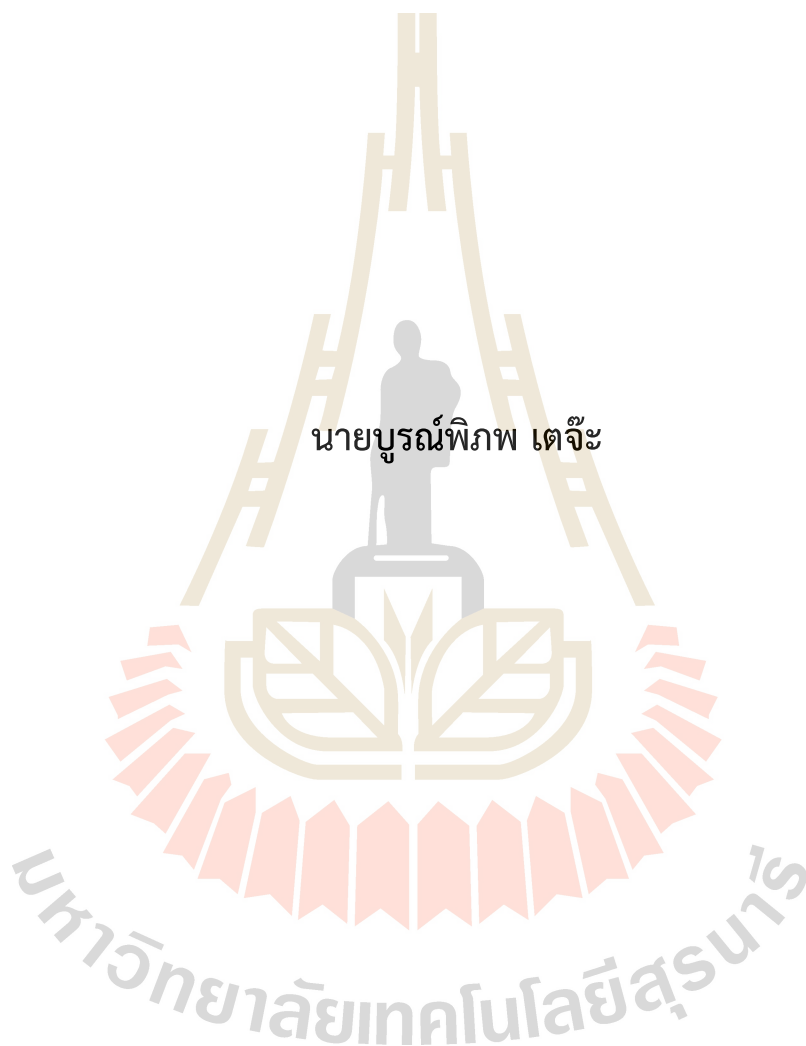


การออกแบบสร้างนวัตกรรมระบบผลิตข้าวหนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง



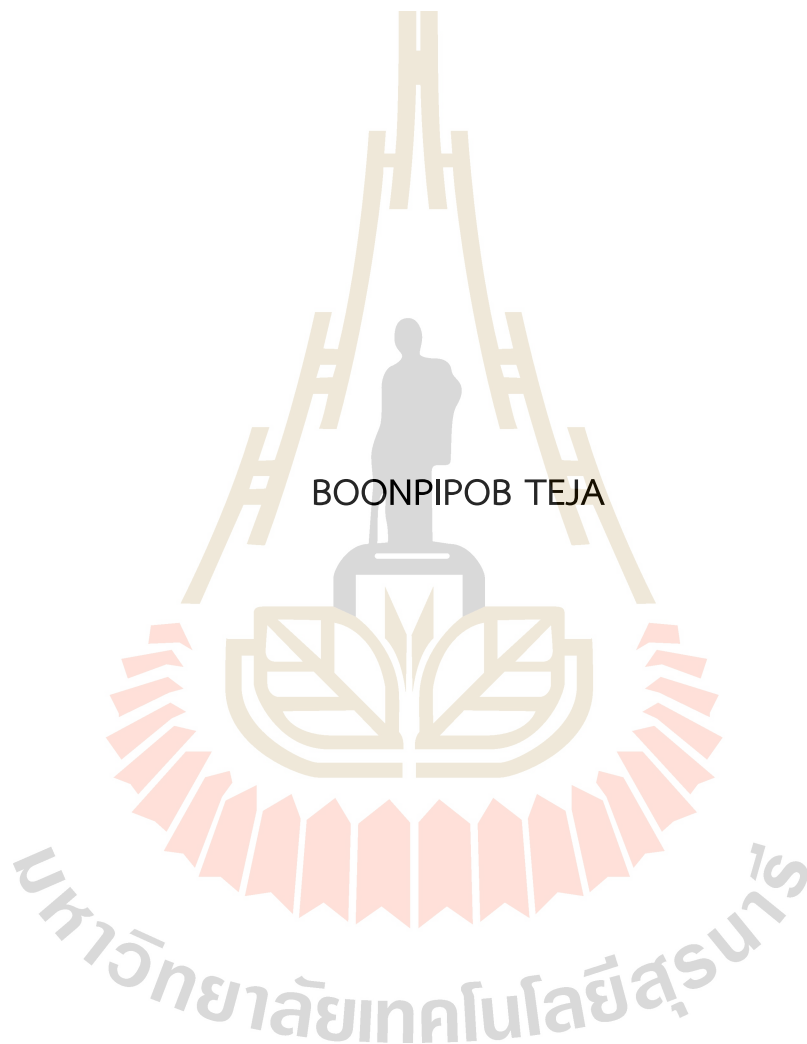
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2567

INNOVATIVE DESIGN OF PARBOILED RICE PRODUCTION SYSTEM
WITH HIGH FREQUENCY ELECTROMAGNETIC WAVES



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 2024

การออกแบบสร้างนวัตกรรมระบบผลิตข้าวหนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(อ. ดร.อภิชาติ อีทรพานิชย์)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.ชนเสฏฐ์ ทศศิริพัฒน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษา)



(รศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภะ)

กรรมการ



(รศ.ดร.ยุพาพร รักสกุลวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ.ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

บูรณพิภพ เติ้จะ:การออกแบบสร้างนวัตกรรมระบบผลิตข้าวหนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง
(INNOVATIVE DESIGN OF PARBOILED RICE PRODUCTION SYSTEM WITH HIGH
FREQUENCY ELECTROMAGNETIC WAVES)

อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนเสฏฐ์ ทศศิกรพัฒน์, 100 หน้า

คำสำคัญ: ข้าวหนึ่ง, การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ, อุโมงค์ไมโครเวฟ, ลดน้ำเสีย

ข้าวหนึ่ง (Parboiled Rice) เป็นสินค้าออกของไทยมานานแล้ว โดยเฉลี่ยในแต่ละปีไทยส่งข้าวหนึ่งออกประมาณ 2.7 ล้านตัน มูลค่าประมาณ 35,000 ล้านบาท หรือคิดเป็นประมาณร้อยละ 25 ของมูลค่าการส่งออกข้าวทั้งหมดของไทย การคุณภาพข้าวหนึ่งของไทยยังมีโอกาสพัฒนาได้อีกมาก เพราะต้นทุนข้าวเปลือกไทยราคาถูกกว่าสหรัฐฯและสหภาพยุโรปซึ่งเป็นทั้งคู่ค้าและคู่แข่งที่สำคัญ ดังนั้นข้าวหนึ่งจึงนับเป็นผลิตภัณฑ์ที่ควรได้รับการส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพซึ่งการแข่งขันดังกล่าวทำให้ประเทศไทยต้องปรับปรุงและพัฒนาทั้งคุณภาพและกระบวนการผลิตรวมถึงการแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่ข้าว การผลิตข้าวหนึ่งเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพข้าวเปลือก โดยเฉพาะข้าวที่มีคุณภาพการขัดสีต่ำ เพื่อลดปริมาณข้าวหัก ระหว่างการสี เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการขณะแช่ข้าวเปลือกในน้ำเพื่อให้ธาตุอาหารและน้ำซึมเข้าสู่เมล็ด ก่อนจะนำมานึ่ง จากนั้น จึงทำข้าวเปลือกหนึ่งให้แห้ง แล้วนำไปผ่านกระบวนการขัดสี ทั้งนี้การนี้จะทำให้ข้าวที่ได้มีสี เหลืองสวยขึ้น สำหรับการผลิตข้าวหนึ่งที่ นิยมใช้ในปัจจุบันยังเป็นวิธีที่มีหลายขั้นตอนและใช้เวลานานในการแช่ข้าวเปลือกเนื่องจากต้องเพิ่มอุณหภูมิของน้ำให้ได้ตามต้องการ ก่อนนำข้าวเปลือกลงแช่อีกทั้งยังใช้น้ำปริมาณมากอย่างไรก็ตามได้มีการพัฒนา กระบวนการผลิตข้าวหนึ่งโดยปรับสภาวะต่างๆ เช่น การปรับปรุง กระบวนการแช่ด้วยการพ่นไอน้ำ การนึ่งโดยใช้น้ำร้อนและตากแห้งด้วยลมร้อน รวมทั้งคุณสมบัติ ทางกายภาพของข้าวสารหนึ่งยังไม่ดีเท่าที่ควรข้าวหนึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสองสีคือข้าวหนึ่งสีเข้มและข้าวหนึ่งอ่อนเนื่องจากสารอาหารจากชั้นเปลือกจะซึมเข้าสู่เนื้อในระหว่างขั้นตอนการแช่และการนึ่งข้าวจะมีสีที่แตกต่างกัน จากกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งแบบดั้งเดิมประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือการแช่,การนึ่งและการอบแห้งโดยมีน้ำทิ้งหรือน้ำเสียจากกระบวนการแช่และกระบวนการนึ่งที่ต้องเกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำ ของเสียทำให้สิ้นเปลืองน้ำ,เวลาและต้นทุนที่สูงขึ้น เพื่อลดเวลาและน้ำเสียที่เกิดจากข้าวหนึ่ง จึงเปลี่ยนขั้นตอนการแช่ข้าวและนึ่งข้าวเป็นขั้นตอนเดียวโดยพิจารณารูปแบบการทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและต่อด้วยการให้ความร้อนด้วยโดยการเหนี่ยวนำแม่เหล็กผ่าน สำหรับการศึกษาถึงการลดน้ำเสียที่เกิดจากระบบหนึ่งข้าวที่และตรวจสอบคุณภาพของข้าวหนึ่ง

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ปีการศึกษา 2567

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

BOONPIPOB TEJA: INNOVATIVE DESIGN OF PARBOILED RICE PRODUCTION SYSTEM
WITH HIGH FREQUENCY ELECTROMAGNETIC WAVES.

THESIS ADVISOR: ASST. PROF. DR. THANASET THOSDEEKORAPHAT, Ph.D., 100 PP.

Keywords: Parboiled Rice, Microwave Heating, Microwave Tunnel, Wastewater.

Parboiled Rice has been a key export product of Thailand for a long time. On average, Thailand exports approximately 2.7 million tons of parboiled rice annually, with a value of about 35 billion baht, accounting for around 25% of the country's rice exports. The quality of Thai parboiled rice still has room for improvement, as the cost of Thai paddy rice is lower than that of key competitors like the United States and the European Union, both trading partners and major rivals. Therefore, parboiled rice is a product that should be promoted and developed further. The competitive landscape has driven Thailand to improve the quality and production processes of parboiled rice, as well as its value-added processing. Parboiled rice production involves enhancing the quality of paddy rice, particularly low-polished rice, to reduce broken grains during milling and increase nutritional value. This process begins with soaking the paddy in water, allowing nutrients and water to penetrate the grains, followed by steaming and drying before the rice undergoes milling. Steaming gives the rice an appealing yellowish hue. Currently, parboiled rice production involves multiple steps and lengthy soaking times, as the water must be heated to the desired temperature before the paddy is soaked. This process also consumes a significant amount of water. However, advancements have been made in the production process, including the use of steam spraying during soaking, hot water steam, and hot air drying. Despite these improvements, the physical properties of parboiled rice grains still have room for enhancement. Parboiled rice can be categorized into two shades: dark and light. The difference in color arises from the nutrient transfer from the rice bran layer to the inner grain during the soaking and steaming processes. The traditional parboiled rice production process comprises three main steps: soaking, steaming, and drying. However, this method generates wastewater during the soaking and steaming stages, which requires treatment and leads to increased water consumption, time, and production costs. To address these challenges, steps have been taken to merge the soaking and steaming stages into a single process. Innovative

approaches, such as heating with microwave energy followed by magnetic induction heating, have been tested. These studies aim to reduce wastewater from the parboiled rice production system while maintaining the quality of the final product.



School of Electronic Engineering

Academic Year 2024

Student's Signature สุรณัฐ

Advisor's Signature T. Thanasat

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนเสฏฐ์ ทศศิกรพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภา อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีกรุณาให้การแนะนำ ชี้แนะ และคำปรึกษาการทำวิจัย

อาจารย์ ดร. สำราญ สันทาลุนัย อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้การแนะนำ ชี้แนะ ให้คำปรึกษาการทำวิจัย และให้คำปรึกษาทางวิชาการมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ พี่ ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่คอยให้ความช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนใน การทำวิจัย รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้ความรักความอบอุ่น และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด อีกทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อแท้และทุกข์ใจ ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดามารดา รวมถึงญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่ยรักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยจนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

บุรณพิภาพ เตจ๊ะ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ(ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ

บทที่

1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	2
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย	2
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย	3
1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน.....	3
1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย	3
1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย.....	3
1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	4
1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.8 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์	4
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ลมร้อนจากการให้ความร้อนแบบการเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็ก	7

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง.....	9
2.4	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตข้าวหนึ่ง.....	12
3	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	15
3.1	บทนำ.....	15
3.2	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง.....	15
3.2.1	ทฤษฎีของคลื่นไมโครเวฟ.....	16
3.2.2	คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟ.....	18
3.2.3	ท่อนำคลื่น (Waveguide).....	19
3.2.4	ผลกระทบที่ผิว.....	19
3.2.5	โหมดของการแพร่กระจายคลื่น.....	20
3.3	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรเหนี่ยวนำแม่เหล็ก.....	21
3.3.1	หลักการสร้างวงจรเหนี่ยวนำความร้อน.....	22
3.3.2	โหลดเรโซแนนซ์ (Resonant Load).....	25
3.4	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนความร้อน.....	26
3.5	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในส่วนองวิธีการผลิตข้าวหนึ่งที่มีอยู่ในปัจจุบัน.....	27
3.5.1	กรรมวิธีการผลิตข้าวหนึ่ง.....	28
3.5.2	คุณภาพข้าวหนึ่ง.....	28
3.5.3	ปัจจัยที่ต้องควบคุมในการทำข้าวหนึ่ง.....	28
3.6	สรุป.....	29
4	การออกแบบและสร้างเครื่องผลิตข้าวหนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง.....	30
4.1	บทนำ.....	30
4.2	ลักษณะทั่วไปของการออกแบบเครื่องผลิตข้าวหนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง.....	30
4.3	การวิเคราะห์อุณหภูมิกับความชื้นและพลังงานความร้อนของข้าว.....	32
4.4	การออกแบบระบบการใช้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	36
4.4.1	ท่อนำคลื่น.....	36
4.4.2	การจำลองผลการแพร่กระจายคลื่นของอุโมงค์ท่อนำคลื่นและความเข้มสนามไฟฟ้าที่โหลดไดโอดอิเล็กทรอนิกส์.....	41

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.3	การออกแบบและสร้างเครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟ	44
4.5	การออกแบบระบบการใช้ลมร้อนจากแหล่งการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก	49
4.5.1	การออกแบบวงจรเหนี่ยวนำความร้อน	50
4.5.2	การออกแบบชุดโหลดความร้อน	52
4.5.3	การออกแบบอุโมงค์อบลมร้อนด้วยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก	55
4.6	สรุป.....	56
5	การทดสอบและผลการทดสอบ.....	57
5.1	บทนำ.....	57
5.2	วิธีการทดสอบการผลิตข้าวนี้้ง	58
5.2.1	วิธีการทดสอบการนี้้งข้าวจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟ	58
5.2.2	วิธีการทดสอบการลดความชื้นด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟ	60
5.2.3	วิธีการทดสอบการลดความชื้นจากการให้ความร้อนด้วยลมร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก	62
5.2.4	วิธีการทดสอบและเก็บผลการทดสอบ	64
5.3	ผลการทดสอบนี้้งข้าวนี้้ง.....	66
5.4	ผลการทดสอบการให้ความร้อนแบบไฮบริด	72
5.4.1	การทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง.....	72
5.4.2	การทดสอบการให้ความร้อนด้วยลมร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก	75
5.4.3	การให้ความร้อนแบบไฮบริด	79
5.5	สรุป.....	84
6	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	85
6.1	สรุปเนื้อหาของโครงการวิจัย	85
6.2	ปัญหาและข้อเสนอแนะ	86

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.3 ประโยชน์ที่ได้รับและการนำไปใช้งาน.....	86
รายการอ้างอิง	87
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.ผลการทดสอบสีของข้าวหนึ่งจากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.....	92
ภาคผนวก ข.บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	94
ประวัติผู้เขียน	100



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 การเปรียบเทียบปริมาณข้าวที่ได้กับกำลังงานที่ต้องการใช้ในช่วงแรก.....	34
4.2 การเปรียบเทียบปริมาณข้าวที่ได้กับกำลังงานที่ต้องการใช้	35
5.1 ทดลองเงื่อนไขเวลาต่างๆและอุณหภูมิ 70 ในการนึ่งข้าวหนึ่งด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (ไมโครเวฟ).....	66
5.2 ทดลองเงื่อนไขเวลาต่างๆและอุณหภูมิ 80 ในการนึ่งข้าวหนึ่งด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (ไมโครเวฟ).....	67
5.3 ทดลองเงื่อนไขเวลาต่างๆและอุณหภูมิ 90 ในการนึ่งข้าวหนึ่งด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (ไมโครเวฟ).....	68
5.4 ทดลองเงื่อนไขเวลาต่างๆและอุณหภูมิ 90 ในการนึ่งข้าวหนึ่งด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (ไมโครเวฟ).....	69
5.5 การทดลองเงื่อนไขความเร็วลมของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก	75
5.6 ทดลองเงื่อนไขอุณหภูมิลมของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก	76
5.7 สรุปผลการเปรียบเทียบคุณภาพข้าวก่อนและหลังการทดสอบ	81

สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

2.1 อุปกรณ์และโครงสร้างที่ใช้ทดสอบ.....	8
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) และเวลาในการทำให้แห้ง (DT, นาที) ของเมล็ด พริกไทยตากแห้งที่ความเร็วลมแบบต่างๆ ด้วยเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด แบบ (FBD) กับ (S-FBD).....	8
2.3 อาร์เรย์แพทช์โพลาริสแบบวงกลมในโรตารีโพรงแบบหลายโหมด	10
2.4 การตั้งค่าการวัดด้วยหัววัดแบบโคแอกเซียลปลายเปิด	10
2.5 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นกับอุณหภูมิเทียบกับเวลาที่ใช้ในการทดสอบ).....	11
2.6 แผนผังของเครื่องอบข้าวนี้้ง MWFB).....	12
2.7 สีของข้าวเปลือกแช่น้ำที่ผ่านการอบแห้งด้วย FB และ MWFB ที่อุณหภูมิอากาศในการอบแห้ง 111, 149 และ 169 °C โดยใช้กระบวนการอบให้แห้ง (ความชื้นขั้นสุดท้ายอยู่ที่ 20.2–23.3% d.b.)	13
3.1 แบบจำลองโมเลกุลของน้ำ	15
3.2 โมเลกุลของน้ำที่เปลี่ยนทิศสลับไปมาอย่างรวดเร็ว	15
3.3 การสะท้อนของคลื่น	18
3.4 หลักการเกิดการเหนี่ยวนำความร้อน	21
3.5 วงจรเหนี่ยวนำความร้อน	21
3.6 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเหนี่ยวนำความร้อน	22
3.7 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์	22
3.8 คลื่นแรงดันและกระแสไหลของวงจรอินเวอร์เตอร์	23
3.9 ระบบที่มีการไหลแบบกระแสเดียว (ก) ระบบที่มีการไหลแบบหลายกระแส (ข)	26
4.1 แสดงการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงและการให้ความร้อนด้วยการ เหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก	31
4.2 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบผลิตข้าวนี้้งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ท่อนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง หรือ Waveguide	39
4.4 การ simulation ตัว Waveguide	41
4.5 ขนาดของอุโมงค์ท่อนำคลื่น	41
4.6 แสดงระยะของพอร์ต	42
4.7 ระยะห่างของพอร์ตแต่ละชุดที่ระยะห่าง $\frac{\lambda}{2}$ ตามแกน Y	42
4.8 ระยะห่างของพอร์ตแต่ละชุดที่ระยะห่าง λ ตามแกน Y	42
4.9 ระยะห่างของพอร์ตแต่ละชุดที่ระยะห่าง $\frac{3\lambda}{2}$ ตามแกน Y	43
4.10 ระยะห่างของพอร์ตแต่ละชุดที่ระยะห่าง 2λ ตามแกน Y	43
4.11 ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่โหนดไดโอดเลกทริก	44
4.12 แผนภาพการทำงานของระบบนี้และลดความชื้นข้างหนึ่งการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง	44
4.13 โครงสร้างและระบบสายพานลำเลียงของอุโมงค์ข้างหนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง	45
4.14 โครงสร้างและระบบสายพานลำเลียงของอุโมงค์ลดความชื้นด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่	45
4.15 ชุดควบคุมการทำงานของลดความชื้นด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (ไมโครเวฟ)	45
4.16 ระยะการวางหัวแมกนีตรอนติดตั้งบนตู้ลดความชื้นด้วยคลื่นไมโครเวฟพร้อมระบบระบายความร้อน	46
4.17 ภาชนะถ่ายเทกำลังงานให้หัวแมกนีตรอนทำงานพร้อมระบบระบายความร้อน	47
4.18 มอเตอร์ขนาดกำลังงาน 200 W	47
4.19 กล่องปรับรอบมอเตอร์	48
4.20 ระบบสายพานลำเลียงที่ติดตั้งบนเครื่องข้างหนึ่งและลดความชื้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ	48
4.21 ระบบควบคุมการทำงานของหัวแมกนีตรอน (ตัวปล่อยคลื่น)	49
4.22 เครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง(ไมโครเวฟ)	49
4.23 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบการใช้ลมร้อนจากแหล่งการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 ชุดวงจรเหนี่ยวนำความร้อนที่ของเครื่องต้นแบบ	51
4.25 แสดงระบบของวงจรกำเนิดความถี่ในส่วนต่าง ๆ.....	51
4.26 เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำภาคแหล่งจ่ายกำลังงานพร้อมชุดควบคุม	52
4.27 ส่วนประกอบของชุดโหลดความร้อน.....	52
4.28 การทดสอบวัดอิมพีแดนซ์ของท่อเหล็กแบบไม่มีกรอบอลูมิเนียม	53
4.29 การทดสอบวัดอิมพีแดนซ์ของท่อเหล็กแบบมีกรอบอลูมิเนียม.....	54
4.30 การทดสอบวัดอิมพีแดนซ์ของท่อเหล็กแบบมีกรอบอลูมิเนียม.....	54
4.31 ผลการจำลองทิศทางลมภายในตู้.....	55
4.32 เครื่องการใช้ลมร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (A)ระบบสายพานลำเลียง (B)ชุดโหลดการให้ความร้อน (C)ตู้อบลดความชื้นข้าว.....	55
5.1 เครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ไมโครเวฟ (A) ชุดควบคุมการทำงาน (B)ทางเข้าของข้าว (C) อุโมงค์ท่อนำคลื่น	59
5.2 ทางเข้าของข้าวที่จะทำการทดสอบ.....	59
5.3 ทางออกของข้าวที่จะทำการทดสอบ	60
5.4 เครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง(ไมโครเวฟ) (A) ชุดควบคุมการทำงาน (B) ระบบสายพานลำเลียง (C) จุดปล่อยคลื่น.....	61
5.5 ทางเข้าของข้าวที่จะทำการทดสอบ.....	61
5.6 ทางออกของข้าวที่จะทำการทดสอบ	62
5.7 เครื่องการใช้ลมร้อนจากการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก(A) ชุดกำเนิดลมร้อน(B) ตู้อบลดความชื้นข้าว (C) ทางลำเลียงข้าวขาออก	63
5.8 ภายในตู้ลดความชื้นด้วยลมร้อน	61
5.9 ข้าวเปลือกคัดพิเศษที่บรรจุในกล่องพลาสติกขนาด 2 กิโลกรัม.....	64
5.10 ทำการวัดค่าความชื้นข้าวหลังการทดสอบ.....	64
5.11 ทำการวัดค่าอุณหภูมิข้าวหลังการทดสอบ	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12	ส่องกล้องตรวจสอบคุณภาพข้าวก่อนและหลังการทดสอบ 65
5.13	เปรียบเทียบการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส กับข้าวที่มีค่าความชื้นต่าง ๆ โดยให้ความร้อนกับข้าวเป็นระยะเวลา 3 นาที 71
5.14	เปรียบเทียบการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส กับข้าวที่มีค่าความชื้นต่าง ๆ โดยให้ความร้อนกับข้าวเป็นระยะเวลา 5 นาที 72
5.15	เปรียบเทียบการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส กับข้าวที่มีค่าความชื้นต่าง ๆ โดยให้ความร้อนกับข้าวเป็นระยะเวลา 7 นาที 72
5.16	เปรียบเทียบความเร็วลมของการวางโหลดที่ใช้ในการทดสอบกับความชื้นของข้าวด้วยการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กความถี่สูง 74
5.17	เปรียบเทียบการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส กับข้าวที่มีค่าความชื้นต่าง ๆ โดยให้ความร้อนกับข้าวเป็นระยะเวลา 7 นาที 74
5.18	การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่สูงย่านไมโครเวฟก่อนและตามด้วยการใช้ลมร้อนจากแหล่งความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กความถี่สูง 78
5.19	การให้ความร้อนด้วยการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กความถี่สูงก่อนและตามด้วยการให้ความร้อนจากคลื่นความถี่สูงย่านไมโครเวฟ 79
5.20	เปรียบเทียบการอบลดความชื้นข้าวเปลือกแบบไฮบริดจากทั้ง 2 รูปแบบ คือ 1) ใช้การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่สูงย่านไมโครเวฟก่อนและตามด้วยลมร้อน 2) การใช้ลมร้อนก่อนแล้วตามด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่สูงย่านไมโครเวฟ 80
5.21	การเปรียบเทียบคุณภาพข้าวก่อนและหลังการทดสอบ 80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวหนึ่ง (parboiled rice) เป็นกรรมวิธีการเพิ่มมูลค่าให้กับข้าวเปลือก เพื่อเป็นสินค้าไว้สำหรับส่งออกและมีแนวโน้มที่น่าจับตามอง โดยเฉพาะข้าวหนึ่งคุณภาพดี ถึงแม้จะไม่มี การบริโภคข้าวหนึ่งภายในประเทศ แต่ข้าวหนึ่งก็เป็นสินค้าออกของไทยมานานแล้ว โดยเฉลี่ยในแต่ละปีไทยส่งออกข้าวหนึ่งออกประมาณ 2.7 ล้านตัน มูลค่าประมาณ 35,000 ล้านบาท หรือประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ของมูลค่าส่งออกข้าวทั้งหมดของไทย ข้าวหนึ่งคุณภาพดีของไทยยังสามารถพัฒนาได้อีกมาก เพราะต้นทุนข้าวเปลือกไทยราคาถูกกว่าสหรัฐอเมริกาและสหภาพยุโรปซึ่งเป็นทั้งคู่ค้าและคู่แข่งที่สำคัญ ฉะนั้นข้าวหนึ่งจึงนับเป็นผลิตภัณฑ์ที่ควรได้รับการส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพ ทั้งเพื่อการส่งออกและการบริโภคในประเทศ ซึ่งการแข่งขันดังกล่าวทำให้ประเทศไทย ต้องปรับปรุงและพัฒนาทั้งคุณภาพและกระบวนการผลิตรวมถึงการแปรรูป เพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่ข้าว การผลิตข้าวหนึ่งเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพข้าวเปลือก โดยเฉพาะข้าวที่มีคุณภาพการขัดสีต่ำ เพื่อลดปริมาณข้าวหัก ระหว่างการสี เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการขณะแช่ข้าวเปลือกในน้ำเพื่อให้ธาตุอาหารและน้ำซึมเข้าสู่เมล็ด ก่อนจะนํามานึ่ง จากนั้น จึงทำข้าวเปลือกหนึ่งให้แห้ง แล้วนำไปผ่านกระบวนการขัดสี ทั้งนี้การนึ่งจะทำให้ข้าวที่ได้มีสี เหลืองสวยขึ้น สำหรับการผลิตข้าวหนึ่งที่ นิยมใช้ใน ปัจจุบันยังเป็นวิธีที่มีหลายขั้นตอนและใช้เวลานานในการแช่ข้าวเปลือกเนื่องจากต้องเพิ่มอุณหภูมิของน้ำให้ได้ตามต้องการก่อนนำข้าวเปลือกลงแช่อีกทั้งยังใช้น้ำปริมาณมากอย่างไรก็ตามได้มีการพัฒนากระบวนการผลิตข้าวหนึ่งโดยปรับสภาวะต่างๆ เช่น การปรับปรุง กระบวนการแช่ด้วยการพ่นไอน้ำ การนึ่งโดยใช้น้ำร้อนและตากแห้งด้วยลมร้อน รวมถึงการนึ่งข้าวหนึ่งที่นิยม เทคนิคฟลูอิดเซชันโดยการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง พบว่ายังใช้เวลาในการทำให้ข้าวเปลือกมีปริมาณความชื้นหลังการแช่สูงขึ้นค่อนข้างนาน รวมทั้งคุณสมบัติ ทางกายภาพของข้าวสารหนึ่งยังไม่ดีเท่าที่ควร

ข้าวหนึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสองสีคือข้าวหนึ่งสีเข้มและข้าวหนึ่งอ่อนเนื่องจากสารอาหารจากชั้นเปลือกจะซึมเข้าสู่เนื้อในระหว่างขั้นตอนการแช่ และ นึ่งข้าวจะทำให้ข้าวมีสีแตกต่างกันจากกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งแบบดั้งเดิมประกอบด้วยสามขั้นตอนคือ การแช่ , การนึ่ง และการอบแห้งโดยมีน้ำทิ้งหรือน้ำเสียจากกระบวนการแช่และกระบวนการนึ่งที่ต้องเกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำ ของเสียทำให้สิ้นเปลืองน้ำ เวลาและต้นทุนที่สูงขึ้น เพื่อลดเวลาและน้ำเสียที่เกิดจากข้าวหนึ่ง จึงเปลี่ยนขั้นตอนการแช่ข้าวและนึ่งข้าว

เป็นขั้นตอนเดียวโดยพิจารณารูปแบบการทดสอบสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและต่อด้วยการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำแม่เหล็กผ่าน สำหรับการศึกษาถึงการลดน้ำเสียที่เกิดจากระบบนึ่งข้าวที่และตรวจสอบคุณภาพของข้าวหนึ่ง ซึ่งรายละเอียดทฤษฎี หลักการทำงาน การออกแบบ และการทดสอบ จะได้อธิบายในบทต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1) เพื่อออกแบบสร้างนวัตกรรมระบบผลิตข้าวหนึ่งโดยใช้พลังงานความร้อนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงกำลังสูงและความร้อนจากเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กความถี่สูงที่สามารถควบคุมคุณภาพของข้าวหนึ่ง ให้ได้ตามมาตรฐานสากล
- 2) เพื่อลดน้ำเสียที่เกิดจากระบบการผลิตข้าวหนึ่งให้ได้ร้อยละ 70

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

- 1) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กระบวนการต่างๆของข้าวเปลือกจนกระทั่งเปลี่ยนเป็นข้าวหนึ่งและควบคุมปรับปรุงให้คุณภาพของข้าวหนึ่งตรงตามมาตรฐาน
- 2) ระบบที่สร้างขึ้นนั้นสามารถลดการเกิดน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตข้าวหนึ่งได้ร้อยละ 70

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1) ออกแบบและสร้างระบบการให้ความร้อนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในการนึ่งข้าวเปลือกให้คงที่ตลอดระยะเวลาในการให้ความร้อนได้
- 2) ออกแบบและสร้างระบบการให้ความร้อนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงและความร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กด้วยความถี่สูง ที่สามารถลดความชื้นหลังจากการนึ่งข้าวเปลือกที่ความชื้น 50-70 % ให้เหลือความชื้นที่ 14-16 % โดยที่ยังคงคุณภาพข้าวไว้ได้
- 3) ได้กำลังการผลิตที่ 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและลดการใช้น้ำของระบบผลิตข้าวหนึ่งได้ร้อยละ 70 จากการผลิตแบบปกติ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ศึกษาค้นคว้าข้อมูลประเภทต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิธีการผลิตข้าวหนึ่ง ในรูปแบบต่าง ๆ ที่มีอยู่ในปัจจุบัน

- 2) วิจัย พัฒนา ออกแบบ และสร้างระบบผลิตข้าวหนึ่งโดยใช้พลังงานความร้อนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงและความร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก เพื่อลดน้ำทิ้งที่เกิดขึ้นจากการผลิตข้าวหนึ่งให้เหลือน้อยที่สุด
- 3) ทดสอบระบบวัดและควบคุมต่าง ๆ ในระบบผลิตข้าวหนึ่ง และระยะเวลาในการให้ความร้อน รวมถึงวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับคุณภาพข้าวหนึ่งและน้ำที่เหลือทิ้งจากระบบการผลิต

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน

ศึกษาและสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการผลิตข้าวหนึ่ง รูปแบบการให้ความร้อนต่าง ๆ ที่มีในปัจจุบันเพื่อเป็นตัวเลือกในการตัดสินใจและออกแบบระบบผลิตข้าวหนึ่งให้ตรงตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน จึงได้ทำการออกแบบและสร้างระบบผลิตข้าวหนึ่งโดยใช้พลังงานความร้อนจากการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยความถี่สูงและความร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก เมื่อระบบพร้อมใช้งานจึงทำการทดสอบการทำงานของระบบและทำการบันทึกค่าพารามิเตอร์ของระบบดังนี้ อุณหภูมิของข้าวหนึ่ง ความชื้นข้าวหนึ่ง ปริมาณข้าว ระยะเวลาในการให้ความร้อน ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และกำลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อน

1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย

- 1) ศึกษาค้นคว้าและเก็บรวบรวมข้อมูลโดยการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) วิเคราะห์ ออกแบบ และศึกษาถึงความเป็นไปได้ด้วยข้อมูลต่างๆ ทางคณิตศาสตร์ หรือข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือทางวิชาการ เกี่ยวกับระบบการผลิตข้าวหนึ่งวิธีการผลิตข้าวหนึ่งด้วยความร้อน โดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงและความร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก
- 3) สร้างเครื่องต้นแบบ เพื่อทำการวัดและทดสอบประสิทธิภาพในการให้พลังงานความร้อนไปยังข้าวที่แช่น้ำ และระยะเวลาในการให้ความร้อน พร้อมทั้งทำการทดลองผลให้ได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง F14113 อาคารเกษตรวิวัฒน์(F14)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111, ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

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

1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) เก็บรวบรวมข้อมูลจากการสำรวจปฏิกิริยารวบรวมที่เกี่ยวข้อ
- 2) เก็บรวบรวมผลจากการออกแบบ สร้างและทดสอบประสิทธิภาพระบบผลิตข้าวหนึ่ง โดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (ไมโครเวฟ) และระบบลดความชื้นข้าวโดยใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (ไมโครเวฟ) และใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้ระบบผลิตข้าวหนึ่งโดยใช้พลังงานความร้อนจากคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยความถี่สูงและความร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก
- 2) ได้องค์ความรู้ในเรื่องของการออกแบบแหล่งพลังงานความร้อนกับให้กับข้าวหนึ่ง ซึ่งเป็นแนวทางให้กับหน่วยงานหรือสถาบันต่าง ๆ ที่สนใจสามารถนำไปประยุกต์ใช้ เพื่อยกระดับและต่อยอดให้มีประสิทธิภาพสูงสุด
- 3) รู้จักกระบวนการคิด วิเคราะห์ อย่างเป็นระบบ เพื่อสามารถนำความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้งานในด้านอื่น ๆ เพื่อแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในทางปฏิบัติและสามารถนำความรู้ไปใช้ประกอบวิชาชีพได้

1.8 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยรวมถึงปฏิกิริยารวบรวมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยรวมถึงปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ทั้งในและต่างประเทศ

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการออกแบบสร้างระบบผลิตข้าวหนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง(ไมโครเวฟ)และระบบลดความชื้นข้าวแบบไฮบริดด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง(ไมโครเวฟ) และใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องหลักๆ คือ ทฤษฎีในส่วนการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง(ไมโครเวฟ) ทฤษฎีการลดความชื้นข้าว ทฤษฎีในส่วนการให้ความร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก และทฤษฎีในส่วนของการถ่ายโอนความร้อน

บทที่ 4 การวิเคราะห์และการออกแบบระบบ ซึ่งจะประกอบไปด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง(ไมโครเวฟ) ร่วมกับการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ซึ่งกระบวนการออกแบบทั้งหมดนี้เป็นออกแบบสร้างระบบผลิตข้าวหนึ่งด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

บทที่ 5 จากการทดสอบระบบผลิตข้าวหนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง โดยการนำข้าวเปลือกเข้ากระบวนการผลิตข้าวหนึ่ง โดยทำการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของการนึ่ง คุณภาพของการนึ่ง และทำการทดสอบหาความสำคัญของการลดความชื้นข้าวเปลือกหลังจากนึ่ง ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือรูปแบบลดความชื้นข้าวจากการให้ความร้อนด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ก่อน แล้วค่อยทำการทดสอบการลดความชื้นข้าวด้วยลมร้อนจากการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก และรูปแบบที่สองทำการทดสอบเหมือนรูปแบบแรก แต่สลับการทำงานก่อนหลัง ซึ่งก่อนการทดสอบนี้ได้ต้องทำการหาความสัมพันธ์ของแต่ละเงื่อนไขก่อน

บทที่ 6 กล่าวถึงสรุปผลการวิจัยและผลของการออกแบบระบบผลิตข้าวหนึ่งด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ปัญหา ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาในอนาคต

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

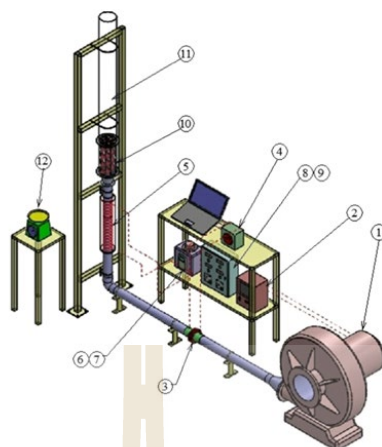
งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ มีวัตถุประสงค์หลักคือ การวิเคราะห์และออกแบบสร้างระบบผลิตข้าวหนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงและการเหนี่ยวนวสนาแม่เหล็กความถี่สูงกำลังสูงโดยการควบคุมกระบวนการในการแช่ข้าวหนึ่งกับกระบวนการหนึ่งเข้าด้วยกันเพื่อลดน้ำเหลือทิ้งจากกระบวนการที่กล่าวมาและควบคุมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงให้กระจายตัวในอุโมงค์ได้มากที่สุด ด้วยวิธีการออกแบบอุโมงค์ไมโครเวฟและออกแบบอาเรย์แมกนีตรอนให้จ่ายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้มีความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่ต้องการให้ความร้อนกับข้าวหนึ่ง และทำให้สามารถที่จะควบคุมความเข้มสีของข้าวหนึ่งได้ โดยในปัจจุบันได้มีนักวิจัยจำนวนมากให้ความสนใจเกี่ยวกับวิธีการออกแบบการผลิตข้าวหนึ่งด้วยหลากหลายวิธีการเพื่อที่จะลดต้นทุนและปรับปรุงคุณภาพให้สามารถนำไปในในระบบอุตสาหกรรมได้ ทั้งการแช่น้ำปริมาณครึ่งหนึ่งของข้าวในศูนย์อากาศ การนึ่งข้าวแบบใช้ไอน้ำความดันสูง เพื่อลดน้ำที่ใช้ในกระบวนการสามารถให้ความร้อนแก่ข้าวหนึ่งได้ดีขึ้น สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ทางผู้จัดได้คิดค้นวิธีการแช่ข้าวหนึ่งในปริมาณหนึ่งส่วนสองของข้าวเปลือกในศูนย์อากาศ เพื่อลดการใช้น้ำในกระบวนการแช่ข้าว

เพื่อให้ทราบถึงแนวทางและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทิศทางความเป็นไปได้ของงานวิจัย ตลอดจนปัญหาและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อนำไปสู่วัตถุประสงค์หลักตามที่ตั้งไว้โดยได้มีการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาและได้อาศัยฐานข้อมูลที่มีอยู่ ซึ่งฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนี้เป็นฐานข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ มีชื่อเสียง และได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เช่นฐานข้อมูล ScienceDirect, IEEE และ SCOPUS นอกจากนี้ยังได้มีการสืบค้นงานวิจัยจากแหล่งสืบค้นข้อมูลอื่น ๆ เช่น จากเครือข่ายอินเทอร์เน็ต จากห้องสมุดของมหาวิทยาลัย โดยผลจากการสืบค้นข้อมูลที่ได้นั้นจะนำมาใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป สำหรับเนื้อหาในส่วนนี้จะได้กล่าวถึง ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนสำหรับการลดความชื้นข้าว การผลิตข้าวหนึ่ง รวมถึงการใช้ประโยชน์ต่างๆ ซึ่งได้รวบรวมข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์และออกแบบลักษณะการให้ความร้อนกับวัสดุไดอิเล็กทริกให้มีความเหมาะสมและให้มีประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุดโดยผลที่ได้จากการศึกษาข้อมูลมีดังหัวข้อต่อไปนี้เริ่มจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการให้ความร้อน ซึ่งในปัจจุบันการให้ความร้อนจากสนามแม่เหล็กได้มีการพัฒนาในรูปแบบต่างๆ เช่นหลักการ การให้ความร้อนการ

เหนี่ยวนำ(Induction Heating) ซึ่งเป็นการให้พลังงานความร้อนจากการอาศัยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากขดลวดเหนี่ยวนำ โดยการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเมื่อมีไฟฟ้ากระแสสลับไหลผ่านขดลวดก็จะทำให้เกิดการสร้างสนามแม่เหล็กไปเกี่ยวข้องกับวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก (Ferromagnetic) ส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลวนอยู่ในวัสดุในทิศทางตรงข้ามกับทิศการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด ตามกฎมือขวา เนื่องจากในวัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กแต่ละชนิดจะมีค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้า ซึ่งแต่ละชนิดจะมีค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าต่างกัน ความต้านทานกระแสไฟฟ้านี้ทำให้เกิดการ สูญเสียพลังงานในการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งตามกฎหมายการอนุรักษ์พลังงานคือพลังงานไม่สามารถสูญหายไปแต่สามารถเปลี่ยนรูปได้ ดังนั้นพลังงานที่สูญเสียนี้จึงเปลี่ยนรูปไปเป็นความร้อนที่เกิดขึ้นในตัววัสดุ และความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปบริเวณอื่น โดยการนำความร้อน การพาความร้อน อีกหลักการเป็นการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นหลักการที่ให้ความร้อนโดยตรงไปยังวัสดุที่เป็นไดอิเล็กตริกที่มีความเหมาะสมต่อช่วงความถี่ที่ใช้ งาน ซึ่งนักวิจัยได้เลือกใช้หลักการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกนี้คือการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave heating) ซึ่งเป็นการให้พลังงานความร้อนโดยการแผ่กระจายคลื่นย่านความถี่ไมโครเวฟ รายงานว่าพลังงานคลื่นไมโครเวฟมีความสามารถในการกำจัดน้ำได้อย่างรวดเร็ว แต่มีข้อจำกัดเรื่องความลึกในการแทรกผ่านของคลื่น (Penetration depth) ที่มีอยู่อย่างจำกัด และการให้ความร้อนเกินไป (Over heating) จนทำให้ตัวอย่างไหม้ ดังนั้นจากเทคโนโลยีการให้ความร้อนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จึงทำให้ผู้วิจัยสนใจที่นำหลักการนี้ไปพัฒนาเป็นการผลิตข้าวหนึ่ง จากหลักการการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ และหลักการการการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้สนใจและได้ศึกษาค้นคว้าการผลิตข้าวหนึ่งและการลดความชื้นข้าว โดยใช้หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำและความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟรวมกัน และหลักการสุดท้ายเป็นกรรมวิธีในการผลิตข้าวหนึ่ง เพื่อเปรียบเทียบและสรุปผลสำหรับศึกษาค้นคว้าต่อไป

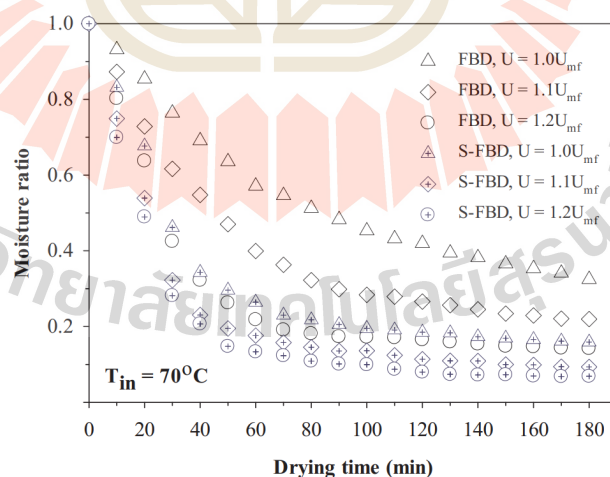
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ความร้อนจากการให้ความร้อนแบบการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

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



รูปที่ 2.1 อุปกรณ์และโครงสร้างที่ใช้ทดสอบ

ในการทดสอบอุณหภูมิเริ่มต้นของพริกอยู่ที่ 27 องศาเซลเซียส กำลังงานที่ใช้ในการทดสอบอยู่ที่ 5 กิโลวัตต์ ระบบจะถูกเปิดให้ทำงานก่อนเพื่อที่จะได้อุณหภูมิภายในคงที่ที่ 70 องศาเซลเซียส ก่อนการทำการทดสอบ โดยจะใช้พริกที่ 200 กรัม ที่มีความชื้นเริ่มต้นที่ 73 เปอร์เซ็นต์ และความเร็วลมที่ใช้อยู่ที่ 1.0 - 1.2 U_{mf} สำหรับห้องที่ใช้ในการทดสอบเป็นทรงกระบอกอะคริลิกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร และความสูง 1000 มิลลิเมตร ซึ่งผลการทดสอบสามารถดูได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) และเวลาในการทำให้แห้ง (DT, นาที) ของเมล็ดพริกไทยตากแห้งที่ความเร็วลมแบบต่างๆ ด้วยเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดแบบ (FBD) กับ (S-FBD)

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

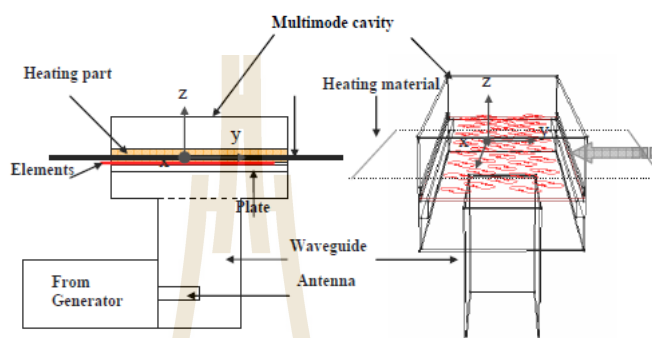
Dobroslav Danailov Dankov and Prodan Ivanov Prodanov และคณะ (Dankov & Prodanov, 2017) ได้ทำการวิเคราะห์และออกแบบอินเวอร์เตอร์แบบ quasi-resonant ZVS (Zero Voltage Switching) สำหรับการทำความร้อนเหนี่ยวนำในวงจรแม่เหล็ก เน้นไปที่การปรับปรุงประสิทธิภาพและความเสถียรของกระบวนการทำความร้อนอินเวอร์เตอร์แบบ ZVS ช่วยให้การสวิตชิ่งเกิดขึ้นที่แรงดันศูนย์ ทำให้ลดการสูญเสียพลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานการใช้งานในระบบเหนี่ยวนำทำให้สามารถสร้างความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในวงจรแม่เหล็กการออกแบบมีการพิจารณาวงจรแม่เหล็กและการปรับค่าองค์ประกอบต่าง ๆ เพื่อให้เกิดการทำงานที่เหมาะสมการใช้หม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนพลังงานไปยังวัสดุที่ต้องการทำความร้อนมีการใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์และซอฟต์แวร์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของวงจรในสถานการณ์ต่าง ๆ การพิจารณาปัจจัยเช่น ความถี่ในการทำงาน การควบคุมอุณหภูมิ และผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์การออกแบบอินเวอร์เตอร์นี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำความร้อนเหนี่ยวนำ ลดการสูญเสียพลังงาน และเพิ่มความเสถียรในการทำงานเหมาะสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมที่ต้องการความร้อนที่มีคุณภาพสูง เช่น การผลิตโลหะและการประมวลผลอาหาร

การวิเคราะห์และออกแบบอินเวอร์เตอร์ quasi-resonant ZVS สำหรับการทำความร้อนเหนี่ยวนำแสดงให้เห็นถึงการพัฒนาเทคโนโลยีที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือในกระบวนการทำความร้อนได้อย่างมีนัยสำคัญ ทำให้มีศักยภาพในการใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟ

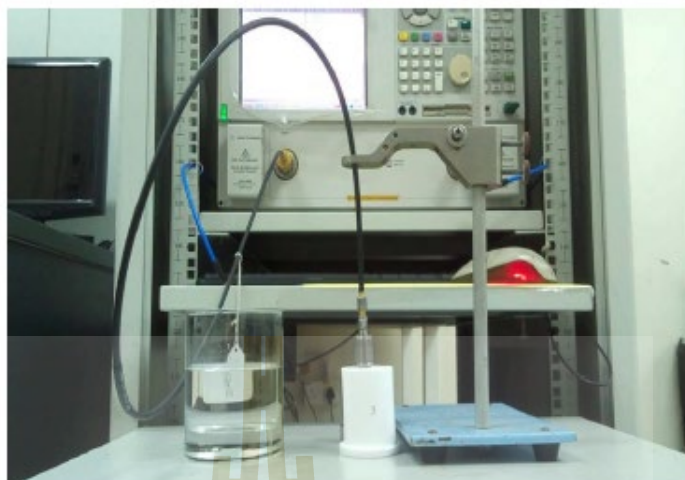
Yoshio Nikawa and Jun Ono และคณะ(Nikawa & Ono, 2005) การศึกษาเกี่ยวกับ "Multimode Cavity with Circular Polarizing Patch Array" เน้นการใช้เทคโนโลยีไมโครเวฟในการให้ความร้อนแก่วัสดุที่บางช่องว่างแบบมัลติโหมดลูกออกแบบเพื่อเพิ่มการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างไมโครเวฟกับวัสดุที่บาง โดยใช้แอเรียแพตช์ที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมเพื่อควบคุมสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพการใช้โพลาไรซ์แบบวงกลมช่วยในการกระจายพลังงานอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นผิววัสดุ ลดปัญหาจุดร้อนและทำให้การให้ความร้อนมีความสม่ำเสมอ ซึ่งสำคัญในงานด้านการแปรรูปอาหารและวัสดุศาสตร์การศึกษาได้ประเมินว่าการจัดเรียงและขนาดของแพตช์มีผลต่อความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุ โดยการปรับแต่งการจัดเรียงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการให้ความร้อนมีการทดลอง

เปรียบเทียบประสิทธิภาพการให้ความร้อนของช่องว่างมัลติโหมดกับวิธีการแบบดั้งเดิม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการออกแบบนี้ช่วยลดเวลาการให้ความร้อนและเพิ่มความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ เทคโนโลยีนี้สามารถนำไปใช้ในหลากหลายสาขา เช่น อุตสาหกรรมอาหาร การแพทย์ และการประมวลผลวัสดุที่ต้องการการให้ความร้อนที่ควบคุมและมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.3 อาร์เรย์แพทช์โฟลาร์ไรซ์แบบวงกลมในเรโซเนเตอร์โพรงแบบหลายโหมด

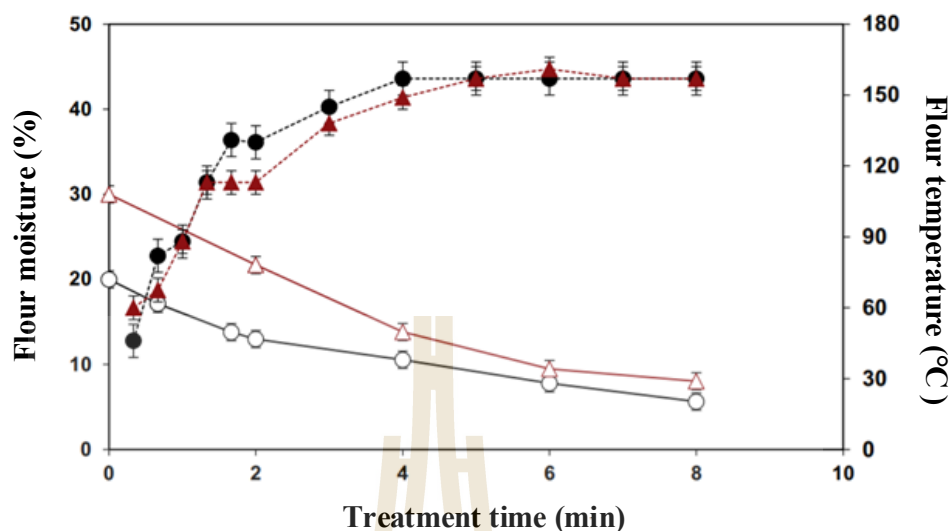
Siti Zulaika#1, Rosemizi Abd. Rahim และคณะ (Zulaika & Rahim, 2018) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทาง Dielectric ของข้าวและแมลงศัตรูข้าว *Sitophilus oryzae* สำหรับการบำบัดด้วยไมโครเวฟนั้นมุ่งเน้นไปที่การเข้าใจพฤติกรรมของวัสดุเมื่อสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการใช้เทคนิคไมโครเวฟในการควบคุมและกำจัดแมลงศัตรูข้าวในนาข้าว ข้าวหรือวัสดุต่าง ๆ มีค่าความจุไฟฟ้าและค่าความต้านทานที่แตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลต่อการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ การวัดการดูดซับพลังงานไมโครเวฟในข้าวและแมลง พบว่ามีความแตกต่างชัดเจน ทำให้สามารถกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดได้ การใช้ไมโครเวฟสามารถลดจำนวนแมลงตัวงวงข้าวโพด (*Sitophilus oryzae*) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของนาข้าววิธีนี้เป็นทางเลือกที่ปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในการควบคุมแมลงศัตรูข้าว การศึกษาแสดงให้เห็นว่าเทคนิคการบำบัดด้วยไมโครเวฟมีศักยภาพในการกำจัดแมลงศัตรูข้าวในนาข้าว โดยอิงจากคุณสมบัติทาง Dielectric ซึ่งอาจนำไปสู่การพัฒนาวิธีการจัดการศัตรูพืชที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืนมากขึ้นในอนาคต



รูปที่ 2.4 การตั้งค่าการวัดด้วยหัววัดแบบโคแอกเซียลสายเปิด

Marina Villanueva และคณะ (Villanueva, Harasym, Muñoz, & Ronda, 2018) ได้ทำการทดสอบเกี่ยวกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านไมโครเวฟ ที่การศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟของแป้งข้าว พบว่าคลื่นไมโครเวฟมีผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาค อุณหภูมิ และคุณสมบัติด้านการไหล (viscometric properties) ของแป้งข้าว แป้งข้าวมีความสามารถในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำและสภาพของแป้ง ซึ่งมีผลต่อการกระจายความร้อนในกระบวนการอบแห้งหรือการปรุงอาหาร คลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างของแป้งข้าว เช่น การเกิดรูพรุนและการกระจายตัวของอนุภาค ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติของแป้งที่ใช้คลื่นไมโครเวฟเพิ่มอุณหภูมิของแป้งข้าวอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้คุณสมบัติการไหลและความหนืดเปลี่ยนแปลง โดยทั่วไป การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความหนืดลดลง แต่ขึ้นอยู่กับระดับความชื้นและระยะเวลาในการให้ความร้อน

สรุปได้ว่า การใช้คลื่นไมโครเวฟมีผลกระทบที่สำคัญต่อคุณสมบัติของแป้งข้าว โดยสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้แป้งในกระบวนการผลิตอาหารได้ แต่ต้องพิจารณาเรื่องความสมดุลระหว่างอุณหภูมิและโครงสร้างจุลภาคเพื่อให้ได้คุณภาพที่ต้องการซึ่งผลที่ได้ดังรูปที่ 2.3



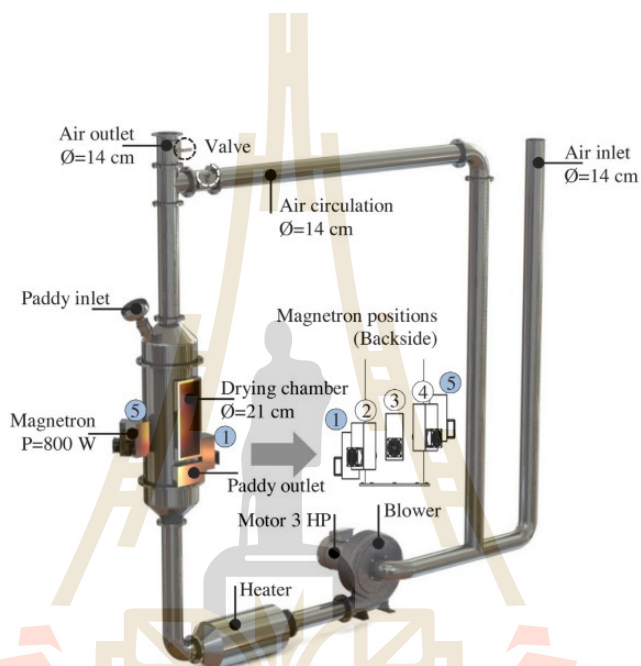
รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นกับอุณหภูมิเทียบกับเวลาที่ใช้ในการทดสอบ

จากผลการทดสอบของการเปลี่ยนแปลงความชื้นเทียบและอุณหภูมิเทียบกับเวลาดังรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่มีความชื้นเริ่มต้นที่ 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการทดสอบที่ 8 นาที ความชื้นสามารถลดลงเหลือ 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิในช่วงแรก อุณหภูมิยังไม่สูงมากเพราะความชื้นสูง เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น อุณหภูมิก็เริ่มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อถึงเวลาที่ 4 - 5 นาที อุณหภูมิเริ่มคงที่

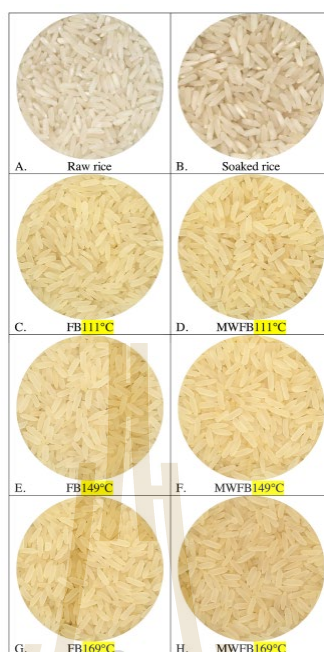
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตข้าวนี้

Saniso พร้อมคณะ (Saniso, Prachayawarakorn, Swasdisevi, & Soponronnarit, 2020; Shen et al., 2021) ได้ทำการทดสอบเกี่ยวกับผลของการผลิตข้าวนี้โดยไม่ใช้ความร้อนด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนด้วยไมโครเวฟเนื่องจากกระบวนการนี้ข้าวแบบดั้งเดิมต้องใช้หม้อต้มแรงดันสูงและมีขั้นตอนการแปรรูปหลายขั้นตอน งานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีใหม่ในการผลิตข้าวนี้ข้าวโดยไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงและมีขั้นตอนการแปรรูปน้อยลง โดยใช้เทคนิคที่เสนอเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดด้วยลมร้อนช่วยไมโครเวฟ (MWFB) ข้าวเปลือกพันธุ์สุพรรณบุรี 1 จะถูกแช่ในน้ำร้อนก่อน จากนั้นจึงอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิ MWFB 111-169 °C และกำลังไมโครเวฟคงที่ 2 วัตต์ต่อ 1 กรัมข้าวเปลือกเปียก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเปิดไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 180 วินาทีตั้งแต่เริ่มกระบวนการอบแห้งจะช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งได้ก็ต่อเมื่ออัตราการอบแห้งอยู่ในช่วงอัตราลดลงครั้งแรกเท่านั้นและสามารถช่วยทำให้แบ่ง

บริเวณแกนเมล็ดข้าวเกิดเจลลาตินได้ ซึ่งการอบแห้งด้วยลมร้อนจะทำให้เกิดเจลลาตินได้ยากมาก ในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบ MWFB โครงสร้างผลึกชนิด A จะลดลงในขณะที่คอมเพล็กซ์อะมิโลส-ลิพิดชนิด V เกิดขึ้น ปริมาณผลผลิตต้นข้าว ความเข้มสีแดง (ค่า a^*) และความเข้มสีเหลือง (ค่า b^*) เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสว่าง (ค่า L^*) เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้ง เพื่อรักษาคุณภาพต้นข้าวที่ดีของข้าวนี้ การอบแห้งข้าวเปลือกที่แช่น้ำไว้จะต้องไม่ต่ำกว่า 22–24% db และจำเป็นต้องทำขั้นตอนอบให้แห้งหลังจากการอบแห้ง



รูปที่ 2.6 แผนผังของเครื่องอบข้าวนี้ MWFB



รูปที่ 2.7 สีของข้าวเปลือกแช่น้ำที่ผ่านการอบแห้งด้วย FB และ MWFB ที่อุณหภูมิอากาศในการอบแห้ง 111, 149 และ 169 °C โดยใช้กระบวนการอบให้แห้ง (ความชื้นขั้นสุดท้ายอยู่ที่ 20.2–23.3% d.b.

ข้าวดิบมีค่า L^* 77.27, a^* -0.13, b^* 17.16 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสีขาวแต่เมื่อข้าวถูกแช่ที่ 70 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ค่า L^* ลดลงเป็น 72.88 ขณะที่ค่า a^* และ b^* เพิ่มขึ้น แสดงถึงสีที่เข้มขึ้นและมีความสีน้ำตาลมากขึ้น ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนย้ายของสารสีและปฏิกิริยาบราวน์ ระหว่างการอบแห้งพบว่า ค่า L^* ลดลง ขณะที่ค่า a^* และ b^* เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาอบแห้ง โดยการอบที่ 111 °C ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นเล็กน้อย แต่ที่อุณหภูมิ 149 °C พบว่าการเปลี่ยนแปลงในค่า a^* และ b^* มีความสำคัญมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อมีการทำให้เย็นร่วมด้วย ค่า L^* เป็นพารามิเตอร์ที่ไวต่อกระบวนการความร้อนมากที่สุด ขณะที่ค่า a^* และ b^* ต้องการอุณหภูมิสูงและระยะเวลาการอบแห้งเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญข้าวที่แห้งด้วย MWFB ที่อุณหภูมิ 149–169 °C มีสีทองที่ตรงกับความต้องการในตลาด โดยมีค่า L^* อยู่ในช่วง 62.8–63.06 ซึ่งไม่แตกต่างจากข้าวพาร์โบลด์เชิงพาณิชย์

บทที่ 3

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

ในการวิเคราะห์และออกแบบสร้างระบบผลิตข้าวหนึ่งโดยใช้พลังงานความร้อนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงและการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กด้วยความถี่สูง เพื่อลดน้ำในการผลิตข้าวหนึ่งพัฒนาระบบให้เป็นอุตสาหกรรมและลดขั้นตอนการผลิตข้าวหนึ่งลง ซึ่งสามารถแบ่งเป็นส่วนสำคัญได้สี่ส่วนดังนี้

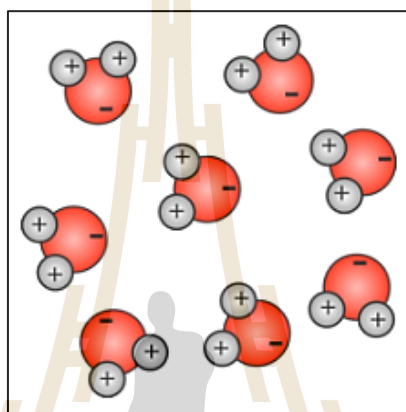
- 1) หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง
- 2) หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กความถี่สูงกำลังสูง
- 3) หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนความร้อน
- 4) หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในส่วนของการวิธีการผลิตข้าวหนึ่งที่มียูในปัจจุบัน
- 5) สรุป

3.2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

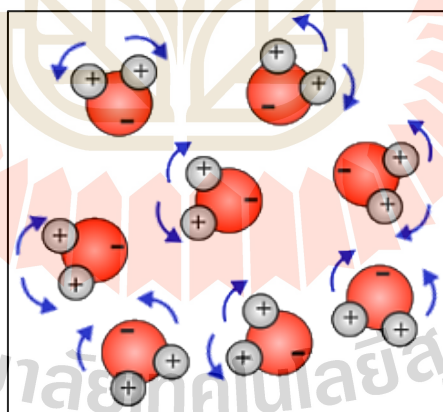
การให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงในย่านไมโครเวฟ (Microwave Heating) เป็นการให้ความร้อนกับน้ำโดยตรง ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของความชื้นในข้าวได้อย่างรวดเร็ว ในการออกแบบเครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟนั้น เป็นคลื่นสนามของพลังงานไฟฟ้าและพลังงานแม่เหล็กอยู่ด้วยกัน จึงจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเร็วเท่ากับความเร็วแสง มีการแผ่รังสีเหมือนแสง แต่มีพลังงานน้อยกว่า เคลื่อนที่ในรูปแบบคลื่น ดังนั้นคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนจะถูกส่งผ่านหรือดูดซับได้นั้น ขึ้นกับวัตถุที่ไมโครเวฟทำปฏิกิริยาด้วยหลักการทำงานโดยอาศัยน้ำ เพราะน้ำเป็นโมเลกุลที่มีขั้วบวกอยู่ที่ปลายด้านหนึ่ง โมเลกุลของน้ำในวัตถุดิบจะเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ เมื่อเปิดเครื่องทำให้เกิดคลื่นไมโครเวฟในตุลิตความชื้น โมเลกุลของน้ำจะเริ่มดูดซับคลื่นไมโครเวฟ ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วยหัวข้อหลัก ได้แก่ ทฤษฎีของคลื่นไมโครเวฟ คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟ ท่อนำคลื่น โหมดของการแพร่กระจายคลื่น และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ มาวิเคราะห์การออกแบบเครื่องและทดสอบให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพต่อการใช้งานมากที่สุด ซึ่งจะได้อธิบายในขั้นตอนต่อไป

3.2.1 ทฤษฎีของคลื่นไมโครเวฟ

โมเลกุลของน้ำ H_2O ประกอบด้วยไฮโดรเจน 2 อะตอมเป็นขั้วบวก และออกซิเจน 1 อะตอมเป็นขั้วลบ เมื่ออิเล็กตรอนภายในอะตอมของน้ำได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟมากพอ จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกและกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ แล้ววิ่งชนกับอะตอมข้างเคียง ทำให้อะตอมข้างเคียงได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นและทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 3.1 แบบจำลองโมเลกุลของน้ำ



รูปที่ 3.2 โมเลกุลของน้ำที่เปลี่ยนทิศสลับไปมาอย่างรวดเร็ว

คลื่นไมโครเวฟมีความถี่อยู่ในช่วง 300 MHz ถึง 300 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่หนึ่งในแถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีสมการที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ สมการแมกเวล (Maxwell's equation)

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \frac{-\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (3.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.4)$$

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

แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากอัตรกริยา ระหว่างคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุที่ต้องการโดยส่วน
ของสนามไฟฟ้าจะทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดโพลาไรเซชันทำให้ค่า Dielectric permittivity ของวัสดุได้อิ
เล็กตริกเขียนได้ตามสมการ

$$\epsilon_0 \epsilon \cong \epsilon_0 \epsilon_r \cong \epsilon_0 (\epsilon'_r - j\epsilon''_r) \quad (3.5)$$

โดยที่	ϵ_0	คือ	ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของฟรีสเปซหรืออากาศ (Permittivity of Free Space) มีค่าเท่ากับ $8.8542 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
	ϵ'_r	คือ	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Constant) หรือค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ (Relative Permittivity)
	ϵ''	คือ	ค่าไดอิเล็กตริกลอสมแฟคเตอร์สัมพัทธ์ (Relative Dielectric Loss Factor)
	j		$j = \sqrt{-1}$

การหาค่าการสะท้อนคลื่นไมโครเวฟ

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad \text{มีหน่วยเป็น } N_p / m \quad (3.6)$$

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Coefficient)

β คือ ค่าคงที่เฟส (Phase Constant)

วิธีการหาความยาวคลื่น λ

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.7)$$

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

$$\lambda = 0.1224489 \text{ m.}$$

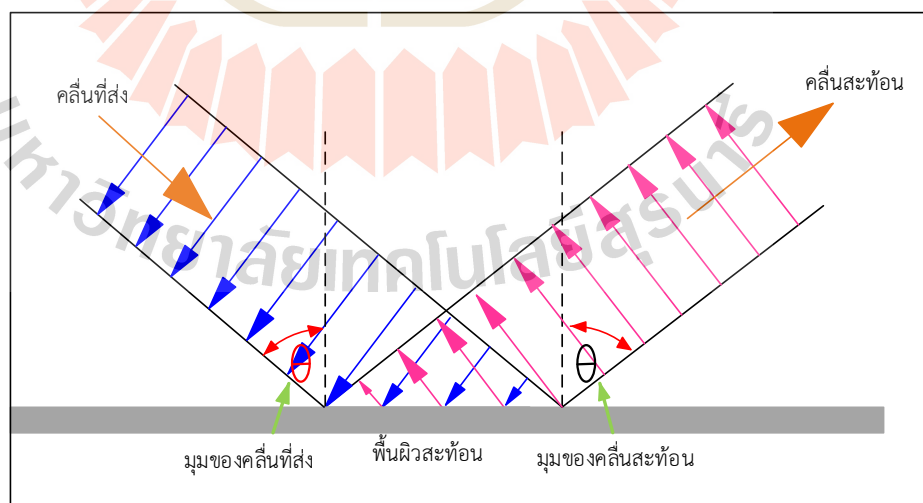
โดยที่ C คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

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

3.2.2 คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟ

1) การสะท้อนกลับ (Reflection)

คลื่นไมโครเวฟเมื่อกระทบกับวัตถุที่เป็นโลหะ หรือส่วนที่มีองค์ประกอบของโลหะ คลื่นจะไม่สามารถทะลุผ่านโลหะได้ และจะสะท้อนกลับทั้งหมด



รูปที่ 3.3 การสะท้อนของคลื่น

2) การส่งผ่าน (Transmission)

คลื่นไมโครเวฟเมื่อกระทบกับวัสดุที่ไม่ใช่โลหะ เช่น แก้ว ไม้ เซรามิก พลาสติก และ กระดาษ เป็นต้น คลื่นจะสามารถทะลุผ่านได้ ดังนั้น วัสดุเหล่านี้จึงนิยมใช้เป็นภาชนะในการนำไปลด ความชื้น

3) การดูดซับ (Adsorption)

คลื่นไมโครเวฟเมื่อกระทบกับวัสดุที่มีน้ำหรือความชื้นภายใน คลื่นบางส่วนจะถูกดูดซับเอาไว้ทำให้โมเลกุลของน้ำดูดซับพลังงานคลื่น และยังเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนตามมา รวมถึงการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำ ซึ่งทำให้เกิดความร้อนได้เช่นกัน เมื่อคลื่นไมโครเวฟหลังถูกดูดซับจะสลายตัวทันที ไม่มีการตกค้างในข้าว

3.2.3 ท่อนำคลื่น (Waveguide)

เวฟไกด์ (Waveguide) หรือท่อนำคลื่นนี้เป็นสายส่งสัญญาณแบบหนึ่งที่ใช้ในการส่งคลื่นไมโครเวฟ โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นท่อกลม หรือท่อเหลี่ยม โดยทำมาจากทองแดงหรืออะลูมิเนียม และภายในจะฉาบด้วยเงินเพื่อให้เป็นตัวนำที่ดี สาเหตุที่สายนำสัญญาณจะต้องทำเป็นท่อลักษณะเช่นนี้ก็ เพราะว่า คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูงมากจะเดินทางได้ดีที่บริเวณพื้นผิวของตัวนำ ถ้าหากใช้สายนำสัญญาณแบบทั่วไปจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานได้ จึงจำเป็นต้องทำเป็นท่อเพื่อป้องกันการสูญเสียพลังงานที่พื้นผิวของสายสัญญาณ ความถี่ต่ำที่สุดที่สามารถใช้งานได้กับเวฟไกด์เรียกว่า ความถี่คัตออฟ ซึ่งความถี่ที่สูงกว่าความถี่คัตออฟ จะสามารถเดินทาง บนเวฟไกด์ได้ ส่วนความถี่ที่ต่ำกว่านี้จะไม่สามารถเดินทางบนเวฟไกด์ได้ ในการเดินทางของคลื่นไมโครเวฟในเวฟไกด์นั้น จะเดินทางโดยการสะท้อนผนังท่อ และเดินทางไปตามความยาวของท่อนำคลื่น และความถี่ที่สูงกว่าจะสามารถเดินทางไปได้ไกลกว่าความถี่ที่ต่ำกว่า สายคู่นำสัญญาณในวงจรโดยทั่วไปมักจะไม่มีความสามารถในการถ่ายโอนพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ย่านความถี่ไมโครเวฟนี้ เพราะพลังงานจะถูกปล่อยออกมาโดยการแผ่รังสี เนื่องจากสนามไม่ได้ถูกจำกัดในทุก ๆ ด้าน ทำให้สายโคแอกเซียลมีประสิทธิภาพมากกว่าสายคู่นำสัญญาณในการส่งถ่ายพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเพราะมีการจำกัดขอบเขตด้วยตัวนำ

3.2.4 ผลกระทบที่ผิว

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

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (3.8)$$

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

โดยที่

ρ คือ Conductor resistivity (S/m) มีค่าเท่ากับ $6.90 \times 10^{-7} (N/m^2)$

μ คือ Magnetic permeability of the material (H/m)

μ_0 คือ ค่าคงที่ เท่ากับ $4\pi \times 10^{-7} (N/m^2)$

μ_r คือ Relative permeability มีค่าเท่ากับ 1.003 ถึง 7 เลือกค่าสูงสุดมาใช้

แทนค่า

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{2\pi f \mu_r \mu_0}} \quad (3.9)$$

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

ดังนั้น $\delta = 3.2 \mu m$

จากการคำนวณหาค่า Skin Depth สรุปได้ว่าความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นมีค่าน้อยมากจนไม่สามารถทะลุผ่านวัสดุที่ใช้ไปได้

3.2.5 โหมดของการแพร่กระจายคลื่น

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

$$E_z = 0, \quad H_z \neq 0 \quad (3.10)$$

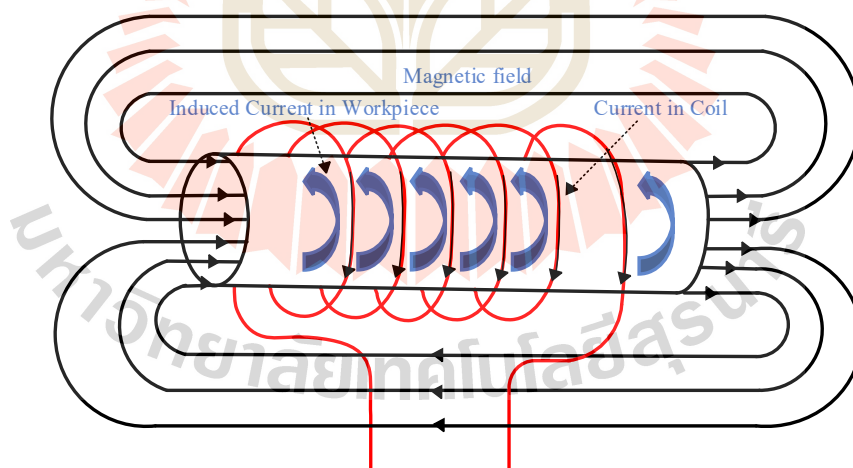
2) ทรานสเวิร์สแมกเนตริกเวฟ (Transverse Magnetic Wave; TM) หรือเรียกว่าคลื่นที่มีแนวสนามแม่เหล็กตามขวาง ซึ่งสนามไฟฟ้า (E) มีส่วนประกอบหรือเวกเตอร์ย่อยอยู่ในแกน X และ Y ของสนามแม่เหล็ก (H) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ไม่มีสนามแม่เหล็กในทิศของการแพร่กระจายของคลื่นแต่มีเฉพาะสนามไฟฟ้าในทิศทางนั้น นั่นคือ

$$H_z = 0, E_z \neq 0$$

(3.11)

3.3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรเหนี่ยวนำแม่เหล็ก

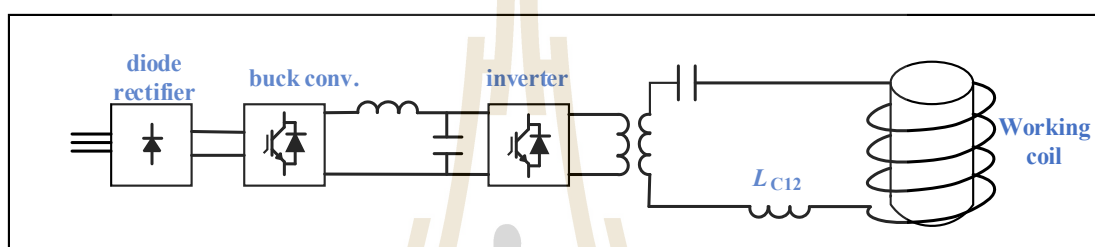
ในหลักการนี้จะสร้างขึ้นเพื่อมาใช้เป็นตัวช่วยในการร่วมการทำงานของทั้งสองหลักการที่ผ่านมา เป็นส่วนที่จะสร้างแหล่งกำเนิดความร้อน เพื่อที่จะนำความร้อนมาใช้ในการช่วยลดความชื้นของข้าว โดยกระบวนการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้เป็นการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงในอีกรูปแบบหนึ่งเมื่อเทียบกับการให้ความร้อนแบบขดลวดความร้อน หรือรูปแบบอื่น ๆ ในลักษณะงาน ที่ต้องการให้เกิดความร้อนบนชิ้นงานโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำ เริ่มจากการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวด ดังรูปที่ 3.4 เมื่อมีไฟฟ้ากระแสสลับไหลผ่านขดลวดก็จะทำให้เกิดการสร้างสนามแม่เหล็กไปเกี่ยวข้องกับวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก (Ferromagnetic) ส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลวนอยู่ภายในวัสดุในทิศทางข้ามกับทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด ตามกฎมือขวา เนื่องจากในวัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กแต่ละชนิดจะมีค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้า ซึ่งแต่ละชนิดจะมีค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าต่างกัน ความต้านทานกระแสไฟฟ้านี้ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน คือพลังงานไม่สามารถสูญหายไปแต่สามารถเปลี่ยนรูปได้ ดังนั้นพลังงานที่สูญเสียนี้จึงเปลี่ยนรูปไปเป็นความร้อนที่เกิดขึ้นในตัววัสดุ



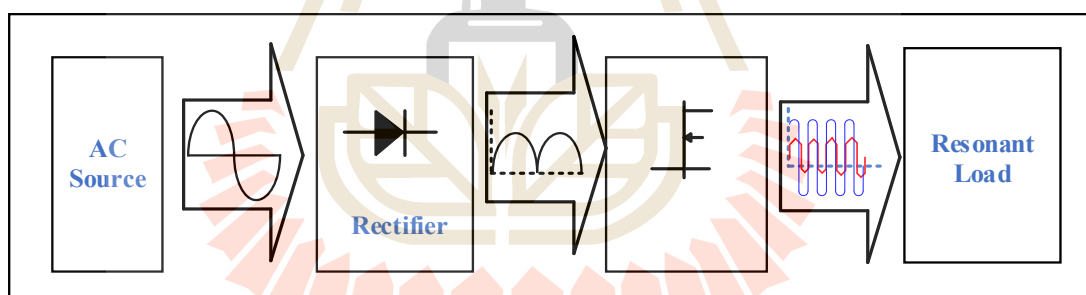
รูปที่ 3.4 หลักการเกิดการเหนี่ยวนำความร้อน

ในหลักการสร้างกระแสความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน จากภาพรวมของวงจรเหนี่ยวนำความร้อน ดังรูปที่ 3.5 สามารถแบ่งการทำงานออกเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งเริ่ม

จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ป้อนให้กับวงจรเรียงกระแส ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนวงจรกรองแรงดันทางด้านเอาต์พุตจะใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ เพื่อกกรองไฟฟ้ากระแสตรงให้เรียบขึ้น แล้วจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงโดยใช้พาวเวอร์ไอจีบีที (Insulated gate bipolar transistor) ทำหน้าที่เป็นสวิตช์กำลังสูง เพื่อจ่ายให้กับชุดโพลเดโรโซแนนซ์ซึ่งต่อแบบอนุกรม



รูปที่ 3.5 วงจรเหนี่ยวนำความร้อน



รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเหนี่ยวนำความร้อน

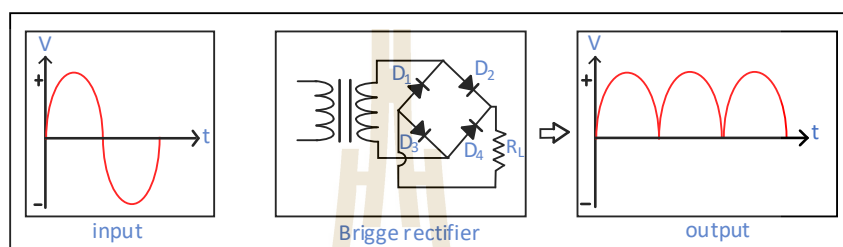
3.3.1 หลักการสร้างวงจรเหนี่ยวนำความร้อน

ในการสร้างวงจรเหนี่ยวนำความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นประกอบด้วย วงจรย่อยอีกหลายส่วน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์ (bridge rectifier circuit)

วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์เป็นวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นชนิดหนึ่ง ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถใช้ร่วมกับหม้อแปลงธรรมดาได้โดยไม่ต้องใช้หม้อแปลงชนิดเซนเตอร์แท็ป ซึ่งวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์ประกอบด้วยไดโอด 4 ตัว ดังรูปที่ 3.7 เมื่อมีสัญญาณขาเข้า (input)

ด้านบวกของไฟฟ้ากระแสสลับ ไดโอดตัวที่ D_2 และ D_3 จะอยู่ในสภาวะไบอัสตรง (forward bias) กระแสไฟฟ้าจึงไหลครบวงจร เกิดสัญญาณขาออก (output) โดยไดโอดตัวอื่นๆ จะอยู่ในสภาวะไบอัสกลับ (reverse bias) ในทำนองเดียวกัน เมื่อสัญญาณขาเข้า (input) สลับเป็นสัญญาณด้านลบของไดโอดตัวที่ D_4 และ D_1 จะอยู่ในสภาวะไบอัสตรง (forward bias) กระแสไฟฟ้าจึงไหลครบวงจรเกิดสัญญาณขาออก (output) โดยไดโอดตัวอื่น ๆ จะอยู่ในสภาวะไบอัสกลับ (reverse bias)



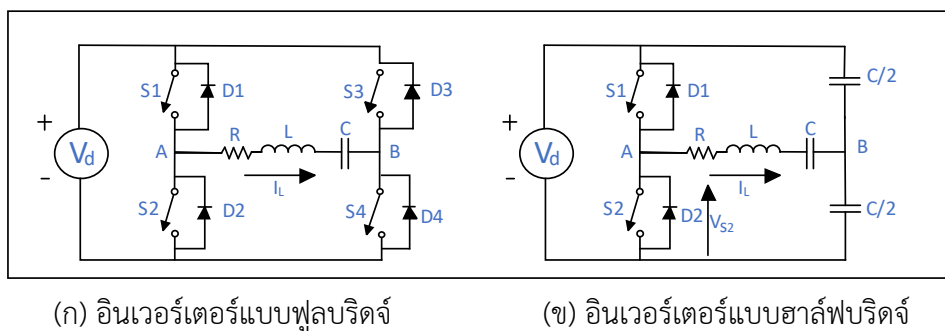
รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์

เนื่องจากวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์เป็นวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น ชนิดหนึ่งการคำนวณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจึงคำนวณเหมือนกับวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นทั่วไปดังสมการที่ 2.36

$$V_{DC} = 1.414V_{AC} \quad (3.12)$$

2) วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter)

ในส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่มีหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับความถี่สูงมี 2 รูปแบบ คือวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์และวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งข้อแตกต่างกันระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์และวงจรอินเวอร์เตอร์คือแรงดันของวงจรอินเวอร์เตอร์ (V_{AB}) ของวงจรแบบฟูลบริดจ์ จะได้รูปคลื่นสแควร์ ที่มีแรงดันสูงเท่ากับ $+V_d$ และแรงดันต่ำสุดเท่ากับ $-V_d$ กระแสผ่านโหลด (i_L) เป็นรูปคลื่นซายน์ดังรูปที่ 3.8 (ก) ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์ฮาล์ฟบริดจ์จะได้ค่าแรงดันเท่ากับ $+V_d$ และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0 และกระแสไหลผ่านโหลด (i_L) เป็นรูปคลื่นซายน์ดังรูปที่ 3.8 (ข) ดังนั้นกำลังไฟฟ้าของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์จะมากกว่าฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.8 คลื่นแรงดันและกระแสไหลของวงจรอินเวอร์เตอร์

เนื่องจากวงจรเหนี่ยวนำความร้อนดังกล่าวมีลักษณะของสนามแม่เหล็กและกระแสไหลวนเป็นแบบกระแสสลับ (AC) ความถี่ที่ใช้งานจึงทำให้มีผลกระทบเชิงผิว (Skin effect) ที่ส่งผลให้การทะลุผ่านวัตถุของสนามแม่เหล็กมีความลึกต่างกันที่ความถี่ต่างกัน ในกรณีที่ใช้งานที่ใช้เหนี่ยวนำความร้อนมีลักษณะเป็นเหล็กหนาจึงทำให้เกิดการกระจายตัวของกระแสไหลวน (Eddy current) ที่ไม่เท่ากันในระดับความลึกที่ต่างกัน โดยที่ตรงตำแหน่งใกล้ๆ พื้นผิววัตถุจะมีกระแสไหลวนสูงสุดและ ลดลงเรื่อย ๆ เมื่อความลึกเพิ่มขึ้น โดยเราสามารถหาค่า Skin depth (δ) หรือระยะความลึกสูงสุดที่ กระแสส่วนใหญ่ของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะไหลระหว่างพื้นผิวกับความลึกของผิว δ ได้จาก สมการที่ 2.37

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \mu \sigma f}} \quad (3.13)$$

$$V = \sqrt{V_R^2 + (V_L + V_C)^2} \quad (3.14)$$

เมื่อ δ คือค่าความลึกผิวในการทะลุผ่านของสนามแม่เหล็ก (Skin depth), μ คือ ค่าสภาพซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Absolute magnetic permeability), f คือค่าความถี่ของสนามแม่เหล็กและ σ คือค่าสภาพนำไฟฟ้า สามารถหาได้จากสมการที่ 2.38

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.15)$$

โดยที่ ρ คือค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ซึ่งค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเหล็กมีค่าประมาณ 10×10^{-8} ถึง 14×10^{-8} โอห์ม-เมตร ($\Omega \cdot m$) จากที่กล่าวมาข้างต้น ($\Omega \cdot m$) จะเห็นได้ว่าถ้าหากเราทำการควบคุมความถี่ของการทำงาน จะเป็นการควบคุมระดับความลึกของชิ้นงานที่ต้องการให้เกิดความร้อนได้

3.3.2 โหลดเรโซแนนซ์ (Resonant Load)

สำหรับโหลดเรโซแนนซ์ที่ใช้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงโดยทั่วไปเช่น เครื่องหลอมโลหะ เครื่องชุบแข็งผิวโลหะ เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ เครื่องเชื่อมความถี่สูง และบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ จะมีข้อได้เปรียบที่สำคัญคือ ลดการสูญเสียในการสวิตช์เมื่อทำการสวิตช์ตัดวงจรที่กระแสศูนย์ (Zero current switch : ZCS) หรือสวิตช์วงจรที่แรงดันศูนย์ (Zero voltage switch : ZVS) และข้อเสียเปรียบที่สำคัญของวงจรเรโซแนนซ์คือ ที่ตำแหน่งใกล้จุดความถี่เรโซแนนซ์กระแสในวงจรจะมีค่ามาก ส่งผลให้แรงดันตกคร่อมวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย สำหรับวงจรเรโซแนนซ์ที่มีค่า Q สูง ดังนั้น สวิตช์ที่เลือกใช้จะต้องสามารถทนแรงดันตกคร่อมขณะ OFF ได้สูงและ L, C ในวงจรที่เลือกใช้ก็เช่นกันจะต้องมีขนาดใหญ่เพื่อสามารถเก็บพลังงานได้มาก สำหรับอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์มีด้วยกัน 2 ชนิดคือ อินเวอร์เตอร์โหลดเรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมและอินเวอร์เตอร์โหลดเรโซแนนซ์ชนิดขนานทั้งสองชนิดมีข้อดีข้อเสียต่างกัน

การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียวงจรอินเวอร์เตอร์โหลดเรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมและขนาน

โหลดเรโซแนนซ์อนุกรม

ข้อดี

- 1) โครงสร้างง่าย ราคาถูก
- 2) สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงได้โดยตรงจากวงจรเรียงกระแสโดยไม่ต้องมีวงจรปรับแรงดัน กำลังไฟฟ้าที่จ่ายสามารถปรับได้ง่ายโดยการปรับความถี่ของวงจรอินเวอร์เตอร์

ข้อเสีย

- 1) ขณะป้อนสัญญาณเพื่อขับวงจรอินเวอร์เตอร์วงจรโหลดจะเปิดวงจรออกไม่ได้
- 2) ไม่สามารถทนการลัดวงจรที่โหลดได้ การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการปรับความถี่ที่สวิตช์ให้เลื่อนออกจากความถี่เรโซแนนซ์ ทำให้กระแสไม่ค่อยเป็นรูปคลื่นไซน์ ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ขึ้นมา

โหลดเรโซแนนซ์ขนาน

ข้อดี

- 1) ขณะป้อนสัญญาณเพื่อขับวงจรอินเวอร์เตอร์โหลดสามารถเปิดวงจรออกได้
- 2) สามารถทนการลัดวงจรที่โหลดได้

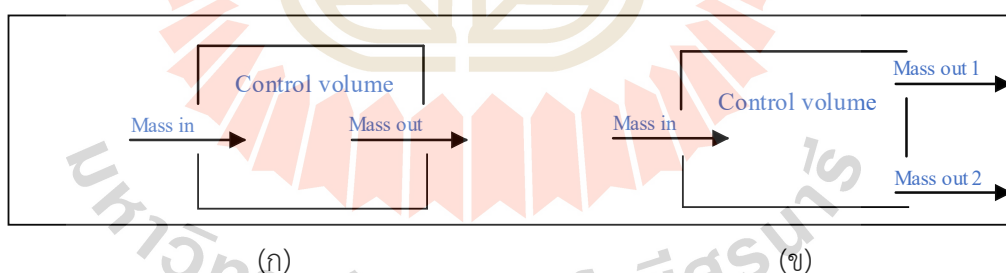
- 3) อุปกรณ์ L และ C ที่ใช้ในวงจรเรโซแนนซ์ไม่จำเป็นต้องมีพิกัดแรงดันหรือกระแสสูง เนื่องจากกระแสเป็นรูปคลื่นสแควร์ จึงมีค่า peak คงที่ที่ตำแหน่งเรโซแนนซ์

ข้อเสีย

- 1) ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงได้โดยตรงจากวงจรเรียงกระแสแต่ต้องมีการปรับแรงดันการใช้สวิตช์ควบคุม
- 2) จำเป็นต้องมี Coke เนื่องจากเป็น constant current
- 3) มีขนาดใหญ่เนื่องจากมี Coke และวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้าให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์

3.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนความร้อน

สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบระบบการให้ความร้อนกับสิ่งใดสิ่งหนึ่งนั้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือการคำนวณการถ่ายโอนพลังงานระหว่างวงจรเหนี่ยวนำความร้อนกับอากาศ ซึ่งเป็นลักษณะของการวิเคราะห์พลังงานสำหรับระบบที่มีการไหลแบบคงตัว สามารถแบ่งได้เป็นสองแบบคือระบบที่มีการไหลแบบกระแสเดียวและระบบที่มีการไหลแบบหลายกระแสดังรูปที่ 3.9 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยมีนิยามว่า ในระหว่างกระบวนการที่มีการไหลแบบคงตัว ปริมาตร มวล และพลังงานภายในระบบจะมีค่าคงที่



รูปที่ 3.9 ระบบที่มีการไหลแบบกระแสเดียว (ก) ระบบที่มีการไหลแบบหลายกระแส (ข)

การถ่ายเทมวลความชื้นจากวัสดุไปสู่อากาศเกิดขึ้นจากการพาความร้อนเนื่องจากความแตกต่างของความดันไอบางส่วน (partial vapor pressure) ที่ชั้นขอบ (boundary layer) ในบริเวณรอยต่อผิวสัมผัสของอากาศและวัสดุ การระเหยโดยตรงเกิดขึ้นเมื่อความดันไอในผิวมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ อย่างเช่นในกรณีของการอบแห้งในสุญญากาศ (vacuum drying) และการอบแห้งแบบแช่

แข็ง (freeze drying) การอบแห้งแบบการพาความร้อนสถานะขอบสำหรับอัตราการถ่ายเทความร้อน (heat flux: q_c) และอัตราการระเหย n_w จะอยู่ในรูป

$$\text{Heat transfer} \longrightarrow q_c = h_g (T_{sf} - T_g) \quad (3.16)$$

$$\text{Mass transfer} \longrightarrow n_w = K_g (P_{vsf} - P_{vg}) \quad (3.17)$$

โดยที่

h_g คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

K_g คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล

T_{sf} คือ อุณหภูมิพื้นผิววัสดุ

T_g คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง

P_{vsf} คือ water vapor partial pressure of surface

P_{vg} คือ water vapor partial pressure of air

และความสามารถในการระเหยจะขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่ให้เข้าไปในวัสดุผ่านอากาศร้อน

ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทในระเหย q_w สามารถแสดงได้ด้วยสมการ

$$\text{Heat transfer in evaporation} \longrightarrow q_w = UA\Delta T \quad (3.18)$$

โดยที่

U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม [$W / (m^2 \cdot K)$]

A คือ พื้นที่ถ่ายเทความร้อน [m^2]

ΔT คือ ผลต่างอุณหภูมิระหว่างสารละลายกับตัวกลางความร้อน

3.5 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในส่วนของการผลิตข้าวึ่งที่มีอยู่ในปัจจุบัน

ข้าวึ่ง (parboiled rice) คือผลิตภัณฑ์จากข้าว (rice) ที่ได้จากการนำข้าวเปลือกมาแช่น้ำจนมีความชื้นประมาณ 30-40% แล้วนำไปทำให้สุกโดยการต้มหรือนึ่ง จากนั้นจึงนำมาทำให้แห้ง (dehydration) แล้วจึงสีเอาเปลือกออก การทำข้าวึ่งเป็นการปรับปรุงคุณภาพของการสีเพื่อทำให้ข้าวหักน้อยลงและปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการของข้าว เพราะสารอาหารจากชั้นเปลือกจะซึมเข้าไปในเนื้อระหว่างการแช่และการนึ่งจะทำให้ข้าวที่ได้มีสีเหลืองอ่อน

3.5.1 กรรมวิธีการผลิตข้าวนี้้ง

การผลิตข้าวนี้้งทำได้ทั้งในระดับครัวเรือนจนถึงระดับอุตสาหกรรม โดยมีขั้นตอนที่สำคัญ ดังนี้

- 1) การแช่ข้าวเปลือก (soaking หรือ steeping) คือการนำข้าวเปลือกไปแช่ในน้ำให้มีความชื้นประมาณ 30-40% เพื่อให้แป้งอ่อนตัวลงในขณะหนึ่ง (gelatinization) น้ำที่ใช้ในการแช่ข้าวเปลือกจะเป็นน้ำร้อนหรือน้ำเย็นก็ได้ ถ้าน้ำเย็นก็จะทำให้ใช้เวลาในการแช่อยู่ที่ 2-3 วัน แต่โดยทั่วไปอุณหภูมิของน้ำที่ใช้จะอยู่ที่ประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส
- 2) การต้มหรือนึ่ง (steaming) เป็นการนำข้าวเปลือกขึ้นจากขั้นตอนแรกมาต้มหรือนึ่งให้สุก เพื่อให้สตา์ช (starch) ในข้าวเปลือกเกิดการเจลาติไนซ์ (gelatinization) ได้อย่างสมบูรณ์ เม็ดสตา์ชขยายตัวสังเกตจากข้างนอกจะเห็นเปลือกเมล็ดข้าวปริออกเล็กน้อย
- 3) การทำให้แห้ง (dehydration) หลังจากต้มหรือนึ่งแล้วจะข้าวเปลือกไปทำให้แห้งโดยตากแดด (sun drying) หรือผ่านเครื่องอบแห้ง (dryer) การทำให้แห้งมีจุดประสงค์เพื่อลดความชื้นของข้าวเปลือกให้เหลือที่ 12-14% ซึ่งเหมาะแก่การเก็บรักษาและทำให้ได้ปริมาณข้าวที่เต็มเมล็ดหลังการสีมากที่สุด

3.5.2 คุณภาพข้าวนี้้ง

ข้าวนี้้งคุณภาพดี พิจารณาจากสิ่งต่างๆ ดังนี้ คือ สี ควรเป็นสีเหลืองอ่อนหรือน้ำตาลอ่อนกลืน เมื่อหุงสุกแล้วควรมีกลิ่นน้อยที่สุด คุณภาพของการสี สีได้ข้าวที่หักน้อย ลักษณะเมล็ดใส แกร่ง ไม่มีท้องไข ขนาดรูปร่างเมล็ดเหมือนข้าวธรรมดา และลักษณะเมื่อข้าวสุกแล้วเมล็ดร่วนไม่ติดกัน

3.5.3 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในการทำข้าวนี้้ง

- 1) ข้าวเปลือกหรือวัตถุดิบสำหรับทำข้าวนี้้ง ควรมีสีของเปลือกและสีชั้นปลอกรำอ่อน เช่น ขาว (ฟาง) หรือน้ำตาล เมล็ดอยู่ในสภาพที่สะอาดไม่มีรอยของแมลงกัดกินหรือเชื้อราทำลาย
- 2) ต้องควบคุมอุณหภูมิของน้ำและระยะเวลาการแช่ให้พอเหมาะเพื่อป้องกันการเกิดกลิ่นและสีที่ไม่ดีของข้าวนี้้ง โดยการแช่ข้าวควรทำให้เกิดการหมุนเวียนของน้ำและข้าวเพื่อป้องกันความร้อนสะสมซึ่งจะทำให้เกิดเมล็ดผิปรกติ (deform grain)

- 3) อุณหภูมิและเวลาขณะหนึ่งต้องควบคุมให้พอเหมาะไม่ควรให้สูงเกินไปเพราะจะมีผลต่อข้าวหนึ่ง ทำให้ลักษณะเมล็ดผิดปกติ (deform grain) และข้าวสารแข็งเกินไปเมื่อใช้เวลานาน
- 4) การทำให้แห้ง ต้องเป็นไปอย่างช้าๆ และสม่ำเสมอถ้าใช้ความร้อนสูงเกินไปและทำให้แห้งรวดเร็ว ข้าวจะแตกและเมื่อสีออกมาจะทำให้ข้าวมีโอกาสหักมากขึ้น
- 5) ความชื้นของข้าวหนึ่งไม่ควรเกิน 14% ซึ่งเหมาะสมต่อการเก็บรักษาไว้ในยุ้งฉางหรือโกดัง ทั้งนี้เพื่อป้องกันการทำลายของจุลินทรีย์โดยเฉพาะเชื้อราต่างๆ

3.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการเหนี่ยวนวสนามแม่เหล็ก วงจรคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนความร้อน และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งที่มีอยู่ในปัจจุบัน ได้แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่สามารถรวมกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งที่จะต้องแช่ข้าวหนึ่งและนึ่งให้อยู่ในขั้นตอนเดียวกัน และยังคงคุณภาพของข้าวหนึ่งไว้ เพื่อลดน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตที่กล่าวมา ส่วนในบทต่อไปจะกล่าวถึงในเรื่องของการออกแบบและสร้างระบบผลิตข้าวหนึ่งโดยใช้วงจรเหนี่ยวนวสนามแม่เหล็กและวงจรคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงเป็นตัวให้พลังงานความร้อน

บทที่ 4

การออกแบบและสร้างเครื่องผลิตข้าวหนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

4.1 บทนำ

สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ผลการจำลอง การออกแบบเครื่องผลิตข้าวหนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง และการคำนวณกำลังงาน โดยอาศัยหลักการออกแบบจากทฤษฎีในบทที่ 3 สำหรับการออกแบบระบบประกอบไปด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ คู่กับการใช้ลมร้อนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ซึ่งกระบวนการทั้งหมดนี้เป็นออกแบบกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง โดยออกแบบของแต่ละส่วนประกอบดังนี้คือ ในกระบวนการแรกจะเป็นการหนึ่งด้วยความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (ไมโครเวฟ) ซึ่งในส่วนนี้ทางผู้วิจัยได้คำนวณและออกแบบขนาดของอุโมงค์ท่อนำคลื่นให้เหมาะสมที่สามารถใช้ในอุตสาหกรรมข้าวขนาดใหญ่ได้ โดยใช้โปรแกรมจำลองขนาดและระยะการปล่อยคลื่น โดยจุดปล่อยคลื่นจะเป็นการจำลองพอร์ตเหมือนกับคลื่นที่หัวแมกนีตรอนปล่อย โดยใช้คลื่นความถี่ 2.45 GHz และโหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการจำลองเป็นข้าวเพื่อวิเคราะห์ผลการแพร่กระจายของคลื่นในท่อนำคลื่นและวิเคราะห์ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่โหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์ และในกระบวนการที่สองเป็นการลดความชื้นด้วยความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง(ไมโครเวฟ)เพื่อไล่ความชื้นภายในเมล็ดข้าวโดยควบคุมอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวไม่เกิน 60 องศาเซลเซียสและต่อด้วยการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก จะเป็นการออกแบบสำหรับการใช้ลมร้อนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก เป็นตัวช่วยในการลดความชื้นข้าวเป็นกระบวนการสุดท้ายเพื่อไล่ความชื้นที่เปลือกข้าว ซึ่งทำให้ความชื้นที่เปลือกข้าวเกิดการระเหยและสามารถลดความชื้นเพิ่มได้อีก โดยในส่วนนี้จะทำการออกแบบวงจรเหนี่ยวนำความร้อนและการออกแบบชุดโหลดความร้อนเพื่อเป็นแหล่งพลังงานความร้อนร่วมกันของระบบต่อไป ซึ่งในกระบวนการออกแบบของระบบทั้ง 3 ระบบนี้จะอธิบายเกี่ยวกับการทำงานและรายละเอียดของการสร้างเครื่องในแต่ละส่วนต่อไป

4.2 การออกแบบระบบผลิตข้าวหนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

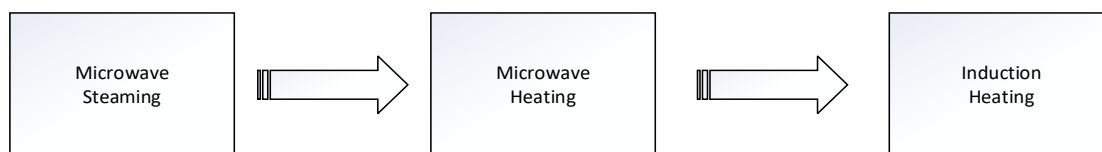
ในการสร้างเครื่องผลิตข้าวหนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงนั้น ผู้วิจัยจะทำการออกแบบสร้างเครื่องตั้งแต่กระบวนการแรกของการผลิตจากข้าวเปลือกจนถึงการได้ข้าวหนึ่งที่มีคุณภาพ ซึ่งประกอบด้วยหลักการการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ และการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการเหนี่ยวนำสนาม

แม่เหล็กเป็นพลังงานร่วมของทั้งสองกระบวนการ โดยความขึ้นที่เกิดขึ้นจากการนี้แล้วนั้นจะมีความขึ้นเริ่มต้นประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ผู้วิจัยต้องการออกแบบระบบให้สามารถลดความขึ้นเหลือประมาณ 14-16 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาถึงระบบการนี้ข้างนี้ด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงและการลดความขึ้นข้าวที่มีความขึ้นสูงและตรวจสอบคุณภาพข้าวที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและการให้ความร้อนแบบการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นหลักการให้ความร้อนและลดความขึ้นข้าวที่มีประสิทธิภาพ ใช้เวลาสั้น และประหยัดพลังงาน โดยจะทำการออกแบบชุดนี้ข้าวและชุดลดความขึ้นข้าวทั้ง 2 ระบบแล้วจะทำนี้ข้างนี้และลดความขึ้นให้เหลือที่ 14-16 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ ซึ่งการออกแบบระบบนี้ จะดำเนินการออกแบบระบบที่มีกำลังงานการผลิตที่ไม่เกิน 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สำหรับการออกแบบระบบต่อไป โดยรายละเอียดของหลักการทำงานของแต่ละระบบสามารถแสดงดังรูปที่ 4.1

รูปที่ 4.1 แสดงการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงและการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

การให้ความร้อนกับวัตถุดิบด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง เป็นการใช้เทคโนโลยีการให้ความร้อนด้วยหลักการที่เหมือนกัน คือการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกและสามารถใช้สมการการให้ความร้อนสำหรับการออกแบบดังสมการในบทที่ 3 คลื่นความถี่สูงที่ใช้จะอยู่ในช่วงของคลื่นไมโครเวฟอยู่ในช่วง 2.40 – 2.50 GHz โดยความถี่ย่านไมโครเวฟจะเหมาะสมกับการให้ความร้อนกับวัตถุดิบที่มีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบ ซึ่งมีความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ของข้าว และสามารถลดความขึ้นของข้าวได้ แต่คุณภาพข้าวจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับการใช้เทคโนโลยีใดในการให้ความร้อนก่อนและหลัง ซึ่งจะได้ทดสอบในบทที่ 4 ต่อไป



รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบผลิตข้าวหนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

ระบบจะบรรจุข้าวเปลือกใส่กล่องพลาสติกแล้วเติมน้ำจากนั้นนำข้าวผ่านทางสายพานลำเลียงผ่านชุดให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อนึ่งข้าวเปลือกให้สุกก่อนจะใช้เวลาประมาณ 1-3 ชั่วโมงขึ้นอยู่กับความต้องการข้าวหนึ่งที่มีสีเข้มหรืออ่อนจากนั้นนำข้าวออกจากกล่องพลาสติกแล้วนำข้าวผ่านทางสายพานลำเลียงเข้ามาผ่านต่อด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อลดความชื้นหลังจากการนึ่งและจะใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 4.2 ซึ่งจะเป็นหลักการพาความร้อน เป็นตัวช่วยหลักในการนำพาความชื้นออกมาจากวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ข้าวจะออกมาทางระบบสายพาน สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบระบบด้วยหลักการทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตข้าวหนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงสามารถวิเคราะห์และออกแบบได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

4.3 การวิเคราะห์พลังงานความร้อนที่ข้าวจะได้รับ

การวิเคราะห์พลังงานความร้อนที่ข้าวจะได้รับ สามารถออกแบบโดยการนำข้อมูลของปริมาณของข้าวเปรียบเทียบกับกำลังงานที่ใช้ โดยงานวิจัยนี้จะดำเนินการออกแบบที่ขนาดกำลังการผลิตข้าวไม่เกิน 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ดังนั้นสามารถคำนวณปริมาณข้าวเทียบกับกำลังงาน ยกตัวอย่างการออกแบบที่กำลังงานการผลิตสูงสุด คือ ข้าว 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จะให้ความร้อนที่ประมาณ 60-100 องศาเซลเซียส โดยสามารถออกแบบการให้ความร้อนในช่วงหนึ่งที่ 90-100 องศา และช่วงการลดความชื้น 2 ช่วงคือ ความชื้นเริ่มต้น 14 เปอร์เซ็นต์ นำไปนึ่งให้กลายเป็นข้าวหนึ่งที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง จากนั้นจะได้ข้าวหนึ่งที่ความชื้น 30-40 เปอร์เซ็นต์ และจะลดความชื้นให้เหลือ 28 เปอร์เซ็นต์ โดยกำหนดให้อุณหภูมิข้าวเริ่มต้นอยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส และช่วงที่สองจะเป็นการคำนวณความชื้นที่ 28 เปอร์เซ็นต์ ลดความชื้นให้เหลือ 16 เปอร์เซ็นต์ โดยจะนำข้อมูลของปริมาณข้าวเปรียบเทียบกับกำลังงานที่ต้องใช้ โดยจะให้ความร้อนอยู่ที่ประมาณ 60 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิข้าว

เริ่มต้นอยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถคำนวณหาความชื้นสุดท้ายหลังจากการลดความชื้นแล้วได้จากสมการที่ 3.4 ในบทที่ 3

$$W_f = \frac{W_i(1 - M_i)}{1 - M_f} \quad (4.1)$$

ในช่วงแรกปริมาณข้าวที่ใช้ในการคำนวณ 100 กิโลกรัม มีความชื้นประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อผ่านเครื่องลดความชื้นแล้วเหลือความชื้นอยู่ที่ 28 เปอร์เซ็นต์ และต้องการให้ข้าวมีความร้อนหลังจากที่มีการลดความชื้นในระบบแล้วอยู่ที่ประมาณไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส โดยกำหนดค่าของข้าวก่อนที่จะเข้าเครื่องอยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส ทำการคำนวณหาน้ำหนักที่เหลือโดยประมาณ ซึ่ง W_f คือน้ำหนักสุดท้าย (กิโลกรัม), W_i คือน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม), M_i คือความชื้นเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์) และ M_f คือความชื้นสุดท้ายหลังการลดความชื้น (เปอร์เซ็นต์)

$$W_f = \frac{100(1 - 0.4)}{1 - 0.28} = 83.33 \text{ กิโลกรัม}$$

จากการคำนวณจะเหลือน้ำหนักสุดท้ายเท่ากับ 83.33 กิโลกรัม และน้ำที่ระเหยออกไป $100 - 83.33$ เท่ากับ 16.67 กิโลกรัม แล้วนำน้ำที่ระเหยออกไปนำมาคำนวณหาพลังงานความร้อนจากสมการที่ 3.9 ในบทที่ 3

$$\begin{aligned} Q_T &= Q_i + Q_d \\ Q_{Total} &= mc\Delta T + ml \end{aligned} \quad (4.2)$$

โดยที่ Q_{Total} คือ ค่าพลังงานความร้อนทั้งหมด (แคลอรี),

m คือ น้ำหนักของน้ำที่ระเหยออก (กรัม),

c คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (1 แคลอรีต่อกรัมองศาเซลเซียส),

ΔT คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปจากสภาพปกติ (องศาเซลเซียส) และ l คือความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (540 แคลอรีต่อกรัม)

$$Q_{Total} = 36500 \times 1 \times (60 - 40) + 36500 \times 540 = 9.5 \times 10^6 \text{ แคลอรี}$$

$$Q_{Total} = 4 \times 10^7 \text{ จูล}$$

เมื่อทำการคำนวณเป็นกำลังไฟฟ้าจากการใช้เวลาทั้งหมด 1 ชั่วโมงในการลดความชื้น จากสมการที่ 3.10 ในบทที่ 3 จะได้

$$P = \frac{Q}{t} = \frac{4 \times 10^7}{60 \times 60} = 11.11 \text{ กิโลวัตต์}$$

ซึ่งจากการคำนวณที่ความชื้น 40 เปอร์เซ็นต์ ต้องการให้ลดความชื้นเหลือ 28 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ปริมาณข้าวที่ต้องการทดสอบ 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จะต้องใช้กำลังงานที่ 11.11 กิโลกรัม เมื่อต้องการปริมาณข้าวที่เพิ่มขึ้นหรือน้อยลง สามารถดูได้จากข้อมูลที่ตาราง 4.1

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบปริมาณข้าวที่ได้กับกำลังงานที่ต้องการใช้ในครั้งแรก

ปริมาณข้าวที่ได้ (กิโลกรัม)	กำลังงานที่ต้องใช้ (กิโลวัตต์)
10	1.11
20	2.22
30	3.33
40	4.44
50	5.56
60	6.67
70	7.78
80	8.89
90	10.00
100	11.11

ซึ่งในการคำนวณช่วงที่ 2 จะเป็นการคำนวณที่ความชื้น 28 เปอร์เซ็นต์ ลดให้เหลือความชื้น 16 เปอร์เซ็นต์ โดยจะนำข้อมูลของปริมาณข้าวเปรียบเทียบกับกำลังงานที่ต้องใช้ โดยจะคำนวณปริมาณข้าวที่ 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยให้ความร้อนอยู่ที่ประมาณไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส โดยกำหนดค่าของข้าวก่อนที่จะเข้าเครื่องอยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส และเมื่อต้องการปริมาณข้าวที่เพิ่มขึ้นหรือน้อยลง สามารถดูได้จากข้อมูลที่ตาราง 4.2

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบปริมาณข้าวที่ได้กับกำลังงานที่ต้องการใช้

ปริมาณข้าวที่ได้(กิโลกรัม)	กำลังงานที่ต้องใช้ (กิโลวัตต์)
10	1.11
20	2.22
30	3.33
40	4.44
50	5.56
60	6.67
70	7.78
80	8.89
90	10.00
100	11.11

จากข้อมูลตารางที่ 4.1 และ 4.2 เป็นตารางการเปรียบเทียบปริมาณข้าวที่ได้กับกำลังงานที่ต้องใช้ ซึ่งข้อมูลในส่วนนี้จะสามารถนำไปออกแบบสร้างเครื่องได้ เมื่อต้องการกำลังการผลิตที่สูงขึ้น สามารถใช้กำลังงานในการให้ความร้อนของระบบที่สูงขึ้นได้เช่นกัน ดังนั้นจากการคำนวณสำหรับการออกแบบ ผู้วิจัยจะออกแบบสร้างระบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟและจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ให้ได้กำลังการผลิตสูงสุดที่ 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จะได้ขนาดกำลังงานสูงสุดที่ประมาณ 11.11 กิโลวัตต์ ดังนั้นในการออกแบบระบบในการลดความชื้นด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟและจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กนี้ จะได้ดำเนินการออกแบบระบบในแต่ละเครื่องเท่ากับ 12 กิโลวัตต์ต่อไป

สำหรับขั้นตอนและการออกแบบสร้างระบบผลิตข้าวหนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟประสิทธิภาพสูงโดยอาศัยการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟและการใช้ลมร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กนั้น ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและสร้างส่วนประกอบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ คือ

1. การออกแบบระบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟ
 - 1.1 ท่อนำคลื่น
 - 1.2 การจำลองผลการแพร่กระจายคลื่นของอุโมงค์ท่อนำคลื่นและความเข้มสนามไฟฟ้าที่โหลดไดโอดเล็กตริก
 - 1.3 การออกแบบและสร้างเครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟ

2. การออกแบบระบบการใช้ความร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

2.1 การออกแบบวงจรเหนี่ยวนำความร้อน

2.2 การออกแบบชุดโหลดความร้อน

2.3 การออกแบบตัวเครื่องอบลมร้อนด้วยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

4.4 การออกแบบระบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟ

จากการวิเคราะห์ด้วยหลักการทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบระบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟซึ่งจะต้องใช้กำลังงานไม่น้อยกว่า 12 กิโลวัตต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีการออกแบบ ระบบโดยใช้หลอดแมกนีตรอน ทั้งหมด 8 หัว โดยแต่ละหัวสามารถออกแบบให้มีการจ่ายกำลังงานสูงสุดได้ถึง 1500 วัตต์ สำหรับการจัดวางตำแหน่งของหลอดแมกนีตรอนสามารถจำลอง ผลการแพร่กระจายคลื่นของท่อนำคลื่นและความเข้มสนามไฟฟ้าที่โหลดไดโอดเล็กทรอนิกส์และการออกแบบสร้างระบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งจะได้วิเคราะห์และออกแบบดังต่อไปนี้

4.4.1 ท่อนำคลื่น

การออกแบบท่อนำคลื่นสำหรับการใช้งานทำได้โดยการเลือกขนาดหน้าตัดจากท่อนำคลื่นมาตรฐาน (Standard Rectangular Waveguide Sizes) ซึ่งมาตรฐานที่จะเลือกนำมาใช้ขึ้นอยู่กับความถี่ที่ต้องการใช้งาน ในโครงการนี้ใช้ความถี่ที่ 2.45 GHz ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาดท่อนำคลื่นขนาด WR340 ตามมาตรฐาน EIA คือ ด้านกว้าง $a = 8.6 \text{ cm}$ และด้านแคบ $b = 4.3 \text{ cm}$ วัสดุที่ใช้ทำ คือ อลูมิเนียม เพราะมีราคาถูกและไม่เกิดสนิม โหมดความถี่ใช้งานคือ TE_{10} ดังนั้นการออกแบบท่อนำคลื่นชนิดควิตี้ โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

โดยการคำนวณหาค่าความถี่คัทออฟที่ต่ำสุดที่คลื่นสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้ในท่อนำคลื่นชนิดควิตี้ จากโหมด TE_{10} ค่า $m = 1$, $n = 0$ จะสามารถหาความถี่คัทออฟได้จากสมการ ดังนี้

$$f_{cutoff} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (4.3)$$

โดยที่ f_{cutoff} คือ ความถี่คัทออฟ (Hz)

c คือ ความเร็วของแสง เท่ากับ $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

m คือ จำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่นที่ด้านกว้างของท่อนำคลื่น

n คือ จำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่นที่ด้านแคบของท่อนำคลื่น

a คือ ด้านกว้างของท่อนำคลื่น (m)

b คือ ด้านแคบของท่อนำคลื่น (m)

แทนค่า จะได้

$$f_{cutoff} = \frac{3 \times 10^8}{2(3.14)} \sqrt{\left(\frac{(1)(3.14)}{8.6 \times 10^{-2}}\right)^2 + \left(\frac{(0)(3.14)}{4.3 \times 10^{-2}}\right)^2}$$

$$= 1.74 \times 10^9$$

$$f_{cutoff} = 1.74 \text{ GHz}$$

การคำนวณหาความยาวคลื่นคัทออฟ จากสมการ

$$\lambda_{cutoff} = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}} \quad (4.4)$$

โดยที่ λ_{cutoff} คือ ความยาวคลื่นคัทออฟ (m)

แทนค่า จะได้

$$\lambda_{cutoff} = \frac{2(3.14)}{\sqrt{\left(\frac{1(3.14)}{8.6 \times 10^{-2}}\right)^2 + \left(\frac{0(3.14)}{4.3 \times 10^{-2}}\right)^2}}$$

$$= 17.2 \times 10^{-2}$$

$$\lambda_{cutoff} = 17.2 \text{ cm}$$

การคำนวณหาความยาวคลื่นในท่อคลื่น จากสมการ

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cutoff}}\right)^2}} \quad (4.5)$$

โดยที่ λ_g คือ ความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น (m)

λ คือ ความยาวคลื่นในอวกาศว่าง (m)

หาค่า λ จากสมการ

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4.6)$$

โดยที่ f คือ ความถี่ที่ใช้งาน (Hz)

แทนค่า จะได้

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{3 \times 10^8}{2.45 \times 10^9} \\ &= 12.24 \times 10^{-2} \\ \lambda &= 12.24 \text{ cm} \end{aligned}$$

จาก $\lambda = 12.24 \text{ cm}$ และ $\lambda_{cutoff} = 17.2 \text{ cm}$ ดังนั้นความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น จะได้

$$\begin{aligned} \lambda_g &= \frac{12.24 \times 10^{-2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{12.24 \times 10^{-2}}{17.2 \times 10^{-2}}\right)^2}} \\ &= 17.42 \times 10^{-2} \\ \lambda_g &= 17.42 \text{ cm} \end{aligned}$$

การคำนวณหาความสูญเสียเนื่องจากผิวตัวนำ จากสมการ

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (4.7)$$

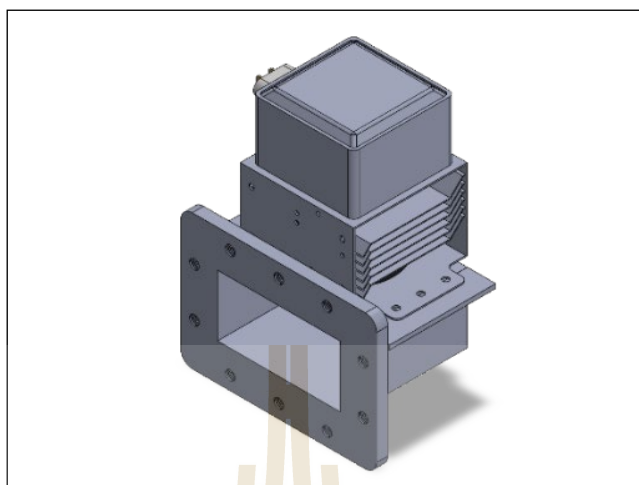
โดยที่ δ คือ ความลึกผิวตัวนำ (m)
 ρ คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวนำ (Ω/m)
 ω คือ ความถี่เชิงมุม มีค่าเท่ากับ $2\pi f$ (rad/s)

วัสดุที่ใช้เป็นอลูมิเนียม $\rho = 2.68 \times 10^{-8} \Omega/m$ จะได้

$$\begin{aligned} \delta &= \sqrt{\frac{2.62 \times 10^{-8}}{(3.14)(2.45 \times 10^9)(4 \times 3.14 \times 10^{-7})}} \\ &= 1.65 \times 10^{-6} \\ \delta &= 1.65 \mu m \end{aligned}$$

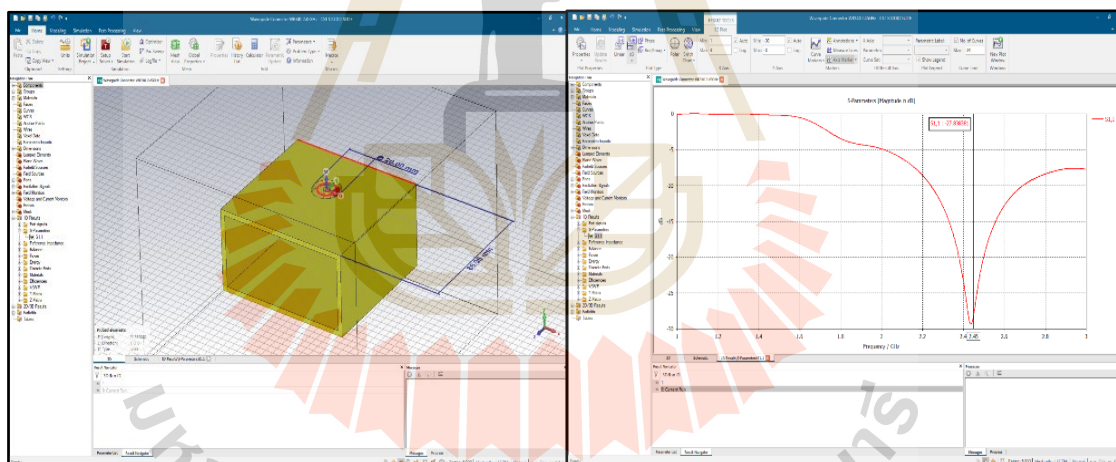
จากการคำนวณพารามิเตอร์ที่ใช้ในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมข้างต้น ขนาดที่เลือกนำมาใช้สามารถให้คลื่นความถี่ 2.45 GHz ผ่านได้ ค่าความสูญเสียเนื่องจากผิวตัวนำมีค่า $\delta = 1.65 \mu m$ และความยาวคลื่นในท่อนำคลื่นที่คำนวณได้คือ $\lambda_g = 17.42 cm$ เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบท่อนำคลื่นชนิดควาวิต์ต่อไป โดยท่อนำคลื่นดังกล่าวนี้สามารถแสดงขนาดของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังรูปต่อไปนี้

โดยทั้งหมดจะใช้ท่อนำคลื่น(Waveguide WR340)ตามขนาดมาตรฐานที่ 86.36x43.18mm ซึ่งจะแสดงรายละเอียดการจำลองผลและออกแบบได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.3 ท่อนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง หรือ Waveguide

โดยส่วนนี้จะเป็นส่วนของการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงกำลังสูง โดยจะประกอบด้วย แหล่งจ่ายกำลังงานที่สร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงส่งไปยังส่วนของ Stub tuner Waveguide

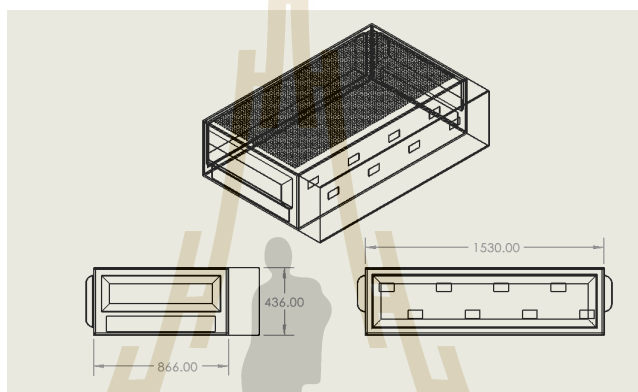


รูปที่ 4.4 การ simulation ตัว Waveguide

จากรูปที่ 4.4 simulation ด้วยโปรแกรมเพื่อดูการนำคลื่นของท่อนำคลื่นนั้น จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ S11 เพื่อดูค่าสูญเสียย้อนกลับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางภายในท่อนำคลื่น ซึ่งจากรูปผลของ S11 มีค่าเป็น -27.83 ที่ความถี่ 2.45GHz โดยแสดงให้เห็นว่ามีค่าสะท้อนกลับน้อยและทำให้มีการนำส่งคลื่นได้ดี

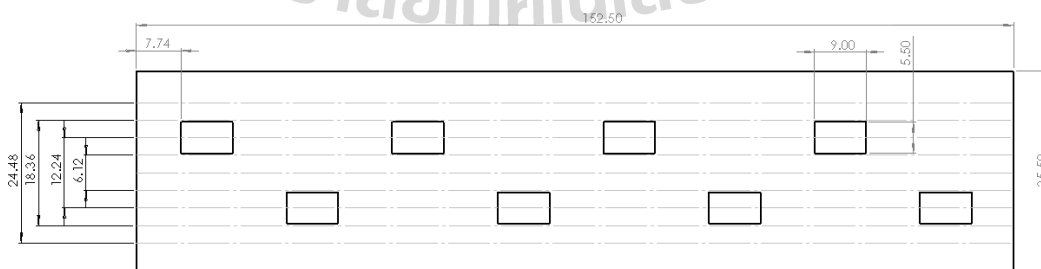
4.4.2 การจำลองผลการแพร่กระจายคลื่นของอุโมงค์ท่อนำคลื่นและความเข้มสนามไฟฟ้าที่โหลดได้อิเล็กทรอนิกส์

ในการจำลองผลการวิเคราะห์ ใช้โปรแกรม CST MW Studio โดยขนาดของท่อนำคลื่นสามารถออกแบบและคำนวณได้จากสมการของคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz เพื่อให้ได้ขนาดที่เป็นมาตรฐานและรองรับการใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตความชื้น โดยขนาดที่ออกแบบมี ความกว้าง 86.6 ความยาว 153 และความสูง 43.6 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.5



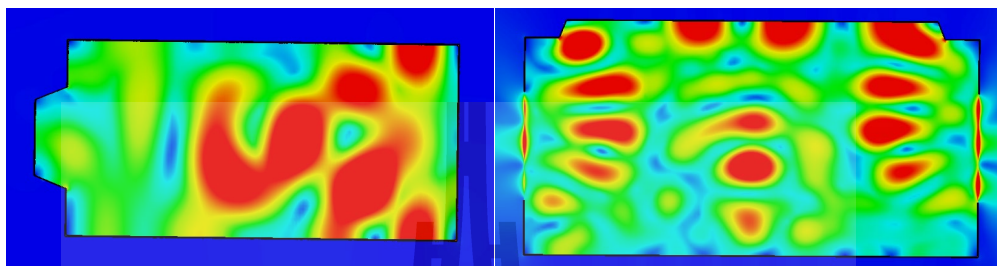
รูปที่ 4.5 ขนาดของอุโมงค์ท่อนำคลื่น

โดยในการออกแบบการจำลองผล มีพอร์ตตัวปล่อยคลื่นจำนวนทั้งหมด 8 พอร์ต แบ่งออกเป็น 2 ชุด ชุดละ 4 พอร์ต โดยแต่ละพอร์ตจะมีระยะห่างที่ 2λ ตามระยะของแกน X และในการวิเคราะห์จะทำการปรับระยะของพอร์ตแต่ละชุดห่างกันที่ระยะ $\frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}$ และ 2λ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.6 และทำการวิเคราะห์หาผลของการกระจายคลื่นในท่อนำคลื่นและความเข้มของสนามไฟฟ้าที่โหลดได้อิเล็กทรอนิกส์ที่ระยะที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด

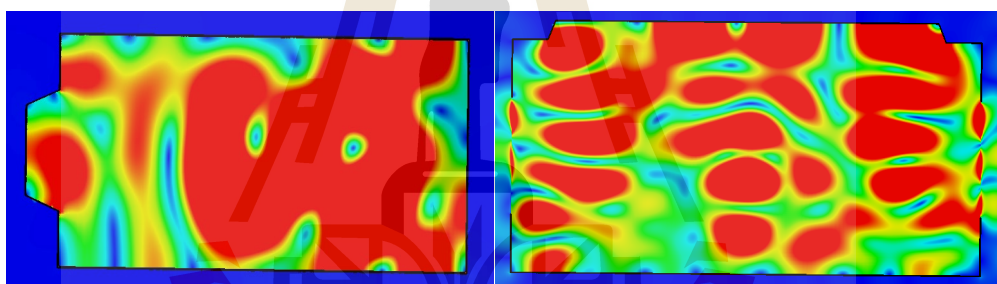


รูปที่ 4.6 แสดงระยะของพอร์ต

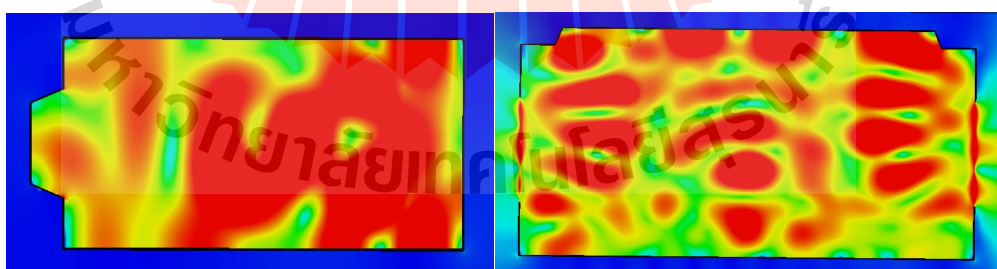
ผลการจำลองจะแสดงการแพร่กระจายของคลื่นในท่อนำคลื่นและความเข้มของสนามไฟฟ้าที่โหนดไดโอดเล็กดังต่อไปนี้



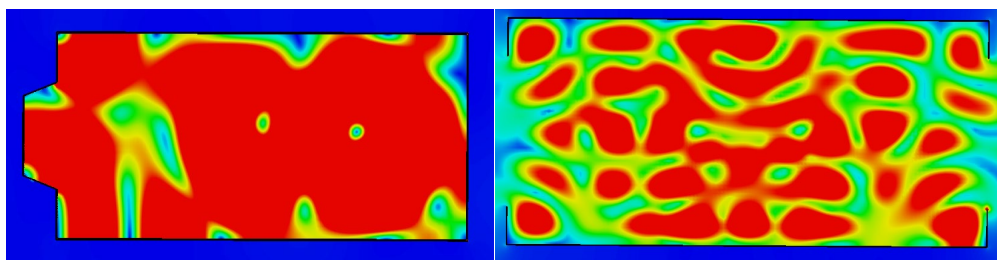
รูปที่ 4.7 ระยะห่างของพอร์ตแต่ละชุดที่ระยะห่าง $\frac{\lambda}{2}$ ตามแกน Y



รูปที่ 4.8 ระยะห่างของพอร์ตแต่ละชุดที่ระยะห่าง λ ตามแกน Y



รูปที่ 4.9 ระยะห่างของพอร์ตแต่ละชุดที่ระยะห่าง $\frac{3\lambda}{2}$ ตามแกน Y



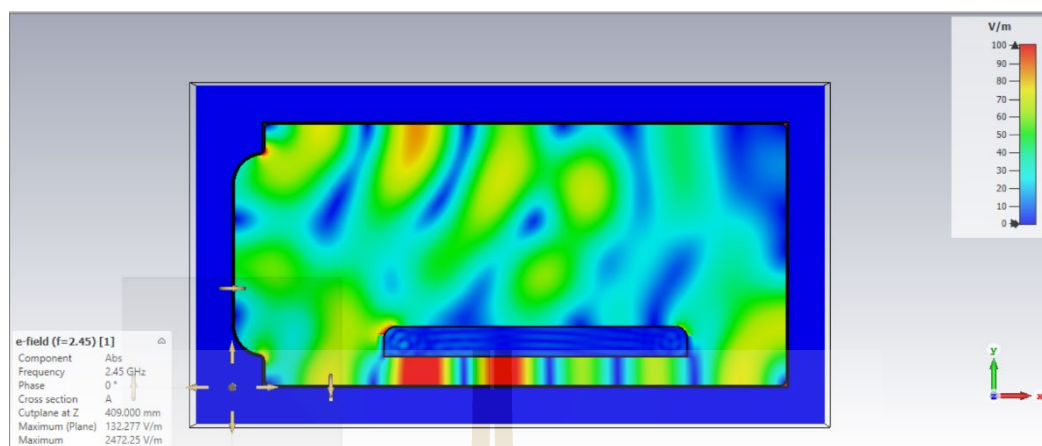
รูปที่ 4.10 ระยะห่างของพอร์ตแต่ละชุดที่ระยะห่าง 2λ ตามแกน Y

พบว่ากรณีที่ตำแหน่งของระยะความยาวคลื่นเท่ากับ $\frac{\lambda}{2}$ การแพร่กระจายของคลื่นในอุโมงค์ท่อนำคลื่นจะอยู่ที่บริเวณตรงกลางจะมีสนามไฟฟ้าเข้มข้นกว่า ขณะที่บริเวณรอบ ๆ จะมีสนามไฟฟ้าเข้มข้นน้อยกว่า ส่วนการวิเคราะห์ที่โหนดไดโวลต์กริก ความเข้มของสนามไฟฟ้าบริเวณตรงกลางยังมีความเข้มข้นมากขึ้น ดังรูปที่ 4.7 เนื่องจากระยะการวางพอร์ตของทั้ง 2 ชุดใกล้กัน

เมื่อพิจารณาที่ระยะห่างระหว่างพอร์ตทั้ง 2 ชุด ห่างกัน λ พบว่าการแพร่กระจายคลื่นจะมีความเข้มของสนามไฟฟ้ามากอยู่ที่บริเวณในท่อนำคลื่น และความเข้มของสนามไฟฟ้าที่โหนดไดโวลต์กริกมีการกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วพื้นที่บริเวณโหนดไดโวลต์กริก ดังรูปที่ 4.8

เมื่อพิจารณาที่ระยะห่าง $\frac{3\lambda}{2}$ พบว่าการแพร่กระจายของคลื่นจะเหมือนกรณีของระยะห่าง λ แต่คลื่นส่วนใหญ่จะเข้มที่บริเวณด้านบนของท่อนำคลื่น ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงาน และยังทำให้ลดประสิทธิภาพของการกระจายคลื่นไปยังโหนดไดโวลต์กริก ดังรูปที่ 4.9

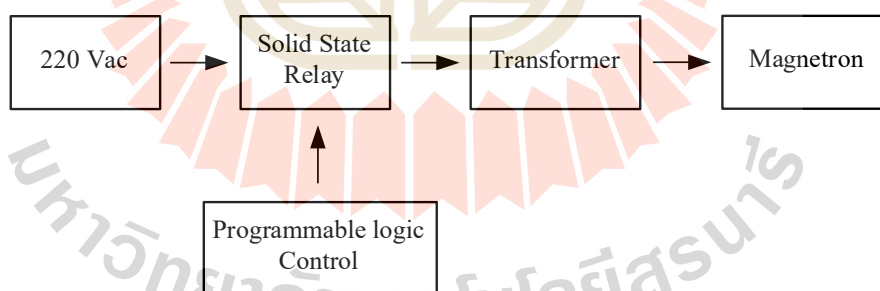
จากผลการจำลองระยะห่างที่คลื่นแพร่กระจายในท่อนำคลื่นและมีความเข้มของสนามไฟฟ้าที่โหนดไดโวลต์กริกเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด คือระยะ 2λ สำหรับความเข้มของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดอยู่ที่ 400 V/m โดยในการออกแบบการจำลองผล มีพอร์ตตัวปล่อยคลื่นจำนวนทั้งหมด 8 พอร์ต กำลังงาน 1500 วัตต์ โดยแต่ละพอร์ตจะมีระยะห่างที่ 2λ ตามระยะของแกน X และในการวิเคราะห์จะทำการปรับระยะของพอร์ตให้ห่างกันที่ระยะ 2λ ของแกน y ตามการวิเคราะห์การแพร่กระจายในท่อนำคลื่นและทำการวิเคราะห์หาระยะการวางโหนดไดโวลต์กริกที่ระยะที่เหมาะสมในการดูดซับ



รูปที่ 4.11 ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่โหลดไดโอดอิเล็กทรอนิกส์

4.4.3 การออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟ

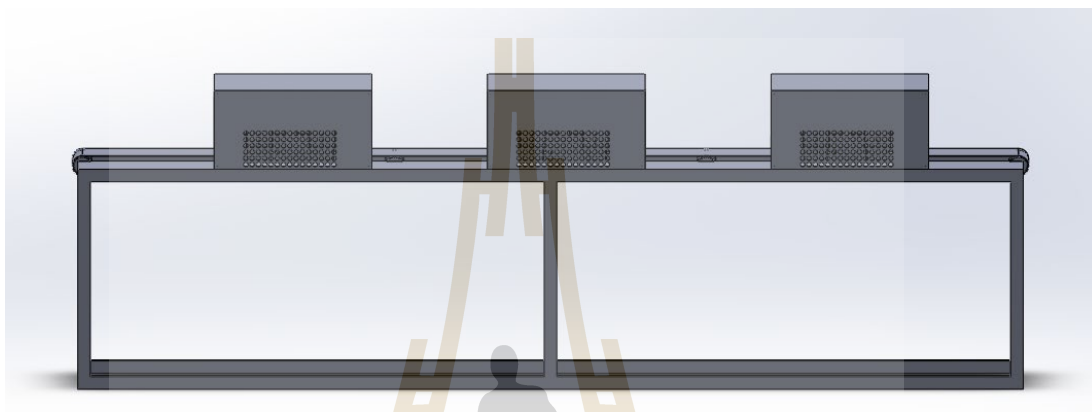
ส่วนนี้เมื่อทำการวิเคราะห์จำลองผลเรียบร้อยแล้ว จะอธิบายบล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่อง และทำการออกแบบและสร้างเครื่องโดยใช้โปรแกรม Solid Work ออกแบบในเบื้องต้นก่อน แล้วหลังจากนั้นก็ลงมือปฏิบัติสร้างเครื่อง พร้อมชุดสายพานลำเลียงกับระบบควบคุมทั้งหมด



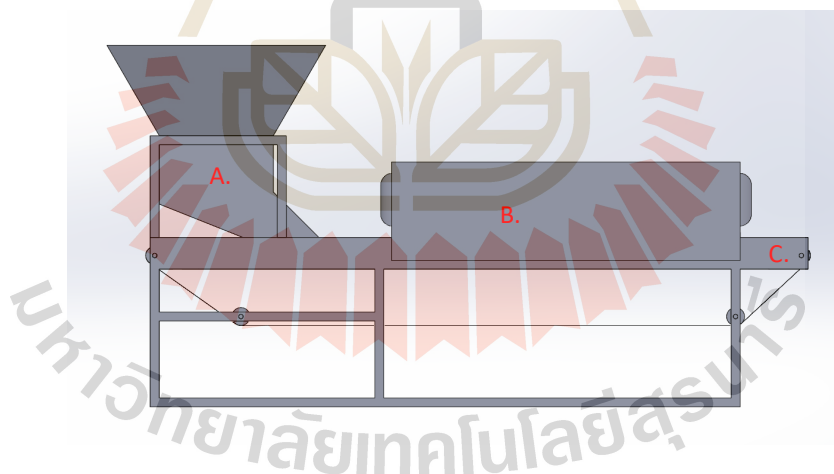
รูปที่ 4.12 แผนภาพการทำงานของระบบนี้และลดความชื้นข้าวนี้การให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

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

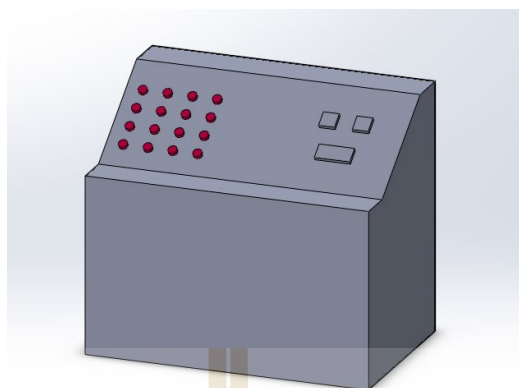
จากการวิเคราะห์ผลการจำลองเพื่อหาขนาดและระยะการวางพอร์ตที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุดแล้วนั้น ซึ่งในการออกแบบการสร้างเครื่องจะยึดตามผลการจำลอง ซึ่งขนาดที่ได้จำลองมีขนาดดังรูปที่ 4.13 และระยะการวางพอร์ตที่เหมาะสมอยู่ที่ระยะการวางพอร์ตที่ 2λ โดยได้ทำการออกแบบโครงสร้างของตู้ลดความชื้นพร้อมระบบสายพานลำเลียงกับชุดควบคุมการทำงานทั้งระบบ



รูปที่ 4.13 โครงสร้างและระบบสายพานลำเลียงของอุโมงค์นิ่งเข้าหนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง



รูปที่ 4.14. โครงสร้างและระบบสายพานลำเลียงของอุโมงค์ลดความชื้นด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง



รูปที่ 4.15 ชุดควบคุมการทำงานของลดความชื้นด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (ไมโครเวฟ)

ซึ่งในการออกแบบและสร้างเครื่องจริงได้อธิบายการทำงานในแต่ละส่วนและอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งทั้งโครงสร้าง ระบบสายพานลำเลียง พร้อมกับชุดควบคุมการทำงาน ของอุโมงค์นิ่งข้าวและอุโมงค์ลดความชื้นด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (ไมโครเวฟ)

สำหรับการออกแบบของอุโมงค์นิ่งข้าวและอุโมงค์ลดความชื้นด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (ไมโครเวฟ) จะประกอบด้วยส่วนต่างๆ คือภาคแหล่งจ่ายกำลังงานและภาคตัวปล่อยคลื่น โดยในภาคของตัวปล่อยคลื่นจะประกอบไปด้วยหัวแมกนีตรอนจำนวน 8 หัว ดังรูปที่ 4.16 โดยที่แต่ละหัวจะมีกำลังงานอยู่ที่ 1500 วัตต์ ความถี่ที่ใช้ในการปล่อยคลื่นคือความถี่ 2.45 GHz และในส่วนภาคแหล่งจ่ายกำลังงานทำหน้าที่จ่ายกำลังงานให้หัวแมกนีตรอนทำงาน ซึ่งในส่วนนี้จะประกอบไปด้วย หม้อแปลง ตัวเก็บประจุ และไดโอด ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.16 ระยะเวลาวางหัวแมกนีตรอนติดตั้งบนตู้ลดความชื้นด้วยคลื่นไมโครเวฟพร้อมระบระบายความร้อน



รูปที่ 4.17 ภาชนะหล่อจ่ายกำลังงานให้หัวแมกนีตรอนทำงานพร้อมระบบระบายความร้อน

ในส่วนระบบสายพานลำเลียงจะประกอบไปด้วย J2051 มอเตอร์เกียร์ กำลังงาน 200 W อัตราทดรอบ 1:28 รอบ เป็นมอเตอร์ 1 เฟส ดังรูปที่ 4.18 เป็นตัวควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ปรับให้ช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับความเร็วที่ปรับอินเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.18 มอเตอร์ขนาดกำลังงาน 200 W

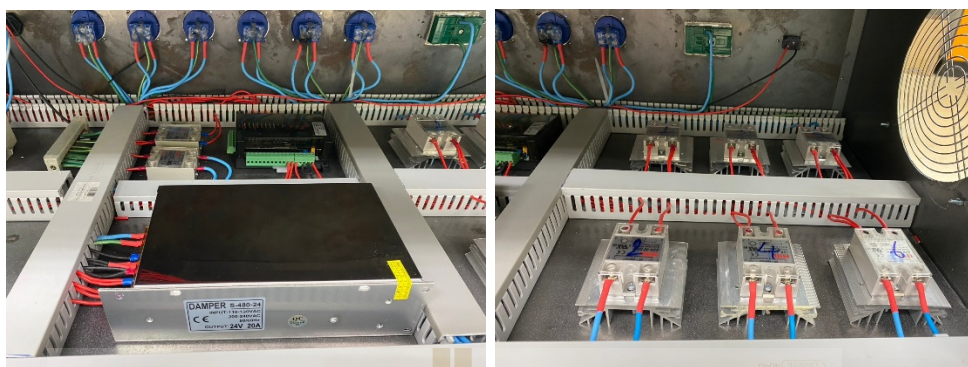


รูปที่ 4.19 กล่องปรับรอบมอเตอร์



รูปที่ 4.20 ระบบสายพานลำเลียงที่ติดตั้งบนเครื่องนึ่งข้าวและลดความชื้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ระบบควบคุมการทำงานหลักของการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า(ไมโครเวฟ) จะใช้บอร์ด PLC FX3U-30MR ในการควบคุมสัญญาณ Solid-State-Relay จ่ายไฟให้กับหม้อแปลงแหล่งจ่ายกำลังงานของหัวแมกนีตรอน อีกทั้งยังควบคุมระบบต่างๆอีกด้วย



รูปที่ 4.21 ระบบควบคุมการทำงานของหัวแมกนีตรอน (ตัวปล่อยคลื่น)

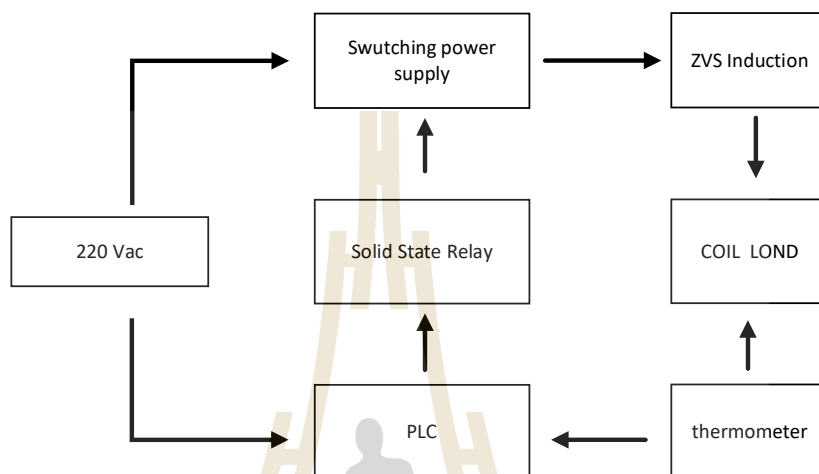


รูปที่ 4.22 เครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง(ไมโครเวฟ)

4.5 การออกแบบระบบการใช้ความร้อนจากแหล่งการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการใช้พลังงานความร้อนจากการเหนี่ยวนำความร้อนสนามแม่เหล็ก เป็นตัวช่วยเสริมการทำงานระบบความชื้นข้าวหนึ่ง โดยการใช้ความร้อนทำให้ความร้อนในข้าวเกิดการระเหยและสามารถลดความชื้นในข้าวได้ ซึ่งการออกแบบนั้นจะออกแบบให้มีกำลังงานไม่น้อยกว่า 10 กิโลวัตต์ ซึ่งในการทดสอบเก็บผลการทดลอง จะใช้อุณหภูมิสูงสุดที่ 60 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30 นาที ซึ่งแบ่งการออกแบบในส่วนต่าง ๆ ได้ดังนี้

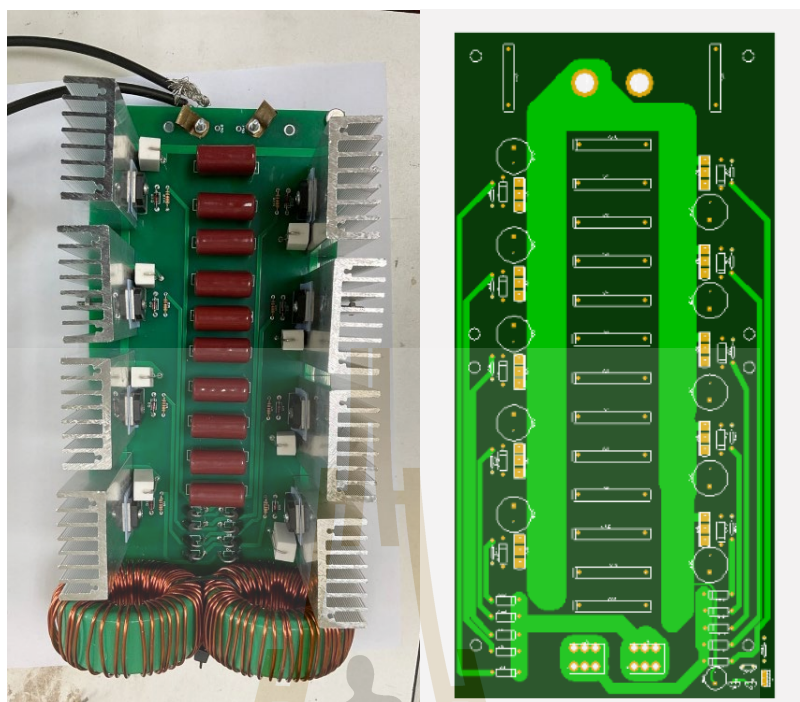
4.5.1 การออกแบบวงจรเหนี่ยวนำความร้อน



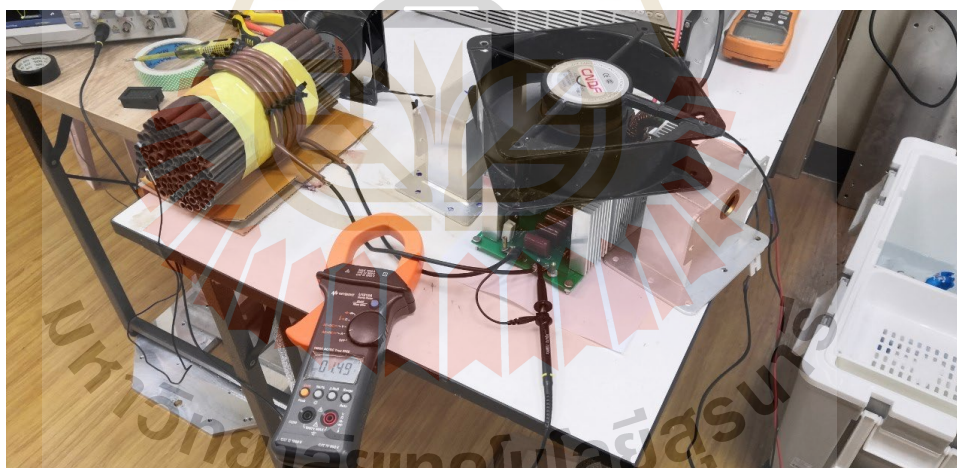
รูปที่ 4.23 การออกแบบระบบเหนี่ยวนำสามารถแสดงแผนภาพบล็อกไดอะแกรม

ในการออกแบบวงจรไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถแสดงแผนภาพบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 4.23 การสร้างวงจรเหนี่ยวนำความร้อน (Induction Heating) มีหลักการทำงานที่น่าสนใจและมีขั้นตอนที่สำคัญหลายประการ ซึ่งอธิบายได้ดังนี้:

เริ่มต้นจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ที่มีความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ซึ่งจะถูกส่งผ่านไปยังวงจรสวิตชิงพาวเวอร์ซัพพลายเพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรงจากนั้นกระแสตรงจะถูกส่งไปยังพาวเวอร์ไอจีบีที (IGBT) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์ แปลงกระแสตรงให้เป็นกระแสสลับที่มีความถี่สูง โดยใช้วงจร ZVS Induction ซึ่งความถี่ที่เหมาะสมสำหรับงานนี้อยู่ในช่วง 20–35 กิโลเฮิร์ตซ์กระแสไฟฟ้าที่มีความถี่สูงจะถูกจ่ายไปยังโหลดขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งมีค่าความเหนี่ยวนำประมาณ 35-45 ไมโครเฮนรี่ และค่าความต้านทานภายในขดลวดประมาณ 2 โอห์ม ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารอบขดลวดและเกิดการเหนี่ยวนำกับชิ้นงานโลหะการทำงานของระบบจะถูกควบคุมสัญญาณจาก PLC (Controller) ซึ่งมีหน้าที่ควบคุมการทำงานของ Solid State Relay และทำการวัดอุณหภูมิเพื่อทำการปรับกำลังงานให้เป็นไปตามต้องการ



รูปที่ 4.24 ชุดวงจรเหนี่ยวนำความร้อนที่ของเครื่องต้นแบบ



รูปที่ 4.25 ระบบของวงจรกำเนิดความถี่ในส่วนต่าง ๆ

จากวงจรดังรูปที่ 4.25 นั้นเป็นส่วนของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์เพื่อนำสัญญาณไปใช้ในการควบคุม On-Off สวิตช์ของ IGBT โดยสามารถแบ่งการทำงานของวงจรนี้ออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ ส่วนแรก a เป็นส่วนที่ใช้สร้างสัญญาณพัลส์ที่มีขนาด 5 โวลต์ โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสร้างสัญญาณพัลส์ออกมา และยังเป็นส่วนควบคุมระบบต่าง ๆ ของวงจรอีกด้วย ส่วนที่สอง b เป็นส่วนที่

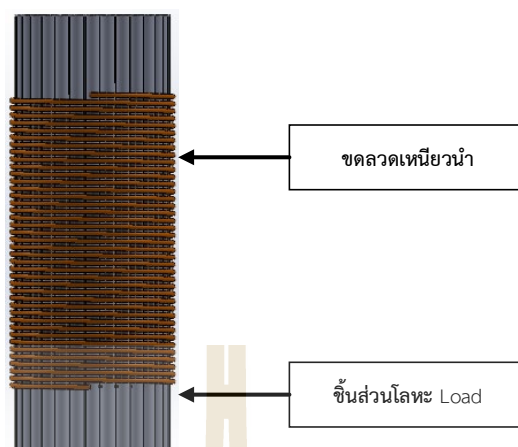
ใช้วงจรขับของ IGBT โดยใช้วงจรรวมแบบสำเร็จรูป (IC Gate Drivers) ซึ่งเป็นวงจรสั่งการให้ IGBT ทำงานแบบ Switch ได้สมบูรณ์ เพราะไม่ทำให้เกิด Loss ซึ่งในตัวชิปประมวลผลของอุปกรณ์ 1 ตัว จะมี 2 Drivers ในตัวทำให้ขับสัญญาณพัลส์ออกมา 12 โวลต์ และในส่วนที่สาม c ส่วนสุดท้ายของวงจรเป็น ส่วนการใช้หม้อแปลงแบบ pulse transformer ทำหน้าที่แยก (Isolated) ระหว่างวงจรกำเนิดสัญญาณ พัลส์ควบคุมกับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ IGBT



รูปที่ 4.26 เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำภาคแหล่งจ่ายกำลังงานพร้อมชุดควบคุม

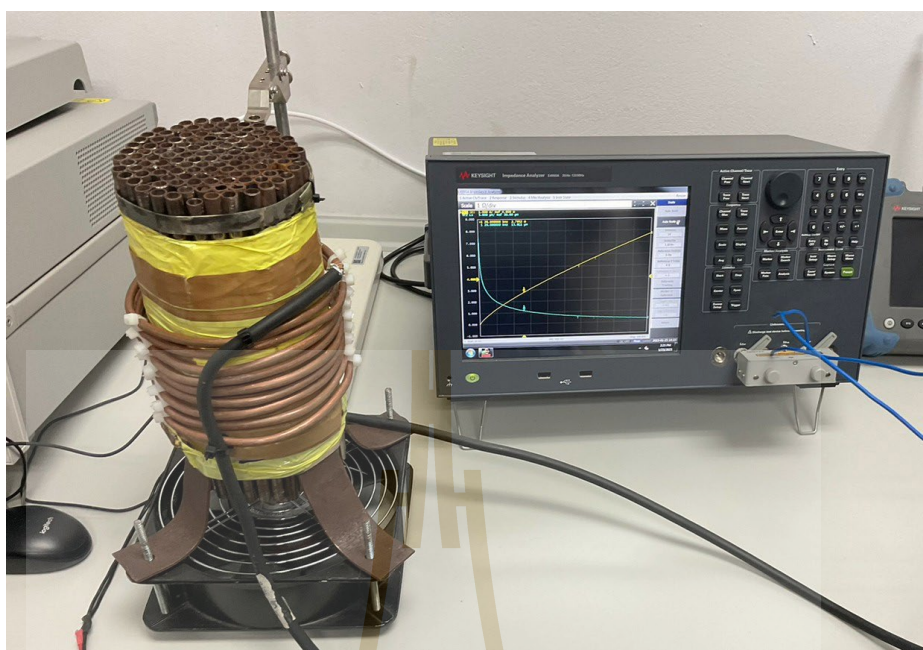
4.5.2 การออกแบบชุดโหลดความร้อน

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการออกแบบชุดโหลดความร้อนของวงจรเหนี่ยวนำความร้อนด้วย สนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะใช้โปรแกรม Solid work ในเบื้องต้นก่อนการออกแบบจริงและทำการซิมูเลเตอร์ ด้วย และในส่วนนี้ใช้เพื่อเป็นต้นกำเนิดความร้อนให้กับระบบให้ความร้อนสำหรับโหลดได้อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ส่วน ดังรูปที่ 4.28

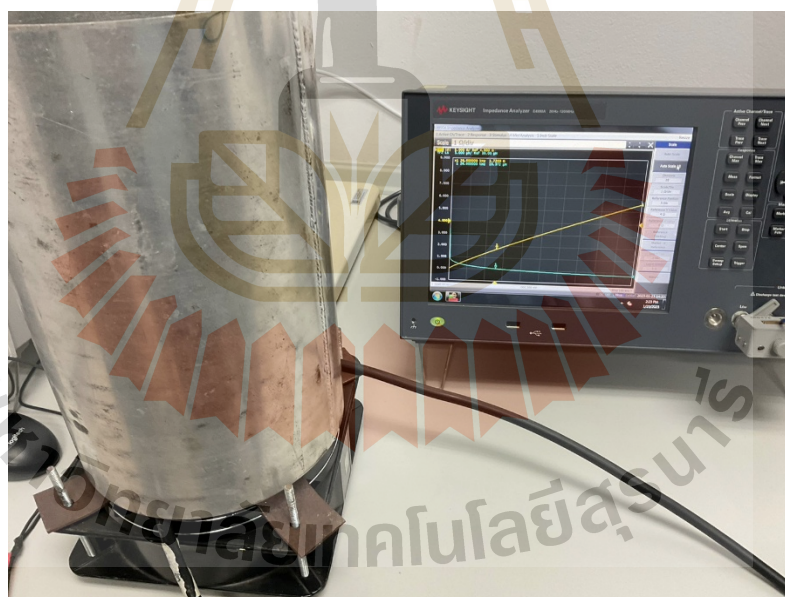


รูปที่ 4.27 ส่วนประกอบของชุดโหลดความร้อน

ในส่วนของการออกแบบชุดโหลดความร้อนนั้นดังที่ได้กล่าวไว้ในเบื้องต้นจะแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะเป็นขดลวดเหนียวน้ำมีลักษณะเป็นขดลวดทรงกระบอก ค่าความเหนียวน้ำจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดและชิ้นงานโลหะที่ถูกเหนียวน้ำถ้าหากโหลดมีค่าความเหนียวน้ำมากเกินไปจะทำให้โหลดถึงกระแสน้ำน้อยทำให้กำลังของเครื่องน้อยลงตามไปด้วย ในทางตรงกันข้ามถ้าโหลดมีค่าความเหนียวน้ำน้อยเกินไปจะทำให้โหลดถึงกระแสน้ำสูงมาก อาจส่งผลเสียต่อตัวอุปกรณ์ในวงจรได้ ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับความต้องการว่าต้องการกำลังงานของเครื่องเท่าไร ในส่วนที่สองจะเป็นชิ้นงานโลหะที่จะถูกเหนียวน้ำให้เกิดความร้อน โดยในการออกแบบชุดโหลดความร้อนสำหรับใช้เป็นแหล่งกำเนิดของความร้อนนั้นเป็นสิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงคือ หน้าสัมผัสหรือพื้นผิวของชิ้นงานโลหะร้อนที่ต้องสัมผัสกับอากาศเพื่อให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานความร้อนจากผิวของชิ้นงานโลหะไปยังอากาศให้มากที่สุด ดังนั้นในการออกแบบและสร้างชุดโหลดความร้อนทางผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเบื้องต้นโดยการการแมทซิงอิมพีแดนซ์โดยใช้เครื่องมือวัด E4990A Impedance Analyzer เป็นการวัดขดลวดเหนียวน้ำสนามแม่เหล็กโดยการจำลองโหลดจริงดังรูปที่ 4.28 และ 4.29 โดยที่รูปที่ 4.29 จะใช้อลูมิเนียมในการครอบเพื่อให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นไปดูดซับท่อเหล็กที่ใช้ในการพาลมร้อนไปในตู้ลดความชื้น

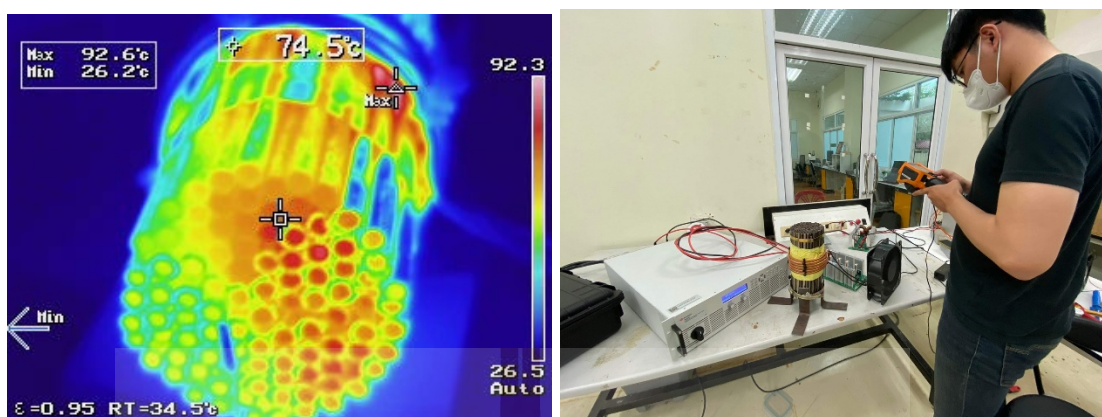


รูปที่ 4.28 การทดสอบวัดอิมพีแดนซ์ของท่อนเหล็กแบบไม่มีกรอบอลูมิเนียม



รูปที่ 4.29 การทดสอบวัดอิมพีแดนซ์ของท่อนเหล็กแบบมีกรอบอลูมิเนียม

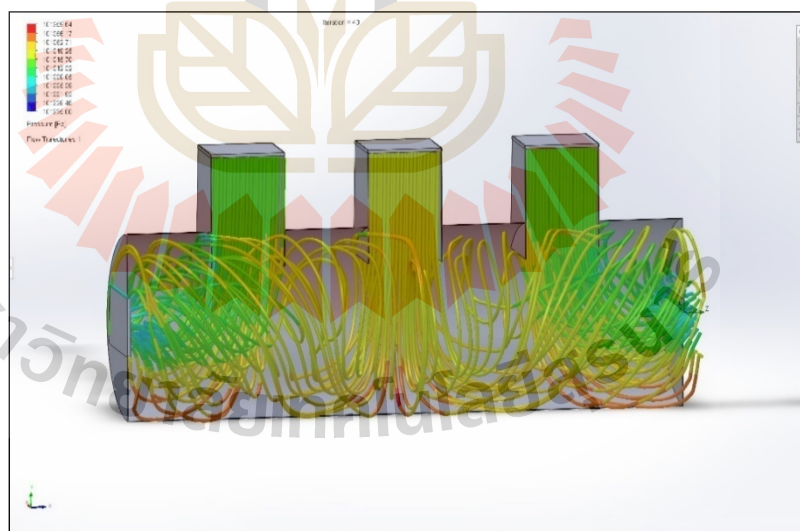
จากการทดสอบวัดและทำการแมทชิ่งอิมพีแดนซ์เพื่อให้ได้กำลังงานสูงสุดตามต้องการแล้ว จึงนำทำการทดสอบเบื้องต้น ดังรูป 4.30



รูปที่ 4.30 การทดสอบวัดอุณหภูมิแดนซ์ของท่อเหล็กแบบมีกรอบอลูมิเนียม

4.5.3 การออกแบบตัวเครื่องอบลมร้อนด้วยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

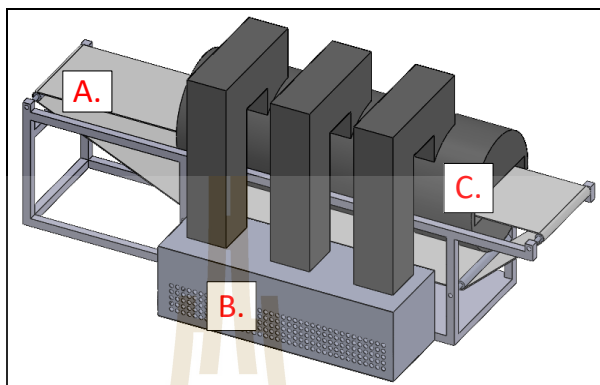
ในการออกแบบตัวเครื่องอบไล่ความชื้นด้วยลมร้อนจากคลื่นแม่เหล็กความถี่สูงกำลังสูง สิ่งที่เราควรคำนึงถึงคือ ทิศทางของลมและความร้อน เนื่องด้วยความร้อนจะลอยขึ้นที่สูงเราจึงติดตั้งคอยล์ร้อนในแนวตั้งและโค้งลงมาหาขั้วที่เราต้องการลดความชื้นและทำให้ลมร้อนนั้นวนอยู่ในระบบก่อนที่จะออกไปจากเครื่อง ทำให้ความร้อนที่ลมพามาขึ้นหมดลงก่อนที่จะลมจะออกไปจากระบบ ดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ผลการจำลองทิศทางลมภายในตู้

โดยระบบอบไล่ความชื้นด้วยลมร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กนั้นจะประกอบไปด้วย 1. ระบบสายพานลำเลียง ใช้สำหรับลำเลียงข้าวเข้าระบบ 2. ชุดโหนดการให้ความร้อน เป็นแหล่งกำเนิดลม

ร้อนที่ใช้ในการลดความชื้น 3. ตู้อบลดความชื้นข้าว เพื่อให้ลมร้อนที่ได้จากแหล่งกำเนิดนั้น หมุนวนภายใน ตู้อบและพัดพาความชื้นไปให้มากที่สุด



รูปที่ 4.32 เครื่องการใช้ลมร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (A)ระบบสายพานลำเลียง (B)ชุดไหลด การให้ความร้อน (C)ตู้อบลดความชื้นข้าว

4.6 สรุป

สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและวิธีการดำเนินงานสำหรับการทดลองระบบผลิตข้าวหนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงพร้อมการอบไล่ความชื้นข้าวแบบไฮบริดซึ่งประกอบไปด้วย การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและ ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ด้วยหลักการทางคณิตศาสตร์สำหรับการ ออกแบบระบบการให้ความร้อน และจำลองรูปแบบการให้ความร้อน และทำการออกแบบสร้างระบบทั้ง 3 รูปแบบ โดยแต่ละแบบออกแบบที่มีขนาดกำลังงานสูงสุด 12 กิโลวัตต์ และอธิบายหน้าที่การทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบ หลักการทำงานของระบบ และการติดตั้งอุปกรณ์ สำหรับการควบคุม การทำงานการแสดงผลในรูปแบบของระบบ IoT เพื่อสามารถบังคับและควบคุมได้ทั้งแบบ Manual และ ระบบ Automatic ซึ่งเป็นชุดควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ ซึ่งถือว่าการพัฒนาสมรรถนะของระบบผลิต ข้าวหนึ่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 5

การทดสอบและผลการทดสอบ

5.1 บทนำ

สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบระบบผลิตข้าวหนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง โดยเริ่มจากกระบวนการนำข้าวเปลือกมาใส่ภาชนะพลาสติกชนิด พอลิโพรไพลีน จากนั้นทำการเติมน้ำตามสัดส่วนที่ต้องการ โดยก่อนการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ของการให้ความร้อนของข้าวนั้น ทางผู้วิจัยจะทำการทดสอบเบื้องต้นของการให้ความร้อนของให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับการนึ่งข้าวเปลือก พร้อมทั้งอีก 2 หลักการประกอบไปด้วย (1) การให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง และ (2) การใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กความถี่สูง สำหรับการลดความชื้นข้าวหลังจากการนึ่ง จากนั้นจะนำผลการทดสอบทดลองของสองหลักการมาเปรียบเทียบกันเพื่อดูประสิทธิภาพในการลดความชื้นข้าวของแต่ละหลักการ จากผลการทดสอบในเบื้องต้น โดยทดสอบที่เงื่อนไขเหมือนกันหมด ความชื้นข้าวเริ่มต้นที่ 16 เปอร์เซ็นต์ เวลาในการทดสอบ 3 ชั่วโมงสำหรับการนึ่ง พบว่าที่ข้าวเปลือกที่ออกมานั้น มีความชื้นสูงถึง 30 – 40 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงนำข้าวเปลือกที่ผ่านการนึ่งแล้วไปทำการทดสอบไล่ความชื้น โดยสามารถแบ่งการทดสอบเพื่อหาความสำคัญออกเป็น 2 รูปแบบ คือรูปแบบลดความชื้นข้าวจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงก่อน แล้วค่อยทำการทดสอบการลดความชื้นข้าวจากการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กความถี่สูงต่อ และรูปแบบที่สองทำการทดสอบเหมือนรูปแบบแรก แต่สลับการทำงานก่อนหลัง โดยในแต่ละส่วนจะทำการทดสอบข้าวในเงื่อนไขต่างๆ เพื่อที่จะได้ความสัมพันธ์การลดความชื้นข้าวที่ดีที่สุด เมื่อทำการทดสอบเสร็จแล้วทางผู้วิจัยจะเก็บตัวอย่างผลการทดสอบ ไปส่องกล้องตรวจสอบคุณภาพข้าว สำหรับเครื่องที่ใช้ในการทดสอบเป็นเครื่องที่ได้ออกแบบในบทที่ 4 เรียบร้อยแล้วซึ่งรายละเอียดการทดสอบจะได้อธิบายในส่วนต่อไป

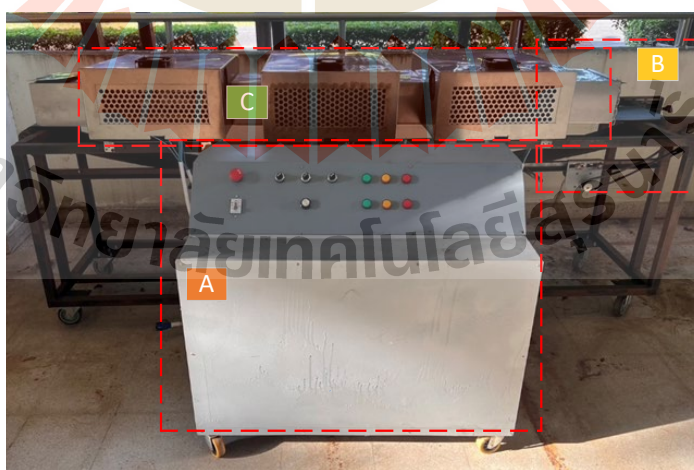
โดยความชื้นที่ใช้ในการทดสอบจะเริ่มต้นประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณข้าวต่อการทดสอบอยู่ที่ 2 กิโลกรัมต่อรอบ ปริมาณน้ำอยู่ที่ 2 ลิตรผ่านการนึ่งเป็นเวลาตามเงื่อนไขที่กำหนด จากนั้นผู้วิจัยต้องการลดความชื้นจากข้าวเปลือกที่ผ่านการนึ่งมาแล้วที่ 40 เปอร์เซ็นต์ เหลือประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์ ตามมาตรฐาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาถึงระบบกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งทั้ง การนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อลดการใช้น้ำในการผลิตและการลดความชื้นข้าวที่มีความชื้นสูงและตรวจสอบคุณภาพของข้าวหนึ่งที่ผ่านกระบวนการผลิตดังกล่าว ให้ได้ตรงตามมาตรฐานอุตสาหกรรมการผลิตข้าวหนึ่งอีกด้วย

5.2 วิธีการทดสอบการผลิตข้าวหนึ่ง

ตามที่ได้กล่าวไว้ในเบื้องต้นแล้วนั้น ซึ่งในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายวิธีการทดสอบ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือการอบนึ่งข้าวจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ การลดความชื้นข้าวจากความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ และการลดความชื้นจากการให้ความร้อนด้วยลมร้อนจากแหล่งพลังงาน การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก โดยทั้ง 3 ระบบนี้ จะใช้กำลังงานในการทดสอบที่ 12 กิโลวัตต์ และใช้ขนาดกำลังการผลิตข้าวเท่ากับการคำนวณในตารางที่ 4.1 สำหรับการทดสอบหาความสัมพันธ์การผลิตข้าวหนึ่งและการคุณภาพในการผลิตข้าวหนึ่งที่ดียิ่งที่สุด แล้วนำแต่ละส่วนทำงานร่วมกันเป็นขั้นเป็นตอนต่อไป โดยวิธีการ เจริญใจ และการเก็บผลการทดสอบแสดงได้ตามหัวข้อต่อไปนี้

5.2.1 วิธีการทดสอบการนึ่งข้าวจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

ในการทดสอบการอบนึ่งข้าวจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (ไมโครเวฟ) จะใช้ไฟ 3 เฟส 220 โวลต์ โดยกำลังงานที่ใช้ในการทำงานอยู่ที่ 12 กิโลวัตต์ โดยการเตรียมเครื่องสำหรับการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.1 ถึง 5.3 โดยในรูปที่ 5.1 เป็นรูปเครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งในส่วนเครื่องนี้จะประกอบไปด้วยส่วนหลักคือ ชุดควบคุมการทำงานทั้งระบบ ชุดสายพานลำเลียง และอุโมงค์นึ่งข้าวหนึ่ง รูปที่ 5.2 เป็นรูปทางเข้าของข้าวที่จะทำการทดสอบ และรูปที่ 5.3 เป็นรูปทางออกของข้าวที่จะทำการทดสอบ เมื่อทำการทดสอบเสร็จแล้วก็นำข้าวไปทำการเก็บผลพร้อมเก็บตัวอย่างไปส่งกล้อง



รูปที่ 5.1 เครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ไมโครเวฟ (A) ชุดควบคุมการทำงาน (B) ทางเข้าของข้าว (C) อุโมงค์ท่อนำคลื่น



รูปที่ 5.2 ทางเข้าของข้าวที่จะทำการทดสอบ



รูปที่ 5.3 ทางออกของข้าวที่จะทำการทดสอบ

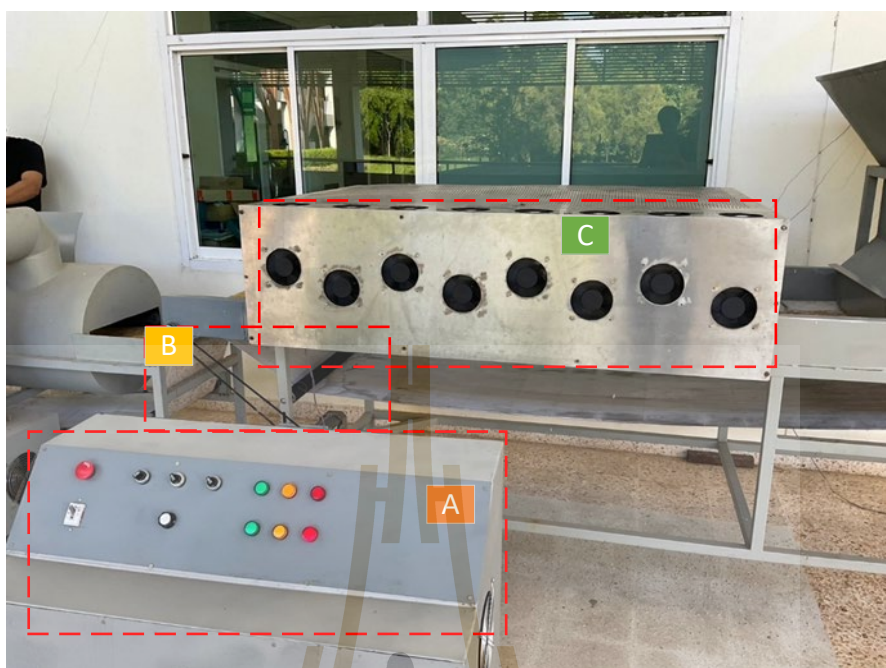
เงื่อนไขในการทดสอบการนึ่งข้าวนึ่ง

เงื่อนไขการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 2 เงื่อนไข ซึ่งแต่ละเงื่อนไขจะต้องได้รูปแบบความสัมพันธ์การนึ่งข้าวนึ่งที่ดีที่สุด แล้วจึงทำการทดสอบหาเงื่อนไขต่อไป

1. เงื่อนไขเวลาในการทดสอบในเงื่อนไขนี้จะใช้เวลาในการทดสอบคือ 30 , 45 และ 60 นาที เพื่อหาระยะเวลาในการนึ่งที่ลดการเกิดข้าวท้องไขได้มากที่สุดโดยต้องมีข้าวท้องไขน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์
2. เงื่อนไขอุณหภูมิในการทดสอบในเงื่อนไขนี้จะใช้อุณหภูมิในการทดสอบคือ 45 , 50 และ 60 องศาเซลเซียส เพื่อหาอุณหภูมิในการนึ่งที่ลดการใช้น้ำได้มากที่สุดโดยที่คุณภาพข้าวไม่เสียหาย

5.2.2 วิธีการทดสอบการลดความชื้นด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ในการทดสอบการลดความชื้นด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ จะใช้ไฟ 3 เฟส 220 โวลต์ โดยกำลังงานที่ใช้ในการทำงานอยู่ที่ 12 กิโลวัตต์ และโดยการเตรียมเครื่องสำหรับการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 5.4 ถึง 5.6 โดยในรูปที่ 5.4 เป็นรูปเครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (ไมโครเวฟ) ซึ่งในส่วนเครื่องนี้จะประกอบไปด้วยส่วนหลักคือ ชุดควบคุมการทำงานทั้งระบบ ชุดสายพานลำเลียง และอุโมงค์อบไล่ความชื้น รูปที่ 5.5 เป็นรูปทางเข้าของข้าวที่จะทำการทดสอบ และรูปที่ 5.6 เป็นรูปทางออกของข้าวที่จะทำการทดสอบ เมื่อทำการทดสอบเสร็จแล้วก็นำข้าวไปทำการเก็บผลพร้อมเก็บตัวอย่างไปส่งกล้อง



รูปที่ 5.4 เครื่องการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง(ไมโครเวฟ) (A) ชุดควบคุมการทำงาน (B) ระบบสายพาลำเลี้ยง (C) จุดปล่อยคลื่น



รูปที่ 5.5 ทางเข้าของข้าวที่จะทำการทดสอบ



รูปที่ 5.6 ทางออกของข้าวที่จะทำการทดสอบ

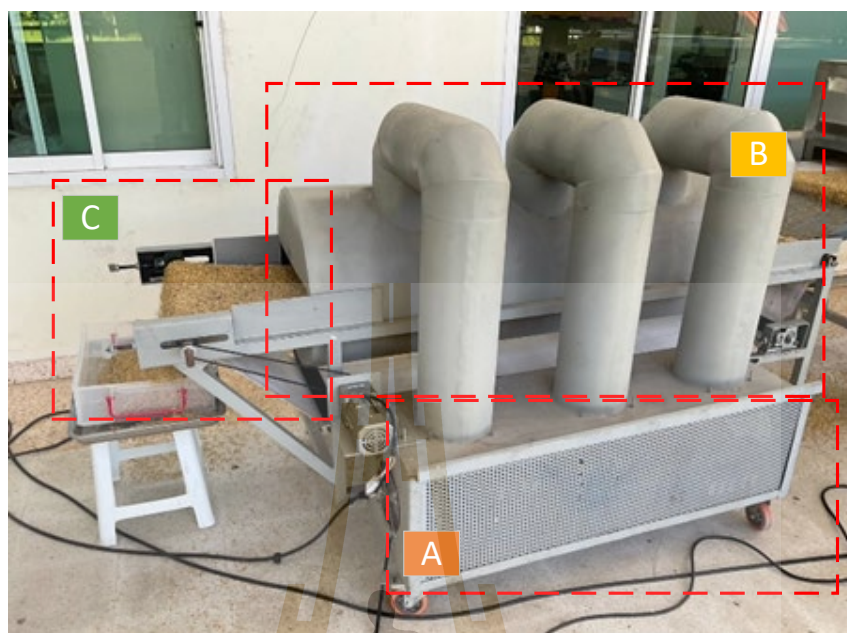
เงื่อนไขในการทดสอบการลดความชื้นข้าว

เงื่อนไขในการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 2 เงื่อนไข ซึ่งแต่ละเงื่อนไขจะต้องได้รูปแบบความสัมพันธ์ในการลดความชื้นข้าวที่ดีที่สุด แล้วจึงทำการทดสอบหาเงื่อนไขต่อไป

1. เงื่อนไขความชื้นในการทดสอบในเงื่อนไขนี้จะใช้เวลาในการทดสอบคือ 3, 5, และ 7 นาที เพื่อหาระยะเวลาในการลดความชื้นได้มากที่สุดโดยคุณภาพข้าวไม่เสียหาย
2. เงื่อนไขปริมาณในการทดสอบในเงื่อนไขนี้จะคำนวณหาอุณหภูมิในการให้ความร้อนจากแหล่งจ่ายพลังงานที่ 40 องศาเซลเซียส, 50 องศาเซลเซียสและสูงสุดที่ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เพื่อหาพลังงานความร้อนที่ใช้ในการลดความชื้นได้มากที่สุดโดยคุณภาพข้าวไม่เสียหาย

5.2.3 วิธีการทดสอบการลดความชื้นจากการให้ความร้อนด้วยลมร้อนจากแหล่งพลังงานการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

ในการทดสอบการลดความชื้นด้วยการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก จะใช้ 3 เฟส 220 โวลต์ โดยกำลังงานที่ใช้ในการทำงานอยู่ที่ 12 กิโลวัตต์ โดยใช้วงจรเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กขนาด 4,000 วัตต์จำนวน 3 ตัว การเตรียมเครื่องสำหรับการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.7 และ 5.8 โดยในรูปที่ 5.7 เป็นรูปเครื่อง ซึ่งในส่วนเครื่องนี้จะประกอบไปด้วยส่วนหลักคือ A. ชุดกำเนิดความร้อนภายในมีโหลลดความร้อน โบลเวอร์เป่าโหล ชุดกำเนิดสัญญาณและควบคุมการทำงาน B. ตู้อบลดความชื้นข้าว และ C. ทางลำเลียงข้าวขาออก รูปที่ 5.8 เป็นรูปภายในตู้อบลดความชื้นด้วยลมร้อน เมื่อทำการทดสอบเสร็จแล้วก็นำข้าวไปทำการเก็บผลพร้อมเก็บตัวอย่างไปส่งกล้อง



รูปที่ 5.7 เครื่องการใช้ลมร้อนจากการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (A) ชุดกำเนิดลมร้อน (B) ตู้อบลดความชื้นข้าว (C) ทางลำเลียงข้าวขาออก



รูปที่ 5.8 ภายในตู้ลดความชื้นด้วยลมร้อน

เงื่อนไขในการทดสอบการลดความชื้นข้าว

เงื่อนไขในการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 2 เงื่อนไข ซึ่งแต่ละเงื่อนไขจะต้องได้รูปแบบความสัมพันธ์ในการลดความชื้นข้าวที่ดีที่สุด แล้วจึงทำการทดสอบหาเงื่อนไขต่อไป

1. เงื่อนไขความเร็วลมในการทดสอบ

ในเงื่อนไขนี้จะใช้เวลาในการทดสอบคือ 4, 6 และ 8 เมตร/วินาที เพื่อหาระยะเวลาในการลดความชื้นได้มากที่สุดโดยคุณภาพข้าวไม่เสียหาย

2. เงื่อนไขปริมาณในการทดสอบ

ในเงื่อนไขนี้จะค่าอุณหภูมิในการให้ความร้อนจากแหล่งจ่ายพลังงานที่ 40 องศาเซลเซียส, 50 องศาเซลเซียสและสูงสุดที่ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เพื่อหาพลังงานความร้อนที่ใช้ในการลดความชื้นได้มากที่สุดโดยคุณภาพข้าวไม่เสียหาย เปอร์เซ็นต์การแตหักน้อยหรือไม่เกิด

5.2.4 วิธีการทดสอบและเก็บผลการทดสอบ

ในกระบวนการทดสอบใช้ข้าวเปลือกคัดพิเศษความชื้นไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ เติมน้ำในกล่องพลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีน ขนาด กว้าง 28 ยาว 42 และสูง 12 เซนติเมตร แล้วทำการเติมน้ำในปริมาตรเดียวกันกับข้าวเปลือก ซึ่งจะเป็นข้าวก่อนการทดสอบปริมาณ 2 กิโลกรัม ดังรูปที่ 5.9 และในแต่ละรูปแบบที่ทดลองข้าวตามการคำนวณในตารางที่ 3.1 เมื่อทำการนึ่งเสร็จแล้วจะทำการวัดความชื้นและอุณหภูมิ ดังรูปที่ 5.10 และ 5.11 เมื่อทำการทดสอบข้าวในแต่ละรูปแบบแล้วจะทำการเก็บผลการทดสอบโดยจะนำข้าวพักทิ้งไว้ 7 นาที โดยในแต่ละนาทิจะทำการเก็บค่าความชื้นหลังการทดสอบ และอุณหภูมิหลังการทดสอบ พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างเพื่อทำการส่องตรวจสอบคุณภาพข้าวหลังการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 5.12 ต่อไป



รูปที่ 5.9 ข้าวเปลือกคัดพิเศษที่บรรจุในกล่องพลาสติกขนาด 2 กิโลกรัม

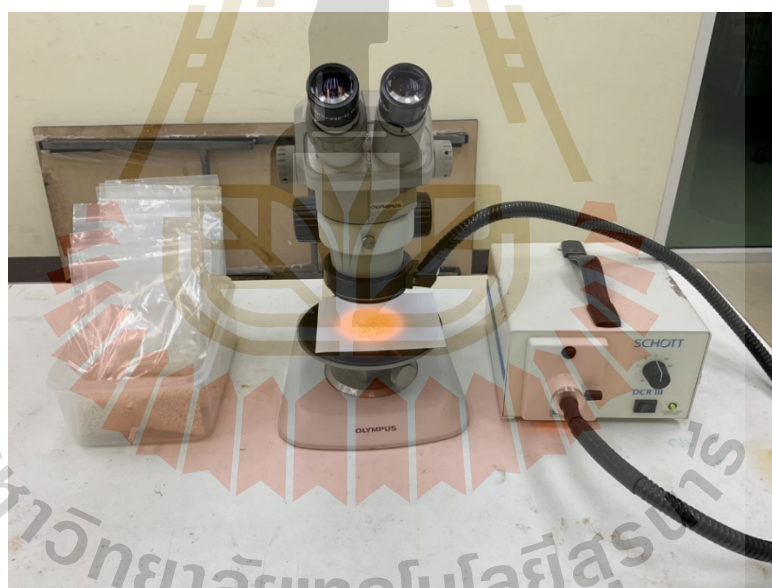


รูปที่ 5.10 ทำการวัดค่าความชื้นข้าวหลังการทดสอบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 5.11 ทำการวัดค่าอุณหภูมิข้าวหลังการทดสอบ

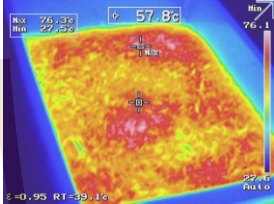
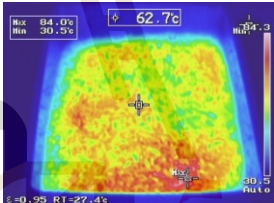
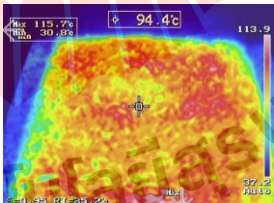


รูปที่ 5.12 ส่องกล้องตรวจสอบคุณภาพข้าวก่อนและหลังการทดสอบ

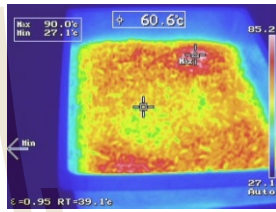
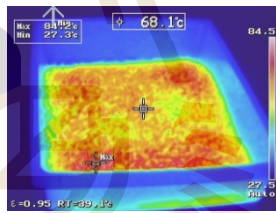
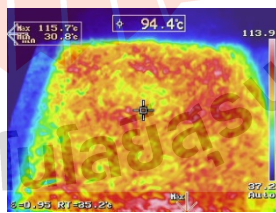
5.3 ผลการทดสอบนึ่งข้าวนี้

สำหรับการทดลองระบบนึ่งข้าวนี้ด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงย่านไมโครเวฟนั้นจะแบ่งการทดสอบเก็บผลต่าง ๆ ออกเป็น 2 เงื่อนไขคือ 1.การทดสอบเงื่อนไขของเวลา 2. ทดสอบเงื่อนไขของอุณหภูมิ จากนั้นนำผลที่ได้ไปทำการเปรียบเทียบคุณภาพข้าวนี้

ตารางที่ 5.2 ทดลองเงื่อนไขเวลาต่างๆและอุณหภูมิ 80 ในการนึ่งข้าวหนึ่งถ้วยด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
ความถี่สูง (ไมโครเวฟ)

เวลาที่ใช้ (นาทีก)	ความชื้น เริ่มต้น (เปอร์ เซ็นต์)	ความชื้น สุดท้าย (เปอร์ เซ็นต์)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	รูปอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	รูปคุณภาพข้าวหลังการ ทดสอบ
30	15	44.8	57.8		
45	15	42.6	62.7		
60	15	38.9	94.4		

ตารางที่ 5.3 ทดลองเงื่อนไขเวลาต่างๆและอุณหภูมิ 90 ในการนึ่งข้าวหนึ่งด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ความถี่สูง (ไมโครเวฟ)

เวลาที่ ใช้ (นาทื)	ความชื้น เริ่มต้น (เปอร์ เซ็นต์)	ความชื้น สุดท้าย (เปอร์ เซ็นต์)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	รูปอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	รูปคุณภาพข้าวหลัง การทดสอบ
30	15	40.8	74.3		
45	15	39.6	79.4		
60	15	35.9	80.2		

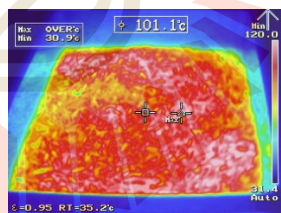
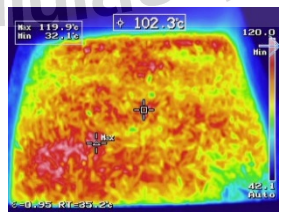
จากผลการทดสอบเงื่อนไขระยะเวลาและอุณหภูมิของการนึ่งข้าวหนึ่ง พบว่า

- 1) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ในทุกช่วงเวลานั้นจะได้ข้าวหนึ่งที่สีเหลืองอ่อน ๆ แต่ปริมาณข้าวที่องไ้จำนวนมากและมีน้ำเหลือทิ้งในกระบวนการผลิตสูงซึ่งเกินกว่าร้อยละ 70 ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ

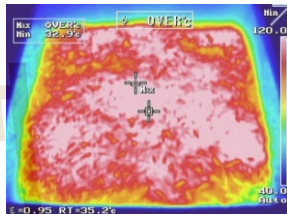
- 2) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาที่ 30 และ 45 นาทีนั้นข้าวหนึ่งเริ่มมีสีที่เข้มขึ้น แต่ปริมาณข้าวท้องไข่จำนวนมาก ยังคงน้ำเหลือทิ้งในกระบวนการเกินกว่าร้อยละ 70 ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ ในขณะที่ 60 นาที ปริมาณข้าวท้องไขลดลงแต่ยังมีปริมาณมากเกินกว่า 50 ของเมล็ดข้าวทั้งหมด
- 3) ที่อุณหภูมิ 90 ข้าวหนึ่งในระยะเวลา 30 40 และ 60 นาที มีลักษณะสีเหลืองอ่อนและเข้มขึ้นตามลำดับ แต่มีปริมาณข้าวท้องไขมาก

จากผลการทดสอบทำการผลิตข้าวหนึ่งนั้นผลของสีข้าวหนึ่งนั้นยังออกเกินไปและยังมีปริมาณท้องไขเกินกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของข้าวทั้งหมดแต่ในอุณหภูมิที่ 90 องศาที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตข้าวหนึ่งด้วยวิธีการดังกล่าวเราจึงทำการทดสอบต่อโดยทำการเพิ่มเวลาของการนั่งเข้าไป เป็น 90 นาที 120 นาที และ 180 นาที

ตารางที่ 5.4 ทดลองเงื่อนไขเวลาต่างๆและอุณหภูมิ 90 ในการนั่งข้าวหนึ่งด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ความถี่สูง (ไมโครเวฟ)

เวลาที่ใช้ (นาที)	ความชื้น เริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์)	ความชื้น สุดท้าย (เปอร์เซ็นต์)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	รูปอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	รูปคุณภาพข้าวหลังการ ทดสอบ
90	15	34.8	101.		
120	15	32.6	120		

ตารางที่ 5.4 ทดลองเงื่อนไขเวลาต่างๆและอุณหภูมิ 90 ในการนึ่งข้าวหนึ่งด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ความถี่สูง (ไมโครเวฟ)(ต่อ)

เวลาที่ ใช้ (นาทีก)	ความชื้น เริ่มต้น (เปอร์ เซ็นต์)	ความชื้น สุดท้าย (เปอร์ เซ็นต์)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	รูปอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	รูปคุณภาพข้าวหลัง การทดสอบ
180	15	31.3	122		

จากผลการทดสอบเงื่อนไขระยะเวลาและอุณหภูมิของการนึ่งข้าวหนึ่งที่ 90 นาทีก 120 นาทีก และ 180 พบว่า

- 4) ที่ระยะเวลา 90 นาทีก เมล็ดข้าวเปลือกเริ่มมีการปริตัวขึ้นมากกว่าระยะเวลา 60 นาทีกในข้างต้นที่กล่าวมา ทำให้ได้ข้าวหนึ่งที่สีเข้ม แต่ไม่เข้มมากเมื่อนำไปวัดค่า L^* 55.29 a^* 2.73 b^* 20.23 และมีค่าChroma 20.42 ซึ่งเป็นสีที่ต้องการของตลาด ปริมาณข้าวท้องไขจำนวนลดลงอย่างมากและมีน้ำเหลือทิ้งในกระบวนการผลิตอยู่ที่ 30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่เกินกว่าที่กำหนด
- 5) ที่ระยะเวลา 120 นาทีก เมล็ดข้าวเปลือกมีการปริตัวขึ้นมาก เนื้อข้าวพองตัวขึ้น ข้าวหนึ่งเริ่มมีสีที่เข้มขึ้น ออกเป็นสีเหลืองทองนำไปวัดค่า L^* 56.25 a^* 3.59 b^* 21.78 และมีค่าChroma 23.54 ซึ่งมีสีที่เข้มขึ้นจาก 90 นาทีก ปริมาณข้าวท้องไขมีน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปต่อผลิตได้ระเหยและถูกดูดซับออกไปจะหมดทำให้ไม่เหลือทิ้งในกระบวนการน้ำทิ้งที่เกินจากระบบ
- 6) ที่ระยะเวลา 180 นาทีก เมล็ดข้าวเปลือกมีการปริตัวขึ้นมาก เนื้อข้าวพองตัวขึ้น ข้าวหนึ่งเริ่มมีสีที่เข้มขึ้น ออกเป็นสีเหลืองเข้มนำไปวัดค่า L^* 55.86 a^* 4.80 b^* 27.44 และมีค่าChroma 27.86 ซึ่งมีสีที่เข้มขึ้นมากทำให้ค่าของความสว่างลดลง ปริมาณข้าวท้องไขมีน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปต่อผลิตได้ระเหยและถูกดูดซับออกไปจะหมดทำให้ไม่เหลือทิ้งในกระบวนการน้ำทิ้งที่เกินจากระบบ

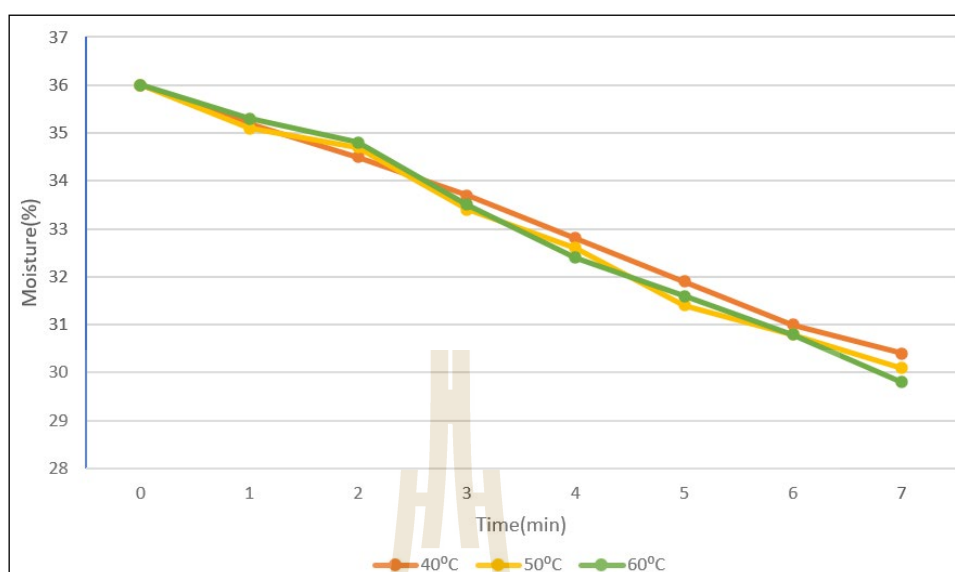
จากการทดลองข้างต้นทำให้ระยะเวลาที่ดีที่สุด คือ 120 นาที ที่ อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ข้าวหนึ่งมีลักษณะสีเหลืองทองเป็นที่ต้องการของตลาด ปริมาณข้าวท้องไขมีน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ อัตราการแตกหักของข้าวหนึ่งน้อยและไม่มีน้ำเหลือจากการผลิตข้าวหนึ่ง

5.4 ผลการทดสอบการลดความชื้นข้าวแบบไฮบริด

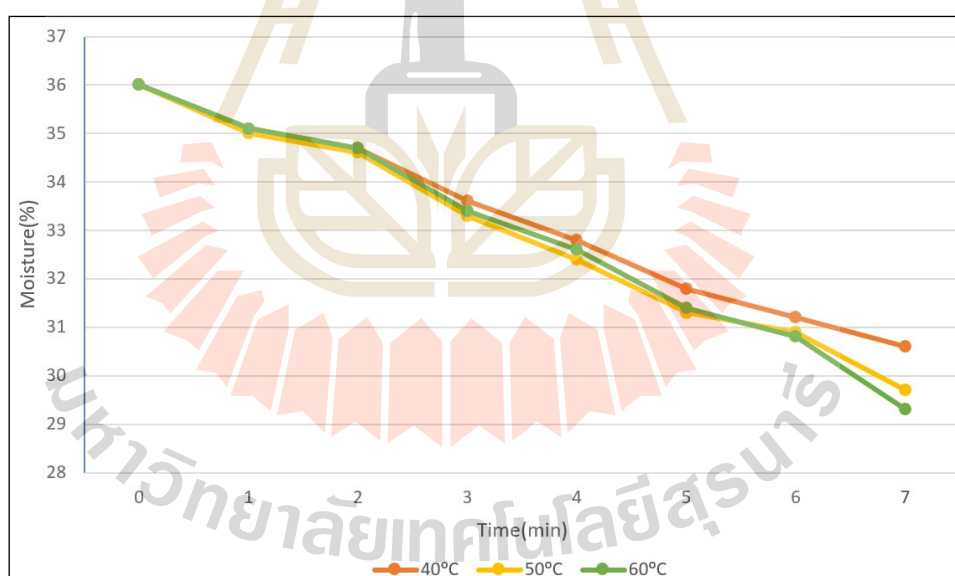
สำหรับการทดลองระบบอบลดความชื้นข้าวเปลือกแบบไฮบริดโดยใช้เทคโนโลยีคลื่นความถี่สูง กำลังสูงนั้นจะแบ่งการทดสอบเก็บผลต่าง ๆ ออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ 1) การให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง(ไมโครเวฟ) 2) การใช้ลมร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กความถี่สูง 3) ผลการทำงานร่วมกันแบบไฮบริดโดยใช้เทคโนโลยีการให้ความร้อนด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ย่านไมโครเวฟกับลมร้อนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กความถี่สูง และนำมาเปรียบเทียบผลของคุณภาพข้าวที่ออกมาจากระบบอบลดความชื้นข้าวเปลือกแบบไฮบริดโดยใช้เทคโนโลยีการให้ความร้อนด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟ

5.4.1 การให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงในย่านไมโครเวฟ

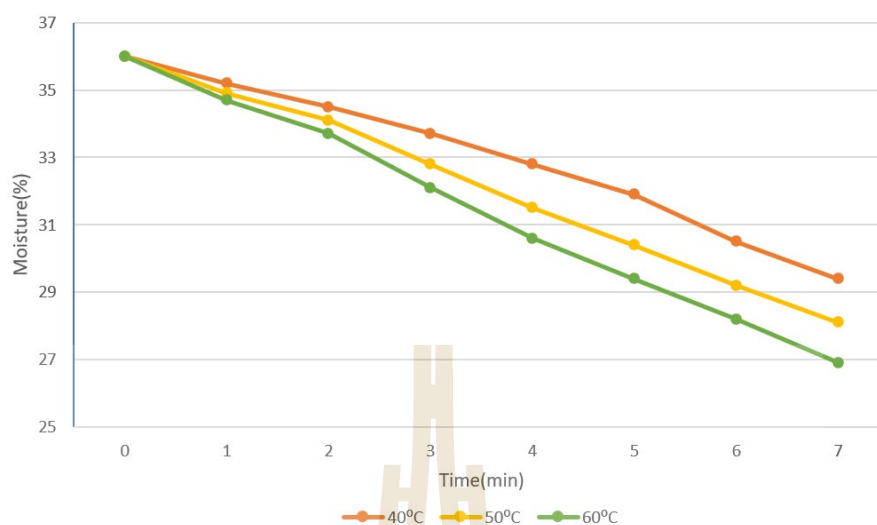
โดยการทดสอบในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็น 2 เงื่อนไข คือ เงื่อนไขของอุณหภูมิกับเวลา ซึ่งเวลาที่จะใช้ในการทดสอบจ่ายกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้แก่โหนดที่เป็นข้าวเปลือกนั้นกำหนดเป็น 3, 5 และ 7 นาที โดยกำหนดค่าอุณหภูมิในการให้ความร้อนจากแหล่งจ่ายพลังงานที่ 40 องศาเซลเซียส, 50 องศาเซลเซียสและสูงสุดที่ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยมีพารามิเตอร์ควบคุมต่าง ๆ คือ ข้าวที่มีความชื้นเริ่มต้นที่ 36 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิของข้าวเริ่มต้นที่ 25 องศาเซลเซียส โดยหลังจากการทดสอบ จะทำการเก็บค่าความชื้นและอุณหภูมิความร้อน (โดยทั้ง 3 ช่วงเวลาที่จ่ายพลังงานเมื่อหยุดจ่ายพลังงานแล้วจะวัดผลความชื้นหลังการให้ความร้อนต่อไปอีกเป็นระยะเวลา 7 นาทีเท่ากันทั้ง 3 เงื่อนไขของการให้ความร้อน) พร้อมเก็บตัวอย่างไปส่องกล้องเพื่อตรวจสอบคุณภาพของเมล็ดข้าว สำหรับผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส กับข้าวที่มีค่าความชื้นต่าง ๆ โดยให้ความร้อนกับข้าวเป็นระยะเวลา 3 นาที



รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส กับข้าวที่มีค่าความชื้นต่าง ๆ โดยให้ความร้อนกับข้าวเป็นระยะเวลา 5 นาที



รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส กับข้าวที่มีค่าความชื้นต่าง ๆ โดยให้ความร้อนกับข้าวเป็นระยะเวลา 7 นาที

โดยจากผลการทดสอบเงื่อนไขเวลาในการทดสอบลดความชื้นข้าวจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟนั้นพบว่า

- 1) การให้ความร้อนด้วยกำลังงานต่าง ๆ ที่เวลา 3 นาที คลื่นมีการกระจายตัวที่บริเวณขอบแต่ไม่กระจายตัวมาที่บริเวณตรงกลางโหลตไดอิเล็กตริก ที่เป็นข้าวทำให้เกิดความร้อนยังไม่ทั่วโหลตไดอิเล็กตริก ส่งผลให้การลดความชื้นข้าวเมื่อพักข้าวไว้ 7 นาที ของระดับกำลังงานที่ทำให้อุณหภูมิข้าวได้ 40 องศาเซลเซียส ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นได้ประมาณ 5.6 เปอร์เซ็นต์ ระดับกำลังงานที่ทำให้อุณหภูมิข้าวได้ 50 องศาเซลเซียส ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นได้ประมาณ 5.9 เปอร์เซ็นต์ และระดับกำลังงานที่ทำให้อุณหภูมิข้าวได้ 60 องศาเซลเซียส ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นได้ประมาณ 6.2 เปอร์เซ็นต์
- 2) การให้ความร้อนด้วยกำลังงานต่าง ๆ ที่เวลา 5 นาที คลื่นมีการกระจายตัวได้ทั่วโหลตไดอิเล็กตริกที่เป็นข้าวทำให้เกิดความร้อนได้ครอบคลุมโหลตไดอิเล็กตริก ส่งผลให้การลดความชื้นข้าวเมื่อพักข้าวไว้ 7 นาที ของระดับกำลังงานที่ทำให้อุณหภูมิข้าวได้ 40 องศาเซลเซียส ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นได้ประมาณ 5.8 เปอร์เซ็นต์ ระดับกำลังงานที่ทำให้อุณหภูมิข้าวได้ 50 องศาเซลเซียส ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นได้ประมาณ 6.6 เปอร์เซ็นต์ และระดับกำลังงานที่ทำให้อุณหภูมิข้าวได้ 60 องศาเซลเซียส ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นได้ประมาณ 6.7 เปอร์เซ็นต์ โดยคุณภาพของข้าวยังไม่เกิดความเสียหาย

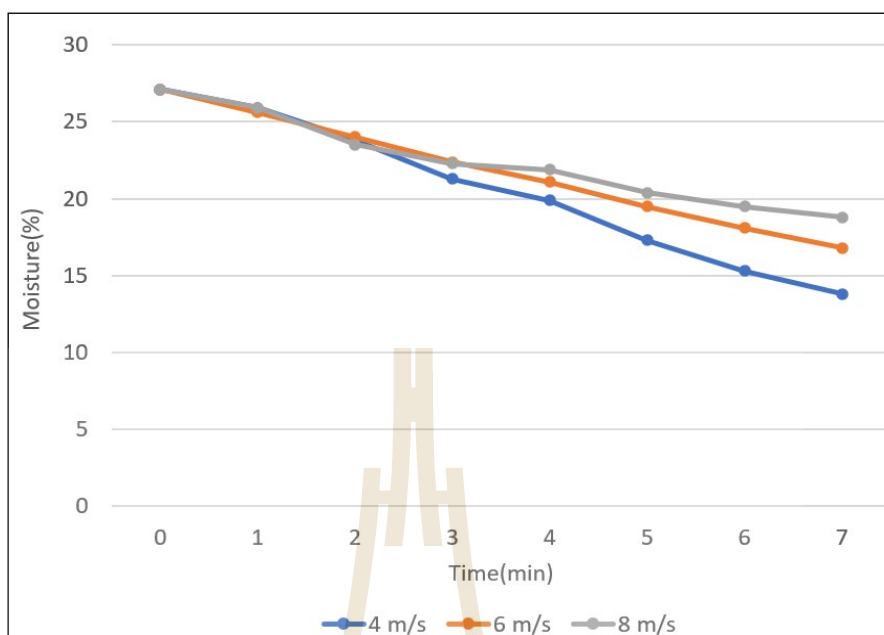
- 3) การให้ความร้อนด้วยกำลังงานต่าง ๆ ที่เวลา 7 นาที คลื่นมีการกระจายตัวได้ทั่วหลอดไดอิเล็กตริกที่เป็นข้าวทำให้เกิดความร้อนได้ครอบคลุมหลอดไดอิเล็กตริก ส่งผลให้การลดความชื้นข้าวเมื่อพักข้าวไว้ 7 นาที ของระดับกำลังงานที่ทำให้อุณหภูมิข้าวได้ 40 องศาเซลเซียส ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นได้ประมาณ 6.7 เปอร์เซ็นต์ ระดับกำลังงานที่ทำให้อุณหภูมิข้าวได้ 50 องศาเซลเซียส ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นได้ประมาณ 7.9 เปอร์เซ็นต์ และระดับกำลังงานที่ทำให้อุณหภูมิข้าวได้ 60 องศาเซลเซียส ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นได้ประมาณ 9.1 เปอร์เซ็นต์ โดยคุณภาพของข้าวเริ่มเกิดความเสียหาย

ดังนั้นกำลังงานความร้อนและเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดสอบในส่วนแรกคือการให้กำลังงานความร้อนที่ทำให้ข้าวมีอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 5 นาที จากนั้นจะทำการทดสอบการลดความชื้นในส่วนของลมร้อนต่อไป

5.4.2 การใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

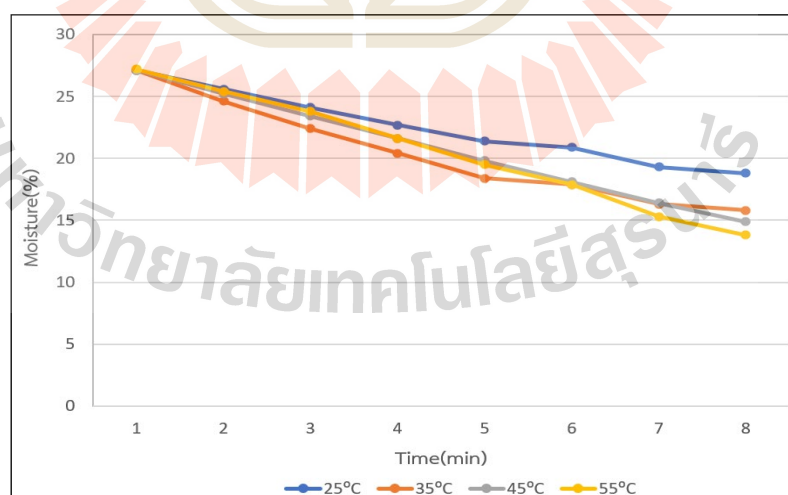
โดยการทดสอบในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็น 2 เงื่อนไข คือ เงื่อนไขของอุณหภูมิความร้อนของลม และความเร็วลม ซึ่งความเร็วลมที่จะใช้ในการทดสอบไล่ความชื้นคือ 4, 6 และ 8 เมตร/วินาที โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ คือ ข้าวที่มีความชื้นเริ่มต้นที่ 27.1 เปอร์เซ็นต์ (เป็นความชื้นที่ได้จากส่วนแรก) ซึ่งจะใช้เวลาในการจ่ายลมร้อนที่ 7 นาที โดยหลังจากการทดสอบจะทำการเก็บค่าความชื้นและอุณหภูมิความร้อน (โดยความเร็วลมร้อนทั้ง 3 ช่วงเมื่อหยุดจ่ายพลังงานแล้วจะวัดผลความชื้นหลังการให้ความร้อนต่อไปอีกเป็นระยะเวลา 7 นาทีเท่ากันทั้ง 3 กรณีของการใช้ลมร้อน) พร้อมเก็บตัวอย่างไปส่องกล้องเพื่อตรวจสอบคุณภาพของเมล็ดข้าว สำหรับผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบความเร็วลมที่ใช้ในการทดสอบกับความชื้นของข้าวด้วยการให้ความร้อนแบบเหนียวน้ำ
สนามแม่เหล็กความถี่สูง

สำหรับเงื่อนไขควบคุมของอุณหภูมิลมที่ใช้คือ 25, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส ที่
ความเร็วลมต่าง ๆ สามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังนี้



รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 25 ,35 ,45 และ 55 องศาเซลเซียส กับข้าวที่มีค่าความชื้น
ต่าง ๆ โดยให้ความร้อนกับข้าวเป็นระยะเวลา 7 นาที

ตารางที่ 5.5 การทดลองเงื่อนไขความเร็วมของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

ความเร็วมที่ใช้ (เมตร/วินาที)	เวลาที่พัก ข้าว (นาทีก)	ความชื้น (เปอร์เซ็นต์)	อุณหภูมิสะสมในระบบ (องศาเซลเซียส)	คุณภาพข้าวหลังการ ทดสอบ
4	0	27.1	65.4	
	1	25.9	63.7	
	2	23.8	61.2	
	3	21.3	60.1	
	4	19.9	59.4	
	5	17.3	57.1	
	6	15.3	55.7	
	7	13.8	49.2	
6	0	27.1	48.1	
	1	25.6	45.2	
	2	24.0	44.3	
	3	22.4	42.2	
	4	21.1	39.4	
	5	19.5	37.2	
	6	18.1	35.1	
	7	16.8	34.9	
8	0	27.1	50.4	
	1	25.9	44.2	
	2	23.5	42.9	
	3	22.3	41.2	
	4	21.9	38.4	
	5	20.4	37.2	
	6	19.5	36.8	
	7	18.8	35.4	

ตารางที่ 5.6 ทดลองเงื่อนไขอุณหภูมิของการให้ความร้อนแบบเหนียวนำสนามแม่เหล็ก (ลมร้อน)

อุณหภูมิของ ลมที่ใช้ (องศา เซลเซียส)	เวลาพักข้าวใน ระบบ (นาทีก)	ความชื้น (เปอร์เซ็นต์)	อุณหภูมิข้าวในระบบ (องศาเซลเซียส)	คุณภาพข้าวหลังการ ทดสอบ
25	0	27.1	48.1	
	1	25.6	45.2	
	2	24.1	44.3	
	3	22.7	42.2	
	4	21.4	39.4	
	5	20.9	37.2	
	6	19.3	35.1	
	7	18.8	34.9	
35	0	27.1	50.2	
	1	24.6	47.4	
	2	22.4	45.7	
	3	20.4	44.1	
	4	18.4	41.2	
	5	17.9	39.1	
	6	16.3	37.9	
	7	15.8	36.2	
45	0	27.1	51.2	
	1	25.2	48.9	
	2	23.4	44.5	
	3	21.6	42.1	
	4	19.8	42.0	
	5	18.1	41.9	
	6	16.4	38.9	
	7	14.9	37.2	

ตารางที่ 5.6 ทดลองเงื่อนไขอุณหภูมิของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (ลมร้อน)(ต่อ)

อุณหภูมิของ ลมที่ใช้ (องศา เซลเซียส)	เวลาพักข้าวใน ระบบ (นาที่)	ความชื้น (เปอร์เซ็นต์)	อุณหภูมิข้าวในระบบ (องศาเซลเซียส)	คุณภาพข้าวหลังการ ทดสอบ
55	0	27.2	54.1	
	1	25.4	50.2	
	2	23.8	47.6	
	3	21.6	44.3	
	4	19.5	43.2	
	5	17.9	42.4	
	6	15.3	40.9	
	7	13.8	39.2	

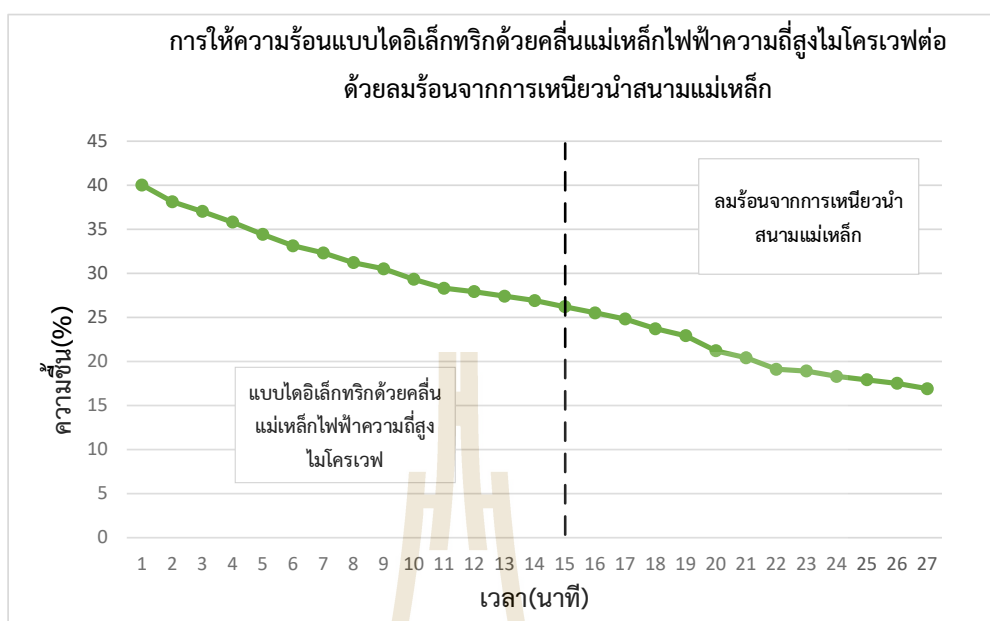
จากผลการทดสอบความเร็วลมที่พบว่าที่ความเร็วลมประมาณ 6 เมตร/วินาที เป็นช่วงความเร็วลมที่เหมาะสม ที่อุณหภูมิความร้อนของลมที่ใช้ประมาณ 45 องศาเซลเซียส โดยไม่ทำให้ข้าวเกิดความเสียหาย

5.4.3 การให้ความร้อนไฮบริดจ์

ซึ่งจากผลการทดสอบการลดความชื้นแต่ละเงื่อนไขของแต่ละระบบเรียบร้อยแล้ว ต่อไปจะได้นำทั้งสองส่วนมาประกอบทำงานร่วมกันเป็นระบบอบลดความชื้นแบบไฮบริดจ์และเก็บผลการทดสอบในกระบวนการสุดท้าย โดยจะแบ่งการทดสอบเป็น 2 รูปแบบคือ

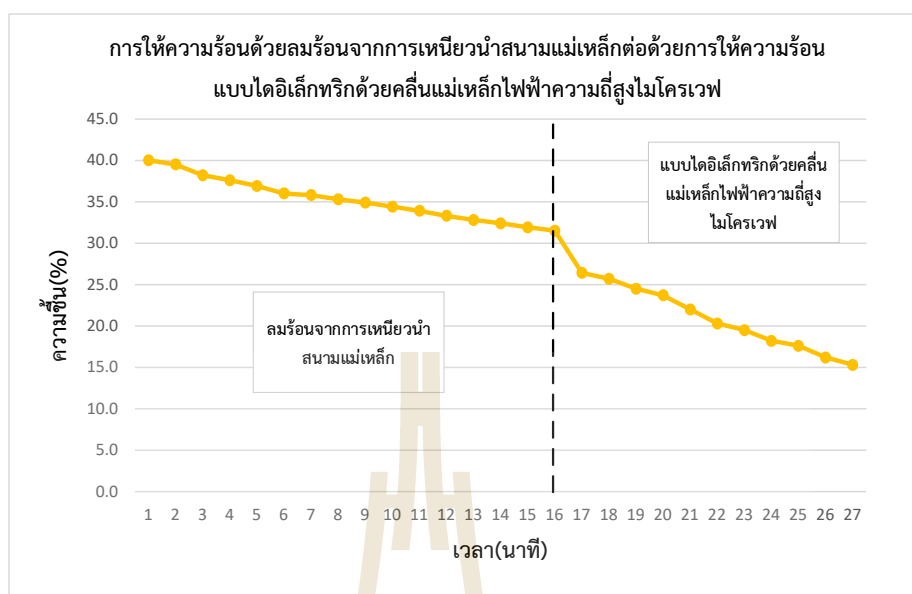
- 1) การให้ความร้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟก่อนและตามด้วยการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กความถี่สูง
- 2) การให้ความร้อนด้วยการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กความถี่สูงก่อนและตามด้วยการให้ความร้อนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟ

ซึ่งได้ผลการทดลองจากระบบอบข้าวแบบไฮบริดจ์ทั้ง 2 รูปแบบนั้นสามารถแสดงผลได้ดังนี้



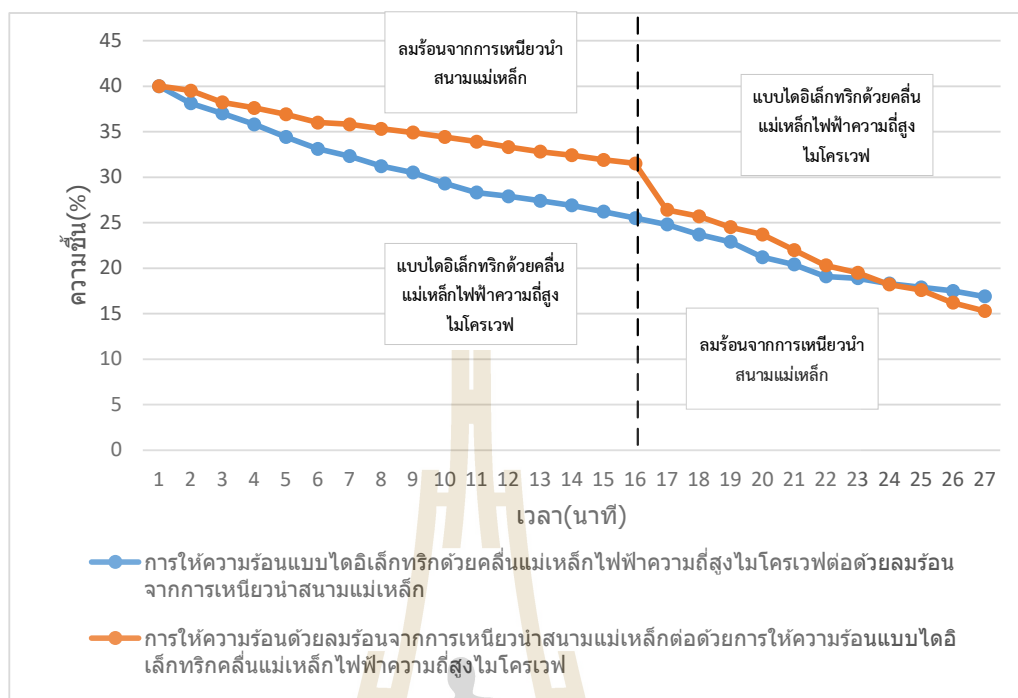
รูปที่ 5.18 การให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟก่อนและตามด้วยการใช้ลมร้อน จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กความถี่สูง

จากรูปที่ 5.18 เป็นกราฟเปรียบเทียบการลดความชื้นจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟก่อนและตามด้วยการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กความถี่สูง โดยการทดสอบนั้นจะนำรูปแบบที่ดีที่สุดของแต่ละส่วนมาทำการทดสอบ ความชื้นข้าวก่อนการทดสอบอยู่ที่ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดสอบในส่วนของการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟสามารถความชื้นได้ 14.5 เปอร์เซ็นต์ และเหลือความชื้นที่ 25.5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพักข้าวไว้ 15 นาที ความชื้นเริ่มคงที่ หลังจากนั้นทำการทดสอบในส่วนของการให้ความร้อนด้วยการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กความถี่สูงต่อ ซึ่งสามารถลดความชื้นได้อีกประมาณ 8.6 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้เหลือความชื้นที่สุดท้ายอยู่ที่ประมาณ 16.9 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพักข้าวไว้ 11 นาที ความชื้นเริ่มคงที่ประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์ โดยคุณภาพข้าวส่วนใหญ่ยังไม่เกิดความเสียหาย



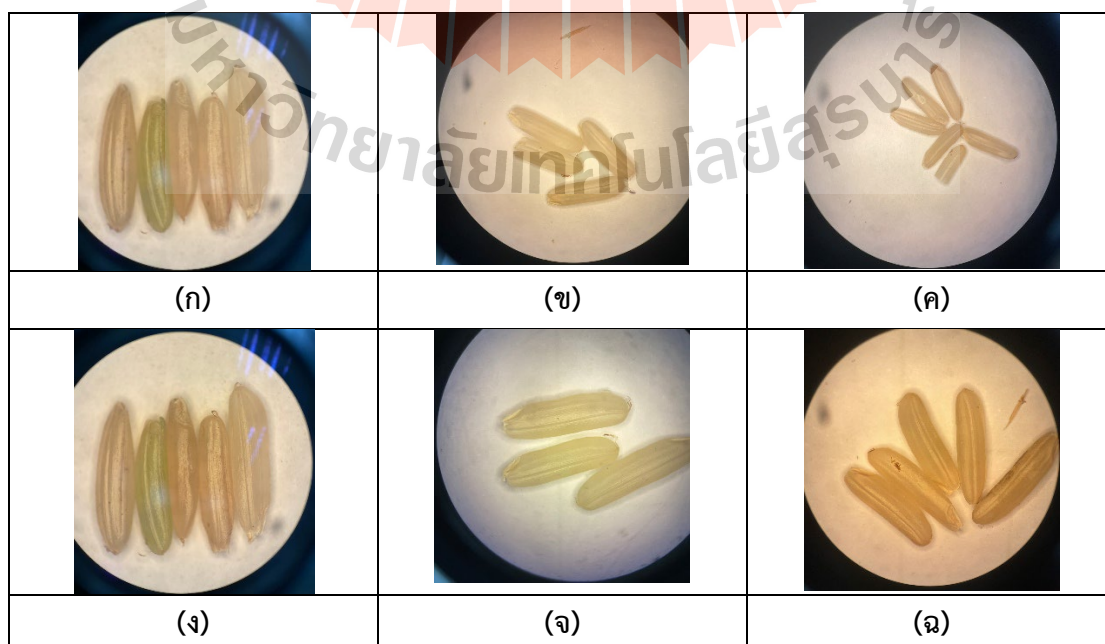
รูปที่ 5.19 การให้ความร้อนด้วยการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กความถี่สูงก่อนและตามด้วยการให้ความร้อนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟ

จากรูปที่ 5.19 เป็นกราฟเปรียบเทียบการลดความชื้นจากการให้ความร้อนด้วยการใช้ลมร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กความถี่สูงก่อนและตามด้วยการให้ความร้อนจากคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟโดยการทดสอบนั้นจะนำรูปแบบที่ดีที่สุดของแต่ละส่วนมาทำการทดสอบ ความชื้นข้าวก่อนการทดสอบอยู่ที่ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดสอบในส่วนของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กสามารถความชื้นได้ประมาณ 8.5 เปอร์เซ็นต์ เหลือความชื้นที่ 31.5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพักข้าวไว้ 15 นาที ความชื้นเริ่มคงที่ หลังจากนั้นทำการทดสอบในส่วนของการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่สูงย่านไมโครเวฟต่อ ซึ่งสามารถลดความชื้นได้อีกประมาณ 16.2 เปอร์เซ็นต์ เหลือความชื้นที่ 15.3 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพักข้าวไว้ 10 นาที ความชื้นเริ่มคงที่ แต่พบว่าข้าวส่วนใหญ่เริ่มเกิดรอยแตกแล้ว



รูปที่ 5.20 เปรียบการอบลดความชื้นข้าวเปลือกแบบไฮบริดจากทั้ง 2 รูปแบบ คือ 1) ใช้การให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟก่อนและตามด้วยลมร้อน 2) การใช้ลมร้อนก่อนแล้วตามด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟ

เมื่อทำการทดสอบการลดความชื้นข้าวและเก็บตัวอย่าง ไปส่องกล้องเพื่อตรวจสอบคุณภาพแล้วในส่วนนี้ จะนำผลการส่องกล้องมาเปรียบเทียบคุณภาพก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบทั้งสองรูปแบบ



รูปที่ 5.21 การเปรียบเทียบคุณภาพข้าวหนึ่งก่อนและหลังการทดสอบ
โดยที่

- (ก) ข้าวเปลือกก่อนการทดสอบ
- (ข) ข้าวหนึ่งหลังการทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟก่อน
- (ค) ข้าวหนึ่งหลังการทดสอบการให้ความร้อนแบบเหนียวนำคลื่นแม่เหล็ก
- (ง) ข้าวเปลือกก่อนการทดสอบ
- (จ) ข้าวหนึ่งหลังการทดสอบการให้ความร้อนแบบเหนียวนำคลื่นแม่เหล็ก
- (ฉ) ข้าวหนึ่งหลังการทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟหลัง

เมื่อนำข้าวไปส่องดูคุณภาพข้าวเพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน พบว่าข้าวเปลือกหนึ่งก่อนการทดสอบหลังจากที่นำข้าวเปลือกหนึ่งที่มีความชื้นประมาณ 40% เพื่อใช้ในการทดลอง เมื่อทำการเก็บผลมาส่องกล้อง เม็ดข้าวก็เกิดการเสียหายเล็กน้อย เกิดรอยร้าวในเม็ดข้าวในบางส่วน เมื่อทำการทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ เม็ดข้าวยังมีคุณภาพเหมือนเดิม ยังไม่เกิดรอยร้าวเพิ่มหรือเกิดการแตกหัก และเมื่อทำการทดสอบการให้ความร้อนแบบเหนียวนำคลื่นแม่เหล็กคุณภาพข้าวก็ยังเหมือนเดิม ยังไม่เกิดการแตกหัก และจากผลการนำข้าวไปส่องดูคุณภาพข้าวเพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน พบว่าข้าวก่อนการทดสอบหลังจากที่นำข้าวเปลือกหนึ่งที่มีความชื้นประมาณ 40% เมื่อทำการเก็บผลมาส่องกล้อง เม็ดข้าวก็เกิดการเสียหายเล็กน้อย เกิดรอยร้าวในเม็ดข้าวในบางส่วน เมื่อทำการทดสอบการให้ความร้อนแบบเหนียวนำคลื่นแม่เหล็ก เม็ดข้าวยังมีคุณภาพเหมือนเดิม ยังไม่เกิดรอยร้าวเพิ่มหรือเกิดการแตกหัก แต่เมื่อทำการทดสอบการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟต่อ คุณภาพข้าวเกิดรอยร้าวมากขึ้น แต่ยังไม่เกิดการแตกหัก

ตารางที่ 5.7 สรุปผลการเปรียบเทียบคุณภาพข้าวก่อนและหลังการทดสอบ

รูปแบบการทดสอบ	ลักษณะคุณภาพข้าวหลังการทดสอบ
การให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟก่อนและการให้ความร้อนแบบเหนียวนำคลื่นแม่เหล็ก	ข้าวไม่เกิดการสูญเสียโครงสร้างเดิมของแป้ง
การให้ความร้อนแบบเหนียวนำคลื่นแม่เหล็กและการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟหลัง	ข้าวเกิดการสูญเสียโครงสร้างเดิมของแป้ง ข้าวแข็งและเกิดการแตกหักของเมล็ดข้าว อาจเกิดจากข้าวที่ได้รับความร้อนมากเกินไป

5.5 สรุป

จากผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ในส่วนของการนึ่งข้าวหนึ่งด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟผลที่ได้จากการทดสอบจะใช้เวลาที่ 120 นาที อุณหภูมิที่ 90 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นรูปแบบความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดในส่วนนี้ จะทำให้สีของข้าวหนึ่งมีสีเหลืองทอง ไม่เข้มมากปริมาณข้าวท้องไข่น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ซึ่งเป็นที่ต้องการของตลาด ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ในส่วนของการลดความชื้นข้าวผลที่ได้จากการทดสอบจะใช้เวลาที่ 7 นาที ระยะการวางโหลตได้อิเล็กตริกที่ 1.5 เซนติเมตร สามารถลดความชื้นจาก 40 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 26.8 เปอร์เซ็นต์ โดยที่คุณภาพข้าวไม่เสียหาย ในส่วนของผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ของการลดความชื้นข้าวของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความร้อนแบบลมร้อน โดยความเร็วลมจะใช้ที่ 6 เมตรต่อวินาที ผลที่ได้จากการทดสอบจะใช้เวลาที่ 7 นาที และอุณหภูมิของลมที่ 45 องศาเซลเซียสเช่นกัน ซึ่งเป็นรูปแบบความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดในส่วนนี้ ซึ่งสามารถลดความชื้นจาก 27 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 14.9 เปอร์เซ็นต์ โดยที่คุณภาพข้าวไม่เสียหาย ทำให้ข้าวหนึ่งที่ผลิตจากระบบนั้นมีคุณภาพสูง สีข้าวเป็นสีเหลืองทองทั้งยังสามารถปรับคุณภาพสีของข้าวหนึ่งได้อีกด้วย



บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปเนื้อหาของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยที่ได้ทำการพัฒนาและการออกแบบสร้างนวัตกรรมระบบผลิตข้าวหนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟลดการใช้เกิดน้ำเสียในกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งสำหรับพื้นที่โรงสีขนาดเล็ก ขนาดกลางและเกษตร ที่ต้องการแปรรูปข้าวเปลือกให้มีมูลค่าสูงขึ้น เนื่องด้วยการผลิตข้าวหนึ่งในปัจจุบันนั้นผู้ที่ทำการผลิตข้าวหนึ่งจะเป็นต้องมีกระบวนการบำบัดน้ำ โดยการบำบัดนั้นจำเป็นต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ทำให้โรงสีขนาดเล็ก ขนาดกลาง หรือเกษตรกรที่สนใจในการทำข้าวหนึ่งเพื่อเพิ่มมูลค่าของข้าวนั้นไม่สามารถทำได้ ดังนั้นการออกแบบสร้างนวัตกรรมระบบผลิตข้าวหนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟจะเพิ่มมูลค่าข้าวขึ้นด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงไมโครเวฟและการเหนี่ยวนำความร้อนด้วยสนามแม่เหล็ก มีขนาดกำลังงานทั้งระบบประมาณ 12,000 วัตต์ต่อระบบ เมื่อคิดค่ากำลังงานไฟฟ้าสำหรับการดำเนินการผลิตข้าวหนึ่งอยู่ที่ประมาณ 2 บาท/กิโลกรัม ปริมาณการผลิตอยู่ที่ 1 ตันต่อวัน โดยระบบผลิตข้าวหนึ่งนั้นจะประกอบไปด้วยระบบหนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงและระบบบอบไล่ความชื้นข้าวเปลือกแบบไฮบริดที่จะทำการออกแบบเป็นสองส่วน คือ ส่วนของการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงและส่วนระบบการให้ลมร้อนจากแหล่งการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ในส่วนแรกจะประกอบไปด้วยชุดแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงทำหน้าที่ในการให้ความร้อนและดูดซับคลื่นความถี่สูงที่ได้ออกแบบให้มีการขยายกำลังของคลื่นไมโครเวฟและสะท้อนให้คลื่นทั่วถึงทั้งตู้อบทำให้กำลังงานที่จ่ายไปสู่สูญเสียน้อยที่สุด และในส่วนที่สองประกอบไปด้วยชุดโหลดความร้อนในการสร้างลมร้อน ระบบตู้อบลมร้อนด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กและวงจรกำเนิดคลื่นสนามแม่เหล็ก โดยการทำงานจะเป็นการสร้างสนามแม่เหล็กความเข้มสูงขึ้นมาและจ่ายให้กับท่อเหล็กใน จากนั้นใช้ลมเป่าผ่านท่อเหล็กเพื่อทำให้เกิดลมร้อน เพื่อลดความชื้นที่ตกค้างบนพื้นผิวของข้าวเปลือกหนึ่งระบบการควบคุมสั่งงานผ่านทางระบบออนไลน์และสามารถสั่งงานและตรวจสอบการทำงานและการใช้พลังงานของระบบบอบไล่ความชื้นข้าวเปลือกแบบไฮบริดผ่าน IoT platform ทางออนไลน์เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด พร้อมทั้งสามารถปรับกำลังการผลิตข้าวหนึ่ง สีของข้าวหนึ่ง ให้มีความเหมาะสมตามความต้องการของผู้ใช้งานได้อีกด้วย

6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

การทดสอบระบบนี้ซึ่งใช้น้ำด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง(ไมโครเวฟ)อาจตั้งเพิ่มระบบในการเติมน้ำและการนำข้าวออกจากกล่องพลาสติกเพื่อลดความยุ่งยากของการทำงานและระบบบไล้ความชื้นข้าวเปลือกแบบไฮบริดไม่สามารถที่จะปรับปริมาณให้สอดคล้องกับความชื้นได้ตลอดเวลาในขณะที่เครื่องกำลังทำงานได้ อาจทำให้ระบบไม่สามารถลดความชื้นได้ทั่วถึงเท่าที่ควร ควรที่จะเพิ่มเซนเซอร์ให้สามารถตรวจวัดความชื้นและเก็บข้อมูลให้มากขึ้นเพื่อทำให้ระบบสามารถวิเคราะห์ได้แม่นยำมากขึ้น และควรเปลี่ยนระบบระบายความร้อนภายในแมกนีตรอนให้เป็นระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นเพิ่มเติมเพื่อให้ระบบระบายความร้อนในระบบได้ดีและไม่ให้ประสิทธิภาพการทำงานของชุดกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงนั้นลดกำลังงานลงทำให้ความร้อน ส่งผลให้การบไล้ความชื้นข้าวเปลือกแบบไฮบริดนั้นมีระยะเวลาในการบไล้เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งช่วยลดการสูญเสียกำลังของตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟและท่อนำคลื่นอีกด้วย

6.3 ประโยชน์ที่ได้รับและการนำไปใช้งาน

หลังจากดำเนินโครงการวิจัยเสร็จสิ้นแล้วได้ระบบผลิตข้าวหนึ่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงโดยใช้เทคโนโลยีการให้ความร้อนด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงและการเหนี่ยวนำแม่เหล็กตั้งเป็นชุดระบบตัวอย่าง 1 ระบบ ขนาด 30 กิโลวัตต์ กำลังการผลิตอยู่ที่ 1 ตันต่อวัน สำหรับการผลิตข้าวหนึ่งที่สามารถลดน้ำที่ใช้ในการผลิตได้และยังไม่ก่อให้เกิดน้ำเสียจากระบบ สามารถนำไปติดตั้งได้กับทุกพื้นที่และสามารถปรับลดขนาดกำลังงานให้เหมาะสมกับการใช้งาน ได้เทคโนโลยีสมัยใหม่สำหรับการผลิตข้าวหนึ่งและการบไล้ความชื้นสูงของกระบวนการนี้ได้และยังนำไปประยุกต์ใช้กับพืชผลประเภทต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ใช้งานง่าย ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานด้านเกษตรผู้ประกอบการโรงสีขนาดเล็กและขนาดกลาง ต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปลอดภัยและยั่งยืน



รายการอ้างอิง

รายการอ้างอิง

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

- Marina Villanueva, Joanna Harasym , Jose María Munoz, Felicidad Ronda.(2018). Microwave absorption capacity of rice flour. Impact of the radiation on rice flour microstructure, thermal and viscometric properties. *Journal of Food Engineering* Volume 224, May 2018, Pages 156-164.
- Mangesh, B., and Sunil, T. (2013). A 25kW, 25kHz Induction Heating Power Supply for MOVPE System Using L-LC Resonant Inverter, *Advances in Power Electronics*, Hindawi Publishing Corporation.
- Matej K., Anze Z., Damijan M., T. Jarm (2010). "Numerical analysis and thermographic investigation of induction heating." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53: 3585-3591.
- Mizuma, T., Kiyokawa, Y., Wakai, Y. (2008). Water absorption characteristics and structural properties of rice for sake brewing. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 106: 258 – 262.
- Muramatsu, Y., Takawa, A., Sakaguchi, E., Kasai, T. (2006). Water absorption characteristics and volume changes of milled and brown rice during soaking. *Cereal Chemistry* 83: 624 – 631.
- Mermelstein, N. H. (1997.) Interest in radiofrequency heating heats up. *Food Technology* 51:794–795.
- Nuchanart Rangkadilok, Sumontha Nookabkaew, Jutamaad Satayavivad . “Research on Arsenic in Thai Rice to Support Specifying Maximum Level of Arsenic in Rice for Thai Rice Export. *Thai Rice Research Journal*”, Vol. 10 No. 2, July - December 2019.
- Nelson, S. O. (1996). Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control. *Transactions of the ASAE*, 39, pp. 1475–1484.
- Potisate, Y., Phoungchandang, S., Kerr, W. L. (2014). The effects of predrying treatment and different drying methods on phytochemical compound retention and drying characteristics of moringa leaves (*Moringa oleifera* Lam.). *Drying technology* 32: 1970 – 1985.
- Piyasena, P., Dussault, C., Koutchma, T., Ramaswamy H. S., Awuah, G. B. (2003). Radio frequency heating of foods: principles, applications and related properties – a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 43: 587 – 606.

- Sweeney, M., Dols, J., Fortenbery B., Sharp, F. (2014). Induction cooking technology design and assessment. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings 9: 370 – 379.
- Sarnago, H., Lucia, O., Mediano, A and Burdio, JM., (2013). Class-D/DE Dual-Mode Operation Resonant Converter for Improved-Efficiency Domestic Induction Heating System, IEEE Transactions on Power Electronics, 28: 1274-1285.
- Thanapat Jongmeesuk, Pattarapon Tossamas, Paiwan worapreda. “Strategy Analysis of Thai Rice Development and Processing and Competition in World Trade Market”. Journal of Research and Development Institute, Rajabhat Maha Sarakham University Vol. 4 No. 2 July–December 2017.
- Thakur, A. K., Gupta, A. K. (2006). Water absorption characteristics of paddy, brown rice and husk during soaking. Journal of Food Engineering 75: 252 – 257.
- Xu Zhoua, Hosahalli Ramaswamyb, Yingtao Qua, Ruzhen Xua, Shaojin Wang.(2019). Combined radio frequency-vacuum and hot air drying of kiwifruits: Effect on drying uniformity, energy efficiency and product quality. Innovative Food Science & Emerging Technologies Volume 56, August 2019, 102182.
- Yuxiao Mao, Penghao Wang, Yi Wu, Lixia Hou, Shaojin Wang.(2021). Effects of various radio frequencies on combined drying and disinfestation treatments for in-shell walnuts. LWT - Food Science and Technology 144 (2021).111246.
- Yafei Liu, Yalan Zhang, Xueying Wei, Dingtao Wu , Jianwu Dai, Shuxiang Liu, Wen Qin.(2021). Effect of radio frequency-assisted hot-air drying on drying kinetics and quality of Sichuan pepper (*Zanthoxylum bungeanum* maxim.) LWT - Food Science and Technology 147 (2021).111572.
- Chuwattanakul, V., & Eiamsa-ard, S. (2019). Hydrodynamics investigation of pepper drying in a swirling fluidized bed dryer with multiple-group twisted tape swirl generators. *Case Studies in Thermal Engineering*, 13, 100389. doi:<https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.100389>
- Dankov, D. D., & Prodanov, P. I. (2017, 13-15 Sept. 2017). *Analysis and design of quasi-resonant ZVS inverter for induction heating in a magnetic circuit*. Paper presented at the 2017 XXVI International Scientific Conference Electronics (ET).

- Nikawa, Y., & Ono, J. (2005, 4-7 Dec. 2005). *Multimode cavity with circular polarizing patch array to heat thin material by microwave*. Paper presented at the 2005 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings.
- Saniso, E., Prachayawarakorn, S., Swasdisevi, T., & Soponronnarit, S. (2020). Parboiled rice production without steaming by microwave-assisted hot air fluidized bed drying. *Food and Bioproducts Processing*, 120, 8 - 20 .
doi:https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.12.005
- Shen, L., Gao, M., Zhu, Y., Liu, C., Wang, L., Kamruzzaman, M., . . . Zheng, X. (2021). Microwave drying of germinated brown rice: Correlation of drying characteristics with the final quality. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 70, 102673. doi:https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102673
- Villanueva, M., Harasym, J., Muñoz, J. M., & Ronda, F. (2018). Microwave absorption capacity of rice flour. Impact of the radiation on rice flour microstructure, thermal and viscometric properties. *Journal of Food Engineering*, 224, 156 - 164 .
doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.12.030
- Zulaika, S., & Rahim, R. A. (2018, 17-19 Dec. 2018). *Dielectric Properties of Rice Paddy and Sitophilus Oryzae for Microwave Heating Treatment*. Paper presented at the 2018 IEEE International RF and Microwave Conference (RFM).

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบสืของข้าวนี้งจากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



ที่ อว 7432/Rep. 043



6 พฤศจิกายน 2567

เรียน นายบุญพิภพ เดชะ

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รายงานผลการทดสอบ

ห้องปฏิบัติการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

หมายเลขใบขอรับบริการ LSF002/68

รายงานผลการทดสอบลำดับที่ RepLSF68002

วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง 25 ตุลาคม 2567

วันเดือนปีที่ทำการทดสอบ 28 ตุลาคม 2567

รายการ ที่	รายการทดสอบ	วิธีการ/เครื่องมือ ที่ใช้ทดสอบ	ผลการทดสอบ		
			ชื่อตัวอย่าง : 1. ข้าวหนึ่งระยะเวลา 90 นาที	ชื่อตัวอย่าง : 2. ข้าวหนึ่งระยะเวลา 120 นาที	ชื่อตัวอย่าง : 3. ข้าวหนึ่งระยะเวลา 180 นาที
			หมายเลขตัวอย่าง : LSF003/68	หมายเลขตัวอย่าง : LSF004/68	หมายเลขตัวอย่าง : LSF005/68
			ลักษณะหรือสภาพ ตัวอย่าง : ของแข็ง สีน้ำตาล	ลักษณะหรือสภาพ ตัวอย่าง : ของแข็ง สีน้ำตาล	ลักษณะหรือสภาพ ตัวอย่าง : ของแข็ง สีน้ำตาล
1	ค่าสี	Color Measurement Spectrophotometer ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Color Quest XE Mode RSEX	L* = 55.29	L* = 56.25	L* = 55.86
			a* = 2.73	a* = 3.59	a* = 4.80
			b* = 20.23	b* = 21.78	b* = 27.44
			C* = 20.42	C* = 23.54	C* = 27.86
			h = 82.28	h = 81.23	h = 80.08

(อาจารย์ ดร. พงษ์ฤทธิ์ ครอบประจักษ์)

รองผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ปฏิบัติการแทนผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ผู้รับรองรายงานผลการทดสอบ

- รายงานนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ทำการทดสอบตามที่ระบุไว้ข้างต้นเท่านั้น
- ห้ามดัด ห้ามถ่ายสำเนาใบรายงานผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนยกเว้นทำทั้งฉบับโดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากห้องปฏิบัติการ

End of Report

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 Tel. 0-4422-3000 Fax. 0-4422-4070
 Suranaree University of Technology 111 University Avenue, Sub District Suranaree, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand
 FM-510-01-01/Rev.No.3/13/05/2562 หน้า 1 จาก 1
 ผู้จัดทำ: ผู้จัดการ

ภาคผนวก ข

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Boonpipob Teja, Thanaset Thosdeekoraphat , Chanchai Thongsopa , Supawat

Kotchapradit. **Analysis and Design of Parboiled Rice Production System**

Devoid Wastewater. 16th South East Asian Technical University Consortium

(SEATUC)



Analysis and Design of Parboiled Rice Production System Devoid Wastewater

Boonpipob Teja
Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasian, Thailand
Email: M6302504@g.sut.ac.th

Thanaset Thosdeekoraphat
Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasian, Thailand
Email: thanaset@sut.ac.th

Chanchai Thongsopa
Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasian, Thailand
Email: Chan@sut.ac.th

Supawat Kotchapradit
Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasian, Thailand
Email: supawat@sut.ac.th

Abstract - This research proposes the design and testing of a new parboiled rice production system to reduce wastewater caused by soaking and steaming processes as a guideline for making a system for use in the parboiled rice production industry by combining soaking and steaming steps. Part one and the use of microwave tunnels for heating. In the beginning of production, a specified amount of water and rice are added to a heat-resistant plastic (PP) box through a 2-level microwave heating process (Steaming), then a drying process.), then rest the steamed rice to set for a time 24 hours and enter the inspection process quality of parboiled rice. The use of microwave tunnels remains an attractive alternative for new parboiled rice production. Because water is used in the first production only once, can control the color quality. Parboiled rice quality reduces production time and consumes a lot of energy in production as well.

Keywords—parboiled rice, microwave heating, Microwave tunnel

wastewater from soaking process and steaming process that must be involved in water treatment, waste. This causes wastage of water and time. The friend reduced the time and waste water produced by parboiled rice. Therefore changing the process of soaking rice and steaming rice To be one step. By heating from the microwave. At a water temperature of 60-80 °c , the initial humidity of 13 ± 3 %, adjust the size 5cm, 10cm and 15cm, adjust the blade angle 30, 45 and 60, the speed of the microwave stator rotor 10, 20 and 30 rpm. The microwave constant of 4.8kw was found that the final moisture content is 70 ± 5 %. The operation of the machine can reduce the waste water caused by soaking and steaming rice by 80-90% compared to the conventional soaking and steaming rice.[1]

I. INTRODUCTION

Rice is an important crop of Thai economy and consumption. Because Thai people have consumed it within the country. It is also one of Thailand's top export economies, where parboiled rice is a rice product. (Rice) obtained by soaking or steeping rice in water to increase the humidity by 30-40%, some of the dissolved vitamins and minerals can be inserted into the seed and remain in the seed even after being exposed. Scrubbed off. Then steamed or boiled until cooked. Then reduce the humidity (Dehydration) or (Drying) and then remove the shell color. Parboiling is the improvement of the milling quality. This makes the rice less broken and improves the nutritional value of rice. Parboiled rice can be divided into two colors: dark parboiled rice and light parboiled rice. Because the nutrients from the rind layer will penetrate into the meat during the steeping and steaming process, the rice will have different colors. Thailand exports the most rice to the African market, accounting for 44% and most of it is parboiled. In addition, the country exports parboiled rice to many countries such as the United States and Europe. Traditional parboiled rice production process consists of three steps: soaking, steaming and drying, with effluent or

II. THE CONCEPT AND CONSTRUCTION

A. antenna design

To design a microwave waveguide to ease the dispersion of the microwaves emitted by the magnetron, we used the CST STUDIO SUITE program to simulate the dispersion and to see the optimum efficiency of the waveguide designed and be applied in the next section.[2]

$$P_A = \frac{P}{V} = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta |E_{rms}|^2 \quad (1)$$

$$D_p = \frac{\lambda_0}{2\pi(2\epsilon_r)^{\frac{1}{2}}} \left(\left(1 + (\tan \delta)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

P_A = power adsorbed/volume

D_p = depth of penetration

F = frequency

ϵ_0 = permittivity of free space

ϵ'_r = relative dielectric constant

$\tan\delta$ = dielectric loss tangent

E_{rms} = root mean square internal electric field

$$(E_{rms} = E_0 / (2)^{1/2})$$

λ_0 = incident wavelength

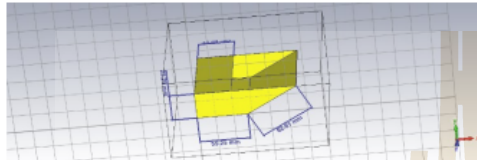


Fig.1- Antenna design used to propagate waves by CST STUDIO SUITE program.

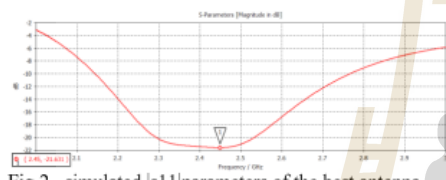


Fig.2- simulated |s11|parameters of the best antenna.

B. steaming system design

From the design of the rice steamer that uses microwave heating, 2.45 GHz frequency, the machine is stainless steel, rectangular shape, width 40 200 25 cm. The cabinet has Magnetrons for generating microwave arrays. 6 together, power 800 w, frequency 2.45 GHz. And there is a belt across the cabinet. to put the experimental sample There is also a cooling fan for the magnetrons to reduce heat build-up which can damage the magnetrons. The hot air from the magnetrons are passed through the steamer to allow the steam to drain. Install a microwave stirs fan with variable speed of the stator waive of the fan to control the distribution of the microwave wave[3, 4]

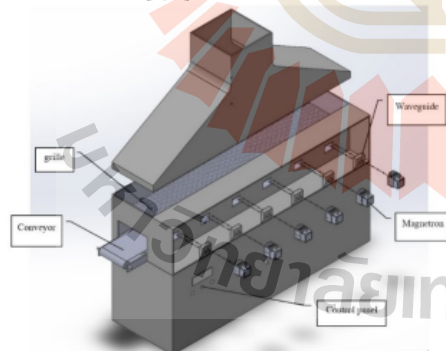


Fig.3- Microwave tunnel system used in parboiled rice production

C. electric field diffusion

Using the CST STUDIO SUITE program. To test the distribution of the electric field. Because high-altitude electromagnetic waves have limitations on the penetration of the waves themselves. It will only allow us to know the limit of the machine when receiving loads in production.[5, 6]

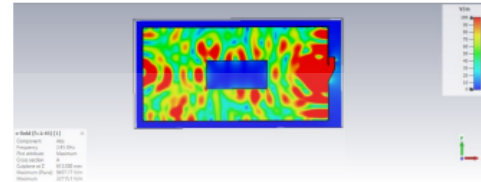


Fig.4- Distribution of electric field when loaded

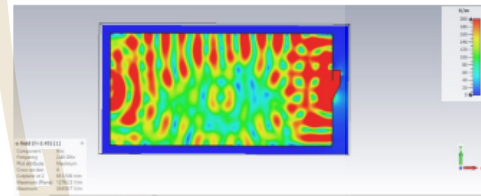


Fig.5- Distribution of electric field at no load

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. experiment example

The experiment was done using rice paddy, Surin one (paddy length x width x thickness = 10.1 x 2.4 x 2.0 mm) with amylose content (13-18%), paddy moisture content of approximately $13 \pm 2\%$.

B. test to measure the heat absorption of water in a microwave tunnel.

Microwave heat absorption experiment released inside the microwave tunnel By using 1000 ml of water. In the experiment, all 3 patterns were used. Type 1 microwave power by turning it on for 10 seconds, then turning it off for 50 seconds (Low power). Type 2 working by turning it on for 15 seconds, then turning it off for 45 seconds (Medium power). Type 3 working by On for 20 seconds, then off again. 30 seconds (High power) 3 types of tests for 30 minutes with results collected for 5 minutes.

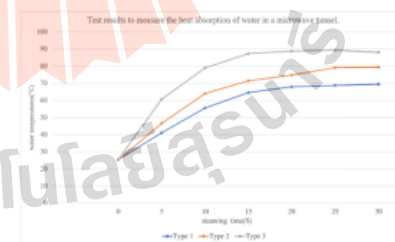


Fig.6- The graph shows the change in temperature over time when passing through a microwave tunnel.

C. test produce steamed rice

Take 1 kg of Surin paddy with 12-16% moisture content, add 1000 ml of water, and steam it in a microwave tunnel (MW) at a temperature of 60-70, microwave power of 4.8 kW. Two types of rice steaming were tested. microwave (MW(standard)) Model 2 Microwave tunnel with agitator blades (MW(stir)) to see how the distribution of microwave waves affects the absorption of parboiled rice may change the quality of parboiled rice for 2 h. 30 minutes to obtain a sample with a moisture content of 54% or more. The sample was then dried to 14-16% moisture, then left at room temperature for the grain to recover for 24 h. go color Initially, the heat after the experiment and the color of the results were measured. Thereafter, the quality of parboiled rice was analyzed as well as the gelatinization level of starch.

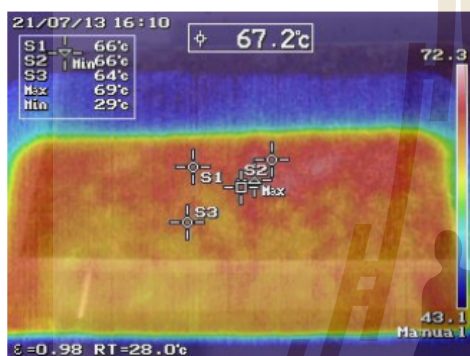


Fig.7 - Measuring the temperature of the rice after coming out of the machine

D. Degree of starch gelatinization(%DSG)

The gelatinization level of DSG starch is one of the most important thermal properties of parboiled rice. The results of the gelatinization time of the starch in parboiled rice, respectively. The DSG value increased with the increased steaming time (from 45% to 71%) of MW (standard) and MW (Stir) (From 52% to 83%), while the gelatinization enthalpy (peak size) decreased steadily (from 1.35 to 0.56 J / g) during steaming. The enthalpy 0.56 J / g for the highest steaming time. The highest DSG value of 83% was found after steaming 180 minutes, indicating that 17% of the starch was not gelatinized. Therefore, the lowest enthalpy was found in rice in the sample that was exposed to steam for the longest. These results were agreed upon by the report, noting that the DSG content increased during the brewing process. DSG's experimental data were calibrated with autoclave time using the equation. [7]

$$\%DSG = \left[1 - \frac{\Delta H}{\Delta H_c} \right] \times 100 \quad (3)$$

%DSG = the degree of starch gelatinization

ΔH = the enthalpy change of starch in the dried rice (J/g dry matter)

ΔH_c = the enthalpy change of raw rice starch (J/g dry matter)

Where DSG is the degree of starch gelatinization (%) and steeping time (min), respectively, during boiling, as long as the treatment heat is high, the granulation dissolution progresses sharply. In addition, higher moisture permeability occurs during steaming to reduce ΔH or increase DSG. The amount of gelatinization of starch is an indication of the extent of the boiling process and may depend on the time and temperature used during the process. Process

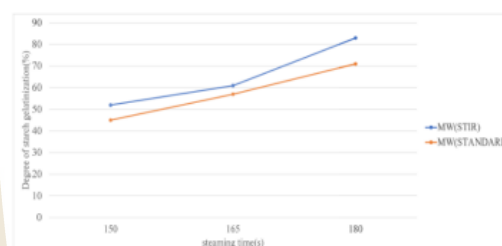


Fig. 7 - The graph shows the relationship between DSG and autoclave time.

E. Color value

Discoloration of rice due to parboiling is another important indicator of quality. It is directly related to the value market because consumers do not except parboiled rice that is the darker rice. A positive linear relationship among the color values and DSG of parboiled rice. The results showed a significant increase in parboiled rice color values ($P < 0.05$) with a DSG increase from the equation ($CV = 0.0317 \times DSG + 16.499$), where CV is the chroma (chroma) model. Linear model is the best model for value scale color compared to DSG steaming MW (standard) color value increased from 17.92 to 18.74 according to (Fig.9) and MW (Stir) color value increased from 18.14 to 19.13 according to (Fig.10), reported color value between 17.0 to 21.0 after. Steamed at temperatures between 60 °C and 90 °C. The effects of the brewing conditions on color and DSG were reported by several changes in color during the browning without enzymes of the Maillard species and conditions. Processing determines the color intensity during boiling. Sugar can also be released during boiling as the rice husk on top is broken off. Subsequent reactions of the sugar with the amino acids of the kernels cause the grain to discolor. The straw pigment produces a color value by dispersing. Enters the endosperm during infusion The color value of parboiled rice decreased while its brightness increased. The lower the trend of brightness will be intense at higher steaming times. Therefore, high steaming times can lead to poor parboiled quality. [8]

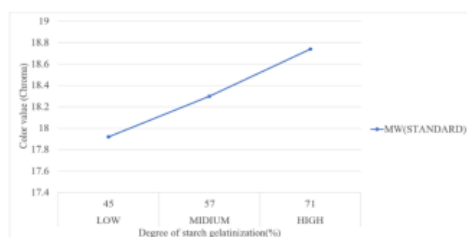


Fig. 8 -Color value curve of MW(Standard)

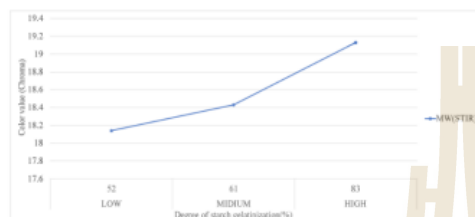


Fig. 9 - Color value curve of MW(Stir)



Fig.10 – Tested rice color

IV. CONCLUSIONS

The use of microwave tunnels may be an alternative way to produce parboiled rice by reducing wastewater. between soaking and steaming rice The control of rice steaming of paddy at 13% moisture by microwave propagation can be divided into two systems: 1 MW (standard), ie the microwave without agitator blades inside the cabinet, 2 MW (stir), or with Installing a microwave stirring impeller inside

the cabinet for better wave propagation. from the analysis results Increasing the degree of gelatinization of starch, gelatinization of starch during the steaming period. Increase rice yield (HRY) to get high quality rice. The rice should not be steamed to less than 54% d.b. moisture, after which the sample should be dried and rested before milling at room temperature. because of the great influence on the color change in paddy Brightness decreases with an increase in steaming temperature and steaming time while both yellow and redness increase. The golden color of the product is obtained by steaming at higher power and longer time [9]

ACKNOWLEDGMENT

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

REFERENCES

1. Saniso, E., et al., *Parboiled rice production without steaming by microwave-assisted hot air fluidized bed drying*. Food and Bioproducts Processing, 2020. **120**: p. 8-20.
2. Shimu, N.J. and A. Ahmed. *Design and performance analysis of rectangular microstrip patch antenna at 2.45 GHz*. in *2016 5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV)*. 2016.
3. Wiedenmann, O., et al. *A multi-physics model for microwave heating in metal casting applications embedding a mode stirrer*. in *2012 The 7th German Microwave Conference*. 2012.
4. Bac, S., et al., *A Continuous Power-Controlled Microwave Belt Drier Improving Heating Uniformity*. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017. **27**(5): p. 527-529.
5. Hu, Y., et al. *Effect of the High-order Modes on Microwave Heating in Rectangular Waveguide*. in *2019 International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM)*. 2019.
6. Watanabe, S., Y. Kakuta, and O. Hashimoto. *Study of Uneven Heating of a Heated Material in a Microwave Oven Considering Air Convection and Heat Radiation*. in *2007 7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology*. 2007.
7. *Abstracts of Papers to be Presented at the 33rd Annual Scientific Session of the American College of Cardiology Dallas, Texas, March 25-29, 1984*. Journal of the American College of Cardiology, 1984. **3**(2, Part 2): p. 469-624.
8. Xu, X., et al., *Effect of ultra-high pressure on quality characteristics of parboiled rice*. Journal of Cereal Science, 2019. **87**: p. 117-123.
9. Taghinezhad, E., et al., *Relationship Between Degree of Starch Gelatinization and Quality Attributes of Parboiled Rice During Steaming*. Rice Science, 2016. **23**(6): p. 339-344.

ประวัติผู้เขียน

นายบุรณพิภพ เตจ๊ะ เกิดเมื่อวันที่ 25 พฤศจิกายน พ.ศ.2540 ที่อำเภอเชียงแสน จังหวัดเชียงราย สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนบ้านหนองปลาสะเด็ด สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเชียงแสนวิทยาคม อำเภอเชียงแสน จังหวัดเชียงราย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2563 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

