



รายงานการวิจัย

ออกแบบสร้างเครื่องกำจัดมอดในเมล็ดธัญพืชสำหรับเกษตรกรและ
อุตสาหกรรมเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์รวมถึงการส่งออก
ด้วยคลื่นความถี่วิทยุเพื่อทดแทนการใช้สารเคมี
(Design of radio frequency for eliminate whole grains
weevil for storage and export industry
to substitute of chemicals)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รายงานการวิจัย

ออกแบบสร้างเครื่องกำจัดมอดในเมล็ดธัญพืชสำหรับเกษตรกรและ
อุตสาหกรรมเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์รวมถึงการส่งออก
ด้วยคลื่นความถี่วิทยุเพื่อทดแทนการใช้สารเคมี
(Design of radio frequency for eliminate whole grains
weevil for storage and export industry
to substitute of chemicals)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อาจารย์ ดร.สำราญ สันทาลุนัย

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2562

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

การประดิษฐ์คิดค้นนี้ได้นำเสนอวิธีการกำจัดมอดในเมล็ดธัญพืชสำหรับเกษตรกรและอุตสาหกรรมการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์รวมถึงการส่งออกด้วยคลื่นความถี่วิทยุเพื่อทดแทนการใช้สารเคมี ซึ่งเป็นการพัฒนาและประยุกต์การออกแบบระบบโดยใช้เทคโนโลยีการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นความถี่วิทยุทดแทนการใช้สารเคมีสำหรับการกำจัดมอดในเมล็ดธัญพืช ซึ่งการฆ่ามอดด้วยหลักการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกนี้จะไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและผู้บริโภค เนื่องจากระบบดังกล่าวที่ใช้เทคนิคการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกนั้นไม่มีการใช้สารเคมีใด ๆ ทั้งสิ้น โดยเครื่องต้นแบบการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกสำหรับกำจัดมอดในเมล็ดธัญพืช ทำการออกแบบสร้างเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริกต้นแบบสำหรับกำจัดมอดในเมล็ดธัญพืชสำหรับเกษตรกรและอุตสาหกรรมการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์โดยไม่ทำให้เมล็ดธัญพืชเกิดความเสียหาย เพื่อการนำมาทดแทนการใช้สารเคมีในการกำจัดมอดในเมล็ดธัญพืช ในปัจจุบัน ซึ่งการทดสอบให้ความร้อนไดอิเล็กตริกพบว่ากำจัดมอดในเมล็ดธัญพืชมีอัตราการตาย 100% และอุณหภูมิสูงสุดของข้าวเมล็ดธัญพืช เท่ากับประมาณ 55 องศาเซลเซียส เมื่อตรวจสอบคุณลักษณะของเมล็ดธัญพืช แล้วไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ ดังนั้นสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมเป็นอย่างมากต่อไป

Abstract

This invention has presented a method to eliminate whole grains weevil for agriculturists and seed storage industry include export with radio frequency to replace using chemicals. Which is the development and application to system design by using dielectric heating technology with radio frequency to replace using chemicals in eliminate whole grains weevil. The eliminates whole grains weevil with the principle of dielectric heating this method does not harm consumers and the environment because using the dielectric heating technique does not use any chemicals at all. By prototype machine the dielectric heating for eliminating whole grains weevil. Designed to build a dielectric heating machine with radio frequency at 42 MHz for eliminating whole grains weevil this machine designed for agriculturists and seed storage industry without damaging the seed to replace using chemicals at present. The dielectric heating test found that can eliminate whole grains weevil has a 100% mortality, and the maximum temperature of the seed equal to 60 °C. When checking characteristics of the seed no quality losses. Therefore, it can be used to benefit a lot in the industry.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2562 ทางคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

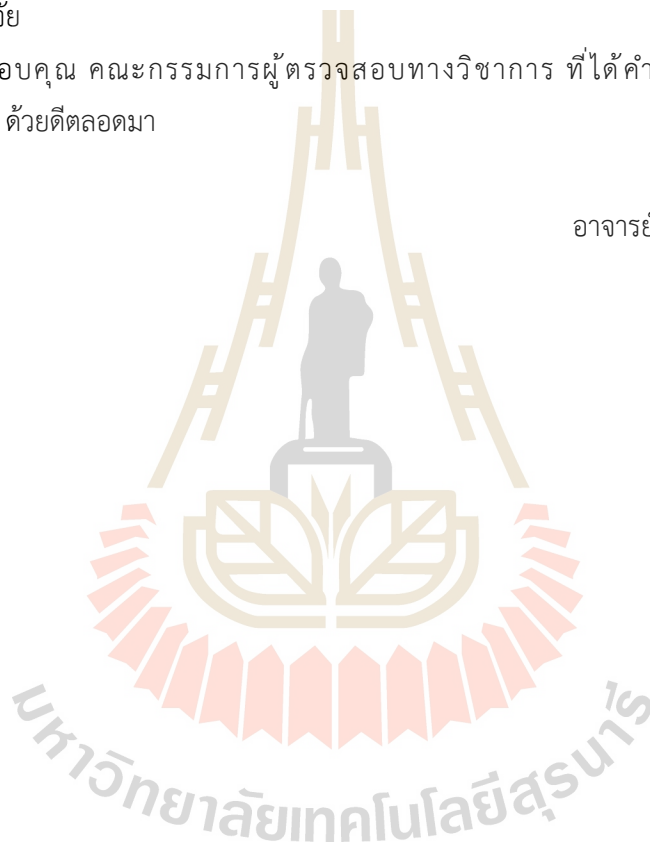
ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและสถานที่สำหรับการทดสอบงานวิจัย

ขอขอบคุณ คณะกรรมการผู้ตรวจสอบทางวิชาการ ที่ได้คำแนะนำข้อเสนอแนะต่อคณะผู้วิจัย ด้วยดีตลอดมา

อาจารย์ ดร.สำราญ สันทาลุนย์

หัวหน้าโครงการวิจัย



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปรีทศวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ปรีทศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1.1 การให้ความร้อนไดโอดีเลกทริก.....	5
2.1.2 การกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการให้ความร้อน กับไดโอดีเลกทริก.....	10
2.1.3 แหล่งจ่ายกำลังงานสำหรับให้ความร้อนไดโอดีเลกทริก.....	12
2.2 ทฤษฎีการให้ความร้อนไดโอดีเลกทริก.....	12
2.2.1 คุณสมบัติของไดโอดีเลกทริก.....	12
2.2.2 พื้นฐานและกลไกการให้ความร้อนของไดโอดีเลกทริก.....	15
2.2.3 หลักการพื้นฐานของการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าในแผ่นเพลต.....	19
2.3 สรุป.....	20
3 การออกแบบเครื่องให้ความร้อนไดโอดีเลกทริกสำหรับฆ่ามอดฆ่ามอดในถั่ว เขียวและข้าวโพด	21
3.1 การวิเคราะห์การให้ความร้อนไดโอดีเลกทริกสำหรับฆ่ามอด.....	21
3.1.1 การวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนแก่วัสดุไดโอดีเลกทริก.....	23
3.1.2 การวิเคราะห์พลังงานที่เกิดขึ้นในมอดข้าวโพดและมอดถั่วเขียว.....	23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.3 การพิจารณาพลังงานและความถี่ที่เหมาะสมต่ออัตราการเกิด ความร้อนในมอด.....	25
3.2 การวิเคราะห์และออกแบบวงจรภาคการให้ความร้อนไดโอดีลิก สำหรับการฆ่ามอดในข้าวโพดและในถั่วเขียวในภาชนะบรรจุขนาด 5 กิโลกรัม.....	26
3.2.1 การวิเคราะห์การให้ความร้อนไดโอดีลิก.....	27
3.2.2 การออกแบบเครื่องการให้ความร้อนไดโอดีลิกสำหรับการ ฆ่ามอดในข้าวโพดและในถั่วเขียวในภาชนะบรรจุขนาด 5 กิโลกรัม.....	33
3.4 สรุป.....	45
4 อุปกรณ์และวิธีการวัดและทดสอบผล.....	46
4.1 อุปกรณ์.....	46
4.2 วิธีการ.....	48
4.3 สถานที่ทำการวิจัย.....	49
5 การทดสอบและผลการทดสอบการให้ความร้อนแก่ไดโอดีลิก.....	50
5.1 กล่าวนำ.....	50
5.2 การทดสอบการให้ความร้อนไดโอดีลิกสำหรับการ ฆ่ามอดในข้าวโพดและในถั่วเขียวในภาชนะบรรจุขนาด 5 กิโลกรัม.....	50
5.3 ผลการวัดความร้อนที่จุดต่างๆ และอัตราการตายของมอด.....	59
5.4 สรุป.....	90
6 สรุป ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	91
6.1 สรุป.....	91
6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	91
เอกสารอ้างอิง.....	92
ภาคผนวก.....	97
คุณสมบัติเฉพาะของเครื่องให้ความร้อนไดโอดีลิกสำหรับฆ่ามอดข้าว.....	97
ประวัตินักวิจัย.....	107

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การให้ความร้อนไดอิเล็กทริกย่านความถี่วิทยุและย่านความถี่ไมโครเวฟกับ มอดข้าวสาธิตมีอัตราการตายที่ 99-100%	8
2.2 การกำจัดตัวงวงข้าว ที่อุณหภูมิ 50 °C ณ เวลาต่าง ๆ เพื่อดูอัตราการตาย	10
3.1 ค่าความหนาแน่นของกำลังงานที่สามารถทำให้มอดข้าวตาย ณ เวลาใด ๆ	24
3.2 ค่าความความเข้มของสนามไฟฟ้าที่สามารถทำให้มอดข้าวตาย ณ เวลาใด ๆ	25
5.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิ (°C) ที่เวลา 20 วินาที โดยใช้ข้าวโพด.....	59
5.2 ผลการทดสอบอุณหภูมิ (°C) ที่เวลา 40 วินาที โดยใช้ข้าวโพด.....	64
5.3 ผลการทดสอบอุณหภูมิ (°C) ที่เวลา 60 วินาที โดยใช้ข้าวโพด.....	68
5.4 ผลการทดสอบอุณหภูมิ (°C) ที่เวลา 20 วินาที โดยใช้ถั่วเขียว.....	72
5.5 ผลการทดสอบอุณหภูมิ (°C) ที่เวลา 40 วินาที โดยใช้ถั่วเขียว.....	76
5.6 ผลการทดสอบอุณหภูมิ (°C) ที่เวลา 60 วินาที โดยใช้ถั่วเขียว.....	80
5.7 ผลการทดสอบอัตราการตาย (ร้อยละ) ณ อุณหภูมิข้าวโพดประมาณ 45 องศาเซลเซียส.....	85
5.8 ผลการทดสอบอัตราการตาย (ร้อยละ) ณ อุณหภูมิข้าวโพดประมาณ 50 องศาเซลเซียส.....	86
5.9 ผลการทดสอบอัตราการตาย (ร้อยละ) ณ อุณหภูมิข้าวโพดประมาณ 60 องศาเซลเซียส.....	87
5.10 ผลการทดสอบอัตราการตาย (ร้อยละ) ณ อุณหภูมิข้าวโพดประมาณ 45 องศาเซลเซียส.....	88
5.11 ผลการทดสอบอัตราการตาย (ร้อยละ) ณ อุณหภูมิถั่วเขียวประมาณ 50 องศาเซลเซียส.....	89
5.12 ผลการทดสอบอัตราการตาย (ร้อยละ) ณ อุณหภูมิถั่วเขียวประมาณ 60 องศาเซลเซียส.....	90

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	การกีดกันของมอดในข้าวโพด.....	2
1.2	การกีดกันของมอดในถั่วเขียว.....	2
2.1	การเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าและไดโพล เนื่องจากคลื่นสนามไฟฟ้า.....	7
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริก กับความถี่ของมอดข้าวและข้าวสาลี.....	9
2.3	การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า.....	11
2.4	การประยุกต์ใช้งานกับแผ่นเพลตที่มีลักษณะเป็นวงกลม.....	11
2.5	การประยุกต์ใช้งานกับแผ่นเพลตที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	11
2.6	หลอดแมกนีตรอนที่ใช้เป็นแหล่งกำลังงานสำหรับให้ความร้อนกับไดอิเล็กตริก.....	12
2.7	อะตอมระหว่างประจุบวกต่อประจุลบของตัวกลางไดอิเล็กตริก.....	16
2.8	รูปแบบตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต.....	19
3.1	บล็อกไดอะแกรมให้ความร้อนไดอิเล็กตริกสำหรับกำจัดมอดข้าวโพดและถั่วเขียว.....	22
3.2	วงจรเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริกสำหรับกำจัดมอดข้าวโพดและถั่วเขียว.....	22
3.3	จำนวนจุดป้อนกำลังงานและผลการจำลอง.....	28
3.4	จำนวนจุดป้อนกำลังงานและผลการจำลองแบบ 2 จุด แนวนอน.....	29
3.5	จำนวนจุดป้อนกำลังงานและผลการจำลองแบบ 2 จุด แนวตั้ง.....	30
3.6	จำนวนจุดป้อนกำลังงานและผลการจำลองแบบ 4 จุด.....	31
3.7	ผลการจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่ดีที่สุดที่สามารถ กำจัดมอดได้เต็มพื้นที่วัสดุไดอิเล็กตริก.....	32
3.8	ขนาดโครงสร้างเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริก.....	33
3.9	ขนาดโครงสร้างเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริก (ต่อ).....	34
3.10	รูปจำลองเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริกที่ทำการออกแบบ.....	35
3.11	รูปจำลองเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริกที่ทำการออกแบบ (ต่อ).....	36
3.12	โครงสร้างให้ความร้อนไดอิเล็กตริกสำหรับการฆ่ามอดที่สร้างขึ้นตามขนาดที่ออกแบบ.....	36
3.13	รูปแบบการวางแหล่งจ่ายกำลังงานเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริก สำหรับฆ่ามอดในข้าวโพดและถั่วเขียว.....	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 ระบบจ่ายกำลังงานสูงที่ติดตั้งแล้ว.....	39
3.15 รูปแบบการวางระบบกำเนิดสัญญาณกำลังงานสูงของเครื่องให้ความร้อน ไดอิเล็กทริกสำหรับหม้ออบในข้าวโพดและมอดในถั่วเขียว.....	40
3.16 การติดตั้งชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุกำลังสูง.....	41
3.17 รูปแบบการวางแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องให้ความร้อน ไดอิเล็กทริกสำหรับหม้ออบข้าวโพดและมอดในถั่วเขียว.....	42
3.18 การติดตั้งแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ตามที่ย่อแบบ.....	43
3.19 โครงสร้างเครื่องกำจัดมอดในเมล็ดธัญพืชสำหรับเกษตรกรและอุตสาหกรรม การเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์รวมถึงการส่งออกด้วยคลื่นความถี่วิทยุเพื่อ ทดแทนการใช้สารเคมี.....	44
4.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล.....	47
4.2 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม.....	47
4.3 เครื่องวิเคราะห์โครมเข้า.....	47
4.4 เครื่องวัดกำลัง.....	48
4.5 กล้องถ่ายภาพความร้อน.....	48
5.1 การวางกล่องที่บรรจุข้าวโพดหรือถั่วเขียวเพื่อทำการทดสอบ.....	51
5.2 การเตรียมกล่องบรรจุข้าวโพดหรือถั่วเขียวเพื่อทำการทดสอบ.....	52
5.3 การวัดอุณหภูมิ.....	53
5.4 ถุงผ้าที่ใช้สำหรับใส่หม้ออบเพื่อทำการทดสอบ.....	54
5.5 ตำแหน่งการวางถุงผ้าที่ใส่หม้ออบสำหรับการทดสอบ.....	55
5.6 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายนอกกล่องที่บรรจุเพื่อการทดสอบ.....	56
5.7 รูปแบบการวางกล่องเพื่อทำการทดสอบ.....	57
5.8 ภาพถ่ายความร้อนแบบปกติทดสอบอุณหภูมิเป็นเวลา 20 วินาที.....	62
5.9 ภาพถ่ายความร้อนแบบกลับกล่องทดสอบอุณหภูมิ 20 วินาที.....	63
5.10 ภาพถ่ายความร้อนแบบปกติทดสอบอุณหภูมิเป็นเวลา 40 วินาที.....	66
5.11 ภาพถ่ายความร้อนแบบกลับกล่องทดสอบอุณหภูมิ 40 วินาที.....	67
5.12 ภาพถ่ายความร้อนแบบปกติทดสอบอุณหภูมิเป็นเวลา 60 วินาที.....	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.13 ภาพถ่ายความร้อนแบบกลับกล้องทดสอบอุณหภูมิ 60 วินาที.....	71
5.14 ภาพถ่ายความร้อนแบบปกติทดสอบอุณหภูมิเป็นเวลา 20 วินาที.....	74
5.15 ภาพถ่ายความร้อนแบบกลับกล้องทดสอบอุณหภูมิ 20 วินาที.....	75
5.16 ภาพถ่ายความร้อนแบบปกติทดสอบอุณหภูมิเป็นเวลา 40 วินาที.....	78
5.17 ภาพถ่ายความร้อนแบบกลับกล้องทดสอบอุณหภูมิ 40 วินาที.....	79
5.18 ภาพถ่ายความร้อนแบบปกติทดสอบอุณหภูมิเป็นเวลา 60 วินาที.....	82
5.19 ภาพถ่ายความร้อนแบบกลับกล้องทดสอบอุณหภูมิ 60 วินาที.....	83



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบัน ข้าวโพดและถั่วเขียวเป็นพืชผลทางการเกษตรและเศรษฐกิจที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศไทย จากสถิติการปลูกข้าวโพดและถั่วเขียวในประเทศไทยประจำปี 2561 พบว่า ข้าวโพดมีพื้นที่เพาะปลูก 7.03 ล้านไร่ ผลผลิต 4.62 ล้านตันต่อปี คิดเป็นมูลค่ารวมประมาณ 8 หมื่นล้านบาท ต่อปี ผลิตร้อยละ 95 ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ การบริโภคในประเทศ และการส่งออก[กระทรวงเกษตร] ถั่วเขียวมีพื้นที่เพาะปลูก 868,833 ไร่ ผลผลิต 109,871 ตัน คิดเป็นมูลค่ารวมประมาณ 3 พันล้านบาทต่อปี โดยหลังจากการเก็บเกี่ยวเมื่อเก็บเกี่ยวผลผลิตเกษตรกรหรือผู้รับซื้อต้องเก็บไว้เพื่อรอจำหน่ายหรือใช้ประโยชน์อื่นๆ ซึ่งระยะเวลาการเก็บผลผลิตไว้ไม่แน่นอน ซึ่งถ้าเกิดการเก็บรักษาเป็นเวลานาน ทำให้เกิดปัญหาตามมาคือ มอดและแมลงต่างๆ มากัดกินและวางไข่ในเมล็ดข้าวโพดและถั่วเขียวที่เก็บไว้ทำให้เกิดความเสียหาย ซึ่งส่งผลกระทบต่อเกษตรกรและผู้รับซื้อเป็นอย่างมาก หนึ่งในตัวการสำคัญที่กัดกินทำให้เกิดความเสียหายมากที่สุดคือมอด มอดมีหลายชนิดตามสภาพสิ่งแวดล้อมและอาหารของมัน โดยตัวมอดที่พบมากที่สุดในการปลูกข้าวโพด คือ ตัวงวงข้าวโพด (Corn weevil, Maize weevil) ซึ่งตัวงวงข้าวโพดเป็นแมลงศัตรูสำคัญที่สุดของเมล็ดธัญพืชทั้งที่ใช้ทำพันธุ์หรือเพื่อการบริโภค เข้าทำลายร่วมกับตัวงวงข้าว ตัวงวงข้าวโพดสามารถบินได้ไกลและแข็งแรงกว่าตัวงวงข้าว ทำให้ระบาดไปในที่ต่างๆ ได้รวดเร็วเมล็ดพันธุ์ที่เก็บนาน 6 เดือน จะได้รับความเสียหายสูงถึง 22% ทำให้นำไปใช้ประโยชน์ต่อไม่ได้ พบเข้าทำลายข้าวโพดตั้งแต่อยู่ในไร่ เข้าทำลายเมล็ดธัญพืชทุกชนิด ได้แก่ ข้าว ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ข้าวสาลี ข้าวโอ๊ต ข้าวบาร์เลย์ และเมล็ดพืชชนิดอื่นๆ และในถั่วเขียว คือ ตัวงวงถั่วเขียว , ตัวงวงเมล็ด (four-spotted bean weevil , cowpea weevil) ซึ่งตัวงวงถั่วเขียว จะเจาะเข้ากินทำลายฝักถั่วในระยะที่ถั่วเริ่มโตเต็มที่โดยจะวางไข่มีสีขาวติดอยู่ที่ผิวเมล็ด เมื่อฝักเป็นตัวหนอนแล้วจะเข้าไปกัดกินภายในเมล็ดจนเป็นโพรงจากนั้นเมื่อเป็นตัวเต็มวัยจะเจาะออกมาจากเมล็ด แสดงดังรูปที่ 1.1 และ รูปที่ 2.2



รูปที่ 1.1 การกักกินของมอดในข้าวโพด



รูปที่ 1.2 การกักกินของมอดในถั่วเขียว

จากปัญหาการกักกินทำลายของมอดในข้าวโพดและถั่วเขียวนั้น ทำให้ผู้วิจัย ศึกษาหาวิธีการในการกำจัดมอดในข้าวโพดและถั่วเขียวหลังจากการเก็บเกี่ยว ซึ่งพบว่า การให้ความร้อนเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดมอด โดยเฉพาะอย่างยิ่งแหล่งพลังงานความร้อนจากการใช้คลื่นความถี่วิทยุและไมโครเวฟ เนื่องจากคลื่นความถี่วิทยุและไมโครเวฟนั้นจะไปทำให้วัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุล

แบบมีขั้วและสามารถทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้อย่างรวดเร็ว รวมทั้งสามารถประยุกต์ใช้การให้ความร้อนได้อิเล็กทรอนิกส์กับสิ่งมีชีวิตหรือศัตรูพืชต่าง ๆ ในภาคการเกษตรได้ เช่น แมลงศัตรูพืช มอดข้าวหรือหนอนต่าง ๆ ที่ฝังตัวและหลบซ่อนอยู่ภายในผลิตผลหรือเมล็ดพืช เพื่อฆ่าหรือขับไล่ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากโครงสร้างของสิ่งมีชีวิตดังกล่าวมีของเหลวหรือมีโครงสร้างโมเลกุลที่สามารถเหนี่ยวนำคลื่นความถี่วิทยุให้เกิดเป็นความร้อนได้ ซึ่งปัจจุบันการฆ่าหรือขับไล่มอดหรือหนอนต่าง ๆ ที่อยู่ในเมล็ดธัญพืชนั้นยังคงต้องใช้สารเคมี ซึ่งเป็นอันตราย ดังนั้นทำให้คณะผู้วิจัยสนใจ ศึกษา ออกแบบและสร้างระบบเครื่องให้ความร้อนได้อิเล็กทรอนิกส์ด้วยความถี่วิทยุ (RADIO FREQUENCY HEATING)

สำหรับฆ่ามอดข้าวโพดและถั่วเขียวด้วยตัวปล่อยคลื่นแบบแผ่นเพลตขนาดใหญ่เพื่อการฆ่ามอดในข้าวโพดและถั่วเขียว ส่งผลให้เก็บผลิตผลได้นานขึ้นสามารถชะลอการบริโภคนในประเทศหรือส่งออกโดยไม่ใช้สารเคมี อีกทั้งยังใช้ได้กับศัตรูพืชอื่น ๆ ธัญพืช หรือผลไม้ที่ใช้สำหรับการอบแห้ง ได้อีกหลายชนิด เนื่องจากสามารถออกแบบให้ปรับเปลี่ยนความถี่ให้มีความเหมาะสมกับได้อิเล็กทรอนิกส์แต่ละชนิดได้และยังได้เทคโนโลยีใหม่สำหรับการใช้งานที่ประหยัด ใช้งานได้ง่าย สะดวก เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งโครงการนี้จะเป็นโครงการที่สามารถออกแบบระบบการฆ่ามอดข้าวโพดและถั่วเขียวที่มีความเหมาะสมและครอบคลุมกระบวนการจัดการมอดสำหรับของผู้ประกอบไทยอย่างยั่งยืน

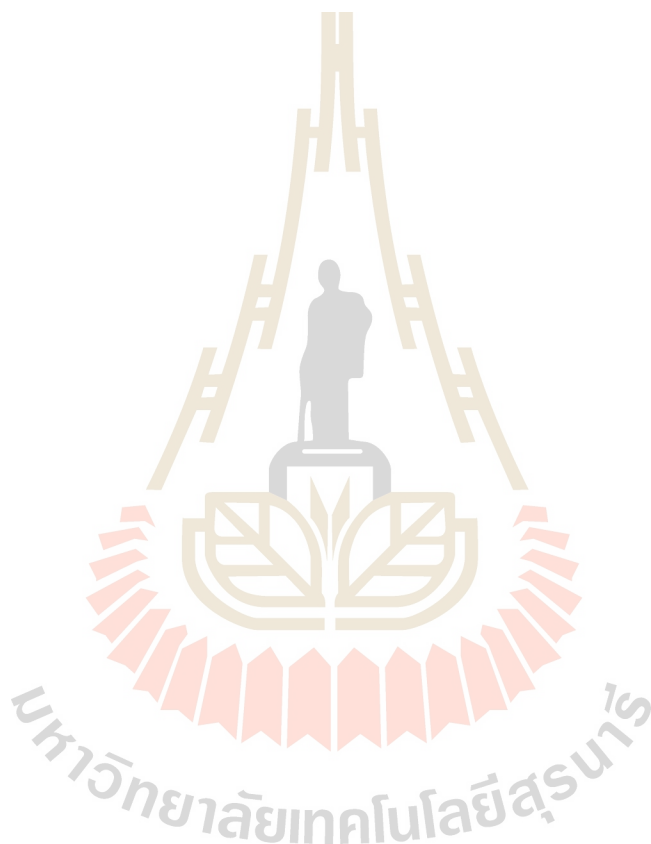
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบได้อิเล็กทรอนิกส์ด้วยความถี่วิทยุโดยใช้ตัวปล่อยคลื่นแบบแผ่นเพลตสำหรับฆ่ามอดข้าวโพดและถั่วเขียว เพื่อการเก็บรักษาก่อนการนำไปบริโภคและการส่งออก โดยมีการออกแบบให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งานเพื่อความสะดวกและง่ายต่อการฆ่ามอดและการนำไปเก็บรักษา ซึ่งไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อเมล็ดพืช และเป็นกรนำมาทดแทนการใช้สารเคมีในการฆ่ามอดในปัจจุบัน

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้รูปแบบและเทคนิคการให้ความร้อนได้อิเล็กทรอนิกส์ด้วยความถี่วิทยุที่สามารถนำไปฆ่ามอดข้าวโพดและถั่วเขียวในอุตสาหกรรมเกษตร ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่ใช้สารเคมีและไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของข้าวโพดและถั่วเขียว พร้อมทั้งมีการทดสอบการให้ความร้อนได้อิเล็กทรอนิกส์กับมอดข้าวโพดและถั่วเขียวรวมถึงอัตราการตายของมอดและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในข้าวโพดและถั่วเขียวเพื่อหาความสัมพันธ์เป็นเงื่อนไขการทำงานของระบบฆ่ามอดและแมลงให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดของระบบ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับการไล่หรือควบคุมแมลงที่จะเข้ามาทำลายผลิตผลทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายในวงกว้าง

โดยวิธีการสร้างเพลตหรือตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าเข้าไปกำจัดแมลงในระบบของการจัดเก็บขนาดใหญ่ ส่งผลให้เก็บผลิตผลได้นานขึ้นสามารถชะลอการส่งออกได้โดยไม่ใช้สารเคมี อีกทั้งยังใช้ได้กับศัตรูพืชอื่น ๆ ธัญพืช หรือผลไม้ที่ใช้สำหรับการอบแห้ง ได้อีกหลายชนิด เนื่องจากสามารถออกแบบให้ปรับเปลี่ยนความถี่ให้มีความเหมาะสมกับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกแต่ละชนิด และยังได้เทคโนโลยีใหม่สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตรที่ประหยัด ใช้งานได้ง่าย สะดวก เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การให้ความร้อนไดอิเล็กตริกกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนเฉพาะวัสดุที่มีการตอบสนองต่อความถี่ที่ใช้งานเท่านั้น จึงทำให้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงและประหยัดพลังงาน ซึ่งได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างวงจร รวมถึงรูปแบบการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกในรูปแบบวิธีต่าง ๆ เพื่อให้สามารถใช้งานได้เหมาะสมกับการใช้ประโยชน์จากแหล่งพลังงานได้ดีที่สุด ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงแนวทางและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลการดำเนินการวิจัย ตลอดจนปัญหาและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อนำไปสู่วัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้ จึงได้มีการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาและอาศัยฐานข้อมูลที่มีอยู่ ซึ่งฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนี้เป็นฐานข้อมูลที่มีชื่อเสียงและได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เช่น ฐานข้อมูล IEEE นอกจากนี้ยังได้มีการสืบค้นงานวิจัยจากแหล่งอื่น ๆ เช่น จากเครือข่ายอินเทอร์เน็ต จากห้องสมุดของมหาวิทยาลัยต่าง ๆ โดยจากผลการสืบค้นที่ได้นั้นจะใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการให้ความร้อนไดอิเล็กตริก รูปแบบแหล่งจ่ายกำลังงานและลักษณะการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกซึ่งได้รวบรวมข้อมูลที่ได้ มาวิเคราะห์และออกแบบลักษณะการให้ความร้อนกับวัสดุไดอิเล็กตริกให้มีความเหมาะสมและให้มีประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุด โดยผลที่ได้จากการศึกษาข้อมูลมีดังหัวข้อต่อไปนี้

2.1 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การให้ความร้อนไดอิเล็กตริก

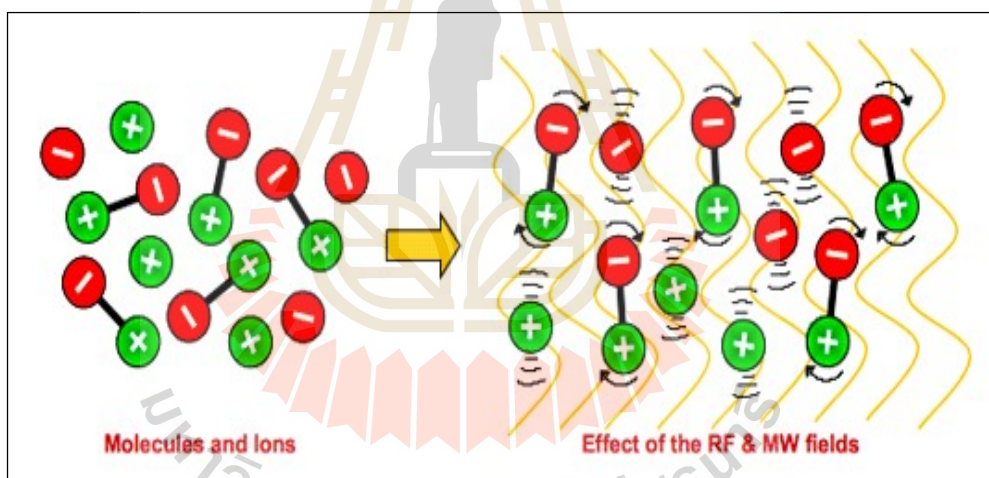
ปรากฏการณ์การให้ความร้อนด้วยเทคโนโลยีด้านการใช้ประโยชน์จากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า นับได้ว่าเป็นหัวข้อที่สำคัญในการวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และทางวิศวกรรม ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาการให้ความร้อนในรูปแบบต่าง ๆ หลายประเภท เช่น การให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ (Induction Heating) (Sarnago et al, 2013) เป็นการให้พลังงานความร้อนโดยอาศัยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เกิดจากขดลวดเหนี่ยวนำ และสนามแม่เหล็กนี้จะเหนี่ยวนำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นงาน ซึ่งกระแสส่วนมากจะไหลผ่านชั้นงานในระดับความลึกผิว (Skin Depth) และกระแสที่ไหลวนรอบชิ้นงานนี้จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่บริเวณผิวของชิ้นงาน ความร้อนนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่เหนี่ยวนำ และความต้านทานสมมูลทางเส้นทางที่กระแส

ไหลผ่าน และความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปบริเวณอื่น โดยการนำความร้อน การพาความร้อน และสำหรับอีกรูปแบบหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน นั่นคือ การให้ความร้อนไดอิเล็กตริก เป็นรูปแบบการให้ความร้อนโดยตรงไปยังวัสดุที่เป็นไดอิเล็กตริกที่มีความเหมาะสมต่อช่วงความถี่ใช้งานและทำให้ไม่กระทบต่อวัสดุอื่น ๆ โดยโครงสร้างของการให้ความร้อนไดอิเล็กตริก ใช้หลักการนำคลื่นความถี่มาประยุกต์ใช้ในรูปแบบของสนามไฟฟ้าเพื่อส่งผ่านกำลังงานเข้าไปในตัวกลางวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสีย การให้ความร้อนไดอิเล็กตริกสามารถใช้หลักการการให้ความร้อนด้วยสนามไฟฟ้าโดยพิจารณาจากการใช้สมการ $D = \epsilon E$ นั่นคือ ค่า ϵ ของวัสดุไดอิเล็กตริกจะมีผลต่อการให้ความร้อนดีที่สุดในสำหรับการให้ความร้อนด้วยสนามไฟฟ้าซึ่งรูปแบบของการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกประกอบด้วย 3 รูปแบบ ดังนี้ (1) การให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นอินฟราเรด (Infrared) (Payne, 1988) ซึ่งเป็นการให้ความร้อนแบบแผ่รังสีโดยอาศัยคลื่นสนามไฟฟ้าความถี่ย่านอินฟราเรด เพื่อให้ความร้อนกับวัสดุไดอิเล็กตริกซึ่งจะสามารถให้ความร้อนได้กับวัสดุที่ต้องการตอบสนองในช่วงคลื่นความถี่อินฟราเรดด้วย (2) การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave heating) (Myungsik et al, 2012) ซึ่งเป็นการให้พลังงานความร้อนโดยการแผ่กระจายคลื่นย่านความถี่ไมโครเวฟ ผ่านเข้าไปในวัสดุที่ต้องการให้ความร้อน โดยวัสดุนั้น ๆ จะต้องมีส่วนประกอบของโมเลกุลของน้ำ หรือโมเลกุลที่มีขั้ว ซึ่งจะดูดซับพลังงานของคลื่นที่ผ่านเข้าไปและเกิดเป็นความร้อนขึ้นได้ และ (3) การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency Heating) (Bayrashev et al, 2002; Granada et al, 2012) ซึ่งกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากสำหรับเทคโนโลยีการให้ความร้อนไดอิเล็กตริก เนื่องจากเป็นช่วงความถี่ที่เหมาะสมกับวัสดุโดยทั่วไป เช่นในกลุ่มของแมลง และสามารถออกแบบวงจรได้ง่าย สามารถออกแบบให้ปรับความถี่เพื่อให้ความถี่ตอบสนองและเหมาะสมกับช่วงความถี่ของวัสดุไดอิเล็กตริกแต่ละชนิดได้ง่าย โดยใช้หลักการให้พลังงานความร้อนโดยการแผ่กระจายคลื่นย่านความถี่วิทยุ ผ่านเข้าไปในวัสดุที่ต้องการให้ความร้อนเช่นเดียวกันกับย่านความถี่ไมโครเวฟ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีความสนใจและได้ศึกษาค้นคว้ารูปแบบการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกในย่านความถี่วิทยุรวมถึงย่านความถี่ไมโครเวฟ

งานวิจัยของรูปแบบการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกย่านความถี่วิทยุและไมโครเวฟที่ผ่านมามีการนำไปใช้ในการถนอมผลไม้ อุตสาหกรรมการอบแห้งและการถนอมอาหาร โดยการใช้หลักการของการกระจายคลื่นความถี่วิทยุและคลื่นไมโครเวฟ เนื่องจากคลื่นความถี่วิทยุและไมโครเวฟนั้น สามารถทำปฏิกิริยากับวัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุล จึงทำให้เกิดการสั่นพ้องของโมเลกุลและสามารถทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุและไมโครเวฟเป็นเทคนิควิธีการให้ความร้อนกับวัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้ว ซึ่งโครงสร้างของการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ใช้หลักการนำคลื่นความถี่มาประยุกต์ใช้เพื่อส่งผ่านกำลังงานเข้าไปในตัวกลางวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสีย การให้ความร้อนไดอิเล็กตริกนั้นเป็นวิธีการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากจะเป็นการสร้างสนามไฟฟ้าสลับระหว่างสองขั้วไฟฟ้า โดยวัสดุที่ต้องการให้ความร้อนนั้น

จะต้องวางหรือลำเลียงอยู่ระหว่างขั้วของตัวปล่อยคลื่น ซึ่งจะทำให้เกิดการสลับขั้วของโมเลกุลในวัสดุ ไดอิเล็กทริกอย่างต่อเนื่อง เพื่อเปลี่ยนทิศทางเข้ากับขั้วตรงข้าม แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนไหวของโมเลกุลเป็นสาเหตุให้วัสดุไดอิเล็กทริกเกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วและทั่วถึง

วัสดุไดอิเล็กทริกสามารถทำให้เกิดความร้อนได้โดยการใช้พลังงานที่มากกระตุ้นที่อยู่ในรูปของ “คลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูง” ซึ่งกลไกของความร้อนที่เกิดขึ้นมาจากสนามไฟฟ้าไปกระตุ้นวัสดุที่มีสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือประจุไฟฟ้าที่อยู่ภายในตัวกลางวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีการสูญเสีย นั้น ๆ จากสภาวะสมดุลทำให้เกิดสภาพเป็นไดโพลที่มีผลต่อสนามไฟฟ้าที่กระตุ้นให้เกิดการโพลาไรซ์ตามทิศทางของสนามไฟฟ้านั้น ซึ่งสนามไฟฟ้าที่กระตุ้นเป็นผลทำให้เกิดการกระจายกำลังงานในรูปของความร้อนภายในตัวกลางวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีการสูญเสีย โดยอีกปรากฏการณ์หนึ่งที่เกิดควบคู่กันคือ ตัวกลางที่มีการสูญเสียสามารถเกิดความร้อนโดยตรงจากการนำไฟฟ้า เนื่องจากการกระจายตัวของอนุภาคไฟฟ้า ภายใต้อิทธิพลของการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าจากภายนอก ทำให้เกิดเส้นทางการนำไฟฟ้าขึ้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าและไดโพล เนื่องจากคลื่นสนามไฟฟ้า

ในรูปที่ 2.1 เป็นการสลับกลับไปมาของขั้วที่เกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้า มีการเปลี่ยนแปลงสลับทิศทาง (ขั้ว) ไปมาอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นกลไกพื้นฐานของการเกิดความร้อน โดยการใช้ “คลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูง” ในการให้ความร้อนกับตัวกลางวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีการสูญเสียโดยสำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้มุ่งเน้นไปทางการให้ความร้อนเพื่อเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการควบคุมแมลง การกำจัดแมลงที่อยู่ในธัญพืช นั่นคือการให้ความร้อนกับกลุ่มแมลงด้วยคลื่นความถี่วิทยุหรือคลื่นไมโครเวฟ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษา ค้นคว้า การให้ความร้อนกับกลุ่มแมลงขึ้น ซึ่งจากงานวิจัยของ Nelson 1996 ได้ทำการวิจัยเรื่องคลื่นความถี่วิทยุและความถี่

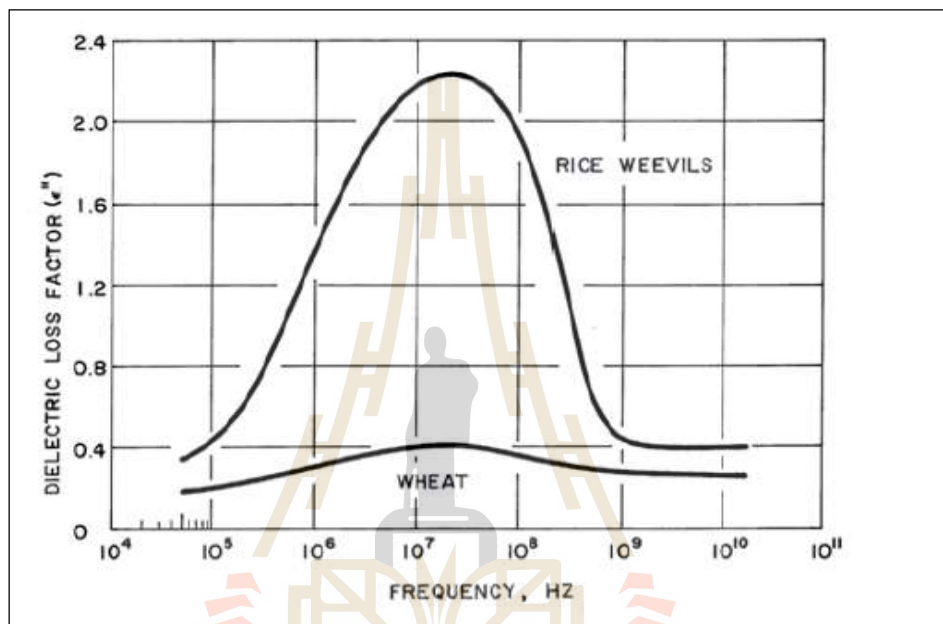
ไมโครเวฟที่ 39 MHz และ 2450 MHz ในการหาช่วงความถี่ที่เหมาะสมในการฆ่ามอดข้าวด้งแสดง
ในตารางที่ 1

ตารางที่ 2.1 การให้ความร้อนไดอิเล็กทริกย่านความถี่วิทยุและย่านความถี่ไมโครเวฟกับมอดข้าวสาลี
มีอัตราการตายที่ 99-100%

Species	Develop- mental stag e	Freq. (MHz)	Medium	Temp. (C)	Reference
Rice weevil, <i>Sitophilus oryzae</i> (L.)	Mixed				
	immature	27	Wheat	56	Anglade et al., 1979
	Adult	39	Wheat	39	Nelson and Whitney, 1960
	Mixed				
	immature	39	Wheat	61	Nelson and Whitney, 1960
	Adult	39	Wheat	40	Nelson and Stetson, 1974a
	Adult	2450	Wheat	83	Nelson and Stetson, 1974a
	Adult	2450	Wheat	>60	Tateya and Takano, 1977
	Pupal	2450	Wheat	>60	Tateya and Takano, 1977
	Larval	2450	Wheat	>58	Tateya and Takano, 1977
Egg	2450	Wheat	>57	Tateya and Takano, 1977	
Granary weevil, <i>Sitophilus granaries</i> (L.)	All	13.6	Wheat	62	Benz, 1975
	Egg	13.6	Wheat	61	Benz, 1975
	Adult	27	Wheat	55	Anglade et al., 1979
	Larval	27	Wheat	58	Anglade et al., 1979
	Pupal	27	Wheat	61	Anglade et al., 1979
	Adult	39	Wheat	41	Nelson and Kantack, 1966
	Adult	39	Wheat	42	Nelson et al., 1966
	Adult	2450	Wheat	86	Anglade et al., 1979
	Adult	2450	Wheat	>92	Hamid et al., 1956
	Adult	2450	Wheat	>57	Baker et al., 1956
	Larval	2450	Wheat	>82	Baker et al., 1956
	Egg	2450	Wheat	>72	Baker et al., 1956

ในงานวิจัยของ Nelson 1991 ได้นำเสนอขบวนการตอบสนองทางความถี่ของมอดข้าวและข้าวสาลีที่มีผลต่อค่าปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กทริก (Dielectric loss factor) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยได้นำเสนอช่วงของการตอบสนองของมอดข้าวจะอยู่ในตั้งแต่ช่วงความถี่

ประมาณ 50 kHz ถึงประมาณ 12 GHz แต่จะพบว่าช่วงความถี่ที่มีค่า ปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริก ที่ดีที่สุดของมอดข้าวอยู่ที่ความถี่ประมาณ 39 MHz โดยมีค่าเท่ากับ 2.24 ส่วนข้าวสาลี จะมีค่าน้อยมาก และพบว่าช่วงความถี่ที่มีค่าปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริกสูงอยู่ในความถี่ ประมาณ 5 MHz ถึงประมาณ 100 MHz จึงเป็นช่วงความถี่ที่ความเหมาะสมที่จะนำมาวิเคราะห์และ ออกแบบได้ดีที่สุด



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริก กับความถี่ของมอดข้าวและข้าวสาลี

ในงานวิจัยของ Liyang Zhou และ Shaojin Wang (Liyang Zhou , Shaojin Wang at 2016) ได้ทำการศึกษาเพื่อยืนยันการใช้คลื่นความถี่วิทยุในการควบคุมด้วงงวงข้าว (มอดข้าว) ในเปลือก ข้าวกล้องและข้าวสาร ซึ่งจากการวิจัยได้มีการใช้คลื่นความถี่วิทยุความถี่ 27.12 MHz กำลังงาน 6 กิโลวัตต์ ในการศึกษาการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในการควบคุมด้วงงวงข้าว (มอดข้าว) ในเปลือก ข้าวกล้องและข้าวสาร โดยใช้แผ่นอิเล็กโทรดที่มีระยะห่าง 11 เซนติเมตรเป็นตัวกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูง และการใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสร่วมด้วย ซึ่งระบบให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุสำหรับควบคุมด้วงงวงข้าว (มอดข้าว) ในเปลือก ข้าวกล้องและข้าวสาร พบว่าด้วงงวงข้าว (มอดข้าว) โตเต็มวัย มีอัตราการตาย 100% ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลา 6 นาที ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2.2 การกำจัดด้วงวงข้าว ที่อุณหภูมิ 50 °C ณ เวลาต่าง ๆ เพื่อดูอัตราการตาย

Table 4
Mortality (mean \pm SD, %) of adult *Sitophilus oryzae* after RF heating to 50 °C for four different holding times.

Sample	Holding times (min)			
	0	2	4	6
Control	4.7 \pm 3.3	3.9 \pm 1.8	2.1 \pm 3.0	4.0 \pm 2.2
Rough rice	83.7 \pm 6.0 aA ^a	90.0 \pm 4.8 aA	99.0 \pm 0.7 aB	100 \pm 0 aB
Brown rice	80.2 \pm 5.9 aA	88.3 \pm 4.3 aA	98.8 \pm 0.9 aB	100 \pm 0 aB
Milled rice	81.5 \pm 6.3 aA	89.7 \pm 5.1 aA	98.8 \pm 0.9 aB	100 \pm 0 aB

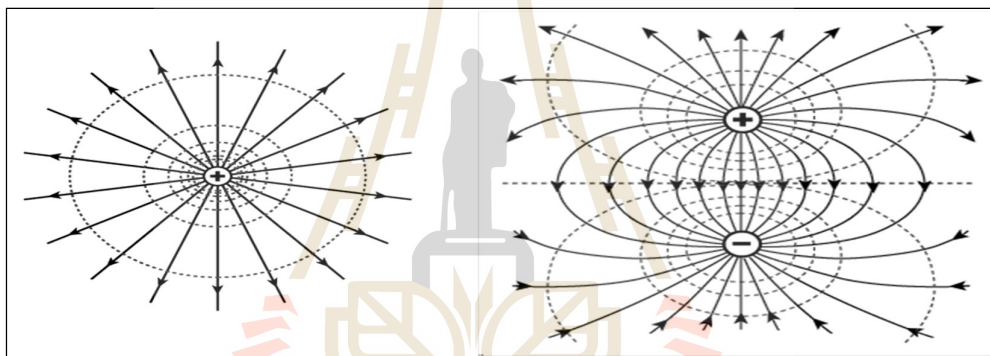
^a Different lower and upper case letters indicate that means are significantly different at P = 0.05 among holding times and samples, respectively.

โดยการให้ความร้อนไดอิเล็กทริกด้วยคลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูงจำเป็นต้องมีตัวแปรหลักในการพิจารณา ซึ่งประกอบด้วย ย่านความถี่ที่ใช้ งาน ปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กทริก รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าเข้าสู่ตัวกลางวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีการสูญเสียและกำลังงานที่ใช้ เนื่องจากเป็นสิ่งที่ต้องนำมาวิเคราะห์ เพื่อนำไปสู่การออกแบบวงจรกำเนิดความถี่และตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้า (Applicator) ให้เหมาะสมกับรูปแบบการใช้งาน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่สามารถให้กำลังงานสนามไฟฟ้าไปยังตัวกลางวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีการสูญเสีย เพื่อให้เกิดความร้อนขึ้นได้ ดังนั้นขนาดและรูปแบบของตัวสร้างสนามไฟฟ้าจึงเป็นส่วนสำคัญที่ต้องนำมาวิเคราะห์เพื่อให้ได้รูปแบบการใช้งานและกำลังงานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการฆ่ามอด

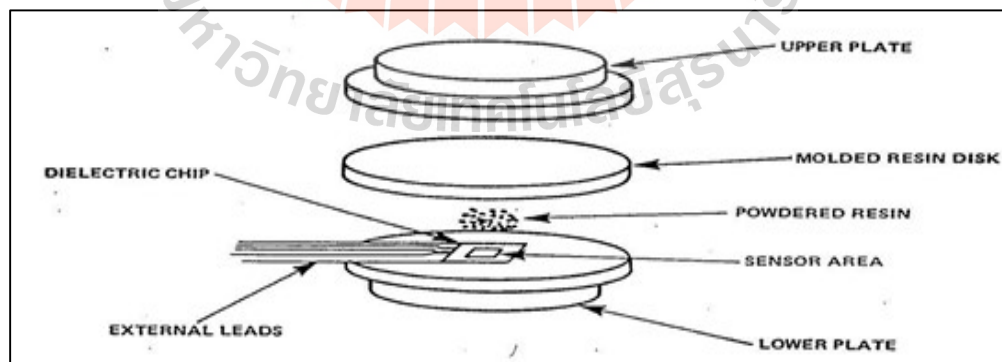
2.1.2. การกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการให้ความร้อนกับไดอิเล็กทริก

ในงานวิจัยสำหรับรูปแบบการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าสำหรับการให้ความร้อนไดอิเล็กทริกที่ผ่านมา ใช้รูปแบบการให้ความร้อนโดยใช้แผ่นเพลต เป็นสื่อกลางในการปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าให้กับตัวกลางวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีการสูญเสีย ส่งผลให้ตัวกลางซึ่งเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกนั้น ๆ เกิดเป็นความร้อนขึ้น ลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าบนแผ่นเพลตนั้นจะมีความเข้มข้นสนามไฟฟ้ามากที่สุดบริเวณจุดป้อนกำลังงานมากที่สุดและจะค่อย ๆ มีความเข้มข้นสนามไฟฟ้าลดลงไป ดังแสดงใน รูปที่ 2.3 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมามีการใช้รูปแบบตัวให้ความร้อน ที่มีลักษณะเป็นแบบวงกลม (Jeffrey 2012) หรือแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสและมีการป้อนกำลังงานเพียงจุดเดียวเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ แต่สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการให้ความร้อนกับวัสดุไดอิเล็กทริก ในกลุ่มของแมลงที่เป็นศัตรูพืช ซึ่งจะมีแมลงที่ปะปน

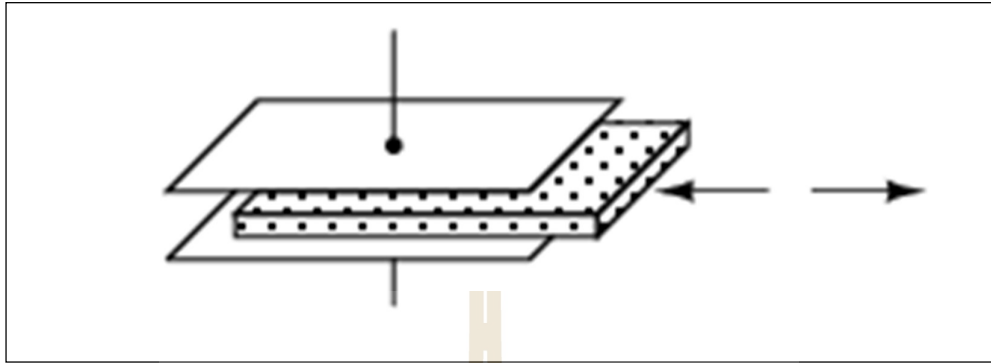
มากับสัญญาณนี้ด้วย เช่น มอดข้าวที่อยู่ในข้าว ซึ่งในการให้ความร้อนจำเป็นต้องมีการไหลลงมาเพื่อให้ความร้อนที่ต่อเนื่อง จึงต้องคำนึงถึงขนาดและความยาวของตัวสร้างสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยจากการสืบค้นข้อมูลพบว่าลักษณะของตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตที่เป็นลักษณะของรูปสี่เหลี่ยมพื้นผ้าจะมีลักษณะที่มีความเหมาะสมกับกระบวนการไหลของข้าว หรือการประยุกต์ใช้งานมากที่สุด เมื่อนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรม ทั้งนี้เพื่อให้มีความเหมาะสมกับพื้นที่การให้ความร้อนมากที่สุดจึงได้มีการศึกษาและถึงจำนวนการป้อนสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด พบว่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าจะมีความเข้มข้นสนามไฟฟ้าที่ตรงกลางมากที่สุด และจะเริ่มลดลงเมื่อออกห่างจากจุดป้อนกำลังงานและมีลักษณะเป็นวงกลมออกไป ดังนั้นลักษณะการป้อนสัญญาณ 1 จุด จึงเหมาะสำหรับตัวปล่อยคลื่นที่มีลักษณะที่เป็นวงกลมหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัสเท่านั้น ซึ่งออกแบบตัวปล่อยคลื่นที่เป็นลักษณะแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าจึงต้องมีการพิจารณาจุดป้อนกำลังงานมากกว่า 1 จุด เพื่อกระจายสนามไฟฟ้าให้เต็มพื้นที่การใช้งาน



รูปที่ 2.3 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.4 การประยุกต์ใช้งานกับแผ่นเพลตที่มีลักษณะเป็นวงกลม



รูปที่ 2.5 การประยุกต์ใช้งานกับแผ่นเพลตที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส

2.1.3 แหล่งจ่ายกำลังงานสำหรับให้ความร้อนไดโอดเล็กทรอนิกส์

สำหรับในส่วนของวงจรแหล่งจ่ายกำลังงานเป็นส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่ง ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้แหล่งกำลังงานคลื่นวิทยุจากหลอดอิเล็กทรอนิกส์ (Electron tube) แสดงดังรูปที่ 2.6 โดยจากการศึกษาข้อมูลของการใช้หลอดอิเล็กทรอนิกส์ พบว่ามีประสิทธิภาพการให้กำลังงานที่สูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้หลอดอิเล็กทรอนิกส์สำหรับออกแบบให้อยู่ในช่วงการทำงานที่กว้างได้



รูปที่ 2.6 หลอดอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เป็นแหล่งกำลังงานสำหรับให้ความร้อนกับไดโอดเล็กทรอนิกส์

2.2 ทฤษฎีการให้ความร้อนไดอิเล็กตริก

2.2.1 คุณสมบัติของไดอิเล็กตริก

การนำคลื่นความถี่มาประยุกต์ใช้งานสำหรับการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกที่ใช้หลักการของการส่งผ่านคลื่นไปยังเนื้อวัสดุนั้นมีอย่างแพร่หลาย (Kurose et al, 2009) โดยที่ผ่านมานั้นความถี่ที่ใช้งานนั้นจะมีย่านความถี่ที่ไม่สูงมากนัก คือประมาณ 1 -15 MHz ต่อมาได้มีการพัฒนาใช้คลื่นความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่งได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมและครัวเรือนได้เช่น การประกอบอาหาร การอบแห้งอาหาร การถนอมอาหาร แต่อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุตั้งที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น ไม่ว่าจะเป็ดย่านความถี่ต่ำหรือย่านความถี่สูงสามารถพัฒนาและประยุกต์ใช้งานด้านอื่น ๆ ทางการเกษตรได้อย่างกว้างขวาง เช่น การกำจัดศัตรูพืชที่กำลังได้รับความนิยมในปัจจุบัน โดยมีการประยุกต์ใช้หลักการส่งผ่านคลื่นความถี่เข้าไปในตัวกลางที่เป็นไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสีย และส่งผลให้ตัวกลางนั้น ๆ เกิดเป็นความร้อนขึ้นได้ ซึ่งจะมีตัวแปรหลัก ในการพิจารณาประกอบด้วย ย่านความถี่ที่ใช้งานรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นเข้าสู่ตัวกลางที่เป็นไดอิเล็กตริก การดูดกลืนหรือการสูญเสียของคลื่นความถี่และกำลังงานที่ต้องใช้ เป็นต้น โดยคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกสำหรับวัสดุแต่ละชนิดนั้นจะเป็นตัวแปรที่สำคัญ ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าความถี่ของ คลื่นวิทยุ เนื่องจากเป็นสิ่งที่จะต้องนำมาวิเคราะห์เพื่อนำไปสู่การออกแบบวงจรกำเนิดความถี่และตัวปล่อยคลื่นให้เหมาะสมกับค่าไดอิเล็กตริกที่ตัวกลางต่าง ๆ ซึ่งคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกนั้นจะสามารถอธิบายได้จากพฤติกรรมภายใต้การใช้งานคลื่นที่ความถี่ต่าง ๆ ซึ่งจะเป็นค่าสภาพยอมเชิงซ้อน (Complex permittivity, ϵ^*) หรือที่เรียกว่า “ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกยังผล (dielectric constant)” ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.1

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.1)$$

เมื่อ ϵ'' คือ ปัจจัยในการสูญเสียยังผล (Dielectric loss factor) โดยสำหรับการพิจารณาค่าการสูญเสียนั้น จะพิจารณาจากส่วนที่เป็นจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าของความถี่และอุณหภูมิที่ใช้งาน และสามารถนิยามค่าการสูญเสียแทนเจนต์ (Loss tangent) ได้ดังสมการที่ (2.2)

$$\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon' \quad (2.2)$$

โดยความถี่วิทยุและความถี่ไมโครเวฟที่สำคัญที่มีการใช้ในปัจจุบันสำหรับการแปรรูปอาหารและอุตสาหกรรมอบแห้งนั้นจะใช้ย่านความถี่วิทยุในช่วง 1-50 MHz และย่านความถี่

ไมโครเวฟ 915 MHz และ 2450 MHz ซึ่งจะใช้หลักการหมุนของไดโพลเป็นกลไกการสูญเสียที่สำคัญ ดังสมการความสัมพันธ์ที่ (2.3)

$$\varepsilon'' = \varepsilon_d'' + \varepsilon_\sigma'' = \varepsilon_d'' + \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \quad (2.3)$$

ซึ่งวัสดุไดอิเล็กตริกที่เป็นสินค้าเกษตรส่วนใหญ่จะแปลงพลังงานไฟฟ้าที่ยานความถี่วิทยุและไมโครเวฟให้เป็นพลังงานความร้อนโดยความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลมาจากการทำอันตรกิริยากันระหว่างพลังงานไมโครเวฟและตัวกลางที่มีคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กตริกที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้วและสามารถเหนี่ยวนำเคลื่อนที่วิทยุให้เกิดเป็นความร้อนได้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.4) (Nelson 1996)

$$\rho C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = 5.563 \times 10^{-11} f E^2 \varepsilon'' \quad (2.4)$$

โดยที่ C_p คือ ความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ($J/kg.K$)

ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m^3)

E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)

t คือ ระยะเวลา (s)

ΔT คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในวัสดุ ($^{\circ}C$)

f คือ ความถี่ (Hz)

สำหรับความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นความถี่วิทยุและไมโครเวฟนั้นพลังงานจะลดลง $1/e$ ($e = 2.718$) ของพลังงานที่ป้อนเข้าไปในพื้นผิวของตัวกลางที่เป็นไดอิเล็กตริกซึ่งโดยทั่วไปแล้วพลังงานของคลื่นความถี่วิทยุจะสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในพื้นผิวของตัวกลางได้มากกว่าคลื่นความถี่ย่านไมโครเวฟ เนื่องจากคลื่นวิทยุมีความถี่ต่ำและมีความยาวคลื่นมากกว่าคลื่นไมโครเวฟ ดังนั้นความถี่จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในลำดับต้น ๆ ที่ต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับเนื้อวัสดุที่ต้องการนำมาใช้งาน โดยสามารถพิจารณาได้จากการทะลุทะลวงคลื่น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$d_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\varepsilon' \left[\sqrt{1 + (\varepsilon''/\varepsilon')^2} - 1 \right]}} \quad (2.5)$$

โดยที่ d_p คือ ความลึกของการทะลุทูลง

c คือ ความเร็วแสงในอวกาศว่าง ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

ฉะนั้นในการออกแบบสร้างเครื่องการให้ความร้อนเพื่อการฆ่ามอดข้าวโพดและมอดถั่วเขียวจะใช้สมการของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาดังสมการที่ 2.4 และความลึกของการเกิดความร้อนที่เข้าไปในตัวมอดข้าวโพดและถั่วเขียวดังสมการที่ 2.5 เพื่อการพิจารณาเลือกความถี่วิทยุและกำลังงานที่เหมาะสมในการออกแบบสร้างเครื่องฆ่ามอดข้าวโพดและมอดถั่วเขียว ตัวกลางที่มีการสูญเสียสามารถทำให้เกิดความร้อนได้โดยการใช้พลังงานกระตุ้นที่อยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งกลไกของความร้อนที่เกิดขึ้นมาจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปกระตุ้นอนุภาคที่มีสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้า หรือประจุไฟฟ้าที่อยู่ในตัวกลางนั้นจากสภาวะสมดุลทำให้เกิดสภาพเป็นไดโพลที่มีผลต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระตุ้นให้เกิดการโพลาริซ์ตามทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้น ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระตุ้นเป็นผลทำให้เกิดการกระจายกำลังงานในรูปของความร้อนภายในตัวกลางที่มีการสูญเสีย โดยอีกปรากฏการณ์หนึ่งที่เกิดควบคู่กันคือ ตัวกลางที่มีการสูญเสียสามารถเกิดความร้อนโดยตรงจากการนำไฟฟ้า

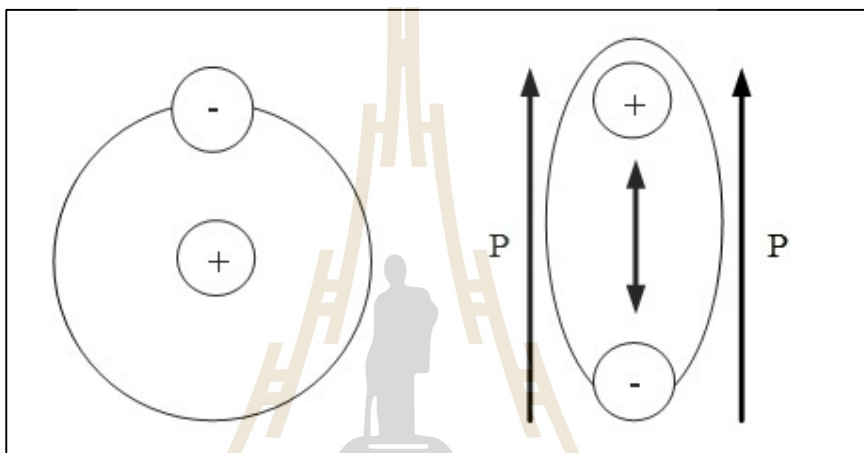
2.2.2 พื้นฐานและกลไกการให้ความร้อนของไดอิเล็กตริก

1) โครงสร้างพื้นฐานของการให้ความร้อนไดอิเล็กตริก

วัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric) สามารถทำให้เกิดความร้อนได้โดยการป้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปในตัวกลางวัสดุไดอิเล็กตริก การทำให้เกิดความร้อนเป็นผลมาจากความสามารถของสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดโพลาริซ์ของประจุภายในตัวกลางวัสดุไดอิเล็กตริก เมื่อทำการป้อนสนามไฟฟ้าสถิต สนามไฟฟ้าสถิตจะทำให้เกิดการโพลาริซ์ขึ้น แต่ในกรณีที่เป็นสนามไฟฟ้าสลับ จะทำให้เกิดโพลาริซ์ดังแสดงตามรูปที่ 2.7 และจะทำให้ไดโพลเกิดการหมุนไปตามคาบเวลาของสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ การหมุนของไดโพลที่ทำให้เกิดความร้อนเกิดจากความเสียดทานหรือเกิดการสั่นพ้องภายในของโมเลกุล โดยโมเลกุลของไดอิเล็กตริกนั้นจะต้องมีค่าไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) หรือโครงสร้างโมเลกุลในวัสดุไดอิเล็กตริกสูงพอ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของการทำให้เกิดความร้อนในไดอิเล็กตริก ซึ่งวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ

ในสภาวะทั่วไปสารที่เป็นไดอิเล็กตริก สามารถที่จะเก็บพลังงานไฟฟ้าได้ โดยเกิดจากประจุบวกและประจุลบ ที่แยกห่างออกจากกันเนื่องจากการป้อนพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปภายในไดอิเล็กตริกซึ่งจะฝืนกับแรงยึดเหนี่ยวของอะตอมหรือโมเลกุล กลไกของการเกิดการแยกห่างกันของประจุขึ้นอยู่กับชนิดของไดอิเล็กตริกและความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับตัวกลาง

ไดอิเล็กตริก โดยสามารถแบ่งชนิดของการเกิดโพลาริเซชันของไดอิเล็กตริกได้ 4 แบบใหญ่ ซึ่งในแต่ละแบบ จะเกิดปรากฏการณ์ที่คล้ายกัน แต่จะเกิดขึ้นที่ความถี่ที่ต่างกัน โดยในแต่ละแบบ ความเป็นกลางทางไฟฟ้าจะถูกรบกวนเนื่องจากการป้อนพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปในไดอิเล็กตริก ซึ่งจะทำให้เกิดการแยกห่างออกจากกันของประจุลบและประจุบวก โดยที่พลังงานสนามไฟฟ้า สลับนี้ ความถี่จะเป็นตัวกำหนดชนิดของการเกิดโพลาริเซชัน จะอธิบายการเกิดโพลาริเซชันชนิดต่าง ๆ ได้ ดังนี้



รูปที่ 2.7 อะตอมระหว่างประจุบวกต่อประจุลบของตัวกลางไดอิเล็กตริก

การเกิดโพลาริเซชันแบบสเปซชาร์จ (Space charge polarization) การเกิดโพลาริเซชันชนิดนี้จะเกิดขึ้นที่ความถี่ต่ำ ซึ่งจะเป็นช่วง VLF และ LF โดยการเกิดโพลาริเซชันจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุหรือตัวกลางมีอิเล็กตรอนอิสระโดยที่ระยะห่างของประจุบวกและประจุลบจะถูกจำกัดโดยส่วนกีดขวาง เมื่อมีการป้อนพลังงานสนามไฟฟ้าเข้าไปยังวัสดุไดอิเล็กตริก อิเล็กตรอนจะไปสะสมบริเวณที่ส่วนกีดขวาง ซึ่งจะทำให้ประจุบวกและประจุลบแยกห่างออกจากกัน มีผลทำให้ไดอิเล็กตริกเกิดโพลาริเซชัน

การเกิดโพลาริเซชันแบบการจัดเรียงไดโพล (Polarization by dipole alignment) การเกิดโพลาริเซชันลักษณะนี้ เกิดขึ้นที่ความถี่สูงมากเช่น ช่วงความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งจะเกิดขึ้นในระดับโมเลกุล โดยหลักการนี้จะใช้เป็นพื้นฐานของการเกิดความร้อนในไดอิเล็กตริก

การเกิดโพลาริเซชันแบบไอออนิก (Ionic polarization) การเกิดโพลาริเซชันลักษณะนี้จะเกิดขึ้นที่ความถี่อินฟราเรด โดยจะเกิดขึ้นเนื่องจากการแยกห่างจากกันของประจุบวกและประจุลบภายในโมเลกุล

การเกิดโพลาริเซชันแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic polarization) การเกิดโพลาริเซชันลักษณะนี้จะเกิดขึ้นที่ความถี่สูง ๆ ที่ใกล้เคียงกับความถี่ของอัลตราไวโอเล็ต โดยนิวเคลียสของอะตอม

ซึ่งเป็นประจุบวกจะอยู่กับที่ในเมตริกซ์ของไดอิเล็กตริก โดยกลุ่มของประจุลบที่อยู่รอบนิวเคลียสจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามา

2) ไดโพลโมเมนต์ที่ถูกดัดขีมิ

ในวัสดุไดอิเล็กตริกที่เป็นแบบไม่มีขั้วภายในโมเลกุลก็ไม่มีไดโพลไฟฟ้าถาวร แต่จะสามารถเหนี่ยวนำโมเมนต์ได้โดยการทำให้โมเลกุลมีรูปร่างที่เปลี่ยนไปโดยการป้อนพลังงานไฟฟ้าเข้าไปยังไดอิเล็กตริก ความสามารถในการเกิดโพลาไรซ์ (Polarizations, α') จะสามารถวัดได้จากการเหนี่ยวนำไดโพลโมเมนต์ของสนามไฟฟ้า ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.6

$$p = \alpha' E_{loc} \quad (2.6)$$

เมื่อ E_{loc} คือ สนามไฟฟ้าภายใน

α' คือ ความสามารถในการเกิดโพลาไรซ์

จากสมการที่ (2.6) ถ้าสมมติให้มีโมเลกุลเป็น N โมเลกุลในหนึ่งหน่วยปริมาตร สามารถแสดงไดโพลโมเมนต์รวมได้ดังสมการที่ (2.7)

$$p = N \alpha' E_{loc} \quad (2.7)$$

หรือในรูปฟังก์ชันของการป้อนสนามไฟฟ้าสามารถเขียนได้ดังสมการ $p = \chi E$ เมื่อ χ คือ ความไว (Susceptibility) ของตัวกลางไดอิเล็กตริก

โดยค่าความไวของไดอิเล็กตริกในตัวกลางที่เป็นอากาศว่าง (free space) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.8)

$$D = \epsilon_0 E \quad (2.8)$$

แต่ถ้าพิจารณาในวัสดุไดอิเล็กตริกจะแสดงได้ดังสมการที่ 2.9

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2.9)$$

จากนั้นแทนค่าสมการที่ (2.8) ลงในสมการที่ (2.9) แล้วจัดรูปใหม่สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.10)

$$D = (\epsilon_0 + \chi) E \quad (2.10)$$

หรือ

$$D = \epsilon' E \quad (2.11)$$

ถ้า

$$\chi = \epsilon' - \epsilon_0 \quad (2.12)$$

สามารถหาค่าความไวสัมพัทธ์ (Relative susceptibility, χ_r) ได้ดัง สมการที่ 2.13

$$\chi_r = \frac{\chi}{\epsilon_0} \quad (2.13)$$

เมื่อแทนค่าสมการสมการที่ (2.12) ลงในสมการ สมการที่ (2.13) แล้วจัดรูปใหม่สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\chi_r = \epsilon_r' - 1$$

สำหรับการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity: ϵ_r') ซึ่งเป็นคุณสมบัติของตัวกลางไดอิเล็กทริกกับค่าความสามารถในการเกิดโพลาริเซชัน ซึ่งเป็นคุณสมบัติของโมเลกุลเนื่องจากค่าของสนามไฟฟ้าภายในจะแตกต่างจากสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามา แสดงได้ ดังสมการที่ (2.14) แต่ยกเว้นสำหรับกรณีของก๊าซความดันต่ำ (Low pressure gases)

$$\frac{N\alpha}{\epsilon_0} = \epsilon_r' - 1 \quad (2.14)$$

และนอกจากนี้สำหรับในตัวกลางอื่น ๆ จะสามารถแสดงค่าสนามไฟฟ้าภายในได้ดังสมการที่ (2.15)

$$E_{loc} = E + \frac{P}{3\epsilon_0} = E \left(1 + \frac{\chi}{3\epsilon_0} \right) = \frac{\epsilon_r' + 2\epsilon_0}{3\epsilon_0} E = \frac{\epsilon_r' + 2}{3} E \quad (2.15)$$

จากนั้นเมื่อแทนค่าสมการ (2.11) ลงในสมการ (2.2) จะเขียนสมการการเกิดโพลาริเซชันได้ดังนี้

$$P = N\alpha \frac{\epsilon_r' + 2}{3} E \quad (2.16)$$

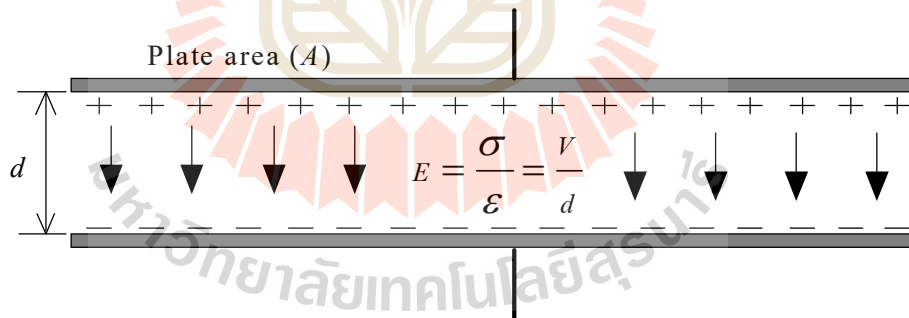
โดยจากสมการที่ (2.16) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϵ_r' กับ α' ได้ดังสมการที่ (2.17) ซึ่งเรียกความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.17) นี้ว่า สมการของ Clausius-Mosotti

$$\frac{N\alpha'}{3\epsilon_0} = \frac{\epsilon_r' - 1}{\epsilon_r' + 2} \quad (2.17)$$

2.2.3 หลักการพื้นฐานของการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าในแผ่นเพลต

1) หลักการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้า

การพิจารณาตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าสำหรับการให้ความร้อนไดอิเล็กทริกถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญมาก เนื่องจากเป็นส่วนที่กระจายพลังงานสนามไฟฟ้าเข้าสู่วัสดุไดอิเล็กทริกให้มีความเหมาะสม ดังนั้นจึงต้องมีการพิจารณาถึงขนาดและปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้า จากงานวิจัยที่ผ่านมาตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต เป็นลักษณะรูปแบบการให้ความร้อนนั้นมีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีการกระจายสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลตมากที่สุด โดยผ่านวัสดุตัวกลางที่มีการสูญเสียหรือวัสดุไดอิเล็กทริก โดยลักษณะของตัวปล่อยคลื่นแบบแผ่นเพลตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 รูปแบบตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต

จาก รูปที่ 2.8 เป็นลักษณะตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต โดยสามารถออกแบบได้จากสมการที่ (2.18) ดังนี้

$$C = \frac{k\epsilon_0 A}{d} \quad (2.18)$$

โดยที่ k คือ ค่าซึมซาบได้ของวัสดุไดอิเล็กตริกที่อยู่ระหว่างแผ่นเพลต

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นเพลต (m^2)

ϵ_0 คือ 8.854×10^{-12} F/m

d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลต (m)

ลักษณะของการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าจะมีการกระจายตัวจากแรงดันที่ขั้วบวกไปยังขั้วลบของแผ่นเพลต โดยความเข้มสนามไฟฟ้า E ที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นเพลตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.19)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{V}{d} \quad (2.19)$$

โดยที่ ϵ คือ ค่าความซึมซาบได้ของแผ่นเพลต

V คือ แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างแผ่นเพลต

d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลต

σ คือ ค่าความนำของวัสดุไดอิเล็กตริก

โดยตัวแปรหลักที่ใช้ในการพิจารณาความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้น ประกอบด้วย แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างแผ่นเพลต (V) และ ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลต (d) ดังนั้นการวิเคราะห์แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างแผ่นเพลต จึงเป็นส่วนสำคัญสำหรับการพิจารณา เพื่อทราบถึงความเข้มของสนามไฟฟ้า และนำไปสู่การวิเคราะห์การให้ความร้อนต่อวัสดุไดอิเล็กตริกต่อไป

2.3 สรุป

ตามเนื้อหาที่ได้กล่าวมาในบทนี้ ได้นำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมของการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ซึ่งประกอบไปด้วยลักษณะการให้ความร้อนกับวัสดุไดอิเล็กตริกที่เหมาะสม รูปแบบของการใช้คลื่นสนามไฟฟ้าที่เหมาะสม การศึกษาช่วงความถี่ที่เหมาะสมกับการให้ความร้อนกับไดอิเล็กตริก แหล่งจ่ายกำลังงานที่เหมาะสม ซึ่งได้ยกตัวอย่างให้ความร้อนกับมอดข้าวสาลี พบว่า ความถี่ใช้งานที่เหมาะสมอยู่ในย่านความถี่วิทยุ และใช้ลักษณะของตัวสร้างสนามไฟฟ้าเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริกในกลุ่มของแมลงที่อยู่ในศัตรูพืชเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรม และใช้การออกแบบแหล่งจ่ายกำลังงาน ด้วยอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ โดยการวิเคราะห์ถึงการออกแบบตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตและการใช้กำลังงานที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้จะได้นำเสนอต่อไป

บทที่ 3

การวิเคราะห์และออกแบบเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริก สำหรับฆ่ามอดในข้าวโพดและถั่วเขียว

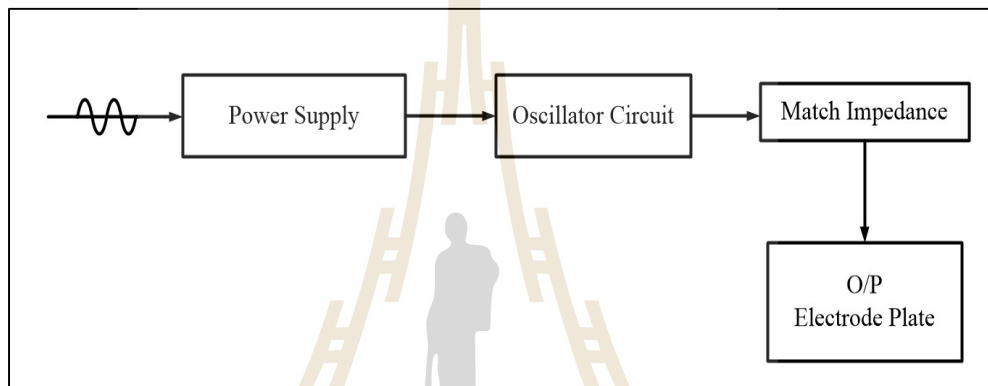
การวิเคราะห์และออกแบบเครื่องให้ความร้อนแกไดอิเล็กตริก ในโครงการนี้มีจุดประสงค์ เพื่อการออกแบบเครื่องสำหรับฆ่ามอดในข้าวโพดและมอดในถั่วเขียวที่บรรจุภัณฑ์ในกล่องสำหรับการฆ่ามอดขนาด 5 กิโลกรัมต่อกล่อง ดังนั้นในบทนี้ จะกล่าวถึงการวิเคราะห์และออกแบบเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริกสำหรับฆ่ามอดในข้าวโพดและถั่วเขียวที่บรรจุภัณฑ์ในกล่องขนาด 5 กิโลกรัมต่อกล่อง โดยระบบ ประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญ คือชุดแหล่งจ่ายกำลังงาน ชุดกำเนิดสัญญาณความถี่และขยายกำลังงานสูง และตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต ซึ่งเป็นภาคส่วนการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกสำหรับฆ่ามอดข้าว โดยแต่ละภาคส่วนใช้ทฤษฎีและการคำนวณจากสมการที่แสดงในบทที่ 2 เพื่อการวิเคราะห์และออกแบบให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยรายละเอียดของการออกแบบอธิบายได้ดังต่อไปนี้

3.1 การวิเคราะห์การให้ความร้อนไดอิเล็กตริกสำหรับฆ่ามอด

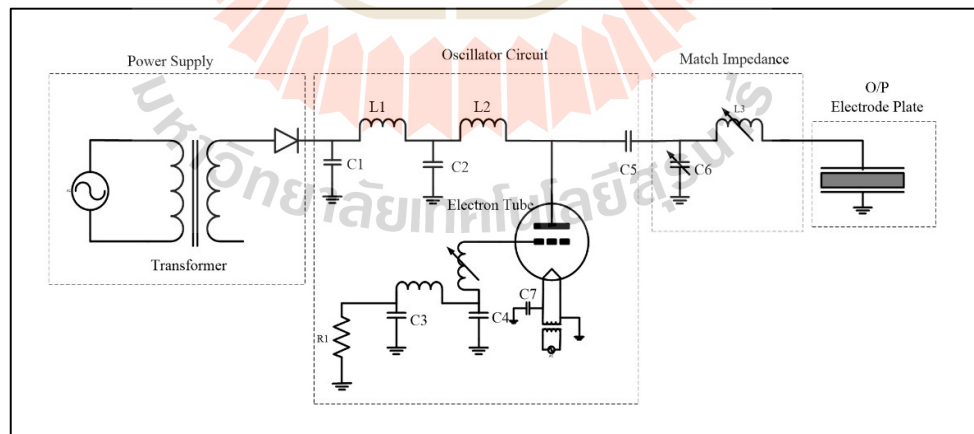
ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของคลื่นสนามไฟฟ้าบนตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต สำหรับให้ความร้อนแกไดอิเล็กตริก โดยได้วิเคราะห์เพื่อนำไปสู่การออกแบบขนาดของตัวสร้างสนามไฟฟ้าที่เหมาะสม และทดสอบกับไดอิเล็กตริกของมอดที่อยู่ในข้าวโพดและในถั่วเขียว ซึ่งใช้มอดในข้าวโพดและถั่วเขียวเป็นไดอิเล็กตัวอย่างในการวิเคราะห์การให้ความร้อนไดอิเล็กตริก เพื่อพิจารณาถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยระบบของการทดสอบการให้ความร้อนไดอิเล็กตริก ประกอบด้วยวงจรภาคแหล่งจ่ายกำลังงาน (Power source) และภาควงจรให้ความร้อนไดอิเล็กตริก (Dielectric Heating) ในส่วนของวงจรภาคแหล่งจ่ายกำลังงาน ใช้หลอดไดอิเล็กตรอนกำลังงานสูงสำหรับกำเนิดสัญญาณและขยายสัญญาณและภาควงจรให้ความร้อนในช่วงจรแมตซ์ซิง RLC เรโซแนนซ์แบบอนุกรม ก่อนที่จะส่งกำลังงานไปยังภาคการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกต่อไป โดยบล็อกไดอะแกรมของระบบแสดงดังรูปที่ 3.1 และมีวงจรการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุแสดงดังรูปที่ 3.2 โครงสร้างการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกซึ่งส่วนสำคัญที่เป็นส่วนให้พลังงานความร้อนคือสนามไฟฟ้าที่เกิดจากตัวปล่อยคลื่นแบบแผ่นเพลต ดังนั้นการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตที่มีผลต่อการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกและให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานจึงเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญ โดยในบทนี้ได้พิจารณาถึงการวิเคราะห์และการออกแบบลักษณะ

การวิเคราะห์และการออกแบบลักษณะการส่งผ่านความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริกเพื่อให้ได้ขนาดตามต้องการโดยใช้การคำนวณจากสมการในบทที่ 2

อัตราการเกิดพลังงานในไดอิเล็กตริก เพื่อนำมาสู่การหาอัตราของความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ต้องใช้ และพลังงานที่เหมาะสมต่อการเกิดสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลต และนำมาสู่การจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อวิเคราะห์ถึงการกระจายตัวของคลื่นสนามไฟฟ้าที่กระจายตัวให้ได้อย่างเหมาะสม ซึ่งได้พิจารณาถึงขนาดกำลังงานที่ใช้ และระยะเวลาในการให้ความร้อนที่เหมาะสมที่สุดต่อขนาดพื้นที่การให้ความร้อน



รูปที่ 3.1 บล็อกโตอะแกรมให้ความร้อนไดอิเล็กตริกสำหรับกำจัดมอดข้าวโพดและถั่วเขียว



รูปที่ 3.2 วงจรเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริกสำหรับกำจัดมอดข้าวโพดและถั่วเขียว

3.1.1 การวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริก

การพิจารณาความเข้มสนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดความร้อนภายในตัวกลางที่มีการสูญเสียหรือวัสดุไดอิเล็กตริก โดยสามารถพิจารณาจากสมการพื้นฐานของแมกซ์เวลล์ ซึ่งนำไปสู่การคำนวณหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของวัสดุไดอิเล็กตริกได้ วัสดุไดอิเล็กตริกจะแปลงพลังงานไฟฟ้าที่ย่านความถี่วิทยุและไม่โครเวฟให้เป็นพลังงานความร้อน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลมาจากการทำอันตรกิริยากันระหว่างพลังงานและตัวกลางที่มีคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กตริกที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้วและสามารถเหนี่ยวนำคลื่นความถี่วิทยุให้เกิดเป็นความร้อนได้ โดยพลังงานที่เกิดขึ้นในวัสดุไดอิเล็กตริกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1)

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

เมื่อทราบถึงพลังงานที่เกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริก จึงสามารถนำมาสู่การคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้าภายในที่ต้องใช้เพื่อทำให้เกิดความร้อนกับวัสดุไดอิเล็กตริกโดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.2)

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

3.1.2 การวิเคราะห์พลังงานที่เกิดขึ้นในมอดข้าวโพดและมอดถั่วเขียว

เพื่อให้ทราบถึงขนาดของพลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริกที่เหมาะสมและเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพการทำงานมากที่สุด จึงได้มีการคำนวณหาอัตราการให้ความร้อนกับวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งใช้มอดข้าวโพดและมอดถั่วเขียวเป็นไดอิเล็กตริกตัวอย่าง ในการให้ความร้อน โดยจากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมในบทที่ 2 พบว่า มอดข้าวโพดและมอดถั่วเขียวจะตายได้เมื่อเกิดอุณหภูมิความร้อนภายในตัวอยู่ที่ประมาณ 48 องศาเซลเซียส (Sitophilus et al, 2012) โดยมีค่าความร้อนจำเพาะ (c) มีค่าเท่ากับ $3.450 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ และ ความหนาแน่นของวัสดุ (ρ) มีค่าเท่ากับ 1000 kg/m^3 (Wang et al 2003) ดังนั้น จากสมการที่ (3.1) จึงสามารถคำนวณหาพลังงานที่เกิดขึ้นภายในตัวมอดข้าว (P) ที่เวลาต่าง ๆ แสดงได้ดังนี้

ที่ อุณหภูมิเท่ากับ 48 องศาเซลเซียส และให้อุณหภูมิเริ่มต้นที่อุณหภูมิเท่ากับ $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ใช้การคำนวณที่เวลา 5 วินาที โดยที่ค่า ความร้อนจำเพาะของมอด (c) มีค่าเท่ากับ $3.450 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ และ ความหนาแน่นของวัสดุ (ρ) มีค่าเท่ากับ 1000 kg/m^3 โดยค่าที่ได้เป็นพลังงานที่ใช้ในหน่วยปริมาตรที่เป็นตารางเมตร แต่จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมมอดมีขนาดตัวโดย

มาตรฐาน กว้าง 1 มิลลิเมตร ยาว 3 มิลลิเมตร และ สูง 1 มิลลิเมตร ดังนั้นมอดจึงมีปริมาตรเท่ากับ 3 mm^3 เมื่อคำนวณหาพลังงานที่เหมาะสมกับปริมาตรของตัวมอดที่เวลา 5 วินาที จึงเท่ากับ 47.61 วัตต์ และจากการคำนวณที่เวลาใด ๆ ตั้งแต่ 1 วินาที ถึง 10 วินาที สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1



ตารางที่ 3.1 ค่าความหนาแน่นของกำลังงานที่สามารถทำให้มอดตาย ณ เวลาใด ๆ

เวลา (วินาที)	กำลังงาน (วัตต์)
1	238.05
2	119.02
3	79.35
4	59.51
5	47.61
6	39.67
7	34.00
8	29.75
9	26.45
10	23.80

จากตารางที่ 3.1 แสดงค่าความหนาแน่นของกำลังงานที่สามารถทำให้มอดข้าวโพดและมอดถั่วเขียวตาย ณ เวลาใด ๆ ซึ่งเป็นการคำนวณหาค่าอัตราพลังงานที่เกิดขึ้นในตัวมอดข้าวโพดและมอดถั่วเขียว ในเวลาตั้งแต่ 1 วินาที ถึง 10 วินาที จากการคำนวณโดยสมการที่ 3.1 ซึ่งพบว่าถ้าต้องการให้มอดข้าวตายเร็วต้องให้พลังงานที่เกิดขึ้นในตัวมอดข้าวมากขึ้นด้วยในทางตรงกันข้ามเมื่อต้องการให้มอดข้าวตายในเวลาช้าลงทำให้ใช้พลังงานน้อยลงด้วย

3.1.3 การพิจารณาพลังงานและความถี่ที่เหมาะสมต่ออัตราการเกิดความร้อนในมอด

เมื่อได้ค่าความพลังงานที่เกิดขึ้นในตัวมอดข้าวของแต่ละช่วงเวลา จึงสามารถคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในตัวมอดข้าวที่จะต้องใช้ทั้งหมด โดยใช้สมการที่ (3.2) ในการพิจารณา ซึ่งจะเห็นว่าในสมการที่ (3.2) มีพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกสองตัวคือ ช่วงความถี่ที่ใช้งานและค่าปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) โดยจากปริทัศน์วรรณกรรมในบทที่ 2 ในงานวิจัยของ Nelson 1991 ได้นำเสนอช่วงความถี่ที่เหมาะสมและค่าปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริกของมอดข้าวไว้ โดยพบว่าช่วงความถี่ประมาณ 10 ถึง 80 MHz เป็นช่วงความถี่ที่เหมาะสมในการใช้เพื่อทำให้ความร้อนไดอิเล็กตริกสำหรับฆ่ามอดและมีค่าปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริกโดยเฉลี่ยประมาณ 2.24 ซึ่งจากสมการที่ 3.1 สามารถคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้าภายในที่ต้องใช้ที่เวลาต่าง ๆ แสดงได้ดังนี้

ที่ อุณหภูมิเท่ากับ 48 องศาเซลเซียส พลังงานที่เกิดขึ้นในตัวมอดข้าวเท่ากับ 46.61 วัตต์ ที่เวลา 5 วินาที เมื่อคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมกับปริมาณของตัวมอดที่ จึงได้เท่ากับ 92.14 V/m และจากการคำนวณที่เวลาใด ๆ ตั้งแต่ 1 วินาที ถึง 10 วินาทีสามารถแสดง ได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าความความเข้มของสนามไฟฟ้าที่สามารถทำให้มอดตาย ณ เวลาใด ๆ

เวลา (วินาที)	กำลังงานที่สะสม (W)	ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)
1	238.05	206.03
2	119.02	145.68
3	79.35	118.95
4	59.51	103.01
5	47.61	92.14
6	39.67	84.10
7	34.00	77.86
8	29.75	72.83
9	26.45	68.67
10	23.80	65.14

จากตารางที่ 3.2 แสดงการคำนวณหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่สามารถทำให้มอด ตาย ในเวลาตั้งแต่ 1 วินาที ถึง 10 วินาที ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการที่ 3.2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ถ้าต้องการให้มอดตายเร็วต้องให้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวมอดมากขึ้นด้วยในทางตรงกัน ข้ามเมื่อต้องการให้มอดตายในเวลาช้าลงทำให้ใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าน้อยลงด้วย

3.2 การวิเคราะห์และออกแบบวงจรภาคการให้ความร้อนไดโอดเล็กทรอนิกส์สำหรับการฆ่า มอดในข้าวโพดและมอดในถั่วเขียวในภาชนะบรรจุขนาด 5 กิโลกรัม

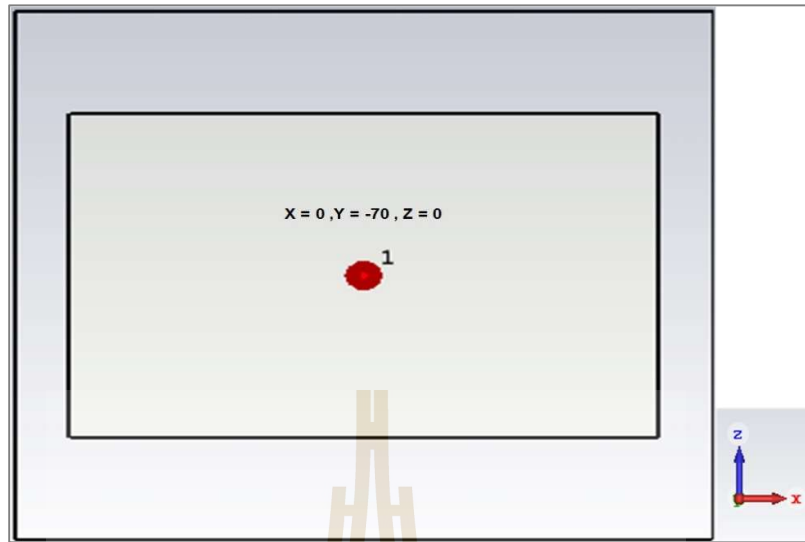
สำหรับการให้ความร้อนไดโอดเล็กทรอนิกส์นั้นเป็นวิธีการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจาก จะ สร้างสนามไฟฟ้าสลับระหว่างสองขั้วไฟฟ้า โดยวัสดุที่ต้องการให้ความร้อนนั้นจะต้องวางหรือลำเลียง อยู่ระหว่างขั้วของตัวปล่อยคลื่นหรืออิเล็กทรอนิกส์แบบแผ่นเพลต ซึ่งจะทำให้เกิดการสลับขั้วของโมเลกุล ในวัสดุไดโอดเล็กทรอนิกส์อย่างต่อเนื่อง เพื่อเปลี่ยนทิศทางเข้ากับขั้วตรงข้าม แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจาก การเคลื่อนไหวของโมเลกุลเป็นสาเหตุให้วัสดุร้อนอย่างรวดเร็วและทั่วถึง ตัวกลางที่มีการสูญเสีย สามารถทำให้เกิดความร้อนได้โดยการใช้พลังงานที่มากกระตุ้นที่อยู่ในรูปของคลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูง ซึ่งกลไกของความร้อนที่เกิดขึ้นมาจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปกระตุ้นวัสดุที่มีสถานะเป็นกลางทาง ไฟฟ้าหรือประจุไฟฟ้าที่อยู่ภายในตัวกลางนั้น ๆ จากสภาวะสมดุลทำให้เกิดสภาพเป็นไดโพลที่มีผลต่อ

ไฟฟ้าที่กระตุ้นให้เกิดการโพลาริเซชันตามทิศทางของสนามไฟฟ้านั้นซึ่งสนามไฟฟ้าที่กระตุ้นเป็นผลทำให้เกิดการกระจายกำลังงานในรูปของความร้อนภายในตัวกลางที่มีการสูญเสีย โดยอีกปรากฏการณ์หนึ่งที่เกิดควบคู่กันคือ ตัวกลางที่มีการสูญเสียสามารถเกิดความร้อนโดยตรงจากการนำไฟฟ้า เนื่องจาก การกระจายตัวของอนุภาคไฟฟ้าภายใต้อิทธิพลของการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าจากภายนอก ทำให้เกิดเส้นทางการนำไฟฟ้าขึ้น โดยตำแหน่งอื่นที่ทำให้เกิดการโพลาริเซชันจากประจุที่บริเวณผิวของตัวกลางที่แตกต่างกับประจุไฟฟ้าในอากาศ หรือการโพลาริเซชันของแมกซ์เวลล์เนอร์ (Maxwell-wagner polarisation) โครงสร้างของการโพลาริเซชันของแมกซ์เวลล์โดยเป็นการสลับกลับไปมาของการโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงสลับทิศทาง (ขั้ว) ไปมาอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นกลไกพื้นฐานของการเกิดความร้อนโดยใช้คลื่นความถี่สูง

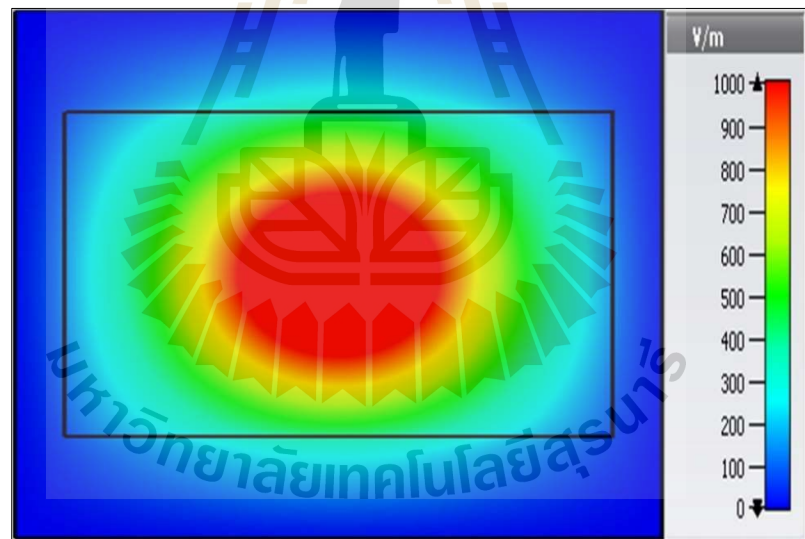
การพิจารณาตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าสำหรับการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญมาก เนื่องจากเป็นส่วนที่กระจายพลังงานสนามไฟฟ้าเข้าสู่วัสดุไดอิเล็กตริก ดังที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นจึงต้องมีการพิจารณาถึงขนาดและปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้า จากงานวิจัยที่ผ่านมาตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต เป็นลักษณะตัวปล่อยคลื่นที่มีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีการปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลตโดยผ่านวัสดุตัวกลางที่มีการสูญเสียหรือวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพต่อการให้ความร้อนมากที่สุด โดยสามารถพิจารณาการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า ที่เกิดจากตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตในหัวข้อต่อไป

3.2.1 การวิเคราะห์การให้ความร้อนไดอิเล็กตริก

เพื่อให้ทราบถึงลักษณะการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลตและความเข้มของสนามไฟฟ้าระหว่างที่มีโพลาริเซชันไดอิเล็กตริก เนื่องจากงานวิจัยได้ใช้โพลาริเซชันไดอิเล็กตริกที่มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า การออกแบบตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งแผ่นเพลตที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งาน ผู้วิจัยเลือกใช้แผ่นเพลตที่มีขนาดความยาวเท่ากับ 52 cm ความสูงเท่ากับ 52 cm และความหนาเท่ากับ 5 mm เป็นขนาดของแผ่นเพลตที่ใช้ในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ การจำลองเพื่อดูลักษณะการกระจายของคลื่นสนามไฟฟ้านั้นเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อจะได้รู้ถึงการกระจายตัวของคลื่นให้ครอบคลุมวัสดุไดอิเล็กตริกได้ทั้งหมดในการจำลองการกระจายตัวของคลื่นสนามไฟฟ้าได้ใช้โปรแกรม CST EM STUDIO ในการจำลอง โดยจะแบ่งการจำลองออกเป็น 2 แบบหลักโดยแบ่งตามจำนวนจุดป้อนกำลังงานให้กับแผ่นเพลต แบบแรกเป็นการจำลองป้อนกำลังงานให้แผ่นเพลต 1 จุดและจะแบ่งเป็นการจำลองย่อยอีก 3 แบบตามตำแหน่งจุดป้อนกำลังงานให้กับเพลตการจำลองป้อนกำลังงานให้แผ่นเพลตแบบ 1 จุด แสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.2



(ก) ตำแหน่งจุดป้อนกำลังงานแบบ 1 จุด

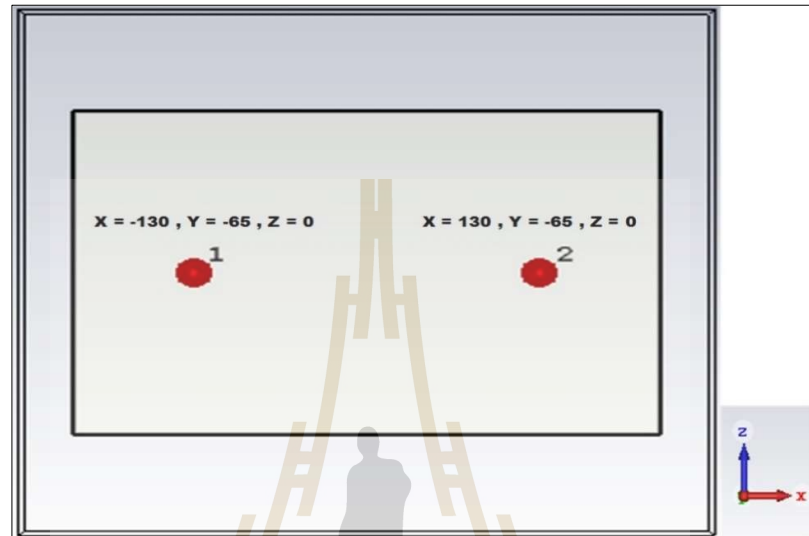


(ข) ผลการจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า

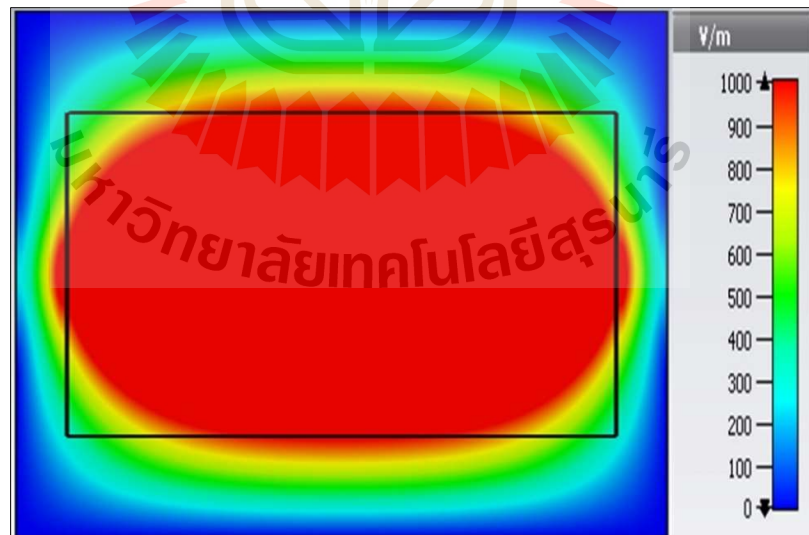
รูปที่ 3.3 จำนวนจุดป้อนกำลังงานและผลการจำลอง

จากรูปที่ 3.3 (ก) เป็นการป้อนกำลังงานให้กับแผ่นเพลตจำนวน 1 จุด ในตำแหน่ง $x = 0, Y = -70, Z = 0$ เมื่อทำการจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าจะได้ตามรูปที่ 3.3 (ข) การ

กระจายตัวของสนามไฟฟ้าจะอยู่เพียงบริเวณตรงจุดบ่อนกำลังงานที่ตรงกลางโดยพิจารณาความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 1000 V/m ซึ่งไม่ครอบคลุมทั่วทั้งวัสดุไดอิเล็กตริก การจำลองบ่อนกำลังงานให้แผ่นเพลตแบบ 2 จุดรูปแบบที่ 1 แสดงดังรูปที่ 3.4



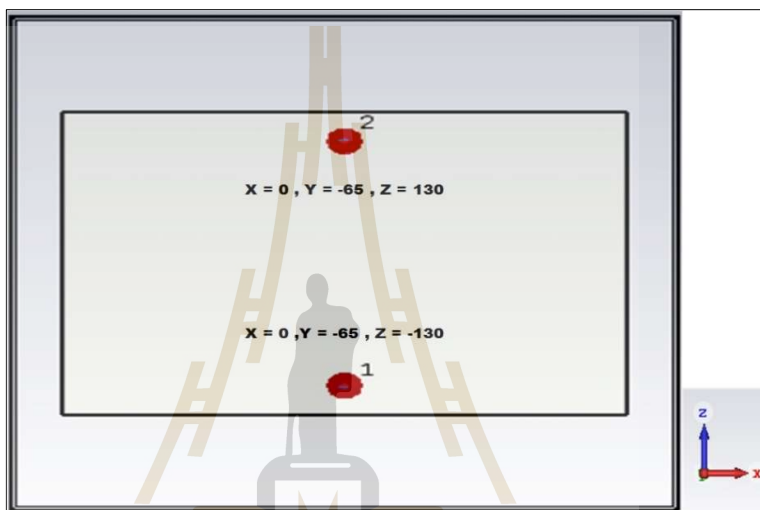
(ก) ตำแหน่งจุดบ่อนกำลังงานแบบ 2 จุด แนวนอน



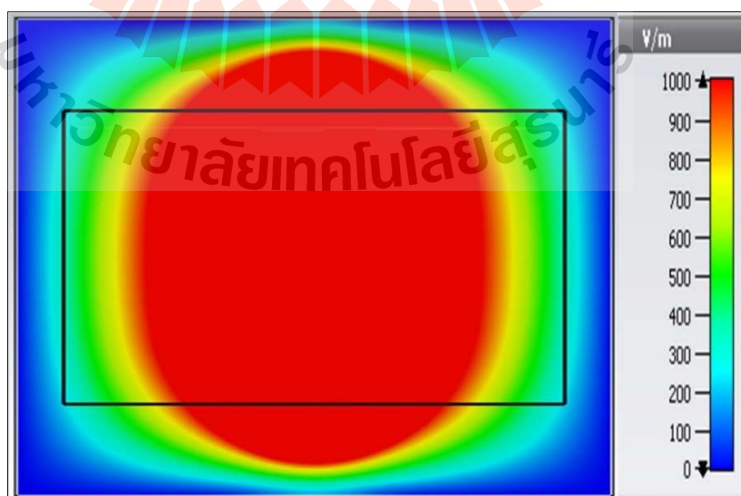
(ข) ผลการจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า

รูปที่ 3.4 จำนวนจุดบ่อนกำลังงานและผลการจำลองแบบ 2 จุด แนวนอน

จากรูปที่ 3.4 (ก) เป็นการป้อนกำลังงานให้กับแผ่นเพลตจำนวน 2 จุด แนวนอน ในตำแหน่ง $x = -130$, $Y = -65$, $Z = 0$ และตำแหน่ง $x = 130$, $Y = -65$, $Z = 0$ เมื่อทำการจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าจะได้ตามรูปที่ 3.4 (ข) การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าจะอยู่เกือบทั่วทั้งแผ่นแต่ก็ยังเหลือบริเวณมุมของแผ่นเพลตที่ความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่าน้อยโดยพิจารณาความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 1000 V/m การจำลองป้อนกำลังงานให้แผ่นเพลตแบบ 2 จุดรูปแบบที่ 2 แสดงดังรูปที่ 3.5



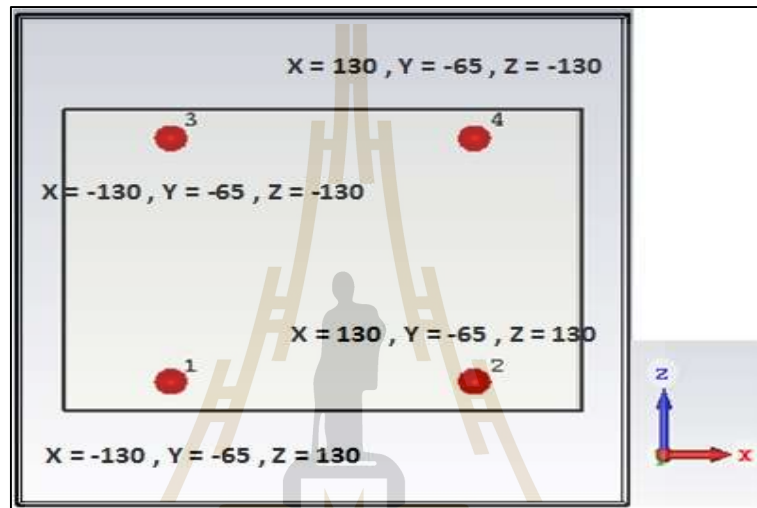
(ก) ตำแหน่งจุดป้อนกำลังงานแบบ 2 จุด แนวนตั้ง



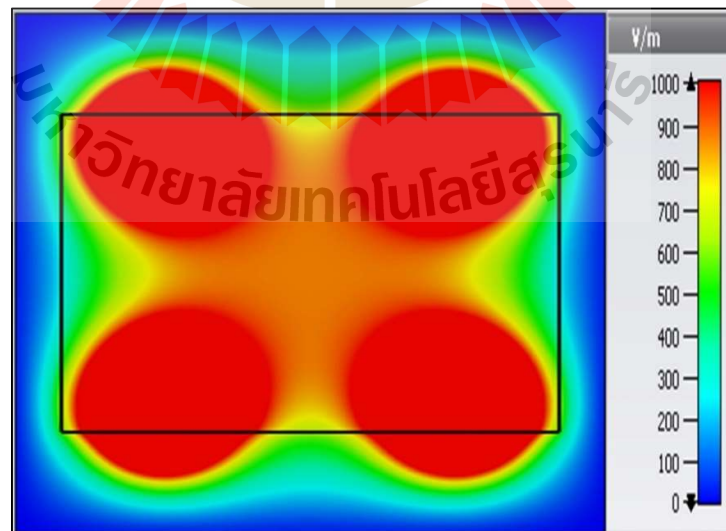
(ข) ผลการจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า

รูปที่ 3.5 จำนวนจุดป้อนกำลังงานและผลการจำลองแบบ 2 จุด แนวนตั้ง

จากรูปที่ 3.5 (ก) เป็นการป้อนกำลังงานให้กับแผ่นเพลตจำนวน 2 จุด แนวตั้ง ในตำแหน่ง $x = 0, Y = -65, Z = 130$ และตำแหน่ง $x = 0, Y = -65, Z = -130$ เมื่อทำการจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าจะได้ตามรูปที่ 3.5 (ข) การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าจะอยู่เฉพาะบริเวณแนวตั้งตามจุดป้อนกำลังงานไม่ทั่วทั้งแผ่นและด้านข้างของแผ่นเพลตมีความเข้มสนามไฟฟ้าน้อยโดยพิจารณาความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 1000 V/m การจำลองป้อนกำลังงานให้แผ่นเพลตแบบ 4 จุด แสดงดังรูปที่ 3.6



(ก) ตำแหน่งจุดป้อนกำลังงานแบบ 4 จุด

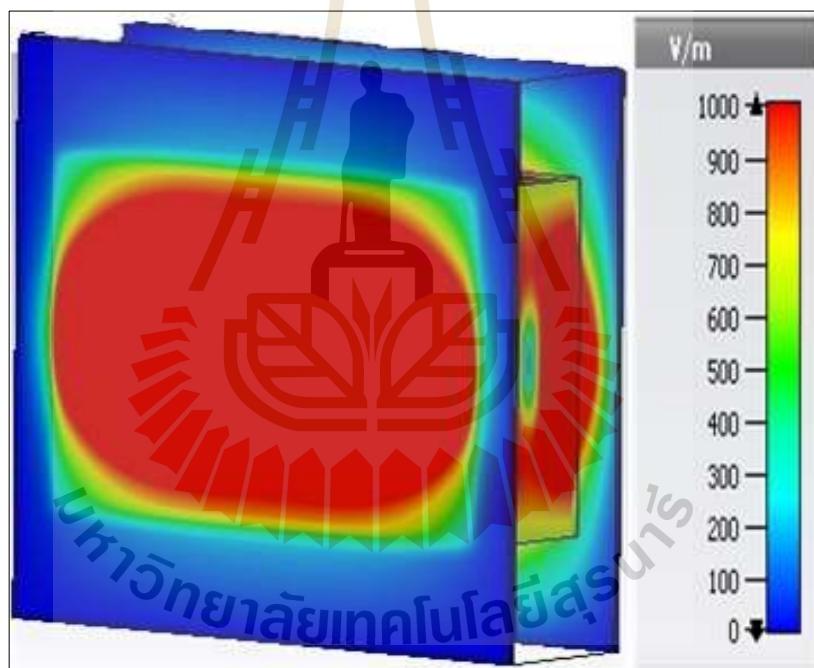


(ข) ผลการจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า

รูปที่ 3.6 จำนวนจุดป้อนกำลังงานและผลการจำลองแบบ 4 จุด

จากรูปที่ 3.6 (ก) เป็นการป้อนกำลังงานให้กับแผ่นเพลตจำนวน 4 จุด ในตำแหน่ง $X = -130$, $Y = -65$, $Z = 130$ ตำแหน่ง $X = 130$, $Y = -65$, $Z = 130$ ตำแหน่ง $X = -130$, $Y = -65$, $Z = -130$ และตำแหน่ง $X = 130$, $Y = -65$, $Z = -130$ เมื่อทำการจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าจะได้ตามรูปที่ 3.6 (ข) การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าจะอยู่เฉพาะบริเวณแนวตั้งตามจุดป้อนกำลังงานไม่ทั่วทั้งแผ่นตรงกลางและด้านข้างของแผ่นเพลตมีความเข้มสนามไฟฟ้าน้อยโดยพิจารณาความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 1000 V/m

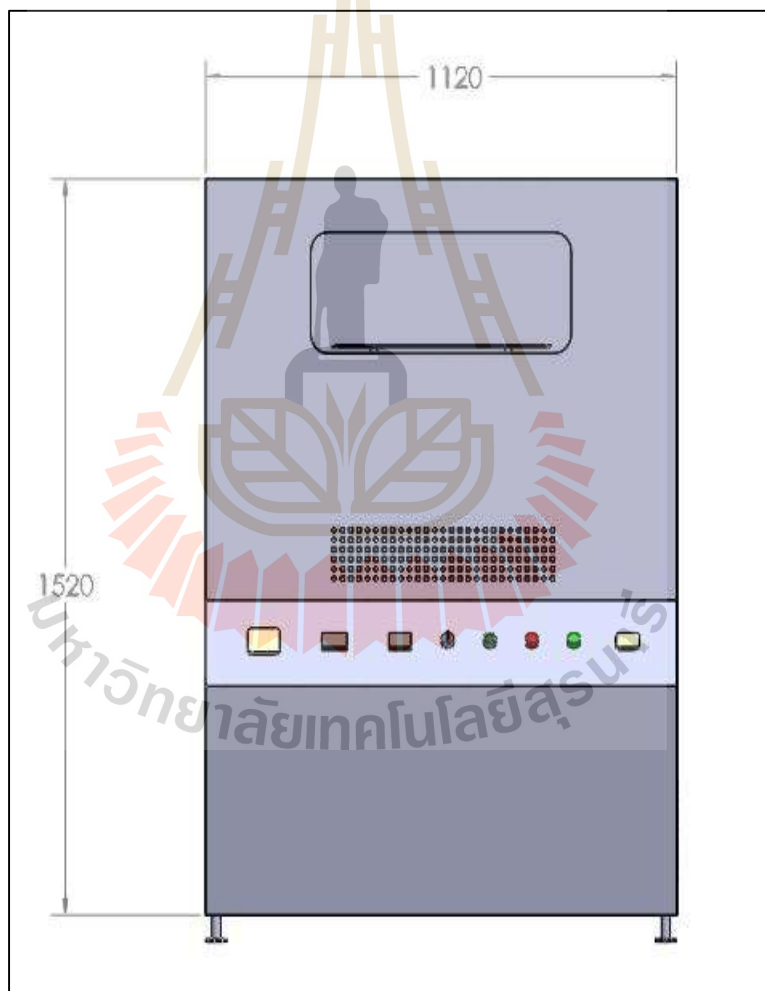
จากการจำลองความเข้มสนามไฟฟ้าทั้ง 4 รูปแบบ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้การป้อนกำลังงานให้กับแผ่นเพลตแบบ 2 จุด แนวนอน เนื่องจากพบว่ามีการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่ครอบคลุมทั้งวัสดุไดอิเล็กตริกและการกระจายตัวรอบด้านได้อย่างสมดุลที่สุด แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ผลการจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่ดีที่สุดที่สามารถกำจัดมอดได้เต็มพื้นที่วัสดุไดอิเล็กตริก

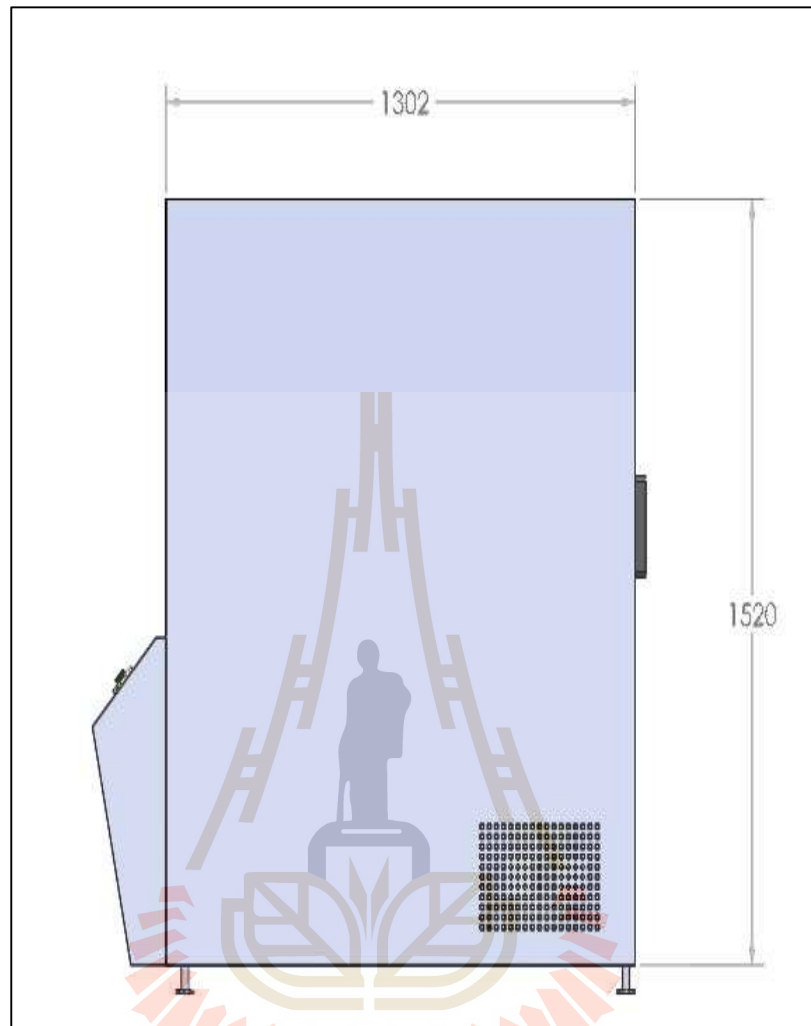
3.2.2 การออกแบบเครื่องการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกสำหรับการฆ่ามอดในข้าวโพดและมอดในถั่วเขียวในภาชนะบรรจุขนาด 5 กิโลกรัม

จากการออกแบบเพื่อหาขนาดสำหรับการออกแบบเครื่องนั้น เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องให้ความสำคัญ เพื่อให้มีการออกแบบมีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด ซึ่งโครงสร้างจะต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะใส่อุปกรณ์การออกแบบทั้งหมด ในระบบนี้จึงเป็นโครงสร้างที่มีขนาด กxยxส เท่ากับ 1120x1302x1520 mm ดังรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแหล่งจ่ายกำลังงานและส่วนการให้ความร้อนไดอิเล็กตริก



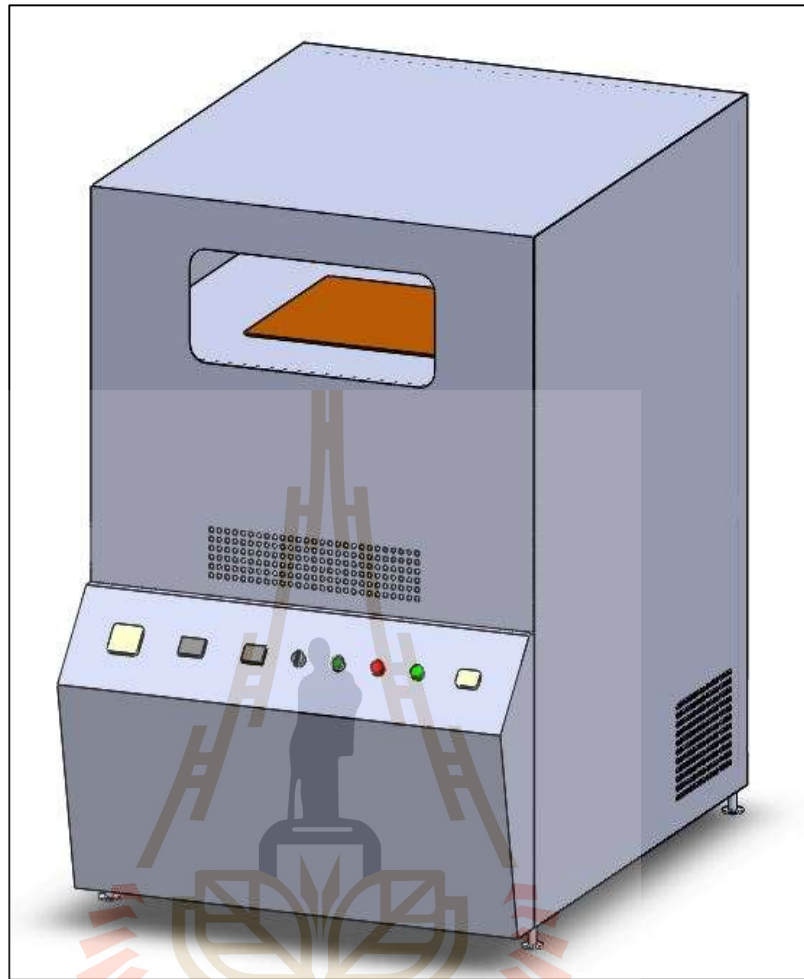
(ก) ด้านหน้า

รูปที่ 3.8 ขนาดโครงสร้างเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริก



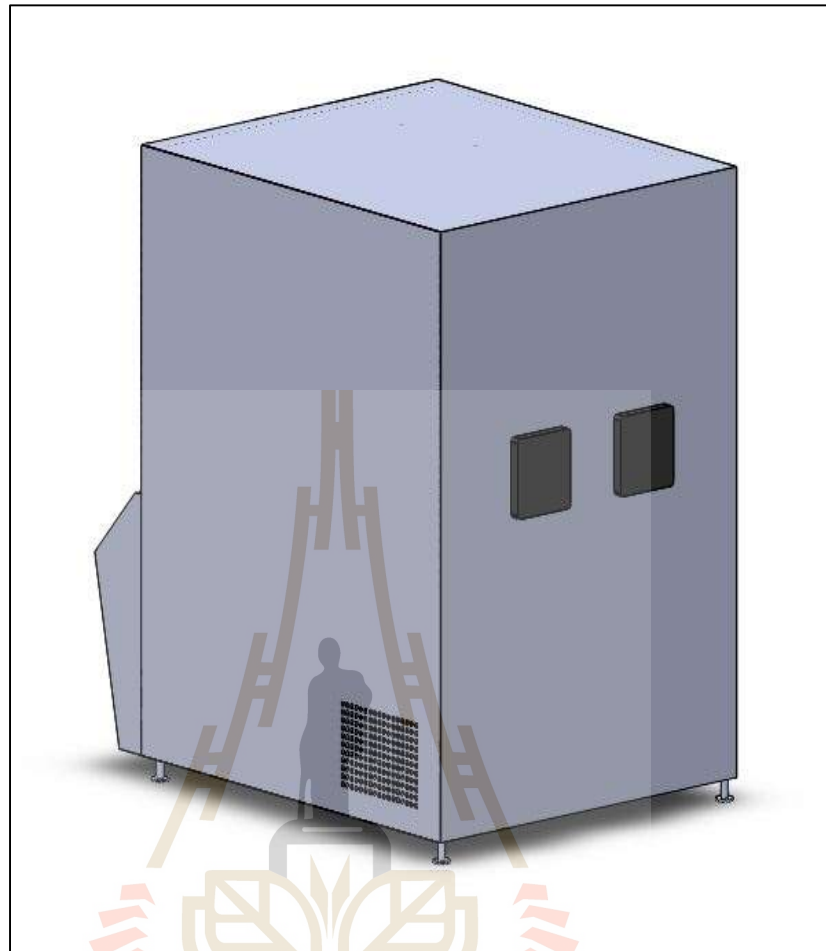
(ข) ด้านข้าง

รูปที่ 3.9 ขนาดโครงสร้างเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กทริก (ต่อ)



(ก) ด้านหน้า

รูปที่ 3.10 รูปจำลองเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริกที่ทำการออกแบบ



(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 3.11 รูปจำลองเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริกที่ทำการออกแบบ (ต่อ)



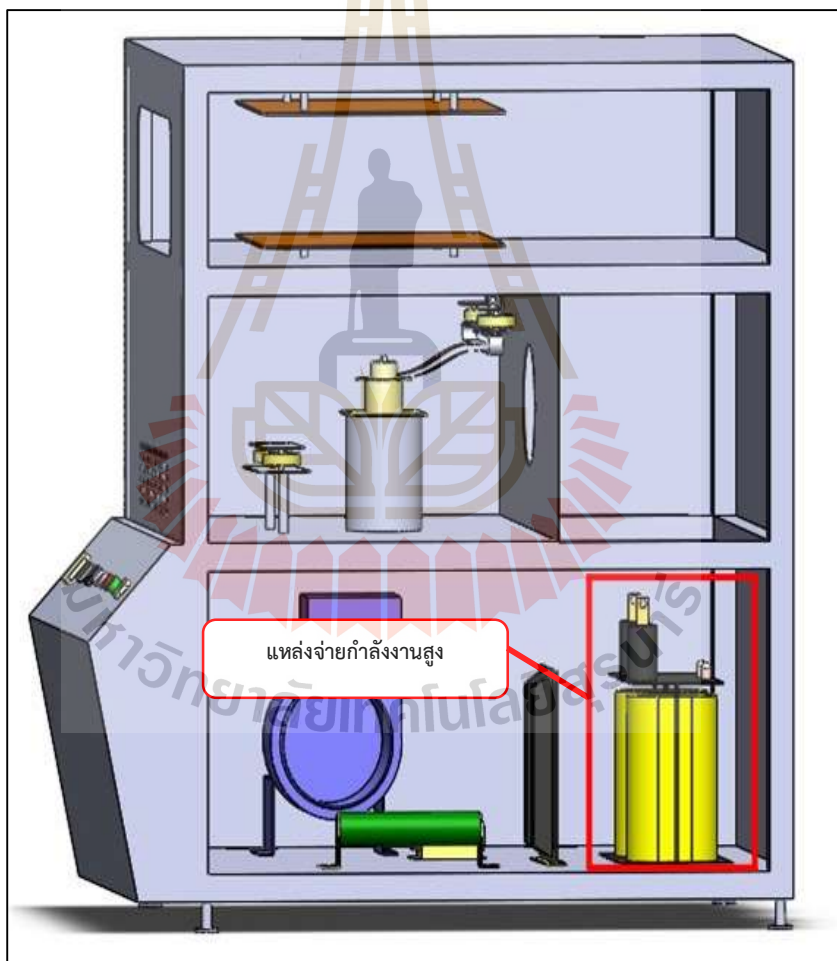
(ก) เชื่อมประกอบโครงตามที่ออกแบบ



(ข) โครงที่ทำการเชื่อมประกอบเสร็จ

รูปที่ 3.12 โครงเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กทริกสำหรับการฆ่ามอด
ที่สร้างขึ้นตามขนาดที่ออกแบบไว้

สำหรับชุดวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุสำหรับเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริก จะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ คือ ภาควงจรกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุ ภาควงจรแมตซ์อิมพีแดนซ์และ ภาควงจรเหนี่ยวนำความร้อนอิเล็กทรอนิกส์โทรดแบบแผ่นเพลต โดยภาควงจรกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุ (Oscillator) จะกำเนิดสัญญาณโดยใช้หลอดอิเล็กทรอนิกส์ตรอน (Electron tube) และเนื่องจากผลการ จำลองและการคำนวณพบว่าต้องใช้กำลังงานที่เอาต์พุตเพลตประมาณ 9 KW ใช้ช่วงความถี่ 10 – 80 MHz ซึ่งการจัดวางระบบแหล่งจ่ายกำลังงานกำลังสูงสามารถแสดงดังรูปที่ 3.13 และระบบแหล่งจ่าย กำลังงานกำลังสูงที่ติดตั้งแล้วแสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 รูปแบบการวางแหล่งจ่ายกำลังงานเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริก สำหรับฆ่ามอดในข้าวโพดและมอดในถั่วเขียว



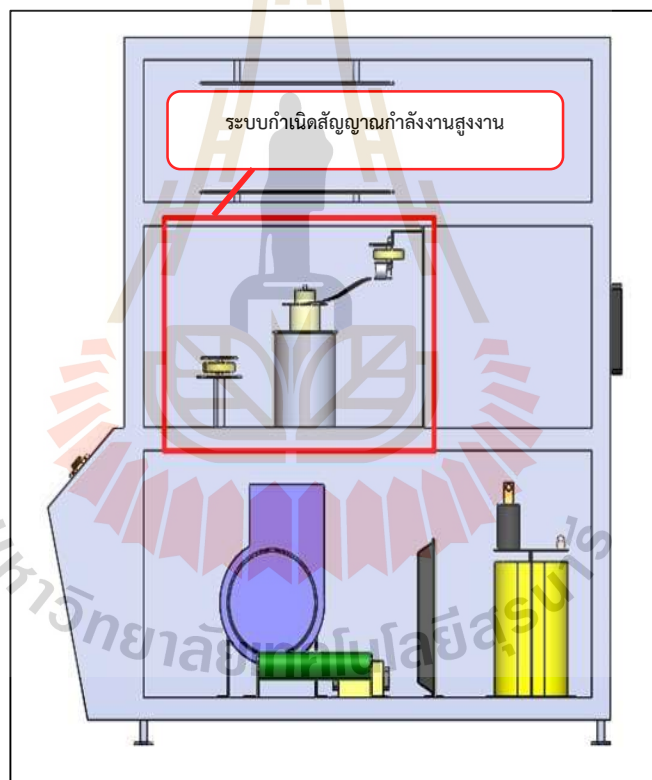
(ก) ด้านหลัง



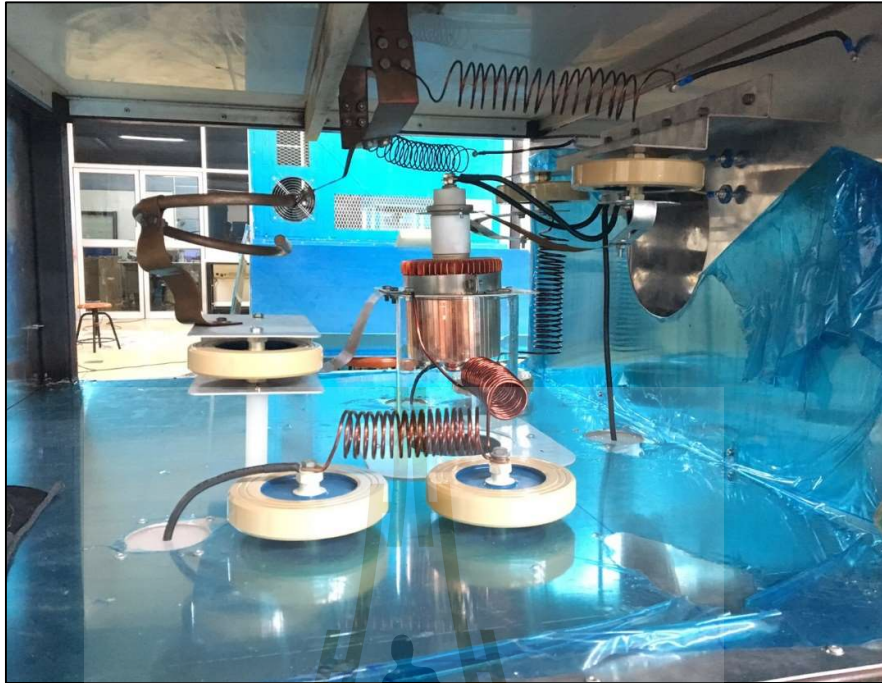
(ข) ด้านข้าง

รูปที่ 3.14 ระบบจ่ายกำลังงานสูงที่ติดตั้งแล้ว

สำหรับการออกแบบชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุ (Oscillator) ด้วยหลอดอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งลักษณะวงจรภาคเอาต์พุตของหลอดอิเล็กทรอนิกส์จะถูกออกแบบเป็นวงจรแมตซ์อิมพีแดนซ์ ซึ่งเป็นการแมตซ์ ระหว่างภาควงจรกำเนิดความถี่วิทยุกับภาควงจรเหนี่ยวนำความร้อนอิเล็กทรอนิกส์แบบแผ่นเพลตเพื่อป้องกันการเสียหายของวงจร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่วงความถี่การทำงานของหลอดอิเล็กทรอนิกส์แต่ละชนิดที่สามารถกำเนิดความถี่และกำลังงานสูงสุดได้ สำหรับกำลังงานเอาต์พุตจากวงจรกำเนิดความถี่วิทยุ จะส่งไปที่ภาควงจรเหนี่ยวนำความร้อนอิเล็กทรอนิกส์แบบแผ่นเพลตที่ภาคสุดท้ายของวงจรเพื่อข่มอดและไข่มอดต่อไป ซึ่งการจัดวางระบบกำเนิดสัญญาณกำลังงานสูงสามารถแสดงดังรูปที่ 3.15 และระบบกำเนิดสัญญาณกำลังงานสูงที่ติดตั้งแล้วสามารถแสดงดังรูปที่ 3.16

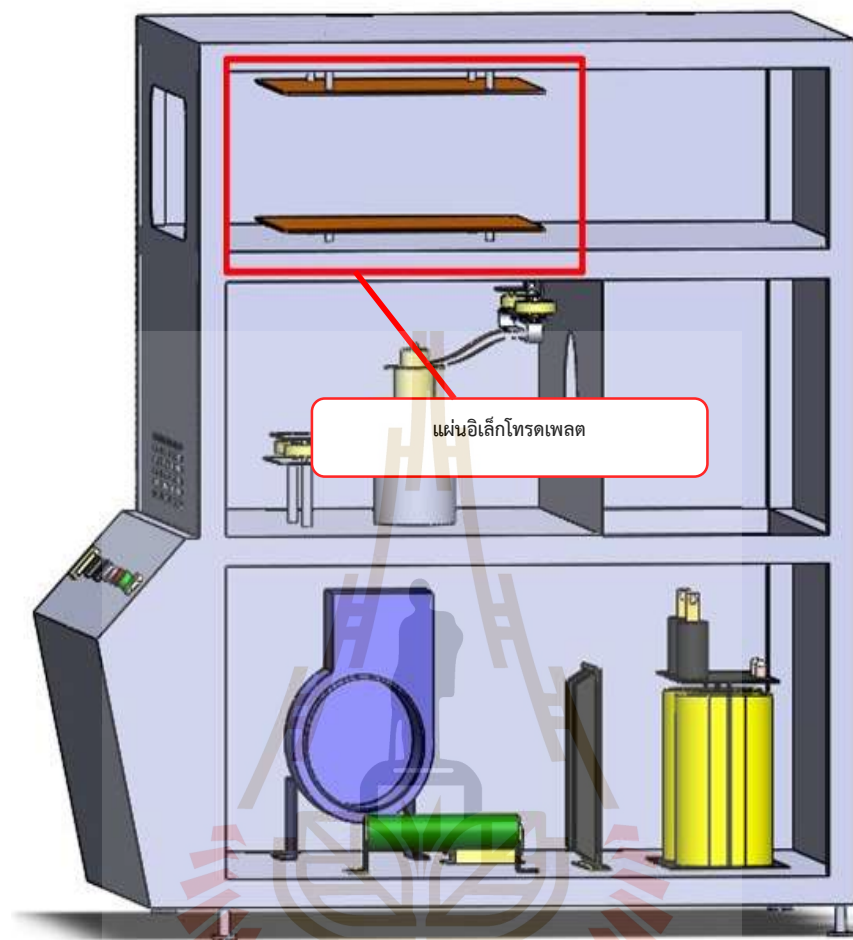


รูปที่ 3.15 รูปแบบการวางระบบกำเนิดสัญญาณกำลังงานสูงของเครื่องให้ความร้อนได้อิเล็กทรอนิกส์
สำหรับข่มอดในข้าวโพดและมอดในถั่วเขียว



รูปที่ 3.16 การติดตั้งชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุกำลังสูง

สำหรับภาควงจรเหนี่ยวนำความร้อนอิเล็กทรอนิกส์ เป็นการพิจารณาตัวสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต ซึ่งสามารถกระจายพลังงานสนามไฟฟ้าเข้าสู่วัสดุไดอิเล็กตริกให้มีความเหมาะสม จึงต้องมีการพิจารณาถึงขนาดและปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้า จากงานวิจัยที่ผ่านมาตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต เป็นลักษณะรูปแบบการให้ความร้อนนั้นมีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากการกระจายสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลตมากที่สุด โดยผ่านวัสดุตัวกลาง ซึ่งเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก โดยลักษณะของตัวปล่อยคลื่นแบบแผ่นเพลตจะมีคุณสมบัติเป็นเหมือนตัวเก็บประจุ และมีทิศทางการไหลของคลื่นสนามไฟฟ้าจากขั้วอิเล็กทรอนิกส์ประจุบวกไปยังประจุลบ ซึ่งรูปแบบของการจัดวางตัวสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตแสดงดังรูปที่ 3.17 และการติดตั้งจริงแสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 รูปแบบการวางแผ่นอิเล็กโทรดของเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริกสำหรับฆ่ามอดใน
ข้าวโพดและมอดในถั่วเขียว



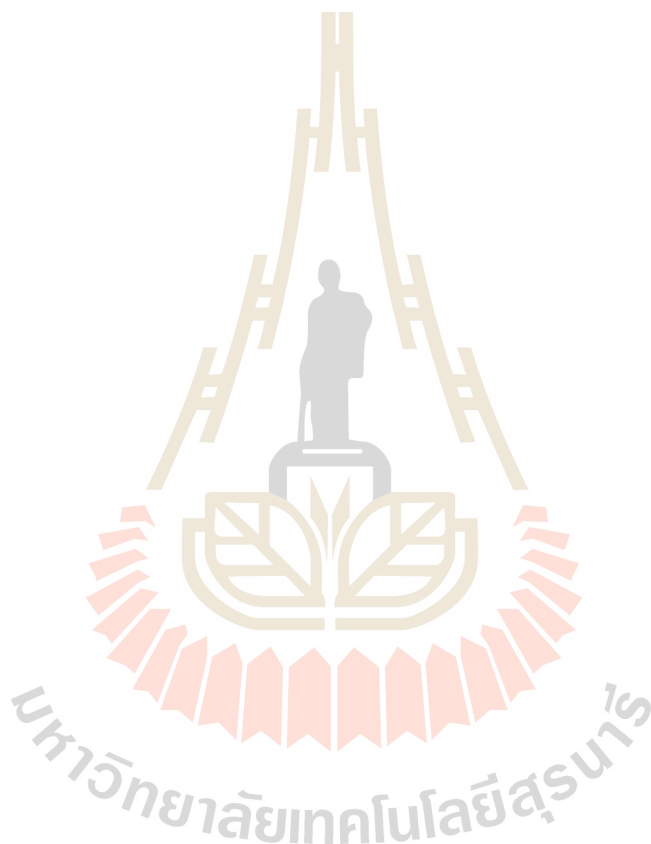
รูปที่ 3.18 การติดตั้งแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบ



รูปที่ 3.19 โครงสร้างเครื่องกำจัดมอดในเมล็ดธัญพืชสำหรับเกษตรกรและอุตสาหกรรมการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์รวมถึงการส่งออกด้วยคลื่นความถี่วิทยุเพื่อทดแทนการใช้สารเคมี

3.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ผลการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกด้วยวิธีการคำนวณจากค่าคุณสมบัติของมอด และใช้โปรแกรม CST ในการวิเคราะห์ถึงระดับกำลังงานและความเข้มสนามไฟฟ้าที่สามารถทำให้เกิดความร้อนที่วัสดุไดอิเล็กตริกได้ เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นการวิเคราะห์และออกแบบเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริกสำหรับการฆ่ามอดในข้าวโพดและมอดในถั่วเขียวในภาชนะบรรจุขนาด 5 กิโลกรัม ทดสอบการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกในบทต่อไป



บทที่ 4

อุปกรณ์และวิธีการวัดและทดสอบผล

การออกแบบเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริกสำหรับฆ่ามอดข้าวโพดและมอดถั่วเขียวให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด จำเป็นต้องมีการวัดผลจากการออกแบบเพื่อนำผลมาวิเคราะห์ และปรับปรุงให้เกิดประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด ดังนั้นเครื่องมือในการวัดผลและวิธีการวัดทดสอบจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์และการประมวลผลที่สูง ซึ่งสามารถใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ รวมถึงวิธีการวัดดังต่อไปนี้

4.1 อุปกรณ์

1) คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC)

คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ใช้สำหรับการจำลองแบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองแบบเพื่อการคาดการณ์ผลจากการออกแบบ เพื่อนำมาสู่การสร้างและทดสอบการใช้งานจริง แสดงดังรูปที่ 4.1

2) เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (spectrum analyzer)

อุปกรณ์เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม ใช้สำหรับการวัดและวิเคราะห์รูปสัญญาณที่ได้จากการออกแบบ เพื่อนำผลมาแก้ไขและปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานให้ดีที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.2

3) เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer)

อุปกรณ์เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ใช้สำหรับการวัดผลการออกแบบวงจรแมตซ์ซิงอิมพีแดนซ์ เพื่อให้สามารถส่งกำลังงานไปยังโหลดไดอิเล็กตริกได้ดีที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.3

4) เครื่องวัดกำลัง (power meter)

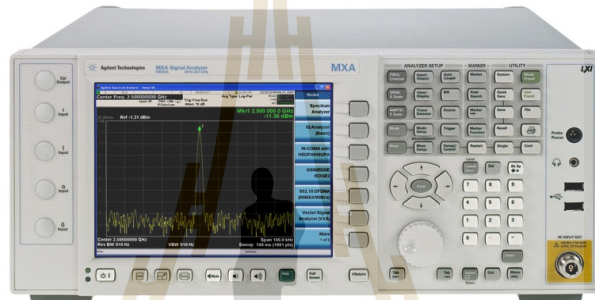
อุปกรณ์เครื่องวัดกำลัง ใช้สำหรับวัดกำลังงานเอาต์พุตที่ได้จากการออกแบบและสร้างชุดต้นแบบ เพื่อวิเคราะห์กำลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริกและเก็บผลการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.4

5) กล้องถ่ายภาพความร้อน

อุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพความร้อนเพื่อตรวจสอบอุณหภูมิของข้าว ในขณะที่ทำการทดสอบเพื่อการวิเคราะห์ผลที่มีประสิทธิภาพสูงสุด แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.1 คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล



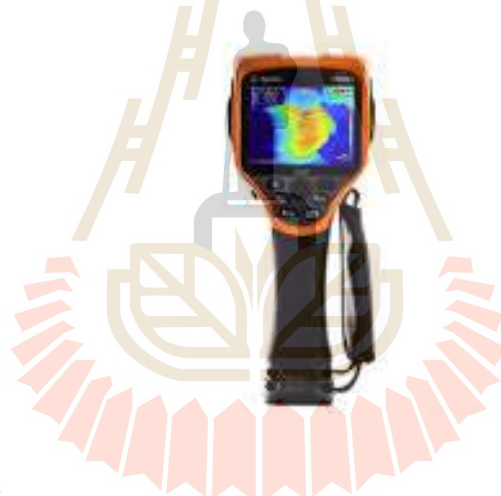
รูปที่ 4.2 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม



รูปที่ 4.3 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย



รูปที่ 4.4 เครื่องวัดกำลัง



รูปที่ 4.5 กล้องถ่ายภาพความร้อน

4.2 วิธีการ

1) วิเคราะห์และออกแบบระบบการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกเพื่อนำไปหม่อมอดในข้าวโพดและถั่วเขียวการหม่อมอดข้าวด้วยการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกนั้น เป็นการพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยทำการออกแบบวงจรให้สามารถปรับเปลี่ยนค่าความถี่และกำลังงานได้ ทั้งนี้เพื่อให้ได้ระบบการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริกที่เหมาะสมกับคุณลักษณะของหม่อมอด อีกทั้งยังสามารถหม่อมอดได้อย่างมีประสิทธิภาพไม่ทำให้เสียหายอีกทั้งเป็นการปลอดภัยยิ่งขึ้นอีกด้วย ยังไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและผู้บริโภคเนื่องจากไม่ต้องใช้สารเคมีในการหม่อมอด นอกจากนี้เทคนิควิธีการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกนั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานให้เกิด

ประโยชน์ได้ในหลากหลายด้าน ซึ่งการศึกษาและออกแบบระบบการให้ความร้อนไดอิเล็กทริกด้วยคลื่นความถี่วิทยุ นั้น ผู้วิจัยจะได้อ้างอิงจากผลงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องที่ได้ทำการทดลองและได้เทคโนโลยีใหม่ในการฆ่ามอดที่ประหยัด ใช้งานได้ง่ายสะดวก เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม วิธีการฆ่ามอดที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน จะใช้สารเคมีในการรมเพื่อฆ่า สารเคมีที่นิยมใช้มี 2 ชนิด คือ เมทิลโบรไมด์ (Methyl Bromide) และฟอสฟีน (Phosphine) ถึงแม้ว่าเมทิลโบรไมด์จะมีประสิทธิภาพในการฆ่ามอดข้าว แต่มีแนวโน้มยกเลิก เนื่องจากเหตุผล เช่น การต้านทานยาของมอด การตกค้างของสารเคมี และความเป็นพิษของสารเคมีต่อผู้ใช้ อีกทั้งยังเป็นตัวการทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศโลก และทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันหลายประเทศได้มองหาทางเลือกทดแทนการใช้สารเคมี เช่น การใช้ การควบคุมระดับออกซิเจนด้วยก๊าซอื่น ๆ เช่น ก๊าซไนโตรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือการฉายรังสี เพื่อให้มอดขาดอากาศตายเป็นต้น แต่ยังไม่มียุทธวิธีถึงความชัดเจนเหมือนกับการใช้คลื่นความถี่วิทยุ แต่การใช้คลื่นความถี่วิทยุที่ผ่านมาไม่ได้รับการพัฒนา เนื่องจากอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์มีราคาสูง พลังงานสิ้นเปลืองมากและการออกแบบที่ยุ่งยาก ซับซ้อนแต่ในปัจจุบันอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ได้มีการพัฒนาไปอย่างมากทำให้มีความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ที่จะนำมาทดแทนการใช้สารเคมีได้อย่างคุ้มค่า

ศึกษาออกแบบและสร้างวงจรการให้ความร้อนไดอิเล็กทริกสำหรับการฆ่ามอดข้าว

การออกแบบและสร้างวงจรการให้ความร้อนไดอิเล็กทริกสำหรับการฆ่ามอดข้าวประกอบด้วยชุดอุปกรณ์และวงจรต่าง ๆ ดังนี้

- 1) ภาควงจรกำเนิดสัญญาณความถี่
- 2) ภาควงจรขยายสัญญาณกำลังสูง
- 3) ภาควงจรแมตซ์อิมพีแดนซ์
- 4) ภาควงจรจ่ายกำลังสนามไฟฟ้า Electrode plate
- 5) ภาควงจรต่อลงกราวด์โครงสร้างของตัวเครื่อง
- 6) แผ่นป้องกันคลื่นสัญญาณไปรบกวนภายนอก
- 7) ระบบควบคุมการทำงานของเครื่อง

4.3 สถานที่ทำการวิจัย

1) ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ อาคารเครื่องมือ 3 (F3) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

2) ห้องวิจัยและปฏิบัติการระบบสื่อสารไร้สาย สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม อาคารเครื่องมือ 3 (F3) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

บทที่ 5

การทดสอบและผลการทดสอบการให้ความร้อนแกไดอิเล็กทริก

5.1 กล่าวนำ

จากการกล่าวถึงการวิเคราะห์และออกแบบระบบการให้ความร้อนไดอิเล็กทริกสำหรับให้ความร้อนกับโพลีไดอิเล็กทริกสำหรับหม้อต้ม โดยใช้โปรแกรม CST EM STUDIO ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนั้น เมื่อพิจารณาจากการออกแบบและจำลองผลพบว่าผลที่ได้นั้นสอดคล้องกับทฤษฎี ซึ่งต่อไปจะได้นำผลการออกแบบดังกล่าวไปสร้างและวัดทดสอบจริงเพื่อเปรียบเทียบผลการออกแบบและการจำลองแบบที่ได้ในบทก่อนหน้านี้ ดังนั้นในบทที่ 5 จะได้ทำการวัดทดสอบ เพื่อเป็นการยืนยันผลการให้ความร้อนแกโพลีไดอิเล็กทริกดังกล่าว ซึ่งในการทดสอบนี้ใช้ความถี่วิทยุที่ความถี่ 42 MHz สำหรับให้ความร้อนไดอิเล็กทริก และในการวัดทดสอบคุณลักษณะของการกระจายความร้อนนั้นจะใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน Agilent KeySight รุ่น U5855A และสุดท้ายจะทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบในรูปของความร้อนจากกล้องถ่ายภาพความร้อนกับผลการจำลองค่าการสูญเสียทางไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม CST EM STUDIO เพื่อสรุปผลการวิจัยต่อไป

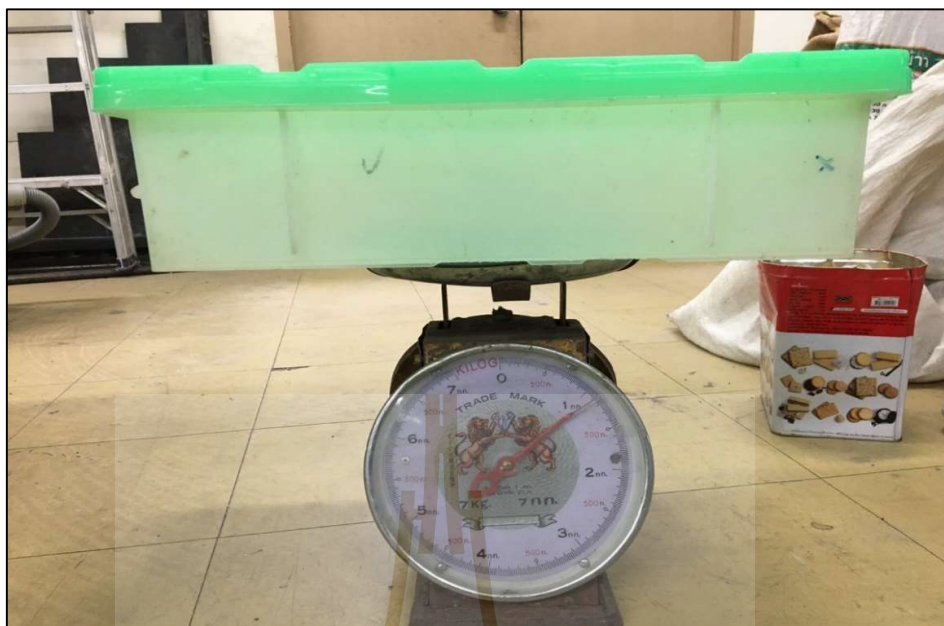
5.2 การทดสอบการให้ความร้อนไดอิเล็กทริกสำหรับหม้อต้มในข้าวโพดและถั่วเขียวในภาชนะบรรจุขนาด 5 กิโลกรัม

สำหรับการทดสอบการให้ความร้อนไดอิเล็กทริกสำหรับหม้อต้มในข้าวโพดและถั่วเขียวที่ในภาชนะบรรจุขนาด 5 กิโลกรัม ในการทดลองนั้นกล่องที่บรรจุข้าวโพดหรือถั่วเขียวจะถูกวางอยู่ตรงกลางระหว่างเพลตทั้งสองซึ่งกล่องที่บรรจุข้าวโพดและถั่วเขียวทำจากวัสดุพลาสติก Polypropylene ซึ่งไม่ดูดซับคลื่นพลังงานดังแสดงรูปที่ 5.1 และดำเนินการทดสอบเบื้องต้นในระดับห้องปฏิบัติการดังแสดงในรูปที่ 5.2 , 5.3 , 5.4 และทำการวิเคราะห์ผลต่อไป



รูปที่ 5.1 กล่องสำหรับบรรจุข้าวโพดหรือถั่วเขียวเพื่อทำการทดสอบ





(ก) น้ำหนักกล่อง 1.1 กิโลกรัม ขณะที่ยังไม่บรรจุข้าวโพดหรือถั่วเขียว



(ข) น้ำหนักรวมกล่อง 6.1 กิโลกรัม เมื่อบรรจุข้าวโพดหรือถั่วเขียว

รูปที่ 5.2 การเตรียมกล่องบรรจุข้าวโพดหรือถั่วเขียวเพื่อทำการทดสอบ



(ก) การวัดอุณหภูมิขณะเปิดเครื่องทำการทดสอบ



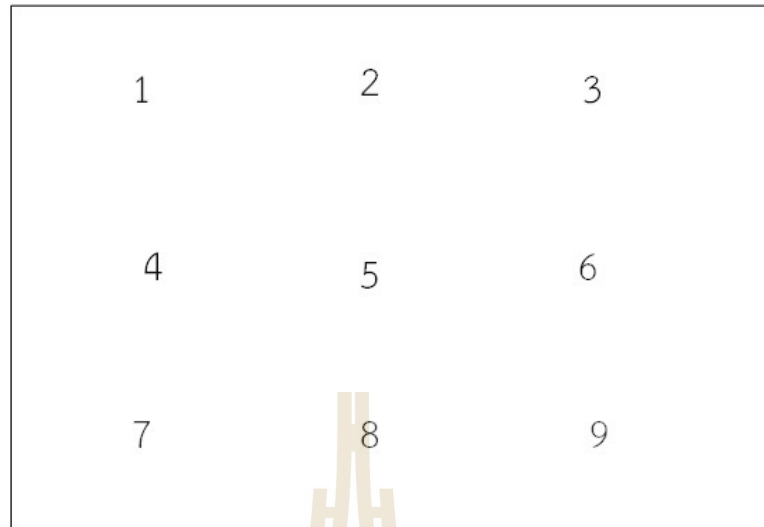
(ข) การวัดอุณหภูมิหลังจากทดสอบ

รูปที่ 5.3 การวัดอุณหภูมิหลังจากการทดสอบ



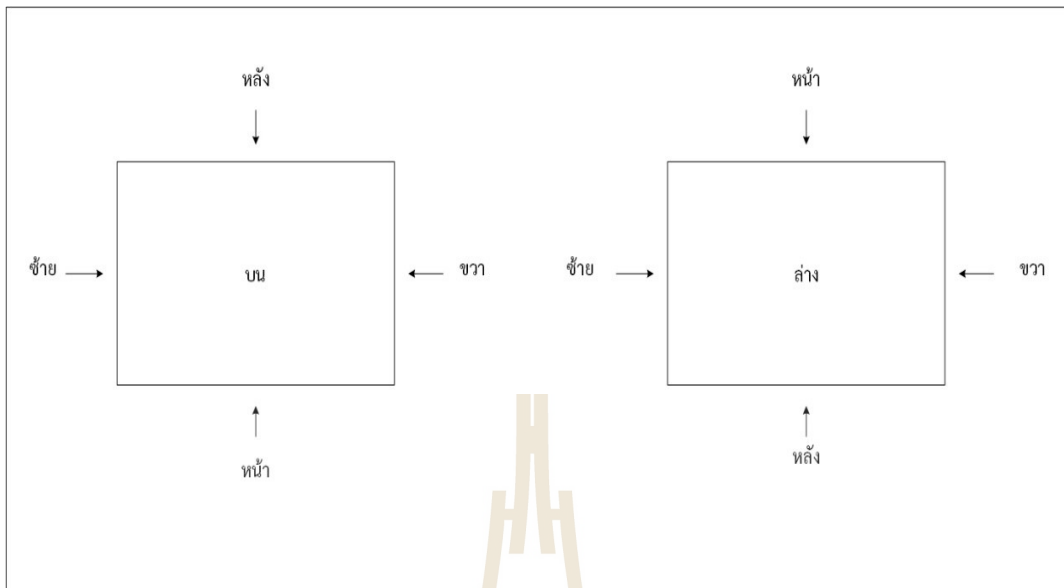
รูปที่ 5.4 ถุงผ้าที่ใช้สำหรับใส่เมล็ดเพื่อทำการทดสอบ

สำหรับการทดสอบอัตราการตายของมอด ได้ดำเนินการจัดมอดข้าวใสในถุงผ้าเป็นชุด ถุงผ้าลักษณะตามรูปที่ 5.4 โดยกำหนดตำแหน่งการวางถุงผ้าใส่เมล็ดข้าว วัดระยะเข้าไป 3 เซนติเมตร ตามรูปที่ 5.5 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องในการกำจัดมอดในข้าวโพดและถั่วเขียว และกล่องที่ใช้สำหรับบรรจุข้าวโพดและถั่วเขียวนั้นเป็นกล่องพลาสติก polypropylene ซึ่งมีขนาด กxยxส เท่ากับ 44x32x13 เซนติเมตร

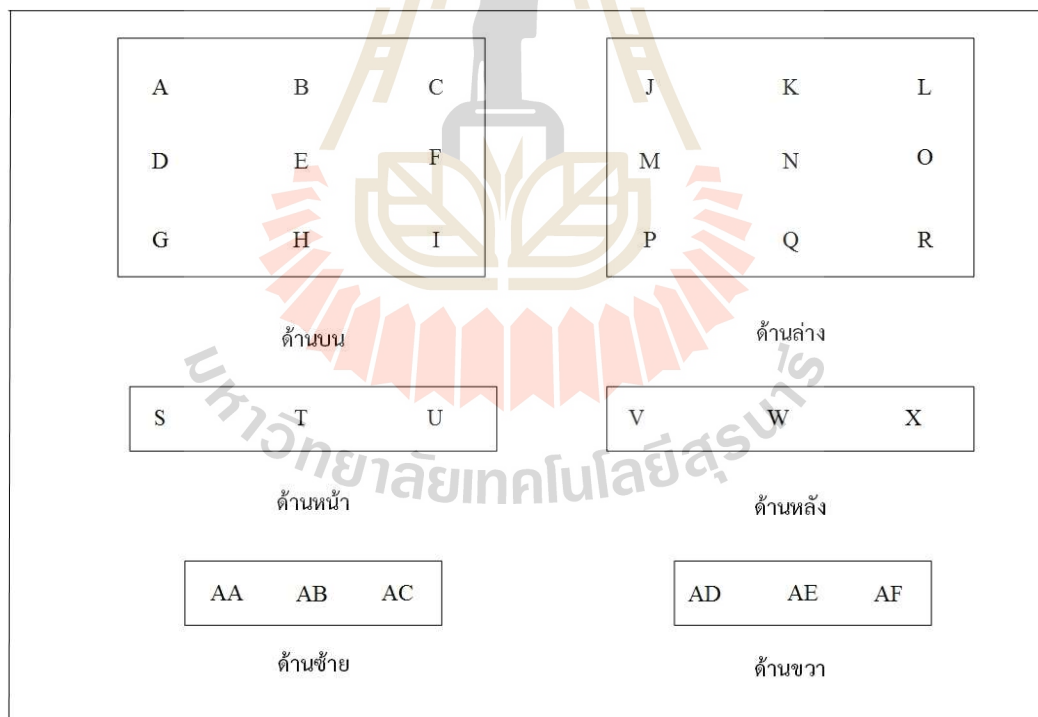


รูปที่ 5.5 ตำแหน่งการวางถุงผ้าที่ใสมอดสำหรับการทดสอบ

สำหรับการทดสอบจะทำการวัดอุณหภูมิภายนอกของกล่องที่บรรจุข้าวโพดและถั่วเขียว สำหรับการทดสอบโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน Agilent KeySight รุ่น U5855A ในการวัดอุณหภูมิและดูภาพรวมของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่กล่องบรรจุสำหรับการทดสอบ ซึ่งกำหนดตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิตามรูปที่ 5.6

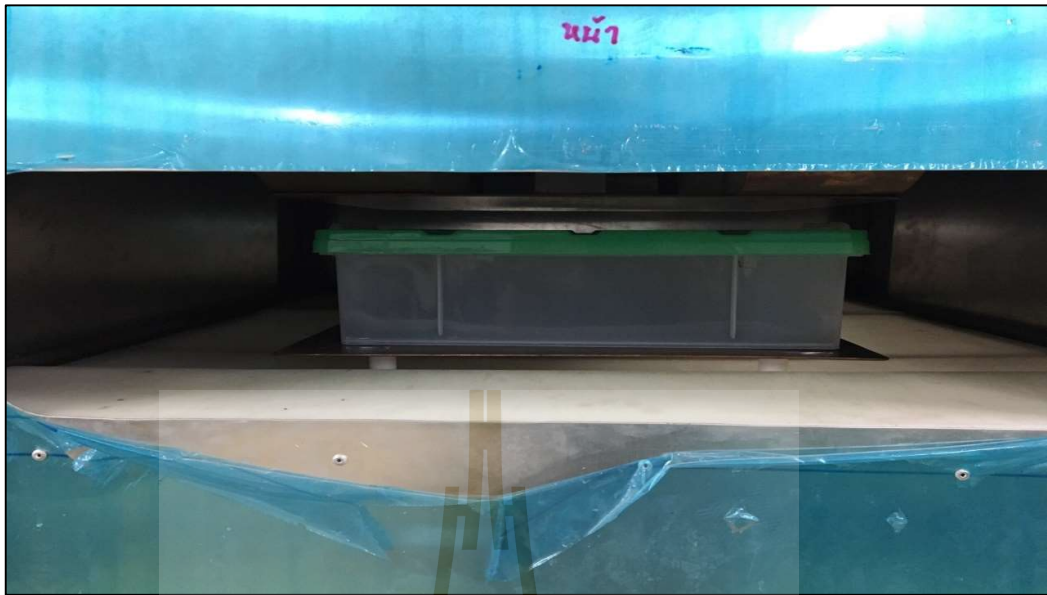


(ก) ด้านของกล่อง



(ข) ตำแหน่งที่กำหนด

รูปที่ 5.6 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายนอกกล่องที่บรรจุเพื่อการทดสอบ



(ก) การทดสอบวางแบบปกติ



(ข) การทดสอบแบบกลับกล่อง

รูปที่ 5.7 รูปแบบการวางกล่องเพื่อทำการทดสอบ

สำหรับการทดสอบการขำมอดในข้าวโพดและในถั่วเขียวนั้นรูปแบบการวางกล่องจะมีด้วยกันอยู่ 2 รูปแบบ เพื่อเปรียบเทียบกระจายสนามไฟฟ้าและความร้อนที่เกิดขึ้นว่ามีการกระจายที่สม่ำเสมอเท่ากันหรือไม่ 1. วางทดสอบแบบปกติในด้านยาวของกล่องดังแสดงในรูปที่ 5.7 (ก) และวางทดสอบแบบกลับกล่อง คือ จะวางทดสอบในแนวยาวของกล่องเสร็จ ก็จะกลับกล่องวางทดสอบในแนวสั้นของกล่องแสดงดังรูปที่ 5.7 (ข) ยกตัวอย่างเช่น ทดสอบให้ความร้อนไดอิเล็กทริกเป็นเวลา 20 วินาที การทดสอบแบบปกติจะวางกล่องด้านยาวจนครบเวลา 20 วินาที แล้วนำออกมาวัดอุณหภูมิ ส่วนการทดสอบแบบกลับกล่องจะวางในแนวยาวก่อนเป็นเวลา 20 วินาที แล้วจึงกลับกล่องให้เป็นแนวสั้นเป็นเวลา 20 วินาที แล้วจึงนำออกมาวัดอุณหภูมิ

การทดสอบวัดอุณหภูมิต่อเวลา

ทดสอบโดยใช้ข้าวโพด

1. ทดสอบโดยใช้เวลา 20 วินาที วัดผลอุณหภูมิทุกตำแหน่ง
ถ่ายภาพความร้อน ทุกด้าน ทั้ง 6 ด้าน
2. กลับด้าน ทดสอบโดยใช้เวลา 20 วินาที วัดผลอุณหภูมิทุกตำแหน่ง
ถ่ายภาพความร้อน ทุกด้าน ทั้ง 6 ด้าน
3. ทดสอบโดยใช้เวลา 40 วินาที วัดผลอุณหภูมิทุกตำแหน่ง
ถ่ายภาพความร้อน ทุกด้าน ทั้ง 6 ด้าน
4. กลับด้าน ทดสอบโดยใช้เวลา 40 วินาที วัดผลอุณหภูมิทุกตำแหน่ง
ถ่ายภาพความร้อน ทุกด้าน ทั้ง 6 ด้าน
5. ทดสอบโดยใช้เวลา 60 วินาที วัดผลอุณหภูมิทุกตำแหน่ง
ถ่ายภาพความร้อน ทุกด้าน ทั้ง 6 ด้าน
6. กลับด้าน ทดสอบโดยใช้เวลา 60 วินาที วัดผลอุณหภูมิทุกตำแหน่ง
ถ่ายภาพความร้อน ทุกด้าน ทั้ง 6 ด้าน

ทดสอบโดยใช้ถั่วเขียว

1. ทดสอบโดยใช้เวลา 20 วินาที วัดผลอุณหภูมิทุกตำแหน่ง
ถ่ายภาพความร้อน ทุกด้าน ทั้ง 6 ด้าน
2. กลับด้าน ทดสอบโดยใช้เวลา 20 วินาที วัดผลอุณหภูมิทุกตำแหน่ง
ถ่ายภาพความร้อน ทุกด้าน ทั้ง 6 ด้าน
3. ทดสอบโดยใช้เวลา 40 วินาที วัดผลอุณหภูมิทุกตำแหน่ง
ถ่ายภาพความร้อน ทุกด้าน ทั้ง 6 ด้าน
4. กลับด้าน ทดสอบโดยใช้เวลา 40 วินาที วัดผลอุณหภูมิทุกตำแหน่ง
ถ่ายภาพความร้อน ทุกด้าน ทั้ง 6 ด้าน

5. ทดสอบโดยใช้เวลา 60 วินาที วัดผลอุณหภูมิทุกตำแหน่ง
ถ่ายภาพความร้อน ทุกด้าน ทั้ง 6 ด้าน
6. กลับด้าน ทดสอบโดยใช้เวลา 60 วินาที วัดผลอุณหภูมิทุกตำแหน่ง
ถ่ายภาพความร้อน ทุกด้าน ทั้ง 6 ด้าน

5.3 ผลการวัดความร้อนที่จุดต่างๆ และอัตราการตายของมอด

ในการทดสอบจะทำการวัดอุณหภูมิภายนอกกล่องเพื่อดูอุณหภูมิและภาพรวมที่เกิดขึ้นภายนอกกล่อง ในการทดสอบใช้ข้าวโพดเป็นตัวทดสอบ เมื่อกล่องที่ทำการทดสอบมีอุณหภูมิเริ่มต้น 29.0 °C ทั้ง 6 ด้าน จากนั้นนำกล่องที่บรรจุข้าวโพดไปผ่านคลื่นความถี่วิทยุ เป็นเวลา 20 วินาที แล้วทำการวัดอุณหภูมิตามตำแหน่งที่กำหนดได้ผลตามตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิ (°C) ที่เวลา 20 วินาที โดยใช้ข้าวโพด

ด้าน	A	B	C	D	E	F	G	H	I	S	T	U	AA	AB	AC
กราวด์	39.2	39.1	39.0	39.3	39.4	39.4	39.2	39.2	39.1	39.0	37.8	37.8	37.5	37.5	37.5
กลับ กล่อง	40.0	39.0	40.0	40.0	39.0	40.0	40.0	39.0	40.0	35.3	36.7	36.7	37.6	37.8	39.0
	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	V	W	X	AD	AE	AF
ใกล้ เพลต	34.1	34.2	34.2	34.4	34.5	34.3	34.2	34.2	34.5	36.4	36.5	36.7	37.3	37.3	37.3
กลับ กล่อง	39.6	39.4	39.4	39.4	39.4	39.3	39.4	39.4	39.6	37.2	37.2	37.2	37.4	37.3	37.3

เมื่อทำการทดสอบนำข้าวโพดไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กทริกเป็นเวลา 20 วินาที ทดสอบแบบปกติ ผลการทดสอบแบบปกติ ด้านกราวด์หรือด้านบน อุณหภูมิภายนอกของกล่องที่ตำแหน่ง A = 39.2 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านบนของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง B = 39.1 °C ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง C = 39.0 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านซ้ายของกล่อง D = 39.3 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง E = 39.4 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง F = 39.4 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง G = 39.2 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางของกล่อง H = 39.2 °C และตำแหน่งสุดท้ายด้านล่างขวา I = 39.1 °C

อุณหภูมิภายนอกกล่องด้านใกล้เพลาหรือด้านล่าง อุณหภูมิภายนอกกล่องที่ตำแหน่ง J = 34.1 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านล่างของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง K = 34.2 °C ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง L = 34.2 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางซ้ายซ้ายของกล่อง M = 34.4 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง N = 34.5 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง O = 34.3 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง P = 34.2 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางกล่อง Q = 34.2 °C และตำแหน่งสุดท้ายด้านล่างขวา R = 34.5 °C อุณหภูมิด้านหน้าของกล่องที่ตำแหน่ง S = 39.0 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง T = 37.8 °C ตำแหน่งถัดไปขวาสุด U = 37.8 °C อุณหภูมิด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง V = 36.4 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง W = 36.5 °C และตำแหน่งลำดับสุดท้ายด้านขวา X = 36.7 °C อุณหภูมิด้านซ้ายของกล่องที่ตำแหน่ง AA = 37.5 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง AB = 37.5 °C ตำแหน่งถัดไปขวาสุด AC = 37.5 °C อุณหภูมิด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง AD 37.3 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง AE = 37.3 °C และตำแหน่งลำดับสุดท้ายด้านขวา AF = 37.3 °C

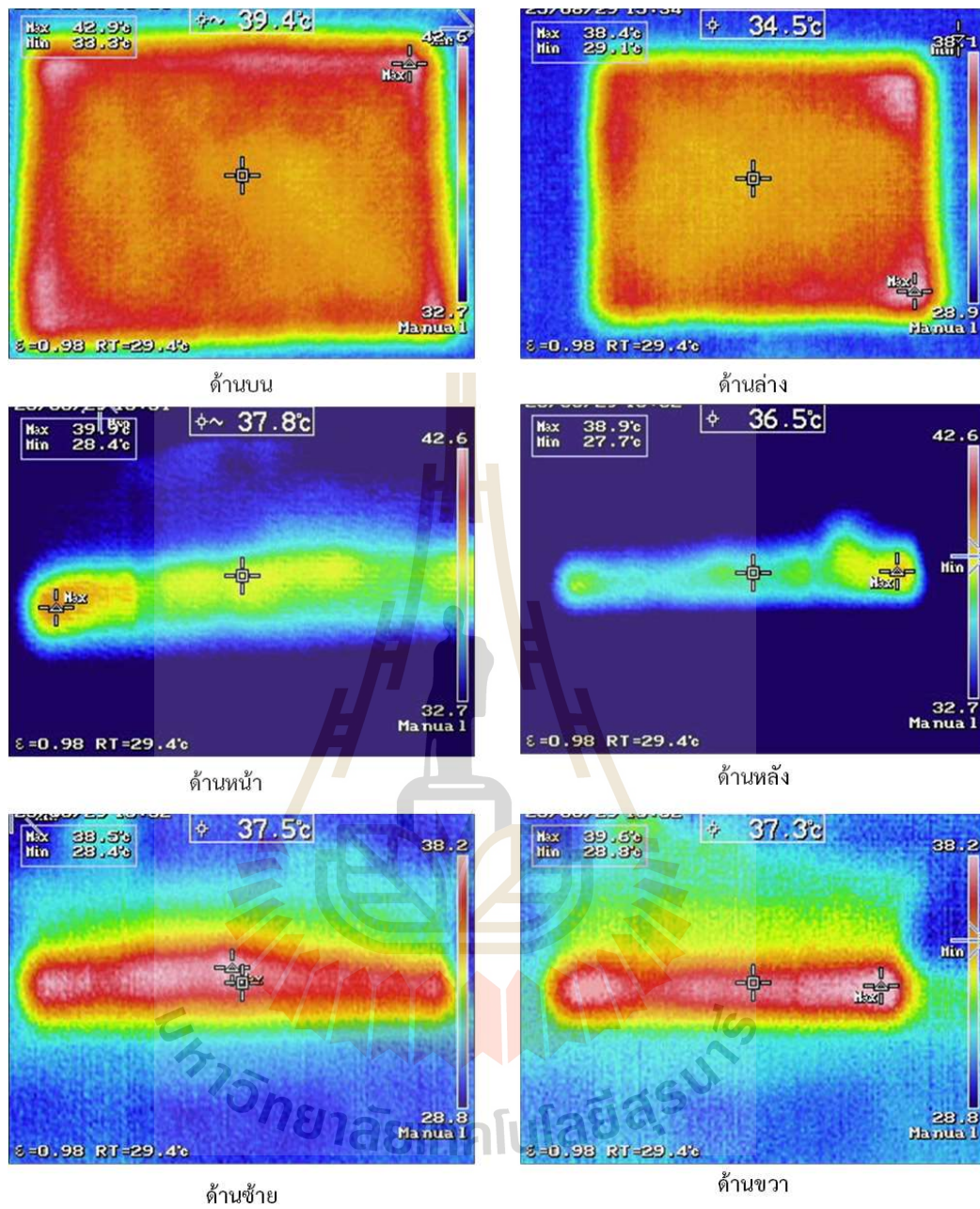
เมื่อทำการทดสอบ 20 วินาที แบบกลับกล่อง ทดสอบโดยการนำข้าวโพดไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กทริกซึ่งวางกล่องทดสอบในแนวยาว 20 วินาที แล้วกลับกล่องจากด้านยาวเป็นด้านสั้น 20 วินาที เสร็จแล้วทำการวัดอุณหภูมิ ด้านกรวดหรือด้านบน อุณหภูมิภายนอกของกล่องที่ตำแหน่ง A = 40.0 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านบนของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง B = 39.0 °C ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง C = 40.0 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านซ้ายของกล่อง D = 40.0 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง E = 39.0 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง F = 40.0 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง G = 40.0 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางของกล่อง H = 39.0 °C และตำแหน่งสุดท้ายล่างขวา I = 40.0 °C

อุณหภูมิภายนอกกล่องด้านใกล้เพลาหรือด้านล่าง อุณหภูมิภายนอกกล่องที่ตำแหน่ง J = 39.6 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านล่างของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง K = 39.4 °C ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง L = 39.4 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางซ้ายซ้ายของกล่อง M = 39.4 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง N = 39.4 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง O = 39.3 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง P = 39.4 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางกล่อง Q = 39.4 °C และตำแหน่งสุดท้ายด้านล่างขวา R = 39.6 °C อุณหภูมิด้านหน้าของกล่องที่ตำแหน่ง S = 35.3 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง T = 36.7 °C ตำแหน่งถัดไปขวาสุด U = 36.7 °C อุณหภูมิด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง V = 37.2 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง W = 37.2 °C และตำแหน่งลำดับสุดท้ายด้านขวา X = 37.2 °C อุณหภูมิด้านซ้ายของกล่องที่ตำแหน่ง AA = 37.6 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง AB = 37.8 °C ตำแหน่งถัดไปขวาสุด AC = 39.0 °C อุณหภูมิ

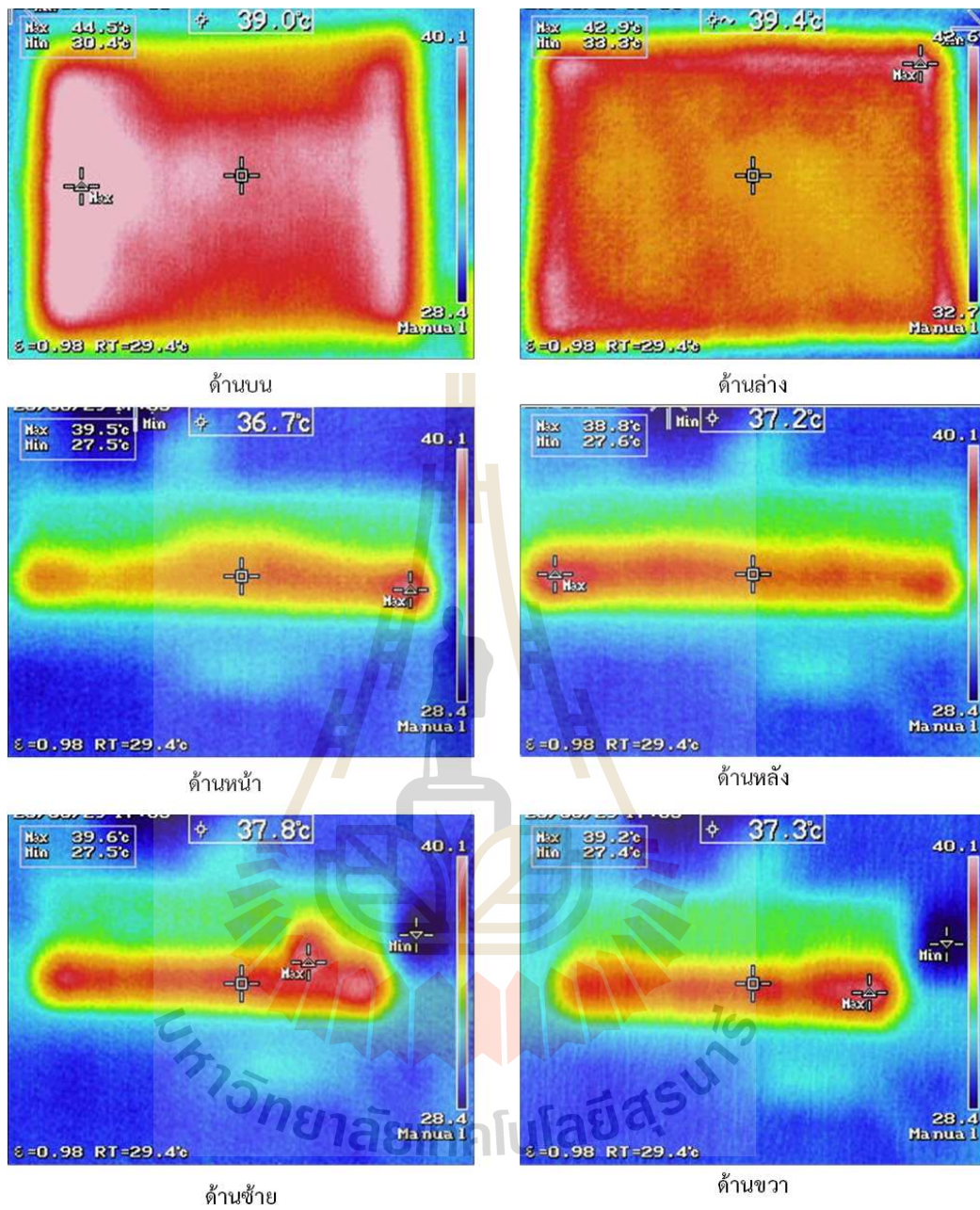
ด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง AD = 37.4 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง AE = 37.3 °C และตำแหน่งลำดับสุดท้ายด้านขวา AF = 37.3 °C

จากการทดสอบนำข้าวโพดไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริกเป็นเวลา 20 วินาที ทั้งแบบปกติและแบบกลับกล่อง พบว่าอุณหภูมิภายนอกกล่องที่ได้ทำการวัดโดยใช้กล้องจับภาพความร้อนนั้น อุณหภูมิของกล่องจะร้อนที่ตำแหน่งขอบของกล่องมากที่สุดทั้งด้านใกล้เพลตและด้านกราวด์ และพบว่าลักษณะการกระจายความร้อนของแบบกลับกล่องจะมีการกระจายที่ทั่วถึงเท่าๆ กันดีกว่าแบบปกติ แสดงดังรูปที่ 5.8 ซึ่งเป็นภาพถ่ายความร้อนแบบปกติทดสอบอุณหภูมิเป็นเวลา 20 วินาที และ แสดงดังรูปที่ 5.9 ซึ่งเป็นภาพถ่ายความร้อนแบบกลับกล่องทดสอบอุณหภูมิ 20 วินาที





รูปที่ 5.8 ภาพถ่ายความร้อนแบบปกติทดสอบอุณหภูมิเป็นเวลา 20 วินาที



รูปที่ 5.9 ภาพถ่ายความร้อนแบบกลบกล้องทดสอบอุณหภูมิ 20 วินาที

การทดสอบถัดไปทำการวัดอุณหภูมิภายนอกกล่องข้าวโพดเพื่ออุณหภูมิและภาพรวมที่เกิดขึ้นภายนอกกล่อง ในการทดสอบใช้ข้าวโพดเป็นตัวทดสอบ โดยกล่องบรรจุข้าวโพดมีอุณหภูมิเริ่มต้น 29.0 °C ทั้ง 6 ด้าน จากนั้นนำกล่องข้าวโพดไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กทริก เป็นเวลา 40 วินาที แล้วทำการวัดอุณหภูมิตามตำแหน่งที่กำหนดได้ผลตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบอุณหภูมิ (°C) ที่เวลา 40 วินาที โดยใช้ข้าวโพด

ด้าน	A	B	C	D	E	F	G	H	I	S	T	U	AA	AB	AC
กราวด์	45.9	45.6	45.6	45.5	45.2	45.3	45.4	45.6	45.8	38.8	38.8	38.8	42.5	42.5	44.0
กลับ กล่อง	49.0	49.0	49.0	49.2	49.4	49.3	49.6	49.6	49.6	50.0	49.9	51.3	49.3	50.4	52.3
	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	V	W	X	AD	AE	AF
ใกล้ เพลต	49.0	48.5	48.5	49.0	48.0	48.0	48.3	48.6	48.8	46.7	46.7	48.3	46.2	45.2	45.2
กลับ กล่อง	49.4	49.3	49.2	48.4	48.0	48.2	49.0	49.1	49.3	50.0	47.3	49.5	51.2	50.7	51.3

เมื่อทำการทดสอบนำข้าวโพดไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กทริกเป็นเวลา 40 วินาที ทดสอบแบบปกติ ผลการทดสอบแบบปกติ ด้านกราวด์หรือด้านบน อุณหภูมิภายนอกของกล่องที่ตำแหน่ง A 45.9 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านบนของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง B = 45.6 °C ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง C = 45.6 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านซ้ายของกล่อง D = 45.5 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง E = 45.2 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง F = 45.3 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง G = 45.4 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางของกล่อง H = 45.6 °C และตำแหน่งสุดท้ายด้านล่างขวา I = 45.8 °C

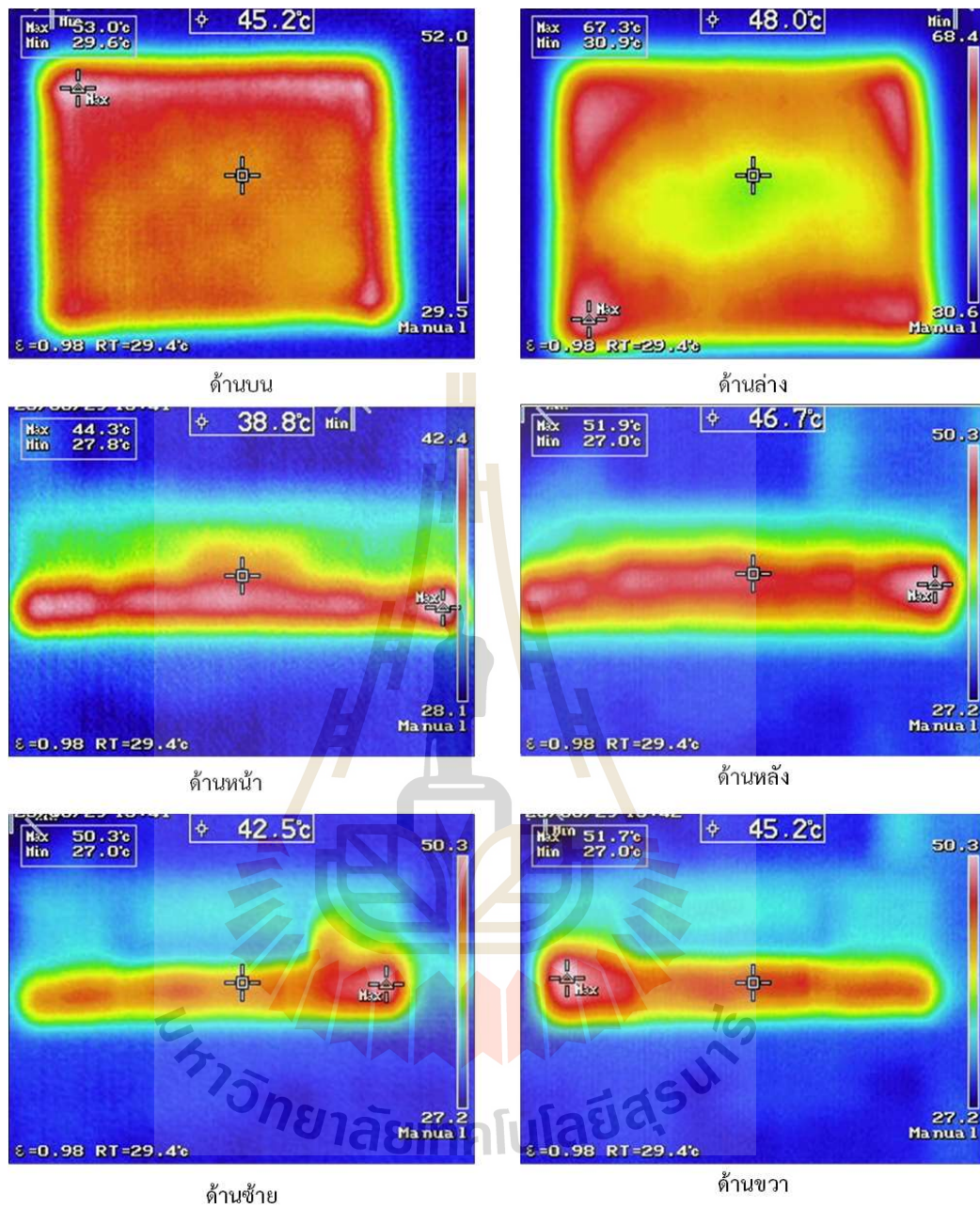
อุณหภูมิภายนอกกล่องด้านใกล้เพลตหรือด้านล่าง อุณหภูมิภายนอกกล่องที่ตำแหน่ง J = 49.0 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านล่างของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง K = 48.5 °C ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง L = 48.5 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางซ้ายของกล่อง M = 49.0 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง N = 48.0 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง O = 48.0 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง P = 48.3 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางของกล่อง Q = 48.6 °C และตำแหน่งสุดท้ายด้านล่างขวา R = 48.8 °C อุณหภูมิด้านหน้าของกล่องที่ตำแหน่ง S = 38.8 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง T = 38.8 °C ตำแหน่งถัดไปขวาสุด U = 38.8 °C อุณหภูมิด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง V = 46.7 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง W = 46.7 °C และตำแหน่งลำดับสุดท้าย

ด้านขวา $X = 48.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านซ้ายของกล่องที่ตำแหน่ง AA = $42.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง AB = $42.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปขวาสุด AC = $44.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง AD = $46.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง AE = $45.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่งลำดับสุดท้ายด้านขวา AF = $45.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$

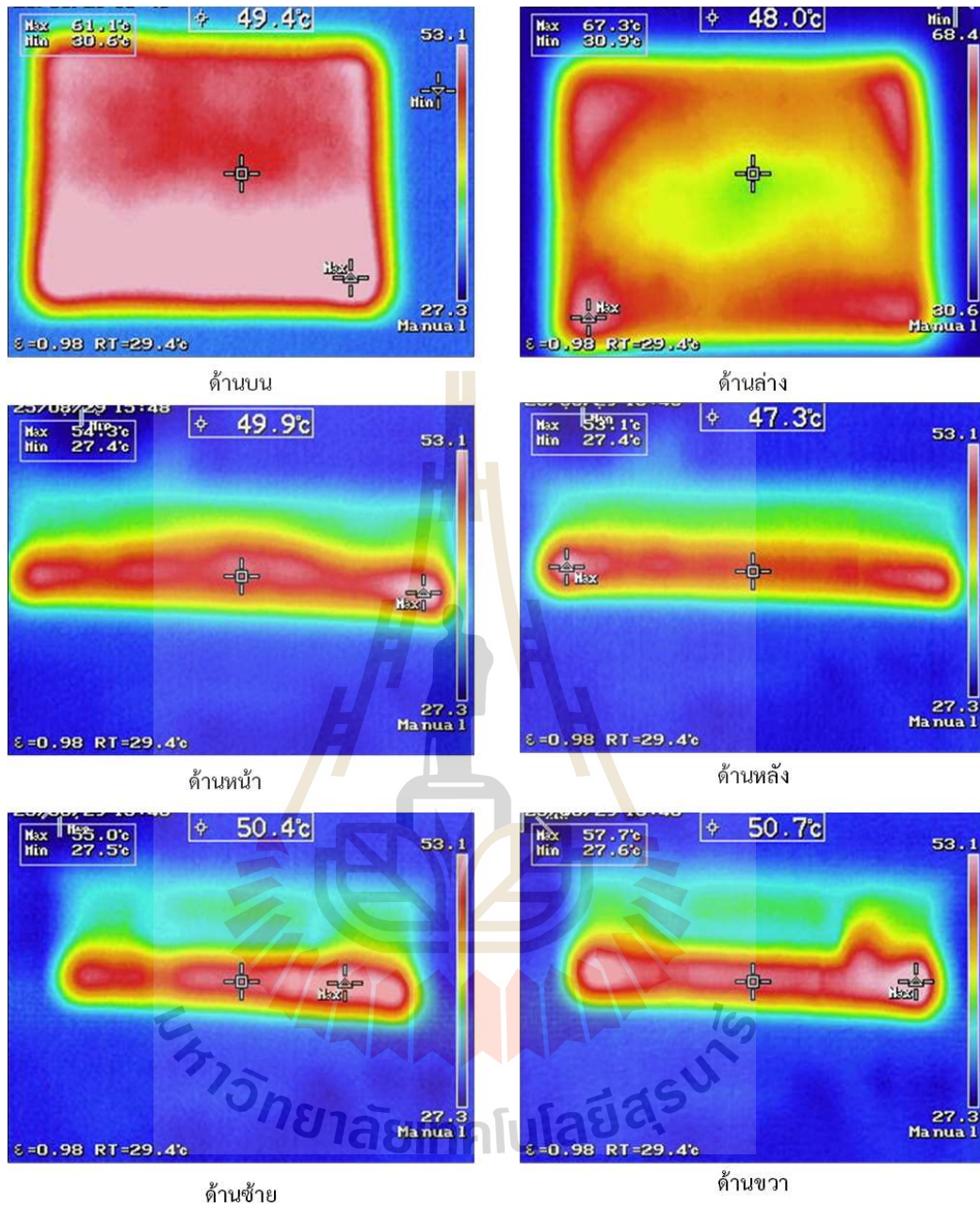
เมื่อทำการทดสอบ 40 วินาที แบบกลับกล่อง ทดสอบโดยการนำข้าวโพดไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริกซึ่งวางกล่องทดสอบในแนวยาว 25 วินาที แล้วกลับกล่องจากด้านยาวเป็นด้านสั้น 25 วินาที เสร็จแล้วทำการวัดอุณหภูมิ ด้านกราวด์หรือด้านบน อุณหภูมิภายนอกของกล่องที่ตำแหน่ง A = $49.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านบนของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง B = $49.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง C = $49.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านซ้ายของกล่อง D = $49.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง E = $49.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง F = $49.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง G = $49.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางของกล่อง H = $49.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่งสุดท้ายล่างขวา I = $49.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิภายนอกกล่องด้านใกล้เพลตหรือด้านล่าง อุณหภูมิภายนอกกล่องที่ตำแหน่ง J = $49.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านล่างของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง K = $49.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง L = $49.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางซ้ายของกล่อง M = $48.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง N = $48.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง O = $48.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง P = $49.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางของกล่อง Q = $49.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่งสุดท้ายด้านล่างขวา R = $49.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านหน้าของกล่องที่ตำแหน่ง S = $50.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง T = $49.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปขวาสุด U = $51.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง V = $50.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง W = $47.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่งลำดับสุดท้ายด้านขวา X = $49.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านซ้ายของกล่องที่ตำแหน่ง AA = $49.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง AB = $50.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปขวาสุด AC = $52.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง AD = $51.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง AE = $50.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่งลำดับสุดท้ายด้านขวา AF = $51.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$

จากการทดสอบนำข้าวโพดไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริกเป็นเวลา 40 วินาที ทั้งแบบปกติและแบบกลับกล่อง พบว่าอุณหภูมิภายนอกกล่องที่ได้ทำการวัดโดยใช้กล้องจับภาพความร้อนนั้น อุณหภูมิของกล่องจะร้อนที่ตำแหน่งขอบของกล่องมากที่สุดทั้งด้านใกล้เพลตและด้านกราวด์ และพบว่าลักษณะการกระจายความร้อนของแบบกลับกล่องจะมีการกระจายที่ทั่วถึงเท่าๆ กัน และมีอุณหภูมิที่สูงกว่าแบบปกติ แสดงดังรูปที่ 5.10 ซึ่งเป็นภาพถ่ายความร้อนแบบปกติทดสอบอุณหภูมิเป็นเวลา 40 วินาที และ แสดงดังรูปที่ 5.11 ซึ่งเป็นภาพถ่ายความร้อนแบบกลับกล่องทดสอบอุณหภูมิ 40 วินาที



รูปที่ 5.10 ภาพถ่ายความร้อนแบบปกติทดสอบอุณหภูมิเป็นเวลา 40 วินาที



รูปที่ 5.11 ภาพถ่ายความร้อนแบบกล้องส่องทดสอบอุณหภูมิ 40 วินาที

การทดสอบถัดไปทำการวัดอุณหภูมิภายนอกกล่องข้าวโพดเพื่ออุณหภูมิและภาพรวมที่เกิดขึ้นภายนอกกล่อง ในการทดสอบใช้ข้าวโพดเป็นตัวทดสอบ โดยกล่องบรรจุข้าวโพดมีอุณหภูมิเริ่มต้น 29.0 °C ทั้ง 6 ด้าน จากนั้นนำกล่องข้าวโพดไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กทริก เป็นเวลา 60 วินาที แล้วทำการวัดอุณหภูมิตามตำแหน่งที่กำหนดได้ผลตามตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบอุณหภูมิ (°C) ที่เวลา 60 วินาที โดยใช้ข้าวโพด

ด้าน	A	B	C	D	E	F	G	H	I	S	T	U	AA	AB	AC
กราวด์	56.0	55.5	55.6	55.6	55.5	55.6	55.4	55.8	55.7	62.0	61.6	63.0	57.0	56.5	57.0
กลับ กล่อง	58.0	58.1	58.1	58.0	58.5	59.1	58.1	58.6	59.6	55.6	55.3	55.7	60.0	55.9	55.4
	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	V	W	X	AD	AE	AF
ใกล้ เพลต	52.0	51.3	51.2	51.0	51.0	51.0	52.6	52.8	52.6	53.0	51.0	53.0	58.4	57.4	58.3
กลับ กล่อง	60.0	60.0	60.4	60.8	60.6	61.0	60.2	60.9	61.8	46.2	46.2	46.2	52.3	53.7	54.5

เมื่อทำการทดสอบนำข้าวโพดไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กทริกเป็นเวลา 60 วินาที ทดสอบแบบปกติ ผลการทดสอบแบบปกติ ด้านกราวด์หรือด้านบน อุณหภูมิภายนอกของกล่องที่ตำแหน่ง A = 56.0 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านบนของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง B = 55.5 °C ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง C = 55.6 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านซ้ายของกล่อง D = 55.6 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง E = 55.5 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง F = 55.6 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง G = 55.4 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางของกล่อง H = 55.8 °C และตำแหน่งสุดท้ายด้านล่างขวา I = 55.7 °C

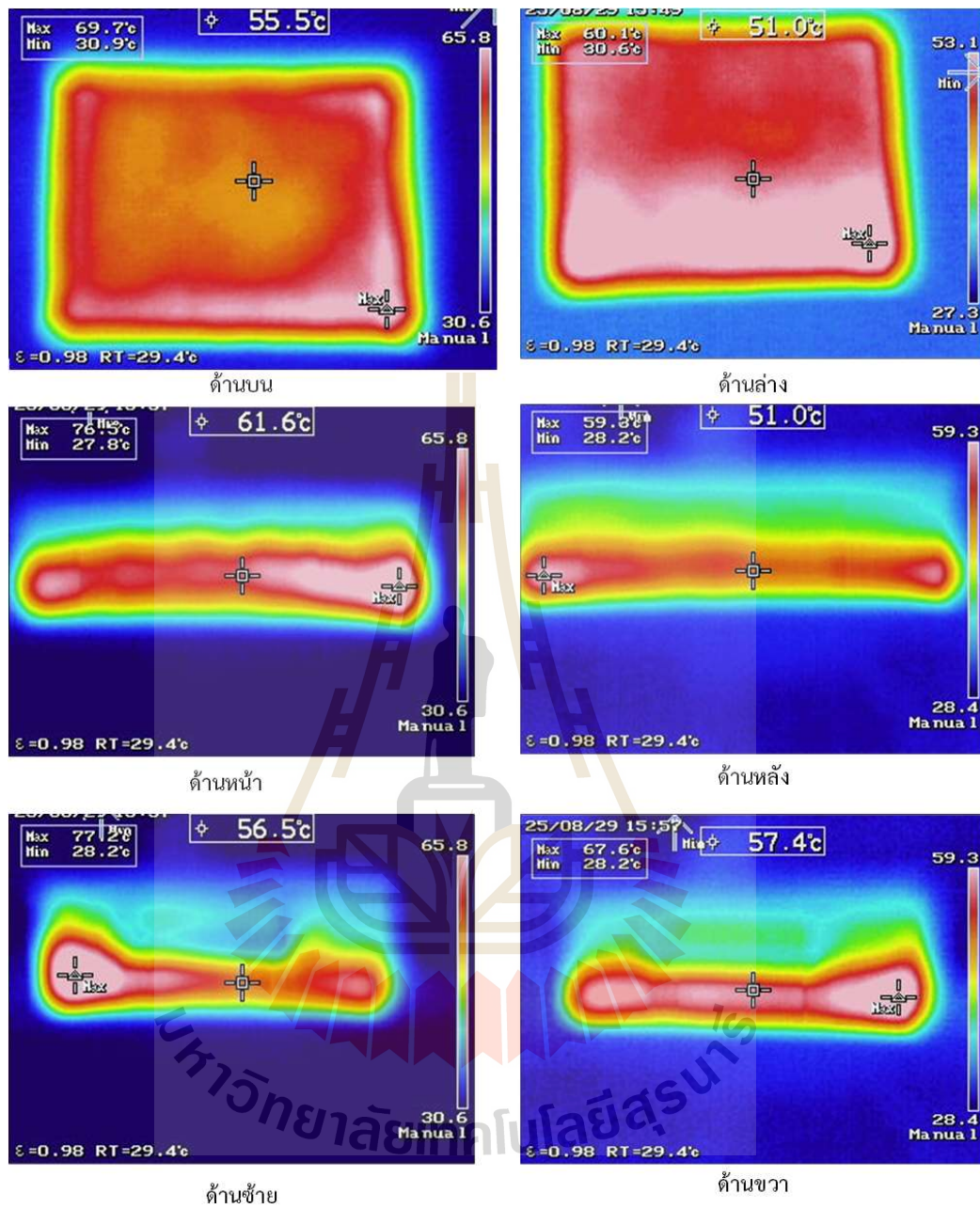
อุณหภูมิภายนอกกล่องด้านใกล้เพลตหรือด้านล่าง อุณหภูมิภายนอกกล่องที่ตำแหน่ง J = 52.0 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านล่างของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง K = 51.3 °C ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง L = 51.2 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านซ้ายของกล่อง M = 51.0 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง N = 51.0 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง O = 51.0 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง P = 52.6 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางของกล่อง Q = 52.8 °C และตำแหน่งสุดท้ายด้านล่างขวา R = 52.6 °C อุณหภูมิด้านหน้าของกล่องที่ตำแหน่ง S = 62.0 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง T = 61.6 °C ตำแหน่งถัดไปขวาสุด U = 63.0 °C อุณหภูมิด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง V = 53.0 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง W = 51.0 °C และตำแหน่งลำดับสุดท้าย

ด้านขวา $X = 53.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านซ้ายของกล่องที่ตำแหน่ง AA = $42.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง AB = $56.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปขวาสุด AC = $57.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง AD = $58.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง AE = $57.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่งลำดับสุดท้ายด้านขวา AF = $58.3\text{ }^{\circ}\text{C}$

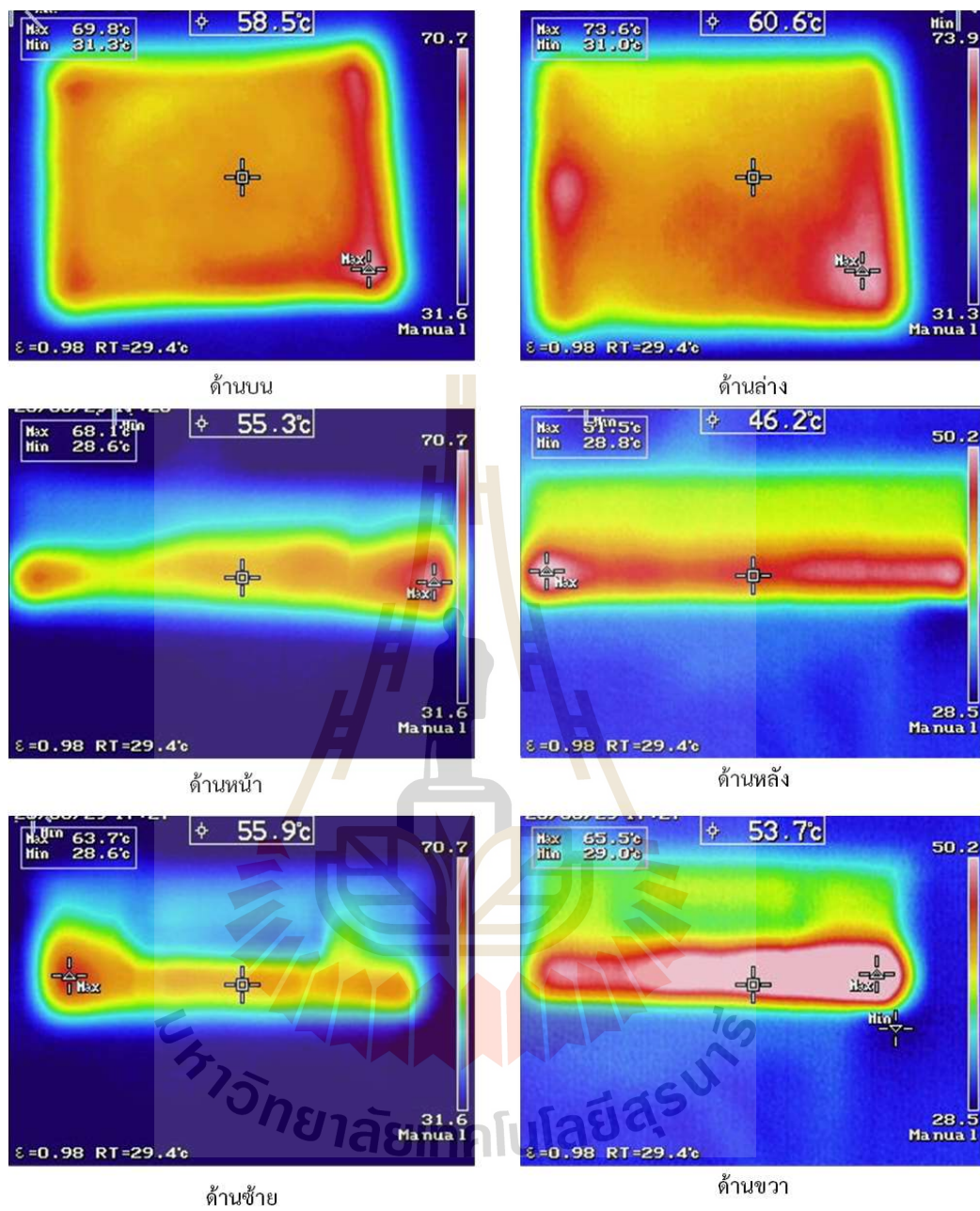
เมื่อทำการทดสอบ 60 วินาที แบบกลับกล่อง ทดสอบโดยการนำข้าวโพดไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กทริกซึ่งวางกล่องทดสอบในแนวยาว 30 วินาที แล้วกลับกล่องจากด้านยาวเป็นด้านสั้น 30 วินาที เสร็จแล้วทำการวัดอุณหภูมิ ด้านกราวด์หรือด้านบน อุณหภูมิภายนอกของกล่องที่ตำแหน่ง A = $58.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านบนของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง B = $58.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง C = $58.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านซ้ายของกล่อง D = $58.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง E = $58.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง F = $59.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง G = $58.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางของกล่อง H = $58.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่งสุดท้ายล่างขวา I = $59.6\text{ }^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิภายนอกกล่องด้านใกล้เพลาหรือด้านล่าง อุณหภูมิภายนอกกล่องที่ตำแหน่ง J = $60.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านล่างของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง K = $60.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง L = $60.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางซ้ายของกล่อง M = $60.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง N = $60.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง O = $61.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง P = $60.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางของกล่อง Q = $60.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่งสุดท้ายด้านล่างขวา R = $61.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านหน้าของกล่องที่ตำแหน่ง S = $55.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง T = $55.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปขวาสุด U = $55.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง V = $46.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง W = $46.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่งลำดับสุดท้ายด้านขวา X = $46.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านซ้ายของกล่องที่ตำแหน่ง AA = $60.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง AB = $55.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปขวาสุด AC = $55.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง AD = $52.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง AE = $53.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่งลำดับสุดท้ายด้านขวา AF = $54.5\text{ }^{\circ}\text{C}$

จากการทดสอบนำข้าวโพดไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กทริกเป็นเวลา 60 วินาที ทั้งแบบปกติและแบบกลับกล่อง พบว่าอุณหภูมิภายนอกกล่องที่ได้ทำการวัดโดยใช้กล้องจับภาพความร้อนนั้น อุณหภูมิของกล่องจะร้อนที่ตำแหน่งขอบของกล่องมากที่สุดทั้งด้านใกล้เพลาและด้านกราวด์ และพบว่าลักษณะการกระจายความร้อนของแบบกลับกล่องจะมีการกระจายที่ทั่วถึงเท่าๆ กัน และมีอุณหภูมิที่สูงกว่าแบบปกติ แสดงดังรูปที่ 5.12 ซึ่งเป็นภาพถ่ายความร้อนแบบปกติทดสอบอุณหภูมิเป็นเวลา 60 วินาที และ แสดงดังรูปที่ 5.13 ซึ่งเป็นภาพถ่ายความร้อนแบบกลับกล่องทดสอบอุณหภูมิ 60 วินาที



รูปที่ 5.12 ภาพถ่ายความร้อนแบบปกติทดสอบอุณหภูมิเป็นเวลา 60 วินาที



รูปที่ 5.13 ภาพถ่ายภาพความร้อนแบบกลับกล้องทดสอบอุณหภูมิ 60 วินาที

การทดสอบถัดไปทำการวัดอุณหภูมิภายนอกกล่องของถ้วยเขียวเพื่อดูอุณหภูมิและภาพรวมที่เกิดขึ้นภายนอกกล่อง ในการทดสอบใช้ถ้วยเขียวเป็นตัวทดสอบ โดยกล่องบรรจุถ้วยเขียวมีอุณหภูมิเริ่มต้น 29.0 °C ทั้ง 6 ด้าน จากนั้นนำกล่องที่บรรจุถ้วยเขียวไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กทริกเป็นเวลา 20 วินาที แล้วทำการวัดอุณหภูมิตามตำแหน่งที่กำหนดได้ผลตามตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบอุณหภูมิ (°C) ที่เวลา 20 วินาที โดยใช้ถ้วยเขียว

ด้าน	A	B	C	D	E	F	G	H	I	S	T	U	AA	AB	AC
กราวด์	40.5	39.8	39.5	39.0	38.8	39.0	39.4	38.6	39.4	35.2	35.2	35.2	35.3	35.3	36.4
กลับ กล่อง	38.0	38.0	38.0	38.1	38.2	38.2	38.1	38.0	38.1	35.9	35.9	35.9	34.0	34.0	34.0
	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	V	W	X	AD	AE	AF
ใกล้ เพลต	36.5	36.4	35.8	35.4	34.9	35.8	34.6	35.0	35.2	35.0	34.8	34.0	34.0	35.6	36.5
กลับ กล่อง	37.5	37.2	37.4	37.5	38.3	38.2	40.0	40.0	40.2	35.1	36.3	38.2	39.5	39.5	39.5

เมื่อทำการทดสอบนำถ้วยเขียวไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กทริกเป็นเวลา 20 วินาที ทดสอบแบบปกติ ผลการทดสอบแบบปกติ ด้านกราวด์หรือด้านบน อุณหภูมิภายนอกของกล่องที่ตำแหน่ง A = 40.5 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านบนของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง B = 39.8 °C ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง C = 39.5 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านซ้ายของกล่อง D = 39.0 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง E = 38.8 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง F = 39.0 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง G = 39.4 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางของกล่อง H = 38.6 °C และตำแหน่งสุดท้ายด้านล่างขวา I = 39.4 °C

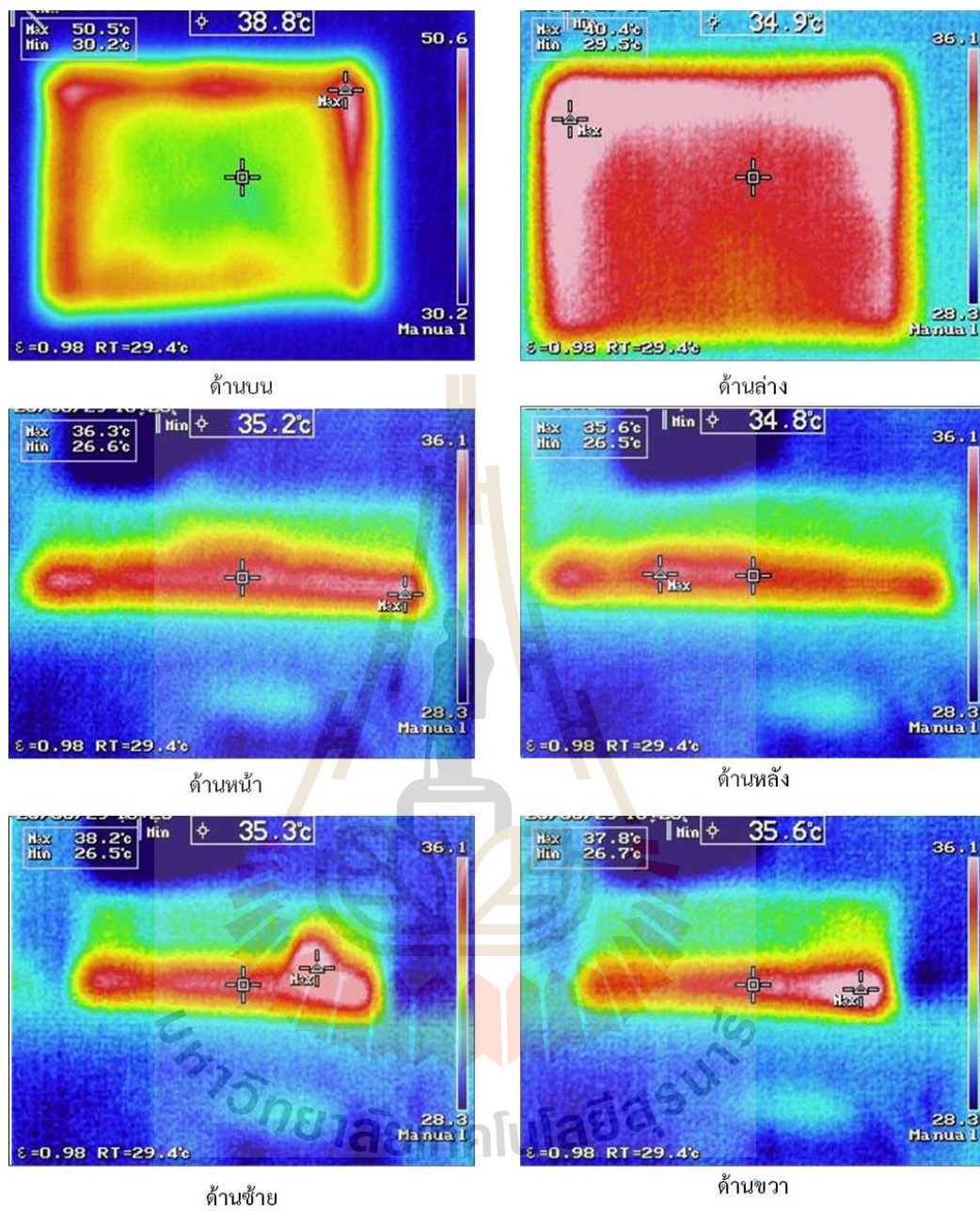
อุณหภูมิภายนอกกล่องด้านใกล้เพลตหรือด้านล่าง อุณหภูมิภายนอกกล่องที่ตำแหน่ง J = 36.5 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านล่างของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง K = 36.4 °C ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง L = 35.8 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางซ้ายของกล่อง M = 35.4 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง N = 34.9 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง O = 35.8 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง P = 34.6 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางของกล่อง Q = 35.0 °C และตำแหน่งสุดท้ายด้านล่างขวา R = 35.2 °C อุณหภูมิด้านหน้าของกล่องที่ตำแหน่ง S = 35.2 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง T = 35.2 °C ตำแหน่งถัดไปขวาสุด U = 35.2 °C อุณหภูมิด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง V = 35.0 °C ซึ่งเป็น

ตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง $W = 34.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่งลำดับสุดท้ายด้านขวา $X = 34.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านซ้ายของกล่องที่ตำแหน่ง $AA = 35.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง $AB = 35.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปขวาสุด $AC = 36.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง $AD = 34.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง $AE = 35.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่งลำดับสุดท้ายด้านขวา $AF = 36.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

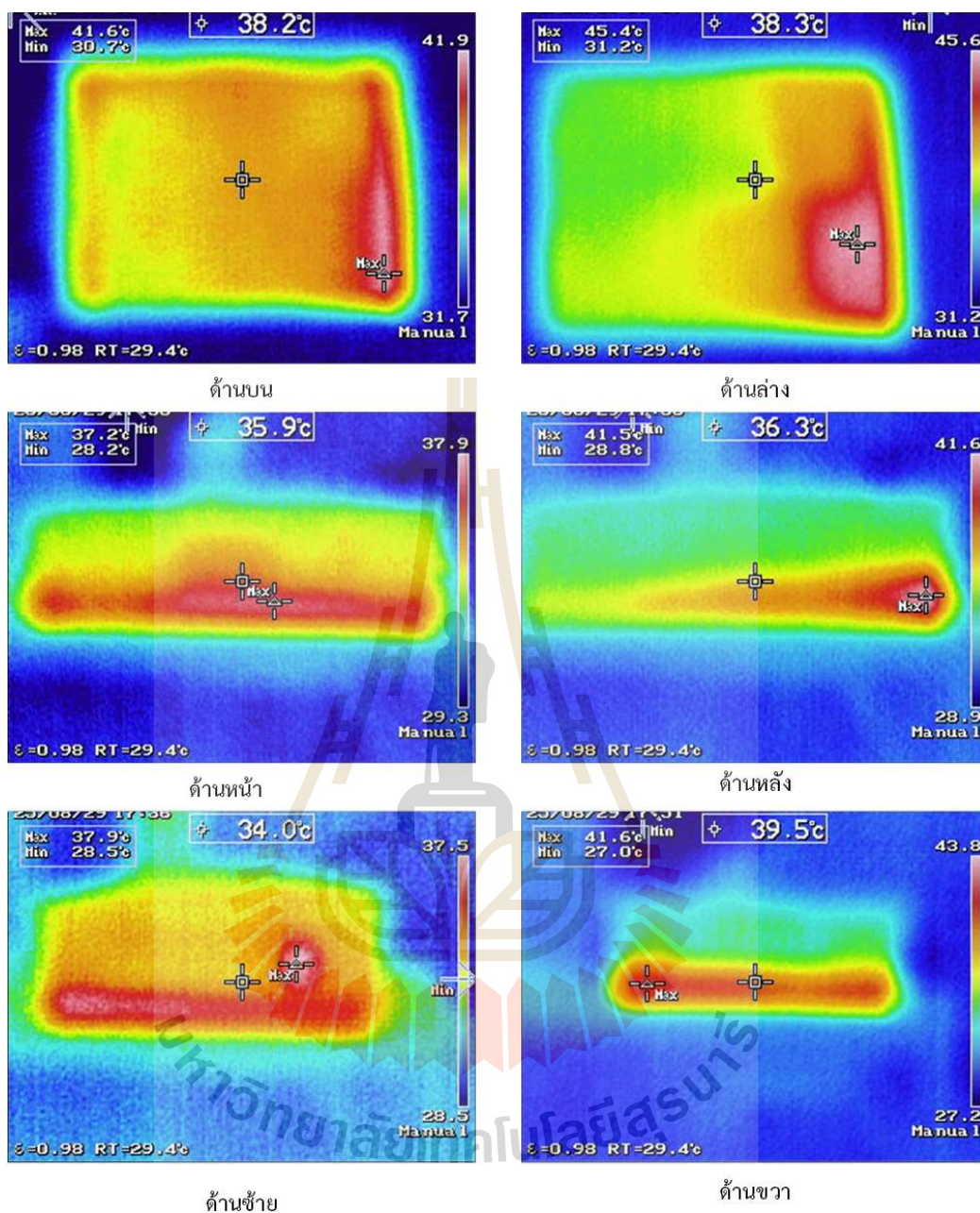
เมื่อทำการทดสอบ 20 วินาที แบบกลับกล่อง ทดสอบโดยการนำแก้วเขียวไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กทริกซึ่งวางกล่องทดสอบในแนวยาว 20 วินาที แล้วกลับกล่องจากแนวยาวเป็นแนวนอน 20 วินาที เสร็จแล้วทำการวัดอุณหภูมิ ด้านกรวดหรือด้านบน อุณหภูมิภายนอกของกล่องที่ตำแหน่ง $A = 38.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านบนของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง $B = 38.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง $C = 38.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านซ้ายของกล่อง $D = 38.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง $E = 38.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง $F = 38.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง $G = 38.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางของกล่อง $H = 38.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่งสุดท้ายล่างขวา $I = 38.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิภายนอกกล่องด้านใกล้เพลตหรือด้านล่าง อุณหภูมิภายนอกกล่องที่ตำแหน่ง $J = 37.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านล่างของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง $K = 37.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง $L = 37.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางซ้ายของกล่อง $M = 38.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง $N = 38.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง $O = 38.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง $P = 40.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางกล่อง $Q = 40.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่งสุดท้ายด้านล่างขวา $R = 40.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านหน้าของกล่องที่ตำแหน่ง $S = 35.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง $T = 35.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปขวาสุด $U = 35.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง $V = 35.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง $W = 36.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่งลำดับสุดท้ายด้านขวา $X = 38.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านซ้ายของกล่องที่ตำแหน่ง $AA = 34.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง $AB = 34.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปขวาสุด $AC = 34.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง $AD = 39.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง $AE = 39.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่งลำดับสุดท้ายด้านขวา $AF = 39.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

จากการทดสอบนำแก้วเขียวไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กทริกเป็นเวลา 20 วินาที ทั้งแบบปกติและแบบกลับกล่อง พบว่าอุณหภูมิภายนอกกล่องที่ได้ทำการวัดโดยใช้กล้องจับภาพความร้อนนั้น อุณหภูมิของกล่องจะร้อนที่ตำแหน่งขอบของกล่องมากที่สุดทั้งด้านใกล้เพลตและด้านกรวด และพบว่าลักษณะการกระจายความร้อนของแบบกลับกล่องจะมีการกระจายที่ทั่วถึงเท่าๆ กันดีกว่าแบบปกติ แสดงดังรูปที่ 5.14 ซึ่งเป็นภาพถ่ายความร้อนแบบปกติทดสอบอุณหภูมิเป็นเวลา 20 วินาทีและแสดงดังรูปที่ 5.15 ซึ่งเป็นภาพถ่ายความร้อนแบบกลับกล่องทดสอบอุณหภูมิ 20 วินาที



รูปที่ 5.14 ภาพถ่ายความร้อนแบบปกติทดสอบอุณหภูมิเป็นเวลา 20 วินาที



รูปที่ 5.15 ภาพถ่ายความร้อนแบบกลับกล้องทดสอบอุณหภูมิ 20 วินาที

การทดสอบถัดไปทำการวัดอุณหภูมิภายนอกกล่องของถั่วเขียวเพื่อดูอุณหภูมิและภาพรวมที่เกิดขึ้นภายนอกกล่อง ในการทดสอบใช้ถั่วเขียวเป็นตัวทดสอบ โดยกล่องบรรจุถั่วเขียวมีอุณหภูมิเริ่มต้น 29.0 °C ทั้ง 6 ด้าน จากนั้นนำกล่องที่บรรจุถั่วเขียวไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กทริกเป็นเวลา 40 วินาที แล้วทำการวัดอุณหภูมิตามตำแหน่งที่กำหนดได้ผลตามตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบอุณหภูมิ (°C) ที่เวลา 40 วินาที โดยใช้แก้วเขียว

ด้าน	A	B	C	D	E	F	G	H	I	S	T	U	AA	AB	AC
กราวด์	49.1	49.1	49.1	49.0	49.1	49.1	50.5	49.2	49.1	46.6	46.6	46.6	47.5	47.5	47.5
กลับ กล่อง	46.2	46.3	46.2	46.1	45.3	47.3	47.2	46.8	46.9	47.7	47.7	47.7	52.1	50.4	51.1
	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	V	W	X	AD	AE	AF
ใกล้ เพลต	47.3	47.3	47.3	47.3	47.3	47.3	47.3	47.3	47.3	46.2	46.2	46.2	40.0	41.5	43.1
กลับ กล่อง	48.7	48.5	48.4	48.4	48.5	48.4	48.4	48.3	48.5	50.1	49.3	49.0	47.6	47.6	47.6

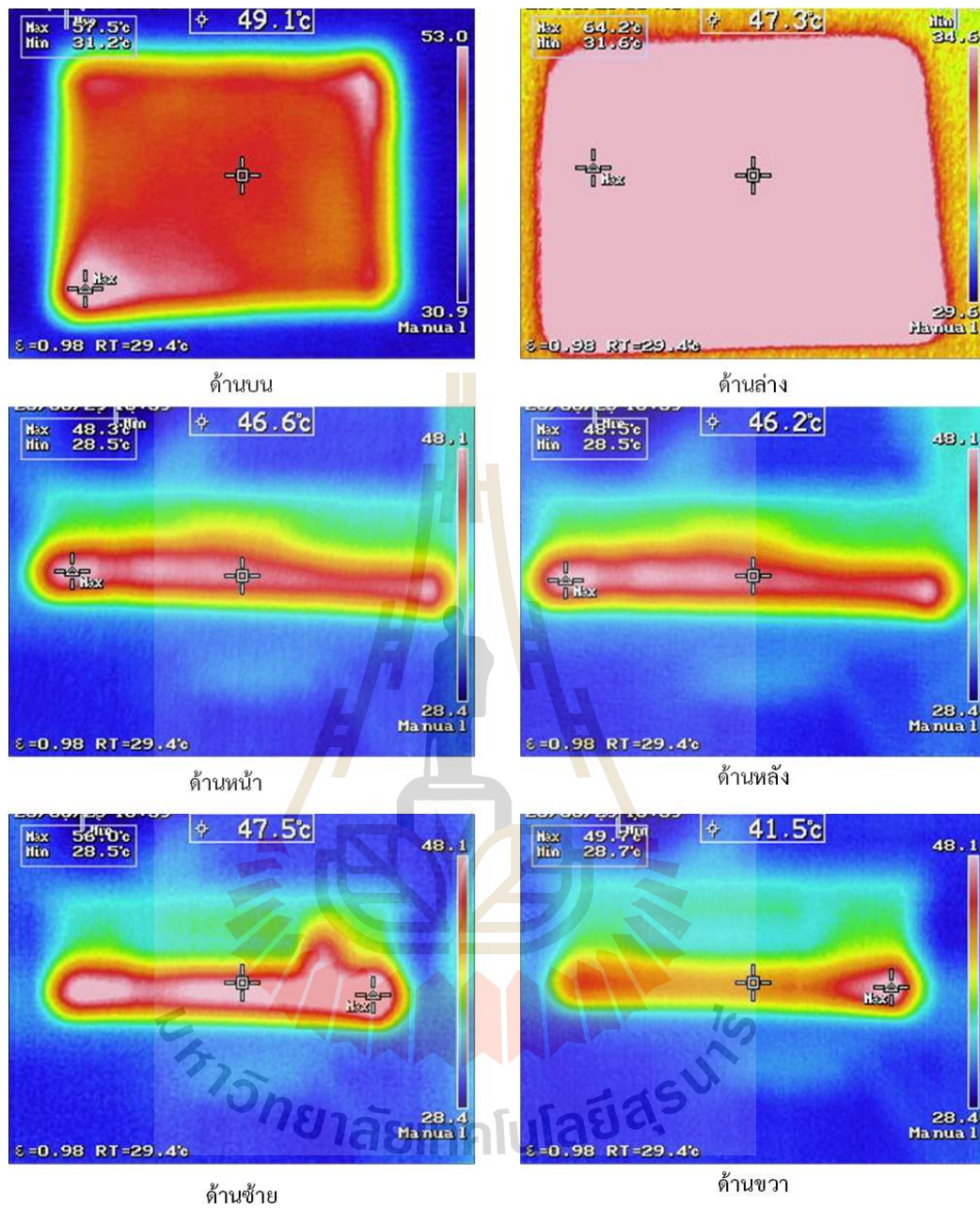
เมื่อทำการทดสอบนำแก้วเขียวไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กทริกเป็นเวลา 40 วินาที ทดสอบแบบปกติ ผลการทดสอบแบบปกติ ด้านกราวด์หรือด้านบน อุณหภูมิภายนอกของกล่องที่ตำแหน่ง A = 49.1 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านบนของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง B = 49.1 °C ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง C = 49.1 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านซ้ายของกล่อง D = 49.0 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง E = 49.1 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง F = 49.1 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง G = 50.5 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางของกล่อง H = 49.2 °C และตำแหน่งสุดท้ายด้านล่างขวา I = 49.1 °C

อุณหภูมิภายนอกกล่องด้านใกล้เพลตหรือด้านล่าง อุณหภูมิภายนอกกล่องที่ตำแหน่ง J = 47.3 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านล่างของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง K = 47.3 °C ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง L = 47.3 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางซ้ายซ้ายของกล่อง M = 47.3 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง N = 47.3 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง O = 47.3 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง P = 47.3 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางกล่อง Q = 47.3 °C และตำแหน่งสุดท้ายด้านล่างขวา R = 47.3 °C อุณหภูมิด้านหน้าของกล่องที่ตำแหน่ง S = 47.7 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง T = 46.6 °C ตำแหน่งถัดไปขวาสุด U = 46.2 °C อุณหภูมิด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง V = 46.2 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง W = 46.2 °C และตำแหน่งลำดับสุดท้ายด้านขวา X = 46.2 °C อุณหภูมิด้านซ้ายของกล่องที่ตำแหน่ง AA = 47.5 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง AB = 47.5 °C ตำแหน่งถัดไปขวาสุด AC = 47.5 °C อุณหภูมิด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง AD = 40.0 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง AE = 41.5 °C และตำแหน่งลำดับสุดท้ายด้านขวา AF = 43.1 °C

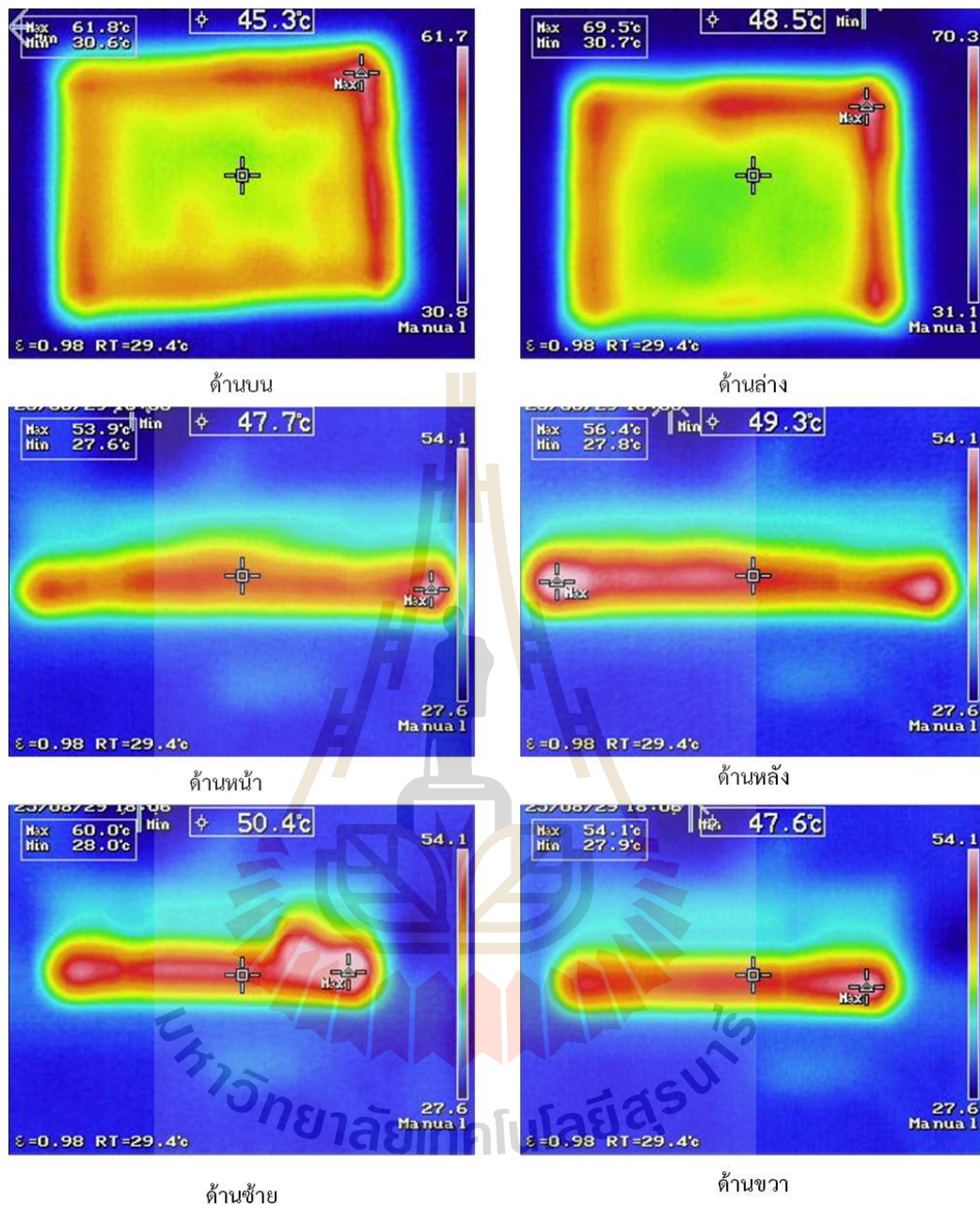
เมื่อทำการทดสอบ 40 วินาที แบบกลับกล่อง ทดสอบโดยการนำแก้วเขียวไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กทริกซึ่งวางกล่องทดสอบในแนวยาว 25 วินาที แล้วกลับกล่องจากแนวยาวเป็นแนวสั้น 25 วินาที เสร็จแล้วทำการวัดอุณหภูมิ ด้านกราวด์หรือด้านบน อุณหภูมิภายนอกของกล่องที่ตำแหน่ง A = 46.2 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านบนของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง B = 46.3 °C ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง C = 46.2 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนซ้ายของกล่อง D = 46.1 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง E = 47.3 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง F = 47.3 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง G = 47.2 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางของกล่อง H = 46.8 °C และตำแหน่งสุดท้ายล่างขวา I = 46.9 °C

อุณหภูมิภายนอกกล่องด้านใกล้เพลาหรือด้านล่าง อุณหภูมิภายนอกกล่องที่ตำแหน่ง J = 48.7 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านล่างของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง K = 48.5 °C ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง L = 48.4 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางซ้ายของกล่อง M = 48.4 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง N = 48.5 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง O = 48.4 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง P = 48.4 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางของกล่อง Q = 48.3 °C และตำแหน่งสุดท้ายด้านล่างขวา R = 48.5 °C อุณหภูมิด้านหน้าของกล่องที่ตำแหน่ง S = 47.7 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง T = 47.7 °C ตำแหน่งถัดไปขวาสุด U = 52.1 °C อุณหภูมิด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง V = 50.1 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง W = 49.3 °C และตำแหน่งลำดับสุดท้ายด้านขวา X = 47.6 °C อุณหภูมิด้านซ้ายของกล่องที่ตำแหน่ง AA = 52.1 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง AB = 50.4 °C ตำแหน่งถัดไปขวาสุด AC = 51.1 °C อุณหภูมิด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง AD = 47.6 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง AE = 47.6 °C และตำแหน่งลำดับสุดท้ายด้านขวา AF = 47.6 °C

จากการทดสอบนำแก้วเขียวไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กทริกเป็นเวลา 40 วินาที ทั้งแบบปกติและแบบกลับกล่อง พบว่าอุณหภูมิภายนอกกล่องที่ได้ทำการวัดโดยใช้กล้องจับภาพความร้อนนั้น อุณหภูมิของกล่องจะร้อนที่ตำแหน่งขอบของกล่องมากที่สุดทั้งด้านใกล้เพลาและด้านกราวด์ และพบว่าลักษณะการกระจายความร้อนของแบบกลับกล่องจะมีการกระจายที่ทั่วถึงเท่าๆ กันดีกว่าแบบปกติ แสดงดังรูปที่ 5.16 ซึ่งเป็นภาพถ่ายความร้อนแบบปกติทดสอบอุณหภูมิเป็นเวลา 40 วินาทีและแสดงดังรูปที่ 5.17 ซึ่งเป็นภาพถ่ายความร้อนแบบกลับกล่องทดสอบอุณหภูมิ 40 วินาที



รูปที่ 5.16 ภาพถ่ายความร้อนแบบปกติทดสอบอุณหภูมิเป็นเวลา 40 วินาที



รูปที่ 5.17 ภาพถ่ายความร้อนแบบกลับกล้องทดสอบอุณหภูมิ 40 วินาที

การทดสอบถัดไปทำการวัดอุณหภูมิภายนอกกล่องของถั่วเขียวเพื่ออุณหภูมิและภาพรวมที่เกิดขึ้นภายนอกกล่อง ในการทดสอบใช้ถั่วเขียวเป็นตัวทดสอบ โดยกล่องบรรจุถั่วเขียวมีอุณหภูมิเริ่มต้น 29.0 °C ทั้ง 6 ด้าน จากนั้นนำกล่องที่บรรจุถั่วเขียวไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กทริกเป็นเวลา 60 วินาที แล้วทำการวัดอุณหภูมิตามตำแหน่งที่กำหนดได้ผลตามตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบอุณหภูมิ (°C) ที่เวลา 60 วินาที โดยใช้ถั่วเขียว

ด้าน	A	B	C	D	E	F	G	H	I	S	T	U	AA	AB	AC
กราวด์	52.3	52.4	52.6	52.5	51.1	52.5	52.3	52.1	52.1	49.5	50.2	50.5	50.1	52.5	53.1
กลับ กล่อง	55.3	55.3	56.3	55.3	55.3	56.2	55.3	55.3	56.4	49.5	50.6	50.6	54.0	54.0	54.0
	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	V	W	X	AD	AE	AF
ใกล้ เพลต	51.9	51.8	51.9	51.4	51.4	51.3	51.5	51.0	51.5	55.4	53.8	53.8	51.7	51.7	51.7
กลับ กล่อง	54.8	54.8	54.8	54.8	54.8	53.5	53.2	53.6	54.5	48.5	46.6	46.6	45.1	42.2	43.4

เมื่อทำการทดสอบนำถั่วเขียวไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กทริกเป็นเวลา 60 วินาที ทดสอบแบบปกติ ผลการทดสอบแบบปกติ ด้านกราวด์หรือด้านบน อุณหภูมิภายนอกของกล่องที่ตำแหน่ง A = 52.3 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านบนของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง B = 52.4 °C ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง C = 52.6 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านซ้ายของกล่อง D = 52.5 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง E = 51.1 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง F = 52.5 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง G = 52.3 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางของกล่อง H = 52.1 °C และตำแหน่งสุดท้ายด้านล่างขวา I = 52.1 °C

อุณหภูมิภายนอกกล่องด้านใกล้เพลตหรือด้านล่าง อุณหภูมิภายนอกกล่องที่ตำแหน่ง J = 51.9 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านล่างของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง K = 51.8 °C ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง L = 51.9 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางซ้ายของกล่อง M = 51.4 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง N = 51.4 °C ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง O = 51.3 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง P = 51.5 °C ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางของกล่อง Q = 51.0 °C และตำแหน่งสุดท้ายด้านล่างขวา R = 51.5 °C อุณหภูมิด้านหน้าของกล่องที่ตำแหน่ง S = 49.5 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง T = 50.2 °C ตำแหน่งถัดไปขวาสุด U = 50.5 °C อุณหภูมิด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง V = 55.4 °C ซึ่งเป็น

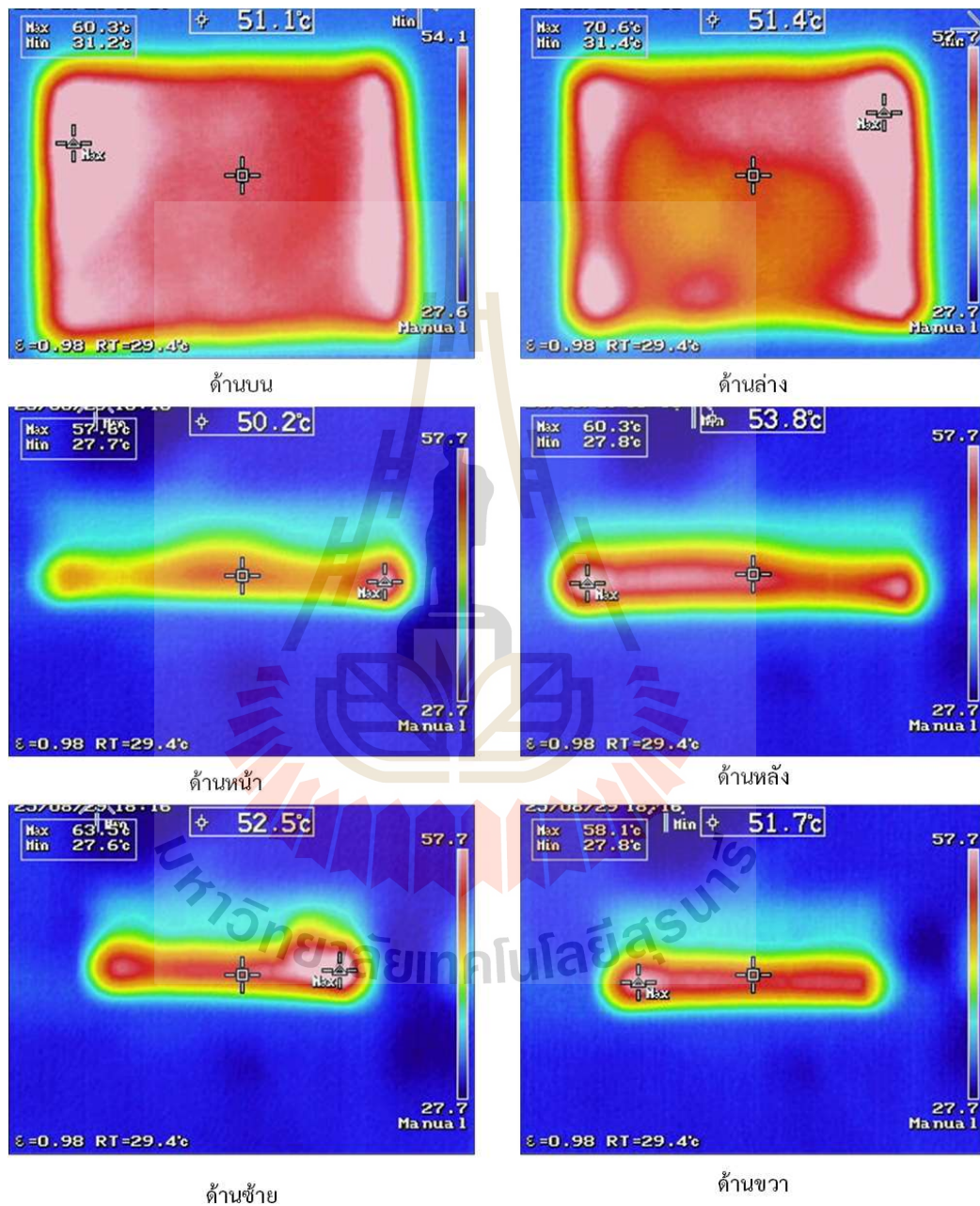
ตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง $W = 53.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่งลำดับสุดท้ายด้านขวา $X = 53.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านซ้ายของกล่องที่ตำแหน่ง $AA = 50.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง $AB = 52.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปขวาสุด $AC = 53.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง $AD = 51.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง $AE = 51.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่งลำดับสุดท้ายด้านขวา $AF = 51.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$

เมื่อทำการทดสอบ 60 วินาที แบบกลับกล่อง ทดสอบโดยการนำแก้วเขียวไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กทริกซึ่งวางกล่องทดสอบในแนวยาว 30 วินาที แล้วกลับกล่องจากแนวยาวเป็นแนวสั้น 30 วินาที เสร็จแล้วทำการวัดอุณหภูมิ ด้านกรวดหรือด้านบน อุณหภูมิภายนอกของกล่องที่ตำแหน่ง $A = 55.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านบนของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง $B = 55.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง $C = 55.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านซ้ายของกล่อง $D = 55.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง $E = 55.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง $F = 56.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง $G = 55.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางของกล่อง $H = 55.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่งสุดท้ายล่างขวา $I = 56.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$

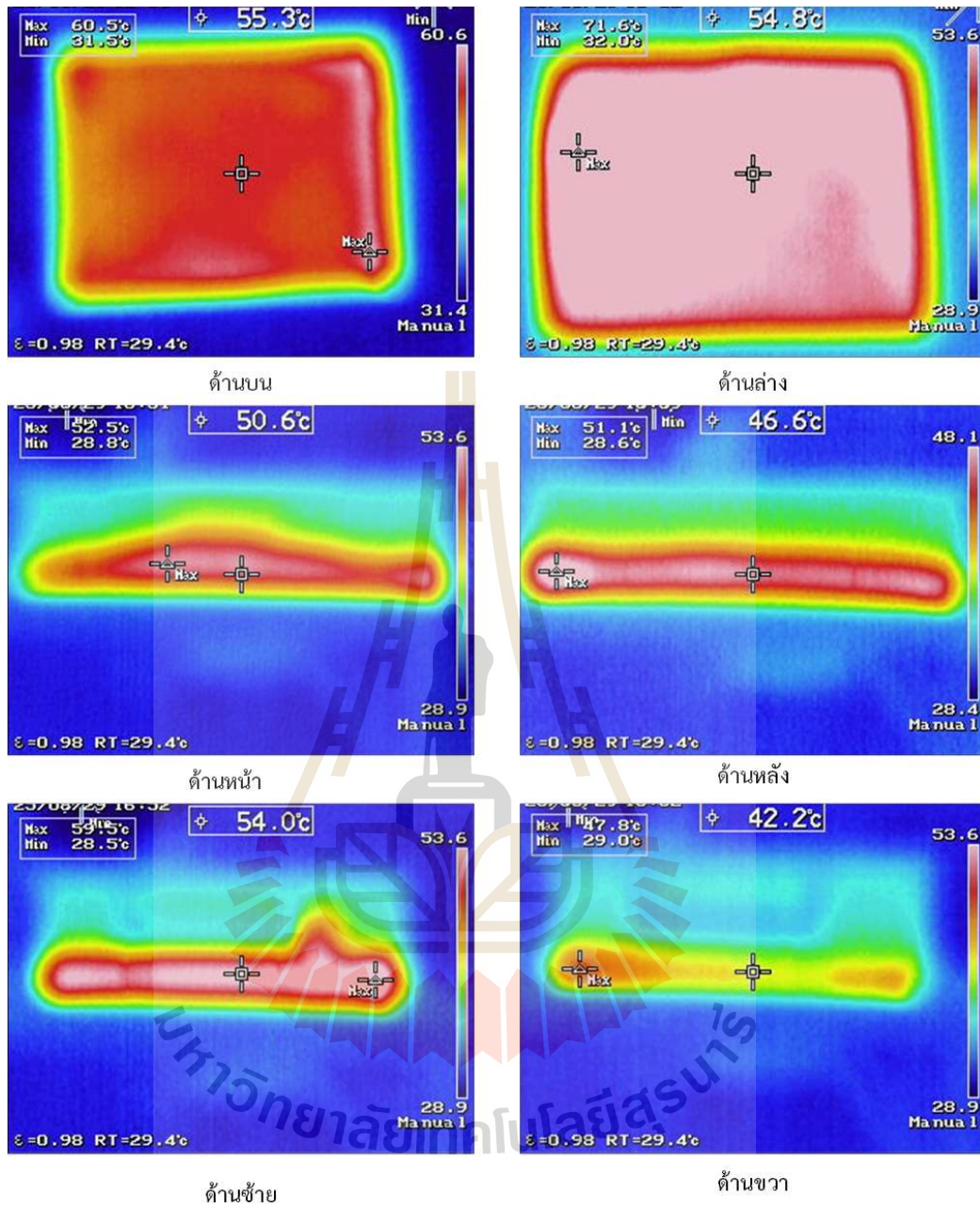
อุณหภูมิภายนอกกล่องด้านใกล้เพลตหรือด้านล่าง อุณหภูมิภายนอกกล่องที่ตำแหน่ง $J = 54.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งบนซ้ายด้านล่างของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลางด้านบนของกล่อง $K = 54.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปบนขวาของกล่อง $L = 54.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางซ้ายของกล่อง $M = 54.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางของกล่อง $N = 54.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปตรงกลางข้างขวาของกล่อง $O = 53.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปด้านล่างซ้ายของกล่อง $P = 53.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปด้านล่างตรงกลางกล่อง $Q = 53.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่งสุดท้ายด้านล่างขวา $R = 54.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านหน้าของกล่องที่ตำแหน่ง $S = 49.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง $T = 50.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปขวาสุด $U = 50.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง $V = 48.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง $W = 46.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่งลำดับสุดท้ายด้านขวา $X = 46.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านซ้ายของกล่องที่ตำแหน่ง $AA = 54.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง $AB = 54.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งถัดไปขวาสุด $AC = 54.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิด้านหลังของกล่องที่ตำแหน่ง $AD = 45.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านซ้ายของกล่อง ตำแหน่งถัดไปตรงกลาง $AE = 42.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่งลำดับสุดท้ายด้านขวา $AF = 43.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$

จากการทดสอบนำแก้วเขียวไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กทริกเป็นเวลา 60 วินาที ทั้งแบบปกติและแบบกลับกล่อง พบว่าอุณหภูมิภายนอกกล่องที่ได้ทำการวัดโดยใช้กล้องจับภาพความร้อนนั้น อุณหภูมิของกล่องจะร้อนที่ตำแหน่งขอบของกล่องมากที่สุดทั้งด้านใกล้เพลตและด้านกรวด และพบว่าลักษณะการกระจายความร้อนของแบบกลับกล่องจะมีการกระจายที่ทั่วถึงเท่าๆ กันดีกว่าแบบ

ปกติ แสดงดังรูปที่ 5.18 ซึ่งเป็นภาพถ่ายความร้อนแบบปกติทดสอบอุณหภูมิเป็นเวลา 60 วินาทีและแสดงดังรูปที่ 5.19 ซึ่งเป็นภาพถ่ายความร้อนแบบกลับกล้องทดสอบอุณหภูมิ 60 วินาที



รูปที่ 5.18 ภาพถ่ายความร้อนแบบปกติทดสอบอุณหภูมิเป็นเวลา 60 วินาที



รูปที่ 5.19 ภาพถ่ายความร้อนแบบกล้องทดสอบอุณหภูมิ 60 วินาที

การทดสอบผลอัตราการตายของมอด

การทดสอบผลกับข้าวโพด

1. ที่อุณหภูมิข้าวโพดประมาณ 40 องศาเซลเซียส นับอัตราการตายของมอด เก็บไว้ 1, 7 และ 14 วัน
เก็บข้าวใส่กล่อง สังเกตผล 15, 30, 45 และ 60 วัน
2. ที่อุณหภูมิข้าวโพดประมาณ 50 องศาเซลเซียส นับอัตราการตายของมอด เก็บไว้ 1, 7 และ 14 วัน
เก็บข้าวใส่กล่อง สังเกตผล 15, 30, 45 และ 60 วัน
3. ที่อุณหภูมิข้าวโพดประมาณ 60 องศาเซลเซียส นับอัตราการตายของมอด เก็บไว้ 1, 7 และ 14 วัน
เก็บข้าวใส่กล่อง สังเกตผล 15, 30, 45 และ 60 วัน

การทดสอบผลกับถั่วเขียว

4. ที่อุณหภูมิถั่วเขียวประมาณ 40 องศาเซลเซียส นับอัตราการตายของมอด เก็บไว้ 1, 7 และ 14 วัน
เก็บข้าวใส่กล่อง สังเกตผล 15, 30, 45 และ 60 วัน
5. ที่อุณหภูมิถั่วเขียวประมาณ 50 องศาเซลเซียส นับอัตราการตายของมอด เก็บไว้ 1, 7 และ 14 วัน
เก็บข้าวใส่กล่อง สังเกตผล 15, 30, 45 และ 60 วัน
6. ที่อุณหภูมิถั่วเขียวประมาณ 60 องศาเซลเซียส นับอัตราการตายของมอด เก็บไว้ 1, 7 และ 14 วัน
เก็บข้าวใส่กล่อง สังเกตผล 15, 30, 45 และ 60 วัน

เมื่อนำข้าวโพดไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริกจากอุณหภูมิเริ่มต้นจนได้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสและนำถุงผ้าที่ใส่มอดออกจากกล่องทันที ผลการทดลองพบว่ามอดตายทั้งหมดในทันที และมีเปอร์เซ็นต์การตาย 100 เปอร์เซ็นต์ในทุกจุด ดังแสดงตามตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบอัตราการตาย (ร้อยละ) ณ อุณหภูมิข้าวโพดประมาณ 60 องศาเซลเซียส ข้าวโพด

จุดที่	อัตราการตาย (ร้อยละ)		เก็บมอดไว้ (วัน)			เก็บข้าวไว้ (วัน)			
	ตัวเต็มวัย	ระยะไข่	1	7	14	15	30	45	60
1	100	-	100	100	100	100	100	100	100
2	100	-	100	100	100	100	100	100	100
3	100	-	100	100	100	100	100	100	100
4	100	-	100	100	100	100	100	100	100
5	100	-	100	100	100	100	100	100	100
6	100	-	100	100	100	100	100	100	100
7	100	-	100	100	100	100	100	100	100
8	100	-	100	100	100	100	100	100	100
9	100	-	100	100	100	100	100	100	100

เมื่อนำถั่วเขียวไปผ่านเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริกจากอุณหภูมิเริ่มต้นจนได้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสและนำถุงผ้าที่ใส่มอดออกจากกล่องทันที ผลการทดลองพบว่ามอดตายทั้งหมดในทันที และมีเปอร์เซ็นต์การตาย 100 เปอร์เซ็นต์ในทุกจุด ดังแสดงตามตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 ผลการทดสอบอัตราการตาย (ร้อยละ) ณ อุณหภูมิถั่วเขียวประมาณ 60 องศาเซลเซียส ถั่วเขียว

จุดที่	อัตราการตาย (ร้อยละ)		เก็บมอดไว้ (วัน)			เก็บข้าวไว้ (วัน)			
	ตัวเต็มวัย	ระยะไข่	1	7	14	15	30	45	60
1	100	-	100	100	100	100	100	100	100
2	100	-	100	100	100	100	100	100	100
3	100	-	100	100	100	100	100	100	100
4	100	-	100	100	100	100	100	100	100
5	100	-	100	100	100	100	100	100	100
6	100	-	100	100	100	100	100	100	100
7	100	-	100	100	100	100	100	100	100
8	100	-	100	100	100	100	100	100	100
9	100	-	100	100	100	100	100	100	100

5.4 สรุป

จากการผลการทดสอบข้างต้นจะเห็นได้ว่าเครื่องต้นแบบการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก สำหรับการฆ่ามอดในข้าวโพดและถั่วเขียว โดยการใช้คลื่นความถี่วิทยุโครงการนี้ สามารถฆ่ามอดได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยเมื่อให้ความร้อนกับข้าวโพดและถั่วเขียว ทำให้มอดตายได้ 100% และลักษณะทางกายภาพของของข้าวโพดและถั่วเขียวไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

บทที่ 6

สรุป ปัญหาและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาและวิจัยถึงการวิเคราะห์การให้ความร้อนไดโอดีเล็กทรอนิกส์ โดยได้ศึกษาทฤษฎีการให้ความร้อนไดโอดีเล็กทรอนิกส์ด้วยสนามไฟฟ้าและพิจารณาถึง กลไกการให้ความร้อนของไดโอดีเล็กทรอนิกส์ หลักการให้ความร้อนไดโอดีเล็กทรอนิกส์พาราเมเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนไดโอดีเล็กทรอนิกส์ และหลักการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าและได้นำทฤษฎีที่ได้ศึกษามาทำการวิเคราะห์และออกแบบด้วยการคำนวณหาระดับพลังงานที่เกิดขึ้นในตัวมอดและช่วงความถี่ที่ใช้ให้มีความเหมาะสม การคำนวณหาระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่สามารถทำให้ความร้อนแก่ไดโอดีเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมได้ การวิเคราะห์ถึงลักษณะของวงจรที่สามารถทำให้เกิดคลื่นสนามไฟฟ้า การคำนวณถึงกำลังงานที่ต้องใช้ภายในวงจรเพื่อให้ได้กำลังงานที่เหมาะสมซึ่งนำมาสู่การจำลองผลของการกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม CST เพื่อวิเคราะห์ถึงจำนวนของจุดป้อนกำลังงานและตำแหน่งของจุดป้อนกำลังงานที่เหมาะสม และได้วิเคราะห์ถึงระดับการใช้กำลังงานที่ใช้ต่อพื้นที่ในการใช้งาน รวมถึงการพิจารณาระยะเวลาในการให้ความร้อนสำหรับขั้วมอดที่เหมาะสม และองค์ประกอบด้านโครงสร้าง ต้นแบบสำหรับขั้วมอดโดยให้ความร้อนไดโอดีเล็กทรอนิกส์ในโครงการนี้ทำงานในย่านความถี่ 42 MHz ซึ่งการทดสอบให้ความร้อนไดโอดีเล็กทรอนิกส์ พบว่ามอดขั้วมอดอัตราการทำลาย 100% และอุณหภูมิสูงสุดของขั้วโพตและถั่วเขียวเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส เมื่อตรวจสอบคุณลักษณะของขั้วโพตและถั่วเขียวแล้วไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ

6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ระบบจ่ายกำลังงาน ระบบจ่ายกำลังงานของอาคาร และระบบกราวด์ (Ground) อาจส่งผลให้การทดสอบระดับกำลังงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพของการออกแบบระบบ การออกแบบเครื่องที่มีขนาดกำลังงานสูง จำเป็นต้องมีระบบการจ่ายกำลังงานและระบบกราวด์ที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด

เอกสารอ้างอิง

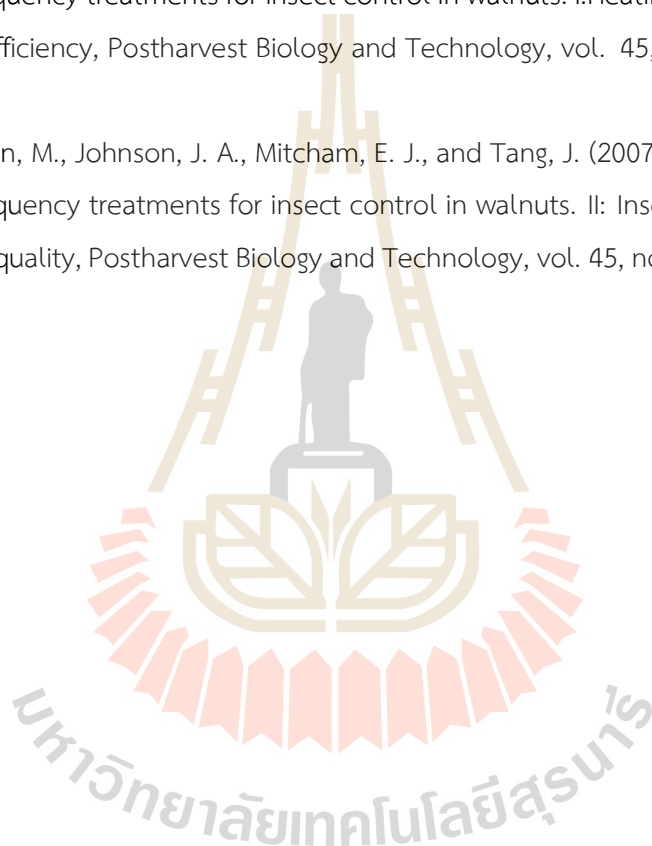
- S. O. Nelson (1991). Dielectric Properties of Agricultural Products, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 26 no. 5, pp. 845-869
- S. O. Nelson (1996). Fundamentals and industrial applications of Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, vol. 39, no. 4, pp. 1475-1484
- Liyang Zhou, A., Shaojin Wang, B., (2016). Verification of radio frequency heating uniformity and *Sitophilus oryzae* control in rough, brown, and milled rice, Journal of Stored Products Research pp. 40-47
- Andreuccetti, D., Bini, M., Ignesti, A., Gambetta, A., and Olmi, R. (1994). Microwave destruction of woodworms, Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, vol. 29, no. 3, pp. 153-160.
- Bayrashev, A., Ziaie, B., (2002). Silicon wafer bonding with an insulator interlayer using RF dielectric heating, Micro Electro Mechanical Systems, The Fifteenth, International Conference on IEEE, pp. 419- 422.
- Bell, C.H., and Wilson, S.M. (1995). Phosphine tolerance and resistance in *trogoderma granarium everts* (Coleoptera: Dermestidae), journal of stored products research, vol. 31, no. 3, pp. 199-205.
- Du, Y. Cheng, T. C. and Farag, A. S. (1996). Principles of power frequency magnetic field shielding with flat sheets in a source of long conductors, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 38, no. 3, pp. 450-459.
- Das, I., Kumar, G., and Shah, N.G. (2013). Microwave Heating as an Alternative Quarantine Method for Disinfestation of Stored Food Grains, International Journal of Food Science, Hindawi Publishing Corporation.
- Edward, P.M. and Elena, S. K. (1997). Aminopeptidase-Like Activity in Hemolymph Plasma from Larvae of the Gypsy Moth, *Lymantria dispar* (Lepidoptera: Lymantriidae) Comp Biochem Physiol, Vol. 116B, pp. 11-18
- Granada, M. and Ferney, W. (2012). Experimental prototype for endogenous drying wood by radio frequency (RF). Alternative Energies and Energy Quality (SIFAE), International Symposium on IEEE. pp. 1- 8.

- Gao, M., Tang, J., Wang, Y., Powers, J., and Wang, S. (2010). Almond quality as influenced by radio frequency heat treatments for disinfestation, *Postharvest Biology and Technology*, vol. 58, no.3, pp. 225–231.
- Hasselgren, L. and Luomi, J. (1995). Geometrical aspects of magnetic shielding at extremely low frequencies, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 37, no. 3, pp. 409–420.
- Kurose, H., Miyagi, D., Takahashi, N., Uchida, N and Kawanaka, K. (2009). 3-D Eddy Current Analysis of Induction Heating Apparatus Considering Heat Emission, Heat Conduction, and Temperature Dependence of Magnetic Characteristics, *IEEE Transactions on Magnetics*, 45: 1847 - 1850.
- Komarov, V. (2012). *Dielectric and Thermal Properties of Materials at Microwave Frequencies*, Handbook, Artech House.
- Lichan, M., Cheng, K.W.E and Ka W.C., Systematic Approach to High-Power and Energy-Efficient Industrial Induction Cooker System: Circuit Design, Control Strategy, and Prototype Evaluation, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26: 3754 - 3765.
- Lagunas-Solar, M. C., Pan, Z., Zeng, N. X., Truong, T. D., Khir, R., and Amaratunga, K. S. P. (2007). Application of radiofrequency power for non-chemical disinfestation of rough rice with full retention of quality attributes, *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 23,no. 5, pp. 647–654.
- Li, C. Wang, J. and Zhu, J. (2010). Experiment and Theoretical Study on Thermal Performance of Honeycomb Ceramic Regenerative Heat Exchanger, *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC) Asia-Pacific*, pp. 1-6.
- Larry Zettler J., and Arthur, F. H. (2000). Chemical control of stored product insects with fumigants and residual treatments, *Crop Protection Vol.1*, p p. 577-582.
- Myungsik K. , and Kwangsoo K. (2012). Development of a compact cylindrical reaction cavity for a microwave dielectric heating system. *Review of Scientific Instruments*, Vol, 83, pp. 1,
- Meng, L.C., Cheng, K.W.E and Wang, W.M. (2011). Thermal Impacts of Electromagnetic Proximity Effects in Induction Cooking System With Distributed Planar Multicoils, *IEEE Transactions on Magnetics*, 47: 3212 - 3215.

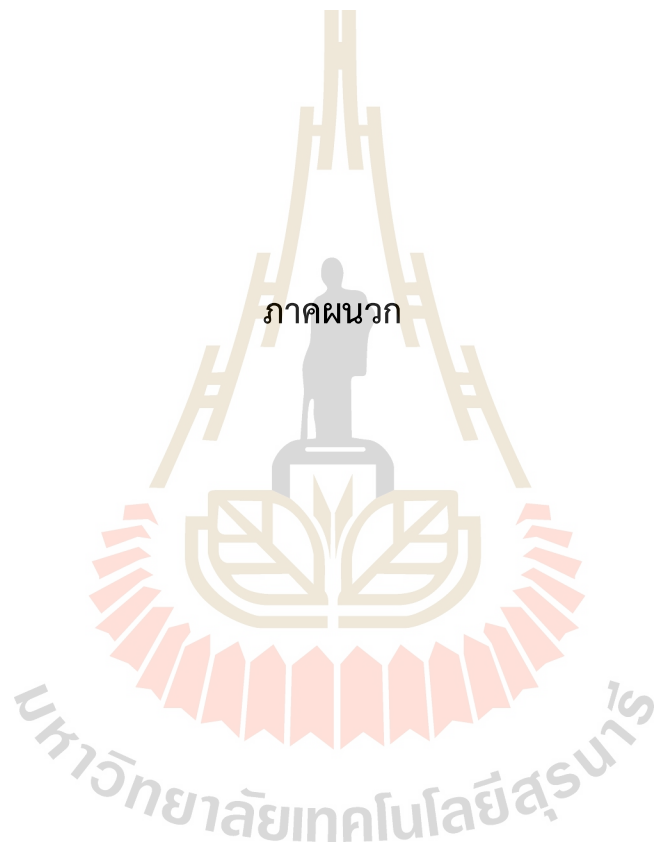
- Mangesh, B., and Sunil, T. (2013). A 25kW, 25kHz Induction Heating Power Supply for MOVPE System Using L-LC Resonant Inverter, *Advances in Power Electronics*, Hindawi Publishing Corporation.
- Mukhametshina, A., and Martynova, E. (2013). Electromagnetic Heating of Heavy Oil and Bitumen: A Review of Experimental Studies and Field Applications, *Journal of Petroleum Engineering*, Hindawi Publishing Corporation.
- Mitcham, E. (2001). Quarantine issues in 2000, *Acta Horticulture*, vol. 553, pp. 451–455.
- Mitcham, E. J., Veltman, R. H. Feng X. (2004). Application of radio frequency treatments to control insects in in-shell walnuts, *Postharvest Biology and Technology*, vol. 33, no. 1, pp. 93–100.
- Marra, F., Zhang, L., and Lyng, J. G. (2009). Radio frequency treatment of foods: review of recent advances, *Journal of Food Engineering*, vol. 91, no. 4, pp. 497–508.
- Nelson, S. O. (2006). Agricultural applications of dielectric measurements, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 13, p.688-702.
- Nelson, S. O. (1996). Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control. *Transactions of the ASAE*, 39, pp. 1475–1484.
- Nelson, S. O. (1991). Dielectric properties of agricultural products Measurements and Applications, *IEEE Trans. Elect. Insul.*, Vol.26, pp. 845-869.
- Nelson, S. O., and Stetson, L. E. (1974). 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.
- Nelson, S. O., and Payne, J. A., (1982). RF dielectric heating for pecan weevil control, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, vol. 31, pp. 456–458.
- Nelson, S. O., (1973). Insect-control Studies with Microwaves and Other Radio-frequency Energy, *Bul. Entomol. Soc. Amer.*, Vol. 19, No. 3, pp. 157-163.
- Oka, H., Uchidate, S., Sekino, N., Namizaki, Y., Kubota, K., Osada, H., Dawson, F.P., and Lavers, J.D. (2011). Electromagnetic Wave Absorption Characteristics of Half Carbonized Powder-Type Magnetic Wood, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, pp. 3078-3070.
- Okamoto, Y. Himeno, R. Ushida, K. Ahagon, A. and Fujiwara, K.(2008). A Dielectric Heating Analysis Method With Accurate Rotational Motion of Stirrer Fan Using

- Nonconforming Mesh Connection, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 44, p. 806-809.
- Robinson W.H. (2005). *Handbook of urban insects and arachnids: A handbook of urban entomology*, Cambridge University Press, 2005.
- Rajendran, S., and Muralidharan, N. (2001). Performance of phosphine in fumigation of bagged paddy rice in indoor and outdoor stores, *Journal of Stored Products Research*, vol. 37, no. 4, pp. 351–358.
- Sarnago, H., Lucia, O., Mediano, A and Burdio, JM., (2013). Class-D/DE Dual-Mode-Operation Resonant Converter for Improved-Efficiency Domestic Induction Heating System, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28: 1274-1285.
- Sonerud, B. Bengtsson, T. Blennow J. and Gubanski, S.M. (2009). Dielectric heating in insulating materials subjected to voltage waveforms with high harmonic content, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 16, pp. 926-933.
- Sitophilus, O., and Koehler, P. G., (2012). *Rice Weevil*, University of Florida, IFAS Extension, Revised.
- Thongsopa, C., and Thosdeekoraphat, T. (2013). Analysis and Design of Magnetic Shielding System for Breast Cancer Treatment with Hyperthermia Inductive Heating, *International Journal of Antennas and Propagation*, Volume 2013, 2013.
- Wang, S., Tang, J., Johnson, J.A., Mitcham, E., Hansen, J.D., Hallman, G., Drake, S.R., and Wang, Y. (2003). Dielectric Properties of Fruits and Insect Pests as related to Radio Frequency and Microwave Treatments, *Biosystems Engineering*, Vol. 85, p. 201-212. 2003.
- Wang, S., Tang, J., and Cavalieri, R. P. (2001). Modeling fruit internal heating rates for hot air and hot water treatments, *Postharvest Biology and Technology*, vol. 22, no. 3, pp. 257–270.
- Wang, S., Tiwari, G., Jiao, S., Johnson, J. A., and Tang, J. (2010). Developing postharvest disinfestations treatments for legumes using radio frequency energy, *Biosystems Engineering*, vol. 105, no. 3, pp. 341–349.
- Wang, S., Tang, J., Johnson J. A. (2002). Process protocols based on radio frequency energy to control field and storage pests in inshell walnuts, *Postharvest Biology and Technology*, vol. 26, no. 3, pp. 265–273.

- Wang, S., Tang, J., Johnson, J. A., and Hansen, J. D. (2002). Thermal death kinetics of fifth-in star *Amyelois transitella* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae), *Journal of Stored Products Research*, vol. 38, no. 5, pp. 427–440.
- Wang, S., Ikediala, J. N., Tang, J., and Hansen, J. D. (2002). Thermal death kinetics and heating rate effects for fifth-instar *Cydiapomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae), *Journal of Stored Products Research*, vol. 38, no. 5, pp. 441–453.
- Wang, S., Monzon, M., Johnson, J. A., Mitcham, E. J., and Tang, J. (2007). Industrial-scale radio frequency treatments for insect control in walnuts. I: Heating uniformity and energy efficiency, *Postharvest Biology and Technology*, vol. 45, no. 2, pp. 240–246.
- Wang, S., Monzon, M., Johnson, J. A., Mitcham, E. J., and Tang, J. (2007). Industrial-scale radio frequency treatments for insect control in walnuts. II: Insect mortality and product quality, *Postharvest Biology and Technology*, vol. 45, no. 2, pp. 247–253.



ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

คุณสมบัติเฉพาะของเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริก
สำหรับฆ่ามอดในข้าวโพดและมอดในถั่วเขียว

**คุณสมบัติเฉพาะของเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กตริก
สำหรับฆ่ามอดในข้าวโพดและมอดในถั่วเขียว**

คุณสมบัติเฉพาะ :

คุณลักษณะทั่วไป

- ใช้กับไฟฟ้า 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต
- ขนาดของกำลังงานเอาต์พุต 9 กิโลวัตต์

ระบบวงจรควบคุมการทำงานทั้งระบบ

- สามารถทำการตัดไฟฟ้าทั้งระบบเมื่อมีกระแสไหลเกิน
- มีชุดควบคุมหลักสามารถทนกระแสได้ 100 แอมป์
- มีการแสดงผลของสถานการณ์ควบคุมกระแสไฟฟ้าในภาคส่วนต่าง ๆ ของตัวเครื่อง

ระบบป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบ

- สามารถป้องกันกระแสไฟรั่วจากตัวเครื่อง
- สามารถป้องกันคลื่นสนามไฟฟ้าด้วยแผ่นปิดกันอลูมิเนียมรอบตัวเครื่อง
- เป็นแท่งกราวด์ทองแดงขนาดความยาว 1.8 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว จำนวน 3 แท่ง สำหรับตอกลงดิน
- สายไฟทองแดงเบอร์ 4 สำหรับต่อจากตัวเครื่องมายังแท่งกราวด์
- มีตัวยึดสายไฟทองแดงที่ตัวเครื่องกับแท่งกราวด์ทองแดง

ข้อมูลทางเทคนิค ต่อ ผลกระทบต่อมนุษย์จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า :

จากมาตรฐานข้อกำหนดของพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 300 kHz ถึง 300 GHz ต่อร่างกายมนุษย์ (Ref) Safety Code 6 - Limits of Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Energy in the Frequency Range from 3 kHz to 300 GHz (2015) ดังรูปที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อกำหนดที่ว่า พลังงานที่มีค่า 0.08 W/kg ถึงจะมีผลต่อมนุษย์ เมื่อเทียบเป็นมวลร่างกายมนุษย์ จะมีผลดังตารางที่ 1

LIMITS OF HUMAN EXPOSURE TO RADIOFREQUENCY ELECTROMAGNETIC ENERGY IN THE FREQUENCY RANGE FROM 3 KHZ TO 300 GHZ

Consumer and Clinical Radiation Protection Bureau
Environmental and Radiation Health Sciences Directorate
Healthy Environments and Consumer Safety Branch
Health Canada

SAFETY CODE 6 (2015)

2.1.2 Specific Absorption Rate Limits (100 kHz–6 GHz)

The SAR is a measure of the rate at which electromagnetic energy is absorbed in the body. Basic restrictions for SAR are intended to prevent the occurrence of thermal effects from RF energy exposure on the body. At frequencies between 100 kHz and 6 GHz, the SAR limits (Table 2) take precedence over field strength and power density reference levels (Section 2.2) and shall not be exceeded.

The SAR should be determined for situations where exposures occur at a distance of 0.2 m or less from the source. In all cases, the values in Table 2 shall not be exceeded. For conditions where SAR determination is impractical, external unperturbed field strength or power density measurements shall be carried out and the limits outlined in Section 2.2 shall be respected.

TABLE 2: Specific Absorption Rate Basic Restrictions (100 kHz–6 GHz)

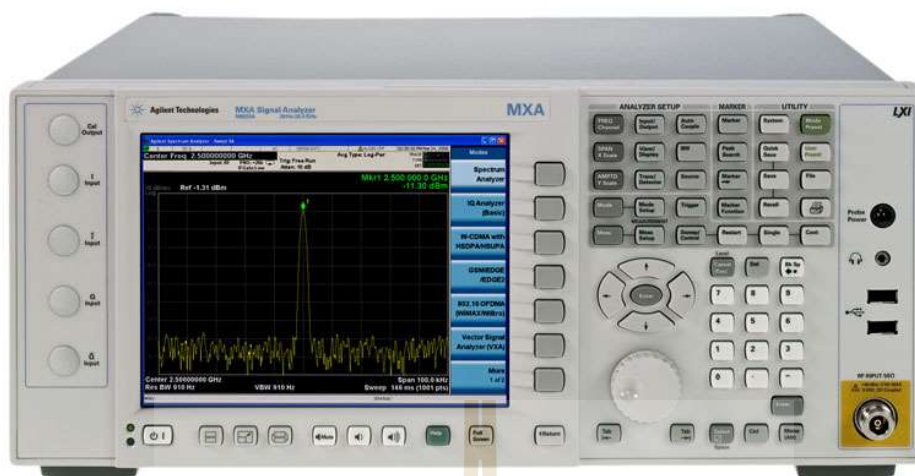
CONDITION	SAR Basic Restriction (W/kg)**	
	Uncontrolled Environment	Controlled Environment
The SAR averaged over the whole body mass.	0.08	0.4
The peak spatially-averaged SAR for the head, neck and trunk, averaged over any 1 g of tissue*	1.6	8
The peak spatially-averaged SAR in the limbs, averaged over any 10 g of tissue*	4	20

รูปที่ 1 มาตรฐานของกำลังงานที่มีผลต่อร่างกายมนุษย์

ตารางที่ 1 มวลร่างกายต่อพลังงาน

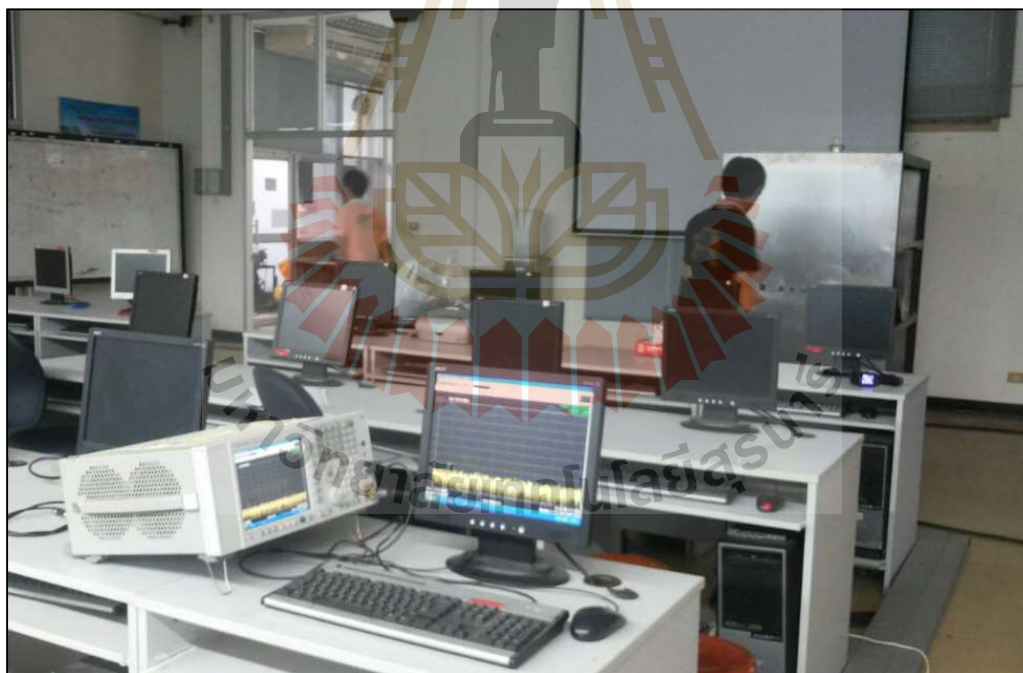
มวลร่างกาย (kg)	พลังงานที่สามารถรับได้ (W)
20	1.600
25	2.000
30	2.400
35	2.800
40	3.200
45	3.600
50	4.000
55	4.400
60	4.800
65	5.200
70	5.600
75	6.000
80	6.400
85	6.800
90	7.200
95	7.600
100	8.000

ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับผลการทดสอบวันผลการแพร่กระจายคลื่นจากตัวเครื่องให้ความร้อนได้อิเล็กทริก ด้วยเครื่องมือวัดและวิเคราะห์สัญญาณขั้นสูง (N9020A MXA Signal Analyzer) ดังแสดงตาม รูปที่ 2



รูปที่ 2 เครื่องมือวิเคราะห์สัญญาณรุ่น N9020A MXA Signal Analyzer

ผลการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของเครื่องให้ความร้อนได้อิเล็กตริก



ลักษณะการทดสอบการแพร่กระจายคลื่น

ตารางที่ 2 ผลการแพร่กระจายคลื่น (ด้านหน้า)

ระยะห่าง (เมตร)	พลังงานที่สามารถรับได้ (dBm)	พลังงานที่สามารถรับได้ (W)
0.1	30.01	1.004098
1	10.01	0.010041
2	3.99	0.00251
3	0.47	0.001116
4	-2.02	0.000628
5	-3.90	0.000407
6	-5.54	0.000279
7	-6.88	0.000205
8	-8.044	0.000157
9	-9.06	0.000124
10	-9.98	0.0001
20	-16.00	2.51E-05
30	-19.52	1.12E-05

ตารางที่ 3 ผลการแพร่กระจายคลื่น (ด้านหลัง)

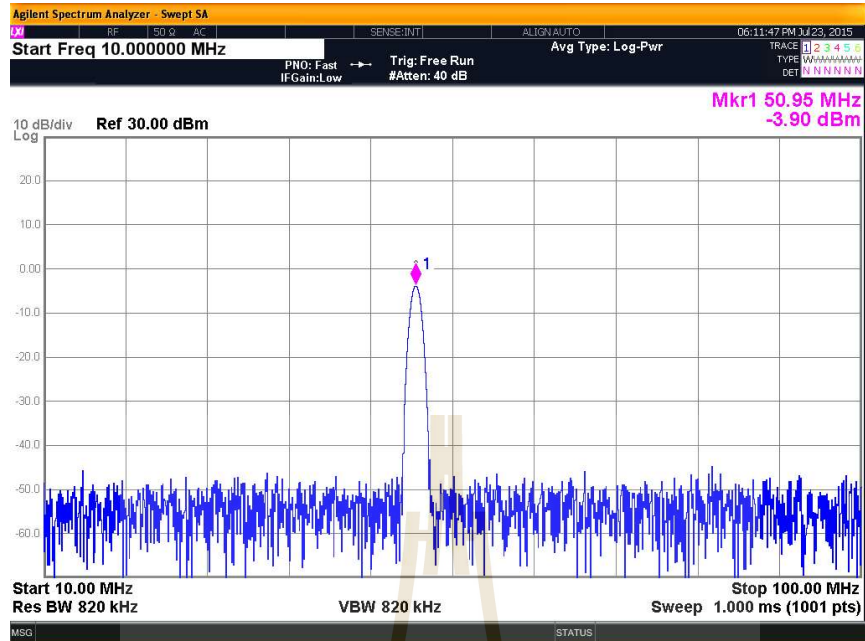
ระยะห่าง (เมตร)	พลังงานที่สามารถรับได้ (dBm)	พลังงานที่สามารถรับได้ (W)
0.1	29.49	0.889996
1	9.49	0.0089
2	3.47	0.002225
3	-0.04	0.000989
4	-2.54	0.000556
5	-4.49	0.000356
6	-6.06	0.000247
7	-7.40	0.000182
8	-8.56	0.000139
9	-9.59	0.00011
10	-10.50	8.9E-05
20	-16.52	2.22E-05
30	-20.04	9.89E-06

ตารางที่ 4 ผลการแพร่กระจายคลื่น (ด้านข้าง ซ้าย)

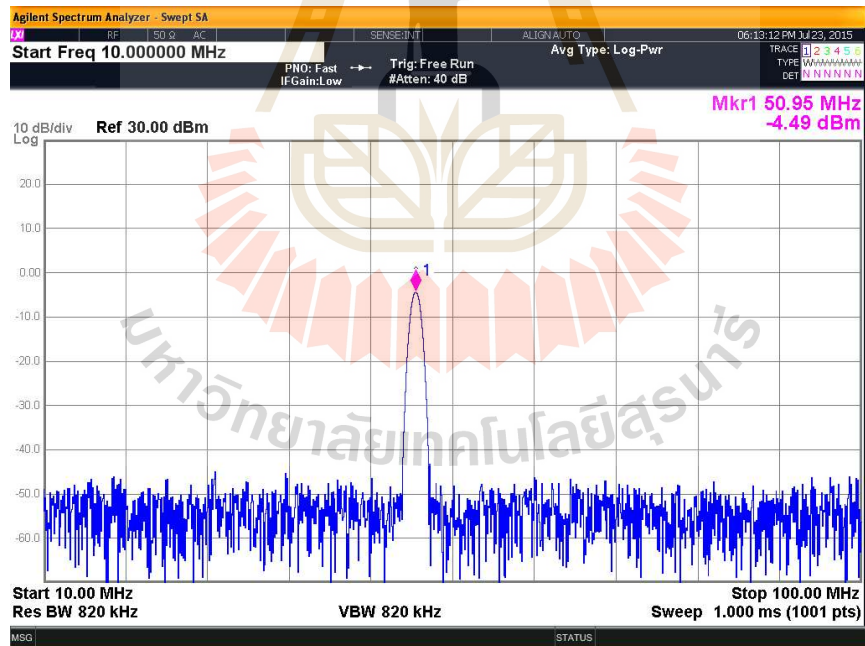
ระยะห่าง (เมตร)	พลังงานที่สามารถรับได้ (dBm)	พลังงานที่สามารถรับได้ (W)
0.1	26.30	0.426741
1	6.30	0.004267
2	0.28	0.001067
3	-3.24	0.000474
4	-5.73	0.000267
5	-7.71	0.000171
6	-9.26	0.000119
7	-10.60	8.71E-05
8	-11.76	6.67E-05
9	-12.78	5.27E-05
10	-13.69	4.27E-05
20	-19.71	1.07E-05
30	-23.24	4.74E-06

ตารางที่ 5 ผลการแพร่กระจายคลื่น (ด้านข้าง ขวา)

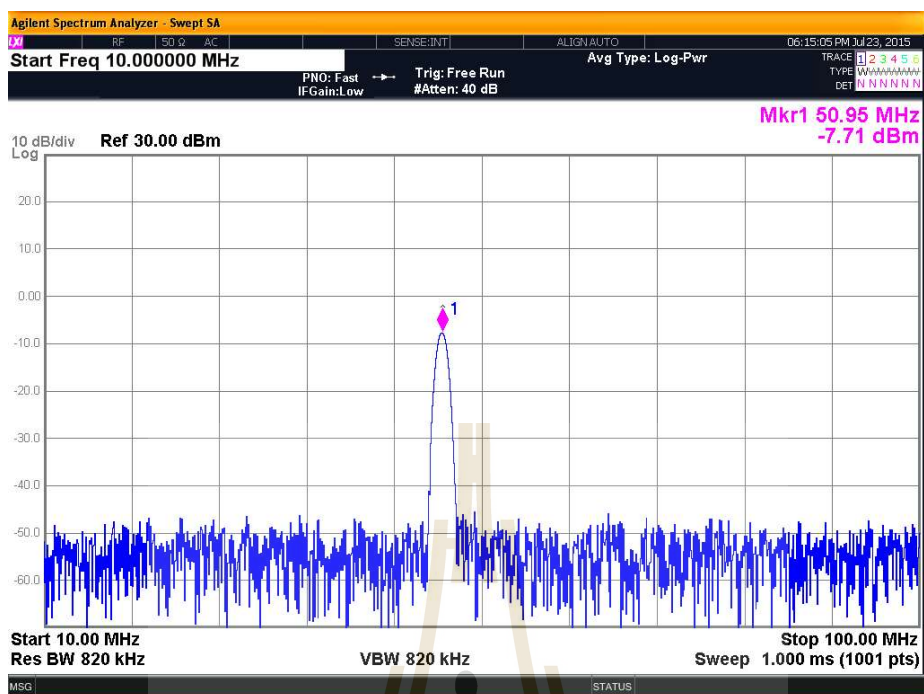
ระยะห่าง (เมตร)	พลังงานที่สามารถรับได้ (dBm)	พลังงานที่สามารถรับได้ (W)
0.1	26.30	0.451844
1	6.30	0.004518
2	0.28	0.00113
3	-3.24	0.000502
4	-5.73	0.000282
5	-7.46	0.000181
6	-9.26	0.000126
7	-10.60	9.22E-05
8	-11.76	7.06E-05
9	-12.78	5.58E-05
10	-13.69	4.52E-05
20	-19.71	1.13E-05
30	-23.24	5.02E-06



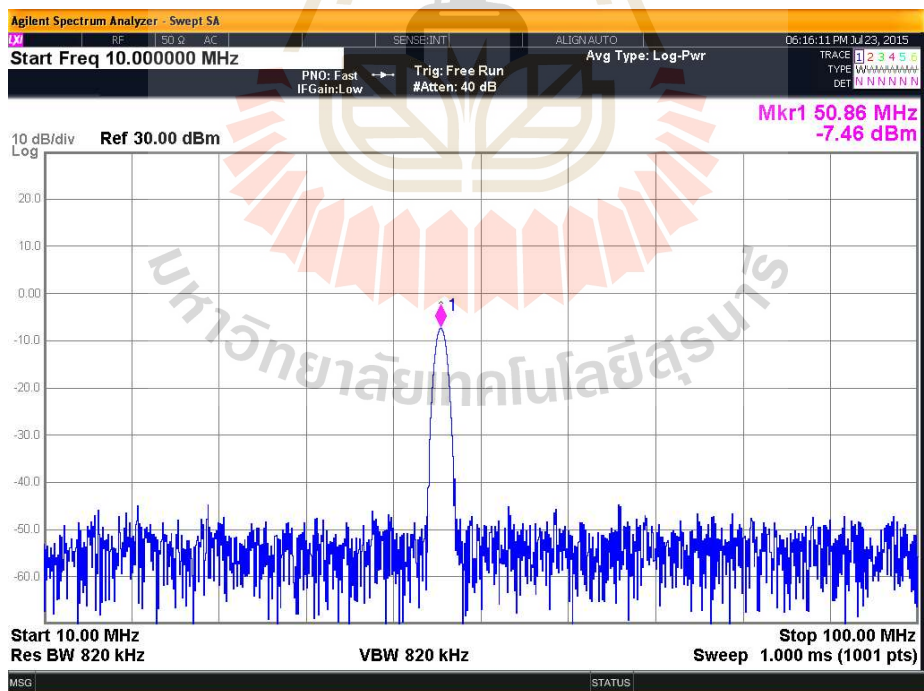
รูปที่ 3 ผลการทดสอบที่ระยะ 5 เมตร ด้านหน้า จากตัวเครื่อง



รูปที่ 4 ผลการทดสอบที่ระยะ 5 เมตร ด้านหลัง จากตัวเครื่อง



รูปที่ 5 ผลการทดสอบที่ระยะ 5 เมตร ด้านข้าง ซ้าย จากตัวเครื่อง



รูปที่ 6 ผลการทดสอบที่ระยะ 5 เมตร ด้านข้าง ขวา จากตัวเครื่อง

สรุปผลการทดสอบ/พลังงานที่มีผลต่อมนุษย์

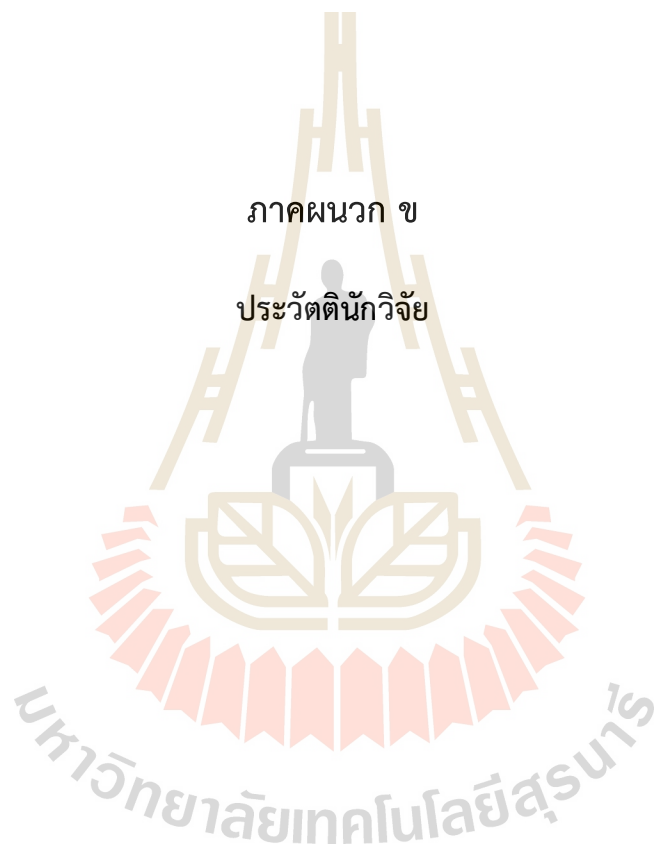
ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบมวลร่างกายต่อพลังงานที่แพร่กระจาย

มวลร่างกาย (kg)	พลังงานแพร่กระจายคลื่น (W) ที่ระยะต่างๆ				พลังงานที่มีผลต่อ มนุษย์ (W)
	0.1 เมตร	1 เมตร	5 เมตร	10 เมตร	
20	1.004098	0.010041	0.000407	0.0001	1.600
25	1.004098	0.010041	0.000407	0.0001	2.000
30	1.004098	0.010041	0.000407	0.0001	2.400
35	1.004098	0.010041	0.000407	0.0001	2.800
40	1.004098	0.010041	0.000407	0.0001	3.200
45	1.004098	0.010041	0.000407	0.0001	3.600
50	1.004098	0.010041	0.000407	0.0001	4.000
55	1.004098	0.010041	0.000407	0.0001	4.400
60	1.004098	0.010041	0.000407	0.0001	4.800
65	1.004098	0.010041	0.000407	0.0001	5.200
70	1.004098	0.010041	0.000407	0.0001	5.600
75	1.004098	0.010041	0.000407	0.0001	6.000
80	1.004098	0.010041	0.000407	0.0001	6.400
85	1.004098	0.010041	0.000407	0.0001	6.800
90	1.004098	0.010041	0.000407	0.0001	7.200
95	1.004098	0.010041	0.000407	0.0001	7.600
100	1.004098	0.010041	0.000407	0.0001	8.000

จากผลการวัดทดสอบการแพร่กระจายคลื่นรบกวนของเครื่องให้ความร้อนไดอิเล็กทริกสำหรับฆ่ามอดข้าว พบว่า เมื่อมีการวัดที่ระยะห่างจากตัวเครื่องที่ 0.1 เมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใกล้ที่สุด พบว่า จะมีระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ 1.00 วัตต์ และเมื่อระยะห่างออกไป ที่ระยะประมาณ 5 เมตร พบว่า การแพร่กระจายลดลงเหลือประมาณ 0.000407 วัตต์ ซึ่งเมื่อเทียบกับมวลของมนุษย์แล้ว พบว่าไม่มีผลกระทบต่อมนุษย์

ภาคผนวก ข

ประวัตินักวิจัย



ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ-นามสกุล อาจารย์ ดร.สำราญ สันทาลุนัย

Dr. Samran Santalunai

2. หมายเลขบัตรประชาชน 1 3212 00018 08 2

3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

4. หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้

สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ. มหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 0-4422-3881
โทรสาร 0-4422-4392

5. การศึกษา

ปีการศึกษา	ระดับปริญญา	ชื่อปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถานศึกษา	ประเทศ
2557	Doctors	Ph.D	Telecommunications Engineering	Suranaree University of Technology	Thailand
2552	Masters	M.Eng	Telecommunications Engineering	Suranaree University of Technology	Thailand
2550	Bachelors	B.Eng	Telecommunications Engineering	Suranaree University of Technology	Thailand

6. ความรู้พิเศษและความชำนาญเชิงวิชาการ

1. ออกแบบระบบเครื่องให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกสำหรับกำจัดแมลงที่เป็นศัตรูพืชและสามารถออกแบบให้เหมาะสมกับวัสดุไดอิเล็กทริกชนิดอื่นๆ
2. ออกแบบวงจรให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสำหรับให้ความร้อนกับวัสดุที่เป็นโลหะ
3. ออกแบบวงจรมอเตอร์ความถี่วิทยุและไมโครเวฟสำหรับประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ

7. ประวัติการทำงาน

ปัจจุบัน อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

- **อาจารย์**
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
- **อาจารย์พิเศษ**
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- **ผู้ช่วยสอน:**
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมและสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- **วิศวกร**
Benchmark Electronics (Thailand) Public Co., Ltd. Nakhonratchasima 30000,
Thailand.

ลักษณะงาน/หน้าที่ : ควบคุมและดูแลการทดสอบวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงการวิเคราะห์
และ หาสาเหตุเพื่อการปรับปรุงให้วงจรมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

• งานวิจัย :

- (1) การออกแบบและสร้างเครื่องป้องกันเปรียงโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงสำหรับแบร็งรับเพลารือ (สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ วช.) (2563)
- (2) พัฒนาเครื่องกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและหาสภาวะที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้ในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์สำหรับลูกปลาวัยอ่อน (สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร สวก.) (2563)
- (3) การพัฒนาต่อยอระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงพร้อมแจ้งเตือนผ่านระบบสื่อสารไร้สายสำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกลเพื่อความมั่นคงของกองทัพ (สำนักงานปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม) (2563)
- (4) การควบคุมแมลงศัตรูข้าวเปลือกและวิเคราะห์คุณภาพในการผลิตเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยคลื่นความถี่วิทยุเพื่อการผลิตข้าวอินทรีย์แปลงใหญ่ (สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร สวก.) (2563)
- (5) ผลกระทบของคลื่นความถี่วิทยุต่อการปรับปรุงข้าวแข็งให้เป็นข้าวนุ่มเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมข้าวไทย (โครงการยกระดับงานวิจัยเพื่ออนาคตสู่ภาคอุตสาหกรรม เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี) (2563)
- (6) ผลกระทบของคลื่นเสียงความถี่สูงต่อการชะลอความสุกของมะม่วงและผลไม้สดสำหรับประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการยืดอายุการเก็บรักษาเพื่อการส่งออก โครงการยกระดับงานวิจัยเพื่ออนาคตสู่ภาคอุตสาหกรรม เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี) (2563)
- (7) การออกแบบสร้างเครื่องกำจัดเห็บโคโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง โครงการยกระดับงานวิจัยเพื่ออนาคตสู่ภาคอุตสาหกรรม เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี) (2563)
- (8) การออกแบบสร้างเครื่องและระบบกำจัดมอดและแมลงในข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวและข้าวสารสำหรับอุตสาหกรรมการส่งออกแบบครบวงจรโดยไม่ใช้สารเคมีเพื่อเพิ่มขีดความสามารถการแข่งขันในตลาดโลกของอุตสาหกรรมข้าวไทยอย่างยั่งยืน (2562)
ทุนอุดหนุนการวิจัยของ สำนักงานสภานโยบายวิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทช.) (2562)
- (9) ออกแบบสร้างเครื่องกำจัดแมลงและศัตรูพืชจำพวกไม้น้ำสำหรับเกษตรกรและอุตสาหกรรมการเพาะปลูกพืชน้ำเพื่อการส่งออกโดยไม่ใช้สารเคมี
ทุนอุดหนุนการวิจัยของ สำนักงานสภานโยบายวิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทช.) (2562)
- (10) การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดโอโซนกำลังสูงสำหรับกำจัดแมลงศัตรูพืชในอุตสาหกรรมกล้วยไม้และดอกไม้เพื่อการส่งออกและนำเข้าที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและทดแทนการใช้สารเคมี
ทุนอุดหนุนการวิจัยของ สำนักงานสภานโยบายวิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทช.) (2562)

- (11) ออกแบบสร้างเครื่องกำจัดมอดในเมล็ดธัญพืชสำหรับเกษตรกรและอุตสาหกรรมการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์รวมถึงการส่งออกด้วยคลื่นความถี่วิทยุเพื่อทดแทนการใช้สารเคมี
ทุนอุดหนุนการวิจัยของ สำนักงานสถานนโยบายวิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทช.) (2562)
- (12) ออกแบบสร้างเครื่องกำจัดมอดมะขามหวานและผลไม้แห้งสำหรับกลุ่มเกษตรกรและภาคอุตสาหกรรมการส่งออกมะขามหวานและผลไม้แห้งด้วยคลื่นความถี่วิทยุ
ทุนอุดหนุนการวิจัยของ สำนักงานสถานนโยบายวิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทช.) (2562)
- (13) ออกแบบสร้างเครื่องฆ่าหนอนและไข่แมลงวันผลไม้ในมะม่วงและผลไม้สดสำหรับอุตสาหกรรมทางเกษตรและส่งออกผลไม้สดด้วยคลื่นความถี่วิทยุ
ทุนอุดหนุนการวิจัยของ สำนักงานสถานนโยบายวิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทช.) (2562)
- (14) ออกแบบสร้างระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงสำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกลเพื่อความมั่นคงของกองทัพ
(ทุนอุดหนุนการวิจัยของ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา) (2561)
- (15) ออกแบบสร้างเครื่องฆ่ามอดข้าวเปลือกและข้าวสารในกระสอบข้าวด้วยคลื่นความถี่วิทยุโดยใช้ตัวปล่อยคลื่นขนาดใหญ่สำหรับอุตสาหกรรมการเก็บรักษาข้าว
(ทุนอุดหนุนการวิจัยของ สวทช.) (2561)
- (16) นวัตกรรมการสร้างเครื่องกำจัดตะกรันในท่อส่งน้ำบาดาล
(ทุนอุดหนุนการวิจัยของ เทคโนโลยีธานี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี) (2561)
- (17) การออกแบบสร้างเครื่องไล่นกด้วยเทคนิคการจับภาพและสั่งการทำงานแบบอัตโนมัติร่วมกับระบบจุดระเบิดในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์
(ทุนอุดหนุนการวิจัยของ เทคโนโลยีธานี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี) (2561)
- (18) นวัตกรรมการสร้างเครื่องกำจัดสาหร่ายและตะไคร่ในแหล่งน้ำด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง
(ทุนอุดหนุนการวิจัยของ เทคโนโลยีธานี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี) (2561)
- (19) โครงการสร้างเครื่องกำจัดมอดมะขามแบบไม่แกะเปลือก
(ทุนอุดหนุนการวิจัยของ บริษัท สารัช มาร์เก็ตติ้ง จำกัด) (2561)
- (20) การวิเคราะห์ผลการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุสำหรับประยุกต์ใช้ในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ในอุตสาหกรรมน้ำผลไม้
(ทุนอุดหนุนการวิจัยของ วช. ผ่าน มทส เพื่อสนับสนุนการสร้างและพัฒนา นักวิจัยรุ่นใหม่) (2561)
- (21) ผลกระทบจากการฆ่ามอดด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกร่วมกับกระบวนการผลิตข้าวสารต่อคุณภาพและความหอมของข้าวหอมมะลิ

- (ทุนอุดหนุนการวิจัยของ วช. ผ่าน สวก.) (2560)
- (22) เครื่องให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก สำหรับฆ่ามอดข้าวเพื่อพัฒนาขีดความสามารถของโรงสีข้าวสหกรณ์การเกษตรในพื้นที่ทุ่งกุลาร้องไห้ (2557).
ทุนวิจัย (สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน))
- (23) ออกแบบสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกสำหรับฆ่ามอดข้าวสำหรับโรงสีข้าวขนาดใหญ่และขนาดชุมชน (2557).
ทุนวิจัย (สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน))
- (24) ออกแบบสร้างเครื่องฆ่ามอดมะขามด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (2557).
ทุนวิจัย (สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน))
- (25) เครื่องให้ความร้อนสารเมลามีนเพื่อขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ขนมซูเปอร์แวร์ (2556).
ออกแบบสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกสำหรับฆ่ามอดข้าว (2555).
ทุนวิจัย (สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน))
- (26) เครื่องผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกด้วยคลื่นไมโครเวฟผ่านการนำความร้อนด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์จากกล่อง UHT
กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี (2555).
- (27) เครื่องให้กำลังงานแบบไร้สายสำหรับรถยนต์ไฮบริด
กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี (2555).
- (28) เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับอุ่นแม่พิมพ์แบบอลูมิเนียม
กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี (2554).
- (29) เครื่องสกัดแบ่งจากเซลล์ลูไลซของกากมันสำปะหลัง
กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี (2554).
- (30) เครื่องกำจัดลูกน้ำยุงโดยไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม
กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี (2553).
- (31) เครื่องไล่ค้างคาวด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง
กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี (2552).
- (32) เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับอุตสาหกรรมครัวเรือน
กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี(2551).
- (33) เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับสวมเปลือกพลาสติกของผลิตภัณฑ์
กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี (2551).

รางวัลที่ได้รับ

- (1) เครื่องให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกสำหรับฆ่ามอดข้าว
รางวัลประกาศเกียรติคุณรางวัลเกียรติยศ “ผลงานเด่น สวก.”
สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) (2558)
- (2) เครื่องให้ความร้อนสารเมลามีนเพื่อขึ้นรูปผลิตภาชนะซูเปอร์แวร์
(รองชนะเลิศอันดับหนึ่ง) การประกวดสิ่งประดิษฐ์ครั้งที่ 8 ประเภทอุปกรณ์ เครื่องมือ การเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ (Hardware)
โดย สถาบันวิจัยและพัฒนา (กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี 2556
- (3) เครื่องผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกด้วยคลื่นไมโครเวฟผ่านการนำความร้อนด้วยอะลูมิเนียม
พอยล์จากกล่อง UHT
(ชนะเลิศอันดับหนึ่ง) การประกวดสิ่งประดิษฐ์ครั้งที่ 7 ประเภทอุปกรณ์ เครื่องมือ การเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ (Hardware)
โดย สถาบันวิจัยและพัฒนา (กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี 2556
- (4) เครื่องให้กำลังงานแบบไร้สายสำหรับรถยนต์ไฮบริด
(ชนะเลิศอันดับหนึ่ง) การประกวดสิ่งประดิษฐ์ครั้งที่ 7 ประเภทอุปกรณ์ เครื่องมือ การเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ (Hardware)
โดย สถาบันวิจัยและพัฒนา (กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี 2555
- (5) เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับอุ่นแม่พิมพ์แบบอลูมิเนียม
(ชนะเลิศอันดับหนึ่ง) การประกวดสิ่งประดิษฐ์ครั้งที่ 6 ประเภทอุปกรณ์ เครื่องมือ การเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ (Hardware)
โดย สถาบันวิจัยและพัฒนา (กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี 2554
- (6) เครื่องสกัดแป้งจากเซลลูโลสของกากมันสำปะหลัง

(ชนะเลิศอันดับหนึ่ง) การประกวดสิ่งประดิษฐ์ครั้งที่ 6 ประเภทอุปกรณ์ เครื่องมือ การเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ (Hardware)

โดย สถาบันวิจัยและพัฒนา (กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี 2554

- (7) เครื่องกำจัดลูกน้ำยุงโดยไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม

ผลงานประดิษฐ์คิดค้นเพื่อขอรับรางวัลผลงานประดิษฐ์คิดค้น ประจำปี 2554

โดย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

- (8) เครื่องไล่คางคกด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

(ชนะเลิศอันดับหนึ่ง) การประกวดสิ่งประดิษฐ์ครั้งที่ 3 ประเภทอุปกรณ์ เครื่องมือ การเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ (Hardware)

โดย สถาบันวิจัยและพัฒนา (กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี 2552

- (9) เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับอุตสาหกรรมครัวเรือน

(ชนะเลิศอันดับหนึ่ง) การประกวดสิ่งประดิษฐ์ครั้งที่ 3 ประเภทอุปกรณ์ เครื่องมือ การเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ (Hardware)

โดย สถาบันวิจัยและพัฒนา (กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี 2551

- (10) เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับสวมปลอกพลาสติกของผลิตภัณฑ์

(รองชนะเลิศอันดับหนึ่ง) การประกวดสิ่งประดิษฐ์ครั้งที่ 3 ประเภทอุปกรณ์ เครื่องมือ การเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ (Hardware)

โดย สถาบันวิจัยและพัฒนา (กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี 2551

8. ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

วารสารวิชาการระดับนานาชาติ (International Journals)

- (1) Nuchanart Santalunai, Samran Santalunai, Piyaporn Meesawad, Chanchai Thongsopa, Samroeng Santalunai, (2021). Plus-Shape of Mushroom-Like EBG with Square Microstrip Emitter to Expand the Working Space in Dielectric Heating Applications. International Journal of Intelligent Engineering and Systems, Vol.14, No.3, PP., 189-200.
- (2) Samroeng Santalunai, Weerawat Charoensiri, Samran Santalunai, Thanaset Thosdeekoraphat, Chanchai Thongsopa, Nuchanart Fhafhiem, Electric Fields Distribution of Optimized Waveguide Potrs Power Position for Grains Drying Applications, International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication (IJEEDC), Volume-8, Issue-11, pp. 1-5.
- (3) Weerawat Charoensiri, Samran Santalunai, Samroeng Santalunai, Thanaset Thosdeekoraphat, Chanchai Thongsopa, Nuchanart Fhafhiem, OPTIMIZATION OF ELECTRIC FIELD DISTRIBUTIONS WITH RECTANGULAR PLATES PARALLEL FOR DIELECTRIC HEATING APPLICATIONS, International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering (IJIEEE), Volume-8, Issue-11
- (4) Worawut Boonpeang, Samran Santalunai, Thanaset Thosdeekoraphat, Chanchai Thongsopa (2020). A new Modeling of IGBT and Freewheeling Diode based on Electric Behavioral with Independently of Time Condition, PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY. Vol 2020, Nr 8, PP. 10-16
- (5) MONTREE BUAPHUEAN, SAMRAN SANTALUNAI, THANASET THOSDEEKORAPHAT, CHANCHAI THONGSOPA, NUCHANART FHFHIEM (2019) DUAL-BAND AND HIGH GAIN U-SHAPED ANTENNA FOR JAMMING THE UNPRECEDENTED UAV. International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication, Volume-7, Issue-9, PP.16-19.
- (6) **Santalunai, S.**, Thosdeekoraphat, T., and Thongsopa, C. (2014). Optimization of Electric Field Distribution on Capacitor Copper Plate by Increasing Input Power Ports for Dielectric Heating Applications, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, Vol. 8(7), PP. 58-65.

- (7) **Santalunai, S.**, Thosdeekoraphat, T., and Thongsopa, C. (2013). Thermal Analysis of Inductive Coils Array against Cylindrical Material Steel for Induction Heating Applications. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 330, PP. 754-759.
- (8) **Santalunai, S.**, Thosdeekoraphat, T., Thongsopa, C. (2014). The Effect of Electric Field Distributions on Grains and Insect for Dielectric Heating Applications. *International Journal of Biological, Veterinary, Agricultural and food Engineering*, Vol:8 No:7, PP. 667-673.
- (9) Wasusathien, W., **Santalunai, S.**, Thosdeekoraphat, T., Thongsopa, C. (2014) Ultra Wideband Breast Cancer Detection by Using SAR for Indication the Tumor Location. *International Journal of Medical, Health, Pharmaceutical and Biomedical Engineering*, Vol:8 No:7, PP. 376-380.
- (10) Thosdeekoraphat, T., **Santalunai, S.**, and Thongsopa, C. (2013). Improved the Performance of Focusing Deep Hyperthermia Inductive Heating for Breast Cancer Treatment by Using Ferro- Fluid with Magnetic Shielding System. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 325, PP. 353-358
- (11) Ratniyomchai, K., **Santalunai, S.**, Thosdeekoraphat, T., Thongsopa, C. (2013). Optimization of Capacitor Copper Plate for Dielectric Heating to Eliminate Insect. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 343, PP. 101-105
- (12) Thosdeekoraphat, T., Thongsopa, C., Jarataku, P., and **Santalunai, S.** (2013). The Optimization of U-shaped Cross Section Antenna with a Strip on a U-shaped Ground Plane for WLAN., *International Journal of Information Engineering*, Vol. 3, Issue. 4, PP.113-121.
- (13) Thosdeekoraphat, T., Summart, S., Saetiaw, C., **Santalunai, S.**, and Thongsopa, C. (2013). CCTAs based Current-mode Quadrature Oscillator with High Output Impedances. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*. Vol.1 PP. 52-56
- (14) Thosdeekoraphat, T., Summart, S., Saetiaw, C., **Santalunai, S.** and Thongsopa, C. (2012). Resistor-less Current-mode Universal Biquad Filter Using CCTAs and Grounded Capacitors. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, Issue 6(9) PP. 559-563.

บทความวิชาการระดับนานาชาติ (International Conference)

- (15) Wittawat Wasusathien, Samran Santalunai, Thanaset Thosdeekoraphat, and Chanchai Thongsopa (2020). Rice Types Classification by Using Dielectric Properties Measurement with Saline Water Increasing Technique, 9th International Symposium on Electrical Insulating Materials, September 13-17, virtual web conference, alternative to Waseda University, Tokyo, Japan, PP.433-438.
- (16) Supatinee Kornsing, Samran Santalunai, Thanaset Thosdeekoraphat, and Chanchai Thongsopa (2020). Dielectric Property Measurement of Freshwater Fishes and Parasite Affecting Infection *Opisthorchis Viverrini* for Dielectric Heating Application, 9th International Symposium on Electrical Insulating Materials, September 13-17, virtual web conference, alternative to Waseda University, Tokyo, Japan, PP.439-442.
- (17) Montree Buaphuean, Samran Santalunai, Thanaset Thosdeekoraphat, Chanchai Thongsopa (2019). Dual-Band and High gain U-Shaped Antenna for Jamming the Unprecedented UAV. International Conference on Recent Innovations in Engineering and Technology (ICRIET), 9th - 10th May, 2019, Amsterdam, Netherlands.
- (18) S. Kotchapradit, T. Thosdeekoraphat, **S. Santalunai** and C. Thongsopa, "Improvement of Electric Field Focusing for Deep Hyperthermia in Breast Cancer Treatment by Using Microwave Dielectric Heating with Curved Plate Applicator," *Proceedings of 2018 Asia-Pacific Microwave Conference*, Kyoto, 2018.
- (19) C. Thongsopa, S. Kotchapradit, **S. Santalunai** and T. Thosdeekoraphat, "Breast Cancer Detection by Using Microwave Ultra- Wideband Antenna," *251ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE, ENGINEERING & TECHNOLOGY - ICSET*, Sydney, 2018
- (20) Supawat Kotchapradit, Thanaset Thosdeekoraphat, **Samran Santalunai**, and Chanchai Thongsopa (2018). Analysis of High Frequency Curved Plate Applicator for Deep Hyperthermia in Breast Cancer Treatment by Using Dielectric Heating, International Symposium on Antennas and Propagation, 23-26 Oct. 2018, Paradise Hotel Busan, Busan, Korea

- (21) Adisak Rattananamlom, Supawat Kotchapradit, **Samran Santalunai**, Thanaset Thosdeekoraphat, Phichet Moungnoul, and Chanchai Thongsopa (2018). Design of High Power Transmission Line Transformer for RF Heating Generator, International Symposium on Antennas and Propagation, 23-26 Oct. 2018, Paradise Hotel Busan, Busan, Korea
- (22) Kachaporn Lhathum, Supawat Kotchapradit, Thanaset Thosdeekoraphat, **Samran Santalunai**, and Chanchai Thongsopa (2018). Analysis and Design of Microwave Plasma for Ozone Generator System by Using Magnetron Tube, International Symposium on Antennas and Propagation, 23-26 Oct. 2018, Paradise Hotel Busan, Busan, Korea
- (23) Jakkarin Srituvanont, Thanaset Thosdeekoraphat, **Samran Santalunai** and Chanchai Thongsopa (2018). Experiment of Induction Heating Application for Heating Multilayer Metallic Hollow Altered Cylinder, The 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA) National University of Singapore, April 26-28, 2018.
- (24) Nuttakorn Pukseesang, **Samran Santalunai**, Thanaset Thosdeekoraphat and Chanchai Thongsopa (2018). Experiment and optimization of magnetostrictive for long time operation to find amplitude of vibration and thermal limit, The 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA) National University of Singapore, April 26-28, 2018.
- (25) Phanupong Saeung, **Samran Santalunai**, Thanaset Thosdeekoraphat, Chanchai Thongsopa (2018). Improved Efficiency of Insect Pest Control System by SSPA, The 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA) National University of Singapore, April 26-28, 2018.
- (26) Thanaset Thosdeekoraphat, Supawat Kotchapradit, **Samran Santalunai** and Chanchai Thongsopa. (2018). Analysis of Microwave Precipitation in the Topographic Barrier for the Lifting Condensation Level of Clouds Formation, The 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA) National University of Singapore, April 26-28, 2018.

- (27) N. Fhaffhiem, W. Naktong, P. Krachodnok and **S. Santalunai**, (2017). Design of RFID Tag with Electromagnetic Band Gap Applying for Metallic Objects, International Symposium on Antennas and Propagation, 30 Oct. – 2 Nov. 2017, Phuket, Thailand
- (28) Thanaset Thosdeekoraphat, **Samran Santalunai**, Kompisit Krajaipote and Chanchai Thongsopa (2017) “The Analysis of High Frequency Plate Applicator for Deep Hyperthermia Cancer Treatment by Using Dielectric Heating, 2017 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO), Cape Town, South Africa , 25 - 28 Sep 2017
- (29) K. Supawat, T. Thanaset, **S. Samran**, and T. Chanchai, "Numerical Method of Microwave Heating to Modified for Lifting Condensation Level of Clouds Formation," Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The World Congress on Engineering 2017, 5-7 July, 2017, London, U.K. , pp 342-345
- (30) Chanon Srisuma, **Samran Santalunai**, Thanaset Thosdeekoraphat, Chanchai Thongsopa, “The Analysis and Design of Milk Pasteurization System by Using Radio Frequency Electric Fields” (APEMC2017) The 2017 Asia-Pacific International EMC Symposium, Yonsei University, Seoul, Republic of Korea, June 20 to 23, 2017.
- (31) Natthapon Poopraditmetakul, **Samran Santalunai**, Thanaset Thosdeekoraphat, Chanchai Thongsopa (2017). NITROGEN FIXATION BY PULSED HIGH VOLTAGE DISCHARGE IN STEAM, The 11th SEATUC Symposium, on 13- 14 March 2017 at Ho Chi Minh University of Technology in Viet Nam.
- (32) Nuttakorn Pukseesang, Thanaset Thosdeekoraphat, **Samran Santalunai**, Worawut Boonpeang, Chanchai Thongsopa (2017). ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF THE SUITABLE POWER TO MAGNETOSTRICTIVE FOR REDUCE OVERHEAT GENERATED BY THE OPERATION OF THE TRANSDUCER IN A LONG TIME, The 11th SEATUC Symposium, on 13-14 March 2017 at Ho Chi Minh University of Technology in Viet Nam.
- (33) Phanupong Seaung, Thanaset Thosdeekoraphat, **Samran Santalunai**, Chanchai Thongsopa (2017). ANALYSIS OF MAGNETIC INDUCTION HEATING BY USING IRON-OXIDE NANOPARTICLES WITHIN THE INSECT BODY FOR INSECT PEST CONTROL IN

- AGRICULTURE, The 11th SEATUC Symposium, on 13-14 March 2017 at Ho Chi Minh University of Technology in Viet Nam.
- (34) Poramin Kuntayom, **Samran Santalunai**, Thanaset Thosdeekoraphat, Chanchai Thongsopa (2017). THE ANALYSIS OF ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION ON DIELECTRIC LOAD BY USING LARGE ELECTRODE PLATES FOR TOBACCO TREATMENT WITH DIELECTRIC HEATING, The 11th SEATUC Symposium, on 13- 14 March 2017 at Ho Chi Minh University of Technology in Viet Nam.
- (35) Warangcana Jantamongcol, Supawat Kochapradit, Thanaset Thosdeekoraphat, **Samran Santalunai**, Chanchai Thongsopa (2017). Analysis and Design of Modifying Atmospheric Conditions by Using Ionization Technology, The 11th SEATUC Symposium, on 13-14 March 2017 at Ho Chi Minh University of Technology in Viet Nam.
- (36) Chanon Srisuma, **Samran Santalunai**, Thanaset Thosdeekoraphat, Chanchai Thongsopa (2017). THE ANALYSIS AND DESIGN OF MILK PASTEURIZATION BY USING RADIO FREQUENCY HEATING, The 11th SEATUC Symposium, on 13- 14 March 2017 at Ho Chi Minh University of Technology in Viet Nam.
- (37) Ekajit Khoomwong; **Samran Santaluna** Chuwong Phongcharoenpanich (2016). “Dual-band thin printed microwave absorber” Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI- CON) , Thailand.
- (38) Srisuma, C. , Krajaipote, K. , Boonpeang, W. , Kuntayom, P. , Kochapradit, S. , **Santalunai, S.**, Thosdeekoraphat, T., and Thongsopa, C. (2016). The Radio Frequency Heating to Eliminate Microorganisms in Wine Packaged in Glass Jars Sealed, The 10th SEATUC Symposium, on 22th – 24th February 2015 at SIT, Tokyo, Japan.
- (39) Krajaipote, K. , Boonpeang, W. , Srisuma, C. , Kuntayom, P. , Kochapradit, S. , Thosdeekoraphat, T., **Santalunai, S.**, and Thongsopa, C. (2016). Study and Analysis of the Different Microwave Drying Power Effects on the Microstructure of Air Dried Sheet (ADS) Rubber, The 10th SEATUC Symposium, on 22th – 24th February 2015 at SIT, Tokyo, Japan.

- (40) Boonpeang, W. , Krajaipote, K. , Srisuma, C. , Kuntayom, P. , Kochapradit, S. , **Santalunai, S.**, Thosdeekoraphat, T., and Thongsopa, C. (2016). Mathematical Modeling of Pixel Identification Base on Thermal Imaging for Real Time Dead Animal Detection, The 10th SEATUC Symposium, on 22th – 24th February 2015 at SIT, Tokyo, Japan.
- (41) **Santalunai, S.**, Thongsopa, C., and Thosdeekoraphat, T. (2015). “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), Hua Hin, Thailand.
- (42) **Santalunai, S.**, Thosdeekoraphat, T., and Thongsopa, C. (2015). The Effect of Electric Field Distributions on Mixture Dielectric Loads by Using Electrode Plate for Pests Controls in Agriculture, International Conference on Electronics, Mechatronics and Automation (ICEMA 2015).
- (43) Thosdeekoraphat, T., Thongsopa, C., **Santalunai, S.**, and Summart, S., (2015). The Magnetic Field Controlling of Focusing Inductive Heating for Hyperthermia Breast Cancer Treatment by Using Ferro-fluid Nanoparticles In Conjunction with Magnetic Shielding System, International Conference on Electronics, Mechatronics and Automation (ICEMA 2015).
- (44) Thongsopa, C. and **Santalunai, S.**, (2014). Dielectric Heating for kill rice weevils, 4th International Rice Congress 2014 (IRC 2014) 27 October – 1 November, Bangkok, Thailand
- (45) **Santalunai, S.**, Thongsopa, C., and Thosdeekoraphat, T. (2014). An Increasing the Power Transmission Efficiency of Flat Spiral Coils by Using Ferrite Materials for Wireless Power Transfer Applications, Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 14- 17, May, 2014, Nakhonratchasima, Thailand.
- (46) **Santalunai, S.** , Intarapanich, A. , Summart, S. , Thosdeekoraphat, T. , and Thongsopa, C. (2012). Wireless Power Transfer Efficiency of Flat and Conical Spiral Coil. International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, July 15-18, Sapporo, Japan.

- (47) Summart, S. , Intarapanich, A. , **Santalunai, S. ,** Thosdeekoraphat, T. , and Thongsopa, C. (2012). Current-mode Four Phase Quadrature Oscillator Using Single MO-CCCDTA., International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, July 15-18 2012, Sapporo, Japan.

บทความวิชาการระดับชาติ (National Conference)

- (48) **Santalunai, S.**, Thosdeekoraphat, T. and Thongsopa, C. (2015). Design of Radio Frequency Circuit for Dielectric Heating Applications. Proceedings of the Electrical Engineering Conference, ECTI-CARD 7, Trang, Thailand.
- (49) Thosdeekoraphat, T. **Santalunai, S.**, and Thongsopa, C. (2012). Design of High Power Low-pass Filter for 88-108 MHz Proceedings of the Electrical Engineering Conference, ECTI-CARD, Pathumthani, Thailand.
- (50) **Santalunai, S.**, and Thongsopa, C. (2009). High Power Amplifier Design for RF Induction Heating. Proceedings of the Electrical Engineering Conference, EECON 32 Prajeenburi, Thailand.

