

ออกแบบเครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุด้วยเซมิคอนดักเตอร์และปรับปรุง
ความสม่ำเสมออุณหภูมิสำหรับให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกในข้าวสาร



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2564

DESIGN HIGH POWER RADIO FREQUENCY GENERATOR USING ALL
SEMICONDUCTOR DEVICES AND DIELECTRIC HEATING
UNIFORMITY IMPROVEMENT IN RICE



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 2021

ออกแบบเครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุด้วยเซมิคอนดักเตอร์และปรับปรุงความ
สม่ำเสมออุณหภูมิสำหรับให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกในข้าวสาร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภะ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.ธนเสถียร ทศศิกรพัฒน์)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อดิศักดิ์ รัตนน้ำล้อม : ออกแบบเครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุด้วยเซมิคอนดักเตอร์และปรับปรุงความสม่ำเสมออุณหภูมิสำหรับให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกในข้าวสาร (DESIGN HIGH POWER RADIO FREQUENCY GENERATOR USING ALL SEMICONDUCTOR DEVICES AND DIELECTRIC HEATING UNIFORMITY IMPROVEMENT IN RICE)
อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภณ, 103 หน้า.

คำสำคัญ : การให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก แผ่นตัวนำทรงกระบอก ความสม่ำเสมออุณหภูมิ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอการออกแบบเครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุด้วยเซมิคอนดักเตอร์และปรับปรุงความสม่ำเสมออุณหภูมิสำหรับให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกในข้าวสาร เป็นวิธีทำให้วัตถุที่เป็นกลางทางไฟฟ้าหรือไม่นำไฟฟ้า เมื่อให้สนามไฟฟ้าแกว่งตัวชนิดนี้ จะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งเป็นวิธีที่ถูกใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากไม่มีสารเคมีตกค้าง ไรต่อการเกิดความร้อน และไม่เสียคุณภาพข้าวสารอย่างมีนัยสำคัญ การให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริกส่วนหนึ่งที่สำคัญ คือ ประสิทธิภาพการทำงานของแหล่งกำเนิดพลังงาน และการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในข้าวสารอย่างสม่ำเสมอหลังจากการให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริก ผู้วิจัยจึงพัฒนาแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าด้วยวงจรขยายกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ ประสิทธิภาพการทำงานมากกว่าการใช้หลอดแมกนีตรอนเป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน และความถี่ที่เลือกใช้ คือ 27.12 MHz เนื่องจากเป็นความถี่มาตรฐานตามกำหนด ISM (Industrial Sciences Medicine) ในส่วนของวงจรขยายกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ ผู้วิจัยได้เลือกใช้วงจรขยายกำลังงานคลาสบี พูช-พูล ซึ่งเป็นวงจรขยายกำลังงานคลาสหนึ่ง ที่สามารถให้ประสิทธิภาพการทำงานมากกว่าการใช้หลอดแมกนีตรอน สำหรับการให้ความร้อนเกิดขึ้นสม่ำเสมอภายในข้าวสารหลังจากให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริก ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอด้วยการใช้แผ่นอิเล็กโทรดทรงกระบอกขนานและประเมินผลความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานด้วยผลการจำลองทางคณิตศาสตร์และตรวจวัดผลความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้น

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนักศึกษา อดิศักดิ์ รัตนน้ำล้อม
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ชาญชัย ทองโสภณ

ADISAK RATTANANAMLOM : DESIGN HIGH POWER RADIO FREQUENCY
GENERATOR USING ALL SEMICONDUCTOR DEVICES AND DIELECTRIC HEATING
UNIFORMITY IMPROVEMENT IN RICE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.
CHANCHAI THONGSOPA, Ph.D., 103 PP.

Keyword : RF heating, dielectric heating, cylindrical electrode plate, temperature
uniformity

This research presents the design of all solid-state devices radio frequency generator and improving the temperature uniformity for dielectric heating in rice. This method is commonly used to heat non-conductive material since, heat can be generated within material when it is in strong electric field. This is a widely used method to heat up rice since, it does not contain chemical residues and it is easy to heat up. Moreover, it does not significantly degrade the quality of rice. The efficiency of the power source and the uniform distribution of heat generated within the rice are important parameters and, hence, a radio frequency power source with a power amplifier circuit is developed. This power source is more efficient than a Triode Tube as a power source. The operating frequency of this is 27.12 MHz, since it is in the ISM (Industrial Sciences Medicine). The radio frequency power amplifier circuit is chosen to be a class B push-pull power amplifier circuit, that can provide much more efficiency than using single Triode Tube. Moreover, it can generate uniform heat inside the rice. To archive uniform heat, parallel cylindrical electrode is proposed, then electric field intensity inside this structure and the thermal uniformity is evaluated by mathematical simulations. Furthermore, the thermal uniformity was measured in the experiment.

School of Electronic Engineering
Academic Year 2021

Student's Signature อดิศักดิ์ รัตนนามลอม
Advisor's Signature T. Chanchai

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดรวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนเสถียร ทศศิริพัฒน์ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญส่ง สุตะพันธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำราญ สันทาลุนัย อาจารย์ ดร.ศุภวัฒน์ คชประดิษฐ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ทางวิชาการ และให้โอกาสในการศึกษา

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาที่สนับสนุนเงินทุนสำหรับการตีพิมพ์บทความในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ และเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกด้านเครื่องมืออุปกรณ์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้ความรักความอบอุ่น และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด อีกทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อแท้และทุกข์ใจ ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดามารดา รวมถึงญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบัน จนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

อดิศักดิ์ รัตนน้ำล้อม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฒ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	5
1.4 ปรัชญาหรือกรอบแนวคิด	5
1.4.1 แหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุด้วยหลอดแมกนีตรอน	5
1.4.2 แหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุด้วยสารกึ่งตัวนำ	6
1.4.3 การปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ	7
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	14
2.1 องค์ประกอบวงจรกำเนิดพลังงานคลื่นความถี่วิทยุกำลังงานสูงด้วยอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ.....	14
2.1.1 วงจรบัฟเฟอร์.....	15
2.1.2 วงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสเอ.....	16
2.1.3 วงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสบีพัส-พาส.....	17
2.1.4 วงจรรวมกำลังงานหรือแบ่งกำลังงานของวิลกินสัน	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.5 หม้อแปลงความถี่สูงหรือบาลัน	20
2.1.6 วงจรเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์รูปตัวแอล	21
2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ	23
2.2.1 การมีขั้วของโมเลกุล	23
2.2.2 คุณสมบัติไดอิเล็กตริก	25
2.2.3 สนามไฟฟ้าและตัวเก็บประจุภายในตัวนำทรงกระบอกขนาน	26
2.2.4 ความเข้มของพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ	28
2.2.5 ความสามารถทะลุผ่านของคลื่น	29
2.3 สรุป	29
3 การออกแบบวงจรพลังงานคลื่นความถี่วิทยุกำลังงานสูงและอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิเตอร์	
ขนานสำหรับปรับปรุงความร้อนแก๊วสตูไดอิเล็กตริก	31
3.1 ชุดวงจรพลังงานคลื่นความถี่วิทยุสำหรับให้ความร้อนแก๊วสตูไดอิเล็กตริก	32
3.1.1 ชุดวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ	32
3.1.2 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสเอ	34
3.1.3 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณย่านความถี่วิทยุคลาสบีแบบพุช-พูล	40
3.1.4 การออกแบบวงจรรวมกำลังงานหรือแบ่งกำลังงานย่านความถี่วิทยุ	42
3.2 การจำลองผลทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงาน...	45
3.2.1 ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานที่เกิดขึ้น ภายในวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อขนาดอิเล็กทรอนิกส์ทรานเปลี่ยนแปลง	46
3.2.2 ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงาน ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อเพิ่มโพสิทีฟโพสิทีฟ	51
3.3 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิเตอร์ขนานสำหรับการปรับปรุงความสม่ำเสมอของ อุณหภูมิภายในวัสดุไดอิเล็กตริก	54

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.1	องค์ประกอบอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกขนานสำหรับการปรับปรุงความ สม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในวัสดุไดอิเล็กตริก	54
3.3.2	การเข้าสู่โครงข่ายระหว่างอิมพีแดนซ์ 50 โอห์มและอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริก	55
3.4	สรุปและอภิปรายผล	56
4	การทดสอบและผลการทดสอบ	57
4.1	ขั้นตอนการทดสอบ	57
4.1.1	วงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ	58
4.1.2	วงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ	58
4.1.3	วงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ	60
4.1.4	วงจรรวมกำลังงานหรือแบ่งกำลังงานย่านความถี่วิทยุ	61
4.1.5	วงจรจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ	62
4.1.6	การเข้าสู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์ระหว่างจ่ายพลังงานและอิเล็กทรอนิกส์	63
4.1.7	การให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริก	64
4.2	ผลการทดสอบ	66
4.2.1	วงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ	66
4.2.2	วงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ	67
4.2.3	วงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ	70
4.2.4	วงจรรวมกำลังงานหรือแบ่งกำลังงานย่านความถี่วิทยุ	72
4.2.5	วงจรจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ	73
4.2.6	การเข้าสู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์ระหว่างแหล่งจ่ายพลังงานและอิเล็กทรอนิกส์	75
4.2.7	การให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริก	76
4.3	สรุปและอภิปรายผล	80
5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	81
	เอกสารอ้างอิง	83

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	89
ประวัติผู้เขียน	103



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ค่าการจำลองความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อรัศมีตัวนำด้านนอกเปลี่ยนแปลง	48
3.2	ค่าการจำลองความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อรัศมีตัวนำด้านในเปลี่ยนแปลง	50
3.3	ค่าการจำลองความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อมีโพลีโพรไพลีนที่ตำแหน่งต่างๆ	54
4.1	ผลการวัดกำลังงานจากวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ	67
4.2	ผลการเปรียบเทียบของอุณหภูมิเฉลี่ย ดัชนีชี้วัดความสม่ำเสมอ และอัตราการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิเมื่อไม่มีโพลีโพรไพลีน	78
4.3	ผลการเปรียบเทียบของอุณหภูมิเฉลี่ย ดัชนีชี้วัดความสม่ำเสมอ และอัตราการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิเมื่อมีโพลีโพรไพลีน	79

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ผลการเปรียบเทียบอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของความชื้นและอุณหภูมิด้วยวิธีการใช้ลมร้อน ตู้อบและคลื่นวิทยุ3
1.2	ผลการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุและผลการจำลอง4
1.3	แผนภาพวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุด้วยหลอดแมกนีตรอน.....6
1.4	แผนภาพชนิดของวงจรขยายสัญญาณ.....6
1.5	รูปแบบการนำสัญญาณของวงจรขยายสัญญาณชนิดต่อเนื่อง7
1.6	การปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนด้วยรูปทรงของบรรจุภัณฑ์มีมุมรัศมีโค้ง8
1.7	ผลการปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนด้วยบรรจุภัณฑ์มีมุมรัศมีโค้ง9
1.8	การปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนด้วยการเพิ่ม PEI บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ9
1.9	ผลการปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนด้วยการเพิ่ม PEI บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ..... 10
1.10	การปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนด้วยการเพิ่มวัสดุภายในตัวอย่างบริเวณอุณหภูมิต่ำ 11
1.11	การปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิด้วยสายพานลำเลียงต่างระดับ 11
1.12	การปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนด้วยวิธีการกวนตัวอย่าง 12
2.1	แผนภาพโครงสร้างวงจรให้กำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ 15
2.2	แผนภาพโครงสร้างวงจรบัฟเฟอร์..... 16
2.3	แผนภาพการนำสัญญาณของวงจรขยายสัญญาณคลาสเอ..... 16
2.4	แผนภาพการนำสัญญาณของวงจรขยายสัญญาณคลาสบี..... 17
2.5	แผนภาพวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสบีพูช-พูล..... 18
2.6	แผนภาพวงจรรวมหรือแบ่งกำลังงานของ Wilkinson ในสายนำสัญญาณ 18
2.7	คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายนำสัญญาณ..... 19
2.8	แผนภาพวงจรรวมกำลังงานหรือรวมกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ 20

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.9	การนำสัญญาณของหม้อแปลงบาลัน..... 20
2.10	แผนภาพวงจรการเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์รูปตัวแอล (ก) ความถี่ต่ำผ่านเมื่ออิมพีแดนซ์ โหลดมากกว่าแหล่งจ่าย (ข) ความถี่ต่ำผ่านเมื่ออิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายมากกว่าโหลด (ค) ความถี่สูงผ่านเมื่ออิมพีแดนซ์โหลดมากกว่าแหล่งจ่าย (ง) ความถี่สูงผ่านเมื่ออิมพีแดนซ์ แหล่งจ่ายมากกว่าโหลด..... 22
2.11	การเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าและไดโพลเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า 23
2.12	แผนภาพสนามไฟฟ้าภายในอิเล็กโทรดทรงกระบอกขนาน..... 26
3.1	แผนภาพโครงสร้างระบบการให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริกทรงกระบอกด้วยคลื่นความถี่ วิทยุ..... 31
3.2	แผนภาพโครงสร้างวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ..... 32
3.3	แผนภาพวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 33
3.4	แผนผังวงจรสำหรับประกอบวงจรชุดกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 34
3.5	ชุดวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 34
3.6	แผนภาพโครงสร้างวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสเอ..... 34
3.7	แผนภาพวงจรการเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์ฝั่งอินพุตของวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ คลาสเอ 35
3.8	แผนภาพวงจรการเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์ฝั่งอินพุตของวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ คลาสเอหลังการออกแบบ..... 36
3.9	แผนภาพวงจรการเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์เอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ คลาสเอ 37
3.10	แผนภาพวงจรการเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์เอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ คลาสเอหลังการออกแบบ..... 38
3.11	แผนภาพวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสเอ 39
3.12	แผนภาพวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสเอ 39
3.13	แผนผังวงจรสำหรับประกอบวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสเอ 40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14	วงจรรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสเอ 40
3.15	แผนภาพวงจรรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสบีแบบพุก-พุกขนาน 41
3.16	วงจรรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสบีแบบพุก-พุกขนาน 42
3.17	แผนภาพวงจรรวมกำลังงานหรือรวมกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุหลังการออกแบบ 43
3.18	วงจรรแบ่งกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ 43
3.19	วงจรรวมกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ 44
3.20	โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิตเตอร์สำหรับให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริก 45
3.21	ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อรัศมีตัวนำภายใน 20 มิลลิเมตร และตัวนำภายนอกรัศมี 40 มิลลิเมตร 46
3.22	ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อรัศมีตัวนำภายใน 20 มิลลิเมตร และตัวนำภายนอกรัศมี 60 มิลลิเมตร 47
3.23	ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อรัศมีตัวนำภายใน 20 มิลลิเมตร และตัวนำภายนอกรัศมี 80 มิลลิเมตร 47
3.24	ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อรัศมีตัวนำภายใน 20 มิลลิเมตร และตัวนำภายนอกรัศมี 100 มิลลิเมตร 47
3.25	ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อรัศมีตัวนำภายใน 20 มิลลิเมตร และตัวนำภายนอกรัศมี 120 มิลลิเมตร 48
3.26	ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อรัศมีตัวนำภายนอก 120 มิลลิเมตร และตัวนำภายในรัศมี 40 มิลลิเมตร 49
3.27	ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อรัศมีตัวนำภายนอก 120 มิลลิเมตร และตัวนำภายในรัศมี 60 มิลลิเมตร 49
3.28	ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อรัศมีตัวนำภายนอก 120 มิลลิเมตร และตัวนำภายในรัศมี 80 มิลลิเมตร 49
3.29	ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อรัศมีตัวนำภายนอก 120 มิลลิเมตร และตัวนำภายในรัศมี 100 มิลลิเมตร 50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.30	ตำแหน่งการวางโพลีโพรไพลีนในอิเล็กทรอนิกส์ทรานซอร์มเมอร์ (ก) เมื่อไม่มีภายในอิเล็กทรอนิกส์ (ข) เมื่ออยู่บริเวณขั้วนำด้านนอก (ค) เมื่อล้อมรอบขั้วนำด้านใน (ง) เมื่ออยู่ที่ทั้ง 2 บริเวณ.. 52
3.31	ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อไม่มีโพลีโพรไพลีน 52
3.32	ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อมีโพลีโพรไพลีนขั้วนำด้านนอก..... 53
3.33	ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อมีโพลีโพรไพลีนล้อมรอบขั้วนำด้านใน..... 53
3.34	ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อมีโพลีโพรไพลีนขั้วนำด้านนอกและล้อมรอบขั้วนำด้านใน..... 53
3.35	องค์ประกอบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซอร์มเมอร์ (ก) เมื่อไม่มีโพลีโพรไพลีน (ข) เมื่อมีโพลีโพรไพลีนล้อมรอบขั้วนำด้านใน (ค) เมื่อไม่มีโพลีโพรไพลีนและมีขั้วสาร (ง) เมื่อมีโพลีโพรไพลีนล้อมรอบขั้วนำด้านในและมีขั้วสาร..... 55
4.1	การทดสอบวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ..... 58
4.2	การวัดค่าการสะท้อนกลับสัญญาณของวงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ..... 59
4.3	การวัดการทำงานของวงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ..... 60
4.4	การวัดค่าการสะท้อนกลับสัญญาณของวงจร (ก) แบ่งกำลังงาน (ข) รวมกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ..... 61
4.5	ชุดวงจรจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ..... 62
4.6	การวัดค่าการสะท้อนกลับสัญญาณของตัวปล่อยคลื่น..... 63
4.7	การทดสอบให้ความร้อนแก่สารไดอิเล็กทริกโดยใช้สนามไฟฟ้าคลื่นความถี่วิทยุ..... 64
4.8	ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิหลังให้ความร้อนด้วยสนามไฟฟ้าคลื่นความถี่วิทยุ..... 65
4.9	การวัดแถบสเปกตรัมวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ..... 67
4.10	ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณฝั่งอินพุตของวงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ..... 68
4.11	ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณฝั่งเอาต์พุตของวงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ..... 68
4.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุต (dBm) และเอาต์พุต (dBm) ของวงจรขับสัญญาณที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต..... 69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานเอาต์พุต (W) และอัตราขยาย (dB) ของวงจรขับสัญญาณที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต	69
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานเอาต์พุตและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของวงจรขับสัญญาณที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต	70
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุต (dBm) และเอาต์พุต (dBm) ของวงจรขยายสัญญาณที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต	71
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานเอาต์พุต (W) และอัตราขยาย (dB) ของวงจรขยายสัญญาณที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต	71
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานเอาต์พุตและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของวงจรขยายสัญญาณที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต	72
4.18 ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณและค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณของวงจรแบ่งกำลังงาน..	73
4.19 ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณและค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณของวงจรรวมกำลังงาน ..	73
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุต (dBm) และเอาต์พุต (dBm) ของวงจรจ่ายพลังงานที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต	74
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานเอาต์พุต (W) และอัตราขยาย (dB) ของวงจรจ่ายพลังงานที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต	74
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานเอาต์พุตและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของวงจรจ่ายพลังงานที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต	75
4.23 ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิเตอร์เมื่อไม่มีโพสิโพรไฟลีนหลังการเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์	76
4.24 ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิเตอร์เมื่อมีโพสิโพรไฟลีนหลังการเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์	76
4.25 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในข่าวสารเมื่อได้รับกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุต่างๆ ในรูปแบบไม่มีโพสิโพรไฟลีนล้อมรอบ	77
4.26 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในข่าวสารเมื่อได้รับกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุต่างๆ ในรูปแบบมีโพสิโพรไฟลีนล้อมรอบ	77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.27	ผลของอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นในข้าวสารหลังให้กำลังงานคลื่นความถี่วิทยุที่ระกัับพลังงานต่างๆ	79
4.28	ผลของอุณหภูมิความร้อนที่บริเวณด้านในและด้านนอก.....	80



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

CH_3Br	=	Methyl bromide
C	=	ค่าเก็บประจุไฟฟ้า
c	=	ความเร็วแสงในอากาศว่าง
C_p	=	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ
D	=	flux density
dT	=	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
dt	=	การเปลี่ยนแปลงเวลา
E	=	electric field
L	=	ค่าเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า
P	=	dipole moment
PH_3	=	Phosphine
Q	=	quality factor
q	=	ประจุไฟฟ้า
Q_v	=	power loss density
R	=	ค่าต้านทานไฟฟ้า
R_{VR}	=	ตัวต้านทานเสมือน
R_S	=	source resistance
R_L	=	load resistance
S_{11}, S_{22}	=	reflection coefficient
S_{21}, S_{31}	=	transmission coefficient
X_C	=	capacitive reactance
X_e	=	electric susceptibility
X_L	=	inductive reactance
Z	=	impedance
α'	=	polarization

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ϵ^*	=	complex permittivity
ϵ'	=	dielectric constant
ϵ''	=	dielectric loss
ϵ_0	=	permittivity of free space
ϵ_r	=	relative permittivity
σ	=	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
λ	=	ความยาวคลื่น
μ	=	ค่าเฉลี่ย
η	=	ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า
ρ	=	ความหนาแน่นของวัสดุ
BALUN	=	Balance to Unbalance
DC	=	ไฟฟ้ากระแสตรง
FEM	=	Finite element method
FCC	=	Federal Communications Commission
IR	=	infrared
ISM	=	Industrial Sciences Medicine
MOSFET	=	Metal oxide semiconductor field effect transistor
PCB	=	printed circuit board
PEI	=	Polyetherimide
PP	=	Polypropylene
UI	=	uniformity index
UNEP	=	United Nations Environment Programme

บทที่ 1

บทนำ

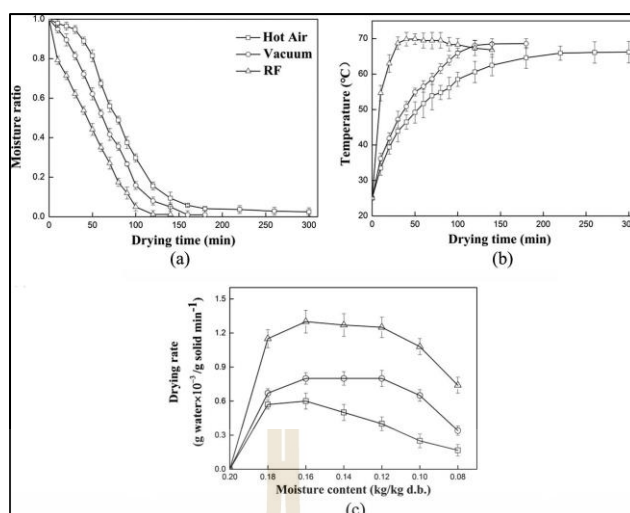
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวเป็นอาหารหลักในเอเชีย มีส่วนประกอบที่เติมไปด้วยคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นแหล่งพลังงานให้กับร่างกาย และเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจที่สำคัญในประเทศไทย แต่มอดข้าวซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลให้คุณภาพข้าวเสียหาย เนื่องจากถูกกัด เจาะ วางไข่เพื่อขยายพันธุ์ ก่อสารเหนียวจากมูลเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดราได้ จึงไม่เป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมข้าวทั้งภายในและต่างประเทศ การใช้สารเคมีรมควันมีต้นทุนต่ำและง่ายต่อการกำจัดแมลงศัตรูข้าว คือ ฟอสฟีน (PH_3) และเมทิลโบรไมด์ (CH_3Br) เป็นต้น ซึ่งเป็นสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ สิ่งแวดล้อม และยังส่งผลในการทำลายชั้นบรรยากาศ จึงถูกยกเลิกใช้จากโครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ (United Nations Environment Programme, UNEP 1992) ในโครงการพิธีสารมอนทรีออล (Montreal Protocol) ในประเทศที่พัฒนาแล้วและประเทศที่กำลังพัฒนา (Yang et al., 2018) นอกจากนี้การใช้สารเคมียังส่งผลให้แมลงศัตรูข้าวมีภูมิต้านทานต่อสารเคมีในรุ่นต่อไป ส่งผลให้อัตราการตายของแมลงศัตรูข้าวลดลง (Benhalima et al., 2004) การแปรรูปด้วยความร้อนเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดวิธีหนึ่งในการถนอมผลผลิตทางการเกษตรหรือเมล็ดพันธุ์พืช เนื่องจากไม่ใช้สารเคมี กระบวนการทางความร้อนไม่เพียงแต่ลดความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา แต่ยังรวมถึงการกำจัดแมลงศัตรูพืช และแบคทีเรีย อย่างไรก็ตาม ผลผลิตทางการเกษตรที่มีความชื้นต่ำมีผลให้ค่าการนำความร้อนต่ำ การใช้ลมร้อนต้องใช้เวลาานสำหรับผลผลิตที่มีปริมาณมาก ซึ่งอาจทำลายคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตรได้ การนึ่งหรือการให้ความร้อนด้วยน้ำร้อนเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพอุณหภูมิกระจายได้ทั่วถึง แต่ผลผลิตทางการเกษตรที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยน้ำร้อนแล้วจะต้องทำให้แห้งอีกครั้งก่อนจัดเก็บ ในประเทศไทยได้ใช้วิธีทางธรรมชาติโดยไม่พึ่งสารเคมีในการกำจัดมอดข้าวในข้าวสาร ซึ่งเป็นวิธีที่เกษตรกรส่วนใหญ่ใช้ เป็นวิธีการป้องกันโดยการลดความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกก่อนแปรรูปเป็นข้าวสาร ด้วยการตากบนลานที่เป็นวัสดุแห้ง สะอาด และความหนาของกองเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกที่นำไปตากจะไม่เกิน 10 เซนติเมตร เนื่องจากจะทำให้เมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกที่อยู่ด้านล่างโดนความร้อนไม่ทั่วถึง ในระหว่างการตากนั้นจะต้องกลับกองเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกทุก ๆ 2 ชั่วโมงหรือวันละ 4 ครั้ง เพื่อให้ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ ใช้เวลาประมาณ 3 วัน ให้ความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกเหลืออยู่ประมาณ 10 ถึง 14 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะช่วยป้องกันศัตรูพืชเข้าทำลาย

ผลผลิตทางการเกษตรได้ดี อีกทั้งยังทำให้สามารถเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ข้าวได้นานอีกด้วย (รักบ้านเกิด, 2558) ซึ่งวิธีนี้ใช้ระยะเวลาานและต้องใช้พื้นที่เป็นลานกว้างในการตากเมล็ดพันธุ์ข้าวจำนวนมาก

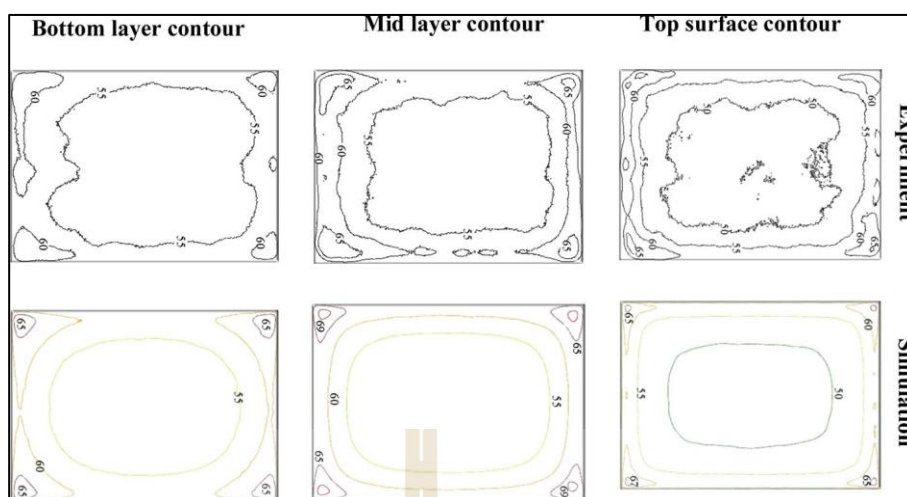
นอกจากนี้ยังมีวิธีการให้ความร้อนแบบใหม่ เช่น การแผ่รังสีอินฟราเรด (Infrared) ไมโครเวฟ (Microwave) และการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (Ohmic heating) แม้ว่าเทคโนโลยีเหล่านี้จะมีข้อดีหลายประการ แต่วิธีการให้ความร้อนที่เกิดขึ้นใหม่เหล่านี้อาจเป็นการให้ความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอหรือการซึมผ่านของความร้อนทะลุผ่านไม่ลึกมาก และส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

การให้ความร้อนแก่สารไดอิเล็กทริกโดยใช้สนามไฟฟ้าย่านความถี่วิทยุ เป็นวิธีการทำให้วัตถุที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า มีการจัดเรียงอนุภาคตามทิศทางของสนามไฟฟ้า และเกิดความร้อนขึ้นภายในตัวอย่างรวดเร็วและสามารถแทรกซึมเข้าไปภายในวัสดุที่มีความหนาได้ลึก เมื่อเทียบกับเทคนิคการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งที่ถูกพัฒนามาเป็นเวลานานและสามารถใช้ได้ในระดับอุตสาหกรรม มีผลงานวิจัยทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อศึกษาการอบแห้งและคุณภาพน้ำมันถั่ววอลนัทหลังจากอบแห้ง ด้วยวิธีการอบแห้ง 3 วิธี ได้แก่ การอบแห้งด้วยคลื่นความถี่วิทยุ การอบแห้งด้วยสุญญากาศ และการอบแห้งด้วยลมร้อน แสดงให้เห็นอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิเฉลี่ยในตัวอย่าง และอัตราการแห้งระหว่างกระบวนการอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ผลลัพธ์แสดงว่า เวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้นที่สุด คือ การอบแห้งด้วยคลื่นความถี่วิทยุใช้เวลา 138 นาที ตามด้วยการอบแห้งด้วยสุญญากาศใช้เวลา 185 นาที และสุดท้ายอบแห้งด้วยลมร้อนใช้เวลา 300 นาที (Zhou et al., 2018) ผลงานวิจัยศึกษาเปรียบเทียบการให้ความร้อนข้าวสารสำหรับการกำจัดศัตรูพืช ด้วยการใช้ลมร้อนที่ 50 องศาเซลเซียส และการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งการให้ความร้อนด้วยลมร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในกองข้าวใช้เวลา 480 นาที เพื่อให้อุณหภูมิสูงถึง 48 องศาเซลเซียส ในขณะที่ใช้คลื่นความถี่วิทยุต้องการเพียง 4.3 นาที เพื่อให้อุณหภูมิถึง 50 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าการใช้คลื่นความถี่วิทยุมีศักยภาพสูงในการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วและสามารถใช้ได้ในตัวอย่างปริมาณมาก (Zhou et al., 2015) มีรายงานพัฒนาการให้ความร้อนเพื่อลดความชื้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุร่วมกับการใช้ลมร้อนสำหรับถั่วแมคคาเดเมียที่ยังไม่เปลือกเปลือก ผลการวิจัยพบว่าความชื้นในถั่วแมคคาเดเมียลดลงอย่างมากเมื่อพลังงานคลื่นความถี่วิทยุและอุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้น เวลาในการลดความชื้นลดลงประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการให้ความร้อนด้วยลมร้อน (Wang, Zhang, Gao, et al., 2014; Wang, Zhang, Johnson, et al., 2014)



รูปที่ 1.1 ผลการเปรียบเทียบอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของความชื้นและอุณหภูมิด้วยวิธีการใช้ลมร้อน ตู้อบและคลื่นวิทยุ (Zhou et al., 2018)

อย่างไรก็ตามการกระจายตัวของอุณหภูมิความร้อนภายในตัวอย่างระหว่างการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ไม่สม่ำเสมอยังคงเป็นปัญหา เนื่องจากความร้อนในการกำจัดแมลงศัตรูพืชหรือการลดความชื้นไม่ทั่วถึง บางบริเวณเกิดอุณหภูมิสูงเกินไปส่งผลให้คุณภาพผลผลิตทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวเสียหาย ความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอได้รับการศึกษาในอาหารและผลผลิตทางการเกษตรจำนวนมาก เช่น ถั่วแห้ง ผักและผลไม้สด ธัญพืช และเนื้อสัตว์ ด้วยเทคโนโลยีเชิงตัวเลข แบบจำลองการคำนวณได้ถูกนำมาใช้ในการจำลองการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุเพื่อคาดการณ์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและการกระจายอุณหภูมิในวัสดุตัวอย่าง แบบจำลองวิธีการองค์ประกอบจำกัด (Finite element method, FEM) 3 มิติของการถ่ายเทความร้อนระหว่างการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุถูกสร้างขึ้นโดยใช้ถั่วเหลืองแห้งเป็นวัสดุทดสอบที่บรรจุในภาชนะพลาสติกสี่เหลี่ยมขนาด $300 \times 220 \times 60$ มิลลิเมตร และแบบจำลองได้รับการตรวจสอบโดยใช้ระบบทำความร้อนคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 เมกะเฮิรตซ์ กำลังงาน 6 กิโลวัตต์ ทั้งผลการจำลองและการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดในชั้นกลาง คือ 55 ถึง 65 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิในชั้นบน คือ 50 ถึง 60 องศาเซลเซียส และชั้นล่าง คือ 55 ถึง 60 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าในชั้นกลาง ดังแสดงในรูปที่ 1.2 นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิที่สูงประมาณ 60 ถึง 65 องศาเซลเซียส เกิดขึ้นที่ขอบและมุมของแต่ละชั้น และอุณหภูมิประมาณ 50 ถึง 55 องศาเซลเซียส เกิดขึ้นในพื้นที่ส่วนกลาง (Alfaifi et al., 2016; Hou et al., 2014; Huang et al., 2015) จุดร้อนที่ขอบและมุมอาจเกิดจากการหักเหและการสะท้อนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นความถี่วิทยุ ส่งผลให้ความหนาแน่นของพลังงานคลื่นความถี่วิทยุเพิ่มขึ้นในพื้นที่เหล่านี้ (Marra et al., 2007)



รูปที่ 1.2 ผลการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุและผลการจำลอง (Huang et al., 2015)

นอกจากนี้การปรับปรุงและพัฒนาในเรื่องของแหล่งกำเนิดพลังงานเป็นอีกเรื่องหนึ่งที่สำคัญที่ผ่านมามีการใช้หลอดแมกนีตรอนเป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน ซึ่งประสิทธิภาพการทำงานอยู่ที่ประมาณ 60 ถึง 65 เปอร์เซ็นต์ ราคาค่อนข้างสูง ประสิทธิภาพการทำงานค่อนข้างต่ำ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานเป็นอย่างมาก จึงได้มีการนำเครื่องขยายกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ (RF Power amplifier) ด้วยอุปกรณ์กึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า มีขนาดเล็ก และอายุการใช้งานที่มากกว่า ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สามารถสร้างสนามไฟฟ้าได้เช่นกัน (M. C. Lagunas-Solar, 2007) ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการออกแบบวงจรจ่ายกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ โดยการออกแบบวงจรด้วย MOSFET (Metal oxide semiconductor field effect transistor) แบบพุช-พูล (Push-pull) สามารถให้กำลังงานเอาต์พุตสูงถึง 2 กิโลวัตต์ และใช้วงจรรวมกำลังงาน (Power combiners) ความถี่สูงเพื่อให้ได้กำลังงานเอาต์พุตมากขึ้นถึง 4 กิโลวัตต์ ในการออกแบบนั้น ใช้การออกแบบที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต มากไปกว่านี้ได้นำเสนอการปรับปรุงลดตำแหน่งความร้อนสูงเกินไปของการให้ความร้อนแก่สารไดอิเล็กตริกด้วยแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิงกรอบและวัสดุโพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เครื่องขยายกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุด้วยอุปกรณ์กึ่งตัวนำถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานในการทดลองการกระจายความสม่ำเสมอของอุณหภูมิด้วยกำลังงานที่แตกต่างกัน 100 200 และ 300 วัตต์ โดยช่องว่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ที่ ความร้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุไดอิเล็กตริกหลังจากให้พลังงานไฟฟ้า ถูกตรวจสอบโดยการถ่ายภาพความร้อนจากกล้องอินฟราเรด (Infrared camera, IR camera) สำหรับการถ่ายโอนพลังงานสูงสุดระหว่างเครื่องขยายกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุและตัวปล่อยคลื่นขณะมีโหลด จำเป็นต้องมีการเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์ที่ตรงกัน (Matching impedance network) ในการศึกษานี้ ใช้วงจรเรโซแนนซ์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุแบบอนุกรม และการ

สะท้อนกำลัง (S11) วัดเครือข่ายที่ตรงกันโดย (Vector network analyzers, VNA) และยังได้จำลองรูปแบบการประยุกต์ใช้การให้ความร้อนไดโอดเล็กทรอนิกส์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของการสูญเสียพลังงานเมื่ออิเล็กทรอนิกส์มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกขนานและมีวัสดุโพสิโทรพิติน ตำแหน่งที่จะวางวัสดุโพสิโทรพิตินอยู่รอบๆ พื้นผิวด้านนอกของตัวนำด้านใน พื้นผิวด้านในของตัวนำด้านนอก และตัวนำทั้งสอง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาการออกแบบเครื่องขยายกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุด้วยอุปกรณ์กึ่งตัวนำกำลังงานสูงสำหรับใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานการให้ความร้อนแก่สารไดโอดเล็กทรอนิกส์

1.2.2 ศึกษาและวิเคราะห์ผลการปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นในข่าวสารด้วยหลักการให้ความร้อนแก่สารไดโอดเล็กทรอนิกส์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ออกแบบและสร้างเครื่องขยายกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุด้วยอุปกรณ์กึ่งตัวนำกำลังงานสูงสำหรับใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานการให้ความร้อนแก่สารไดโอดเล็กทรอนิกส์

1.3.2 ศึกษาผลของการปรับปรุงความสม่ำเสมอของความร้อนที่เกิดขึ้นในข่าวสารด้วยหลักการให้ความร้อนแก่สารไดโอดเล็กทรอนิกส์

1.3.3 ศึกษาความเข้มของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของการสูญเสียพลังงานจากผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จ

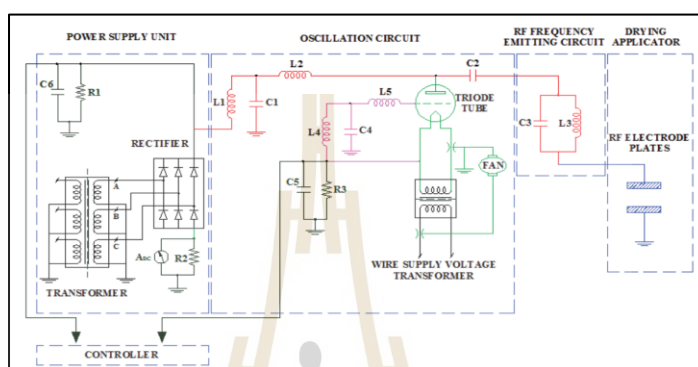
1.4 ปรัชญาวรรณกรรม

การใช้คลื่นความถี่วิทยุเป็นแหล่งพลังงานการให้ความร้อนแก่วัสดุไดโอดเล็กทรอนิกส์มีประโยชน์ให้เห็นอย่างชัดเจน คือ ช่วยลดเวลาในการให้ความร้อนหรืออบแห้ง ไม่มีสารเคมีตกค้าง สามารถใช้ได้ปริมาณมาก และไม่ส่งผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์เสียหายอย่างมีนัยสำคัญ ในงานวิจัยนี้เห็นความสำคัญของแหล่งกำเนิดพลังงานและการกระจายความร้อนที่ผลิตภัณฑ์อย่างสม่ำเสมอ จึงได้ศึกษาปรัชญาวรรณกรรมเกี่ยวกับการสร้างแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุและการกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอในผลิตภัณฑ์ด้วยหลักการการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

1.4.1 แหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุด้วยหลอดแมกนีตรอน

ด้วยเทคโนโลยีดั้งเดิมในการสร้างแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุได้ใช้หลอดแมกนีตรอน (Triode tube) ในการออกแบบ ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ผ่านตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า จากนั้นหม้อแปลงจะแปลงแรงดันไฟฟ้า 380 โวลต์ เป็น 6.5 กิโลโวลต์ ผ่าน

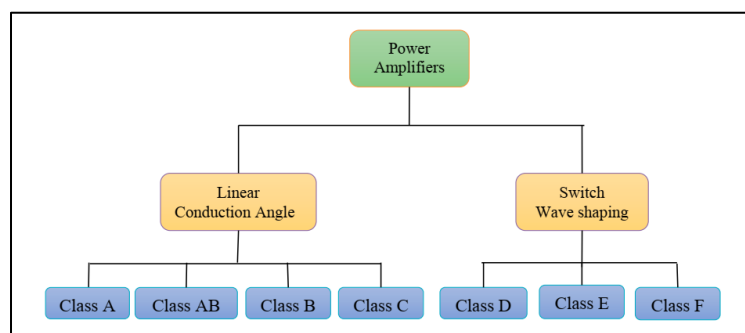
วงจรกรองเพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจร กำหนดความถี่ที่ขาแอโนดของหลอดแมกนีตรอน ในส่วนของวงจรถูกกำเนิดคลื่นความถี่ประกอบด้วย วงจรหลักๆ คือ หลอดแมกนีตรอนความถี่สูง และตัวเหนี่ยวนำขนานกับตัวเก็บประจุ ขาแคโทดของ หลอดแมกนีตรอนถูกต่อเข้ากับหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจาก 380 โวลต์ เป็น 12.6 โวลต์ กำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 27 เมกะเฮิร์ต ดังแสดงในรูปที่ 1.3 (Hay et al., 2018)



รูปที่ 1.3 แผนภาพวงจรถูกกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุด้วยหลอดแมกนีตรอน (Hay et al., 2018)

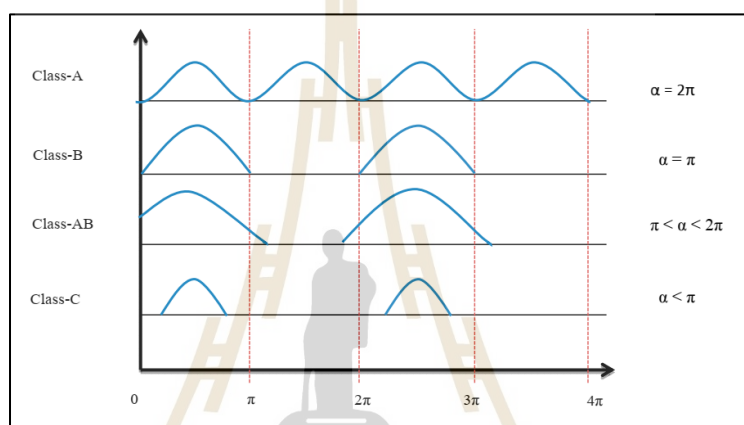
1.4.2 แหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุด้วยสารกึ่งตัวนำ

เทคโนโลยีในปัจจุบันสารกึ่งตัวนำมีบทบาทมากขึ้นด้านระบบการสื่อสารไร้สาย ทรานซิสเตอร์ถูกนำมาใช้ในส่วนของการขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ ประเภทของวงจรถายสัญญาณจะถูกแบ่งด้วยคลาสต่างๆ โดยหลักๆ แล้วจะมี 2 กลุ่ม คือ วงจรถายสัญญาณโหมดเชิงเส้น (Linear mode) และวงจรถายสัญญาณโหมดสวิตช์ (Switch mode) คลาสต่างๆ ของวงจรถายกำลังงาน เช่น A, AB, B, C, D, E และ F ดังแสดงในรูปที่ 1.4 ให้กำลังงานขับตั้งแต่ระดับมิลลิวัตต์ไปจนถึงกิโลวัตต์ ขึ้นอยู่กับการใช้งาน คลาสต่างๆ ถูกกำหนดด้วยการไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์



รูปที่ 1.4 แผนภาพชนิดของวงจรถายสัญญาณ (Hannan et al., 2014)

คลาสของวงจรขยายสัญญาณโหมตเชิงเส้นมีคลาสดังนี้ คือ A, AB, B และ C จะเป็นคลาสการทำงานสัญญาณต่อเนื่อง ในแต่ละคลาสจะแตกต่างกันที่มุมการนำสัญญาณ ขึ้นอยู่กับจุดไบอัสให้กับวงจร โดยคลาสเอจะนำสัญญาณ 360 องศา หรือขยายสัญญาณเต็มลูกคลื่น คลาสบีจะนำสัญญาณเพียงครึ่งเดียวหรือ 180 องศา คลาสเอบีจะนำสัญญาณที่มุมตั้งแต่มากกว่า 180 องศา แต่ น้อยกว่า 360 องศา ส่วนคลาสซีจะมีมุมการทำงานน้อยกว่า 180 องศา ดังรูปที่ 1.5 จะเห็นว่ามีเพียง คลาสเอที่ขยายสัญญาณได้เต็มลูกคลื่นหรือกล่าวได้ว่าสามารถขยายสัญญาณได้แล้วไม่เกิดการ ผิดเพี้ยนของสัญญาณ



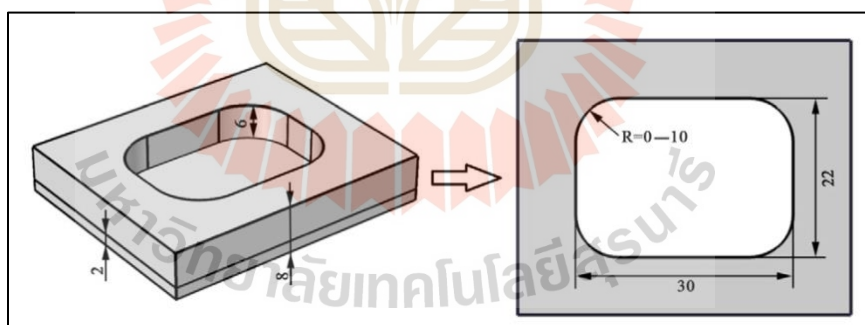
รูปที่ 1.5 รูปแบบการนำสัญญาณของวงจรขยายสัญญาณชนิดต่อเนื่อง

ในการใช้งานวงจรขยายสัญญาณในทรานซิสเตอร์แบบโหมตสวิทช์ จะทำงานเพียง 2 สถานะ คือ เปิดและปิดนั่นคือจะให้สถานะมีแรงดันไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ ซึ่งจะทำให้คาบเวลาระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าไม่ซ้อนทับกันที่ทรานซิสเตอร์จึงไม่เกิดกำลังงานขึ้นที่ทรานซิสเตอร์ ต่างจากโหมตเชิงเส้นที่มีบางช่วงเวลาเกิดกระแสและแรงดันไฟฟ้าซ้อนทับกัน จึงเกิดกำลังงานขึ้นที่ทรานซิสเตอร์และเปลี่ยนเป็นความร้อนขึ้นที่ทรานซิสเตอร์ ด้วยเหตุนี้โหมตสวิทช์สามารถทำให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าสูงถึง 100 เปอร์เซ็นต์ในเชิงทฤษฎี ซึ่งในทางปฏิบัติงานหลายๆ ด้านต้องการสัญญาณต่อเนื่อง เป็นที่ทราบดีว่าสัญญาณพัลส์ (Pulse) ซึ่งถูกใช้ในวงจรขยายสัญญาณโหมตสวิทช์ ประกอบไปด้วยสัญญาณฮาร์โมนิกส์หลายองค์ประกอบรวมกัน จำเป็นต้องกำจัดออกหากต้องการเพียงสัญญาณมูลฐานด้วยวงจรกรองความถี่

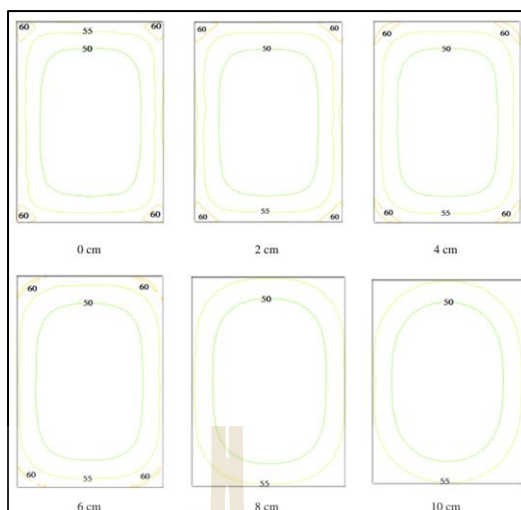
1.4.3 การปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ

การให้ความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอระหว่างการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ สาเหตุหลักมาจากความแตกต่างของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกกระหว่างตัวอย่างและสภาพแวดล้อมของตัวอย่าง

(โดยปกติคืออากาศ) ส่งผลให้มีการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ (Huang, Marra, et al., 2016) อาจส่งผลให้เกิดปัญหามากมาย เช่น ความสม่ำเสมอในการอบแห้งไม่ดี ความเสียหายของคุณภาพผลิตภัณฑ์ และไม่สามารถกำจัดแมลงศัตรูพืชที่ปะปนอยู่ในผลผลิตทางการเกษตร ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องศึกษาปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการปรับปรุงความสม่ำเสมอของความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ การปรับเปลี่ยนการกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวอย่างเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้บ่อย มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการลดความแตกต่างระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวอย่างและสภาพแวดล้อมเพื่อลดความร้อนที่ขอบ โดยการใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกใกล้เคียงกับตัวอย่างเป็นภาชนะห่อหุ้มตัวอย่าง การใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกใกล้เคียงกับตัวอย่าง นอกจากจะลดความแตกต่างของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกระหว่างตัวอย่างและสภาพแวดล้อมแล้ว ยังช่วยให้หลีกเลี่ยงการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างตัวอย่างกับอากาศโดยรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะช่วยปรับปรุงความสม่ำเสมอของการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Huang, Zhang, et al., 2016) ผลการวิจัยพบว่า ความสม่ำเสมอของการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ดีที่สุดสำหรับถั่วเหลืองสามารถทำได้เมื่อวัสดุห่อหุ้มคือโพลีสไตรีน (Polystyrene) มีรัศมีมุมด้านใน 8 เซนติเมตร และความหนาขอบรอบด้านของวัสดุ 8 เซนติเมตร และความหนาด้านล่าง 2 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1.6 และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นหลังให้พลังงานคลื่นความถี่วิทยุเป็นเวลา 12 นาที ดังแสดงในรูปที่ 1.7

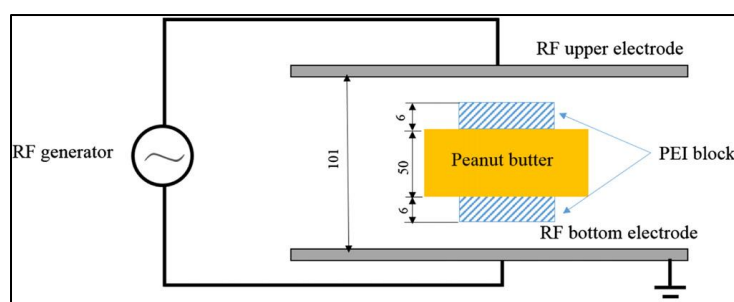


รูปที่ 1.6 การปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนด้วยรูปทรงของบรรจุภัณฑ์มีมุมรัศมีโค้ง (Huang, Zhang, et al., 2016)

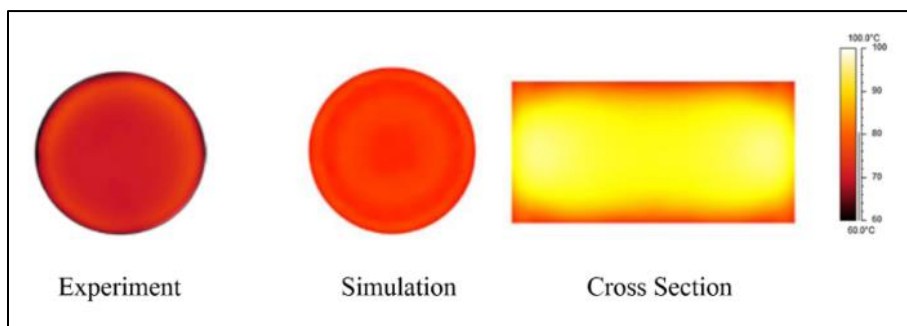


รูปที่ 1.7 ผลการปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนด้วยบรรจุภัณฑ์ที่มีมุมรีสมี่โค้ง (Huang, Zhang, et al., 2016)

การใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กทริกใกล้เคียงกับตัวอย่างนอกจากจะใช้เป็นวัสดุห่อหุ้มเพื่อลดความแตกต่างของคุณสมบัติไดอิเล็กทริกดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีผลการศึกษาถูกนำมาเพิ่มในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำเพื่อเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในบริเวณนั้น (Jiao et al., 2015) ผลการศึกษาโดยการเพิ่มวัสดุโพลีเอเทอร์อิมได์ (Polyetherimide, PEI) ที่มีขนาดและความสูงต่างกันวางไว้บริเวณตรงกลางด้านบนและด้านล่างของบรรจุภัณฑ์เนยถั่วทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 1.8 เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำสุดหลังจากให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ทั้งผลการทดลองและการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์พบว่ามีผลสม่ำเสมอในการกระจายความร้อนที่ดีที่สุดเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพลีเอเทอร์อิมได์ 8 เซนติเมตร และสูง 1.3 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1.9

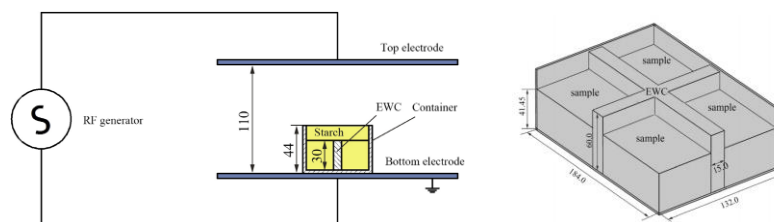


รูปที่ 1.8 การปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนด้วยการเพิ่ม PEI บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ (Jiao et al., 2015)



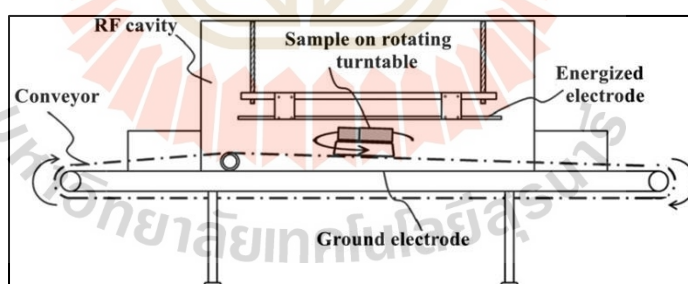
รูปที่ 1.9 ผลการปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนด้วยการเพิ่ม PEI บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ (Jiao et al., 2015)

ในการทำงานเดียวกัน เนื่องจากวัสดุที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กทริกใกล้เคียงกับตัวอย่าง แต่มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำกว่า สามารถนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้ามาในบริเวณตรงกลางของตัวอย่างได้มากขึ้น (Zhu et al., 2017) แสดงให้เห็นถึงผลการศึกษาในการวางวัสดุโพลีสไตรีนไว้ตรงกลางภาชนะสี่เหลี่ยม โดยการทดสอบให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุกับแป้งมันฝรั่ง ดังแสดงในรูปที่ 1.10 ทั้งผลการทดลองและการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ พบว่าความสูงและความกว้างของวัสดุที่เพิ่มลงไปส่งผลอย่างมากในการปรับปรุงความร้อนที่สม่ำเสมอภายในตัวอย่าง รูปร่างหรือขนาดของวัสดุและตำแหน่งของตัวอย่างที่ถูกรวบรวมไว้ระหว่างอิเล็กโทรด ส่งผลต่อการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในตัวอย่าง ซึ่งส่งผลต่อความสม่ำเสมอของการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Yu et al., 2016) ศึกษาการกระจายอุณหภูมิของเมล็ดคาโนลา (canola) ที่บรรจุในภาชนะขนาดเล็ก กลาง และใหญ่หลังจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ พบว่าเกิดความร้อนสูงเกินไปบริเวณขอบในตัวอย่างที่บรรจุในภาชนะขนาดเล็กไปจนถึงขนาดกลาง แต่ไม่พบในตัวอย่างที่บรรจุในภาชนะขนาดใหญ่ ผลการศึกษานี้บ่งชี้ว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีความสม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อภาชนะบรรจุตัวอย่างที่มีพื้นที่ผิวขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าขนาดของอิเล็กโทรดด้านบน ในทำงานเดียวกัน (Tiwari et al., 2011) แสดงให้เห็นผลของการศึกษาพบว่าค่าความสม่ำเสมอของความร้อนที่เกิดขึ้นหลังจากป้อนคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นความถี่วิทยุที่เหมาะสมที่สุด โดยการวางแบ่งสาลิไว้ตรงกลางของอิเล็กโทรดและทำให้ขนาดของตัวอย่างใกล้เคียงหรือเท่ากับพื้นที่ของอิเล็กโทรดด้านบนในการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์



รูปที่ 1.10 การปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนด้วยการเพิ่มวัสดุภายในตัวอย่าง บริเวณอุณหภูมิต่ำ (Zhu et al., 2017)

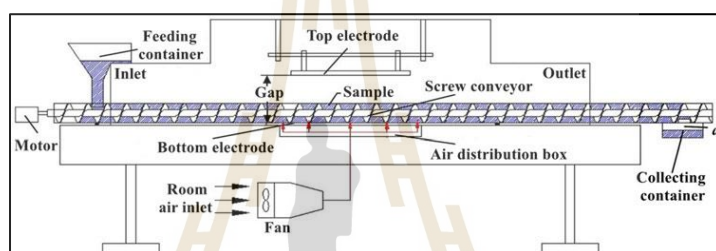
นอกจากวิธีการปรับเปลี่ยนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการเพิ่มวัสดุที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กทริกใกล้เคียงกับตัวอย่างแล้ว อีกวิธีหนึ่งคือเปลี่ยนตำแหน่งของตัวอย่างในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง เพื่อเปลี่ยนการกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในตัวอย่าง ดังผลงานวิจัยสำรวจความเป็นไปได้ในการปรับปรุงความสม่ำเสมอของการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Palazoglu & Miran, 2018) โดยใส่แป้งสาลีลงในภาชนะสี่เหลี่ยมบนสายพานลำเลียงเอียงที่เคลื่อนที่แล้วหมุนไปตามแนวพร้อมกัน ดังแสดงในรูปที่ 1.11 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่บนสายพานลำเลียงและการหมุนของตัวอย่างสามารถลดความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในตัวอย่างในภาชนะปริมาตรรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และความสม่ำเสมอในการทำความร้อนสามารถปรับปรุงเพิ่มเติมได้โดยการเพิ่มความเร็วของการหมุน



รูปที่ 1.11 การปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิด้วยสายพานลำเลียงต่างระดับ (Palazoglu & Miran, 2018)

การกวนหรือผสมเป็นระยะ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงความสม่ำเสมอของการทำความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Chen et al., 2015) ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นผลจำลองการกระจายอุณหภูมิในเมล็ดข้าวสาลีที่บรรจุในภาชนะพลาสติกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่มีและไม่มีเงื่อนไขการกวนหรือผสม ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิของ

ตัวอย่างที่บริเวณมุมและขอบสูงเกินไปภายใต้ทั้งสองเงื่อนไข แต่ความแตกต่างของอุณหภูมิ ในตัวอย่างจะค่อยๆ ลดลงตามเวลาในการกวนหรือผสมที่เพิ่มขึ้นทั้งในการจำลองและการทดลอง นอกจากนี้ (Zhou & Wang, 2019) แสดงให้เห็นถึงผลการศึกษาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอุณหภูมิของถั่วเหลืองหลังการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุลดลงจาก 4.8 องศาเซลเซียส เป็น 0.8 องศาเซลเซียส นั่นคือ เกิดความสม่ำเสมอของอุณหภูมิมากขึ้นภายในตัวอย่าง เมื่อใช้สกรูลำเลียง ดังแสดงในรูปที่ 1.12 ร่วมกับการใช้ลมที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างไม่เคลื่อนไหว ในทำนองเดียวกัน (Macana et al., 2018) ยังได้ออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุแบบสว่านสำหรับระบบ 50 โอห์ม ในการกำจัดแมลงศัตรูพืช เพื่อแก้ปัญหาการให้ความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอของเมล็ดข้าวสาลีและเมล็ดคาโนลา



รูปที่ 1.12 การปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนด้วยวิธีการกวนตัวอย่าง (Zhou & Wang, 2019)

ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดในระบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุเป็นอีกปัจจัยหนึ่ง ซึ่งส่งผลต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และอัตราการทำความร้อน โดยทั่วไปความเข้มของสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการให้ความร้อนเพิ่มมากขึ้น แต่การให้ความร้อนอย่างรวดเร็วอาจทำให้เกิดความร้อนที่รวดเร็วและสูงเกินไปที่บริเวณขอบและมุม จึงส่งผลกระทบต่อให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของการทำความร้อน ดังนั้นการปรับแต่งหรือศึกษาหาระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่เหมาะสมก่อนการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่ง เพื่อให้แน่ใจว่ามีความสม่ำเสมอในการทำความร้อนที่เหมาะสม ดังผลการศึกษาอัตราการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุของเนยถั่ว พบว่าอัตราการเกิดความร้อนในตัวอย่างจะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น แต่ความสม่ำเสมอในการให้ความร้อนของตัวอย่างดีขึ้น (Shi et al., 2017)

นอกเหนือจากวิธีการปรับปรุงความสม่ำเสมอของความร้อนที่เกิดขึ้นในการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุแบบวิธีเดียวที่อธิบายข้างต้น ยังมีการศึกษาการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุร่วมกับการใช้ลมร้อนหรือมากกว่านั้น สามารถปรับปรุงความสม่ำเสมอของการให้ความร้อนได้อย่างมาก ดังผลงานวิจัยเพื่อลดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวและบริเวณด้านในของ

ตัวอย่าง และหลีกเลี่ยงการควบแน่นของความชื้นอย่างรุนแรงที่อยู่ติดกับพื้นผิวตัวอย่างในระหว่างการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุของขมบ่งก้อนในสภาพแวดล้อมเปิดสำหรับการควบคุมเชื้อรา (Liu et al., 2013) ผลการศึกษาพบว่าไม่มีการควบแน่นของความชื้นติดกับพื้นผิวตัวอย่าง มีอุณหภูมิต่ำสุดอยู่ที่เนื้อด้านในบริเวณแกนกลางของตัวอย่าง และความแตกต่างของอุณหภูมิภายในชั้นขมบ่งแต่ละชั้นมีค่าน้อยกว่า 5 องศาเซลเซียส สำหรับผลผลิตทางการเกษตรในลักษณะของเมล็ดพืช มักใช้การเติมลมร้อนเพิ่มขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของตัวอย่างมีอุณหภูมิต่ำกว่า ในระหว่างการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยปกติแล้วจะอยู่ที่บริเวณด้านล่าง ในงานวิจัย (Zhou et al., 2015) ปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในข้าวสารเพื่อควบคุมแมลงศัตรูพืช โดยการเคลื่อนย้ายตัวอย่างบนสายพานลำเลียงด้วยความเร็ว 12.4 เมตรต่อชั่วโมง กวนตัวอย่างสองครั้งและพักที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ด้วยลมร้อนเป็นเวลา 5 นาที พบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอุณหภูมิของข้าวสารหลังให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ลดลงจาก 4.1 องศาเซลเซียส เป็น 1.8 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ การรวมกันหลายวิธีได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพอย่างมากในการปรับปรุงความสม่ำเสมอในการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุของเมล็ดข้าวโพด (Zheng et al., 2016) ถั่ว (Ling et al., 2016) และผลไม้ (Hou et al., 2014)

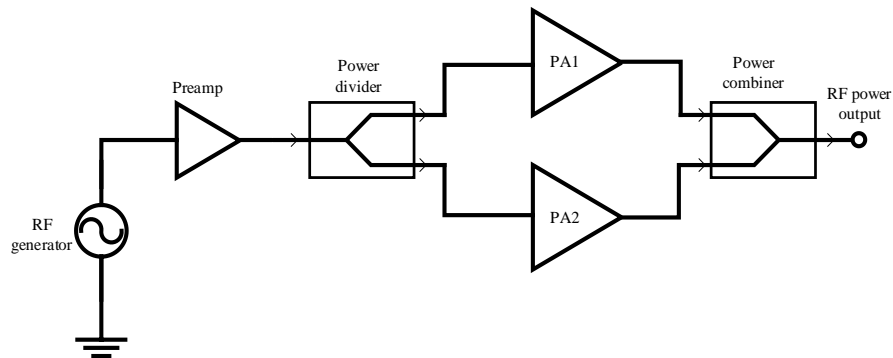
จากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลการให้ความร้อนแก่สารไดอิเล็กตริกโดยใช้สนามไฟฟ้า คลื่นความถี่วิทยุสำหรับผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งเป็นวิธีการให้ความร้อนได้เร็วเนื่องจากอุณหภูมิเกิดขึ้นจากภายในวัสดุ และไม่มีสารเคมีตกค้าง อีกทั้งไม่ส่งผลเสียต่อคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตรในส่วนของแหล่งกำเนิดพลังงานคลื่นความถี่วิทยุสำหรับเป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนแก่สารไดอิเล็กตริก การใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำบนพื้นฐานวงจรรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ สามารถให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าสูง ขนาดเล็ก และอายุการใช้งานนานกว่าการใช้หลอดแมกนีตรอน นอกจากนี้ในส่วนของการปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้น อุณหภูมิสูงมักจะเกิดขึ้นที่บริเวณขอบและมุม ในบริเวณที่ห่างออกจากจุดป้อนพลังงานหรือบริเวณศูนย์กลางของตัวอย่างจะมีอุณหภูมิต่ำ การหลีกเลี่ยงบรรจุภัณฑ์ให้เกิดมุมและการเพิ่มวัสดุไดอิเล็กตริกที่ไม่มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกพร้อมกับตัวอย่างในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำเป็น วิธีที่สามารถทำให้เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิได้ดีขึ้น ทั้งการออกแบบวงจรรขยายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุด้วยอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำบนพื้นฐานการออกแบบวงจรรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุและการเกิดความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจากสนามไฟฟ้าคลื่นความถี่วิทยุจะได้นำเสนอในบทถัดไป

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แมลงศัตรูพืชที่ปะปนอยู่ในผลผลิตทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวส่งผลให้คุณภาพของผลผลิตเกิดความเสียหาย การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุในการกำจัดแมลงศัตรูพืชเป็นวิธีที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากไม่มีสารเคมีตกค้าง สามารถกำจัดแมลงศัตรูพืชตั้งแต่เป็นไข่จนถึงตัวเต็มวัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่ทำให้คุณภาพผลผลิตทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวเสียหายลดลงอย่างมีนัยสำคัญ การให้ความร้อนแก่สารไดอิเล็กทริกด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยคลื่นความถี่ที่ถูกจัดสรรสำหรับใช้งานทางด้าน อุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ (ISM band, Industrial Sciences Medicine) เรียกว่าเป็นคลื่นความถี่สาธารณะโดยไม่ต้องขออนุญาต คือ $13.56 \text{ MHz} \pm 6.68 \text{ kHz}$, $27.12 \text{ MHz} \pm 160.00 \text{ kHz}$ และ $40.68 \text{ MHz} \pm 20.00 \text{ kHz}$ ได้รับการจัดสรรโดย US Federal Communications Commission (FCC) เพื่อไม่ให้รบกวนระบบสื่อสารอื่นๆ มีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุต่อวัสดุไดอิเล็กทริก ดังนั้นการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรคลื่นความถี่วิทยุสำหรับเป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน คุณสมบัติไดอิเล็กทริก ความสามารถของคลื่นในการแทรกซึมภายในวัสดุ ความหนาแน่นและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะได้อธิบายในบทนี้

2.1 องค์ประกอบวงจรกำเนิดพลังงานคลื่นความถี่วิทยุกำลังงานสูงด้วยอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

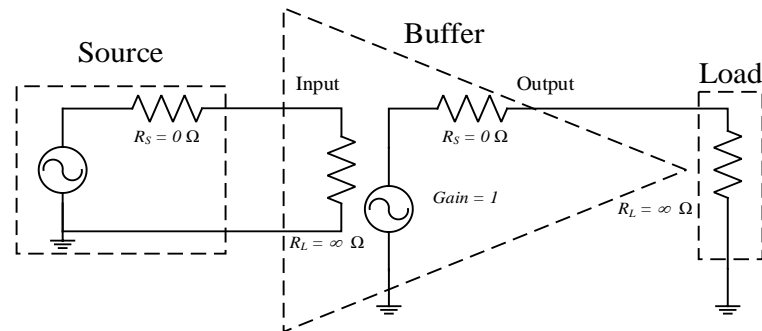
พลังงานที่ทำให้เกิดความร้อนภายในวัสดุไดอิเล็กทริกสำหรับงานวิจัยนี้ คือ คลื่นความถี่วิทยุ ประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ วงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ วงจรรวมหรือแบ่งกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ และวงจรขยายกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในส่วนของวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุใช้โมดูลสำเร็จสำหรับเป็นอินพุตให้กับวงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ เพื่อให้กำลังงานจากวงจรกำเนิดคลื่นถ่ายโอนไปยังวงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ วงจรบัฟเฟอร์และวงจรเข้าคูโครงข่ายอิมพีแดนซ์มีหน้าที่สำคัญทำให้เกิดการถ่ายกำลังงานสูงสุด



รูปที่ 2.1 แผนภาพโครงสร้างวงจรให้กำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ

2.1.1 วงจรบัฟเฟอร์ (Buffer)

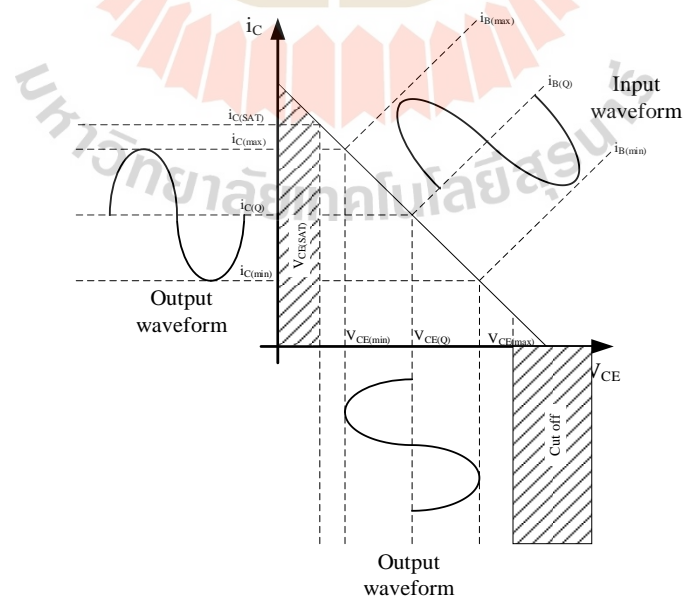
ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วงจรบัฟเฟอร์เชื่อมต่อระหว่างชุดวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุและวงจรขยายคลื่นความถี่วิทยุภาคต้น เนื่องจากชุดวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุเป็นแหล่งกำเนิดแรงดันคลื่นความถี่วิทยุ เพื่อให้เกิดสัญญาณของแรงดันสูงสุดที่โหลด โหลดจำเป็นต้องมีค่าอิมพีแดนซ์มาจากจากการพิจารณาวงจรสมมูล Thevenin กำหนดเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ของวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุเป็นฝั่งแหล่งจ่าย (R_S) ส่วนอินพุทอิมพีแดนซ์ของวงจรบัฟเฟอร์เป็นฝั่งโหลด (R_L) ตามรูปที่ 2.2 สามารถคำนวณหาแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของโหลดได้จากสมการแบ่งแรงดัน และจะเห็นว่าจะได้แรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของโหลดมากที่สุดเมื่ออิมพีแดนซ์ของโหลดเข้าใกล้อนันต์ กล่าวได้ว่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายควรมีค่าเข้าใกล้ 0 ส่วนอิมพีแดนซ์ของโหลดควรมีค่าเข้าใกล้อนันต์จึงจะทำให้เกิดการถ่ายโอนสัญญาณแรงดันได้สูงสุด ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวงจรบัฟเฟอร์ที่มีอิมพีแดนซ์ของอิมพีแดนซ์มีค่าเข้าใกล้อนันต์ส่วนอิมพีแดนซ์เอาท์พุทมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ อธิบายได้ว่าสัญญาณแรงดันฝั่งอินพุทของวงจรบัฟเฟอร์สามารถเกิดการถ่ายโอนสัญญาณแรงดันสูงสุดจากวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุได้ และมีอัตราขยาย 1 เท่า จึงทำให้แรงดันอินพุทและเอาท์พุทของวงจรบัฟเฟอร์มีค่าเท่ากัน ในส่วนอิมพีแดนซ์เอาท์พุทของวงจรบัฟเฟอร์มีค่าเข้าใกล้ 0 จึงสามารถส่งต่อสัญญาณแรงดันไปยังชุดวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุได้สูงสุด



รูปที่ 2.2 แผนภาพโครงสร้างวงจรบัฟเฟอร์

2.1.2 วงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสเอ (Class A power amplifier)

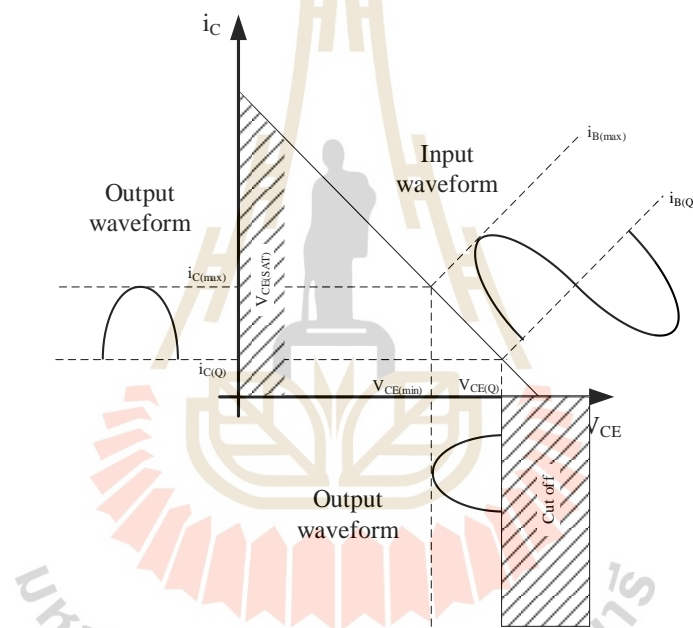
วงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสเอมักนิยมใช้เป็นวงจรขยายกำลังงานภาคต้น เนื่องจากให้สัญญาณที่ไม่ผิดเพี้ยนแต่ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าในอุดมคติสูงสุดอยู่ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ อุปกรณ์ที่นิยมนำมาใช้ขยายกำลังงาน คือ ทรานซิสเตอร์ (Transistor) คุณสมบัติของอุปกรณ์นี้จะทำงานก็ต่อเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าขาเข้าหรือฝั่งอินพุตมากกว่าจุดทำงานของทรานซิสเตอร์ (Threshold Voltage) ดังนั้นในวงจรขยายกำลังงานคลาสเอจึงจำเป็นต้องมีแรงดันไบอัส (Bias voltage) ที่มากกว่าจุดการทำงานของทรานซิสเตอร์ตลอดเวลาการใช้งานเพื่อให้สัญญาณที่เข้ามาสามารถขยายได้เต็มลูกคลื่นดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพการนำสัญญาณของวงจรขยายสัญญาณคลาสเอ

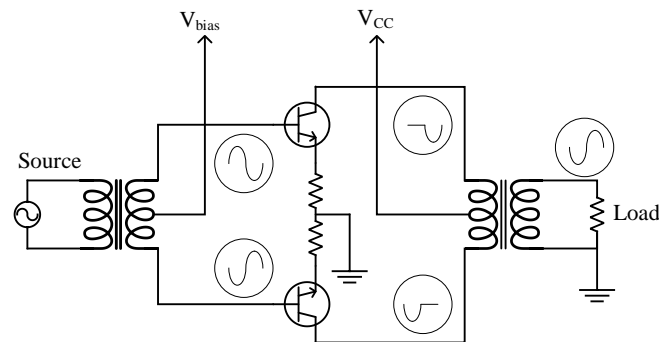
2.1.3 วงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสบีพุช-พูล (Class B push-pull power amplifier)

วงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุเชิงเส้นประสิทธิภาพทางไฟฟ้าสูงในงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้คลาสบีพุช-พูล เนื่องจากใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดเดียว ต่างจากคลาสเอบีพุช-พูล ที่ต้องใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ชนิดเพื่อขยายสัญญาณทั้งฝั่งบวกและฝั่งลบ วงจรคลาสบีนี้จะขยายสัญญาณฝั่งบวกเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยกำหนดแรงดันไบอัสให้วงจรที่ระดับจุดทำงานของทรานซิสเตอร์ เนื่องจากว่าวงจรคลาสบีขยายสัญญาณเพียงฝั่งบวกเท่านั้น จึงส่งผลให้สัญญาณเอาต์พุตผิดเพี้ยน แต่ทรานซิสเตอร์จะไม่ทำงานหนักเหมือนวงจรคลาสเอ



รูปที่ 2.4 แผนภาพการนำสัญญาณของวงจรขยายสัญญาณคลาสบี

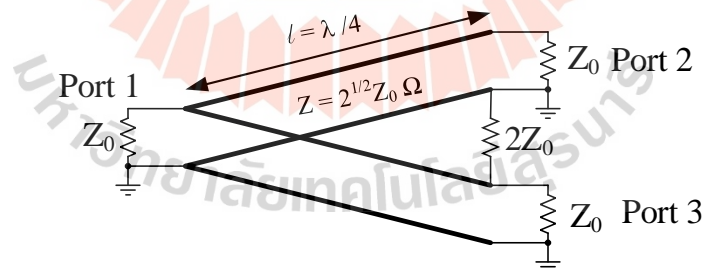
เพื่อให้ได้สัญญาณเอาต์พุตไม่ผิดเพี้ยนจึงต้องใช้วงจรคลาสบี 2 ชุด โดยมีหม้อแปลงความถี่สูงช่วยทั้งฝั่งอินพุตและเอาต์พุต จะทำให้วงจรคลาสบีสลับกันทำงานดังรูปที่ 2.5 หม้อแปลงความถี่สูงถูกนำมาใช้เพื่อทำให้มุมเฟสระหว่างทรานซิสเตอร์ต่างกัน 180 องศา ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า วงจรคลาสบีจะขยายสัญญาณเพียงฝั่งบวกเท่านั้น จะทำให้เอาต์พุตของทรานซิสเตอร์จะปรากฏเพียงสัญญาณฝั่งเดียวเท่านั้น แต่นั่นเป็นสัญญาณที่ผิดเพี้ยน หม้อแปลงความถี่สูงฝั่งเอาต์พุตจะรวมสัญญาณจากทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 ตัว ส่งผลให้โหลดสามารถรับสัญญาณได้เต็มลูกคลื่นและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าสูงถึง 70 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.5 แผนภาพวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสบีพัส-พูล

2.1.4 วงจรรวมกำลังงานหรือแบ่งกำลังงานของวิลกินสัน (Wilkinson's power combiner/divider)

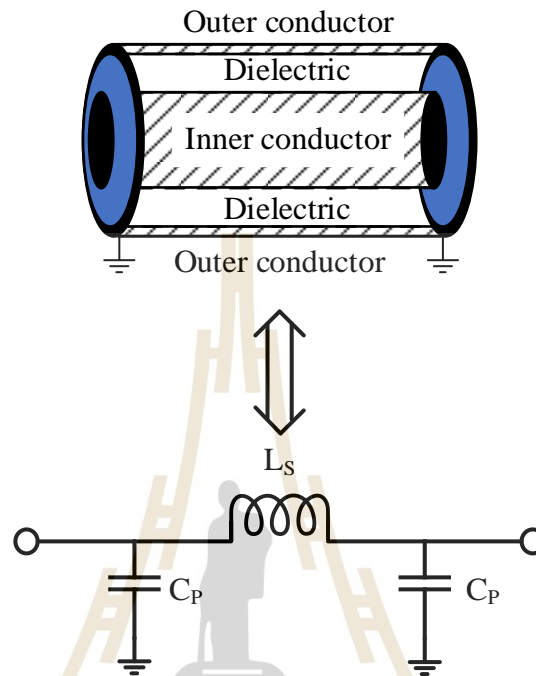
วงจรรวมหรือแบ่งกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุถูกนำมาใช้รวมหรือแบ่งกำลังงานจากวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ จำนวนทางหรือพอร์ตของวงจรรวมกำลังงานนี้จะขึ้นอยู่กับจำนวนชุดวงจรขยายสัญญาณ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ชุดวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุจำนวน 2 ชุด จึงต้องใช้วงจรรวมกำลังงานแบบ 2 ทาง เป็นวงจรที่ค้นพบโดย Ernest Wilkinson ในปี 1960 ซึ่งเป็นวงจรที่ปรับปรุงและพัฒนาขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการต่อตัวต้านทานที่มีขนาดเป็น 2 เท่าของอิมพีแดนซ์อินพุต ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพวงจรรวมหรือแบ่งกำลังงานของ Wilkinson ในสายนำสัญญาณ

จากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าต้องใช้ความยาวสายส่งขนาดเท่ากับ $\lambda/4$ (λ คือความยาวคลื่น) และมีค่าอิมพีแดนซ์ภายในสายส่งเท่ากับ $\sqrt{2}$ ของอิมพีแดนซ์อินพุต เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนกำลังงานสูงสุด วงจรนี้หากนำไปใช้กับคลื่นความถี่ต่ำ จะส่งผลให้ต้องใช้สายส่งที่มีความยาวมากตามความยาวคลื่น แต่เนื่องด้วยคุณสมบัติของสายส่งมีองค์ประกอบของตัวนำด้านนอกและตัวนำด้านใน

ระหว่างตัวนำทั้ง 2 นี้คั่นด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก จึงส่งผลให้สายส่งมีคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุ นอกจากนี้ความยาวของสายส่งจะส่งผลให้มีคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายนำสัญญาณ

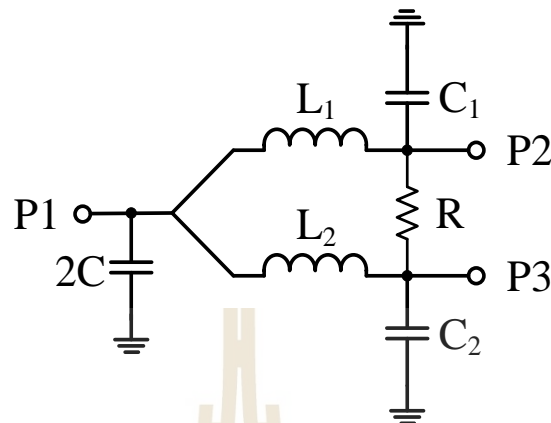
จากรูปที่ 2.6 และ 2.7 สามารถแสดงแผนภาพวงจรแบ่งกำลังงานและวงจรรวมกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ 2 ทาง ของ Wilkinson ด้วยอุปกรณ์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.8 หากนำไปใช้เป็นวงจรแบ่งกำลังงานจะทำหน้าที่แบ่งกำลังงานจาก 1 พอร์ตเป็น 2 พอร์ต โดยแต่ละพอร์ตจะมีกำลังงานเท่าๆ กัน โดยจะถูกแบ่งมาจากพอร์ต 1 ในส่วนของการนำไปใช้เป็นวงจรรวมกำลังงานจะทำหน้าที่ในการรวมกำลังงานจาก 2 พอร์ต เพื่อออก 1 พอร์ต สามารถคำนวณหาค่าต่างๆ ได้จากสมการ 2.1 -2.4 กำหนด $Z_0 = 50 \Omega$

$$R = 2Z_0 \quad (2.1)$$

$$X_C, X_L = \sqrt{2}Z_0 \quad (2.2)$$

$$L_1, L_2 = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (2.3)$$

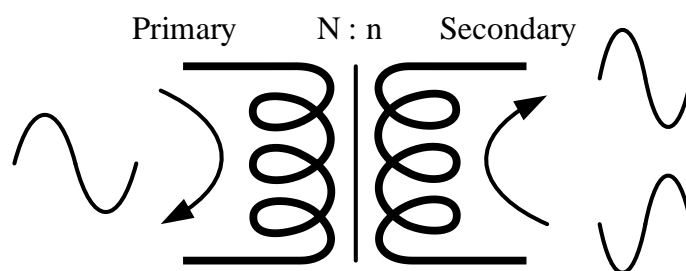
$$C_1, C_2 = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.8 แผนภาพวงจรรวมกำลังงานหรือรวมกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ

2.1.5 หม้อแปลงความถี่สูงหรือบาลัน (BALUN transformer)

หม้อแปลงบาลัน (BALUN) ถูกเรียกว่ามาจาก Balance to Unbalance เนื่องจากฝั่งหนึ่งของหม้อแปลงต่ออยู่กับชุดอุปกรณ์ 1 ทาง (Unbalance) ส่วนอีกฝั่งของหม้อแปลงจะต่อกับอุปกรณ์ 2 ทาง ที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากัน (Balance) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 หม้อแปลงนี้ถูกนำมาใช้กับวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุแบบพุช-พูล เนื่องจากหม้อแปลงบาลันนี้ให้สัญญาณฝั่งบาลานซ์ต่างกัน 180 องศา และกำลังงานแบ่งเท่าๆ กัน หรือเป็นครึ่งหนึ่งของฝั่งอับบาลานซ์ ซึ่งเป็นสิ่งที่วงจรแบบพุช-พูลต้องการ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ในการแปลงอิมพีแดนซ์หรือแมชชิงอิมพีแดนซ์จากฝั่งอับบาลานซ์มายังฝั่งบาลานซ์เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนกำลังงานสูงสุด หม้อแปลงบาลานซ์สามารถนำไปใช้ได้ทั้ง 2 ฝั่ง คือ แบ่งสัญญาณจากฝั่งอับบาลานซ์มายังฝั่งบาลานซ์ หรือรวมสัญญาณจากฝั่งบาลานซ์มายังฝั่งอับบาลานซ์



รูปที่ 2.9 การนำสัญญาณของหม้อแปลงบาลัน

จากรูปที่ 2.9 กำหนดแรงดันฝั่งปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ V_p ด้วยขดลวดจำนวน N รอบ และฝั่งทุติยภูมิมีแรงดัน V_s ด้วยขดลวดจำนวน n รอบ อัตราส่วนระหว่างฝั่งปฐมภูมิต่อทุติยภูมิ ดังแสดงในสมการ 2.5 กำลังงานที่เกิดขึ้นทั้งฝั่งปฐมภูมิและทุติยภูมิควรมีค่าเท่ากันเนื่องจากสามารถถ่ายโอนกำลังงานได้สูงสุด จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและตัวต้านทานในเชิงของกำลังงานไฟฟ้า คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดยกกำลังสองต่อตัวต้านทานของโหลด ดังแสดงในสมการที่ 2.6 จากสมการที่ 2.5 และ 2.6 สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ 2.7

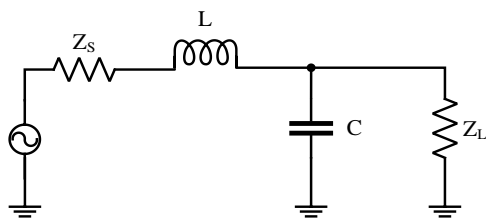
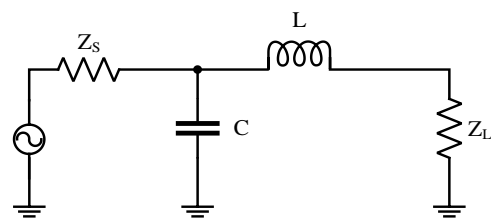
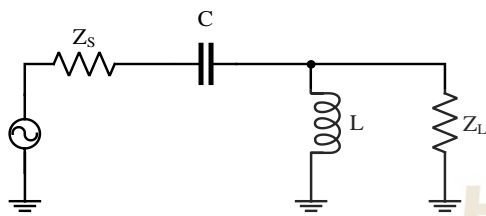
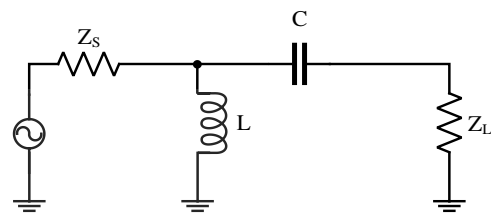
$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N}{n} \quad (2.5)$$

$$\frac{V_p^2}{R_p} = \frac{V_s^2}{R_s} \quad (2.6)$$

$$\frac{N^2}{n^2} = \frac{R_p}{R_s} \quad (2.7)$$

2.1.6 วงจรเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์รูปตัวแอล (Matching impedance L network)

วิธีการเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์ (Matching impedance network) เพื่อการถ่ายโอนกำลังงานสูงสุดมีหลายวิธี ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีวงจรเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์รูปตัวแอล ซึ่งเป็นวิธีอย่างง่ายด้วย 2 องค์ประกอบ คือ โครงข่ายตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ (LC network) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ก) และ (ข) จะเป็นโครงข่ายความถี่ต่ำผ่านเมื่ออิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายน้อยกว่าอิมพีแดนซ์โหลดและอิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายมากกว่าอิมพีแดนซ์โหลดตามลำดับ ในส่วน (ค) และ (ง) จะเป็นโครงข่ายความถี่สูงผ่านเมื่ออิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายน้อยกว่าอิมพีแดนซ์โหลดและอิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายมากกว่าอิมพีแดนซ์โหลดตามลำดับ โดยเริ่มจากการคำนวณหาค่าโหลด Q อนุกรม (Q_s) และขนาน (Q_p) ตามสมการ (2.8) นำมาสู่การหาค่ารีแอกแตนซ์ (reactance) อนุกรม (X_s) และขนาน (X_p) ตามสมการ (2.9) และ (2.10) ตามลำดับ

(ก) Low pass filter $Z_S < Z_L$ (ข) Low pass filter $Z_S > Z_L$ (ค) High pass filter $Z_S < Z_L$ (ง) High pass filter $Z_S > Z_L$

รูปที่ 2.10 แผนภาพวงจรการเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์รูปตัวแอล (ก) ความถี่ต่ำผ่านเมื่ออิมพีแดนซ์โหลดมากกว่าแหล่งจ่าย (ข) ความถี่ต่ำผ่านเมื่ออิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายมากกว่าโหลด (ค) ความถี่สูงผ่านเมื่ออิมพีแดนซ์โหลดมากกว่าแหล่งจ่าย (ง) ความถี่สูงผ่านเมื่ออิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายมากกว่าโหลด

$$Q_S = Q_P = \sqrt{\frac{R_P}{R_S} - 1} \quad (2.8)$$

$$X_S = Q_S R_S \quad (2.9)$$

$$X_P = \frac{R_P}{Q_P} \quad (2.10)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X} \quad (2.11)$$

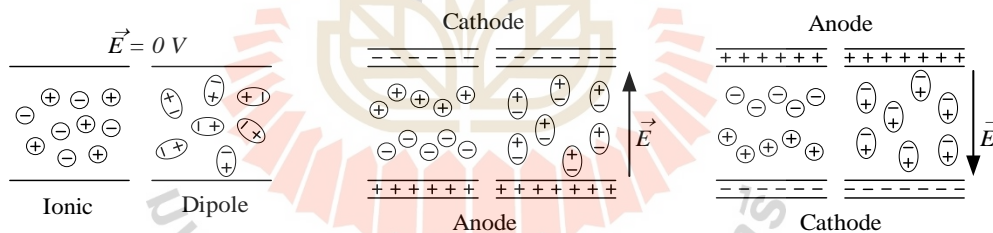
$$L = 2\pi f X \quad (2.12)$$

เมื่อ R_S และ R_P คือ ค่าความต้านทานอนุกรมและขนานตามลำดับ โดยค่าความต้านทานขนานจะมีค่ามากกว่าค่าความต้านทานอนุกรม จากรูปที่ 2.10 (ก) และ (ค) ค่าความต้านทานอนุกรม คือ อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย และค่าความต้านทานขนาน คือ อิมพีแดนซ์ของโหลด ในทางกลับกันรูปที่ 2.10 (ข) และ (ง) ค่าความต้านทานอนุกรม คือ อิมพีแดนซ์ของโหลด ส่วนค่า

ความต้านทานขนาน คือ อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย จากคาร์รีแอกแทนซ์จะนำไปสู่การหาค่าความจุและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าจากสมการที่ (2.11) และ (2.12)

2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

เมื่อวัสดุไดอิเล็กตริกซึ่งมีความเป็นกลางทางไฟฟ้าอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดคู่ขนาน วัสดุไดอิเล็กตริกจะได้รับพลังงานไฟฟ้าคลื่นความถี่วิทยุ ส่งผลให้กลุ่มอะตอมที่มีประจุสุทธิทางไฟฟ้าบวก (cation) ภายในวัสดุเคลื่อนที่ไปยังบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าประจุลบ (cathode) ส่วนกลุ่มอะตอมที่มีประจุสุทธิทางไฟฟ้าลบ (anion) ภายในวัสดุจะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าประจุบวก (anode) เรียกว่า Ionic migration อีกปรากฏการณ์หนึ่งที่เกิดขึ้น คือ โมเลกุลเกิดสภาพการมีขั้วไฟฟ้าและเกิดการหมุนของโมเลกุล (dipole rotation) ตามขั้วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 เกิดการเคลื่อนที่ความเร็วสูงอย่างต่อเนื่อง ทั้งสองเหตุการณ์นี้ทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุล จะเกิดการสร้างความร้อนเกิดขึ้นภายในวัสดุ โดยทั่วไปการเคลื่อนที่ของประจุภายในวัสดุจะเป็นผลอย่างมากในคลื่นความถี่ย่านวิทยุ และการเคลื่อนที่ของประจรรวมทั้งการหมุนของไดโพลจะเป็นผลในช่วงย่านความถี่ไมโครเวฟ (Zhou & Wang, 2018)



รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าและไดโพลเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า

2.2.1 การมีขั้วของโมเลกุล

วัสดุไดอิเล็กตริกเมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับ โมเลกุลของวัสดุมีความสามารถเกิดการมีขั้วแตกต่างกันตามสัมประสิทธิ์การเกิดโพลาไรซ์ (Polarization, α') และสามารถบอกปริมาณความหนาแน่นการมีขั้วของโมเลกุลหรือโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment, P) ในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้า ได้ดังนี้

$$P = \alpha' E_{loc} \quad (2.13)$$

เมื่อ α' คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเกิดโพลาริซ

E_{loc} คือ สนามไฟฟ้าภายใน

จากสมการที่ (2.13) หากโมเลกุลมีจำนวน N โมเลกุลในหนึ่งหน่วยปริมาตร สามารถบอกปริมาณความหนาแน่นการมีขั้วของโมเลกุลรวมหรือไดโพลโมเมนต์รวมได้ดังสมการที่ (2.14) นอกจากนี้คุณสมบัติสภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้าหรือความซึมซาบทางไฟฟ้า (Electric susceptibility) ของวัสดุไดอิเล็กตริกสามารถบอกปริมาณความมีขั้วของโมเลกุลได้ดังสมการที่ (2.15)

$$P = N\alpha'E_{loc} \quad (2.14)$$

$$P = \epsilon_0\chi_e E \quad (2.15)$$

เมื่อ χ_e คือ ค่าสภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กตริก

เมื่อมีสนามไฟฟ้าภายนอก (E) เกิดขึ้นในตัวกลางที่เป็นอากาศว่าง ความสัมพันธ์ความหนาแน่นของเส้นแรงไฟฟ้า (Flux density, D) กับสนามไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (2.16) เมื่อ ϵ_0 คือ แร่งต้านสนามไฟฟ้าของอากาศว่าง (8.85×10^{-12} F/m) เป็นค่าคงที่ ดังนั้นความหนาแน่นของเส้นแรงไฟฟ้าในอากาศว่างจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มของสนามไฟฟ้าภายนอก และไม่เกิดการมีขั้วขึ้นของโมเลกุลในสุญญากาศ เมื่อวัสดุไดอิเล็กตริกอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ความหนาแน่นของเส้นแรงไฟฟ้าจะเป็นไปดังสมการที่ (2.17) นอกจากความเข้มของสนามไฟฟ้าแล้ว ความหนาแน่นของเส้นแรงไฟฟ้ายังขึ้นกับปริมาณความมีขั้วของโมเลกุลภายในวัสดุไดอิเล็กตริกอีกด้วย

$$D = \epsilon_0 E \quad (2.16)$$

$$D = \epsilon_0 E_{loc} + P \quad (2.17)$$

จากสมการที่ (2.17) สามารถอธิบายความสัมพันธ์ค่าความอ่อนไหวทางไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กตริกและความหนาแน่นของเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้ด้วยการแทนสมการที่ (2.15) ลงในสมการที่ (2.17) จะได้ดังสมการที่ (2.18) และจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (2.19)

$$D = \epsilon_0 E_{loc} + \epsilon_0\chi_e E_{loc} \quad (2.18)$$

$$D = \epsilon_0(1 + x_e)E_{loc} \quad (2.19)$$

โดยจะเรียกเทอม $(1+x_e)$ หรือ ϵ_r ว่าค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การเกิดโพลาริเซชันจากสมการ (2.14) และ (2.15) ได้ตั้งสมการ (2.20) และหากพิจารณาสนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้น เมื่อมีสนามไฟฟ้าภายนอกผ่านตัวกลางอื่นๆ แสดงในสมการ (2.21)

$$N\alpha' E_{loc} = \epsilon_0 x_e E \quad (2.20)$$

$$E_{loc} = \frac{\epsilon_r + 2}{3} E \quad (2.21)$$

จากสมการ (2.21) แทนลงในสมการ (2.20) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_r และ α' ได้ตั้งสมการ (2.22) ซึ่งเรียกความสัมพันธ์ของสมการนี้ว่า สมการของ Clausius-Mosotti

$$\frac{N\alpha'}{3\epsilon_0} = \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \quad (2.22)$$

2.2.2 คุณสมบัติไดอิเล็กตริก

วัสดุไดอิเล็กตริกเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าจะมีพฤติกรรมเป็นตัวเก็บประจุทางไฟฟ้าในการเก็บพลังงานและมีพฤติกรรมเป็นตัวต้านทาน ส่งผลให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้นภายในวัสดุ ความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริกกับสนามไฟฟ้าประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ความสามารถในการซึมผ่านได้ของสนามไฟฟ้าในวัสดุไดอิเล็กตริก (permeability) แต่ถือว่าใกล้เคียงกับสุญญากาศ ไม่มีผลต่อการให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริก อีกส่วนหนึ่ง คือ สภาพยอมทางไฟฟ้า (permittivity) มีบทบาทสำคัญทำให้เกิดความร้อน สภาพยอมทางไฟฟ้าเป็นปริมาณเชิงซ้อน (complex permittivity, ϵ^*) โดยทั่วไปใช้อธิบายคุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริกที่เกี่ยวข้องกับการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการลดทอนของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในวัสดุ สามารถอธิบายได้ตั้งสมการ (2.23)

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.23)$$

เมื่อ ϵ' คือ ค่าคงที่วัสดุไดอิเล็กตริก (dielectric constant)

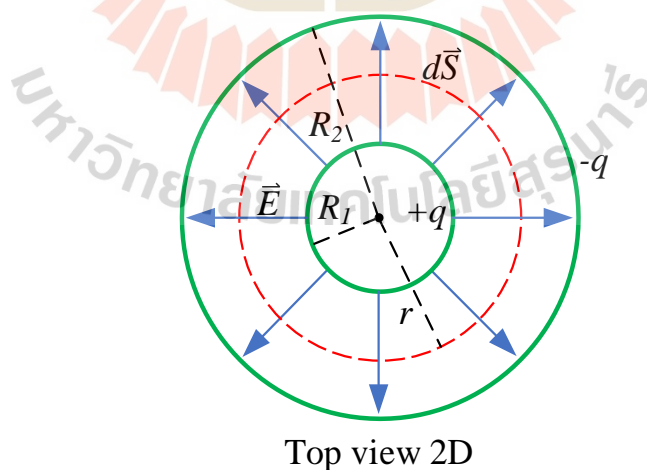
ϵ'' คือ ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (dielectric loss)

สภาพยอมทางไฟฟ้าส่วนจริงของวัสดุไดอิเล็กตริก คือ ค่าคงที่วัสดุไดอิเล็กตริก อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุ ส่วนจินตภาพ คือ ค่าการสูญเสียวัสดุไดอิเล็กตริก อธิบายถึงความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของผลผลิตทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความถี่ ปริมาณความชื้น และความหนาแน่น เป็นต้น (Guo & Zhu, 2014; Nelson & Trabelsi, 2012) ทั้งค่าคงที่และค่าการสูญเสียวัสดุไดอิเล็กตริกสามารถนิยามด้วยค่าการสูญเสียแทนเจนต์ (Loss tangent) ได้จากสมการที่ (2.24)

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2.24)$$

2.2.3 สนามไฟฟ้าและตัวเก็บประจุภายในตัวนำทรงกระบอกขนาน

สนามไฟฟ้า (\vec{E}) ที่เกิดขึ้นระหว่างตัวนำไฟฟ้า 2 ตัวนำทรงกระบอก กำหนดรัศมีของตัวนำด้านใน คือ R_1 รัศมีตัวนำด้านนอก คือ R_2 เส้นสนามไฟฟ้าจะพุ่งตรงจากตัวนำด้านในไปสู่ตัวนำด้านนอก เมื่อพิจารณาตามกฎของเกาส์ (Gauss's Law) เพื่อคำนวณหาขนาดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น สนามไฟฟ้าที่รัศมีน้อยกว่า R_1 และมากกว่า R_2 จะมีค่าเป็นศูนย์ สนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำจะพิจารณาจากพื้นผิวเกาส์เขียน ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แผนภาพสนามไฟฟ้าภายในอิเล็กโทรดทรงกระบอกขนาน

จากรูปที่ 2.12 เมื่อนำผิวของเกาส์เซียนล้อมรอบตัวนำด้านใน เมื่อมีสนามไฟฟ้าวิ่งผ่าน โดยมีทิศทางจากตัวนำด้านในสู่ตัวนำด้านนอก เรียกว่าฟลักซ์ไฟฟ้าให้โดยสมการที่ (2.25) นั่นคือ ผลคูณของสนามไฟฟ้าและระยะผิวเกาส์เซียนรอบผิวปิดมีค่าเท่ากับประจุต่อค่าสภาพยอมของสุญญากาศ

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (2.25)$$

ฟลักซ์ไฟฟ้าจากตัวนำทรงกระบอกขนานจะไม่เกิดขึ้นที่ฐานหรือด้านบน เนื่องจากไม่มีสนามไฟฟ้าวิ่งผ่าน เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างตัวนำและพื้นผิวเกาส์เซียนจะมีทิศทางเดียวกันหรือขนานกัน ดังนั้นผลคูณจะมีค่าเท่ากับผลคูณของขนาด นอกจากนี้ สนามไฟฟ้ามีความสมมาตรในแนวรัศมี ขนาดของสนามจะเท่ากันทุกจุดที่อยู่บนผิวเกาส์เซียน ดังนั้นสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.26

$$E \int_S dS = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (2.26)$$

จากสมการพื้นที่ผิวข้างของทรงกระบอก กำหนดความยาว h แทนในสมการที่ 2.26 จะได้ดังสมการที่ 2.27 และจัดรูปใหม่จะได้สมการสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างตัวนำทรงกระบอก ดังสมการที่ 2.28 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ได้ดังสมการที่ 2.29

$$2E\pi rh = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (2.27)$$

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 rh} \quad (2.28)$$

$$\vec{E} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 rh} \vec{u}_r \quad (2.29)$$

เมื่อวัสดุไดอิเล็กตริกถูกวางไว้ภายในสนามไฟฟ้าหรือระหว่างตัวนำไฟฟ้าขนาน จะมีคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุ (C , Farad (F)) สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าสัมบูรณ์ของประจุ (q) และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (ΔV) ดังสมการที่ 2.30

$$C = \frac{q}{\Delta V} \quad (2.30)$$

ความต่างศักย์ไฟฟ้าคือผลต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างตัวนำด้านใน (กำหนดเป็นจุด B) และตัวนำด้านนอก (กำหนดเป็นจุด A) ซึ่งศักย์ไฟฟ้าคือพลังงานศักย์ของประจุไฟฟ้าที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่ระยะทางใดๆ ($d\vec{l}$) ดังแสดงในสมการที่ 2.31

$$\Delta V = V_B - V_A = - \int_A^B \vec{E} d\vec{l} \quad (2.31)$$

เมื่อเวกเตอร์รัศมี ($d\vec{r}$) ของพื้นผิวเกาส์จากรูปที่ 2.11 มีทิศทางเดียวกับระยะทางใดๆ ($d\vec{l}$) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.32 นำสมการที่ 2.29 และ 2.32 แทนในสมการที่ 2.31 จะได้ดังสมการที่ 2.33 และสามารถจัดรูปใหม่ได้สมการความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างตัวนำทรงกระบอกขนานได้ดังสมการที่ 2.34

$$d\vec{l} = d\vec{r} = dr\vec{u}_r \quad (2.32)$$

$$\Delta V = - \int_A^B \frac{q}{2\pi\epsilon_0 rh} \vec{u}_r dr\vec{u}_r \quad (2.33)$$

$$\Delta V = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 h} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (2.34)$$

จากสมการที่ 2.34 นำไปแทนในสมการที่ 2.30 จะได้สมการความสัมพันธ์ของค่าความเก็บประจุที่ขึ้นกับความยาวของทรงกระบอกและรัศมีของตัวนำภายในและภายนอกดังสมการที่ 2.35

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 h}{\ln(R_2/R_1)} \quad (2.35)$$

2.2.4 ความเข้มของพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ (Power density of RF energy)

พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนด้วยความสัมพันธ์กับวัสดุไดอิเล็กตริกและพลังงานที่กระจายไปในปริมาตรหนึ่งหน่วย ความเข้มของพลังงานที่เกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกหลังได้รับพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงในสมการที่ (2.36) และเกิดเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ หากไม่พิจารณาการถ่ายโอนอุณหภูมิกับอากาศจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.37)

$$Q_v = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E^2 \quad (2.36)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_v}{\rho C_p} \quad (2.37)$$

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (dT) ภายในวัสดุต่อเวลาที่เปลี่ยนแปลง (dt) หลังจากที่ได้รับพลังงาน โดยที่ ϵ_0 คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกในสุญญากาศ (8.854×10^{-12} F/m) หากกำหนดความถี่ (f) และความเข้มสนามไฟฟ้า (E , V/m) เป็นค่าคงที่จะเห็นความร้อนที่เกิดขึ้นแปรผันตรงกับค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก แต่จะแปรผกผันกับค่าความหนาแน่น (ρ , kg/m³) และค่าความจุความร้อนจำเพาะ (C_p , J/kgK) ของวัสดุไดอิเล็กตริก

2.2.5 ความสามารถทะลุผ่านของคลื่น (Penetration depth)

ระหว่างการให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริก พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมากระทบวัสดุ บางส่วนจะถูกสะท้อนด้วยผิวของวัสดุ ส่วนที่เหลือวัสดุจะดูดซับพลังงานและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน การทะลุผ่านของพลังงานคลื่นความถี่วิทยุถูกกำหนดเป็นความลึกของความเข้มพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ลดลงตาม $1/e$ ($e = 2.718$) ระยะที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กตริก (d_p) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.38)

$$d_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\epsilon' \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1 \right]}} \quad (2.38)$$

ซึ่ง c คือ ความเร็วแสงในอากาศว่าง (3×10^8 m/s) จากสมการที่ (2.38) จะเห็นว่าระยะที่คลื่นสามารถทะลุผ่านได้จะแปรผกผันกับความถี่ (f) นั่นคือ เมื่อความถี่สูงขึ้นระยะการทะลุผ่านจะสั้นลง มากไปกว่านี้วัสดุที่มีความถี่สูงจะส่งผลต่อคุณสมบัติไดอิเล็กตริกสูง (ϵ) ทำให้ความสามารถการทะลุผ่านของคลื่นสั้นลงเช่นกัน ดังนั้นพลังงานคลื่นความถี่วิทยุให้ศักยภาพการทำความร้อนได้ดีที่วัสดุมีความถี่ต่ำ

2.3 สรุป

การออกแบบการให้ความร้อนแก่สารไดอิเล็กตริกโดยใช้สนามไฟฟ้าคลื่นความถี่วิทยุประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนของวงจรให้พลังงานคลื่นความถี่วิทยุและตัวปล่อยคลื่น เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจและนำไปสู่การออกแบบ ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของวงจรจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุกำลังงานสูงด้วยอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำโดยการออกแบบจะใช้หลักการพื้นฐานการออกแบบวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุแบบต่อเนื่องในคลาสเอและคลาสบี พุซ-พูล รวมถึงการเข้าคูโครงข่ายอิมพีแดนซ์ภายในวงจรเพื่อให้เกิดการถ่ายโอนกำลังงานสูงสุดด้วยการเข้าคูโครงข่าย

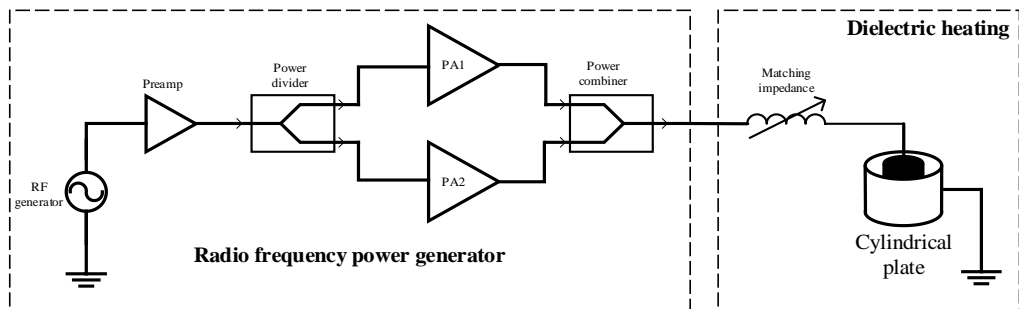
อิมพีแดนซ์รูปตัวแอล และหลักการเกิดความร้อนแก่สารไดอิเล็กทริกในโครงสร้างของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ของไมโครโพรเซสเซอร์ เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับประกอบไปด้วย การมีขั้วของโมเลกุล คุณสมบัติไดอิเล็กทริก สนามไฟฟ้าและตัวเก็บประจุภายในตัวนำทรานซิสเตอร์ ความเข้มของพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ และความสามารถทะลุผ่านของคลื่น



บทที่ 3

การออกแบบวงจรพลังงานคลื่นความถี่วิทยุกำลังงานสูงและอิเล็กทรอนิกส์ ทรงกระบอกขนานสำหรับปรับปรุงความร้อนแก๊สไดอิเล็กตริก

งานวิจัยนี้แสดงการออกแบบวงจรพลังงานคลื่นความถี่วิทยุกำลังงานสูงและแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกขนานสำหรับปรับปรุงความร้อนแก๊สไดอิเล็กตริกให้มีความสม่ำเสมอ ในส่วนของวงจรพลังงานคลื่นความถี่วิทยุในงานวิจัยนี้ได้ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำในการออกแบบเป็นหลัก ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าการใช้หลอดแมกนีตรอนในการออกแบบ โดยความถี่ที่ใช้ในการออกแบบคือ 27.12 เมกกะเฮิร์ต ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่ถูกอนุญาตให้ใช้สำหรับอุตสาหกรรม ประกอบไปด้วย ชุดวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency generator) การออกแบบวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสเอ สำหรับเป็นวงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ (Pre-amplifier) วงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสบีแบบพุช-พูลขนาน สำหรับวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency power amplifier) วงจรรวมกำลังงานหรือแบ่งกำลังงานวิลกินสัน (Wilkinson's power combiner/divider) และการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกขนาน (Cylindrical electrode) พร้อมวงจรเข้าคู่อิมพีแดนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 นอกจากนี้การวิเคราะห์การแผ่กระจายสนามไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอในวัสดุไดอิเล็กตริกภายใต้อิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกขนานที่รัศมีต่างๆ เมื่อมีและไม่มีวัสดุโพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP) ที่ตำแหน่งล้อมรอบตัวนำด้านใน และบริเวณตัวนำด้านนอก ด้วยโปรแกรม CST EM STUDIO เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของอุณหภูมิที่จะเกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกหลังจากได้รับพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ



รูปที่ 3.1 แผนภาพโครงสร้างระบบการให้ความร้อนแก๊สไดอิเล็กตริกทรงกระบอกด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

3.1 ชุดวงจรพลังงานคลื่นความถี่วิทยุสำหรับให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริก

ชุดวงจรพลังงานคลื่นความถี่วิทยุสำหรับให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริกนี้ประกอบไปด้วย ชุดวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ วงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ วงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ และวงจรรวมหรือแบ่งกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ ในหัวข้อนี้จะได้อธิบายถึงการออกแบบวงจรต่างๆ ซึ่งการออกแบบวงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุจะเป็นการออกแบบวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสเอ และวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุจะเป็นการออกแบบวงจรขยายสัญญาณคลาสบีแบบพุช-พูล

3.1.1 ชุดวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ

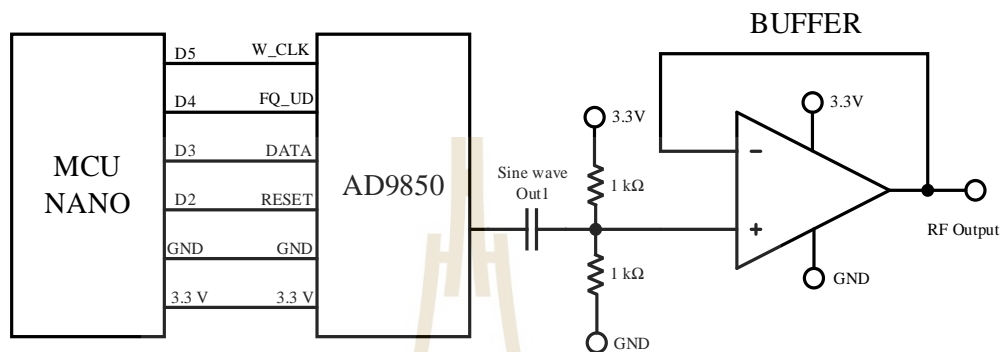
การสร้างแหล่งกำเนิดพลังงานคลื่นความถี่วิทยุสำหรับให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริก ในส่วนแรกจำเป็นต้องมีชุดวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ ชุดวงจรควบคุม Arduino Nano ชุดวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ AD9850 ให้ความเสถียรในการสร้างคลื่นความถี่ หาซื้อได้ง่ายและสามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ง่าย ต่างจากการออกแบบด้วยอุปกรณ์ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนานเพื่อให้เกิดความถี่กำทอน (LC resonance) เนื่องจากหาค่าของอุปกรณ์ได้ยาก มีโอกาสเกิดความผิดพลาดของสัญญาณได้สูง นอกจากนี้ยังมีวิธีการใช้อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Crystal oscillator) การใช้อุปกรณ์ชนิดนี้สร้างคลื่นสัญญาณ ยังคงมีความผิดพลาดของสัญญาณ จำเป็นต้องมีอุปกรณ์อื่นเข้ามาช่วยเพื่อให้เกิดสัญญาณความถี่ที่ต้องการมีความเสถียรและจำเป็นต้องขยายสัญญาณให้มีขนาดใหญ่ขึ้นในการนำไปใช้ โดย IC AD9850 เป็นอุปกรณ์ที่รวมทุกอย่างในการสร้างคลื่นสัญญาณที่มีความเสถียรไว้ในตัวเดียว อุปกรณ์นี้สามารถสร้างคลื่นรูปไซน์ 1 ถึง 40 เมกกะเฮิร์ต และคลื่นรูปสี่เหลี่ยม 20 ถึง 30 เมกกะเฮิร์ต อย่างละ 2 ช่องสัญญาณ เอาท์พุทที่ได้ อยู่ในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้า และส่วนสุดท้ายของวงจรชุดนี้ คือ วงจร Buffer ด้วย IC AD8063 ซึ่งเป็น Op-amp ที่มีขนาดเล็กและสามารถตอบสนองต่อความถี่สูงได้ ดังแสดงแผนภาพในรูปที่ 3.2



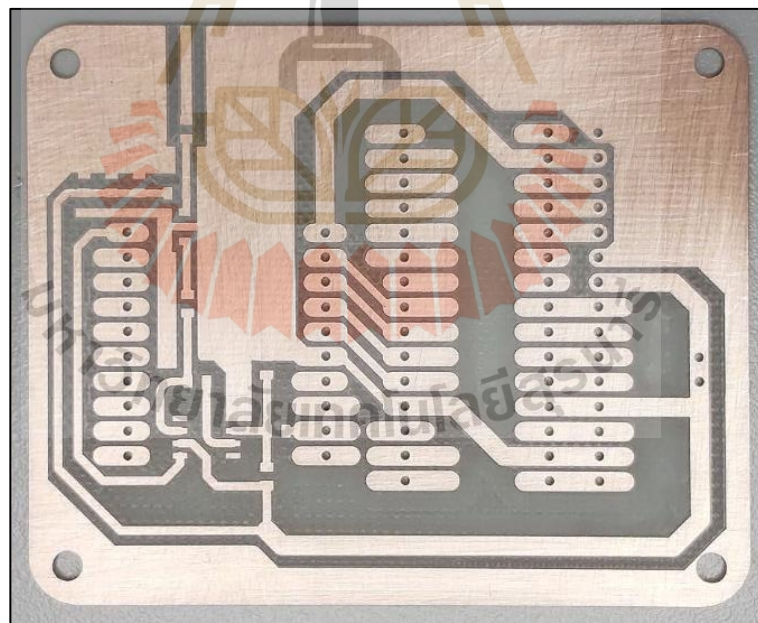
รูปที่ 3.2 แผนภาพโครงสร้างวงจรมกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ

ดังที่กล่าวมาข้างต้นถึงองค์ประกอบชุดวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ ใช้บอร์ดควบคุม Arduino Nano โดยให้ขา D5 D4 D3 D2 GND และ 3.3 V เชื่อมต่อกับบอร์ด AD9850 ด้วยขา W_CLK FQ_UD DATA RESET GND และ 3.3 V ตามลำดับ ในการควบคุมเพื่อให้ได้ความถี่ที่ต้องการ ในงานวิจัยนี้ต้องการสัญญาณรูปไซน์ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต เพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้า

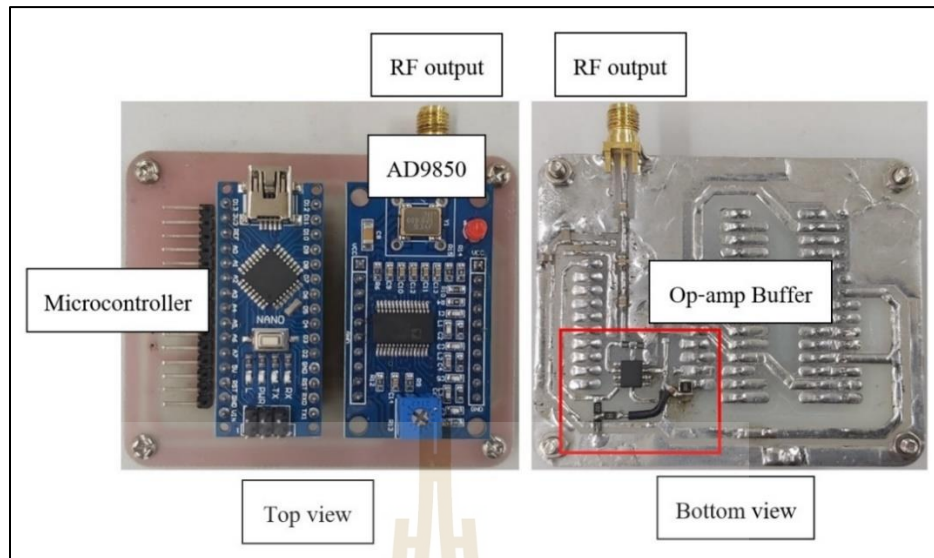
กระแสตรงจากวงจรบัฟเฟอร์รบกวนเอาต์พุต AD9850 จึงต้องใช้ตัวเก็บประจุเชื่อมต่อ ส่วนของวงจรบัฟเฟอร์จำเป็นต้องมีแรงดันไบอัสเพื่อให้สัญญาณที่ได้ไม่ผิดเพี้ยนดังแสดงในรูปที่ 3.3 หลังจากการออกแบบนำมาสู่การสร้างวงจบบนแผ่น PCB (Printed Circuit Board) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และประกอบอุปกรณ์ต่างๆ ลงบนแผ่น PCB ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.3 แผนภาพวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ



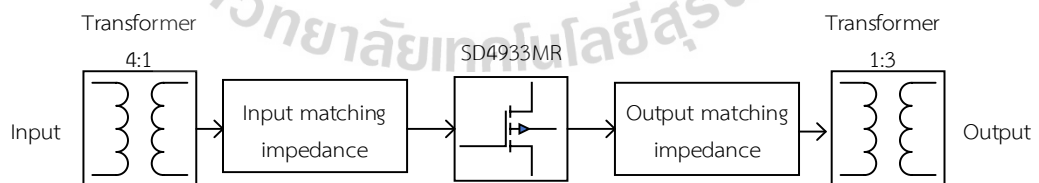
รูปที่ 3.4 แผงลายวงจรสำหรับประกอบวงจรชุดกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ



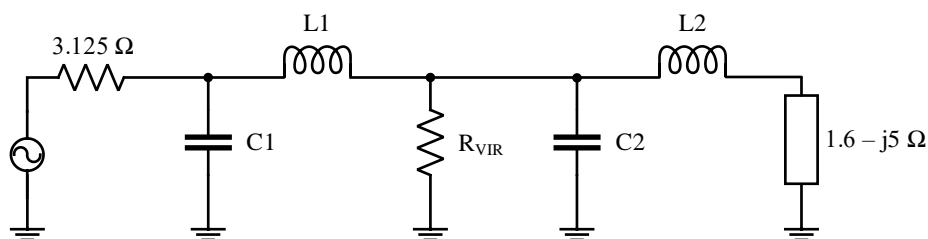
รูปที่ 3.5 ชุดวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ

3.1.2 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสเอ (Class A power amplifier)

การออกแบบวงจรขยายสัญญาณคลาสเอในงานวิจัยนี้ใช้ SD4933MR MOSFET n-channel มีค่าอิมพีแดนซ์อินพุต $Z_{in} = 1.6 - j5.0$ โอห์ม อิมพีแดนซ์เอาต์พุต $Z_{out} = 3.3 + j1.0$ โอห์ม ที่ความถี่ 30 เมกะเฮิร์ต และระดับแรงดันในการทำงาน 2.5 – 3.75 โวลต์ เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนกำลังงานสูงสุดจากอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ในงานวิจัยนี้ใช้หม้อแปลงอิมพีแดนซ์ความถี่สูงและการออกแบบแมชชิงอิมพีแดนซ์ทั้งฝั่งอินพุตและเอาต์พุต องค์ประกอบของวงจรนี้แสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนภาพโครงสร้างวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสเอ



รูปที่ 3.7 แผนภาพวงจรการเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์ฝั่งอินพุตของวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสเอ

ในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสเอฝั่งอินพุตใช้หม้อแปลงอิมพีแดนซ์ 16:1 นั่นคือแปลงอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม มาเป็น 3.125 โอห์ม ดังนั้นในส่วนของวงจรแมชชิงอิมพีแดนซ์ จะทำการแมชชิงอิมพีแดนซ์จากอิมพีแดนซ์ 3.125 โอห์ม มาเป็น $1.6 - j5.0$ โอห์ม ด้วยวิธีเข้าคู่โครงข่ายรูปตัวแอล ในลักษณะของความถี่ต่ำผ่าน ดังรูป 2.9 (ข) ในการออกแบบนี้จะใช้ความถี่ 30 เมกะเฮิร์ตเป็นจุดตัดความถี่ต่ำผ่าน ในการออกแบบเข้าคู่โครงข่ายด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องมีตัวต้านทานเสมือน (R_{VIR}) ระหว่างโครงข่ายเพื่อแบ่งการออกแบบเป็น 2 ส่วน ดังรูป 3.7 และสามารถคำนวณตัวต้านทานเสมือนได้ดังนี้

$$R_{VIR} = \sqrt{(3.125) \cdot (1.6)} = 2.24 \Omega$$

ส่วนแรกของการออกแบบจะเป็นการเข้าคู่โครงข่ายของอิมพีแดนซ์ 3.125 โอห์ม และ 2.24 โอห์ม (R_{VIR}) อีกส่วนจะเป็นการเข้าคู่โครงข่ายระหว่างอิมพีแดนซ์ 2.24 โอห์ม และ 1.6 โอห์ม สามารถหาค่าโหนด Q ทั้ง 2 ส่วนได้จากสมการ (2.19) ได้ดังนี้

$$Q = \sqrt{\frac{3.125}{2.24} - 1} = \sqrt{\frac{2.24}{1.6} - 1} = 0.63$$

หลังจากที่ได้ค่าโหนด Q คือ 0.63 สามารถหาค่ารีแอคแทนซ์อนุกรมและขนานทั้ง 2 ส่วนได้จากสมการที่ (2.20) และ (2.21) ได้ดังนี้

$$X_{P1} = \frac{3.125}{0.63} = 4.96 \Omega$$

$$X_{S1} = (2.24)(0.63) = 1.41 \Omega$$

$$X_{P2} = \frac{2.24}{0.63} = 3.56 \Omega$$

$$X_{S2} = (1.6)(0.63) = 1 \Omega$$

จากการหาค่ารีแอกแตนซ์ ในส่วนแรก ได้ค่ารีแอกแตนซ์ขนาน (X_{P1}) 4.96 โอห์ม รีแอกแตนซ์อนุกรม (X_{S1}) 1.41 โอห์ม ในส่วนที่ 2 ได้ค่ารีแอกแตนซ์ขนาน (X_{P2}) 3.56 โอห์ม รีแอกแตนซ์อนุกรม (X_{S2}) 1 โอห์ม จากรูปที่ 3.7 จะเห็นว่ารีแอกแตนซ์อนุกรมต่อโดยตรงกับค่าอิมพีแดนซ์ $1.6 - j5$ โอห์ม เพื่อหักล้างส่วนจินตภาพ ($-j5$) ต้องใช้ค่ารีแอกแตนซ์ 5 โอห์ม ($j5$) ดังนั้นค่ารีแอกแตนซ์อนุกรมในส่วนที่ 2 จึงมีค่าเท่ากับ 6 โอห์ม ($j + j5$) และนำไปสู่การหาค่าตัวเก็บประจุและค่าความเหนี่ยวนำ จากสมการที่ (2.22) และ (2.23) ได้ดังนี้

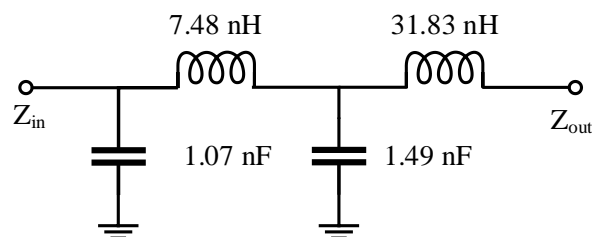
$$C_1 = \frac{1}{2\pi(30 \times 10^6)(4.96)} = 1.07 \text{ nF}$$

$$L_1 = \frac{1.41}{2\pi(30 \times 10^6)} = 7.48 \text{ nH}$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi(30 \times 10^6)(3.56)} = 1.49 \text{ nF}$$

$$L_2 = \frac{6}{2\pi(30 \times 10^6)} = 31.83 \text{ nH}$$

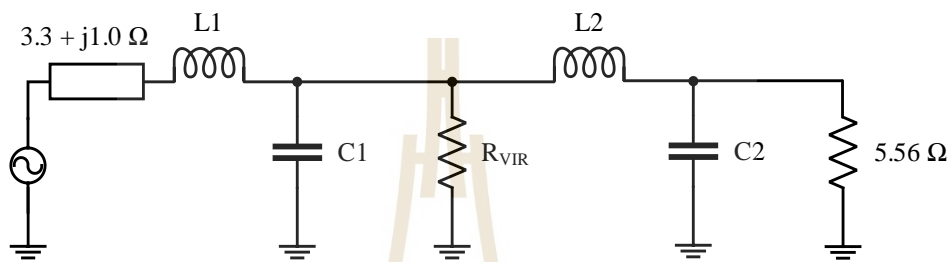
ผลจากการหาค่าตัวเก็บประจุและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าในวงจรเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์ทางฝั่งอินพุตจากหม้อแปลงอิมพีแดนซ์ 4:1 ได้ค่าความจุไฟฟ้า C_1 และ C_2 คือ 1.07 และ 1.49 nF ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า L_1 และ L_2 คือ 7.48 และ 31.83 nH ตามลำดับ ดังแผนผังวงจรในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แผนผังวงจรเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์ฝั่งอินพุตของวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ คลาสเอหลังการออกแบบ

ส่วนถัดมาจะเป็นการออกแบบเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์ทางด้านเอาต์พุตด้วยหม้อแปลงอิมพีแดนซ์ 1:9 การออกแบบใช้วิธีการเข้าคู่โครงข่ายรูปตัวแอลแบบความถี่ต่ำผ่านดังรูปที่ 2.9 (ก) ในฝั่งเอาต์พุตนั้นจะเป็นการเข้าคู่อิมพีแดนซ์ระหว่าง $3.3 + j1.0$ โอห์ม และ 5.56 โอห์ม โดยจะเริ่มจากการหาค่าความต้านทานเสมือนและแผนผังวงจรดังรูปที่ 3.9

$$R_{VIR} = \sqrt{(3.3) \cdot (5.56)} = 4.28 \Omega$$



รูปที่ 3.9 แผนภาพวงจรการเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์เอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสเอ

โดยจะแบ่งการออกแบบเป็น 2 ส่วนเช่นกัน คือ การออกแบบเข้าคู่โครงข่ายระหว่าง $3.3 + j1.0$ โอห์ม กับ 4.28 โอห์ม และการออกแบบเข้าคู่โครงข่ายระหว่าง 4.28 โอห์ม กับ 5.56 โอห์ม ทั้ง 2 สามารถคำนวณหาค่าโหลต Q จากสมการ (2.19) ได้ดังนี้

$$Q = \sqrt{\frac{4.28}{3.3} - 1} = \sqrt{\frac{5.56}{4.28} - 1} = 0.60$$

จากค่าโหลต Q คือ 0.60 สามารถหาค่ารีแอคแทนซ์อนุกรมและขนานทั้ง 2 ส่วนได้จากสมการที่ (2.20) และ (2.21) ได้ดังนี้

$$X_{P1} = \frac{4.28}{0.60} = 7.13 \Omega$$

$$X_{S1} = (3.3)(0.60) = 1.98 \Omega$$

$$X_{P2} = \frac{5.56}{0.60} = 9.27 \Omega$$

$$X_{S2} = (4.28)(0.60) = 2.57 \Omega$$

จากการหาค่ารีแอกแตนซ์ ในส่วนที่ 1 ได้ค่ารีแอกแตนซ์อินдукทีฟ (X_{S1}) 1.98 โอห์ม ค่ารีแอกแตนซ์ขานาน (X_{P1}) 7.13 โอห์ม และส่วนที่ 2 ค่ารีแอกแตนซ์อินдукทีฟ (X_{S2}) 2.57 โอห์ม ค่ารีแอกแตนซ์ขานาน (X_{P2}) 9.27 โอห์ม จากรูป 3.7 จะเห็นว่ารีแอกแตนซ์อินдукทีฟต่อกับอิมพีแดนซ์ $3.3 + j1.0$ โอห์ม ค่ารีแอกแตนซ์จึงถูกชดเชยไปถึงได้ (X_{S1}) 0.98 โอห์ม เมื่อนำไปหาค่าความเก็บประจุและค่าความเหนี่ยวนำจากสมการที่ (2.22) และ (2.23) ได้ดังนี้

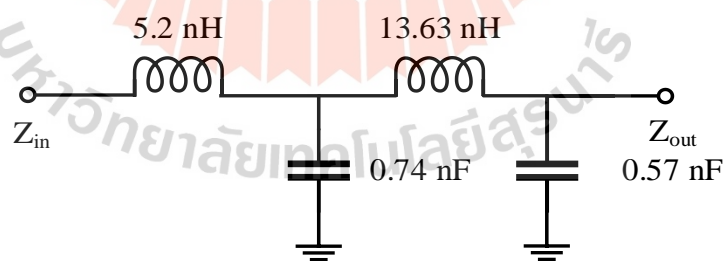
$$C_1 = \frac{1}{2\pi(30 \times 10^6)(7.13)} = 0.74 \text{ nF}$$

$$L_1 = \frac{0.98}{2\pi(30 \times 10^6)} = 5.2 \text{ nH}$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi(30 \times 10^6)(9.27)} = 0.57 \text{ nF}$$

$$L_2 = \frac{2.57}{2\pi(30 \times 10^6)} = 13.63 \text{ nH}$$

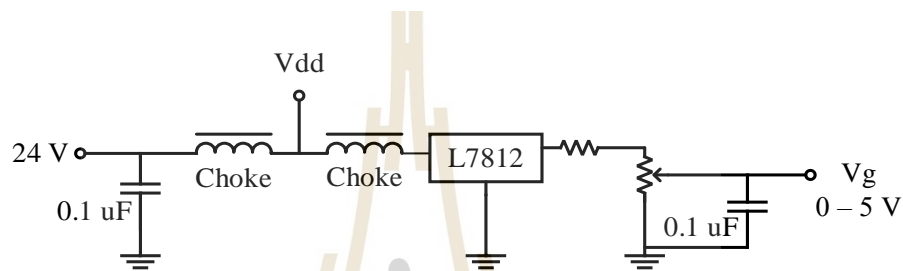
ผลจากการออกแบบเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์ในรูปแบบตัวแอลร่วมกับหม้อแปลงอิมพีแดนซ์ 1:3 ทางฝั่งเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสเอ ได้ค่าความเก็บประจุและค่าเหนี่ยวนำไฟฟ้า C_1 และ C_2 คือ 0.74 nF และ 0.57 nF ส่วน L_1 และ L_2 คือ 5.2 nH และ 13.63 nH ตามลำดับ ดังแสดงในแผนภาพวงจรรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แผนภาพวงจรการเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์เอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสเอหลังการออกแบบ

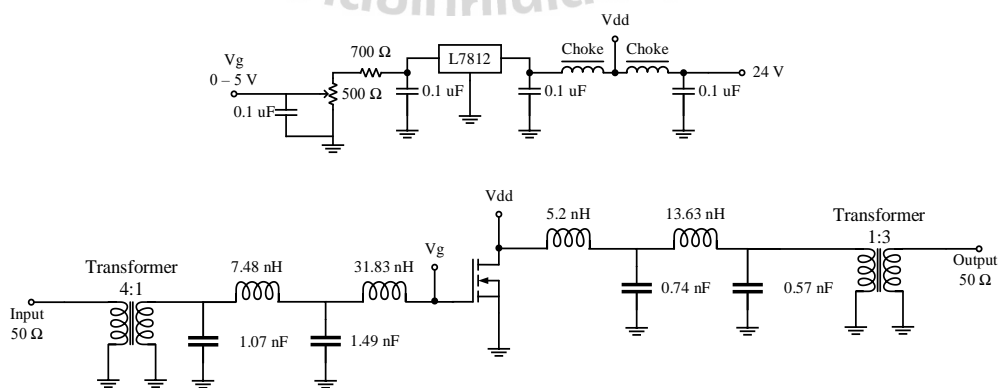
วงจรนี้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์ สำหรับขาเดรน (V_{dd}) เนื่องจากขาเดรนเป็นเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ นั่นคือเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จำเป็นต้องมีตัวเก็บประจุขานานและตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าหรือโชค (Choke) เพื่อป้องกันไฟฟ้า

กระแสสลับกวนกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ขาเกตต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไบอัส (V_g) ให้กับวงจรถ่าย โดยจะต่อมาจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์ เนื่องจากแรงดันไบอัสต้องการแรงดันที่ไม่สูงมาก จึงใช้ IC L7812 ในการคงค่าแรงดันจาก 24 โวลต์ เป็น 12 โวลต์ และมีความจำเป็นต้องใช้ช็อคอีกหนึ่งตัว เนื่องจากต่อโดยตรงมาจากขาเดรน ซึ่งให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จากนั้นใช้ตัวต้านทานต่อขนานในลักษณะของการแบ่งแรงดัน (Voltage divider) เพื่อปรับค่าแรงดันที่ขาเกต การออกแบบนี้ ออกแบบให้แรงดันไบอัสมีค่าแรงดันตั้งแต่ 0 ถึง 5 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แผนภาพวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับวงจรถ่ายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ คลาสเอ

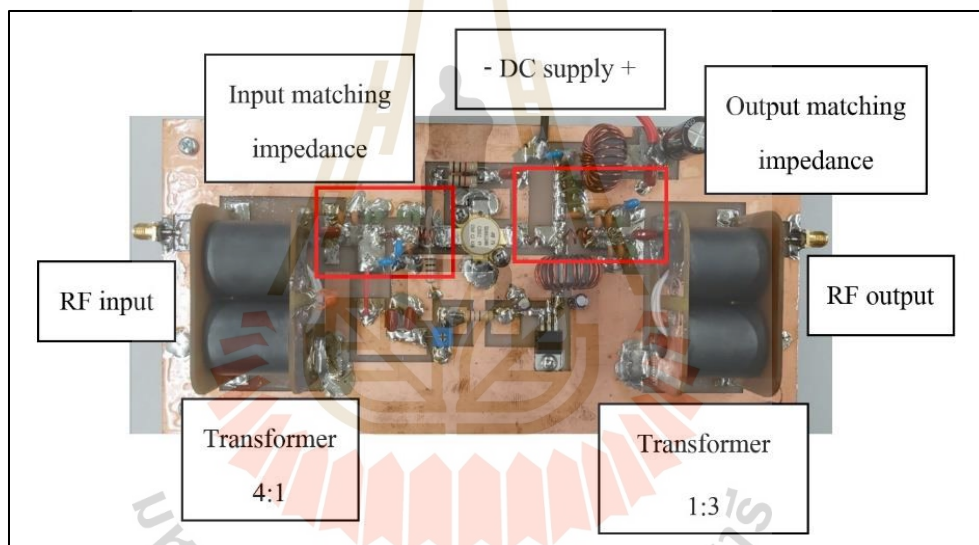
หลังจากที่ได้ออกแบบส่วนการเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์ทั้งอินพุตและเอาท์พุต ร่วมถึงส่วนของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ทั้งหมดถูกนำมาต่อเข้าด้วยกันดังแผนภาพแสดงในรูปที่ 3.12 นำมาสู่การออกแบบลายวงจรบนแผ่น PCB ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และลงอุปกรณ์จากที่ได้ออกแบบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.14 โดยที่หม้อแปลงอิมพีแดนซ์ใช้แกนเฟอร์ไรท์ 28B1020-100 ทั้งฝั่งอินพุตและเอาท์พุต ขดลวดที่ใช้พันแกนคือ RG142 coaxial cable สำหรับการสูญเสียพลังงานต่ำ



รูปที่ 3.12 แผนภาพวงจรถ่ายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ คลาสเอ



รูปที่ 3.13 แผงลายวงจรสำหรับประกอบวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสเอ

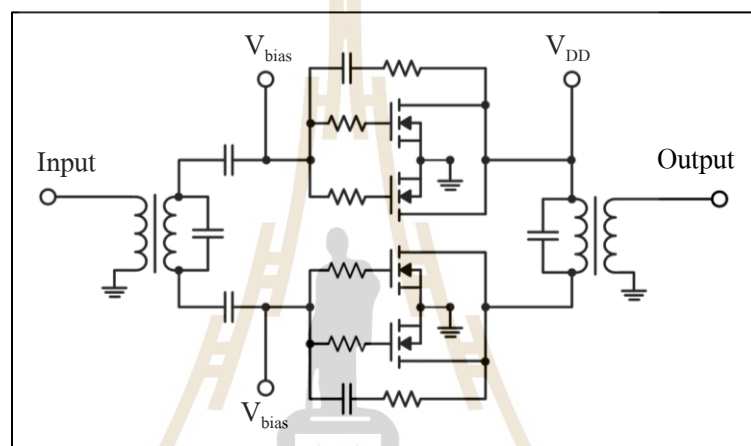


รูปที่ 3.14 วงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสเอ

3.1.3 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณย่านความถี่วิทยุคลาสบีแบบพุช-พูลขนาน

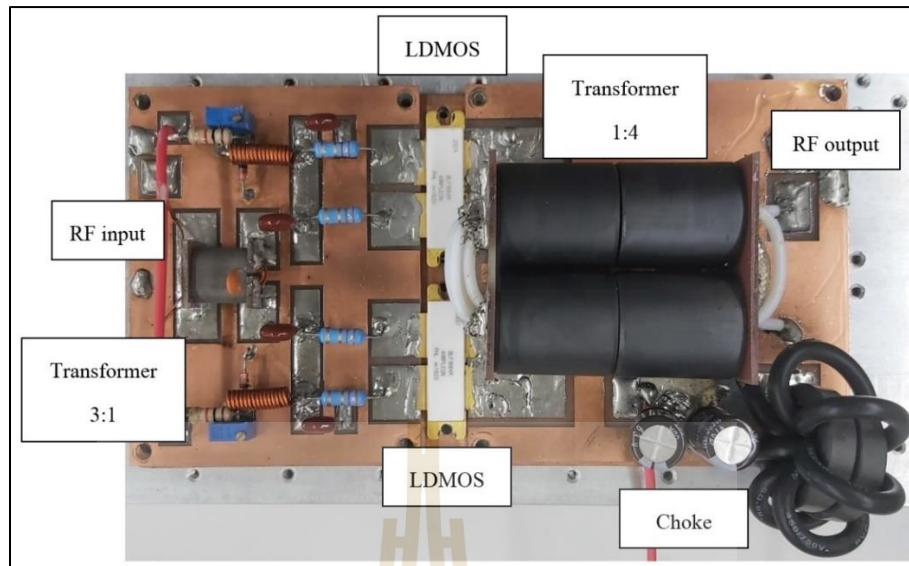
เป็นวงจรหลักในการขยายกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุกำลังงานสูง ในงานวิจัยนี้ได้ ออกแบบวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสบีแบบพุช-พูล ด้วย Dual LDMOS transistor Enhancement type N-channel BLF188XR ดังแสดงในรูปที่ 3.15 แต่ MOSFET เป็นชนิด N-channel จะทำงานขยายเฉพาะฝั่งบวกเท่านั้น หากใช้วงจรคลาสเอในการขยายกำลังงานสูงจะส่งผลเสียอย่างมาก เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นบนอุปกรณ์ LDMOS และประสิทธิภาพทางไฟฟ้าต่ำ ดังนั้นการใช้หม้อแปลงบาลันจะช่วยให้ Dual MOSFET สลับกันทำงาน (ต่างจากคลาสเอที่ทำงานขยายทั้ง

ฝั่งบวกและลบ) ซึ่งช่วยลดการทำงานของหนักของอุปกรณ์และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน การไบอัสของวงจรนี้จะใช้ค่าที่จุดการทำงานที่ V_{TH} ของ MOSFET ที่ใช้ นอกจากนี้หม้อแปลงยังมีหน้าที่ในการแมชชิงอิมพีแดนซ์เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนกำลังงานสูงสุดจากกำลังงานฝั่งขาเข้ามายัง MOSFET และจาก MOSFET ไปยังฝั่งขาออกกำลังงาน MOSFET ที่ถูกนำมาใช้กำลังงานสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 1200 วัตต์ หากต้องการกำลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า จึงต้องใช้ Dual MOSFET 2 ตัว โดย Dual MOSFET แต่ละตัวจะต่อขนานกัน นั่นคือ ขาเกตต่อขาเกตและขาเดรนต่อขาเดรน เปรียบเสมือนเป็น MOSFET 1 ตัว



รูปที่ 3.15 แผนภาพวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสบีแบบพุช-พูลขนาน

วงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสบีพุช-พูลนี้ ใช้หม้อแปลงบาลันฝั่งอินพุต 9:1 ด้วยแกนเฟอร์ไรต์ BN-02 ใช้ RG316 coaxial cable พันแกน 3 รอบ เพื่อแบ่งสัญญาณออกเป็น 2 ส่วน มีความต่างเฟส 180 องศา เพื่อให้ Dual LDMOS สลับกันทำงาน ในส่วนของฝั่งเอาต์พุตใช้หม้อแปลงบาลัน 1:16 ด้วยแกนเฟอร์ไรต์ 28B1020-100 จำนวน 4 ลูก ใช้ RG142 coaxial cable พันแกน 4 รอบ เพื่อทนต่อกำลังงานสูงและสำหรับการรวมสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุระหว่าง Dual MOSFET ที่ขาเดรน ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 วงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุคลาสบีแบบพุช-พูลขนาน

3.1.4 การออกแบบวงจรรวมกำลังงานหรือแบ่งกำลังงานย่านความถี่วิทยุ

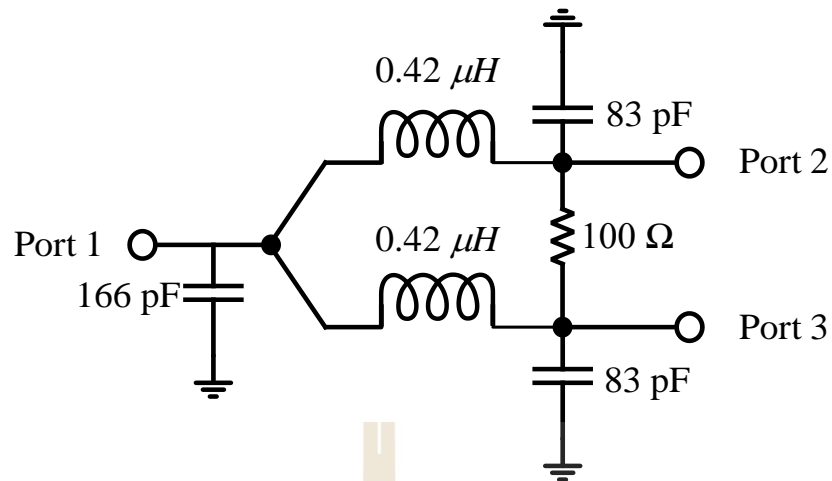
วงจรแบ่งกำลังงานและวงจรรวมกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ 2 ทาง ใช้การออกแบบเดียวกันตามสมการที่ 2.1 – 2.4 ดังแสดงแผนภาพวงจรในรูปที่ 3.17 ขึ้นอยู่กับพอร์ตที่ใช้ หากใช้พอร์ตที่ 1 เป็นอินพุต จะถูกใช้เป็นวงจรแบ่งกำลังงาน หากใช้พอร์ต 2 และ 3 เป็นอินพุต จะทำหน้าที่เป็นวงจรรวมกำลังงาน โดยกำหนดสำหรับอิมพีแดนซ์ทั้ง 3 พอร์ต คือ 50 Ω ที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต สามารถคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังนี้

$$R = 2 \times (50) = 100 \Omega$$

$$X_C, X_L = \sqrt{2} \times (50) = 70.71 \Omega$$

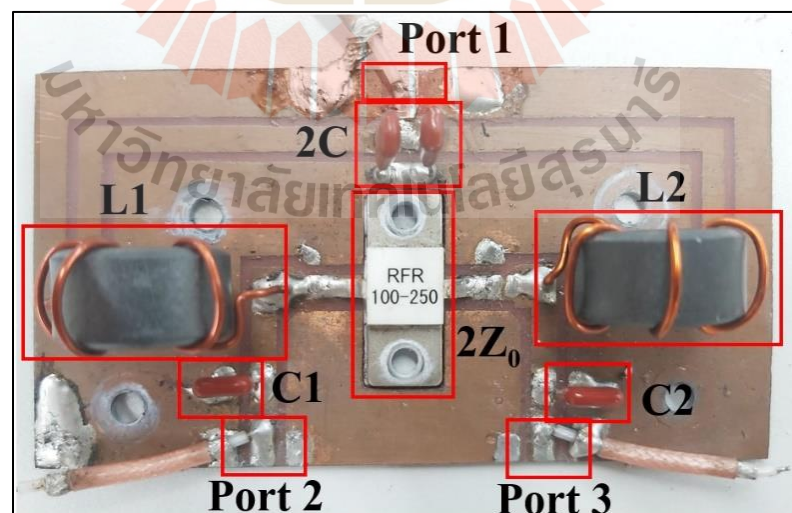
$$L_1, L_2 = \frac{70.71}{2\pi(27.12 \times 10^6)} = 0.42 \mu H$$

$$C_1, C_2 = \frac{1}{2\pi(27.12 \times 10^6)(70.71)} = 83 pF$$



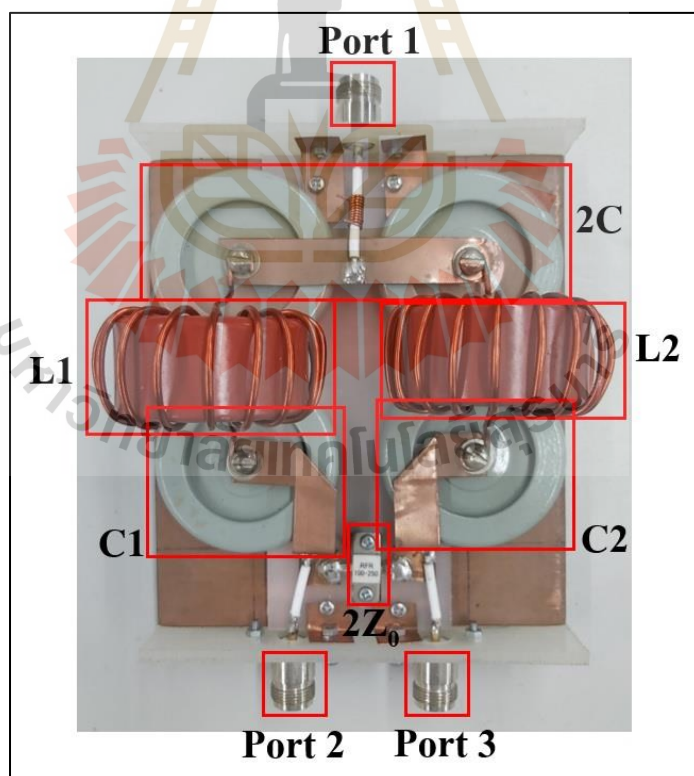
รูปที่ 3.17 แผนภาพวงจรรวมกำลังงานหรือรวมกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุหลังการออกแบบ

ในการเลือกใช้อุปกรณ์ที่จะนำมาออกแบบขึ้นอยู่กับกำลังงานที่ใช้ ในส่วนของวงจรแบ่งกำลังงานจะใช้แบ่งกำลังงานที่รับมาจากวงจรขยายสัญญาณภาคต้น ซึ่งกำลังงานไม่สูงมากนัก ตัวต้านทานที่ใช้ ได้เลือกใช้ให้สามารถทนกำลังงานได้ 250 วัตต์ ขดลวดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร แกนเฟอร์ไรต์มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 20 มิลลิเมตร และมีความยาว 10 มิลลิเมตร สำหรับการสร้างตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่นำมาใช้เป็นชนิดไมลาร์ (Mylar Capacitor) ทนแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 250 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 วงจรแบ่งกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ

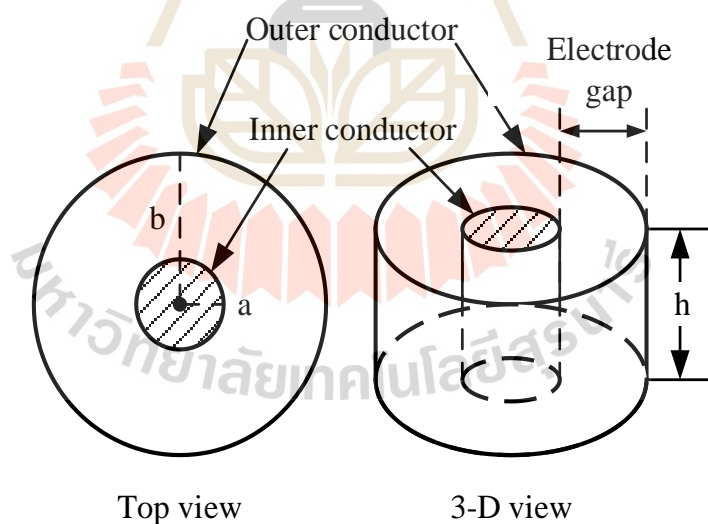
การเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับวงจรรวมกำลังงานจะถูกใช้ในการรวมกำลังงานจากวงจรขยายกำลังงานภาคหลัก ซึ่งให้กำลังงานสูง ขดลวดที่นำมาใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร แกนเฟอร์ไรท์ T200-2B มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 31.8 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50.8 มิลลิเมตร และความยาว 14 มิลลิเมตร สำหรับสร้างตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเป็นชนิดทนแรงดันสูงได้ถึง 1 กิโลโวลต์ ตัวต้านทานไฟฟ้ามีขนาดทนกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด 250 วัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.19 จะสังเกตเห็นว่าความสามารถในการทนกำลังงานไฟฟ้าของตัวต้านทานในวงจรแบ่งกำลังงานและรวมกำลังงานมีค่าเท่ากัน แต่กำลังงานไฟฟ้าที่จะผ่านวงจรรวมกำลังงานมีค่าสูง เนื่องจากตัวต้านทานถูกใช้ต่อที่บริเวณพอร์ต 2 และ 3 กำลังงานที่ออกจาก 2 พอร์ตนี้ควรมีขนาดเท่ากัน ที่ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากัน ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าควรมีขนาดเท่ากันด้วยเช่นกัน ในทางทฤษฎีแล้วเมื่อทั้ง 2 พอร์ตมีขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่เท่ากัน ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตัวต้านทานจึงมีค่าเป็นศูนย์ ในทางปฏิบัติไม่อาจทำให้ความต่างศักย์นี้เป็นศูนย์ได้แต่มีขนาดที่ใกล้เคียง เนื่องจากปัจจัยหลายๆ อย่างเช่น ค่าความผิดพลาดของอุปกรณ์ ความสามารถในขยายกำลังงานของแต่ละชุดที่ไม่เท่ากัน เป็นต้น



รูปที่ 3.19 วงจรรวมกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ

3.2 การจำลองผลทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงาน

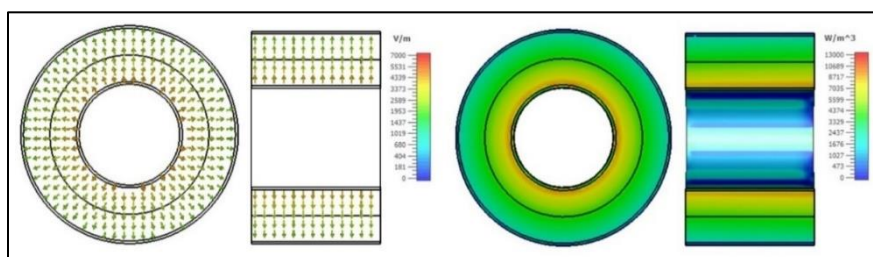
การจำลองผลทางคณิตศาสตร์ของความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric field intensity, V/m) และความหนาแน่นการดูดซับพลังงาน (Power loss density, W/m^3) ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริก ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดขนานทรงกระบอก ด้วยโปรแกรมจำลองผลทางคณิตศาสตร์ CST STUDIO SUITE 2019 จำลองผลโดยการใช้อิเล็กโทรดรูปทรงกระบอกด้วยแผ่นทองแดงหนา 0.5 มิลลิเมตร มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.20 ประกอบด้วยตัวนำด้านในทรงกระบอกมีรัศมี a มิลลิเมตร เป็นบริเวณปล่อยคลื่นความถี่วิทยุ ตัวนำด้านนอกทรงกระบอกมีรัศมี b มิลลิเมตร กำหนดเป็นกราวด์ทางไฟฟ้า ตัวนำทั้ง 2 มีความสูง h มิลลิเมตร เท่ากัน ระยะห่างหรือช่องว่างของตัวนำทั้ง 2 คือผลต่างระหว่างรัศมีตัวนำด้านในและด้านนอก สำหรับใส่วัสดุไดอิเล็กตริก ในงานวิจัยนี้ใช้ข้าวสารเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก ดังที่ได้กล่าวไว้ถึงอุณหภูมิความร้อนสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้า เมื่อรูปแบบของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกอย่างสม่ำเสมอแล้ว จะส่งผลให้อุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกสม่ำเสมอด้วยเช่นกัน ซึ่งการคาดการณ์ด้วยผลการจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นวิธีที่ประหยัดและรวดเร็ว



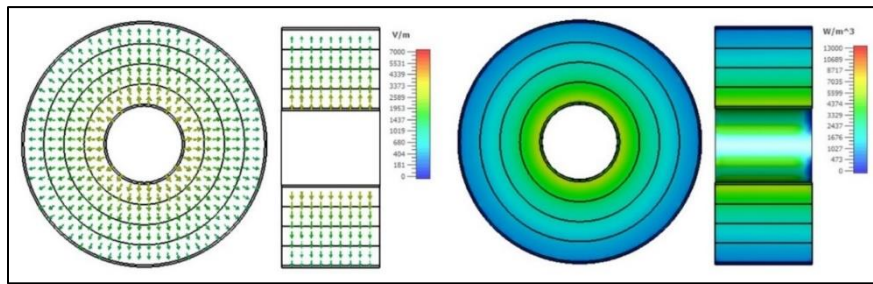
รูปที่ 3.20 โครงสร้างอิเล็กโทรดขนานทรงกระบอกสำหรับให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริก

3.2.1 ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานที่เกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อขนาดไดอิเล็กโตรดเปลี่ยนแปลง

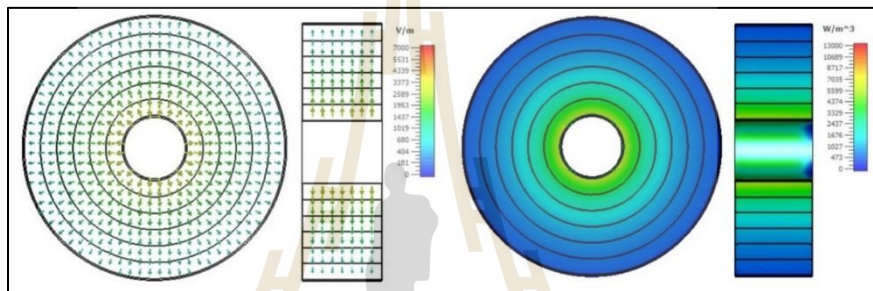
การจำลองผลทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริก ระหว่างแผ่นอิเล็กโตรดขนานทรงกระบอก โดยกำหนดเงื่อนไขสนามไฟฟ้าภายในตัวนำด้านในและบริเวณที่มีรัศมีมากกว่าตัวนำด้านนอกเป็นศูนย์ เพื่อศึกษาผลกระทบต่อสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกต่อระยะห่างระหว่างตัวนำด้านในและด้านนอก ได้กำหนดให้ตัวนำด้านในมีรัศมีคงที่ 20 มิลลิเมตร ส่วนตัวนำด้านนอกจะมีการเปลี่ยนแปลงรัศมี คือ 40 60 80 100 และ 120 มิลลิเมตร โดยตัวนำทั้ง 2 มีความสูงที่เท่ากัน คือ 50 มิลลิเมตร เพื่อสะดวกต่อการศึกษา สนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานจะถูกแบ่งพิจารณาระยะรัศมีทุกๆ 10 มิลลิเมตร จากตัวนำด้านใน กำลังงานคลื่นความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต ถูกใช้ป้อนเป็นพลังงานด้วยท่อนำคลื่น (Waveguide port) เพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริก กำหนดเป็นค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามรัศมีของตัวนำด้านนอกที่เปลี่ยนแปลงไปและตัวนำด้านนอกที่เปลี่ยนแปลงไป วัสดุในการจำลองผลสำหรับเป็นอิเล็กโตรดหรือตัวนำ คือ ทองแดง ซึ่งเป็นวัสดุที่ถูกกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ จาก CST STUDIO SUITE 2019 วัสดุไดอิเล็กตริกที่ถูกนำมาใช้ในการศึกษา คือ ข้าวสาร โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญในการจำลองผล คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ($\epsilon' = 8.7628$) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\epsilon'' = 0.5026$) ของข้าวสารที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต (Yang et al., 2018) ในการจำลองผลจะพิจารณาระยะห่างระหว่างตัวนำทุกๆ 10 มิลลิเมตร ดังแสดงภาพตัดขวางแบบ 2 มิติ ตามแนวระนาบ XY เป็นมุมมองด้านบน และตามแนวระนาบ XZ เป็นมุมมองด้านข้าง ทั้งผลการจำลองสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับ ในรูปที่ 3.21 – 3.25 จะเห็นว่าทั้งความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานจะมีขนาดลดลงที่ระยะห่างออกไปจากตัวนำด้านใน ที่บริเวณล้อมรอบตัวนำด้านในจะมีความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานสูง หากระยะห่างระหว่างตัวนำมีระยะมากเกินไปจะส่งผลให้การกระจายตัวของสนามไฟฟ้ามีความสม่ำเสมอต่ำดังแสดงในตารางที่ 3.1



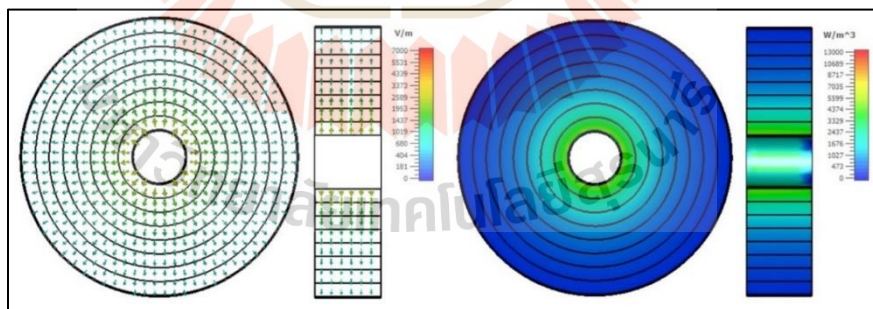
รูปที่ 3.21 ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อรัศมีตัวนำภายใน 20 มิลลิเมตร และตัวนำภายนอกรัศมี 40 มิลลิเมตร



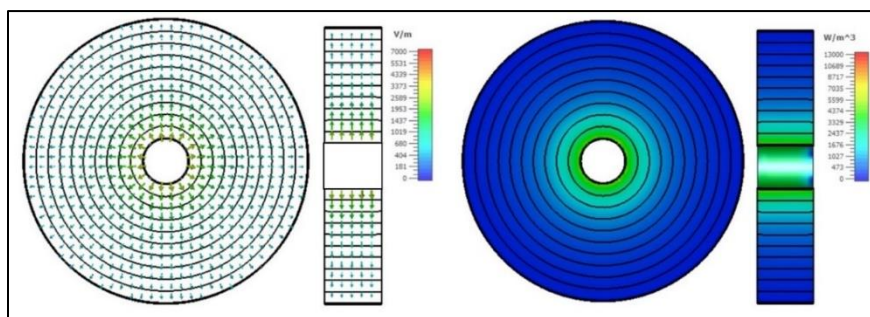
รูปที่ 3.22 ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อรัศมีตัวนำภายใน 20 มิลลิเมตร และตัวนำภายนอกรัศมี 60 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.23 ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อรัศมีตัวนำภายใน 20 มิลลิเมตร และตัวนำภายนอกรัศมี 80 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.24 ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อรัศมีตัวนำภายใน 20 มิลลิเมตร และตัวนำภายนอกรัศมี 100 มิลลิเมตร



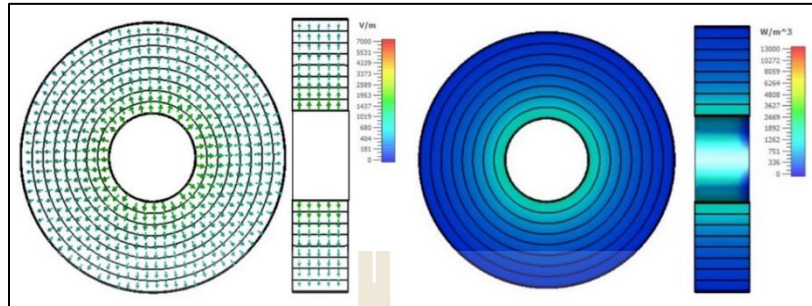
รูปที่ 3.25 ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อรัศมีตัวนำภายใน 20 มิลลิเมตร และตัวนำภายนอกรัศมี 120 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.1 ค่าการจำลองความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อรัศมีตัวนำด้านนอกเปลี่ยนแปลง

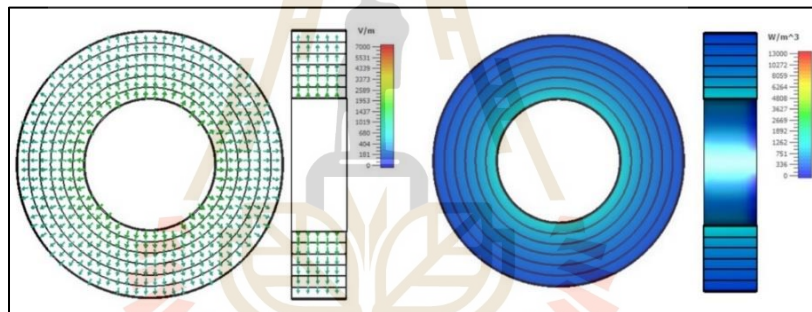
รัศมีตัวนำด้านนอก (มม.)	ค่าเฉลี่ยห่างจากตัวนำด้านใน 10 มม. (W/m^3)	ค่าเฉลี่ยห่างจากตัวนำด้านนอก 10 มม. (W/m^3)	ดัชนีชี้วัดความสม่ำเสมอ
40	6,166.33	3,073.19	0.421
60	3,648.13	756.14	0.667
80	3,501.84	394.97	0.914
100	3,047.17	200.12	1.056
120	2,954.28	128.7	1.286

ในส่วนถัดมาเป็นการจำลองผลทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานที่เกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกต่อระยะรัศมีตัวนำภายในที่เปลี่ยนแปลงไป กำหนดให้รัศมีตัวนำด้านนอกคงที่ 120 มิลลิเมตร ส่วนตัวนำด้านในจะมีการเปลี่ยนแปลงรัศมี คือ 40 60 80 และ 100 มิลลิเมตร ความสูงของตัวนำทั้งคู่ 50 มิลลิเมตร ป้อนพลังงานด้วยท่อนำคลื่นความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต วัสดุที่ใช้เป็นตัวนำคือทองแดง คุณสมบัติต่างๆ จาก CST STUDIO SUITE 2019 ค่าไดอิเล็กตริกของข้าวสารถูกใช้ในการจำลองผลเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก $8.7628 - j0.5026$ ϵ ที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต การพิจารณาผลที่เกิดขึ้น เพื่อสะดวกต่อการวิเคราะห์การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายในวัสดุไดอิเล็กตริก โดยจะพิจารณาระยะรัศมีทุกๆ 10 มิลลิเมตร จากตัวนำด้านใน ดังแสดงภาพตัดขวางแบบ 2 มิติ ตามแนวระนาบ XY เป็นมุมมองด้านบน และตามแนวระนาบ XZ เป็นมุมมองด้านข้าง ทั้งผลการจำลองสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูด

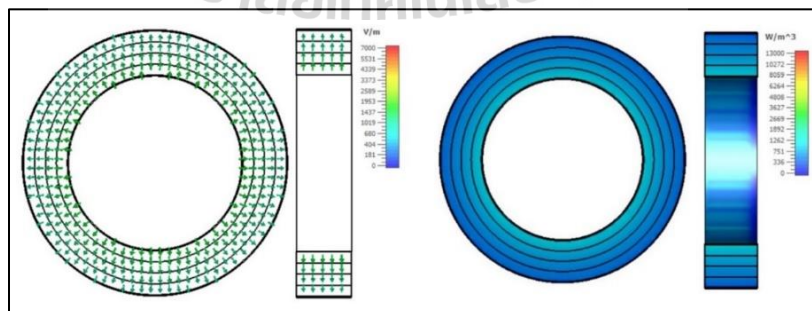
ซ้ำ ในรูปที่ 3.26 – 3.29 ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นการดูดซับพลังงานให้ค่าความสม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างตัวนำลดลง ดังแสดงในตารางที่ 3.2



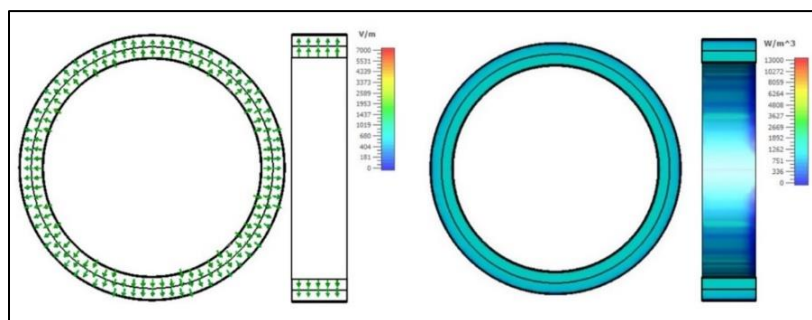
รูปที่ 3.26 ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อรัศมีตัวนำภายนอก 120 มิลลิเมตร และตัวนำภายในรัศมี 40 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.27 ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อรัศมีตัวนำภายนอก 120 มิลลิเมตร และตัวนำภายในรัศมี 60 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.28 ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อรัศมีตัวนำภายนอก 120 มิลลิเมตร และตัวนำภายในรัศมี 80 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.29 ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อรัสมีดวงนำ
ภายนอก 120 มิลลิเมตร และตัวนำภายในรัสมิ่ 100 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.2 ค่าการจำลองความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อรัสมีดวงนำด้านในเปลี่ยนแปลง

รัสมีดวงนำด้านใน (มม.)	ค่าเฉลี่ยห่างจากตัวนำด้าน ใน 10 มม. (W/m^3)	ค่าเฉลี่ยห่างจากตัวนำด้าน นอก 10 มม. (W/m^3)	ดัชนีชี้วัดความ สม่ำเสมอ
40	1,346.48	207.35	0.421
60	1,000.61	320.66	0.405
80	937.65	520.97	0.234
100	1,223.39	1,013.6	0.119

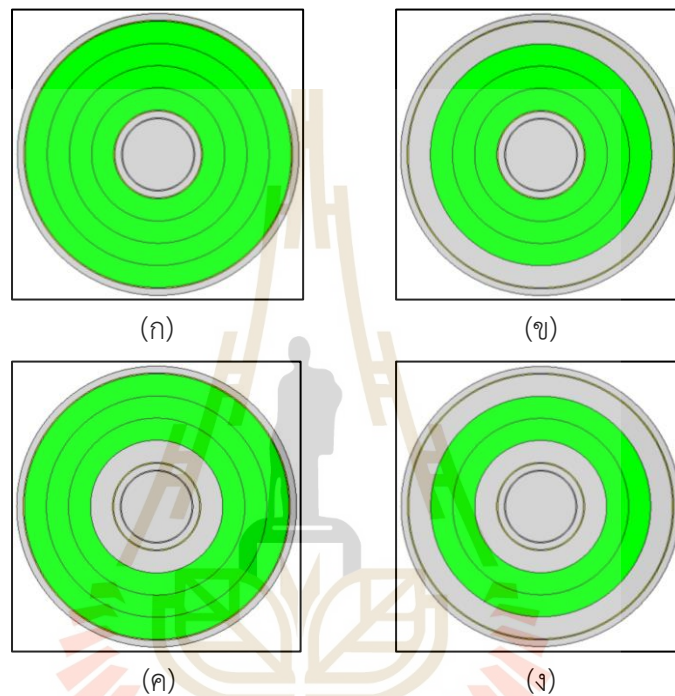
จากรูปที่ 3.29 ให้ค่าความสม่ำเสมอที่ดีที่สุดจากการจำลองเปลี่ยนขนาดรัสมีดวงนำ
ด้านใน ซึ่งมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 20 มิลลิเมตร ในทำนองเดียวกันจากรูปที่ 3.21 เป็นผลการ
จำลองการเปลี่ยนแปลงขนาดรัสมีดวงนำด้านนอก ซึ่งมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 20 มิลลิเมตร
เช่นเดียวกันและเกิดความสม่ำเสมอที่ดีที่สุด จากผลการจำลองทั้ง 2 เงื่อนไขนี้สามารถสรุปได้ว่า
ระยะห่างระหว่างตัวนำส่งผลต่อความสม่ำเสมอต่อขนาดความเข้มสนามไฟฟ้าความหนาแน่นการดูด
ซับพลังงาน และขนาดรัสมิ่ของตัวนำมีผลต่อขนาดความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับ
พลังงาน จะเห็นว่ารูปที่ 3.21 มีขนาดรัสมิ่ตัวนำน้อยกว่ารูปที่ 3.29 แต่มีระยะห่างระหว่างตัวนำ
เท่ากัน ที่พลังงานป้อนเท่ากัน แต่ความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานภายใน
วัสดุไดอิเล็กตริกมากกว่า เนื่องจากตัวนำที่มีรัสมิ่มากขึ้นทำให้พื้นที่ของตัวนำมีขนาดมากขึ้น
จำเป็นต้องใช้พลังงานมากขึ้นหากต้องการความเข้มสนามไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น

3.2.2 ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานที่เกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อเพิ่มโพลีโพรไพลีน

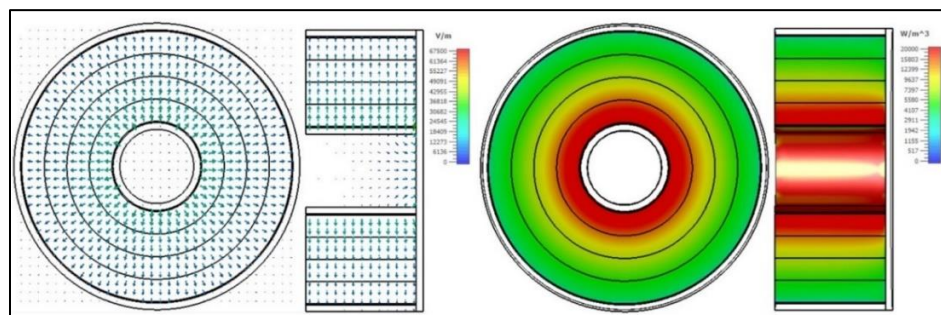
จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดรัศมีของตัวนำ หากต้องการความสม่ำเสมอของความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานควรเลือกใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำและขนาดรัศมีของตัวนำให้เหมาะสมกับพลังงานที่ใช้ เนื่องจากกระจายตัวที่เกิดขึ้นยังจำเป็นต้องปรับปรุง การศึกษาการปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกด้วยผลจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานที่เกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริก เมื่อตัวนำหรืออิเล็กโทรดทำหน้าที่ปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าเป็นรูปทรงกระบอกขนาน กำหนดตัวนำด้านในรัศมี 20 มิลลิเมตร ตัวนำด้านนอกรัศมี 60 มิลลิเมตร ความสูงของตัวนำทั้งคู่ 50 มิลลิเมตร วัสดุไดอิเล็กตริกจะอยู่ระหว่างตัวนำด้วยความสูง 50 มิลลิเมตร และได้ศึกษาผลของการเพิ่มวัสดุไดอิเล็กตริกอีกชนิดเพื่อศึกษาการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานภายในวัสดุไดอิเล็กตริกตัวอย่าง (ข้าวสาร) เมื่อวัสดุไดอิเล็กตริกมากกว่า 1 วัสดุอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าเดียวกัน ความเข้มของสนามไฟฟ้าจะแปรผกผันกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก วัสดุที่เลือกใช้ในการศึกษา คือ โพลีโพรไพลีน (Polypropylene, PP) เนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถขึ้นรูปเป็นรูปทรงต่างๆ ได้ง่ายด้วยเครื่องขึ้นรูปสามมิติ ราคาถูก และคุณสมบัติค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ นั่นคือเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับจะไม่เกิดอุณหภูมิความร้อนขึ้นภายในวัสดุ อุณหภูมิสูงสุดที่เหมาะสมต่อการใช้งาน คือ 82.2 องศาเซลเซียส การใช้โพลีโพรไพลีนนำมาใช้เพื่อศึกษาการปรับปรุงการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นภายในข้าวสาร จะศึกษาโดยการวางตำแหน่งของโพลีโพรไพลีนรูปทรงกระบอกด้วยความสูงเท่ากับตัวนำคลื่น 3 รูปแบบ คือ รัศมีโพลีโพรไพลีนภายนอก 80 มิลลิเมตร รัศมีภายใน 70 มิลลิเมตร รัศมีโพลีโพรไพลีนภายนอก 30 มิลลิเมตร รัศมีภายใน 20 มิลลิเมตร และใช้ทั้ง 2 ขนาด ดังรูปที่ 3.30

การวางตำแหน่งของโพลีโพรไพลีนในลักษณะนี้ เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นเมื่อมีโพลีโพรไพลีนชนิดบริเวณตัวนำด้านนอก ล้อมรอบตัวนำด้านใน และทั้ง 2 กรณี วัสดุที่ใช้เป็นตัวนำ คือ ทองแดง ด้วยคุณสมบัติจาก CST STUDIO SUITE 2019 พารามิเตอร์สำหรับโพลีโพรไพลีน คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ($\epsilon' = 2.1000$) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\epsilon'' = 0.0001$) (Jiao et al., 2014) และพารามิเตอร์ของข้าวสาร คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ($\epsilon' = 8.7628$) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\epsilon'' = 0.5026$) ที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต ป้อนพลังงานด้วยท่อนำคลื่นความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต ทุกรูปแบบกำหนดพลังงานที่ป้อนเท่ากัน (200 วัตต์) และแบ่งผลการพิจารณาระยะรัศมีจากตัวนำด้านในสู่ตัวนำด้านนอกทุกๆ 10 มิลลิเมตร ดังแสดงภาพตัดขวางแบบ 2 มิติ ตามแนวระนาบ XY เป็นมุมมองด้านบน และตามแนวระนาบ XZ เป็นมุมมองด้านข้าง ทั้งผลการจำลองสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับ ในรูปที่ 3.31 – 3.34 จะเห็นว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าภายในโพลีโพรไพลีน

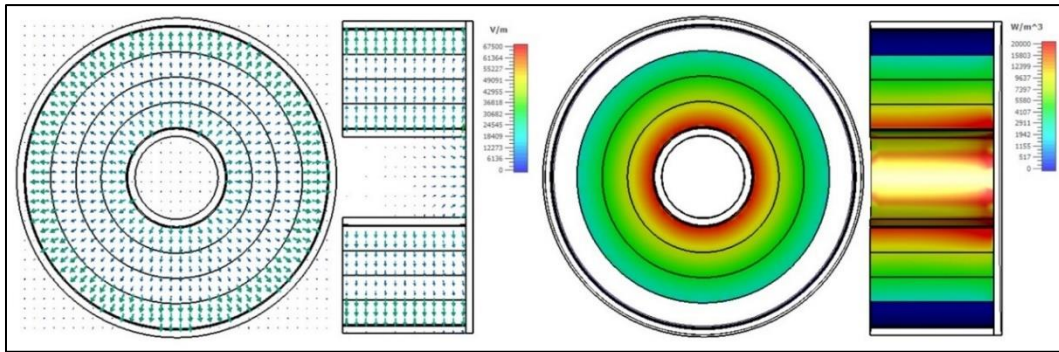
มากกว่าเกิดขึ้นภายในข้าวสาร เนื่องจากคุณสมบัติไดอิเล็กตริก แต่การดูดซับพลังงานจะเกิดขึ้นเฉพาะในข้าวสารเท่านั้น การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากที่สุดจากผลการจำลองนี้ เกิดขึ้นเมื่อโพลีโพรไพลีนล้อมรอบตัวนำด้านในและขีดบริเวณตัวนำด้านนอกดังแสดงในรูปที่ 3.34 รองลงมาคือการวางโพลีโพรไพลีนล้อมรอบตัวนำด้านในตามรูปที่ 3.33 ซึ่งดัชนีชี้วัดความสม่ำเสมอแตกต่างกันไม่มากนักดังแสดงในตารางที่ 3.3



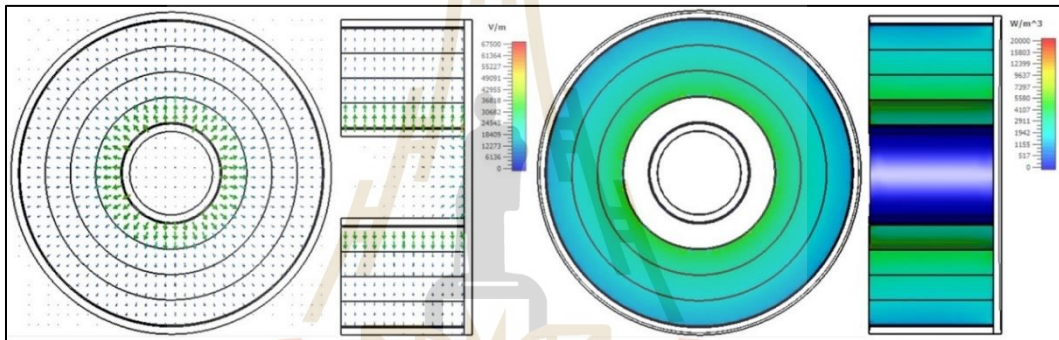
รูปที่ 3.30 ตำแหน่งการวางโพลีโพรไพลีนในอิเล็กโทรดทรงกระบอก (ก) เมื่อไม่มีภายในอิเล็กโทรด (ข) เมื่ออยู่บริเวณขีดตัวนำด้านนอก (ค) เมื่อล้อมรอบตัวนำด้านใน (ง) เมื่ออยู่ที่ทั้ง 2 บริเวณ



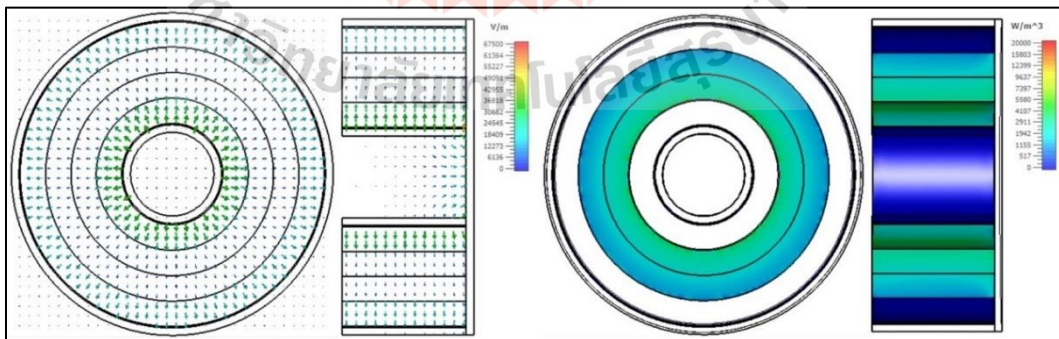
รูปที่ 3.31 ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อไม่มีโพลีโพรไพลีน



รูปที่ 3.32 ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อมีโพลีโพรไพลีน ชิดตัวนำด้านนอก



รูปที่ 3.33 ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อมีโพลีโพรไพลีน ล้อมรอบตัวนำด้านใน



รูปที่ 3.34 ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อมีโพลีโพรไพลีน ชิดตัวนำด้านนอกและล้อมรอบตัวนำด้านใน

ตารางที่ 3.3 ค่าการจำลองความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อมีโพลีโพรไพลีนที่ตำแหน่งต่างๆ

ตำแหน่งโพลีโพรไพลีน	ค่าเฉลี่ยที่ตัวอย่างด้าน ใน 10 มม. (W/m ³)	ค่าเฉลี่ยที่ตัวอย่างด้าน นอก 10 มม. (W/m ³)	ดัชนีชี้วัดความ สม่ำเสมอ
-	21,308.27	4,153.79	1.164
ขีดตัวนำด้านนอก	12,713.47	3,372.81	0.602
ล้อมรอบตัวนำด้านใน	3,407.46	1,435.50	0.392
ทั้ง 2 บริเวณ	2,497.93	1,421.72	0.336

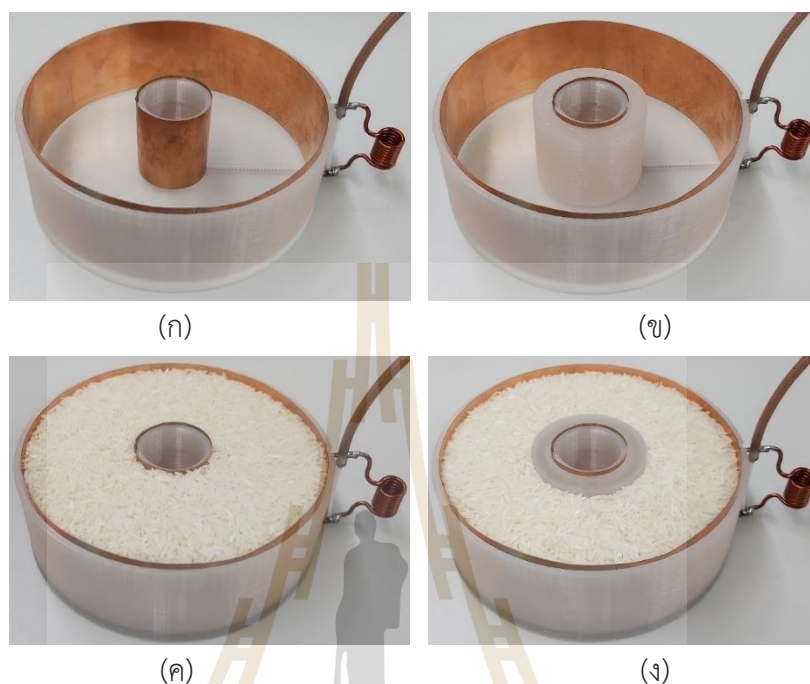
3.3 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดทรงกระบอกขนานสำหรับการปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในวัสดุไดอิเล็กตริก

จากการจำลองผลของความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานที่เกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะลดลงตามระยะห่างออกไปจากตัวนำด้านใน นอกจากนี้การใช้โพลีโพรไพลีนล้อมรอบตัวนำด้านในและอยู่ที่บริเวณตัวนำทั้งคู่ดังรูปที่ 3.33 และ 3.34 ส่งผลให้การกระจายตัวของความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงานที่เกิดขึ้นภายในข่าวสารสม่ำเสมอ แต่จะเห็นว่าวิธีการใช้โพลีโพรไพลีนไว้ที่ตำแหน่งตัวนำทั้งคู่จะทำให้พื้นที่บรรจุข่าวสารลดลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงตรวจสอบผล วิธีการปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นภายในข่าวสารด้วยอิเล็กทรอนิกส์โทรดทรงกระบอกขนานและเพิ่มโพลีโพรไพลีนล้อมรอบตัวนำด้านใน

3.3.1 องค์ประกอบอิเล็กทรอนิกส์โทรดทรงกระบอกขนานสำหรับการปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในวัสดุไดอิเล็กตริก

ประกอบไปด้วยโพลีโพรไพลีนเป็นโครงสร้างทรงกระบอกปลายเปิดด้านเดียว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร สูง 50 มิลลิเมตร ถูกสร้างขึ้นจากเครื่องปรีน 3 มิติ ด้วยการปรีนแบบเต็มเต็ม เพื่อให้เนื้อวัสดุเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ตัวนำทำมาจากทองแดงหนา 0.5 มิลลิเมตร ใช้สำหรับเป็นตัวนำด้านนอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร และตัวนำด้านในรัศมี 20 มิลลิเมตร โดยตัวนำทั้งคู่สูง 50 มิลลิเมตร ในส่วนของโพลีโพรไพลีนสำหรับล้อมรอบตัวนำด้านในเป็นรูปทรงกระบอกกลวง มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 40 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 60 มิลลิเมตร และสูง 50 มิลลิเมตร ซึ่งจะชิดกับตัวนำภายในพอดี เพื่อไม่ให้มีช่องว่างของอากาศ ถูกสร้างขึ้นจากเครื่องปรีน 3 มิติเช่นเดียวกัน กำหนดให้ตัวนำด้านในเป็นจุดบ่อนพลังงานและตัวนำด้านนอกเป็นกราวด์ทางไฟฟ้า โดยจะใช้สาย RG142 coaxial cable เป็นสายนำสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุหัวต่อ N-type โดยตัวนำด้านในของ RG142 เชื่อมต่อกับตัวนำด้านในของอิเล็กทรอนิกส์โทรด โดยการเจาะ

ทะลุผ่านโครงสร้างบริเวณด้านล่างตรงกลาง ส่วนตัวนำด้านนอกของ RG142 เชื่อมต่อกับตัวนำด้านนอกของอิเล็กทรอนิกส์ จะถูกเชื่อมต่อที่บริเวณด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 อิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอก (ก) เมื่อไม่มีโพลีโพรพิลีน (ข) เมื่อมีโพลีโพรพิลีน (ค) เมื่อไม่มีโพลีโพรพิลีนและมีข้าวสาร (ง) เมื่อมีโพลีโพรพิลีนและมีข้าวสาร

3.3.2 การเข้าคู่โครงข่ายระหว่างอิมพีแดนซ์ 50 โอห์มและอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอก สำหรับให้ความร้อนแก่วิสตุไคอิเล็กทรอนิกส์

พลังงานจะถูกป้อนให้กับอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกด้วยเครื่องให้พลังงานคลื่นความถี่วิทยุที่ได้สร้างขึ้น สำหรับโหลด 50 โอห์ม เมื่ออิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกถูกบรรจุข้าวสารระหว่างอิเล็กทรอนิกส์โดยมีโพลีโพรพิลีนล้อมรอบตัวนำด้านในของอิเล็กทรอนิกส์ จะมีค่าอิมพีแดนซ์เฉพาะของตัวเอง แตกต่างออกไปจาก 50 โอห์ม ที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต ส่งผลให้กำลังงานคลื่นความถี่วิทยุที่ถูกจ่ายออกมามีประสิทธิภาพที่ไม่ดีนัก จำเป็นต้องมีวงจรการเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์ระหว่างแหล่งจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุสำหรับโหลด 50 โอห์ม และอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกสำหรับให้ความร้อนแก่วิสตุไคอิเล็กทรอนิกส์ วิธีการออกแบบจะใช้วิธีการออกแบบ LC resonance อนุกรม ซึ่งอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกเมื่อมีวิสตุไคอิเล็กทรอนิกส์บรรจุไว้ระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ จะมีคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุทางไฟฟ้าตามทฤษฎีที่ได้กล่าวมา ในการออกแบบนั้นจึงต้องหาค่าตัวเหนี่ยวนำมาต่ออนุกรม ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ขดลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร พันรอบแกนเฟอร์ไรท์ T200-2B มีขนาด

เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 31.8 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50.8 มิลลิเมตร และความยาว 14 มิลลิเมตร ในการตรวจสอบความสามารถในการเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ได้ใช้ FieldFox Microwave Analyzer N9916A 14 GHz ในการตรวจวัดการสะท้อนกลับของพลังงาน (S11) ที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิรตซ์

3.4 สรุปและอภิปรายผล

แหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุถูกออกแบบ บนพื้นฐานวงจรรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ ในการออกแบบนี้เลือกใช้การออกแบบในกลุ่มของการขยายสัญญาณต่อเนื่อง ประกอบด้วยวงจรรขยายสัญญาณคลาสเอและวงจรรขยายสัญญาณคลาสบีพุก-พุลขนาน 2 ชุด ทั้ง 2 วงจรมีการออกแบบการเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์ทั้งอินพุตและเอาต์พุตสำหรับโหลด 50 โอห์ม เพื่อให้ได้กำลังงานสูงได้ ออกแบบวงจรรวมกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุของวิลกินสัน ในส่วนของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิเตอร์ประกอบขนาน สำหรับปล่อยสนามไฟฟ้าในการปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อน การประเมินด้วยผลจำลองทางคณิตศาสตร์ของความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นการดูดซับพลังงาน จะทำการศึกษาความสม่ำเสมอของความหนาแน่นการดูดซับพลังงานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของรัศมีตัวนำด้านใน รัศมีตัวนำด้านนอก และเมื่อเพิ่มวัสดุโพสิทีฟไฟสติก จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิเตอร์ประกอบขนานและมีโพสิทีฟไฟสติกล้อมรอบตัวนำด้านในสามารถปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนได้ดี รูปแบบโครงสร้างนี้จะถูกนำไปสร้างและตรวจสอบผลของความร้อนในบทรัดไป

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดสอบ

จากที่ได้กล่าวถึงทฤษฎีและการออกแบบในบทที่ผ่านมา สำหรับการปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนแก๊วสตูไดโอดีเล็กตริกโดยอีเล็กโทรดทรงกระบอกขนานด้วยคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 เมกกะเฮิร์ต การจำลองผลระยะห่างระหว่างอีเล็กโทรดส่งผลต่อการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของความเข้มสนามไฟฟ้า อย่างไรก็ตามที่บริเวณใกล้เคียงหรือล้อมรอบตัวนำด้านในจะมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงและลดลงตามระยะห่างออกไปจากตัวนำด้านในของอีเล็กโทรด จากผลการศึกษาการปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนในผลผลิตทางการเกษตรด้วยการเพิ่มวัสดุไดโอดีเล็กตริกที่มีคุณสมบัติค่าคงที่ไดโอดีเล็กตริกใกล้เคียงหรือมากกว่าผลผลิตทางการเกษตร แต่มีค่าการสูญเสียไดโอดีเล็กตริกต่ำ ในบริเวณที่อุณหภูมิของผลผลิตทางการเกษตรต่ำ นำมาสู่การปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นภายในข้าวสารด้วยอีเล็กโทรดทรงกระบอกโดยมีโพลีโพรไพลีนอยู่บริเวณล้อมรอบตัวนำด้านใน ในบทนี้จึงได้เสนอผลของการออกแบบวงจรให้พลังงานคลื่นความถี่วิทยุ ประกอบด้วย ชุดวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ วงจรขยายสัญญาณภาคต้น วงจรขยายสัญญาณภาคหลัก และวงจรรวมหรือแบ่งกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งจะถูกใช้เป็นวงจรให้พลังงานแก๊วสตูไดโอดีเล็กตริกเพื่อให้เกิดความร้อน และผลของอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นหลังจากได้รับคลื่นความถี่วิทยุจะถูกรายงาน

4.1 ขั้นตอนการทดสอบ

การให้ความร้อนแก๊วสตูไดโอดีเล็กตริกด้วยคลื่นความถี่วิทยุ แหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุจะถูกออกแบบและสร้าง งานวิจัยนี้ออกแบบโดยใช้อุปกรณ์อีเล็กทรอนิกส์ชนิดสารกึ่งตัวนำ องค์ประกอบของวงจรชุดนี้ประกอบไปด้วย วงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ วงจรขยายสัญญาณภาคต้น วงจรขยายสัญญาณภาคหลัก และวงจรรวมหรือแบ่งกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ จากนั้นจะถูกใช้เป็นพลังงานให้เกิดความร้อนแก๊วสตูไดโอดีเล็กตริก โดยมีอีเล็กโทรดทรงกระบอกเป็นตัวปล่อยคลื่น มีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

4.1.1 วงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ

วงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุในงานวิจัยนี้ต้องการคลื่นความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต ถูกควบคุมหรือป้อนคำสั่งการทำงานจากบอร์ด Arduino Nano ในการควบคุมบอร์ด AD9850 กำเนิดพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับคลื่นความถี่วิทยุตามที่ต้องการ ขั้นตอนการทดสอบของวงจรนี้หลังจากออกแบบและสร้าง ใช้แหล่งจ่ายพลังงานกระแสตรง 5 โวลต์ ผลลัพธ์ที่ต้องการวัดผล คือ ความถี่และกำลังงานที่เกิดขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ Spectrum Analyzer (Signal Hound, USB-SA124B) สามารถวัดความถี่ได้ในช่วง 100 กิโลเฮิร์ต ถึง 12.4 จิกกะเฮิร์ต เพื่อป้องกันกำลังงานที่ออกมาจากวงจรถูกคลื่นความถี่วิทยุเข้าเครื่องมือวัดนี้ ผู้วิจัยได้ใช้ตัวลดทอนสัญญาณ 40 dB ผลการทดสอบแสดงบนซอฟต์แวร์ Spike Spectrum Analyzer Software บนอุปกรณ์ Laptop ด้วยระบบปฏิบัติการ Windows 10 โดยใช้ย่านความถี่ในการวัดผลในช่วง 1 ถึง 100 เมกกะเฮิร์ต ช่องความถี่ในการวัดทุกๆ 30 กิโลเฮิร์ต กำลังงานสูงสุดในการวัดอยู่ที่ 0 dBm ดังแสดงในรูปที่ 4.1

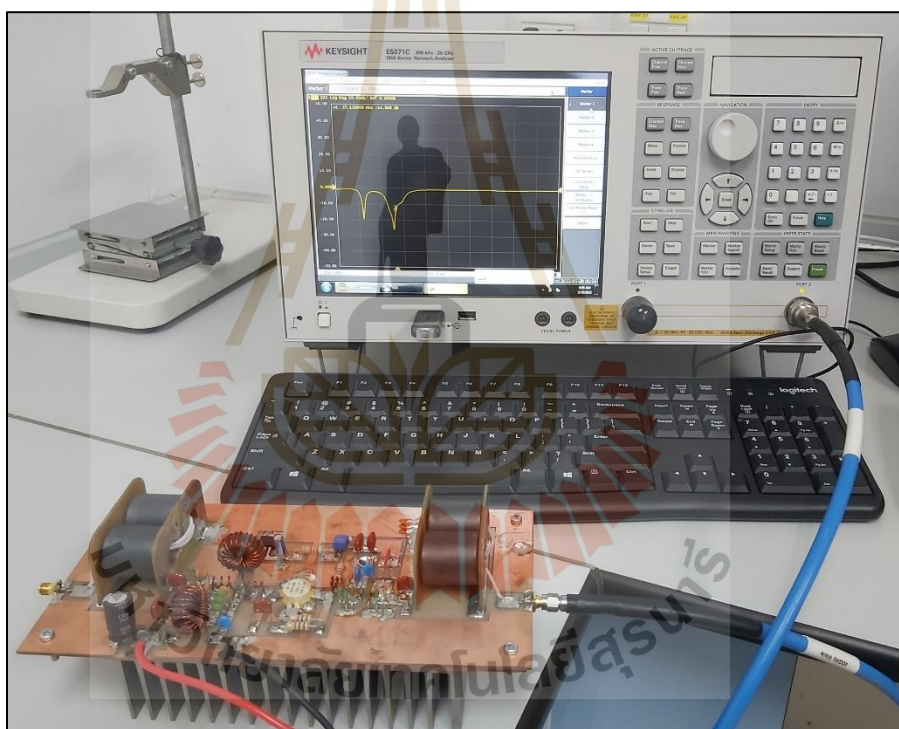


รูปที่ 4.1 การทดสอบวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ

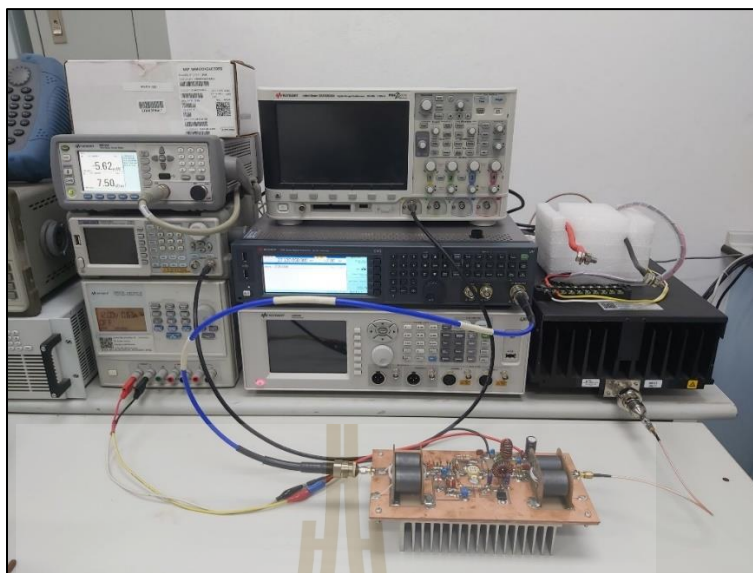
4.1.2 วงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ

วงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุจะทำหน้าที่ในการขยายกำลังงานต่อจากชุดวงจรถูกกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ เพื่อให้กำลังงานเพียงพอสำหรับเป็นกำลังงานอินพุตของวงจรถ่ายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ จากการออกแบบและสร้างวงจรนี้ การวัดการสะท้อนกลับของสัญญาณ (S11) ทั้ง

อินพุตและเอาต์พุต ถูกวัดด้วย Network Analyzer (Keysight, E5071C ENA series 300 kHz – 20 GHz) ในช่วงความถี่ 1 ถึง 100 เมกกะเฮิร์ต โดยจะพิจารณาที่ความถี่ใช้งานคือ 27.12 เมกกะเฮิร์ต ให้มีค่าต่ำกว่า -10 dB ด้วยการปรับแต่งพารามิเตอร์การเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์ทั้งอินพุตและเอาต์พุต จากการใช้ตัวเก็บประจุทางไฟฟ้าต่อขนานกับหม้อแปลงอิมพีแดนซ์ฝั่งเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 หลังจากนั้นวงจรนี้จะถูกนำไปทดสอบป้อนพลังงาน โดยมีแหล่งจ่ายพลังงาน กระแสตรง 24 โวลต์ อินพุตจะถูกป้อนให้กับวงจรชุดนี้ด้วย เครื่องป้อนสัญญาณ EXG Analog Signal Generator N5171B คลื่นความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต ที่ระดับพลังงาน -8 ถึง 18 dBm โดยปรับค่าที่ละ 1 dBm เอาต์พุตจะถูกต่อเข้ากับตัวลดทอนสัญญาณ 20 dB และเครื่องอ่านค่ากำลังงาน Terminator Power Meter (Keysight, N432A) ที่เกิดขึ้นกับโหลด 50 โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 การวัดค่าการสะท้อนกลับสัญญาณของวงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ



รูปที่ 4.3 การวัดการทำงานของวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ

4.1.3 วงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ

วงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุถูกออกแบบบนพื้นฐานวงจรขยายสัญญาณคลาสบีแบบพุช-พูล ขนาด ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ 2 ชุด เพื่อให้ได้กำลังงานที่มากขึ้น หลังจากที่ได้ออกแบบและสร้าง การวัดค่าการสะท้อนของสัญญาณ (S11) ทั้งอินพุตและเอาต์พุตถูกวัดด้วย FieldFox Microwave Analyzer N9916A 14 GHz ในช่วงความถี่ 1 ถึง 100 เมกกะเฮิร์ต โดยจะพิจารณาที่ความถี่ใช้งานคือ 27.12 เมกกะเฮิร์ต ของวงจรแต่ละชุด ด้วยการปรับแต่งพารามิเตอร์การเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์โดยตัวเก็บประจุขนานกับหม้อแปลงอิมพีแดนซ์ฝั่งเข้าคู่โครงข่าย หลังจากนั้นวงจรแต่ละชุดจะถูกนำไปทดสอบความสามารถการทำงาน ประกอบไปด้วย อัตราขยาย ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า และกำลังงานเอาต์พุต โดยการป้อนกำลังงานคลื่นความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ตให้กับวงจร เนื่องจากวงจรขยายสัญญาณภาคหลักเป็นชุดวงจรกำลังงานสูง อินพุตที่ต้องการจึงมากกว่าวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทดสอบวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุแต่ละชุดโดยการป้อนกำลังงานคลื่นความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต จากเครื่องป้อนสัญญาณ EXG Analog Signal Generator N5171B ปรับกำลังงาน 0 ถึง 10 dBm โดยปรับที่ละ 1 dBm ผ่านวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุเพื่อขยายสัญญาณให้มากที่สุดเพื่อการทดสอบ PowerAnalyst Model 4391A จะถูกต่อไว้ระหว่างวงจรขยายสัญญาณภาคต้นและภาคหลักเพื่อวัดกำลังงานอินพุตของวงจรขยายสัญญาณภาคหลัก ในขณะที่เดียวกัน PowerAnalyst Model 4391A อีกตัวจะถูกต่อที่เอาต์ของวงจรขยายสัญญาณภาคหลักเพื่อวัดกำลังงานที่ส่งผ่านไปยังโหลด 50 โอห์ม โดยมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 50 โวลต์ เป็นไฟเลี้ยงให้กับวงจรดังแสดงในรูปที่ 4.4

4.1.4 วงจรรวมกำลังงานหรือแบ่งกำลังงานย่านความถี่วิทยุ

วงจรแบ่งกำลังงานทำหน้าที่ในการแบ่งกำลังงานจากวงจรขยายสัญญาณภาคต้น เพื่อแบ่งกำลังงานออกเป็น 2 ทาง สำหรับเป็นกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุอินพุตให้กับวงจรขยายสัญญาณภาคหลัก 2 ชุด การวัดการสะท้อนของสัญญาณจะถูกวัดทั้งหมด 3 พอร์ต ด้วย FieldFox Microwave Analyzer N9916A 14 GHz โดยจะทำการวัดที่ละพอร์ต ในขณะที่พอร์ตอื่นๆ ถูกต่อเข้ากับโหลด 50 โอห์ม กำหนดพอร์ต 1 ตามรูปที่ 3.18 เป็นอินพุตสัญญาณ พอร์ต 2 และ 3 คือเอาต์พุตสัญญาณ การวัดการสะท้อนของสัญญาณแต่ละพอร์ตกำหนดเป็น S11, S22 และ S33 นอกจากนี้ค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 (S21) และพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 3 (S3) จะถูกวัดที่ละคู่ เนื่องจากพอร์ตสัญญาณการวัดมี 2 ช่องสัญญาณ ในขณะที่ทำการวัดค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณทางใดทางหนึ่ง พอร์ตที่เหลือจะถูกต่อเข้ากับโหลด 50 โอห์ม ในส่วนของวงจรรวมกำลังงานจะทำหน้าที่ในการรวมกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุจากเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณภาคหลัก 2 ชุด กำหนดดังรูปที่ 3.19 พอร์ต 2 และ 3 ถูกใช้เป็นอินพุตสัญญาณ พอร์ต 1 ถูกใช้เป็นเอาต์พุตสัญญาณ ในการวัดการสะท้อนกลับของสัญญาณจะทำการวัดเช่นเดียวกันกับวงจรแบ่งกำลังงาน ส่วนค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณของวงจรรวมกำลังงานจากพอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 1 กำหนดคือ S12 และค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณจากพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 1 กำหนดคือ S13 โดยที่พอร์ตไม่ได้ทำการวัด จะถูกต่อไว้กับโหลด 50 โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 4.4



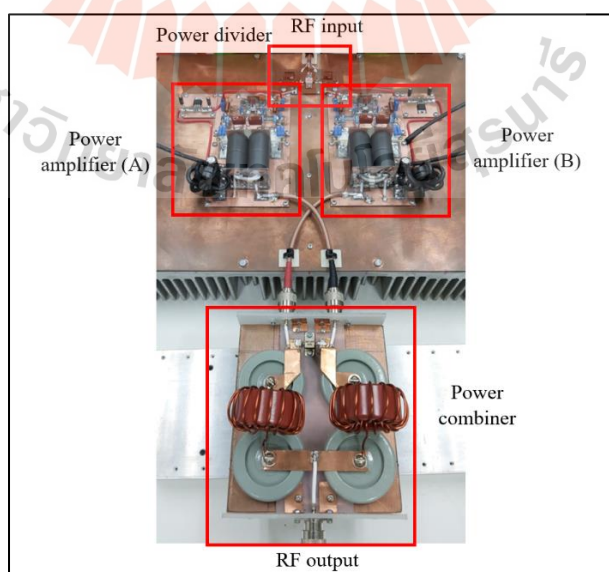
(ก)

(ข)

รูปที่ 4.4 การวัดค่าการสะท้อนกลับสัญญาณของวงจร (ก) แบ่งกำลังงาน (ข) รวมกำลังงาน คลื่นความถี่วิทยุ

4.1.5 วงจรจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ

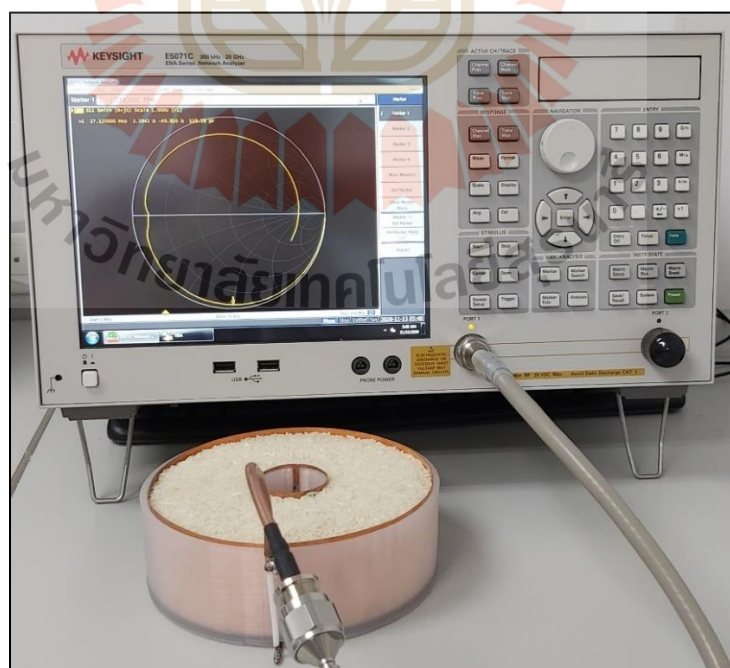
หลังจากองค์ประกอบในแต่ละส่วนของชุดวงจรจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุผ่านการวัดคุณสมบัติต่างๆ แล้ว การทดสอบวัดผลเต็มระบบถูกทดสอบโดย เครื่องป้อนสัญญาณ EXG Analog Signal Generator N5171B ที่ความถี่วิทยุ 27.12 เมกกะเฮิร์ต โดยปรับกำลังงาน 0 dBm ถึง 10 dBm เป็นอินพุตให้กับวงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ จากนั้นที่เอาต์พุตของวงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุจะถูกแบ่งกำลังงานออกเป็น 2 ทางด้วยวงจรแบ่งกำลังงาน เพื่อเป็นอินพุตให้กับวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ 2 ชุด ที่เอาต์พุตของวงจร 2 ชุดนี้จะถูกรวมกำลังงานด้วยวงจรรวมกำลังงาน ที่เอาต์พุตของวงจรรวมกำลังงานจะถูกต่อเข้ากับ PowerAnalyst Model 4391A ในการวัดกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุซึ่งถูกถ่ายโอนไปยังโหลด 50 โอห์ม ซึ่งโหลดสามารถทนกำลังงานได้ถึง 15 กิโลวัตต์ และมีการระบายความร้อนด้วยอากาศ การทดสอบเต็มระบบนี้แสดงดังรูปที่ 4.5 วงจรรวมกำลังงานเป็นวงจรที่มีกำลังงานสูงผ่าน ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับตัวต้านทาน 100 โอห์ม ที่อยู่ในวงจรรวมกำลังงานไม่ควรมีค่ามาก จะทำให้เกิดพลังงานสูญเสียที่ตัวต้านทานนี้ และนำไปสู่ความเสียหายของอุปกรณ์ได้ เนื่องจากทนกำลังงานที่เกิดขึ้นไม่ไหว ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเกิดขึ้นเมื่อกำลังงานไฟฟ้าทั้ง 2 พอร์ตมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากวงจรขยายสัญญาณภาคหลัก 2 ชุด ให้กำลังงานเอาต์พุตไม่เท่ากัน จึงจำเป็นต้องปรับอัตราขยายสัญญาณของวงจรขยายสัญญาณภาคหลักที่แตกต่างกันโดยการปรับแรงดันเกต เพื่อให้ได้กำลังงานเอาต์พุตที่เท่ากันและจะส่งผลให้ความต่างศักย์ที่ตัวต้านทานมีค่าลดลง หลังจากนั้นชุดวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุจะถูกนำมาต่อแทน เครื่องป้อนสัญญาณ EXG Analog Signal Generator N5171B



รูปที่ 4.5 ชุดวงจรจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ

4.1.6 การเข้าสู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์ระหว่างแหล่งจ่ายพลังงานและอิเล็กทรอนิกส์

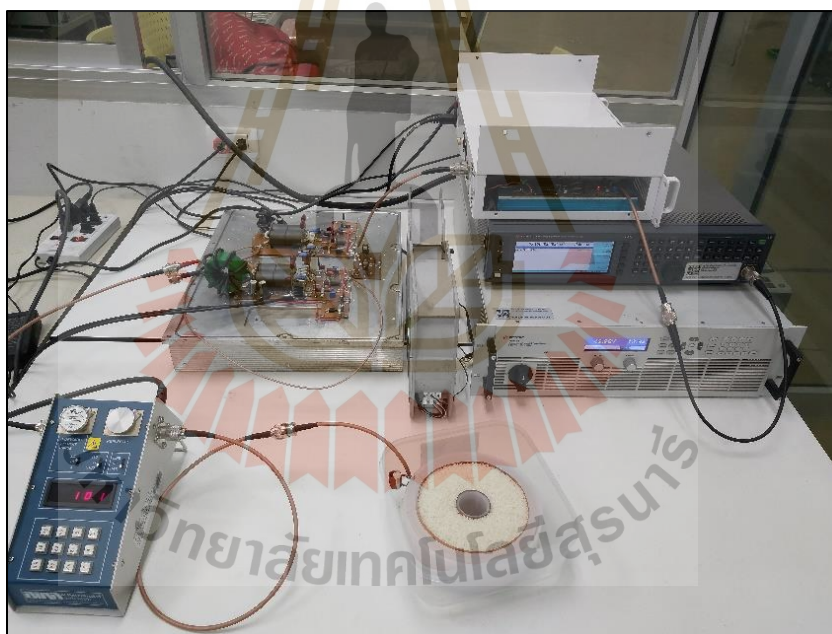
การปรับปรุงการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นกับวัสดุไดอิเล็กตริกโดยคลื่นความถี่วิทยุ ในงานวิจัยได้สนใจศึกษาวิธีการปรับปรุงรูปแบบของอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอก และใช้โพสิโพรไพลีนเข้าช่วย จึงได้ทดสอบและศึกษาการให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นความถี่วิทยุโดยอิเล็กทรอนิกส์เป็นรูปทรงกระบอก ทั้งมีและไม่มีโพสิโพรไพลีนล้อมรอบตัวนำด้านใน องค์ประกอบทั้ง 2 รูปแบบนี้มีความแตกต่างกัน ดังนั้นอิมพีแดนซ์ของแต่ละแบบจะมีความแตกต่างกัน เพื่อให้นำมาสู่การถ่ายโอนกำลังงานสูงสุด วิธีการเข้าสู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์ระหว่างแหล่งจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุสำหรับโหลด 50 โอห์ม และอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกที่มีวัสดุไดอิเล็กตริก ในรูปแบบแรกอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกจะถูกบรรจุข่าวสารใหม่จนเต็มอิเล็กทรอนิกส์ ในรูปแบบที่ 2 โพสิโพรไพลีนล้อมรอบตัวนำด้านในด้วยความหนา 10 มิลลิเมตร จากนั้นข่าวสารใหม่จะถูกบรรจุจนเต็มช่องว่างอิเล็กทรอนิกส์ ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าถูกต่ออนุกรมกับอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกจากฝั่งแหล่งจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุทั้ง 2 รูปแบบ ความสามารถในการเข้าสู่โครงข่ายทั้ง 2 รูปแบบขึ้นอยู่กับค่าตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า จากนั้นจะวัดการสะท้อนสัญญาณ (S11) ด้วย FieldFox Microwave Analyzer N9916A 14 GHz ช่วงการวัด 1 ถึง 100 เมกกะเฮิร์ต พิจารณาที่ความถี่ใช้งาน 27.12 เมกกะเฮิร์ต ดังแสดงในรูปที่ 4.6 นอกจากนี้การวัดการสะท้อนกลับของสัญญาณเมื่อไม่มีโหลดหรือไม่มีข่าวสารจะถูกวัดเพื่อเป็นข้อมูลศึกษาเพิ่มเติม



รูปที่ 4.6 การวัดค่าการสะท้อนกลับสัญญาณของตัวปล่อยคลื่น

4.1.7 การให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริก

นอกจากรูปทรงของอิเล็กทรอนิกส์ ระยะเวลาห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ และการเพิ่มวัสดุโพลีโพรไพลีนแล้ว ในการปรับปรุงความสม่ำเสมอแล้ว อุณหภูมิและอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของข้าวและการรอดชีวิตของแมลงศัตรูพืช จากการศึกษาการกำจัดแมลงศัตรูพืชในข้าวสารโดยการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุและไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของข้าวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมในการกำจัดแมลงศัตรูพืชตัวเต็มวัย คือ 50 ถึง 54 องศาเซลเซียส อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิความร้อนของข้าวสารหลังจากให้กำลังงานคลื่นความถี่วิทยุน้อยกว่า 5.8 องศาเซลเซียสต่อนาที จะไม่ส่งผลเสียหายต่อคุณภาพข้าวอย่างมีนัยสำคัญ (Jiao et al., 2017; Liu et al., 2021; Zhou & Wang, 2016) ทั้งอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นและอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นภายในข้าวสารหลังจากได้รับพลังงานคลื่นความถี่วิทยุขึ้นกับกำลังงานที่จ่าย



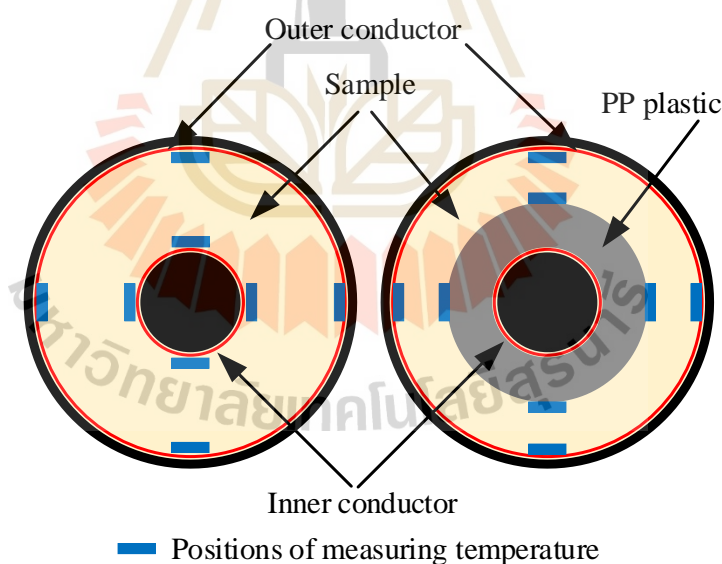
รูปที่ 4.7 การทดสอบให้ความร้อนแก่สารไดอิเล็กตริกโดยใช้สนามไฟฟ้าคลื่นความถี่วิทยุ

เครื่องป้อนสัญญาณ EXG Analog Signal Generator N5171B ที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต จะถูกป้อนกำลังงานให้กับชุดวงจรขยายสัญญาณภาคต้นเพื่อเป็นกำลังงานอินพุตให้กับวงจรขยายสัญญาณภาคหลัก 2 ชุด โดยมีวงจรแบ่งและรวมกำลังงาน เครื่องป้อนสัญญาณจะถูกปรับกำลังงานจ่ายเพื่อให้กำลังงานที่เกิดขึ้นกับโหลดมีกำลังงาน 100 200 และ 300 วัตต์ โดยใช้ PowerAnalyst Model 4391A เป็นเครื่องวัดกำลังงานที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.7 พลังงานคลื่น

ความถี่วิทยุนี้จะถูกป้อนให้กับอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิเตอร์ทั้งสอง 2 รูปแบบนี้ เป็นเวลา 6 นาที และจะทำการวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นทุกๆ 1 นาที ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน IR camera (U5857A True IR, Keysight Technology) ที่บริเวณพื้นผิวด้านบนของขั้วสาร มากไปกว่านี้ที่บริเวณล้อมรอบตัวนำด้านใน 4 จุด และบริเวณตัวนำด้านนอก 4 จุด ดังรูปที่ 4.8 จะถูกวัดค่าอุณหภูมิเพื่อให้เห็นความแตกต่างของอุณหภูมิที่ 2 บริเวณ ได้อย่างชัดเจน อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปก่อนได้รับพลังงานและได้รับพลังงานคลื่นความถี่วิทยุของขั้วสารเป็นเวลา 6 นาที จะถูกนำมาตรวจสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อน (Uniformity index, UI) ที่เกิดขึ้นจากสมการที่ 4.1

$$UI = \frac{\sqrt{\sigma^2 - \sigma_0^2}}{\mu - \mu_0} \quad (4.1)$$

เมื่อ σ และ σ_0 คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปและอุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส) ตามลำดับ ส่วน μ และ μ_0 คือ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปและอุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส) ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิหลังให้ความร้อนด้วยสนามไฟฟ้าคลื่นความถี่วิทยุ

การตรวจสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นนี้ ถูกนำมาใช้ในกระบวนการให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กทริกด้วยคลื่นความถี่วิทยุในผลผลิตทางการเกษตรมากมาย เช่น ในงานวิจัยการอบถั่วเหลือง (Huang, Zhang, et al., 2016) การอบแห้งผลไม้ (Alfaifi

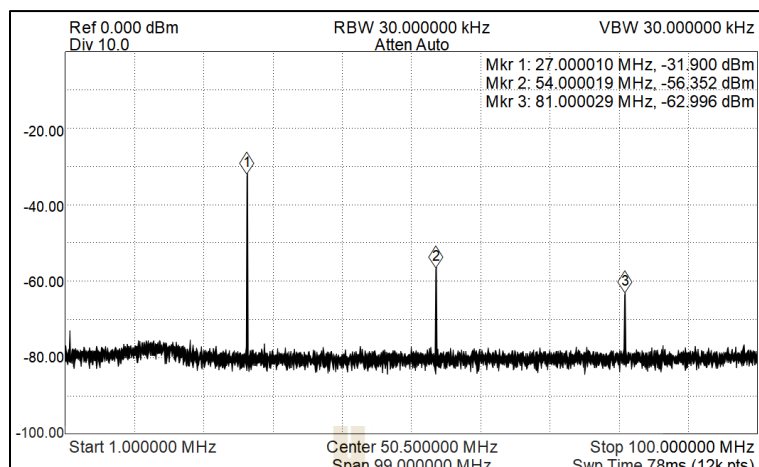
et al., 2016) การอบแห้งแกลัด (Hou et al., 2016) การอบแห้งจุ่มข้าวสาลี (Ling et al., 2018) และการอบแห้งถั่วเขียว (Lin & Wang, 2020) เป็นต้น

4.2 ผลการทดสอบ

การให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กทริกจะประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดพลังงานคลื่นความถี่วิทยุและอิเล็กทรอนิกส์สำหรับปล่อยคลื่นดังที่ได้กล่าวมา ในส่วนของแหล่งกำเนิดพลังงานคลื่นความถี่วิทยุจะประกอบไปด้วยหลายภาคส่วนของวงจรและการศึกษาการปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นกับข้าวสารด้วยอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกโดยมีและไม่มีโพสิโทรโพสไลน์ ล้อมรอบตัวนำด้านจะถูกนำเสนอผลการทดลองในหัวข้อนี้

4.2.1 วงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ

วงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุถูกเขียนโปรแกรมไว้สำหรับกำเนิดคลื่นความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต แบบต่อเนื่อง เมื่อจ่ายไฟ 5 โวลต์ ให้กับวงจร ที่เอาต์พุตของวงจรถูกต่อเข้ากับ Spectrum Analyzer (Signal Hound, USB-SA124B) และแสดงผลการวัดบนซอฟต์แวร์ Spike Spectrum Analyzer Software ดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยมีตัวลดทอนสัญญาณ 40 dB ผลแสดงถึงการวัดกำลังงานที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ 1 ถึง 100 เมกกะเฮิร์ต กำลังงานสูงสุดอันดับหนึ่งที่วัดได้ปรากฏที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต ถัดมา คือ 54.24 เมกกะเฮิร์ต และสุดท้าย 81.36 เมกกะเฮิร์ต ซึ่งเกิดจากความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency) หรือเรียกว่าฮาร์โมนิกส์ (Harmonics) ความถี่มูลฐานที่ปรากฏวัดกำลังงานได้ 8.100 dBm ฮาร์โมนิกส์อันดับสอง -16.352 dBm และฮาร์โมนิกส์อันดับสาม -22.996 dBm ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นว่าสัญญาณที่เกิดขึ้นจากวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุไม่ได้ให้เพียงแค่ความถี่มูลฐาน แต่ปรากฏความถี่ฮาร์โมนิกส์ออกมาด้วย นั้นหมายความว่ามีความผิดเพี้ยนของสัญญาณหรือความถี่มูลฐานมีองค์ประกอบของความถี่อื่นๆ รวมอยู่ด้วย หากพิจารณาถึงกำลังงานที่เกิดขึ้นในแต่ละความถี่ ซึ่งความถี่มูลฐานนั้นได้ให้กำลังงานที่ชัดเจน และที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับต่างๆ ให้กำลังงานที่ต่ำกว่าความถี่มูลฐานหลายเท่า ยิ่งฮาร์โมนิกส์อันดับสูงกำลังงานก็จะยิ่งน้อยลง ดังนั้นการออกแบบวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 เมกกะเฮิร์ต สามารถกำเนิดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับหรือคลื่นรูปไซน์ (Sine wave) ได้เป็นอย่างดี



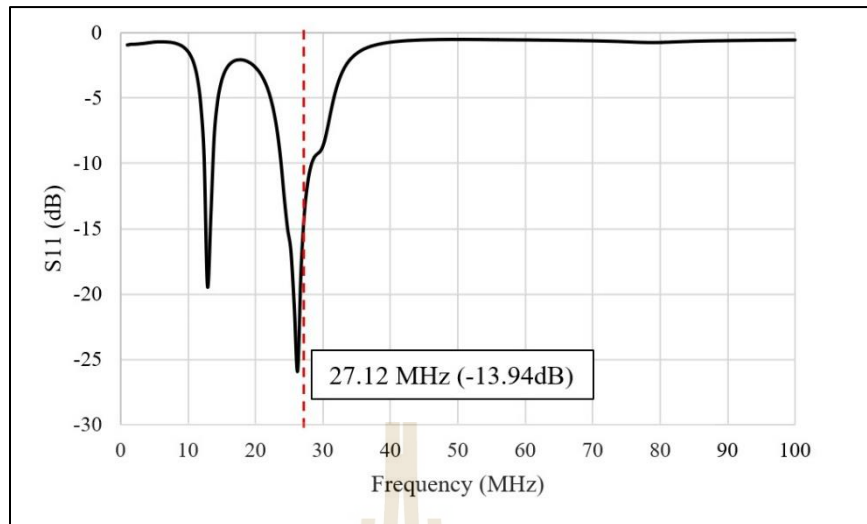
รูปที่ 4.9 การวัดแถบสเปกตรัมวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดกำลังงานจากวงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ

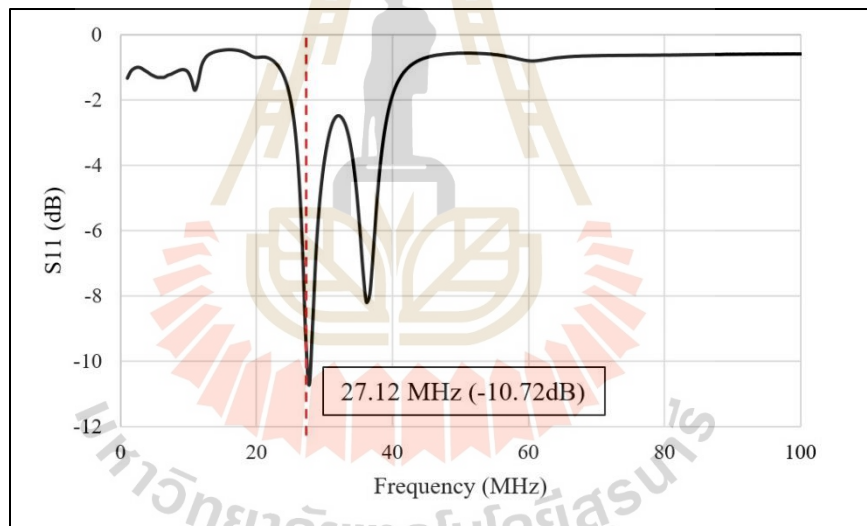
ความถี่ (MHz)	ผลการวัด (dBm)	ชดเชยตัวลดทอนสัญญาณ 40 dB (dBm)	กำลังงาน (mW)
27.12	-31.900	8.100	6.457
54.24	-56.352	-16.352	0.023
81.36	-62.996	-22.996	0.005

4.2.2 วงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ

หลังจากที่ออกแบบและสร้างวงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุสำหรับขยายสัญญาณที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต วงจรจะถูกวัดค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณ (S11) ทั้งอินพุตและเอาต์พุตเพื่อปรับปรุงการเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์ โดยการต่อตัวเก็บประจุขนานกับหม้อแปลงอิมพีแดนซ์ จากการปรับปรุงการเข้าคู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์ พบว่าต้องใช้ตัวเก็บประจุที่ฝั่งอินพุต 14.1 nF ส่วนเอาต์พุตไม่มีการต่อตัวเก็บประจุเพิ่ม ผลการวัดค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณทั้งอินพุตและเอาต์พุตแสดงในรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต ทางฝั่งอินพุตวัดได้ -13.94 dB และฝั่งเอาต์พุต -10.72 dB ซึ่งเป็นค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณที่ต่ำสามารถนำไปใช้งานได้



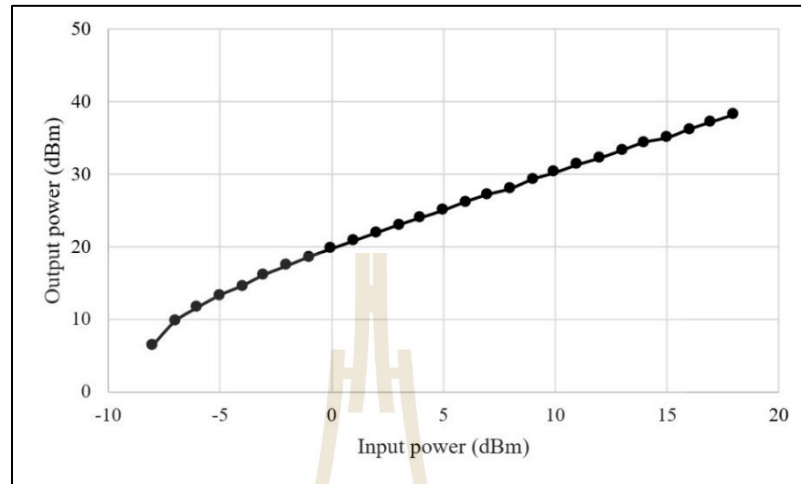
รูปที่ 4.10 ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณฝั่งอินพุตของวงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ



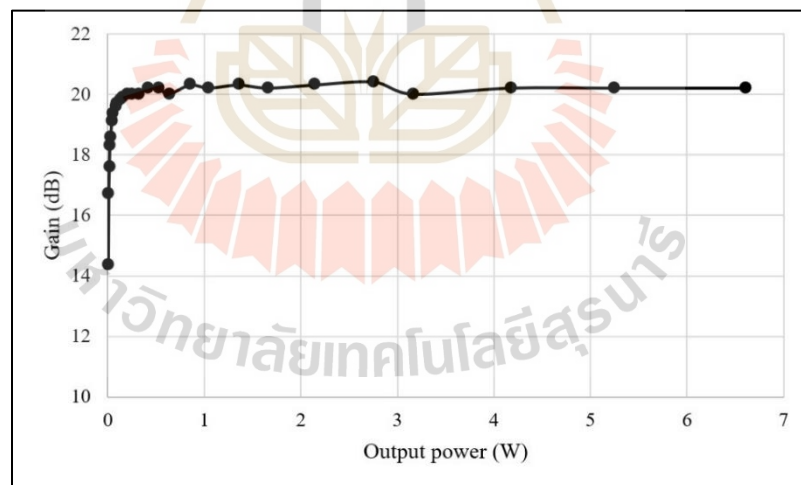
รูปที่ 4.11 ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณฝั่งเอาต์พุตของวงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ

หลังจากนั้นแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 24 โวลต์ ถูกจ่ายให้กับวงจร แรงดัน V_{DD} 24 โวลต์ แรงดัน V_{GS} 3.3 โวลต์ กำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 เมกกะเฮิร์ต ถูกป้อนเข้าที่อินพุตจาก EXG Analog Signal Generator N5171B ด้วยกำลังงานตั้งแต่ -8 ถึง 18 dBm ผลแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุต (dBm) ต่อกำลังงานเอาต์พุต (dBm) แสดงดังรูปที่ 4.12 จะเห็นว่ากำลังงานเอาต์พุตจะเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นต่ออินพุต กำลังงานเอาต์พุตจะมากกว่าอินพุต สิ่งนี้บ่งบอกถึงความสามารถในการขยายกำลังงาน จะเห็นได้ชัดจากรูปที่ 4.13 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลัง

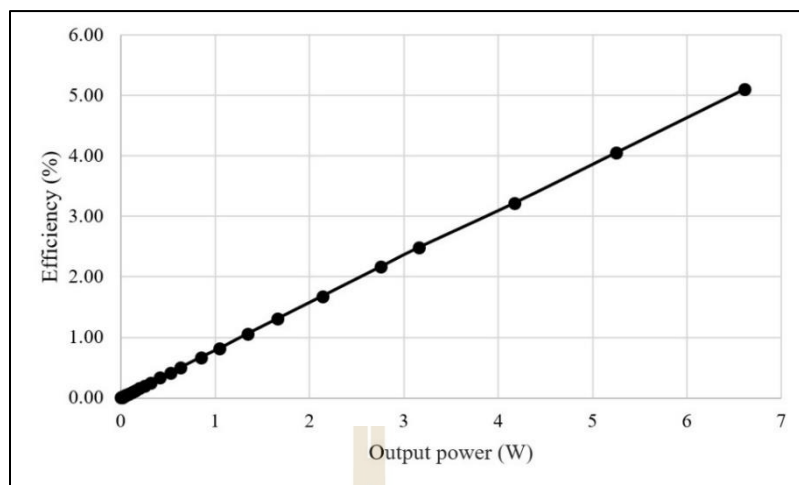
งานเอาต์พุต (W) และอัตราขยาย (dB) วงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุที่ได้ออกแบบนี้ สามารถให้ อัตราขยายคงที่ 20 dB เมื่อมีกำลังงานอินพุตมากกว่า 0 dBm ขึ้นไป



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุต (dBm) และเอาต์พุต (dBm) ของวงจรขับสัญญาณที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต



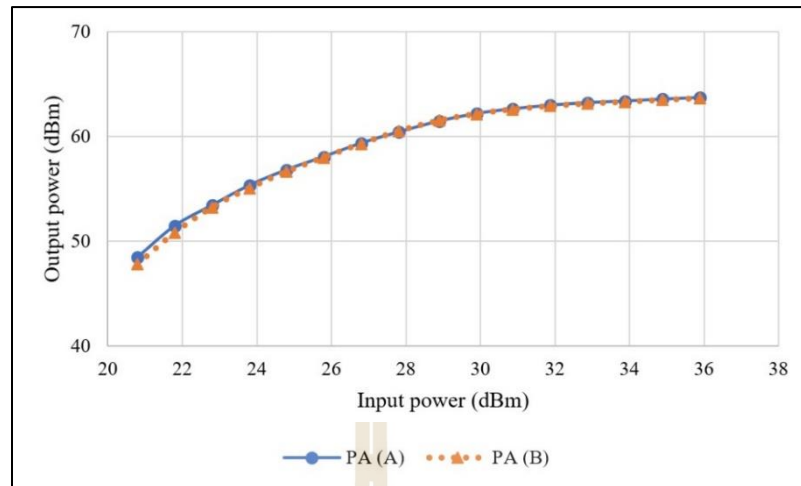
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานเอาต์พุต (W) และอัตราขยาย (dB) ของวงจรขับสัญญาณที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต



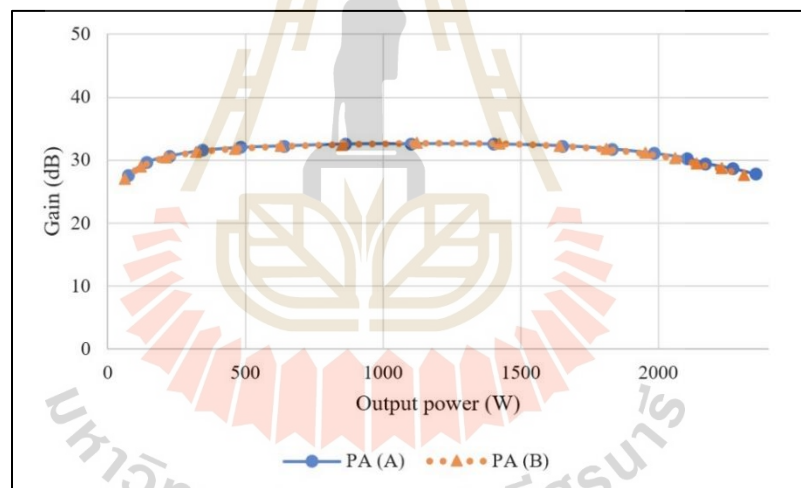
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานเอาต์พุตและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของวงจรขับสัญญาณที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิรตซ์

4.2.3 วงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ

วงจรขยายสัญญาณภาคหลักถูกออกแบบและสร้างขึ้นมา 2 ชุด ในแต่ละชุดจะถูกทดสอบหลังจากการปรับปรุงเข้าคู่มือวงจรช่วยอิมพีแดนซ์แล้ว แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 50 โวลต์ ถูกจ่ายให้กับวงจร 2 ชุดนี้ เพื่อให้ได้ V_{DD} 50 โวลต์ ทั้ง 2 ชุดวงจร ส่วน V_{GS} ของวงจรชุด A ปรับเป็น 1.7 โวลต์ วงจรชุด B 1.52 โวลต์ เพื่อให้กำลังงานที่เกิดขึ้นในวงจรรวมกำลังงานเกิดความแตกต่างกันน้อยที่สุดดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น กำลังงานคลื่นความถี่วิทยุถูกใช้เป็นอินพุตมาจากวงจรขยายกำลังงานภาคต้น หลังจากที่ได้วัดผลกำลังงานเอาต์พุตของวงจรขยายกำลังงานภาคมาแล้ว จะถูกใช้เป็นอินพุตสำหรับวงจรนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.15 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต (dBm) และเอาต์พุต (dBm) ของวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุภาคหลักทั้ง 2 ชุด จะเห็นว่ากำลังงานที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 ชุดนี้มีความแตกต่างกันเล็กน้อยไม่เป็นอันตรายต่อวงจรรวมกำลังงาน มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานเป็นเชิงเส้น นั้นหมายความว่าเมื่ออัตราคงที่ในช่วงหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตกับอัตราขยายกำลังงานของวงจรทั้ง 2 ชุด ซึ่งมีความใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุต (dBm) และเอาต์พุต (dBm) ของ วงจรขยายสัญญาณที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต

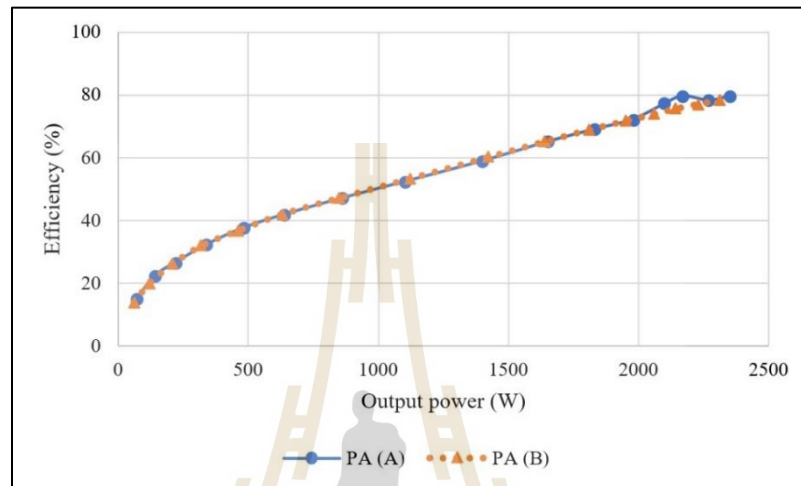


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานเอาต์พุต (W) และอัตราขยาย (dB) ของ วงจรขยายสัญญาณที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต

ในส่วนถัดมา ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า (η) ของวงจรทั้ง 2 ชุดนี้จะถูกพิจารณาตั้งแสดงในรูปที่ 4.17 ผลการทดสอบจะเห็นว่าที่ กำลังงานเอาต์พุตต่ำ ประสิทธิภาพของวงจรทั้ง 2 ชุดจะต่ำ และจะสูงขึ้นเมื่อวงจรให้กำลังงานเอาต์พุตที่สูงขึ้น ดังนั้นวงจรทั้ง 2 ชุดนี้เหมาะกับการนำไปใช้สำหรับกำลังงานสูง ในวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ ประสิทธิภาพบ่งบอกถึงความสามารถให้กำลังงานเอาต์พุตเทียบกับกำลังงานอินพุตที่เปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 4.2 หากประสิทธิภาพมีความใกล้เคียง 100 เปอร์เซ็นต์มาก สามารถบอกได้ว่า วงจรชุดนั้นสามารถทำงานได้

อย่างเต็มประสิทธิภาพ มีการสูญเสียของกำลังงานน้อยมาก โดยทั่วไปกำลังงานที่สูญเสียไปจะอยู่ในรูปของความร้อนที่เกิดขึ้นบนตัวอุปกรณ์

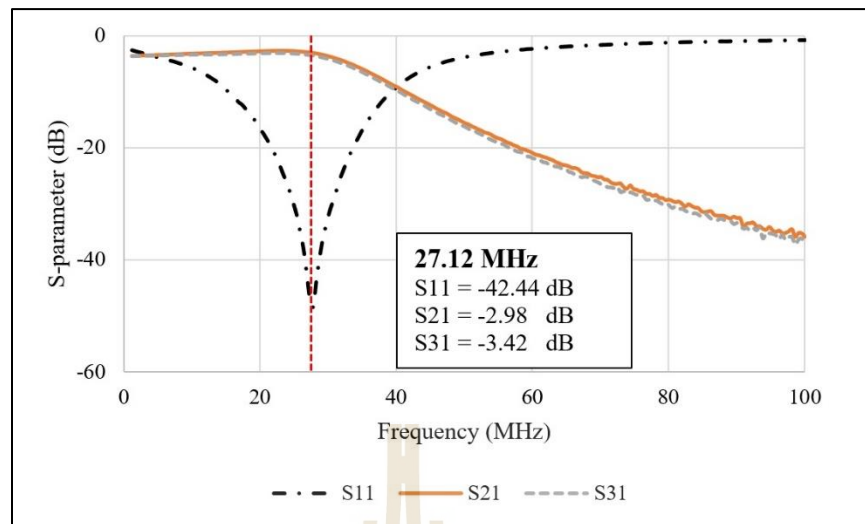
$$\eta (\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{out}}{V_{DC} \times I_{DC}} \times 100 \quad (4.2)$$



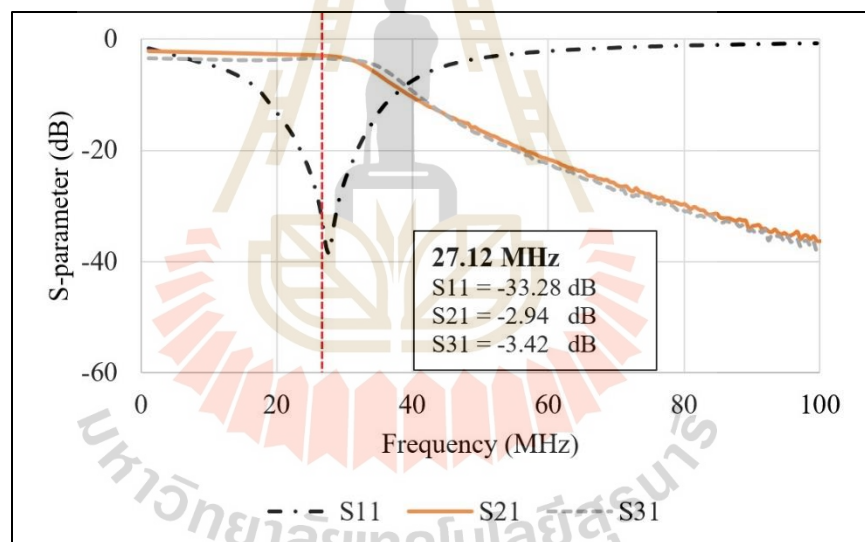
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานเอาต์พุตและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของ วงจรขยายสัญญาณที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต

4.2.4 วงจรรวมกำลังงานหรือแบ่งกำลังงานย่านความถี่วิทยุ

การทดสอบวัดผลของวงจรนี้จะเป็นการวัดเพื่อทดสอบความสามารถการเข้าคู่ โครงข่ายอิมพีแดนซ์สำหรับโหลด 50 โอห์ม โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญในการวัด คือ ค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณ (S11) และค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณ (S21, S31) ผลการทดสอบของวงจร แบ่งกำลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.18 ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณถูกวัดที่พอร์ต 1 ที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต ให้ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณ -42.44 dB และค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณทั้ง 2 ทาง มีค่า -2.98 และ -3.42 dB และผลการทดสอบของวงจรรวมกำลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.19 ให้ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณ -33.28 dB และค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณทั้ง 2 พอร์ต มีค่า -2.94 และ -3.42 dB เช่นเดียวกัน นั้นหมายความว่าทั้งวงจรรวมและแบ่งกำลังงานที่ได้ออกแบบไว้สามารถ ถ่ายโอนกำลังงานสูงสุดจากอินพุตไปยังเอาต์พุตที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต



รูปที่ 4.18 ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณและค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณของวงจรแบ่งกำลังงาน

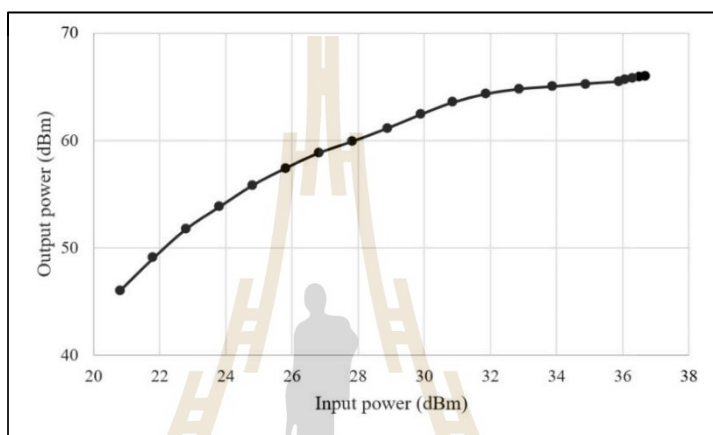


รูปที่ 4.19 ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณและค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณของวงจรรวมกำลังงาน

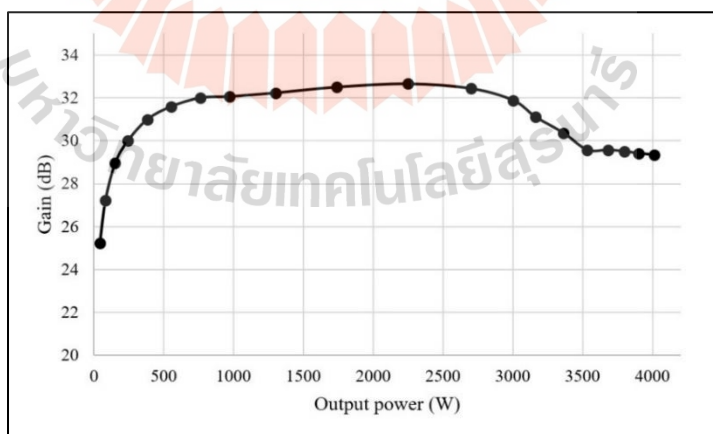
4.2.5 วงจรจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ

วงจรจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุประกอบไปด้วย วงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ วงจรขยายสัญญาณภาคต้น วงจรขยายสัญญาณภาคหลัก และวงจรรวมหรือแบ่งกำลังงาน หลังจากที่ได้ออกแบบและสร้างวงจรแต่ละชุด การทดสอบและรายงานผลของวงจรแต่ละชุดดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น วงจรในแต่ละชุดจะถูกต่อเข้าด้วยกันในการทดสอบวงจรรวมกำลังงานและเอาท์พุทสุดท้าย เนื่องจากต้องการให้กำลังอินพุทสามารถปรับค่าได้เพื่อดูช่วงอัตราขยายกำลังงาน และประสิทธิภาพแต่ละ

ช่วงกำลังงานด้วยเครื่องป้อนสัญญาณ EXG Analog Signal Generator N5171B ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุต (dBm) และกำลังงานเอาต์พุต (dBm) แสดงดังในรูปที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงของกำลังงานจะเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นในช่วงหนึ่ง เมื่อกำลังงานสูงขึ้นการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานจะลดลง นั่นบ่งบอกว่าอัตราขยายกำลังงานของวงจรขยายกำลังงานภาคหลักทั้ง 2 ชุด เมื่อทำงานร่วมกันจะมีอัตราขยายที่ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.21 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานเอาต์พุตและอัตราขยายกำลังงาน

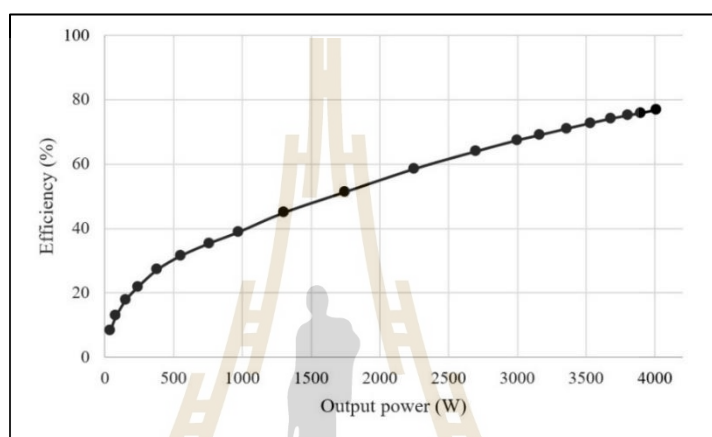


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุต (dBm) และเอาต์พุต (dBm) ของวงจรจ่ายพลังงานที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานเอาต์พุต (W) และอัตราขยาย (dB) ของวงจรจ่ายพลังงานที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต

ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุภาคหลักทั้ง 2 ชุด ถูกคำนวณตามสมการที่ 4.2 แสดงผลตามรูปที่ 4.22 ประสิทธิภาพของวงจรจะสูงขึ้นเมื่อวงจรถูกใช้สำหรับกำลังงานสูง วัตถุประสงค์ของการออกแบบวงจรต้องการให้ได้กำลังงานเอาต์พุต 4 กิโลวัตต์ จากการออกแบบและสร้างวงจรจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต เมื่อวัดผลแสดงให้เห็นว่าความสามารถของวงจร สามารถให้กำลังงาน 4.01 กิโลวัตต์ ด้วยอัตราขยาย 29.5 dB และประสิทธิภาพทางไฟฟ้า 76.75 %

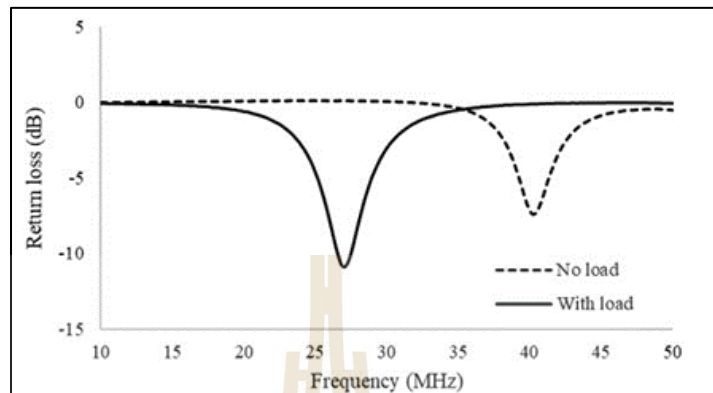


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานเอาต์พุตและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของวงจรจ่ายพลังงานที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต

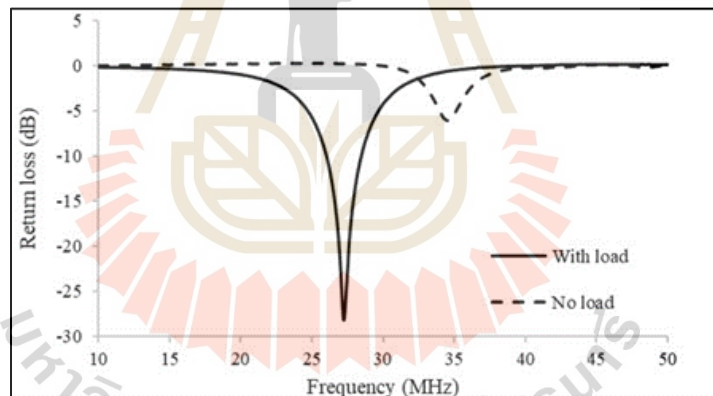
4.2.6 การเข้าสู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์ระหว่างแหล่งจ่ายพลังงานและอิเล็กทรอนิกส์

การปรับปรุงความสม่ำเสมอในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการปรับเปลี่ยนรูปแบบของอิเล็กทรอนิกส์เป็นทรงกระบอกและใช้โพสิโพรไพลีนล้อมรอบตัวนำด้านนำเข้าช่วยในการปรับปรุง การทดสอบเพื่อดูผลแตกต่างการปรับปรุงเมื่อมีและไม่มีโพสิโพรไพลีนจะถูกทดสอบ ก่อนโหลดจะได้รับกำลังงาน การเข้าสู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์จะถูกออกแบบและสร้าง และจะทำการวัดการสะท้อนกลับของสัญญาณ โดยรูปแบบแรกเมื่อไม่มีโพสิโพรไพลีน ผลการวัดการสะท้อนกลับของสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 4.23 โดยที่มีโหลดและไม่มีโหลด ในขณะที่มีโหลด ที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต ค่าการสะท้อนต่ำกว่า -10 dB ในส่วนของรูปแบบที่ 2 เป็นรูปแบบที่มีโพสิโพรไพลีนล้อมรอบตัวนำด้านใน ผลการวัดการสะท้อนกลับสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 4.24 ผลการทดสอบจะทดสอบทั้งที่มีโหลดและไม่มีโหลดหลังจากเข้าสู่โครงข่ายแล้ว ผลการทดสอบเมื่อมีโหลดที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต ต่ำกว่า -25 dB อิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 2 รูปแบบหลังจากเข้าสู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์เมื่อมีโหลด ให้ค่าการสะท้อนกลับของ

สัญญาณที่ดี ซึ่งสามารถจ่ายกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุจากวงจรจ่ายกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ 50 โอห์ม



รูปที่ 4.23 ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิเตอร์กรอบอกเมื่อไม่มีโพลีโพรไพลีนหลังการเข้าสู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์

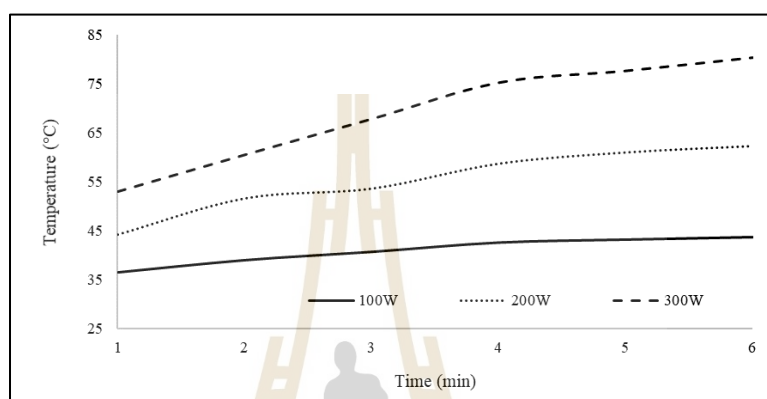


รูปที่ 4.24 ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิเตอร์กรอบอกเมื่อมีโพลีโพรไพลีนหลังการเข้าสู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์

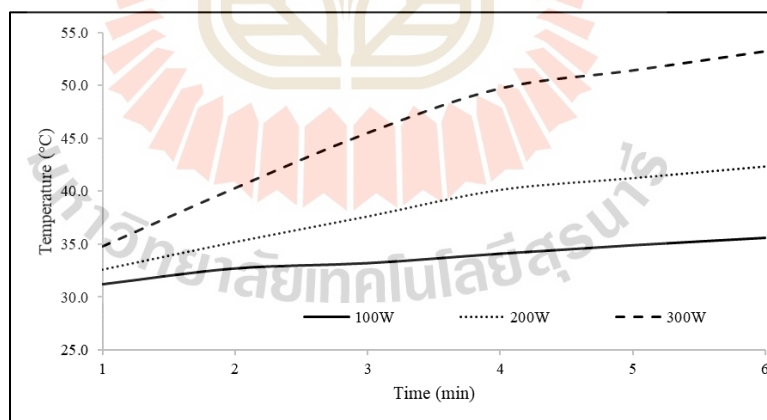
4.2.7 การให้ความร้อนแก่วัสดุอิเล็กทรอนิกส์

หลังจากอิเล็กทรอนิกส์เข้าสู่โครงข่ายอิมพีแดนซ์แล้วทั้ง 2 รูปแบบ ในงานวิจัยนี้ต้องการอุณหภูมิไหลตอยู่ในช่วง 50 ถึง 54 องศาเซลเซียส อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไม่เกิน 5.8 องศาเซลเซียสต่อนาที และมีความกระจายตัวของอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอ หากพิจารณาจากอุณหภูมิเริ่มต้น 25 องศาเซลเซียส ต้องการอุณหภูมิสุดท้าย 54 องศาเซลเซียส โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 5.8 องศาเซลเซียสต่อนาที จะต้องใช้เวลาในการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุอย่างน้อย

6 นาที ซึ่งกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุที่จะต้องจ่ายให้กับโหลด เป็นสิ่งที่ต้องทดสอบเพื่อให้ได้ตามที่กำหนด โดยกำลังงานที่จะต้องจ่ายกำหนดให้มีค่า 100 200 และ 300 วัตต์ หลังจากที่ได้รับกำลังงาน อุณหภูมิจะถูกวัดทุกๆ 1 นาที ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเวลา 6 นาที ในรูปแบบที่ไม่มีโพลิโพรไพลีนล้อมรอบแสดงในรูปที่ 4.25 และมีโพลิโพรไพลีนล้อมรอบแสดงในรูปที่ 4.26 โดยอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ



รูปที่ 4.25 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในข้าวสารเมื่อได้รับกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุต่างๆ ในรูปแบบไม่มีโพลิโพรไพลีนล้อมรอบ



รูปที่ 4.26 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในข้าวสารเมื่อได้รับกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุต่างๆ ในรูปแบบมีโพลิโพรไพลีนล้อมรอบ

พิจารณาอิเล็กทรอนิกส์ในรูปแบบ ไม่มีโพลิโพรไพลีน อุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นจะเกิดที่บริเวณล้อมรอบตัวนำด้านใน เมื่อ ป้อนกำลังงาน 100 วัตต์ อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นคือ 43.7 องศา

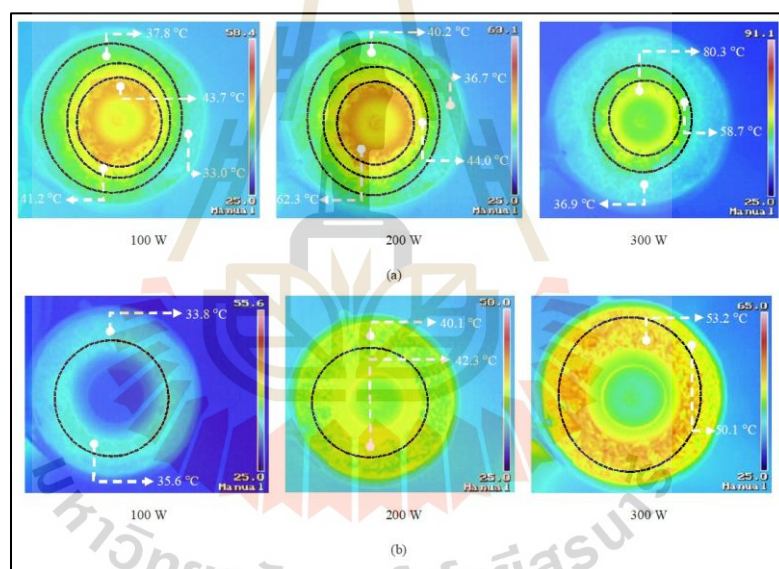
เซลเซียส อยู่ที่บริเวณล้อมรอบตัวนำด้านในและอุณหภูมิต่ำสุด คือ 33.0 องศาเซลเซียส ที่บริเวณตัวนำด้านนอก เมื่อเพิ่มกำลังงานเป็น 200 วัตต์ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณล้อมรอบตัวนำด้านใน 62.3 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิบริเวณตัวนำด้านนอก 36.7 องศาเซลเซียส สุดท้ายที่กำลังงาน 300 วัตต์ อุณหภูมิที่บริเวณตัวนำด้านใน คือ 80.3 องศาเซลเซียส และที่บริเวณตัวนำด้านนอก 36.9 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ดังจะเห็นว่าการใช้อิเล็กโทรดทรงกระบอกความเข้มของสนามไฟฟ้าจะอยู่ที่บริเวณล้อมรอบตัวนำด้านใน เมื่อให้กำลังงานสูงขึ้น ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิจะลดลงอย่างมาก ในส่วนของอิเล็กโทรดทรงกระบอกที่มีโพลีโพรไพลีนล้อมรอบตัวนำด้านใน ความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละบริเวณหลังจากได้รับพลังงานเป็นเวลา 6 นาที มีความแตกต่างกันเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ต่างจากที่ไม่มีโพลีโพรไพลีน แต่อุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อใช้กำลังงานและเวลาที่เท่ากันเปลี่ยนแปลงได้ไม่รวดเร็วเท่ากับการที่ไม่มีโพลีโพรไพลีน รูปแบบที่มีวัสดุโพลีโพรไพลีนนี้สามารถช่วยให้เกิดการกระจายของอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอ และสามารถทำให้โหลดมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 50 องศาเซลเซียส ด้วยกำลังงาน 300 วัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.27

ตารางที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบของอุณหภูมิเฉลี่ย ดัชนีชี้วัดความสม่ำเสมอ และอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อไม่มีโพลีโพรไพลีน

กำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ (W)	100	200	300
อุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณตัวนำด้านใน (°C)	43.7 ± 0.9	62.3 ± 1.2	80.3 ± 1.6
อุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณตัวนำด้านนอก (°C)	33.0 ± 0.7	36.7 ± 0.7	36.9 ± 0.7
ความแตกต่างของอุณหภูมิ (°C)	10.7 ± 1.5	25.6 ± 2.0	43.4 ± 2.3
ดัชนีชี้วัดความสม่ำเสมอ (UI)	0.401	0.522	0.646
อัตราการเปลี่ยนแปลงความร้อน (°C/min)	3.1 ± 0.9	6.2 ± 1.2	9.2 ± 1.6

ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบของอุณหภูมิเฉลี่ย ดัชนีชี้วัดความสม่ำเสมอ และอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อมีโพลีโพรไพลีน

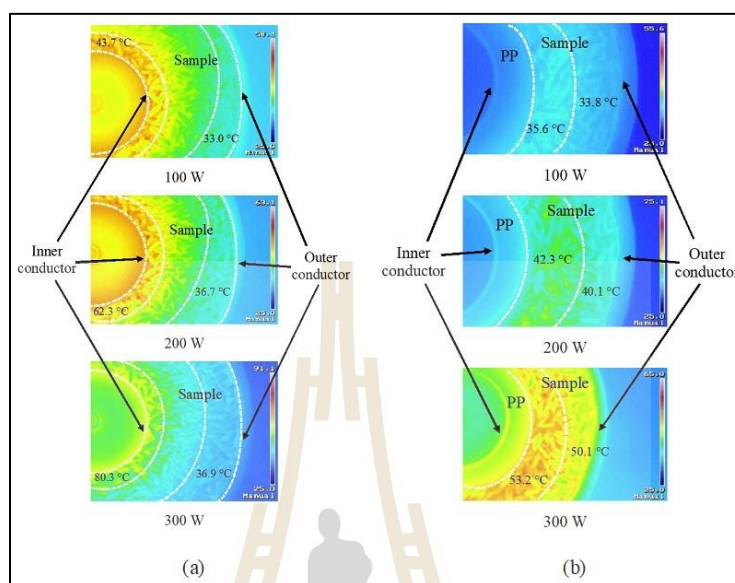
กำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ (W)	100	200	300
อุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณตัวนำด้านใน (°C)	35.6 ± 0.7	42.3 ± 0.8	53.2 ± 1.1
อุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณตัวนำด้านนอก (°C)	33.8 ± 0.7	40.1 ± 0.8	50.1 ± 1.0
ความแตกต่างของอุณหภูมิ (°C)	1.8 ± 1.4	2.2 ± 1.6	3.1 ± 2.1
ดัชนีชี้วัดความสม่ำเสมอ (UI)	0.093	0.068	0.058
อัตราการเปลี่ยนแปลงความร้อน (°C/min)	1.8 ± 0.7	2.9 ± 0.8	4.7 ± 1.1



รูปที่ 4.27 ผลของอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นในข้าวสารหลังให้กำลังงานคลื่นความถี่วิทยุที่ระกัับพลังงานต่างๆ

จากผลการทดลองจะเห็นว่าไม่ว่าจะใช้รูปแบบที่มีหรือไม่มีโพลีโพรไพลีน อุณหภูมิสูงสุดจะเกิดขึ้นที่บริเวณล้อมรอบตัวนำด้านใน และจะลดลงตามระยะห่างออกไปจากตัวนำด้านใน เนื่องจากตัวนำด้านในเป็นจุดปล่อยพลังงาน ดังนั้นหากจะพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิ ความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งแต่บริเวณตัวนำด้านในในตัวนำด้านนอกที่เกิดขึ้นทั้ง 2 รูปแบบนี้ และด้วยกำลังงานที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ชัดดังแสดงในรูปที่ 4.28 และจะเห็นว่าวัสดุโพลีโพรไพลีน ไม่เปลี่ยนแปลง

พลังงานให้เป็นความร้อนในตัวเอง จากภาพถ่ายความร้อนแสดงให้เห็นว่า มีอุณหภูมิต่ำกว่าโหลด และที่บริเวณติดกับโหลดมีอุณหภูมิสูงสุด ซึ่งเกิดจากการถ่ายโอนความร้อนมาจากโหลด



รูปที่ 4.28 ผลของอุณหภูมิความร้อนที่บริเวณด้านในและด้านนอก

4.3 สรุปและอภิปรายผล

ผลการทดสอบผลของวงจรให้กำลังงานคลื่นความถี่วิทยุซึ่งประกอบไปด้วย วงจรกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุสามารถให้กำลังงานสูงสุด 6.457 mW ที่ความถี่ 27.12 MHz โดยมีฮาร์โมนิกส์อันดับ 2 และ 3 กำลังงานอยู่ที่ 0.023 และ 0.005 mW ตามลำดับ วงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุมีอัตราขยาย 20 dB วงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุมีอัตราขยาย 32 dB วงจรรวมหรือแบ่งกำลังงานวิลกินสันให้ค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณต่ำกว่า -30 dB และค่าการสูญเสียการนำสัญญาณมากกว่า -3.5 dB จากผลการทดสอบทั้งระบบของวงจรให้กำลังงานคลื่นความถี่วิทยุสามารถให้กำลังงานสูงสุด 4 กิโลวัตต์ ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า 76.75 % ที่ความถี่ 27.12 MHz ในส่วนของการนำกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุไปใช้เป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนแก่ข้าวสารในหลักการให้ความร้อนไดอิเล็กตริกด้วยอิเล็กโทรดทรงกระบอกขนาน โดยตัวนำด้านในมีรัศมี 20 มิลลิเมตร ตัวนำด้านนอกมีรัศมี 60 มิลลิเมตร และสูง 50 มิลลิเมตร เมื่อวัสดุโพลีโอโพรไพลีนล้อมรอบตัวนำด้านในมีความหนา 10 มิลลิเมตร เมื่อกำลังงานถูกป้อน 300 วัตต์ ภายในเวลา 6 นาที สามารถทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น 50 – 54 องศาเซลเซียส ให้ค่าดัชนีชี้วัดความสม่ำเสมอ 0.058

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ออกแบบและสร้างวงจรเป็นแหล่งพลังงานคลื่นความถี่วิทยุด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำบนพื้นฐานวงจรขยายสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุสำหรับให้ความร้อนแก่ข้าวสารด้วยหลักการให้ความร้อนแก่สารไดอิเล็กตริก และยังนำเสนอวิธีการปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นกับวัสดุไดอิเล็กตริก โดยวิธีการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ 27.12 เมกกะเฮิร์ต ชุดวงจรแหล่งจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ ประกอบไปด้วย วงจรกำเนิดความถี่ วงจรขับสัญญาณ วงจรขยายสัญญาณ และวงจรรวมหรือแบ่งกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ สามารถให้กำลังงานสูงสุดถึง 4 กิโลวัตต์ ด้วยประสิทธิภาพทางไฟฟ้า 76.75 % ในการศึกษาที่ผ่านมามีอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์เลียมฟีนผ้าถูกนำมาใช้ อุณหภูมิความร้อนมันจะเกิดขึ้นที่บริเวณขอบและมุม จึงนำมาสู่การศึกษาและปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นกับข้าวสารหลังจากให้พลังงานคลื่นความถี่วิทยุ ด้วยการทำรูปทรงของอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์เลียมฟีนเป็นรูปทรงกระบอกขนานเพื่อลดมุม นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มวัสดุโพลีโพรไพลีนล้อมรอบตัวนำด้านใน ซึ่งจะมีการทดสอบค่าการสะท้อนกลับสัญญาณ (S11) ของอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์เลียมฟีนบรรจุไว้ระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์เลียมฟีนที่มีและไม่มีโพลีโพรไพลีนที่ความถี่ 27.12 เมกกะเฮิร์ต มีค่าต่ำกว่า -10 และ -25 dB ตามลำดับ หลังจากนั้นกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุถูกป้อน ซึ่งรูปแบบของอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์เลียมฟีนที่มีวัสดุโพลีโพรไพลีนล้อมรอบตัวนำด้านในสามารถให้ค่าตัวชี้วัดความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อนได้ดี มีค่า 0.058 ที่กำลังงาน 300 วัตต์ มีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 4.7 องศาเซลเซียสต่ออนาที

สำหรับปัญหาที่พบในวงจรแหล่งจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ จะเป็นเรื่องของอุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นบนอุปกรณ์ทรานส์เลียมฟีนหากมีการระบายความร้อนไม่ทัน และวงจรขับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุมีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่ต่ำ เนื่องจากการเลือกใช้คุณสมบัติของอุปกรณ์ โดยอุปกรณ์ที่เลือกใช้สำหรับวงจรขับสัญญาณมีคุณสมบัติที่ให้กำลังงานสูงถึง 300 วัตต์ แต่ถูกนำมาใช้ที่กำลังงานต่ำ ซึ่งจะมีประสิทธิภาพต่ำลงไปด้วย ในส่วนของการออกแบบเข้าสู่โครงข่ายวงจรขับ แกนเฟอร์ไรท์ของหม้อแปลงอิมพีแดนซ์สามารถเลือกใช้ที่มีขนาดเล็กลงได้ เนื่องจากมีกำลังงานไม่สูงมากในวงจรขับ ในส่วนของโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์เลียมฟีนสำหรับเป็นตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้า หลังจากให้พลังงานคลื่นความถี่วิทยุในการทดสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิความร้อน ที่บริเวณตัวนำด้านในให้อุณหภูมิสูงที่สุด ส่งผลให้ข้าวสารคลายความชื้นออกมาเป็นไอน้ำเกาะตามตัวนำด้านในและทำให้เมล็ดข้าวสาร

เกาะติดที่ตัวนำด้านใน ส่วนที่บริเวณตัวนำด้านนอกเมื่อบรรจุข้าวสารลงไประหว่างอิเล็กโทรด จะมีเมล็ดข้าวสารบางส่วนติดตามช่องระหว่างตัวนำและโครงสร้าง

สำหรับแนวทางการพัฒนาชุดวงจรจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ สามารถนำไปพัฒนาการปรับหรือควบคุมการจ่ายพลังงานให้กับโหลด เนื่องจากมีชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุม และยังสามารถเพิ่มกำลังงานเอาต์พุตได้สูงมากขึ้นด้วยวงจรรวมกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุ ในส่วนของอิเล็กโทรดสำหรับตัวปล่อยคลื่นในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบที่ขนาดตัวนำด้านนอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร และตัวนำด้านในเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร สูง 50 มิลลิเมตร สำหรับใช้เป็นขนาดในการศึกษาผลที่เกิดขึ้น เนื่องจากว่าแหล่งจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุสามารถให้กำลังงานได้สูงสุดถึง 4 กิโลวัตต์ ดังนั้นการขยายขนาดของอิเล็กโทรดเพื่อรองรับปริมาณข้าวสารที่มากขึ้นและสามารถยกระดับได้ถึงระดับอุตสาหกรรมเป็นสิ่งที่ควรพัฒนาต่อไป



เอกสารอ้างอิง

- Alfaifi, B., Tang, J., Rasco, B., Wang, S., & Sablani, S. (2016, 2016/10/01/). Computer simulation analyses to improve radio frequency (RF) heating uniformity in dried fruits for insect control. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 37, 125-137. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.08.012>
- Benhalima, H., Chaudhry, M. Q., Mills, K. A., & Price, N. R. (2004, 2004/01/01/). Phosphine resistance in stored-product insects collected from various grain storage facilities in Morocco. *Journal of Stored Products Research*, 40(3), 241-249. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-474X\(03\)00012-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-474X(03)00012-2)
- Chen, L., Wang, K., Li, W., & Wang, S. (2015, 10/01). A strategy to simulate radio frequency heating under mixing conditions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118, 100-110. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.025>
- Guo, W., & Zhu, X. (2014, 12/01). Dielectric Properties of Red Pepper Powder Related to Radiofrequency and Microwave Drying. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 3591-3601. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1375-x>
- Hannan, M. A., Hussein, H. A., Mutashar, S., Samad, S. A., & Hussain, A. (2014). Automatic frequency controller for power amplifiers used in bio-implanted applications: issues and challenges. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 14(12), 23843-23870. <https://doi.org/10.3390/s141223843>
- Hay, N., Kien, P. V., & Duc, A. L. (2018, 23-24 Nov. 2018). Study on Designing and Manufacturing a Radio Frequency Generator Using in Drying Technology. 2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD),
- Hou, L., Huang, Z., Kou, X., & Wang, S. (2016, 2016/10/01/). Computer simulation model development and validation of radio frequency heating for bulk chestnuts based on single particle approach. *Food and Bioprocess Technology*

Processing, 100, 372-381.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.08.008>

Hou, L., Ling, B., & Wang, S. (2014). Development of thermal treatment protocol for disinfecting chestnuts using radio frequency energy [Article]. *Postharvest Biology and Technology*, 98, 65-71.

<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.07.007>

Huang, Z., Marra, F., Subbiah, J., & Wang, S. (2016, 11/28). Computer simulation for improving radio frequency (RF) heating uniformity of food products: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58.

<https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1253000>

Huang, Z., Zhang, B., Marra, F., & Wang, S. (2016, 2016/02/01/). Computational modelling of the impact of polystyrene containers on radio frequency heating uniformity improvement for dried soybeans. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 33, 365-380.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.11.022>

Huang, Z., Zhu, H., Yan, R., & Wang, S. (2015, 2015/01/01/). Simulation and prediction of radio frequency heating in dry soybeans. *Biosystems Engineering*, 129, 34-47. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.09.014>

Jiao, S., Sun, W., Yang, T., Zou, Y., Zhu, X., & Zhao, Y. (2017). Investigation of the Feasibility of Radio Frequency Energy for Controlling Insects in Milled Rice [Article]. *Food and Bioprocess Technology*, 10(4), 781-788.

<https://doi.org/10.1007/s11947-017-1865-8>

Jiao, Y., Shi, H., Tang, J., Li, F., & Wang, S. (2015, 2015/08/01/). Improvement of radio frequency (RF) heating uniformity on low moisture foods with Polyetherimide (PEI) blocks. *Food Research International*, 74, 106-114.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.04.016>

Jiao, Y., Tang, J., & Wang, S. (2014, 2014/11/01/). A new strategy to improve heating uniformity of low moisture foods in radio frequency treatment for pathogen control. *Journal of Food Engineering*, 141, 128-138.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.05.022>

- Lin, B., & Wang, S. (2020, 2020/03/01/). Dielectric properties, heating rate, and heating uniformity of wheat flour with added bran associated with radio frequency treatments. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *60*, 102290. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102290>
- Ling, B., Hou, L., Li, R., & Wang, S. (2016, 2016/02/01/). Storage stability of pistachios as influenced by radio frequency treatments for postharvest disinfestations. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *33*, 357-364. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.10.013>
- Ling, B., Lyng, J. G., & Wang, S. (2018, 2018/08/01/). Radio-frequency treatment for stabilization of wheat germ: Dielectric properties and heating uniformity. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *48*, 66-74. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.05.012>
- Liu, Q., Qu, Y., Liu, J., & Wang, S. (2021, 2021/04/01/). Effects of radio frequency heating on mortality of lesser grain borer, quality and storage stability of packaged milled rice. *LWT*, *140*, 110813. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110813>
- Liu, Y., Wang, S., Mao, Z., Tang, J., & Tiwari, G. (2013, 2013/05/01/). Heating patterns of white bread loaf in combined radio frequency and hot air treatment. *Journal of Food Engineering*, *116*(2), 472-477. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.11.029>
- M. C. Lagunas-Solar, Z. P., N. X. Zeng, T. D. Truong, R. Khir, K. S. P. Amaratunga. (2007). Application of radiofrequency power for non-chemical disinfestation of rough rice with full retention of quality attributes. *Applied Engineering in Agriculture*, *23*(5), 8.
- Macana, R. J., Moirangthem, T. T., & Baik, O. D. (2018). *50-ohm RF technology based applicator design and fabrication for disinfestation of insect pests in stored grains* 2018 ASABE Annual International Meeting, St. Joseph, MI. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=49484&t=5>
- Marra, F., Lyng, J., Romano, V., & McKenna, B. M. (2007, 04/01). Radio-frequency heating of foodstuff: Solution and validation of a mathematical model.

Journal of Food Engineering, 79, 998-1006.

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.03.031>

Nelson, S., & Trabelsi, S. (2012, 01/01). Factors Influencing the Dielectric Properties of Agricultural and Food Products. *The Journal of microwave power and electromagnetic energy: a publication of the International Microwave Power Institute*, 46, 93-107.

Palazoğlu, T. K., & Miran, W. (2018, 2018/06/01/). Experimental investigation of the combined translational and rotational movement on an inclined conveyor on radio frequency heating uniformity. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 47, 16-23.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.01.003>

Shi, H. J., Sun, Z. J., Yan, Z. M., & Ren, J. B. (2017, 12/01). Influence of electrode distance on heating behaviour associated to radio frequency processing of low moisture foods. *Acta Alimentaria*, 46, 517-526.

<https://doi.org/10.1556/066.2017.46.4.15>

Tiwari, G., Wang, S., Tang, J., & Birla, S. (2011, 02/21). Analysis of radio frequency (RF) power distribution in dry food materials. *Journal of Food Engineering - J FOOD ENG*, 104. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.01.015>

Wang, Y., Zhang, L., Gao, M., Tang, J., & Wang, S. (2014, 2014/07/04). Pilot-Scale Radio Frequency Drying of Macadamia Nuts: Heating and Drying Uniformity. *Drying Technology*, 32(9), 1052-1059.

<https://doi.org/10.1080/07373937.2014.881848>

Wang, Y., Zhang, L., Johnson, J., Gao, M., Tang, J., Powers, J., & Wang, S. (2014, 01/01). Developing Hot Air-Assisted Radio Frequency Drying for In-shell Macadamia Nuts. *Food and Bioprocess Technology*, 7. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1055-2>

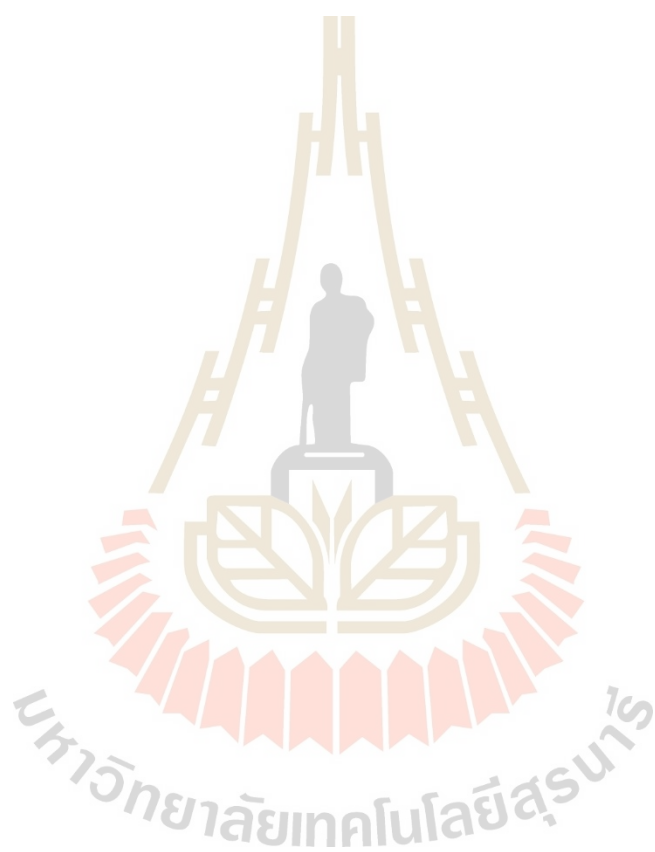
Yang, C., Zhao, Y., Tang, Y., Yang, R., Yan, W., & Zhao, W. (2018, 2018/06/01/). Radio frequency heating as a disinfestation method against *Corcyra cephalonica* and its effect on properties of milled rice. *Journal of Stored Products Research*, 77, 112-121.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jspr.2018.04.004>

- Yu, D., Shrestha, B. L., & Baik, O.-D. (2016, 2016/08/01/). Temperature distribution in a packed-bed of canola seeds with various moisture contents and bulk volumes during radio frequency (RF) heating. *Biosystems Engineering*, *148*, 55-67. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.05.006>
- Zheng, A., Zhang, B., Zhou, L., & Wang, S. (2016, 07/01). Application of radio frequency pasteurization to corn (*Zea mays* L.): Heating uniformity improvement and quality stability evaluation. *Journal of Stored Products Research*, *68*, 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2016.04.007>
- Zhou, H., & Wang, S. (2019, 01/01). Developing a screw conveyor in radio frequency systems to improve heating uniformity in granular products. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, *12*, 174-179. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191203.4227>
- Zhou, L., Ling, B., Zheng, A., Zhang, B., & Wang, S. (2015, 2015/05/01/). Developing radio frequency technology for postharvest insect control in milled rice. *Journal of Stored Products Research*, *62*, 22-31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jspr.2015.03.006>
- Zhou, L., & Wang, S. (2016). Industrial-scale radio frequency treatments to control *Sitophilus oryzae* in rough, brown, and milled rice [Article]. *Journal of Stored Products Research*, *68*, 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2016.03.002>
- Zhou, X., Gao, H., Mitcham, E. J., & Wang, S. (2018, 2018/03/12). Comparative analyses of three dehydration methods on drying characteristics and oil quality of in-shell walnuts. *Drying Technology*, *36*(4), 477-490. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1351452>
- Zhou, X., & Wang, S. (2018, 04/09). Recent developments in radio frequency drying of food and agricultural products: A review. *Drying Technology*, *37*, 1-16. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1452255>
- Zhu, H., Li, D., Li, S., & Wang, S. (2017). A novel method to improve heating uniformity in mid-high moisture potato starch with radio frequency assisted treatment. *Journal of Food Engineering*, *206*, 23-36.

รักบ้านเกิด. (2558). การเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ข้าวให้มีคุณภาพดีมีอัตราการงอกสูง.

<http://www.rakbankerd.com/agriculture/page.php?id=4960&s=tblrice>





ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

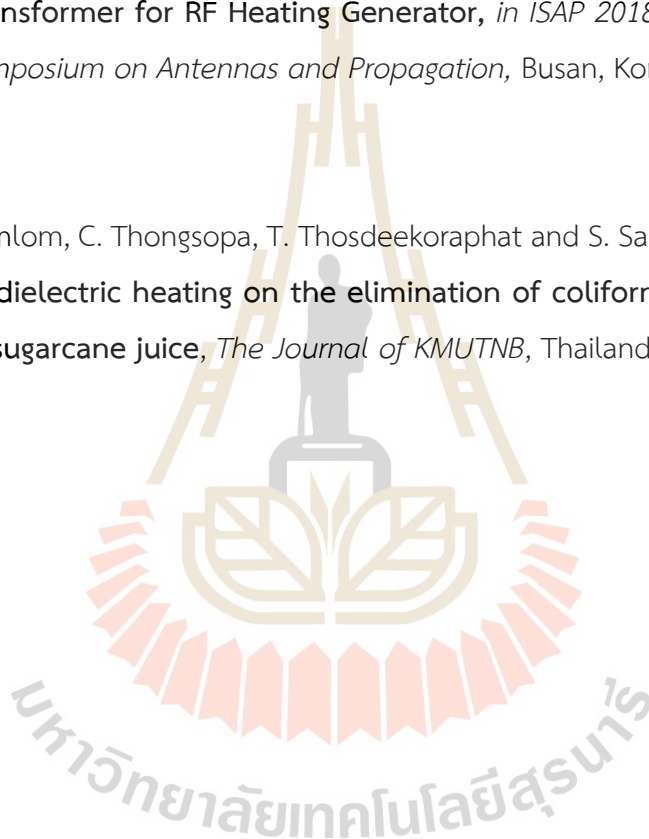
รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความวิชาการ

A. Rattananamlom, S. Kotchapradit, S. Santalunai, T. Thosdeekoraphat, P. Moungnoul and C. Thongsopa (2018). **Design of High Power Transmission Line Transformer for RF Heating Generator**, in *ISAP 2018 – 2018 International Symposium on Antennas and Propagation*, Busan, Korea (South).

วารสารวิชาการ

A. Rattananamlom, C. Thongsopa, T. Thosdeekoraphat and S. Santalunai (2025). **Effect of dielectric heating on the elimination of coliform and fecal coliform in sugarcane juice**, *The Journal of KMUTNB*, Thailand.



Design of High Power Transmission Line Transformer for RF Heating Generator

*Adisak Rattananamlom¹, Supawat Kotchapradit¹, Samran Santalunai¹, Thanaset Thosdeekoraphat¹, Phichet Moungnoul² and Chanchai Thongsopa¹

¹School of Electronic Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima 30000, Thailand

²Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand
Email: *hyadnamkang@hotmail.com

Abstract – In this paper, presented design method of 1:4 transmission line transformer (TLT) at the high power base of coaxial cable surrounded a ferrite core and compensation element used for improve return loss. The model for 1:4 TLT used in matching impedance at 39 MHz of push-pull power amplifiers (PAs) with insertion loss approximately -3 dB, return loss lower -40 dB and different phase shift about 180° are presented.

Index Terms — Transmission line transformer (TLT), BALUN, matching network, magnetic materials, power amplifiers (PAs), RF heating generator.

1. Introduction

RF heating or dielectric heating used widely in agriculture industry for insect control non-chemical [1]. The RF heating generator has been an important role of the power source. In last many works to improve efficiency of the RF power source by using the PA switching mode and push-pull PAs or/and power combiner used to get a higher power [2, 3]. Another important part of the PA is matching network for transferring maximum power to the load. For RF push-pull high PAs, BALUN transformer used for balance to unbalance transformation. Mostly designed TLT in HF/VHF for high power broadband by using coaxial cables around with the magnetic core.

In [4], design PA 40 W at 2-800 MHz. In simulation 1:4 TLT use coaxial cable and inductance parallel from magnetic material. In [5], analysis and modeling for parasitic impedance of a coaxial cable surrounded by ferrite material that's placed on a heat sink to remove the power dissipated. In [6], design and simulation input matching impedance with 1:4 TLT base of Q factor for narrowband and get eliminated reactance before matching to 1:4 TLT from active device. In the scope of this study, modeling of 1:4 push-pull TLT uses coaxial cable surrounded by ferrite material with using the appropriate frequency for making the load (dielectric material) get maximum energy absorption for conversion to heat, 39 MHz for control rice weevil [7]. In this work design with characteristic magnetic inductance and compensation element that success with low loss, low return loss and different phase 180° of port balance will be shown.

2. TLT

For best performance, design of the TLT base of 1:1 impedance with a characteristic impedance of transmission line should be the square root of product impedance input and output. Lower cut-off frequency can be used characteristic magnetic inductance of coaxial cable and magnetic cores.

$$L_{co} = 2l_{co}[\ln(2l_{co}/r) - 1] \quad (1)$$

and

$$L_{mag} = \mu_0 \mu_r N^2 A / l_{mag} \quad (2)$$

where L_{co} and L_{mag} are magnetic inductance of coaxial cable and magnetic core, respectively. l_{co} and l_{mag} are coaxial cable length and the mean path length of magnetic core, respectively. r is radius of the outer surface of the outer conductor. μ_0 and μ_r are permeability of free space and magnetic core, respectively. A is the cross section area of magnetic core. N is the number of turns.

Flux density in the core will be suitable for maximum voltage across the inductance of the core.

$$B_{max} = V_{max} / (\omega AN) \quad (3)$$

where ω is the angular frequency.

The high cut-off frequency will be use quarter wavelength of physical coaxial cable length. Compensation element, such as series inductance or/and parallel capacitance can be below return loss.

3. Design and simulation of the 1:4 TLT

The design requirement transformation impedance 12.5 Ω balances to 50 Ω unbalance with center frequency is 39 MHz and bandwidth not necessary must be wide. It consist 1:1 BALUN and 1:4 TLT. First step, determined inductance suitable for low cut-off frequency, use (1) and (2) to define inductance of lower cut-off frequency and the handle power capability of coaxial cable suitable for output power and flux density high sufficient (3). Coaxial cable length used to suitable length ferrite core will not use quarter wavelength

due to a high cut-off frequency high suitable for frequency to use (39 MHz). Choose ferrite core which has flux density and permeability suitable to design from the datasheet (2). That's the magnetic core can be handle for high power levels and not place to heat sink, the capacitance of magnetic core to the ground will be ignored. BALUN 1:1 used coaxial cable 50Ω length 50 mm and TLT 1:4 used 25Ω length 50 mm 2 wire, all cable surrounded with same ferrite core. Coaxial cable short length affects to high cut-off frequency very high. This can be use capacitance to compensate for below return loss. For the simulation use ADS, magnetic inductance of ferrite core can be used (2) parallel coaxial cable, as illustrated by Fig.1.

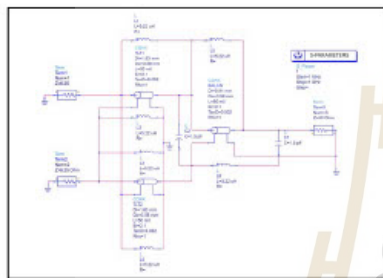


Fig. 1. 1:4 TLT push-pull schematic.

4. Result and discussion

For design 1:4 TLT push-pull with coaxial cable surrounded a ferrite core and compensation element can be design narrowband high performance with 39 MHz low insertion loss that same as 2 ports and return loss lower -40 dB, as illustrated by Fig. 2. Phase shift between port 1 and 2 different approximate 180° with coaxial cable BALUN can be success, as illustrated by Fig. 3.

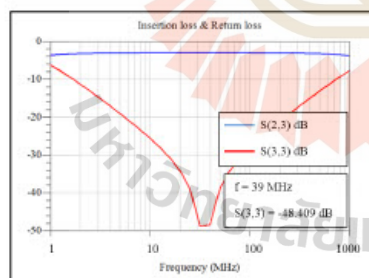


Fig. 2. Insertion and return loss of 1:4 TLT

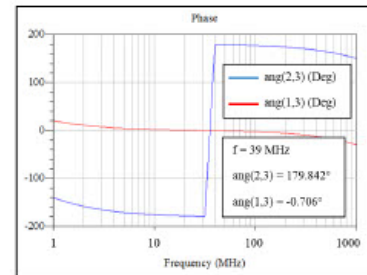


Fig. 3. Phase shift between port inputs of 1:4 TLT

5. Conclusion

High power amplifier can be design with push-pull or/and power combiner. In this work propose design push-pull TLT for 39 MHz with characteristic magnetizing inductance of low cut-off frequency and high cut-off frequency can be use compensation element to below frequency. Characteristic material selection has been important to design especially magnetic core that's affect to magnetizing inductance.

Acknowledgment

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

References

- [1] L. Zhou and S. Wang, "Industrial-scale radio frequency treatments to control *Sitophilus oryzae* in rough, brown, and milled rice," *Journal of Stored Products Research*, vol. 68, no. Supplement C, pp. 9-18, 2016/07/01/ 2016.
- [2] A. Gupta, Y. Arondekar, S. V. G. Ravindranath, H. Krishnaswamy, and B. N. Jagatap, "A 13.56 MHz high power and high efficiency RF source," in *2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*, 2013, pp. 1-4.
- [3] P. Srimuang, N. Puangngernmak, and S. Chalermwisutkul, "13.56 MHz class E power amplifier with 94.6% efficiency and 31 watts output power for RF heating applications," in *2014 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2014, pp. 1-5.
- [4] K. Li, T. Shi, S. Di, and W. Yin, "A 40W ultra broadband LDMOS power amplifier," in *2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2015, pp. 1-4.
- [5] A. Fanti, L. Piattella, G. Scotti, P. Tommasino, and A. Trifiletti, "Analysis and modelling of broad-band ferrite-based coaxial transmission-line transformers," in *The 40th European Microwave Conference*, 2010, pp. 353-356.
- [6] H. Mubarak and M. Makkawi, "Design and simulation of wide band input matching circuit for RF power transistor in VHF range," in *2017 International Conference on Communication, Control, Computing and Electronics Engineering (ICCCCEE)*, 2017, pp. 1-5.
- [7] S. O. Nelson and L. F. Charity, *Frequency Dependence of Energy Absorption by Insects and Grain in Electric Fields*. 1972, pp. 1099-1102.



ผลของการใช้คลื่นความถี่สูงโดยหลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกต่อการกำจัดเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและฟิคัลโคลิฟอร์มในน้ำอ้อยคั้นสด

อดิศักดิ์ รัตนน้ำล้อม* ชาญชัย ทองโสภณ ธนเสฏฐ์ ทศศิกรพัฒน์ และ สำราญ ลันทาลุณย์
สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

* ผู้รับทราบประสานงาน โทรศัพท์ 0 9225 2702 7 อีเมล: m5940622@ug.sut.ac.th

บทคัดย่อ

อ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจนอกจากจะแปรรูปเป็นน้ำตาลแล้ว ยังสามารถแปรรูปเป็นเครื่องดื่มน้ำอ้อยคั้นสด สามารถทำได้ง่ายมีขายทั่วไปตามตลาดท้องถิ่น ความปลอดภัยจากเชื้อแบคทีเรียที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคเป็นสิ่งสำคัญ หากปะปนมากับเครื่องดื่มสามารถก่อให้เกิดโรคต่างๆ ได้ ในงานวิจัยนี้นำเสนอผลของการศึกษาการกำจัดเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและฟิคัลโคลิฟอร์มด้วยคลื่นความถี่สูงโดยหลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกในน้ำอ้อยคั้นสด ซึ่งตัวอย่างที่ถูกนำมาศึกษาจะถูกผสมเชื้อแบคทีเรียลงไป ก่อนนำไปผ่านคลื่นความถี่สูง 800 วัตต์ เป็นเวลา 1 นาที และ 1 นาที 30 วินาที ที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส 1 दिन ก่อนนำไปตรวจสอบปริมาณเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและฟิคัลโคลิฟอร์มที่มีอยู่ในตัวอย่างด้วยวิธีมาตรฐานสำหรับการตรวจสอบน้ำและน้ำเสีย นอกจากนี้คุณสมบัติไดอิเล็กตริก ความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณน้ำตาลในของเหลวจะถูกตรวจสอบด้วย เชื้อแบคทีเรียสามารถถูกกำจัดได้ด้วยการให้ความร้อนโดยคลื่นความถี่สูง แต่คุณสมบัติไดอิเล็กตริก ความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณน้ำตาลของน้ำอ้อยไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: น้ำอ้อยคั้นสด, เชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม, เชื้อแบคทีเรียกลุ่มฟิคัลโคลิฟอร์ม, การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



Effect of dielectric heating on the elimination of coliform and fecal coliform in sugarcane juice

Adisak Rattananamlom*, Chanchai Thongsopa, Thanaset Thosdeekoraphat and Samran Santalunai
School of Electronic Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima,
Thailand

*Corresponding Author, Tel. 0 9225 2702 7, E-mail: m5940622@g.sut.ac.th

Abstract

Sugarcane is economic crops that can not only be processed into sugar but can also be processed into fresh sugarcane juice. Fresh sugarcane juice is easily available at local markets. Safety from bacteria that are harmful to consumers is important. If bacteria are mixed with beverages, it can cause various diseases. This research studies the results of the bacteria elimination which are coliform and fecal coliform bacteria by using high frequency based on dielectric heating principle in freshly sugarcane juice. Fresh sugarcane juice samples were inoculated with bacteria before being subjected to 800 watts of high frequency for 1 min and 1 min and 30 s at a volume of 100 mL. Afterwards, it was stored at 4 °C for 24 hours before being examined for the bacteria of coliforms and fecal coliforms in juices using standard methods for water and wastewater monitoring. In addition, the dielectric properties, pH values and sugar content in the liquid (°Brix) were also examined. Bacteria can be eliminated by high-frequency heating. In addition, the dielectric properties, pH and sugar content in the liquid (°Brix) were also examined. Bacteria can be eliminated by high-frequency heating. However, the dielectric properties, pH values and sugar content in the liquid of sugarcane juice did not change significantly.

Keywords: Sugarcane juice, Total coliform bacteria, Fecal coliform bacteria, Dielectric heating.



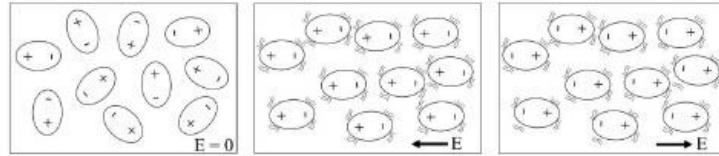
1. บทนำ

อ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญในประเทศไทยทั้งภายในและต่างประเทศตามรายงานการส่งออกน้ำตาลทรายไปจำหน่ายต่างประเทศ ประจำปี 2564 โดยทำมูลค่าจากการแปรรูปเป็นน้ำตาลทราย อีกทั้งยังสามารถแปรรูปเป็นน้ำอ้อยคั้นสด ซึ่งให้คุณค่าทางโภชนาการ คือน้ำตาลซูโครสสูงมาก ให้ความรู้สึกสดชื่นต่อผู้บริโภค [1] สามารถผลิตและจำหน่ายได้ตามท้องถิ่นทั่วไป เนื่องจากทำได้ง่าย แต่เครื่องคั้นน้ำอ้อยคั้นสดมักพบเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม (Total coliform bacteria) และอีโคไล (Escherichia coli, E.coli) [2] ซึ่งเป็นแบคทีเรียในกลุ่มฟีคัลโคลิฟอร์ม (Fecal coliform) ที่ก่อให้เกิดโรค หากกระบวนการผลิตและบรรจุภัณฑ์ไม่สะอาด ในธรรมชาติเชื้อแบคทีเรียชนิดนี้จะอยู่ในลำไส้ของคนและสัตว์เลื้อยคลานในการช่วยย่อยอาหาร [3] และจะถูกขับออกมากับอุจจาระหรือมูลสัตว์ [4] หากเชื้อแบคทีเรียนี้เข้าสู่ระบบการทำงานอื่นๆ ของร่างกายจะก่อให้เกิดโรคได้ เช่น เกิดโรคในระบบทางเดินอาหารของผู้บริโภค บางรายเกิดอาการรุนแรง ใต้งานฝึกปศุสัตว์อาจถึงแก่ชีวิตโดยเฉพาะคนชราและเด็ก เนื่องจากเชื้อแบคทีเรียชนิดนี้จะไปยับยั้งการสร้างโปรตีนและทำลายเซลล์เยื่อลำไส้ โรคติดเชื้อทางเดินปัสสาวะ [5] โรคเยื่อหุ้มสมองอักเสบ และติดเชื้อในกระแสเลือด [6, 7] เป็นต้น การตรวจพบเชื้อแบคทีเรียในอาหารหรือเครื่องดื่ม เป็นการบ่งชี้คุณลักษณะความสะอาดที่ต่ำและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ มีข้อกำหนดตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 356) พ.ศ. 2556 เรื่อง เครื่องดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท กำหนดตรวจพบแบคทีเรียโคลิฟอร์มได้น้อยกว่า 2.2/100 มิลลิลิตร ด้วยวิธีเอ็มพีเอ็น (MPN) กำหนดให้ตรวจไม่พบแบคทีเรียชนิดอีโคไล

การเตรียมเครื่องมือในการคั้นน้ำอ้อยสดและเตรียมลำอ้อยที่จะนำมาคั้นน้ำให้สะอาดจึงเป็นสิ่งสำคัญ แต่เชื้อแบคทีเรียเหล่านี้เป็นสิ่งที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งสามารถปนกับอาหารและเครื่องดื่มได้จากปัจจัยอื่นๆ

เช่น ตามเครื่องแต่งกาย หรือมือของผู้ผลิตที่สัมผัสเชื้อแบคทีเรียนี้มาทั้งโดยตรงและทางอ้อมโดยที่ผู้ผลิตไม่รู้ตัว ซึ่งเชื้อแบคทีเรียชนิดนี้จะออกมาตามมูลสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมและหากเป็นช่วงหน้าฝน หรือร้านของผู้ผลิตอยู่ใกล้บริเวณแหล่งน้ำของเกษตรกรผู้เลี้ยงสัตว์ เชื้อแบคทีเรียเหล่านี้อาจปะปนมากับแหล่งน้ำ หากผู้ผลิตสัมผัสและนำเข้าสู่กระบวนการผลิต จะส่งผลให้ผู้บริโภคมีความเสี่ยงและเป็นอันตรายต่อโรคที่จะเกิดขึ้นจากเชื้อแบคทีเรียเหล่านี้ได้ เพื่อให้มั่นใจต่อผู้บริโภค การยับยั้งหรือการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเหล่านี้จึงมีความจำเป็น เป็นอย่างมาก แต่วิธีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียนั้นจะต้องไม่ส่งผลต่อคุณค่าทางโภชนาการของอาหารและเครื่องดื่ม มีผลการศึกษาและวิจัยวิธีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในอาหารและเครื่องดื่มด้วยการใช้ความร้อนจากภายนอกเข้าสู่อาหารหรือทำให้เกิดความร้อนขึ้นจากภายในอาหาร รังสีอินฟราเรด (Infrared, IR) [8] และรังสีอัลตราไวโอเล็ต [9] จะเป็นวิธีสำหรับเครื่องดื่มที่มีความโปร่งแสง เช่น น้ำดื่ม สนามไฟฟ้ามักใช้กับเครื่องดื่ม [10] และสารสกัดจากธรรมชาติเป็นส่วนผสมซึ่งจะได้มาจากพืชและผลไม้ [11] วิธีการดังกล่าวไม่ส่งผลเสียต่อคุณค่าทางโภชนาการอาหารและเครื่องดื่ม

ในการศึกษานี้สนใจการศึกษาการกำจัดเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและฟีคัลโคลิฟอร์มในน้ำอ้อยคั้นสด ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเปรียบเทียบการใช้คลื่นความถี่สูง ความร้อนจากการต้ม และคลื่นความถี่เหนือเสียง (Ultrasonics) ในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้น้ำอ้อยเน่าเสียเพื่อการเก็บรักษาน้ำอ้อยได้นานขึ้น และไม่ส่งผลต่อคุณค่าทางโภชนาการรวมทั้งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ซึ่งคลื่นความถี่สูงสามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ได้ดีที่สุด [12] มีการศึกษาการใช้คลื่นความถี่สูงร่วมกับคลื่นความถี่เหนือเสียงในการกำจัดจุลินทรีย์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาน้ำอ้อยสดที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสและไม่ส่งผลต่อคุณค่าทางโภชนาการ [13] มีการศึกษาการใช้ความดันสูงและการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก (Ohmic heating) ส่งผลต่อการ



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้า (E) และมีสนามไฟฟ้าตามทิศทาง

เกิดลื่นน้ำตาล และเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้น้ำอ้อยเน่าเสีย [14, 15] นอกจากนี้คุณสมบัติไดอิเล็กตริกจะเป็นตัวชี้วัดสถานะของแข็ง ของเหลวในอาหารจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอาหาร และค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกบ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อนด้วยหลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก [16]

มีการศึกษาริธีการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำอ้อยและไม่ส่งผลต่อคุณค่าทางโภชนาการ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มอายุการเก็บรักษาไว้ได้นานขึ้นได้หลากหลายวิธี สำหรับในระดับครัวเรือนแล้วการใช้คลื่นความถี่สูงสามารถทำได้ง่ายและเป็นขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน ผลการศึกษาการใช้คลื่นความถี่สูงในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและฟิโคลิฟอร์มในน้ำอ้อยคั้นสดด้วยคลื่นความถี่สูงโดยหลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก และตรวจสอบคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ปริมาณน้ำตาลในของเหลว ความเป็นกรด-ด่าง โดยการเปรียบเทียบน้ำอ้อยคั้นสดที่ไม่ผ่านคลื่น ผ่านคลื่น 1 นาที และ 1 นาที 30 วินาที ที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

2 วิธีศู อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 หลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

วัสดุไดอิเล็กตริกเป็นฉนวนทางไฟฟ้าและจะเกิดการเรียงตัวใหม่ของโปรตอนและอิเล็กตรอนตามขั้วสนามไฟฟ้าที่ได้รับ ตามรูปที่ 1 เมื่อวัสดุเกิดการจัดเรียงตัวใหม่นั้น แสดงว่าได้รับพลังงานไฟฟ้าและจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนตามสมการที่ 1

$$P = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' |E|^2 \tag{1}$$

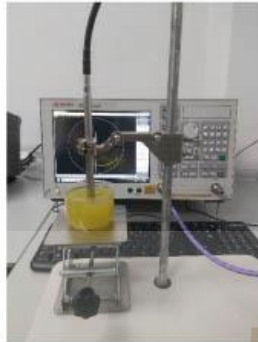
- เมื่อ P คือความหนาแน่นของการสูญเสียพลังงาน
- f คือความถี่สนามไฟฟ้า
- ϵ_0 ค่าสภาพยอมได้ของสนามไฟฟ้าในสุญญากาศ
- ϵ'' ค่าความสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน
- E คือสนามไฟฟ้า

การถ่ายเทพลังงานความร้อนภายในวัสดุเกิดได้จากอุณหภูมิรอบวัสดุและค่าความสามารถการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนจากความเข้มสนามไฟฟ้าที่ได้รับตามสมการที่ 2

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T \tag{2}$$

- เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของวัสดุ
- C_p คือความร้อนจำเพาะ
- T คืออุณหภูมิ
- t คือเวลา
- k คือค่าการแพร่ความร้อนของวัสดุ

ภายในเครื่องให้กำเนิดพลังงานความถี่สูงจะใช้หลอดแมกนีตรอนเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่ 2.45 จิกะเฮิร์ต แม่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่เดียวกันออกมา มีโบกวนในการกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้ทั่วเตาด้วยหลักการการสะท้อนคลื่น เพื่อให้สนามแม่เหล็กกระจายสู่หลอดภายในเตาได้ทั่วถึง เนื่องจากคลื่นความถี่นี้อยู่ในย่านเดียวกับระบบสื่อสาร เช่น สัญญาณ



รูปที่ 2 อุปกรณ์เครื่องมือการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

อินเตอร์เน็ต สัญญาณมือถือ เป็นต้น เพื่อป้องกันพลังงานหรือคลื่นออกมาบริเวณจึงมีโลหะล้อมรอบเครื่อง เรียกว่ากรงฟาราเดย์ทำให้เกิดมีพลังงานความถี่สูงอยู่ในเตาเท่านั้นเมื่อใช้งาน

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

เตรียมตัวอย่างน้ำอ้อยคั้นสดจากตลาดท้องถิ่น อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 900 มิลลิลิตร เพื่อให้มั่นใจได้ว่าในน้ำอ้อยคั้นสดมีเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและฟีคัลโคลิฟอร์มปะปนอยู่ น้ำในโหลสุกัณฑ์จากห้องน้ำสาธารณะถูกเติมลงไป 45 มิลลิลิตร ตัวอย่างจะถูกบรรจุในภาชนะถ้วยพลาสติกปิดสนิทปริมาณ 100 มิลลิลิตร แบ่งเป็น 9 ตัวอย่าง สำหรับการทดสอบที่ไม่ผ่านคลื่นความถี่สูง 3 ตัวอย่าง ผ่านคลื่น 1 นาที 3 ตัวอย่าง และผ่านคลื่น 1 นาที 30 วินาที 3 ตัวอย่าง ด้วยเครื่องให้กำเนิดความถี่สูง 800 วัตต์ และวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์ (0-200 องศาเซลเซียส) สารเหลวชนิดแอลกอฮอล์สีแดง จากนั้นเก็บรักษาตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส 1 คืน

2.3 การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำอ้อย ใช้หัววัดแบบประสิทธิภาพ (Performance probe kit) ด้วย open-ended coaxial dielectric probe kit (N1501A,



รูปที่ 3 อุปกรณ์เครื่องมือการวัดความเป็นกรด-ด่าง

Keysight Technology) เชื่อมต่อกับตัววิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ (E5071C, Keysight Technology) ตามรูปที่ 2 ผ่านการวิเคราะห์บนซอฟต์แวร์ Keysight materials measurement suite 2016 ก่อนการวัดทำการสอบเทียบแบบเปิดกับอากาศ แบบปิดด้วย Performance probe short และน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนต่างๆ ออกไปที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (DI water, Deionized water) ในช่วงย่านความถี่ 1 – 10 จิกกะเฮิร์ต น้ำอ้อยตัวอย่างถูกบรรจุในภาชนะพลาสติกปริมาณ 100 มิลลิลิตร ก่อนนำไปวัดถูกพักอุณหภูมิไว้ที่อุณหภูมิห้อง ตัวอย่างน้ำอ้อยถูกแบ่งเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มละ 3 ตัวอย่าง คือ กลุ่มที่ไม่ผ่านคลื่นความถี่สูง กลุ่มที่ผ่านคลื่น 1 นาที และกลุ่มที่ผ่านคลื่น 1 นาที 30 วินาที เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดเชื้อแบคทีเรียเกิดขึ้นข้ามตัวอย่างหรือมาจากปัจจัยภายนอกการวัดจะถูกวัดในห้องปิด และทุกครั้งหลังการวัด หัววัดจะถูกทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ ซึ่งหัววัดจะไม่ถูกถอดออกมาจากการติดตั้งที่ถูกสอบเทียบไว้แล้ว เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดเคลื่อนจากปัจจัยที่เปลี่ยนไป

2.4 การวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง

ความเป็นกรด-ด่างของตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่ม ถูกวัดด้วยเครื่องมือวัด pH conductivity meter: Mettler Toledo S47-K SevenMulti ตามรูปที่ 3 ความสามารถในการวัดของเครื่องมืออยู่ในช่วง -2.00 ถึง 20.00 pH ก่อนตัวอย่างถูกนำไปวัด เครื่องมือวัดทำการสอบเทียบด้วยสารละลาย



บัฟเฟอร์ (Buffer solution) pH 4.00 ± 0.02 (20°C) และ pH 7.00 ± 0.02 (20°C) ตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่ม กลุ่มละ 3 ตัวอย่างถูกนำไปวัดที่อุณหภูมิห้อง (25°C) ทุกครั้งก่อนและหลังทำการวัด หัววัดความเข้มข้นความเป็นกรด-ด่างจะถูกเช็ดทำความสะอาดด้วยผ้าแอลกอฮอล์และล้างด้วยน้ำกลั่น

2.5 การวัดความหวานหรือปริมาณน้ำตาลในของเหลว

เป็นการวัดปริมาณซูโครสในสารละลาย หรือวัดเปอร์เซ็นต์ของแข็งที่ละลายในน้ำ (Total Soluble Solid, TSS) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของของเหลว โดยการหักเหของแสงในหน่วยบริกซ์ (Brix) โดยให้ความหมายว่ามีซูโครสกี่กรัมในสารละลาย 100 กรัม ในการศึกษานี้ใช้ Hand Held Brix Refractometer (Atago MASTER-53M) สามารถวัดได้ในช่วง $0.0 - 33.0\%$ Brix ก่อนการวัดเครื่องมือทำการสอบเทียบด้วยน้ำกลั่นเพื่อปรับค่าให้ได้ 0.0% Brix ก่อนนำไปวัด ตัวอย่างจะถูกใช้เพียง 1 หยดต่อการวัด 1 ครั้ง ทั้ง 3 กลุ่ม กลุ่มละ 3 ตัวอย่าง ทุกครั้งก่อนและหลังวัดผล เครื่องมือวัดจะถูกเช็ดด้วยผ้าแอลกอฮอล์และล้างด้วยน้ำกลั่น หลังจากนั้นซับให้แห้งด้วยผ้าแห้งสะอาด

2.6 การตรวจเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม

การตรวจหาปริมาณเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มใช้วิธีมาตรฐานสำหรับการตรวจสอบน้ำและน้ำเสีย (Standard methods for the examination of water & wastewater, 23rd ed., 2017, part 9221 B.) มีขั้นตอนการตรวจอยู่ 3 ระยะ คือ การตรวจเบื้องต้น (Presumptive Phase) การตรวจยืนยัน (Confirmed Phase) และการตรวจขั้นสมบูรณ์ (Completed Phase) แต่จะใช้เพียง 2 ระยะแรกในการตรวจและนำไปวิเคราะห์เชื้อแบคทีเรียด้วยวิธีเอ็มพีเอ็น (MPN, Most Probable Number)

การตรวจเบื้องต้น เป็นการแยกแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มออกจากแบคทีเรียกลุ่มอื่น โดยการเตรียมอาหารเพาะเลี้ยงเชื้อ Lauryl tryptose broth ความเข้มข้น 2

เท่า ปริมาตร 10 มิลลิลิตร จำนวน 5 หลอด และความเข้มข้น 1 เท่า ปริมาตร 10 มิลลิลิตร จำนวน 10 หลอด จากนั้นนำตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องเดิมลงในหลอดอาหาร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร สำหรับหลอดอาหารความเข้มข้น 2 เท่า จำนวน 5 หลอด เดิมตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตร สำหรับหลอดอาหารความเข้มข้น 1 เท่า จำนวน 5 หลอด และตัวอย่างปริมาตร 0.1 มิลลิลิตรสำหรับหลอดอาหารความเข้มข้น 1 เท่า จำนวน 5 หลอด โดยทุกหลอดจะมีที่ดักก๊าซ (Durham tube) คร่าวอยู่ภายใน นำไปป้อนเพาะเชื้อที่ตู้บ่มเชื้ออุณหภูมิ 35 ± 0.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ± 2 ชั่วโมง หากมีเชื้อแบคทีเรียจะปรากฏแก๊สหรือลิเปลี่ยนเป็นสีเหลือง นั่นคือให้ผลเป็นบวก ถ้าผลปรากฏไม่แน่ชัดให้ทำการบ่มเพาะอีก 24 ชั่วโมง

การตรวจยืนยัน เตรียมอาหาร Brilliant Green Lactose Bile broth (BGLB) ปริมาตร 10 มิลลิลิตรต่อ 1 หลอด โดยจะใช้จำนวนเท่ากับจำนวนที่ให้ผลเป็นบวกจากการตรวจเบื้องต้น นำหลอดที่ให้ผลบวกเข้าหลอดเบาๆ หรือหมุนหลอดเพื่อให้เชื้อกระจายทั่วหลอดของการตรวจเบื้องต้น ใช้ลูปเขี่ยเชื้อ (Sterile loop) เล็มผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ถ่ายลงในอาหารการตรวจยืนยันและมีหลอดดักก๊าซคร่าวอยู่ภายใน นำไปป้อนเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 35 ± 0.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ± 3 ชั่วโมง หากปรากฏก๊าซในหลอดดักก๊าซจะเป็นผลยืนยันว่ามีเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มหรือให้ผลเป็นบวก ทำการบันทึกจำนวนหลอดที่ให้ผลเป็นบวก จากหลอดการทดสอบ 3 ชุด ชุดละ 5 หลอด (10, 1 และ 0.1 มิลลิลิตร) นำไปเปรียบเทียบกับตาราง MPN

2.7 การตรวจเชื้อแบคทีเรียที่คัลโคลิฟอร์ม

การตรวจเชื้อแบคทีเรียกลุ่มคัลโคลิฟอร์ม จะใช้วิธีการตรวจเบื้องต้นแบบเดียวกับการตรวจเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม ในขั้นตอนการตรวจยืนยัน จะใช้ตัวอย่างจากหลอดเฉพาะที่ให้ผลบวกในการตรวจเบื้องต้น ใช้ลูปเขี่ยเชื้อถ่ายไปยังอาหาร Escherichia coli (EC broth) ปริมาตร 10 มิลลิลิตรต่อหลอด โดยมีหลอดดักก๊าซคร่าวอยู่ภายใน นำไป



ตารางที่ 1 คุณค่าทางโภชนาการ อุณหภูมิและปริมาณเชื้อแบคทีเรียในตัวอย่าง

ระยะเวลาตัวอย่างผ่านคลื่นความถี่สูง	ความเป็นกรด-ด่าง	อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณน้ำตาลในของเหลว (°Brix)	ปริมาณเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม (MPN/100 ml)	ปริมาณเชื้อแบคทีเรียโคลิ (MPN/100 ml)
0 นาที	4.68 ± 0.02	25 ± 1	17.9 ± 0.3	≥ 1.6 × 10 ⁵	≥ 1.6 × 10 ⁵
1 นาที	5.13 ± 0.01	91 ± 2	18.7 ± 0.1	< 2	ไม่พบ
1 นาที 30 วินาที	5.13 ± 0.01	107 ± 2	19.8 ± 0.1	< 2	ไม่พบ

บ่มเพาะเชื้อ ที่อุณหภูมิ 44.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ± 2 ชั่วโมง หากมีก๊าซเกิดขึ้นในหลอดคอก์ก้าชนั้นแสดงว่ามีเชื้อแบคทีเรียกลุ่มฟิซิลโคลิฟอร์มหรือให้ผลเป็นบวก ถ้าผลที่เกิดขึ้นไม่แน่ชัด จะใช้เวลาบ่มเพาะเชื้อเพิ่มอีก 24 ชั่วโมง บันทึกผลจำนวนหลอดทดลองที่ให้ผลเป็นบวกของแต่ละชุดทั้งหมด 3 ชุด ชุดละ 5 หลอดการทดลอง ตามลำดับที่ได้เตรียมไว้ตั้งแต่การตรวจเบื้องต้น นำไปเปรียบเทียบกับตาราง MPN (10, 1 และ 0.1 มิลลิลิตร)

2.8 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดลองทั้งหมดตรวจสอบซ้ำ 3 ครั้ง แสดงเป็นค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตามกำหนดขั้นตอนแบบเชิงเส้นทั่วไป การเปรียบเทียบที่มีนัยสำคัญทางสถิติถูกกำหนดเมื่อ P = 0.05 โดย Microsoft Excel

3. ผลการทดลอง

3.1 ความเป็นกรด-ด่างของน้ำอ้อย

ผลการตรวจสอบคุณสมบัติความเป็นกรด-ด่าง ของตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 1 ตัวอย่างน้ำอ้อยคั้นสดทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านคลื่นความถี่สูงถูกเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาตรวจสอบถูกนำมาพักไว้ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) ตัวอย่างน้ำอ้อยไม่ผ่านคลื่นให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.68 ± 0.02 ตัวอย่างน้ำอ้อยที่ผ่านคลื่น 1 นาที ให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง 5.13 ± 0.01 และน้ำอ้อยที่ผ่านคลื่นความถี่สูง 1 นาที 30 วินาที ให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง 5.13 ± 0.01 ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำอ้อยคั้นสดเมื่อผ่านคลื่นความถี่สูงไม่เปลี่ยนแปลง

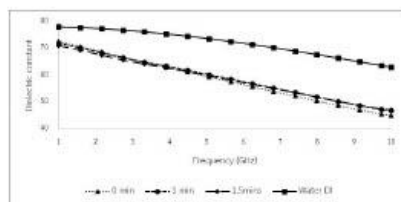
อย่างมีนัยสำคัญ (P < 0.05)

3.2 ปริมาณน้ำตาลในของเหลว

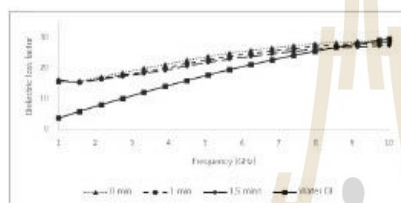
ผลการตรวจสอบปริมาณน้ำตาลหรือซูโครสในตัวอย่าง เพื่อตรวจสอบผลกระทบที่เกิดขึ้นจากคลื่นความถี่สูง โดยเปรียบเทียบผลปริมาณน้ำตาลในตัวอย่างที่ผ่านคลื่นและไม่ผ่านคลื่น ก่อนนำไปตรวจสอบวัดผล ตัวอย่างจะถูกพักอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส ในตัวอย่างน้ำอ้อยคั้นสดไม่ผ่านคลื่นความถี่สูง ปริมาตร 100 กรัม พบปริมาณน้ำตาล 17.9 ± 0.3 องศาบริกซ์ หรือมีซูโครส 17.9 ± 0.3 กรัม ตัวอย่างน้ำอ้อยคั้นสดผ่านคลื่นความถี่สูง 1 นาที ปริมาตร 100 กรัม พบปริมาณน้ำตาล 18.7 ± 0.1 องศาบริกซ์ หรือมีซูโครส 18.7 ± 0.1 กรัม และน้ำอ้อยคั้นสดผ่านคลื่นความถี่สูง 1 นาที 30 วินาที ปริมาตร 100 กรัม พบปริมาณน้ำตาล 19.8 ± 0.1 องศาบริกซ์ หรือซูโครส 19.8 ± 0.1 กรัม ดังแสดงตามตารางที่ 1 และไม่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำตาลในน้ำอ้อยคั้นสดเมื่อผ่านคลื่นความถี่สูง (P < 0.05)

3.3 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำอ้อย

การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกวัดทั้งค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) ตัวอย่างน้ำอ้อยคั้นสดที่ไม่ผ่านและผ่านคลื่นความถี่สูงเป็นเวลา 1 นาที และ 1 นาที 30 วินาที และน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนถูกตรวจสอบคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ



รูปที่ 4 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของน้ำอ้อยคั้นสดที่ผ่านและไม่ผ่านคลื่นความถี่สูง และน้ำผ่านการกำจัดไอออน



รูปที่ 5 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำอ้อยคั้นสดที่ผ่านและไม่ผ่านคลื่นความถี่สูง และน้ำผ่านการกำจัดไอออน

น้ำอ้อยคั้นสดก่อนและหลังผ่านคลื่นความถี่สูง ผลแสดงตามรูปที่ 4 เป็นผลของค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ของตัวอย่างน้ำอ้อยคั้นสดไม่ผ่านคลื่นความถี่สูง ผ่านคลื่น 1 นาที่ ผ่านคลื่น 1 นาที่ 30 วินาที และน้ำผ่านการกำจัดไอออนต่างๆ ที่ความถี่ 2.45 จิกกะเฮิร์ต ให้ค่า 67.75 67.6 66.8 และ 77.1 ตามลำดับ ในรูปที่ 5 แสดงผลของค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของตัวอย่าง ให้ค่า 17.9 17.2 16.9 และ 9.9 ตามลำดับ

3.4 เชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม

ผลการทดสอบหาปริมาณเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม ด้วยวิธีมาตรฐานสำหรับการตรวจสอบน้ำและน้ำเสีย ของตัวอย่างแสดงในตารางที่ 1 ในตัวอย่างน้ำอ้อยคั้นสดถูกเค็ม น้ำในโหลสุกัณฑ์จากห้องน้ำสาธารณะ ในตัวอย่างน้ำอ้อยคั้นสดที่ไม่ผ่านคลื่นความถี่สูงตรวจพบการเกิดปฏิกิริยาเป็นฟองก๊าซหรือให้ผลยืนยันได้ว่ามีเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิ

ฟอร์มทั้งหมด 15 หลอดการทดลอง ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับตารางเอ็มพีเอ็น (10, 1 และ 0.1 มิลลิตร) ให้ผลมีปริมาณเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มมากกว่าหรือเท่ากับ 1600 MPN/100ml ส่วนตัวอย่างน้ำอ้อยที่ผ่านคลื่นความถี่สูงที่เวลา 1 นาที่ และ 1 นาที่ 30 วินาที ไม่เกิดปฏิกิริยาตั้งแต่ระยะการตรวจเบื่องต้นทั้งหมด 15 หลอดการทดลอง จึงไม่มีความจำเป็นในการตรวจระยะยืนยันผล เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับตารางเอ็มพีเอ็น พบว่ามีปริมาณเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มน้อยกว่า 2 MPN/100ml

3.5 เชื้อแบคทีเรียกลุ่มฟิซิลโคลิฟอร์ม

ผลการทดสอบหาปริมาณเชื้อแบคทีเรียกลุ่มฟิซิลโคลิฟอร์มด้วยวิธีมาตรฐานสำหรับการตรวจสอบน้ำและน้ำเสียของตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าตัวอย่างน้ำอ้อยคั้นสดที่ไม่ผ่านคลื่นความถี่สูง ทำการทดสอบถึงระยะการตรวจยืนยันและปรากฏปฏิกิริยาก๊าซเกิดขึ้นทั้ง 15 หลอดการทดลอง เมื่อนำมาเทียบกับตารางเอ็มพีเอ็นพบว่าปริมาณเชื้อแบคทีเรียกลุ่มฟิซิลโคลิฟอร์มมากกว่าหรือเท่ากับ 1600 MPN/100ml ในส่วนของตัวอย่างน้ำอ้อยคั้นสดผ่านคลื่นความถี่สูงด้วยเวลา 1 นาที่ และ 1 นาที่ 30 วินาที ไม่ปรากฏปฏิกิริยาเกิดเป็นฟองก๊าซหรือเปลี่ยนเป็นสีเหลืองตั้งแต่ระยะการตรวจเบื่องต้น จึงสามารถกล่าวได้ว่าไม่พบเชื้อแบคทีเรียกลุ่มฟิซิลโคลิฟอร์ม

4. อภิปรายและสรุปผล

สำหรับงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาผลของการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและฟิซิลโคลิฟอร์มในน้ำอ้อยคั้นสดด้วยคลื่นความถี่สูงโดยหลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก

ผลการทดสอบคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวอย่างน้ำอ้อยคั้นสดเมื่อผ่านคลื่นความถี่สูงด้วยเวลามากขึ้นค่าคงตัวและค่าการสูญเสียที่ความถี่ 2.45 จิกกะเฮิร์ต ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ คุณสมบัติความเป็นกรด-ด่างเมื่อผ่านคลื่นความถี่สูงแม้ใช้เวลา 1 นาที่หรือ 1 นาที่ 30 วินาที ไม่พบความแตกต่างและไม่เปลี่ยนแปลงไปจาก



ตัวอย่างที่ไม่ผ่านคลื่นความถี่สูงอย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนของปริมาณน้ำตาลในตัวอย่างเมื่อผ่านคลื่นความถี่สูงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

ในการตรวจสอบเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและฟิคัลโคลิฟอร์มในตัวอย่าง หลังจากผสมน้ำในโกลุขภัณฑ์จากห้องน้ำสาธารณะและผ่านคลื่นความถี่สูงที่เวลาต่างๆ ให้ผลว่าตัวอย่างไม่พบเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและฟิคัลโคลิฟอร์มเมื่อตัวอย่างผ่านคลื่นเป็นเวลา 1 นาที และ 1 นาที 30 วินาที ให้อุณหภูมิ 91 และ 107 องศาเซลเซียสตามลำดับ แต่จะตรวจพบเชื้อแบคทีเรียปริมาณมากเมื่อตัวอย่างไม่ผ่านคลื่น มีงานวิจัยในลักษณะคล้ายกัน เมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นสามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้ [17]

น้ำอ้อยคั้นสดสามารถถูกกำจัดเชื้อแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและฟิคัลโคลิฟอร์มที่ปะปนอยู่ด้วยคลื่นความถี่สูง 800 วัตต์ต่อ 100 มิลลิลิตร ซึ่งไม่ส่งผลให้คุณสมบัติไดโอดีลิกตริก คุณสมบัติความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณน้ำตาลในตัวอย่างเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ จากการสังเกตพบว่าการใช้เวลาที่ 1 นาที 30 วินาที น้ำอ้อยคั้นสดเริ่มเดือดและกระเด็นออกจากภาชนะทดลอง การใช้เวลา 1 นาที จึงเป็นเวลาที่เหมาะสม

5. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Arif, A. Batool, W. Nazir, R. S. Khan, and N. Khalid, "Physicochemical characteristics nutritional properties and health benefits of sugarcane juice," in *Non-alcoholic Beverages: Volume 6. The Science of Beverages*, 2019, pp. 227-257.
- [2] P. M. Sudsaichon Homthong, "Detection of coliform bacteria and Escherichia coli in sugar

cane juice at Amphur Muang Chonburi, Chonburi province," *The Golden Teak : Science and Technology Journal*, vol. 2, p. 8, 2019.

- [3] C. Ambrosi et al., "Colonic adenoma-associated Escherichia coli express specific phenotypes," *Microbes and Infection*, Article vol. 21, no. 7, pp. 305-312, 2019, doi: 10.1016/j.micinf.2019.02.001.
- [4] R. Nag et al., "Quantitative microbial human exposure model for faecal indicator bacteria and risk assessment of pathogenic Escherichia coli in surface runoff following application of dairy cattle slurry and co-digestate to grassland," *Journal of Environmental Management*, Article vol. 299, 2021, Art no. 113627, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113627.
- [5] J. Vila et al., "Escherichia coli: An old friend with new tidings," *FEMS Microbiology Reviews*, Review vol. 40, no. 4, pp. 437-463, 2016, doi: 10.1093/femsre/fuw005.
- [6] P. R. Meena, P. Yadav, H. Hemlata, K. K. Tejavath, and A. P. Singh, "Poultry-origin extraintestinal Escherichia coli strains carrying the traits associated with urinary tract infection, sepsis, meningitis and avian colibacillosis in India," *Journal of Applied Microbiology*, Article vol. 130, no. 6, pp. 2087-2101, 2021, doi: 10.1111/jam.14905.
- [7] N. Zlatkov and B. E. Uhlin, "Absence of Global Stress Regulation in Escherichia coli Promotes Pathoadaptation and Novel c-di-GMP-dependent Metabolic Capability," *Scientific Reports*, Article vol. 9, no. 1, 2019, Art no. 2600, doi: 10.1038/s41598-019-39580-w.



- [8] R. Zhang *et al.*, "Sterilization of Escherichia coli by Photothermal Synergy of WO₃-x/C Nanosheet under Infrared Light Irradiation," *Environmental Science & Technology*, vol. 54, no. 6, pp. 3691-3701, 2020/03/17 2020, doi: 10.1021/acs.est.9b07891.
- [9] Z. O. Nazar and N. O. A. Al-Musawi, "Performance application of ultraviolet disinfection technique for raw water," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1895, no. 1, p. 012036, 2021/05/01 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1895/1/012036.
- [10] A. Y. Panich Intra, Visut Asanavijit, Pichayakorn Manopian, Chaiarnan Pengmanee, Niorn Somsri, "Inactivation of E. coli in Milk Tea Undergoing Pulsed Electric Field Pasteurization," *The Journal of KMUTNB*, vol. 25, 2015, doi: 10.14416/j.kmutnb.2015.05.005.
- [11] J. D. Dubreuil, "Fruit extracts to control pathogenic Escherichia coli: A sweet solution," *Heliyon*, vol. 6, no. 2, p. e03410, 2020/02/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03410>.
- [12] S. Adulvitayakorn, S. H. Azhari, and H. Hasan, "The effects of conventional thermal, microwave heating, and thermosonication treatments on the quality of sugarcane juice," *Journal of Food Processing and Preservation*, Article vol. 44, no. 2, 2020, Art no. e14322, doi: 10.1111/jfpp.14322.
- [13] S. Zia, M. R. Khan, X. A. Zeng, Sehrish, M. A. Shabbir, and R. M. Aadil, "Combined effect of microwave and ultrasonication treatments on the quality and stability of sugarcane juice during cold storage," *International Journal of Food Science and Technology*, Article vol. 54, no. 8, pp. 2563-2569, 2019, doi: 10.1111/ijfs.14167.
- [14] O. P. Chauhan, N. Ravi, N. Roopa, S. Kumar, and P. S. Raju, "High pressure, temperature and time-dependent effects on enzymatic and microbial properties of fresh sugarcane juice," *Journal of Food Science and Technology*, Article vol. 54, no. 12, pp. 4135-4138, 2017, doi: 10.1007/s13197-017-2872-5.
- [15] B. Brochier, G. D. Mercali, and L. D. F. Marczak, "Effect of moderate electric field on peroxidase activity, phenolic compounds and color during ohmic heating of sugarcane juice," *Journal of Food Processing and Preservation*, Article vol. 43, no. 12, 2019, Art no. e14254, doi: 10.1111/jfpp.14254.
- [16] Y. A. Gezahegn *et al.*, "Dielectric properties of water relevant to microwave assisted thermal pasteurization and sterilization of packaged foods," *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 74, p. 102837, 2021/12/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102837>.
- [17] S. Peng, J. Hummerjohann, R. Stephan, and P. Hammer, "Short communication: Heat resistance of Escherichia coli strains in raw milk at different subpasteurization conditions," *Journal of Dairy Science*, vol. 96, no. 6, pp. 3543-3546, 2013/06/01/ 2013, doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6174>.

ประวัติผู้เขียน

นายอดิศักดิ์ รัตนน้ำล้อม เกิดเมื่อวันที่ 1 กรกฎาคม พ.ศ. 2536 ที่อำเภอบ้านฝาง จังหวัดอุดรธานี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนพัฒนานิคม อำเภอพัฒนานิคม จังหวัดลพบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2558 ด้วยเกียรตินิยมอันดับ 2 ต่อมาในปี พ.ศ. 2559 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

