

ผลกระทบจากความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าว



นายเฉลิมเกียรติ สุตาชา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2565

THE EFFECT OF HIGH FREQUENCY AND HIGH INTENSITY  
ELECTRIC FIELD ON FUNGAL INHIBITION IN RICE



CHALERMKIAT SUTACHA

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Doctor of Philosophy in Electrical Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2022

## ผลกระทบจากความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.สำราญ สันทาลุนย์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภะ)

กรรมการ



(ผศ. ดร.ชนเสฏฐ์ ทศดีกรพัฒน์)

กรรมการ



(อ. ดร.วาสนา เป็นเครือ)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เฉลิมเกียรติ สุตาชา : ผลกระทบจากความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าว  
(THE EFFECT OF HIGH FREQUENCY AND HIGH INTENSITY ELECTRIC FIELD ON  
FUNGAL INHIBITION IN RICE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำราญ สันทาลุนัย,  
108 หน้า.

คำสำคัญ: ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก/ความเข้มสนามไฟฟ้า/การยับยั้งเชื้อราในข้าว/แอสเพอร์จิลลัส

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกเป็นเทคโนโลยีการให้ความร้อนโดยอาศัยสนามไฟฟ้าความถี่สูง กระบวนการให้ความร้อนดังกล่าวถูกใช้เพื่อให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริกซึ่งประกอบด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุหรือการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ วิธีการนี้สามารถทำลายเซลล์ของเชื้อราด้วยความร้อนที่สร้างขึ้นซึ่งเป็นวิธีที่ไม่มีสารพิษตกค้างและไม่มีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ สำหรับผลิตภัณฑ์ข้าวนั้นการปนเปื้อนเชื้อราในเมล็ดข้าวก่อนจัดเก็บหรือจำหน่ายมีความสำคัญมาก คุณภาพของเมล็ดข้าวนั้นอาจได้รับผลกระทบจากเชื้อราแอสเพอร์จิลลัสที่ปนเปื้อนการปนเปื้อนในข้าวจากเชื้อราระหว่างการเก็บเกี่ยวและการเก็บรักษาทำให้ข้าวมีคุณภาพและมูลค่าทางเศรษฐกิจต่ำ นอกจากนี้ยังสามารถเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงศึกษาผลของความร้อนแบบไดอิเล็กตริกที่ใช้สำหรับการยับยั้งเชื้อราในข้าวด้วยความเข้มของสนามไฟฟ้าเพื่อพัฒนาอุปกรณ์การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกจากการเปรียบเทียบคุณสมบัติไดอิเล็กตริกระหว่างตัวอย่างเชื้อรา *Aspergillus* sp. สายพันธุ์ BP17 และข้าวซึ่งใช้หลักการโพรบแบบปลายเปิด ระบบขนาด 9 kW และ 40.68 MHz ถูกตรวจสอบตามความเข้มของสนามไฟฟ้าแตกต่างกันที่ 150 190 225 300 และ 450 kV/m โดยมีอุณหภูมิแตกต่างกันที่ 70 80 90 100 และ 110 °C ผลการทดลองพบว่าสามารถยับยั้งเชื้อราได้ร้อยละ 100 ที่ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า  $\geq 225$  kV/m ที่อุณหภูมิต่ำสุดที่ 90 °C นอกจากนี้พบว่าการร่วมกันของอุณหภูมิและความเข้มของสนามไฟฟ้ามีความสัมพันธ์ต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าวอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ผลลัพธ์บ่งชี้ว่าการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกร่วมกับความเข้มของสนามไฟฟ้าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราและมีประโยชน์สำหรับอุตสาหกรรมข้าว

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

CHALERMKIAT SUTACHA: THE EFFECT OF HIGH FREQUENCY AND HIGH INTENSITY ELECTRIC FIELD ON FUNGAL INHIBITION IN RICE. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. SAMRAN SANTALUNAI, Ph.D., 108 PP.

Keyword: DIELECTRIC HEATING/ELECTRIC FIELD INTENSITY/FUNGAL INACTIVATION IN RICE/ASPERGILLUS

Dielectric heating is a heating method that uses high-frequency alternating electric fields. The process of heating is used to heat the dielectric materials, including radio frequency heating or microwave heating. The method can potentially damage fungal cells by heat generation, which has no toxic residues and no human health effect. Fungal decontamination of rice grains before storage or distribution is crucial for rice products. The products can be affected by contaminated fungi especially *Aspergillus* species. Fungal contamination of rice during harvest and storage results in low quality rice and economic value. Furthermore, it can be harmful to human health. Therefore, researchers studied the effect of high frequency and high intensity electric field on fungal inhibition in rice for developing dielectric heating equipment. The dielectric properties of *Aspergillus* sp. BP17 and rice powder were compared using open-end coaxial probe method. Different electric field intensities (150, 190, 225, 300, and 450 kV/m) and temperatures (70, 80, 90, 100, and 110 °C) were evaluated by the dielectric heating system (9 kW, 40.68 MHz). The results indicated that the lowest temperature of 90 °C at an electric field intensity value  $\geq 225$  kV/m showed the highest percentage of inactivation on *Aspergillus* (100%). The combination of temperature and electric field intensity can increase the percentage of fungal inactivation in rice grains significantly ( $p \leq 0.05$ ). These results indicate that dielectric heating combined with electric field intensity is an effective method for inhibiting fungal contamination and useful for rice industries.

School of Electronic Engineering  
Academic Year 2022

Student's Signature..... chalemkiat  
Advisor's Signature..... Samran Santalunai

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี มาจากความเมตตากรุณาและความช่วยเหลือ จากบุคคลและกลุ่มบุคคลให้ความกรุณาทั้งด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนการศึกษา ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำราญ สันทาลุนย์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยช่วยเหลือ และคอยแนะนำในเรื่องทางวิชาการ รวมทั้งการตรวจสอบ แก้ไข และตรวจทานจนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนเสถียร ทศศิริพัฒน์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ถ่ายทอดประสบการณ์ทางด้านวิชาการ และให้โอกาสในการศึกษา

อ.ดร.วาสนา เป็นเครือ อาจารย์ประจำสาขาวิชาปรีคลินิก สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่แนะนำด้านเทคนิคการทำปฏิบัติการจุลชีววิทยา และให้คำปรึกษาด้านการตีพิมพ์ผลงานวิจัย ในวารสารระดับนานาชาติ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมเดช ภาพัฒน์บุรี อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้คำปรึกษาด้านการตีพิมพ์ผลงานวิจัย ในวารสารระดับนานาชาติ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และมหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี ที่สนับสนุนทุนทางการศึกษา และสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการลาศึกษาต่อ

ขอขอบคุณมิตรสหาย รุ่นพี่ รุ่นน้องบัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่คอยเป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ทั้งในอดีตและปัจจุบัน

ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ ครู อาจารย์ทั้งในอดีต และปัจจุบัน รวมถึงบิดา มารดา และญาติพี่น้องของผู้วิจัยที่คอยการสนับสนุนอย่างดีมาโดยตลอด อีกทั้งกำลังใจจากคนรักที่ช่วยให้การทำงานวิจัย ลุล่วงไปได้ด้วยดี หากมีข้อผิดพลาดหรือขาดตกบกพร่องประการใด ผู้วิจัยขออภัยมา ณ ที่นี้ และสุดท้ายนี้หวังว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้นำไปพัฒนาและสามารถนำองค์ความรู้ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ต่อไป

เฉลิมเกียรติ สุตาชา

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ญ
<b>บทที่</b>	
<b>1. บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	5
1.4 ขอบเขตของการวิจัย .....	5
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย .....	6
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	6
1.7 นวัตกรรมของงานวิจัยนี้.....	7
1.8 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	7
<b>2. ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>8</b>
2.1 กล่าวนำ.....	8
2.2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	8
2.3 การเสื่อมคุณภาพและมาตรฐานของข้าว .....	26
2.3.1 การเสื่อมคุณภาพในอาหาร.....	27
2.3.2 การควบคุมจุลินทรีย์ในอาหาร .....	28
2.3.3 สารพิษของเชื้อราและเชื้อราในข้าว .....	30
2.3.4 มาตรฐานสินค้าข้าวหอมมะลิไทย.....	34
2.4 ทฤษฎีการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก .....	35

## สารบัญ (ต่อ)

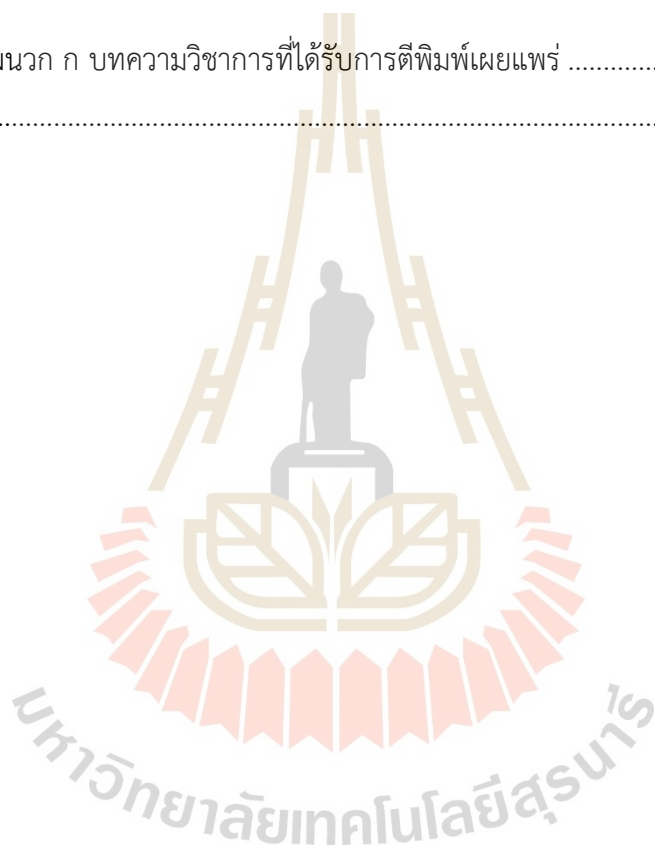
หน้า

2.4.1	หลักการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้า .....	36
2.4.2	พื้นฐานและกลไกการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก.....	37
2.4.3	ปัจจัยที่มีผลต่อการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก .....	38
2.4.4	การให้ความร้อนด้วยคลื่นสนามไฟฟ้า .....	41
2.4.5	การให้ความเข้มข้นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลท .....	42
2.5	สรุป.....	44
<b>3.</b>	<b>การวิเคราะห์และออกแบบระบบตัวปล่อยความเข้มข้นไฟฟ้าความถี่สูง</b> .....	<b>45</b>
3.1	กล่าวนำ.....	45
3.2	แนวคิดการออกแบบระบบตัวปล่อยความเข้มข้นไฟฟ้าความถี่สูง.....	46
3.3	การออกแบบและวิเคราะห์ระบบตัวปล่อยความเข้มข้นไฟฟ้าความถี่สูง .....	48
3.3.1	การวิเคราะห์ผลของวัสดุที่มีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้า .....	49
3.3.2	การวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติของโพล्टไดอิเล็กตริก.....	50
3.3.3	การวิเคราะห์และจำลองการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าสำหรับ ตัวปล่อยคลื่น .....	55
3.4	การวางแผนศึกษาผลกระทบความเข้มข้นไฟฟ้าความถี่สูง.....	58
3.4.1	การออกแบบการทดสอบระบบตัวปล่อยความเข้มข้นไฟฟ้าความถี่สูง.....	60
3.4.2	การเตรียมตัวอย่างการทดสอบการยับยั้งเชื้อราในข้าว .....	62
3.5	สรุป.....	64
<b>4.</b>	<b>ผลการทดสอบและการอภิปรายผล</b> .....	<b>65</b>
4.1	กล่าวนำ.....	65
4.2	การทดสอบระบบตัวปล่อยความเข้มข้นไฟฟ้าความถี่สูง.....	66
4.3	การทดสอบระบบตัวปล่อยความเข้มข้นไฟฟ้าความถี่สูงกับ โพล्टไดอิเล็กตริก.....	70
4.4	ผลการใช้พลังงานของระบบตัวปล่อยความเข้มข้นไฟฟ้าความถี่สูง.....	74
4.5	ผลการยับยั้งเชื้อราหลังผ่านระบบตัวปล่อยความเข้มข้นไฟฟ้าความถี่สูง.....	75
4.6	สรุป.....	80
<b>5.</b>	<b>สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b> .....	<b>81</b>
5.1	สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	81



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ .....	82
5.3 แนวทางพัฒนาในอนาคต.....	82
รายการอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....	94
ประวัติผู้เขียน.....	108



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	ตลาดส่งออก 10 อันดับแรกของไทยรายประเทศ ปี 2563 ถึง 2564 .....2
2.1	เชื้อราในข้าวและสารพิษจากเชื้อราในข้าว .....9
2.2	ปริมาณเชื้อราบนเมล็ดข้าวและสารพิษของข้าวประเทศไทย ..... 10
2.3	การเกิดอะฟลาทอกซินตามธรรมชาติในข้าวกล้องและข้าวสี ..... 13
2.4	การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีบนพื้นฐานใช้ความร้อน..... 14
2.5	การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่ไม่ใช้ความร้อน ..... 15
2.6	การยับยั้งเชื้อราโดยการให้ความร้อนคลื่นวิทยุของธัญพืชและผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ..... 18
2.7	การปรับปรุงการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ..... 20
2.8	ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของธัญพืช ..... 24
2.9	เชื้อราและสารพิษจากเชื้อราในข้าว ..... 31
3.1	คุณสมบัติของวัสดุต่าง ๆ ที่ทำการศึกษาในการออกแบบ ..... 50
3.2	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและการเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างข้าวและเชื้อรา ..... 55
4.1	ผลการวัดสัญญาณความถี่ที่เกิดจากระบบที่ความเข้มสนามไฟฟ้าต่างกัน ..... 68
4.2	อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน ..... 73
4.3	อัตราการใช้พลังงานของระบบที่ความเข้มสนามไฟฟ้าแตกต่างกัน ..... 75
4.4	การยับยั้งเชื้อราในข้าวหลังผ่านระบบที่อุณหภูมิและความเข้มสนามไฟฟ้าต่างกัน ..... 78

## สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	สถิติการส่งออกตั้งแต่ปี 2564 ถึง 2565..... 1
2.1	ผังกระบวนการในการผลิตข้าวจากข้าวเปลือกสู่ข้าวขัดสี..... 11
2.2	แผนที่ผลผลิตข้าว 10 อันดับแรกของแต่ละภาค ..... 12
2.3	ตัวอย่างธัญพืชต่าง ๆ ที่บริโภคของประชากรทั่วโลก ..... 19
2.4	การให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุสำหรับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ..... 19
2.5	ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าว..... 23
2.6	ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวไทย..... 23
2.7	ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของผงเชื้อราที่กินได้..... 25
2.8	ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของเชื้อราในพืช ..... 26
2.9	สกุลเชื้อราและเชื้อรา <i>Aspergillus</i> ที่พบในตัวอย่างข้าว..... 30
2.10	สารพิษจากเชื้อราในอาหารของมนุษย์..... 32
2.11	ขั้นตอนที่ใช้ในการแปรรูปข้าว..... 34
2.12	ตัวอย่างระบบ..... 37
2.13	โครงสร้างของวัสดุกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ..... 38
2.14	การเสียดสีโมเลกุลและไอออนตามทิศทางของคลื่นสนามไฟฟ้า..... 38
2.15	โครงสร้างตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลท..... 43
3.1	ขั้นตอนการวิเคราะห์และออกแบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง ..... 46
3.2	รูปแบบแนวคิดในการยับยั้งเชื้อราในข้าวด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง..... 48
3.3	แนวคิดในการออกแบบระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง..... 49
3.4	เครื่องมือและอุปกรณ์ในกระบวนการวัดตัวอย่างวัสดุ..... 51
3.5	การวัดค่าตัวอย่างของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ..... 52
3.6	ผลการวัดค่า $\epsilon'$ ของตัวอย่างข้าวและตัวอย่างเชื้อรา..... 53
3.7	ผลการวัดค่า $\epsilon''$ ของตัวอย่างข้าวและตัวอย่างเชื้อรา..... 53
3.8	การออกแบบการทดสอบการแผ่กระจายคลื่นและความเข้มสนามไฟฟ้า ..... 56
3.9	ระดับของความเข้มสนามไฟฟ้าที่ไหลในระบบที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าต่างกัน..... 57
3.10	ระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงแบบแผ่นเพลท ..... 59

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 การวัดสัญญาณความถี่ที่เกิดจากระบบโดยการใช้วิธีการเหนี่ยวนำ.....	60
3.12 การถ่ายภาพความร้อนที่เกิดจากระบบจริง .....	61
3.13 การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือทางจุลชีววิทยา.....	62
3.14 การเตรียมเครื่องมือตรวจสอบการยับยั้งเชื้อราบนอาหารเลี้ยงเชื้อด้วยกล้องจุลทรรศน์.....	63
4.1 การทดสอบระบบตัวปล่อยความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าว.....	66
4.2 การปรับความชื้นสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลท .....	67
4.3 ระดับของสัญญาณความถี่ที่ความชื้นสนามไฟฟ้าต่างกัน .....	69
4.4 ระดับผลค่าความร้อนในโหลด.....	72
4.5 ความสัมพันธ์การถ่ายโอนความร้อนที่ความชื้นสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน.....	73
4.6 การใช้พลังงานของระบบที่ความชื้นสนามไฟฟ้าแตกต่างกัน.....	74
4.7 การยับยั้งเชื้อราบนข้าวที่ความชื้นสนามไฟฟ้าต่างกัน ณ อุณหภูมิ 70 °C.....	75
4.8 การยับยั้งเชื้อราบนข้าวที่ความชื้นสนามไฟฟ้าต่างกัน ณ อุณหภูมิ 80 °C.....	76
4.9 การยับยั้งเชื้อราบนข้าวที่ความชื้นสนามไฟฟ้าต่างกัน ณ อุณหภูมิ 90 °C.....	76
4.10 การยับยั้งเชื้อราบนข้าวที่ความชื้นสนามไฟฟ้าต่างกัน ณ อุณหภูมิ 100 °C .....	77
4.11 การยับยั้งเชื้อราบนข้าวที่ความชื้นสนามไฟฟ้าต่างกัน ณ อุณหภูมิ 110 °C .....	77
4.12 การยับยั้งเชื้อราบนข้าวที่อุณหภูมิและความชื้นสนามไฟฟ้าต่างกัน .....	78
4.13 การยับยั้งเชื้อราบนข้าวด้วยความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูง ณ อุณหภูมิ 90 °C .....	79

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

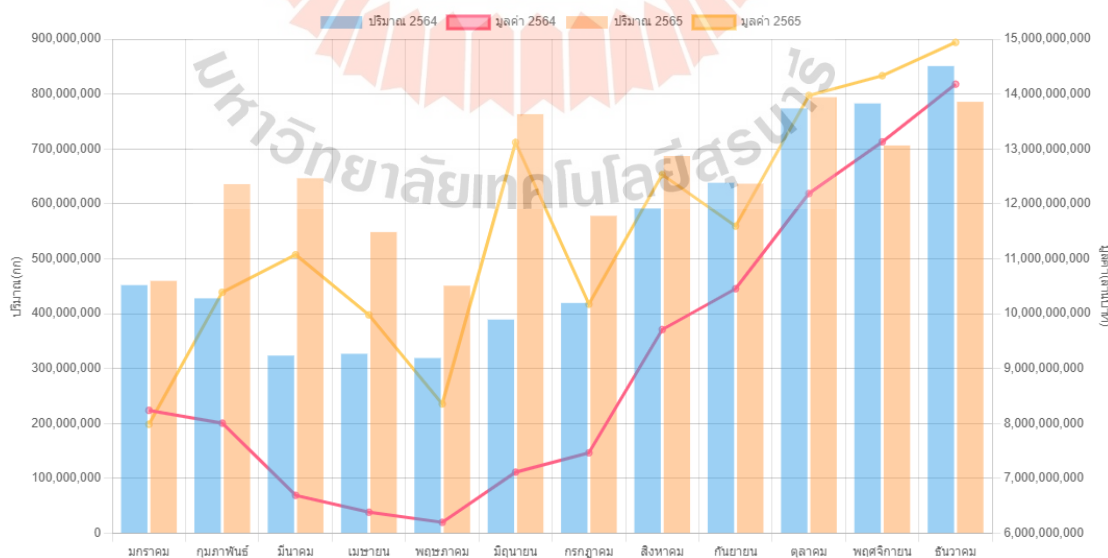
$C_p$	=	ความร้อนจำเพาะ (Specific heat)
$E_{loc}$	=	ความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric field strength)
$f$	=	ความถี่ (Frequency)
$P$	=	ค่ากำลังที่ดูดซับต่อหนึ่งหน่วยมวล (Power absorbed per unit mass)
$\tan \delta$	=	ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ (Loss tangent)
$P_0$	=	กำลังงานคลื่นที่ตกกระทบในตัวกลาง
$\epsilon^*$	=	ค่าความซบซิมได้เชิงซ้อน (Complex permittivity)
$\epsilon'$	=	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant)
$\epsilon''$	=	ค่าปัจจัยสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor)
$\alpha$	=	ค่าคงที่ของการลดทอนกำลังงานคลื่น (Attenuation constant)
$\sigma_d$	=	ค่าความนำของไดอิเล็กตริก (Dielectric conductivity)
$\rho$	=	ความหนาแน่นของวัสดุ (Bulk density)
$\Delta t$	=	ระยะเวลาที่เปลี่ยนไป
$\Delta T$	=	อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าว (*Oryza Sativa* L.) เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวที่มีลักษณะลำต้นเป็นปล้องส่าย โดยจัดอยู่เป็นพันธุ์เดียวกันกับหญ้า (Family gramineae) และเป็นหนึ่งในธัญพืชที่มีความสำคัญเป็นแหล่งอาหารประมาณร้อยละ 75 ของประชากรโลก (Savi et al., 2018) รวมถึงเป็นอาหารหลักของประเทศในแถบเอเชีย การบริโภคข้าวต่อคนจากการเปรียบเทียบ 154 ประเทศในปี 2560 พบว่าลาวมีการบริโภคข้าวต่อหัวสูงสุดอยู่ที่ 266 กิโลกรัม รองลงมา คือ บังคลาเทศ กัมพูชา เวียดนาม อินโดนีเซีย เมียนมาร์ เซียร์ราลีโอน และไทย ฯลฯ (Helgi Library, 2022) ดังนั้นข้าวจึงเป็นพืชที่มีความสำคัญของประเทศไทยในทางเศรษฐกิจเพราะทั้งสร้างรายได้และเป็นสินค้าเพื่อการบริโภคในประเทศ รวมถึงเป็นสินค้าการส่งออกระหว่างประเทศที่สามารถทำรายได้มหาศาลในแต่ละปี (Jongmeesuk, Tossamas, and Worapreda, 2017) จากข้อมูลการส่งออกข้าวไทยของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2566) จะเห็นว่าการส่งออกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ พบว่าในปี 2564 มีปริมาณการส่งออก 6,296,680,597 กิโลกรัม และในปี 2565 มีปริมาณการส่งออก 7,693,545,607 กิโลกรัม โดยมีมูลค่าเฉลี่ย 138,451,761,150 บาท ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 สถิติการส่งออกตั้งแต่ปี 2564 ถึง 2565 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2566)

จากการเก็บและรวบรวมข้อมูลข้าวไทยของศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์ได้สรุปรายงานข้อมูลการส่งออกข้าวไทย (กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ, 2565) พบว่าตลาดส่งออก 10 อันดับแรกของประเทศไทยเป็นรายประเทศ ตั้งแต่ ปี 2563 ถึง 2564 คือ สหรัฐอเมริกา แอฟริกาใต้ จีน ญี่ปุ่น ฮองกง แคนเมอรูน อิรัก โมซัมบิก สิงคโปร์ และเยเมน ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ตลาดส่งออก 10 อันดับแรกในปี 2563 ถึง 2564 ของไทยรายประเทศ

ประเทศ	มูลค่า (ล้านบาท)		สัดส่วน (ร้อยละ)	
	2563	2564	2563	2564
	ม.ค. - ธ.ค.	ม.ค. - มิ.ย.	ม.ค. - ธ.ค.	ม.ค. - มิ.ย.
สหรัฐอเมริกา	21,892.39	7,008.52	18.87	16.89
แอฟริกาใต้	9,925.16	4,501.62	8.55	10.85
จีน	8,426.53	3,040.77	7.26	7.33
ญี่ปุ่น	3,608.17	2,680.05	3.11	6.46
ฮ่องกง	5,932.47	2,377.74	5.11	5.73
แคนเมอรูน	3,928.87	1,833.11	3.39	4.42
อิรัก	304.08	1,557.06	0.26	3.75
โมซัมบิก	2,793.39	1,540.74	2.41	3.71
สิงคโปร์	3,923.03	1,290.90	3.38	3.11
เยเมน	1,738.65	1,025.56	1.50	2.47
อื่น ๆ	53,570.17	14,650.45	46.16	35.30
มูลค่ารวม	116,042.91	41,506.52	100	100

หมายเหตุ จาก Fact Sheet ข้าว ต.ค.64 (กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ, 2565)

การจัดการเมล็ดข้าวหลังการเก็บเกี่ยวนั้นข้าวหลังจากการเก็บเกี่ยวจะถูกนำไปทำให้แห้งและเก็บทำการรักษาไว้ในโรงเก็บสิ่งสำคัญ ต้องสังเกตทุกขั้นตอนของการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวอย่างรอบคอบเพราะมีอยู่หลายขั้นตอน เช่น การตากในนา การนวดข้าว การตากในโรงนา ทำความสะอาด คัดเกรด จัดเก็บ และชั่งน้ำหนัก ขัดสี ก่อนนำไปบริโภค ซึ่งข้าวเปลือกที่จัดเก็บจะเป็นเมล็ดข้าวยังคงปกคลุมด้วยกลีบ หลังจากนำข้าวเปลือกแยกแกลบข้าวผ่านกระบวนการกะเทาะเปลือกจะกลายเป็นข้าวกล้อง (Brown rice) หากนำข้าวกล้องไปขัดเอาชั้นรำออกให้เหลือแต่ชั้นแป้งที่จะเป็นข้าวขาว (White rice) ก่อนที่นำไปใช้สำหรับการจัดจำหน่ายหรือเพื่อวัตถุประสงค์อื่นต่อไป มีรายงานสารพิษ

จากเชื้อราในข้าวเนื่องจากเชื้อราหลายชนิดที่อาจปนเปื้อนในข้าวในระยะเก็บเกี่ยวและหลังจากการเก็บเกี่ยว เนื่องจากเชื้อราแต่ละชนิดอาจมีสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเจริญในระยะเวลาดังกล่าว ในระหว่างห่วงโซ่การผลิตต่างๆ เชื้อราที่สร้างสารพิษจัดอยู่ในกลุ่มของเชื้อราที่สามารถปนเปื้อนในข้าวได้โดยเฉพาะเชื้อราในกลุ่มแอสเพอร์จิลลัส (*Aspergillus*) และเชื้อราดังกล่าวสามารถเจริญได้ในระหว่างการจัดเก็บ หากมีสภาพทางนิเวศวิทยาที่เหมาะสมซึ่งอันตรายอย่างยิ่งต่อสุขภาพของผู้บริโภค (GONÇALVES et al., 2019) สำหรับประเทศไทยอยู่ในเขตร้อนชื้นทำให้เหมาะอย่างยิ่งแก่การเจริญของเชื้อรา ทำให้ข้าวมักถูกปนเปื้อนเชื้อราและสารพิษจากเชื้อรา เช่น อะฟลาทอกซิน (Aflatoxin) เป็นต้น โดยเฉพาะอะฟลาทอกซิน บี 1 เป็นสารพิษก่อมะเร็ง ปริมาณของสารพิษจากเชื้อราขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อม เช่น ความชื้นของเมล็ด อุณหภูมิ และระยะเวลาการเก็บรักษา เป็นต้น จากปัจจัยดังกล่าวทำให้เมล็ดข้าวถูกเชื้อราเข้าทำลายซึ่งในข้าวไทยพบเชื้อรา *Aspergillus flavus*, *Aspergillus niger* และ *Penicillium* spp. ปนเปื้อนในข้าวกล้อง ข้าวซ้อมมือ ข้าวเหนียว และข้าวฮาง ในส่วนข้าวสารตรวจไม่พบเชื้อรา (กิตติพงษ์ ศรีม่วง และคณะ, 2565)

นอกจากจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้บริโภคแล้ว ปัญหาเหล่านี้ยังเป็นอุปสรรคทางการค้าทั้งในและต่างประเทศอีกด้วย การปนเปื้อนในข้าวจากเชื้อราเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของข้าวและผลผลิตลดลง การปนเปื้อนของสารพิษจากเชื้อราเกินกว่ามาตรฐานที่แต่ละประเทศกำหนดอาจนำไปสู่การถูกปฏิเสธการนำเข้า เช่น รายงานสรุปการกักกัน/ปฏิเสธการนำเข้าสินค้าอาหารไทยในตลาดญี่ปุ่นปี 2554 (จूरี่รัตน์ ปาคำสี, 2554) ระบุว่าสินค้ากลุ่มข้าวและธัญพืชถูกกักกันและปฏิเสธการนำเข้า ณ ด่านนำเข้าของประเทศญี่ปุ่น เนื่องจากมีการตรวจพบว่ามีปัญหาด้านสุขอนามัยที่ไม่ถูกต้องตามกฎหมายสุขอนามัยอาหาร และถูกปฏิเสธการนำเข้ามากที่สุดจำนวน 51 ครั้ง ปัญหาหลัก คือ ตรวจพบการปนเปื้อนในข้าวสารจากเชื้อรา และสารอะฟลาทอกซินมีปริมาณที่ถูกปนเปื้อนในธัญพืชเกินมาตรฐานที่ญี่ปุ่นกำหนดไว้ และในปี พ.ศ. 2555 สินค้ากลุ่มข้าวจากไทยถูกปฏิเสธการนำเข้าในตลาดญี่ปุ่น 29 ครั้ง โดยปัญหาหลัก คือ การตรวจพบของการปนเปื้อนของเชื้อราที่เกินกว่ามาตรฐาน (จूरี่รัตน์ ปาคำสี, 2555) จากข้อมูลดังกล่าวส่งผลกระทบต่อภาพลักษณ์ข้าวไทยเป็นอย่างมากจึงทำให้กระทรวงพาณิชย์และกระทรวงเกษตรฯ ของประเทศไทยทำการตรวจสอบเหตุดังกล่าว พบว่าเหตุที่ข้าวที่มีเชื้อราเกิดขึ้นระหว่างการขนส่งหรือการเก็บรักษาข้าวที่อยู่ในประเทศญี่ปุ่นอาจเก็บข้าวไว้ไม่ดี เช่น โดนเกล็ดหิมะ หรือ ละอองฝน เป็นต้น โดยเป็นข้าวที่ส่งออก จำนวน 87 ตัน เป็นปลายข้าวหรือข้าวเกรดต่ำ ผู้นำเข้าส่วนใหญ่จะนำไปแปรรูปในด้านอื่นไม่ใช่เพื่อการบริโภคโดยตรง พบข้าวที่มีปัญหาดังกล่าว มีจำนวน 1 ตัน และได้ทำลายทิ้งไปแล้ว ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันว่าข้าวไทยที่ส่งออกนั้นปลอดเชื้อรา ในการส่งออกข้าวไทยในทุกครั้งมีการตรวจสอบและออกใบรับรองความปลอดภัย (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2562)งานวิจัยในปัจจุบันพบว่าข้าวกล้องในประเทศไทยมีการปนเปื้อนเชื้อรามากที่สุดส่งผลกระทบต่อความเชื่อมั่นในคุณภาพและความปลอดภัยในการบริโภคข้าว (กิตติพงษ์ ศรีม่วง และคณะ, 2565) เหตุและปัจจัยที่ทำให้



พบว่าเชื้อรามีการและทำลายธัญพืชมากที่สุดอันเนื่องมาจากข้าวมีความชื้นต่ำกว่าอาหารทั่วไปที่มักมีความชื้นสูงกว่าจึงเน่าเสียจากแบคทีเรียเป็นส่วนใหญ่ เช่น ผัก ผลไม้ เป็นต้น เชื้อราที่พบในธัญพืชส่วนใหญ่เป็นเชื้อราที่มีแหล่งกำเนิดจากดิน อากาศ และสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจากปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นทำให้การศึกษาและค้นหาวิธีการยับยั้งเชื้อราในข้าวจึงมีความจำเป็นและเร่งด่วนเพื่อให้ผู้บริโภคมั่นใจได้ว่าได้ข้าวที่มีคุณภาพและไม่มีเชื้อราในข้าว

ปัจจุบันมีการรายงานเทคนิคในการขจัดและยับยั้งเชื้อราการปนเปื้อนของเชื้อราทั้งหมด 3 วิธี คือ วิธีทางเคมี ชีวภาพ และกายภาพ (Akhila et al., 2021) ในวิธีทางเคมีจากการใช้สารเคมีต่างๆ เช่น โอโซน (O<sub>3</sub>) เป็นสารต้านจุลชีพที่มีศักยภาพ และสามารถนำไปใช้งานที่หลากหลายในการยับยั้งเชื้อราผ่านกระบวนการออกซิเดชันในอาหาร แต่อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของการใช้โอโซนในงานอุตสาหกรรม เช่น ความต้องการต้นทุนสูงสำหรับการติดตั้งและการทำงาน (Afsah-Hejri, Hajeb and Ehsani, 2020; Yang et al., 2020) วิธีการทางชีวภาพในการควบคุมสภาพแวดล้อมในด้านต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และตัวแปรด้านสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการทางชีวภาพดังกล่าวไม่สามารถฆ่าหรือยับยั้งเชื้อราได้ทั้งหมดโดยเฉพาะสปอร์ของเชื้อรา (Srivastava and Mishra, 2021) สำหรับวิธีการทางกายภาพ เช่น การใช้ความร้อน คือ การไล่ระดับอุณหภูมิด้วยวิธีการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายในทำให้ใช้พลังงานจำนวนมากเพื่อสร้างความร้อน แต่อย่างไรก็ตาม ข้าวที่มีความชื้นต่ำทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำ สามารถนำไปสู่การเสื่อมคุณภาพระหว่างการปนเปื้อน ดังนั้นเทคนิคการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกถูกนำมาใช้เพื่อแก้ไขปัญหา ข้อดีของเทคนิคนี้มีหลายประการ เช่น อัตราการให้ความร้อนเร็วขึ้น มีความสม่ำเสมอ และความรู้สึกของการแทรกซึมความร้อนที่สูงขึ้น เป็นต้น รวมถึงไม่ต้องมีการไล่ระดับของอุณหภูมิ เนื่องจากการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกด้วยความถี่วิทยุ (Radio frequency heating : RFH) และไมโครเวฟ (Microwave heating : MWH) เป็นต้น สามารถทำความร้อนได้อย่างรวดเร็วในเวลาอันสั้น และสามารถทำลายเซลล์เชื้อราได้ (Wason, Verma and Subbiah, 2021; Fang et al., 2011; Schmidt, Zannini and Arendt, 2018) โดยไม่มีสารพิษตกค้างและไม่มีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ รวมถึงมีการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมข้าว (Mir et al., 2021; Chandravarman, Agyei and Ali et al., 2022; Zhang et al., 2022)

ในปัจจุบันระบบ RFH และ MWH ได้ถูกนำมาใช้ในการควบคุมเชื้อราต่างๆ ในผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น การใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อการควบคุมเชื้อรา *A. flavus* ในเมล็ดพืชน้ำมัน ข้าวสาลี และข้าวโพด (Vearasilp et al., 2015; Jiao, Zhong and Deng, 2016) และ *Penicillium crustosum* ในเกาลัด (Hou, Kou and Wang, 2018) และการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเพื่อการควบคุมเชื้อรา *A. flavus* และ *A. parasiticus* ที่ปนเปื้อนอยู่ในข้าวกล้อง ข้าวบาร์เลย์ และข้าวโพด (Lee, Park, Byun, Chun and Ha, 2017; Höhlig et al., 2015) *Penicillium* spp. และ *Aspergillus* spp. ในเมล็ดถั่ว (Zheng, Zhang and Wang, 2017) เทคนิคดังกล่าวสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็น

ความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริกและอาศัยสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุหรือไมโครเวฟ ในการส่งกำลังไฟฟ้าในรูปของสนามไฟฟ้าเข้าไปในวัสดุไดอิเล็กตริกโดยตรงสำหรับวัสดุที่สามารถให้ความร้อนได้นั้นต้องมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลที่มีขั้ว การให้ความร้อนแบบเลือกเป้าหมายของวัสดุไดอิเล็กตริกเป้าหมายในการศึกษาก่อนหน้านี้เป็นวิธีการสำหรับการควบคุมแมลงในข้าวและเป็นหนึ่งในเทคนิคที่ได้รับการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม (Sosa-Morales, Valerio-Junco, López-Malo and García, 2010; Nelson and Trabelsi, 2012; Nelson, 2015; Zhou, Ling, Zheng and Wang, 2015; Yang, Zhao, Tang, Yang, Yan and Zhao, 2018; Hou, Liu and Wang, 2019; Cui, Sun, Xia, Wang, Cao and Wu, 2020; Hou, Wu, Kou Li and Wang, 2022) เทคนิคนี้เป็นการให้ความร้อนแก่แมลงจนถึงอุณหภูมิถึงตายที่ 60 °C และ 30 นาที โดยสามารถหลีกเลี่ยงความร้อนสร้างขึ้นในข้าวด้วยการอาศัยคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกัน (Hou, Johnson and Wang, 2016; Mohamad, Muhamad, Mohd Jusoh and Khairuddin, 2018) รวมถึงการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้า อย่างไรก็ตามสำหรับการจัดและยับยั้งเชื้อราในข้าวยังไม่ได้ดำเนินการเปรียบเทียบผลกระทบระดับความเข้มข้นไฟฟ้าต่อการยับยั้งเชื้อรา จากปัญหาที่ได้กล่าวมาทั้งหมดทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะศึกษาผลกระทบจากความเข้มข้นไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าวจากสนามไฟฟ้าความถี่สูงระหว่างแผ่นเพลท

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบความเข้มข้นไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าว
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ผลร่วมของอุณหภูมิกับความเข้มข้นไฟฟ้าต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าว

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

- 1.3.1 ความแตกต่างระหว่างค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวและเชื้อรานั้นสามารถใช้เพื่อออกแบบระบบการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกได้
- 1.3.2 ระดับความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าความถี่สูงมีผลต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าว

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ข้าวที่ใช้ในการทดสอบค่าไดอิเล็กตริกเป็นข้าวที่มีการปนเปื้อนเชื้อราตามธรรมชาติ
- 1.4.2 เชื้อราใช้ในการทดสอบค่าไดอิเล็กตริกเป็นเชื้อรา *Aspergillus* sp. สายพันธุ์ BP17
- 1.4.3 ศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวอย่างข้าวและเชื้อราในย่านความถี่ของการใช้งาน
- 1.4.4 ทดสอบการให้ระดับความเข้มข้นไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าว

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

### 1.5.1 แนวทางการดำเนินงาน

1. ศึกษาและสำรวจปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
2. ศึกษาวิธีการวัดค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวอย่างข้าวและเชื้อรา
3. ศึกษาและการออกแบบระบบให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก
4. ศึกษาการยับยั้งเชื้อราในข้าวด้วยการให้ความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูง
5. ออกแบบการยับยั้งเชื้อราในข้าวด้วยการให้ความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูง และ

จำลองผลด้วยโปรแกรม CST Studio suite

6. บันทึกและวิเคราะห์ผลการทดสอบ
7. สรุปการผลวิจัยและการดำเนินงาน
8. จัดทำรายงานและเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ

### 1.5.2 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ F03203 ณ อาคารเครื่องมือ 3 (F3)  
ห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยา F2206 ณ อาคารเครื่องมือ 2 (F2) และอาคารสิรินธรวิศวะพัฒน์ (F11)  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

### 1.5.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal computer)
2. โพรบวัดความชื้น (Moisture meter)
3. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer)
4. หัว Open-End Coaxial Probe ชนิด High temperature
5. กล้องวัดความร้อนแบบอินฟราเรด (Thermal imaging camera)
6. ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)
7. ตู้ปลอดเชื้อ (Laminar flow clean bench)
8. กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Sterio microscope)

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้ทราบค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวอย่างข้าวที่มีการปนเปื้อนเชื้อราตามธรรมชาติและเชื้อรา *Aspergillus* sp. สายพันธุ์ BP17

1.6.2 ได้วิธีการยับยั้งเชื้อราโดยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกพร้อมกับความชื้นของสนามไฟฟ้า

## 1.7 นวัตกรรมของงานวิจัยนี้

วิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการศึกษาผลกระทบจากความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าว คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวอย่างข้าวที่มีการปนเปื้อนเชื้อราตามธรรมชาติและเชื้อรา *Aspergillus* sp. สายพันธุ์ BP17 ในย่านความถี่ 40 ถึง 8,500 MHz เพื่อระบุความแตกต่างของตัวอย่างข้าวและเชื้อรา ณ ความถี่ 40.68 MHz ของคลื่นวิทยุ รวมถึง 915 และ 2,450 MHz ของคลื่นไมโครเวฟ อีกทั้งยังได้ศึกษาวิธีการยับยั้งเชื้อรา ผลกระทบการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกและความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงจะได้รับการตรวจสอบเป็นครั้งแรกในวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อยืนยันความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความเข้มสนามไฟฟ้ามีผลเกี่ยวข้องกับอัตราการยับยั้งเชื้อราบนข้าว

## 1.8 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีทั้งหมด 5 บท ประกอบไปด้วยเนื้อหา ดังต่อไปนี้

**บทที่ 1** กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย สมมติฐานของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ นวัตกรรมของงานวิจัยนี้ และส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

**บทที่ 2** กล่าวถึงข้อมูลการศึกษารวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวกับความเข้มสนามไฟฟ้า ความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อรา หลักการต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของข้าว รวมถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ประกอบด้วย ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การเสีอมคุณภาพและมาตรฐานของข้าว และทฤษฎีการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

**บทที่ 3** กล่าวถึงการวิเคราะห์และออกแบบระบบ ซึ่งประกอบไปด้วยออกแบบระบบการยับยั้งเชื้อราในข้าวด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง และการวางแผนศึกษาผลกระทบความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าว

**บทที่ 4** กล่าวถึงผลการทดสอบและการอภิปรายผล การทดสอบการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงกับโพลต์ไดอิเล็กตริก ผลการใช้พลังงาน และผลการยับยั้งเชื้อราในข้าวหลังการทดสอบระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง โดยจะมีการวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความเข้มสนามไฟฟ้าในการยับยั้งเชื้อราในข้าว

**บทที่ 5** กล่าวถึงสรุปผลการวิจัย ปัญหาที่เกิดขึ้นกับงานวิจัยนี้ ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาในอนาคต

## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กล่าวนำ

ในการศึกษาวิธีการใช้งานความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อนำไปใช้ยับยั้งเชื้อราจำเป็นต้องเข้าใจพื้นฐานเพื่อการออกแบบระบบให้ความร้อน รวมถึงหลักการ ทฤษฎี และแหล่งอ้างอิงต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงาน และเกี่ยวข้องกับการจัดเชื้อราในระดับอุตสาหกรรม ดังนั้นบทนี้จะทำการกล่าวถึงเนื้อหาจากการทบทวนปรัทัศน์วรรณกรรม งานวิจัย และทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย การเสื่อมคุณภาพในอาหาร มาตรฐานของข้าว และทฤษฎีการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก โดยจะกล่าวถึงเฉพาะในส่วนที่เป็นประโยชน์และกล่าวอ้างถึงในการดำเนินงานวิจัย

#### 2.2 ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้ทราบทิศทางของการวิจัยจึงทำการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการทำการวิจัย โดยการทบทวนวรรณกรรมจะนำเสนอเอกสารการวิจัยที่เผยแพร่ในฐานข้อมูลสากล เช่น ISI Scopus Science Direct SJR IEEE Xplore SpringerLink และ TCI เป็นต้น จะนำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการทำวิจัย มีหัวข้องานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1. ปัญหาเชื้อราที่อาจปนเปื้อนในเมล็ดข้าว
2. เทคโนโลยีการฆ่าและยับยั้งเชื้อราในธัญพืช
3. การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่ในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร
4. ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของธัญพืชและเชื้อรา

จากศึกษางานวิจัยของ Gonçalves และคณะ (GONÇALVES et al., 2019) ได้ศึกษาการทบทวนวรรณกรรมกลยุทธ์การเอาชนะปัญหาของเชื้อราที่อาจปนเปื้อนในข้าว และถึงการผลิตสารพิษจากเชื้อรา โดยมีสารพิษจากเชื้อราในข้าว ดังตารางที่ 2.1 เมื่อเชื้อราติดไปกับเมล็ดข้าวอาจจะพบเงื่อนไขที่เหมาะสมที่จะเจริญในขั้นตอนต่าง ๆ ของวงจรของการผลิตจนมีสารพิษจากเชื้อราในข้าว แม้ว่ารายงานการเกิดสารพิษจากเชื้อราในข้าวมีน้อยลงเมื่อเทียบกับธัญพืชอื่น ๆ แต่เชื้อราที่อาจปนเปื้อนข้าวสามารถแพร่เชื้อในเมล็ดพืช และเชื้อราสามารถผลิตสารพิษได้ในระหว่างการเก็บรักษาหากมีสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และอากาศ เป็นต้น ถือเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการเจริญของเชื้อรา ซึ่งจากการรายงานล่าสุดพบว่าการติดเชื้อในเมล็ดข้าวที่มีเชื้อรา *A. flavus* รวมถึงอาจมีความเสี่ยงเนื่องจากการได้รับสารพิษอะฟลาทอกซินในระดับสูงจากการจัดการข้าวที่ไม่เหมาะสม

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างเชื้อราในข้าวและสารพิษจากเชื้อราในข้าว

ชนิดเชื้อรา	สารพิษจากเชื้อรา
<i>Aspergillus</i> spp.	
<i>A. flavus</i>	อะฟลาทอกซิน บีหนึ่ง บีสอง
<i>A. ochraceus</i>	โอคราทอกซิน เอ
<i>A. versicolor</i>	สเตอริกมาโตซีสทิน
<i>Fusarium</i> spp.	
<i>F. armeniacum</i>	เอสที-สอง ที-สอง
<i>F. fujikuroi</i>	ฟูโมนิซิน บี1 กรดจิบเบอเรลลิก มอนิลิฟอร์มิน
<i>F. graminearum</i>	ดีออกซีนิวาไลน์อล
<i>F. proliferatum</i>	ฟูมอโนซิน บีหนึ่ง
<i>F. subglutinans</i>	บิวเวอริซิน มอนิลิฟอร์มิน
<i>Penicillium</i> spp.	
<i>P. aurantiogriseum</i>	กรดเพนิซิลิน
<i>P. citreonigrum</i>	ซีเทรีโอวีรีดิน
<i>P. citrinum</i>	ซีทรินิน
<i>P. commune</i>	กรดไซโคลพิอะโซนิก
<i>P. islandicum</i>	ซีตรีโอวีรีดิน ลูทีโอสไกริน
<i>P. rugulosum</i>	รูกูโลซิน
<i>P. verrucosum</i>	ซีทรินิน โอคราทอกซิน เอ
<i>Alternaria</i> spp.	
<i>A. infectoria</i>	อัลเทอร์นาเรียทอกซิน
<i>A. tenuissima</i>	อัลเทอร์นาเรียทอกซิน
<i>Ustilaginoidea virens</i>	อุสตีลาจีโนดิน ยูสตีลอกซิน

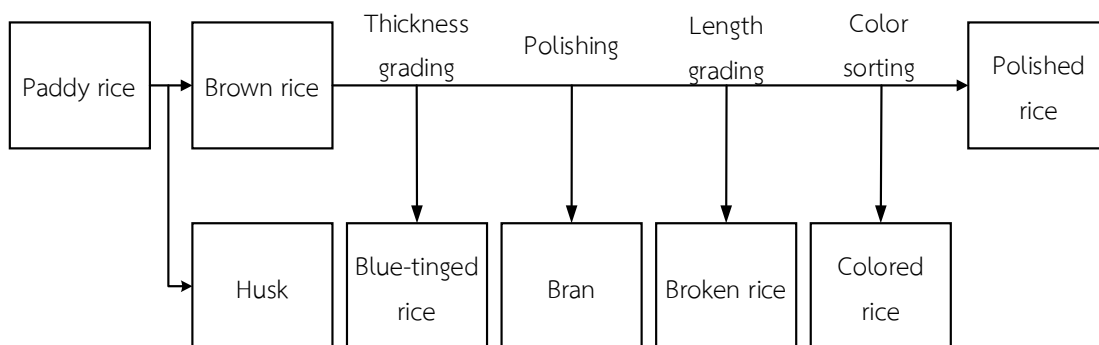
หมายเหตุ จาก “Pre-and postharvest strategies to minimize mycotoxin contamination in the rice food chain,” โดย GONÇALVES et al., 2019, 442.

ตารางที่ 2.2 ปริมาณเชื้อราบนเมล็ดข้าวและสารพิษของข้าวประเทศไทย

ภูมิภาค	จำนวนตัวอย่างที่วิเคราะห์	จำนวนตัวอย่างที่ตรวจพบ (ร้อยละ)	ตัวอย่างที่เป็นบวก (ร้อยละ)	ช่วงของค่า AFB <sub>1</sub> (ug/kg)	ค่าเฉลี่ยของ AFB <sub>1</sub> (ug/kg)	จำนวนเกินค่าที่กำหนด (20 ug/kg)	จำนวนตัวอย่างที่พบเชื้อรา		
							<i>A. flavus</i>	<i>A. niger</i>	<i>Penicillium</i> spp.
<b>ข้าวสาร</b>									
กลาง	41	0	0	nd	nd	0	0	0	0
เหนือ	63	0	0	nd	nd	0	0	0	0
อีสาน	37	0	0	nd	nd	0	0	0	0
ใต้	11	0	0	nd	nd	0	0	0	0
รวม	152	0					0	0	0
<b>ข้าวกล้อง</b>									
กลาง	81	27	33.33	8.20–19.41	11.86	0	54	0	0
เหนือ	71	26	36.62	8.43–18.82	11.80	0	53	3	2
อีสาน	55	18	32.73	8.93–19.26	12.24	0	41	6	6
ใต้	47	12	25.53	8.27–29.05	18.08	50	26	11	13
รวม	254	83	32.68				174	20	21
<b>ข้าวซ้อมมือ</b>									
ใต้	33	4	12.12	20.56–29.12	25.67	100	24	10	9
รวม	33	4				100	24	10	9
<b>ข้าวเหนียว</b>									
อีสาน	21	0	0	nd	nd	0	2	3	0
ใต้	55	0	0	nd	nd	0	19	0	0
รวม	76	0	0				21	3	0
<b>ข้าวฮาง</b>									
เหนือ	8	0	0	nd	nd	0	8	3	0
รวม	8	0					8	3	0

nd หมายถึง ปริมาณของสารพิษที่ตรวจไม่พบ

หมายเหตุ จาก “การตรวจสอบการปนเปื้อนของอะฟลาทอกซินปี 1 ในข้าวไทย,” โดย กิตติพงษ์ ศรีม่วง และคณะ, 2565, 34.



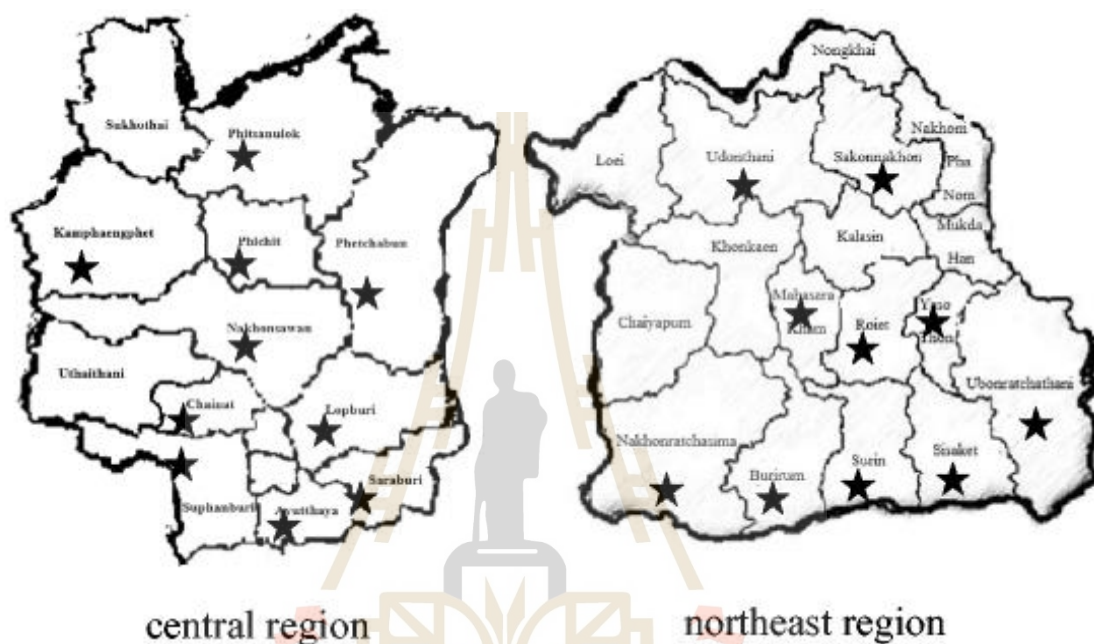
รูปที่ 2.1 ผังกระบวนการในการผลิตข้าวจากข้าวเปลือกสู่ข้าวขัดสี (GONÇALVES et al., 2019)

จากรูปที่ 2.1 การผลิตสารพิษจากเชื้อราในระยะหลังการเก็บเกี่ยวซึ่งข้าวหลังการเก็บเกี่ยวเมล็ดพืชยังคงคลุมด้วยแกลบเรียกกันว่า “ข้าวเปลือก” ซึ่งหลังจากทำการแยกแกลบ ข้าวสีน้ำตาลเรียกว่า “ข้าวกล้อง” หลังจากนั้นจะผ่านการขัดสีและกระบวนการคัดแยกก่อนถูกเรียกว่า “ข้าวขาว” พบว่าในข้าวกล้องและรำข้าวมีการปนเปื้อนของสารพิษจากเชื้อรา ในขณะที่เดียวกันพบว่าการปนเปื้อนในข้าวขัดสีต่ำที่สุด ซึ่งสิ่งที่บ่งชี้พบว่าขั้นตอนที่สำคัญที่สุดที่ทำให้การปนเปื้อนต่ำที่สุด คือ การขัดสีเพื่อกำจัดรำข้าวออกไป โดยที่เชื้อราที่ผลิตสารพิษจากเชื้อราที่สามารถปนเปื้อนข้าว เช่น *Aspergillus Fusarium* และ *Penicillium* เป็นต้น ปัจจัยต่าง ๆ เช่น ชนิดของรา การปฏิสัมพันธ์กับจุลินทรีย์อื่น ๆ พื้นที่การเพาะปลูก สภาพอากาศ และการจัดเก็บหลังการเก็บเกี่ยว เป็นต้น มีผลต่อการปนเปื้อนของสารพิษจากเชื้อรา

จากศึกษางานวิจัยของ กิตติพงษ์ ศรีม่วง และคณะ (กิตติพงษ์ และคณะ, 2565) ได้ศึกษาการตรวจสอบข้าวไทยที่มีการปนเปื้อนของอะฟลาทอกซิน บี 1 ของข้าวจำนวนทั้งหมด 5 ชนิด คือ ข้าวสาร ข้าวกล้อง ข้าวซ้อมมือ ข้าวเหนียว และ ข้าวฮาง เป็นต้น การปนเปื้อนของเชื้อราบนเมล็ดพืชและอาหารแห้งเพราะว่าซึ่งประเทศไทยอยู่ในเขตร้อนชื้นที่เหมาะสมแก่การเจริญและแพร่กระจายของเชื้อรา จึงทำให้มักพบ การปนเปื้อนสารพิษอะฟลาทอกซินบี 1 ที่ถือว่าเป็นสารพิษจากเชื้อราที่ก่อมะเร็งและเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค งานวิจัยได้นำได้ทำการตรวจสอบข้าวในเขตภาคกลาง ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ เพื่อดูการปนเปื้อนของอะฟลาทอกซินบี 1 ในข้าวไทย ดำเนินการตั้งแต่ เดือนมีนาคม 2559 ถึง พฤษภาคม 2560 จากตัวอย่างข้าวทั้งหมด 523 ตัวอย่าง โดยมีข้าวสาร 152 ตัวอย่าง ข้าวกล้อง 254 ตัวอย่าง ข้าวซ้อมมือ 33 ตัวอย่าง ข้าวเหนียว 76 ตัวอย่าง และข้าวฮาง 8 ตัวอย่าง พบว่าข้าวกล้องมีการปนเปื้อนร้อยละ 32.68 ซึ่งมีการปนเปื้อนมากที่สุด สำหรับการตรวจเชื้อราบนเมล็ดข้าวพบเชื้อรา *A. flavus* ร้อยละ 68.50 *A. niger* ร้อยละ 7.87 และ *Penicillium spp.* ร้อยละ 8.26 แต่มีการปนเปื้อนอะฟลาทอกซิน บี 1 ต่ำกว่ามาตรฐานที่ประเทศไทยกำหนดไว้ โดยปริมาณเชื้อราบนเมล็ดข้าว และสารพิษอะฟลาทอกซิน บี 1 ในข้าวไทย



รวมถึงพบว่าข้าวกล้องและข้าวซ้อมมือในภาคใต้บางส่วนมีค่าการปนเปื้อนเกินมาตรฐานของไทยที่ได้จำกัดอะฟลาทอกซินรวมไม่เกิน 20 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ดังตารางที่ 2.2 ดังนั้นเมื่อซื้อข้าวเพื่อบริโภคควรพิจารณาคุณลักษณะของสี กลิ่น หรือมีการเกาะรวมกันเป็นก้อน ข้อสังเกตในงานวิจัย คือการบรรจุข้าวสามารถช่วยป้องกันไม่ให้เชื้อราเจริญและสร้างสารพิษภายหลังบรรจุในถุงสุญญากาศแต่วิธีการนี้ไม่สามารถทำลายเชื้อราและสารพิษอะฟลาทอกซินที่ถูกปนเปื้อนมาแล้ว



รูปที่ 2.2 แผนที่ผลผลิตข้าว 10 อันดับแรกของแต่ละภาค (Panrapee et al., 2016)

จากศึกษางานวิจัยของ Iamtaweearoen Panrapee และคณะ (Panrapee et al., 2016) ได้ศึกษาและประเมินการบริโภคอะฟลาทอกซิน ปี 1 ของประชากรไทยจากการบริโภคข้าวกล้องและข้าวสีที่ปนเปื้อนสารพิษจากเชื้อรา รวมถึงการประมาณการความเสี่ยงมะเร็งของผู้บริโภคชาวไทยจากการบริโภคข้าวกล้องและข้าวสี เนื่องจากคนไทยหันมาใส่ใจสุขภาพ และบริโภคข้าวกล้องหรือผลิตภัณฑ์จากข้าวกล้องแทนข้าวขาว การทดลองใช้ตัวอย่างทั้งหมด 240 ตัวอย่าง จากสองช่วงเวลา ช่วงที่ 1 เก็บเกี่ยวฤดูรวบรวมในเดือนมิถุนายน ถึง กรกฎาคม 2555 และช่วงที่ 2 ในเดือนธันวาคม 2555 ถึง มกราคม 2556 จาก 20 จังหวัดของข้อมูลภาคกลาง และ 20 จังหวัดของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยเลือกเป็นตัวแทนจังหวัดของผลผลิตข้าวสูงสุดแต่ละภาค จากภาพแผนที่ภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยจากผลผลิต 10 อันดับแรกของแต่ละภาค ภาคกลาง คือ พิษณุโลก กำแพงเพชร พิจิตร เพชรบูรณ์ นครนายก ชัยนาท ลพบุรี

สุพรรณบุรี พระนครศรีอยุธยา สระบุรี ภาคภาคตะวันออกเฉียงเหนือ คือ อุตรธานี สกลนคร มหาสารคาม ร้อยเอ็ด นครราชสีมา ยโสธร บุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ และอุบลราชธานี ดังรูป 2.2

จากงานวิจัยดังกล่าว (Panrapee et al., 2016) พบว่าฤดูเพาะปลูกและฤดูเก็บเกี่ยวมีอิทธิพลต่อการปนเปื้อนและระดับอะฟลาทอกซิน ปี 1 โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัจจัยปริมาณฝนและช่วงอุณหภูมิ จากการศึกษาตัวอย่างข้าว 240 ตัวอย่าง พบว่ามีเพียง 1 ตัวอย่างที่มีค่าปนเปื้อนเกินมาตรฐานของไทยที่ได้มีการจำกัดสารพิษอะฟลาทอกซินรวมไม่เกิน 20 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม แต่มี 12 ตัวอย่างที่มีค่าปนเปื้อนเกินมาตรฐานเกินระดับสูงสุดของสหภาพยุโรป สำหรับอะฟลาทอกซิน ปี 1 เท่ากับ 2 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในประเทศไทยคุณภาพและความปลอดภัยของข้าวไทยเป็นไปตามข้อกำหนด ทำให้ความเสี่ยงของประชากรต่อการเกิดมะเร็งตับผ่านการทานข้าวกล้องและข้าวสีมีน้อย อย่างไรก็ตามควรมีการตรวจสอบอะฟลาทอกซินในตัวสินค้าอย่างต่อเนื่องเพื่อความปลอดภัยของอาหาร โดยช่วงที่ 1 ในเดือนมิถุนายน ถึง กรกฎาคม 2555 สูงกว่าช่วงที่ 2 ในเดือนธันวาคม 2555 ถึง มกราคม 2556 ค่าของอะฟลาทอกซินในข้าวกล้องและข้าวสีตามธรรมชาติ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าของอะฟลาทอกซินในข้าวกล้องและข้าวสี

การสุ่มตัวอย่าง	ภูมิภาค	จำนวนตัวอย่าง				
		<LOD <sup>a</sup> or ND	>LOD-2 $\mu\text{g kg}^{-1}$	>2-4 $\mu\text{g kg}^{-1}$	>4-10 $\mu\text{g kg}^{-1}$	>10 $\mu\text{g kg}^{-1}$
ช่วงที่ 1	ภาคกลาง	24	32	2	1	1
	ภาคอีสาน	25	30	2	2	1
ช่วงที่ 2	ภาคกลาง	54	4	2	0	0
	ภาคอีสาน	54	5	1	0	0

หมายเหตุ จาก “Exposure to aflatoxin B 1 in Thailand by consumption of brown and color rice,” โดย Panrapee et al., 2016, 21.

จากงานวิจัยของ Ranjna Sirohi และคณะ (Sirohi et al., 2021) ได้ศึกษาความก้าวหน้าและหนทางข้างหน้าของเทคโนโลยีสำหรับการฆ่าเชื้อธัญพืช การระบุเทคโนโลยีการแปรรูปและการกำจัดเชื้อต่างๆ ที่ปนเปื้อนเพื่อให้ได้เมล็ดพืชที่มีคุณภาพและปลอดภัยเป็นประเด็นที่สำคัญ การรักษาเมล็ดธัญพืชให้ปลอดภัยและปราศจากการปนเปื้อนทั้งหลาย คือ ไมโครเวฟ ความถี่วิทยุ อินฟราเรด การให้ความร้อนแบบโอห์มมิก และการทำให้แห้งแบบใหม่ร่วมวิธีไม่ใช้ความร้อน เช่น พลาสมาเย็น การฉายรังสี ไอออน และนาโนเทคโนโลยี เป็นต้น เพื่อใช้เวลาในการผลิตโดยรวมลดลงอย่างมากโดยสิ้นเปลืองพลังงานน้อยที่สุดในการกำจัดเชื้อที่ปนเปื้อน

ตารางที่ 2.4 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีบนพื้นฐานใช้ความร้อน

วิธีการ	หลักการ	ข้อดี	ข้อจำกัด	การใช้งาน
Microwave	การใช้คลื่นวิทยุที่ถ่ายทอดพลังงานไฟฟ้าให้กับวัสดุไดอิเล็กตริกทำให้เนื้อวัสดุเกิดความร้อนกระจายทั่วภายใน	เป็นกระบวนการที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ สามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ประยุกต์ใช้ในกระบวนการหมอมหลอม และการทำให้ปราศจากเชื้อได้	มีข้อจำกัดกับวัสดุที่เป็นโลหะ ควบคุมอุณหภูมิในการความร้อนค่อนข้างลำบาก และมีการระเหยของน้ำ	การอบแห้งแบบ ความร้อนแห้ง การลวก การปรุงอาหาร การฆ่าเชื้อ และการปรับอุณหภูมิ และการทำอาหารให้สุก
Radio Frequency	การสร้างสนามไฟฟ้าและคลื่นวิทยุที่ถ่ายเทพลังงานไปยังวัสดุไดอิเล็กตริกทำให้เกิดเป็นความร้อนกระจายทั่วภายในเนื้อวัสดุ	การทำผลิตภัณฑ์ให้แห้ง รวดเร็วขึ้น การให้ความร้อนที่สม่ำเสมอ การปรับระดับความชื้น รวมถึงการทำความร้อนแบบไม่ต้องสัมผัส เป็นกระบวนการที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน	ราคาอุปกรณ์ของเครื่อง รวมถึงความคุ้มค่าของค่าใช้จ่ายต่างๆในการดำเนินงานระดับอุตสาหกรรม	การอบแห้งแบบ ความร้อนแห้ง การละลายแช่แข็ง การพาสเจอร์ไรซ์อาหาร การยับยั้งและการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์การทำอาหารให้สุก และการปรับปรุงหลังการอบแห้ง
Infrared	การแผ่กระจายรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่วัดดูดซับและให้ความร้อนโดยตรงกับเนื้อวัสดุภายนอก	การถ่ายเทความร้อนสูง ร้อนที่พื้นผิวเป็นเนื้อเดียวกัน การใช้เวลาทำความร้อน ใช้พลังงานต่ำในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์	การให้ความร้อนเฉพาะภายนอกเนื้อวัสดุที่สูง แต่ภายในเนื้อวัสดุมีข้อจำกัด	ใช้สำหรับการย่าง การทอด การทำอาหาร การคายน้ำ และการยับยั้งเชื้อโรค
Ohmic Heating	การใช้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านโดยตรงกับเนื้อวัสดุ ซึ่งทำหน้าที่เป็นความต้านทานไฟฟ้าในขณะที่กำลังสร้างความร้อนกับเนื้อวัสดุ	ประสิทธิภาพในการส่งผ่าน ความร้อนสูง ให้ความร้อนในเนื้อวัสดุอย่างรวดเร็ว การให้ความร้อนสูง และความร้อนสม่ำเสมอ	ใช้กับอาหารไม่ได้ทุกชนิด ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุอาหารเพิ่มขึ้น ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการติดตั้งสูง การตรวจสอบ และการควบคุมยาก	ใช้สำหรับการลวก การปกเปิดอก การละลาย การระเหย และการคายน้ำ
Superheated Steam Drying	ใช้แรงดันไอน้ำคงที่และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยจะเปลี่ยนไอน้ำอิ่มตัวจนเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีขึ้น ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ และมีความปลอดภัย เช่น ไม่มีอันตรายจากไฟไหม้ การระเบิด เป็นต้น	ต้องใช้เวลาในการทำให้แห้งมากขึ้นในบางกรณี ระบบมีความซับซ้อน การใช้ในอุตสาหกรรมยังไม่แพร่หลาย	ใช้สำหรับทำให้แห้ง การคั่ว การลวก การยับยั้งการทำงานของเซลล์พืช

หมายเหตุ จาก “Technologies for disinfection of food grains: Advances and way forward,” โดย Sirohi et al., 2021, 13.

ตารางที่ 2.5 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่ไม่ใช้ความร้อน

วิธีการ	หลักการ	ข้อดี	ข้อจำกัด	การใช้งาน
Cold Plasma	การผ่านก๊าซที่เกิดจากกระบวนการใช้สนามไฟฟ้าทำให้เกิดเป็นสถานะพลาสมา	ปฏิกิริยาเคมีสูง เวลาบำบัดสั้น อุณหภูมิต่ำ ต้นทุนที่ใช้ในการดำเนินงานต่ำ	การลงทุนสูง และมีกระบวนการที่ซับซ้อน งบประมาณการไม่พอที่จะกำจัดจุลินทรีย์ทั้งหมด เพราะไม่ได้ผลกับไวรัส และส่วนประกอบของอาหาร	ใช้สำหรับพื้นผิวของวัตถุดิบและวัสดุบรรจุภัณฑ์
Electrohydrodynamic Drying	สร้างการปลดปล่อยโคโรนาไฟฟ้าแรงสูงในตัวกลางที่เป็นก๊าซ โดยหลักการอิเล็กโทรโฟเรซิส และแรงไดอิเล็กโตรโฟเรติก	ต้นทุนการผลิตอาหารลดลง ทดตัวน้อยลง คีโนน้ำที่ตื้นขึ้น และคุณภาพอาหารดีขึ้น	อุปกรณ์ซับซ้อน ระบบลงทุนสูง ส่งผลกระทบต่ออาหาร เนื้อเหนียว อัตราการคั้นตัวต่ำ และเกิดสีน้ำตาลเข้ม	ใช้สำหรับการทำให้แห้งและคายน้ำที่แบบวิกฤตยิ่งยวด
Ozonation	สร้างก๊าซโอโซนมาจากไฟฟ้าแรงสูง มีปฏิกิริยากับจุลินทรีย์และสารก่อมลพิษ	มีประสิทธิภาพที่สูงด้านการต่อต้านแบคทีเรียและไวรัส มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อโรคที่รุนแรง โดยใช้เวลาทำปฏิกิริยาสั้น	ระบบลงทุนสูง ระยะเวลาในการละลายในน้ำได้น้อย มีความเสี่ยงอันตรายจากไฟไหม้ และปัญหาความเป็นพิษ	วิธีการการถนอมผลิตภัณฑ์อาหาร การฆ่าเชื้อ และการดับกลิ่น
Pulsed Light	สร้างพัลส์แสงความเข้มสูงในช่วงเวลาสั้นจนทำให้เกิดความเสียหายให้กับสายดีเอ็นเอของแบคทีเรีย	ประสิทธิภาพและรวดเร็วในการต่อต้านแบคทีเรีย ไวรัส และเวลาทำปฏิกิริยาสั้น	การฉายแสงไม่สม่ำเสมอ ตัวอย่างเกิดสีน้ำตาลเข้ม ความสามารถในการทะลุทะลวงไปภายในเนื้อวัสดุที่จำกัด	ใช้สำหรับบนพื้นผิวของอาหาร อุปกรณ์อาหาร และวัสดุบรรจุภัณฑ์

ตารางที่ 2.5 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่ไม่ใช้ความร้อน (ต่อ)

วิธีการ	หลักการ	ข้อดี	ข้อจำกัด	การใช้งาน
Ultrasound	การแพร่กระจายพลังงานเชิงกลของคลื่นและสร้างการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความดันจะแตกต่างกัน	ความสามารถในการถ่ายโอนพลังงานเร็วขึ้น การไล่ระดับความร้อนลดลง และการตอบสนองระหว่างกระบวนการสกัดได้เร็วขึ้น	เกิดการเสีรูปของพื้นผิววัสดุ จนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง และเกิดสารประกอบที่ไม่พึงประสงค์ ขึ้นกับวัสดุที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่	ใช้สำหรับการทำอิมัลชันอาหาร การฆ่าเชื้อ การสกัด และการแช่แข็งอาหารสด
Irradiation	ใช้รังสีไอออไนซ์ที่เกิดขึ้นจากการใช้แกมมาหรือเอกซเรย์	ลดการใช้สารเคมีที่ใช้สำหรับบรรจุภัณฑ์ และควบคุมเวลาออกและแตกหน่อโดยไม่ทิ้งร่องรอยการบำบัด	ต้นทุนระหว่างกระบวนการสูง มาตรฐานไม่สอดคล้องกัน ต้องการปริมาณผลิตภัณฑ์เพียงพอในแต่ละครั้งในการดำเนินการ และการบำบัดไม่มีผลต่อไวรัส	ใช้สำหรับบรรจุอาหารจำนวนมากก่อนบรรจุหีบห่อ ยับยั้งแบคทีเรียโดยการทำลายดีเอ็นเอ
High Hydrostatic Pressure	การใช้ค่าแรงกดที่มากกว่า 100 Mpa จนถึง 900 Mpa กับอาหารที่อยู่ภายในบรรจุภัณฑ์ที่สามารถทนต่อแรงดันสูง (โดยปกติแรงกดที่ใช้งานที่ค่าประมาณ 600 Mpa)	กักเก็บโพลีฟีนอล ส่งผลกระทบต่อสารอาหารน้อยที่สุด ใช้เวลาในการแปรรูปอย่างรวดเร็ว	กระบวนการบำบัดเป็นรอบหรือ กึ่งต่อเนื่อง	ใช้สำหรับในการเปลี่ยนสภาพโปรตีน และเพื่อการทำลายเซลล์ของแบคทีเรีย

หมายเหตุ จาก “Technologies for disinfection of food grains: Advances and way forward,” โดย Sirohi et al., 2021, 13.

ในควบคุมการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ของธัญพืชนั้นจากการศึกษาและทบทวนเกี่ยวกับความก้าวหน้าที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีต่าง ๆ เกี่ยวกับการจัดการปนเปื้อนของธัญพืชอาหารโดยใช้ความร้อนและไม่ใช้เทคโนโลยีความร้อน พบว่าเทคนิคฆ่าเชื้อด้วยความร้อนอาจส่งผลกระทบต่อเมล็ดพืชได้ที่มีคุณภาพโดยการเสื่อมคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสและโภชนาการแต่เป็นส่วนใหญ่คุ้มค่า ในขณะที่เทคนิคไม่ใช้ความร้อนมีประสิทธิภาพค่อนข้างดีกว่าแต่ต้องการลงทุนสูง ดังนั้นการผสมผสานระหว่างเทคโนโลยีที่ไม่ใช้ความร้อนกับกระบวนการอื่น ๆ ยังคงเป็นหัวข้อที่อยู่ระหว่างการวิจัย โดยได้ทำการสรุปวิธีการและหลักการในด้านต่างๆ รวมถึงในข้อดีและข้อจำกัดของการประยุกต์ใช้ของเทคโนโลยีที่ไม่ใช้ความร้อนและของเทคโนโลยีที่ไม่ใช้ความร้อน ดังตารางที่ 2.4 และ 2.5

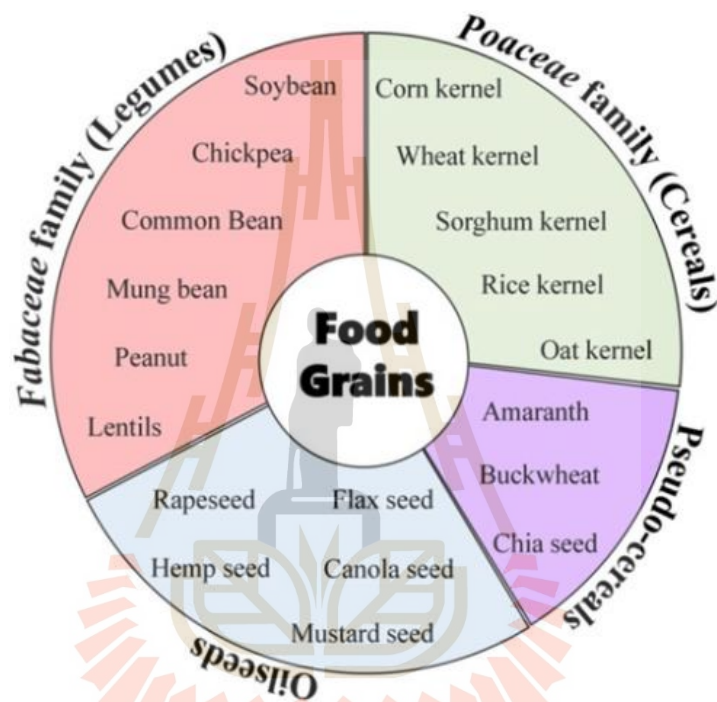
จากงานวิจัยของ Bo Ling และคณะ (Ling, Cheng and Wang, 2020) ได้ศึกษาการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับอาหารประเภทธัญพืชมีส่วนสำคัญของอาหารประจำวันของประชากรทั่วโลกและสัตว์ มีส่วนประกอบ เช่น โปรตีน น้ำมัน แป้ง เป็นต้น เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่ปลอดภัยและมีความเสถียรในการจัดเก็บสูงเนื่องจากมีความชื้นต่ำ ในด้านความปลอดภัยของอาหารของการเก็บรักษาและการจัดการปนเปื้อนของเมล็ดพืชและผลิตภัณฑ์จากเมล็ดพืชจึงกลายเป็นปัญหาที่สำคัญ โดยปัญหาการปนเปื้อนของแมลงและจุลินทรีย์เป็นปัญหาหลัก ทำให้เกิดความกังวลต่อกระทบต่อธัญพืชทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของอุตสาหกรรมแปรรูปเมล็ดพืชอาหาร รวมถึงความสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวที่ขึ้นกับอาหารจากแมลง เชื้อรา เชื้อโรค และเอนไซม์ต่าง ๆ ที่ไม่พึงประสงค์ยังคงเป็นปัญหาหลักสำหรับอุตสาหกรรมธัญพืช การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุเพื่อการปรับปรุงความปลอดภัยและคุณภาพของเมล็ดพืชจึงน่าสนใจเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม อาหารเนื่องจากความรวดเร็ว ปริมาตร และความลึก ในการลดความสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวโดยไม่มีสารเคมีตกค้าง รวมถึงการใช้คลื่นความถี่วิทยุสามารถแทนที่การพาความร้อนและการนำความร้อนได้ สำหรับผลิตภัณฑ์จากธัญพืชที่ปนเปื้อนไข่แมลงหรือตัวอ่อนตามธรรมชาติในช่วงก่อนการเก็บเกี่ยวจนแปรรูป และเก็บรักษา ที่ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ธัญพืชลดลงอย่างมากในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร มีการศึกษาเทคนิคการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุเพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ รวมถึงใช้ในการยับยั้งเอนไซม์ การพาสเจอร์ไรส์ การฆ่าเชื้อ การอบแห้ง และการคั่ว เป็นต้น มีรายงานว่าเมื่อนำข้าว 4.5 กิโลกรัม ร่วมกับคลื่นความถี่วิทยุ โดยใช้ระบบขนาด 5 kV 40.68 MHz ช่องว่างอิเล็กโทรดขนาด 16 เซนติเมตร ใช้เวลา 120 วินาที เพื่อให้ได้อัตราการตายร้อยละ 100 ของไข่แมลงหรือตัวอ่อนตามธรรมชาติของผลิตภัณฑ์จากธัญพืชในอุตสาหกรรมอาหาร โดยของผลิตภัณฑ์ธัญพืชอุตสาหกรรมประเภทเมล็ดพืชน้ำมัน เช่น เมล็ดเรพซีด เมล็ดแฟลกซ์ เมล็ดคาโนลา เมล็ดป่าน และเมล็ดมัสตาร์ด เป็นต้น ต่อมาธัญพืชตระกูลหญ้า เช่น เมล็ดข้าวโพด เมล็ดข้าวสาลี เมล็ดข้าวฟ่าง เมล็ดข้าว และเมล็ดข้าวโอ๊ต เป็นต้น รวมถึงธัญพืชตระกูลถั่ว เช่น ถั่วเหลือง ถั่วชิกพี ถั่วแขก ถั่วเขียว ถั่วลิสง และถั่วเลนทิล เป็นต้น ดังรูปที่ 2.3

จากการทบทวนวรรณกรรมด้านการยับยั้งเชื้อราโดยการให้ความร้อนคลื่นวิทยุของธัญพืชและผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ (Jiao et al., 2016; Zheng et al., 2017; Hou et al., 2018; Liu, Tang, Mao, Mah, Jiao and Wang, 2011; Li, Chen and Yao, 2015; Vearasilp et al. 2015; จิตรมาศ นากา, สุชาดา เวียร์ศิลป์, สงวนศักดิ์ ธนาพรพูนพงษ์, Dieter von Hörsten และ Wolfgang Lücke, 2556) เกี่ยวกับการยับยั้งเชื้อราโดยการให้ความร้อนคลื่นวิทยุของธัญพืช อะพลาทอกซินเป็นสารพิษจากเชื้อรา เช่น *A. flavus* และ *A. parasiticus* ที่มีความเป็นพิษสูงและความทนทานสูงสุด รวมถึงซึ่งพบได้ในอาหารและอาหารสัตว์ผลิตภัณฑ์ที่มีการติดเชื้อ ได้แก่ ข้าวโพด ถั่วลิสง ข้าวสาลี ถั่วเหลือง และเมล็ดพืชน้ำมัน ดังตารางที่ 2.6

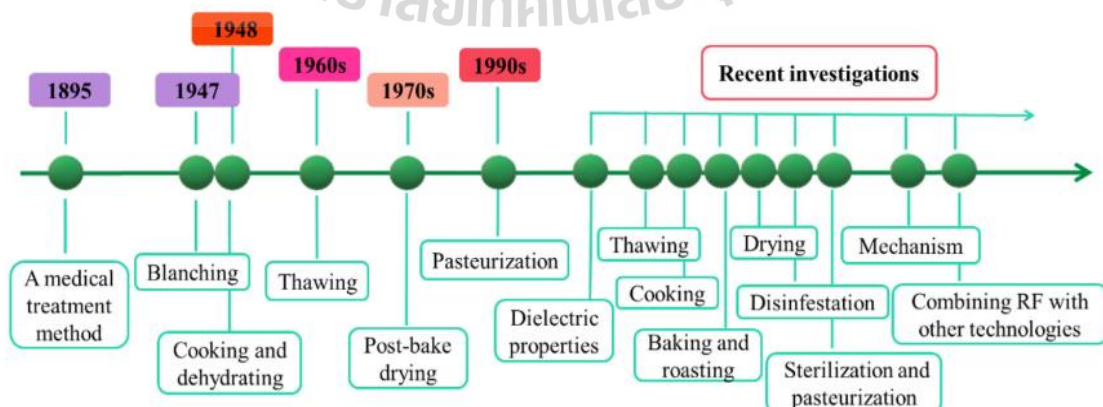
ตารางที่ 2.6 การยับยั้งเชื้อราโดยการให้ความร้อนคลื่นวิทยุของธัญพืชและผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

Commodities	Target Microorganism	Treatment		Level of Inhibition	Reference
		System	Conditions/Holding Time /MC (% w.b)		
Corn	<i>A. flavus</i>	HARF 12 kW 27.12 MHz	65 °C, 10 min, 12.0%	3-log reductions	(Jiao et al., 2016)
	<i>A. flavus</i>	HARF 12 kW 27.12 MHz	65 °C, 10 min 15.0%	4-log reductions	(Jiao et al., 2016)
	<i>A. parasiticus</i>	HARF 6 kW 27.12 MHz	70 °C, 12 min	5-log reductions	(Zheng et al., 2017)
Wheat	<i>A. flavus</i>	HARF 12 kW 27.12 MHz	65 °C, 10 min, 12.0%	2-log reductions	(Jiao et al., 2016)
	<i>A. flavus</i>	HARF 12 kW 27.12 MHz	65 °C, 10 min 15.0%	3-log reductions	(Jiao et al., 2016)
Chestnuts	<i>P. crustosum</i>	HARF 6 kW 27.12 MHz	6 kW 27.12 MHz 60 °C	4-log reductions	(Hou et al., 2018)
White Bread	<i>P. citrinum</i>	HARF 6 kW 27.12 MHz	58 °C, 4.6 min 37.1%	4-log reduction	(Liu et al., 2011)
Rice Flour	Total Plate Count	RF-H	100 °C, 1 min	Undetectable	(Li et al., 2015)
Oil Seed	<i>A. flavus</i>	RF-H	80 °C	88.44%	(Vearasilp et al., 2015)
			90 °C	100%	
Rice (KDML 105)	<i>A. flavus</i>	RF-H 27.12 MHz	90 °C	99.30%	(จิตรมาศ นากา และคณะ, 2556)

แม้ว่าผลการศึกษาบางชิ้นจะยืนยันว่าผลของการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุมีผลกระทบยับยั้งการทำงานเฉพาะ ผลกระทบในส่วนที่เกิดจากความร้อนเท่านั้น การสำรวจผลของการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ต่อเชื้อรา พบว่าในกลุ่มอาหารค่ากิจกรรมทางน้ำ (Water activity:  $A_w$ ) ที่สูง มักจะขึ้นอยู่กับความเสี่ยง สภาพของโปรตีน ขณะที่อยู่ในธัญพืชอาหารและผลิตภัณฑ์กลุ่มกิจกรรมทางน้ำต่ำการยับยั้งเชื้อรา กลไกส่วนใหญ่มักเกี่ยวข้องกับเซลล์ที่ได้รับบาดเจ็บ ดังนั้นการศึกษาในอนาคตจึงจำเป็นต้องสำรวจว่า การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุมีผลกระทบ และมีกลไกทำให้การยับยั้งเชื้อราอย่างไร



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างธัญพืชต่าง ๆ ที่บริโภคของประชากรทั่วโลก (Ling et al., 2020)



รูปที่ 2.4 การให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุสำหรับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร (Zhang et al., 2022)



ตารางที่ 2.7 การปรับปรุงการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

วิธีการ	ผลิตภัณฑ์	หมายเหตุ	อ้างอิง	
การปรับเปลี่ยนกำลังไฟ / อัตราความร้อน	มันฝรั่ง	ได้ค่าเหมาะสมที่สุดที่เหมาะสมที่ช่องว่าง	(Zhang et al., 2018)	
	ลูกบาศก์	อิเล็กโทรด 120 มม.		
	แป้งสาลี	ระยะห่างของอิเล็กโทรดที่มากขึ้นจะช่วยให้ความร้อนมีความสม่ำเสมอมากขึ้น		
การปรับเปลี่ยนขนาด หรือตำแหน่ง	เนื้อวัว	ได้ค่าเหมาะสมที่สุดที่ช่องว่างอิเล็กโทรด 90 มม.	(Villa-Rojas et al., 2017)	
		ความสม่ำเสมอในการทำความร้อนดีขึ้น		
	นมผง	โดยตัวอย่างที่มีความหนาเล็กน้อย หรือ	(Li et al., 2018)	
		ในรูปทรงลูกบาศก์ หรือพื้นที่ฐานใหญ่ขึ้น		
		วางตัวอย่างในกล่องทรงกระบอกสูง 6 ซม.		
ถั่วเหลือง	วางถั่วเหลืองไว้ตรงกลางของขั้วไฟฟ้าสองแผ่น	(Huang et al., 2015)		
การเสริมอากาศร้อน / การเพิ่มการเคลื่อนไหว และการผสม	อัลมอนต์	การเคลื่อนย้ายตัวอย่างบนสายพาน	(Gao et al., 2010)	
		ลำเลียงด้วยการเสริมลมร้อน 63 °C และ		
		ผสมตัวอย่าง 1 ครั้ง		
	เกล็ด	ผสมผสานการเสริมอากาศร้อนและการเพิ่มการเคลื่อนไหว		
ข้าวโพด		การเคลื่อนย้ายข้าวโพดบนสายพาน	(Zheng et al., 2016)	
		ลำเลียงร่วมกับลมร้อน 70 °C และผสม		
		ตัวอย่าง 2 ครั้ง		
แมคคาเดเมีย แบบมีเปลือก	การเสริมลมร้อน 50 °C		(Wang et al., 2014)	
	ถั่วเหลือง	ใช้การลำเลียงแบบสกรูขนาดเล็ก		Zhou et al., 2019)
	ข้าวโพด และถั่วลิสง			

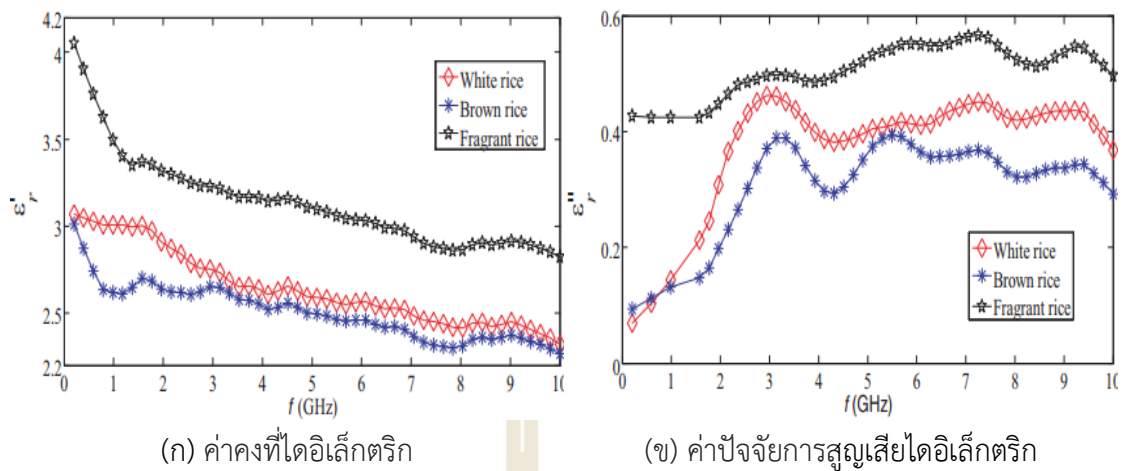
ตารางที่ 2.7 การปรับปรุงการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร (ต่อ)

วิธีการ	ผลิตภัณฑ์	หมายเหตุ	อ้างอิง
การเสริมอากาศร้อน / การเพิ่มการเคลื่อนไหวและการผสม	วอลนัท	การเคลื่อนย้ายตัวอย่างบนสายพานลำเลียงด้วยการเสริมลมร้อน 60 °C และผสมตัวอย่าง 1 ครั้ง	(Wang et al., 2007)
		การเสริมลมร้อน 70 °C และผสมตัวอย่าง 3 ครั้ง	(Wang et al., 2007)
	ข้าวสาลี	ผสมตัวอย่าง 3 ครั้ง	(Chen et al., 2015)
		การเคลื่อนย้ายตัวอย่างบนสายพานลำเลียง	(Chen, Huang et al., 2016)
	แป้งสาลี	การหมุนตัวอย่างในแนวนอนรอบแกนกลางบนสายพานลำเลียงแบบเอียงรวมกับการเพิ่มความเร็วยของการหมุน	(Palazoglu et al., 2018)
การแบ่งชั้น	อัลมอนต์	วางตัวอย่างในภาชนะแบ่งเป็นห้าชั้น	(Li et al., 2018)
	เมล็ดถั่วลิสง	แบ่งตัวอย่างออกเป็น 1 ถึง 7 ชั้น และเพิ่มช่องว่างอากาศระหว่างแต่ละชั้น	(Zhang et al., 2019)
การใช้ตัวอย่างที่มีวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ที่คล้ายคลึงกัน	แป้งข้าวโพด	คลุมโพนบนตัวอย่างในที่บรรจุในงานเพาะเชื้อแก้ว	(Ozturk et al., 2017)
	เมล็ดถั่วลิสง	การเพิ่มแผ่นไมก้าในจุดเย็นของตัวอย่างและเพิ่มความหนาของแผ่นเพลท	(Zhang et al., 2017)
	แป้งถั่วเหลือง	การใช้ภาชนะโพลีสไตรีน	(Huang et al., 2016)
	ถั่วเหลือง	การใช้ภาชนะกับตัวอย่างที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกคล้ายกัน	(Huang et al., 2015)
	แป้งสาลี	การวางกระบอกสไตรีนขนาดเล็กทั้งด้านบนและด้านล่างโดยที่ตัวอย่างภาชนะและใช้แทนงานเพาะเชื้อโพลีสไตรีน	(Villa-Rojas et al., 2017)
การปรับเปลี่ยนขนาดอิเล็กทรอนิกส์	ปลา	การปรับเปลี่ยนอิเล็กทรอนิกส์ส่วนบนมีขนาดใกล้เคียงกับตัวอย่าง	(Llave et al., 2015)
	ลูกเกด	การปรับเปลี่ยนมุมภาชนะและลดขอบคมบรรจุภัณฑ์	(Alfaifi et al., 2016)
	ถั่วเหลือง	การปรับเปลี่ยนอิเล็กทรอนิกส์ส่วนบนมีขนาดใกล้เคียงแต่เล็กกว่าตัวอย่าง	(Huang et al., 2015)

จากงานวิจัยของ Lihui Zhang และคณะ (Zhang et al., 2022) ได้ศึกษาการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุสำหรับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเพื่อหาแนวทางลดการรมควันด้วยสารเคมี และความร้อนแบบดั้งเดิม เนื่องจากใช้ง่ายและไม่ทิ้งสารเคมีตกค้าง สามารถถ่ายโอนพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังผลิตภัณฑ์จำนวนมากเพื่อให้เกิดความรวดเร็วที่เพิ่มประสิทธิภาพและโปรโตคอลกระบวนการที่เป็นไปได้สำหรับสินค้าทางการเกษตรและส่งเสริมระดับอุตสาหกรรม เช่น วิธีการรักษาทางการแพทย์ การลวก การปรุงอาหาร การคายน้ำ การละลาย การทำแห้งแบบย้อนกลับ และการพาสเจอร์ไรซ์ เป็นต้น จนถึงในปัจจุบันมีการร่วมวิธีต่าง ๆ ร่วมกัน ดังรูปที่ 2.4

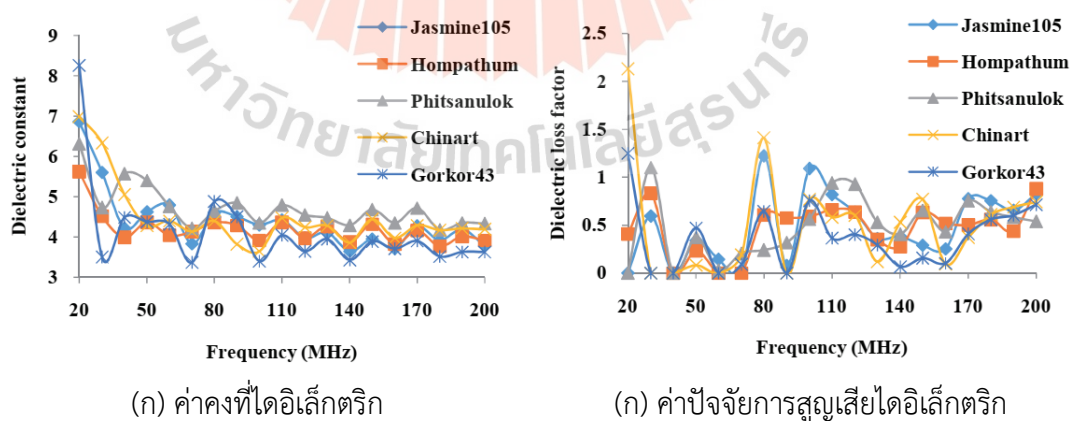
จากการทบทวนวรรณกรรมด้านการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับธัญพืชและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรต่างๆ (Zhang, Kou, Zhang, Cheng and Wang, 2018; Shi, Sun, Yan and Ren, 2017; Villa-Rojas, Zhu, Marks and Tang, 2017; Li, Li, F., Tang, Zhang, Wang, Koral and Jiao, 2018; Dag, Singh and Kong, 2019; Huang, Zhu, Yan and Wang, 2015; Guo, Mujumdar and Zhang, 2019; Hou, Huang, Kou, Wang, 2016; Zheng, Zhang, Zhou and Wang, 2016; Wang, Zhang, Gao, Tang and Wang, 2014; Zhou and Wang, 2019; Wang, Monzon, Johnson, Mitcham and Tang, 2007; Chen, Wang, Li and Wang, 2015; Chen, Huang, Wang, Li and Wang, 2016; Palazoğlu and Miran, 2018; Li, Kou, Hou, Ling and Wang, 2018; Zhang, Ramaswamy and Wang, 2019; Ozturk, Kong, Singh, Kuzy and Li, 2017; Zheng, Zhang and Wang, 2017; Huang, Marra and Wang, 2016; Llave, Liu, Fukuoka and Sakai, 2015; Alfaifi, Tang, Rasco, Wang and Sablani, 2016) ประกอบไปด้วย วอลนัท อัลมอนด์ เกาลัด เมล็ดถั่วลิสง ข้าวโพด แมคคาเดเมีย เมล็ดถั่วลิสง ถั่วเหลือง มันฝรั่ง ข้าวสาลี แป้งถั่วเหลือง แป้งข้าวโพด แป้งสาลี นมผง ปลา เนื้อวัว และลูกเกด เป็นต้น สรุปข้อมูลดังตารางที่ 2.7 การปรับปรุงการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร จากข้อมูลพบว่าสามารถปรับปรุงในหลากหลายรูปแบบ เช่น การจำลองและวิธีการทดลองในการปรับปรุงความสม่ำเสมอ เช่น การปรับค่ากำลังไฟ การปรับอัตราความร้อน การเพิ่มอากาศร้อน การเพิ่มการเคลื่อนไหว การหมุนตัวอย่าง การแบ่งชั้นของใช้วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ และการปรับเปลี่ยนขนาดหรือตำแหน่งอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

จากการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของเมล็ดพืชและผลิตภัณฑ์จากธัญพืชที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ เช่น ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ค่าปัจจัยการสูญเสียไดอิเล็กตริก รวมถึงความสามารถในการทะลุทะลวง เป็นต้น ดังรูปที่ 2.5 และ 2.6 ตารางที่ 2.8 รวมถึงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของเชื้อรา ดังรูป 2.7 และ 2.8



รูปที่ 2.5 ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าว (Cheng et al., 2017)

ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวจากการทบทวนวรรณกรรม (Yang, Zhao, Tang, Yang, Yan and Zhao, 2018; Jiao, Johnson, Tang, Tiwari and Wang, 2011; Nelson and Trabelsi, 2006; Ozturk, Kong, Singh, Kuzy and Li, 2017; Ling, Lyng and Wang, 2018; Ling, Liu, Zhang and Wang, 2018) ดังตารางที่ 2.8 และคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวจากงานวิจัยของ Ee Meng Cheng และคณะ (Cheng et al., 2017) ดังรูปที่ 2.5 รวมถึงงานวิจัยของ Wittawat Wasusathien และคณะ (Wasusathien et al., 2020) ที่เป็นค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวไทย ดังรูปที่ 2.6

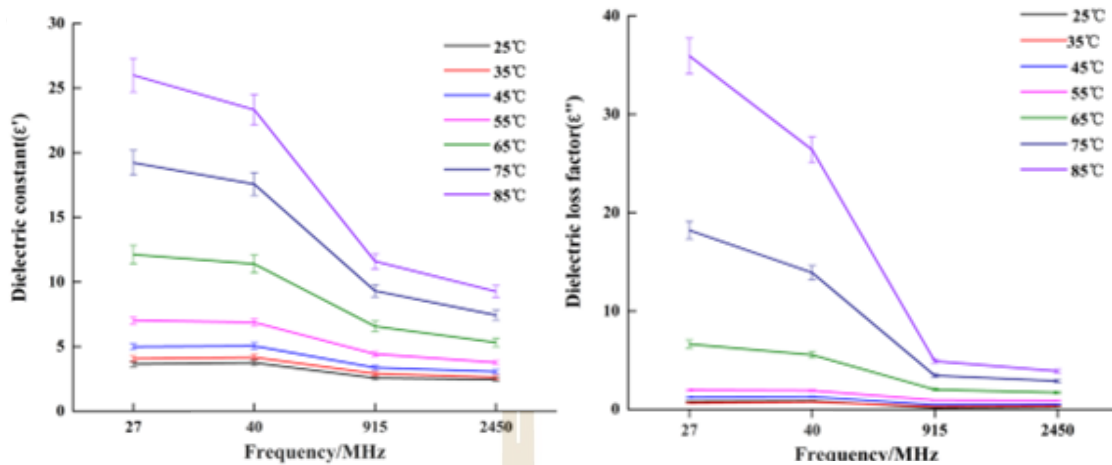


รูปที่ 2.6 ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวไทย (Wasusathien et al., 2020)

ตารางที่ 2.8 ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของธัญพืช

Commodities	MC (%w.b)	Temp (°C)	Frequency (MHz)									Reference
			Dielectric Constant			Dielectric Loss Factor			Penetration Depth (cm)			
			13.5	27.1	40.6	13.5	27.1	40.6	13.5	27.1	40.6	
			6	2	8	6	2	8	6	2	8	
Milled Rice	14.13	25	9.1	8.8	8.2	0.6	0.5	0.4	1761	1036	40	(Yang et al., 2018)
Black Eyed Pea	12.7	20	-	3.6	3.5	-	0.3	0.3	-	1008	651	(Jiao et al., 2011)
		40	-	4.1	4	-	0.5	0.5	-	766	504	
		60	-	5.5	5.3	-	1	0.9	-	431	300	
Mung Bean	10.2	20	-	3.2	3.2	-	0.2	0.2	-	1075	707	(Jiao et al., 2011)
		40	-	3.5	3.5	-	0.3	0.3	-	1063	683	
		60	-	4.2	4.1	-	0.4	0.4	-	977	640	
Wheat Kernel	11	25	-	4.8	-	-	7.3	-	-	96	-	(Nelson et al., 2006)
		75	-	14.9	-	-	67.6	-	-	24	-	
		95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Corn Flour	10.3	20	3.9	3.7	-	4.2	0.1	-	2037	1083	-	(Ozturk et al., 2017)
		80	9.1	8.4	-	12.5	0.7	-	404	289	-	
Wheat Germ	11.3	25	3.7	3.6	3.5	0.4	0.4	0.3	1389	831	549	(Ling et al., 2018)
		55	6.3	5.8	5.6	0.7	0.6	0.6	1082	623	408	
		85	10.2	9.3	8.6	1.1	0.9	0.9	861	471	325	
Rice Bran	10.4	25	2.9	2.8	2.7	0.1	0.2	0.2	1658	1001	625	(Ling, Liu et al., 2018)
		70	5.5	4.9	4.7	2.7	1.9	1.5	1195	213	159	
		100	15.1	11.5	10.2	20.7	12.0	9.4	865	55	43	

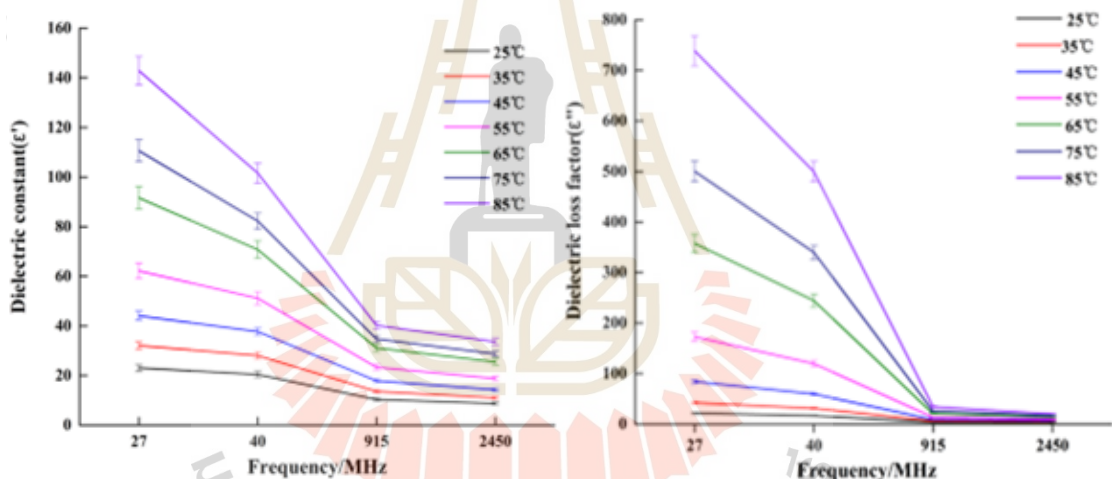
จากงานวิจัยของ Siying Qi และคณะ (Qi et al., 2021) ได้ศึกษา การทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของผงเชื้อราที่กินได้โดยใช้หลักการโพบายแบบปลายเปิดที่คลื่นความถี่วิทยุและไมโครเวฟ 1 - 3,000 MHz งานวิจัยพบว่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของผงเชื้อราที่กินได้เพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเปลี่ยนชัดเจนที่ความถี่ 27 MHz และ 40 MHz ดังรูปที่ 2.7



(ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

(ข) ค่าปัจจัยการสูญเสียไดอิเล็กตริก

(เชื้อรา *Pleurotus eryngii* ที่ความชื้นร้อยละ 12.0 ณ อุณหภูมิต่างกัน)



(ค) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

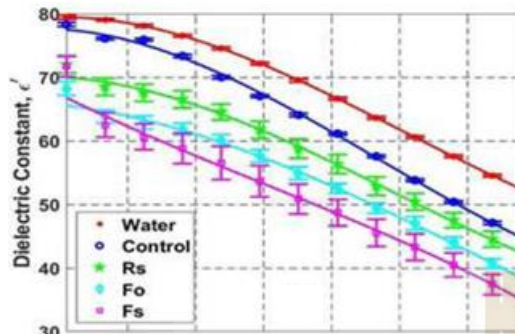
(ง) ค่าปัจจัยการสูญเสียไดอิเล็กตริก

(เชื้อรา *Pleurotus eryngii* ที่ความชื้นร้อยละ 30.9 ณ อุณหภูมิต่างกัน)

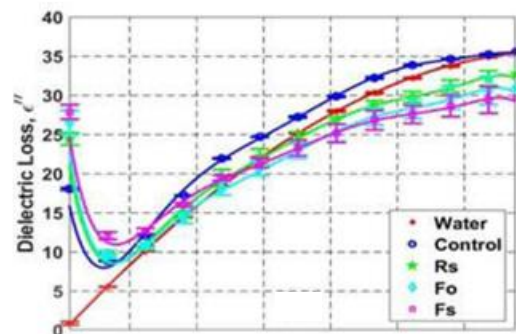
รูปที่ 2.7 ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของผงเชื้อราที่กินได้ (Qi et al., 2021)

ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของเชื้อราจากงานวิจัยของ Mousa I. Hussein และคณะ (Hussein et al., 2019) ได้ศึกษา การทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการวิเคราะห์ลักษณะคุณสมบัติไดอิเล็กตริกโดยใช้หลักการโพรบปลายเปิด (Open-ended coaxial probe) ด้วยการศึกษาที่ช่วงความถี่ไมโครเวฟ (200 MHz-3.6 GHz) โดยได้ทำการศึกษาเชื้อราและเชื้อราในพืชทั้งหมด 7 ชนิด คือ *Botrytis cinerea* (Bc), *Alternaria solani* (As), *Ceratocystis radicola* (Cr), *Rhizoctonia solani* (Rs), *Lasiodiplodia theobromae* (Lt), *Fusarium* sp. คือ *F. oxysporum* (Fo) และ

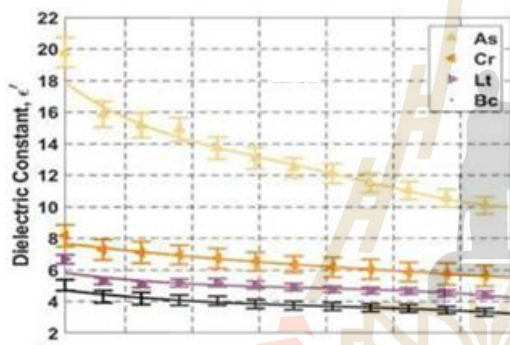
*F. solani* (Fs) ผลการวิจัยพบความแปรปรวนของพฤติกรรมค่าคงที่ไดอิเล็กตริกอย่างมีนัยสำคัญระหว่างเชื้อราทั้งเจ็ดตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.8



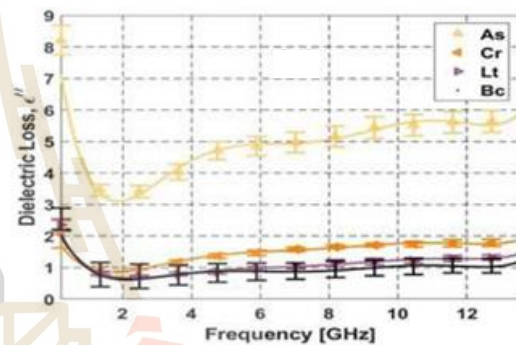
(ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของกลุ่มเชื้อราในดิน



(ข) ค่าปัจจัยการสูญเสียไดอิเล็กตริกของกลุ่มเชื้อราในดิน



(ค) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของกลุ่มเชื้อราในอากาศ



(ง) ค่าปัจจัยการสูญเสียไดอิเล็กตริกของกลุ่มเชื้อราในอากาศ

รูปที่ 2.8 ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของเชื้อราในพืช (Hussein et al., 2019)

## 2.3 การเสื่อมคุณภาพและมาตรฐานของข้าว

ข้าวเป็นส่วนหนึ่งของอาหารของผู้คนจำนวนมากทั่วโลกซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหลักในบางภูมิภาค การเสื่อมคุณภาพในอาหารเนื่องจากจุลินทรีย์ที่พบได้ทั่วไปในดิน น้ำ และอากาศ เช่น แบคทีเรีย ยีสต์ และรา เป็นต้น ในระหว่างช่วงโซ่การผลิตจนทำให้เกิดการเน่าเสีย ส่งผลให้สูญเสียความมั่นคงทางอาหารหากมีสภาพการเก็บรักษาที่ไม่เหมาะสมและเชื้อราที่แตกต่างกันระหว่างการเก็บเกี่ยวและหลังการเก็บเกี่ยวจนเกิดสารพิษจากเชื้อราในข้าว (GONÇALVES, et al. 2019) ซึ่งอาจนำไปสู่ความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้บริโภคจากการปนเปื้อนของสารพิษจากเชื้อราในข้าว สารพิษดังกล่าว คือ อะฟลาทอกซิน จัดเป็นสารก่อมะเร็งกลุ่มที่ 1 โดย International agency for research on cancer (IARC 2002) ซึ่งก่อให้เกิดมะเร็งตับร้อยละ 5-28 ทั่วโลก

ข้าวที่เก็บเกี่ยวนั้นมีแนวโน้มที่จะปนเปื้อนเชื้อราเพราะประเทศไทยในช่วงการเก็บเกี่ยวมีฝนตกหนักและเกิดขึ้นบ่อยครั้ง พบว่าระดับปริมาณของอะฟลาทอกซินในข้าว คือ 0.05-1.66 ng/g

(Phan, De Saeger, Eeckhout and Jacxsens 2023) จากเชื้อราที่ปนเปื้อนในข้าว เช่น *Aspergillus Fusarium* และ *Penicillium* เป็นต้น โดยเฉพาะเชื้อรา *Aspergillus* เป็นเชื้อราที่มีปนเปื้อนในข้าวมากที่สุดในข้าวไทย รวมถึงพบว่าข้าวกล้องมีการปนเปื้อนมากที่สุดร้อยละ 32.68 และเชื้อราบนเมล็ดข้าว *A. flavus* มากที่สุดที่ร้อยละ 68.50 (กิตติพงษ์ et al., 2022) ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญมากที่จะเอาชนะปัญหาเชื้อราในข้าว

### 2.3.1 การเสื่อมคุณภาพในอาหาร

การเสื่อมคุณภาพของอาหารเป็นปัญหาสำคัญที่ก่อให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจ ในอุตสาหกรรมอาหาร และการแพร่กระจายของเชื้อโรคที่เกิดจากอาหาร การเน่าเสียของจุลินทรีย์เกิดจากการเจริญของจุลินทรีย์ในอาหารที่ปนเปื้อนหรือโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะต่างๆ เช่น กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และการก่อกำของก๊าซ เป็นต้น จุลินทรีย์ในอาหารที่พบได้ในดิน น้ำ และอากาศ หากอาหารมีสภาพที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์จะทำให้อาหารเน่าเสียเร็วขึ้น (ธารารัตน์ ซื่อตอพล, 2558) ดังนั้นจึงมีปัจจัยหลายประการที่เกี่ยวข้องกับการเจริญของจุลินทรีย์และส่งผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ เช่น

1. สารอาหาร (Nutrients) คือ ส่วนประกอบของอาหาร และประเภทของสารอาหารที่มีมากในอาหารประเภทนั้น โดยการเสื่อมคุณภาพในอาหารประเภทโปรตีนมักจะเน่าเสียจากแบคทีเรีย อาหารประเภทแป้งมักจะเน่าเสียจากเชื้อราที่ย่อยแป้ง เช่น *Aspergillus* และ *Rhizopus* เป็นต้น และวิตามินต่างๆ ยังช่วยให้จุลินทรีย์เจริญได้ดีอีกด้วย

2. สารที่ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ (Inhibitors) คือ สารป้องกันเชื้อรา และแบคทีเรีย เป็นสารเคมีที่เติมลงในอาหารเพื่อช่วยป้องกันการเน่าเสียต่างๆ ที่เกิดจากการเจริญของจุลินทรีย์

3. ค่ากิจกรรมของน้ำ หรือ ปริมาณน้ำอิสระที่อยู่ในอาหารนั้นจะอยู่ในรูปอิสระ (Free water) และจับกับสารอื่น ๆ โดยน้ำที่แทรกซึมเข้าไปในช่องว่างและอาจมีการเกาะติดกับส่วนประกอบของอาหาร สามารถเป็นตัวทำละลายปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ และจุลินทรีย์สามารถนำมาใช้ในการดำรงชีวิตได้ ส่วนใหญ่จุลินทรีย์จะเจริญในอาหารที่มีปริมาณน้ำอิสระสูง และมีความเข้มข้นของเกลือและน้ำตาลต่ำ เช่น อาหารเลี้ยงเชื้อ เป็นต้น

4. ค่าความเป็นกรดต่าง (Potential of hydrogen ion: pH) เป็นตัวเลขที่แสดงการวัดความเป็นกรดหรือต่างในสารที่ละลายน้ำได้ ค่า pH แสดงในระดับลอการิทึมของตัวเลข 1-14 โดยมี 7 เป็นจุดที่เป็นกลาง และค่าที่ต่ำกว่า 7 แสดงถึงความเป็นกรด ตัวเลขที่สูงกว่า 7 บ่งบอกถึงความเบสต่างของอาหาร

5. ปริมาณออกซิเจนในอาหาร จุลินทรีย์ต้องการออกซิเจนในปริมาณที่แตกต่างกันในการเจริญ เช่น จุลินทรีย์ที่เจริญได้เฉพาะในที่ที่มีออกซิเจน (Obligate aerobes) จุลินทรีย์ที่เจริญได้เฉพาะในที่ที่ไม่มีออกซิเจน (Obligate anaerobes) จุลินทรีย์ที่เจริญได้ทั้งที่มีออกซิเจนและไม่มี



ออกซิเจน (Facultative anaerobes) และจุลินทรีย์ที่เจริญได้ดีในสภาวะที่มีออกซิเจนเล็กน้อย (Microaerophiles) เป็นต้น

6. ปริมาณก๊าซออกซิเจน (Oxygen) ในอาหาร เชื้อจุลินทรีย์มีความต้องการปริมาณออกซิเจนในการเจริญแตกต่างกัน ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีต่างๆ มาใช้มากขึ้นเพื่อช่วยรักษาคุณภาพและคุณค่าทางอาหารของผลิตภัณฑ์อาหารนั้นๆ ให้นานที่สุดและเป็นการเพิ่มอายุการเก็บของอาหารในภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์ โดยใส่ออกซิเจนที่ไวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) เช่น อาหารที่มีไขมัน น้ำผลไม้ เป็นต้น

7. สภาพรีดิวซ์-ออกซิไดซ์ (Oxidation reduction potential: Eh) ความสามารถในการออกซิเดชันที่เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอน และการลดลงที่เกิดปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอนของสารพร้อมรับอิเล็กตรอนเป็นตัวออกซิไดซ์ได้ดีในขณะที่สารที่พร้อมให้อิเล็กตรอนเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดีในเนื้ออาหาร การเจริญของจุลินทรีย์ต้องมีปฏิกิริยาออกซิเดชันลดลงอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้พลังงานไปใช้ในเซลล์ของจุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจน เช่น เชื้อรา เป็นต้น และแบคทีเรียที่อาศัยออกซิเจน เช่น *Bacillus* เป็นต้น

8. อุณหภูมิในอาหาร สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มตามอุณหภูมิ เช่น ระดับที่ 1 คือ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการปรุงอาหารประเภทต่าง ๆ ที่สูงกว่า 60 °C ระดับที่ 2 คือ โซนอันตราย เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่จุลินทรีย์สามารถเจริญได้อย่างรวดเร็ว คือ 4 °C ถึง 60 °C ระดับ 3 คือ การเก็บรักษาโดยใช้ความเย็นในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 4 °C และระดับ 4: การเก็บรักษาอาหารแบบแช่แข็งในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า -18 °C

### 2.3.2 การควบคุมจุลินทรีย์ในอาหาร

การควบคุมจุลินทรีย์ในทางจุลชีววิทยา แบ่งได้ 2 แบบ คือ เพื่อทำลายจุลินทรีย์หรือ ทำให้ตาย และเพื่อยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ ซึ่งความหมายของคำว่า ตาย หมายถึง การที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเพิ่มจำนวนได้อีก ส่วนการควบคุมการเจริญของจุลินทรีย์นั้น เซลล์อาจจะตายหรือไม่ตายก็ได้ ซึ่งการควบคุมการเจริญของจุลินทรีย์เพื่อไม่ให้อาหารเสื่อมคุณภาพ หรือ เน่าเสียในอุตสาหกรรมอาหารนั้นทำได้ 4 รูปแบบ คือ การควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ การแยกเชื้อจุลินทรีย์ออก การทำลายเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และการยับยั้งในการเจริญของจุลินทรีย์ที่มีชีวิต การควบคุมการเจริญของจุลินทรีย์ขึ้นอยู่กับ การทราบรูปแบบการควบคุมและการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะที่ส่งผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ เช่น การบำบัดด้วยความร้อน การใช้สารเคมี การฉายรังสี การควบคุมปริมาณน้ำในอาหาร การใช้อุณหภูมิต่ำ และการปรับความเข้มข้นของก๊าซในบรรยากาศ เป็นต้น (ธารารัตน์ ซื่อตอฟ, 2558)

การควบคุมจุลินทรีย์ในอาหารถือเป็นสิ่งสำคัญ เช่น เพื่อป้องกันจุลินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อร่างกายไม่ให้เจริญในอาหารจนถึงมือผู้บริโภค รวมถึงการรักษาอาหารให้คงความน่ารับประทาน ยังคงความกรอบ ไม่ให้มึ้กลิ้นเหม็นหืน สีไม่เปลี่ยน รสชาติยังคงเดิม และไม่มีรสชาติที่ไม่

พึงประสงค์ เป็นต้น การควบคุมเชื้อจุลินทรีย์ในอุตสาหกรรมอาหารทำได้หลายวิธีเพื่อรักษาคุณภาพและความปลอดภัยของอาหาร ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะส่วนที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย ดังนี้

### 1. ควบคุมค่ากิจกรรมของน้ำ

การยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์โดยการควบคุมค่ากิจกรรมของน้ำ หรือ ปริมาณน้ำอิสระ เนื่องจากการดำรงชีวิตและการเจริญของจุลินทรีย์ต้องอาศัยน้ำ ถ้าค่ากิจกรรมของน้ำไม่เหมาะสมก็จะหยุดการเจริญ หลักการนี้อาจทำให้อาหารยังมีจุลินทรีย์หลงเหลืออยู่ เช่น การทำให้แห้ง การรมควัน และการเติมเกลือหรือเติมน้ำตาล เป็นต้น

### 2. ความร้อนต่อจุลินทรีย์

จุลินทรีย์ประกอบด้วยสารชีวโมเลกุล ทั้งประเภทโปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต ทั้งที่ผิวนอกของเซลล์และภายในเซลล์ สารชีวโมเลกุล ถ้าค่าความร้อนต่อจุลินทรีย์ไม่เหมาะสมก็จะเกิดการฆ่า หรือ ยับยั้งเกิดขึ้น โดยความร้อนจะไปมีผลทำให้เอนไซม์และโปรตีนภายในเซลล์เสียสภาพในความร้อนเพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ ใช้ได้ 2 รูปแบบ คือ

1) ความร้อนชื้น (Wet heat) คือ ความร้อนที่เกี่ยวข้องกับน้ำ สามารถทำลายจุลินทรีย์โดยทำให้โปรตีนจับตัวกันเป็นก้อน วิธีที่ใช้อาจเป็นน้ำร้อนหรือไอน้ำร้อน เช่น การต้มและใช้ไอน้ำภายใต้ความกดดัน เป็นต้น

2) ความร้อนแห้ง (Dry heat) คือ ความร้อนที่ไม่มีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง สามารถทำลายเซลล์หรือเซลล์เสียสภาพของจุลินทรีย์จากการสูญเสียน้ำภายในเซลล์ เช่น การใช้เตาเผา และการอบแห้ง และการอบลมร้อน เป็นต้น

### 3. สารเคมีที่มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์

การใช้สารเคมีเพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่ผิววัสดุโดยทำการใช้สารเคมีเพื่อลดจำนวนจุลินทรีย์บนพื้นผิวของวัสดุในสภาพแวดล้อมที่กำหนดจนอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ หรือ ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์หรือสารกันบูด สารกันบูดสามารถยืดอายุการเก็บรักษาอาหารได้เพื่อยับยั้งหรือฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียของอาหารหรือจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค โดยผลของสารเคมีต่อเชื้อจุลินทรีย์ทำให้เซลล์ของจุลินทรีย์ซึ่งประกอบด้วยชีวโมเลกุลนั้นมีการตอบสนองต่อสารเคมีเฉพาะ เช่นเดียวกับความร้อน แต่กลไกการทำลายเซลล์จะเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างโมเลกุลของสารเคมีกับชีวโมเลกุล เช่นโครงสร้างของผนังเซลล์เสียสภาพจนส่งผลต่อโครงสร้าง การทำงานของเอนไซม์ สารพันธุกรรม และโครงสร้างอื่น ๆ ภายในเซลล์ เป็นต้น ซึ่งส่งผลให้หยุดการเจริญและทำให้เซลล์ตายได้

### 4. รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า

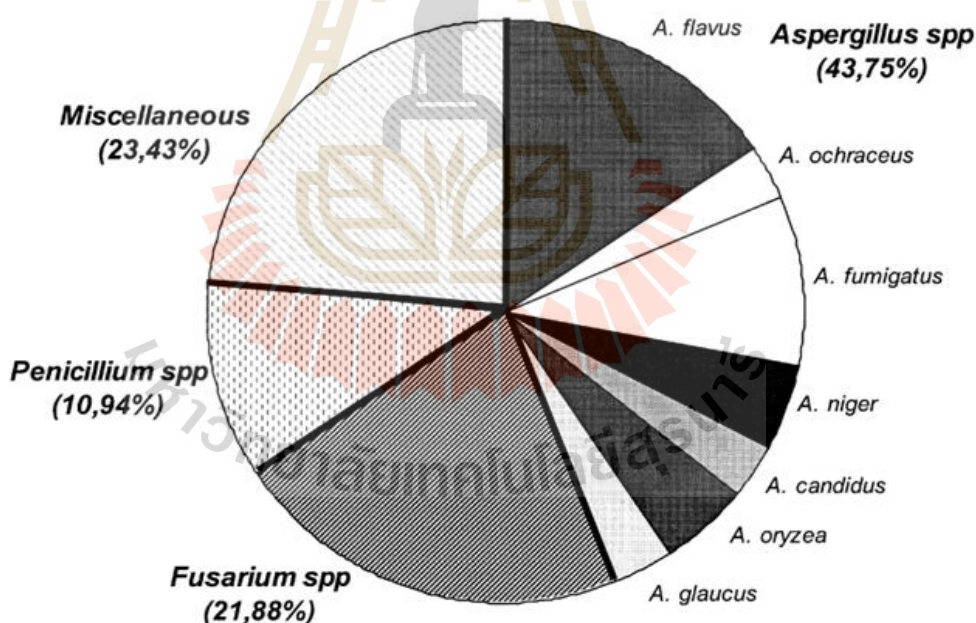
การใช้รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (Radiation) จะใช้ช่วงคลื่นที่สามารถทำลาย หรือ ควบคุมการเจริญของจุลินทรีย์ด้วยช่วงคลื่นที่มีความยาวคลื่นต่างๆ กันหลายช่วง ในช่วงคลื่นวิทยุจะมี

พลังงานน้อยสุดจนถึงรังสีแกมมาที่มีพลังงานมากที่สุด เช่น รังสีอัลตราไวโอเล็ต รังสีแกมมา และรังสีไมโครเวฟ เป็นต้น ยกตัวอย่างการนำไปประยุกต์ใช้งานควบคุมจุลินทรีย์ในอาหาร เช่น

1) การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตเพื่อควบคุมการเจริญของจุลินทรีย์ เนื่องจากรังสีไวโอเล็ตสามารถทะลุผ่านวัตถุได้น้อยมาก จึงมักใช้ฆ่าเชื้อในอากาศในพื้นที่การผลิตที่ต้องการความสะอาดสูง และบนพื้นผิวของอุปกรณ์ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ห้องบรรจุอาหาร ในสภาพแวดล้อมการผลิตอาหาร และพื้นผิวบรรจุภัณฑ์อาหาร เป็นต้น การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตในการฆ่าเชื้อจะต้องคำนึงถึงส่วนประกอบของอาหารที่อาจถูกออกซิไดซ์ด้วยรังสี

2) การใช้รังสีแกมมาเพื่อควบคุมการเจริญของจุลินทรีย์ จึงมักใช้เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา ชะลอการสุก และทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่สร้างสปอร์ในอาหาร เป็นต้น ข้อควรระวังในการฉายรังสีอาหารต้องมีปริมาณรังสีที่ในระดับที่ปลอดภัยต่อผู้บริโภค

3) การใช้รังสีไมโครเวฟเพื่อควบคุมการเจริญของจุลินทรีย์ ทั้งแบบธรรมดาและแบบสุญญากาศ ในปัจจุบันมีการใช้ไมโครเวฟในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ในอุตสาหกรรมการอบแห้ง นมพาสเจอร์ไรส์ และน้ำผลไม้ เป็นต้น



รูปที่ 2.9 สกุลเชื้อราและเชื้อรา *Aspergillus* ที่พบในตัวอย่างข้าว (Trung, T. S. et al., 2017)

### 2.3.3 สารพิษของเชื้อราและเชื้อราในข้าว

การปนเปื้อนสารพิษของเชื้อราและเชื้อราในข้าวทั้งก่อน และหลังการเก็บเกี่ยว รวมถึงระหว่างกระบวนการเก็บรักษาเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์ จนทำให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจที่ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงทางอาหารของประเทศ ส่งผลกระทบต่อ

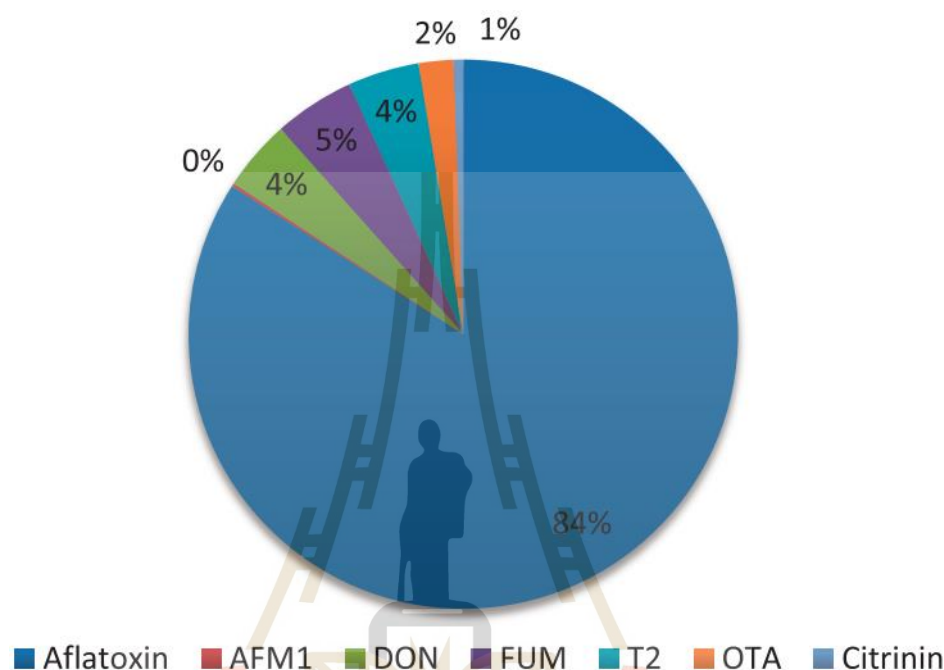
เศรษฐกิจการผลิตอาหารและส่งผลต่อสุขภาพของมนุษย์ในระดับโลก (GONÇALVES et al., 2019) ในบรรดาเชื้อราที่เป็นปัญหาหลักและปนเปื้อนในข้าว คือ เชื้อราสายพันธุ์ *Aspergillus* ซึ่งพบมากที่สุดที่ในข้าว รองลงมา คือ *Fusarium* และ *Penicillium* ดังรูปที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 เชื้อราและสารพิษจากเชื้อราในข้าว

	ชนิดเชื้อรา	สารพิษจากเชื้อรา
<i>Aspergillus spp</i>	<i>A. flavus</i>	อะฟลาทอกซิน บีหนึ่ง บีสอง
	<i>A. fumigatus</i>	
	<i>A. candidus</i>	
	<i>A. ochraceus</i>	โอคราทอกซิน เอ
	<i>A. versicolor</i>	อริกมาโตซิสทิน
<i>Fusarium spp</i>	<i>F. armeniacum</i>	เอสที-สอง ที-สอง
	<i>F. fujikuroi</i>	ฟูโมนิซิน บี1 กรดจิบเบอเรลลิก มอนิลิฟอร์มิน
	<i>F. graminearum</i>	ดีออกซินิวาลีนอล
	<i>F. proliferatum</i>	ฟูมอโนซิน บีหนึ่ง
	<i>F. subglutinans</i>	บิวเวอริซิน มอนิลิฟอร์มินมอนิลิฟอร์มิน
<i>Penicillium spp.</i>	<i>P. aurantiogriseum</i>	กรดเพนิซิลิน
	<i>P. citreonigrum</i>	ซีเทรีโอวิริดิน
	<i>P. citrinum</i>	ซีทรินิน
	<i>P. commune</i>	กรดไซโคลพิอะโซนิก
	<i>P. islandicum</i>	ซีเทรีโอวิริดิน ลูทีโอสไกริน
	<i>P. rugulosum</i>	รูกูโลซิน
	<i>P. verrucosum</i>	ซีทรินิน โอคราทอกซิน เอ

หมายเหตุ จาก “Green and sustainable technologies for the decontamination of fungi and mycotoxins in rice: A review,” โดย P., Agyei, D., and Ali, A., 2022, 278-295.

อย่างไรก็ตาม สารพิษจากเชื้อราได้เกิดจากบางสายพันธุ์ของเชื้อราไม่ใช่ทุกสายพันธุ์ เช่น *A. oryzae* และ *Penicillium* sp. เป็นต้น ถูกนำไปใช้ในการผลิตอาหารต่างๆ ส่วนสายพันธุ์เชื้อราอื่นๆ ที่อยู่ในข้าวมีอยู่หลายชนิดที่สามารถผลิตสารพิษได้ (Chandravarnan et al., 2022) เช่น เชื้อรา *A. flavus* ที่สามารถผลิตสารพิษอะฟลาทอกซิน เป็นต้น ดังตารางที่ 2.9 และรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 สารพิษในอาหารของมนุษย์จากเชื้อรา (Tulayakul, P., and Sugita-Konishi, Y., 2017)

สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กต้องอาศัยกล้องจุลทรรศน์ (Microscope) เพราะไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น จุลินทรีย์ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามเชื้อราสามารถถูกสังเกตได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับจุลินทรีย์ชนิดอื่นจากการสังเกตเส้นใยของรา การปนเปื้อนในข้าวจากเชื้อราอาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านต่างๆ เช่น การเปลี่ยนสี เปลี่ยนกลิ่น เปลี่ยนรสชาติ และเปลี่ยนรสสัมผัส ตลอดจนการเสื่อมคุณภาพของเมล็ดข้าว เป็นต้น โดยที่เชื้อรา 3 สกุล คือ *Aspergillus* *Fusarium* และ *Penicillium* เป็นเชื้อราที่มีผลต่อการเสื่อมคุณภาพในข้าวและการผลิตสารพิษจากเชื้อรา เช่น

#### 1. *Aspergillus*

เป็นเชื้อราที่มีผนังกันเส้นใย และแต่ละสายพันธุ์มีลักษณะโครงสร้างของสปอร์ที่แตกต่างกัน โดย *A. flavus*, *A. candidus* และ *A. fumigatus* ถือเป็นสายพันธุ์ที่สำคัญที่สุดในการปนเปื้อนข้าว โดยที่สายพันธุ์เชื้อรา *A. flavus* เป็นปัญหาหลักเพราะสามารถทนต่ออุณหภูมิที่หลากหลายและความชื้นสัมพัทธ์ในระดับต่ำ รวมถึงสามารถติดเชื้อในเมล็ดข้าวได้เมื่อความชื้นสูงกว่าร้อยละ 12

## 2. *Penicillium*

เป็นราที่มีลักษณะโครงสร้างของสปอร์ที่มีสีน้ำเงิน หรือ สีเขียวอมเทา โดยที่เชื้อราชนิดนี้มีสายพันธุ์หลักอยู่ 3 สายพันธุ์ คือ *P. citrinum*, *P. islandicum* และ *P. verrucosum* เชื้อรา *P. verrucosum* สามารถเจริญระหว่าง 0-31 °C มีการเจริญดีที่สุดเมื่ออยู่ที่ 20 °C และเจริญได้อย่างรวดเร็วเมื่อปริมาณความชื้นอยู่ระหว่างร้อยละ 27-30

## 3. *Fusarium*

เป็นราที่มีลักษณะโครงสร้างของสปอร์สีออกชมพู เทา เชื้อราชนิดนี้มักอยู่ในกลุ่มธัญพืชและพืชหัว มีสายพันธุ์หลัก คือ *F. proliferatum*, *F. oxysporum*, *F. graminearum* และ *F. semitectum* โดยที่สายพันธุ์เชื้อรา *F. proliferatum* เป็นสายพันธุ์ที่พบได้บ่อยเนื่องจากสภาพแวดล้อมในระหว่างการเพาะปลูกที่มีความชื้นสูงและสภาวะอุณหภูมิที่เอื้อต่อการเจริญ

การปนเปื้อนในข้าวของสารพิษจากเชื้อราที่ผลิตโดยเชื้อรารวมชนิดการติดเชื้อในอาหาร อาจส่งผลทำให้เกิดพิษเฉียบพลันและเรื้อรังทั้งในสัตว์และมนุษย์จนถึงแก่ชีวิตได้ โดยที่สารพิษจากเชื้อรา 3 ชนิด คือ อะฟลาทอกซิน โอคราทอกซิน และฟูโมนิซาร์พิษ สารพิษจากเชื้อราเหล่านี้สามารถสะสมในร่างกายมนุษย์และสัตว์ผ่านห่วงโซ่อาหาร ดังนี้

### 1. อะฟลาทอกซิน

อะฟลาทอกซิน (Aflatoxins: AF) ที่ถูกผลิตโดยเชื้อรา *Aspergillus* ส่วนใหญ่เป็น *A. flavus* *A. parasiticus* และไม่ค่อยมี *A. nomius* และ *A. tamari* โดยที่สารพิษอะฟลาทอกซิน บี1 บี2 จี1 และ จี2 แยกประเภทสารพิษจากข้าว บรรดาอะฟลาทอกซินที่ได้กล่าวมาประเภท บี1 เป็นสารก่อมะเร็งต่อมนุษย์มากที่สุด

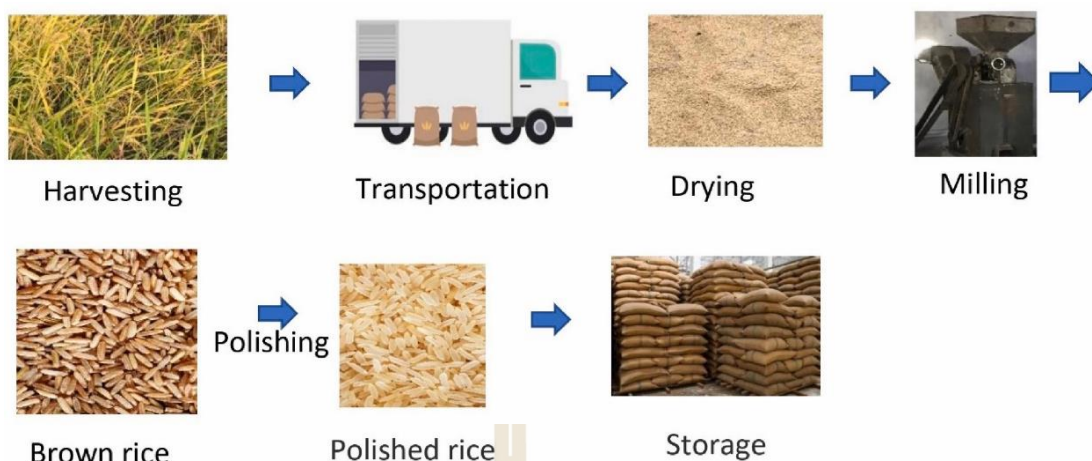
### 2. โอคราทอกซิน

โอคราทอกซิน (Ochratoxin: OTA) ที่ถูกผลิตโดยเชื้อรา *A. ochraceus* และ *P. verrucosum* แบ่งออกเป็น A, B และ C โดยที่ชนิด A ส่วนมากจะพบในเมล็ดธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวบาร์เลย์ ข้าวโอ๊ต และถั่ว เป็นต้น โดยที่ชนิด A เป็นชนิดที่พบและมีความเป็นพิษมากที่สุด

### 3. ฟูโมนิซิน

ฟูโมนิซิน (Fumonisin: FB) ที่ถูกผลิตโดยเชื้อรา *F. graminearum* และ *F. proliferatum* ซึ่งสามารถผลิตสารพิษภายใต้การเก็บรักษาที่ไม่ดีทั้งก่อนและหลังจากการเก็บเกี่ยวเชื้อราโดยที่ส่วนมากพบ เช่น ข้าวโพด ข้าว และข้าวฟ่าง เป็นต้น

ข้าวในระหว่างเจริญเติบโตในทุ่งนาตลอดจนถึงการเก็บเกี่ยวซึ่งเชื้อราสามารถปนเปื้อนข้าวในทุกกระบวนการได้ เหตุมาจากการจัดการและการเก็บรักษาต่างๆ ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เอื้ออำนวยและการเจริญของเชื้อรา เช่น การเพาะปลูกที่ไม่เหมาะสม การเก็บเกี่ยวที่ไม่ใส่ใจ การจัดการระหว่างการเก็บเกี่ยว และการบรรจุและสภาพการเก็บรักษา เป็นต้น ตลอดจนการขนส่งที่ไม่เหมาะสมเป็นปัจจัยที่สามารถนำไปสู่การปนเปื้อนเชื้อราในข้าว ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนที่ใช้ในการแปรรูปข้าว (Chandravarnan, P. et al., 2022)

#### 2.3.4 มาตรฐานสินค้าข้าวหอมมะลิไทย

ข้าวเป็นแหล่งอาหารและพลังงานที่มีความหลากหลายของสายพันธุ์ แต่ที่โดดเด่นจนเป็นเอกลักษณ์ของคนไทยและที่ยอมรับในระดับสากล คือ ข้าวหอมมะลิไทย (Thai hom mali rice) มีกลิ่นหอมตามธรรมชาติคล้ายใบเตยขึ้นอยู่กับว่าเป็นข้าวใหม่หรือข้าวเก่า เมื่อหุงเป็นข้าวสวยแล้วเมล็ดข้าวจะอ่อนนุ่ม (กรมการค้าต่างประเทศ, 2559) เพื่อให้ได้ข้าวที่มีคุณภาพ และสามารถทำให้ผู้บริโภคมั่นใจได้ว่าข้าวหอมมะลิไทยที่ได้รับมานั้นมีคุณภาพที่ดี ดังนั้นในการพิจารณาคุณภาพข้าวจากการใช้เกณฑ์หรือมาตรฐานจึงเป็นปัจจัยสำคัญ (กองวิจัยและพัฒนาข้าว, 2559) ทั้งเพื่อการบริโภคและการค้า ยกตัวอย่างเกณฑ์หรือมาตรฐานที่ใช้ในการพิจารณาคุณภาพข้าว 2 ประเภท ดังนี้

##### 1) คุณภาพทางกายภาพ

คุณภาพทางกายภาพ คือ คุณภาพภายนอกที่สังเกตได้ของเมล็ดข้าวที่สามารถตรวจสอบได้ ชั่งได้ และวัดได้ โดยคุณภาพของเมล็ดพืชทางกายภาพยังใช้ในการค้าข้าวเพื่อจำแนกเกรดข้าว ข้อดี คือ สามารถเห็นได้ชัดและสามารถตรวจสอบได้ทันที เช่น สีข้าวเปลือก ขนาดของเมล็ด สีข้าวกล้อง รูปร่างเมล็ด ข้าวท้องไข่ และความใสของเมล็ด เป็นต้น

##### 2) คุณภาพทางเคมี

คุณภาพทางเคมี คือ คุณสมบัติและส่วนประกอบต่าง ๆ ของเมล็ดที่มีผลต่อคุณภาพคุณภาพของข้าวที่ผู้บริโภคใช้ในการตัดสินใจเลือกซื้อที่สามารถคาดคะเนคุณภาพของข้าวโดยตามชนิดและสายพันธุ์ของข้าว เช่น ปริมาณอมิโลส ปริมาณโปรตีน ความคงตัวของแป้งสุก ระยะเวลาในการหุงต้ม การยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก และกลิ่นหอมของข้าว เป็นต้น

ดังนั้นการควบคุมคุณภาพของข้าวในกระบวนการผลิตจึงสำคัญ นอกจากนี้ยังเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการส่งเสริมการค้าข้าวหอมมะลิไทยไปยังตลาดนานาชาติ โดยการปฏิบัติตาม

มาตรฐานช่วยเพิ่มความไว้วางใจให้แก่ผู้นำเข้าและผู้บริโภคในต่างประเทศ สำหรับผู้นำเข้า มาตรฐานช่วยให้สามารถมั่นใจได้ว่าข้าวหอมมะลิไทยที่เข้าสู่ตลาดนั้นมีคุณภาพที่ดี ในขณะเดียวกันผู้บริโภคในประเทศและต่างประเทศสามารถเลือกซื้อข้าวหอมมะลิไทยที่มีมาตรฐาน และได้รับการรับรองที่ชัดเจน จากประกาศกระทรวงพาณิชย์ เรื่อง กำหนดให้ข้าวหอมมะลิไทยเป็นสินค้ามาตรฐานและมาตรฐานสินค้าข้าวหอมมะลิไทย ฉบับที่ 3 พ.ศ. 2559 (กรมการค้าต่างประเทศ, 2559) และประกาศกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ได้กำหนดมาตรฐานสินค้าเกษตร เรื่อง กำหนดมาตรฐานสินค้าเกษตร : ข้าวหอมมะลิไทย มาตรฐานเลขที่ มกษ 4004-2555 กลุ่มสินค้าข้าวหอมไทย (กรมการค้า, 2564) ในหัวข้อการประเมินคุณภาพข้าวในการซื้อขายนี้จะอ้างอิงรายละเอียดในประกาศในข้างต้น โดยจะกล่าวถึงเฉพาะส่วนที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย ดังนี้

### 1) ความชื้น

ข้าวที่เก็บในเวลาที่เหมาะสมและลดความชื้นอย่างเหมาะสม ข้าวที่มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 14.0 จะมีราคาแพงกว่าข้าวที่มีความชื้นสูง เพราะสามารถสีข้าวแห้งที่มีความชื้นเหมาะสมได้โดยไม่ต้องลดความชื้นลงอีก อย่างไรก็ตาม หากข้าวที่มีความชื้นมากเกินไปต้องทำการจัดการลดความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักข้าวหลังการลดความชื้น

### 2) ลักษณะทางกายภาพของข้าว

ข้าวที่แตกและขัดสีจะได้รับจะถูกประเมินในด้านต่างๆ เช่น สีข้าวกล้อง ท้องไข ความใสขุ่นของเมล็ด เป็นต้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อราคาข้าว รวมทั้งในข้าวขาวและข้าวกล้อง การประเมินสิ่งเจือปนอื่นๆ ในข้าว เช่น ข้าวแดง ข้าวเหลือง ปลายข้าว หรือ ข้าวปนเปื้อน เป็นต้น เพื่อการคัดคุณภาพข้าวตามมาตรฐานสินค้า

### 3) คุณภาพการสี

ข้าวที่แปรสภาพจากข้าวเปลือกเป็นข้าวสารจะได้รับการขัดสี จะถูกการคัดแยกตามมาตรฐาน เช่น เป็นข้าวเต็มเมล็ดที่ไม่มีส่วนใดหัก มีความยาวเฉลี่ยของข้าวต้องไม่ต่ำกว่า 7.0 มิลลิเมตร มีความยาวเฉลี่ยต่อความกว้างเฉลี่ยของข้าวเต็มเมล็ดที่ไม่มีส่วนใดหักต้องไม่ต่ำกว่า 3.2:1 เป็นต้น ข้าวที่จะไม่ผ่านการประเมินผลจะถูกคัดแยกออกไป เช่น ข้าวหัก และปลายข้าว เป็นต้น

ข้าวที่มีคุณภาพและมาตรฐานจะได้รับการบรรจุหีบห่อในภาชนะบรรจุที่เก็บรักษาได้เป็นอย่างดี และไม่มีกรปลอมปนข้าวชนิดอื่นๆ รวมถึงข้าวจะต้องปราศจากแมลงและไรที่มีชีวิต เพื่อให้ข้าวหอมมะลิไทยสามารถตอบสนองตามความต้องการของตลาดและเป็นที่ยอมรับ

## 2.4 ทฤษฎีการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

การถ่ายเทความร้อนเป็นวิธีการถ่ายเทความร้อนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งเมื่อมีอุณหภูมิต่างกันเกิดขึ้น โดยแบ่งออกเป็น 3 วิธี คือ การนำ การพา และการแผ่รังสี ระบบการให้ความร้อนร่วมกับการให้ความชื้นของสนามไฟฟ้าเป็นการให้ความร้อนรูปแบบพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่

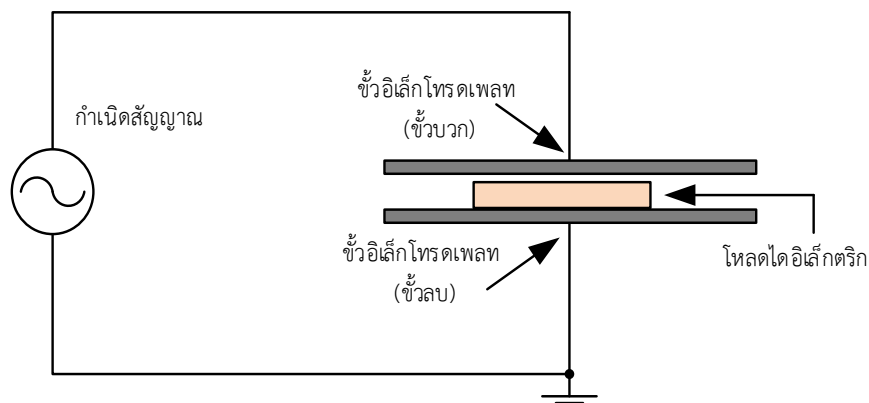


อาศัยคลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency) หรือ ไมโครเวฟ (Microwave) ในการนำคลื่นไปใช้งานจะถูกกำหนดภายในช่วงความถี่เฉพาะที่จัดสรรเพื่อการนำไปใช้งานด้านอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ (Industrial sciences medicine : ISM) ใช้แทนการพาความร้อนแบบดั้งเดิมซึ่งในอุตสาหกรรมอาหารมีการนำคลื่นความถี่ไปประยุกต์ใช้ เช่น ความถี่ 40.68 MHz สำหรับคลื่นความถี่วิทยุ และความถี่ 2,450 MHz สำหรับคลื่นไมโครเวฟ (Yang, Li, Pan, Luo, Xing, Wang, et al. 2020) โดยนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ เช่น การอบแห้ง และการละลาย เป็นต้น (Jones, 2011)

สำหรับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก (Dielectric heating : DH) เป็นวิธีการในการประยุกต์ใช้งานพลังงานความร้อนในรูปแบบของคลื่นสนามไฟฟ้า โดยการทำให้วัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric Material) ที่ถูกคลื่นสนามไฟฟ้าทำปฏิกิริยากับโพลดทำให้ผลกระทบจากพลังงานในรูปแบบของไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นความร้อนที่มีประสิทธิภาพของการทำความร้อนสูงเนื่องจากส่งพลังงานโดยตรงไปยังโพลด นิยมนำไปประยุกต์ใช้ในเครื่องทำความร้อนแบบ RFH ในช่วงความถี่ระหว่างประมาณ 1-100 MHz และการให้ความร้อนแบบ MWH ในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 500 MHz (Nelson, S.O., 2015) ประกอบไปด้วย หลักการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้า พื้นฐานและกลไกการให้ความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อการให้ความร้อน การส่งผ่านความร้อน การให้ความร้อนด้วยคลื่นสนามไฟฟ้า การให้ความร้อนแบบแผ่นเพลท โดยจะกล่าวเฉพาะส่วนที่เป็นประโยชน์หรือกล่าวอ้างถึงในการดำเนินงานวิจัยนี้เพื่อให้เนื้อหา มีความกระชับชัดเจน

#### 2.4.1 หลักการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้า

กระจายคลื่นสนามไฟฟ้านั้นสำคัญมากในระบบให้ความร้อนแบบ DH เนื่องจากเป็นตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าที่กระจายพลังงานสนามไฟฟ้าเข้าสู่โพลด ทำให้จึงต้องมีการพิจารณาจะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนกำเนิดสัญญาณเป็นตัวกำหนดความถี่ที่ใช้งานและระดับกำลังงานที่ใช้สำหรับป้อนกำลังงานให้กับแผ่นเพลท แผ่นเพลทสำหรับกระจายพลังงานสนามไฟฟ้าทั้งหมด 2 ขั้ว คือ ขั้วบวก (Electrode) และขั้วลบ (Ground electrode) โดยที่ขั้วบวกจะได้รับพลังงานเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าซึ่งจะถูกส่งผ่านไปยังโพลดและเข้าสู่ขั้วลบเป็นกราวด์ โพลดไดอิเล็กตริกเป็นองค์ประกอบสุดท้าย จากชนิดของโพลดที่หลากหลายมักถูกอ้างอิงในการออกแบบระบบที่ใช้เนื่องจากลักษณะการทำงานที่แตกต่างกันในแต่ละแถบความถี่ที่ใช้งาน และต้องมีลักษณะเฉพาะตอบสนองต่อคลื่นที่ใช้งานเพื่อแปลงพลังงานสนามเป็นความร้อนโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างระบบ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555).

#### 2.4.2 พื้นฐานและกลไกการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

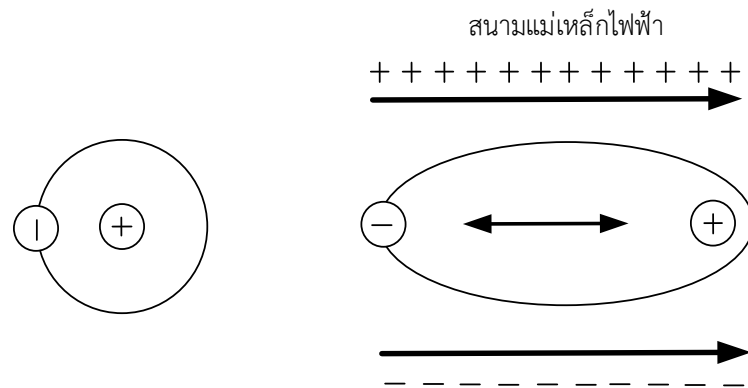
จากหลักการของกลไกการให้ความร้อนดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้ ดังนี้

##### 1) พื้นฐานของการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

พื้นฐานและหลักการทำงานจะอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่วิทยุหรือย่านความถี่ไมโครเวฟเมื่อปล่อยคลื่นส่งผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุที่เป็นโพลไดอิเล็กตริกระหว่างขั้วแผ่นเพรตอิเล็กโทรด โดยวัสดุที่สามารถใช้การให้ความร้อนด้วยหลักการนี้ได้นั้นจะต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้ว (Dipolar molecules) หรืออาจประกอบไปด้วยน้ำ (Tang, Ikediala, Wang, Hansen and Cavalieri, 2000) เพื่อทำการเปลี่ยนพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนภายในวัสดุ ตามหลักการข้างต้นมันแตกต่างจากการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมซึ่งอาศัยการพาความร้อนของอากาศร้อนหรือการถ่ายเทไปยังพื้นผิวของวัสดุก่อนแล้วจึงนำความร้อนจากพื้นผิวด้านนอกแทรกซึมเข้าไปยังเนื้อวัสดุ โดยวัสดุที่ขั้วบวกและขั้วลบเรียงตัวกันในทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เข้ามาส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานของโมเลกุลและการกระจายความร้อนไปทั่ววัสดุไดอิเล็กตริก จากหลักการดังกล่าวจึงทำให้การให้ความร้อนที่เป็นวิธีการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง ดังรูปที่ 2.13

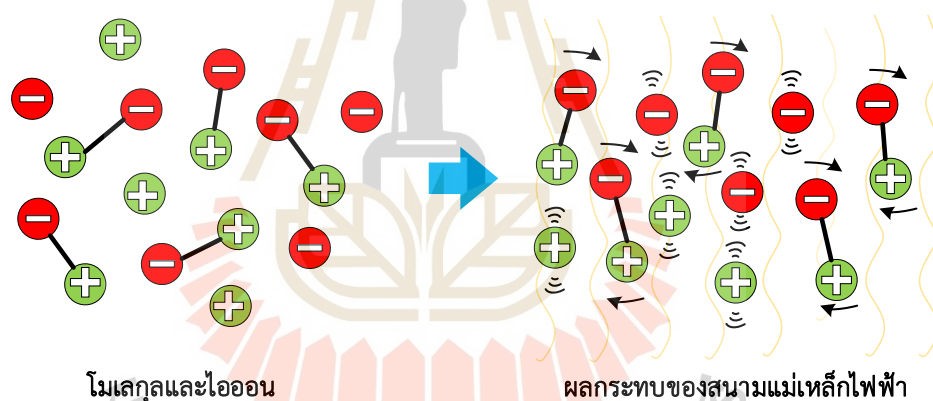
##### 2) กลไกการเกิดความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริก

ลักษณะทางไฟฟ้าของวัสดุสามารถอธิบายได้ด้วยคุณสมบัติไดอิเล็กตริกซึ่งมีอิทธิพลต่อการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจนทำให้เกิดเสียดสีกันจนเกิดความร้อนขึ้นตามความถี่ได้ด้วยการป้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พลังงานของสนามไฟฟ้าสลับนี้จะทำให้เกิดโพลาไรซ์ โมเลกุลที่มีขั้วไฟฟ้าจะพยายามเรียงตัวของขั้วบวกและขั้วลบตามทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านเข้าไบนั่นคือทำให้เกิดการเสียดสีกันของโมเลกุลจนเป็นความร้อนกระจายทั่วภายในเนื้อวัสดุหรือเป็นการถ่ายโอนพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปภายในเนื้อวัสดุ



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของวัสดุกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Profpeterelia, 2016)

เมื่อพิจารณาการป้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะต้องมีค่าไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) เพื่อบอกถึงสภาพขั้วของพันธะหรือโมเลกุลของโมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การเสียดสีโมเลกุลและไอออนตามทิศทางของคลื่นสนามไฟฟ้า (Profpeterelia, 2016)

### 2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

จากปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบระบบให้ความร้อนนั้นสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

#### 1) ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) เป็นคุณสมบัติของวัสดุใด ๆ ที่มีความสัมพันธ์เกี่ยวกับคลื่นความถี่ วัสดุที่มีค่า  $\epsilon'$  ที่สูงจัดเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric material) โดยจะส่วนสำคัญในการออกแบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง ลักษณะทางไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กตริกทั้งหลายนั้นมีอิทธิพลต่อการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีความสามารถในการนำไฟฟ้าและความสามารถในการจัดเก็บและการแพร่กระจายของพลังงานไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

ภายในวัสดุ ดังนั้นในการออกแบบระบบการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกจำเป็นต้องมีการศึกษาค่าคุณสมบัติพื้นฐานการใช้งานช่วงความถี่ที่เหมาะสมที่สุดขึ้นอยู่กับค่าคุณสมบัตินั้น ๆ ในย่านความถี่ของการใช้งาน (Wang, et al. 2003; Wang, Wig et al. 2003) สามารถอธิบายได้ด้วยค่าสภาพยอมเชิงซ้อน (Complex permittivity,  $\epsilon^*$ ) ดังสมการที่ (2.1)

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

เมื่อ  $\epsilon'$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก  
 $\epsilon''$  คือ ค่าปัจจัยสูญเสียไดอิเล็กตริก

ค่า  $\epsilon'$  และ  $\epsilon''$  เป็นค่าปริมาณที่น่าสนใจในทางปฏิบัติ ซึ่งทั้งสองค่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ความชื้นของอาหาร สำหรับการพิจารณาจากส่วนที่เป็นจินตภาพ (j) ทำให้ทราบความสามารถของวัสดุในการดูดซับหรือกระจายพลังงานในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนจากการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก สามารถอธิบายได้ด้วยค่าการสูญเสียแทนเจนต์ (Loss tangent) ดังสมการที่ (2.2)

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

## 2) การเกิดความร้อนของวัสดุ

เมื่อคลื่นผ่านวัสดุที่มีขั้วไฟฟ้านั้นไหลจะพยายามจัดแนวกับทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เข้ามาทำให้เกิดการเสียดสีกันของโมเลกุล จนส่งผลทำให้มีการหมุนของไดโพล และทำให้เกิดมีการเสียดทานจากการของไดโพล ที่จะทำให้เกิดความร้อนในหนึ่งหน่วยโดยปริมาตร  $V_a$  นั้นจะแปรผันขึ้นอยู่กับค่าของกำลังงานของคลื่นสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายในหนึ่งหน่วยปริมาตร ดังสมการที่ (2.3)

$$\frac{p}{V_a} = \sigma_d E_{loc}^2 \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\sigma_d$  คือ ค่าความนำของไดอิเล็กตริก (Dielectric conductivity)  
 ค่า  $\sigma_d$  หมายถึง ภาวะที่วัสดุยอมให้ประจุไฟฟ้าไหลผ่าน หรือถ่ายโอนประจุไฟฟ้าได้  
 ดังสมการที่ (2.4) และ (2.5)

$$\sigma_d = \omega \varepsilon' \varepsilon_0 \tan \delta \quad (2.4)$$

$$\frac{P}{V_a} = \omega \varepsilon' \varepsilon_0 \tan \delta E_{loc}^2 \quad (2.5)$$

ในกรณีของตัวกลางที่แตกต่างจากทิศทางเคลื่อนที่ของแพร่กระจายของคลื่นที่ระบุมาจากภายนอก สามารถได้กำลังงานของคลื่นภายในตัวกลางในทิศทาง Z ดังสมการที่ (2.6)

$$P_{(z)} = P_0 e^{-2\alpha z} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $P_0$  คือ กำลังงานคลื่นที่ตกกระทบในตัวกลาง  
 $\alpha$  คือ ค่าคงที่ของการลดทอนกำลังงานคลื่น

วัสดุไดอิเล็กตริกจะสร้างความร้อนโดยการแพร่กระจายความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริกนั้น เกิดขึ้นจากพลังงานที่กระจายต่อหน่วยปริมาตรในวัสดุที่ไม่เป็นแม่เหล็กที่อยู่ในรูปตัวกลางใด ๆ ที่เป็นเนื้อเดียวกันภายใต้สนามไฟฟ้าได้รับการพิจารณาว่าเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการประเมินความเสี่ยงที่เกิดจากการสัมผัสกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า อย่างไรก็ตามพลังงานกระจายไปในปริมาณหนึ่ง ๆ สามารถอธิบายได้ด้วยรูปแบบสมการของการส่งถ่ายความร้อน ค่ากำลังที่ดูดซับต่อหนึ่งหน่วยมวล (Power absorbed per unit mass, P) สามารถหาได้จากการแทนค่าจากสมการที่ (2.2) ลงไปในสมการที่ (2.5) จะได้สมการที่ (2.7) และเมื่อพิจารณาในรูปแบบตัวกลางของวัสดุไดอิเล็กตริกใด ๆ จะได้สมการที่ (2.8)

$$\frac{P}{V_a} = \omega \varepsilon' \varepsilon_0 (\varepsilon'' / \varepsilon') E_{loc}^2 \quad (2.7)$$

$$P = 5.563 \times 10^{-11} f \varepsilon'' E_{loc}^2 \quad (2.8)$$

โดยที่  $E_{loc}$  คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)  
 $f$  คือ ความถี่ (Hz)  
 $\varepsilon''$  คือ ค่าปัจจัยสูญเสียไดอิเล็กตริก

การหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในตัวกลางจะทำได้โดยการวัดค่าหรือการประมาณโดยวิธีทางแบบจำลองเชิงเลข (Numerical modeling) โดยที่ การวัดค่ากำลังงานที่แพร่กระจายอยู่ในตัวกลางและในการคำนวณหาอุณหภูมิสูงขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของค่ากำลังที่ดูดซับต่อหนึ่งหน่วยมวล ดังสมการที่ (2.9)

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{P}{\rho C_p} \quad (2.9)$$

โดยที่  $C_p$  คือ ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) (j/kg. °C)  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\Delta t$  คือ ระยะเวลา (s)  
 $\Delta T$  คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในวัสดุ (°C)

#### 2.4.4 การให้ความร้อนด้วยคลื่นสนามไฟฟ้า

สำหรับการให้ความร้อนด้วยคลื่นสนามไฟฟ้านั้นเมื่อวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีค่า  $\epsilon''$  ค่อนข้างสูงอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าความถี่วิทยุและความถี่ไมโครเวฟที่มีความเข้มเพียงพอทำให้เกิดความร้อนภายในตัวกลางที่เป็นไดอิเล็กตริก วัสดุจะดูดซับพลังงานจากสนามไฟฟ้าโดยการแปลงพลังงานสนามไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนในวัสดุจะเป็นการให้ความร้อนความถี่สูงซึ่งจะขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้งาน ต่อมาตัวกลางที่มีการสูญเสียสามารถเกิดความร้อนโดยตรงจากการนำไฟฟ้าภายใต้การกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าภายนอกและทำให้เกิดเส้นทางการนำไฟฟ้าขึ้นที่เกิดควบคู่กันทำให้การพิจารณากำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงเป็นตัวแปรสำคัญ

การคำนวณหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นภายในตัวกลางมีการสูญเสียชนิดเดียวและมีการส่งผ่านความร้อนภายในตัวกลางที่มีการสูญเสียจากการพาความร้อนที่บริเวณผิวของตัวกลางที่มีการสูญเสียและไม่คิดการระเหยของน้ำกลายเป็นไอโดยการนำความร้อน (Heat conduction) โดยที่มวลไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อแหล่งกำเนิดอื่นที่ทำให้เกิดการโพลาไรซ์มาจากประจุไฟฟ้าที่บริเวณผิวของตัวกลางที่แตกต่างกับประจุไฟฟ้าในอากาศหรือการโพลาไรซ์ (Maxwell-wagner polarization) จากสมการพื้นฐานของแมกเวลล์ โครงสร้างดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงแบบลักษณะเป็นสลับกลับไปมาของการโพลาไรซ์ การเปลี่ยนแปลงสลับทิศทางสลับขั้วไปมาอย่างรวดเร็วโดยใช้คลื่นความถี่สูงนั้น ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวจะเกิดการแพร่กระจายพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อจะทำให้เกิดความร้อนแก่วัตถุใด ๆ นั้น สามารถอธิบายได้ด้วยค่าการส่งผ่านความร้อน (Nelson, 1996) ดังสมการที่ (2.10)

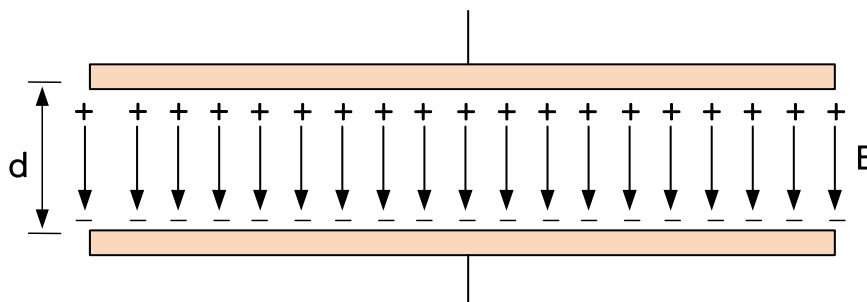
$$\rho C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = 5.563 \times 10^{-11} f \epsilon'' E_{loc}^2 \quad (2.10)$$

โดยที่ $E_{loc}$	คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)
$f$	คือ ความถี่ (Hz)
$\varepsilon''$	คือ ค่าปัจจัยสูญเสียไดอิเล็กตริก
$C_p$	คือ ความร้อนจำเพาะ (J/kg. °C)
$\rho$	คือ ความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m <sup>3</sup> )
$\Delta t$	คือ ระยะเวลา (s)
$\Delta T$	คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในวัสดุ (°C)

#### 2.4.5 การให้ความเข้มสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลท

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกเป็นผลโดยส่งผ่านคลื่นสนามไฟฟ้าเข้าไปในวัสดุ ไดอิเล็กตริกเป็นพลังงานความร้อนจะเป็นการให้ความร้อนความถี่สูง จากเกิดการเสียดสีกันของ โมเลกุลเกิดเป็นความร้อนกระจายทั่วภายในเนื้อวัสดุไดอิเล็กตริกทำให้เกิดการแปลงผันพลังงานจาก คลื่นสนามไฟฟ้าเป็นความร้อนได้ มีความสามารถในการถ่ายเทด้านพลังงานที่มีความสามารถสูงและ ลดระยะเวลาการให้ความร้อน ดังนั้นการศึกษาทฤษฎีการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลทจึง เป็นหัวข้อที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ผล

การให้ความเข้มสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลทนั้นสนามไฟฟ้าที่กระจายพลังงานผ่าน วัสดุตัวกลางที่เป็นวัสดุไดอิเล็กตริกภายใต้ความเข้มสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างแผ่นเพลทเป็นส่วนที่ สำคัญในการพิจารณาตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงแบบแผ่นเพลท ลักษณะของตัวปล่อย ความเข้มสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลทจะมีคุณสมบัติเป็นเหมือนตัวเก็บประจุ รูปแบบสนามไฟฟ้า ระหว่างแผ่นเพลทแบบคู่ขนานเกิดจากแผ่นเพลทที่มีประจุบวกและประจุลบในแต่ละแผ่น เมื่อมีประจุ วางในสนามไฟฟ้าจะเกิดแรงกระทำกับประจุโดยที่ทิศทางของสนามไฟฟ้าจะมีทิศทางพุ่งออกจากแผ่น ประจุบวกไปเข้าหาแผ่นประจุลบทำให้ระหว่างแผ่นเพลทจะมีความต่างศักย์เกิดขึ้น ขั้วอิเล็กโทรด แพลตที่ขั้วบวกจะมีศักย์ไฟฟ้าสูงแต่ขั้วอิเล็กโทรดแพลตที่ขั้วลบจะมีศักย์ไฟฟ้าต่ำ ดังนั้นการออกแบบ ระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงจำเป็นต้องเข้าใจหลักการทำงานและโครงสร้างของ อุปกรณ์ที่นำมาออกแบบ ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 โครงสร้างตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลท (Physicskruadd, 2012)

จากรูปที่ 2.15 โครงสร้างตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลทสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.11)

$$C = \frac{k\epsilon_0 A}{d} \quad (2.11)$$

โดยที่  $k$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นเพลท ( $m^2$ )  
 $\epsilon_0$  คือ  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m  
 $d$  คือ ระยะห่างระหว่างเพลท (m)

จากการพิจารณาลักษณะของการกระจายสนามไฟฟ้าของตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลทจะมีทิศทางของสนามไฟฟ้าจากแรงดันที่ขั้วอิเล็กโทรดเพลทประจุบวกไปยังขั้วอิเล็กโทรดเพลทประจุลบ โดยความเข้มสนามไฟฟ้า ( $E$ ) ระหว่างตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลทที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (2.12)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{V}{d} \quad (2.12)$$

โดยที่  $\epsilon$  คือ ค่าความซึมซาบได้ของแผ่นเพลท  
 $V$  คือ แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างแผ่นเพลท  
 $d$  คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลท  
 $\sigma$  คือ ค่าความนำของวัสดุไดอิเล็กตริก



## 2.5 สรุป

การศึกษาผลกระทบจากความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าวนั้น จำเป็นต้องพิจารณาในหลายปัจจัย ซึ่งประกอบไปด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ค่า  $\epsilon'$  และ  $\epsilon''$  ของโพลิต ความถี่ที่ใช้งานบนระบบของตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงแบบแผ่นเพลท เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าว การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก และการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่เพียงพอสำหรับฆ่าหรือยับยั้งเชื้อราเพื่อให้ได้รูปแบบการใช้งาน ทั้งนี้เพื่อนำมาวิเคราะห์ ออกแบบและทดสอบให้เหมาะสม รวมถึงการนำไปพัฒนาระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด



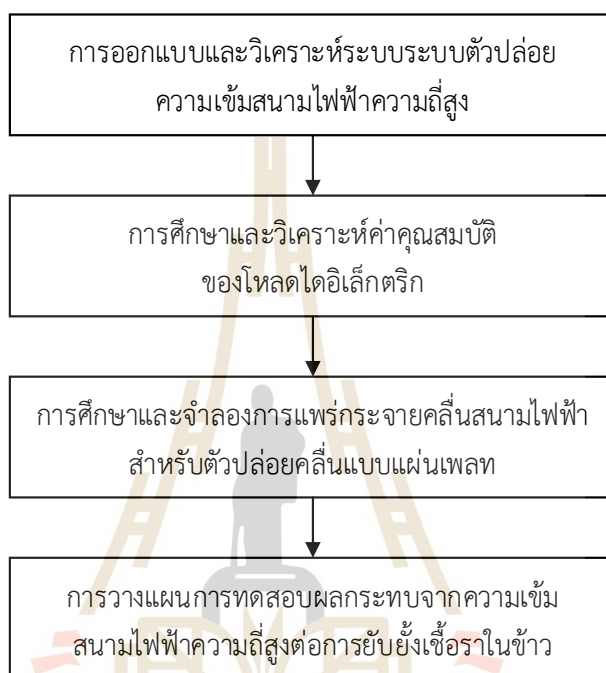
## บทที่ 3

### การวิเคราะห์และออกแบบระบบตัวปล่อยความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูง

#### 3.1 กล่าวนำ

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงเนื้อหาการวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริก ลักษณะของคลื่นสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายในโพลดสำหรับตัวปล่อยคลื่นแบบแผ่นเพลท รวมถึงระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าความถี่สูงที่มีผลต่อความร้อนของโพลด ในงานวิจัยนี้ได้เลือกข่าวเพื่อทำการศึกษาวิจัยเนื่องจากในระหว่างการเก็บเกี่ยวและการเก็บรักษาขั้วนั้นมีการปนเปื้อนเชื้อราทำให้คุณภาพของขั้วลดลงและยังเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค รวมถึงการวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติของโพลดด้วยค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ต่างกันด้วยการตรวจสอบความสามารถในการดูดซับคลื่นของวัสดุในแต่ละชนิดจะแตกต่างกันไปขึ้นกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องออกมาเป็นค่าตัวเลขคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยที่เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้วัดจะประกอบด้วยหัววัดโคแอกเซียลแบบปลายเปิดบนเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลพร้อมซอฟต์แวร์ นำผลที่วัดได้นำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าความแตกต่างเพื่อไปเลือกความถี่ในระบบที่เหมาะสมที่สุดก่อนนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบจริง และออกแบบระบบการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกที่สามารถปรับระดับความชื้นสนามไฟฟ้าเพื่อที่จะออกแบบพัฒนาระบบการยับยั้งเชื้อราในขั้วด้วยความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูงให้เหมาะสมกับการใช้งานกับโพลดเป้าหมาย ก่อนทำการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าสำหรับตัวปล่อยคลื่นแบบแผ่นเพลทที่เป็นส่วนประกอบในการกำเนิดสนามไฟฟ้าความถี่สูง ทั้งนี้เพื่อทำการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าความถี่สูงที่แผ่กระจายเข้าไปในโพลดที่เป็นขั้วจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปสำหรับการวิเคราะห์ระบบที่มีการป้อนสัญญาณแบบ 1 พอร์ต เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มการครอบคลุมในการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมภายในขั้วที่ใช้ในการทดสอบ โดยมีการบันทึกผลที่ได้ในระหว่างการทดสอบจากระบบการให้ความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูง นอกจากนี้ยังรวมถึงการวางแผนเพื่อศึกษาผลกระทบจากความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูงในขั้วด้วยระบบจริง โดยทำการศึกษาผลกระทบจากระบบยับยั้งเชื้อราในขั้วด้วยความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูงด้วยการวางแผนการทดลอง ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ปัจจัยที่สนใจศึกษา ปัจจัยแรก คือ ความร้อนที่เกิดขึ้นในโพลดขั้วที่ปนเปื้อนเชื้อราที่ระดับต่าง ๆ และปัจจัยที่สอง คือ ความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูงที่ระดับต่าง ๆ โดยปัจจัยทั้งสองเกิดขึ้นจากระบบจริงจากการให้ความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูงก่อนนำขั้วที่ผ่านระบบมาทำการทดสอบตรวจสอบผลการยับยั้งความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูงก่อนนำขั้วที่ผ่านระบบมาทำการทดสอบตรวจสอบผลการยับยั้งเชื้อราบนขั้ว โดยขั้นตอนและกระบวนการทดลองต่าง ๆ ภายใต้ตู้ปลอดเชื้อเพื่อป้องกันไม่ให้มีสิ่งปนเปื้อนภายนอก

(Cross contamination) ก่อนทดสอบบนอาหารเลี้ยงเชื้อและฆ่าเชื้อจุลินทรีย์อุปกรณ์ก่อนนำมาใช้งานเพื่อนำตัวอย่างบนอาหารเลี้ยงเชื้อมาตรวจสอบผลการยับยั้งเชื้อราในตัวอย่างข้าวด้วยกล้องจุลทรรศน์ แนวทางที่ได้จะศึกษาผลกระทบจากความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูงกับความร้อนที่เกิดขึ้นไหลต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าวที่ใช้งานบนระบบจริง โดยรูปแบบและกระบวนการของขั้นตอนการวิเคราะห์และออกแบบระบบตัวปล่อยความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์และออกแบบระบบตัวปล่อยความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูง

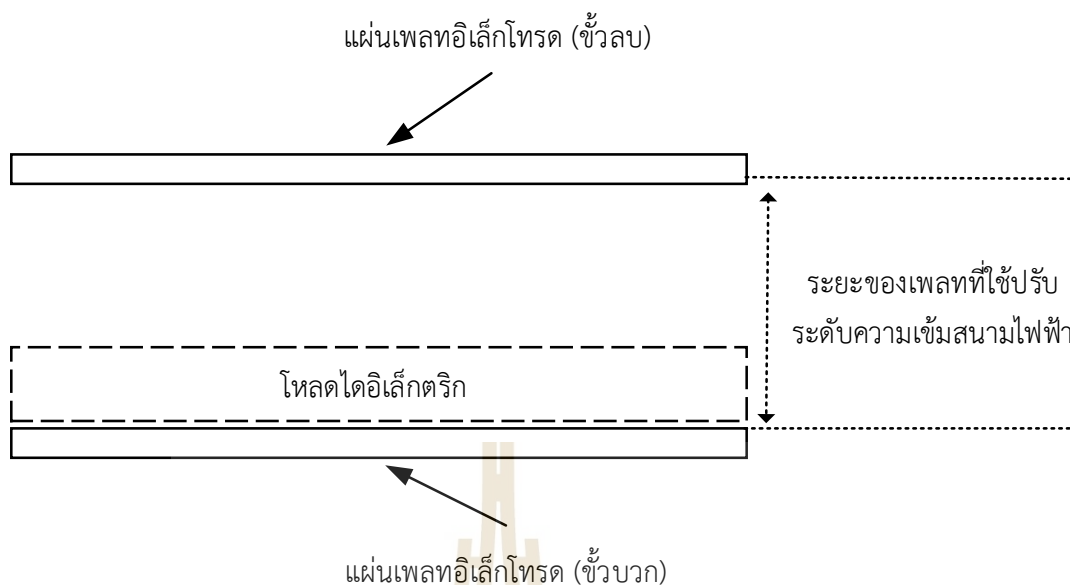
### 3.2 แนวคิดการออกแบบระบบตัวปล่อยความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบยับยั้งเชื้อราในธัญพืชด้วยความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูง โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุ เครื่องกำเนิดสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลทถูกนำมาใช้ในการศึกษาส่วนใหญ่ เนื่องจากเป็นเครื่องกำเนิดสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานกับโพลของวัสดุในภาชนะรูปทรงต่าง ๆ จึงเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน หนึ่งในปัญหาในระหว่างการเก็บเกี่ยวและการเก็บรักษาข้าว คือ มีปัญหาจากการปนเปื้อนเชื้อราในข้าว โดยเฉพาะในข้าวกล้องมีการพบมากที่สุด เนื่องจากความหลากหลายของเชื้อราในข้าว โดยกลุ่มเชื้อราที่พบมากที่สุดจากการทบทวนวรรณกรรมในบทที่ 2 คือ กลุ่มเชื้อรา *Aspergillus* spp. และสามารถผลิตสารพิษที่เกิดจากเชื้อราเหล่านั้นได้หากข้าวได้ถูกเก็บรักษาอย่างไม่เหมาะสม จากปัญหาดังกล่าวเมื่อข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาไปเข้าสู่กระบวนการต่าง ๆ ในการผลิตข้าวสารตลอดจนถึงการจัดจำหน่าย หากทำการยับยั้งเชื้อราในระดับอุตสาหกรรมข้าวก่อนการจัดจำหน่ายจะทำให้ผู้บริโภคเกิดความมั่นใจได้ว่าได้ข้าวที่มีคุณภาพและ

ปลอดภัย เทคโนโลยีด้านเชื้อาระดับอุตสาหกรรมข้าวแบบดั้งเดิมใช้การให้ความร้อนแบบไถ่ระดับ ความร้อนด้วยการถ่ายเทความร้อนซึ่งต้องใช้พลังงานจำนวนมากในการสร้างความร้อน เนื่องจากข้าว มีความชื้นต่ำทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและความสม่ำเสมอจึงต่ำ รวมถึงทำให้คุณภาพของข้าวที่ ได้รับหลังการให้ความร้อนจึงมักเสื่อมลงจากปัญหาของการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัย ได้นำเสนอการศึกษาผลกระทบจากความเข้มข้นไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าวด้วย เทคนิคการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ซึ่งเทคโนโลยีการทำความร้อนด้วยสนามไฟฟ้าความถี่สูงนั้น ถูกเลือกใช้งานเพื่อถ่ายเทพลังงานในรูปของสนามไฟฟ้าผ่านวัสดุเป้าหมายโดยที่ไม่จำเป็นต้องทำไถ่ ระดับอุณหภูมิเช่นเดียวกับการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมเนื่องจากโพลีเมอร์ร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึง อุณหภูมิสูงในช่วงเวลาสั้น ๆ

ในการศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบคุณลักษณะไดอิเล็กตริกของตัวอย่างข้าวและเชื้อราเพื่อ นำไปประยุกต์ใช้งานความถี่สูงในระบบจริงที่สามารถปรับระดับความเข้มข้นสนามไฟฟ้าให้เหมาะสมกับ การใช้งานกับโพลีเมอร์เป้าหมาย ต่อมาวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าสำหรับตัวปล่อยคลื่น แบบแผ่นเพลทซึ่งเป็นส่วนประกอบในการกำเนิดสนามไฟฟ้าความถี่สูงจากการคำนวณ และจำลอง ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้ากับโพลีเมอร์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปเพื่อพิจารณา การแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในโพลีเมอร์ และก่อนนำไปออกแบบการทดสอบผลกระทบ จากความเข้มข้นสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าวหลังจากผ่านระบบการให้ความเข้มข้น สนามไฟฟ้าความถี่สูง

ในส่วนการทดสอบระบบการให้ความเข้มข้นสนามไฟฟ้าความถี่สูงกับโพลีเมอร์จะใช้แหล่งจ่ายกำลัง งานและสัญญาณความถี่สูงจากภายนอกเพื่อให้กำลังงานกับแผ่นเพลทสำหรับการสร้างสนามไฟฟ้าใน การส่งผ่านความเข้มข้นสนามไฟฟ้าไปยังโพลีเมอร์ทำการทดสอบในระบบจริงและนำตัวอย่างมาตรวจสอบ ผลกระทบการยับยั้งเชื้อราในข้าว แนวคิดในการออกแบบระบบยับยั้งเชื้อราในข้าวด้วยความเข้มข้น สนามไฟฟ้าความถี่สูงนั้น แสดงได้ดังรูปที่ 3.2 มีส่วนประกอบหลักเป็นขั้วอิเล็กโทรดแบบแผ่นเพลท คือ ขั้วอิเล็กโทรดแบบแผ่นเพลทที่มีการป้อนกำลังงานที่ขั้วบวกลงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าเพื่อทำการ ส่งผ่านกำลังงานไปยังโพลีเมอร์ไปสู่ขั้วอิเล็กโทรดแบบแผ่นเพลทที่กราวด์ที่ขั้วลบ และโพลีเมอร์ที่เป็นข้าวโดย ทำการบรรจุในงานเพาะเชื้อแบบแก้วเพื่อที่จะป้องกันเชื้อราและสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ ไม่ให้โพลีเมอร์ เกิดการปนเปื้อน ก่อนทำการออกแบบและวิเคราะห์ลักษณะการแผ่กระจายคลื่นและความเข้มข้น สนามไฟฟ้าเข้าไปในโพลีเมอร์ในหัวข้อต่อไป

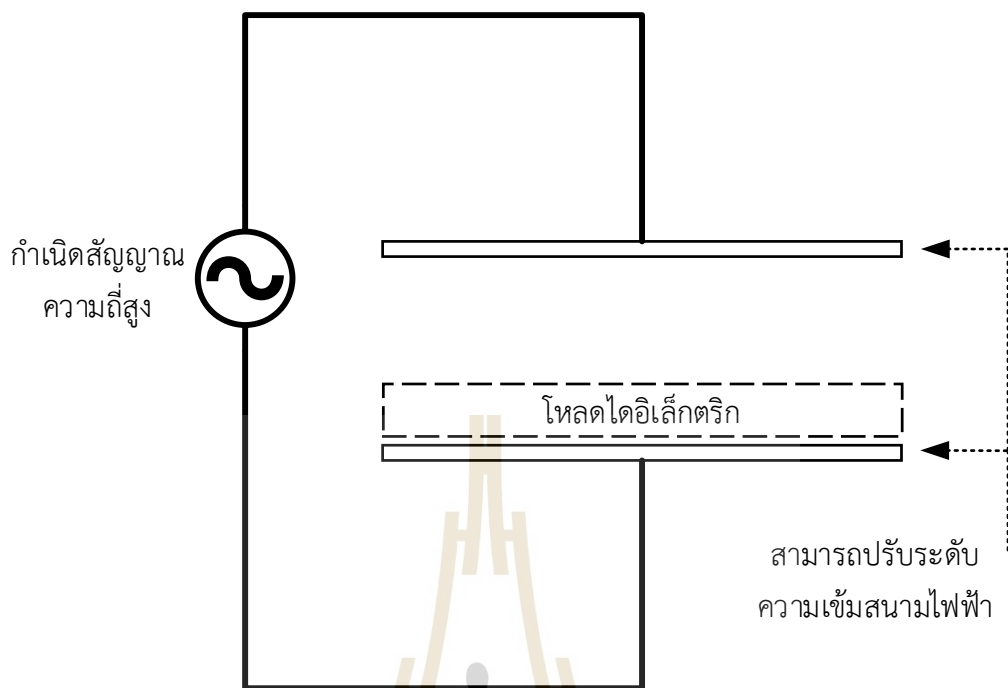


รูปที่ 3.2 รูปแบบแนวคิดในการยับยั้งเชื้อราในข้าวด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง

### 3.3 การออกแบบและวิเคราะห์ระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง

สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายแนวความคิดในการวิเคราะห์และออกแบบระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง การวิเคราะห์ผลของวัสดุที่มีผลต่อการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้า การวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติของโพลไดอิเล็กตริก การวิเคราะห์และจำลองการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าสำหรับตัวปล่อยคลื่นแบบแผ่นเพลท การวางแผนการทดสอบผลกระทบจากความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าว รวมถึงการวางแผนและการเตรียมการทดสอบการยับยั้งเชื้อราในข้าวหลังผ่านระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อตรวจสอบผลกระทบที่เกิดขึ้น ซึ่งในงานวิจัยได้มุ่งเน้นการศึกษาผลกระทบต่อเชื้อรา

สำหรับแนวความคิดของการออกแบบระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง ประกอบด้วยส่วนของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณความถี่สูง และตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลท โดยในส่วนวงจรถูกกำเนิดสัญญาณความถี่สูงบนระบบยับยั้งเชื้อราด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงจะวิเคราะห์ความแตกต่างของค่า  $\epsilon'$  และ  $\epsilon''$  ของโพลทในการเลือกใช้สัญญาณความถี่สูงที่เหมาะสมในการยับยั้งเชื้อราในข้าว การทำงานของระบบยับยั้งเชื้อราในข้าวด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงโดยตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลทนั้นสามารถเลือกกำหนดความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงที่ปรับค่าได้จากระยะของขั้วอิเล็กโทรดแบบแผ่นเพลท ประกอบไปด้วยขั้วอิเล็กโทรดแพลตตินั่มสำหรับปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าเพื่อส่งผ่านกำลังงานไปยังโพลทที่เป็นข้าว และเข้าสู่ขั้วอิเล็กโทรดแพลตตินั่มที่ขั้วลบ แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แนวคิดในการออกแบบระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง

### 3.3.1 การวิเคราะห์ผลของวัสดุที่มีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้า

จากการออกแบบดังรูปที่ 3.3 รูปแบบของระบบยังขึ้นอยู่กับความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง โดยเริ่มต้นจากวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่สูงที่สามารถกำหนดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 9 kV และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 1 A ทำการส่งต่อกำลังงานที่ได้ให้กับแผ่นเพลทเพื่อสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าไปยังโหลด คลื่นสนามไฟฟ้านั้นจะแผ่กระจายไปตามทิศทางของอิเล็กโทรดแบบเพลท โดยพลังงานถูกป้อนที่อิเล็กโทรดขั้วบวกและเข้าสู่อิเล็กโทรดของเพลทกรวดที่อิเล็กโทรดขั้วลบ โดยที่สนามไฟฟ้าภายในโหลดไดอิเล็กตริกจะถูกแปรผันจากพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อนที่ส่งผลต่อการกำเนิดคลื่นสนามไฟฟ้า คือ วัสดุสำหรับการออกแบบตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลท ในหัวข้อนี้จะมีการวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าเพื่อให้ทราบถึงค่าประสิทธิผลของการแพร่กระจายและนำค่าที่ได้มาออกแบบระบบจริง

สภาพนำทางไฟฟ้าของวัสดุแต่ละชนิดได้รับผลกระทบจากการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้า และวัสดุที่ใช้กำหนดคุณสมบัติการแพร่กระจายสนามไฟฟ้า การคัดเลือกมาจากรูปร่างของการพิจารณาวัสดุที่มีค่าตัวแปรของสภาพความนำไฟฟ้าและตัวแปรของค่าความซึมซับได้เป็นหลัก โดยที่งานวิจัยนี้ได้พิจารณาวัสดุ 4 ชนิด คือ ทองแดง (Cu) อลูมิเนียม (Al) วัสดุเหล็กโครงสร้าง (Fe) และเหล็กกล้าไร้สนิม (SST) ดังตารางที่ 3.1 โดยที่วัสดุแต่ละชนิดนั้นมีค่าสภาพนำทางไฟฟ้าและค่าความซึมซับได้ในการออกแบบของวัสดุแต่ละชนิด พบว่าวัสดุที่เป็นทองแดงสามารถแพร่กระจาย

ของสนามไฟฟ้ามากที่สุด โดยมีค่าสภาพนำทางไฟฟ้าเท่ากับ  $56.6 \times 10^6$  และเมื่อเทียบกับค่าสภาพนำทางไฟฟ้าของวัสดุอื่นๆ นั้น พบว่ามีค่าสภาพนำทางไฟฟ้าน้อยกว่าทองแดง แต่เนื่องจากทองแดงมีราคาสูง ด้วยเหตุนี้ทำให้ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้วัสดุที่เป็นอลูมิเนียมในการออกแบบตัวปล่อยสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลท ซึ่งวัสดุที่เป็นอลูมิเนียมมีค่าความซึมซาบได้เท่ากับทองแดงและมีน้ำหนักที่เบากว่าทองแดงมาก และมีค่าสภาพนำทางไฟฟ้าที่สามารถยอมรับได้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุต่าง ๆ ที่ทำการศึกษาในการออกแบบ

ชนิดของวัสดุ	ค่าสภาพนำทางไฟฟ้า	ค่าความซึมซาบได้
ทองแดง (Cu)	$56.6 \times 10^6$	1
อลูมิเนียม (Al)	$35.0 \times 10^6$	1
เหล็กโครงสร้าง (Fe)	$10.0 \times 10^6$	4000
เหล็กกล้าไร้สนิม (SST)	$1.45 \times 10^6$	200000

### 3.3.2 การวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติของโพลดีไดอิเล็กตริก

เนื่องจากวัสดุที่ต่างกันมีความสามารถในการดูดซับคลื่นของวัสดุแต่ละชนิดที่สัญญาณความถี่ที่แตกต่างกันซึ่งค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกประกอบไปด้วยค่า  $\epsilon'$  และ  $\epsilon''$  ดังนั้นในงานวิจัยนี้สนใจวิเคราะห์ค่าดังกล่าวเพื่อออกแบบระบบที่ยังเชื่อถือได้ในช่วงด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง การทดสอบสมมติฐานของงานวิจัยนี้ได้ทดสอบ ณ อาคารสิรินธรวิศวกรรม (F11) ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การวิเคราะห์ตัวอย่างที่สนใจตรวจสอบได้เลือกใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวัดค่าประกอบด้วยหัววัดโคแอกเซียลแบบปลายเปิด เครื่องวิเคราะห์เครือข่าย Agilent technologies (E5071C) และคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลพร้อมซอฟต์แวร์ Keysight materials measurement suite ดังรูปที่ 3.4 (ก) โดยก่อนการทดสอบและใช้งานอุปกรณ์เพื่อวิเคราะห์ค่าจำเป็นต้องมีการสอบเทียบอุปกรณ์การวัด ในส่วนการสอบเทียบอุปกรณ์ของหัว Open-end coaxial probe ชนิด High temperature และทำการสอบเทียบอุปกรณ์ในรูปแบบ Air/Short probe/Water ที่อุณหภูมิห้อง ( $25 \pm 2$  °C) ดังรูปที่ 3.4 (ข) โดยน้ำที่นำมาใช้ในงานวิจัย คือ น้ำที่ปราศจากประจุ (Deionized water) จากคุณสมบัตินี้จึงทำให้เหมาะสมกับการใช้สอบเทียบอุปกรณ์เพื่อความแม่นยำในกระบวนการวัดด้วยเทคนิคการวัดโดยใช้หลักการโพรบแบบปลายเปิด (Open-end coaxial probe method) (Cheng et al., 2017; Wasusathien et al., 2020; Hussein et al., 2019)



ก) เครื่องมือวัดและอุปกรณ์พร้อมคอมพิวเตอร์ติดตั้งซอฟต์แวร์



1. Open

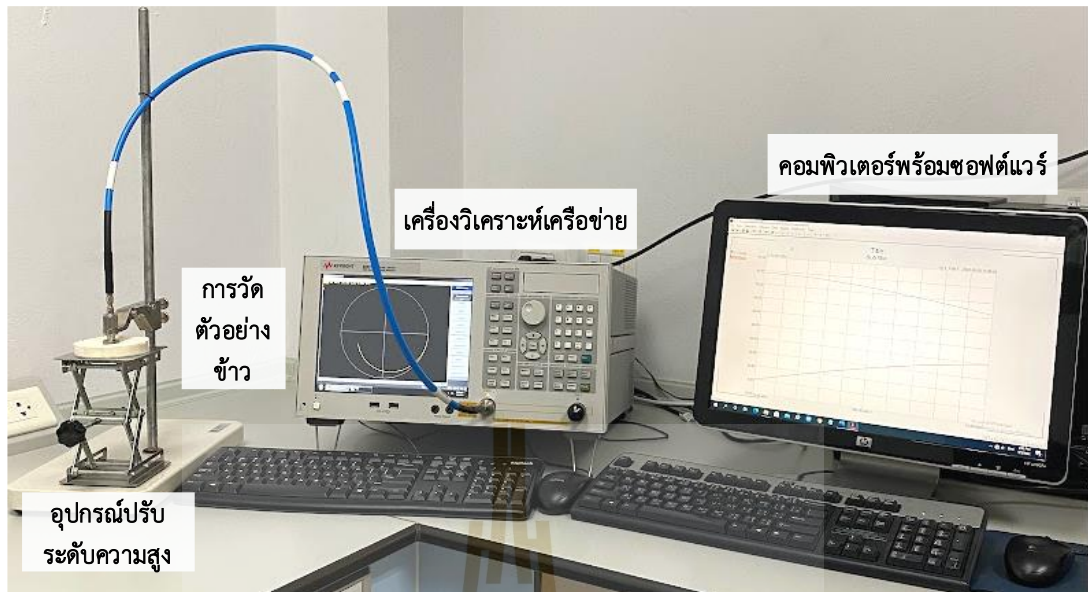
2. Short

3. Water

ข) การสอบเทียบหัววัดอุปกรณ์เครื่องมือวัด

รูปที่ 3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ในกระบวนการวัดตัวอย่างวัสดุ





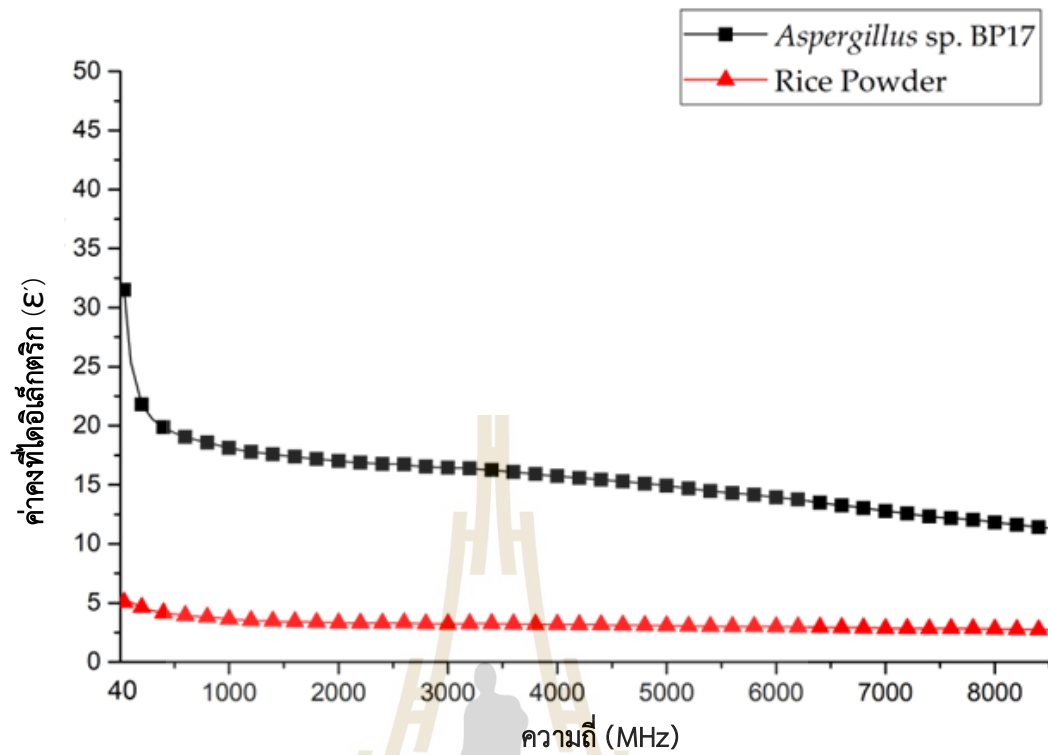
ก) การวัดค่าตัวอย่างข้าว



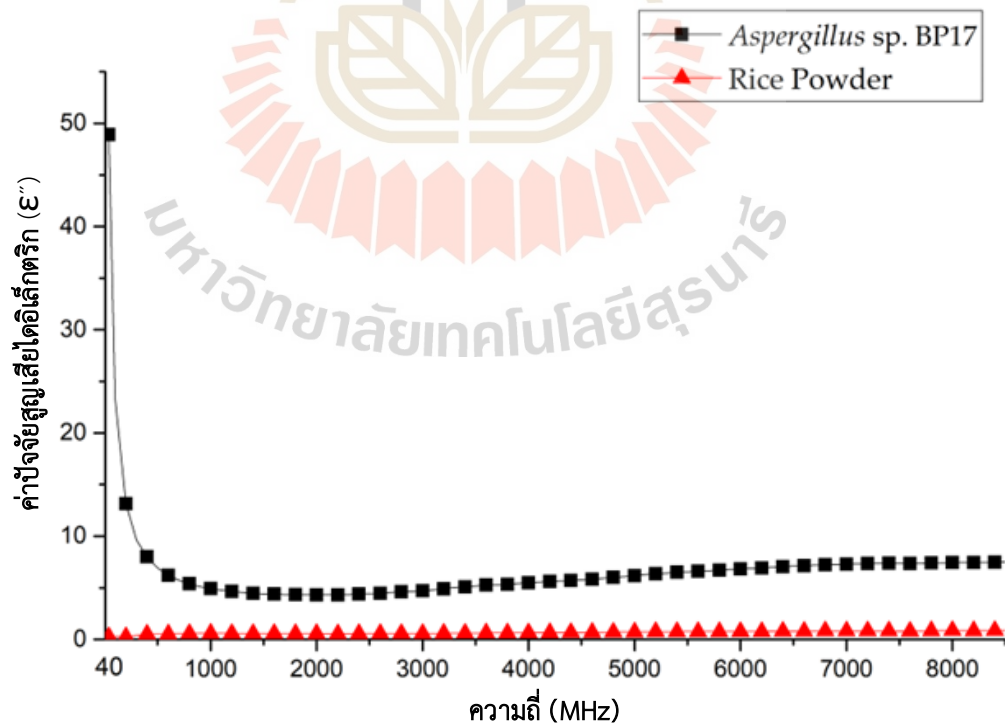
ข) การวัดค่าตัวอย่างเชือก

### รูปที่ 3.5 การวัดค่าตัวอย่างของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะมีตัวอย่างที่ใช้ทั้งหมด 2 ชนิด คือ ตัวอย่างข้าวและตัวอย่างเชือก การทดสอบเพื่อหาค่าด้วยเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายหลักการโพรบแบบปลายเปิดกับตัวอย่างข้าวและตัวอย่างเชือก แสดงดังรูปที่ 3.5 โดยตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดสอบจะบรรจุอยู่บนงานเพาะเชื้อ



รูปที่ 3.6 ผลการวัดค่า  $\epsilon'$  ของตัวอย่างข้าวและตัวอย่างเชื้อรา



รูปที่ 3.7 ผลการวัดค่า  $\epsilon''$  ของตัวอย่างข้าวและตัวอย่างเชื้อรา

ในการวัดค่า  $\epsilon'$  และ  $\epsilon''$  ของตัวอย่างข้าว งานวิจัยนี้เลือกข้าวกล้องหอมมะลิเพราะมีเชื้อรามากที่สุด (กิตติพงษ์ และคณะ, 2565) โดยที่ตัวอย่างข้าวได้นำข้าวมาจากตลาดท้องถิ่นในจังหวัดนครราชสีมา วัดปริมาณความชื้นของข้าวโดยใช้เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพืชแบบดิจิทัล รุ่น Handheld smart sensor AR991 ก่อนนำตัวอย่างไปทำการบดหรือบั่นให้ละเอียดเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากช่องว่างของอากาศ (Cheng et al., 2017) ก่อนนำตัวอย่างไปทำการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ดังรูปที่ 3.5 (ก) การวัดค่า  $\epsilon'$  และ  $\epsilon''$  นั้นได้ทำการวัดด้วยโปรแกรม N1500A Materials measurement suite ที่ถูกตั้งค่าช่วงของการวัดให้ครอบคลุมย่านความถี่ 40 ถึง 8,500 MHz ที่ความละเอียด 1,001 จุด ก่อนนำค่า  $\epsilon'$  และ  $\epsilon''$  ที่ได้นำไปตรวจสอบและทำการวิเคราะห์ต่อไป ดังรูปที่ 3.6 และ 3.7

ในการวัดค่า  $\epsilon'$  และ  $\epsilon''$  ของตัวอย่างเชื้อรา งานวิจัยนี้เลือกเชื้อรา *Aspergillus* sp. สายพันธุ์ BP17 โดยนำมาจากห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยา สาขาวิชาปริคณิสิก สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นำตัวอย่างเชื้อราบนจานเพาะเชื้อทำการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Hussein et al., 2019) ดังรูปที่ 3.5 (ข) การวัดค่า  $\epsilon'$  และ  $\epsilon''$  นั้น ทำการวัดด้วยโปรแกรม N1500A Materials measurement suite ที่ถูกตั้งค่าช่วงของการวัดให้ครอบคลุมย่านความถี่ 40 ถึง 8,500 MHz ที่ความละเอียด 1,001 จุด ก่อนนำค่า  $\epsilon'$  และ  $\epsilon''$  ไปทำการวิเคราะห์ผลต่อไป ดังรูปที่ 3.6 และ 3.7

จากรูปที่ 3.6 และ 3.7 ผลการวัดของตัวอย่างข้าวกับตัวอย่างเชื้อราใน พบว่าค่า  $\epsilon'$  ทั้งตัวอย่างข้าวและตัวอย่างเชื้อรา มีแนวโน้มลดลงอย่างช้าๆ ตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น จากที่ได้ทำการเปรียบเทียบค่า  $\epsilon'$  พบว่าตัวอย่างเชื้อรามีค่า  $\epsilon'$  สูงกว่าตัวอย่างข้าวในทุกย่านความถี่ สังเกตได้จากเส้นกราฟตัวอย่างเชื้อราด้านบนมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยเฉพาะความถี่ที่ต่ำกว่า 200 MHz ซึ่งได้สรุปค่า  $\epsilon'$  ของตัวอย่างข้าวและเชื้อราในตารางที่ 3.2 ต่อมาจากการวัดค่า  $\epsilon''$  ของตัวอย่างข้าวกับตัวอย่างเชื้อรา พบว่าค่า  $\epsilon''$  ทั้งตัวอย่างข้าวและตัวอย่างเชื้อรามีค่าที่เกิดขึ้นแตกต่างกันโดยเทียบตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น สังเกตได้จากเส้นกราฟตัวอย่างเชื้อราด้านบนมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยเฉพาะความถี่ที่ต่ำกว่า 200 MHz ที่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งได้สรุปค่า  $\epsilon''$  ของตัวอย่างข้าวและเชื้อรา ดังตารางที่ 3.2

จากการเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างข้าวและเชื้อราในตารางที่ 3.2 พบว่าค่าความแตกต่างของค่า  $\epsilon''$  ของตัวอย่างข้าวและเชื้อรามากที่สุด ณ ที่คลื่นความถี่ 40.68 MHz ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงเลือกใช้ที่ 40.68 MHz เพื่อนำไปวิเคราะห์และการจำลองการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าสำหรับตัวปล่อยคลื่นแบบแผ่นเพลทก่อนออกแบบระบบสำหรับทดสอบระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อไป

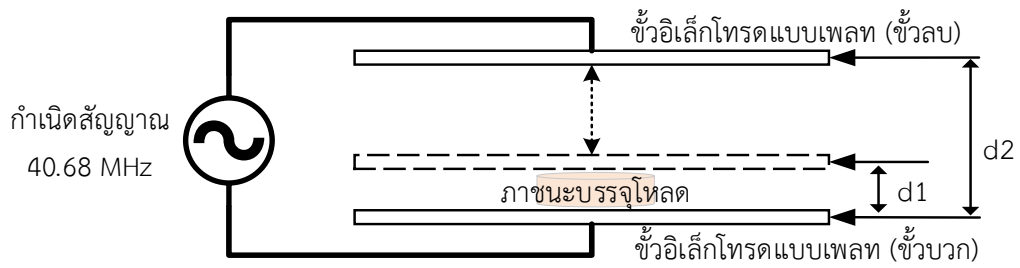
ตารางที่ 3.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและการเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างข้าวและเชื้อรา

Mean $\pm$ SD	ความถี่ (MHz)					
	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon'$ )			ค่าปัจจัยสูญเสียไดอิเล็กตริก ( $\epsilon''$ )		
	40.68	915	2450	40.68	915	2450
<i>Aspergillus</i> sp.	31.574 $\pm$	18.356 $\pm$	16.794 $\pm$	48.92 $\pm$	5.042 $\pm$	4.412 $\pm$
BP17 (A)	0.333	0.449	0.166	0.466	0.117	0.106
Rice powder (B)	4.754 $\pm$	3.774 $\pm$	3.343 $\pm$	0.251 $\pm$	0.551 $\pm$	0.582 $\pm$
	0.123	0.044	0.064	0.036	0.022	0.019
Ratio A:B	6.641	4.863	5.024	194.900	9.151	7.580

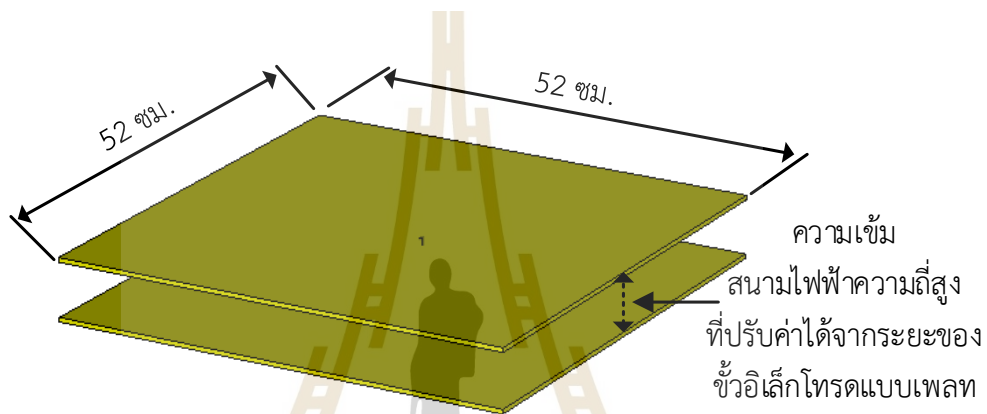
### 3.3.3 การวิเคราะห์และจำลองการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าสำหรับตัวปล่อยคลื่น

ในวิทยานิพนธ์ได้มุ่งเน้นไปในด้านการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบจากความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าว รวมถึงลักษณะของการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าและการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลทอิลีกโทรดและที่เกิดขึ้นโหนดนั้น จะอยู่ระหว่างแผ่นเพลทอิลีกโทรดทั้ง 2 แผ่นในระหว่างทดสอบการแผ่กระจายคลื่นและความเข้มสนามไฟฟ้านำไปวิเคราะห์และจำลองการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้า

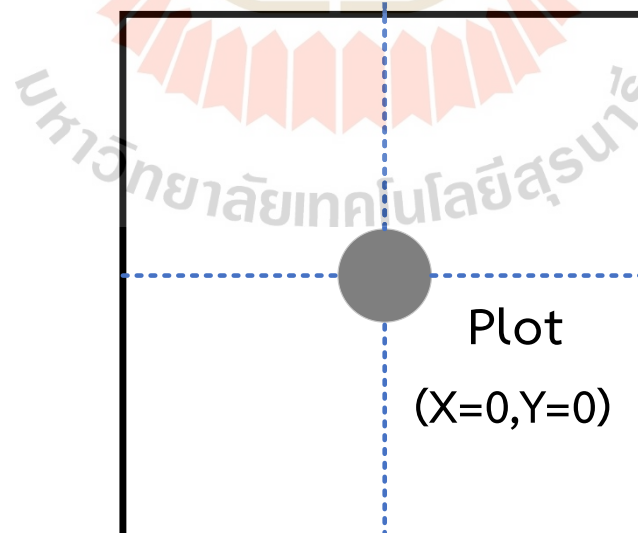
ตัวปล่อยคลื่นแบบแผ่นเพลท ๓ คลื่นความถี่ 40.68 MHz และภาชนะสำหรับบรรจุโหนดจะบรรจุอยู่ในจานเพาะเชื้อแก้ว (Glass petri dish) ในการทดลองได้เลือกใช้ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 15 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.8 (ก) โดยการออกแบบตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลทจำเป็นต้องให้มีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงดังกล่าว แผ่นเพลทที่จะใช้การวิเคราะห์และจำลองการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าให้มีลักษณะเหมาะสมต่อการออกแบบบนระบบจริง ๆ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้มีการเลือกใช้ตัวปล่อยคลื่นแบบแผ่นเพลทที่สามารถปรับระดับความเข้มสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลทมีขนาดความกว้าง 52 เซนติเมตร ความยาว 52 เซนติเมตร ความหนา 0.5 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.8 (ข) โดยใช้วิธีป้อนกำลังงานแบบ 1 พอร์ตให้กับแผ่นเพลท หลักการนี้ใช้แพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าที่การป้อนกำลัง 9 kV และจุดป้อนกำลังในแกน  $X = 0$  และแกน  $Y = 0$  แสดงดังรูปที่ 3.8 (ค) เพื่อพิจารณาถึงลักษณะการแพร่กระจายคลื่นและความเข้มของสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นภายในโหนดระหว่างแผ่นเพลทอิลีกโทรดทั้ง 2 แผ่นด้วยการจำลองด้วยโปรแกรม CST Studio Suite ภายใต้ความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อไป



ก) รูปแบบการทดสอบการแผ่กระจายคลื่นและความเข้มสนามไฟฟ้า

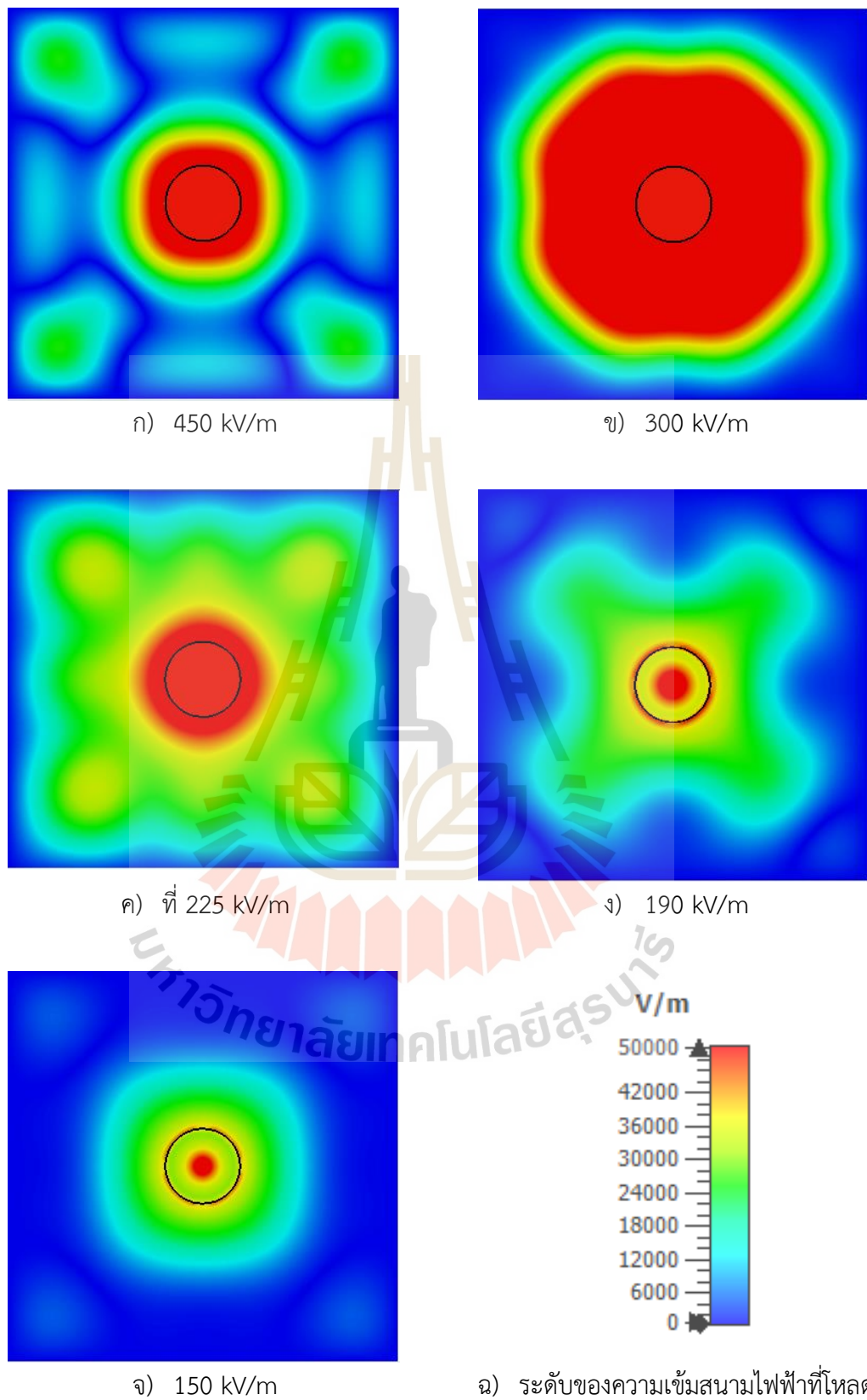


ข) การปรับความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างตัวปล่อยคลื่นแบบแผ่นเพลท



ค) รูปแบบการป้อนสัญญาณคลื่นสนามไฟฟ้าแบบ 1 พอร์ต

รูปที่ 3.8 การออกแบบการทดสอบการแผ่กระจายคลื่นและความเข้มสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.9 ระดับของความเข้มสนามไฟฟ้าที่โหลดระบบที่ความเข้มสนามไฟฟ้าต่างกัน

ผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในโหนดภายใต้ความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงด้วยการป้อนกำลัง ณ ตำแหน่งที่กำหนด กำหนดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเท่ากับ 9 kV กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตเท่ากับ 1 A และกำหนดค่าของความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระหว่างแผ่นเพลททั้ง 2 แผ่น ประกอบไปด้วย 5 ระดับ คือ 450 300 225 190 และ 150 kV/m ตามลำดับ ส่วนตัดขวางการจำลองภายในโหนดระหว่างแผ่นเพลท และระดับของความเข้มสนามไฟฟ้าที่โหนด แสดงดังรูปที่ 3.9

ผลการจำลองภายในโหนดพบว่ามีการกระจายไปรอบๆ จากจุดป้อนกำลังงานของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในโหนดมากที่สุด ณ ที่จุดป้อนกำลังงานและมีการแผ่กระจายค่อยๆ ลดลงจากจุดป้อน ต่อมาจากรูปที่ 3.9 (ก-ค) ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 225 300 และ 450 kV/m พบว่าการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในโหนดครอบคลุมสม่ำเสมอ โดยการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะลักษณะที่ความเข้มลดลงไปตามระยะทางจากจุดป้อนกำลังแต่ครอบคลุมโหนดทั้งหมด แต่จากรูปที่ 3.9 (ง-จ) ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 150 และ 190 kV/m พบว่าการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในโหนดไม่ครอบคลุมสม่ำเสมอ โดยการแผ่กระจายของคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะลักษณะที่ความเข้มลดลงไปตามระยะทางจากจุดป้อนกำลัง รวมถึงความเข้มสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมีแนวโน้มที่จะทำให้ยับยั้งเชื้อราในข้าวด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงไม่ครอบคลุมโหนดที่เกิดขึ้นภายในโหนดเมื่ออ้างอิงจากจุดป้อนกำลังจากการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้า ดังนั้นจึงทำการวางแผนการทดสอบผลกระทบจากความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าวต่อไป

### 3.4 การวางแผนศึกษาผลกระทบความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง

จากการออกแบบและวิเคราะห์ระบบการยับยั้งเชื้อราในข้าวด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงเมื่อได้อุปกรณ์ประกอบต่าง ๆ สำหรับระบบยับยั้งเชื้อราในข้าวด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงแล้วนั้น จะมีการวางแผนการทดสอบผลกระทบจากความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าวบนการศึกษาและการออกแบบก่อนนำไปสู่การใช้งานในระบบจริง ได้กำหนดให้ป้อนค่ากำลังอินพุต ณ ตำแหน่งที่กำหนดด้วยแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเท่ากับ 9 kV และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตเท่ากับ 1 A รวมถึงกำหนดค่าของความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระหว่างแผ่นเพลททั้ง 2 แผ่น ประกอบไปด้วย 5 ระดับ คือ 450 300 225 190 และ 150 kV/m ตามลำดับ โดยทำการแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ การวางแผนการทดสอบระบบการยับยั้งเชื้อราในข้าวด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง และการวางแผนและการเตรียมการทดสอบการยับยั้งเชื้อราในข้าวหลังผ่านระบบการยับยั้งเชื้อราในข้าวด้วยความถี่สูง



ก) เครื่องให้ความร้อนความถี่สูงที่สามารถปรับความเข้มสนามไฟฟ้า



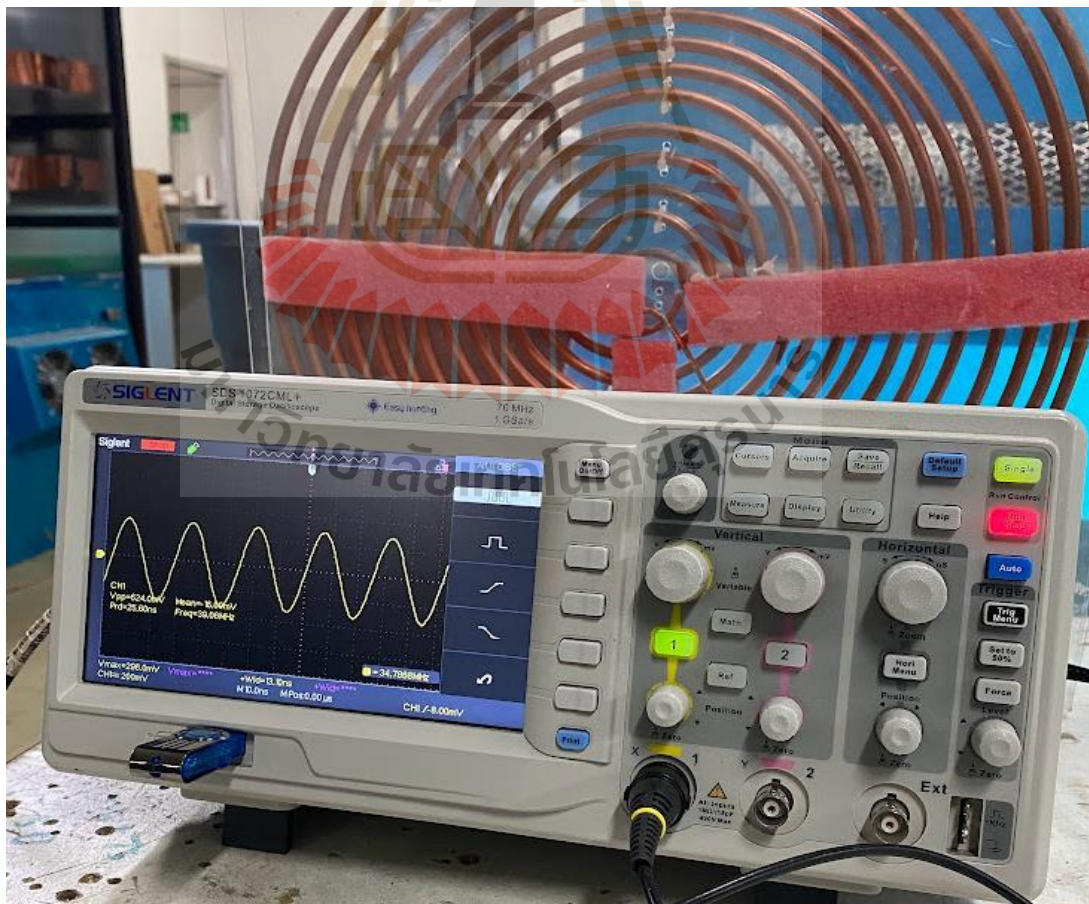
ข) การเตรียมการวางโหนดระหว่างแผ่นเพลท

รูปที่ 3.10 ระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงแบบแผ่นเพลท



### 3.4.1 การออกแบบการทดสอบระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง

การออกแบบโครงสร้างของระบบให้มีประสิทธิภาพนั้นได้ทำการจัดวางรูปแบบโครงสร้างของระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงแบบแผ่นเพลทแบบที่สามารถปรับได้ที่มีขนาดความกว้างเท่ากับ 100 เซนติเมตร ความยาวเท่ากับ 120 เซนติเมตร และความสูงเท่ากับ 160 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.10 (ก) สำหรับการศึกษาาระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงที่สามารถปรับความเข้มสนามไฟฟ้านั้น ได้ทำการวางแผนการทดสอบโดยลักษณะการเตรียมการวางโหนดในระบบจริงและสามารถปรับความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลท แสดงดังรูปที่ 3.10 (ข) และในการวางแผนการทดสอบระดับความเข้มสนามไฟฟ้ามีการกำหนดระยะของขั้วอิเล็กโทรดแบบแผ่นเพลททั้งหมด 5 ระดับ จากการคำนวณได้จากสมการ 2.12 ในบทที่ 2 ซึ่งประกอบไปด้วยที่ระยะ 20 มิลลิเมตร (450 kV/m) ที่ระยะ 30 มิลลิเมตร (300 kV/m) ที่ระยะ 40 มิลลิเมตร ที่ระยะ 40 มิลลิเมตร (190 kV/m) และที่ระยะ 50 มิลลิเมตร (150 kV/m) ตามลำดับ เพื่อนำค่าที่ได้ไปเตรียมการทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ F03203 อาคารเครื่องมือ 3 (F3) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.11 การวัดสัญญาณความถี่ที่เกิดจากระบบโดยการใช้วิธีการเหนี่ยวนำ

การทดสอบระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การทดสอบสัญญาณความถี่ที่เกิดขึ้นจากระบบ และการทดสอบระบบการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงกับโหนด ในส่วนแรกทำการทดสอบสัญญาณความถี่ที่เกิดขึ้นจากระบบตามที่ได้กำหนดนั้น ทดสอบโดยการให้กำลังงานเพื่อทดสอบสัญญาณความถี่ที่เกิดจากระบบที่ความเข้มสนามไฟฟ้าต่างกัน ก่อนที่จะใช้เครื่องมือออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณ แต่เนื่องจากระบบมีแรงดันไฟฟ้ากำลังสูงไม่สามารถวัดได้โดยตรงจึงใช้วิธีการเหนี่ยวนำ (Induced) สัญญาณที่ออกจากระบบผ่านขดลวดเหนี่ยวนำก่อนที่จะต่อเข้ากับออสซิลโลสโคป Siglent SDS1072CML+ เพื่อวัดสัญญาณที่เกิดขึ้นในระบบที่ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน แสดงดังรูปที่ 3.11



ก) กล้องถ่ายภาพความร้อน

ข) โหนดที่บรรจุในงานเพาะเชื้อ

รูปที่ 3.12 การถ่ายภาพความร้อนที่เกิดจากระบบจริง

การวัดผลการทดสอบระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง ส่วนที่สองการทดสอบระบบการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงกับโหนด ทดสอบโดยการวัดระดับผลค่าความร้อนภายในโหนดจะใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน รุ่น Keysight U5857A เพื่อวัดความร้อนภายในโหนดในระหว่างการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง แสดงดังรูปที่ 3.12 (ก) สำหรับโหนดที่เป็นข้าวจะบรรจุในงานเพาะเชื้อชนิดแก้วเพราะเหมาะสมสำหรับใช้ในการทดลองทางจุลชีววิทยา และทนความร้อนได้สูงถึง 300 °C โดยที่งานเพาะเชื้อชนิดแก้วที่ใช้ผ่านฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ภายใต้ความดันไอน้ำด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) แสดงดังรูปที่ 3.12 (ข) เพื่อการวัดผลและวิเคราะห์ระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงในบทต่อไป

### 3.4.2 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบการยับยั้งเชื้อราในข้าว

สำหรับการยับยั้งเชื้อราในข้าวหลังผ่านระบบการยับยั้งเชื้อราในข้าวด้วยความถี่สูง โดยทดสอบการวัดผลการยับยั้งเชื้อราด้วยการทดลองทางจุลชีววิทยา ณ ห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยา F2206 อาคารเครื่องมือ 2 (F2) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แสดงดังรูปที่ 3.13



ก) การเตรียมอุปกรณ์และตัวอย่างในตู้ปลอดเชื้อ



ข) การเตรียมอุปกรณ์ในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ



ค) การเตรียมอุปกรณ์ทดลองในตู้ปลอดเชื้อ

รูปที่ 3.13 การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือทางจุลชีววิทยา



รูปที่ 3.14 การเตรียมเครื่องมือตรวจสอบการยับยั้งเชื้อราบนอาหารเลี้ยงเชื้อด้วยกล้องจุลทรรศน์

สำหรับการตรวจสอบผลการทดลองจะใช้ตู้ปลอดเชื้อหรือตู้ลามินาร์ (Laminar flow clean bench) เพื่อไม่ให้เกิดการปนเปื้อนที่ไม่พึงประสงค์จากสิ่งปนเปื้อนเพิ่มเติมจากภายนอก แสดงรูปที่ 3.13 (ก) รวมถึงตะเกียงแอลกอฮอล์เพื่อเผาอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการดังกล่าวจนกว่าจะหมดจะมีอุณหภูมิร้อนจนเป็นสีแดงจึงจะปล่อยให้เย็นลงก่อนจะวางตัวอย่างข้าวที่อาหารเลี้ยงเชื้อ Potato Dextrose Agar (PDA) ต่อมาในการเตรียมอุปกรณ์ก่อนนำมาใช้งานจะฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อภายใต้ความดันไอน้ำ (Autoclave) แสดงดังรูปที่ 3.13 (ข) ก่อนวางตัวอย่างที่ต้องการทดสอบลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อเพื่อตรวจสอบผลที่เกิดขึ้นจากการให้ความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าวต่อไป แสดงดังรูปที่ 3.13 (ค) ซึ่งการเตรียมการทดสอบการยับยั้งเชื้อราในข้าว นั้น ตัวอย่างข้าวจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นข้าวที่ไม่ได้ผ่านระบบที่เป็นกลุ่มควบคุม จำนวน 3 ตัวอย่าง และส่วนที่สองจะเป็นข้าวที่ผ่านระบบการยับยั้งเชื้อราในข้าวด้วยความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูง จำนวน 75 ตัวอย่าง แต่ละตัวอย่างจะถูกสุ่มเลือกจำนวน 20 เมล็ด ก่อนวาง

เมล็ดข้าวที่ได้บนอาหารเลี้ยงเชื้อภายใต้ตู้ปลอดเชื้อ รุ่น ScanLaf Mars 1500 โดยใช้เทคนิคปลอดเชื้อ และนำจานเพาะเชื้อที่ได้ไปไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 วัน ก่อนนำไปทำการแปรผลภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Sterio microscope) รุ่น ZEISS Stemi 305 ที่มีกำลังขยาย 5:1 ในการตรวจสอบการยับยั้งเชื้อรา แสดงดังรูปที่ 3.14 เพื่อตรวจสอบที่เกิดขึ้นจากระบบให้ความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าวในบทต่อไป

### 3.5 สรุป

การวิเคราะห์และออกแบบระบบตัวปล่อยความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูง ในบทนี้ได้ทำการอธิบายในด้านการออกแบบและวิเคราะห์การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก การเปรียบเทียบค่า  $\epsilon'$  และ  $\epsilon''$  การเลือกความถี่ที่ใช้งานบนระบบตัวปล่อยความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูงแบบแผ่นเพลท และการวางแผนศึกษาผลกระทบความชื้นสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าว ซึ่งการวิเคราะห์และออกแบบที่ได้จากบทนี้จะนำข้อมูลที่ได้เพื่อไปวัดผลจากการทดลองในบทถัดไป



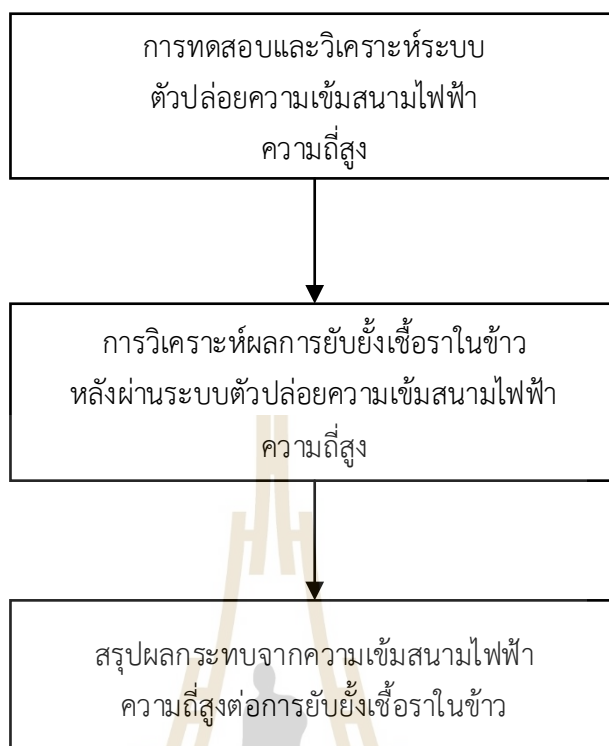
## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

#### 4.1. กล่าวนำ

การวิเคราะห์และออกแบบระบบตัวปล่อยความถี่สูงเพื่อยับยั้งเชื้อราที่ปนในเมล็ดข้าวนั้น จากวิเคราะห์ตัวอย่างข้าวและเชื้อราที่กล่าวถึงในบทก่อนหน้า พบว่าค่า  $\epsilon''$  ที่ความถี่ 40.68 MHz มีค่าความแตกต่างกันมากที่สุดของค่า  $\epsilon''$  ที่ 195.68 เท่า ต่อมาจากการวิเคราะห์ความแตกต่างที่พบนำไปออกแบบระบบจริงที่สามารถปรับระดับความถี่สูงไฟฟ้าแบบแผ่นเพลท โดยแผ่นเพลทมีขนาดความกว้าง 52 เซนติเมตร ความยาว 52 เซนติเมตร ความหนา 0.5 เซนติเมตร และใช้วิธีป้อนกำลังงานแบบ 1 พอร์ต ใช้ระบบขนาด 9 kW ที่สัญญาณความถี่ 40.68 MHz โดยใช้โปรแกรม CST Studio suite เพื่อจำลองการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในโหนดภายใต้ความถี่สูงไฟฟ้าที่ค่าแตกต่างกัน จากการออกแบบในบทที่ 3 นั้น ได้นำผลการออกแบบดังกล่าวไปใช้งาน และเพื่อทดสอบผลกระทบจากความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าวตามที่วางแผนการวิเคราะห์และออกแบบไว้ก่อนหน้านี้

ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จะได้ทำการทดสอบเพื่อเป็นการวัดผลกระทบจากความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าว ซึ่งในเนื้อหาที่สำคัญบทนี้จะกล่าวถึงการนำทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ผ่านมา เพื่อใช้สำหรับการออกแบบระบบจริง โดยระบบการให้ความถี่สูงที่สามารถปรับระดับความถี่สูงไฟฟ้าแบบแผ่นเพลท สำหรับทดสอบผลกระทบจากความถี่สูงที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นเพลทต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าว ทำการทดสอบโดยการให้กำลังงานให้กับความถี่ที่ใช้งานบนระบบที่ความถี่ 40.68 MHz กับ ตัวปล่อยความถี่สูงขนาด 9 kW ไปยังโหนดที่เป็นข้าวเพื่อศึกษาผลกระทบความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อรา ในระหว่างการศึกษาค้นคว้าได้ทำการวัดทดสอบความร้อนที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นเพลทในโหนด การวัดค่าอุณหภูมิที่ผิวของโหนดดังกล่าวทำแบบไม่สัมผัสที่โหนดโดยตรง รวมถึงการวัดดังกล่าวไม่เข้าไปทำลายและส่งผลกระทบต่อการบินในโหนด ก่อนที่จะนำข้าวที่ผ่านระบบการให้ความถี่สูงไปตรวจสอบการฆ่าหรือยับยั้งเชื้อราที่ปนในข้าว ด้วยกล้องจุลทรรศน์ รุ่น ZEISS Stemi 305 บนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA และสุดท้ายจะนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ผลกระทบจากความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าวเพื่อสรุปผลการวิจัยต่อไป ดังรูปที่ 4.1

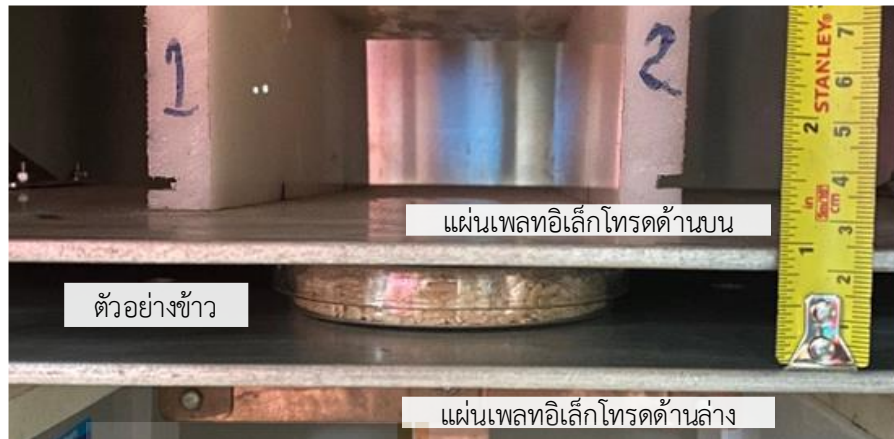


รูปที่ 4.1 การทดสอบระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าว

#### 4.2 การทดสอบระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง

สำหรับผลการตั้งค่าระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงระหว่างแผ่นเพลทที่เกิดจากระบบในเงื่อนไขระยะห่างระหว่างแผ่นเพลทที่ต่างกัน ดังรูปที่ 4.2 พบว่าที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 450 300 225 190 และ 150 kV/m มีระยะห่างระหว่างแผ่นเพลท ณ 2 3 4 5 และ 6 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.2(ก)-4.3(จ) ตามลำดับโดยเป็นการปรับระยะห่างระหว่างแผ่นเพลทในระบบการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง ซึ่งจะนำไปทดสอบระดับของสัญญาณความถี่ที่เกิดจากระบบที่ความเข้มสนามไฟฟ้าต่างกับกับโหลดที่เป็นข้าวต่อไป

สำหรับผลการทดสอบระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงโดยการวัดสัญญาณผ่านวงจรถอดทอนสัญญาณแบบขดลวดเหนี่ยวนำที่ต่ออยู่กับเครื่องมือออสซิลโลสโคปเพื่อวัดระดับของคลื่นสัญญาณไฟฟ้าของความถี่ที่เกิดจากการส่งผ่านพลังงานไปยังโหลด ค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่กระแสสลับชั่วขณะที่เกิดขึ้นจากการเรโซแนนซ์กับโหลดจากระบบที่ความเข้ม เครื่องมือจะแสดงกราฟรูปคลื่นสัญญาณไซน์ที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.3 และสรุปผลความถี่ ดังตารางที่ 4.1 ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 450 300 225 190 และ 150 kV/m ตามลำดับ



ก) ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 450 kV/m



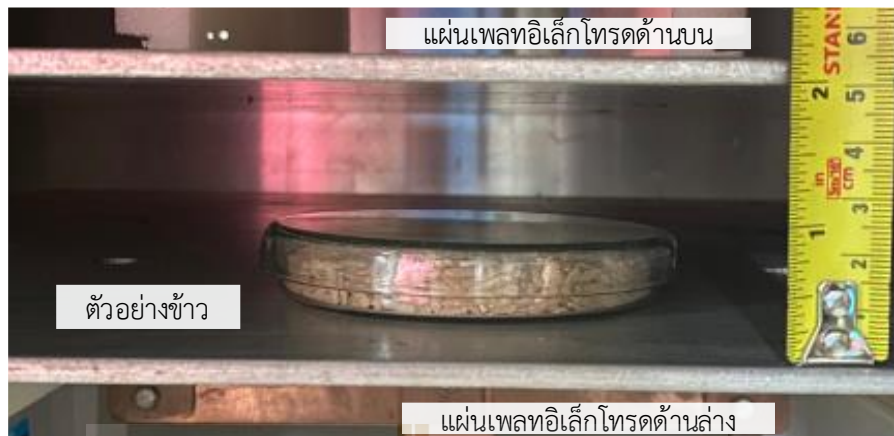
ข) ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 300 kV/m



ค) ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 225 kV/m

รูปที่ 4.2 การปรับความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลท





ง) ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 190 kV/m



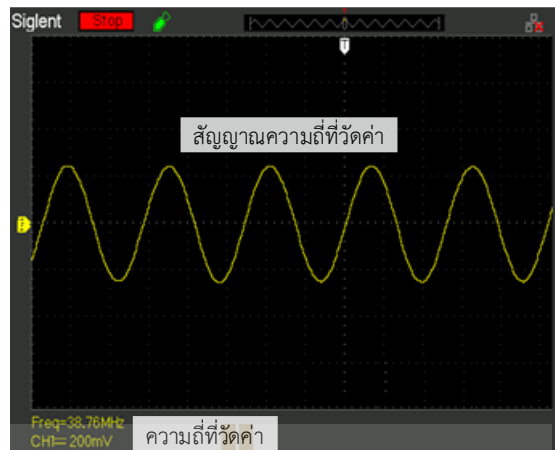
จ) ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 150 kV/m

รูปที่ 4.2 การปรับความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลท (ต่อ)

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดสัญญาณความถี่ที่ความเข้มสนามไฟฟ้าต่างกัน

การวัดสัญญาณ	ความเข้มสนามไฟฟ้า (kV/m)				
	450	300	225	190	150
ความถี่ (MHz)	38.76	40.16	41.32	42.37	43.48

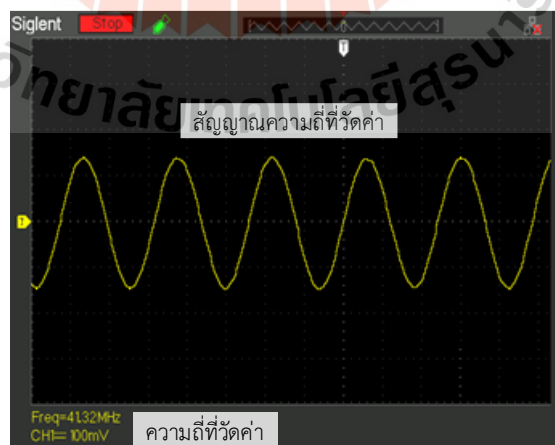
จากตารางที่ 4.1 ณ ความเข้มสนามไฟฟ้า 450 300 225 190 และ 150 kV/m ผลการวัดสัญญาณด้วยออสซิลโลสโคปสามารถความถี่ที่เกิดจากระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงคือ 38.76 40.16 41.32 42.37 และ 43.48 MHz ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.3



ก) ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 450 kV/m

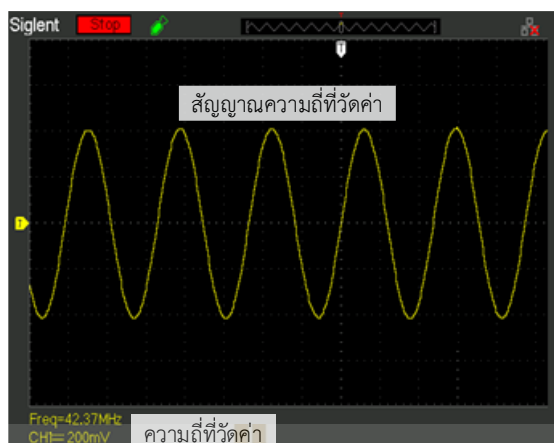


ข) ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 300 kV/m



ค) ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 225 kV/m

รูปที่ 4.3 ระดับของสัญญาณความถี่ที่ความเข้มสนามไฟฟ้าต่างกัน



ง) ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 190 kV/m

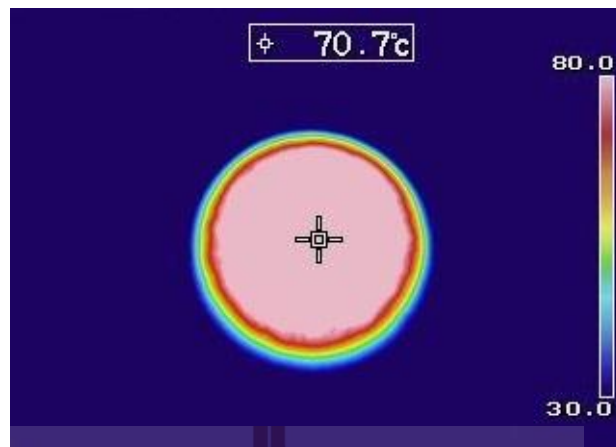


จ) ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 150 kV/m

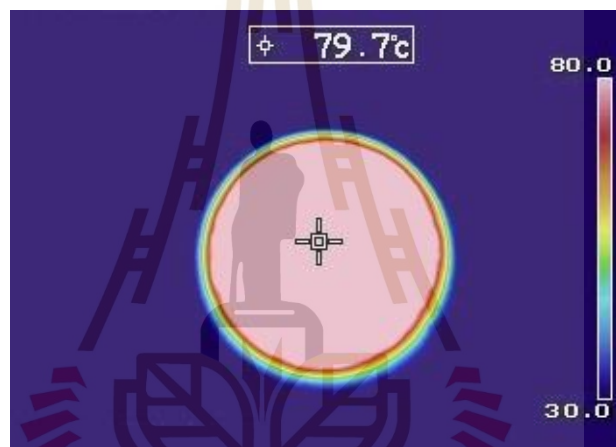
รูปที่ 4.3 ระดับของสัญญาณความถี่ที่ความเข้มสนามไฟฟ้าต่างกัน (ต่อ)

#### 4.3 การทดสอบระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงกับโหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์

สำหรับผลการทดสอบระบบกับโหลดที่เกิดจากระบบในเงื่อนไขความเข้มสนามไฟฟ้าต่างกัน โดยกล้องถ่ายภาพความร้อนสามารถวัดค่าความร้อนในโหลด ดังรูปที่ 4.4 พบว่าที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 450 300 225 190 และ 150 kV/m แสดงค่าความร้อนในโหลดที่เป็นข้าว ณ 70.7 79.7 89.8 100.4 และ 110.5 °C ดังรูปที่ 4.4(ก)-4.3(จ) ตามลำดับ ซึ่งจะนำไปทดสอบผลการยับยั้งเชื้อราในข้าวหลังผ่านระบบจริงต่อไป



ก) ที่ระดับผลค่าความร้อน 70 °C

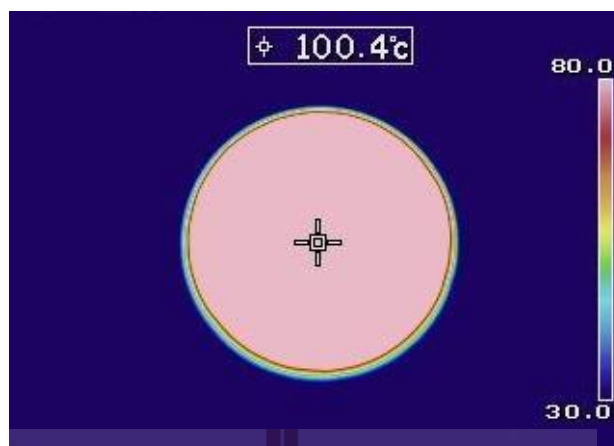


ข) ที่ระดับผลค่าความร้อน 80 °C

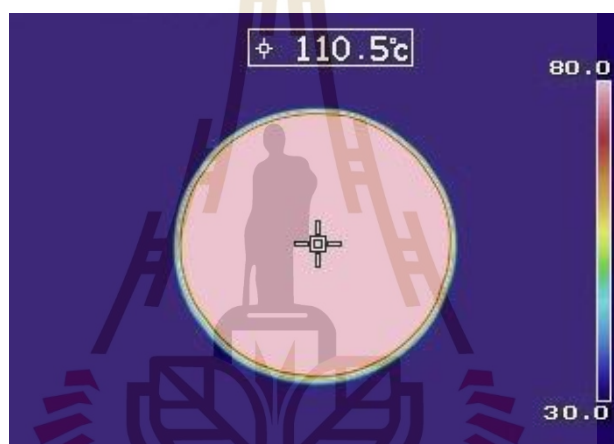


ค) ที่ระดับผลค่าความร้อน 90 °C

รูปที่ 4.4 ระดับผลค่าความร้อนในโหลด



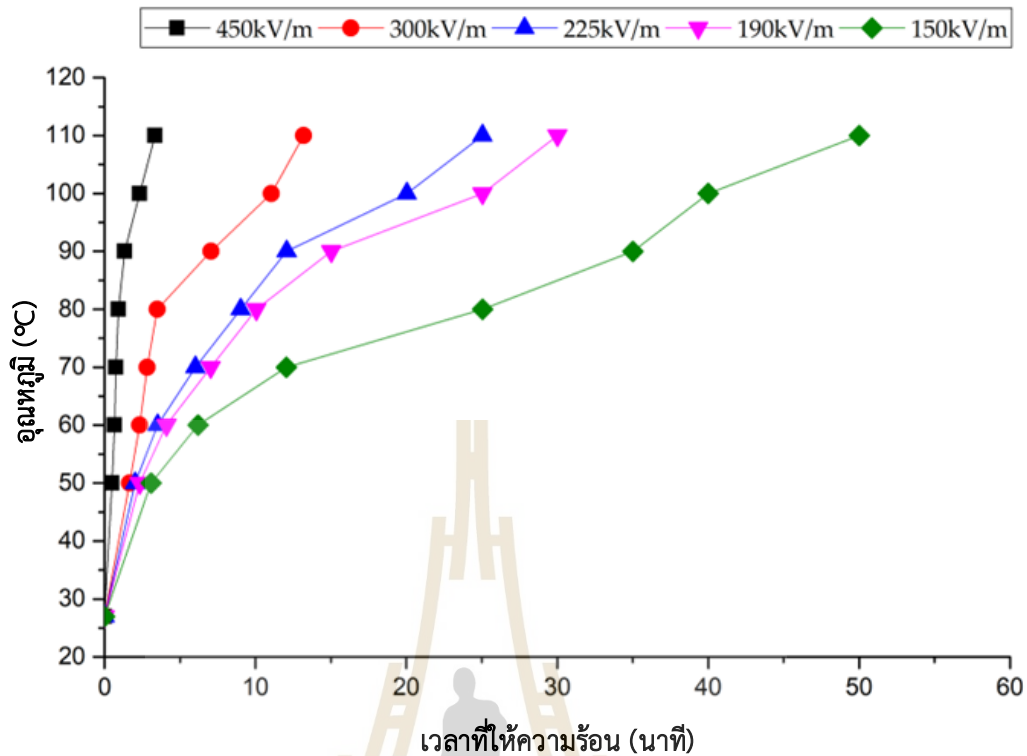
ง) ที่ระดับผลค่าความร้อน 100 °C



จ) ที่ระดับผลค่าความร้อน 110 °C

รูปที่ 4.4 ระดับผลค่าความร้อนในโหลด (ต่อ)

สำหรับผลการทดสอบความสัมพันธ์การถ่ายโอนความร้อนโหลดที่เกิดจากระบบในเงื่อนไขความเข้มสนามไฟฟ้าต่างกัน พบว่าที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 450 300 225 190 และ 150 kV/m แสดงดังรูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์การถ่ายโอนความร้อนโหลดไดอิเล็กตริกที่ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 450 kV/m ใช้เวลาในการถ่ายโอนความร้อนไปยังโหลดที่เป็นขั้วน้อยที่สุด ทำให้กราฟความสัมพันธ์การถ่ายโอนความร้อนโหลดมีแนวโน้มความชันของกราฟมากที่สุด และที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 150 kV/m ใช้เวลาในการโอนความร้อนไปยังโหลดที่เป็นขั้วมากที่สุด รวมถึงทำให้กราฟความสัมพันธ์การถ่ายโอนความร้อนโหลดมีแนวโน้มความชันของกราฟน้อยที่สุด



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์การถ่ายโอนความร้อนที่ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน

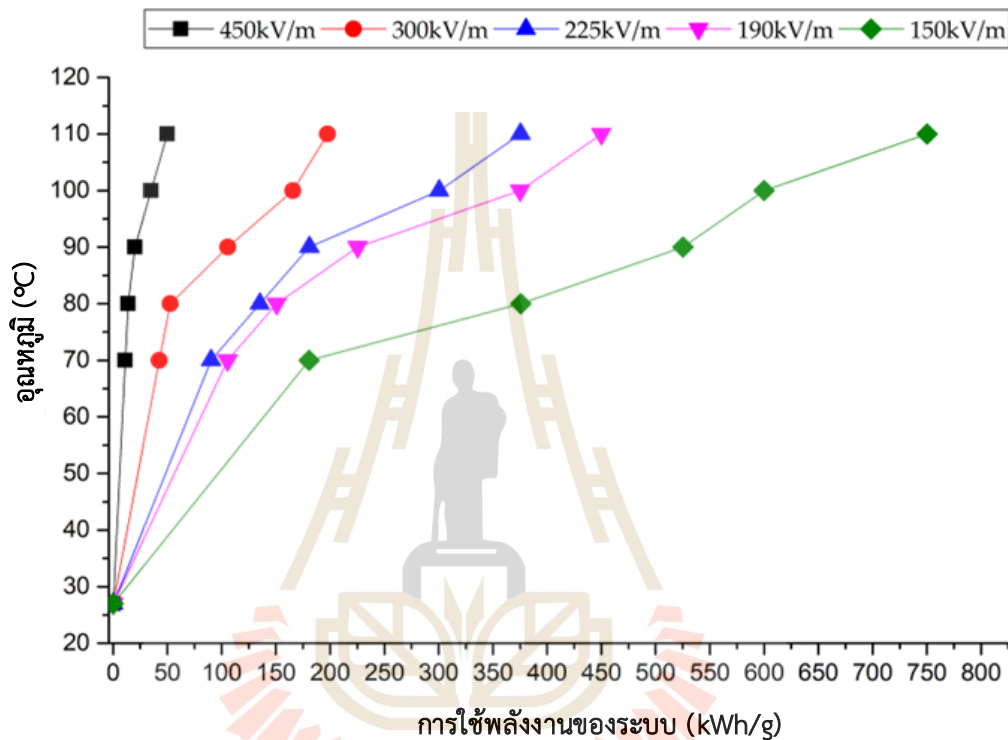
ตารางที่ 4.2 อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน

ความเข้มสนามไฟฟ้า ( kV/m)	อัตราการถ่ายโอนความร้อน (°C/min)				
	70°C	80°C	90°C	100°C	110°C
150	3.570	2.116	1.780	1.825	1.659
190	6.114	5.274	4.195	2.916	2.767
225	7.147	5.878	5.221	3.644	3.316
300	15.176	15.143	8.936	6.606	6.296
450	57.333	57.818	47.25	31.286	24.900

สำหรับผลอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน ดังตารางที่ 4.2 พบว่า ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 450 kV/m มีค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุด คือ 57.333 57.818 47.250 31.286 และ 24.900 °C/min ตามลำดับ และที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 150 kV/m มีค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุด คือ 3.570 2.116 1.780 1.825 และ 1.659 ณ อุณหภูมิที่เกิดขึ้น กับ โหลดที่เป็นข้าว คือ 70 80 90 100 และ 110 °C ตามลำดับ

#### 4.4 ผลการใช้พลังงานของระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง

สำหรับผลของการใช้พลังงานของระบบที่เกิดขึ้นในเงื่อนไขความเข้มสนามไฟฟ้าต่างกันที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 450 300 225 190 และ 150 kV/m แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าการใช้พลังงานของระบบมีความชันของกราฟมากที่สุดที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 450 kV/m และการใช้พลังงานของระบบมีความชันของกราฟน้อยที่สุดที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 150 kV/m



รูปที่ 4.6 การใช้พลังงานของระบบที่ความเข้มสนามไฟฟ้าแตกต่างกัน

สำหรับผลอัตราการการใช้พลังงานของระบบที่ความเข้มสนามไฟฟ้าแตกต่างกัน ดังตารางที่ 4.3 พบว่าที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 450 kV/m มีค่าการใช้พลังงานของระบบน้อยที่สุด คือ 11.25 13.75 20 35 และ 50 kWh/g ตามลำดับ และที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 150 kV/m มีค่าการใช้พลังงานของระบบมากที่สุด คือ 180.75 375.75 525.25 600 และ 750.25 kWh/g ตามลำดับ ณ อุณหภูมิที่เกิดขึ้น กับ โหลดที่เป็นข้าว คือ 70 80 90 100 และ 110 °C ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 อัตราการใช้พลังงานของระบบที่ความเข้มสนามไฟฟ้าแตกต่างกัน

ความเข้มสนามไฟฟ้า (kV/m)	การใช้พลังงาน (kWh/g)				
	70 °C	80 °C	90 °C	100 °C	110 °C
150	180.750	375.750	525.251	600.000	750.251
190	105.500	150.750	225.251	375.500	450.000
225	90.251	135.251	181.001	300.500	375.500
300	42.500	52.500	105.750	165.750	197.750
450	11.250	13.751	20.000	35.000	50.000

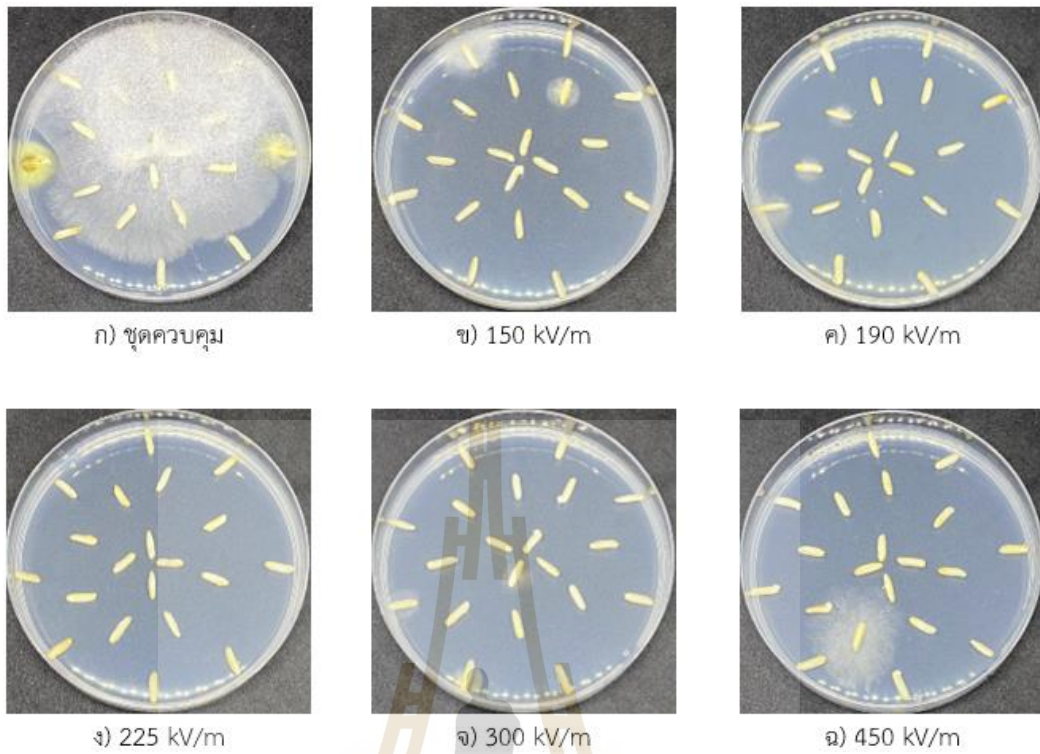
#### 4.5. ผลการยับยั้งเชื้อราหลังผ่านระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง

สำหรับผลการยับยั้งเชื้อราในข้าวหลังผ่านระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงที่ความเข้มสนามไฟฟ้าต่างกัน คือ 450 300 225 190 และ 150 kV/m พบว่าข้าวหลังผ่านระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงสามารถยับยั้งเชื้อราที่อยู่เป็นในข้าวได้ ดังรูปที่ 4.7-4.11

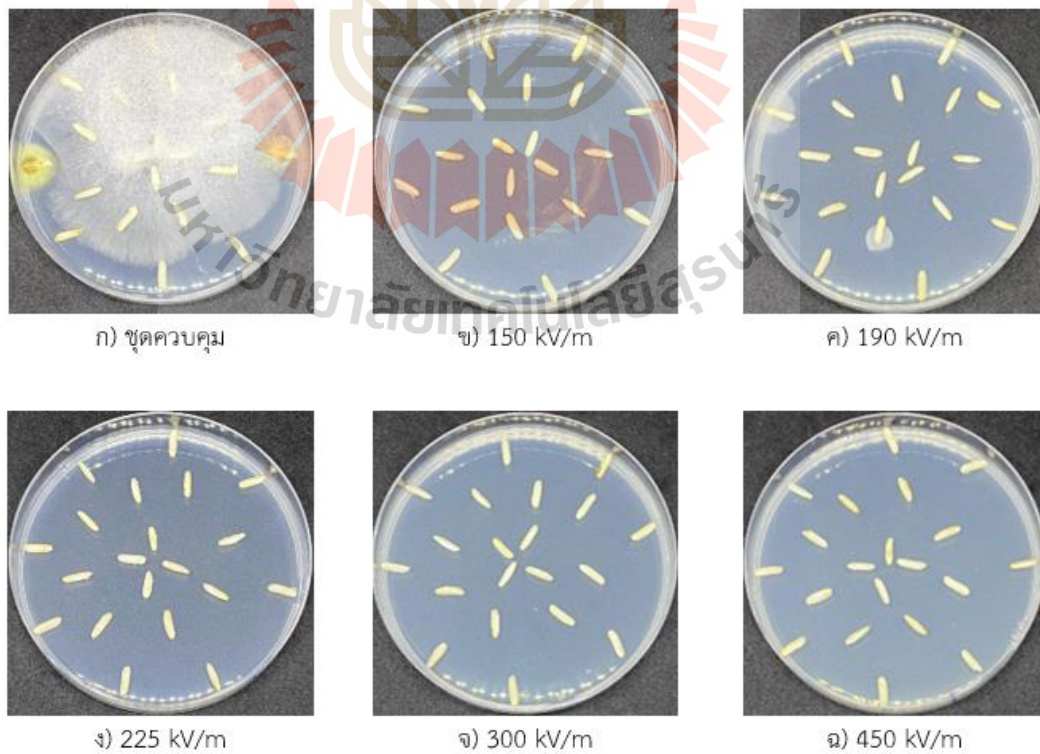


รูปที่ 4.7 การยับยั้งเชื้อราบนข้าวที่ความเข้มสนามไฟฟ้าต่างกัน ณ อุณหภูมิ 70 °C





รูปที่ 4.8 การยับยั้งเชื้อราบนข้าวที่ความเข้มสนามไฟฟ้าต่างกัน ณ อุณหภูมิ 80 °C



รูปที่ 4.9 การยับยั้งเชื้อราบนข้าวที่ความเข้มสนามไฟฟ้าต่างกัน ณ อุณหภูมิ 90 °C



รูปที่ 4.10 การยับยั้งเชื้อราบนข้าวที่ความเข้มสนามไฟฟ้าต่างกัน ณ อุณหภูมิ 100 °C

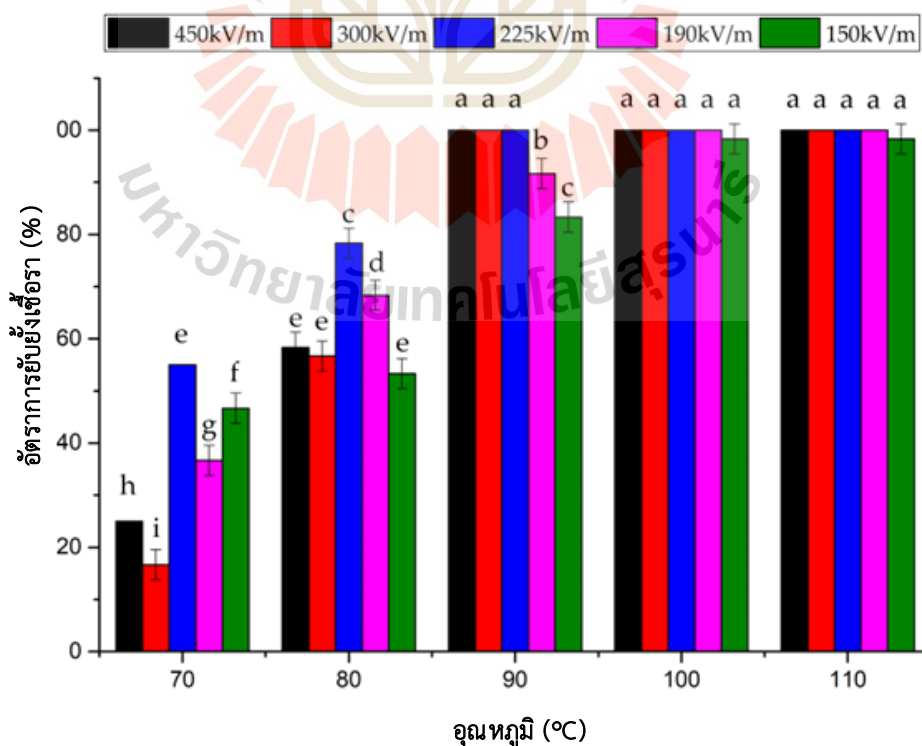


รูปที่ 4.11 การยับยั้งเชื้อราบนข้าวที่ความเข้มสนามไฟฟ้าต่างกัน ณ อุณหภูมิ 110 °C

ตารางที่ 4.4 การยับยั้งเชื้อราในข้าวหลังผ่านระบบที่อุณหภูมิและความเข้มสนามไฟฟ้าต่างกัน

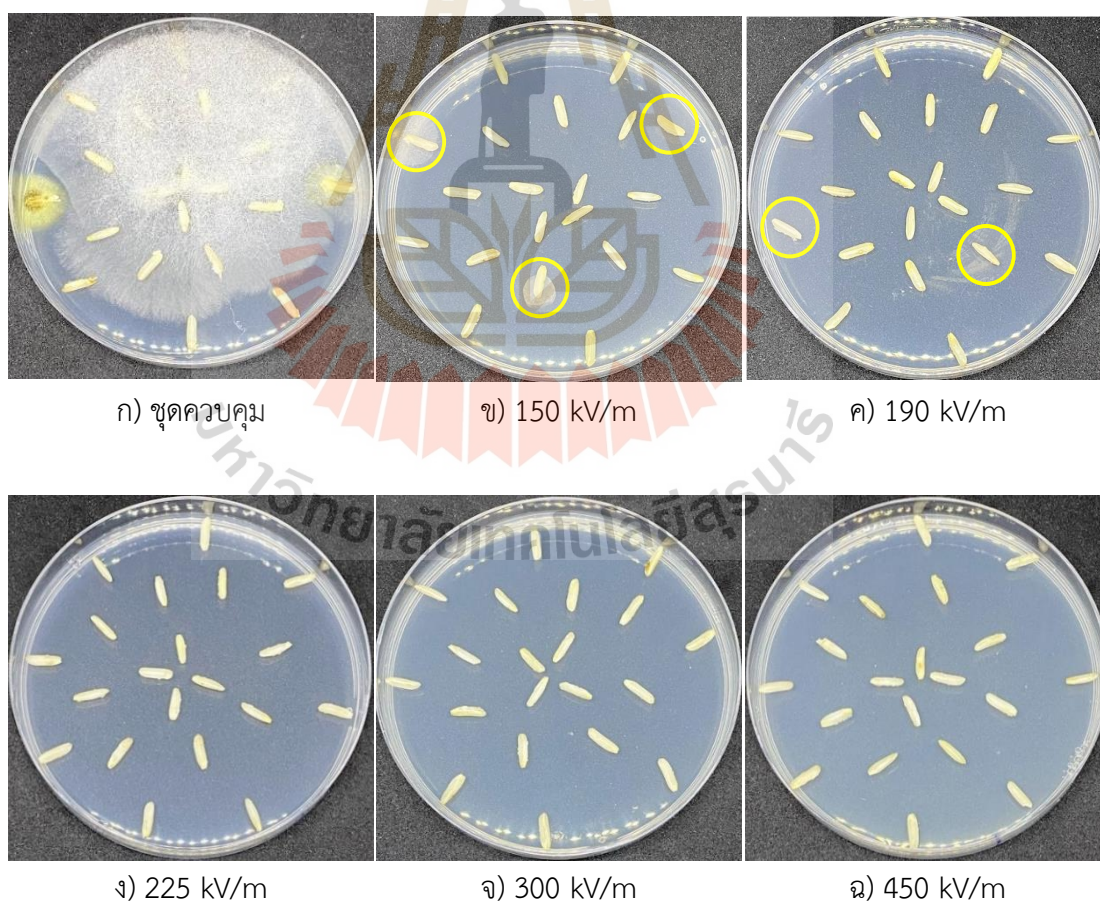
อุณหภูมิ (°C)	การยับยั้งเชื้อราบนข้าวที่อุณหภูมิและความเข้มสนามไฟฟ้าต่างกัน (%)				
	450 kV/m	300 kV/m	225 kV/m	190 kV/m	150 kV/m
70	25.00	16.67	55.00	36.67	46.67
80	58.33	56.67	78.33	68.33	53.33
90	100.00	100.00	100.00	91.67	83.33
100	100.00	100.00	100.00	100.00	98.33
110	100.00	100.00	100.00	100.00	98.33

จากรูปที่ 4.7-4.11 พบว่าการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงที่ต่างกันมีผลยับยั้งเชื้อราในข้าวที่แตกต่างกัน ซึ่งได้สรุปการยับยั้งเชื้อราในข้าวหลังผ่านระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง ดังตารางที่ 4.4 ก่อนนำผลการยับยั้งเชื้อราในข้าวหลังผ่านระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงที่ได้นำไปทำการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.12 การยับยั้งเชื้อราบนข้าวกล้องที่อุณหภูมิและความเข้มสนามไฟฟ้าต่างกัน

จากตารางที่ 4.4 พบว่าอัตราการยับยั้งเชื้อราอยู่บนแผ่นในข้าวร้อยละ 100 ดังนี้ ที่อุณหภูมิ 90 °C ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 450 300 และ 225 kV/m ที่ความร้อน 100 °C ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 450 300 225 และ 190 kV/m และที่ความร้อน 110 °C ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 450 300 225 และ 190 kV/m ตามลำดับ ดังนั้นจึงได้ทำการทดสอบสมมติฐานความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องระหว่างอุณหภูมิและความเข้มสนามไฟฟ้ามีผลเกี่ยวข้องกับอัตราการยับยั้งเชื้อราบนข้าว โดยในการทดสอบสมมติฐานทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (ANOVA) ในการที่ดำเนินการเพื่อหาความแตกต่างทางสถิติระหว่างค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง ระดับนัยสำคัญตั้งไว้ที่ความน่าจะเป็นร้อยละ 5 ทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยหลายวิธีโดยใช้แบบทดสอบแพททอเรียล การทำงานร่วมกันของอุณหภูมิและความเข้มของสนามไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็นทั้งหมด 9 กลุ่ม ซึ่ง a-i มาจากกลุ่มสูงสุดไปต่ำสุดของการยับยั้งเชื้อรา ดังรูปที่ 4.12 โดยการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ SPSS Statistics เวอร์ชัน 20.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความเข้มสนามไฟฟ้าในการยับยั้งเชื้อราในข้าวมีความเกี่ยวข้องกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )



รูปที่ 4.13 การยับยั้งเชื้อราบนข้าวด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง ณ อุณหภูมิ 90 °C

จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความเข้มสนามไฟฟ้าเพื่อให้เห็นภาพการทดสอบผลของการยับยั้งเชื้อราในข้าว โดยทำการเลือกตัวอย่าง 6 ตัวอย่าง คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้รับการบำบัดจัดเป็นกลุ่มควบคุม 1 ตัวอย่าง และตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดแล้วที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 450 300 225 190 และ 150 kV/m ที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าอย่างละ 1 ตัวอย่าง ณ อุณหภูมิ 90 °C แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าการแสดงการเจริญของเชื้อราในจานเพาะเลี้ยงพลาสติกบนอาหารเลี้ยงเชื้อมีความแตกต่างกัน โดยทำการสังเกตภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ จากเมล็ดข้าวที่มีไมซีเลียม (Mycelium) ของเชื้อราเป็นกลุ่มเส้นใยที่อยู่รวมกันเป็นกระจุกภายในจานเลี้ยงเชื้อ เช่น เส้นใยสีขาว สีเขียว สีเหลือง สีแดง และสีฟ้า เป็นต้น โดยที่กลุ่มควบคุมที่ไม่ถูกบำบัดมีเมล็ดข้าวที่มีไมซีเลียมของเชื้อราอยู่ทุกเมล็ด ดังรูปที่ 4.13 (ก) ส่วนตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดแล้วที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 150 และ 190 kV/m พบว่ามีเมล็ดข้าวที่มีไมซีเลียมอยู่บางเมล็ด ดังรูปที่ 4.13 (ข) และ 4.13 (ค) รวมถึงตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดแล้วที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 225 300 และ 450 kV/m ไม่มีเมล็ดข้าวที่มีไมซีเลียมของเชื้อรา ดังรูปที่ 4.13 (ง) ถึง 4.13 (ฉ)

#### 4.6 สรุป

ในบทนี้ได้อธิบายและวิเคราะห์ผลการทดสอบการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าว จากการทดสอบเป็นการทดสอบเพื่อยืนยันผลกระทบการยับยั้งเชื้อราในข้าวด้วยระบบการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง (Orsat, V and Raghavan, G. V., 2014) โดยได้ทดสอบด้วยการออกแบบระบบการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงที่สามารถปรับระดับความเข้มสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลทที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า 450 300 225 190 และ 150 kV/m เพื่อหาอัตราการยับยั้งเชื้อราบนข้าวกล้องที่อุณหภูมิและความเข้มสนามไฟฟ้าต่างกัน โดยทดสอบการใช้กำลังงานอินพุต 9 kW และใช้จุดป้อนกำลังงานแบบ 1 พอร์ต ซึ่งคลื่นไฟฟ้าแบบแผ่นเพลทจะส่งผ่านกำลังความเข้มสนามไฟฟ้าไปยังโหนด และสามารถส่งผลกระทบจนเกิดการยับยั้งเชื้อราที่ปนเปื้อนในเมล็ดข้าว จากการทดสอบพบว่า การให้ความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงนั้นส่งผลให้เกิดการยับยั้งเชื้อราที่ปนเปื้อนในเมล็ดข้าว ทั้งนี้ยังพบอีกว่า ณ ความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงที่ระดับที่สูงขึ้นส่งผลกับโหนด ทำให้ที่อุณหภูมิเป้าหมายมีการใช้ระยะเวลาและการใช้พลังงานในระบบลดลง รวมถึงจากการหาความสัมพันธ์เกี่ยวข้องระหว่างความร้อนและความเข้มสนามไฟฟ้ามีผลเกี่ยวข้องกับอัตราการยับยั้งเชื้อราในข้าว

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอผลกระทบจากความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าวโดยการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง พิจารณาระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่ได้ระหว่างแผ่นเพลทกับโพลดที่สำหรับการประยุกต์กับความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงจากการคำนวณเริ่มต้นจากการศึกษาทฤษฎีและความเป็นไปได้ในหลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ต่อมาทำการวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวอย่างข้าวและตัวอย่างเชื้อราเพื่อให้ทราบความสามารถในการดูดซับคลื่นของวัสดุในตัวอย่างแต่ละชนิดในช่วงความถี่ใช้งานที่แตกต่างกัน ต่อมาจากการคำนวณค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวอย่างนำมาวิเคราะห์ผลความแตกต่างกันของค่า  $\epsilon''$  ก่อนนำไปออกแบบระบบการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงที่สามารถปรับระดับความเข้มสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลทและทดสอบผลกระทบจากความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าวในระบบจริง

จากผลการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงกับโพลดในการทดลองระบบจริง ที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า คือ 450 300 225 190 และ 150 kV/m มีระยะห่างระหว่างแผ่นเพลทจากการคำนวณ ณ 2 3 4 5 และ 6 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากผลการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงกับโพลดในระบบจริง พบว่ามีผลความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนความร้อนโพลดในระบบจริงแตกต่างกันที่ ณ ความเข้มสนามไฟฟ้า 450 kV/m ใช้เวลาในการโอนความร้อนไปยังโพลดที่เป็นขั้วน้อยที่สุด ส่วนที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 150 kV/m ใช้เวลาในการโอนความร้อนไปยังโพลดที่เป็นขั้วมากที่สุด ต่อมาจากการใช้พลังงานของระบบ พบว่า ณ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับโพลดไดอิเล็กตริกในระบบจริง ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 450 kV/m มีผลของการใช้พลังงานของระบบน้อยที่สุด ส่วนที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 150 kV/m มีค่าการใช้พลังงานของระบบมากที่สุด และผลของการยับยั้งเชื้อราในข้าวหลังผ่านระบบการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูง พบว่า ณ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับโพลดไดอิเล็กตริกค่าเดียวกันในระบบจริงมีอัตราการยับยั้งเชื้อราในข้าวแตกต่างกัน จากการทดสอบสมมติฐานระหว่างความร้อนมีความสัมพันธ์กับความเข้มสนามไฟฟ้าในระบบจริง พบว่าค่าดังกล่าวมีผลเกี่ยวข้องกับอัตราการยับยั้งเชื้อราในข้าว จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความเข้มสนามไฟฟ้ามีผลต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าวที่มีความเกี่ยวข้องกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) และสามารถประยุกต์ในใช้งานเพื่อฆ่าหรือยับยั้งเชื้อราในธัญพืชทางการเกษตรชนิดอื่น ๆ ต่อไป

## 5.2. ปัญหาและข้อเสนอแนะ

สำหรับปัญหาที่พบในระหว่างการดำเนินการวิจัย คือ การกำหนดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษานั้นจะใช้วิธีการคำนวณ เนื่องจากเครื่องมือไม่สามารถวัดที่กำลังงานความถี่สูงทำให้สามารถเกิดความคลาดเคลื่อนได้ การกำหนดค่าของโพลดิใช้เทคนิคการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวอย่างเชื้อราที่ถูกเลือกและการควบคุมระดับการปนเปื้อนภายในข้าวของตัวอย่างเชื้อรา อาจส่งผลกระทบต่อพลังงานความเข้มสนามไฟฟ้าและความถี่ในระบบได้ ปัญหาจากการทดสอบระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงที่ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลทที่เกิน 60 มิลลิเมตร มีการส่งผ่านพลังงานความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงกับโพลดิลดลงและทำให้ใช้เวลานานขึ้น ณ ความร้อนที่มากกว่า 90 °C และอาจจะเพิ่มเติมเงื่อนไขอื่น ๆ ของค่าความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลทด้วยเครื่องวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การเพิ่มจำนวนจุดป้อนกำลังและการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของจุดป้อนกำลังงานเพื่อลดข้อผิดพลาดจากการทดลอง รวมถึงการประยุกต์ให้สามารถนำไปใช้งานจริงได้

## 5.3 แนวทางพัฒนาในอนาคต

ในงานวิจัยผลกระทบจากความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการยับยั้งเชื้อราในข้าว ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลทกับโพลดิที่เป็นข้าว โดยรูปแบบและโครงสร้างของการนำเสนอของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้น ได้มุ่งเน้นทำการศึกษาแนวทางการเป็นไปได้ของการใช้หลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ร่วมกับความเข้มสนามไฟฟ้าเพื่อยับยั้งเชื้อราและการทดลองในระบบจริง รวมถึงนำไปเป็นพัฒนาระบบและประยุกต์เพื่อใช้งานแก้ไขปัญหาในสภาพการใช้งานจริงจนถึงการทดสอบกับเชื้อรากลุ่มอื่น ๆ เพิ่มเติมร่วมกับธัญพืชทางการเกษตรชนิดอื่น ๆ สำหรับการออกแบบและพัฒนาระบบอาจจะต้องมีเครื่องที่สามารถวัดความเข้มสนามไฟฟ้าภายในโพลดิที่แม่นยำกว่าการคำนวณ หรือ การปรับเปลี่ยนวงจรที่ใช้ในการสร้างความถี่สูงให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเพื่อฆ่าหรือยับยั้งเชื้อราได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## รายการอ้างอิง

- กรมการข้าว. (2564). มาตรฐานข้าวคุณภาพ (ผลิตภัณฑ์สินค้าข้าว Q). สืบค้นจาก <https://dric.ricethailand.go.th/page.php?pid=4046>
- กรมการค้าต่างประเทศ. (2559). ประกาศกระทรวงพาณิชย์ เรื่อง กำหนดให้ข้าวหอมมะลิไทยเป็นสินค้ามาตรฐานและมาตรฐานสินค้าข้าวหอมมะลิไทย (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2559. สืบค้นจาก <https://www.dft.go.th/th-th/Detail-Law/ArticleId/8072/-3-2559>
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2555). ข้อมูลเทคโนโลยีเชิงลึก การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก (Dielectric Heating). สืบค้นจาก <http://www2.dede.go.th/Advancetech/Vol2/04Sample/PDF/08dielectric.pdf>
- กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ. (2565). Fact sheet ข้าว ต.ค.64. Retrieved from [https://ditp.go.th/ditp\\_web61/article\\_sub\\_view.php?filename=contents\\_attachment/759833/759833.pdf&title=759833&cate=456&d=0](https://ditp.go.th/ditp_web61/article_sub_view.php?filename=contents_attachment/759833/759833.pdf&title=759833&cate=456&d=0)
- กองวิจัยและพัฒนาข้าว. (2559). องค์ความรู้เรื่องข้าว. สืบค้นจาก <http://www.ricethailand.go.th/rkb3/title-index.php-file=content.php&id=6-2.htm>
- กิตติพงษ์ ศรีม่วง, กัญญา เชื้อพันธ์, กาญจนา พิบูลย์, สวาง ไชยรินทร์, กฤษณา สุตทะสาร, ยศพร ต้นสมรส, รุจิรา ปรีชา, ... รัศมี ฐิติเกียรติพงศ์. (2565). การตรวจสอบการปนเปื้อนของอะฟลาทอกซินปี 1 ในข้าวไทย. *วารสารวิชาการข้าว*, 9(1), pp. 30-36. สืบค้นจาก <http://thairicersearchjournal.ricethailand.go.th/index.php/2019-07-11-16-06-11?id=102>
- จิตรมาศ นากา, สุชาดา เวียร์ศิลป์, สงวนศักดิ์ ธนาพรพูนพงษ์, Dieter von Hörsten และ Wolfgang Lücke (2556). ผลของความร้อนคลื่นความถี่วิทยุต่อการควบคุมเชื้อรา *Aspergillus flavus* สารพิษอะฟลาทอกซินปี 1 และคุณภาพการหุงต้มของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 บรรจุที่มีความหนาแน่นต่างกัน. *วารสารเกษตร*, 29(1), 1-12. สืบค้นจาก <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/joacmu/article/view/245912>
- จूरี่รัตน์ ปาคำสี. (2554). สถาบันอาหาร. สืบค้นจาก <http://fic.nfi.or.th/japan-desk/upload/file/pdf/JP-2554.pdf>
- จूरี่รัตน์ ปาคำสี. (2555). สถาบันอาหาร. สืบค้นจาก <http://fic.nfi.or.th/japan-desk/upload/file/pdf/JP-2555.pdf>



สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. (2562) เกษตรฯ-พาณิชย์ยื่นข่าวไทย.

Retrieved from <https://warning.acfs.go.th/th/early-warning/view/?page=1191>

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2566) ระบบฐานข้อมูลและการให้บริการข้อมูลการค้าเกษตรต่างประเทศของประเทศไทย. Retrieved from <https://impexpth.oae.go.th/export>  
 ธารารัตน์ ชื่อดอฟ. (2558). จุลชีววิทยาทางอาหาร. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Afsah-Hejri, L., Hajeb, P., & Ehsani, R. J. (2020). Application of ozone for degradation of mycotoxins in food: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(4), 1777-1808. doi: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12594>

Alfaifi, B., Tang, J., Rasco, B., Wang, S., & Sablani, S. (2016). Computer simulation analyses to improve radio frequency (RF) heating uniformity in dried fruits for insect control. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 37, 125-137. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.08.012>

Akhila, P. P., Sunooj, K. V., Aaliya, B., Navaf, M., Sudheesh, C., Sabu, S., ... Khaneghah, A. M. (2021). Application of electromagnetic radiations for decontamination of fungi and mycotoxins in food products: A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 399-409. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.013>

Chandravarnan, P., Agyei, D., & Ali, A. (2022). Green and sustainable technologies for the decontamination of fungi and mycotoxins in rice: A review. *Trends in Food Science & Technology*. 124, 278-295 doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.020>

Chen, L., Huang, Z., Wang, K., Li, W., & Wang, S. (2016). Simulation and validation of radio frequency heating with conveyor movement. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 30(4), 473-491. doi: <https://doi.org/10.1080/09205071.2015.1121841>

Chen, L., Wang, K., Li, W., & Wang, S. (2015). A strategy to simulate radio frequency heating under mixing conditions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118, 100-110. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.025>

- Cheng, E. M., You, K. Y., Lee, K. Y., Abbas, Z., Rahim, H. A., Khor, S. F., ... & Lee, Y. S. (2017, November). Dielectric spectroscopy technique for carbohydrate characterization of fragrant rice, brown rice and white rice. In *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-FALL)* (pp. 205-209). IEEE. doi:<https://doi.org/10.1109/PIERS-FALL.2017.8293136>
- Cui, M., Sun, W., Xia, L., Wang, Z., Cao, Y., & Wu, Y. (2020). Effect of radio frequency heating on the mortality of *Rhizopertha dominica* (F.) and its impact on grain quality. *Journal of Stored Products Research*, *89*, 101695. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101695>
- Dag, D., Singh, R. K., & Kong, F. (2019). Dielectric properties, effect of geometry, and quality changes of whole, nonfat milk powder and their mixtures associated with radio frequency heating. *Journal of Food Engineering*, *261*, 40-50. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.04.017>
- Fang, Y., Hu, J., Xiong, S., & Zhao, S. (2011). Effect of low-dose microwave radiation on *Aspergillus parasiticus*. *Food Control*, *22*(7), 1078-1084. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.01.004>
- Gao, M., Tang, J., Wang, Y., Powers, J., & Wang, S. (2010). Almond quality as influenced by radio frequency heat treatments for disinfestation. *Postharvest Biology and Technology*, *58*(3), 225-231. doi: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2010.06.005>
- Gonçalves, A., Gkrillas, A., Dorne, J. L., Dall'Asta, C., Palumbo, R., Lima, N., ... Giorni, P. (2019). Pre- and postharvest strategies to minimize mycotoxin contamination in the rice food chain. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *18*(2), 441-454. doi: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12420>.
- Guo, C., Mujumdar, A. S., & Zhang, M. (2019). New development in radio frequency heating for fresh food processing: A review. *Food Engineering Reviews*, *11*, 29-43. doi:<https://doi.org/10.1007/s12393-018-9184-z>
- Helgi Library. (2022). Rice Consumption Per Capita. Retrieved from <https://www.helgilibrary.com/indicators/rice-consumption-per-capita>

- Hou, L., Huang, Z., Kou, X., & Wang, S. (2016). Computer simulation model development and validation of radio frequency heating for bulk chestnuts based on single particle approach. In *2016 ASABE Annual International Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers. doi: <https://doi.org/10.13031/aim.20162455715>
- Hou, L., Johnson, J. A., & Wang, S. (2016). Radio frequency heating for postharvest control of pests in agricultural products: A review. *Postharvest Biology and Technology*, *113*, 106-118. doi: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.11.011>
- Hou, L., Kou, X., Li, R., & Wang, S. (2018). Thermal inactivation of fungi in chestnuts by hot air assisted radio frequency treatments. *Food Control*, *93*, 297-304. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.06.016>
- Hou, L., Liu, Q., & Wang, S. (2019). Efficiency of industrial-scale radio frequency treatments to control *Rhizopertha dominica* (Fabricius) in rough, brown, and milled rice. *biosystems engineering*, *186*, 246-258. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.08.009>
- Hou, L., Wu, Y., Kou, X., Li, R., & Wang, S. (2022). Developing high-temperature-short-time radio frequency disinfestation treatments in coix seeds: Insect mortality, product quality and energy consumption. *Biosystems Engineering*, *215*, 262-270. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.01.018>.
- Höhlig, B., Schmidt, D., Mechtcherine, V., Hempel, S., Schröfl, C., Trommler, U., & Roland, U. (2015). Effects of dielectric heating of fresh concrete on its microstructure and strength in the hardened state. *Construction and Building Materials*, *81*, 24-34. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.004>
- Huang, Z., Marra, F., & Wang, S. (2016). A novel strategy for improving radio frequency heating uniformity of dry food products using computational modeling. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *34*, 100-111. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.01.005>
- Huang, Z., Zhu, H., Yan, R., & Wang, S. (2015). Simulation and prediction of radio frequency heating in dry soybeans. *Biosystems Engineering*, *129*, 34-47. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.09.014>

- Jiao, S., Johnson, J. A., Tang, J., Tiwari, G., & Wang, S. (2011). Dielectric properties of cowpea weevil, black-eyed peas and mung beans with respect to the development of radio frequency heat treatments. *biosystems engineering*, *108*(3), 280-291 doi:<https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2010.12.010>
- Jiao, S., Zhong, Y., & Deng, Y. (2016). Hot air-assisted radio frequency heating effects on wheat and corn seeds: Quality change and fungi inhibition. *Journal of Stored Products Research*, *69*, 265-271. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2016.09.005>
- Jones, P. L. (2011). High frequency heating. Retrieved from <https://www.thermopedia.com/de/content/850/>
- Jongmeesuk, T., Tossamas, P., & Worapreda, P. (2017). Strategy analysis of Thai rice development and processing and competition in world trade market. *Journal of Research and Development Institute, Rajabhat Maha Sarakham University*, *4*(2), 13-26.
- Lee, S. H., Park, S. Y., Byun, K. H., Chun, H. S., & Ha, S. D. (2017). Effects of microwaves on the reduction of *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus* on brown rice (*Oryza sativa* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.). *Food Additives & Contaminants: Part A*, *34*(7), 1193-1200. doi:<https://doi.org/10.1080/19440049.2017.1319072>
- Li, R., Kou, X., Hou, L., Ling, B., & Wang, S. (2018). Developing and validating radio frequency pasteurisation processes for almond kernels. *Biosystems Engineering*, *169*, 217-225. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.03.001>
- Li, Y., Li, F., Tang, J., Zhang, R., Wang, Y., Koral, T., & Jiao, Y. (2018). Radio frequency tempering uniformity investigation of frozen beef with various shapes and sizes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *48*, 42-55. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.05.008>
- Ling, B., Liu, X., Zhang, L., & Wang, S. (2018). Effects of temperature, moisture, and metal salt content on dielectric properties of rice bran associated with radio frequency heating. *Scientific Reports*, *8*(1), 4427. doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-018-22567-4>

- Ling, B., Lyng, J. G., & Wang, S. (2018). Radio-frequency treatment for stabilization of wheat germ: Dielectric properties and heating uniformity. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 48, 66-74. doi:<https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2018.05.012>
- Ling, B., Cheng, T., & Wang, S. (2020). Recent developments in applications of radio frequency heating for improving safety and quality of food grains and their products: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 60(15), 2622-2642. doi:<https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1651690>
- Liu, Y., Tang, J., Mao, Z., Mah, J. H., Jiao, S., & Wang, S. (2011). Quality and mold control of enriched white bread by combined radio frequency and hot air treatment. *Journal of Food Engineering*, 104(4), 492-498. doi:<https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2010.11.019>
- Llave, Y., Liu, S., Fukuoka, M., & Sakai, N. (2015). Computer simulation of radiofrequency defrosting of frozen foods. *Journal of Food Engineering*, 152, 32-42. doi:[10.1016/j.jfoodeng.2014.11.020](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.11.020)
- Mir, S. A., Dar, B. N., Shah, M. A., Sofi, S. A., Hamdani, A. M., Oliveira, C. A., ... Sant'Ana, A. S. (2021). Application of new technologies in decontamination of mycotoxins in cereal grains: Challenges, and perspectives. *Food and Chemical Toxicology*, 148, 111976. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.111976>
- Mohamad, S. N. H., Muhamad, I. I., Mohd Jusoh, Y. M., & Khairuddin, N. (2018). Dielectric properties for selected wall material in the development of microwave-encapsulation-drying. *Journal of food science and technology*, 55, 5161-5165. doi: <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3327-3>.
- Nelson, S. O. (1996). Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control. *Transactions of the ASAE*, 39(4), 1475-1484. doi: <https://doi.org/10.13031/2013.27641>
- Nelson, S.O. (2015). *Dielectric Properties of Agricultural Materials and Their Applications*. (1st ed.). Academic Press: Amsterdam, The Netherlands.
- Nelson, S. O., & Trabelsi, S. (2006). Dielectric spectroscopy of wheat from 10 MHz to 1.8 GHz. *Measurement Science and Technology*, 17(8), 2294. doi: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/8/034>

- Nelson, S. O., & Trabelsi, S. (2012). Factors influencing the dielectric properties of agricultural and food products. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 46(2), 93-107. doi: <https://doi.org/10.1080/08327823.2012.11689828>.
- Ozturk, S., Kong, F., Singh, R. K., Kuzy, J. D., & Li, C. (2017). Radio frequency heating of corn flour: Heating rate and uniformity. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 44, 191-201. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.05.001>
- Orsat, V., & Raghavan, G. V. (2014). Radio-frequency processing. In *Emerging technologies for food processing* (pp. 385-398). Academic Press. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-411479-1.00021-8>
- Palazoğlu, T. K., & Miran, W. (2018). Experimental investigation of the combined translational and rotational movement on an inclined conveyor on radio frequency heating uniformity. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 47, 16-23. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.01.003>
- Panrapee, I., Phakpoom, K., Thanapoom, M., Nampeung, A., & Warapa, M. (2016). Exposure to aflatoxin B 1 in Thailand by consumption of brown and color rice. *Mycotoxin research*, 32, 19-25. doi: <https://doi.org/10.1007/s12550-015-0236-4>
- Phan, L. T. K., De Saeger, S., Eeckhout, M., & Jacxsens, L. (2023). Public health risk due to aflatoxin and fumonisin contamination in rice in the Mekong Delta, Vietnam. *International Journal of Food Contamination*, 10(1), 4. doi: <https://doi.org/10.1186/s40550-023-00104-0>
- Physicskruadd. (2012). สนามไฟฟ้า (electric field). สืบค้นจาก <https://physicskruadd.wordpress.com/2012/03/12/สนามไฟฟ้า-electric-field/>
- Profpeterelia. (2016). Hysteresis Losses and Dielectric Heating. Retrieved from <https://profpeterelia.wordpress.com/2016/04/27/hysteresis-losses-and-dielectric-heating/>
- Qi, S., Han, J., Lagnika, C., Jiang, N., Qian, C., Liu, C., ... Zhang, M. (2021). Dielectric properties of edible fungi powder related to radio-frequency and microwave drying. *Food Production, Processing and Nutrition*, 3(1), 1-13. doi: <https://doi.org/10.1186/s43014-021-00060-2>.

- Savi, G. D., Piacentini, K. C., Rocha, L. O., Carnielli-Queiroz, L., Furtado, B. G., Scussel, R., ... Angioletto, E. (2018). Incidence of toxigenic fungi and zearalenone in rice grains from Brazil. *International journal of food microbiology*, 270, 5-13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.02.004>
- Schmidt, M., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2018). Recent advances in physical post-harvest treatments for shelf-life extension of cereal crops. *Foods*, 7(4), 45. doi: <https://doi.org/10.3390/foods7040045>
- Shi, H. J., Sun, Z. J., Yan, Z. M., & Ren, J. B. (2017). Influence of electrode distance on heating behaviour associated to radio frequency processing of low moisture foods. *Acta Alimentaria*, 46(4), 517-526. doi:10.1556/066.2017.46.4.15
- Sirohi, R., Tarafdar, A., Gaur, V. K., Singh, S., Sindhu, R., Rajasekharan, R., ... Pandey, A. (2021). Technologies for disinfection of food grains: Advances and way forward. *Food Research International*, 145, 110396. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110396>
- Sosa-Morales, M. E., Valerio-Junco, L., López-Malo, A., & García, H. S. (2010). Dielectric properties of foods: Reported data in the 21st Century and their potential applications. *LWT-Food Science and Technology*, 43(8), 1169-1179. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.03.017>
- Srivastava, S., & Mishra, H. N. (2021). Ecofriendly nonchemical/nonthermal methods for disinfestation and control of pest/fungal infestation during storage of major important cereal grains: A review. *Food Frontiers*, 2(1), 93-105. doi: <https://doi.org/10.1002/fft2.69>
- Tang, J., Ikediala, J. N., Wang, S., Hansen, J. D., & Cavalieri, R. P. (2000). High-temperature-short-time thermal quarantine methods. *Postharvest Biology and Technology*, 21(1), 129-145. doi: [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(00\)00171-X](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(00)00171-X)
- Tulayakul, P. and Sugita-Konishi, Y. (2017). Mycotoxin contamination in foodstuffs and feeds-health concerns in Thailand. *Japanese Journal of Veterinary Research*, 65(3), 173-183. Retrieved from <https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/67146/1/p173-183%20Phitsanu%20Tulayakul.pdf>

- Vearasilp, S., Thobunluepop, P., Thanapornpoonpong, S. N., Pawelzik, E., & von Hörsten, D. (2015). Radio frequency heating on lipid peroxidation, decreasing oxidative stress and aflatoxin B1 reduction in *Perilla frutescens* L. highland oil seed. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, *5*, 177-183. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.08.027>
- Villa-Rojas, R., Zhu, M. J., Marks, B. P., & Tang, J. (2017). Radiofrequency inactivation of *Salmonella* Enteritidis PT 30 and *Enterococcus faecium* in wheat flour at different water activities. *Biosystems engineering*, *156*, 7-16. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.01.001>
- Wang, S. H. A. O. J. I. N., Monzon, M. A. R. I. A., Johnson, J. A., Mitcham, E. J., & Tang, J. U. M. I. N. G. (2007). Industrial-scale radio frequency treatments for insect control in walnuts: I: Heating uniformity and energy efficiency. *Postharvest Biology and Technology*, *45*(2), 240-246. doi:<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.12.023>
- Wang, S., Tang, J., Johnson, J. A., Mitcham, E. L. I. Z. A. B. E. T. H., Hansen, J. D., Hallman, G., ... Wang, Y. (2003). Dielectric properties of fruits and insect pests as related to radio frequency and microwave treatments. *Biosystems Engineering*, *85*(2), 201-212. doi:[https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00042-4](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00042-4)
- Wang, Y., Wig, T. D., Tang, J., & Hallberg, L. M. (2003). Dielectric properties of foods relevant to RF and microwave pasteurization and sterilization. *Journal of Food Engineering*, *57*(3), 257-268. doi:[https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00306-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00306-0)
- Wang, Y., Zhang, L., Gao, M., Tang, J., & Wang, S. (2014). Evaluating radio frequency heating uniformity using polyurethane foams. *Journal of Food Engineering*, *136*, 28-33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.03.018>
- Wason, S., Verma, T., & Subbiah, J. (2021). Validation of process technologies for enhancing the safety of low-moisture foods: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *20*(5), 4950-4992. doi: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12800>



- Wasusathien, W., Santalunai, S., Thosdeekoraphat, T., & Thongsopa, C. (2020, September). Rice Types Classification by Using Dielectric Properties Measurement with Saline Water Increasing Technique. In *2020 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM)* (pp. 433-438). IEEE.
- Yang, C., Zhao, Y., Tang, Y., Yang, R., Yan, W., & Zhao, W. (2018). Radio frequency heating as a disinfestation method against *Corcyra cephalonica* and its effect on properties of milled rice. *Journal of stored products research*, *77*, 112-121. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jspr.2018.04.004>.
- Yang, C., Zhao, Y., Tang, Y., Yang, R., Yan, W., & Zhao, W. (2018). Radio frequency heating as a disinfestation method against *Corcyra cephalonica* and its effect on properties of milled rice. *Journal of stored products research*, *77*, 112-121. doi:<https://doi.org/10.1016/J.JSPR.2018.04.004>
- Yang, K., Li, K., Pan, L., Luo, X., Xing, J., Wang, J., ... Chen, Z. (2020). Effect of ozone and electron beam irradiation on degradation of zearalenone and ochratoxin A. *Toxins*, *12*(2), 138. doi: <https://doi.org/10.3390/toxins12020138>
- Zhang, L., Kou, X., Zhang, S., Cheng, T., & Wang, S. (2018). Effect of water activity and heating rate on *Staphylococcus aureus* heat resistance in walnut shells. *International journal of food microbiology*, *266*, 282-288. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.12.019>
- Zhang, L., Lan, R., Zhang, B., Erdogdu, F., & Wang, S. (2021). A comprehensive review on recent developments of radio frequency treatment for pasteurizing agricultural products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *61*(3), 380-394.
- Zhang, S., Ramaswamy, H., & Wang, S. (2019). Computer simulation modelling, evaluation and optimisation of radio frequency (RF) heating uniformity for peanut pasteurisation process. *biosystems engineering*, *184*, 101-110. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.06.004>
- Zhang, Y., Pandiselvam, R., Zhu, H., Su, D., Wang, H., Ai, Z., ... Liu, Y. (2022). Impact of radio frequency treatment on textural properties of food products: An updated review. *Trends in Food Science & Technology*. *124*, 154-166 doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.014>

- Zheng, A., Zhang, L., & Wang, S. (2017). Verification of radio frequency pasteurization treatment for controlling *Aspergillus parasiticus* on corn grains. *International Journal of Food Microbiology*, 249, 27-34. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.02.017>
- Zheng, A., Zhang, B., Zhou, L., & Wang, S. (2016). Application of radio frequency pasteurization to corn (*Zea mays* L.): Heating uniformity improvement and quality stability evaluation. *Journal of Stored Products Research*, 68, 63-72. doi:<https://doi.org/10.1016/J.JSPR.2016.04.007>
- Zheng, A., Zhang, L., & Wang, S. (2017). Verification of radio frequency pasteurization treatment for controlling *Aspergillus parasiticus* on corn grains. *International Journal of Food Microbiology*, 249, 27-34. doi:<https://doi.org/10.1016/J.IJFOODMICRO.2017.02.017>
- Zhou, H., & Wang, S. (2019). Developing a screw conveyor in radio frequency systems to improve heating uniformity in granular products. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(3), 174-179. doi: <https://doi.org/10.25165/IJABE.V12I3.4227>
- Zhou, L., Ling, B., Zheng, A., Zhang, B., & Wang, S. (2015). Developing radio frequency technology for postharvest insect control in milled rice. *Journal of Stored Products Research*, 62, 22-31. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2015.03.006>



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี




## บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Sutacha, C., Santalunai, S., Thongsopa, C., Thosdeekoraphat, T., & Penkrue, W. (2022). Inactivation of Contaminated Fungi in Rice Grains by Dielectric Heating. *Applied Sciences*, 12(20), 10478. doi:<https://doi.org/10.3390/app122010478>



Article

# Inactivation of Contaminated Fungi in Rice Grains by Dielectric Heating

Chalermkiat Sutacha <sup>1</sup>, Samran Santalunai <sup>1,\*</sup> , Chanchai Thongsopa <sup>1</sup> , Thanaset Thosdeekoraphat <sup>1</sup> and Watsana Penkhruue <sup>2</sup> 

<sup>1</sup> School of Electronic Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

<sup>2</sup> School of Preclinic Sciences, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

\* Correspondence: samran.sa@sut.ac.th

**Abstract:** The quality of rice is decreased when contaminated with fungi. *Aspergillus* species are the most frequently found in rice. This research proposes using a dielectric heating method for fungal inactivation in rice grains by radio frequency (RF) energy. In order to understand the interaction between the fungi contaminating rice and electrical energy, dielectric properties comparison between *Aspergillus* sp. BP17 and rice powder were measured using an open-ended coaxial probe with a vector network analyzer (VNA) to develop dielectric heating equipment. The effect of RF energy on the dielectric heating system (9 kW, 40.68 MHz) is investigated based on different electric field intensities (150, 190, 225, 300, and 450 kV/m) with different temperatures (70, 80, 90, 100, and 110 °C). The growth of fungi contaminating rice was determined using a direct count method and reported as a percentage of inactivation. The result showed that the fungal inactivation of 100% was obtained at the electric field intensity value  $\geq 225$  kV/m at the lowest temperature of 90 °C. The combination of temperature and electric field intensity significantly ( $p \leq 0.05$ ) increased the percentage of fungal inactivation in rice grains. The optimal conditions of dielectric heating are suitable for fungal inactivation in rice industries. These results indicate that the proposed dielectric heating system is useful for inactivation of *Aspergillus* species.

**Keywords:** dielectric heating; fungal inactivation; electric field intensity; energy consumption



**Citation:** Sutacha, C.; Santalunai, S.; Thongsopa, C.; Thosdeekoraphat, T.; Penkhruue, W. Inactivation of Contaminated Fungi in Rice Grains by Dielectric Heating. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 10478. <https://doi.org/10.3390/app122010478>

Academic Editor: Antonio Valero

Received: 20 September 2022

Accepted: 14 October 2022

Published: 17 October 2022

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

Rice (*Oryza sativa* L.) is one of the most important grains that feed approximately 75% of the world's population. It is a staple food of Asian countries, including China, India, Indonesia, Bangladesh, Vietnam, Philippines, Thailand, etc. [1,2]. However, the quality of rice grains can be affected by contaminated fungal contamination *Aspergillus* species [3,4].

*Aspergillus* species contamination levels in brown rice were discovered to be  $10^3$  CFU/g [5]. Rice contamination with fungal species during harvest and storage is of poor quality and low economic value. Moreover, it can harm human and animal health [6]. Some fungal species (mainly *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus*) produce aflatoxin, which are fungal secondary metabolites that contaminate dietary staples worldwide, including maize, rice, and groundnuts [7]. Dietary exposure to aflatoxin is a public health concern due to its acute and chronic carcinogenic effects [8]. Therefore, decontamination of fungi in rice grains before storage or distribution is very important.

Techniques for fungal decontamination have been reported, including chemical, biological, and physical methods [9]. Various chemicals, such as ozone (O<sub>3</sub>), have the potential to inhibit fungal growth and disrupt mycelial development through oxidation reactions. However, the use of ozone limitations in industrial applications, such as the high-cost requirement for installation and operation [10,11]. Biological methods, such as temperature, humidity, and other environmental parameters, do not kill or inhibit fungi, especially fungal spores [12]. Interestingly, there are physical mechanisms, such as radio frequency

heating (RFH) and microwave heating (MWH). The methods can potentially damage fungal cells by heat generation [13–15], which has no toxic residues and no effect on human health. In addition, the rice industry has used RFH and MWH treatments [16–18].

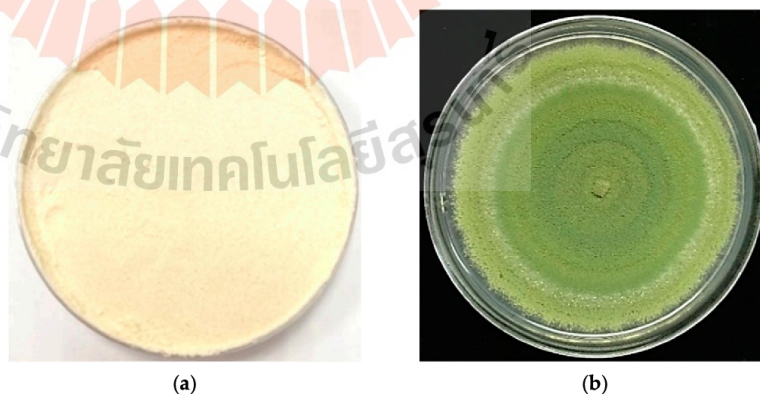
RFH and MWH have been used for controlling various fungi in food products. For example, RF treatment used to control *Aspergillus flavus* in oilseed, wheat, and corn [19,20] and *Penicillium crustosum* in chestnuts [21]. The control of *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus* in brown rice, barley, and corn [5,22], *Penicillium* spp., and *Aspergillus* spp. in Brazil nut seed shell and kernel has been reported using MW [23]. At the present study, dielectric heating is one of the heating techniques, including RF and MW energy. This technique can convert electrical energies into thermal energy inside the dielectric material. Depending on the electric field frequency, different heat level is generated in the dielectric material [24–28]. In previous studies, the application of dielectric heating is a selective heating technique for insect control in rice [29–37]. The method involves heating the insects to a lethal temperature (60 °C) with exposure time (30 min) and avoiding the heat generated in the rice based on the different dielectric properties [33,38]. The dielectric loss is the ability to dissipate energy in an applied electric field [31,33]. The measured dielectric loss is considered to find out the optimal frequency ranges, which leads to efficient heating system.

This is novel research that aims to optimize the best condition of dielectric heating for fungal control in rice products. The comparative effect of these dielectric heating frequency ranges on fungal growth had not yet been conducted. In addition, the effect of electric field intensity on the heating system is also examined in this study. The information about dielectric properties is an important key for developing dielectric heating industrial equipment in the future.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Rice Samples Preparation and Fungal Strain

Thai Hom Mali brown rice (*Oryza sativa* L. cv. KDML105) was purchased from the local market in Nakhon Ratchasima city, Thailand. The rice was taken out and allowed to equilibrate to room temperature ( $25 \pm 2$  °C) overnight. The moisture content of the rice sample was measured using a digital grain moisture meter (Handheld SMART SENSOR AR991, Hebei, China). Five Kg of dehulled polished rice samples was grounded to a fine powder using a grinding machine (Huangcheng HC-200, Shanghai, China), as shown in Figure 1a.

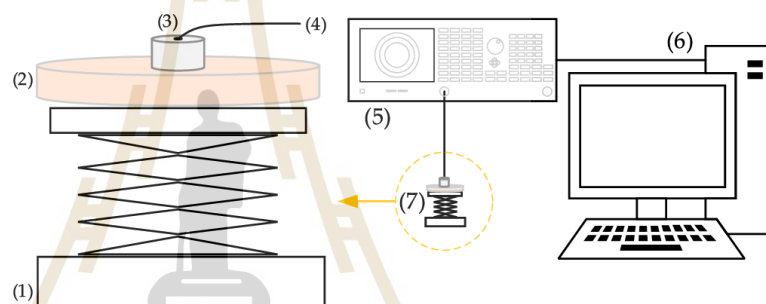


**Figure 1.** The sample of dielectric properties measurement: (a) Rice powder sample; (b) *Aspergillus* sp. BP17.

The fungal strain BP17 was identified as *Aspergillus* sp. and procured from the culture collection of AJTR microbiology laboratory, School of Preclinical Sciences, Institute of Science, Suranaree University of Technology (Nakhon Ratchasima city, Thailand) with deposited number as BP17. The strain was cultured on Potato Dextrose Agar (PDA; Himedia, Maharashtra, India) and incubated at 30 °C for one week, as shown in Figure 1b.

### 2.2. Measurement of Dielectric Properties of Fine Rice Powder and *Aspergillus* sp. BP17

The fungal colony on PDA and 60 g of fine rice powder in a polystyrene Petri dish (diameter 100 mm and height 15 mm) were measured dielectric properties using a VNA (Agilent Technologies, Inc., Santa Clara, CA, USA) with an open-ended coaxial probe and a computer [39,40]. The probe and the network analyzer were contacted using a highly flexible coaxial. The network analyzer measurement based on software (Keysight Materials Measurement Suit; Keysight Technologies Inc., Santa Rosa, CA, USA) was set from 40 to 8500 MHz and at 1001 discrete frequencies to measure the dielectric properties. The measurement set-up is shown in Figure 2.



**Figure 2.** Measurement equipment (1. Laboratory jack, 2. Sample, 3. Open-ended coaxial probe, 4. Coaxial cable, 5.VNA, 6. Computer with software and 7. Measurement setup).

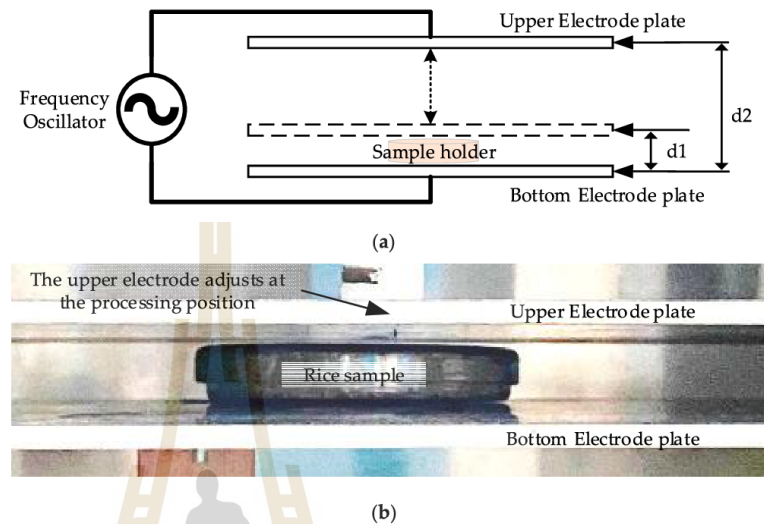
The measurement system was turned on and kept in a standby mode at room temperature for approximately 60 min. Then, the network analyzer and the open-end coaxial probe were calibrated at room temperature using air, short, and deionized water as the standard [41]. After that, the calibrated probe was dried and cleaned using 70% alcohol.

For dielectric properties measurement, the samples (fungal colony on PDA and 60 g of fine rice powder) were placed on the laboratory jack and the sample surface was touched with the probe (Figure S1 in Supplementary Material). Then, the dielectric property values of each sample were measured with three replications, and the values were recorded and analyzed for optimal frequency ranges in dielectric heating experiments.

### 2.3. Experimental Design for Dielectric Heating System

#### 2.3.1. Dielectric Heating System Setting

The dielectric heating system (9 kW, 40.68 MHz) was used in this study. This system mainly consisted of two parallel electrode plates and a frequency oscillator as shown in Figure 3a. The upper and bottom electrode plate size is 52 cm × 52 cm. The position of the upper electrode can be adjusted to achieve a different electric field intensity while the bottom electrode plate is fixed for placing the samples, the central position of the bottom electrode provides a better heating rate with a more uniform temperature distribution [42]. The sterile Petri dish containing the rice sample was placed at the center of the bottom electrode, as shown in Figure 3b.



**Figure 3.** Schematic diagram of dielectric heating system: (a) Dielectric heating system; (b) Samples in dielectric heating system.

For dielectric heating, the power conversion in a material depends on the operating frequency, dielectric loss factor and the electric field density inside the material. The power dissipated per unit volume in the dielectric material can be expressed [43] as Equation (1):

$$P = fE^2\epsilon'' 55.63 \times 10^{-12} \quad (1)$$

where  $P$  is the power dissipated per unit volume ( $W/m^3$ ),  $f$  is the frequency (Hz),  $E$  is the rms electric field intensity (V/m) and  $\epsilon''$  is dielectric loss factor of the material being exposed to the alternating electric fields.

### 2.3.2. Determining the Optimal ISM Frequency Bands

Specific frequency range of RF and MW were studied at 40 to 8500 MHz based on the industrial, scientific, and medical (ISM) frequency [44]. Then, the dielectric constant ( $\epsilon'$ ) and loss ( $\epsilon''$ ) at 40.68 MHz of RF, and 915 and 2450 MHz of MW were measured and analyzed. The optimal frequency was calculated using the ratio between dielectric properties of *Aspergillus* sp. BP17 and rice samples, and the highest of the ratio was chosen as optimal ISM frequency (MHz).

### 2.3.3. The Study of Relative Electric Field Intensity and Temperature

The dielectric heating system was set the optimized ISM frequency band as 40.68 MHz. The electric field intensity was studied and calculated according to Equation (2):

$$E = \frac{V}{\Delta d} \quad (2)$$

where  $E$  is the electric field intensity (V/m),  $V$  is the voltage during the heating process (V),  $\Delta d$  is the distance between electrodes (m).

In total, 75 dehulled polished rice samples (60 g with 8.33% moisture content) were prepared in sterile glass Petri dish and then placed at the central position of the bottom electrode under the dielectric heating system at 40.68 MHz frequency. The temperature was monitored and recorded using the infrared thermography camera (U5857A, Keysight



Technologies Inc., Santa Rosa, CA, USA). At different five electric field intensities (150, 190, 225, 300, and 450 kV/m), heating time ( $t$ ) was recorded three replicates at each five temperatures ( $T$ ) including 70, 80, 90, 100, and 110 °C and calculated for heating rate (°C/min) according to Equation (3):

$$\text{Heating rate} = \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (3)$$

where  $T$  is the temperature in sample (°C) and  $t$  is the heating time (min).

The energy consumption ( $W$ ) was calculated according to Equation (4):

$$W = \frac{VI\Delta t}{m} \quad (4)$$

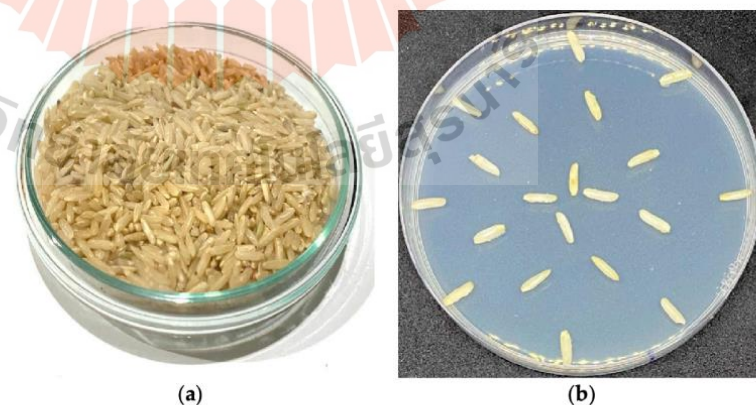
where  $W$  is the energy consumption (kWh  $g^{-1}$ ),  $V$  is the voltage during the heating process (V),  $I$  is the current during the heating process (A),  $t$  is the heating time (hour), and  $m$  is the sample mass (gram).

#### 2.3.4. Effect of Dielectric Heating on Fungal Growth

The treated seventy-five rice samples in a sterile glass Petri dish (Figure 4a) were treated at different electric field intensities (150, 190, 225, 300, and 450 kV/m) and temperatures (70, 80, 90, 100, and 110 °C) using dielectric heating system. The non-treated rice sample was used as control with three replications. The rice samples were kept in a sterile glass Petri dish during the heating process using aseptic techniques [45]. After that 20 grains of treated and non-treated (control) rice samples were randomly selected and placed on a sterile PDA using aseptic techniques under a laminar airflow cabinet (ScanLaf/Mars 1500, Labogene Aps, Lyngø, Denmark) (Figure 4b). Then, the plates were incubated at room temperature for five days. The fungal mycelium was observed using a stereo microscope (Stemi 305, Carl Zeiss, Oberkochen, Germany) and compared with control groups that were not exposed to the electric field. Fungal colonies on rice seeds were counted and fungal inactivation was calculated according to Equation (5):

$$\text{fungal inactivation (\%)} = \left(1 - \frac{N_P}{N_T}\right) \times 100\% \quad (5)$$

where  $N_P$  is the number of positive rice grain, and  $N_T$  is the number of total rice grain.



**Figure 4.** Samples for investigating fungal inactivation: (a) rice sample; (b) rice grains on PDA before incubation.

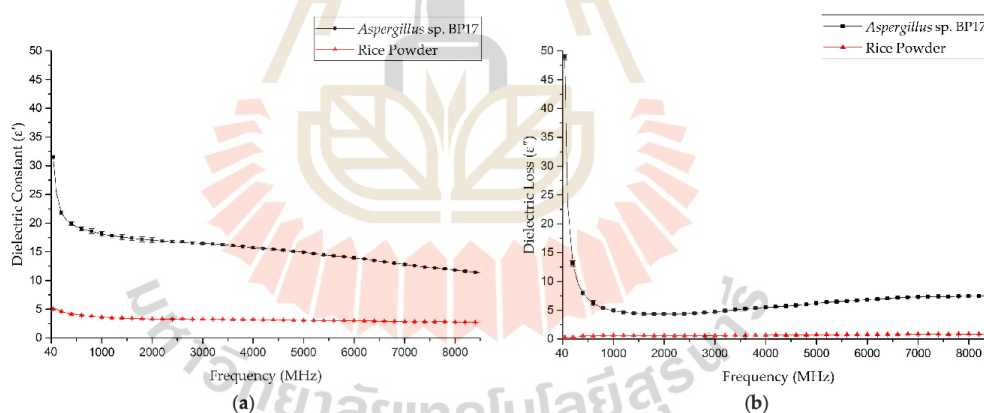
#### 2.4. Statistical Analysis

Each experiment was carried out in triplicate and data were statistically analyzed using SPSS Statistics version 20.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA). One-way analysis of variance (ANOVA) was performed to determine the static differences between the sample means, with the level of significance set at 5% probability. Multiple comparisons of the means were conducted using a factorial experiment test. All data were expressed as mean  $\pm$  SD.

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. Optimization of Frequency Band under Dielectric Heating System

The dielectric properties [dielectric constant ( $\epsilon'$ ) and loss ( $\epsilon''$ )] of *Aspergillus* sp. BP17 and rice powder samples were investigated at frequency ranges as 40 to 8500 MHz as shown in Figure 5. The result showed that dielectric constants of both *Aspergillus* sp. BP17 and rice powder were decreased when frequency increased. In accordance with Cheng et al. (2017) reported that the electric constant is generally decreases when frequency increases for all types of rice due to the presence of polar molecules such as glucose and fructose [40]. At low frequencies (<200 MHz), the dielectric constants of *Aspergillus* sp. BP17 rapidly decreased from 31.5 to 21.8 at frequencies between 40 to 200 MHz (Figure 5a, upper line). A previous study reported that the dielectric constants of fungi were higher than 4.0 at frequencies lower than 200 MHz including *Botrytis cinerea*, *Alternaria solani*, *Ceratocystis radicicola*, *Rhizoctonia solani*, *Lasiodiplodia theobromae*, *Fusarium oxysporum* and *F. solani* [39]. However, the dielectric constants of rice powder slowly reduced from 5.06 to 4.63 at frequencies between 40 to 200 MHz (Figure 5a, bottom line). In comparison between fungi and rice samples, *Aspergillus* sp. BP17 showed higher dielectric constant than the rice sample due to it being associated with cell membrane polarization [46].



**Figure 5.** Dielectric properties of *Aspergillus* sp. BP17 and rice powder: (a) Dielectric constant ( $\epsilon'$ ) and (b) Dielectric loss ( $\epsilon''$ ).

The dielectric loss of *Aspergillus* sp. BP17 rapidly decreased from 48.92 to 13.13 at frequencies between 40 to 200 MHz (Figure 5b, upper line). After that, the values were slowly increased when frequencies were increased between 2000 and 8500 MHz. In contrast, the dielectric loss of rice was 0.26 and 0.86 at frequency of 40–200 and 8500 MHz, respectively (Figure 5b, bottom line). *Aspergillus* sp. BP17 and rice powder showed a different dielectric loss because the change of dielectric loss was caused by the relative effects of ionic conductivity and free water relaxation [40,41,47]. Moreover, the dielectric loss behavior of *Aspergillus* sp. BP17 was similar to the results reported in edible fungi [47]

and the dielectric loss behavior of rice in this study was also similar to Jasmine rice 105, Hompathum rice, Phitsanulok rice, Chinart rice, and Gorkor 43 rice [48].

According to the US Federal Communication Commission (FCC), it has been reported that the optimal specific frequencies for ISM uses 13.56, 27.12, and 40.68 MHz of RF and 915 and 2,450 MHz of MW [44]. So, three ISM frequency bands, including 40.68, 915, and 2450 MHz, were selected and calculated the ratio of dielectric constant and loss in fungal and rice powder samples (Table 1). The result showed that optimal frequency was 40.68 MHz based on the highest of ratio (194.9 folds) between dielectric loss of *Aspergillus* sp. BP17 and rice powder, which is the same result with Figure 5b. Therefore, at a frequency with the high difference of dielectric loss between fungi and rice can be applied for fungal inactivation using dielectric heating applications based on the “thermal runaway” phenomenon as described [33]. Therefore, the frequency of 40.68 MHz was selected for fungal control using dielectric heating system in the next experiment.

**Table 1.** Dielectric properties of *Aspergillus* sp. BP17 and rice powder.

Mean ± SD	Dielectric Constant			Dielectric Loss		
	Frequency (MHz)					
	40.68	915	2450	40.68	915	2450
<i>Aspergillus</i> sp. BP17 (A)	31.574 ± 0.333	18.356 ± 0.449	16.794 ± 0.166	48.92 ± 0.466	5.042 ± 0.117	4.412 ± 0.106
Rice powder (B)	4.754 ± 0.123	3.774 ± 0.044	3.343 ± 0.064	0.251 ± 0.036	0.551 ± 0.022	0.582 ± 0.019
Ratio A:B	6.641	4.863	5.024	194.900	9.151	7.580

### 3.2. Study of Relative Electric Field Intensity and Temperature on Heating System

The effect of relative electric field intensities and temperatures (heating time-temperature histories and energy consumption-temperature histories) was investigated at the selected frequency of 40.68 MHz (Figure 6). The result showed that the heating time-temperature histories and energy consumption-temperature histories were nonlinear. The graph also indicates that the heating time and energy consumption decreased when electric field intensities increased. The optimal electric field intensity was 450 kV/m based on the highest ratio (26.26 folds at 90 °C) between the heating time comparison of 450 kV/m and 150 kV/m for each temperature (35 min, and 47.25 °C/min). The differences in the heating time are because of various heating mechanisms [49]. It has been reported that dielectric materials convert electric energy to heat when placed into an electromagnetic field in the range of radio and microwave frequencies [43,50]. Similar to the earlier work, heating rate and heating time changed with electrode gaps [51–53]. Moreover, the optimal electric field intensity was 450 kV/m based on the highest of ratio (26.26 folds at 90 °C) between the energy consumption comparison of 450 kV/m and 150 kV/m for each temperature (0.33 kWh/g). This result showed that the increased electric field intensity allowed less energy in the dielectric heating system. Similar to the earlier work, energy comparison changed with electrode gaps (1.98 folds at 80 °C) [49].

### 3.3. Effect of Dielectric Heating Condition on Fungal Growth

The rice samples were treated by the heating system at a selected frequency and electric field intensity of 40.68 MHz with 150, 190, 225, 300, and 450 kV/m, respectively. The fungal inactivation on the rice sample was obtained by using temperature with electric field intensity (Figure 7). As seen in Figure 7, the synergies of temperatures and electric field intensities can be divided into nine groups (a–i, which are from the highest to lowest group of the fungal inactivation). The result showed that the fungal inactivation of 100% was obtained at the electric field intensity value  $\geq 225$  kV/m at the lowest temperature of 90 °C. Based on statistical analysis, the fungal inactivation in rice grains was significant ( $p \leq 0.05$ ) by the effects of the combination of temperature and electric field intensity. A previous study reported that the effect of both the thermal and non-thermal was caused by the

pasteurization mechanism on micro-organisms at the cellular level [54]. Here, the fungal inactivation of 100% was obtained using 190 kV/m at 100 and 110 °C, 225 kV/m at 90, 100 and 110 °C, 300 kV/m at 90, 100 and 110 °C, 450 kV/m at 90, 100 and 110 °C (Figure 7). The effect of different temperatures on fungal inhibition has been reported including *Aspergillus* sp. in canned strawberries (94 °C) [55] and grape juice (85 °C) [56], *Aspergillus niger* (90 °C) and *Aspergillus flavus* in oil seed (90 °C) [19], *Aspergillus flavus* in Khao Dawk Mali 105 (90 °C) [57], and the other *Aspergillus* species with a neosartorya-morph (80–90 °C) [58].

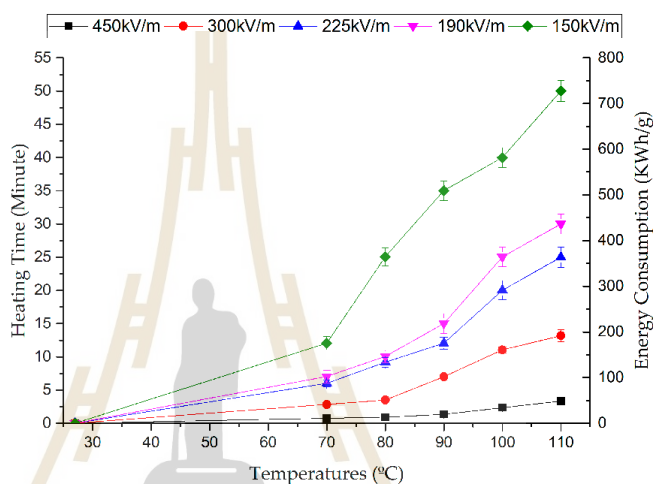


Figure 6. The relative electric field intensity and temperature in the heating system.

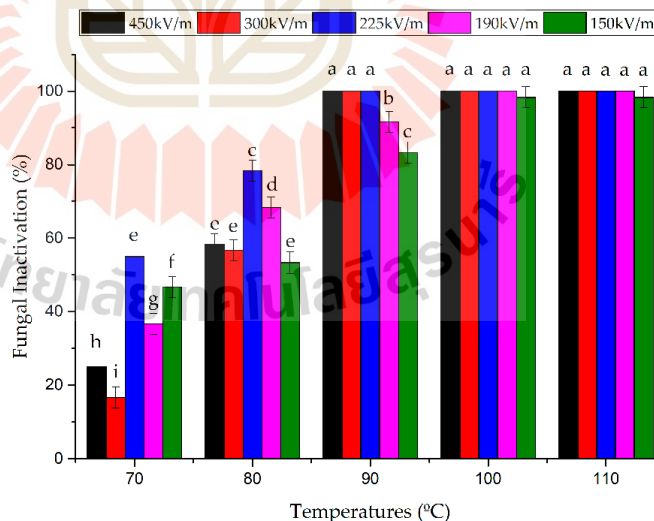
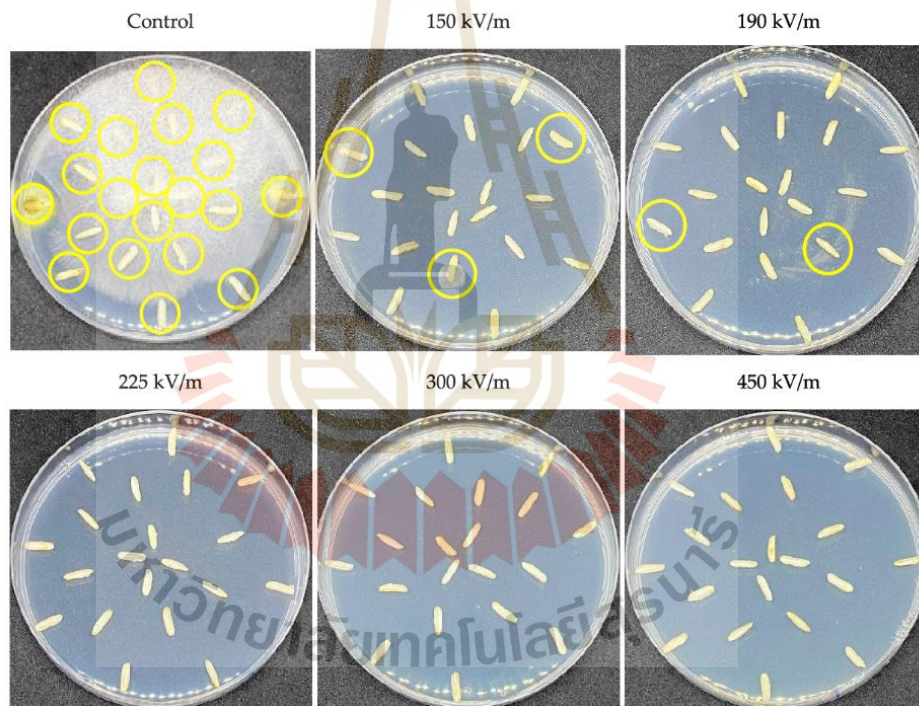


Figure 7. The relative electric field intensity and temperature on fungal growth. Average  $\pm$  standard deviation from three replicate experiments. Different letters in the same column are considered significantly different according to Duncan's multiple comparison test ( $p \leq 0.05$ ).

To visualize the effect of dielectric heating on fungal growth based on different electric intensities, six samples including one non-treated sample (control) and five treated samples (150, 190, 225, 300, and 450 kV/m) were selected to show fungal inactivation. Figure 8 shows the fungal growth on PDA after rice samples were treated with different electric intensities at 90 °C. Fungal mycelium was grown from rice grains in the control agar plate. On the contrary, fungal growth from rice grains was decreased based on 150 kV/m and 190 kV/m, and the hyphae were not germinated from rice grains that were treated with electric field intensity value  $\geq 225$  kV/m at 90 °C. This indicates that the optimal conditions of dielectric heating (combination of 225 kV/m and 90 °C) are powerful for fungal inactivation in rice grains by dielectric heating. Cain reported that the electric field (194 kV/m) has a non-thermal effect on the cellular membrane (in the air of electrode gaps) [59]. Use of both thermal and non-thermal mechanisms was reported in *Aspergillus fumigatus* and *Neosartorya fischeri* in apple juice (83 and 92 °C with 20 V/cm, 83 °C with 27 V/cm, and 90 °C with 9 V/cm) [60,61] and *Aspergillus niger* in tomato (89 °C with 36 V/cm) [62].



**Figure 8.** The fungal growth on Petri dish after treated with different electric intensity at 90 °C.

The results indicate that the contaminated fungi in rice grain products can be eliminated using the dielectric heating machine. The system can generate heat on fungal cells faster than the surrounding media/environments. As a result, the rapid oscillation of the fungal cell leads to elastic limit, rupture, and cell death [63].

This study suggested that dielectric heating is an effective method for fungal inactivation in rice grains. Additionally, the optimal conditions of dielectric heating are suitable for inactivation of contaminated fungi in rice industries.

#### 4. Conclusions

In the present study, the dielectric properties between *Aspergillus* sp. BP17 and rice were studied, and the optimal frequency of 40.68 MHz was selected for fungal inactivation using the dielectric heating system. The optimization of dielectric heating for fungal inactivation was evaluated by the relationship between electric field intensity and temperature. The results showed that dielectric heating treatment killed or inhibited fungi on rice grains. The best condition (energy consumption of 0.33 kWh/g and fungal inactivation of 100%) was obtained at 450 kV/m and 90 °C. This study provides knowledge of dielectric heating for developing the heating system and equipment for rice products.

**Supplementary Materials:** The following supporting information can be downloaded at: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/app122010478/s1>, Figure S1: Measuring dielectric properties of sample: (a) Rice powder sample; (b) *Aspergillus* sp. BP17.

**Author Contributions:** Conceptualization, C.S., S.S., C.T., T.T. and W.P.; methodology, C.S. and S.S.; validation, C.S., S.S., C.T., T.T. and W.P.; formal analysis, C.S., S.S. and W.P.; investigation, C.S., S.S. and C.T.; data curation, C.S. and S.S.; writing—original draft preparation, C.S. and S.S.; writing—review and editing, C.S., S.S., C.T. and W.P.; visualization, C.S.; supervision, S.S. and C.T.; project administration, S.S. and C.T. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research was funded by Suranaree University of Technology (SUT), Thailand Science Research and Innovation (TSRI), and National Science Research and Innovation Fund (NSRF) (NRSI no. 179289).

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Informed Consent Statement:** Not applicable.

**Data Availability Statement:** Not applicable.

**Acknowledgments:** This work was supported by Suranaree University of Technology, Thailand Science Research and Innovation, and National Science Research and Innovation Fund.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

#### References

- Savi, G.D.; Piacentini, K.C.; Rocha, L.O.; Carnielli-Queiroz, L.; Furtado, B.G.; Scussel, R.; Zaroni, E.T.; Machado-de-Ávila, R.A.; Corrêa, B.; Angioletto, E. Incidence of toxigenic fungi and zearalenone in rice grains from Brazil. *Int. J. Food Microbiol.* **2018**, *270*, 5–13. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Rice Consumption Per Capita. Available online: <https://www.helgilibrary.com/indicators/rice-consumption-per-capita> (accessed on 5 October 2022).
- Gonçalves, A.; Gkrillas, A.; Dorne, J.L.; Dall’Asta, C.; Palumbo, R.; Lima, N.; Battilani, P.; Venâncio, A.; Giorni, P. Pre- and postharvest strategies to minimize mycotoxin contamination in the rice food chain. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* **2019**, *18*, 441–454. [[CrossRef](#)]
- Kittipong, S.; Kunya, C.; Kanjana, P.; Sa-ang, C.; Grissana, S.; Yotsaporn, T.; Rujira, P.; Witthuda, R.; Rasamee, D. Investigation on the Contamination of Aflatoxin B1 in Thai Rice. *Thai Rice Res. J.* **2018**, *1*, 30–36.
- Lee, S.H.; Park, S.Y.; Byun, K.H.; Chun, H.S.; Ha, S.D. Effects of microwaves on the reduction of *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus* on brown rice (*Oryza sativa* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.). *Food Addit. Contam.* **2017**, *34*, 1193–1200. [[CrossRef](#)]
- Mannaa, M.; Kim, K.D. Influence of temperature and water activity on deleterious fungi and mycotoxin production during grain storage. *Mycobiology* **2017**, *45*, 240–254. [[CrossRef](#)]
- Trung, T.S.; Bailly, J.; Querin, A.; Le Bars, P.; Guerre, P. Fungal contamination of rice from south Vietnam, mycotoxinogenesis of selected strains and residues in rice. *Rev. Médecine Vétérinaire* **2001**, *152*, 555–560.
- Ali, N. Aflatoxins in rice: Worldwide occurrence and public health perspectives. *Toxicol. Rep.* **2019**, *6*, 1188–1197. [[CrossRef](#)]
- Akhila, P.P.; Sunooj, K.V.; Aaliya, B.; Navaf, M.; Sudheesh, C.; Sabu, S.; Khaneghah, A.M. Application of electromagnetic radiations for decontamination of fungi and mycotoxins in food products: A comprehensive review. *Trends Food Sci. Technol.* **2021**, *114*, 399–409. [[CrossRef](#)]
- Afsah-Hejri, L.; Hajeb, P.; Ehsani, R.J. Application of ozone for degradation of mycotoxins in food: A review. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* **2020**, *19*, 1777–1808. [[CrossRef](#)]
- Yang, K.; Li, K.; Pan, L.; Luo, X.; Xing, J.; Wang, J.; Wang, L.; Wang, R.; Zhai, Y.; Chen, Z. Effect of Ozone and Electron Beam Irradiation on Degradation of Zearalenone and Ochratoxin, A. *Toxins* **2020**, *12*, 138. [[CrossRef](#)]

12. Srivastava, S.; Mishra, H.N. Ecofriendly nonchemical/nonthermal methods for disinfestation and control of pest/fungal infestation during storage of major important cereal grains: A review. *Front. Nutr.* **2021**, *2*, 93–105. [\[CrossRef\]](#)
13. Wason, S.; Verma, T.; Subbiah, J. Validation of process technologies for enhancing the safety of low-moisture foods: A review. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* **2021**, *20*, 4950–4992. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
14. Fang, Y.; Hu, J.; Xiong, S.; Zhao, S. Effect of low-dose microwave radiation on *Aspergillus parasiticus*. *Food Control* **2011**, *22*, 1078–1084. [\[CrossRef\]](#)
15. Schmidt, M.; Zannini, E.; Arendt, E.K. Recent Advances in Physical Post-Harvest Treatments for Shelf-Life Extension of Cereal Crops. *Foods* **2018**, *7*, 45. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
16. Mir, S.A.; Dar, B.; Shah, M.A.; Sofi, S.A.; Hamdani, A.M.; Oliveira, C.A.; Moosavi, M.H.; Khaneghah, A.M.; Sant'Ana, A.S. Application of New Technologies in Decontamination of Mycotoxins in Cereal Grains: Challenges, and Perspectives. *Food Chem. Toxicol.* **2021**, *148*, 111976. [\[CrossRef\]](#)
17. Chandravarman, P.; Agyei, D.; Ali, A. Green and sustainable technologies for the decontamination of fungi and mycotoxins in rice: A review. *Trends Food Sci. Technol.* **2022**, *124*, 278–295. [\[CrossRef\]](#)
18. Zhang, Y.; Pandiselvam, R.; Zhu, H.; Su, D.; Wang, H.; Ai, Z.; Kothakota, A.; Khaneghah, A.M.; Liu, Y. Impact of Radio Frequency Treatment on Textural Properties of Food Products: An Updated Review. *Trends Food Sci. Technol.* **2022**, *124*, 154–166. [\[CrossRef\]](#)
19. Veearasilp, S.; Thobunluepop, P.; Thanapornpoonpong, S.N.; Pawelzik, E.; von Hörsten, D. Radio frequency heating on lipid peroxidation, decreasing oxidative stress and aflatoxin B1 reduction in *Perilla frutescens* L. highland oil seed. *Agric. Agric. Sci. Procedia* **2015**, *5*, 177–183. [\[CrossRef\]](#)
20. Jiao, S.; Zhong, Y.; Deng, Y. Hot air-assisted radio frequency heating effects on wheat and corn seeds: Quality change and fungi inhibition. *J. Stored Prod. Res.* **2016**, *69*, 265–271. [\[CrossRef\]](#)
21. Hou, L.X.; Kou, X.X.; Li, R.; Wang, S.J. Thermal inactivation of fungi in chestnuts by hot air assisted radio frequency treatments. *Food Control* **2018**, *93*, 297–304. [\[CrossRef\]](#)
22. da Silva, A.C.; Sarturi, H.J.; Dall'Oglio, E.L.; Soares, M.A.; de Sousa, P.T.; Gomes de Vasconcelos, L.; Kuhnen, C.A. Microwave drying and disinfestation of Brazil nut seeds. *Food Control* **2016**, *70*, 119–129. [\[CrossRef\]](#)
23. Zheng, A.J.; Zhang, L.H.; Wang, S.J. Verification of radio frequency pasteurization treatment for controlling *Aspergillus parasiticus* on corn grains. *Int. J. Food Microbiol.* **2017**, *249*, 27–34. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
24. Feng, H.; Yin, Y.; Tang, J. Microwave drying of food and agricultural materials: Basics and heat and mass transfer modeling. *Food Eng. Rev.* **2012**, *4*, 89–106. [\[CrossRef\]](#)
25. Höhlig, B.; Schmidt, D.; Mechtcherine, V.; Hempel, S.; Schrofl, C.; Trommler, U.; Roland, U. Effects of dielectric heating of fresh concrete on its microstructure and strength in the hardened state. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *81*, 24–34. [\[CrossRef\]](#)
26. Ling, B.; Liu, X.; Zhang, L.; Wang, S. Effects of temperature, moisture, and metal salt content on dielectric properties of rice bran associated with radio frequency heating. *Sci. Rep.* **2018**, *8*, 4427. [\[CrossRef\]](#)
27. Ling, B.; Cheng, T.; Wang, S. Recent developments in applications of radio frequency heating for improving safety and quality of food grains and their products: A review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2019**, *60*, 2622–2642. [\[CrossRef\]](#)
28. Goñi, S.M.; d'Amore, M.; Della Valle, M.; Olivera, D.F.; Salvadori, V.O.; Marra, F. Effect of Load Spatial Configuration on the Heating of Chicken Meat Assisted by Radio Frequency at 40.68 MHz. *Foods* **2022**, *11*, 1096. [\[CrossRef\]](#)
29. Sosa-Morales, M.E.; Valerio-Junco, L.; López-Malo, A.; Garcia, H.S. Dielectric properties of foods: Reported data in the 21st century and their potential applications. *LWT Food Sci. Technol.* **2010**, *43*, 1169–1179. [\[CrossRef\]](#)
30. Nelson, S.O.; Trabelsi, S. Factors Influencing the Dielectric Properties of Agricultural and Food Products. *J. Microwave Power Electromagn. Energy* **2012**, *46*, 93–107. [\[CrossRef\]](#)
31. Nelson, S.O. *Dielectric Properties of Agricultural Materials and Their Applications*, 1st ed.; Academic Press: Amsterdam, The Netherlands, 2015; p. 33.
32. Zhou, L.; Ling, B.; Zheng, A.; Zhang, B.; Wang, S. Developing radio frequency technology for postharvest insect control in milled rice. *J. Stored Prod. Res.* **2015**, *62*, 22–31. [\[CrossRef\]](#)
33. Hou, L.; Johnson, J.A.; Wang, S. Radio frequency heating for postharvest control of pests in agricultural products: A review. *Postharvest Biol. Technol.* **2016**, *113*, 106–118. [\[CrossRef\]](#)
34. Yang, C.; Zhao, Y.; Tang, Y.; Yang, R.; Yan, W.; Zhao, W. Radio frequency heating as a disinfestation method against *Corcyra cephalonica* and its effect on properties of milled rice. *J. Stored Prod. Res.* **2018**, *77*, 112–121. [\[CrossRef\]](#)
35. Hou, L.; Liu, Q.; Wang, S. Efficiency of industrial-scale radio frequency treatments to control *Rhizopertha dominica* (fabricius) in rough, brown, and milled rice. *Biosyst. Eng.* **2019**, *186*, 246–258. [\[CrossRef\]](#)
36. Cui, M.; Sun, W.; Xia, L.; Wang, Z.; Cao, Y.; Wu, Y. Effect of radio frequency heating on the mortality of *Rhizopertha dominica* (F.) and its impact on grain quality. *J. Stored Prod. Res.* **2020**, *89*, 101695. [\[CrossRef\]](#)
37. Hou, L.; Wu, Y.; Kou, X.; Li, R.; Wang, S. Developing high-temperature-short-time radio frequency disinfestation treatments in coix seeds: Insect mortality, product quality and energy consumption. *Biosyst. Eng.* **2022**, *215*, 262–270. [\[CrossRef\]](#)
38. Mohamad, S.N.H.; Muhamad, I.I.; Mohd Jusoh, Y.M.; Khairuddin, N. Dielectric properties for selected wall material in the development of microwave-encapsulation-drying. *J. Food Sci. Technol.* **2018**, *55*, 5161–5165. [\[CrossRef\]](#)
39. Hussein, M.I.; Jithin, D.; Rajmohan, I.J.; Sham, A.; Saeed, E.E.M.; AbuQamar, S.F. Microwave characterization of hydrophilic and hydrophobic plant pathogenic fungi using open-ended coaxial probe. *IEEE Access* **2019**, *7*, 45841–45849. [\[CrossRef\]](#)

40. Cheng, E.M.; You, K.Y.; Lee, K.Y.; Abbas, Z.; Rahim, H.A.; Khor, S.F.; Zakaria, Z.; Lee, Y.S. Dielectric spectroscopy technique for carbohydrate characterization of fragrant rice, brown rice and white rice. In Proceedings of the 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-FALL), Singapore, 19–22 November 2017; pp. 205–209. [\[CrossRef\]](#)
41. Bansal, N.; Dhaliwal, A.S.; Mann, K.S. Dielectric characterization of rapeseed (*Brassica napus* L.) from 10 to 3000 MHz. *Biosyst. Eng.* **2016**, *143*, 1–8. [\[CrossRef\]](#)
42. Ozturk, S.; Kong, F.B.; Singh, R.K.; Kuzy, J.D.; Li, C.Y.; Trabelsi, S. Dielectric properties, heating rate, and heating uniformity of various seasoning spices and their mixtures with radio frequency heating. *J. Food Eng.* **2018**, *228*, 128–141. [\[CrossRef\]](#)
43. Nelson, S.O. Fundamentals of dielectric properties measurements and agricultural applications. *J. Microw. Power Electromagn. Energy* **2010**, *44*, 98–113. [\[CrossRef\]](#)
44. Jiao, Y.; Tang, J.; Wang, Y.; Koral, T.L. Radio-frequency applications for food processing and safety. *Annu. Rev. Food Sci. Technol.* **2018**, *9*, 105–127. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
45. Saran, S.; Gurjar, M.; Baronia, A.; Sivapurapu, V.; Ghosh, P.S.; Raju, G.M.; Maurya, I. Heating, ventilation and air conditioning (HVAC) in intensive care unit. *Crit. Care* **2020**, *24*, 194. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
46. François, A.; Tong, C.; Thomas, C.; Jean, J.F.; Mary, P.; David, D.; Katia, G. Microwaving biological cells: Intracellular analysis with microwave dielectric spectroscopy. *IEEE Microw. Mag.* **2015**, *16*, 87–96. [\[CrossRef\]](#)
47. Qi, S.; Han, J.; Lagnika, C.; Jiang, N.; Qian, C.; Liu, C.; Li, D.; Tao, Y.; Yu, Z.; Wang, L.; et al. Dielectric properties of edible fungi powder related to radio-frequency and microwave drying. *Food Prod. Process. Nutr.* **2021**, *3*, 15. [\[CrossRef\]](#)
48. Wasusathien, W.; Santalunai, S.; Thosdeekoraphat, T.; Thongsopa, C. Rice Types Classification by Using Dielectric Properties Measurement with Saline Water Increasing Technique. In Proceedings of the 2020 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Tokyo, Japan, 13–17 September 2020; pp. 433–438.
49. Cao, X.; Zhang, M.; Chitrakar, B.; Mujumdar, A.S.; Zhong, Q.; Wang, Z.; Wang, L. Radio frequency heating for powder pasteurization of barley grass: Antioxidant substances, sensory quality, microbial load and energy consumption. *J. Sci. Food Agric.* **2019**, *99*, 4460–4467. [\[CrossRef\]](#)
50. El Khaled, D.; Castellano, N.; Gázquez, J.; Perea-Moreno, A.-J.; Manzano-Agugliaro, F. Dielectric Spectroscopy in Biomaterials: Agrophysics. *Materials* **2016**, *9*, 310. [\[CrossRef\]](#)
51. Birla, S.L.; Wang, S.; Tang, J.; Tiwari, G. Characterization of radio frequency heating of fresh fruits influenced by dielectric properties. *J. Food Eng.* **2008**, *89*, 390–398. [\[CrossRef\]](#)
52. Kim, S.Y.; Sagong, H.G.; Choi, S.H.; Ryu, S.; Kang, D.H. Radio-frequency heating to inactivate *Salmonella* Typhimurium and *Escherichia coli* O157:H7 on black and red pepper spice. *Int. J. Food Microbiol.* **2012**, *153*, 171–175. [\[CrossRef\]](#)
53. Bedane, T.F.; Chen, L.; Marra, E.; Wang, S. Experimental study of radio frequency (RF) thawing of foods with movement on conveyor belt. *J. Food Eng.* **2017**, *201*, 17–25. [\[CrossRef\]](#)
54. Zhang, Z.; Wang, J.; Hu, Y.; Wang, L. Microwaves, a potential treatment for bacteria: A review. *Front. Microbiol.* **2022**, *13*, 1–14. [\[CrossRef\]](#)
55. Kavanagh, J.; Larchet, N.; Stuart, M. Occurrence of a heat-resistant species of *Aspergillus* in canned strawberries. *Nature* **1963**, *198*, 1322. [\[CrossRef\]](#)
56. Splittstoesser, D.F.; Splittstoesser, C.M. Ascospores of *Byssoschlamys fulva* compared with those of a heat resistant *Aspergillus*. *J. Food Sci.* **1977**, *42*, 685–688. [\[CrossRef\]](#)
57. Naka, J.; Vearasilp, S.; Thanapornpoonpong, S.N. Effects of radio frequency heat treatment to control of *Aspergillus flavus* aflatoxin B1 and quality in rice var. KDML 105 in different bagging densities. *Warasan Kaset* **2013**, *29*, 1–12.
58. Dijksterhuis, J. Fungal spores: Highly variable and stress-resistant vehicles for distribution and spoilage. *Food Microbiol.* **2019**, *81*, 2–11. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
59. Cain, C.A. A theoretical basis for microwave and RF field effects on excitable cellular membranes. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **1980**, *2*, 142–147. [\[CrossRef\]](#)
60. Müller, W.A.; Pasin, M.V.A.; Sarkis, J.R.; Marczak, L.D.F. Effect of pasteurization on *Aspergillus fumigatus* in apple juice: Analysis of the thermal and electric effects. *Int. J. Food Microbiol.* **2021**, *338*, 108993. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
61. Müller, W.A.; Marczak, L.D.F.; Sarkis, J.R. Thermal and kinetic integrated models applied for *Aspergillus fumigatus* inactivation during ohmic and conventional juice pasteurization. *J. Food Eng.* **2022**, *319*, 110907. [\[CrossRef\]](#)
62. Yıldız, H.; Baysal, T. Effects of alternative current heating treatment on *Aspergillus niger*, pectin methylesterase and pectin content in tomato. *J. Food Eng.* **2006**, *75*, 327–332. [\[CrossRef\]](#)
63. Orsat, V.; Raghavan, G.V. Radio-Frequency Processing. In *Emerging Technologies for Food Processing*, 2nd ed.; Da-Wen, S., Ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2014; pp. 385–398. [\[CrossRef\]](#)



## ประวัติผู้เขียน

นายเฉลิมเกียรติ สุตาชา เกิดเมื่อวันที่ 11 ธันวาคม 2530 ที่อำเภอเชียงใน จังหวัดอุบลราชธานี สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ จากวิทยาลัยเทคนิคอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี เมื่อ พ.ศ. 2549 จากนั้นสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม-อิเล็กทรอนิกส์ เมื่อ พ.ศ. 2553 และ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี เมื่อ พ.ศ. 2556 หลังจากสำเร็จการศึกษาปัจจุบันได้ทำงานในตำแหน่งพนักงานในสถาบันอุดมศึกษาสายวิชาการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี ก่อนลาศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตด้วยทุนที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอกจากกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา (ทุนOROG) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

