

## ระบบกำจัดมอดข้าวประสิทธิภาพสูงสำหรับใช้ในครัวเรือน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2561

**HIGH EFFICIENCY WEEVILS CONTROL SYSTEM FOR  
HOME-USE APPLICATION**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Electronic Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2018**

## ระบบกำจัดมอดข้าวประสิทธิภาพสูงสำหรับใช้ในครัวเรือน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

---

(ผศ. ดร.ชนเสถียร ทศศิกรพัฒน์)  
ประธานกรรมการ

---

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

---

(ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์)  
กรรมการ

---

(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล

---

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กาญจนาพร แซ่อึ้ง : ระบบกำจัดมอดข้าวประสิทธิภาพสูงสำหรับใช้ในครัวเรือน  
(HIGH EFFICIENCY WEEVILS CONTROL SYSTEM FOR HOME-USE  
APPLICATION) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภณ, 97 หน้า.

แนวโน้มนำการบริโภคของผู้คนกำลังเข้าสู่การบริโภคแบบคลินที่เป็นอาหารปลอดสารเคมี โดยเฉพาะสารเคมีที่อยู่กับผลผลิตทางการเกษตร แม้แต่ในข้าวก็มีสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดแมลงมอดข้าว การกำจัดมอดข้าวแบบไม่ใช้สารเคมีมีหลายวิธี วิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมและมีการค้นคว้าวิจัยเรื่อยมา คือการกำจัดมอดข้าวด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก (Dielectric heating) หรือ RF (Radio frequency) heating งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนา ระบบกำจัดมอดข้าวให้สามารถใช้ภายในครัวเรือน ด้วยการใช้อุปกรณ์ขยายขนาดเล็กลักษณะประสิทธิภาพสูง Laterally Diffused MOSFET (LDMOS) ที่มีขนาดกะทัดรัดเหมาะกับการออกแบบสำหรับเครื่องขนาดเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน การออกแบบพัฒนาระบบกำจัดมอดข้าวนี้ เพื่อทดแทนการกำจัดมอดข้าวด้วยการใช้สารเคมีแบบดั้งเดิม ที่อาจจะส่งผลเสียต่อร่างกายเนื่องจากสารเคมีตกค้างในอาหาร อีกทั้งยังทำให้ชั้นบรรยากาศของโลกถูกทำลายเนื่องจากสารเคมีดังกล่าว

ผลการทดลองการออกแบบเพลตขนาดพบว่า เมื่อขนาดเพลตขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้ความถี่ที่เพลต Resonance ต่ำลง อีกทั้งอัตราส่วนของเพลตไม่มีผลอย่างมีนัยยะสำคัญ การเลือกใช้ความถี่ส่งผลต่ออัตราการให้ความร้อนของข้าวและมอดข้าว โดยที่ความถี่ต่ำอัตราการให้ความร้อนต่ำ แต่มีการกระจายตัวของความร้อนสม่ำเสมอ ซึ่งตรงกันข้ามกับความถี่สูงที่ให้อัตราการให้ความร้อนที่ดี แต่มีการกระจายตัวที่แคบ ด้วยการออกแบบเพลตขนาดที่เหมาะสมกับความถี่ที่ใช้งานจะทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้าสูง และส่งผลให้การกระจายตัวของสนามไฟฟ้ามีความสม่ำเสมอ

ผลการทดลองระบบกำจัดมอดข้าว โดยใช้ RF power 300 W และ 773 W ที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 2, 4, 10 วินาที พบว่ามอดข้าวมีอัตราการตายสูงเมื่ออยู่ภายใต้ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงเป็นระยะเวลานาน ซึ่งสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับพลังงานที่มอดได้รับ แต่แปรผกผันกับคุณภาพของข้าว เพราะข้าวเสียหายจากการที่อุณหภูมิสูงมากเกินไป ต้นทุนค่าไฟฟ้าในการกำจัดมอดจากการทดลองสามารถแทนที่การกำจัดมอดด้วยสารเคมี ระบบกำจัดมอดข้าวที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพโดยรวมของระบบอยู่ที่ 64%

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_



PHANUPONG SAEUNG : HIGH EFFICIENCY WEEVILS CONTROL  
SYSTEM FOR HOME-USE APPLICATION. THESIS ADVISOR : ASSOC.  
PROF. CHANCHAI THONGSOPA, Ph.D., 97 PP.

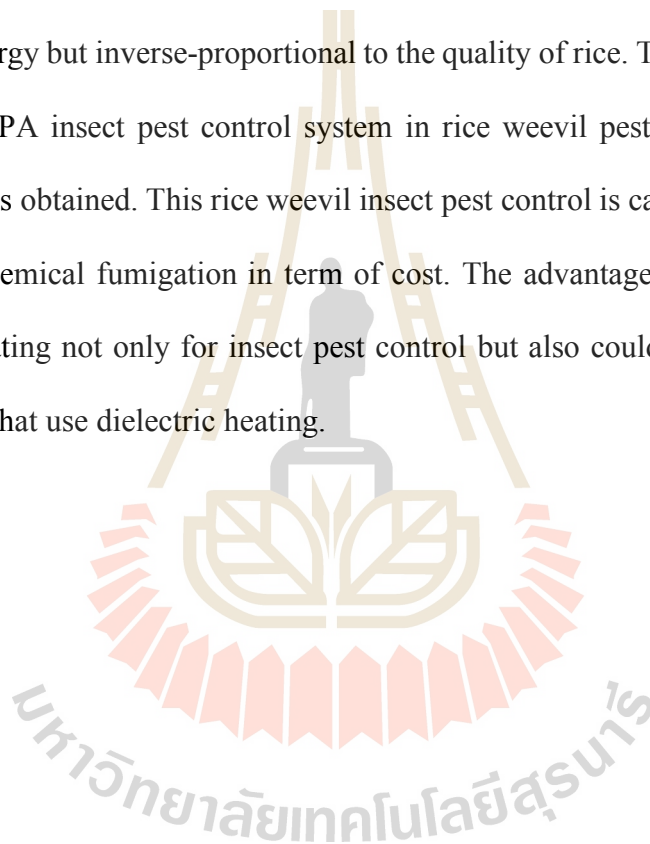
#### DIELECTRIC HEATING/RICE WEEVIL CONTROL/SSPA/HIGH EFFICIENCY

Thai people trending about food was going to food safety they will care much about their food and worrying health being affected from residue pesticide and others chemical in food. Rice has been one of favored food in Thailand. One of major problem about rice was rice weevil (*Sitophilus oryzae* [Linnaeus]). Rice weevil causing rice damaged including reduced quality, weight losses, reduced nutrition, low germination rate, increased bacteria and fungi and many more. Rice weevil can be eliminated by using chemical fumigation. However, only adult rice weevil will be killed, and not too long rice will be infested with rice weevil again. Generally, in order to eliminate all stage of rice weevil in one process dielectric heating has been used. Dielectric heating in rice weevil control not only eliminate the insects but leaves no chemical residue in rice also not harmful to health and environments. To have this dielectric heating works for home-use the Laterally Diffused MOSFET (LDMOS) is selected as active device in RF amplifier. Therefore, the parallel plate applicator was studied to work together with RF amplifier.

It was found that for larger parallel plate caused resonance frequency to lower. It has no significant to change the ratio of plate. Selecting frequency for dielectric heating found that using low frequency has better heat uniformly but poor heat rate and using in high frequency has good heat rate but heat uniformly was unacceptable. By

designing the parallel plate to the appropriate frequency will yield good heat rate and heat uniformly.

The experimental of rice weevil insect pest control system using dielectric heating compared two RF powers 300 and 773 W both used same exposure time 2, 4 and 10 second. The results gave that rice weevil has high elimination rate when exposed to high strength electric field and long exposure time. The mortality was proportional to the RF energy but inverse-proportional to the quality of rice. The results of using the prototype SSPA insect pest control system in rice weevil pest control, 64% overall efficiency was obtained. This rice weevil insect pest control is capable of replacing the traditional chemical fumigation in term of cost. The advantage of high efficiency in dielectric heating not only for insect pest control but also could apply to any related applications that use dielectric heating.



School of Electronic Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature\_\_\_\_\_

Advisor's Signature\_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้การอบรมสั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำการศึกษาค้นคว้า ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนเสถียร ทศศิริพัฒน์ ที่กรุณาให้การแนะนำ คำปรึกษา ชี้แนะ แนวทางการเขียน และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ดร.สำราญ สันทาลุณย์ ที่กรุณาให้การแนะนำ และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์ ที่กรุณาให้การแนะนำ คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ในการทำวิจัย

ภาณุพงษ์ แซ่อึ้ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดประสงค์งานวิจัย.....	4
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>2 ทบทวนวรรณกรรม งานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 ทบทวนวรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	20
2.2.1 ตัวเก็บประจุแบบเพลตขนาน (Parallel plate capacitor).....	20
2.2.2 วัสดุไดอิเล็กทริก Dielectric materials.....	20
<b>3 การออกแบบการวิจัย.....</b>	<b>28</b>
3.1 พารามิเตอร์ของเพลตที่เกี่ยวข้อง.....	30
3.2 การจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โมเดลของเพลตใน CST.....	31
3.3 วัสดุที่ใช้สร้างเพลต.....	36
3.4 ค่าสภาพยอมของข้าว (Permittivity of rice).....	36
3.4.1 การวัดค่าสภาพยอมของข้าว (Measured of permittivity of rice).....	37
3.5 การออกแบบเครื่องกำจัดมอดข้าวสำหรับครัวเรือน.....	40

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.1	การออกแบบเพลตสำหรับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก.....	40
3.5.2	การเลือกใช้เครื่องขยายสัญญาณความถี่สูงกำลังสูง.....	41
3.6	การออกแบบวงจร Matching network.....	42
3.7	ประสิทธิภาพ.....	43
3.7.1	ประสิทธิภาพของเครื่องขยายสัญญาณ.....	43
3.7.2	ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน.....	44
3.7.3	ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ.....	45
3.8	การกำจัดมอดข้าวด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก.....	46
3.9	การประเมินคุณภาพของข้าวหลังการกำจัดมอดด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก.....	47
<b>4</b>	<b>ผลการวิจัย และอภิปรายผล.....</b>	<b>48</b>
4.1	ผลการศึกษาพารามิเตอร์เพลตที่เกี่ยวข้อง.....	48
4.1.1	ความยาวของเพลต.....	51
4.1.2	ความกว้างของเพลต.....	55
4.1.3	พื้นที่ของเพลต.....	57
4.1.4	สนามไฟฟ้าภายในวัสดุที่อยู่ระหว่างเพลต.....	59
4.1.5	ระยะห่างระหว่างเพลต.....	68
4.2	ผลการวัดค่าสภาพยอมของข้าว (Permittivity of rice).....	68
4.3	ผลการทดสอบ Power amplifier.....	70
4.4	การออกแบบสร้างเพลตขนานสำหรับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก.....	74
4.5	ผลการทดสอบระบบกำจัดมอดด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก.....	83
4.6	ผลการทดลองการกำจัดมอดข้าวด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกและคุณภาพของข้าว.....	87
<b>5</b>	<b>สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>90</b>
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	90
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	90

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง.....	92
ภาคผนวก บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	95
ประวัติผู้เขียน.....	97



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลการจำลองความถี่ที่เพลต Resonant เมื่อขนาดความยาวของเพลตเปลี่ยน.....	52
4.2 ผลการจำลองความถี่ที่เพลต Resonant เมื่อขนาดความยาวของเพลตเปลี่ยน โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้น ที่ความกว้างเพลตเท่ากับ 50 mm และระยะห่างระหว่างเพลตเท่ากับ 10 mm.....	53
4.3 ผลการจำลองความถี่ที่เพลต Resonant เมื่อขนาดความยาวของเพลตเปลี่ยน โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้น ที่ความกว้างเพลตเท่ากับ 10 mm และระยะห่างระหว่างเพลตเท่ากับ 50 mm.....	54
4.4 ผลการจำลองความถี่ที่เพลต Resonant เมื่อขนาดความกว้างของเพลตเปลี่ยน.....	56
4.5 ผลการจำลองขนาดของเพลต ที่อัตราส่วน และพื้นที่ของเพลตต่างกัน เพื่อหาความสัมพันธ์ของความถี่ที่ Resonance และการสะท้อนกลับ.....	58
4.6 ความเข้มของสนามไฟฟ้าเมื่อมุมเฟสเปลี่ยนไป ของเพลตที่ Resonance ที่ 10 MHz.....	61
4.7 ความเข้มของสนามไฟฟ้าเมื่อมุมเฟสเปลี่ยนไป ของเพลตที่ Resonant ที่ 80 MHz.....	66
4.8 Power dissipation ที่เกิดขึ้นในมอดที่ความถี่ 1 – 2450 MHz เมื่อให้ $2\pi E^2 \epsilon_0 = 1$ .....	71
4.9 ผลการวัด Harmonics ของ RF Oscillator ที่ความถี่ 80 MHz.....	73
4.10 อัตราการตายของมอดกับระยะเวลาในการให้ความร้อนและกำลังที่ใช้.....	87

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
1.1	วงจรกิจต์มอดข้าว ( <i>S. oryzae</i> ) จากไข่เป็นตัวอ่อน ดักแด้ และตัวโตเต็มวัย (Davis, 2011).....	2
2.1	แผนภาพคลื่นตกกระทบกับวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีบางส่วนสะท้อนออกมา และระยะความลึกที่เรียกว่า Penetration depth ซึ่งขึ้นกับความถี่และชนิดของวัสดุ ดั่งสมการ (2.3) (Hou et al., 2016).....	10
2.2	ผลการ Simulation ของการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกกับวัตถุรูปร่าง ต่างแบบกัน 10 แบบ (Ferrari-John et al., 2016).....	11
2.3	เครื่องกำจัดแมลงด้วย Dielectric heating แบบสายพาน (Zhou & Wang, 2016b).....	14
2.4	เครื่องกำจัดแมลงด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกแบบปล่อยข้าวไหลในแนวตั้ง (Vearasilp et al., 2015).....	15
2.5	เครื่องกำจัดแมลงโดยใช้สนามไฟฟ้าสลับแรงสูง (ซ้าย) แบบ Coaxial และ (ขวา) แบบเพลตขนาน (Ponomaryova et al., 2009).....	15
2.6	Setup ของชุดอุปกรณ์ให้ความร้อนเพื่อศึกษาผลกระทบทางความร้อนที่มีต่อตัวมอดข้าว (Yan et al., 2014).....	16
2.7	ผลการทดลองจากการศึกษาผลกระทบทางความร้อนต่อตัวมอด (Yan et al., 2014).....	16
2.8	(ซ้าย) โมเดลสามมิติ Y-maze chamber และ (ขวา) ภาพ cross section ของ cross section แสดงตำแหน่งทางเข้าของมอดข้าว บริเวณมืดและบริเวณที่ใช้แสง (Jeon et al., 2012).....	18
2.9	อัตราการรอดของมอดข้าวเมื่อถูกรมด้วย Basil oil ความเข้มข้น 10% และชุดควบคุม ที่ไม่ผ่านการใช้ Basil oil (Follett et al., 2014).....	19
2.10	(ซ้าย) Set up ของการให้ความร้อนแบบอินฟราเรดเพื่อกำจัดไข่มอด และ (ขวา) จุดที่เหมาะสมสำหรับการให้ความร้อนแบบอินฟราเรด ที่ให้อัตราการตายของไข่มอดสูงใน ขณะที่ยังรักษาคุณภาพของข้าว (Duangkhamchan et al., 2017).....	19
2.11	การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของเพลตขนานที่มีประจุ Q.....	22
2.12	เส้นทางการอินทิเกรต เพื่อหาสนามไฟฟ้าระหว่างเพลตขนาน.....	22
2.13	ค่า Dielectric permittivity ที่ขึ้นกับความถี่ ทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพ (Kasap, 2006).....	23



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.14 เมื่อมีสนามไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่งเปลี่ยนจาก $E_0$ เป็น $E$ อย่างกะทันหัน ทำให้ Induced dipole moment ลดลงจาก $\alpha_d(0)E_0$ เป็น $\alpha_d(0)E$ การลดลงนี้เกิดขึ้นจาก Random collisions ของโมเลกุล (Kasap, 2006).....	26
2.15 ค่า Relative permittivity ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน และเกิด Relaxation peak ที่ $\omega = 1/\tau$ (Kasap, 2006).....	27
2.16 (ซ้าย)ตัวเก็บประจุแบบเพลตขนานที่มีแรงดันไฟฟ้าสลับแบบ Sinusoidal มีความสมมาตรเท่ากับฝั่ง (ขวา) วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุที่มีความนำ $G_p$ ขนานกับตัวเก็บประจุ (Kasap, 2006).....	27
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยการออกแบบต้นแบบการกำจัดมอดข้าวสำหรับใช้ในครัวเรือน.....	28
3.2 IR camera หรือ Imaging infrared thermometer (U5857A, Keysight).....	29
3.3 หน้าจอหลักของ CST เมื่อเปิดโปรแกรมขึ้นมา.....	31
3.4 หน้า Summary ของการสร้าง Template ใน CST.....	32
3.5 วงจรของโหลดเพลตขนานพร้อมชุด Matching network (Inductor).....	33
3.6 3D โมเดลของเพลตขนานพร้อม Port และ Matching network ที่ขึ้นรูปใน CST.....	34
3.7 ผลลัพธ์ค่า S11 ที่ได้จากการใช้โปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	35
3.8 ขั้นตอนการศึกษาค่าพารามิเตอร์ของเพลตขนาน โดยใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์ช่วย.....	35
3.9 เครื่องบดวัสดุ Cross beater mill (PULVERISETTE 16, FRITSCH GmbH).....	38
3.10 การจัดชุดการวัดค่าไดอิเล็กทริกของข้าว โดยใช้ Dielectric probe.....	40
3.11 ระบบการกำจัดมอดด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกประสิทธิภาพสูง.....	45
3.12 ระยะเวลาที่ให้ความร้อนเทียบกับอุณหภูมิ และพื้นที่ของการกำจัดแมลงในขณะที่ยังรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรอยู่ (Hou et al., 2016).....	46
4.1 ค่าไดอิเล็กทริกของข้าว (Wheat) และมอดข้าวในช่วง 5 kHz – 20 GHz (ซ้าย) เปรียบเทียบค่า Dielectric constant ของข้าวและมอด (ขวา) เปรียบเทียบค่า Dielectric loss factor ข้าว และมอดข้าว โดยมีจุด Relaxation peak ของมอดที่ประมาณ 40 MHz (Nelson, 2005).....	49

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 กำหนดค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุใน CST เพื่อให้มีค่าคุณสมบัติใกล้เคียงกับข้าว ในความเป็นจริง (ซ้าย) กำหนด Dielectric dispersion ที่กำหนดโดย User (ขวา) กำหนดจุดของ ค่าไดอิเล็กทริก โดยกำหนดสามจุดความถี่.....	49
4.3 ค่าคุณสมบัติของวัสดุที่กำหนด โดยผู้ใช้งาน โดยกำหนดให้มีความใกล้เคียงกับค่า ไดอิเล็กทริกของข้าว เพื่อให้การจำลองผลโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความแม่นยำ.....	50
4.4 ขนาดเริ่มต้นของเพลตขนาด 10 x 10 x 10 mm โดยใช้ PCB เป็นเพลตและมีวัสดุ ไดอิเล็กทริกอยู่ภายในระหว่างเพลต.....	50
4.5 ผลการจำลองค่าพารามิเตอร์ S11 ของการเปลี่ยนขนาดของเพลต ค่า S11 มีแนวโน้ม ทางความถี่ต่ำลงเมื่อขนาดความยาวเพลตเพิ่มขึ้น ที่ความกว้างเพลตเท่ากับ 10 mm และระยะห่างระหว่างเพลตเท่ากับ 10 mm.....	51
4.6 ผลการจำลองค่าพารามิเตอร์ S11 ของการเปลี่ยนขนาดของเพลต ค่า S11 มีแนวโน้ม ทางความถี่ต่ำลงเมื่อขนาดความยาวเพลตเพิ่มขึ้น ที่ความกว้างเพลตเท่ากับ 50 mm และระยะห่างระหว่างเพลตเท่ากับ 10 mm.....	53
4.7 ผลการจำลองค่าพารามิเตอร์ S11 ของการเปลี่ยนขนาดของเพลต ค่า S11 มีแนวโน้ม ทางความถี่ต่ำลงเมื่อขนาดความยาวเพลตเพิ่มขึ้น ที่ความกว้างเพลตเท่ากับ 10 mm และระยะห่างระหว่างเพลตเท่ากับ 50 mm.....	54
4.8 ผลการจำลองค่าพารามิเตอร์ S11 ของการเปลี่ยนขนาดของเพลต ค่า S11 มีแนวโน้ม ทางความถี่ต่ำลงเมื่อขนาดความกว้างเพลตเพิ่มขึ้น ที่ความยาวเพลตเท่ากับ 10 mm และระยะห่างระหว่างเพลตเท่ากับ 10 mm.....	56
4.9 สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณเพลตขนาดที่มุมเฟส 0 องศา (ซ้าย) มุมมองด้านบนเพลต สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเพลตมีความเป็น Uniform สูง ถึงแม้บริเวณขอบจะมี การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าแบบ Fringing fields แต่สนามไฟฟ้าบริเวณภายใน วัสดุไดอิเล็กทริกยังคงมีความ Uniform (ขวา) มุมมองด้านข้างของเพลต ที่ขอบ ของเพลตมีสนามไฟฟ้ากระจายตัวออกมาจากเพลตเล็กน้อย.....	60
4.10 สนามไฟฟ้าที่กระจายตัวบริเวณเพลต (บน) ที่สนามไฟฟ้ามีความเข้มสูงสุดที่มุมเฟส 60 องศา และ (ล่าง) ที่สนามไฟฟ้ามีความเข้มต่ำที่สุดที่มุมเฟส 150 องศา.....	60

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในเพลต จากซ้ายไปขวาที่มุมเฟส 0, 45, 90 และ 120 องศา ที่ความถี่ 80 MHz, 500 MHz และ 1200 MHz.....	62
4.12 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของเพลตที่ Resonant ที่ 80 MHz ที่มุมเฟส 90 องศา ซึ่งทำให้มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด.....	65
4.13 ภาพตัดขวางของวัสดุไดอิเล็กทริกที่อยู่ระหว่างเพลต (ซ้าย) การกระจายตัวของ Power loss density และ (ขวา) การกระจายตัวของ SAR.....	67
4.14 ภาพตัดขวางของวัสดุไดอิเล็กทริกที่อยู่ระหว่างเพลต เพื่อดูการกระจายตัวของ Power loss density (ซ้าย) การเพิ่ม Margin ที่ขอบของด้านความกว้างเพลต 5mm และ (ขวา) เพิ่ม Margin ทั้งด้านกว้างและด้านยาวเพลตด้านละ 5 mm.....	67
4.15 ผลการวัดค่าไดอิเล็กทริกของข้าวสาร (เส้นทึบ) และข้าวเหนียว (เส้นจุด) ที่ความถี่ 10 – 1000 MHz (บน) ผลการวัดค่า Dielectric constant คุณสมบัติทางไดอิเล็กทริกของข้าวสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยข้าวสารมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำกว่าข้าวเหนียวโดยเฉลี่ย 0.37 และ (ล่าง) ผลการวัดค่า Dielectric loss factor ช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 300 MHz มีบางช่วงที่มีค่าติดลบ ซึ่งไม่ถูกต้องตามความเป็นจริงเนื่องจาก Dielectric probe ที่ใช้เป็นประเภทความถี่สูง แต่ในทางตรวจสอบความแตกต่างระหว่างวัสดุไดอิเล็กทริกสองชนิด สามารถใช้ระบุถึงความแตกต่างหรือความเหมือนกันได้ ผลการวัดที่ได้ ข้าวสารมีค่าต่ำกว่าข้าวเหนียวโดยเฉลี่ย 0.10 ซึ่งแทบจะไม่แตกต่างกัน.....	69
4.16 การทดสอบ Oscillator ที่ความถี่ 80 MHz โดยวัดกำลังส่งและ Harmonic ของสัญญาณ.....	72
4.17 การทดสอบ Power amplifier ที่ความถี่ 80MHz.....	74
4.18 เพลตที่ใช้ VNA วัด Impedance และวัดค่า S11 (ซ้าย) เพลตขนาดเล็ก (5 x 5 x 1 cm) (ขวา) เพลตขนาดกลาง (12 x 12 x 2 cm).....	75
4.19 ผลการวัดเพลตขนานโดยใช้ VNA (ซ้าย) วัดเพลตขนาดเล็ก S11 อยู่ที่ความถี่ 77.13 MHz มีค่าประมาณ -25 dB และ (ขวา) ผลการวัดของเพลตขนาดกลาง S11 อยู่ที่ความถี่ 57.6 MHz ที่ -21 dB.....	75
4.20 การใช้เครื่อง Impedance analyzer วัด Impedance ของเพลตขนานที่สร้างขึ้น.....	78
4.21 เพลตขนาด 4.5x7x13 cm ได้ Impedance 50.5-j510 $\Omega$ ที่ความถี่ 19.37 MHz.....	78

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ออกแบบเพลตขนาด 12x3.5x7 cm ให้ใช้ได้กับระบบ 50 $\Omega$ ที่ 95 MHz.....	79
4.23 ยืนยันผลการออกแบบเพลต โดยใช้ VNA ในการวัดค่า S11 ได้ -10.24dB @95 MHz.....	79
4.24 การทดสอบเพลต (ซ้าย) ชุดทดสอบ RF power amplifier และเพลต (ขวา) วัดความร้อนของข้าวในเพลต.....	80
4.25 การออกแบบวงจร Impedance matching โดยใช้ Smith chart.....	80
4.26 การทดสอบผลการออกแบบเพลต 100 kg/hr ได้ S11 -10.2 dB ที่ความถี่ 95 MHz.....	81
4.27 การทดสอบให้ความร้อนแบบ Dielectric heating ของการออกแบบเพลต 100 kg/hr ที่ความถี่ 95 MHz.....	82
4.28 การจัดชุดการทดลองระบบกำจัดมอดข้าวด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก.....	84
4.29 ข้อมูลภาพที่ได้จาก IR camera (U5857A, Keysight) ของการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกด้วยกำลัง 300 W ตั้งแต่เวลา 0 – 60 วินาที (บน) ที่เวลา 0 วินาที อุณหภูมิของทั้งสามจุดใกล้เคียงอุณหภูมิพื้นหลังที่ 25 °C (กลาง) เมื่อผ่านไป 7 วินาที อุณหภูมิของข้าวอยู่ที่ประมาณ 50 °C ซึ่งเพียงพอต่อการกำจัดมอดข้าว อุณหภูมิที่ Matching network เพิ่มขึ้นจากเดิม 3 °C และอุณหภูมิพื้นหลังยังคงเท่าเดิม และ (ล่าง) ที่เวลาผ่านไป 60 วินาที อุณหภูมิของข้าวเท่ากับ 152 °C.....	85
4.30 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heat rate) ของการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกกับวัสดุไดอิเล็กทริกที่เป็นข้าว (เส้นทึบ) ใช้กำลัง RF power 773 W Heat rate ที่ดีที่สุดเท่ากับ 10.5 °C/s และ (เส้นประ) RF power เท่ากับ 300 W ได้ Heat rate เท่ากับ 4.76 °C /s.....	86

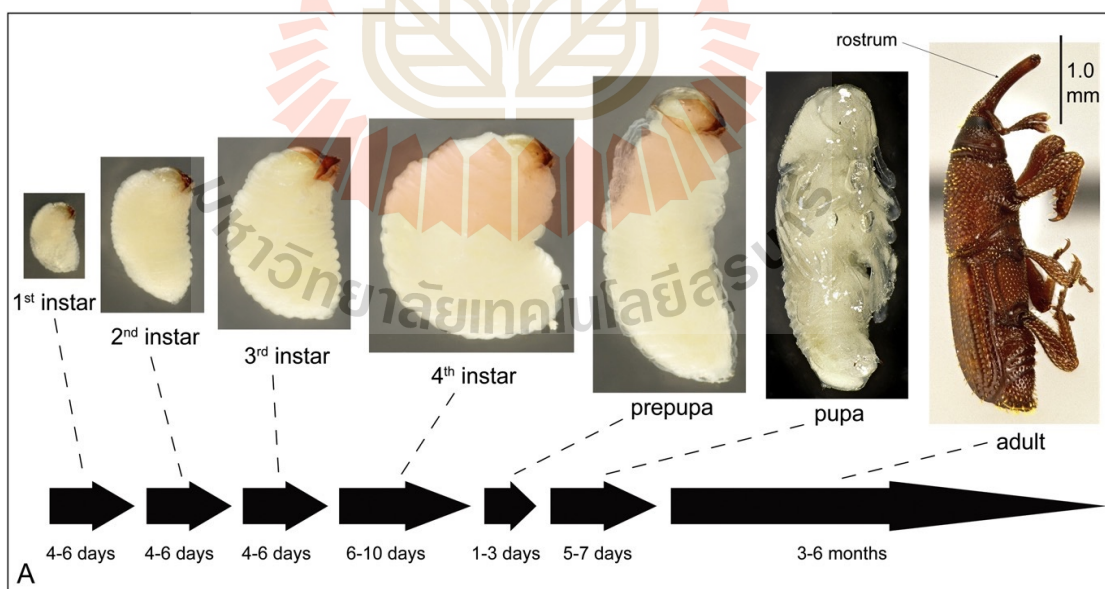
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อาหารปลอดภัยได้รับความสนใจจากผู้บริโภคมากขึ้น ผู้วิจัยจึงเลือกหนึ่งในอาหารที่เป็นอาหารหลักของคนไทยคือ ข้าว ปัญหาของการเก็บข้าวที่สีแล้ว (Milled rice) คือมีแมลงมอดข้าว (Rice weevil) ชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Sitophilus oryzae* (Linnaeus) (ย่อ *S. oryzae*) มาทำลายข้าว ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพและปริมาณของข้าวที่เก็บ สร้างความเสียหาย รวมทั้งยังส่งผลต่อความเชื่อมั่นของผู้บริโภคที่ซื้อสินค้าไป นอกจากนี้ข้าวที่ปนเปื้อนมอดข้าวยังสร้าง Bacteria และ Fungi ขึ้นมาอย่างมาก ก่อให้ข้าวมีเชื้อโรค สกปรก และอาจทำให้ส่งผลเสียต่อการบริโภคข้าวที่ปนเปื้อนเหล่านี้ (Zakladnoy, 2018) จึงมีวิธีกำจัดมอดข้าวด้วยการรมสารเคมีเพื่อทำลายมอด (Chemical fumigation) การกำจัดมอดข้าวด้วยวิธีนี้ได้รับความนิยมในกลุ่มโรงสีผู้ผลิตข้าวมาก เนื่องจากมีต้นทุนไม่สูง มอดตัวโตเต็มวัยถูกกำจัดหมดสิ้น อีกทั้งไม่มีสารเคมีหลงเหลือเนื่องจากสารเคมีที่ใช้ในการรมข้าวคือ Methyl bromide ( $\text{CH}_3\text{Br}$ ) ซึ่งมีจุดเดือดอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ  $3^\circ\text{C}$  ที่อุณหภูมิปกติในประเทศไทยมีค่าระหว่าง  $20 - 35^\circ\text{C}$  สารเคมีนี้จะเดือดและระเหยเป็นไอเข้าสู่ชั้นบรรยากาศโลก อย่างไรก็ตามผู้บริโภคยังมีความกังวลเกี่ยวกับการตกค้างของสารเคมีในข้าว รวมถึงความกังวลเกี่ยวกับชั้นบรรยากาศโลก เนื่องจาก Methyl bromide เมื่อระเหยกลายเป็นไอ จะลอยเข้าสู่ชั้นบรรยากาศโลกและทำลายชั้นโอโซนบริเวณขั้วโลก ด้วยความตระหนักถึงปัญหาสุขภาพที่อาจจะเกิดจากการที่มีสารเคมีตกค้างในอาหาร ซึ่งสามารถส่งผลแบบเฉียบพลันหากสัมผัสโดยตรง รวมถึงอาจส่งผลต่อสุขภาพในระยะยาวได้หากมีการบริโภคสะสมในปริมาณมาก และความกังวลเกี่ยวกับสภาพสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อทุกชีวิตบนโลก ทำให้มีการห้ามใช้และนำเข้าสินค้าที่มีสารเคมี เช่น Methyl Bromide, Methyl Parathion, Methoxy Ethyl Mercuric Chloride, Monocrotophos, Sodium Cyanide และอีกหลาย ๆ ชนิด ในหลายประเทศ ซึ่งอาจมีผล ต่อสุขภาพของผู้บริโภคทั้งในระยะสั้นและระยะยาว นอกจากนี้การถูกทำลายของชั้นโอโซนในบรรยากาศโลกโดยสารเคมีที่ใช้ในการควบคุมแมลง ได้มีหลายประเทศตระหนักถึงปัญหานี้ซึ่งนำไปสู่การทำสนธิสัญญาร่วมกัน เพื่อต่อต้านการใช้สารเคมีในการกำจัดแมลง ในปี 1992 ชื่อว่าสนธิสัญญา Montreal protocol (United States Environmental Protection Agency) เป็นการผลักดันให้ผู้คนตระหนัก ถึงภัยอันตรายที่กำลังก่อตัวขึ้นจากการใช้สารเคมีในอาหาร

การใช้สารเคมีเพื่อกำจัดแมลงมอดข้าวไม่ได้ส่งผลต่อสุขภาพเท่านั้นแต่ยังส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมบนโลกด้วย แต่หากไม่ใช้สารเคมี แมลงมอดข้าวก็จะทำลายข้าวทำให้ข้าวเสียหายจากการเก็บข้าว เกษตรกรในประเทศไทยที่ทำนาเอง หลังจากเก็บเกี่ยวจะนำข้าวไปสีเอาเปลือกข้าวออกแล้วเก็บข้าวที่สีแล้วไว้ ข้าวที่เก็บหากมีมอดข้าวปนเปื้อนจะเจอปัญหาน้ำหนักข้าวตก ราคาขายไม่ดีหากจะนำข้าวมากินเอง ข้าวก็สูญเสียคุณภาพ การเก็บข้าวเป็นระยะเวลาอันยาวนานไม่สามารถทำได้หากไม่กำจัดมอดเสียก่อน มอดข้าวที่ปนเปื้อนอยู่ในข้าวจะอาศัยอยู่ในเมล็ดข้าวโดยการเจาะรูเข้าไปในเมล็ดข้าว วงจรชีวิตของมอดข้าวเริ่มจากตัวโตเต็มวัยสืบพันธุ์แล้วเจาะเมล็ดข้าวไปวางไข่ไว้ จากนั้นไข่จะพัฒนาเป็นดักแด้ พัฒนาต่อจนเป็นตัวอ่อนช่วงนี้ตัวอ่อนจะยังอยู่ในเมล็ดข้าวเมื่อโตขึ้นจะออกมาจากเมล็ดข้าวเข้าสู่ตัวโตเต็มวัย วงจรชีวิตมอดข้าวมีชีวิตอยู่ประมาณ 90 – 180 วัน (Davis, 2011) ตามรูปที่ 1.1 นอกจากมอดจะใช้เมล็ดข้าวเป็นที่ขยายพันธุ์ ยังใช้เป็นอาหารและที่อยู่อาศัย ในทุกกระบวนการที่มอดทำส่งผลให้มีการเจาะทำลายข้าว ข้าวที่มีการปนเปื้อนแมลงมอดข้าวจะเป็นข้าวที่คุณภาพแย่ ลักษณะของข้าวจะแตกหักเป็นผงใช้เป็นอาหารไม่ได้ สูญเสียมูลค่าจากน้ำหนักที่ลดลง แม้ว่าการกำจัดมอดข้าวจะนิยมใช้สารเคมีเนื่องจากมีต้นทุนที่ถูก แต่ยังมีวิธีทางเลือกอื่นที่ได้รับความสนใจและพัฒนาวิจัยเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน คือการกำจัดแมลงด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก (Dielectric heating for insect control)



รูปที่ 1.1 วงจรชีวิตมอดข้าว (*S. oryzae*) จากไข่เป็นตัวอ่อนดักแด้ และตัวโตเต็มวัย (Davis, 2011)



การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก (Dielectric heating) คือการให้วัสดุที่ต้องการให้ความร้อนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า พลังงานจากสนามไฟฟ้าภายนอกจะทำให้วัสดุที่มีโมเลกุลแบบมีขั้ว โมเลกุลจะถูกบังคับไปตามทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า ฉะนั้นหากให้สนามไฟฟ้ามีทิศแบบสลับขั้ว โมเลกุลจะหมุนตัวตามทิศของสนามไฟฟ้าภายนอก ซึ่งการหมุนของโมเลกุลในวัสดุหากหมุนในความถี่ที่เหมาะสม (Resonance frequency and relaxation) จะทำให้เกิดความร้อนจากโมเลกุล เป็นการเกิดความร้อนภายในวัสดุ สนามไฟฟ้าไม่มีความร้อนเกิดขึ้นภายในสนาม แต่การนำวัสดุที่เป็นโมเลกุลแบบมีขั้วอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าสลับ จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นจากการหมุนของโมเลกุลภายใน วัสดุต่างชนิดกันอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าเดียวกัน อาจมีความร้อนเกิดขึ้นไม่เท่ากัน เป็นเพราะค่าสภาพยอม (Permittivity) ของวัสดุต่างชนิดไม่เหมือนกัน จากข้อเท็จจริงนี้ทำให้สามารถเลือกให้ความร้อนแก่วัสดุบางชนิดได้แม้ว่าวัสดุนั้นจะอยู่บนกับวัสดุอื่น เช่น แผลงมอดข้าวในข้าว

มอดข้าวที่ปนเปื้อนอยู่ในข้าวสามารถกำจัด ด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก โดยเลือกความถี่ที่เหมาะสมที่จะทำให้มอดข้าวเกิดความร้อนภายในสูงที่สุด ในขณะที่ทำให้ข้าวมีความสูญเสียน้อยที่สุด เพราะการให้สนามไฟฟ้าแก่มอดข้าวและข้าว ย่อมทำให้ข้าวสามารถเกิดความร้อนได้ เนื่องจากเมล็ดข้าวมีส่วนประกอบของโมเลกุลที่มีขั้ว

ในช่วงแรกการนำการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกมาใช้ในการกำจัดแมลง มีความกังวลเกี่ยวกับอนาคตของเทคโนโลยีนี้ ทั้งในเรื่องต้นทุนอุปกรณ์ที่สูง รวมถึงค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากหลอดสูญญากาศที่มีประสิทธิภาพราว ๆ 50% เมื่อมองย้อนกลับไปเทียบกับค่าใช้จ่ายของการใช้สารเคมีกำจัดแมลง ทำให้ยากที่จะมีผู้ลงทุนกับวิธีการจัดแบบไม่ใช้สารเคมี แต่การพัฒนาก็ไม่ได้หยุดนักวิจัยยังคงค้นคว้ามาเรื่อย ๆ จนสามารถอยู่ในอุตสาหกรรมได้ ที่ประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นกระแสสลับความถี่สูง (DC to AC conversion) อยู่ที่ 50 – 65% สำหรับหลอดสูญญากาศ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ศึกษาและพยายามที่จะเพิ่มประสิทธิภาพ ไม่เพียงแค่การแปลงไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นกระแสสลับความถี่สูง แต่ยังรวมประสิทธิภาพทั้งระบบ จากไฟฟ้า 220 V, 50 Hz เป็นความร้อนที่เกิดขึ้นต่อวินาทีในข้าว เปรียบเทียบใช้กำลังไฟฟ้าเทียบกับกำลังที่เกิดขึ้นกับข้าวในรูปแบบความร้อน โดยใช้ LDMOS (Laterally Diffused MOSFET) ในวงจรขยายสัญญาณความถี่สูง กำลังสูง SSPA (Solid-State Power Amplifier) แทนวงจรหลอดสูญญากาศ LDMOS มีข้อได้เปรียบ เช่น ประสิทธิภาพอยู่ที่ 70 – 85% ขนาดเล็ก และเหมาะกับการพัฒนาอุปกรณ์กำจัดแมลงขนาดเล็ก สำหรับใช้ตามครัวเรือน

จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้ คือสร้างอุปกรณ์กำจัดมอดข้าวที่ปนเปื้อนในข้าวขนาดเล็ก ประสิทธิภาพสูง เพื่อใช้สำหรับครัวเรือน เพื่อลดความเสียหายอันจะเกิดขึ้นกับข้าวจากการปนเปื้อนของมอดข้าว รวมถึงธุรกิจรอบครัวรายย่อย ที่ต้องการสร้างรายได้จากการรับกำจัดมอดข้าวในข้าว

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังสังเกตเห็นความเป็นไปได้ที่จะกำจัดแมลงชนิดอื่นที่ชอบอาศัยอยู่ในข้าว เช่น มด เนื่องจากมดจะมาทำรังในข้าวที่เก็บไว้ ทำให้ข้าวเกิดความเสียหาย

## 1.2 จุดประสงค์งานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษา และออกแบบอุปกรณ์กำจัดมอดในข้าวสำหรับครัวเรือน ประสิทธิภาพไม่ต่ำกว่า 60%

## 1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

- 1) มอดข้าวเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกที่สามารถให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกได้
- 2) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ SSPA สามารถใช้กับงานให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกแทนหลอดสุญญากาศ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ระบบกำจัดแมลงมอดข้าว ที่สามารถใช้ทดแทนกับระบบกำจัดแมลงมอดข้าวที่มีอยู่ในครัวเรือน และอุตสาหกรรมปัจจุบัน เพื่อลดการใช้พลังงาน ค่าใช้จ่าย และยังคงคุณภาพที่ดีของข้าว
- 2) เป็นแนวทางให้กับหน่วยงานที่สนใจสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ของตน เพื่อยกระดับสินค้าประเภทผลผลิตทางการเกษตรส่งออก และภายในประเทศ



## บทที่ 2

### ทบทวนวรรณกรรม งานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทบทวนวรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โดยทั่วไปการกำจัดแมลงศัตรูพืชผลผลิตทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว (Postharvest pest control) นิยมทำกันอยู่หกวิธี (Wang & Tang, 2001) หนึ่งในกำจัดแมลงด้วยการรมสารเคมี (Chemical fumigation treatment) เป็นวิธีที่มีราคาถูกและนิยมใช้มากที่สุด สำหรับมอดข้าวใช้เวลาประมาณ สามชั่วโมงเพื่อให้ตัวโตเต็มวัยของมอดตาย ได้อัตรากำไรผลิตสูง โดยทั่วไปจะใช้ Methyl bromide (MeBr) ความเข้มข้นประมาณ 80 – 95% หลังจากรมเสร็จแล้วจะปล่อยสารทิ้งสู่บรรยากาศ MeBr มีจุดเดือดต่ำดังนั้นเมื่อปล่อยสาร สารดังกล่าวจะระเหยออกอย่างรวดเร็ว เป็นการลดสารตกค้างเหลือทิ้งไว้ในข้าวให้น้อยที่สุด นอกจากเรื่องสารตกค้างในข้าวยังมีเรื่องของกรณีที่ MeBr ทำลายชั้นบรรยากาศโลก โดยมีการตั้งสนธิสัญญา Montreal Protocol ประกาศสั่งห้ามไม่ให้ใช้ MeBr เพื่อปกป้องรักษาชั้นบรรยากาศโลก สองการใช้รังสี (Ionizing radiation treatment) เป็นการใช้รังสีแกมมา (Gamma ray) ที่มีพลังงานสูงเข้าทำลาย DNA (Deoxyribonucleic acid) ของแมลงหรือแบคทีเรียไม่ทำให้สามารถสืบพันธุ์ต่อได้ เนื่องจากรังสีแกมมาสามารถทะลุทะลวงได้สูง และไม่จำเป็นต้องใช้ความเข้มข้นสูง เพียง 0.3 kGy ก็สามารถกำจัดแมลงหรือแบคทีเรียได้โดยยังรักษาคุณภาพของผลผลิตไว้ได้ วิธีนี้จะไม่ทำให้แมลงตาย 100% ในทันที แต่จะทำให้แมลงหรือแบคทีเรียไม่สามารถมีรุ่นลูกต่อไปได้ วิธีการทำลาย DNA โดยรังสีมีสองกลไก คือหนึ่งการเข้าทำลายโดยตรง (Direct) รังสีที่มีพลังงานสูงจะทำลายพันธะสาย DNA ของแมลงโดยตรง สองการทำลายโดยอ้อม (Indirect) รังสีแกมมาเมื่อกระทบกับโมเลกุลของน้ำ ( $H_2O$ ) น้ำจะแตกตัวเป็นไฮดรอกไซด์  $OH^-$  จาก  $H_2O + photon \rightarrow H^+ + OH^-$  ซึ่ง  $OH^-$  นี้คือประจุไอออนที่แตกตัวออกมาจากน้ำและประจุดังกล่าวนี้เมื่อไปชน DNA พันธะจะถูกทำลาย ปัญหาหลักของวิธีการใช้รังสีคือมีต้นทุนการสร้างสูง ทั้งการควบคุม การป้องกันรังสีรั่วไหล รวมถึงความตระหนักของผู้บริโภคที่ระแวงถึงการตกค้างของรังสีในอาหาร และยังมีปัญหาการกำจัดกากรังสีหลังการใช้ สามารถควบคุมระดับออกซิเจนในบรรยากาศ (Controlled atmosphere treatments) ลดระดับของออกซิเจน ( $O_2$ ) ในบรรยากาศให้ลดลง และเพิ่มระดับของคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ให้มากขึ้น โดยปกติแล้วจะนำผลผลิตที่มีแมลงปนเปื้อนไว้ในโรงที่ปิดสนิทขนาดใหญ่ จากนั้นเริ่มลดระดับของออกซิเจนให้ต่ำกว่า 1% และเพิ่มระดับของคาร์บอนไดออกไซด์ให้มากกว่า 20%

การกำจัดแมลงด้วยวิธีการควบคุมระดับออกซิเจนนี้สามารถกำจัดสิ่งมีชีวิตที่ปนเปื้อนผลผลิตได้ 100% แต่เป็นวิธีกำจัดแมลงที่มีราคาสูง ใช้ระยะเวลาสั้น รวมทั้งได้รับรายงานว่า การให้ผลผลิตอยู่ในภาวะที่มีระดับออกซิเจนต่ำ มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลไม้บางชนิด ที่การกำจัดด้วยการแช่แข็ง (Cold treatment) โดยลดอุณหภูมิของผลผลิตทางการเกษตร หากใช้เวลานานพอจะสามารถกำจัดแมลงให้ตายได้ แต่ปัญหาค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษาเพื่อคงอุณหภูมิ ทั้งยังใช้ระยะเวลานานกว่าแมลงจะตายทั้งหมด หากการใช้ความร้อนกำจัดแมลงแบบดั้งเดิม (Conventional heating treatment) เป็นการใช้ลมร้อนหรือน้ำร้อน หรือทั้งสองอย่างเวียนผ่านผลผลิต วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายทั้งการสร้างและการควบคุม ใช้แทนวิธีการใช้สารเคมีได้ดี ปกติแล้วจะทำให้ผลผลิตเคลื่อนในสายพานการผลิตอย่างช้า และใช้เวลาในการให้ความร้อน 20 – 360 นาที ตามแต่ชนิดของผลผลิต ที่อุณหภูมิ 40 – 52 °C ด้วยวิธีนี้สามารถกำจัดแมลงได้ถึง 99.9968% ปัญหาของการกำจัดแมลงด้วยความร้อนในระยะเวลาสั้น อาจทำให้มีผลต่อคุณภาพของผลผลิต เช่น ความอ่อนนุ่มของผลไม้บางชนิดที่เปลี่ยนไป การใช้ความร้อนเป็นระยะเวลาสั้นไม่ส่งผลดีต่อคุณภาพของสินค้าในการผลิตระดับอุตสาหกรรม หากการกำจัดแมลงด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก (Dielectric heating treatment) เป็นการใช้นามความถี่ในย่านความถี่วิทยุ RF (Radio frequency) หรือ คลื่นความถี่สูง ย่านความถี่ไมโครเวฟ MW (Microwave) ทั้งสองอย่างนี้ RF และ MW คือหลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก ซึ่งจะได้ผลดีกับวัสดุที่เป็นวัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric material) วัสดุพวกนี้คือ วัสดุที่มีโมเลกุลเป็นขั้ว (Polar molecules) เมื่อให้วัสดุอยู่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic field) ขั้วของโมเลกุลจะหมุนเคลื่อนที่ตามทิศของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าก่อให้เกิดความร้อนจากภายในวัสดุ โดยทั่วไปใช้ความถี่ 12 – 2450 MHz ในอุตสาหกรรมการผลิตอาหาร ความร้อนที่เกิดขึ้นจากพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic energy) อธิบายได้จากสมการ (2.1)

$$P_{vol} = \rho C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = \omega E^2 \epsilon_0 \epsilon_r'' \quad (2.1)$$

เมื่อ	$\rho$	คือ ความหนาแน่นของวัสดุ ( $\text{kg/m}^3$ )
	$C_p$	คือ ค่าจำเพาะความจุความร้อนของวัสดุ ( $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ )
	$\Delta T$	คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ในช่วงเวลา $\Delta t$
	$\omega$	คือ ความถี่เชิงมุม (rad)
	$E$	คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)
	$\epsilon_0$	คือ Dielectric permittivity ( $8.8541 \times 10^{-12}$ F/m)
	$\epsilon_r''$	คือ Dielectric loss factor

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกสำหรับการควบคุมกำจัดศัตรูพืชหลังการเก็บเกี่ยว เริ่มตั้งแต่ 1929 โดย Headlee และ Burdette (Nelson, 1996) ทำการทดลองกับแมลงบางชนิดในน้ำผึ้งที่มีความถี่ 12 MHz มีการศึกษาเพิ่มเติมเรื่อยมา ต่อมานาย Davis ได้ลิขสิทธิ์ในปี 1934 ในชื่อ High-Frequency Method and Equipment for Exterminating Insect Life in Seed, Grain, or Other Materials ในช่วงปี 1950 เริ่มมีการตระหนักถึงสุขภาพ และความปลอดภัยจากสารเคมีที่ใช้ในการฆ่าแมลง จนถึง 1970 ทำให้มีการศึกษาเกี่ยวกับทางเลือกในการกำจัดแมลงอื่น ๆ ที่ไม่ใช่สารเคมี ถึงแม้จะมีความเป็นห่วงกังวลเกี่ยวกับการใช้สารเคมี ทุกวันนี้ก็ยังมีการใช้สารเคมีอยู่เช่นเคย

การจะให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกแก่สาร จำเป็นต้องพิจารณาถึง Dielectric permittivity ซึ่ง ค่านี้จะอยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อน ส่วนที่เป็นค่าจริงจะหมายถึง ความสามารถในการเก็บพลังงานในรูปของสนามไฟฟ้า และส่วนจินตภาพจะหมายถึง พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกกระจายตัวแปลงไปเป็นพลังงานในรูปแบบใหม่ คือพลังงานความร้อน ซึ่งคือหลักการพื้นฐานของการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก หรือการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟ ถ้าหากใช้คลื่นความถี่ในย่านไมโครเวฟ ค่า Dielectric permittivity ที่อยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อน สามารถเขียนได้  $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$  โดยที่  $\epsilon'$  คือ Dielectric constant และ  $\epsilon''$  คือ Dielectric loss factor ค่าไดอิเล็กทริกอีกรูปแบบ ที่นิยมใช้คือ Loss tangent สามารถเขียนได้ในรูป  $\tan(\delta) = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก กำลังกระจายต่อหน่วยปริมาตรในวัสดุ Non-magnetic วัสดุเนื้อเดียวที่ได้รับพลังงานจากคลื่นวิทยุ RF energy สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.1) การให้กำลังอย่างต่อเนื่องจะทำให้วัสดุมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่อเวลาที่เปลี่ยนไป (Heating rate: °C/s) อธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.2)

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P_{vol}}{\rho C_p} \quad (2.2)$$

ความถี่ที่ใช้ในการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกจะอยู่ในช่วง 1 – 100 MHz วัสดุที่จะนำมาให้ความร้อนด้วยวิธีนี้จะอยู่ระหว่างเพลตตัวนำที่วางขนานกัน ความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างเพลตขนานที่มีวัสดุไดอิเล็กทริก จะเท่ากับ Voltage ของสัญญาณ RF ที่ตกคร่อมระหว่างเพลตหารด้วยความหนาของวัสดุ  $E = V/d$  (V/m)

การให้ความร้อนแบบไมโครเวฟ เบื้องหลังการเกิดความร้อนจะเหมือนกับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกต่างที่ความถี่ที่ใช้ ความถี่ย่านไมโครเวฟที่นิยมนำมาใช้ให้ความร้อน จะใช้ความถี่ที่สูงมากกว่า 500 MHz ซึ่งมี 869, 915, และ 2450 MHz เป็นการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ออกมา เมื่อคลื่นกระทบกับวัสดุ ไดอิเล็กทริก วัสดุจะดูดซับพลังงานแล้วแปลงเป็นพลังงานความร้อน ข้อดีของการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟคือวัสดุมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงในระยะเวลาที่สั้น ทำให้มีข้อเสียตามมาก็คือการควบคุมที่ลำบากและการกระจายตัวของความร้อนไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งยังไม่สามารถใช้กับวัสดุที่มีความหนามากเกินไป เมื่อคลื่นตกกระทบวัสดุคลื่นจะยังสามารถเคลื่อนที่ในวัสดุได้ อีกช่วงความยาวหนึ่งแต่พลังงานจะลดทอนเรื่อยไป ตามความลึกที่คลื่นเข้ามาในวัสดุ สามารถอธิบายได้ในสมการ (2.3) (Hou, Johnson, & Wang, 2016) รูปที่ 2.1 เป็นแผนภาพที่ช่วยให้เข้าใจเรื่อง Penetration depth เมื่อ Incident wave ที่มีพลังงานค่าหนึ่งตกกระทบวัสดุ จะมีพลังงานบางส่วนสะท้อนออกไป ขึ้นอยู่กับวัสดุนั้นว่ามีความซึมซาบคลื่นได้ดีแค่ไหน พลังงานที่เข้าไปในวัสดุจะลดทอนลงตามระยะความลึกที่มากขึ้น จนเมื่อพลังงานมีค่าเท่ากับ  $1/e$  หรือประมาณ 37% เรียกความลึกนี้ว่า Penetration depth ระยะความลึกนี้ขึ้นอยู่กับความถี่ และชนิดของวัสดุ

$$d_p = \frac{c}{\omega \left[ 2\epsilon' \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} - 1 \right) \right]^{1/2}} \quad (2.3)$$

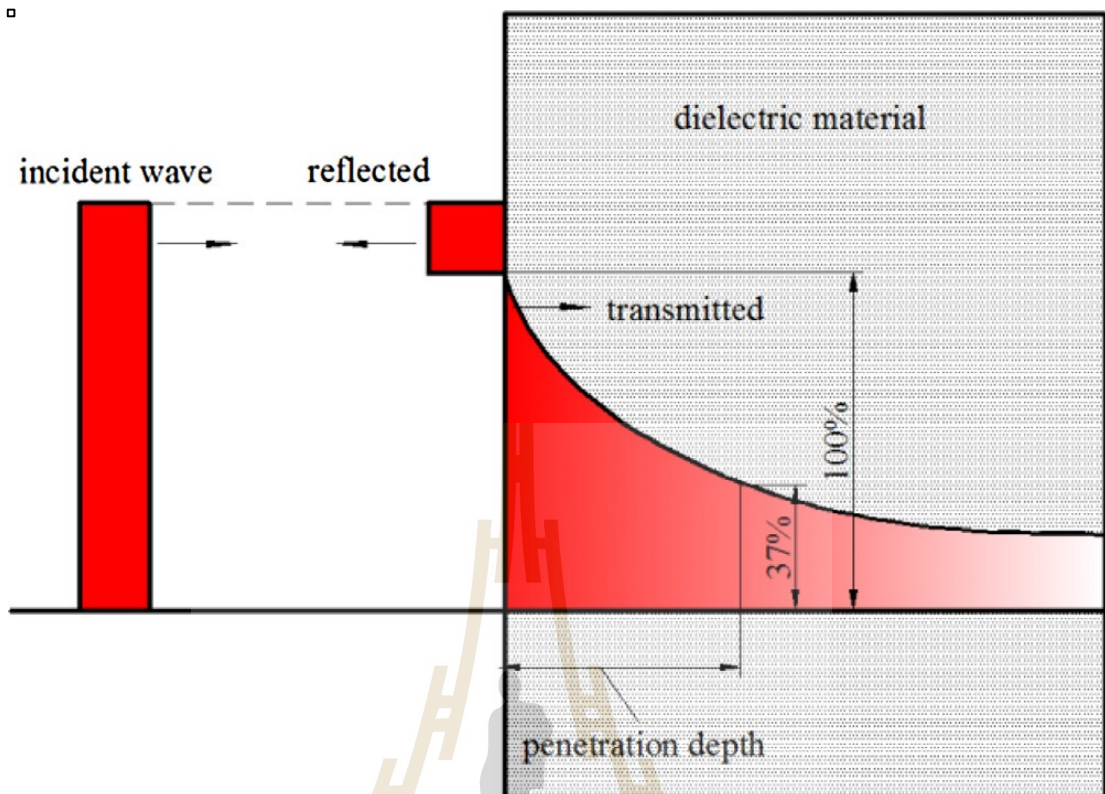
ความแตกต่างระหว่างการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกและการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟ ในการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกจะใช้ความถี่ย่านความถี่วิทยุ RF อยู่ในช่วง 1 – 100 MHz ซึ่งโดยปกติที่ใช้โดยทั่วไปจะมีความถี่ 13.5, 27, และ 40 MHz การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกเกิดขึ้นมาก่อนการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟ โดยในช่วง 1947 การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกส่วนมากจะให้ความร้อนแก่วัสดุอยู่ระหว่างเพลตขนานกันสองเพลต แต่ก็ยังมีอีกหลายรูปแบบในการให้ความร้อนไม่เพียงแต่เพลตขนานเท่านั้น การให้ความร้อนแบบไมโครเวฟก็ยังถือว่าเป็นการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกชนิดหนึ่ง 1988 เพราะฉะนั้นสมการที่ (2.1) จะใช้กับการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟได้ เป็นการพัฒนา การให้ความร้อนหลังจากสงครามโลกครั้งที่สองที่มีการผลิต Magnetrons ขึ้นมาใช้ การให้ความร้อนแบบไมโครเวฟจะใช้ความถี่ที่สูงกว่า 500 MHz ส่วนมากจะใช้ความถี่ 869, 915, และ 2450 MHz อย่างที่เคยกล่าวถึงไปแล้วว่าการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกจะให้วัสดุอยู่ระหว่างเพลตขนาน การให้ความร้อนอย่างรวดเร็วทำได้โดยให้ความต่างศักย์ระหว่างเพลตขนานสูงมาก โดยจำกัดที่ Dielectric breakdown ของวัสดุนั้น สำหรับรูปร่างทางกายภาพของเพลตขนานทำให้มีความเข้มสนามไฟฟ้าที่ Uniform ถ้าวัสดุนี้เป็นแบบ Homogeneous แตกต่างจากการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟที่ การลดทอนและ Penetration depth มีความสำคัญเนื่องจากความถี่ที่ใช้สูงกว่าการให้ความร้อนแบบ RF มาก ทำให้การให้ความร้อนสูงอย่างรวดเร็วสามารถทำได้ถึงแม้ว่าจะมีความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต่ำ อย่างไรก็ตามการประมาณความเข้ม

สนามไฟฟ้าจะเป็นไปอย่างซับซ้อนด้วยการที่มีการลดทอนในวัสดุและรูปร่างของวัสดุที่อาจจะไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นเพื่อให้วัสดุมีความร้อนทั่วกันจะนิยมหมุนวัสดุในขณะที่วัสดุเคลื่อนที่ผ่านคลื่น แต่สำหรับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก Penetration depth จะไม่มีผลมากเพราะความยาวคลื่นที่ต่ำเมื่อเทียบกับความถี่ย่านไมโครเวฟ ในขณะที่รูปร่างของวัสดุจะมีผลอย่างมาก นาย R. S. Ferrari-John และคณะ (Ferrari-John et al., 2016) ศึกษาจากการจำลองบนคอมพิวเตอร์ พบว่ารูปร่างของวัสดุที่เป็นแบบทรงกลม จะให้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของวัสดุระหว่างเพลตมีความ Uniform มากที่สุด แต่ไม่ได้เข้มที่สุด จุดที่มีสนามไฟฟ้าเข้มที่สุดคือจุดที่วัสดุมีรูปร่างเรียวยาวแหลมและคม เช่นตรงขอบของกล่องที่มีเหลี่ยม หรือ ตรงยอดของวัสดุรูปร่างพีระมิด ดังรูปที่ 2.2 อุณหภูมิแปรผันตรงต่อความเข้มสนามไฟฟ้าตามสมการที่ (2.1)

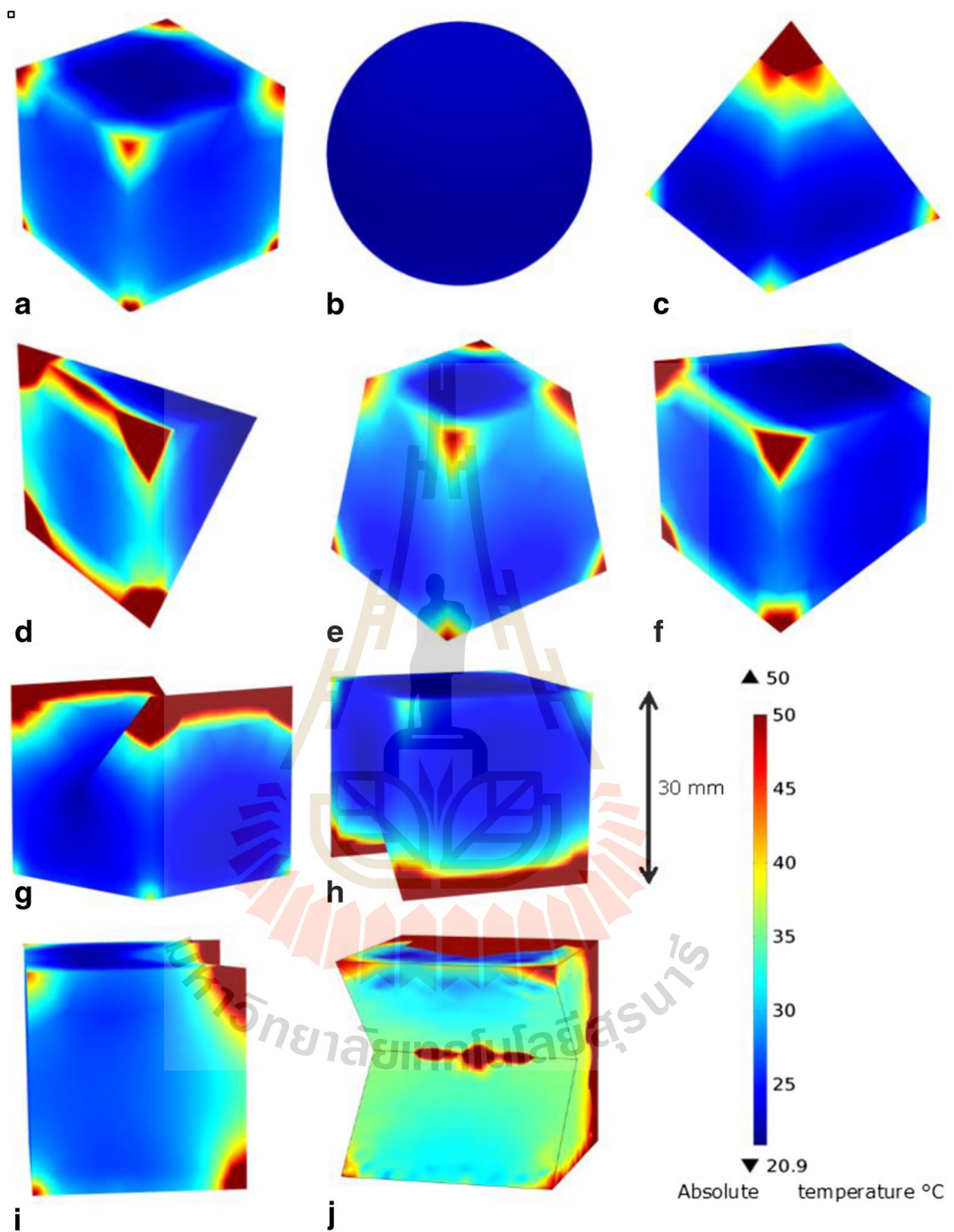
การเลือกให้ความร้อนแก่วัสดุต่างชนิดกัน หากในผลผลิตข้าวหลังการเก็บเกี่ยว มีศัตรูคือมอดข้าว การเลือกให้ความร้อนจำเพาะต่อมอดทำได้ ถึงแม้ว่ามอดข้าวจะปนผสมอยู่ในข้าว เมื่อให้พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นในทั้งข้าวและมอดข้าว ความถี่ที่ได้รับสำหรับมอดและข้าวจะเป็นความถี่เดียวกัน ที่แตกต่างกันคือค่า Dielectric loss factor ของข้าวและมอดข้าวไม่เหมือนกันแม้ในความถี่เดียวกัน ทำให้สนามไฟฟ้าในข้าวและมอดไม่เท่ากัน หากเลือกให้มอดมีความร้อนสูงกว่าข้าวทำได้โดยเลือกความถี่ที่เหมาะสม แต่เป็นไปได้เลยที่ข้าวจะไม่ได้รับพลังงาน เนื่องจากทั้งข้าวและมอดอยู่ผสมกัน ดังนั้นข้าวจึงได้รับพลังงานและถูกแปลงมาเป็นพลังงานความร้อนเช่นเดียวกับมอด เพียงแต่ในปริมาณที่น้อยกว่าตามค่า Loss factor ในทางกลับกันสามารถเลือกให้ความถี่ทำให้ข้าวร้อนมากกว่ามอดได้เช่นกัน นี่คือข้อได้เปรียบของการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกคือการเลือกให้ความร้อนแก่วัสดุที่ต้องการถึงแม้ว่าวัสดุนั้นจะอยู่ปนกับวัสดุอื่น

การทดลองการให้ความร้อนแก่แมลงในช่วงที่ผ่านมา (1929 - 2018) วัสดุที่ได้รับพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีความร้อนสูงขึ้นด้วยอัตราหนึ่ง ความชันของอัตราการเพิ่มความร้อน (Heat rate) นี้ขึ้นอยู่กับความเข้มสนามไฟฟ้า และความถี่ของสนามไฟฟ้า อีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญคือ Dielectric loss factor ซึ่งจะเพิ่มขึ้นหากวัสดุนั้นมีความชื้นเพิ่มขึ้นเช่น เมล็ดข้าว อัตราการให้ความร้อนในเมล็ดข้าวจะเพิ่มขึ้นเมื่อข้าวมีความชื้นสูงขึ้น การทดลองยังบอกด้วยว่าแมลงที่ปนเปื้อนในข้าว หรือในแป้งข้าว สามารถควบคุมได้ด้วยการให้ความร้อนแบบช่วงระยะเวลาสั้น เนื่องจากวิธีนี้จะไม่ทำให้วัสดุข้าว หรือแป้งข้าวเสียหาย สำหรับการให้ความร้อนที่ดีข้าวหรือแป้งข้าวควรจะมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 40 – 60 °C ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของวัสดุนั้น แมลงมอดข้าวสามารถถูกกำจัดได้ที่ความถี่ 13 และ 39 MHz โดยไม่ทำให้ข้าวหรือแป้งข้าวเสียหาย อย่างไรก็ตาม การนำการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกไม่ว่าจะแบบ RF heating หรือ Microwave heating ก็ยังไม่เป็นที่แพร่หลายเนื่องจากต้นทุนที่สูงเมื่อเทียบกับวิธีการใช้สารเคมีแบบเดิม





รูปที่ 2.1 แผนภาพคลื่นตกกระทบกับวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีบางส่วนสะท้อนออกมา และระยะความลึกที่เรียกว่า Penetration depth ซึ่งขึ้นกับความถี่และชนิดของวัสดุตั้งสมการ (2.3) (Hou et al., 2016)



รูปที่ 2.2 ผลการ Simulation ของการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกกับวัตถุรูปร่าง ต่างแบบกัน 10 แบบ (Ferrari-John et al., 2016)

จากการทดลองอัตราการตายของมอดข้าวขึ้นอยู่กับสามปัจจัยหลัก ความถี่, ความเข้มสนามไฟฟ้า, และ อัตราการเพิ่มความร้อน (Heat rate) (Nelson, 1996) อัตราการตายของมอดยังมีในรูปแบบของความล่าช้า (Delayed) แมลงบางชนิดอาจใช้เวลาถึง 2 – 3 สัปดาห์กว่าจะตายหลังจากถูกให้ความร้อน ความล่าช้าของมอดข้าวใช้ระยะเวลา 1 – 8 วัน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความถี่ที่ใช้ในการให้ความร้อน ยังมีการปรับปรุงพัฒนาวิธีอื่น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอัตราการตายของแมลง เช่นการเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้า พบว่าอัตราการตายของแมลงสูงกว่า ความเข้มสนามไฟฟ้าค่าที่ความถี่เดียวกัน นอกจากนี้ยังได้มีการเพิ่มการใช้มอดคลื่นสั้นมาช่วยเพิ่มอัตราการตายของแมลง โดยใช้สัญญาณแบบ Pulse-modulated ความกว้าง 5 – 40 ms และ 10 – 40 ลูกคลื่นสัญญาณต่อวินาที (Pulse per second) พบว่าการทำมอดคลื่นสั้นของสัญญาณไม่ได้มีความแตกต่างจากการใช้สัญญาณเดิม (CW) แต่อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าจะเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าเป็น 4 kV/cm และใช้ Pulse สั้นลงถึง 50  $\mu$ m ผลลัพธ์ยังคงไม่แตกต่างจากใช้ความเข้มสนามไฟฟ้า 1.4 kV/cm แบบต่อเนื่อง (CW)

พวกแมลงที่รอดจากการศึกษาพบว่าแมลงเหล่านี้ ยังมีความสามารถในการสืบพันธุ์ได้แต่ อัตราการสืบพันธุ์ลดลงหลังจากที่ผ่านการให้ความร้อน เพราะผลกระทบจากความร้อนที่ทำให้แมลงเกิดการบาดเจ็บ (Heat injuries) เช่นความร้อนส่งผลต่ออวัยวะที่ใช้ในการสืบพันธุ์ ทำให้อัตราการสืบพันธุ์ของแมลงลดลง ผลกระทบการบาดเจ็บจากความร้อนที่เกิดขึ้นกับแมลงที่สังเกตได้แมลงมีขาไม่ครบ หรือรูปร่างของแมลงผิดปกติไปหลังจากผ่านการให้ความร้อน

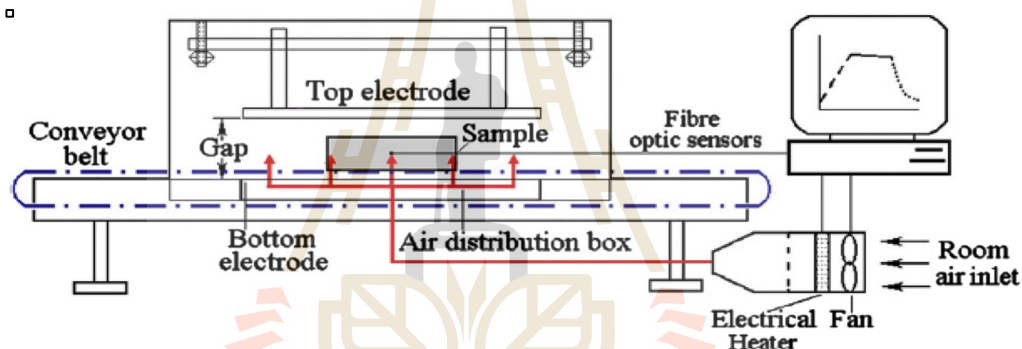
มีการศึกษาและทดลองการยืนยันเพื่อพิสูจน์ว่าการใช้ RF heating สามารถใช้กำจัดแมลงได้จริง โดย (Zhou & Wang, 2016b) ทำการทดลองกำจัดมอดในข้าวสามชนิด rough, brown, and milled rice คือ ข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวสาร โดยใช้เครื่องให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 27.12 MHz ขนาดกำลัง 6 kW ดังรูปที่ 2.3 ตัวแปรที่ศึกษามี เวลาที่ให้ความร้อน อุณหภูมิที่ให้ต่อข้าว โดยเริ่มจากการคงค่าเวลาที่ให้ความร้อนที่ ห้านาที แล้วมีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 4 แบบ คือ 44, 46, 48 และ 50 °C ผลอัตราการรอดของแมลงที่ได้พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการตายกับอุณหภูมินั้นแปรผันตรงต่อกัน โดยมีอัตราการตายสูงสุดที่ 50 °C จากนั้นได้เปลี่ยนตัวแปรในการศึกษา ให้อุณหภูมิคงที่ 50 °C และให้ช่วงเวลาที่ให้ความร้อนแตกต่างกัน 4 แบบคือ 0, 2, 4 และ 6 นาที ผลอัตราการตายของมอดพบว่ายิ่งเวลาที่ให้ความร้อนมากขึ้นอัตราการตายของมอดสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งมอดข้าวสามารถกำจัด 100% ได้ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 6 นาที นอกจากนี้ในงานวิจัยยังศึกษาถึงคุณภาพของข้าวหลังผ่านการให้ความร้อน โดยผู้วิจัยได้สรุปว่าการกำจัดมอดด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกที่สามารถกำจัดได้ 100% ผลทางกายภาพของข้าวไม่ว่าจะเป็น ความชื้น โปรตีน กรดไขมัน สี ฯ ไม่มีความแตกต่างกันกับข้าวที่ไม่ได้ผ่านการกำจัดมอดอย่างมีนัยสำคัญ และได้มีลักษณะงานวิจัยในทำนองเดียวกันนี้ (Vearasilp et al., 2015) ได้ใช้เครื่องกำจัดมอดทำงานที่ 27 MHz ที่กำลัง 15 kW ดังรูปที่ 2.4 โดยทำการทดลองที่สองช่วงอุณหภูมิคือ 50



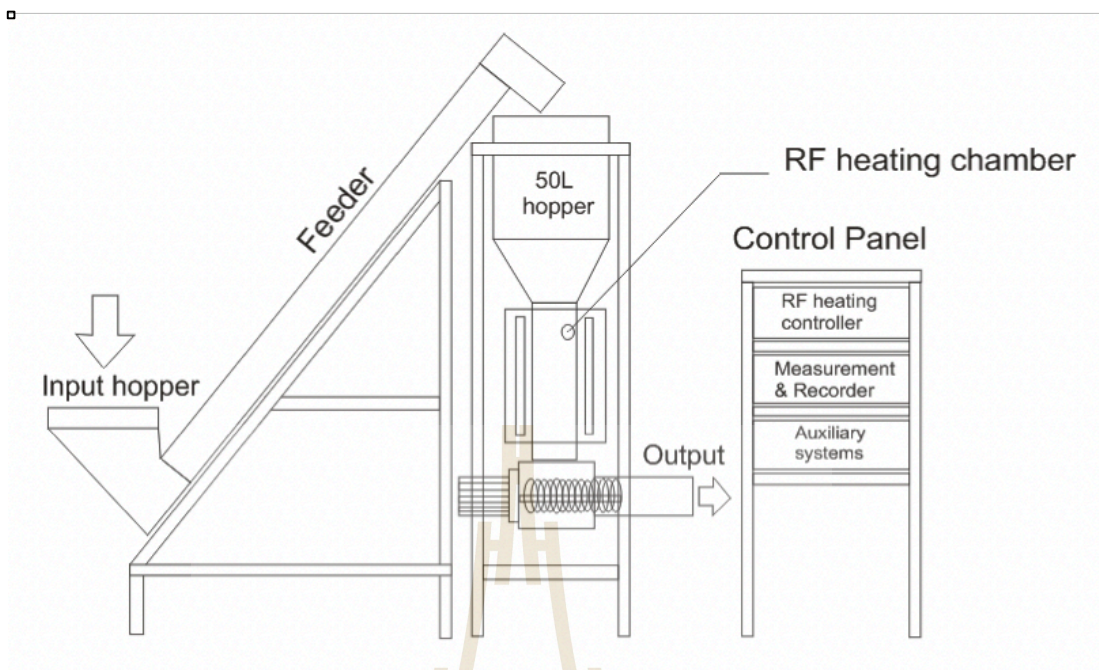
และ 55 °C ที่ช่วงเวลากการให้อุณหภูมิ 4 ช่วงคือ 0, 1, 3 และ 5 นาที ผลการทดลองของกลุ่มวิจัยนี้พบว่า นอกจากกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้ให้ความร้อนแล้ว กลุ่มอื่นทั้งหมดที่เหลืออัตราการตายของมอดอยู่ที่ 100% ซึ่งแตกต่างจากผลการทดลองของอีกกลุ่ม ถึงแม้จะใช้ที่ความถี่เดียวกัน แต่ขนาดกำลังไม่เท่ากัน ซึ่งอาจจะมีส่วนทำให้มอดตายได้ถึงแม้อุณหภูมิและเวลาจะไม่สูงมาก นอกจากนี้คุณภาพของข้าวเช่น ความชื้น โปรตีน กรดไขมัน สี ฯ ไม่มีความแตกต่างกันกับข้าวที่ไม่ได้ผ่านการกำจัดมอดอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกันกับงานวิจัยข้างต้น และในกลุ่มวิจัยเดียวกันนี้ได้ทดลองศึกษาอุณหภูมิและเวลา หลากหลายมากขึ้น โดยมีเป้าหมายเพื่อหาจุดที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดมอดอย่างประหยัดพลังงานมากที่สุด (Wangspa, Chanbang, & Vearasilp, 2015) โดยใช้อุณหภูมิต่างกัน 5 รูปแบบคือ 50, 55, 60, 65 และ 70 °C และช่วงเวลาที่ให้ความร้อน 4 รูปแบบคือ 90, 120, 150 และ 180 วินาที พบว่าทุกช่วงเวลาที่อุณหภูมิ 50°C ไม่สามารถทำให้มอดตาย 100% ได้ นับเฉพาะอัตราการตายมอดที่เท่ากับ 100% มี 55 °C 180 วินาที 60 °C ที่ 150 และ 180 วินาที 65 และ 70 °C ที่ 120, 150 และ 180 วินาที โดยทางคณะกลุ่มผู้วิจัยได้สรุปว่า ณ ตำแหน่งมีประหยัดพลังงานมากที่สุดคือการใช้อุณหภูมิ 65 °C ที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 วินาที

ได้มีการพิจารณาถึงลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าสำหรับการกำจัดมอดข้าว ด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก โดยการใช้การกระจายสนามไฟฟ้าแบบทรงกระบอก หรือแบบ Coaxial และแบบแผ่นเพลตขนาน (Ponomaryova, De Rivera Y Oyarzabal, & Sánchez, 2009) ดังรูปที่ 2.5 ทางผู้วิจัยได้สรุปว่า แบบเพลตขนานนั้นให้อัตราการตายของมอดได้ดีกว่าแบบทรงกระบอก งานวิจัยชิ้นนี้แตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมา ที่พูดถึงอุณหภูมิเป็นหลักในการหาความสัมพันธ์กับอัตราการตายของมอด งานวิจัยนี้จะพูดถึงความเข้มของสนามไฟฟ้าเป็นหลัก โดยทำการทดลอง 4 ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต่างกันคือ 350, 700, 1000 และ 2000 kV/m ที่ระยะเวลาต่างกัน 6 แบบคือ 0.5, 1, 5, 10, 20 และ 30 วินาที ใช้ความถี่ 47.5 MHz ผลที่ได้ค่อนข้างน่าสนใจ เพราะไม่ใช่เพียงความเข้มสนามไฟฟ้าสูง และระยะเวลานาน งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ใหม่ในการกำจัดมอด เช่นที่ ความเข้มสนามไฟฟ้า 350 kV/m มอดตาย 100% ที่ระยะเวลา 5, 10 และ 20 วินาที เพียงแต่ที่ 30 วินาที มอดกลับตายไม่ทั้งหมด เป็นที่น่าแปลกใจ เพราะโดยทั่วไปยิ่งมอดได้รับพลังงานมากเท่าใด อัตราการตายของมอดจะสูงขึ้นตาม นอกจากนี้ยังเป็นที่น่าสนใจเมื่อที่ระยะเวลา 1 วินาที ที่ความเข้ม 700, 1000 และ 2000 พบว่า อัตราการตายของมอดคือ 100% แต่เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นอัตราการตายมอดกลับต่ำลง เช่นที่ 700 kV/m ที่ 5 และ 20 วินาที อัตราการตายมอดไม่ใช่ 100% สุดท้ายที่ 2000 kV/m อัตราการตายมอดเป็น 100% ทุกช่วงระยะเวลา แม้ที่ 0.5 วินาที มอดยังตาย 100% ทั้งนี้มอดจะตายด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าหรือด้วยอุณหภูมิที่มาจากกำลังสูญเสีย ยังไม่มีข้อสรุปที่ประจักษ์แจ้ง

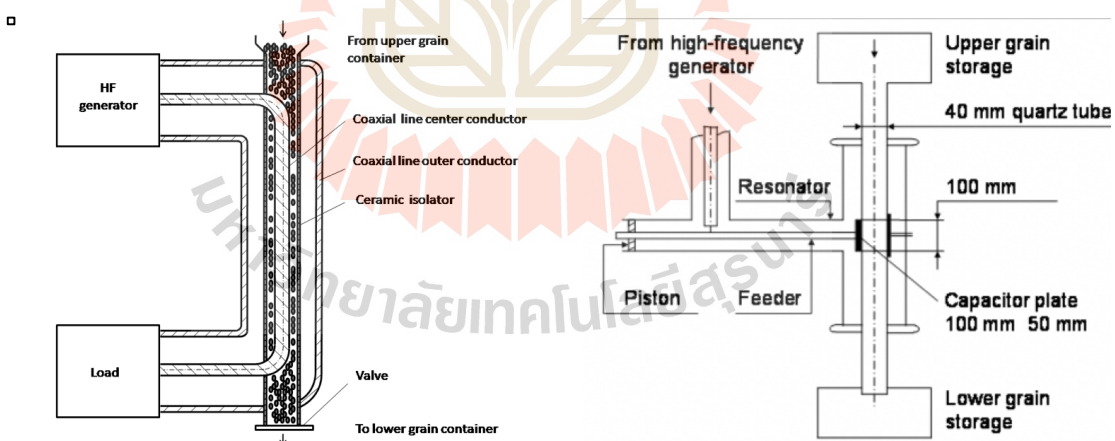
มีกลุ่มนักวิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับการตายของมอดด้วยการทำให้ร้อน นาย Rongjun Yan และคณะ ได้ออกแบบการทดลองเพื่อหาช่วงอุณหภูมิที่มอดจะตายจากความร้อน โดยไม่ได้ใช้ความถี่คลื่นวิทยุหรือความเข้มสนามไฟฟ้า (Yan, Huang, Zhu, Johnson, & Wang, 2014) จากอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น รูปที่ 2.6 ให้มอดข้าวอยู่ในหลอด Chamber ที่ภายในมีการควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ Heater ที่ปรับค่าได้ และใช้คอมพิวเตอร์ในการเก็บบันทึกผล จากการทดลองได้ผลดังรูปที่ 2.7 ทดลองที่อุณหภูมิต่างกันสี่แบบคือ 44, 46, 48, และ 50 °C ค่า N/N0 คืออัตราการรอด โดยที่ N คือจำนวนตัวมอดที่รอดชีวิต N0 คือจำนวนมอดตั้งต้น ผลที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 50 °C เมื่อคงอุณหภูมิไว้เป็นระยะเวลา 4 นาที ทำให้อัตราการรอดเป็น 0% และสามารถบอกได้ว่า Activation energy สำหรับการฆ่ามอดคือ 505 kJ/mol การใช้ Heating rate ที่แตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบ พบว่าที่ 1, 5, และ 10 °C /min ไม่ได้ส่งผลต่ออัตราการตายของมอดข้าวอย่างมีนัยยะสำคัญ



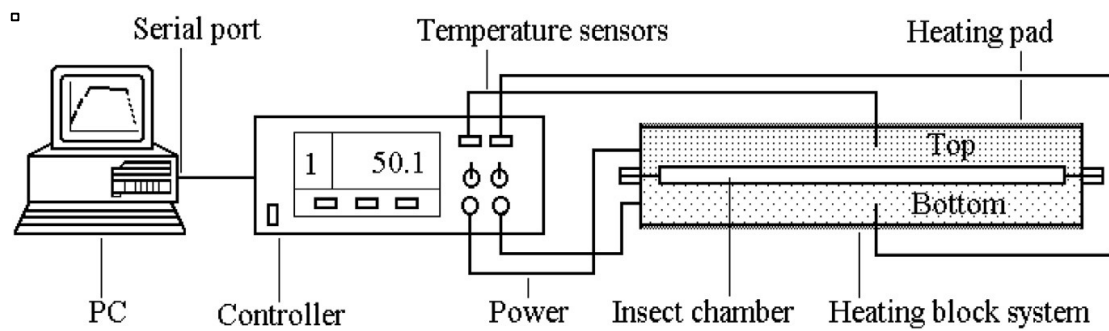
รูปที่ 2.3 เครื่องกำจัดแมลงด้วย Dielectric heating แบบสายพาน (Zhou & Wang, 2016b)



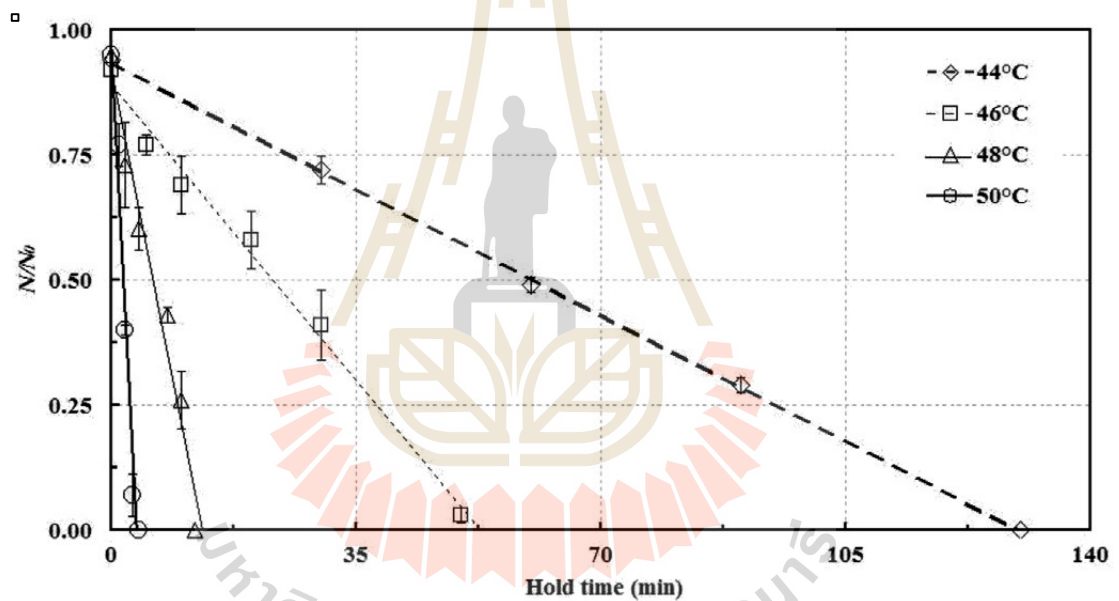
รูปที่ 2.4 เครื่องกำจัดแมลงด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกแบบปล่อยข้าวไหลในแนวตั้ง (Vearasilp et al., 2015)



รูปที่ 2.5 เครื่องกำจัดแมลงโดยใช้สนามไฟฟ้าสลับแรงสูง (ซ้าย) แบบ Coaxial และ (ขวา) แบบเพลดขนาน (Ponomaryova et al., 2009)



รูปที่ 2.6 Setup ของชุดอุปกรณ์ให้ความร้อนเพื่อศึกษาผลกระทบทางความร้อนที่มีต่อตัวมอดข้าว (Yan et al., 2014)



รูปที่ 2.7 ผลการทดลองจากการศึกษาผลกระทบทางความร้อนต่อตัวมอด (Yan et al., 2014)

นอกจากวิธีการกำจัดมอดที่ได้กล่าวไป ยังมีวิธีอื่นอีกที่ได้มีการศึกษา เพื่อหาความเป็นไปได้ ที่จะกำจัดหรือขับไล่หรือล่อให้ออกมา มอดข้าวที่ปนเปื้อนในข้าว มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการตอบสนองต่อแสงของมอดข้าว โดยใช้ LED (Light-emitting Diodes) โดยนาย Ju-Hyun Jeon และคณะพยายามที่จะล่อให้มอดข้าวมาติดกับดัก โดยใช้ความยาวคลื่นแสงที่แตกต่างกันห้าแบบ (Jeon, Oh, Cho, & Lee, 2012) โดยจัดการทดลองให้อยู่ใน Y-maze chamber ดังรูปที่ 2.8 จากการทดลองพบว่าแสงที่ดึงดูดมอดข้าวมากที่สุดเรียงตามลำดับ คือ สีน้ำเงิน (450 nm) สีเขียว (520 nm) สีแดง (660 nm) UV (365 nm) และ IR (730 nm)

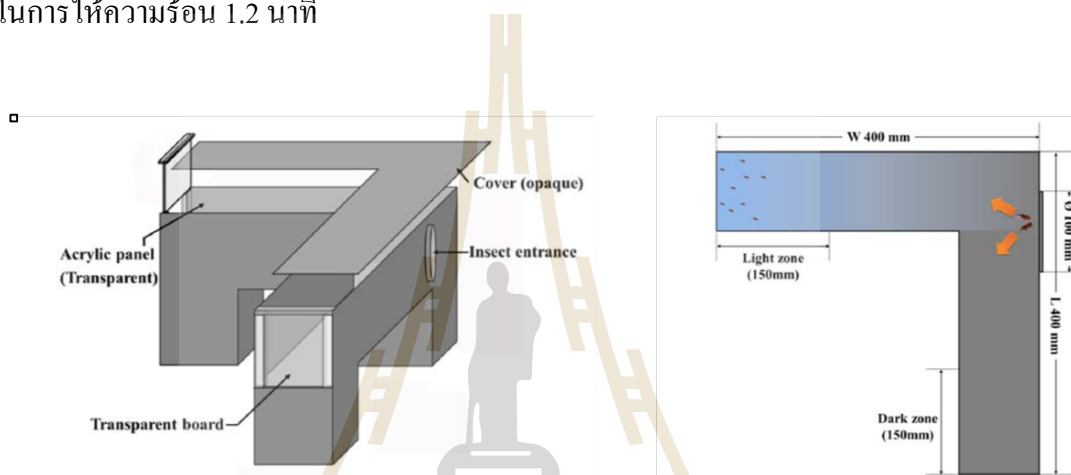
การใช้สารเคมีรมมอดข้าวเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายถูกแต่ก็เป็นห่วงว่าจะมีสารเคมีตกค้าง จึงเป็นที่มาของการหาสารเคมีทางเลือกที่สกัดมาจากพืชเพื่อนำมาทดแทน Br นาย Peter A. Follett และคณะได้ใช้น้ำมันสกัดจากใบโหระพา Basil oil รมมอดข้าวแทน โดยใช้ปริมาตร 3 ml ความเข้มข้น 10% ใช้เวลา 10 นาที พบว่ามอดข้าวมีอัตราการรอดต่ำลงหลังจากผ่านการรม Basil oil เมื่อเทียบกับชุดควบคุม (รูปที่ 2.9) จากนั้นเมื่อผ่านไป 6 วันอัตราการรอดจึงเป็น 0% (Follett, Rivera-Leong, & Myers, 2014) ต่อมานาย Farah Hossain และคณะได้ใช้ Basil oil ร่วมกับการใช้รังสีในการกำจัดมอด พบว่าถ้าพ่น Basil oil อย่างเดียวจะต้องใช้เข้มข้นขึ้นสูงเพื่อให้ได้ระยะเวลาที่สั้นลงสำหรับอัตราการรอด 0% เช่นเดียวกับการใช้การฉายรังสีอย่างเดียวที่จะต้องการปริมาณ Dose สูง เมื่อนำทั้งสองวิธีมารวมกันได้ผลลัพธ์ที่ดีคือ อัตราการรอด 0% ที่ค่า LC<sub>50</sub> ของ Basil oil 0.83 ul/ml และใช้รังสี 200 Gy ภายในระยะเวลาห้าวัน (Hossain, Lacroix, Salmieri, Vu, & Follett, 2014)

นาย Marissa X. McDonough และคณะได้ใช้ Ozone gas ความเข้มข้นสูงในการกำจัดแมลงในอาหาร การทดลองแบ่งเป็น 6 ความเข้มข้นตั้งแต่ 50 ถึง 1800 ppm จากผลการทดลองพบว่า ในการกำจัดมอดข้าว (*S. oryzae* (L.)) ตัวโตเต็มวัย ต้องใช้ Ozone ความเข้มข้น 1800 ppm เป็นเวลา 60 นาที นอกจากมอดแล้วในงานวิจัยยังได้ทดลองกับแมลงชนิดอื่นและสถานะอื่นในวงจรชีวิตเช่น ไข่ ตัวอ่อน ดักแด้ (McDonough, Mason, & Woloshuk, 2011)

นาย K.E. Law-Ogbomo และ D.A. Enobakhare ได้ทดลองกำจัดมอดข้าวด้วยผงจากใบยี่หระ และผงจากใบป่าช้าเหงา (Leaf powder of *Ocimum gratissimum* and *Vernonia amygdalina*) โดยวัดผลจากอัตราการตายของมอด อัตราการวางไข่ น้ำหนักของเมล็ดข้าว และการแตกหักของเมล็ดข้าว พบว่าใน Dose 4 g / 20 g grain สำหรับผงใบยี่หระ สามารถกำจัดตัวเต็มวัยได้ 100% เมื่อผ่านไป 21 วัน ในขณะที่ผงใบป่าช้าเหงาต้องใช้ 5 g / 20 g grain จึงจะได้ การกำจัด 100% การใช้ผงใบยี่หระสามารถลดน้ำหนักของข้าวที่หายไปได้ 48.90% เมื่อเทียบกับชุดทดลองควบคุมที่ไม่มีการใช้สารสกัดจากใบ ส่วนใบป่าช้าเหงาสามารถลดได้ 48.09% (Law-Ogbomo & Enobakhare, 2007)

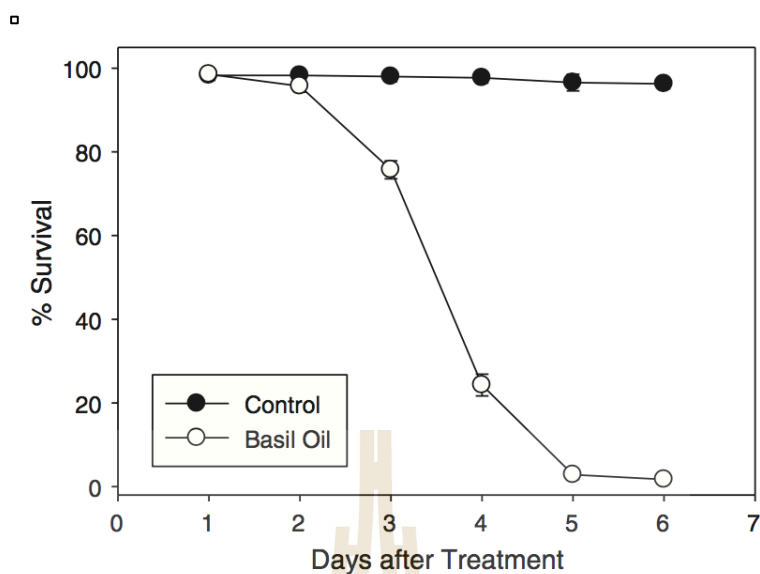
มีนักวิจัยในประเทศไทยกลุ่มหนึ่งได้ศึกษาผลกระทบ จากการกำจัดมอดข้าวโดยใช้การให้ความร้อนแบบอินฟราเรด (Infrared heating) (Duangkhamchan et al., 2017) นาย Wasan

Duangkhamchan และคณะ ได้ทดสอบกับข้าวที่มีไข่ของมอดข้าวอยู่ภายใน การจัดการทดลองดังรูปที่ 2.10 (ซ้าย) ใช้อุณหภูมิ 50 – 60 °C เวลาในการให้ความร้อนที่ 1 – 3 นาที พบว่าที่อุณหภูมิ 50 °C ต้องใช้เวลาถึง 3 นาทีเพื่อจะให้อัตราการตายของไข่มอดเป็น 100% ในขณะที่ อุณหภูมิ 55 และ 60 °C ใช้เวลา 2 นาทีที่อัตราการตายของไข่ 100% ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับข้าวคือ เมื่อให้ความร้อนเป็นระยะเวลานานจะทำให้ความชื้นต่ำและมีน้ำหนักหายไป อีกทั้งยังทำให้ความแข็ง (Hardness) มีค่าสูงขึ้น เพื่อจะหาอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้อย่างเหมาะสม จึงทำ Desirability contour plot ดังรูปที่ 2.10 (ขวา) พบว่าจุดที่เหมาะสมคือค่าสูงสุดในกราฟ คือ 0.714 หมายถึงใช้อุณหภูมิ 53.59 °C เวลาในการให้ความร้อน 1.2 นาที

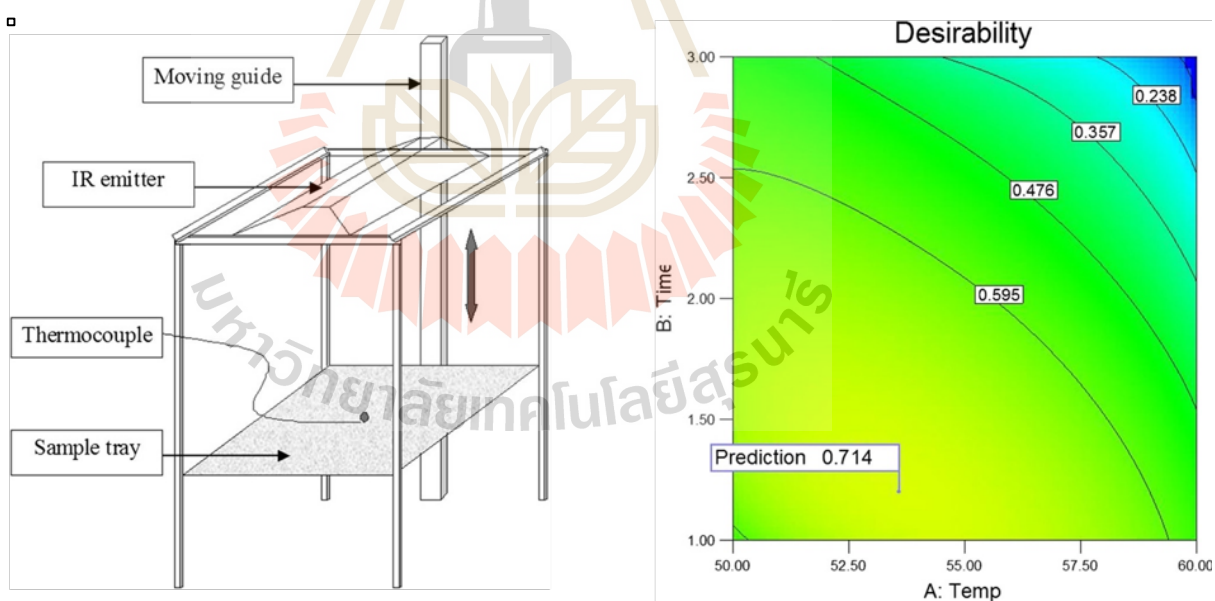


รูปที่ 2.8 (ซ้าย) โมเดลสามมิติ Y-maze chamber และ (ขวา) ภาพ cross section ของ cross section แสดงตำแหน่งทางเข้าของมอดข้าว บริเวณมืดและบริเวณที่ใช้แสง (Jeon et al., 2012)





รูปที่ 2.9 อัตรารอดของมอดข้าวเมื่อถูกรมด้วย Basil oil ความเข้มข้น 10% และชุดควบคุมที่ไม่ผ่านการใช้ Basil oil (Follett et al., 2014)



รูปที่ 2.10 (ซ้าย) Set up ของการให้ความร้อนแบบอินฟราเรดเพื่อกำจัดไข่มอด และ (ขวา) จุดที่เหมาะสมสำหรับการให้ความร้อนแบบอินฟราเรด ที่ให้อัตราการตายของไข่มอดสูง ในขณะที่ยังรักษาคุณภาพของข้าว (Duangkhamchan et al., 2017)

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 ตัวเก็บประจุแบบเพลตขนาน (Parallel plate capacitor)

ตัวเก็บประจุประเภทนี้ประกอบไปด้วยแผ่นตัวนำที่มีพื้นที่  $A$  สองแผ่นขนาดเท่ากัน วางในจุดศูนย์กลางและมุมเดียวกัน ห่างกันเป็นระยะ  $d$  หากมีความต่างศักย์  $\Delta V$  จะทำให้มีประจุ  $+Q$  และ  $-Q$  ค่าความเก็บประจุ (Capacitance) หาได้จาก  $C = Q/\Delta V$  สนามไฟฟ้าภายในเพลตทั้งสองจะเกิดขึ้นดังรูป 2.11 จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าไม่ใช่เส้นตรงตลอดทั้งเพลต โดยเฉพาะบริเวณขอบที่มีความโค้งของสนามไฟฟ้ามาก เรียกเหตุการณ์นี้ว่า Edge effects และสนามไฟฟ้าที่เป็น Non-linear ในบริเวณขอบจะเรียกว่า Fringing fields ในการหาสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างเพลต หาได้จาก Gauss's law คือการอินทิเกรตพื้นที่ปิดของบริเวณที่สนใจ ดังรูปที่ 2.12 จากบริเวณนั้นทำให้ได้สนามไฟฟ้าเท่ากับ

$$\oiint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0} \quad (2.4)$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (2.5)$$

ทำให้

$$|\Delta V| = Ed \quad (2.6)$$

คือสนามไฟฟ้าจะเท่ากับความต่างศักย์ระหว่างเพลตหารด้วยระยะห่างของเพลต จะได้ค่าความเก็บประจุของเพลตขนานเท่ากับ

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (2.7)$$



### 2.2.2 วัสดุไดอิเล็กทริก Dielectric materials

จากที่ได้รู้ว่า ค่าความเก็บประจุของเพลตขนานเท่ากับ สมการที่ (2.7) สมการนั้นได้ใช้อากาศเป็นตัวกลางระหว่างเพลต แต่ถ้าตัวกลางระหว่างเพลตเป็นวัสดุอื่นที่ไม่ใช้อากาศจะต้องมีเทอมที่คูณเข้ามาคือค่า Relative permittivity ค่าความเก็บประจุจะเพิ่มตามค่า Polarization ของตัวกลาง ค่า Relative permittivity เป็นคุณสมบัติเฉพาะวัสดุที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ ตัวเก็บบางชนิดไม่ได้ถูกออกแบบมาให้ใช้กับความถี่สูงเพราะจะมี การสูญเสียเกิดขึ้น การสูญเสียที่ว่านี้ไม่ต่างจาก  $I^2R$  ในตัวต้านทาน คือกำลังสูญเสียไปเป็นความร้อน การสูญเสียในตัวเก็บประจุขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้งาน อีกตัวแปรที่สำคัญคือ Electric dipole moment  $p$  ที่วัด Electrostatic effects ของสองประจุ  $+Q$  และ  $-Q$  ที่ห่างกัน  $a$  จะมีค่าเท่ากับ

$$p = Qa \quad (2.8)$$

ในภาวะปกติประจุรวมของอะตอมจะมีค่าเป็นศูนย์ โดยมีประจุบวกอยู่ตรงกลางและกลุ่มอิเล็กตรอนวิ่งรอบ แต่ถ้าหากอะตอมถูกวางในสนามไฟฟ้าค่าหนึ่ง อิเล็กตรอนที่มีมวลน้อยกว่าจะถูกบังคับให้เคลื่อนตัวแยกห่างจากประจุบวก การที่อะตอมถูกเหนี่ยวนำให้แยกประจุลบและบวก จะเรียกว่า Polarization  $P$  และจะเรียกอะตอมนั้นว่าอะตอมที่มีขั้ว Polarized atom

$$P = Np_{av} = \sigma_p \quad (2.9)$$

เมื่อ  $N$  คือจำนวน โมเลกุล และ  $p_{av}$  คือ Dipole moment เฉลี่ยต่อโมเลกุล และ  $\sigma_p$  คือ Polarization charge density เพื่อที่จะอธิบายว่าทำไม Polarization ถึงขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้า จึงกำหนดให้มี Electric susceptibility  $\chi_e$  โดยที่

$$P = \epsilon_0 \chi_e E \quad (2.10)$$

จากสมการที่ (2.5) ถ้าให้  $\sigma = Q/A$  คือ Free surface charge density บนเพลต จะได้

$$\sigma = \epsilon_0 E + \sigma_p \quad (2.11)$$

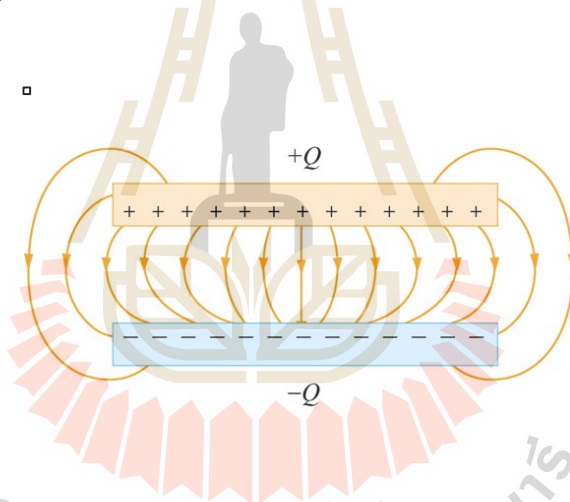
จากสมการที่ (2.9) และ (2.10) ทำให้

$$\sigma = \epsilon_0(1 + \chi_e)E \quad (2.12)$$

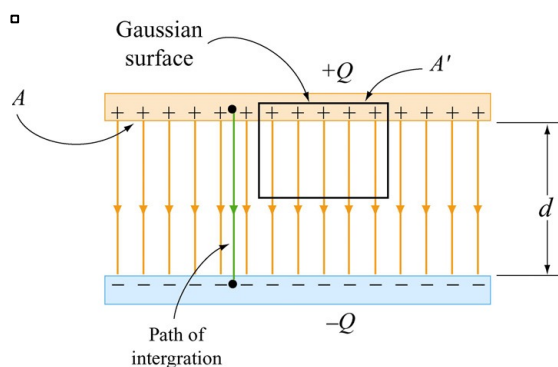
จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง Dielectric permittivity และ Electric susceptibility

$$\epsilon_r = 1 + \chi_e \quad (2.13)$$

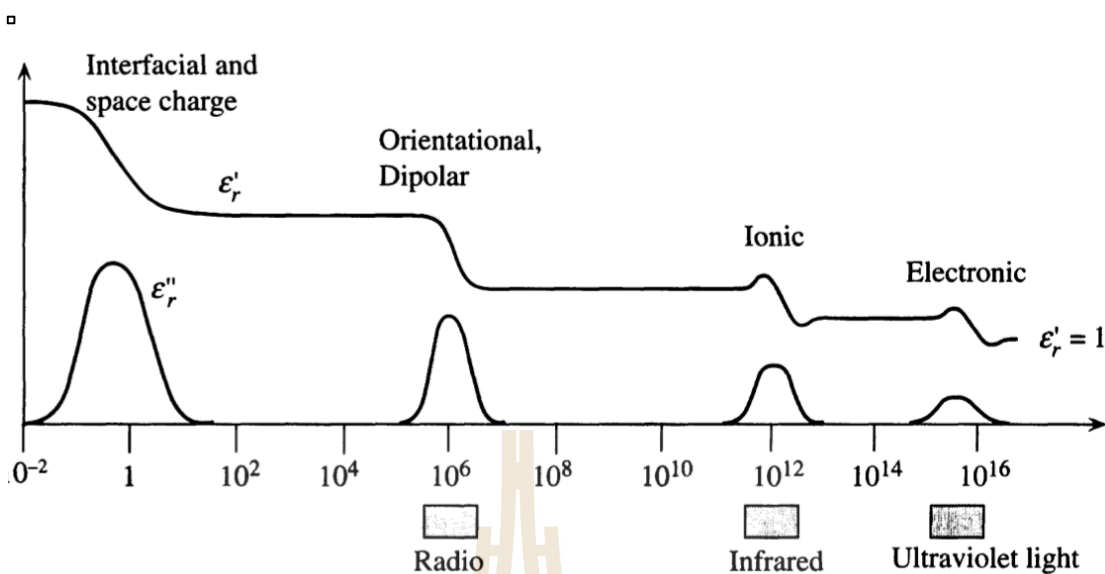
Polarization mechanisms การพหุติตัวของความมีขั้วจะเกิดขึ้นตามความถี่ที่ตอบสนองต่อ โมเลกุลหรืออะตอม ตามรูปที่ 2.13 ในรายละเอียดของพฤติกรรมอื่น นอกจาก Orientational (Dipolar) จะไม่ได้กล่าวถึง



รูปที่ 2.11 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของเพลตขนานที่มีประจุ Q



รูปที่ 2.12 เส้นทางการอินทิเกรต เพื่อหาสนามไฟฟ้าระหว่างเพลตขนาน



รูปที่ 2.13 ค่า Dielectric permittivity ที่ขึ้นในความถี่ทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพ (Kasap, 2006)

Orientalional (Dipolar) เกิดขึ้นกับโมเลกุลของสารบางชนิด เช่น KCl หรือ  $H_2O$  ที่จะมี Permanent dipole moment  $p_0$  จากประจุลบ  $Cl^-$  ไปยังประจุบวก  $H^+$  ในของเหลวหรือแก๊สการมีของสนามไฟฟ้านี้จะเกิดขึ้นแบบกระจายโดยไม่มีทิศทางแน่นอน ประจุยังพยายามที่จะหมุนตัวตามสนามไฟฟ้าภายนอก แรงที่โมเลกุลสัมผัสได้คือ Torque  $\tau$

$$\tau = Ep_0 \sin\theta \quad (2.14)$$

โดยที่

$$p_0 = aQ \quad (2.15)$$

Dielectric loss วัสดุไดอิเล็กทริกที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าคงที่จะมีความเป็นขั้ว Polarization หรือมีค่า Dipole moment เท่ากับ

$$p = \alpha_d E \quad (2.16)$$

เมื่อ  $\alpha_d$  คือ Polarizability มีค่าเท่ากับ

$$\alpha_d = \frac{p_0^2}{3kT} \quad (2.17)$$

รูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นถึง เมื่อให้สนามไฟฟ้าคงที่  $E_0$  ทำให้เกิด Dipole moment ค่าหนึ่ง และที่  $t=0$  สนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจาก  $E_0$  เป็น  $E$  จากนั้น Dipole moment ไม่ได้เปลี่ยนแปลงค่าทันทีทันใด จะมีช่วงเวลาในการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงของ Dipole moment ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าภายนอกเรียกว่า Relaxation process และช่วงเวลาที่เปลี่ยนแปลงเรียกว่า Relaxation time  $\tau$  แต่เมื่อวัสดุนั้นอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องแบบ Sinusoidal หรือ AC voltage ที่มีสนามไฟฟ้าเท่ากับ  $E = E_0 \sin(\omega t)$  Dipole moment จะเท่ากับ

$$p = \alpha_d(\omega) E_0 e^{j\omega t} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $\alpha_d(\omega)$  มีค่าเท่ากับ

$$\alpha_d(\omega) = \frac{\alpha_d(0)}{1 + j\omega\tau} \quad (2.19)$$

ค่า  $\alpha_d(\omega)$  เป็นจำนวนเชิงซ้อนชี้ให้เห็นว่า  $p$  และ  $E$  นั้น Out of phase ดังรูปที่ 2.15 ที่ความถี่ต่ำ  $\omega\tau \ll 1$  ค่า  $\alpha_d(\omega)$  นั้นใกล้เคียงกับ  $\alpha_d(0)$  ตอนที่  $p$  และ  $E$  In phase อัตรา Relaxation time นั้นสูงมากที่  $\omega = 1/\tau$  และที่ความถี่สูง  $\omega\tau \gg 1$  อัตรา Relaxation time จะกลับมามีค่าเพราะ  $p$  และ  $E$  นั้น Out of phase สามารถแยกค่า Dielectric constant ได้จาก

$$\epsilon = 1 + \frac{N\alpha_d}{\epsilon_0} \quad (2.20)$$

ซึ่ง  $\epsilon$  จะอยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อนตาม  $\alpha_d(\omega)$  เขียนในรูป  $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$  ค่า Dielectric permittivity  $\epsilon'$  และ Dielectric loss  $\epsilon''$  นี้จะขึ้นอยู่กับความถี่ ค่า  $\epsilon''$  จะเป็น 0 ที่ความถี่ต่ำและที่ความถี่สูง แต่จะสูงสุดที่  $\omega\tau = 1$  ค่า  $\epsilon'$  ใช้คำนวณหาค่าความเก็บประจุจากสมการที่ (22)

ตัวเก็บประจุในรูปที่ 2.16 มีวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ระหว่างเพลต ที่มีแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับตกคร่อม ดังนั้นค่าความนำไฟฟ้า (Admittance  $Y$ ) จะเท่ากับ

$$Y = j\omega C + G_p \quad (2.21)$$

เมื่อ

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r' A}{d} \quad (2.22)$$

และ

$$G_p = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r'' \omega A}{d} \quad (2.23)$$

ถ้าตัวเก็บประจุในอุดมคติจะไม่มีส่วนที่สูญเสียและ ไม่มีกำลังที่เกิดขึ้นจริง เพราะ  $G_p$  หรือ  $1/R_p$  เป็น 0 แต่ในความเป็นจริงจะมีส่วนที่มีกำลังเกิดขึ้นจริงใน  $R_p$  เพราะว่า

$$P_{input} = IV = YV^2 = j\omega CV^2 + \frac{V^2}{R_p} \quad (2.24)$$

ในส่วนหลังคือจำนวนจริง ฉะนั้นกำลังกระจายที่สูญเสีย Power dissipation จะขึ้นอยู่กับค่า  $\epsilon''$  และความถี่ที่ตรงเงื่อนไข  $\omega\tau = 1$  เนื่องจาก  $1/\tau$  คืออัตราของการชนกันของโมเลกุล Molecular collisions และเมื่อขณะที่  $\omega = 1/\tau$  สองเหตุการณ์ พลังงานสะสมโดยสนามไฟฟ้าและพลังงานถ่ายโอนสู่ Random collisions เกิดขึ้นในอัตราเดียวกัน ทำให้พลังงานถูกเปลี่ยนไปเป็นความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ เหตุการณ์นี้เรียกว่า Dielectric resonance จุดที่  $\epsilon''$  สูง

ที่สุด ในขณะที่  $\omega = 1/\tau$  เรียกว่า Relaxation peak กำลังสูญเสียกระจายต่อหน่วยปริมาตร Power dissipation per unit volume สามารถคำนวณได้จาก

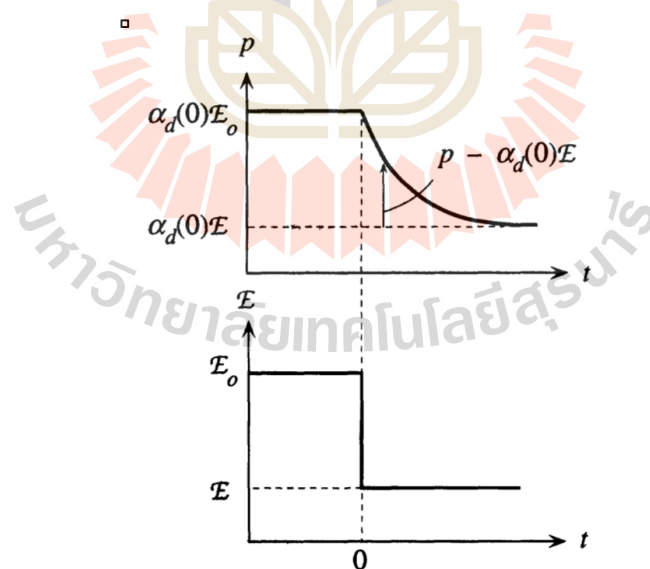
$$P_{vol} = \frac{P_{loss}}{Volume} = \frac{V^2}{R_p} \times \frac{1}{dA} = \frac{V^2}{d} \times \frac{1}{dA} = \frac{V^2}{d^2} \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' \quad (2.25)$$

จะได้

$$P_{vol} = \omega E^2 \epsilon_0 \epsilon_r'' = 2\pi f E^2 \epsilon_0 \epsilon_r'' \quad (2.26)$$

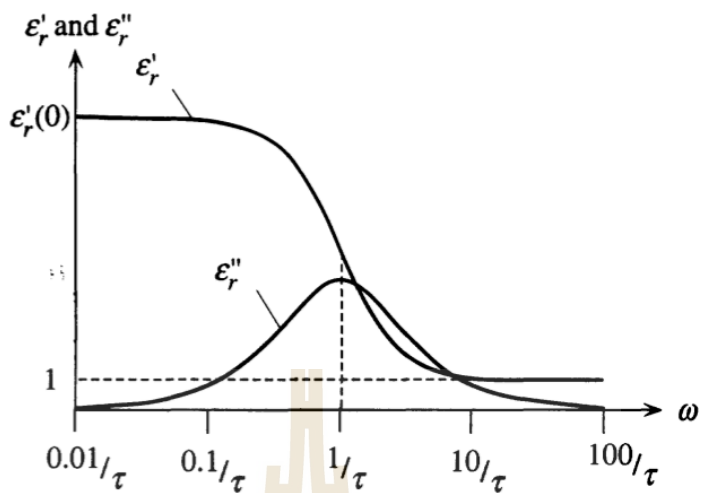
หรือ

$$P_{vol} = \omega E^2 \epsilon_0 \epsilon_r' \tan(\delta) \quad (2.27)$$

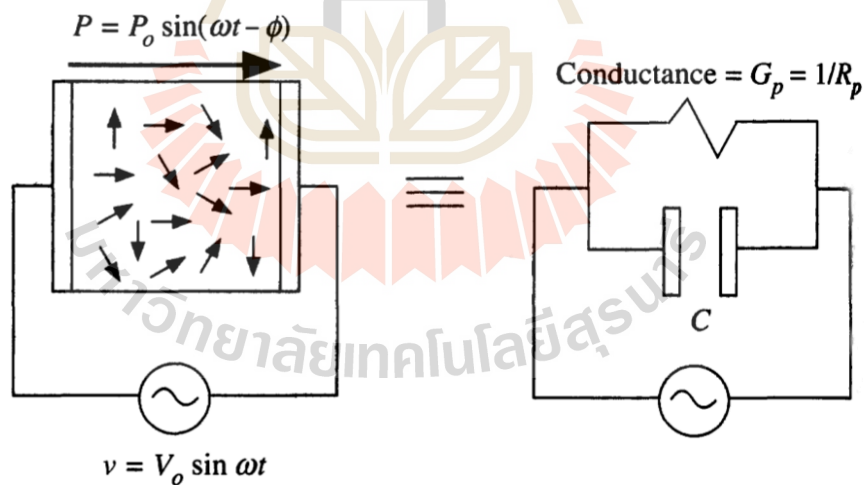


รูปที่ 2.14 เมื่อมีสนามไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่งเปลี่ยนจาก  $E_0$  เป็น  $E$  อย่างกะทันหัน ทำให้ Induced dipole moment ลดลงจาก  $\alpha_d(0)E_0$  เป็น  $\alpha_d(0)E$  การลดลงนี้เกิดขึ้นจาก Random collisions ของโมเลกุล (Kasap, 2006)





รูปที่ 2.15 ค่า Relative permittivity ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน และเกิด Relaxation peak ที่  $\omega = 1/\tau$  (Kasap, 2006)

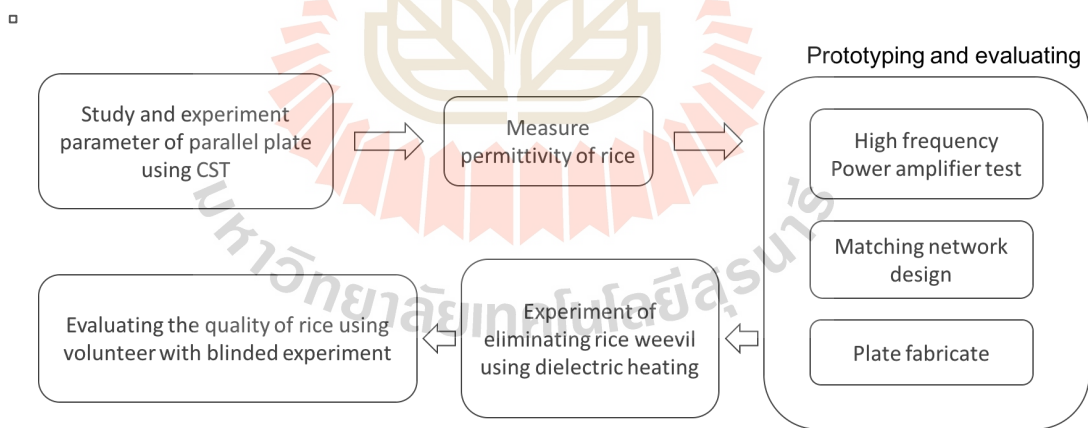


รูปที่ 2.16 (ซ้าย) ตัวเก็บประจุแบบเพลตขนานที่มีแรงดันไฟฟ้าสลับแบบ Sinusoidal มีความสมมาตรเท่ากับฝั่ง (ขวา) วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุที่มีความนำ  $G_p$  ขนานกับตัวเก็บประจุ (Kasap, 2006)

### บทที่ 3

#### การออกแบบการวิจัย

เพื่อให้ระบบกำจัดแมลงมอดข้าวในข้าวมีการประหยัดพลังงานสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ ในขณะที่ต้องได้ผลการผลิตที่ยอมรับได้ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการกำหนดแนวทางในการดำเนินการวิจัย และขอบเขตที่เกี่ยวข้อง เพื่อควบคุมและจำกัดตัวแปรต่าง ๆ ในรูปที่ 3.1 คือการวางแผนการออกแบบการทดลอง เริ่มจากการศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของเพลตขนาน โดยใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์เป็นตัวช่วย ตามด้วยการวัดค่าไดอิเล็กทริกของข้าวเพื่อหาข้อจำกัดการใช้งานของระบบกำจัดมอด จากนั้นออกแบบ Prototype ทดสอบศักยภาพของวงจรขยายสัญญาณความถี่สูงกำลังสูง รวมถึงการออกแบบวงจร Matching network พร้อมกับสร้างขึ้นรูปเพลต และประเมินการทำงานของต้นแบบที่สร้างขึ้น สุดท้ายคือการออกแบบการทดลองกำจัดมอด และประเมินคุณภาพของข้าวหลังผ่านการกำจัดมอด ด้วยการนำข้าวดังกล่าวไปประกอบอาหารแล้วทดสอบกับอาสาสมัครด้วยวิธี Blinded experiment



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยการออกแบบต้นแบบของการกำจัดมอดข้าวสำหรับใช้ในครัวเรือน

วิธีการกำจัดมอดข้าว ใช้การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก จากพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสลับช่วงคลื่นความถี่วิทยุ ส่งผ่านไปยังมอดข้าว พลังงานที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปความร้อนในตัวมอดและข้าว การวัดอุณหภูมิจะวัดจากอุณหภูมิของข้าว เนื่องจากมอดข้าวมีขนาดเล็กการวัดอุณหภูมิของมอดโดยตรงเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก และไม่ทำกัน หลายงานวิจัยอาศัยอุณหภูมิของข้าวเป็นตัวแปรตามเป็นหลักสำหรับอุณหภูมิ ปกติแล้วการวัดอุณหภูมิของข้าวที่ทำโดยทั่วไปมีสองวิธี วิธีแรกใช้ Fiber optical thermometer วิธีที่สองใช้ Imaging infrared thermometer ทั้งสองวิธีเป็นการวัดอุณหภูมิโดยใช้แสงอินฟราเรด ในการวิจัยนี้ใช้การวัดอุณหภูมิแบบ Imaging infrared thermometer (U5857A, Keysight) ชื่อเรียกโดยย่อของอุปกรณ์นี้คือ IR camera จากรูปที่ 3.2 IR camera รับข้อมูลภาพพื้นที่อุณหภูมิจากตัวอย่างทดลอง และเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลนี้จะนำไปใช้ในการพล็อตกราฟของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่อหน่วยเวลา (Heat rate) ที่ซึ่ง Heat rate นี้จะนำไปวิเคราะห์หาค่ากำลังความร้อน (Heat power) ที่จะนำไปเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้า (Electrical power) ที่ป้อนเข้าไป เพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของระบบ

□



รูปที่ 3.2 IR camera หรือ Imaging infrared thermometer (U5857A, Keysight)

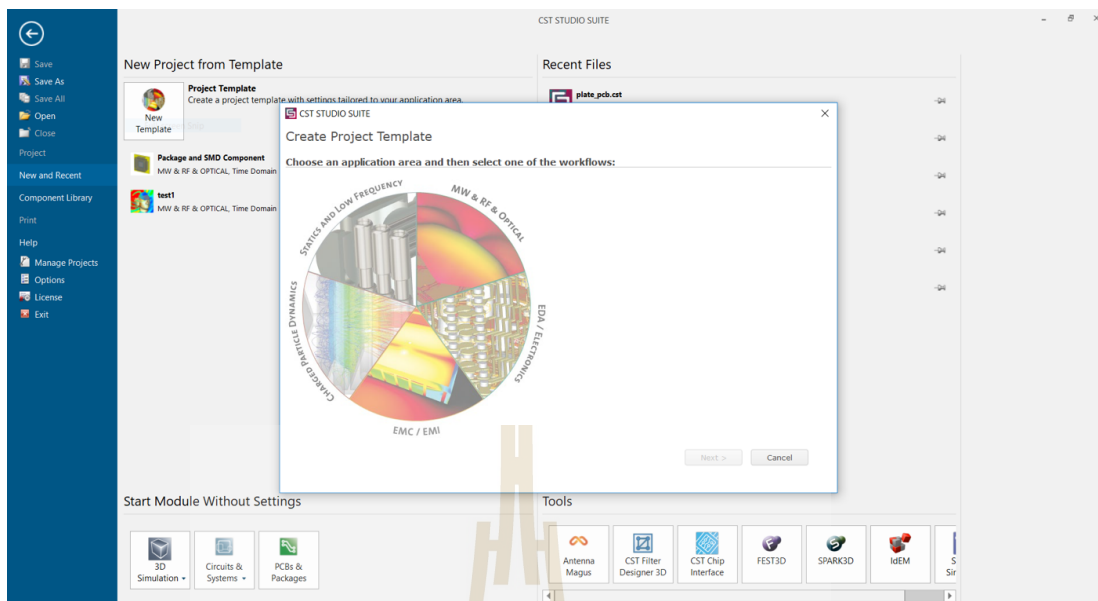
### 3.1 พารามิเตอร์ของเพลตที่เกี่ยวข้อง

เพื่อที่จะหาขนาดที่เหมาะสมของแผ่นเพลต จึงศึกษาค่าพารามิเตอร์ของรูปร่างทางกายภาพของแผ่นเพลตมีค่าพารามิเตอร์ดังนี้ ความกว้าง ความยาว และระยะห่างระหว่างเพลต โดยเบื้องต้นได้ใช้การจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาขนาดที่เหมาะสม จากนั้นสร้างและวัดผล การจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ใช้โปรแกรม CST (Computer Simulation Technology GmbH, Dassault Systèmes company, Germany) รูปที่ 3.3 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อค่า S11 เป็นต้น

ความยาวของเพลตเป็นอัตราส่วนขึ้นตรงกับระยะเวลาที่ข้าวอยู่ในเพลต เมื่อเพลตยาวขึ้น ข้าวจะอยู่ในเพลตนานขึ้น ข้าวจะเริ่มเข้าสู่เพลตที่ปากทางเข้า และเคลื่อนที่ไปตามความยาวของเพลต ระยะเวลาที่ข้าวอยู่ในเพลตสามารถควบคุมได้จากอัตราการไหลของข้าวก็ได้

ความกว้างของเพลตคูณกับระยะห่างระหว่างเพลตคือพื้นที่ของข้าวที่จะเข้าไปได้ เมื่อความกว้างมีค่ามากขึ้น ข้าวจะเข้าไปได้มากขึ้นทำให้ขีดจำกัดของอัตราไหลข้าวสูงขึ้น เพื่อรองรับการผลิตในปริมาณที่สูง ความกว้างของเพลตจึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ

ระยะห่างของเพลตขนานเป็นตัวกำหนดความเข้มสนามไฟฟ้า ซึ่งแปรผกผันกันระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้ากับระยะห่างเพลต เมื่อระยะห่างมีค่ามากขึ้นความเข้มสนามไฟฟ้าจะมีค่าลดลง แต่หากระยะเพลตต่ำมากเกินไปจะมีผลเสียบางประการ เช่น เกิดการกระโดดของประจุไฟฟ้า หรือปริมาณของข้าวที่เข้าเพลตน้อยลงทำให้กำลังการผลิตต่ำ หรือข้าวร้อนเร็วมากเกินไปควบคุมอุณหภูมิได้ยาก ๆ ดังนั้น การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจึงจำเป็นอย่างยิ่ง สำหรับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกเพื่อการกำจัดแมลงหลังการเก็บเกี่ยว



รูปที่ 3.3 หน้าจอหลักของ CST เมื่อเปิดโปรแกรมขึ้นมา

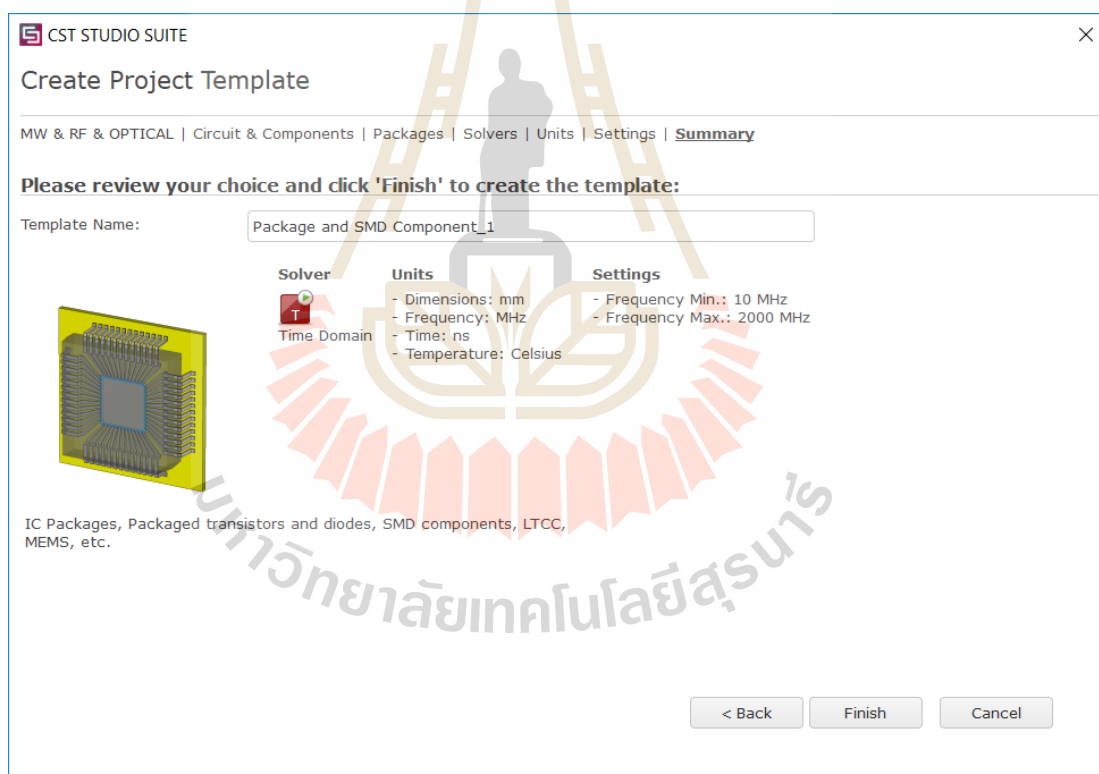
### 3.2 การจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โมเดลของเฟลตใน CST

เมื่อเปิดโปรแกรม CST ขึ้นมาจะแสดงหน้าแรกดังรูปที่ 3.3 ในขั้นแรกจะต้องสร้าง Template สำหรับใช้งานก่อน โดยเลือก Template แบบ MW & RF & Optical จากนั้นเลือก Circuit & Components แล้วเลือก Packages โปรแกรมจะถามว่าจะเลือกใช้ Solvers ตัวไหน ให้เลือก Time Domain ส่วนนี้สามารถปรับเปลี่ยนในภายหลังได้ จากขั้นตอนนี้จะเป็นการกำหนดหน่วย Units ของขนาดต่าง ๆ มิติของโมเดล หรือ

หน่วยของความถี่เป็นต้น ให้กำหนดดังนี้

Dimensions:	mm
Frequency:	MHz
Time:	ns
Temperature:	Celsius
Voltage:	V
Current:	A
Resistance:	Ohm
Conductance:	S
Inductance:	H
Capacitance:	F

เมื่อกำหนดหน่วยของขนาดเสร็จ โปรแกรมจะให้กำหนดช่วงความถี่ที่ต้องการจำลองผล ถึงแม้ว่าจะต้องการใช้งานหรือออกแบบเพียงความถี่เดียว แต่บางกรณีอาจจะไม่ได้เป็นไปอย่างที่คาดไว้ ดังนั้นการจำลองความถี่ให้ครอบคลุมกับความถี่ที่ต้องการใช้ จะเห็นถึงแนวโน้ม เช่นการปรับแต่งพารามิเตอร์จะช่วยให้สามารถทำนาย ค่าการคำนวณผลการจำลองเพื่อให้เป็นไปในทิศทางที่ต้องการ อย่างไรก็ตามการกำหนดช่วงความถี่จะต้องกำหนดอย่างเหมาะสม ไม่เช่นนั้นการตั้งช่วงความถี่ที่กว้างมากเกินไป จะส่งผลต่อการจำลองซึ่งจะทำให้ช้า และเกินความจำเป็น ดังนั้นการกำหนดความถี่จะต้องกำหนดอย่างเหมาะสม ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ช่วงความถี่ 10 – 2000 MHz นอกจากนี้โปรแกรมมีช่อง Monitors: ซึ่งยังไม่ต้องทำเครื่องหมายถูกใด ๆ ลงไป จะเพิ่มเองภายหลังหลังจากขั้นตอนนี้ สุดท้ายคือหน้า Summary รูปที่ 3.4 ที่จะสรุปข้อมูลที่ได้กำหนดไป ในขั้นตอนนี้สามารถตั้งชื่อให้กับ Template ได้ เมื่อเสร็จแล้วกด Finish



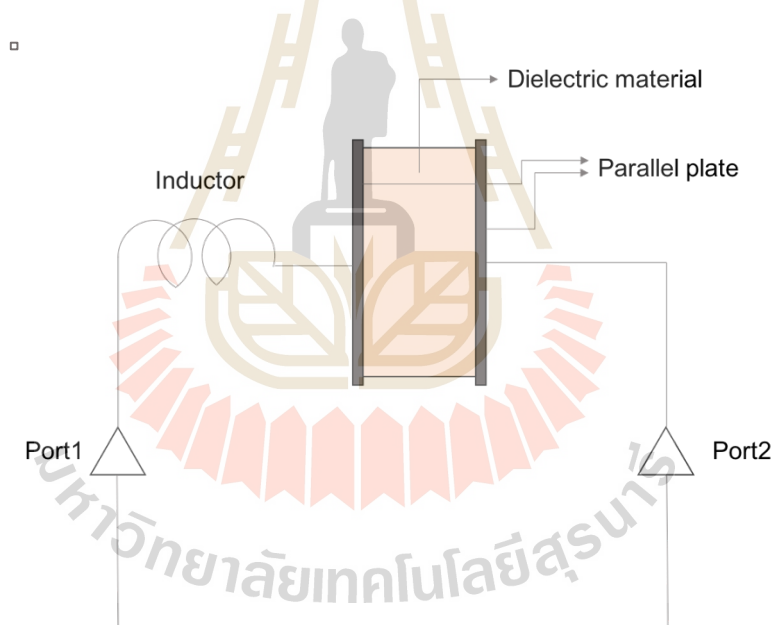
รูปที่ 3.4 หน้า Summary ของการสร้าง Template ใน CST

หลังจากกำหนด Template ของโปรแกรม จะแสดงหน้าจอว่าง ๆ ในหน้าจอนี้สามารถขึ้นรูปชิ้นงาน 3D เพื่อนำไปจำลองทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งหลักของการใช้โปรแกรม CST คือต้องการ

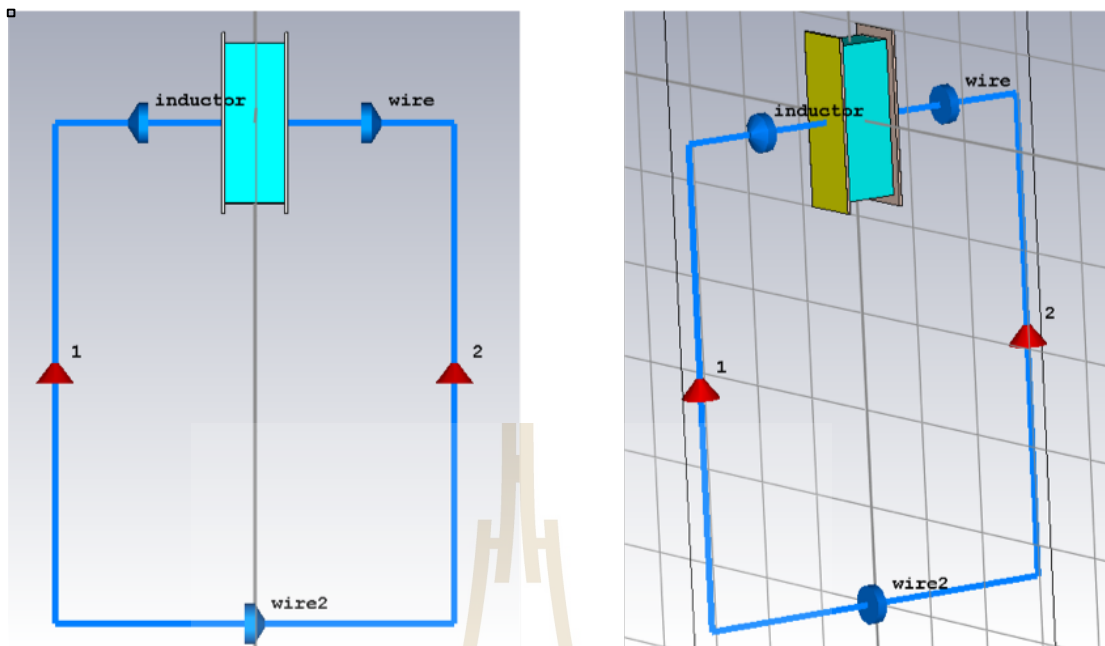


ศึกษาพารามิเตอร์ของเฟลตขนาน ดังนั้นจึงทำการสร้างโมเดลในโปรแกรมขึ้นมาโดยอาศัยจากพารามิเตอร์พื้นฐานที่ต้องมี คือความสูง ความยาว และระยะห่างระหว่างเฟลต

ในการใช้โปรแกรมจำลองการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะต้องมีแหล่งกำเนิดสัญญาณ ซึ่งในกรณีนี้จะใช้ Discrete port เป็นแหล่งรับและกำเนิดสัญญาณ วงจรของเฟลตขนานที่จะใช้ในโปรแกรม CST เป็นดังรูปที่ 3.5 เริ่มจาก Discrete port ตัวที่ 1 ผ่านชุด Matching network คือตัวเหนี่ยวนำ Inductance แล้วจึงเป็น โหลดเฟลตมีแผ่นตัวนำสองแผ่น ที่ขึ้นระหว่างกลางด้วยวัสดุไดอิเล็กทริก ปิดท้ายด้วย Discrete port ตัวที่ 2 ด้านท้ายระหว่าง Discrete port สองตัวเชื่อมเข้าด้วยกันเปรียบเสมือน Ground ของวงจร ในการขึ้นรูปโมเดลในโปรแกรม CST จะใช้การวาด Block แล้วกำหนดคุณสมบัติทางวัสดุให้กับโปรแกรม เพื่อระบุว่า Block ไหนคือวัสดุอะไร การสร้างสายไฟหรือตัวเหนี่ยวนำในโปรแกรมจะใช้ Lumped Element ที่เป็นอุปกรณ์ Passive รูปที่ 3.6 คือโมเดลเฟลตขนานที่ใช้ PCB ในโปรแกรม CST แบบ 2 ports

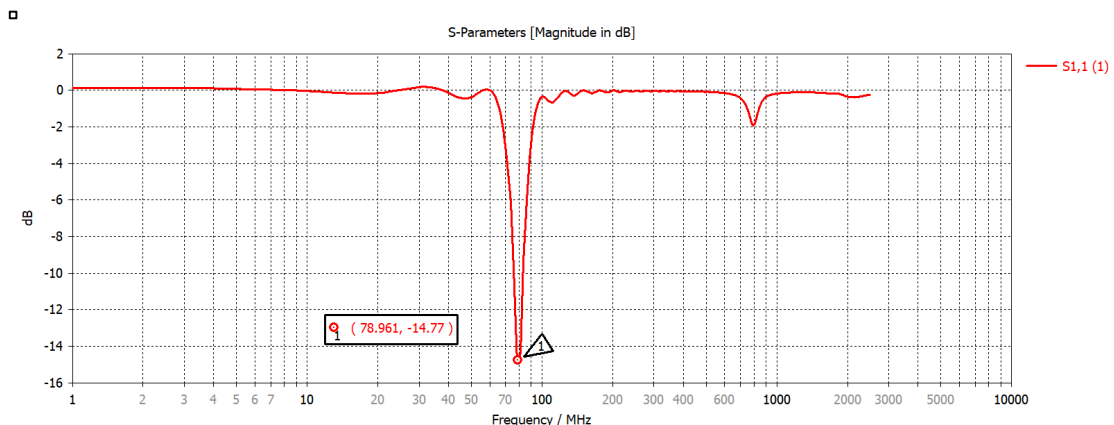


รูปที่ 3.5 วงจรของโหลดเฟลตขนานพร้อมชุด Matching network (Inductor)



รูปที่ 3.6 3D โมเดลของเฟลตขานานพร้อม Port และ Matching network ที่ขึ้นรูปใน CST

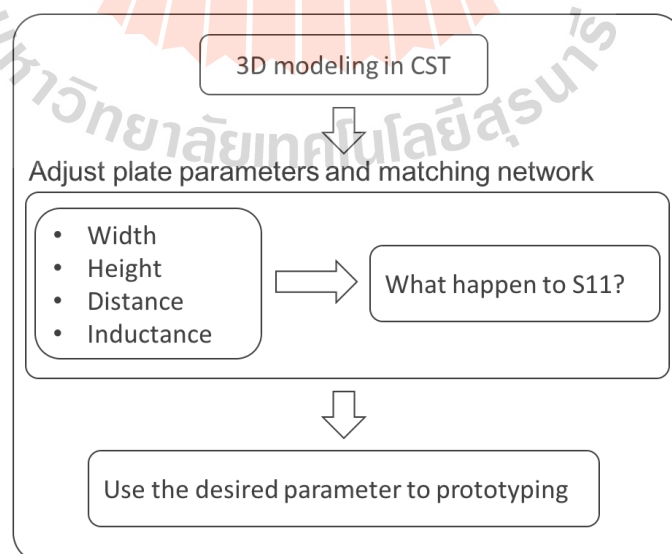
การจำลองผลด้วยโปรแกรม CST จะต้องมีโมเดลก่อน จึงจะสามารถจำลองผลในโปรแกรม เมื่อมีโมเดล 3D ที่สร้างขึ้นรูป และกำหนดค่าคุณสมบัติให้กับวัสดุแต่ละชนิดแล้ว เมื่ออยากจะทราบผลของจำลองให้กดที่ Simulation แล้วไปที่ Solver ที่เลือกตอนแรก ซึ่งอาจจะเป็น Time domain หรือ Frequency domain จะมีหน้าต่าง Popup เด้งขึ้นมา ให้กด Start จะเริ่มทำการจำลองผลในโปรแกรม การจำลองผลในโปรแกรม CST ระยะเวลาที่ใช้จะขึ้นอยู่กับขนาดของโมเดล ความซับซ้อน โมเดล ความละเอียดของความแม่นยำที่เลือก และช่วงของความถี่ที่ใช้ รวมถึงการดู Field Monitor ที่กำหนดไว้ ในขั้นแรกของการจำลองผลเป็น ไปดังรูปที่ 3.7 จะเริ่มจากการสุ่มกำหนดค่าพารามิเตอร์ค่าหนึ่งขึ้นมา ก่อน จากนั้นลองปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อหาแนวโน้มความเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งตัวแปรที่สนใจคือ S11 เนื่องจากเป็นตัวแปรที่สะท้อนถึงความเข้ากันได้ของอุปกรณ์ที่ทดสอบ DUT (Device under test) และความถี่ เนื่องจากในโมเดลมี 2 ports ดังนั้นค่าผลลัพธ์ที่ได้จาก S-parameter จะมีสี่ตัว คือ S11 S21 S12 S22 และเนื่องจากอุปกรณ์ที่ทดสอบนี้มีความสมมาตรในเชิงเรขาคณิตฯ และไม่สามารถขยายสัญญาณเองได้ (Passive) ดังนั้นค่า S11 และ S22 จึงมีความเท่ากัน เช่นเดียวกับ S12 และ S21 ที่เท่ากัน ถึงแม้ว่าโปรแกรมจะมีผลลัพธ์มาให้สี่ตัวแปร แต่จะดูเพียงแค่ S11 และ S21 หลังจากการจำลองผลเสร็จแล้วโปรแกรมจะสร้างข้อมูลกราฟมาให้ รูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ผลลัพธ์ค่า S11 ที่ได้จากการใช้โปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์

การหาค่าพารามิเตอร์ของเพลตจะเริ่มจากค่าที่สุ่มเลือกมาค่าหนึ่ง จากนั้นจึงทดลองปรับที่ค่าพารามิเตอร์เพื่อดูแนวโน้มความเปลี่ยนแปลงของ S11 กระบวนการทดลองดังรูปที่ 3.8 เมื่อได้ค่า S11 เป็นที่น่าพอใจ คือ S11 ไปตกที่ความถี่ที่ต้องการและมีค่าติดลบมากกว่า -10 dB จึงถือว่าใช้ได้ จากนั้นจะเลือกโมเดลต้นแบบในโปรแกรม CST ที่มีค่าพารามิเตอร์ที่รู้ชัดแล้วว่าจะให้ S11 ตรงตามตำแหน่งที่ต้องการ นำไปสร้างต้นแบบของจริงเพื่อนำไปทดสอบและประเมินขีดความสามารถต่อไป

Study and experiment parameter of parallel plate using CST



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการศึกษาค่าพารามิเตอร์ของเพลตขนาน โดยใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์ช่วย

### 3.3 วัสดุที่ใช้สร้างเพลต

เพลตประกอบไปด้วยตัวนำที่มีพื้นที่กำหนด การเลือกใช้วัสดุที่มาทำเพลตต้องคำนึงถึงค่าความนำของวัสดุ โดยธรรมชาติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะเคลื่อนที่บริเวณผิวของตัวนำ ขึ้นกับความถี่ โดยในความถี่ต่ำ คลื่นจะเดินทางทั่วทั้งเนื้อตัวนำ แต่หากเป็นความถี่สูงคลื่นจะเดินทางเฉพาะบนผิวของตัวนำ การเลือกใช้เพลตจึงต้องคำนึงถึงลักษณะทางธรรมชาติของคลื่น ในการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก เพลตที่ใช้จะต้องมีลักษณะผอม บาง เพื่อให้คลื่นสามารถเดินทางในตัวนำได้ดี ทั้งยังต้องมีค่าความนำสูง การเลือกใช้เพลตจึงใช้แผ่น PCB (Printed circuit board) เนื่องจากวัสดุตัวนำเป็นเนื้อทองแดง ให้ค่าความนำสูง ทั้งยังบาง มีราคาไม่แพง หาซื้อได้ง่าย PCB แบบหน้าเดียวโดยทั่วไปจะมีสองชั้น ชั้นของตัวนำ (Copper layer) และชั้นของวัสดุรอง (Substrate layer) วัสดุที่เป็น Substrate จะใช้ FR4 (Flame resistant) ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ติดไฟ เหมาะกับเพลตขนานสำหรับการให้ความร้อน ถึงแม้ว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างเพลตจะอยู่ที่ 50 – 60 °C ซึ่งไม่เพียงพอที่จะทำให้ติดไฟ แต่ในแง่ความปลอดภัย และความคุ้มค่า รวมถึงการเข้าถึงได้ง่าย การใช้ PCB เป็นเพลตจึงนับว่าสมเหตุสมผล

### 3.4 ค่าสภาพยอมของข้าว (Permittivity of rice)

เนื่องจากการกำจัดมอดข้าว อาศัยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก ซึ่งวัสดุไดอิเล็กทริกส่วนมากเป็นข้าว และข้าวที่นิยมบริโภคในประเทศไทยแบ่งออกใหญ่ ๆ ได้สองชนิดคือ ข้าวสารและข้าวเหนียว ดังนั้นหากข้าวต่างชนิดมีค่าไดอิเล็กที่ต่างกัน จะส่งผลต่อการทำงานของระบบ ซึ่งอาจทำให้ระบบที่ออกแบบใช้ได้ หรือไม่ได้ในบางกรณี จึงจำเป็นต้องวัดค่าไดอิเล็กทริกของข้าวทั้งสองชนิด เพื่อยืนยันความสามารถในการทำงานของระบบกำจัดมอดข้าวที่พัฒนาขึ้น

การวัดค่าสภาพยอมของวัสดุจะทำการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากโพรบ แล้วดูค่าสะท้อนกลับ จากนั้นแปลงค่าสะท้อนกลับเป็นค่าสภาพยอมของวัสดุ โดยทั่วไปค่าสภาพยอมจะอยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน ส่วนที่เป็นค่าจริงเราเรียกว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และส่วนที่เป็นจำนวนเชิงซ้อนเรียกว่า Dielectric loss factor หรือเรียกย่อว่า Loss factor เป็นพารามิเตอร์เอกลักษณ์ของแต่ละวัสดุ ในสมการ (1) ค่าการกระจายความร้อนต่อหน่วยปริมาตร จะแปรผันตรงกับ Loss factor ถ้าอยากให้อุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้นในช่วงเวลาที่สั้น ควรจะเลือกความถี่ที่วัสดุนั้นมีค่า Loss factor สูงสุด เนื่องจากค่า Loss factor ขึ้นอยู่กับความถี่ ฉะนั้นการหาช่วงความถี่ที่ดีที่สุดจึงสมควรทำ ใช้การวัดค่าไดอิเล็กทริกผ่าน Dielectric probe ร่วมกับเครื่อง Vector Network Analyzer หรือ VNA

ค่าไดอิเล็กทริกที่ได้จะได้รับการวัด มีสองค่าจาก  $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก Dielectric constant และ ค่า Dielectric loss factor ทั้งสองค่าเป็นค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุที่ขึ้นอยู่กับความถี่ การวัดค่าไดอิเล็กทริกของข้าว ทำการวัดข้าวสองชนิดคือข้าวเหนียว และข้าวสวย ข้อจำกัดของ Dielectric probe นี้คือวัดได้เฉพาะวัสดุเนื้อเดียวของแข็งหรือของเหลว หากวัสดุเป็นผงจะต้องอัดให้แน่นก่อน การวัดค่าไดอิเล็กทริกข้าวจึงต้องบดข้าวให้ละเอียดก่อน จากนั้นอัดให้แน่น จึงจะสามารถวัดค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุที่เป็นก้อนเล็กได้

### 3.4.1 การวัดค่าสภาพยอมของข้าว (Measured of permittivity of rice)

เนื่องจากข้าวสารมีลักษณะที่เป็นก้อน และมีขนาดเล็กกว่าขนาดของโพรวัดไดอิเล็กทริก หากวัดค่าไดอิเล็กทริกของข้าว โดยที่ข้าวยังเป็นเม็ดอยู่ พื้นผิวที่โพรวัดสัมผัสกับข้าวจะมีช่องว่างจากอากาศด้วย ทำให้ค่าที่ได้จากการวัดไดอิเล็กทริกไม่ใช่ค่าไดอิเล็กทริกที่แท้จริงของข้าว เนื่องจากมีส่วนที่เป็นช่องว่างอากาศ การแปรผลจะเพี้ยนไป ดังนั้นการเตรียมตัวอย่างที่จะใช้วัดค่าไดอิเล็กทริก จึงต้องนำข้าวไปบดให้ละเอียดก่อนเพื่อลดช่องว่างของอากาศ ข้าวที่บดละเอียดเป็นผง จะถูกนำไปอัดให้แน่น ก่อนที่จะทำการวัดค่าไดอิเล็กทริกต่อไป

การบดข้าว ใช้เครื่องบดแบบละเอียดสูง Cross beater mill (PULVERISETTE 16, FRITSCH GmbH) รูปที่ 3.9 จากห้องปฏิบัติการธรณีวิทยา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สามารถปรับความเร็วในการบดได้ ในการบดข้าวนี้ทางผู้เชี่ยวชาญจากห้องปฏิบัติการ ได้แนะนำให้ใช้ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที ใช้ Filter ขนาด 1 micron เพื่อให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของข้าวที่ถูกบดแล้วประมาณ 1 micron เนื่องจากข้าวที่ถูกบดนั้นผ่าน Filter แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องกรองอีกรอบ สามารถนำข้าวที่ผ่านการบดไปใช้ได้ เมื่อบดข้าวเสร็จแล้วจะนำข้าวมาอัดให้แน่นเพื่อพยายามลดช่องว่างอากาศให้น้อยที่สุด โดยที่ขนาดของตัวอย่างข้าว ที่จะนำไปวัดค่าไดอิเล็กทริก จะต้องมีความสูงของตัวอย่างข้าวไม่น้อยกว่า 11 mm ตามสมการ (3.1) เนื่องจากค่าไดอิเล็กทริกมาจากการแปรผลผ่านการที่คลื่นแผ่ผ่านตัวกลางแล้วคลื่นสะท้อนกลับจากตัววัสดุเอง หากความสูงของตัวอย่างที่จะวัดไม่เพียงพอคลื่นจะสะท้อนจากขอบ หรือช่วงรอยต่อระหว่างวัสดุที่ต่างกัน ซึ่งจะทำให้การแปรผลผิดเพี้ยนไป เราทราบว่าค่าไดอิเล็กทริกของข้าวจะมีค่าอยู่ระหว่าง 3 – 12 F/m (Nelson, 1996) ซึ่งค่าไดอิเล็กทริกนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่ด้วย ดังนั้นจึงจะต้องเผื่อความสูงของวัสดุให้ครอบคลุม ทุกช่วงค่าไดอิเล็กทริกของข้าวที่เป็นไปได้

$$t_{\min} = \frac{20}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.9 เครื่องบดวัสดุ Cross beater mill (PULVERISETTE 16, FRITSCH GmbH)

หลังจากเตรียมตัวอย่างที่จะใช้วัดค่าไดอิเล็กทริกเสร็จแล้ว การวัดค่าไดอิเล็กทริกของข้าวที่บดและอัดให้แน่นแล้ว จะใช้โพรบวัดไดอิเล็กทริก Dielectric probe (N1501A, Keysight) ร่วมกับ VNA Vector network analyzer (N9918A, Keysight) และคอมพิวเตอร์ สำหรับแปรผลค่าการสะท้อนของคลื่นไปเป็นค่าไดอิเล็กทริก ในการวัดจะสามารถแปรผลค่าไดอิเล็กทริกออกมาเป็นจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งค่าจริงเรียกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก Dielectric constant และส่วนจินตภาพเรียกว่าค่าสูญเสียของไดอิเล็กทริก Dielectric loss factor ถึงแม้ว่าจะเรียกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแต่ในความเป็นจริง ค่าคุณสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุนั้น จะขึ้นอยู่กับความถี่ และอุณหภูมิของวัสดุ (Nelson, 2004, 2005; Nelson & Bartley Jr, 2002)

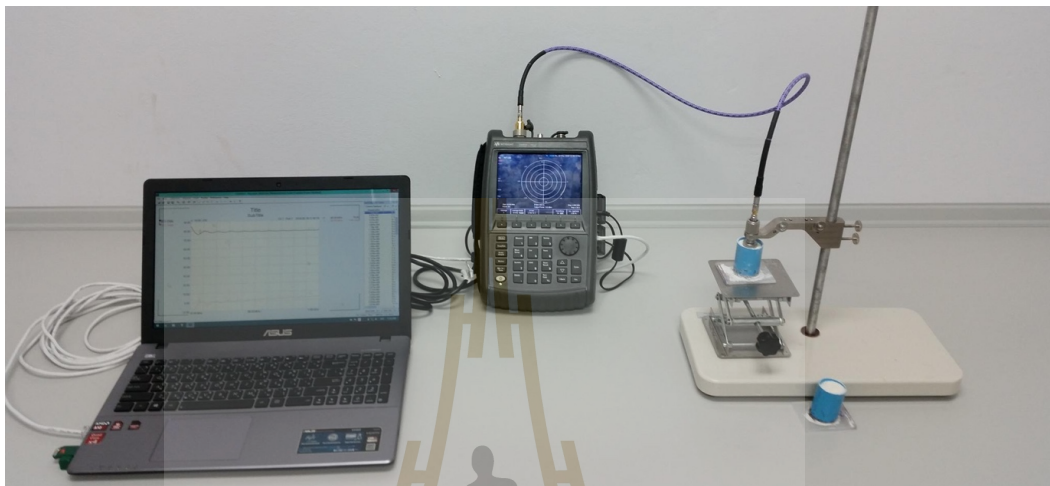
การวัดค่าไดอิเล็กทริก โดยใช้ Dielectric probe (N1501A, Keysight) จะต้องติดตั้งโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลจากทาง Keysight การใช้งานโปรแกรมจะใช้ร่วมกับ USB token มิฉะนั้นโปรแกรมจะไม่สามารถใช้งานได้ หลังจากเตรียมโปรแกรม ต่อ สาย Coaxial เข้ากับ Dielectric probe และ VNA จากนั้น เชื่อมต่อ VNA และคอมพิวเตอร์โดยใช้สาย Network LAN ที่มีหัวต่อแบบ RJ45 การจัดชุดทดลองการวัดดังรูปที่ 3.10



แต่ก่อนจะวัดค่าไดอิเล็กทริกได้ จำเป็นต้องทำการ Calibration ก่อน ซึ่งจำเป็นต้องทำทุกครั้งที่มีการวัด หลังจาก Calibration หนึ่งรอบแล้วจะวัดก็ครั้งก็ได้ แต่หากเก็บชุดการทดลองแล้ว จัดชุดการทดลองการวัดใหม่ หรือมีการเปลี่ยนช่วงความถี่ที่ใช้ในการวัด จำเป็นต้องทำการ Calibration เสมอ การ Calibration เริ่มจากการตั้งความถี่ที่จะใช้วัด เป็นช่วงความถี่ ในการวัดค่าไดอิเล็กทริกของขั้วนี้ใช้ความถี่ช่วง 10 – 1000 MHz เมื่อตั้งความถี่แล้ว โปรแกรมจะแนะนำขั้นตอน Calibration ให้แก่ผู้ใช้ ขั้นตอนที่ว่านี้คือ โปรแกรมจะให้ผู้ใช้วัด Dielectric probe กับอากาศ (Open calibration) คือปล่อยให้ Probe ไม่สัมผัสกับอะไรเลย นอกจากอากาศ เมื่อพร้อมให้กด Perform จากนั้น โปรแกรมจะใช้เวลาในการเก็บข้อมูลช่วงเวลาหนึ่ง เมื่อเสร็จแล้ว โปรแกรมจะแนะนำขั้นตอนถัดมาคือให้ Probe วัดกับน้ำ จะต้องเป็นน้ำ DI เท่านั้น DI water (Deionized water) เป็นน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงแทบจะปราศจาก ion ของแร่ธาตุอื่น ขั้นตอนนี้จะต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ เนื่องจากน้ำและความชื้นไม่เป็นมิตรต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และโดยเฉพาะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เฉพาะทางชั้นสูงอย่าง VNA ที่มีราคาสูง ซึ่งจำเป็นต้องกังวลเกี่ยวกับความปลอดภัยของอุปกรณ์ด้วย ในขั้นตอนนี้ให้ใช้น้ำ DI ใส่แก้วมีความสูงไม่น้อยกว่า 100 mm แล้วให้ Probe จุ่มในน้ำลงไปประมาณ 5 – 8 mm ห้ามจุ่ม Probe จนชิดขั้วต่อเด็ดขาด ในระหว่างนี้สังเกตด้วยว่า บริเวณหน้าสัมผัสของ Probe มีฟองน้ำค้างอยู่หรือไม่ หากมีฟองน้ำอยู่ให้ค่อย ๆ ตะแคง Probe จนไม่มีฟองน้ำค้างอยู่บริเวณหน้าสัมผัสของ Probe จากนั้นวัดอุณหภูมิของน้ำโดยใช้ Thermometer ค่าอุณหภูมิจำเป็นต้องตรงกับความเป็นจริงเพื่อจะได้ค่าที่ได้จากการวัดใกล้เคียงกับความจริงมากที่สุด หลังจากอ่านอุณหภูมิของน้ำ ให้ใส่ค่าอุณหภูมิเข้าไปในโปรแกรมซึ่งจะมีช่องให้ใส่ เมื่อพร้อมให้กด Perform ที่โปรแกรม จากนั้นขั้นตอนสุดท้ายของการ Calibration คือการ Short calibration ซึ่งขั้นตอนนี้สำคัญที่สุด เนื่องจากการ Calibration นี้ อาศัยอุปกรณ์เพิ่มอีกสองตัว คือตัวยึดประกบและแผ่นรอง Probe หากขาดชิ้นใดชิ้นหนึ่งไปขั้นตอนนี้จะไม่สามารถทำได้ โดยเฉพาะแผ่นรอง Probe ซึ่งเป็นวัสดุเฉพาะไม่สามารถใช้อื่นทดแทนได้ และไม่ใช้ไม่ได้ วิธีคือให้ใส่แผ่นรองเข้าไปในตัวยึดประกบก่อน จึงสวมเข้ากับ Probe การหมุนขันยึดประกบต้องค่อย ๆ ทำ และขันพอดีมือ ไม่แน่น ไม่หลวม เมื่อพร้อมแล้วกด Perform เป็นอันเสร็จขั้นตอนการ Calibration สำหรับ Dielectric probe

หลังจากเตรียมตัวอย่างที่จะวัดค่าไดอิเล็กทริก และ Calibration การวัดค่าไดอิเล็กทริกให้นำ หน้าสัมผัสของ Probe สัมผัสกับวัสดุที่เตรียมมาให้ราบเรียบไปกับแนวของวัสดุ อาจจะมีตัวช่วยในการกดวัสดุกับ Probe ให้แน่น เมื่อจัดอุปกรณ์เสร็จแล้วให้กดวัดค่าไดอิเล็กทริกในโปรแกรม ในขั้นตอนนี้จะใช้ช่วงเวลาหนึ่งในการดำเนินการ เมื่อเสร็จแล้วโปรแกรมจะให้แสดงผล ค่าผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูป  $\epsilon'$  และ  $\epsilon''$  ซึ่งก็คือส่วนจริงและส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอม (Permittivity) หรือค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุ

การเก็บผลการทดลองการวัด จะวัดค่าไดอิเล็กทริกทั้งหมด 10 ครั้งต่อข้าวหนึ่งชนิด เพื่อหาค่าเฉลี่ยและป้องกันความผิดพลาดที่อาจจะเกิดโดยไม่ตั้งใจในระหว่างการวัด ในการวัดนี้วัดที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 25 °C



รูปที่ 3.10 การจัดชุดการวัดค่าไดอิเล็กทริกของข้าว โดยใช้ Dielectric probe

### 3.5 การออกแบบเครื่องกำเนิดข้าวสำหรับครัวเรือน

#### 3.5.1 การออกแบบเพลตสำหรับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกส่วนมากจะให้วัสดุอยู่ระหว่างเพลตขนาน แล้วจ่ายแรงดันเพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น โดยแรงดันดังกล่าวต้องเป็นแรงดันแบบกระแสสลับเพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นแบบสลับด้าน เพื่อให้โมเลกุลในวัสดุเกิดการเคลื่อนที่แบบหมุน เนื่องจากการใช้สำหรับครัวเรือนจึงต้องคำนึงเรื่องขนาดที่เหมาะสมไม่ใหญ่หรือเล็กเกินไป อีกเรื่องที่ต้องคำนึงคือเรื่องกำลังไฟฟ้าที่ใช้งาน เพื่อเป็นการกำจัดตัวแปรที่จะมากไป จึงกำหนดให้อุปกรณ์นี้ใช้กำลังไม่เกิน 1,000 W หรือ 1 kW การออกแบบเพลตและขนาดเครื่องให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกใช้กับกำลังไฟฟ้า 1 kW เป็นหัวข้องานวิจัยนี้

เพลตขนานทั้งสองมีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยม ภายในจะมีข้าวที่จะให้ความร้อน ข้าวมีคุณสมบัติเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก ดังนั้นเพลตขนานที่มีข้าวอยู่ภายในจึงเสมือนเป็นตัวเก็บประจุตัวหนึ่ง ดังนั้นโหลดของกำลังไฟฟ้านี้จึงเป็นโหลดแบบความเก็บประจุ Capacitive load การจะส่งกำลังไฟฟ้าสูงสุดไปยังโหลดจึงจำเป็นต้องมีการ Matching ที่  $50 \Omega$  ซึ่งจะ Matching ได้จะต้องรู้ค่าความเก็บประจุของเพลตที่มีข้าว การวัดค่า Impedance ของเพลตต้องใช้เครื่องมือขั้นสูง เช่น Impedance meter หรือ Impedance analyzer จากนั้นจึงใช้ Smith chart หาค่าเหนี่ยวนำ (Conductive)

หรือค่าความเก็บประจุ (Capacitive) เพื่อใช้ในวงจร Matching network ต่อไป วิธีที่นิยมปฏิบัติทั่วไปคือ ใช้ VNA วัดค่า S11 เพื่อดูแนวโน้มนៃของ Impedance การตรวจสอบการ Matching ก็ใช้ VNA วัดค่า S11 เช่นเดิม โดยดูจากขนาดแอมพลิจูดของ S11 ที่ความถี่ที่ต้องการซึ่งขนาดของแอมพลิจูดที่ใช้ได้คือ -10 dB ลงมา ยิ่งติดลบมากยิ่งดี เพราะหมายถึงการสะท้อนกลับที่ความถี่นั้นมีย่าน้อย

### 3.5.2 การเลือกใช้เครื่องขยายสัญญาณความถี่สูงกำลังสูง

อุปกรณ์ที่ใช้ขยายสัญญาณความถี่สูงกำลังสูง ที่นิยมใช้มีหลอดสูญญากาศ (Electronics tube) ซึ่งสามารถขยายสัญญาณกำลังสูงได้ดี มีความคงทน และใช้ในระดัพบอุตสาหกรรรมเป็นส่วนใหญ่ แต่มีข้อเสียที่มีประสิทธิภาพต่ำ (Alba & Berestov, 2016) อีกทั้งยังมีขนาดใหญ่ รวมถึงความต้องการใช้การระบายความร้อนด้วยลม ซึ่งต้องใช้มอเตอร์ขนาดใหญ่ ทำให้เครื่องขยายสัญญาณกำลังสูงแบบที่เป็นหลอดสูญญากาศมีข้อได้เปรียบเรื่องรองรับกำลังไฟฟ้าได้สูง แต่มีจุดอ่อนคือประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับต่ำ (DC power to RF power) และขนาดที่เเทอะทะ การออกแบบให้ใช้งานสำหรับครัวเรือนต้องมีขนาดไม่ใหญ่มากเกินไป เพื่อสะดวกต่อการเคลื่อนย้าย และต้องประหยัดไฟ ซึ่งได้เลือก LDMOS มาใช้เป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ซึ่งจะเรียกเครื่องขยายสัญญาณแบบที่ใช้ Semiconductor นี้ว่า SSPA (Solid state power amplifier) เทคโนโลยีของ LDMOS ในขณะทำงานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีขนาดเล็กที่มีกำลังไฟฟ้าต่อตัวสูง รวมถึงประสิทธิภาพที่ค่อนข้างน่าพอใจสำหรับกำลังไฟฟ้าขนาด 1 kW ต่อหนึ่งตัว เครื่องขยายสัญญาณที่ใช้เป็นเครื่องขยายสัญญาณที่ได้มีการออกแบบและพัฒนาขึ้นมาในห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

SSPA นี้ใช้ LDMOS เบอร์ Freescale semiconductors (MRFE6VP61K25H) สองตัว แต่ละตัวจะมี FET อยู่ในสองตัว การใช้งานจะทำให้เป็น Amp class AB แบบ Push-Pull LDMOS หนึ่งตัวรองรับกำลังสูงสุดได้ 1.25 kW แต่ใช้สองตัวเพราะเนื่องจากต้องการแบ่งเบาภาระระบายความร้อน หากใช้งานหนึ่งตัวที่กำลัง 1 kW จะทำให้เกิดความร้อนสูง หากระบายความร้อนไม่ทันจะส่งผลให้ LDMOS เกิดความเสียหายได้ การใช้งาน LDMOS สองตัวทำได้โดยแบ่งกำลังสัญญาณที่เข้ามาเป็นสองทาง เมื่อขยายสัญญาณผ่านตัว LDMOS มาแล้วจึงรวมสัญญาณอีกครั้งหนึ่ง

ความสูญเสียในระบบที่ไม่จำเป็น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง เช่น สูญเสียจากความร้อนใน Power supply หรือ สูญเสียจาก Mismatch ดังแผนภาพที่ 3.11 ระบบกำจัดมอดในขั้วด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก เริ่มจากไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V จ่ายไฟฟ้าให้กับ Power supply (Keysight) เป็น ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดัน 48 V สำหรับ Power amplifier และ Power supply 12 V สำหรับ Oscillator ที่จะส่งสัญญาณ RF ให้ Power Amplifier ประสิทธิภาพของ Amplifier หาได้จาก

$$PAE = \frac{RF_{out} + RF_{in}}{DC_{in}} \quad (3.2)$$

เมื่อ	$PAE$	คือ Power added efficiency (W)
	$DC_{in}$	คือ กำลังของไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนเข้าระบบ (W)
	$RF_{in}$	คือ กำลังของสัญญาณ RF ที่ป้อนเข้าระบบ (W)
	$RF_{out}$	คือ กำลังของสัญญาณ RF ที่ออกจากระบบ (W)

กำลังสัญญาณ RF ที่ออกจาก Power amplifier จะผ่าน Power meter เพื่อวัดหาค่ากำลังสัญญาณ RF ที่แท้จริง โดยใช้ RF Power meter (Bird 4391A) จากนั้นกำลังของสัญญาณจะเข้า Matching network ก่อนที่จะเข้าโหลดเพลดขนาน การทำ Matching network เพื่อให้โหลดรับกำลังได้สูงสุด สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ เนื่องจากกำลังที่ถูกสะท้อน คือความสูญเสีย เป็นเหตุให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องทำ Matching network เพื่อส่งผ่านกำลังสูงสุดให้แก่โหลด

### 3.6 การออกแบบวงจร Matching network

โหลดเพลดขนานจะมีสภาพเหมือนตัวเก็บประจุ ตามการอธิบายในบทที่ 2 ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้ค่าความเก็บประจุ Capacitance มี Impedance เท่ากับ  $50 \Omega$  จึงต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความเป็น Inductance คือตัวเหนี่ยวนำมาหักล้างความเป็นความเก็บประจุออกไป สำหรับการปฏิบัติ ทำ Matching network วิธีที่รวดเร็วก็คือการใช้ VNA Vector network analyzer (N9918A, Keysight) มาหาค่า S11 ค่านี้จะบ่งบอกถึงการที่สัญญาณที่ส่งออกไปสะท้อนกลับมาได้เท่าใด คือช่วงความถี่ที่ส่งออกไปมีการสะท้อนกลับมาน้อย (น้อยกว่า -10 dB) หมายถึงช่วงความถี่นั้นถูกรับโดยอุปกรณ์ที่มาทดสอบได้ดี ตรงกันข้ามช่วงความถี่ที่มีการสะท้อนเยอะ (มากกว่า -10 dB) คืออุปกรณ์ที่นำมาทดสอบไม่สามารถเอาช่วงความถี่นั้นมาใช้ได้จึงสะท้อนออก สรุปได้ว่าค่า S11 หากมีค่าต่ำ (น้อยกว่า -10 dB) ที่ความถี่ใด ความถี่นั้นสามารถใช้งานได้ดีกับอุปกรณ์ที่มาทดสอบ อุปกรณ์ที่นิยมใช้ค่า S11 คือประเภท สายอากาศ หรือ โหลดชนิดพิเศษที่ใช้กับช่วงความถี่สูง

การใช้ VNA ทำ Matching network โดยการต่อ โหลด DUT (Device under test) เข้ากับ Port1 ของ VNA ซึ่งก่อนที่จะทำการวัดหรือก่อนที่จะใช้งาน VNA จำเป็นต้อง Calibration VNA ก่อน เพื่อให้ค่าที่วัดออกมามีความถูกต้องมากที่สุด หลังจาก Calibration เรียบร้อยแล้วต่อโหลดเข้ากับ VNA แล้วเลือก โหมดวัด S parameter ซึ่งหากต่อเพียง Port เดียว จะวัดได้เฉพาะ S11 ในกรณีนี้

วัดสองพอร์ตจะเห็นค่า S11 S12 S21 และ S22 ในขั้นแรกค่าที่วัดได้จะเป็นค่าที่ยังไม่ถูก Matching เพื่อที่จะให้ S11 ไปตกที่ความถี่ที่ต้องการจะต้องปรับค่าความเหนี่ยวนำ หรือปรับขนาดของเพลต เช่นความสูง ความยาว หรือระยะห่างระหว่างเพลต การปรับขนาดความสูงและความยาวไม่สามารถทำได้อย่างสะดวก เนื่องจากจะต้องเปลี่ยนเพลต ไปเลย ดังนั้นในขั้นนี้ จะเป็นการปรับความเหนี่ยวนำและระยะห่างระหว่างเพลต

นอกจากนี้การ Matching ควรคำนึงถึงความกว้างของ Bandwidth เนื่องจากโหนดของระบบ เป็นเสมือนตัวเก็บประจุ แต่เป็นตัวเก็บประจุที่ไม่ใช่ค่าคงที่ เมื่อระบบทำงาน ขั้วซึ่งเป็น Dielectric material จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิของ Dielectric material เปลี่ยน ค่าคุณสมบัติทางไดอิเล็กทริกจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป (Nelson, 2004, 2005; Nelson & Bartley Jr, 2002)

อีกวิธีหนึ่งที่ใช้ Impedance matching คือใช้เครื่องมือ Impedance analyzer (E4990A, Keysight) วัดค่า Impedance ของเพลตขนาดที่ออกแบบ จากนั้นใช้ Smith chart ในการออกแบบ วงจร Impedance matching (Bowick, Blyler, & Ajluni, 2008) เพื่อให้ฝั่ง Load มีค่า Impedance เท่ากันกับฝั่ง Source คือ 50  $\Omega$

### 3.7 ประสิทธิภาพ

#### 3.7.1 ประสิทธิภาพของเครื่องขยายสัญญาณ (RF power amplifier efficiency, $\eta_{RF}$ )

ภายในเครื่องขยายสัญญาณความถี่วิทยุกำลังสูง RF power amplifier ประกอบไปด้วยชุด Matching network ด้าน Input ก่อนที่จะเข้า LDMOS เพื่อขยายสัญญาณ จากนั้นสัญญาณจะออกมารวมกันที่ภาค Matching network ด้าน Output ชุดขยายสัญญาณกำลังสูงนี้ออกแบบการขยายแบบ Class AB push-pull การวัดประสิทธิภาพของเครื่องขยายสัญญาณกำลังสูงจะวัดจากกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้าไปยังกำลังไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงขาออก

$$\eta_{RF} = \frac{RF_{out}}{DC_{in}} \quad (3.3)$$

การปรับจูนภาค Matching network ทั้งด้าน Input และ Output เป็นกุญแจสำคัญที่ทำให้เครื่องขยายสัญญาณมีประสิทธิภาพสูง ทั้งนี้การละเลยการปรับจูนอาจจะทำให้วงจรเกิดแปรปรวนนำไปสู่ Oscillated โดยถ้าภาค Matching network เกิด Oscillated จะทำให้มี Harmonics เกิดขึ้นจำนวนมากและเยอะ ส่งผลให้ Power amplifier ขยายทุกสัญญาณที่เข้ามา และอาจจะทำให้เกิด Non-linear ทำให้สัญญาณมีความเพี้ยน ซึ่งจะส่งผลต่อเนื่องไปยังภาคโหนด ที่ออกแบบไว้สำหรับความถี่เดียว เมื่อสัญญาณมีหลายความถี่ออกมา ความถี่อื่นที่โหนดไม่สามารถรับไว้ได้จะ



สะท้อนกลับ กำลังที่สะท้อนกลับนี้จะกลับเข้าไปยัง LDMOS ทำให้ LDMOS เกิดความร้อนที่ตัวมันเอง Heat dissipated สูงกว่าปกติ อาจจะนำไปสู่การ Overheat และทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายขึ้น ตามเอกสารการใช้งานของ LDMOS ช่วงการขยายสัญญาณแต่ละช่วงจะให้ประสิทธิภาพไม่เท่ากัน และเพราะว่า LDMOS นี้ออกแบบมาใช้สำหรับกำลังสูง ดังนั้นประสิทธิภาพที่ดีที่สุดสำหรับ LDMOS คือช่วงกำลังสูง เมื่อสัญญาณที่เข้ามาไม่เพียงพอทำให้ LDMOS ทำงานในช่วงกำลังสูงได้ LDMOS จะยังคงขยายสัญญาณ แต่ไม่ได้ทำงานอย่างเต็มประสิทธิภาพ เป็นเหตุผลการปรับจูน Matching network มีความสำคัญเพื่อที่จะได้ประสิทธิภาพที่สูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

### 3.7.2 ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน (Thermal efficiency, $\eta_{th}$ )

การแลกเปลี่ยนพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นความร้อน เกิดขึ้นจากสมการ (2.1) สมการนี้คิดในกรณีที่คุณสมบัติ การหาประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนพลังงานจึงคิดขึ้นจากกำลังความร้อนเกิดขึ้นที่ขา  $P_{heat}$  เทียบกับกำลังคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้  $RF_{out}$

$$\eta_{th} = \frac{P_{heat}}{RF_{out}} \quad (3.4)$$

และ

$$P_{heat} = mC_p \left( \frac{\Delta T}{\Delta t} \right) \quad (3.5)$$

เมื่อ	$P_{heat}$	คือ กำลังของความร้อนที่เกิดขึ้น (W)
	$m$	คือ มวล (kg)
	$C_p$	คือ ค่าจำเพาะความร้อนของซิลิคอน มีค่าโดยเฉลี่ยที่ 1421 J/kg°C (Iguaz et al., 2003; Zhou & Wang, 2016a)
	$\Delta T$	คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป (°C) ในช่วงเวลา $\Delta t$ (s)

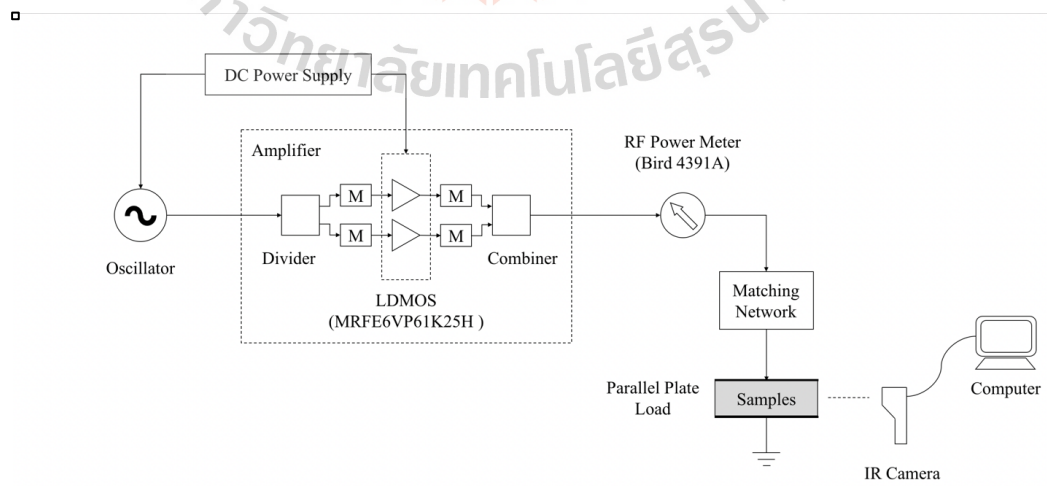


### 3.7.3 ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ (Overall efficiency, $\eta_{overall}$ )

เป้าหมายของการกำจัดมอดในข้าวคือการให้ความร้อนแก่ข้าวและมอดข้าว ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกวัดผลเทียบกับกำลังทางไฟฟ้าที่ใช้ ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบจะคำนวณจากกำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่ป้อนเข้าระบบ เทียบกับความร้อนที่เกิดขึ้นกับข้าว อุณหภูมิต่อหน่วยเวลาดังนั้นประสิทธิภาพโดยรวมของระบบคือกำลังทางไฟฟ้า (Input) กับกำลังทางความร้อน (Output)

$$\eta_{overall} = \frac{P_{electrical}}{P_{heat}} \quad (3.6)$$

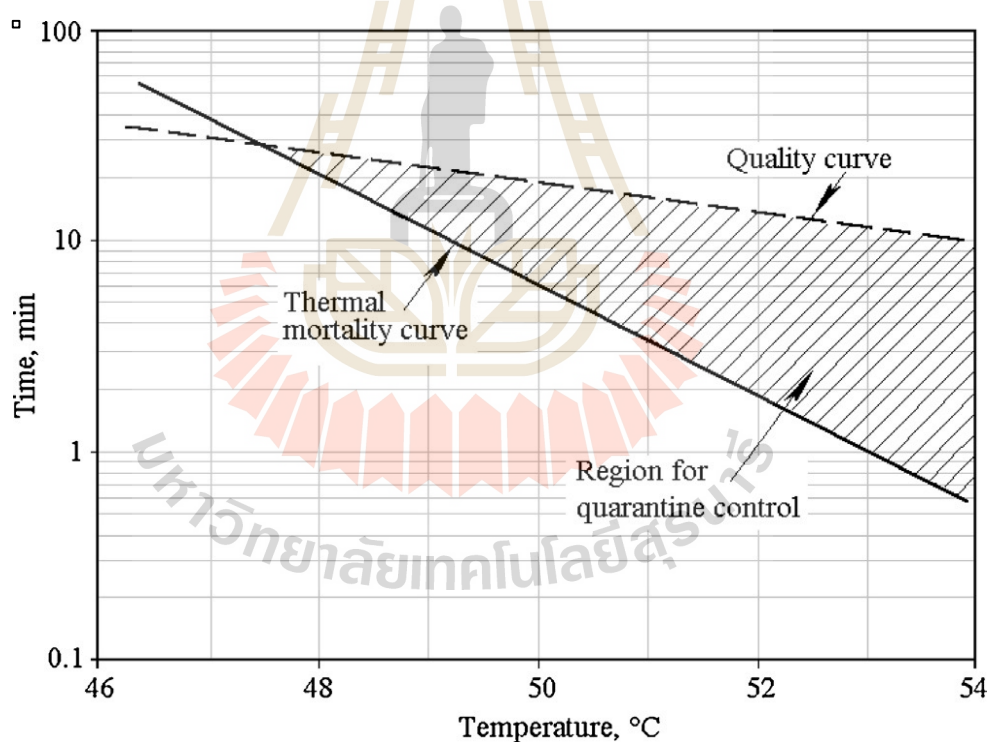
กำลังทางไฟฟ้าคือปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ ตามรูปที่ 3.11 แบ่งเป็นสามส่วนหลักคือ หนึ่งส่วนกำเนิดสัญญาณ สองส่วนขยายสัญญาณ และสามส่วนระบายความร้อน ส่วนกำเนิดสัญญาณ (Oscillator) สร้างสัญญาณความถี่วิทยุ 80MHz ขนาดกำลัง 10 W ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 V ใช้เครื่องมือ Power supply (Keysight, U8031A) เป็นอุปกรณ์จ่ายไฟให้ส่วนกำเนิดสัญญาณ ส่วนขยายสัญญาณ รับสัญญาณจากส่วนกำเนิดสัญญาณแล้วขยายสัญญาณขึ้นเป็นสัญญาณกำลังสูง ใช้ Power supply (Keysight, N8950A) จ่ายไฟให้ชุดขยายสัญญาณ ส่วนระบายความร้อน เป็นพัลลภที่พัลระบายความร้อนที่เกิดขึ้นในภาคขยายสัญญาณ เนื่องจากกำลังที่สูงสูญเสียไปจากการขยายจะเปลี่ยนไปเป็นความร้อนที่เกิดขึ้นบนอุปกรณ์ขยายสัญญาณ หากอุปกรณ์ขยายสัญญาณมีอุณหภูมิสูงมากเกินไป อาจทำให้อุปกรณ์ขยายสัญญาณเกิดความเสียหายได้ เพื่อป้องกันความสูญเสียที่อาจจะเกิดขึ้นจึงจำเป็นต้องติดตั้งพัลลภเพิ่มเพื่อระบายความร้อน



รูปที่ 3.11 ระบบการกำจัดมอดด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกประสิทธิภาพสูง

### 3.8 การกำจัดมอดข้าวด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก

ในการกำจัดมอดข้าวโดยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก จะต้องควบคุมไม่ให้อุณหภูมิของข้าวสูงมากหรือต่ำมากเกินไป ไม่เช่นนั้นแล้วข้าวอาจเกิดความเสียหายหรือไม่สามารถกำจัดมอดข้าวได้ทั้งหมด จากกราฟการให้ความร้อนของ Tang et al. (รูปที่ 3.12) (Hou et al., 2016) จะมีช่วงพื้นที่สำหรับการกำจัดแมลงแบบระยะเวลาสั้น พื้นที่ดังกล่าวเกิดขึ้นจากเส้นทึบและเส้นประเหนือเส้นทึบคือสามารถกำจัดแมลงได้ในอุณหภูมิหนึ่งต่อระยะเวลาที่ให้ หากการให้ความร้อนต่ำกว่าเส้นทึบแมลงอาจจะถูกกำจัดไม่หมด เส้นประคือแนวคุณภาพของอาหาร หากการให้ความร้อนสูงกว่าเส้นประ อาหารอาจจะถูกทำลายไปบางส่วนจากความร้อน ส่งผลให้คุณภาพของอาหารที่ผ่านกระบวนการนี้มีคุณภาพที่แย่ ดังนั้นการให้ความร้อนสำหรับการกำจัดแมลงที่ดีควรจะให้ความร้อนที่อยู่ในช่วงพื้นที่ที่แรเงา คือเหนือเส้นทึบและต่ำกว่าเส้นประ หรือนัยหนึ่งคือให้ความร้อนในช่วง 47.5 ที่เวลา 12 นาที ถึง 54 ที่เวลา 0.6 นาที



รูปที่ 3.12 ระยะเวลาที่ให้ความร้อนเทียบกับอุณหภูมิ และพื้นที่ของการกำจัดแมลงในขณะที่ยังรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรอยู่ (Hou et al., 2016)

การเตรียมมอดข้าวใช้มอดตัวโตเต็มวัย 30 ตัว คละเพศ และข้าวที่ปนเปื้อนมอดโดยคาดว่า จะมีไข่มอดภายในข้าวอยู่จำนวนหนึ่ง ต่อหนึ่งการทดลอง

ระยะเวลาที่ใช้ให้ความร้อนแก่มอดข้าวใช้ 2, 4, 10 วินาที เพื่อหาระยะเวลาที่ให้อัตราการตายมอดสูงสุด ในขณะที่ยังรักษาคุณภาพของข้าวไว้ได้อยู่

### 3.9 การประเมินคุณภาพของข้าวหลังการกำจัดมอดด้วยการให้ความร้อนแบบ

#### ไดอิเล็กทริก

เพื่อที่จะประเมินคุณภาพของข้าวที่ผ่านการกำจัดมอด จึงได้หาอาสาสมัครมาทดลองชิมอาหารที่ปรุงจากข้าวดังกล่าว โดยแบ่งเป็นกลุ่มตามระยะเวลาที่ให้ความร้อน แล้วละสุ่มแบบไม่ให้ผู้สมัครทราบว่าอาหารจานไหนมาจากอะไร เพื่อที่จะได้ข้อพิสูจน์ที่ไม่ได้มาจากอคติของอาสาสมัครเอง วิธีการนี้เรียกว่า Blinded experiment โดยทดลองกับอาสาสมัครจำนวน 10 คน แต่ละคนจะได้ชิมอาหารสามจาน แล้วให้ประเมินคุณภาพตามความคิดเห็นของอาสาสมัครแต่ละคน คะแนนที่ได้ทั้งหมดจะนำมาให้ตามอาหารแต่ละกลุ่ม ด้วยวิธีนี้จะสามารถระบุได้ว่าอาหารที่ผ่านการกำจัดมอดด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก มีความต่างหรือไม่ต่างจากอาหารปรุงจากข้าวที่ไม่ผ่านการกำจัดมอด

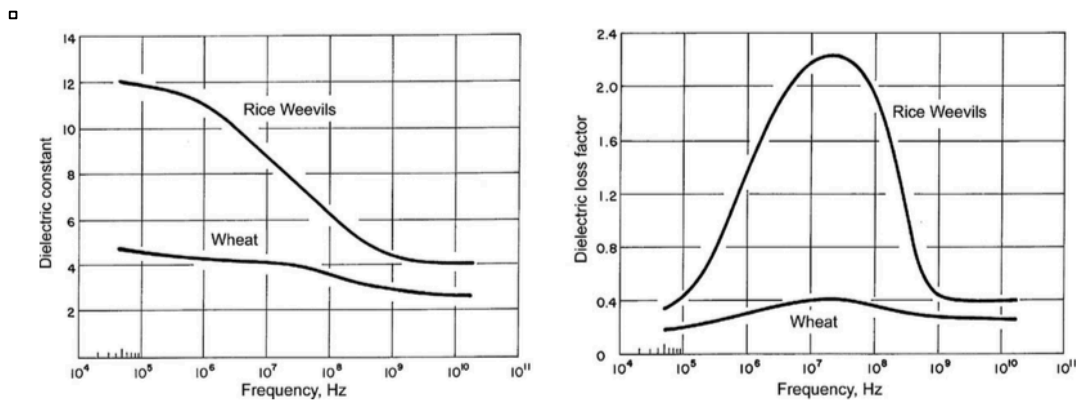
## บทที่ 4

### ผลการวิจัย และอภิปรายผล

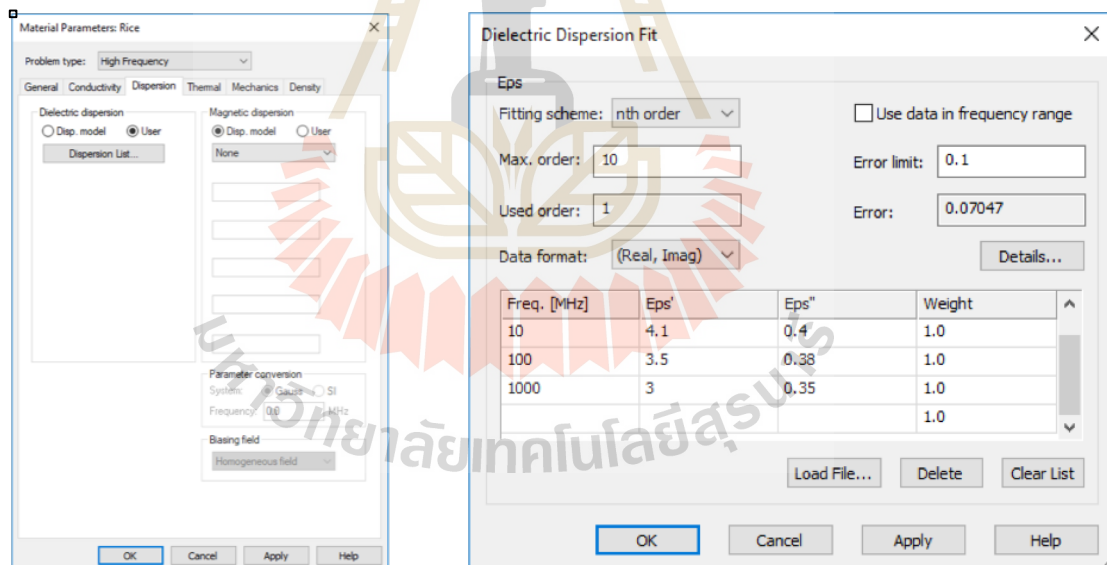
#### 4.1 ผลการศึกษาพารามิเตอร์เฟลตที่เกี่ยวข้อง

ด้วยการใช้โปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์ CST มาเป็นตัวช่วยในกระบวนการศึกษาค้นคว้า ค่าพารามิเตอร์ของเฟลต เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์เฟลตและค่า S-parameter โดยเริ่มจากการขึ้นรูปโมเดลสามมิติ (3D model) ในโปรแกรม CST เพื่อสร้างโครงสร้างที่จำเป็นต่อระบบให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกโดยใช้เฟลตขนาน โดยส่วนประกอบจะมี เฟลตขนาน วัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ระหว่างเฟลต วงจร Matching network และ Discrete port สำหรับให้โปรแกรมระบุจุดที่ป้อนกำลังของ RF power หรือ จูร์รับกำลัง RF power ด้วยการที่มี 2 ports จะทำให้ทราบถึงขนาดของ S11 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน และ S21 คือค่าการส่งผ่านกำลัง

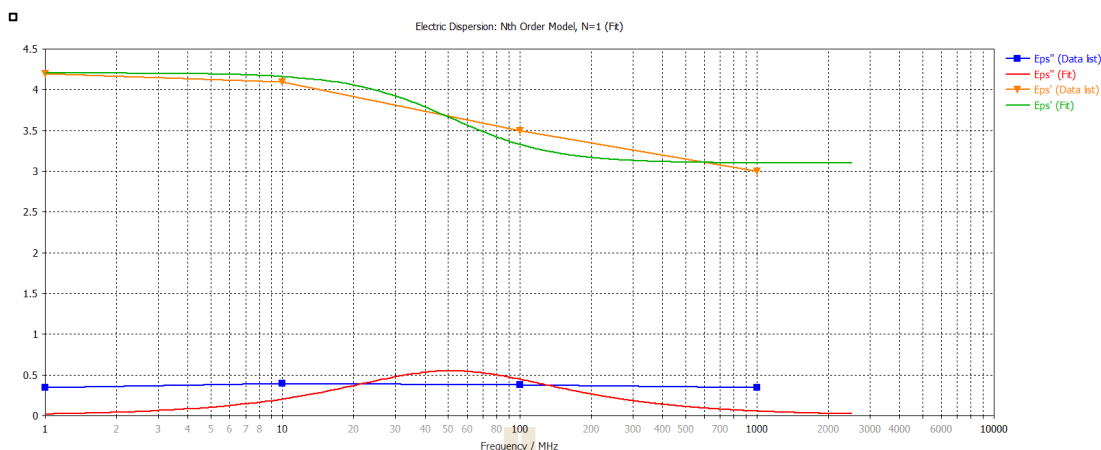
ระหว่างขึ้นรูปโมเดลสามมิติ ต้องกำหนดชื่อตัวแปรขนาดของมิติของวัสดุด้วยเพื่อให้สะดวกต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ ส่วนที่ต้องกำหนดขนาดจะมีความสูง ความยาวของเฟลต ระยะห่างระหว่างเฟลต ซึ่งระยะห่างอันนี้จะเป็นขนาดของวัสดุไดอิเล็กทริกด้วย จากนั้นจะมีความหนาของแผ่น PCB ที่ใช้เป็นเฟลต และความหนาของแผ่นทองแดงบน PCB ในขั้นแรกหลังจากขึ้นรูปสามมิติเสร็จแล้ว จะกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กทริกให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด วัสดุไดอิเล็กทริกที่ใช้นี้คือข้าว ซึ่งมีค่าคุณสมบัติทางไดอิเล็กทริกดังรูปที่ 4.1 (Nelson, 2005) ซึ่งมีค่า  $\epsilon'$  อยู่ในช่วงประมาณ 3 – 5 และค่า  $\epsilon''$  ในช่วงประมาณ 0.2 – 0.4 ที่มีจุดยอดที่ความถี่ 39 MHz เพื่อให้การจำลองผลใกล้เคียงกับความเป็นจริงจึงต้องกำหนดค่าคุณสมบัติทางไดอิเล็กทริกให้สอดคล้องกับชนิดของวัสดุ โดยการเปิดหน้าต่างกำหนดค่าวัสดุใน CST (Material Parameters) อยู่ที่ด้านซ้ายของหน้าจอหลักใน Tree list ชื่อ Materials แล้วเลือกวัสดุที่เป็นวัสดุไดอิเล็กทริกที่กำหนดไว้ ในที่นี้ชื่อว่า Rice ดังรูปที่ 4.2 (ซ้าย) จากนั้นไปที่ Dispersion เลือก User ในช่องของ Dielectric dispersion แล้วคลิก Dispersion list... จะมีหน้าต่างใหม่ขึ้นมา รูปที่ 4.2 (ขวา) ในหน้าต่างนี้ผู้ใช้กำหนดจุด ค่า  $\epsilon'$   $\epsilon''$  และความถี่ โดยใช้ค่าจากใน รูปที่ 4.1 ควรที่จะกำหนดจุดอย่างน้อยสองจุด เพื่อให้โปรแกรมสามารถ Fitting ค่าได้ใกล้เคียงกับที่ต้องการ หลังจากกำหนดจุดแล้ว กด OK จะได้ค่าคุณสมบัติของวัสดุในโปรแกรม (รูปที่ 4.3) ใกล้เคียงกับค่าไดอิเล็กทริกของข้าวในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ค่าไดอิเล็กทริกของข้าว (Wheat) และมอดข้าวในช่วง 5 kHz – 20 GHz (ซ้าย) เปรียบเทียบค่า Dielectric constant ของข้าวและมอด (ขวา) เปรียบเทียบค่า Dielectric loss factor ข้าว และมอดข้าว โดยมีจุด Relaxation peak ของมอดที่ประมาณ 40 MHz (Nelson, 2005)

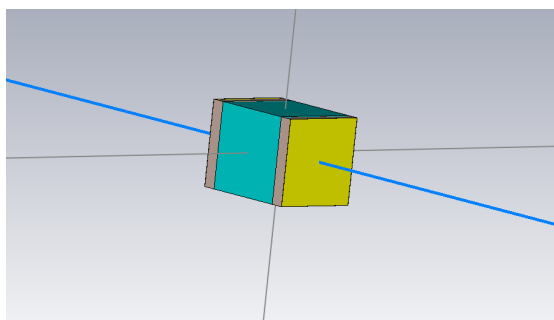


รูปที่ 4.2 กำหนดค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุใน CST เพื่อให้มีค่าคุณสมบัติใกล้เคียงกับข้าวในความเป็นจริง (ซ้าย) กำหนด Dielectric dispersion ที่กำหนดโดย User (ขวา) กำหนดจุดของค่าไดอิเล็กทริก โดยกำหนดสามจุดความถี่



รูปที่ 4.3 ค่าคุณสมบัติของวัสดุที่กำหนดโดยผู้ใช้งาน โดยกำหนดให้มีความใกล้เคียงกับค่าไดอิเล็กทริกของข้าว เพื่อให้การจำลองผลโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความแม่นยำ

หลังจากกำหนดค่าวัสดุไดอิเล็กทริกของข้าวแล้ว การจำลองผลการทดลองจะเริ่มจากกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของเพลต ซึ่งมีความยาว ความกว้าง และระยะห่างระหว่างเพลต โดยกำหนดค่าเริ่มต้นที่ 10 mm สำหรับทุกพารามิเตอร์ รูปที่ 4.4 แล้วปรับพารามิเตอร์ที่สนใจเพิ่มขึ้น ทีละ 10 – 20 mm ตามความเหมาะสม จากนั้นจึงเปลี่ยนไปดูพารามิเตอร์อื่น การเปลี่ยนพารามิเตอร์ในโปรแกรม ให้เปลี่ยนในหน้าต่าง Parameter List เมื่อเปลี่ยนแล้วกด Parametric Update เพื่อให้โปรแกรมอัปเดตพารามิเตอร์ตามที่กำหนด ในการจำลองนี้ได้เพิ่มพารามิเตอร์อีกตัวเข้ามาคือ Margin หรือระยะห่างระหว่างวัสดุไดอิเล็กทริก และขอบของเพลต เพื่อแก้ปัญหาเรื่องของการที่สนามไฟฟ้าบริเวณขอบมีค่าที่ไม่ Uniform หรือ Fringing fields ในขั้นแรกจะให้ระยะห่างระหว่างขอบนี้เป็นศูนย์ แล้วจึงเพิ่มระยะห่างนี้เพื่อศึกษาต่อไป

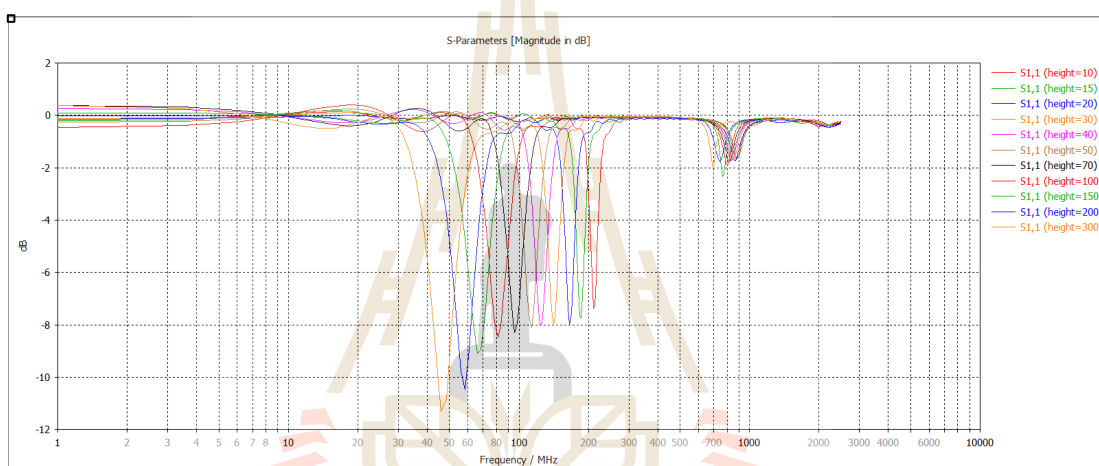


รูปที่ 4.4 ขนาดเริ่มต้นของเพลตขนาด 10 x 10 x 10 mm โดยใช้ PCB เป็นเพลตและมีวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ภายในระหว่างเพลต



#### 4.1.1 ความยาวของเพลต

การศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้น จากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความยาวของเพลต เพื่อหาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ S11 โดยกำหนดค่าความยาวดังนี้ 10, 15, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 150, 200, และ 300 mm ทั้งหมด 11 ขนาด ในการจำลองผลจะเลือกการจำลองผลแบบ Par. Sweep คือการกำหนดค่าพารามิเตอร์ล่วงหน้า แล้วให้โปรแกรมจำลองผลตามพารามิเตอร์ที่กำหนด ด้วยวิธีนี้สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ทั้งหมด 11 แบบดังกล่าว แล้วให้โปรแกรมจำลองผลตามพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ ซึ่งสะดวกสำหรับผู้ใช้ ไม่ต้องคอยรอการจำลองผลครบหนึ่งครั้งแล้วค่อยตั้งโปรแกรมทีละครั้ง รูปที่ 4.5 คือผลจากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST



รูปที่ 4.5 ผลการจำลองค่าพารามิเตอร์ S11 ของการเปลี่ยนขนาดของเพลต ค่า S11 มีแนวโน้มทางความถี่ต่ำลงเมื่อขนาดความยาวเพลตเพิ่มขึ้น ที่ความกว้างเพลตเท่ากับ 10 mm และระยะห่างระหว่างเพลตเท่ากับ 10 mm

จากผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์การเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของเพลต พบว่าเมื่อเริ่มต้นที่ความยาวเท่ากับ 10 mm ค่า S11 ที่ได้ไปลงที่จุดต่ำสุดที่ 210.2 MHz เท่ากับ -7.48 dB เมื่อเพิ่มความยาวขึ้น ค่าจุดต่ำสุดของ S11 มีแนวโน้มขยับไปทางซ้ายคือความถี่ที่ต่ำลง และยิ่งไปกว่านั้นคือค่า S11 ดีขึ้นเนื่องจากจุดต่ำสุดของ S11 ดัดลบมากขึ้นบ่งบอกถึงการสะท้อนกลับที่ต่ำลงแปรความได้ว่าโหลดมีการซับก้างได้มากขึ้น ค่า S11 ที่ดีควรจะดัดลบมากกว่า -10 dB เพราะยิ่งดัดลบมากยิ่งมีการสะท้อนกลับมาน้อย ค่าต่ำสุดของ S11 และความถี่ที่ต่ำสุด เทียบกับความยาวที่เปลี่ยนไปโดยมีค่าความกว้างและระยะห่างเริ่มต้นที่ 10 mm เป็นดังตารางที่ 4.1 การที่ความยาวของเพลตเพิ่มขึ้นถึงแม้ความกว้างและระยะห่างระหว่างเพลตจะเท่าเดิม ทำให้พื้นที่ของเพลตเพิ่มมาก

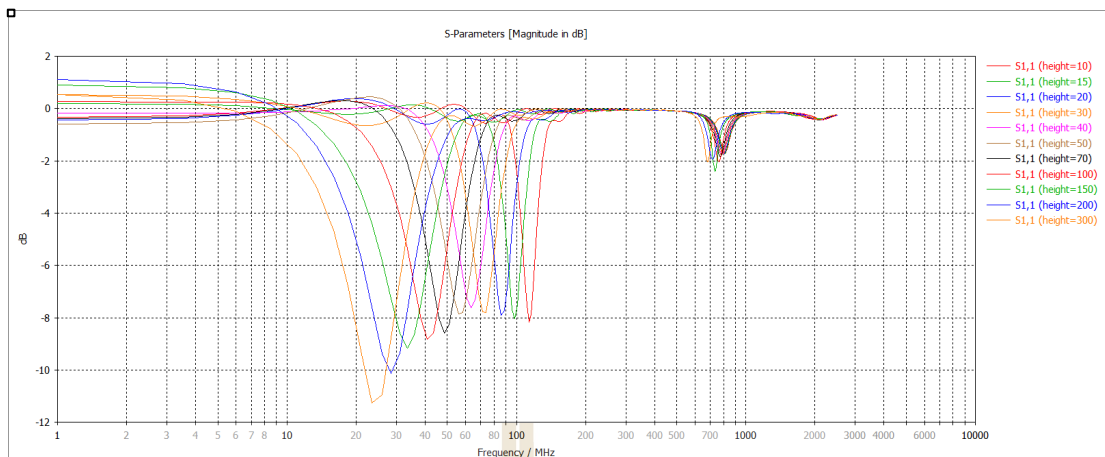


ขึ้น เมื่อพื้นที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าความเก็บประจุเพิ่มขึ้นตามสมการที่ (2.7) และ (2.22) ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดความเปลี่ยนแปลงกับ S11

ตารางที่ 4.1 ผลการจำลองความถี่ที่เพลด Resonant เมื่อขนาดความยาวของเพลดเปลี่ยน

ความยาวของเพลด (mm)	ความถี่ที่ Resonance (MHz)	S11 (dB)
10	210.2	-7.48
15	198.0	-7.75
20	174.3	-8.02
30	152.8	-7.98
40	137.5	-8.06
50	124.8	-8.08
70	95.7	-8.31
100	82.1	-8.48
150	67.1	-9.12
200	57.7	-10.44
300	46.4	-11.33

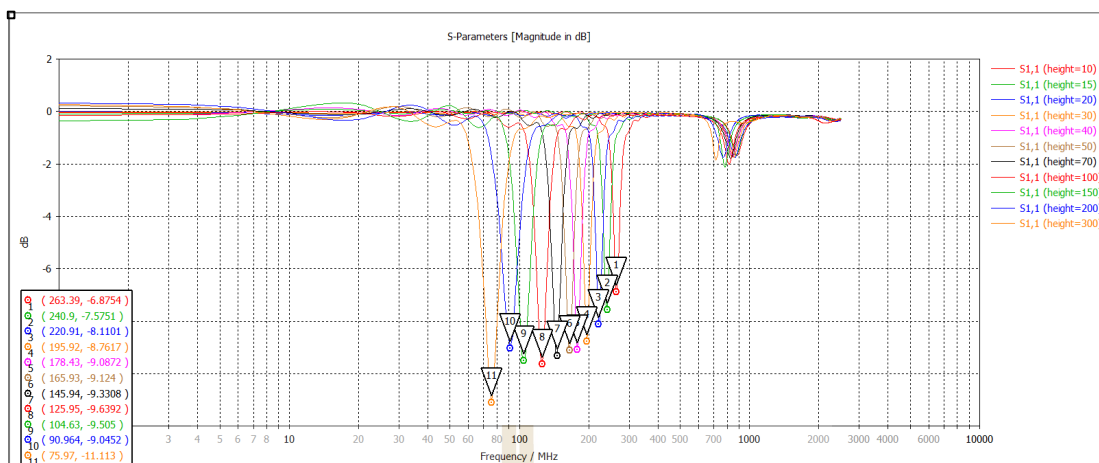
เพื่อยืนยันผลการทดลองที่ได้ จึงได้กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นเพิ่มอีกสองเงื่อนไข คือ ให้ค่าความกว้างเริ่มต้นเท่ากับ 50 mm และระยะห่างระหว่างเพลดเท่ากับ 10 mm และอีกเงื่อนไขคือ ค่าความกว้างเริ่มต้นเท่ากับ 10 mm และระยะห่างระหว่างเพลดเท่ากับ 50 mm แล้วดูผลที่ได้จากสองเงื่อนไข ว่าสนับสนุนซึ่งกันและกันหรือไม่ ผลจากการให้ค่าความกว้างเริ่มต้นเท่ากับ 50 mm เป็นไปดังรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.2 และผลของค่าเริ่มต้นระยะห่างระหว่างเพลดเท่ากับ 50 mm เป็นไปดังรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.6 ผลการจำลองค่าพารามิเตอร์ S11 ของการเปลี่ยนขนาดของเพลต ค่า S11 มีแนวโน้มทางความถี่ต่ำลงเมื่อขนาดความยาวเพลตเพิ่มขึ้น ที่ความกว้างเพลตเท่ากับ 50 mm และระยะห่างระหว่างเพลตเท่ากับ 10 mm

ตารางที่ 4.2 ผลการจำลองความถี่ที่เพลต Resonant เมื่อขนาดความยาวของเพลตเปลี่ยน โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้น ที่ความกว้างเพลตเท่ากับ 50 mm และระยะห่างระหว่างเพลตเท่ากับ 10 mm

ความยาวของเพลต (mm)	ความถี่ที่ Resonance (MHz)	S11 (dB)
10	113.4	-8.17
15	98.46	-8.04
20	85.97	-7.99
30	73.47	-7.79
40	63.47	-7.60
50	55.98	-7.85
70	48.48	-8.60
100	40.98	-8.82
150	33.48	-9.16
200	28.48	-10.14
300	23.49	-11.27



รูปที่ 4.7 ผลการจำลองค่าพารามิเตอร์ S11 ของการเปลี่ยนขนาดของเพลต ค่า S11 มีแนวโน้มทางความถี่ต่ำลงเมื่อขนาดความยาวเพลตเพิ่มขึ้น ที่ความกว้างเพลตเท่ากับ 10 mm และระยะห่างระหว่างเพลตเท่ากับ 50 mm

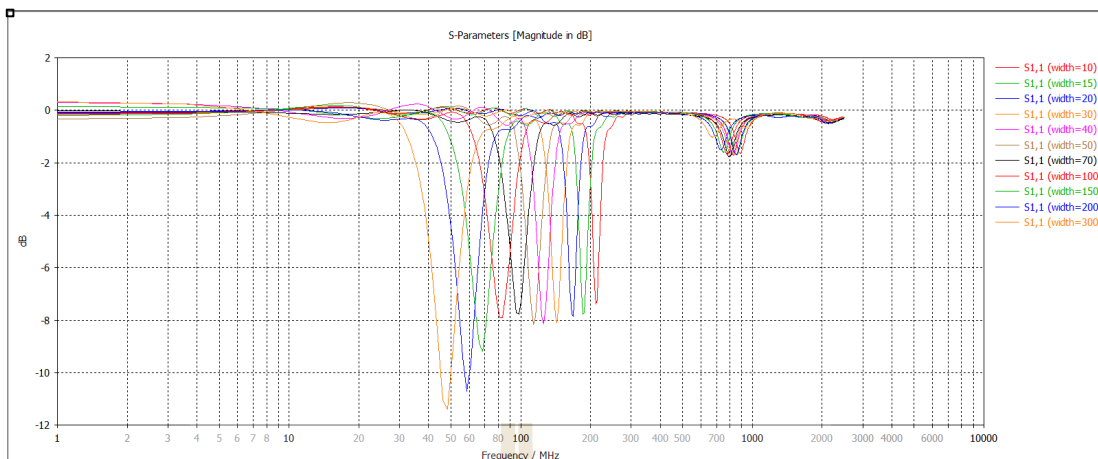
ตารางที่ 4.3 ผลการจำลองความถี่ที่เพลต Resonant เมื่อขนาดความยาวของเพลตเปลี่ยน โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้น ที่ความกว้างเพลตเท่ากับ 10 mm และระยะห่างระหว่างเพลตเท่ากับ 50 mm

ความยาวของเพลต (mm)	ความถี่ที่ Resonance (MHz)	S11 (dB)
10	263.39	-6.88
15	240.90	-7.58
20	220.91	-8.11
30	195.92	-8.76
40	178.43	-9.09
50	165.93	-9.12
70	145.94	-9.33
100	125.95	-9.64
150	104.63	-9.50
200	90.96	-9.05
300	75.97	-11.11

เมื่อให้ค่าเริ่มต้นของความกว้างเพิ่มเป็น 50 mm พบว่าจุดที่ S11 ต่ำสุดเริ่มต้นถูกขยับเลื่อนไปทางซ้าย คือความถี่ต่ำลง และความถี่ของจุดที่ S11 ต่ำสุดก็มีความถี่ต่ำลงเมื่อเพิ่มความยาวมากขึ้น ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันกับแบบแรกที่กำหนดค่าพารามิเตอร์ทั้งสามตัวให้เป็น 10 mm สิ่งที่แตกต่างกันจากแบบแรกคือหนึ่ง ความถี่ที่ S11 ต่ำสุดทั้งหมดถูกขยับไปทางซ้าย และสอง Bandwidth ของ S11 มีความกว้างมากขึ้น ซึ่งการที่ Bandwidth เพิ่มขึ้นหมายถึงโหลดสามารถรับมือกับการเลื่อนของความถี่ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้ Mismatch อาจจะนำไปสู่การสะท้อนกลับเข้าวงจรขยายสัญญาณและอาจทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้ แต่ในเมื่อมี Bandwidth ที่กว้างกว่าทำให้โหลดสามารถรับกำลังได้ถึงแม้จะไม่ดีเท่าจุดที่ต่ำที่สุด ในบางกรณีก็สามารถลดการสะท้อนกลับไปยังวงจรขยายสัญญาณได้ ในขณะที่หากให้ระยะห่างระหว่างเพลตเริ่มต้นเท่ากับ 50 mm ผลการทดลองที่ได้ค่า S11 มี Bandwidth ที่แคบมากกว่าสองแบบที่ผ่านมา ในขณะที่แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความยาวยังคงรูปแบบเดิมคือความถี่ของจุดที่ S11 ต่ำสุดก็มีความถี่ต่ำลงเมื่อเพิ่มความยาวมากขึ้น ถึงแม้ว่าจุดเริ่มต้นจุดต่ำสุดของ S11 จะอยู่ที่ความถี่สูงกว่าสองแบบที่ผ่านมา แต่เมื่อเพิ่มความยาวมากขึ้น จุดต่ำสุดของ S11 มีความถี่ต่ำลง จากผลการทดลองพารามิเตอร์ความยาวของเพลตทำให้สามารถได้ข้อสรุปว่า การเพิ่มความยาวของเพลตส่งผลให้ค่าความเก็บประจุสูงขึ้นแล้วส่งผลให้ค่า S11 แปรผกผันกับค่าความเก็บประจุ

#### 4.1.2 ความกว้างของเพลต

หลังจากที่ได้ข้อสรุปจากการทดลองเพิ่มความยาวของเพลต ขั้นตอนต่อไปคือการศึกษาค่าพารามิเตอร์ความกว้างของเพลต ผลลัพธ์ที่ได้ (รูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.4) มีความคล้ายคลึงอย่างมาก กับผลการทดลองของการปรับพารามิเตอร์ความยาวครั้งแรก สาเหตุเนื่องจากคุณลักษณะทางรูปทรงเรขาคณิตๆ มีความเหมือนกัน เพียงแต่เพลตเหมือนถูกหมุนไป 90 องศา ดังนั้นค่าความเก็บประจุของเพลตจึงเหมือนกัน และเมื่อให้ค่าความยาวตั้งต้นเป็น 50 mm หรือให้ค่าตั้งต้นระยะห่างระหว่างเพลตเป็น 50 mm ผลลัพธ์ที่ได้เหมือนกันกับการปรับพารามิเตอร์ความยาว



รูปที่ 4.8 ผลการจำลองค่าพารามิเตอร์ S11 ของการเปลี่ยนขนาดของเพลต ค่า S11 มีแนวโน้มทางความถี่ต่ำลงเมื่อขนาดความกว้างเพลตเพิ่มขึ้น ที่ความยาวเพลตเท่ากับ 10 mm และระยะห่างระหว่างเพลตเท่ากับ 10 mm

ตารางที่ 4.4 ผลการจำลองความถี่ที่เพลต Resonant เมื่อขนาดความกว้างของเพลตเปลี่ยน

ความยาวของเพลต (mm)	ความถี่ที่ Resonance (MHz)	S11 (dB)
10	210.92	-7.39
15	185.93	-7.77
20	168.43	-7.86
30	143.44	-8.11
40	125.95	-8.14
50	113.46	-8.17
70	98.46	-7.78
100	83.46	-7.89
150	68.47	-9.18
200	58.47	-10.71
300	48.48	-11.39

การที่ผลการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ความยาวและความกว้าง นั้นได้ผลลัพธ์เหมือนกัน เป็นเพราะค่าความถี่ประจุของเพลตไม่แตกต่างกัน ถึงแม้ว่ารูปทรงจะมีการขยับในคนละทิศกัน แต่เมื่อค่าความถี่ประจุเท่าเดิม จึงทำให้ S11 ที่ได้มีความคล้ายคลึงกันอย่างมาก เนื่องจากทุกการขยับหนึ่งครั้งของการปรับพารามิเตอร์ความยาว จะมีพื้นที่ กว้างคูณยาว เท่ากันกับการปรับพารามิเตอร์ความกว้าง ดังนั้นส่วนที่จะมีผลต่อ S11 ที่จะศึกษาต่อไปคือพื้นที่ของเพลต และตามด้วยระยะห่างระหว่างเพลต

#### 4.1.3 พื้นที่ของเพลต

เพื่อที่จะศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของเพลตและ S11 จึงทำการเก็บผลการทดลองเพิ่มในการปรับพารามิเตอร์สองตัวคือความยาวและความกว้าง ไปพร้อมกัน และเนื่องจากพื้นที่ของเพลตส่งผลต่อค่าความถี่ประจุ การผลการทดลองที่ผ่านมา เมื่อเพิ่มความยาวหรือความกว้าง ในขณะที่ระยะห่างระหว่างเพลตมีค่าเท่าเดิม จะทำให้ค่าความถี่ประจุมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อค่าความถี่ประจุเพิ่มขึ้นทำให้ จุดที่ S11 ต่ำสุดมีการขยับความถี่ลง ในขณะที่เมื่อให้พารามิเตอร์เริ่มต้นของระยะห่างระหว่างเพลตมีค่าสูงขึ้น หมายความว่าค่าความถี่ประจุตั้งต้นมีค่าต่ำลง ทำให้ค่า S11 เริ่มต้นมีความถี่ขยับขึ้นสูง แต่เมื่อเพิ่มพื้นที่ของเพลต ค่า S11 มีการขยับความถี่ลง ในลักษณะเดิม ซึ่งจุดที่ S11 ต่ำสุดนี้คือจุดที่มีการ Resonant ของเพลตกับตัวเหนี่ยวนำ ดังสมการ (4.1)

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.1)$$

เมื่อค่าความถี่ประจุเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความเหนี่ยวนำเท่าเดิม จะทำให้ความถี่ Resonant ลดลง สามารถปรับเพลตให้ได้ขนาด และความถี่ Resonant ตามที่ต้องการได้ การกำหนดพื้นที่ที่เพลตจะกำหนดตามอัตราส่วนระหว่างความกว้างและความยาวด้วย โดยจะใช้อัตราส่วนกว้างต่อยาว 1:1, 1:1.5, 1:1.61, 1:2, 1:2.5, และ 1:3 ทั้งหมด 6 แบบ แต่ละแบบจะใช้ 3 ขนาด โดยมีขนาดความกว้างเริ่มต้นที่ 10, 30, และ 70 ผลการทดลองการจำลองพื้นที่ของเพลตในตารางที่ 4.5 จากผลการทดลองที่ได้ สนับสนุนข้อมูลเดิมที่ว่า เมื่อพื้นที่เพลตเพิ่มขึ้น ความถี่ที่ Resonance จะต่ำลง เนื่องจากค่าความถี่ประจุจากเพลตเพิ่มขึ้น แต่ค่าความเหนี่ยวนำเท่าเดิม จากแนวโน้มพบว่ายิ่งพื้นที่เพิ่มขึ้นค่า S11 ยิ่งต่ำลง เมื่อพื้นที่ของเพลตเพิ่มขึ้นจะทำให้การดูดซับกำลังทำได้ดีขึ้น พื้นที่ของเพลตแปรผกผันกับความถี่ Resonance เมื่อพื้นที่ต่ำ ความถี่ Resonance จะสูง เนื่องจากพื้นที่ที่เพลตต่ำทำให้ค่าความถี่ประจุต่ำ และเมื่อค่าความถี่ประจุต่ำในขณะที่ค่าความเหนี่ยวนำเท่าเดิม จะทำให้ความถี่ Resonance สูงขึ้นตามสมการ (4.1)



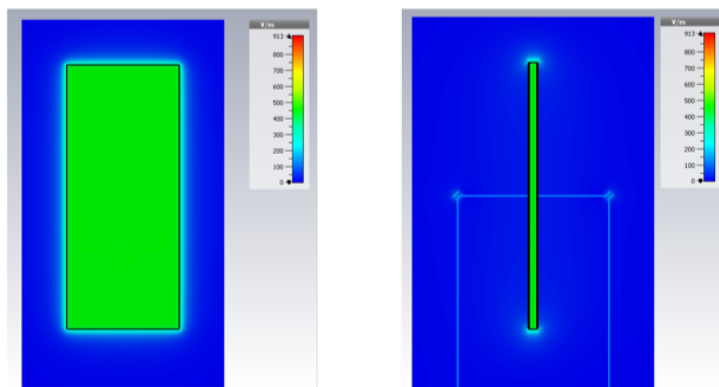
ตารางที่ 4.5 ผลการจำลองขนาดของเพลต ที่อัตราส่วน และพื้นที่ของเพลตต่างกัน เพื่อหาความสัมพันธ์ของความถี่ที่ Resonance และการสะท้อนกลับ

Plate ratio	Width x Height (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Resonance frequency (MHz)	S11 (dB)
1:1	10 x 10	100	210.92	-7.3928
	30 x 30	900	92.924	-7.5866
	70 x 70	4900	42.018	-8.3263
1:1.5	10 x 15	150	185.93	-7.7552
	30 x 45	1350	75.97	-7.6988
	70 x 105	7350	33.487	-8.7826
1:1.61	10 x 16.1	161	180.93	-7.7629
	30 x 48.3	1449	73.471	-7.8008
	70 x 112.7	7889	30.988	-8.9265
1:2	10 x 20	200	165.93	-7.9839
	30 x 60	1800	67.499	-7.9832
	70 x 140	9800	28.489	-9.8644
1:2.5	10 x 25	250	150.94	-7.8685
	30 x 75	2250	60.976	-8.0158
	70 x 175	12250	25.99	-10.482
1:3	10 x 30	300	140.94	-8.0406
	30 x 90	2700	53.479	-8.1667
	70 x 210	14700	25.99	-10.881

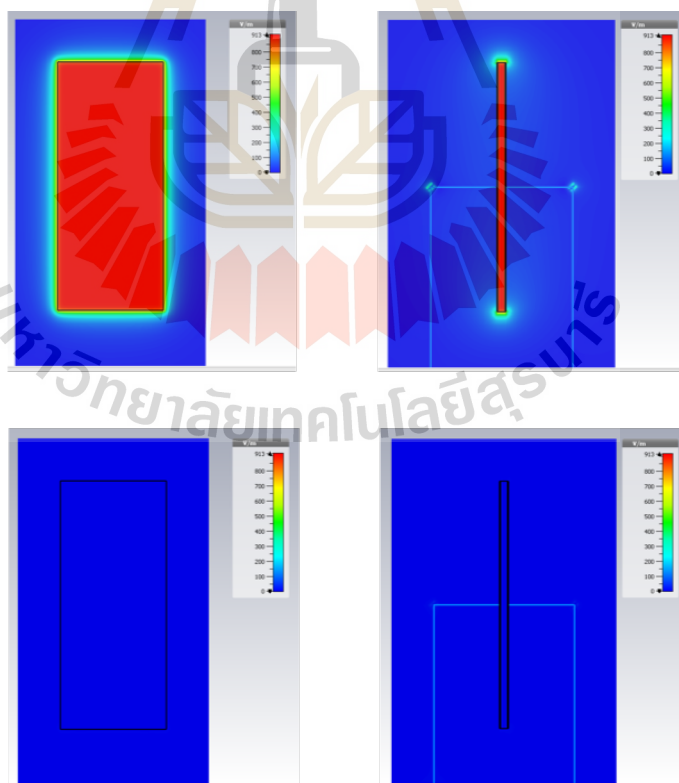
#### 4.1.4 สนามไฟฟ้าภายในวัสดุที่อยู่ระหว่างเพลต

เพื่อศึกษาการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายในวัสดุ ที่ความถี่ต่างกัน เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสมกับงานที่ใช้ในการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก จากสมการ (2.1) กำลังการกระจายต่อหน่วยปริมาตรจะแปรผันตรงกับขนาดความเข้มสนามไฟฟ้ากำลังสอง ดังนั้นยิ่งสนามไฟฟ้ามีความเข้มสูงยิ่งเกิดการเปลี่ยนพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ไปเป็นพลังงานความร้อนได้ดี แต่นอกเหนือจากความความสนามไฟฟ้าแล้วยังต้องคำนึงถึงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในวัสดุด้วย เนื่องจากการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ ย่อมทำให้ความร้อนที่เกิดไม่สม่ำเสมอตามไปด้วย การคำนึงถึงการเกิดความร้อนที่สม่ำเสมอทั่วกันตลอดทั้งวัสดุจึงเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาด้วย

ในการทดลองจะพิจารณาสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 10, และ 80 โดยจะออกแบบเพลตให้ S11 ไปลงที่ความถี่ดังกล่าวที่มี Magnitude ใกล้เคียงกันแล้วพิจารณาที่ความถี่ 10, 80, 500, และ 1200 MHz แต่ขนาดของเพลตแต่ละความถี่อาจจะไม่เท่ากัน เนื่องจากค่าความเก็บประจุไม่เท่ากัน ส่งผลให้ความถี่ Resonant ไม่เท่ากัน ในรูปที่ 4.9 เป็นผลการทดลองของการทำให้เพลตใช้งานที่ความถี่ 10 MHz ได้ความถี่ Resonant ที่ 10.1 MHz S11 เท่ากับ -7.24 dB มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ 456.14 V/m มีความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ Uniform เนื่องจากทั่วทั้งวัสดุมีความเข้มสนามไฟฟ้าที่ไม่แตกต่างกันมาก เมื่อคำนวณเป็นกำลังสูญเสียในรูปของความร้อนจะมีอุณหภูมิที่สม่ำเสมอทั่วทั้งบริเวณวัสดุ ในการพิจารณาจำเป็นต้องคิดมุมของเฟสด้วย เนื่องจากที่เฟสต่างกันจะส่งผลถึงความเข้มสนามไฟฟ้า มุมเฟสของสัญญาณในจุดที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดคือที่มุมเฟส 60, และ 150 องศา ตามข้อมูลในตารางที่ 4.6 ในรูปที่ 4.10 คือสนามไฟฟ้าในวัสดุที่มุมเฟส 60, และ 150 องศาตามลำดับ ผลการทดลองความเข้มสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งกลางเพลตที่มุมเฟส 0 – 360 องศา ในตารางที่ 4.6 ที่มุมเฟส 60 และ 240 มีความเข้มสนามไฟฟ้าภายในวัสดุสูงสุดคือ 911.271 V/m เมื่อเทียบกับมุมเฟสอื่น และที่มุม 150 และ 330 มีความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำที่สุดคือ 0.583 V/m



รูปที่ 4.9 สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณเพลตขนานที่มุมเฟส 0 องศา (ซ้าย) มุมมองด้านบนบนเพลต สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเพลตมีความเป็น Uniform สูง ถึงแม้บริเวณขอบจะมีการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าแบบ Fringing fields แต่สนามไฟฟ้าบริเวณภายในวัสดุไดอิเล็กทริกยังคงมีความ Uniform (ขวา) มุมมองด้านข้างของเพลต ที่ขอบของเพลตมีสนามไฟฟ้ากระจายตัวออกมาจากเพลตเล็กน้อย

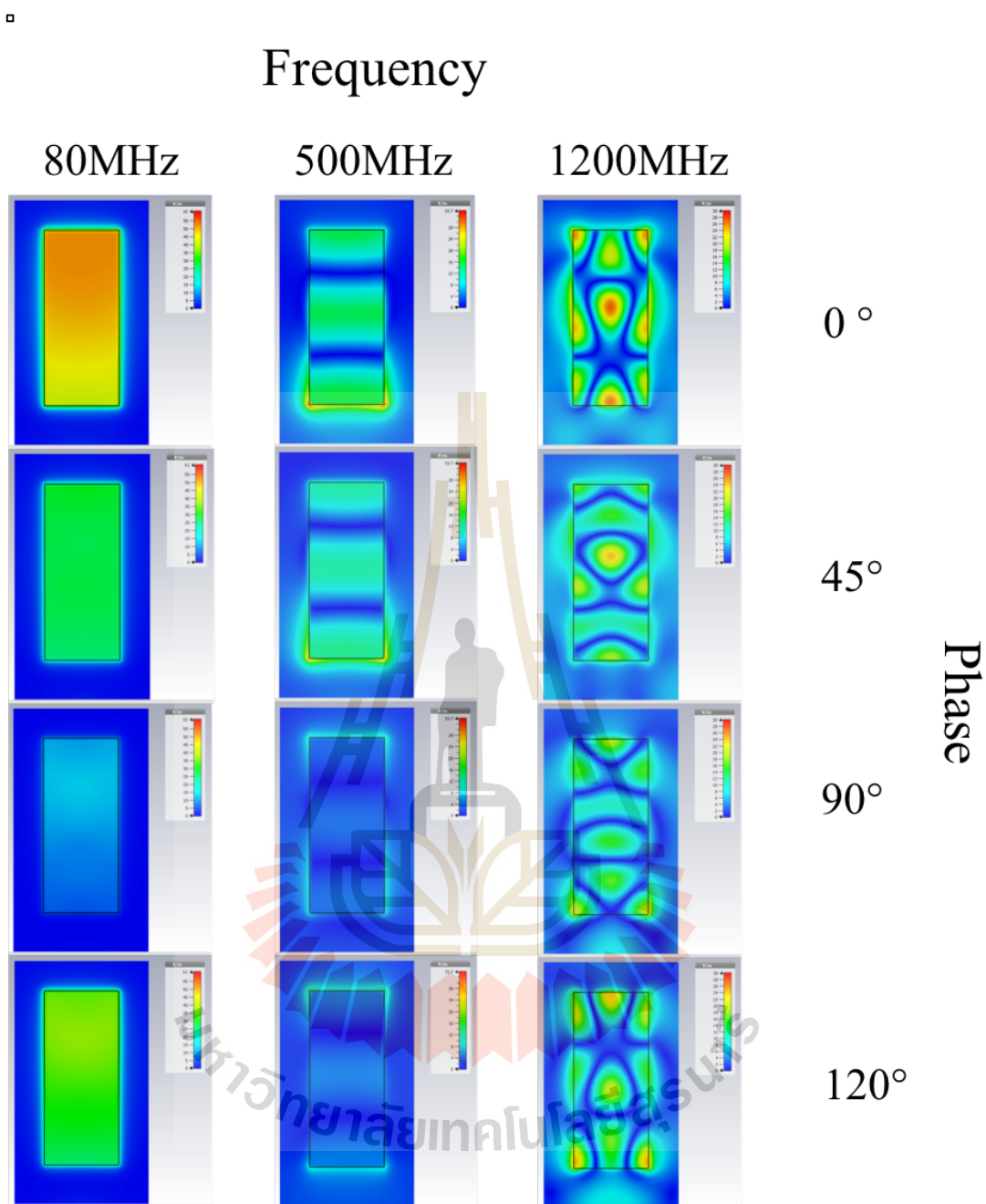


รูปที่ 4.10 สนามไฟฟ้าที่กระจายตัวบริเวณเพลต (บน) ที่สนามไฟฟ้ามีความเข้มสูงสุดที่มุมเฟส 60 องศา และ (ล่าง) ที่สนามไฟฟ้ามีความเข้มต่ำที่สุดที่มุมเฟส 150 องศา

ตารางที่ 4.6 ความเข้มของสนามไฟฟ้าเมื่อมุมเฟสเปลี่ยนไป ของเพลตที่ Resonance ที่ 10 MHz

Phase (degree)	Electric field intensity (V/m)
0	456.14
30	789.475
45	880.371
60	911.271
90	788.892
120	455.13
135	235.291
150	0.583
180	456.14
210	789.475
225	880.371
240	911.271
270	788.892
300	455.13
315	235.921
330	0.583
360	456.14

ในรูปที่ 4.10 สนามไฟฟ้ามีความเข้มสูงสุดที่มุมเฟส 60 และมีความเข้มสนามไฟฟ้าเกือบเท่ากัน ทั้งทั้งบริเวณวัสดุที่อยู่ภายในเพลต เนื่องจากเพลตถูกออกแบบมาเพื่อความถี่ที่ใช้นี้คือ 10MHz แต่หากนำมาใช้ที่ความถี่สูง ที่ 80, 500, 1200 MHz สนามไฟฟ้าจะเป็นไปดังรูปที่ 4.11 เพื่อให้เห็นรายละเอียดของสนามไฟฟ้าได้ชัดเจน ในแต่ละความถี่จึงไม่ได้ใช้สเกลสนามไฟฟ้าอันเดียวกัน ในรูปที่ 4.11 ไล่จากบนลงล่างคือที่มุมเฟส 0, 45, 90, และ 120



รูปที่ 4.11 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในเพลต จากซ้ายไปขวาที่มุมเฟส 0, 45, 90 และ 120 องศา ที่ความถี่ 80 MHz, 500 MHz และ 1200 MHz

ในรูปที่ 4.11 (แถวแรก) คือสนามไฟฟ้าภายในวัสดุที่ความถี่ 80 MHz จากซ้ายไปขวาคือที่มุมเฟส 0, 45, 90, และ 120 สนามไฟฟ้ามีความเข้มอยู่ในช่วง 0 – 60 V/m ถึงแม้ว่าจะมีการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าค่อนข้าง Uniform ใกล้เคียงกับของความถี่ 10 MHz แต่เนื่องจากสนามไฟฟ้ามีความเข้มที่ต่ำเกินไป เนื่องจากเฟลตที่ทดสอบนี้มีค่า S11 ที่ความถี่ 80 MHz เท่ากับ -0.36 dB นับว่าแทบจะสะท้อนกำลังกลับหมด ที่ความถี่ 80 MHz สำหรับเฟลตที่ออกแบบมาที่ความถี่ 10 MHz จึงไม่สามารถใช้งานได้ แต่เพื่อศึกษาผลการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในความถี่ที่ไม่ใช่ความถี่ที่ออกแบบ เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าภายในวัสดุระหว่างเฟลตได้ดียิ่งขึ้น จึงต้องพิจารณาการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในความถี่อื่น นอกจากนี้มุมเฟสที่ให้ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดเป็นคอนละมูมกับความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดของ 10 MHz รูปที่ 4.11 (แถวกลาง) คือสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 500 MHz มีความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วง 0 – 25 V/m น่าสนใจตรงที่สนามไฟฟ้าที่กระจายตัวไม่สม่ำเสมอ มีช่วงหรือแถบที่สนามไฟฟ้าเป็น 0 V/m ตลอดมุมเฟส เป็นแถบที่ไม่ว่าจะเปลี่ยนมุมเฟสเป็นมุมใด จะได้สนามไฟฟ้าเท่ากับหรือใกล้เคียง 0 V/m และสุดท้ายรูปที่ 4.11 (แถวสุดท้าย) เป็นสนามไฟฟ้าของความถี่ 1200 MHz ที่ความถี่นี้แถบหรือช่วงที่สนามไฟฟ้าเท่ากับ 0 V/m ไม่ได้อยู่กับที่เหมือนของความถี่ 500 MHz แต่มีการเปลี่ยนหรือตำแหน่งของแถบที่เป็น 0 V/m มีความเข้มสนามไฟฟ้าช่วง 0 – 30 V/m ซึ่งสูงกว่าของความถี่ 500 MHz แต่บริเวณที่มีความเข้มสูงเป็นเพียงบริเวณแคบเพียงจุด หรือสองจุดทั่วทั้งวัสดุ

ต่อไปเป็นการพิจารณาเฟลตที่ออกแบบสำหรับความถี่ 80 MHz กระบวนการศึกษาจะเป็นแบบเดียวกันกับการศึกษาเฟลตที่ความถี่ 10 MHz โดยจะพิจารณาที่ความถี่ที่ออกแบบ จากนั้นจึงนำเฟลตดังกล่าวไปศึกษาที่ความถี่อื่น เฟลตที่ออกแบบสำหรับความถี่ 80 MHz มีค่า S11 เท่ากับ -7.58 dB ซึ่งใกล้เคียงกับเฟลต 10 MHz ในรูปที่ 4.12 คือการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 80 MHz มุมเฟส 90 ซึ่งมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงที่สุดเท่ากับ 1837.88 V/m ข้อมูลผลการทดลองความเข้มสนามไฟฟ้ากับมุมเฟส 0 – 360 ในตารางที่ 4.7 จากข้อมูลในตาราง ที่ความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำที่สุดคือที่มุมเฟส 0, 180 มีค่าเท่ากับ 93.875 V/m และที่ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดที่มุมเฟส 90 และ 270 ในรูปที่ 4.12 คือสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงสุดที่มุมเฟส 90 การกระจายตัวค่อนข้าง Uniform แต่ความ Uniform แย่กว่าของเฟลตความถี่ 10 MHz อาจจะเป็นเพราะเนื่องจากระยะห่างระหว่างเฟลตของเฟลตความถี่ 80 MHz มีระยะที่มากกว่า การกระจายตัวของสนามไฟฟ้ามีการกระจายตัวที่ดีเมื่ออยู่ภายในวัสดุ แต่ที่ขอบมีความไม่สม่ำเสมออยู่ สาเหตุที่บริเวณของขอบเฟลตมีความเข้มสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเป็นเพราะ Edge effects ที่ทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณขอบมีความ Non-linear และการเกิดสนามไฟฟ้างดงกล่าวเรียกสนามไฟฟ้านั้นว่า Fringing fields ที่บริเวณขอบของวัสดุมีความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำกว่าบริเวณตรงกลาง ห่างกันประมาณ 200 V/m และจุดที่ต่ำ



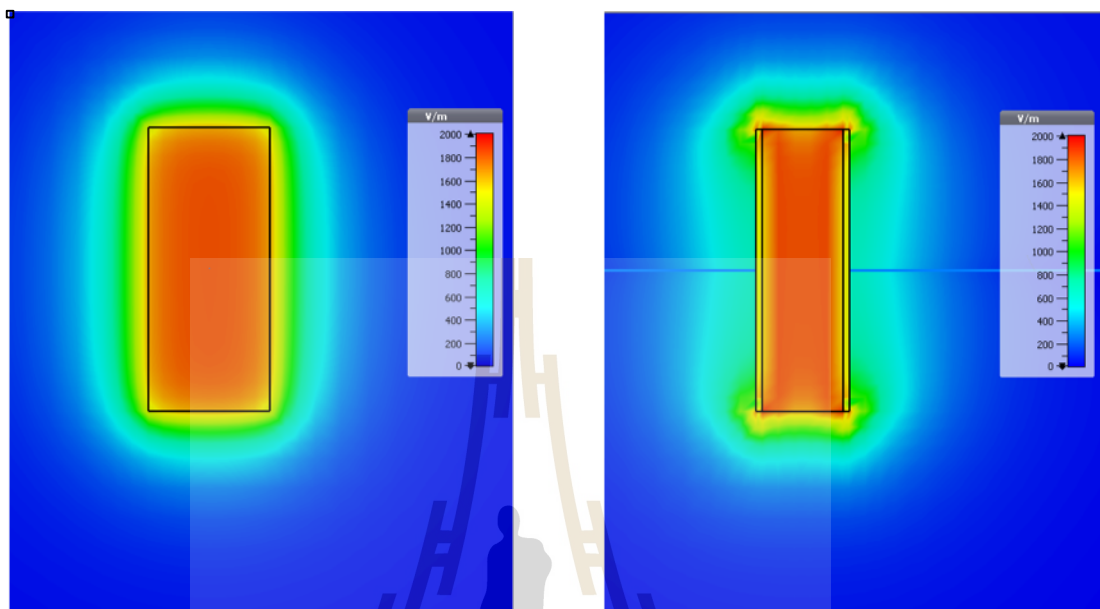
ที่สุดคือบริเวณขอบมุมของวัสดุทั้งสี่ด้าน ที่บริเวณนี้มีความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำกว่าบริเวณกลางอยู่ประมาณ 400 V/m

การเปลี่ยนพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นความร้อนที่เกิดขึ้น โดยใช้สมการ (2.1) ใน CST มีการคำนวณ Power loss dissipation ( $W/m^3$ ) อยู่ในชื่อ Power loss density ในรูปที่ 4.13 (ซ้าย) คือ Power loss density ในวัสดุไดอิเล็กทริก ผลที่ได้นี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับมุมเฟสของสัญญาณ เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่นำมาคำนวณคือค่าสัมบูรณ์ของสนามไฟฟ้ายกกำลังสอง ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับความเข้มสนามไฟฟ้า กล่าวคือ Power loss density แปรผันโดยตรงกับความเข้มสนามไฟฟ้า มีค่าสูงบริเวณตรงกลางวัสดุ ค่าสูงสุดที่ได้คือ  $3781 W/m^3$  ที่ความถี่ 80 MHz ในขณะที่ความถี่อื่นเช่น 10, 500, 1200 MHz มีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ  $0 W/m^3$  เท่านั้น เช่นเดียวกันกับ SAR (Specific absorption rate) ในหน่วย  $W/kg$  ที่คำนวณใน CST รูปที่ 4.13 (ขวา) มีค่าสูงสุดที่  $4.2 W/kg$  บริเวณกลางวัสดุ แต่ที่บริเวณขอบและมุมทั้งแปดของวัสดุเป็นบริเวณที่มีค่าต่ำสุด สาเหตุเพราะสนามไฟฟ้าที่บริเวณนั้นมีความเข้มต่ำ การที่สนามไฟฟ้าในวัสดุมีความเข้มตรงกลางวัสดุสูงเป็นเพราะเพลตถูกออกแบบมาให้ใช้งานที่ความถี่ที่ใช้งาน ทำให้กำลังถูกส่งผ่านมาได้ดี หากนำเพลตมาใช้งานในความถี่ที่ไม่ได้ถูกออกแบบมา จะทำให้กำลังส่วนมากถูกสะท้อนกลับ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างของเพลตด้วย

$$SAR = C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (4.2)$$

เพื่อที่จะพยายามทำให้ทั่วทั้งวัสดุมีค่า Power loss ที่ Uniform จึงทำให้เพลตมีความเหลือวัสดุออกไป ผลการทดลองในรูปที่ 4.14 พบว่า การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าไม่มีความแตกต่างจากการทำให้วัสดุเสมอกับขอบเพลต ทำให้ Power loss density มีการกระจายตัวที่ไม่แตกต่างจากเดิม ที่บริเวณมุมและขอบยังมีค่าที่ต่ำกว่าบริเวณตรงกลาง จึงได้ทดลองทำให้เพลตมีขนาดเล็กกว่าวัสดุ ผลที่ได้พบว่าที่ขอบและมุมของวัสดุยังคงมีความเข้มของสนามไฟฟ้าต่ำกว่าบริเวณตรงกลาง แต่การทำให้เพลตมีขนาดเล็กกว่าวัสดุไม่มากจะช่วยทำให้ ที่บริเวณขอบของความกว้างมีค่าสนามไฟฟ้าในช่วงที่ต่ำ มีความแคบลง หมายความว่าบริเวณที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำมีบริเวณน้อยลง ทำให้ในกรณีที่ยืดที่สุดคือ มีมอดข้าวไหลไปตามขอบ มอดจะยังได้รับพลังงานความร้อนจนตายได้ ในการออกแบบเบื้องต้นจากการทดลองที่ได้คือ ควรจะให้เพลตมีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับขนาดของวัสดุระหว่างเพลตแต่เล็กกว่าไม่มาก ในการทดลองได้ให้ขนาดของเพลตมีขนาดเล็กกว่าขนาดของวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ 2 mm การนำไปใช้งานจริงคือวัสดุไดอิเล็กทริก จะเป็นข้าวที่ถูกทำให้เคลื่อนที่ผ่านเพลตในแนวตั้งจากกับพื้นโลก ดังนั้นส่วนที่สำคัญคือขอบของด้าน

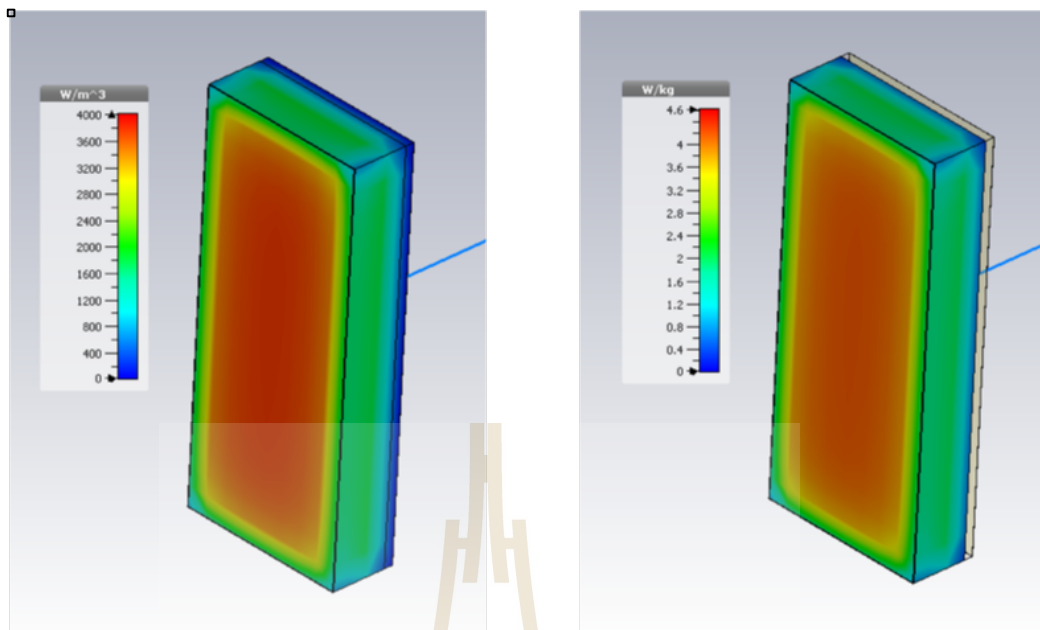
กว้าง เนื่องจากถึงขอบของด้านยาวจะมีความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำ แต่เมื่อเวลาผ่านไปวัสดุคุณนั้นจะผ่านจุดตรงกลางเพลต ทำให้ยังคงได้รับพลังงานที่เพียงพอต่อการนำมอด



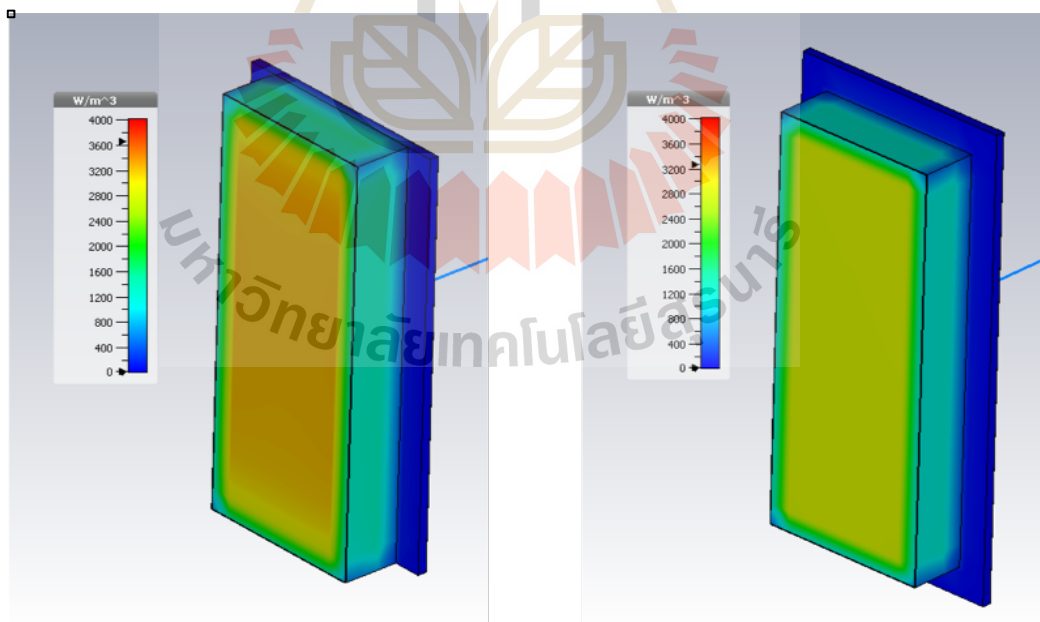
รูปที่ 4.12 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของเพลตที่ Resonant ที่ 80 MHz ที่มุมเฟส 90 องศา ซึ่งทำให้มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด

ตารางที่ 4.7 ความเข้มของสนามไฟฟ้าเมื่อมุมเฟสเปลี่ยนไป ของเพลตที่ Resonant ที่ 80 MHz

Phase (degree)	Electric field intensity (V/m)
0	93.875
30	1000.24
45	1365.96
60	1638.59
90	1837.88
120	1544.72
135	1233.2
150	837.644
180	93.875
210	1000.24
225	1365.96
240	1638.59
270	1837.88
300	1544.72
315	1233.2
330	837.644
360	93.875



รูปที่ 4.13 ภาพตัดขวางของวัสดุไดอิเล็กทริกที่อยู่ระหว่างเพลต (ซ้าย) การกระจายตัวของ Power loss density และ (ขวา) การกระจายตัวของ SAR



รูปที่ 4.14 ภาพตัดขวางของวัสดุไดอิเล็กทริกที่อยู่ระหว่างเพลต เพื่อดูการกระจายตัวของ Power loss density (ซ้าย) การเพิ่ม Margin ที่ขอบของด้านความกว้างเพลต 5mm และ (ขวา) เพิ่ม Margin ทั้งด้านกว้างและด้านยาวเพลตด้านละ 5 mm

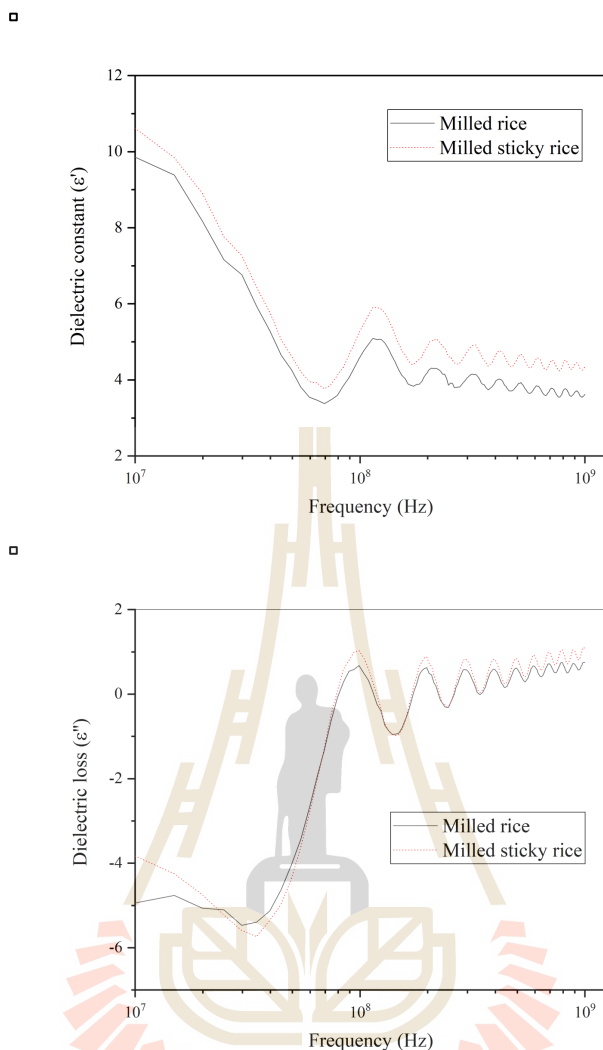
#### 4.1.5 ระยะห่างระหว่างเฟลต

จากสมการ (2.6) เป็นที่ประจักษ์อยู่แล้วว่าเมื่อระยะระหว่างเฟลตสั้นลง ความเข้มสนามไฟฟ้าจะสูงขึ้น และสมการ (2.22) ซึ่งบอกถึงค่าความเก็บประจุที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะระหว่างเฟลตขนานสั้นลง เมื่อระยะระหว่างเฟลตขนานเปลี่ยน จะทำให้ค่าความเก็บประจุเปลี่ยน และส่งผลให้ค่าความถี่ Resonance เปลี่ยน ซึ่งถ้าหากเป็นเฟลตที่มีการทำ Impedance matching ไว้แล้ว การปรับเปลี่ยนระยะของเฟลตอาจจะต้องทำ Impedance matching ใหม่อีกครั้ง เพื่อป้องกันความสูญเสียที่อาจจะเกิดขึ้นต่อแหล่งกำเนิดสัญญาณกำลังสูง หาก Mismatch จะมีกำลังส่วนใหญ่ที่สะท้อนกลับไปยังแหล่งกำเนิดสัญญาณ ฉะนั้นระยะห่างระหว่างเฟลตควรจะถูกกำหนดไว้ตั้งแต่ตอนออกแบบ อีกทั้งการปรับระยะระหว่างเฟลตขนานทำได้ลำบากหากมีการขึ้นรูปสร้างจริงไปแล้ว

#### 4.2 ผลการวัดค่าสภาพยอมของข้าว (Permittivity of rice)

การวัดค่าสภาพยอมของข้าว ใช้ Dielectric probe (N1501A, Keysight) ร่วมกับ VNA Vector network analyzer (N9918A, Keysight) เพื่อหาค่า Dielectric constant และ Dielectric loss factor ในช่วงความถี่ 10 – 1000 MHz วัดค่าไดอิเล็กทริกข้าวสองชนิด แต่ละชนิดจะมีสามตัวอย่าง วัดซ้ำตัวอย่างละห้าครั้ง เพื่อขจัดค่ารบกวนอื่น ที่อาจทำให้การวัดได้ผลคลาดเคลื่อน ไป ผลการวัดข้าวขาวหรือข้าวเจ้า ได้ผลการวัดในรูปแบบที่ 4.15 ผลการวัดที่ได้ อาจมีความต่างจากค่าความเป็นจริง เนื่องจาก Dielectric probe ที่ใช้นี้ สามารถวัดค่าไดอิเล็กทริกที่อยู่ในช่วงความถี่ 200 – 60000 MHz ทำให้ช่วงที่ต่ำกว่า 200 MHz ค่าที่วัดได้อาจจะเพี้ยนไปจากความเป็นจริง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะไม่สามารถวัดค่าไดอิเล็กทริกในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งานคือ 80 MHz แต่ผลที่ได้จากการวัดสามารถบอกได้ว่า ข้าวสาร (ข้าวเจ้า) และข้าวเหนียวมีความต่างกันของค่าไดอิเล็กทริกเล็กน้อย

ค่าไดอิเล็กทริกของข้าวสารมีค่า Dielectric constant และ Dielectric loss factor ทั้งสองค่าต่ำกว่าข้าวเหนียวเล็กน้อย โดยค่า Dielectric constant ของข้าวสารจะมีค่าต่ำกว่าข้าวเหนียวโดยเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.37 และค่า Dielectric loss factor ของข้าวสารมีค่าต่ำกว่าข้าวเหนียวโดยเฉลี่ย 0.10 ค่าไดอิเล็กทริกที่วัดนี้สามารถบอกได้ว่าข้าวทั้งสองชนิดมีค่าไดอิเล็กทริกที่ไม่เท่ากัน แต่เนื่องจากความต่างเพียงเล็กน้อยทำให้ระบบกำจัดมอดข้าวที่ออกแบบ สามารถใช้ได้กับข้าวทั้งสองชนิดคือ ข้าวสารและข้าวเหนียว



รูปที่ 4.15 ผลการวัดค่าไดอิเล็กทริกของข้าวสาร (เส้นทึบ) และข้าวเหนียว (เส้นจุด) ที่ความถี่ 10 – 1000 MHz (บน) ผลการวัดค่า Dielectric constant คุณสมบัติทางไดอิเล็กทริกของข้าวสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยข้าวสารมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำกว่าข้าวเหนียวโดยเฉลี่ย 0.37 และ (ล่าง) ผลการวัดค่า Dielectric loss factor ช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 300 MHz มีบางช่วงที่มีค่าติดลบ ซึ่งไม่ถูกต้องตามความเป็นจริงเนื่องจาก Dielectric probe ที่ใช้เป็นประเภทความถี่สูง แต่ในทางตรวจสอบความแตกต่างระหว่างวัสดุไดอิเล็กทริกสองชนิด สามารถใช้ระบุถึงความแตกต่างกันหรือความเหมือนกันได้ ผลการวัดที่ได้ข้าวสารมีค่าต่ำกว่าข้าวเหนียวโดยเฉลี่ย 0.10 ซึ่งแทบจะไม่แตกต่างกัน



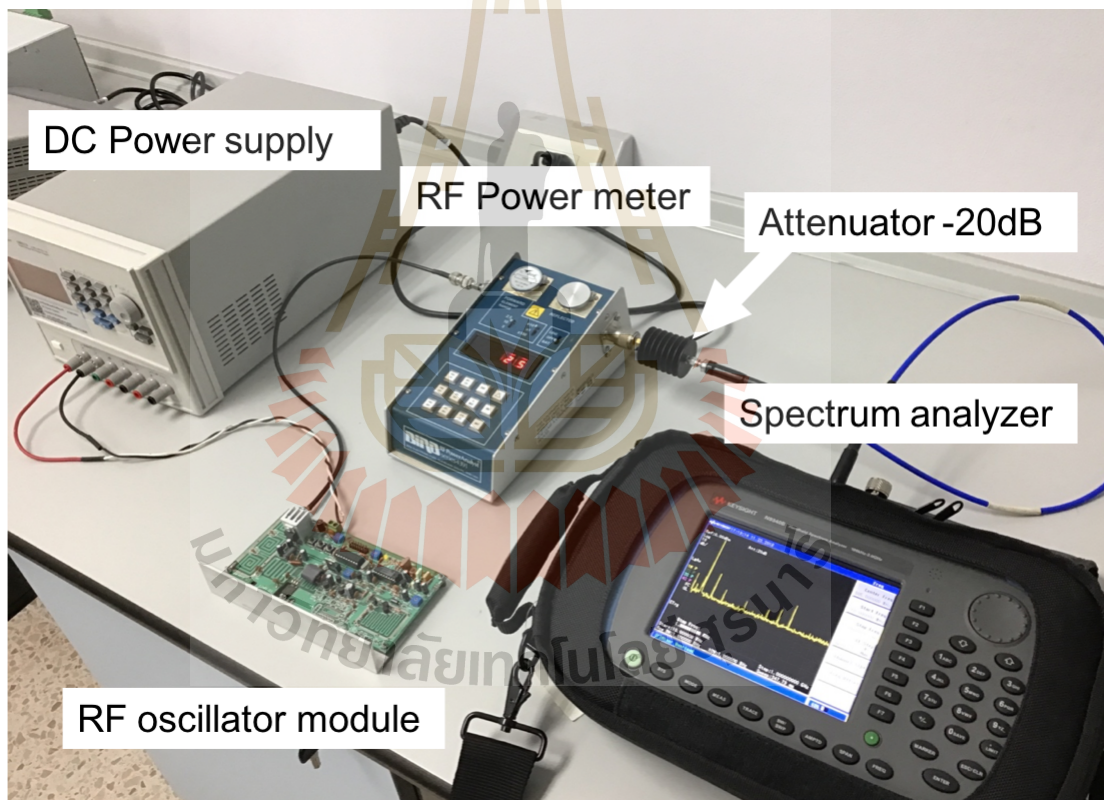
### 4.3 ผลการทดสอบ Power amplifier

Power amplifier หรือเครื่องขยายสัญญาณกำลังสูง ใช้ LDMOS ในการสร้างเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูง เมื่อเทียบกับการขยายสัญญาณโดยใช้อุปกรณ์อื่นที่ความถี่เดียวกัน ในการทดสอบจะใช้ Dummy load 50  $\Omega$  แล้วดู RF power จาก RF meter เทียบกับกำลังไฟฟ้า (DC power) ที่ใช้เพื่อหาประสิทธิภาพของ Power amplifier ในการหาประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้งานด้วย เนื่องจาก Power amplifier อาจมีประสิทธิภาพที่ดี แต่ไม่ใช่ความถี่ที่จะนำไปใช้ก็ไม่เกิดประโยชน์ ดังนั้นจึงต้องปรับจูนให้ Power amplifier มีประสิทธิภาพที่ดีสำหรับความถี่ที่ใช้งาน จากรูปที่ 4.1 ค่า Dielectric loss factor ของมอดมี Relaxation peak ที่ความถี่ประมาณ 40 MHz จากสมการ (2.1) ถ้าให้สนามไฟฟ้าคงที่ แล้ว Plot ผลคูณระหว่าง  $\epsilon''$ , Dielectric loss factor และ  $f$ , Frequency จากกราฟรูปที่ 4.1 จะได้ Power dissipation เทียบกับข้อมูลความถี่ในตารางที่ 4.8 เห็นได้ว่า Relaxation peak ไม่ใช่จุดที่ทำให้ Power dissipation สูงที่สุด ในขณะที่เมื่อความถี่สูงมากไป จะทำให้ความ Uniform ของสนามไฟฟ้าภายในวัสดุไดอิเล็กทริกสูญเสียไป ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอภายในวัสดุ จากผลการจำลองในหัวข้อที่ 4.1 ความถี่ที่เหมาะสมจึงอยู่ในช่วง 80 – 120 MHz ถึงแม้ว่าที่ความถี่ต่ำจะมีความ Uniform ที่ดี แต่ Power dissipation เยء และที่ความถี่สูงจะได้ Power dissipation ที่ดี แต่ความเป็น Uniform ของสนามไฟฟ้าเยء และอาจจะทำให้ข้าวเกิดความเสียหายจาก Overheating ได้ การเลือกใช้งานความถี่จึงเลือกความถี่ที่ 80MHz เนื่องจากที่ความถี่สูงกว่านี้ Power amplifier จะมีราคาสูงทั้งมีประสิทธิภาพที่ไม่เทียบเท่าความถี่ต่ำ ซึ่งความถี่ที่เลือกใช้นี้เป็นความถี่ที่ใกล้เคียงความถี่วิทยุ แต่ไม่ใช่ความถี่วิทยุ (88 – 108 MHz) จึงไม่รบกวนความถี่วิทยุกระจายเสียง ข้อดีของการเลือกใช้ความถี่ใกล้เคียงความถี่วิทยุ คือสามารถคัดแปลงอุปกรณ์ขยายสัญญาณของวิทยุกระจายเสียงได้ โดยการปรับ Matching network อีกทั้ง Oscillator สามารถหาซื้อได้ง่ายในราคาที่เหมาะสม

ตารางที่ 4.8 Power dissipation ที่เกิดขึ้นในมอดที่ความถี่ 1 – 2450 MHz เมื่อให้  $2\pi E^2 \epsilon_0 = 1$

Frequency (MHz)	Rice weevil loss factor ( $\epsilon_r''$ )	Power dissipation (MW/m <sup>3</sup> )
1	1.38	1.38
5	1.8	9
10	2.11	21.1
20	2.19	43.8
30	2.2	66
40	2.29	91.6
50	2.11	105.5
60	2.09	125.4
70	2.01	140.7
80	1.98	158.4
90	1.95	175.5
100	1.89	189
500	0.5	250
1000	0.41	410
2450	0.4	980

เมื่อเลือกความถี่ที่จะใช้ จากนั้นส่วนที่ต้องพิจารณาต่อไปคือ ภาคกำเนิดสัญญาณ (Oscillator) สำหรับภาคขยายสัญญาณ เริ่มจากภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับ Oscillator ใช้ DC power supply 12 V (U8031A, Keysight) ซึ่งมีประสิทธิภาพ 92% และ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับ Power amplifier ใช้ DC power supply 48V (N8946A, Keysight) ที่มีประสิทธิภาพ 91.5% ตามที่ผู้ผลิตแจ้ง ในส่วนของ Oscillator จะให้กำเนิดความถี่ 80 MHz ซึ่งเมื่อจ่ายไฟฟ้าให้เริ่มทำงาน โดยจ่ายไฟฟ้า 12 V Oscillator กินกระแส 0.96 A ได้ RF power ที่ 80 MHz 2.5 W นับเฉพาะส่วนที่ Oscillator ใช้กำลังไฟฟ้าไป คำนวณได้จาก กำลังที่ใช้ + กำลังที่สูญเสียจากประสิทธิภาพของ Power supply จะเท่ากับ  $12\text{ V} * 0.96\text{ A} + (12\text{ V} * 0.96\text{ A}) * (1 - 0.92) = 12.4416\text{ W}$  การชุดทดลองการ ทดสอบ Oscillator ดังรูปที่ 4.16



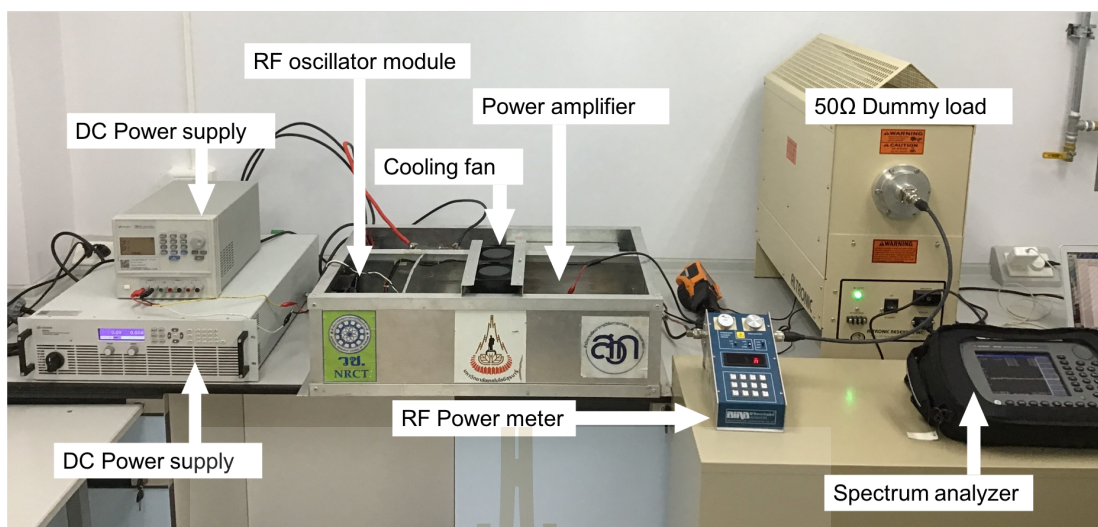
รูปที่ 4.16 การทดสอบ Oscillator ที่ความถี่ 80 MHz โดยวัดกำลังส่งและ Harmonic ของสัญญาณ

การทดสอบ Oscillator นอกจากกำลังไฟฟ้าที่ใช้แล้ว ยังวัดกำลังของความถี่ที่ออกด้วย โดยใช้ RF power meter (4391A, Bird) วัด RF power ได้ 2.5 W และต่อเข้ากับ Spectrum analyzer (N9340B, Keysight) ก่อนที่สัญญาณจะเข้าที่เครื่อง Spectrum analyzer จำเป็นต้องต่อ Attenuator เพื่อลดทอนกำลังบางส่วนออกไป เพราะอาจจะทำให้อุปกรณ์เสียหายได้ เนื่องจาก Spectrum analyzer ส่วนมากจะรับ RF power ได้ไม่เกิน 2 W ในการทดลองนี้ใช้ Attenuator -20 dB ผลการวัด Spectrum ของสัญญาณที่มาจาก Oscillator ที่ความถี่พื้นฐานคือ 80 MHz วัดได้ 9.68 dBm ตามด้วยที่ Harmonic อันดับสองคือ 160 MHz ได้ -33.03 dBm ซึ่งต่างกันมากกว่า 40 dBm ถือว่าสัญญาณมีความเป็น Sine สูงมาก ผลการทดสอบสัญญาณ Oscillator ที่ความถี่อื่นในตารางที่ 4.9 Oscillator ที่ดีควรจะกำเนิดสัญญาณเพียงความถี่เดียว แต่ในความเป็นจริงการกำเนิดสัญญาณความถี่จะมี Harmonic ตามมาด้วยเสมอ อยู่ที่ว่าจะมีมากหรือน้อยเพียงใด จากผลการทดสอบ Oscillator ที่ได้ ถือว่าสัญญาณมีคุณภาพเนื่องจากความถี่ Harmonic มี Amplitude ต่ำกว่าความถี่พื้นฐานมาก

ตารางที่ 4.9 ผลการวัด Harmonics ของ RF Oscillator ที่ความถี่ 80 MHz

ความถี่ (MHz)	Amplitude (dBm)
80	9.68
160	-33.03
240	-44.89
400	-55.06
560	-55.84
640	-45.15
720	-36.40

เมื่อได้สัญญาณจาก Oscillator สัญญาณจะถูกส่งต่อไปยัง Power amplifier รูปที่ 4.17 เพื่อขยายสัญญาณให้มีกำลังสูงขึ้น ซึ่งผลการทดสอบ Power amplifier เมื่อใช้กับ 50  $\Omega$  load ที่ 80 MHz ได้ประสิทธิภาพ ที่ 93.3%  $P_{DC} = 449$  W และ  $P_{RF} = 419$  W วัดกำลัง DC จากที่ Power supply และวัดกำลัง RF จาก RF power meter รูปสัญญาณในเฟสของกระแสใช้ Oscilloscope ที่ด้าน Probe ใช้ขดลวดพันรอบแกนสาย Coaxial ที่ลอก Ground ที่หุ้มออก จำนวน 5 รอบ สัญญาณที่ได้ เป็นรูป Sine มีขนาดประมาณ 5 V เมื่อวัดดูสัญญาณ Harmonic จาก Spectrum analyzer พบว่ามี Harmonic อันดับคู่เกิดขึ้น

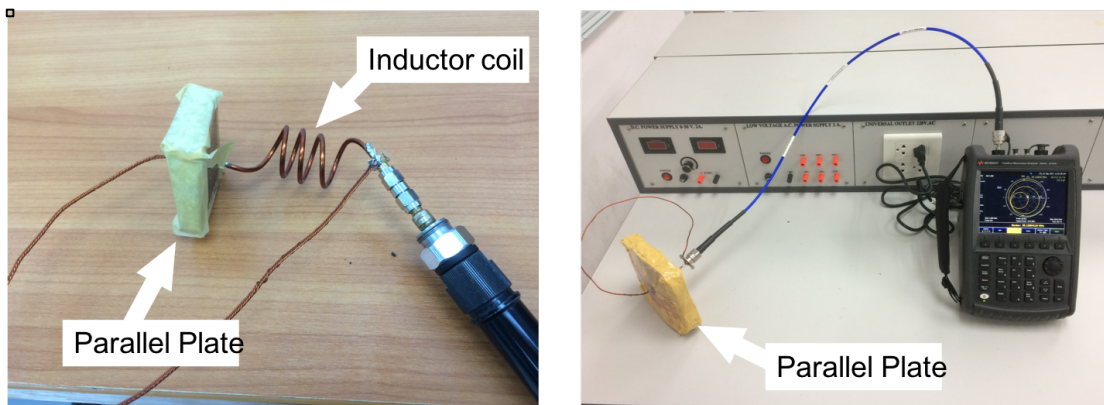


รูปที่ 4.17 การทดสอบ Power amplifier ที่ความถี่ 80MHz

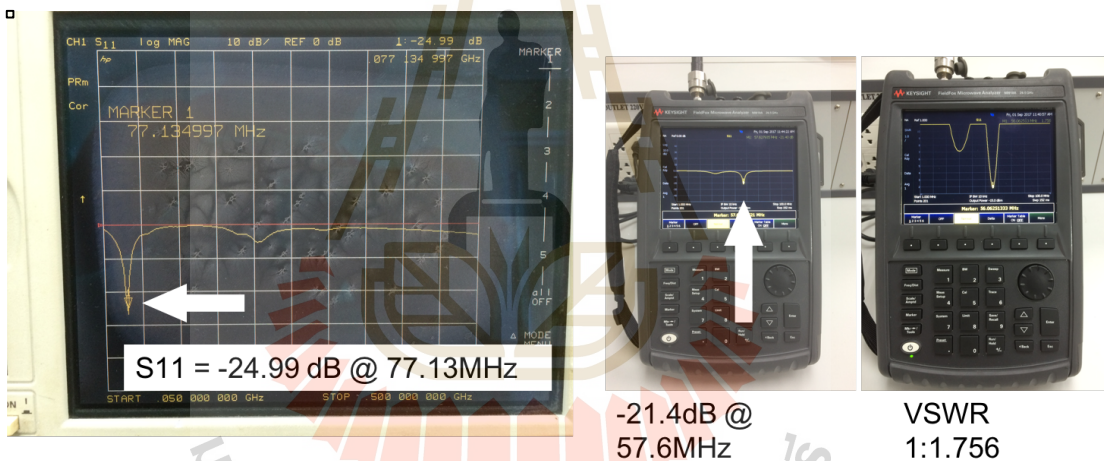
#### 4.4 การออกแบบสร้างเพลตขนานสำหรับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก

หลังจากที่ศึกษาการออกแบบเพลตจากการทดลองจำลองผลใน CST ขึ้นต่อมาคือการสร้างเพลตขนานเพื่อทดสอบใช้งานจริง โดยการออกแบบเพลตสำหรับความถี่ที่จะใช้งานโดยใช้แผ่นทองแดงบางดังรูปที่ 4.18 ซ้ายคือเพลตขนาดเล็ก (5 x 5 x 1 cm) ขวาคือเพลตขนานขนาด (12 x 12 x 2 cm) ผลการวัดที่ได้ดังรูปที่ 4.19 จากผลการวัดพบว่าสำหรับเพลตขนาดเล็กความถี่ที่ Resonance จะสูงกว่าเพลตที่มีขนาดใหญ่กว่า ถึงแม้ว่าจะสามารถทำ Impedance matching ให้ใช้ได้กับความถี่อื่น แต่ในทางปฏิบัติควรเลือกใช้ขนาดของเพลตตามความเหมาะสมกับความถี่ที่ใช้ ข้อดีของการเลือกใช้ความถี่สูง จะได้ Heat rate ที่สูงแต่ต้องแลกกับขนาดของเพลตที่เล็ก อีกทั้งการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายในเพลตที่ไม่ค่อยสม่ำเสมอ ส่งผลให้ Heat uniformly ต่ำ ในทางตรงกันข้าม การเลือกใช้ความถี่ต่ำ จะทำให้สามารถใช้เพลตขนาดใหญ่ขึ้นได้ และให้การกระจายตัวของความร้อนอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งภายในบริเวณเพลต แต่ Heat rate ต่ำ ซึ่งจะร้อนได้ช้ากว่าการใช้ความถี่สูง การออกแบบเพลตขนาดจึงต้องคำนึงถึงความถี่ที่จะใช้งานด้วย





รูปที่ 4.18 เฟลตที่ใช้ VNA วัด Impedance และวัดค่า S11 (ซ้าย) เฟลตขนาดเล็ก (5 x 5 x 1 cm) (ขวา) เฟลตขนาดกลาง (12 x 12 x 2 cm)



รูปที่ 4.19 ผลการวัดเฟลตขนาน โดยใช้ VNA (ซ้าย) วัดเฟลตขนาดเล็ก S11 อยู่ที่ความถี่ 77.13 MHz มีค่าประมาณ -25 dB และ (ขวา) ผลการวัดของเฟลตขนาดกลาง S11 อยู่ที่ความถี่ 57.6 MHz ที่ -21 dB

หากต้องการใช้เฟลตที่มีขนาดใหญ่กว่านี้ เพื่อรองรับกำลังที่สูงขึ้นหรือเหตุผลทางด้าน การเพิ่มกำลังการผลิตให้สูง การออกแบบเฟลตขนาดใหญ่ก็ไม่ต่างจากการออกแบบเฟลตขนาดเล็ก ก็จะต้องคำนึงถึงการส่งผ่านกำลังสูงสุด เพื่อความปลอดภัยต่อเครื่องขยายสัญญาณกำลังสูง ในกรณีของการ Mismatch แล้วสัญญาณสะท้อนกลับเข้าสู่เครื่องขยายสัญญาณ หรือลดความ สูญเสียของกำลังที่เกิดขึ้น โดยเปล่าประโยชน์ ดังนั้นนอกจากการออกแบบเฟลตและเลือกความถี่ที่จะใช้แล้ว การออกแบบวงจร Impedance matching จึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้

นอกจากวิธีการใช้ VNA สำหรับการทำ Impedance matching ที่ได้กล่าวไป อีกวิธีที่สามารถทำได้คือการใช้ Impedance analyzer วัดเฟลตที่สร้างขึ้น รูปที่ 4.20 เครื่อง Impedance analyzer สามารถวิเคราะห์ค่าความต้านทาน ทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพ ตามความถี่ที่เลือกได้อีกทั้งยังสามารถบอกได้ว่า DUT (Device under test) นั้นเป็นค่าความเก็บประจุหรือค่าความเหนี่ยวนำเท่าใด โดยผู้ใช้งานจะต้องเป็นผู้กำหนด การอ่านค่าให้กับเครื่องมือวัด

การสร้างเฟลตโดยใช้เครื่อง Impedance analyzer ทำได้สองวิธี หนึ่งคือการทำให้เฟลตมี Impedance ส่วนจริงเป็น  $50 \Omega$  จากนั้นนำ Inductance หรือ Capacitance มาหักลบหรือบวกส่วนจินตภาพให้เป็นศูนย์ ข้อสังเกตหนึ่งที่พบจากการวัดเฟลต คือขนาดของเฟลตมีผลต่อความถี่ที่เฟลตมีส่วนจริง  $50 \Omega$  โดยขนาดของเฟลตแปรผกผันกับความถี่ที่  $50 \Omega$  หมายความว่ายิ่งเฟลตขนาดเล็ก ความถี่ที่เฟลตเป็น  $50 \Omega$  ยิ่งมีความถี่สูงขึ้น ทั้งนี้ยังไม่สามารถคาดการณ์ได้ว่าขนาดเฟลตเท่าใดจึงจะได้  $50 \Omega$  ที่ความถี่ใด เนื่องจากขึ้นอยู่กับวัสดุไดอิเล็กทริกที่อยู่ในเฟลต ซึ่งมีความซับซ้อนสูง วิธีที่ทำได้คือ Trial and try คือการทดลองสร้างเฟลตและทำการทดลองวัดจริง

การวัดเฟลตที่ขนาดแตกต่างกัน เฟลตขนาด  $4.5 \times 7 \times 30$  cm แบบใน รูปที่ 4.20 Impedance ส่วนจริงที่มีค่าประมาณ  $50 \Omega$  อยู่ที่ความถี่  $7.6$  MHz และมีค่าส่วนจินตภาพที่  $-j644.34 \Omega$  การที่ส่วนจินตภาพติดลบคือระบบที่นำมาวัดค่า Impedance มีความเป็น Capacitance สูงกว่า Inductance หากจะ Matching ต้องนำ Inductance ที่มีขนาด  $+j644.34 \Omega$  ที่ความถี่  $7.6$  MHz เพื่อหักล้างส่วนจินตภาพให้ใกล้เคียง  $0$  มากที่สุด ซึ่งได้ค่า Inductance เท่ากับ  $2.09 \mu\text{H}$  เมื่อนำ Inductance มาต่ออนุกรมกับเฟลต จะได้เฟลตที่ Matching  $50 \Omega$  ที่  $7.6$  MHz

วัดเฟลตขนาด  $4.5 \times 7 \times 13$  cm ได้ Impedance  $50.5 - j510 \Omega$  ที่ความถี่  $19.37$  MHz (รูปที่ 4.21) วิธีการ Matching เช่นเดียวกันกับวิธีข้างต้น คือนำ Inductance มาหักล้างกับ Capacitance เพื่อให้ได้  $50 \Omega$  ที่ส่วนจริงเพื่ออย่างเดียวน เฟลตขนาด  $4.5 \times 7 \times 3.5$  cm ได้ Impedance  $50.9 - j450.44 \Omega$  ที่ความถี่  $55.68$  MHz ตัวอย่างการ Matching เฟลตด้วยวิธีนี้คือ กำหนดความถี่ที่ต้องการ Matching จากนั้นสร้างเฟลตแล้วนำไปวัด จากนั้นลดหรือเพิ่มขนาดเฟลตเพื่อให้ได้ Impedance ที่ต้องการ ยกตัวอย่างต้องการออกแบบเฟลตที่ความถี่  $95$  MHz จากข้างต้น เฟลตขนาด  $4.5 \times 7 \times 3.5$  cm ได้ที่ความถี่  $55.68$  MHz แต่ที่ความถี่  $95$  MHz ได้ Impedance  $24.8 - j48 \Omega$  ส่วนจริงมีค่าต่ำกว่า  $50 \Omega$  ต้องเพิ่มความกว้างของเฟลต เมื่อปรับความกว้างเฟลตจนได้ระยะที่ได้ Impedance ประมาณ  $50 \Omega$  จากนั้นจึง Matching ด้วย Inductance โดยที่เฟลตขนาดใหม่  $12 \times 3.5 \times 7$  cm ได้ Impedance  $47.1 - j155.99 \Omega$  (รูปที่ 4.22) ส่วนจริงมีค่าใกล้เคียง  $50$  หักลบส่วนจินตภาพโดยใช้ Inductance ขนาด  $261.35 \text{ nH}$  จากนั้นยืนยันผลการ Matching โดยการใช้ VNA วัดเฟลต รูปที่ 4.23 ได้  $S_{11}$  เท่ากับ  $-10.24$  dB ที่ความถี่  $95$  MHz หลังจากสร้างเฟลตเสร็จแล้ว ต่อไปคือการทดสอบให้ความร้อน รูปที่ 4.28 โดยใช้แหล่งกำเนิด



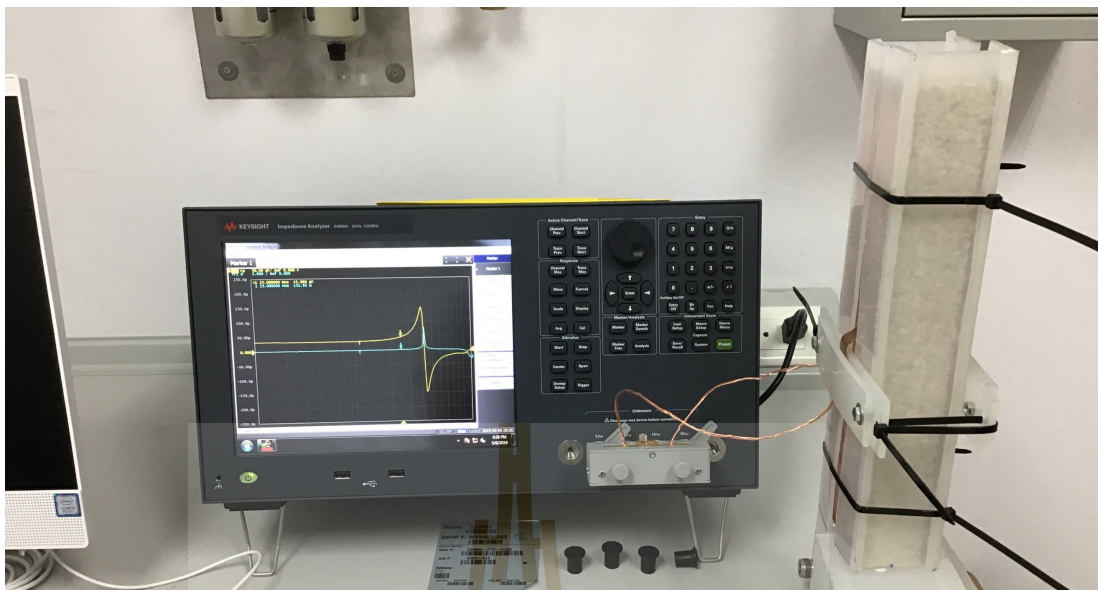
สัญญาณความถี่สูงกำลังสูง 95 MHz 430 W ส่งกำลังไปยังเพลตโดยตรง จากนั้นวัดความร้อนที่เกิดขึ้นที่ข้าว

อีกวิธีที่ใช้ออกแบบเพลตคือการกำหนด ขนาดของเพลตเพื่อให้ตรงกับความต้องการสำหรับกำลังการผลิตที่สูงขึ้น ซึ่งถ้าหากเพลตมีขนาดเล็กมากเกินไป ไม่สามารถให้กำลังการผลิตที่ต้องการได้ จึงต้องออกแบบเพลตที่ใหญ่ขึ้น ในขณะที่ Impedance จำเป็นต้อง Matching กับ RF power amplifier

ตัวอย่างการ Matching ที่ 25MHz เพลตขนาด 4.5x7x30 cm เมื่อนำมาวัดกับเครื่อง Impedance analyzer ที่ความถี่ 25 MHz ได้ค่าในรูปของ  $R \pm jX$  ได้เท่ากับ  $19.64 - j131.87 \Omega$  ที่ส่วนจินตภาพติดลบอันเนื่องมาจากอุปกรณ์ที่นำมาวัดมีค่าความเป็น ความเก็บประจุเยอะกว่าความเหนี่ยวนำ แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นจนเลยจุด Self-resonance คือจุดที่อุปกรณ์นั้นมีค่า  $+j$  และ  $-j$  เท่ากัน หลังจากจุดนี้ อุปกรณ์นั้นจะมีค่าความเหนี่ยวนำมากกว่าค่าความเก็บประจุซึ่งจะทำให้ Impedance ส่วนจินตภาพมีค่าเป็นบวก

เมื่อได้ค่า Impedance ของเพลตขนาดแล้ว ต่อไปคือการออกแบบวงจร Impedance matching โดยใช้ Smith chart เพื่อที่จะทำให้ Impedance ฝั่ง Load มีค่าเท่ากับ  $50 \Omega$  ในการออกแบบวงจรสามารถใช้เครื่องมือช่วยเหลือ ในที่นี้จะใช้โปรแกรม Online จาก [www.will-kelsey.com](http://www.will-kelsey.com) เพื่อมาวิเคราะห์วงจร โดยการใช้โปรแกรม เริ่มจากการกำหนดความถี่ที่จะใช้และเลือกค่า Impedance ที่จะใช้ ในที่นี้ใช้  $50 \Omega$  จากนั้นกำหนดค่า Impedance ใน Blackbox ขั้นตอนสุดท้ายคือการเลือก Component มาวางจนกว่าเส้นที่ลากจะมาหยุดที่ตรงกลางแผนภูมิ ซึ่งก็คือ  $50 \Omega$  ดังรูปที่ 4.25 จากการใช้โปรแกรมช่วยจะได้ออกแบบวงจร Impedance matching คือตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมขนาด 990 nH และตัวเก็บประจุขนาด 155 pF ซึ่งเป็นค่าที่หาไม่ได้ทั่วไป ซึ่งหากใช้ค่าเก็บประจุขนาด 150 pF จะเป็นค่าที่หาซื้อได้ทั่วไป ถึงจะไม่ได้ลงที่  $50 \Omega$  อย่างที่ออกแบบไว้แต่สามารถยอมรับได้

การออกแบบเพลตที่กำลังการผลิต 100 kg/hr ที่ความถี่ 95 MHz เนื่องจากข้าวมีความหนาแน่น 1040 – 1100 kg/m<sup>3</sup> ต้องการให้ข้าวอยู่ในเพลต 15 วินาที จะได้ขนาดเพลตเท่ากับ 4.5x7x14.5 cm เมื่อวัดเพลตที่ความถี่ 95 MHz ได้ Impedance  $4.1+j120 \Omega$  การที่  $j$  เป็นบวกคือเพลตกลายเป็น Inductance แทนที่จะเป็น Capacitance ดังนั้นจึง Matching โดยการใส่ Capacitance ไปหักล้าง Inductance และเนื่องจาก Capacitor ที่ใส่ไปมีค่า Impedance ส่วนจริงด้วย ทำให้ระบบโดยรวมมี Impedance ที่ใกล้เคียงระบบ  $50 \Omega$  ยืนยันการทดสอบโดยใช้ VNA รูปที่ 4.26 จากนั้นทดสอบให้ความร้อนดังในรูปที่ 4.27

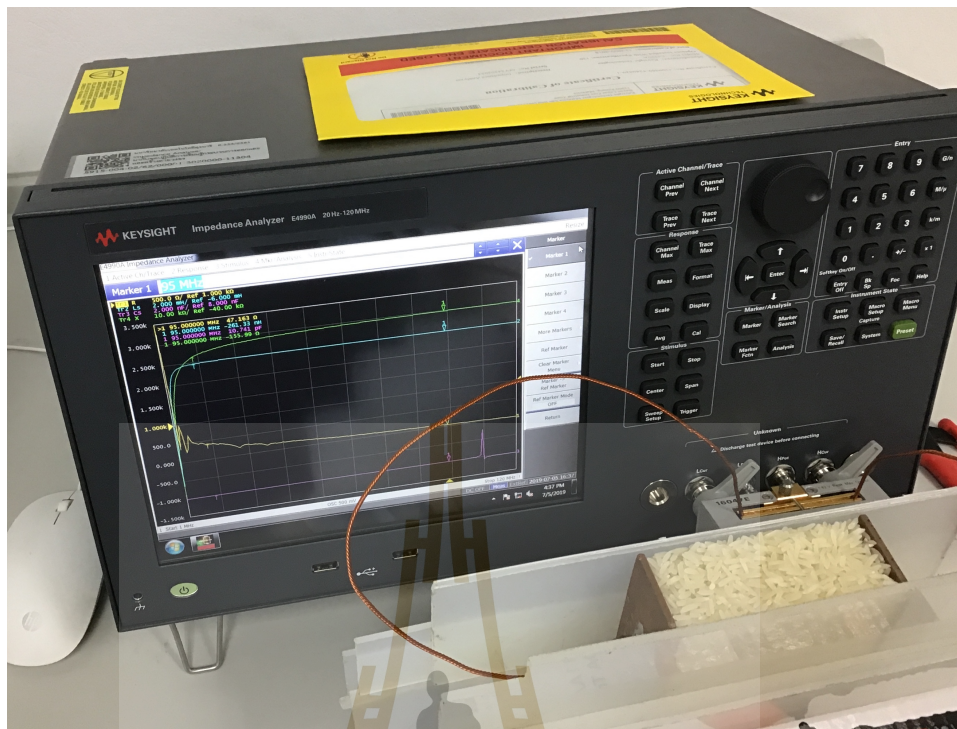


รูปที่ 4.20 การใช้เครื่อง Impedance analyzer วัด Impedance ของเฟลตขนาดที่สร้างขึ้น

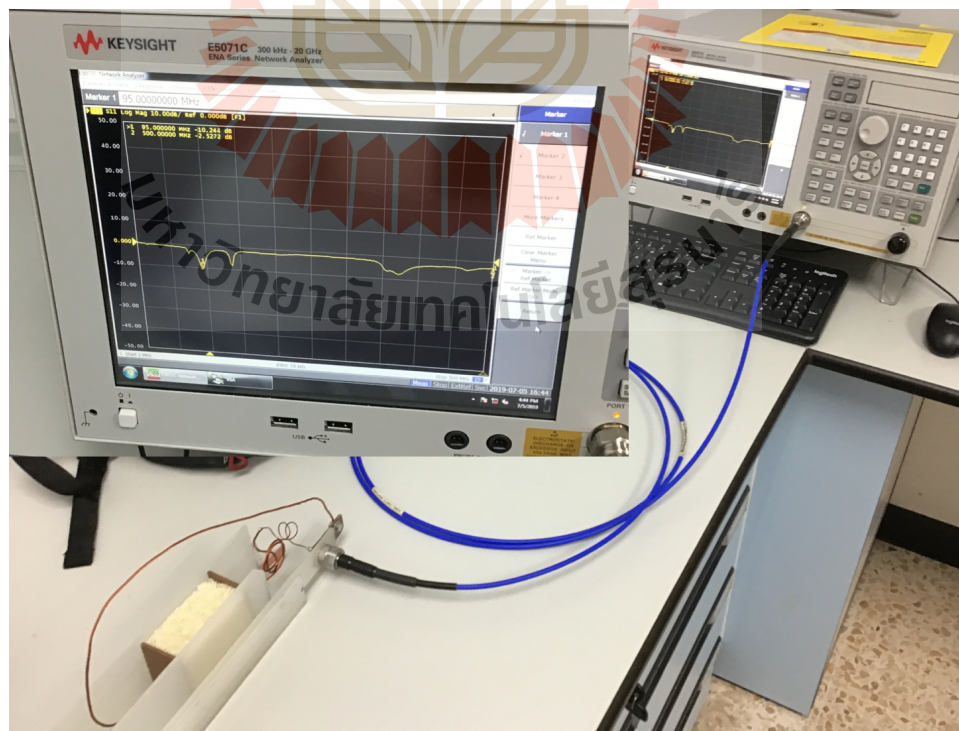


รูปที่ 4.21 เฟลตขนาด 4.5x7x13 cm ได้ Impedance 50.5-j510  $\Omega$  ที่ความถี่ 19.37 MHz





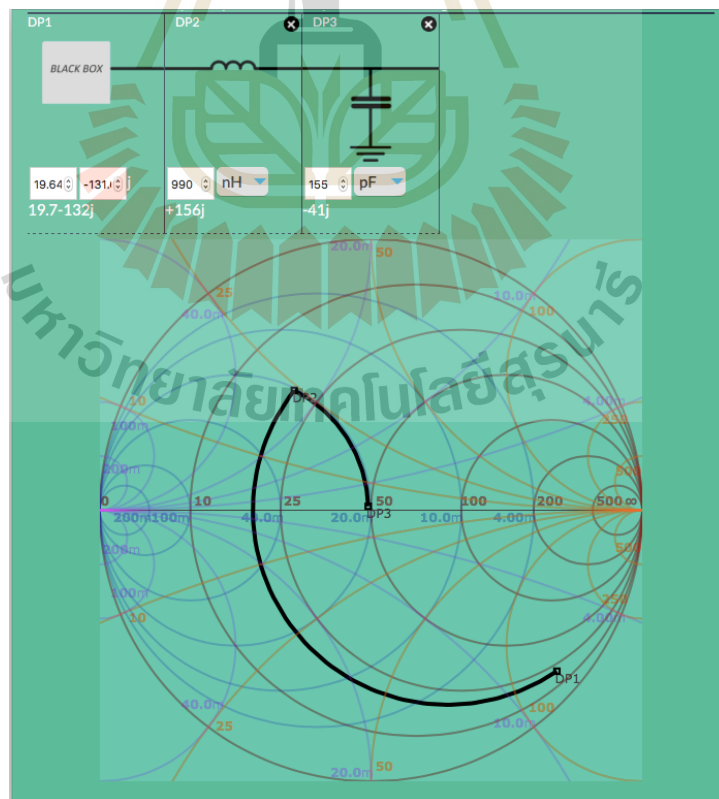
รูปที่ 4.22 ออกแบบเฟลตขนาด 12x3.5x7 cm ให้ใช้ได้กับระบบ 50 Ω ที่ 95 MHz



รูปที่ 4.23 ยืนยันผลการออกแบบเฟลต โดยใช้ VNA ในการวัดค่า S11 ได้ -10.24dB @95 MHz

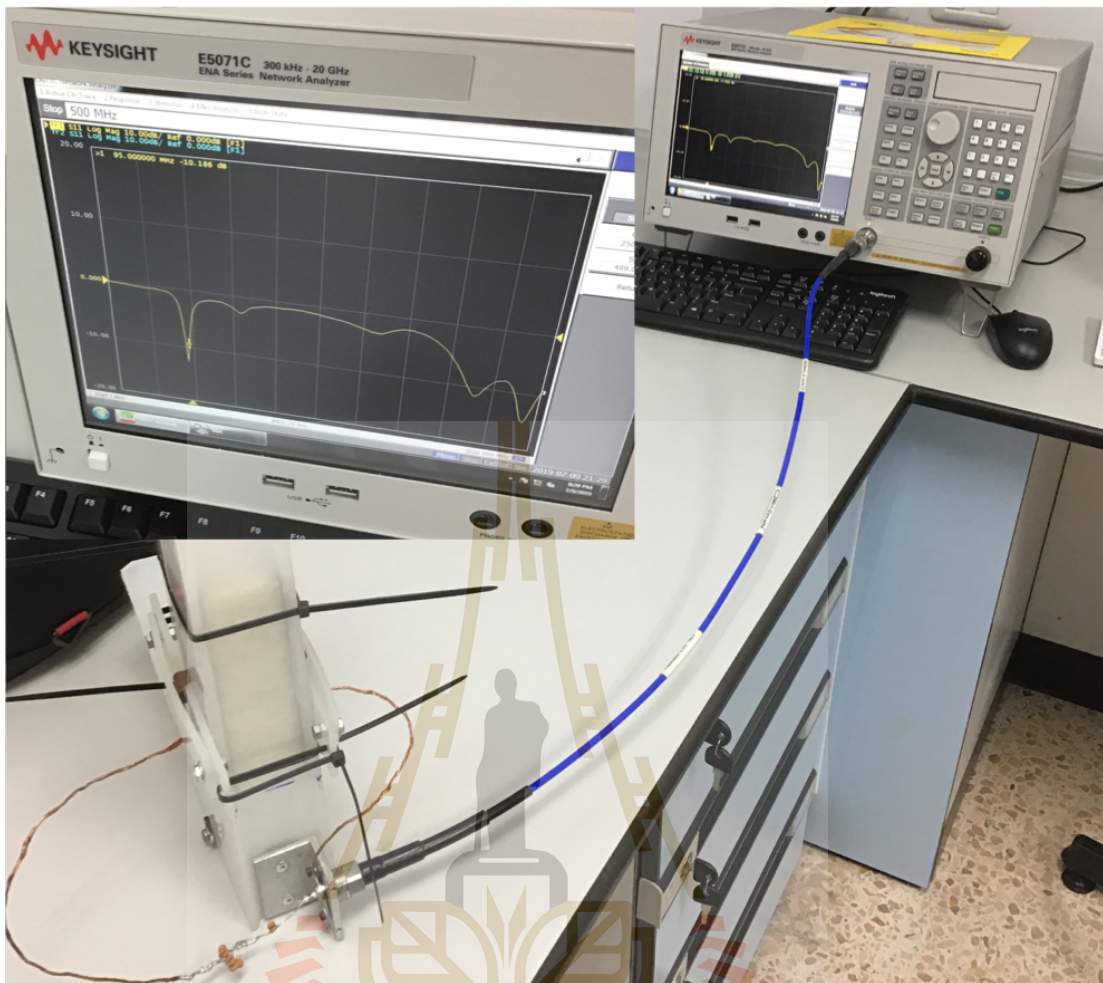


รูปที่ 4.24 การทดสอบเฟลต (ซ้าย) ชุดทดสอบ RF power amplifier และเฟลต (ขวา) วัดความร้อนของขั้วในเฟลต



รูปที่ 4.25 การออกแบบวงจร Impedance matching โดยใช้ Smith chart





รูปที่ 4.26 การทดสอบผลการออกแบบเฟลต 100 kg/hr ได้  $S_{11} -10.2$  dB ที่ความถี่ 95 MHz



รูปที่ 4.27 การทดสอบให้ความร้อนแบบ Dielectric heating ของการออกแบบเพลต 100 kg/hr ที่ความถี่ 95 MHz

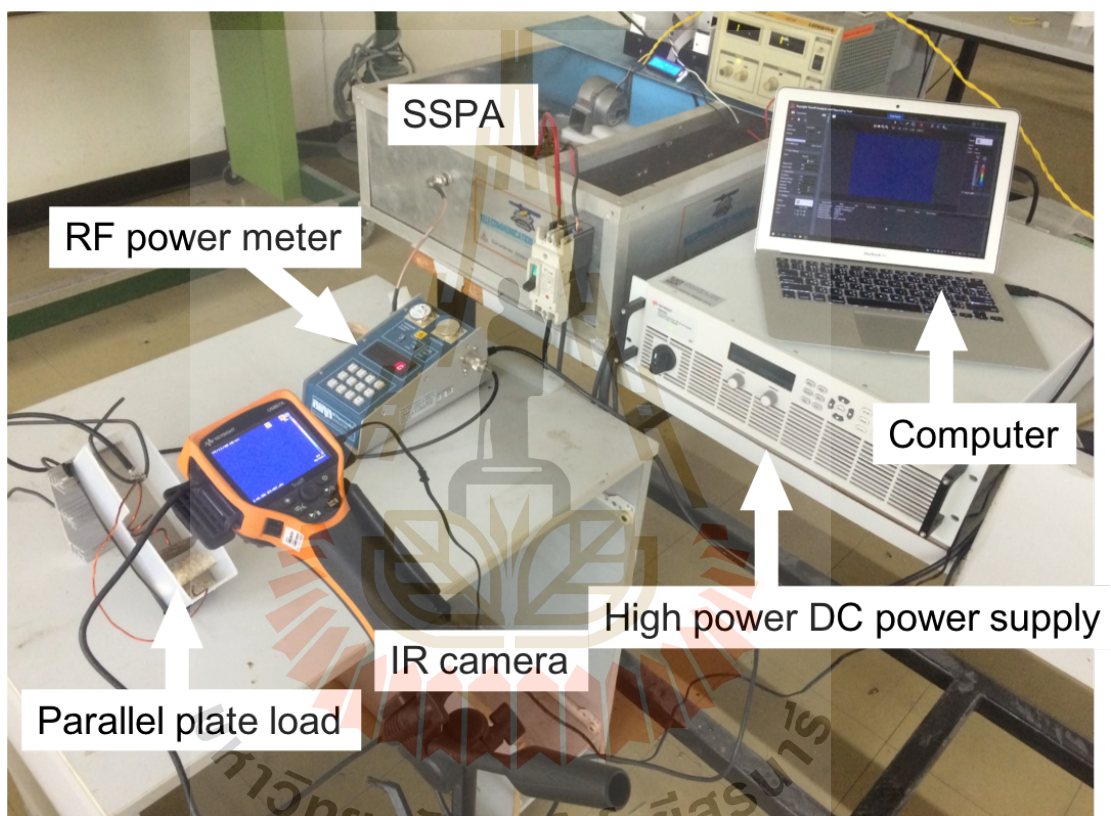
#### 4.5 ผลการทดสอบระบบกำจัดมอดด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก

ระบบกำจัดมอดข้าวในข้าวประกอบด้วย ภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power) ภาคกำเนิดสัญญาณความถี่สูง (Oscillator) ภาคขยายสัญญาณความถี่สูงกำลังสูง (Power amplifier) และ โหลดเพลตขนาน (Parallel plate load)

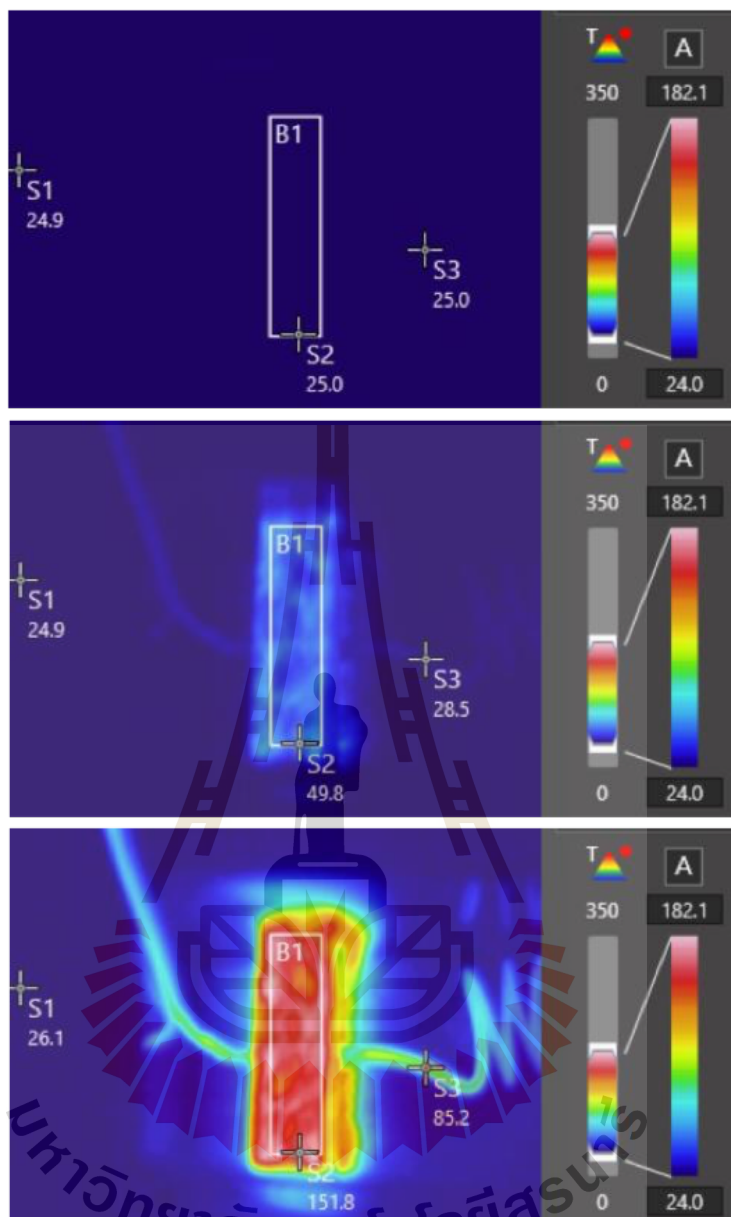
ในการทดสอบ SSPA นั้นใช้ Dummy load ในการทดลอง ซึ่งเป็น Load ในอุดมคติ ไม่มีการสูญเสียกำลังเพราะไม่มีการสะท้อนกลับ แต่ในระบบกำจัดมอดข้าวต้นแบบนี้จะส่งสัญญาณที่ขยายแล้วไปยัง RF power meter ก่อนสัญญาณที่จะเข้าโหลดเพลตขนานที่มีข้าวอยู่ภายในระหว่างเพลต แล้วใช้ IR camera วัดอุณหภูมิแบบต่อเนื่องโดยต่อสายเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูลรูปที่ 4.28 ผลการทดสอบเบื้องต้นหลังจากป้อนสัญญาณกำลังสูงไปยังโหลด กำลังของไฟฟ้ากระแสตรง DC power supply 48 V 22 A กับประสิทธิภาพ 91.5% คิดเป็นกำลัง 1056W กำลังที่ส่งผ่านไปยังโหลด (Forward power) 773 W และมีกำลังบางส่วนสะท้อนกลับ (Reflected power) 7W ประสิทธิภาพของระบบแบบเพิ่มกำลังขาเข้า PAE ของระบบเท่ากับ 73.7% รูปที่ 4.29 เป็นข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก ด้วยกำลัง 300 W ตั้งแต่ระยะเวลา 0 – 60 วินาที จุด S1 คืออุณหภูมิแวดล้อม ที่อยู่บริเวณข้างเคียงของการทดลอง จุด S2 คืออุณหภูมิของข้าวที่ได้รับการให้ความร้อน แต่เป็นเพียงจุดเดียว ซึ่ง พื้นที่ B1 คืออุณหภูมิเฉลี่ยของข้าวที่อยู่ระหว่างเพลตขนาน เป็นอุณหภูมิที่จะนำไปพล็อตหา Heat rate และจุดสุดท้าย S3 เป็นอุณหภูมิจากบริเวณลวดทองแดงที่ใช้ทำ Coli เป็น Matching network ของเพลตขนาน ในรูปที่ 4.18 (บน) ที่เป็นจุดเริ่มต้นการให้ความร้อนที่เวลา 0 วินาที อุณหภูมิของทั้งสามจุดมีความใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากสถานะแวดล้อมเดียวกัน บริเวณใกล้เคียงกันย่อมมีอุณหภูมิที่ไม่ต่างกันมาก อีกทั้งยังเป็นอุณหภูมิอ้างอิงว่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการทดลองนี้มีอุณหภูมิเท่ากับ 25.0 °C เมื่อเวลาผ่านไป 7 วินาทีในรูปที่ 4.18 (กลาง) ซึ่งทำให้อุณหภูมิของข้าวที่จุด S2 มีค่าประมาณ 50 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิเริ่มต้นของข้าวที่ทำให้มอดเริ่มตาย (Vearasilp et al., 2015) จุด S1 ซึ่งเป็นอุณหภูมิสภาพแวดล้อมยังคงไม่เปลี่ยนแปลง และจุด S3 ที่ลวดทองแดงมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากเดิม 3.5 °C ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่เกิดการสูญเสียอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ สุดท้ายรูปที่ 4.29 (ล่าง) เมื่อเวลาผ่านไป 60 วินาที อุณหภูมิของข้าวสูงอย่างมาก ที่จุด S2 151.8 °C แต่ที่สูงที่สุด อยู่ที่ 180 °C เป็นอุณหภูมิทำให้ข้าวเกิดความเสียหาย ไม่สามารถนำมาใช้ประกอบอาหารได้ ในการทดลองได้ทดสอบเพื่อหาแนวโน้มของการเพิ่มของอุณหภูมิข้าวเมื่อเทียบกับระยะเวลาที่เปลี่ยนไป เพราะการให้ความร้อนเพื่อกำจัดมอดข้าวจะไม่ให้อุณหภูมิข้าวเกิน 70 °C เนื่องด้วยกังวลว่าอาจจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของข้าว ในการให้ความร้อนเพื่อการกำจัดมอดอุณหภูมิของข้าวจะอยู่ที่ 50 – 70 °C เท่านั้น



ประสิทธิภาพของระบบกำจัดมอดข้าวด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก เริ่มจากประสิทธิภาพของเครื่องขยายสัญญาณกำลังสูงซึ่งได้ 93.3% ต่อมาคือประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเปลี่ยนจาก  $P_{RF}$  ไปเป็น  $P_{heat}$  คำนวณตามสมการ (3.4) และ (3.5) ซึ่งกำลังความร้อนที่ได้จะมาจาก รูปที่ 4.30 Heat rate ของข้าว จะได้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 94% สำหรับ  $P_{RF} = 300$  W และ 96% สำหรับ  $P_{RF} = 773$  W เมื่อคิดกำลังที่ใช้ทั้งหมด ตั้งแต่กระบวนการแรก คือ  $P_{DC}$  จนมาเป็น  $P_{heat}$  จะได้ประสิทธิภาพที่ 64.1%

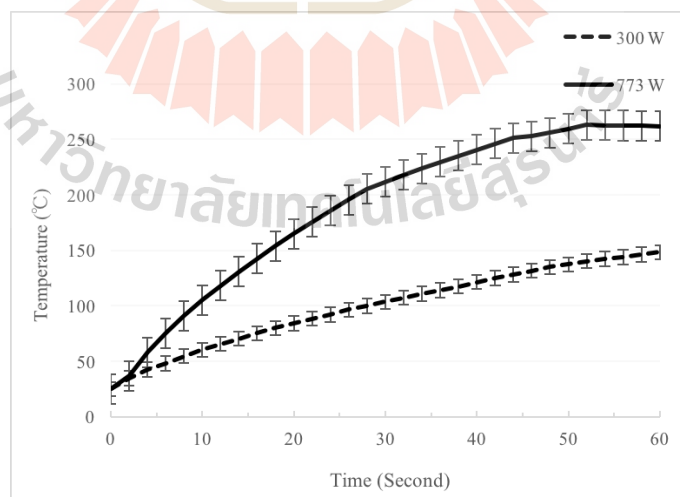


รูปที่ 4.28 การจัดชุดการทดลองระบบกำจัดมอดข้าวด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก



รูปที่ 4.29 ข้อมูลภาพที่ได้จาก IR camera (U5857A, Keysight) ของการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกด้วยกำลัง 300 W ตั้งแต่เวลา 0 – 60 วินาที (บน) ที่เวลา 0 วินาที อุณหภูมิของทั้งสามจุดใกล้เคียงอุณหภูมิพื้นหลังที่ 25 °C (กลาง) เมื่อผ่านไป 7 วินาที อุณหภูมิของข้าวอยู่ที่ประมาณ 50 °C ซึ่งเพียงพอต่อการกำจัดมอดข้าว อุณหภูมิที่ Matching network เพิ่มขึ้นจากเดิม 3 °C และอุณหภูมิพื้นหลังยังคงเท่าเดิม และ (ล่าง) ที่เวลาผ่านไป 60 วินาที อุณหภูมิของข้าวเท่ากับ 152 °C

การหา Heat rate ของการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกจะใช้อุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณ B1 ในรูปที่ 4.29 โดยเปรียบเทียบสองกำลังที่ 300 W และ 773 W ที่เวลา 0 – 60 วินาทีที่ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.30 ทั้งสองกำลังที่เปรียบเทียบกันมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 25.0 °C ในแต่ละช่วงเวลากราฟมีความชันไม่เท่าตลอดทั้งช่วง เนื่องจากเมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกมีอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าไดอิเล็กทริกในวัสดุจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ (Nelson, 2004, 2005; Nelson & Bartley Jr, 2002) เช่นเดียวกับข้าวเมื่อข้าวมีอุณหภูมิสูงขึ้นค่าไดอิเล็กทริกในข้าวย่อมเปลี่ยนแปลงไป เมื่อค่าไดอิเล็กทริกเปลี่ยนทำให้วงจรเฟดขานามี Impedance ที่เปลี่ยนตาม แต่ในขณะที่ Matching network ยังคงมีค่าเท่าเดิมทำให้การถ่ายโอนกำลังสูงสุดต่ำลง เนื่องจากโหลดเฟดขานาน Mismatch ไปจากเดิมเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในช่วงที่ Heat rate สูงที่สุดคือช่วงเริ่มต้นการให้ความร้อน เมื่อนำข้อมูลที่ได้จาก Heat rate มาคำนวณเป็น Heat power เพื่อหาประสิทธิภาพของการถ่ายโอนความร้อน Thermal efficiency ที่ใช้กำลัง 300W ได้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนที่ 94% จากสมการ (3.4) และกำลัง 773W ได้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนที่ 96% จากผลการทดลองที่ได้อาจจะมียุคค่าที่สูงมากกว่าความเป็นจริงเนื่องจากค่า Specific heat capacity ของข้าวได้อ้างอิงจาก (Iguaz et al., 2003; Zhou & Wang, 2016a) ที่มีค่าอยู่ที่ประมาณ 1421 J/kg°C ซึ่งโดยปกติแล้วประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนโดยทั่วไปอยู่ที่ 76.5 – 79.5% (Hou et al., 2016) การศึกษาค่า Specific heat capacity ของข้าวแต่ละชนิดจำเป็นอย่างยิ่งในการวิจัยต่อไป เนื่องจากข้าวในประเทศไทยอาจจะมีค่า Specific heat capacity ที่ต่างจากข้าวต่างประเทศ



รูปที่ 4.30 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heat rate) ของการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกกับวัสดุไดอิเล็กทริกที่เป็นข้าว (เส้นทึบ) ใช้กำลัง RF power 773 W Heat rate ที่ดีที่สุดเท่ากับ 10.5 °C/s และ (เส้นประ) RF power เท่ากับ 300 W ได้ Heat rate เท่ากับ 4.76 °C/s

#### 4.6 ผลการทดลองการกำจัดมอดข้าวด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก และคุณภาพของข้าว

ผลทดลองการกำจัดมอดข้าวจากการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก ได้ตรวจสอบการอยู่รอดของมอดหลังจากผ่านการกำจัดไปแล้ว 3 วัน ของการให้ความร้อนต่างช่วงเวลากัน 3 แบบ 2, 4, และ 10 วินาที และสองช่วง RF power ที่ 300W และที่ 773W ผลการทดลองการกำจัดมอดในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 อัตราการตายของมอดกับระยะเวลาในการให้ความร้อนและกำลังที่ใช้

RF power และช่วงเวลาการให้ความร้อน		มอด 30 ตัวในข้าว 100 กรัม		
		อุณหภูมิ (°C)	อัตราการตายมอด (%)	คุณภาพข้าว
0 W	Control	25.4	0	Normal
300 W	2 s	34.53	3.33±3.33	Normal
	4 s	42.37	7.77±1.92	Normal
	10 s	60.42	91.11±8.38	Normal
773 W	2 s	36.92	11.11±5.09	Normal
	4 s	57.94	98.88±1.92	Normal
	10 s	105.42	100	Bad

การให้กำลังที่ 300 W ที่ 2 วินาที มอดมีอัตราการตายต่ำเนื่องจากกำลังความร้อนที่ได้รับไม่เพียงพอต่อการทำให้มอดตายได้ แต่ยังมีมอดบางตัวที่ตายหลังจากสามวัน อาจเป็นเพราะมอดตัวโตเต็มวัยถึงอายุขัย หรือมอดมีความผิดปกติบางอย่างตั้งแต่กำเนิดจึงไม่แข็งแรง หรือด้วยสาเหตุอื่นแต่ไม่ใช่เพราะตายด้วยความร้อน เนื่องจากอุณหภูมิที่ข้าวเพียง 34.53 °C เท่านั้น ซึ่งไม่เพียงพอต่อการทำให้มอดตายเพราะความร้อน (Yan et al., 2014) ในด้านของคุณภาพและประสิทธิภาพการกินรสสัมผัสของข้าวที่หุงแล้ว จากอาสาสมัคร 5 คน ถูกสุ่มทั้งหมด 7 ตัวอย่างข้าวตามตาราง พบว่าการให้คะแนนของข้าวที่ผ่านการกำจัดมอดด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก 300 W, 2 s ในด้านคะแนนไม่มีความต่างอย่างมีนัยยะสำคัญกับชุดควบคุม (Control) การทดลองต่อมาในการเพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อนเป็น 4 วินาที พบว่ามอดมีอัตราการตายสูงขึ้น แต่ไม่ตายทั้งหมด บางส่วนที่ตายอาจจะเป็นเพราะความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวมอด การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในวัสดุต่างค่าไดอิเล็กทริกกัน จะมีอุณหภูมิต่างกัน ในกรณีของข้าวกับมอดข้าว

ที่ 80 MHz ค่า Dielectric loss factor ต่างกัน 5 เท่า ดังนั้น Power dissipation ของข้าวกับมอดข้าวต่างกัน 5 เท่า อุณหภูมิที่มอดข้าวจะสูงกว่าที่วัดได้จากข้าว แต่จะเป็นเท่าใดต้องทราบค่า Specific heat capacity ของมอดข้าวที่ต้องศึกษาต่อไป ดังนั้นถึงแม้ว่าอุณหภูมิที่วัดได้จากข้าวจะเท่ากับ 42.37 °C แต่อุณหภูมิที่เกิดในตัwmอดจะสูงกว่า และแม้เพียงระยะเวลาสั้น 4 วินาที ด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นจึงทำให้มอดบางส่วนตายไป มอดที่ยังมีชีวิตอยู่ที่สังเกตได้มีลักษณะเหมือนองค์ประกอบของร่างกายไม่ครบ เช่นบางตัวมีขาหลุด ขาไม่ครบ แต่ยังขยับได้อยู่ภายในสามวัน หลังจากการให้ความร้อน และคาดว่าจะมีชีวิตอยู่ไม่เกินเจ็ดวันหลังจากที่ให้ความร้อนด้วยกำลัง 300W และระยะเวลา 4 วินาที ด้านคุณภาพของข้าวได้คะแนนไม่ต่างจากชุดควบคุม สุดท้ายของการใช้กำลัง 300W คือให้ระยะเวลาการให้ความร้อน 10 วินาที มอดข้าวตายเกือบทั้งหมด  $91.11 \pm 8.38\%$  ในขณะที่คุณภาพของข้าวยังอยู่ในเกณฑ์ที่อาสาสมัครไม่สามารถบอกถึงความต่างจากข้าวปกติที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน จากข้อมูลในเบื้องต้นทำให้สรุปได้ว่าอัตราการตายของมอดขึ้นโดยตรงกับพลังงานที่ได้รับ

การทดลองเพิ่มเติมโดยการใช้ RF power 773 W โดยให้ระยะเวลาการให้ความร้อนเช่นเดียวกันกับกำลัง 300 W โดยเปรียบเทียบอุณหภูมิ อัตราการตายของมอดหลังจากสามวัน และคุณภาพรสสัมผัสของข้าวที่หุงแล้วที่ผ่านการกำจัดมอดด้วยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก ในการทดลองต่อมา ใช้กำลัง 773 W ระยะเวลา 2 วินาที อุณหภูมิของข้าวไม่ต่างกันมากจากกำลัง 300 W ที่ระยะเวลาการให้ความร้อนเดียวกัน แต่มอดมีอัตราการตายสูงกว่า เป็นเพราะความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงกว่ามากกว่าเท่าตัว อาจจะทำให้มอดมีอัตราการตายที่สูงกว่า เนื่องจาก Power dissipation จะขึ้นโดยตรงกับความเข้มสนามไฟฟ้ายกกำลังสอง เมื่อความเข้มสูงกว่าทำให้มอดเกิดความร้อนภายในตัวได้สูง แต่การที่อุณหภูมิของข้าวไม่แตกต่างกันมากเป็นเพราะข้าวมีปริมาณ (มวล) ที่เยอะ ตามสมการกำลังของความร้อน (3.5) เมื่อระยะเวลาที่ใช้สั้นพอกัน มวลเท่ากัน กำลังที่ใช้ต่างย่อมทำให้อุณหภูมิสุดท้ายต่างกัน ในการให้ความร้อน 2 วินาที อาจจะมีมอดตายไปที่จะทำให้อุณหภูมิของข้าวทั้งหมดเกิดการเปลี่ยนแปลงกะทันหัน จึงทำให้อุณหภูมิที่วัดได้ไม่แตกต่างกันมาก แต่อัตราการตายของมอดสูงกว่า เพราะกำลังที่สูงกว่าทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนได้สูงกว่ากำลังต่ำ ทำให้อัตราการตายมอดสูงกว่า การให้ความร้อนด้วยกำลัง 300 W 4 วินาที ในด้านมอดที่ยังไม่ตายมีลักษณะคล้ายกับการให้ความร้อน 300 W 4 วินาที คือมีขาไม่ครบ เชื่องช้า อาจจะมีชีวิตอยู่ต่ออีกไม่นาน หรือสูญเสียความสามารถในการขยายพันธุ์ ซึ่งต้องศึกษาต่อไป ในเบื้องต้นหลังจากสามวันการให้ความร้อนด้วยกำลัง 773 W 2 วินาที อัตราการตายมอดข้าวเท่ากับ  $11.11 \pm 5.09\%$

การทดลองต่อมาคือเพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อนด้วยการใช้กำลังเท่าเดิม 773 W เมื่อทดลองให้ความร้อนเป็นระยะเวลา 4 วินาที พบว่าในบางครั้งของการทดลองไม่มีมอดมีชีวิตอยู่เลย



และค่าเฉลี่ยอัตราการตายของมอดเท่ากับ  $98.88 \pm 1.92\%$  อุณหภูมิของข้าวอยู่ที่  $57.94^{\circ}\text{C}$  ด้านรสสัมผัสของข้าวได้คะแนนไม่ต่างจากชุดควบคุม ถึงแม้ว่าอัตราการตายของมอดจะไม่ใช่ 100% ทุกครั้งหลังจากสามวัน แต่มอดที่เหลืออาจจะมีชีวิตอยู่ได้ไม่นาน และถึงจะยังมีชีวิตอยู่ได้ความสามารถในการขยายพันธุ์จะสูญเสียความสามารถไป

สุดท้ายการให้ความร้อน 773 W เป็นระยะเวลา 10 วินาที ทำให้มอดตายทั้งหมด ในขณะที่เดียวกันทางด้านคุณภาพของข้าวและรสสัมผัสจากการรับประทานข้าวที่หุงแล้ว ได้คะแนนแย่ที่สุดที่มีการทดลอง เนื่องมาจากอุณหภูมิของข้าวที่สูงเกิน  $100^{\circ}\text{C}$  อาจจะทำให้ส่วนประกอบของน้ำที่อยู่ในข้าวร้อนจนเปลี่ยนสถานะไปเป็นแก๊สและระเหยออกไป ซึ่งทำให้ความชื้นที่อยู่ในข้าวลดต่ำลงมากจนข้าวแห้งและสูญเสียความร้อนทำลายคุณภาพข้าว กลายเป็นข้าวที่มีรสสัมผัสที่ต่างจากเดิม เมื่อนำไปหุงหรือปรุงให้สุกด้วยวิธีอื่น และไม่สามารถนำมาประกอบอาหารให้รับประทานได้อีกต่อไป ถึงแม้ว่ามอดจะถูกกำจัดทั้งหมดอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูง เพราะอุณหภูมิในมอดย่อมสูงกว่าที่ข้าว แต่ไม่สามารถนำข้าวที่ผ่านการกำจัดมอดมาใช้ได้ ดังนั้นการให้ความร้อนในช่วงกำลังและระยะเวลาที่ให้ความร้อนนี้ไม่สามารถนำมาใช้งานได้ หรืออาจจะต้องมีการแปลมระบายความร้อนในระหว่างที่ให้ความร้อนซึ่งจะต้องศึกษาต่อไป

ในแง่ของการเก็บรักษาข้าวด้วยการกำจัดมอดผ่านการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก ที่ประหยัดพลังงานมากที่สุด ถ้าเลือกระหว่างช่วงกำลังต่ำแต่ให้ระยะเวลาให้ความร้อนนาน 300 W ระยะเวลา 10 – 12 วินาที กับกำลังสูงในระยะเวลาสั้น 773 W ระยะเวลา 4 – 6 วินาที ช่วงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ของ 300 W จะมีอุณหภูมิในช่วง  $60.4 - 65.5$  และ  $57.9 - 75.4^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับพลังงานที่ใช้จะอยู่ในช่วง  $30 - 36\text{kJ/kg}$  และ  $30.92 - 46.38\text{kJ/kg}$  นับว่าการใช้กำลังต่ำนั้นประหยัดพลังงานมากกว่าแต่ใช้เวลานานกว่าการใช้กำลังสูง ถ้าพิจารณาในแง่ของกำลังการผลิตนั้น การใช้กำลังสูงจะได้ Throughput ที่สูงกว่า ความแตกต่างระหว่างสองกำลังไฟฟ้าที่ใช้อยู่ที่ Heat rate ซึ่งกำลังสูงกว่าจะได้ Heat rate ที่มีความชันมากกว่า ทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในข้าวสูงขึ้นเร็วกว่ากำลังที่ใช้งานต่ำ ซึ่งต้องศึกษาต่อไปว่าการให้อุณหภูมิสูงภายในระยะเวลาสั้น มีผลดีกว่าหรือแย่กว่าการทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างช้า ซึ่งอาจจะมีผลต่อคุณค่าทางโภชนาการของข้าว หรือทำให้คุณสมบัติบางอย่างของข้าวเปลี่ยนแปลงไป



## บทที่ 5

### สรุปผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ระบบกำลังมอดพัลส์ที่พัฒนาขึ้นจาก SSPA (Solid-state power amplifier) สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในส่วนของการแปลง DC to RF power conversion คือการแปลงกำลังไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง เมื่อเทียบกับการใช้หลอดสุญญากาศ ซึ่งประสิทธิภาพโดยทั่วไปของหลอดสุญญากาศอยู่ที่ 50 – 60% แต่ SSPA ที่พัฒนาขึ้นจากเทคโนโลยี LDMOS (Laterally Diffused MOSFET) ประสิทธิภาพโดยทั่วไปอยู่ที่ 70 – 80% และสามารถเพิ่มขีดจำกัดได้โดยการ Optimization วงจร Power amplifier นอกจากนี้การออกแบบเพลดขานานที่ดีสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในส่วนของการแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงไปเป็นกำลังความร้อน Electromagnetic energy to heat power dissipation conversion การ Matching เพลดมีผลอย่างมากกับสนามไฟฟ้าภายในเพลด รวมถึงความเข้มของสนามไฟฟ้าต่อมุมเฟสที่เปลี่ยนไป ตลอดจนการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ

การกำลังมอดพัลส์ด้วยกำลังไฟฟ้านี้จะใช้เวลาในการกำลังมอดพัลส์น้อยกว่าการใช้กำลังไฟฟ้าที่สูง แต่การใช้กำลังไฟฟ้านี้จะประหยัดพลังงานมากกว่าการใช้กำลังสูงในปริมาณข้างเท่ากัน ซึ่งอัตราการตายของมอดพัลส์โดยตรงกับพลังงานที่ได้รับ ตัวแปรที่มีผลกับพลังงาน กำลังไฟฟ้าที่ใช้ระยะเวลาที่ให้ออมได้รับพลังงาน ความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างเพลด รวมถึงความถี่ที่เพลด Resonant เนื่องจากที่ความถี่สูง Power dissipation จะสูงขึ้นตามความถี่คูณกับค่า Dielectric loss factor และค่าพารามิเตอร์ S11 ของเพลดซึ่งหาก S11 ค่าหมายถึงการสะท้อนกลับต่ำ แสดงว่ากำลังที่เหลือถูกเพลดจับกำลังไปทั้งหมด

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ระบบกำลังมอดพัลส์ประสิทธิภาพสูงที่พัฒนาขึ้นเป็นระบบที่ใช้สำหรับครัวเรือน เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ไม่ได้สูงมาก รวมถึงขนาดที่ไม่ใหญ่จนเกินไป เหมาะที่จะเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน กำลังความร้อนมาจากกำลังไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง การจะนำระบบกำลังมอดพัลส์ประสิทธิภาพสูงนี้ไปใช้กับขนาดอุตสาหกรรม จะต้องปรับปรุงในส่วนของการประสิทธิภาพของ Power amplifier ที่ใช้อยู่ในงานวิจัยนี้เป็น Class AB Push-Pull ที่มีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพ

ในทางทฤษฎี Class E สามารถให้ประสิทธิภาพได้ถึง 99.99% ซึ่งเป็นส่วนที่ต้องศึกษาต่อไป รวมทั้งการรวมกำลังจาก Power amplifier หลายโมดูลเพื่อให้ได้กำลังสูงนับเป็นเรื่องที่ทำนาย ส่วนการออกแบบเฟลตสามารถทำนายผลได้ด้วยการจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปเพื่อใช้งานจริงในส่วนของคุณภาพทางกายภาพหรือทางเคมีของข้าว เป็นสิ่งที่ต้องศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้น เพราะเพียงการทดลองหุงข้าวเพื่อรับประทาน โดยอาสาสมัคร ไม่สามารถบอกได้ว่าข้าวมีการเปลี่ยนแปลงส่วนใดไปบ้างในระดับโมเลกุล หลังจากที่ผ่านมาการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก อาจจะมีส่วนที่ทำให้เกิด Chemical shift ในข้าวซึ่งอาจส่งผลดีหรือผลเสียกับตัวข้าวหรือแม้แต่กับผู้บริโภคได้ที่จะต้องมีการศึกษาวิจัยต่อไป

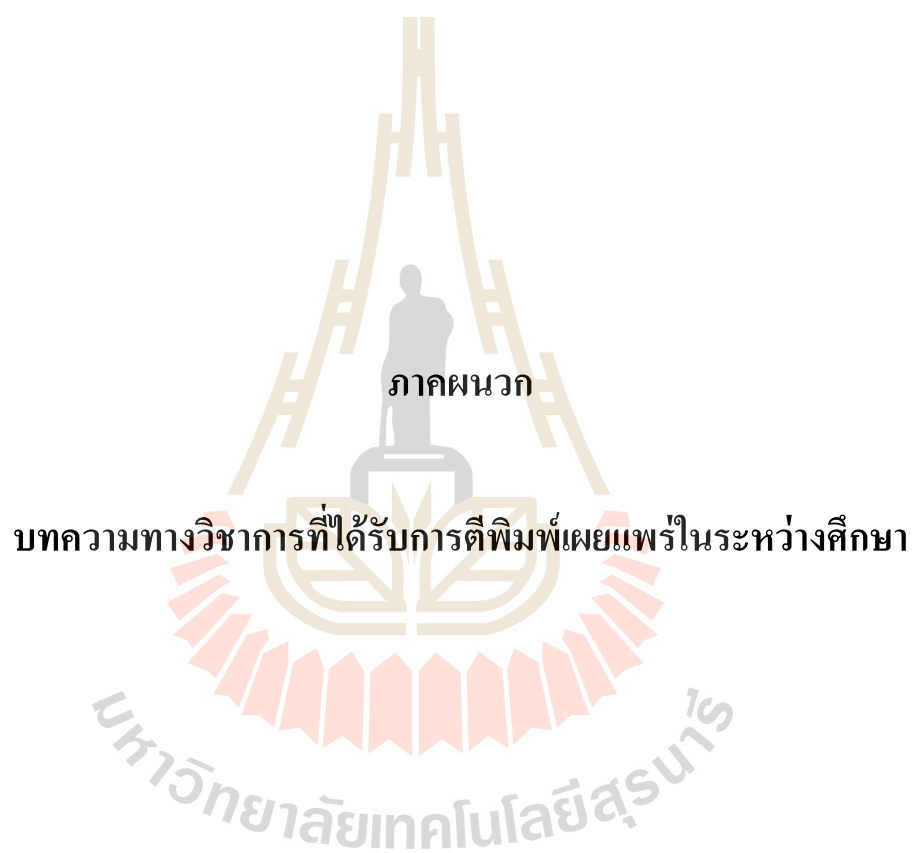


## รายการอ้างอิง

- Alba, S. A., & Berestov, A. A. (2016). High power megahertz range solid state generator: Experimental tests with dielectric melting furnace. Paper presented at the International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM.
- Bowick, C., Blyler, J., & Ajluni, C. (2008). Chapter 4 - Impedance Matching. In C. Bowick, J. Blyler, & C. Ajluni (Eds.), *RF Circuit Design (Second Edition)* (pp. 63-102). Burlington: Newnes.
- Davis, S. R. (2011). Rostrum structure and development in the rice weevil *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionoidea: Dryophthoridae). *Arthropod Structure and Development*, 40(6), 549-558. doi:10.1016/j.asd.2011.06.002
- Duangkhamchan, W., Phomphai, A., Wanna, R., Wiset, L., Laohavanich, J., Ronsse, F., & Pieters, J. G. (2017). Infrared Heating as a Disinfestation Method Against *Sitophilus oryzae* and Its Effect on Textural and Cooking Properties of Milled Rice. *Food and Bioprocess Technology*, 10(2), 284-295. doi:10.1007/s11947-016-1813-z
- Ferrari-John, R. S., Katrib, J., Palade, P., Batchelor, A. R., Dodds, C., & Kingman, S. W. (2016). A Tool for Predicting Heating Uniformity in Industrial Radio Frequency Processing. *Food and Bioprocess Technology*, 9(11), 1865-1873. doi:10.1007/s11947-016-1762-6
- Follett, P. A., Rivera-Leong, K., & Myers, R. (2014). Rice weevil response to basil oil fumigation. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 17(2), 119-121. doi:10.1016/j.aspen.2013.11.008
- Hossain, F., Lacroix, M., Salmieri, S., Vu, K., & Follett, P. A. (2014). Basil oil fumigation increases radiation sensitivity in adult *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Stored Products Research*, 59, 108-112. doi:10.1016/j.jspr.2014.06.003
- Hou, L., Johnson, J. A., & Wang, S. (2016). Radio frequency heating for postharvest control of pests in agricultural products: A review. *Postharvest Biology and Technology*, 113, 106-118. doi:10.1016/j.postharvbio.2015.11.011

- Iguaz, A., San Martín, M. B., Arroqui, C., Fernández, T., Maté, J. I., & Vírseada, P. (2003). Thermophysical properties of medium grain rough rice (LIDO cultivar) at medium and low temperatures. *European Food Research and Technology*, 217(3), 224-229. doi:10.1007/s00217-003-0760-x
- Jeon, J.-H., Oh, M.-S., Cho, K.-S., & Lee, H.-S. (2012). Phototactic response of the rice weevil, *Sitophilus oryzae* linnaeus (Coleoptera: Curculionidae), to light-emitting diodes. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 55(1), 35-39. doi:10.1007/s13765-012-0006-3
- Kasap, S. O. (2006). *Principles of Electronic Materials and Devices* (3rd ed.): McGraw- Hill.
- Law-Ogbomo, K. E., & Enobakhare, D. A. (2007). The use of leaf powders of *Ocimum gratissimum* and *Vernonia amygdalina* for the management of *Sitophilus oryzae* (Lin.) in stored rice. *Journal of Entomology*, 4(3), 253-257. doi:10.3923/je.2007.253.257
- McDonough, M. X., Mason, L. J., & Woloshuk, C. P. (2011). Susceptibility of stored product insects to high concentrations of ozone at different exposure intervals. *Journal of Stored Products Research*, 47(4), 306-310. doi:10.1016/j.jspr.2011.04.003
- Nelson, S. O. (1996). Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 39(4), 1475-1484.
- Nelson, S. O. (2004). Agricultural applications of dielectric spectroscopy. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 39(2), 75-85. doi:10.1080/08327823.2004.11688510
- Nelson, S. O. (2005). Dielectric spectroscopy in agriculture. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 351(33-36 SPEC. ISS.), 2940-2944. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2005.04.081
- Nelson, S. O., & Bartley Jr, P. G. (2002). Measuring frequency- and temperature-dependent permittivities of food materials. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 51(4), 589-592. doi:10.1109/TIM.2002.802244
- Ponmaryova, I. A., De Rivera Y Oyarzabal, L. N., & Sánchez, E. R. (2009). Interaction of radio-frequency, high-strength electric fields with harmful insects. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 43(4), 43417-43427.

- Vearasilp, S., Thanapornpoonpong, S.-n., Krittigamas, N., Suriyong, S., Akaranuchat, P., & von Hörsten, D. (2015). Vertical Operating Prototype Development Supported Radio Frequency Heating System in Controlling Rice Weevil in Milled Rice. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 5(Supplement C), 184-192. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.08.028>
- Wang, S., & Tang, J. (2001). Radio frequency and microwave alternative treatments for insect control in nuts: A review. *International Agricultural Engineering Journal*, 10(3-4), 105-120.
- Wangspa, W., Chanbang, Y., & Vearasilp, S. (2015). Radio frequency heat treatment for controlling rice weevil in rough rice cv. Khao Dawk Mali 105. *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences*, 14(2), 189-197. doi:10.12982/CMUJNS.2015.0081
- Yan, R., Huang, Z., Zhu, H., Johnson, J. A., & Wang, S. (2014). Thermal death kinetics of adult *Sitophilus oryzae* and effects of heating rate on thermotolerance. *Journal of Stored Products Research*, 59, 231-236. doi:10.1016/j.jspr.2014.03.006
- Zakladnoy, G. A. (2018). Effect of Grain Infestation with the Rice Weevil *Sitophilus oryzae* L. (Coleoptera, Dryophthoridae) on the Quality of Grain and Grain Products. *Entomological Review*, 98(6), 659-662. doi:10.1134/S0013873818060015
- Zhou, L., & Wang, S. (2016a). Industrial-scale radio frequency treatments to control *Sitophilus oryzae* in rough, brown, and milled rice. *Journal of Stored Products Research*, 68, 9-18. doi:10.1016/j.jspr.2016.03.002
- Zhou, L., & Wang, S. (2016b). Verification of radio frequency heating uniformity and *Sitophilus oryzae* control in rough, brown, and milled rice. *Journal of Stored Products Research*, 65, 40-47. doi:10.1016/j.jspr.2015.12.003



ภาคผนวก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Saeung, P., Santalunai, S., Thosdeekoraphat, T., & Thongsopa, C. (2018). **Improved efficiency of insect pest control system by SSPA**. Paper presented at the 2018 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications, ICIEA 2018.



## ประวัติผู้เขียน

นายภาณุพงษ์ แซ่เอ็ง เกิดเมื่อวันที่ 10 พฤษภาคม พ.ศ. 2535 เริ่มศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนสวนบัว กรุงเทพมหานคร และสำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านปะหลาน มหาสารคาม ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนพัคณภูมิพิทยาคาร มหาสารคาม ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนหอพระ เชียงใหม่ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2558 หลังสำเร็จการศึกษาภายในปีเดียวกันได้เริ่มศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ระหว่างเข้ารับการศึกษาก็ได้เป็นผู้ช่วยสอน วิชาปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ วิชาปฏิบัติการไมโครโปรเซสเซอร์ วิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ และวิชาปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ขั้นสูง 1 ในขณะที่เดียวกันก็ได้ร่วมทำวิจัย โดยเป็นผู้ช่วยวิจัยให้กับสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และสาขาวิชาเทคโนโลยีผลิตสัตว์ นอกจากนี้ยังเป็นวิทยากรอบรมในหัวข้อ “การออกแบบระบบควบคุมและการประยุกต์ใช้งานตัวตรวจรู้อิเล็กทรอนิกส์ สำหรับอุตสาหกรรม 4.0”

หัวข้อวิจัยที่มีความถนัดเป็นพิเศษคือ การออกแบบวงจรทางด้านคลื่นความถี่สูง การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก และวิศวกรรมสายอากาศ มีงานอดิเรกด้วยการเป็นนักเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ สร้างเว็บไซต์ ออกแบบระบบจัดการข้อมูล โดยใช้ฐานข้อมูล และออกแบบระบบการประยุกต์การใช้งาน IoT ร่วมกับตัวตรวจรู้อิเล็กทรอนิกส์

ผลงานวิจัย: ได้เสนอบทความเข้าร่วมการประชุมวิชาการนานาชาติ The 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications, ICIEA 2018 ที่ Shaw Foundation Alumni House, National University of Singapore, Singapore. ในหัวข้อ Improved efficiency of insect pest control system by SSPA.