

การออกแบบสร้างเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริดประสิทธิภาพสูง  
จากพลังงานคลื่นความถี่วิทยุและไมโครเวฟ



นายสำเร็จ สันทาลุนัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2563

**DESIGN OF HIGH EFFICIENCY HYBRID RICE MOISTURE  
REMOVAL MACHINE BY USING RADIO FREQUENCY  
WAVE AND MICROWAVE**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2020**


การออกแบบสร้างเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริดประสิทธิภาพสูงจากพลังงาน  
คลื่นความถี่วิทยุและไมโครเวฟ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



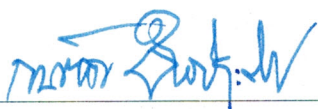
(อ. ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์)  
ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภากา)  
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.ชนเสถียร ทศดีกรพัฒน์)  
กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)  
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)  
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สำเร็จ สันทาลุณย์ : การออกแบบสร้างเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด  
ประสิทธิภาพสูงจากพลังงานคลื่นความถี่วิทยุและไมโครเวฟ (DESIGN OF HIGH  
EFFICIENCY HYBRID RICE MOISTURE REMOVAL MACHINE BY USING  
RADIO FREQUENCY WAVE AND MICROWAVE) อาจารย์ที่ปรึกษา :  
รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภณ, 138 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ ออกแบบและสร้างเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด ด้วย  
หลักการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและคลื่นความถี่วิทยุร่วมกับแหล่งพลังงาน  
ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก สำหรับการลดความชื้นข้าวผ่านการกำจัดสารหนุ  
ออกแล้ว ที่มีความชื้นสูงประมาณ 44 เปอร์เซ็นต์ ให้สามารถลดความชื้นลงที่ประมาณ  
24 เปอร์เซ็นต์ เพื่อประยุกต์ใช้กับระบบลดความชื้นแบบอื่นที่มีอยู่ในปัจจุบันให้มีความชื้น  
ตามค่ามาตรฐาน โดยการวิเคราะห์ การออกแบบและสร้างเครื่องด้วยหลักการทาง  
คณิตศาสตร์และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และทดสอบผลเพื่อตรวจสอบค่าความชื้นและ  
คุณภาพของข้าวที่ผ่านกระบวนการลดความชื้น 2 รูปแบบคือ การให้ความร้อนด้วย  
คลื่นไมโครเวฟและต่อด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ และการให้ความร้อนด้วย  
คลื่นความถี่วิทยุต่อด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ สำหรับศึกษาผลของคุณสมบัติ  
ข้าวก่อนและหลังการทดสอบ จากผลการทดสอบพบว่า การทดสอบทั้ง 2 รูปแบบสามารถ  
ลดความชื้นได้ปริมาณใกล้เคียงกันที่ประมาณ 18 – 20 เปอร์เซ็นต์ แต่มีลักษณะคุณภาพข้าว  
ที่แตกต่างกัน โดยลักษณะการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและต่อด้วยการให้ความร้อน  
ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ มีลักษณะคุณภาพข้าวที่ดีกว่า ซึ่งไม่ทำให้ข้าวแห้งแตกร้าว และไม่เกิด  
การสูญเสียโครงสร้างเดิมของแป้ง ดังนั้นการลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด ด้วยหลักการให้  
ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและคลื่นความถี่วิทยุ ร่วมกับแหล่งพลังงานความร้อนด้วยการ  
เหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก สามารถใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและต่อด้วย  
การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ จะมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดและยังสามารถนำไป  
ประยุกต์ใช้ในกระบวนการลดความชื้นกับวัตถุดิบชนิดอื่นๆ ต่อไปได้อีกด้วย



SAMROENG SANTALUNAI : DESIGN OF HIGH EFFICIENCY HYBRID  
RICE MOISTURE REMOVAL MACHINE BY USING RADIO  
FREQUENCY WAVE AND MICROWAVE. THESIS ADVISOR :  
ASSOC. PROF. CHANCHAI THONHSOPA, Ph.D., 138 PP.

MICROWAVE HEATING / RADIO FREQUENCY HEATING / INDUCTION  
HEATING

This research has analyzed, designed, and built a hybrid moisture removal machine with the heating principle by using microwave and radio frequency combined with heat energy from electromagnetic induction. For rice moisture removal by arsenic removal. It is high humidity approximately 44% and can reduce moisture up to approximately 18% - 20% to be applied to other existing dehumidification systems to get moisture followed standard. By analyzed, designed, and built machines with principles of mathematics and computer programs. Test the results to check the moisture value and quality of rice that through the dehumidification process 2 types is microwave heating and followed by radio frequency heating and radio frequency heating and followed by microwave heating. To study the effect of rice properties before and after testing. From the test results, it was found that tests all 2 types were able to reduce moisture in a similar amount approximately 22% but have rice quality is different characteristics. By form microwave heating and followed by radio frequency heating was found rice quality has characteristics is better, not dry rice, cracks, and not loss of original structure of starch. Therefore, hybrid dehumidification with the principle of microwave heating and followed by radio frequency heating combined with

heat energy from electromagnetic induction can be used technique microwave heating and followed by radio frequency. It has the best efficiency and can also be applied in the dehumidification process with other raw materials.



School of Electronic Engineering  
Academic Year 2020

Student's Signature S. Samroeng  
Advisor's Signature P. Chankei

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ ปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไข วิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนเสฏฐ์ ทศศิกรพัฒน์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรม อิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำปรึกษาทางวิชาการมาโดยตลอด

อาจารย์ ดร. สำราญ สันทาคุณย์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้การแนะนำ ชี้แนะ และคำปรึกษาการทำวิจัย รวมทั้ง ช่วยตรวจและแก้ไขเนื้อหาวิทยานิพนธ์มาโดยตลอดจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ พี่ ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุน ในการทำวิจัย รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้ง ในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้ความรักความอบอุ่น และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด อีกทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อแท้และท้อใจ ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต เรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดามารดา รวมถึงญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอด ประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัย จนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

สำเร้ง สันทาคุณย์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	4
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	4
1.4 ข้อยกเว้นเบื้องต้น.....	4
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน.....	5
1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย.....	5
1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย.....	6
1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	6
1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	6
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.8 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
1.9 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์.....	16
<b>2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์และออกแบบเครื่องลดความชื้นข้าว</b>	
<b>แบบไฮบริด.....</b>	<b>17</b>
2.1 บทนำ.....	17

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการลดความชื้นข้าว .....	18
2.2.1	อัตราความชื้น .....	18
2.2.2	การคำนวณพลังงานความร้อน .....	21
2.3	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ .....	23
2.3.1	ทฤษฎีของคลื่นไมโครเวฟ .....	23
2.3.2	คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟ.....	26
2.3.3	ท่อนำคลื่น .....	27
2.3.4	ผลกระทบที่ผิว.....	27
2.3.5	โหมดของการแพร่กระจายคลื่น .....	28
2.4	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ .....	28
2.4.1	ลักษณะทั่วไปของการให้ความร้อนของไดอิเล็กตริก.....	29
2.4.2	พื้นฐานและกลไกการให้ความร้อนของไดอิเล็กตริก .....	30
2.4.3	หลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก .....	33
2.4.4	การส่งผ่านความร้อน .....	37
2.4.5	การให้ความร้อนด้วยคลื่นสนามไฟฟ้า.....	38
2.5	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงาน ความร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก.....	42
2.5.1	หลักการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก .....	42
2.6	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนความร้อน .....	47
2.7	สรุป .....	49
3	การออกแบบและสร้างเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด .....	50
3.1	บทนำ.....	50
3.2	ลักษณะทั่วไปของการออกแบบเครื่องลดความชื้นแบบไฮบริด .....	51
3.3	การวิเคราะห์อุณหภูมิกับความชื้นและพลังงานความร้อนของข้าว .....	53
3.4	การออกแบบระบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	57

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.1	การจำลองผลการแพร่กระจายคลื่นของท่อนำคลื่นและ ความเข้มสนามไฟฟ้าที่โหลดไดโอดเล็กตริก .....	57
3.4.2	การออกแบบและสร้างเครื่องการให้ความร้อนด้วย คลื่นไมโครเวฟ .....	60
3.5	การออกแบบระบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ.....	66
3.5.1	การจำลองผลการแพร่กระจายของคลื่นและความเข้ม สนามไฟฟ้าที่โหลดไดโอดเล็กตริกโดยตัวปล่อยแบบแผ่นเพลต .....	66
3.5.2	การออกแบบและสร้างเครื่องการให้ความร้อนด้วย คลื่นความถี่วิทยุ .....	70
3.6	การออกแบบระบบการใช้ความร้อนจากแหล่งการให้ความร้อน แบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก .....	77
3.6.1	การออกแบบวงจรเหนี่ยวนำความร้อน .....	77
3.6.2	การออกแบบชุด โหลดความร้อน .....	80
3.7	สรุป .....	84
<b>4</b>	<b>การทดสอบและผลการทดสอบ.....</b>	<b>85</b>
4.1	บทนำ.....	85
4.2	วิธีการทดสอบการลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด.....	86
4.2.1	วิธีการทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ .....	86
4.2.2	วิธีการทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ .....	89
4.2.3	วิธีการทดสอบการใช้ความร้อนจากแหล่งพลังงานการให้ ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก.....	91
4.2.4	วิธีการทดสอบและเก็บผลการทดสอบ.....	93
4.3	ผลการทดสอบการลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด .....	95
4.3.1	การทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	96
4.3.2	การทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ.....	106
4.3.3	การทดสอบการใช้ความร้อนจากแหล่งพลังงานการให้ ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก.....	111



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.4	สรุปผลการทดสอบ.....	113
4.4	ผลการทดสอบการให้ความร้อนแบบไฮบริด.....	114
4.4.1	การทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟก่อนและ การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุหลัง.....	114
4.4.2	การทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุก่อนและ การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟหลัง.....	117
4.4.3	สรุปผลการทดสอบ.....	120
4.5	การเปรียบเทียบผลของคุณภาพข้าว.....	122
4.6	สรุป.....	124
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	125
5.1	สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	125
5.2	ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	126
5.3	แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	126
	รายการอ้างอิง.....	128
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก.บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	131
	ประวัติผู้เขียน.....	138

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	การเปรียบเทียบปริมาณข้าวที่ได้กับกำลังงานที่ต้องการใช้ในช่วงแรก .....55
3.2	การเปรียบเทียบปริมาณข้าวที่ได้กับกำลังงานที่ต้องการใช้ .....56
4.1	ทดลองเงื่อนไขเวลาของการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....97
4.2	ทดลองเงื่อนไขระยะเวลาของการวางไหลตของการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ .....99
4.3	ทดลองเงื่อนไขความเร็วลมของการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ..... 101
4.4	ทดลองเงื่อนไขอุณหภูมิของลมของการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ..... 104
4.5	ทดลองเงื่อนไขเวลาของการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ..... 106
4.6	ทดลองเงื่อนไขอุณหภูมิลมของการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ..... 109
4.7	ทดลองเงื่อนไขอุณหภูมิภายในตู้อบของการใช้ลมร้อน..... 112
4.8	การทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟก่อน และการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุหลัง ..... 115
4.9	การทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุก่อน และการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟหลัง ..... 118
4.10	สรุปผลการเปรียบเทียบคุณภาพข้าวก่อนและหลังการทดสอบ ..... 123

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แผนผังการทดสอบทำแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด .....9
1.2	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาในการทำแห้งของเมล็ด พริกไทยตากแห้งที่ความเร็วลมแบบต่างๆ ด้วยเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด แบบ (FBD) กับ (S-FBD) ..... 10
1.3	การเปลี่ยนแปลงของความชื้นกับอุณหภูมิเทียบกับเวลาที่ใช้ในการทดสอบ..... 11
1.4	อัตราความชื้นเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง..... 12
1.5	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคทั่วไปของข้าวกล้องที่กำลังงาน 5 วัตต์ต่อกรัม ภายใต้กำลังขยาย 3000 ไมโครเมตร ..... 13
1.6	การเปลี่ยนแปลงความชื้นของผลกีวีระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน (HAD), การอบแห้งด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (RFVD) และการอบแห้งแบบผสม (RFVD+HAD) ..... 14
1.7	การทำแห้งของแต่ละความถี่เทียบกับเวลา..... 15
2.1	แสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราความชื้นกับอุณหภูมิของวัตถุดิบ ..... 19
2.2	แบบจำลองโมเลกุลของน้ำ..... 23
2.3	โมเลกุลของน้ำที่เปลี่ยนทิศสลับไปมาอย่างรวดเร็ว ..... 24
2.4	การสะท้อนของคลื่น ..... 26
2.5	โครงสร้างพื้นฐานของการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ..... 30
2.6	โครงสร้างอะตอมระหว่างประจุบวกต่อประจุลบของตัวกลางไดอิเล็กตริก ..... 31
2.7	ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีกันของโมเลกุลขั้วบวกและขั้วลบพยายาม จัดเรียงตัวกันตามทิศทางของคลื่นสนามไฟฟ้าที่ส่งผ่านเข้าไปในไดอิเล็กตริก ..... 32
2.8	โครงสร้างตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต ..... 39
2.9	โครงสร้างตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต ที่มีส่วนประกอบของโหนดไดอิเล็กตริก ..... 40
2.10	วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม ..... 41
2.11	หลักการเกิดการเหนี่ยวนำความร้อน ..... 43

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.12	วงจรถ่ายความร้อน.....43
2.13	บล็อกไดอะแกรมของวงจรถ่ายความร้อน.....44
2.14	บล็อกไดอะแกรมของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์.....44
2.15	คลื่นแรงดันและกระแสไหลของวงจรถ่ายความร้อนอินเวอร์เตอร์.....45
2.16	ระบบที่มีการไหลแบบกระแสเดียว (ก) ระบบที่มีการไหลแบบหลายกระแส (ข).....48
3.1	แสดงการให้ความร้อนกับวัตถุที่ได้อิเล็กตริกด้วยคลื่นความถี่วิทยุ คลื่นไมโครเวฟและการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก.....52
3.2	บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด.....53
3.3	ขนาดของท่อนำคลื่น.....58
3.4	แสดงระยะของพอร์ต.....58
3.5	ระยะห่างของพอร์ตแต่ละชุดที่ระยะห่าง $\lambda$ ตามแกน Y.....59
3.6	ระยะห่างของพอร์ตแต่ละชุดที่ระยะห่าง $2\lambda$ ตามแกน Y.....59
3.7	ระยะห่างของพอร์ตแต่ละชุดที่ระยะห่าง $3\lambda$ ตามแกน Y.....59
3.8	ระยะห่างของพอร์ตแต่ละชุดที่ระยะห่าง $4\lambda$ ตามแกน Y.....59
3.9	แผนภาพการทำงานของเครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....60
3.10	โครงสร้างและระบบสายพานลำเลียงของผู้ลดความชื้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....61
3.11	ชุดควบคุมการทำงานของผู้ลดความชื้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....61
3.12	เครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....62
3.13	ระยะการวางหัวแมกนีตรอนติดตั้งบนผู้ลดความชื้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ พร้อมระบบระบายความร้อน.....63
3.14	ภาคแหล่งจ่ายกำลังงานให้หัวแมกนีตรอนทำงานพร้อมระบบระบายความร้อน.....63
3.15	มอเตอร์ขนาดกำลังงาน 1/4 แรงม้า.....64
3.16	Inverter Mitsubishi Model: FR-D720S-0.4K.....64
3.17	ระบบสายพานลำเลียงที่ติดตั้งบนเครื่องลดความชื้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....65
3.18	ระบบควบคุมการทำงานของหัวแมกนีตรอน (ตัวปล่อยคลื่น).....65
3.19	เครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....66

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.20	ขนาดของแผ่นเพลตที่ใช้ในการจำลอง.....67
3.21	รูปแบบการวางแผ่นเพลตและปรับระยะแผ่นเพลตในการจำลอง .....67
3.22	รูปแบบการจำลองจุดตัวปล่อยสนามไฟฟ้าบนแผ่นเพลต (a) 1 จุด (b) 2 จุด และ (c) 4 จุด .....68
3.23	ระยะแผ่นเพลตห่างกัน 2 เซนติเมตร .....68
3.24	ระยะแผ่นเพลตห่างกัน 4 เซนติเมตร .....69
3.25	ระยะแผ่นเพลตห่างกัน 6 เซนติเมตร .....69
3.26	โครงสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกข้าวสาร.....71
3.27	ชุดให้กำเนิดคลื่นสนามไฟฟ้าพร้อมระบบควบคุมการทำงาน .....72
3.28	ชุดสายพานลำเลียงของเครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ .....72
3.29	เครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุทั้งระบบ .....73
3.30	ภาคแหล่งจ่ายกำลังงาน.....74
3.31	ภาคกำเนิดความถี่ .....74
3.32	ภาคตัวปล่อยการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกแบบแผ่นเพลต .....75
3.33	ระบบสายพานลำเลียงที่ติดตั้งบนเครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ.....75
3.34	ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ.....76
3.35	เครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ .....76
3.36	แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของวงจรเหนี่ยวนำความร้อน .....77
3.37	ชุดวงจรเหนี่ยวนำความร้อนที่ของเครื่องต้นแบบ.....78
3.38	แสดงระบบของวงจรกำเนิดความถี่ในส่วนต่าง ๆ .....79
3.39	เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำภาคแหล่งจ่ายกำลังงานพร้อมชุดควบคุม .....80
3.40	ส่วนประกอบของชุดโหลดความร้อน .....80
3.41	ขนาดของชิ้นส่วนโลหะที่ใช้ในการจำลอง (a) ขนาดท่อเหล็ก 4 หุน (b) ขนาดท่อเหล็ก 8 หุน .....81
3.42	ผลการจำลองทิศทางลมขนาดท่อเหล็ก 4 หุน (a) ด้านหน้า (b) ด้านข้าง .....82
3.43	ผลการจำลองทิศทางลมขนาดท่อเหล็ก 8 หุน (a) ด้านหน้า (b) ด้านข้าง .....82

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.44 ชุดโพลดความร้อนที่สร้างขึ้นและลักษณะการวางตัวของขดลวดเหนี่ยวนำ กับชิ้นงานโลหะ .....	83
4.1 เครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ .....	87
4.2 ทางเข้าของข้าวที่จะทำการทดสอบ .....	87
4.3 ทางออกของข้าวที่จะทำการทดสอบ .....	88
4.4 เครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ .....	89
4.5 ทางเข้าของข้าวที่จะทำการทดสอบ .....	90
4.6 ทางออกของข้าวที่จะทำการทดสอบ .....	90
4.7 เครื่องการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็ก .....	92
4.8 ภายในตู้อบลดความชื้นด้วยลมร้อน .....	92
4.9 ความชื้นข้าวที่ใช้ในการทดสอบ .....	93
4.10 ถาดข้าวที่ใช้ในการทดสอบ .....	94
4.11 เก็บตัวอย่างผลการทดสอบ .....	94
4.12 ทำการวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิข้าวหลังการทดสอบ .....	95
4.13 ส่งกล้องตรวจสอบคุณภาพข้าวก่อนและหลังการทดสอบ .....	95
4.14 คุณภาพข้าวก่อนการทดสอบ .....	96
4.15 กราฟเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการทดสอบ .....	98
4.16 กราฟเปรียบเทียบระยะความสูงของการวางโพลดที่ใช้ในการทดสอบ .....	100
4.17 กราฟเปรียบเทียบความเร็วลมของการวางโพลดที่ใช้ในการทดสอบ .....	103
4.18 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของลมที่ใช้ในการทดสอบ .....	105
4.19 กราฟเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการทดสอบ .....	108
4.20 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของลมที่ใช้ในการทดสอบ .....	110
4.21 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของลมร้อนภายในตู้อบ .....	113
4.22 กราฟเปรียบเทียบการลดความชื้นจากการให้ความร้อนด้วย คลื่นไมโครเวฟก่อนและการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุหลัง .....	117



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 กราฟเปรียบเทียบการลดความชื้นจากการให้ความร้อนด้วย คลื่นความถี่วิทยุก่อนและการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟหลัง.....	119
4.24 กราฟเปรียบเทียบการลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด.....	120
4.25 การเปรียบเทียบคุณภาพข้าวก่อนและหลังการทดสอบ .....	122



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมข้าวไทย มีผลผลิตจากเกษตรกรเป็นจำนวนมาก ซึ่งข้าวที่ผลิตได้นั้นถูกใช้เพื่อการบริโภคภายในประเทศเพียงครั้งหนึ่งและอีกครึ่งหนึ่งนั้นจำเป็นต้องระบายออกไปสู่ตลาดโลก ข้าวสารที่เหลือจากการบริโภคภายในประเทศจึงกลายเป็นสินค้าส่งออกและเป็นสินค้าที่ทำรายได้เป็นอันดับต้นๆให้กับประเทศไทยและประเทศไทยยังเป็นผู้ส่งออกข้าวรายหลักของโลก (Thanapat Jongmeesuk et al., 2017) สถาบันวิจัยจุฬาภรณ์ได้เก็บตัวอย่างข้าวจากจังหวัดต่างๆทั่วประเทศ ทั้งข้าวขาวและข้าวสี ตั้งแต่ปี 2550 จนถึงปัจจุบัน มาตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารหนูอย่างต่อเนื่อง พบว่า ในช่วงปี 2550 - 2560 ในข้าวหอมมะลิ มีปริมาณสารหนูเฉลี่ยอยู่ที่ 0.133 (<0.018 – 0.702) มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ข้าวสีเฉลี่ยอยู่ที่ 0.210 (0.046 - 0.683) มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และข้าวเหนียวเฉลี่ยอยู่ที่ 0.095 (<0.018 – 0.222) มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยจะเห็นได้ว่าข้าวสีมีปริมาณสารหนुरวมมากกว่าข้าวหอมมะลิและข้าวเหนียว การวิเคราะห์ชนิดของสารหนูพบว่า ข้าวไทยมีปริมาณสารหนูนินทรีย์ [inorganic As; iAs หรือ As (III) และ As(V)] โดยเฉลี่ย 52 - 63เปอร์เซ็นต์ ของสารหนुरวม ซึ่งสูงกว่าสารหนูนินทรีย์ (monomethylarsonic acid; MMA และ dimethylarsinic acid, DMA) อย่างไรก็ตาม ปริมาณสารหนูนินทรีย์ในข้าวไทยส่วนใหญ่โดยเฉพาะข้าวขาว ยังอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ ตามที่คณะกรรมการมาตรฐานอาหารระหว่างประเทศโคเด็กซ์ (CODEX) และคณะกรรมการยุโรป(European Commission, EC) ได้วิเคราะห์สารหนูและค่ามาตรฐานสูงสุดของสารหนูที่ยอมรับได้ในข้าว ค่ามาตรฐานสูงสุดของสารหนูที่ยอมรับได้ในข้าวขัดสีไว้ที่ระดับ 0.20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่การกำหนดค่าสูงสุดของ iAs ในข้าวไม่ขัดสีหรือข้าวกล้อง มีความแตกต่างกันของ 2 หน่วยงาน ระหว่าง คณะกรรมการยุโรปและคณะกรรมการโคเด็กซ์ โดยคณะกรรมการยุโรปนั้นได้กำหนดค่าสูงสุดของ iAs ในข้าวกล้องไว้ที่ 0.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนคณะกรรมการโคเด็กซ์ได้กำหนดค่าสูงสุดไว้ที่ 0.35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Nuchanart Rangkadilok et al., 2019) ซึ่งถ้ามีการสะสมของสารหนูในข้าวที่เกินค่ามาตรฐานสูงสุดที่องค์กรต่างประเทศกำหนดไว้ ซึ่งอาจจะมีผลต่อสุขภาพและการส่งออกของข้าวไทย

โดยสารหนูสามารถพบได้ทั่วไปในทุกสภาพแวดล้อม เช่น ในน้ำ ในอากาศ ในอาหาร และในดิน โดยสารหนูที่พบมีทั้งในรูปอินทรีย์ (Organic) และ อนินทรีย์ (Inorganic) ซึ่งสารหนูในรูปอนินทรีย์จะมีความเป็นพิษมากกว่า การได้รับสารหนูในรูปอนินทรีย์เป็นเวลานานส่งผลให้ร่างกายคือ เสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งปอด โดยสารหนูในรูปอนินทรีย์สามารถพบในยาฆ่าแมลง ยา หรืออาหารสัตว์ ผักผลไม้ และข้าว โดยสำนักงานอาหารและยาประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S. FDA) ได้จำกัดปริมาณสารหนูในรูปอนินทรีย์ให้มีในผลิตภัณฑ์ข้าวได้ไม่เกิน 100 ส่วนในพันล้านส่วน (ppb) การลดปริมาณของสารหนูในข้าวสารสามารถทำได้ดังนี้คือ การล้างในน้ำที่มากเกินไป (ใช้น้ำ 6-10 เท่าของข้าว) เป็นจำนวนหลายครั้ง จะสามารถช่วยลดปริมาณสารหนูได้ 40 – 60 เปอร์เซ็นต์ (U.S. FDA) แต่ปัญหาที่พบต่อจากการล้างคือข้าวสารมีความชื้นที่เพิ่มขึ้นคืออยู่ในช่วง 30 - 50 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักแห้ง (Muramatsu et al., 2006; Thakur and Gupta, 2006; Mizuma et al., 2008) ซึ่งมาตรฐานความชื้นของความทางการค้าคือ ความชื้นของข้าวสารต้องไม่สูงกว่าร้อยละ 14 (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2560) โดยปริมาณความชื้นที่สูงก็จะทำให้เกิดการเสื่อมเสีย เช่น การเกิดเชื้อรา การแตกหักง่าย หรือการเกิดกลิ่นหืน ซึ่งส่งผลให้อายุการเก็บรักษาสั้นลง กระบวนการลดความชื้นข้าวถูกใช้ในการจำกัดน้ำออกจากอาหาร เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของข้าวให้ยาวนานขึ้น อีกทั้งกระบวนการลดความชื้นช่วยลดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการบรรจุ การเก็บรักษา และการขนส่ง เนื่องจากน้ำหนัก และปริมาตรตัวอย่างอาหารที่ลดลง (Potisate et al., 2014)

ปัจจุบันมีหลักการที่จะนำมาใช้เป็นการลดความชื้นข้าวหลายรูปแบบประกอบด้วยหลักการอบแห้งด้วยลมร้อน โดยเริ่มต้นจากลมที่ไหลเข้าสู่ข้าวจะถูกทำให้ร้อนด้วยตัวทำความร้อน การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อน และความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำของลมร้อนจะเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดกระบวนการระเหยของน้ำในข้าว โดยลมร้อนจะเคลื่อนที่โดยรอบเมล็ดข้าว และลมร้อนก็จะเกิดการถ่ายเทความร้อนไปสู่ภายในเมล็ดข้าว ทำให้น้ำในเมล็ดข้าวเกิดการระเหยเริ่มจากที่ผิวหน้าเมล็ดข้าวไปยังภายในเมล็ดข้าว ตัวอย่างเครื่องลดความชื้นข้าวที่อาศัยหลักการลดความชื้นด้วยลมร้อน ได้แก่ เครื่องลดความชื้นแบบถาด (Tray dryer) โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการลดความชื้นโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 50 ถึง 70 องศาเซลเซียส ข้อดีของเครื่องลดความชื้นแบบถาดคือ การใช้งานไม่ซับซ้อน ราคาถูก แต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องการใช้อุณหภูมิสูง และเวลาในการลดความชื้นที่นานจะทำให้ตัวอย่างเกิดการหดตัว และเกิดการสูญเสียลักษณะทางคุณภาพ อีกรูปแบบคือการลดความชื้นแบบไดอิเล็กตริก (Dielectric drying) ด้วยพลังงานคลื่นไมโครเวฟ (Microwave) หรือคลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency) สามารถทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี และใช้เวลาการลดความชื้นที่สั้น เนื่องจากการเกิดความร้อนทั่วทั้งชิ้นพร้อมกัน (Uniform heating) (Piyasena et al., 2003) รายงานว่าพลังงานคลื่นไมโครเวฟมีความสามารถในการกำจัดน้ำได้อย่างรวดเร็ว แต่มีข้อจำกัดเรื่องความลึกในการ

แทรกผ่านของคลื่น (Penetration depth) ที่มีอยู่อย่างจำกัด และการให้ความร้อนเกินไป (Over heating) จนทำให้ตัวอย่างไหม้ ส่วนคลื่นความถี่วิทยุ นั้น อัตราการให้ความร้อนช้ากว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟ แต่คลื่นความถี่วิทยุให้ค่าความลึกในการแทรกผ่านของคลื่นที่สูงกว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟ จากการศึกษาประสิทธิภาพการประกอบอาหารโดยใช้พลังงานความร้อนแบบต่างๆ พบว่าการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำให้ประสิทธิภาพสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ คลื่นไมโครเวฟมีประสิทธิภาพเท่ากับ 58 เปอร์เซ็นต์ การให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้ามีประสิทธิภาพเท่ากับ 47 เปอร์เซ็นต์ และการให้ความร้อนโดยใช้ก๊าซมีประสิทธิภาพเท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ (Sweeney et al., 2014; Frogner et al., 2011) นอกจากนี้ยังพบว่าการลดความชื้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำจากอาหารมากถึง 70 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการลดความชื้นโดยทั่วไปด้วยลมร้อนมีค่าเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ (Memelstein, 1997) โดยหลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกคือ การสร้างความร้อนจากภายในอาหารโดยอาศัยคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของอาหาร เช่น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และ ค่าปัจจัยการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss factor) โดยทั้งสองค่านี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าความลึกในการแทรกผ่าน (Penetration depth) เพื่อใช้ในการออกแบบกระบวนการลดความชื้น โดยค่าความถี่ของคลื่นความถี่วิทยุที่นิยมใช้ในการลดความชื้นมี 3 ระดับคือ 13.56, 27.12 และ 40.68 เมกะเฮิร์ต (Piyasena et al., 2003) ซึ่งการให้ความร้อนแบบไฮบริดระหว่างการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ และลมร้อนช่วยลดระยะเวลาในการลดความชื้นมากถึง 67 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้จากการศึกษาการลดความชื้นด้วยการร่วมกันของไมโครเวฟ และฟลูอิดไดซ์เบด เปรียบเทียบกับการลดความชื้นทางการคั่ว (การลดความชื้นด้วยลมร้อน การตากแดด การลดความชื้นในร่ม) พบว่าการลดความชื้นด้วยการร่วมกันของไมโครเวฟ และฟลูอิดไดซ์เบด มีประสิทธิภาพในการลดความชื้นของข้าวได้อย่างรวดเร็ว และประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงกว่าการลดความชื้นแบบลมร้อน (Jabbari et al., 2007; Inprasit et al., 2001) และ การศึกษาของ (Tirawanichakul et al., 2007) ยังพบว่าการลดความชื้นที่อุณหภูมิสูงในเวลาสั้นให้ค่าคุณภาพในการหุงไม่แตกต่างกับการลดความชื้น โดยทั่วไป

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยจึงได้มีความสนใจในการออกแบบระบบลดความชื้นข้าวที่ผ่านการกำจัดสารหนูออกแล้วที่มีลักษณะความชื้นสูง โดยจะนำเทคโนโลยีต่างๆ ที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้น มาทำการลดความชื้นแบบไฮบริดประกอบด้วย หลักการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและคลื่นความถี่วิทยุ และใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเป็นพลังงานร่วมของทั้งสองกระบวนการ โดยความชื้นที่เกิดจากการกำจัดสารหนูออกแล้วนั้นจะมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 44 เปอร์เซ็นต์ (กระบวนการแช่น้ำ 12 ชั่วโมง) โดยทำการออกแบบระบบให้สามารถลดความชื้นเหลือประมาณ 24 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ เนื่องจากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องปัจจุบันมีเทคโนโลยีการลดความชื้นจาก 24 เปอร์เซ็นต์ โดยประมาณและคงเหลือ

14 เปอร์เซ็นต์ ตามมาตรฐานอยู่แล้ว เช่น การลดความชื้นด้วยหลักการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาถึงการลดความชื้นข้าวที่มีความชื้นสูงและตรวจสอบคุณภาพของข้าวที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุร่วมกับการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการให้ความร้อนแบบการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก โดยจะทำการออกแบบระบบลดความชื้นข้าวทั้ง 2 ระบบแล้วจะทำให้ความชื้นเหลือที่ 24 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ โดยพิจารณารูปแบบการทดสอบ 2 รูปแบบ คือ (1) การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและต่อด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (2) การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุและต่อด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ สำหรับการศึกษาถึงการลดความชื้นข้าวที่มีความชื้นสูงและตรวจสอบคุณภาพของข้าว ซึ่งรายละเอียดทฤษฎี หลักการทำงาน การออกแบบ และการทดสอบ จะได้อธิบายในบทต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาการลดความชื้นข้าวจากผลที่ได้ในกระบวนการลดสารหนูในข้าว

1.2.2 ออกแบบ สร้างเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริดด้วยคลื่นไมโครเวฟ คลื่นความถี่วิทยุ และใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ที่มีประสิทธิภาพสูงประหยัดพลังงานที่ทำให้คุณภาพของข้าวไม่เสียหาย

1.2.3 ศึกษาคุณสมบัติข้าวก่อนและหลังการลดความชื้น ด้วย 2 รูปแบบ คือ (1) การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและต่อด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (2) การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุและต่อด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

## 1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

การให้พลังงานความร้อนด้วยคลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูง ในรูปแบบของการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกและการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก โดยใช้หลักการการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ คลื่นความถี่วิทยุ และใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเป็นพลังงานร่วมของทั้งสองหลักการ ที่สามารถลดความชื้นข้าวที่ผ่านการกำจัดสารหนูออกแล้ว โดยความชื้นที่เกิดจากการกำจัดสารหนูออกแล้วนั้นจะมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 44 เปอร์เซ็นต์ ให้สามารถลดความชื้นเหลือประมาณ 24 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ

## 1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 ต้องการลดความชื้นข้าวที่ผ่านการกำจัดสารหนูออกแล้ว ที่มีความชื้นของข้าวอยู่ที่ร้อยละ 44 ลดความชื้นข้าวเหลือที่ร้อยละ 24 โดยประมาณ

1.4.2 สามารถออกแบบระบบลดความชื้นข้าวได้ที่กำลังงานสูงสุด 10 กิโลวัตต์ และมีอัตราผลิตสูงสุดที่ 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

1.4.3 ออกแบบสร้างเครื่องลดความชื้นแบบไฮบริด

1.4.4 ทำการทดลองใช้กับข้าวสาร

## 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 ศึกษาปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดความชื้นแบบไฮบริดด้วยคลื่นไมโครเวฟ คลื่นความถี่วิทยุ และใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด

1.5.2 ออกแบบสร้างเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด เพื่อใช้ทดสอบลดความชื้นข้าวสาร จากความชื้นของข้าวร้อยละ 44 ให้เหลือความชื้นของข้าวร้อยละ 24 โดยประมาณ โดยให้ได้กำลังงานการผลิตสูงสุดที่ 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

1.5.3 ทดสอบและเก็บผลเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริดเพื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการใช้กำลังงาน อุณหภูมิ ความชื้นข้าวและอัตราการไหลของข้าวที่ไหลผ่านในแต่ละระบบของเครื่อง

## 1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

### 1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน

1) ศึกษาปรีทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และออกแบบสร้างเครื่องลดความชื้นแบบไฮบริดด้วยคลื่นไมโครเวฟ คลื่นความถี่วิทยุ และใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

2) ทดสอบ เก็บผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3) จัดทำรายงานและเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ

### 1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย

1) ศึกษาค้นคว้าและเก็บรวบรวมข้อมูลโดยการสำรวจปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

2) วิเคราะห์ ออกแบบ และศึกษาข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือทางวิชาการถึงวิธีการลดความชื้นข้าว โดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ คลื่นความถี่วิทยุ และใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

3) สร้างเครื่องต้นแบบเพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพในการใช้พลังงานและปรับปรุงเครื่องให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น



### 1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อาคารเครื่องมือ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111, ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

### 1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
- 2) ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)
- 3) โพรบวัดความชื้น (Moisture Meter)
- 4) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Supply)
- 5) มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล (Digital Multimeter)
- 6) มิเตอร์วัดค่า LCR (Handheld Capacitance and LCR Meters)
- 7) กล้องวัดความร้อนแบบอินฟราเรด (Thermal Imaging Camera)

### 1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) เก็บรวบรวมข้อมูลจากการสำรวจปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
- 2) เก็บรวบรวมผลจากการออกแบบ สร้างและทดสอบประสิทธิภาพเครื่องลดความชื้นข้าวโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ คลื่นความถี่วิทยุ และใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ได้เครื่องต้นแบบ คือ เครื่องลดความชื้นข้าว ด้วยเครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ขนาดใหญ่พร้อมระบบสายพานลำเลียงข้าว เครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุพร้อมระบบสายพานลำเลียงข้าว และเครื่องใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

1.7.2 ได้องค์ความรู้ในเรื่องการออกแบบเครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ เครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ และเครื่องใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กพร้อมระบบควบคุมการทำงานของแต่ละเครื่อง ซึ่งสามารถนำไปใช้งาน เพื่อยกระดับการลดความชื้นข้าวในอุตสาหกรรมข้าวไทยให้มีมาตรฐานสูงยิ่งขึ้น

1.7.3 รู้จักกระบวนการคิด วิเคราะห์ อย่างเป็นระบบ เพื่อสามารถนำความรู้ที่ได้มา ไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอื่นๆ เพื่อแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในทางปฏิบัติและสามารถนำความรู้ไปใช้ในการประกอบวิชาชีพได้

## 1.8 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้ทราบถึงแนวทางและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทิศทางความเป็นไปได้ของงานวิจัย ตลอดจนปัญหาและข้อเสนอนี้ต่าง ๆ เพื่อนำไปสู่วัตถุประสงค์หลักตามที่ตั้งไว้โดยได้มีการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาและได้อาศัยฐานข้อมูลที่มีอยู่ ซึ่งฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนี้เป็นฐานข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ มีชื่อเสียง และได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เช่นฐานข้อมูล ScienceDirect, IEEE และ SCOPUS นอกจากนี้ยังได้มีการสืบค้นงานวิจัยจากแหล่งสืบค้นข้อมูลอื่นๆ เช่น จากเครือข่ายอินเทอร์เน็ต จากห้องสมุดของมหาวิทยาลัย โดยผลจากการสืบค้นข้อมูลที่ได้ นั้นจะนำมาใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป สำหรับเนื้อหาในส่วนนี้จะได้กล่าวถึง ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์จากการให้ความร้อนสำหรับการลดความชื้นข้าว ซึ่งได้รวบรวมข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์และออกแบบลักษณะการให้ความร้อนกับวัสดุไดอิเล็กตริกให้มีความเหมาะสมและให้มีประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุด โดยผลที่ได้จากการศึกษาข้อมูลมีดังหัวข้อต่อไปนี้

เริ่มจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการให้ความร้อน ซึ่งในปัจจุบันการให้ความร้อนจากสนามแม่เหล็กได้มีการพัฒนาในรูปแบบต่างๆ เช่น หลักการ การให้ความร้อน การเหนี่ยวนำ (Induction Heating) (Jakkarin Srituvanont et al. 2018; Mangesh, et al. 2013; Sarnago, et al. 2013; Lichan, et al. 2011; Ahmed, et al. 2011; Matej, Anze et al. 2008) ซึ่งเป็นการให้พลังงานความร้อนจากการอาศัยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เกิดจากขดลวดเหนี่ยวนำ โดยการป้อนไฟฟ้า กระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเมื่อมีไฟฟ้ากระแสสลับไหลผ่านขดลวดก็จะทำให้เกิดการสร้างสนามแม่เหล็ก ไปเกี่ยวข้องกับวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก (Ferromagnetic) ส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลวนอยู่ภายในวัสดุในทิศตรงข้ามกับทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด ตามกฎมือขวา เนื่องจากในวัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กแต่ละชนิดจะมีค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้า ซึ่ง แต่ละชนิดจะมีค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าต่างกัน ความต้านทานกระแสไฟฟ้านี้ทำให้เกิดการ สูญเสียพลังงานในการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน คือ พลังงานไม่สามารถสูญหายไปแต่สามารถเปลี่ยนรูปได้ ดังนั้นพลังงานที่สูญเสียนี้จึงเปลี่ยนรูปไปเป็นความร้อนที่เกิดขึ้นในตัววัสดุ และความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปบริเวณอื่น โดยการนำความร้อน การพาความร้อน และอีกหลักการเป็นการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นหลักการที่ให้ความร้อนโดยตรงไปยังวัสดุที่เป็น ไดอิเล็กตริกที่มีความเหมาะสมต่อช่วงความถี่ที่ใช้ งาน ซึ่งหลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave heating) (Nelson, 1996; Andreuccetti, et al. 1994) ซึ่งเป็นการให้พลังงานความร้อน โดยการแผ่กระจายคลื่นย่านความถี่ไมโครเวฟ (Uniform heating) Piyasena et al. (2003) รายงานว่าพลังงานคลื่นไมโครเวฟมีความสามารถในการกำจัดน้ำได้อย่างรวดเร็ว แต่มี

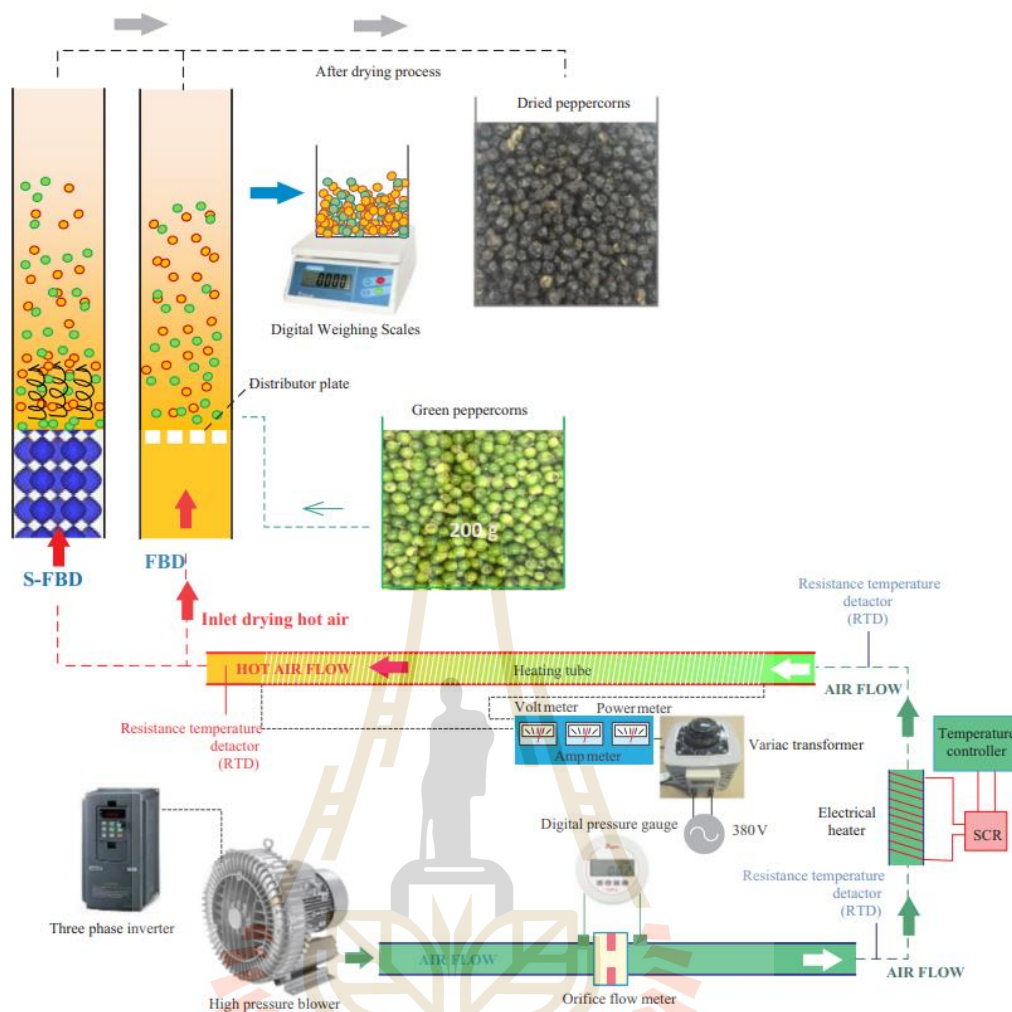
ข้อจำกัดเรื่องความลึกในการแทรกผ่านของคลื่น (Penetration depth) ที่มีอยู่อย่างจำกัด และการให้ความร้อนเกินไป (Over heating) จนทำให้ตัวอย่างไหม้ ส่วนการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency) นั้น อัตราการให้ความร้อนช้ากว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟ แต่คลื่นความถี่วิทยุให้ค่าความลึกในการแทรกผ่านของคลื่นที่สูงกว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟ ดังนั้นจากเทคโนโลยีการให้ความร้อนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จึงทำให้ผู้วิจัยสนใจที่นำหลักการนี้ไปพัฒนาเป็นการลดความชื้นข้าว จากหลักการการให้ความร้อนแบบเหนียว และหลักการการการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้สนใจและได้ศึกษาค้นคว้าการลดความชื้นข้าว โดยใช้หลักการให้ความร้อนแบบเหนียวและการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก เพื่อเปรียบเทียบและสรุปผลสำหรับศึกษาค้นคว้าต่อไป

#### งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับใช้ความร้อนจากการให้ความร้อนแบบการเหนียวนำสนามแม่เหล็ก

(Saniso et al, 2008) ได้ศึกษาการใช้เครื่องทำความร้อนแบบฟลูอิดเบดแบบใช้ไมโครเวฟ (MWFB) ทำข้าวหนึ่ง โดยที่ความชื้นของข้าวอยู่ที่ 22 - 24 เปอร์เซ็นต์ โดยทำการลดความชื้นด้วยอุณหภูมิ MWFB 111 - 169 องศาเซลเซียส และกำลังงานคงที่ 2 วัตต์ต่อกรัม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ามีเปิดไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 180 วินาที

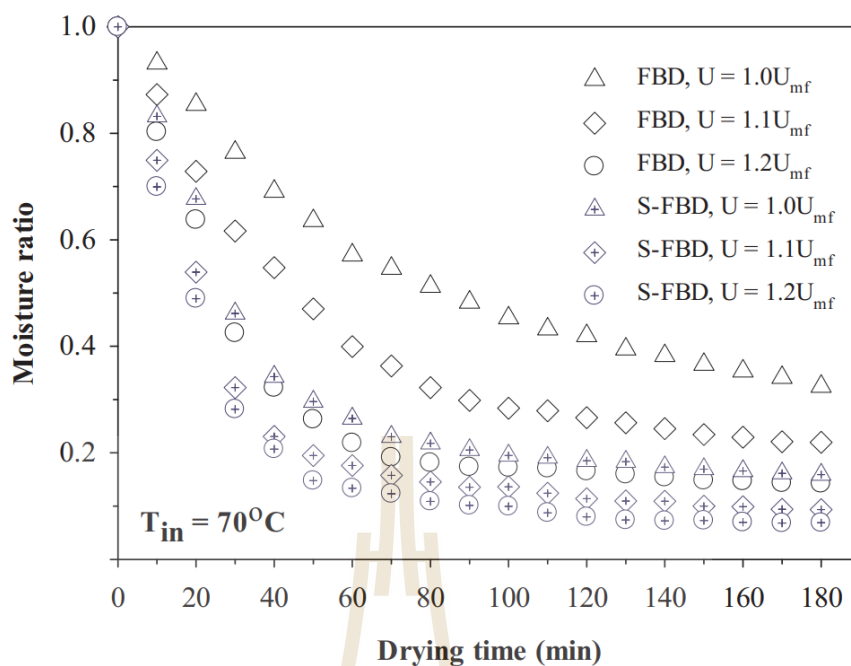
V. Chuwattanakula และคณะ (V. Chuwattanakul et al, 2019) ได้ทำการทดสอบเกี่ยวกับการให้ความร้อนแบบฟลูอิดเบดในการอบแห้งพริกไทย โดยทำการทดสอบ 2 รูปแบบ เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกัน (1) แบบติดตั้งเครื่องกำเนิดการหมุนด้วยการพันเกลียวหลายตัว (S-FBD) (2) แบบไม่ติดตั้งเครื่องกำเนิดการหมุนด้วยการพันเกลียว (FBD) ความเร็วลมที่ใช้ในการทดสอบ ( $U^* = U/U_{mf}$ ) ที่ 1.0, 1.1 และ 1.2 วิธีการทดสอบดูได้ดังรูป 1.1

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 1.1 แผนผังการทดสอบทำแห้งแบบฟลูอิดไชเบด

ในการทดสอบอุณหภูมิเริ่มต้นของพริกอยู่ที่ 27 องศาเซลเซียส กำลังงานที่ใช้ในการทดสอบอยู่ที่ 5 กิโลวัตต์ ระบบจะถูกเปิดให้ทำงานก่อนเพื่อที่จะได้อุณหภูมิภายในคงที่ที่ 70 องศาเซลเซียส ก่อนการทำการทดสอบ โดยจะใช้พริกที่ 200 กรัม ที่มีความชื้นเริ่มต้นที่ 73 เปอร์เซ็นต์ และความเร็วลมที่ใช้อยู่ที่ 1.0 - 1.2 Umf สำหรับห้องที่ใช้ในการทดสอบเป็นทรงกระบอกอะคริลิกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร และความสูง 1000 มิลลิเมตร ซึ่งผลการทดสอบสามารถดูได้ดังรูปที่ 1.2

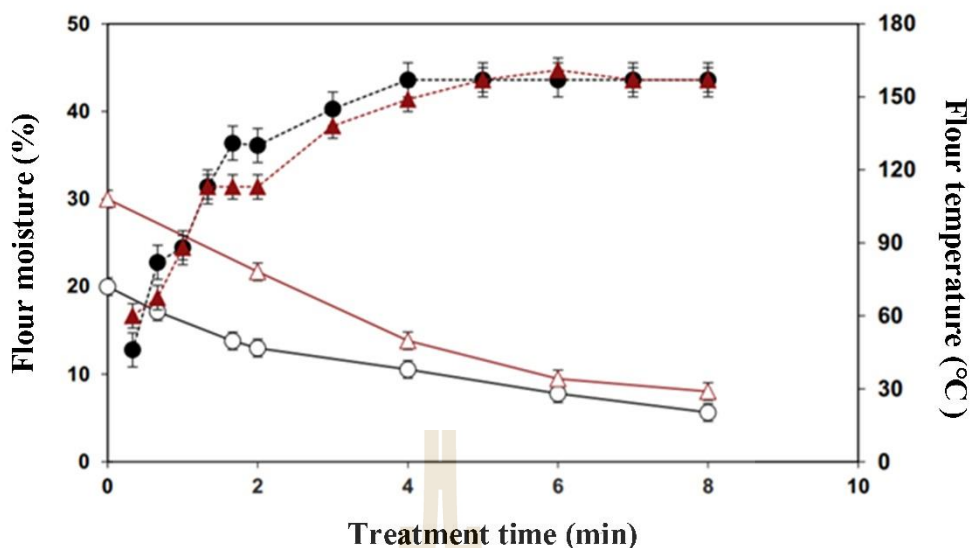


รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) และเวลาในการทำให้แห้ง (DT, นาที) ของเมล็ดพริกไทยตากแห้งที่ความเร็วลมแบบต่างๆ ด้วยเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบ (FBD) กับ (S-FBD)

จากผลการทดสอบพบว่าการทำแห้งแบบ S-FBD สามารถลดความชื้นของพริกได้เร็วกว่าเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดทั่วไป FBD ที่ความเร็วลม ( $U^*=U/U_{mf}=1.2$ )

#### งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

Marina Villanueva และคณะ (Marina et al, 2018) ได้ทำการทดสอบเกี่ยวกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นรังสีไมโครเวฟ ที่มีกับความชื้นของแป้งข้าวเจ้า และทำการประเมินคุณลักษณะของข้าว โดยในการทดสอบแป้งข้าวเจ้ามีความชื้นเริ่มต้นที่ 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ แล้วดูผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นที่ข้าวดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นในการทดสอบ ซึ่งในการทดสอบจะใช้กำลังงานของการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ 900 วัตต์ ทำการทดสอบ 2 เงื่อนไข โดยที่แป้งข้าวเจ้าน้ำหนักที่ 100 กรัม และปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่ 2 ระดับ คือที่ 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ถูกวางบนภาชนะปิดด้วยฟิล์มพลาสติกที่มี 4 - 5 รู โดยทำการทดสอบที่เว 2, 4, 6, 8, 12 และ 16 นาที ซึ่งผลที่ได้ดังรูปที่ 1.3



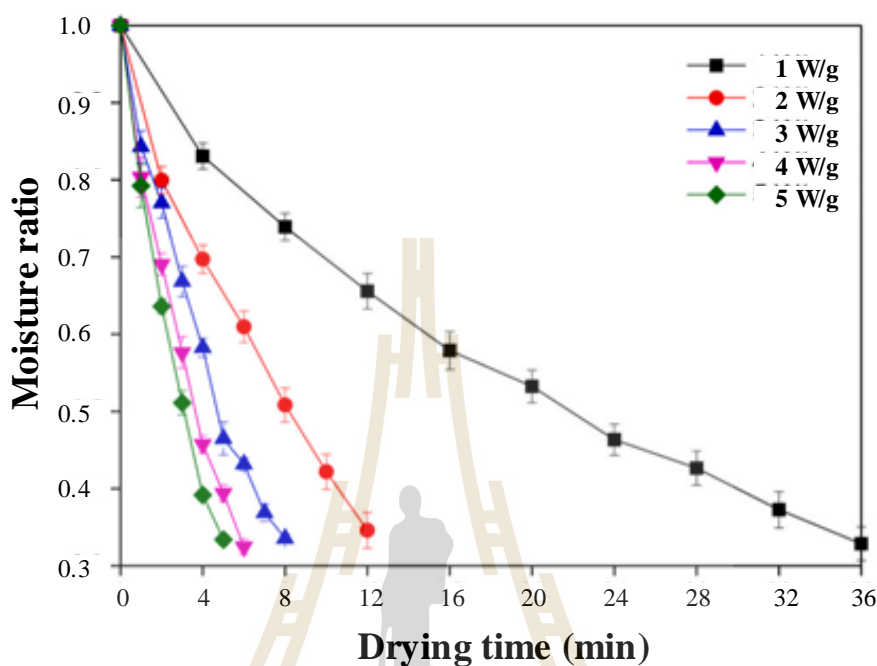
รูปที่ 1.3 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นกับอุณหภูมิเทียบกับเวลาที่ใช้ในการทดสอบ

จากผลการทดสอบของการเปลี่ยนแปลงความชื้นเทียบและอุณหภูมิเทียบกับเวลา ดังรูปที่ 1.1 จะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่มีความชื้นเริ่มต้นที่ 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการทดสอบที่ 8 นาที ความชื้นสามารถลดลงเหลือ 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิในช่วงแรก อุณหภูมิยังไม่สูงมากเพราะความชื้นสูง เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น อุณหภูมิก็เริ่มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อถึงเวลาที่ 4 - 5 นาที อุณหภูมิเริ่มคงที่

Liuyang Shen และคณะ (Liuyang et al, 2021) ได้ทำการทดสอบเกี่ยวกับการการอบแห้งข้าวกล้องด้วยคลื่นไมโครเวฟ และดูการเปลี่ยนแปลงของการอบแห้งและคุณภาพของข้าว จากการได้ศึกษาลักษณะของการอบแห้งจะมีผลต่อคุณภาพรวมของสีและกรด Gamma-aminobutyric (GABA) ของข้าวกล้องเมื่อทำการทดสอบผ่านการอบด้วยไมโครเวฟ ความเข้มของไมโครเวฟทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กภายในข้าวกล้อง เมื่อเพิ่มอัตราในการทำให้แห้งในระยะเริ่มต้น ในขณะที่อุณหภูมิสูงทำให้ Gelatinization ของแป้งขัดขาวอัตราการทำให้แห้งในระยะต่อมา ซึ่งรูปแบบที่ใช้ในการทดสอบเบื้องต้น ระยะเวลาการอบแห้งที่ต้องการให้ความชื้นเหลืออยู่ที่ 14.5 เปอร์เซ็นต์ คือจะทำการทดสอบที่ 32, 12, 8, 6 และ 5 นาที สำหรับข้าวที่ 200 กรัม โดยกำลังงานที่ใช้ในการทำให้แห้งอยู่ที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 วัตต์ต่อกรัม ตามลำดับ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านคุณภาพของข้าวกล้อง ช่วงเวลาสำหรับการทดสอบแต่ละครั้งถูกกำหนดเป็น 4, 2, 1, 1 และ 1 นาที ตามลำดับ สำหรับการทดสอบทั้งหมด ความเข้มของไมโครเวฟที่แตกต่างกันสามารถทำได้โดยการปรับเอาท์พุท เมื่อทำการทดสอบเสร็จ จะใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรด (FLIR E95, FLIR Systems Inc., USA); 4) จากนั้นนำตัวอย่างบนจานแก้วมาผสมให้ละเอียดเพื่อกำหนดค่าบ่งชี้



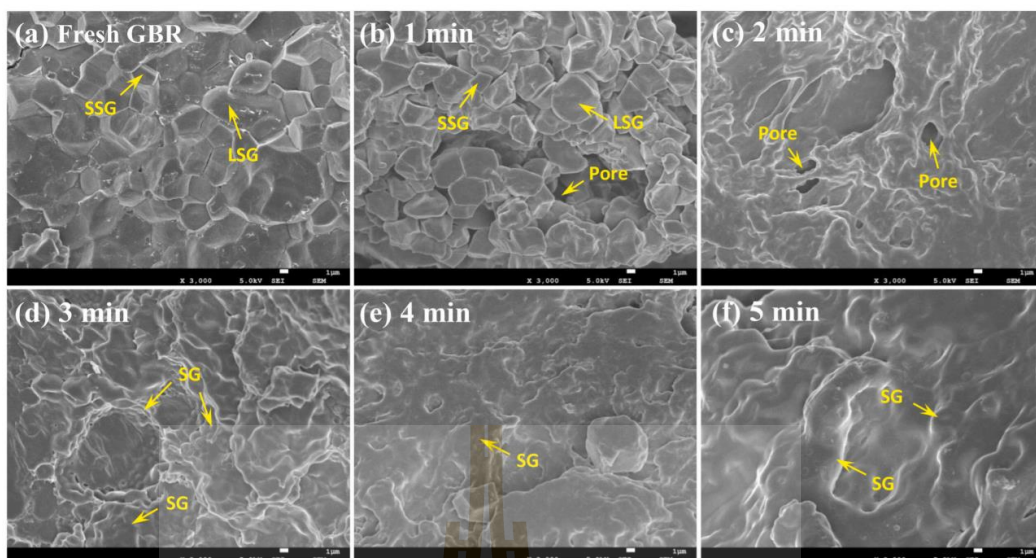
คุณภาพในภายหลัง ซึ่งรวมถึงสี ปริมาณความชื้น และปริมาณข้าวกล้อง ในขณะที่เดียวกัน เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบของเมล็ดข้าวใหม่เกรียม (เกิดขึ้นในระยะหลังของการอบแห้ง)



รูปที่ 1.4 อัตราความชื้นเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

จากผลการทดสอบการทำแห้งด้วยไมโครเวฟที่กำลังงาน 1 - 5 วัตต์ต่อกรัม เห็นได้ชัดว่า ความชื้นของข้าวกล้องที่กำลังงาน 1 วัตต์ต่อกรัม ค่อยๆลดลง ในขณะที่ความชื้นของข้าวกล้องที่กำลังงาน 5 วัตต์ต่อกรัม ลดลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ระยะเวลาการอบแห้งเพื่อให้ได้ความชื้นเป้าหมาย 13.0 -14.5 ที่ 1 วัตต์ต่อกรัม คือ 36 นาที ในขณะที่ลดลง 66.7, 77.8, 83.3 และ 86.1 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังงานที่ 2, 3, 4 และ 5 วัตต์ต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งจะชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มกำลังงานของการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมากขึ้น จะทำให้กระบวนการทำแห้งลดระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คล้ายกันกับการทำแห้งของ (Soysal, 2004, Khoshtaghaza, Darvishi, & Minaei, 2015, Azimi-Nejadian & Hoseini, 2019)

จากผลทดสอบก่อนหน้าการเพิ่มกำลังงานของการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมากขึ้น จะทำให้กระบวนการทำแห้งลดระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง ดังนั้นในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาคุณลักษณะของข้าวกล้องที่ผ่านการอบที่ กำลังงานที่มากที่สุด ซึ่งเป็นกำลังงานที่ 5 วัตต์ต่อกรัม มาเป็นตัวอย่างการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและเจลาตินไนซ์ของแป้ง ผลที่ได้ดังรูปที่ 1.5



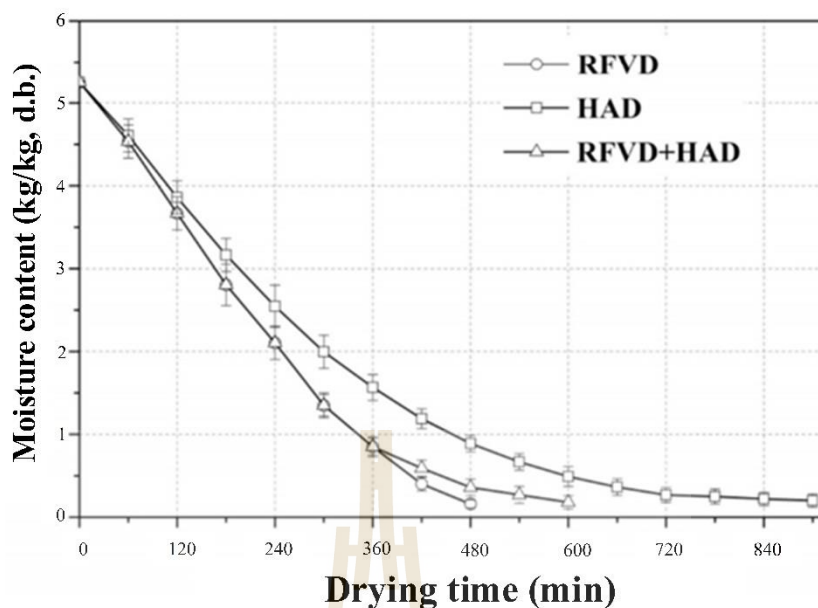
รูปที่ 1.5 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคทั่วไปของขั้วถั่วที่ทำงาน 5 วัตต์ต่อกรัม ภายใต้กำลังขยาย 3000 ไมโครเมตร

จากผลการส่องกล้องจากรูปที่ 1.5a และ b ความแน่นโครงสร้างอัดแน่นของเม็ดแป้งถูกรบกวนโดยการทำให้แห้งด้วยไมโครเวฟด้วยการจัดวางที่หลวม ในระยะเริ่มต้นของการอบแห้ง (รูปที่ 1.5b-c) การปล่อยคลื่นไมโครเวฟทำให้โครงสร้างแป้งยุบตัวลง รูมขนเล็กลงเนื่องจากการกระจายความชื้นอย่างเข้มข้นภายในขั้วถั่วภายใต้การทำให้แห้งด้วยไมโครเวฟ (Shen et al., 2019) ซึ่งนำไฟฟ้าไปสู่การแพร่กระจายและการระเหยของความชื้นและการเพิ่มประสิทธิภาพของอัตราการอบแห้ง หลังของการอบแห้ง (รูปที่ 1.5d-f) เมล็ดข้าวที่เพิ่มขึ้น อุณหภูมิเนื่องจากความร้อนสะสมค่อยๆส่งผลให้ผลของเจลลิตินในเซชันบางส่วนของเม็ดแป้งภายในขั้วถั่ว เกิดเจลลิตินซ์อย่างสมบูรณ์เมื่อสิ้นสุดการอบแห้ง

โครงสร้างที่ไม่มีช่องว่างหรือรอยแยก (รูปที่ 3d-f) ซึ่งเป็นขีดขวางการอบแห้ง

#### งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

Xu Zhou และคณะ (Xu et al, 2019) ได้ทำการทดสอบเกี่ยวกับการวิธีการทำแห้งสองวิธี เป็นวิธีการทำแห้งโดยการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (RFVD) กับการใช้ลมร้อน (HAD) โดยทำการทดสอบกับกวีที่มีขนาดความหนาอยู่ที่ 6 มิลลิเมตร ซึ่งผลการทดสอบสามารถดูได้ดังรูปที่ 1.6



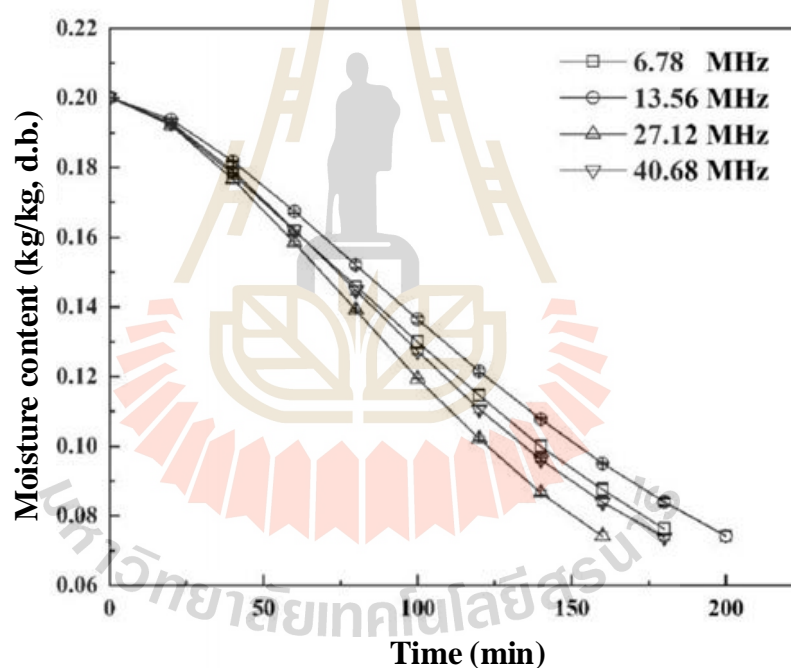
รูปที่ 1.6 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของผลกีวีระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน (HAD), การอบแห้งด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (RFVD) และการอบแห้งแบบผสม (RFVD+HAD)

จากการศึกษาก่อนหน้านี้ ผลการวิจัยพบว่าระยะเวลาในการทำแห้งที่ดีที่สุด เมื่อใช้การทำแห้งแบบ RFVD ตามด้วย RFVD + HAD และ HAD ที่เวลา 480, 600 และ 900 นาที อย่างไรก็ตาม พบรูปแบบการอบแห้งที่ไม่สม่ำเสมอทั้งในวิธี RFVD และ HAD แต่กระบวนการ RFVD+HAD ส่งผลให้มีการกระจายความชื้นที่สม่ำเสมอยิ่งขึ้นทั้งภายในและระหว่างชั้นผลไม้ ประสิทธิภาพพลังงานเฉลี่ยของ HAD คือ 9.92480 เปอร์เซ็นต์ ของ RFVD + HAD คือ 22.93 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ กระบวนการ RFVD+HAD ยังส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดีขึ้น

Yafei et al, 2021 ในการศึกษาเป็นการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุร่วมกับการทำให้แห้งด้วยลมร้อน ซึ่งการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุเป็นวิธีการที่ให้ความร้อนสม่ำเสมออย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเป็นการทดสอบการทำแห้งกับพริก โดยจะทำได้แห้งโดยใช้การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุร่วมกับการทำให้แห้งด้วยลมร้อนเปรียบเทียบกับทำให้แห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว

Yuxiao Mao และคณะ (Yuxiao et al, 2021) ได้ทำการทดสอบเกี่ยวกับระบบทำความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (RF) ที่ระบบที่มีกำลัง 2 กิโลวัตต์และสี่ความถี่ 6.78, 13.56, 27.12 และใช้ 40.68 เมกะเฮิร์ตซ์ เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของความถี่ต่างๆ ต่อลักษณะการอบแห้ง และการกำจัดศัตรูพืช โดยใช้วอลนัทในเปลือก ผลการวิจัยพบว่า เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นอุณหภูมิวอลนัทเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก  $70.87 \pm 5.59$  เป็น  $76.16 \pm 5.83$  องศาเซลเซียส และดัชนีความสม่ำเสมอของความร้อน

ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และเวลาทดสอบลดลงเพื่อให้ศัตรูพืชตายได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ไม่มีผลต่ออัตราส่วนการแตกของวอลนัท (CR) และสี ( $L^*$ ) ( $P > 0.05$ ) แต่มีนัยสำคัญพบความแตกต่างในค่าเปอร์ออกไซด์ (PV) และกรดไขมันอิสระ (FFA) ( $P < 0.05$ ) ซึ่งยังคงเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (PV  $< 1.0$  meq/kg, FFA  $< 0.6$  เปอร์เซ็นต์) โดยรวมแล้ว เวลาในการทำให้แห้งสั้นที่สุด (150 นาที) และสูงสุดประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (21.50 เปอร์เซ็นต์) เกิดขึ้นได้เมื่อใช้ระบบ RF 27.12 เมกะเฮิรตซ์ เพื่อทำให้อวาลนัทแห้งจากความชื้น 20 เปอร์เซ็นต์ (d.b.) ถึง 8 เปอร์เซ็นต์ (d.b.) ที่อัตราการให้ความร้อนใกล้เคียงกัน (1.40 องศาเซลเซียสต่อนาที) และอุณหภูมิ ดังนั้นระบบทำความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ความถี่ 27.12 เมกะเฮิรตซ์ ระบบสามารถย่นระยะเวลาการอบแห้งให้สั้นลงอย่างมากและปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานและมีศักยภาพสำหรับงานอุตสาหกรรมได้ สามารถดูผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 การทำแห้งของแต่ละความถี่เทียบกับเวลา

ดังนั้นจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางผู้วิจัยจึงได้มีความสนใจที่จะนำเทคโนโลยีในแต่ละรูปแบบสำหรับการออกแบบระบบลดความชื้นข้าวที่ผ่านการกำจัดสารหนูออกแล้วที่มีลักษณะความชื้นสูง โดยจะนำเทคโนโลยีต่างๆ ที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้น มาทำการลดความชื้นแบบไฮบริดประกอบด้วย หลักการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและคลื่นความถี่วิทยุ และใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเป็นพลังงานร่วมของทั้งสองกระบวนการ

สำหรับการศึกษาถึงผลการลดความชื้น และคุณภาพข้าวจากการลดความชื้นต่อไป โดยรายละเอียดการดำเนินการในแต่ละบทจะแสดงในหัวข้อที่ 1.9 ต่อไป

## 1.9 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท ดังต่อไปนี้

**บทที่ 1** กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

**บทที่ 2** กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการออกแบบเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด ด้วยคลื่นไมโครเวฟ คลื่นความถี่วิทยุ และใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องหลักๆ คือ ทฤษฎีการลดความชื้นข้าว ทฤษฎีในส่วนของให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ทฤษฎีในส่วนของให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ทฤษฎีในส่วนของให้ความร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก และทฤษฎีในส่วนของถ่ายโอนความร้อน

**บทที่ 3** การวิเคราะห์และการออกแบบระบบ ซึ่งจะประกอบไปด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและคลื่นความถี่วิทยุ ร่วมกับการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ซึ่งกระบวนการออกแบบทั้งหมดนี้เป็นออกแบบกระบวนการลดความชื้นข้าวด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

**บทที่ 4** จากการทดสอบเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด โดยการลดความชื้นข้าวจากกระบวนการล้างกำจัดสารหนูออกแล้ว โดยสามารถแบ่งการทดสอบเพื่อหาความสำคัญออกเป็น 2 รูปแบบ คือรูปแบบลดความชื้นข้าวจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟก่อน แล้วค่อยทำการทดสอบการลดความชื้นข้าวจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุต่อ และรูปแบบที่สองทำการทดสอบเหมือนรูปแบบแรก แต่สลับการทำงานก่อนหลัง ซึ่งก่อนการทดสอบนี้ได้ต้องทำการหาความสัมพันธ์ของแต่ละเงื่อนไขก่อน

**บทที่ 5** กล่าวถึงสรุปผลการวิจัยและผลของการออกแบบเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด ปัญหา ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาในอนาคต



## บทที่ 2

# หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ในการวิเคราะห์และการออกแบบ เครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด

### 2.1 บทนำ

การวิเคราะห์และออกแบบเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด ด้วยคลื่นไมโครเวฟ คลื่นความถี่วิทยุ และใช้ความร้อนจากแหล่งพลังงานการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องหลักๆ คือ ทฤษฎีการลดความชื้นข้าว ทฤษฎีในส่วนของให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ทฤษฎีในส่วนของให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ทฤษฎีในส่วนของให้ความร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก และทฤษฎีในส่วนของถ่ายโอนความร้อน ซึ่งก่อนการออกแบบและสร้างเครื่องในแต่ละส่วน ผู้วิจัยจำเป็นต้องมีความรู้ในแต่ละส่วน ซึ่งในส่วนแรกจะเป็นส่วนทฤษฎีลดความชื้นข้าว ซึ่งในส่วนนี้เป็นส่วนสำคัญที่ผู้วิจัยต้องนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับทฤษฎีที่เหลือในแต่ละส่วน เพื่อที่จะได้ออกแบบและสร้างเครื่องต่อไป โดยในส่วนนี้ผู้วิจัยจำเป็นต้องคำนึงถึง อัตราความชื้น อัตราเร็วในการลดความชื้น การใช้พลังงานในการลดความชื้น รวมไปถึงความร้อนที่ใช้ในการลดความชื้น ในส่วนที่สองเป็นทฤษฎีในส่วนของให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ในส่วนนี้จำเป็นต้องรู้ทฤษฎีของคลื่นไมโครเวฟ คุณสมบัติของคลื่น การทำงานของตัวปล่อยคลื่นท่อนำคลื่น ผลกระทบที่ผิว รวมไปถึงการแพร่กระจายของคลื่น ในส่วนที่สามเป็นทฤษฎีในส่วนของให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ จะต้องรู้ถึงลักษณะของการให้ความร้อนของไดอิเล็กตริก พื้นฐานและกลไกการให้ความร้อนของไดอิเล็กตริก และการส่งผ่านความร้อนเป็นต้น และในส่วนที่สี่ซึ่งเป็นทฤษฎีในส่วนของใช้ความร้อนจากแหล่งพลังงานการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ในส่วนนี้จะต้องรู้หลักการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก และการคำนวณพลังงานความร้อน และในส่วนที่ห้าซึ่งเป็นทฤษฎีในส่วนสุดท้ายเป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนความร้อน ดังนั้นทางผู้วิจัยจะต้องทราบถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในแต่ละส่วน ซึ่งรายละเอียดจะได้อธิบายในส่วนต่อไป

## 2.2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการลดความชื้นข้าว

การลดความชื้นมีความสำคัญในการลดความชื้นของวัตถุดิบ ไม่ว่าจะเป็นในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่มชนิดผง ยา อุตสาหกรรมสี ย้อม อุตสาหกรรมไม้ เป็นต้น การลดความชื้น คือ การเอาน้ำออกจากวัสดุที่ต้องการทำให้ปริมาณน้ำในวัสดุนั้นลดลง โดยส่วนใหญ่วัสดุนั้นจะอยู่ในสถานะของแข็ง น้ำที่ระเหยออกจากวัสดุนั้นอาจจะไม่ต้องระเหยที่จุดเดือดแต่ใช้อากาศพัดผ่านวัสดุนั้นเพื่อดึงน้ำออกมา วัสดุจะแห้งได้มากน้อยจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของมันด้วยในการลดความชื้น เมื่อทำให้ของเหลวในวัตถุดิบระเหยเป็นไอ จะได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่มีสัดส่วนของของเหลวต่ำลงซึ่งนอกจากจะมีกรณีที่วัตถุดิบมีสภาพเป็นของแข็งที่เปียกชื้นแล้ว ยังมีกรณีที่ลดความชื้นของเหลวข้น (slurry) หรือของเหลวใสเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ผงอีกด้วย เครื่องลดความชื้นโดยมากมักจะเป็นส่วนสุดท้ายของกระบวนการผลิต โดยผลิตภัณฑ์ที่ลดความชื้นแล้วจะกลายเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จทันที ดังนั้น การลดความชื้นไม่สม่ำเสมอ จึงเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสนใจ นอกจากนี้ ความร้อนแฝงของการระเหยของของเหลวจะมีค่าสูง การลดความชื้นจึงสิ้นเปลืองพลังงานมาก การจัดการพลังงานความร้อนจึงเป็นปัญหาที่สำคัญ การรู้จักชนิดของเครื่องลดความชื้นและการเลือกใช้ชนิดของเครื่องลดความชื้นให้ตรงกับคุณสมบัติจำเพาะของวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นเรื่องจำเป็น ขนาดของเครื่องลดความชื้นและเวลาที่ใช้ในการลดความชื้น จะส่งผลต่อปริมาณไฟฟ้า หรือปริมาณไอน้ำที่จำเป็นต้องใช้ในกระบวนการ ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วยหัวข้อหลัก ได้แก่ อัตราความชื้น อัตราเร็วในการลดความชื้นกับเส้นกราฟแสดงสมบัติการลดความชื้น การใช้พลังงานในการลดความชื้น และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อน เพื่อจะได้ทราบถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมาวิเคราะห์การออกแบบเครื่องและทดสอบให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพต่อการใช้งานมากที่สุด ซึ่งในรายละเอียดจะได้อธิบายในขั้นตอนต่อไป

### 2.2.1 อัตราความชื้น

อัตราการลดความชื้นจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัตถุดิบและสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ เวลา ความชื้นสัมพัทธ์ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Heat transfer coefficient) โดยทั่วไปการอบแห้งสามารถแบ่งได้ 3 ช่วง ดังรูปที่ 2.1 ช่วงแรกคือ ช่วงอุ่นวัตถุดิบเริ่มแรก (Initial period) เป็นช่วงเริ่มต้นที่วัตถุดิบที่ใช้ในการลดความชื้นมีความชื้นเริ่มต้นยังสูงอยู่และเป็นช่วงที่อุณหภูมิของวัตถุดิบจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิตั้งต้นจนถึงอุณหภูมิสมดุล เรียกว่าช่วงอุ่นวัตถุดิบ ซึ่งอัตราการลดความชื้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงคงที่ ช่วงที่สองคือ ช่วงอบด้วยอัตราเร็วคงที่ (Constant-rate period) อัตราการถ่ายเทมวลวัตถุดิบมีความสมดุลกับอัตราการถ่ายเทความร้อน จึงทำให้อุณหภูมิของวัสดุคงที่และปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ได้รับจะถูกไปใช้ในการระเหยความชื้นเท่านั้น ซึ่งขั้นของการระเหยจะเกิดที่ผิวหน้าของวัตถุดิบโดยอัตราความชื้นของวัตถุดิบ

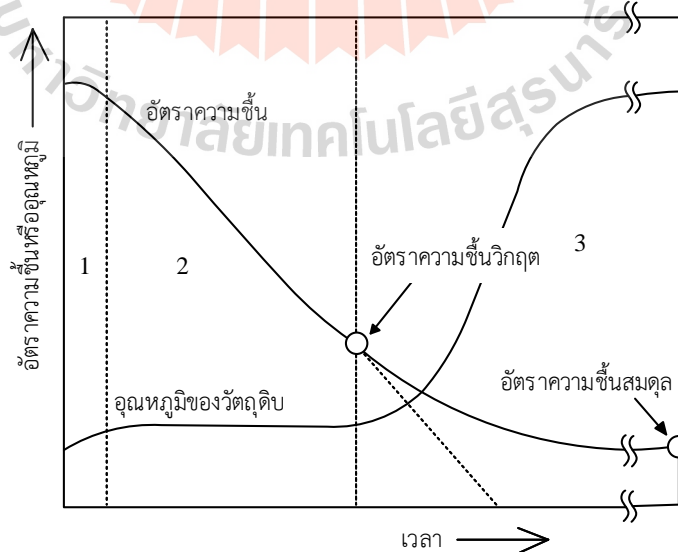


จะลดลงด้วยอัตราเร็วคงที่และอัตราเร็วในการอบนั้นก็จะมีค่าคงที่ ซึ่งช่วงนี้เรียกว่า ช่วงอบด้วยอัตราเร็วคงที่ ซึ่งอัตราเร็วในการอบคงที่  $R_A$  สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.1

$$R_A = \frac{\alpha(T - T_m)}{\lambda} \quad (2.1)$$

โดยที่	$R_A$	คือ อัตราเร็วในการอบคงที่
	$\alpha$	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (วัตต์ต่อตารางเมตรเคลวิน)
	$T$	คือ อุณหภูมิของไออากาศร้อนภายในถังอบ (เคลวิน)
	$T_m$	คือ อุณหภูมิของวัตถุดิบในถังอบ (เคลวิน)
	$\lambda$	คือ ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ (จุลต่อกิโลกรัม)

ช่วงสุดท้ายคือ ช่วงอบด้วยอัตราเร็วลดลง (Falling-rate period) เมื่อกระบวนการลดความชื้นดำเนินต่อไปอุณหภูมิของวัสดุภายในจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการ ซึ่งขึ้นของการระเหยจะค่อยๆ เลื่อนลงลึกเข้าไปในเนื้อวัตถุดิบจนปริมาณความชื้นที่ผิวหน้าวัตถุดิบแห้งลง และความชื้นภายในเนื้อวัตถุดิบก็เริ่มลดลง ทำให้ความชื้นอิสระภายในตัววัตถุดิบจะซึมขึ้นมาทดแทน ให้ทันกับอัตราเร็วในการระเหยที่ผิวหน้า อีกทั้งจะทำให้อุณหภูมิของวัตถุดิบเริ่มเข้าใกล้อุณหภูมิของอากาศร้อนในเครื่องด้วย จากบริเวณพื้นผิวเข้าไปถึงภายในเนื้อวัตถุดิบ ซึ่งในช่วงนี้อัตราเร็วในการลดความชื้นจะค่อยๆ ลดลงตามเวลาที่ผ่านไป



รูปที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราความชื้นกับอุณหภูมิของวัตถุดิบ

การหาสมดุลความร้อนของกระบวนการลดความชื้นข้าวด้วยความร้อน ซึ่งใช้สมการการสมดุลพลังงานของอากาศร้อนกับความชื้นของวัสดุ โดยสมมติให้ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำจากวัสดุขึ้นมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงความร้อนสัมผัสของอากาศ ดังสมการที่ 2.2

$$m_w h_{fg} = \dot{m}_a c_a (T_{ai} - T_{af}) t \quad (2.2)$$

โดยที่	$m_w$	คือ มวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ (กิโลกรัม)
	$h_{fg}$	คือ ความร้อนแฝงของการระเหย (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)
	$\dot{m}_a$	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (กิโลกรัมต่อวินาที)
	$c_a$	คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ (กิโลจูลต่อกิโลกรัมเซลเซียส)
	$T_{ai}$	คือ อุณหภูมิอากาศก่อนการอบแห้ง (องศาเซลเซียส)
	$T_{af}$	คือ อุณหภูมิอากาศหลังการอบแห้ง (องศาเซลเซียส)
	$t$	คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (วินาที)

การหาประสิทธิภาพรวมในการลดความชื้นข้าว ด้วยความร้อนนั้นสามารถคำนวณได้จากความร้อนที่ใช้ในการระเหยของน้ำต่อปริมาณความร้อนที่ให้ด้วยแหล่งพลังงานความร้อนตามสมการที่ 2.3

$$\eta_t = \frac{m_w h_{fg}}{m_f LHV} \times 100 \quad (2.3)$$

โดยที่	$\eta_t$	คือ มวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ (กิโลกรัม)
	$LHV$	คือ ความร้อนแฝงของการระเหย (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)

กรณีที่เราทราบค่าความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของวัตถุดิบ น้ำหนักเริ่มต้นของวัตถุดิบ เราสามารถคำนวณหาค่าน้ำหนักสุดท้ายหลังการลดความชื้นได้จากสมการ 2.4

$$W_f = \frac{W_i (1 - M_i)}{(1 - M_f)} \quad (2.4)$$

โดยที่	$M_i$	คือ ความชื้นเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์)
	$M_f$	คือ ความชื้นสุดท้าย (เปอร์เซ็นต์)

$W_i$  คือ น้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)

$W_f$  คือ น้ำหนักสุดท้าย (กิโลกรัม)

ความชื้นมาตรฐานเปียก จะแสดงน้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ต่อน้ำหนักรวมของวัสดุ โดยปกติจะแสดงอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ ซึ่งความชื้นมาตรฐานเปียกนิยมใช้ในทางค้า ดังสมการที่ 2.5

$$M_w = \frac{m_w - m_d}{m_w} \times 100\% \quad (2.5)$$

ความชื้นมาตรฐานแห้ง ซึ่งปกติแล้วจะใช้ในงานวิจัยทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ เนื่องจากมวลแห้งของวัสดุไม่มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการลดความชื้น ดังนั้นจึงง่ายในการวิเคราะห์การถ่ายเทความชื้น ซึ่งความชื้นมาตรฐานการลดความชื้นหาได้ดังสมการที่ 2.6

$$M_d = \frac{m_w - m_d}{m_d} \times 100\% \quad (2.6)$$

โดยที่  $M_w$  คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (เปอร์เซ็นต์)  
 $M_d$  คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (เปอร์เซ็นต์)  
 $m_w$  คือ น้ำหนักของวัสดุขณะเปียก (กิโลกรัม)  
 $m_d$  คือ น้ำหนักของวัสดุขณะแห้ง (กิโลกรัม)

### 2.2.2 การคำนวณพลังงานความร้อน

ในการให้ความร้อนไม่ว่าจะมีวัตถุประสงค์ทำให้วัตถุนั้นร้อนเพื่อลดความชื้นหรือเพื่ออะไรก็ตาม อีกสิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงคือปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ เนื่องจากเป็นปัจจัยหนึ่งที่เป็นตัวชี้วัดความคุ้มค่าในการลงทุนกับอุปกรณ์หรือเทคโนโลยีนั้น

#### 1) การคำนวณหาปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในการให้ความร้อน

ปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการให้ความร้อนแบ่งออกเป็นสองส่วนประกอบด้วย ส่วนที่หนึ่ง เป็นพลังงานที่ต้องใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการลดความชื้น ซึ่งปริมาณพลังงานความร้อนในช่วงเพิ่มอุณหภูมินี้สามารถหาได้จากสมการที่ 2.7

$$Q_i = mc\Delta T \quad (2.7)$$

โดยที่ $Q_i$	คือ ปริมาณพลังงานความร้อนในช่วงเพิ่มอุณหภูมิ ( $MJ$ )
$m$	คือ มวลของวัตถุมีหน่วยเป็นกรัม ( $g$ )
$c$	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ ( $cal / g \cdot ^\circ C$ ) หรือ ( $KJ / kg \cdot K$ )
$\Delta T$	คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ( $^\circ C$ )

ตัวอย่างเช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศมีค่าเท่ากับ 1.02 กิโลจูลต่อกิโลกรัม องศาเซลเซียส และของน้ำหนักเท่ากับ 4.19 กิโลจูลต่อกิโลกรัม องศาเซลเซียส แต่สำหรับค่าความจุความร้อนของวัสดุแต่ละชนิดก็มีค่าแตกต่างกันขึ้นกับอุณหภูมิและความชื้นด้วย เช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะของข้าวจะมีค่า 0.782 กิโลจูลต่อกิโลกรัม องศาเซลเซียสและส่วนที่สองเป็นพลังงานที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุ ซึ่งหาได้จากปริมาณพลังงานความร้อนในช่วงของการระเหย สามารถหาได้จากสมการที่ 2.8

$$Q_d = mL \quad (2.8)$$

โดยที่ $Q_d$	คือ ปริมาณพลังงานความร้อนในช่วงของการระเหยน้ำ ( $MJ$ )
$m$	คือ มวลน้ำที่ต้องการระเหยออก ( $kg$ )
$L$	คือ ค่าความร้อนแฝงจำเพาะของการกลายเป็นไอ ( $KJ / kg$ )

โดยที่ ความร้อนแฝงจำเพาะของการกลายเป็นไอคือ ปริมาณพลังงานความร้อนที่สารมวล 1 หน่วย ได้รับหรือคายออกเพื่อใช้เปลี่ยนสถานะ โดยที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง มีหน่วยเป็นหน่วยปริมาณความร้อนต่อหน่วยมวล เช่น แคลอรีต่อกรัม กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมหรือจูลต่อกิโลกรัม ตัวอย่างเช่น ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอน้ำมีค่า 2257 กิโลจูลต่อกิโลกรัม คิดเป็น 40.66 กิโลจูลต่อโมลและ 1 แคลอรีต่อกิโลกรัม องศาเซลเซียส ถ้าเป็นการลดความชื้นปริมาณพลังงานความร้อนรวมที่ต้องใช้ในลดความชื้นทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับ

$$Q_T = Q_i + Q_d \quad (2.9)$$

เมื่อต้องการคำนวณเป็นกำลังไฟฟ้าจากการลดความชื้นเทียบกับเวลาที่ใช้ในการลดความชื้น ได้จากสมการที่ 2.10

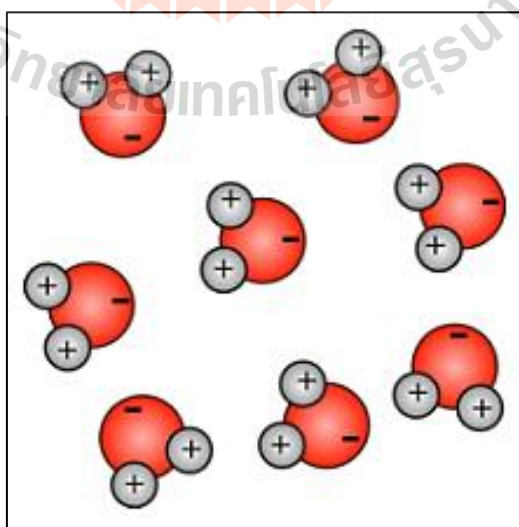
$$P = \frac{Q}{t} \quad (2.10)$$

## 2.3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

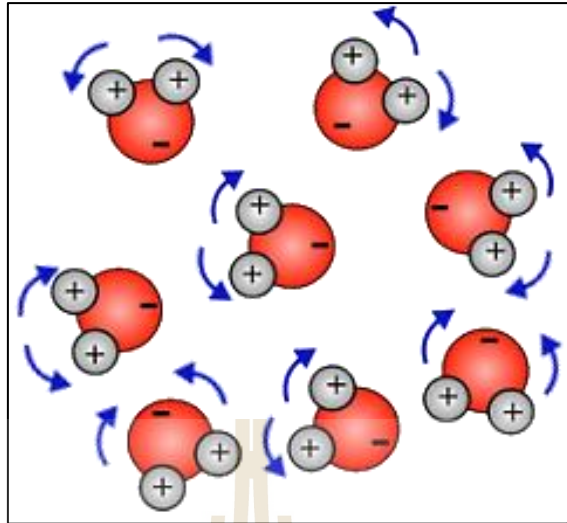
การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Heating) ซึ่งมีความสามารถในการให้ความร้อนกับน้ำซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของความชื้นในข้าวได้อย่างรวดเร็ว ในการออกแบบเครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟนั้น เป็นคลื่นสนามของพลังงานไฟฟ้า และพลังงานแม่เหล็กอยู่ด้วยกัน จึงจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเร็วเท่ากับความเร็วแสง มีการแผ่รังสีเหมือนแสง แต่มีพลังงานน้อยกว่า คลื่นที่อยู่ในรูปแบบคลื่น ดังนั้นคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนไปมาจะถูกส่งผ่านหรือดูดกลืนได้นั้น ขึ้นกับวัตถุดิบที่ไมโครเวฟทำปฏิกิริยาด้วยหลักการทำงานโดยอาศัยน้ำ เพราะน้ำเป็นโมเลกุลชนิดมีขั้วบวกที่ปลายด้านหนึ่ง โมเลกุลของน้ำในวัตถุดิบจะจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ เมื่อเปิดเครื่องทำให้เกิดคลื่นไมโครเวฟในตู้ลดความชื้น โมเลกุลของน้ำจะเริ่มดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วยหัวข้อหลัก ได้แก่ ทฤษฎีของคลื่นไมโครเวฟ คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟ ท่อนำคลื่น โหมดของการแพร่กระจายคลื่น และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ มาวิเคราะห์การออกแบบเครื่องและทดสอบให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพต่อการใช้งานมากที่สุด ซึ่งจะได้อธิบายในขั้นตอนต่อไป

### 2.3.1 ทฤษฎีของคลื่นไมโครเวฟ

โมเลกุลของน้ำ  $H_2O$  ประกอบด้วยไฮโดรเจน 2 อะตอมเป็นขั้วบวก และออกซิเจน 1 อะตอมเป็นขั้วลบ เมื่ออิเล็กตรอนภายในอะตอมของน้ำได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟมากพอ จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ แล้ววิ่งชนกับอะตอมข้างเคียง ทำให้อะตอมข้างเคียงได้รับพลังงานเพิ่มมากขึ้นและทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 2.2 แบบจำลองโมเลกุลของน้ำ



รูปที่ 2.3 โมเลกุลของน้ำที่เปลี่ยนทิศสลับไปมาอย่างรวดเร็ว

คลื่นไมโครเวฟมีความถี่อยู่ในช่วง 300 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 300 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นช่วงความถี่หนึ่งในแถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีสมการที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ สมการแมกเวล (Maxwell's equation)

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.11)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.12)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.13)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.14)$$

โดยที่	$\nabla$	คือ ตัวดำเนินการไดเวอร์เจนซ์
	$\vec{E}$	คือ สนามไฟฟ้า
	$\vec{B}$	คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก
	$\vec{H}$	คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้า
	$\vec{J}$	คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า
	$\vec{D}$	คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า
	$\rho$	คือ ความหนาแน่นของประจุอิสระ

แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากอัตรกิริยา ระหว่างคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุ ที่ต้องการลดความชื้นโดยส่วนของสนามไฟฟ้าจะทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดโพลาไรเซชันทำให้ค่า Dielectric permittivity ของวัสดุไดอิเล็กตริกเขียนได้ตามสมการ

$$\epsilon_0 \epsilon \cong \epsilon_0 \epsilon_r \cong \epsilon_0 (\epsilon'_r - j\epsilon''_r) \quad (2.15)$$

โดยที่  $\epsilon_0$  คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของฟรีสเปซหรืออากาศ (Permittivity of Free Space)  
มีค่าเท่ากับ  $8.8542 \times 10^{-12} \text{ F/m}$   
 $\epsilon'_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Constant)  
หรือค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ (Relative Permittivity)  
 $\epsilon''_r$  คือ ค่าไดอิเล็กตริกทอสเฟคเตอร์สัมพัทธ์ (Relative Dielectric Loss Factor)  
 $j = \sqrt{-1}$

การหาค่าการสะท้อนคลื่นไมโครเวฟ

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad \text{มีหน่วยเป็น } N_p / m \quad (2.16)$$

$\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Coefficient)

$\beta$  คือ ค่าคงที่เฟส (Phase Constant)

วิธีการหาความยาวคลื่น  $\lambda$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.17)$$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2.45 \times 10^9 \text{ Hz}}$$

โดยที่  $C$  คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

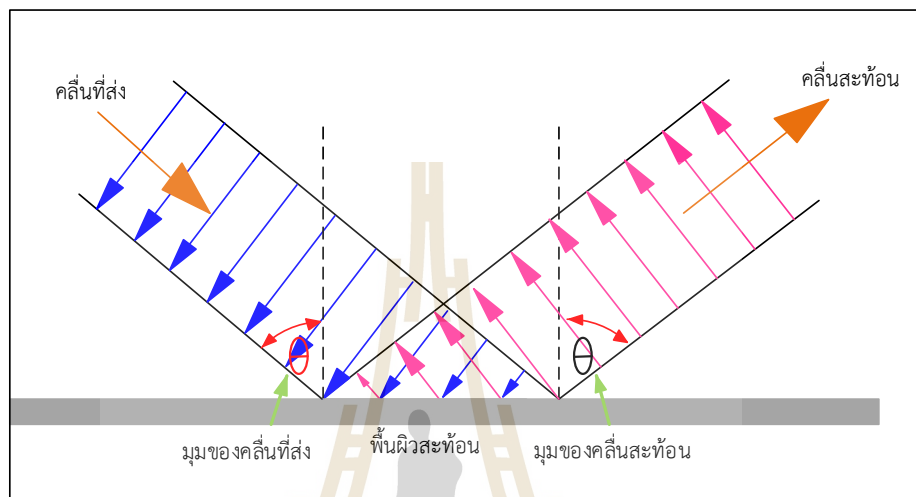
$$f = 2.45 \times 10^9 \text{ Hz}$$



### 2.3.2 คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟ

#### 1) การสะท้อนกลับ (Reflection)

คลื่นไมโครเวฟเมื่อวิ่งกระทบกับวัสดุที่เป็นโลหะ หรือส่วนที่มีม็อดคั้ประกอบของโลหะ คลื่นจะไม่สามารถวิ่งทะลุผ่านโลหะได้ และจะสะท้อนกลับทั้งหมด



รูปที่ 2.4 การสะท้อนของคลื่น

#### 2) การส่งผ่าน (Transmission)

คลื่นไมโครเวฟเมื่อวิ่งกระทบกับวัสดุที่ไม่ใช่โลหะ เช่น แก้ว พลาสติก กระจก เซรามิก และไม้ เป็นต้น คลื่นจะสามารถทะลุผ่านได้ ดังนั้น วัสดุเหล่านี้จึงนิยมใช้เป็นภาชนะในการนำไปลดความร้อน

#### 3) การดูดซับ (Adsorption)

คลื่นไมโครเวฟเมื่อวิ่งกระทบกับวัสดุที่มีน้ำหรือความชื้นภายใน คลื่นบางส่วนจะถูกดูดซับเอาไว้ทำให้โมเลกุลของน้ำดูดซับพลังงานคลื่น และยังเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนตามมา รวมถึงการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำ ซึ่งทำให้ร้อนได้เช่นกัน เมื่อคลื่นไมโครเวฟหลังถูกดูดซับจะสลายตัวทันที ไม่มีการตกค้างในข้าว

### 2.3.3 ท่อนำคลื่น

เวฟไกด์ (Waveguide) หรือว่าท่อนำคลื่นนี้เป็นสายส่งสัญญาณชนิดหนึ่งที่ใช้ในการส่งคลื่นไมโครเวฟ โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นท่อกลม หรือท่อเหลี่ยม แล้วแต่จะทำมาจากทองแดงหรืออะลูมิเนียม คำนในฉายด้วยเงินเพื่อให้เป็นตัวนำที่ดี สาเหตุที่สายนำสัญญาณต้องทำเป็นท่อนี้ก็เพราะว่า คลื่นไมโครเวฟมีความถี่สูงมากจะเดินทางได้ดีที่บริเวณผิวของตัวนำถ้าหากใช้

สายนำสัญญาณทั่วไปจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปได้ จึงต้องทำเป็นท่อเพื่อป้องกันการสูญเสียพลังงานจากผิวของสายสัญญาณ ความถี่ต่ำสุดที่สามารถใช้งานได้กับเวฟไกด์เรียกว่า ความถี่คัตออฟ ซึ่งถ้าความถี่สูงกว่าความถี่ คัตออฟ จะสามารถเดินทางไปในเวฟไกด์ได้ ส่วนความถี่ที่ต่ำกว่านี้จะไม่สามารถเดินทางบนเวฟไกด์ได้ ในการเดินทางของคลื่นไมโครเวฟ ในเวฟไกด์นั้น จะเดินทางโดยการสะท้อนผนังท่อ และเดินทางไปตามความยาวของท่อนำคลื่น และความถี่ที่สูงก็สามารถเดินทางได้ไกลกว่าความถี่ที่ต่ำสายคู่นำสัญญาณที่ใช้กันในวงจรโดยทั่วไป มักไม่มีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ไมโครเวฟที่ความถี่นี้พลังงาน จะถูกปล่อยออกมาโดยการแผ่รังสี เพราะสนามไม่ได้จำกัดในทุก ๆ ด้านสายโคแอกเซียล มีประสิทธิภาพมากกว่าสายคู่นำสัญญาณในการส่งถ่ายพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเพราะมีการจำกัด ขอบเขตด้วยตัวนำ

### 2.3.4 ผลกระทบที่ผิว

การหาค่าผลกระทบที่ผิว (skin depth) เพื่อทดสอบความทะลุทะลวงของ คลื่นไมโครเวฟที่กระทำกับวัสดุ Stainless steel ชนิด Austenitic stainless steel, 304 Series หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (2.18)$$

$$\mu = \mu_r \mu_0, \quad \omega = 2\pi f$$

โดยที่	$\rho$	คือ Conductor resistivity ( $S/m$ ) มีค่าเท่ากับ $6.90 \times 10^{-7} (N/m^2)$
	$\mu$	คือ Magnetic permeability of the material (H/m)
	$\mu_0$	คือ ค่าคงที่ เท่ากับ $4\pi \times 10^{-7} (N/m^2)$
	$\mu_r$	คือ Relative permeability มีค่าเท่ากับ 1.003 ถึง 7 เลือค่าสูงสุดมาใช้

แทนค่า

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{2\pi f \mu_r \mu_0}} \quad (2.19)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2(6.90 \times 10^{-7}) \Omega \cdot m}{(2\pi \times 2.45 \times 10^9 \text{ Hz}) \left(4\pi \times 10^{-7} \text{ N/m}^2\right)}} \quad (7)$$

ดังนั้น  $\delta = 3.2 \mu\text{m}$

จากการคำนวณหาค่า Skin Depth สรุปได้ว่าความทะลุทะลวงของคลื่นมีค่าน้อยมากจนไม่สามารถทะลุผ่านวัสดุที่ใช้ไปได้

### 2.3.5 โหมดของการแพร่กระจายคลื่น

1) **ทรานสเวิร์สอิเล็กทริกเวฟ** (Transverse Electric Wave; TE) หรือเรียกว่าคลื่นที่มีแนวสนามไฟฟ้าวางตามขวาง ซึ่งสนามแม่เหล็ก (H) มีส่วนประกอบหรือเวกเตอร์ย่อยอยู่ในแกน X และ Z ของสนามไฟฟ้า (E) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ไม่มีสนามไฟฟ้าในทิศของการแพร่กระจายของคลื่นแต่มีเฉพาะสนามแม่เหล็กในทิศทางนั้น นั่นคือ

$$E_z = 0, H_z \neq 0 \quad (2.20)$$

2) **ทรานสเวิร์สแมกเนตริกเวฟ** (Transverse Magnetic Wave; TM) หรือเรียกว่าคลื่นที่มีแนวสนามแม่เหล็กวางตามขวาง ซึ่งสนามไฟฟ้า (E) มีส่วนประกอบหรือเวกเตอร์ย่อยอยู่ในแกน X และ Y ของสนามแม่เหล็ก (H) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ไม่มีสนามแม่เหล็กในทิศของการแพร่กระจายของคลื่นแต่มีเฉพาะสนามไฟฟ้าในทิศทางนั้น นั่นคือ

$$H_z = 0, E_z \neq 0 \quad (2.21)$$

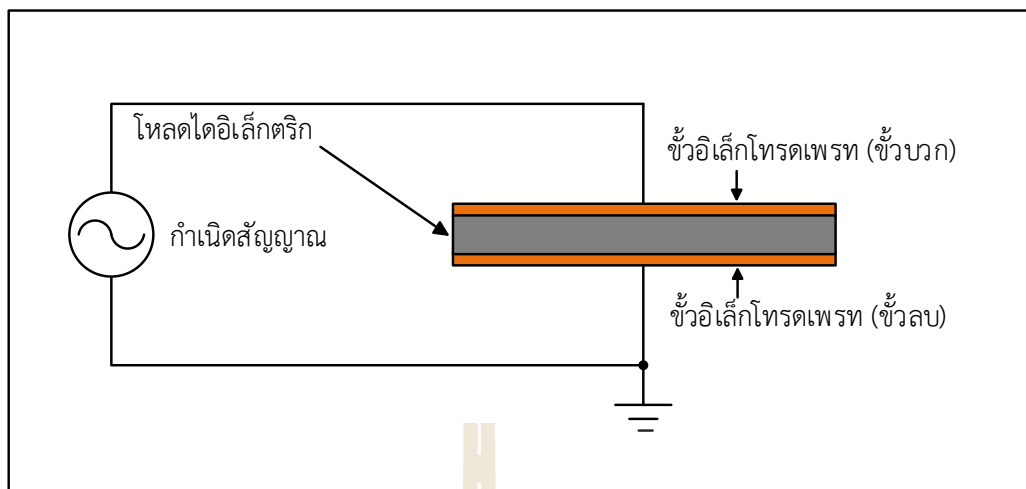
## 2.4 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

การให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ (Radio frequency Heating) ซึ่งเป็นระบบที่สามารถให้ความร้อนที่เหมาะสมกับแป้งที่อยู่ในเมล็ดข้าวได้เป็นอย่างดี ทำให้สามารถลดความชื้นได้อีกกระบวนการหนึ่งของระบบ และการนำคลื่นความถี่มาประยุกต์ใช้งานสำหรับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกที่ใช้หลักการของการส่งผ่านคลื่นไปยังเนื้อวัสดุนั้นมีอย่างแพร่หลาย โดยที่ผ่านมานั้นความถี่ที่ใช้งานนั้นจะมีย่านความถี่ที่ไม่สูงมากนัก ต่อมาได้มีการพัฒนาใช้คลื่นความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่งได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกนั้น เป็นวิธีการการให้พลังงานความร้อนในรูปแบบของคลื่นสนามไฟฟ้า โดยคลื่นสนามไฟฟ้าที่กระทำต่อวัสดุ

ไดอิเล็กทริกจะทำปฏิกิริยากับโพลไดอิเล็กตริกให้เกิดการแปรผันเป็นพลังงานในรูปแบบของไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งเป็นวิธีการให้ความร้อนไปยังวัสดุไดอิเล็กตริกโดยตรง ทำให้มีประสิทธิภาพการให้ความร้อนสูง โดยในปัจจุบัน ได้มีการประยุกต์ใช้ในงานทางด้านภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากขึ้น เช่นภาคเกษตรกรรม ได้นำเทคโนโลยีการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกสำหรับอุตสาหกรรมการลดความชื้นผลไม้เพื่อการส่งออกอุตสาหกรรมการถนอมผลไม้ การถนอมอาหารและการลดความชื้นไม้ เป็นต้น โดยจากปรัทศวรรณกรรมที่ได้สืบค้นงานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้ศึกษาและนำเสนอมานั้น งานวิจัยส่วนใหญ่ได้มีการนำเสนอถึงความจำเป็นไดอิเล็กตริก ทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาและออกแบบเครื่องให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริกโดยใช้แผ่นเพลตสำหรับถ่ายโอนกำลังงานไปยังโพลไดอิเล็กตริก และใช้โพลไดอิเล็กตริกที่เป็นข้าวเป็นโพลไดอิเล็กตริกหลักในงานวิจัยนี้ ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเพื่อการออกแบบเครื่องให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริกและการทดสอบผลอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วยหัวข้อหลัก ได้แก่ หลักการพื้นฐานของการให้ความร้อนด้วยคลื่นสนามไฟฟ้า ทฤษฎีพื้นฐานและกลไกการให้ความร้อนของไดอิเล็กตริก โครงสร้างพื้นฐานการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก หลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อน ซึ่งส่วนต่าง ๆ เหล่านี้จำเป็นต้องมีการศึกษาถึงทฤษฎีของหลักการทำงานในแต่ละภาคส่วน รวมถึงการประยุกต์ใช้งานและโครงสร้างวัสดุไดอิเล็กตริกต่าง ๆ เพื่อนำมาซึ่งการวิเคราะห์การออกแบบเครื่องและทดสอบให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพต่อการใช้งานมากที่สุด โดยจะกล่าวถึงเฉพาะส่วนที่เป็นประโยชน์หรือกล่าวอ้างถึงในการดำเนินงานวิจัย เพื่อให้เนื้อหามีความกระชับชัดเจน

#### 2.4.1 ลักษณะทั่วไปของการให้ความร้อนของไดอิเล็กตริก

ลักษณะ โดยทั่วไปของการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ คือส่วนกำเนิดสัญญาณ ซึ่งเป็นตัวกำหนดลักษณะของสัญญาณและความถี่ที่ต้องการใช้งาน รวมถึงระดับกำลังงานที่ใช้สำหรับให้ความร้อน สำหรับป้อนกำลังงานให้กับแผ่นเพลตมีทั้งหมด 2 ขั้ว คือขั้วอิเล็กโทรดแบบแผ่นเพลตที่มีการป้อนกำลังงาน (ขั้วบวก) (electrode) เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าและส่งผ่านกำลังงานไปยังโพลไดอิเล็กตริก และเข้าสู่ขั้วอิเล็กโทรดแบบแผ่นเพลตที่เป็นกราวด์ (ขั้วลบ) (Ground electrode) และอีกส่วนประกอบหนึ่งคือ โพลไดอิเล็กตริก ซึ่งรูปแบบของการให้ความร้อนแบบโพลไดอิเล็กตริกสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 โดยมีรูปแบบของวงจรที่ใช้ในการให้ความร้อนแบบเรโซแนนซ์แบบอนุกรม ดังนี้สำหรับการวิเคราะห์การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกจึงต้องศึกษาถึงทฤษฎีของการให้ความร้อนของไดอิเล็กตริก ทฤษฎีของการให้ความร้อนที่เป็นผลมาจากคลื่นสนามไฟฟ้า รวมถึงทฤษฎีของวงจรเรโซแนนซ์ เพื่อให้การวิเคราะห์ออกแบบและทดสอบให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

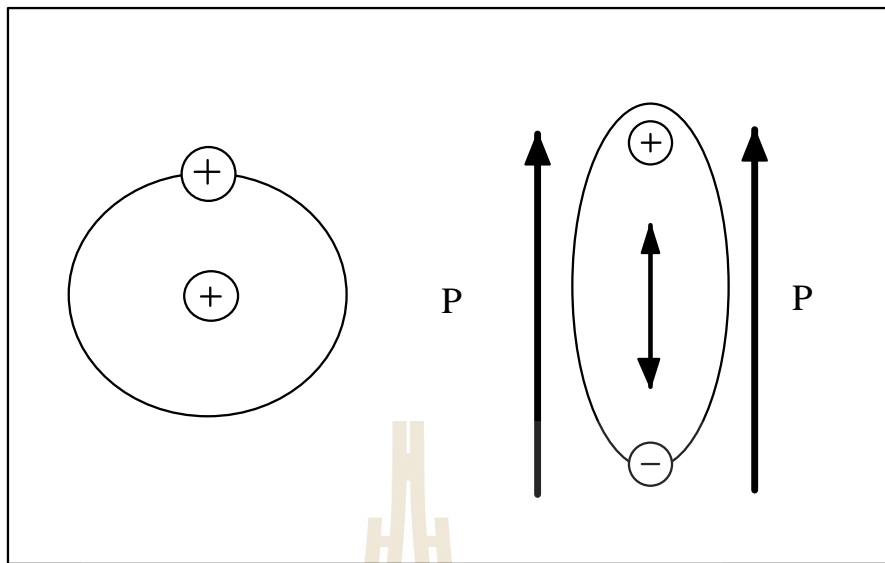


รูปที่ 2.5 โครงสร้างพื้นฐานของการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

## 2.4.2 พื้นฐานและกลไกการให้ความร้อนของไดอิเล็กตริก

### 1) โครงสร้างพื้นฐานของการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก (dielectric heating) นั้นมีหลักการทำงาน โดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่วิทยุ (radio frequency) หรือย่านความถี่ไมโครเวฟ (microwave) กำลังสูงส่งผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุที่เป็นไดอิเล็กตริก โดยวัสดุที่สามารถใช้การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกได้นั้นจะต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กล่าวคือจะต้องเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้วหรืออาจจะประกอบไปด้วยน้ำ ซึ่งมีโมเลกุลแบบมีขั้วเช่นกันเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเป็นการทำให้เกิดความร้อนเป็นผลมาจากความสามารถของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำให้เกิดโพลาริเซชันของประจุภายในไดอิเล็กตริก เมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสลับแล้วสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสลับจะทำให้เกิดโพลาริเซชัน แต่ในกรณีที่เป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสลับพลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสลับนี้จะทำให้เกิดโพลาริเซชันดังแสดงในรูปที่ 2.6



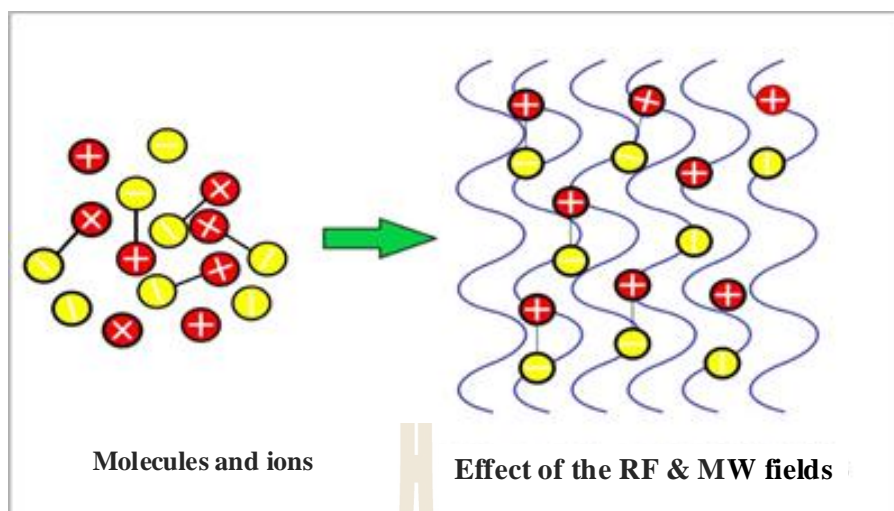
รูปที่ 2.6 โครงสร้างอะตอมระหว่างประจุบวกต่อประจุลบของตัวกลางไดอิเล็กตริก

ส่วนวัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบไม่มีขั้ว เช่น อากาศ เทฟลอน (Teflon) หรือแก้วซึ่งจะไม่สามารถดูดซับพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ โดยคลื่นจะผ่านทะลุเข้าไปในเนื้อวัสดุโดยไม่เกิดความร้อนหรือการเปลี่ยนแปลงใด ๆ สำหรับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกนั้นเป็นวิธีการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากการถ่ายเทพลังงานเป็นความร้อนเกิดภายในเนื้อวัสดุโดยตรง ซึ่งจะมีความแตกต่างจากการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมซึ่งใช้เชื้อเพลิงหรือขดลวดไฟฟ้าซึ่งการถ่ายเทความร้อนจะอาศัยการพาของอากาศร้อนหรือการแผ่รังสีจากแหล่งความร้อนเป็นหลักซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นจะถ่ายเทไปที่ผิววัสดุก่อน จากนั้นจึงจะค่อยเกิดการนำความร้อนจากผิวนอกของวัสดุเข้าไปสู่ภายในวัสดุ

## 2) กลไกการเกิดความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก

สำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารไดอิเล็กตริกนั้นสามารถทำให้เกิดความร้อนได้โดยการป้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปในไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นการทำให้เกิดความร้อนเป็นผลมาจากความสามารถของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำให้เกิดโพลาไรซ์ของประจุภายในไดอิเล็กตริก เมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสถิตแล้วสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสถิตจะทำให้เกิดโพลาไรซ์ขึ้น แต่ในกรณีที่เป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสลับพลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสลับนี้จะทำให้เกิดโพลาไรซ์ นั่นคือขั้วไฟฟ้าที่เป็นขั้วบวกและขั้วลบพยายามเรียงตัวกันตามทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านเข้าไป ซึ่งทำให้เกิดการเสียดสีกันของโมเลกุล เกิดเป็นความร้อนกระจายทั่วภายในเนื้อวัสดุหรือเป็นการถ่ายเทพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังวัสดุไดอิเล็กตริก ดังแสดงในรูปที่ 2.7





รูปที่ 2.7 ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีกันของโมเลกุลขั้วบวกและขั้วลบพยายามจัดเรียงตัวกันตามทิศทางของคลื่นสนามไฟฟ้าที่ส่งผ่านเข้าไปในไดอิเล็กตริก

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงไปตามคาบเวลาของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ไดอิเล็กตริก ซึ่งการหมุนของไดโพลที่ทำให้เกิดความร้อน โดยเกิดจากความเสียดทานภายในของโมเลกุล โดยโมเลกุลของไดอิเล็กตริกนั้นจะต้องมีค่าไดโพลโมเมนต์ (dipole moment) สูงพอ โดยจะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของการทำให้เกิดความร้อนในไดอิเล็กตริก ไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ ซึ่งในสภาวะทั่วไปสารที่เป็นไดอิเล็กตริกสามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าได้ โดยเกิดจากประจุบวกและประจุลบที่แยกห่างออกจากกันเนื่องจากการป้อนพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปภายในไดอิเล็กตริกซึ่งจะฝืนกับแรงยึดเหนี่ยวของอะตอมหรือโมเลกุลในสภาวะทั่วไปสารที่เป็นไดอิเล็กตริก สามารถที่จะเก็บพลังงานไฟฟ้าได้ โดยเกิดจากประจุบวกและประจุลบที่แยกห่างออกจากกันเนื่องจากการป้อนพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปภายในไดอิเล็กตริกซึ่งจะฝืนกับแรงยึดเหนี่ยวของอะตอมหรือโมเลกุล

ในสภาวะทั่วไปสารที่เป็นไดอิเล็กตริก สามารถที่จะเก็บพลังงานไฟฟ้าได้ โดยเกิดจากประจุบวกและประจุลบ ที่แยกห่างออกจากกันเนื่องจากการป้อนพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปภายในไดอิเล็กตริกซึ่งจะฝืนกับแรงยึดเหนี่ยวของอะตอมหรือโมเลกุล กลไกของการเกิดการแยกห่างกันของประจุขึ้นอยู่กับชนิดของไดอิเล็กตริกและความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับตัวกลางไดอิเล็กตริก โดยสามารถแบ่งชนิดของการเกิดโพลาไรซ์ของไดอิเล็กตริกได้ 4 แบบ ซึ่งในแต่ละแบบจะเกิดปรากฏการณ์ที่คล้ายกัน แต่จะเกิดขึ้นที่ความถี่ที่แตกต่างกัน โดยในแต่ละแบบความเป็นกลางทางไฟฟ้าจะถูกรบกวนเนื่องจากการป้อนพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปในไดอิเล็กตริกซึ่งจะทำให้เกิดการแยกห่างออกจากกันของประจุลบและประจุบวก โดยที่พลังงาน



สนามไฟฟ้าสถิตนี้ความถี่จะเป็นตัวกำหนดชนิดของการเกิดโพลาริเซชัน จะอธิบายการเกิดโพลาริเซชันชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้คือ การเกิดโพลาริเซชันแบบสเปซชาร์จ (Space charge polarization) การเกิดโพลาริเซชันชนิดนี้จะเกิดขึ้นที่ความถี่ต่ำ ซึ่งจะเป็นช่วง VLF และ LF โดยการเกิดโพลาริเซชันจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุหรือตัวกลางมีอิเล็กตรอนอิสระ โดยที่ระยะห่างของประจุบวกและประจุลบจะถูกจำกัดโดยส่วนกีดขวาง เมื่อมีการป้อนพลังงานสนามไฟฟ้าเข้าไปยังวัสดุไดอิเล็กตริก อิเล็กตรอนจะไปสะสมบริเวณที่ส่วนกีดขวาง ซึ่งจะทำให้ประจุบวกและประจุลบแยกห่างออกจากกัน มีผลทำให้ไดอิเล็กตริกเกิดโพลาริเซชันการเกิดโพลาริเซชันแบบการจัดเรียงไดโพล (Polarization by dipole alignment) การเกิดโพลาริเซชันลักษณะนี้ เกิดขึ้นที่ความถี่สูงมากเช่น ย่านความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งจะเกิดขึ้นในระดับโมเลกุล โดยหลักการนี้จะใช้เป็นพื้นฐานของการเกิดความร้อนในไดอิเล็กตริก การเกิดโพลาริเซชันแบบไอออนิก (Ionic polarization) การเกิดโพลาริเซชันลักษณะนี้จะเกิดขึ้นที่ย่านความถี่อินฟราเรด โดยจะเกิดขึ้นเนื่องจากการแยกห่างจากกันของประจุบวกและประจุลบภายในโมเลกุล และการเกิดโพลาริเซชันแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic polarization) การเกิดโพลาริเซชันลักษณะนี้จะเกิดขึ้นที่ความถี่สูง ๆ ที่ใกล้เคียงกับความถี่ของอัลตราไวโอเล็ต โดยนิเวศของอะตอม ซึ่งเป็นประจุบวกจะอยู่กับที่ในเมตริกซ์ของไดอิเล็กตริก โดยกลุ่มของประจุลบที่อยู่รอบนิเวศจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามา

#### 2.4.3 หลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

##### 1) คุณสมบัติพื้นฐานของไดอิเล็กตริก

คุณสมบัติของตัวกลางไดอิเล็กตริกของวัสดุใด ๆ ที่มีความสัมพันธ์เกี่ยวกับคลื่นความถี่ จำเป็นต้องมีการศึกษาถึงลักษณะการเกิดและการแพร่กระจายความร้อนในไดอิเล็กตริกด้วยสนามไฟฟ้า เพื่อให้ตัวกลางไดอิเล็กตริกของวัสดุใด ๆ มีความร้อนและมีช่วงความถี่ใช้งานเหมาะสมที่สุด จึงต้องมีการศึกษาถึงคุณสมบัติของไดอิเล็กตริก ซึ่งคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกนั้นสามารถอธิบายได้จากพฤติกรรมภายใต้การใช้งานคลื่นที่ความถี่ต่าง ๆ ด้วยค่าสภาพยอมเชิงซ้อน (Complex permittivity,  $\epsilon^*$ ) หรือที่เรียกว่า “ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกยังผล (dielectric constant)” ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ของสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.22)$$

เมื่อ  $\epsilon''$  คือ ปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริก (dielectric loss factor) โดยสำหรับการพิจารณาค่าการสูญเสีย นั้น จะพิจารณาจากส่วนที่เป็นจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าของความถี่และอุณหภูมิที่ใช้งาน และสามารถนิยามค่าการสูญเสียแทนเจนต์ (Loss tangent) ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\tan \delta = \varepsilon'' / \varepsilon' \quad (2.23)$$

โดยความถี่วิทยุที่สำคัญที่มีการใช้ในปัจจุบันสำหรับการใช้งานในงานวิจัยนี้ จะใช้ย่านความถี่วิทยุในช่วง 1 – 50 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งจะใช้หลักการหมุนของไดโพลเป็นกลไกการสูญเสียที่สำคัญ ดังสมการความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\varepsilon'' = \varepsilon_d'' + \varepsilon_\sigma'' + \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \quad (2.24)$$

## 2) รูปแบบการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก

วัสดุไดอิเล็กตริก (dielectric) ที่มีการสูญเสียนั้นสามารถทำให้เกิดเป็นความร้อนได้โดยการป้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปในไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นการทำให้เกิดความร้อนเป็นผลมาจากความสามารถของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำให้เกิดโพลาริซชันของประจุภายในไดอิเล็กตริก เมื่อทำการป้อนสนามไฟฟ้าสถิตแล้วสนามไฟฟ้าสถิตจะทำให้เกิดโพลาริซชัน แต่ในกรณีที่เป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสลับพลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสลับนี้จะทำให้เกิดโพลาริซชันและจะทำให้ไดโพลเกิดการหมุนไปตามคาบเวลาของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ป้อน การหมุนของไดโพลที่ทำให้เกิดความร้อนโดยเกิดจากความเสียดทานภายในของโมเลกุล โดยโมเลกุลของไดอิเล็กตริกนั้นจะต้องมีค่าไดโพล โมเมนต์ (dipole moment) สูงพอ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของการทำให้เกิดความร้อนในไดอิเล็กตริก ไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบซึ่งในสถานะทั่วไปสารที่เป็นไดอิเล็กตริก สามารถที่จะเก็บพลังงานไฟฟ้าได้ โดยเกิดจากประจุบวกและประจุลบที่แยกห่างออกจากกัน เนื่องจากการป้อนพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปภายในไดอิเล็กตริก ซึ่งจะฝืนกับแรงยึดเหนี่ยวของอะตอมหรือโมเลกุล โดยกลไกของการเกิดการแยกห่างกันของประจุจะขึ้นอยู่กับชนิดของไดอิเล็กตริกและความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไดอิเล็กตริก โดยการแบ่งชนิดของการเกิดโพลาริซชันของไดอิเล็กตริกนั้นสามารถแบ่งได้ 4 ลักษณะซึ่งในแต่ละแบบจะเกิดปรากฏการณ์ที่คล้ายกันแต่จะเกิดขึ้นที่ความถี่ที่แตกต่างกัน โดยในแต่ละแบบความเป็นกลางทางไฟฟ้าจะถูกรบกวน เนื่องจากการป้อนพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปในไดอิเล็กตริก ซึ่งจะทำให้เกิดการแยกห่างออกจากกันของประจุบวกและประจุลบโดยที่พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสลับนั้นความถี่จะเป็นตัวกำหนดชนิดของการเกิดโพลาริซชัน ซึ่งสามารถอธิบายการเกิดโพลาริซชันชนิดต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้ คือ อันดับแรกนั้นเป็นลักษณะการเกิดโพลาริซชันแบบสเปซชาร์จ์ (space charge polarization) โดยการเกิดโพลาริซชันชนิดนี้จะเกิดขึ้นที่ ความถี่ต่ำ ซึ่งจะเป็นช่วง VLF และ LF เนื่องจากการเกิดโพลาริซชันเมื่อ

วัสดุหรือตัวกลางมีอิเล็กตรอนอิสระ โดยที่ระยะห่างของประจุบวกและประจุลบจะถูกจำกัดด้วยสิ่งกีดขวาง

เมื่อมีการป้อนพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปยังไดอิเล็กตริกแล้ว อิเล็กตรอนจะสะสมบริเวณที่ส่วนกีดขวาง ซึ่งจะทำให้ประจุบวกและประจุลบแยกห่างออกจากกัน และมีผลทำให้ไดอิเล็กตริกเกิดโพลาริซ์ โดยการเกิดโพลาริซ์ลักษณะนี้เป็นพื้นฐานของอิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำ ต่อมาอันดับที่สองเป็นการเกิดโพลาริซ์แบบการจัดเรียงขั้วของไดโพล (polarization by dipole alignment) การเกิดโพลาริซ์แบบนี้จะเกิดขึ้นที่ความถี่สูงมาก เช่น ย่านความถี่ไมโครเวฟโดยจะเกิดขึ้นในระดับของโมเลกุล โดยหลักการนี้จะใช้เป็นพื้นฐานของการเกิดความร้อนในไดอิเล็กตริก ต่อมาเป็นการเกิดโพลาริซ์แบบไอออนิก (ionic polarization) การเกิดโพลาริซ์แบบนี้จะเกิดขึ้นที่ความถี่ของอินฟราเรด โดยจะเกิดขึ้นเนื่องจากการแยกห่างจากกันของประจุบวกและประจุลบภายในโมเลกุล และสุดท้ายเป็นการเกิดโพลาริซ์แบบอิเล็กทรอนิกส์ (electronic polarization) การเกิดโพลาริซ์แบบนี้จะเกิดขึ้นที่ความถี่สูง ๆ ที่ใกล้เคียงกับความถี่ของอัลตราไวโอเลต ซึ่งนิวเคลียสของอะตอมซึ่งเป็นประจุบวกจะอยู่กับที่ในเมตริกซ์ของไดอิเล็กตริก โดยกลุ่มของประจุลบที่อยู่รอบนิวเคลียสนั้นจะ เคลื่อนที่ไปในทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามา

### 1) การเกิดความร้อนและการกระจายอุณหภูมิของไดอิเล็กตริก

การทำให้เกิดความร้อนในไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นสนามไฟฟ้า จะเกิดขึ้นเนื่องจากการแพร่กระจายของพลังงานของสนามไฟฟ้าเข้าไปในไดอิเล็กตริก ซึ่งพลังงานที่แพร่กระจายนี้จะทำให้เกิดการหมุนของไดโพล และจะเกิดความเสียหายจากการหมุนทำให้เกิดความร้อนการแพร่กระจายของกำลังงาน ที่ทำให้เกิดความร้อนในหนึ่งหน่วยปริมาตร  $V_a$  จะแปรผันตรงกับกำลังงานของคลื่นสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายในหนึ่งหน่วยปริมาตรและจะเป็นไปตามสมการที่ (2.25)

$$\frac{P}{V_a} = \sigma_d E_{loc}^2 \quad (2.25)$$

เมื่อ  $\sigma_d$  คือ ค่าความนำของไดอิเล็กตริก (Dielectric conductivity) และมีค่าเท่ากับ สมการที่ (2.40) เมื่อแทนค่าจากสมการที่ (2.26) ลงในสมการที่ (2.25) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.27)

$$\sigma_d = \omega \epsilon' \epsilon_0 \tan \delta \quad (2.26)$$

$$\frac{P}{V_a} = \omega \varepsilon' \varepsilon_0 \tan \delta E_{loc}^2 \quad (2.27)$$

ในกรณีของคลื่นภายในตัวกลางที่มีความแตกต่างจากคลื่นที่ให้ออกภายนอก โดยที่คลื่นเดินทางภายในตัวกลางในทิศทาง Z สามารถได้กำลังงานของคลื่นภายในตัวกลาง ดังสมการที่ (2.28)

$$P_{(z)} = P_0 e^{-2\alpha z} \quad (2.28)$$

เมื่อ  $P_0$  คือ กำลังงานคลื่นที่ตกกระทบในตัวกลาง  
 $\alpha$  คือ ค่าคงที่ของการลดทอนกำลังงานคลื่นในไดอิเล็กตริก

สำหรับการพิจารณาเกิดความร้อนภายในตัวกลางไดอิเล็กตริกจะมีการแพร่กระจายของความร้อนภายในตัวกลางด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การนำ (Conduction) การพา (Convection) และการแผ่ (Radiation) แต่ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะการแพร่กระจายของความร้อน โดยการนำและการแผ่เท่านั้น การเกิดความร้อนเนื่องจากคลื่นความถี่ภายในตัวกลางจะสามารถอธิบายได้ด้วยรูปแบบสมการมาตรฐานของสมการการส่งถ่ายความร้อน ซึ่งวัสดุไดอิเล็กตริกจะแปลงพลังงานไฟฟ้าที่ผ่านความถี่วิทยุให้เป็นพลังงานความร้อน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลมาจากการทำอันตรกิริยากันระหว่างพลังงานและตัวกลางที่มีคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กตริกที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้วและสามารถเหนี่ยวนำคลื่นความถี่วิทยุให้เกิดเป็นความร้อนได้ ซึ่งค่ากำลังที่ดูดซับต่อหนึ่งหน่วยมวล (Power absorbed per unit mass, P) สามารถหาได้จาก การแทนค่าจากสมการที่ (2.23) ลงในสมการที่ (2.27) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{P}{V_a} = \omega \varepsilon' \varepsilon_0 (\varepsilon'' / \varepsilon') E_{loc}^2 \quad (2.29)$$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาในรูปของตัวกลางไดอิเล็กตริกใด ๆ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.30)

$$P = 5.563 \times 10^{-11} f \varepsilon'' E_{loc}^2 \quad (2.30)$$

โดยที่  $E_{loc}$  คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)

- $f$  คือ ความถี่ (Hz)  
 $\varepsilon''$  คือ ปัจจัยที่มีการสูญเสียขงผลไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor)

ในการใช้งานคลื่นความถี่สนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อคลื่นเดินทางเข้ามาในตัวกลางการหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในตัวกลางโดยวิธีการวิเคราะห์เป็นวิธีการที่ยากมาก แต่อาจจะทำได้โดยการวัดหรือการประมาณโดยวิธีทางแบบจำลองเชิงเลข (Numerical modeling) โดยที่ค่ากำลังที่ดูดซับต่อหนึ่งหน่วยมวล (Power absorbed per unit mass,  $P$ ) จะเป็นตัวบ่งชี้การวัดค่ากำลังงานที่แพร่กระจายอยู่ในตัวกลาง และในการคำนวณหาอุณหภูมิสูงขึ้นก็สามารถหาได้จากสมการที่ (2.31)

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{P}{\rho C_p} \quad (2.31)$$

- โดยที่  $C_p$  คือ ความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ( $J / kg \cdot ^\circ C$ )  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นของวัสดุ ( $kg / m^3$ )  
 $\Delta t$  คือ ระยะเวลา (s)  
 $\Delta T$  คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในวัสดุ ( $^\circ C$ )

#### 2.4.4 การส่งผ่านความร้อน

สำหรับการพิจารณากำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดความร้อนภายในตัวกลางที่เป็นไดอิเล็กตริกหรือตัวกลางที่มีการสูญเสีย โดยตัวกลางที่มีการสูญเสียดังกล่าวนั้นสามารถทำให้เกิดความร้อนได้ เมื่อมีพลังงานมากระตุ้นซึ่งอยู่ในรูปของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง โดยกลไกของความร้อนที่เกิดขึ้นมาจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปกระตุ้นอนุภาคที่มีสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือประจุไฟฟ้าที่อยู่ภายในตัวกลางนั้น จากสถานะสมดุลทำให้เกิดสภาพเป็นไดโพลที่มีผลต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระตุ้นให้เกิดการโพลาไรซ์ตามทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้น ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระตุ้นเป็นผลทำให้เกิดการกระจายกำลังงานในรูปของความร้อนภายในตัวกลางที่มีการสูญเสีย โดยอีกปรากฏการณ์หนึ่งที่เกิดควบคู่กันคือ ตัวกลางที่มีการสูญเสียสามารถเกิดความร้อนโดยตรงจากการนำไฟฟ้า เนื่องจากการกระจายตัวของอนุภาคประจุไฟฟ้าภายใต้อิทธิพลของการกระตุ้นจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกและทำให้เกิดเส้นทางการนำไฟฟ้าขึ้น โดยสามารถพิจารณาได้จากสมการพื้นฐานของแมกซ์เวลล์ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งนำไปสู่การคำนวณหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นภายใต้

เงื่อนไขว่าเป็นตัวกลางที่มีการสูญเสียชนิดเดียวและมีการส่งผ่านความร้อน โดยการนำความร้อน (heat conduction) ภายในตัวกลางที่มีการสูญเสียที่มีการพาความร้อนที่บริเวณผิวของตัวกลางที่มีการสูญเสีย และไม่คิดการระเหยของน้ำกลายเป็นไอ (มวลไม่เปลี่ยนแปลง) โดยแหล่งกำเนิดอื่นที่ทำให้เกิดการโพลาริเซชันมาจากประจุไฟฟ้าที่บริเวณผิวของตัวกลางที่แตกต่างกับประจุไฟฟ้าในอากาศหรือการโพลาริเซชันของแมกเวลล์ (Maxwell-wagner polarization) ซึ่งโครงสร้างของการโพลาริเซชันของแมกเวลล์นั้นจะมีลักษณะเป็นการเปลี่ยนแปลงสลับกลับไปมาของการโพลาริเซชันเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงสลับทิศทาง (สลับขั้ว) ไปมาอย่างรวดเร็วและเป็นกลไกพื้นฐานของการเกิดความร้อนโดยใช้คลื่นความถี่สูง ซึ่งการแพร่กระจายพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อจะทำให้เกิดความร้อนแก่วัตถุใด ๆ สามารถแสดงด้วยสมการการส่งผ่านความร้อน แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\rho C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = 5.563 \times 10^{-11} f \varepsilon'' E_{loc}^2 \quad (2.32)$$

โดยที่	$E_{loc}$	คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)
	$f$	คือ ความถี่ (Hz)
	$\varepsilon''$	คือ ปัจจัยที่มีการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor)
	$C_p$	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)

#### 2.4.5 การให้ความร้อนด้วยคลื่นสนามไฟฟ้า

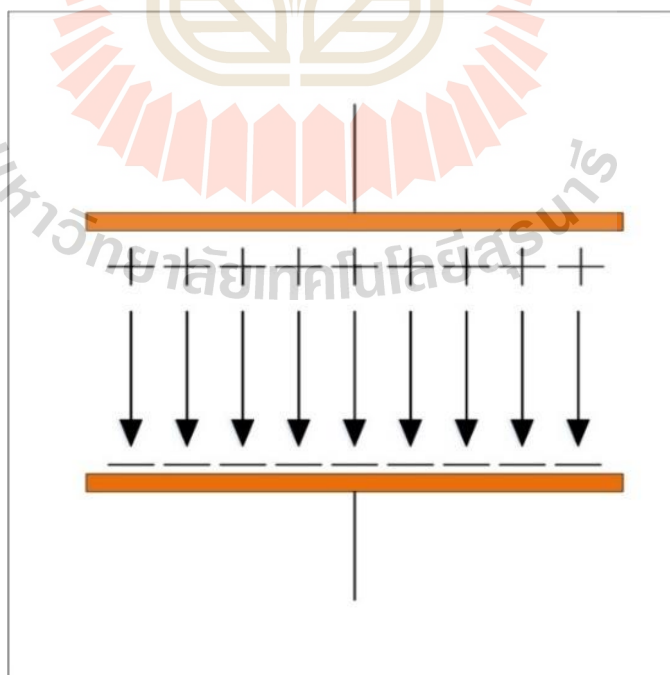
จากเนื้อหาในข้างต้นได้กล่าวไว้ว่าการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าที่สามารถทำให้เกิดความร้อนได้ โดยการป้อนคลื่นสนามไฟฟ้าเข้าไปในวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นผลของการทำให้เกิดความร้อน โดยเกิดจากจากความสามารถของสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดโพลาริเซชันของประจุภายในไดอิเล็กตริกเมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสถิตแล้ว สนามไฟฟ้าสถิตจะทำให้เกิดโพลาริเซชัน แต่ในกรณีที่เป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสลับพลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสลับนี้จะทำให้เกิดโพลาริเซชัน นั่นคือขั้วไฟฟ้าที่เป็นขั้วบวกและขั้วลบพยายามเรียงตัวกันตามทิศทางของคลื่นสนามไฟฟ้าที่ส่งผ่านเข้าไป ซึ่งทำให้เกิดการเสียดสีกันของโมเลกุลเกิดเป็นความร้อนกระจายทั่วภายในเนื้อวัสดุหรือเป็นการถ่ายเทพลังงานจากคลื่นสนามไฟฟ้าไปยัง



วัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งสามารถทำให้เกิดการแปลงผันพลังงานจากสนามไฟฟ้าเป็นความร้อนได้ ดังนั้นการศึกษาทฤษฎีของการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าจึงเป็นอีกหัวข้อที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ผลของการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อวัสดุไดอิเล็กตริก สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอการใช้ตัวสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตสำหรับการวิเคราะห์การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ซึ่งจะได้นำกล่าวถึงทฤษฎีของการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าของตัวสร้างคลื่นแบบแผ่นเพลตในหัวข้อต่อไป

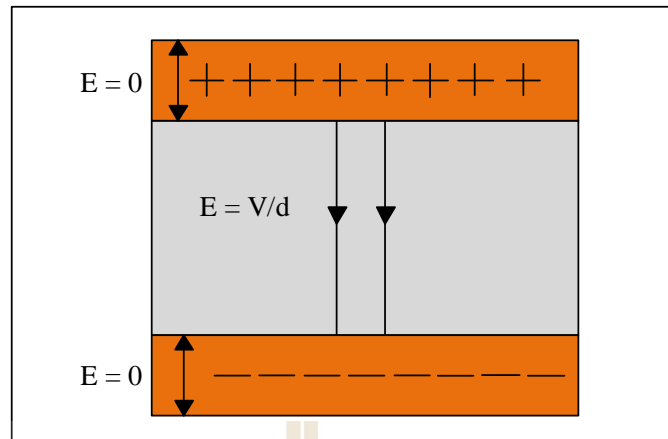
### 1) ลักษณะการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าของตัวสร้างคลื่นแบบแผ่นเพลต

การพิจารณาตัวกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าสำหรับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญมาก เนื่องจากเป็นส่วนที่กระจายพลังงานสนามไฟฟ้าเข้าสู่วัสดุไดอิเล็กตริกให้มีความเหมาะสม ดังนั้นจึงต้องมีการพิจารณาถึงขนาดและปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้า จากงานวิจัยที่ผ่านมาตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต เป็นลักษณะรูปแบบการให้ความร้อนนั้นมีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีการกระจายสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลตมากที่สุด โดยผ่านวัสดุตัวกลางซึ่งเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก โดยลักษณะของตัวปล่อยคลื่นแบบแผ่นเพลตจะมีคุณสมบัติเป็นเหมือนตัวเก็บประจุ และมีทิศทางการไหลของคลื่นสนามไฟฟ้าจากขั้วอิเล็กโทรดประจุบวกไปยังประจุลบ ซึ่งรูปแบบของตัวสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต





รูปที่ 2.9 โครงสร้างตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตที่มีส่วนประกอบของโหนดไดอิเล็กตริก

จากรูปที่ 2.8 และ 2.9 เป็นลักษณะตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต โดยสามารถออกแบบได้จากสมการที่ 2.33 ดังนี้

$$C = \frac{k\epsilon_0 A}{d} \quad (2.33)$$

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

ลักษณะของการกระจายสนามไฟฟ้าจะมีการกระจายตัวจากแรงดันที่มีขั้วบวกไปยังขั้วลบของแผ่นเพลต โดยความเข้มสนามไฟฟ้า E ที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นเพลตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.34

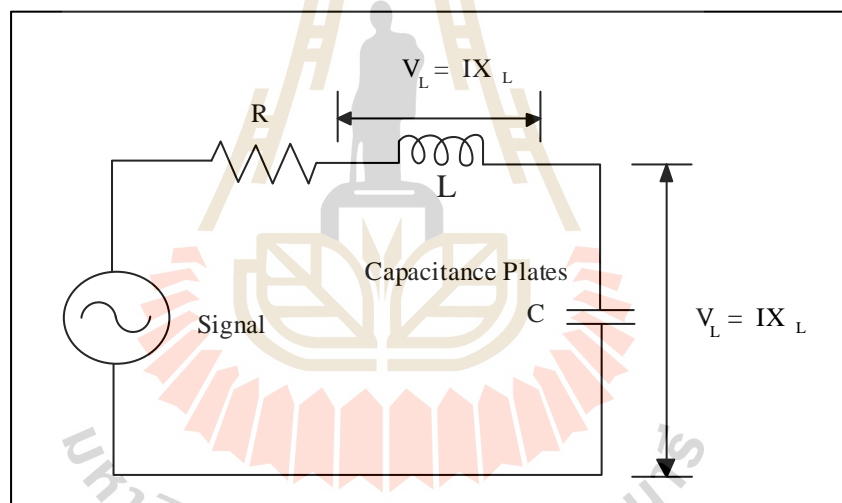
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{V}{d} \quad (2.34)$$

โดยที่  $\epsilon$  คือ ค่าความซึมซาบได้ของแผ่นเพลต  
 V คือ แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างแผ่นเพลต

- d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลต  
 $\sigma$  คือ ค่าความนำของวัสดุไดอิเล็กตริก

## 2) วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series resonance circuit)

เนื่องจากโพลคในงานวิจัยนี้เป็นลักษณะแบบแผ่นเพลต จึงได้ทำการใช้หลักการของวงจรเรโซแนนซ์เพื่อทำการแมตซ์ซิ่ง เพื่อให้ได้กำลังงานที่ตกคร่อมระหว่างแผ่นเพลตมากที่สุด โดยลักษณะพฤติกรรมทางไฟฟ้าของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมจะมีอิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่งเรโซแนนซ์ต่ำที่สุด ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านวงจรจะมีค่ามากที่สุดทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าที่โพลคมีค่าสูงสุด วิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าทำได้โดยการลดแรงดันที่จ่ายให้วงจร หรือเลื่อนความถี่การใช้งานให้ต่ำหรือสูงกว่าตำแหน่งเรโซแนนซ์ ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RLC ที่ต่อแบบอนุกรมและมีค่าดังสมการที่ 2.34 และดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.35)$$

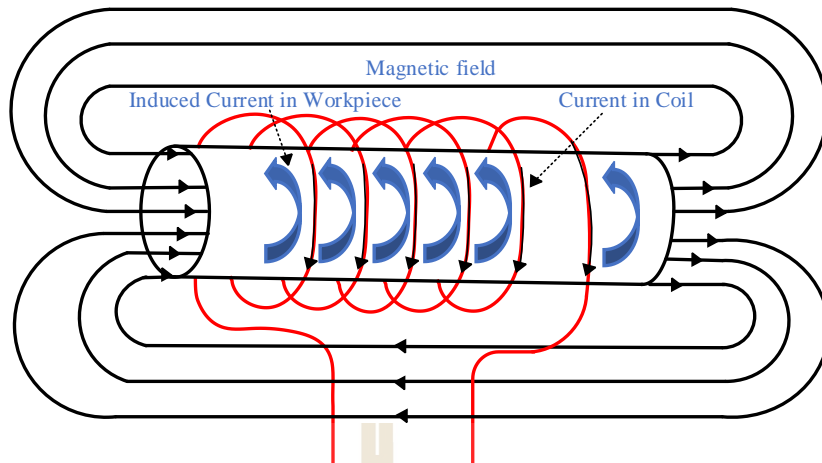
จากสมการ 2.35 จะพบว่า ค่าอิมพีแดนซ์จะขึ้นอยู่กับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเนื่องจากค่า  $X_L = 2\pi fL$  และ  $X_C = 1/2\pi fc$  โดยผลรวมของค่ารีแอกแตนซ์จะมีค่าเท่ากับ  $(X_L - X_C)$  ดังนั้นถ้าความถี่ของแหล่งจ่ายไฟมีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์จะมีผลทำให้ค่ารีแอกแตนซ์รวมมีค่าเป็นศูนย์ ( $X_L = X_C$ ) และอิมพีแดนซ์รวมของวงจรจะมีค่าเท่ากับค่าความต้านทาน

## 2.5 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการใช้ความร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

ในส่วนนี้จะจะเป็นหลักการที่ทำงานร่วมกันกับหลักการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและคลื่นความถี่วิทยุ โดยจะใช้ความร้อนจากแหล่งพลังงานการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Induction Heating) เป็นตัวช่วยเสริมในการลดความชื้นข้าว ซึ่งทำให้ความร้อนในข้าวเกิดการระเหยและสามารถลดความชื้นออกได้อีก ซึ่งการออกแบบเครื่องให้ความร้อนสำหรับเมล็ดข้าวด้วยความร้อนโดยใช้พลังงานความร้อน จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก สามารถแบ่งเป็นส่วนที่สำคัญได้สามส่วนหลัก ๆ คือ ทฤษฎีในส่วนของวงจรเหนี่ยวนำความร้อนและทฤษฎีในส่วนของกาถ่ายโอนความร้อนระหว่างชิ้นงานที่ถูกเหนี่ยวนำความร้อนกับอากาศ ซึ่งการที่จะออกแบบและสร้างเครื่องจำเป็นต้องมีความรู้ในทุกส่วน ส่วนประกอบกันจึงจะสามารถสร้างเครื่องให้ความร้อนให้ออกมามีระบบที่สมบูรณ์และสามารถ นำไปใช้งานได้เนื้อหาในบทนี้จะได้กล่าวถึง หลักการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำทาง แม่เหล็กไฟฟ้า หลักการสร้างวงจรเหนี่ยวนำความร้อน วงจรเรียงกระแส วงจรอินเวอร์เตอร์ โทลคเรโซแนนซ์ ทฤษฎีและหลักการของกระบวนการให้ความร้อน การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นใน กระบวนการการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นข้อมูลความรู้ที่ผู้วิจัยหรือผู้ที่สนใจจะออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนหรือเครื่องลดความชื้นด้วยลมร้อนหรือแม้แต่ต้องการจะนำไปต่อยอดพัฒนาจำเป็นต้องรู้ดังมีรายละเอียดในส่วนต่างๆ ดังนี้

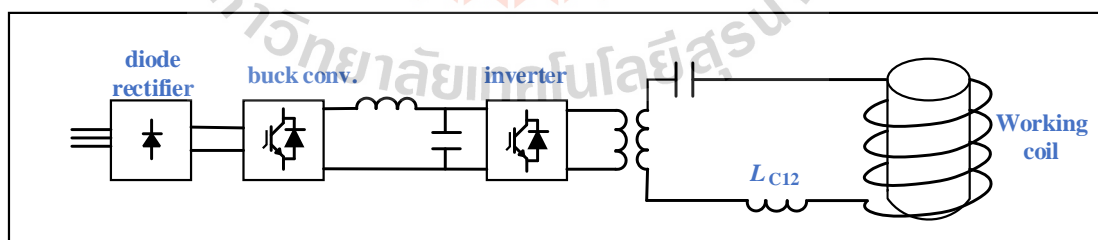
### 2.5.1 หลักการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก

ในหลักการนี้จะสร้างขึ้นเพื่อมาใช้เป็นตัวช่วยในการร่วมการทำงานของทั้งสองหลักการที่ผ่านมา เป็นส่วนที่จะสร้างแหล่งกำเนิดความร้อน เพื่อที่จะนำความร้อนมาใช้ในการช่วยลดความชื้นของข้าว โดยกระบวนการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้เป็นการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงอีก รูปแบบหนึ่งเมื่อเทียบกับการให้ความร้อนแบบขดลวดความร้อน หรือรูปแบบอื่น ๆ ในลักษณะงาน ที่ต้องการให้เกิดความร้อน โดยตรงบนชิ้นงานการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำอาศัยหลักการเหนี่ยวนำ โดยการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวด ดังรูปที่ 2.11 เมื่อมีไฟฟ้ากระแสสลับไหลผ่านขดลวดก็จะทำให้เกิดการสร้างสนามแม่เหล็กไปเกี่ยวข้องกับวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก (Ferromagnetic) ส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลวนอยู่ภายในวัสดุในทิศตรงข้ามกับทิศการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด ตามกฎมือขวา เนื่องจากในวัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กแต่ละชนิดจะมีค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้า ซึ่งแต่ละชนิดจะมีค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าต่างกัน ความต้านทานกระแสไฟฟ้านี้ทำให้เกิดการ สูญเสียพลังงานในการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน คือพลังงานไม่สามารถสูญหายไปได้แต่สามารถเปลี่ยนรูปได้ดังนั้นพลังงานที่สูญเสียนี้จึงเปลี่ยนรูปไปเป็นความร้อนที่เกิดขึ้นในตัววัสดุ

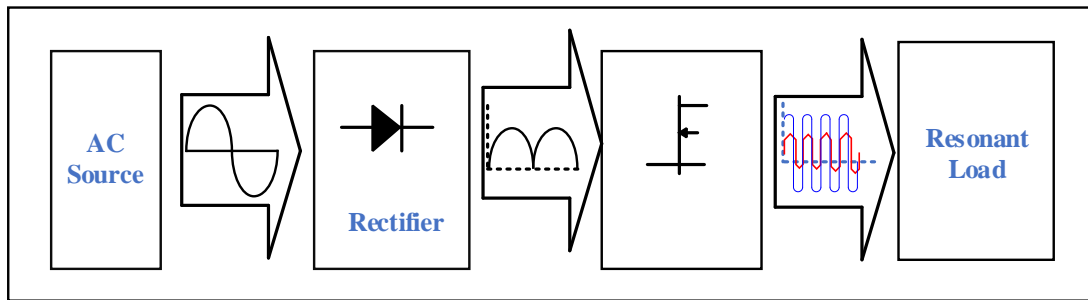


รูปที่ 2.11 หลักการเกิดการเหนี่ยวนำความร้อน

ในหลักของการสร้างกระแสความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน จากภาพรวมของวงจรเหนี่ยวนำความร้อน ดังรูปที่ 2.12 สามารถแบ่งการทำงานออกเป็น บล็อกไดโอดแกรมได้ ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งเริ่มจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ป้อนให้กับวงจรเรียงกระแส ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนวงจรกรองแรงดันทางด้านเอาต์พุตจะใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ เพื่อกรองไฟฟ้ากระแสตรงให้เรียบขึ้น แล้วจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงโดยใช้เพาเวอร์ไอจีบีที (Insulated gate bipolar transistor) ทำหน้าที่เป็นสวิตช์กำลังสูง เพื่อจ่ายให้กับชุดโพลเดเรโซแนนซ์ซึ่งต่อแบบอนุกรม



รูปที่ 2.12 วงจรเหนี่ยวนำความร้อน



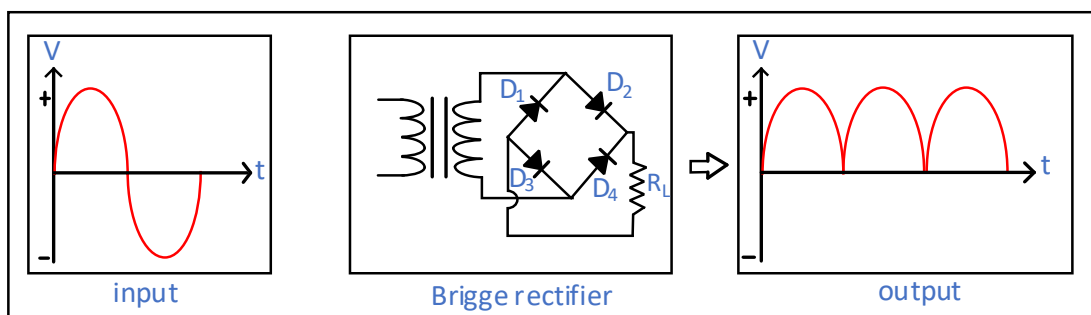
รูปที่ 2.13 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเหนี่ยวนำความร้อน

### 1) หลักการสร้างวงจรเหนี่ยวนำความร้อน

ในการสร้างวงจรเหนี่ยวนำความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้น ประกอบด้วย วงจรย่อยอีกหลายส่วน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์ (bridge rectifier circuit)

วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์เป็นวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นชนิดหนึ่ง ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถใช้ร่วมกับหม้อแปลงธรรมดาได้โดยไม่ต้องใช้หม้อแปลงชนิดเซนเตอร์แท็ป ซึ่งวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์ประกอบด้วยไดโอด 4 ตัว ดังรูปที่ 2.14 เมื่อมีสัญญาณขาเข้า (input) ซีกบวกของไฟฟ้ากระแสสลับ ไดโอดตัวที่  $D_2$  และ  $D_3$  จะอยู่ในสภาวะไบอัสตรง (forward bias) กระแสไฟฟ้าจึงไหลครบวงจร เกิดสัญญาณขาออก(output) โดยไดโอดตัวอื่นๆ จะอยู่ในสภาวะไบอัสกลับ(reverse bias) ในทำนองเดียวกัน เมื่อสัญญาณขาเข้า(input) สลับเป็นสัญญาณซีกลบ ไดโอดตัวที่  $D_4$  และ  $D_1$  จะอยู่ในสภาวะไบอัสตรง (forward bias) กระแสไฟฟ้าจึงไหลครบวงจรเกิดสัญญาณขาออก(output) โดยไดโอดตัวอื่น ๆ จะอยู่ในสภาวะไบอัสกลับ (reverse bias)



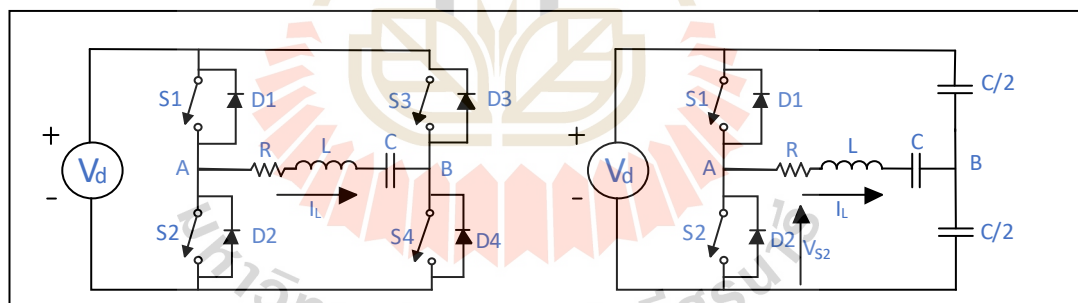
รูปที่ 2.14 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์

เนื่องจากวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์เป็นวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นชนิดหนึ่งการคำนวณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจึงคำนวณเหมือนกับวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นทั่วไปดังสมการที่ 2.36

$$V_{DC} = 1.414V_{AC} \quad (2.36)$$

### วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter)

ในส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่มีหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับความถี่สูงมี 2 รูปแบบ คือวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์และวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งข้อแตกต่างกันระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์และวงจรอินเวอร์เตอร์ คือแรงดันของวงจรอินเวอร์เตอร์ ( $V_{AB}$ ) ของวงจรแบบฟูลบริดจ์ จะได้รูปคลื่นสแควร์ที่มีแรงดันสูงเท่ากับ  $+V_d$  และแรงดันต่ำสุดเท่ากับ  $-V_d$  กระแสผ่านโหลด ( $i_L$ ) เป็นรูปคลื่นซาย์ ดังรูปที่ 2.15 (ก) ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์ฮาล์ฟบริดจ์จะได้ค่าแรงดันเท่ากับ  $+V_d$  และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0 และกระแสไหลผ่านโหลด ( $i_L$ ) เป็นรูปคลื่นซาย์ดังรูปที่ 2.15 (ข) ดังนั้นกำลังไฟฟ้าของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์จะมากกว่าฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์



(ก) อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์

(ข) อินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์

### รูปที่ 2.15 คลื่นแรงดันและกระแสไหลของวงจรอินเวอร์เตอร์

เนื่องจากวงจรเหนี่ยวนำความร้อนดังกล่าวมีลักษณะของสนามแม่เหล็กและกระแสไหลวนเป็นแบบกระแสสลับ (AC) ความถี่ที่ใช้งานจึงทำให้มีผลกระทบเชิงผิว (Skin effect) ที่ส่งผลให้การทะลุผ่านวัตถุของสนามแม่เหล็กมีความลึกต่างกันที่ความถี่ต่างกัน ในกรณีที่ใช้เหนี่ยวนำความร้อนมีลักษณะเป็นเหล็กหนาจึงทำให้เกิดการกระจายตัวของกระแสไหลวน (Eddy current) ที่ไม่เท่ากันที่ระดับความลึกต่างกัน โดยที่ตรงตำแหน่งใกล้ๆ พื้นผิววัตถุจะมีกระแสไหลวนสูงสุด



และ ลดลงเรื่อย ๆ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น โดยเราสามารถหาค่า Skin depth ( $\delta$ ) หรือระยะความถี่สูงสุดที่ กระแสส่วนใหญ่ของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะไหลระหว่างพื้นผิวกับความถี่ของผิว  $\delta$  ได้จาก สมการที่ 2.37

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \mu \sigma f}}$$

$$V = \sqrt{V_R^2 + (V_L + V_C)^2} \quad (2.37)$$

เมื่อ  $\delta$  คือค่าความถี่ผิวในการทะลุผ่านของสนามแม่เหล็ก (Skin depth),  $\mu$  คือ ค่าสภาพให้ซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Absolute magnetic permeability),  $f$  คือค่าความถี่ของสนามแม่เหล็ก และ  $\sigma$  คือค่าสภาพนำไฟฟ้า สามารถหาได้จากสมการที่ 2.38

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.38)$$

โดยที่  $\rho$  คือค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ซึ่งค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเหล็กมีค่าประมาณ  $10 \times 10^{-8}$  ถึง  $14 \times 10^{-8}$  โอห์ม-เมตร ( $\Omega \cdot m$ ) จากที่กล่าวมาข้างต้น ( $\Omega \cdot m$ ) จะเห็นได้ว่าถ้าหากเราทำการควบคุมความถี่ของการทำงาน จะเป็นการควบคุมระดับความถี่ของชิ้นงานที่ต้องการให้เกิดความร้อนได้

## 2) โหลดเรโซแนนซ์ (Resonant Load)

สำหรับโหลดเรโซแนนซ์ที่ใช้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงโดยทั่วไปเช่น เครื่องหลอมโลหะ เครื่องชุบแข็งผิวโลหะ เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ เครื่องเชื่อมความถี่สูง และแบตเตอรี่อิเล็กทรอนิกส์ จะมีข้อได้เปรียบที่สำคัญคือ ลดการสูญเสียในการสวิตช์เมื่อทำการ สวิตช์ตัดวงจรที่กระแสศูนย์ (Zero current switch : ZCS) หรือสวิตช์วงจรที่แรงดันศูนย์ (Zero voltage switch : ZVS) และข้อเสียเปรียบที่สำคัญของวงจรเรโซแนนซ์คือ ที่ตำแหน่งใกล้จุดความถี่เรโซแนนซ์กระแสในวงจรจะมีค่ามากส่งผลให้แรงดันตกคร่อมวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย สำหรับวงจรเรโซแนนซ์ที่มีค่า Q สูง ดังนั้น สวิตช์ที่เลือกใช้จะต้องสามารถทนแรงดันตกคร่อมขณะ OFF ได้สูงและ L,C ในวงจรที่เลือกใช้ก็เช่นกันจะต้องมีขนาดใหญ่ เพื่อสามารถเก็บพลังงานได้ มาก สำหรับอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์มีด้วยกัน 2 ชนิดคือ อินเวอร์เตอร์โหลดเรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมและอินเวอร์เตอร์โหลดเรโซแนนซ์ชนิดขนาน ทั้งสองชนิดมีข้อดีข้อเสียต่างกัน

## การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของจอร์อินเวอร์เตอร์โหลดเรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมและขนาน

### โหลดเรโซแนนซ์อนุกรม

#### ข้อดี

- 1) โครงสร้างง่าย ราคาถูก
- 2) สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงได้โดยตรงจากวงจรเรียงกระแสโดยไม่ต้องมีวงจรปรับแรงดันกำลังไฟฟ้าที่จ่ายสามารถปรับควบคุมได้ง่ายโดยการปรับความถี่ของวงจรอินเวอร์เตอร์

#### ข้อเสีย

- 1) ขณะป้อนสัญญาณเพื่อขับวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรโหลดจะเปิดวงจรออกไม่ได้
- 2) ไม่สามารถทนการลัดวงจรที่โหลดได้ การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการปรับความถี่ที่สวิทซ์ให้เลื่อนออกจากความถี่เรโซแนนซ์ ทำให้กระแสไม่ค้อยเป็นรูปคลื่นไซน์ ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้นตามมา

### โหลดเรโซแนนซ์ขนาน

#### ข้อดี

- 1) ขณะป้อนสัญญาณเพื่อขับวงจรอินเวอร์เตอร์ โหลดสามารถเปิดวงจรออกได้
- 2) สามารถทนการลัดวงจรที่โหลดได้
- 3) อุปกรณ์ L และ C ที่ใช้ในวงจรเรโซแนนซ์ไม่จำเป็นต้องมีพิคัดแรงดันหรือกระแสสูง เนื่องจากกระแสเป็นรูปคลื่นสแควร์ จึงมีค่า peak คงที่ที่ตำแหน่งเรโซแนนซ์

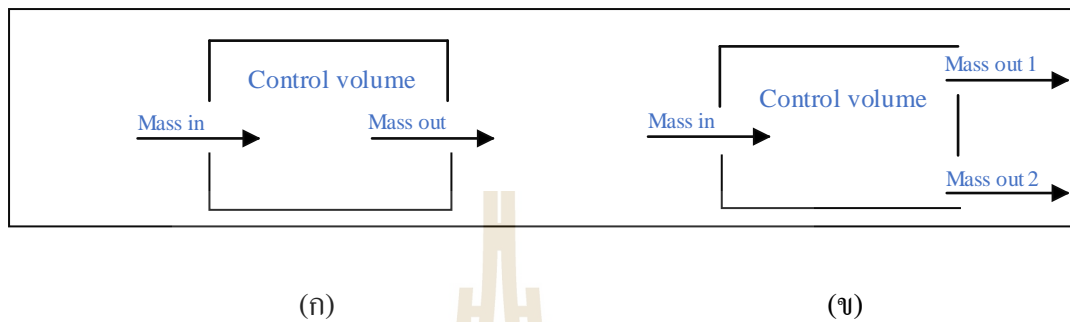
#### ข้อเสีย

- 1) ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงได้โดยตรงจากวงจรเรียงกระแส แต่ต้องมีการปรับแรงดันการใช้สวิทซ์ควบคุม
- 2) จำเป็นต้องมี coke เนื่องจากเป็น constant current
- 3) มีขนาดใหญ่เนื่องจากมี Coke และวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้าให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์

## 2.6 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนความร้อน

สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบระบบการให้ความร้อนกับสิ่งใดสิ่งหนึ่งนั้นอีกสิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงคือการคำนวณในเรื่องของการถ่ายโอนพลังงานระหว่างวงจรเหนี่ยวนำความร้อนกับอากาศ ซึ่งเป็นลักษณะของการวิเคราะห์พลังงานสำหรับระบบที่มีการไหลแบบคงตัว สามารถแบ่ง

ได้เป็นสองแบบคือระบบที่มีการไหลแบบกระแสเดียวและระบบที่มีการไหลแบบหลายกระแส ดังรูปที่ 2.16 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยมีนิยามว่า ในระหว่างกระบวนการที่มีการไหลแบบคงตัว ปริมาตร มวล และพลังงานภายในระบบจะมีค่าคงที่



รูปที่ 2.16 ระบบที่มีการไหลแบบกระแสเดียว (ก) ระบบที่มีการไหลแบบหลายกระแส (ข)

การถ่ายเทมวลความชื้นจากวัสดุไปสู่อากาศเกิดขึ้นจากการพาความร้อน เนื่องจากความแตกต่างของ partial vapor pressure ที่ boundary layer ในบริเวณรอยต่อผิวสัมผัสของอากาศและวัสดุ การระเหยโดยตรงเกิดขึ้นเมื่อความดันไอในผิวมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ อย่างเช่นในกรณีนี้ของ vacuum drying และ freeze drying การอบแห้งแบบการพาความร้อน สภาวะขอบสำหรับ heat flux  $q_c$  และอัตราการระเหย  $n_w$  จะอยู่ในรูป

$$\begin{aligned} \text{Heat transfer} & \longrightarrow q_c = h_g (T_{sf} - T_g) \\ \text{Mass transfer} & \longrightarrow n_w = K_g (P_{vsf} - P_{vg}) \end{aligned}$$

โดยที่	$h_g$	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
	$K_g$	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล
	$T_{sf}$	คือ อุณหภูมิพื้นผิววัสดุ
	$T_g$	คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง
	$P_{vsf}$	คือ water vapor partial pressure of surface
	$P_{vg}$	คือ water vapor partial pressure of air

และความสามารถในการระเหย จะขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่ให้เข้าไปในวัสดุผ่านอากาศร้อน ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทในระเหย  $q_w$  สามารถแสดงได้ด้วยสมการ

Heat transfer in evaporation  $\longrightarrow$   $q_w = UA\Delta T$

โดยที่  $U$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม [ $W / (m^2 \cdot K)$ ]  
 $A$  คือ พื้นที่ถ่ายเทความร้อน [ $m^2$ ]  
 $\Delta T$  คือ ผลต่างอุณหภูมิระหว่างสารละลายกับตัวกลางความร้อน

## 2.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการลดความชื้นข้าวด้วยแบบไฮบริด ซึ่งจะประกอบไปด้วยทฤษฎีการอบแห้ง ทฤษฎีในส่วนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ทฤษฎีในส่วนการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ทฤษฎีในส่วนการให้ความร้อนจากการเหนี่ยวนำความร้อน และทฤษฎีในส่วนของการถ่ายโอนความร้อน ซึ่งในแต่ละส่วนในบทนี้ได้อธิบายรายละเอียด สมการการคำนวณ การวิเคราะห์การออกแบบ รวมไปถึงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้เพื่อนำมาซึ่งการวิเคราะห์การออกแบบเครื่องและทดสอบให้ประสิทธิภาพมากที่สุด



## บทที่ 3

### การออกแบบและสร้างเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด

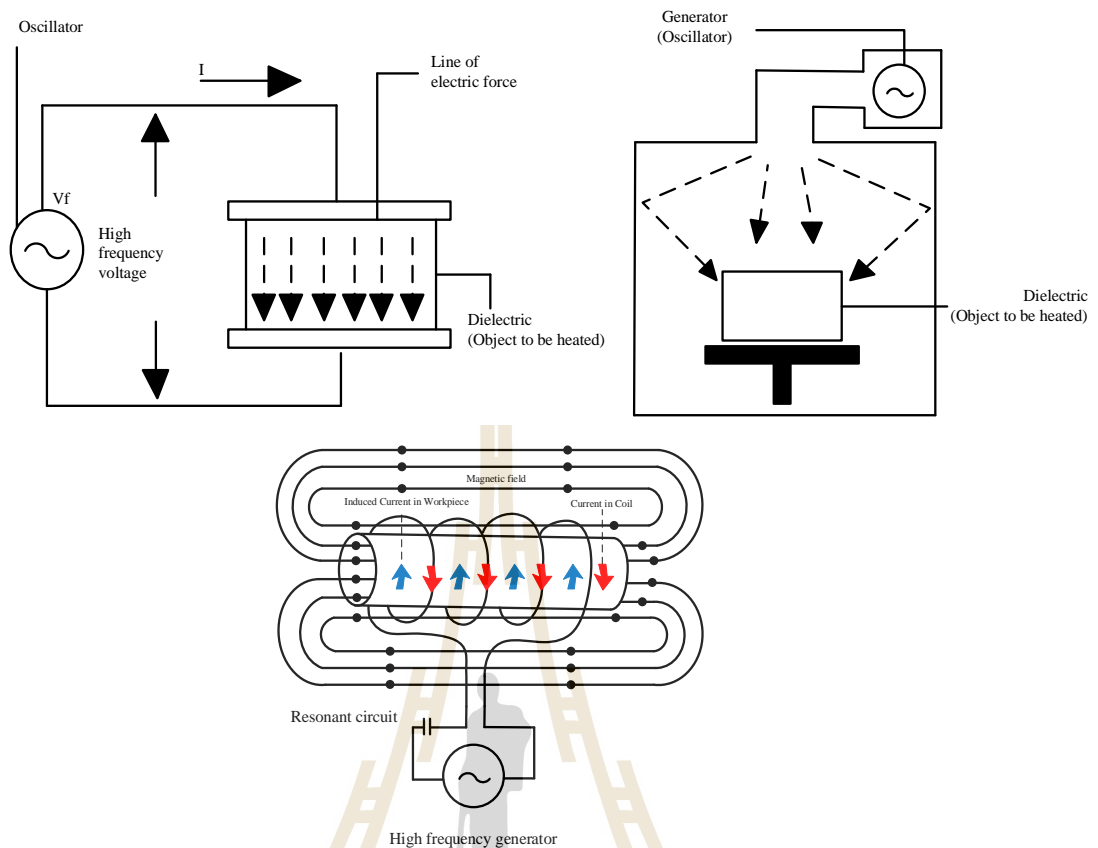
#### 3.1 บทนำ

สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะได้กล่าวถึงการวิเคราะห์ผลการจำลอง การออกแบบเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด และการคำนวณกำลังงาน โดยอาศัยหลักการออกแบบจากทฤษฎีในบทที่ 2 สำหรับการออกแบบระบบ ซึ่งจะประกอบไปด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและคลื่นความถี่วิทยุ ร่วมกับการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ซึ่งกระบวนการออกแบบทั้งหมดนี้เป็นออกแบบกระบวนการลดความชื้นข้าวด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยออกแบบแต่ละส่วนประกอบของระบบดังนี้คือ ในกระบวนการแรกจะเป็นการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งในส่วนนี้ทางผู้วิจัยได้คำนวณและออกแบบขนาดของท่อนำคลื่นให้เหมาะสมที่สามารถใช้ในอุตสาหกรรมลดความชื้นข้าวขนาดใหญ่ได้ โดยใช้โปรแกรมจำลองขนาดและระยะการปล่อยคลื่น โดยจุดปล่อยคลื่นจะเป็นการจำลองพอร์ตเหมือนกับคลื่นที่หัวแมกนีตรอนปล่อย ที่คลื่นความถี่ 2.45 จิกะเฮิร์ตซ์ และโหลดไดโอดเล็กตริกที่ใช้ในการจำลองเป็นข้าว เพื่อวิเคราะห์ผลการแพร่กระจายของคลื่นในท่อนำคลื่นและวิเคราะห์ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่โหลดไดโอดเล็กตริก และในกระบวนการที่สองเป็นการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ จะใช้โปรแกรมในการจำลองตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต โดยในการจำลองปรับระยะห่างของแผ่นเพลต เพื่อวิเคราะห์ผลการกระจายตัวของคลื่นและความเข้มของสนามไฟฟ้าที่โหลดไดโอดเล็กตริก (ข้าว) เหมือนกับการจำลองของการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด และทำการสร้างเครื่องขึ้นมา ในส่วนของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก จะเป็นการออกแบบสำหรับการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก เป็นตัวช่วยเสริมในการลดความชื้นข้าวให้กับทั้งสองกระบวนการ ซึ่งทำให้ความร้อนในข้าวเกิดการระเหยและสามารถลดความชื้นเพิ่มได้อีก โดยในส่วนนี้จะทำการออกแบบวงจรเหนี่ยวนำความร้อนและการออกแบบชุดโหลดความร้อนเพื่อเป็นแหล่งพลังงานความร้อนร่วมของระบบต่อไป ซึ่งในการออกแบบระบบทั้ง 3 ระบบนี้จะได้อธิบายการทำงานและรายละเอียดของการสร้างเครื่องของแต่ละส่วนต่อไป

### 3.2 ลักษณะทั่วไปของการออกแบบเครื่องลดความชื้นแบบไฮบริด

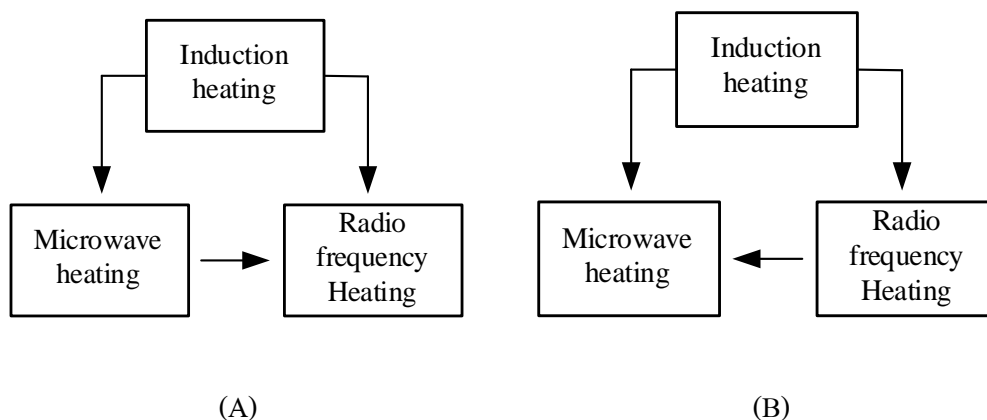
ในการสร้างเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริดนั้น ผู้วิจัยจะทำการออกแบบสร้างเครื่องลดความชื้นข้าวที่ผ่านการกำจัดสารหนูออกแล้ว ซึ่งเป็นการลดความชื้นแบบไฮบริดประกอบด้วยหลักการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและคลื่นความถี่วิทยุ และใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเป็นพลังงานร่วมของทั้งสองกระบวนการ โดยความชื้นที่เกิดจากการกำจัดสารหนูออกแล้วนั้นจะมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 44 เปอร์เซ็นต์ (กระบวนการแช่ 12 ชั่วโมง) ผู้วิจัยต้องการออกแบบระบบให้สามารถลดความชื้นเหลือประมาณ 24 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ เนื่องจากปัจจุบันมีเทคโนโลยีการลดความชื้นจาก 24 เปอร์เซ็นต์ โดยประมาณและคงเหลือ 14 เปอร์เซ็นต์ ตามมาตรฐานอยู่แล้ว เช่น การลดความชื้นด้วยหลักการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาถึงการลดความชื้นข้าวที่มีความชื้นสูงและตรวจสอบคุณภาพของข้าวที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุรวมกับการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการให้ความร้อนแบบการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นหลักการลดความชื้นข้าวที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำสูง ใช้เวลาสั้น และประหยัดพลังงาน โดยจะทำการออกแบบระบบลดความชื้นข้าวทั้ง 2 ระบบแล้วจะทำให้ความชื้นเหลือที่ 24 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ ซึ่งการออกแบบระบบนี้ จะดำเนินการออกแบบระบบที่มีกำลังงานการผลิตที่ไม่เกิน 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สำหรับการออกแบบระบบต่อไป โดยรายละเอียดหลักการทำงานของแต่ละระบบสามารถแสดงดังรูปที่ 3.1





รูปที่ 3.1 แสดงการให้ความร้อนกับวัตถุดิบไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นความถี่วิทยุ คลื่นไมโครเวฟและการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

การให้ความร้อนกับวัตถุดิบด้วยคลื่นความถี่วิทยุและคลื่นไมโครเวฟ เป็นการใช้เทคโนโลยีการให้ความร้อนด้วยหลักการที่เหมือนกัน คือการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกและสามารถใช้สมการการให้ความร้อนสำหรับการออกแบบตั้งสมการในบทที่ 2 สิ่งที่แตกต่างกันคือย่านคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้อยู่ในช่วง 10 - 100 เมกะเฮิร์ตซ์ ส่วนคลื่นความถี่ไมโครเวฟอยู่ในช่วง 2.40 - 2.50 จิกะเฮิร์ตซ์ จะเห็นได้ว่าย่านคลื่นความถี่ต่างกันอย่างมาก โดยความถี่ย่านไมโครเวฟจะเหมาะสมกับการให้ความร้อนกับวัตถุดิบที่มีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบ ซึ่งมีความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ของข้าว และสามารถลดความชื้นของข้าวได้ แต่ลักษณะของคุณภาพข้าวจะมีคุณสมบัติที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับการใช้เทคโนโลยีใดในการให้ความร้อนก่อนและหลัง ซึ่งจะได้ทดสอบในบทที่ 4 ต่อไป



รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด

ในรูปที่ 3.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด 2 รูปแบบคือ (1) ระบบจะส่งผลิตภัณฑ์ข้าวทางสายพานลำเลียงเข้ามาผ่านชุดให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่ย่านไมโครเวฟก่อนและต่อด้วยการลดความชื้นที่ระบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ดังรูปที่ 3.2(A) รูปแบบที่ (2) ระบบจะส่งผลิตภัณฑ์ข้าวทางสายพานลำเลียงเข้ามาผ่านชุดให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุและต่อด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ดังรูปที่ 3.2(B) และทั้ง 2 ระบบนี้ จะใช้แหล่งพลังงานความร้อนร่วมจากหลักการให้ความร้อนสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 3.2 ซึ่งจะเป็นหลักการพาความร้อน เป็นตัวช่วยหลักในการนำพาความชื้นที่ออกมาจากวัตถุดิบและ ผลิตภัณฑ์ข้าวจะออกมาทางระบบสายพาน สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบระบบด้วยหลักการทางคณิตศาสตร์ของระบบการให้ความร้อนแบบไฮบริดสามารถวิเคราะห์และออกแบบได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

### 3.3 การวิเคราะห์อุณหภูมิกับความชื้นและพลังงานความร้อนของข้าว

การวิเคราะห์อุณหภูมิกับความชื้นและพลังงานความร้อนของข้าว สามารถออกแบบจากการนำข้อมูลของปริมาณของข้าวเปรียบเทียบกับกำลังงานที่ต้องใช้ โดยงานวิจัยนี้จะดำเนินการออกแบบที่ขนาดกำลังการผลิตข้าวไม่เกิน 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ดังนั้นสามารถคำนวณปริมาณข้าวเทียบกับกำลังงาน ซึ่งสามารถยกตัวอย่างการออกแบบที่กำลังงานการผลิตสูงสุด คือข้าว 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ให้ความร้อนอยู่ที่ประมาณ 60 องศาเซลเซียส โดยสามารถออกแบบการลดความชื้น 2 ช่วงคือ ความชื้นเริ่มต้น 44 เปอร์เซ็นต์ ลดให้เหลือ 34 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดให้อุณหภูมิข้าวเริ่มต้นอยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส และช่วงที่สองจะเป็นการคำนวณที่ความชื้น 34 เปอร์เซ็นต์ ลดให้เหลือ 24 เปอร์เซ็นต์ โดยจะนำข้อมูลของปริมาณของข้าวเปรียบเทียบกับ

กำลังงานที่ต้องใช้เหมือนกัน ให้ความร้อนอยู่ที่ประมาณ 60 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิข้าวเริ่มต้นอยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถคำนวณหาความชื้นสุดท้ายหลังจากการลดความชื้นแล้วได้จากสมการที่ 2.4 ในบทที่ 2

$$W_f = \frac{W_i(1 - M_i)}{1 - M_f}$$

ในช่วงแรกปริมาณข้าวที่ใช้ในการคำนวณ 100 กิโลกรัม ที่มีความชื้นประมาณ 44 เปอร์เซ็นต์ เมื่อผ่านเครื่องลดความชื้นแล้วเหลือความชื้นอยู่ที่ 34 เปอร์เซ็นต์ และต้องการให้ข้าวร้อนหลังจากการลดความชื้นในระบบนี้แล้วอยู่ที่ประมาณไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส โดยกำหนดค่าข้าวก่อนเข้าเครื่องอยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส ทำการคำนวณหาน้ำหนักที่เหลือโดยประมาณ ซึ่ง  $W_f$  คือน้ำหนักสุดท้าย (กิโลกรัม),  $W_i$  คือน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม),  $M_i$  คือความชื้นเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์) และ  $M_f$  คือความชื้นสุดท้ายหลังการลดความชื้น (เปอร์เซ็นต์)

$$W_f = \frac{100(1 - 0.44)}{1 - 0.34} = 84.85 \text{ กิโลกรัม}$$

จากการคำนวณจะเหลือน้ำหนักสุดท้ายเท่ากับ 84.85 กิโลกรัม และน้ำที่ระเหยออกไป  $100 - 84.85$  เท่ากับ 15.15 กิโลกรัม แล้วนำน้ำที่ระเหยออกไปนำมาคำนวณหาพลังงานความร้อนจากสมการที่ 2.9 ในบทที่ 2

$$Q_T = Q_i + Q_d$$

$$Q_{Total} = mc\Delta T + ml$$

โดยที่  $Q_{Total}$  คือค่าพลังงานความร้อนทั้งหมด (แคลอรี),  $m$  คือ คือน้ำหนักของน้ำที่ระเหยออกไป (กรัม),  $c$  คือความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (1 แคลอรีต่อกรัมองศาเซลเซียส),  $\Delta T$  คืออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปจากสภาพปกติ (องศาเซลเซียส) และ  $l$  คือความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (540 แคลอรีต่อกรัม)

$$Q_{Total} = 15150 \times 1 \times (60 - 25) + 15150 \times 540 = 8.711 \times 10^6 \text{ แคลอรี}$$

$$Q_{Total} = 3.647 \times 10^7 \text{ จูล}$$

เมื่อทำการคำนวณเป็นกำลังไฟฟ้าจากการใช้เวลาทั้งหมด 1 ชั่วโมงในการลดความชื้น จากสมการที่ 2.10 ในบทที่ 2 จะได้

$$P = \frac{Q}{t} = \frac{3.647 \times 10^7}{60 \times 60} = 10.13 \text{ กิโลวัตต์}$$

ซึ่งจากการคำนวณที่ความชื้น 44 เปอร์เซ็นต์ ต้องการให้ลดเหลือ 34 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ปริมาณข้าวที่ต้องการทดสอบ 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จะต้องใช้กำลังงานที่ 10.13 กิโลกรัม เมื่อต้องการปริมาณข้าวที่เพิ่มขึ้นหรือน้อยลง สามารถดูได้จากข้อมูลที่ตาราง 3.1

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบปริมาณข้าวที่ได้กับกำลังงานที่ต้องการใช้ในครั้งแรก

ปริมาณข้าวที่ได้ (กิโลกรัม)	กำลังงานที่ต้องใช้ (กิโลวัตต์)
10	1.01
20	2.02
30	3.04
40	4.05
50	5.07
60	6.08
70	7.10
80	8.10
90	9.12
100	10.13

ซึ่งในการคำนวณช่วงที่ 2 จะเป็นการคำนวณที่ความชื้น 34 เปอร์เซ็นต์ ลดให้เหลือ 24 เปอร์เซ็นต์ โดยจะนำข้อมูลของปริมาณของข้าวเปรียบเทียบกับกำลังงานที่ต้องใช้เหมือนกัน โดยจะคำนวณปริมาณข้าวที่ 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมงเช่นกัน โดยให้ความร้อนอยู่ที่ประมาณไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส โดยกำหนดค่าข้าวก่อนเข้าเครื่องอยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส และเมื่อต้องการปริมาณข้าวที่เพิ่มขึ้นหรือน้อยลง สามารถดูได้จากข้อมูลที่ตาราง 3.2

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบปริมาณข้าวที่ได้กับกำลังงานที่ต้องการใช้

ปริมาณข้าวที่ได้(กิโลกรัม)	กำลังงานที่ต้องใช้ (กิโลวัตต์)
10	0.88
20	1.74
30	2.62
40	3.48
50	4.36
60	5.23
70	6.11
80	6.98
90	7.85
100	8.80

จากข้อมูลตารางที่ 3.1 และ 3.2 เป็นตารางการเปรียบเทียบปริมาณข้าวที่ได้กับกำลังงานที่ต้องการใช้ ซึ่งข้อมูลในส่วนนี้จะนำไปออกแบบสร้างเครื่องได้ โดยจะพบว่า เมื่อต้องการกำลังการผลิตที่สูงขึ้น สามารถใช้กำลังงานในการให้ความร้อนของระบบที่สูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้นจากการคำนวณสำหรับการออกแบบ ผู้วิจัยจะออกแบบสร้างเครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ และการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ให้ได้กำลังการผลิตสูงสุดที่ 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จะได้ขนาดกำลังงานสูงสุดที่ประมาณ 10.13 กิโลวัตต์ ดังนั้นในการออกแบบระบบในการลดความชื้นแบบไฮบริดนี้ จะได้ดำเนินการออกแบบระบบในแต่ละเครื่องเท่ากับ 10 กิโลวัตต์ต่อไป

สำหรับขั้นตอนและการออกแบบสร้างเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริดประสิทธิภาพสูง โดยอาศัยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ คลื่นความถี่วิทยุ และการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กนั้น ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและสร้างส่วนประกอบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ คือ

1. การออกแบบระบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ
  - 1.1 การจำลองผลการแพร่กระจายคลื่นของท่อนำคลื่นและความเข้มสนามไฟฟ้าที่โหลดไดโอดเล็กตริก
  - 1.2 การออกแบบและสร้างเครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ
2. การออกแบบระบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

- 2.1 การจำลองผลการแพร่กระจายของคลื่นและความเข้มสนามไฟฟ้าที่โหลดไดอิเล็กทริกโดยตัวปล่อยสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต
- 2.2 การออกแบบและสร้างเครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ
3. การออกแบบระบบการให้ความร้อนจากแหล่งพลังงานให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก
  - 3.1 การออกแบบวงจรเหนี่ยวนำความร้อน
  - 3.2 การออกแบบชุดโหลดความร้อน

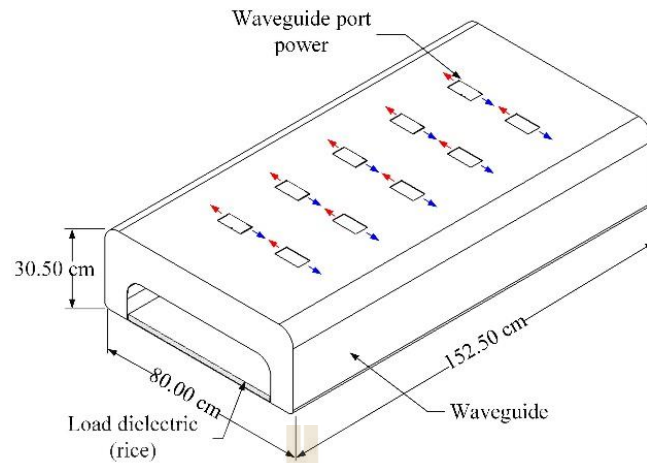
### 3.4 การออกแบบระบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

จากการวิเคราะห์ด้วยหลักการทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบระบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟซึ่งจะต้องใช้กำลังงานไม่น้อยกว่า 10 กิโลวัตต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีการออกแบบระบบโดยใช้หลอดแมกนีตรอน ทั้งหมด 10 หัว เนื่องจากในแต่ละหัวสามารถออกแบบให้มีการจ่ายกำลังงานสูงสุดได้ถึง 1000 วัตต์ สำหรับการจัดวางตำแหน่งของหลอดแมกนีตรอนสามารถจำลองผลการแพร่กระจายคลื่นของท่อนำคลื่นและความเข้มสนามไฟฟ้าที่โหลดไดอิเล็กทริกและการออกแบบสร้างระบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งจะได้วิเคราะห์และออกแบบดังต่อไปนี้

#### 3.4.1 การจำลองผลการแพร่กระจายคลื่นของท่อนำคลื่นและความเข้มสนามไฟฟ้าที่โหลดไดอิเล็กทริก

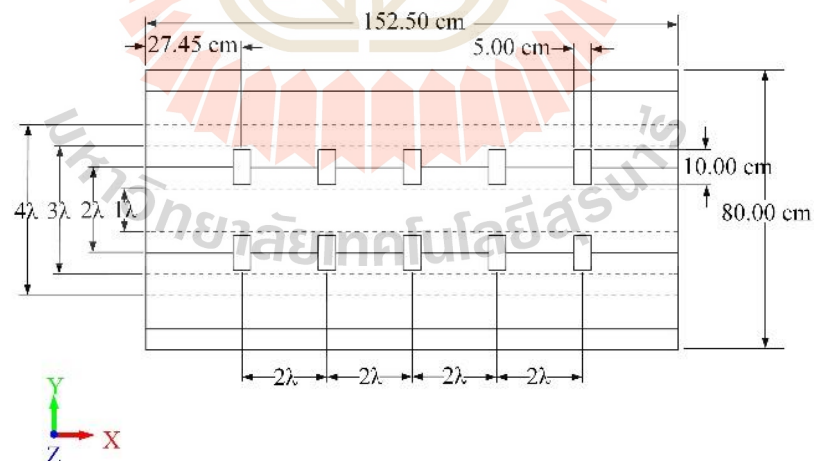
ในการจำลองผลการวิเคราะห์ ใช้โปรแกรม CST MW Studio โดยขนาดของท่อนำคลื่นสามารถออกแบบและคำนวณได้จากสมการของคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 2.45 จิกะเฮิร์ตซ์ เพื่อให้ได้ขนาดที่เป็นมาตรฐานและรองรับการใช้งานในอุตสาหกรรมการลดความชื้น โดยขนาดที่ออกแบบมีความกว้าง ความยาว และความสูง 80 เซนติเมตร 152.50 เซนติเมตร และ 30.50 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.3





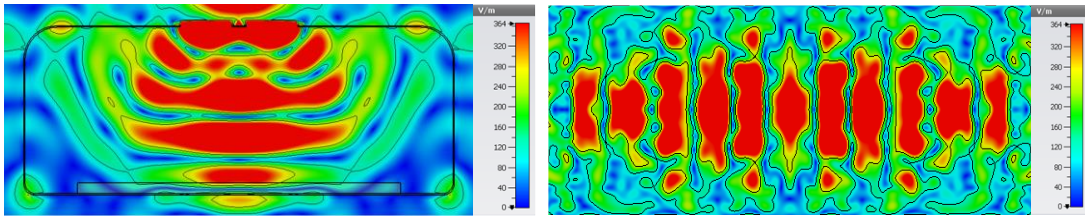
รูปที่ 3.3 ขนาดของท่อนำคลื่น

โดยในการออกแบบการจำลองผล มีพอร์ตตัวปล่อยคลื่นจำนวนทั้งหมด 10 พอร์ต แบ่งออกเป็น 2 ชุด ชุดละ 5 พอร์ต โดยแต่ละพอร์ตจะมีระยะห่างที่  $2\lambda$  ตามระยะของแกน X และในการวิเคราะห์จะทำการปรับระยะของพอร์ตแต่ละชุดห่างกันที่ระยะ  $\lambda$ ,  $2\lambda$ ,  $3\lambda$  และ  $4\lambda$  ตามลำดับ ดังแสดงรูปที่ 3.4 และทำการวิเคราะห์หาผลของการกระจายคลื่นในท่อนำคลื่นและความเข้มของสนามไฟฟ้าที่โหนดไดอิเล็กตริกที่ระยะที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด

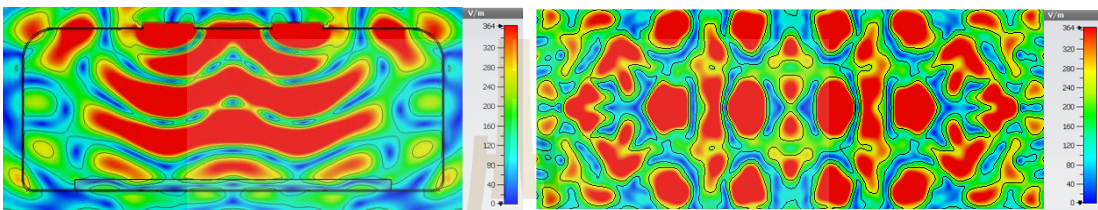


รูปที่ 3.4 แสดงระยะของพอร์ต

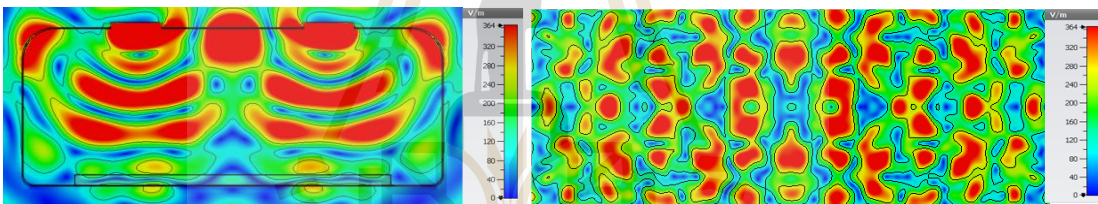
ผลการจำลองจะแสดงการแพร่กระจายคลื่นในท่อนำคลื่นและความเข้มของสนามไฟฟ้าที่โหนดไดอิเล็กตริกดังต่อไปนี้



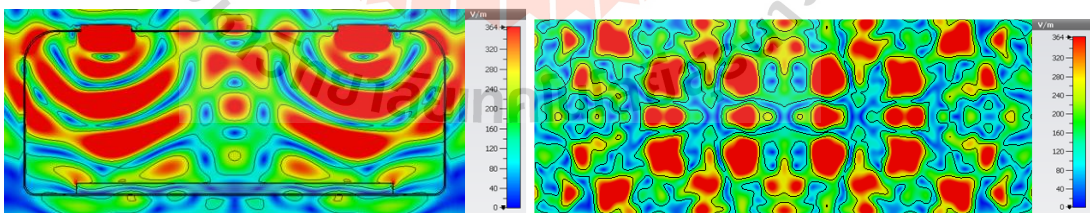
รูปที่ 3.5 ระยะห่างของพอร์ตแต่ละชุดที่ระยะห่าง  $\lambda$  ตามแกน Y



รูปที่ 3.6 ระยะห่างของพอร์ตแต่ละชุดที่ระยะห่าง  $2\lambda$  ตามแกน Y



รูปที่ 3.7 ระยะห่างของพอร์ตแต่ละชุดที่ระยะห่าง  $3\lambda$  ตามแกน Y



รูปที่ 3.8 ระยะห่างของพอร์ตแต่ละชุดที่ระยะห่าง  $4\lambda$  ตามแกน Y

จากผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม CST MW Studio ในการวิเคราะห์ผลของการแพร่กระจายคลื่นในท่อนำคลื่นและความเข้มของสนามไฟฟ้าที่โหลดไดอิเล็กตริกทั้ง 4 กรณี โดยปรับกำลังงานที่ 1000 วัตต์ ที่ความถี่ 2.45 จิกะเฮิรตซ์ พบว่ากรณีที่  $\lambda$  การแพร่กระจายของคลื่นในท่อนำคลื่นจะอยู่ที่บริเวณตรงกลางจะมีสนามไฟฟ้าเข้มกว่า ขณะที่บริเวณด้านล่างเข้มน้อยกว่า ส่วน

การวิเคราะห์พิจารณาที่โหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์ ความเข้มของสนามไฟฟ้ายังเข้มบริเวณตรงกลางมาก เช่นกัน ดังรูปที่ 3.5 เนื่องจากระยะการวางพอร์ตของทั้ง 2 ชุดใกล้กัน

เมื่อพิจารณาที่ระยะห่างระหว่างพอร์ตทั้ง 2 ชุด ห่างกัน  $2\lambda$  พบว่าการแพร่กระจายของคลื่นจะมีความเข้มของสนามไฟฟ้าส่วนมากอยู่ที่บริเวณในท่อนำคลื่น และความเข้มของสนามไฟฟ้าที่โหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์มีการกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วพื้นที่บริเวณโหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์ ดังรูปที่ 3.6

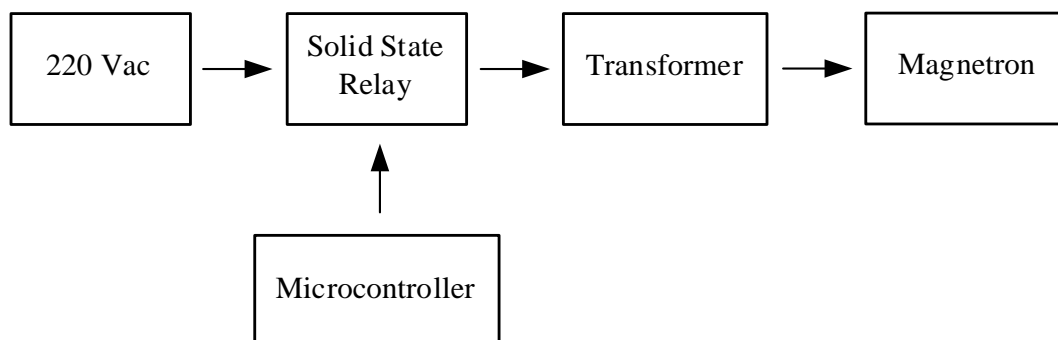
เมื่อพิจารณาที่ระยะห่าง  $3\lambda$  พบว่าการแพร่กระจายของคลื่นจะเหมือนในกรณีที่ระยะห่าง  $2\lambda$  แต่คลื่นส่วนใหญ่จะเข้มที่บริเวณด้านบนของท่อนำคลื่น ส่งผลให้สูญเสียพลังงานและยังลดประสิทธิภาพของการกระจายคลื่นไปยังโหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์ ดังรูปที่ 3.7

เมื่อพิจารณาที่ระยะห่าง  $4\lambda$  พบว่าการแพร่กระจายของคลื่นส่วนใหญ่กระจายไปที่ขอบของท่อนำคลื่น ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปอย่างมาก ซึ่งส่งผลต่อความเข้มของสนามไฟฟ้าที่โหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์ ซึ่งทำให้ค่าความเข้มของสนามแม่ไฟฟ้าที่โหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์ลดลงด้วย ดังรูปที่ 3.8

จากผลการจำลองระยะห่างที่คลื่นแพร่กระจายในท่อนำคลื่นและมีความเข้มของสนามไฟฟ้าที่โหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด คือระยะ  $2\lambda$  สำหรับความเข้มของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดอยู่ที่ 364 V/m

### 3.4.2 การออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ส่วนนี้เมื่อทำการวิเคราะห์จำลองผลเรียบร้อยแล้ว จะอธิบายบล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่อง และทำการออกแบบและสร้างเครื่องโดยใช้โปรแกรม Solid Work ออกแบบในเบื้องต้นก่อน แล้วหลังจากนั้นก็ลงมือปฏิบัติสร้างเครื่องจริง พร้อมชุดสายพานลำเลียงกับระบบควบคุมทั้งหมด

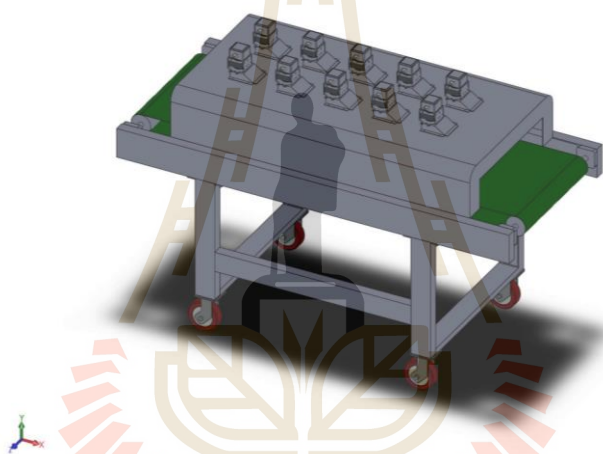


รูปที่ 3.9 แผนภาพการทำงานของเครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ในการทำงานของเครื่องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220V เป็นภาคแหล่งจ่ายให้กับหม้อแปลง โดยที่ใช้ Solid State Relay เป็นสวิตช์ ปิด - เปิด การจ่ายไฟให้กับหม้อแปลง และใช้ Microcontroller ส่งสัญญาณควบคุมการทำงานของ Solid State Relay

#### การออกแบบและสร้างเครื่อง

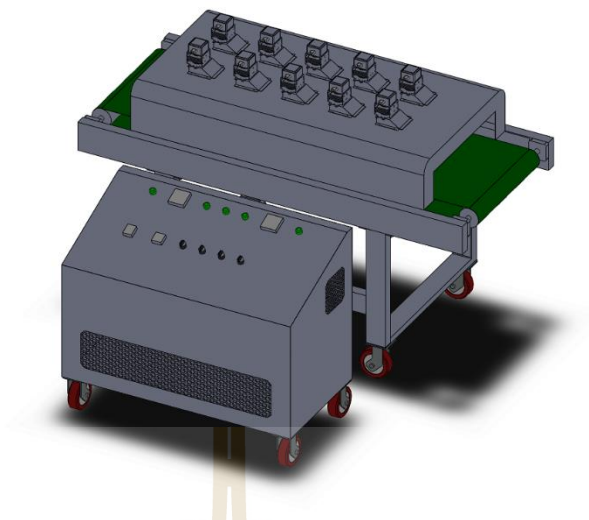
จากการวิเคราะห์ผลการจำลองเพื่อหาขนาดและระยะการวางพอร์ตที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุดแล้วนั้น ซึ่งในการออกแบบการสร้างเครื่องจะยึดตามผลการจำลอง ซึ่งขนาดที่ได้จำลองมีขนาดดังรูปที่ 3.3 และระยะการวางพอร์ตที่เหมาะสมอยู่ที่ระยะการวางพอร์ตที่  $2\lambda$  โดยได้ทำการออกแบบโครงสร้างของตู้ลดความชื้นพร้อมระบบสายพานลำเลียงกับชุดควบคุมการทำงานทั้งระบบ



รูปที่ 3.10 โครงสร้างและระบบสายพานลำเลียงของตู้ลดความชื้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 3.11 ชุดควบคุมการทำงานของตู้ลดความชื้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 3.12 เครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

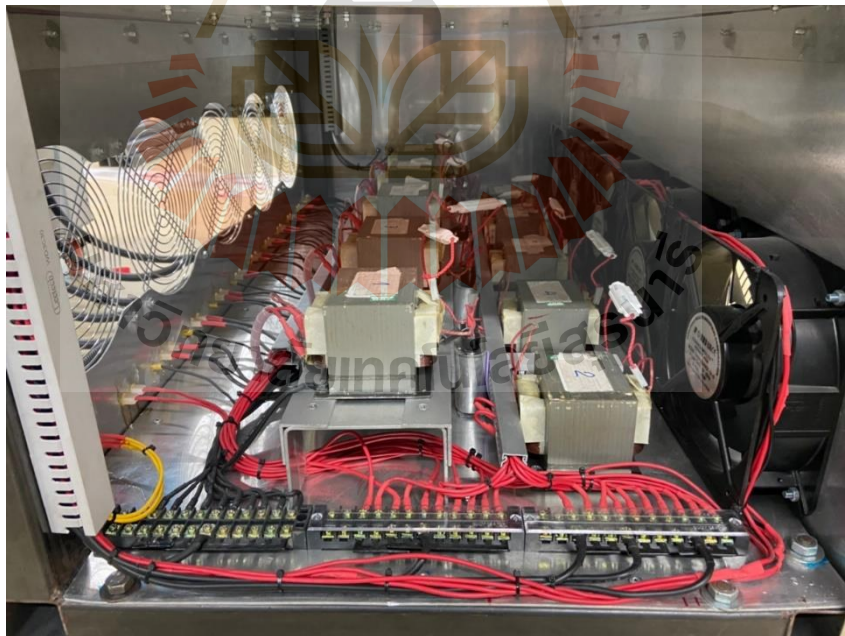
ซึ่งในการออกแบบและสร้างเครื่องจริงจะได้อธิบายการทำงานในแต่ละส่วนและอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งทั้งโครงสร้าง ระบบสายพานลำเลียง พร้อมกับชุดควบคุมการทำงาน ของตู้ลดความชื้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ

สำหรับการออกแบบตู้ลดความชื้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ จะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ คือ ภาคนำจ่ายกำลังงานและภาควัปปล่อยคลื่น โดยในภาควัปปล่อยคลื่นจะประกอบไปด้วย หัวแมกนีตรอนจำนวน 10 หัว ดังรูปที่ 3.13 โดยที่แต่ละหัวจะมีกำลังงานอยู่ที่ 1000 วัตต์ ความถี่ที่ใช้ในการปล่อยคลื่น ความถี่ 2.45 กิโลเฮิร์ตซ์ และในส่วนภาคนำจ่ายกำลังงานทำหน้าที่จ่ายกำลังงานให้หัวแมกนีตรอนทำงาน ซึ่งในส่วนนี้จะประกอบไปด้วย หม้อแปลง ตัวเก็บประจุ และ ไดโอด ดังรูปที่ 3.14





รูปที่ 3.13 ระยะการวางหัวแมกนีตรอนติดตั้งบนตู้ลดความชื้นด้วยคลื่นไมโครเวฟพร้อมระบบระบายความร้อน



รูปที่ 3.14 ภาคแหล่งจ่ายกำลังงานให้หัวแมกนีตรอนทำงานพร้อมระบบระบายความร้อน

ในส่วนระบบสายพานลำเลียงจะประกอบไปด้วยมอเตอร์เกียร์ 3 สาย แบบขาตั้ง กำลังงาน 1/4 แรงม้า อัตราทดรอบ 1:60 รอบ เป็นมอเตอร์ 3 เฟส ดังรูปที่ 3.15



โดยใช้ Inverter Mitsubishi Model: FR - D720S -0.4K เป็นตัวควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ปรับให้ช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับความถี่ที่ปรับอินเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 มอเตอร์ขนาดกำลังงาน 1/4 แรงม้า

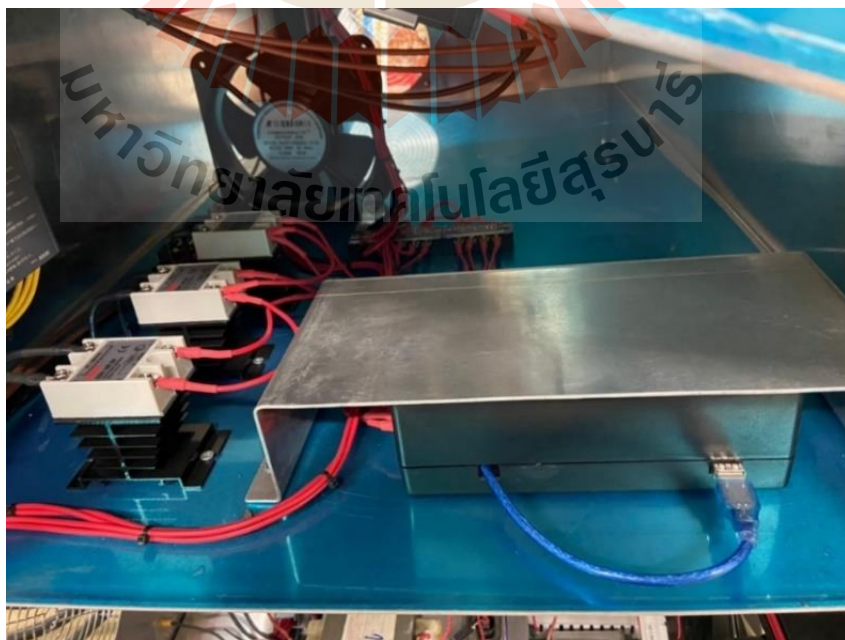


รูปที่ 3.16 Inverter Mitsubishi Model: FR-D720S-0.4K



รูปที่ 3.17 ระบบสายพานลำเลียงที่ติดตั้งบนเครื่องลดความชื้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ จะใช้บอร์ด Microcontroller ในการทำงานควบคุมการทำงาน โดยใช้บอร์ด Arduino Nano ในการควบคุมสัญญาณ Solid-state จ่ายไฟให้กับหม้อแปลงแหล่งจ่ายกำลังงานของหัวแมกนีตรอน



รูปที่ 3.18 ระบบควบคุมการทำงานของหัวแมกนีตรอน (ตัวปล่อยคลื่น)



รูปที่ 3.19 เครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

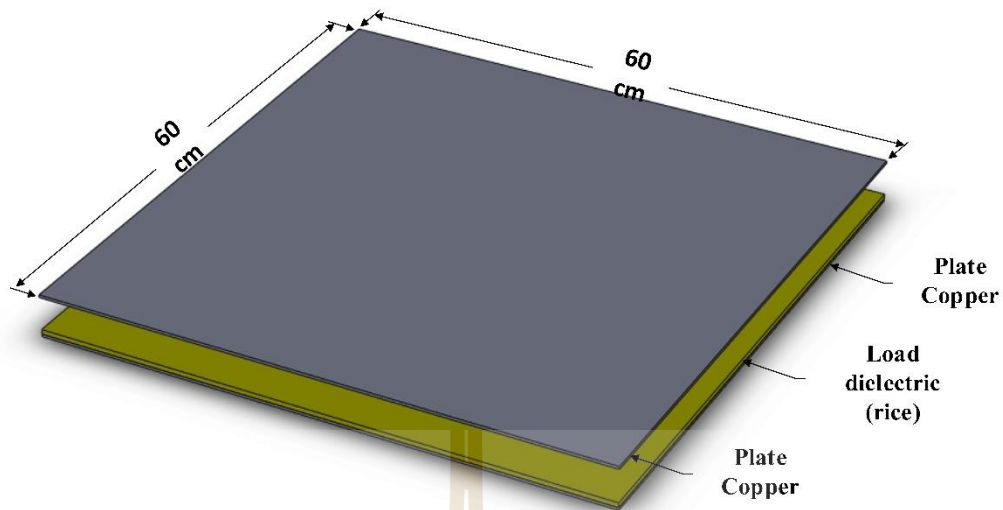
### 3.5 การออกแบบระบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

จากการวิเคราะห์ด้วยหลักการทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบระบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุจะต้องใช้กำลังงาน 10 กิโลวัตต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีการออกแบบ ระบบโดยหลอดอิเล็กทรอนิกส์ในการกำเนิดสัญญาณ ซึ่งจะใช้หลอดเบอร์ 7T69RB สำหรับการออกแบบตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าสามารถออกแบบได้จากผลการจำลองผลการแพร่กระจายคลื่นแบบแผ่นเพลตสำหรับการให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริก และการออกแบบและสร้างเครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ สามารถอธิบายได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

#### 3.5.1 การจำลองผลการแพร่กระจายของคลื่นและความเข้มสนามไฟฟ้าที่โหลดไดอิเล็กตริกโดยตัวปล่อยสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต

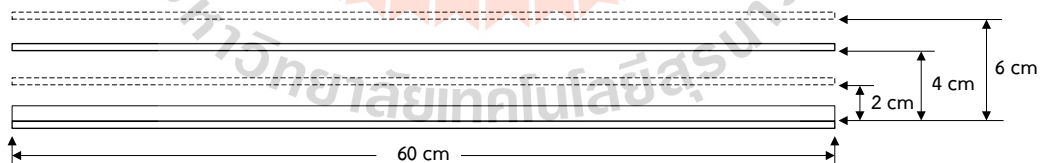
ในการจำลองผลการวิเคราะห์ ใช้โปรแกรม CST MW Studio เหมือนกับโปรแกรมที่ใช้จำลองพอร์ตการปล่อยคลื่นไมโครเวฟ แต่จะแตกต่างกันที่รูปแบบการปล่อยคลื่น โดยที่การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุจะเป็นแบบแผ่นเพลต จะจำลองการกระจายตัวของคลื่นสนามไฟฟ้าบนตัวสร้างสนามไฟฟ้า สำหรับให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริก โดยได้วิเคราะห์เพื่อนำไปสู่การออกแบบขนาดของตัวสร้างสนามไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยขนาดของแผ่นเพลตที่ออกแบบในการจำลองมีขนาดความกว้าง ความยาว และความหนา เท่ากับ 60 เซนติเมตร 60 เซนติเมตร และ 0.3 เซนติเมตร ตามลำดับ เพื่อให้ข้าวสามารถไหลได้ไม่น้อยกว่า 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ดังรูปที่ 3.20





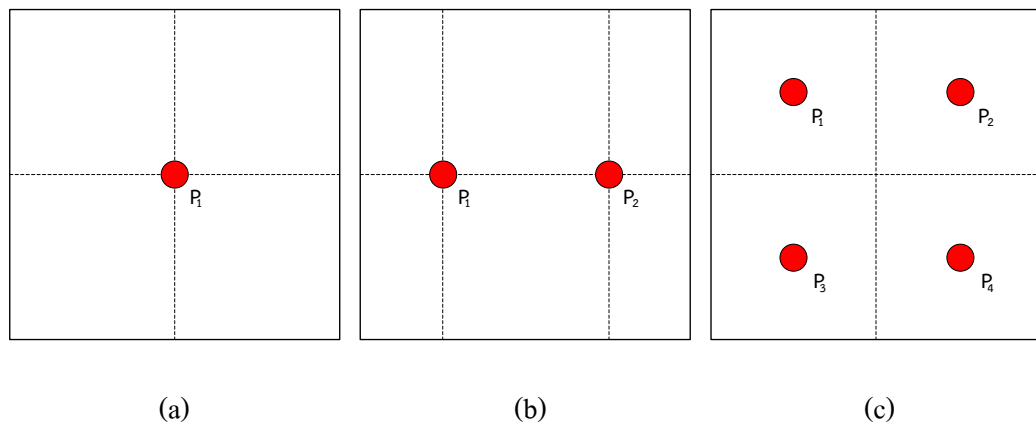
รูปที่ 3.20 ขนาดของแผ่นเพลตที่ใช้ในการจำลอง

โดยในการออกแบบการจำลองผล จะมีแผ่นเพลตจำนวนสองแผ่นที่มีขนาดเท่ากันวางประกบกันโดยที่มีช่องว่างระหว่างแผ่นเพลตเพื่อใส่โหลดไดอิเล็กทริกในการจำลอง ดังรูปที่ 3.21 โดยแต่ละแผ่นจะมีหน้าที่ต่างกัน แผ่นเพลตด้านล่างเป็นตัวปล่อยสนามไฟฟ้า ส่วนด้านบนจะเป็นแผ่นกราว ในการจำลองจะทำการกำหนดแผ่นเพลตด้านล่างไว้กับที่ และปรับระยะแผ่นเพลตด้านบนขึ้นไปเป็นระยะ 2 เซนติเมตร 4 เซนติเมตร และ 6 เซนติเมตร แล้วดูการกระจายตัวของคลื่นสนามไฟฟ้าบนตัวสร้างสนามไฟฟ้า โดยกำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองที่ แรงดัน 9000 โวลต์ กระแสไฟฟ้าประมาณ 1 แอมป์



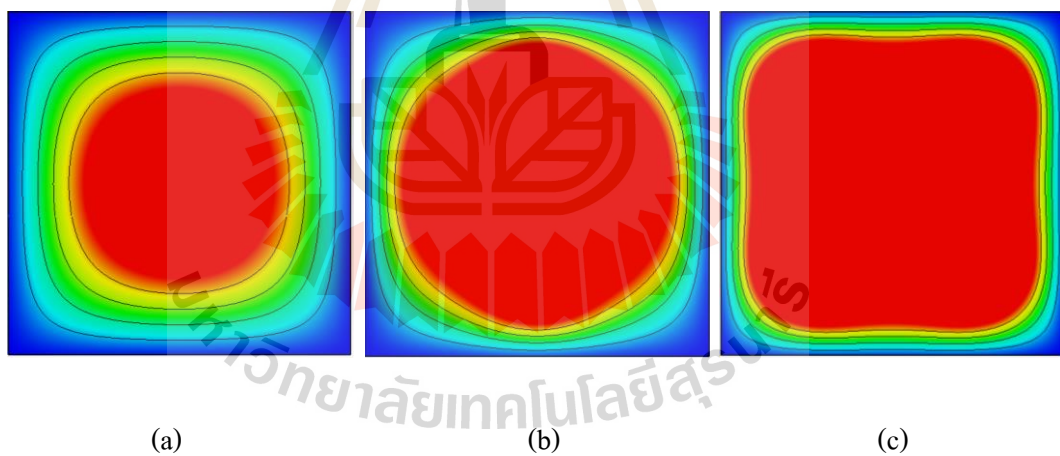
รูปที่ 3.21 รูปแบบการวางแผ่นเพลตและปรับระยะแผ่นเพลตในการจำลอง

และในการจำลองผลการวิเคราะห์ของแผ่นเพลต โดยแต่ละระยะห่างระหว่างแผ่นเพลต จะจำลองจุดตัวปล่อยสนามไฟฟ้าบนแผ่นเพลต โดยจะกำหนดจุดตัวปล่อยสนามไฟฟ้าเป็น 1 จุด 2 จุด และ 4 จุด เพื่อดูความแตกต่างของการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและความเข้มของสนามไฟฟ้าแต่ละรูปแบบดังรูปที่ 3.22

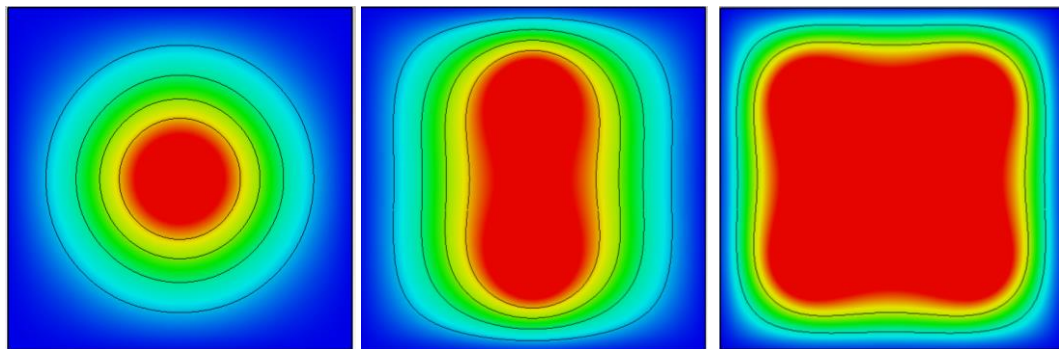


รูปที่ 3.22 รูปแบบการจำลองจุดตัวปล่อยสนามไฟฟ้าบนแผ่นเพลต (a) 1 จุด (b) 2 จุด และ (c) 4 จุด

ผลการจำลองการกระจายตัวของคลื่นสนามไฟฟ้าบนตัวสร้างสนามไฟฟ้า สำหรับให้ความร้อนแก่อิเล็กทรอนิกส์ โดยเขตค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ 40,000 V/m เพื่อดูความแตกต่างของแต่ละรูปแบบการจำลอง ผลการจำลองดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.23 ระยะแผ่นเพลตห่างกัน 2 เซนติเมตร

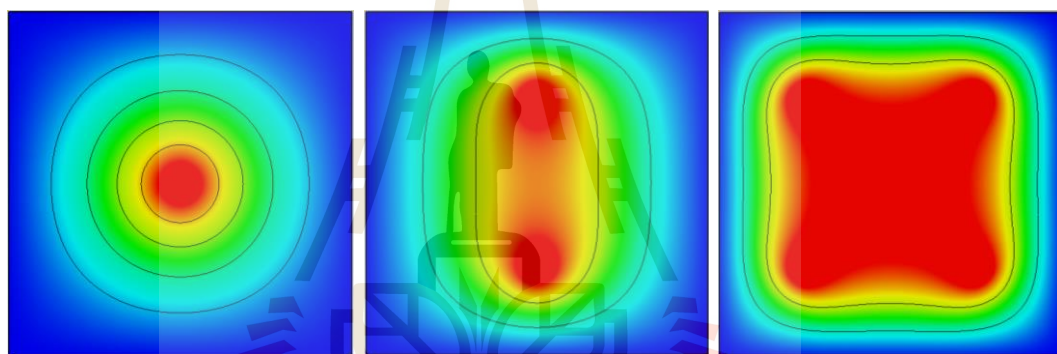


(a)

(b)

(c)

รูปที่ 3.24 ระยะแผ่นเพลตห่างกัน 4 เซนติเมตร



(a)

(b)

(c)

รูปที่ 3.25 ระยะแผ่นเพลตห่างกัน 6 เซนติเมตร

จากการจำลองวิเคราะห์การกระจายตัวของคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต สำหรับการให้ความร้อนแก่โหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์ ขนาดแผ่นเพลตความกว้าง ความยาว และความหนา 60 เซนติเมตร 60 เซนติเมตร และ 0.3 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นขนาดที่ไม่เคยออกแบบมาก่อน โดยใช้คลื่นความถี่เรโซแนนซ์ 32 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยการจำลองนั้นจะจำลองระยะห่างระหว่างแผ่นเพลตจะมีทั้งหมด 3 ระยะห่าง โดยที่ระยะระหว่างแผ่นเพลตจะห่าง 2 เซนติเมตร 4 เซนติเมตร และ 6 เซนติเมตร และโดยแต่ละระยะห่างจะมีการจำลองจุดปล่อยสนามไฟฟ้าบนแผ่นเพลต 3 แบบ ประกอบไปด้วยจำนวนจุดปล่อยคลื่นบนแผ่นเพลต 1 จุด 2 จุด และ 4 จุด เพื่อดูการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ระหว่างแผ่นเพลต

ผลวิเคราะห์จากการจำลองที่ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลตที่ 2 เซนติเมตร โดยการจำลองการวางจุดปล่อยสนามไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ และกำหนดค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุด  $40,000 \text{ V/m}$  เท่ากันหมดทุกแบบ พบว่าการจำลองแบบ 4 จุด มีการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าทั่วพื้นที่บริเวณ โหลด ไดอิเล็กตริก ซึ่งจะทำให้ที่บริเวณ โหลด ไดอิเล็กตริก ได้รับพลังงานเท่าๆกัน และผลการจำลองแบบ 2 จุด มีความเข้มของสนามไฟฟ้าเท่ากัน แต่มีการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าน้อยกว่า ซึ่งจะทำให้ที่ โหลด ไดอิเล็กตริกจะได้รับพลังงานไม่ทั่วถึง ส่วนผลการจำลองแบบจุดเดียวตรงกลางแผ่นเพลต พบว่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้ากระจายตัวอยู่บริเวณใกล้กับจุดตัวปล่อย ซึ่งจะทำให้ โหลด ไดอิเล็กตริกได้รับพลังงานแค่จุดจุดเดียว

เมื่อพิจารณาการจำลองที่ระยะห่าง 4 เซนติเมตร โดยจำลองตำแหน่งจุดตัวปล่อยเหมือนกันกับระยะห่างที่ 2 เซนติเมตร พบว่า ผลจากการจำลองแต่ละแบบมีการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าน้อยกว่าระยะห่าง 2 เซนติเมตร ซึ่งจะมีผลทำให้ โหลด ไดอิเล็กตริกได้รับพลังงานที่น้อยลง

และเมื่อพิจารณาผลการจำลองที่ระยะ 6 เซนติเมตร โดยรูปแบบการจำลองวางจุดปล่อยสนามไฟฟ้าเหมือนกันกับทุกระยะห่างที่จำลอง พบว่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้ายิ่งน้อยกว่าระยะห่างที่ 4 เซนติเมตร ซึ่งจะทำให้ โหลด ไดอิเล็กตริกได้รับพลังงานที่น้อยลงอีก และประสิทธิภาพที่ได้ก็จะน้อยลงตามด้วย

จากผลการจำลองนี้จึงสรุปได้ว่า ระยะห่างของแผ่นเพลตจะมีผลมากกับการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า ระยะห่างมากขึ้น การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าจะลดลงและค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าลดน้อยลงด้วย ส่วนจุดตัวปล่อยสนามยิ่งเยะยิ่งดี แต่ต้องคำนึงถึงขนาดของงานที่ใช้ เพราะมากเกินไปจะสูญเสียพลังงานเปล่า และจากผลการจำลองที่ผู้วิจัยทำการจำลองพบว่า ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลตที่ระยะ 2 เซนติเมตร มีการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและความเข้มของสนามไฟฟ้าเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งจะได้ออกแบบและสร้างเครื่องในขั้นตอนต่อไป

### 3.5.2 การออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

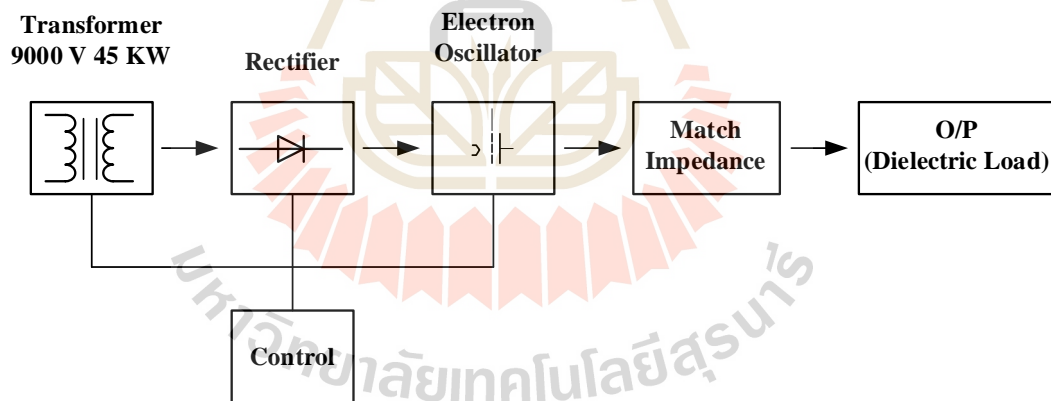
ส่วนนี้จะกล่าวถึงการแสดงหลักการการทำงานให้ความร้อนแบบ ไดอิเล็กตริก การส่งผ่านความร้อนแก่วัสดุ ไดอิเล็กตริก และเมื่อทำการวิเคราะห์จำลองผลเรียบร้อยแล้ว จะทำการออกแบบและสร้างเครื่องโดยใช้โปรแกรม Solid Work ออกแบบในเบื้องต้นก่อน แล้วหลังจากนั้นก็ลงมือปฏิบัติสร้างเครื่องจริง พร้อมชุดสายพานกับระบบควบคุมทั้งหมด

#### หลักการการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของคลื่นสนามไฟฟ้าบนตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต สำหรับให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก โดยได้วิเคราะห์เพื่อนำไปสู่



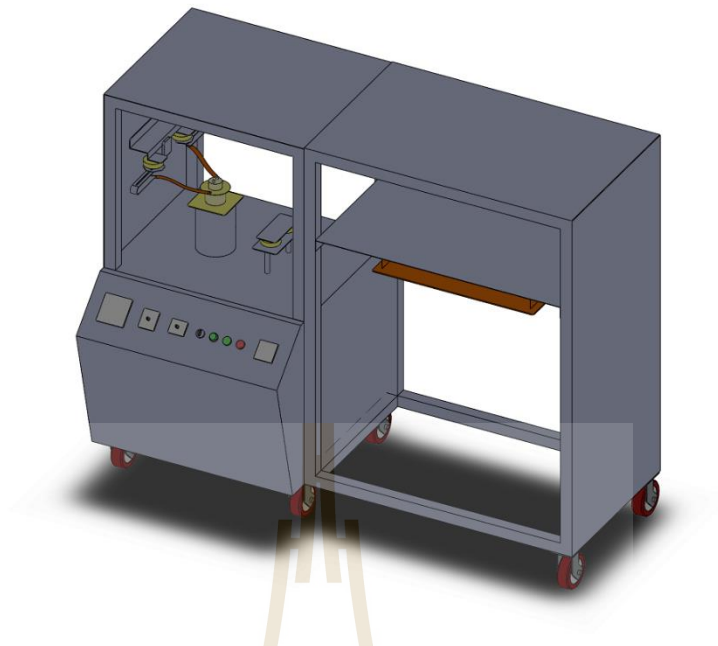
การออกแบบขนาดของตัวสร้างสนามไฟฟ้าที่เหมาะสม และทดสอบกับไดอิเล็กตริกข้าวสารซึ่งตัวอย่างในการวิเคราะห์การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก เพื่อพิจารณาถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยระบบของการทดสอบการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ประกอบด้วยวงจรรภาคแหล่งจ่ายกำลังงาน (Power source) และภาควงจรให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก (Dielectric Heating) ในส่วนของวงจรรภาคแหล่งจ่ายกำลังงาน ใช้หลอดไดอิเล็กตรอนกำลังงานสูงสำหรับกำเนิดสัญญาณและขยายสัญญาณและภาควงจรให้ความร้อนใช้วงจรแมตซ์ซิง RLC เรโซแนนซ์แบบอนุกรม ก่อนที่จะส่งกำลังงานไปยังภาควงจรให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกต่อไป โดยบล็อกไดอะแกรมของระบบแสดงดังรูปที่ 3.26 โครงสร้างการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกซึ่งส่วนสำคัญที่เป็นส่วนให้พลังงานความร้อนคือ สนามไฟฟ้าที่เกิดจากตัวปล่อยคลื่นแบบแผ่นเพลต ดังนั้นการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตที่มีผลต่อการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกและให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานจึงเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญ โดยในบทนี้ได้พิจารณาถึงการวิเคราะห์และออกแบบลักษณะการส่งผ่านความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริกเพื่อให้ได้ขนาดตามต้องการ โดยใช้การคำนวณจากสมการในบทที่ 2 และดูผลการจำลองเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่ออัตราการการเกิดพลังงานในไดอิเล็กตริก



รูปที่ 3.26 โครงสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกข้าวสาร

### การออกแบบและสร้างเครื่อง

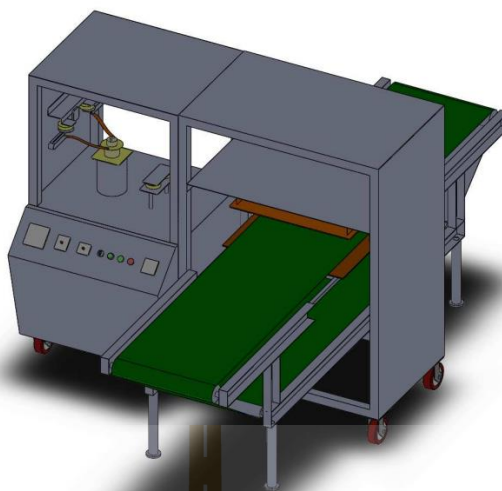
จากการวิเคราะห์ผลการจำลองเพื่อหาระยะของแผ่นเพลตที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุดแล้วนั้น ซึ่งในการออกแบบการสร้างเครื่องจะยึดตามผลการจำลอง ซึ่งขนาดที่ได้จำลองมีขนาดดังรูปที่ 3.20 และระยะการวางแผ่นเพลตที่เหมาะสมอยู่ที่ระยะการวางพอร์ตที่ 2 เซนติเมตร โดยได้ทำการออกแบบโครงสร้างของเครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุพร้อมระบบสายพานลำเลียงกับชุดคุมการทำงานทั้งระบบ



รูปที่ 3.27 ชุดให้กำเนิดคลื่นสนามไฟฟ้าพร้อมระบบควบคุมการทำงาน



รูปที่ 3.28 ชุดสายพานลำเลียงของเครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ



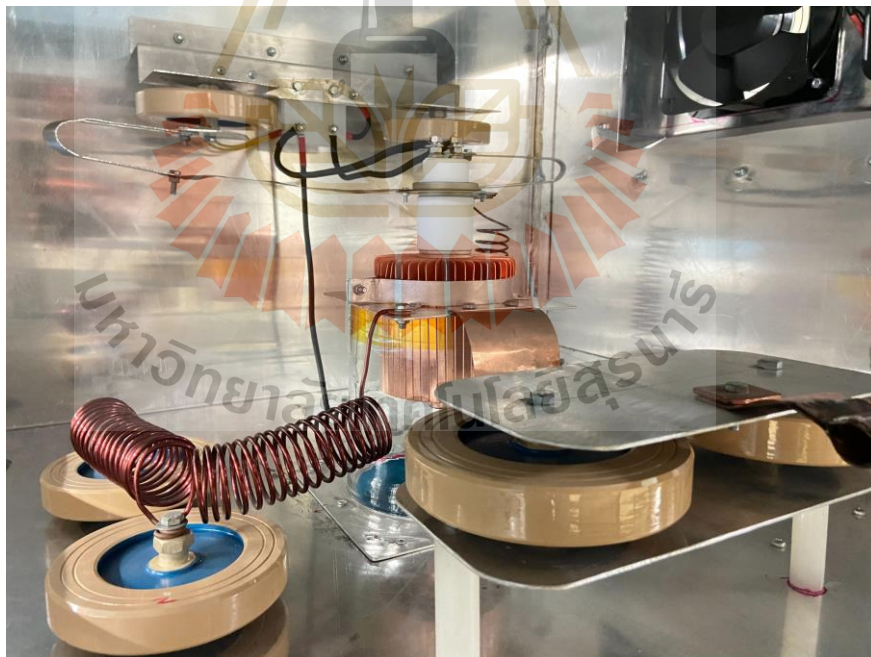
รูปที่ 3.29 เครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุทั้งระบบ

ซึ่งในการออกแบบและสร้างเครื่องจริงจะได้อธิบายการทำงานในแต่ละส่วนและอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งทั้งโครงสร้าง ระบบสายพานลำเลียง พร้อมกับชุดควบคุมการทำงาน ของเครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

สำหรับการออกแบบเครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ จะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ คือภาคแหล่งจ่ายกำลังงาน ภาคกำเนิดความถี่ และภาคตัวปล่อยให้ความร้อน ไดอิเล็กทริก และระบบสายพานอยู่ระหว่างแผ่นเพลต โดยในภาคแหล่งจ่ายกำลังงานจะใช้หม้อแปลง High Voltage ขนาดแรงดัน 9000 โวลต์ กระแส 1 แอมป์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ดังรูปที่ 3.30 ในส่วนภาคกำเนิดความถี่ใช้ ออกแบบชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุ (Oscillator) ด้วยหลอดอิเล็กตรอนเบอร์ 7T69RB ซึ่งลักษณะวงจรภาคเอาต์พุตของหลอดอิเล็กตรอนจะถูกออกแบบเป็นวงจรแมตชิงอิมพีแดนซ์ ซึ่งเป็นการแมตซ์ ระหว่างภาควงจรกำเนิดความถี่วิทยุกับภาควงจรเหนี่ยวนำความร้อนอิเล็กทรอนิกส์แบบแผ่นเพลตเพื่อป้องกันการเสียหายของวงจร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่วงความถี่การทำงานของหลอดอิเล็กตรอนแต่ละชนิดที่สามารถกำเนิดความถี่และกำลังงานสูงสุดได้ ดังรูปที่ 3.31 สำหรับกำลังงานเอาต์พุตจากวงจรกำเนิดความถี่วิทยุ จะส่งไปที่ภาคตัวปล่อยการให้ความร้อน ไดอิเล็กทริกแบบแผ่นเพลตที่ภาคสุดท้ายของวงจрдังรูปที่ 3.32

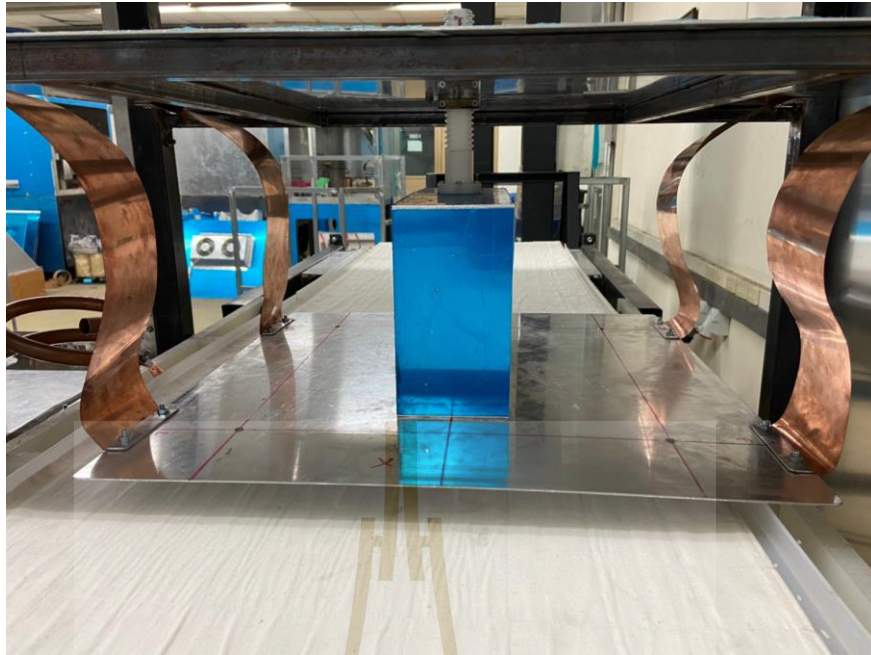


รูปที่ 3.30 ภาคแหล่งจ่ายกำลังงาน



รูปที่ 3.31 ภาคกำเนิดความถี่



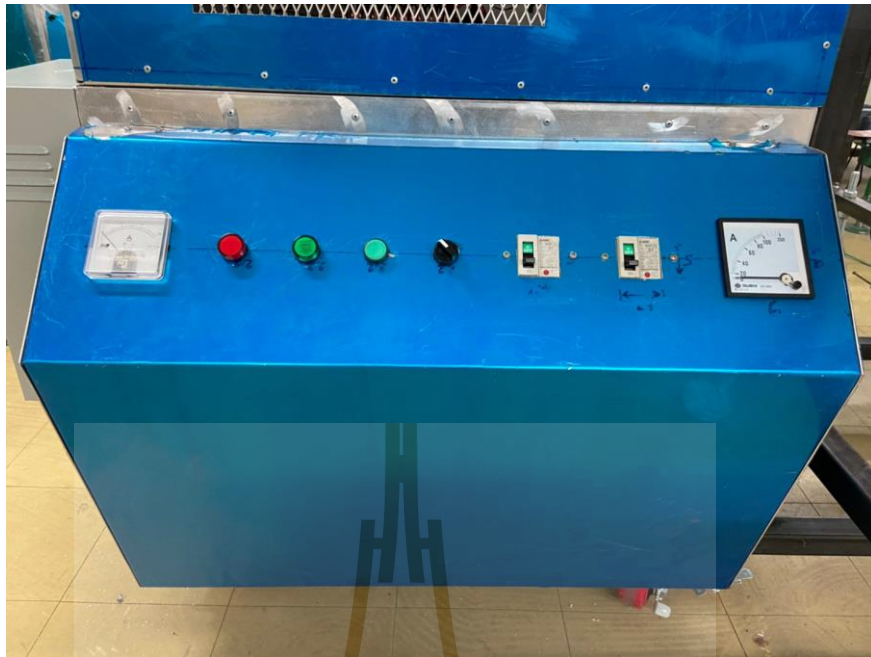


รูปที่ 3.32 ภาควัสดุเพื่อการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกแบบแผ่นฟิล์ม

ในส่วนระบบสายพานลำเลียงจะใช้ชุดเหมือนกันกับเครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 ระบบสายพานลำเลียงที่ติดตั้งบนเครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ



รูปที่ 3.34 ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ



รูปที่ 3.35 เครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

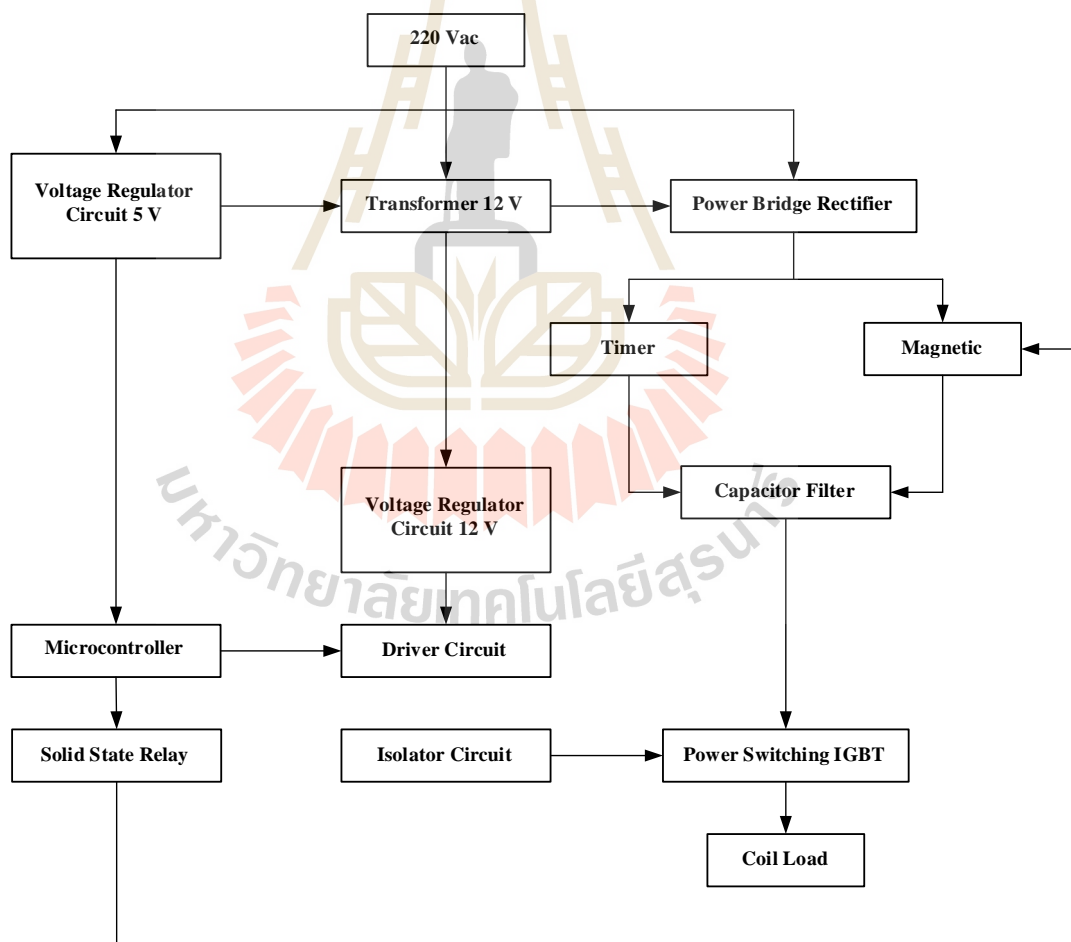


### 3.6 การออกแบบระบบการใช้ความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการใช้พลังงานความร้อนจากการเหนี่ยวนำความร้อนสนามแม่เหล็กเป็นตัวช่วยเสริมการทำงานของสองเครื่องแรก เพื่อใช้ความร้อนทำให้ความร้อนในข้าวเกิดการระเหย และสามารถลดความชื้นออก ซึ่งการออกแบบนั้นจะออกแบบให้มีกำลังงานไม่น้อยกว่า 5 กิโลวัตต์ ซึ่งในการทดสอบเก็บผลการทดลอง จะใช้อุณหภูมิสูงสุดที่ 55 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1 นาที ซึ่งสามารถแบ่งการออกแบบในส่วนต่าง ๆ ดังนี้

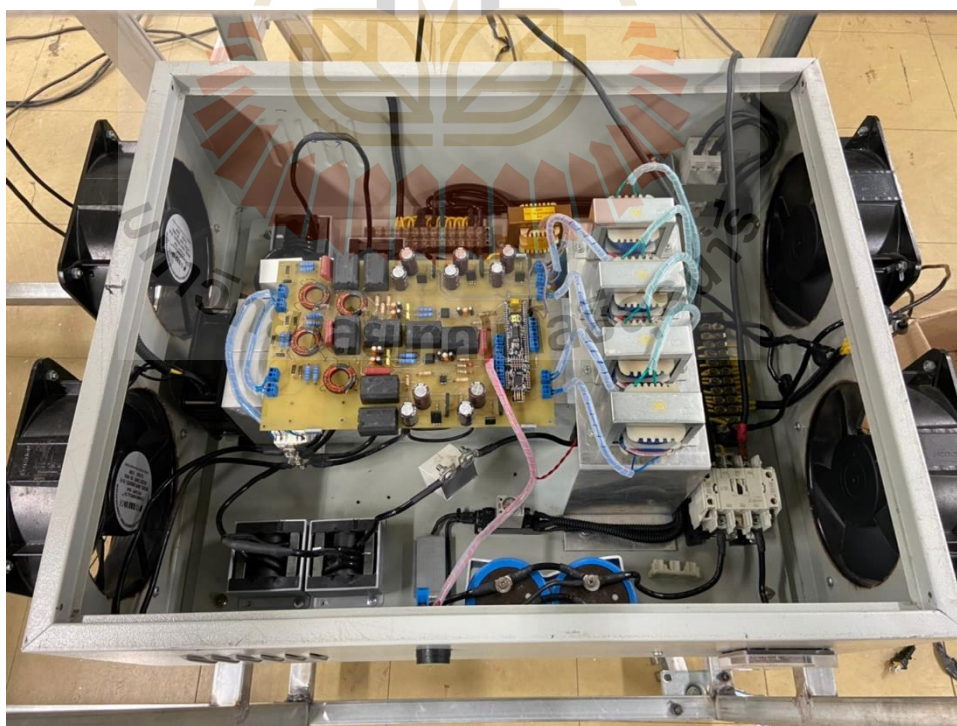
#### 3.6.1 การออกแบบวงจรเหนี่ยวนำความร้อน

ในการออกแบบวงจรไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถแสดงแผนภาพบล็อกไดอะแกรมได้ ดังรูปที่ 3.36

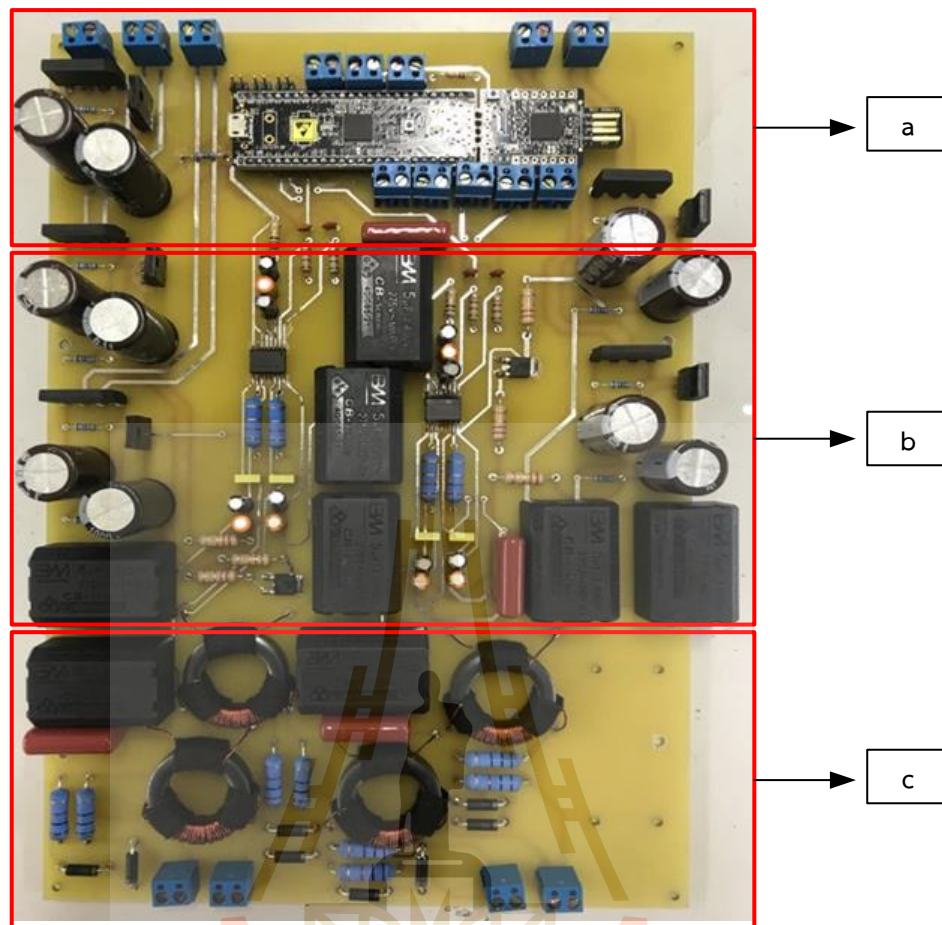


รูปที่ 3.36 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของวงจรเหนี่ยวนำความร้อน

การสร้างวงจรเหนี่ยวนำความร้อนเป็นการสร้างกระแสไฟฟ้าความถี่สูงให้วิ่งผ่านขดลวดเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารอบขดลวดและเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนขึ้นกับชิ้นงาน โลหะที่อยู่ภายในวงของขดลวดเหนี่ยวนำดังแผนภาพบล็อกไดอะแกรม โดยหลักการทำงานของวงจรเหนี่ยวนำความร้อน (Induction Heating) เริ่มจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ จ่ายไฟผ่านวงจรเรียงกระแสด้วยไดโอดบริดจ์กำลัง ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นตัวเก็บประจุขนาดใหญ่มัจะทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้มีความเรียบขึ้นเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แล้วจ่ายให้เพาเวอร์ไอจีบีที (IGBT) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงโดยความถี่ที่เหมาะสมกับชิ้นงาน โลหะที่จะใช้ในงานวิจัยนี้จะอยู่ในช่วง 8 – 12 กิโลเฮิร์ตซ์จากนั้นจ่ายให้กับโหลดขดลวดเหนี่ยวนำที่มีค่าความเหนี่ยวนำ (L) อยู่ประมาณ 380 ไมโครเฮนรี่ และค่าความต้านทานภายในขดลวด (R) อยู่ที่ 2.9 โอห์ม เพื่อทำให้เกิดการเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน โลหะและทำให้เกิดเป็นความร้อนขึ้นตัวชิ้นงาน โดยตรงการทำงานของเพาเวอร์ไอจีบีทีจะถูกขับให้ทำงาน โดยชุดวงจรขับ ไอจีบีที (Driver) ซึ่งถูกควบคุมความถี่ของวงจรด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (Controller) ในการควบคุมสัญญาณของวงจรขับ และควบคุมการทำงานของ Solid State Relay



รูปที่ 3.37 ชุดวงจรเหนี่ยวนำความร้อนที่ของเครื่องต้นแบบ



รูปที่ 3.38 แสดงระบบของวงจรกำเนิดความถี่ในส่วนต่าง ๆ

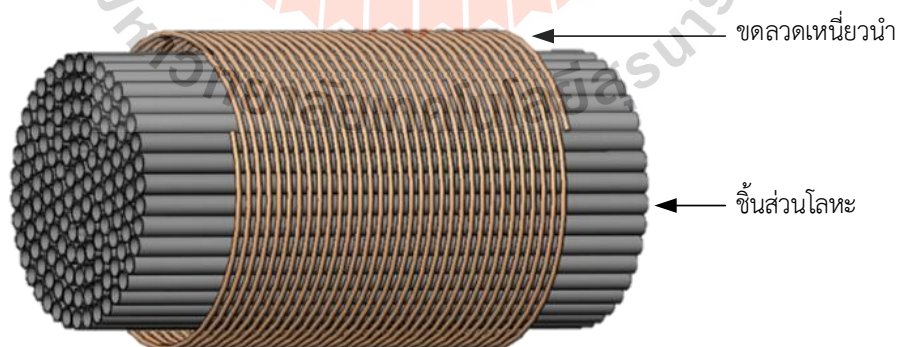
จากวงจรดังรูปที่ 3.38 นั้นเป็นส่วนของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์เพื่อนำสัญญาณไปใช้ในการควบคุม On-Off สวิตช์ของ IGBT โดยสามารถแบ่งการทำงานของวงจรนี้ออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ ส่วนแรก a เป็นส่วนที่ใช้สร้างสัญญาณพัลส์ที่มีขนาด 5 โวลต์ โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสร้างสัญญาณพัลส์ออกมา และยังเป็นส่วนควบคุมระบบต่าง ๆ ของวงจรอีกด้วย ส่วนที่สอง b เป็นส่วนที่ใช้วงจรขับของ IGBT โดยใช้วงจรรวมแบบสำเร็จรูป (IC Gate Drivers) ซึ่งเป็นวงจรสั่งการให้ IGBT ทำงานแบบ Switch ได้สมบูรณ์ เพราะทำให้ไม่เกิด Loss ซึ่งในตัวชิปประมวลผลของอุปกรณ์ 1 ตัว จะมี 2 Drivers ในตัวทำให้ขับสัญญาณพัลส์ออกมา 12 โวลต์ และในส่วนที่สาม c ส่วนสุดท้ายของวงจรเป็นส่วนการใช้หม้อแปลงแบบ pulse transformer ทำหน้าที่แยก (Isolated) ระหว่างวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ควบคุมกับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ IGBT



รูปที่ 3.39 เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำภาคแหล่งจ่ายกำลังงานพร้อมชุดควบคุม

### 3.6.2 การออกแบบชุดโหลดความร้อน

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการออกแบบชุดโหลดความร้อนของวงจรเหนี่ยวนำความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะใช้โปรแกรม Solid work ในเบื้องต้นก่อนการออกแบบจริง และในส่วนนี้ใช้เพื่อเป็นต้นกำเนิดความร้อนให้กับระบบให้ความร้อนสำหรับโหลดไดอิเล็กตริกซึ่งจะประกอบด้วย 2 ส่วน ดังรูปที่ 3.40

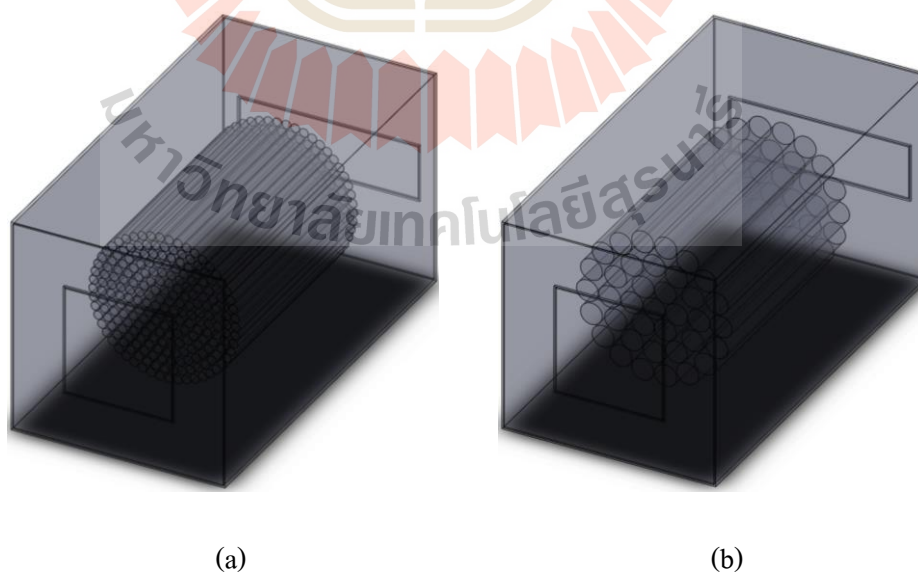


รูปที่ 3.40 ส่วนประกอบของชุดโหลดความร้อน

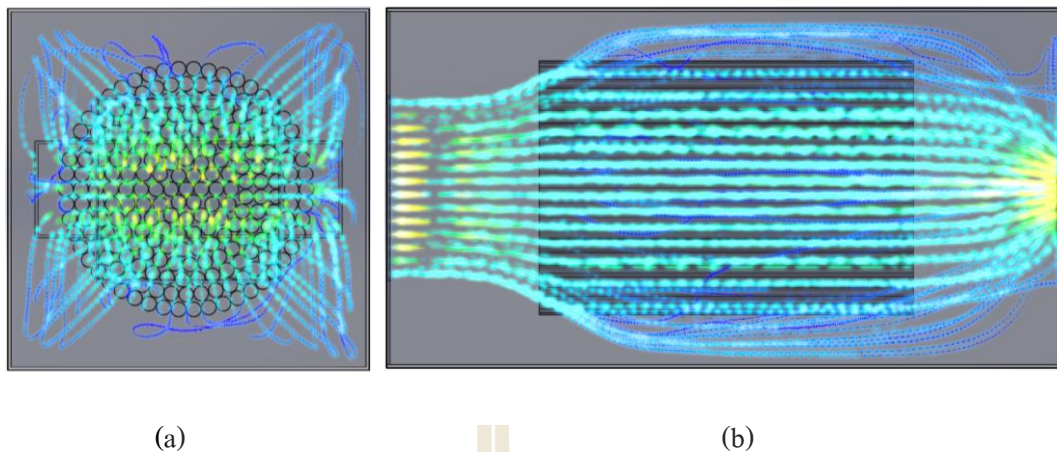
ในส่วนของการออกแบบชุดโหลดความร้อนนั้นดังที่ได้กล่าวไว้ในเบื้องต้นจะแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะเป็นขดลวดเหนี่ยวนำมีลักษณะเป็นขดลวดทรงกระบอก



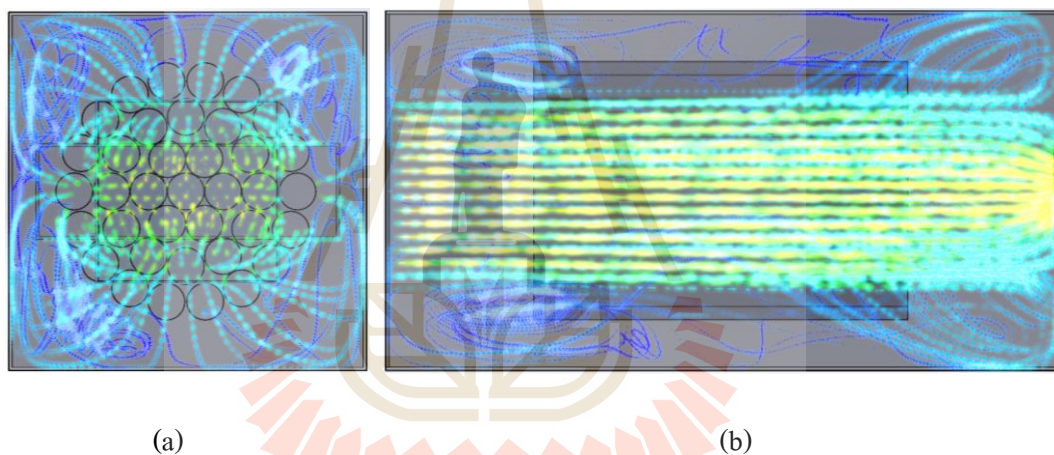
ค่าความเหนียวจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดและชิ้นงานโลหะที่ถูกเหนียว ถ้าหากโลหะมีค่าความเหนียวมากเกินไปจะทำให้โหลดดึงกระแสได้น้อยทำให้กำลังของเครื่องน้อยลงตามไปด้วย ในทางตรงกันข้ามถ้าโลหะมีค่าความเหนือน้อยเกินไปจะทำให้โหลดดึงกระแสสูงมากซึ่งอาจส่งผลเสียต่อตัวอุปกรณ์ในวงจรได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ออกแบบว่าต้องการกำลังงานของเครื่องเท่าไร ในส่วนที่สองจะเป็นชิ้นงานโลหะที่จะถูกเหนียวทำให้เกิดความร้อน โดยในการออกแบบชุดโหลดความร้อนสำหรับใช้เป็นแหล่งกำเนิดของลมร้อนนั้นเป็นสิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงคือ หน้าสัมผัสหรือพื้นผิวของชิ้นงานโลหะร้อนที่ต้องสัมผัสกับอากาศเพื่อให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานความร้อนจากผิวของชิ้นงานโลหะไปยังอากาศให้มากที่สุด ดังนั้นในการออกแบบและสร้างชุดโหลดความร้อนทางผู้วิจัยได้ออกแบบจำลองชิ้นงานส่วนที่เป็นโลหะที่ถูกเหนียวให้เกิดความร้อน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ขนาด คือขนาดท่อเหล็กกลวงและบางขนาด 4 หุน ความหนา 0.6 มิลลิเมตร และขนาด 8 หุนขนาดความหนาเท่ากัน เพื่อจำลองผลดูทิศทางลมที่ไหลผ่านชิ้นงานส่วนที่เป็นโลหะ โดยที่ออกแบบกล่องครอบชิ้นงานส่วนที่เป็นโลหะขนาดความกว้าง 24 เซนติเมตร ความยาว 45 เซนติเมตร และความสูง 24 เซนติเมตร โดยขนาดทิศทางลมเข้ามีขนาดความกว้าง 12 เซนติเมตร ความยาว 12 เซนติเมตร และขนาดของทิศทางลมออกมีขนาดความกว้าง 6 เซนติเมตร ความยาว 20 เซนติเมตร ซึ่งจะวางชิ้นงานส่วนที่เป็นโลหะไว้ตรงกลางของกล่อง ดังรูปที่ 3.41 และขนาดความเร็วลมที่ใช้ในการจำลอง 15 เมตรต่อวินาที ผลการจำลองดังรูปที่ 3.42 และ 3.43



รูปที่ 3.41 ขนาดของชิ้นส่วนโลหะที่ใช้ในการจำลอง (a) ขนาดท่อเหล็ก 4 หุน  
(b) ขนาดท่อเหล็ก 1 หุน



รูปที่ 3.42 ผลการจำลองทิศทางการไหลขนาดท่อเหล็ก 4 หุน (a) ด้านหน้า (b) ด้านข้าง

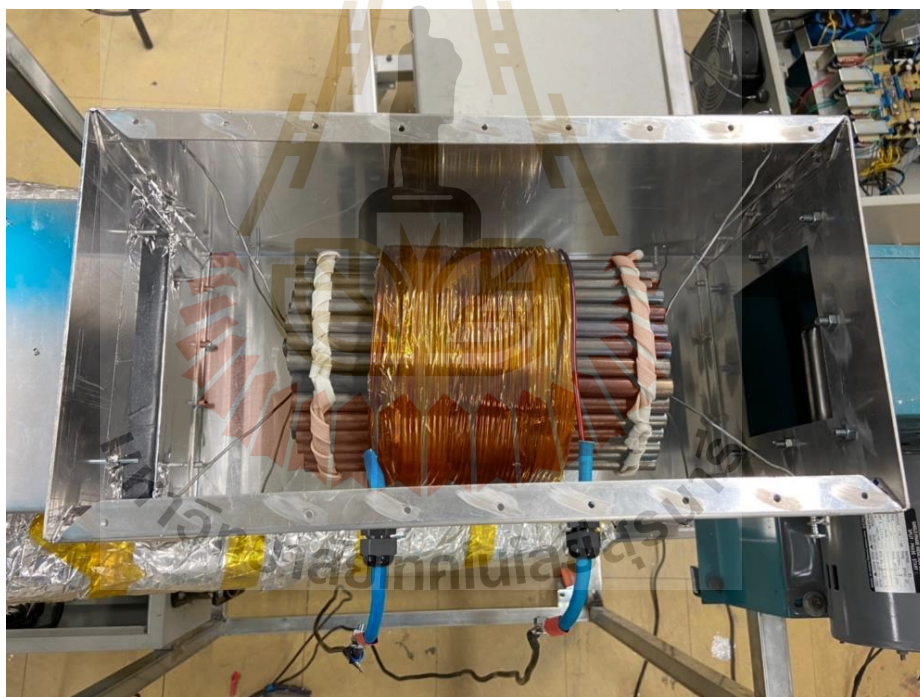


รูปที่ 3.43 ผลการจำลองทิศทางการไหลขนาดท่อเหล็ก 8 หุน (a) ด้านหน้า (b) ด้านข้าง

ดังนั้นจากผลการจำลองในการออกแบบและสร้างชุดโหลดความร้อนของจริง ผู้วิจัยเลือกใช้ท่อเหล็กกลวงและบาง ขนาด 4 หุน ความหนา 0.6 มิลลิเมตร เพราะทิศทางการไหลของลมมีการไหลผ่านชิ้นส่วนที่เป็นโลหะได้ทั่วถึงและการไหลวนกลับของลมภายในกล่องค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับขนาดท่อเหล็ก 8 หุน จากผลการจำลองที่ได้ทางผู้วิจัยทำการตัดท่อเหล็กเป็นท่อน ๆ ตามผลการจำลองแล้วนำมาวัดรวมกันมีลักษณะคล้ายรังผึ้งทรงกระบอก ซึ่งการออกแบบชิ้นงานโลหะให้มีลักษณะคล้ายรังผึ้งนี้จะทำให้มีพื้นที่ความร้อนที่จะสัมผัสกับอากาศได้มากทำให้สามารถสร้างลมร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เหตุผลที่เลือกใช้ท่อเหล็กกลวงและบางขนาดดังกล่าวนี้เนื่องจากมีพื้นที่ผิวความร้อนที่สัมผัสกับอากาศมากและอากาศผ่านได้สะดวกแต่ถ้าเลือกใช้ท่อเหล็กตัดหรือท่อเหล็กกลวงหนาจะเกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนจากการนำ



ความร้อนลึกลงไปในเนื้อเหล็กและสะสมอยู่ในนั้นไม่สามารถนำออกมาใช้ได้ซึ่งเป็นความสิ้นเปลืองพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ และถ้าใช้ท่อเหล็กกลวงใหญ่เกินไปจะทำให้มีอากาศเย็นที่ไม่ได้สัมผัสถูกความร้อนรอดผ่านท่อมากส่งผลให้ลมร้อนมีอุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้การประกอบขดลวดเหนียวนำ และชิ้นงาน โลหะเข้าด้วยกัน ควรวางตัวชิ้นงาน โลหะให้อยู่กึ่งกลางของขดลวด และไม่ควรให้ชิ้นงานนั้นสัมผัส โคนขดลวดเหนียวนำ โดยตรงหรืออยู่ใกล้ขดลวดมากเกินไปเพราะจะทำให้สัญญาณของแรงดันไฟฟ้าที่ผ่านขดลวดเพี้ยนและอาจจะส่งผลย้อนกลับไปยังวงจรอาจทำให้เกิดความเสียหายกับวงจรได้ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบชุด โหลดความร้อนโดยการพันขดลวดเหนียวนำเป็นทรงกระบอกและใช้เทปทนความร้อนพันรอบขดลวดเพื่อให้อยู่ตรง แล้ววางไว้เป็นแนวอนในกล่องที่สร้างขึ้นที่มีขนาดพอดีกับขดลวด จากนั้นวางชิ้นงาน โลหะไว้กึ่งกลางของขดลวดแล้วยึดชิ้นงานด้วยลวดกับผนังของกล่องให้ชิ้นงานลอยอยู่กลางขดลวดได้โดยไม่สัมผัส โคนขดลวดดังรูปที่ 3.44



รูปที่ 3.44 ชุด โหลดความร้อนที่สร้างขึ้นและลักษณะการวางตัวของขดลวดเหนียวนำกับชิ้นงาน โลหะ

### 3.7 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์การออกแบบเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด ซึ่งประกอบไปด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ด้วยหลักการทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบระบบการให้ความร้อน และจำลองรูปแบบการให้ความร้อน และทำการออกแบบสร้างระบบทั้ง 2 รูปแบบ โดยแต่ละแบบออกแบบที่มีขนาดกำลังงานสูงสุด 10 กิโลวัตต์ สำหรับทดสอบคุณภาพและประสิทธิภาพการลดความชื้น และออกแบบระบบการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการให้ความร้อนร่วมแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ซึ่งการออกแบบนั้นจะออกแบบให้มีกำลังงานขนาดไม่น้อยกว่า 5 กิโลวัตต์ สำหรับการทดสอบผลในบทที่ 4 ต่อไป



## บทที่ 4

### การทดสอบและผลการทดสอบ

#### 4.1 บทนำ

สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด โดยการลดความชื้นข้าวจากกระบวนการล้างกำจัดสารหนุออกแล้ว โดยก่อนการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ของการให้ความร้อนและการลดความชื้นของข้าวนั้น ทางผู้วิจัยจะทำการทดสอบเบื้องต้นของการลดความชื้นของทั้ง 3 หลักการ ประกอบไปด้วย (1) การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (2) การให้คลื่นความถี่วิทยุ และ (3) การใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการให้ความร้อนแบบการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก หลังจากนั้นจะนำผลการทดสอบของทั้ง 3 หลักการมาเปรียบเทียบกันเพื่อดูประสิทธิภาพในการลดความชื้นข้าวของแต่ละหลักการ จากผลการทดสอบในเบื้องต้น โดยทดสอบที่เงื่อนไขเหมือนกันหมด ความชื้นข้าวเริ่มต้นที่ 44 เปอร์เซ็นต์ เวลาในการทดสอบ 5 นาที เท่ากัน พบว่าที่หลักการ 1, 2 และ 3 สามารถลดความชื้นเหลือที่ 35.1, 36.4 และ 42.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าหลักการที่ 1 และ 2 สามารถความชื้นข้าวได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับหลักการที่ 3 ซึ่งผลการลดความชื้นไม่ต่างจากเดิมมาก ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้หลักการแรกทั้งที่ 1 และ 2 เป็นหลักการหลักในการลดความชื้นข้าว และจะใช้ หลักการที่ 3 เป็นตัวช่วยเสริมการทำงานของสองหลักการแรก โดยสามารถแบ่งการทดสอบเพื่อหาความสำคัญออกเป็น 2 รูปแบบ คือรูปแบบลดความชื้นข้าวจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟก่อน แล้วค่อยทำการทดสอบการลดความชื้นข้าวจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุต่อ และรูปแบบที่สองทำการทดสอบเหมือนรูปแบบแรก แต่สลับการทำงานก่อนหลัง โดยในแต่ละส่วนจะทำการทดสอบข้าวในเงื่อนไขต่างๆ เพื่อที่จะได้ความสัมพันธ์การลดความชื้นข้าวที่ดีที่สุด เมื่อทำการทดสอบเสร็จแล้วทางผู้วิจัยจะเก็บตัวอย่างผลการทดสอบ ไปส่งกล้องตรวจสอบคุณภาพข้าว สำหรับเครื่องที่ใช้ในการทดสอบเป็นเครื่องที่ได้ออกแบบในบทที่ 3 เรียบร้อยแล้วซึ่งรายละเอียดการทดสอบจะได้อธิบายในส่วนต่อไป

โดยความชื้นที่ใช้ในการทดสอบจะเริ่มต้นประมาณ 44 เปอร์เซ็นต์ (กระบวนการแช่ 12 ชั่วโมง) ผู้วิจัยต้องการลดความชื้นเหลือประมาณ 24 เปอร์เซ็นต์ และเนื่องจากปัจจุบันมีเทคโนโลยีการลดความชื้นจาก 24 เปอร์เซ็นต์ โดยประมาณและคงเหลือ 14 เปอร์เซ็นต์ ตามมาตรฐานอยู่แล้ว เช่น การลดความชื้นด้วยหลักการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็น

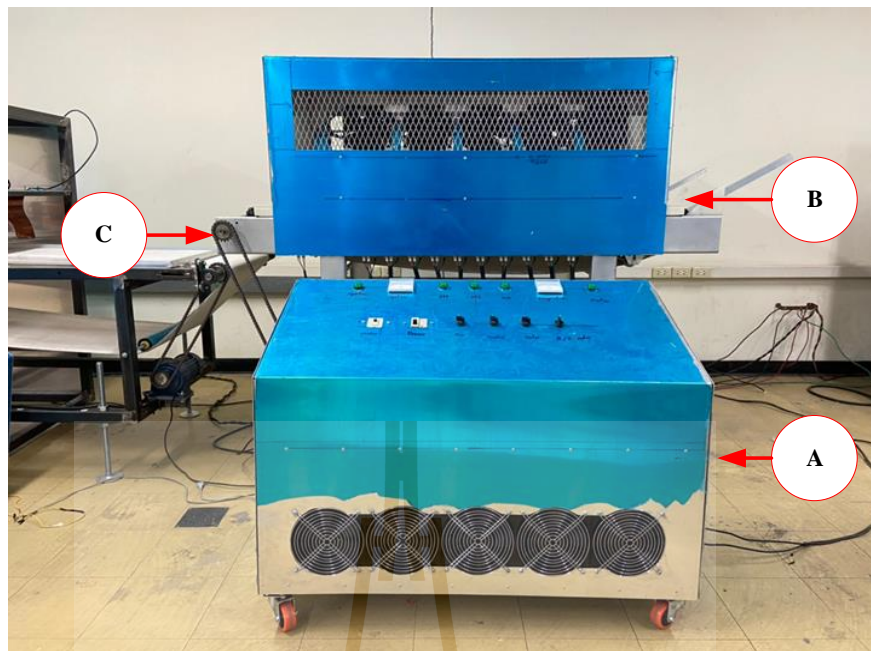
การศึกษาถึงการลดความชื้นข้าวที่มีความชื้นสูงและตรวจสอบคุณภาพของข้าวที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุร่วมกับการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการให้ความร้อนแบบการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นหลักการลดความชื้นข้าวที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำสูง ใช้เวลาน้อย และประหยัดพลังงาน โดยจะทำการออกแบบระบบลดความชื้นข้าวทั้ง 2 ระบบแล้วจะทำให้ความชื้นเหลือที่ 24 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบตรวจสอบคุณภาพของข้าวทางผู้วิจัยเลยจะทำการทดสอบตัวอย่างที่กำลังงาน 5 กิโลวัตต์ เพื่อที่จะได้ประหยัดพลังงาน และได้ยืดอายุการใช้งานของเครื่องด้วย

## 4.2 วิธีการทดสอบการลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด

ตามที่ได้กล่าวไว้ในเบื้องต้นแล้วนั้น ซึ่งในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายวิธีการทดสอบ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือการลดความชื้นข้าวจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ และการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก โดยทั้ง 3 ระบบนี้ จะใช้กำลังงานในการทดสอบที่ 5 กิโลวัตต์ และใช้ขนาดกำลังการผลิตข้าวเท่ากับการคำนวณในตารางที่ 3.1 สำหรับการทดสอบหาความสัมพันธ์การลดความชื้นข้าวและคุณภาพข้าวที่ดีที่สุด แล้วนำแต่ละส่วนทำงานร่วมกันเป็นขั้นตอนต่อไป โดยวิธีการ เงื่อนไข และการเก็บผลการทดสอบแสดงได้ตามหัวข้อต่อไปนี้

### 4.2.1 วิธีการทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ในการทดสอบการลดความชื้นด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ จะใช้ไฟเฟสเดียว 220 โวลต์ โดยกำลังงานที่ใช้ในการทำงานอยู่ที่ 5 กิโลวัตต์ โดยการเตรียมเครื่องสำหรับการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.3 โดยในรูปที่ 4.1 เป็นรูปเครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งในส่วนเครื่องนี้จะประกอบไปด้วยส่วนหลักคือ ชุดควบคุมการทำงานทั้งระบบ ชุดสายพานลำเลียง และตู้ลดความชื้นข้าว รูปที่ 4.2 เป็นรูปทางเข้าของข้าวที่จะทำการทดสอบ และรูปที่ 4.3 เป็นรูปทางออกของข้าวที่จะทำการทดสอบ เมื่อทำการทดสอบเสร็จแล้วก็นำข้าวไปทำการเก็บผลพร้อมเก็บตัวอย่างไปส่งกล้อง

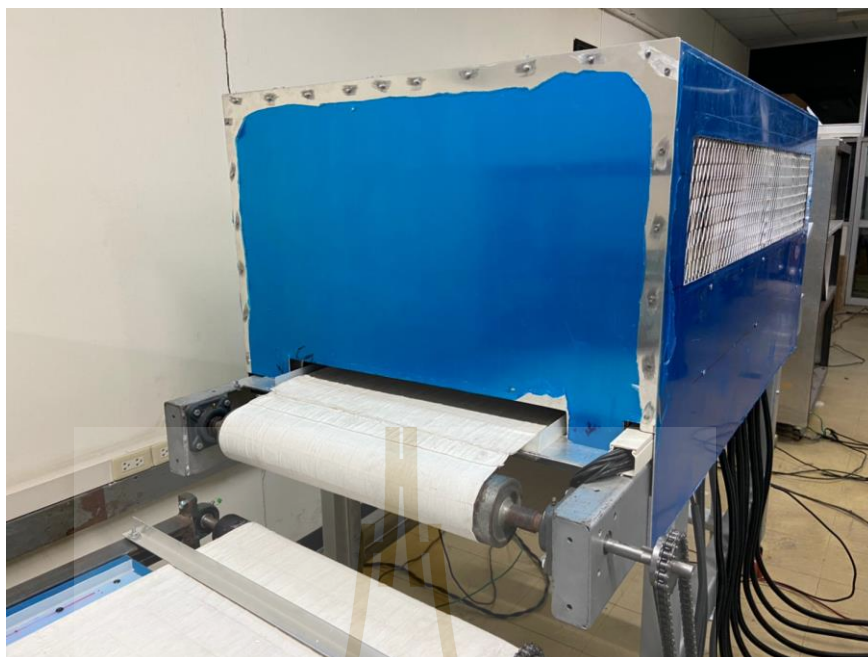


รูปที่ 4.1 เครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (A) ชุดควบคุมการทำงาน (B) ทางเข้าของข้าว (C) ระบบสายพานลำเลียง



รูปที่ 4.2 ทางเข้าของข้าวที่จะทำการทดสอบ





รูปที่ 4.3 ทางออกของข้าวที่จะทำการทดสอบ

#### เงื่อนไขในการทดสอบการลดความชื้นข้าว

เงื่อนไขในการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 4 เงื่อนไข ซึ่งแต่ละเงื่อนไขจะต้องได้รูปแบบความสัมพันธ์การลดความชื้นข้าวที่ดีที่สุด แล้วจึงทำการทดสอบหาเงื่อนไขต่อไป

- เงื่อนไขเวลาในการทดสอบ  
ในเงื่อนไขนี้จะใช้เวลาในการทดสอบคือ 3, 5 และ 7 นาที เพื่อหาระยะเวลาในการลดความชื้นได้มากที่สุด โดยที่คุณภาพข้าวไม่เสียหาย
- เงื่อนไขระยะความสูงของการวางโหลต  
ในเงื่อนไขนี้เมื่อได้ระยะเวลาที่เหมาะสมแล้ว ก็ทำการทดสอบหาระยะความสูงของการวางถาด โดยระยะที่ทำการทดสอบคือ ระยะติดพื้น ระยะที่ 1.5 และ 3 เซนติเมตร เพื่อทดสอบหาระยะความยาวคลื่นที่คลื่นลงมาที่โหลตมากที่สุด
- เงื่อนไขความเร็วลมที่ใช้ในการทดสอบ  
ในเงื่อนไขนี้จะใช้ลมในการเป่าลดความชื้นข้าว ขณะเครื่องทำงาน โดยความเร็วลมที่ใช้ในการทดสอบ 0, 4, 8 และ 12 เมตรต่อวินาที



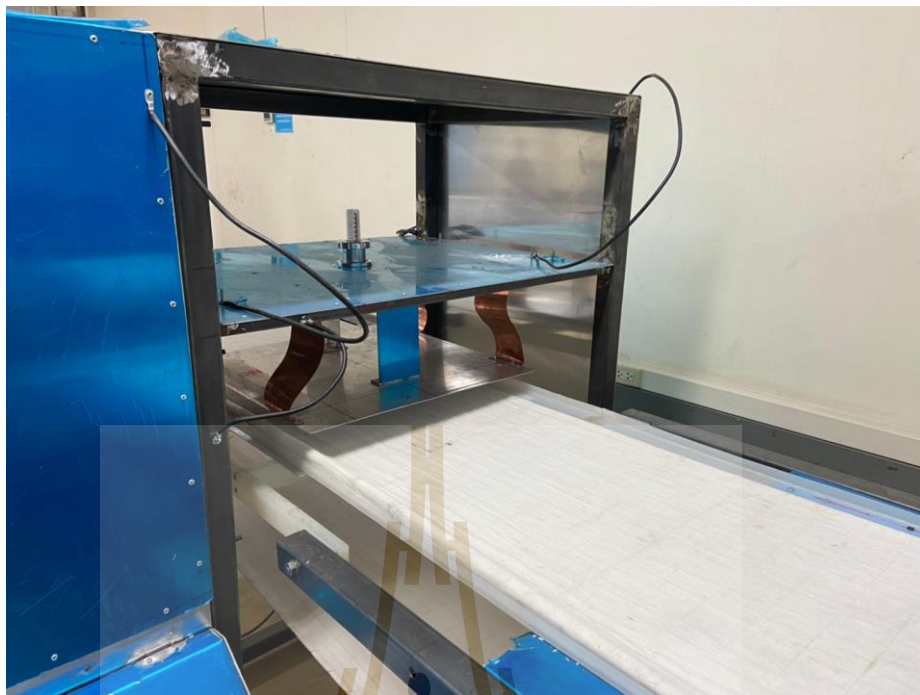
- เงื่อนไขอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ  
เมื่อได้เงื่อนไขที่ดีที่สุดทั้ง 3 เงื่อนไขแล้วเงื่อนไขนี้จะทำการเพิ่มอุณหภูมิของ  
ลมเพื่อการลดความชื้นข้าวจะสามารถลดลงได้อีก โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ  
25, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

#### 4.2.2 วิธีการทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

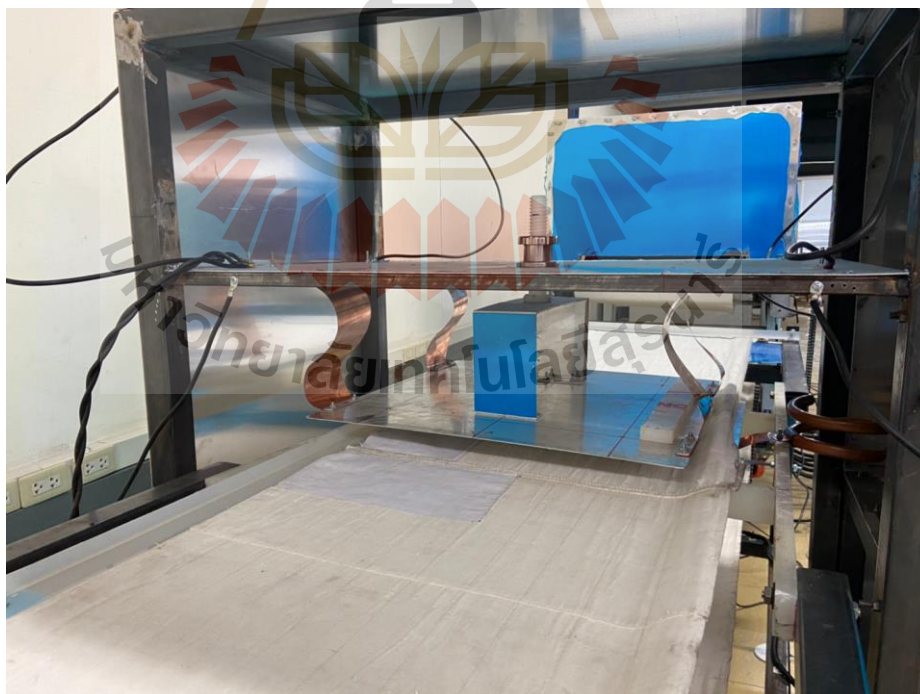
ในการทดสอบการลดความชื้นด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ จะใช้  
ไฟเฟสเดียว 220 โวลต์ โดยกำลังงานที่ใช้ในการทำงานอยู่ที่ 5 กิโลวัตต์ และความถี่ที่ใช้ประมาณ  
32 เมกะเฮิร์ต โดยการเตรียมเครื่องสำหรับทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.4 ถึง 4.6 โดยในรูปที่ 4.4  
เป็นรูปเครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งในส่วนเครื่องนี้จะประกอบไปด้วยส่วนหลัก  
คือ ชุดควบคุมการทำงานทั้งระบบ ชุดสายพานลำเลียง และจุดปล่อยคลื่น ซึ่งจะเป็นแบบแผ่นเพลต  
รูปที่ 4.5 เป็นรูปทางเข้าของข้าวที่จะทำการทดสอบ และรูปที่ 4.6 เป็นรูปทางออกของข้าวที่จะทำ  
การทดสอบ เมื่อทำการทดสอบเสร็จแล้วก็นำข้าวไปทำการเก็บผลพร้อมเก็บตัวอย่างไปส่งกล้อง



รูปที่ 4.4 เครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (A) ชุดควบคุมการทำงาน (B) ระบบสายพาน  
ลำเลียง (C) จุดปล่อยคลื่น



รูปที่ 4.5 ทางเข้าของข้าวที่จะทำการทดสอบ



รูปที่ 4.6 ทางออกของข้าวที่จะทำการทดสอบ

### เงื่อนไขในการทดสอบการลดความชื้นข้าว

เงื่อนไขในการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 2 เงื่อนไข ซึ่งแต่ละเงื่อนไขจะต้องได้รูปแบบความสัมพันธ์ในการลดความชื้นข้าวที่ดีที่สุด แล้วจึงทำการทดสอบหาเงื่อนไขต่อไป

#### ➤ เงื่อนไขเวลาในการทดสอบ

ในเงื่อนไขนี้จะใช้เวลาในการทดสอบคือ 3, 5, 7 และ 9 นาที เพื่อหาระยะเวลาในการลดความชื้นได้มากที่สุด โดยคุณภาพข้าวไม่เสียหาย พร้อมใช้ความเร็วลมขนาด 8 เมตรต่อวินาที เพื่อเป่าช่วยลดความชื้นขณะทำการทดสอบ

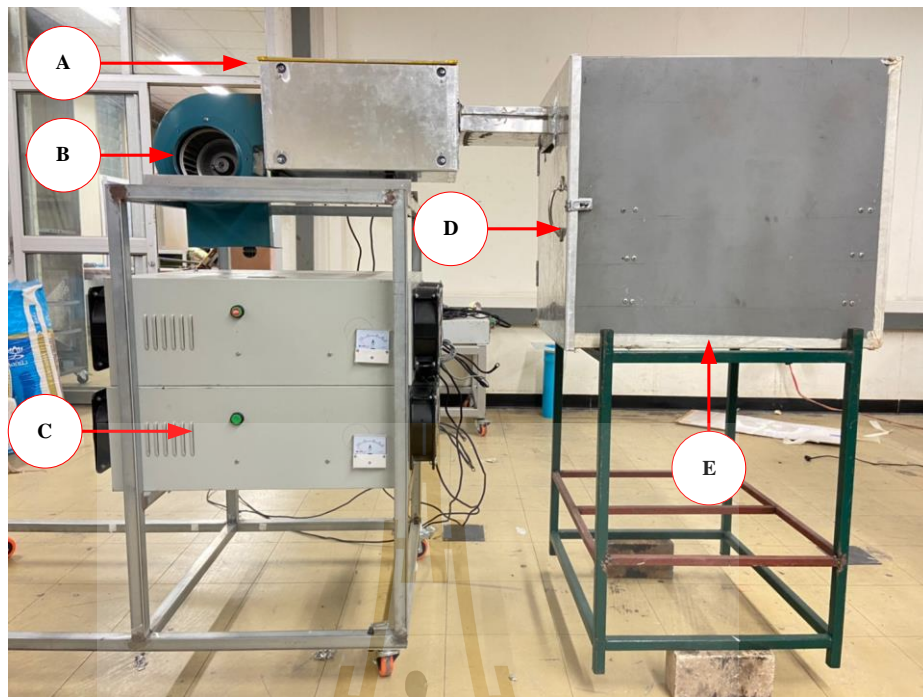
#### ➤ เงื่อนไขอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ

ในเงื่อนไขนี้เมื่อได้ระยะเวลาที่เหมาะสมแล้ว จะทำการเพิ่มอุณหภูมิของลมให้ลมร้อนขึ้น เพื่อช่วยเป่าลดความชื้นข้าว โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

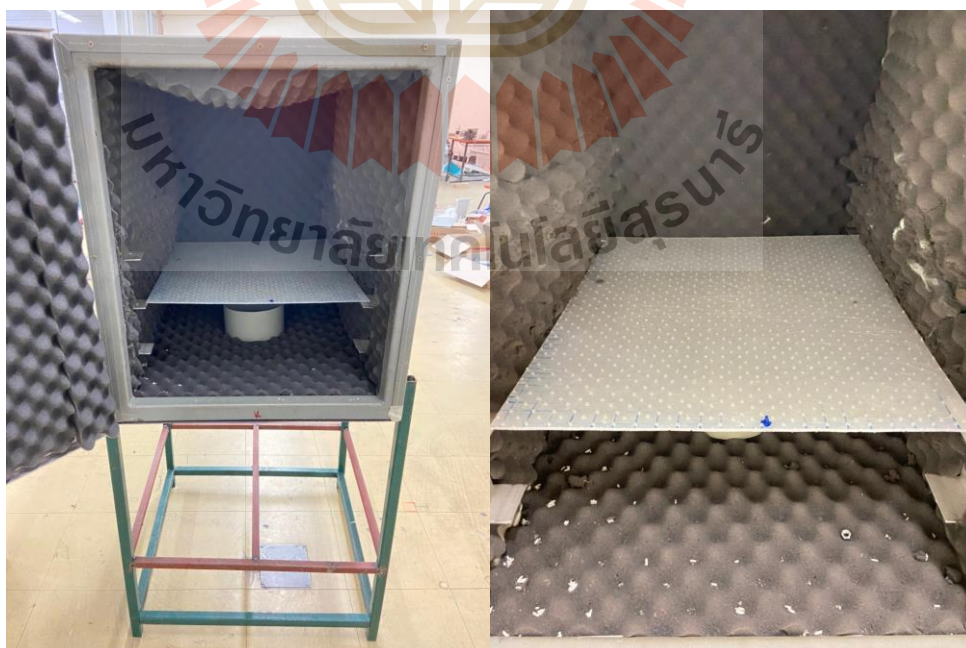
### 4.2.3 วิธีการทดสอบการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

ในการทดสอบการลดความชื้นด้วยการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก จะใช้ไฟเฟสเดียว 220 โวลต์ โดยกำลังงานที่ใช้ในการทำงานอยู่ที่ 5 กิโลวัตต์ โดยการเตรียมเครื่องสำหรับการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 โดยในรูปที่ 4.7 เป็นรูปเครื่อง ซึ่งในส่วนเครื่องนี้จะประกอบไปด้วยส่วนหลักคือ ชุดโหนดการให้ความร้อน โบลเวอร์เป่าโหนด ชุดกำเนิดสัญญาณและควบคุมการทำงานและตู้อบลดความชื้นข้าว รูปที่ 4.8 เป็นรูปภายในตู้อบลดความชื้นด้วยลมร้อน เมื่อทำการทดสอบเสร็จแล้วก็นำข้าวไปทำการเก็บผลพร้อมเก็บตัวอย่างไปส่งกล้อง





รูปที่ 4.7 เครื่องการใช้ความร้อนจากแหล่งพลังงานการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (A) ชุดโหลดการให้ความร้อน (B) โบลเวอร์เป่าโหลด (C) ชุดกำเนิดสัญญาณและควบคุมการทำงาน (D) ตู้อบลดความชื้นข้าว (E) ทางลมร้อนระบายออก



รูปที่ 4.8 ภายในตู้อบลดความชื้นด้วยลมร้อน

### เงื่อนไขในการทดสอบการลดความชื้นข้าว

เงื่อนไขในการทดสอบจะทำการทดสอบที่เงื่อนไขอุณหภูมิภายในตู้อบอยู่ที่ 35, 55 และ 75 องศาเซลเซียส โดยเวลาที่ใช้ในการทดสอบอยู่ที่ 5 นาที

#### 4.2.4 วิธีการทดสอบและเก็บผลการทดสอบ

ในกระบวนการทดสอบใช้ข้าวขาวคัดพิเศษ แฉ่น้ำเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง (ตามข้อกำหนดของการเอาสารหนุออก) ในอัตราส่วน 3:5 ความชื้นข้าวที่ได้หลังจากนำข้าวออกจากน้ำแล้วอยู่ที่ 44 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเป็นข้าวก่อนการทดสอบ ดังรูปที่ 4.9 และ ในแต่ละรูปแบบที่ทดลองข้าวตามการคำนวณในตารางที่ 3.1 วางบนถาดขนาดความกว้าง 50 เซนติเมตร ความยาว 50 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.10 เมื่อทำการทดสอบข้าวในแต่ละรูปแบบแล้วจะทำการเก็บผลการทดสอบโดยจะนำข้าวพักทิ้งไว้ 7 นาที โดยในแต่ละนาทิจะทำการเก็บค่าความชื้นหลังการทดสอบและอุณหภูมิหลังการทดสอบ พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างเพื่อทำการส่งตรวจสอบคุณภาพข้าวหลังการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 – 4.13 ต่อไป



รูปที่ 4.9 ความชื้นข้าวที่ใช้ในการทดสอบ





รูปที่ 4.10 ถาดข้าวที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 4.11 เก็บตัวอย่างผลการทดสอบ





รูปที่ 4.12 ทำการวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิข้าวหลังการทดสอบ

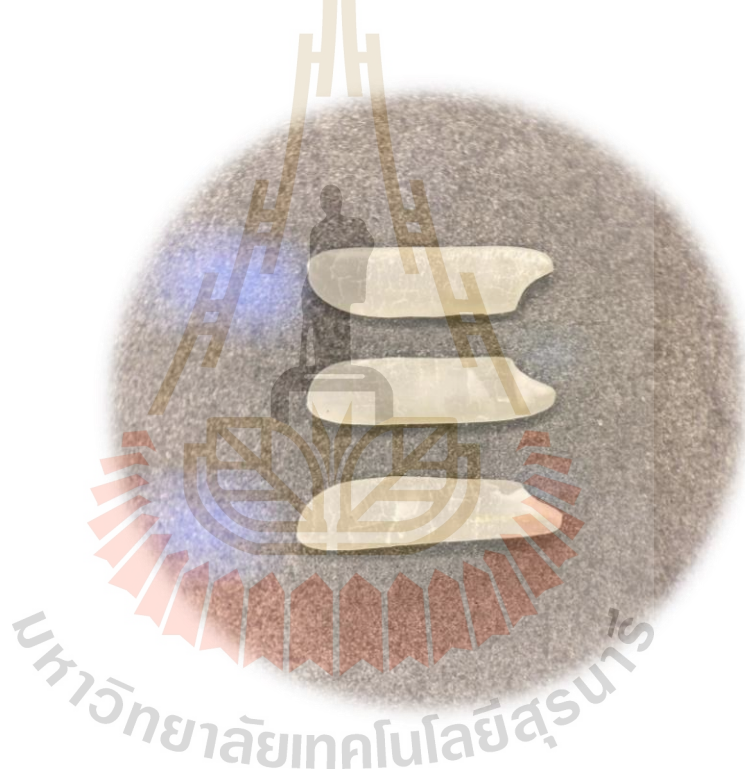


รูปที่ 4.13 ส่องกล้องตรวจสอบคุณภาพข้าวก่อนและหลังการทดสอบ

#### 4.3 ผลการทดสอบการลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด

ในการเก็บผลการทดสอบของการลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งในส่วนนี้จะทำการทดสอบทั้งหมด

4 เงื่อนไข ประกอบไปด้วย เงื่อนไขเวลา ระยะการวาง โหลด ความเร็วลม และอุณหภูมิของลม เพื่อจะได้เงื่อนไขที่ทำงานร่วมกันที่ดีที่สุด และส่วนการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ จะทำการทดสอบ 2 เงื่อนไข ประกอบไปด้วย เงื่อนไขเวลาและอุณหภูมิของลม โดยขนาดความเร็วลมที่ใช้ในการทดสอบจะอ้างอิงจากการทดสอบในเงื่อนไขความเร็วลมของการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ เพื่อจะได้เงื่อนไขที่ทำงานร่วมกันที่ดีที่สุด หลังจากนั้นจะได้เงื่อนไขที่ดีที่สุดของแต่ละส่วนมาทำงานร่วมกัน เพื่อที่จะการลดความชื้นข้าวที่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอีก ในส่วนของอุณหภูมิของลมร้อนของทั้งสองส่วนจะใช้ลมร้อนจากการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก และก่อนการทดสอบทางผู้วิจัยทำการนำข้าวมาส่องตรวจวัดคุณภาพข้าวเพื่อไว้เปรียบเทียบกับข้าวหลังการทดสอบ ซึ่งรายละเอียดผลการทดสอบจะได้อธิบายในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 4.14 คุณภาพข้าวก่อนการทดสอบ

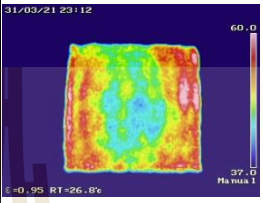

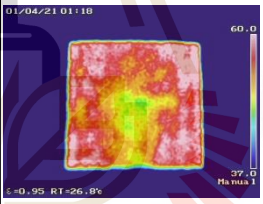

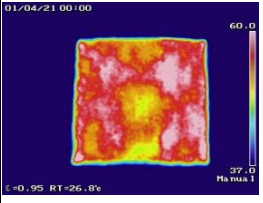

#### 4.3.1 การทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

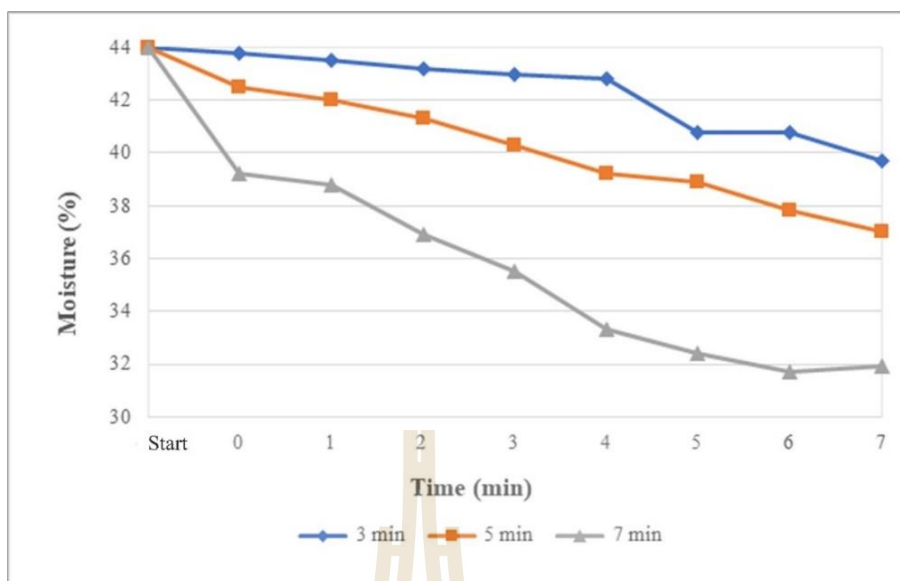
การทดสอบในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็น 4 เงื่อนไข ซึ่งจะประกอบไปด้วย

##### 1) เงื่อนไขเวลาในการทดสอบ

ในการทดสอบของเงื่อนไขเวลา เวลาที่จะใช้ในการทดสอบ 3, 5 และ 7 นาที โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ข้าวที่มีความชื้นเริ่มต้นที่ 44 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิของข้าวที่ 25 องศาเซลเซียส หลังจากทดลองเสร็จแล้วจะทำการเก็บค่าความชื้น ความร้อน หลังการทดสอบ และเก็บตัวอย่างไปตรวจสอบคุณภาพข้าว

ตารางที่ 4.1 ทดลองเงื่อนไขเวลาของการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

เวลาที่ ใช้ (นาที)	เวลาที่ พักข้าว (นาที)	ความชื้น (เปอร์ เซ็นต์)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	รูปอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	รูปคุณภาพข้าวหลัง การทดสอบ
3	0	43.8	47.5		
	1	43.5	45.2		
	2	43.2	43.1		
	3	43.0	41.9		
	4	42.8	39.6		
	5	40.8	38.7		
	6	40.8	36.1		
5	0	42.5	52.8		
	1	42.0	50.4		
	2	41.3	47.1		
	3	40.3	43.4		
	4	39.2	41.2		
	5	38.9	38.9		
	6	37.8	36.2		
7	0	39.2	58.1		
	1	38.8	55.4		
	2	36.9	49.2		
	3	35.5	48.1		
	4	33.3	45.2		
	5	32.4	42.1		
	6	31.7	39.2		
	7	31.9	37.5		



รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการทดสอบกับความชื้นของข้าวด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยที่ Start คือ ความชื้นข้าวเริ่มต้น และ 0 – 7 คือ เวลาที่ใช้ในการวัดผลหลังจากข้าวผ่านการทดสอบแล้ว

จากผลการทดสอบเงื่อนไขเวลาในการทดสอบลดความชื้นข้าวจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่าที่เวลา 3 นาที คลื่นมีการกระจายตัวที่บริเวณขอบ คลื่นไม่กระจายตัวมาที่บริเวณตรงกลางโหลดไดอิเล็กตริก ทำให้เกิดความร้อนไม่ทั่วโหลดไดอิเล็กตริก ส่งผลให้การลดความชื้นข้าวเมื่อพักข้าวไว้ 7 นาที ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นได้เพียง 4.3 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 5 นาที คลื่นมีการกระจายตัวทั่วโหลดไดอิเล็กตริก ส่งผลให้ลดความชื้นได้ถึง 7 เปอร์เซ็นต์ โดยที่คุณภาพข้าวยังไม่เสียหาย เมื่อเทียบกับข้าวก่อนการทดสอบ และที่เวลา 7 นาที คลื่นมีการกระจายตัวทั่วโหลด และมีความเข้มของสนามไฟฟ้ามากเกินไป ถึงความชื้นจะลดลงมากถึง 12.1 เปอร์เซ็นต์ แต่ทำให้ข้าวเกิดความเสียหาย ข้าวแตกหัก ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมที่จะใช้ในการทดสอบ ทางผู้วิจัยจะใช้เวลาที่ 5 นาที เพราะที่ 3 นาทีเป็นเวลาที่น้อยไป ซึ่งยังไม่เห็นที่แตกต่าง ส่วนที่ 7 นาทีเป็นเวลาที่นานไป และคุณภาพข้าวเกิดการเสียหาย

## 2) เงื่อนไขระยะความสูงของการวางโหลด

ในการทดสอบของเงื่อนไขระยะความสูงของการวางโหลดไดอิเล็กตริก ระยะที่จะใช้ในการทดสอบที่ระยะติดพื้น ระยะที่ 1.5 และ 3 เซนติเมตร ซึ่งจากการคำนวณตามความยาวคลื่นที่ระยะติดพื้น ซึ่งเป็นระยะที่ความยาวคลื่นเท่ากับ  $8\lambda/4$  ซึ่งเป็นระยะที่โหลดไดอิเล็กตริกได้รับพลังงานมากที่สุด ตามผลการจำลองในบทที่ 3 และทางผู้วิจัยต้องการปรับระยะเพื่อดูความยาวคลื่นและช่องการปล่อยลมเพื่อระบายความชื้นออกจากโหลดไดอิเล็กตริก โดยทำการปรับระยะไปที่

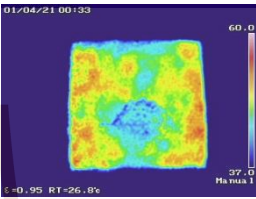

3 เซนติเมตร ซึ่งความยาวคลื่นเท่ากับ  $7\lambda/4$  ซึ่งเป็นระยะที่ได้รับพลังงานน้อยกว่า ตามผลการจำลองในบทที่ 3 เช่นกัน และเนื่องจากที่ระยะติดพื้นกับระยะที่ 3 เซนติเมตร เป็นระยะที่ห่างกัน ดังนั้นทางผู้วิจัยจะทำการทดสอบที่ระยะ 1.5 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระยะที่อยู่ระหว่างสองความยาวคลื่นนี้ โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ข้าวที่มีความชื้นเริ่มต้นที่ 44 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิของข้าวที่ 25 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการทดสอบ 5 นาที หลังจากทดลองเสร็จแล้วจะทำการเก็บค่าความชื้น ความร้อน หลังการทดสอบ และเก็บตัวอย่างไปตรวจสอบคุณภาพข้าว

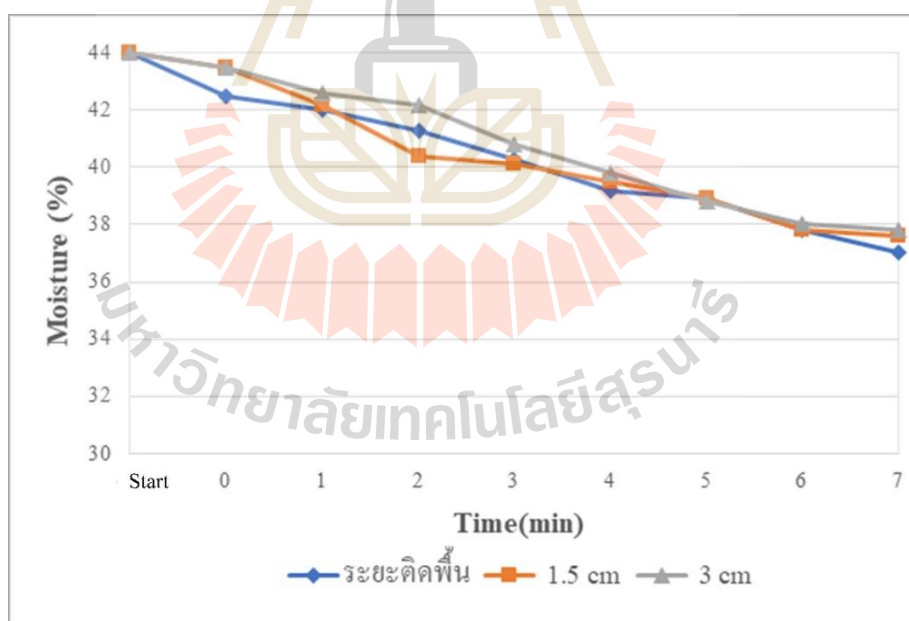
ตารางที่ 4.2 ทดลองเงื่อนไขระยะความสูงของการวางโหลคของการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ระยะที่ใช้ (เซนติเมตร)	เวลาที่พักข้าว (นาที)	ความชื้น (เปอร์เซ็นต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิหลังการทดสอบ (องศาเซลเซียส)	คุณภาพข้าวหลังการทดสอบ
ระยะติดพื้น	0	42.5	52.8		
	1	42.0	50.4		
	2	41.3	47.1		
	3	40.3	43.4		
	4	39.2	41.2		
	5	38.9	38.9		
	6	37.8	36.2		
	7	37.0	35.5		
1.5	0	43.5	52.1		
	1	42.2	48.3		
	2	40.4	46.2		
	3	40.1	44.3		
	4	39.5	40.4		
	5	38.9	38.4		
	6	37.8	36.9		
	7	37.6	35.2		



ตารางที่ 4.2 ทดลองเงื่อนไขระยะความสูงของการวางโหลของการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (ต่อ)

ระยะที่ใช้ (เซนติเมตร)	เวลาที่ พักข้าว (นาที)	ความชื้น (เปอร์เซ็นต์)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	อุณหภูมิหลังการ ทดสอบ (องศาเซลเซียส)	คุณภาพข้าวหลัง การทดสอบ
3	0	43.5	48.1		
	1	42.6	44.9		
	2	42.2	42.2		
	3	40.8	40.2		
	4	39.8	39.1		
	5	38.8	35.9		
	6	38.0	34.3		
	7	37.8	33.9		



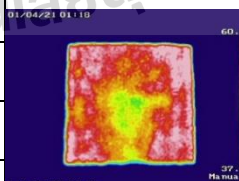

รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบระยะความสูงของการวางโหลที่ใช้ในการทดสอบกับความชื้นของข้าวด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยที่ Start คือ ความชื้นข้าวเริ่มต้น และ 0-7 คือ เวลาที่ใช้ในการวัดผลหลังจากข้าวผ่านการทดสอบแล้ว

จากผลการทดสอบเงื่อนไขระยะเวลาความสูงของการวางโหลดไดอิเล็กตริก ซึ่งใช้เวลา 5 นาที ในการทดสอบ พบว่าที่ระยะเวลาความสูงของโหลดไดอิเล็กตริกที่ระยะติดพื้น คลื่นมีการกระจายตัวทั่วโหลดไดอิเล็กตริก ทำให้สามารถลดความชื้นจากความชื้นเริ่มต้น 7 เปอร์เซ็นต์ โดยคุณภาพข้าวยังไม่เสียหาย ที่ระยะ 1.5 เซนติเมตรคลื่นมีการกระจายตัวทั่วบริเวณเช่นกัน แต่ความชื้นลดลงน้อยกว่าอยู่ 0.6 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ระยะ 3 เซนติเมตร ความเข้มของสนามไฟฟ้าลงมาถึงโหลดไดอิเล็กตริกน้อย และทำให้เกิดการสูญเสียกำลังงานไป ส่งผลให้ความชื้นลดลงได้เพียง 6.2 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นระยะที่เหมาะสมที่จะใช้ในการทดสอบต่อไปคือระยะติดพื้น ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปตามการจำลองในบทที่ 3

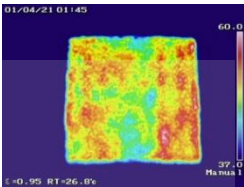


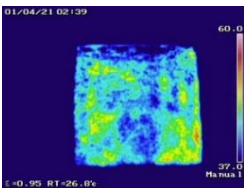

### 3) เงื่อนไขความเร็วมที่ใช้ในการทดสอบ

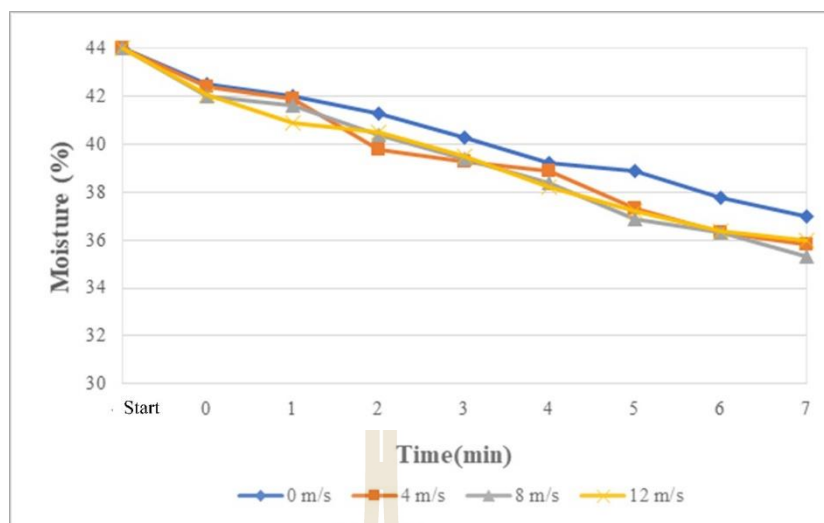
ในการทดสอบของเงื่อนไขความเร็วม จะใช้เวลาที่ 5 นาที ที่ระยะการวางโหลดไดอิเล็กตริกที่ระยะ 0 เซนติเมตร และความเร็วมที่จะใช้ในการทดสอบ 0, 4, 8 และ 12 เมตรต่อวินาที โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ข้าวที่มีความชื้นเริ่มต้นที่ 44 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิของข้าวที่ 25 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการทดสอบ 5 นาที หลังจากทดลองเสร็จแล้วจะทำการเก็บค่าความชื้น ความร้อน หลังการทดสอบ และเก็บตัวอย่างไปตรวจสอบคุณภาพข้าว

ตารางที่ 4.3 ทดลองเงื่อนไขความเร็วมของการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ความเร็วมที่ใช้ (เมตร/วินาที)	เวลาที่ พักข้าว (นาที)	ความชื้น (เปอร์ เซ็นต์)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	อุณหภูมิหลังการ ทดสอบ (องศาเซลเซียส)	คุณภาพข้าวหลัง การทดสอบ
0	0	42.5	52.8		
	1	42.0	50.4		
	2	41.3	47.1		
	3	40.3	43.4		
	4	39.2	41.2		
	5	38.9	38.9		
	6	37.8	36.2		
	7	37.0	35.5		

ตารางที่ 4.3 ทดลองเงื่อนไขความเร็วลมของการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (ต่อ)

ความเร็วลมที่ใช้ (เมตร/วินาที)	เวลาที่ พักข้าว (นาที)	ความชื้น (เปอร์ เซ็นต์)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	อุณหภูมิหลังการ ทดสอบ (องศาเซลเซียส)	คุณภาพข้าวหลัง การทดสอบ
4	0	42.4	51.9		
	1	41.9	48.7		
	2	39.8	46.2		
	3	39.3	44.1		
	4	38.9	39.4		
	5	37.3	37.1		
	6	36.3	35.7		
	7	35.8	35.2		
8	0	42.0	48.1		
	1	41.6	45.2		
	2	40.4	44.3		
	3	39.4	42.2		
	4	38.4	39.4		
	5	36.9	37.2		
	6	36.3	35.1		
	7	35.3	34.9		
12	0	42.1	8		
	1	40.9	44.2		
	2	40.5	42.9		
	3	39.5	41.2		
	4	38.2	38.4		
	5	37.2	37.2		
	6	36.4	36.8		
	7	36.0	35.4		



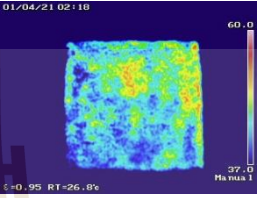
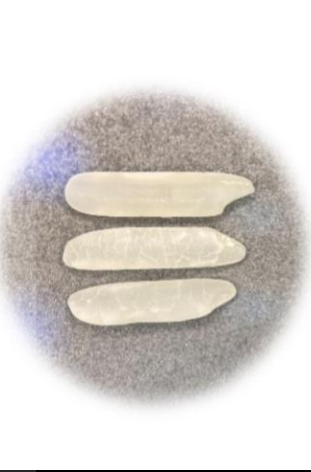
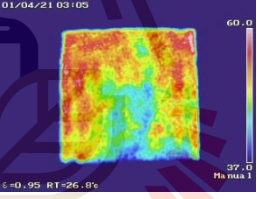
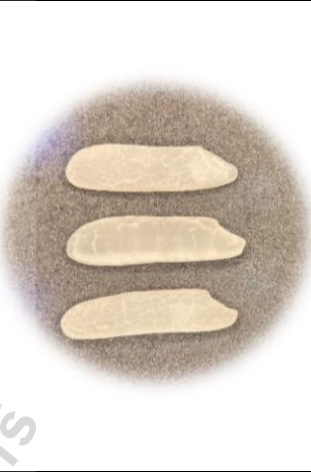
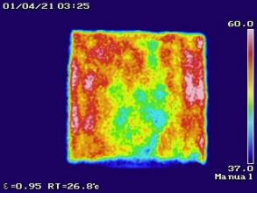

รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบความเร็วลมของการวางโหลดที่ใช้ในการทดสอบกับความชื้นของข้าว ด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยที่ Start คือ ความชื้นข้าวเริ่มต้น และ 0 – 7 คือ เวลาที่ใช้ในการวัดผลหลังจากข้าวผ่านการทดสอบแล้ว

จากผลการทดสอบเงื่อนไขความเร็วลม ในการทดสอบลดความชื้นข้าวจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่าที่ความเร็วลม 0 เมตรต่อวินาที (ไม่มีลม) ความชื้นลดได้ถึง 7 เปอร์เซ็นต์ การแพร่กระจายของคลื่นทั่วบริเวณโหลดไดอิเล็กตริก ที่ความเร็วลม 4 เมตรต่อวินาที เมื่อมีลมช่วยเป่าลดความชื้น จะเห็นได้ว่าความชื้นลดลงถึง 8.2 เปอร์เซ็นต์ การกระจายตัวของคลื่นที่ทั่วบริเวณแต่ความร้อนที่ผิวโหลดไดอิเล็กตริกเริ่มร้อนน้อยลง เพราะลมช่วยเป่าระบายความร้อนที่ความเร็วลม 8 เมตรต่อวินาที สามารถความชื้นได้ถึง 8.7 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งโหลดไดอิเล็กตริกเริ่มเย็นขึ้นเพราะลมที่แรงขึ้น จึงทำให้การลดความชื้นที่อยู่ในข้าวได้มากขึ้น และที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที ความชื้นที่ลดได้ 8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นลมที่แรงมากไป ส่งผลให้ความร้อนที่เกิดจากคลื่นบนโหลดไดอิเล็กตริกร้อนไม่ทัน จึงทำให้โหลดไดอิเล็กตริกเย็นก่อน ซึ่งในการทดสอบของเงื่อนไขนี้คุณภาพของข้าว ยังไม่เสียหายเมื่อเปรียบเทียบกับคุณภาพข้าวก่อนการทดสอบ

#### 4) เงื่อนไขอุณหภูมิลมที่ใช้ในการทดสอบ


ในการทดสอบของเงื่อนไขอุณหภูมิลม ขนาดลมที่ใช้ 8 เมตรต่อวินาที และจะทำการทดสอบที่อุณหภูมิของลมที่ 25, 35, 45 และ 55 องศาเซียส เพื่อทดสอบดูผลของการลดความชื้นด้วยการทำงานร่วมกันของลมร้อนและการแพร่กระจายของคลื่น โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ข้าวที่มีความชื้นเริ่มต้นที่ 44 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิของข้าวที่ 25 องศาเซียส และเวลาที่ใช้ในการทดสอบ 5 นาที หลังจากทดลองเสร็จแล้วจะทำการเก็บค่าความชื้น ความร้อน หลังการทดสอบ และเก็บตัวอย่างไปตรวจสอบดูคุณภาพข้าว

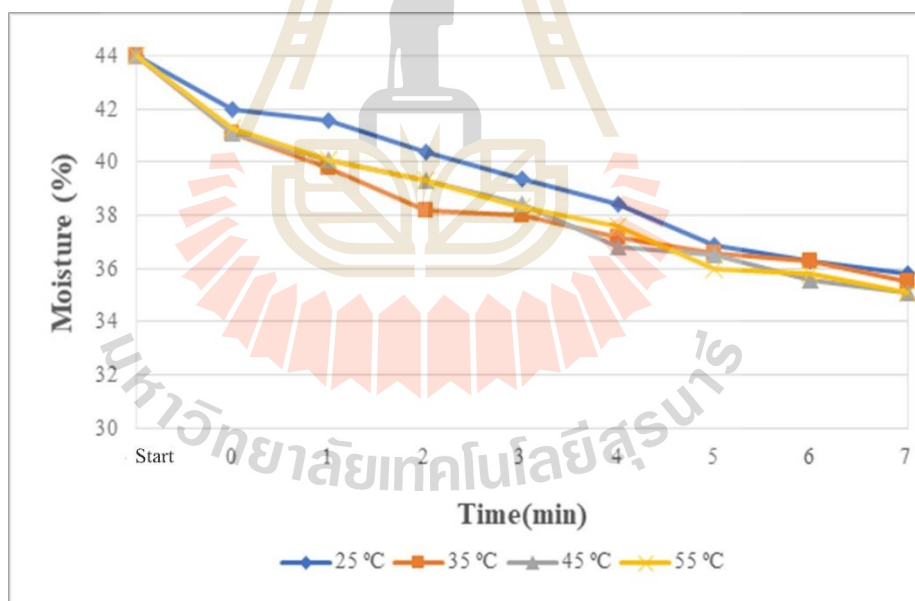
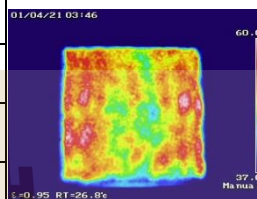
ตารางที่ 4.4 ทดลองเงื่อนไขอุณหภูมิของลมของการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

อุณหภูมิ ของลมที่ใช้ (เซนติเมตร)	เวลาที่ พักข้าว (นาที)	ความชื้น (เปอร์ เซ็นต์)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	อุณหภูมิหลังการ ทดสอบ (องศาเซลเซียส)	คุณภาพข้าวหลัง การทดสอบ
25	0	42.0	48.1		
	1	41.6	45.2		
	2	40.4	44.3		
	3	39.4	42.2		
	4	38.4	39.4		
	5	36.9	37.2		
	6	36.3	35.1		
35	0	41.1	50.2		
	1	39.8	47.4		
	2	38.2	45.7		
	3	38.0	44.1		
	4	37.2	41.2		
	5	36.6	39.1		
	6	36.3	37.9		
45	0	41.1	51.2		
	1	40.1	48.9		
	2	39.3	44.5		
	3	38.4	42.1		
	4	36.8	42.0		
	5	36.5	41.9		
	6	35.6	38.9		
	7	35.1	37.2		



ตารางที่ 4.4 ทดลองเงื่อนไขอุณหภูมิของลมของการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (ต่อ)

อุณหภูมิของลมที่ใช้ (เซนติเมตร)	เวลาที่พักข้าว (นาที)	ความชื้น (เปอร์เซ็นต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิลังการทดสอบ (องศาเซลเซียส)	คุณภาพข้าวหลังการทดสอบ
55	0	41.3	54.1		
	1	40.1	50.2		
	2	39.3	47.6		
	3	38.3	44.3		
	4	37.6	43.2		
	5	36.0	42.4		
	6	35.8	40.9		
	7	35.1	39.2		



รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของลมที่ใช้ในการทดสอบกับความชื้นของข้าวด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยที่ Start คือ ความชื้นข้าวเริ่มต้น และ 0 – 7 คือ เวลาที่ใช้ในการวัดผลหลังจากข้าวผ่านการทดสอบแล้ว

จากผลการทดสอบเงื่อนไขอุณหภูมิของลม พบว่าเมื่ออุณหภูมิของลมสูงขึ้นทำงานร่วมกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ จะทำให้ความชื้นของข้าวสามารถลดได้เยอะขึ้น แต่เมื่อ

อุณหภูมิสูงมากเกินไปจะทำให้ข้าวเกิดความเสียหาย และเกิดการแตกหักได้ จากการวิเคราะห์ความชื้นทั้งหมดของการทดสอบอุณหภูมิของลมพบว่าความสามารถลดได้เยอะกว่าลมทั่วไป แต่เมื่อมาคู่ที่อุณหภูมิของไหลไดอิเล็กตริกหลังการทดสอบพบว่าที่ อุณหภูมิ 45 และ 55 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิที่สูงร่วมความเร็วลมที่แรงด้วย ซึ่งจะส่งผลให้เมล็ดข้าวเกิดการแตกหักได้ ดังนั้นอุณหภูมิของลมที่เหมาะสมกับการช่วยลดความชื้นอยู่ที่ 35 องศาเซลเซียส จากผลการทดสอบของการลดความชื้นด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งมี 4 เงื่อนไข ประกอบไปด้วย เงื่อนไขเวลา ระยะการวางไหลไดอิเล็กตริก ความเร็วลม และอุณหภูมิของลม ผลที่ได้จากการทดสอบจะใช้เวลาที่ 5 นาที ระยะการวางไหลไดอิเล็กตริกที่ระยะติดพื้น ความเร็วลม 8 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิของลมที่ 35 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นรูปแบบความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดในส่วนนี้ ซึ่งสามารถลดความชื้นจาก 44 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 35.5 เปอร์เซ็นต์ โดยที่คุณภาพข้าวไม่เสียหาย

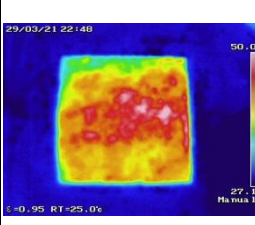

#### 4.3.2 การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

การทดสอบในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็น 2 เงื่อนไข ซึ่งจะประกอบไปด้วย

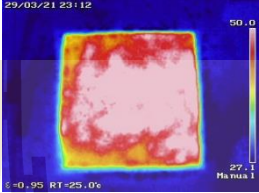

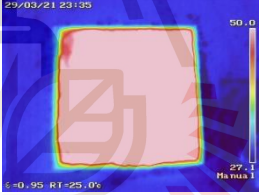

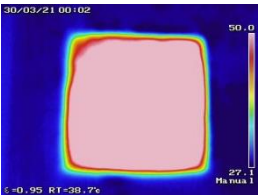

##### 1) เงื่อนไขเวลาในการทดสอบ

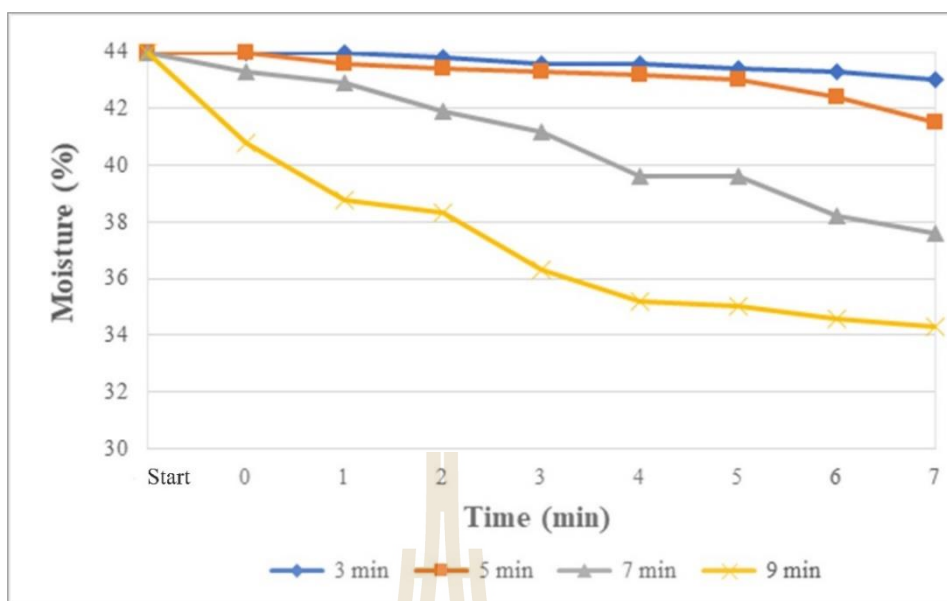
ในการทดสอบของเงื่อนไขเวลาของการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ เวลาที่จะใช้ในการทดสอบ 3, 5, 7 และ 9 นาที โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ข้าวที่มีความชื้นเริ่มต้นที่ 44 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิของข้าวที่ 25 องศาเซลเซียส หลังจากทดลองเสร็จแล้วจะทำการเก็บค่าความชื้น ความร้อน หลังการทดสอบ และเก็บตัวอย่างไปตรวจสอบดูคุณภาพข้าว

ตารางที่ 4.5 ทดลองเงื่อนไขเวลาของการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

เวลาที่ใช้ (นาที)	เวลาที่พักข้าว (นาที)	ความชื้น (เปอร์เซ็นต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	รูปอุณหภูมิหลังการทดสอบ (องศาเซลเซียส)	รูปคุณภาพข้าวหลังการทดสอบ
3	0	44.0	43.6		
	1	43.9	41.4		
	2	43.8	39.9		
	3	43.6	37.8		
	4	43.6	36.4		
	5	43.4	35.2		
	6	43.3	33.7		
	7	43.0	32.5		

ตารางที่ 4.5 ทดลองเงื่อนไขเวลาของการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (ต่อ)

เวลาที่ ใช้ (นาที)	เวลาที่ พักข้าว (นาที)	ความชื้น (เปอร์ เซ็นต์)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	รูปอุณหภูมิหลังการ ทดสอบ (องศาเซลเซียส)	รูปคุณภาพข้าวหลัง การทดสอบ
5	0	44.0	55.1		
	1	43.6	49.9		
	2	43.4	47.4		
	3	43.3	43.7		
	4	43.2	42.3		
	5	43.0	40.2		
	6	42.4	38.8		
7	0	43.3	55.9		
	1	42.9	52.4		
	2	41.9	50.7		
	3	41.2	47.1		
	4	39.6	46.2		
	5	39.6	45.1		
	6	38.2	41.9		
9	0	40.8	60.9		
	1	38.8	55.9		
	2	38.3	53.3		
	3	36.3	48.5		
	4	35.2	48.2		
	5	35.0	46.1		
	6	34.6	45.9		
	7	34.3	43.5		



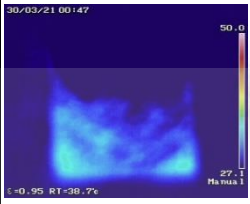

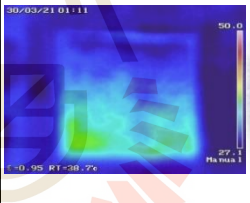

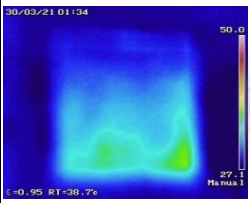

รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการทดสอบกับความชื้นของข้าวด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยที่ Start คือ ความชื้นข้าวเริ่มต้น และ 0 – 7 คือ เวลาที่ใช้ในการวัดผลหลังจากข้าวผ่านการทดสอบแล้ว

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบเงื่อนไขเวลาของการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ พบว่าที่เวลา 3 นาที คลื่นมีการกระจายตัวทั่วบริเวณโหลดไดอิเล็กตริก แต่ความเข้มของสนามไฟฟ้า น้อย จึงทำให้โหลดไดอิเล็กตริกร้อนไม่มาก ส่งผลให้ลดความชื้นได้ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยที่คุณภาพ ยังไม่เสียหาย ที่เวลา 5 นาที คลื่นมีการกระจายตัวทั่วบริเวณโหลดไดอิเล็กตริกและมีความเข้มของ สนามไฟฟ้ามากขึ้น ทำให้โหลดไดอิเล็กตริกร้อนขึ้น จึงทำให้ลดความชื้นได้ 2.5 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ ข้าวไม่ได้เสียหาย ที่เวลา 7 และ 9 นาที คลื่นมีการกระจายตัวทั่วบริเวณโหลดไดอิเล็กตริกเช่นกัน และมีความเข้มของสนามไฟฟ้ามากกว่าเดิม จึงส่งผลให้โหลดไดอิเล็กตริกร้อนมาก ความชื้นลดได้ ถึง 6.4 และ 9.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่เมื่อนำข้าวไปส่องกล้องตรวจสอบคุณภาพข้าวแล้วพบว่า เมล็ดข้าวเกิดความเสียหายดังนั้นเวลาที่ดีที่สุดจะใช้เป็นเวลา 5 นาที ในการทดสอบหาเงื่อนไขต่อไป

## 2) เงื่อนไขอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ

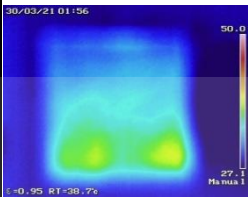

ในการทดสอบของเงื่อนไขอุณหภูมิของลมที่ 25, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส เพื่อทดสอบดูผลของการ ลดความชื้นด้วยการทำงานร่วมกันของลมร้อนและการแพร่กระจายของคลื่น โดยกำหนด ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ข้าวที่มีความชื้นเริ่มต้นที่ 44 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิของข้าวที่ 25 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการทดสอบ 5 นาที หลังจากทดลองเสร็จแล้วจะทำการเก็บ ค่าความชื้น ความร้อน หลังการทดสอบ และเก็บตัวอย่างไปตรวจสอบดูคุณภาพข้าว

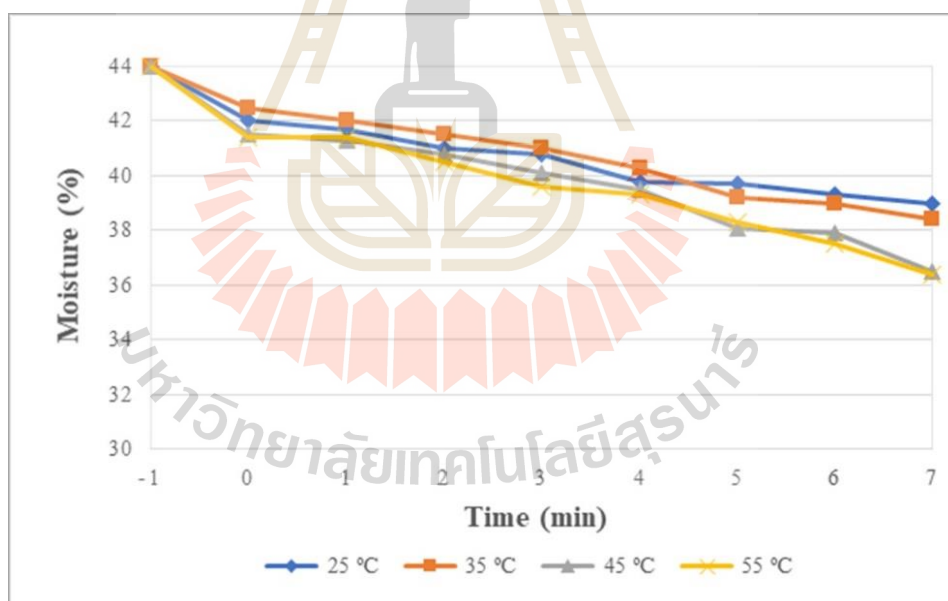
ตารางที่ 4.6 ทดลองเงื่อนไขอุณหภูมิลงของการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

อุณหภูมิ ของลมที่ใช้ (นาท)	เวลาที่ พักข้าว (นาท)	ความชื้น (เปอร์ เซ็นต์)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	รูปอุณหภูมิตั้ง การทดสอบ (องศาเซลเซียส)	รูปคุณภาพข้าวหลัง การทดสอบ
25	0	42.0	34.5		
	1	41.7	29.8		
	2	41.0	27.7		
	3	40.8	27.1		
	4	39.8	26.9		
	5	39.7	26.3		
	6	39.3	25.5		
35	0	42.5	36.1		
	1	42.0	32.7		
	2	41.5	31.1		
	3	41.0	29.9		
	4	40.3	28.5		
	5	39.2	27.8		
	6	39.0	27.1		
45	0	41.5	37.2		
	1	41.3	34.5		
	2	40.8	33.3		
	3	40.1	32.1		
	4	39.5	30.8		
	5	38.1	29.1		
	6	37.9	28.4		
	7	36.5	28.1		



ตารางที่ 4.6 ทดลองเงื่อนไขอุณหภูมิผลของการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (ต่อ)

อุณหภูมิของลมที่ใช้ (นาทีก)	เวลาที่พักข้าว (นาทีก)	ความชื้น (เปอร์เซ็นต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	รูปอุณหภูมิตั้งการทดสอบ (องศาเซลเซียส)	รูปคุณภาพข้าวหลังการทดสอบ
55	0	41.4	37.1		
	1	41.4	32.6		
	2	40.5	31.7		
	3	39.6	31.1		
	4	39.3	30.8		
	5	38.3	29.9		
	6	37.5	29.7		
	7	36.4	29.3		



รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิลมที่ใช้ในการทดสอบกับความชื้นของข้าวด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยที่ Start คือ ความชื้นข้าวเริ่มต้น และ 0 – 7 คือ เวลาที่ใช้ในการวัดผลหลังจากข้าวผ่านการทดสอบแล้ว

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบเงื่อนไขอุณหภูมิลมของการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุนั้น ซึ่งจะเป็นการทดสอบการทำงานร่วมกันระหว่างคลื่นความถี่กับการใช้ลมร้อนในการ

ลดความชื้นข้าว ซึ่งเมื่อโหลไดอิเล็กตริกมีความร้อนด้วยคลื่นและการใช้ลมร้อนช่วยเป่า จะส่งผลให้ความชื้นข้าวลดลงอย่างมาก แต่เมื่อโหลไดอิเล็กตริกร้อนมากเกินไป ซึ่งผลที่ตามมาโหลอาจเกิดความเสียหายได้ จากผลการทดสอบพบว่าที่อุณหภูมิของลม 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิห้อง ความชื้นที่ลดได้ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยที่คุณภาพยังไม่เสียหาย ที่อุณหภูมิของลม 35 องศาเซลเซียส ความร้อนของลมเพิ่มขึ้น ทำให้โหลไดอิเล็กตริกร้อนขึ้นกว่าเดิม ความชื้นที่ลดได้ 5.6 เปอร์เซ็นต์ โดยที่คุณภาพข้าวยังไม่เสียหาย ที่อุณหภูมิของลม 45 และ 55 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิของลมที่ร้อนขึ้นอีก ทำให้โหลไดอิเล็กตริกร้อนขึ้นอีก ความชื้นที่สามารถลดได้ 7.5 และ 7.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นความชื้นที่สามารถได้มากในเดือนนี้ แต่เมื่อนำเมล็ดข้าวไปส่งกองตรวจสอบคุณภาพข้าว ข้าวเกิดความเสียหาย แดกหัก ดังนั้นในการทดสอบนี้จะใช้อุณหภูมิของลมที่เหมาะสมคือ 35 องศาเซลเซียส


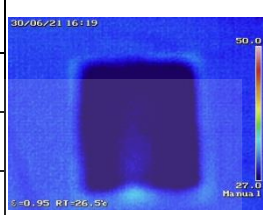

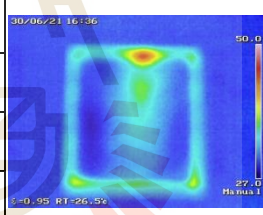

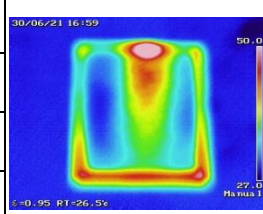
จากผลการทดสอบในส่วนของการลดความชื้นข้าวจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งมี 2 เดือนไข ประกอบไปด้วยเดือนไขเวลา และอุณหภูมิของลมร้อน โดยความเร็วลมจะอยู่ที่ 8 เมตรต่อวินาที ผลที่ได้จากการทดสอบจะใช้เวลาที่ 5 นาที และอุณหภูมิของลมที่ 35 องศาเซลเซียส เช่นกัน ซึ่งเป็นรูปแบบความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดในส่วนนี้ ซึ่งสามารถลดความชื้นจาก 44 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 38.4 เปอร์เซ็นต์ โดยที่คุณภาพข้าวไม่เสียหาย

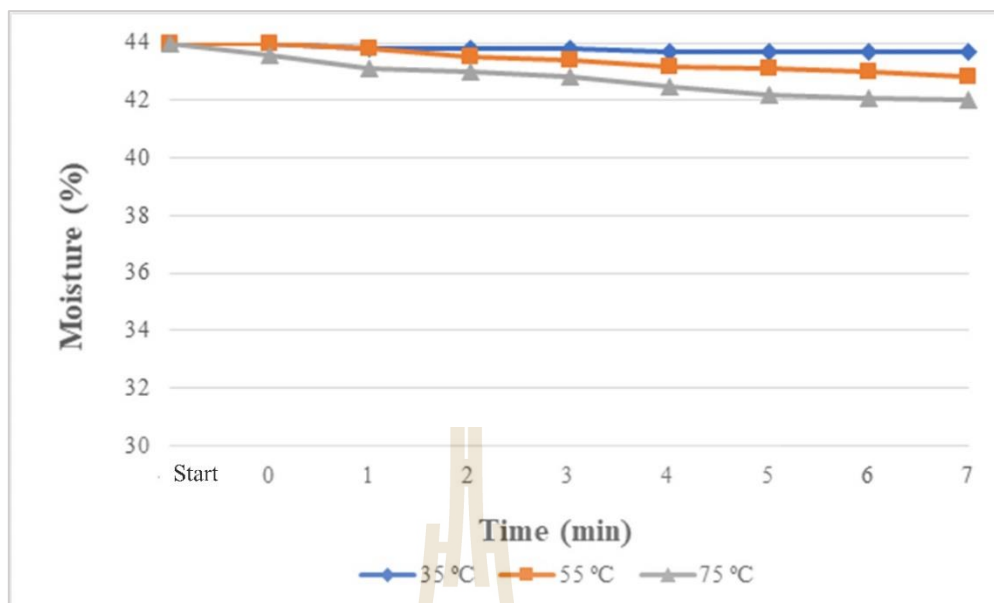
#### 4.3.3 การทดสอบการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

##### สนามแม่เหล็ก

การทดสอบในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบที่เดือนไขอุณหภูมิภายในตู้อบอยู่ที่ 35, 55 และ 75 องศาเซลเซียส โดยเวลาที่ใช้ในการทดสอบอยู่ที่ 5 นาที โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ข้าวมีความชื้นเริ่มต้นที่ 44 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิของข้าวที่ 25 องศาเซลเซียส หลังจากทดลองจะทำการเก็บค่าความชื้น ความร้อน หลังการทดสอบ และเก็บตัวอย่างไปตรวจสอบดูคุณภาพข้าว

ตารางที่ 4.7 ทดลองเงื่อนไขอุณหภูมิภายในตู้อบของการใช้ลมร้อน

อุณหภูมิ ภายใน (องศา เซลเซียส)	เวลาที่ พักข้าว (นาที)	ความชื้น (เปอร์ เซ็นต์)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	รูปอุณหภูมิหลังการ ทดสอบ (องศาเซลเซียส)	รูปคุณภาพข้าวหลัง การทดสอบ
35	0	44.0	31.2		
	1	43.8	27.5		
	2	43.8	27.0		
	3	43.8	26.6		
	4	43.7	26.2		
	5	43.7	26.1		
	6	43.7	26.1		
	7	43.7	26.0		
55	0	44.0	40.2		
	1	43.8	35.2		
	2	43.5	32.2		
	3	43.4	32.1		
	4	43.2	29.7		
	5	43.1	29.5		
	6	43.0	29.5		
	7	42.8	29.2		
75	0	43.6	50.2		
	1	43.1	48.1		
	2	43.0	40.1		
	3	42.8	35.7		
	4	42.5	35.3		
	5	42.2	35.0		
	6	42.1	34.7		
	7	42.0	33.6		



รูปที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของลมร้อนภายในตู้อบที่ใช้ในการทดสอบกับความชื้นของข้าว โดยที่ Start คือ ความชื้นข้าวเริ่มต้น และ 0 – 7 คือ เวลาที่ใช้ในการวัดผลหลังจากข้าวผ่านการทดสอบแล้ว

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบเงื่อนไขอุณหภูมิของลมร้อนภายในตู้อบของการให้ความร้อนด้วยลมร้อน พบว่าเมื่ออุณหภูมิของลมร้อนภายในตู้อบสูงขึ้นจะทำให้ความชื้นลดลง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงมากเกินไปจะทำให้ข้าวเกิดความเสียหาย และเกิดการแตกหักได้ จากการวิเคราะห์ความชื้นทั้งหมดของการทดสอบ ความชื้นของข้าวที่ผ่านการอบแต่ละอุณหภูมิ ความชื้นลดลงน้อยมาก และแต่ละอุณหภูมิ เมื่อนำตัวอย่างข้าวไปส่องวัดตรวจสอบคุณภาพข้าว ข้าวเกิดการแตกหักและเสียหายเป็นอย่างมากด้วย ดังนั้นทางผู้วิจัยจะไม่นำส่วนของการใช้ลมร้อนเป็นส่วนหลักในการลดความชื้น แต่จะนำไปเป็นส่วนของตัวช่วยเสริม ทำงานร่วมกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและคลื่นความถี่วิทยุแทน

#### 4.3.4 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ในส่วนของการลดความชื้นข้าวด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ผลที่ได้จากการทดสอบจะใช้เวลาที่ 5 นาที ระยะเวลาวางโหลดไดโอดีลิกทริกที่ 0 เซนติเมตร ความเร็วลม 8 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิของลมที่ 35 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นรูปแบบความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดในส่วนนี้ ซึ่งสามารถลดความชื้นจาก 44 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 35.5 เปอร์เซ็นต์ โดยที่คุณภาพข้าวไม่เสียหาย ในส่วนของผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ของการลดความชื้นข้าวของการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยความเร็วลมจะใช้ที่ 8 เมตรต่อ

วินาที ผลที่ได้จากการทดสอบจะใช้เวลาที่ 5 นาที และอุณหภูมิของลมที่ 35 องศาเซลเซียสเช่นกัน ซึ่งเป็นรูปแบบความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดในส่วนนี้ ซึ่งสามารถลดความชื้นจาก 44 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 38.4 เปอร์เซ็นต์ โดยที่คุณภาพข้าวไม่เสียหาย และในส่วนของผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ของการลดความชื้นข้าวของการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการให้ความร้อนแบบเหนียวนำสนามแม่เหล็ก โดยในส่วนนี้ไม่เหมาะสมกับการลดความชื้นข้าวที่สูงๆ เพราะจะทำให้ข้าวเกิดการเสียหายและแตกหักได้ ดังนั้นในส่วนนี้จึงควรนำไปเป็นการทำงานร่วมกับระบบอื่นๆ

#### 4.4 ผลการทดสอบการให้ความร้อนแบบไฮบริด


เมื่อทำการทดสอบทั้งสองส่วนเพื่อหารูปแบบความสัมพันธ์การลดความชื้นที่ดีที่สุดได้แล้ว ในขั้นตอนนี้จะทำการนำทั้งสองส่วนมางานร่วมกัน โดยเริ่มที่การลดความชื้นข้าวจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟก่อน แล้วทำการพักข้าวจนกว่าความชื้นที่ลดลงเริ่มคงที่ ความชื้นไม่ลดลงต่อไปแล้ว โดยทำการวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิของข้าวทุกๆ นาที แล้วทำการเก็บตัวอย่าง หลังจากนั้นก็ทำการทดสอบลดความชื้นข้าวจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุต่อ และเก็บค่าเหมือนกัน และเมื่อเสร็จแล้วจะทำการทั้งสองส่วนสลับการทดสอบกัน โดยทำการลดความชื้นจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุก่อน แล้วทำการทดสอบการลดความชื้นข้าวจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟหลัง แล้วนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบดูรูปแบบไหนความชื้นลดได้เยอะกว่า และคุณภาพข้าวไม่เสียหาย

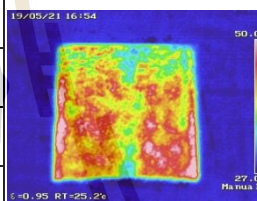
##### 4.4.1 การทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟก่อนและการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุหลัง

ในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยตารางผลการทดสอบ กราฟ และสรุปผลการทดสอบ

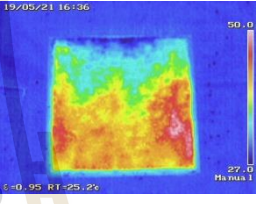



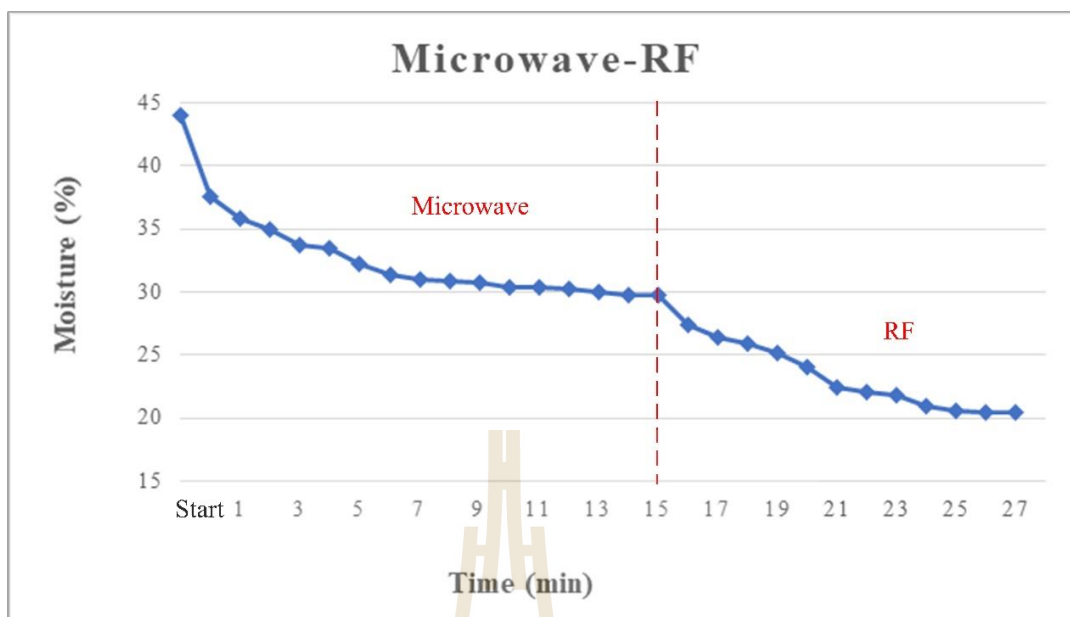
ตารางที่ 4.8 การทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟก่อนและการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุหลัง

รูปแบบในการทดสอบ	เวลาที่พักร้าว (นาที)	ความชื้น (เปอร์เซ็นต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	รูปอุณหภูมิหลังการทดสอบ (องศาเซลเซียส)	รูปคุณภาพข้าวหลังการทดสอบ
MW	0	37.5	50.2		
	1	35.8	44.9		
	2	34.9	44.7		
	3	33.7	44.1		
	4	33.4	40.0		
	5	32.2	39.8		
	6	31.4	36.2		
	7	31.0	34.2		
	8	30.8	33.1		
	9	30.7	32.5		
	10	30.4	32.2		
	11	30.3	31.1		
	12	30.2	30.9		
	13	30.0	29.9		
	14	29.8	29.2		
	15	29.8	29.1		



ตารางที่ 4.8 การทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟก่อนและการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุหลัง(ต่อ)

รูปแบบในการทดสอบ	เวลาที่พักข้าว (นาที)	ความชื้น (เปอร์เซ็นต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	รูปอุณหภูมิหลังการทดสอบ (องศาเซลเซียส)	รูปคุณภาพข้าวหลังการทดสอบ
RF	0	27.4	47.8		
	1	26.4	42.8		
	2	25.9	38.2		
	3	25.1	37.2		
	4	24.0	37.1		
	5	22.4	36.1		
	6	22.0	33.8		
	7	21.8	32.7		
	8	21.0	32.4		
	9	20.6	32.2		
	10	20.5	32.1		
	11	20.4	31.8		




รูปที่ 4.22 กราฟเปรียบเทียบการลดความชื้นจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟก่อนและการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุหลัง โดยที่ Start คือ ความชื้นข้าวเริ่มต้น และ 0 – 7 คือ เวลาที่ใช้ในการวัดผลหลังจากข้าวผ่านการทดสอบแล้ว

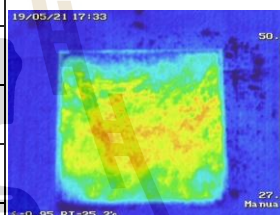
จากผลการทดสอบ จะนำรูปแบบที่ดีที่สุดของแต่ละส่วนมาทำการทดสอบ ความชื้นข้าวก่อนการทดสอบอยู่ที่ 44 เปอร์เซ็นต์เท่าเดิม จากผลการทดสอบในส่วนของ การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ สามารถลดความชื้นได้ 16.6 เปอร์เซ็นต์ เหลือความชื้นที่ 27.4 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพักข้าวไว้ 15 นาที ความชื้นเริ่มคงที่ หลังจากนั้นทำการทดสอบในส่วนของ การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุต่อ สามารถลดความชื้นได้ 7 เปอร์เซ็นต์ เหลือความชื้นที่ 20.4 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพักข้าวไว้ 11 นาที ความชื้นเริ่มคงที่ และความชื้นสุดท้ายที่ได้จากการทดสอบของรูปแบบนี้เหลือที่ 20.4 เปอร์เซ็นต์ และคุณภาพข้าวส่วนใหญ่ยังไม่เสียหาย

#### 4.4.2 การทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุก่อนและการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟหลัง


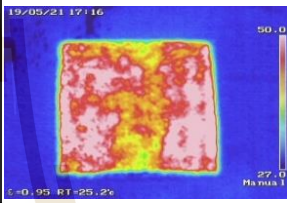
ในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยตารางผลการทดสอบ กราฟ และสรุปผลการทดสอบ

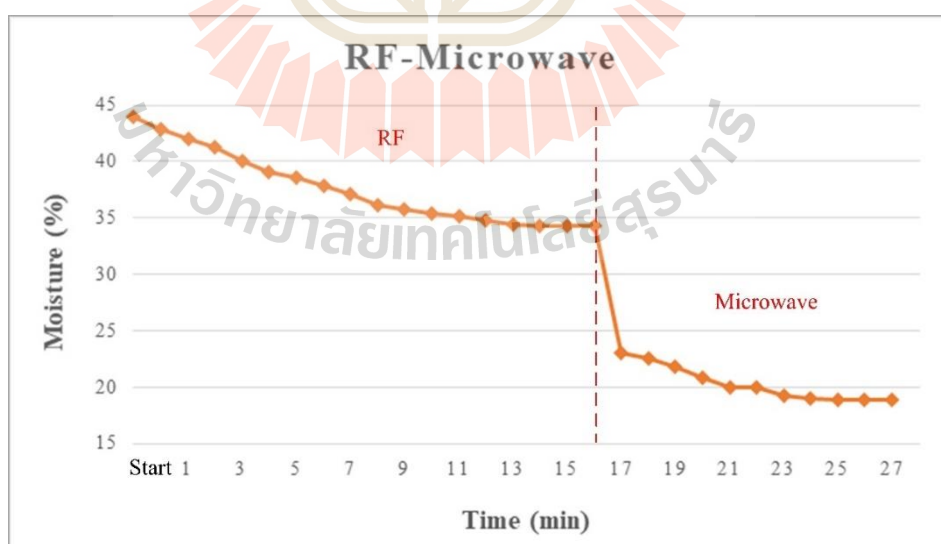
ตารางที่ 4.9 การทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุก่อนและการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟหลัง

รูปแบบในการทดสอบ	เวลาที่พักข้าว (นาที)	ความชื้น (เปอร์เซ็นต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	รูปอุณหภูมิหลังการทดสอบ (องศาเซลเซียส)	รูปคุณภาพข้าวหลังการทดสอบ
RF	0	42.8	53.1		
	1	42.0	47.2		
	2	41.3	44.1		
	3	40.0	40.2		
	4	39.1	39.1		
	5	38.6	37.2		
	6	37.8	36.7		
	7	37.1	36.1		
	8	36.1	36.0		
	9	35.8	35.9		
	10	35.4	34.5		
	11	35.1	34.2		
	12	34.8	34.0		
	13	34.4	33.8		
	14	34.3	33.8		
	15	34.3	32.9		
	16	34.3	30.8		



ตารางที่ 4.9 การทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุก่อนและการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟหลัง(ต่อ)

รูปแบบในการทดสอบ	เวลาที่พักข้าว (นาที)	ความชื้น (เปอร์เซ็นต์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	รูปอุณหภูมิหลังการทดสอบ (องศาเซลเซียส)	รูปคุณภาพข้าวหลังการทดสอบ
MW	0	23.0	50.1		
	1	22.5	45.6		
	2	21.8	42.1		
	3	20.8	40.5		
	4	20.0	38.6		
	5	19.9	37.7		
	6	19.2	37.2		
	7	19.0	36.6		
	8	18.9	34.9		
	9	18.9	34.7		
	10	18.8	34.0		



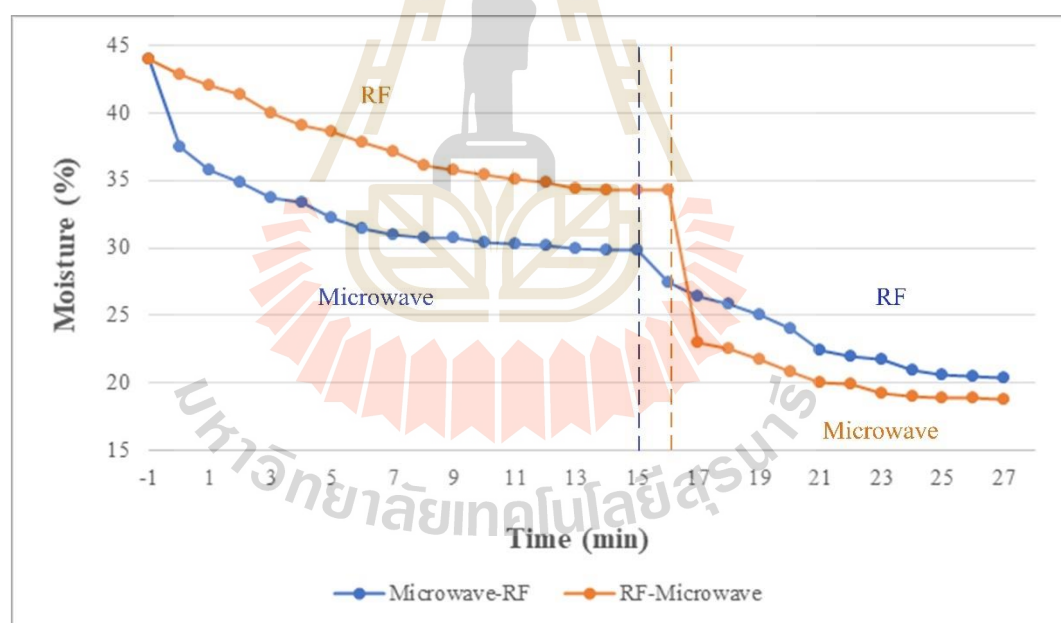
รูปที่ 4.23 กราฟเปรียบเทียบการลดความชื้นจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุก่อนและการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟหลัง โดยที่ Start คือ ความชื้นข้าวเริ่มต้น และ 0 – 7 คือ เวลาที่ใช้ในการวัดผลหลังจากข้าวผ่านการทดสอบแล้ว



จากผลการทดสอบ ในส่วนนี้จะลดความชื้นจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุก่อน และการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟหลัง โดยจะนำรูปแบบที่ดีที่สุดของแต่ละส่วนมาทำการทดสอบ ความชื้นข้าวก่อนการทดสอบอยู่ที่ 44 เปอร์เซ็นต์เท่าเดิม จากผลการทดสอบในส่วนของ การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุสามารถความชื้นได้ 9.6 เปอร์เซ็นต์ เหลือความชื้นที่ 34.4 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพักข้าวไว้ 16 นาที ความชื้นเริ่มคงที่ หลังจากนั้นทำการทดสอบในส่วนของ การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟต่อ สามารถลดความชื้นได้ 15.6 เปอร์เซ็นต์ เหลือความชื้นที่ 18.8 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพักข้าวไว้ 10 นาที ความชื้นเริ่มคงที่ ความชื้นสุดท้ายที่ได้จากการทดสอบรูปแบบนี้ เหลือ 18.8 เปอร์เซ็นต์ และคุณภาพข้าวส่วนใหญ่เกิดรอยร้าว

#### 4.4.3 สรุปผลการทดสอบ

ในส่วนนี้จะนำผลทดสอบของทั้งสองรูปแบบจากหัวข้อ 4.4.1 และ 4.4.2 มาเปรียบเทียบการลดความชื้นของแต่ละรูปแบบ โดยกำลังงานที่ใช้ในการทดสอบทั้งระบบเป็น 10 กิโลวัตต์



รูปที่ 4.24 กราฟเปรียบเทียบการลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด โดยที่ Start คือ ความชื้นข้าวเริ่มต้น และ 0 – 7 คือ เวลาที่ใช้ในการวัดผลหลังจากข้าวผ่านการทดสอบแล้ว

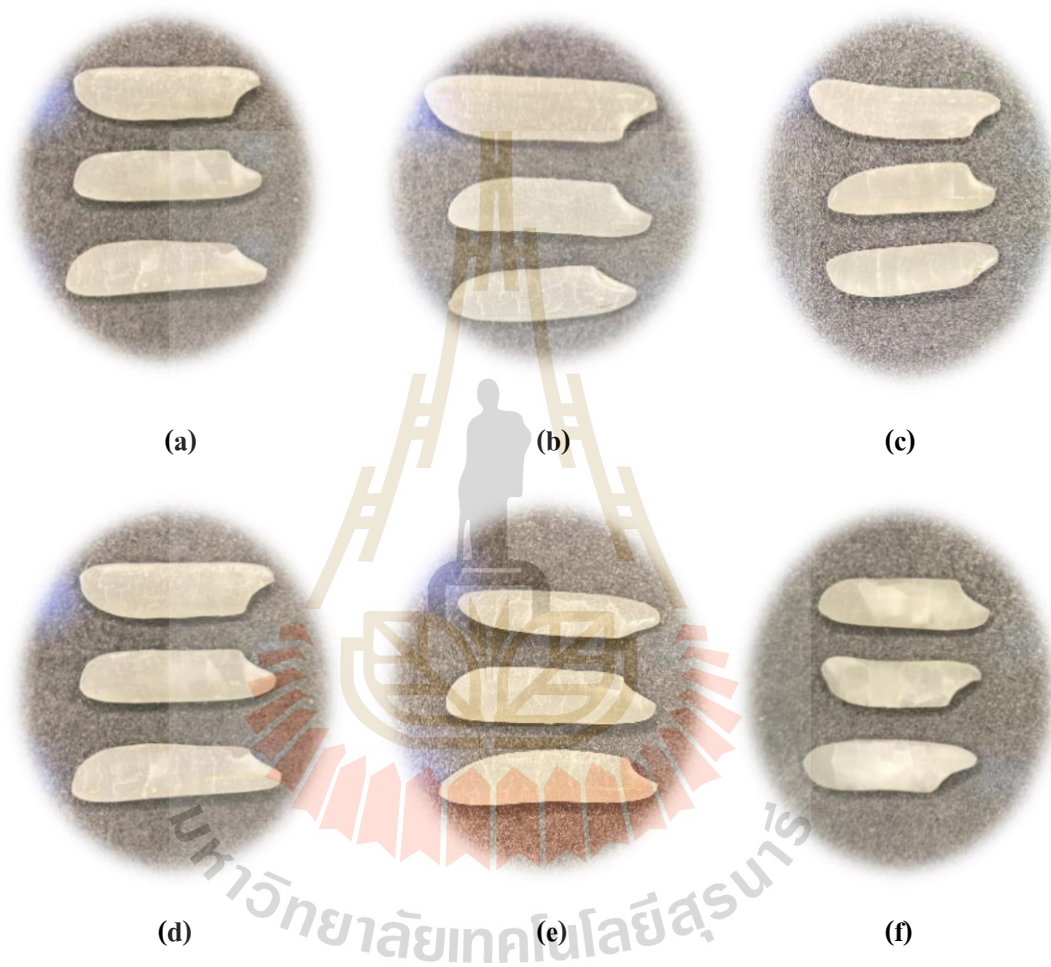
จากรูปที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบการลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด ซึ่งจะมีอยู่ 2 ส่วนหลักๆ ตามที่ได้กล่าวไว้ในเบื้องต้นแล้ว โดยในส่วนนี้จะนำทั้งสองหลักการมาทำงานร่วมกัน สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ประกอบไปด้วยแบบแรกจะเป็นนำโพลดไดอิเล็กตริกไปทดลองกับการให้

ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟก่อน (Microwave) แล้วค่อยนำไปทดลองกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (RF) และรูปแบบที่สองสลับการทำงานก่อนหลังของรูปแบบแรก จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบรูปแบบแรก การลดความชื้นข้าวด้วยคลื่นไมโครเวฟ ความชื้นที่ลดได้ค่อยๆ ลดลง และเมื่อนำไปทดสอบกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุต่อ ความชื้นก็ค่อยๆ ลดลง จนครบเวลาที่ต้องการวัด และผลการทดสอบของรูปแบบที่สอง เริ่มจากการลดความชื้นข้าวด้วยคลื่นความถี่วิทยุก่อน ความชื้นก็ลดลงเรื่อยๆ แต่ลดได้น้อยกว่า แต่เมื่อทำการลดความชื้นจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟต่อ ความชื้นที่อยู่ในข้าวลดลงจากเดิมมากทันที ซึ่งอาจจะทำให้เมล็ดข้าวเกิดความเสียหายได้ จากการทดสอบทั้งสองรูปแบบ รูปแบบแรกสามารถลดความชื้นได้น้อยกว่ารูปแบบที่สองอยู่ 1.6 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อนำตัวอย่างข้าวไปส่องกล้องตรวจวัดคุณภาพข้าวพบว่าข้าวส่วนใหญ่รูปแบบแรกข้าวยังไม่เกิดความเสียหาย ส่วนรูปแบบที่สองข้าวส่วนใหญ่เกิดรอยร้าวและแตกหักมากกว่า



#### 4.5 การเปรียบเทียบผลของคุณภาพข้าว

เมื่อทำการทดสอบการลดความชื้นข้าวและเก็บตัวอย่าง ไปส่องกล้องเพื่อตรวจสอบคุณภาพแล้วในส่วนนี้ จะนำผลการส่องกล้องมาเปรียบเทียบคุณภาพก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบทั้งสองรูปแบบ



รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบคุณภาพข้าวก่อนและหลังการทดสอบ

- โดยที่ (a) ข้าวก่อนการทดสอบ  
 (b) ข้าวหลังการทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟก่อน  
 (c) ข้าวหลังการทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุหลัง  
 (d) ข้าวก่อนการทดสอบ  
 (e) ข้าวหลังการทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุก่อน  
 (f) ข้าวหลังการทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟหลัง

จากผลการนำข้าวไปส่องดูคุณภาพข้าวเพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน พบว่าข้าวก่อนการทดสอบหลังจากที่นำข้าวไปแช่ไว้ 12 ชั่วโมง เมื่อทำการเก็บผลมาส่องกล้อง เม็ดข้าวก็เกิดการเสียหายเล็กน้อย เกิดรอยร้าวในเม็ดข้าวในบางส่วน เมื่อทำการทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ เม็ดข้าวยังมีคุณภาพเหมือนเดิม ยังไม่เกิดรอยร้าวเพิ่มหรือเกิดการแตกหัก และเมื่อทำการทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุต่อ คุณภาพข้าวก็ยังเหมือนเดิม ยังไม่เกิดการแตกหัก

จากผลการนำข้าวไปส่องดูคุณภาพข้าวเพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน พบว่าข้าวก่อนการทดสอบหลังจากที่นำข้าวไปแช่น้ำไว้ 12 ชั่วโมง เมื่อทำการเก็บผลมาส่องกล้อง เม็ดข้าวก็เกิดการเสียหายเล็กน้อย เกิดรอยร้าวในเม็ดข้าวในบางส่วน เมื่อทำการทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ เม็ดข้าวยังมีคุณภาพเหมือนเดิม ยังไม่เกิดรอยร้าวเพิ่มหรือเกิดการแตกหัก แต่เมื่อทำการทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟต่อ คุณภาพข้าวเกิดรอยร้าวมากขึ้น แต่ยังไม่เกิดการแตกหัก

ตารางที่ 4.10 สรุปผลการเปรียบเทียบคุณภาพข้าวก่อนและหลังการทดสอบ

รูปแบบการทดสอบ	ลักษณะคุณภาพข้าว ก่อนการทดสอบ	ลักษณะคุณภาพข้าว หลังการทดสอบ
การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟก่อนและการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุหลัง	มีรอยร้าวจากการแช่น้ำ	มีรอยร้าวจากการแช่น้ำ ข้าวไม่เกิดการสูญเสียโครงสร้างเดิมของแป้ง
การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุก่อนและการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟหลัง	มีรอยร้าวจากการแช่น้ำ	ข้าวเกิดการสูญเสียโครงสร้างเดิมของแป้ง ข้าวแข็ง และเกิดการแตกหักของเมล็ดข้าว อาจเกิดจากข้าวที่ได้รับความร้อนมากเกินไป

จากการวิเคราะห์ผลของตารางที่ 4.10 พบว่ารูปแบบการทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟก่อนและการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุหลัง ลักษณะคุณภาพข้าวก่อนการทดสอบมีรอยร้าวจากการแช่น้ำ และเมื่อดูคุณภาพข้าวหลังการทดสอบ คุณภาพข้าวยังเหมือนเดิมกับก่อนทำการทดสอบและข้าวไม่เกิดการสูญเสียโครงสร้างเดิมของแป้ง และรูปแบบการทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุก่อนและการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

หลัง ลักษณะคุณภาพข้าวก่อนการทดสอบ และลักษณะคุณภาพข้าวหลังการทดสอบ มีรอยร้าวและข้าวเกิดการสูญเสียโครงสร้างเดิมของแป้ง ข้าวแข็ง และเกิดการแตกหักของเมล็ดข้าว อาจเกิดจากข้าวที่ได้รับความร้อนมากเกินไป

#### 4.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการทดสอบเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด โดยใช้หลักการการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ และใช้ลมร้อนจากการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก เป็นตัวช่วยเสริมในการทดสอบ ซึ่งในแต่ละหลักการก็ได้นำเสนอใจที่ดีที่สุดมาทดสอบการทำงานร่วมกันแบบเป็นระบบ เพื่อที่ความชื้นจะสามารถลดได้มากขึ้น จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบจึงสรุปได้ว่ารูปแบบการลดความชื้นด้วยคลื่นไมโครเวฟก่อนแล้วค่อยนำไปทดลองกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ เพราะเมื่อส่องกล้องตรวจสอบดูคุณภาพข้าว เกิดความเสียหายน้อยกว่า





## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

งานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ ออกแบบและสร้างเครื่องลดความชื้นแบบไฮบริด ด้วยหลักการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและคลื่นความถี่วิทยุ ร่วมกับแหล่งพลังงานความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก สำหรับการลดความชื้นข้าวผ่านการกำจัดสารหนูออก โดยจะนำเทคโนโลยีต่างๆ มาทำงานร่วมกันเป็นการลดความชื้นแบบไฮบริด ประกอบด้วยกระบวนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและคลื่นความถี่วิทยุ และใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเป็นพลังงานร่วมของทั้งสองกระบวนการ โดยความชื้นที่เกิดจากการกำจัดสารหนูออกแล้วนั้นจะมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 44 เปอร์เซ็นต์ ผู้วิจัยต้องการออกแบบระบบให้สามารถลดความชื้นเหลือประมาณ 24 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากปัจจุบันมีเทคโนโลยีการลดความชื้นจาก 24 เปอร์เซ็นต์ โดยประมาณและคงเหลือ 14 เปอร์เซ็นต์ ตามมาตรฐานอยู่แล้ว เช่น การลดความชื้นด้วยหลักการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาถึงการลดความชื้นข้าวที่มีความชื้นสูงและตรวจสอบคุณภาพของข้าวที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุรวมกับการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการให้ความร้อนแบบการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก โดยจะทำการออกแบบระบบลดความชื้นข้าวทั้ง 3 ระบบแล้วจะทำให้ความชื้นเหลือที่ 24 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแต่ละระบบจะมีเงื่อนไขต่างๆ เพื่อหารูปแบบความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด โดยที่ระบบแรกการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ผลที่ได้จากการทดสอบจะใช้เวลาที่ 5 นาที ระยะการวางไหลดโคอิเล็กตริกที่ระยะติดพื้น ความเร็วลม 8 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิของลมที่ 35 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นรูปแบบความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดในส่วนนี้ ซึ่งสามารถลดความชื้นจาก 44 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 35.5 เปอร์เซ็นต์ โดยที่คุณภาพข้าวไม่เสียหาย ระบบที่สองการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ จากผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ของการลดความชื้นข้าว โดยความเร็วลมจะใช้ที่ 8 เมตรต่อวินาที ผลที่ได้จากการทดสอบจะใช้เวลาที่ 5 นาที และอุณหภูมิของลมที่ 35 องศาเซลเซียสเช่นกัน ซึ่งเป็นรูปแบบความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดในส่วนนี้ ซึ่งสามารถลดความชื้นจาก 44 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 38.4 เปอร์เซ็นต์ โดยที่คุณภาพข้าวไม่เสียหาย โดยทั้งสองกระบวนการนี้จะใช้ระบบที่สามเป็นการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำทำงานร่วม จากการหาความสัมพันธ์ต่างๆแล้วนำไปสู่การพิจารณารูปแบบการทดสอบ 2 รูปแบบคือ (1) การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

และต่อด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (2) การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุและต่อด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่าการทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ก่อนและต่อด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ สามารถทำให้ความชื้นเหลือที่ 20.4 เปอร์เซ็นต์ จากความชื้นซ้ำก่อนการทดสอบอยู่ที่ 44 เปอร์เซ็นต์และคุณภาพข้าวยังเหมือนเดิมกับก่อนทำการทดสอบ โดยที่ข้าวไม่เกิดการสูญเสียโครงสร้างเดิมของแป้ง และการทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุและต่อด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถทำให้ความชื้นเหลือที่ 18.8 เปอร์เซ็นต์ซึ่งจะลดความชื้นได้มากกว่ารูปแบบแรก แต่คุณภาพข้าวเกิดความเสียหาย เกิดรอยร้าว แตกหัก ซึ่งจะทำให้ข้าวเกิดการสูญเสียโครงสร้างเดิมของแป้ง โดยรูปแบบการทดสอบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการลดความชื้นกับวัตถุดิบชนิดอื่นๆ ที่เป็นแป้งต่อไปได้อีกด้วย

## 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

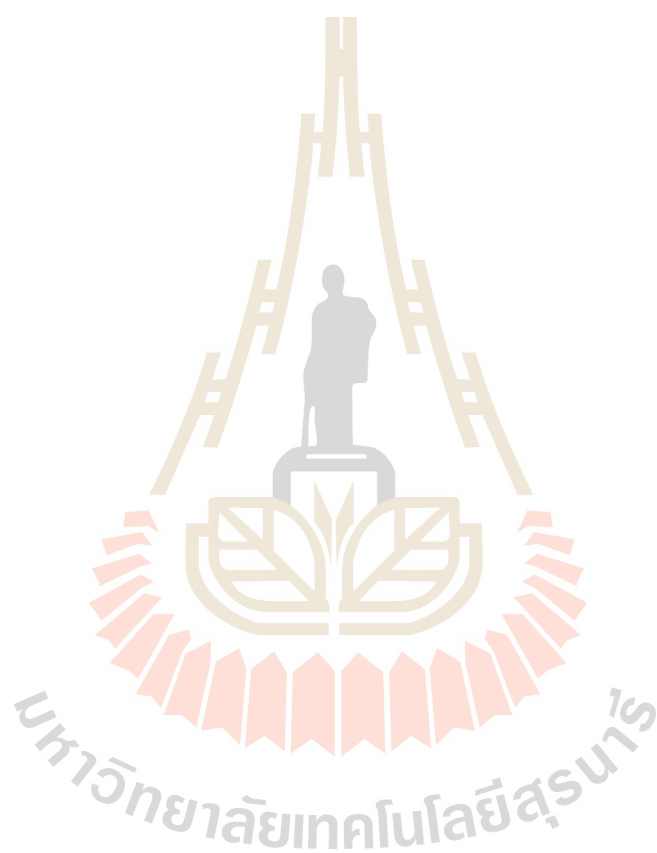
1) เนื่องจากการลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด จะใช้หลักการการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งในการทดสอบจะต้องให้ข้าวไหลบนระบบสายพานลำเลียง ซึ่งสายพานที่มีอยู่ทั่วไปไม่สามารถใช้ได้กับความถี่สูงยกตัวอย่างเช่น สายพานลำเลียงชนิด PVC (Polyvinylchloride) ซึ่งเป็นพลาสติกที่ไม่สามารถทนความร้อนสูงได้ และพลาสติกชนิดนี้เกิดการฉับคลื่นด้วย จะทำให้สายพานร้อนจนถึงขั้นละลายได้ วิธีแก้ปัญหาคือใช้วัสดุ (PP) Polypropylene ซึ่งเป็นพลาสติกที่สามารถใช้กับความถี่สูงได้และทนความร้อนได้ นำไปทำเป็นสายพานเพื่อใช้ในการทดสอบ แต่ราคาค่อนข้างสูง

2) ก่อนการทดสอบแต่ละครั้งเพื่อหาเงื่อนไขต่างๆ ต้องทำการแช่ข้าว 12 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารหนุออก หลังจากแช่ข้าวครบเวลาที่กำหนดแล้วนั้นความชื้นในข้าวค่อนข้างสูง และในเมล็ดข้าวก็เกิดรอยร้าว ดังนั้นในการทดสอบหาความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดของแต่ละเงื่อนไข ความชื้นข้าวไม่สามารถลดความชื้นลดลงให้เหลือความชื้นมาตรฐานได้ และก็ไม่สามารถเก็บข้าวไว้ได้ ข้าวก็ต้องทิ้ง ดังนั้นก่อนการทดสอบทั้งหมดควรวางแผนการทดสอบให้เรียบร้อยก่อน เพื่อที่จะได้ไม่ต้องเสียข้าวและเสียเวลาในการแช่ข้าว

## 5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

เทคโนโลยีการลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด ซึ่งเป็นการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟไปสู่การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ และใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเป็นพลังงานร่วมของทั้งสองระบบ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีการทดสอบมาแล้ว

เห็นถึงผลการคงค่าถึงคุณสมบัติของข้าวได้อย่างดี ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม  
การลดความชื้นชนิดอื่นๆ ที่มีความชื้นสูงต่อไปในอนาคต



## รายการอ้างอิง

- Aiquan Jiao, Xueming Xu, Zhengyu Jin.(2014). Modelling of dehydration–rehydration of instant rice in combined microwave-hot air drying. *food and bioproducts processing* 92(2014) 259–265.
- Ahmed, N.A., (2011). High-Frequency Soft-Switching AC Conversion Circuit with Dual Mode PWM/PDM Control Strategy for High-Power IH Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58: 1440 - 1448.
- Andreuccetti, D., Bini, M., Ignesti, A., Gambetta, A., and Olmi, R. (1994). Microwave destruction of woodworms, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, vol. 29, no. 3, pp. 153–160.
- Deandrae L.Smith, Griffiths G.Atungulu. (2018). Impact of drying deep beds of rice with microwave set at 915 MHz frequency on the rice milling yields. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. Volume 45, February 2018, Pages 220-227.
- E.Saniso, S. Prachayawarakornb, T. Swasdisevi, S. Soponronnarit. (2020) . Parboiled rice production without steaming by microwave-assisted hot air fluidized bed drying. *Food and Bioproducts Processing* 120 (2020) 8–20.
- Frogner, K., Andersson, M., Cedell, T., Svensson L., Jeppsson P., Stahl, J. (2011). Industrial heating using energy efficient induction technology. *Proceeding of the 44th CIRP international Conference on Manufacturing System*.
- Jakkarin Srituvanont, Thanaset Thosdeekoraphat, Chanchai Thongsopa, Samran Santalunai. (2018). Experiment of induction heating application for heating multilayer metallic hollow altered cylinder. *The 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications* 26-28 April, 2018.
- Liuyang Shen, Ming Gao, Yong Zhu, Chenghai Liu, Lei Wang, Md Kamruzzaman, Chai Liu, Xianzhe Zheng. (2021). Microwave drying of germinated brown rice: Correlation of drying characteristics with the final quality. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* Volume 70, June 2021

- Lichan, M., Cheng, K.W.E and Ka W.C., Systematic Approach to High-Power and Energy Efficient Industrial Induction Cooker System: Circuit Design, Control Strategy, and Prototype Evaluation, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26: 3754 - 3765.
- Marina Villanueva, Joanna Harasym , Jose María Munoz, Felicidad Ronda. (2018). Microwave absorption capacity of rice flour. Impact of the radiation on rice flour microstructure, thermal and viscometric properties. *Journal of Food Engineering* Volume 224, May 2018, Pages 156-164.
- Mangesh, B., and Sunil, T. (2013). A 25kW, 25kHz Induction Heating Power Supply for MOVPE System Using L-LC Resonant Inverter, *Advances in Power Electronics*, Hindawi Publishing Corporation.
- Matej K., Anze Z., Damijan M., T. Jarm (2010). " Numerical analysis and thermographic investigation of induction heating." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53: 3585-3591.
- Mizuma, T., Kiyokawa, Y., Wakai, Y. (2008). Water absorption characteristics and structural properties of rice for sake brewing. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 106: 258 – 262.
- Muramatsu, Y., Takawa, A., Sakaguchi, E., Kasai, T. (2006). Water absorption characteristics and volume changes of milled and brown rice during soaking. *Cereal Chemistry* 83: 624 – 631.
- Mermelstein, N. H. (1997.) Interest in radiofrequency heating heats up. *Food Technology* 51:794–795.
- Nuchanart Rangkadilok, Sumontha Nookabkaew, Jutamaad Satayavivad . “Research on Arsenic in Thai Rice to Support Specifying Maximum Level of Arsenic in Rice for Thai Rice Export. *Thai Rice Research Journal*”, Vol. 10 No. 2, July - December 2019.
- Nelson, S. O. (1996). Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control. *Transactions of the ASAE*, 39, pp. 1475–1484.
- Potisate, Y., Phoungchandang, S., Kerr, W. L. (2014). The effects of predrying treatment and different drying methods on phytochemical compound retention and drying characteristics of moringa leaves (*Moringa oleifera* Lam.). *Drying technology* 32: 1970 – 1985.



- Piyasena, P., Dussault, C., Koutchma, T., Ramaswamy H. S., Awuah, G. B. (2003). Radio frequency heating of foods: principles, applications and related properties – a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 43: 587 – 606.
- Sweeney, M., Dols, J., Fortenbery B., Sharp, F. (2014). Induction cooking technology design and assessment. *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings* 9: 370 – 379.
- Sarnago, H., Lucia, O., Mediano, A and Burdio, JM., (2013). Class-D/DE Dual-Mode Operation Resonant Converter for Improved-Efficiency Domestic Induction Heating System, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28: 1274-1285.
- Thanapat Jongmeesuk, Pattarapon Tossamas, Paiwan worapreda. “Strategy Analysis of Thai Rice Development and Processing and Competition in World Trade Market”. *Journal of Research and Development Institute, Rajabhat Maha Sarakham University* Vol. 4 No. 2 July–December 2017.
- Thakur, A. K., Gupta, A. K. (2006). Water absorption characteristics of paddy, brown rice and husk during soaking. *Journal of Food Engineering* 75: 252 – 257.
- V. Chuwattanakula, S. Eiamsa-ard. (2019). Hydrodynamics investigation of pepper drying in a swirling fluidized bed dryer with multiple-group twisted tape swirl generators. *Case Studies in Thermal Engineering* Volume 13, March 2019, 100389.
- Xu Zhoua, Hosahalli Ramaswamyb, Yingtao Qua, Ruzhen Xua, Shaojin Wang.(2019). Combined radio frequency-vacuum and hot air drying of kiwifruits: Effect on drying uniformity, energy efficiency and product quality. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* Volume 56, August 2019, 102182.
- Yuxiao Mao, Penghao Wang, Yi Wu, Lixia Hou, Shaojin Wang. (2021). Effects of various radio frequencies on combined drying and disinfestation treatments for in-shell walnuts. *LWT - Food Science and Technology* 144 (2021).111246.
- Yafei Liu, Yalan Zhang, Xueying Wei, Dingtao Wu , Jianwu Dai, Shuxiang Liu, Wen Qin.(2021). Effect of radio frequency-assisted hot-air drying on drying kinetics and quality of Sichuan pepper (*Zanthoxylum bungeanum maxim.*) *LWT - Food Science and Technology* 147 (2021).111572.



## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Samroeng Santalunai, Weerawat Charoensiri, Samran Santalunai, Thanaset Thosdeekoraphat, Chanchai Thongsopa, Nuchanart Fhafhiam. **Electric Fields Distribution of Optimized Waveguide Potrs Power Position for Grains Drying Applications.** International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication, ISSN(p): 2320-2084, ISSN(e): 2321-2950 Volume-8, Issue-11, Nov.-2020.



## ELECTRIC FIELDS DISTRIBUTION OF OPTIMIZED WAVEGUIDE POTRS POWER POSITION FOR GRAINS DRYING APPLICATIONS

<sup>1</sup>SAMROENG SANTALUNAL, <sup>2</sup>WEERAWAT CHAROENSIRI, <sup>3</sup>SAMRAN SANTALUNAL,  
<sup>4</sup>THANASET THOSDEEKORAPHAT, <sup>5</sup>CHANCHAI THONGSOPA, <sup>6</sup>NUCHANART FHAFHIEM

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

<sup>2,3,4,5,6</sup>School of Electronic Engineering, Department of Electronic Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

<sup>2,3,4,5,6</sup>Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, Thailand

E-mail: <sup>1</sup>m6200480@g.sut.ac.th, <sup>2</sup>m6112448@g.sut.ac.th, <sup>3</sup>samran.sa@sut.ac.th, <sup>4</sup>thanaset@sut.ac.th, <sup>5</sup>chan@sut.ac.th, <sup>6</sup>nuchanart.fa@rmuti.ac.th

**Abstract** - This paper presents the optimum conditions of the electromagnetic field distribution at 2.45 GHz in large-scale waveguides. An analysis process is adjusted the distance of waveguide port power that affecting the dielectric load (rice). In the large waveguide composes of five pairs ports power, the gap between two ports is adjusted from one of wavelength to four of wavelength in order to achieve the best electric distribution and electric intensity. The appropriate simulation results are obtained when the distance between two ports power is two of wavelength, most of the wave propagation has a greater electric field distribution in active area and the electric field intensity is characterized by its distribution over the area of the dielectric load. The simulation results are described and discussed in this research by using the CST program. The aim of this research to designs the dielectric heating process by using large-scale waveguide to be use in rice dehumidification in the industry.

**Keywords** - Large Scale Waveguide, Electric Field Distribution, Dielectric Heating.

### I. INTRODUCTION

Nowadays, the drying industrial is continuously growing and production expanding because it is the main industry of the food processing for consumption in the world market [1-3]. The main drying industrial is consisted of grains, fruits and food. In group of grains drying industrial. Industrial drying processes require the advanced technology applied in the process to create high efficiency, more save energy and sustainable use in the future. The engineering and science technology have been taking over so much in the application of heating in the drying industry. It consists of 2 main technologies [4-6] which are coil heating and microwave heating. The coil heating is the technology that use of a coil heater for generating heating and bringing heat to the raw material [7-8]. However, this process is technology that consumes a lot of energy since it generates energy with a load of resistance to heat up the metal. Therefore, it is a problem for the entrepreneurs must bear the high electricity cost. Considering to microwave drying technique [9-11], it is a technology that has been widely used for the drying industry. Because the water molecules, which are the important parameters of moisture in the raw material, vibrate and cause the molecules to friction, creating heat energy and entering the dehumidification process for drying in the internal load are short time and it is can be directly heated to the dielectric load [12-18]. But whatever it is, it has more factor to control drying process. There are input power and position of multi-ports. When the input power is increased or

decreased, the dehumidification efficiency will increase or decrease quickly. If input power or electromagnetic field density is too high, the dry loading is damaged. To consider the position of multi-ports, it is the distance between each microwave ports. If placed ports at an improper or unbalanced distance, resulting in decreased drying efficiency. It also negatively affects the dielectric load. So, the important factors of dielectric heating by using the microwave frequency to have the highest drying efficiency is distance between each microwave ports. It is necessary to analyze and improve the placement and spacing of the emitter in order to determine the wave propagation characteristics to cover the area of the dielectric load that is heated for concrete industrial applications.

Therefore, this research presents electric field distributions of the large-scale waveguide optimization with multi-port power for grains drying applications. Considering to find the position and distance of the port power and the most suitable dielectric load. The analysis can be used simulating with the CST Microwave Studio Software for analyzing the effects of electric field distributions to the dielectric load for maximum efficiency and future industrial applications.

### II. THE CONCEPT AND CONSTRUCTION

The optimization of electric field distributions in dielectric load of multiport power to apply in the large-scale drying industry. Figure.1 shows the structure of the microwave waveguide together with

port power. The size of the waveguides can be designed and calculated from microwave equation at frequency of 2.45 GHz for support drying industry applications. The desired parameters size which are width, length and height of 80 cm, 152.50 cm and 30.50 cm, respectively. The wave guide port power each set will have 5 points. Each point will be  $2\lambda$  apart and then place the wave guide port power along the Y axis. The result analysis is divided from Figure.2 will adjust the distance of the wave guide port power. The wave guide port power will have 10 points, will arranged in 2 sets of X axis, With the distance to analyzed are  $1\lambda$ ,  $2\lambda$ ,  $3\lambda$  and  $4\lambda$ . For see the optimal distance of the wave guide port power. The results of the analysis of field strength and propagation to the load. When the result of the electric field intensity and spread spectrum paid in the first place.

**III. ELECTRIC FIELD DISTRIBUTIONS AND HEAT THEORY**

The analysis of the microwave propagation and the heating on dielectric load is consisted of two principles which are electric field distributions and dielectric heating, the electric field distributions principle is consideration of electric field radiating to examine for nearfield distribution of electric fields. From the simulation results can be using Maxwell's equations analysis according to the equation (1-2).

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

Where  $E$  is the electric field  
 $B$  is magnetic flux,  
 $H$  is magnetic field,  
 $J$  is current density,  
 and  $D$  is electric displacement.

The current density in Equation (3) obtained

$$J = -nqu \quad (3)$$

Where  $n$ ,  $u$  and  $q$  are the free electron density, the mean electron (fluid) velocity and the electron charge respectively [14].

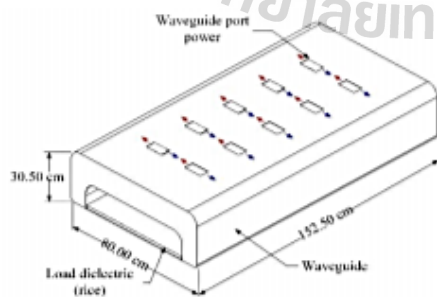


Figure 1: Geometry of large-scale waveguide.

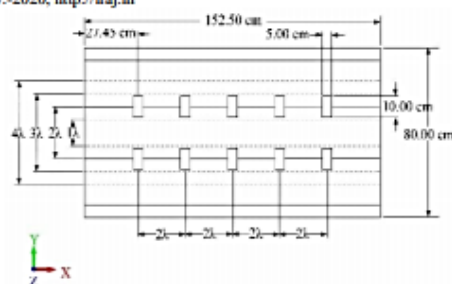


Figure 2: The position of five pairs port power and the adjusting between two ports from  $\lambda$  to  $4\lambda$ .

Dielectric heating involves the heating of electrically insulating materials by dielectric loss. A changing electric field across the material causes energy to be dissipated as the molecules attempt to line up with the continuously changing electric field.

Dielectric heating relates the material characteristic as known the loss factor. It is the ability of the dielectric material changing electric field to heat. The dielectric material that has higher loss factor is easier to be affected by dielectric heating. Dielectric materials with loss factor are greater than 0.02 that are generally considered for dielectric heating [17]. Both the loss tangent and the dielectric constant are varied with the frequency, applied and the temperature of the material. The power is absorbed by the material, which the value of heat generated through the material and is represented as (4).

$$P = E^2 \sigma = 2\pi f E^2 \epsilon_0 \epsilon'' \quad (4)$$

where,  $P$  is power loss density ( $W/m^3$ ),  $E$  is rms electric field strength in the material (V/m),  $\sigma$  is conductivity ( $1/\Omega$ ),  $f$  is applied frequency (Hz),  $\epsilon_0$  is permittivity of free space (F/m), and  $\epsilon''$  is loss factor. The rate of temperature is increased (C/s) in the material that is given by (5). Where  $c$  is specified the heat of the material ( $kJ/kg^\circ C$ ) and  $\rho$  is density of the material ( $kg/m^3$ )

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{P}{\rho c} \quad (5)$$

The penetration depth is defined as the depth which the power is decayed to 0.368 (1/e) of its maximum value [19]. It is varied depending on the loss factor and the resonant frequency. Usually, the higher loss factor is, the lower the penetration depth will be. When the wavelength is increased, the penetration depth is increased as well. The relationship between wavelength and penetration depth is expressed as (6) where  $d_p$  is penetration depth (cm) and  $c$  is speed of light ( $3 \times 10^8$ )



$$d_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\epsilon' \left[ \sqrt{1 + (\epsilon' / \epsilon'')^2} - 1 \right]}} \quad (6)$$

### III. SIMULATION RESULT

The results are simulated by using CST MW studio to analyze an effect of power by considering the electric field intensity at dielectric load in large-scale waveguide. The simulation is distributed to four cases that the distance between port power is adjusted with the electrical port power is 800 W at resonant frequency of 2.45 GHz. The parameter of the simulation can be used according to the concept and construction. The simulation results show the electric field distribution and electric intensity on the dielectric load in the waveguide of the section wrapping in Z-axis at 1 cm for electric field distributions analysis and the length in X-axis are 152.50 cm for electric field intensity on the dielectric load and shown the maximum electric field intensity is 364 V/m to comparisons in each case. Determining the percentage of electromagnetic field density in each case to determine the amount of electric field density occurring within the dielectric load. The percentage can be calculated using MATLAB program.

The gap between two ports power is adjusted with distance of  $\lambda$ ,  $2\lambda$ ,  $3\lambda$  and  $4\lambda$ , respectively as illustrated in Figure.2. The results of electric field distribution and electric intensity are shown in Figure.3. Considering the electric field distribution of two regions that the electric field occurs throughout the waveguide and within the load dielectric. Figure.3(a) describes the investigated electric field of orientation. It seems that the wave propagation has an electric field intensity in the middle of the waveguide while the lateral areas are distributed electric fields in less field intensity. When determining the electric field intensity that occurs with the dielectric load as shown

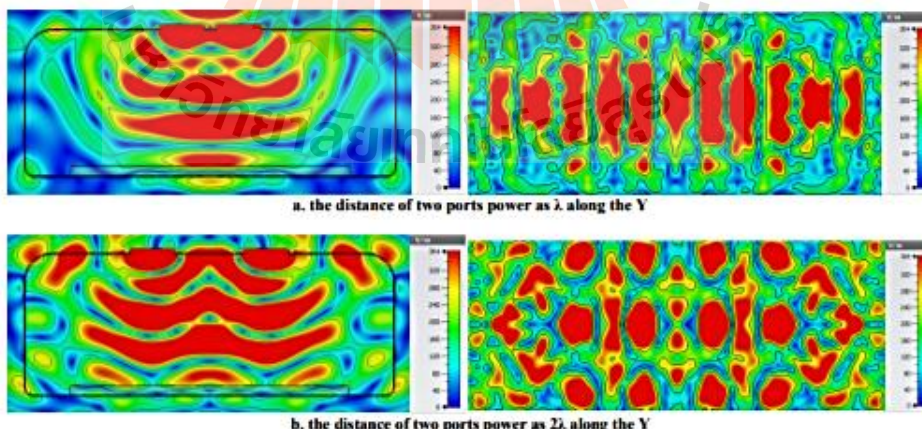
in Figure.3(a). The electric field intensity also occurs in the middle, since the two ports generates power too close. It also causes damage to the center of the dielectric load.

Considering the electric field distribution when adjusting the emitter distance to  $2\lambda$ , the wave propagation has a greater electric field intensity almost throughout the active area in the waveguide. The electric field intensity characterize is distribute over the wide area of the dielectric load. The wave propagation can distribute heat evenly across the dielectric load and does not damage the dielectric load at some point where overheating is possible as shown in Figure.3(b).

When the two ports emitter distance is changed to  $3\lambda$ , it is found that most of the electromagnetic field propagation characteristics had the same electric field density distribution area as in case of the emitter distance at  $2\lambda$ , but observed that the electromagnetic field intensity at the top of the waveguide is relatively high. This results in loss of power and also reduces the efficiency of the emission from the wave to the dielectric load. And when considering the degree of electric field intensity at the load, it was found that there was a decrease in intensity.

In addition, the two ports emitter distance is changed to  $4\lambda$  as displayed in Figure.3(d). As a result, found that electric field propagation characteristics is mostly distributed to the edges of the waveguide. It caused a considerable loss of power which affects the electric field that occurs at the dielectric load. The electric field is mainly characterized by its distribution over the edges of the dielectric load area and electric field intensity value is decreased too.

From simulated results of the waveguide port power spacing, it is found that the distance of  $2\lambda$  is the most suitable distance for positioning. Due to the propagation of electric field have the highest intensity in active areas as waveguide and dielectric load, which also causes less power loss as well.





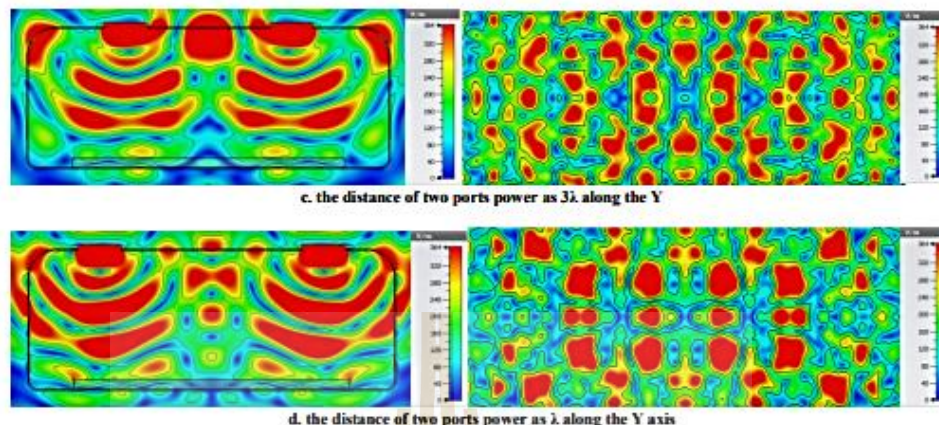


Figure 3: Electric field distribution and electric field intensity in large scale waveguide and at load dielectric when the distance of two ports power is adjusted.

#### IV. CONCLUSION

The large-scale waveguide consisting of ten microwave ports power to generates electromagnetic wave is presented. The overall size of waveguide system is  $800 \times 1525 \times 305$  mm<sup>3</sup>. The port position is concerned to analyze the electric field distribution and intensity which are occurred throughout the waveguide and within the load dielectric. From simulation results, the properly distance between two ports power of two rows is  $2\lambda$ . The distribution of wave in the waveguide has a greater electric field intensity almost throughout the active area. Moreover, the electric field intensity has the highest at load (rice).

#### ACKNOWLEDGMENTS

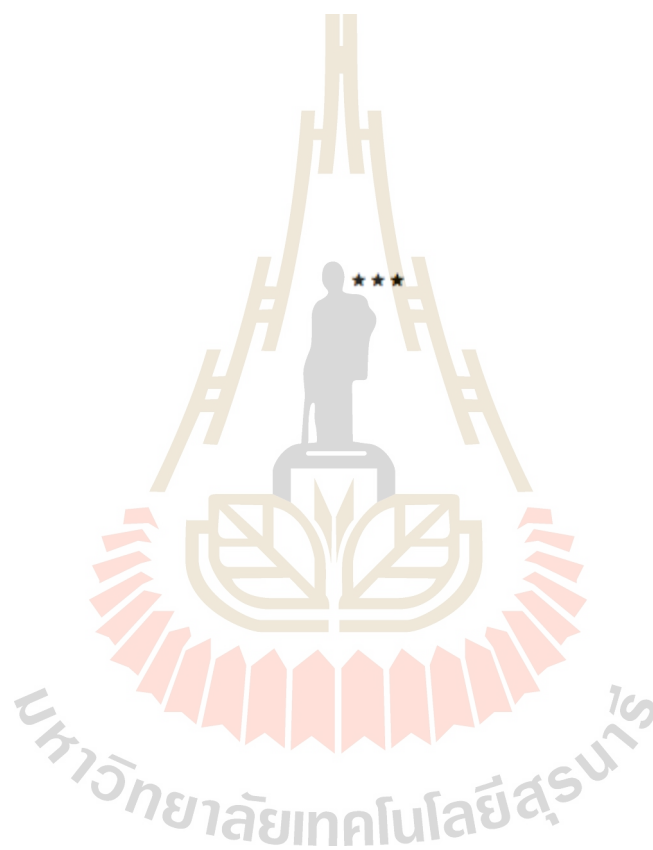
This work was supported by Suranaree University of Technology (SUT) and the Office of the Higher Education under NRU project of Thailand

#### REFERENCES

- [1] Ziegler, V., Timm, N.D.S., Ferreira, C.D., Goebel, J.T., Pohndorf, R.S., Oliveira, M.D. "Effects of drying temperature of red popcorn grains on the morphology, technological, and digestibility properties of starch," *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol. 145, Pages 568-574, 15 February 2020.
- [2] Singh, A.P., Ghoshdastidar, P.S. "A computational heat transfer and optimization study of drying of peas and rice in a rotary dryer," *ASME-JSME-KSME 2019 8th Joint Fluids Engineering Conference*, AJKFluids 2019.
- [3] Cruz, F.P.B., Johann, G., de Oliveira, K.C., Palú, F., da Silva, E.A., Guirardello, R., Curvelo Pereira, N. "Crambe grain drying: Evaluation of a linear and double resistance driving force model and energetic performance," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80, pp. 1-8, 2017.
- [4] Kluchnikov, A. "Development of new method of drying at energy-saving universal dryer to improve quality of crops used in fodder production," *Engineering for Rural Development* Vol. 18, 2019, Pages 105-111, 18th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, ERD 2019; Jelgava; Latvia; 22 May 2019 through 24 May 2019.
- [5] Jörg Schemminger, Duncan Mbuge, Werner Hofacker. "Ambient air cereal grain drying - Simulation of the thermodynamic and microbial behavior," *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 13, October 2019.
- [6] Saeed Firouzia, Mohammad Reza Alizadeh, Dsitar Haghtalab. "Energy consumption and rice milling quality upon drying paddy with a newly-designed horizontal rotary dryer," *Energy*, Vol. 119, Pages 629-636, 15 January 2017.
- [7] Pedro Lastra-González, Irune Indacoechea-Vega, Miguel A. Calzada-Pérez, Daniel Castro-Fresno, Angel Vega-Zamanillo. "Mechanical assessment of the induction heating as a method to accelerate the drying process of cold porous asphalt mixtures," *Construction and Building Materials*, Vol. 208, Pages 646-650, 30 May 2019.
- [8] Dong-Seong Kim, Ji-Young So, Dae-kyong Kim. "Study on Heating Performance Improvement of Practical Induction Heating Rice Cooker with Magnetic Flux Concentrator," *IEEE Transactions on applied superconductivity*, vol. 26, no. 4, June 2016.
- [9] Liuyang Shen, Yong Zhu, Chenghai Liu, Lei Wang, Hui Liu, Md Kamruzzaman, Chai Liu, Youpeng Zhang, Xianzhe Zheng. "Modelling of moving drying process and analysis of drying characteristics for germinated brown rice under continuous microwave drying," *Biosystems Engineering*, Vol. 195, Pages 64-88, July 2020.
- [10] E. Sattiso, S. Prachayawarakorn, T. Swasdisevi, S. Saponronnarit. "Parboiled rice production without steaming by microwave-assisted hot air fluidized bed drying," *Food and Bioproducts Processing* Vol. 120, Pages 8-20, March 2020.
- [11] Mahmoud Amer, Mohamed Nour, Mahmoud Ahmed, Shinachi Ookawara, Sameh Nada, Ahmed Elwardany. "The effect of microwave drying pretreatment on dry torrefaction of agricultural biomasses," *Bioresource Technology*, Vol. 286, August 2019.
- [12] Deepali Jain, Juming Tang, Patrick D. Pedrow, Zhongwei Tang, Shyam Sablani, Yoon-Ki Hong. "Effect of changes in salt content and food thickness on electromagnetic heating of rice, mashed potatoes and peas in 915 MHz single mode microwave cavity," *Food Research International*, Vol. 119, Pages 584-595, May 2019.
- [13] Tanakorn Unpinit, Vannrumpai Seiththanabutra, Tinnakorn Kamsan, Panomkorn Kwakong and Apichart Artnasewaw "Dehydration of Rice Paddy by using Automation

International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication, ISSN(p): 2320-2084, ISSN(e): 2321-2950  
Volume-8, Issue-11, Nov.-2020, <http://iraj.in>

- Microwave Heating," Kasem Budit Engineering Journal, Vol.7 No.1 January-June 2017.
- [14] Cheng Qian, Dazhi Ding, and Rushan Chen. "An Efficient 3-D Time-Domain Method for High Power Microwave Propagation Problems," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol.14,2015.
- [15] Aiqian Jiao, Xueming Xu, Zhengyu Jin. "Modelling of dehydration-rehydration of instant rice incombined microwave-hot air drying," Food and Bioproducts Processing, Vol 92, Issue 3, Pages 259-265, July 2014.
- [16] Sun, Qingjie, Tao Wang, Liu Xiong, and Yunxia Zhao. "The effect of heat moisture treatment on physicochemical properties of early indica rice," Food chemistry, 141(2): Pages 853-857, (2013).
- [17] V. Komarov, "Dielectric and Thermal Properties of Materials at Microwave Frequencies," Handbook, Artech House. 2012.
- [18] Zhao, Siming, Shanbai Xiong, Chengguang Qiu, and Yongliang Xu. "Effect of microwaves on rice quality," Journal of Stored Products Research. 43(4): Pages 496-502, (2007).
- [19] S. Wang, J. Tang, J.A. Johnson, E. Mitcham, J.D. Hansen, G. Hallman, S.R. Drake, and Y. Wang, "Dielectric Properties of Fruits and Insect Pests as related to Radio Frequency and Microwave Treatments," Biosystems Engineering, vol. 85, pp. 201-212. 2003.



## ประวัติผู้เขียน

นายสำเร็จ สันทาลุนย์ เกิดเมื่อวันที่ 2 ตุลาคม พ.ศ.2539 ที่อำเภอสำโรงทาบ จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนบ้านหนองหัวโพธิ์ไทร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนสำโรงทาบวิทยาคม อำเภอสำโรงทาบ จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2562 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

