

การออกแบบวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุสำหรับการ  
ให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก



นายวีรวัฒน์ เจริญศิริ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2563

**DESIGN OF RADIO FREQUENCY OSCILLATOR  
CIRCUIT FOR DIELECTRIC HEATING**

**Weerawat Charoensiri**



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

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2020**

การออกแบบวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุสำหรับการ  
ให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์)

ประธานกรรมการ



(อ. ดร.สำราญ สันทาลุนัย)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภณ)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รักษาราชการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

และประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วีรวัฒน์ เจริญศิริ : การออกแบบวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุสำหรับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก (DESIGN OF RADIO FREQUENCY CIRCUIT OSCILLATOR FOR DIELECTRIC HEATING) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. สำราญ สันทาลุนย์, 79 หน้า

ปัจจุบันการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก (Dielectric heating) มีการใช้งานอย่างแพร่หลายไม่ว่าจะเป็นด้านการแพทย์ อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมกรรมเซรามิกและอุตสาหกรรมเกษตร เนื่องจากการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกเป็นการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกจะเกิดความร้อนได้โดยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผ่านเข้าไปยังเนื้อวัสดุ โดยวัสดุที่ให้ความร้อนนั้นจะต้องตอบสนองต่อคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบเครื่องให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่วิทยุในการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก โดยโพลไดอิเล็กตริกคือข้าวสารเพื่อการกำจัดมอดที่อยู่ในข้าวสาร ซึ่งออกแบบเครื่องให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก โดยใช้หลอดไตรโอดเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่ย่านวิทยุกำลังงานสูงในการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก และออกแบบสัญญาณความถี่ในการใช้งานที่ความถี่ 38- 42 MHz มีกำลังงานการผลิตที่ 300 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยการออกแบบเครื่องให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก ประกอบไปด้วยการออกแบบแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุกำลังงานสูงและการออกแบบแมทซิงเรโซแนนซ์ขนาดใหญ่สำหรับให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก และเมื่อทำการออกแบบเครื่องต้นแบบเป็นที่เรียบร้อยแล้วจะได้เครื่องต้นแบบที่มีประสิทธิภาพสูงในการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริกอื่น ๆ ต่อไป

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนักศึกษา วีรวัฒน์  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา



WEERAWAT CHAROENSIRI : DESIGN OF RADIO FREQUENCY  
OSCILLATOR CIRCUIT FOR DIELECTRIC HEATING. THESIS  
ADVISOR : ASST. PROF.SAMRAN SANTALUNAI, Ph.D., 78 PP.

DESIGN OF RADIO FREQUENCY OSCILLATOR CIRCUIT FOR DIELECTRIC  
HEATING

At present, dielectric heating is widely used whether medical, food industry, ceramic industry, and agricultural industry because dielectric heating is high efficiency heating. Dielectric heating will heat happen by electromagnetic waves transmitted through into the material. By the heated material must respond to electromagnetic waves. This research presented the design of a dielectric heating machine with electromagnetic waves at radio frequency in dielectric heating by the dielectric load is milled rice to exterminate weevils in the milled rice. Designed dielectric heating machine using triode tube as a signal source high-power radio frequency to heat the dielectric and designed frequency signal in use at the frequency 38 to 42 MHz, it has a production capacity of 300 kg per hour. By designed dielectric heating machine consist designed a signal source high-power radio frequency and designed a large resonance matching for heat the dielectric. When designed the prototype machine complete will get a high-efficiency prototype machine in dielectric heating, include can be applied to using for heated the other dielectric materials in the future.

School of Electronic Engineering  
Academic Year 2020

Student's Signature C. Weerawat  
Advisor's Signature Samran

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

อาจารย์ ดร. ตำราญ สันทาคูณย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภา อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำปรึกษาทางวิชาการมาโดยตลอด และให้โอกาสในการศึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนเสกฐ์ ทศศิกรพัฒน์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ทางวิชาการและให้โอกาสในการศึกษา

ขอขอบคุณ พี่ ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่คอยให้ความช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้ความรักความอบอุ่น และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด อีกทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อแท้และท้อใจ ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดามารดา รวมถึงญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัย จนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

วิวัฒน์ เจริญศิริ

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.8 ปรัชญา/บรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
1.9 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์.....	14
<b>2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>15</b>
2.1 กล่าวนำ.....	15
2.2 พื้นฐานและกลไกของการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก.....	15
2.2.1 โครงสร้างพื้นฐานของการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก.....	16
2.2.2 กลไกการเกิดความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก.....	17
2.3 หลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก.....	18
2.3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของไดอิเล็กตริก.....	18

## สารบัญ (ต่อ)

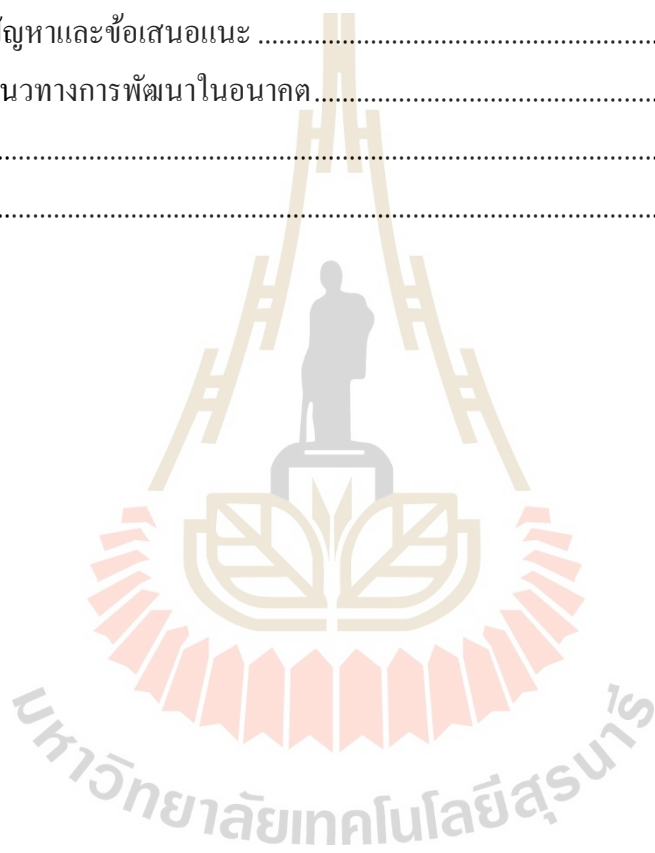
### หน้า

2.3.2	รูปแบบการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก.....	19
2.3.3	การเกิดความร้อนและการกระจายอุณหภูมิไดอิเล็กตริก.....	20
2.4	การส่งผ่านความร้อน.....	23
2.5	การให้ความร้อนด้วยคลื่นสนามไฟฟ้า.....	25
2.5.1	ลักษณะการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าของตัวสร้างคลื่นแบบแผ่นเพลต.....	25
2.5.2	ลักษณะของตัวเหนี่ยวนำ.....	27
2.5.3	วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม.....	28
2.6	สรุป.....	29
<b>3</b>	<b>การออกแบบเครื่องให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก.....</b>	<b>31</b>
3.1	กล่าวนำ.....	31
3.2	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของหลอดไดรไอต์.....	32
3.3	การออกแบบเครื่องให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นความถี่วิทยุ.....	39
3.3.1	การออกแบบแหล่งจ่ายกำลังงาน.....	39
3.3.2	การออกแบบชุดกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ.....	42
3.3.3	การออกแบบเมทซิงเรโซแนนซ์แผ่นเพลตสำหรับให้ความร้อน.....	48
3.4	สรุป.....	53
<b>4</b>	<b>การวัดและผลการทดลอง.....</b>	<b>54</b>
4.1	กล่าวนำ.....	54
4.2	การสร้างตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต อิเล็กโทรดและขดลวดเหนี่ยวนำ.....	54
4.2.1	การสร้างตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าและการวัด.....	55
4.2.2	การสร้างตัวเหนี่ยวนำและการวัด.....	58
4.3	ผลการทดสอบการเมทซิงอิมพีแดนซ์และการวัดค่าความร้อน การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ.....	60
4.3.1	การทดสอบเมทซิงอิมพีแดนซ์เรโซแนนซ์ความถี่วิทยุ.....	62
4.3.2	การวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้น.....	65

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 สรุป.....	68
<b>5 บทสรุป.....</b>	<b>69</b>
5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	69
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	70
5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	70
รายการอ้างอิง.....	71
ประวัติผู้เขียน.....	79



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ข้อมูลจำเพาะของหลอดไฟโอดเบอร์ 7T69RB .....32
3.2	ตารางข้อมูลจำเพาะการไปอัสไฟโอดเบอร์ 7T69RB.....33
3.3	กระแสที่ขั้วเฟลต (Plate) จากมุม 0-75° .....37
3.4	คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ.....49
3.5	ค่าความเหนี่ยวนำที่ความถี่เรโซแนนซ์ต่าง ๆ .....51
4.1	ค่าความจุที่วัดได้แต่ละความถี่ .....58
4.2	ผลการทดสอบความถี่ในการแมทชิงอิมพีแดนซ์ด้วยตัวเหนี่ยวนำ .....63
4.3	ผลการวัดอุนหภูมิ.....66

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	หลอดไฟโอดกำลังที่ใช้เป็นแหล่งกำลังงานสำหรับให้ความร้อนแก่ไดโอดีเล็กตริก.....5
1.2	การเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าและไดโพลเนื่องจากคลื่นสนามไฟฟ้า.....6
1.3	การใช้คลื่นความถี่วิทยุและไมโครเวฟในการกำจัดมอดในข้าวสาลี.....7
1.4	การใช้คลื่นความถี่วิทยุและไมโครเวฟที่ความถี่ 39 MHz และ 2.45 GHz เปรียบเทียบการตายของมอดข้าวกับอุณหภูมิของข้าวสาลี .....8
1.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยสูญเสียไดโอดีเล็กตริกกับความถี่ของ ข้าวสาลีและมอดข้าว .....9
1.6	ระบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุของ Livang Zhou และ Shaojin Wang.....10
1.7	อัตราการตายของด้วงวงข้าวโตเต็มวัย โดยการให้ความร้อนด้วยคลื่น คลื่นความถี่วิทยุโดยการกำหนดเวลาเท่ากัน อุณหภูมิแตกต่างกัน .....10
1.8	อัตราการตายของด้วงวงข้าวโตเต็มวัย โดยการให้ความร้อนด้วยคลื่น คลื่นความถี่วิทยุโดยการกำหนดอุณหภูมิเท่ากัน เวลาต่างกัน .....11
1.9	เครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุสำหรับอบแห้งเห็ดหลินจือ.....12
1.10	วงจรกำเนิดความถี่ย่านความถี่วิทยุสำหรับให้ความร้อนแก่ไดโอดีเล็กตริก ของ Nguyen Hay และคณะ .....13
2.1	โครงสร้างอะตอมระหว่างประจุบวกต่อประจุลบของตัวกลางไดโอดีเล็กตริก .....16
2.2	การให้ความร้อนด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแก่วัสดุที่ไม่มีขั้วและ วัสดุที่เป็นโลหะ.....17
2.3	ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีของ โมเลกุลข้าวบวกและข้าวลบพยายามจัดเรียง ตัวกันตามทิศทางของคลื่นสนามไฟฟ้าที่ส่งผ่านเข้าไปใน ไดโอดีเล็กตริก .....18
2.4	โครงสร้างตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต .....26
2.5	โครงสร้างตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต ที่ประกอบโครงสร้างด้วยโพลไดโอดีเล็กตริก .....26
2.6	วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม .....29

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1	บล็อกจากอะแกรมเครื่องให้ความร้อนแก๊สไดอิเล็กตริก .....31
3.2	โครงสร้างของหลอดไตรโอดเบอร์ 7T69RB.....34
3.3	วงจรแหล่งจ่ายกำลังงาน .....40
3.4	หม้อแปลงแรงดันสูง .....41
3.5	ไดโอดกำลัง.....41
3.6	แหล่งจ่ายกำลังงานที่ติดตั้งแล้ว.....42
3.7	แผนผังวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ .....43
3.8	แหล่งจ่ายกำลังงานแรงดันกระแสสลับ.....43
3.9	วงจรไบอัสซักริด (Grid).....44
3.10	ตัวต้านทานกำลังงานสูง .....44
3.11	ตัวเหนี่ยวนำ.....45
3.12	ตัวเก็บประจุ.....45
3.13	วงจรไบอัสซักริด (Grid) ที่ทำการติดตั้งแล้ว.....46
3.14	วงจรรองความถี่ .....46
3.15	วงจรรองความถี่และวงจรป้องกันสัญญาณกระแสตรงที่ทำการติดตั้งแล้ว.....47
3.16	วงจรให้ความร้อนแก๊สไดอิเล็กตริก .....48
3.17	ขนาดตัวเก็บประจุแบบแผ่นเพลตสำหรับปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้า .....50
3.18	ขนาดของตัวเหนี่ยวนำสำหรับแมทชิงเรโซแนนซ์ .....52
3.19	วงจรเครื่องให้ความร้อนแก๊สไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นความถี่วิทยุ.....53
4.1	โครงสร้างระบบตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าสำหรับ การให้ความร้อนแก๊สไดอิเล็กตริก .....55
4.2	รูปแบบและโครงสร้างของแผ่นเพลตสำหรับการทดสอบ การให้ความร้อนแก๊สไดอิเล็กตริก .....56
4.3	รูปแบบการวัดค่าความจุของตัวสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต .....57
4.4	ค่าความจุของตัวสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต .....57



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบสำหรับการแมทชิงอิมพีแดนซ์กับโหลดไดโอดีลิก.....	58
4.6 รูปแบบการวัดค่าความเหนี่ยวนำตามตำแหน่งที่ได้คำนวณ.....	59
4.7 ค่าความเหนี่ยวนำที่ออกแบบสำหรับแมทชิงความถี่เรโซแนนซ์.....	59
4.8 ระบบการให้ความร้อนแก่ไดโอดีลิกโดยใช้เทคนิคการ ให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ.....	60
4.9 กล้องถ่ายภาพความร้อน KEYSIGHT รุ่น U5857A.....	61
4.10 ลักษณะรูปแบบการต่อเพื่อวัดสัญญาณความถี่ของระบบ.....	61
4.11 การปรับตำแหน่งค่าเหนี่ยวนำแมทชิงอิมพีแดนซ์.....	62
4.10 การวัดอุณหภูมิและถ่ายภาพความร้อนที่เกิดขึ้น.....	65

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันพลังงานความร้อนมีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย ทั้งในภาคครัวเรือน และภาคอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการอบแห้ง อุตสาหกรรมการถนอมอาหาร การให้ความอบอุ่นในบ้าน เป็นต้น ซึ่งแหล่งพลังงานความร้อนที่นำมาใช้นั้นมีหลากหลายรูปแบบตามการใช้งาน ทั้งการใช้แก๊ส การใช้ขดลวดความร้อน การใช้คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น สำหรับปัจจุบันรูปแบบการให้ความร้อนที่กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมากคือการใช้คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการให้ความร้อน ซึ่งการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นสนามไฟฟ้านี้เป็นการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นรูปแบบที่สามารถให้ความร้อนโดยตรงกับวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อช่วงคลื่นความถี่ใช้งาน การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกเป็นการให้ความร้อนโดยการทำให้โมเลกุลเกิดการสั่น จึงเกิดการเสียดสีกันของโมเลกุลระหว่างขั้วเกิดเป็นความร้อนขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งรูปแบบการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกประกอบด้วย 2 รูปแบบหลัก ๆ คือ การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency Heating) และการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Heating) ปัจจุบันการให้ความร้อนด้วยคลื่นสนามไฟฟ้ามีการนำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมการเกษตร ซึ่งในภาคการเกษตรมีการใช้คลื่นสนามไฟฟ้าย่านความถี่วิทยุ เพื่อให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริกสำหรับกำจัดศัตรูพืชชนิดต่าง ๆ เช่น หนอนชนิดต่าง ๆ มอดข้าว รวมถึงไข่ของแมลงศัตรูพืชที่อยู่ในผลผลิตหรือเมล็ดพืช (Nelson and Stetson., 1974b.) (Nelson., 1996) สำหรับการกำจัดแมลงศัตรูพืชที่ปะปนอยู่ในผลผลิตหรือเมล็ดพืช เนื่องจากแมลงศัตรูพืชมีโครงสร้างที่เป็นของเหลวหรือมีโครงสร้างโมเลกุลที่สามารถเหนี่ยวนำคลื่นความถี่วิทยุทำให้เกิดความร้อนได้ (Edward and Eleaa.,1997)

ซึ่งจากความเป็นมาข้างต้น ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์จากคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับการกำจัดแมลงศัตรูพืชที่ปะปนมากับอยู่ในผลผลิตและเมล็ดพืช โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้ข้าวในการเป็นโหนดไดอิเล็กตริกในการให้ความร้อน เนื่องจากในปัจจุบันกำลังประสบกับปัญหาการที่มอดข้าวเข้ากัดกินทำลายเกิดความเสียหายต่อภาคการเกษตรและอุตสาหกรรมการส่งออกข้าวเป็นอย่างมาก ซึ่งผู้วิจัยมีความสนใจศึกษาและออกแบบการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก เพื่อประยุกต์

ใช้ในการกำจัดมอดที่อยู่ในข้าว โดยผู้วิจัยจะทำการศึกษาการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกโดยใช้คลื่นสนามไฟฟ้าย่านคลื่นความถี่วิทยุ การออกแบบวงจรการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกและสร้างระบบให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นวิทยุที่สามารถปรับความถี่ให้เหมาะสม รวมถึงการทดสอบผล การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการให้ความร้อนเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงที่สุดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อการศึกษาออกแบบวงจรระบบให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกสำหรับให้ความร้อนแก่ข้าวเพื่อการจัดมอด โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุ การวิเคราะห์และปรับแต่งวงจรกิจงานสูงย่านความถี่วิทยุ เพื่อให้ได้เครื่องให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกสำหรับกำจัดมอดในข้าวที่มีประสิทธิภาพสูง

## 1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

การให้พลังงานความร้อนแบบไดอิเล็กตริก โดยใช้คลื่นความถี่ย่านวิทยุนั้น จะสามารถให้ความร้อนแก่ข้าวสารสำหรับกำจัดมอดได้อย่างมีประสิทธิภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1) ศึกษาหาข้อมูลการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก
- 2) ออกแบบวงจรและสร้างระบบให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกสำหรับกำจัดมอดข้าวด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่มีประสิทธิภาพ สามารถปรับความถี่ตามความเหมาะสมได้
- 3) ทดสอบและวิเคราะห์ผลการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกสำหรับกำจัดมอดในข้าว

## 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ศึกษาค้นคว้าข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นความถี่วิทยุ
- 2) วิจัย พัฒนา ออกแบบเครื่องสำหรับให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นความถี่ย่านความถี่วิทยุสำหรับกำจัดมอดในข้าว เพื่อให้การกำจัดมอดอย่างมีประสิทธิภาพ
- 3) ทดสอบและวิเคราะห์การใช้ความถี่และกำลังงานที่เหมาะสมในการกำจัดมอด เพื่อให้ได้เครื่องกำจัดมอดด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่มีประสิทธิภาพ

## 1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

### 1.6.1 แนวทางการวิจัย แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนได้แก่

1) ศึกษาวารสารงานวิชาการที่เกี่ยวข้องกับรูปแบบการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกที่มีการใช้ในปัจจุบัน

2) ศึกษาออกแบบสร้างวงจรการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก โดยโหลดไดอิเล็กตริกอยู่ในแผ่นเพลต

3) ออกแบบวงจรและสร้างเครื่องต้นแบบกำลังงานสูงสำหรับให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกกับโหลดในแผ่นเพลต เพื่อจ่ายกำลังงานให้กับแผ่นเพลตที่ได้ออกแบบ สำหรับสร้างสนามไฟฟ้าในการส่งผ่านกำลังงานไปยังโหลดไดอิเล็กตริกให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

4) ทดสอบและวิเคราะห์เปรียบเทียบผลถึงประสิทธิภาพการให้ความร้อนและสามารถปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพให้มีความเหมาะสมมากที่สุด

5) จัดทำวิทยานิพนธ์

### 1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานประยุกต์ ซึ่งดำเนินงานตามกรอบดังต่อไปนี้

1) ศึกษาวารสารวิชาการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2) ออกแบบ วิเคราะห์ และศึกษาความเป็นไปได้ของการเกิดสนามไฟฟ้าในแผ่นเพลต ที่มีผลต่อโหลดไดอิเล็กตริก

3) สร้างเครื่องต้นแบบสำหรับให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก เพื่อกำจัดมอดจ้าว ทดสอบ วัดผลประสิทธิภาพการให้ความร้อน รวมถึงสามารถปรับความถี่การให้ความร้อนไดอิเล็กตริกให้เหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด

1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ อาคารเครื่องมือ 3 (F3) และ ห้องวิจัยและปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ชั้นสูง อาคารเครื่องมือ 11 (F11) สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ. เมือง จ.นครราชสีมา 30000

### 1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1) เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC)

2) เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ (function generator)

3) เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (spectrum analyzer)

4) เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer)

5) กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal )

### 1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) เก็บรวบรวมข้อมูลจากการสำรวจวารสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) เก็บรวบรวมผลที่ได้จากการจำลองแบบ การออกแบบ การสร้างเครื่องต้นแบบ และวัดทดสอบการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกสำหรับกำจัดมอด

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้เครื่องต้นแบบสำหรับให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริกเพื่อกำจัดมอดในข้าวด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ที่สามารถกำจัดมอดในข้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของข้าว
- 2) ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการออกแบบวงจรการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นความถี่สูง ซึ่งเป็นแนวทางที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อยกระดับอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
- 3) รู้จักการคิด วิเคราะห์ อย่างเป็นระบบเพื่อสามารถนำความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้งานในด้านอื่น ๆ เพื่อแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในทางปฏิบัติและสามารถนำความรู้ไปใช้ประโยชน์ไปใช้ประกอบวิชาชีพได้

## 1.8 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้ทราบถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนปัญหาและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อนำไปสู่วัตถุประสงค์ในการออกแบบระบบให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกสำหรับกำจัดมอดข้าว โดยทำการศึกษาจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาและฐานข้อมูล เช่น ฐานข้อมูล Scopus , ScienceDirect , IEEE สำหรับเนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้หลอดไฟ LED ในการสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าความถี่ย่านความถี่วิทยุ สำหรับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก รูปแบบแหล่งจ่ายกำลังงานและลักษณะการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ซึ่งได้มีการรวบรวมข้อมูลนำมาวิเคราะห์และออกแบบวงจรและลักษณะการให้ความร้อนกับไดอิเล็กตริกให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด โดยผลที่ได้จากการศึกษาข้อมูลมีหัวข้อดังต่อไปนี้

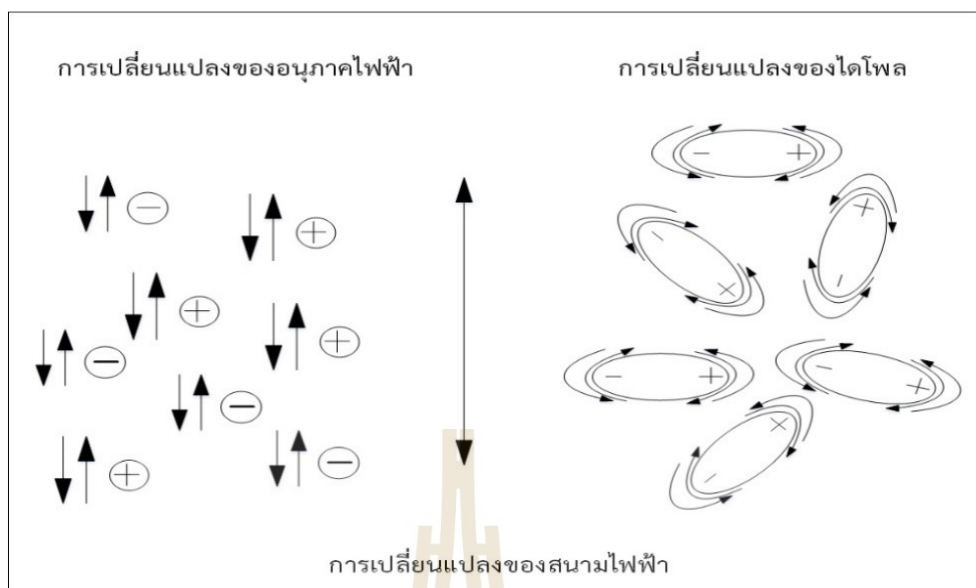
สำหรับในส่วนวงจรแหล่งจ่ายกำลังงานเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ซึ่งในงานวิจัยต่าง ๆ ที่มีการศึกษาและวิจัยนั้น มีการใช้แหล่งกำลังงานสูงจากหลอดไฟ LED ในการสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าย่านความถี่วิทยุในการให้ความร้อน แสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 หลอดไตรโอดที่ใช้เป็นแหล่งกำลังงานสำหรับให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

ในของวัสดุไดอิเล็กตริกสามารถเกิดความร้อนขึ้นได้โดยการใช้พลังงานมากระตุ้นซึ่งอยู่ในรูปแบบของคลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูง โดยกลไกในการเกิดความร้อนเกิดขึ้นจากที่สนามไฟฟ้าไปกระตุ้นวัสดุที่วัสดุที่มีสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือประจุไฟฟ้าที่อยู่ภายในตัวกลางของวัสดุที่มีความเป็นฉนวนไดอิเล็กตริก จากสถานะสมดุลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของไดโพลส่งผลให้สนามไฟฟ้าที่กระตุ้นให้เกิดการโพลาไรซ์ตามทิศทางของสนามไฟฟ้า ซึ่งสนามไฟฟ้าที่กระตุ้นเป็นผลทำให้เกิดการกระจายกำลังงานในรูปของความร้อนภายในตัวกลางของวัสดุที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กตริก โดยอีกปรากฏการณ์หนึ่งที่เกิดควบคู่กันคือ ตัวกลางที่เกิดการสูญเสียสามารถเกิดความร้อนได้โดยตรงจากการนำไฟฟ้า ภายใต้อิทธิพลของการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าจากภายนอก ทำให้เกิดเส้นทางการนำไฟฟ้าขึ้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1.2





รูปที่ 1.2 การเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าและไดโพลเนื่องจากคลื่นสนามไฟฟ้า

ในรูปที่ 1.2 เป็นการสลับกลับไปมาของการโพลาไรซ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงสลับขั้วอนุภาคไฟฟ้ากลับไปกลับมาอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นกลไกทำให้เกิดความร้อน โดยการใช้คลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูงในการให้ความร้อนกับตัวกลางวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสีย โดยในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดแนวทางการวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบวงจรสำหรับให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกโดยใช้หลอดไตรโอดสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูงย่านความถี่วิทยุสำหรับให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกเพื่อ การกำจัดมอดข้าวที่อยู่ในเมล็ดข้าว นั่นคือการให้ความร้อนกับมอดด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษา ค้นคว้า การออกแบบวงจรการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกโดยใช้หลอดไตรโอดและการให้ความร้อนในกลุ่มมอดและแมลง ซึ่งจากงานวิจัยของ (Nelson, 1995 ) ได้ทำการวิจัยเรื่องคลื่นความถี่วิทยุที่ 39 MHz และความถี่ไมโครเวฟที่ 2450 MHz ในการหาช่วงย่านความถี่ที่เหมาะสมในการกำจัดมอดข้าว ดังแสดงในรูปที่ 1.3 และรูปที่ 1.4

**Table 1. Reported host-media temperatures following RF and microwave dielectric heating exposures necessary for 99 to 100% insect mortality**

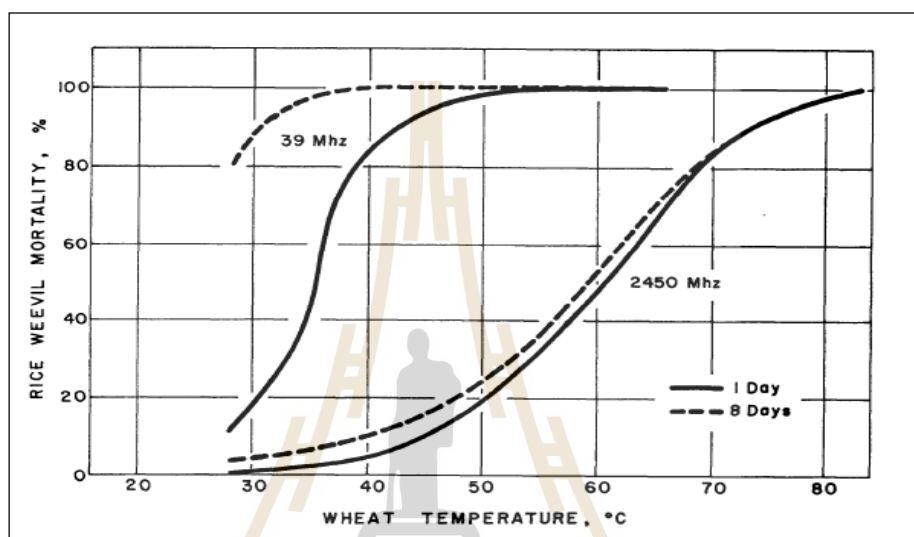
Species	Developmental Stage	Freq. (MHz)	Medium	Temp.* (°C)	Reference
Rice weevil, <i>Sitophilus oryzae</i> (L.)	Mixed immature	27	Wheat	56	Anglade et al., 1979
	Adult	39	Wheat	39	Nelson and Whitney, 1960
	Mixed immature	39	Wheat	61	Nelson and Whitney, 1960
	Adult	39	Wheat	40	Nelson and Stetson, 1974a
	Adult	2450	Wheat	83	Nelson and Stetson, 1974a
	Adult	2450	Wheat	> 60	Tateya and Takano, 1977
	Pupal	2450	Wheat	> 60	Tateya and Takano, 1977
	Larval	2450	Wheat	> 58	Tateya and Takano, 1977
	Egg	2450	Wheat	> 57	Tateya and Takano, 1977
Granary weevil, <i>Sitophilus granarius</i> (L.)	All	13.6	Wheat	62	Benz, 1975
	Egg	13.6	Wheat	61	Benz, 1975
	Adult	27	Wheat	55	Anglade et al., 1979
	Larval	27	Wheat	58	Anglade et al., 1979
	Pupal	27	Wheat	61	Anglade et al., 1979
	Adult	39	Wheat	41	Nelson and Kantack, 1966
	Adult	39	Wheat	42	Nelson et al., 1966
	Adult	2450	Wheat	86	Anglade et al., 1979
	Adult	2450	Wheat	> 92	Hamid et al., 1968
	Adult	2450	Wheat	> 57	Baker et al., 1956
	Larval	2450	Wheat	> 82	Baker et al., 1956
Egg	2450	Wheat	> 72	Baker et al., 1956	

รูปที่ 1.3 การใช้คลื่นความถี่วิทยุและไมโครเวฟในการกำจัดมอดในข้าวสาลี

จากรูปที่ 1.3 จะเป็นการใช้คลื่นความถี่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่วิทยุและไมโครเวฟทดลองให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกกับมอดข้าวและมอดยุงฉางที่อยู่ในข้าวสาลี โดยทำการทดลองกับมอดระยะไข่ ระยะตัวอ่อน ระยะดักแด้ ตัวไม่เต็มวัยและตัวเต็มวัย พบว่าการใช้ความถี่ที่ 39 MHz กับมอดทั้งสองชนิดในระยะตัวเต็มวัยมีอัตราการตายอยู่ที่ 99-100% โดยที่อุณหภูมิของข้าวสาลีจะอยู่ที่ประมาณ 40 °C และการใช้คลื่นความถี่ย่านความถี่วิทยุที่ 13 และ 27 MHz ในตัวเต็มวัยมีอัตราการตาย 99-100% เช่นเดียวกัน โดยที่จะมีอุณหภูมิของข้าวสาลีอยู่ที่ประมาณ 55 °C และการใช้คลื่นความถี่ย่านความถี่ไมโครเวฟที่ 2.45 GHz ในการทดลองกับตัวเต็มวัยของมอดมีอัตราการตาย



อยู่ที่ 99-100% เช่นเดียวกัน โดยที่จะมีอุณหภูมิของข้าวสาลีอยู่ที่มากกว่า  $70^{\circ}\text{C}$  ซึ่งพบว่าการใช้คลื่นความถี่ย่านความถี่วิทยุและไมโครเวฟในการกำจัดมอดข้าวและมอดยุ่งางที่อยู่ในข้าวสาลีนั้น การใช้คลื่นความถี่ย่านความถี่วิทยุที่อุณหภูมิไม่บ่อยมีผลต่อข้าวมากมั่ง ต่างกับการใช้คลื่นความถี่ย่านความถี่ไมโครเวฟที่มีอุณหภูมิในการกำจัดที่สูงซึ่งทำให้ข้าวสาลีเกิดความเสียหายจากความร้อนที่สูงมากได้

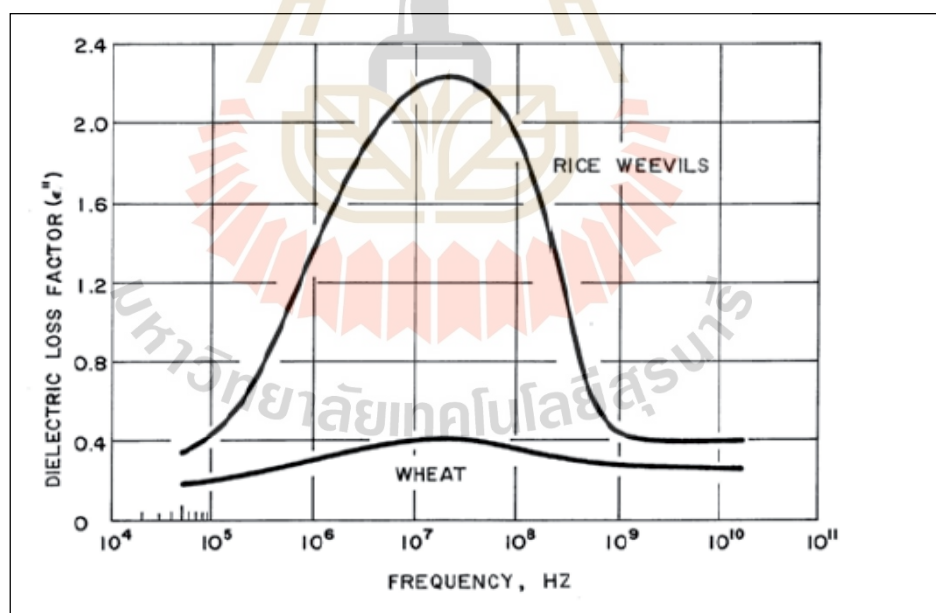


รูปที่ 1.4 การใช้คลื่นความถี่วิทยุและไมโครเวฟที่ 39 MHz และ 2.45 GHz  
เปรียบเทียบการตายของมอดข้าวกับอุณหภูมิของข้าวสาลี

จากรูปที่ 1.4 เป็นการพิจารณาอัตราการตายของมอดข้าวต่ออุณหภูมิของข้าวสาลี ซึ่งพบว่า การใช้ความถี่ย่านความถี่วิทยุที่ 39 MHz นั้นจะมีอัตราการตายของมอดข้าวอยู่ที่ร้อยละ 80% โดยที่ อุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ  $38^{\circ}\text{C}$  และเมื่อเก็บไว้เป็นระยะ 8 วัน มอดข้าวก็จะตาย 100% และจากการ ทดลองเมื่อใช้คลื่นความถี่ย่านความถี่วิทยุ 39 MHz เมื่อใช้อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  ขึ้นไปจะทำให้มอดข้าวตาย 100% โดยที่ไม่ต้องเก็บไว้ถึง 8 วัน ถัดมาเป็นการใช้คลื่นความถี่ย่านความถี่ไมโครเวฟที่ 2.45 GHz พบว่าที่อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$  จะทำให้มอดข้าวมีอัตราการตายอยู่ที่ร้อยละ 80% และถ้าหากต้องการให้ มอดข้าว 100 % นั้นจะต้องทำให้ข้าวมีอุณหภูมิมากกว่า  $80^{\circ}\text{C}$  ซึ่งพบว่าหากมีการใช้อุณหภูมิที่สูง มาก ๆ เกินไปนั้นจะทำให้ข้าวสาลีเกิดความเสียหายทางกายภาพได้ ดังนั้นจากการทดลองการใช้ คลื่นย่านความถี่วิทยุและย่านความถี่ไมโครเวฟในการกำจัดมอดในข้าวสาลีนั้น ช่วงคลื่นความถี่ที่ เหมาะสมในการกำจัดมอดนั้น คือคลื่นความถี่ย่านความถี่วิทยุ ดังนั้นจากเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึง สนใจออกแบบและพัฒนาเครื่องให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริกที่เหมาะสมสำหรับกำจัดมอดในข้าว

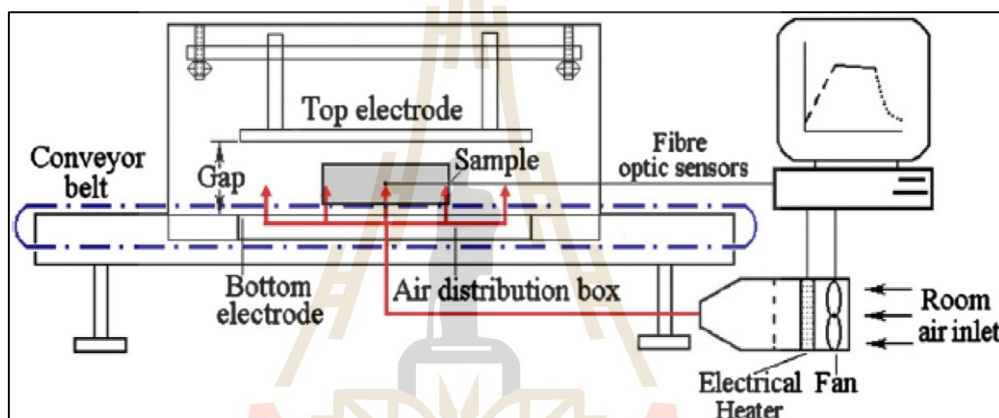
อีกทั้งการใช้คลื่นความถี่ย่านความถี่วิทยุยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับศัตรูพืชชนิดอื่น ๆ ต่อไปอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

จากงานวิจัยจากงานวิจัยของ Nelson (1996) ได้นำเสนอเกี่ยวกับการตอบสนองทางความถี่ของมอดข้าวและข้าวสาลีต่อค่าปัจจัยสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) ซึ่งแสดงในรูปที่ 1.5 โดยทำการวัดค่าปัจจัยสูญเสียไดอิเล็กตริกของมอดข้าวและข้าวสาลี โดยใช้ความถี่ในการวัดที่ความถี่ 50 MHz ถึง 12 GHz ซึ่งพบว่าช่วงความถี่ของมอดข้าวในการตอบสนองต่อค่าปัจจัยสูญเสียไดอิเล็กตริกดีที่สุด จะมีความถี่อยู่ที่ประมาณ 39 MHz โดยที่มีค่าปัจจัยสูญเสียไดอิเล็กตริกเท่ากับ 2.24 ส่วนของข้าวสาลีนั้นจะมีค่าปัจจัยสูญเสียไดอิเล็กตริกอยู่ที่ประมาณ 0.4 ซึ่งน้อยมาก และพบว่าช่วงความถี่ที่ตอบสนองต่อค่าปัจจัยสูญเสียไดอิเล็กตริกสูงนั้นจะมีความถี่ประมาณ 10 -100 MHz ดังนั้นความถี่ในช่วงดังกล่าวจึงเป็นความถี่ที่เหมาะสมต่อการกำจัดมอดข้าวที่ดีที่สุด ซึ่งจะนำความถี่ในช่วงดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์และออกแบบเครื่องให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริกเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด



รูปที่ 1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยสูญเสียไดอิเล็กตริกกับความถี่ของข้าวสาลีและมอดข้าว

จากงานวิจัยของ Liyang Zhou และ Shaojin Wang (Liyang Zhou , Shaojin Wang al 2015) ได้ทำการศึกษาเพื่อยืนยันการใช้คลื่นความถี่วิทยุในการควบคุมด้วงงวงข้าว (มอดข้าว) ในเปลือกข้าวกล้องและข้าวสาร ซึ่งจากการวิจัยได้มีการใช้คลื่นความถี่วิทยุความถี่ 27.12 MHz กำลังงาน 6 กิโลวัตต์ ในการศึกษาการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในการควบคุมด้วงงวงข้าว (มอดข้าว) ในเปลือก ข้าวกล้องและข้าวสาร โดยใช้แผ่นอิเล็กโทรดที่มีระยะห่าง 11 เซนติเมตรเป็นตัวกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูง และการใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสร่วมด้วย ซึ่งระบบให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุสำหรับควบคุมด้วงงวงข้าว (มอดข้าว) ในเปลือก ข้าวกล้องและข้าวสารแสดงดังรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 ระบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุของ Liyang Zhou และ Shaojin Wang

**Table 3**  
Mortality (mean ± SD, %) of adult *Sitophilus oryzae* after RF heating to 4 temperatures for holding 5 min.

Treatment	Temperatures (°C)			
	44	46	48	50
Control	3.3 ± 1.6	4.1 ± 2.1	2.8 ± 1.8	3.5 ± 1.6
Rough rice	67.7 ± 8.0 aA <sup>a</sup>	79.4 ± 9.2aAB	92.3 ± 6.8aBC	99.7 ± 0.6 aC
Brown rice	64.7 ± 8.3 aA	75.7 ± 2.8 aA	89.5 ± 7.2 aB	99.3 ± 0.6 aC
Milled rice	66.2 ± 7.6 aA	76.4 ± 6.1 aA	91.7 ± 3.8 aB	99.9 ± 1.0 aC

<sup>a</sup> Different lower and upper case letters indicate that means are significantly different at P = 0.05 among temperatures and samples, respectively.

รูปที่ 1.7 อัตราการตายของด้วงงวงข้าวโตเต็มวัย โดยการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุโดยการกำหนดเวลาเท่ากัน อุณหภูมิต่างกัน

จากรูปที่ 1.7 เป็นการทดลองเพื่อวิเคราะห์อัตราการตายของด้วงงวงข้าว (มอดข้าว) ในเปลือก ข้าวกล้องและข้าวสาร โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 44 , 46 , 48 และ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที ซึ่งจากการทดลองเป็นการเปรียบเทียบตัวควบคุมที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุกับตัวที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่อุณหภูมิต่างกัน 4 อุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 44 องศาเซลเซียส มอดในข้าวเปลือกมีอัตราการตายอยู่ที่ 66.7% มอดในข้าวกล้องมีอัตราการตายอยู่ที่ 64.7% มอดในข้าวขาวมีอัตราการตายอยู่ที่ 66.2% ถัดมาที่อุณหภูมิ 46 องศาเซลเซียส มอดในข้าวเปลือกมีอัตราการตายอยู่ที่ 79.4% มอดในข้าวกล้องมีอัตราการตายอยู่ที่ 75.7% มอดในข้าวขาวมีอัตราการตายอยู่ที่ 76.4% ถัดมาที่อุณหภูมิ 48 องศาเซลเซียส มอดในข้าวเปลือกมีอัตราการตายอยู่ที่ 92.3% มอดในข้าวกล้องมีอัตราการตายอยู่ที่ 89.5% มอดในข้าวขาวมีอัตราการตายอยู่ที่ 91.7% ถัดมาที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มอดในข้าวเปลือกมีอัตราการตายอยู่ที่ 99.7% มอดในข้าวกล้องมีอัตราการตายอยู่ที่ 66.3% มอดในข้าวขาวมีอัตราการตายอยู่ที่ 99.9% และทำการทดลองการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุร่วมกับลมร้อนโดยกำหนดอุณหภูมิเท่ากันที่ 50 องศาเซลเซียส แต่ใช้เวลาต่างกันสำหรับกำจัดด้วงงวงข้าว แสดงดังรูปที่ 1.8

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

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

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

รูปที่ 1.8 อัตราการตายของด้วงงวงข้าวโตเต็มวัย โดยการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุโดยการกำหนดอุณหภูมิเท่ากัน เวลาต่างกัน

จากรูปที่ 1.8 เป็นการทดลองเพื่อวิเคราะห์อัตราการตายของด้วงงวงข้าว (มอดข้าว) ในเปลือก ข้าวกล้องและข้าวสาร โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 เวลาในการทดลองที่ 0 , 2 , 4 และ 6 นาที ที่เวลา 0 นาที มอดในข้าวเปลือกมีอัตราการตายอยู่ที่ 83.7% มอดใน

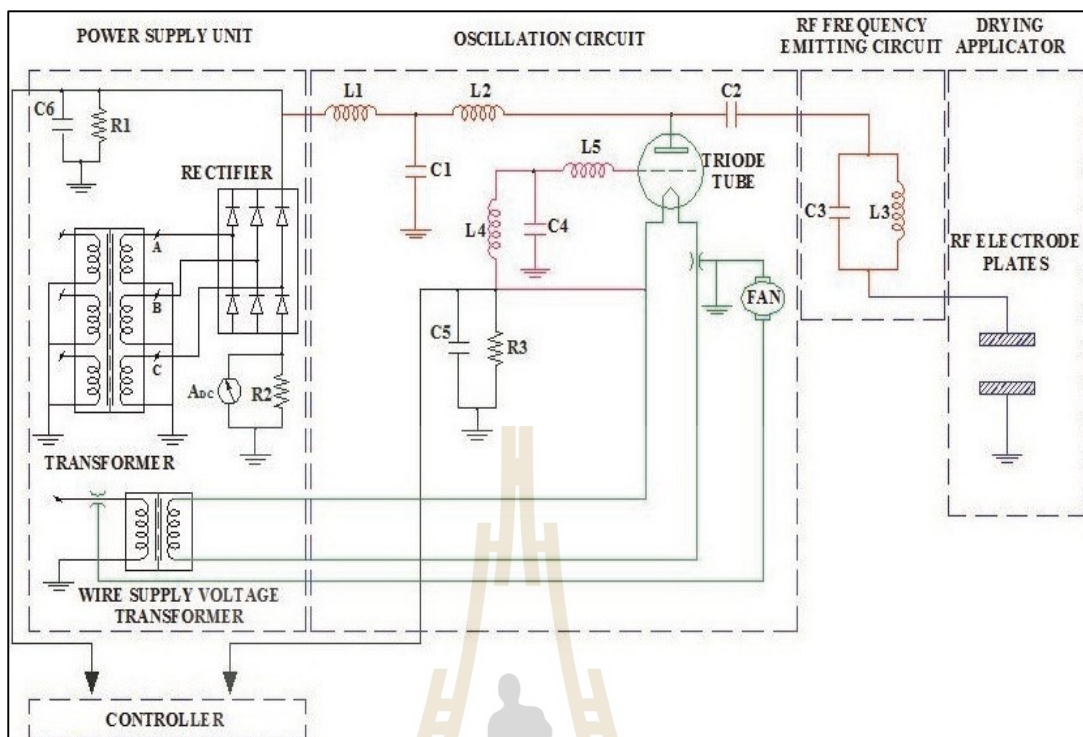
ข้าวกล้องมีอัตราการตายอยู่ที่ 80.2% มอดในข้าวขาวมีอัตราการตายอยู่ที่ 81.5% ถัดมาที่เวลา 2 นาที มอดในข้าวเปลือกมีอัตราการตายอยู่ที่ 90.0% มอดในข้าวกล้องมีอัตราการตายอยู่ที่ 88.3% มอดในข้าวขาวมีอัตราการตายอยู่ที่ 89.7% ถัดมาที่เวลา 4 นาที มอดในข้าวเปลือกมีอัตราการตายอยู่ที่ 99.0% มอดในข้าวกล้องมีอัตราการตายอยู่ที่ 98.8% มอดในข้าวขาวมีอัตราการตายอยู่ที่ 98.8% ถัดมาที่เวลา 6 นาที มอดในข้าวเปลือกมีอัตราการตายอยู่ที่ 100% มอดในข้าวกล้องมีอัตราการตายอยู่ที่ 100% มอดในข้าวขาวมีอัตราการตายอยู่ที่ 100% การทดลองจึงสรุปได้ว่าการใช้คลื่นความถี่วิทยุสามารถกำจัดด้วงงวงข้าว (มอดข้าว) ได้

จากงานวิจัยของ Nguyen Hay และคณะ (Nguyen Hay, Pham Van Kien, Le Anh Duc al., 2018) ได้ทำการศึกษาการออกแบบเครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุสำหรับใช้ในเทคโนโลยีการอบแห้ง ซึ่งพวกเขาได้ศึกษาและออกแบบเครื่องสำหรับให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นความถี่ย่านวิทยุที่ความถี่ 27 MHz กำลังงาน 3 กิโลวัตต์ ในการอบแห้งเห็ดหลินจือ ซึ่งการออกแบบเครื่องสำหรับให้ความร้อนไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นความถี่วิทยุอบแห้งเห็ดหลินจือโดยใช้หลอดไตรโอด 7T69RB เป็นแหล่งกำลังงานกำเนิดคลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูง แสดงดังรูปที่ 1.9 และออกวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุสำหรับให้ความร้อนไดอิเล็กตริกแสดงดังรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.9 เครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุสำหรับอบแห้งเห็ดหลินจือ





รูปที่ 1.10 วงจรกำเนิดคลื่นความถี่ย่านความถี่วิทยุสำหรับให้ความร้อนแก่

ไดโอดเล็กทรอนิกส์ของ Nguyen Hay และคณะ

โดยจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่นำเสนอมานั้นส่วนใหญ่ได้มุ่งเน้นการวิเคราะห์เพื่อออกแบบสร้างและศึกษาผลการทดลองของงานวิจัยเกี่ยวกับการสร้างระบบให้ความร้อนแบบไดโอดเล็กทรอนิกส์เพื่อให้ความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการให้ความร้อนไดโอดเล็กทรอนิกส์ด้วยคลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูงนั้น จำเป็นต้องมีตัวแปรหลักในการพิจารณา ประกอบด้วยย่านความถี่ที่ใช้งานปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดโอดเล็กทรอนิกส์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าเข้าสู่ตัวกลางของวัสดุที่มีคุณสมบัติไดโอดเล็กทรอนิกส์ที่มีการสูญเสีย และการใช้กำลังงานในการให้ความร้อน ซึ่งเป็นสิ่งที่จะต้องนำมาวิเคราะห์เพื่อนำไปสู่การออกแบบวงจรกำเนิดความถี่และตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้า ให้เหมาะสมกับรูปแบบการใช้งาน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่สามารถทำให้กำลังงานสนามไฟฟ้าไปยังตัวกลางวัสดุที่มีการสูญเสีย เพื่อให้เกิดความร้อนได้ ดังนั้นขนาดและรูปแบบของตัวสร้างสนามไฟฟ้าจึงเป็นส่วนสำคัญที่ต้องนำมาวิเคราะห์ เพื่อให้ได้รูปแบบการใช้งานและการใช้กำลังงานที่เหมาะสมที่สุด

## 1.9 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท ดังต่อไปนี้

**บทที่ 1** กล่าวถึงที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยรวมถึงปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

**บทที่ 2** กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการออกแบบสร้างระบบสร้างคลื่นความถี่สูง หลักการพื้นฐานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง พื้นฐานการทำให้เกิดความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

**บทที่ 3** กล่าวถึงการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณกำลังงานสูงย่านความถี่วิทยุในการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก และการออกแบบตัวปล่อยคลื่นแบบแผ่นเพลต

**บทที่ 4** กล่าวถึงการวัดค่าทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ และผลการทดลอง ของวงจรกำเนิดสัญญาณกำลังงานสูงย่านคลื่นความถี่วิทยุสำหรับเครื่องให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก และการให้ความร้อนด้วยแผ่นเพลต

**บทที่ 5** กล่าวถึงสรุปผลการวัดและการทดลองการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก โดยมีรายละเอียดเกี่ยวกับการสรุปผลการวิจัยในบทต่าง ๆ ทั้งหมด ปัญหาที่เกิดขึ้นข้อเสนอแนะแนวทางในการแก้ไขปัญหา รวมถึงแนวทางการพัฒนาในอนาคต

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กล่าวนำ

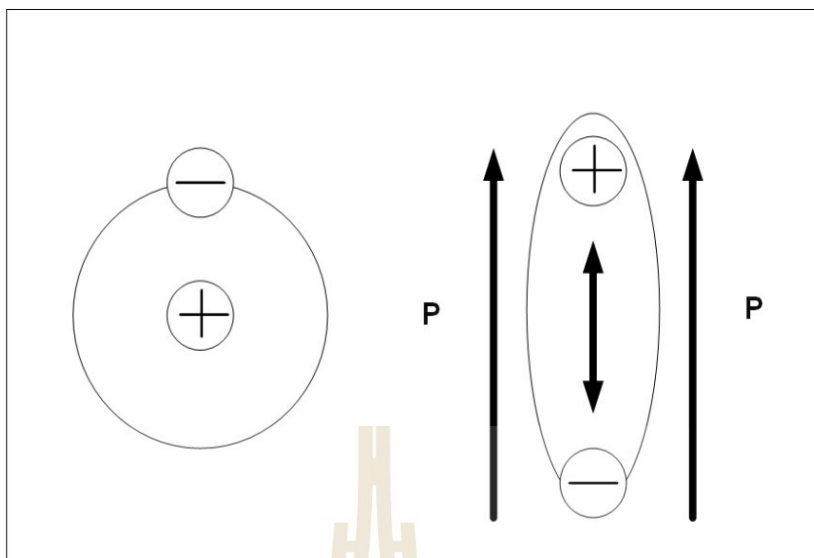
เพื่อให้เข้าใจถึงหลักการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก จึงต้องทำการศึกษาหาข้อมูลและทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งมีความสำคัญและมีประโยชน์อย่างมากในการดำเนินงานวิจัย เพื่อให้เป็นพื้นฐานความรู้ และความเข้าใจงาน สามารถใช้เป็นแหล่งอ้างอิงสำหรับงานวิจัย ดังนั้นจึงได้นำเสนอทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยจะกล่าวถึงเฉพาะส่วนที่เป็นประโยชน์ หรือกล่าวอ้างถึงต่อการดำเนินงานวิจัย โดยงานวิจัยนี้จะทำการศึกษา คือ หลักการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก ทฤษฎีพื้นฐานของการกระจายความร้อนด้วยคลื่นสนามไฟฟ้า และภาควงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุกำลังสูง โดยทำการแมตซ์ซิ่งกับ โหลดที่เป็นแผ่นเพลต

#### 2.2 พื้นฐานและกลไกการให้ความร้อนของไดอิเล็กตริก

##### 2.2.1 โครงสร้างพื้นฐานของการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

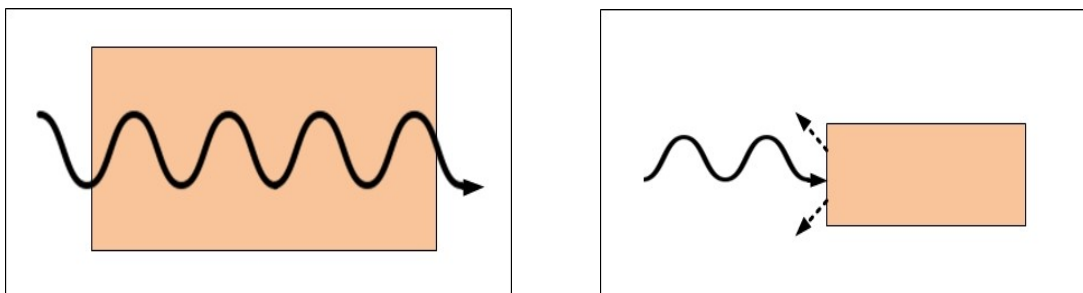
การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก (dielectric heating) เป็นการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการให้ความร้อน ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่ที่ใช้ในการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกนั้น คือย่านความถี่วิทยุ (radio frequency) หรือย่านความถี่ไมโครเวฟ (microwave) สำหรับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกนั้นจะใช้คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากำลังงานสูงส่งผ่านไปยังวัสดุที่เป็นที่ไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นวัสดุที่ตอบสนองต่อคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า กล่าวคือวัสดุหรือชิ้นงานที่ต้องการให้ความร้อนด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้น จะต้องมีการตอบสนองต่อคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อแปลงพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นความร้อนในเนื้อวัสดุ สำหรับวัสดุที่ตอบสนองต่อคลื่นสนามไฟฟ้านั้น ได้แก่ น้ำหรือวัสดุที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ ซึ่งเมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไป สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้เกิดโพลาไรซ์ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2





รูปที่ 2.1 โครงสร้างอะตอมระหว่างประจุบวกต่อประจุลบของตัวกลางไดอิเล็กตริก

ส่วนวัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบไม่มีขั้ว เช่น อากาศ เทฟลอน (Teflon) หรือแก้วซึ่งจะไม่สามารถดูดซับพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ โดยคลื่นจะผ่านทะลุเข้าไปในเนื้อวัสดุโดยไม่เกิดความร้อนหรือการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ลักษณะของคลื่นสนามแม่เหล็กที่ผ่านแสดงดังรูปที่ 2.2 ก และวัสดุที่เป็นโลหะนั้น มีคุณสมบัติในการสะท้อนคลื่นในย่านความถี่วิทยุหรือไมโครเวฟ โดยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะไม่สามารถทะลุทะลวงเข้าไปให้ความร้อนในเนื้อโลหะได้ โลหะจึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมกับการใช้ในการทำโครงสร้างเตาและตัวสะท้อนคลื่นให้อยู่ในบริเวณที่กำหนดแสดงดังรูปที่ 2.2 ข สำหรับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกนั้นเป็นวิธีการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากการถ่ายเทพลังงานเป็นความร้อนเกิดภายในเนื้อวัสดุโดยตรง ซึ่งจะมีความแตกต่างจากการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมซึ่งใช้เชื้อเพลิงหรือขดลวดไฟฟ้าซึ่งการถ่ายเทความร้อนจะอาศัยการพาของอากาศร้อนหรือการแผ่รังสีจากแหล่งความร้อนเป็นหลักซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นจะถ่ายเทไปที่ผิววัสดุก่อน จากนั้นจึงจะค่อยเกิดการนำความร้อนจากผิวนอกของวัสดุเข้าไปสู่ภายในวัสดุ



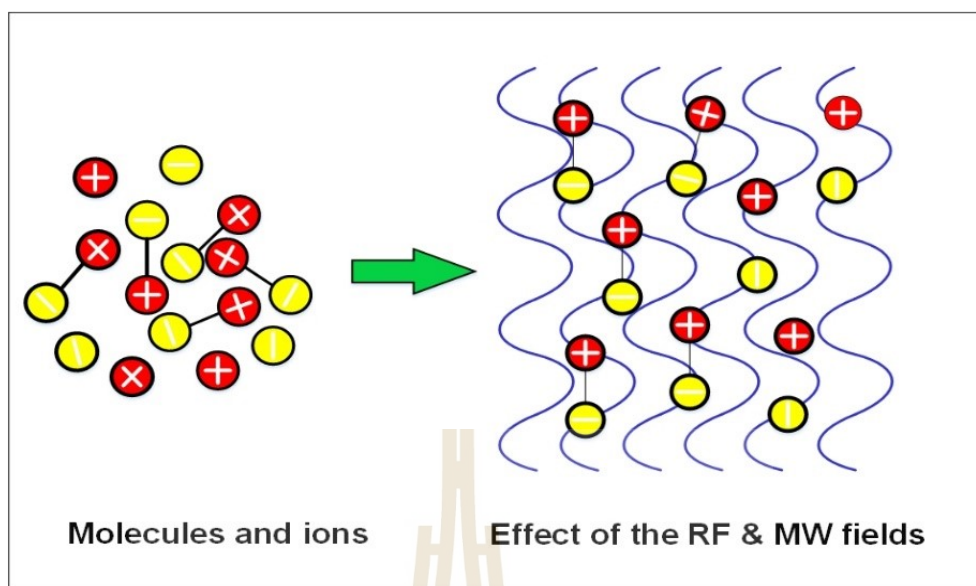
(ก) การให้ความร้อนแก่วัสดุที่ไม่มีขั้ว

(ข) การให้ความร้อนแก่วัสดุที่เป็นโลหะ

รูปที่ 2.2 การให้ความร้อนด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแก่วัสดุที่ไม่มีขั้วและวัสดุที่เป็นโลหะ

### 2.2.2 กลไกการเกิดความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก

สำหรับกลไกการเกิดความร้อนไดอิเล็กตริกนั้น เมื่อวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารไดอิเล็กตริกต่าง ๆ หรือโมเลกุลแบบมีขั้ว ทำการป้อนคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านคลื่นความถี่สูงเข้าไปจะทำให้เกิดการโพลาไรซ์ของประจุภายใน ไดอิเล็กตริกเกิดการเรียงตัวของประจุในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสนามแม่เหล็ก แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากทิศทางของขั้วสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของคลื่นความถี่สูงเปลี่ยนสลับไปสลับมาหลายล้านครั้งต่อวินาที โมเลกุลที่มีขั้วของวัสดุต่าง ๆ ก็จะเริ่มหมุน ทำให้สนามไฟฟ้าสลับขั้ว โมเลกุลก็จะหมุนในอีกทางด้วยความถี่สูงมากเช่นกัน และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงไปตามคาบเวลาของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ไดอิเล็กตริก ซึ่งจากคุณลักษณะการหมุนสลับขั้วกันด้วยความถี่สูงนี้ทำให้เกิดพลังงานจลน์ที่สูงมากเกิดจากความเสียดทานภายใน โมเลกุล และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะมีตัวแปรหลักในการพิจารณาประกอบด้วย เช่น ช่วงความถี่ที่ใช้งาน รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นเข้าสู่ตัวกลางที่เป็นไดอิเล็กตริก การดูดกลืนหรือการสูญเสียของคลื่นความถี่และกำลังงานที่ต้องใช้ เป็นต้น โดยคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกสำหรับวัสดุแต่ละชนิดนั้นจะเป็นตัวแปรที่สำคัญ ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าความถี่ของคลื่นวิทยุ และคลื่นความถี่ย่านไมโครเวฟ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีกันของ โมเลกุลขั้วบวกและขั้วลบพยายามจัดเรียงตัวกันตามทิศทางของคลื่นสนามไฟฟ้าที่ส่งผ่านเข้าไปในไดอิเล็กตริก

## 2.3 หลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

### 2.3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของไดอิเล็กตริก

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกมีการประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย ซึ่งที่ผ่านมานั้น การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกจะใช้ความถี่ในการให้ความร้อนที่ไม่สูงมากนัก คือประมาณ 1-15 MHz ต่อมาได้มีการพัฒนาใช้คลื่นความถี่ที่สูงมากขึ้น ซึ่งได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมและครัวเรือนได้เช่น การประกอบอาหาร การอบแห้งอาหาร และการเกษตร สำหรับการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริกนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริก โดยคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกสำหรับวัสดุแต่ละชนิดนั้นจะเป็นตัวแปรที่สำคัญ ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าความถี่ เนื่องจากเป็นสิ่งที่จะต้องนำมาวิเคราะห์ เพื่อนำไปสู่การออกแบบวงจรกำเนิดความถี่และตัวปล่อยคลื่นให้เหมาะสมกับค่าไดอิเล็กตริกที่ตัวกลางต่าง ๆ ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริกนั้นจะอธิบายได้จากพฤติกรรมภายใต้การใช้งานคลื่นที่ย่านความถี่คลื่นต่าง ๆ คือ ค่าสภาพยอมเชิงซ้อน (Complex permittivity,  $\epsilon^*$ ) หรือ “ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant)” ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ สมการที่ 2.1

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

เมื่อ  $\epsilon''$  คือ ค่าปัจจัยสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) ค่าการสูญเสีย นั้น จะทำการดูในส่วนที่เป็นจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกซึ่งจะขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้งาน และ ค่าการสูญเสียแทนเจนต์ (Loss tangent) ได้ดังสมการต่อไปนี้

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

โดยความถี่วิทยุที่สำคัญที่มีการใช้ในปัจจุบันสำหรับการใช้งานในงานวิจัยนี้ จะใช้ ย่านความถี่วิทยุในช่วง 10 MHz–50 MHz ซึ่งจะใช้หลักการหมุนของไดโพลเป็นกลไกการสูญเสียที่สำคัญ ดังสมการความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\epsilon'' = \epsilon_d'' + \epsilon_\sigma'' + \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \quad (2.3)$$

### 2.3.2 รูปแบบการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก

วัสดุที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (dielectric) ที่มีการสูญเสียนั้นสามารถทำให้เกิดเป็นความร้อนได้ โดยการใช้คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผ่านเข้าไปยังวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากความสามารถของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำให้เกิดโพลาริซชันของประจุภายในไดอิเล็กตริก จะทำให้ไดโพลเกิดการหมุนตามคาบเวลาของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านเข้าไป ซึ่งการหมุนของไดโพลทำให้เกิดความร้อนโดยเกิดจากการเสียดสีกันภายในของโมเลกุล โดยโมเลกุลของไดอิเล็กตริกนั้นจะต้องมีค่าไดโพลโมเมนต์ (dipole moment) สูงพอ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของการทำให้เกิดความร้อนภายในไดอิเล็กตริก ซึ่งไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบซึ่งในสภาวะทั่วไปสารที่เป็นไดอิเล็กตริกสามารถที่จะเก็บพลังงานไฟฟ้าได้ โดยเกิดจากการที่ประจุหลุดออกจากกัน เนื่องจากการป้อนพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปภายในไดอิเล็กตริก ซึ่งจะฝืนกับแรงยึดเหนี่ยวของอะตอมหรือโมเลกุล โดยกลไกการแยกกันของประจุขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุไดอิเล็กตริกและความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไดอิเล็กตริก โดยการแบ่งชนิดของการเกิดโพลาริซชันของไดอิเล็กตริกนั้นแบ่งได้ 4 ลักษณะซึ่งในแต่ละแบบจะเกิดปรากฏการณ์ที่คล้ายกันแต่จะเกิดขึ้นที่ความถี่ที่แตกต่างกัน โดยในแต่ละแบบความเป็นกลางทางไฟฟ้าจะถูกรบกวน เนื่องจากการป้อนพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปในไดอิเล็กตริก ซึ่งจะทำให้เกิดการแยกห่างออกจากกันของประจุลบ

และประจุบวกโดยที่พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสลับนั้นความถี่จะเป็นตัวกำหนดชนิดของการเกิดโพลาริซ ซึ่งสามารถอธิบายการเกิดโพลาริซชนิดต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้ คือ อันดับแรกนั้นเป็นลักษณะการเกิดโพลาริซแบบสเปซชาร์จ (space charge polarization) โดยการเกิดโพลาริซชนิดนี้ จะเกิดขึ้นที่ ความถี่ต่ำ ซึ่งจะเป็นช่วง VLF และ LF เนื่องจากการเกิดโพลาริซจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุหรือตัวกลางมีอิเล็กตรอนอิสระ โดยที่ระยะห่างของประจุบวกและประจุลบจะถูกจำกัดด้วยสิ่งกีดขวาง

เมื่อมีการป้อนพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปยังไดอิเล็กตริกแล้วอิเล็กตรอนจะสะสมบริเวณที่ส่วนกีดขวาง ซึ่งจะทำให้ประจุบวกและประจุลบแยกห่างออกจากกัน และมีผลทำให้ไดอิเล็กตริกเกิดโพลาริซ โดยการเกิดโพลาริซลักษณะนี้เป็นพื้นฐานของอิเล็กตรอนิกส์สารกึ่งตัวนำ ต่อมาอันดับที่สองเป็นการเกิดโพลาริซแบบการจัดเรียงขั้วของไดโพล (polarization by dipole alignment) การเกิดโพลาริซแบบนี้จะเกิดขึ้นที่ความถี่สูงมาก เช่น ย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยจะเกิดขึ้นในระดับของโมเลกุล โดยหลักการนี้จะใช้เป็นพื้นฐานของการเกิดความร้อนในไดอิเล็กตริก ต่อมาเป็นการเกิดโพลาริซแบบไอออนิก (ionic polarization) การเกิดโพลาริซแบบนี้จะเกิดขึ้นที่ความถี่ของอินฟราเรด โดยจะเกิดขึ้นเนื่องจากการแยกห่างจากกันของประจุบวกและประจุลบภายในโมเลกุล และสุดท้ายเป็นการเกิดโพลาริซแบบอิเล็กตรอนิกส์ (electronic polarization) การเกิดโพลาริซแบบนี้จะเกิดขึ้นที่ความถี่สูง ๆ ที่ใกล้เคียงกับความถี่ของอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งนิวเคลียสของอะตอมซึ่งเป็นประจุบวกจะอยู่กับที่ในเมตริกซ์ของวัสดุไดอิเล็กตริก โดยกลุ่มของประจุลบที่อยู่รอบนิวเคลียสนั้น เคลื่อนที่ไปในทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามา

### 2.3.3 การเกิดความร้อนและการกระจายอุณหภูมิไดอิเล็กตริก

การทำให้เกิดความร้อนในไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นสนามไฟฟ้า จะเกิดขึ้นเนื่องจากการแพร่กระจายของพลังงานของสนามไฟฟ้าเข้าไปในไดอิเล็กตริก ซึ่งพลังงานที่แพร่กระจายนี้จะทำให้เกิดการหมุนของไดโพล และจะเกิดความเสียหายจากการหมุนทำให้เกิดความร้อนการแพร่กระจายของกำลังงาน ที่ทำให้เกิดความร้อนในหนึ่งหน่วยปริมาตร  $V_a$  จะแปรผันตรงกับกำลังงานของคลื่นสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายในหนึ่งหน่วยปริมาตรและจะเป็นไปตามสมการที่ (2.4)

$$\frac{P}{V_a} = \sigma_d E_{loc}^2 \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\sigma_d$  คือ ค่าความนำของไดอิเล็กตริก (Dielectric conductivity)

สมการที่ (2.5) เมื่อทำการแทนค่าจากสมการที่ (2.5) ลงในสมการที่ (2.4) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.6)

$$\sigma_d = \omega \varepsilon' \varepsilon_0 \tan \delta \quad (2.5)$$

$$\frac{P}{V_a} = \omega \varepsilon' \varepsilon_0 \tan \delta E_{loc}^2 \quad (2.6)$$

ในกรณีของคลื่นภายในตัวกลางที่มีความแตกต่างจากคลื่นที่ให้จากภายนอก โดยที่คลื่นเดินทางภายในตัวกลางในทิศทาง Z สามารถได้กำลังงานของคลื่นภายในตัวกลางดังสมการที่ (2.7)

$$P_{(z)} = P_0 e^{-2\alpha z} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $P_0$  คือ กำลังงานคลื่นที่ตกกระทบในตัวกลาง  
 $\alpha$  คือ ค่าคงที่ของการลดทอนพลังงานคลื่นในไดอิเล็กตริก

ในกรณีที่พิจารณาสนามที่เคลื่อนที่ในระยะทาง  $d_1$  สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.8) ถ้าพิจารณาสมการ (2.8) ใหม่จะได้ความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (2.9)

$$\int_0^{d_1} e^{-2\alpha z} dz = \frac{1}{1\alpha} (1 - e^{-2\alpha d_1}) \quad (2.8)$$

$$\frac{P(d_1)}{V_a} = \omega \varepsilon' \varepsilon_0 \tan \delta E_{loc}^2 \frac{1}{2\alpha} (1 - e^{-2\alpha d_1}) \quad (2.9)$$



สำหรับการพิจารณาเกิดความร้อนภายในตัวกลางของวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีการแพร่กระจายของความร้อนภายในตัวกลางด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การนำ (Conduction) การพา (Convection) และการแผ่ (Radiation) แต่ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะการแพร่กระจายของความร้อนโดยการนำและการแผ่เท่านั้น การเกิดความร้อนเนื่องจากคลื่นความถี่ภายในตัวกลางจะสามารถอธิบายได้ด้วยรูปแบบสมการมาตรฐานของสมการการส่งถ่ายความร้อน โดยวัสดุไดอิเล็กตริกจะแปลงพลังงานไฟฟ้าที่ผ่านความถี่วิทยุให้เป็นพลังงานความร้อน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการทำอันตรกิริยากันระหว่างพลังงานและวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กตริกที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่มีขั้วและมีความสามารถในการเหนี่ยวนำคลื่นความถี่ให้เกิดเป็นความร้อนได้ ซึ่งค่ากำลังที่ดูดซับต่อหนึ่งหน่วยมวล (Power absorbed per unit mass,  $P$ ) สามารถหาได้จาก การแทนค่าจากสมการที่ (2.2) ลงในสมการที่ (2.6) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{P}{V_a} = \omega \epsilon' \epsilon_0 (\epsilon'' / \epsilon') E_{loc}^2$$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาในรูปของตัวกลางใด ๆ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.10)

$$P = 5.563 \times 10^{-11} f \epsilon'' E_{loc}^2 \quad (2.10)$$

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

ในการใช้งานคลื่นความถี่สนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อคลื่นเดินทางเข้ามาในตัวกลางการหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในตัวกลางโดยวิธีการวิเคราะห์เป็นวิธีการที่ยากมาก แต่อาจจะทำได้โดยการวัดหรือการประมาณโดยวิธีทางแบบจำลองเชิงเลข (Numerical modeling) โดยที่ค่ากำลังที่ดูดซับต่อหนึ่งหน่วยมวล (Power absorbed per unit mass,  $P$ ) จะเป็นตัวบอกรถึงการวัดค่ากำลังงานที่แผ่กระจายอยู่ในตัวกลาง และในการคำนวณหาอุณหภูมิสูงขึ้นก็สามารถหาได้จากสมการที่ (2.11)

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{P}{\rho C_p} \quad (2.11)$$

โดยที่	$C_p$	คือ ค่าความร้อนจำเพาะ ( $J / kg \cdot ^\circ C$ )
	$\rho$	คือ ความหนาแน่นของมวลวัสดุ ( $kg / m^3$ )
	$\Delta t$	คือ เวลาที่เปลี่ยนแปลง ( $s$ )
	$\Delta T$	คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในวัสดุ ( $^\circ C$ )

สำหรับความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นความถี่วิทยุและไมโครเวฟนั้น พลังงานจะลดลง  $1/e^\circ$  ( $e = 2.718$ ) ของพลังงานที่ป้อนเข้าไปในพื้นที่ผิวของวัสดุที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกซึ่งโดยทั่วไปแล้วพลังงานของคลื่นความถี่วิทยุจะสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในพื้นที่ผิวของตัวกลางได้มากกว่าคลื่นความถี่ย่านไมโครเวฟ เนื่องจากคลื่นวิทยุมีความถี่ต่ำและมีความยาวคลื่นมากกว่าคลื่นไมโครเวฟ ดังนั้นความถี่จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในลำดับต้น ๆ ที่ต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับวัสดุที่ต้องการนำมาใช้งาน โดยพิจารณาได้จากทะลุผ่านวัสดุของคลื่น ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

โดยที่	$d_p$	คือ ความลึกของการทะลุทะลวง
	$c$	คือ ความเร็วแสงในอวกาศว่าง ( $3 \times 10^8 m/s$ )

## 2.4 การส่งผ่านความร้อน

สำหรับการพิจารณากำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดความร้อนภายในวัสดุที่เป็นไดอิเล็กตริกหรือวัสดุที่มีการสูญเสีย โดยตัวกลางที่มีการสูญเสียดังกล่าวนี้สามารถทำให้เกิดความร้อนได้ เมื่อมีพลังงานมากระตุ้นซึ่งอยู่ในรูปของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง โดยกลไกความร้อนที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปกระตุ้นอนุภาคที่มีสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือประจุไฟฟ้าที่อยู่ภายในตัวกลางนั้นจากสภาวะสมดุล ทำให้เกิดเป็นสภาพเป็นไดโพลที่มีผลต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระตุ้นให้เกิดการโพลาไรซ์ตามทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้น ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระตุ้นเป็นผลทำให้เกิดการกระจาย



กำลังงานในรูปของความร้อนภายในตัวกลางที่มีการสูญเสีย โดยอีกปรากฏการณ์หนึ่งที่เกิดควบคู่กันคือ ตัวกลางที่เกิดการสูญเสียสามารถทำให้เกิดความร้อนโดยตรงจากการนำไฟฟ้า เนื่องจากการกระจายตัวของประจุไฟฟ้าภายใต้อิทธิพลของการกระตุ้นจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกและทำให้เกิดเส้นทางการนำไฟฟ้าขึ้น โดยสามารถพิจารณาได้จากสมการพื้นฐานของแมกซ์เวลล์ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งนำไปสู่การคำนวณหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นภายใต้เงื่อนไขว่าเป็นตัวกลางที่มีการสูญเสียชนิดเดียวและมีการส่งผ่านความร้อนโดยการนำความร้อน (heat conduction) ภายในตัวกลางที่มีการสูญเสียที่มีการพาความร้อนที่บริเวณผิวของตัวกลางที่มีการสูญเสีย และไม่เกิดการระเหยของน้ำกลายเป็นไอ (มวลไม่เปลี่ยนแปลง) โดยแหล่งกำเนิดอื่นที่ทำให้เกิดการโพลาริเซชันมาจากประจุไฟฟ้าที่บริเวณผิวของตัวกลางที่แตกต่างกับประจุไฟฟ้าในอากาศหรือการโพลาริเซชันของแมกเวลล์ (Maxwell-wagner polarization) ซึ่งโครงสร้างของการโพลาริเซชันของแมกเวลล์นั้นจะมีลักษณะเป็น การเปลี่ยนแปลงสลับกลับไปมาของการโพลาริเซชันเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงสลับทิศทางกลับไปกลับมาอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นพื้นฐานของการเกิดความร้อนโดยใช้คลื่นความถี่สูง ซึ่งการแพร่กระจายพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อจะทำให้เกิดความร้อนแก่วัตถุใด ๆ สามารถแสดงด้วยสมการการส่งผ่านความร้อน (heat transport equation) (Metaxas et al., 1983; ดวงอาทิตย์ ศรีมูล, 2544; ชาญชัย ทองโสภณ, 2545) แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\rho C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = 5.563 \times 10^{-11} f \varepsilon'' E_{loc}^2 \quad (2.13)$$

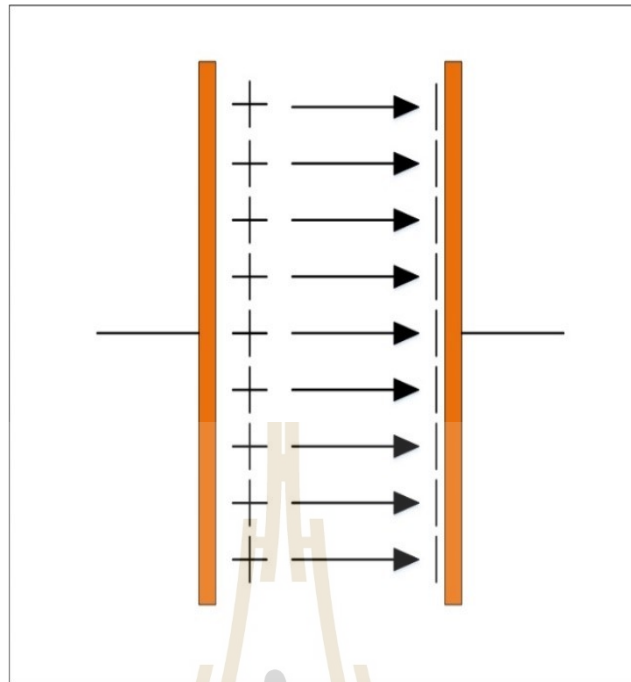
โดยที่	$E_{loc}$	คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า ( $V/m$ )
	$f$	คือ ความถี่ ( $Hz$ )
	$\varepsilon''$	คือ ปัจจัยที่มีการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor)
	$C_p$	คือ ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ( $J/kg \cdot ^\circ C$ )
	$\rho$	คือ ค่าความหนาแน่นของมวลวัสดุ ( $kg/m^3$ )
	$\Delta t$	คือ ระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลง ( $s$ )
	$\Delta T$	คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในวัสดุ ( $^\circ C$ )

## 2.5 การให้ความร้อนด้วยคลื่นสนามไฟฟ้า

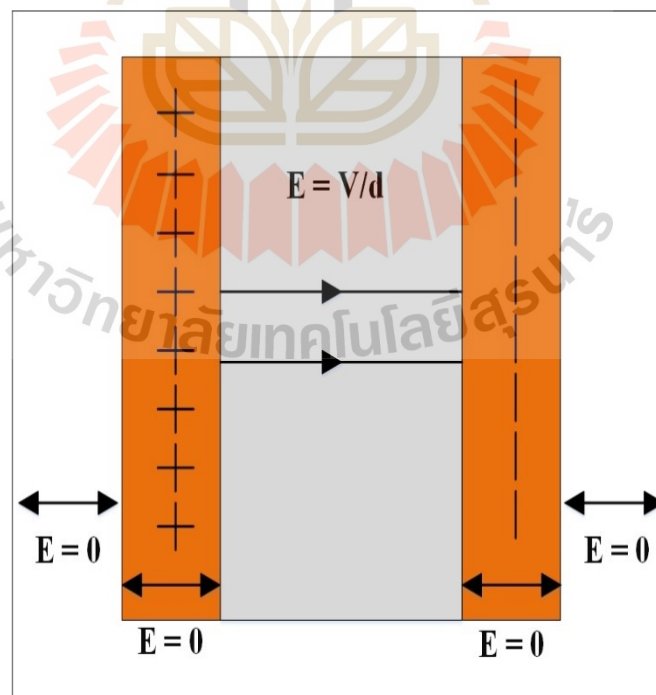
จากเนื้อหาในข้างต้นได้กล่าวไว้ว่าการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าที่สามารถทำให้เกิดความร้อนได้ โดยการป้อนคลื่นสนามไฟฟ้าเข้าไปในวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นผลของการทำให้เกิดความร้อน โดยเกิดจากจากความสามารถของสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดโพลาไรซ์ของประจุภายใน ไดอิเล็กตริกเมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสติดแล้ว สนามไฟฟ้าสติดจะทำให้เกิดโพลาไรซ์ขึ้น แต่ในกรณีที่เป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสลับพลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสลับนี้จะทำให้เกิดโพลาไรซ์ นั่นคือขั้วไฟฟ้าที่เป็นขั้วบวกและขั้วลบพยายามเรียงตัวกันตามทิศทางของคลื่นสนามไฟฟ้าที่ส่งผ่านเข้าไป ซึ่งทำให้เกิดการเสียดสีกันของโมเลกุล เกิดเป็นความร้อนกระจายทั่วภายในเนื้อวัสดุหรือเป็นการถ่ายเทพลังงานจากคลื่นสนามไฟฟ้าไปยังวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งสามารถทำให้เกิดการแปลงผันพลังงานจากสนามไฟฟ้าเป็นความร้อนได้ ดังนั้นการศึกษาทฤษฎีของการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าจึงเป็นอีกหัวข้อที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ผลของการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อวัสดุไดอิเล็กตริก สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอการใช้ตัวสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตสำหรับการวิเคราะห์การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ซึ่งจะได้กล่าวถึงทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าของตัวสร้างคลื่นแบบแผ่นเพลตในหัวข้อต่อไป

### 2.5.1 ลักษณะการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าของตัวสร้างคลื่นแบบแผ่นเพลต

การพิจารณาตัวกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าสำหรับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากเป็นส่วนที่จะแพร่กระจายพลังงานสนามไฟฟ้าเข้าสู่วัสดุไดอิเล็กตริกให้มีความเหมาะสม ดังนั้นจึงต้องวิเคราะห์ห้ขนาดและปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้า จากงานวิจัยที่ผ่านมาตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต เป็นลักษณะรูปแบบการให้ความร้อนนั้นมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีการกระจายสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลตมากที่สุด โดยผ่านวัสดุตัวกลางซึ่งเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก โดยลักษณะของตัวปล่อยคลื่นแบบแผ่นเพลตจะมีคุณสมบัติเป็นเหมือนตัวเก็บประจุ และมีทิศทางกรไหลของคลื่นสนามไฟฟ้าจากขั้วอิเล็กโทรดประจุบวกไปยังประจุลบ ซึ่งรูปแบบของตัวสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต แสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 โครงสร้างตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต



รูปที่ 2.5 โครงสร้างตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตที่ประดิษฐ์โดยโหนดไดอิเล็กตริก

จากรูปที่ 2.5 และ 2.6 เป็นลักษณะตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต โดยสามารถออกแบบได้จากสมการที่ (2.13) ดังนี้

$$C = \frac{k\epsilon_0 A}{d} \quad (2.14)$$

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

ลักษณะของการกระจายสนามไฟฟ้าจะมีการกระจายตัวจากแรงดันที่มีขั้วบวกไปยังขั้วลบของแผ่นเพลต โดยความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นคำนวณได้จากสมการที่ (2.15)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{V}{d} \quad (2.15)$$

โดยที่	$\epsilon$	คือ ค่าความซึมซาบได้ของแผ่นเพลต
	$V$	คือ แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างแผ่นเพลต
	$d$	คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลต
	$\sigma$	คือ ค่าความนำของวัสดุไดอิเล็กตริก

### 2.5.2 ลักษณะของตัวเหนี่ยวนำ

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำจะต้องไม่เกิดการหักล้างสนามแม่เหล็ก จากเหตุผลข้างต้นตัวเหนี่ยวนำจะต้องสามารถทำให้เกิดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในพื้นที่ที่ต้องการให้ความร้อนได้ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้ (1) A helical solenoid จะให้ความร้อนแก่ชิ้นงานภายในตัวเหนี่ยวนำ (2) A pancake coil จะให้ความร้อนเฉพาะบริเวณผิวหน้าด้านหนึ่งของชิ้นงาน (3) An internal coil จะให้ความร้อนบริเวณรอบนอกของขดลวดเหนี่ยวนำโดยทั่วไปแล้วขดลวดเหนี่ยวนำนิยมจากลวด โดยการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำนั้นจะพิจารณาจาก 3 ปัจจัยดังนี้

1) จำนวนรอบของลวดเหนี่ยวนำ ถ้าตัวเหนี่ยวนำมีจำนวนรอบที่มากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าก็จะมีค่ามากขึ้นตามจำนวนของขดลวด ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำจึงมีค่าสูงขึ้น

2) พื้นที่ของลวดเหนี่ยวนำ ถ้าลวดเหนี่ยวนำมีพื้นที่มากขึ้นเป็นผลให้สนามแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำจึงมีค่าสูงขึ้น

3) ความยาวของลวดเหนี่ยวนำ ถ้ากำหนดให้ความยาวของลวดเท่ากันพัน 10 รอบ โดยการขยายพื้นที่ให้ห่างออกไปจะทำให้สนามแม่เหล็กมีค่าลดลง แต่ในทางกลับกันถ้าหากบีบขดลวดเหนี่ยวนำให้ชิดกันจะทำให้สนามแม่เหล็กเสริมกันทำให้สนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้น เป็นผลให้ค่าเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำสามารถหาได้จาก

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

เมื่อ  $L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำ ( $H$ )

$\mu$  คือ ค่าความซึมซาบได้

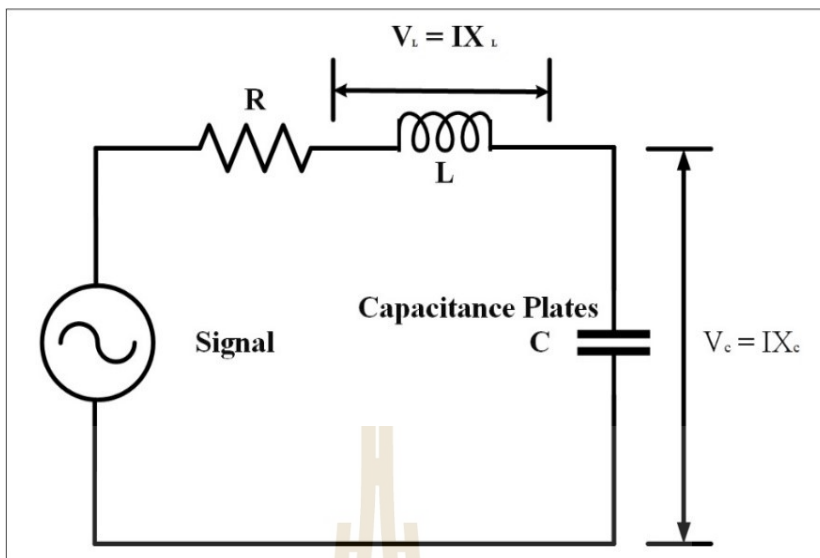
$N$  คือ จำนวนรอบของขดลวด

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัด ( $m^2$ )

$l$  คือ ความยาว ( $m$ )

### 2.5.3 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

เนื่องจากโวลต์ในงานวิจัยนี้เป็นลักษณะแบบแผ่นเพลต จึงได้ทำการใช้หลักการของวงจรเรโซแนนซ์เพื่อทำการแมตซ์ซิ่ง เพื่อให้ได้กำลังงานที่ตกคร่อมระหว่างแผ่นเพลตมากที่สุด โดยลักษณะพฤติกรรมทางไฟฟ้าของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมจะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่งเรโซแนนซ์ต่ำที่สุด ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านวงจรจะมีค่ามากที่สุดทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าที่โวลต์มีค่าสูงสุด วิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าทำได้โดยการลดแรงดันที่ทำการจ่าย หรือการเปลี่ยนความถี่ให้สูงหรือต่ำกว่าตำแหน่งเรโซแนนซ์ สำหรับค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรที่ต่อแบบอนุกรมกันด้วย RLC แสดงดังรูปที่ 2.7 และการหาค่าดังสมการที่ (2.17)



รูปที่ 2.6 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2.17}$$

- เมื่อ  $f$  คือ ความถี่
- $L$  คือ ค่าเหนี่ยวนำ
- $C$  คือ ค่าเก็บประจุ

จากสมการ 2.17 จะพบว่า ค่าอิมพีแดนซ์จะขึ้นอยู่กับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า เนื่องจากค่า  $X_L = 2\pi fL$  และ  $X_C = 1/2\pi fc$  โดยผลรวมของค่ารีแอกแตนซ์จะมีค่าเท่ากับ  $(X_L - X_C)$  ดังนั้นถ้าความถี่ของแหล่งจ่ายไฟมีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์จะมีผลทำให้ค่ารีแอกแตนซ์รวมมีค่าเป็นศูนย์ ( $X_L = X_C$ ) และอิมพีแดนซ์รวมของวงจรจะมีค่าเท่ากับค่าความต้านทาน ( $Z = R$ )

## 2.6 สรุป

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกสิ่งสำคัญคือต้องเข้าใจถึงหลักการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก รวมถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของโพลดิในแผ่นเพลตสำหรับการให้

ความร้อนแก่ไดโอดีล็คทริก ซึ่งในบทนี้ได้อกล่าวถึง ทฤษฎีพื้นฐานและกลไกการให้ความร้อนแบบ ไดโอดีล็คทริกซึ่งได้อธิบายถึงโครงสร้างพื้นฐานการให้ความร้อนแบบ ไดโอดีล็คทริก หลักการให้ความ ร้อนแบบ ไดโอดีล็คทริก จะอธิบายถึงสมการการเกิดความร้อนและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการให้ ความร้อนและหลักการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้า เพื่อให้ทราบถึงพลังงานที่จะเกิดขึ้นบนตัวปล่อย คลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต และกล่าวถึงหลักการให้ความร้อนด้วยคลื่นสนามไฟฟ้า ซึ่ง ประกอบด้วย ลักษณะการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าของตัวสร้างคลื่นแบบแผ่นเพลต ลักษณะของตัว เหนี่ยวนำรวมถึงวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม ทั้งนี้เพื่อนำมาซึ่งการวิเคราะห์การออกแบบเครื่อง และทดสอบให้ประสิทธิภาพมากที่สุด



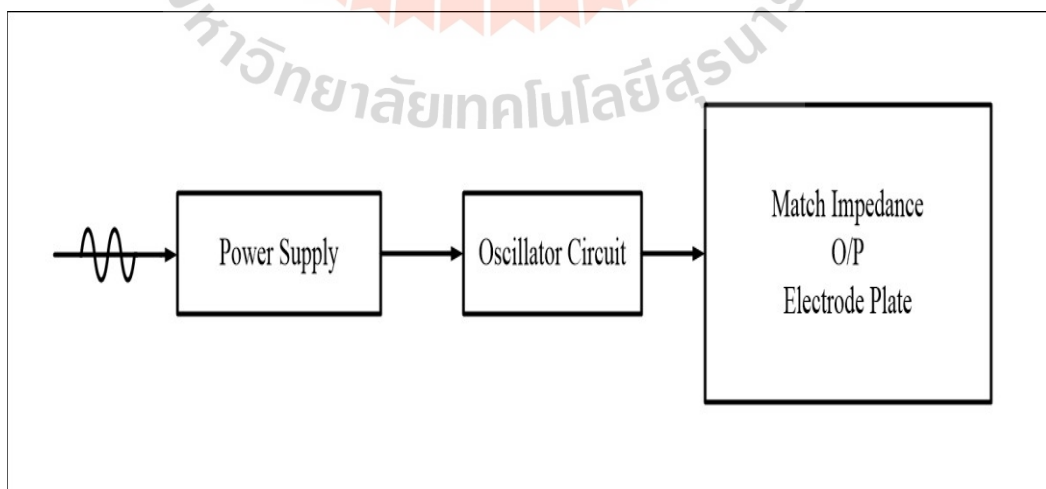


### บทที่ 3

## การออกแบบเครื่องให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก

### 3.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้จะได้กล่าวถึงการวิเคราะห์และการออกแบบเครื่องให้ความร้อนแบบแก่ไดอิเล็กตริก ซึ่งโหลดไดอิเล็กตริกในงานวิจัยคือข้าวสาร โดยเครื่องให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นความถี่ย่านวิทยุออกแบบเพื่อประยุกต์ใช้สำหรับกำจัดมอดและไข่มอดในข้าวสาร ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุจากหลอดไตรโอดเบอร์ 7T69RB เป็นแหล่งกำเนิดความถี่ย่านวิทยุกำลังงานสูงสำหรับให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก ซึ่งประกอบด้วยการออกแบบวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุเพื่อเป็นแหล่งจ่ายกำลังงานสูงย่านความถี่วิทยุ การออกแบบวงจรแมตซ์ซิ่งและการออกแบบแผ่นเพลตสำหรับให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก โดยมีบล็อกไดอะแกรมของเครื่องสำหรับให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริกแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งแต่ละส่วนของเครื่องให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริกนั้นใช้ทฤษฎีและการคำนวณการออกแบบจากสมการในบทที่ 2 เพื่อออกแบบให้เหมาะสมที่สุด ซึ่งรายละเอียดของการออกแบบเครื่องให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริกได้อธิบายในบทนี้ ทำการออกแบบความถี่วิทยุที่เหมาะสมในการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริกสามารถนำไปใช้งานได้โดยมีประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมเครื่องให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก

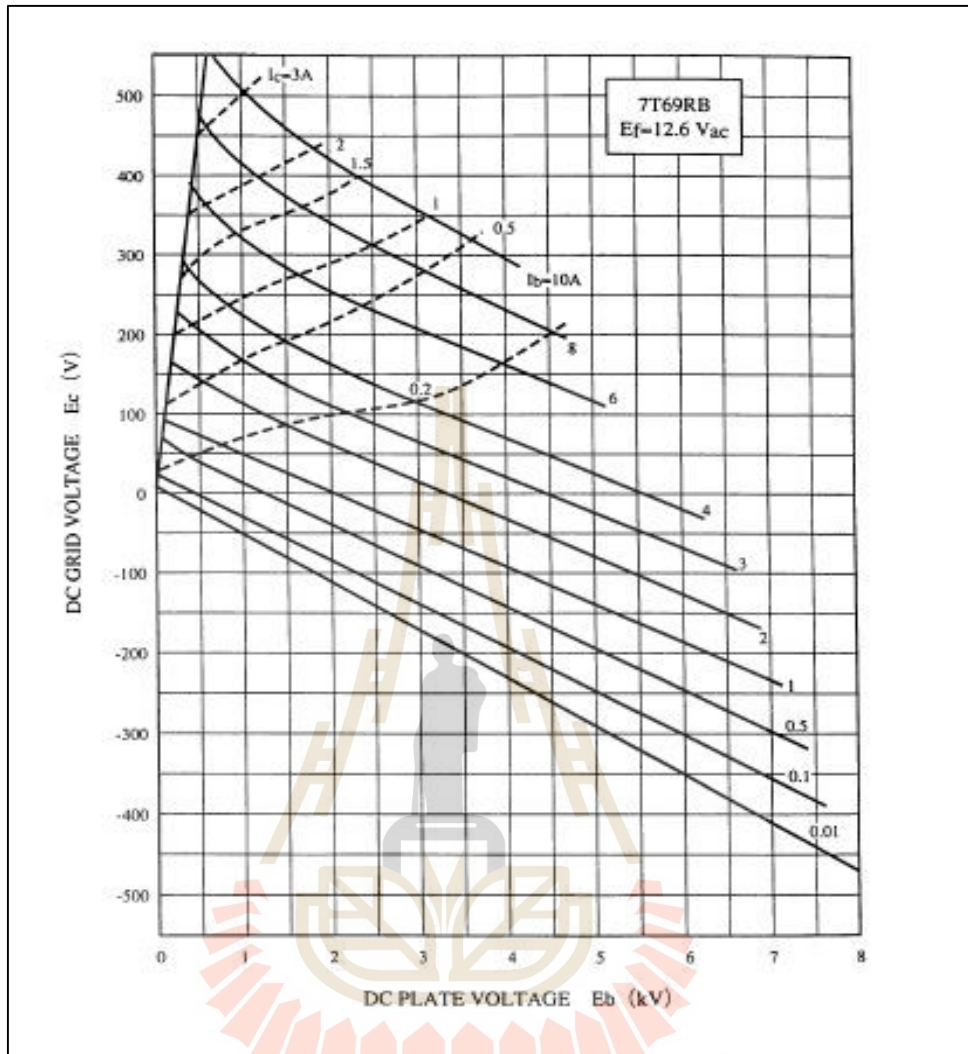
### 3.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของหลอดไตรโอด

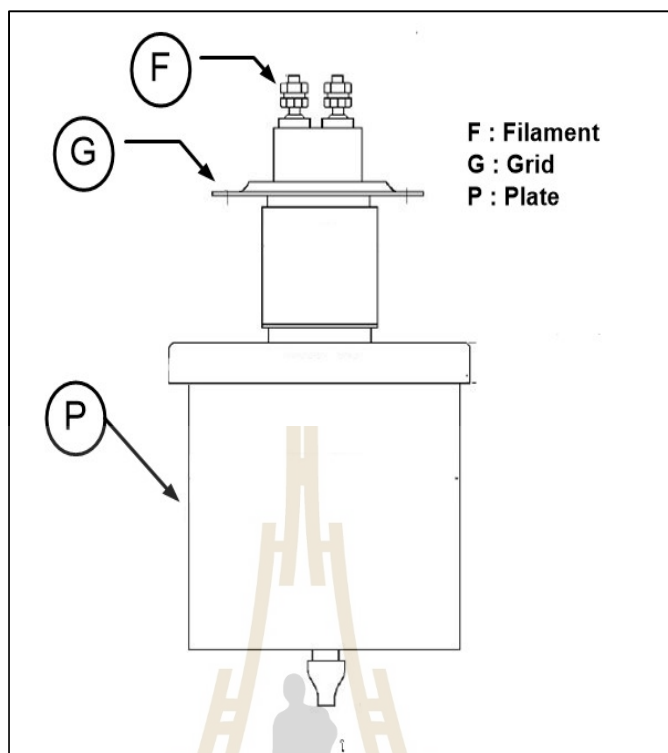
สำหรับในหัวข้อนี้จะทำการกล่าวถึงการวิเคราะห์และการออกแบบเครื่องให้ความร้อนแก่ไดโอดเล็กทรอนิกส์แบบแผ่นเพลตโดยใช้หลอดไตรโอดในการให้ความร้อน เนื่องจากการให้ความร้อนแก่ไดโอดเล็กทรอนิกส์นั้น ต้องใช้แหล่งจ่ายกำลังงานสูงส่งผ่านพลังงานไปยังโหนดไดโอดเล็กทรอนิกส์ โดยงานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้หลอดไตรโอดเบอร์ 7T69RB เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่กำลังงานสูงในการให้ความร้อนแก่ไดโอดเล็กทรอนิกส์ โดยมีข้อมูลจำเพาะของหลอดอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับการออกแบบดังตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 และมีโครงสร้างของหลอดไตรโอด แสดงดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของหลอดไตรโอดเบอร์ 7T69RB

<b>Electrical:</b>			
Filament: Thoriated tungsten			
Voltage.....	12.6	V	
Current .....	35	A	
Transconductance (I <sub>b</sub> = 0.8 A) .....	13	mS	
Amplification factor .....	21	-	
Direct interelectrode capacitances			
Grid-Plate.....	13	pF	
Grid-Filament .....	18	pF	
Plate-Filament .....	0.7	pF	
Frequency for maximum ratings .....	110	MHz	
<b>Mechanical:</b>			
Overall dimensions: (see outline)			
Length .....	235	mm	
Diameter .....	128	mm	
Weight (Approx.) .....	2.8	kg	
Operating position: .....	Vertical		
<b>Cooling:</b>			
Anode: Forced air (1)			
Min. air flow .....	7	m <sup>3</sup> / min	
Min. static flow loss .....	35	mm water	
Max. incoming air temperature .....	45	°C	
Max. temperature of ceramic to metal seals (2).....	250	°C	
Max. temperature of radiator.....	250	°C	
<b>Absolute Maximum Ratings</b>			
Class C Telegraphy			
	Continuous	Intermittent (3)	
DC plate voltage .....	6	8	kV
DC plate current .....	2	2	A
DC grid current .....	0.5	0.6	A
Plate dissipation .....	4500	5500	W
Grid dissipation.....	150	230	W

ตารางที่ 3.2 ตารางข้อมูลจำเพาะการไบอัสไตรโอดเบอร์ 7T69RB



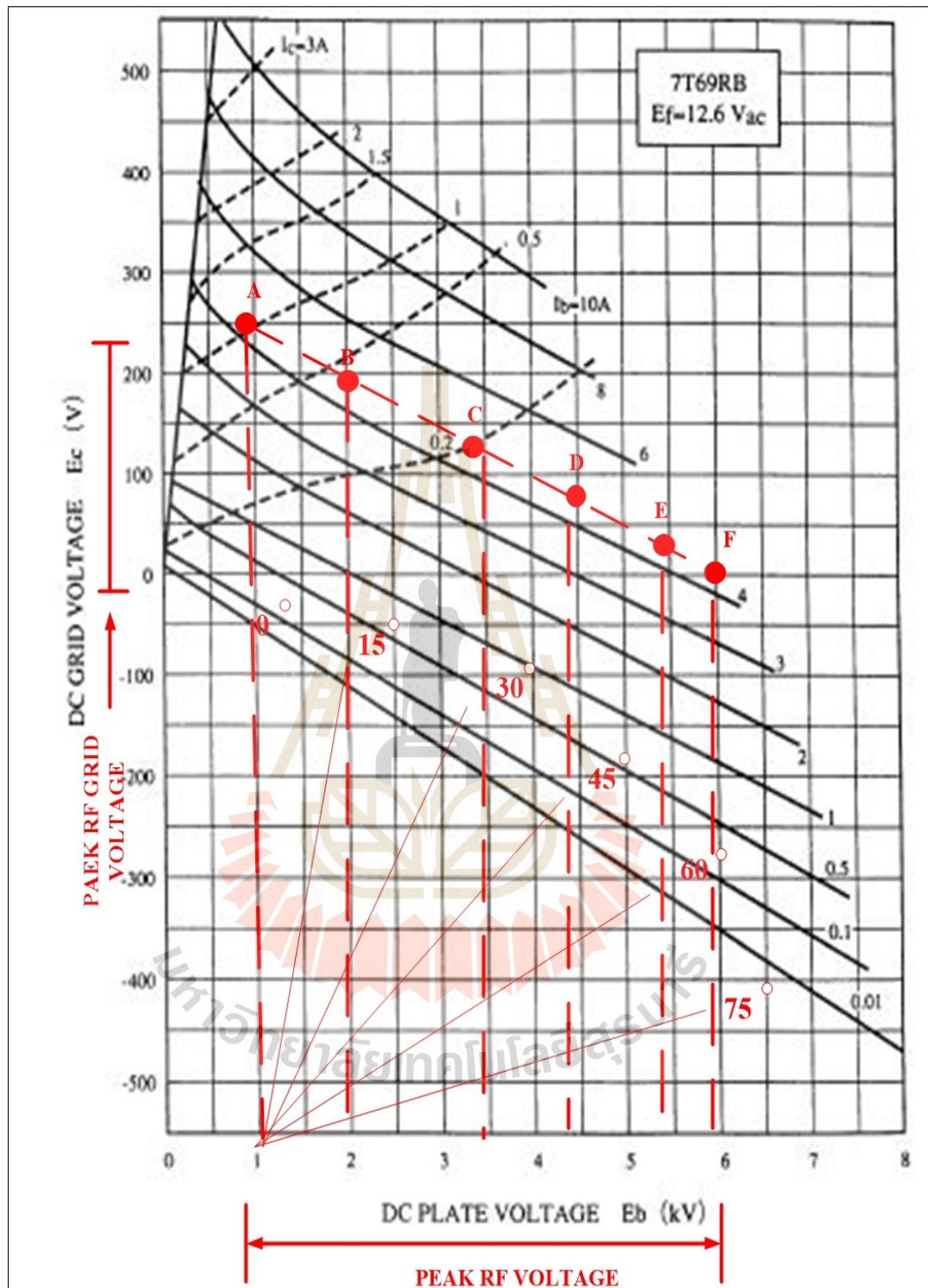


รูปที่ 3.2 โครงสร้างของหลอดไตรโอดเบอร์ 7T69RB

จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 เป็นตารางข้อมูลจำเพาะของหลอดไตรโอดเบอร์ 7T69RB ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่ย่านวิทยุ สำหรับให้ความร้อนแก่ไดโอดอิเล็กทรอนิกส์ และในรูปที่ 3.2 หลอดไตรโอดที่ใช้ในการกำเนิดสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ นั้น ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้วด้วยกัน คือ ขั้วฟิลาเมนต์ (Filament) หรือแคโทด (Cathode), ขั้วกริด (Grid) และขั้วเพลต (plate) หรือแอโนด (Anode) การทำงานของหลอดไตรโอดนั้น อิเล็กตรอนจะถูกปล่อยจากขั้วฟิลาเมนต์ (Filament) หรือแคโทด (Cathode) โดยการแผ่รังสีความร้อน (Thermionic Emission) ภายในสุญญากาศทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ซึ่งจะใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ขั้วเพลต (Plate) หรือแอโนด (Anode) เป็นบวกตั้งแต่ 20 โวลต์ ถึงหลายพันโวลต์ โดยอิเล็กตรอนเป็นประจุลบจะถูกดึงดูดเข้ากับขั้วเพลต (Plate) หรือแอโนด (Anode) ซึ่งเป็นประจุบวกไหลผ่านช่องว่างระหว่างเส้นกริด (Grid) ทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนขึ้น ขนาดของกระแสไฟฟ้านี้สามารถควบคุมได้โดยแรงดันไฟฟ้าที่การเสถียรระหว่างแคโทด (Cathode) และกริด (Grid) กริด (Grid) ทำหน้าที่เหมือนประตูสำหรับอิเล็กตรอน แรงดันไฟฟ้าลบที่มากขึ้นบนกริดจะขั้วอิเล็กตรอนออกไป ดังนั้นสัญญาณแปรผันพลังงานต่ำ (AC) ที่ใช้กับขั้วกริดสามารถควบคุมกระแสแอโนดได้

ในอุดมคติกระแสจะไหลไปยังขั้วบวก (Anode) โดยมีแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์กลางกริด (Grid) กระแสแอโนดจะลดลงอย่างต่อเนื่องเนื่องจากกริดถูกทำให้เป็นลบมากขึ้นเมื่อเทียบกับแคโทด (Cathode)

เพื่อให้ทราบถึงกำลังงานและประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องให้ความร้อนแก่อิเล็กทริกจะต้องคำนวณค่าต่าง ๆ เพื่อการออกแบบให้มีประสิทธิภาพในการทำงานมากที่สุดโดยทำการคำนวณจากข้อมูลตารางไบอัสของหลอดไตรโอด สำหรับการออกแบบหลอดไตรโอดเพื่อให้ความร้อนแก่อิเล็กทริกในงานวิจัยนี้นั้น เป็นการออกแบบไบอัสหลอดไตรโอดที่ ขั้วเพลต (plate) หรือแอโนด (Anode) และขั้วกริด (Grid) ซึ่งขั้วกริด (Grid) นั้นจะเป็นตัวควบคุมการไหลของอิเล็กตรอนเปรียบเสมือนประตู ดังนั้นการคำนวณค่าไบอัสจะทำให้ทราบถึงกำลังงานและประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องให้ความร้อนแก่อิเล็กทริก และจากตารางข้อมูลพบว่าที่ ขั้วเพลต (plate) หรือแอโนด (Anode) สามารถไบอัสแรงดันกระแสตรงได้สูงสุดทำงานต่อเนื่องที่ 8 kV ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการใช้แรงดันไบอัสที่ขั้วเพลต 6 kV โดยใช้คลาส C ในการไบอัส ซึ่งการคำนวณจากข้อมูลในตารางที่ 3.2 แสดงการคำนวณดังต่อไปนี้



สำหรับการคำนวณไบอัสของหลอดไตรโอดเพื่อหาประสิทธิภาพในการทำงานของหลอดนั้น จะทำการคำนวณโดยใช้เส้นการทำงาน (Load Line) โดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันเพื่อควบคุมกริด (Grid) ของหลอดไตรโอด ซึ่งการกำหนดเส้นทำงาน (Load Line) โดยในงานวิจัยนี้จะ



การกำหนดแรงดันที่ขั้วเพลต 6 kV และกำหนดแรงดันที่ขั้ว (Grid) 0 V ซึ่งในตารางการคำนวณคือจุด G โดยเส้นการทำงานจะต้องกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของเส้นการทำงาน (Load Line) กำหนดให้จุดตัดกระแสเพลต (Paek Rf Grid Voltage) เพื่อเปิดกริด (Grid) เท่ากับ 250 V จุดเริ่มต้นแรงดันที่ขั้วเพลต 1 kV ซึ่งกำหนดตำแหน่งเป็นจุด A จากนั้นทำการลากเส้นตรงจากจุด A ไปยังจุด G และทำการกำหนดตำแหน่งเพื่อการคำนวณ โดยกำหนดตำแหน่งห่างกันทำมุม  $15^{\circ}$  จาก  $0-75^{\circ}$  (Mojtaba Heydari และคณะ, 2009) และ (“CARE AND FEEDING OF POWER GRID TUBES 5th Edition”, 2003) และได้ตำแหน่ง จาก A-F ซึ่งค่าแต่ละตำแหน่งแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 กระแสที่ขั้วเพลต (Plate) จากมุม  $0-75^{\circ}$

ตำแหน่ง	กระแสเพลต (A)	แรงดันเพลต (kV)
A	4.1	1
B	4.3	2
C	4.3	3.4
D	4.2	4.5
E	4.1	5.2
F	4.1	5.7

เมื่อทำการหาเส้นการทำงานและกำหนดตำแหน่งแล้ว ถัดไปจึงคำนวณค่าต่าง ๆ โดยใช้สมการที่ได้แสดงในบทที่ 2 เพื่อหาประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่อง โดยทำการคำนวณดังต่อไปนี้

กระแสไฟที่ขั้วเพลต (DC plate current) คำนวณได้จาก

$$I_{dc} = \left( \frac{0.5A + B + C + D + E + F}{12} \right)$$

$$I_{dc} = \left( \frac{0.5 * 4.1 + 4.3 + 4.3 + 4.2 + 4.1 + 4.1}{12} \right)$$

$$I_{dc} = 1.92A$$



กระแสเพลตสูงสุด (Peak fundamental plate current) คำนวณได้จาก

$$I_l = \left( \frac{A + 1.93B + 1.73 + 1.41D + E + 0.52F}{12} \right)$$

$$I_l = \left( \frac{4.1 + 1.93 * 4.3 + 1.73 * 4.3 + 1.41 * 4.2 + 0.52 * 4.1}{12} \right)$$

$$I_l = 2.67 A$$

แรงดันเพลตสูงสุด (Peak RF voltage)

$$V_{rf} = 6kV - 1kV$$

$$V_{rf} = 5kV$$

กำลังงานไฟฟ้ากระแสตรงรวม (DC input power)

$$P_{dc} = V_{dc} * I_{dc}$$

$$P_{dc} = 6000 * 1.92$$

$$P_{dc} = 11,520 \text{ W}$$

กำลังงานเอาต์พุต (RF power output)

$$P_o = 0.5 * \text{Peak RF voltage} * \text{Peak fundamental RF current}$$

$$P_o = 0.5 * 5kW * 2.67$$

$$P_o = 6,675 \text{ W}$$

ประสิทธิภาพ (Efficiency)

$$\eta = \frac{RF \text{ power output}}{DC \text{ input power}} 100\%$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_{dc}} 100\%$$

$$\eta = \frac{6,675}{11,520} 100\%$$

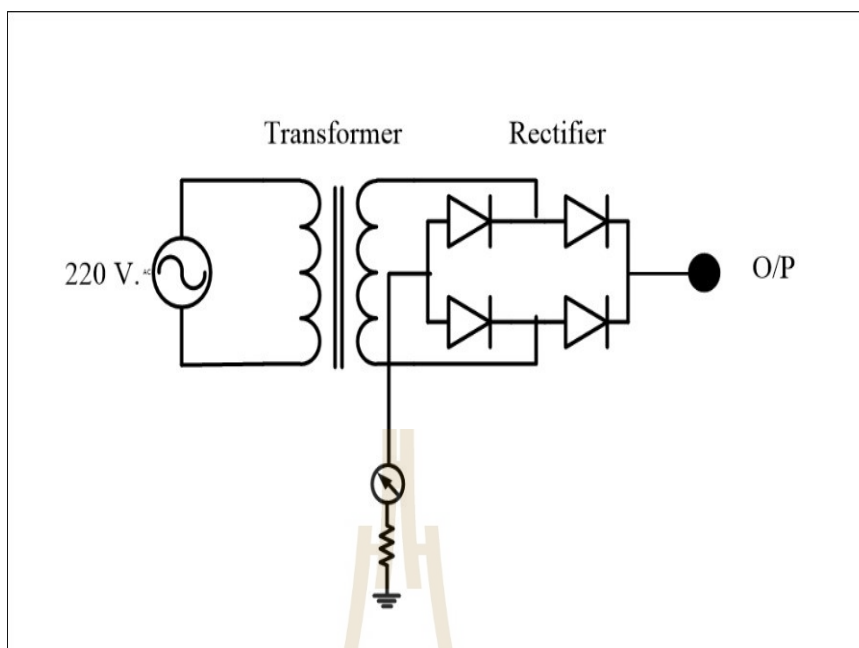
$$\eta = 57.9\%$$

### 3.3 การออกแบบเครื่องให้ความร้อนแก่วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

การออกแบบเครื่องให้ความร้อนแก่วัสดุอิเล็กทรอนิกส์นั้นจะประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ ดังแสดงในบล็อกไดอะแกรมที่ 3.1 ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนแหล่งจ่ายกำลังงาน (Power Supply) ส่วนกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ (Oscillator, 7T69RB) ส่วนการให้ความร้อนแก่วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ (Match Impedance O/P Electrode Plate)

#### 3.3.1 การออกแบบแหล่งจ่ายกำลังงาน

การออกแบบแหล่งจ่ายกำลังงานสูง (Power Supply) สำหรับจ่ายแรงดันให้กับขั้วเพลต (Plate) ของหลอดไตรโอด ซึ่งประกอบไปด้วยหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงและไดโอดกำลังสูง ซึ่งวงจรแสดงแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรแหล่งจ่ายกำลังงาน

จากการวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพในการทำงานของหลอดไดโอดในหัวข้อที่ 3.2 ซึ่งทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อนำมาออกแบบ โดยจากการคำนวณ ผู้วิจัยได้มีการใช้แรงดันกระแสตรงขนาด 6 kV ตามที่ได้มีการคำนวณมา โดยแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงที่จ่ายให้กับขั้วเพลตนั้น ใช้หม้อแปลงกระแสสลับอินพุต 220 V เอาต์พุต 7 kV แสดงดังรูปที่ 3.4 ทำการแปลงแรงดันจากไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรงโดยใช้ไดโอดกำลังสูง (Power diode) แสดงดังรูปที่ 3.5 โดยการออกแบบวงจรกระแสตรงเพื่อจ่ายกำลังงานให้กับขั้วเพลตนั้น เป็นวงจรเรียงกระแสแบบบริจด์ เมื่อคำนวณแรงดัน โดยใช้สมการในบทที่ 2 จะได้แรงดันเท่ากับ 6.3 kV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณพารามิเตอร์ในการไบอัสหลอดไดโอด และแหล่งจ่ายกำลังงานที่ติดตั้งแล้วแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.4 หม้อแปลงแรงดันสูง



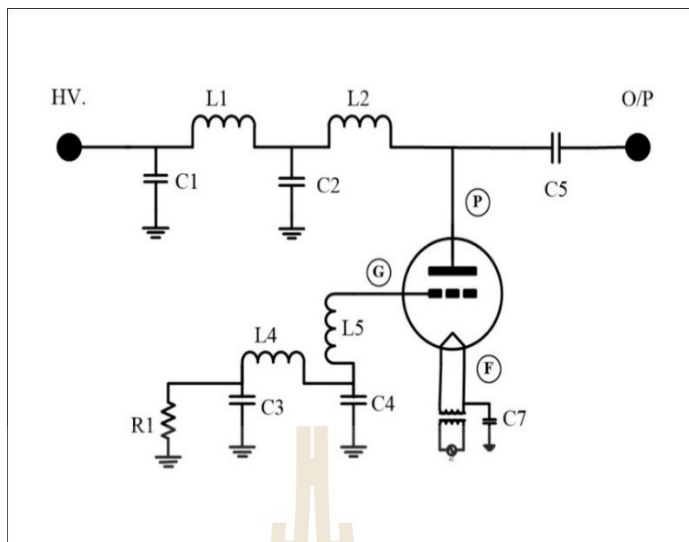
รูปที่ 3.5 ไดโอดกำลัง



รูปที่ 3.6 แหล่งจ่ายกำลังงานที่ติดตั้งแล้ว

### 3.3.2 การออกแบบชุดกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ

การออกแบบชุดกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ (Oscillator) เป็นการออกแบบสร้างคลื่นความถี่ย่านความถี่วิทยุ เพื่อเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่สูงสำหรับให้ความร้อนแก่ไดโอดเล็กทรอนิกส์ วงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุแสดงดังรูปที่ 3.7 (Oscillator Circuit) โดยในงานวิจัยนี้ใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่ย่านวิทยุจากหลอดไตรโอดเบอร์ 7T69RB ซึ่งใช้ข้อมูลตามตารางข้อมูลจำเพาะของหลอดไตรโอด ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ในการออกแบบ โดยหลอดไตรโอดที่ใช้ในการกำเนิดสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุนั้น ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้วด้วยกันคือ ขั้วฟิลาเมนต์ (Filament) หรือแคโทด (Cathode), ขั้วกริด (Grid) และขั้วเพลต (plate) หรือแอนโนด (Anode) และวงจรที่ได้ออกแบบชุดกำเนิดคลื่นความถี่ย่านความถี่วิทยุสำหรับให้ความร้อนแก่ไดโอดเล็กทรอนิกส์แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผนผังวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ

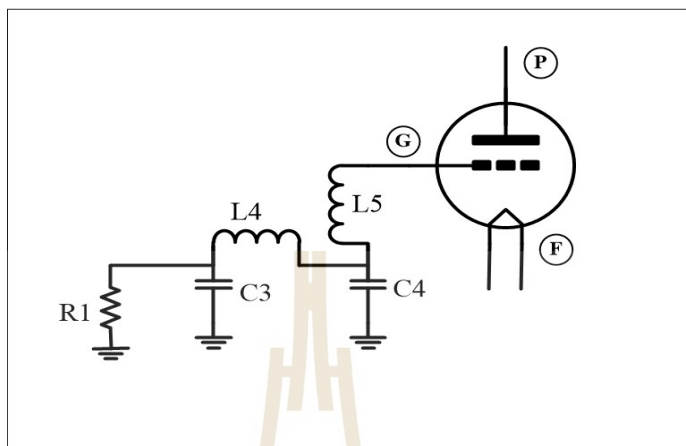
จากการทำการของหลอดไตรโอดผู้วิจัยจึงได้ออกแบบส่วนต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลจำเพาะของหลอดไตรโอดและการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการออกแบบ โดยทำการออกแบบแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

- **ขั้วฟิลาเมนต์ (Filament) หรือแคโทด (Cathode)** เป็นขั้วสำหรับปล่อยอิเล็กตรอน โดยผู้วิจัยทำการออกแบบตามตามร่างข้อมูลจำเพาะของหลอดไตรโอดโดยใช้ข้อมูลจำเพาะ ซึ่งกำหนดไว้ว่าให้ใช้แหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ ขนาด 12.6 V. 36 A. แหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แหล่งจ่ายแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ

- **ขั้วกริด (Grid)** เป็นขั้วสำหรับควบคุมการไหลของอิเล็กตรอน เพื่อให้กำลังงานเอาต์พุตของหลอดของหลอดอิเล็กทรอนิกส์ทรอน วงจรแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วงจรไบอัสขั้วกริด (Grid)

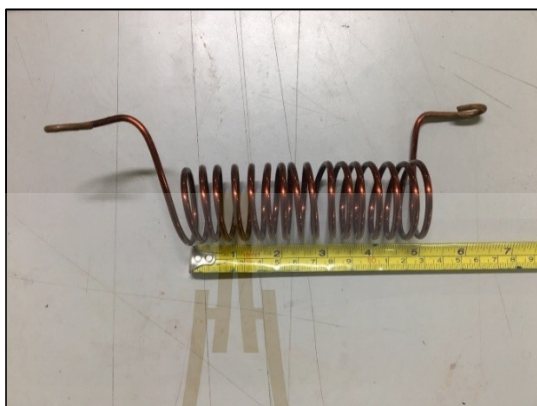
สำหรับการออกแบบที่ขั้วกริดนั้นจะใช้พารามิเตอร์ที่ได้คำนวณในหัวข้อที่ 3.2 ในการออกแบบนั้นเป็นการไบอัสขั้วกริด (Grid) ซึ่งทำการไบอัสด้วยแอมป์พลีฟายคลาส C ซึ่งการไบอัสขั้วกริดนั้นจะประกอบด้วย ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (Nguyen Hay, Pham Van Kien, Le Anh Duc al., 2018) โดยใช้ R ไบอัส 4 k $\Omega$  โดยวงจรในการไบอัสขั้วกริด (Grid) นั้นแสดงดังรูปที่ 3.9 ซึ่งประกอบด้วย  $R_1, L_4, L_5, C_3, C_4$  โดยตัวต้านทานที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นตัวที่ทนกำลังงานสูง ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ตัวต้านทานที่ทนกำลังงานได้สูงสุด 2 kW แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ตัวต้านทานกำลังงานสูง



ในส่วนของตัวเหนี่ยวนำเช่นเดียวกับตัวต้านทานจะต้องทนแรงดันและกระแสสูง โดยในส่วนของตัวเหนี่ยวนำได้ใช้ทองแดงเบอร์ 10 ในการสร้างตัวเหนี่ยวนำ โดยการออกแบบตัวเหนี่ยวนำได้คำนวณค่าตามสมการในบทที่ 2 โดยตัวเหนี่ยวนำที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.11

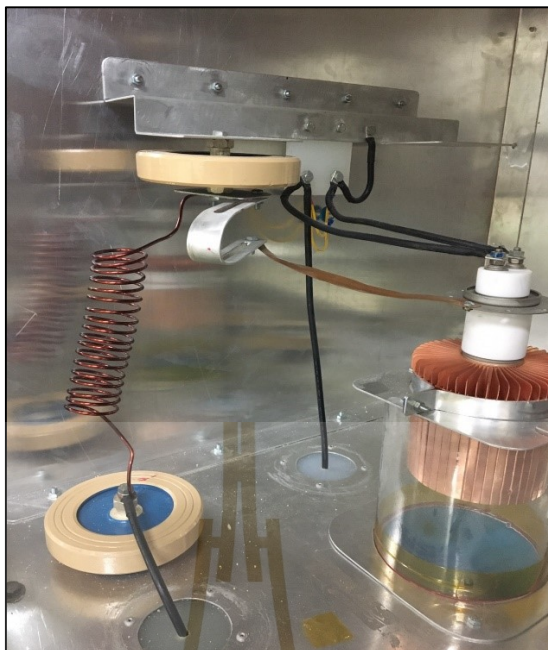


รูปที่ 3.11 ตัวเหนี่ยวนำ

และตัวเก็บประจุนั้น ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวเก็บประจุทนกำลังงานสูงเช่นเดียวกับตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับการออกแบบหลอดไฟ LED โดยเฉพาะ (Stray field Limited, England, 2007. Radio Frequency Drying Systems for the Textile Industry Handbook.) แสดงดังรูปที่ 3.12 และวงจรไบอัสซั้วกริด (Grid) ที่ทำการติดตั้งแล้วแสดงดังรูปที่ 3.13

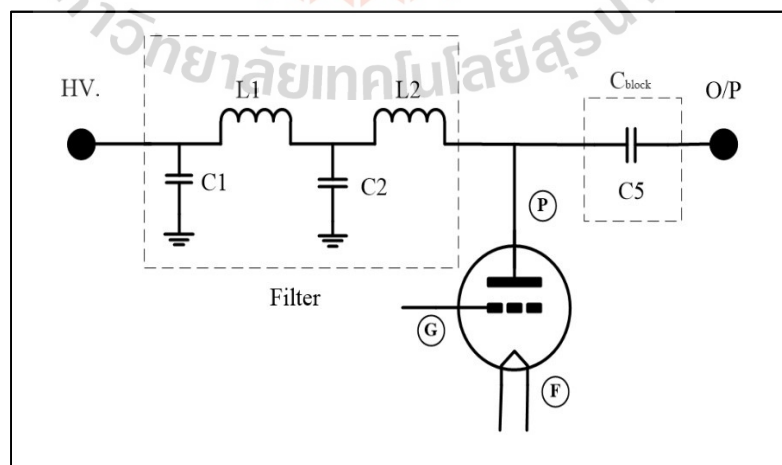


รูปที่ 3.12 ตัวเก็บประจุ



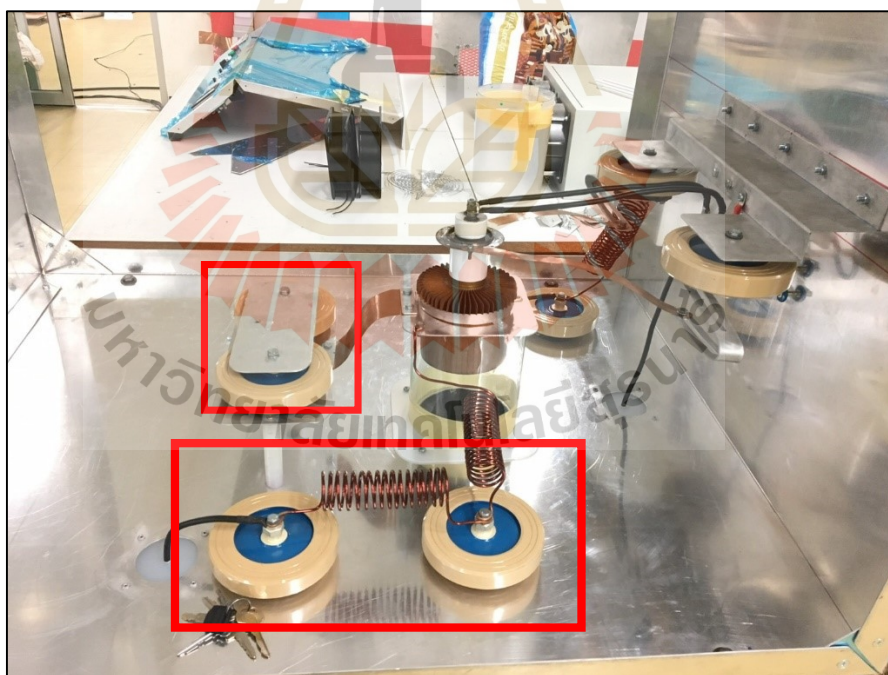
รูปที่ 3.13 วงจรไบอัสซ์กริด (Grid) ที่ทำการติดตั้งแล้ว

- **ขั้วเพลต (Plate) หรือแอโนด (Anode)** ออกแบบโดยใช้แรงดันไฟแรงดันกระแสตรงขนาดประมาณ 6.3 kV ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ การออกแบบแหล่งจ่ายกำลังงาน (Power supply) ซึ่งถัดมาจึงได้ทำการออกแบบวงจรกรองความถี่วงจรป้องกันสัญญาณกระแสตรงดังแสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วงจรกรองความถี่

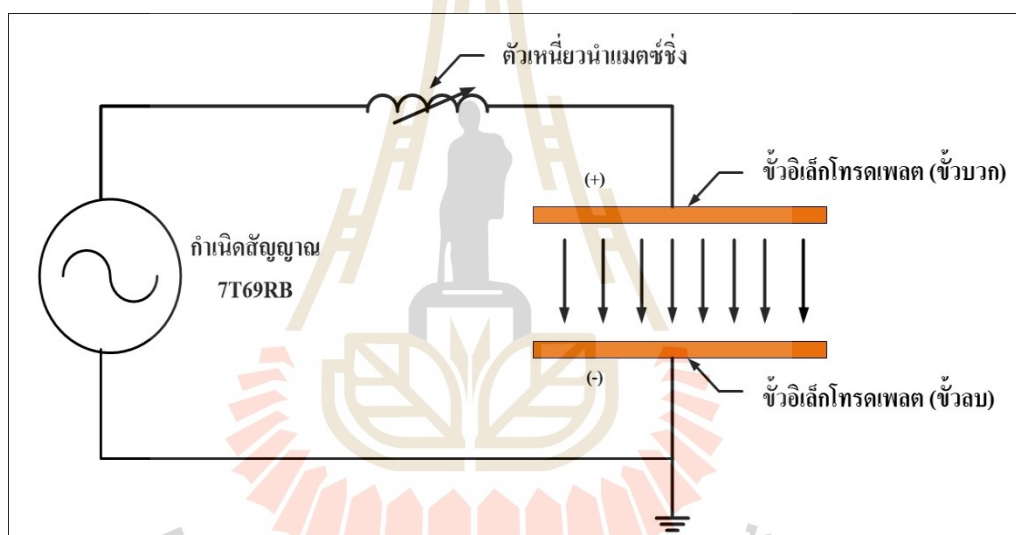
การออกแบบวงจรที่ขั้วเพลต (Plate) ซึ่งด้านอินพุตหลังจากทำการออกแบบแหล่งจ่ายกำลังงานกระแสตรงเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ลำดับถัดมาได้ทำการออกแบบวงจรรองความถี่ ซึ่งทำการออกแบบเป็นวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาย ( $\pi$ ) ประกอบด้วยตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ โดยตัวเก็บประจุ ( $C_1, C_2$ ) เป็นตัวเก็บประจุสำหรับใช้ในหลอดไตรโอดโดยเฉพาะ ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุกำลังงานสูงเช่นเดียวกับที่ใช้ในการออกแบบวงไบอัสที่ขั้วกริด การเลือกใช้ตัวเก็บประจุสามารถใช้ได้ตั้งแต่ 100 – 1,500 pF ตามมาตรฐานการออกแบบวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ (Stray field Limited, England, 2007. Radio Frequency Drying Systems for the Textile. Industry Handbook.) โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาดความจุ 500 pF 25 kV ตัวเหนี่ยวนำ ( $L_1, L_2$ ) ใช้ขนาด 5  $\mu$ H ซึ่งทำการออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่ทนกำลังงานสูงเช่นเดียวกับการไบอัสที่ขั้วกริด (Grid) และส่วนเอาต์พุตของขั้วเพลตนั้นจะมีตัวเก็บประจุ ( $C_3$ ) ซึ่งมีหน้าที่ให้การป้องกันสัญญาณกระแสตรงเพื่อไม่ให้ผ่านไปยังส่วนเอาต์พุตในการให้ความร้อน โดยเลือกใช้ขนาด 1000 pF 25 kV ซึ่งวงจรรองความถี่ด้านอินพุตและวงจรป้องกันสัญญาณกระแสตรงด้านเอาต์พุตที่ได้ติดตั้งแล้วแสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจรรองความถี่และวงจรป้องกันสัญญาณกระแสตรงที่ทำการติดตั้ง

### 3.3.3 การออกแบบเมทซิงเรโซแนนซ์แผ่นเพลตสำหรับให้ความร้อนแก่อิเล็กตริก

สำหรับการออกแบบเมทซิงเรโซแนนซ์แผ่นเพลตสำหรับให้ความร้อนแก่อิเล็กตริก (Match Impedance O/P Electrode Plate) เป็นการออกแบบวงจรให้ความร้อนแก่อิเล็กตริก โดยโพลดิโนงานวิจัยนี้คือข้าวสาร ซึ่งการออกแบบวงจรให้ความร้อนแก่อิเล็กตริกนั้น ทำการออกแบบโดยใช้วงจร LC เรโซแนนซ์แบบอนุกรม ในการส่งผ่านกำลังงานจากส่วนกำเนิดสัญญาณ ความถี่ไปยังส่วนวงจร LC เรโซแนนซ์แบบอนุกรม ซึ่งประกอบไปด้วยค่าของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ แสดงดังรูปที่ 3.16 ซึ่งตัวเก็บประจุจะออกแบบให้เป็นตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต โดยตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดบวกสำหรับปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าเพื่อส่งผ่านกำลังงานไปยังโพลดิโนข้าวสาร และเข้าสู่ขั้วอิเล็กโทรดลบ



รูปที่ 3.16 วงจรให้ความร้อนแก่อิเล็กตริก

เพื่อทราบถึงประสิทธิภาพการกระจายของคลื่นสนามไฟฟ้า และนำมาออกแบบระบบการให้ความร้อนแก่อิเล็กตริกด้วยคลื่นความถี่วิทยุให้มีความเหมาะสมที่สุด ซึ่งพบว่าผลของการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าจะมีผลต่อค่าการนำทางไฟฟ้าของวัสดุแต่ละชนิดในการพิจารณาคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้านั้น ได้เลือกใช้วัสดุที่มีค่าตัวแปรของค่าการนำไฟฟ้าและค่าความซึมซาบได้ โดยวัสดุที่เลือกใช้ได้แก่ทองแดง (Cu) อลูมิเนียม (Al) วัสดุเหล็ก โครงสร้าง (Fe) และ เหล็กกล้าไร้สนิม (SST) จากผลการศึกษาพบว่าวัสดุที่เป็นทองแดง ซึ่งมีค่าสภาพนำทางไฟฟ้าเท่ากับ  $59.6 \times 10^6$  S/m เมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุชนิด

อื่นที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำกว่า ทำให้วัสดุที่เป็นทองแดงสามารถแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าได้ดีที่สุด ผู้วิจัยจึงได้เลือกทองแดงสำหรับใช้ในการออกแบบแผ่นเพลต โดยที่ค่าการนำไฟฟ้าและค่าความซึมซาบได้ของวัสดุ แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ

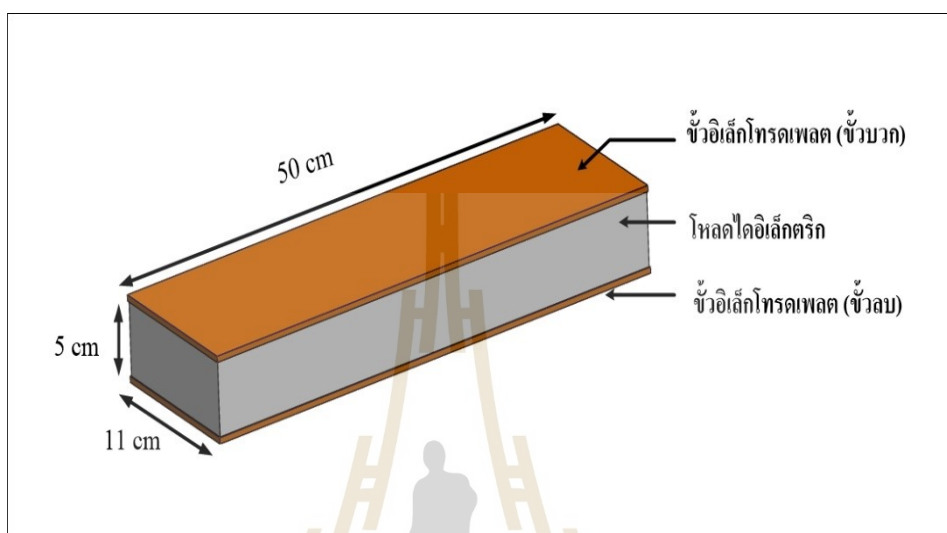
ชนิดวัสดุ	ค่าสภาพนำทางไฟฟ้า (S/m)	ค่าความซึมซาบได้
ทองแดง (Cu)	$59.6 \times 10^6$	1
อลูมิเนียม (Al)	$35.0 \times 10^6$	1
เหล็กโครงสร้าง (Fe)	$10.0 \times 10^6$	4000
เหล็กกล้าไร้สนิม (SST)	$1.45 \times 10^6$	200000

สำหรับการออกแบบวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมสำหรับแมทชิงอิมพีแดนซ์นั้น เป็นการออกแบบเพื่อให้ได้คลื่นความถี่ออกมาสำหรับให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก โดยจากข้อมูลจำเพาะของหลอดไตรโอดระบุเพียงว่าให้ความถี่สูงสุดที่ 110 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบเครื่องให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริกเพื่อประยุกต์ใช้ในการให้ความร้อนแก่โหลดข้าวสารในการหมัก โดยจะทำการออกแบบให้มีความถี่ในช่วงหมัก 39 MHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่พบว่าสามารถหมักได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Nelson, 1995) โดยทำการออกแบบตัวเก็บประจุแบบแผ่นเพลตสำหรับปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าและตัวเหนี่ยวนำดังนี้

1. การออกแบบสร้างตัวเก็บประจุแบบแผ่นเพลตสำหรับปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้า การพิจารณาความเข้มสนามไฟฟ้าที่มีผลจากตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตเป็นส่วนสำคัญสำหรับการพิจารณา เนื่องจากเป็นส่วนที่สามารถทำให้ทราบได้ว่า พื้นที่แต่ละส่วน มีส่วนไหนบ้างที่มีความเข้มของสนามไฟฟ้ามากที่สุด และส่วนไหนที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าน้อยที่สุด รวมถึงการพิจารณาเพื่อปรับปรุงให้ตัวปล่อยคลื่นมีการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าได้ทั่วพื้นที่มากที่สุด ซึ่งการออกแบบการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกขนาดไม่เกิน 300 กิโลกรัม/ชั่วโมงนั้น ซึ่งสามารถคำนวณได้ว่าใน 1 วินาที จะต้องได้ข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก 0.083 กิโลกรัม หรือ 10 วินาทีที่ต้องได้ข้าวประมาณ 0.83 กิโลกรัม ดังนั้น ตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตจะต้องมีขนาดและปริมาตรที่สามารถบรรจุข้าว ไม่ต่ำกว่า 0.83 กิโลกรัม และต้องไหลออกจากตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตภายใน 10 วินาที ซึ่งตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตที่ออกแบบจะต้องคำนึงถึงความสมดุลและขนาดของแผ่นเพลต ซึ่งจะเป็นผลต่อการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าของระบบ (ชาญชัย ทองโสภณและสำราญ สันทาลุณย์, 2555) โดยจากการออกแบบ



เพื่อให้ได้ระบบดังกล่าวและมีความเหมาะสมที่สุด จึงได้ตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตที่มีขนาดความกว้างเท่ากับ 15 เซนติเมตร ความยาวเท่ากับ 50 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างแผ่นเพลต เท่ากับ 6 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ขนาดตัวเก็บประจุแบบแผ่นเพลตสำหรับปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้า

สำหรับการคำนวณค่าตัวเก็บประจุแบบแผ่นเพลตสำหรับปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$C = \frac{k\epsilon_0 A}{d}$$

คำนวณค่าความจุแบบยังไม่ได้โหลด

$$C = \frac{(1)(8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m})(0.15 \text{ m})(0.5 \text{ m})}{0.05 \text{ m}}$$

$$C = 9.74 \text{ pF}$$

คำนวณค่าเก็บประจุเมื่อใส่โพลดข้าวสาร โดยที่ไดอิเล็กตริกของข้าวสารเท่ากับ 2.5

$$C = \frac{(2.5)(8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m})(55 \text{ m}^2)}{0.05 \text{ m}}$$

$$C = 24.35 \text{ pF}$$

2. การออกแบบตัวเหนี่ยวนำแมทซิง จำนวนค่าความเหนี่ยวนำโดยคำนวณ เพื่อให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการที่ความถี่เรโซแนนซ์ 38 , 39 , 40 , 41 และ 42 MHz ดังนั้นจึง คำนวณค่าความเหนี่ยวนำโดยใช้ค่าเก็บความจุที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 24.35 pF และ คำนวณโดยใช้สมการที่ 2.17 ในบทที่ 2 ในการแมทซิงเรโซแนนซ์ ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 3.3

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

ตารางที่ 3.5 ค่าความเหนี่ยวนำที่ความถี่เรโซแนนซ์ต่าง ๆ

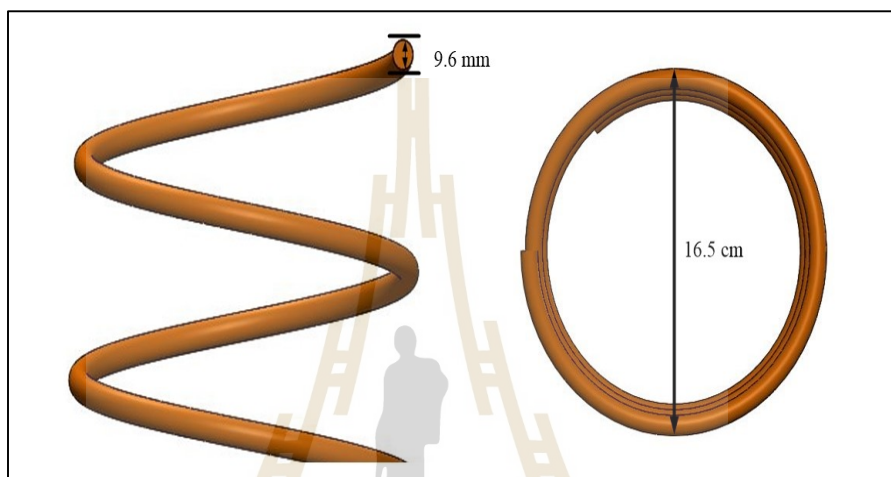
ความถี่ (MHz)	ค่าความเหนี่ยวนำ (nH)
38	720.4
39	683.93
40	650.16
41	618.83
42	589.72

สำหรับการออกแบบค่าเหนี่ยวนำแมทซิงเรโซแนนซ์ เนื่องจากมีความถี่เรโซแนนซ์หลายความถี่ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำให้ค่าครบทุก ๆ ค่าความถี่ที่ได้ทำการคำนวณ ซึ่งการออกแบบคำนวณโดยใช้สมการที่ 2.16 ในบทที่ 2



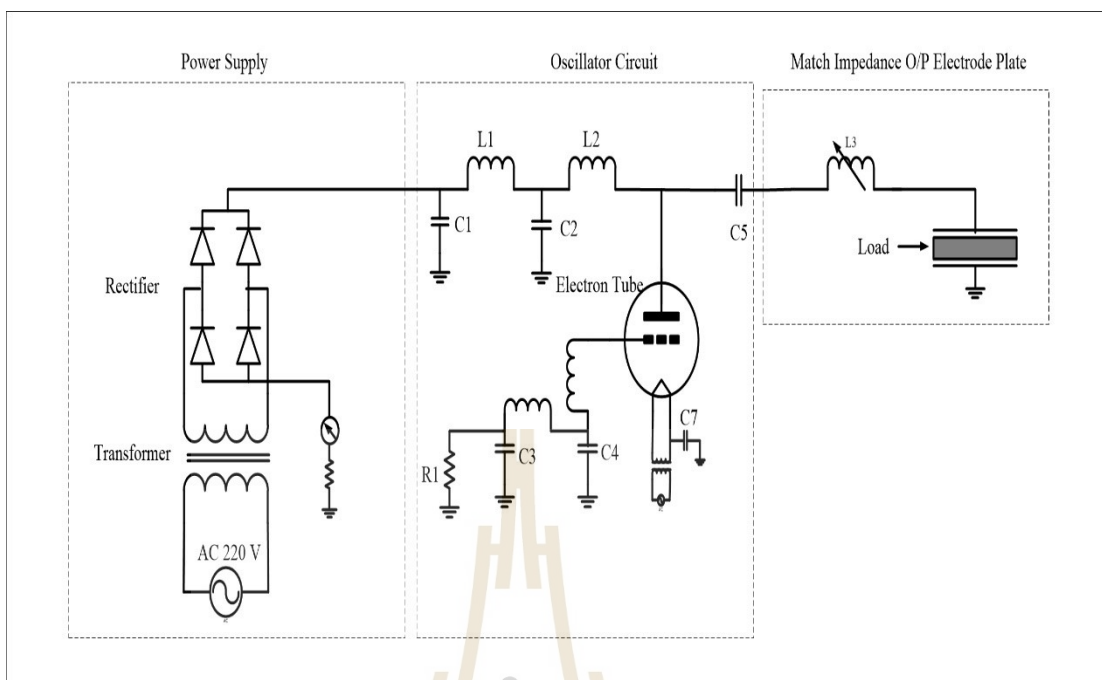
$$L = \frac{\mu AN^2}{l}$$

ทำการออกแบบโดยใช้ทองแดงขนาดพื้นที่หน้าตัด 3/8 นิ้ว (9.6 mm.) แบบกลวง ความหนา 0.8 mm. เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดทองแดง 16.5 cm. แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.18 ขนาดของตัวเหนี่ยวนำสำหรับแมทซิงเรโซแนนซ์

เมื่อทำการออกแบบส่วนต่าง ๆ ของเครื่องตามบล็อกไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนแหล่งจ่ายกำลังงาน (Power Supply) ส่วนกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ (Oscillator, 7T69RB) ส่วนการให้ความร้อนแก่ไดโอดีคตริก (Match Impedance O/P Electrode Plate) เป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงได้วางจรรยาบรรณสำหรับเครื่องให้ความร้อนแก่ไดโอดีคตริกด้วยคลื่นวิทยุ แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 วงจรเครื่องให้ความร้อนแก่ไดโอดเล็กทรอนิกส์ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

### 3.4 สรุป

ในบทนี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์การออกแบบเครื่องให้ความร้อนแก่ไดโอดเล็กทรอนิกส์ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุจากหลอดไดคร โอด โดยการออกแบบในแต่ละส่วนนั้นได้มีการศึกษาการออกแบบในแต่ละภาคส่วนจากข้อมูลต่าง ๆ เพื่อให้การทำงานมีประสิทธิภาพสูงที่สุด สำหรับภาคเอาต์พุตที่เป็นแผ่นเพลต โดยการออกแบบแผ่นเพลตสำหรับการให้ความร้อนแก่ไดโอดเล็กทรอนิกส์ย่านคลื่นความถี่วิทยุ พิจารณาการใช้แผ่นเพลตที่เป็นแผ่นทองแดงที่สามารถเกิดการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีที่สุดและเหมาะสมกับงานมากที่สุด และพิจารณาการเรโซแนนซ์ของภาควงจรซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญ เพื่อให้ได้กำลังงานและความถี่ย่านวิทยุที่เหมาะสมส่งผ่านไปยังโหลดที่เป็นแผ่นเพลต ซึ่งจะทำการออกแบบ วิเคราะห์ทำการทดสอบในบทที่ 4 ต่อไป

## บทที่ 4

### ผลการวัดและการทดลอง

#### 4.1 กล่าวนำ

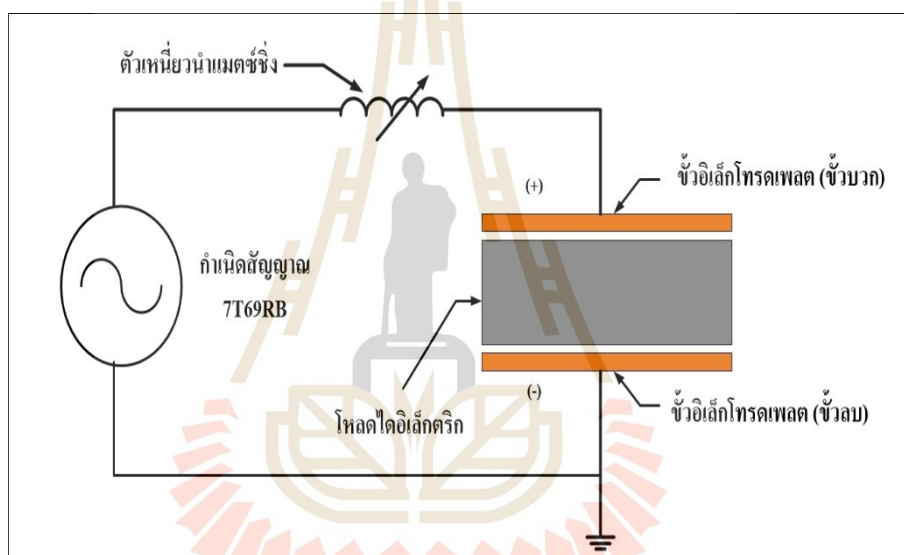
สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงได้การวิเคราะห์ การสร้างวงจร LC เรโซแนนซ์ เพื่อกำเนิดความถี่ย่านความถี่สำหรับให้ความร้อนแก่ไดโอดีลิก และวัดทดสอบ ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการใช้ข้อมูลที่ได้ทำการค้นคว้ารวมถึงหลักการและทฤษฎีต่าง ๆ เพื่อใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบการให้ความด้วยคลื่นความถี่ย่านวิทยุ โดยมีตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตที่มีการป้อนกำลัง ซึ่งจะต้องใช้วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมซึ่งประกอบด้วย LC โดยจะใช้โพลีเอทิลีนกับแผ่นเพลตอลิเล็กโทรด์เป็นตัวเก็บประจุและใช้ตัวเหนี่ยวนำที่สามารถปรับค่าได้เพื่อที่จะปรับแมทซิงอิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์ เพื่อให้ได้ความถี่ที่เหมาะสมสำหรับให้ความร้อนแก่ไดโอดีลิก กำลังงานสูงสุดและมีประสิทธิภาพการถ่ายโอนกำลังงานสูงสุดที่โหลด และให้ได้ประสิทธิภาพการเกิดความร้อน สำหรับทดสอบผลของอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นจากคลื่นสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลตอลิเล็กโทรด์ จะทดสอบด้วยการจ่ายกำลังงานคลื่นสนามไฟฟ้าที่ความถี่เรโซแนนซ์ให้กับตัวสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตอลิเล็กโทรด์ที่มีโพลีเอทิลีนอยู่ระหว่างแผ่นเพลตทั้ง 2 แผ่น และวัดทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดแมทซิงเรโซแนนซ์ สัญญาณความถี่ที่ได้วงจรเรโซแนนซ์ที่ออกแบบ และค่าอุณหภูมิความร้อนในส่วนของขั้ว โดยในการวัดทดสอบความร้อนนั้นจะใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน KEYSIGHT U5857A และสุดท้ายจะทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลจากการวัดความร้อนจากกล้องถ่ายภาพความร้อน และสรุปผลการวิจัยต่อไป

#### 4.2 การสร้างตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตอลิเล็กโทรด์และขดลวด

##### เหนี่ยวนำ

สำหรับการออกแบบโครงสร้างของระบบการให้ความร้อนแบบแผ่นเพลตด้วยความถี่วิทยุสำหรับให้ความร้อนกับโพลีเอทิลีนหรือโพลีไดโอดีลิก เพื่อการหมักในขั้วสารนั้น จะใช้

อุปกรณ์ในการทดสอบนั้นจะประกอบไปด้วย ชุดแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่ด้วยหลอดไตรโอด ส่งต่อกำลังงานให้กับภาควงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม ประกอบด้วยขดลวดเหนี่ยวนำที่ปรับค่าได้ แมทชิงอิมพีแดนซ์ของวงจรรเรโซแนนซ์และตัวเก็บประจุ ซึ่งตัวเก็บประจุถูกออกแบบให้เป็นตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต โดยตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต ประกอบด้วย ขั้วอิเล็กโทรดขั้วบวกสำหรับปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าเพื่อส่งผ่านกำลังงานไปยังโหลดขั้วสาร และ เข้าสู่ขั้วอิเล็กโทรดขั้วลบ ซึ่งเป็นการทำงานของระบบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุโดยตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต โดยโครงสร้างระบบตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าสำหรับการ ให้ความร้อนแก่โหลดขั้วสาร สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างระบบตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าสำหรับการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก

#### 4.2.1 การสร้างตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าและการวัด

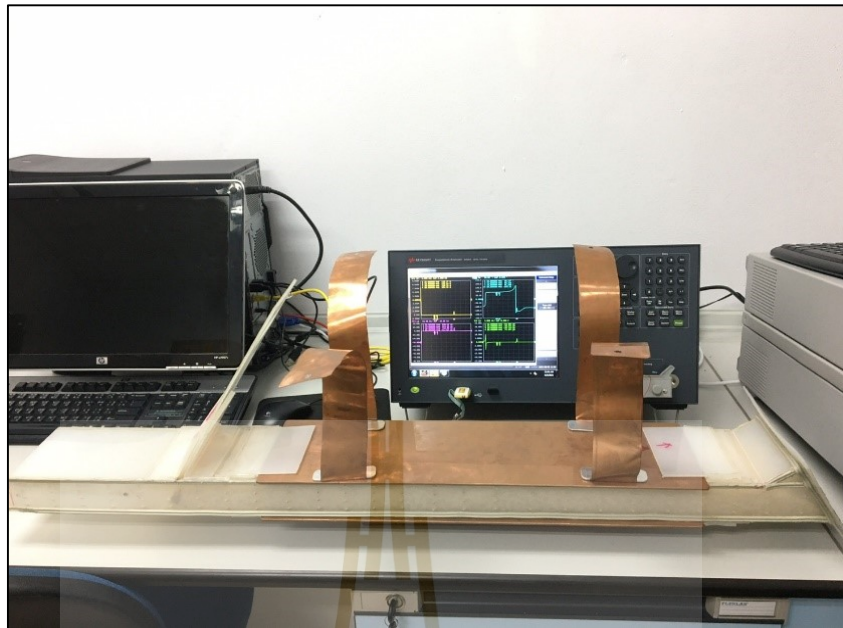
สำหรับการสร้างตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบผ่านเพลตนั้น ทำการออกแบบ สำหรับให้ความร้อนแก่โหลดขั้วสาร เพื่อประยุกต์ใช้ในการฆ่ามอดซึ่งออกแบบให้เป็นลักษณะ สีเหลี่ยมผืนผ้า มีกำลังการผลิตที่ 300 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยแผ่นเพลตทำมาจากทองแดงที่มีขนาด ของแผ่นเพลตกว้าง 11 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร และหนา 5 เซนติเมตร ซึ่งในบทที่ 3 จำนวน ค่าของตัวเก็บประจุแบบแผ่นเพลต ซึ่งคำนวณเมื่อใส่หลอด ไดอิเล็กตริก ได้ค่าความจุเท่ากับ 24.35

pF ดังนั้นเมื่อคำนวณและได้จำจงเสร็จแล้ว จึงทำการสร้างตัวเก็บประจุแบบแผ่นเพลตจริงขึ้นมา ซึ่งลักษณะของแผ่นเพลตแสดงดังรูปที่ 4.2

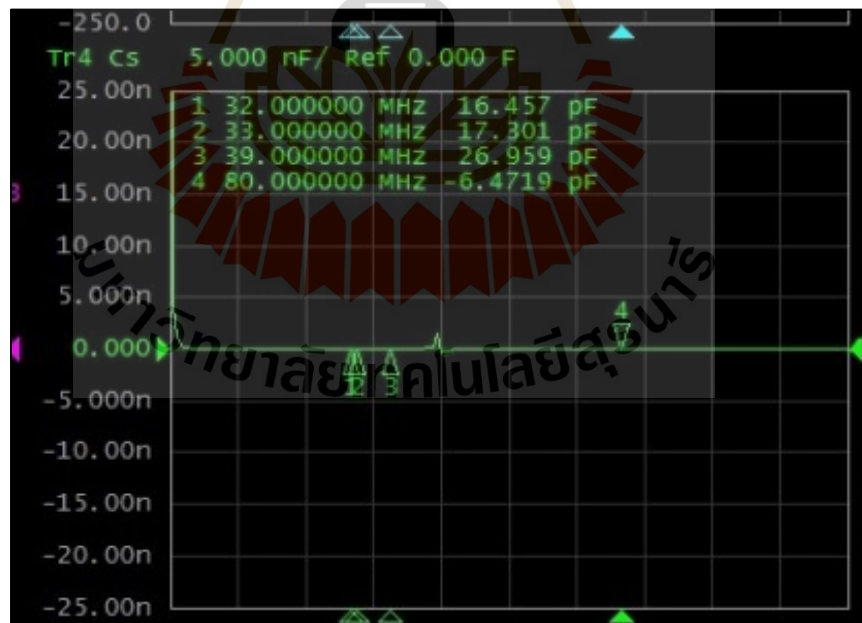


รูปที่ 4.2 รูปแบบและ โครงสร้างของแผ่นเพลตสำหรับทดสอบการให้ความร้อนแก่ไดโอดีเล็กตริก

จากนั้นทำการวัดค่าความจุของแผ่นเพลตโดยใช้เครื่องมือวัด Impedance Analyzer ยี่ห้อ KEYSIGHT รุ่น E4990A ซึ่งรูปแบบการวัดและค่าความจุของแผ่นเพลตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 โดยเลือกวงจรสมมูลสำหรับการวัดเป็นแบบขนาน โดยทำการตั้งค่าช่วงความถี่ในการวัดตั้งแต่ 20 kHz -120 MHz ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการแมทชิงความถี่ที่ 38 MHz-42 MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการการนำมอด ผลการวัดค่าความจุ แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าผลของค่าความจุแต่ละขนาดมีผลใกล้เคียงกับการออกแบบในบทที่ 3



รูปที่ 4.3 รูปแบบการวัดค่าความจุของตัวสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต



รูปที่ 4.4 ค่าความจุของตัวสร้างคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต



ตารางที่ 4.1 ค่าความจุที่วัดได้แต่ละความถี่

ความถี่ในการวัด (MHz)	ค่าตัวเก็บประจุ (pF)
38	23.82
39	26.95
40	25.01
41	24.13
42	24.42

#### 4.2.2 การสร้างตัวเหนี่ยวนำและการวัด

สำหรับการสร้างตัวเหนี่ยวนำนั้นจะได้นำผลการวิเคราะห์และออกแบบในบทที่ 3 มาเพื่อทำการสร้างสำหรับทดสอบเช่นเดียวกัน ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำได้จากการคำนวณด้วยวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม โดยค่าที่ออกแบบในบทที่ 3 แสดงดังตารางที่ 3.3 นั่นคือผลของค่าความเหนี่ยวนำสำหรับการแมทชิ่งกับวงจรทั้งหมด ซึ่งลักษณะของตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบโดยใช้ทองแดงขนาดพื้นที่หน้าตัด 3/8 นิ้ว (9.6 mm.) แบบกลวงความหนา 0.8 mm. เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดทองแดง 16.5 cm. โดยออกแบบให้สามารถปรับค่าความเหนี่ยวนำได้ เพื่อให้ค่าเหนี่ยวนำตามที่ออกแบบในแต่ละความถี่ดังกล่าวในบทที่ 3 แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.5 ตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบสำหรับการแมทชิ่งอิมพีแดนซ์กับโหลดไดโอดีเล็กตริก



จากนั้นทำการวัดค่าความจุของแผ่นเพลตโดยใช้เครื่องมือวัด Impedance Analyzer ยี่ห้อ KEYSIGHT รุ่น E4990A ซึ่งรูปแบบการวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 โดยเลือกวงจรสมมูลสำหรับการวัดเป็นแบบขนาน ซึ่งการวัดค่าความเหนี่ยวนำนั้นเป็นการวัดเพื่อหาตำแหน่งในการแมทชิงอิมพีแดนซ์เพื่อให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้คำนวณจากตารางที่ 3.3 ในบทที่ 3



รูปที่ 4.6 รูปแบบการวัดค่าความเหนี่ยวนำตามตำแหน่งที่ได้คำนวณ



รูปที่ 4.7 ค่าความเหนี่ยวนำที่ออกแบบสำหรับแมทชิงความถี่เรโซแนนซ์

เมื่อได้อุปกรณ์ประกอบต่าง ๆ สำหรับการทดสอบแล้ว ต่อไปจะได้จัดวางรูปแบบโครงสร้างของระบบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุสำหรับทดสอบการให้ความร้อนแก่ไดโอดีเล็กตริกโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ ซึ่งจะใช้ทดสอบกับโพลีคาร์บอเนตเพื่อยืนยันผลการเมทซิงอิมพีแดนซ์เรโซแนนซ์ ซึ่งสามารถแสดงดังในรูปที่ 4.7



(ก) ด้านหน้า

(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 4.8 ระบบการให้ความร้อนแก่ไดโอดีเล็กตริกโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ

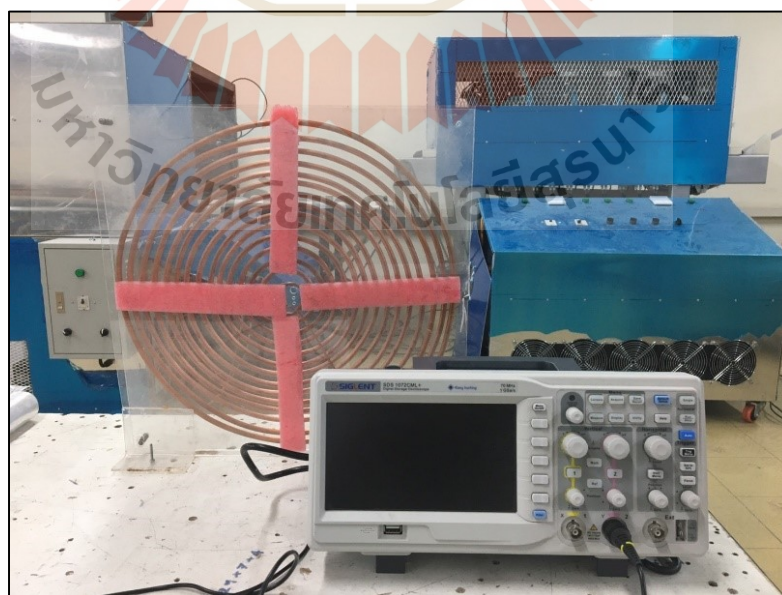
#### 4.3 ผลการทดสอบการเมทซิงอิมพีแดนซ์และการวัดค่าความร้อนด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

สำหรับผลการทดสอบการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุจะเริ่มต้นจากการทดสอบด้วยการเมทซิงอิมพีแดนซ์ด้วยตัวเหนี่ยวนำ เพื่อวัดสัญญาณความถี่และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการเมทซิงอิมพีแดนซ์โดยทำการเมทซิงให้ได้ความถี่ใช้งานที่ 38 , 39 , 40 , 41 และ 42 MHz ซึ่งจะวัดค่าอุณหภูมิของโพลีคาร์บอเนตด้วยการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน KEYSIGHT รุ่น U5857A ซึ่งสามารถแสดงลักษณะรูปร่างของตัวกล้องถ่ายภาพความร้อนได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.9 กล้องถ่ายภาพความร้อน KEYSIGHT รุ่น U5857A

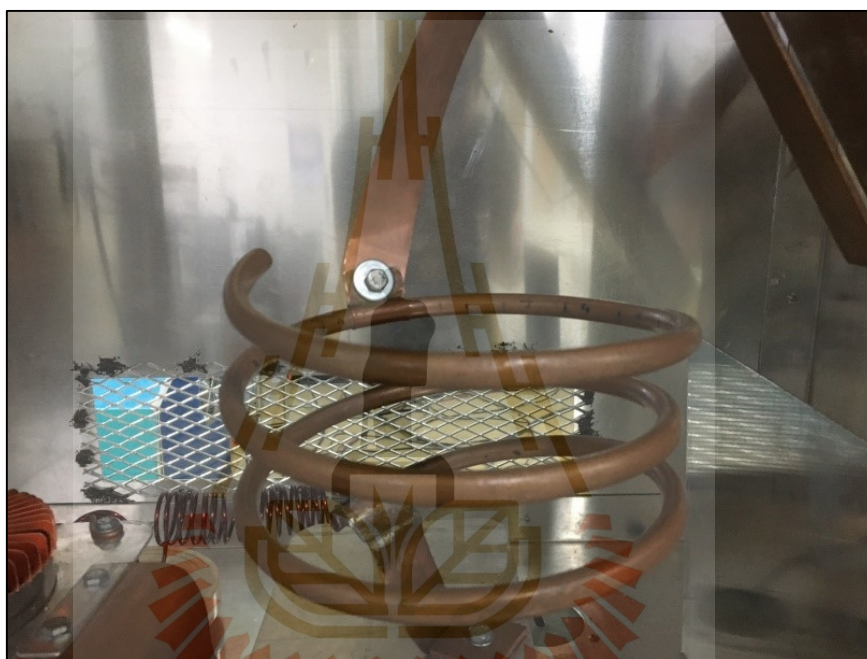
สำหรับการวัดสัญญาณความถี่ของระบบนั้น จะใช้วิธีการอินดิว (Induced) เนื่องจากความถี่ที่ออกมาจากเครื่องนั้น มีกำลังงานที่สูงกว่าเครื่องมือวัด ทำให้เครื่องมือวัดไม่สามารถวัดได้โดยตรง จึงใช้วิธีอินดิว (Induced) สัญญาณผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ และต่อเข้ากับออสซิลโลสโคป SIGLEN รุ่น SDS 1072CML+ 70 MHz แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.10 ลักษณะรูปแบบการต่อเพื่อวัดสัญญาณความถี่ของระบบ

#### 4.3.1 การทดสอบแมทซิงอิมพีแดนซ์เรโซแนนซ์ความถี่วิทยุ

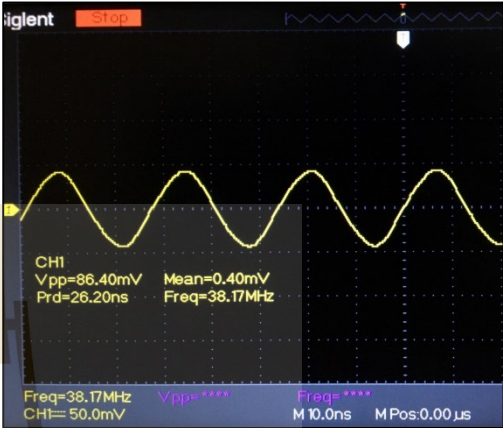
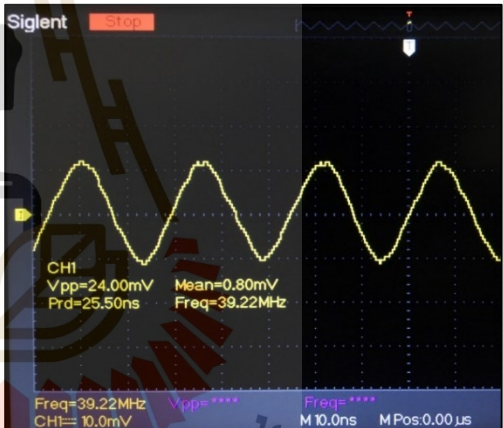
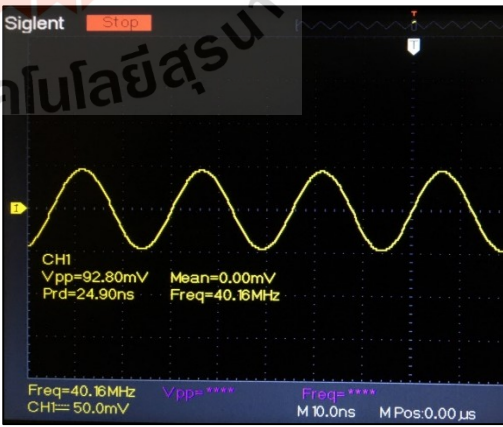
สำหรับการทดสอบแมทซิงอิมพีแดนซ์เรโซแนนซ์ กำหนดรูปแบบการแมทซิงเรโซแนนซ์ความถี่ ตามบทที่ 3 โดยการทดสอบเปรียบเทียบสัญญาณความถี่ที่ออกมาเมื่อเทียบกับการคำนวณ LC เรโซแนนซ์ .ในบทที่ 3 โดยการทดสอบใช้ข่าวสารเป็นโหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในการทดสอบนั้นจะทำการปรับค่าความเหนี่ยวนำตามตำแหน่งที่ได้ทำการค่า การปรับตำแหน่งแสดงดังรูปที่ 4.9 การให้ความร้อน การวัดผลสัญญาณแสดงดังตารางที่ 4.2

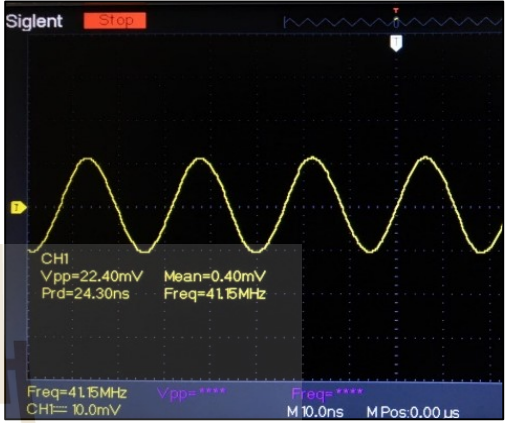
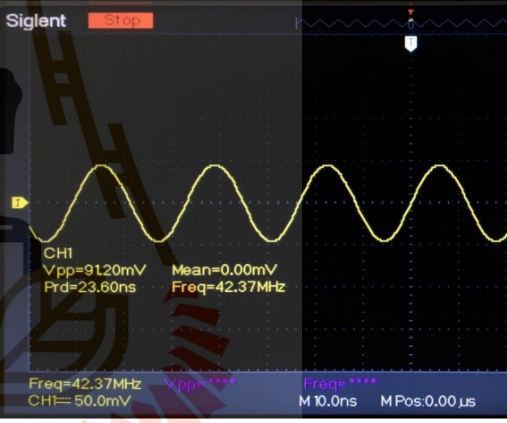


รูปที่ 4.11 การปรับตำแหน่งค่าเหนี่ยวนำแมทซิงอิมพีแดนซ์



ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความถี่ในการแมทซิงอิมพีแดนซ์ด้วยตัวเหนี่ยวนำ

ความถี่ที่กำหนด (MHz)	ความถี่ที่ได้จากการ แมทซิง (MHz)	ภาพสัญญาณที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป
38	38.17	
39	39.22	
40	40.15	

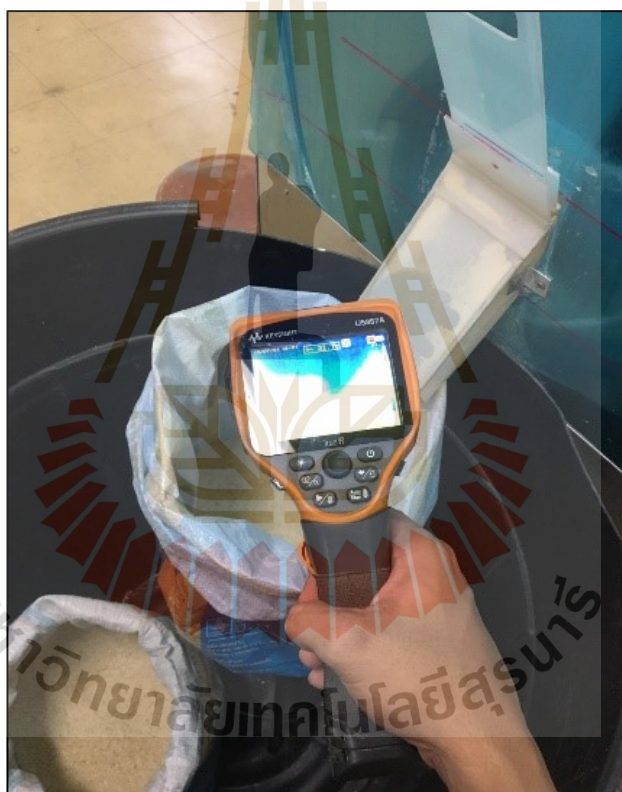
ความถี่ที่กำหนด (MHz)	ความถี่ที่ได้จากการ แมทซิง (MHz)	ภาพสัญญาณที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป
41	41.15	
42	42.37	

จากผลการทดสอบการแมทซิงอิมพีแดนซ์ด้วยตัวเหนี่ยวนำ เมื่อทำการแมทซิงอิมพีแดนซ์เพื่อให้ได้ความถี่ 38 MHz ทำการปรับค่าเหนี่ยวนำตามตำแหน่งที่ได้ทำการวัดจากเครื่อง Impedance Analyzer ผลการทดสอบพบว่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ออกมาขึ้นเท่ากับ 38.17 MHz ถัดมาทำการแมทซิงเพื่อให้ได้ความถี่ 39 MHz โดยทำการปรับค่าเหนี่ยวนำตามตำแหน่งที่วัดค่าได้เช่นเดียวกับความถี่ก่อนหน้านี้ ผลการทดสอบพบว่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ออกมาขึ้นเท่ากับ 39.22 MHz ถัดมาทำการแมทซิงเพื่อให้ได้ความถี่ 40 MHz โดยทำการปรับค่าเหนี่ยวนำตามตำแหน่งที่วัดค่าได้เช่นเดียวกับความถี่ก่อนหน้านี้ ผลการทดสอบพบว่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ออกมาขึ้นเท่ากับ 40.15 MHz ถัดมาทำการแมทซิงเพื่อให้ได้ความถี่ 41 MHz โดยทำการปรับค่าเหนี่ยวนำตามตำแหน่งที่วัดค่าได้เช่นเดียวกับความถี่ก่อนหน้านี้ ผลการทดสอบพบว่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ออกมาขึ้นเท่ากับ 41.15 MHz ถัดมาทำการแมทซิงเพื่อให้ได้ความถี่ 39 MHz โดยทำการปรับค่าเหนี่ยวนำตาม

ตำแหน่งที่วัดค่าได้เช่นเดียวกับความถี่ก่อนหน้านี้ ผลการทดสอบพบว่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ออกมา นั้นเท่ากับ 42.37 MHz

#### 4.3.2 การวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้น

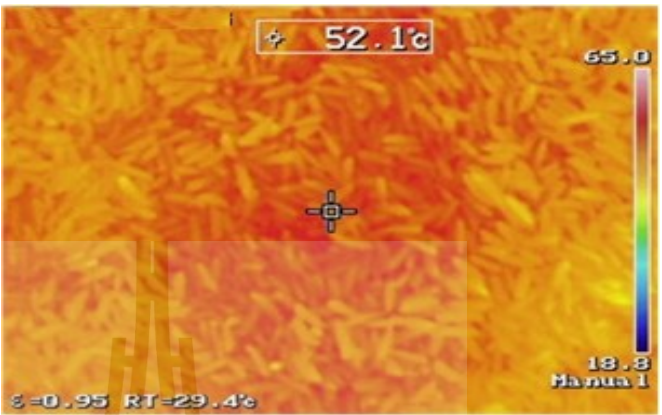
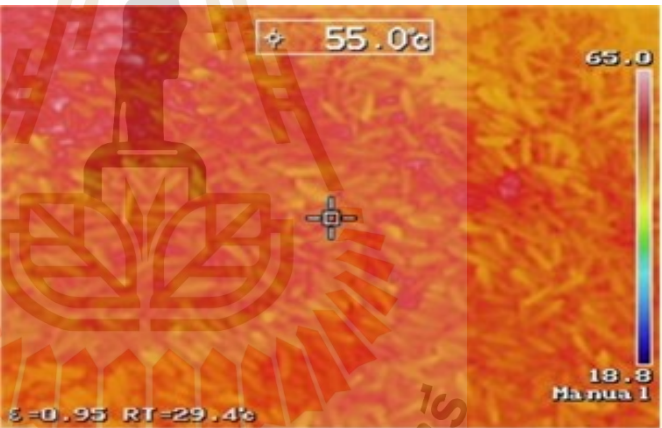
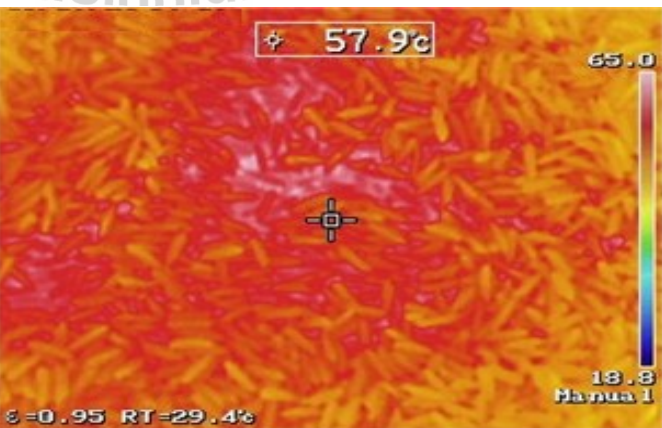
สำหรับการวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นนั้น ทำการวัดโดยการวัดข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยกำหนดให้มีอัตราการไหลของข้าวสารอยู่ที่ 200 กิโลกรัมต่อ ชั่วโมง ในทุกย่านความถี่ที่เกิดจากการแมทซิงเรโซแนนซ์ การวัดอุณหภูมิของข้าวสารหลังจากผ่านการให้ความร้อนแก่ไดโอดีเล็กทริกด้วยคลื่นความถี่วิทยุ แสดงดังรูปที่ 4.10 และความถี่และอุณหภูมิที่ได้จากการแมทซิงเรโซแนนซ์ แสดงดังตารางที่ 4.3

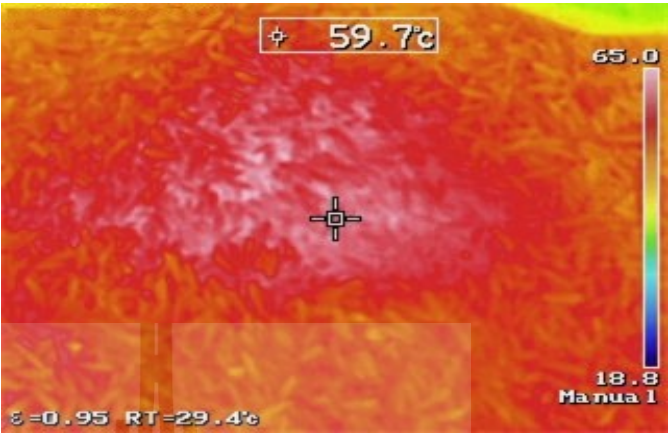



รูปที่ 4.12 การวัดอุณหภูมิและถ่ายภาพอุณหภูมิที่เกิดขึ้น



ตารางที่ 4.3 ผลการวัดอุณหภูมิ

ความถี่ (MHz)	อุณหภูมิ (°C)
38.17	52.1 °C 
39.22	55.0 °C 
40.15	57.9 °C 

ความถี่ (MHz)	อุณหภูมิ (°C)
41.15	59.7 °C 
42.37	61.9 °C 

จากผลการทดสอบวัดอุณหภูมิ เมื่อทำการทดสอบโดยการแมทซิงเรโซแนนซ์ได้ ความถี่ 38.17 MHz ความร้อนที่เกิดขึ้นเท่ากับ 53.6 °C ถัดมาเมื่อแมทซิงเรโซแนนซ์ได้ความถี่ 39.22 ความร้อนที่เกิดขึ้นเท่ากับ 57.8 °C ถัดมาเมื่อแมทซิงเรโซแนนซ์ได้ความถี่ 40.15 MHz ความร้อนที่เกิดขึ้นเท่ากับ 60.6 °C ถัดมาเมื่อแมทซิงเรโซแนนซ์ได้ความถี่ 41.15 MHz ความร้อนที่เกิดขึ้นเท่ากับ 62.1 °C ถัดมาเมื่อแมทซิงเรโซแนนซ์ได้ความถี่ 42.37 MHz ความร้อนที่เกิดขึ้นเท่ากับ 65.1 °C

#### 4.4 สรุป

จากผลการทดสอบการแมทซิงเรโซแนนซ์ด้วยตัวเหนี่ยวนำสำหรับให้ความร้อนแก่ไดโอดีลิกตริก ซึ่งโพลไดโอดีลิกตริกในงานวิจัยนี้ได้ใช้ข่าวสารในการทดสอบ โดยทำการกำหนดความถี่ในการแมทซิงที่ 38 MHz, 39 MHz, 40 MHz, 41 และ 42 MHz ซึ่งความถี่ที่ได้จากการทดสอบในการแมทซิงนั้น เป็น 38.17 MHz , 39.22 MHz , 40.15 MHz , 41.15 MHz และ 42.37 MHz โดยมีความใกล้เคียงกับที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งความถี่ที่คลาดเคลื่อนไปนั้น อาจเกิดจากการปรับหรือตำแหน่งการติดตั้งค่าเหนี่ยวนำนั้นไม่เหมือนกับตอนที่วัดค่าเหนี่ยวนำ และเมื่อทำการวัดอุณหภูมิพบว่า มีอุณหภูมิที่ความถี่ 38.17 MHz เท่ากับ 53.6 °C ถัดมาที่ความถี่ 39.22 MHz เท่ากับ 57.8 °C ถัดมาที่ความถี่ 40.15 MHz เท่ากับ 60.6 °C ถัดมาที่ความถี่ 41.15 MHz เท่ากับ 62.1 และที่ความถี่ 42.37 MHz เท่ากับ 65.1 ซึ่งพบว่าเมื่อความถี่สูงขึ้นอุณหภูมิก็นิ่งขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน



## บทที่ 5

### บทสรุป

#### 5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ ออกแบบ ทดสอบ และเปรียบเทียบผลของการให้ความร้อนแก่ไดโอดีลิกตริกด้วยคลื่นความถี่วิทยุสำหรับกำจัดมอดในข้าวสาร การศึกษาทฤษฎีการให้ความร้อนแก่ไดโอดีลิกตริกด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่วิทยุ ศึกษาวิเคราะห์ลักษณะของการให้ความร้อนแก่ไดโอดีลิกตริก ทฤษฎีวงจรถายสัญญาณกำลังสูง ออกแบบวงจรและสร้างวงจรกำเนิดความถี่ย่านวิทยุสำหรับการให้ความร้อนแก่ไดโอดีลิกตริก โดยศึกษาลักษณะของวงจรประกอบด้วย วงจรกำเนิดความถี่ย่านวิทยุกำลังงานสูงสำหรับเป็นแหล่งจ่ายกำลังให้กับตัวปล่อยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านแผ่นเพลต ทำการออกแบบความถี่สำหรับให้ความร้อนแก่ไดโอดีลิกตริกที่ความถี่ 38-42 MHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่เหมาะสมในการกำจัดมอด ในส่วนของการทดสอบและการวัดผลจะทำการทดสอบด้วยการแมทชิงเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 38 MHz , 39 MHz , 40 MHz, 41 MHz และ 42 MHz ตามที่ได้ออกแบบและคำนวณ

จากการวัดผลการทดลองพบว่า เมื่อทำแมทชิงที่ความถี่ 38 MHz ตามที่คำนวณออกแบบพบว่าความถี่ที่ได้จากการวัดเท่ากับ 38.17 MHz ถัดมาเมื่อทำแมทชิงที่ความถี่ 39 MHz พบว่าความถี่ที่ได้จากการวัดเท่ากับ 39.22 MHz ถัดมาเมื่อทำแมทชิงที่ความถี่ 40 MHz พบว่าความถี่ที่ได้จากการวัดเท่ากับ 40.15 MHz ถัดมาเมื่อทำแมทชิงที่ความถี่ 41 MHz พบว่าความถี่ที่ได้จากการวัดเท่ากับ 41.15 MHz ถัดมาเมื่อทำแมทชิงที่ความถี่ 42 MHz พบว่าความถี่ที่ได้จากการวัดเท่ากับ 42.37 MHz และผลการวัดอุณหภูมิที่ความถี่ที่ได้ทำการแมทชิงเรโซแนนซ์ เมื่อกำหนดให้เวลาในการให้ความร้อนแก่ไดโอดีลิกตริกเท่ากันพบว่า ที่ความถี่ 38.17 MHz มีอุณหภูมิเท่ากับ 52.1 °C, ถัดมาที่ความถี่ 39.22 MHz มีอุณหภูมิเท่ากับ 55.0 °C, ถัดมาที่ความถี่ 40.15 MHz มีอุณหภูมิเท่ากับ 57.9 °C, ถัดมาที่ความถี่ 41.15 MHz มีอุณหภูมิเท่ากับ 59.7 °C, ถัดมาที่ความถี่ 42.37 MHz มีอุณหภูมิเท่ากับ 61.9 °C สรุปผลที่ได้จากการทดสอบการออกแบบเครื่องให้ความร้อนแก่ไดโอดีลิกตริกด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ได้สร้าง การออกแบบความถี่ในการใช้งานมีความใกล้เคียงกับการคำนวณออกแบบ และเมื่อทำการทดสอบเห็นได้ว่ามีประสิทธิภาพที่ดีซึ่งมีอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการฆ่ามอด

## 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

การออกแบบเครื่องให้ความร้อนแก๊สไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นความถี่วิทยุในงานวิจัยนี้มีกำลังงานสูง ซึ่งต้องใช้แรงดันไฟฟ้าหลายพันโวลต์ในการทำงาน ซึ่งต้องทำการออกแบบให้ดีและมีความปลอดภัย

## 5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

พัฒนาและออกแบบให้เครื่องให้ความร้อนแก๊สไดอิเล็กตริกสำหรับกำจัดมอดในข้าวสารให้มีกำลังงานที่สูงขึ้น เพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมข้าวไทย



## รายการอ้างอิง

- S. O. Nelson, "Fundamentals and industrial applications of Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control," *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, vol. 39, no. 4, pp. 1475-1484, 1996.
- J. N. I. J. T. e. a. S. Wang, "Radio frequency treatments to control codling moth in in-shell walnuts," *Postharvest Biology and Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 29-38, 2001.
- J. T. Y. W. J. P. a. S. W. M. Gao, "almond quality as influenced by radio frequency heat treatments for disinfestation," *Postharvest Biology and Technology*, vol. 58, no. 3, pp. 225-231, 2000.
- J.N. I. S. J. D. H. a. R. P. C. J.Tang, "High-temperature-short-time thermal quarantine methods," *Postharvest Biology and Technology*, vol. 21, no. 1, pp. 129-145, 2000.
- J. T. a. R. P. C. S. Wang, "Modeling fruit *Postharvest Biology and Technology*, vol. 21, no. 1, pp. 129-145, 2000.
- S. O. N. a. J. A. Payne, "RF dielectric heating for pecan weevil control," *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, vol. 31, pp. 456-458, 1982.
- G. K. N. G. S. Ipsita Das, "Microwave Heating as an Alternative Quarantine Method for Disinfestation of Stored Food Grains," *International Journal of Food Science*, 2013.
- J. T. B. R. S. S. a. Y. J. B. Alfaiifi, "Radio frequency disinfestation treatments for dried fruit: dielectric properties," *LWT—Food Science and Technology*, vol. 50, no. 2, pp. 746-754, 2013.
- S.O. Nelson, "Dielectric properties of agricultural products:measurements and applications," *IEEE Transactions on Electrical*, vol. 26, no. 5, pp. 845-869, 199

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Weerawat Charoensiri, Samran Suntalunai, Samroeng Suntalunai, Thanaset Thosdeekoraphat,  
Chanchai Thongsopa, Nuchnart Fhaphiem

**The Optimization Of Electric Field Distributions With Rectangular Plates Parallel  
For Dielectric Heating**, Proceedings of International Video Conference on Science  
Technology and Management, Bangkok, Thailand, 29th – 30th September, 2020



## THE OPTIMIZATION OF ELECTRIC FIELD DISTRIBUTIONS WITH RECTANGULAR PLATES PARALLEL FOR DIELECTRIC HEATING APPLICATIONS

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

<sup>1,2,3,4,5</sup>School of Electronic Engineering, Department of Electronic Engineering, Suranaree University of Technology,  
Nakhon Ratchasima, Thailand

<sup>6</sup>Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of  
Technology Isan, Nakhon Ratchasima, Thailand  
E-mail: m6112448@g.sut.ac.th, samran.sa@sut.ac.th

**Abstract** - This paper, presents an analysis of electric field distribution and electric field intensity which is occurred with dielectric load by using two sets of rectangular copper plates in parallel patterns for processing of dielectric load heating. The rice is used to dielectric load and used the rectangular copper plates for transfer the power and electric fields. The rectangularly copper plates are placed with parallel form in a metal chamber room. The simulation is analyzed the distance between parallel copper plates with three case by using the CST MICROWAVE STUDIO<sup>®</sup> when the electrical power source is 20 kW at resonance frequency of 39 MHz. As a result, when the position of two electrodes is optimized, the electric field distribution and the electric field intensity are analyzed. It shows that the distance between the nearest rectangular copper plate sets as 850 mm is a suitable position. Therefore, in this case doesn't have an overlapping electromagnetic wave, so the input power to at the dielectric load is occurred with the least loss.

**Keywords** - Rectangular copper plates, Electric field distribution, Dielectric heating.

### I. INTRODUCTION

Electromagnetic waves are widely used for heating as it is directly heated to materials that require heating. Electromagnetic waves provide high thermal efficiency. Electromagnetic heating has two main types that are induction and electrolyte heating. Induction is the process that heated by a magnetic field based on magnetic resonance generated by induction coils. In addition, electrolyte heating is the heating from the electric field by using the electric field directly into the material as a dielectric material that is suitable for the use spectrum, which does not affect other materials as it is heated by vibrating molecules [2]. The dielectric heating uses radio frequency and microwave frequencies because microwave frequencies are widely used in the food drying industry, which is a high frequency in the gigahertz range. Microwave wave can generate heat quickly and suitable for small heat because it is a high frequency range and has a narrow wavelength. Most of the radio frequency in the megahertz range are used in the agricultural industry for pest and insect elimination which has the design of radio frequency to have the suitable frequency for pest control, as well as dielectric heating by using radio frequency, can be designed to have large system because it is a low frequency range that has a wide wavelength [3]. In provides research, the radio frequency is applied in agriculture process to heat the dielectric in groups of pests such as rice weevil or various worm inside the produce or seed [4],[5]. Therefore, the structure of an organism contains liquid or molecules that can absorb heat from electromagnetic waves very well.

Moreover, Nelson and Stetson researched about the heating of rice weevil in wheats at the frequency of 39 MHz and 2450 MHz. The temperature of wheats is compared with mortality rate of rice weevil [6]. In [7] studied the design of dielectric heating at 65 MHz to get rid of rice weevil by using copper plate size as 30×30 mm<sup>2</sup>. An analysis of electric field distribution and electric field intensity that is occurred at dielectric load by using input power of 1000 watt at frequency of 39 MHz [8] and the simulation of electric field distribution and electric field intensity by using electrode to control the insect in agriculture system [9] were studied. Most of the previous research used only one set of dielectric heater.

Therefore, the researcher has the concept of two sets plate design to heat the dielectric load with in the same device. This research is studied the distribution of electric field and the electric field intensity occurring with dielectric loads. CST MICROWAVE STUDIO<sup>®</sup> is used to simulate the dielectric heating.

### II. DIELECTRIC HEATING

The properties of the material, also known as the loss factor, it is the ability of the dielectric material to convert the electric field used into heat. Dielectric materials with loss factor are greater than 0.02 that are generally considered for dielectric heating [10]. The permittivity is denoted by the symbol of  $\epsilon$ , which is the ability of a dielectric material to be polarized. Dividing the permittivity by the permittivity of free space  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  F/m resulted in the relative permittivity (dielectric constant)  $\epsilon$

$$\epsilon' = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1)$$

Material properties can be expressed as a complex quantity, the real part is associated with the capability of the material for storing energy, and the imaginary part is associated with the dissipation of electric energy in the material by conversion of electric energy to heat. The complex permittivity is shown here, where  $j$  represents the complex operator  $\sqrt{-1}$

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2)$$

Where  $\epsilon''$  is dielectric loss factor for determining the loss, will consider the imaginary part of the dielectric constant, which will depend on the frequency and the operating temperature and can define the loss tangent as the following equation. The ac electrical conductivity associated with the dielectric loss in the material  $\sigma = \omega\epsilon''\epsilon'$  (S/m) is where  $\omega$  is the angular frequency,  $2\pi f$ . The loss angle can be expressed as a component of the loss factor as (3)

$$\tan \delta = \epsilon''/\epsilon' \quad (3)$$

Both the loss tangent and the dielectric constant are varied with the frequency, applied and the temperature of the material. The power is absorbed by the material, which

the value of heat generated through the material and is represented as (4)

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

where,  $P$  is power loss density (W/m<sup>3</sup>),  $E$  is rms electric field strength in the material (V/m),  $\sigma$  is conductivity (1/Ωm),  $f$  is applied frequency (Hz),  $\epsilon_0$  is permittivity of free space (F/m), and  $\epsilon''$  is loss factor.

### III. CHARACTERISTIC AND PARAMETER OF ELECTRODE PLATE FOR DIELECTRIC HEATING

For the most efficient heating of the dielectric, the structure of the heating of the dielectric must be appropriately designed. Which consists of power circuit and signal frequency resonance at 39 MHz, shown in Figure 1.

Figure 2 shows the structural dimensions of the metal chamber for dielectric heating simulation. Specify the metal chamber material, aluminum size 1200 x 2000 mm, height 1000 mm. The metal chamber is designed to limit the electromagnetic wave to the dielectric heating area.

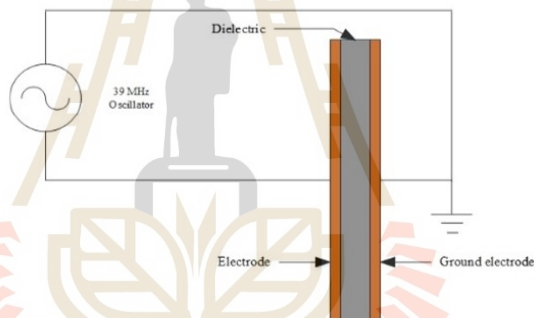


Figure 1: Converter Schematic of dielectric heating applications

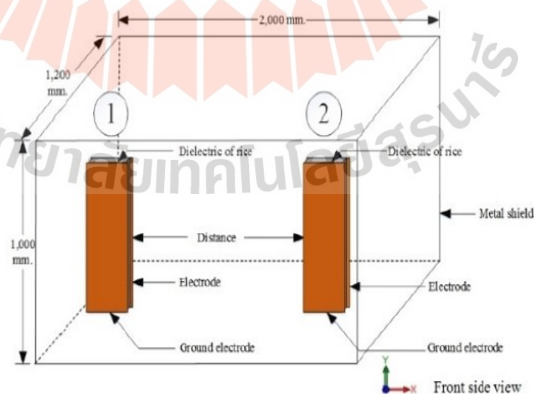


Figure 2: The dimensions of the metal chamber for dielectric heating simulation



The Optimization of Electric Field Distributions with Rectangular Plates Parallel for Dielectric Heating Applications

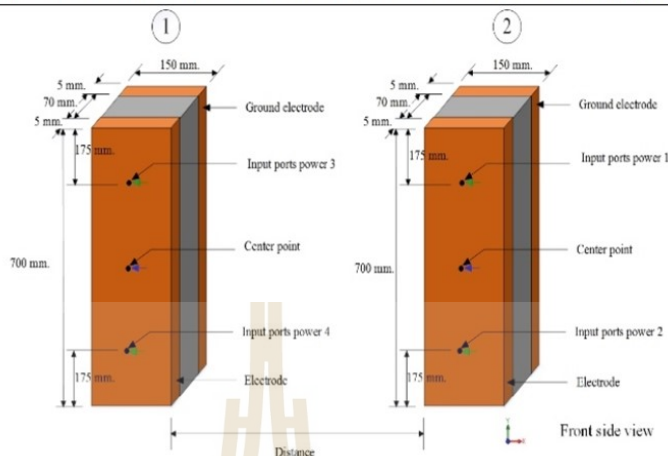


Figure 3: The dimensions of rectangular copper plates and input ports power for electric field analysis

Figure 3 shows the structure size, simulation of electric field distribution and electric field intensity. Heating the dielectric uses rectangular copper plates to transfer the power and electric field to the dielectric load. Which designed a rectangular copper plates and 2 sets of dielectric loads placed in parallel positions. Specify that the rectangular copper plates is 150 x 700 mm. Thickness of 5 mm. Specify the work points of the 2 sets of copper rectangular plates, 2 power points and specify the distance between the rectangular copper plates 3 distances. Distance to simulate the distribution of electric fields and the intensity of the electric field occurring in all 3 distances.

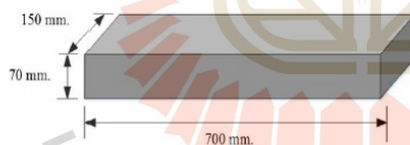


Figure 4: The dimensions of dielectric materials

Figure 4 shows the structure size of the dielectric load. Use rice as a dielectric load for dielectric heating simulation. The rice has a dielectric loss factor of 0.4 and has a permeability value of 3.4, respectively. [8] and the dielectric load size is 150 x 700 mm. Thickness of 70 mm.

#### IV. SIMULATION OF ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION AND ELECTRIC FIELD INTENSITY ON DIELECTRIC LOAD

The electric power sources are generated the input power of 20 kW at the frequency of 39 MHz to rectangular copper plate with two ports per set. Analyzing to the distribution of electric field and

electric field intensity at dielectric loads which are rice when the distance between two copper plates set is adjusted to find the best position so that has not been mutual coupling by both loads. In this simulation, rice is arranged in rectangularly form to make it suitable for copper plates. Rectangular copper plate is responsible for transmitting the power to the dielectric load. Fig.5 shows the distribution of electric field and electric field intensity when dielectric load is cut into the z-axis with a thickness of 5 mm.

Consider the electric near-field at the load in copper plate sets as illustrated in Figure 5. Figure 5(a) shows electric field intensity when the distance between two sets of electrodes is 1250 mm, the electric field intensity of feed point no.1 at  $X = -700$  and  $Y = 175$ , feed point no.2 at  $X = -700$  and  $Y = -175$ , feed point no.3 at  $X = 700$  and  $Y = 175$  and feed point no.4 at  $X = 700$  and  $Y = -175$  are equal as 135,488 V/m.

The diffusion characteristics of the electric field showed that the asymmetric electric field diffusion of the side of the heating unit to the first and second dielectric set attached to the metal wall was simulated. The electric field is spread to the wall of the metal room. This causes the energy input does not completely occur directly at the diode load because it is also spread to the walls of the simulated metal room.

Figure 5(b) shows electric field intensity when the distance between two sets of electrodes is 850 mm, the electric field intensity of feed point no.1 at  $X = -500$  and  $Y = 175$ , feed point no.2 at  $X = -500$  and  $Y = -175$ , feed point no.3 at  $X = 500$  and  $Y = 175$  and feed point no.4 at  $X = 500$  and  $Y = -175$  are equal as 141,152 V/m. In which the electric field intensity is highest at the center of the input power point and decrease when the distance from the input power point is the same as in case 1, the diffusion characteristics of the electric field found that the

propagation of the electric field spread symmetrically around the dielectric heating sets, causing all the energy input to occur at the dielectric load directly. Finally, Figure 5(c) shows electric field intensity when the distance between two sets of electrodes is 450 mm, the electric field intensity of feed point no.1 at X = -300 and Y = 175, feed point no.2 at X = -300 and Y = -175, feed point no.3 at X = 300 and Y = 175 and feed point no.4 at X = 300 and Y = -175 are equal as 132,567 V/m. In which the electric field intensity is highest at the center of the power supply point and decreases as the distance

from the power supply points is the same as in case 1 and case 2. The electric field distribution showed that there is an asymmetric electric field distribution around the heating unit to the first and second dielectric due to the diaphragm heating. Electrode set 1 and set 2 are close together, causing the diffusion of electric fields overlap in the middle between the dielectric heating units. Moreover, when entering energy to the dielectric load, the input energy does not occur at all dielectric loads directly. Due to the loss of areas where the electric field intensity overlaps.

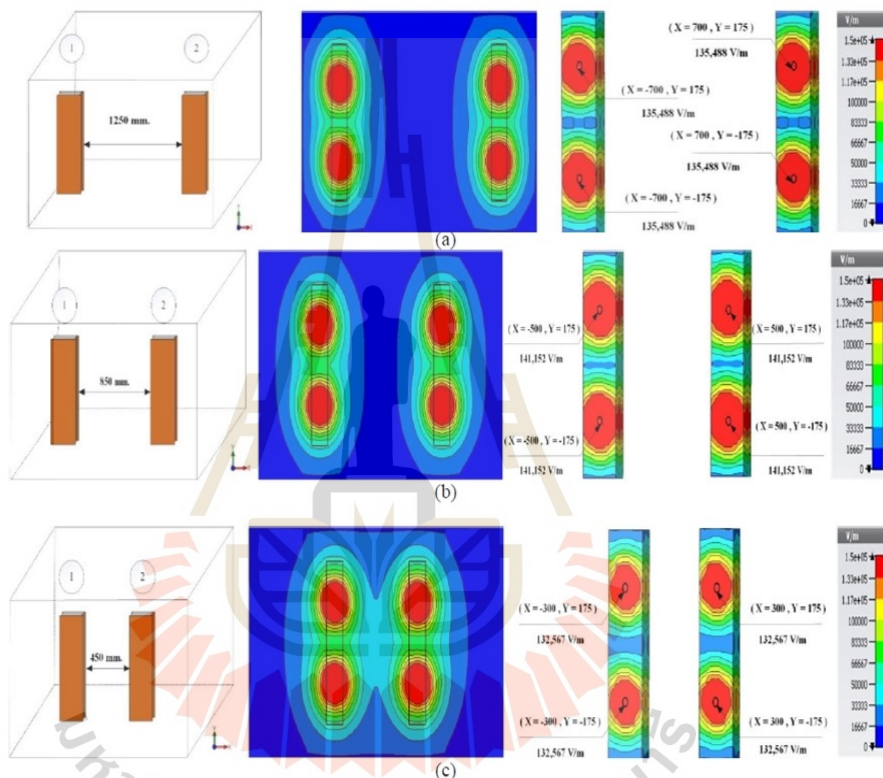


Figure 5: The simulation results of the electric field distribution and electric field intensity, when (a) simulate of dielectric heating at a distance of 1,250 mm, (b) simulate of dielectric heating at a distance of 850 mm, (c) simulate of dielectric heating at a distance of 450 mm

The simulation results of dielectric heating in all 3 cases show the electric field distribution and the electric field intensity occurring at the four power input ports. In which the electric field distribution and electric field intensity are maximum at the position center of input port power and decrease with the greater distance from the feed point in all cases. In case of the distance between two sets of electrodes as 850 mm has the best electric field distribution and electric field intensity that is 141,152 V/m. This value indicates that the load can absorb the electric field as

well and there is very little mutual coupling between the two sets of power sources. Moreover, electric field distribution and electric field intensity in case 1 and 2 is closest is 135,488 V/m and 132,567 V/m. When the distance between two sets of electrode as 1,250 mm and 450 mm, respectively. The reason that these two cases have electrical near-field values less than case 2. Because a lot of mutual coupling is occurred between two ports power in case 1 and the structure of two electrode set is closed to metal chamber that is performed as ground.



## V. CONCLUSION

Electric field distribution and electric field intensity in dielectric heating process is analyzed when two sets of electrode are arranged with the distance between electrode set is varied. The parallel technique of two set dielectric heating in the same metal chamber is designed in this research with the electrical power source as 20 kW at the frequency of 39 MHz resonance frequency. The simulation consists of three cases, in which each case determines the distance between the dielectric heating sets, in case 1 has a distance of 1,250 mm, in case 2 has a distance of 850 mm and in case 3 has a distance of 450 mm for considering the electric near-field absorption at dielectric load as rice. As a result, the maximum electric field intensity is 141,152 V/m. For resulting, the highest efficiency of dielectric heating system is raised when the system consists of two sets of electrode structure in a metal chamber size of 1200 × 1200 × 1000 mm<sup>3</sup>. This research is believed to be able to continue to be used to dielectric heating using radio frequencies for use in the agricultural industry.

## REFERENCES

- [1] H. Samago, O. Lucia, A. Mediano, and JM. Burdio, "Class-D/DE Dual-Mode-Operation Resonant Converter for Improved-Efficiency Domestic Induction Heating System," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, pp. 1274-1285.
- [2] Zhang, L. h., Xu, H. d. and Li, S. F., "Effects of micronization on properties of *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne fruit powder," *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, vol. 10, no. 4, pp. 633-637, 2009.
- [3] Idris Ahmed Ali, "Effect of load on the heating efficiency and temperature uniformity in multimode cavity applicators," *Journal of microwave power and electromagnetic energy*, vol. 50, no.2, pp. 123-137, 2016.
- [4] S.O. Nelson, "Agricultural applications of dielectric measurements," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 13, pp. 688-702, 2006.
- [5] S. O. Nelson, "Dielectric properties of agricultural products Measurements and Applications," *IEEE Trans. Elect. Insul.*, vol. 26, pp. 845-869, 1991
- [6] Nelson, S. O., and Stetson, L. E. (1974). "Comparative Effectiveness of 39- and 2450-MHz Electric Fields for Control of Rice Weevils in Wheat," *J. Econ. Entomol.*, vol. 67, No. 5, pp. 592-595, 1974
- [7] Ratniyomchai, K., Santalunai, S., Thosdeekoraphat, T. and Thongsopa, C., "Optimization of Capacitor Copper Plate for Dielectric Heating to Eliminate Insect," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 343, pp.101-105, 2013.
- [8] Santalunai, S., Thosdeekoraphat, T., Thongsopa, C. "The Effect of Electric Field Distributions on Grains and Insect for Dielectric Heating Applications," *International Journal of Biomedical, Veterinary, Agricultural and Food Engineering*, vol. 8, No. 7, pp. 667-673, 2014.
- [9] Santalunai, S., and Thongsopa, C. "The Effect of Electric Field Distributions on Mixture Dielectric Loads by Using Electrode Plate for Pests Controls in Agriculture," *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, vol. 4 no. 4, pp. 305-308, 2016.
- [10] V. Komarov, "Dielectric and Thermal Properties of Materials at Microwave Frequencies," *Handbook*, Artech House, 2012.



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## ประวัติผู้เขียน

นายวิวัฒน์ เจริญศิริ เกิดเมื่อวันที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2538 ที่อำเภอบ้านด่าน จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาต้นและตอนปลายที่โรงเรียนรณรงค์บุรีพิทยาคม รัชมังคลาภิเษก อำเภอบ้านด่าน จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2561 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

