

การออกแบบระบบให้ความร้อนท่อลำเลียงข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำ
ร่วมกับลมร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิข้าว



นายธนกฤต ชัยวันดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2566

DESIGN OF A HEATING SYSTEM FOR CONVEYING RICE BY
INDUCTION HEATING WITH HOT AIR FOR INCREASING THE
TEMPERATURE OF RICE



THANAKRIT CHAIWANDEE

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 2023

การออกแบบระบบให้ความร้อนท่อลำเลียงข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลม
ร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิข้าว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยดำเนินการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.สำราญ สันทาลุนย์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.ไชยชัย ทองโสภ)

กรรมการ



(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

รณกฤต ชัยวันดี : การออกแบบระบบให้ความร้อนต่อลำเลียงข้าวสารด้วยเทคนิคการ
เหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิข้าว (DESIGN OF A HEATING SYSTEM FOR
CONVEYING RICE BY INDUCTION HEATING WITH HOT AIR FOR INCREASING THE
TEMPERATURE OF RICE)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำราญ สันทาลุนย์, 93 หน้า

คำสำคัญ: การทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ/การทำความร้อนข้าว/การออกแบบรางซิกแซก/ระบบ
ไฮบริด

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบระบบให้ความร้อนข้าวสาร โดยใช้เทคโนโลยีการให้ความ
ร้อนแบบเหนี่ยวนำมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพพร้อมกับการใช้ลมร้อน โดยทำการออกแบบท่อทรง
สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ด้านในจะมีรางสลับฟันปลาสำหรับให้ความร้อนข้าวสารทั้งหมด 3 รูปแบบ คือ ปรับ
องศาของรางสลับฟันปลาที่ 35 องศา 45 องศา และ 55 องศา เพื่อดูแนวโน้มการไหลของลมร้อนและ
ทดสอบประสิทธิภาพในการให้ความร้อนแก่ข้าวสาร โดยใช้โปรแกรม SolidWorks เพื่อจำลองการ
ไหลของลมร้อน และทำการทดลองเพื่อเทียบกับผลจำลองที่ Simulation ไว้ โดยจะวัดผลจาก
อุณหภูมิของเมล็ดข้าวที่ไหลผ่านลมร้อนและการใช้การเหนี่ยวนำความร้อน ว่ามีประสิทธิภาพในการ
ให้ความร้อนกับเมล็ดข้าวได้ทั่วถึงและไม่ทำให้เมล็ดข้าวแตกหักหรือเสียหาย และจะทดสอบระหว่าง
การใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวเทียบกับการใช้ลมร้อนร่วมกับการใช้การเหนี่ยวนำความร้อน โดยจะ
กำหนดอัตราการไหลของข้าวสาร 3 รูปแบบ คือ 100kg/h 150kg/h และ 200kg/h ซึ่งทั้ง 3 รูปแบบ
จะใช้กำลังงานของลมร้อน 1,143W 2,352W และ 3,756W และใช้กำลังงานของการให้ความร้อน
แบบเหนี่ยวนำ 146W 228W และ 360W โดยจะใช้เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดในการวัดอุณหภูมิของ
ข้าวสาร พบว่าที่การออกแบบท่อให้ความร้อนข้าวสารที่มีรางสลับฟันปลา 45 องศา มีแนวโน้มที่จะทำ
ให้ข้าวสารมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นและไม่ทำให้ข้าวสารแตกหักหรือเกิดความเสียหาย และเมื่อเปรียบเทียบ
การทดสอบการให้ความร้อนข้าวสารพบว่าการใช้ลมร้อนร่วมกับการใช้การเหนี่ยวนำความร้อนมี
แนวโน้มทำให้อุณหภูมิของข้าวสารสูงขึ้นและมีแนวโน้มที่จะใช้กำลังงานน้อยกว่าการใช้ลมร้อนเพียง
อย่างเดียว

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

THANAKRIT CHAIWANDEE : DESIGN OF A HEATING SYSTEM FOR CONVEYING RICE BY INDUCTION HEATING WITH HOT AIR FOR INCREASING THE TEMPERATURE OF RICE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SAMRAN SANTALUNAI, PH.D., 93 PP.

Keyword: INDUCTION HEATING/RICE HEATING/ZIGZAG RAIL DESIGN/HYBRID SYSTEM

This research presents the design of a rice heating system utilizing induction heating technology to enhance efficiency in conjunction with hot air usage. A rectangular duct with an internal zigzag rail is designed to heat the rice in three different configurations: 35 degrees, 45 degrees and 55 degrees angles of the zigzag rail to observe the trend of hot air flow and test the efficiency in heating the rice. SolidWorks is used to simulate the hot air flow, and experiments are conducted to compare with the simulated results. The effectiveness is measured based on the temperature of the rice grains passing through the hot air and induction heating, ensuring the rice grains are uniformly heated without breaking or damage. Comparisons are made between using hot air alone and using hot air combined with induction heating. The rice flow rates are set at 100 kg/h, 150 kg/h and 200 kg/h with hot air power at 1,143W, 2,352W and 3,756W respectively, and induction heating power at 146W, 228W and 360W respectively. An infrared thermometer is used to measure the temperature of the rice. It was found that the 45 degree zigzag rail design tends to increase the rice temperature effectively without causing breakage or damage. Moreover, when comparing the rice heating tests, it was observed that the combination of hot air and induction heating tends to increase the rice temperature more efficiently and is likely to use less power than hot air alone.

School of Electronic Engineering
Academic Year 2023

Ch.Thanakrit
Student's Signature.....
Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ กลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ให้ความกรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านงานวิจัยและด้านวิชาการ อาทิเช่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สำราญ สันทาลุนย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ได้ให้คำปรึกษา และแนะนำอย่างดีในการจัดทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งให้คำแนะนำ แก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินการ รวมถึงช่วยตรวจสอบ และปรับปรุงวิทยานิพนธ์อย่างละเอียดถี่ถ้วน ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถเสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภาก อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้ให้คำแนะนำทางวิชาการ ซึ่งช่วยเป็นแนวทางในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังได้มอบโอกาสในการศึกษาและการพัฒนาตนเองอย่างเต็มที่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนเสฏฐ์ ทศศิริพัฒน์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้ให้คำแนะนำและปรึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์และแนวทางในการออกแบบระบบ รวมถึงการเลือกใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมต่อระบบที่ออกแบบ เพื่อให้การออกแบบมีประสิทธิภาพสูงสุด

ขอขอบคุณพี่ ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และกำลังใจ ในการทำวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถเสร็จสมบูรณ์ได้อย่างดี

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยครั้งนี้ รวมถึงขอขอบคุณบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ อย่างเต็มที่

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมารดาและบิดาที่ให้กอบารมเลี้ยงดู และสนับสนุนการศึกษาอย่างเต็มที่ อีกทั้งขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่คอยให้คำแนะนำ และเสนอแนะแนวทางในทุกขั้นตอนของวิทยานิพนธ์นี้ ทำให้ผู้เขียนได้เรียนรู้และพัฒนาตนเองไปอย่างมีประสิทธิภาพ บทเรียนและคำแนะนำของท่านทั้งหลายจะเป็นแรงผลักดันให้ผู้เขียนประสบความสำเร็จในชีวิต ขอขอบคุณอาจารย์ท่านผู้เคยอบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจในทุก ๆ ช่วงเวลา จากความกรุณาและการสนับสนุนอันดีเสมอแก่ผู้วิจัย

ธนกฤต ชัยวันดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 ปรัชญาหรือค่านิยม.....	5
1.8 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์.....	7
2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 กล่าวนำ.....	8
2.2 หลักการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	8
2.2.1 หลักการสร้างวงจรเหนี่ยวนำความร้อน.....	10
2.2.2 โพลตเรโซแนนซ์.....	12
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนความร้อน.....	15
2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในส่วนของการคำนวณพลังงานความร้อน.....	17
2.4.1 การคำนวณหาปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในการให้ความร้อน.....	17
2.5 สรุป.....	17

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3. การออกแบบระบบให้ความร้อนท่อลำเลียงข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำ	
ร่วมกับลมร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิข้าว	18
3.1 บทนำ.....	18
3.2 การออกแบบวงจรเหนี่ยวนำความร้อน	18
3.3 การออกแบบท่อลำเลียงข้าวสารร่วมกับเครื่องเป่าลมร้อน	25
3.4 การคำนวณหาค่าของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน.....	28
3.5 การออกแบบวิธีการทดลองและการเก็บผล	30
3.6 สรุป.....	32
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	33
4.1 บทนำ.....	33
4.2 การทดสอบการเพิ่มอุณหภูมิข้าวสารด้วยระบบการเป่าลมร้อนเพียงอย่างเดียว	34
4.2.1 การทดสอบระบบการเป่าลมร้อนเพียงอย่างเดียวที่อัตราการไหล 100kg/h	34
4.2.2 การทดสอบระบบการเป่าลมร้อนเพียงอย่างเดียวที่อัตราการไหล 150kg/h	38
4.2.3 การทดสอบระบบการเป่าลมร้อนเพียงอย่างเดียวที่อัตราการไหล 200kg/h	41
4.3 การทดสอบการเพิ่มอุณหภูมิข้าวสารด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน.....	44
4.3.1 ทดสอบที่อัตราการไหล 100kg/h และที่ กำลังงานเหนี่ยวนำ 146W.....	45
4.3.2 ทดสอบที่อัตราการไหล 100kg/h และที่ กำลังงานเหนี่ยวนำ 228W.....	48
4.3.3 ทดสอบที่อัตราการไหล 100kg/h และที่ กำลังงานเหนี่ยวนำ 360W.....	51
4.3.4 ทดสอบที่อัตราการไหล 150kg/h และที่ กำลังงานเหนี่ยวนำ 146W.....	54
4.3.5 ทดสอบที่อัตราการไหล 150kg/h และที่ กำลังงานเหนี่ยวนำ 228W.....	57
4.3.6 ทดสอบที่อัตราการไหล 150kg/h และที่ กำลังงานเหนี่ยวนำ 360W.....	60
4.3.7 ทดสอบที่อัตราการไหล 200kg/h และที่ กำลังงานเหนี่ยวนำ 146W.....	63
4.3.8 ทดสอบที่อัตราการไหล 200kg/h และที่ กำลังงานเหนี่ยวนำ 228W.....	66
4.3.9 ทดสอบที่อัตราการไหล 200kg/h และที่ กำลังงานเหนี่ยวนำ 360W.....	69
4.4 การวัดผลที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวสารที่ 100 kg/h	72
4.5 การวัดผลที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวสารที่ 150 kg/h	74
4.6 การวัดผลที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวสารที่ 200 kg/h	76

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.7 สรุป.....	78
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	79
5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	79
5.1.1 สรุปการวัดผลอุณหภูมิของข้าวสารที่ใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว	80
5.1.2 สรุปการวัดผลอุณหภูมิของข้าวสารที่ใช้การเหนียวนำร่วมกับลมร้อน	80
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	80
5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	81
รายการอ้างอิง.....	82
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	83
ประวัติผู้เขียน.....	93

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียโพลีเรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมและขนาน.....	13
2.2 การเปรียบเทียบลักษณะของอุปกรณ์ คลื่นแรงดันและกระแสโพลีเรโซแนนซ์ ชนิดอนุกรมและขนาน.....	14
2.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรเรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมและขนาน.....	15

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ	6
1.2 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นที่เป็นข้ออ.....	7
2.1 หลักการเกิดการเหนี่ยวนำความร้อน	9
2.2 วงจรเหนี่ยวนำความร้อน.....	10
2.3 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเหนี่ยวนำความร้อน	10
2.4 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริด.....	11
2.5 คลื่นแรงดันและกระแสไหลของวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์	11
2.6 ระบบที่มีการไหลแบบกระแสเดียว (ก) ระบบที่มีการไหลแบบหลายกระแส (ข)	16
3.1 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของวงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	19
3.2 Schematic วงจรเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Induction).....	19
3.3 ลายวงจรด้าน Top.....	20
3.4 ลายวงจรด้าน Bottom.....	20
3.5 วงจรที่ได้จากการออกแบบพร้อมใส่อุปกรณ์ (ด้านหน้า).....	21
3.6 วงจรที่ได้จากการออกแบบพร้อมใส่อุปกรณ์ (ด้านหลัง)	21
3.7 Schematic ขนาน Capacitor.....	22
3.8 ลายวงจรขนาน Capacitor ด้าน Top.....	22
3.9 ลายวงจรขนาน Capacitor ด้าน Bottom.....	23
3.10 วงจรขนาน Capacitor ที่ได้จากการออกแบบพร้อมใส่อุปกรณ์ (ด้านหน้า).....	23
3.11 วงจรขนาน Capacitor ที่ได้จากการออกแบบพร้อมใส่อุปกรณ์ (ด้านหลัง)	24
3.12 วงจรเหนี่ยวนำความร้อนที่ใช้งานจริง	24
3.13 การออกแบบท่อลำเลียงข้าวสาร	25
3.14 โครงสร้างภายในของท่อลำเลียงข้าวสารทั้ง 3 รูปแบบ	26
3.15 ผลการจำลองทิศทางการไหลของลมทั้ง 3 รูปแบบ.....	27
3.16 ออกแบบระบบให้ความร้อนสำหรับเมล็ดข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน....	29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 ท่อลำเลียงข้าวสารที่จะใช้ในการทดลองและเก็บผล	31
3.18 ระบบให้ความร้อนสำหรับเมล็ดข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน	31
3.19 เครื่องเป่าลมร้อนที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ.....	32
4.1 ระบบการให้ความร้อนข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน.....	33
4.2 แสดงอุณหภูมิเริ่มต้นของข้าวสารที่ 25 องศาเซลเซียส ก่อนผ่านระบบการเป่าลมร้อน.....	34
4.3 แสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 1,143W ได้อุณหภูมิ 40.2 องศาเซลเซียส.....	35
4.4 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบ การเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 1,143W และที่อัตราการไหล 100kg/h.....	35
4.5 แสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 2,352W ได้อุณหภูมิ 61.2 องศาเซลเซียส.....	36
4.6 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบ การเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 2,352W และที่อัตราการไหล 100kg/h.....	36
4.7 แสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 3,756W ได้อุณหภูมิ 80.3 องศาเซลเซียส.....	37
4.8 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบ การเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 3,756W และที่อัตราการไหล 100kg/h.....	37
4.9 แสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 1,143W ได้อุณหภูมิ 40.9 องศาเซลเซียส.....	38
4.10 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบ การเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 1,143W และที่อัตราการไหล 150kg/h.....	38
4.11 แสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 2,352W ได้อุณหภูมิ 61.9 องศาเซลเซียส.....	39
4.12 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบ การเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 2,352W และที่อัตราการไหล 150kg/h.....	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 แสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 3,756W ได้อุณหภูมิ 81 องศาเซลเซียส.....	40
4.14 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเป่าลมร้อน ที่กำลังงาน 3,756W และที่อัตราการไหล 150kg/h.....	40
4.15 แสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 1,143W ได้อุณหภูมิ 41.3 องศาเซลเซียส.....	41
4.16 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเป่าลมร้อน ที่กำลังงาน 1,143W และที่อัตราการไหล 200kg/h.....	41
4.17 แสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 2,352W ได้อุณหภูมิ 62 องศาเซลเซียส.....	42
4.18 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเป่าลมร้อน ที่กำลังงาน 2,352W และที่อัตราการไหล 200kg/h.....	42
4.19 แสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 3,756W ได้อุณหภูมิ 82.3 องศาเซลเซียส.....	43
4.20 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเป่าลมร้อน ที่กำลังงาน 3,756W และที่อัตราการไหล 200kg/h.....	43
4.21 สัญญาณ Output เรโซแนนซ์ที่ความถี่ 11 kHz.....	44
4.22 แสดงอุณหภูมิเริ่มต้นของข้าวสารที่ 27 องศาเซลเซียส ก่อนผ่านระบบ การเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน.....	44
4.23 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 1,289W ได้อุณหภูมิ 63.2 องศาเซลเซียส.....	45
4.24 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 1,289W และที่อัตราการไหล 100kg/h.....	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 2,498W ได้อุณหภูมิ 82.3 องศาเซลเซียส.....	46
4.26 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 2,498W และที่อัตราการไหล 100kg/h	46
4.27 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 3,902W ได้อุณหภูมิ 108.3 องศาเซลเซียส	47
4.28 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 3,902W และที่อัตราการไหล 100kg/h	47
4.29 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 1,371W ได้อุณหภูมิ 75.3 องศาเซลเซียส.....	48
4.30 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 1,371W และที่อัตราการไหล 100kg/h	48
4.31 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 2,580W ได้อุณหภูมิ 97.5 องศาเซลเซียส.....	49
4.32 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 2,580W และที่อัตราการไหล 100kg/h	49
4.33 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 3,984W ได้อุณหภูมิ 123.8 องศาเซลเซียส	50
4.34 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 3,984W และที่อัตราการไหล 100kg/h	50
4.35 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 1,503W ได้อุณหภูมิ 102 องศาเซลเซียส.....	51
4.36 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 1,503W และที่อัตราการไหล 100kg/h	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.37 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 2,712W ได้อุณหภูมิ 127.8 องศาเซลเซียส	52
4.38 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 2,712W และที่อัตราการไหล 100kg/h	52
4.39 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 4,116W ได้อุณหภูมิ 147.5 องศาเซลเซียส	53
4.40 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน	53
4.41 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 1,289W ได้อุณหภูมิ 62.2 องศาเซลเซียส.....	54
4.42 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 1,289W และที่อัตราการไหล 150kg/h	54
4.43 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 2,498W ได้อุณหภูมิ 80.8 องศาเซลเซียส.....	55
4.44 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 2,498W และที่อัตราการไหล 150kg/h	55
4.45 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 3,902W ได้อุณหภูมิ 106 องศาเซลเซียส.....	56
4.46 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 3,902W และที่อัตราการไหล 150kg/h	56
4.47 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 1,371W ได้อุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส.....	57
4.48 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 1,371W และที่อัตราการไหล 150kg/h	57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.49 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 2,580W ได้อุณหภูมิ 96.3 องศาเซลเซียส.....	58
4.50 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 2,580W และที่อัตราการไหล 150kg/h	58
4.51 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 3,984W ได้อุณหภูมิ 121.3 องศาเซลเซียส	59
4.52 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 3,984W และที่อัตราการไหล 150kg/h	59
4.53 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 1,503W ได้อุณหภูมิ 102 องศาเซลเซียส.....	60
4.54 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 1,503W และที่อัตราการไหล 150kg/h	60
4.55 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 2,712W ได้อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส.....	61
4.56 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 2,712W และที่อัตราการไหล 150kg/h	61
4.57 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 4,116W ได้อุณหภูมิ 145.5 องศาเซลเซียส	62
4.58 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 4,116W และที่อัตราการไหล 150kg/h	62
4.59 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 1,289W ได้อุณหภูมิ 62 องศาเซลเซียส.....	63
4.60 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 1,289W และที่อัตราการไหล 200kg/h	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.61 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 2,498W ได้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส.....	64
4.62 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 2,498W และที่อัตราการไหล 200kg/h	64
4.63 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 3,902W ได้อุณหภูมิ 104.3 องศาเซลเซียส	65
4.64 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 3,902W และที่อัตราการไหล 200kg/h	65
4.65 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 1,371W ได้อุณหภูมิ 71.3 องศาเซลเซียส.....	66
4.66 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 1,371W และที่อัตราการไหล 200kg/h	66
4.67 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 2,580W ได้อุณหภูมิ 95.5 องศาเซลเซียส.....	67
4.68 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 2,580W และที่อัตราการไหล 200kg/h	67
4.69 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 3,984W ได้อุณหภูมิ 118.3 องศาเซลเซียส	68
4.70 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 3,984W และที่อัตราการไหล 200kg/h	68
4.71 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 1,503W ได้อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส.....	69
4.72 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 1,503W และที่อัตราการไหล 200kg/h	69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.73 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 2,712W ได้อุณหภูมิ 123.3 องศาเซลเซียส	70
4.74 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 2,712W และที่อัตราการไหล 200kg/h	70
4.75 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 4,116W ได้อุณหภูมิ 144 องศาเซลเซียส.....	71
4.76 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 4,116W และที่อัตราการไหล 200kg/h	71
4.77 กราฟแสดงความต่างของอุณหภูมิจากการใช้ลมร้อนอย่างเดียว กับการใช้ลมร้อนร่วมกับการเหนี่ยวนำความร้อน ที่อัตราการไหล 100 kg/h โดยที่ (a) เป็นกราฟที่ใช้กำลังงาน 146W (b) เป็นกราฟที่ใช้กำลังงาน 228W และ (c) เป็นกราฟที่ใช้กำลังงาน 360W	73
4.78 กราฟแสดงความต่างของอุณหภูมิจากการใช้ลมร้อนอย่างเดียว กับการใช้ลมร้อนร่วมกับการเหนี่ยวนำความร้อน ที่อัตราการไหล 150 kg/h โดยที่ (a) เป็นกราฟที่ใช้กำลังงาน 146W (b) เป็นกราฟที่ใช้กำลังงาน 228W และ (c) เป็นกราฟที่ใช้กำลังงาน 360W	75
4.79 กราฟแสดงความต่างของอุณหภูมิจากการใช้ลมร้อนอย่างเดียว กับการใช้ลมร้อนร่วมกับการเหนี่ยวนำความร้อน ที่อัตราการไหล 200 kg/h โดยที่ (a) เป็นกราฟที่ใช้กำลังงาน 146W (b) เป็นกราฟที่ใช้กำลังงาน 228W และ (c) เป็นกราฟที่ใช้กำลังงาน 360W	77

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในปัจจุบันมีการนำพืชธัญพืช เช่น ข้าว ข้าวโพด ถั่ว มาใช้ในการอบแห้งเพื่อแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์และอาหารต่าง ๆ โดยวิธีการอบแห้งจะช่วยกำจัดความชื้นในพืชและเพิ่มความคงทนต่อการเก็บรักษา และยังช่วยรักษาสารอาหารภายในพืชไว้ได้ดี จึงสามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์และอาหารต่าง ๆ ได้ เช่น ข้าวอบแห้งเป็นวิธีการแปรรูปของข้าวที่มีการนำเอาความร้อนจากเครื่องอบแห้งมาใช้ในการกำจัดความชื้นในเมล็ดข้าว เพื่อเพิ่มความคงทนต่อการเก็บรักษาและลดการเปลี่ยนแปลงของสีและรสชาติของข้าว เป็นเทคโนโลยีการผลิตข้าวแปรรูปที่มีความสะอาดและมีมาตรฐาน นอกจากนี้ ยังมีการนำข้าวอบแห้งไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเสริม เช่น โจ๊กข้าวกล้อง น้ำมันรำข้าวหรือใช้เป็นวัตถุดิบในอาหารต่าง ๆ อีกด้วยการอบแห้งข้าวโพดเป็นวิธีการแปรรูปที่สามารถเก็บรักษาคุณค่าอาหารไว้ได้นานและสามารถนำไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ ได้หลากหลาย เช่น บะหมี่ข้าวโพด อาหารสัตว์ เป็นต้น การอบแห้งถั่วเป็นวิธีหนึ่งในการแปรรูปถั่ว ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นส่วนประกอบหลายอย่าง เช่น อาหารสัตว์ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตอาหาร เช่น น้ำมันถั่วเหลือง ซึ่งทำได้ง่ายและมีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยมักจะใช้วิธีการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่ใช้ความร้อนและลมร้อนสำหรับลดความชื้นในถั่วให้เหลือประมาณ 10-12% จากที่กล่าวมาข้างต้นปัจจุบันมีการใช้แหล่งพลังงานความร้อนในการอบแห้งหลายรูปแบบ เช่น จากธรรมชาติ คือการเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าในการอบแห้งธัญพืชต่าง ๆ การใช้ขดลวดความร้อนเป็นการใช้เทคโนโลยีที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อให้ความร้อนแก่วัตถุที่ต้องการอบแห้ง การใช้พลังงานความร้อนจากแก๊ส เป็นวิธีการอบแห้งที่ใช้แก๊สเป็นแหล่งพลังงานในการสร้างความร้อนเพื่อให้ความชื้นภายในวัตถุถูกขับออกไป และแบบการใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเทคโนโลยีที่ใช้พลังงานไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เพื่อกำจัดความชื้นจากวัตถุดิบ ปัจจุบันการใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการให้ความร้อนจะมี 2 รูปแบบ คือ แบบเหนี่ยวนำความร้อน และแบบไดอิเล็กตริก การใช้พลังงานจากธรรมชาตินั้นมีข้อเสียอย่างหนึ่ง คือขึ้นอยู่กับสภาพอากาศและพิกัดที่ใช้งาน และไม่สามารถใช้งานได้ตลอดเวลา ส่วนการใช้ขดลวดความร้อนในการอบแห้งนั้นอาจมีข้อเสียบางประการ เช่น มีความเสี่ยงที่จะเกิดการเป็นไฟได้ และใช้พลังงานเยอะเกินความจำเป็น และการใช้พลังงานจากแก๊สจะต้องใช้เครื่องมือที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เมื่อเทียบกับการใช้พลังงานความร้อนจากธรรมชาติหรือการใช้พลังงานความร้อนจากขดลวดความร้อนรวมไป

ถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ การใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีข้อดีหลายประการ เช่น ประหยัดพลังงาน มีความปลอดภัย สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ง่ายทำความร้อนได้รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพในการอบแห้งสูง โดยแบบเหนี่ยวนำความร้อนเป็นเทคโนโลยีที่ใช้การสร้างกระแสไฟฟ้าแบบสั้น (electromagnetic waves) จากสนามแม่เหล็กเพื่อให้เกิดความร้อนในวัสดุที่ต้องการอบแห้ง โดยไม่ต้องสัมผัสกับแหล่งความร้อนโดยตรง การอบแห้งทำได้เร็วและมีประสิทธิภาพสูง โดยไม่ต้องใช้เวลาในการเตรียมความร้อนก่อน การใช้เทคโนโลยีนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำ ซึ่งช่วยลดการสูญเสียของสารอาหารและยังช่วยให้สินค้ามีคุณภาพดี ไม่มีการใช้เชื้อเพลิงหรือแหล่งพลังงานในการสร้างความร้อน จึงไม่มีการปล่อยก๊าซเสียสู่บรรยากาศ และเป็นเทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกเป็นเทคโนโลยีการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟ โดยใช้คลื่นความถี่สูง ซึ่งเรียกว่าคลื่นไดอิเล็กตริก (Electromagnetic waves) เพื่อทำให้โมเลกุลภายในเกิดการสั่นจนเกิดเป็นความร้อน การใช้ไดอิเล็กตริกในการอบแห้งมีความประหยัดพลังงานมากกว่าการใช้เครื่องทำความร้อนแบบอื่น ๆ เช่น เหนี่ยวนำความร้อน หรือการใช้แก๊ส ไม่สร้างมลพิษหรือก๊าซเสียต่อสิ่งแวดล้อม และไม่ต้องใช้สารเคมี ทำให้เป็นวิธีการแปรรูปที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด สามารถทำความร้อนได้สม่ำเสมอ และมีคุณภาพสูง เนื่องจากมีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้ดีกว่าการใช้เครื่องทำความร้อนอื่น ๆ การให้ความร้อนมากก่อนที่จะผ่านการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกจะทำให้วัตถุที่จะถูกอบแห้งมีอุณหภูมิเริ่มต้นสูงขึ้น จึงทำให้การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นและเร็วขึ้น ทำให้เวลาการอบแห้งลดลง และประหยัดพลังงานได้ เนื่องจากการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกโดยไม่ต้องให้ความร้อนก่อน อาจจะทำให้เกิดความเสียหายกับวัตถุ เนื่องจากการใช้ไดอิเล็กตริกจะเพิ่มความร้อนในวัตถุที่อบแห้งเร็ว ซึ่งอาจทำให้วัตถุแตกหรือเกิดความเสียหายได้ และช่วยลดการสะสมความร้อนของวัตถุ เนื่องจากอุณหภูมิเริ่มต้นสูงขึ้น ทำให้เกิดการแพร่กระจายความร้อนได้ดีขึ้น และลดการสะสมความร้อนที่อาจทำให้เกิดความเสียหายต่อวัตถุได้ ปัจจุบันมีการออกแบบและใช้งานพรีฮีตหลายรูปแบบ เช่น เตาอบที่มีท่อพรีฮีตในตัวเครื่อง เครื่องจะทำการส่งความร้อนจากท่อพรีฮีตไปยังช่องอบแห้งเพื่ออบแห้งข้าวสาร วิธีนี้สามารถลดเวลาในการอบแห้งได้มาก และสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ง่าย ยังมีเครื่องพรีฮีตแบบอินฟราเรด ซึ่งใช้ความร้อนจากแสงอินฟราเรดในการพรีฮีตข้าวสาร และเครื่องพรีฮีตแบบไมโครเวฟ ซึ่งใช้คลื่นไมโครเวฟในการพรีฮีตข้าวสาร ทั้งนี้การเลือกใช้เครื่องพรีฮีตในการอบแห้งข้าวสารนั้นขึ้นอยู่กับความต้องการและงบประมาณของผู้ใช้งานด้วย

ดังนั้น บทความนี้จะนำเสนอการทดลองและการออกแบบระบบให้ความร้อนต่อลำเลียงข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนสำหรับใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องฆ่ามอดข้าวแบบไดอิเล็กตริก โดยใช้การเหนี่ยวนำความร้อน (induction heating) ด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าถ่ายเทความร้อนให้กับท่อลำเลียงข้าวสาร และใช้ลมร้อนเป่าผ่านเข้าไปในท่อลำเลียง เพื่อเพิ่มอุณหภูมิ

ด้านในท่อลำเลียงให้สูงขึ้น และช่วยให้ข้าวสารที่ไหลผ่านท่อลำเลียงมีอุณหภูมิที่สม่ำเสมอทั่วถึงทุกเมล็ด โดยไม่เกิดความเสียหายต่อข้าวสาร

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อออกแบบระบบให้ความร้อนท่อลำเลียงข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน และวิเคราะห์ผลต่างของอุณหภูมิข้าวสารที่เพิ่มขึ้นจากอัตราการไหลและความร้อนภายในท่อที่ต่างกัน

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ออกแบบระบบเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนกับท่อลำเลียงข้าวสาร

1.3.2 ออกแบบท่อลำเลียงข้าวสารเพื่อใช้สำหรับระบบให้ความร้อนข้าวร่วมกับลมร้อน

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาข้อมูลรูปแบบของเครื่องให้ความร้อนข้าวหรือรูปแบบการให้ความร้อนเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบให้ความร้อนสำหรับข้าวสาร

1.4.2 ออกแบบระบบให้ความร้อนท่อลำเลียงข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน

1.4.3 วิจัย พัฒนา ออกแบบ ทดสอบ และปรับปรุงระบบให้ความร้อนท่อลำเลียงข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน

1.4.4 ทดสอบ เก็บผล และวิเคราะห์ ระบบให้ความร้อนท่อลำเลียงด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่สร้างขึ้น

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 แนวทางการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) ออกแบบและสร้างระบบให้ความร้อนท่อลำเลียงข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน
- 3) ทดสอบ เก็บผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5.2 ระเบียบวิธีวิจัยเป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

- 1) สืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

- 2) ศึกษาและวิเคราะห์ระบบการอบข้าวหรือการให้ความร้อนสำหรับเมล็ดข้าวที่นิยมใช้ในปัจจุบันเพื่อหาข้อแตกต่างของงานวิจัย ออกแบบวิเคราะห์การพันขดลวดเหนี่ยวนำให้ได้ประสิทธิภาพที่เหมาะสม
- 3) วิเคราะห์และปรับปรุงให้เครื่องให้ความร้อนสำหรับเมล็ดข้าวด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำความร้อนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.5.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ อาคารเครื่องมือ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

1.5.4 เครื่องมือที่ใช้สำหรับวิจัย

- 1) คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
- 2) ออสซิลโลสโคป
- 3) เครื่องวัด RLC
- 4) กล่องส่งอุณหภูมิแบบอินฟราเรด
- 5) แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง
- 6) ชุดเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแสดงผลแบบดิจิตอล

1.5.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) เก็บรวบรวมข้อมูลจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
- 2) เก็บผลจากอุณหภูมิของเมล็ดข้าวที่เพิ่มขึ้นและความสม่ำเสมอของอุณหภูมิเมล็ดข้าวหลังผ่านเครื่องด้วยการส่งดูด้วยกล่องส่งอุณหภูมิแบบอินฟราเรด

1.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลความรู้เกี่ยวกับการสร้างและผลการทดลองระบบให้ความร้อนต่อลำเลียง

ข้าวสารจะถูกนำไปวิเคราะห์และแสดงผลเป็นข้อมูลทางวิศวกรรม วิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ประสิทธิภาพในการให้ความร้อนกับข้าวสารของระบบให้ความร้อนต่อลำเลียง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

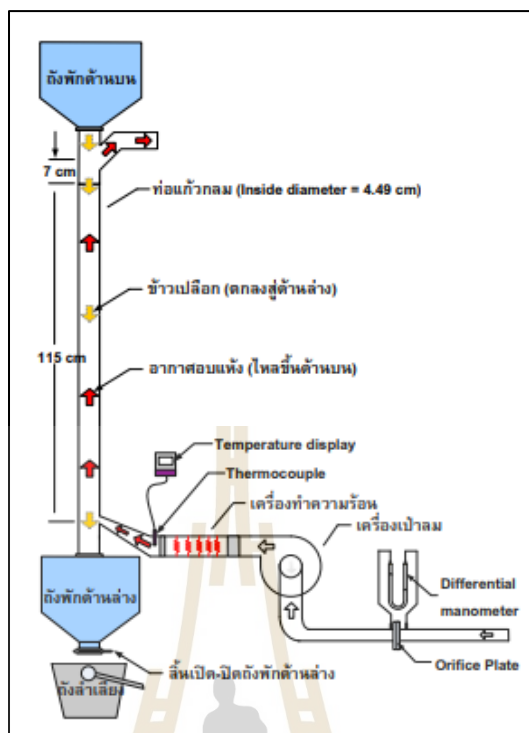
- 1.6.1 ได้ระบบให้ความร้อนต่อลำเลียงข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน
- 1.6.2 สามารถนำความรู้ที่ได้จากทฤษฎีมาประยุกต์ใช้กับงานอื่น ๆ ได้
- 1.6.3 สามารถนำความรู้ที่ได้จากการวิจัยและศึกษามาประกอบวิชาชีพระดับปริญญาตรีได้
- 1.6.4 ได้ทักษะการเรียนรู้ด้วยตนเอง การคิดวิเคราะห์และออกแบบ รวมทั้งการแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้าที่เกิดขึ้นได้

1.7 ปรีทัศน์วรรณกรรม

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อสร้างเครื่องให้ความร้อนข้าวที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิให้กับข้าวสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อนำไปช่วยเพิ่มกำลังการผลิตให้กับเครื่องฆ่ามอดข้าวแบบไดอิเล็กตริกได้ ซึ่งเครื่องที่ให้ความร้อนข้าวหรืออบข้าวได้มีการสร้างขึ้นในรูปแบบต่าง ๆ มากมาย ซึ่งในแต่ละแบบก็จะมีวัตถุประสงค์ในการสร้างขึ้นมาเพื่อใช้งานที่ต่างกันออกไป และเพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ทิศทางความเป็นไปได้ตลอดจนปัญหาและข้อเสนอแนะต่าง ๆ

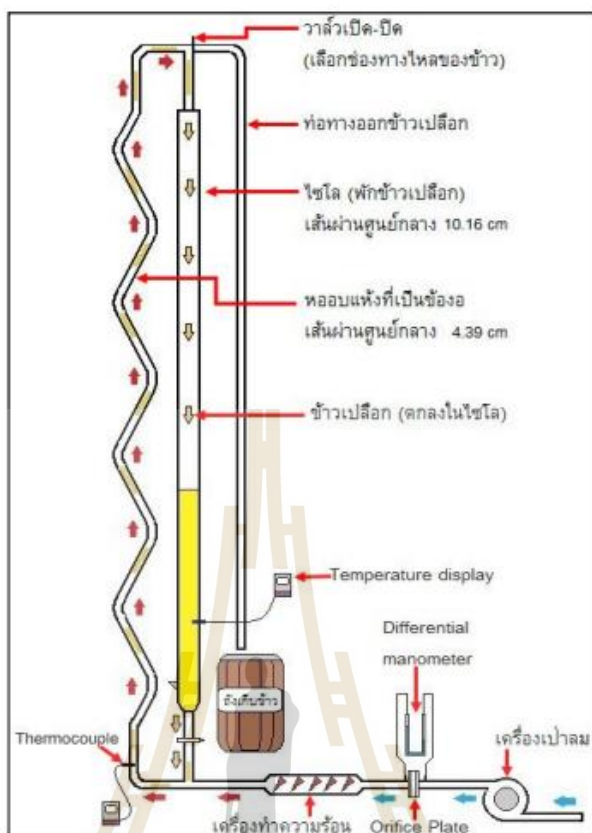
เริ่มจากงานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบเครื่องอบแห้งข้าว ซึ่งถือว่าเป็นส่วนสำคัญในการให้ความร้อนข้าวให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยในงานวิจัยได้ทำการวิเคราะห์เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระและให้คุณภาพข้าวสารที่ดี ได้วิเคราะห์และออกแบบเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ ซึ่งได้สรุปผลการทดสอบแล้วว่าเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระสามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็วและลดการใช้พลังงาน ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาถึงคุณภาพผลผลิตหลังการอบแห้งเพิ่มเติม งานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณข้าวต้นและความขาวของข้าวสารโดยใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ 40°C, 60°C, 100°C, 130°C และ 150 °C ความเร็วของลมอบแห้ง 1 m/s, 2 m/s และ 3 m/s ระยะเวลาพักข้าวเปลือก 0 นาที, 1 นาที, 2 นาที และ 4 นาที ผลการทดลองพบว่า ข้าวเปลือกที่มีการพักระหว่างรอบการอบแห้งตั้งแต่ 1 นาที ได้ปริมาณข้าวต้นและความขาวข้าวสารใกล้เคียงกับ ตัวอย่างอ้างอิง แสดงถึงข้อดีของเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระที่มีประสิทธิภาพสูงในการอบแห้งและรักษาคุณภาพของข้าวสารหลังขัดสีได้ดี





รูปที่ 1.1 เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ

งานวิจัยประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นที่เป็นช่องอ เป็นเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นที่เป็นช่องที่ทำการออกแบบขึ้นในงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นแนวใหม่ที่มีความสะดวกรวดเร็วในการทำงาน วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ได้จัดทำเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการใช้พลังงานในการลดความชื้นของข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งชนิดนี้ ด้วยการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C , 100°C และ 120°C ความเร็วลมในการอบแห้ง 14 m/s , 15 m/s และ 16 m/s โดยเริ่มจากการอบในหอบแห้งที่เป็นท่อแบบ 8 ขยัก และท่อแบบ 16 ขยัก ซึ่งจากการทดสอบพบว่าอุณหภูมิความร้อน และความเร็วลมที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งเร็วขึ้น อีกทั้งการเพิ่มขยักท่ออบแห้งจาก 8 ขยัก เป็น 16 ขยัก สามารถเพิ่มปริมาณการอบแห้งให้เพิ่มขึ้น และช่วยลดการใช้พลังงานลงได้ ซึ่งจากการทดลองการอบแห้งที่รวดเร็วที่สุดและให้ปริมาณการอบแห้งสูงสุดเกิดขึ้นที่ อุณหภูมิอบแห้ง 120°C ความเร็วลมอบแห้ง 16 m/s และใช้หอบแห้งช่องอ 16 ขยัก ส่วนพลังงานป้อนจุ่มจำเพาะที่ต่ำสุดของการทดลองมีค่าประมาณ 3.87 MJ/kg น้ำที่ระเหย เกิดขึ้นที่อุณหภูมิอบแห้ง 120°C ความเร็วลมอบแห้ง 14 m/s และใช้หอบแห้งช่องอ 16 ขยัก



รูปที่ 1.2 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นที่เป็นช่องอ

1.8 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท

บทที่ 1 กล่าวถึงบทนำ ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย วัตถุประสงค์การวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และรายละเอียดในวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึง หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึง การออกแบบระบบให้ความร้อนข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน

บทที่ 4 กล่าวถึง ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

บทที่ 5 กล่าวถึง การสรุปผลการทดลอง

บทที่ 2

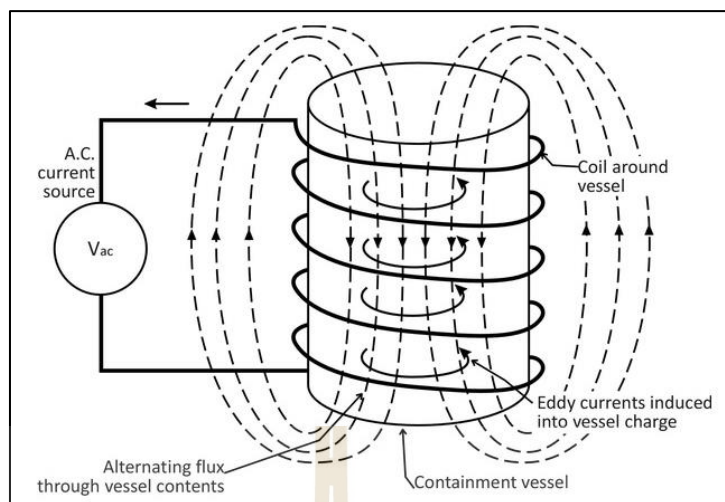
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

การออกแบบเครื่องให้ความร้อนสำหรับเมล็ดข้าวโดยใช้พลังงานความร้อนจากการเหนี่ยวนำมีส่วนประกอบหลายอย่างที่สำคัญ ทั้งในส่วนของวงจรเหนี่ยวนำความร้อน วิธีที่จะถ่ายโอนความร้อนระหว่างชิ้นงานที่ถูกเหนี่ยวนำความร้อนกับอากาศ และการคำนวณพลังงานความร้อน ซึ่งการที่จะออกแบบระบบให้ความร้อนสำหรับเมล็ดข้าวสารนั้น จำเป็นต้องศึกษาถึงทฤษฎีของการออกแบบวงจรต่าง ๆ จึงจะสามารถสร้างเครื่องให้ความร้อนให้ออกมามีประสิทธิภาพสูงสุด โดยเนื้อหาในบทนี้จะได้กล่าวถึงทฤษฎีการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า วงจรเหนี่ยวนำความร้อน วงจรเรียงกระแส วงจรอินเวอร์เตอร์ โหลดเรโซแนนซ์ และหลักการของกระบวนการให้ความร้อน การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อให้ได้วงจรเหนี่ยวนำความร้อนและการถ่ายเทความร้อนของเครื่องทำความร้อนให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

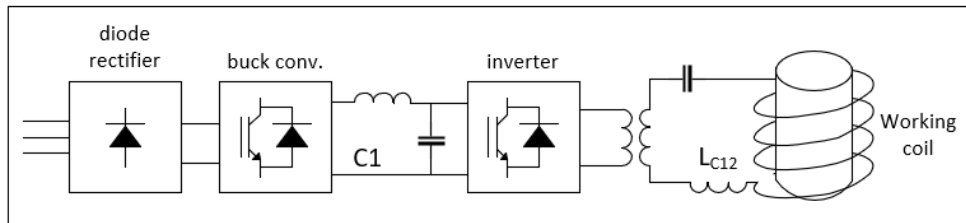
2.2 หลักการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า

การเหนี่ยวนำความร้อน (Induction Heating) เป็นกระบวนการที่ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการทำให้วัสดุเกิดความร้อน กระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับการใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current, AC) ที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction Coil) เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กแปรผัน (Alternating Magnetic Field) รอบ ๆ ขดลวด เมื่อวัตถุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าอยู่ในสนามแม่เหล็กนี้ จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลวน (Eddy Current) ในวัตถุ ซึ่งกระแสไฟฟ้านี้จะสร้างความร้อนเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ และความร้อนที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความถี่ของกระแสไฟฟ้าและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ ดังรูปที่ 2.1

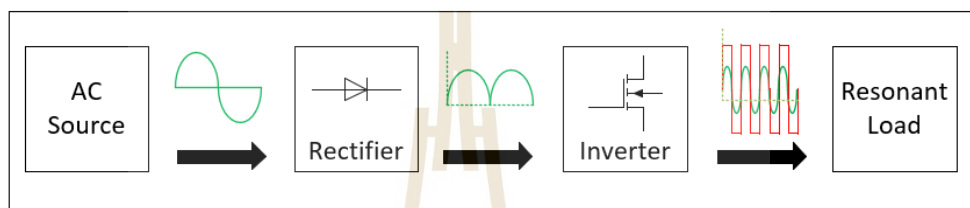


รูปที่ 2.1 หลักการเกิดการเหนี่ยวนำความร้อน

การสร้างกระแสความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน จากภาพรวม ดังรูปที่ 2.2 ของวงจรเหนี่ยวนำความร้อนสามารถแบ่งการทำงานออกเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ ดังรูปที่ 2.3 บล็อกไดอะแกรมนี้อธิบายกระบวนการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ โดยเริ่มจากการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Source) ให้กระแสไฟฟ้าสลับที่มีรูปคลื่นเป็นไซน์เวฟ จากนั้นกระแสไฟฟ้ากระแสสลับนี้จะถูกแปลงเป็นกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (DC) โดยผ่านวงจรแปลงกระแสไฟฟ้า (Rectifier) ต่อมากระแสไฟฟ้ากระแสตรงถูกแปลงกลับเป็นกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่สูงโดยอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ซึ่งเป็นวงจรที่ประกอบด้วยอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์ สดท้ายกระแสไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงนี้จะถูกส่งไปยังโหลดเรโซแนนซ์ (Resonant Load) ที่เป็นขดลวดเหนี่ยวนำที่ทำงานร่วมกับตัวเก็บประจุเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความถี่สูง และทำให้เกิดการเหนี่ยวนำความร้อนในวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้า ทำให้กระบวนการนี้สามารถให้ความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพและควบคุมได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 2.2 วงจรเหนี่ยวนำความร้อน



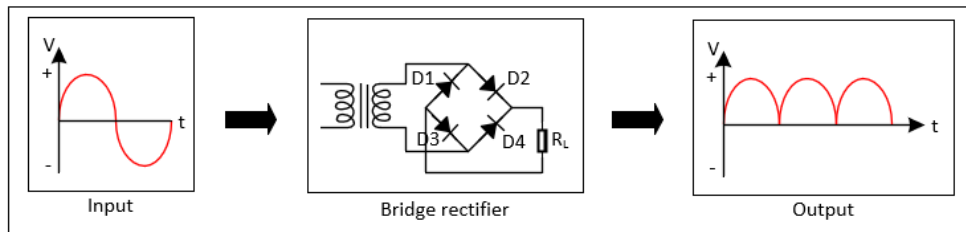
รูปที่ 2.3 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเหนี่ยวนำความร้อน

2.2.1 หลักการสร้างวงจรเหนี่ยวนำความร้อน

ในการสร้างวงจรเหนี่ยวนำความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วยวงจรย่อยอีกหลายส่วน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์ (bridge rectifier circuit)

วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์เป็นวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นชนิดหนึ่ง ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถใช้ร่วมกับหม้อแปลงธรรมดาได้ โดยไม่จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงชนิดเซนเตอร์แท็ป ซึ่งวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์ (bridge rectifier circuit) ทำงานโดยใช้ไดโอด 4 ตัวเพื่อลำเลียงกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่เข้ามาและแปลงเป็นกระแสไฟฟ้ากระแสตรง โดยในแต่ละครึ่งรอบของรูปคลื่นกระแสสลับ ไดโอดสองตัวจะนำกระแสไฟฟ้าและอีกสองตัวจะไม่ทำงาน ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียวเสมอไปยังโหลด ส่งผลให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่คงที่หลังการกรองคลื่นกระแสสลับออกไป ดังรูปที่ 2.4



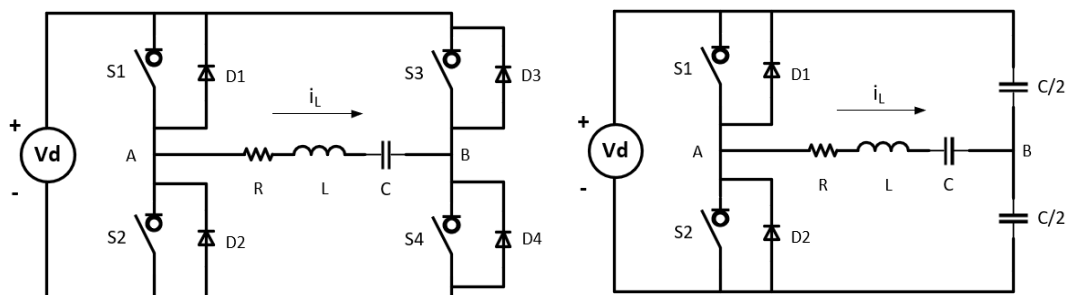
รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริด

เนื่องจากวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดเป็นวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นชนิดหนึ่ง การคำนวณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจึงคำนวณเหมือนกับวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นทั่วไปดังสมการที่ 2.1

$$V_{DC} = 1.414V_{AC} \quad (2.1)$$

2) วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter)

ในส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่มีหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับความถี่สูงมี 2 รูปแบบ คือวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟลูบริด และวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริด ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งข้อแตกต่างกันระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟลูบริดและวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริด คือแรงดันของวงจรอินเวอร์เตอร์ (V_{AB}) ของวงจรแบบฟลูบริดจะได้รูปคลื่นสแควร์ที่มีแรงดันสูงเท่ากับ $+V_d$ และแรงดันต่ำสุดเท่ากับ $-V_d$ กระแสผ่านโหลด (i_L) เป็นรูปคลื่นซาย ดังรูปที่ 2.5 (ก) ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์ฮาล์ฟบริด จะได้ค่าแรงดันเท่ากับ $+V_d$ และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0 และกระแสไหลผ่านโหลด (i_L) เป็นรูปคลื่นซายดังภาพที่ 2.5 (ข) ดังนั้นกำลังไฟฟ้าของวงจรฟลูบริดจะมากกว่าวงจรฮาล์ฟบริดอินเวอร์เตอร์



(ก) อินเวอร์เตอร์แบบฟลูบริด

(ข) อินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริด

รูปที่ 2.5 คลื่นแรงดันและกระแสไหลของวงจรอินเวอร์เตอร์

เนื่องจากวงจรเหนี่ยวนำความร้อนสร้างสนามแม่เหล็ก และกระแสไหลวนแบบ กระแสสลับ (AC) ความถี่ที่ใช้งานจึงทำให้เกิดผลกระทบเชิงผิว (Skin effect) ซึ่งทำให้สนามแม่เหล็ก สามารถทะลุผ่านวัตถุที่ความถี่แตกต่างกันไปตามแต่ละความถี่ เมื่อขึ้นงานที่ใช้เหนี่ยวนำความร้อน เป็นเหล็กที่มีความหนา กระแสที่ไหลวน (Eddy current) จะไม่สม่ำเสมอในระดับความถี่ที่ต่างกัน กระแสไหลวนจะสูงสุดบริเวณใกล้พื้นผิวของวัตถุและลดลงเรื่อยๆ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ก็สามารถหา ค่าความลึกของผิว (Skin depth) ซึ่งเป็นระยะความลึกที่กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำส่วนใหญ่ไหลระหว่าง พื้นผิวกับความลึกของผิว ดังสมการที่ 2.2

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \mu \sigma f}} \quad (2.2)$$

โดยที่ δ คือ ค่า ระยะความลึกของผิว ที่กระแสไหลวนมีค่าลดลงประมาณ 63% ของค่าบนพื้นผิว
 μ คือ ค่าความสามารถของวัสดุในการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Magnetic Permeability)
 f คือ ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้ในการเหนี่ยวนำความร้อน (Frequency)
 σ คือ ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุ (Electrical Conductivity)

สามารถหาได้จากสมการที่ 2.3

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.3)$$

โดยที่ ρ คือค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ซึ่งค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเหล็กมี ค่าประมาณ 10×10^{-8} ถึง 14×10^{-8} โอห์ม-เมตร ($\Omega \cdot m$) ซึ่งหากทำการควบคุมความถี่ของการ ทำงานจะเป็นการควบคุมระดับความลึกของชิ้นงานที่ต้องการให้เกิดความร้อนได้

2.2.2 โหลดเรโซแนนซ์

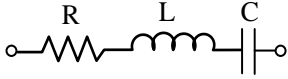
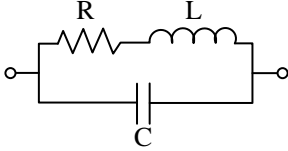
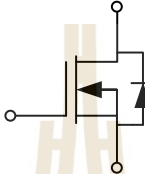
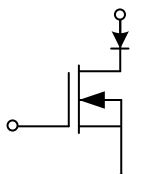
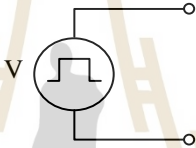
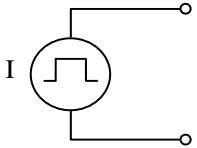
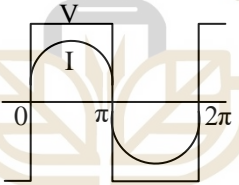
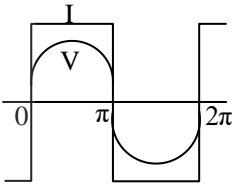
โหลดเรโซแนนซ์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง เช่น เครื่องหลอมโลหะและเครื่อง ชุบแข็งผิวโลหะ ช่วยลดการสูญเสียระหว่างการสวิตชิงโดยตัดวงจรที่กระแสศูนย์หรือแรงดันศูนย์ อย่างไรก็ตาม ข้อเสียหลักคือกระแสจะเพิ่มขึ้นใกล้จุดความถี่เรโซแนนซ์ ทำให้แรงดันตกคร่อมวงจร เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในวงจรที่มีค่า Q สูง สวิตซ์ต้องทนแรงดันสูงในสถานะ OFF และส่วนประกอบ L, C ต้องมีขนาดใหญ่ อินเวอร์เตอร์โหลดเรโซแนนซ์มี 2 ชนิด คือแบบอนุกรม และแบบขนาน ซึ่งทั้ง 2

ชนิดจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ดังที่แสดงในตารางที่ 2.1 โดยชนิดอนุกรมใช้แหล่งจ่ายแรงดันคงที่และคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่เพื่อกรองแรงดัน

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียโพลดิโธเนนซ์ชนิดอนุกรมและขนาน

ชนิดโพลดิโธเนนซ์	ข้อดี	ข้อเสีย
อนุกรม	<ul style="list-style-type: none"> -โครงสร้างไม่ซับซ้อนราคาถูก -สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงได้โดยตรงจากวงจรเรียงกระแสโดยไม่ต้องปรับแรงดัน -กำลังไฟฟ้าที่จ่ายสามารถปรับความถี่ได้ 	<ul style="list-style-type: none"> -ขณะป้อนสัญญาณเพื่อขับวงจรจะเอาโพลออกจากวงจรได้ -ไม่สามารถทนทานการลัดวงจรที่โพลได้ -ถ้าแหล่งจ่ายมีการเปลี่ยนแปลง วงจรต้องการการปรับจูนใหม่เพื่อให้คงประสิทธิภาพเดิม
ขนาน	<ul style="list-style-type: none"> -ขณะป้อนสัญญาณสามารถนำโพลออกจากวงจรได้ -สามารถทนการลัดวงจรที่เกิดขึ้นที่โพลได้ -อุปกรณ์ L และ C ที่ใช้ในวงจรเรโซแนนซ์ไม่จำเป็นต้องมีพิกัดแรงดันสูง เนื่องจากกระแสเป็นรูปคลื่นสแควร์ จึงมีค่า peak คงที่ ที่ตำแหน่งเรโซแนนซ์ 	<ul style="list-style-type: none"> -จำเป็นต้องมี coke เนื่องจากเป็น constant current -ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจากวงจรเรียงกระแสได้โดยตรง แต่ต้องมีการปรับแรงดันการใช้สวิตช์ควบคุม -มีขนาดใหญ่มากมี coke และวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบลักษณะของอุปกรณ์ คลื่นแรงดันและกระแสโวลตเรจโชนันซ์ชนิดอนุกรมและขนาน

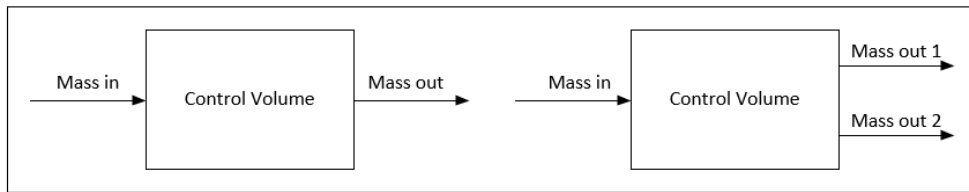
Circuit	Series Resonant	Parallel Resonant
โวลต		
สวิตซ์		
แหล่งจ่าย		
คลื่นเอาต์พุต		

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรเรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมและขนาน

คุณสมบัติ	เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรม	เรโซแนนซ์ชนิดขนาน
ความถี่เรโซแนนซ์ f_r	$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$	$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$
แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม R	สูงสุดที่ f_r	คงที่ที่ V_o
กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน R	ค่าคงที่ที่ $\frac{V_o}{R}$	ต่ำสุดที่ f_r
ค่า Q	$Q = \frac{2\pi f_r L}{R}$	$Q = \frac{R}{2\pi f_r L}$
ค่าแบนด์วิดท์, BW	$BW = \frac{f_R}{Q}$	$BW = \frac{f_R}{Q}$
สถานะ Impedance ที่จุดต่ำ กว่า f_r	Capacitive	Inductive
สถานะ Impedance ที่จุดสูง กว่า f_r	Inductive	Capacitive
ผลกระทบเมื่อเปลี่ยนค่า R	เพิ่มค่า R, ค่า BW เพิ่ม	เพิ่มค่า R, ค่า BW ลด
ผลกระทบเมื่อเปลี่ยนค่า $\frac{L}{C}$	เพิ่มค่า $\frac{L}{C}$, ค่า BW ลด	เพิ่มค่า $\frac{L}{C}$, ค่า BW ลด

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนความร้อน

สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบระบบการให้ความร้อนกับวัตถุ ควรพิจารณาการคำนวณการถ่ายโอนพลังงานระหว่างวงจรเหนี่ยวนำความร้อนกับอากาศ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์พลังงานในระบบที่มีการไหลแบบคงตัว ระบบนี้แบ่งได้เป็นสองแบบคือ ระบบที่มีการไหลแบบกระแสเดียวและระบบที่มีการไหลแบบหลายกระแส ตามรูปที่ 2.6 (ก) และ (ข)



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.6 ระบบที่มีการไหลแบบกระแสเดียว (ก) ระบบที่มีการไหลแบบหลายกระแส (ข)

การถ่ายเทมวลความชื้นจากวัสดุสู่อากาศเกิดขึ้นผ่านกระบวนการพาความร้อน อันเนื่องมาจากความแตกต่างของแรงดันไอบางส่วนที่ชั้น boundary layer ซึ่งเป็นชั้นรอยต่อระหว่างผิวสัมผัสของอากาศและวัสดุ การระเหยโดยตรงจะเกิดขึ้นเมื่อความดันไอที่ผิววัสดุมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ เช่นในกรณีของ vacuum drying และ freeze drying การอบแห้งแบบพาความร้อนสถานะขอบสำหรับ heat flux q_c และอัตราการระเหย n_w จะอยู่ในรูป

$$\text{Heat transfer} \longrightarrow q_c = h_g (T_{sf} - T_g) \quad (2.4)$$

$$\text{Mass transfer} \longrightarrow n_w = k_g (P_{vsf} - P_v) \quad (2.5)$$

โดยที่ h_g คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

k_g คือ สัมประสิทธิ์ การถ่ายเทมวล

T_{sf} คือ อุณหภูมิผิวของวัตถุ

T_g คือ อุณหภูมิของอากาศอบแห้ง

P_{vsf} คือ ความดันบางส่วนของไอน้ำที่พื้นผิว

P_{va} คือ ความดันบางส่วนของไอน้ำในอากาศ

และความสามารถในการระเหยของวัสดุจะขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่เข้าสู่วัสดุผ่านอากาศร้อนและปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทในระหว่างการระเหยออกมาจากวัสดุนั้นๆ เนื่องจากปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทมาก จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการระเหย q_w สามารถแสดงดังสมการที่ 2.6

$$\text{Heat transfer in evaporation} \longrightarrow q_w = UA\Delta T \quad (2.6)$$

โดยที่ U คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($W / (m^2 K)$)

A คือ พื้นที่ของการถ่ายเทความร้อน (m^2)

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างสารละลายกับตัวกลางความร้อน

2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในส่วนของ การคำนวณพลังงานความร้อน

ในการให้ความร้อน ไม่ว่าจะมียัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุสำหรับการอบไล่ความชื้นหรือการอบแห้ง อีกประเด็นสำคัญที่ต้องพิจารณา คือ ปริมาณของพลังงานที่จำเป็นต้องใช้ เนื่องจากปัจจัยนี้เป็นตัวชี้วัดในการลงทุนกับอุปกรณ์หรือเทคโนโลยีนั้น ๆ ว่าคุ้มค่าหรือไม่

2.4.1 การคำนวณหาปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในการให้ความร้อน

พลังงานที่ต้องใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุจนถึงอุณหภูมิอบแห้ง ดังสมการที่ 2.7 ที่สามารถระบุพลังงานความร้อนที่ต้องการในช่วงอุณหภูมินั้น ๆ

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

โดยที่ Q_i คือ ปริมาณของพลังงานความร้อนในช่วงเพิ่มอุณหภูมิ (MJ)

m คือ มวลของวัสดุ (g)

c คือ ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ ($cal / g^{\circ}C$) หรือ ($kJ / kg \cdot k$)

ΔT คือ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ($^{\circ}C$)

เช่น ค่าความร้อนจำเพาะของข้าวมีค่า 0.782 กิโลจูลต่อกิโลกรัมต่อองศาเซลเซียส

2.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า วงจรเหนี่ยวนำความร้อน วงจรเรียงกระแส วงจรอินเวอร์เตอร์ โหลดเรโซแนนซ์ และกระบวนการให้ความร้อน การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อใช้ศึกษาและนำมาอ้างอิงเพื่อออกแบบระบบให้ความร้อนที่ปลอดภัยข่าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิข้าวรวมทั้งผลของการทดสอบ

บทที่ 3

การออกแบบระบบให้ความร้อนท่อลำเลียงข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำ ร่วมกับลมร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิข้าว

3.1 บทนำ

ในบทนี้ได้แสดงการออกแบบระบบให้ความร้อนท่อลำเลียงข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิข้าวสำหรับใช้กับเครื่องฆ่ามอดข้าวแบบไดอิเล็กตริก ระบบให้ความร้อนนี้ถูกออกแบบมาเพื่อตอบสนองความต้องการในการเพิ่มกำลังผลิตของเครื่องฆ่ามอดข้าวแบบไดอิเล็กตริก โดยการเพิ่มอุณหภูมิของเมล็ดข้าวก่อนที่จะผ่านเครื่องฆ่ามอดข้าว ซึ่งช่วยให้เมล็ดข้าวสามารถดูดซับพลังงานจากเครื่องฆ่ามอดได้มากขึ้น และเกิดความร้อนภายในเมล็ดข้าวมากขึ้น ทำให้สามารถเพิ่มกำลังการผลิตของเครื่องฆ่ามอดข้าวได้โดยไม่ต้องเพิ่มขนาดของเครื่องฆ่ามอด

จากการศึกษาระบบของเครื่องให้ความร้อนสำหรับเมล็ดข้าวด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำความร้อน ความร้อนนี้จากการที่ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของระบบการให้ความร้อนของเครื่องสามารถแบ่งการออกแบบในส่วนต่าง ๆ ได้ดังนี้

การออกแบบวงจรเหนี่ยวนำความร้อน

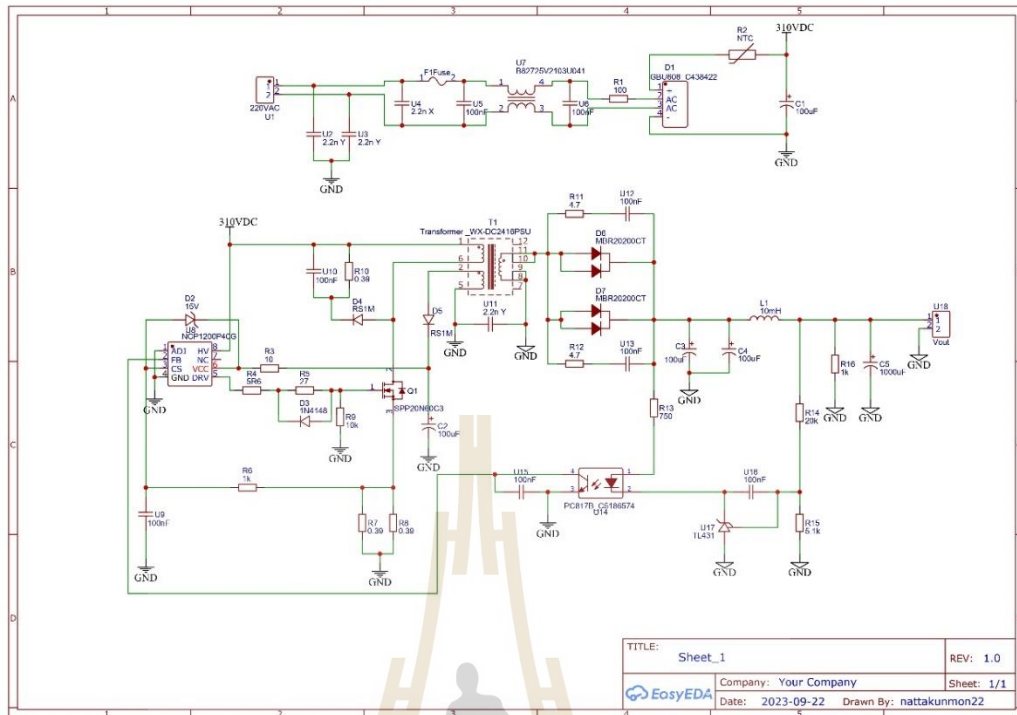
การออกแบบท่อลำเลียงข้าวสารร่วมกับเครื่องเป่าลมร้อน

การคำนวณหาค่าของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน

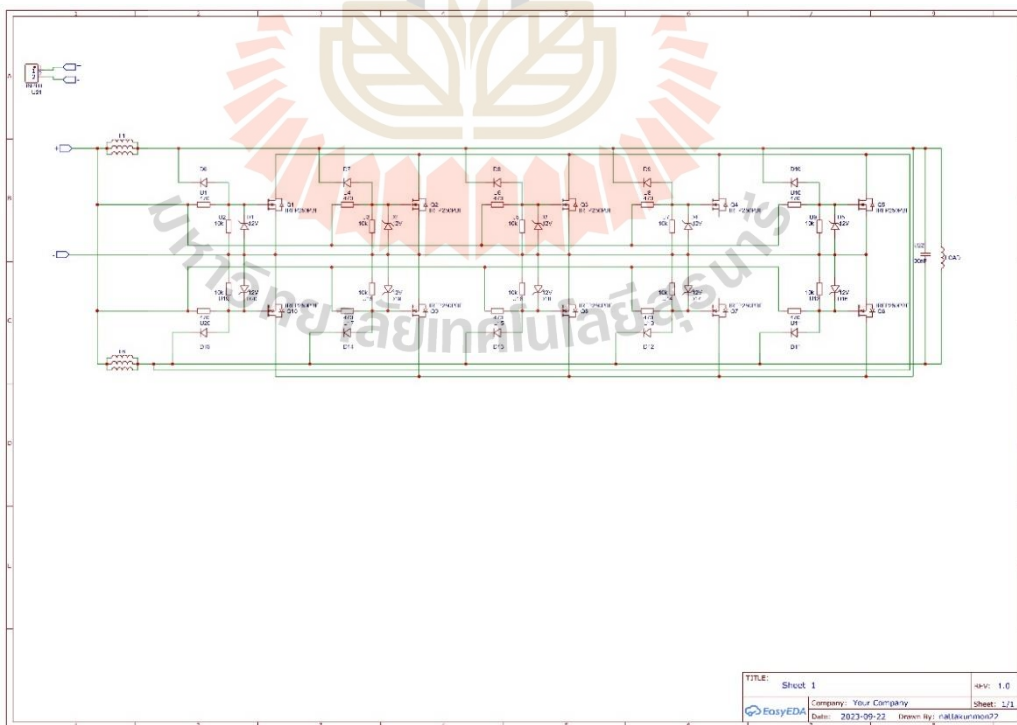
การออกแบบวิธีการทดลองและการเก็บผล

3.2 การออกแบบวงจรเหนี่ยวนำความร้อน

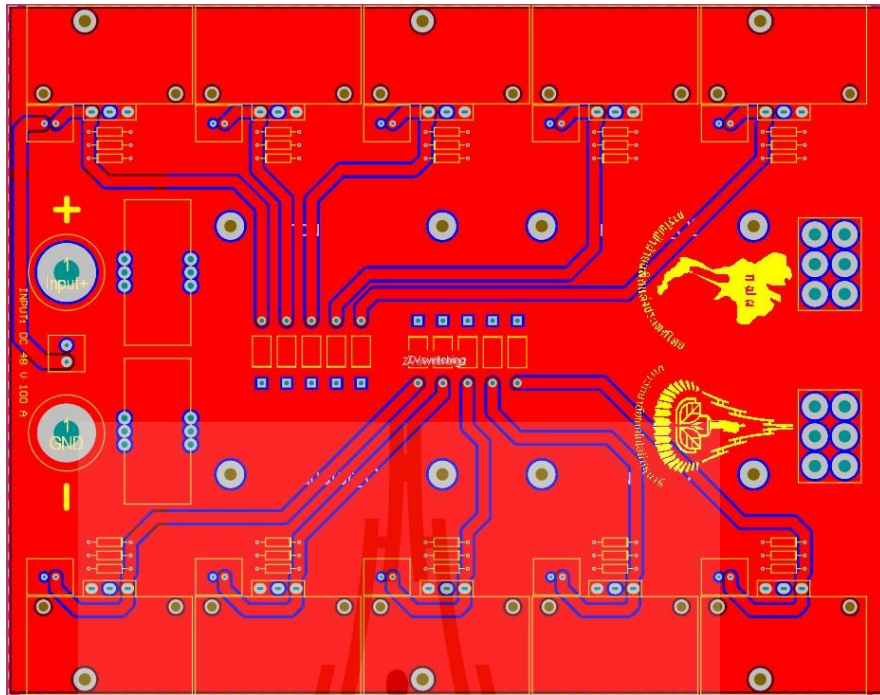
การออกแบบวงจรขนาด 5 กิโลวัตต์ เป็นการนำบอร์ดที่มีอยู่แล้วในแลปเครื่องมือ 3 (F3) มาใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบด้วยภาคส่วนต่าง ๆ โดยส่วนของวงจรแหล่งจ่ายกำลังงานไปยังโหลด (Switching) แสดงดังรูปที่ 3.1 การออกแบบลายวงจรพิมพ์แสดงดังรูปที่ 3.3 และ 3.4 การลงอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 3.5 ส่วนของวงจรแม่ขึงด้วยวงจรขนาน Capacitor แสดงดังรูปที่ 3.7 การออกแบบลายวงจรพิมพ์แสดงดังรูปที่ 3.8 และ 3.9 และการลงอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 3.10 ซึ่งจะได้วงจรจริงที่ได้ออกแบบดังแสดงในรูปที่ 3.12



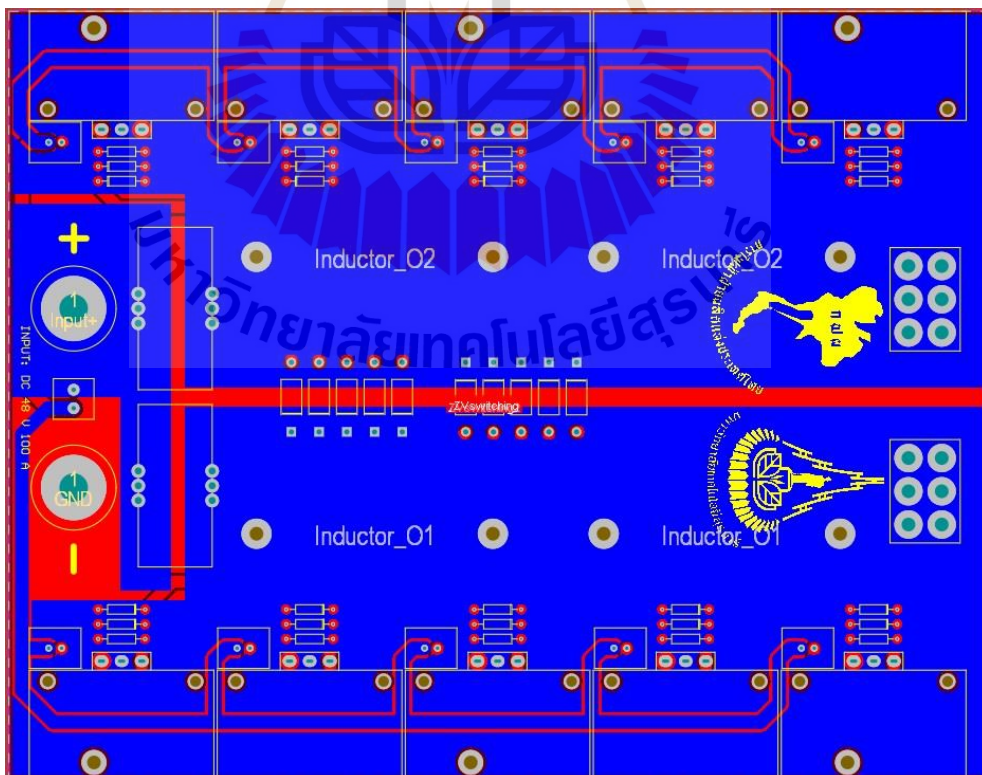
รูปที่ 3.1 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของวงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



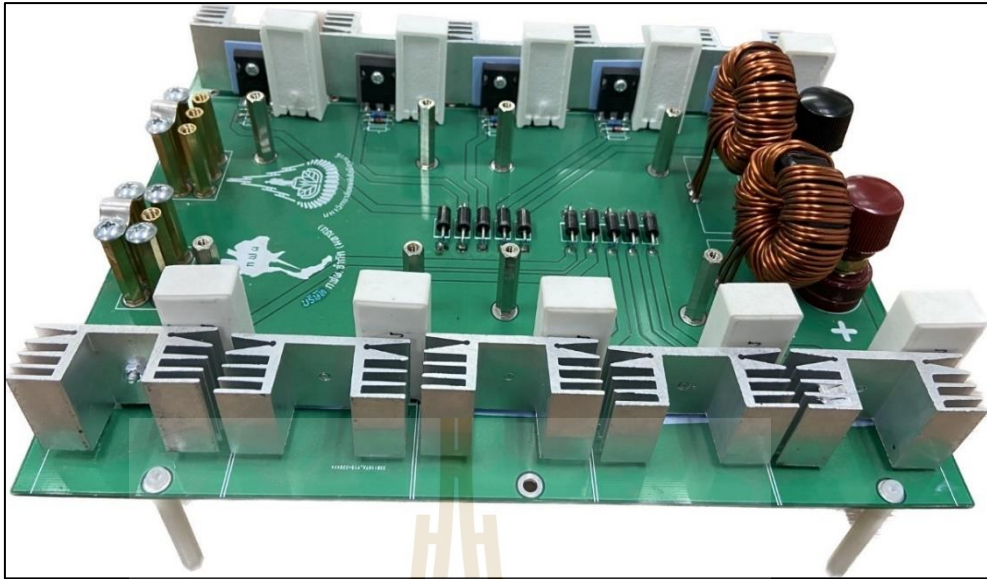
รูปที่ 3.2 Schematic วงจรเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Induction)



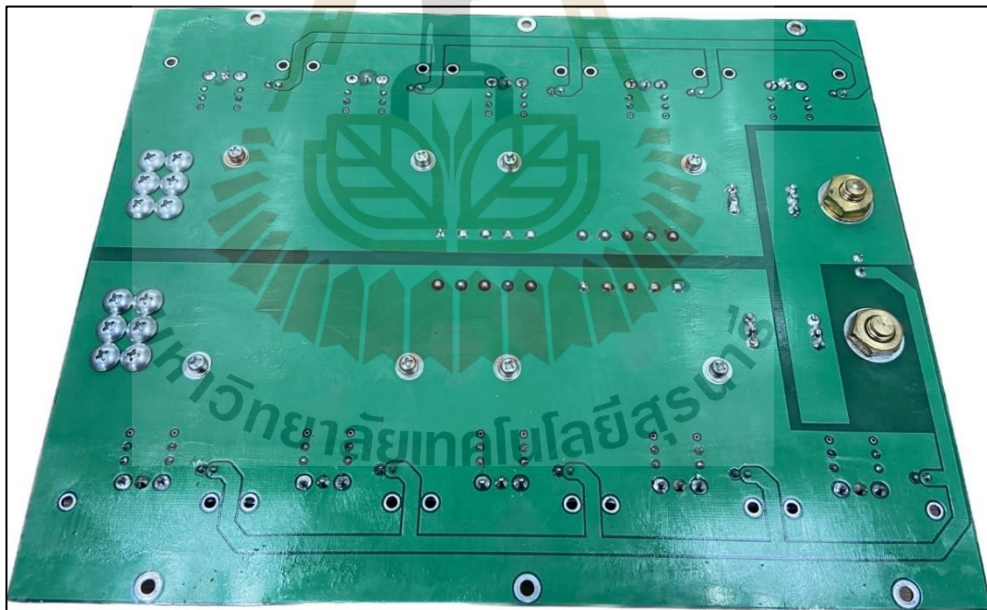
รูปที่ 3.3 ลายวงจรด้าน Top



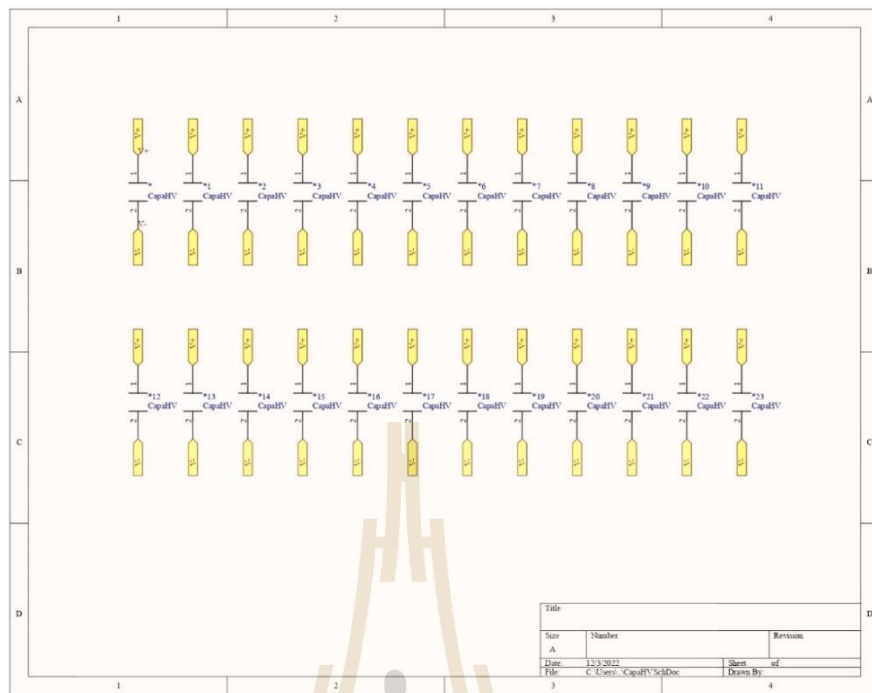
รูปที่ 3.4 ลายวงจรด้าน Bottom



รูปที่ 3.5 วงจรที่ได้จากการออกแบบพร้อมใส่อุปกรณ์ (ด้านหน้า)



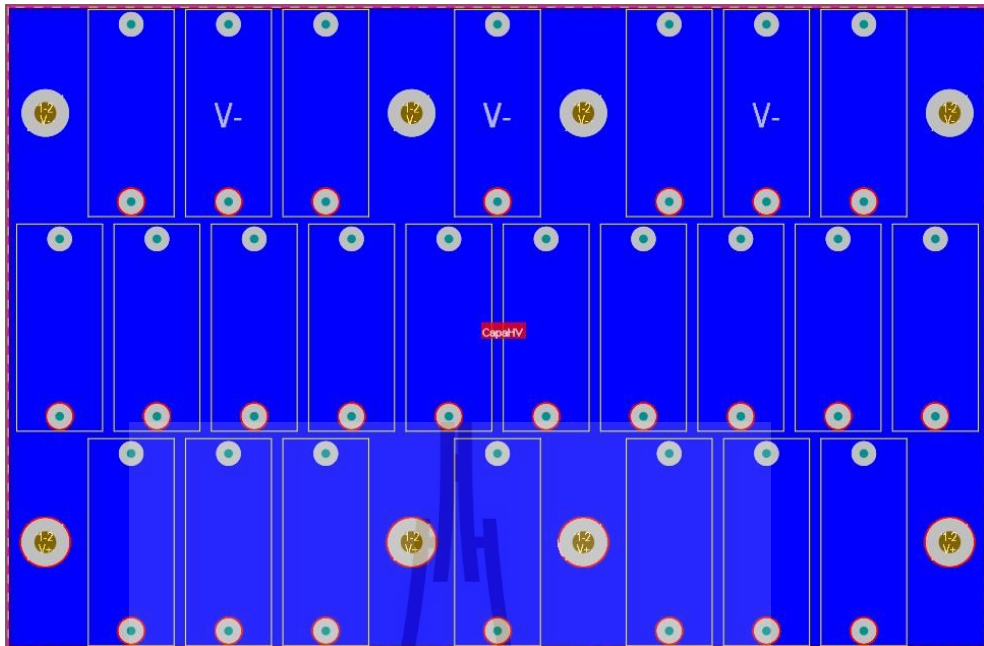
รูปที่ 3.6 วงจรที่ได้จากการออกแบบพร้อมใส่อุปกรณ์ (ด้านหลัง)



รูปที่ 3.7 Schematic ขนาน Capacitor



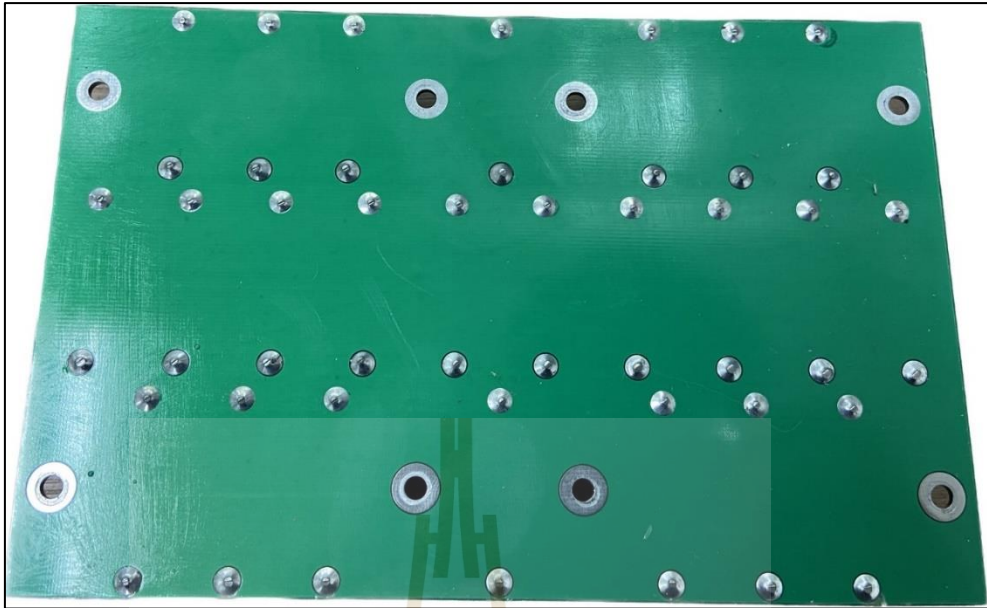
รูปที่ 3.8 ลายวงจรขนาน Capacitor ด้าน Top



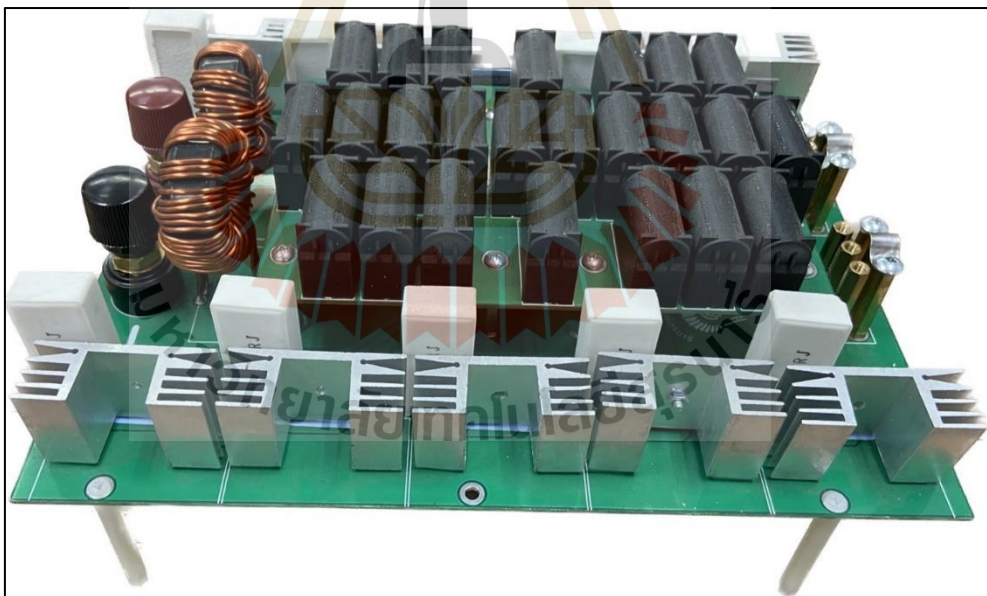
รูปที่ 3.9 ลายวงจรขนาน Capacitor ด้าน Bottom



รูปที่ 3.10 วงจรขนาน Capacitor ที่ได้จากการออกแบบพร้อมใส่อุปกรณ์ (ด้านหน้า)



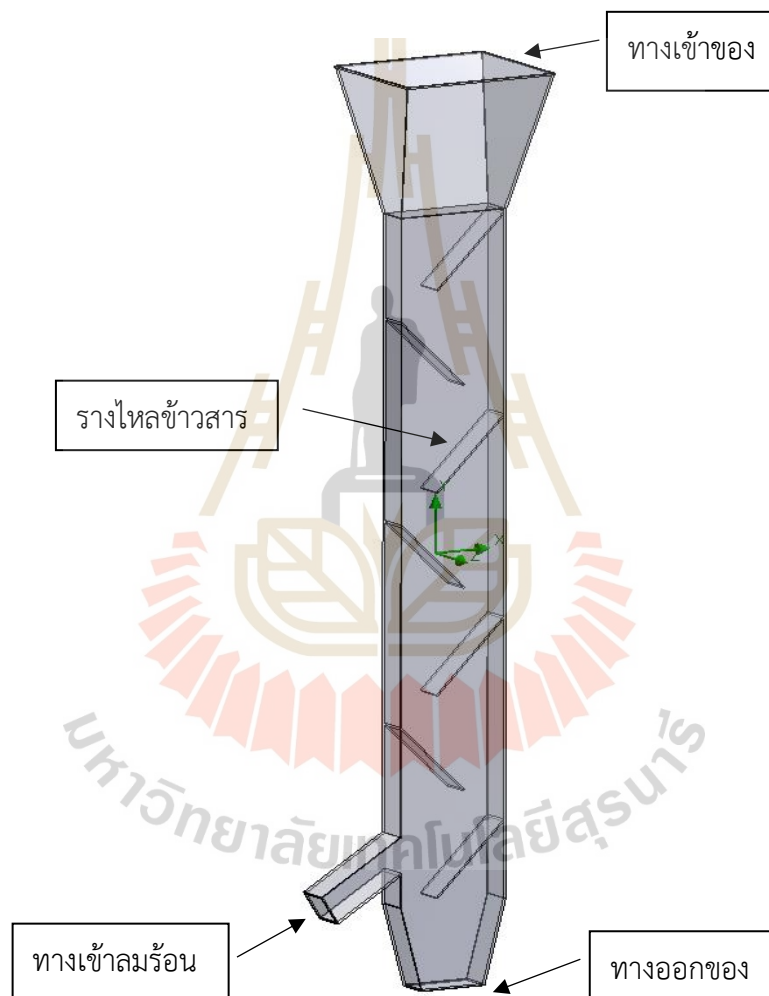
รูปที่ 3.11 วงจรขนาน Capacitor ที่ได้จากการออกแบบพร้อมใส่อุปกรณ์ (ด้านหลัง)



รูปที่ 3.12 วงจรเหนี่ยวนำความร้อนที่ใช้งานจริง

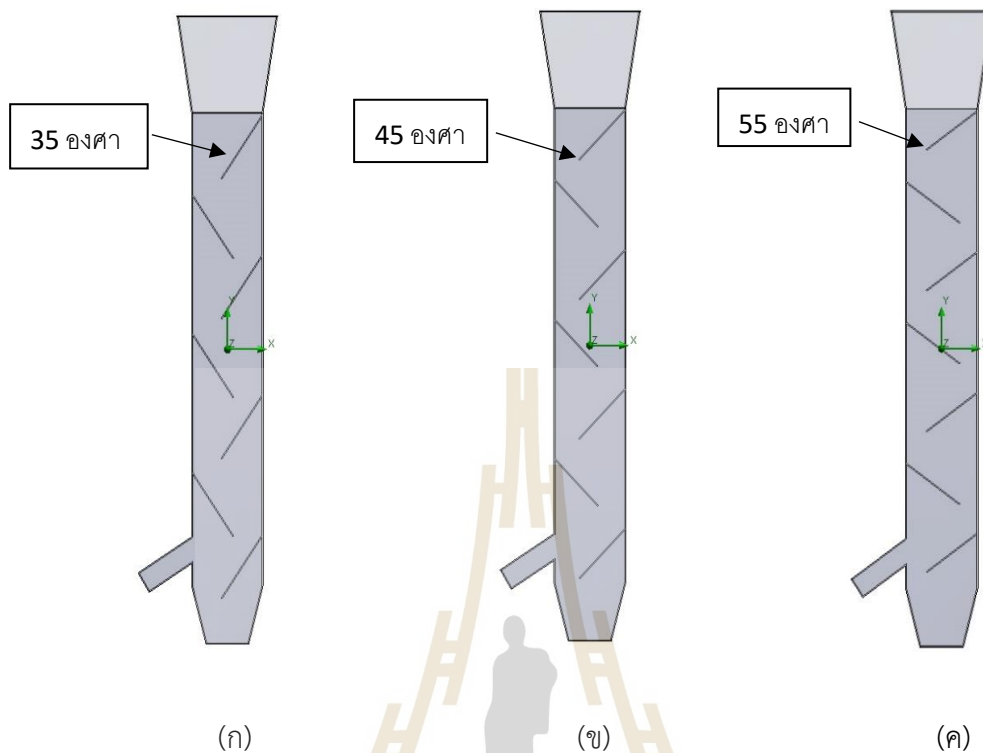
3.3 การออกแบบท่อลำเลียงข้าวสารร่วมกับเครื่องเป่าลมร้อน

การออกแบบท่อลำเลียงข้าวสารสำหรับให้เมล็ดข้าวไหลผ่านเพื่อรับพลังงานความร้อนถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญ เนื่องจากเป็นจุดที่มีการถ่ายเทความร้อนจากชุดขดลวดเหนียวน้ำ และลมร้อนที่จะผ่านเข้ามาในท่อลำเลียงข้าวสาร เพื่อช่วยเพิ่มอุณหภูมิของเมล็ดข้าวที่ไหลผ่านลงมาให้มีอุณหภูมิที่สูงขึ้นและสม่ำเสมอทุกเมล็ด ดังรูปที่ 3.13



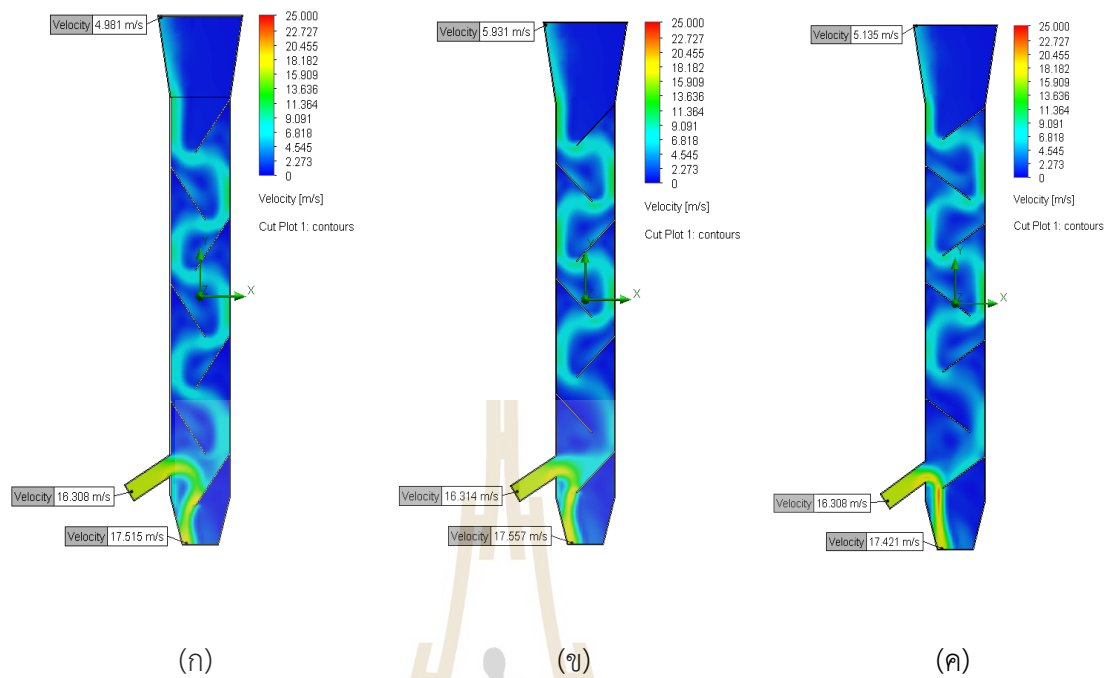
รูปที่ 3.13 การออกแบบท่อลำเลียงข้าวสาร

ซึ่งจากการวิเคราะห์ที่ได้ทำการออกแบบของสากการไหลของข้าวสารไว้ 3 รูปแบบ คือ 35 องศา 45 องศา และ 55 องศา ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 โครงสร้างภายในของท่อลำเลียงข้าวสารทั้ง 3 รูปแบบ

จากการออกแบบโครงสร้างของท่อลำเลียงข้าวสารทั้ง 3 รูปแบบ ได้ทำการ Simulation ผ่านโปรแกรม Solid Works เพื่อจำลองดูการไหลของลม และการแพร่กระจายของลมร้อน ซึ่งการจำลองจะมีทั้งหมด 3 รูปแบบ คือ รูปที่ 1 จะกำหนดองศาแรงไหลของข้าวที่ 35 องศา โดยกำหนดความเร็วลมที่ 16.3 m/s และกำหนดอุณหภูมิของลมร้อนอยู่ที่ 40 องศาเซลเซียส รูปที่ 2 จะกำหนดองศาแรงไหลของข้าวที่ 45 องศา โดยกำหนดความเร็วลมที่ 16.3 m/s และกำหนดอุณหภูมิของลมร้อนอยู่ที่ 40 องศาเซลเซียส รูปที่ 3 จะกำหนดองศาแรงไหลของข้าวที่ 55 องศา โดยกำหนดความเร็วลมที่ 16.3 m/s และกำหนดอุณหภูมิของลมร้อนอยู่ที่ 40 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ผลการจำลองทิศทางการไหลของลมทั้ง 3 รูปแบบ

ในการจำลองผลของท่อลำเลียงข้าวสารจะเป็นการออกแบบองศาของรางไหลข้าวที่เป็นรูปแบบสลับฟันปลา เพื่อเป็นการลดการไหลของข้าวสาร เพื่อให้เมล็ดข้าวที่ถูกปล่อยลงมาในท่อได้เกิดการสัมผัสความร้อนที่เกิดจากทั้งลมร้อนและการให้ความร้อนแบบเหนียวน้ำ โดยจะกำหนด 3 รูปแบบคือ 30 องศา 45 องศาและ 55 องศา ซึ่งจากผลการจำลองรูปแบบการไหลของลมและลมร้อนรวมถึงองศาการไหลของรางไหลข้าวสารพบว่าที่ 35 องศา เมล็ดข้าวจะไหลลงมาจากด้านบนลงมาถึงด้านล่างเร็วที่สุด ทำให้เมล็ดข้าวได้สัมผัสกับความร้อนน้อยที่สุดเช่นกัน ที่ 45 องศา ความเร็วในการไหลของเมล็ดข้าวช้ากว่าเดิม ทำให้เมล็ดข้าวสามารถสัมผัสกับความร้อนได้ดีกว่าแบบที่ 35 องศา ส่วนที่ 55 องศา ความเร็วในการไหลของเมล็ดข้าวช้าที่สุด ซึ่งจะทำให้เมล็ดข้าวสารสัมผัสกับความร้อนได้มากที่สุด แต่เนื่องจากองศาในการไหลของเมล็ดข้าวนั้นช้าเกินไป จึงทำให้เมล็ดข้าวสัมผัสกับความร้อนมากเกินไปด้วยจึงทำให้เกิดความเสียหายต่อเมล็ดข้าวสาร ดังนั้นรูปแบบ 45 องศาจึงเป็นรูปแบบที่ดีที่สุดในการออกแบบท่อลำเลียงข้าวสาร

3.4 การคำนวณหาค่าของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน

ในการคำนวณหาค่าของขดลวดเหนี่ยวนำ สามารถคำนวณได้จากหลักการของวงจรเรโซแนนซ์เพื่อทำการแมตซ์ซิ่ง เพื่อให้ได้กำลังงานที่ขดลวดเหนี่ยวนำมากที่สุด โดยลักษณะพฤติกรรมทางไฟฟ้าของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมจะมีอิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่งเรโซแนนซ์ต่ำที่สุด ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านวงจรจะมีค่ามากที่สุดทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าที่โหลดมีค่าสูงสุด วิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าทำได้โดยการลดแรงดันที่จ่ายให้วงจร หรือเลื่อนความถี่การใช้งานให้ต่ำหรือสูงกว่าตำแหน่งเรโซแนนซ์ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RLC ที่ต่อแบบอนุกรม

จากสมการ

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

ต้องการคำนวณหาค่าของขดลวดเหนี่ยวนำ (L)

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C}$$

ความถี่ที่ต้องการออกแบบคือ 10kHz และค่าตัวเก็บประจุ (C) ที่กำหนดไว้คือ $8\mu\text{F}$ จะได้

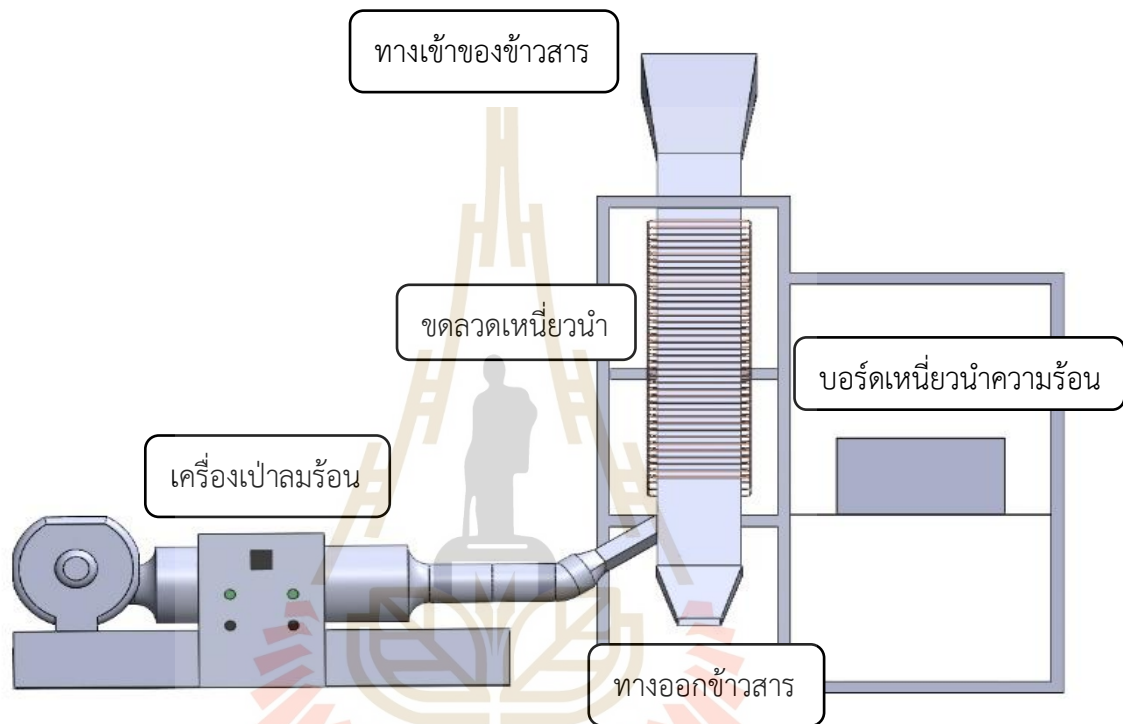
$$L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C}$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 (10 \times 10^3)^2 (8 \times 10^{-6})}$$

$$L = 31.6\mu\text{H}$$

ดังนั้น ขดลวดเหนี่ยวนำ (L) ที่ได้ คือ $31.6\mu\text{H}$

หลังจากที่ทำการจำลองผลและศึกษาข้อมูลต่าง ๆ รวมถึงการคำนวณแม่ทซึ่งแล้ว จึงได้นำมาสู่ขั้นตอนการสร้างท่อลำเลียงข้าวสาร โดยใช้โครงสร้างเป็นแผ่นเหล็กขนาด 3 มิลลิเมตร ขนาด 20*120*6 เซนติเมตร โดยทำการสร้างโครงเหล็กเพื่อรองรับการติดตั้งของเครื่องให้ความร้อนให้มีแนวเอียง 45 องศา เพื่อลดการไหลของข้าวไม่ให้เร็วเกินไป ซึ่งจะทำให้ข้าวที่ไหลผ่านลงมาได้ค่อย ๆ ดูดซับพลังงานความร้อนจากตัวท่อลำเลียง ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ออกแบบระบบให้ความร้อนสำหรับเมล็ดข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนียวน้ำร่วมกับลมร้อน

3.5 การออกแบบวิธีการทดลองและการเก็บผล

ในการทดลองจะเปรียบเทียบระหว่างการใช้เครื่องเป่าลมร้อนเพียงอย่างเดียวกับการใช้เครื่องเป่าลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและการประหยัดพลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิของเมล็ดข้าว โดยการทดลองจะกำหนดอัตราการไหลของเมล็ดข้าว 3 ตัวอย่าง คือ 100kg/h, 150kg/h และ 200kg/h ซึ่งทั้ง 3 ตัวอย่างนี้จะทดลองเหมือนกันทั้งแบบใช้เครื่องเป่าลมร้อนอย่างเดียวและใช้เครื่องเป่าลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

ตัวเครื่องจะมีส่วนประกอบ 2 ส่วนหลัก ๆ คือ 1.เครื่องเป่าลมร้อน 2.ชุดท่อเหนี่ยวนำความร้อน ในส่วนของการทดลองเครื่องเป่าลมร้อนจะกำหนดแรงลมอยู่ที่ 16.3 m/s และกำหนดอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 60 องศาเซลเซียสและ 80 องศาเซลเซียส โดยคิดออกมาเป็นกำลังงานจะได้ 1,143W, 2,352W และ 3,756W ตามลำดับ โดยจะใช้ลมร้อนเป่าเข้ามาในท่อจากด้านล่างซ้ายและปล่อยข้าวลงมาจากด้านบนของท่อ และจะกำหนดอัตราการไหลของข้าวเป็น 3 รูปแบบ คือ 100 kg/h, 150 kg/h และ 200 kg/h เพื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนมาที่เมล็ดข้าว เมื่อทดลองและเก็บผลอุณหภูมิของข้าวที่เพิ่มขึ้นจากการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวแล้ว จากนั้นจะเพิ่มในส่วนของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ โดยจะกำหนดกำลังงานของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ 3 กำลังงาน คือ 146W, 228W และ 360W โดยจะเริ่มที่อัตราการไหล 100kg/h, 150kg/h และ 200kg/h และเปรียบเทียบกำลังงานที่ใช้กับค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นระหว่างการใช้เครื่องเป่าลมร้อนเพียงอย่างเดียวกับการใช้เครื่องเป่าลมร้อนร่วมกับการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.17 ท่อลำเลียงข้าวสารที่จะใช้ในการทดลองและเก็บผล



รูปที่ 3.18 ระบบให้ความร้อนสำหรับเมล็ดข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน

สำหรับเครื่องที่จะใช้เป่าลมร้อนเข้าไปในท่อลำเลียงข้าวสารจะเป็นเครื่องที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ (ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อาคารเครื่องมือ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)



รูปที่ 3.19 เครื่องเป่าลมร้อนที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ

3.6 สรุป

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบระบบให้ความร้อนข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ออกแบบรางไหลในท่อลำเลียงข้าวสาร ผลการจำลองลักษณะการไหลของลมแบบต่าง ๆ และการคำนวณชุดแมทซิ่งของวงจรเหนี่ยวนำความร้อน ในส่วนของวงจรเหนี่ยวนำความร้อน กำลังงานของลมร้อน และอัตราการไหลของข้าวสาร ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบการทดลอง โดยจะมีการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ซึ่งได้อธิบายไว้แล้วในบทนี้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบระหว่างการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวเทียบกับการใช้ลมร้อนร่วมกับการใช้การเหนี่ยวนำความร้อน โดยจะกำหนดอัตราการไหลของข้าวสาร 3 รูปแบบ คือ 100kg/h 150kg/h และ 200kg/h ซึ่งทั้ง 3 รูปแบบจะใช้กำลังงานของลมร้อน 1,143W 2,352W และ 3,756W และใช้กำลังงานของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ 146W 228W และ 360W โดยจะใช้เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดในการวัดอุณหภูมิของข้าวสาร เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการให้ความร้อนแก่ข้าวสาร และนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผลต่อไป



รูปที่ 4.1 ระบบการให้ความร้อนข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน

4.2 การทดสอบการเพิ่มอุณหภูมิข้าวสารด้วยระบบการเป่าลมร้อนเพียงอย่างเดียว

ในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบการเพิ่มอุณหภูมิข้าวสารด้วยระบบการเป่าลมร้อนเพียงอย่างเดียว โดยจะกำหนดอัตราการไหลของข้าวสาร 3 รูปแบบ คือ 100kg/h 150kg/h และ 200kg/h และกำหนดกำลังงานของลมร้อน 3 กำลังงาน ได้แก่ 1,143W 2,352W และ 3,756W โดยทั้ง 3 กำลังงานนี้จะได้อุณหภูมิของลมร้อนอยู่ที่ 40 องศาเซลเซียส 60 องศาเซลเซียส และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และจะใช้ข้าวสารที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 25 องศาเซลเซียส เท่ากัน ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิเริ่มต้นของข้าวสารที่ 25 องศาเซลเซียส ก่อนผ่านระบบการเป่าลมร้อน

4.2.1 การทดสอบระบบการเป่าลมร้อนเพียงอย่างเดียวที่อัตราการไหล 100kg/h

ในรูปที่ 4.3 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 1,143W โดยจะมีอุณหภูมิของลมร้อนอยู่ที่ 40.2 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.4 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเป่าลมร้อน ที่อัตราการไหล 100kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 25 องศาเซลเซียส เป็น 28.6 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 3.6 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.3 แสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 1,143W ได้อุณหภูมิ 40.2 องศาเซลเซียส

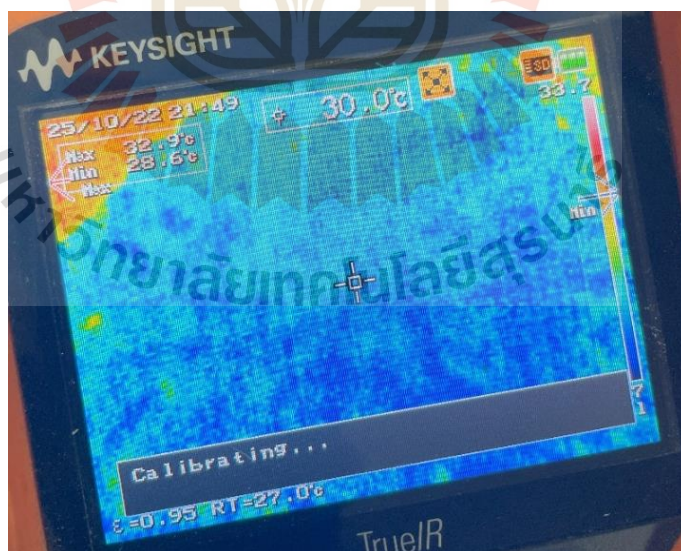


รูปที่ 4.4 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 1,143W และที่อัตราการไหล 100kg/h

ในรูปที่ 4.5 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 2,352W โดยจะมีอุณหภูมิของลมร้อนอยู่ที่ 61.2 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.6 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเป่าลมร้อน ที่อัตราการไหล 100kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 25 องศาเซลเซียส เป็น 30 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 5 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.5 แสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 2,352W ได้อุณหภูมิ 61.2 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.6 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 2,352W และที่อัตราการไหล 100kg/h

ในรูปที่ 4.7 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 3,756W โดยจะมีอุณหภูมิของลมร้อนอยู่ที่ 80.3 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.8 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเป่าลมร้อน ที่อัตราการไหล 100kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 25 องศาเซลเซียส เป็น 31.5 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 6.5 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.7 แสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 3,756W ได้อุณหภูมิ 80.3 องศาเซลเซียส



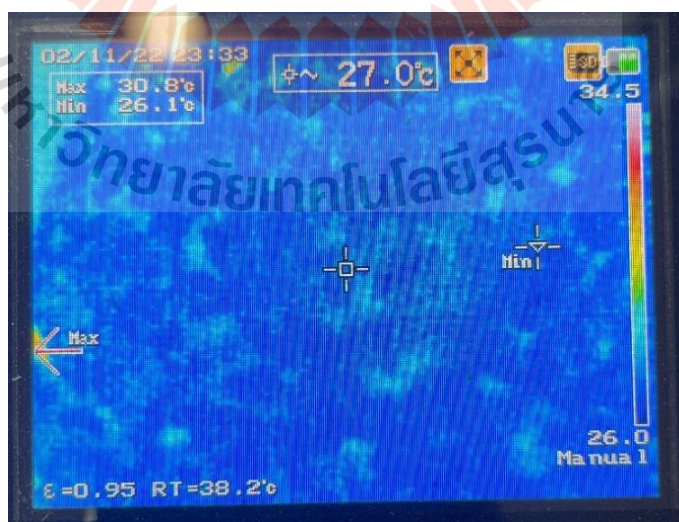
รูปที่ 4.8 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 3,756W และที่อัตราการไหล 100kg/h

4.2.2 การทดสอบระบบการเป่าลมร้อนเพียงอย่างเดียวที่อัตราการไหล 150kg/h

ในรูปที่ 4.9 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 1,143W โดยจะมีอุณหภูมิของลมร้อนอยู่ที่ 40.9 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.10 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเป่าลมร้อน ที่อัตราการไหล 150kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 25 องศาเซลเซียส เป็น 27 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 2 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.9 แสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 1,143W ได้อุณหภูมิ 40.9 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.10 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 1,143W และที่อัตราการไหล 150kg/h

ในรูปที่ 4.11 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 2,352W โดยจะมีอุณหภูมิของลมร้อนอยู่ที่ 61.9 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.12 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเป่าลมร้อน ที่อัตราการไหล 150kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 25 องศาเซลเซียส เป็น 28.9 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 3.9 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.11 แสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 2,352W ได้อุณหภูมิ 61.9 องศาเซลเซียส

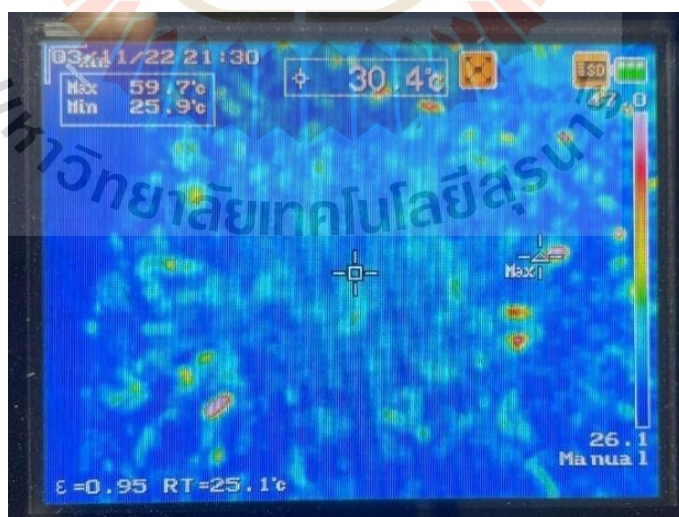


รูปที่ 4.12 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 2,352W และที่อัตราการไหล 150kg/h

ในรูปที่ 4.13 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 3,756W โดยจะมีอุณหภูมิของลมร้อนอยู่ที่ 81 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.14 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเป่าลมร้อน ที่อัตราการไหล 150kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 25 องศาเซลเซียส เป็น 30.4 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 5.4 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.13 แสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 3,756W ได้อุณหภูมิ 81 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.14 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 3,756W และที่อัตราการไหล 150kg/h

4.2.3 การทดสอบระบบการเป่าลมร้อนเพียงอย่างเดียวที่อัตราการไหล 200kg/h

ในรูปที่ 4.15 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 1,143W โดยจะมีอุณหภูมิของลมร้อนอยู่ที่ 41.3 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.16 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเป่าลมร้อน ที่อัตราการไหล 200kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 25 องศาเซลเซียส เป็น 26.5 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 1.5 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.15 แสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 1,143W ได้อุณหภูมิ 41.3 องศาเซลเซียส

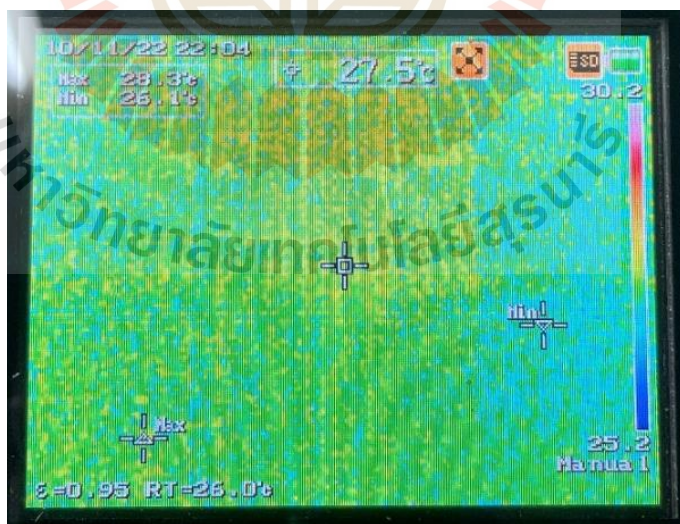


รูปที่ 4.16 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 1,143W และที่อัตราการไหล 200kg/h

ในรูปที่ 4.17 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 2,352W โดยจะมีอุณหภูมิของลมร้อนอยู่ที่ 62 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.18 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเป่าลมร้อน ที่อัตราการไหล 200kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 25 องศาเซลเซียส เป็น 27.8 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 2.8 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.17 แสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 2,352W ได้อุณหภูมิ 62 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.18 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 2,352W และที่อัตราการไหล 200kg/h

ในรูปที่ 4.19 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 3,756W โดยจะมีอุณหภูมิของลมร้อนอยู่ที่ 80 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.20 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเป่าลมร้อน ที่อัตราการไหล 200kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 25 องศาเซลเซียส เป็น 29 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 4 องศาเซลเซียส



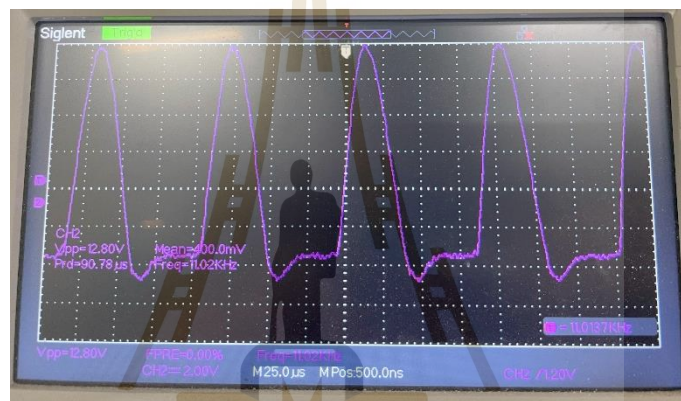
รูปที่ 4.19 แสดงอุณหภูมิของระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 3,756W ได้อุณหภูมิ 82.3 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.20 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเป่าลมร้อนที่กำลังงาน 3,756W และที่อัตราการไหล 200kg/h

4.3 การทดสอบการเพิ่มอุณหภูมิข้าวสารด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน

ในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบการเพิ่มอุณหภูมิข้าวสารด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน โดยจะกำหนดอัตราการไหลของข้าวสาร 3 รูปแบบ คือ 100kg/h 150kg/h และ 200kg/h และ กำหนดกำลังงานของลมร้อน 3 กำลังงาน ได้แก่ 1,143W 2,352W และ 3,756W เช่นเดียวกับการทดสอบการให้ความร้อนด้วยระบบการเป่าลมร้อนเพียงอย่างเดียว โดยจะเพิ่มกำลังงานของระบบเหนี่ยวนำความร้อนที่ได้ออกแบบชุดแม่เหล็กที่สัญญาณความถี่ 11 kHz ดังรูปที่ 4.21 และจะใช้ 3 กำลังงาน ได้แก่ 146W 228W และ 360W เข้าไปช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเพิ่มอุณหภูมิข้าวสาร และจะใช้ข้าวสารที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เท่ากัน ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.21 สัญญาณ Output เรโซแนนซ์ที่ความถี่ 11 kHz



รูปที่ 4.22 แสดงอุณหภูมิเริ่มต้นของข้าวสารที่ 27 องศาเซลเซียส ก่อนผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน

4.3.1 ทดสอบที่อัตราการไหล 100kg/h และที่กำลังงานเหนี่ยวนำ 146W

ในรูปที่ 4.23 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 1,289W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 63.2 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.24 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 100kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 32.2 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 5.2 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.23 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 1,289W ได้อุณหภูมิ 63.2 องศาเซลเซียส

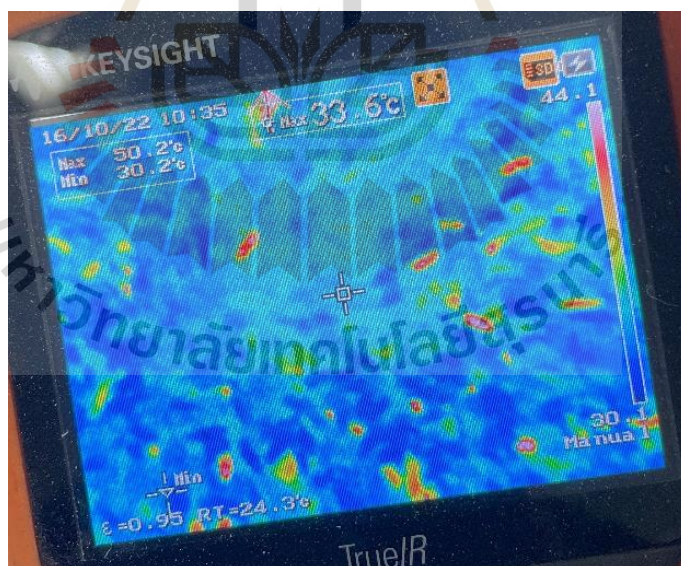


รูปที่ 4.24 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 1,289W และที่อัตราการไหล 100kg/h

ในรูปที่ 4.25 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 2,498W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 82.3 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.26 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 100kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 33.6 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 6.6 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.25 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 2,498W ได้อุณหภูมิ 82.3 องศาเซลเซียส

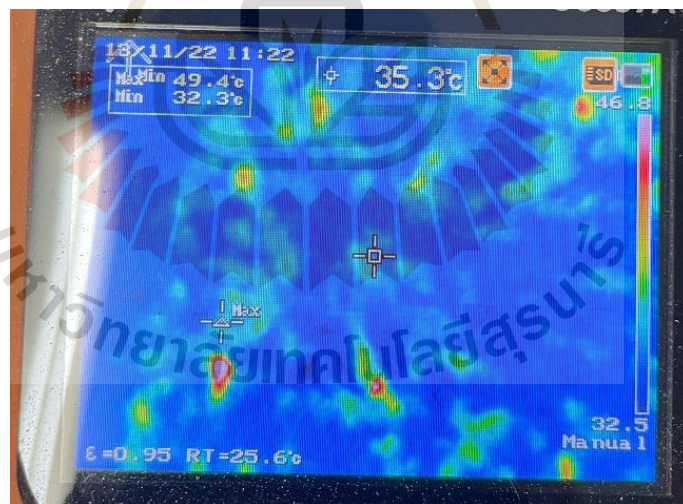


รูปที่ 4.26 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 2,498W และที่อัตราการไหล 100kg/h

ในรูปที่ 4.27 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 3,902W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 108.3 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.28 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 100kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 35.3 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 8.3 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.27 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 3,902W ได้อุณหภูมิ 108.3 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.28 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 3,902W และที่อัตราการไหล 100kg/h

4.3.2 ทดสอบที่อัตราการไหล 100kg/h และที่กำลังงานเหนี่ยวนำ 228W

ในรูปที่ 4.29 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 1,371W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 75.3 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.30 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 100kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 33 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 6 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.29 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 1,371W ได้อุณหภูมิ 75.3 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.30 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 1,371W และที่อัตราการไหล 100kg/h

ในรูปที่ 4.31 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 2,580W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 97.5 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.32 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 100kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 34.8 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 7.8 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.31 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 2,580W ได้อุณหภูมิ 97.5 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.32 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 2,580W และที่อัตราการไหล 100kg/h

ในรูปที่ 4.33 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 3,984W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 123.8 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.34 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 100kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 36.4 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 9.4 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.33 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 3,984W ได้อุณหภูมิ 123.8 องศาเซลเซียส



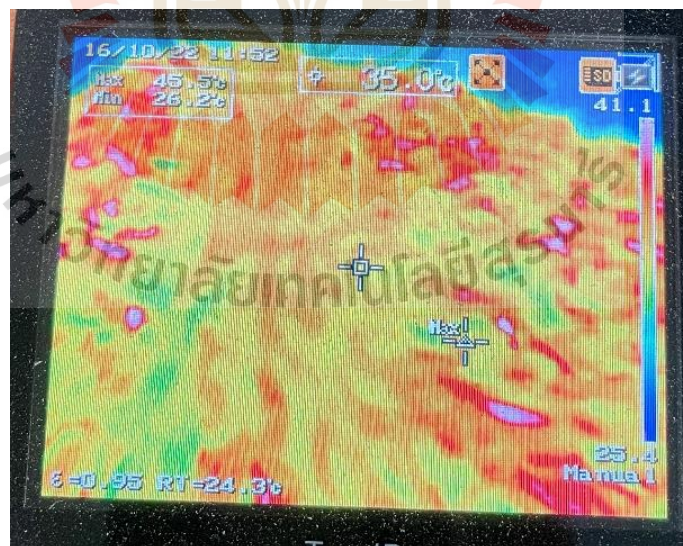
รูปที่ 4.34 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 3,984W และที่อัตราการไหล 100kg/h

4.3.3 ทดสอบที่อัตราการไหล 100kg/h และที่กำลังงานเหนี่ยวนำ 360W

ในรูปที่ 4.35 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 1,503W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 102 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.36 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 100kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 35 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 8 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.35 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 1,503W ได้อุณหภูมิ 102 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.36 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 1,503W และที่อัตราการไหล 100kg/h

ในรูปที่ 4.37 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 2,712W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 127.8 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.38 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 100kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 36.6 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 9.6 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.37 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 2,712W ได้อุณหภูมิ 127.8 องศาเซลเซียส

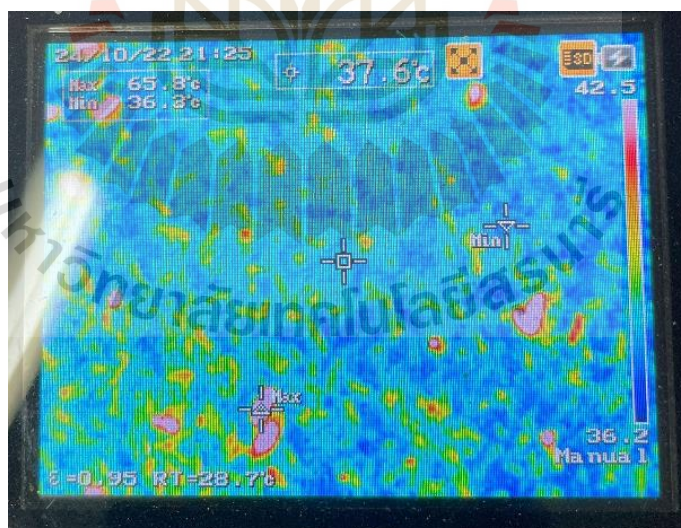


รูปที่ 4.38 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 2,712W และที่อัตราการไหล 100kg/h

ในรูปที่ 4.39 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 4,116W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 147.5 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.40 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 100kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 37.8 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 10.8 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.39 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 4,116W ได้อุณหภูมิ 147.5 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.40 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน

4.3.4 ทดสอบที่อัตราการไหล 150kg/h และที่กำลังงานเหนี่ยวนำ 146W

ในรูปที่ 4.41 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 1,289W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 62.2 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.42 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 150kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 30.8 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 3.8 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.41 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 1,289W ได้อุณหภูมิ 62.2 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.42 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 1,289W และที่อัตราการไหล 150kg/h

ในรูปที่ 4.43 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 2,498W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 80.8 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.44 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 150kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 32.2 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 5.2 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.43 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 2,498W ได้อุณหภูมิ 80.8 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.44 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 2,498W และที่อัตราการไหล 150kg/h

ในรูปที่ 4.45 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 3,902W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 106 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.46 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 150kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 33.4 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 6.4 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.45 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 3,902W ได้อุณหภูมิ 106 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.46 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 3,902W และที่อัตราการไหล 150kg/h

4.3.5 ทดสอบที่อัตราการไหล 150kg/h และที่กำลังงานเหนี่ยวนำ 228W

ในรูปที่ 4.47 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 1,371W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 72 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.48 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 150kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 31.9 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 4.9 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.47 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 1,371W ได้อุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.48 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 1,371W และที่อัตราการไหล 150kg/h

ในรูปที่ 4.49 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 2,580W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 96.3 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.50 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 150kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 33.1 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 6.1 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.49 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 2,580W ได้อุณหภูมิ 96.3 องศาเซลเซียส

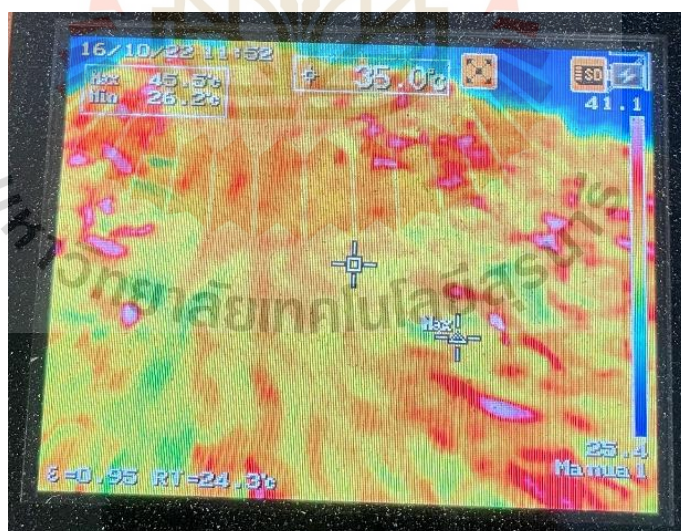


รูปที่ 4.50 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 2,580W และที่อัตราการไหล 150kg/h

ในรูปที่ 4.51 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 3,984W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 121.3 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.52 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 150kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 35 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 8 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.51 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 3,984W ได้อุณหภูมิ 121.3 องศาเซลเซียส



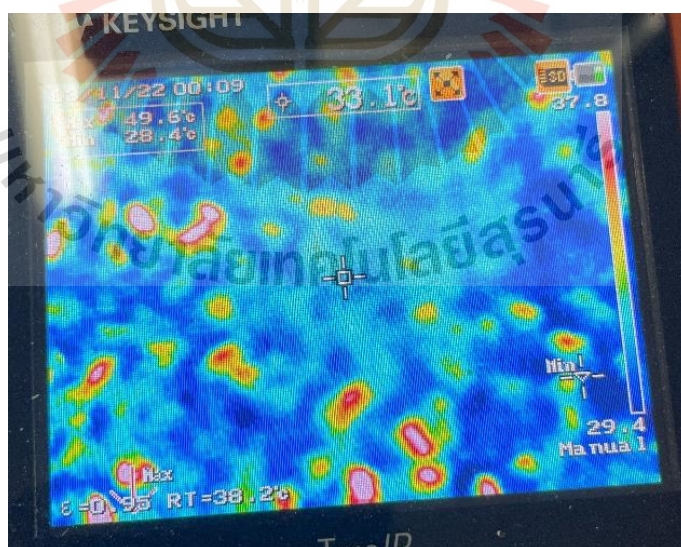
รูปที่ 4.52 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 3,984W และที่อัตราการไหล 150kg/h

4.3.6 ทดสอบที่อัตราการไหล 150kg/h และที่กำลังงานเหนี่ยวนำ 360W

ในรูปที่ 4.53 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 1,503W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 102 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.54 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 150kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 33.1 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 6.1 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.53 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 1,503W ได้อุณหภูมิ 102 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.54 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 1,503W และที่อัตราการไหล 150kg/h

ในรูปที่ 4.55 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 2,712W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 125 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.56 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 150kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 35.3 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 8.3 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.55 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 2,712W ได้อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.56 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 2,712W และที่อัตราการไหล 150kg/h

ในรูปที่ 4.57 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 4,116W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 145.5 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.58 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 150kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 36.7 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 9.7 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.57 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 4,116W ได้อุณหภูมิ 145.5 องศาเซลเซียส



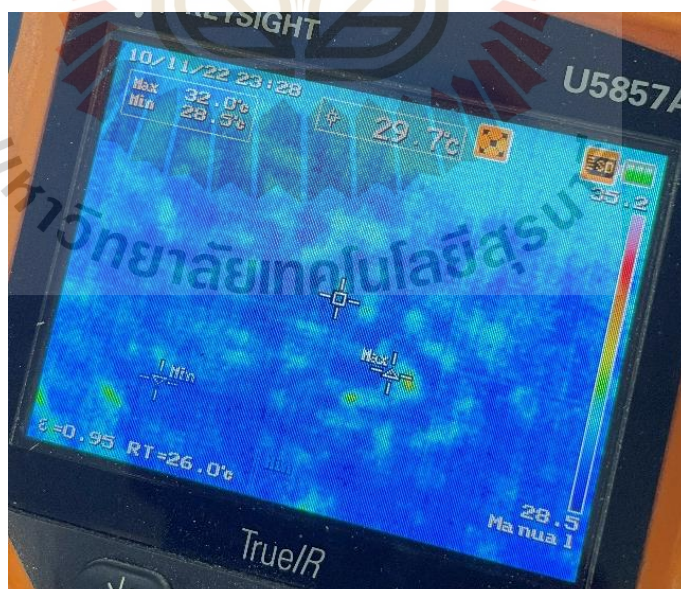
รูปที่ 4.58 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 4,116W และที่อัตราการไหล 150kg/h

4.3.7 ทดสอบที่อัตราการไหล 200kg/h และที่กำลังงานเหนี่ยวนำ 146W

ในรูปที่ 4.59 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 1,289W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 62 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.60 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 200kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 29.7 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 2.7 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.59 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 1,289W ได้อุณหภูมิ 62 องศาเซลเซียส

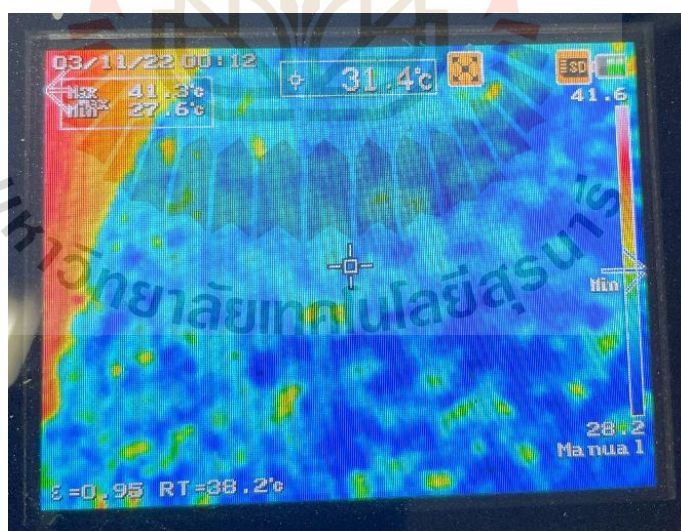


รูปที่ 4.60 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 1,289W และที่อัตราการไหล 200kg/h

ในรูปที่ 4.61 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 2,498W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 80 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.62 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 200kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 31 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 4 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.61 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 2,498W ได้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.62 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 2,498W และที่อัตราการไหล 200kg/h

ในรูปที่ 4.63 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 3,902W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 104.3 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.64 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 200kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 32.3 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 5.3 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.63 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 3,902W ได้อุณหภูมิ 104.3 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.64 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 3,902W และที่อัตราการไหล 200kg/h

4.3.8 ทดสอบที่อัตราการไหล 200kg/h และที่กำลังงานเหนี่ยวนำ 228W

ในรูปที่ 4.65 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 1,371W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 71.3 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.66 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 200kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 30.8 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 3.8 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.65 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 1,371W ได้อุณหภูมิ 71.3 องศาเซลเซียส

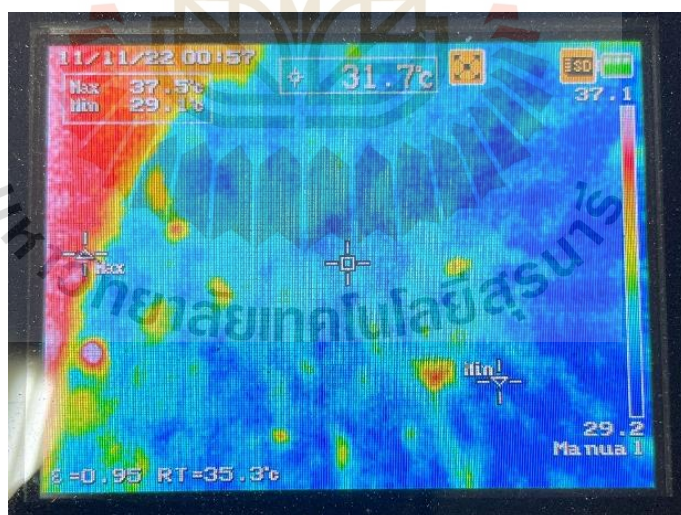


รูปที่ 4.66 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 1,371W และที่อัตราการไหล 200kg/h

ในรูปที่ 4.67 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 2,580W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 95.5 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.68 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 200kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 31.9 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 4.9 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.67 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 2,580W ได้อุณหภูมิ 95.5 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.68 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 2,580W และที่อัตราการไหล 200kg/h

ในรูปที่ 4.69 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 3,984W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 118.3 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.70 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 200kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 33.2 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 6.2 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.69 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 3,984W ได้อุณหภูมิ 118.3 องศาเซลเซียส



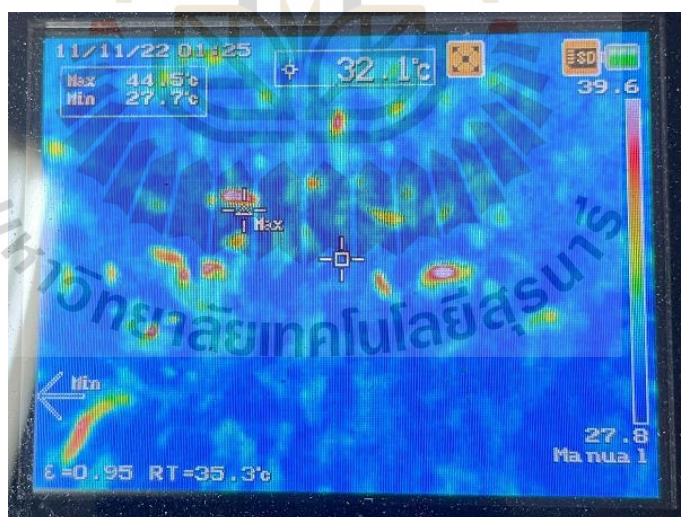
รูปที่ 4.70 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 3,984W และที่อัตราการไหล 200kg/h

4.3.9 ทดสอบที่อัตราการไหล 200kg/h และที่กำลังงานเหนี่ยวนำ 360W

ในรูปที่ 4.71 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 1,503W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 98 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.72 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 200kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 32.1 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 5.1 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.71 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 1,503W ได้อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.72 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 1,503W และที่อัตราการไหล 200kg/h

ในรูปที่ 4.73 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 2,712W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 123.3 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.74 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 200kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 33.5 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 6.5 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.73 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 2,712W ได้อุณหภูมิ 123.3 องศาเซลเซียส

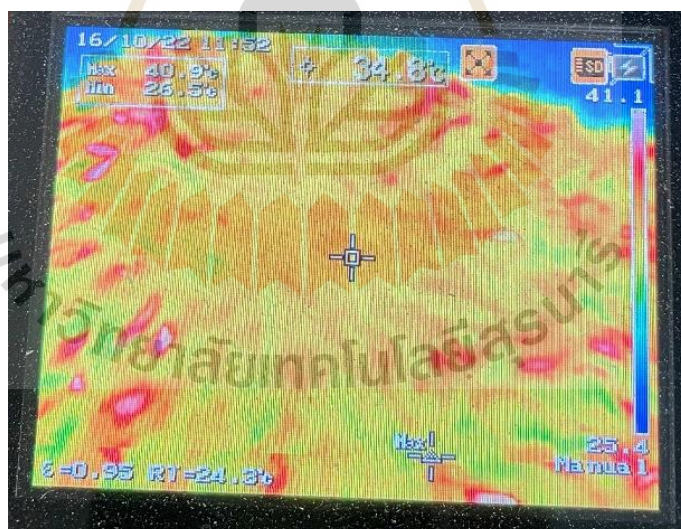


รูปที่ 4.74 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 2,712W และที่อัตราการไหล 200kg/h

ในรูปที่ 4.75 จะแสดงอุณหภูมิของระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงานรวม 4,116W โดยจะมีอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารอยู่ที่ 144 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 4.76 จะแสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน ที่อัตราการไหล 200kg/h จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 27 องศาเซลเซียส เป็น 34.9 องศาเซลเซียส ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับ 7.9 องศาเซลเซียส



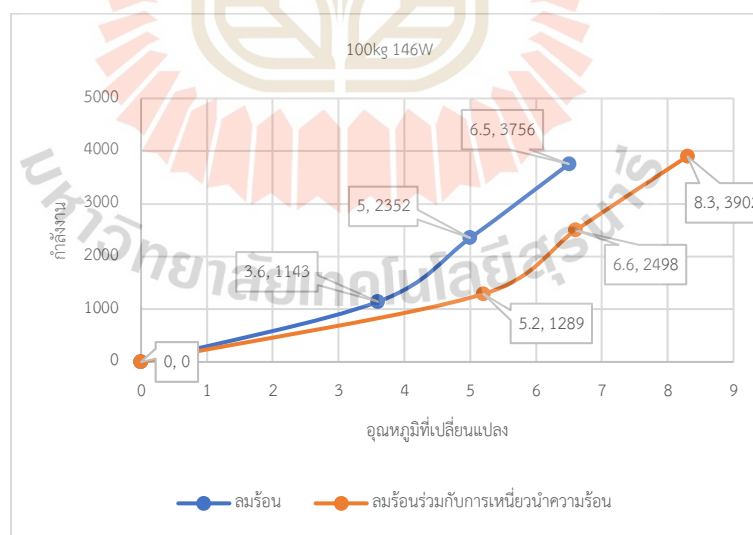
รูปที่ 4.75 แสดงอุณหภูมิรวมภายในท่อลำเลียงข้าวสารที่กำลังงานรวม 4,116W ได้อุณหภูมิ 144 องศาเซลเซียส



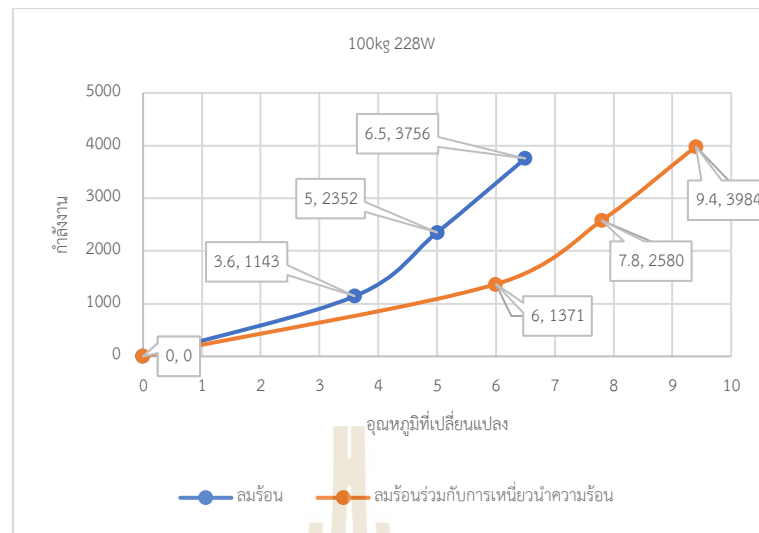
รูปที่ 4.76 แสดงอุณหภูมิของข้าวสารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยระบบการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนที่กำลังงาน 4,116W และที่อัตราการไหล 200kg/h

4.4 การวัดผลที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวสารที่ 100 kg/h

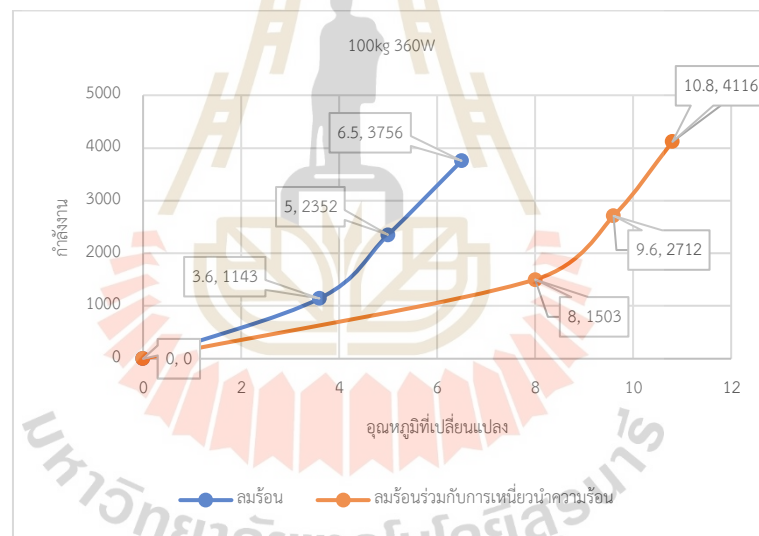
จากผลการทดลองในรูปที่ 4.77 จะเป็นการเปรียบเทียบอุณหภูมิของเมล็ดข้าวที่เพิ่มขึ้นและค่ากำลังงานที่ใช้ระหว่างการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งกำหนดกำลังงานไว้ 3 กำลังงานคือ 1,143W 2523W และ 3,756W กับการใช้ลมร้อนร่วมกับการเหนี่ยวนำความร้อน โดยกำหนดกำลังงานของการเหนี่ยวนำความร้อนเป็น 146W, 228W และ 360W ตามลำดับรูปและ กำหนดอัตราการไหลของเมล็ดข้าวอยู่ที่ 100 kg/h โดยที่รูปที่ 4.77(a) จะเป็นการทดลองเพิ่มกำลังงานของการเหนี่ยวนำความร้อน 146W ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าที่จุดแรกของการใช้ลมร้อนร้อนเพียงอย่างเดียวที่กำลังงาน 1,143W อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้นไป 3.6 องศาเซลเซียส แต่พอเพิ่มกำลังงานของการเหนี่ยวนำความร้อนไป 146W จะได้กำลังงานรวมอยู่ที่ 1,289W อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 5.2 องศาเซลเซียส ซึ่งเทียบเท่ากับการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวในจุดที่ 2 ที่อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้นไป 5 องศาเซลเซียส แต่ใช้กำลังงานไป 2,352W ซึ่งมากกว่าการใช้ลมร้อนร่วมกับการเหนี่ยวนำความร้อนถึง 1,063W เมื่อเพิ่มกำลังงานของการเหนี่ยวนำความร้อนเป็น 228W ดังรูปที่ 4.77(b) จะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเพิ่มสูงขึ้นและมีแนวโน้มของค่ากำลังงานที่ใช้ลดน้อยลงกว่ารูปที่ 4.77(a) และเมื่อเพิ่มกำลังงานของการเหนี่ยวนำความร้อนเป็น 360W ดังรูปที่ 4.77(c) ก็จะได้เห็นได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นถึงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวที่เพิ่มสูงขึ้นและค่ากำลังงานที่ใช้ลดน้อยลงเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.77(a) และรูปที่ 4.77(b)



(a)



(b)

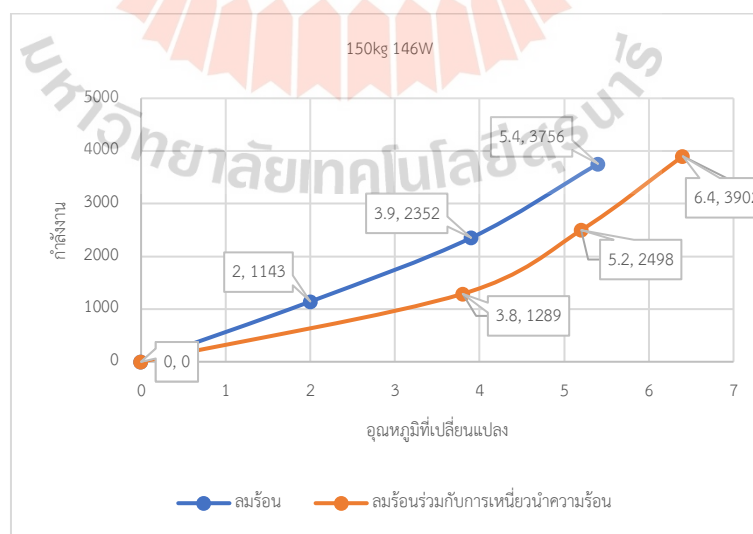


(c)

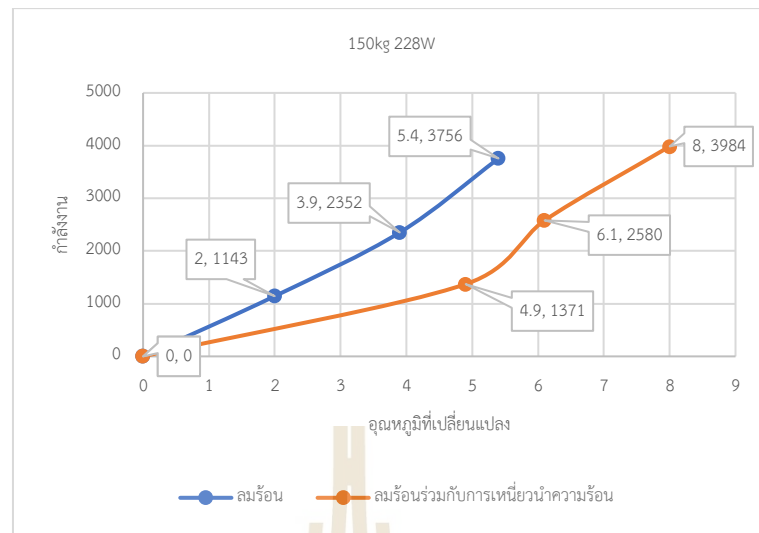
รูปที่ 4.77 กราฟแสดงความต่างของอุณหภูมิระหว่างการใช้ลมร้อนอย่างเดียวกักับการใช้ลมร้อนร่วมกับการเหนี่ยวนำความร้อน ที่อัตราการไหล 100 kg/h โดยที่ (a) เป็นกราฟที่ใช้กำลังงาน 146W (b) เป็นกราฟที่ใช้กำลังงาน 228W และ (c) เป็นกราฟที่ใช้กำลังงาน 360W

4.5 การวัดผลที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวสารที่ 150 kg/h

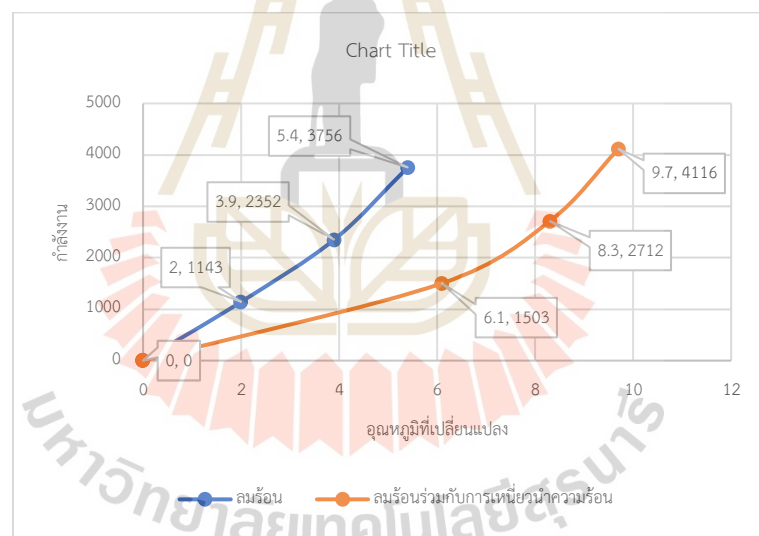
จากผลการทดลองในรูปที่ 4.78 จะเป็นการเปรียบเทียบอุณหภูมิของเมล็ดข้าวที่เพิ่มขึ้นและค่ากำลังงานที่ใช้ระหว่างการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวกับการใช้ลมร้อนร่วมกับการเหนี่ยวนำความร้อนในรูปแบบเดียวกันกับรูปที่ 4.78 แต่ในส่วนของอัตราการไหลของเมล็ดข้าวจะเพิ่มขึ้นเป็น 150kg/h เพื่อดูแนวโน้มของค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของเมล็ดข้าวและค่ากำลังงานที่ใช้ ซึ่งจากรูปที่ 4.78(a) จะกำหนดค่ากำลังงานของการเหนี่ยวนำความร้อนเป็น 146W ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นว่าที่จุดแรกของการใช้ลมร้อนร้อนเพียงอย่างเดียวที่ กำลังงาน 1,143W อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้นไป 2 องศาเซลเซียส แต่พอเพิ่มกำลังงานของการเหนี่ยวนำความร้อนไป 146W จะได้กำลังงานรวมอยู่ที่ 1,289W อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 3.8 องศาเซลเซียส ซึ่งเทียบเท่ากับการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวในจุดที่ 2 ที่อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้นไป 3.9 องศาเซลเซียส แต่ใช้กำลังงานไป 2,352W ซึ่งมากกว่าการใช้ลมร้อนร่วมกับการเหนี่ยวนำความร้อนถึง 1,063W เมื่อเพิ่มกำลังงานของการเหนี่ยวนำความร้อนเป็น 228W ดังรูปที่ 4.78(b) จะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเพิ่มสูงขึ้นและมีแนวโน้มของค่ากำลังงานที่ใช้ลดน้อยลงกว่ารูปที่ 4.78(a) และเมื่อเพิ่มกำลังงานของการเหนี่ยวนำความร้อนเป็น 360W ดังรูปที่ 4.78(c) ก็จะได้เห็นได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นถึงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวที่เพิ่มสูงขึ้นและค่ากำลังงานที่ใช้ลดน้อยลงเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.78(a) และรูปที่ 4.78(b) แต่เมื่อเทียบกับรูปที่ 4.77 จะเห็นได้ว่าการใช้การเหนี่ยวนำความร้อนร่วมกับลมร้อนนั้นสามารถช่วยเพิ่มอุณหภูมิของเมล็ดข้าวได้สูงขึ้นแต่ใช้กำลังงานน้อยลงเหมือนกัน แต่ในรูปที่ 4.78 จะได้ค่าอุณหภูมิของเมล็ดข้าวน้อยกว่ารูปที่ 4.77



(a)



(b)

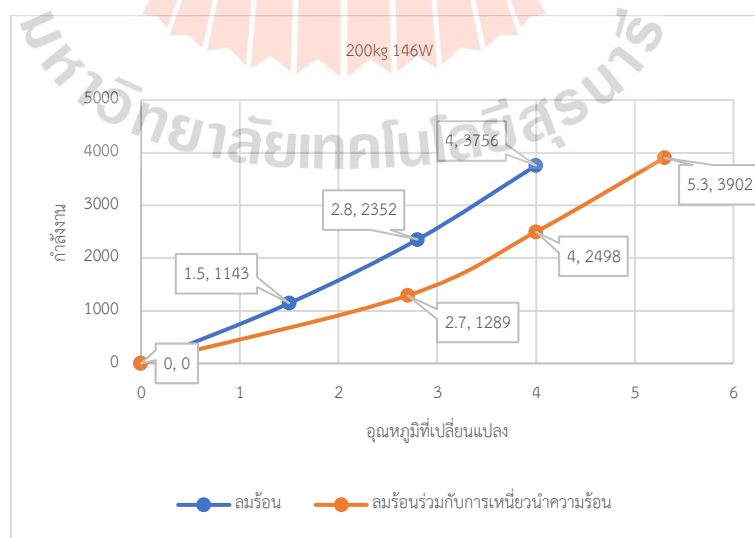


(c)

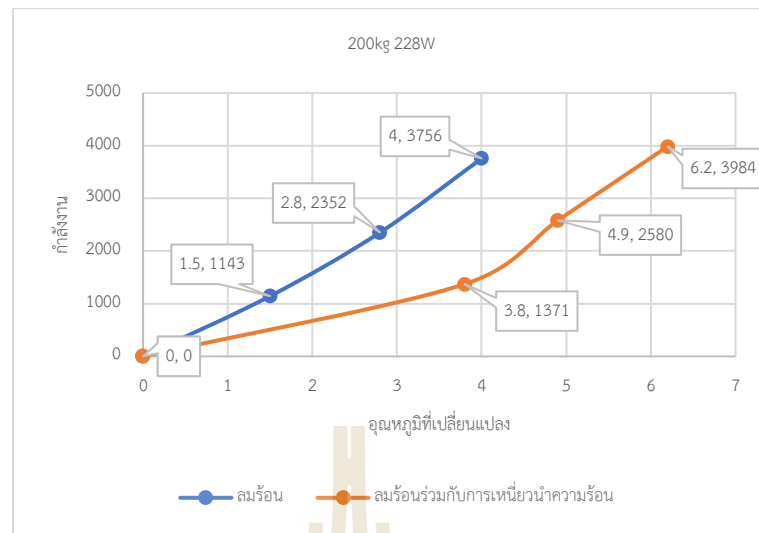
รูปที่ 4.78 กราฟแสดงความต่างของอุณหภูมิการใช้ลมร้อนอย่างเดียวกับการใช้ลมร้อนร่วมกับการเหนี่ยวนำความร้อน ที่อัตราการไหล 150 kg/h โดยที่ (a) เป็นกราฟที่ใช้กำลังงาน 146W (b) เป็นกราฟที่ใช้กำลังงาน 228W และ (c) เป็นกราฟที่ใช้กำลังงาน 360W

4.6 การวัดผลที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวสารที่ 200 kg/h

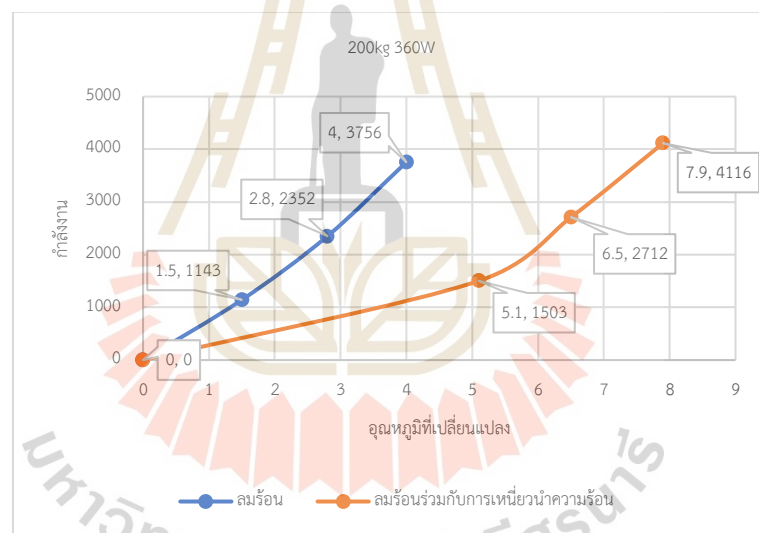
จากผลการทดลองในรูปที่ 4.79 จะเป็นการเปรียบเทียบอุณหภูมิของเมล็ดข้าวที่เพิ่มขึ้นและค่ากำลังงานที่ใช้ระหว่างการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวกับการใช้ลมร้อนร่วมกับการเหนี่ยวนำความร้อนในรูปแบบเดียวกันกับรูปที่ 4.77 และ 4.78 แต่ในส่วนของอัตราการไหลของเมล็ดข้าวจะเพิ่มขึ้นเป็น 200kg/h เพื่อดูแนวโน้มของค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของเมล็ดข้าวและค่ากำลังงานที่ใช้ ซึ่งจากรูปที่ 4.79(a) จะกำหนดค่ากำลังงานของการเหนี่ยวนำความร้อนเป็น 146W ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าที่จุดแรกของการใช้ลมร้อนร้อนเพียงอย่างเดียวที่ กำลังงาน 1,143W อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้นไป 1.5 องศาเซลเซียส แต่พอเพิ่มกำลังงานของการเหนี่ยวนำความร้อนไป 146W จะได้กำลังงานรวมอยู่ที่ 1,289W อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 2.7 องศาเซลเซียส ซึ่งเทียบเท่ากับการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวในจุดที่ 2 ที่อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้นไป 2.8 องศาเซลเซียส แต่ใช้กำลังงานไป 2,352W ซึ่งมากกว่าการใช้ลมร้อนร่วมกับการเหนี่ยวนำความร้อนถึง 1,063W เมื่อเพิ่มกำลังงานของการเหนี่ยวนำความร้อนเป็น 228W ดังรูปที่ 4.79(b) จะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเพิ่มสูงขึ้นและมีแนวโน้มของค่ากำลังงานที่ใช้ลดน้อยลงกว่ารูปที่ 4.79(a) และเมื่อเพิ่มกำลังงานของการเหนี่ยวนำความร้อนเป็น 360W ดังรูปที่ 4.79(c) ก็จะได้เห็นได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นถึงอุณหภูมิของเมล็ดข้าวที่เพิ่มสูงขึ้นและค่ากำลังงานที่ใช้ลดน้อยลงเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.79(a) และรูปที่ 4.79(b) แต่เมื่อเทียบกับรูปที่ 4.77 และรูปที่ 4.78 จะเห็นได้ว่าการใช้การเหนี่ยวนำความร้อนร่วมกับลมร้อนนั้นสามารถช่วยเพิ่มอุณหภูมิของเมล็ดข้าวได้สูงขึ้นแต่ใช้กำลังงานน้อยลงเหมือนกัน แต่ในรูปที่ 4.79 จะได้ค่าอุณหภูมิของเมล็ดข้าวน้อยกว่ารูปที่ 4.77 และรูปที่ 4.78



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.79 กราฟแสดงความต่างของอุณหภูมิการใช้ลมร้อนอย่างเดียวกับการใช้ลมร้อนร่วมกับการเหนี่ยวนำความร้อน ที่อัตราการไหล 200 kg/h โดยที่ (a) เป็นกราฟที่ใช้กำลังงาน 146W (b) เป็นกราฟที่ใช้กำลังงาน 228W และ (c) เป็นกราฟที่ใช้กำลังงาน 360W

4.7 สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบระบบให้ความร้อนข้าวสารโดยใช้เทคโนโลยีการเหนี่ยวนำความร้อน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการอบแห้งต่าง ๆ ซึ่งจากผลการทดลองชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพของตัวเครื่องที่ออกแบบการใช้งานลมร้อนร่วมกับการใช้การเหนี่ยวนำความร้อนว่าสามารถเพิ่มอุณหภูมิข้าวสารได้สูงขึ้น และไม่ทำให้ข้าวสารเกิดการแตกหัก หรือเสียหายจากการโดนความร้อน และยังช่วยในเรื่องของการประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้การเหนี่ยวนำความร้อนเป็นการให้ความร้อนแบบตรงจุดและมีประสิทธิภาพสูง และยังสามารถพัฒนาต่อยอดจากเดิมเพื่อเพิ่มในเรื่องของกำลังการผลิตได้ในอนาคต



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิเคราะห์ ทดสอบ ออกแบบ และเปรียบเทียบผลของของระบบให้ความร้อนข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน การวิจัยเริ่มจากการศึกษาความเป็นมา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย วิธีดำเนินงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมถึงปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง จากนั้นศึกษาหลักการและทฤษฎีของวงจรเหนี่ยวนำความร้อน ทฤษฎีการถ่ายโอนความร้อน และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง จากนั้นออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน เพื่อใช้สำหรับการทดสอบ เก็บผล เพื่อนำไปวิเคราะห์ข้อมูลการทำงานและประสิทธิภาพของเครื่องต่อไป โดยเครื่องให้ความร้อนข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนนี้จะมีชุดวงจรเหนี่ยวนำความร้อนขนาด 5,000 วัตต์ สำหรับใช้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนให้กับตัวเครื่อง และเครื่องเป่าลมร้อนที่ให้กำลังงานสูงสุด 3,756 วัตต์ ซึ่งตัวท่อให้ความร้อนข้าวจะมีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม ด้านในท่อจะมีแผ่นเหล็กวางสลับกันอยู่ด้านในเพื่อให้ข้าวสารที่ไหลลงมาได้สัมผัสกับความร้อนของท่อได้มากยิ่งขึ้น และช่วยลดการไหลของข้าวให้อยู่ในท่อได้นานยิ่งขึ้น และในส่วนด้านล่างของท่อจะมีช่องเป่าลมร้อนอัดเข้ามาให้สวนทางกับข้าวสารเพื่อช่วยทำให้อุณหภูมิของข้าวสารเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ รวมระยะทางของข้าวสารที่ไหลผ่านท่อให้ความร้อนทั้งสิ้น 126 เซนติเมตร

จากการวิเคราะห์และออกแบบท่อให้ความร้อนข้าวสารโดยใช้โปรแกรม Solid Works การปรับองศาของรางไหลข้าวที่ 45 องศา จะทำให้ลมที่เป่าเข้าไปในท่อไหลออกด้านบนได้ดีกว่าแบบอื่นๆ ซึ่งการทดลองจะแบ่งออกเป็นสองส่วน ในส่วนแรกจะเป็นการวัดอุณหภูมิของเมล็ดข้าวจากการที่ใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวในแต่ละกำลังงาน ด้วยอัตราการไหลของข้าวสารที่ต่างกันเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ในส่วนที่สองจะเป็นการวัดอุณหภูมิของข้าวสารเช่นกัน แต่จะใช้วงจรเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนโดยจะกำหนดให้กำลังงานของลมร้อนเท่าเดิม แต่จะเพิ่มกำลังงานของวงจรเหนี่ยวนำเข้าไป เพื่อดูประสิทธิภาพของเครื่องให้ความร้อนข้าวสาร

5.1.1 สรุปการวัดผลอุณหภูมิของข้าวสารที่ใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว

จากการวัดผลอุณหภูมิของข้าวสารหลังผ่านการให้ความร้อนโดยใช้เครื่องเป่าลมร้อนเพียงอย่างเดียวพบว่ากำลังงานต่าง ๆ ที่อัตราการไหล 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สามารถเพิ่มอุณหภูมิข้าวสารได้ตั้งแต่ 3.6 องศาเซลเซียส ถึง 6.5 องศาเซลเซียส ส่วนที่อัตราการไหล 150 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สามารถเพิ่มอุณหภูมิข้าวสารได้ตั้งแต่ 2 องศาเซลเซียส ถึง 5.4 องศาเซลเซียส และที่อัตราการไหล 200 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สามารถเพิ่มอุณหภูมิข้าวสารได้ตั้งแต่ 1.5 องศาเซลเซียส ถึง 4 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบที่กำลังงานของลมร้อนที่เท่ากันแล้วจะเห็นได้ว่า ยิ่งอัตราการไหลเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลต่างของอุณหภูมิลดลง

5.1.2 สรุปการวัดผลอุณหภูมิของข้าวสารที่ใช้การเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน

เมื่อนำวงจรเหนี่ยวนำมาใช้เพิ่มอุณหภูมิข้าวสารร่วมกับการเป่าลมร้อนจะทำให้ผลต่างของอุณหภูมิข้าวสารเพิ่มขึ้น และใช้กำลังงานน้อยลงอย่างมาก โดยเทียบจากจุดที่ประหยัดพลังงานได้มากที่สุด คือ ที่อัตราการไหล 100 kg/h ที่กำลังงานลมร้อนจุดที่ 3 ใช้กำลังงาน 3,756W อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 6.5°C เทียบกับที่กำลังงานเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนจุดที่ 1 ใช้กำลังงาน 1,503W อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 8°C ซึ่งอุณหภูมิสูงกว่า 1.5 °C และประหยัดพลังงานไปได้ 2,253W หรือคิดเป็น 59.98%

สรุปผลที่ได้จากทดสอบระบบให้ความร้อนข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนพบว่า ประสิทธิภาพของระบบให้ความร้อนข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน สามารถเพิ่มอุณหภูมิข้าวสารได้สูงขึ้น และไม่ทำให้ข้าวสารเกิดการแตกหัก หรือเสียหายจากการโดนความร้อน และยังช่วยในเรื่องของการประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้การเหนี่ยวนำความร้อนเป็นการให้ความร้อนแบบตรงจุดและมีประสิทธิภาพสูง และยังสามารถพัฒนาต่อยอดจากเดิม เพื่อเพิ่มในเรื่องของกำลังการผลิตได้

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

การออกแบบระบบให้ความร้อนข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อน จะพบปัญหาในส่วนของแรงลมจากเครื่องเป่าลมร้อนเบาเกินไป ทั้งนี้ด้วยข้อจำกัดของกำลังงานที่สามารถทำลมร้อนออกมาได้มีจำกัด หากเพิ่มแรงลมก็จะส่งผลให้อุณหภูมิของลมร้อนลดลง ซึ่งไม่ส่งผลดีต่อการเพิ่มอุณหภูมิข้าวสาร และในส่วนของท่อลำเลียงข้าวสารหากเพิ่มระยะทางให้ข้าวสารดูดซับความร้อนได้มากขึ้น ก็จะสามารถเพิ่มอัตราการไหลของข้าวสารได้มากขึ้นด้วย

5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

แนวทางในการพัฒนาระบบให้ความร้อนข้าวสารด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำร่วมกับลมร้อนสามารถเพิ่มขนาดท่อลำเลียงข้าวสารให้ใหญ่ขึ้นอีก เพื่อเพิ่มกำลังการผลิตให้สูงขึ้น และเพิ่มกำลังงานของลมร้อนให้มากขึ้น เพื่อให้สามารถเพิ่มแรงลมได้ และเพิ่มการเก็บผลในเรื่องของคุณภาพข้าวสารหลังจากที่ผ่านเครื่องให้ความร้อน เช่น สีของข้าวสาร การแตกข้าว ความชื้น เป็นต้น ซึ่งจะนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานและพัฒนาให้สามารถใช้งานได้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป



รายการอ้างอิง

- กীরติเดช เทพสถิตย์ศิลป์. 2561.การออกแบบระบบให้ความร้อนข้าวด้วยลมร้อนโดยใช้เทคนิคการ
เหนี่ยวนำความร้อน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีสุรนารี. 84 น.
- ณัฐพงษ์ วงศ์บัพพา. 2557.เส้นแนวปฏิบัติการของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นที่เป็นข้อ
งอ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
127 น.
- โศรฎา แข็งการ. 2557. การพัฒนาและวิจัยเพื่อการปรับปรุงเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่น
อิสระ. วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
198 น.
- O. Lucia, P. Maussion, E. J. Dede, and J. M. Burdío, "Induction Heating Technology
and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future
Challenges," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 5, pp. 2509-
2520, May 2014. DOI: 10.1109/TIE.2013.2281162.
- Yu-Lin Lee, Chang-Hua Lin and Hwa-Dong Liu, A Novel MPPT Heating Control
Strategy Applied to the Induction Heating System. Processes (MDPI), v. 10, n.
6, p. 1151, 2022.



ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Thanakrit Chaiwandee, Samroeng Santalunai, Samran Santalunai, Chanchai Tongsoa, Weerawat Charoensiri, Jariya Pakprom, Thanaset Thosdeekoraphat, Nuchanart Santalunai, Pichaya Chaipanya “OPTIMIZING RICE HEATING EFFICIENCY: A COMPARATIVE STUDY OF ZIGZAG RAIL DESIGN AND HYBRID INDUCTION HEATING IN A NOVEL RICE HEATING SYSTEM”, PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY. (ACCEPTED 13 JUNE 13, 2024)



1. Thanakrit CHAIWANDEE¹, 2. Samroeng SANTALUNAI¹, 3. Samran SANTALUNAI^{1*}, 4. Chanchai THONGSOPA¹, 5. Weerawat CHAROENSIRI¹, 6. Jariya PAKPROM¹, 7. Thanaset THOSDEEKORAPHAT¹, 8. Nuchanart SANTALUNAI^{2*}, 9. Pichaya CHAIPANYA³

Suranaree University of Technology (1), Rajamangala University of Technology Isan (2), Srinakharinwirot University (3), Thailand
ORCID: 1. 0009-0007-9894-1317; 2. 0009-0002-2581-0678; 3. 0000-0001-6777-2230; 4. 0000-0003-2534-4398; 5. 0009-0005-6861-8469; 6. 0009-0002-5540-2624; 7. 0000-0001-5976-2438; 8. 0000-0002-5598-1534; 9. 0000-0002-6890-9865;

Optimizing Rice Heating Efficiency: A Comparative Study of Zigzag Rail Design and Hybrid Induction Heating in a Novel Rice Heating System

Abstract: This article outlines the development of a novel rice heating system, leveraging induction heating technology and hot air for enhanced efficiency. The core innovation lies in a rectangular pipe featuring three types of alternating zigzag rails, set at angles of 35, 45, and 55 degrees, to optimize hot air flow and test efficiency. The design process involved using Solidwork program to simulate hot air flow, followed by real-world experiments to validate the simulation outcomes. Key performance indicators included the temperature of rice grains exposed to hot air and the effectiveness of induction heating in uniformly heating the rice without causing damage or breakage. The study also compared the effectiveness of using hot air alone versus a combination of hot air and induction heating. Rice flow rates were tested at 100kg/h, 150kg/h, and 200kg/h, with corresponding hot air power levels of 1,143W, 2,352W, and 3,756W, and induction heating powers of 145W, 228W, and 300W. An infrared thermometer measured the rice temperature. Results indicated that the 45-degree zigzag rail design yielded higher rice temperatures without damage. Additionally, combining hot air with induction heating was found to increase rice temperature more effectively and use energy more efficiently compared to using hot air alone.

Streszczenie.

Keywords: Induction Heating, Rice Heating System, Zigzag Rail Design, Hybrid Systems
Słowa kluczowe:

1. Introduction

Grains like wheat, rice, and maize hold a central position in the global food security framework and economy, serving as the cornerstone of diets and major commodities in international trade. Their cultivation and production have far-reaching implications, not only in terms of nutritional sustenance for the global population but also in the context of environmental sustainability. Key challenges in grain production include efficient water usage and adapting to the impacts of climate change. The technological evolution in agriculture, therefore, plays a pivotal role in enhancing the efficiency of grain production, making these crops indispensable in global food systems. In the cycle of grain production, post-harvest preservation emerges as a critical step for ensuring year-round availability and preventing loss. Among various preservation methods, drying stands out as a fundamental process. It effectively reduces spoilage, inhibits mold growth, and curtails the development of toxins before the produce is transformed into diverse food products [1-10]. This process is not just about moisture removal; it's about safeguarding the quality and safety of food supplies. The methods employed for drying agricultural produce are varied, each with its own set of benefits and challenges. Traditional approaches, such as using natural sunlight, have been commonplace due to their simplicity and low cost. This method capitalizes on converting the sun's heat energy into a means for drying grains [11]. However, its efficacy is highly dependent on weather conditions, limiting its reliability and applicability [12]. As agricultural practices have evolved, so have the drying

methods. Modern approaches have sought to overcome the limitations of traditional methods, leading to the exploration and adoption of alternative techniques. One such method involves using heating coils, where electrical energy is used to heat a coil, which then transfers the heat to the material to be dried [13]. While effective, this method is not without its drawbacks, primarily its relatively high energy consumption, which can be a significant factor, especially in large-scale operations [14]. Another technique is gas heating, which involves generating heat to evaporate moisture within metals, subsequently transferring the heat to the agricultural produce [15]. This method, while efficient, necessitates more complex equipment compared to natural or coil heating methods and also carries implications due to combustion [16]. Amidst these varied techniques, the use of electromagnetic fields as a heat source has emerged as a modern, innovative approach [17-19]. This technology, characterized by energy efficiency, safety, and ease of temperature control, marks a significant advancement in the field of agricultural produce drying. Currently, this technology is employed in two principal forms: induction heating and dielectric heating [20-27]. The architecture of energy emitters has evolved, incorporating various designs for diverse applications [28-34]. Both methods have garnered attention for their potential to offer sustainable and efficient alternatives to traditional drying techniques. Induction heating, particularly, has shown promise in drying processes [35-36]. Operating on the principle of electromagnetic induction, this method involves passing an

alternating current through a coil to create a rapidly alternating magnetic field. When a conductive material, like metal, is placed within this magnetic field, eddy currents are induced within the material. These currents generate heat due to the resistance of the material, which is then transferred to the surrounding agricultural produce, enabling efficient and uniform drying.

Dielectric heating, also known as radio frequency (RF) or microwave heating, offers a different approach [37]. This process utilizes high-frequency electromagnetic waves, typically in the radio frequency or microwave spectrum, to heat dielectric materials. The waves cause rapid oscillation of polar molecules, such as water, generating heat through internal friction and dipole rotation. This method is particularly effective for applications requiring even heat distribution and is highly efficient for quickly heating materials. Enhancing the efficiency of dielectric heating is a topic of ongoing research. A promising strategy involves pre-heating the raw materials before they are subjected to the dielectric heating process. Research by Nelson and others has shown that increasing the temperature of the raw materials can enhance their dielectric properties, thus boosting the efficiency of dielectric heating in both effectiveness and time reduction. The versatility of dielectric heating extends to various applications within the agricultural sector. Its use is not limited to the drying of crops; it also includes pest control and disinfection, seed germination and sterilization, herbicide activation, and other post-harvest processes. These applications are particularly relevant for maintaining product quality and safety, especially in the processing of fruits and vegetables.

Given the significance of these findings, this research proposes an in-depth investigation into the design of an induction heating system, specifically for heating rice, which has been selected as the sample material. The study aims to evaluate the power levels involved in using hot air in conjunction with induction heating and compare this with the use of hot air alone. Furthermore, the research seeks to assess the heating efficiency at various rice flow rates, employing both simulations of wind flow in rice conveyor pipes and practical usage tests.

The methodology employed in this research is detailed in Section 2, where the experimental setup, including the induction heating system design and the simulation models used, will be described. Section 3 will present the results and discussions, elaborating on the findings from both the simulations and the actual usage tests. This section will also include a comparative analysis of the efficiency of the heating methods under different operational conditions. Finally, Section 4 will offer a comprehensive summary of the research findings, highlighting the implications of these findings for the agricultural industry and suggesting areas for future research.

2. Materials and Methods

This section outlines the methodology adopted for the experimental study, focusing on the design and setup of the apparatus, the materials used, and the procedures followed. The experimental setup is designed to evaluate the efficiency of induction heating in combination with hot air for heating rice grains. The entire system is segmented into three major components: the induction heating circuit, the rice flow pipe, and the hot air blowing mechanism.

Induction Heating Circuit: Central to the experiment is the induction heating circuit, which is engineered to provide a variable power range from a minimum of 100W to a maximum of 2500W. This variability allows for a comprehensive analysis of the effect of different power levels on the heating process. The heart of this circuit is the

induction coil, meticulously crafted from a copper wire with a diameter of 3 mm. This coil, constituting 30 turns with a consistent 3 cm spacing between each wire, is strategically coiled around the rice flow pipe. The total inductance of the coil, calculated to be approximately 90 μ H, is determined through precise resonance matching calculations. This inductance is critical as it directly influences the efficiency and effectiveness of the induction heating process.

Rice Flow Pipe Design: The rice flow pipe is ingeniously designed to facilitate the optimal flow and heating of rice grains. It features an interior structure comprising alternating zigzag flow troughs, each extending to a length of 15 centimeters. These troughs, comprising five panels, are arranged to guide the rice flow at a 45-degree angle, a configuration determined to be most effective based on preliminary studies. The dimensions of the pipe are carefully chosen to optimize the heating process – it measures 100 cm in length, 20 cm in width, and 6 cm in thickness, and is constructed from 3 mm thick steel. This material choice not only ensures durability but also plays a vital role in the induction heating process due to its conductive properties. The upper section of the pipe is conically shaped, serving as the entry point for the rice. This section includes a specialized mechanism designed to regulate the descent of rice into the pipe, ensuring a consistent and controlled flow.

Hot Air Blowing Mechanism: The hot air system is a pivotal component of the experimental setup. It consists of a blower capable of delivering air at a speed of 16.3 m/s. This air is directed into the lower left entry of the pipe, ensuring an even distribution of hot air throughout the pipe's length. The system is calibrated to operate at three distinct air temperatures – 40°C, 60°C, and 80°C. These temperatures correspond to power settings of 1,143W, 2,352W, and 3,756W, respectively. The choice of these specific temperature and power settings allows for a thorough investigation of the impact of different levels of hot air heating on the rice grains.

Experimentation Procedure: The experimentation involves adjusting rice flow rates to 100 kg/h, 150 kg/h, and 200 kg/h. These variations are essential to evaluate the heat transfer efficiency from the hot air to the rice grains under different flow conditions. Comparative experiments are conducted to assess the temperature increments in the rice grains when heated solely by the hot air system versus a combination of hot air and induction heating. This comparative analysis is crucial to understanding the added value of induction heating in the process.

Induction Heating Power Settings: To analyze the efficacy of power transfer through induction heating, the induction heating power is set at three different levels – 146W, 228W, and 360W. These levels are chosen to represent a range of low, medium, and high-power settings, providing a comprehensive understanding of how varying levels of induction heating influence the heating process. These settings are maintained consistently across different rice flow rates to ensure a fair and accurate comparison with the temperature increments achieved through the standalone hot air system.

2.1 Induction Heating system.

Induction heating is a fascinating and efficient process used for heating conductive materials, most commonly metals. It relies on the principles of electromagnetic induction to generate heat directly within the workpiece. Unlike traditional heating methods, induction heating offers rapid, controllable, and localized heating without any physical contact between the heat source and the material being heated. The fundamental principle behind induction heating is Faraday's Law of Electromagnetic Induction,

which states that a changing magnetic field within a circuit induces a current in the circuit. Mathematically, this is expressed as:

$$(1) \quad \varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

Where ε is the induced electromotive force (EMF) in volts, N is the number of turns in the coil, and $d\Phi/dt$ is the rate of change of magnetic flux in webers per second.

In an induction heating system, an alternating current (AC) flows through a coil, producing a dynamic magnetic field around it. When a conductive material is placed within this magnetic field, the changing field induces eddy currents in the material. According to Lenz's Law, these currents flow in such a way as to create their own magnetic field, which opposes the original field. The resistance of the material to the flow of these eddy currents generates heat, which is given by Joule's Law:

$$(2) \quad P = I^2 R$$

where P is the power (heat) generated in watts, I is the induced current in amperes, and R is the resistance of the material in ohms.

The efficiency of induction heating is influenced by several factors, including the frequency of the alternating current, the properties of the material (such as permeability and resistivity), and the design of the induction coil. Higher frequencies can produce more concentrated heating and are better suited for smaller or thinner materials. The coil design also plays a critical role in determining the distribution of the magnetic field and, consequently, the heating pattern.

Induction heating has diverse applications, ranging from industrial forging and melting to domestic cooking appliances. Its ability to provide rapid, controlled, and efficient heating makes it a valuable technology in numerous fields.

2.3 Heat transfer.

The theory of heat energy transfer to grains during the hot air drying process is fundamentally based on the principles of thermodynamics and heat transfer. The primary mode of heat transfer in this process is convective heat transfer, where heat is transferred from the hot air to the grains. The basic heat transfer equation that governs this process is given by:

$$(3) \quad q = hA(T_{air} - T_{grain})$$

Where: q is the rate of heat transfer (in watts, W). h is the convective heat transfer coefficient (in watts per square meter per degree Celsius, $W/m^2 \cdot ^\circ C$). A is the surface area of the grain exposed to the hot air (in square meters, m^2). T_{air} is the temperature of the hot air (in degrees Celsius, $^\circ C$). T_{grain} is the temperature of the grains (in degrees Celsius, $^\circ C$).

This equation highlights that the rate of heat transfer (q) is directly proportional to the temperature difference between the hot air and the grains ($T_{air} - T_{grain}$), the surface area of the grains exposed to the hot air, and the convective heat transfer coefficient.

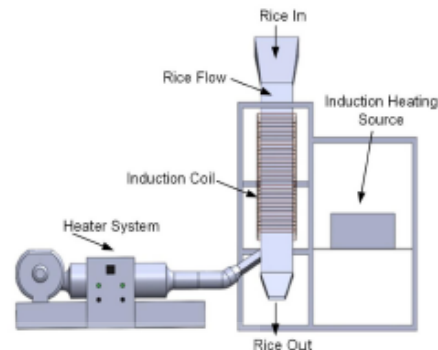


Figure 1: Schematic Representation of the Heating System Configuration

Key Aspects of the Process:

Convective Heat Transfer: Convective heat transfer is the primary mechanism through which the hot air transfers its energy to the grains. The convective heat transfer coefficient (h) is influenced by factors such as air velocity, properties of the air (like viscosity and thermal conductivity), and the configuration of the grain bed.

Temperature Gradient: The effectiveness of the drying process depends significantly on the temperature gradient between the hot air and the grains. A larger temperature difference typically results in more efficient drying.

Moisture Evaporation: As the grains absorb heat, their temperature increases, causing the moisture within them to evaporate. The energy required for this phase change comes from the heat transferred from the hot air, which is used to overcome the latent heat of vaporization of water.

Grain Properties: The thermal properties of the grains, including specific heat, thermal conductivity, and density, affect how heat is absorbed and distributed within the grain. These properties can vary with the type of grain and its initial moisture content.

2.4 Statistical Analysis.

In this research, three replicates of the experiment were carried out, and the gathered data was subjected to statistical analysis using SPSS Statistics, version 20.0. To evaluate the statistical disparities among the means of the various samples, a one-way Analysis of Variance (ANOVA) was employed, setting the threshold for statistical significance at 5%. The study focused on discerning significant differences in the dielectric properties of the tested soil samples, utilizing Fisher's Least Significant Difference (LSD) test as the criterion for significance.

3. Results and discussions

In this research, three replicates of the experiment were carried out, and the gathered data was subjected to statistical analysis using SPSS Statistics, version 20.0. To evaluate the statistical disparities among the means of the various samples, a one-way Analysis of Variance (ANOVA) was employed, setting the threshold for statistical significance at 5%. The study focused on discerning significant differences in the dielectric properties of the tested soil samples, utilizing Fisher's Least Significant Difference (LSD) test as the criterion for significance.

3.1 Simulations Result and Discussions

This research was embarked upon with the primary objective of augmenting the efficiency of power transfer to rice grains during their transit through a delivery pipe. Recognizing the potential for improvement in this domain, the study was geared towards exploring various flow patterns by altering the trough angle within the pipe. This approach was underpinned by the hypothesis that different trough angles could significantly influence the heat exposure and, consequently, the quality of the rice grains during processing.

To bring this conceptual idea to fruition, SolidWorks – a state-of-the-art simulation software known for its precision and versatility – was employed. The use of such sophisticated software was integral to the study, as it allowed for a detailed and accurate representation of the airflow dynamics within the pipe, as well as the distribution of hot air, which is a critical factor in the heating process of the rice grains.

The investigative process was structured around three distinct simulation models. Each of these models was characterized by a specific trough angle – 35 degrees, 45 degrees, and 55 degrees. This range of angles was chosen to provide a comprehensive understanding of how varying degrees of inclination could impact the heating process. To ensure consistency and reliability in the results, all models were assessed under uniform operational conditions. These conditions included a wind speed of 16.3 meters per second parameters that are representative of typical industrial settings for rice processing.

The simulation outcomes, which are visually detailed in Figures 2-4, offered insightful revelations. At a 35-degree trough angle, it was observed that the rice grains moved most rapidly from the top to the bottom of the pipe. This quick movement implied that the grains were exposed to the least amount of heat. While this might seem advantageous in preventing overheating, it also raised concerns about the grains not receiving adequate heat treatment, which is essential for certain quality parameters in rice processing.

In contrast, the simulation model with a 45-degree trough angle presented a markedly different scenario. The rice grains in this model moved more slowly compared to the 35-degree model. This reduced speed of movement meant that the grains were exposed to the hot air for a longer duration, thereby receiving more effective heat treatment. This observation was particularly noteworthy as it suggested that a moderate slowing of the grain movement could enhance the heating process without compromising the quality of the rice grains.

The model with a 55-degree trough angle offered another perspective. Here, the movement of the rice grains was the slowest among the three models, leading to the maximum heat exposure. While, theoretically, this should have been the most effective in terms of heat treatment, the reality was somewhat different. The prolonged exposure to heat at this angle resulted in damage to the grains due to overheating. This finding was critical as it highlighted the fine balance that needs to be maintained in the heating process – too little heat exposure could result in underprocessing, while too much could cause damage to the grains. From these observations, the study concluded that the 45-degree trough angle struck the most effective balance. This angle facilitated efficient heat exposure while simultaneously ensuring that the integrity and quality of the rice grains were not compromised. Such a balance is not merely a technical achievement but is of paramount importance in the context of rice processing industries. It addresses a critical need for optimizing energy use while

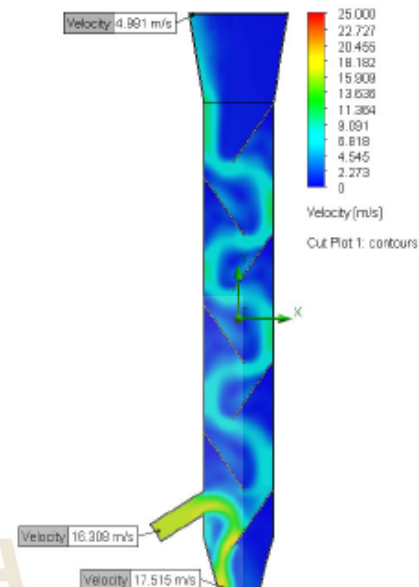


Figure 2: displays a simulation of the rice flow trough pattern set at a 35-degree angle.

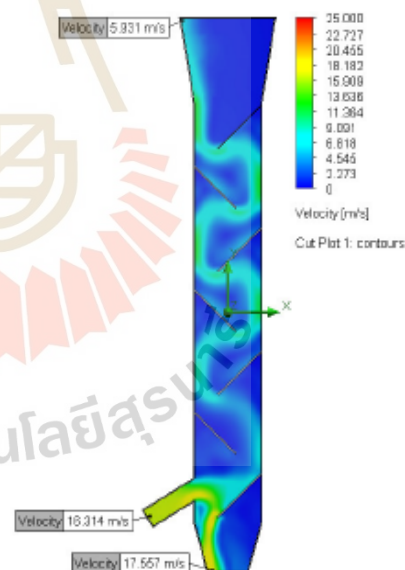


Figure 3: displays a simulation of the rice flow trough pattern set at a 45-degree angle.

maintaining, if not enhancing, the quality of the processed rice.

Furthermore, these findings have broader implications. They underscore the importance of precision in the design and operation of grain processing equipment. The study clearly demonstrates that even minor adjustments in the equipment design, such as the angle of the trough, can have significant impacts on the efficiency of the process. This insight opens up new avenues for innovation in the design of grain processing machinery, where efficiency and quality are pivotal considerations.

The comprehensive analysis of how different trough angles in a rice delivery pipe affect the efficiency of heat treatment of rice grains. The optimal angle of 45 degrees offers a practical solution that balances effective heat exposure with grain integrity, thereby enhancing the overall efficiency of the rice conveyance system. These findings are not only significant for the rice processing industry but also contribute to the broader field of agricultural processing, where efficiency and product quality are continually sought-after objectives.

3.2 Experiments Result and Discussions.

This study was primarily focused on enhancing the thermal efficiency of rice grain processing using a combination of hot air and induction heating. Set against the backdrop of varying operational conditions – including different grain flow rates and power settings – the experimental setup was meticulously designed to provide comprehensive insights. The critical findings, presented in Figures 6, 7, and 8, shed light on the interplay between power consumption and the resulting temperature increase in rice grains. These results not only offer a deeper understanding of the heating process but also suggest ways to optimize energy use in grain processing.

At a grain flow rate of 100 kg/h, the results, as depicted in Figure 6, reveal a notable contrast in heating efficiency between sole hot air usage and its combination with induction heating. Specifically, the application of 1,143W of hot air, when supplemented with 148W of induction heating, led to a temperature increase of 5.2 degrees Celsius. This enhancement was achieved with significantly lower total power consumption compared to using 2,523W of hot air alone, which only achieved a comparable temperature increase of 5 degrees Celsius. This suggests a marked efficiency improvement when incorporating induction heating, even at its lowest power setting.

Elevating the grain flow rate to 150 kg/h, as shown in Figure 7, the results followed a similar trend but with a slight reduction in the temperature increments. This indicates the influence of grain flow rate on the heating process. Even at this higher flow rate, combining hot air with induction heating remained more energy-efficient than using hot air alone. This finding underscores the importance of considering flow rates in industrial applications, as it directly impacts the heating efficiency and energy consumption.

Further increasing the grain flow rate to 200 kg/h, Figure 8 presents an intriguing scenario: The initial setting of 1,143W hot air power, complemented with 148W of induction heating, led to a temperature rise of 2.7 degrees Celsius – a notable increase from the 1.5 degrees Celsius achieved with hot air alone. The trend of enhanced efficiency at higher induction heating powers was consistent, reinforcing the argument for combining heating methods. These results also highlight the scalability of this approach in different operational settings.

The experimentation clearly demonstrates that the combination of hot air and induction heating is not just a

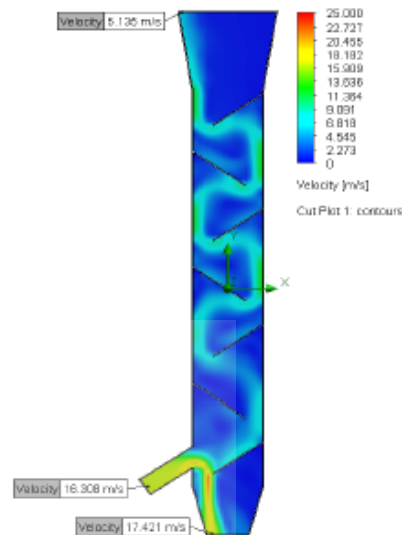


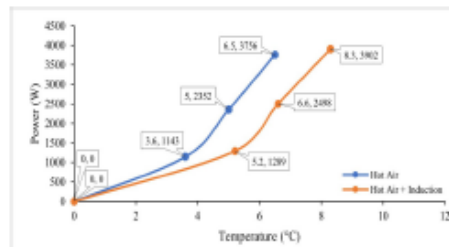
Figure 4: displays a simulation of the rice flow trough pattern set at a 55-degree angle.

viable alternative but a superior method for heating rice grains. This hybrid approach significantly reduces the total power requirement while achieving equivalent or higher temperature increases in the grains. This efficiency gain is critical, especially in industrial settings where energy costs and consumption are major considerations. The synergy between hot air and induction heating seems to produce a more uniform and effective heating process, which is crucial for maintaining grain quality. This finding could be a game-changer for the rice processing industry, potentially leading to more sustainable and cost-effective practices.

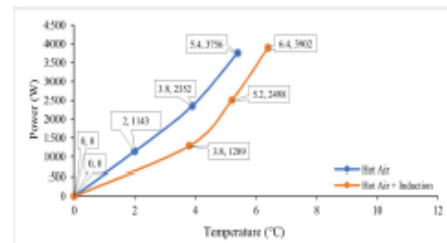
The grain flow rate emerges as a key factor influencing the heating efficiency in our experiments. As the flow rate increases, the effectiveness of the heating methods appears to fluctuate. This observation is vital for practical applications, as it suggests that optimal settings may vary based on operational throughput. Industries looking to implement these findings must consider their specific grain flow rates to achieve the best balance between energy consumption and heating efficiency. This aspect opens up avenues for further research, especially in exploring the upper limits of flow rates and their corresponding optimal heating conditions.

The implications of this study for the rice processing industry are substantial. By adopting the combination of hot air and induction heating, facilities can achieve higher efficiency in grain heating while reducing energy costs. The adaptability of this method to different grain flow rates also adds to its industrial appeal, offering a flexible solution to various operational scales.

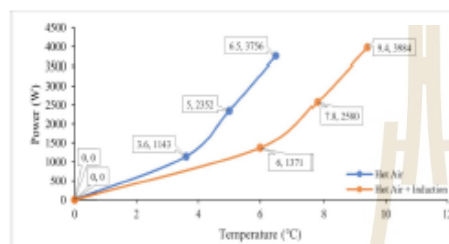
While the study provides insightful results, it is not without limitations. Future research could explore a broader range of grain types and environmental conditions to validate the universality of these findings. Additionally, long-term studies on the impact of this heating method on grain quality would be beneficial.



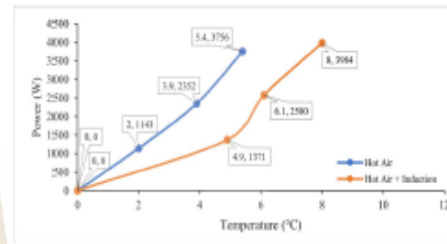
(a) depicting the scenario where 146W of power is utilized



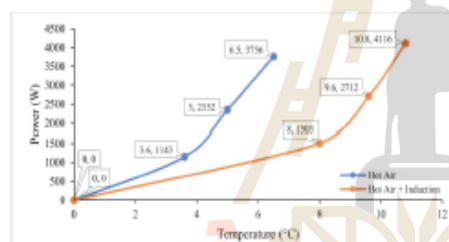
(b) showing the results at 228W of power



(c) illustrating the temperature differences when 360W of power is employed.



(b) showing the results at 228W of power



(c) illustrating the temperature differences when 360W of power is employed.

Figure 6: presents a comparative graph illustrating the variation in temperature when using hot air solely and when it is combined with induction heating at a flow rate of 100 kg/hr.

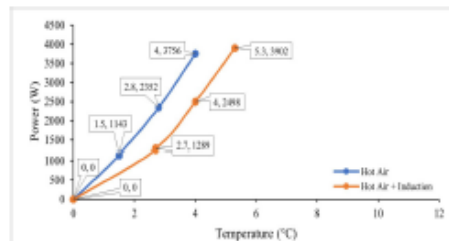
Figure 7: presents a comparative graph illustrating the variation in temperature when using hot air solely and when it is combined with induction heating at a flow rate of 150 kg/hr.

The integration of hot air and induction heating presents a promising advancement in rice grain processing, offering enhanced efficiency and energy savings. The results of this study not only contribute to a better understanding of grain heating dynamics but also pave the way for more sustainable practices in the industry. Continued exploration in this field is essential to further refine these methods and extend their application to broader contexts.

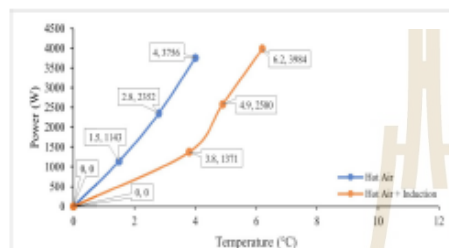
4. Conclusions:

This study conclusively demonstrates that a 45-degree zigzag rail design within a rice flow pipe significantly enhances the heating efficiency of rice grains by optimizing hot air flow and energy use. Furthermore, it establishes that combining hot air with induction heating is superior to using hot air alone for rice grain processing. This hybrid method not only achieves higher temperature increases in the grains but also reduces total power consumption,

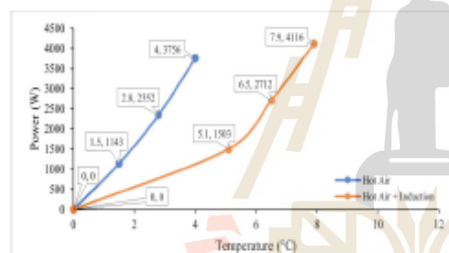
showcasing a notable improvement in energy efficiency. The research underscores the importance of adjusting operational settings, such as grain flow rates, to optimize heating efficiency and energy consumption, indicating the need for flexible system design in industrial applications. The findings mark a significant advancement in rice processing technology, offering a more sustainable, efficient, and cost-effective method that could transform industry practices. Future investigations could further explore the applicability of these methods to different grain types and assess the long-term impact on grain quality, potentially broadening the scope and impact of this research in agricultural processing technology. This study's insights into optimizing rice heating efficiency pave the way for more sustainable practices in the agricultural sector, highlighting the importance of innovative approaches to improving food processing systems.



(a) depicting the scenario where 146W of power is utilized



(b) showing the results at 228W of power



(c) illustrating the temperature differences when 360W of power is employed.

Figure 8: presents a comparative graph illustrating the variation in temperature when using hot air solely and when it is combined with induction heating at a flow rate of 200 kg/hr.

Acknowledgments

This work was supported by Suranaree University of Technology (SUT) Research and Development Fund.

Authors: Mr. Thanakrit Chalwande, E-mail: M0300975@g.sut.ac.th, School of Electronic Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand; Mr. Samroeng Santaluna, E-mail: D0400422@g.sut.ac.th, School of Electronic Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima; Asst. Prof. Dr. Samran Santaluna, E-mail: samran.sa@sut.ac.th, School of Electronic Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand; Assoc. Prof. Dr. Chanchal Thongsopa, E-mail: chan@sut.ac.th, School of Electronic Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima; Mr. Weerawat Charoensri, E-mail: D0400422@g.sut.ac.th, School of Electronic Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima,

Ms. Jarlya Pakprom, E-mail: jarlyapakprom.jp@gmail.com, School of Electronic Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima; Asst. Prof. Dr. Thanaset Thosdeekoraphat E-mail: thanaset@sut.ac.th, School of Electronic Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand; Asst. Prof. Dr. Nuchanart Santaluna, E-mail: nuchanart.fa@mutl.ac.th, Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, Thailand; Asst. Prof. Dr. Pichaya Chaipanya, E-mail: pichayac@g.swu.ac.th, Department of Electrical Engineering, Srinakharinwirot University, Nakhon Nayok, Thailand.

REFERENCES

- [1] Wu, Y., Wu, W., Han, F., Zhang, Y., Xu, Y., Intelligent Monitoring and Control of Grain Continuous Drying Process Based on Multi-parameter Corn Accumulated Temperature Model, International Conference on Smart Grid and Electrical Automation, (2017), 77-80.
- [2] da Paixão, A.A., Corêa, P.C., Baptestini, F.M., Zeymer, J.S., Bustos-Vanegas, J.D., Physical Properties of Beans of the BRSMG Majestoso Cultivar During Drying, Bioscience Journal, 36, (2020), No. 6, 1911-1918.
- [3] Zemin, X., Wenfu, W., Lijun, Y., Prediction Impact of Vacuum Drying Parameters on Rice Taste Value with Neural Network Model, International Conference on Digital Manufacturing & Automation, (2010), 95-98.
- [4] Bultum, L.E., Emire, S.A., Tufa, L.T., Physicochemical Characterization of Microwave-Stabilized Rice Bran Oil from Ethiopian Small-scale Rice-processing Plants, Frontiers in Food Science and Technology, (2022), 1-8.
- [5] Cheentam, S., Attisilwet, J., Cheentam, R., Junphum, S., Utilization and Preservation of Local Rice Varieties in Central Region, Thailand, NeuroQuantology, 20, (2022), No. 22, 488-457.
- [6] Wu, Y., Liu, Z., Gao, H., Zhang, L., Han, F., Zhang, Y., Wu, W., Wu, Z., Chen, H., Li, W., Research on Numerical Simulation of Circulated Rice Drying Process of Constant Rate, International Conference on Robots & Intelligent System, (2016), 357-362.
- [7] Muhandri, T., Subarna, Agista, A.Z., Hariyadi, P., Aminullah, Optimization of Drying Process of Corn Noodles Using Fluidized Bed Dryer, ALMA MATER Publishing House, "VASILE ALECSANDRI" University of Bacău, (2019), No. 1, 43-52.
- [8] Valentim, J.K., Bittencourt, T.M., Lima, H.J.D., Moraleco, D.D., Del Solar Velarde, J.M., Procopio, D.P., Mendes, J.P., Franzo, V.S., de Almeida, A.A., Use of Corn Distillers Dried Grain with Solubles in Broilers Feed, Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú (RIVEP), 34, (2023), No. 1, 1-10.
- [9] Toomer, O.T., Oviedo, E.O., Ali, M., Patino, D., Joseph, M., Frisko, M., Vu, T., Maharjan, P., Fallen, B., Milan, R., Current Agronomic Practices, Harvest & Post-Harvest Processing of Soybeans (Glycine max)—A Review, Agronomy, 13, (2023), No. 2, 427.
- [10] Gobana, G.M., Geleta, T.E., Characterization and Optimization of Soybean Oil from Soybean Seed (Keta and Billo 19) Variety, Innovations, (2022), No. 68, 140-159.
- [11] Elieser Tarigan, Dept. of Electrical Engineering, and PusLET, Hybrid PV-T Solar Collector using Amorphous Type of Solar Cells for Solar Dryer, International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), p. 352-356, 2020.
- [12] Yanlai, Z., Minglong, Z., Hong, Z., Zhandong, Y., Solar Drying for Agricultural Products in China, International Conference on New Technology of Agricultural, (2011), 715-719.
- [13] Mayur, P., Rahul, K., Choubey, P., Kumar, J., Influence of coil shapes on temperature distribution in Induction heating process, Materials Today: Proceedings, 72, (2023), No. 6, 3029-3035.
- [14] Philip Montgomery, D., This study is not without its limitations: Acknowledging limitations and recommending future research in applied linguistics research articles, Journal of English for Academic Purposes, 65, (2023), 101291.

- [15] Tagong, K., Phanlek, C., Jindarak, S., Ammatachaya, P., Rotary Dryer and Roaster for Fresh Chili by using Heat Energy from LPG, International Conference on Cogeneration, Small Power Plants and District Energy, (2016).
- [16] Salman, A.M., Ibrahim, I.A., Gad, H.M., Farag, T.M., Effects of Air Temperature on Combustion Characteristics of LPG Diffusion Flame, Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 1008, (2020), 128-138.
- [17] Thosdeekoraphat, T., Tanthal, K., Lhathum, K., Kotchpradit, S., Santalunai, S., Thongsopa, C., The Design of a Large-Scale Induction Heating Power Source for Organic Waste Digesters to Produce Fertilizer, Energies, 16(5), (2023), 16052123.
- [18] Srituvanont, J., Thosdeekoraphat, T., Santalunai, S., Thongsopa, C., Experiment of Induction Heating Application for Heating Multilayer Metallic Hollow Altered Cylinder, The 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), National University of Singapore, April 25-28, 2018.
- [19] Pongprakhon, N., Thongsopa, C., Santalunai, S., Thosdeekoraphat, T., Santalunai, N., Chalpanya, P., The Study of Water Reconditioning using Magnetic Field for Plant Industry, Przegląd Elektrotechniczny, 99, (2023), No. 7, 59-64.
- [20] Lee, Y.-L., Lin, C.-H., Liu, H.-D., A Novel MPPT Heating Control Strategy Applied to the Induction Heating System, Processes (MDPI), 10, (2022), No. 6, 1151.
- [21] Liu, T., Liang, S., Hu, J., Expert Control System based Hierarchical Control Strategy for Tunnel Microwave Rice Drying, European Control Conference (ECC), (2019), 3619-3624.
- [22] Srisuma, C., Santalunai, S., Thosdeekoraphat, T., Thongsopa, C., The Analysis and Design of Milk Pasteurization System by Using Radio Frequency Electric Fields, The 2017 Asia-Pacific International EMC Symposium, (2017), 158-160.
- [23] Kotchpradit, S., Thosdeekoraphat, T., Santalunai, S., Thongsopa, C., Improvement of Electric Field Focusing for Deep Hyperthermia in Breast Cancer Treatment by Using Microwave Dielectric Heating with Curved Plate Applicator.
- [24] Santalunai, S., Thongsopa, C., Thosdeekoraphat, T., The efficiency of dielectric heating by using symmetrically electric power ports on electrode plate for pest control, 2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, (2015), 1-4.
- [25] Sutacha, C., Santalunai, S., Thongsopa, C., Thosdeekoraphat, T., Penkhrua, W., Inactivation of Contaminated Fungi in Rice Grains by Dielectric Heating, Applied Sciences, 12 (2022), No. 20, 10478.
- [26] Yodrot, T., Santalunai, S., Thongsopa, C., Thosdeekoraphat, T., Santalunai, N., Measurement of Dielectric Properties in Soil Contaminated by Biodiesel-Diesel Blends Based on Radio Frequency Heating, Applied Sciences, 13 (2023), no. 3, 1248.
- [27] Rathiyomchai, K., Santalunai, S., Thosdeekoraphat, T., Thongsopa, C., Optimization of capacitor copper plate for dielectric heating to eliminate insect, Applied Mechanics and Materials, 343 (2013), 101-105.
- [28] Saeung, P., Santalunai, S., Thosdeekoraphat, T., Thongsopa, C., Improved Efficiency of Insect Pest Control System by SSPA, The 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications, (2018), 179-183.
- [29] Wasusathien, W., Santalunai, S., Thosdeekoraphat, T., Thongsopa, C., Rice Types Classification by Using Dielectric Properties Measurement with Saline Water Increasing Technique, 9th International Symposium on Electrical Insulating Materials, (2020), 433-435.
- [30] Komsing, S., Santalunai, S., Thosdeekoraphat, T., Thongsopa, C., Dielectric Property Measurement of Freshwater Fishes and Parasite Affecting Infection Opisthorchis Viverrini for Dielectric Heating Application, 9th International Symposium on Electrical Insulating Materials, (2020), 439-442.
- [31] Seehanan, T., Fhathiem, N., Santalunai, S., Krachodnok, P., Analysis of electric fields distribution by using EBG structure for dielectric heating applications, 4th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology: Exploring Innovative Solutions for Smart Society, (2018), 1-4.
- [32] Santalunai, N., Santalunai, S., Meesawad, P., Thongsopa, C., Santalunai, S., Plus-Shape of Mushroom-Like EBG with Square Microstrip Emitter to Expand the Working Space in Dielectric Heating Applications, International Journal of Intelligent Engineering and Systems, 14 (2021), No. 3, 189-200.
- [33] S. Komsing, N. Fhathiem, A. Innok and A. Ruengwaree, "Design of Wide-Band Dipole Antenna for Digital TV Broadcasting Application," 2018 International Electrical Engineering Congress (IEECON), Krabi, Thailand, 2018, pp. 1-4.
- [34] N. Fhathiem, W. Naktong, A. Innok and A. Ruengwaree, "High-gain and broadband antenna using microstrip combined with the waveguide antenna," 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Phuket, Thailand, 2017, pp. 1-2.
- [35] Lucla, O., Maussion, P., Dede, E.J., Burdilo, J.M., Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 61, (2014), No. 5, 2509-2520.
- [36] Liu, C., Han, J., Lu, R., Liu, J., Ma, X., Numerical Study of Ti6Al4V Alloy Tube Heated by Super-Frequency Induction Heating, Materials (MDPI), 16, (2023), No. 11, 3938.
- [37] Bhagya Raj, G.V.S., Dash, K.K., Heat transfer analysis of convective and microwave drying of dragon fruit, Food Process Engineering, 44, (2021), No. 9, 13775.

ประวัติผู้เขียน

นายธนภุต ชัยวันดี เกิดเมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ.2537 ที่อำเภอเมือง จังหวัดสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาต้นที่โรงเรียนอู่ทอง อำเภออู่ทอง จังหวัดสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) แผนกวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์ สาขาอิเล็กทรอนิกส์ จากวิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) แผนกวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์ สาขาอิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรม จากวิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (คอบ.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จังหวัดกรุงเทพมหานคร จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

