

การพาสเจอร์ไร้น้ำนมโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ



นายชานนท์ ศรีสุมา

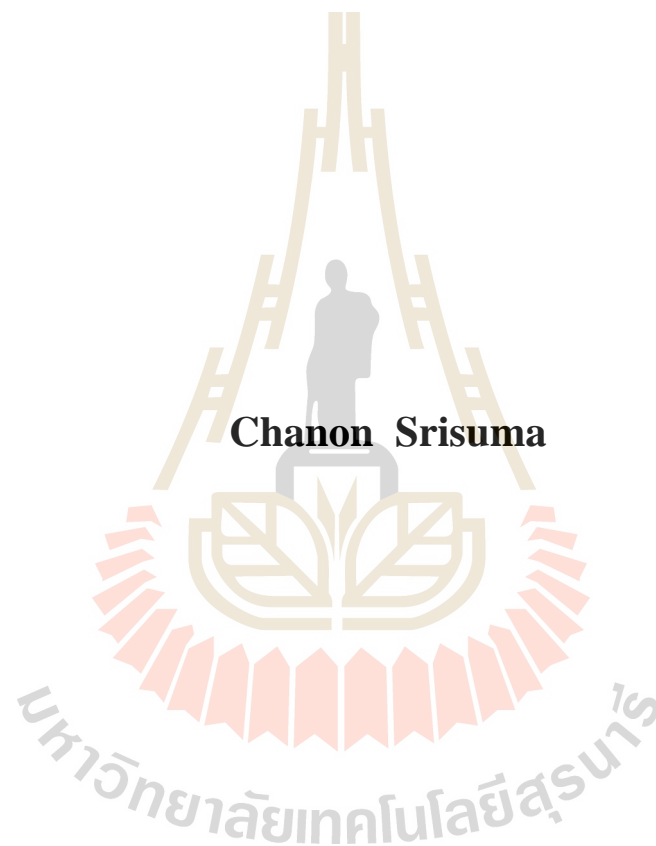
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2559

**MILK PASTEURIZATION USING RADIO FREQUENCY
HEATING TECHNIQUE**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electronic
and Photonic Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2016**

การ पासเจอร์ไรซ์น้ำมันโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ

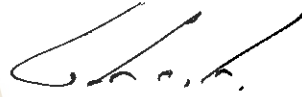
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



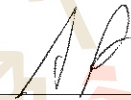
(ผศ. ดร.บุญส่ง สุตะพันธ์)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.ชาญชัย ทองโสธา)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ดร.อภิชาติ อินทรพาณิชย์)

กรรมการ



(อ. ดร.ธนา เทียรพัฒน์) ทศศิกรพัฒน์)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
และพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชานนท์ ศรีสุมา : การพาสเจอร์ไรซ์น้ำนมโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ
(MILK PASTEURIZATION USING RADIO FREQUENCY HEATING TECHNIQUE)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภณ, 92 หน้า

งานวิจัยนี้นำเสนอการพาสเจอร์ไรซ์อาหาร โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ การพาสเจอร์ไรซ์ ที่ได้รับผลทั้งการให้ความร้อนและการใช้ความเข้มของสนามไฟฟ้าในการทำลายเชื้อแบคทีเรียที่ปนเปื้อนในอาหาร ในอุตสาหกรรมการพาสเจอร์ไรซ์นิยมใช้การให้ความร้อน เนื่องจากความร้อนสามารถทำลายเชื้อแบคทีเรียได้ประสิทธิภาพมากที่สุด แต่การให้ความร้อนที่ใช้ น้ันอาศัยหลักการพาคความร้อนและการนำความร้อน ซึ่งเป็นวิธีการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพ น้อยและสิ้นเปลืองพลังงาน ปัจจุบันเทคโนโลยีการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุกำลังได้รับความ สนใจเป็นอย่างมากและมีการใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย ในทางด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ เนื่องจาก มีประสิทธิภาพสูงและประหยัดพลังงาน ซึ่งลักษณะของการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุทำงาน โดยส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านความถี่วิทยุเข้าไปในเนื้อวัสดุ โดยวัสดุที่สามารถนำมาให้ความ ร้อนด้วยความถี่วิทยุได้จะต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กล่าวคือ จะต้องเป็นวัสดุที่มีโครงสร้าง โมเลกุลแบบมีขั้วหรือเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งการให้ความร้อนด้วย ความถี่วิทยุโดยส่วนใหญ่จะออกแบบเป็นวงจรขยายสัญญาณ ใช้ความถี่ 65 MHz ที่ใช้กระแสสูง และโวลต์ต่ำในการให้ความร้อน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบการพาสเจอร์ไรซ์อาหาร โดยใช้ เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ โดยใช้หลอดไตรโอดในการสร้างสัญญาณความถี่วิทยุที่ 40 MHz และให้แรงดันไฟฟ้าถึง 9.8 kV ป้อนกำลังงานให้กับวงจร LC รีโซแนนซ์แบบอนุกรม โดย ออกแบบตัวปล่อยคลื่นเป็นแบบแผ่นเพลตไดอิเล็กตริกที่ตรงที่เป็นค่าความจุของวงจรรีโซแนนซ์และยัง เป็นส่วนที่ปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าไปยังหลอดน้ำนมดิบหรือหลอดไดอิเล็กตริก เพื่อแปลงพลังงาน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นความร้อนในหลอดน้ำนมดิบ และยังให้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าถึง 1.2 kV/cm. ซึ่งงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์และออกแบบ การพาสเจอร์ไรซ์อาหาร โดยใช้เทคนิคการให้ความ ร้อนด้วยความถี่วิทยุ ที่สามารถทำลายเชื้อแบคทีเรียด้วยความร้อนและยังได้รับผลของความเข้ม สนามไฟฟ้าในการทำลายแบคทีเรีย ซึ่งระบบที่กล่าวมานั้นสามารถลดจำนวนแบคทีเรียในน้ำนมดิบ ได้และน้ำนมดิบไม่เสียคุณภาพ

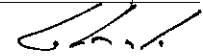
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนักศึกษา

ชานนท์ ศรีสุมา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

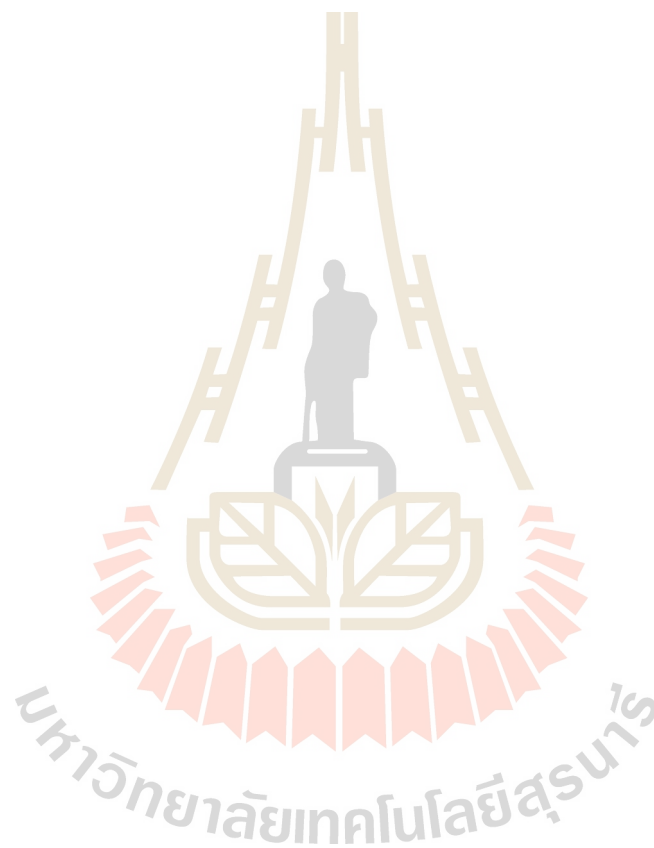


CHANON SRISUMA : MILK PASTEURIZATION USING RADIO
FREQUENCY HEATING TECHNIQUE. THESIS ADVISOR : ASSOC.
PROF. CHANCHAI THONGSOPA, Ph.D., 92 PP.

FOOD PASTEURIZATION /RADIO FREQUENCY HEATING /ELECTRIC FIELD/
ELECTORDE PLATE /BACTERIA

This research presents, food pasteurization using radio frequency heating technique, the results of both the heating and the intensity of the electric field strength, to eliminate contaminated bacteria in food. In the pasteurization industry, the use of heat because heat can eliminate bacteria most effectively. But the heat is used, the principle of convection and conduction heating, which method of heating is less efficient and use a lot of energy. Currently, radio frequency heating technology is gaining much attention and has been widely exploited, in various industries. Due to its high efficiency and energy saving. Which characteristics of radiofrequency heating works by transmitting radio frequency electromagnetic waves into the material. The material can be heated by radio frequency, it must be a material that responds to electromagnetic waves, and that is, it must be a material with a polar molecular structure or dielectric material. Which is radio frequency heating, design is a power amplifier at 65 MHz frequency, use high currents and low voltages in heating. In this research, we have designed food pasteurization using radio frequency heating technique. By using triode tubes to generate radio frequency signal at 40 MHz and providing voltage of up to 9.8 kVDC, input power to LC series resonance circuit. By design, the electrode plate that is the capacity of the resonance circuit, and it is also the part that emits electromagnetic waves to the raw milk load or dielectric load, the convert electromagnetic energy into heat in

raw milk load and gives an electric field strength of 1.2 kV / cm. This research will analyze and design food pasteurization using radio frequency heating technique, which can eliminate bacteria by heat and received the results of the electric fields strength in the eliminate bacteria. The system can reduce the number of bacteria in raw milk and raw milk does not lose quality.



School of Electronics Engineering

Academic Year 2016

Student's Signature

ธนวัฒน์ ฤกษ์งาม

Advisor's Signature

[Signature]

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญส่ง สุตะพันธ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำปรึกษาทางวิชาการและงานวิจัยมาโดยตลอด

อาจารย์ ดร.สำราญ สันทาลุนัย อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำปรึกษาทางวิชาการมาโดยตลอด

อาจารย์ ดร.ธนเสกฐ์ ทศศิกรพัฒน์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำปรึกษาทางวิชาการมาโดยตลอด

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่คอยให้ความช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

คุณสรัญญา อินทโชติ ที่ช่วยดูแลในเรื่องเอกสารต่าง ๆ ระหว่างศึกษาจนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้ความรักความอบอุ่น และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด อีกทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อแท้และท้อใจ ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดามารดา รวมถึงญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบัน จนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

ชานนท์ ศรีสุมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ท
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของเรื่อง.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 ทัศนวิสัยวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของโหลดในแผ่นเพลต	
สำหรับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก	12
2.1 กล่าวนำ.....	12
2.2 การพาสเจอร์ไรซ์	12
2.3 หลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกด้วยความถี่วิทยุ	14
2.3.1 การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกด้วยด้วยความถี่วิทยุ	14
2.3.2 คุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริก	16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.3	สมการที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกด้วยความถี่วิทยุ	18
2.3.4	ระดับความลึกของการทะลุทะลวง	21
2.4	วงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม	21
2.5	คุณลักษณะของตัวเหนี่ยวนำ.....	25
2.6	สรุป.....	26
3	การวิเคราะห์และออกแบบการพาสเจอร์ไรซ์อาหารโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อน	
	ด้วยความถี่วิทยุ.....	27
3.1	กล่าวนำ.....	27
3.2	แนวความคิดในการออกแบบระบบการพาสเจอร์ไรซ์อาหาร โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ	28
3.3	การวิเคราะห์และออกแบบการพาสเจอร์ไรซ์อาหาร โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ	30
3.3.1	การวิเคราะห์ผลของวัสดุที่มีผลต่อการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้า.....	30
3.3.2	การวิเคราะห์และจำลองลักษณะการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าในโหลดน้ำนมดิบ.....	32
3.4	การวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนแก่โหลดน้ำนมดิบสำหรับการพาสเจอร์ไรซ์อาหาร โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ	50
3.4.1	การวิเคราะห์กำลังงานที่เกิดขึ้นในโหลดน้ำนมดิบ	51
3.4.2	การวิเคราะห์พลังงานและความเข้มสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมต่ออัตราการเกิดความร้อนในขวดน้ำนมดิบ	53
3.4.3	การวิเคราะห์ระดับความลึกผิวของคลื่นสนามไฟฟ้าที่ทะลุทะลวงเข้าไปในขวดน้ำนมดิบ	56
3.4.4	การออกแบบเมทซิงรีโซแนนซ์แผ่นเพลตสำหรับการพาสเจอร์ไรซ์โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ.....	57
3.5	สรุป.....	58

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4	การวัดและผลการทดลอง	60
4.1	กล่าวนำ.....	60
4.2	การสร้างตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตและตัวเหนี่ยวนำ.....	61
4.2.1	การสร้างตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้า	62
4.2.2	การสร้างตัวเหนี่ยวนำ	63
4.3	ผลการทดสอบวัดค่าความร้อนด้วยการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุและ สัญญาณความถี่.....	65
4.3.1	การทดสอบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ	67
4.3.2	การวัดทดสอบความถี่ที่เกิดขึ้นของระบบ	71
4.3.3	การตรวจนับจำนวนเชื้อแบคทีเรียที่ลดลงและคุณภาพน้ำนมดิบ หลังจากผ่านระบบให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ	72
4.5	สรุป.....	73
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	74
5.1	สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	74
5.2	ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	75
5.3	แนวทางการพัฒนาในอนาคต	75
	รายการอ้างอิง	76
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	79
	ประวัติผู้เขียน	92

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ผลของอุณหภูมิและความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีต่อการทำลายเชื้อแบคทีเรีย E-coli ใช้ระบบ 80 kW RFEF ที่ความถี่ 21.1 kHz	6
1.2 ค่าของอุณหภูมิกับค่าปัจจัยการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) ของน้ำผลไม้ ไวน์ และน้ำมันดิบ ที่ความถี่ 40.68 MHz	10
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการพาสไร์เจอร์	14
2.2 ตารางเปรียบเทียบความถี่และความยาวคลื่น	16
3.1 คุณสมบัติของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่เลือกมาทำการศึกษาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้า.....	31
3.2 ค่าความหนาแน่นของกำลังงานที่สูญเสียในขดไวน์ ณ เวลาใด ๆ.....	52
4.1 ผลการตรวจนับเชื้อแบคทีเรียและคุณภาพของน้ำมันดิบที่ผ่านระบบให้ความด้วยความถี่วิทยุ	72

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ส่วนตัดขวางของห้องทำลายเบคทีเรีย ได้แก่ ฉนวนเพฟลอนและขั้วไฟฟ้า สแตนเลสแบบกลม.....	7
1.2 ห้องทำลายเชื้อเบคทีเรียขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งคู่.....	8
1.3 การสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูงแบบแผ่นเพลตขนาน.....	8
1.4 การทนทานความร้อนของเบคทีเรียที่ไม่สร้างสปอร์.....	9
1.5 การทนทานความร้อนของเบคทีเรียที่สร้างสปอร์.....	9
2.1 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	15
2.2 รูปแบบการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกด้วยความถี่วิทยุ.....	18
2.3 วงจรสมมูลของระบบการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกด้วยความถี่วิทยุ.....	19
2.4 วงจรรีโซแนนซ์ RLC แบบอนุกรม.....	22
2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ.....	23
2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุ.....	23
2.7 กราฟความสัมพันธ์ของความถี่รีโซแนนซ์.....	24
3.1 รูปแบบของแนวคิดการให้ความร้อนแก่โพลไดอิเล็กตริก.....	29
3.2 แนวความคิดในการออกแบบระบบการพาสเจอร์ไรซ์โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อน ด้วยความถี่วิทยุ.....	30
3.3 รูปแบบการวิเคราะห์เพื่อทดสอบการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าและ ความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโพลนํ้ามันดิบที่มีการปนสํญญาณ 1 พอร์ต.....	33
3.4 ผลการจำลองการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโพลดและระหว่าง แผ่นเพลตไดอิเล็กโตรดที่มีการปนจุดกําลังงานแบบ 1 พอร์ต.....	35

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5	รูปแบบการวิเคราะห์เพื่อทดสอบผลการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้า และความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโหลคน้ำนํมดิบที่มีการป้อนสัญญาณ 2 พอร์ต.....36
3.6	ผลการจำลองการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโหลดและระหว่างแผ่น เพลตอิเล็กโตรดที่มีการป้อนจุดกำลังงานแบบ 2 พอร์ต 38
3.7	รูปแบบการวิเคราะห์เพื่อทดสอบการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้า และความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโหลคน้ำนํมดิบที่มีการป้อนสัญญาณ 4 พอร์ต.....39
3.8	ผลการจำลองการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโหลดและระหว่างแผ่น เพลตอิเล็กโตรดที่มีการป้อนกำลังงานแบบ 4 พอร์ต 41
3.9	รูปแบบการวิเคราะห์เพื่อทดสอบการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าและ ความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโหลคน้ำนํมดิบที่มีการป้อนสัญญาณ 8 พอร์ต 42
3.10	ผลการจำลองการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโหลดและระหว่างแผ่น เพลตอิเล็กโตรดที่มีการป้อนจุดกำลังงานแบบ 8 พอร์ต..... 44
3.11	รูปแบบการวิเคราะห์เพื่อทดสอบการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าและ ความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโหลคน้ำนํมดิบที่มีการป้อนกำลังงาน 16 พอร์ต..... 45
3.12	ผลการจำลองการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโหลดและระหว่างแผ่น เพลตอิเล็กโตรดที่มีการป้อนกำลังงานแบบ 16 พอร์ต..... 47
3.13	การแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าที่มีการป้อนกำลังงานแบบ 1 พอร์ต 2 พอร์ต 4 พอร์ต 8 พอร์ต และ 16 พอร์ต..... 49
3.14	ความสัมพันธ์ของกำลังที่เกิดขึ้นในขวดน้ำนํมดิบต่อเวลา..... 53
3.15	ความสัมพันธ์ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำนํมดิบที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่และอุณหภูมิ..... 54
3.16	ความสัมพันธ์ปัจจัยการสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำนํมดิบที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ และอุณหภูมิ..... 54
4.1	โครงสร้างระบบตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าสำหรับการให้ความร้อนแก่โหลคน้ำนํมดิบ..... 62
4.2	โครงสร้างของแผ่นเพลตสำหรับทดสอบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุสำหรับการ พาสเจอร์ไรซ์น้ำนํมดิบ แบบ 16 พอร์ต..... 63
4.3	โครงสร้างของขดลวดที่ออกแบบสำหรับ แมทซิงกับโหลดไดอิเล็กตริก..... 64

4.4	โครงสร้างของระบบการพาสเจอร์ไรซ์อาหาร โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ.....	65
4.5	ลักษณะรูปร่างของตัวกล้องถ่ายภาพความ KEYSIGHT U5857A.....	66
4.6	ลักษณะรูปแบบการต่อเพื่อวัดสัญญาณความถี่ของระบบ	67
4.7	ลักษณะรูปแบบการวางไหลค่าน้ำมดึบระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กทรอนิกส์.....	68
4.8	ก่อนผ่านระบบให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ.....	69
4.9	ผ่านระบบให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุใช้เวลา 240 วินาที.....	69
4.10	หลังจากให้ความร้อนเรียบร้อยแล้วจะสิ้นสุดกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์.....	70
4.11	สัญญาณความถี่ที่เกิดจากระบบให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ.....	71



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตไวน์และน้ำผลไม้ในประเทศไทย มีการผลิตและจัดจำหน่ายกันหลากหลายทั้งในประเทศและต่างประเทศ ยกตัวอย่างเช่น บริษัทน้ำผลไม้มาลี ทิปโก้ ยูนิฟ กลุ่มผลิตและจัดจำหน่ายไวน์และน้ำผลไม้โอท็อป เป็นต้น แต่ในขณะที่วางจำหน่ายเกิดปัญหาเครื่องดื่มเน่าเสียก่อนกำหนดและขาดเกิดการแตกร้าง ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นเกิดจากการมีเชื้อจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียที่ตกค้างภายในผลิตภัณฑ์ สิ่งเหล่านี้ก่อให้เกิดพาหะของโรคและทำให้อาหารเน่าเสียก่อนกำหนด กลุ่มผลิตจัดจำหน่ายไวน์และน้ำผลไม้โอท็อปใช้วิธีการพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization) เป็นการกำจัดเชื้อแบคทีเรียโดยใช้วิธีแบบหม้อต้ม โดยบรรจุไวน์และน้ำผลไม้ลงในขวดปิดผนึก แล้วนำขวดลงไปแช่ในหม้อต้ม จากนั้น ต้มน้ำในหม้อต้มให้ได้อุณหภูมิประมาณ 80-100 องศาเซลเซียส โดยใช้พลังงานจากแก๊สหุงต้ม ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้อาศัยหลักการพาความร้อนจากภายนอกเข้าไปยังในขวด โดยมีแก้วเป็นตัวกลางพาความร้อนไปยังน้ำผลไม้และไวน์ การให้ความร้อนด้วยวิธีนี้ใช้เวลานาน กว่าอุณหภูมิภายในจะเท่ากันทั้งหมดและทำให้อุณหภูมิที่ผิวขวดจะมีอุณหภูมิมากเกินไป M. Corredig และ D.G. Dalgleish (1999) จะทำให้โปรตีนเสียคุณภาพ

งานวิจัยชิ้นนี้มุ่งเน้นไปที่การพาสเจอร์ไรซ์น้ำนมโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ (Food pasteurization using radio frequency heating technique) แม้ว่าในปัจจุบันมีวิธีการพาสเจอร์ไรซ์อาหารอยู่หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันคือการให้ความร้อนกับอาหารเพื่อทำลายเชื้อแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดพาหะของโรคทุกชนิดในอาหารและยืดอายุการเก็บรักษาของอาหาร ซึ่งวิธีดังกล่าวถ้าให้อุณหภูมิที่สูงเกินไปและใช้เวลานาน จะทำให้อาหารสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ และถ้าให้อุณหภูมิต่ำเกินไปและใช้เวลานานแบคทีเรียก็ยังคงอยู่ ก่อให้เกิดโรคในอาหารและอาหารเน่าเสีย เนื่องจากแหล่งความร้อนที่ใช้ในการพาสเจอร์ไรซ์นั้นอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนแบบการนำ (Conduction) และการถ่ายเทความร้อนแบบการพา (Convection) ซึ่งการถ่ายเทความร้อนแบบดังกล่าว เป็นวิธีการที่ยากในการทำให้อุณหภูมิของอาหารเท่ากันอย่างสม่ำเสมอ และใช้พลังงานมากในการสร้างแหล่งความร้อน แต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันนักวิจัยได้คิดค้นและพัฒนาการพาสเจอร์ไรซ์ โดยการใช้นิวเคลียร์ไฟฟ้าที่ความถี่วิทยุเข้ามามีบทบาทมากขึ้น เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ความถี่วิทยุในการทำละลายเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรีย และเทคโนโลยีนี้ยังทำให้เกิด

ความร้อนภายในอาหารหรือที่เรียกว่า การให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ เป็นรูปแบบการให้ความร้อน โดยตรงกับวัสดุที่เป็นไดอิเล็กตริกที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อช่วงความถี่การใช้งาน ซึ่งทำให้ไม่กระทบต่อวัสดุอื่น ๆ เนื่องจากเป็นการให้ความร้อนโดยทำให้โมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กตริกเกิดการสั่น เกิดการเสียดสีกันของโมเลกุลระหว่างขั้วและทำให้เกิดความร้อนขึ้น และความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นสม่ำเสมอทั่วทั้งปริมาตรของวัสดุ ดังนั้นเทคโนโลยีนี้จึงมีประสิทธิภาพมากในการพาสเจอร์ไรซ์อาหารด้วยการให้ความร้อน

จากการศึกษาวิธีการพาสเจอร์ไรซ์ด้วยสนามไฟฟ้าที่ความถี่วิทยุ โดย Nyrop (1946) ได้ทดสอบฆ่าเชื้อแบคทีเรีย E.Coil ได้ถึง 95.5% ที่อุณหภูมิน้อยกว่า 40 °C โดยใช้ความเข้มสนามไฟฟ้า 0.23 kV/cm และความถี่ 20 MHz จึงเป็นจุดเริ่มต้นให้มีการวิจัยและพัฒนาต่อจากอดีตจนถึงปัจจุบันดังนี้ Balk, Hancioglu และ Gorris (1996) ได้ศึกษาผลกระทบของความถี่วิทยุบนไรโบโซม ยีสต์ และแบคทีเรีย พบว่าช่วงความถี่ 27-100 MHz โดยใช้ความเข้มสนามไฟฟ้า 3.4 V/cm ซึ่งสามารถเพิ่มอัตราการสลายของเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรีย ยีสต์ และไรโบโซมได้ Geveke (2002) ได้ศึกษาและทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย E-coli K-12 และ *Listeria innocua* โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อที่จะหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่น้อยที่สุดที่สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ ซึ่งพบว่า ความเข้มสนามไฟฟ้าที่มากกว่าหรือเท่ากับ 0.5 kV/cm ที่ความถี่ 18 MHz เป็นค่าของความเข้มสนามไฟฟ้าที่น้อยที่สุด ที่สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ที่อุณหภูมิ 55 °C Awuah (2005) ใช้หลักการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ 27.12 MHz และมีกำลังของระบบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ 2 kW ในการทำลายเชื้อแบคทีเรีย E-coli K-12 และ *Listeria innocua* ในน้ำนมดิบ โดยให้ไหลผ่านแผ่นอลูมิเนียมอิเล็กโตรดทำให้อุณหภูมิสูงถึง 65 °C ซึ่งสามารถลดจำนวนเชื้อแบคทีเรีย E-coli K-12 และ *Listeria innocua* ได้ 5 log และ 7 log ตามลำดับ Geveke (2007) ได้เพิ่มค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าถึง 20 kV/cm และใช้ความถี่ 21, 30 และ 40 kHz สำหรับทำลายเชื้อแบคทีเรีย E-coli K-12 ในน้ำส้ม โดยให้ไหลผ่านจุดปล่อยสนามไฟฟ้าความเข้มสูง สามารถลดจำนวนเชื้อแบคทีเรีย E-coli K-12 ได้ 3.3 log Ukuku (2012) ได้ใช้สนามไฟฟ้า และการให้ความร้อนแบบธรรมดา ในการทำลายเชื้อแบคทีเรีย E-coli K-12 ในน้ำแอปเปิล โดยเปรียบเทียบแบบการให้ความร้อนแบบธรรมดาเพียงอย่างเดียวกับการให้ความร้อนแบบธรรมดาแล้วนำไปผ่านสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสนามไฟฟ้า 25 kV/cm ที่ความถี่ 20 kHz ด้วยการให้น้ำแอปเปิลไหลผ่านสนามไฟฟ้า พบว่า แบบที่ใช้ทั้งสองกระบวนการมีประสิทธิภาพมากกว่า เนื่องจากแบคทีเรีย เกิดรูพรุนที่เยื่อหุ้มเซลล์จากสนามไฟฟ้าความเข้มสูงและได้รับความร้อนจากการให้ความร้อนแบบธรรมดา

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้สนามไฟฟ้าความเข้มสูงจะทำได้โดยการให้ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขั้ว มีระยะที่แคบมาก ๆ ทำให้ช่องของความเข้มสนามไฟฟ้าที่อาหารไหลผ่านมีขนาดเล็ก จึงทำให้มีข้อจำกัดในการทำลายเชื้อแบคทีเรียได้แต่เพียงการให้อาหารไหลผ่านช่องของความเข้มสนามไฟฟ้าขนาดเล็กเท่านั้น อีกทั้งยังได้ความถี่ต่ำ ดังนั้นจึงเกิดแนวความคิดที่จะพัฒนาเทคนิคการพาสเจอร์ไรซ์อาหาร ด้วยการสร้างความเข้มสนามไฟฟ้าที่มีความถี่วิทยุแบบแผ่นเพลตอิเล็กโทรด เพื่อที่จะเพิ่มระยะห่างของช่องความเข้มสนามไฟฟ้าให้มากขึ้นและมีความเข้มสนามไฟฟ้าเพียงพอในการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ และมีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าเพียงพอสำหรับทำลายเชื้อแบคทีเรียหรือพาสเจอร์ไรซ์อาหารที่บรรจุอยู่ในภาชนะได้ และประหยัดพลังงานมากกว่าการพาสเจอร์ไรซ์ด้วยการให้ความร้อนแบบธรรมดา

การสร้างเครื่องต้นแบบเพื่อใช้สำหรับการใช้ทดสอบ การพาสเจอร์ไรซ์น้ำนมโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ โดยใช้หลอดไตรโอดที่สามารถรับแรงดันไฟฟ้าได้ 9 kVDC ความถี่สูงสุด 100 MHz และวงจร LC รีโซแนนซ์แบบอนุกรมในการออกแบบ และใช้น้ำนมดิบในการทดลอง โดยจะวิเคราะห์ความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเพลตและในน้ำนมดิบได้จากการจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST EM STUDIO โดยบรรจุน้ำนมดิบลงในขวดแก้วแล้วนำไปผ่านชุดสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตอิเล็กโทรดที่สร้างขึ้น วิธีการที่นำเสนอจะนั้นจะสามารถทำลายเชื้อแบคทีเรียในน้ำนมดิบได้ โดยได้รับผลจากการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุและความเข้มของสนามไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาการพาสเจอร์ไรซ์น้ำนมโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ และออกแบบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุสำหรับพาสเจอร์ไรซ์น้ำนมดิบ

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแผ่นเพลตที่ได้จากการออกแบบและสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ สามารถทำให้หลอดไดอิเล็กตริก (น้ำนมดิบ) เกิดความร้อนขึ้นได้ เมื่อหลอดไดอิเล็กตริกมีคุณสมบัติการตอบสนองในย่านความถี่ของการใช้งาน และสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเพลตทำให้เกิดความร้อนที่สามารถทำลายแบคทีเรียในน้ำนมดิบได้

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

ออกแบบการพาสเจอร์โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ ให้มีประสิทธิภาพ และให้เหมาะสมกับวัสดุโคอิเล็คทริกที่ใช้ (นํ้านมดิบ)

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 ศึกษาหาข้อมูลและออกแบบการพาสเจอร์ไรซ์โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ

1.5.2 ทดสอบการพาสเจอร์ไรซ์กับนํ้านมดิบ วิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพและสามารถปรับปรุงให้มีความเหมาะสม

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยและพัฒนาต่อไปสำหรับการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ ที่เป็นผลมาจากคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

1.6.2 เป็นแนวทางในการนำหลักการมาประยุกต์ใช้กับการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ กับวัสดุชนิดต่าง ๆ และพัฒนาต่อสู่อุตสาหกรรมด้านอาหารและเกษตร

1.7 ปรัชญาธรรมกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุและการใช้สนามไฟฟ้าความถี่วิทยุในด้านอุตสาหกรรมอาหาร กำลังเป็นที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนเฉพาะวัสดุที่มีการตอบสนองต่อความถี่ที่ใช้งาน จึงเป็นแหล่งพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและประหยัดพลังงาน ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบและทดสอบ รวมถึงรูปแบบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุและรูปแบบการใช้สนามไฟฟ้าความถี่วิทยุ ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงแนวทางและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลการดำเนินการวิจัย ตลอดจนปัญหาและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อนำไปสู่วัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้ จึงได้มีการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมา โดยจากผลการสืบค้นที่ได้นั้นจะใช้เป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัยต่อไป เนื้อหาในหัวข้อนี้กล่าวถึง ปรัชญาธรรมกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วย การให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุในด้านอุตสาหกรรมอาหาร ลักษณะของรูปแบบการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูง การใช้สนามไฟฟ้าความถี่วิทยุในการพาสเจอร์ไรซ์ การทันทานความร้อนของแบคทีเรีย และกลไกการเกิดความร้อนด้วยความถี่วิทยุ ซึ่งได้รวบรวมข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์และออกแบบลักษณะการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการใช้งาน โดยผลที่ได้จากการศึกษาข้อมูลมีในหัวข้อต่อไป

งานวิจัยเกี่ยวกับการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุในด้านอุตสาหกรรมอาหาร การให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุหรือเรียกอีกแบบว่า การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก เมื่อวัสดุที่เป็น ไดอิเล็กตริก ได้รับพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ความถี่ 10-300 MHz จะมีการถ่ายโอนพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้กับผลิตภัณฑ์โดยตรง จึงทำให้เกิดการเหนี่ยวนำความร้อนขึ้นทั้งหมดภายในปริมาตรของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเกิดจากการเสียดสีของโมเลกุลภายในผลิตภัณฑ์จนทำให้เกิดความร้อนและความร้อนที่ได้นั้นเกิดจากภายในออกสู่ภายนอก (Orfeail, 1987; Piyasena, et., 2003) การประยุกต์ใช้การให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุสำหรับอาหาร โดยให้อาหารอยู่ระหว่างเพลตอิเล็กโตรด 2 เพลต ซึ่งอาหารทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า แต่เมื่ออาหารที่เป็นวัสดุโลหะวางอยู่ระหว่างเพลตที่มีสนามไฟฟ้าสลับและความถี่สูง สนามไฟฟ้าสามารถผ่านไปยังภายในอาหาร ทำให้เกิดความร้อนที่น้ำนมโดยตรง และการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุยังสามารถเลือกให้เฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ตอบสนองต่อความถี่นั้น ๆ (Vicente & Castro, 2007) ด้วยเหตุนี้ การให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุจึงเป็นทางเลือกที่ดีกว่าการให้ความร้อนแบบธรรมดา เนื่องจากเป็นการให้ความร้อนได้ทั้งปริมาตรของผลิตภัณฑ์ ช่วยลดระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่อาหารและทำให้อาหารมีอุณหภูมิที่สม่ำเสมอทั้งปริมาตร จึงทำให้เทคโนโลยีนี้ได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารในต่างประเทศกันอย่างกว้างขวาง และมีการแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่มากกว่าการให้ความร้อนแบบธรรมดา จึงทำให้เทคโนโลยีนี้ได้รับการประยุกต์ใช้จนประสบความสำเร็จในด้านอุตสาหกรรมอาหาร อาหารที่แปรรูปและการพาสเจอร์ไรซ์ด้วยกระบวนการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ มีคุณภาพดีกว่าการให้ความร้อนแบบธรรมดา และยืดอายุการเก็บรักษาได้นานขึ้น เนื่องจากการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุสามารถทำลายเชื้อแบคทีเรียในอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงทำให้การให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุเป็นที่ยอมรับ จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพาสเจอร์ไรซ์อาหารด้วยเทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ ได้มีการทดลองทำลายเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* K12 ในน้ำส้มและน้ำแอปเปิล พบว่าสามารถลดจำนวนเชื้อแบคทีเรียลงได้ 3.0 และ 3.3 log CFU/ml ตามลำดับ (Geveke, 2007) โดยไม่มีการสูญเสียของกรดแอสคอร์บิกหรือเอนไซม์ที่มีประโยชน์ในน้ำผลไม้ และการประยุกต์ใช้การให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุสามารถทำลายเชื้อแบคทีเรียในอาหารได้มีประสิทธิภาพมากกว่าการให้ความร้อนแบบธรรมดา จึงทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจศึกษาและพัฒนาอุตสาหกรรมพาสเจอร์ไรซ์ในประเทศให้มีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงาน ด้วยการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้สนามไฟฟ้าความถี่วิทยุ (Radio frequency electric fields; RFEF) ในการพาสเจอร์ไรซ์ พบว่าการศึกษาและวิจัยการใช้สนามไฟฟ้าความถี่วิทยุในการทำลายเชื้อแบคทีเรีย เป็นกระบวนการไม่ใช้ความร้อนมาก และใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต่ำในการพาส

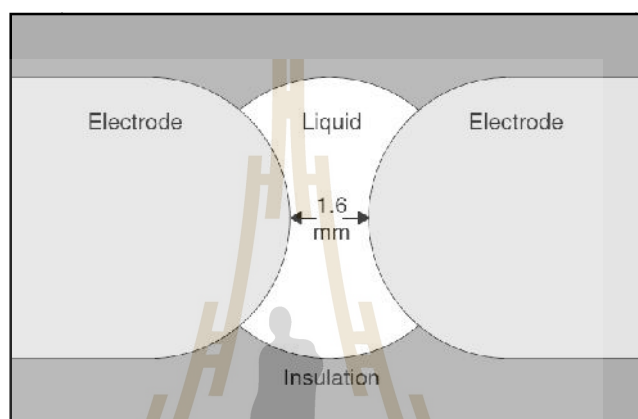
เจอร์ไรซ์อาหาร ทำให้อาหารมีความสดและไม่สูญเสียคุณค่าทางโภชนาการจากความร้อน (Fleming, 1944; Decareau, 1985; & Dahm, 2000) สำหรับการใช้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดที่สามารถทำลายเชื้อแบคทีเรียได้คือ 0.23 kV/cm ที่ความถี่ 20 MHz สามารถทำลายเชื้อแบคทีเรียได้ 99.5% (Nyrop, 1946) จากนั้นได้มีการพิสูจน์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดโดยใช้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า 0.5 kV/cm และความถี่ 18 MHz สามารถทำลายเชื้อแบคทีเรีย E-coli K-12 และ *Listeria innocua* ในน้ำแอปเปิลได้ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการขยายกำลังของระบบการใช้สนามไฟฟ้าความถี่วิทยุเป็น 80 kW ในการทำลายเชื้อแบคทีเรีย E-coli K-12 ในน้ำแอปเปิล จะออกแบบระบบเป็นแบบการไหลผ่านความเข้มสนามไฟฟ้าที่อัตราการไหล 1.4 l/min โดยระบบจะมีค่าสนามไฟฟ้าตั้งแต่ 1, 15 และ 20 kV/cm และใช้ความถี่ 21.1 kHz เพื่อเปรียบเทียบการทำลายเชื้อแบคทีเรียที่ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าต่างๆ ตามตารางที่ 1.1 จะทราบว่าความเข้มสนามไฟฟ้าน้อยกว่า 1 kV/cm สามารถทำลายเชื้อแบคทีเรีย E-coli ได้ 0.2 log CFU/ml ที่อุณหภูมิ 55 °C และ 65 °C แต่ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า 20 kV/cm สามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ได้ถึง 2.2 และ 3.1 log CFU/ml ที่อุณหภูมิ 55 °C และ 65 °C (Geveke & Brunkhorst, 2004) ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้สนใจที่จะใช้หลักการของสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุ มาช่วยการพาสเจอร์ไรซ์น้ำนม โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ โดยจะใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่มากกว่า 1 kV/cm ที่ความถี่ 40 MHz และสามารถพาสเจอร์ไรซ์อาหารที่บรรจุลงในภาชนะได้

ตารางที่ 1.1 ผลของอุณหภูมิและความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการทำลายเชื้อแบคทีเรีย E-coli โดยใช้ระบบ 80 kW RFEF ที่ความถี่ 21.1 kHz (Geveke & Brunkhorst, 2004)

Temperature (°C)	Electric fields (kV/cm)	Inactivation (log cfu/ml)
55	<<1	0.2
55	20	2.2
65	<<1	0.2
65	20	3.1

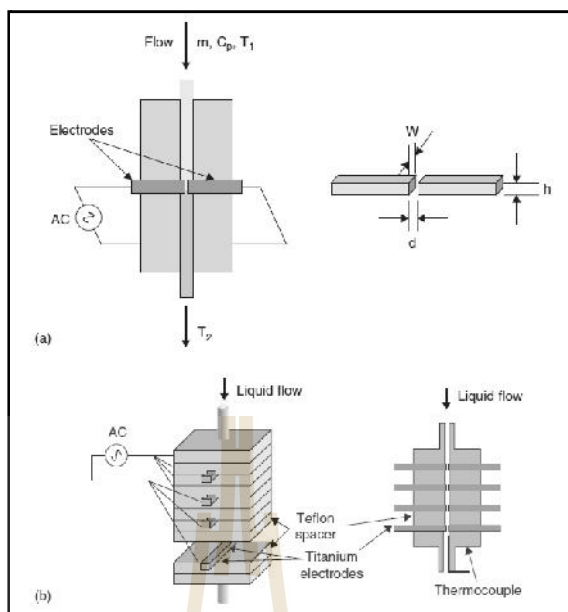
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับรูปแบบการสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูง เป็นส่วนสำคัญอีกอย่างในการออกแบบห้องทำลายเชื้อแบคทีเรีย เพื่อให้ได้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงและมีประสิทธิภาพ สำหรับการออกแบบและประดิษฐ์ห้องทำลายเชื้อแบคทีเรียโดยภายในห้องจะมีความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงและมีอาหารหรือของเหลวไหลผ่านสนามไฟฟ้านั้นและกั้นด้วยเทฟลอนไม่ให้ของเหลวไหลออกตามรูปที่ 1.1 ขั้วอิเล็กโตรดทั้ง 2 ขั้วจะถูกกั้นด้วยเทฟลอน เพื่อไม่ให้ของเหลวรั่ว

ไหลออกและกันขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองขั้ว ขั้วอิเล็กโทรดมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกส่วนหัวถูกทำให้โค้งกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.4 mm ขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขั้วมีระยะห่าง 1.6 mm และเอาต์พุตของแหล่งจ่ายต่อกับขั้วอิเล็กโทรดเพื่อให้สนามไฟฟ้าตั้งฉากกับทิศทางการไหลของของเหลว (Geveke et al., 2002) ห้องทำลายเชื้อแบคทีเรียนี้ไม่เหมาะสำหรับการพาสเจอร์ไรซ์อาหารที่บรรจุอยู่ในภาชนะ



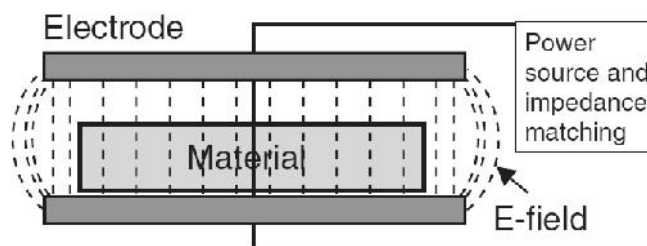
รูปที่ 1.1 ส่วนตัดขวางของห้องทำลายเชื้อแบคทีเรีย ได้แก่ ฉนวนเพลตอนและขั้วไฟฟ้าสแตนเลสแบบกลม (Geveke et al., 2002)

ต่อได้มีการพัฒนาห้องทำลายเชื้อแบคทีเรียแบบสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับการไหลของของเหลว โดยเพิ่มขั้วอิเล็กโทรดเป็น 4 ขั้ว เพื่อให้ได้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่มากขึ้นและให้ของเหลวไหลผ่าน ขั้วอิเล็กโทรดทำด้วยไทเทเนียม ที่มีระยะห่างระหว่างขั้ว 0.2 mm ขั้วอิเล็กโทรดประกบกันแบบแซนวิช ระหว่างเพลตเพลตอนและมีรูให้ของเหลวไหลผ่านสนามไฟฟ้าความเข้มสูงตามรูปที่ 1.2 (Uemura & Isobe, 2002)



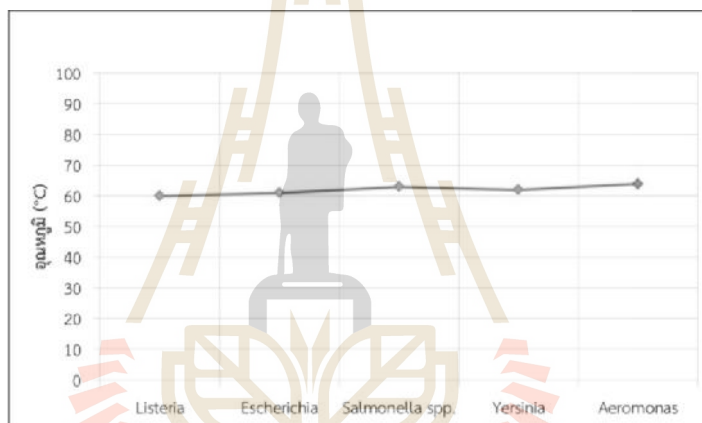
รูปที่ 1.2 (a) ห้องทำลายเชื้อแบคทีเรียขั้วไฟฟ้าแบบหนึ่งคู่ (b) ห้องทำลายเชื้อแบคทีเรียขั้วไฟฟ้าและจนวนเทฟลอน (Uemura & Isobe, 2002)

จากการศึกษาระบบการสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูงแบบดังกล่าวจะประยุกต์ใช้ได้แค่แบบการไหลผ่านเท่านั้น และการสร้างห้องทำลายเชื้อนั้นยังยุ่งยากและราคาของวัสดุค่อนข้างแพง จึงทำให้ผู้วิจัยสนใจใช้วิธีการปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูงแบบแผ่นเพลตอิเล็กโทรด ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในการพาสเจอร์ไรซ์แบบอาหารบรรจุอยู่ในภาชนะได้ตามรูปที่ 1.3 แบบแผ่นเพลตขนาน (Metaxas, 1988) และใช้อลูมิเนียมในการสร้างแผ่นเพลตที่มีราคาไม่สูง

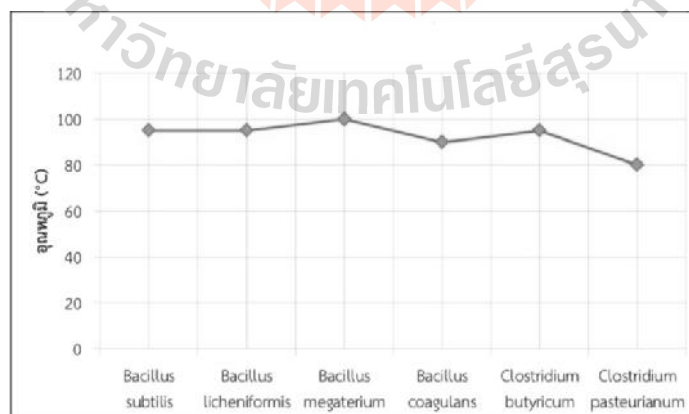


รูปที่ 1.3 การสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูงแบบแผ่นเพลตขนาน (Metaxas, 1988)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทนทานความร้อนของแบคทีเรีย จากการศึกษาการทนทานความร้อนของแบคทีเรีย โดยแบคทีเรียจะจำแนกเป็น 2 ประเภท ประเภทแรกคือประเภทแบคทีเรียที่ไม่สร้างสปอร์ และประเภทสุดท้ายคือประเภทของแบคทีเรียที่สร้างสปอร์ การทนทานของอุณหภูมิของแบคทีเรียที่ไม่สร้างสปอร์จะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าแบคทีเรียที่สร้างสปอร์ ซึ่งอุณหภูมิของแบคทีเรียที่ไม่สร้างสปอร์จะมีความทนทานของอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 60 °C และอุณหภูมิของแบคทีเรียที่สร้างสปอร์จะมีความทนทานของอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 90 °C แสดงในตารางที่ 1.2 และ 1.3 การทนทานความร้อนของแบคทีเรียที่สร้างสปอร์ เนื่องจากสปอร์มีองค์ประกอบพิเศษที่ทนความร้อนได้ดี เช่น เอนไซม์ที่ทนความร้อน มีแร่ธาตุมากโดยเฉพาะแคลเซียม และมีกรดไดฟิโคลินิก เป็นต้น (V.M. Silva & Gibbs, 2009)



รูปที่ 1.4 การทนทานความร้อนของแบคทีเรียที่ไม่สร้างสปอร์ (V.M. Silva & Gibbs, 2009)



รูปที่ 1.5 การทนทานความร้อนของแบคทีเรียที่สร้างสปอร์ (V.M. Silva & Gibbs, 2009)

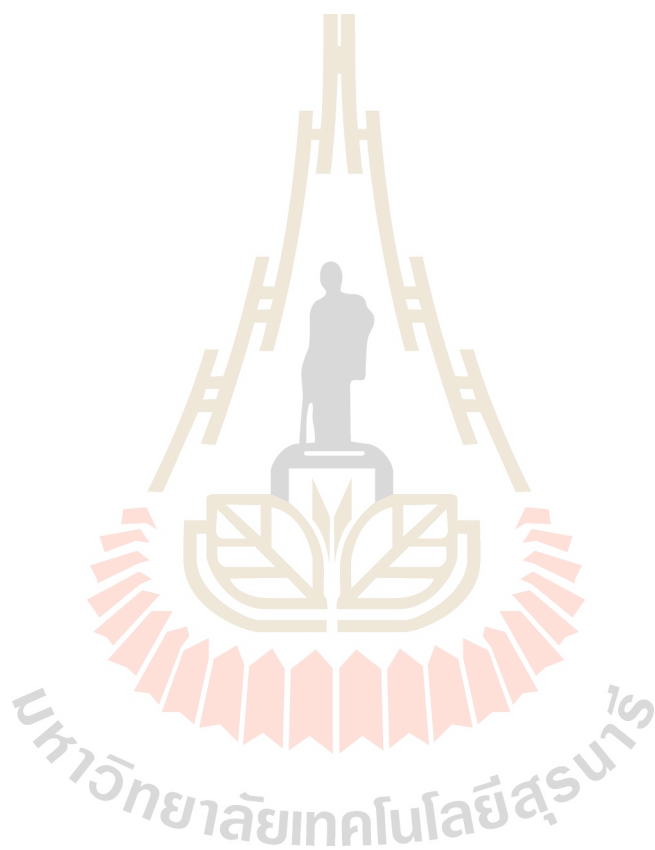
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกลไกการเกิดความร้อนด้วยความถี่วิทยุ จะเกิดความร้อนขึ้นได้เมื่อวัสดุนั้นจะต้องมีค่าการสูญเสียของไดอิเล็กตริกที่เหมาะสมกับความถี่นั้น จากงานวิจัยที่ผ่านพบว่าในน้ำผลไม้ ไวน์ และน้ำนมดิบ เป็นวัสดุที่มีการสูญเสียของไดอิเล็กตริกแสดงในตารางที่ 1.2 จึงเป็นแนวทางในการออกแบบการพาสเจอร์ไรซ์น้ำนมโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ จากตารางที่ 1.1 จะเห็นว่าค่าการสูญเสียของวัสดุไดอิเล็กตริกนั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และค่าที่แต่ละความถี่ค่าการสูญเสียของไดอิเล็กตริกจะไม่เท่ากัน (Zurina Zainal et al., 2014 and X.Zhu et al., 2012) เนื่องจากงานวิจัยนี้จะใช้ความถี่วิทยุที่ 40 MHz ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์และออกแบบสร้างเครื่องต้นแบบ จึงนำค่าเหล่านี้มาทำการคำนวณหากำลังที่ต้องใช้ในการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ

ตารางที่ 1.2 ค่าของอุณหภูมิกับค่าปัจจัยการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) ของน้ำผลไม้ ไวน์ และน้ำนมดิบ ที่ความถี่ 40.68 MHz (Zurina Zainal et al., 2014 and X.Zhu et al., 2012)

Fruit juice	Dielectric loss factor	Temperature(°C)			
		25	45	65	85
Apple	ϵ''	88.7	125.7	166.7	205.4
Pear		119.1	168.1	221.8	284.2
Orange		144.9	208.9	278.0	309.3
Grape		136.7	192.3	256.5	330.7
Pineapple		180.7	251.6	319.9	382.3
Wine		1.2	2.3	5.7	8.6
Raw milk		273	284.5	307.4	346.2

การพาสเจอร์ไรซ์น้ำนมโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ จำเป็นต้องมีตัวแปรหลักในการพิจารณาซึ่งประกอบด้วยความถี่ที่ใช้งาน ปัจจัยในการสูญเสียยังผลของวัสดุไดอิเล็กตริก รูปแบบการสร้างความถี่สนามไฟฟ้าความถี่สูง และความเข้มสนามไฟฟ้าที่จะช่วยทำลายเชื้อแบคทีเรีย เนื่องจากงานวิจัยนี้ การพาสเจอร์ไรซ์น้ำนมโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ จะได้รับผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากปัจจัยการสูญเสียยังผลของวัสดุ และยังได้รับความเข้มของสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุในการทำลายเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งงานวิจัยชิ้นนี้จะเลือกน้ำนมดิบในการทดลองและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการพาสเจอร์ไรซ์น้ำนมโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่

วิทยุ เพื่อนำไปสู่การออกแบบให้เหมาะสมกับรูปแบบการใช้งาน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่สามารถให้กำลังสนามไฟฟ้าไปยังวัสดุ ไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสีย เพื่อให้เกิดความร้อนขึ้นและให้ความเข้มข้นสนามไฟฟ้าเพียงพอสำหรับทำลายเชื้อแบคทีเรีย ดังนั้นขนาดและรูปแบบของตัวสร้างสนามไฟฟ้า จึงเป็นส่วนสำคัญที่ต้องนำมาวิเคราะห์ เพื่อให้ได้รูปแบบการใช้งานและการใช้กำลังงานที่เหมาะสมที่สุด



บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การศึกษา เข้าใจหลักการและทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานวิจัยนี้ มีความสำคัญและมีประโยชน์อย่างมากในการดำเนินงาน เพื่อให้เป็นพื้นฐานของความรู้และความเข้าใจในงานสามารถใช้เป็นแหล่งอ้างอิงในการดำเนินงานวิจัย ดังนั้นบทนี้จึงได้นำเสนอหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานวิจัยนี้โดยจะกล่าวถึงเฉพาะส่วนที่เป็นประโยชน์หรือกล่าวอ้างอิงถึงการดำเนินงานวิจัย โดยประกอบด้วยดังนี้ การพาสเจอร์ไรซ์ หลักการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ ทฤษฎีพื้นฐานของการกระจายความร้อนด้วยคลื่นสนามไฟฟ้า วงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับโหลดที่เป็นแผ่นเพลตหรือตัวเก็บประจุ โดยจะกล่าวถึงส่วนที่เป็นประโยชน์หรือกล่าวอ้างอิงถึงการดำเนินงานวิจัย

2.2 การพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization)

การปนเปื้อนของจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียในอาหาร ทำให้อาหารเปลี่ยนแปลงทางด้านสี กลิ่น รส ทั้งที่ต้องการและไม่ต้องการ รวมถึงการสร้างสารพิษ ดังนั้นการยืดอายุการเก็บของอาหาร ต้องควบคุมไม่ให้แบคทีเรียเจริญในอาหารหรือลดปริมาณแบคทีเรียในอาหาร โดยการแยกหรือกำจัดสภาวะที่ไม่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของแบคทีเรียออกไป หรือสร้างสภาวะขัดขวางการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสำหรับอาหารเหลว วิธีการควบคุมการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่นิยมได้แก่ การใช้ความร้อนเพื่อลดปริมาณเชื้อแบคทีเรียและทำลายเอนไซม์ในอาหาร หลักการใช้ความร้อนในอาหารนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ระยะเวลาที่ใช้ และชนิดของอาหาร ความร้อนที่ใช้ในการทำสปอร์ของแบคทีเรานั้นต้องใช้ไอน้ำเดือดที่ความดันเพื่อให้อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส แล้วบรรจุในภาชนะที่ปิดแน่น อาหารที่ผ่านความร้อนที่ระดับต่ำกว่าจะต้องใช้วิธีการถนอมอาหารอย่างอื่น เพื่อช่วยในการยืดอายุการเก็บ เช่น เก็บที่อุณหภูมิต่ำ

การพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization) เป็นการถนอมนํ้านมโดยใช้ความร้อนอุณหภูมิระหว่าง 60-80 องศาเซลเซียส ทำลายเชื้อแบคทีเรียที่ปนเปื้อนในอาหาร การพาสเจอร์ไรซ์ตั้งชื่อตามนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส หลุยส์ ปาสเตอร์ (Louis Pasteur) เพื่อให้เกียรติในฐานะที่เป็นบุคคลแรกในการคิดค้นการกำจัดเชื้อแบคทีเรียในเหล้าไวน์ระหว่างปี พ.ศ.2407-2408 โดยการใช้ความร้อนที่

อุณหภูมิประมาณ 50-60 องศาเซลเซียส การค้นพบของหลุยส์ ปาสเตอร์ ทำให้เราสามารถกำจัด เชื้อจุลินทรีย์ในการผลิตเครื่องดื่ม ทำให้รสชาติ กลิ่น และสีของเครื่องดื่มไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือ มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก วัตถุประสงค์ของการทำพาสเจอร์ไรซ์อาหาร ได้แก่

- ทำลายแบคทีเรียที่ก่อโรค (Pathogenic Bacteria) ทุกชนิดในอาหาร ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิด

โรคคนและสัตว์

- ลดจำนวนของแบคทีเรียให้น้อยลง
- ทำลายเอนไซม์ต่างๆ ในน้ำผลไม้ นำนม เป็นต้น
- ยืดอายุการเก็บรักษาให้ยาวนานขึ้น (ประมาณ 3 วัน ตามกฎหมาย)
- รักษาคุณสมบัติให้เหมือนอาหารสดตามธรรมชาติ

การพาสเจอร์ไรซ์เป็นการกำจัดเชื้อแบคทีเรียโดยใช้ความร้อน โดยความร้อนจะทำลาย เอนไซม์ต่าง ๆ รวมทั้งแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรค อุณหภูมิที่ใช้ต้องไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส โดย ส่วนใหญ่การพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลวจะใช้อุณหภูมิที่มากกว่า 63 องศาเซลเซียส และคงอยู่ที่ อุณหภูมินี้ไม่น้อยกว่า 30 นาที (V.M. Silva & Gibbs, 2009) จากนั้นอาหารเหลวจะถูกทำให้เย็นลงที่ อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า การพาสเจอร์ไรซ์เป็นการถนอมอาหารแบบชั่วคราว เพราะ สามารถป้องกันไม่ให้แบคทีเรียเจริญในช่วงระยะเวลาหนึ่ง แต่สารอาหารยังอยู่ครบถ้วนหรือเกือบ ครบถ้วน ดังนั้นจึงมีประโยชน์ต่ออาหารที่รับประทานเป็นประจำแต่ไม่เก็บไว้นานๆ เช่น นม น้ำ ผลไม้ เป็นต้น อาหารเหลวที่ผ่านการพาสเจอร์ไรซ์ควรจัดเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส หรืออุณหภูมิต่ำเย็น เพื่อยับยั้งการเกิดของสปอร์ของแบคทีเรีย วิธีการพาสเจอร์ไรซ์มี 2 วิธีคือ

วิธีใช้ความร้อนต่ำ-เวลานาน (LTLT : Low Temperature – Long Time) วิธีนี้ใช้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 62.8-65.6 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (V.M. Silva & Gibbs, 2009) เมื่อผ่านความ ร้อนโดยใช้เวลาตามที่กำหนดแล้ว ต้องเก็บอาหารไว้ในที่เย็นซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า 7.2 องศา เซลเซียส กรรมวิธีนี้นอกจากจะทำลายแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคแล้วยังยับยั้งการทำงานของเอน ไซม์ย่อยไขมันชนิดไลเปสซึ่งเป็นตัวการทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ในนํานม

วิธีใช้ความร้อนสูง-เวลาสั้น (HTST : High Temperature – Short Time) วิธีที่ใช้ความร้อน ที่อุณหภูมิสูงกว่าวิธีแรก แต่ใช้เวลาน้อยกว่าคืออุณหภูมิ 71.1 องศาเซลเซียสคงไว้เป็นเวลา 15 วินาที (V.M. Silva & Gibbs, 2009) อาหารที่ผ่านความร้อนจะได้รับการบรรจุลงกล่องหรือขวดโดยวิธี ปราศจากเชื้อแล้วนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 7.2 องศาเซลเซียส

การพาสเจอร์ไรซ์จะแตกต่างจากการสเตอริไรซ์และได้รับความนิยมนมากกว่า เนื่องจาก สเตอริไรซ์ทำให้อาหารรสชาติและคุณภาพของอาหารแย่ลง รวมถึงการสเตอริไรซ์ทำให้สูญเสียสิ่งมีชีวิต

ขนาดเล็กที่มีประโยชน์ต่อร่างกายอีกด้วย การพาสเจอร์ไรซ์จะทำลายเชื้อแบคทีเรียเพียง 95-99% ในขณะที่การสเตอริไรซ์จะทำลายแบคทีเรียได้ทั้งหมด ประสิทธิภาพของการทำลายแบคทีเรียของการพาสเจอร์ไรซ์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาในการพาสเจอร์ไรซ์ตามตารางที่ 2.1 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการพาสเจอร์ไรซ์

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการพาสเจอร์ไรซ์

(V.M. Silva & Gibbs, 2009)

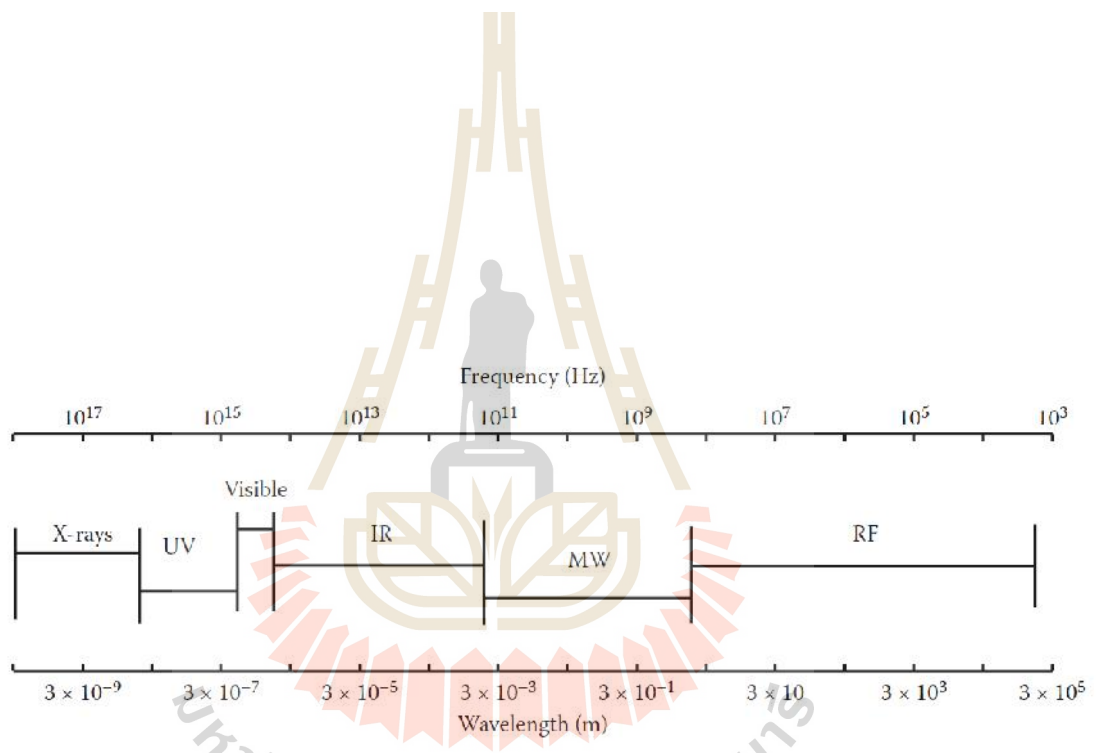
อุณหภูมิ (°C)	เวลา
68.2	30 นาที
71.7	15 วินาที
88.4	0.1 วินาที
97.6	0.05 วินาที
100.0	0.01 วินาที

2.3 หลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกด้วยความถี่วิทยุ

คลื่นความถี่วิทยุและคลื่นความถี่ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุและไมโครเวฟในบางครั้งจะเรียกกันว่า การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก (Dielectric heating) หรือ การให้ความร้อนแบบการสูญเสียของวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric loss heating) การให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุเกิดจากการสลับขั้วของสนามไฟฟ้าที่ความถี่สูงทำให้โมเลกุลภายในตัววัสดุที่มีขั้วทางไฟฟ้าสลับกันไปมา ทำให้เกิดการสั่นกันจนเกิดเป็นความร้อนขึ้นภายในวัสดุ ดังนั้นลักษณะการเกิดความร้อนแบบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุจึงไม่เหมือนกับการให้ความร้อนแบบธรรมดาเมื่อเปรียบเทียบกัน เช่น ความเร็วและปริมาณการเกิดความร้อน เป็นต้น ปัจจุบันพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กันมากมายหลากหลายในด้านต่าง ๆ ซึ่งในด้านอุตสาหกรรมอาหารได้นำการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุมาประยุกต์ใช้จนประสบความสำเร็จ ได้แก่ การอบแห้ง การอบ และการละลายเนื้อสัตว์แช่แข็ง (Richardson, 2001)

2.3.1 การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกด้วยความถี่วิทยุ

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกด้วยความถี่วิทยุและไมโครเวฟ เป็นกระบวนการให้ความร้อนขั้นสูงในด้านวิศวกรรมอาหาร การให้ความร้อนแบบไดอิเล็ก



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$c = \lambda f$$

(2.1)

โดยที่ c คือ ความเร็วของแสง (3.0×10^8 m/s)
 λ คือ ความยาวคลื่น (m)
 f คือ ความถี่ (Hz)

ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบความถี่และความยาวคลื่น (Tang et al., 2000)

คลื่นความถี่	ความถี่วิทยุ			ไมโครเวฟ	
ความถี่ (MHz)	13.56	27.12	40.68	915	2450
ความยาวคลื่น (m)	22	11	7.4	0.33	0.12

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก เมื่อวัสดุไดอิเล็กตริก เช่น อาหาร ที่วางอยู่ในสนามไฟฟ้าสลับในอาหารจะมีโมเลกุลที่มีขั้วทางไฟฟ้า เช่น น้ำ และขั้วโมเลกุลเหล่านี้จะมีไดโพลโมเมนต์ (Electrical dipole moment) นั่นคือประจุบวกและประจุลบที่เรียงกัน เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าประจุบวกและประจุลบจะโยกย้ายไปมาในส่วนต่าง ๆ ของโมเลกุลตามสนามไฟฟ้า และนำไปสู่การโพลาไรซ์เซชัน (Polarization) ถ้าเป็นสนามไฟฟ้าสลับ ขั้วของโมเลกุลจะหมุนไปตามสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การหมุนของขั้ว (Dipole rotation) (Marra et al., 2009) ด้วยปรากฏการณ์นี้เกิดจากการหมุนของประจุบริเวณรอบๆ ของโมเลกุล จึงเปลี่ยนพลังงานของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้เป็นความร้อน และทำให้อุณหภูมิภายในวัสดุเพิ่มขึ้น ซึ่งจะแตกต่างจากขั้วโมเลกุลไอออนในอาหารที่แยกออกจากจะเกิดการเคลื่อนไหวไปมาสอดคล้องกับสนามไฟฟ้าที่ใช้ ในทำนองเดียวกันทิศทางการเคลื่อนไหวที่แตกต่างกันไปตามสนามไฟฟ้าสลับ ความร้อนจะเกิดขึ้นภายในวัสดุที่เกิดจากการสั่นของไอออนไปมาในวัสดุ (Buefler, 1993) กลไกนี้เรียกว่า การเหนี่ยวนำด้วยไอออน (Ionic conduction) การเหนี่ยวนำด้วยไอออนและการหมุนของขั้วเป็นกลไกหลักสำหรับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกด้วยความถี่วิทยุและไมโครเวฟ ทั้งสองกลไกขึ้นอยู่กับความเข้มสนามไฟฟ้ากับความถี่

2.3.2 คุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริก

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ลักษณะทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุเป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก และยังเป็นตัวแปรสำคัญในการจำลองกระบวนการเกิดความร้อนแบบไดอิเล็กตริกด้วยคอมพิวเตอร์ ลักษณะทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุประกอบด้วย สภาพความซึม (Permeability) และสภาพความยอม (Permittivity) โดยทั่วไปเป็นที่ยอมรับกันว่า สำหรับวัสดุที่เป็นไดอิเล็กตริกส่วนใหญ่สภาพความซึมจะไม่มีส่วนทำให้เกิดความร้อนแบบไดอิเล็กตริก (Zhang and Datta, 2001) ดังนั้นจึงไม่ได้นำมาพิจารณา ส่วนสภาพความยอมจะมีส่วนทำให้เกิดความร้อนแบบไดอิเล็กตริก สภาพความยอมจะเป็นปริมาณเชิงซ้อนที่ใช้อธิบายคุณสมบัติของไดอิเล็กตริก ที่เกี่ยวข้องกับการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เข้าไปในวัสดุไดอิเล็กตริกและการลดทอนพลังงานของคลื่นภายในวัสดุ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์สำหรับสภาพความยอมดังนี้

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon_0 (\epsilon_r' - j \epsilon_r'') = \epsilon' - j \epsilon'' \quad (2.2)$$

เมื่อ	ϵ	คือ สภาพความยอม (Permittivity)
	ϵ_r	คือ สภาพความยอมสัมพัทธ์เชิงซ้อน (Relative complex permittivity)
	ϵ_0	คือ สภาพความยอมของสุญญากาศ ($8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)
	ϵ_r'	คือ ค่าคงที่สภาพความยอมสัมพัทธ์ (Relative dielectric constant)
	ϵ_r''	คือ ปัจจัยการสูญเสียของไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative dielectric loss factor)
	ϵ'	คือ ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริก (Dielectric constant)
	ϵ''	คือ ปัจจัยการสูญเสียของไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor)
	j	คือ $\sqrt{-1}$

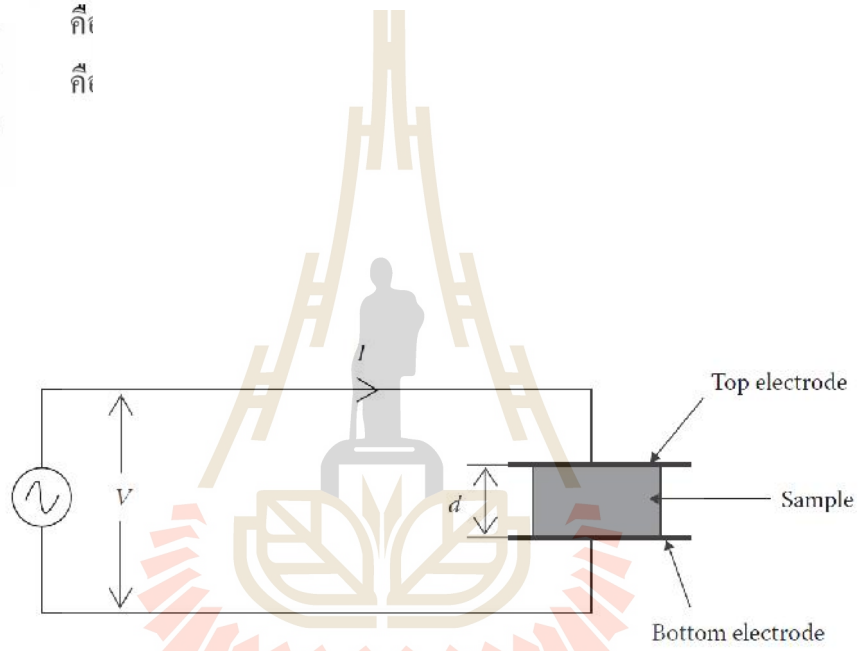
ϵ_r' หรือ ϵ' เป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความสามารถการเก็บประจุกระแสไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กตริก นั้นจะส่งผลกระทบต่อของการกระจายของสนามไฟฟ้าและมุม (Phase) ของคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านวัสดุ ϵ_r'' หรือ ϵ'' จะอธิบายความสามารถของวัสดุในการกระจายพลังงาน เนื่องจากกลไกต่างๆ ของการโพลาไรซ์ (Polarization) ความสามารถนี้มีผลต่อการดูดซับพลังงาน และการลดทอนของคลื่นสนามไฟฟ้า ที่ในที่สุดจะก่อให้เกิดความร้อนในวัสดุ

ค่ามุมสัมผัสสูญเสีย (Loss tangent) เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ใช้อธิบายปัจจัยการกระจายพลังงานของวัสดุ ซึ่งก็คือการสัมผัสของมุมการสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) และเท่ากับอัตราของ

UNIT 07: DIELECTRIC MATERIALS

$$\delta = \epsilon'' / \epsilon' = \epsilon_r'' / \epsilon_r'$$

$\tan \delta$ คือ
 ϵ_r' คือ
 ϵ_r'' คือ
 ϵ' คือ
 ϵ'' คือ



จงจะแสดง

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r' A}{d}$$

C (หน่วย F)

A (หน่วย m^2)

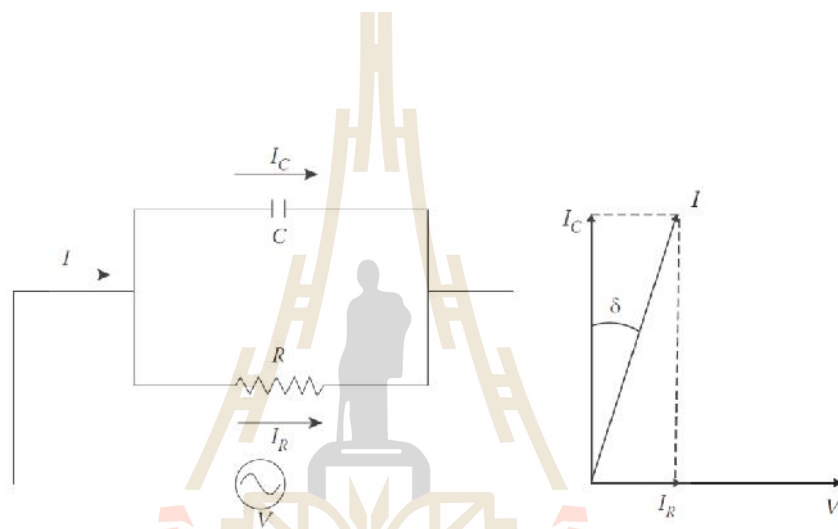
d

ϵ_0 พิธี

ϵ_r' พิธี

m)

$-12 F/m)$



สูง

δ

~

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$I_C)$

$$I_C = \omega VC = 2\pi fVC$$

V) และ

$I_R)$ สามารถ

$$I_R = I \sin \delta = I_C \tan \delta$$

~ ~ ~ Q) ให้ ~

$$Q = VI_R = VI_c \tan \delta = 2\pi f V^2 C \tan \delta \quad (2.7)$$

เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ มีความสัมพันธ์กับความเข้มสนามไฟฟ้า (E) แสดงตามสมการที่ 2.8

$$E = \frac{V}{d} \quad (2.8)$$

เมื่อ E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)
 d คือ ระยะห่างระหว่างเพลตอิเล็กโตรด (m)

เมื่อนำสมการ (2.8) แทนในสมการที่ (2.7)

$$Q = 2\pi \epsilon_0 \epsilon_r' f E^2 d A \tan \delta = 2\pi \epsilon_0 \epsilon_r'' f E^2 d A \quad (2.9)$$

เมื่อ dA คือ ปริมาตรของโหลด ดังนั้นกำลังงานการกระจายในหน่วยปริมาตรแสดงได้ดังนี้

$$P = 2\pi \epsilon_0 \epsilon_r'' f E^2 = 5.50 \times 10^{-11} \epsilon_r'' f E^2 \quad (2.10)$$

เมื่อ P คือ การกระจายพลังงานต่อหน่วยปริมาตรที่เกิดความร้อนในวัสดุ (W/m^3)
 ความสามารถในการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุไดอิเล็กตริกโดยการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ เพื่อเปลี่ยนแปลงพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้เป็นความร้อน ขึ้นอยู่กับค่าสภาพความยอมของวัสดุ ความถี่ และความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ใช้ (Orfeuil, 1987) สามารถกำหนดหาอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปได้จากสมการที่ 2.11

$$\Delta T = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r'' f t E^2}{\rho C_P} \quad (2.11)$$

เมื่อ ΔT คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ($^{\circ}C$)
 t คือ ระยะเวลาที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น (s)
 f คือ ความถี่ (Hz)
 ϵ_0 คือ สภาพความยอมของสุญญากาศ ($8.854 \times 10^{-12} F/m$)

ϵ''	คือ ปัจจัยการสูญเสียของไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor)
E	คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)
ρ	คือ ความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m^3)
C_p	คือ ความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ($J/kg \cdot ^\circ C$)

2.3.4 ระดับความลึกของการทะลุทะลวง

ในวัสดุที่มีการสูญเสียจะมีค่าการลดทอนที่สูงขึ้น เป็นผลให้อัตราการสูญเสียสูงขึ้น อัตราการสูญเสียที่น้อยจะทำให้กำลังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางเข้าไปภายในวัสดุไดไกล กำลังของการทะลุทะลวงจะถูกกำหนดโดยระยะทางที่เข้าไป ซึ่งกำลังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะลดลงที่ $1/e$ ($e = 2.718$) ของกำลังที่ป้อนเข้าไป (Metaxas & Meresdith, 1993) ความลึกการทะลุทะลวงสำหรับวัสดุไดอิเล็กตริกสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.12

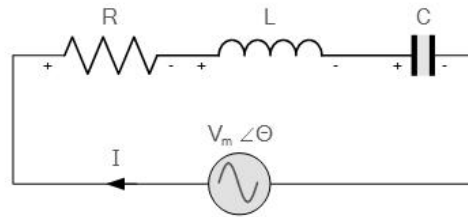
$$d_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\epsilon' [\sqrt{1+(\epsilon''/\epsilon')^2} - 1]}} \quad (2.12)$$

เมื่อ	d_p	คือ ความลึกของการทะลุทะลวง (m)
	c	คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ ($3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$)

จากสมการ 2.12 ความลึกของการทะลุทะลวงขึ้นอยู่กับความถี่และคุณสมบัติของไดอิเล็กตริก ซึ่งความถี่วิทยุสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในวัสดุไดอิเล็กตริกได้มากกว่าไมโครเวฟ ดังนั้นการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุจึงเหมาะสมกับงานวิจัยนี้มากกว่าการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

2.4 วงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม

วงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรมเป็นวงจรที่สำคัญในงานวิจัยนี้ เนื่องจากการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ จะสร้างชุดปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูงเป็นแบบแผ่นเพลตหรือตัวเก็บประจุ จึงใช้หลักการของวงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรมในการแมตซ์อิมพีแดนซ์ เพื่อให้ได้กำลังที่ตกคร่อมระหว่างแผ่นเพลตมากที่สุด ดังนั้นงานวิจัยนี้จำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีของวงจร RLC รีโซแนนซ์แบบอนุกรมดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจร RLC รีโซแนนซ์แบบอนุกรม (<http://www.electronics-tutorials.ws>)

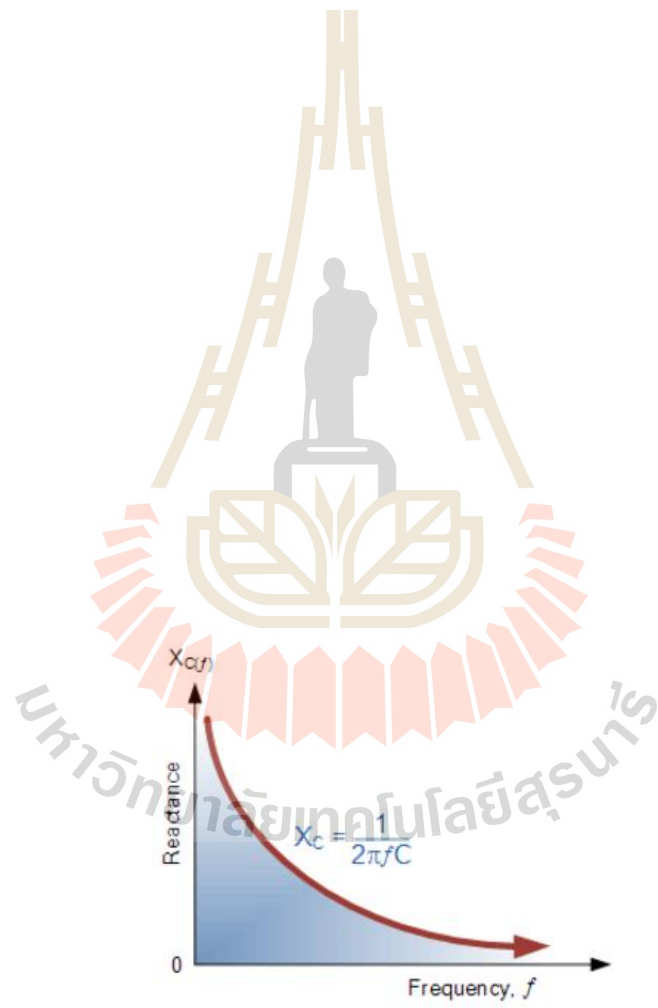
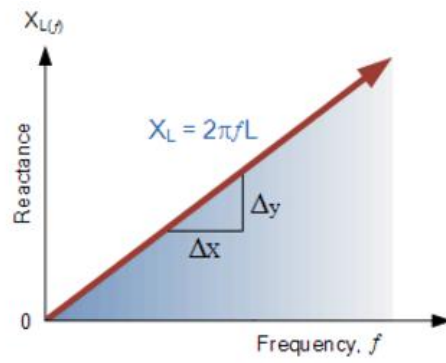
จากรูปที่ 2.4 เป็นวงจรรีโซแนนซ์ RLC แบบอนุกรม ซึ่งจะใช้อธิบายการรีโซแนนซ์ของวงจร และสมการที่ต้องทราบสำหรับวงจรรีโซแนนซ์ มีดังนี้

$$X_L = 2\pi fL \quad (2.13)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.14)$$

เมื่อ	X_L	คือ ความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductive reactance)
	X_C	คือ ความต้านทานของตัวเก็บประจุ (Capacitive reactance)
	f	คือ ความถี่
	L	คือ ตัวเหนี่ยวนำ
	C	คือ ตัวเก็บประจุ

จากสมการที่ 2.13 ค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ ถ้ามีความถี่ที่เพิ่มขึ้นหรือมีค่าตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีความถี่มากๆ ค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำจะมีค่ามากๆ ตามความถี่ และจะทำให้วงจรที่มีตัวเหนี่ยวนำเปรียบเสมือนการเปิดวงจร แต่ในทางกลับกันที่ความถี่ต่ำมากๆ ค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำจะมีค่าต่ำลงจนถึงศูนย์ และทำให้วงจรเปรียบเสมือนการลัดวงจร ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ



2.5 คุณลักษณะของตัวเหนี่ยวนำ

การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำจะต้องไม่ทำให้เกิดการหักล้างสนามแม่เหล็กจากเหตุผลข้างต้นขดลวดเหนี่ยวนำจะต้องสามารถทำให้เกิดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในพื้นที่ที่ต้องการให้ความร้อนได้ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลักดังนี้ (1) A helical solenoid จะให้ความร้อนแก่ชิ้นงานภายในขดลวดเหนี่ยวนำ (2) A pancake coil จะให้ความร้อนเฉพาะบริเวณผิวหน้าด้านหนึ่งของชิ้นงาน (3) An internal coil จะให้ความร้อนบริเวณรอบนอกของขดลวดเหนี่ยวนำ โดยทั่วไปแล้วขดลวดเหนี่ยวนำนิยมจากลวดแดง ทั้งนี้เพราะทองแดงเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ซึ่งลักษณะตัวอย่างขดลวดแบบต่าง ๆ ได้แก่ แบบ (1) round (2) rectangular (3) formed (4) pancake (5) spiral-helical และ (6) internal โดยขดลวดแบบต่าง ๆ เหล่านี้จะถูกนำไปใช้ตามสภาวะของงานตามรูปร่างวัสดุที่มีความเหมาะสม ทำให้มีกำลังสูญเสียในขดลวดเหนี่ยวนำต่ำ ซึ่งจะส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพสูง สำหรับการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำนั้นจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อกระแสไฟฟ้าในขดลวด จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กหรือความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยรวม โดยการคำนวณหรือการพิจารณาค่าความเหนี่ยวนำนั้นถูกกำหนดโดย 3 ปัจจัยดังนี้

1) จำนวนรอบของขดลวด โดยถ้าตัวเหนี่ยวนำมีจำนวนรอบของขดลวดมากขึ้น สนามแม่เหล็กที่เกิดจากการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าในขดลวดเกิดขึ้นมากด้วย สนามแม่เหล็กปริมาณมากนี้จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นในตัวเหนี่ยวนำ และจากการที่มีเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนมากตัดกับขดลวด จึงส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำมากตามไปด้วย ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำจึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบของขดลวด

2) พื้นที่ของขดลวด โดยถ้าพื้นที่ของขดลวดเพิ่มขึ้นสำหรับขดลวดที่มีจำนวนรอบใด ๆ จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กมีจำนวนมากขึ้นด้วย และการมีสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นตาม ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำจึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ของขดลวด

3) ความยาวของขดลวด โดยถ้าทำให้ขดลวดจำนวน 4 รอบขยายพื้นที่ออกผลรวมของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดแต่ละขดจะมีปริมาณลดลง แต่ในทางกลับกันถ้าขดลวดที่มีจำนวนเท่าเดิมนำมาพันให้อยู่ชิดกันมากขึ้นความยาวของขดลวดสั้นลงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดในแต่ละขดจะเสริมซึ่งกันและกันทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่ามากตามไปด้วย ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำจึงเป็นสัดส่วนผกผันกับความยาวของขดลวด

$$L = \frac{\mu AN^2}{l} \quad (2.16)$$

- เมื่อ L คือค่าความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็นเฮนรี
 ~ คือค่าความซึมซาบได้
 N คือจำนวนรอบของขดลวด
 A คือพื้นที่หน้าตัด มีหน่วยเป็นตารางเมตร
 l คือความยาวของวัสดุที่นำมาทำแกน มีหน่วยเป็นเมตร

2.6 สรุป

สำหรับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกหรือการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ สิ่งสำคัญคือต้องเข้าใจถึงหลักการทำงานของระบบ และโครงสร้างของอุปกรณ์ที่นำมาออกแบบ รวมถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องสำหรับการให้ความร้อนแบบด้วยความถี่วิทยุ ซึ่งในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและกลไกการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ ซึ่งได้อธิบายถึงโครงสร้างพื้นฐาน การให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ จะอธิบายถึงสมการการเกิดความร้อนและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อน ลักษณะการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าของตัวสร้างคลื่นแบบแผ่นเพลต คุณลักษณะของตัวเหนี่ยวนำและวงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม ทั้งนี้เพื่อนำมาซึ่งการวิเคราะห์ ออกแบบ และทดสอบให้มีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด

บทที่ 3

การวิเคราะห์และออกแบบการพาสเจอร์ไร้น้ำนมโดยใช้เทคนิค การให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ

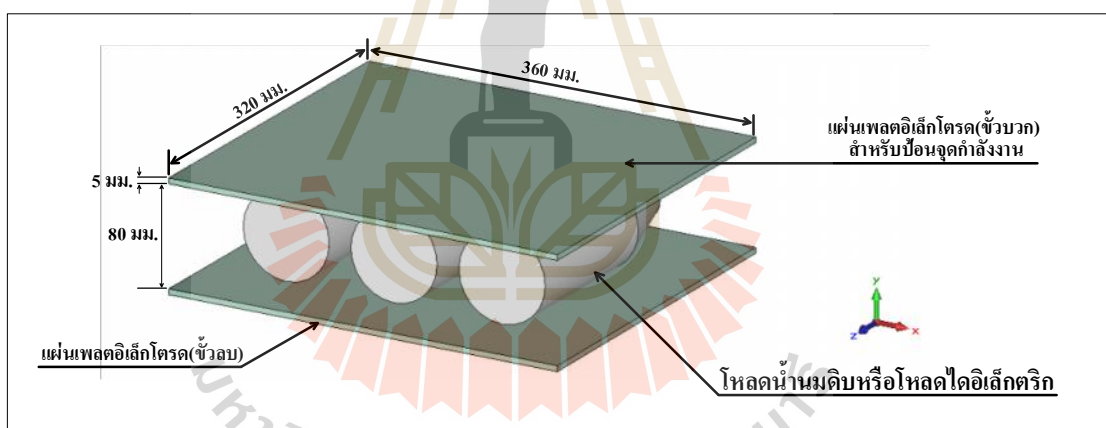
3.1 กล่าวนำ

สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะได้กล่าวถึงการวิเคราะห์การแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้า ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการเกิดความร้อนกับโพลไดอิเล็กตริกหรืออาหาร ซึ่งโพลไดอิเล็กตริกในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยน้ำนมดิบ ที่ยังไม่ได้ผ่านการพาสเจอร์ไรซ์ โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้น้ำนมดิบ เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่บริโภคกันส่วนใหญ่และสามารถตรวจสอบคุณภาพได้ง่าย สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบการพาสเจอร์ไร้น้ำนมโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุจะใช้โปรแกรม CST EM STUDIO เพื่อวิเคราะห์เชิงตัวเลขในการศึกษาความเป็นไปได้ของรูปแบบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุที่เกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้า ทั้งนี้ เพื่อประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ โดยเบื้องต้นนั้น จะเป็นการศึกษาและวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพของการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโพลไดอิเล็กตริกหรือโพลไดอิเล็กตริก สำหรับการออกแบบตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าจะออกแบบเป็นแบบแผ่นเพลต ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในการกำเนิดสนามไฟฟ้าความถี่สูง ทั้งนี้ เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพของสนามไฟฟ้าที่แผ่กระจายเข้าไปในโพลไดอิเล็กตริก และสามารถนำมาออกแบบและสร้างตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตให้มีความเหมาะสม และให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด จากนั้นได้นำตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตที่มีผลการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าที่ดีที่สุด ที่ได้จากการศึกษาและวิเคราะห์มาสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ทดสอบการพาสเจอร์ไรซ์ การจำลองนั้นจะใช้วิธีการป้อนกำลังงานด้วยสัญญาณความถี่ที่ 40 MHz ซึ่งในส่วนนี้เริ่มต้นจากการศึกษาผลการจำลองแบบด้วยวิธีการป้อนกำลังงานที่ตำแหน่งต่าง ๆ และใช้เทคนิคการเพิ่มจำนวนจุดป้อนกำลังงานเพื่อให้ได้ตำแหน่งและจำนวนจุดป้อนกำลังงานที่ดีที่สุด เมื่อได้วิธีการป้อนกำลังงานที่เหมาะสม จากนั้นทำการจำลองผลการให้ความร้อนกับโพลไดอิเล็กตริก เพื่อหาประสิทธิภาพของกำลังงานสำหรับการให้ความร้อนกับโพลไดอิเล็กตริกที่เหมาะสม ซึ่งผลเฉลยของการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุนั้นได้จากการจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST EM STUDIO ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งใช้เป็นแนวทางในการทดสอบระบบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุที่เหมาะสมต่อการใช้งานต่อไป

3.2 แนวความคิดในการออกแบบระบบการพาสเจอร์ไรซ์น้ำนมโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่จะมีการใช้ตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต เนื่องจากสามารถให้ความเข้มข้นสนามไฟฟ้าได้ดีที่สุดและเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานกับ โหลดในรูปทรงต่างๆ จึงเหมาะกับงานวิจัยที่จะพาสเจอร์ไรซ์อาหารที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ และสืบเนื่องจากปัญหาในปัจจุบันปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตน้ำผลไม้ไวน์และนมพาสเจอร์ไรซ์ ในประเทศไทย มีการผลิตและจัดจำหน่ายกันหลากหลายทั้งในประเทศและต่างประเทศ ยกตัวอย่างเช่น บริษัทน้ำผลไม้มาลี ทิปโก้ ยูนิฟ กลุ่มผลิตและจัดจำหน่ายไวน์และน้ำผลไม้โอท็อป เป็นต้น แต่ในขณะที่วางจำหน่ายเกิดปัญหาเครื่องเค็มเน่าเสียก่อนกำหนดและขาดเกิดการแตกร้าว ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นเกิดจากการมีเชื้อจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียที่ติดค้างภายในผลิตภัณฑ์ สิ่งเหล่านี้ก่อให้เกิดพาหะของโรคและทำให้อาหารเน่าเสียก่อนกำหนด กลุ่มผลิตจัดจำหน่ายไวน์ น้ำผลไม้โอท็อปและนมพาสเจอร์ไรซ์ จะใช้วิธีการพาสเจอร์ไรซ์ เป็นการกำจัดเชื้อแบคทีเรียโดยใช้วิธีแบบหม้อต้ม โดยบรรจุผลิตภัณฑ์ลงขวดแก้ว แล้วนำขวดลงไปแช่ในหม้อ จากนั้น ต้มให้น้ำได้อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้พลังงานจากแก๊สหุงต้ม วิธีดังกล่าวอาศัยหลักการพาความร้อนจากภายนอกเข้าไปยังในขวดโดยมีแก้วเป็นตัวกลาง การให้ความร้อนด้วยวิธีนี้ใช้เวลานาน กว่าอุณหภูมิภายในจะทำกันทั้งหมดและทำให้อุณหภูมิที่ผิวขวดจะมีอุณหภูมิมากเกินไปจะทำให้อาหารสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำเสนอการพาสเจอร์ไรซ์น้ำนมโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ สำหรับการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ ซึ่งเป็นวิธีการทำลายเชื้อแบคทีเรียด้วยความร้อนและความเข้มข้นสนามไฟฟ้า ประหยัดพลังงานและระยะเวลาการให้ความร้อน โดยในงานวิจัยนี้ใช้โหลดไดอิเล็กตริกที่เป็นน้ำนมดิบ โดยลักษณะของการวิเคราะห์การให้ความร้อนจะใช้แผ่นอิเล็กโตรดแบบเพลตเป็นตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้า เพื่อส่งผ่านกำลังงานไปยังโหลดน้ำนมดิบ ซึ่งสามารถทำให้โหลดเกิดความร้อนขึ้นได้ โดยได้ใช้หลักการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการคำนวณและการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อพิจารณาระดับความเข้มและการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโหลดในแผ่นเพลต ซึ่งเป็นผลต่อการเกิดความร้อนและสร้างชุดทดสอบ สำหรับทดสอบให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ กับโหลดไดอิเล็กตริกในแผ่นเพลต โดยใช้แหล่งจ่ายกำลังงานจากภายนอกที่ออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อให้กำลังงานกับแผ่นเพลตที่ได้ออกแบบสำหรับสร้างสนามไฟฟ้าในการส่งผ่านกำลังงานไปยังโหลดและนำผลที่ได้มาตรวจสอบผลการทำลายเชื้อแบคทีเรียในน้ำนมดิบ ซึ่งรูปแบบของแนวความคิดการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักคือตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต มีทั้งหมด 2 ชั้น คือ ชั้นอิเล็กโตรดแบบแผ่นเพลตที่มีการป้อน

กำลังงาน(ขั้วบวก) เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าและส่งผ่านกำลังงานไปยังโหลดไดโอดีลิกและเข้าสู่ขั้ว
 อดิเล็กโตรดแบบแผ่นเพลตที่เป็นกรวด (ขั้วลบ) และอีกส่วนประกอบหนึ่งคือ โหลดไดโอดีลิกที่
 ประกอบไปด้วยวัสดุที่เป็นแก้วและน้ำมันดิบ ทั้งนี้วัสดุทั้ง 2 ชนิดจะมีการวิเคราะห์ผลของการให้
 ความร้อน โดยจะไม่คิดในส่วนของแก้วที่เป็นภาชนะ เนื่องจากคุณสมบัติของแก้วไม่มีผลกับ
 สนามไฟฟ้าที่ใช้ เมื่อนำมาให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุจะไม่มีผลกระทบกับตัววัสดุที่เป็นแก้ว
 ดังนั้นการวิเคราะห์การให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุในงานวิจัยจะคิดเฉพาะน้ำมันดิบ โดยการ
 วิเคราะห์นี้จะให้โหลดไดโอดีลิกทั้ง 3 ขวด วางอยู่ระหว่างเพลตอดิเล็กโตรดทั้ง 2 เพลต ทำการเพิ่ม
 จุดป้อนกำลังงานให้กับแผ่นเพลตที่ตำแหน่งต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโหลด
 สำหรับหาวิธีการออกแบบและสร้างระบบให้มีประสิทธิภาพการทำงานและมีความเหมาะสมต่อ
 การใช้งานมากที่สุด ซึ่งก่อนที่จะวิเคราะห์ถึงผลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโหลดไดโอดีลิก ใน
 หัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงการวิเคราะห์และออกแบบการพาสเจอร์ไรซ์น้ำมันโดยใช้เทคนิคการให้
 ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ

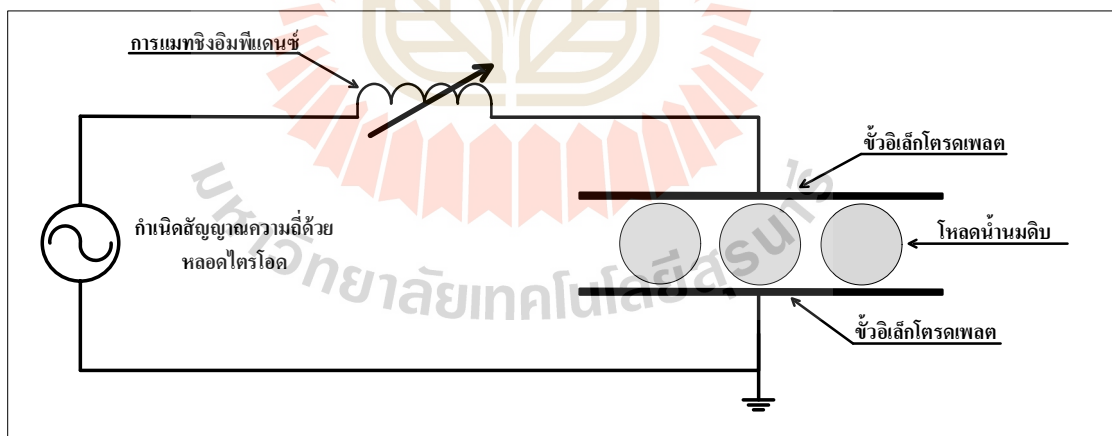


รูปที่ 3.1 รูปแบบของแนวคิดการให้ความร้อนแก่โหลดไดโอดีลิก

3.3 การวิเคราะห์และออกแบบการพาสเจอร์ไรซ์น้ำนมโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ

สำหรับหัวข้อต่อไปนี้จะได้กล่าวถึงแนวความคิดในการวิเคราะห์และออกแบบระบบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ สำหรับวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโพลدن้านมดิบ ซึ่งประกอบด้วยหัวข้อในการวิเคราะห์และออกแบบ คือ การวิเคราะห์ผลของการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าในน้ำนมดิบ การวิเคราะห์และจำลองการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้า และการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการให้กำลังงานสำหรับการพาสเจอร์ไรซ์น้ำนมโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้า

สำหรับแนวความคิดในการจัดวางระบบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งประกอบด้วยส่วนกำเนิดสัญญาณความถี่ กำเนิดความถี่ ส่งต่อกำลังงานให้กับภาควงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม ประกอบด้วยค่าของตัวเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุ ซึ่งตัวเป็นประจุจะออกแบบให้เป็นตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต โดยตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดแผ่นบนสำหรับเป็นขั้วบวกสำหรับปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าเพื่อส่งผ่านกำลังงานไปยังโพลدن้านมดิบ และเข้าสู่ขั้วอิเล็กโทรดแผ่นล่างเป็นขั้วลบ ซึ่งเป็นการทำงานของระบบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ



รูปที่ 3.2 แนวความคิดในการออกแบบระบบการพาสเจอร์ไรซ์โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ

3.3.1 การวิเคราะห์ผลของวัสดุที่มีผลต่อการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้า

จากแนวความคิดการออกแบบในรูปแบบที่ 3.2 ซึ่งเป็นรูปแบบของระบบการให้ความร้อนแก่โหลดไดโอดีเล็กด้วยควมถี่วิทยุ โดยเริ่มต้นจากวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ โดยใช้หลอดไตรโอดที่มีกำลังงานสูงโดยให้ แรงดันเอาต์พุต 9 kVDC กระแสเอาต์พุต 2 A และความถี่สูงสุด 110 MHz ส่งต่อกำลังงานให้กับวงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรมที่สามารถปรับแมทชิงอิมพีแดนซ์ และป้อนกำลังงานให้กับแผ่นเพลต เพื่อสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าและเปลี่ยนกำลังงานคลื่นสนามไฟฟ้าให้เป็นความร้อน โดยสนามไฟฟ้าจะแผ่กระจายในทิศทางของขั้วอิเล็กโตรดแบบแผ่นเพลตที่มีการป้อนกำลังงาน(ขั้วบวก) เข้าสู่ขั้วอิเล็กโตรดแบบแผ่นเพลตที่เป็นกราวด์ (ขั้วลบ) สนามไฟฟ้าที่ผ่านหลอดไดโอดีเล็กหรือหลอดน้ำนมดิบ นั้นจะไปทำปฏิกิริยากับหลอดไดโอดีเล็กหรือหลอดน้ำนมดิบและเปลี่ยนเป็นรูปแบบของความร้อน ตัวแปรสำคัญในการกำเนิดคลื่นสนามไฟฟ้านั้นคือ วัสดุที่ใช้ในการออกแบบตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต ซึ่งในหัวข้อนี้ จะได้มีการวิเคราะห์ถึงประสิทธิผลของการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าของวัสดุแต่ละชนิด เพื่อทราบถึงประสิทธิผลการแผ่กระจาย และนำมาออกแบบระบบการให้ความร้อนด้วยควมถี่วิทยุ ให้มีความเหมาะสมที่สุด ซึ่งพบว่าผลของการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าจะมีผลต่อค่าสภาพนำทางไฟฟ้าของวัสดุแต่ละชนิด และวัสดุที่ใช้ในการพิจารณาคูณลักษณะของการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้านั้น ได้เลือกใช้วัสดุที่มีค่าตัวแปรของสภาพนำทางไฟฟ้าและตัวแปรของค่าความซึมซาบได้ โดยวัสดุที่เลือกใช้ได้แก่ ทองแดง (Cu) อลูมิเนียม (Al) วัสดุเหล็กโครงสร้าง (Fe) และ เหล็กกล้าไร้สนิม (SST) จากผลการศึกษาพบว่าวัสดุที่เป็นทองแดง ซึ่งมีค่าสภาพนำทางไฟฟ้าเท่ากับ 59.6×10^6 S/m เมื่อเทียบกับค่าสภาพนำทางไฟฟ้าของวัสดุอื่นที่มีค่าที่น้อยกว่า ทำให้วัสดุที่เป็นทองแดงสามารถแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าได้ดีที่สุด แต่ทองแดงมีราคาที่สูง ดังนั้นจึงเลือกใช้วัสดุที่เป็นอลูมิเนียม ที่มีค่าความซึมซาบเท่ากับทองแดง และค่าสภาพนำทางไฟฟ้าที่ยอมรับได้ในการออกแบบตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต และจะใช้ทดแทนทองแดงที่มีราคาสูง โดยที่ค่าสภาพนำทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบได้ของวัสดุแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่เลือกมาทำการศึกษาวิเคราะห์ประสิทธิผลการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้า

ชนิดของวัสดุ	ค่าสภาพนำทางไฟฟ้า (S/m)	ค่าความซึมซาบได้
ทองแดง (Cu)	59.6×10^6	1
อลูมิเนียม (Al)	35.0×10^6	1
เหล็กโครงสร้าง (Fe)	10.0×10^6	4000
เหล็กกล้าไร้สนิม (SST)	1.45×10^6	200000

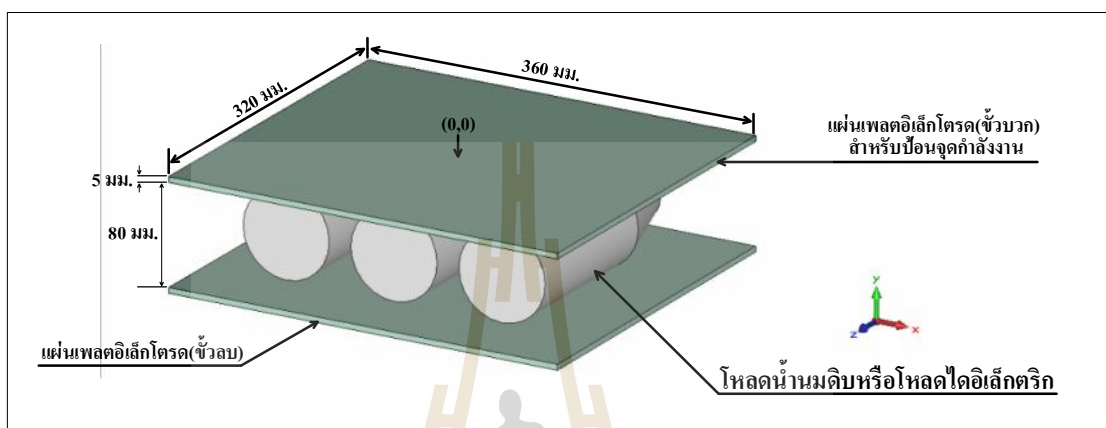
3.3.2 การวิเคราะห์และจำลองลักษณะการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าในโหนด น้ำนมดิบ

เพื่อให้ทราบถึงลักษณะการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโหนดน้ำนมดิบ ความเข้มสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมและการแผ่กระจายได้ทั่วทั้งโหนดน้ำนมดิบ สืบเนื่องมาจากงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นในด้านอุตสาหกรรมอาหารและการพาเสเจอร์ไรซ์ให้มีประสิทธิภาพ ใช้เวลาน้อย และประหยัดพลังงาน ซึ่งงานวิจัยนี้จะจำลอง วิเคราะห์และออกแบบการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโหนดน้ำนมดิบหรือโหนดไดอิเล็กตริก และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับโหนดน้ำนมดิบเท่านั้น โดยให้โหนดน้ำนมดิบวางอยู่ในระหว่างแผ่นเพลตไดอิเล็กโตรดทั้ง 2 แผ่น โดยจะวางไว้ทั้ง 3 ขวด ซึ่งขวดที่ใช้สำหรับบรรจุน้ำนมดิบจะเป็นวัสดุที่ทำจากแก้ว เนื่องจากแก้วมีค่าการสูญเสียของไดอิเล็กตริกน้อยมากๆ จึงไม่มีผลกับการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ โดยขวดแก้วมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร สูง 250 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงออกแบบแผ่นเพลตเป็นอลูมิเนียมทั้ง 2 แผ่น ที่ขนาดกว้าง 320 มิลลิเมตร ยาว 360 มิลลิเมตร และความหนา 5 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างแผ่นเพลตเท่ากับ 80 มิลลิเมตร แล้วปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าผ่านโหนดน้ำนมดิบ เพื่อให้กำลังงานของคลื่นสนามไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นความร้อน และความร้อนที่เกิดขึ้นจะไปทำลายเชื้อแบคทีเรียและความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระหว่างเพลตไดอิเล็กโตรดที่มีค่ามากกว่า 0.5 kV/cm เพียงพอสำหรับการทำลายเชื้อแบคทีเรียลงได้ ในการจำลองจะใช้ค่าคุณสมบัติเฉพาะของน้ำนมดิบเป็นโหนด และดูผลการจำลองการแผ่กระจายของความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 123.64 kV/m เนื่องจากเป็นค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่แผ่นเพลตไดอิเล็กโตรด เพื่อการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้า อุณหภูมิที่เกิดขึ้น และสามารถปรับแต่งงานการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าได้ทั่วทั้งโหนดน้ำนมดิบ จากการศึกษาพบว่าการใช้จุดป้อนกำลังงานมีผลต่อการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้า ซึ่งการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าจะแผ่กระจายออกจากจุดป้อนกำลังที่สูงที่สุดและกำลังค่อยๆ ลดลงตามระยะทางจากจุดป้อนกำลังอย่างสมมาตรและเป็นวงกลม ดังนั้นในการวิเคราะห์นี้ จะใช้เทคนิคการเพิ่มจุดป้อนกำลังสำหรับการวิเคราะห์ โดยแบ่งการพิจารณาออกเป็น 5 รูปแบบ คือ การพิจารณาจุดป้อนกำลัง 1 พอร์ต 2 พอร์ต 4 พอร์ต 8 พอร์ต และ 16 พอร์ต โดยพิจารณาจากการจำลองผลโดยใช้โปรแกรม CST EM STUDIO สำหรับการวิเคราะห์ผลทั้ง 5 รูปแบบ

- กรณีที่ 1 การวิเคราะห์การป้อนจุดกำลังงานแบบ 1 พอร์ต

สำหรับหัวข้อนี้เป็นการจำลองผลด้วยการป้อนจุดกำลังงานแบบ 1 พอร์ต ให้กับแผ่นเพลตไดอิเล็กโตรดและทำการป้อนจุดสัญญาณที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของแผ่นเพลต เพื่อพิจารณาลักษณะการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระหว่างแผ่นเพลตไดอิเล็กโตรด โดยไม่มี

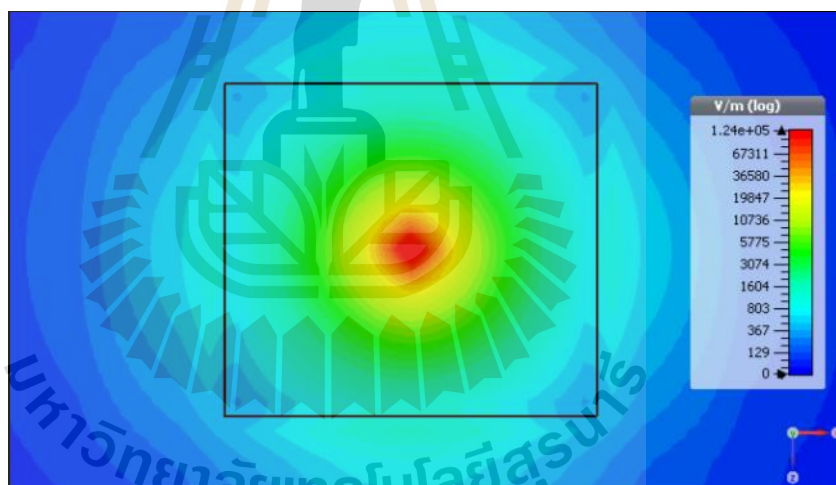
โพลีเอทิลีน และลักษณะการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโพลีเอทิลีน โดยแต่ละพอร์ตกำหนดให้ป้อนกำลังอินพุต โดยให้ค่าแรงดันเท่ากับ 9.8 kV และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2 A ซึ่งกำลังที่ใช้ป้อนให้กับแผ่นเพลตอิเล็กโทรด จะเป็นกำลังเอาต์พุตของหลอดไดโอดที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ ลักษณะและรูปแบบการจำลอง เมื่อใช้กับจุดป้อนสัญญาณ 1 พอร์ต แสดงดังรูปที่ 3.3

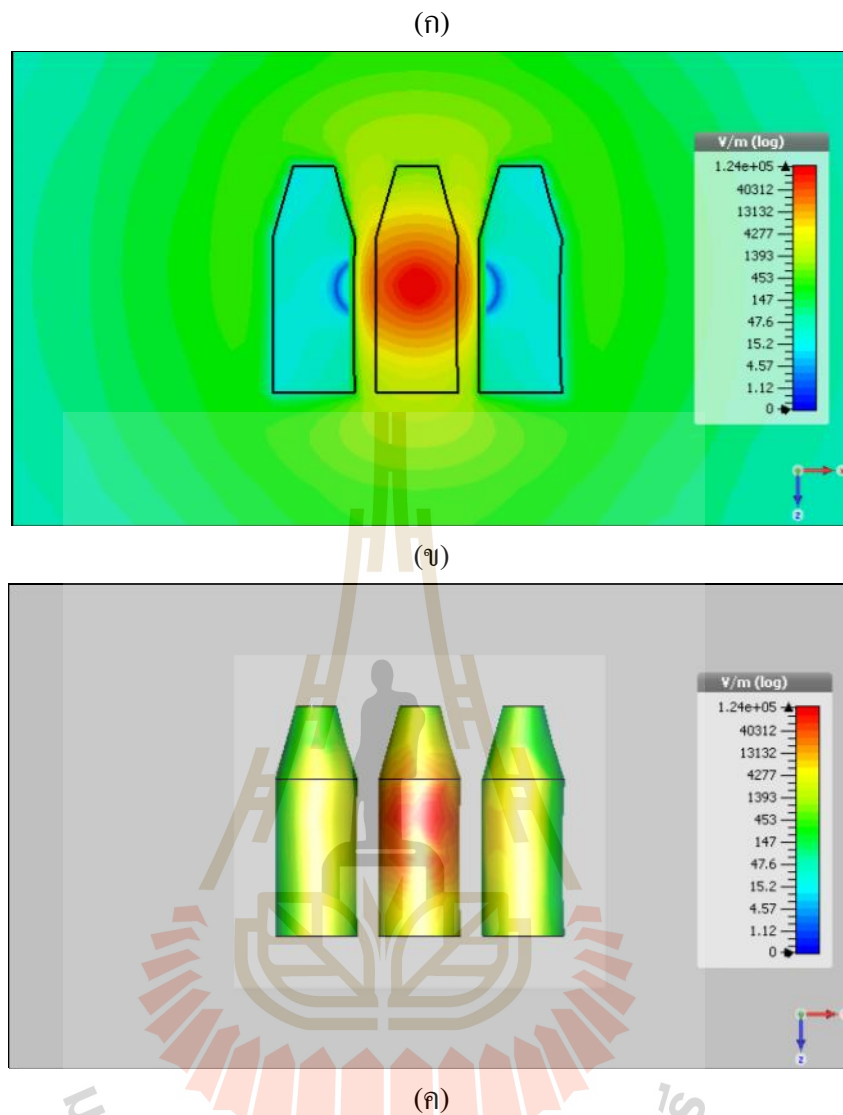


รูปที่ 3.3 รูปแบบการวิเคราะห์เพื่อทดสอบผลการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าและความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโพลีเอทิลีนที่มีการป้อนสัญญาณ 1 พอร์ต

ผลการจำลองด้วยการกำหนดตำแหน่งจุดป้อนกำลังงานที่จุดศูนย์กลางของแผ่นเพลตอิเล็กโทรด แสดงดังรูปที่ 3.4 (ก) แสดงการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่ไม่ใส่โพลีเอทิลีน และแสดงส่วนตัดขวางภายในระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กโทรด พบว่าคลื่นสนามไฟฟ้ามีการแผ่กระจายไปรอบ ๆ บริเวณของจุดป้อนกำลังงาน ความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มมากที่สุดที่บริเวณตรงกลางของตำแหน่งจุดป้อนสัญญาณและจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อมีระยะห่างออกไปจากจุดป้อนสัญญาณ การป้อนสัญญาณที่ตำแหน่งตามรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นตำแหน่งตรงกลางของแผ่นเพลตอิเล็กโทรด (ขั้วบวก) พบว่าคลื่นสนามไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่จะมีการแผ่กระจายไปรอบ ๆ บริเวณตรงกลางของจุดป้อนสัญญาณและมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ตำแหน่งตรงกับจุดป้อนสัญญาณซึ่งมีค่าเท่ากับ 123.64 kV/m และจะมีค่าน้อยที่บริเวณรอบ ๆ ที่ห่างออกจากจุดป้อนสัญญาณ จากรูปที่ 3.4 (ข) แสดงการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้า โดยใส่โพลีเอทิลีนเข้าไปในระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กโทรด และแสดงส่วนตัดขวางภายในระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กโทรดที่อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นเพลต พบว่าขดที่ 2 นั้นจะอยู่ตรงกับจุดป้อนสัญญาณพอดีทำให้สนามไฟฟ้ากระจายเข้าไปในโพลีเอทิลีนได้ และขดที่ 1 และ 3 ซึ่งจะมีการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่น้อยมากเพียง 20 V/m ที่เข้าไปภายในขดโพลีเอทิลีน เนื่องจากจุดป้อนสัญญาณ 1 พอร์ตไม่

สามารถแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าได้ทั่วทั้ง 3 ขวด จากรูปที่ 3.4 (ค) แสดงการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้า โดยใช้โพลดิ้นน้ำมดบินเข้าไปในระหว่างเฟลตและแสดงเป็นรูป 3 มิติ พบว่าการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้า มีความเข้มข้นสนามไฟฟ้ามากที่สุดที่ขวดที่ 2 แต่การดูภาพแบบ 3 มิติ พบว่าขวดที่ 1 และ 3 การแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าสามารถแผ่กระจายได้ความเข้มข้นสนามไฟฟ้ามากกว่าภายในขวดจากภาพที่ 3.4 (ข) โดยมีค่าความเข้มข้นสนามไฟฟ้าถึง 4.2 kV/m แต่ค่าความเข้มข้นสนามไฟฟ้าที่ได้นั้นก็ไม่ทั่วทั้งขวด จะทำให้การเกิดความร้อนไม่สม่ำเสมอและความเข้มข้นสนามไฟฟ้าไม่เพียงพอที่จะทำลายเชื้อแบคทีเรีย เนื่องจากจุดป้อนกำลังเพียงจุดเดียวจึงทำให้การแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าได้ค่อนข้างน้อย เกิดจากจุดป้อนกำลังงานมีผลต่อการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้า ซึ่งการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าจะแผ่กระจายออกจากจุดป้อนกำลังที่สูงที่สุดและกำลังค่อยๆ ลดลงตามระยะทางจากจุดป้อนกำลังอย่างสมมาตรและเป็นวงกลม ดังนั้นการป้อนจุดสัญญาณ 1 พอร์ต ยังไม่เพียงพอที่จะแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าได้ทั่วทั้ง 3 ขวด





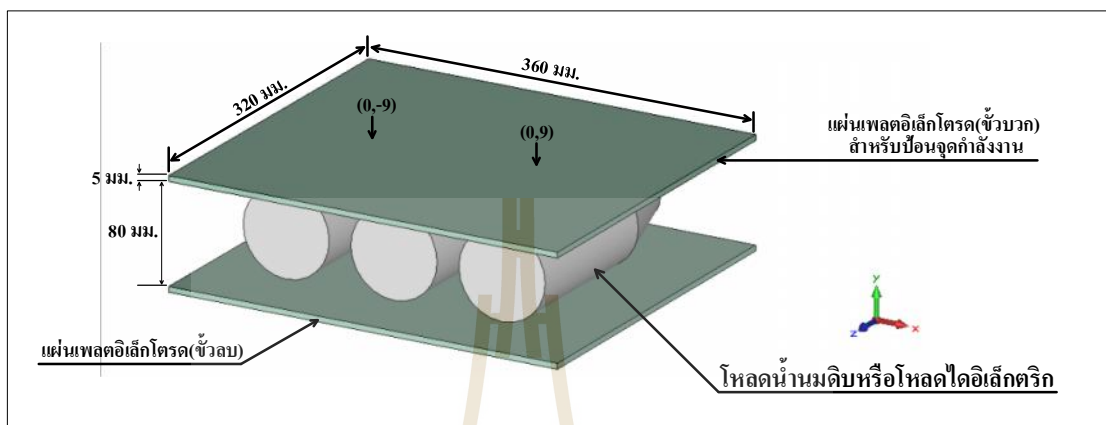
รูปที่ 3.4 ผลการจำลองการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโหนดและระหว่างแผ่นเพลต

อิเล็กโทรดที่มีการป้อนจุดกำลังงานแบบ 1 พอร์ต

- กรณีที่ 2 การวิเคราะห์การป้อนจุดกำลังงานแบบ 2 พอร์ต

สำหรับหัวข้อนี้เป็นการจำลองจุดป้อนกำลังงานแบบ 2 พอร์ต ให้กับแผ่นเพลตอิเล็กโทรดที่ตำแหน่งตามรูปที่ 3.5 เพื่อพิจารณาลักษณะการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กโทรด โดยไม่มีโหนดน้ำนมดิบ และลักษณะการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโหนดน้ำนมดิบ โดยแต่ละพอร์ตกำหนดให้ป้อนค่ากำลังอินพุต โดยให้

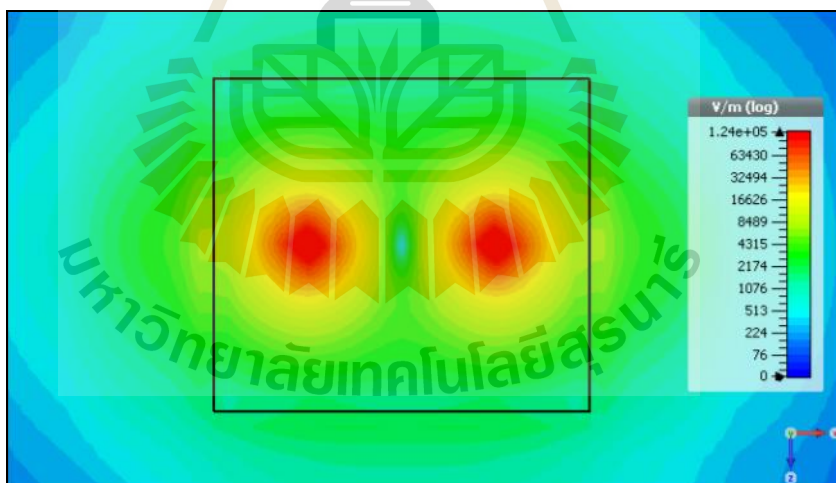
ค่าแรงดันเท่ากับ 9.8 kV และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1 A เพื่อให้กำลังงานที่ใช้เท่ากับการจำลองกรณี
ที่ 1 ซึ่งกำลังที่ใช้ป้อนให้กับแผ่นเพลต จะเป็นกำลังงานเอาต์พุตของหลอดไดโอดที่จะใช้ในงานวิจัย
นี้ ลักษณะและรูปแบบการจำลอง เมื่อใช้กับจุดป้อนกำลังงาน 2 พอร์ต แสดงดังรูปที่ 3.5



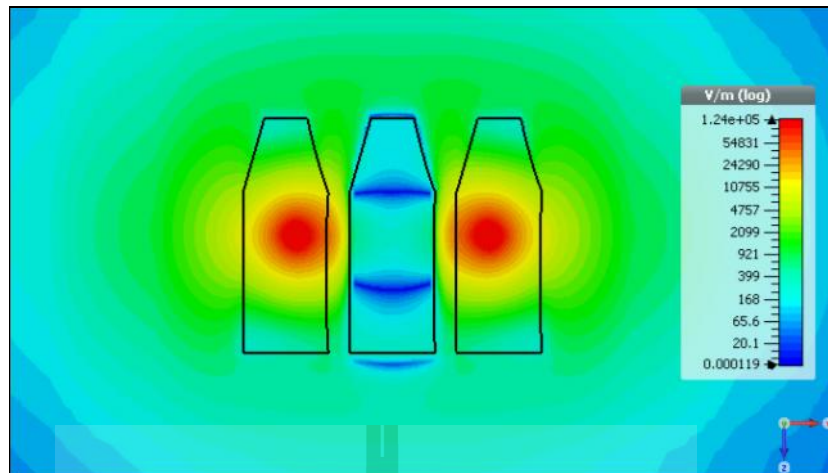
รูปที่ 3.5 รูปแบบการวิเคราะห์เพื่อทดสอบผลการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าและความเข้ม
สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในหลอดนํ้านมดิบที่มีการป้อนสัญญาณ 2 พอร์ต

ผลการจำลองการกำหนดตำแหน่งจุดป้อนกำลังงาน 2 พอร์ต ที่ตำแหน่งตามรูปที่
3.5 แสดงดังรูปที่ 3.6 (ก) แสดงการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่ไม่ใส่หลอดหลอดนํ้านมดิบ
และแสดงส่วนตัดขวางภายในระหว่างแผ่นเพลตเล็กโตรด พบว่าคลื่นสนามไฟฟ้ามีการแผ่กระจาย
ไปรอบ ๆ บริเวณของจุดป้อนกำลังงาน ความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มมากที่สุดที่
บริเวณตรงกลางของตำแหน่งจุดป้อนสัญญาณและจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อมีระยะการแผ่กระจาย
ห่างออกไปจากจุดป้อนสัญญาณ การป้อนสัญญาณที่ตำแหน่งตามรูปที่ 3.5 ที่แผ่นเพลตเล็กโตรด
(ขั้วบวก) พบว่าคลื่นสนามไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่จะมีการแผ่กระจายไปรอบ ๆ บริเวณตรงกลางของ
จุดป้อนสัญญาณและมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ตำแหน่งตรงกับจุดป้อนสัญญาณซึ่งมีค่าเท่ากับ
123.64 kV/m และจะมีค่าน้อยที่บริเวณรอบ ๆ ที่ห่างออกจากจุดป้อนสัญญาณ แต่การป้อนจุด
สัญญาณ 2 พอร์ต นั้นให้พื้นที่การแผ่กระจายสนามไฟฟ้าได้มากกว่าการป้อนจุดสัญญาณแบบ 1
พอร์ต เมื่อเทียบกับค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกมากับการป้อนจุดสัญญาณแบบ 1
พอร์ต จากรูปที่ 3.6 (ข) แสดงการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้า โดยใส่หลอดนํ้านมดิบเข้าไปใน
ระหว่างแผ่นเพลตเล็กโตรด และแสดงส่วนตัดขวางภายในระหว่างแผ่นเพลตเล็กโตรดที่อยู่ตรง
กลางระหว่างแผ่นเพลตเล็กโตรด พบว่าขาคที่ 2 นั้นจะอยู่ตรงกลางระหว่างจุดป้อนสัญญาณทั้ง 2

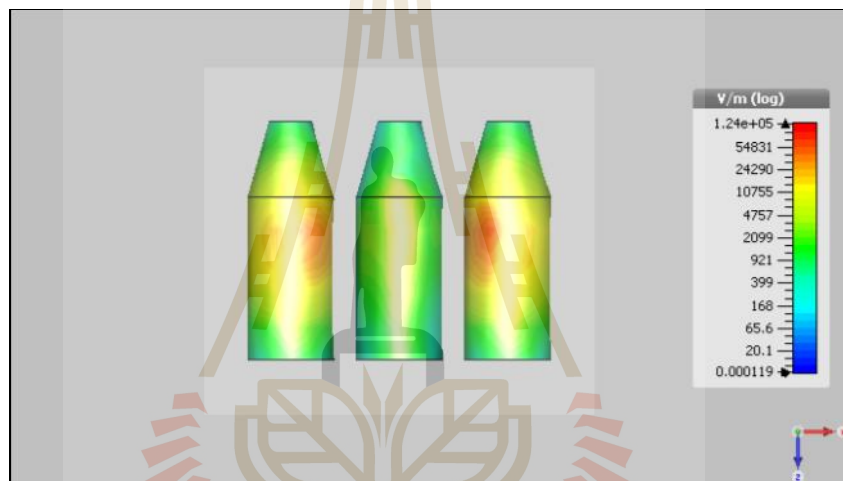
พอร์ต เนื่องจากการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าจะมากที่สุดที่จุดป้อนและค่อยๆ แผ่กระจายออกทำให้ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าค่อยๆ ลดลง จึงทำสนามไฟฟ้ากระจายเข้าไปในน้ำมันดิบขวดที่ 1 และ 3 มีการแผ่กระจายของความเข้มข้นสนามไฟฟ้าเข้าไปในโหลดน้ำดิบได้มากที่สุดที่ 123.64 kV/m แต่ยังคงไม่ทั่วทั้งขวด มีความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าเฉพาะตรงกลางขวดที่ 1 และ 3 ซึ่งขวดที่ 2 นั้นอยู่ห่างจากจุดป้อนสัญญาณทำให้สนามไฟฟ้าแผ่กระจายได้น้อยเพียง 200 V/m และมีจุดที่แทบจะไม่มีเข้มข้นของสนามไฟฟ้าเลยในขวดที่ 2 ซึ่งการป้อนจุดสัญญาณแบบ 2 พอร์ตยังคงไม่ทั่วทั้ง 3 ขวด จากรูปที่ 3.6 (ก) แสดงการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้า โดยใช้โหลดน้ำมันดิบเข้าไปในระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กโตรด และแสดงเป็นรูป 3 มิติ พบว่าการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้า จะแผ่กระจายเข้าไปในโหลดได้มากในขวดที่ 1 และ 3 ซึ่งขวดที่ 2 นั้นยังคงพอมีสวนสนามไฟฟ้าแผ่กระจายไปได้แต่น้อยจากจุดป้อนกำลังงาน 2 พอร์ต จึงทำให้การแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าได้ไม่ทั่วทั้ง 3 ขวด ซึ่งการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าจะแผ่กระจายออกจากจุดป้อนกำลังที่สูงที่สุดและกำลังค่อยๆ ลดลงตามระยะห่างจากจุดป้อนกำลังอย่างสมมาตรและเป็นวงกลม ดังนั้นการป้อนจุดสัญญาณ 2 พอร์ตยังไม่เพียงพอที่จะแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าได้ทั่วทั้ง 3 ขวด



(ก)



(จ)



(ค)

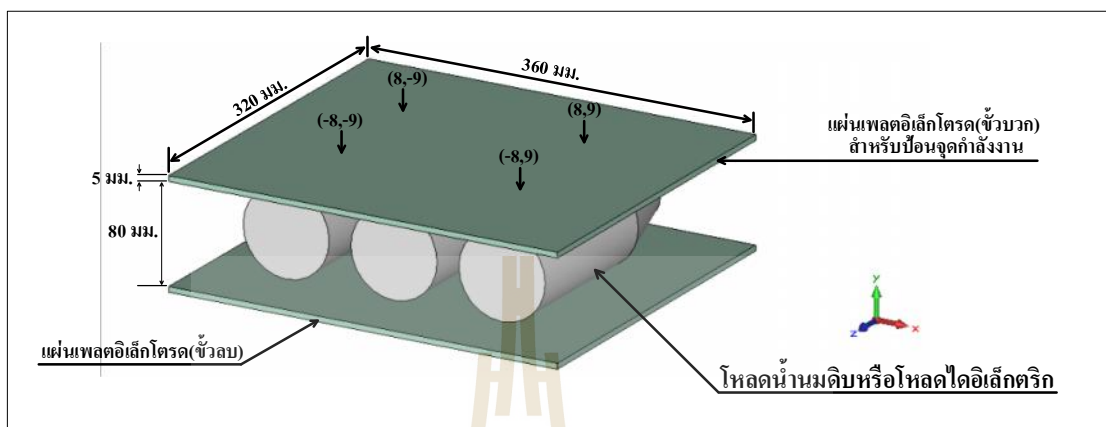
รูปที่ 3.6 ผลการจำลองการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโหลดและระหว่างแผ่นเพลต

อเล็กโตรดที่มีการป้อนจุดกำลังงานแบบ 2 พอร์ต

- กรณีที่ 3 การวิเคราะห์การป้อนจุดกำลังงานแบบ 4 พอร์ต

สำหรับหัวข้อนี้เป็นการจำลองผลด้วยการป้อนจุดกำลังงานแบบ 4 พอร์ต ให้กับแผ่นเพลตอเล็กโตรดและทำการป้อนจุดสัญญาณที่ตำแหน่งตามรูปที่ 3.7 เพื่อพิจารณาลักษณะการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระหว่างแผ่นเพลตอเล็กโตรด โดยไม่มีโหลดน้ำมันมดิว และลักษณะการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโหลดน้ำมันมดิว โดยแต่ละพอร์ตกำหนดให้ป้อนค่ากำลังอินพุต โดยให้ค่าแรงดันเท่ากับ 9.8 kV และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.5 A เพื่อให้กำลังงานที่ใช้เท่ากับการจำลองกรณีที่ 1 ซึ่งกำลังที่ใช้ป้อนให้กับแผ่นเพลตอเล็กโตรด จะ

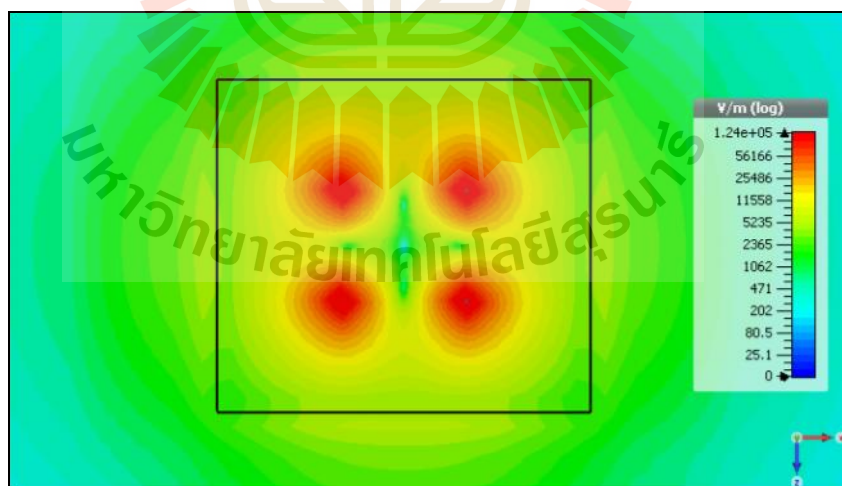
เป็นกำลังงานเอาต์พุตของหลอดไดโอดที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ ลักษณะและรูปแบบการจำลอง เมื่อใช้กับจุดป้อนกำลังงาน 4 พอร์ต แสดงดังรูปที่ 3.7



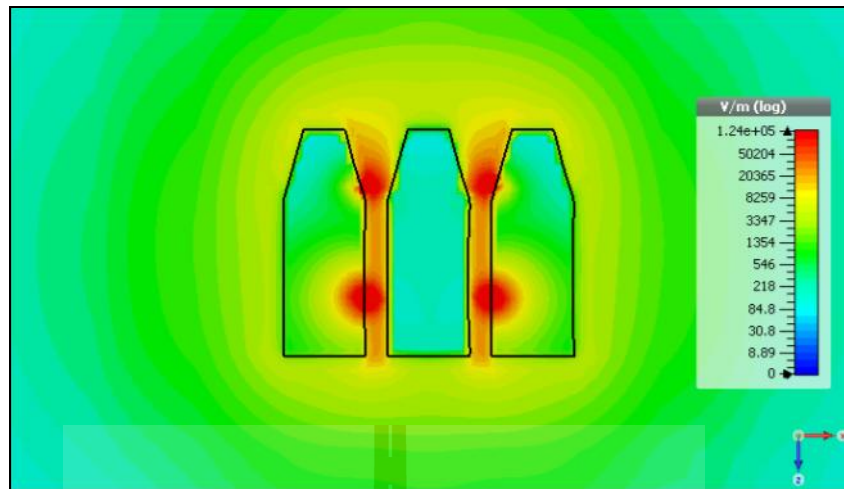
รูปที่ 3.7 รูปแบบการวิเคราะห์เพื่อทดสอบผลการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าและความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในหลอดนำมดึบที่มีการป้อนสัญญาณ 4 พอร์ต

ผลการจำลองการกำหนดตำแหน่งจุดป้อนกำลังงาน 4 พอร์ต แสดงดังรูปที่ 3.8 (ก) แสดงการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่ไม่ใส่หลอดนำมดึบ และแสดงส่วนตัดขวางภายในระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กทรอนิกส์ พบว่าคลื่นสนามไฟฟ้ามีการแผ่กระจายไปรอบ ๆ บริเวณของจุดป้อนกำลังงาน ความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มมากที่สุดที่บริเวณตรงกลางของตำแหน่งจุดป้อนสัญญาณและจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อมีระยะการแผ่กระจายห่างออกไปจากจุดป้อนสัญญาณ การป้อนสัญญาณแบบ 4 พอร์ต ที่แผ่นเพลตอิเล็กทรอนิกส์ (ขั้วบวก) พบว่าคลื่นสนามไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่จะมีการแผ่กระจายไปรอบ ๆ บริเวณตรงกลางของจุดป้อนสัญญาณและมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ตำแหน่งตรงกับจุดป้อนสัญญาณซึ่งมีค่าเท่ากับ 123.64 kV/m และจะมีค่าน้อยที่บริเวณรอบ ๆ ที่ห่างออกจากจุดป้อนสัญญาณทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้าน้อยที่สุดประมาณ 420 V/m การป้อนจุดสัญญาณ 4 พอร์ต นั้นให้พื้นที่การแผ่กระจายสนามไฟฟ้าได้มากกว่าการป้อนสัญญาณแบบ 2 พอร์ต เมื่อเทียบกับค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกมากับการป้อนจุดสัญญาณแบบ 2 พอร์ต จากรูปที่ 3.8 (ข) แสดงการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้า โดยใส่หลอดนำมดึบเข้าไปในระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กทรอนิกส์ และแสดงส่วนตัดขวางภายในระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กทรอนิกส์ พบว่าการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าเข้าไปในขวดได้น้อยทั้ง 3 ขวด เกิดจากจุดป้อนกำลังงานอยู่ระหว่างช่องว่างระหว่างขวดพอดี จึงทำให้สนามไฟฟ้าเลือกที่จะ

ผ่านบริเวณที่ไม่มีโพลต์มากกว่า เนื่องจากการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าจะมากที่สุดที่จุดป้อนและค่อยๆ แผ่กระจายออกทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้าค่อยๆ ลดลง บวกกับช่องว่างระหว่างขดพอดี้ทำให้สนามไฟฟ้าเลือกผ่านบริเวณที่ไม่มีโพลต์ จึงทำสนามไฟฟ้ากระจายเข้าไปในน้ำมันดิบได้น้อยทั้ง 3 ขวด และพื้นที่การแผ่กระจายของการป้อนกำลังงานของ 2 พอร์ต มากกว่า 4 พอร์ต ขวดที่ 1 และ 3 มีการแผ่กระจายของความเข้มสนามไฟฟ้าเข้าไปในโพลต์น้ำดิบได้มากที่สุดที่ 123.64 kV/m และขวดที่ 2 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าเข้าไปได้เพียง 90 V/m แต่ยังคงไม่ทั่วทั้งขวด ซึ่งการป้อนจุดสัญญาณแบบ 4 พอร์ตยังคงไม่ทั่วทั้ง 3 ขวด จากรูปที่ 3.8 (ก) แสดงการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้า โดยใช้โพลต์น้ำมันดิบเข้าไปในระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กโตรด และแสดงเป็นรูป 3 มิติ พบว่าการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้า จะแผ่กระจายเข้าไปในโพลต์ได้ค่อนข้างสม่ำเสมอทั้ง 3 ขวด แต่ก็ทราบว่าสนามไฟฟ้าไม่ได้แผ่กระจายเข้าไปถึงกลางขวดเลยที่แสดงดังรูปที่ 3.9 (ข) เป็นเพียงการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าได้เพียงแค่บริเวณผิวด้านนอกเท่านั้น จึงทำให้การแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าได้ไม่ทั่วทั้ง 3 ขวด ซึ่งการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าจะแผ่กระจายออกจากจุดป้อนกำลังที่สูงที่สุดและกำลังค่อยๆ ลดลงตามระยะทางจากจุดป้อนกำลังอย่างสมมาตรและเป็นวงกลม ดังนั้นการป้อนจุดสัญญาณ 4 พอร์ต ยังไม่เพียงพอที่จะแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าได้ทั่วทั้ง 3 ขวด



(ก)



(จ)



(ค)

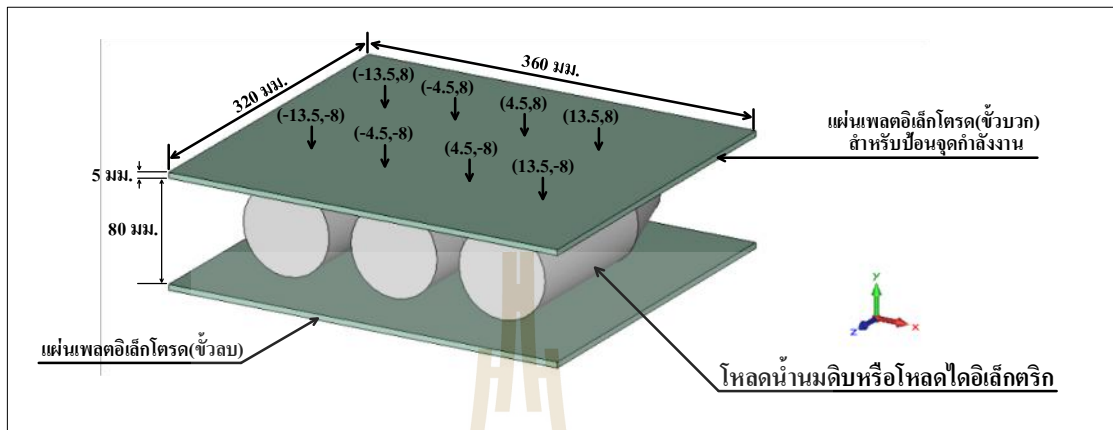
รูปที่ 3.8 ผลการจำลองการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโหลดและระหว่างแผ่นเพลต

อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการป้อนกำลังงานแบบ 4 พอร์ต

- กรณีที่ 4 การวิเคราะห์การป้อนจุดกำลังงานแบบ 8 พอร์ต

สำหรับหัวข้อนี้เป็นการจำลองผลด้วยการป้อนจุดกำลังงานแบบ 8 พอร์ต ให้กับแผ่นเพลตอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อพิจารณาลักษณะการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กทรอนิกส์ โดยไม่มีโหลดน้ำหนัก และลักษณะการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโหลดน้ำหนัก โดยแต่ละพอร์ตกำหนดให้ป้อนค่ากำลังอินพุต โดยให้ค่าแรงดันเท่ากับ 9.8 kV และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.25 A เพื่อให้กำลังงานที่ใช้เท่ากับการจำลองกรณีที่ 1 ซึ่งกำลังที่

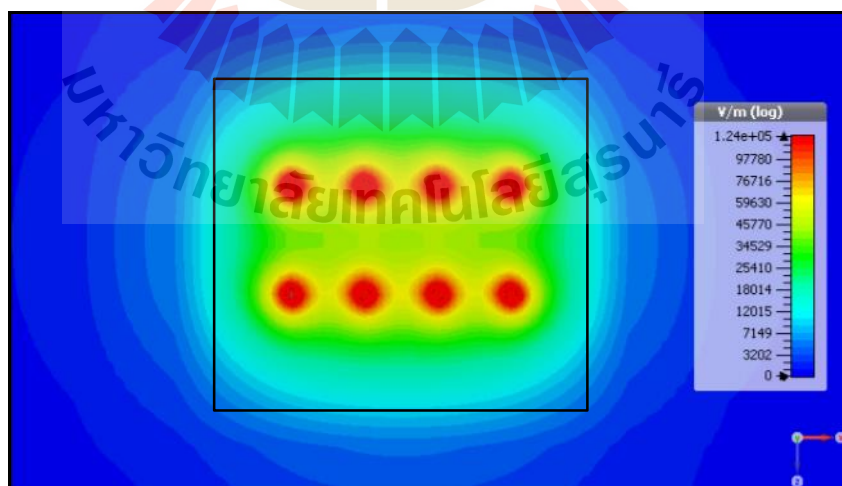
ใช้ป้อนให้กับแผ่นเพลตอิเล็กโตรด จะเป็นกำลังงานเอาต์พุตของหลอดไตรโอดที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ ลักษณะและรูปแบบการจำลอง เมื่อใช้กับจุดป้อนกำลังงาน 8 พอร์ต แสดงดังรูปที่ 3.9



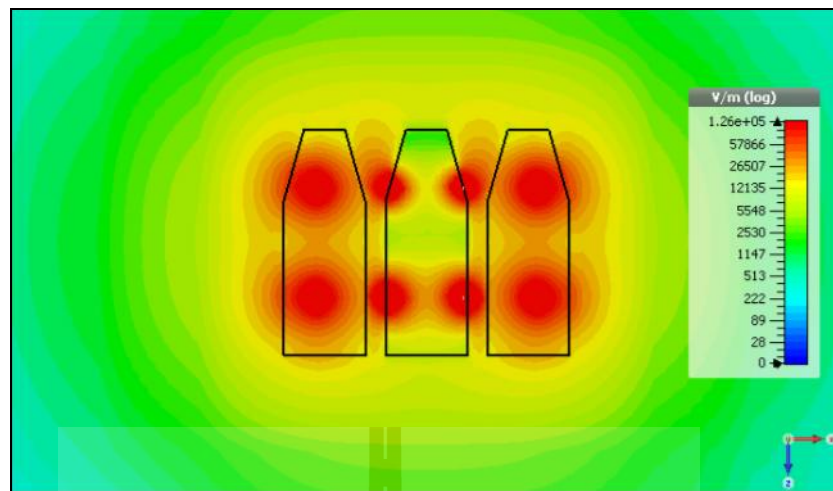
รูปที่ 3.9 รูปแบบการวิเคราะห์เพื่อทดสอบผลการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าและความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในหลอดนํ้านมดิบที่มีการป้อนสัญญาณ 8 พอร์ต

ผลการจำลองการกำหนดตำแหน่งจุดป้อนกำลังงาน 8 พอร์ต แสดงดังรูปที่ 3.11 (ก) แสดงการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่ยังไม่ใส่หลอดหลอดนํ้านมดิบ และแสดงส่วนตัดขวางภายในระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กโตรด พบว่าคลื่นสนามไฟฟ้ามีการแผ่กระจายไปรอบ ๆ บริเวณของจุดป้อนกำลังงาน ความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มมากที่สุดที่บริเวณตรงกลางของตำแหน่งจุดป้อนสัญญาณและจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อมีระยะการแผ่กระจายห่างออกไปจากจุดป้อนสัญญาณ การป้อนสัญญาณแบบ 8 พอร์ต ที่แผ่นเพลตอิเล็กโตรด (ขั้วบวก) พบว่าคลื่นสนามไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่จะมีการแผ่กระจายไปรอบ ๆ บริเวณตรงกลางของจุดป้อนสัญญาณและมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ตำแหน่งตรงกับจุดป้อนสัญญาณซึ่งมีค่าเท่ากับ 123.64 kV/m และจะมีค่าน้อยที่บริเวณรอบ ๆ ที่ห่างออกจากจุดป้อนสัญญาณทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้าน้อยที่สุดประมาณ 1.8 kV/m การป้อนจุดสัญญาณ 8 พอร์ต นั้นให้พื้นที่การแผ่กระจายสนามไฟฟ้าได้มากกว่าการป้อนสัญญาณแบบ 4 พอร์ต เมื่อเทียบกับค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกมากับการป้อนจุดสัญญาณแบบ 4 พอร์ต จากรูปที่ 3.10 (ข) แสดงการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าโดยใส่หลอดนํ้านมดิบเข้าไปในระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กโตรด และแสดงส่วนตัดขวางภายในระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กโตรดที่อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กโตรด พบว่าการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าเข้าไปในขวดได้มากในขวดที่ 1 และ 3 ซึ่งค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดในขวดที่ 1

และ 3 ประมาณ 12.14 kV/m แต่ในส่วนของขวดที่ 2 การแผ่กระจายของสนามไฟฟ้ายังคงไม่ทั่วเมื่อเทียบกับขวดที่ 1 และ 3 ซึ่งเกิดจากจุดป้อนกำลังงานอยู่ระหว่างช่องว่างระหว่างขวดกับขวดพอดิ จึงทำให้สนามไฟฟ้าเลือกที่จะผ่านบริเวณที่ไม่มีโหลดมากกว่า เนื่องจากการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าจะมากที่สุดที่จุดป้อนและค่อยๆ แผ่กระจายออกทำให้ความเข้าสนามไฟฟ้าค่อยๆ ลดลงบวกกับช่องว่างระหว่างขวดพอดิทำให้สนามไฟฟ้าเลือกผ่านบริเวณที่ไม่มีโหลด จึงทำสนามไฟฟ้ากระจายเข้าไปในน้ำมันดิบได้น้อยในขวดที่ 2 และพื้นที่การแผ่กระจายของการป้อนจุดกำลังงานของ 8 พอร์ต มากกว่า 4 พอร์ต แต่ยังคงไม่ทั่วทั้งขวด ซึ่งการป้อนจุดสัญญาณแบบ 8 พอร์ตยังคงไม่ทั่วทั้ง 3 ขวด จากรูปที่ 3.10 (ค) แสดงการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้า โดยใช้โหลดน้ำมันดิบเข้าไปในระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กโตรด และแสดงเป็นรูป 3 มิติ พบว่าการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้า จะแผ่กระจายเข้าไปในโหลดได้ค่อนข้างสม่ำเสมอทั้ง 3 ขวด แต่ก็ทราบว่าสนามไฟฟ้าไม่ได้แผ่กระจายเข้าไปถึงกลางขวดในส่วนของขวดที่ 2 แสดงดังรูปที่ 3.10 (ข) เป็นเพียงการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าได้เพียงแค่อบริเวณผิวด้านนอกเท่านั้น จึงทำให้การแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าได้ไม่ทั่วทั้ง 3 ขวด ซึ่งการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าจะแผ่กระจายออกจากจุดป้อนกำลังที่สูงที่สุดและกำลังค่อยๆ ลดลงตามระยะทางจากจุดป้อนกำลังอย่างสมมาตรและเป็นวงกลม ดังนั้นการป้อนจุดสัญญาณ 8 พอร์ต ยังไม่เพียงพอที่จะแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าได้ทั่วทั้ง 3 ขวด



(ก)



(จ)



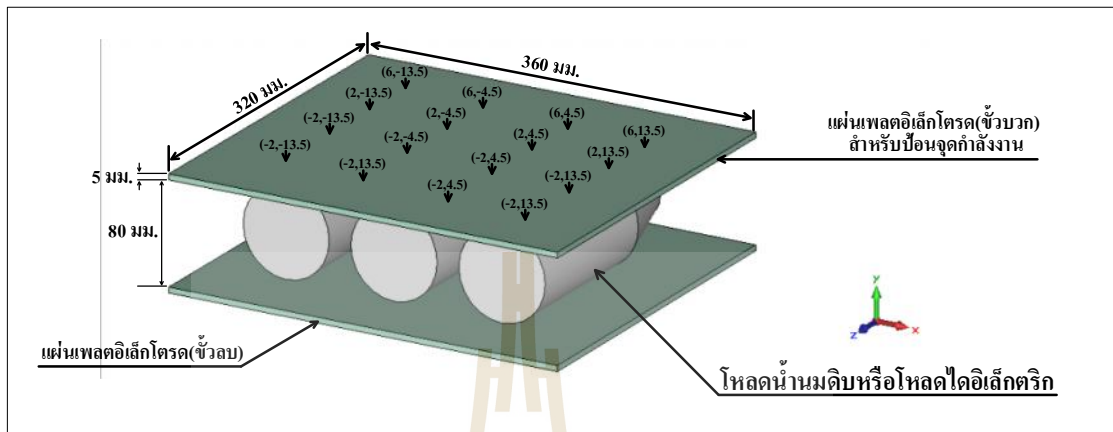
(ค)

รูปที่ 3.10 ผลการจำลองการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโหนดและระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กโตรดที่มีการป้อนกำลังงานแบบ 8 พอร์ต

- กรณีที่ 5 การวิเคราะห์การป้อนกำลังงานแบบ 16 พอร์ต

สำหรับหัวข้อนี้เป็นการจำลองผลด้วยการป้อนกำลังงานแบบ 16 พอร์ต ให้กับแผ่นเพลตและทำการป้อนจุดสัญญาณที่ตำแหน่งตามรูปที่ 3.11 เพื่อพิจารณาลักษณะการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระหว่างเพลตอิเล็กโตรดโดยไม่มีโหนดน้ำมันดิบ และลักษณะการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโหนดน้ำมันดิบ โดยแต่ละพอร์ตกำหนดให้ป้อนกำลังอินพุต โดยให้ค่าแรงดันเท่ากับ 9.8 kV และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.125 A เพื่อให้กำลังงานที่ใช้เท่ากับการจำลองกรณีที่ 1 ซึ่งกำลังที่ใช้ป้อนให้กับแผ่นเพลตอิเล็กโตรด จะเป็นกำลังงานเอาต์พุต

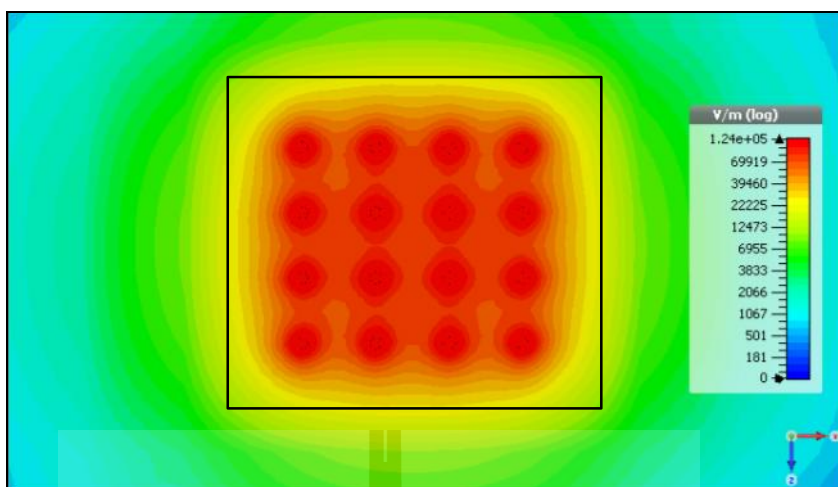
ของหลอดไฟ LED ที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ ลักษณะและรูปแบบการจำลอง เมื่อใช้กับจุดป้อนกำลังงาน 16 พอร์ต แสดงดังรูปที่ 3.11



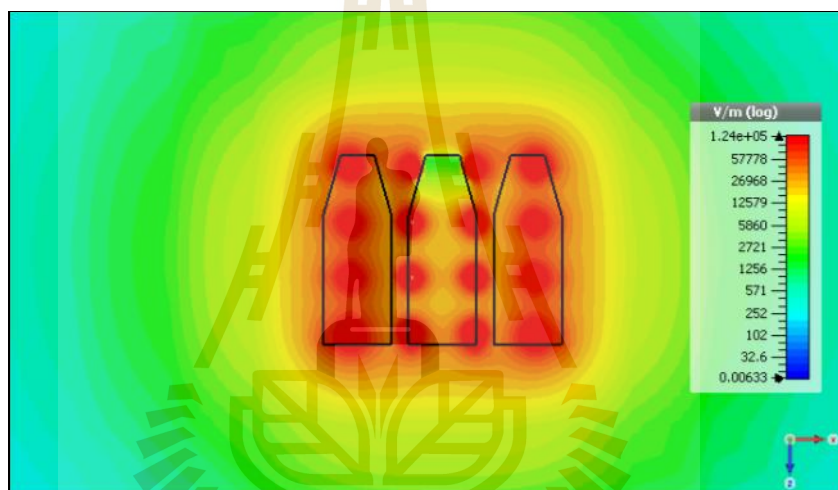
รูปที่ 3.11 รูปแบบการวิเคราะห์เพื่อทดสอบผลการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าและความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโหลดนํ้านมดึบที่มีการป้อนกำลังงาน 16 พอร์ต

ผลการจำลองการกำหนดตำแหน่งจุดป้อนกำลังงาน 16 พอร์ต แสดงดังรูปที่ 3.12 (ก) แสดงการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่ยังไม่ได้ใส่โหลดโหลดนํ้านมดึบ และแสดงส่วนตัดขวางภายในระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กทรอนิกส์ พบว่าคลื่นสนามไฟฟ้ามีการแผ่กระจายไปรอบ ๆ บริเวณของจุดป้อนกำลังงาน ความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มมากที่สุดที่บริเวณตรงกลางของตำแหน่งจุดป้อนสัญญาณและจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อมีระยะการแผ่กระจายห่างออกไปจากจุดป้อนสัญญาณ การป้อนสัญญาณแบบ 16 ที่แผ่นเพลตอิเล็กทรอนิกส์ (ชั้นบน) พบว่าคลื่นสนามไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่จะมีการแผ่กระจายไปรอบ ๆ บริเวณตรงกลางของจุดป้อนสัญญาณและมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ตำแหน่งตรงกับจุดป้อนสัญญาณซึ่งมีค่าเท่ากับ 123.64 kV/m และจะมีค่าน้อยที่บริเวณรอบ ๆ ที่ห่างออกจากจุดป้อนสัญญาณทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้าน้อยที่สุดประมาณ 30 kV/m การป้อนจุดสัญญาณ 16 พอร์ต นั้นให้พื้นที่การแผ่กระจายสนามไฟฟ้าได้มากกว่าการป้อนสัญญาณแบบ 8 พอร์ต เมื่อเทียบกับค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกมากับการป้อนจุดสัญญาณแบบ 8 พอร์ต จากรูปที่ 3.12 (ข) แสดงการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าโดยใส่โหลดนํ้านมดึบเข้าไปในระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กทรอนิกส์ และแสดงส่วนตัดขวางภายในระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กทรอนิกส์ พบว่าการแผ่กระจายของความเข้มสนามไฟฟ้าสามารถเข้าไปในขวดได้มากถึง 3 มีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงที่สุดประมาณ

124 kV/m และค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดในช่วงที่ 2 บริเวณส่วนบนของขดมีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าประมาณ 51 kV/m ซึ่งเป็นค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดที่สามารถทำลายเชื้อแบคทีเรียลงได้และความเข้มสนามไฟฟ้านี้ยังทำให้โพลีเอทิลีนเกิดความร้อนด้วยการให้ความถี่วิทยุ เนื่องจากการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าจะมากที่สุดที่จุดป้อนและค่อยๆ แผ่กระจายออกทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้าค่อยๆ ลดลง จึงต้องมีออกแบบการวางจุดป้อนกำลังงานให้เหมาะสมกับโพลีเอทิลีนเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการให้ความร้อนที่ดีที่สุด การเกิดความร้อนด้วยความถี่วิทยุนอกจากคุณสมบัติของวัสดุแล้ว ยังมีการแผ่กระจายของความเข้มสนามไฟฟ้าด้วย ซึ่งยิ่งการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าได้สม่ำเสมอจะทำให้ประสิทธิภาพการเกิดความร้อนที่สม่ำเสมอด้วยเช่นกัน ดังนั้นสำหรับการป้อนจุดกำลังงานแบบ 16 พอร์ต ให้การแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าได้ทั่วที่สุดทั้ง 3 ขด สำหรับให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุกับโพลีเอทิลีนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จากรูปที่ 3.12 (ค) แสดงการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้า โดยใส่โพลีเอทิลีนเข้าไปในระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กโตรด และแสดงเป็นรูป 3 มิติ พบว่าการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้า จะแผ่กระจายเข้าไปในโพลีเอทิลีนได้สม่ำเสมอทั้ง 3 ขด แต่ที่ทราบว่าสนามไฟฟ้าไม่ได้แผ่กระจายเข้าไปถึงส่วนบนของขดที่ 2 แต่ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่อยู่บริเวณนั้น มีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าเพียงพอที่จะทำลายเชื้อแบคทีเรียและทำให้เกิดความร้อนด้วยความถี่วิทยุประมาณ 51 kV/m ดังนั้นการป้อนจุดกำลังงานแบบ 16 พอร์ต ให้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ 1, 2, 3 และ 4 และการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้ายังเข้าไปได้ทั้งขด ทั้งผิวนอกและภายใน ซึ่งทำให้การให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ เกิดความร้อนที่สม่ำเสมอทั้ง 3 ขด และทั้งปริมาตรของโพลีเอทิลีน โดยการป้อนจุดกำลังงานแบบ 16 พอร์ต แสดงตามรูปที่ 3.11 ที่แผ่นเพลตอิเล็กโตรด (ข้างขวา) จะทำให้การแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าได้สม่ำเสมอ



(ก)



(ข)

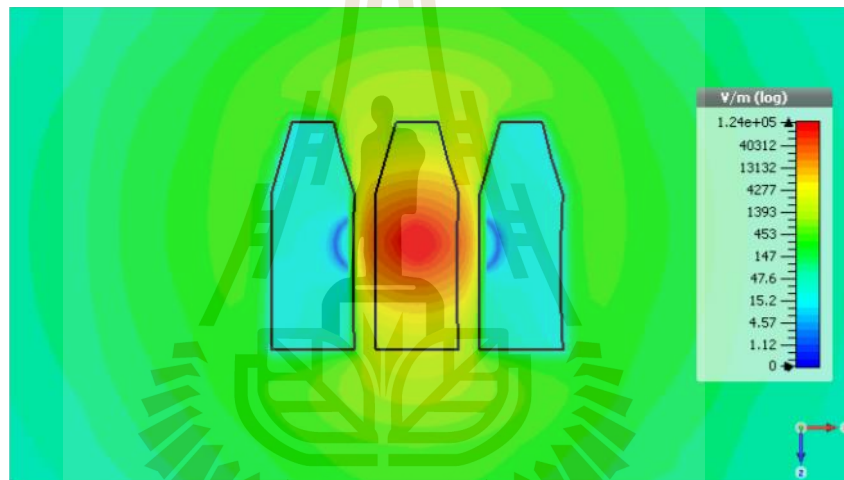


(ค)

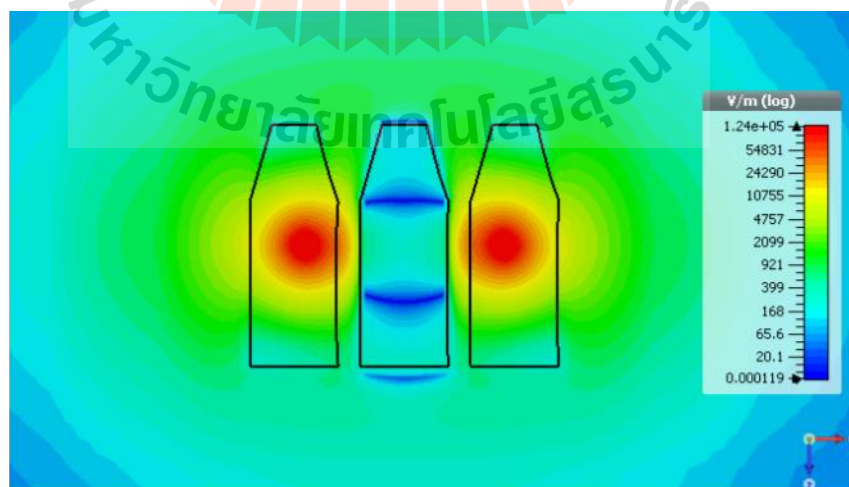
รูปที่ 3.12 ผลการจำลองการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโหนดและระหว่างแผ่น

เพลตอิเล็กโตรดที่มีการป้อนกำลังงานแบบ 16 พอร์ต

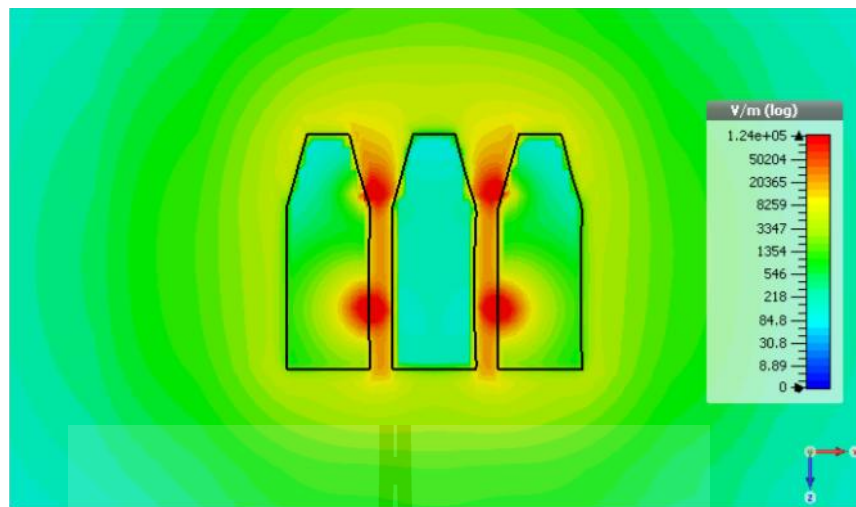
นำผลการจำลองเมื่อใช้กำลังงานเท่ากันและแสดงผลของการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าจากการจำลองด้วยส่วนตัดขวางภายในระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กโตรดกับโหลดน้ำมันดิบที่อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กโตรดทั้ง 2 เพลต และแสดงผลความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 124 kV/m เพื่อแสดงผลการเปรียบเทียบความเข้มสนามไฟฟ้าของแต่ละรูปแบบ โดยแสดงดังรูปที่ 3.13 โดยผลการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าเมื่อป้อนกำลังงาน 1 พอร์ต แสดงดังรูปที่ 3.13 (ก) การป้อนกำลังงาน 2 พอร์ต แสดงดังรูปที่ 3.13 (ข) ป้อนกำลังงาน 4 พอร์ต แสดงดังรูปที่ 3.11 (ค) การป้อนกำลังงาน 8 พอร์ต แสดงดังรูปที่ 3.13 (ง) และการป้อนกำลังงาน 16 พอร์ต แสดงดังรูปที่ 3.13 (จ)



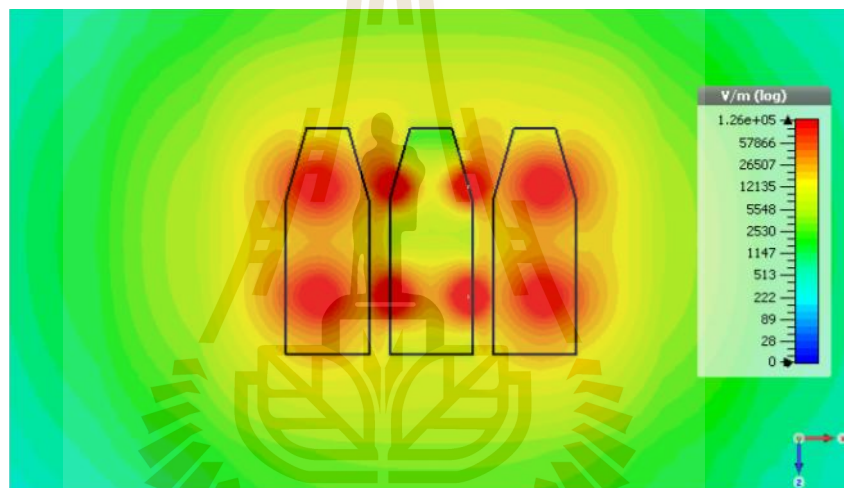
(ก)



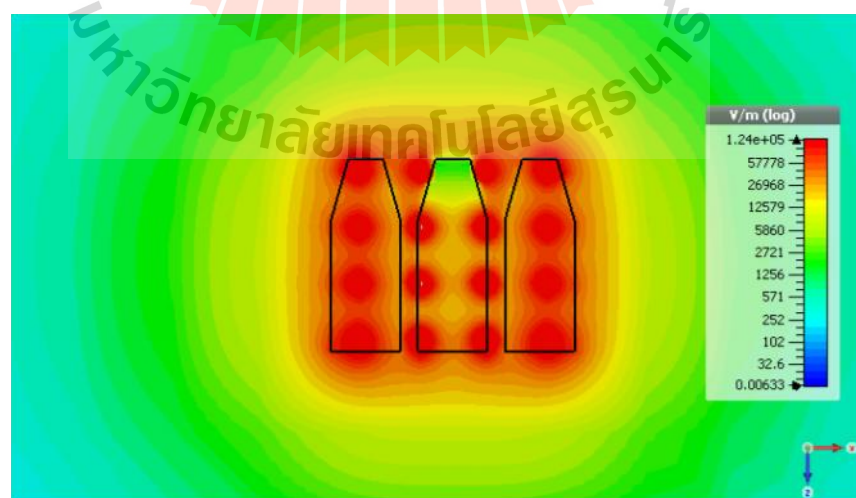
(ข)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.13 การแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าที่มีการป้อนกำลังงานแบบ 1 พอร์ต 2 พอร์ต 4 พอร์ต

8 พอร์ต และ 16 พอร์ต

จากผลของการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าที่มีการป้อนกำลังงานแบบ 1 พอร์ต 2 พอร์ต 4 พอร์ต 8 พอร์ต และ 16 พอร์ต เมื่อพิจารณาที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าเท่ากับ 124 kV/m ในแต่ละรูปแบบ พบว่าในรูปแบบการป้อนกำลังงานแบบ 16 พอร์ต ให้พื้นที่การกระจายสนามไฟฟ้าที่เข้าไปในโหลคน้ำนมดิบมากที่สุด ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอจะทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นสม่ำเสมอทั่วทั้งปริมาตรของโหล และด้วยค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดของการป้อนจุดกำลังงานแบบ 16 พอร์ต เท่ากับ 52 kV/m ซึ่งความเข้มของสนามไฟฟ้านี้มีค่าที่เพียงพอสำหรับการทำลายเชื้อแบคทีเรียได้ โดยค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดที่สามารถทำลายเชื้อแบคทีเรียได้เท่ากับ 50 kV/m สำหรับการป้อนจุดกำลังงานแบบ 1 พอร์ต 2 พอร์ต 4 พอร์ต และ 8 พอร์ต จะมีส่วนที่ให้ความเข้มสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้เกิดความร้อนไม่สม่ำเสมอตามไปด้วย และค่าความเข้มสนามไฟฟ้าไม่เพียงพอสำหรับการทำลายเชื้อแบคทีเรียด้วยสนามไฟฟ้า ดังนั้นในการจำลองและวิเคราะห์ในหัวข้อนี้จึงสรุปได้ว่า การให้จุดป้อนกำลังงานแบบ 16 พอร์ต นั้นให้การแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าได้สม่ำเสมอ และทั่วถึงทั้งปริมาตรของโหล น้ำนมดิบมากที่สุด

3.4 การวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนแก่โหลคน้ำนมดิบสำหรับการการพาสเจอร์ไรซ์น้ำนมโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ

การพิจารณาความเข้มสนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในโหลคน้ำนมดิบ โดยสามารถพิจารณาการคำนวณหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของโหลคน้ำนมดิบ ซึ่งเป็นผลมาจากการให้กำลังงานกับแผ่นเพลต โดยความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวแปรสำคัญที่สามารถทำให้เกิดความร้อนภายในโหลได้อิเล็กตริกได้ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการในบทที่ 2 และนำไปสู่การคำนวณเพื่อทราบถึงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของโหลคน้ำนมดิบ ซึ่งโหลคน้ำนมดิบที่ได้รับพลังงานในรูปแบบของสนามไฟฟ้าจะแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นความร้อน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลมาจากการทำอันตรกิริยากันระหว่างพลังงานและตัวกลางที่มีคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กตริกและมีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้ว ซึ่งสามารถเหนี่ยวนำคลื่นสนามไฟฟ้าให้เกิดเป็นความร้อนได้ โดยผลของการเกิดพลังงานในโหลคน้ำนมดิบ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุไดอิเล็กตริก (kg/m^3) C_p คือ ความร้อนจำเพาะของไดอิเล็กตริก (Specific heat) ($\text{J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$) ΔT คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในวัสดุไดอิเล็กตริก ($^{\circ}\text{C}$) Δt คือระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลง (s) โดยในสมการนี้ พลังงานที่เกิดขึ้นในโหล โหลคน้ำนมดิบจะมีความสัมพันธ์กันระหว่างอุณหภูมิและเวลา ซึ่งเมื่อทราบถึงระดับพลังงานที่เกิดขึ้นภายใน โหลคน้ำนมดิบ จึงสามารถ

คำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้าภายในของโหลด เพื่อออกแบบระบบการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก โดยสามารถคำนวณจากสมการที่ 3.2 เมื่อ f คือความถี่ (Hz) ϵ'' คือ ปัจจัยที่มีการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) และ P คือ กำลังที่เกิดขึ้นในโหลดไดอิเล็กตริกหรือโหลดน้ำมันดิบ

$$P = \rho C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (3.1)$$

$$E = \sqrt{\frac{P}{5.563 \times 10^{-11} f \epsilon''}} \quad (3.2)$$

3.4.1 การวิเคราะห์กำลังงานที่เกิดขึ้นในโหลดน้ำมันดิบ

เพื่อให้ทราบถึงขนาดของกำลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่โหลดน้ำมันดิบที่เหมาะสมและเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพการทำงานมากที่สุด จึงได้มีการคำนวณหาอัตราการให้ความร้อนกับวัสดุไดอิเล็กตริก โดยจากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมในบทที่ 2 พบว่า แบคทีเรียที่ไม่สร้างสปอร์จะไม่สามารถทนความร้อนได้เมื่ออุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 65 องศาเซลเซียส และตายลง ในที่สุด โดยมีค่าความร้อนจำเพาะของน้ำมันดิบมีค่าเท่ากับ $3,784 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ และความหนาแน่นของน้ำมันดิบมีค่าเท่ากับ $1,028.5 \text{ kg/m}^3$ ดังนั้น จากสมการที่ (3.1) จึงสามารถคำนวณหา กำลังงานที่เกิดขึ้นภายในขวด ที่เวลาต่าง ๆ แสดง ได้ดังนี้

ที่ อุณหภูมิเท่ากับ 65 องศาเซลเซียส และให้อุณหภูมิเริ่มต้นที่อุณหภูมิเท่ากับ 4 องศาเซลเซียส โดยมีการเปลี่ยนแปลงของเวลา 10 วินาที

$$P = 1,028.484(\text{kg/m}^3) \times 3,768.3(\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}) \frac{(65 - 4)^\circ\text{C}}{10 \text{ sec}}$$

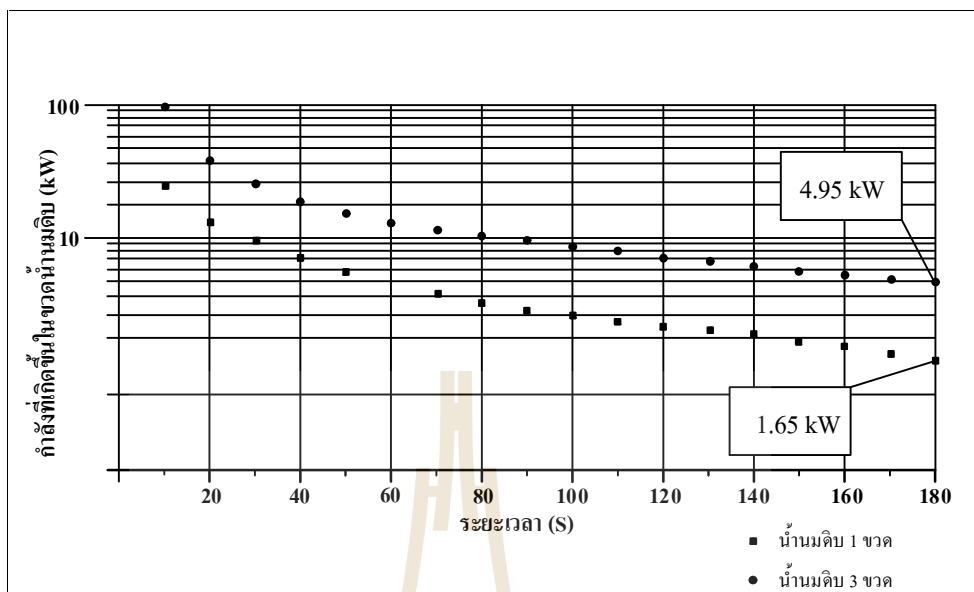
$$P = 23.64 \text{ MW/m}^3$$

โดยค่าที่ได้เป็นกำลังงานในหน่วยปริมาตร จากการวัดขนาดของขวดไวน์ โดยมี รัศมีของขวด 40 มิลลิเมตร และสูง 250 มิลลิเมตร ดังนั้นขวดจึงมีปริมาตรเท่ากับ 1.26 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ดังนั้นเมื่อคำนวณหาพลังงานที่เหมาะสมกับปริมาตรของขวดที่เวลา 10 วินาที จึงเท่ากับ 29.8 kW และจากการคำนวณที่เวลาใด ๆ ตั้งแต่ 10 วินาที ถึง 180 วินาที สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 แสดงการคำนวณค่ากำลังงานที่สูญเสียในขวดน้ำมันดิบ ในเวลาตั้งแต่ 10 วินาที ถึง 120 วินาที ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการที่ 3.1 โดยระยะเวลาที่ต้องการพิจารณาในการพาสเจอร์ไรซ์ใน

งานวิจัยนี้ ต้องการออกแบบไว้ที่ประมาณ 180 วินาที นั่นคือ พลังงานที่ต้องใช้ ในการพาสเจอร์ไรซ์ เท่ากับ 1.65 kW ที่ 1 ขวด และ 4.96 kW ที่ 3 ขวด ซึ่งเพียงพอกับกำลังงานของหลอดไตรโอดที่ใช้ ในการออกแบบ ซึ่งกำลังงานของหลอดไตรโอดเบอร์ 7T96RB จะมีกำลังเอาต์พุตสูงสุดที่ 9 kW แต่ หลอดไตรโอดจะมีการสูญเสีย Plate dissipation ที่ 3 kW ดังนั้นกำลังเอาต์พุตที่ได้จะเท่ากับ 6 kW จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 3.14 ซึ่งพบว่าถ้าต้องการพาสเจอร์ไรซ์น้ำนมดิบที่ใช้ ระยะเวลาสั้นจะต้องใช้กำลังมาก แต่ถ้าต้องการกำลังการผลิตที่ไม่มากก็ใช้เวลาที่นานขึ้น ก็ สามารถพาสเจอร์ไรซ์น้ำนมดิบได้เช่นกัน ทั้งนี้กำลังของหลอดไตรโอดนั้นขึ้นอยู่กับกระแสของ อิมพีแดนซ์ของภาคการเหนี่ยวนำความร้อน

ตารางที่ 3.2 ค่ากำลังงานที่สูญเสียในขวดน้ำนมดิบ ณ เวลาใด ๆ

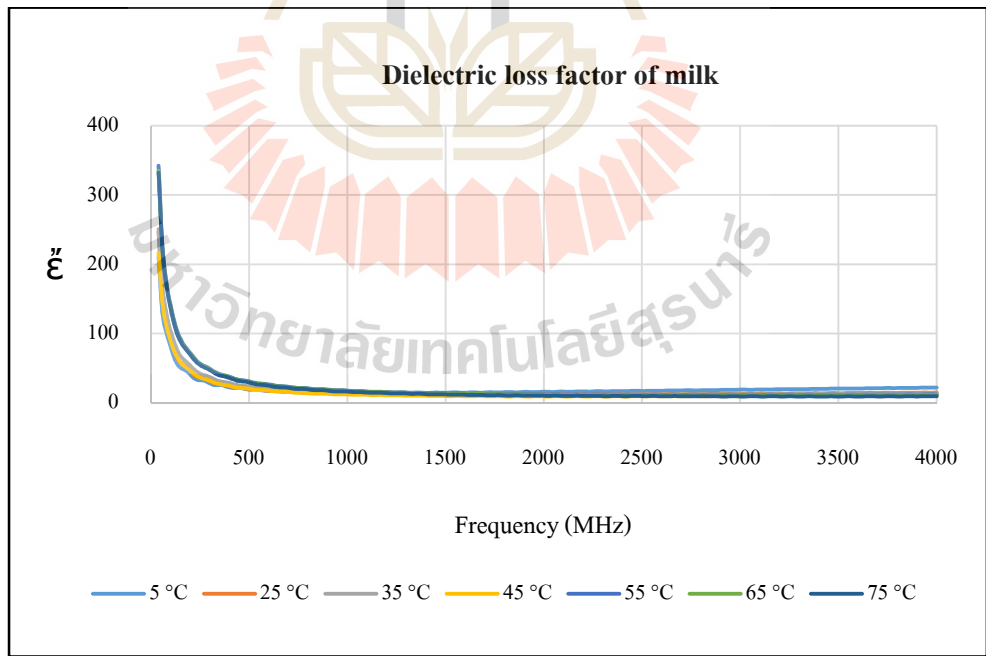
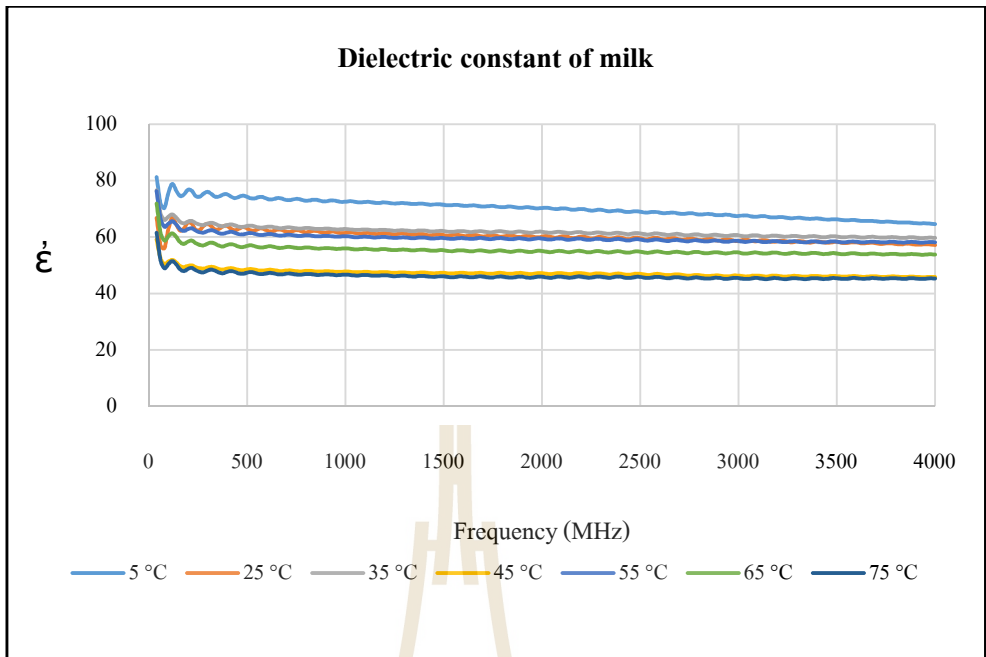
เวลา (s)	กำลังงานที่สูญเสีย (kW) ที่ 1 ขวด	กำลังงานที่สูญเสีย (kW) ที่ 3 ขวด
10	29.8	89.4
20	14.9	44.7
30	9.93	29.8
40	7.45	22.3
50	5.96	17.9
60	4.96	14.9
70	4.26	12.8
80	3.72	11.2
90	3.31	9.93
100	2.98	8.94
110	2.71	8.12
120	2.48	7.45
130	2.29	6.87
140	2.13	6.38
150	1.99	5.96
160	1.86	5.59
170	1.75	5.26
180	1.65	4.96



รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ของกำลังที่เกิดขึ้นในขวดน้ำมันดิบต่อเวลา

3.4.2 การวิเคราะห์พลังงานและความเข้มสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมต่ออัตราการเกิดความร้อนในขวดน้ำมันดิบ

เมื่อได้กำลังที่เกิดขึ้นในขวดน้ำมันดิบของแต่ละช่วงเวลา จึงสามารถคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในขวดน้ำมันดิบที่ต้องใช้ทั้งหมด โดยใช้สมการที่ (3.2) และ (3.1) ในการพิจารณา ซึ่งจะเห็นว่าในสมการที่ (3.2) มีพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกสองตัวคือ ค่าปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) โดยจากปริทศวรรณกรรมในบทที่ 2 ในงานวิจัยของ (X.Zhu et al. 2012 and Zurina Zainal et al. 2014) ได้นำเสนอช่วงอุณหภูมิกับค่าปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริกของไวน์และน้ำผลไม้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะวัดค่า Dielectric constant และ Dielectric loss factor ด้วยตัวเองโดยใช้เครื่องมือวัด Keysight Fieldfox เพื่อการวิเคราะห์ค่าไดอิเล็กตริก ที่อุณหภูมิและความถี่เปลี่ยนแปลงไปแสดงตามรูปที่ 3.15 และ 3.16 แสดงผลการวัดค่าไดอิเล็กตริกของน้ำมันดิบที่ความถี่ 40 - 4,000 MHz เพื่อหาช่วงกำลังงานที่เพียงพอและเหมาะสมที่สุดสำหรับการออกแบบการพาสเจอร์ไรซ์ในน้ำมันดิบ โดยได้เลือกความถี่ที่ประมาณ 40 MHz และหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าต้องใช้สำหรับการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ



จากความสัมพันธ์ของค่าปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริกของน้ำมันดิบที่ความถี่ 40 MHz ผู้วิจัยจึงใช้ความถี่ 40 MHz และใช้ค่าปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริกที่เปลี่ยนแปลง มาทำการคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้าภายในที่ต้องใช้ในช่วงเวลา 10 วินาที ถึง 180 วินาที โดยจากสมการที่ (3.2) สามารถคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้าภายในต้องใช้ที่เวลาต่างๆ โดยเลือกค่าปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริกที่น้อยที่สุด และได้สนามไฟฟ้าที่เพียงพอกับการพาสเจอร์ไรซ์น้ำมันดิบ แสดงได้ดังนี้

$$E_{loc} = \sqrt{\frac{P}{5.563 \times 10^{-11} f \epsilon''}}$$

$$E_{loc} = \sqrt{\frac{89.4 \times 10^3}{(5.563 \times 10^{-11}) \times (40.68 \times 10^6) \times (210.18)}}$$

$$E_{loc} = 433.54 \text{ V/m}$$

จากการคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต้องใช้สำหรับให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ ที่สำหรับให้ความร้อนกับน้ำมันดิบเท่ากับ 433.54 V/m เป็นอย่างน้อยถึงจะให้ความร้อนได้ตามอุณหภูมิที่ต้องการ แต่งานวิจัยนี้การพาสเจอร์ไรซ์น้ำมันโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ ได้รับผลการทำลายเชื้อแบคทีเรียด้วยความร้อนและความเข้มสนามไฟฟ้า จึงได้สร้างความเข้มสนามไฟฟ้าที่แผ่นเพลตไดอิเล็กโตรด จากสมการที่ 3.3

$$E = \frac{V}{d} \tag{3.3}$$

จากสมการที่ 3.3 จะคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้าที่แผ่นเพลตไดอิเล็กโตรด โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่จะสร้างสำหรับงานวิจัยนี้ คือ 9.8 kV เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งจ่ายและหลอดไตรโอดสามารถทนแรงดันได้ 10 kV และจากการจำลองเราให้ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลตเท่ากับ 80 มิลลิเมตร จะได้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าเท่ากับ 1.23 kV/cm ซึ่งจากปริทัศน์วรรณกรรมในบทที่ 2 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่มากกว่า 0.5 kV/cm นั้นสามารถทำลายเชื้อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะให้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่มากกว่าถึง 2.46 เท่า ทำให้การพาสเจอร์ไรซ์น้ำมันโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ สามารถทำลายเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งในส่วนของความร้อนและความเข้มสนามไฟฟ้า

3.4.3 การวิเคราะห์ระดับความลึกผิวของคลื่นสนามไฟฟ้าที่ทะลุทะลวงเข้าไปในขวดนํ้านมดิบ

เมื่อได้กำลังงานและความถี่ที่ต้องการแล้ว จะคำนวณหาความสามารถของการทะลุทะลวงของความถี่ที่ได้ใช้ออกแบบ จากทฤษฎีในบทที่ 2 พิจารณาให้เหมาะสมกับเนื้อวัสดุที่ต้องการนำมาใช้งาน โดยสามารถพิจารณาได้จากการทะลุทะลวงของคลื่น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.12 ใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียของไดอิเล็กตริกของนํ้านมดิบที่ได้จากการวัดด้วย Keysight Fieldfox ในการคำนวณ และใช้ความถี่ที่ 40 MHz

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

$$d_p = \frac{3 \times 10^8}{2\pi \times (40 \times 10^6) \sqrt{2 \times (81.3) \left[\sqrt{1 + \left(\frac{210.18}{81.3}\right)^2} - 1 \right]}}$$

$$d_p = 0.0691 \text{ m} = 69.1 \text{ mm}$$

จากการคำนวณคลื่นสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ สามารถทะลุทะลวงได้ความลึก 69.1 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถทะลุผ่านเข้าไปในขวดนํ้านมดิบหรือเนื้อวัสดุไดอิเล็กตริกได้ 69.1 มิลลิเมตร ทำให้พิสูจน์ได้ว่าความร้อนที่เกิดขึ้นภายในขวดนํ้านมดิบนั้นเกิดขึ้นเท่ากันทั้งขวด ไม่ได้เกิดที่ผิวขวดแล้วพาความร้อนเข้าไป เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของขวดมีขนาด 80 มิลลิเมตร ทำให้คลื่นสนามไฟฟ้าทะลุทะลวงผ่านไปได้ถึง 86.38 เปอร์เซ็นต์ของขวด

3.4.4 การออกแบบเมทซิงรีโซแนนซ์แผ่นเพลตสำหรับการพาสเจอร์ไรซ์โดยใช้เทคนิคการความร้อนด้วยความถี่วิทยุ

การออกแบบแผ่นเพลตสำหรับให้ความร้อน โหลดน้ำนมดิบ ซึ่งจะรับกำลังงานจากหลอดไตรโอดและต่อเข้ากับวงจร LC รีโซแนนซ์แบบอนุกรม โดยแผ่นเพลตเป็นแผ่นอลูมิเนียมที่มีขนาดของแผ่นเพลตที่ใช้ในการทดลองนี้มีความกว้าง 320 มิลลิเมตร ยาว 360 มิลลิเมตร และหนา 5 มิลลิเมตร ระยะระหว่างแผ่นเพลตเท่ากับ 80 มิลลิเมตร จึงทำการคำนวณหาค่าความจุที่เกิดระหว่างแผ่นเพลตสองเพลตและค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในวงจรเพื่อทำการเมทซิงโดยยังไม่ใส่โหลดน้ำนมดิบ สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ได้จากสมการที่ 2.4 ดังที่ได้กล่าวได้ในบทที่ 2 ดังต่อไปนี้

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r' A}{d}$$

$$C = \frac{(8.854 \times 10^{-12}) \times 1 \times (0.1152 \text{ m}^2)}{0.08 \text{ m}}$$

$$C = 12.75 \text{ pF}$$

ซึ่งจะได้ค่าความจุระหว่างแผ่นเพลตที่ยังไม่ใส่โหลดน้ำนมดิบ ถ้าจะคำนวณค่าความจุที่ใส่โหลดเข้าไปนั้นทำได้ยาก จึงจะใช้วิธีการปรับค่าเหนี่ยวนำของวงจรแทนเพื่อให้ได้ความถี่ที่ต้องการ ดังนั้นจะทำการคำนวณค่าเหนี่ยวนำโดยจะใช้ค่าความจุที่ได้จากการคำนวณคือ 12.75 pF และกำหนดความถี่ 40.68 MHz โดยใช้สมการรีโซแนนซ์จากสมการที่ 2.15

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$40 \times 10^6 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \times (12.75 \times 10^{-12})}}$$

$$L = 1.24 \text{ uH}$$

โดยค่าเหนี่ยวนำที่ได้นี้จะเป็ค่าเหนี่ยวนำที่ความถี่รีโซแนนซ์ 40.68 MHz ซึ่งจะเป็นการรีโซแนนซ์ที่เพลตยังไม่ได้ใส่โหลด และค่าเหนี่ยวนำนี้จะออกแบบให้เป็นค่าเหนี่ยวนำที่ปรับได้เพื่อสำหรับใส่โหลดเข้าไปในแผ่นเพลตอิเล็กทรอนิกส์ จะทำให้ค่าความจุมีการเปลี่ยนแปลงและทำให้

ความถี่รีโซแนนซ์มีการเปลี่ยนแปลงด้วย จึงใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำนี้จะเป็นการปรับให้ความถี่รีโซแนนซ์ใกล้เคียงกับที่ออกแบบมากที่สุด

3.5 สรุป

การวิเคราะห์และออกแบบผลของระบบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ ในบทนี้เป็นการวิเคราะห์การแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้า ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการเกิดอุณหภูมิความร้อนกับโหลคน้ำนมดิบหรือโหลคโคอิเล็กตริกและการทำลายเชื้อแบคทีเรียด้วยความเข้มสนามไฟฟ้า ซึ่งโหลคน้ำนมดิบในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย น้ำนมดิบที่ยังไม่ได้ผ่านการพาสเจอร์ไรซ์ โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ใช้น้ำนมดิบ เป็นผลิตภัณฑ์ที่บริโภคกันส่วนใหญ่และสามารถตรวจสอบคุณภาพได้ง่าย สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบการพาสเจอร์ไรซ์น้ำนมโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ เนื่องจากกำลังประสบปัญหา การพาสเจอร์ไรซ์ที่ไม่ได้ประสิทธิภาพ และใช้พลังงานมาก โดยระบบดังกล่าวมีการวิเคราะห์ผลการให้ความร้อนแบบด้วยความถี่วิทยุ เพื่อทราบถึงประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังงานซึ่งในลำดับแรกได้วิเคราะห์ถึงลักษณะของวัสดุกับการตอบสนองในการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้า สำหรับใช้เป็นตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต ซึ่งพบว่าวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นทองแดงสามารถสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าได้มากกว่าวัสดุชนิดอื่น ๆ เนื่องจากมีค่าความนำทางไฟฟ้ามากกว่าวัสดุชนิดอื่นแต่มีราคาที่สูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นอลูมิเนียมใช้เป็นตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตสำหรับแทนการใช้ทองแดงที่มีราคาสูง และเลือกใช้แผ่นเพลตที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยเลือกใช้ขนาดของแผ่นเพลตที่มีความกว้างเท่ากับ 320 มิลลิเมตร ความยาวเท่ากับ 360 มิลลิเมตร และความหนาเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ทั้ง 2 แผ่นเพลต แล้วกำหนดระยะห่างระหว่างแผ่นเพลตเท่ากับ 80 มิลลิเมตร ทั้งนี้เพื่อให้ผลการทดสอบที่สอดคล้องกับงานวิจัย ที่มุ่งเน้นไปทางด้านอุตสาหกรรมอาหารหรือการพาสเจอร์ไรซ์เป็นการยืดอายุและทำลายเชื้อแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรค ซึ่งน้ำนมดิบจะบรรจุอยู่ในขวดแก้วและนำไปวางไว้ในระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กโตรด เพื่อให้ผ่านสนามไฟฟ้าความเข้มสูงแบบแผ่นเพลต ทำการให้ความร้อนและความเข้มสนามไฟฟ้าทำลายเชื้อแบคทีเรีย เพื่อการออกแบบตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตมีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานในอนาคต ดังนั้นจึงมีการใช้แผ่นเพลตที่มีลักษณะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าในการจำลองสำหรับการให้ความร้อนแกโหลคน้ำนมดิบ หลังจากนั้นได้วิเคราะห์ถึงลักษณะของจำนวนจุดป้อนกำลังงาน เพื่อทราบถึงการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าในแผ่นเพลต และสามารถปรับปรุงให้มีพื้นที่การแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าได้ดีที่สุด ซึ่งพบว่า การใช้จุดป้อนกำลังงานเท่ากับ 16 พอร์ต และเป็นการวางที่ตำแหน่งจุดป้อนกำลังงานที่สมมาตรกันกับแผ่นเพลตสามารถให้การแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าได้ดีที่สุด และ

มีพื้นที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าดีมากที่สุด ซึ่งเมื่อได้ลักษณะการป้อนกำลังงานที่เหมาะสมที่สุดแล้ว หลังจากนั้นได้มีการวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อน พบว่าการที่จะเพิ่มอุณหภูมิของน้ำนมดิบให้ได้ อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิของการพาสเจอร์ไรซ์ที่ทำให้อาหารไม่เสียคุณภาพ จะใช้กำลังมากถึง 89.4 kW ในระยะเวลา 10 วินาที ซึ่งใช้กำลังสูงมากและเป็นอันตรายกับผู้วิจัย จึงได้เพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อนทั้งสามขวดเป็น 180 วินาที ทำให้เหลือกำลังที่ต้องใช้เท่ากับ 4.96 kW ซึ่งเป็นกำลังที่สามารถสร้างได้ โดยใช้หลอดไตรโอดที่จะนำมาออกแบบนั้นสามารถให้กำลังและความเข้มสนามไฟฟ้าเพียงพอสำหรับการพาสเจอร์ไรซ์ โดยความเข้มสนามไฟฟ้าที่จะได้จากแผ่นเพลตเท่ากับ 1.23 kV/cm และกำลังงานเอาต์พุตเท่ากับ 6 kW เพียงพอสำหรับการทำลายเชื้อแบคทีเรียด้วยความร้อนและสนามไฟฟ้า และวิเคราะห์การทะลุทะลวงของคลื่นสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้น พบว่าสามารถทะลุทะลวงได้ 69.1 มิลลิเมตร สามารถทะลุทะลวงได้ถึง 86.38 เปอร์เซ็นต์ของขวดเนื่องจากขวดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร จึงทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเท่ากันทั้งปริมาตร โดยผลจากการจำลอง วิเคราะห์ และออกแบบจะถูกยืนยันด้วยผลการทดสอบในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

การวัดและผลการทดลอง

4.1 กล่าวนำ

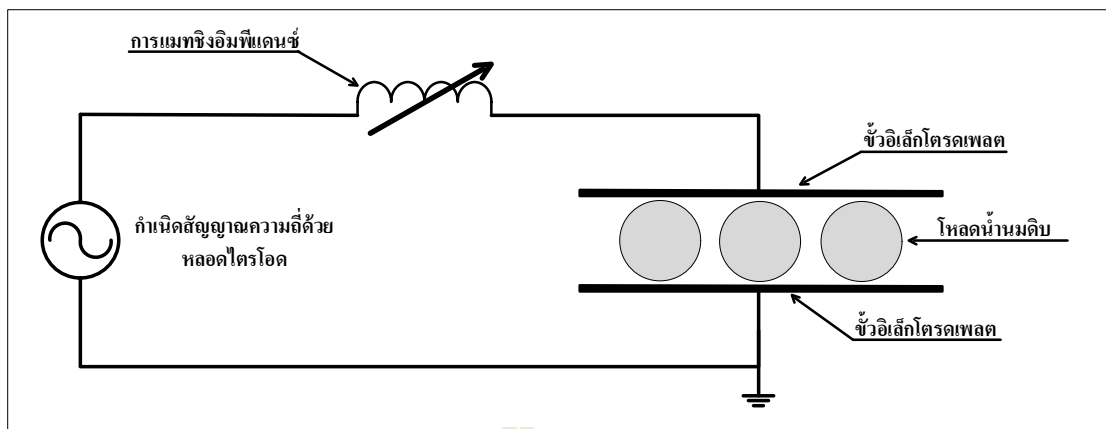
จากการกล่าวถึงการวิเคราะห์และออกแบบการพาสเจอร์ไรซ์อาหาร โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ สำหรับให้ความร้อนกับโหลค่น้ำนมดิบ เพื่อทำลายเชื้อแบคทีเรียที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำนมดิบ โดยใช้โปรแกรม CST EM STUDIO ในการจำลองการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนั้น ซึ่ง ได้พบว่าลักษณะตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตอิเล็กโตรดที่มีขนาดความกว้างเท่ากับ 320 มิลลิเมตร ความยาวเท่ากับ 360 มิลลิเมตร และความหนา 5 มิลลิเมตร และการใช้วิธีการป้อนกำลังงานแบบ 16 พอร์ต ที่ระยะห่างเท่า ๆ กัน แบบสมมาตรเป็นเทคนิคที่ทำให้มีการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าได้เหมาะสมและมีการส่งผ่านกำลังงานไปยังโหลค่น้ำนมดิบหรือโหลค่ไดอิเล็กตริกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด และได้วิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนไปยังโหลค่น้ำนมดิบ เมื่อเทียบกับระยะเวลาการให้ความร้อน นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์ผลของคลื่นสนามไฟฟ้าที่กระทำต่อโหลค่น้ำนมดิบ และการทะลุทะลวงของคลื่นสนามไฟฟ้า ซึ่งการออกแบบในบทที่ 3 นั้น ให้ผลของคลื่นสนามไฟฟ้าซึ่งเป็นผลต่อโหลค่น้ำนมดิบและก่อให้เกิดเป็นอุณหภูมิความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะได้นำผลการออกแบบดังกล่าวไปสร้างและวัดทดสอบจริงเพื่อเปรียบเทียบผลการออกแบบและการจำลองแบบที่ได้ในบทก่อนหน้า

ดังนั้นในบทที่ 4 จะได้ทำการสร้างและวัดทดสอบ เพื่อเป็นการยืนยันผลการให้ความร้อนแก่โหลค่น้ำนมดิบดังกล่าว ซึ่งเนื้อหาที่สำคัญในบทนี้จะกล่าวถึงการนำทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ผ่านมา เพื่อใช้สำหรับการออกแบบและสร้างระบบจริง โดยมีตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตที่มีการป้อนกำลังงานแบบ 16 พอร์ต ซึ่งจะต้องใช้วงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรมซึ่งประกอบด้วย LC โดยจะใช้โหลค่น้ำนมดิบกับแผ่นเพลตอิเล็กโตรดเป็นตัวเก็บประจุ และใช้ตัวเหนี่ยวนำที่สามารถปรับค่าได้ เพื่อที่จะปรับแมทชิงอิมพีแดนซ์ของวงจรรีโซแนนซ์เพื่อให้ได้กำลังงานสูงสุดและมีประสิทธิภาพการถ่ายโอนกำลังงานสูงสุดที่โหลค่น้ำนมดิบ และให้ได้ประสิทธิภาพการเกิดความร้อนและความเข้มของสนามไฟฟ้า สำหรับทดสอบผลของอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นจากคลื่นสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กโตรด จะทดสอบด้วยการจ่ายกำลังงานคลื่นสนามไฟฟ้าที่ความถี่รีโซแนนซ์ 40 MHz ให้กับตัวสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต

อิเล็กทรอนิกส์ที่มีโหลดนํ้าชนิดอยู่ระหว่างแผ่นเพลตทั้ง 2 แผ่น และวัดทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความเหนียวนาของขดลวดแมทซิงรีโซแนนซ์ สัญญาณความถี่ที่ได้วงจรรีโซแนนซ์ที่ ออกแบบ และค่าอุณหภูมิความร้อนในส่วนของนํ้าชนิด โดยในการวัดทดสอบความร้อนนั้นจะใช้ กล้องถ่ายภาพความร้อน KEYSIGHT U5857A และสุดท้ายจะทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลจาก การวัดทดสอบในรูปของความร้อนจากกล้องถ่ายภาพความร้อน และนํ้าชนิดที่ผ่านระบบการ พาสเจอร์ไรซ์ที่ออกแบบขึ้นไปเพาะเชื้อแบคทีเรีย และนับจำนวนของแบคทีเรียที่ลดลงจากการใช้ ระบบการพาสเจอร์ไรซ์อาหาร โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุที่สร้างขึ้นสำหรับ งานวิจัยนี้เพื่อสรุปผลการวิจัยต่อไป

4.2 การสร้างตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตอิเล็กทรอนิกส์และขดลวด เหนียวนา

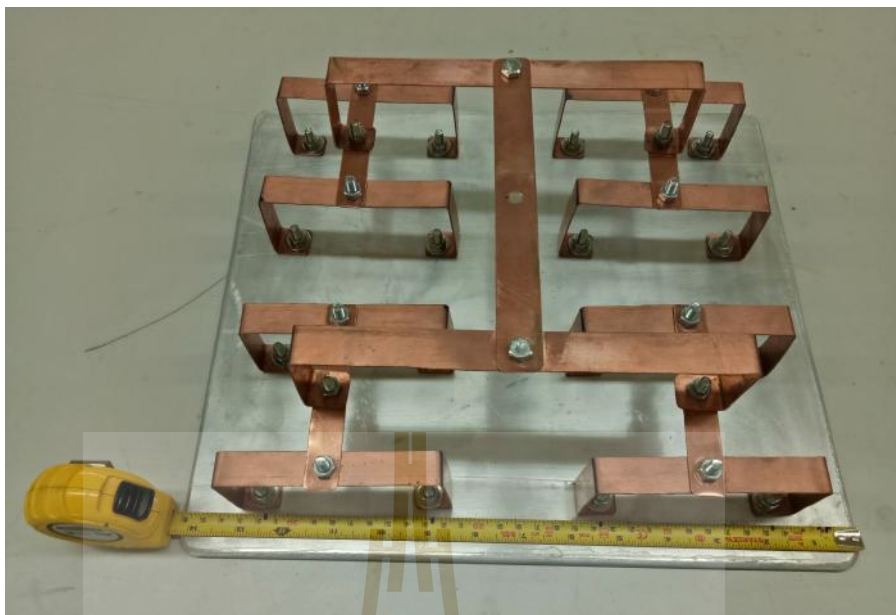
จากการออกแบบคุณลักษณะ โครงสร้างของระบบการให้ความร้อนแบบด้วยความถี่วิทยุ สำหรับให้ความร้อนกับโหลดนํ้าชนิดหรือโหลดไดอิเล็กตริก เพื่อการพาสเจอร์ไรซ์นํ้าชนิดหรือ ทำลายเชื้อแบคทีเรียในนํ้าชนิด อุปกรณ์ในการทดสอบนั้นจะประกอบไปด้วย ชุดแหล่งกำเนิด สัญญาณความถี่ด้วยหลอดไตรโอดที่ความถี่ 40 MHz ส่งต่อกำลังงานให้กับภาควงจรรีโซแนนซ์ แบบอนุกรม ประกอบด้วยขดลวดเหนียวนาที่ปรับค่าได้ สำหรับแมทซิงอิมพีแดนซ์ของวงจรรี โซแนนซ์และตัวเก็บประจุ ซึ่งตัวเป็นประจุจะออกแบบให้เป็นตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่น เพลต โดยตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต ประกอบด้วยขั้วอิเล็กทรอนิกส์แผ่นบนเป็นขั้วบวก สำหรับปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าเพื่อส่งผ่านกำลังงานไปยังโหลดนํ้าชนิด และเข้าสู่ขั้วอิเล็กทรอนิกส์ แผ่นล่างเป็นขั้วลบ ซึ่งเป็นการทำงานของระบบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ โดยตัวปล่อยคลื่น สนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตที่มีขนาดความกว้างเท่ากับ 320 มิลลิเมตร ความยาวเท่ากับ 360 มิลลิเมตร และมีความหนา 5 มิลลิเมตร และมีโหลดนํ้าชนิด สำหรับทดสอบผลการให้ความร้อนที่ เกิดจากคลื่นสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลตทั้งสอง โดยโครงสร้างระบบตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้า สำหรับการให้ความร้อนแก่โหลดนํ้าชนิด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างระบบตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าสำหรับการให้ความร้อนแก่หลอดน้ำนมดิบ

4.2.1 การสร้างตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้า

สำหรับการสร้างตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตนั้นจะได้นำผลการวิเคราะห์และออกแบบในบทที่ 3 มาเพื่อทำการสร้างสำหรับทดสอบ ซึ่งแผ่นเพลตที่ได้ออกแบบมีขนาดความกว้างเท่ากับ 320 มิลลิเมตร ความยาวเท่ากับ 360 มิลลิเมตร และความหนา 5 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลตเท่ากับ 80 มิลลิเมตร ซึ่งในบทที่ 3 มีการพิจารณาลักษณะของตัวเก็บประจุแบบแผ่นเพลตที่มีไดอิเล็กตริกหรือหลอดน้ำนมดิบ และคำนวณค่าของตัวเก็บประจุแบบแผ่นเพลตที่มีหลอดน้ำนมดิบอยู่ตรงกลางระหว่างเพลต ซึ่งแผ่นเพลตนั้นจะทำการใส่จุดป้อนกำลังงานที่แผ่นเพลตที่ได้วิเคราะห์ในบทที่ 3 พบว่าแบบ 16 พอร์ต นั้นให้ความเข้มสนามไฟฟ้าทั่ว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 สำหรับการป้อนจุดสัญญาณแต่ละจุดจะต้องสมมาตรกันทั้ง 16 พอร์ต เพื่อให้การแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าได้ทั่วทั้งแผ่นเพลตและหลอดน้ำนมดิบ ตามที่ได้จำลองผลด้วยโปรแกรมในบทที่ 3



รูปที่ 4.2 โครงสร้างของแผ่นเพลตสำหรับทดสอบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุสำหรับการพาสเจอร์ไรซ์น้ำนมดิบ แบบ 16 พอร์ต

4.2.2 การสร้างตัวเหนี่ยวนำ

สำหรับการสร้างตัวเหนี่ยวนำนั้นจะนำผลการคำนวณการแมทชิงอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 40.68 MHz จากการคำนวณ และทำการสร้างขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งลักษณะของตัวเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้นนั้นใช้ลวดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 17.67 ตารางมิลลิเมตร หรือเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตรแสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งออกแบบไว้สำหรับปรับแมทชิงอิมพีแดนซ์เมื่อใส่โพลدنํานมดิบในระหว่างแผ่นเพลต



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของขดลวดที่ออกแบบสำหรับการแมทชิงอิมพีแดนซ์กับโหลดไดอิเล็กตริก

เมื่อได้องค์ประกอบต่าง ๆ สำหรับการทดสอบแล้ว ต่อไปจะได้จัดวางรูปแบบโครงสร้างของระบบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ สำหรับทดสอบการพาสเจอร์ไรซ์อาหารโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ ซึ่งจะใช้ทดสอบกับโหลคน้ำนมดิบเพื่อยืนยันผลการให้ความร้อนในบทที่ 3 ซึ่งสามารถแสดงดังในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 โครงสร้างระบบการพาสเจอร์ไรซ์อาหารโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ

จากรูปที่ 4.4 เป็นรูปแบบของการจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบตามโครงสร้างของระบบการพาสเจอร์ไรซ์อาหารโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุที่ได้กำหนดไว้ในรูปที่ 4.1 โดยการทดสอบนั้นจะมีโหลค่น้ำนมดิบสำหรับผลทดสอบที่เกิดขึ้น เนื่องจากคลื่นสนามไฟฟ้าจากแผ่นเพลต ซึ่งจะแสดงผลเป็นความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นจะใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน KEYSIGHT U5857A สำหรับการวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้น เพื่อที่จะนำไปตรวจนับจำนวนเชื้อแบคทีเรียในน้ำนมดิบ

4.3 ผลการทดสอบวัดค่าความร้อนด้วยการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุและ สัญญาณความถี่

สำหรับผลการทดสอบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุจะเริ่มต้นจากการทดสอบด้วยการให้กำลังงาน เพื่อทดสอบกำลังงานที่สามารถทำให้ความร้อนในขวดน้ำนมดิบอุณหภูมิเท่ากันทั้งหมด ซึ่งจะวัดค่าอุณหภูมิของโหลค่น้ำนมดิบด้วยการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน KEYSIGHT U5857A ซึ่งสามารถแสดงลักษณะรูปร่างของตัวกล้องถ่ายภาพความร้อนได้ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งการวัดอุณหภูมิ

ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนจะต้องกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (emissivity, ϵ) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการแผ่รังสีความร้อน (Thermal radiation) ของวัตถุที่อุณหภูมิใด ๆ ในการทดลองนี้เราจะถ่ายภาพความร้อนจากวัตถุที่เป็นแก้ว ดังนั้นจะกำหนดค่า ϵ เท่ากับ 0.93 ในการวัดความร้อนที่เกิดขึ้นจากการทดลองระบบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ โดยระหว่างที่ทำการวัดนั้นจะหยุดการให้กำลังงานจากแหล่งกำเนิดก่อน เนื่องจากคลื่นความถี่ที่มีกำลังงานสูงนั้นจะรบกวนการทำงานของตัวกล้องถ่ายภาพความร้อนและส่งผลกระทบต่อค่าอุณหภูมิได้



รูปที่ 4.5 ลักษณะรูปร่างของตัวกล้องถ่ายภาพความร้อน KEYSIGHT U5857A
(ภาพจากเว็บไซต์ของบริษัทเทอร่าโมสแกน จำกัด ;)

สำหรับการวัดสัญญาณความถี่ของระบบนั้น จะใช้วิธีการอินดิว (Induced) สัญญาณความถี่ที่ออกจากระบบ เนื่องจากระบบให้โวลต์สูงเกินค่าโวลต์สูงสุดของเครื่องมือวัดจึงไม่สามารถวัดได้โดยตรง จึงใช้การวิธีอินดิว (Induced) สัญญาณผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ และต่อเข้ากับออสซิลโลสโคป Agilent Technologies รุ่น DSO-X-2002A 70 MHz แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ลักษณะรูปแบบการต่อเพื่อวัดสัญญาณความถี่ของระบบ

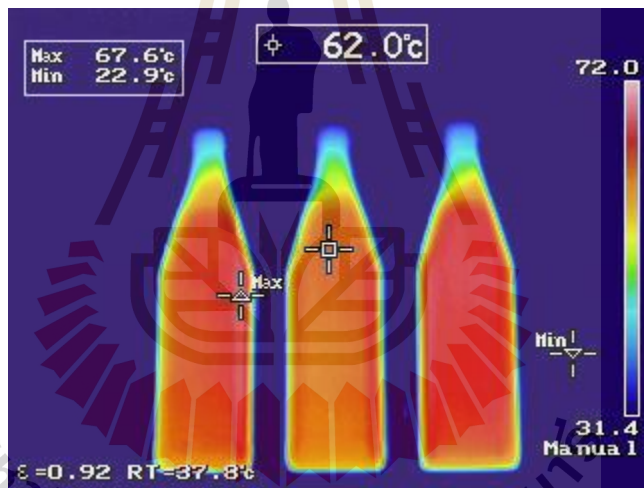
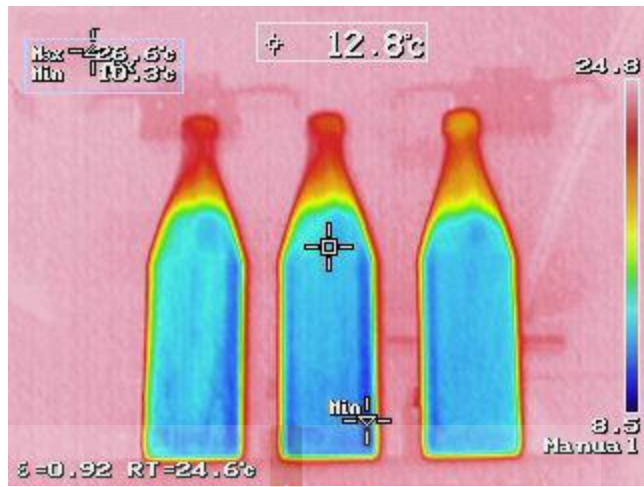
4.3.1 การทดสอบการพาสเจอร์ไรซ์โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ

สำหรับการทดสอบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุนั้น กำหนดรูปแบบการให้ความร้อนตามบทที่ 3 ซึ่งได้กำหนดจุดป้อนกำลังงานแบบ 16 พอร์ต และใส่โพลไดนามิคตรงกลางระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กโตรดแสดงดังรูปที่ 4.7 โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลตเท่ากับ 120 มิลลิเมตร เนื่องจากระยะห่างที่ 80 มิลลิเมตร เมื่อเปิดระบบเกิดการสปาร์คของสนามไฟฟ้าที่โพลไดนามิค ทำให้ขาดแก้วแตก จึงทำให้ต้องเพิ่มระยะห่างระหว่างเพลต และทำความค่าความเข้มสนามไฟฟ้าลดลงและการเพิ่มอุณหภูมิใช้เวลานานขึ้น แต่ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าก็ยังคงเพียงที่จะทำลายเชื้อแบคทีเรียได้



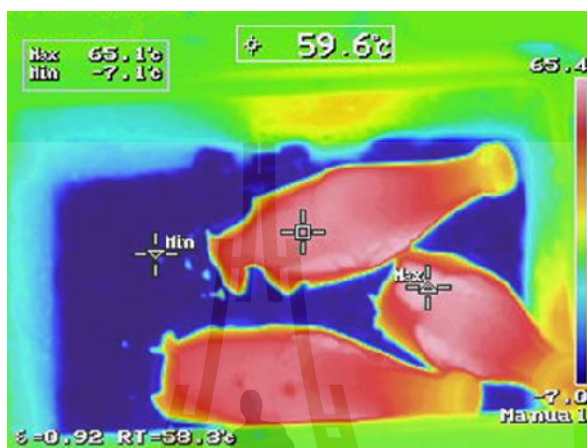
รูปที่ 4.7 ลักษณะรูปแบบการวางโหลค่น้ำนมดิบระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กทรอนิกส์

เมื่อวางโหลค่น้ำนมดิบทั้ง 3 ขวดเรียบร้อยแล้ว เริ่มทำการทดสอบโดยการทำการเปิดแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่จ่ายให้กับระบบตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต เพื่อให้พลังงานสนามไฟฟ้าหรือเส้นแรงไฟฟ้าไหลผ่านโหลค่น้ำนมดิบ โดยให้กำลังงานอินพุต 7 kW โดยการวัดด้วยแอมมิเตอร์ เวลาในการทดสอบกับโหลค่น้ำนมดิบใช้เวลา เท่ากับ 240 วินาที ถึงจะทำให้ได้อุณหภูมิสำหรับการพาสเจอร์ไรซ์ที่ 65 องศาเซลเซียสขึ้นไปจะสามารถทำลายแบคทีเรียที่อยู่ในน้ำนมดิบได้ โดยจะแสดงดังรูปที่ 4.8 เป็นรูปที่ยังไม่ได้ผ่านระบบให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ และรูปที่ 4.9 เป็นรูปที่ผ่านระบบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุแล้ว



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เช่นเดียวกับรูปที่ 4.10 ก็จะเป็นการสิ้นสุดกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ หลังจากนั้นก็นำไปตรวจนับจำนวนเชื้อแบคทีเรีย โดยส่งตัวอย่างให้กับโรงงานแปรรูปนม ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นผู้ตรวจสอบความเชื่อแบคทีเรีย



(ก)

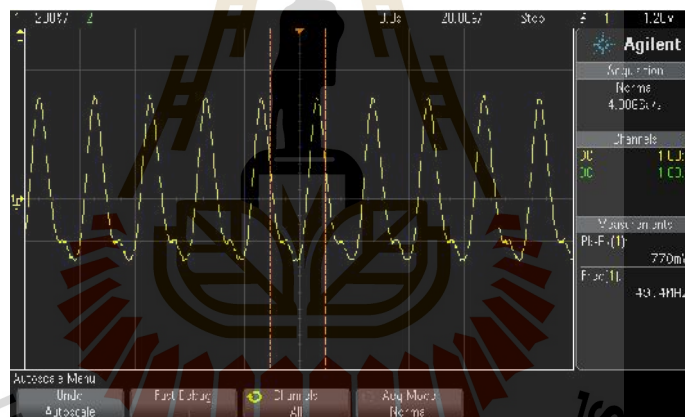


(ข)

รูปที่ 4.10 หลังจากให้ความร้อนเรียบร้อยแล้วจะสิ้นสุดกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์
(ก) แสดงแบบกล้องถ่ายภาพความร้อน (ข) แสดงแบบถ่ายภาพธรรมดา

4.3.2 การวัดทดสอบสัญญาณความถี่ที่เกิดขึ้นของระบบการพาสเจอร์ไรซ์โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ

สำหรับการวัดสัญญาณความถี่ของระบบให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ จะใช้การอินดิคสัญญาณผ่านขดลวดเหนี่ยวนำโดยต่อตามรูปที่ 4.7 และใส่โพลคั่นน้ำนมดิบ จากนั้นเริ่มเปิดระบบการทำงานของเครื่องให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ โดยเครื่องมือวัดออสซิลโลสโคปสามารถวัดสัญญาณได้ดังรูปที่ 4.12 แสดงสัญญาณไซน์โดยมีความถี่ 49.4 MHz เป็นความถี่ที่เกิดจากวงจรรีโซแนนซ์โดยที่ใส่โพลคั่นน้ำนมดิบเข้าไปในระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กโตรด ที่ได้ปรับแมทชิ่งอิมพีแดนซ์กับโพลคั่นน้ำนมดิบเรียบร้อยแล้ว ซึ่งความถี่ที่ออกมาได้ก็คาดเคลื่อนออกไปจากความถี่ไดอิเล็กตริกของน้ำนมดิบที่ 40.68 MHz แต่ความถี่ที่ได้นั้นก็ยังสามารถให้ความร้อนกับโพลคั่นน้ำนมดิบได้



รูปที่ 4.11 สัญญาณความถี่ที่เกิดจากระบบให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ

4.3.3 การตรวจนับจำนวนเชื้อแบคทีเรียที่ลดลงและคุณภาพน้ำนมดิบหลังจากผ่านระบบ

ให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ

การตรวจนับจำนวนเชื้อแบคทีเรียสำหรับน้ำนมดิบที่ผ่านระบบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ จะนำไปส่งตรวจวัดที่โรงงานแปรรูปนม ณ ฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ผลที่ได้จากการตรวจวัดแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการตรวจนับเชื้อแบคทีเรียและคุณภาพของน้ำนมดิบที่ผ่านระบบให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ

คุณภาพ	มาตรฐาน	นมดิบ	นมดิบที่ผ่านระบบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ		
			ขวดที่ 1	ขวดที่ 2	ขวดที่ 3
อุณหภูมิ	< 6 °C	-	-	-	-
สี	สีปกติของนมดิบ	✓	✓	✓	✓
กลิ่น	ไม่มีกลิ่นเหม็นหรือกลิ่นเปรี้ยว	✓	✓	✓	✓
ลักษณะเนื้อนม	ไม่เป็นเม็ดหรือก้อน	✓	✓	✓	✓
Clot on boiling test	นมดิบไม่ตกตะกอน	✓	✓	✓	✓
pH	6.6 – 6.9	6.73	6.69	6.72	6.64
Total solids	12.5 – 12.7	11.02	11.51	11.31	11.54
% fat	มากกว่าหรือเท่ากับ 3.5	3.1	3.2	3.2	3.3
Solid non fat	มากกว่าหรือเท่ากับ 8.25	7.92	8.31	8.23	8.34
Specific gravity	1.027 – 1.035	1.0270	1.0285	1.0274	1.0281
Resazurin test	ไม่น้อยกว่าเกรด 4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Antibiotic	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
SPC (cfu/ml)	400,000 cfu/ml	510,000	11,360	12,157	11,136
Coliform (cfu/ml)	1,000 cfu/ml	1,130	1	1	0

จากผลการตรวจนับจำนวนแบคทีเรียและคุณภาพน้ำนมดิบที่ผ่านระบบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุนั้น พบว่าระบบที่ออกแบบให้การกระจายของสนามไฟฟ้าแบบ 16 พอร์ต ทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นสม่ำเสมอ และความเข้มสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ ทำให้ระบบการพาสเจอร์ไรซ์

โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ สามารถทำลายเชื้อแบคทีเรียที่อยู่ในน้ำนมดิบได้ ผ่านมาตรฐานโรงงานแปรรูปนม และยังคงไม่เสียคุณภาพของน้ำนม

4.4 สรุป

จากการทดสอบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุแก่โหลคน้ำนมดิบ การทดสอบเพื่อยืนยันการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุสามารถทำลายเชื้อแบคทีเรียที่อยู่ในน้ำนมดิบ ซึ่งบรรจุอยู่ในขวดแก้วได้ ทดสอบโดยการออกแบบจุดป้อนสัญญาณแบบ 16 พอร์ต และใช้กำลังงานอินพุต 7 kW ผ่านหลอดไดโอดเป็นตัวกำเนิดคลื่นและส่งต่อให้กับตัวปล่อยคลื่นแบบแผ่นเพลตอิเล็กทรอนิกส์ คลื่นสนามไฟฟ้าจากแผ่นเพลตจะส่งกำลังสนามไฟฟ้าไปยังโหลคน้ำนมดิบจนทำให้เกิดความร้อนขึ้น และใช้เวลา 240 วินาที ทำให้อุณหภูมิน้ำนมดิบเพิ่มขึ้นมา 65 องศาเซลเซียส และนำไปแช่เย็นก็จะสิ้นสุดกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ และความถี่ที่เกิดขึ้นของระบบเป็น 49.4 MHz ซึ่งก็ส่งผลให้สามารถให้ความร้อนกับน้ำนมดิบได้ หลังจากนั้นนำผลที่ได้จากการทดสอบของระบบไปตรวจนับจำนวนแบคทีเรียที่ลดลงและคุณภาพของน้ำนมดิบ พบว่า การพาสเจอร์ไรซ์อาหารโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ สามารถลดจำนวนแบคทีเรียลงได้ผ่านมาตรฐานโรงงานแปรรูปนม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และไม่เสียคุณภาพของน้ำนมดิบ



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการพาสเจอร์ไรซ์อาหาร โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ โดยการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแผ่นเพลตอิเล็กโตรด และสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโหลคน้ำนมดิบ โดยใช้การจำลองผลด้วยโปรแกรม CST EM STUDIO เพื่อพิจารณาระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต และความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโหลคน้ำนมดิบ ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการแปรผันพลังงานของสนามไฟฟ้าให้เป็นความร้อน และทดสอบผลการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุในระบบจริง จากการจำลองสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโหลคน้ำนมดิบด้วย โปรแกรมพบว่า การป้อนจุดสัญญาณแบบ 16 พอร์ต ให้ผลของการกระจายสนามไฟฟ้าได้ทั่วที่สุดหากเทียบกับแบบ 1, 2, 4 และ 8 เนื่องจากจุดป้อนสัญญาณคลื่นสนามไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่จะมีการแผ่กระจายไปรอบ ๆ บริเวณตรงกลางของจุดป้อนสัญญาณและมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ตำแหน่งตรงกับจุดป้อนสัญญาณและจะมีค่าน้อยที่บริเวณรอบ ๆ อย่างสมมาตร จึงทำให้การป้อนจุดสัญญาณแบบ 16 พอร์ตดีที่สุดสำหรับโหลคน้ำนมดิบ จากนั้นทำการสร้างแผ่นเพลตอลูมิเนียม ขนาดความกว้างเท่ากับ 320 มิลลิเมตร ความยาวเท่ากับ 360 มิลลิเมตร และความหนา 5 มิลลิเมตร เป็นตัวปล่อยคลื่น จากนั้นทำการทดสอบจริงโดยการ ออกแบบจุดป้อนสัญญาณแบบ 16 พอร์ต และใช้กำลังอินพุต 7 kW ผ่านหลอดไดโอดเป็นตัวกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุและส่งต่อไปกับตัวปล่อยคลื่นแบบแผ่นเพลตอิเล็กโตรด และคลื่นสนามไฟฟ้าจากแผ่นเพลตจะส่งผ่านกำลังสนามไฟฟ้าไปยังโหลคน้ำนมดิบจนทำให้เกิดความร้อนขึ้น และใช้เวลา 240 วินาที ทำให้อุณหภูมิในน้ำนมดิบเพิ่มขึ้นมา 65 องศาเซลเซียส และนำไปแช่เย็นเป็นอันสิ้นสุดกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ และความถี่ที่เกิดขึ้นของระบบได้ความถี่ 49.4 MHz เป็นความถี่ที่เกิดจากการใส่โหลคน้ำนมดิบในระหว่างแผ่นเพลตอิเล็กโตรด จากนั้นได้ส่งผลไปตรวจนับจำนวนของแบคทีเรียที่ลดลงและคุณภาพของน้ำนมดิบ ปรากฏว่าสามารถลดจำนวนแบคทีเรียลงได้ผ่านมาตรฐาน โรงงานแปรรูปนม ณ มหาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และคุณภาพไม่เสียหายสามารถบริโภคได้ โดยระบบดังกล่าวนี้สามารถใช้เป็นแนวทางการให้ความร้อนแก่โหลคไดอิเล็กตริกชนิดต่าง ๆ ที่เป็นของเหลว และสามารถประยุกต์ใช้ในการให้ความร้อนแทนการให้ความร้อนแบบธรรมดาได้อย่างมีประสิทธิภาพ และประหยัดพลังงานกว่าการให้ความร้อนแบบธรรมดา

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

สำหรับปัญหาที่พบในการดำเนินการจัดทำวิทยานิพนธ์คือ การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบและการวัดกำลังงานนั้นจะใช้วิธีการคำนวณ เนื่องจากเครื่องมือวัดไม่มีความละเอียดพอและไม่สามารถวัดค่ากำลังงานที่สูงได้ ทำให้อาจเกิดความคลาดเคลื่อน และการกำหนดค่าของโหลดไดโอดีลิกตริกที่เป็นน้ำมันดิบและช่องว่างระหว่างขดกับระยะห่างระหว่างแผ่นเพลตที่มีอากาศเป็นตัวกลางนั้นไม่สามารถคำนวณได้ จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนต่อผลการส่งผ่านกำลังงานความร้อนและความถี่ที่เกิดจากระบบ ปัญหาการทดสอบจริงเมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นเพลตที่ 80 มิลลิเมตร เกิดการสปาร์กที่ขดแก้วกับขดน้ำมันดิบทำให้ขดแก้วแตก จึงต้องขยายแผ่นเพิ่มทำให้ประสิทธิภาพการให้ความร้อนน้อยลงและใช้เวลานานขึ้น นอกจากนี้ก็จะต้องเพิ่มเติมในการทดลองการวัดความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในโหลดไดโอดีลิกตริก เพื่อให้การทดลองมีชัดเจนมากขึ้นและความผิดพลาดน้อยลงจนเป็นที่ยอมรับได้ตามหลักทฤษฎีนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และออกแบบให้เป็นระบบสายพานลำเลียงโหลดน้ำมันดิบผ่านแผ่นเพลตไดโอดีลิกตริกจะช่วยให้การแผ่กระจายสนามไฟฟ้าได้สม่ำเสมอกว่าแบบเป็นขด จะทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงขึ้น

5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

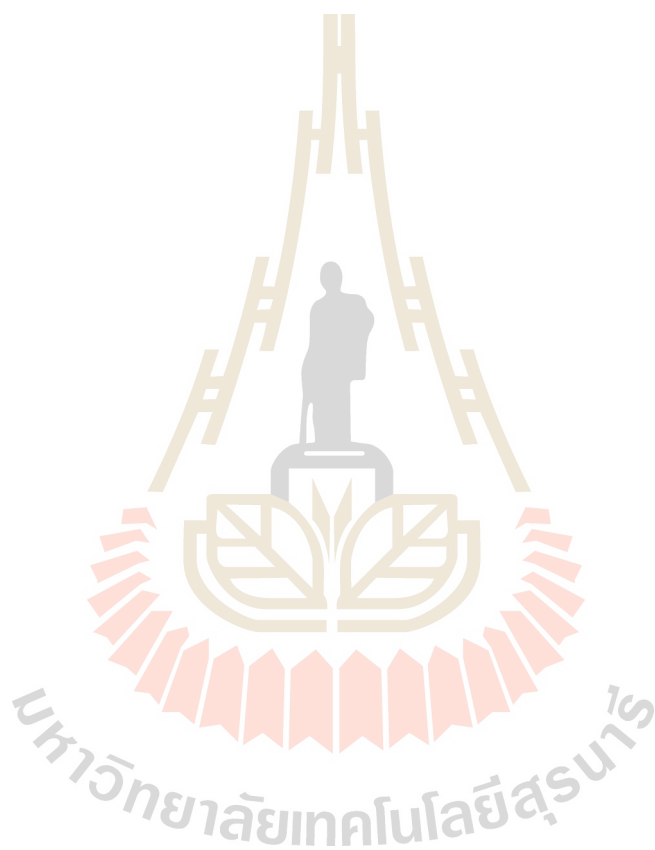
ในงานวิจัยการพาสเจอร์ไรซ์อาหารโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ ในงานวิจัยนี้จะออกแบบสำหรับพาสเจอร์ไรซ์น้ำมันดิบ แต่อาหารชนิดอื่นก็สามารถนำมาออกแบบประยุกต์ใช้ได้ไม่ว่าจะเป็นพาสเจอร์ไรซ์ อบแห้ง เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุและยังได้รับผลของความเข้มสนามไฟฟ้าในการทำลายแบคทีเรีย ซึ่งเป็นแนวทางในการพาสเจอร์ไรซ์อาหารในอนาคตที่จะให้ประสิทธิภาพและประหยัดพลังงานกว่าการพาสเจอร์ไรซ์แบบเก่า สำหรับการออกแบบและพัฒนาในอนาคตให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นนั้นจะต้องมีเครื่องวัดค่าไดโอดีลิกตริกของโหลดต่างๆ ที่จะนำมาออกแบบให้แม่นยำมากกว่าการคำนวณหรือการปรับแมทซิงอิมพีแดนซ์ของระบบให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ และใช้วัสดุที่บรรจุอาหารเป็นพลาสติกชนิดที่ไม่มีผลกับความถี่ที่ใช้เพื่อป้องกันการแตกร้าว จะทำให้การให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุมีประสิทธิภาพมากขึ้นและความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้น ซึ่งจะทำให้ประหยัดพลังงานมากขึ้นและประสิทธิภาพการทำลายเชื้อจุลินทรีย์สูงขึ้น

รายการอ้างอิง

- Buffler C.R. (1993), **Microwave Cooking and Processing: Engineering Fundamentals for the Food Scientist**, New York, Van Nostrand Reinhold.
- Dike O. Ukuku, David J. Geveke and Peter H. Cooke, (2012), **Effect of Thermal and Radio Frequency Electric Fields Treatments on Escherichia coli bacteria in Apple Juice**, J Microb Biochem Technol, Volume 4(3), pp. 76-81.
- Geveke 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.
- Geveke D.J, Brunkhorst C. (2004), **RFEF pilot plant for inactivation of Escherichia coli in apple juice**, Fruit Processing 14, pp.167-170.
- Geveke 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
- Geveke 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
- G.B. Awuah et al. (2005), **Inactivation of Escherichia coli K-12 and Listeria innocua in milk using radio frequency (RF) heating**, Innovative Food Science and Emerging Technologies 6, pp.396–402.
- Fleming H (1944), **Effect of high frequency fields on microorganisms**, Electrical Engineering, 63, pp.18–21.
- Marra F., Zhang L., Lyng J.G. (2009), **Radio frequency treatment of foods: Review of recent advances**, Journal of Food Engineering, 91, pp.497–508.
- M. Corredig, D.G. Dalgleish. (1999), **The mechanisms of the heat-induced interaction of whey proteins with casein micelles in milk**, International Dairy Journal 9, pp.233-236
- Metaxas AC (1988), **RF and microwave energy heats up**, IEE Review, 34 (5), pp.185–187.
- Nelson S.O. (1996), **Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control**, Transactions of the ASAE, 46(2), pp.567–574.

- Nelson S.O., Bartley P.G. (2000), **Measuring frequency and temperature dependent dielectric properties of food materials**, Transactions of the ASAE, 43(6), pp.1733–1736.
- Nyrop JE (1946), **A specific effect of high frequency electric currents on biological objects**, Nature, 157, pp.51.
- Orfeuil M. (1987), **Electric Process Heating: Technologies, Equipment, Applications**. Columbus, OH: Battelle Press, Chapter 7.
- Ponne, C. T., Balk, M., Hancioglu, O., & Gorris, L. G. M. (1996), **Effect of radio frequency energy on biological membranes and microorganisms**, Lebensmittel Wissenschaft und Technologie, 29(1/2), pp. 41-48.
- Piyasena P., Dussault C., Koutchma T., Ramaswamy H.S., Awuah G.B. (2003), **Radio frequency heating of foods: Principles, applications and related properties**, A review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 43(6), pp.587–606.
- Silva, F.M., Gibbs, P., Vieira, M.C., and Silva, C.L.M. (1999), **Thermal inactivation of Alicyclobacillus acidoterrestris spores under different temperature, soluble solids and pH conditions for the design of fruit processes**, International Journal of Food Microbiology 51(2/3), pp.95–103.
- Tang J., Ikediala J.N., Wang S., Hansen J.D., Cavalieri R.P. (2000), **High-temperature-short-time thermal quarantine methods**, Postharvest Biology and Technology, 21, pp.129–145.
- Uemura K, Isobe S (2002), **Developing a new apparatus for inactivating Escherichia coli in saline water with high electric field AC**, Journal of Food Engineering, 53 (3), pp.203–207.
- 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
- 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 0.5-50 GHz RANGE**, American Journal of Applied Sciences 11 (7), pp.1104-1112.

Zhang H., Datta A.K. (2001), **Electromagnetics of microwave heating: Magnitude and uniformity of energy absorption in an oven.** In Handbook of Microwave Technology for Food Application. A.K. Datta and R.C. Anantheswaran (eds.), New York: Marcel Dekker, pp.1–28.





ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Chanon Srisuma, Samran Santalunai, Thanaset Thosdeekoraphat and Chanchai Thongsopa. **“The Analysis and Design of Milk Pasteurization System by Using Radio Frequency Electric Fields”** The Asia-Pacific International EMC, The Commons, Yonsei University, Seoul, Korea, 20-23 June 2017, pp.158-160.

Chanon Srisuma, Samran Santalunai, Thanaset Thosdeekoraphat and Chanchai Thongsopa. **“THE ANALYSIS AND DESIGN OF MILK PASTEURIZATION BY USING RADIO FREQUENCY HEATING”** The 11th SEATUC, SOUTH EAST ASEAN TECHNICAL UNIVERSITY CONSORTIUM, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), Ho Chi Minh, Vietnam, 13-14 March 2017.

Chanon Srisuma , Kompisit Krajaipote, Worawut Boonpeang, Poramin Kuntayom, Supawat Kochapradit, Sumran Santalunai ,Thanaset Thosdeekoraphat, and Chanchai Thongsopa, **“THE RADIO FREQUENCY HEATING TO ELIMINATE MICROORGANISMS IN WINE PACKAGED IN GLASS JARS SEALED”**, The 10th SEATUC, SOUTH EAST ASEAN TECHNICAL UNIVERSITY CONSORTIUM, Shibaura Institute of Technology, Tokyo, Japan. 22-24 February 2016.

The Analysis and Design of Milk Pasteurization System by Using Radio Frequency Electric Fields

Chanon Srisuma*, Samran Santalunai, Thanaset Thosdeekoraphat, Chanchai Thongsopa
School of Electronics Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand
*Email: m5741021@g.sut.ac.th

Abstract— An analysis and design of dielectric heating system by using radio frequency electric field (RFEF) will be presented for the milk pasteurization process. It is a technique to transmit the electric fields into the intermediary by using the RFEF. To determine heat distribution in the dielectric loads, which electric field intensity are analyzed to be suitable for fluid and milk. In heating process, the heated material must be the polar molecules to perform the best efficiency of electric field transmission into the medium in order to increase the temperature of medium to greater heights. The electric field distributions on the lossy medium was analyzed using the CST EM STUDIO program. To investigate the difference of electric power on heating predicted by the theoretical model. In order to verify the simulation results. The proposed system is realized and experimentally examined. The applicator of RFEF with excited by 40 MHz signal and electric field strength of 1.6 kV/cm. In the results, it is found that the temperature of milk would be increased about 72.3°C, the process will be take approximately 3 minutes, and reduced population of bacteria 109,260 cfu/ml. Moreover, the investigation result revealed that the temperature of 71.7°C, it will be eliminated the bacteria in milk and extended shelf life of milk. The advantage of the principle of radio frequency electric fields is that it can be applied to eliminate the bacteria in milk pasteurization.

Keywords— radio frequency electric fields; pasteurization; eliminate; bacteria; milk

I. INTRODUCTION

At present pasteurization industry still used the heat exchanger to eliminated the bacteria, causing disease all kind of food and extend the shelf life. This method, if temperature is too high the food will have lost nutritional value then it requires a lot of energy on the part of the heat exchanger [1,2]. State-of-the-art of pasteurization by using an electric field is to breaking the cell membrane of the bacteria [3]. The induced membrane potential and hence the breakdown voltage, are proportional to the external electric field strength. At the critical external electric field strength, bacteria died by electrical breakdown of the cell membrane that caused a hole in the cell membrane [4,5]. Since it eliminated the bacteria with electric fields and thermal we will prove the effective of an electric field strength 0.23 kV/cm at 20 MHz, 99.5% of *E. coli* at ≤ 40 °C can be eliminated [6]. However, details of the experiment apparatus and procedure not described. Study results of the effects of radio frequency energy on liposomes, yeast and bacteria appears that the frequency range 27-100 MHz can increase the rate of breakdown of the bacterial and liposomes but electric field less than 0.34 V/m cannot eliminate the bacteria and liposomes [7]. Therefore, study minimal electric field can eliminate the bacteria, find the minimal electric field at 0.5 kV/cm [8]. Applying electric field technology in pasteurization of milk can eliminate *E. coli K-12*

and *Listeria innocua*. Power of electric field is 2 kW at 27.12 MHz have been used to rise the temperature of the milk increase about 65 °C which decrease *E. coli K-12* and *Listeria innocua* [9]. After that, the radio frequency electric field develop wherewith the electric field strength increase 15, 20 and 25 kV/cm at frequency 20, 30 and 40 kHz, and flowing rates are 540 and 1,400 ml/min. In electric field, bacteria died by heat that destroyed the cell membrane at 65 and 75 °C [10-12]. But higher frequency will make the electric field power lower. The process eliminate bacteria must make gap electrode very narrow. Therefore, we analyze and design, high electric field strength, high frequency and gap electrode wide to destroy the cell membrane and eliminate bacteria with thermal energy wherewith gap electrode wide apply food pasteurization in-container.

In this paper, the analysis and design of dielectric heating system by using radio frequency electric field (RFEF) will be presented for the milk pasteurization process. To investigate the difference of electric power on heating predicted by the theoretical model. The electric field distributions on the lossy medium was analyzed using the CST EM STUDIO program. To investigate the difference of electric power on heating predicted by the theoretical model. In this system, the applicator of RFEF with excited by 40 MHz signal and electric field strength of 1.6 kV/cm. In the results, it is found that the temperature of milk would be increased about 72.3°C, the process will be take approximately 2 minutes, and reduced population of bacteria 109,260 cfu/ml. The investigation result revealed that the temperature of 71.7°C, it will be eliminate the bacteria in milk and extended shelf life of milk. The advantage of the principle of radio frequency electric fields is that it can be applied to eliminate the bacteria in milk pasteurization.

II. ANALYSIS AND DESIGN

A. Analysis of Radio Frequency Electric Fields

The process of RFEF, destroy cell membranes of bacteria or call electroporation [4]. The study found that lowest electric field strength at 0.5 kV/cm can destroy cell membranes. Therefore, we use software CST EM STUDIO simulation to analysis the distribution of the electric field. Build electrode plate size 32x36 cm, cylindrical bottles glass radius 3 cm and high 25 cm and the distance between electrodes plate 8 cm on CST EM STUDIO as show in Fig. 1. The electrodes plates are aluminum and use default value of raw milk set in software. Define voltage at 12.6 kV, frequency at 40 MHz, and port signal input 4, 8 and 16 port as shown in Fig. 2 (a), (b) and (c) respectively.

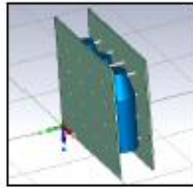


Fig. 1. Model of build in CST EM STUDIO

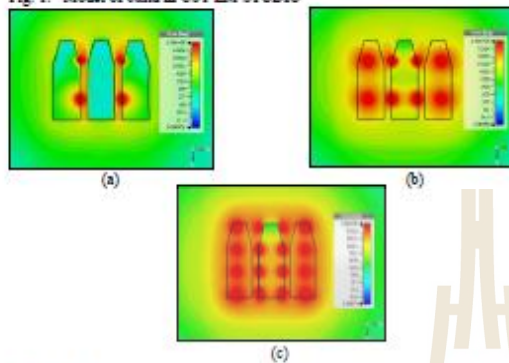


Fig. 2. Results simulation of CST EM STUDIO signal input 4 (a) signal input 8 (b) and signal input 16 (c) show electric fields strength

Fig. 2 (a) and (b) show that the maximum electric fields strength cannot distribution all area of a bottle, but Fig. 2 (c) maximum electric fields strength can distribution whole area of a bottle. Wherewith port signal input at electrode plates are entered, the electric fields strength at port will have maximum electric fields strength and the fields strength gradually distributed be circular. Which shown in Fig. 2 electric fields strength at 1.58 kV/cm that value greater than 0.5 kV/cm three times. The analysis region has electric fields strength more than 0.5 kV/cm, bacteria will be killed. It is clearly that 16 input port is better than 4 and 8 input ports.

But the process of RFEF, can make raw milk temperature up high that is "dielectric heating" [13,14]. The heated material must be the polar molecule. To perform the best efficiency of power transmission in form of an electric field into the material, dielectric materials such as most agricultural products can store part of the electric energy and convert the other part into heat in an electromagnetic field. The increase in temperature of a material as a result of the absorbed electromagnetic energy [14]. Therefore, we simulate power loss density of raw milk by CST EM STUDIO as shown in Fig. 3 (a), (b) and (c).

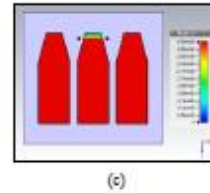
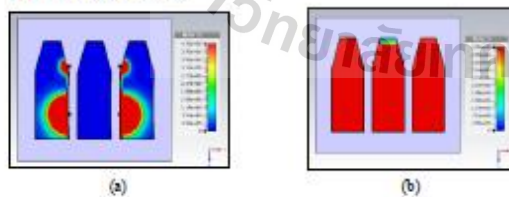


Fig. 3. Results simulation of CST EM STUDIO signal input 4 (a) signal input 8 (b) and signal input 16 (c) show electric fields strength

Fig. 3 (a) shown that the power loss density in raw milk by signal input 4 port, minimal power loss density in raw milk which value maximum power loss density 4.35 MW/m³ is from equation of Nelson [15], power loss density convert to the temperature that happened within raw milk. From equation, we use time of operate 120 second, the temperature of raw milk at 4 °C increases to 72 °C, for temperature at 72 °C bacteria in raw milk can be kill. Figure 3 (b) and (c) we use signal input 8 and 16 port, the power loss density all equal within raw milk. From Fig. 3 (b) and (c) the temperature all within raw milk are high enough to be kill bacteria.

B. Design of Radio Frequency Electric Fields

Analysis of RFEF we will entered signal input 16 port, which electric fields strength distributed and power loss density throughout raw milk in the bottle. Block diagram of the system for kill bacteria in raw milk is shown in Fig. 4.



Fig. 4. Block diagram of system radio frequency electric fields

Design of source of electric fields and frequency, the system comprised a transformer source voltage output 9 kV and converted to DC voltage with bridge rectifier 12.6 kV and the oscillator circuit at frequency 40 MHz and use aluminum parallel plates that act like capacitors size 32×36 cm. LC-series resonant circuit matching network is a must have for maximize the heat of the raw milk it is depend to the value dielectric of the raw milk. Adjusting the inductance matching series LC resonant shown in Fig. 5 (a). RFEF prototype system for the milk pasteurization process shown in Fig. 5 (b).

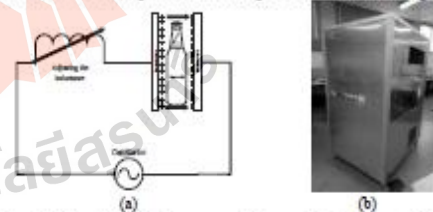


Fig. 5. (a) Adjusting the inductance matching series LC resonant (b) the radio frequency electric fields equipment system Experiment and Results

C. Measurement Tools

The signal output of the proposed system is measured by using an Agilent technology digital storage oscilloscope (Model DSO-X-2002A 70 MHz) by using inductor coil

isolated. The temperatures were measured using the thermal camera (FLIR TG165 Imaging IR Thermometer). By Emissivity adjustment to the water in order to measured temperature accurately.

D. Material

Raw milk used in the experiment is stored at a temperature 4°C, the pH 6.73, total solids 11.02, fat 3.1%, solids nonfat 7.92, and specific gravity is 1.027.

E. Experiment result

The results of RFEF system we have designed. Because of the signal cannot be measured by directly equipment cannot withstand voltage 12.6 kV. We took the signal by using inductor isolated. Signal frequency 50MHz but we designed circuit series LC resonant, matching resonant the frequency at 40 MHz, due to the calculation of the capacitors that we did not take into account gap air between bottle. But our system work, and we adjusting the inductance matching at frequency 40 MHz shown in Fig. 6.



Fig. 6. Signal from the coil isolate by adjusting the inductance matching at frequency 40 MHz

The experimental RFEF system for 2 minutes. Temperature from IR camera shown in Fig. 7.

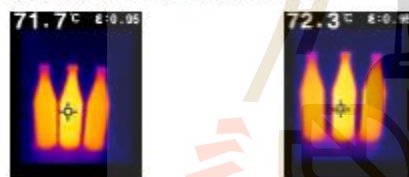


Fig. 7. The temperature of the thermal camera

The thermal from RFEF is around 72°C all the same temperature inside the bottle. Suggests that pathogenic microbes are destroyed by thermal, and the temperature at 71.7°C a temperature standard pasteurization. Our RFEF systems design can be used in pasteurization. After that we take raw milk inspect number of bacteria. RFEF system can kill bacteria and through standard pasteurization industry, can reduced population of bacteria 109,260 cfu/ml.

III. CONCLUSIONS

The analysis and design of dielectric heating system by using RFEF are presented for the milk pasteurization process. To investigate the difference of electric power on heating predicted by the theoretical model. The electric field

distributions on the lossy medium was analyzed using the CST EM STUDIO program. To investigate the difference of electric power on heating predicted by the theoretical model. In the results, it is found that the temperature of milk would be increased about 72.3°C, the process will be take approximately 3 minutes, and reduced population of bacteria 109,260 cfu/ml. The investigation result revealed that the temperature of 71.7°C and the electric fields strength more 0.5 kV/cm, it will be eliminated the bacteria in milk and extended shelf life of raw milk. The advantage of the principle of RFEF is that it can be applied to eliminate the bacteria in milk pasteurization. In addition, this principle is being developed to be used more in pasteurization industry and drying industry.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Suranaree University of Technology (SUT) and by the Office of the Higher Education under NRU project of Thailand.

REFERENCES

- [1] Book Emerging Technologies for Food Processing, Elsevier's Science & Technology Rights Department in Oxford, UK, 2005.
- [2] Filipa Vinagre Marques da Silva and Paul Anthony Gibbs "Principles of Thermal Processing: Pasteurization", Taylor & Francis Group, LLC., pp.14-38, 2008.
- [3] U.Zimmermann, G. pilwat, F.Riemann, "Dielectric breakdown of cell membranes", Biophys. J. 14, pp. 881-899, 1974.
- [4] Teissie, et al., "Electroporation of cell membranes" Advanced Drug Delivery Reviews 35, pp. 3-19, 1999
- [5] Nelson, S. O., and Payne, J. A., "RF dielectric heating for pecan weevil control", Transactions of the American Society of Agricultural Engineers", vol. 31, pp. 456-458, 1982.
- [6] Nyrop, J. E., "A specific effect of high-frequency electric currents on biological objects", Nature, 157(3976), 1946.
- [7] Ponna, C. T., Balk, M., Hancioglu, O., & Gorris, L. G. M., "Effect of radio frequency energy on biological membranes and microorganisms", Lebensmittel Wissenschaft und Technologie, 29(1/2), pp. 41-48, 1996.
- [8] D.J. Gevake et al., "Radio frequency energy effects on microorganisms in foods", Innovative Food Science & Emerging Technologies 3, pp. 133-138, 2002.
- [9] G.B. Awuah et al., "Inactivation of Escherichia coli K-12 and Listeria innocua in milk using radio frequency (RF) heating", Innovative Food Science and Emerging Technologies 6, pp.396- 402, 2005.
- [10] D.J. Gevake et al., "Radio frequency electric fields processing of orange juice", Innovative Food Science and Emerging Technologies 8, pp. 548-554, 2007.
- [11] D.J. Gevake, C. Brunkhorst, "Radio frequency electric fields inactivation of Escherichia coli in apple cider", Journal of Food Engineering 83, pp. 215-221, 2008.
- [12] Dike O. Ukuku, David J. Gevake and Peter H. Cooke, "Effect of Thermal and Radio Frequency Electric Fields Treatments on Escherichia coli bacteria in Apple Juice", J Microb Biochem Technol, Volume 4(3), pp. 076-081, 2012.
- [13] Nelson, S. O., and Payne, J. A., "RF dielectric heating for pecan weevil control", Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, vol. 31, pp. 456-458, 1982.
- [14] Nelson, S. O., "Agricultural applications of dielectric measurements", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 13, pp.688-702, 2006.
- [15] Nelson, S. O., "Insect-control Studies with Microwaves and Other Radio-frequency Energy", Bul. Entomol. Soc. Amer., Vol. 19, No. 3, pp. 157-163, 1973.

THE RADIO FREQUENCY HEATING TO ELIMINATE MICROORGANISMS IN WINE PACKAGED IN GLASS JARS SEALED

Chanon Srisuma , Kompisit Krajaipote, Worawut Boonpeang, Poramin Kuntayom, Supawat Kochapradit, Sumran Santalunai ,Thanaset Thosdeekoraphat, and Chanchai Thongsopa
School of Electronics Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand
chanon.srisuma@gmail.com

ABSTRACT

In this paper, the microorganisms eliminated for wine packaging in a sealed glass bottle by using the principle of radio frequency heating (RFH) are presented. To determine the relationship of the power and frequency appropriate for the killing of bacteria in wine, including the relationship between temperature variations with the distance of the electrode plates. It is a technique to find that involves heating directly to dielectric, because of this method involves heating efficiency is very high. In addition, the heating is also used time periods less than conventional methods. In the experimental, the electrode plates was designed by using an aluminum material and excited by 51 MHz signal. The results found that the temperature of the wine would increase from 25 ° C to 29-63 ° C, it will be take approximately 30-120 seconds. The temperature range of 50-60 ° C, it will be killed bacteria to effectively. The advantage of the principle of radio frequency heating is that it can be applied to eliminate the microorganisms for wine packaging in a sealed glass bottle.

1. INTRODUCTION

At present, the wine processes after fermentation successfully, have pasteurization wine for eliminating microorganisms in wine and clean bottle for eliminating microbial residue in the bottle, before bottling, and then sealed, were taken off distribute, but find problem microorganisms residues inside a sealed bottle. The microorganisms residues reactive fermentation inside the bottle, the results of the reaction, that is carbon dioxide bubbles so making bottle bombs fracture and bad taste wine. However, the solution by In-container pasteurization, packaged food to be pasteurized in hermetically sealed packaging and use principles heat transfer to the food, (P.P.Lewicki, 2003). But present has principles of radio frequency heating, this heating the

material directly, the interest and study in this solution.

Studied, technology RF and microwave heating are technology temperature increases of dielectric material. The increase in temperature of material as a result of the absorbed electromagnetic energy (Nelson, 1996). The RF heating is direct materials, therefore, all pieces of the same materials temperature. This technology has been applied in various applications. The Agriculture applied to the dielectric heating for killing moth in rice by electric field plate, rice and moth in between plate. The rice and moth is dielectrics materials as a result of the absorbed electromagnetic energy the temperature increase, this the temperature increase killing moth in rice (Santalunai, 2015), etc. The food applied to the dielectric heating pasteurization, sterilization and post-harvest. Radio frequency heating as a postharvest treatment against codling moth in cherries (J.N Ikediala, 2001). Radio frequency heating at 27.12 MHz for the pasteurization of ham samples repacked in plastic films, the samples were brought to internal temperatures of 75°C and 58°C in 5 min (V.Orsat, 2004). Radio frequency electric fields treatment on *Escherichia coli* bacteria in apple juice at 25 kV/cm and operated at 25°C, 55°C and 75°C for 3.4 milliseconds at a flow rate of 540 ml/min (Dike O. Ukuku, 2012), etc.

In this paper, the microorganisms eliminated for wine packaging in a sealed glass bottle by using the principle of radio frequency heating (RFH) are presented. It is a technique to find that involves heating directly to dielectric, because of this method involves heating efficiency is very high. In addition, the heating is also used time periods less than conventional methods. To determine the relationship of the power and frequency appropriate for the killing of bacteria in wine, including the relationship between temperature variations with the distance of the electrode plates. The electrode plates was designed by using an aluminum plate size of 31×36 cm and excited by 51 MHz signal, output voltage is

7,000 V. The temperature of the wine would be increased from 25 °C to 29-63 °C, it will be take approximately 30-120 seconds. The temperature range of 50-60 °C, it will be killed bacteria to effectively. The advantage of the principle of radio frequency heating is that it can be applied to eliminate the microorganisms for wine packaging in a sealed glass bottle.

2. EXPERIMENT

2.1 Experimental Apparatus

Principles of radio frequency and microwave heating. Dielectric materials, such as most agricultural products, can store part of the electric energy and convert the other part into heat in an electromagnetic field created by a RF or microwave system. The increase in temperature of a material as a result of the absorbed electromagnetic energy can be expressed by (Nelson, 1996)

$$\rho C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = 5.563 \times 10^{-11} f E^2 \epsilon'' \quad (1)$$

where C_p is the specific heat of the material ($J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$), ρ is the density of the material ($kg.m^{-3}$), E is the electric field intensity ($V.m^{-1}$), f is the frequency (Hz), ϵ'' is the dielectric loss factor of the material, Δt is the time duration (s) and ΔT is the temperature rise in the material ($^{\circ}C$).

From equation (1), design source electric field and frequency which a variable we can design and build. By we build radio frequency heating system comprised a transformer source voltage output 7,000 volts and design electronic oscillator at frequency 50 MHz and use aluminum is plate size 32×36 cm in Fig. 1(a).

The signal output we using tools Agilent Technology digital storage oscilloscope (Model DSO-X-2002A 70 MHz) by using inductor isolate (Fig. 1(b)) measurement signal output, sample temperatures were measured using the thermal camera (FLIR TG165 Imaging IR Thermometer).

Increase energy field by adjusting the distance between the plates, for test the difference of the electric field, the temperature increase of wine by used same time while the operation. The wine bottles are sealed and placed between the plates and the experiment was only one bottle (Fig. 2).

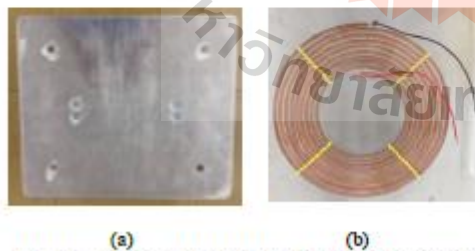


Fig. 1 (a) aluminum is plate size 32×36 cm (b) inductor isolate

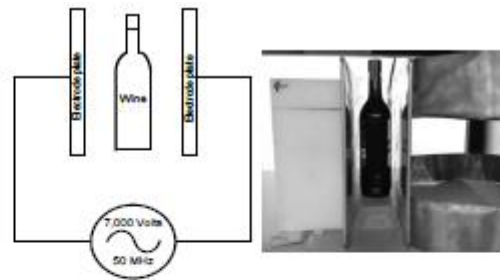


Fig. 2 The wine bottles are sealed and placed between the plates.

3. RESULT AND ANALYSIS

Fig. 3 show the comparison of temperature with the distance between the plates. When the electrode plates close at 9 cm, the temperature of wine increase 66.2 °C at 120 seconds, and when the electrode plates close at 15 cm, temperature of wine increase 35.4°C at 120 seconds. The electrode plates even closer together, energy electric fields, even more, allows the plates closer together and make more energy than radio frequency heating the temperatures rising well over and the temperature that occurs depending on the dielectric constants of wine.

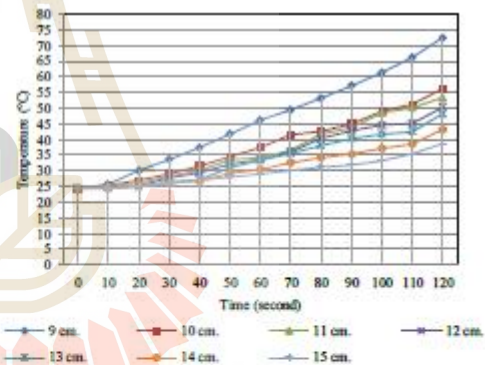


Fig. 3 The graph shows the relationship between the distances of the plates with the temperature,

Fig. 4 show that the signal output from electronics circuit, we have designed for using radio frequency heating wine by using inductor isolate. Because signal cannot be measured directly, measurement cannot withstand voltage 7000 Volts, so that the inductor isolate. Signal frequency 50MHz by there is a load of wine.

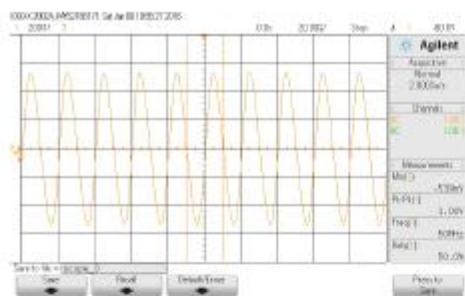


Fig. 4 Signal from the coil isolate by connected to measurement oscilloscope (have a load).

Fig. 5 show frequency 53.8MHz by no load. Because the circuit will be designed according to the load dielectrics, which dielectrics are different, the signal has a different frequency and based on the matching circuit.

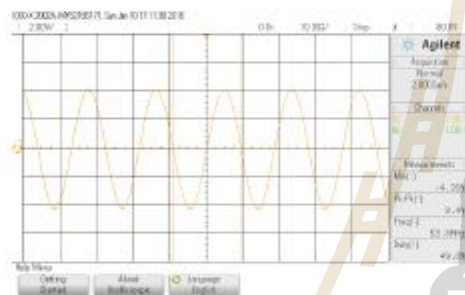


Fig. 5 Signal from the coil isolate by connected to measurement oscilloscope (no a load).

The temperature, we measured the temperature measured by the external bottle of wine. The temperature outside is greater than, approximately 4-5 °C, which sufficient eliminate microorganisms in wine.

CONCLUSION

In this paper, we study the relationship of the power and frequency appropriate for the killing of bacteria in wine, including the relationship between temperature variations with the distance of the electrode plates. In the experimental, the electrode plates was be designed by using an aluminum material and excited by 51 MHz signal. The results found that the temperature of the wine would increase from 25 °C to 29-63 °C, it will be take approximately 30-120 seconds. The temperature range of 50-57.2 °C, it will be killed bacteria to effectively. Nevertheless, the electric field is much more energy on temperature, linear graph, heat in a sealed container it

was found that when the wine is heated until the temperature reached 57.2 °C bottles to leak so dangerous. The advantage of the principle of radio frequency heating is that it can be applied to eliminate the microorganisms for wine packaging in a sealed glass bottle to effectively.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Suranaree University of Technology (SUT) and by the Office of the Higher Education under NRU project of Thailand.

REFERENCES

- Nelson, S. O. Agricultural applications of dielectric measurements, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 13, p.688-702,2006
- Nelson, S. O. Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control. Transactions of the ASAE, 39, pp. 1475-1484, 1996.
- Nelson, S. O. Dielectric properties of agricultural products Measurements and Applications, IEEE Trans. Elect. Insul., Vol.26, pp. 845-869, 1991
- Nelson, S. O., and Stetson, L. E. Comparative Effectiveness of 39- and 2450-MHz Electric Fields for Control of Rice Weevils in Wheat, J. Econ. Entomol., Vol. 67, No. 5, pp. 592-595, 1974.
- Nelson, S. O., and Payne, J. A., RF dielectric heating for pecan weevil control, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, vol. 31, pp. 456-458, 1982
- Nelson, S. O., Insect-control Studies with Microwaves and Other Radio-frequency Energy, Bul. Entomol. Soc. Amer., Vol. 19, No. 3, pp. 157-163,1973.
- Santalumai, S., Thongsopa, C., and Thosdeekoraphat, T. The Efficiency of Dielectric Heating by Increasing the Electric Power Ports in Symmetrically model on Electrode Plate for Pest Control" Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), PP 1-4,2015.
- Dike O Ukuku, David J. Geveke and Peter H. Cooke, Effect of Thermal and Radio Frequency Electric Fields Treatments on Escherichia coli bacteria in Apple Juice, J Microb Biochem Technol, Volume 4(3), pp. 076-081, 2012.
- J.N. Ikediala, J.D. Hansen, J. Tang, S.R. Drake and S. Wang Development of a saline water immersion technique with RF energy as a postharvest treatment against codling moth in cherries Postharvest Biology and Technology, Volume 24, Issue 1, Pages 25-37,2002.
- V. Orsat, L. Bai and G.S.V. Raghavanc Radio-Frequency Heating of Ham to Enhance Shelf-Life in Vacuum Packaging Journal of Food Process Engineering 27, pp.267-283, 2004.

THE ANALYSIS AND DESIGN OF MILK PASTEURIZATION BY USING RADIO FREQUENCY HEATING

Chanon Srisuma*, Samran Santalunai, Thanaset Thosdeekoraphat, Chanchai Thongsopa
School of Electronics Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

*Email: chanonsrisuma@gmail.com

ABSTRACT

In this paper, the analysis and design of dielectric heating by using radio frequency heating (RFH) are presented for milk pasteurization process. It is a technique of heating based on the electric field by using the radio frequency to transmit the electric power in form of an electric field into the dielectric materials. To determine heat distribution in the dielectric loads, which electric field intensity are analyzed to be suitable for fluid and milk. In heating process, the heated material must be the polar molecules. Especially, to perform the best efficiency of power transmission in form of an electric field into the material for increase the temperature into materials. The dielectric loads of the fluid and milks were the target dielectric materials for analyzed. To investigate the difference of electric power on heating predicted by the theoretical model, the electric field distributions will be analyzed by using the CST EM STUDIO program. This system, the applicator of RFH with excited by 40 MHz signal and power of 6 kW for the milk pasteurization process. In order to verify the simulation results, the proposed system is realized and experimentally examined. In the simulation and measurement results, it is found that the temperature of milk would be increased about 72.3C, the process will be take approximately 2 minutes. Which the temperature of 71.7°C, it will be microbial inactivation in milk and extended shelf life of milk. The advantage of the principle of radio frequency heating is that it can be applied to microbial inactivation in milk pasteurization.

KEYWORDS: *pasteurization, radio frequency heating, electric field, temperature, microbial inactivation, milk.*

1. INTRODUCTION

Pasteurization was discovered in 1864 by a scientist Louis Pasteur is a method of microbial inactivation which is not very high temperature (less than 100°C) the timing is right for this type of food, such as milk pasteurization temperature of 71.7°C take a time 15 second. This helps

microbial inactivation, dangerous pathogenic microbes with enzymes that cause food spoilage. The control microorganisms that cause food spoilage, do not proliferate and extend the shelf life of food.

The current pasteurization has developed more, thermal methods and non-thermal methods. But thermal methods more popular non-thermal because of thermal microbial inactivation more efficiently. The survey milk pasteurization use of heat exchangers include continuous pasteurization, batch pasteurization, and in-container pasteurization. These methods are interesting in-container pasteurization, it prevents the return of microbial best. Studied, technology in-container pasteurization. E. Bhuvanewari & C. Anandharamakrishnan (2014) analysis of pasteurization of bottled beer in a tunnel pasteurizer, found heat transfer from the outside to the inside, then take up to 19 minutes, the temperature inside the bottle, within the same bottle at 60°C, and used heat source from boiling gas, electric coils etc. These are outdated technology which consumes much energy when compared to the temperatures of those energy. Studied literature, Modi A & Prajapat R. (2014) pasteurization process energy optimization. Found pasteurization process a milk dairy plant, electric coils of rated power 295.96 kW are used to heat the milk to the desired temperature. Will notice that the electric coils use much energy. However studied, technology radio frequency heating (RFH) are technology temperature increases of dielectric material. The increase in temperature of material as a result of the absorbed electromagnetic energy. Nelson (1996). The RFH is direct materials, therefore, all pieces of the same materials temperature. Radio frequency heating from part of a group of innovation techniques based on electromagnetic heating applied for pasteurization. Awush (2005) use radio frequency heating a 2 kW, 27.12 MHz, inactivation of escherichia coli K-12 and listeria innocua in milk under continuous flow conditions, RF heating was found to be capable of inactivating both Listeria and E. coli in milk, with E. coli

being the more heat sensitive of the two. For a total residence time of 55.5 s, up to 5- and 7-log reductions were found for heating *Listeria* and *E. coli*, respectively at 1200 W, and an applicator tube exit temperature of approximately 65°C. But cannot in-container pasteurization so that we are analysis and design of milk pasteurization by using radio frequency heating and applied use milk pasteurization industry.

In this paper, the analysis and design of dielectric heating by using radio frequency heating (RFH) are presented for milk pasteurization process. It is a technique of heating based on the electric field by using the radio frequency to transmit the electric power in form of an electric field into the dielectric materials. To determine heat distribution in the dielectric loads, which electric field intensity are analyzed to be suitable for fluid and milk. In the heating process, the heated material must be the polar molecules. Especially, to perform the best efficiency of power transmission in form of an electric field into the material for increase the temperature into materials. The dielectric loads of the fluid and milk were the target dielectric materials for analyzed. To investigate the difference of electric power on heating predicted by the theoretical model, the electric field distributions will be analyzed by using the CST EM STUDIO program. This system, the applicator of RFH with excited by 40 MHz signal and power of 6 kW for the milk pasteurization process.

2. EXPERIMENT

2.1 Experiment apparatus

2.1.1 Radio frequency equipment

Design source radio frequency dielectric heater 6 kW 40 MHz which a variable we can design and build. By we build radio frequency heating system comprised a transformer source voltage output 7,000 volts and design electronic oscillator at frequency 40 MHz and use aluminum are plate size 32×36 cm in (Fig.1). The method dielectric heat likens capacitor, thus we designed a series of dielectric heating. By using the principles series LC resonant circuit, for matching resonant the frequency at 40 MHz, to heat the raw milk and the capacitor plates are used to matching, the value dielectric of the raw milk. And adjusting the inductance matching series LC resonant in (Fig.2). The radio frequency equipment system in (Fig.3).



Fig. 1 aluminums are plate size 32×36 cm.

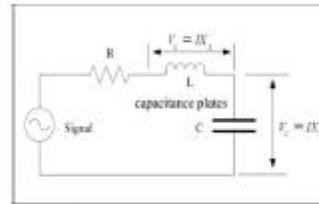


Fig. 2 series LC resonant.



Fig. 3 the radio frequency equipment system.

2.1.2 Measurement Tools

The signal output we using tools Agilent Technology digital storage oscilloscope (Model DSO-X-2002A 70 MHz) by using inductor isolate (Fig.4) measurement signal output. The temperatures were measured using the thermal camera (FLIR TG165 Imaging IR Thermometer). By Emissivity adjustment to the water, in order to be able to measure temperatures accurately.



Fig. 4 using inductor isolate with oscilloscope.

2.1.3 Material

Raw milk used in the experiment, raw milk is stored at a temperature of 4°C, the pH 6.73, total solids 11.02, percent fat 3.1, solids nonfat 7.92, and specific gravity 1.027.

2.2 Experiment

Experiments pasteurized milk by the radio frequency heating system. We use raw milk packaged in glass bottles containing net volume 200 ml, by glass bottle with a diameter of 7 cm and 28 cm high, 3 bottles and net volume total 600 ml. We are pasteurized at each three bottles. Preparing the system for radio frequency heat. Then take raw milk is packaged in glass bottles, put down in between the heating plates in Fig 5, the distance between the plates 8 cm. And on the radio frequency heating system 3 minute.



Fig 5 bottles put down in between the heating plates

$$\Delta T = \frac{1}{C_p} P_d \Delta t \quad (2)$$

By $C_p = 0.214 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, $\rho = 3.962 \text{ kg.m}^{-3}$, $\epsilon'' = 173$, frequency at 40 MHz and voltage output 7 kV. These values are set in CST EM STUDIO, and simulate monitor E-Field and Power loss in (Fig 6, 7)

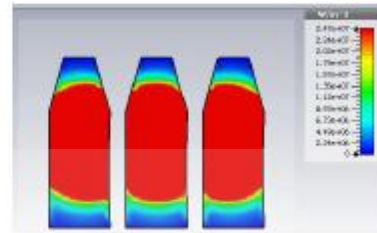


Fig. 6 Power loss density of two port signal input in lossy medium

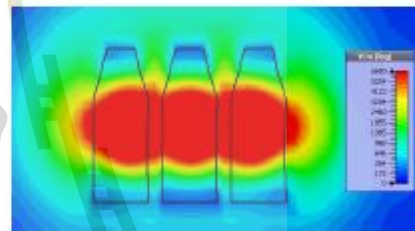


Fig. 7 E-Field distribution between the plate and the raw milk.

3. ANALYSIS AND RESULT

3.1 Simulation result

Principles of radio frequency and microwave heating. Dielectric materials, such as most agricultural products, can store part of the electric energy and convert the other part into heat in an electromagnetic field created by a RF or microwave system. The increase in temperature of a material as a result of the absorbed electromagnetic energy can be expressed by Nelson (1996)

$$\rho C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = 5.563 \times 10^{-11} f E^2 \epsilon'' \quad (1)$$

Where C_p is the specific heat of the material ($\text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$), ρ is the density of the material (kg.m^{-3}), E is the electric field intensity (V.m^{-1}), f is the frequency (Hz), ϵ'' is the dielectric loss factor of the material, Δt is the time duration (s) and ΔT is the temperature rise in the material (°C). The power absorbed per unit mass: P_d ($\text{W} \times \text{m}^{-3}$) described indicates the power which spread in the lossy medium and can calculate the temperature increasing by following equation (2).

Figure 6 shows the power loss density of two port signal input in the lossy medium. Power loss density maximum $2.47 \times 10^7 \text{ W/m}^3$, this value would imply a lossy of raw milk to the temperature increasing. Notice that the header area and the bottle are less lossy, because depending on the input signal port.

Figure 7 shows Field distribution between the plate and the raw milk. Since we designed an electric field plate. As a result, the distribution of the electric field is almost equal and the temperature inside the bottle is equal to all.

3.2 Experiment result

The results from the radio frequency heating system we designed. We can check that the system is designed, by check signal oscilloscope in (Fig. 8).

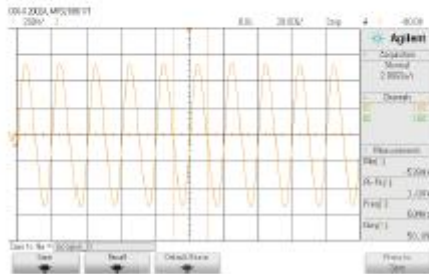


Fig. 8 Signal from the coil isolate by connected to measurement oscilloscope

Fig. 8 show that the signal output from electronics circuit, we have designed for using radio frequency heating wine by using inductor isolate. Because signal cannot be measured directly, measurement cannot withstand voltage 7000 Volts. Signal frequency 50MHz but we designed circuit series LC resonant, matching resonant the frequency at 40 MHz. Because of the calculation of the capacitors that we did not take into account gap air between bottle. But our system can work, and we adjusting the inductance matching at frequency 40 MHz in (Fig. 9)

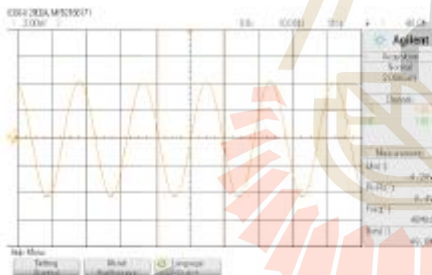


Fig. 9 Signal from the coil isolate by adjusting the inductance matching at frequency 40 MHz

The experimental radio frequency heating system for 2 minutes. Thermometer with the thermal camera in (Fig. 10), and stored at temperatures below 4°C. To extend the shelf life of pasteurized milk a longer time.

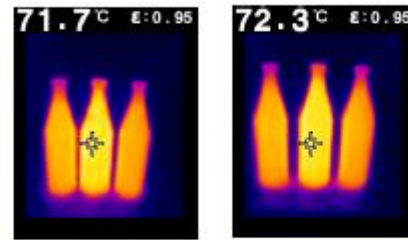


Fig. 10 The temperature of the thermal camera

The thermal from the radio frequency heat at 72°C all the same temperature inside the bottle. Suggests that pathogenic microbes are destroyed by thermal, and the temperature at 71.7 ° C a temperature standard pasteurization. Which appear to radio frequency heat systems we design can be used in pasteurization. In terms of heating, because of the radio frequency heating, the energy savings than heating a heat exchanger.

4. CONCLUSIONS

The proposed system is realized and experimentally examined. In the simulation and measurement results, it is found that the temperature of milk would be increased about 72.3C, the process will take approximately 2 minutes. Which the temperature of 71.7°C, it will be microbial inactivation in milk and extended the shelf life of milk. The advantage of the principle of radio frequency heating is that it can be applied to microbial inactivation in milk pasteurization. The radio frequency heating energy efficient than heat transfer. In the future, this principle is being developed to be used more in pasteurization industry and drying industry.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Suranaree University of Technology (SUT) and by the Office of the Higher Education under NRU project of Thailand.

REFERENCES

- Nelson, S. O. Dielectric properties of agricultural products Measurements and Applications, IEEE Trans. Elect. Insul., Vol.26, pp. 845-869, 1991.
- Nelson, S. O., and Stetson, L. E. Comparative Effectiveness of 39- and 2450-MHz Electric Fields for Control of Rice Weevils in Wheat, J. Econ. Entomol., Vol. 67, No. 5, pp. 592-595, 1974.
- Nelson, S. O., and Payne, J. A., RF dielectric heating for pecan weevil control, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, vol. 31, pp. 456-458, 1982.

Nelson, S. O., Insect-control Studies with Microwaves and Other Radio-frequency Energy, *Bul. Entomol. Soc. Amer.*, Vol. 19, No. 3, pp. 157-163, 1973.
 Aoi, S., Interaction between mechanical engineering and environmental engineering Part 1, *J. of Kyoto Univ.*, vol. 1, no. 5, pp. 204-215, 1999a.

G.B. Awuah et al, Inactivation of Escherichia coli K-12 and Listeria innocua in milk using radio frequency (RF) heating, *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 6, pp. 396-402, 2005.

E. Bhuvanawari, C. Anandharamakrishnan, Heat transfer analysis of pasteurization of bottled beer in a tunnel pasteurizer using computational fluid dynamics, *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 23 pp.156-163, 2014.

Modi, A., Prajapat R., Pasteurization Process Energy Optimization for a Milk Dairy Plant by Energy Audit Approach, *International journal of scientific & technology research* 3, issue 6, June 2014.

PHOTOS AND INFORMATION

	<p>Charnon Srisuma received the B.E. (2013) degrees in Electronic engineering from Suranaree University of Technology. He studying master's degree in electronic engineering at Suranaree University of Technology, Thailand. Research interests include RF high power and high power self-oscillator, microwave circuit and RF circuit design.</p>
	<p>Samran Santalunai received the B.S. and M.S. degrees in telecommunication engineering from Suranaree University of Technology in 2007 and 2009, respectively. Research interests include wireless power transfer, induction heating and RF circuit design.</p>
	<p>Thanaset Thosdeekoraphat received the B.S. and M.S. degrees in Telecommunication engineering from Suranaree University of Technology in 2006 and 2008, respectively. Ph.D. in Telecommunication engineering (2013), Suranaree University of</p>

Technology, Thailand. At present Lecturer, School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand. Research interests include hyperthermia inductive heating, magnetic shielding system, RF and microwave circuit design, microwave heating, antenna, active antenna and UWB transmitter-receiver design and analysis of impulse signal for UWB communication system. In addition, as a reviewer of the International Journal of Antennas and Propagation.



Chanchai Thongsopa received B.Eng (1st Hons) Electronics Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTT), Thailand, M.Eng. (Electrical and Communications Engineering), Kasetsart University, Thailand and D.Eng. (Electrical Engineering), King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTT), Thailand in 1992, 1996 and 2002, respectively. Experiences & Expert are RF circuit design, active antenna, Microwave heating application in 1992-1997. Researcher at Aeronautical Radio of Thailand Company Design Systems Air Traffic control: Design transmitters VHF-UHF (AM) 25W (on 24 Hour) and Design Transmitters HF (AM) 1KW (on 24 Hour). Furthermore, Researcher at National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) and consultant of SDH project at Telephone Organization of Thailand (TOT) design RF circuit in 1997-2000.

ประวัติผู้เขียน

นายชานนท์ ศรีสุมา เกิดวันที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2534 ที่อำเภออุ้มทอง จังหวัดสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนสระยายโสมวิทยาลัย อำเภออุ้มทอง จังหวัดสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนอุ้มทอง อำเภออุ้มทอง จังหวัดสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์) จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2557 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

