

การพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วย
อินฟราเรด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2565

DEVELOPMENT OF AN INFRARED-ASSISTED PNEUMATIC PADDY
DRYING SYSTEM



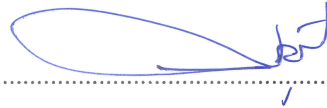
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical and Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2022

การพัฒนาระบบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วย

อินฟราเรด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.ศุภกิตต์ สายสุนทร)

ประธานกรรมการ




(ผศ. ดร.กระวี ตรีอำรรค)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก)



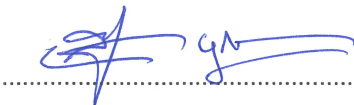
(ผศ. ดร.เทวรัตน์ ตรีอำรรค)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)



(ผศ. ดร.พูนศักดิ์ จุลยเสน)

กรรมการ



(อ. ดร.สามารถ บุญอาจ)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

บุญทริกา ศิลา : การพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วย
อินฟราเรด (DEVELOPMENT OF AN INFRARED-ASSISTED PNEUMATIC PADDY
DRYING SYSTEM) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำรรค, 174 หน้า.

คำสำคัญ : การอบแห้ง/ข้าวเปลือก/อินฟราเรด

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาต้นแบบเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยรังสีอินฟราเรดในการอบแห้งข้าวเปลือก ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดเสริมในระบบอบแห้งเพื่อลดความสิ้นเปลืองพลังงานในระบบ หลักการอบแห้งอาศัยอากาศอุณหภูมิสูงลำเลียงเข้าสู่หอบแห้งซึ่งภายในมีหลอดอินฟราเรดติดตั้งอยู่ตรงกลางหอบเพื่อเป็นแหล่งให้ความร้อนแหล่งที่สอง โดยข้าวเปลือกในถังเก็บถูกลำเลียงไปยังหอบแห้งพร้อมกับลมร้อนและสัมผัสกับความร้อนที่แผ่ออกมาจากหลอดอินฟราเรดเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนร่วมกัน โดยทำการศึกษาเงื่อนไขการอบแห้งข้าวเปลือก 5 เงื่อนไข คือ 1) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อน 60°C 2) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อน 60°C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 50 W 3) การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรด 850 W 4) การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรด 80°C และ 5) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อน 60°C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 850 W โดยกำหนดให้ความเร็วลมและอัตราการป้อนข้าวเปลือกคงที่ ที่ 6 m/s และ 8.4 kg/min ตามลำดับ ทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวตอกมะลิ 105 ความชื้นเริ่มต้น 23% (wb) ครั้งละ 20 kg จนถึงความชื้นสุดท้าย 14% (wb) ผลการทดสอบพบว่าในแง่ของพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงความชื้นการอบแห้งพลังงานความร้อนร่วมสามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งและลดเวลาการอบแห้ง ในแง่ของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) พบว่าการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 80°C มีค่า SEC ต่ำสุดที่เท่ากับ 13.236 MJ/kg_{water} และในส่วนของคุณภาพข้าวพบว่าการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W มีค่า HRY(%) และดัชนีความขาว (Whiteness index, WI) สูงสุด

สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา.....บุญทริกา ศิลา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....ดร.กระวี ตรีอำรรค
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

BOONTARIKA SILA : DEVELOPMENT OF AN INFRARED-ASSISTED PNEUMATIC PADDY DRYING SYSTEM. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KRAWEE TREEAMNUK, D.Eng., 174 PP.

Keyword : DRYING/PADDY/INFRARED

The objective of this research was to develop a prototype of an infrared-assisted pneumatic paddy drying system and investigate the feasibility of adding infrared radiation into the drying system to reduce energy consumption. The principle of drying relies on high-temperature air entering a drying chamber, which contains centrally installed infrared tubes as a secondary heat source. The paddy rice in the storage bin is conveyed to the drying chamber, resulting in simultaneous heat exchange. The study investigates five drying conditions : 1) drying with hot air at 60°C, 2) drying with hot air at 60°C combined with 50 Watts of infrared radiation, 3) drying with 850 Watts of infrared radiation, 4) drying with infrared radiation at 80°C, and 5) drying with hot air at 60°C combined with 850 Watts of infrared radiation. The air velocity and paddy rice feeding rate were kept constant at 6 m/s and 8.4 kg/min, respectively. The experiments were conducted on 20 kg per batch of Khao Dok Mali 105 paddy rice, initial moisture content of 23% (wb) drying until reaching a final moisture content of 14% (wb) The results showed that, the combined heat drying could increase the drying rate and reduce the drying time. Regarding specific energy consumption (SEC), the experiment with hot air at 80°C achieved the lowest SEC value of 13.236 MJ/kg_{water}. In terms of rice quality, drying with 850 watts of infrared radiation resulted in the highest values of head rice yield (HRY%) and whiteness index (WI).

School of Agricultural Engineering

Academic Year 2022

Student's Signature... Boontarika Sila.....

Advisor's Signature... Krawee Treeamnuk.....

Co-Advisor's Signature... Tawarat Treeamnuk.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำและช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้มอบโอกาสทางการศึกษา และให้ความรู้ทางวิชาการ คำปรึกษาที่มีประโยชน์อย่างยิ่ง อีกทั้งยังสนับสนุนเงินทุนสำหรับการทำงานวิจัย ต่อยอดทำงานให้สำเร็จลุล่วงได้ในครั้งนี้ ตลอดจนให้คำแนะนำสำหรับการเขียนและตรวจสอบบทความทางวิชาการและรวมไปถึงวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้มอบความรู้ คำแนะนำและชี้แนะแนวคิดต่างๆของงานวิจัย ทั้งรวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ทุนสนับสนุนในการศึกษาระดับมหาบัณฑิต และให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่สำหรับงานวิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ท้ายนี้ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับผู้วิจัยตลอดมา และขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาที่ส่งเสริมการศึกษา และให้กำลังใจมาโดยตลอด อีกทั้งขอขอบคุณรุ่นพี่รุ่นน้องและเพื่อนสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจ ความช่วยเหลือและคำปรึกษาแก่ผู้วิจัยตลอดการทำงานวิจัย

บุญชริกา ศีลา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ต

บทที่

1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ข้าว.....	4
2.1.1 การพัฒนาดอกข้าวไปเป็นเมล็ด.....	4
2.1.2 โครงสร้างและส่วนประกอบภายในเมล็ดข้าว.....	5
2.2 การอบแห้ง.....	7
2.2.1 ความสำคัญของการอบแห้ง.....	7
2.2.2 อัตราการอบแห้ง.....	7
2.3 ปริมาณความชื้นในเนื้อวัสดุ.....	8
2.3.1 ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basic).....	8
2.3.2 ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basic).....	9
2.3.3 การแปลงความชื้นมาตรฐานเปียกไปเป็นมาตรฐานแห้ง.....	9
2.3.4 การแปลงความชื้นมาตรฐานแห้งไปเป็นมาตรฐานเปียก.....	9

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือก.....	10
2.4.1	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบบรรจุกระสอบ.....	10
2.4.2	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบกระบะ.....	11
2.4.3	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบถังหมุนเวียน.....	11
2.4.4	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบคอลัมน์.....	12
2.4.5	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบเมล็ดไหลคลุกเคล้า.....	14
2.4.6	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบโรตารี.....	15
2.4.7	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไดซ์เบด.....	16
2.4.8	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบสเปาเต็ดเบด.....	19
2.4.9	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบพาหะลม.....	21
2.4.10	การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด.....	24
2.5	การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง.....	30
2.5.1	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง.....	30
2.5.2	ประสิทธิภาพของการอบแห้ง.....	30
2.6	การตรวจสอบคุณภาพของการขัดสี.....	31
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	33
3.1	ตัวอย่างวัสดุอบแห้ง.....	33
3.1.1	ข้าวเปลือก.....	33
3.1.2	ขั้นตอนการเตรียมข้าวเปลือกก่อนการอบแห้ง.....	34
3.2	เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรดที่พัฒนาขึ้น...36	
3.2.1	ส่วนประกอบของเครื่อง.....	36
3.2.2	หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรด.....	37
3.3	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวัดค่าในการทดลอง.....	40
3.3.1	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 AT.....	40

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.2	เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ K-Type Thermocouple และ MAX6675 Module.....	41
3.3.3	เซ็นเซอร์ DHT22 (AM2302).....	42
3.3.4	เครื่องวัดความเร็วลมแบบดิจิทัล (Anemometer AHJ-503).....	43
3.3.5	มิเตอร์ไฟฟ้า.....	43
3.3.6	เครื่องวัดความชื้น.....	44
3.3.7	เครื่องแยกเมล็ดข้าวหัก (ตะแกรงกลมยาว).....	44
3.3.8	เครื่องสีข้าวและขัดขาว.....	45
3.4	การฝังข้าวเปลือกให้แห้งเพื่อใช้เป็นชุดควบคุมคุณภาพ.....	45
3.5	ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าความชื้น.....	46
3.6	การทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือก.....	47
3.5.1	การทดสอบหาอัตราการป้อน.....	47
3.5.2	การทดสอบเพื่อหาอุณหภูมิอบแห้งที่เหมาะสม.....	48
3.5.3	การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีการอบแห้งที่แตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบแห้ง.....	49
3.7	การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง.....	51
3.7.1	อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR).....	51
3.7.2	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC).....	52
3.7.3	การทดสอบคุณภาพข้าว (Quality of rice).....	52
3.8	สถานที่ทำการทดลอง.....	55
3.9	ระยะเวลาทำการทดลอง.....	55
4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	56
4.1	ผลการทดสอบหาอัตราการป้อนที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดรอบพัดลมและมอเตอร์ป้อนในการทดลองให้คงที่.....	56

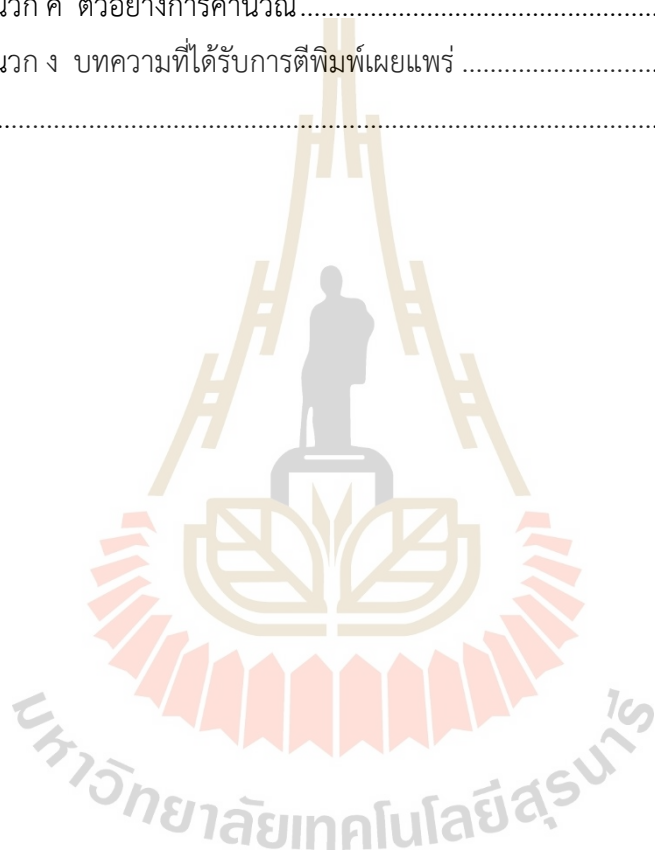
สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2	ผลการทดสอบเพื่อหาเงื่อนไขการทดสอบที่เหมาะสมที่ควบคุมให้อุณหภูมิข้าวเปลือก ขาออกไม่เกิน 45°C.....	58
4.2.1	การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว.....	58
4.2.2	การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด.....	59
4.2.3	การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้รังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว.....	60
4.3	ผลการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีการอบแห้งที่แตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพการอบแห้ง.....	61
4.3.1	ผลของอุณหภูมิภายในถังเก็บ และอุณหภูมิหอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขการ ทดลอง	61
4.3.2	ผลการศึกษาพฤติกรรมการอบแห้ง.....	63
4.4	การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง.....	65
4.4.1	อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR).....	65
4.4.2	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC).....	69
4.4.3	การทดสอบคุณภาพข้าว.....	72
5	บทสรุป	77
5.1	สรุปผลงานวิจัย.....	77
5.1.1	พฤติกรรมเปลี่ยนแปลงความชื้น.....	77
5.1.2	อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR).....	77
5.1.3	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC).....	77
5.1.4	การทดสอบคุณภาพข้าว.....	78
5.1.5	การประเมินสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้น... 78	78
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	78
	รายการอ้างอิง.....	80
	ภาคผนวก.....	89

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก ตารางผลการทดลอง.....	89
ภาคผนวก ข ผลการทดลองหาเปอร์เซ็นต์ข้าวตันของข้าวเปลือก.....	130
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณ.....	133
ภาคผนวก ง บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	140
ประวัติผู้เขียน.....	174



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	ผลการทดสอบเบื้องต้นในการหาความถี่โบลเวอร์และมอเตอร์ป้อนที่เหมาะสม57
4.2	ผลการวัดความเร็วลมและอัตราการป้อนที่ความถี่โบลเวอร์และมอเตอร์ป้อนที่เหมาะสม ที่หาได้จากจากตารางที่ 4.157
4.3	การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR)68
4.4	การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC)71
4.5	ปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น (Head rice yield, HRY)74
4.6	ดัชนีความขาว (Whiteness index, WI)76
ก.1	ผลของการเปรียบเทียบอุณหภูมิในหอบแห้งและอุณหภูมิถึงเก็บข้าว ณ เวลาใดๆ ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 60 65 และ 70 °C90
ก.2	ผลของการเปรียบเทียบอุณหภูมิในหอบแห้งและอุณหภูมิถึงเก็บข้าว ณ เวลาใดๆ ที่ การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิการอบแห้ง 60 ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 50 และ 60 W 92
ก.3	ผลของการเปรียบเทียบอุณหภูมิในหอบแห้งและอุณหภูมิถึงเก็บข้าว ณ เวลาใดๆ ที่การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้รังสีอินฟราเรด 600 700 และ 850 W93
ก.4	ผลของการเปรียบเทียบอุณหภูมิในหอบแห้งและอุณหภูมิถึงเก็บข้าว ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C95
ก.5	ผลของการเปรียบเทียบอุณหภูมิในหอบแห้งและอุณหภูมิถึงเก็บข้าว ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน 80°C97
ก.6	ผลของการเปรียบเทียบอุณหภูมิในหอบแห้งและอุณหภูมิถึงเก็บข้าว ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C + Infrared 50 W98
ก.7	ผลของการเปรียบเทียบอุณหภูมิในหอบแห้งและอุณหภูมิถึงเก็บข้าว ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วย Infrared 850 W100
ก.8	ผลของการเปรียบเทียบอุณหภูมิในหอบแห้งและอุณหภูมิถึงเก็บข้าว ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C + Infrared 850 W101

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.9 การทดลองซ้ำที่ 1 : ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C.....	103
ก.10 การทดลองซ้ำที่ 2 : ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C.....	103
ก.11 การทดลองซ้ำที่ 3 : ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C.....	106
ก.12 การทดลองซ้ำที่ 1 : ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน 80°C.....	108
ก.13 การทดลองซ้ำที่ 2 : ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน 80°C.....	109
ก.14 การทดลองซ้ำที่ 3 : ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน 80°C.....	111
ก.15 การทดลองซ้ำที่ 1 : ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C + IR 50 W.....	112
ก.16 การทดลองซ้ำที่ 2 : ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C + IR 50 W.....	114
ก.17 การทดลองซ้ำที่ 3 : ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C + IR 50 W.....	115
ก.18 การทดลองซ้ำที่ 1 : ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด IR 850 W.....	117
ก.19 การทดลองซ้ำที่ 2 : ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด IR 850 W.....	118
ก.20 การทดลองซ้ำที่ 3 : ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด IR 850 W.....	120
ก.21 การทดลองซ้ำที่ 1 : ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C + IR 850 W.....	121

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.22 การทดลองซ้ำที่ 2 : ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C + IR 850 W.....	123
ก.23 การทดลองซ้ำที่ 3 : ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C + IR 850 W.....	124
ก.24 บันทึกผลการใช้พลังงานรวมทั้งหมดของระบบ (kW-h).....	126
ก.25 บันทึกผลการใช้พลังงานรวมทั้งหมดของระบบ (MJ)	127
ก.26 บันทึกผลการคำนวณค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะ (SEC)	128
ก.27 ผลการคำนวณอัตราการอบแห้ง (Drying rate).....	129
ข.1 ผลค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตั้น และดัชนีความขาวข้าวหลังการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C	131
ข.2 ผลค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตั้น และดัชนีความขาวข้าวหลังการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับอินฟราเรด 50 W	131
ข.3 ผลค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตั้น และดัชนีความขาวข้าวหลังการอบแห้งด้วยลมร้อน 80°C.....	131
ข.4 ผลค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตั้น และดัชนีความขาวข้าวหลังการอบแห้ง ด้วยรังสีอินฟราเรด 850 W.....	132
ข.5 ผลค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตั้น และดัชนีความขาวข้าวหลังการอบแห้ง ด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับอินฟราเรด 850 W.....	132
ข.6 ผลค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตั้น และดัชนีความขาวของข้าวตัวอย่างควบคุม	132
ค.1 การทดลองซ้ำที่ 1: ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C.....	134
ค.2 ผลการคำนวณอัตราการอบแห้ง (Drying rate) ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C.....	135
ค.3 บันทึกผลการใช้พลังงานรวมทั้งหมดของระบบ (kW-h).....	136
ค.4 บันทึกผลการใช้พลังงานรวมทั้งหมดของระบบ (MJ)	137
ค.5 บันทึกผลการคำนวณค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะ (SEC)	138
ค.6 ผลค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตั้น และดัชนีความขาวข้าวหลังการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C.....	139

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การพัฒนาของดอกข้าวเป็นเมล็ด..... 5
2.2	ส่วนประกอบและโครงสร้างเมล็ดข้าว 6
2.3	แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นในวัสดุในกระบวนการอบแห้ง 8
2.4	เครื่องลดความชื้นแบบข้าวเปลือกบรรจุในกระสอบ..... 10
2.5	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบกระเบะ 11
2.6	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบถ้อนเวียน (Circulating type dryer)..... 12
2.7	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบคอล์มน์ชนิดข้าวเปลือกไม่ไหลคลุกเคล้า..... 13
2.8	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบคอล์มน์ชนิดข้าวเปลือกมีการไหลคลุกเคล้า 13
2.9	เครื่องลดความชื้นเมล็ดพืชแบบเมล็ดไหลคลุกเคล้า LSU (Louisiana State University)... 14
2.10	เครื่องลดความชื้นแบบฟลูอิดไดซ์-เบด (Fluidized bed drying)..... 19
2.11	เครื่องลดความชื้นเมล็ดพืชแบบสเปาต์เตดเบด (Spouted Bed) 21
2.12	เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic dryer) 22
2.13	สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและช่วงรังสีอินฟราเรด 25
3.1	ตัวอย่างเมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่ใช้ทดลองการอบแห้ง 33
3.2	ขั้นตอนการหาความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลอง..... 35
3.3	ขั้นตอนการเติมน้ำเพื่อเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกก่อนนำมาทดลอง 35
3.4	แผนภาพระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรด..... 37
3.5	เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรดที่พัฒนาขึ้น 38
3.6.A	อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ควบคุมพัดลมความดันสูง 38
3.6.B	พัดลมความดันสูง (Blower)..... 38
3.6.C	อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ควบคุมมอเตอร์..... 38
3.6.D	มอเตอร์ขับเคลื่อนป้อน (Feeding motor)..... 38
3.7.A	ถังเก็บข้าวขนาด 0.40 x 0.50 x 0.80 m ³ 39
3.7.B	สกรูลำเลียงข้าว (Feeder) ยาว 1 เมตร 39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8.A เครื่องควบคุมอุณหภูมิฮีตเตอร์ (Temperature control).....	39
3.8.B ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric heater) ขนาด 3 kW	39
3.9 ตู้ควบคุมการทำงานของเครื่องอบแห้ง	39
3.10.A สวิตช์ควบคุมกระแสไฟฟ้า (Dimmer Switch)	40
3.10.B ดิจิตอลแอมป์มิเตอร์โวลต์มิเตอร์ (Peacefair PZEM-021 AC)	40
3.10.C หอบแห้งที่ทำจากท่ออะคริลิก และ หลอดอินฟราเรดชนิดควอทซ์ขนาด 1 kW	40
3.11 บอร์ด Arduino Mega 2560 AT	40
3.12 K-Type Thermocouple and MAX6675 Module	41
3.13 ส่วนประกอบของ MAX6675 Module	41
3.14 ส่วนประกอบของ เซ็นเซอร์ DHT22 (AM2302)	42
3.15 ตู้ควบคุมการต่อวงจรเซ็นเซอร์วัดค่าเข้ากับบอร์ด (Arduino).....	42
3.16 เครื่องวัดความเร็วลมแบบดิจิทัล (Anemometer AHJ-503).....	43
3.17 มิเตอร์ไฟฟ้า 1 Phase ยี่ห้อ MITSUBISHI ELECTRIC รุ่น MF-37E 5(15)A	43
3.18 เครื่องวัดความชื้น Model : Kett C- 600	44
3.19 เครื่องคัดแยกเมล็ดข้าวหัก (Cylinder Separator).....	44
3.20 เครื่องสีข้าวและขัดขาว ยี่ห้อ MARTEC รุ่น 10.....	45
3.21 การผึ่งข้าวเปลือกเพื่อใช้เป็นชุดควบคุม.....	46
3.22 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven).....	47
3.23 ชั่งตัวอย่างข้าว 1 kg.....	53
3.24 การสีข้าวด้วยเครื่องสีข้าวและขัดขาว ยี่ห้อ MARTEC รุ่น 10.....	53
3.25 การแยกเมล็ดข้าวหักเครื่องคัดแยกข้าวหัก (Cylinder Separator).....	54
3.26 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ปริมาณข้าวตัน (%HRY).....	54
3.27 วัดค่าดัชนีความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้น.....	55
4.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิในหอบแห้งและอุณหภูมิถึงเก็บข้าว ณ เวลาใดๆ ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 60 65 และ 70°C	59
4.2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิในหอบแห้งและอุณหภูมิถึงเก็บข้าว ณ เวลาใดๆ ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 60°C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 50 และ 60 W.....	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 การเปรียบเทียบอุณหภูมิในหอบแห้งและอุณหภูมิถึงเก็บข้าว ณ เวลาใดๆ โดยใช้อินฟราเรดในการอบแห้งที่ 600 700 และ 850 W ตามลำดับ.....	61
4.4 ผลของอุณหภูมิหอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง	62
4.5 ผลของอุณหภูมิภายในถังเก็บ และอุณหภูมิมอเตอร์ในถังเก็บในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง	63
4.6 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกที่ทดลองอบแห้งด้วยวิธีการทดลองที่แตกต่างกัน ..	65
4.7 ผลของอัตราการอบแห้งข้าวเปลือก ณ เวลาต่างๆ ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง.....	66
4.8 ผลของอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกเฉลี่ยในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง.....	67
4.9 ผลของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ณ เวลาต่างๆ ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง	70
4.10 ผลของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง	71
4.11 ผลของปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน (Head rice yield, HRY) ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง	73
4.12 ค่าดัชนีความขาวของข้าวหลังการอบแห้งด้วยเงื่อนไขการอบแห้งที่แตกต่างกัน	75

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

M_d	=	ความชื้นมาตรฐานแห้ง (% d.b)
M_w	=	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b)
W	=	มวลรวมทั้งหมดของวัสดุ (kg)
W_d	=	มวลแห้งของวัสดุ ($kg_{dry,solid}$)
W_w	=	มวลน้ำในวัสดุ (kg_{water})
T	=	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
η_{dry}	=	ประสิทธิภาพการอบแห้ง (%)
DR	=	อัตราการอบแห้ง (kg/h หรือ % db/h)
SEC	=	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (kJ/kg_{water})
E	=	พลังงานรวมทั้งหมดที่ใช้ในระบบอบแห้ง (kJ)
W_i	=	น้ำหนักวัสดุก่อนอบแห้ง (kg)
W_f	=	น้ำหนักวัสดุหลังอบแห้ง (kg)
M_i	=	ความชื้นวัสดุก่อนอบแห้ง (%w.b)
M_f	=	ความชื้นวัสดุหลังอบแห้ง (% d.b)
T	=	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ข้าว นับเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ทั้งในด้านการบริโภคและการเป็นสินค้าเกษตรส่งออกของประเทศ อีกทั้งยังมีความสำคัญต่อสถานะเศรษฐกิจไทยเนื่องจากเป็นพืชหลักที่เกษตรกรส่วนใหญ่ของประเทศเพาะปลูก มีพื้นที่เพาะปลูกครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศ ในปีการผลิต 2563 ไทยเป็นผู้ส่งออกข้าวอันดับ 3 ของโลก โดยมีปริมาณการส่งออกถึง 5.72 ล้านตัน รองจากอินเดีย และเวียดนาม (สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์, 2563) ซึ่งสร้างเม็ดเงินเข้าสู่ประเทศไทยเป็นจำนวนมาก ในการรักษาคุณภาพข้าวให้ได้ตามมาตรฐานนั้นเป็นสิ่งที่สำคัญ อย่างไรก็ตาม ชวนาไทยยังคงประสบกับปัญหาคุณภาพข้าวที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐานหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งปัจจัยหลักที่ทำให้ข้าวมีคุณภาพต่ำลงนั้นคือ ความชื้นที่สะสมในข้าวโดยข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวมีความชื้นสูงถึง 24 – 28% (wb) (Padua, 1985) ความชื้นข้าวที่สูงนั้นส่งผลให้เกิดการเจริญเติบโตของเชื้อราได้ (Pei et al., 2021) ส่งผลให้ผลผลิตข้าวที่ได้เกิดการเน่าเสียระหว่างการเก็บรักษา อีกทั้งความชื้นที่สูงยังมีผลกระทบต่อการแตกหักที่เด่นชัดระหว่างการสี เนื่องจากเมล็ดข้าวดูดซับความชื้นอย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดการอ่อนตัวลงและเกิดรอยแตกเป็นผลให้ร้อยละข้าวตัน (Head rice yield, HRY) หลังการสีลดลงอีกด้วย (Banaszek and Siebenmorgen, 1989) ซึ่งปัญหาความชื้นสูงในข้าว นั้นทำให้ข้าวเปลือกไม่มีคุณภาพที่ดีพอที่จะขายได้ราคาตามมาตรฐานส่งผลให้เกษตรกรขายข้าวเปลือกได้ในราคาต่ำและมีผลผลิตคุณภาพสูงออกสู่ตลาดน้อยลง ดังนั้นการควบคุมความชื้นข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวจึงเป็นสิ่งสำคัญ ความชื้นที่เหมาะสมในการเก็บรักษาเมล็ดข้าวเปลือกคือ 14% (wb) จะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาให้นานขึ้นและคุณภาพการสีสูงขึ้น (Kunze and Calderwood, 1980 และ สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว, 2562)

แนวคิดการลดความชื้นข้าวเปลือกจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการอบแห้งเข้ามาทดแทนการลดความชื้นด้วยการตากข้าวบนลาน วิธีดังกล่าวนี้เป็นวิธีดั้งเดิมซึ่งมีข้อดีคืออาศัยพลังงานแสงอาทิตย์ในการช่วยลดความชื้นในข้าว ทำให้ไม่มีค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน แต่พบว่าข้อเสียคือต้องใช้พื้นที่จำนวนมากในการตากข้าว ประกอบกับต้อง

คำนึงถึงสภาพอากาศซึ่งบางครั้งไม่มีแสงอาทิตย์ตลอดช่วงเวลาที่ต้องการตากข้าว เครื่องอบแห้งมีข้อได้เปรียบกว่าวิธีการลดความชื้นแบบดั้งเดิมคือ มีความสะดวก รวดเร็ว สามารถลดความชื้นข้าวหลังการเก็บเกี่ยวได้ทันท่วงที เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่นิยมใช้งานในปัจจุบันคือเครื่องอบแห้งแบบใช้ลมร้อนในการอบแห้งเนื่องจากมีความสะดวกในการทำงาน เครื่องอบแห้งชนิดนี้ได้แก่ เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดไหลคลุกเคล้า หรือ LSU (Louisiana State University) อุณหภูมิลมร้อนสามารถใช้ได้สูงถึง 60°C (พิรสิทธิ์ ทวยนาค, 2557) เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์-เบด สามารถใช้อุณหภูมิอบแห้งได้สูงถึง 140 - 150°C เหมาะสำหรับอบวัสดุที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงมากกว่า 29.9 % (db) สามารถลดความชื้นได้ต่ำสุดถึง 23% (db) (Soponronnarit, 1999) แต่มีข้อจำกัดคือการลดความชื้นที่รวดเร็วในช่วงแรกอาจทำให้ข้าวเกิดความเครียดและเกิดการแตกร้าว ต้องอาศัยการอบในที่อับอากาศ (tempering) เข้ามาช่วย (Soponronnarit et al., 1995) และเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมซึ่งอาศัยลมร้อนใช้อุณหภูมิสูงถึง 80°C (จิรารัตน์ จอกกิว, 2559) ซึ่งหลักการทำงานคือข้าวที่มีความชื้นสูงถูกป้อนเข้ามาในห้องอบแห้งและถูกลมที่เป่าเข้ามาในห้องอบแห้งพัดลอยขึ้นไปพร้อมกัน ทั้งนี้ ปัญหาหลักของการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนคือการใช้พลังงานในการอบแห้งที่สูง (Mihindukulasuriya and Jayasuriya, 2013) จากการให้ความร้อนกับอากาศอบแห้ง ดังนั้นจึงต้องมีการประยุกต์ใช้พลังงานจากแหล่งอื่นๆ เข้ามาใช้ร่วมกันเพื่อลดการใช้พลังงานของอากาศอบแห้งและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอบแห้งให้สูงขึ้น

รังสีอินฟราเรดเป็นทางเลือกหนึ่งของการใช้พลังงานร่วมในระบบอบแห้ง เนื่องจากมีคุณสมบัติสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อวัสดุได้โดยตรงโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง จึงมีการสูญเสียพลังงานให้กับสิ่งแวดล้อมน้อยมาก ส่งผลให้เกิดการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า (Ginzburg, 1969; Sandu, 1986; Ratti and Mujumdar, 1995) และพบว่าการใช้รังสีอินฟราเรดในการอบแห้งสามารถลดการใช้เวลาในการอบแห้งลดลงเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน (Abe and Afzal, 1997) มีการใช้พลังงานจากรังสีอินฟราเรดในการอบแห้งวัสดุหลายชนิดพบว่า วัสดุที่ผ่านการอบแห้งมีคุณภาพที่สูงเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน (Niibori and Motoi, 1988) ทั้งนี้จากข้อดีดังกล่าวจึงมีการประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับการอบแห้งหลายประเภท เช่น มีการพัฒนาเทคนิคการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น (นเรศ มีโส, 2555) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยรังสีอินฟราเรด ลมร้อนและการเทมเปอร์ริง (จักรมาส เลหาวิช, 2559)

เพื่อเป็นการพัฒนาการอบแห้งแบบพาหะลมด้วยอากาศร้อนให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาต้นแบบระบบอบแห้งแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยรังสี

อินฟราเรดในการอบแห้งข้าวเปลือก และทำการประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องที่พัฒนาขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องอบแห้งต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมพลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรด

1.2.2 เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้น

1.2.3 เพื่อประเมินสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เก็บเกี่ยวจากอำเภอลำปลายมาศ จังหวัดบุรีรัมย์ ช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2564

1.3.2 แหล่งพลังงานความร้อนที่ใช้คือพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีของฮีตเตอร์อินฟราเรดไฟฟ้าและฮีตเตอร์ไฟฟ้าสำหรับทำความร้อนให้อากาศอบแห้งที่ใช้ในระบบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ระบบต้นแบบการอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมพลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรด

1.4.2 ได้ทราบถึงสมรรถนะของระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาต่อไป

1.4.3 ได้ประยุกต์ใช้วิธีการแบบใหม่ในการอบแห้งข้าวเปลือกเพื่อช่วยแก้ปัญหาด้านการลดความชื้นของพืชผลทางการเกษตร

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้าว

ข้าวเป็นพืชสายพันธุ์เดียวกับหญ้า โดยพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2525 ให้ความหมายของคำว่าข้าวไว้ดังนี้ คือ ชื่อไม้ล้มลุกหลายชนิดหลายสกุลในวงศ์หญ้า (สำนักงานปลัดกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2564) ในบรรดาข้าวที่ปลูกกว่า 40,000 สายพันธุ์ทั่วโลก มีเพียงสองสายพันธุ์หลักเท่านั้นที่ปลูกกันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ *Oryza sativa* หรือข้าวเอเชีย และ *Oryza glaberrima* หรือข้าวแอฟริกา (Ricepedia, 2018) ซึ่งมีหลายสายพันธุ์โดยจุดเริ่มต้นของการเพาะปลูกข้าวของมนุษย์ นักโบราณคดีพบหลักฐานว่า ข้าวป่า อันเป็นพืชพันธุ์ในธรรมชาติได้พัฒนาไปเป็นข้าวปลูกในบริเวณลุ่มน้ำเหลืองและลุ่มน้ำแยงซีเกียง จึงสันนิษฐานว่าข้าวป่าและข้าวปลูกปรากฏขึ้นมาประมาณ 10,000 ปีมาแล้ว (Gnanamanickam, 2009) และได้รับความนิยมในการบริโภคมาจนถึงปัจจุบัน โดยในประเทศไทยข้าวจัดเป็นอาหารประจำชาติที่มีประวัติยาวนานมาตั้งแต่สมัยพ่อขุนรามคำแหง จนเมื่อถึงรัชกาลที่ 5 ทรงโปรดให้มีการประกวดพันธุ์ข้าวขึ้นเป็นครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2450 ที่ทุ่งหลวง คลองรังสิต เพื่อเป็นการอุดหนุนบำรุงและหาพันธุ์ข้าวที่ดีมาไว้ทำพันธุ์ ซึ่งต่อมาได้มีการแนะนำเมล็ดพันธุ์ข้าวชุดแรกที่ปลูกอย่างเป็นทางการในปี พ.ศ. 2478 เพื่อเป็นการส่งเสริมให้ชาวนาไทยเริ่มหันมาปลูกข้าวพันธุ์ดีมากขึ้น (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

2.1.1 การพัฒนาของดอกข้าวไปเป็นเมล็ดข้าว

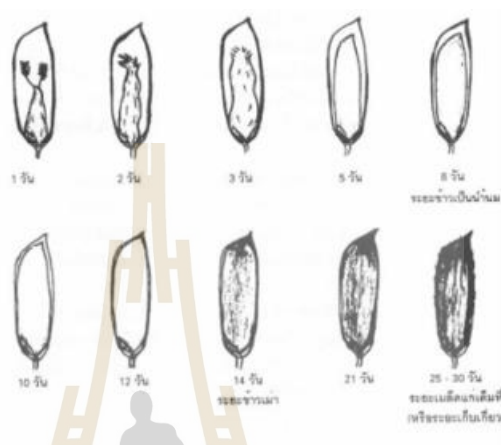
การสร้างเมล็ดข้าวแบ่งได้เป็น 3 ระยะ (ดังรูปที่ 2.1) มีขั้นตอนดังนี้ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

1) ระยะข้าวเป็นน้ำนม (Milk stage) ใช้เวลาประมาณ 7 วัน หลังผสมเกสร ระยะต้นๆ ลักษณะภายในของเมล็ดข้าวจะเป็นของเหลวสีขาวคล้ายน้ำนม เปลือกของเมล็ดมีสีเขียว

2) ระยะข้าวเม่า หรือไต หรือเป็นโด้ (Dough stage) ใช้เวลาประมาณ 14-21 วัน หลังผสมเกสร เปลือกใหญ่และเปลือกเล็กเริ่มแข็ง มีสีเขียวอมน้ำตาล เนื้อในเมล็ดซึ่งเป็นน้ำนมจะมีน้ำน้อยลง เหนียวและแข็งขึ้นตามลำดับ

3) ระยะเมล็ดแก่เต็มที่ หรือระยะเก็บเกี่ยว (Maturation stage) ใช้เวลาประมาณ

30 วันหลังการผสมเกสร เมล็ดจะมีโครงสร้างสมบูรณ์เต็มที่ ทั้งขนาดและความแข็งของเปลือก และสีที่สุกเต็มที่ที่จะเปลี่ยนจากสีเขียวกลายเป็นสีน้ำตาล อาจมีสีน้ำตาลเข้ม น้ำตาลม่วง หรือน้ำตาลดำ ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว ส่วนเนื้อของเมล็ดจะมีสีขาว และแข็งมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าวเช่นกัน



รูปที่ 2.1 การพัฒนาของดอกข้าวเป็นเมล็ด ที่มา : (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

2.1.2 โครงสร้างและส่วนประกอบภายในเมล็ดข้าว

เมล็ดข้าวประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว เรียกว่าแกลบ (Hull หรือ Husk) และส่วนเนื้อ หรือผลแท้ (True fruit หรือ Caryopsis grain) (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547 และ Juiano, 1958) โดยมีรายละเอียดแต่ละส่วนดังนี้

1) **แกลบ (Hull or Husk)** ส่วนเนื้อ หรือ ผลแท้ (Caryopsis grain) ภายในเมล็ดข้าวจะถูกห่อหุ้มด้วยแกลบซึ่งเป็นเปลือกที่อยู่ชั้นนอกสุด ประกอบไปด้วย เปลือกใหญ่ (Lemma) และเปลือกเล็ก (Palea) โดยเปลือกเล็กและเปลือกใหญ่จะถูกยึดเข้าด้วยกันด้วยโครงสร้างที่คล้ายตะขอสองอัน ทำให้ไม่มีช่องว่างภายนอกเมล็ดข้าว สามารถช่วยป้องกันแมลงระหว่างการเก็บรักษาได้ (Juiano, 1981) ผิวด้านนอกของแกลบประกอบไปด้วย ขน (Trichomes) ซึ่งเป็นขนเล็กๆ ขึ้นตามแนวยาวของเปลือกใหญ่และเปลือกเล็ก เซลล์แกลบประกอบไปด้วยสารลิกนินและมีความเปราะมาก มีน้ำหนักประมาณ 16 - 28 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักเมล็ดข้าว (Juliano, 1972)

2) **เนื้อ หรือ ผลแท้ (True fruit หรือ Caryopsis grain)** ส่วนประกอบ แสดงดังรูปที่ 2.2

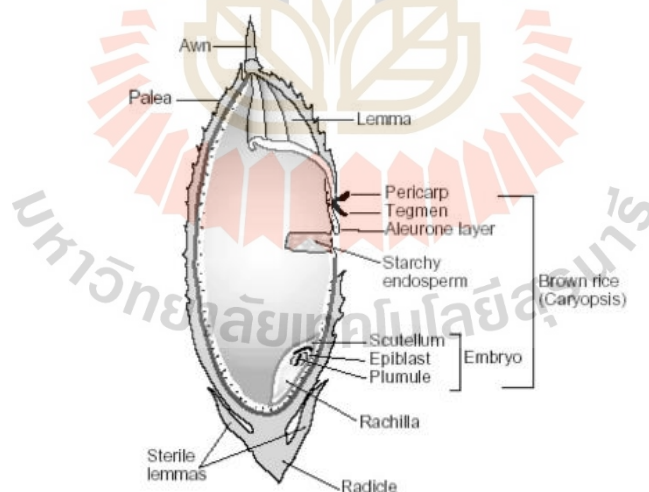
2.1 เยื่อหุ้มผล (Pericarp) เยื่อหุ้มผลเป็นผนังรังไข่ที่สุกเต็มที่แล้ว เกิดการ

เสื่อมสภาพระหว่างการเกิดเนื้อ หรือผลแท้ (Caryopsis) (Bechtel and Pomeranz, 1980) มีความหนาประมาณ 10 ไมครอน มีสารสีรงควัตถุปนอยู่ ทำให้ข้าวกล้องมีสีต่างๆ เช่น น้ำตาลอ่อน น้ำตาลแดง เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีโปรตีน เซลลูโลส เป็นองค์ประกอบสำคัญ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

2.2 เยื่อหุ้มเมล็ด (Seed coat) เยื่อหุ้มเมล็ดมีความหนาประมาณ 0.5 ไมครอน อยู่ด้านในถัดมาจากชั้นเยื่อหุ้มผล (Pericarp) (Bechtel and Pomeranz, 1977) ภายในประกอบไปด้วยเม็ดสีและไขมันทำให้ข้าวกล้องเกิดสี (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547 และ juiano, 1958)

2.3 นิวเซลลัส (Nucellus) เป็นเซลล์ที่อยู่ถัดมาจากเยื่อหุ้มเมล็ด เซลล์มีความหนาประมาณ 2.5 ไมครอน เซลล์ผนังกั้นระหว่างเยื่อหุ้มเมล็ดและนิวเซลลัสมีความอ่อนแอ ทำให้เกิดการแยกตัวระหว่างเนื้อเยื่อทั้งสองได้ง่าย (Bechtel and Pomeranz, 1977)

2.4 คัพภะ (Embryo) เป็นต้นอ่อน (Germ) มีขนาดเล็กและอยู่บริเวณน้ำท้องที่โคนเมล็ดด้านเปลือกใหญ่ (Lemma) ส่วนท้องของเมล็ดมีส่วนประกอบเป็นรากอ่อน (Radicle) ต้นอ่อน (Plumule) เยื่อหุ้มรากอ่อน (Coleorhiza) เยื่อหุ้มต้นอ่อน (Coleoptile) ท่อน้ำท่ออาหาร และใบเลี้ยง (Scutellum) ซึ่งเป็นใบเลี้ยงเดี่ยว (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) คัพภะเป็นแหล่งสะสมอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของต้นอ่อน อุดมไปด้วยโปรตีน และไขมัน (Buttrose and Soeffky, 1973)



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบและโครงสร้างเมล็ดข้าว ที่มา : (Kennedy, 2019)

2.5 เนื้อเมล็ด (Endosperm) มีมากที่สุด ในเมล็ดข้าวประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักทั้งหมด ภายในประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนซับแอลิวโรน (Sub aleurone layer) เป็น

เซลล์ 2 ชั้นอยู่ถัดมาจากชั้นแอริวโลน และส่วนที่เป็นสตาร์ชในเนื้อข้าว (Starchy endosperm) มีส่วนประกอบหลักคือ Amylose และ Amylopectin

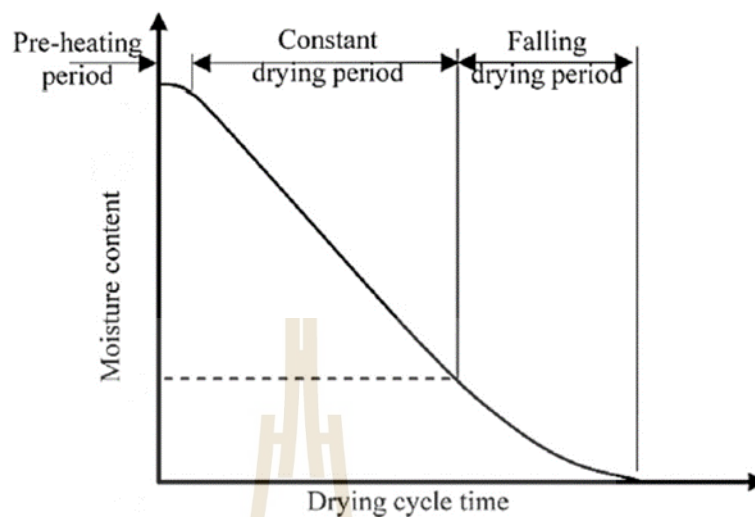
2.2 การอบแห้ง (Drying)

2.2.1 ความสำคัญของการอบแห้ง

การอบแห้งคือการกำจัดความชื้นหรือน้ำออกจากวัสดุจนมีความชื้นอยู่ในปริมาณที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา กระบวนการอบแห้งยังมีความสำคัญในการช่วยลดน้ำหนักของวัสดุเพื่อให้ง่ายในการขนส่ง (Sivakumar, 2016) ปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้งคือ อุณหภูมิอากาศ ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ความเร็วของอากาศในการอบแห้ง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุและประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง (Sharada, 2013)

2.2.2 อัตราการอบแห้ง (Drying rate)

การอบแห้งด้วยลมร้อน (Hot air drying) เป็นการใช้อากาศเป็นตัวกลางในการพาความชื้นออกจากวัสดุ เมื่ออากาศร้อนไหลผ่านวัสดุทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิและเกิดการถ่ายเทความร้อนจากอากาศที่มีอุณหภูมิสูงไปยังผิววัสดุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในช่วงแรก กระบวนการอบแห้งจึงเริ่มต้นขึ้น โดยสามารถแบ่งช่วงการอบแห้งออกเป็น 3 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ในช่วงแรกของการอบแห้งจะเป็นช่วงรับความร้อนแฝงเข้ามาอุ่นที่ผิว (Pre-heat) เรียกว่าช่วง Initial Adjustment phase (Sivakumar, 2016) หลังจากที่วัสดุได้รับความร้อนมากพอที่จะสลายพันธะน้ำบนผิว (Free water surface) น้ำจะเริ่มระเหย โดยจะเริ่มเข้าสู่ช่วงที่ 2 คือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant drying period) ที่ช่วงนี้ความร้อนที่อากาศถ่ายเทเข้ามาให้กับวัสดุจะใช้ในการระเหยน้ำที่ผิวทั้งหมด ซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อน สมดุลกับการระเหยน้ำ น้ำที่ระเหยออกจากผิวจะมีมวลน้ำใหม่ที่ขนส่งโดยการแพร่จากภายในวัสดุเข้ามาแทนที่ ส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวคงที่ (Chu et al., 1953) จนกระทั่งการขนส่งน้ำมายังผิวลดลง ทำให้การระเหยน้ำออกที่ผิวลดลงส่งผลให้อัตราการอบแห้งเริ่มลดลง เราเรียกปริมาณความชื้นนี้ว่า ความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) (Zeki, 2009) และการอบแห้งดำเนินมาสู่ช่วงที่ 3 คือ ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling drying period) ปริมาณน้ำภายในวัสดุลดลงและเกิดการหดตัวที่บริเวณผิวภายนอก ทำให้การขนส่งน้ำมายังผิวเริ่มยากขึ้นและช้าลง ส่งผลให้อัตราการอบแห้งเริ่มลดลงและอุณหภูมิที่ผิววัสดุจะสูงขึ้นจนเข้าใกล้อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ (Dry bulb temperature) (Zeki, 2009) และกระบวนการจะสิ้นสุดลงเมื่อความชื้นในวัสดุลดลงจนเข้าสู่ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content)



รูปที่ 2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นในวัสดุในกระบวนการอบแห้ง
ที่มา : (Sivakumar, 2016)

2.3 ปริมาณความชื้นในเนื้อวัสดุ (Moisture content)

ปริมาณความชื้นในเนื้อวัสดุ คือ ค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่อยู่ในวัสดุหรือเมล็ดพืชเมื่อเทียบกับมวลชิ้นและมวลแห้งของวัสดุ การแสดงค่าความชื้นสามารถแบ่งออกได้ 2 รูปแบบคือ (AOAC, 1995)

2.3.1 ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basic)

$$M_w = \frac{\text{Mass of moisture (water)}}{\text{Total mass of material}}$$

$$M_w = \frac{W_w}{W} \quad (2.1)$$

$$M_w = \frac{W - W_d}{W} \quad (2.2)$$

2.3.2 ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basic)

$$M_d = \frac{\text{Mass of moisture (water)}}{\text{Mass of dry material}}$$

$$M_d = \frac{W_w}{W_d} \quad (2.3)$$

$$M_d = \frac{W - W_d}{W_d} \quad (2.4)$$

2.3.3 การแปลงความชื้นมาตรฐานเปียกไปเป็นมาตรฐานแห้ง

$$M_d = \frac{M_w}{1 - M_w} \quad (2.5)$$

2.3.4 การแปลงความชื้นมาตรฐานแห้งไปเป็นมาตรฐานเปียก

$$M_w = \frac{M_d}{1 + M_d} \quad (2.6)$$

- โดยที่
- M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (kg/kg (w.b))
 - M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (kg/kg (d.b))
 - W คือ มวลรวมทั้งหมดของวัสดุ (g)
 - W_d คือ มวลแห้งของวัสดุ (g)
 - W_w คือ มวลน้ำในวัสดุ (g)

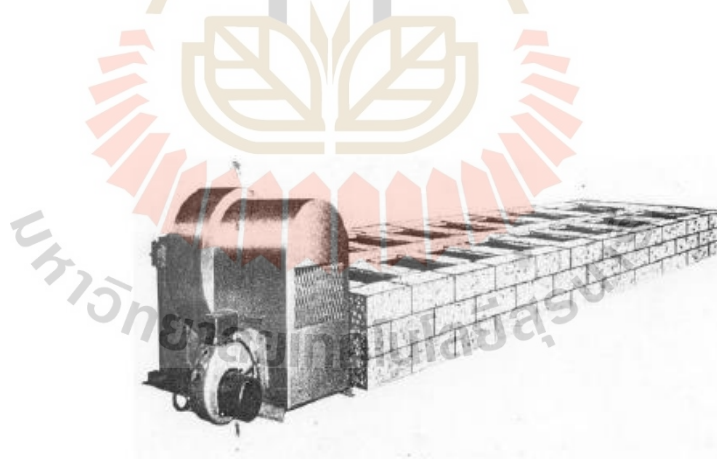
ปริมาณความชื้นในวัสดุทางการเกษตรนั้นเป็นปัจจัยสำคัญต่ออายุการเก็บรักษา และคุณภาพของวัสดุ เนื่องจากปริมาณความชื้นมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในวัสดุ ซึ่งจุลินทรีย์ใช้ปริมาณน้ำอิสระ (Water activity) ในการเจริญเติบโต (Government of Manitoba, 2017) และเพื่อหลีกเลี่ยงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ วัสดุควรมีปริมาณความชื้นที่ทำให้ปริมาณน้ำอิสระในเนื้อต่ำกว่า 0.6 - 0.65 (Mercer, 2008)

2.4 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือก (Paddy Dryer)

ในปัจจุบันมีเครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกหลายชนิดถูกใช้ในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย ซึ่งสามารถจำแนกได้ตามวิธีการใช้งาน หรือวิธีการถ่ายเทความร้อน (Ryozo, 1994) โดย พิรสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ (2557) ได้แบ่งเครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกออกเป็นดังนี้

2.4.1 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบบรรจุกระสอบ

เครื่องลดความชื้นชนิดนี้ แสดงดังรูปที่ 2.4 นิยมใช้ลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ข้าว โดยมีลักษณะเป็นช่องหลายช่องเครื่องเริ่มทำงานโดยการเป่าลมร้อนผ่านเข้าไปห้องด้านล่าง จากนั้นลมร้อนที่อยู่ด้านล่างจะไหลขึ้นมาผ่านกระสอบข้าวที่วางอยู่ด้านบน โดยอุณหภูมิที่ใช้อบแห้งจะสูงไม่เกิน 45°C ในการอบแห้งแต่ละครั้งต้องมีการพลิกกระสอบข้าวกลับเมื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น



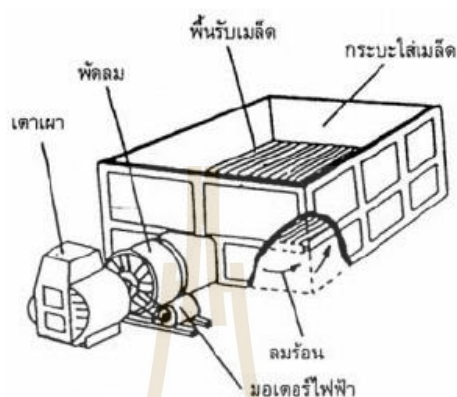
รูปที่ 2.4 เครื่องลดความชื้นแบบข้าวเปลือกบรรจุในกระสอบ

ที่มา : (พิรสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ, 2557)

2.4.2 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบกระบะ

ข้าวเปลือกที่นำมาอบแห้งจะวางอยู่บนตะแกรง โดยตะแกรงวางอยู่บนห้องอบแห้งซึ่งเป็นห้องกำเนิดลมร้อน แสดงดังรูปที่ 2.5 ลมร้อนจะถูกเป่าเข้ามาในห้องอบแห้งจากด้านล่างจากนั้น

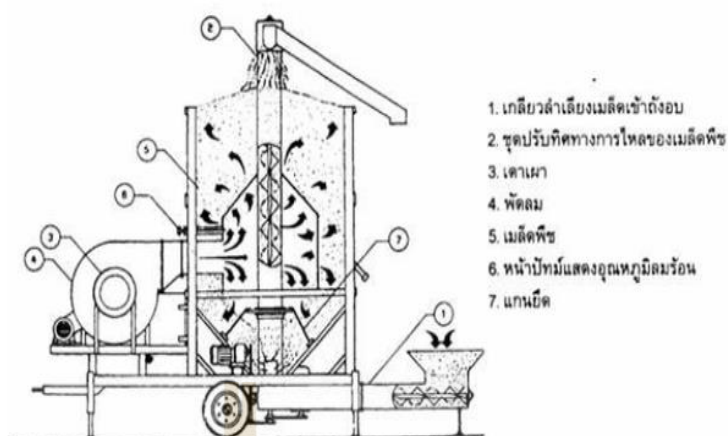
จะไหลผ่านข้าวที่วางอยู่ด้านบน ใช้อุณหภูมิอบแห้งไม่เกิน 50°C นิยมใช้อบแห้งเมล็ดพันธ์เนื่องจากเป็นเครื่องที่อยู่กับที่ไม่ทำให้เมล็ดพันธ์แตกหักและเกิดความเสียหายขณะอบแห้ง



รูปที่ 2.5 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบกระบะ
ที่มา : (พิรสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ, 2557)

2.4.3 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบถังหมุนเวียน (Circulating type dryer)

ตัวเครื่องประกอบด้วยถังอบแห้งทรงกระบอก แสดงดังรูปที่ 2.6 ที่มีลักษณะภายนอกเจาะรูตะแกรงรอบตัวถังเพื่อระบายอากาศ ภายในตัวถังมีท่อทรงกระบอกติดตั้งไว้กลางถังเพื่อส่งลมร้อน โดยหลักการทำงานคือ ข้าวจะถูกลำเลียงเข้าไปในถังทรงกระบอกและจากนั้นถูกส่งขึ้นไปด้านบนโดยเกลียวลำเลียง (Screw auger) และถูกปล่อยให้ไหลลงมาจากด้านบน โดยลมร้อนจะถูกเป่าเข้ามาในตัวถังที่อยู่ตรงกลางทำให้อากาศร้อนไหลผ่านเข้าสู่เมล็ดข้าวในแนวรัศมี จากนั้นผ่านออกทางรูตะแกรงภายในถังและออกสู่บรรยากาศภายนอก ซึ่งเครื่องอบแห้งประเภทนี้ไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากปัญหาฝุ่นละอองที่ออกจากตัวถังที่มีการเจาะรูตะแกรง และปัญหาด้านการสึกหรอของระบบลำเลียง



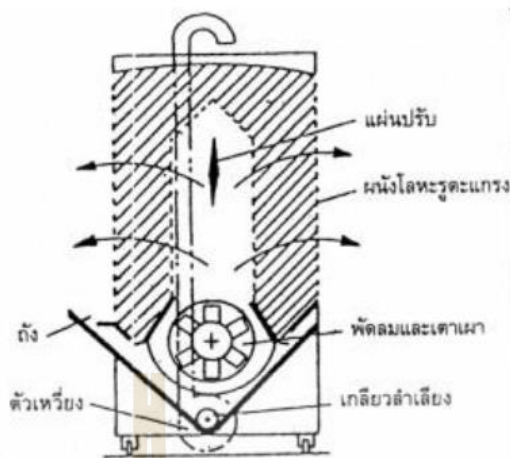
รูปที่ 2.6 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบถ่วงหมุนเวียน (Circulating type dryer)

ที่มา : (พิริสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ, 2557)

2.4.4 เครื่องลดความชื้นแบบคอลัมน์ (Column type dryer)

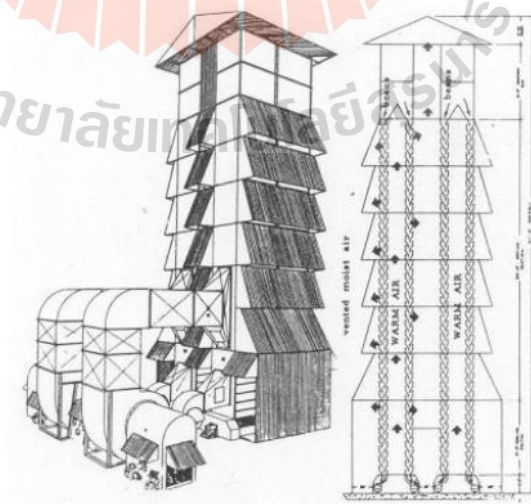
เครื่องลดความชื้นแบบนี้หากมองภายนอกจะเห็นถึงบรรจุเมล็ดพืชเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมแนวตั้งสูงกว่า 3 เมตร ถังบรรจุข้าวเปลือกต่อเข้ากับท่อลมร้อนทางด้านข้างซึ่งมีเตาลมร้อนและพัดลมเป็นส่วนประกอบ ส่วนทางด้านล่างของถังบรรจุเมล็ดจะมีชุดควบคุมการไหลของข้าวเปลือก เครื่องลดความชื้นแบบนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

2.4.4.1 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบคอลัมน์ชนิดข้าวเปลือกไม่ไหลคลุกเคล้า : ภายในถังบรรจุข้าวเปลือกของเครื่องลดความชื้นแบบนี้จะประกอบด้วย ช่องบรรจุข้าวเปลือกที่ด้านข้างทั้ง 2 ด้านเป็นตะแกรงเพื่อให้ลมร้อนผ่านได้อย่างสะดวก โดยออกแบบให้มีช่องว่างอย่างน้อย 2 ช่อง ตรงกลางของเครื่องซึ่งใช้เป็นห้องลมร้อน ที่จะไหลผ่านข้าวเปลือกและไหลออกทางแนวข้างทั้ง 2 ช่อง เครื่องลดความชื้นแบบนี้มีข้อเสีย คือ ข้าวเปลือกที่อยู่ชิดห้องลมร้อนจะแห้งเร็วกว่าทางด้านท่อลมออกทำให้เครื่องลดความชื้นแบบนี้ใช้ปริมาณลมร้อนจำเพาะสูง เพื่อให้ความแตกต่างระหว่างความชื้นข้าวเปลือกส่วนที่ติดห้องลมร้อนกับด้านลมออกน้อย อุณหภูมิความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งประมาณ 54°C แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบคอลัมน์ชนิดข้าวเปลือกไม่ไหลคลุกเคล้า
ที่มา : (พิรสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ, 2557)

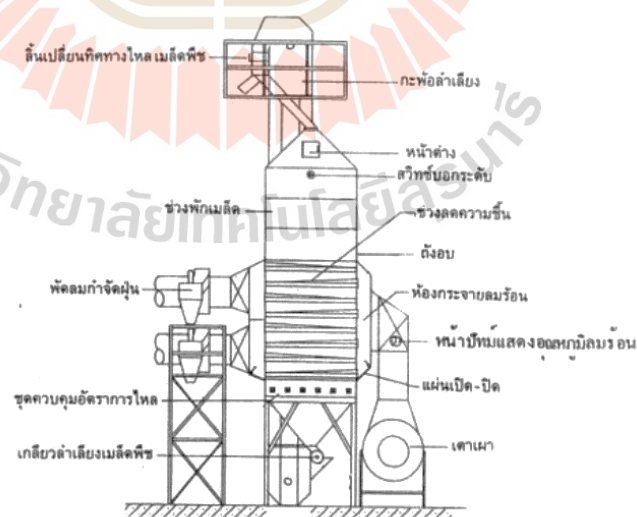
2.4.4.2 ชนิดข้าวเปลือกมีการไหลคลุกเคล้า: ต่างจากชนิดข้าวเปลือกไม่ไหลคลุกเคล้าคือ ภายในห้องอบแห้งระหว่างห้องลมร้อนกับช่องบรรจุข้าวเปลือกจะถูกกั้นด้วยแผ่นทึบที่ทำเป็นแนวกลับทิศการไหลของข้าวเปลือกสลับกันไปมา ซึ่งในระหว่างแผ่นจะมีช่องว่างให้ลมไหลผ่านได้ข้าวเปลือกที่ไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่างมีโอกาสสัมผัสลมร้อนเท่า ๆ กัน เนื่องจากข้าวเปลือกมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบคอลัมน์ชนิดข้าวเปลือกมีการไหลคลุกเคล้า
ที่มา : (พิรสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ, 2557)

2.4.5 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบเมล็ดไหลคลุกเคล้า

เครื่องลดความชื้นแบบเมล็ดไหลคลุกเคล้า โดยทั่วไปเรียกว่า แบบ LSU (Louisiana State University) ลักษณะของถังภายนอกเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมแนวตั้ง ข้าวจะถูกลำเลียงจากด้านล่างขึ้นไปด้านบนถึง จากนั้นทำการปล่อยข้าวให้ไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่างเมื่อเริ่มกระบวนการอบแห้ง ซึ่งภายในถังอบรูปสี่เหลี่ยมจะมีท่อลมวางเรียงกันอยู่ในแต่ละชั้น โดยท่อลมที่วางเรียงกันอยู่แต่ละท่อ ประกอบด้วยท่อลมร้อนเข้า และท่อลมเย็นออกสลับกัน ลักษณะการไหลของลมที่ผ่านเข้ามาในห้องอบคือ เมื่อทำการส่งลมร้อนเข้ามาในห้องอบแล้ว ลมร้อนจะเข้าไปยังท่อลมร้อนในแนวตั้งฉากเข้าเมื่อมองจากด้านหน้า ท่อลมร้อนเข้านี้จะพัด ผ่านข้าวเปลือกในถังอบและไหลออกทางท่อลมออกที่อยู่ชั้นด้านบนและด้านล่างท่อลม แต่ละท่อจะมีลักษณะเป็นรางคว่ำ ด้านบนแหลม ด้านล่างเปิดวางในแนวขนานกับพื้นยาวตลอดถัง ที่ปลายรางด้านหนึ่งจะเจาะช่องต่อเข้ากับห้องรวบรวมลม ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะปิดท่อลมแต่ละชั้นโดยมีช่องที่เจาะเข้ากับห้องรวบรวมลมสลับกัน โดยชั้นหนึ่งจะต่อเข้าทางด้านห้องลมร้อนเข้า และอีกชั้นหนึ่งจะต่อเข้ากับห้องลมออก เครื่องลดความชื้นแบบนี้ทำให้เกิดการไหลข้าวเปลือกแบบไหลกลับไปกลับมา และทำให้ข้าวเปลือกมีโอกาสสัมผัสกับลมร้อนที่ไหลเข้า และเกิดการถ่ายเทความชื้นกับลมที่ไหลออก ทำให้เกิดการลดความชื้นสม่ำเสมอเท่ากันตลอดทั้งถังบรรจุ อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้จะได้สูงกว่าแบบคอลัมน์คือ 66°C สำหรับการใช้งานก็เช่นเดียวกันกับแบบคอลัมน์ คือ ใช้อบแบบเป็นครั้งหรือเป็นงวดและใช้อบแบบไหลต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เครื่องลดความชื้นเมล็ดพืชแบบเมล็ดไหลคลุกเคล้า LSU (Louisiana State University)

ที่มา : (พิริสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ, 2557)

2.4.6 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบโรตารี (Rotary type dryer)

เครื่องอบแห้งแบบโรตารีส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีและแร่ ซึ่งในด้านอาหารการ ใช้งานส่วนใหญ่มักใช้สำหรับอบแห้งของเสีย หรืออาหารสัตว์ที่เป็นพืช โดยเครื่องอบแห้งแบบโรตารี ส่วนประกอบหลักจะประกอบไปด้วย ถังทรงกระบอกที่ทำจากโลหะ มีแผงเกล็ดภายใน ถัง ทรงกระบอกจะเอียงทำมุมเล็กน้อย ซึ่งวัสดุที่อบแห้งจะถูกป้อนจากด้านบนของถังและ เคลื่อนลงมา ทางออกด้านล่างถัง กระบวนการอบแห้งจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุถูกป้อนเข้าไปในถัง เมื่อถึงมุมวัสดุจะถูก แผงบานเกล็ดภายในตัวถังกวาดขึ้นไปด้านบน และตกลงมาด้านล่างถัง ทำให้วัสดุเกิดการแลกเปลี่ยน ความร้อนขณะลอยตัวตกลงมา (Zeki, 2009)

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งแบบโรตารีพบว่า Firouzi, S. et al. (2016) ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหมุนแนวนอน (Industrial horizontal rotary dryer (IHRD)) และทำการทดสอบเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพ ความสิ้นเปลือง พลังงานและคุณภาพข้าว ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบเบดอยู่กับที่ (Industrial batch-type bed dryer (IBBD) โดยใช้ข้าวเปลือกในประเทศอิหร่านตอนเหนือ ที่มีความชื้นเริ่มต้น 14 -15 % (wb) ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 38 – 40°C จนถึงความชื้นสุดท้าย 5 ระดับ (8.0%, 9.0%, 10.0%, 11.0%, และ 12.0% (wb)) พบว่า อัตราการอบแห้งเครื่องอบแห้งแบบเบดอยู่กับที่ (Industrial batch-type bed dryer (IBBD) ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า ในส่วนของความสิ้นเปลือง พลังงานพบว่าเครื่องอบแห้งแบบเบดอยู่กับที่ที่มีความสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่า คือ ความสิ้นเปลือง พลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 2.64 - 7.48 MJ/kg_{water} ในขณะที่ เครื่องอบแห้งแบบ (IHRD) มีความสิ้นเปลือง พลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 5.5 – 17.41 MJ/kg_{water} แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเครื่องอบแห้งแบบ (IHRD) ให้ คุณภาพข้าวที่ดีกว่าเครื่องอบแห้งแบบเบดอยู่กับที่

ปฏิวัติ คมวชิรกุล, ฉัตรชัย นิยมมล และอัครวิณ ยอดรัักษ์ (2562) ได้ทำการศึกษา อิทธิพลของการแผ่รังสีแบบอินฟราเรดระยะไกล ต่อการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบโร ตารี โดยใช้ข้าวเปลือกพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ความชื้นเริ่มต้น 30 - 32% (db) นำข้าวมาอบที่ความเข้ม ของรังสีอินฟราเรดต่างกัน: 2 3 และ 4 kW/m² ที่ความเร็วรอบถังหมุน: 3 และ 6 rpm พบว่า เมื่อใช้ ความเข้มของรังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้น ความชื้นของข้าวเปลือกจะลดลงมากขึ้น พบว่าการหมุนของรอบ ถังไม่ส่งผลต่อการลดความชื้นข้าวเปลือก และพบว่าจุดที่เหมาะสมในการอบแห้งคือ ที่ความเข้มรังสี อินฟราเรด 4 kW/m² ความเร็วถังอบ: 3 rpm ซึ่งทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำสุดคือ 42.2 MJ/kg_{water}

อัศวิน ยอดรักษ์ และคณะ (2562) พัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารี ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งแบบโรตารี สำหรับอบข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูง (31% (db)) โดยประเมินความชื้น อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงาน ซึ่งในการทดลองใช้ข้าวเปลือกพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 30 ถึง 32% (db) ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการอบแห้งออกเป็น 3 ช่วง คือ การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารีที่ใช้ความร้อนจากการแผ่รังสีอินฟราเรด (IRD): 2 3 และ 4 kW/m² เป็นเวลา 50 นาที การเป่าด้วยอากาศแวดล้อม (Ambient Air Ventilation): 11 m/s การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารีที่ใช้ความร้อนจากลมร้อน (HRD): 80 100 และ 120°C ความเร็วรอบการหมุน: 3 และ 6 rpm จากผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงความชื้น และอัตราการอบแห้งสูงสุด ที่เงื่อนไขการทดลอง ความเข้มของรังสีอินฟราเรด 4 kW/m² อุณหภูมิอบแห้ง 120°C ความเร็วรอบของเครื่องอบแห้งแบบโรตารี 6 rpm ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดเท่ากับ 39.7 MJ/kg_{water}

2.4.7 เครื่องลดความชื้นแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed drying)

ลักษณะเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดในปัจจุบันประกอบไปด้วย ห้องอบแห้งแบบปิด ซึ่งภายในห้องอบแห้งมีตะแกรงเหล็กเพื่อรองรับข้าวเปลือกที่ถูกลำเลียงเข้ามาในห้องอบแห้ง โดยอุปกรณ์ป้อนเมล็ดข้าว ซึ่งชั้นข้าวเปลือกที่ไหลเข้ามามีความหนาเบดอยู่ที่ประมาณ 10 – 15 cm ตัวเครื่อง สามารถใช้อุณหภูมิอบแห้งได้สูงถึง 140 – 150°C เหมาะสำหรับอบวัสดุที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงมากกว่า 29.9% (db) สามารถลดความชื้นได้ต่ำสุดถึง 23% (db) (Soponronnarit, 1999) โดยมีหลักการการทำงานเริ่มต้นคือ หัวเผา น้ำมันเชื้อเพลิง (Burner) ทำการเผาเพื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศ จากนั้นเครื่องเป่า (Blower) จะเป่าลมร้อนขึ้นไปห้องอบแห้งด้วยความเร็ว 2.0 – 2.3 m/s ผ่านเข้ามาจากด้านล่างของห้องอบแห้ง และพัดขึ้นไปยังชั้นเมล็ดข้าวเปลือกที่มีความหนา โดยลมร้อนกับข้าวเปลือกจะไหลแบบตั้งฉากกัน จากนั้นเมื่ออบแห้งเสร็จแล้ว ลมร้อนจะไหลขึ้นไปยังไซโคลนเพื่อทำความสะอาด แล้วไหลไปยังเครื่องเป่าลม (Blower) อีกครั้ง (Soponronnarit, 1995)

จากที่ได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดพบว่า Sutherland, J.W. and Ghaly, T.F. (1992) เป็นกลุ่มวิจัยกลุ่มแรกที่ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน ในการอบแห้งข้าวเปลือก ผลการทดลองพบว่า ร้อยละข้าวต้นของข้าวเปลือกจะอยู่ที่ 58 – 61% เมื่อข้าวเปลือกถูกอบแห้งโดยมีความชื้นเริ่มต้นจาก 28.2% (db) ถึงความชื้น

สุดท้าย 20.5% (db) และพบว่า ร้อยละข้าวต้นของข้าวเปลือกจะอยู่ที่ 15 – 24% เมื่ออบแห้งจนถึงความชื้นสุดท้าย 19% (db)

Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S. (1994) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน โดยทำการทดสอบเก็บค่าพารามิเตอร์การทำงานที่มีผลต่อคุณภาพข้าวเปลือก ความสามารถในการทำให้แห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงาน โดยเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วยห้องอบแห้งที่ทำจากแผ่นสแตนเลส ภายในระบบอากาศถูกทำให้ร้อนด้วยฮีตเตอร์และเป่าด้วยพัดลมมายังห้องอบแห้ง และมีการหมุนวนอากาศเสียมาใช้ซ้ำ จากผลการทดลองพบว่าความสามารถของการทำให้แห้งมากขึ้น เมื่อใช้อุณหภูมิอากาศในการอบแห้งมากขึ้น และใช้อัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น และเพื่อพิจารณาถึงความสิ้นเปลืองพลังงาน พบว่ามีค่าลดลง เมื่ออัตราการไหลของอากาศลดลง และเมื่อมีการใช้อากาศเสียเข้ามาวนซ้ำมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาภาวะที่ใช้ออบแห้งพบว่าอุณหภูมิอากาศสูงสุดที่ใช้ออบแห้งอยู่ที่ 115°C และพบว่าที่ความชื้นสุดท้ายข้าวเปลือก 24 – 25 % (db) สามารถรักษาคุณภาพข้าวได้ สภาวะการทำงานที่เหมาะสมมีดังนี้ เมื่อความเร็วอากาศ 4.4 m/s มีการใช้อากาศเสียวนซ้ำที่ 80% ที่ความหนาชั้นอบแห้ง 9.5 cm อัตราการป้อนอากาศ 0.1 kg/s ทำให้ต้นทุนการอบแห้งรวมเท่ากับ 0.08 เหรียญสหรัฐ/kg

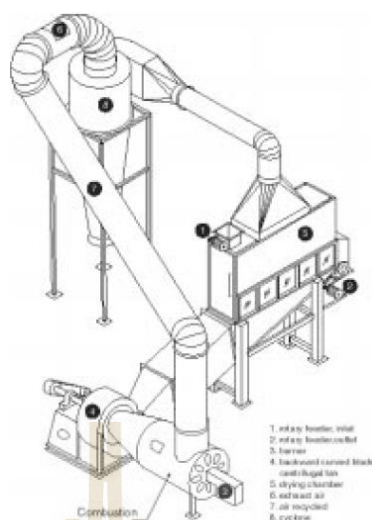
Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S and Sripawaatakul, O. (1996) ได้ทำการออกแบบและทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีการไหลขวาง (Cross-flow fluidized bed paddy dryer) ซึ่งมีความจุอัตราการป้อน 200 กิโลกรัม/ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกไม่ควรต่ำกว่า 23% (db) เพื่อรักษาคุณภาพข้าวเปลือก ทั้งด้านความขาวและคุณภาพร้อยละข้าวต้น และพบว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการอบแห้งคือ ที่อุณหภูมิอบแห้ง 115°C ความเร็วลม 2.3 m/s ที่ความหนาชั้นเบด 10 cm และสัดส่วนการวนอากาศเสียมาใช้ซ้ำคือ 80% ซึ่งสภาวะนี้ทำให้เครื่องมีความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำที่สุด และในขณะเดียวกันได้อัตราการอบแห้งสูงสุด

Soponronnarit, S., Yapha, M. and Prachayawarakorn, S. (1995) ได้ทำการออกแบบและทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบมีการไหลขวาง (Cross-flow fluidized bed paddy dryer) ซึ่งมีความจุอัตราการป้อน 1 ตัน/ชั่วโมง เพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์ สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูง ซึ่งกระบวนการอบแห้งมีการวนอากาศเสียกลับมาใช้ซ้ำ พบว่าเครื่องทำงานได้มีประสิทธิภาพสูง ทั้งด้านร้อยละข้าวต้นและความขาว สามารถลดความชื้น

ข้าวเปลือกได้จาก 45% มาตรฐานแห้ง ลงไปถึงความชื้นสุดท้าย 24% (db) โดยใช้อุณหภูมิอากาศ 120°C สัดส่วนของอากาศเสียที่วนใช้ซ้ำอยู่ที่ 66% ที่อัตราการไหลอากาศ 0.05 kg/s ความเร็วลม 3.2 m/s ความลึกเบตข้าวเปลือกอยู่ที่ 10 cm มีการใช้พลังงานรวมทั้งหมด 2.32 MJ/kg_{water}

Soponronnarit, S. (1999) ได้ทำการวิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไดซ์เบตในเชิงพาณิชย์แสดงดังรูปที่ 2.10 รวมทั้งสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอบแห้งให้เหมาะสมยิ่งขึ้น จากความสำเร็จในการพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตแบบไหลขวางเชิงพาณิชย์ในปี 1995 ทำให้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกฟลูอิดไดซ์เบตเชิงพาณิชย์ที่มีกำลังผลิต 5 – 10 ตัน วางจำหน่ายมากกว่า 90 เครื่องในปี 1995 ซึ่งเครื่องที่วางจำหน่ายเชิงพาณิชย์มีความแตกต่างจากเครื่องต้นแบบเล็กน้อย คือ เครื่องต้นแบบมีการระบายอากาศเสียออกก่อนที่จะเข้าไปในไซโคลน แต่เครื่องที่จำหน่ายออกแบบให้อากาศเสียเข้าไปในไซโคลนก่อนแล้วจึงระบายออก จากความต่างนี้จึงได้ทำการวิจัยเพื่อปรับปรุงพารามิเตอร์ให้เหมาะสมยิ่งขึ้น จากผลการวิจัยและพัฒนาได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และพารามิเตอร์การอบแห้งที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิอากาศ 140 -150°C อัตราการวนอากาศเสียซ้ำที่ 80% มีความเร็วอากาศที่ 2.0 – 2.3 m/s ที่ความหนาชั้นเบต 10 – 15 cm ภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสมนี้เมื่ออบแห้งที่ความชื้นเริ่มต้นมากกว่า 29.9% (db) จะทำให้ผลผลิตร้อยละข้าวต้นเพิ่มขึ้น 50% เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน

แต่อย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตก็ยังมีข้อเสีย นเรศ มีโส (2012) ได้กล่าวว่า ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องแบบฟลูอิดไดซ์เบตในช่วงแรกนั้นจะมีความชื้นที่บริเวณผิวของเมล็ดแตกต่างจากแกนกลางของเมล็ดมาก หรือเรียกว่าเกิด (Moisture gradient) มาก ทำให้เมื่อมีการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงอย่างรวดเร็ว เกิดการเคลื่อนที่ของความชื้นจากแกนกลางมายังผิวอย่างรวดเร็ว เกิดความเครียดขึ้น ส่งผลให้ข้าวเกิดการแตกร้าว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Thompson and Foster (1963) ได้ทำการศึกษาความเครียดแตกและการแตกในข้าวโพดแห้ง ซึ่งได้ตั้งข้อสังเกตว่าความเร็วในการทำให้แห้ง ซึ่งแสดงในแง่ของการสูญเสียความชื้นเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อชั่วโมง เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการพัฒนารอยแตกที่เกิดจากความเค้น และ Gunasekaran, S. et. al (1985) ทำการวิจัยและกำหนดลักษณะขนาดของรอยแตกจากความเครียดในเมล็ดข้าวโพด ได้กล่าวว่า รอยแตกที่เกิดจากความเค้นมักเกี่ยวข้องกับการทำให้ข้าวโพดแห้งอย่างรวดเร็วด้วยอากาศแห้งที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นปัญหาดังกล่าวนี้จึงกลายเป็น ข้อจำกัดของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบต (นเรศ มีโส, 2555)



รูปที่ 2.10 เครื่องลดความชื้นแบบฟลูอิดไดซ์-เบด (Fluidized bed drying)

ที่มา : (Soponronnarit, 1999)

2.4.8 เครื่องลดความชื้นแบบสเปาเต็ดเบด (Spouted Bed)

สับเนืองมาจากเมล็ดพืชโดยทั่วไปมีรูปร่างที่แตกต่างกัน และขนาดไม่เท่ากัน ทำให้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดมีข้อจำกัดในการอบแห้งเมล็ดพืชที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งทำให้การผสมกันระหว่างเมล็ดพืชกับอากาศเกิดขึ้นไม่ได้ประสิทธิภาพมากพอ ส่งผลให้เกิดการใช้ความร้อนที่ไม่มีประสิทธิภาพ จึงมีการใช้เทคนิคการอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดที่มีประสิทธิภาพในการผสมระหว่างเมล็ดพืชกับอากาศ เข้ามาในการแก้ปัญหา แสดงดังรูปที่ 2.11 และวิธีการนี้ยังช่วยลดแรงดันตกคร่อมระหว่างเบด สามารถนำไปใช้กับวัสดุที่ไวต่อความร้อนโดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอนุภาคได้มาจากการผสมอย่างทั่วถึงและใช้เวลาในการสัมผัสสั้นในบริเวณลำสเปาต์ (Wetchacama et al., 2001) โดยมีหลักการทำงานคือ ลมร้อนความเร็วสูงถูกเป่าขึ้นไปยังห้องอบแห้ง จากนั้นทำการลำเลียงและเร่งให้เมล็ดพืชลอยสูงขึ้นมีลักษณะเป็นลำอากาศ ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณสเปาต์ (Spout Zone) เป็นบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนและมวลสูงมาก และหลังจากที่เมล็ดพืชลอยขึ้นไปจนถึงความต่ำแห่งสูงสุดของเบด ความเร็วเมล็ดจะลดลงและตกลงมายังบริเวณวงแหวนที่อยู่ระหว่างผนังห้องอบแห้งกับบริเวณสเปาต์ ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณวงแหวน (The annulus region) ซึ่งเป็นบริเวณที่เมล็ดพืชเคลื่อนที่ตกลงมาทวนกระแสลำสเปาต์ จากนั้นจะถูกลำสเปาต์เป่าขึ้นอีกครั้งซึ่งจะมีการเคลื่อนที่แบบนี้ตลอดเวลาของการอบแห้ง (Mathur and Epstein, 1974) แต่อย่างไรก็ตามเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดมีข้อเสียและข้อจำกัดคือเป็นเครื่อง

อบแห้งที่ทำงานแบบเป็นงวดๆ ยังไม่สามารถพัฒนาเป็นเครื่องอบแห้งที่ทำงานแบบต่อเนื่องได้ (พิรสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ, 2557)

จากการที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบตพบว่า Wetchacama, S. et al. (2001) ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบตสองมิติ (Two – Dimensional spouted bed technique) เพื่อใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูง โดยทดสอบที่สภาวะความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น 31.1 - 45.6% (db) อุณหภูมิอากาศขาเข้า 130 140 และ 150°C และที่ความจุ (Hold-up) ต่างกัน คือ 20 25 และ 30 kg โดยลมร้อนจากฮีตเตอร์จะถูกเป่าขึ้นไปยังห้องอบแห้ง ผ่านเข้าไปช่องทางเข้าห้องอบแห้งกว้าง 4 cm จากนั้นไหลผ่านทางเข้า (Entrance height) ยาว 10 cm เข้าไปยังท่อสเปาต์ที่มีความกว้าง 8 cm ข้าวจะถูกอบจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ 16% (db) จากผลการทดลองพบว่าความเร็วขั้นต่ำที่ทำให้ข้าวเปลือกเคลื่อนที่อยู่ที่ 15.4 – 16.4 m/s และเมื่อไหลไปยังบริเวณสเปาต์จะมีความเร็ว 3.9 – 4.1 m/s และพบว่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เมื่อใช้อัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น เนื่องจากส่งผลให้มีการหมุนเวียนข้าวเปลือกบริเวณสเปาต์มากขึ้น นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่วนในด้านของคุณภาพข้าวพบว่าสภาวะอบแห้งที่ยอมรับได้ที่เอื้อต่อคุณภาพข้าวที่สูง ควรใช้อุณหภูมิอบแห้งไม่เกิน 150°C และความชื้นสุดท้ายของข้าวไม่ควรต่ำกว่า 21% (db)

Ghalavand, Y., Sadegh, M and Rahimi, A (2010) ทำการทดลองอบแห้งถั่วลิ้นเตาด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบตระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อตรวจสอบผลกระทบจากอุณหภูมิอากาศขาเข้า อัตราการไหลอากาศ ความสูงเบต และขนาดของเมล็ดที่แตกต่างกัน ต่ออัตราการอบแห้ง โดยมีการทดสอบที่สภาวะดังนี้ อุณหภูมิอากาศขาเข้า 40 45 50 55 60 และ 65 °C ที่ความจุ (Hold-up) ต่างกันคือ 265 308 และ 376 kg เส้นผ่านศูนย์กลางเมล็ดสี่ระดับคือ 5.5 6.5 7.5 และ 8.5 mm โดยใช้อัตราการไหลสองระดับคือ 8.56 และ 10.30 g/s จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการไหล ส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น และผลกระทบจากความสูงของเบตและเส้นผ่านศูนย์กลางของเมล็ดที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราการอบแห้งเมล็ดถั่วลิ้นเตาลดลง

กิตติ สถาพรประสาธน์ และคณะ (2020) ได้ทำการศึกษาการลดความชื้นเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งสเปาต์ฟลูอิดเบต ซึ่งเป็นการอบแห้งพริกไทยด้วยเทคนิคสเปาเต็ดเบตทำงานร่วมกับฟลูอิดไดซ์เบต มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้งเมล็ดพริกไทย และศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิลมร้อน ความเร็วลม เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และ

คุณภาพหลังการอบแห้ง ซึ่งการพัฒนาเทคนิคสเปาเต็ดเบตทำงานร่วมกับฟลูอิดไดซ์เบต เพื่อแก้ปัญหาแรงดันตกคร่อมของฟลูอิดไดซ์เบต และปัญหาการหมุนเวียนต่ำของสเปาเต็ดเบต โดยการดำเนินการใช้เมล็ดพริกไทยสดที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 28.66 % (db) ทำการทดลองปรับอุณหภูมิการอบแห้งสามระดับ คือ 70 80 และ 90°C โดยเมล็ดพริกไทยจะถูกเป่าขึ้นไปในอากาศโดยอิทธิพลจากลำสเปาต์ เมื่อเมล็ดพริกไทยลอยไปถึงจุดสูงสุดของเบต ความเร็วจะค่อยๆลดลง และไหลแยกออกจากกระแสมตกลงมายังเบต และถูกลมที่อยู่ใต้ตะแกรงเป่าอีกครั้งซึ่งเป็นอิทธิพลลมร้อนจากฟลูอิดไดซ์เบต จากผลการทดลองพบว่า ที่ความเร็วลมสเปาต์ 24 m/s ความเร็วลมฟลูอิดไดซ์เบต 9 m/s อุณหภูมิอบแห้ง 90°C ที่ความสูงเบต 10 cm มีอัตราการอบแห้งสูงสุด เมื่อพิจารณาความสิ้นเปลืองพลังงาน พบว่าที่ความเร็วลมสเปาต์ 18 m/s ความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ 9 m/s อุณหภูมิอบแห้ง 90°C ที่ความสูงเบต 15 cm มีค่า SEC = 7.936 kWh/kg_{water} ซึ่งเป็นความสิ้นเปลืองพลังงานน้อยที่สุด



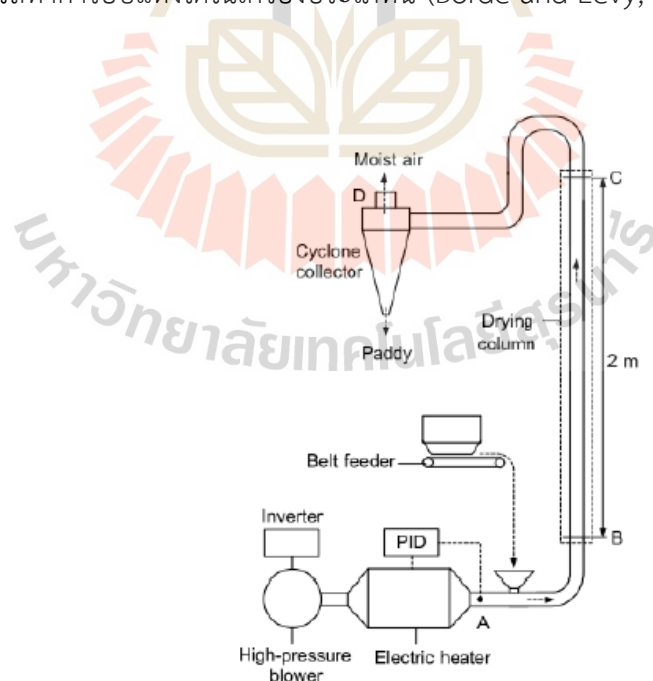
รูปที่ 2.11 เครื่องลดความชื้นเมล็ดพริกแบบสเปาเต็ดเบต (Spouted Bed)

ที่มา : (พิรสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ, 2557)

2.4.9 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic dryer)

จากปัญหาการอบแห้งวัสดุความชื้นสูงที่ต้องใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนาน เนื่องจากมีการหมุนเวียนของวัสดุต่ำในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบตและสเปาเต็ดเบต เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมจึงเข้ามาเป็นทางเลือกในการอบแห้งมากขึ้น (ปิยะพล พึ่งพงศ์พันธุ์ และคณะ, 2559) โดยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมทำงานโดยอาศัยหลักการ การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (Convection heat and mass transfer) ระหว่างอากาศร้อนกับวัสดุที่เป็นอนุภาคแข็ง

ซึ่งเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Borde and Levy, 2006) ซึ่งมี 6 องค์ประกอบพื้นฐาน แสดงดังรูปที่ 2.12 คือ 1.) ชุดทำความร้อน (Heater), 2.) อุปกรณ์ป้อนวัสดุ (Material feeder), 3.) หอบแห้ง (Drying column), 4.) อุปกรณ์แยกอากาศ (Cyclone collector), 5.) ถังเก็บวัสดุ (Dried product collector) และ 6.) พัดลมความดันสูง (Blower) โดยวัสดุเปียกจะถูกป้อนเข้าไปในกระแสาอากาศร้อน ทำให้วัสดุเคลื่อนที่ไปกับอากาศร้อนในหอบแห้ง เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นในหอบแห้งระหว่างวัสดุและอากาศร้อน ซึ่งระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนมักจะสั้นมาก หลังจากนั้นวัสดุและอากาศจะไหลออกจากหอบแห้ง ซึ่งในส่วนของวัสดุนั้นจะไหลไปเก็บที่ถังเก็บ ส่วนอากาศร้อนจะไหลไปยังอุปกรณ์แยกอากาศ เพื่อทำความสะอาดแยกฝุ่นที่ติดมากับอากาศออกจากกัน จากนั้นอากาศจะถูกปล่อยออกสู่ภายนอก ข้อดีของการอบแห้งด้วยวิธีนี้คือ ใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้น สามารถอบวัสดุแบบหมุนเวียนได้จนกว่าจะได้รับความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย สามารถติดตั้งภายในอาคารได้ วัสดุสามารถเข้าสู่ความชื้นสมดุลได้เร็ว เนื่องจากความหนาแน่นของวัสดุในหอบแห้งต่ำ เกิดการถ่ายโอนพลังงานความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งมีการบำรุงรักษาที่ง่าย และค่าบำรุงรักษาต่ำ เนื่องจากภายในตัวเครื่องมีส่วนที่เคลื่อนไหวน้อย มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน แต่อย่างไรก็ตามควรหลีกเลี่ยงการอบแห้งวัสดุที่จับตัวเป็นก้อนซึ่งไม่สามารถทำการอบแห้งได้ในเครื่องประเภทนี้ (Borde and Levy, 2006; Kemp, 1994)



รูปที่ 2.12 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic dryer)

ที่มา : (ปิยพล ฟุ้งพงศ์พันธุ์ และคณะ, 2559)

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการอบแห้งแบบพาหะลมโดยนักวิจัยหลายท่านพบว่า Bunyawanichakul, P. et al. (2007) ได้สร้างแบบจำลองการอบแห้งเมล็ดข้าว ในเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic dryer) โดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับการไหลเพื่ออธิบายคุณลักษณะการอบแห้งแบบพาหะลม ซึ่งใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลอง (Simulation) ซึ่งกำหนดให้ หอบแห้งสูง 300 เมตร ใช้ข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 33.3% (db) มีอุณหภูมิข้าวขาเข้าที่ 30°C สภาวะในการจำลอง คือ ใช้อุณหภูมิอากาศร้อนคงที่ 110°C ในการอบแห้ง โดยศึกษาอิทธิพลของเส้นผ่านศูนย์กลาง อัตราการป้อน และความเร็วอากาศร้อนขาเข้า ที่ส่งผลต่อจลนศาสตร์ การอบแห้ง จากผลการสร้างแบบจำลองพบว่า อัตราการลดความชื้นข้าวจะสูงขึ้นเมื่อ เพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางหอบแห้ง และความเร็วลมในการอบแห้ง และในทางตรงกันข้าม พบว่าอัตราการอบแห้งลดลงเมื่อ เพิ่มอัตราการป้อนข้าวเปลือก ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ต้องใช้หอบแห้งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ และอัตราการป้อนข้าวที่ต่ำ จึงจะลดความชื้นได้ต่ำเพียงพอ

ฉัตรชัย นิยมมล (2555) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อความสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม (Pneumatic dryer) ที่ใช้หอบแห้งแบบท่อเกลียว โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง ความเร็วอากาศที่ใช้อบแห้ง อัตราการป้อนข้าวเปลือก และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ หรือ SEC โดยในการทดลองใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 28% (db) จากผลการทดลองพบว่า สภาวะการอบแห้งที่ทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ หรือ SEC ต่ำที่สุดที่ 1.78 MJ/kg_{water} คือ การอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 100°C ใช้ความเร็วลม 30 m/s และใช้อัตราการป้อน 150 kg/h ซึ่งความชื้นสุดท้ายที่ลดลงต่ำสุดคือ 17.7% มาตรฐานแห้ง จากผลการทดลองสังเกตได้ว่าการใช้หอบแห้งแบบเกลียว สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้อย่างรวดเร็ว และมีความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ เมื่อเทียบกับการอบแห้งที่หอบแห้งเป็นท่อเรียบ

ปิยะพล พึ่งพงศ์พันธุ์ และคณะ (2559) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม (Pneumatic dryer) ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ขนาดของหอบแห้ง อุณหภูมิอบแห้ง และอัตราการป้อนข้าวเปลือก มีการดำเนินงานโดยใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 30% (db) ทดสอบอบแห้งที่อุณหภูมิต่างกันคือ 90 110 และ 130°C ที่อัตราการป้อนข้าวเปลือก 12 16 และ 20 kg/h โดยทดสอบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหอบแห้ง 2 แบบคือ 30 mm และ 50 mm ใช้ความเร็วอากาศเข้าสู่ห้องอบแห้งคงที่ที่ 15 m/s ซึ่งทำการแบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนคือ 1.) อบแห้ง 1 รอบ 2.) อบแห้ง 2 รอบ จากผล

การทดลองพบว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ของเครื่องลดลง เมื่อ เพิ่มอุณหภูมิการอบแห้ง อัตราการป้อนข้าวเปลือก และเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้ง ที่สภาวะเหมาะสมที่ทำให้ ความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำที่สุดที่ $1.6 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ คือ การอบแห้ง 1 รอบ ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางหอบแห้ง 50 mm ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 130°C และใช้อัตราการป้อน 20 kg/h ในส่วนของความชื้นสุดท้ายหลังการอบแห้งจะต่ำที่สุดที่ 19.3% (db) ที่เงื่อนไขการอบแห้ง 2 รอบ ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางหอบแห้ง 50 mm อุณหภูมิอบแห้ง 130°C และอัตราการป้อน 20 kg/h

จิตรรัตน์ จอกแก้ว (2016) ได้ทำการพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม (Pneumatic dryer) และได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อสมรรถนะเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น โดยปัจจัยที่ศึกษาคือ อุณหภูมิการอบแห้ง ความเร็วลมที่ใช้อบแห้ง และทำการตรวจสอบคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง โดยการทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ 1.) กรณีติดตั้งไซโคลนในการทดสอบ 2.) กรณีไม่ติดตั้งไซโคลนในการทดสอบ เพื่อศึกษาผลกระทบของไซโคลนต่อสมรรถนะเครื่อง ด้วย โดยดำเนินการอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ทำการอบแห้งครั้งละ 40 kg ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 80°C จากผลการทดลองพบว่า การไม่ติดตั้งไซโคลน ส่งผลให้อัตราการลดความชื้นของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีติดตั้งไซโคลน และพบว่า ที่สภาวะเหมาะสมที่ทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุดที่ $7.25 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ คือ ใช้อัตราการไหลอากาศ $0.0512 \text{ m}^3/\text{s}$ และถ้าหากพิจารณาเรื่องคุณภาพข้าว พบว่าที่สภาวะเหมาะสมที่ทำให้ ข้าวมีคุณภาพดีที่สุดคือ การใช้อัตราการป้อน $0.063 \text{ m}^3/\text{s}$ โดยจะได้ร้อยละต้นข้าวดีที่สุดที่ 36.84 %

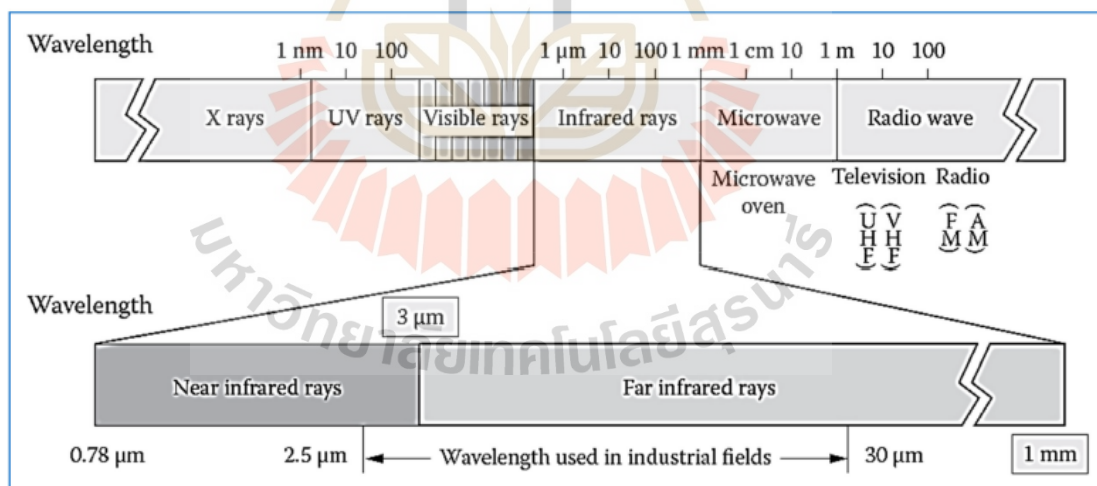
2.4.10 การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared Radiation dryer)

รังสีอินฟราเรดถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ 1800 โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Herschel เขาได้ทำการทดลองใช้ปริซึมเพื่อแยกสีของแสงที่ส่งมาจากดวงอาทิตย์ จากนั้นทำการวัดอุณหภูมิของแถบสีแต่ละแถว เขาพบว่ามีความร้อนที่สูงเกิดขึ้นบริเวณนอกเขตสเปกตรัมสีแดง ซึ่งเป็นบริเวณที่ตาไม่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งเป็นการทดลองที่มีการค้นพบรังสีอินฟราเรดครั้งแรก (Aboud, et al., 2019)

รังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic spectrum) ที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.75 ถึง 1,000 ไมโครเมตร (μm) ซึ่งอยู่ระหว่างคลื่นแสงที่ตามองเห็น (Visible region) และคลื่นไมโครเวฟ (Microwaves) แสดงดังรูปที่ 2.13 โดยรังสีอินฟราเรดสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท (Sakai and Hanazawa, 1994) ดังนี้

- 1) รังสีอินฟราเรดระยะใกล้ (Near – IR): ความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 0.75–1.4 μm
- 2) รังสีอินฟราเรดระยะกลาง (Mid – IR): ความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 1.4–3 μm
- 3) รังสีอินฟราเรดระยะไกล (Far – IR): ความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 3–1,000 μm

แหล่งกำเนิดของรังสีอินฟราเรด วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์สามารถปล่อยรังสีอินฟราเรดออกมาได้ (Aboud et al., 2019) โดยแหล่งกำเนิดแสงและแหล่งกำเนิดความร้อนส่วนใหญ่รวมถึงดวงอาทิตย์ พลังงานความร้อนที่แผ่ออกมาส่วนใหญ่เป็นการแผ่รังสีแบบอินฟราเรด (Rosenthal, 1992) คุณสมบัติพื้นฐานของการรับรังสีคือ 1.) การสะท้อน (Reflectivity) 2.) การดูดซับ (Absorptivity) และ 3.) การส่งผ่านหรือถ่ายเท (Emissivity transmissivity) เมื่อรังสีอินฟราเรดแผ่มากระทบกับผิววัตถุ จะเกิดกระบวนการดูดซับเข้าสู่เนื้อวัตถุ และเกิดการถ่ายเทลึกเข้าไปด้านใน และรังสีบางส่วนที่ไม่ถูกดูดซับ จะสะท้อนเปลี่ยนทิศทางออกไป โดยวัตถุแต่ละชนิดมีความสามารถในการแผ่รังสี และดูดซับรังสีแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของผิววัตถุแต่ละชนิด ซึ่งเราเรียกคุณสมบัตินี้ว่า สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (Emissivity (ϵ)) (Aboud et al., 2019)



รูปที่ 2.13 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและช่วงรังสีอินฟราเรด
ที่มา : (Aboud et al., 2019)

ในปัจจุบันมีการนำรังสีอินฟราเรดเข้ามาใช้ในสายงานที่หลากหลาย และอุตสาหกรรมด้านอาหารแหล่งความร้อนจากรังสีอินฟราเรดถือเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกที่มีความสำคัญ ข้อดีของรังสีอินฟราเรด Pan, Z. (2010) ได้กล่าวไว้ว่า รังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งพลังงาน

ความร้อนที่มีประสิทธิภาพ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีความสม่ำเสมอและมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันของพลังงานความร้อนที่ปล่อยออกมา ทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูง และใช้เวลาในการถ่ายเทความร้อนต่ำ ส่งผลให้ลดความสิ้นเปลืองพลังงาน อีกทั้งยังช่วยเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์อีกด้วย Nindo and Tang (2007) ได้กล่าวว่ารังสีอินฟราเรดเป็นพลังงานที่สะอาดที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับพลังงานเชื้อเพลิง แต่อย่างไรก็ตามในการสัมผัสรังสีอินฟราเรดต้องใช้ความระมัดระวังเนื่องจากมีอุณหภูมิสูง ควรหลีกเลี่ยงการสัมผัสในระยะเวลาที่ยาวนาน ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดแผลไหม้ได้ (Lee, et al., 2006)

แหล่งความร้อนรังสีอินฟราเรดที่นำมาใช้งานด้านการอบแห้งแบ่งออกเป็น 2 แหล่ง คือ 1) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric heaters): อุณหภูมิอยู่ในช่วง 1,100 – 2,200°C 2) ฮีตเตอร์เตาแก๊ส (Gas – fired heater): อุณหภูมิอยู่ในช่วง 1,100 – 2,200°C (Hung, et al., 1995) โดยฮีตเตอร์ชนิดไฟฟ้า (Electric heaters) มีการนำมาใช้งานแพร่หลายมากกว่าชนิดเตาแก๊ส เนื่องจากง่ายในการควบคุม ให้ความร้อนค่อนข้างเร็วและเป็นพลังงานที่สะอาด ซึ่งภายในฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะประกอบด้วยหลอดอินฟราเรดที่มีหลอดโลหะความต้านทานสูงอยู่ด้านใน โดยวัสดุที่นิยมนำมาทำหลอดอินฟราเรดคือ วัสดุประเภทเซรามิกที่มีคุณสมบัติทนความร้อนสูง เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า หลอดแก้วควอทซ์ ซึ่งจะปล่อยคลื่นอินฟราเรดระยะกลางออกมา (Aboud et al., 2019)

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดในการอบแห้งสามารถรวบรวมได้ดังนี้

Abe, T. and Afzal, T.M. (1997) ได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 4 แบบจำลองเพื่ออธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งข้าวเปลือกชั้นบางด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด แบบจำลองที่ใช้อธิบายคือ 1) แบบจำลองเอกโปเนนเชียล (The exponential model), 2) แบบจำลองเพจ (Page model), 3) แบบจำลองการแพร่กระจาย (A Diffusion model), 4) แบบจำลองการประมาณค่าการแพร่กระจาย (An approximation of diffusion) โดยการทดลองใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 25 – 47% มาตรฐานแห้ง นำไปอบแห้งที่ความเข้มรังสีอินฟราเรดต่างกันคือ 0.167 – 0.625 W/cm² โดยใช้ความเร็วอากาศอบแห้งที่แตกต่างกันที่ 0.3 – 0.7 m/s จากผลการทดลองพบว่า อัตราการลดความชื้นมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มของรังสีอินฟราเรด ค่าความชื้นเริ่มต้นที่แตกต่างกันไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการลดความชื้น ในส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า สมการของเพจ (Page model) เหมาะสมที่สุดในการอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งข้าวเปลือกชั้นบางด้วยรังสีอินฟราเรด

ฉัตรชัย นิยมล (2555) ศึกษาและทดสอบกระบวนการอบแห้งด้วยวิธีการแผ่รังสี

อินฟราเรดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ได้ศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งของแครอทลูกบาศก์ และกล้วยสไลด์บาง ทดลองอบแห้งแครอทลูกบาศก์ที่อุณหภูมิพื้นผิวควบคุม 60 – 80°C ความดันห้องอบแห้ง 7 – 10 kPa ส่วนกล้วยทดลองที่อุณหภูมิ 50 – 60°C โดยใช้ความหนาต่างกันคือ 2 – 4 mm จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งและความดันสุญญากาศห้อง ส่งผลให้ อัตราการลดความชื้นของแครอทลูกบาศก์และกล้วยสไลด์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ความหนาที่ลดลงของกล้วยสไลด์บาง มีอิทธิพลต่อการลดความชื้นที่เพิ่มขึ้น

Hany S. EL- Mesery et al. (2021) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความชื้นอินฟราเรด และอุณหภูมิอากาศ ที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานและคุณภาพทางกายภาพของแอปเปิ้ล ที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดแบบไฮบริด ทำการทดลองโดยใช้ผลแอปเปิ้ลสดที่มีความชื้นเริ่มต้น 82.0% (wb) หั่นเป็นเนื้อบาง 2 mm นำไปอบแห้งที่ความเข้มรังสีอินฟราเรดต่างกันคือ 0.15 – 0.3 W/ cm² และใช้อากาศหมุนเวียนที่อุณหภูมิต่างกันคือ 30 – 50°C จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มความเข้มรังสีอินฟราเรด และอุณหภูมิอากาศหมุนเวียน ส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการอบแห้งลดลง สภาวะเหมาะสมที่มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุดคือ ใช้ความเข้มรังสีอินฟราเรด 0.3 W/ cm² อุณหภูมิอากาศหมุนเวียน 50°C ซึ่งมีความสิ้นเปลืองพลังงานอยู่ที่ 4.32 MJ/kg_{water} ในส่วนของคุณภาพพบว่า ความเข้มของรังสีอินฟราเรดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ การหดตัวและการคายน้ำของแอปเปิ้ลเพิ่มขึ้น

Amini, G. et al. (2021) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนสีและสร้างแบบจำลองจลนศาสตร์การอบแห้งของเมือกหรือมิวซิเลจของเมล็ดแมงลัก ในกระบวนการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด โดยในการทดลองใช้เมือกหรือมิวซิเลจของเมล็ดแมงลัก ที่มีความชื้นเริ่มต้น 99.4% (wb) นำมาอบแห้งด้วยความเข้มรังสีอินฟราเรดกำลังต่างกันคือ 150 – 375 W และปรับระยะเวลาหลอดอินฟราเรดและใช้ความหนาของเมือกต่างกัน เพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาหลอดอินฟราเรดและความหนาของเมือกพร้อมด้วย จากผลการทดลองพบว่า กำลังของหลอดอินฟราเรดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มระยะของหลอดรังสีอินฟราเรดและลดความหนาของเมือกส่งผลให้อัตราการลดความชื้นลดลง ในส่วนของการเปลี่ยนสีพบว่า เมื่อความเข้มของหลอดอินฟราเรดเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความสว่างเพิ่มขึ้น (*L) และแบบจำลองของเพจ (Page model) มีความเหมาะสมที่สุดในการอธิบายจลนศาสตร์การอบแห้งเมือกโหระพาด้วยรังสีอินฟราเรด

ณัฐพล แซ่ลิ้ม เทวรัตน์ ตรีอำนาจ และกระวี ตรีอำนาจ (2561) ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมี มีวัตถุประสงค์เพื่อ

ประเมินสมรรถนะการอบแห้งโดยพิจารณาจาก ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) อัตราการอบแห้ง คุณภาพข้าวซึ่งประกอบด้วย เปอร์เซ็นต์ข้าวตัน (HRY) และดัชนีความขาว(WI) เครื่องที่พัฒนาประกอบด้วย ห้องอบแห้งทรงกระบอก 2 ชั้น คือ ทรงกระบอกชั้นในทำจากแผ่นกระจกใสเส้นผ่านศูนย์กลาง 26.5 เซนติเมตร และทรงกระบอกชั้นนอกทำจากตะแกรงเหล็กเจาะรูเส้นผ่านศูนย์กลาง 29.5 เซนติเมตร ภายในทรงกระบอกด้านในติดตั้งฮีตเตอร์อินฟราเรดไฟฟ้าขนาด 1200 W และด้านล่างติดตั้งพัดลมความดันสูง (Blower) 120 W ทำการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้น 23 – 26 % (wb) อบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C อัตราการไหลอากาศ 1.075 m³/min ทดลองที่อัตราการไหลข้าวเปลือกต่างกันคือ 0.837 1.228 1.875 และ 2.308 kg/min จากการทดลองพบว่า สภาวะที่ส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงสุด ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด และคุณภาพข้าวดีที่สุด คือ การอบแห้งที่อัตราการไหลข้าวเปลือก 1.875 kg/min

นอกจากนี้รังสีอินฟราเรดยังถูกนำไปใช้ร่วมกับการอบแห้งประเภทอื่น เป็นการประยุกต์ใช้ในการอบแห้งพลังความร้อนร่วมให้เกิดประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่ง Aboud, S. (2019) ได้กล่าวว่าการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งที่มากกว่าการอบแห้งที่แยกกัน ดังนั้นจากการที่ได้ศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้รังสีอินฟราเรดเป็นพลังงานความร้อนเสริมสามารถสรุปได้ดังนี้

นเรศ มีโส, (2555) ทำการพัฒนาแบบจำลองที่ประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด เพื่อลดข้อจำกัดของฟลูอิดไดซ์เบดที่มีความชื้นสุดท้ายที่ยังสูงหลังการอบแห้ง และเพื่อเพิ่มคุณภาพในเมล็ดข้าว โดยการสร้างแบบจำลองการอบแห้งหลายขั้นตอน (multi-stage drying) ซึ่งประกอบด้วย 1.) การอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed drying) 2.) การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดระยะไกล (Far infrared irradiation) 3.) ปรับอุณหภูมิและความชื้น (Tempering) 4.) การระบายความร้อนด้วยอากาศแวดล้อม (Ambient air ventilation) กำหนดให้อุณหภูมิการอบแห้งด้วยฟลูอิดไดซ์เบดอยู่ที่ 150°C เป็นเวลา 1 – 2 นาที จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่ความเข้ม 0.3 – 0.5 W/ cm² จากผลการทดลองพบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง และชี้ให้เห็นว่า รังสีอินฟราเรดมีประสิทธิภาพในการลดความชื้นข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นสูง และพบว่าเมื่อเมล็ดข้าวสัมผัสกับรังสีอินฟราเรดจะทำให้อุณหภูมิของเมล็ดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ชั้นเจาะทะลุ (Penetrating layer)

นเรศ มีโส, (2555) ได้ทำการพัฒนาเทคนิคการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดแบบคลื่นสั้น เพื่อศึกษาอิทธิพลของการแผ่รังสี ความเร็วลมร้อน และความสูงเบดข้าวเปลือกที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการอบแห้งข้าวเปลือก และคุณภาพข้าว โดยในการ

ทดลองใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท 1 นำไปอบแห้งในห้องอบแห้งที่ติดตั้งเบดตะแกรงสำหรับป้อนข้าวเปลือก และด้านบนห้องจะติดตั้งอุปกรณ์กำเนิดรังสีอินฟราเรดแบบคลื่นสั้น ลมร้อนจะถูกเป่าเข้ามาภายในห้องด้านล่างตะแกรง จากนั้นเมื่อข้าวกระทบกับลมร้อน ส่งผลให้ข้าวเปลือกลอยตัวอิสระภายในห้องอบแห้ง ในขณะที่เดียวกันรังสีอินฟราเรดจากด้านบนห้องอบแห้งจะแผ่ลงมากระทบข้าวเป็นขั้นตอนที่สอง จากผลการทดลองพบว่า กำลังของรังสีอินฟราเรด ความเร็วอากาศร้อนที่เพิ่มขึ้น มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิ และร้อยละข้าวตันของข้าวเปลือก ที่สภาวะเหมาะสมในการอบแห้งคือ ใช้กำลังการแผ่รังสีคลื่นสั้น 8000 W ร่วมกับอุณหภูมิอากาศร้อน 40°C ที่ความเร็วลม 1.12 m/s ใช้ความสูงเบด 6 cm

จักรมาศ เลหาวิช (2559) ได้ทำการพัฒนาและสร้างเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน และการเทมเปอร์ริง โดยทำการศึกษาดูแปรต่างๆที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการอบแห้ง และหาสภาวะที่เหมาะสมของระบบ ตัวแปรที่ศึกษาคือ ระดับความชื้นเริ่มต้นที่ต่างกัน 20 – 30 % (wb) เวลาที่ใช้ออบแห้งต่างกันคือ 2 – 6 นาที ระดับอุณหภูมิลมร้อนที่ต่างกันคือ 40 – 60°C ระยะเวลาในการเทมเปอร์ริง 0 – 60 นาที และระยะเวลาอบแห้งด้วยลมร้อน 0 – 300 นาที จากผลการทดลองพบว่าการใช้รังสีอินฟราเรดสามารถลดความชื้นได้ในช่วงเวลาสั้นๆ และเหมาะกับการลดความชื้นข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นสูง รังสีอินฟราเรดมีส่วนช่วยให้เมล็ดข้าวรับความร้อนทั้งภายในและนอกเมล็ดพร้อมๆกัน ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็วภายในเมล็ด ในส่วนของการเทมเปอร์ริงพบว่า ส่งผลน้อยมากต่อการลดความชื้น และเมื่อใช้อุณหภูมิลมร้อนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งคือ ใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงกว่า 25% (wb) ขึ้นไป อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไม่เกิน 4 นาที โดยใช้อุณหภูมิลมร้อนไม่เกิน 50°C และใช้เวลาในการอบแห้งด้วยลมร้อนน้อยกว่า 180 นาที

เสาวณี คณาภรณ์ (2551) ได้ทำการพัฒนาและสร้างเครื่องอบแห้งข้าวกล้องชั้นบางพลังงานความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานจากลมร้อน โดยทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อ อัตราการอบแห้ง คุณภาพข้าว และความสิ้นเปลืองพลังงาน ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิการอบแห้ง ความชื้นเริ่มต้น และความเข้มของรังสีอินฟราเรด ซึ่งใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 26.0 – 33.6% (db) โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ 1) การอบแห้งใช้พลังงานจากรังสีอินฟราเรด 2) ใช้พลังงานจากลมร้อน 3) ใช้พลังงานความร้อนร่วมโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน จากการทดลองพบว่า การอบแห้งที่ใช้พลังงานความร้อนร่วมมีอัตราการอบแห้งสูงสุด และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิตอบแห้ง ส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น และความสิ้นเปลืองพลังงานลดลง นอกจากนี้พบว่า การอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว การเพิ่มความเข้ม

ของรังสีอินฟราเรด ไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการอบแห้ง ในส่วนของคุณภาพข้าวพบว่า ร้อยละข้าวต้น จะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสุดท้ายข้าวเปลือกต่ำกว่า 20% (db) และใช้อุณหภูมิการอบแห้งไม่เกิน 60°C

2.5 การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกสามารถประเมินประสิทธิภาพ โดยพิจารณาจาก 2 ส่วนคือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และประสิทธิภาพในการอบแห้ง (จิตรารัตน์ จอกกิว, 2559)

2.5.1 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง

พิจารณาการใช้ประโยชน์จากความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออก ซึ่งเป็นอัตราส่วน ระหว่างความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำจากวัสดุ ต่อปริมาณความร้อนที่ให้แก่เครื่องอบแห้ง ดังสมการ ที่ 2.7

$$\eta_{\text{dry}} = \frac{Q_{\text{evap}}}{Q_a} \times 100 \quad (2.7)$$

หรือ

$$\eta'_{\text{dry}} = \frac{Q_{\text{evap}} + Q_s}{Q_a} \times 100 \quad (2.8)$$

สามารถประเมินได้ในรูปของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) คือ ดังสมการ 2.9 ซึ่งเป็นค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง

$$\text{SEC} = \frac{E}{W_i - W_f} \times 100 \quad (2.9)$$

2.5.2 ประสิทธิภาพในการอบแห้ง

พิจารณาประสิทธิภาพในการอบแห้งประเมินจาก อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) ซึ่งคำนวณได้จาก อัตราส่วนของปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาการอบแห้ง หรือ ปริมาณความชื้นที่หายไปจากวัสดุต่อระยะเวลาการอบแห้ง ดังสมการที่ 2.10 และ 2.11

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t} \times 100 \quad (2.10)$$

หรือ

$$DR = \frac{M_i - M_f}{t} \times 100 \quad (2.11)$$

โดยที่	η_{dry}	คือ	ประสิทธิภาพการอบแห้ง (%)
	η'_{dry}	คือ	ประสิทธิภาพรวมการอบแห้งเมื่อรวมความร้อนสัมผัส (%)
	DR	คือ	อัตราการอบแห้ง (kg/h หรือ % db/h)
	SEC	คือ	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (kJ/kg _{water})
	Q_{evap}	คือ	ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ (kJ)
	E	คือ	พลังงานรวมทั้งหมดที่ใช้ในระบบอบแห้ง (kJ)
	Q_s	คือ	ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ (kJ)
	W_i	คือ	น้ำหนักวัสดุก่อนอบแห้ง (kg)
	W_f	คือ	น้ำหนักวัสดุหลังอบแห้ง (kg)
	M_i	คือ	ความชื้นวัสดุก่อนอบแห้ง (%db)
	M_f	คือ	ความชื้นวัสดุหลังอบแห้ง (%db)
	t	คือ	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

2.6 การตรวจสอบคุณภาพของการขัดสี

ในทางอุตสาหกรรมการค้าข้าวการเพิ่มปริมาณข้าวเต็มเมล็ด และข้าวตัน (Head rice) ถือว่าเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเมล็ดข้าว การแตกหักของเมล็ดข้าวมักเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการการสีข้าว เนื่องจากเมล็ดข้าวดูดซับความชื้นอย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดการอ่อนตัวลงและเกิดเป็นรอยแตกเป็นผลให้ร้อยละข้าวตัน (Head rice yield, HRY) หลังการสีลดลงอีกด้วย (Banaszek and Siebenmorgen, 1989)

การตรวจสอบและประเมินปริมาณข้าวเต็มเมล็ด (Whole grain) และข้าวตัน (Head rice) หลังกระบวนการอบแห้งและกระบวนการสีข้าวจึงเป็นสิ่งสำคัญ คุณภาพการสีของข้าวประเมินได้จากปริมาณข้าวเต็มเมล็ด (Whole grain) และข้าวตัน (Head rice) ข้าวที่มีคุณภาพการสีดี คือข้าวที่ผ่านกระบวนการขัดสีแล้วได้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและข้าวตันสูง มีปริมาณข้าวหัก (Broken rice) น้อย

การประเมินคุณภาพการสีของข้าวเกี่ยวข้องกับการแปรสภาพข้าวหรือการสีข้าว (Rice milling) ซึ่งหมายถึง การทำให้เปลือก รำ และคัพภะออกจากเมล็ดข้าว (จิตรารัตน์ จอกแก้ว, 2559)

นำน้ำหนักข้าวเปลือก ข้าวกล้อง ข้าวขาว และข้าวเต็มเมล็ด ไปคำนวณหา ปริมาณแกลบ รำ และข้าวเต็มเมล็ด ดังสมการ (2.12) – (2.14) (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรกรรมและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2555)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของแกลบ} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก} - \text{น้ำหนักข้าวกล้อง}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100 \quad (2.12)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของรำ} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวกล้อง} - \text{น้ำหนักข้าวขาว}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100 \quad (2.13)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ข้าวตัน} = \frac{\text{น้ำหนักตันข้าว}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100 \quad (2.14)$$

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการพัฒนาต้นแบบระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมพลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรด เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้น และเพื่อประเมินเงื่อนไขการทำงานที่ดีที่สุดของระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้น

ซึ่งบทนี้จะอธิบายถึง อุปกรณ์และเครื่องมือการวัดในการทดลอง และขั้นตอนการดำเนินงานต่างๆ โดยจะแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

3.1 ตัวอย่างวัสดุอบแห้ง

3.1.1 ข้าวเปลือก

ในการทดสอบการอบแห้งครั้งนี้วัสดุที่ใช้ทดสอบคือข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เก็บเกี่ยวจากอำเภอลำปลายมาศ จังหวัดบุรีรัมย์ ช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2564 ซึ่งนำข้าวมาเก็บรักษาไว้ในห้องเย็นที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 4°C แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างเมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ใช้ทดลองการอบแห้ง

3.1.2 ขั้นตอนการเตรียมข้าวเปลือกก่อนการอบแห้ง

เนื่องจากข้าวเปลือกที่นำมาทดสอบเป็นข้าวเก่าที่ผ่านการเก็บเกี่ยวมาแล้วเมื่อปลายปี พ.ศ 2564 ส่งผลให้ความชื้นที่สะสมอยู่ในเมล็ดข้าวลดลงตามเวลาการเก็บรักษา ดังนั้นเพื่อให้ตัวอย่างข้าวที่นำมาทดลองมีความชื้นเริ่มต้น 23-24 % (wb) จำเป็นต้องมีการนำข้าวมาเพิ่มความชื้นก่อนทดลองทุกครั้ง ซึ่งขั้นตอนการเพิ่มความชื้นข้าวก่อนการทดลองมีดังนี้

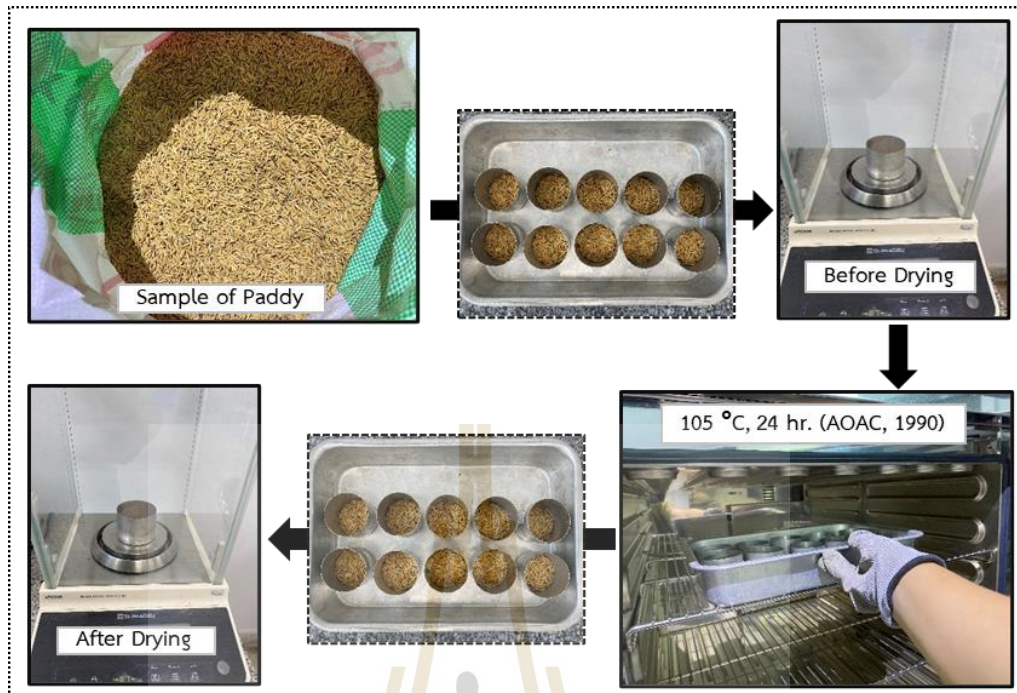
3.1.2.1 นำชุดข้าวเปลือกที่จะนำมาทดลอง 20 kg ออกมาจากห้องเย็นและนำมาผึ่งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.1.2.2 นำข้าวชุดข้าวเปลือกมาตรวจหาความชื้นเริ่มต้น เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณปริมาณน้ำที่จะต้องเติมเข้าไปเพื่อเพิ่มความชื้นข้าวเปลือก โดยขั้นตอนการหาความชื้นเริ่มต้นผู้วิจัยจะทำการสุ่มตัวอย่างข้าวเปลือก นำมาชั่งน้ำหนักก่อนนำไปอบในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (AOAC, 1990) จากนั้นนำออกมาชั่งน้ำหนักหลังการอบแห้ง และทำการคำนวณหาความชื้นเริ่มต้นตามสมการที่ 2.2 ที่แสดงในบทที่ 2

3.1.2.3 ปริมาณน้ำที่ผู้วิจัยจะเติมเข้าไปในตัวอย่างเพื่อให้ได้ความชื้นเป้าหมายที่ต้องการ แสดงดังสมการที่ 3.1 (อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว, 2564)

$$W_{\text{water,add}} = \frac{0.01(W_{\text{net}} - W_{\text{dry,net}}) - (M_{\text{target}} - W_{\text{net}})}{(M_{\text{target}} - 0.01)} \quad (3.1)$$

โดยที่	$W_{\text{water,add}}$	คือ มวลของน้ำที่จะต้องเติมเข้าไปในตัวอย่าง (g)
	W_{net}	คือ มวลของข้าวเปลือกทั้งหมดที่นำมาเตรียมตัวอย่าง (g)
	$W_{\text{dry,net}}$	คือ มวลแห้งของข้าวเปลือกทั้งหมดที่นำมาเตรียมตัวอย่าง (g)
	M_{target}	คือ ความชื้นเป้าหมาย (% wb)



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการหาความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเติมน้ำเพื่อเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกก่อนนำมาทดลอง

3.2 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรดที่พัฒนาขึ้น

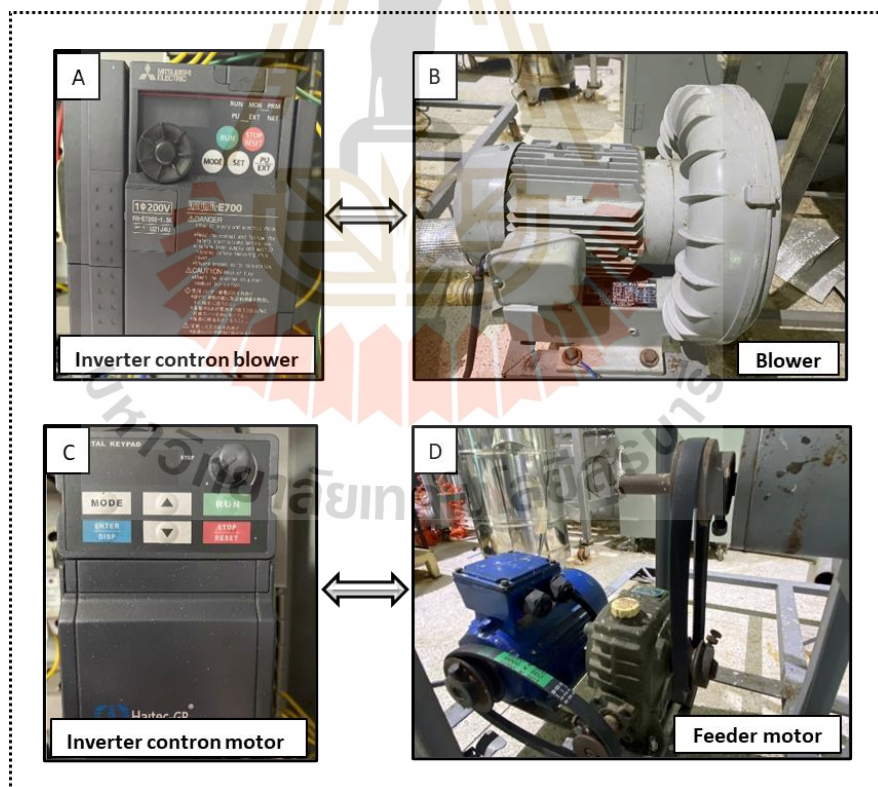
3.2.1 ส่วนประกอบของเครื่อง

ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้ง แสดงดังรูปที่ 3.4 – 3.11 ซึ่งมีรายละเอียดของส่วนประกอบดังนี้

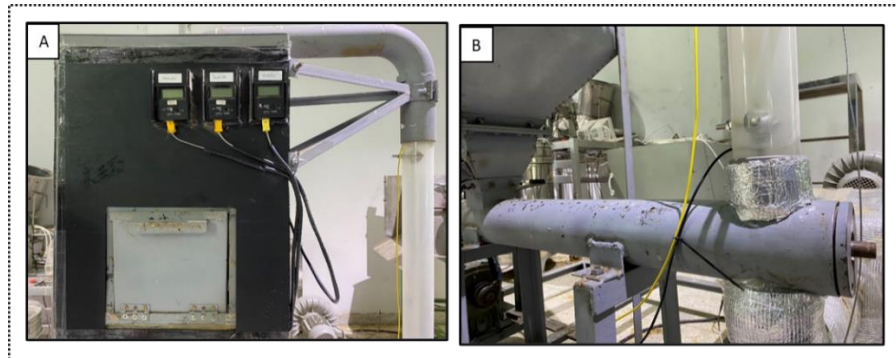
1. พัดลมความดันสูง (Blower) ขนาด 1.5 kW ยี่ห้อ HITACHI รุ่น VORTEX ซึ่งมีหน้าที่ป้อนอากาศความเร็วสูงเข้าไปในห้องอบแห้ง เพื่ออบแห้งผลิตภัณฑ์ โดยอาศัยกระบวนการพาความร้อน แสดงดังรูปที่ 3.6
2. อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ควบคุมพัดลมความดันสูงยี่ห้อ MITSUBISHI รุ่น E700 มีหน้าที่ในการควบคุมความเร็วรอบของพัดลมความดันสูงให้ได้ความเร็วรอบที่ต้องการ แสดงดังรูปที่ 3.6
3. ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric heater) ขนาด 3 kW ซึ่งถูกห่อหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนระหว่างการใช้งาน โดยฮีตเตอร์ไฟฟ้าถูกใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศก่อนจะไหลเข้าไปในห้องอบแห้ง แสดงดังรูปที่ 3.8
4. เครื่องควบคุมอุณหภูมิฮีตเตอร์ (Temperature control) ยี่ห้อ BERM รุ่น REX-C100 ซึ่งถูกใช้เพื่อควบคุมอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้ามาเพิ่มอุณหภูมิในฮีตเตอร์ไฟฟ้าให้คงที่และสม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่ 3.8
5. สกรูลำเลียงข้าว (Feeder) ยาว 1 เมตร ซึ่งเกลียวทำจากเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร (จิตรารัตน์ จอกแก้ว (2559) แสดงดังรูปที่ 3.7
6. มอเตอร์ขับเคลื่อนสกรูขนาด 0.75 kW ซึ่งทำหน้าที่ในการขับเคลื่อนสกรูลำเลียงข้าวเข้าสู่ห้องอบแห้ง แสดงดังรูปที่ 3.6
7. อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ควบคุมมอเตอร์ยี่ห้อ HATTEC-GR มีหน้าที่ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ได้ความเร็วรอบที่ต้องการเพื่อควบคุมอัตราการป้อนข้าวให้คงที่ แสดงดังรูปที่ 3.6
8. หอบแห้งที่ทำจากท่ออะคริลิขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 74 มิลลิเมตร ยาว 1 เมตร (จิตรารัตน์ จอกแก้ว, 2559) แสดงดังรูปที่ 3.10
9. ถังเก็บข้าวขนาด $0.40 \times 0.50 \times 0.80 \text{ m}^3$ (จิตรารัตน์ จอกแก้ว (2559) แสดงดังรูปที่ 3.10



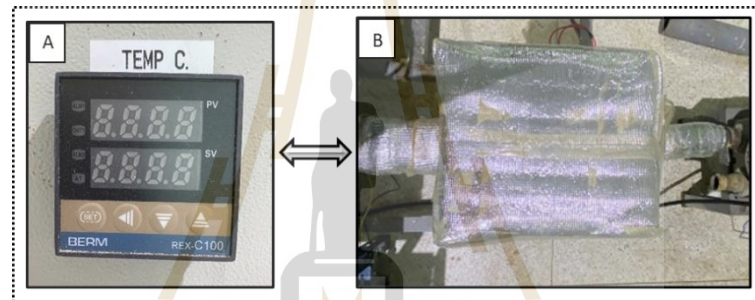
รูปที่ 3.5 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรดที่พัฒนาขึ้น



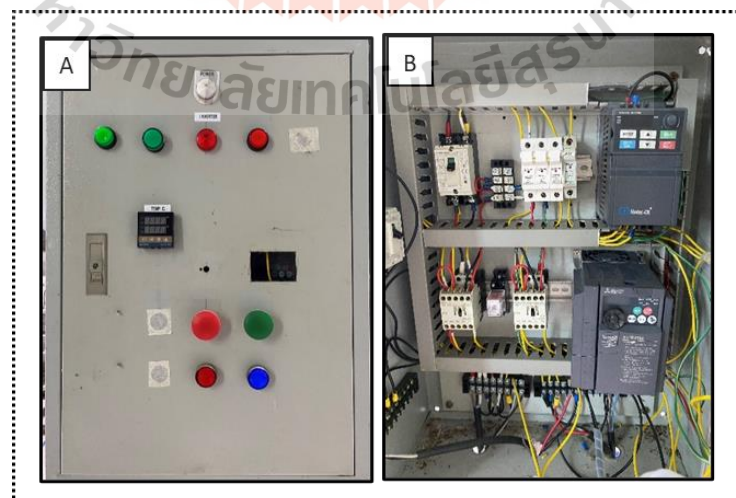
รูปที่ 3.6 (A) อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ควบคุมพัดลมความดันสูง
 (B) พัดลมความดันสูง (Blower) และ (C) อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ควบคุมมอเตอร์
 (D) มอเตอร์ขับเคลื่อน (Feeding motor)



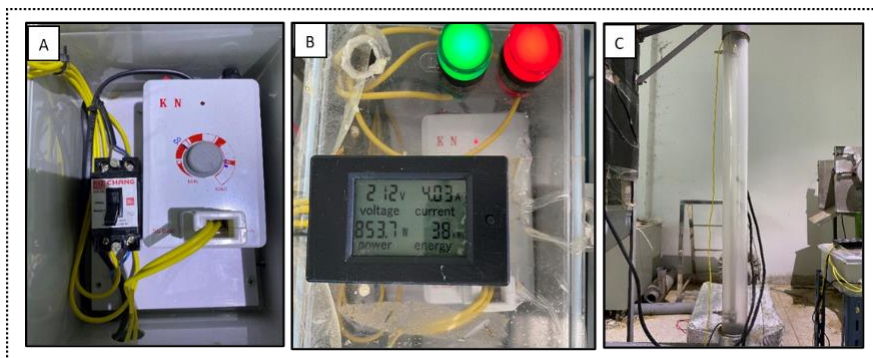
รูปที่ 3.7 (A) ถังเก็บข้าวขนาด $0.40 \times 0.50 \times 0.80 \text{ m}^3$
 (B) สกรูลำเลียงข้าว (Feeder) ยาว 1 เมตร



รูปที่ 3.8 (A) เครื่องควบคุมอุณหภูมิฮีตเตอร์ (Temperature control)
 (B) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric heater) ขนาด 3 kW



รูปที่ 3.9 (A) และ (B) ตู้ควบคุมการทำงานของเครื่องอบแห้ง



รูปที่ 3.10 (A) สวิตช์ควบคุมกระแสไฟฟ้า (Dimmer Switch)

(B) ดิจิตอลแอมป์มิเตอร์โวลต์มิเตอร์ (Peacefair PZEM-021 AC)

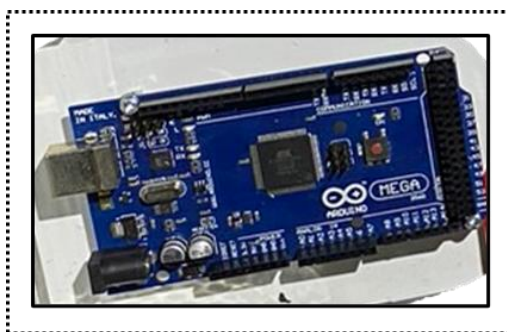
(C) หออบแห้งที่ทำจากท่ออะคริลิก และ หลอดอินฟราเรด ชนิดควอทซ์ขนาด 1 kW

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวัดค่าในการทดลอง

ในการทำการทดลองครั้งนี้ ข้อมูลต่างๆ ที่มีความจำเป็นต่อการวิเคราะห์ผลการทดลอง เช่น อุณหภูมิและความชื้น ณ จุดต่างๆของเครื่องอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น และความเร็วมของอากาศอบแห้ง ข้อมูลเหล่านี้ล้วนได้มาจากการวัดค่า โดยเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ผู้วิจัยใช้วัดค่าเพื่อเก็บข้อมูลดังกล่าวมีดังนี้

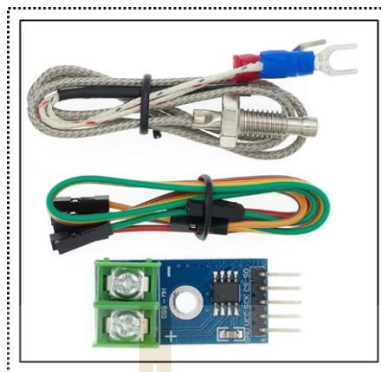
3.3.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 AT

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 AT เป็นบอร์ดที่ใช้รับค่าและประมวลผลข้อมูลที่เก็บวัดจากเซนเซอร์ต่างๆ โดยจะทำการเขียนโปรแกรมภาษา C/C++ และแสดงค่าผ่านโปรแกรม Arduino IDE เวอร์ชัน 1.8.19 แสดงดังรูปที่ 3.11



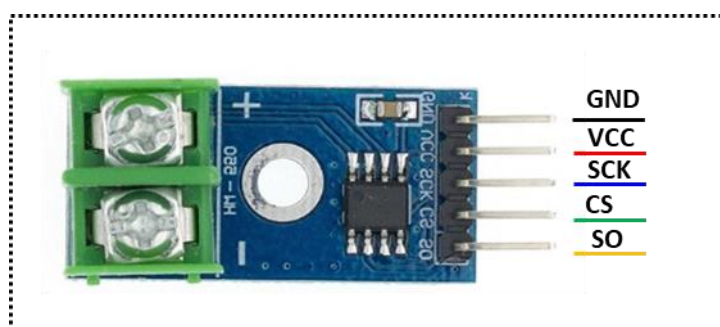
รูปที่ 3.11 (A) บอร์ด Arduino Mega 2560 AT

3.3.2 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ K-Type Thermocouple และ MAX6675 Module



รูปที่ 3.12 K-Type Thermocouple and MAX6675 Module

ในการวัดอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ ในกระบวนการอบแห้ง เครื่องมือที่ผู้วิจัยเลือกใช้ในการวัดค่าอุณหภูมิคือ เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ K-Type Thermocouple เนื่องจากเป็นที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุดในงานวิจัยด้านการอบแห้ง ซึ่งตัวเซ็นเซอร์ทำจากส่วนประกอบของวัสดุ Chromel และ Alomel ที่สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงถึง $1,400^{\circ}\text{C}$ และต่ำสุดถึง -200°C แสดงดังรูปที่ 3.11 และนอกจากนี้การเชื่อมต่อข้อมูลอุณหภูมิที่วัดได้จากตัวเซ็นเซอร์เข้ามาแสดงผลในโปรแกรม Arduino IDE ต้องอาศัยอุปกรณ์อีกหนึ่งตัวที่มีชื่อว่า MAX6675 Module ซึ่งเป็นตัวกลางการสื่อสารแบบ SPI (Serial Peripheral Interface) ระหว่างบอร์ด Arduino และ K-Type Thermocouple ในการรับส่งข้อมูลระหว่างกัน โดยส่วนประกอบของ MAX6675 Module แสดงดังรูปที่ 3.13 สามารถอธิบายได้ดังนี้

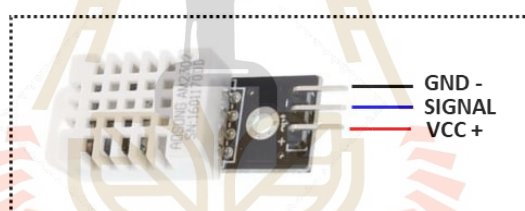


รูปที่ 3.13 ส่วนประกอบของ MAX6675 Module

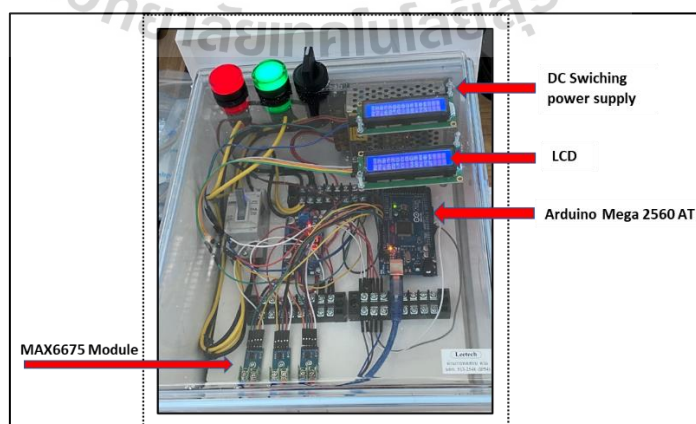
- 1.) GND คือ ขาที่ใช้เชื่อมต่อกับสายดินที่มีขั้วเป็นลบ (-)
- 2.) VCC คือ ขาที่ใช้เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีขั้วบวก (+) ที่แรงดัน 5 V
- 3.) SCK (Serial Clock) คือ สัญญาณนาฬิกาที่ถูกส่งออกจาก Master (บอร์ด Arduino Mega 2560 AT) เพื่อเป็นสัญญาณอ้างอิงในการทำงาน
- 4.) CS (Chip select) คือ สัญญาณที่ Master (บอร์ด Arduino Mega 2560 AT) เลือกว่าต้องการให้ Slave (K-Type Thermocouple) ตัวไหนทำงาน
- 5.) SO (Slave out) คือ สัญญาณที่ Slave (K-Type Thermocouple) ส่งกลับไปยัง Master (บอร์ด Arduino Mega 2560 AT)

3.3.3 เซ็นเซอร์ DHT22 (AM2302)

ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อม ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ส่วนประกอบของ เซ็นเซอร์ DHT22 (AM2302)



รูปที่ 3.15 ตู้ควบคุมการต่อวงจรเซ็นเซอร์วัดค่าเข้ากับบอร์ด (Arduino)

3.3.4 เครื่องวัดความเร็วลมแบบดิจิทัล (Anemometer AHJ-503)

ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความเร็วลมขาออกหอบแห้งในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 เครื่องวัดความเร็วลมแบบดิจิทัล (Anemometer AHJ-503)

3.3.5 มิเตอร์ไฟฟ้า



รูปที่ 3.17 มิเตอร์ไฟฟ้า 1 Phase ยี่ห้อ MITSUBISHI ELECTRIC รุ่น MF-37E 5(15)A

3.3.6 เครื่องวัดความขาว



รูปที่ 3.18 เครื่องวัดความขาว Model : Kett C- 600, Kett Electronic Laboratory Corporation, Tokyo, Japan

3.3.7 เครื่องแยกเมล็ดข้าวหัก (ตะแกรงกลมยาว)



รูปที่ 3.19 เครื่องคัดแยกเมล็ดข้าวหัก

3.3.8 เครื่องสีข้าวและขัดขาว

สำหรับการสีข้าวและขัดขาวข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นเพื่อตรวจสอบคุณภาพข้าวในด้านของเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน



รูปที่ 3.20 เครื่องสีข้าวและขัดขาว ยี่ห้อ MARTEC รุ่น 10

3.4 การผึ่งข้าวเปลือกให้แห้งเพื่อใช้เป็นชุดควบคุมคุณภาพ

ขั้นตอนการทำชุดควบคุมคุณภาพข้าวเปลือกด้วยวิธีการผึ่งให้แห้งแสดงดังรูปที่ 3.21 สามารถทำได้ดังนี้

- 1) นำข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 23-24 % มาตรฐานเปียก ไปผึ่งในที่ร่ม
- 2) ทำการสูมตัวอย่างเพื่อนำไปวัดความชื้นทุกวัน จนกระทั่งข้าวเปลือกมีความชื้นลดลงเหลือ 14 % มาตรฐานเปียก
- 3) แล้วนำข้าวเปลือกที่ผ่านการผึ่งในที่ร่มไปตรวจวัดคุณภาพข้าว ได้แก่ เปอร์เซ็นต์ข้าวตันและดัชนีความขาว



รูปที่ 3.21 การผึ่งข้าวเปลือกเพื่อใช้เป็นชุดควบคุม

3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าความชื้น

ในการทดลองการอบแห้งข้าวเปลือกข้อมูลที่สำคัญที่ขาดไม่ได้คือค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ ซึ่งมีวิธีในการหาค่าตามมาตรฐาน Association of Official Analytical Chemists (AOAC) ซึ่งมีขั้นตอนการหาสามารถอธิบายได้ดังนี้ ขั้นตอนแรกจะทำการสุ่มตัวอย่างข้าวเปลือกออกมา 10 กรัม จากนั้นนำข้าวเปลือกใส่ในภาชนะทรงกระบอกที่ทำจากอลูมิเนียมและนำมาชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกค่า หลังจากนั้นนำข้าวเปลือกเข้าไปอบในตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 3.22 เมื่อครบเวลาที่กำหนดทำการทำออกจากตู้อบเพื่อที่จะมาชั่งน้ำหนักหลังอบอีกครั้ง ขั้นตอนสุดท้ายนำข้อมูลน้ำหนักก่อน - หลังอบมาคำนวณหาความชื้นตามสมการที่ 2.2 (AOAC, 2000)

$$M_w = \frac{W - W_d}{W} \quad (2.2)$$

โดยที่ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (kg/kg (w.b))

W คือ มวลรวมทั้งหมดของวัสดุ(ก่อนอบในตู้อบ) (g)

W_d คือ มวลแห้งของวัสดุ(หลังอบในตู้อบ) (g)



รูปที่ 3.22 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)

3.6 การทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือก

ในการทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกในงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

- 1) การทดสอบหาอัตราการป้อนที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดรอบพัสดมและมอเตอร์ป้อนในการทดลองให้คงที่
- 2) การทดสอบเพื่อหาเงื่อนไขการทดสอบที่เหมาะสมที่ควบคุมให้อุณหภูมิข้าวเปลือกขาออกไม่เกิน $45 - 50^{\circ}\text{C}$
- 3) การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีการอบแห้งที่แตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบแห้ง
- 4) การตรวจสอบคุณภาพข้าว

3.5.1 การทดสอบหาอัตราการป้อน

ในการหาอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่เหมาะสม ผู้วิจัยจะทำการปรับอัตราการไหลของอากาศอบแห้ง (ความถี่อินเวอร์เตอร์ของโบลเวอร์) ที่ระดับ 50 Hz 55 Hz 60 Hz และปรับค่าอัตราการป้อนข้าวเปลือก (ความถี่อินเวอร์เตอร์ของมอเตอร์ป้อนข้าว) ที่ระดับ 10 – 25 Hz ในแต่ละระดับของอัตราการไหลอากาศอบแห้งเพื่อหาความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้ข้าวเปลือกสามารถลอยขึ้นไปในหอบแห้งได้โดยไม่ตกลงมา จากนั้นเมื่อได้ความถี่ของแต่ละอุปกรณ์ที่เหมาะสมตามเงื่อนไขแล้ว จะทำการวัดความเร็วลมและอัตราการป้อน จากนั้นจะกำหนดค่าความถี่ที่ได้ให้เป็นตัวแปรควบคุมคงที่ในทุกการทดลองต่อไป

3.5.2 การทดสอบเพื่อหาอุณหภูมิอบแห้งที่เหมาะสม

ในการทดสอบการอบแห้ง ผู้วิจัยต้องการควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกขณะอบแห้งไว้ไม่เกิน 45 – 50°C เพื่อควบคุมคุณภาพของข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง ซึ่งปัญหาของการใช้อุณหภูมิการอบแห้งที่สูงเกินไป ส่งผลให้คุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้งลดลงเนื่องจากส่งผลให้เกิดการแตกหักได้ง่ายระหว่างการขัดสี ซึ่งปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นเด่นชัดในงานวิจัยของ (จิตรรัตน์ จอกแก้ว, 2559) ซึ่งใช้อุณหภูมิการอบแห้งสูงถึง 80°C โดยผลการทดลองได้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสูงสุดอยู่ที่ 36.84% ทางผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึงปัญหาดังกล่าว ดังนั้นจึงทำการทดลองเพื่อควบคุมอุณหภูมิการอบแห้งให้ต่ำลงเพื่อควบคุมคุณภาพของเมล็ดข้าว โดยการทดลองในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองเปรียบเทียบการอบแห้งทั้งหมด 5 เงื่อนไข ซึ่งเงื่อนไขที่ควบคุมอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกจะมีทั้งหมด 3 เงื่อนไขการทดลอง ซึ่งจะใช้ตัวอย่างข้าวเปลือกในการอบแห้งครั้งละ 20 kg ที่มีความชื้นเริ่มต้น 23 -24 % (wb) แต่ละเงื่อนไขมีดังนี้

1) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว

การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวจะทำการกำหนดอุณหภูมิอบแห้งข้าวเปลือก 3 ระดับเพื่อหาอุณหภูมิอบแห้งที่เหมาะสมดังนี้ 60 65 และ 70°C ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิในห้องอบแห้ง และอุณหภูมิขาออกห้องอบแห้งซึ่งในการทดลองนี้ใช้เป็นอุณหภูมิภายในถังเก็บข้าวเปลือกซึ่งเป็นอุณหภูมิเป้าหมายที่ต้องการควบคุมไว้ให้อยู่ในช่วง 45 – 50°C

2) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวจะทำการกำหนดวัตต์ของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ออบแห้งข้าวเปลือก 3 ระดับ ได้แก่ 50 และ 60 W ทำการอบแห้งร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิในห้องอบแห้ง และอุณหภูมิขาออกห้องอบแห้งซึ่งในการทดลองนี้ใช้เป็นอุณหภูมิภายในถังเก็บข้าวเปลือกซึ่งเป็นอุณหภูมิเป้าหมายที่ต้องการควบคุมไว้ให้อยู่ในช่วง 45 – 50°C เช่นเดียวกับเงื่อนไขที่ 1

3) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้รังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว

การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้รังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียวที่ความเข้ม 3 ระดับ ได้แก่ 600 700 850 W ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิในห้องอบแห้ง และอุณหภูมิขาออกห้องอบแห้งซึ่งในการทดลองนี้ใช้เป็นอุณหภูมิภายในถังเก็บข้าวเปลือกซึ่งเป็นอุณหภูมิเป้าหมายที่ต้องการควบคุมไว้ให้อยู่ในช่วง 45 – 50°C เช่นเดียวกับเงื่อนไขที่ 1 และ 2

3.5.3 การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีการอบแห้งที่แตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบแห้ง

จากหัวข้อการทดลองที่ 3.5.2 จะทำให้เราทราบอุณหภูมิและความชื้นของรังสีอินฟราเรดที่เหมาะสมในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากนั้นทำการกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งให้คงที่ และความชื้นของรังสีอินฟราเรดให้คงที่ ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบแห้งของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ทั้ง 3 เงื่อนไข ภายใต้สภาวะการควบคุมอุณหภูมิเมล็ดข้าวขาออกให้อย่างในช่วง 45°C หัวข้อ (1-3) และทดสอบที่อุณหภูมิสูงสุดที่ฮีตเตอร์ไฟฟ้าสามารถทำได้ที่อุณหภูมิ 80°C และทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 850 W เพื่อศึกษาอิทธิพลของความชื้นรังสีอินฟราเรดที่เพิ่มขึ้นที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการอบแห้ง หัวข้อที่ (4-5) แสดงดังนี้

1) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C

- 1.1 ตัวอย่างข้าวเปลือก 20 kg ความชื้นเริ่มต้น 23 – 24 % (wb)
- 1.2 อบแห้งที่อุณหภูมิอากาศร้อนคงที่ คือ 60°C
- 1.3 ความเร็วอากาศร้อนคงที่ 6 m/s (ความถี่อินเวอร์เตอร์ 60 Hz)
- 1.4 อัตราการป้อนคงที่ คือ 8.4 kg/min (ความถี่อินเวอร์เตอร์ 16 Hz)
- 1.5 เริ่มทำการทดลองและบันทึกค่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ และ สุ่มเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกทุก 10 นาที เพื่อตรวจสอบความชื้นข้าวที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ ระหว่างกระบวนการอบแห้งกำลังดำเนินไป

1.6 วัดค่าการใช้พลังงานของแต่ละอุปกรณ์จากมิเตอร์ไฟฟ้า ที่ติดตั้ง ณ ตำแหน่งต่างๆ

1.7 ทำการทดลองจนข้าวเปลือกมีความชื้นสุดท้ายถึง 14% (wb) จึงสิ้นสุดการทดลอง และบันทึกเวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด

2) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด

50 W

- 1.1 ตัวอย่างข้าวเปลือก 20 กิโลกรัม ความชื้นเริ่มต้น 23 – 24 % (wb)
- 1.2 อบแห้งที่อุณหภูมิอากาศร้อนคงที่ คือ 60°C
- 1.3 ความชื้นรังสีอินฟราเรดคงที่ คือ 50 W
- 1.4 ความเร็วอากาศร้อนคงที่ 6 m/s (ความถี่อินเวอร์เตอร์ 60 Hz)
- 1.5 อัตราการป้อนคงที่ คือ 8.4 kg/min (ความถี่อินเวอร์เตอร์ 16 Hz)

1.6 เริ่มทำการทดลองและบันทึกค่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ และ สุ่มเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกทุก 10 นาที เพื่อตรวจสอบความชื้นข้าวที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ ระหว่างกระบวนการอบแห้งกำลังดำเนินไป

1.7 วัดค่าการใช้พลังงานของแต่ละอุปกรณ์จากมิเตอร์ไฟฟ้า ที่ติดตั้ง ณ ตำแหน่งต่างๆ

1.8 ทำการทดลองจนข้าวเปลือกมีความชื้นสุดท้ายถึง 14 % (wb) จึงสิ้นสุดการทดลอง และบันทึกเวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด

3) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้รังสีอินฟราเรด 850 วัตต์

1.1 ตัวอย่างข้าวเปลือก 20 kg ความชื้นเริ่มต้น 23 – 24 % (wb)

1.2 ความเข้มรังสีอินฟราเรดคงที่ คือ 850 W

1.3 ความเร็วอากาศร้อนคงที่ 6 m/s (ความถี่อินเวอร์เตอร์ 60 Hz)

1.4 อัตราการป้อนคงที่ คือ 8.4 kg/min (ความถี่อินเวอร์เตอร์ 16 Hz)

1.5 เริ่มทำการทดลองและบันทึกค่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ และ สุ่มเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกทุก 10 นาที เพื่อตรวจสอบความชื้นข้าวที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ ระหว่างกระบวนการอบแห้งกำลังดำเนินไป

1.6 วัดค่าการใช้พลังงานของแต่ละอุปกรณ์จากมิเตอร์ไฟฟ้า ที่ติดตั้ง ณ ตำแหน่งต่างๆ

1.7 ทำการทดลองจนข้าวเปลือกมีความชื้นสุดท้ายถึง 14 % (wb) จึงสิ้นสุดการทดลอง และบันทึกเวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด

4) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 80°C

1.1 ตัวอย่างข้าวเปลือก 20 kg ความชื้นเริ่มต้น 23 – 24 % (wb)

1.2 อบแห้งที่อุณหภูมิอากาศร้อนคงที่ คือ 80°C

1.3 ความเร็วอากาศร้อนคงที่ 6 m/s (ความถี่อินเวอร์เตอร์ 60 Hz)

1.4 อัตราการป้อนคงที่ คือ 8.4 kg/min (ความถี่อินเวอร์เตอร์ 16 Hz)

1.5 เริ่มทำการทดลองและบันทึกค่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ และ สุ่มเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกทุก 10 นาที เพื่อตรวจสอบความชื้นข้าวที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ ระหว่างกระบวนการอบแห้งกำลังดำเนินไป

1.6 วัดค่าการใช้พลังงานของแต่ละอุปกรณ์จากมิเตอร์ไฟฟ้า ที่ติดตั้ง ณ ตำแหน่งต่างๆ

1.7 ทำการทดลองจนข้าวเปลือกมีความชื้นสุดท้ายถึง 14 % (wb) จึงสิ้นสุดการทดลอง และบันทึกเวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด

5) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 850 W

1.1 ตัวอย่างข้าวเปลือก 20 kg ความชื้นเริ่มต้น 23 – 24 % (wb)

1.2 อบแห้งที่อุณหภูมิอากาศร้อนคงที่ คือ 60°C

1.3 ความเข้มรังสีอินฟราเรดคงที่ คือ 50 W

1.4 ความเร็วอากาศร้อนคงที่ 6 m/s (ความถี่อินเวอร์เตอร์ 60 Hz)

1.5 อัตราการป้อนคงที่ คือ 8.4 kg/min (ความถี่อินเวอร์เตอร์ 16 Hz)

1.6 เริ่มทำการทดลองและบันทึกค่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ และ สุ่มเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกทุก 10 นาที เพื่อตรวจสอบความชื้นข้าวที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ ระหว่างกระบวนการอบแห้งกำลังดำเนินไป

1.7 วัดค่าการใช้พลังงานของแต่ละอุปกรณ์จากมิเตอร์ไฟฟ้า ที่ติดตั้ง ณ ตำแหน่งต่างๆ

1.8 ทำการทดลองจนข้าวเปลือกมีความชื้นสุดท้ายถึง 14 % (wb) จึงสิ้นสุดการทดลอง และบันทึกเวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด

3.7 การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

ในงานวิจัยนี้ได้มีการประเมินสมรรถนะการอบแห้ง โดยพิจารณาจากอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) และการทดสอบคุณภาพข้าว ดังนี้ เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น (Head rice yield, HRY) ดัชนีความขาว (Whiteness index, WI) ซึ่งมีวิธีการดังนี้

3.7.1 อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR)

พิจารณาประสิทธิภาพในการอบแห้งประเมินจาก อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) ซึ่งคำนวณได้จาก อัตราส่วนของปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาการอบแห้ง หรือ ปริมาณความชื้นที่หายไปจากวัสดุต่อระยะเวลาการอบแห้ง ดังสมการที่ 2.10 (ณัฐพล แซ่ลิ้ม และคณะ, 2561)

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t} \times 100 \quad (2.10)$$

โดยที่	DR	คือ อัตราการอบแห้ง (kg _{water} /h)
	W _i	คือ น้ำหนักเริ่มต้นของข้าวเปลือก (kg)
	W _f	คือ น้ำหนักข้าวเปลือกหลังอบแห้ง (kg)
	t	คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

3.7.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC)

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งพิจารณาการใช้ประโยชน์จากความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออก สามารถประเมินได้ในรูปของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) ซึ่งเป็นค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง ต่อมวลน้ำทั้งหมดที่ระเหยออกจากข้าวเปลือก ซึ่งค่าพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ประกอบด้วย พลังงานจากพัดลมความดันสูง (Blower) มอเตอร์ป้อน (Feeding motor) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric heater) และ หลอดอินฟราเรด (Infrared lamp) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.9

$$SEC = \frac{E_{total}}{W_i - W_f} \times 100 \quad (2.9)$$

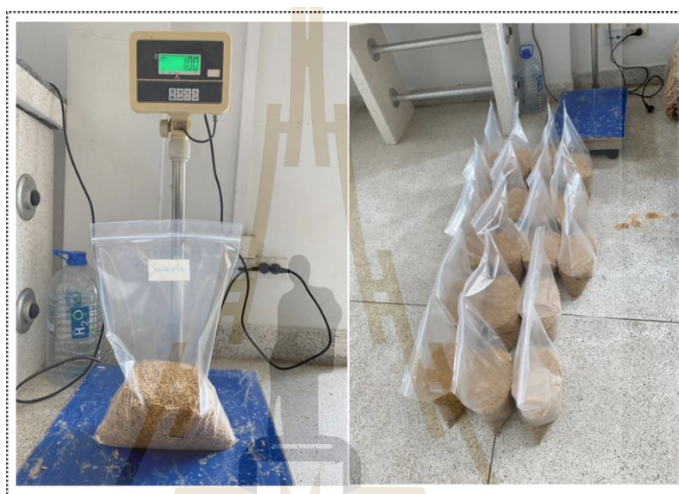
โดยที่	E _{total}	คือ ผลรวมของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งประกอบด้วยพลังงานจากพัดลมความดันสูง มอเตอร์ป้อน ฮีตเตอร์ไฟฟ้า และ หลอดอินฟราเรด (MJ)
	W _i	คือ น้ำหนักเริ่มต้นของข้าวเปลือก (kg)
	W _f	คือ น้ำหนักข้าวเปลือกหลังอบแห้ง (kg)

3.7.3 การทดสอบคุณภาพข้าว (Quality of rice)

การตรวจสอบและประเมินคุณภาพข้าว (Quality of rice) หลังกระบวนการอบแห้งเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งการตรวจสอบคุณภาพข้าวในงานวิจัยนี้ประเมินจาก ปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน (Head rice yield, HRY) และดัชนีความขาว (Whiteness index, WI) ซึ่งข้าวที่มีคุณภาพการสีดี คือข้าวที่

ผ่านกระบวนการขัดสีแล้วได้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและข้าวตันสูง มีปริมาณข้าวหัก (Broken rice) น้อย การประเมินคุณภาพการสีของข้าวเกี่ยวข้องกับกระบวนการแปรสภาพข้าวหรือการสีข้าว (Rice milling) ซึ่งหมายถึง การทำให้เปลือก รำ และคัพภะออกจากเมล็ดข้าว (จิตรารัตน์ จอกแก้ว, 2559) นำน้ำหนักข้าวขาว ไปคำนวณหา ข้าวเต็มเมล็ด ดังสมการ (2.14) (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2555) มีวิธีการดังนี้

- 1.) ชั่งตัวอย่างข้าว 1 kg ที่มีความชื้นเริ่มต้น 14% (wb) แสดงดังรูปที่ 3.23



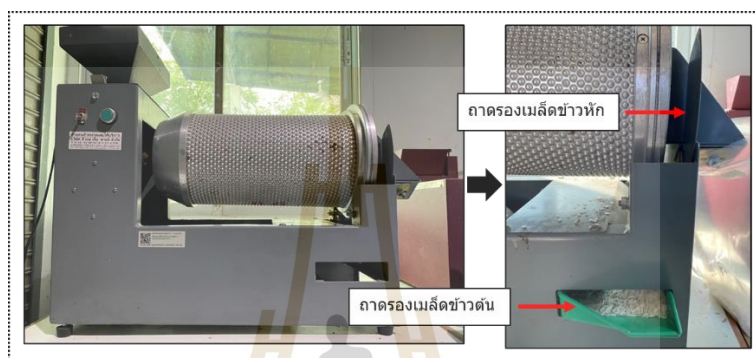
รูปที่ 3.23 ชั่งตัวอย่างข้าว 1 kg

- 2.) นำมาแกะเทาะเปลือกและขัดขาวด้วยสีข้าวและขัดขาว ยี่ห้อ MARTEC รุ่น 10



รูปที่ 3.24 การสีข้าวด้วยเครื่องสีข้าวและขัดขาว ยี่ห้อ MARTEC รุ่น 10

3.) นำข้าวที่ผ่านการสีและขัดขาวมาคัดแยกเมล็ดข้าวหักหรือคัดแยกปลายข้าวออก โดยใช้เครื่องคัดแยกข้าวหัก (Cylinder Separator) ซึ่งผลิตจากบริษัท ที.เอส.เอ็ม. ซานน์ ซึ่งปรับมุมเอียงถาดรองรับข้าวหักไปที่ 45 องศาจากแนวดิ่ง โดยเครื่องจะทำการหมุนแยกเมล็ดข้าวต้นและเมล็ดข้าวหักแยกออกจากกัน ซึ่งเมล็ดข้าวต้นจะถูกแยกให้ตกลงไปยังถาดรองสีเขียวที่แสดงดังรูป 3.25 ในส่วนของเมล็ดข้าวหักจะถูกแยกให้ตกลงในถาดรองซึ่งวางทำมุม 45 องศา ที่อยู่ด้านในตัวเครื่อง



รูปที่ 3.25 การแยกเมล็ดข้าวหักเครื่องคัดแยกข้าวหัก (Cylinder Separator)

4.) นำข้าวต้นผ่านการคัดแยกเมล็ดแล้วมาชั่งน้ำหนัก แสดงดังรูป 3.23 และบันทึกค่า จากนั้นนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น (%HRY) ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการที่ 2.14



รูปที่ 3.26 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ปริมาณข้าวต้น (%HRY)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ข้าวตัน (\%HRV)} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวตัน}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100 \quad (2.14)$$

5.) จากนั้นนำข้าวตันที่ผ่านการคัดแยกเมล็ดมาวิเคราะห์หาค่าดัชนีความขาวด้วยเครื่องวัดความขาว ที่แสดงดังรูป 3.24 และบันทึกค่าความขาว



รูปที่ 3.27 วัดค่าดัชนีความขาวด้วยเครื่องวัดความขาว

3.8 สถานที่ทำการทดลอง

ห้องปฏิบัติการจักรกลเกษตร อาคารจักรกลเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.9 ระยะเวลาทำการทดลอง

เริ่มทำวิทยานิพนธ์ เดือน มกราคม ปี พ.ศ. 2565 – มิถุนายน ปี พ.ศ. 2566

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับการรายงานผลการทดลองที่ได้อธิบายหัวข้อการทดลองและวิธีการทดลองไว้ในบทที่ 3 ก่อนหน้านี้ ซึ่งหัวข้อการทดลองที่จะรายงานผลและวิเคราะห์ผลประกอบด้วย 3 ส่วนคือ

- 1) ผลการทดสอบหาอัตราการป้อนที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดรอบพัฒนาและมอเตอร์ป้อนในการทดลองให้คงที่
- 2) ผลการทดสอบเพื่อหาเงื่อนไขการทดสอบที่เหมาะสมที่ควบคุมให้อุณหภูมิข้าวเปลือกขาออกไม่เกิน $45 - 50^{\circ}\text{C}$
- 3) ผลการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีการอบแห้งที่แตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบแห้ง
- 4) ผลการตรวจสอบคุณภาพข้าว

4.1 ผลการทดสอบหาอัตราการป้อนที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดรอบพัฒนาและมอเตอร์ป้อนในการทดลองให้คงที่

ในการหาอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่เหมาะสม ผู้วิจัยจะทำการปรับอัตราการไหลของอากาศอบแห้ง (ความถี่อินเวอร์เตอร์ของโบลเวอร์) ที่ระดับ 50 Hz 55 Hz 60 Hz และปรับค่าอัตราการป้อนข้าวเปลือก (ความถี่อินเวอร์เตอร์ของมอเตอร์ป้อนข้าว) ที่ระดับ 10 – 25 Hz ในแต่ละระดับของอัตราการไหลอากาศอบแห้งเพื่อหาความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้ข้าวเปลือกสามารถลอยขึ้นไปในหอบแห้งได้โดยไม่ตกลงมา จากนั้นเมื่อได้ความถี่ของแต่ละอุปกรณ์ที่เหมาะสมตามเงื่อนไขแล้ว จะทำการวัดความเร็วลมและอัตราการป้อน จากนั้นจะกำหนดค่าความถี่ที่ได้ให้เป็นตัวแปรควบคุมคงที่ในทุกการทดลองต่อไป

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบเบื้องต้นในการหาความถี่โบลเวอร์และมอเตอร์ป้อนที่เหมาะสม

ครั้งที่	ความถี่โบลเวอร์ (Hz)	ความถี่มอเตอร์ป้อน (Hz)	ผลการลอยตัวของข้าว
1	50	10	ไม่ลอย
		15	ไม่ลอย
		20	ไม่ลอย
2	55	10	ไม่ลอย
		15	ไม่ลอย
		20	ไม่ลอย
3	60	10	ลอย
		16	ลอย
		20	ไม่ลอย

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดความเร็วลมและอัตราการป้อนที่ความถี่โบลเวอร์และมอเตอร์ป้อนที่เหมาะสมที่หาได้จากตารางที่ 4.1

ครั้งที่	ความเร็วลม (Hz)	ความเร็วลม (m/s)	อัตราการป้อน (Hz)	อัตราการป้อน (kg/min)
3	60	6	16	8.4

จากผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า เมื่อทำการปรับความถี่โบลเวอร์ไปที่ 60 Hz และความถี่มอเตอร์ป้อนไปที่ 16 Hz ความถี่ดังกล่าวส่งผลทำให้เมล็ดข้าวที่ไหลเข้าไปในหอบแห้งสามารถถูกลมเป่าให้ลอยขึ้นไปในอากาศและไหลกลับสู่ห้องอบแห้งได้โดยไม่ตกลงมา จากนั้นทางผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลเบื้องต้นที่ความถี่ดังกล่าวดังแสดงในตารางที่ 4.2 คือ ค่าความเร็วลมอากาศอบแห้ง และอัตราการป้อน จากผลการเก็บข้อมูลสามารถสรุปผลได้ว่า ในงานวิจัยครั้งนี้ค่าความเร็วอากาศที่ใช้ในการอบแห้งคือ 6 m/s ที่ความถี่อินเวอร์เตอร์ 60 Hz และใช้ความถี่มอเตอร์ป้อนอยู่ที่ 16 Hz ซึ่งให้อัตราการป้อนข้าวเปลือกอยู่ที่ 8.4 kg/min ซึ่งค่าดังกล่าวทางผู้วิจัยจะใช้เป็นตัวแปรควบคุมตลอดการทดลอง

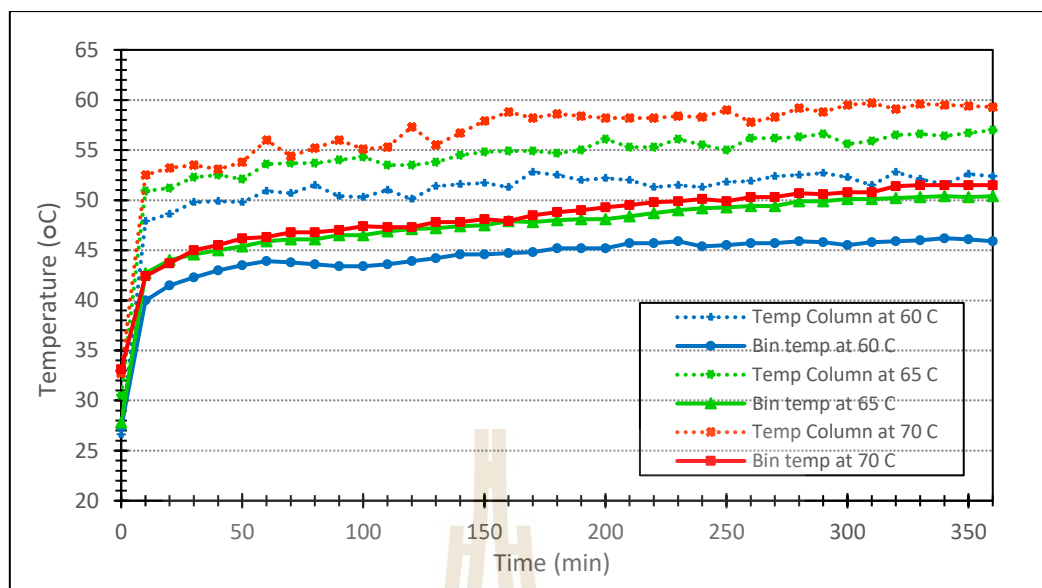
4.2 ผลการทดสอบเพื่อหาเงื่อนไขการทดสอบที่เหมาะสมที่ควบคุมให้อุณหภูมิข้าวเปลือกขาวออกไม่เกิน 45°C

ในการทดสอบการอบแห้ง ผู้วิจัยต้องการควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกขณะอบแห้งไว้ไม่เกิน 45°C เพื่อควบคุมคุณภาพของข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง ซึ่งปัญหาของการใช้อุณหภูมิการอบแห้งที่สูงเกินไป ส่งผลให้คุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้งลดลงเนื่องจากส่งผลให้เกิดการแตกหักได้ง่ายระหว่างการขัดสี ซึ่งปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นเด่นชัดในงานวิจัยของ (จิตรรัตน์ จอกแก้ว, 2559) ซึ่งใช้อุณหภูมิการอบแห้งสูงถึง 80°C โดยผลการทดลองได้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดสูงสุดอยู่ที่ 36.84% ทางผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึงปัญหาดังกล่าว ดังนั้นจึงทำการทดลองเพื่อควบคุมอุณหภูมิการอบแห้งให้ต่ำลงเพื่อควบคุมคุณภาพของเมล็ดข้าว โดยการทดลองในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองเปรียบเทียบการอบแห้งทั้งหมด 4 เงื่อนไข ซึ่งเงื่อนไขที่ควบคุมอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกจะมีทั้งหมด 3 เงื่อนไขการทดลอง ซึ่งจะใช้ตัวอย่างข้าวเปลือกในการอบแห้งครั้งละ 20 kg ที่มีความชื้นเริ่มต้น 23 -24 % (wb) อบแห้งจนมีความชื้นสุดท้ายถึง 14% (wb) ผลการทดลองแต่ละเงื่อนไขแสดงต่อไปนี้

4.2.1 การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว

การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวจะทำการกำหนดอุณหภูมิอบแห้งข้าวเปลือก 3 ระดับเพื่อหาอุณหภูมิอบแห้งที่เหมาะสมดังนี้ 60 65 และ 70°C ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิในห้องอบแห้ง และอุณหภูมิขาออกห้องอบแห้ง ซึ่งในการทดลองนี้ใช้เป็นอุณหภูมิภายในถังเก็บข้าวเปลือกซึ่งเป็นอุณหภูมิเป้าหมายที่ต้องการควบคุมไว้ให้อยู่ในช่วง 45°C

จากผลการทดลองที่แสดงดังรูปที่ 4.1 ที่แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิในห้องอบแห้งและอุณหภูมิถังเก็บข้าว ณ เวลาใดๆ ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 60 65 และ 70°C พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิการอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้อุณหภูมิภายในถังเก็บข้าวมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 45.6°C ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิที่อยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการ และเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการอบแห้ง 65 และ 70°C อุณหภูมิถังเก็บข้าวจะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 48.5 และ 49°C ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับการใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ 60°C ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้อุณหภูมิอบแห้งข้าวเปลือกในงานวิจัยนี้อยู่ที่ 60°C เพื่อควบคุมคุณภาพข้าวเปลือกตลอดการทดลองการอบแห้งด้วยลมร้อน

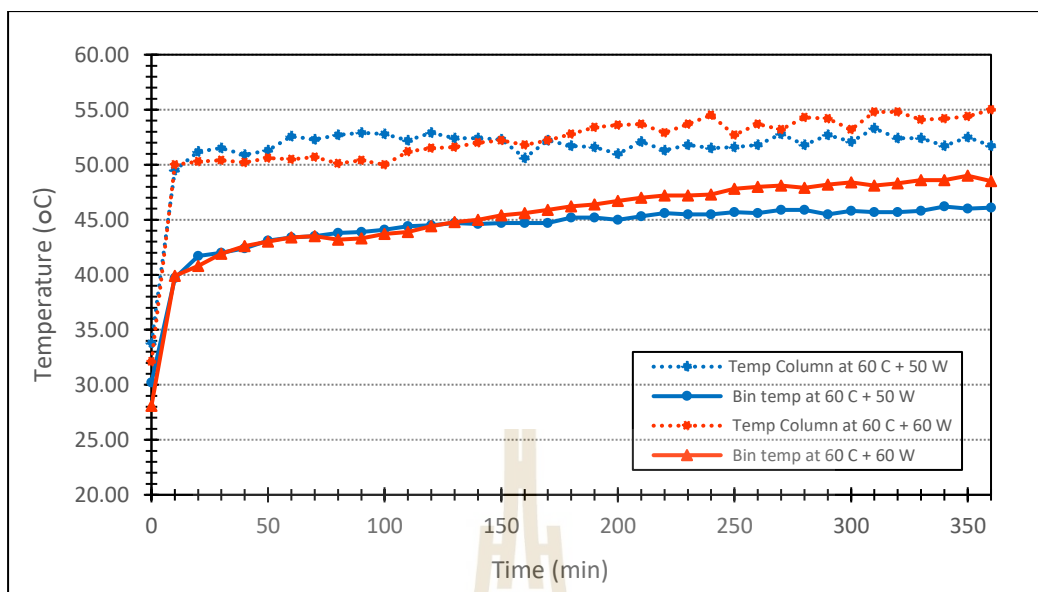


รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิในหอบแห้งและอุณหภูมิถังเก็บข้าว ณ เวลาใดๆ ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 60 65 และ 70 °C

4.2.2 การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด

การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวจะทำการกำหนดวัตต์ของรังสีอินฟราเรดที่ใช้อบแห้งข้าวเปลือก 2 ระดับ ได้แก่ 50 และ 60 W ทำการอบแห้งร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิในห้องอบแห้ง และอุณหภูมิขาออกห้องอบแห้งซึ่งในการทดลองนี้ใช้เป็นอุณหภูมิภายในถังเก็บข้าวเปลือกซึ่งเป็นอุณหภูมิเป้าหมายที่ต้องการควบคุมไว้ให้อยู่ในช่วง 45°C

จากผลการทดลองที่แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าการทดลองโดยใช้ลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 50 W สามารถควบคุมอุณหภูมิเป้าหมาย (อุณหภูมิภายในถังเก็บ) ให้อยู่ในช่วง 45°C ได้ ซึ่งอุณหภูมิภายในถังเก็บจะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 45.9°C ในขณะเดียวกันการใช้ลมร้อน 60°C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 60 W มีผลทำให้อุณหภูมิเป้าหมาย (อุณหภูมิภายในถังเก็บ) อยู่ในช่วง 47.5°C ซึ่งมีค่ามากกว่าในเงื่อนไขแรก จากวัตถุประสงค์ในการทดลองครั้งนี้คือเพื่อหาเงื่อนไขการอบแห้งที่สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในถังเก็บให้อยู่ในช่วง 45°C เพื่อควบคุมคุณภาพข้าวหลังการอบแห้ง ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกเงื่อนไขการอบแห้งพลังงานความร้อนร่วมที่เงื่อนไข อุณหภูมิลมร้อน 60°C ร่วมกับการใช้รังสีอินฟราเรดที่ 50 W ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้

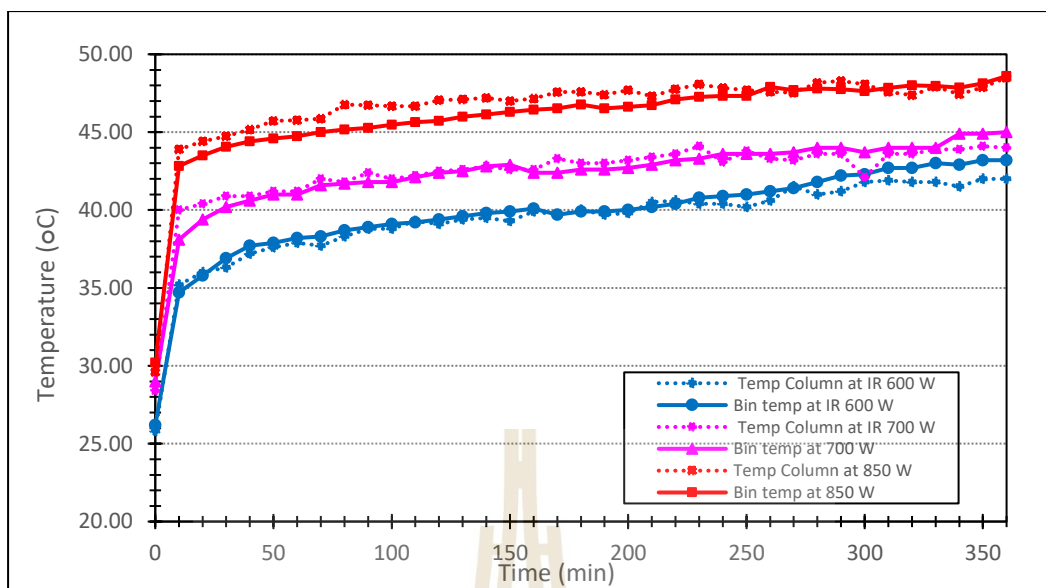


รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิในหอบแห้งและอุณหภูมิถังเก็บข้าว ณ เวลาใดๆ ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 60 °C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 50 และ 60 W ตามลำดับ

4.2.3 การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้รังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว

การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้รังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียวที่ความเข้ม 3 ระดับ ได้แก่ 600 700 850 W ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิในห้องอบแห้ง และอุณหภูมิข้าวออกห้องอบแห้งซึ่งในการทดลองนี้ใช้เป็นอุณหภูมิภายในถังเก็บข้าวเปลือกซึ่งเป็นอุณหภูมิเป้าหมายที่ต้องการควบคุมไว้ให้อยู่ในช่วง 45°C เช่นเดียวกับเงื่อนไขที่ 4.2.2 และ 4.2.1

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่า การใช้ความเข้มของรังสีอินฟราเรดในการอบแห้งที่ 600 700 และ 850 W ส่งผลให้อุณหภูมิเป้าหมาย (อุณหภูมิภายในถังเก็บ) เฉลี่ยอยู่ที่ 39.72 42.32 และ 46.56°C ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้ความเข้มอินฟราเรดในการอบแห้งที่ 850 W สามารถควบคุมอุณหภูมิเป้าหมาย (อุณหภูมิภายในถังเก็บ) ให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิใกล้เคียง 45°C ไปได้ เพื่อควบคุมคุณภาพข้าวหลังการอบแห้ง ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกเงื่อนไขการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรดในการทดสอบที่เงื่อนไข ความเข้มรังสีอินฟราเรด 850 W ในงานวิจัยนี้เพื่อใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งที่แตกต่างกันการทดลองขั้นต่อไป



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบอุณหภูมิในหอบแห้งและอุณหภูมิถังเก็บข้าว ณ เวลาใดๆ โดยใช้ อินฟราเรดในการอบแห้งที่ 600 700 และ 850 W ตามลำดับ

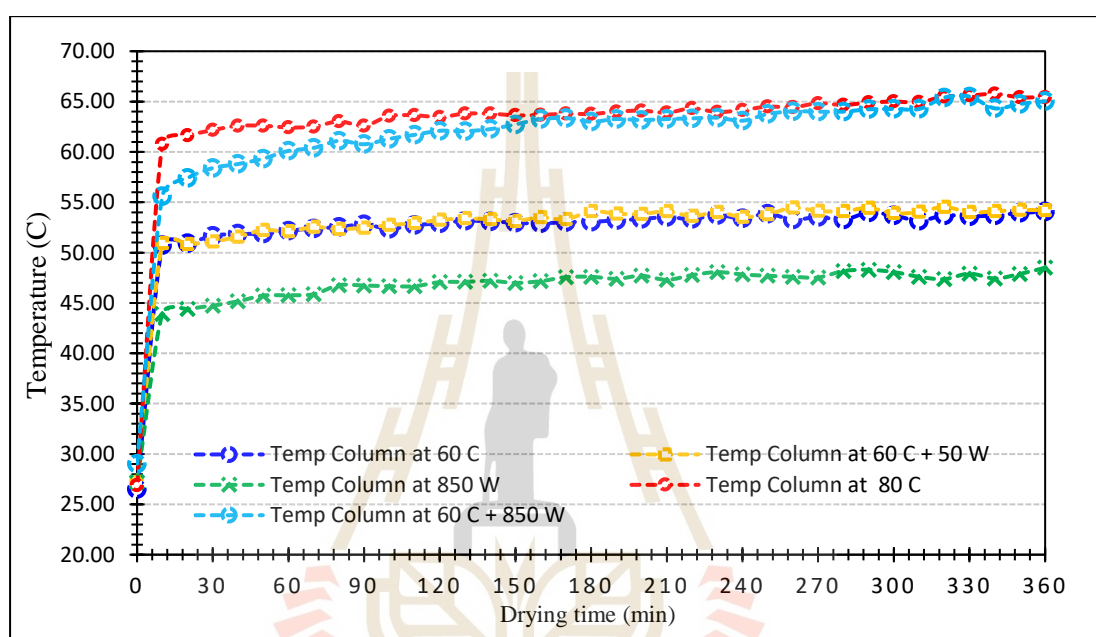
4.3 ผลการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีการอบแห้งที่แตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบแห้ง

จากหัวข้อการทดลองที่ 4.2 จะทำให้เราทราบอุณหภูมิและความชื้นของรังสีอินฟราเรดที่เหมาะสมในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากนั้นทำการกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งให้คงที่ และความชื้นของรังสีอินฟราเรดให้คงที่ ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบแห้งของแต่ละเงื่อนไข ทั้งนี้การทดลองการอบแห้งข้าวเปลือกผู้วิจัยได้ทำการทดลองทั้งหมด 5 เงื่อนไขการทดลอง โดยเพิ่มการทดลองการอบแห้งข้าวเปลือกมา 2 การทดลองคือ ด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 80°C และ การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 850 W เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์เพิ่มเติมและเปรียบเทียบเกี่ยวกับพฤติกรรมการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงาน และคุณภาพข้าว ในแต่ละการทดลอง ผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลของอุณหภูมิภายในถังเก็บ และอุณหภูมิหอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

จากการทดลองการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีการที่ต่างกันทั้ง 5 เงื่อนไข ทางผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆของเครื่องอบแห้งเพื่อนำมาเป็นข้อมูลเบื้องต้น

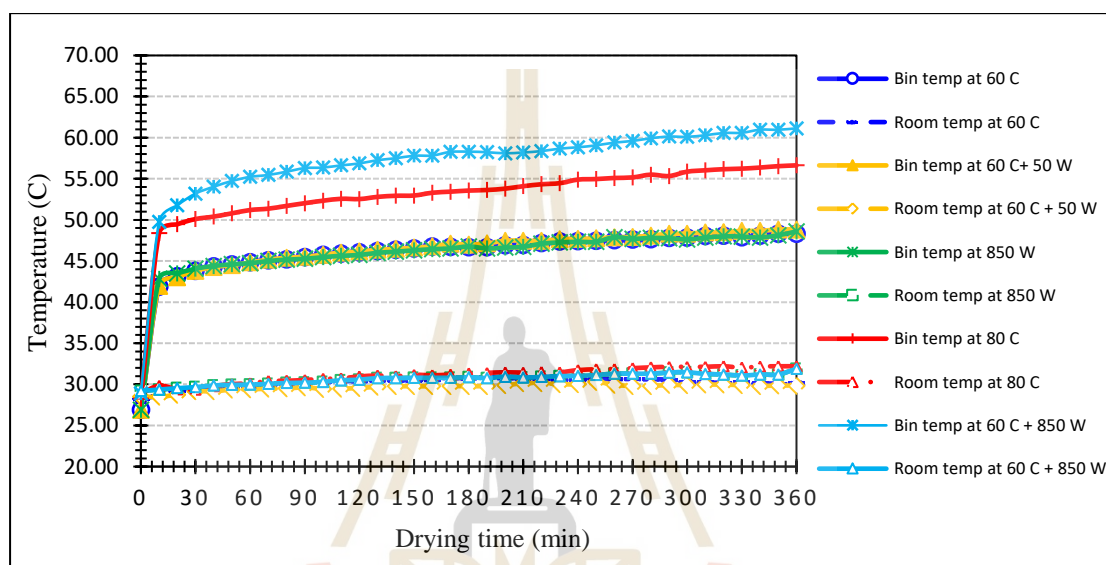
ประกอบการพิจารณาประสิทธิภาพการอบแห้ง เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิหอบแห้งของแต่ละเงื่อนไขดังแสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าเงื่อนไขการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C การอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 50 W การอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W และการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 80°C และการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ร่วมกับการรังสีอินฟราเรด 850 W



รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิหอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ผลของค่าอุณหภูมิภายในหอบแห้งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 52.27 52.59 46.88 62.86 และ 61.51°C ตามลำดับ ซึ่งค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมระหว่างการทดลองของทั้ง 5 เงื่อนไขมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 30.21 29.66 30.69 31.13 และ 30.69°C ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันเมื่อพิจารณาผลของค่าอุณหภูมิถึงเก็บซึ่งผลการทดลองพบว่าเงื่อนไขการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C การอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 50 W และการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W ค่าอุณหภูมิถึงเก็บมีค่าใกล้เคียงกันแสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 45.93 46.19 และ 45.88°C ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่ทางผู้วิจัยได้ตั้งเป้าหมายไว้ และในส่วนของ การทดลองอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 80°C และการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ร่วมกับการรังสีอินฟราเรด 850 W พบว่าอุณหภูมิถึงเก็บมีค่าสูงกว่าเงื่อนไขทั้ง 3 เงื่อนไขก่อนหน้านี้ ซึ่งมีอุณหภูมิถึงเก็บเฉลี่ยอยู่ที่ 52.85 และ 56.90°C ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้อุณหภูมิการอบแห้งที่สูงจึงส่งผลให้อุณหภูมิในถึงเก็บนั้น

มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย และจะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิภายในหอบแห้งของการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W ต่ำที่สุดคือ 46.88°C ในขณะที่ค่าอุณหภูมิถึงเก็บมีค่าสูงใกล้เคียงกับเงื่อนไขการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C และการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 50 W ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติของการแผ่รังสีอินฟราเรดซึ่งรังสีอินฟราเรดมีความสามารถเจาะทะลุเข้าไปในเมล็ดข้าว และทำให้เมล็ดข้าวดูดซับพลังงานบางส่วนไว้ภายใน (Ginzburg, 1969)



รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิภายในถังเก็บ และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ส่งผลทำให้เกิดการสะสมพลังงานความร้อนภายในเมล็ดข้าวในขณะที่อบแห้งในหอบแห้ง แต่เนื่องด้วยวิธีการวัดอุณหภูมิภายในหอบแห้งเป็นการวัดอุณหภูมิที่อากาศอบแห้ง ซึ่งไม่สามารถวัดที่ตัวเมล็ดข้าวได้โดยตรงจึงทำให้ค่าอุณหภูมิที่วัดออกมามีค่าต่ำกว่าค่าอุณหภูมิจริงที่สะสมภายในเมล็ดข้าว และเมื่อไหลออกจากหอบแห้งเข้าสู่ถังเก็บ เนื่องจากความร้อนที่สะสมภายในเมล็ดข้าวหอบแห้งมีค่ามากจึงเกิดการถ่ายเทออกมาอันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในถังเก็บและภายในเมล็ดข้าว จึงส่งผลให้ค่าอุณหภูมิภายในถังเก็บสูงใกล้เคียงกับ เงื่อนไขการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C และการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 50 W นั้นเอง

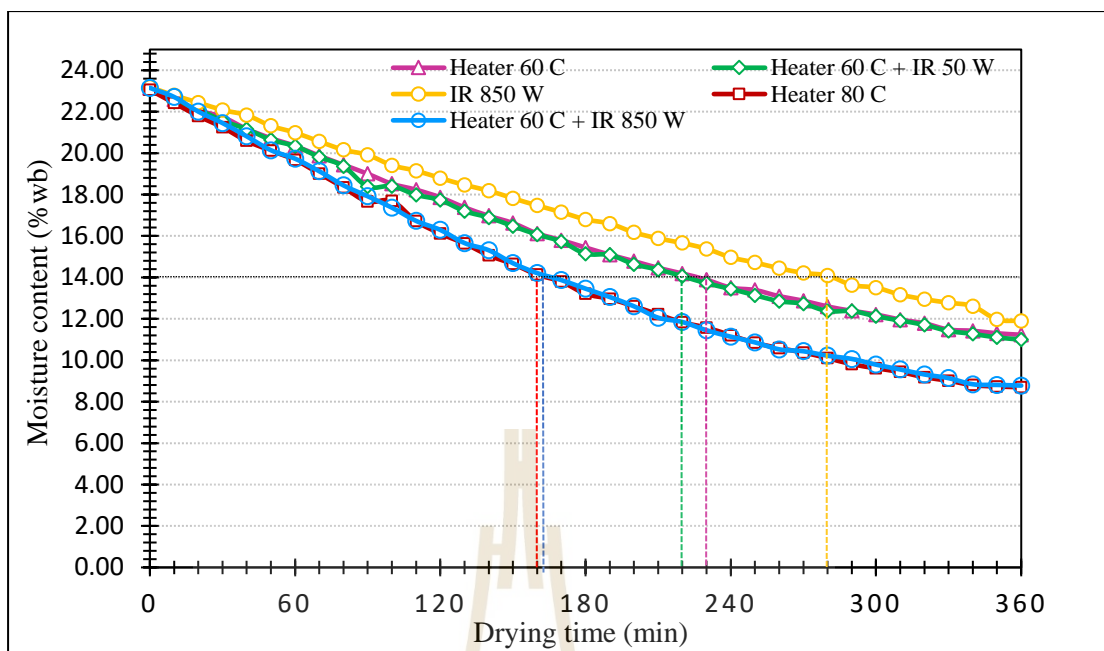
4.3.2 ผลการศึกษาพฤติกรรมการอบแห้ง

จากผลการทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมเสริมความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดที่พัฒนาขึ้น ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการทดลองอบแห้ง 5 เงื่อนไขที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาผลการศึกษาดูพฤติกรรมการอบแห้งของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่า เงื่อนไขการ

อบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C การอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 50 W การอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W การทดลองอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 80°C และการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 850 W ใช้เวลาในการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 23 % (wb) จนถึงความชื้นสุดท้าย 14 % (wb) อยู่ที่ 230 220 280 160 และ 163 นาที ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 80°C และการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 850 W ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้อุณหภูมิการอบแห้งที่สูงส่งผลให้อุณหภูมิภายในหอบแห้งนั้นสูงตามไปด้วยจะสังเกตได้จากรูปที่ 4.4 ดังนั้นทำให้ใช้ระยะเวลาการอบแห้งที่ค่อนข้างน้อยกว่าวิธีการอบแห้งด้วยวิธีอื่นๆ

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขการทดลองที่ควบคุมอุณหภูมิเป้าหมาย(อุณหภูมิภายในถังเก็บ) ให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิใกล้เคียง 45°C ทั้ง 3 เงื่อนไขการทดลอง ประกอบด้วยวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C วิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 50 W และวิธีการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว 850 W จะสังเกตได้ว่าวิธีการอบแห้งที่ใช้พลังงานความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดช่วยลดระยะเวลาการอบแห้งลงได้ ซึ่งใช้เวลาในการอบแห้งน้อยการการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C เพียงอย่างเดียว และการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว ซึ่งเมื่อยิ่งเพิ่มความเข้มของรังสีอินฟราเรดในการใช้เข้าไปเสริมเป็นพลังงานความร้อนร่วมจาก 50 W เป็น 850 W ในการทดสอบที่เงื่อนไขการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 850 W จะสังเกตได้ว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งมีระยะเวลาที่ลดลง จากเดิม 220 นาที เหลือเพียง 163 นาที ที่ความชื้นสุดท้าย 14 % (wb) ซึ่งมีสาเหตุมาจากวิธีการอบแห้งแบบการใช้พลังงานความร้อนเสริมนั้นจะส่งผลให้อุณหภูมิอากาศอบแห้งเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากแหล่งความร้อนที่เข้ามาเสริม และการเสริมความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดยังช่วยให้ข้าวเปลือกที่อบแห้งได้รับความร้อนจากทั้งสองแหล่งนั้นก็คือจากอากาศร้อนที่ผลิตโดยฮีตเตอร์ไฟฟ้า และจากการแผ่รังสีอินฟราเรดของหลอดอินฟราเรด จึงเป็นสาเหตุให้ กระบวนการอบแห้งโดยใช้วิธีนี้จึงช่วยลดระยะเวลาการอบแห้งได้

เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 60°C และการใช้รังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียวที่ความเข้ม 850 W จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าการใช้รังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียวที่ความเข้ม 850 W ใช้เวลามากที่สุดในกระบวนการอบแห้ง ซึ่งเป็นผลมาจากแหล่งความร้อนได้มาจากหลอดรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียวอาจยังมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอ



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกที่ทดลองอบแห้งด้วยวิธีการทดลองที่แตกต่างกัน

เมื่อเทียบกับแหล่งความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับซึ่ง Aboud, S. (2019) ได้กล่าวว่าการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งที่มากกว่าการอบแห้งที่แยกกัน และ Meeso, N. et al., (2004); Lin et al., (2007); Nimmol et al., (2007); Aktas et al., (2017) ได้กล่าวว่าเมื่อนำรังสีอินฟราเรดมาใช้ร่วมกับวิธีอบแห้งวิธีต่างๆสามารถช่วยลดระยะเวลาได้มาก

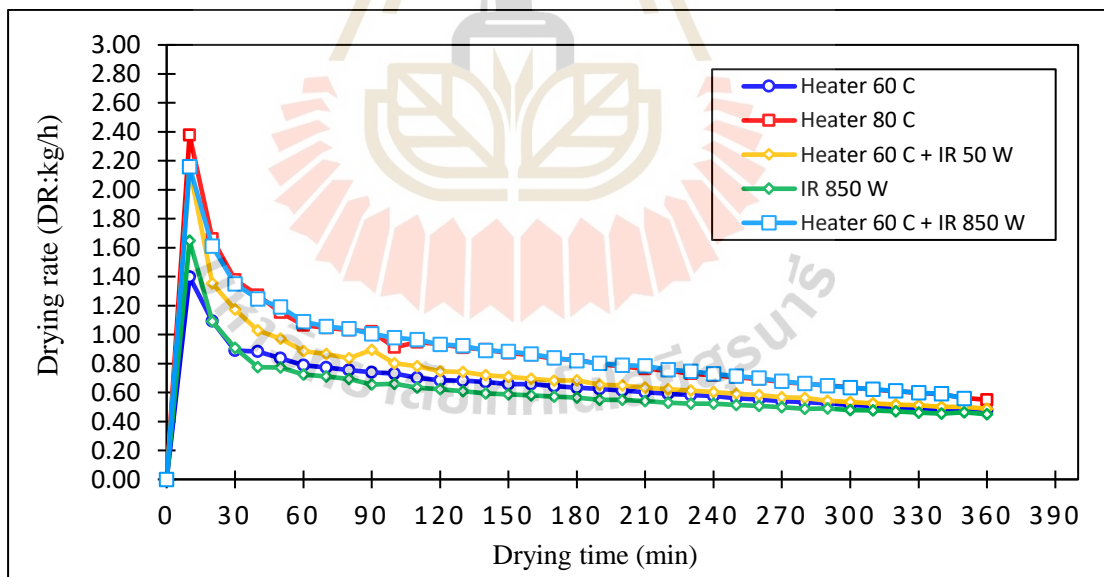
4.4 การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

ในงานวิจัยนี้ได้มีการประเมินสมรรถนะการอบแห้ง โดยพิจารณาจากอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) และการทดสอบคุณภาพข้าว ประกอบด้วย เปอร์เซ็นต์ข้าวตัน (Head rice yield, HRY) ดัชนีความขาว (Whiteness index, WI) ซึ่งผลการทดลองแสดงดังนี้

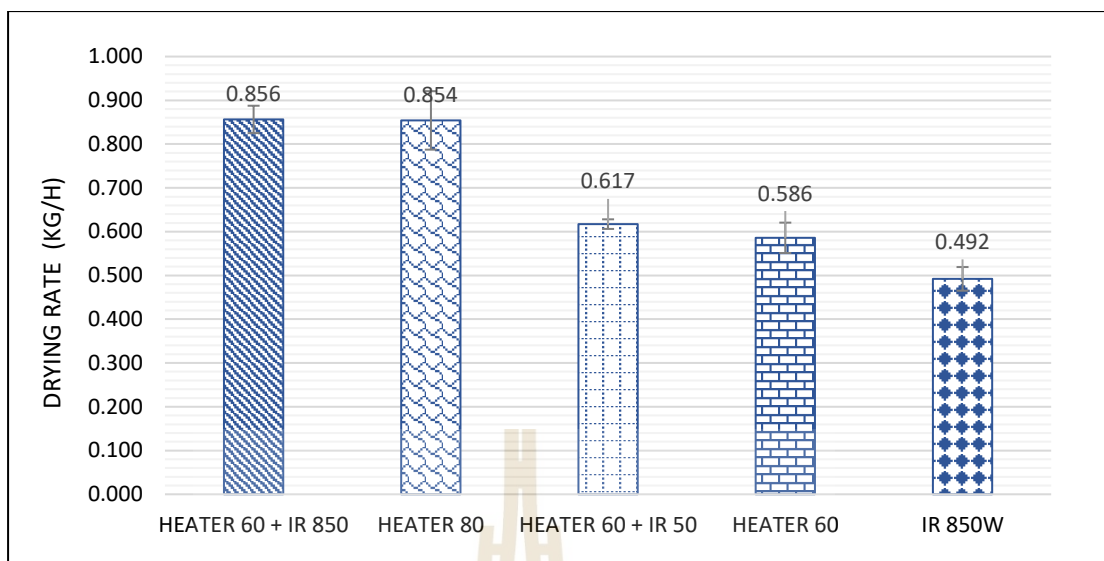
4.4.1 อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR)

การพิจารณาประสิทธิภาพในการอบแห้งที่ประเมินจาก อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) ซึ่งคำนวณได้จาก อัตราส่วนของปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาการอบแห้ง หรือปริมาณความชื้นที่หายไปจากวัสดุต่อระยะเวลาการอบแห้ง

จากกราฟรูปที่ 4.7 แสดงอัตราการอบแห้งข้าวเปลือก ณ เวลาต่างๆ ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองพบว่า สอดคล้องกับรูปที่ 4.6 ซึ่งแสดงพฤติกรรมการอบแห้ง พบว่าอัตราการอบแห้งจะสูงในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งในทุกเงื่อนไขการทดลอง เนื่องจากในช่วงแรกของการอบแห้งในเมล็ดข้าวจะมีปริมาณน้ำที่สะสมอยู่มาก ซึ่งเมล็ดข้าวจะรับความร้อนแฝงเข้ามาอุ่นที่ผิว (Pre-heat) เรียกว่าช่วง Initial Adjustment phase (Sivakumar, 2016) หลังจากที่เมล็ดข้าวได้รับความร้อนมากพอที่จะสลายพันธะน้ำบนผิว (Free water surface) น้ำจะเริ่มระเหย และเริ่มระเหยอย่างรวดเร็ว ในช่วงแรกนี้ความร้อนที่อากาศถ่ายเทเข้ามาให้กับวัสดุจะใช้ในการระเหยน้ำที่ผิวทั้งหมด ซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อน สอดคล้องกับการระเหยน้ำ น้ำที่ระเหยออกจากผิวจะมีมวลน้ำใหม่ที่ขนส่งโดยการแพร่จากภายในวัสดุเข้ามาแทนที่ (Chu et al., 1953) ส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำหรืออัตราการอบแห้งจะมีค่าสูงในช่วงแรกของการอบแห้ง ซึ่งจากรูปที่ 4.7 จะพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปอัตราการอบแห้งจะมีค่าลดลงซึ่งมีสาเหตุมาจากปริมาณน้ำที่สะสมอยู่ในเมล็ดข้าวเริ่มมีปริมาณลดลงส่งผลให้การขนส่งน้ำมายังผิวลดลง ทำให้น้ำในการระเหยออกที่ผิวลดลงส่งผลให้อัตราการอบแห้งเริ่มลดลงในช่วงท้ายการอบแห้งนั่นเอง



รูปที่ 4.7 ผลของอัตราการอบแห้งข้าวเปลือก ณ เวลาต่างๆ ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง



รูปที่ 4.8 ผลของอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกเฉลี่ยในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

จากรูปที่ 4.8 แสดงอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกเฉลี่ยในเงื่อนไขการทดลองที่แตกต่างกันซึ่งแสดงถึงปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 23% (wb) ถึงความชื้นสุดท้าย 14% (wb) ต่อเวลาการอบแห้งทั้งหมด ซึ่งพบว่า เงื่อนไขการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C การอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 50 W การอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W การทดลองอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 80°C และการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W มีค่าอัตราการอบแห้งอยู่ที่ 0.586 0.617 0.492 0.845 และ 0.856 $\text{kg}_{\text{water}}/\text{h}$ ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W มีอัตราการอบแห้งที่สูงที่สุด รองลงมาคือ การอบแห้งด้วยลมร้อน 80°C การอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 50 W การอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C และการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W ตามลำดับ จากผลการทดลองจะสังเกตได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งนั้นก็คืออุณหภูมิการอบแห้ง ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อใช้อุณหภูมิการอบแห้งที่สูงจะส่งผลให้อัตราการอบแห้งจะสูงตามไปด้วยซึ่งจากรูปที่ 4.4 การอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W และการอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 80°C จะมีอุณหภูมิหอบแห้งสูงใกล้เคียงกันเฉลี่ยอยู่ที่ 62.86 และ 61.51°C ตามลำดับ รองลงมาคือการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 50 W การอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C และการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W ซึ่งมีผลของค่าอุณหภูมิภายในหอบแห้งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 52.59 52.27 และ 46.88°C ตามลำดับ ซึ่งมีผลสอดคล้องกับอัตราการอบแห้งนั่นเอง

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของรังสีอินฟราเรดที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งซึ่งทำการเปรียบเทียบวิธีการอบแห้ง 3 วิธีคือ การอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C และการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 50 W และการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W พบว่าการเสริมรังสีอินฟราเรดเข้ามาเสริมการอบแห้งด้วยลมร้อนช่วยให้เพิ่มอัตราการอบแห้งได้เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนธรรมดา อย่างไรก็ตามเมื่อนำรังสีอินฟราเรดมาใช้ในการอบแห้งเพียงแหล่งความร้อนเดียวจะพบว่า ยังมีอัตราการอบแห้งที่ต่ำ เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งแบบเสริมความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับการอธิบายในหัวข้อที่ 4.3.2 ผลการศึกษาพฤติกรรมการอบแห้ง และยังพบอีกว่าการอบแห้งแบบวิธีการเสริมความร้อนร่วมเมื่อเพิ่มความเข้มของรังสีอินฟราเรดจาก 50 W เพิ่มขึ้นเป็น 850 W จะยิ่งส่งผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR)

METHODS	DR (KG _{WATER} /H)
HEATER 60°C	0.586 ± 0.035 ^{bcd}
HEATER 80°C	0.854 ± 0.067 ^{ab}
HEATER 60°C + IR 50 W	0.617 ± 0.011 ^{abc}
HEATER 60°C + IR 850 W	0.856 ± 0.031 ^a
IR 850 W	0.492 ± 0.027 ^d

หมายเหตุ ^{a,b,c} ตัวอักษรยกกำลังภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึงค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$).

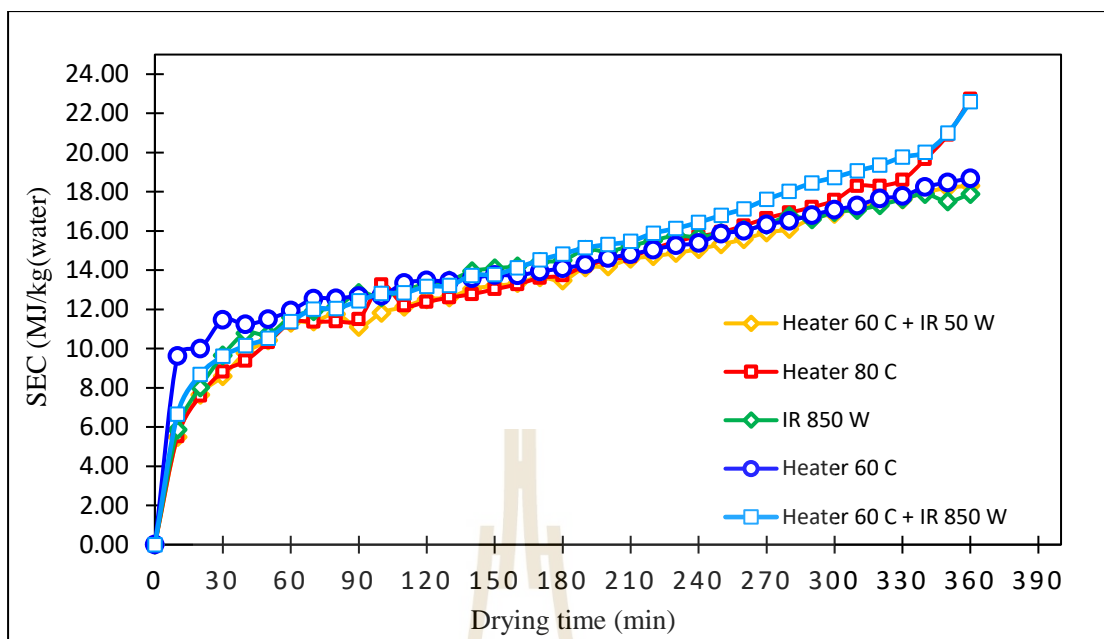
อย่างไรก็ตามตารางที่ 4.3 แสดงอัตราการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C และการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 50 W ยังไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากระดับปัจจัยความเข้มรังสีอินฟราเรดที่ใช้เสริมความร้อนร่วมกับลมร้อนยังอยู่ในระดับที่ต่ำที่ 50 W ซึ่งมีสาเหตุมาจากผู้วิจัยต้องการควบคุมให้อุณหภูมิในถังอบแห้งไว้ไม่ให้เกิน 45°C เพื่อควบคุมคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง (MÜLLER et al., 2022; Zheng and Lan, 2007) ส่งผลให้เกิดข้อจำกัดของการใช้ระดับความเข้มของรังสีอินฟราเรดในการทดสอบร่วมกับลมร้อน ทำให้การอบแห้งทั้งสองวิธียังไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อผู้วิจัยทำการทดสอบหาความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเพิ่มความเข้มของรังสีอินฟราเรดในการอบแห้งแบบวิธีการเสริมความร้อนร่วมเป็น

850 W พบว่า อัตราการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C และการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) นั้นหมายความว่าความเข้มของรังสีอินฟราเรดส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง และยังพบอีกว่าวิธีการอบแห้งแบบพลังงานความร้อนร่วม ส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว

4.4.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC)

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งพิจารณาการใช้ประโยชน์จากความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออก สามารถประเมินได้ในรูปของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) ซึ่งเป็นค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง ต่อมวลน้ำทั้งหมดที่ระเหยออกจากข้าวเปลือก ซึ่งค่าพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ประกอบด้วย พลังงานจากพัดลมความดันสูง (Blower) มอเตอร์ป้อน (Feeding motor) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric heater) และ หลอดอินฟราเรด (Infrared lamp) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.9 โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.9 – 4.10 และตารางที่ 4.4

จากกราฟรูปที่ 4.9 ผลของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ณ เวลาต่างๆ ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) มีแนวโน้มค่อยๆ เพิ่มขึ้นในช่วงแรก และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในช่วงหลังการอบแห้ง เมื่อเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงาน ณ ช่วงเวลาต่างๆ พบว่า ในช่วงแรกของการอบแห้งค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) มีค่าต่ำกว่าช่วงหลังการอบแห้ง เนื่องจากในช่วงแรกของการอบแห้งจากรูปที่ 4.7 อัตราการอบแห้งมีค่าค่อนข้างสูง นั้นหมายความว่าอากาศร้อนที่ไหลเข้ามาแลกเปลี่ยนความร้อนกับเมล็ดข้าวสามารถใช้ความร้อนเข้าไประเหยน้ำที่ผิวเมล็ดข้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากความร้อนที่ถูกถ่ายเทให้กับอากาศจะถูกถ่ายเทไปยังเมล็ดข้าวเพื่อใช้ระเหยน้ำได้อย่างเต็มที่ เนื่องจากปริมาณน้ำในเมล็ดข้าวในช่วงแรกนั้นมีปริมาณมากจึงมีการเคลื่อนย้ายมวลน้ำในเมล็ดข้าวซึ่งอาศัยความแตกต่างของความดันระหว่างภายในเมล็ดและผิวเมล็ดดันน้ำออกมายังผิวเมล็ดได้เป็นจำนวนมาก (Chu et al., 1953) ซึ่งส่งผลให้ช่วงแรกของการอบแห้งเกิดการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพมากกว่านั่นเอง (Jokiniemi et al., 2015) ซึ่งในช่วงหลังการอบแห้งจากรูปที่ 4.4 จะสังเกตได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิในหอบแห้งมีค่าสูงขึ้น

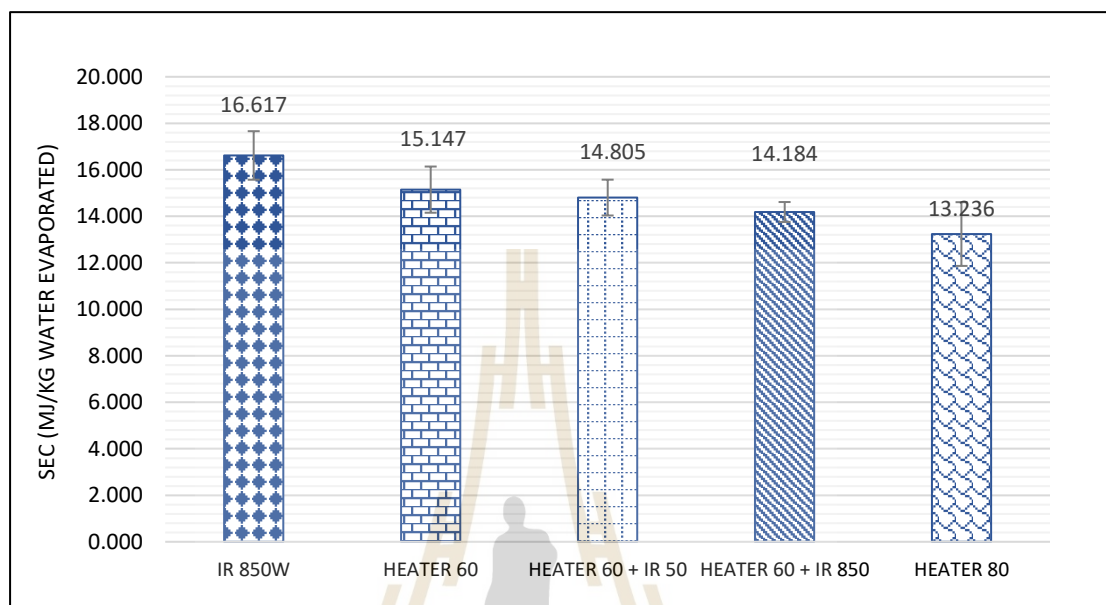


รูปที่ 4.9 ผลของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ณ เวลาต่างๆ ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ในขณะเดียวกันจากรูปที่ 4.7 อัตราการอบแห้งมีแนวโน้มที่ลดลง นั่นหมายความว่าในช่วงหลังการอบแห้งน้ำที่สะสมในเมล็ดข้าวมีปริมาณลดลงเนื่องจากเกิดการขนถ่ายออกเป็นจำนวนมากในช่วงแรก ซึ่งการอบแห้งจะเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling drying period) (Zeki, 2009) ในขณะที่อากาศร้อนที่เป็นตัวกลางการถ่ายเทความร้อนยังได้รับพลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนด้วยปริมาณเท่าเดิม แต่ในขณะเดียวกันปริมาณน้ำที่จะเข้าไประเหยนั่นมีปริมาณลดลง ดังนั้นส่งผลให้ความร้อนที่แหล่งความร้อนถ่ายเทให้กับอากาศ ไม่สามารถนำไปใช้ระเหยน้ำได้ในปริมาณเท่าเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงต้นการอบแห้ง และบางส่วนถูกใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิที่ผิวเมล็ดแทน ซึ่งจะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้ง และอุณหภูมิถึงเก็บในช่วงท้ายการอบแห้งจะมีแนวโน้มที่สูงขึ้น ดังนั้นจากรูปที่ 4.9 จะสังเกตได้ว่าการใช้พลังงานความร้อนมีประสิทธิภาพลดลงสังเกตได้จากค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) นั้นสูงขึ้นในช่วงท้ายการอบแห้ง (Jokiniemi et al., 2015)

จากรูปที่ 4.10 ผลของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองทดลองพบว่า พบว่า เงื่อนไขการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C การอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 50 W การอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W และการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 80°C และการ

อบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W มี SEC อยู่ที่ 15.147 14.805 16.617 13.236 และ 14.184 MJ/kg_{water} ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ผลของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ตารางที่ 4.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC)

METHODS	SEC (MJ/KG _{WATER})
HEATER 60°C	15.147 ± 0.993 ^a
HEATER 80°C	13.236 ± 1.370 ^a
HEATER 60°C + IR 50 W	14.805 ± 0.771 ^a
HEATER 60°C + IR 850 W	14.184 ± 0.429 ^a
IR 850 W	16.617 ± 1.043 ^a

หมายเหตุ ^{a,b,c} ตัวอักษรยกกำลังภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์เดียวกัน หมายถึงค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (p<0.05).

ซึ่งจะเห็นได้ว่าการการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) สูงที่สุด รองลงมาคือ การอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C การอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 50 W การอบแห้งด้วยลมร้อน 80 °C และการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W ตามลำดับ ซึ่งจะ

สังเกตได้ว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง 80°C มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด รองลงมาคือ การอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W ซึ่งหนึ่งในปัจจัยหลักของการลดความสิ้นเปลืองพลังงานการอบแห้งคือ การใช้อุณหภูมิการอบแห้งสูง (Suomi et al., 2003) ซึ่งอากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะมีความสามารถในการรับน้ำจากการระเหยได้ดีกว่าอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ และเกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนได้มากกว่า เนื่องจากมีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอากาศร้อนและอุณหภูมิที่เมล็ดข้าวที่มากกว่า จึงทำให้มีการถ่ายเทความร้อนเพื่อใช้ในการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกได้ดีกว่าอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ ส่งผลทำให้การอบแห้งใช้เวลาลดลงในการลดความชื้นให้ถึงความชื้นเป้าหมาย ดังนั้นความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจึงมีค่าน้อยกว่าเงื่อนไขการทดลองอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งการใช้อากาศร้อนอุณหภูมิ 80°C ใช้เวลาการอบแห้งเพียง 160 นาทีเท่านั้น และการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W ใช้เวลาใกล้เคียงกันคือ 163 นาที แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่าการใช้อุณหภูมิสูงจะช่วยลดความสิ้นเปลืองพลังงานได้มากกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำ แต่สิ่งที่ต้องคำนึงตามมาก็คือ ปัญหาคุณภาพข้าวหลังการอบแห้ง (Mussi et al, 2015; Wiset et al, 2001)

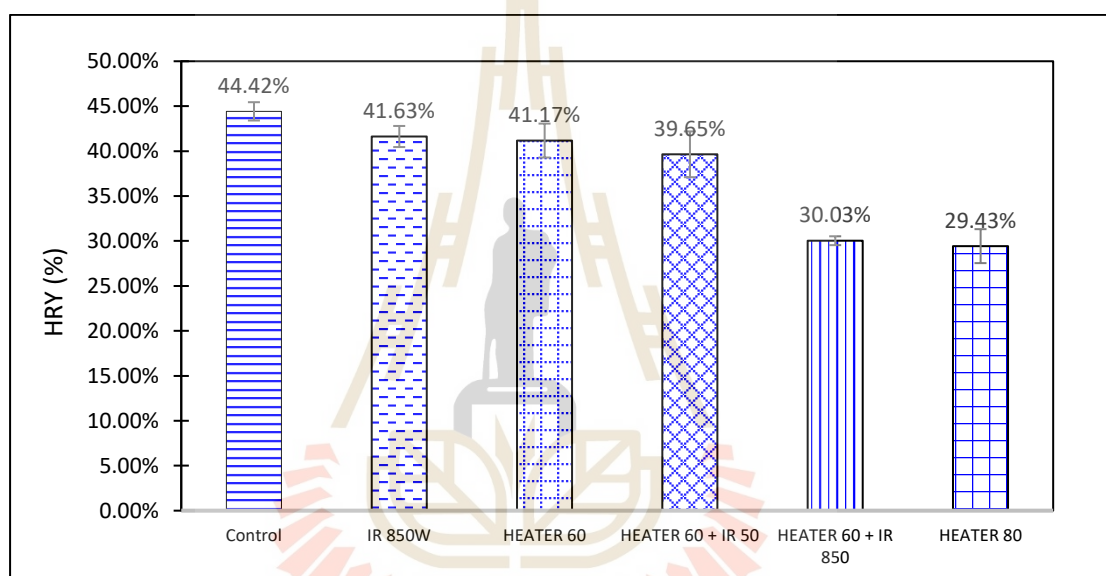
ในขณะที่เดียวกันเมื่อเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการใช้รังสีอินฟราเรดเข้ามาใช้ในการอบแห้งและเข้ามาเป็นพลังงานความร้อนเสริมในการอบแห้งพบว่า เงื่อนไขการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W ยังมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่นานกว่าเงื่อนไขอื่น และพบว่าการใช้รังสีอินฟราเรดเสริมความร้อนร่วมกับลมร้อน สามารถช่วยลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้ ซึ่งสอดคล้องกับระยะเวลาในการอบแห้งที่การเสริมความร้อนร่วมกับลมร้อนใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่น้อยกว่าการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 60°C แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติที่แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่า ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทั้ง 5 เงื่อนไขการทดลองยังไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.4.3 การทดสอบคุณภาพข้าว

การตรวจสอบและประเมินคุณภาพข้าว (Quality of rice) หลังกระบวนการอบแห้งเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งการตรวจสอบคุณภาพข้าวในงานวิจัยนี้ประเมินจาก ปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน (Head rice yield, HRY) และดัชนีความขาว (Whiteness index, WI) ผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

1) ปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น (Head rice yield, HRY)

ข้าวที่มีคุณภาพการสีดี คือข้าวที่ผ่านกระบวนการขัดสีแล้วได้ปริมาณข้าวเต็ม เมล็ดและข้าวต้นสูง มีปริมาณข้าวหัก (Broken rice) น้อย การประเมินคุณภาพการสีของข้าว เกี่ยวข้องกับการแปรรูปข้าวหรือการสีข้าว (Rice milling) ซึ่งหมายถึง การทำให้เปลือก รำ และคัพพะออกจากเมล็ดข้าว (จิตรรัตน์ จอกแก้ว, 2559) นำน้ำหนัก ข้าวขาว ไปคำนวณหา ข้าวเต็ม เมล็ด ดังสมการ (2.14) (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและ สหกรณ์, 2555) ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.11 ผลของปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น (Head rice yield, HRY) ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

จากรูปที่ 4.11 แสดงผลของปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น (Head rice yield, HRY) ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง พบว่าที่เงื่อนไขการทดลองการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C การอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 50 W การอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W การทดลองอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 80°C และการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W มีค่า HRY(%) อยู่ที่ 41.175 39.646 41.627 29.429 และ 30.033% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W

ตารางที่ 4.5 ปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน (Head rice yield, HRY)

METHODS	HRY (%)
HEATER 60°C	41.175 ± 0.019 ^a
HEATER 80°C	29.429 ± 0.019 ^b
HEATER 60°C + IR 50 W	39.646 ± 0.025 ^a
HEATER 60°C + IR 850 W	30.033 ± 0.049 ^b
IR 850 W	41.627 ± 0.012 ^a
QUALITY CONTROL SAMPLE	44.425 ± 0.010 ^a

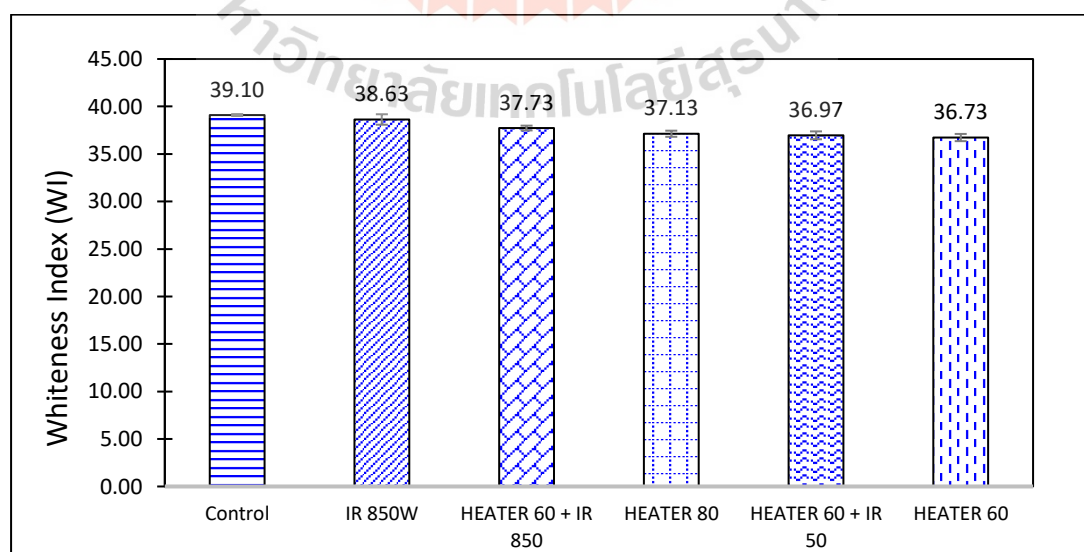
หมายเหตุ ^{a,b,c} ตัวอักษรยกกำลังภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึงค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$).

มีค่า HRY(%) สูงที่สุด รองลงมาคือ การอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C และการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 50 W ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าเงื่อนไขการทดลองที่ใช้รังสีอินฟราเรดในการอบแห้งให้ผลของค่า HRY(%) ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับเงื่อนไขอื่น ๆ และมีค่าใกล้เคียงตัวอย่างชุดควบคุมมากที่สุด ซึ่งสืบเนื่องมาจากการใช้รังสีอินฟราเรดในการอบแห้งที่ 850 W นั้น เมื่อสังเกตจากรูปที่ 4.4 จะพบว่าอุณหภูมิภายในหอบแห้งนั้นค่อนข้างที่จะต่ำกว่าเงื่อนไขอื่น นั่นก็คืออยู่ที่ประมาณ 46.8°C ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิภายในหอบแห้งนั้นส่งผลต่อคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้รังสีอินฟราเรดอบแห้งจะทำให้มีอุณหภูมิภายในหอบแห้งที่ต่ำและส่งผลให้คุณภาพข้าวหลังการอบแห้งนั้นมีค่าสูงกว่าเงื่อนไขอื่น และค่า HRY(%) ของเงื่อนไขการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C และการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 50 W มีค่าที่ใกล้เคียงกัน กับการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 850 W เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ออบแห้งนั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C และการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W ซึ่งอุณหภูมิการอบแห้งที่ต่ำจะช่วยลดการเกิดความแตกต่างของความดันและความเค้นในเมล็ดข้าวในช่วงเริ่มต้นการอบแห้งและไม่ทำให้เมล็ดข้าวเกิดการหดตัวจากแรงดึงภายในแกนกลางเมล็ดอันเนื่องมาจากการใช้อุณหภูมิการอบแห้งที่สูงเกินไป (S. Gunasekaran et. al., 1985) และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติที่แสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่า ค่า HRY(%) ของเงื่อนไขการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C และการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 50 W และการใช้รังสีอินฟราเรดในการอบแห้งที่ 850 W และตัวอย่างชุดควบคุม ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ในทางตรงกันข้ามจากรูปที่ 4.11 เมื่อพิจารณาเงื่อนไขการอบแห้งด้วยลมร้อน 80°C และการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W พบว่ามีค่า HRY(%) ต่ำที่สุดคือ 29.429 และ 30.033% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับตัวอย่างชุดควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เกี่ยวกับอุณหภูมิการอบแห้งก่อนหน้านี้ ซึ่งอุณหภูมิภายในหอบแห้งนั้นส่งผลต่อคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง ซึ่งสังเกตได้ว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน 80°C และการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W จะส่งผลให้อุณหภูมิภายในหอบแห้งนั้นสูงกว่าเงื่อนไขการทดลองอื่น ซึ่งอาจเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลทำให้ค่า HRY(%) ต่ำ ซึ่งการใช้อุณหภูมิต่ำที่สูงจะส่งผลให้ ความแตกต่างระหว่างความดันที่ผิวเมล็ดข้าวและบริเวณแกนกลางนั้นมีความแตกต่างกันมาก ซึ่งส่งผลให้กระบวนการเคลื่อนที่ของมวลน้ำที่อยู่บริเวณแกนกลางเมล็ดข้าวมาที่ผิว เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากความแตกต่างของความดัน จึงทำให้เนื้อเมล็ดข้าวบริเวณแกนกลางเกิดการหดตัวหรือเกิดความเค้นสะสมขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดรอยร้าวหรือรอยแตกสะสมในเมล็ดข้าว และทำให้ส่งผลกระทบต่อปัญหาทางด้านคุณภาพในแง่ของปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน (Head rice yield, HRY) ดังผลการทดลอง

2) ดัชนีความขาว (Whiteness index, WI)

การวัดดัชนีความขาวนั้นสามารถทำได้โดยนำข้าวตันที่ผ่านการคัดแยกเมล็ดมาวิเคราะห์หาค่าดัชนีความขาวด้วยเครื่องวัดความขาว ที่แสดงดังรูป 3.24 และบันทึกค่าความขาว โดยผลการศึกษาค่าดัชนีความขาวแสดงดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ค่าดัชนีความขาวของข้าวหลังการอบแห้งด้วยเงื่อนไขการอบแห้งที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.6 ดัชนีความขาว (Whiteness index, WI)

METHODS	WHITENESS INDEX (WI)
HEATER 60°C	36.733 ± 0.379 ^a
HEATER 80°C	37.133 ± 0.321 ^a
HEATER 60°C + IR 50 W	36.967 ± 0.416 ^a
HEATER 60°C + IR 850 W	37.733 ± 0.252 ^a
IR 850 W	38.633 ± 0.551 ^a
COMTROL	39.100 ± 0.100 ^a

หมายเหตุ ^{a,b} ตัวอักษรยกกำลังภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึงค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$).

จากรูปที่ 4. ค่าดัชนีความขาวของข้าวหลังการอบแห้งด้วยเงื่อนไขการอบแห้งที่แตกต่างกัน พบว่าที่เงื่อนไขการทดลองการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C การอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 50 W การอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W และการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 80°C และการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W มีค่าดัชนีความขาวอยู่ที่ 36.733 36.976 38.633 37.133 และ 37.733 ตามลำดับ ซึ่งมีชุดตัวอย่างข้าวเปลือกควบคุมที่มีดัชนีความขาว 39.100 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าดัชนีความขาวของเงื่อนไขต่างๆ กับชุดตัวอย่างควบคุมพบว่า การอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W มีค่าดัชนีความขาวสูงที่สุดและมีค่าใกล้เคียงกับชุดตัวอย่างควบคุมที่สุด ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้อุณหภูมิการอบแห้งที่ต่ำสามารถเพิ่มค่าดัชนีความขาวได้ รองลงมาคือ การอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W การทดลองอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 80°C การอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 50 W และการทดลองการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าแต่ละเงื่อนไขการทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

เพื่อเป็นการพัฒนาการอบแห้งแบบพาหะลมด้วยอากาศร้อนให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นผู้วิจัยจึงได้ทำการพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรดขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการพัฒนาต้นแบบระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมพลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรด และเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความชื้นขณะอบแห้งและประเมินสมรรถนะของระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้น การทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความชื้น การอบแห้งโดยใช้พลังงานความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดช่วยลดระยะเวลาการอบแห้งลงได้ และการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 80°C และการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W ใช้ระยะเวลาการอบแห้งน้อยที่สุด และสังเกตได้ว่าการเพิ่มความเข้มของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งแบบเสริมความร้อนจาก 50 W เป็น 850 W สามารถช่วยลดเวลาการอบแห้งลงได้

5.1.2 อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) การอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C และการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W มีอัตราการอบแห้งที่สูงใกล้เคียงกัน และการอบแห้งพลังงานความร้อนร่วมสามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งได้ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติพบว่า เจอนไขการทดลองนี้ยังไม่มี ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C และยังคงพบว่าการเพิ่มความเข้มของรังสีอินฟราเรดในกระบวนการอบแห้งแบบเสริมความร้อนจาก 50 W เป็น 850 W ส่งผลให้ค่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

5.1.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) การอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C และการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ต่ำที่สุด และการอบแห้งพลังงานความร้อนร่วมสามารถลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ลงได้ และในส่วนของ การอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W มีค่า SEC สูงที่สุด

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติพบว่าแต่ละเงื่อนไขการทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

5.1.4 การทดสอบคุณภาพข้าว

ปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน (Head rice yield, HRY) พบว่าการการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W มีค่า HRY(%) สูงที่สุด และการอบแห้งด้วยลมร้อน 80°C มีค่า HRY(%) ต่ำที่สุดในส่วนของการเปรียบเทียบวิธีการอบแห้งพลังความร้อนร่วม และวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน พบว่า การอบแห้งพลังงานความร้อนร่วม มีค่า HRY(%) น้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C แต่อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติพบว่าแต่ละเงื่อนไขการทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในส่วนของดัชนีความขาว (Whiteness index, WI) การอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W มีค่า ดัชนีความขาว สูงที่สุดแต่อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติพบว่าแต่ละเงื่อนไขการทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

5.1.5 การประเมินสถานะการทำงานที่เหมาะสมของระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้น

ในแง่ของพฤติกรรมการอบแห้ง และอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) สามารถสรุปได้ว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C และการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W มีอัตราการอบแห้งสูงใกล้เคียงกัน

ในแง่ของความสัมพันธ์พลังงาน การอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C และการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W มีค่าความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ต่ำที่สุด

ในแง่คุณภาพข้าว ในการพิจารณาเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน (Head rice yield, HRY) พบว่าการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W มีค่า HRY(%) สูงที่สุด และในการพิจารณาดัชนีความขาว (Whiteness index, WI) พบว่า การอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 W มีค่า ดัชนีความขาว สูงที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรด สิ่งที่ต้องทำการปรับปรุงเพิ่มเติมคือ

1. ควรมีการหุ้มฉนวนฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ผลิตลมร้อนให้แน่นหนาากกว่านี้เนื่องจากมีลมรั่วเข้าไปในระบบอบแห้งส่งผลให้อุณหภูมิการอบแห้งไม่สามารถควบคุมให้สูงได้ตามเป้าหมาย

2. ควรมีการออกแบบหรือพัฒนาเครื่องมือวัดที่สามารถวัดอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกขาออกได้โดยตรงเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวัดอุณหภูมิเมล็ดข้าวมากยิ่งขึ้นและส่งผลดีต่อการควบคุมคุณภาพข้าวหลังการอบแห้ง เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้อุณหภูมิถึงเก็บข้าวในการประมาณอุณหภูมิเมล็ดข้าวขาออก

3. ควรมีการศึกษาออกแบบระบบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิถึงเก็บโดยการควบคุมความเร็วมอเตอร์ และอุณหภูมิฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ เพื่อควบคุมอุณหภูมิขาออก และเพิ่มคุณภาพข้าวหลังการอบแห้ง

4. ควรมีการศึกษาทดสอบอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดหลายระดับมากขึ้นเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการอบแห้ง



รายการอ้างอิง

- กิตติ สถาพรประสาธน์, กรณัฐ ทวีเจริญธรรม, กรวิชัย ตลับทอง และฉัตรนิตา พรหมมาโอิน. (2563). การออกแบบห้องพริกไทยด้วยเทคนิคสเปาต์เต็ดเบตทำงานร่วมกับฟลูอิดไดซ์เบต. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 15 ฉบับที่ 1:เดือน มกราคม – เมษายน.
- เกียรติศักดิ์ ใจโต. (2558). การพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบสเปาต์เต็ดเบตสำหรับอบแห้งมะพร้าวขูด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. p. 10.
- จักรมาส เลหาวิช, นักวิจัย (2559). โครงการอบแห้งข้าวเปลือกโดย รังสีอินฟราเรด ลมร้อน และการเทมเปอร์ริง. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม.
- จิตรารัตน์ จอกแก้ว. (2559). การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. pp. 24-25.
- ฉัตรชัย นิยมล. (2555). ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ท่ออบแห้งชนิดท่อเกลียว. KKU Res. Journal. ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- นเรศ มีโส, นักวิจัย (2555). การพัฒนาเทคนิคการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ฟลูอิดไดซ์เซชั่นร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม.
- ปฏิวัตร คมวชิรกุล, ฉัตรชัย นิยมล, อัศวิน ยอดรักษ์. (2562). ผลกระทบของการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและพลังงานของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารี. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 20. วันที่ 14-15 มีนาคม 2562. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.

ปิยะพล ฟุ้งพงศ์พันธุ์, ศุภณัฐ ไผทโสภณ, อานันท์ ตัน ภูมิ, ฉัตรชัย นิยมมล และกิตติ สถาพรประสาธน์. (2559). อิทธิพลของขนาดหอบแห้งที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – มิถุนายน.

พิรสิทธิ์ ทวยนาค, มณฑล ชูโซนาค, มุस्ताฟา ยะภา และ ประชา บุญยวานิชกุล. (2557). การทบทวนพัฒนาการของการลดความชื้นข้าวเปลือกในทางอุตสาหกรรม. SWU Engineering Journal (2014), vol. 9(1), pp. 68-74.

สำนักงานปลัดกระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2563). ความเป็นมาข้าวขาวแจ๊กชัชนาท [ออนไลน์] สืบค้นจาก: <https://www.opsmoac.go.th/chainat-dwl-files-421591791093>

สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์. (2563). สินค้าส่งออกสำคัญของไทยตามโครงสร้างสินค้าส่งออกโลก [ออนไลน์] สืบค้นจาก: <http://tradereport.moc.go.th/Report/Default.aspx?Report=MenucomRecode&lmExType=1&Lang=Th>

สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว. (2562). วิทยาการก่อน และหลังการเก็บเกี่ยวข้าว. [ออนไลน์] สืบค้นจาก: <http://webold.ricethailand.go.th/rkb3/title-index.php-file=content.php&id=3-5.htm>

เสาวณี คุณาภรณ์, สุภวรรณ ฐิระวณิชกุล และยุทธนา ฐิระวณิชกุล. (2551). การอบแห้งข้าวกล้องชั้นบางโดยใช้พลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานไฟฟ้า. การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18. วันที่ 20 – 21 ตุลาคม พ.ศ. 2551 จังหวัดชลบุรี. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

อัศวิน ยอดรักษ์ และ ฉัตรชัย นิยมมล. (2562). การพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารีร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดในระดับห้องปฏิบัติการ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33. วันที่ 2-5 กรกฎาคม พ.ศ. 2562 จังหวัดอุดรธานี. ETM – 024. ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2547). ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน คณะอุตสาหกรรมเกษตร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร.
- Abe, T. & Afzal, T.M. (1997). Thin-layer infrared radiation drying of rough rice. *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 67, pp. 289–297.
- About, S.A.A., Altemimi, A.B., Al-Hilphy, A.R.S. & Lee, Y-C. (2019). A Comprehensive Review on Infrared Heating Applications in Food Processing. *Molecules*, vol. 24(22), pp. 4125 – 4145). Retrieved from <https://doi.org/10.3390/molecules24224125>
- Amini, G., Salehi, F., Rasouli, M. (2021). Color changes and drying kinetics modeling of basil seed mucilage during infrared drying process. *Information Processing in Agriculture*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.07.001>.
- AOAC, O. (1990). *Official Methods of Analysis*. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA.
- AOAC, Official Method of Analysis of AOAC International. (1995). Virginia: Association of Official Analytical Chemists.
- Banaszek, M. M. & Siebenmorgen, T. J. (1990). Head Rice Yield Reduction Rates Caused by Moisture Adsorption. *American Society of Agricultural*, 33(4).
- Bechtel, D.B., and Pomeranz, Y. (1977). Ultrastructure of the mature ungerminated rice (*Oryza sativa*) caryopsis. The caryopsis coat and aleurone cells. *American Journal of Botany*, vol. 64, pp. 966 – 973.
- Bechtel, D.B., and Pomeranz, Y. (1980). The rice kernels. *Advances in Cereal and Technology*, vol. 3, pp. 73 – 113.
- Berk, Zeki. (2009). *Food process engineering and technology: Dehydration*, pp. 459 – 510. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812018-7.00022-1>

- Bord, I. & Levy, A. (2006). 6 Pneumatic and Flash Drying. In Mujumdar, A.S., (Eds). Handbook of Industrial Drying (pp. 397 – 409). DOI:10.1201/9781420017618.ch16.
- Bunyawanchakul, P., Walker, G.J., Sargison, J.E. & Doe, P.E. (2007). Modelling and simulation of paddy grain (rice) drying in a simple pneumatic dryer. Biosystems Engineering, vol. 96(3), pp. 335 – 344. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.11.004>
- Buttrose, M.S., and Soeffky, A. (1973). Ultrastructure of lipid deposits and other contents in freeze – etched coleoptile cells of ungerminated rice grains. The Australian Journal of Biological Sciences, vol. 26, pp. 357 – 364.
- Chatchai nimmol. (2010). Vacuum Far-infrared Drying of Foods and Agricultural Materials. The Journal of KMUTNB., vol. 20 (1), Jan. – Apr.
- Chu, J., Lane, A. and Conklin, D. (1953). Evaporation of liquids into their superheated vapors. Ind Eng Chem, vol. 53(3), pp. 275 – 280.
- De Padua D B (1985). Requirements for drying high moisture content grain in Southeast Asia, preserving grain quality by aeration and in-store drying. Proceedings of International Seminar, pp 45–49, Kuala Lumpur, Malaysia
- EL-Mesery, H.S., Kamel, R.M. & Emara, R.Z. (2021). Influence of infrared intensity and air temperature on energy consumption and physical quality of dried apple using hybrid dryer. Case Studies in Thermal Engineering, vol. 27, 101365. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101365>.
- Firouzi, S., Alizadeh, M.R. & Haghtalab, Didar. (2016). Energy consumption and rice milling quality upon drying paddy with a newly-designed horizontal rotary dryer. Energy, vol. 119, pp. 629 – 636. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.026>
- Ghalavand, Y., Sadegh, M-H. & Rahimi, A. (2010). Experimental and parametric study on drying of green peas in spouted bed. International Journal of Food Science and Technology, vol. 45, pp. 2546 – 2552.

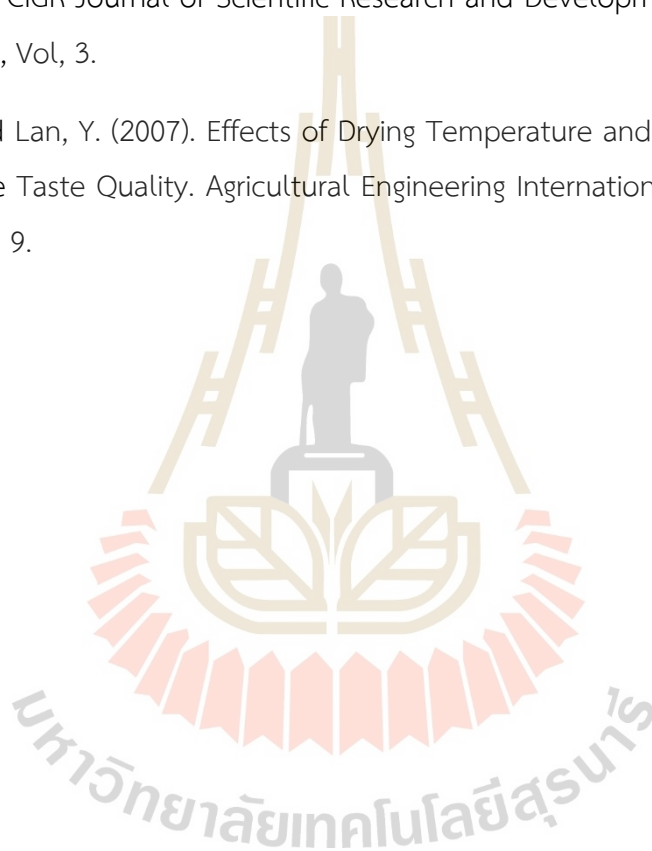
- Ginzburg, A.S. (1969). Application of infrared radiation in food processing. Chemical and Process Engineering Series, Leonard Hill, London.
- Gnanamanickam Samuel S. (2009). Rice and its importance to human life. Biological Control of Rice Diseases. Progress in Biological Control, vol. 8, pp. 1 – 11.
- Government of Manitoba (2017). Water content and water activity: Two factors that affect food safety. [Online] Retrieved from <https://www.gov.mb.ca/agriculture/food-safety/at-the-food-processor/water-content-water-activity.html>.
- Gunasekaran, S., Deshpande, S.S., Paulsen, M.R., Shove, G.C. (1985). Size characterization of stress cracks in corn kernels. Trans. ASAE Paper No. 85.
- Hung, J.Y., Wimberger, R.J., Mujumdar, A.S. (1995). Drying of coated webs. Mujumdar, A.S., (Ed.). Handbook of Industrial Drying (2nd, pp. 1007 – 1038). New York, NY, USA: Marcel Dekker Inc.
- Jokiniemi, T., Oksanen, T., Ahokas, J. (2015). Continuous airflow rate control in a recirculating batch grain dryer. Agronomy Research, vol. 13(1), pp. 89 – 94.
- Juliano. B.O. (1972). The rice caryopsis and its composition. In Rice chemistry and technology. (1st ed.). pp. 10 – 74. American Association of Cereal Chemists. St. Paul. Minnesota.
- Juliano. B.O. (1981). Rice grain properties and resistance to storage insects, A review. IRRI Research paper series, vol. 56, p. 9.
- Kemp, I.C. (1994). SCALE-UP OF PNEUMATIC CONVEYING DRYERS. Drying Technology: An International Journal, vol. 12:1-2, pp. 279 – 297.
<http://dx.doi.org/10.1080/07373939408959957>
- Kennedy G, Burlingame B, Nguyen N. (2002). Nutrient impact assessment of rice in major rice-consuming countries. Food and Agriculture Organization of the United Nations. [Online] Retrieved from <http://www.fao.org/3/Y6159T/y6159t04.htm#Note1>.

- Kunze O R, Calderwood D L (1980). *Systems for Drying Rice, Drying and Storage of Agricultural Crops* AVI Pub. Co. Ltd., Connecticut, USA
- Lee, S.C., Jeong, S.M., Kim, S.Y., Park, H.R., Nam, K.C. & Ahn, D.U. (2006). Effect of far-infrared radiation and heat treatment on the antioxidant activity of water extracts from peanut hulls. *Food Chem*, vol. 94, pp. 489 – 493.
- Mathur, K. B. & N. Epstein. (1974). *Spouted Beds*. New York: Academic Press.
- Meeso, N., Nathakaranakule, A., Madhiyanon, T. & Soponronnarit, S. (2006). Modelling of far-infrared irradiation in paddy drying process. *Journal of Food Engineering*, vol. 78, pp. 1248–1258.
- Mercer, D. G. (2008). Solar drying in developing countries: Possibilities and pitfalls. In G. L. Robertson, & J. R. Lupien (Eds.). *Using food science and technology to improve nutrition and promote national development* International Union of Food Science & Technology (vol. 1, pp. 49 – 58).
<https://alimentosprocessados.com.br/arquivos/ciencia-e-tecnologia/Using-Food-Science-and-Technology-to-Improve....pdf>.
- Mihindukulasuriya, S.D.F., Jayasuriya, H.P.W. (2013). Mathematical modeling of drying characteristics of chilli in hot air oven and fluidized bed dryers. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol. 15, pp. 154 – 166.
- MÜLLER¹, A., Marcela, M.T., MALDANER, V., CORADI, P. C., MORAES, R.S.d., MARTENS, S., LEAL, A.F., PEREIRA, V.F., MARIN, C. K. (2022). Rice Drying, Storage and Processing: Effects of Post-Harvest Operations on Grain Quality. *Rice Science*, vol. 29, pp. 16-30.
- Mussi, L. P., Guimarães, A. O., Ferreira, K. S., Pereira, N. R. (2015). Spouted bed drying of jambolão (*Syzygium cumini*) residue: Drying kinetics and effect on the antioxidant activity, anthocyanins and nutrients contents. *LWT*, vol. 61(1), pp. 80 - 88.

- Niibori, F. and Motoi, S. (1988). Evaporation of vegetables used by infrared rays. *Food Processing*, vol. 23, pp. 38 – 42.
- Nindo, C.I. and Tang, J. (2007). Refractance Window Dehydration Technology: A Novel Contact Drying Method. *Dry. Technol*, vol. 25, pp. 37–48.
- Pan, Z., Atungulu, G.G. (2010). *Infrared Heating for Food and Agricultural Processing*. New York, NY, USA: CRC Press.
- Penggang Pei, Ke Xiong, Xiaoyi Wang, Baoguo Sun, Zhiyao Zhao, Jiping Xu, Xuebo jin, Hong Ye, Junsong Xiao, Jianlei Kong (2021). Modelling the effect of environmental factors on the growth of *Aspergillus parasiticus* and mycotoxin production in paddy during storage, 93, 101846, Beijing, 100048, China.
- Ratti, C., Mujumdar, A.S. 1995. Infrared drying. *Handbook of Industrial Drying: Volume 1*, 2nd ed., Mujumdar, A.S. (Ed.), Marcel Dekker, New York, pp. 567–588.
- Ricepedia, CGIAR, IRRI, Philippines. (2018). Cultivated rice species. [Online] Retrieved from: <http://ricepedia.org/rice-as-a-plant/rice-species/cultivated-rice-species>.
- Rosenthal, I. (1992). *Electromagnetic Radiations in Food Science*. Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Ryozo Toei, Morio Okazaki & Hajime Tamon. (1994). Convectonal basic design for convection or conduction dryers. *Drying Technology: An International Journal*, vol. 12, pp. 59 – 97. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1080/07373939408959950>
- Sakai, N., Hanazawa, T., (1994). Applications and advances in far-infrared heating in Japan. *Trends Food Sci. Technol*, vol. 5(11), pp. 357 – 362. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/0924-2244\(94\)90213-5](https://doi.org/10.1016/0924-2244(94)90213-5).
- Sandu, C. (1986). Infrared radiative drying in food engineering: A process analysis. *Biotechnology Progress*, vol. 2, pp. 109 – 119.

- Sharada S. (2013). Studies on effect of various operating parameters & foaming agents – drying of fruits and vegetables. *International journal of modern engineering research (IJMER)*, vol. 3(3), pp. 1512 – 1519.
- Sivakumar, R., Saravanan, R., Elaya Perumal, A. & Iniyan, S. (2016). Fluidized bed drying of some agro products – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 61, pp. 280 – 301.
- Soponronnarit, S., (1995). Strategy for managing moist paddy. *The Royal Institute Journal*, vol. 20(4), pp. 115-125.
- Soponronnarit, S. (1999). Fluidized-Bed Paddy Drying. (*Science Asia*) vol. 25: pp. 51-56.
- Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S. & Sripawaatakul, O. (1996). Development of Cross-Flow Fluidized Bed Paddy Dryer. *Drying Technology: An International Journal*, vol. 14:10, pp. 2397 - 2410.
<http://dx.doi.org/10.1080/07373939608917212>.
- Soponronnarit, S., Yapha, M. & Prachayawarakorn, S. (1995). Cross-Flow Fluidized Bed Paddy Dryer: Prototype and Commercialization. *Drying Technology: An International Journal*, vol. 13, pp. 2207 – 2216.
<http://dx.doi.org/10.1080/07373939508917075>.
- Soponronnarit, S. & Prachayawarakorn, S. (1994). OPTIMUM STRATEGY FOR FLUIDIZED BED PADDY DRYING. *Drying Technology: An International Journal*, vol. 12:7, pp. 1667 – 1686. <http://dx.doi.org/10.1080/07373939408962192>
- Suomi, P., Lötjonen, T., Mikkola, H., Kirkkari, A.-M. & Palva, R. (2003). Viljan korjuu ja varastointi laajenevalla viljatilalla. *Maa- ja elintarviketalous* 31, 100 pp. (in Finnish)
- Thompson, R. A. & Foster, G. H. (1963). Stress cracks and breakage in artificially dried corn. *Marketing Research Bulletin No. 631*, TFRD, AMS, USDA

- Wetchacama, S., Soponronnarit, S., Swasdisevi, T., Prachayawarakorn, S., Panich-ing-orn, J. & Suthicharoenpanich, S. (2001). Drying of High Moisture Paddy by Two-Dimensional Spouted Bed Technique. *Kasetsart J. (Nat. Sci.)*, vol. 35, pp. 93 – 103.
- Wiset, L., G. Szrednicki, R. H. Driscoll, C.Nimmuntacin, and, Siwapornrak P. (2001). Effects of high temperature drying rice quality. *Agricultural Engineering International, the CIGR Journal of Scientific Research and Development*. Manuscript FP01 003, Vol, 3.
- Zheng, X. and Lan, Y. (2007). Effects of Drying Temperature and Moisture Content on Rice Taste Quality. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, vol. 9.





ภาคผนวก ก

ตารางผลการทดลอง

1. การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกเบื้องต้นด้วยเครื่องอบแห้ง

1.1 ผลการทดสอบเพื่อหาเงื่อนไขการทดสอบที่เหมาะสมที่ควบคุมให้อุณหภูมิข้าวเปลือกขาออกไม่เกิน 45 °C

ตารางผนวกที่ ก1 ผลของการเปรียบเทียบอุณหภูมิในหอบแห้งและอุณหภูมิจึงเก็บข้าว ณ เวลาใดๆ ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 60 65 และ 70 °C

Time (min)	Heater 60°C		Heater 65°C		Heater 70°C	
	Column	Bin	Column	Bin	Column	Bin
0	26.6	27.3	30.50	27.80	32.70	33.10
10	47.9	40.0	50.90	42.70	52.50	42.40
20	48.6	41.5	51.20	44.00	53.20	43.70
30	49.8	42.3	52.30	44.60	53.50	45.00
40	49.9	43.0	52.50	45.00	53.10	45.50
50	49.8	43.5	52.10	45.40	53.80	46.20
60	50.9	43.9	53.60	45.90	56.00	46.30
70	50.7	43.8	53.70	46.10	54.40	46.80
80	51.5	43.6	53.70	46.10	55.20	46.80
90	50.4	43.4	54.00	46.50	56.00	47.00
100	50.3	43.4	54.30	46.50	55.10	47.40
110	51.0	43.6	53.50	46.90	55.30	47.30
120	50.1	43.9	53.50	47.10	57.30	47.30
130	51.4	44.2	53.80	47.20	55.50	47.80
140	51.6	44.6	54.50	47.40	56.70	47.80
150	51.7	44.6	54.80	47.50	57.90	48.10
160	51.3	44.7	54.90	47.90	58.80	47.90
170	52.8	44.8	54.90	47.80	58.20	48.50
180	52.5	45.2	54.70	48.00	58.60	48.80
190	52.0	45.2	55.00	48.10	58.40	49.00
200	52.2	45.2	56.10	48.10	58.20	49.30

Time (min)	Heater 60°C		Heater 65°C		Heater 70°C	
	Column	Bin	Column	Bin	Column	Bin
210	52.0	45.7	55.30	48.40	58.20	49.50
220	51.3	45.7	55.30	48.70	58.20	49.80
230	51.5	45.9	56.10	49.00	58.40	49.90
240	51.3	45.4	55.50	49.20	58.30	50.10
250	51.8	45.5	55.00	49.30	59.00	49.90
260	51.9	45.7	56.20	49.40	57.80	50.30
270	52.4	45.7	56.20	49.40	58.30	50.30
280	52.5	45.9	56.30	49.90	59.20	50.70
290	52.7	45.8	56.60	49.90	58.80	50.60
300	52.3	45.5	55.60	50.10	59.50	50.80
310	51.5	45.8	55.90	50.10	59.70	50.80
320	52.8	45.9	56.50	50.20	59.10	51.40
330	52.1	46.0	56.60	50.30	59.60	51.50
340	51.6	46.2	56.40	50.40	59.50	51.50
350	52.6	46.1	56.70	50.30	59.40	51.50
360	52.4	45.9	57.00	50.40	59.30	51.50

ตารางผนวกที่ ก2 ผลของการเปรียบเทียบอุณหภูมิในหอบแห้งและอุณหภูมิถังเก็บข้าว ณ เวลาใดๆ ที่การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิการอบแห้ง 60 ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 50 และ 60 วัตต์

Time (min)	Heater 60°C + 50 W		Heater 60°C + 60 W	
	Column	Bin	Column	Bin
0	33.80	30.20	32.10	28.10
10	49.50	39.70	50.00	39.90
20	51.20	41.70	50.30	40.80
30	51.50	42.00	50.40	41.90
40	50.90	42.40	50.20	42.60
50	51.30	43.10	50.60	43.00
60	52.60	43.40	50.50	43.40
70	52.30	43.50	50.70	43.50
80	52.70	43.80	50.10	43.20
90	52.90	43.90	50.40	43.30
100	52.80	44.10	50.00	43.70
110	52.20	44.40	51.20	43.90
120	52.90	44.50	51.50	44.40
130	52.40	44.70	51.60	44.80
140	52.40	44.60	52.00	45.00
150	52.30	44.70	52.20	45.40
160	50.60	44.70	51.80	45.60
170	52.20	44.70	52.20	45.90
180	51.70	45.20	52.80	46.20
190	51.60	45.20	53.40	46.40
200	51.00	45.00	53.60	46.70
210	52.10	45.30	53.70	47.00
220	51.30	45.60	52.90	47.20
230	51.80	45.50	53.70	47.20
240	51.50	45.50	54.50	47.30

Time (min)	Heater 60°C + 50 W		Heater 60°C + 60 W	
	Column	Bin	Column	Bin
250	51.60	45.70	52.70	47.80
260	51.80	45.60	53.70	48.00
270	52.80	45.90	53.20	48.10
280	51.80	45.90	54.30	47.90
290	52.70	45.50	54.20	48.20
300	52.10	45.80	53.20	48.40
310	53.30	45.70	54.80	48.10
320	52.40	45.70	54.80	48.30
330	52.40	45.80	54.10	48.60
340	51.70	46.20	54.20	48.60
350	52.50	46.00	54.40	49.00
360	51.70	46.10	55.00	48.50

ตารางผนวกที่ ก3 ผลของการเปรียบเทียบอุณหภูมิในหอบแห้งและอุณหภูมิถังเก็บข้าว ณ เวลาใดๆ ที่การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้รังสีอินฟราเรด 600 700 และ 850 W

Time (min)	IR 600 W		IR 700 W		IR 850 W	
	Column	Bin	Column	Bin	Column	Bin
0	25.80	26.20	28.40	29.00	29.60	30.20
10	35.20	34.70	40.00	38.10	43.90	42.83
20	36.00	35.80	40.40	39.40	44.40	43.50
30	36.30	36.90	40.90	40.20	44.73	44.07
40	37.20	37.70	40.90	40.60	45.17	44.40
50	37.60	37.90	41.20	41.00	45.73	44.60
60	37.90	38.20	41.20	41.00	45.77	44.73
70	37.70	38.30	42.00	41.60	45.87	45.00
80	38.30	38.70	41.80	41.70	46.77	45.17
90	38.80	38.90	42.40	41.80	46.73	45.27

Time (min)	IR 600 W		IR 700 W		IR 850 W	
	Column	Bin	Column	Bin	Column	Bin
100	38.80	39.10	42.00	41.80	46.67	45.47
110	39.30	39.20	42.20	42.10	46.67	45.63
120	39.10	39.40	42.50	42.40	47.07	45.73
130	39.40	39.60	42.60	42.50	47.10	46.00
140	39.50	39.80	42.80	42.80	47.20	46.13
150	39.30	39.90	42.60	42.90	46.99	46.30
160	39.90	40.10	42.60	42.40	47.17	46.43
170	39.70	39.70	43.30	42.40	47.57	46.53
180	40.00	39.90	43.00	42.60	47.60	46.77
190	39.70	39.90	43.00	42.60	47.40	46.53
200	39.80	40.00	43.20	42.70	47.70	46.63
210	40.50	40.20	43.40	42.90	47.30	46.73
220	40.60	40.40	43.60	43.20	47.77	47.10
230	40.40	40.80	44.10	43.30	48.07	47.27
240	40.40	40.90	43.10	43.60	47.83	47.33
250	40.20	41.00	43.80	43.60	47.70	47.33
260	40.60	41.20	43.30	43.60	47.60	47.90
270	41.50	41.40	43.20	43.70	47.53	47.70
280	41.00	41.80	43.60	44.00	48.17	47.80
290	41.20	42.20	43.60	44.00	48.30	47.77
300	41.80	42.30	42.10	43.70	48.07	47.63
310	41.90	42.70	43.60	44.00	47.60	47.83
320	41.80	42.70	43.60	44.00	47.37	48.00
330	41.80	43.00	43.90	44.00	47.92	47.97
340	41.50	42.90	43.90	44.90	47.43	47.87
350	42.00	43.20	44.10	44.90	47.88	48.13
360	42.00	43.20	44.00	45.00	48.50	48.60

2. ผลการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีการอบแห้งที่แตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบแห้ง 5 เงื่อนไข

2.1 ผลของอุณหภูมิภายในถังเก็บ และอุณหภูมิหอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ตารางผนวกที่ ก4 ผลของการเปรียบเทียบอุณหภูมิในหอบแห้งและอุณหภูมิจังเก็บข้าว ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C

Time (min)	Heater 60°C (Rep.1)		Heater 60°C (Rep.2)		Heater 60°C (Rep.3)	
	Column	Bin	Column	Bin	Column	Bin
0	26.50	26.90	26.50	26.90	26.50	26.90
10	49.20	38.70	51.60	42.90	51.40	44.10
20	50.40	41.10	51.50	43.70	50.90	44.60
30	50.60	42.00	52.40	44.30	52.00	45.10
40	51.00	42.70	52.60	44.70	52.00	45.60
50	51.90	43.40	52.30	45.00	51.40	45.30
60	52.00	43.90	52.60	45.10	51.90	45.50
70	52.70	44.20	53.00	45.40	51.50	45.60
80	52.70	44.40	53.00	45.50	51.90	45.70
90	52.70	44.50	53.10	45.60	52.60	46.30
100	53.20	45.00	52.50	45.90	51.40	46.40
110	53.10	45.20	52.90	46.10	52.20	46.40
120	53.40	45.50	53.40	46.00	51.90	46.70
130	53.70	45.60	53.40	46.40	52.40	46.70
140	53.80	45.70	53.00	46.60	52.50	46.80
150	53.50	46.00	52.70	46.50	52.70	47.10
160	53.40	46.10	53.00	46.90	52.30	47.30
170	53.80	46.20	53.20	46.90	52.10	47.10
180	53.20	46.40	53.50	46.70	52.50	47.00
190	53.30	46.30	53.40	46.80	52.90	46.90
200	53.70	46.60	53.60	46.80	52.70	47.40

Time (min)	Heater 60°C (Rep.1)		Heater 60°C (Rep.2)		Heater 60°C (Rep.3)	
	Column	Bin	Column	Bin	Column	Bin
210	53.70	46.70	53.80	46.90	53.10	47.30
220	53.60	46.70	53.70	47.20	52.70	47.70
230	53.70	47.10	54.10	47.00	53.40	48.10
240	53.90	47.30	53.40	47.20	52.90	47.80
250	54.30	47.40	54.00	47.10	53.30	47.90
260	53.70	47.50	53.40	47.30	52.70	47.80
270	53.90	47.40	53.60	47.20	53.10	48.20
280	54.00	47.60	53.10	47.20	52.70	48.20
290	54.70	47.60	53.50	47.40	53.70	48.40
300	54.10	47.80	53.40	47.40	53.60	48.30
310	53.80	48.00	53.10	47.70	52.60	48.40
320	54.60	48.00	53.60	47.60	52.90	48.60
330	54.70	47.80	52.30	47.20	53.80	48.70
340	53.90	48.10	53.50	47.50	53.70	48.60
350	54.00	48.10	53.90	48.10	53.90	48.70
360	54.30	48.20	54.00	48.10	53.90	48.60

ตารางผนวกที่ ก5 ผลของการเปรียบเทียบอุณหภูมิในหอบแห้งและอุณหภูมิถังเก็บข้าว ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน 80°C

Time (min)	Heater 80°C (Rep.1)		Heater 80°C (Rep.2)		Heater 80°C (Rep.3)	
	Column	Bin	Column	Bin	Column	Bin
0	60.20	47.00	60.60	47.60	59.00	45.20
10	60.40	48.70	61.90	48.90	60.00	47.60
20	61.20	49.40	62.50	49.90	61.20	49.10
30	61.50	50.00	62.90	50.40	62.10	49.90
40	62.30	50.10	63.20	50.70	62.30	50.40
50	62.00	50.50	63.70	51.10	62.10	50.80
60	61.50	50.90	63.20	51.60	62.60	51.10
70	62.00	51.20	63.10	51.50	62.40	51.40
80	62.40	51.40	63.60	51.80	63.10	51.90
90	62.00	51.60	62.80	52.30	63.00	52.20
100	62.70	51.90	64.30	52.60	63.70	52.50
110	63.60	52.10	64.20	52.80	63.10	52.80
120	62.60	51.80	63.70	52.90	64.10	52.90
130	62.70	52.10	64.70	53.40	64.00	52.90
140	63.50	52.30	63.70	53.40	64.20	53.10
150	63.20	52.40	63.50	53.20	64.20	53.30
160	63.00	52.70	64.00	53.40	64.00	53.80
170	63.20	53.10	64.00	53.70	64.20	53.50
180	63.70	53.10	63.40	53.60	64.20	54.00
190	63.40	53.20	64.00	53.60	64.60	54.10
200	64.00	53.10	64.00	53.90	64.30	54.40
210	63.30	53.30	64.20	54.30	64.20	54.70
220	64.20	53.60	64.40	54.50	64.40	54.90
230	63.30	53.50	64.30	54.70	64.30	55.20
240	63.50	54.30	64.50	55.00	64.50	55.40
250	63.80	54.00	65.30	55.20	64.40	55.70

Time (min)	Heater 80°C (Rep.1)		Heater 80°C (Rep.2)		Heater 80°C (Rep.3)	
	Column	Bin	Column	Bin	Column	Bin
260	63.90	54.30	64.30	55.30	65.10	55.70
270	64.10	54.60	65.10	55.40	65.30	55.50
280	64.20	55.00	64.80	55.70	65.00	55.80
290	64.60	54.40	65.10	55.80	65.00	55.80
300	64.90	54.80	65.10	56.20	65.00	56.60
310	64.60	55.00	65.80	56.50	64.40	56.60
320	64.40	55.10	66.30	56.80	65.80	56.60
330	65.60	55.20	66.10	56.80	65.10	56.70
340	65.70	55.70	66.00	57.10	65.60	56.30
350	64.80	55.90	66.00	57.40	65.50	56.30
360	64.80	55.90	66.00	57.70	65.50	56.30

ตารางผนวกที่ ก6 ผลของการเปรียบเทียบอุณหภูมิในหอบแห้งและอุณหภูมิถึงเก็บข้าว ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C + Infrared 50 วัตต์

Time (min)	Heater 60°C + IR (Rep.1)		Heater 60°C + IR (Rep.2)		Heater 60°C + IR (Rep.3)	
	Column	Bin	Column	Bin	Column	Bin
0	27.20	26.90	27.20	26.90	27.20	26.90
10	50.00	39.80	51.50	43.50	51.30	42.60
20	50.20	41.90	51.40	44.00	50.90	43.20
30	50.70	43.30	51.10	44.40	51.50	43.70
40	51.40	43.90	51.40	44.90	51.90	44.00
50	52.50	44.30	52.30	44.90	51.90	44.30
60	51.60	44.60	53.00	45.40	51.70	44.50
70	52.60	45.00	52.50	45.70	52.50	44.80
80	52.30	45.40	52.40	45.80	52.30	45.00
90	52.30	45.50	53.00	46.00	52.10	45.10

Time (min)	Heater 60°C + IR (Rep.1)		Heater 60°C + IR (Rep.2)		Heater 60°C + IR (Rep.3)	
	Column	Bin	Column	Bin	Column	Bin
100	52.70	45.80	53.10	46.10	52.40	45.40
110	53.00	46.10	52.90	46.30	52.90	45.70
120	53.40	46.30	53.40	46.30	52.90	45.90
130	53.60	46.20	53.70	46.80	52.90	46.10
140	53.00	46.60	53.60	46.80	53.30	46.10
150	53.10	46.80	53.50	47.10	52.80	46.00
160	53.50	47.10	53.70	47.00	53.30	46.30
170	53.20	47.30	53.90	47.40	52.80	46.60
180	54.50	47.30	54.00	47.30	53.80	46.40
190	54.10	47.30	54.30	47.50	53.20	46.60
200	54.60	47.43	53.60	47.70	53.30	47.30
210	54.00	47.22	54.10	47.60	54.20	47.60
220	53.40	47.40	54.30	47.60	53.20	47.40
230	54.50	47.80	54.00	47.70	53.50	47.50
240	54.50	47.80	53.50	47.70	52.60	47.60
250	54.60	47.90	53.30	47.80	53.50	47.60
260	54.90	48.00	54.30	47.80	54.20	47.90
270	55.00	48.10	53.90	47.70	53.50	48.00
280	54.90	48.20	53.60	47.90	53.80	48.20
290	55.30	48.50	54.10	47.80	53.90	48.60
300	54.50	48.50	53.50	48.20	53.70	48.30
310	55.00	48.70	53.40	48.20	53.70	48.50
320	55.20	48.70	53.90	48.20	54.50	48.60
330	55.20	49.00	53.70	48.20	53.10	48.80
340	55.10	49.00	53.70	48.20	53.50	48.80
350	55.20	49.20	53.80	48.30	53.70	49.00
360	55.10	49.10	53.70	48.40	53.80	49.00

ตารางผนวกที่ ก7 ผลของการเปรียบเทียบอุณหภูมิในหอบแห้งและอุณหภูมิถึงเก็บข้าว ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วย Infrared 850 วัตต์

Time (min)	IR 850 W (Rep.1)		IR 850 W (Rep.2)		IR 850 W (Rep.3)	
	Column	Bin	Column	Bin	Column	Bin
0	42.60	41.60	42.70	40.80	42.50	41.90
10	43.50	42.70	44.80	42.80	43.40	43.00
20	43.60	43.30	45.40	43.60	44.20	43.60
30	44.40	43.70	44.90	44.50	44.90	44.00
40	44.30	44.20	46.10	44.80	45.10	44.20
50	44.90	44.30	46.60	45.10	45.70	44.40
60	45.10	44.40	46.30	45.30	45.90	44.50
70	45.00	44.60	46.50	45.60	46.10	44.80
80	45.70	44.80	47.00	45.70	47.60	45.00
90	45.70	45.00	47.40	45.50	47.10	45.30
100	46.10	45.10	47.50	46.10	46.40	45.20
110	46.70	45.40	47.50	46.20	45.80	45.30
120	47.20	45.50	47.70	46.20	46.30	45.50
130	47.30	46.00	47.60	46.20	46.40	45.80
140	46.20	45.90	48.50	46.70	46.90	45.80
150	45.88	46.00	48.60	46.80	46.50	46.10
160	46.90	46.10	48.20	46.80	46.40	46.40
170	46.90	46.20	48.50	47.00	47.30	46.40
180	48.00	46.40	48.20	47.50	46.60	46.40
190	47.10	46.40	48.70	46.80	46.40	46.40
200	46.90	46.60	48.80	46.90	47.40	46.40
210	46.80	46.70	47.60	46.70	47.50	46.80
220	46.80	46.90	48.40	47.40	48.10	47.00
230	47.10	47.20	48.90	47.40	48.20	47.20
240	47.70	47.40	48.80	47.40	47.00	47.20
250	46.70	47.20	49.30	47.60	47.10	47.20

Time (min)	IR 850 W (Rep.1)		IR 850 W (Rep.2)		IR 850 W (Rep.3)	
	Column	Bin	Column	Bin	Column	Bin
260	46.60	48.30	49.00	48.10	47.20	47.30
270	47.10	47.80	48.20	48.10	47.30	47.20
280	47.50	48.20	49.70	48.10	47.30	47.10
290	47.90	48.30	49.70	48.20	47.30	46.80
300	48.10	48.10	49.20	48.50	46.90	46.30
310	46.30	48.70	49.00	48.20	47.50	46.60
320	46.30	48.60	48.20	48.60	47.60	46.80
330	47.55	48.80	48.60	48.30	47.60	46.80
340	46.20	48.60	48.50	48.00	47.60	47.00
350	47.55	48.80	48.50	48.60	47.60	47.00
360	46.20	48.80	48.50	48.60	47.60	47.00

ตารางผนวกที่ ก8 ผลของการเปรียบเทียบอุณหภูมิในหอบแห้งและอุณหภูมิถังเก็บข้าว ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C + Infrared 850 วัตต์

Time (min)	Heater 60°C + IR 850 (Rep.1)		Heater 60°C + IR 850 (Rep.2)		Heater 60°C + IR 850 (Rep.3)	
	Column	Bin	Column	Bin	Column	Bin
0	28.50	28.30	28.50	28.30	30.10	30.10
10	54.20	50.30	55.80	49.90	56.80	49.10
20	57.30	53.10	56.90	50.80	58.00	51.40
30	58.70	54.40	57.90	52.30	58.60	52.90
40	58.60	54.80	58.30	53.40	59.50	53.90
50	58.40	55.20	59.40	54.20	60.20	54.80
60	59.00	56.00	60.10	54.60	61.20	55.10
70	59.20	56.10	60.90	54.90	61.10	55.40
80	60.20	56.20	61.40	55.60	61.70	55.80
90	60.30	56.50	60.80	56.00	61.20	56.40

Time (min)	Heater 60°C + IR 850 (Rep.1)		Heater 60°C + IR 850 (Rep.2)		Heater 60°C + IR 850 (Rep.3)	
	Column	Bin	Column	Bin	Column	Bin
	100	60.50	56.60	60.90	56.10	62.50
110	61.20	56.80	61.90	56.40	62.00	56.70
120	61.10	57.20	62.90	56.60	62.30	56.80
130	61.30	57.30	62.40	57.20	62.50	57.30
140	61.50	58.00	62.20	57.00	63.10	57.50
150	61.20	58.30	63.20	57.30	63.80	57.80
160	62.10	58.10	63.00	57.50	64.70	57.90
170	61.70	58.30	63.70	58.00	64.70	58.50
180	61.80	58.60	63.40	58.20	63.80	58.10
190	61.70	58.60	63.50	58.10	64.60	58.00
200	61.20	58.50	63.60	57.60	64.70	58.20
210	61.10	58.60	63.90	57.90	64.80	58.10
220	61.30	58.70	63.80	58.20	64.90	58.20
230	62.00	59.30	63.60	58.30	64.60	58.40
240	61.30	59.60	63.70	58.60	64.30	58.30
250	62.80	59.70	63.60	58.80	64.90	58.70
260	62.90	60.80	64.10	58.50	65.10	58.90
270	62.60	61.00	64.30	58.90	65.10	58.90
280	62.30	61.50	64.50	59.00	65.20	59.30
290	62.00	61.50	64.70	59.50	66.00	59.40
300	63.20	61.60	64.90	59.20	64.70	59.50
310	63.30	61.70	64.60	59.70	64.90	59.50
320	66.50	62.50	64.80	59.50	64.90	59.70
330	66.60	61.80	64.70	59.70	65.20	60.30
340	63.20	62.40	64.80	60.30	65.00	60.20
350	63.60	62.50	64.80	60.20	65.90	60.20
360	64.30	62.90	64.80	60.20	66.00	60.30

2.2 ผลของพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความชื้นในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ตารางผนวกที่ ก9 **การทดลองซ้ำที่ 1:** ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลอง อบแห้งด้วยลมร้อน 60°C

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
0	11.4637	10.3767	19.4000	7.9363	23.31382
10	15.5151	11.1292	24.1549	8.6398	22.36818
20	15.3008	10.9522	23.8652	8.5644	21.80201
30	11.3045	11.3514	20.1877	8.8832	21.74357
40	15.1073	10.7809	23.6160	8.5087	21.07616
50	14.9987	11.4940	24.1375	9.1388	20.49069
60	11.5606	10.5982	20.0197	8.4591	20.18362
70	11.4857	10.7539	20.1123	8.6266	19.78166
80	11.3988	11.2262	20.4544	9.0556	19.33513
90	15.4032	11.1302	24.4259	9.0227	18.93497
100	11.5663	10.9436	20.4930	8.9267	18.42995
110	15.2168	10.8917	24.1521	8.9353	17.96230
120	11.4298	10.6693	20.2144	8.7846	17.66470
130	15.2531	10.6948	24.1104	8.8573	17.18125
140	15.6392	10.4111	24.3019	8.6627	16.79361
150	11.5888	10.4328	20.3255	8.7367	16.25738
160	11.3610	10.6961	20.3469	8.9859	15.98901
170	15.1472	10.3978	23.9126	8.7654	15.69947
180	11.2611	10.9536	20.5435	9.2824	15.25708
190	11.5546	10.7574	20.7128	9.1582	14.86605
200	11.5915	10.4874	20.5649	8.9734	14.43637
210	11.2760	10.9545	20.6611	9.3851	14.32653
220	11.2581	10.5032	20.3072	9.0491	13.84435

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
230	11.5498	10.2172	20.3775	8.8277	13.59962
240	15.3084	10.6105	24.5338	9.2254	13.05405
250	15.6900	10.7977	25.0967	9.4067	12.88237
260	15.5284	10.3410	24.5583	9.0299	12.67866
270	11.0386	10.2694	20.0278	8.9892	12.46616
280	15.2325	10.7111	24.6253	9.3928	12.30779
290	15.2468	11.5118	25.3852	10.1384	11.93037
300	11.6225	10.9446	21.2894	9.6669	11.67425
310	11.3317	10.9719	21.0450	9.7133	11.47112
320	11.4349	10.5628	20.8118	9.3769	11.22714
330	11.6135	10.3204	20.8043	9.1908	10.94531
340	11.1547	10.7731	20.7547	9.6000	10.88916
350	11.1136	10.9941	20.9367	9.8231	10.65117
360	14.9817	10.0756	24.0041	9.0224	10.45298

ตารางผนวกที่ ก10 การทดลองซ้ำที่ 2: ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลอง
อบแห้งด้วยลมร้อน 60°C

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
0	15.2991	10.7437	23.5700	8.2709	23.0163
10	11.3034	10.6460	19.5471	8.2437	22.5653
20	15.1062	11.3042	23.9148	8.8086	22.0768
30	14.9975	11.0427	23.6501	8.6526	21.6442
40	11.5594	11.5320	20.6579	9.0985	21.1022
50	11.4849	10.2959	19.6451	8.1602	20.7432
60	11.3981	10.1098	19.4521	8.0540	20.3347

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
70	15.4026	10.9694	24.1888	8.7862	19.9026
80	11.5647	10.7933	20.2574	8.6927	19.4621
90	15.2165	10.3901	23.6234	8.4069	19.0874
100	11.4290	10.6975	20.1491	8.7201	18.4847
110	15.2525	10.2982	23.6709	8.4184	18.2537
120	15.6376	10.4090	24.1869	8.5493	17.8663
130	11.5875	11.7251	21.2621	9.6746	17.4881
140	11.3599	10.6279	20.1814	8.8215	16.9968
150	15.1461	10.5648	23.9418	8.7957	16.7452
160	11.2593	10.4186	19.9910	8.7317	16.1912
170	11.5540	10.3932	20.2979	8.7439	15.8690
180	11.5906	10.9950	20.8826	9.2920	15.4889
190	11.2756	10.2400	19.9625	8.6869	15.1670
200	11.2573	11.3817	20.9382	9.6809	14.9433
210	11.5496	10.9819	20.9455	9.3959	14.4419
220	15.3070	10.4967	24.2985	8.9915	14.3397
230	15.6890	10.3289	24.5775	8.8885	13.9453
240	15.5275	11.3819	25.3388	9.8113	13.7991
250	11.0375	10.8023	20.3584	9.3209	13.7137
260	15.2311	10.9216	24.6982	9.4671	13.3176
270	15.2467	11.1142	24.8972	9.6505	13.1696
280	11.6211	10.2001	20.5196	8.8985	12.7607
290	11.3303	11.1254	21.0430	9.7127	12.6980
300	11.4345	10.4707	20.5849	9.1504	12.6095
310	11.6133	11.6149	21.7995	10.1862	12.3006
320	11.1538	10.9493	20.7757	9.6219	12.1231
330	11.1138	11.0342	20.8296	9.7158	11.9483

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
340	14.9807	11.3026	24.9462	9.9655	11.8300
350	11.1291	10.6394	20.5330	9.4039	11.6125
360	15.4641	10.2623	24.5383	9.0742	11.5773

ตารางผนวกที่ ก11 การทดลองซ้ำที่ 3: ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลอง
อบแห้งด้วยลมร้อน 60°C

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
0	11.0308	11.1600	19.6124	8.5816	23.10394
10	11.2533	11.2021	19.9000	8.6467	22.81179
20	11.1933	10.7575	19.5503	8.3570	22.31466
30	15.2796	10.7038	23.6457	8.3661	21.83991
40	10.7344	11.1883	19.5385	8.8041	21.30976
50	11.2663	11.3911	20.2747	9.0084	20.91721
60	11.3955	10.7867	19.9692	8.5737	20.51601
70	11.4415	11.3704	20.5462	9.1047	19.92630
80	11.6289	11.5675	20.9409	9.3120	19.49860
90	10.7949	10.4587	19.2695	8.4746	18.97081
100	15.1944	11.0343	24.1721	8.9777	18.63825
110	11.3005	10.7655	20.0772	8.7767	18.47383
120	11.0917	11.5877	20.5873	9.4956	18.05449
130	10.7111	10.4115	19.3044	8.5933	17.46338
140	11.7757	11.0349	20.9208	9.1451	17.12566
150	11.7455	10.9955	20.8877	9.1422	16.85508
160	15.5827	10.0619	24.0163	8.4336	16.18283
170	11.6335	10.5214	20.4901	8.8566	15.82299

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
180	11.4533	10.9464	20.6946	9.2413	15.57681
190	15.2492	11.0602	24.6224	9.3732	15.25289
200	11.3234	10.3756	20.1454	8.8220	14.97359
210	11.4587	10.3950	20.3354	8.8767	14.60606
220	11.2875	10.1960	20.0174	8.7299	14.37917
230	11.3254	11.3161	21.0451	9.7197	14.10733
240	15.2894	11.0598	24.8385	9.5491	13.65938
250	11.2425	10.3297	20.1703	8.9278	13.57155
260	10.9358	10.8661	20.3593	9.4235	13.27615
270	11.5949	11.5627	21.6558	10.0609	12.98832
280	11.1131	11.5553	21.1995	10.0864	12.71192
290	11.3313	11.3754	21.2815	9.9502	12.52879
300	14.9602	11.1363	24.7222	9.7620	12.34072
310	15.1363	10.5457	24.4041	9.2678	12.11774
320	14.8950	10.6728	24.2876	9.3926	11.99498
330	11.3862	10.4012	20.5865	9.2003	11.54578
340	15.7342	10.9117	25.3859	9.6517	11.54724
350	11.2268	10.9875	20.9795	9.7527	11.23823
360	15.3753	10.0516	24.3203	8.9450	11.00919

ตารางผนวกที่ ก12 การทดลองซ้ำที่ 1: ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลอง
อบแห้งด้วยลมร้อน 80°C

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
0	11.2631	10.2827	19.0936	7.8305	23.74635
10	10.8458	11.6954	19.8464	9.0006	23.04154
20	11.0305	10.9825	19.5365	8.5060	22.54951
30	11.2535	10.0795	19.1284	7.8749	21.87212
40	11.1930	11.0980	19.9224	8.7294	21.34258
50	15.2797	10.5327	23.6123	8.3326	20.88828
60	10.7342	11.5744	19.9584	9.2242	20.30516
70	11.3265	11.0125	20.0934	8.7669	20.39137
80	11.3958	10.2079	19.6220	8.2262	19.41340
90	11.4421	11.5197	20.8127	9.3706	18.65587
100	11.6294	11.1593	20.7853	9.1559	17.95274
110	10.9748	10.6637	19.6101	8.6353	19.02154
120	15.1944	10.5309	23.9344	8.7400	17.00614
130	11.3006	11.2294	20.6800	9.3794	16.47461
140	11.0905	11.0183	20.3303	9.2398	16.14133
150	10.7117	10.6228	19.6646	8.9529	15.71996
160	11.7749	11.0488	21.1339	9.3590	15.29397
170	11.7441	10.4554	20.6677	8.9236	14.65080
180	15.5827	10.3566	24.4587	8.8760	14.29620
190	11.6328	10.8016	20.9647	9.3319	13.60632
200	11.4528	10.4164	20.4764	9.0236	13.37122
210	15.2486	11.1353	24.9424	9.6938	12.94532
220	11.3227	10.5641	20.5787	9.2560	12.38250
230	11.4570	10.8821	21.0155	9.5585	12.16309
240	11.2869	10.7880	20.8034	9.5165	11.78624

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
250	11.3246	10.8668	20.9547	9.6301	11.38054
260	15.2891	10.6234	24.7448	9.4557	10.99177
270	11.2412	10.2234	20.3695	9.1283	10.71170
280	10.9346	11.5654	21.2841	10.3495	10.51326
290	11.5940	10.9540	21.4181	9.8241	10.31495
300	11.1122	10.7269	20.7790	9.6668	9.88263
310	11.3304	10.2172	20.5422	9.2118	9.84027
320	14.9608	11.0856	24.9840	10.0232	9.58360
330	15.1358	10.2283	24.4185	9.2827	9.24494
340	14.8947	11.9556	25.7579	10.8632	9.13714
350	11.3846	10.7597	21.1961	9.8115	8.81251
360	15.7333	11.5723	26.2928	10.5595	8.75193

ตารางผนวกที่ ก13 การทดลองซ้ำที่ 2: ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลอง
อบแห้งด้วยลมร้อน 80°C

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
0	11.2629	10.3617	19.1689	7.9060	24.434
10	10.8431	11.7081	19.7897	8.9466	23.586
20	11.0305	10.4178	19.0446	8.0141	23.073
30	11.2529	10.1222	19.0956	7.8427	22.520
40	11.1916	10.3544	19.2637	8.0721	22.042
50	15.2801	10.7148	23.7059	8.4258	21.363
60	10.7341	11.5061	19.8580	9.1239	20.704
70	11.2661	10.7595	19.8557	8.5896	20.167
80	11.3953	10.4233	19.7981	8.4028	19.384

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
90	11.4414	10.7705	20.1599	8.7185	19.052
100	11.6289	11.0074	20.6103	8.9814	18.406
110	10.7946	10.9931	19.8354	9.0408	17.759
120	15.1936	10.6499	24.0037	8.8101	17.275
130	11.2998	11.0641	20.5101	9.2103	16.755
140	11.0915	10.6460	20.0165	8.9250	16.166
150	10.7115	10.4626	19.5341	8.8226	15.675
160	11.7732	11.4059	21.4805	9.7073	14.892
170	11.7438	11.7457	21.7995	10.0557	14.388
180	15.5814	11.1162	25.1323	9.5509	14.081
190	11.6318	11.5560	21.6039	9.9721	13.706
200	11.4512	10.5342	20.5991	9.1479	13.160
210	15.2479	10.5827	24.4526	9.2047	13.021
220	11.3221	11.1753	21.0975	9.7754	12.527
230	11.4558	10.1787	20.3799	8.9241	12.326
240	11.2848	11.8713	21.7579	10.4731	11.778
250	11.3235	10.6088	20.6899	9.3664	11.711
260	15.2866	10.4100	24.5213	9.2347	11.290
270	11.2402	11.0686	21.0980	9.8578	10.939
280	10.9332	10.7047	20.4977	9.5645	10.651
290	11.5933	10.2335	20.7616	9.1683	10.409
300	11.1119	10.4956	20.5396	9.4277	10.175
310	11.3295	11.4997	21.6885	10.3590	9.919
320	14.9588	10.4789	24.4331	9.4743	9.587
330	15.1349	11.3816	25.4506	10.3157	9.365
340	14.8942	11.1106	24.9857	10.0915	9.172
350	11.3845	10.0882	20.569	9.1845	8.958
360	15.7322	10.4645	25.278	9.5458	8.779

ตารางผนวกที่ ก14 การทดลองซ้ำที่ 3: ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลอง
อบแห้งด้วยลมร้อน 80°C

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
0	11.2604	11.1122	19.7596	8.4992	23.68140
10	10.8422	10.4123	18.8574	8.0152	23.02181
20	11.0283	11.5889	20.0465	9.0182	22.18243
30	11.2528	10.4864	19.4899	8.2371	21.44969
40	11.1915	10.3253	19.3465	8.1550	21.01924
50	15.2791	10.4031	23.5839	8.3048	20.16995
60	10.7336	10.3373	19.0163	8.2827	19.87560
70	11.2654	11.2083	20.3173	9.0519	19.23931
80	11.3954	11.7167	20.9372	9.5418	18.56239
90	11.4415	11.0521	20.5102	9.0687	17.94591
100	11.6293	10.2613	20.1194	8.4901	17.26097
110	10.7948	11.2577	20.1638	9.3690	16.77696
120	15.1933	11.2287	24.5825	9.3892	16.38213
130	11.2998	10.8529	20.4491	9.1493	15.69719
140	11.0909	10.2442	19.7901	8.6992	15.08170
150	10.7112	10.7664	19.9085	9.1973	14.57405
160	11.7731	10.4567	20.7406	8.9675	14.24159
170	11.7433	11.1412	21.3623	9.6190	13.66280
180	15.5796	10.5129	24.6858	9.1062	13.38070
190	11.6315	11.3908	21.5580	9.9265	12.85511
200	11.4506	10.8955	20.9842	9.5336	12.49966
210	15.2463	10.8777	24.7820	9.5357	12.33717
220	11.3216	11.3987	21.3585	10.0369	11.94698
230	11.4547	10.1627	20.4443	8.9896	11.54319
240	11.2845	11.2114	21.2373	9.9528	11.22607

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
250	11.3232	10.7976	20.9381	9.6149	10.95336
260	15.2882	11.1116	25.2231	9.9349	10.58983
270	11.2397	11.2982	21.3636	10.1239	10.39369
280	10.9329	10.8850	20.7080	9.7751	10.19660
290	11.5932	10.6674	21.2136	9.6204	9.81495
300	11.1115	10.9341	20.9924	9.8809	9.63225
310	11.3289	10.7962	21.1090	9.7801	9.41164
320	14.9595	11.3241	25.2249	10.2654	9.34909
330	15.1355	11.0549	25.1816	10.0461	9.12537
340	14.8934	10.6753	24.6144	9.7210	8.93933
350	11.3834	10.7057	21.1464	9.7630	8.80559
360	15.7322	10.5394	25.3576	9.6254	8.67222

ตารางผนวกที่ ก15 การทดลองซ้ำที่ 1: ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลอง
อบแห้งด้วยลมร้อน 60°C + IR 50 W

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
0	15.2349	11.5806	24.1383	8.9034	23.11797
10	15.5080	11.6072	24.5411	9.0331	22.17675
20	15.2977	10.0488	23.1543	7.8566	21.81554
30	11.3029	10.9761	19.9428	8.6399	21.28443
40	15.1045	10.6342	23.5200	8.4155	20.86382
50	14.9967	10.8146	23.5971	8.6004	20.47417
60	11.5599	10.8454	20.2165	8.6566	20.18183
70	11.4849	11.0031	20.3402	8.8553	19.51995
80	11.3959	10.1276	19.5749	8.1790	19.24049

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
90	15.4001	10.7967	24.1694	8.7693	18.77796
100	11.5639	11.7036	21.1563	9.5924	18.03889
110	15.2146	10.1920	23.6066	8.3920	17.66091
120	11.4288	10.8779	20.4335	9.0047	17.22024
130	15.2522	11.7824	25.0526	9.8004	16.8217
140	15.6358	10.9192	24.7430	9.1072	16.59462
150	11.5873	10.9853	20.7983	9.2110	16.15158
160	11.3595	11.4105	20.9755	9.6160	15.72674
170	15.1457	11.8109	25.1480	10.0023	15.31297
180	11.2597	11.0059	20.6411	9.3814	14.76026
190	11.5535	10.1846	20.2369	8.6834	14.7399
200	11.5910	10.4779	20.5660	8.9750	14.34352
210	11.2759	10.8047	20.5667	9.2908	14.01149
220	11.2580	10.2749	20.1403	8.8823	13.55342
230	11.5500	11.8445	21.8266	10.2766	13.23737
240	15.3075	10.9193	24.8206	9.5131	12.87811
250	15.6892	11.1279	25.4064	9.7172	12.67714
260	15.5201	10.2988	24.5602	9.0401	12.22181
270	11.0376	10.8342	20.5643	9.5267	12.06827
280	15.2316	10.1428	24.1673	8.9357	11.90105
290	15.2471	10.0094	24.0773	8.8302	11.78093
300	11.6220	11.3928	21.7022	10.0802	11.52131
310	11.3289	11.2331	21.3173	9.9884	11.08065
320	11.4346	11.7660	21.9080	10.4734	10.98589
330	11.6135	10.4350	20.9350	9.3215	10.67082
340	11.1538	10.9670	20.9662	9.8124	10.52795
350	11.1133	10.7525	20.7923	9.6790	9.983725
360	11.9806	10.5964	24.5022	12.5216	9.927503

ตารางผนวกที่ ก16 การทดลองซ้ำที่ 2: ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลอง
อบแห้งด้วยลมร้อน 60°C + IR 50 W

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
0	11.2636	10.0835	18.957	7.6934	24.28529
10	15.5021	11.5752	24.366	8.8639	23.42335
20	15.2948	10.0858	23.0437	7.7489	23.17020
30	11.3008	11.7414	20.3849	9.0841	22.63188
40	15.1026	11.3896	23.9609	8.8583	22.22466
50	14.9946	11.6696	24.1355	9.1409	21.66912
60	11.5579	11.3661	20.5023	8.9444	21.30634
70	11.4840	10.7674	20.0298	8.5458	20.63265
80	11.3958	10.1459	19.4789	8.0831	20.33137
90	15.4010	10.7694	24.0184	8.6174	19.98254
100	11.5625	10.7998	20.2687	8.7062	19.38554
110	15.0278	11.5524	24.5683	9.5405	17.41543
120	11.4282	10.0707	19.6312	8.2030	18.54588
130	15.2520	10.3525	23.7354	8.4834	18.05458
140	15.6350	10.8414	24.5273	8.8923	17.97831
150	11.5868	10.6743	20.4088	8.8220	17.35289
160	11.3589	11.0553	20.5419	9.1830	16.93577
170	15.1443	11.3276	24.5982	9.4539	16.54101
180	11.2574	10.7328	20.2406	8.9832	16.30143
190	11.5519	11.6627	21.3523	9.8004	15.96800
200	11.5872	10.4142	20.4028	8.8156	15.35019
210	11.2741	10.1778	19.9048	8.6307	15.20073
220	11.2557	11.2098	20.8148	9.5591	14.72551
230	11.5483	10.2736	20.3340	8.7857	14.48275
240	15.3059	11.0407	24.7776	9.4717	14.21106

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
250	15.6877	10.6588	24.8597	9.1720	13.94904
260	15.5265	10.2695	24.3865	8.8600	13.72511
270	11.0356	10.3439	20.0070	8.9714	13.26869
280	15.2294	10.5716	24.4030	9.1736	13.22411
290	15.2452	11.8859	25.5882	10.3430	12.98093
300	11.6204	11.5796	21.7478	10.1274	12.54102
310	11.3198	10.7947	20.7447	9.4249	12.68956
320	11.4278	10.4000	20.5426	9.1148	12.35769
330	11.6093	10.6432	20.9424	9.3331	12.30927
340	11.1501	10.5782	20.4543	9.3042	12.04364
350	11.1099	10.0281	19.949	8.8391	11.85668
360	14.9761	11.6465	25.2565	10.2804	11.72970

ตารางผนวกที่ ก17 การทดลองซ้ำที่ 3: ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลอง
อบแห้งด้วยลมร้อน 60°C + IR 50 W

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
0	11.2647	11.5738	20.0521	8.7874	24.17166
10	15.5103	10.6394	23.6247	8.1144	23.73254
20	15.2981	10.2346	23.1557	7.8576	23.22514
30	11.3010	11.6424	20.3122	9.0112	22.60015
40	15.1048	10.6356	23.3726	8.2678	22.26297
50	14.9965	10.1447	22.9372	7.9407	21.72563
60	11.5582	11.8226	20.8626	9.3044	21.29988
70	11.4840	10.7175	19.9700	8.4860	20.82109
80	11.3974	10.5947	19.8211	8.4237	20.49138

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
90	15.4007	11.2119	24.3772	8.9765	19.93774
100	11.5631	10.9783	20.4042	8.8411	19.46749
110	15.2144	11.0681	24.1849	8.9705	18.95176
120	11.4279	10.3179	19.8237	8.3958	18.62879
130	15.2518	10.7903	24.0731	8.8213	18.24787
140	15.6372	11.5079	25.0750	9.4378	17.98851
150	11.5874	10.8088	20.5134	8.9260	17.41914
160	11.3601	11.3432	20.7596	9.3995	17.13538
170	15.1446	10.5636	23.9415	8.7969	16.72441
180	11.2582	10.3168	19.9061	8.6479	16.17653
190	11.5524	11.3243	21.0752	9.5228	15.90827
200	11.5879	11.4371	21.2729	9.6850	15.31944
210	11.2752	10.3814	20.0658	8.7906	15.32356
220	11.2571	11.5924	21.1293	9.8722	14.83903
230	11.5483	10.4331	20.4548	8.9065	14.63228
240	15.3070	10.4819	24.2791	8.9721	14.40388
250	15.6886	10.8261	25.0044	9.3158	13.95055
260	15.5275	10.4182	24.5151	8.9876	13.73174
270	11.0369	10.8871	20.4575	9.4206	13.47007
280	15.2306	11.6544	25.3570	10.1264	13.11093
290	15.2463	10.4496	24.3245	9.0782	13.12395
300	11.6211	11.5144	21.6762	10.0551	12.6737
310	11.3169	10.8628	20.8051	9.4882	12.6542
320	11.4323	10.6736	20.7724	9.3401	12.49344
330	11.6113	10.6813	20.9720	9.3607	12.36366
340	11.1523	11.4326	21.2022	10.0499	12.09436
350	11.1115	11.6429	21.3904	10.2789	11.71529
360	14.9785	11.3963	25.0572	10.0787	11.56165

ตารางผนวกที่ ก18 การทดลองซ้ำที่ 1: ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลอง
อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด IR 850 W

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
0	11.2638	11.1153	19.821	8.5572	23.75474
10	10.8383	11.4535	19.6141	8.7758	23.37888
20	11.0304	11.1478	19.5966	8.5662	23.15793
30	11.2531	10.7293	19.5535	8.3004	22.63801
40	11.1933	11.6956	20.2710	9.0777	22.38363
50	15.2797	10.4686	23.4607	8.1810	21.85201
60	10.7341	10.2539	18.7522	8.0181	21.80439
70	11.2662	10.0265	19.1648	7.8986	21.22276
80	11.3952	10.6303	19.8103	8.4151	20.83855
90	11.4416	10.6827	19.9370	8.4954	20.47516
100	11.6289	11.3903	20.7255	9.0966	20.13731
110	10.7950	10.9526	19.5595	8.7645	19.9779
120	15.1941	11.0613	24.1080	8.9139	19.41363
130	11.3006	11.0572	20.2409	8.9403	19.14499
140	11.0913	11.1942	20.1748	9.0835	18.8553
150	10.7117	11.5173	20.0848	9.3731	18.61721
160	11.7743	11.3891	21.0768	9.3025	18.32103
170	11.7442	10.8973	20.6929	8.9487	17.88149
180	15.5824	11.3700	24.9600	9.3776	17.52331
190	11.6326	10.9934	20.7275	9.0949	17.26945
200	11.4517	10.8925	20.5014	9.0497	16.91806
210	15.2614	10.7020	24.1796	8.9182	16.66791
220	11.3225	10.2814	19.9310	8.6085	16.27113
230	11.4563	10.7615	20.4837	9.0274	16.11392
240	11.2870	11.1069	20.6324	9.3454	15.85951

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
250	11.3248	11.4294	20.9757	9.6509	15.56075
260	15.2889	10.3407	24.0620	8.7731	15.15952
270	11.2407	11.5971	21.1012	9.8605	14.97443
280	10.9344	10.3493	19.7816	8.8472	14.51403
290	11.5936	10.6992	20.7416	9.1480	14.49828
300	11.1126	11.9844	21.4238	10.3112	13.96148
310	11.3359	11.2158	21.0109	9.6750	13.73776
320	14.9602	11.4862	24.8866	9.9264	13.57977
330	15.1358	11.4208	25.0425	9.9067	13.25739
340	14.8949	11.5088	24.9236	10.0287	12.86059
350	11.3848	11.5399	21.4521	10.0673	12.76094
360	15.7332	11.5401	25.8236	10.0904	12.56228

ตารางผนวกที่ ก19 การทดลองซ้ำที่ 2: ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลอง
อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด IR 850 W

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
0	11.2623	11.5202	19.9752	8.7129	23.85028
10	10.8428	11.7434	19.8544	9.0116	23.26243
20	11.0282	10.2234	18.9154	7.8872	22.85150
30	11.2525	10.2459	19.2078	7.9553	22.35626
40	11.1911	10.0267	19.0211	7.8300	21.90850
50	15.2797	11.2754	24.1015	8.8218	21.76065
60	10.7341	10.0410	18.6365	7.9024	21.29868
70	11.2657	11.8899	20.6451	9.3794	21.11456
80	11.3947	10.5889	19.8071	8.4124	20.55454

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
90	11.4411	10.9628	20.1780	8.7369	20.30412
100	11.6292	11.7770	21.0713	9.4421	19.82593
110	10.7943	11.9803	20.4500	9.6557	19.40352
120	15.1933	10.5650	23.7494	8.5561	19.01467
130	11.2997	10.3225	19.7059	8.4062	18.56430
140	11.0906	10.5616	19.7084	8.6178	18.40441
150	10.7125	10.5191	19.3278	8.6153	18.09851
160	11.7726	11.5715	21.3037	9.5311	17.63298
170	11.7435	11.2932	21.0892	9.3457	17.24489
180	15.5801	10.5631	24.3533	8.7732	16.94484
190	11.6312	10.7044	20.5531	8.9219	16.65203
200	11.4506	10.7047	20.3979	8.9473	16.41709
210	15.2456	11.9435	25.2838	10.0382	15.95261
220	11.3212	11.6829	21.1812	9.8600	15.60315
230	11.4544	10.8588	20.6500	9.1956	15.31661
240	11.2842	10.1232	19.8869	8.6027	15.01995
250	11.3228	10.5419	20.3172	8.9944	14.67952
260	15.2877	10.7918	24.5257	9.2380	14.39797
270	11.2397	10.7090	20.4326	9.1929	14.15725
280	10.9324	10.6240	20.0833	9.1509	13.86578
290	11.5929	11.3067	21.3539	9.7610	13.67066
300	11.1109	10.5954	20.2873	9.1764	13.39260
310	11.3290	11.2426	21.0938	9.7648	13.14465
320	14.9598	11.5891	25.0698	10.1100	12.76285
330	15.1348	11.8257	25.4618	10.3270	12.67325
340	14.8933	10.8173	24.3606	9.4673	12.48001
350	11.3833	11.2030	21.2205	9.8372	12.19138
360	15.7322	10.4951	24.9709	9.2387	11.97130

ตารางผนวกที่ ก20 การทดลองซ้ำที่ 3: ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลอง
อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด IR 850 W

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
0	11.2673	11.6306	20.1278	8.8605	23.94192
10	15.5165	11.7392	24.4739	8.9574	23.69667
20	15.3022	10.8564	23.6456	8.3434	23.14764
30	11.3044	10.2562	19.2145	7.9101	22.87494
40	15.1080	11.1809	23.7643	8.6563	22.57958
50	15.0639	10.3931	23.1210	8.0571	22.47645
60	11.5912	10.3896	19.7035	8.1123	21.91903
70	11.4863	11.7366	20.7086	9.2223	21.42273
80	11.3993	11.9710	20.8551	9.4558	21.01078
90	15.4042	11.9407	24.8789	9.4747	20.65206
100	11.5659	11.5377	20.7926	9.2267	20.02999
110	15.2172	10.4463	23.5821	8.3649	19.92476
120	11.4302	10.9828	20.2805	8.8503	19.41672
130	15.2531	10.1661	23.4592	8.2061	19.27976
140	15.6383	10.8506	24.4312	8.7929	18.96393
150	11.5885	10.0612	19.8024	8.2139	18.36063
160	11.3603	11.6541	20.9006	9.5403	18.13782
170	15.1473	10.2558	23.5631	8.4158	17.94107
180	11.2603	10.3795	19.8080	8.5477	17.64825
190	11.5543	11.3136	20.9182	9.3639	17.23324
200	11.5917	10.6052	20.4124	8.8207	16.82665
210	11.2767	10.4807	20.0065	8.7298	16.70595
220	11.2575	10.7870	20.2870	9.0295	16.29276
230	11.5502	10.2370	20.1570	8.6068	15.92459
240	15.3082	10.9463	24.5249	9.2167	15.80077

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
250	15.6905	11.6945	25.5657	9.8752	15.55689
260	15.5281	10.9914	24.8641	9.3360	15.06087
270	11.0390	10.6653	20.1278	9.0888	14.78158
280	15.2314	11.7741	25.2804	10.0490	14.65165
290	15.2469	10.8671	24.5617	9.3148	14.2844
300	11.6223	10.5615	20.6388	9.0165	14.6286
310	11.4365	10.8363	20.7810	9.3445	13.76669
320	11.6149	11.0053	21.1027	9.4878	13.78881
330	11.1551	10.6708	20.3875	9.2324	13.47978
340	11.1150	11.8149	21.3584	10.2434	13.301
350	14.9839	11.0998	24.6305	9.6466	13.09213
360	11.1340	11.5675	21.1890	10.0550	13.07543

ตารางผนวกที่ ก21 การทดลองซ้ำที่ 1: ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลอง
อบแห้งด้วยลมร้อน 60°C + IR 850 W

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
0	11.1755	10.1117	18.7897	7.6142	24.6991
10	11.6089	10.392	19.5313	7.9224	23.7666
20	10.9188	10.416	18.9152	7.9964	23.2267
30	11.4357	10.507	19.5537	8.1180	22.7387
40	15.1467	11.219	23.8924	8.7457	22.0436
50	11.6587	10.836	20.1624	8.5037	21.5222
60	11.2576	10.212	19.3327	8.0751	20.9269
70	15.5178	11.074	24.3387	8.8209	20.3430
80	11.1555	10.839	19.822	8.6665	20.0397

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
90	11.3613	10.789	20.0644	8.7031	19.3313
100	11.2614	10.675	19.9275	8.6661	18.8157
110	15.4051	11.290	24.6265	9.2214	18.3210
120	11.5665	10.228	20.0057	8.4392	17.4925
130	11.5513	11.293	20.9556	9.4043	16.7208
140	11.5557	10.060	19.9583	8.4026	16.4735
150	10.9618	10.732	19.9833	9.0215	15.9360
160	11.0402	11.381	20.6398	9.5996	15.6539
170	11.4000	11.057	20.8001	9.4001	14.9882
180	15.1085	11.462	24.9192	9.8107	14.4030
190	15.3030	11.519	25.2094	9.9064	14.0025
200	15.3092	10.789	24.5974	9.2882	13.9105
210	11.2646	11.032	20.8502	9.5856	13.1109
220	11.5085	11.512	21.5446	10.0361	12.8228
230	15.2176	11.3984	25.2327	10.0151	12.1359
240	11.4316	10.933	21.0379	9.6063	12.1348
250	11.3061	11.503	21.5033	10.1972	11.3518
260	15.0328	11.1548	24.9497	9.9169	11.0975
270	11.5892	10.1291	20.6155	9.0263	10.8874
280	14.9807	10.0888	24.0027	9.0220	10.5741
290	11.2613	10.4853	20.6545	9.3932	10.4155
300	15.2551	10.741	24.8926	9.6375	10.2737
310	11.2785	10.6699	20.889	9.6105	9.9289
320	15.6405	10.8914	25.4809	9.8404	9.6498
330	11.5792	10.7296	21.283	9.7038	9.5605
340	15.7066	11.0511	25.7324	10.0258	9.2778
350	11.5124	10.9747	21.4893	9.9769	9.0918
360	11.4661	11.7457	22.1878	10.7217	8.7181

ตารางผนวกที่ ก22 การทดลองซ้ำที่ 2: ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลอง
อบแห้งด้วยลมร้อน 60°C + IR 850 W

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
0	11.1748	10.1746	18.901	7.7262	24.0638
10	11.6085	11.8294	20.6267	9.0182	23.7645
20	10.9187	10.8942	19.2910	8.3723	23.1490
30	11.4350	10.8203	19.8061	8.3711	22.6352
40	15.1460	10.9777	23.7175	8.5715	21.9190
50	11.6576	11.5297	20.7398	9.0822	21.2278
60	11.2570	10.5258	19.6053	8.3483	20.6873
70	15.5163	11.0920	24.3991	8.8828	19.9171
80	11.1564	11.3929	20.3254	9.1690	19.5201
90	11.3609	10.0898	19.5445	8.1836	18.8923
100	11.2611	10.1035	19.5258	8.2647	18.1996
110	15.4037	10.3169	23.8823	8.4786	17.8183
120	11.5655	11.1567	20.7884	9.2229	17.3331
130	11.5516	10.0783	19.9588	8.4072	16.5812
140	11.5556	10.5699	20.4139	8.8583	16.1932
150	10.9616	10.7475	20.0287	9.0671	15.6353
160	11.0393	10.0919	19.5952	8.5559	15.2201
170	11.4003	11.4503	21.1926	9.7923	14.4800
180	15.1082	10.5394	24.1436	9.0354	14.2703
190	15.3034	10.7229	24.5478	9.2444	13.7882
200	15.3089	11.7618	25.5153	10.2064	13.2242
210	11.2642	10.2612	20.1956	8.9314	12.9595
220	11.5088	10.5150	20.7188	9.2100	12.4108
230	15.2173	10.8890	24.8061	9.5888	11.9405
240	11.4305	11.5398	21.6082	10.1777	11.8035

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
250	11.3059	10.5624	20.6756	9.3697	11.2919
260	15.0310	11.2763	25.0552	10.0242	11.1038
270	11.5891	11.1831	21.5677	9.9786	10.7707
280	14.9802	11.3173	25.1204	10.1402	10.4009
290	11.2603	10.1743	20.3858	9.1255	10.3083
300	15.2540	10.6477	24.8120	9.5580	10.2341
310	11.2755	10.6753	20.8881	9.6126	9.9548
320	15.6395	10.2155	24.8578	9.2183	9.7616
330	11.5770	10.4037	21.0085	9.4315	9.3448
340	15.7055	10.2361	24.9872	9.2817	9.3239
350	11.5109	10.2572	20.8452	9.3343	8.9976
360	11.4649	10.7680	21.2842	9.8193	8.8104

ตารางผนวกที่ ก23 การทดลองซ้ำที่ 3: ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลอง
อบแห้งด้วยลมร้อน 60°C + IR 850 W

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
0	11.1750	10.5649	19.2177	8.0427	23.8734
10	11.6091	11.1462	20.1843	8.5752	23.0662
20	10.9187	10.6054	19.1114	8.1927	22.7497
30	11.4356	11.3782	20.3047	8.8691	22.0518
40	15.1467	10.4177	23.3140	8.1673	21.6017
50	11.657	10.7652	20.1815	8.5245	20.8143
60	11.2578	11.7295	20.6231	9.3653	20.1560
70	15.5416	10.2805	23.8043	8.2627	19.6275
80	11.1553	11.527	20.4752	9.3199	19.1472

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
90	11.3615	10.6213	20.0382	8.6767	18.3085
100	11.2611	10.8163	20.1732	8.9121	17.6049
110	15.4049	11.477	24.8993	9.4944	17.2745
120	11.5662	10.6225	20.3963	8.8301	16.8736
130	11.5515	11.4794	21.1701	9.6186	16.2099
140	11.5552	11.079	20.9279	9.3727	15.4012
150	10.9618	10.6435	20.0027	9.0409	15.0571
160	11.039	11.4445	20.8142	9.7752	14.5860
170	11.3998	10.1929	20.1710	8.7712	13.9479
180	15.1088	10.3209	24.0033	8.8945	13.8205
190	15.3028	10.5855	24.4876	9.1848	13.2323
200	15.3095	10.3401	24.2960	8.9865	13.0908
210	11.2641	10.0937	20.0877	8.8236	12.5831
220	11.509	10.1854	20.4634	8.9544	12.0859
230	15.2182	11.91044	25.7469	10.5287	11.6011
240	11.4313	10.6413	20.8280	9.3967	11.6959
250	11.3058	10.2871	20.4397	9.1339	11.2102
260	15.0314	10.0248	23.9602	8.9288	10.9329
270	11.5895	10.3569	20.8478	9.2583	10.6074
280	14.9813	10.8771	24.7072	9.7259	10.5837
290	11.2602	10.6111	20.7943	9.5341	10.1497
300	15.2547	10.7399	24.8873	9.6326	10.3102
310	11.2755	10.6753	20.8881	9.6126	9.9548
320	15.6395	10.2155	24.8578	9.2183	9.7616
330	11.5770	10.4037	21.0085	9.4315	9.3448
340	15.7055	10.2361	24.9872	9.2817	9.3239
350	11.5109	10.2572	20.8452	9.3343	8.9976
360	11.4649	10.7680	21.2842	9.8193	8.8104

2.3 ผลการใช้พลังงานรวมทั้งหมดของระบบ

ตารางผนวกที่ ก24 บันทึกผลการใช้พลังงานรวมทั้งหมดของระบบ (kW-h)

เงื่อนไขการทดสอบ	No.	น้ำหนักข้าว	ค่า	ค่า	การใช้พลังงานทั้งหมด (kW-h)				Total
			ความชื้นเริ่มต้น (%wb)	ความชื้นสุดท้าย (%wb)	Motor	Blower	Heater	Infrared	
HEATER 60	1	20	23.310	13.840	2.850	2.400	4.070	-	9.320
	2	20	23.016	13.945	2.700	2.500	4.020	-	9.220
	3	20	23.104	14.107	2.650	2.550	4.190	-	9.390
	Avg		23.143	13.964	2.733	2.483	4.093	-	9.310
HEATER 60 + IR 50	1	20	23.118	14.011	2.750	2.400	3.860	0.240	9.250
	2	20	23.170	13.949	2.600	2.600	4.070	0.270	9.540
	3	20	23.225	13.951	2.850	2.400	4.010	0.310	9.570
	Avg		23.171	13.970	2.733	2.467	3.980	0.273	9.453
HEATER 80	1	20	23.041	14.296	2.150	1.850	5.090	-	9.09
	2	20	23.073	14.081	1.900	1.800	4.590	-	8.29
	3	20	23.021	14.241	1.800	1.600	4.280	-	7.68
	Avg		23.045	14.206	1.950	1.750	4.653	-	8.353
IR 850W	1	20	23.158	13.961	3.350	3.000	-	4.100	10.45
	2	20	23.262	14.157	3.100	2.800	-	3.910	9.81
	3	20	23.148	14.629	3.400	3.150	-	4.190	10.74
	Avg		23.189	14.249	3.283	2.983	-	4.067	10.33
HEATER 60 + IR 850	1	20	23.227	14.002	2.200	1.800	3.300	2.320	9.62
	2	20	23.149	14.270	2.000	1.700	2.990	2.190	8.88
	3	20	23.066	13.948	2.000	1.850	3.010	2.220	9.08
	Avg		23.147	14.073	2.067	1.783	3.100	2.243	9.19

ตารางผนวกที่ ก25 บันทึกผลการใช้พลังงานรวมทั้งหมดของระบบ (MJ)

เงื่อนไขการทดสอบ	No.	น้ำหนักข้าว	ค่า	ค่า	การใช้พลังงานทั้งหมด (MJ)				Total
			ความชื้นเริ่มต้น (%wb)	ความชื้นสุดท้าย (%wb)	Motor	Blower	Heater	Infrared	
HEATER 60	1	20	23.310	13.840	10.260	8.640	14.652	-	33.552
	2	20	23.016	13.945	9.720	9.000	14.472	-	33.192
	3	20	23.104	14.107	9.540	9.180	15.084	-	33.804
	Avg		23.143	13.964	9.840	8.940	14.736	-	33.516
HEATER 60 + IR 50 W	1	20	23.118	14.011	9.900	8.640	13.896	0.864	33.300
	2	20	23.170	13.949	9.360	9.360	14.652	0.972	34.344
	3	20	23.225	13.951	10.260	8.640	14.436	1.116	34.452
	Avg		23.171	13.970	9.840	8.880	14.328	0.984	34.032
IR 800W	1	20	23.234	14.072	11.880	10.800	-	13.104	35.78
	2	20	23.061	13.988	12.600	11.880	-	14.040	38.52
	3	20	23.117	14.121	11.160	9.900	-	12.276	33.34
	Avg		23.137	14.060	11.880	10.860	-	13.140	35.88
HEATER 80	1	20	23.041	14.296	7.740	6.660	18.324	-	32.72
	2	20	23.073	14.081	6.840	6.480	16.524	-	29.84
	3	20	23.021	14.241	6.480	5.760	15.408	-	27.65
	Avg		23.045	14.206	7.020	6.300	16.752	-	30.072
IR 850W	1	20	23.158	13.961	12.060	10.800	-	14.760	37.62
	2	20	23.262	14.157	11.160	10.080	-	14.076	35.32
	3	20	23.148	14.629	12.240	11.340	-	15.084	38.66
	Avg		23.189	14.249	11.820	10.740	-	14.640	37.20
HEATER 60 + IR 850 W	1	20	23.227	14.002	7.920	6.480	11.880	8.352	34.632
	2	20	23.149	14.270	7.200	6.120	10.764	7.884	31.968
	3	20	23.066	13.948	7.200	6.660	10.836	7.992	32.688
	Avg		23.147	14.073	7.440	6.420	11.160	8.076	33.096

ตารางผนวกที่ ก26 บันทึกผลการคำนวณค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะ (SEC)

เงื่อนไขการทดสอบ		ค่าความชื้น	ค่าความชื้น	W_w (kg)	Q_{total} (MJ)	SEC (MJ/kg _{water})
		เริ่มต้น (%wb)	สุดท้าย (%wb)			
HEATER 60	1	23.310	13.840	2.198	33.552	15.263
	2	23.016	13.945	2.345	33.192	14.154
	3	23.104	14.107	2.095	33.804	16.136
		23.143	13.964	2.213	33.516	15.147
HEATER 60 + IR 50 W	1	23.118	14.011	2.118	33.300	15.722
	2	23.170	13.949	2.402	34.344	14.298
	3	23.225	13.951	2.376	34.452	14.500
		23.171	13.970	2.299	34.032	14.805
HEATER 80	1	23.041	14.296	2.205	32.724	14.841
	2	23.073	14.081	2.410	29.844	12.383
	3	23.021	14.241	2.201	27.648	12.562
		23.045	14.206	2.272	30.072	13.236
IR 850W	1	23.158	13.961	2.276	37.620	16.529
	2	23.262	14.157	2.258	35.316	15.640
	3	23.148	14.629	2.182	38.664	17.720
		23.189	14.249	2.239	37.200	16.617
HEATER 60 + IR 850 W	1	23.227	14.002	2.526	34.632	13.710
	2	23.149	14.270	2.218	31.968	14.413
	3	23.066	13.948	2.256	32.688	14.489
		23.147	14.073	2.333	33.096	14.184

2.4 ผลการคำนวณอัตราการอบแห้ง (Drying rate)

ตารางผนวกที่ ก27 ผลการคำนวณอัตราการอบแห้ง (Drying rate)

เงื่อนไขการทดสอบ		ค่าความชื้น	ค่าความชื้น	Ww (kg)	Time (min)	Drying rate	
		เริ่มต้น (%wb)	สุดท้าย (%wb)			(kg/min)	(kg/h)
HEATER 60	1	23.310	13.840	2.198	220.000	0.010	0.600
	2	23.016	13.945	2.345	230.000	0.010	0.612
	3	23.104	14.107	2.095	230.000	0.009	0.547
		23.143	13.964	2.213	226.667	0.010	0.586
HEATER 60 + IR 50 W	1	23.118	14.011	2.118	210.000	0.010	0.605
	2	23.170	13.949	2.402	230.000	0.010	0.627
	3	23.225	13.951	2.376	230.000	0.010	0.620
		23.171	13.970	2.299	223.333	0.010	0.617
HEATER 80	1	23.041	14.296	2.205	170.000	0.013	0.778
	2	23.073	14.081	2.410	160.000	0.015	0.904
	3	23.021	14.241	2.201	150.000	0.015	0.880
		23.045	14.206	2.272	160.000	0.014	0.854
IR 850W	1	23.158	13.961	2.276	280.000	0.008	0.488
	2	23.262	14.157	2.258	260.000	0.009	0.521
	3	23.148	14.629	2.182	280.000	0.008	0.468
		23.189	14.249	2.239	273.333	0.008	0.492
HEATER 60 + IR 850 W	1	23.227	14.002	2.526	170.000	0.015	0.892
	2	23.149	14.270	2.218	160.000	0.014	0.832
	3	23.066	13.948	2.256	160.000	0.014	0.846
		23.147	14.073	2.333	163.333	0.014	0.856



ภาคผนวก ข

ผลการทดลองหาเปอร์เซ็นต์ข้าวตันของข้าวเปลือก

1. ผลการทดสอบคุณภาพหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก

ตารางผนวกที่ ข1 ผลค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตัง และดัชนีความขาวข้าวหลังการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C

No.	MC(final) (%wb)	น้ำหนัก (g)		HRY (%)	SD (HRY)	WI	SD (WI)
		ข้าวเปลือก	ข้าวตัง				
1	14.21	1000	416.49	41.65%		37.00	
2	14.32	1000	427.80	42.78%	0.0189	36.30	0.3786
3	14.01	1000	390.95	39.10%		36.90	
average	14.18	1000	411.75	41.17%		36.73	

ตารางผนวกที่ ข2 ผลค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตัง และดัชนีความขาวข้าวหลังการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับอินฟราเรด 50 วัตต์

No.	MC(final) (%wb)	น้ำหนัก (g)		HRY (%)	SD (HRY)	WI	SD (WI)
		ข้าวเปลือก	ข้าวตัง				
1	14.11	1000	425.72	42.57%		36.50	
2	14.29	1000	384.40	38.44%	0.0255	37.10	0.4163
3	14.33	1000	379.27	37.93%		37.30	
average	14.24	1000	396.46	39.65%		36.97	

ตารางผนวกที่ ข3 ผลค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตัง และดัชนีความขาวข้าวหลังการอบแห้งด้วยลมร้อน 80°C

No.	MC(final) (%wb)	น้ำหนัก (g)		HRY (%)	SD (HRY)	WI	SD (WI)
		ข้าวเปลือก	ข้าวตัง				
1	14.06	1000	315.99	31.60%		36.90	
2	14.69	1000	281.44	28.14%	0.0189	37.00	0.3215
3	14.25	1000	285.43	28.54%		37.50	
average	14.33	1000	294.29	29.43%		37.13	

ตารางผนวกที่ ข4 ผลค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น และดัชนีความขาวข้าวหลังการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 850 วัตต์

No.	MC(final) (%wb)	น้ำหนัก (g)		HRY (%)	SD (HRY)	WI	SD (WI)
		ข้าวเปลือก	ข้าวต้น				
1	14.37	1000	403.28	40.33%		39.00	
2	14.56	1000	419.47	41.95%	0.0117	38.90	0.5508
3	14.12	1000	426.07	42.61%		38.00	
average	14.35	1000	416.27	41.63%		38.63	

ตารางผนวกที่ ข5 ผลค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น และดัชนีความขาวข้าวหลังการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับอินฟราเรด 850 วัตต์

No.	MC(final) (%wb)	น้ำหนัก (g)		HRY (%)	SD (HRY)	WI	SD (WI)
		ข้าวเปลือก	ข้าวต้น				
1	13.95	1000	298.00	29.80%		38.00	
2	14.68	1000	306.00	30.60%	0.0049	37.70	0.2517
3	14.99	1000	297.00	29.70%		37.50	
average	14.54	1000	300.33	30.03%		37.73	

ตารางผนวกที่ ข6 ผลค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น และดัชนีความขาวของข้าวตัวอย่างควบคุม

No.	MC(final) (%wb)	น้ำหนัก (g)		HRY (%)	SD (HRY)	WI	SD (WI)
		ข้าวเปลือก	ข้าวต้น				
1	14.66	1000	456.01	45.60%		39.10	
2	14.58	1000	438.34	43.83%	0.0102	39.20	0.1000
3	14.36	1000	438.39	43.84%		39.00	
average	14.53	1000	444.25	44.42%		39.10	



ภาคผนวก ค
ตัวอย่างการคำนวณ

1. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความชื้น

ตารางผนวกที่ ค1 การทดลองซ้ำที่ 1: ผลการลดลงของความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่เงื่อนไขการทดลอง
อบแห้งด้วยลมร้อน 60°C

Time (min)	Weight of container	Weight of paddy (before drying)	Weight (C + P) (After drying)	Weight of paddy (after drying)	Moisture
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%wb)
0	11.4637	10.3767	19.4000	7.9363	23.3138
10	15.5151	11.1292	24.1549	8.6398	22.3681
20	15.3008	10.9522	23.8652	8.5644	21.8020

จากตารางตัวอย่างผลการทดลองสามารถคำนวณหาค่าความชื้นจากสมการที่ 2.2

$$M_w = \frac{W_w}{W} \times 100 = \frac{W - W_d}{W} \times 100$$

$$\text{Time 0 min: } M_w = \frac{10.3767 - 7.9363}{10.3767} \times 100 = 23.3138 \%w.b$$

$$\text{Time 10 min: } M_w = \frac{11.1292 - 8.6369}{11.1292} \times 100 = 22.3681 \%w.b$$

$$\text{Time 20 min: } M_w = \frac{10.9522 - 8.5644}{10.9522} \times 100 = 21.8020 \%w.b$$

2. ตัวอย่างการคำนวณอัตราอบแห้ง (Drying rate)

ตารางผนวกที่ ค2 ผลการคำนวณอัตราการอบแห้ง (Drying rate) ที่เงื่อนไขการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C

เงื่อนไขการทดสอบ	ค่าความชื้น เริ่มต้น (%wb)	ค่าความชื้น สุดท้าย (%wb)	Ww (kg)	Time (min)	Drying rate		
					(kg/min)	(kg/h)	
HEATER 60	1	23.310	13.840	2.198	220.000	0.010	0.600
	2	23.016	13.945	2.345	230.000	0.010	0.612
	3	23.104	14.107	2.095	230.000	0.009	0.547
		23.143	13.964	2.213	226.667	0.010	0.586

จากตารางตัวอย่างผลการทดลองสามารถคำนวณหาค่าความชื้นจากสมการที่ 2.10

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t} \times 100 = \frac{W_w}{t} \times 100$$

Heater 60 (1): $DR = \frac{2.198}{220} \times 100 = 0.010 \text{ kg/min}$

$$DR = 0.010 \text{ kg/min} \times 60 = 0.600 \text{ kg/h}$$

Heater 60 (2): $DR = \frac{2.345}{230} \times 100 = 0.010 \text{ kg/min}$

$$DR = 0.010 \text{ kg/min} \times 60 = 0.612 \text{ kg/h}$$

Heater 60 (3): $DR = \frac{2.095}{230} \times 100 = 0.009 \text{ kg/min}$

$$DR = 0.009 \text{ kg/min} \times 60 = 0.547 \text{ kg/h}$$

3. ตัวอย่างการคำนวณหาพลังงานจำเพาะ (SEC)

3.1 การแปลงค่าพลังงานรวมในระบบในหน่วย (kWh) เป็นค่าพลังงานรวมในระบบในหน่วย (MJ)

ตารางผนวกที่ ค3 บันทึกผลการใช้พลังงานรวมทั้งหมดของระบบ (kW-h)

เงื่อนไขการทดสอบ	No.	น้ำหนักข้าว	ค่า	ค่า	การใช้พลังงานทั้งหมด (kW-h)				
			ความชื้นเริ่มต้น (%wb)	ความชื้นสุดท้าย (%wb)	Motor	Blower	Heater	Infrared	Total
HEATER 60	1	20	23.310	13.840	2.850	2.400	4.070	-	9.320
	2	20	23.016	13.945	2.700	2.500	4.020	-	9.220
	3	20	23.104	14.107	2.650	2.550	4.190	-	9.390
	Avg		23.143	13.964	2.733	2.483	4.093	-	9.310

จากตารางตัวอย่างผลการใช้พลังงานรวมทั้งหมดของระบบหน่วย (kW-h) สามารถแปลงหน่วยให้เป็น MJ ได้โดยขั้นตอนต่อไปนี้

Step 1: จากข้อมูลพื้นฐานต่อไปนี้

$$1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$$

$$1 \text{ h} = 60 \text{ min} = 3600 \text{ s}$$

จาก $E = Pt$ (W x s = J)

เมื่อ $E =$ พลังงาน (Joule)

$t =$ เวลา (s)

$P =$ กำลังไฟฟ้า (Watt)

ดังนั้น

$$1 \text{ Ws} = 1 \text{ J}$$

$$1 \text{ kWh} = 1000 \times 3600 \text{ (Ws)}$$

$$1 \text{ kWh} = 3,600,000 \text{ Ws}$$

$$\underline{1 \text{ kWh} = 3.6 \text{ MJ}}$$

Step 2: จากตารางผนวกที่ ค3 บันทึกผลการใช้พลังงานรวมทั้งหมดของระบบ (kW-h)

Heater 60 (1): 1 kWh = 3.6 MJ

$$9.320 \text{ kWh} = \frac{9.320 \text{ kWh} \times 3.6 \text{ MJ}}{1 \text{ kWh}} = 33.552 \text{ MJ}$$

Heater 60 (2): 1 kWh = 3.6 MJ

$$9.220 \text{ kWh} = \frac{9.220 \text{ kWh} \times 3.6 \text{ MJ}}{1 \text{ kWh}} = 33.192 \text{ MJ}$$

Heater 60 (3): 1 kWh = 3.6 MJ

$$9.390 \text{ kWh} = \frac{9.390 \text{ kWh} \times 3.6 \text{ MJ}}{1 \text{ kWh}} = 33.804 \text{ MJ}$$

Step 3: ดังนั้นสามารถแสดงผลการใช้พลังงานรวมทั้งหมดของระบบในหน่วย (MJ) ดังตาราง ค4

ตารางผนวกที่ ค4 บันทึกผลการใช้พลังงานรวมทั้งหมดของระบบ (MJ)

เงื่อนไขการทดสอบ	No.	น้ำหนักข้าว	ค่า	ค่า	การใช้พลังงานทั้งหมด (MJ)				Total
			ความชื้นเริ่มต้น (%wb)	ความชื้นสุดท้าย (%wb)	Motor	Blower	Heater	Infrared	
HEATER 60	1	20	23.310	13.840	10.260	8.640	14.652	-	33.552
	2	20	23.016	13.945	9.720	9.000	14.472	-	33.192
	3	20	23.104	14.107	9.540	9.180	15.084	-	33.804
	Avg		23.143	13.964	9.840	8.940	14.736	-	33.516

3.2 การคำนวณหาพลังงานจำเพาะ (SEC)

ตารางผนวกที่ ค5 บันทึกผลการคำนวณค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะ (SEC)

เงื่อนไขการทดสอบ		ค่าความชื้น	ค่าความชื้น	W_w (kg)	E_{total} (MJ)	SEC (MJ/kg _{swater})
		เริ่มต้น (%wb)	สุดท้าย (%wb)			
HEATER 60	1	23.310	13.840	2.198	33.552	15.263
	2	23.016	13.945	2.345	33.192	14.154
	3	23.104	14.107	2.095	33.804	16.136
			23.143	13.964	2.213	33.516

จากตารางตัวอย่างผลการทดลองสามารถคำนวณหาค่าความชื้นจากสมการที่ 2.9

$$SEC = \frac{E_{total}}{W_i - W_f} = \frac{E_{total}}{W_w}$$

$$\text{Heater 60 (1): } SEC = \frac{33.552}{2.198} = 15.263 \text{ MJ/kg}_{\text{swater}}$$

$$\text{Heater 60 (2): } SEC = \frac{33.192}{2.345} = 14.154 \text{ MJ/kg}_{\text{swater}}$$

$$\text{Heater 60 (3): } SEC = \frac{33.804}{2.095} = 16.136 \text{ MJ/kg}_{\text{swater}}$$

4. ตัวอย่างการคำนวณหาคุณภาพข้าว

4.1 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตันและดัชนีความขาว

ตารางผนวกที่ ค6 ผลค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน และดัชนีความขาวข้าวหลังการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C

No.	MC(final) (%wb)	น้ำหนัก (g)		HRY (%)	SD (HRY)	WI	SD (WI)
		ข้าวเปลือก	ข้าวตัน				
1	14.21	1000	416.49	41.65%		37.00	
2	14.32	1000	427.80	42.78%	0.0189	36.30	0.3786
3	14.01	1000	390.95	39.10%		36.90	
average	14.18	1000	411.75	41.17%		36.73	

จากตารางตัวอย่างผลการทดลองสามารถคำนวณหาค่าความชื้นจากสมการที่ 2.14

$$\text{เปอร์เซ็นต์ข้าวตัน (\%HRY)} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวตัน}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100$$

$$\text{Heater 60 (1): เปอร์เซ็นต์ข้าวตัน (\%HRY)} = \frac{416.49}{1000} \times 100 = 41.65\%$$

$$\text{Heater 60 (2): เปอร์เซ็นต์ข้าวตัน (\%HRY)} = \frac{427.80}{1000} \times 100 = 42.78\%$$

$$\text{Heater 60 (3): เปอร์เซ็นต์ข้าวตัน (\%HRY)} = \frac{390.95}{1000} \times 100 = 39.10\%$$



ภาควิชา

บทความที่ตีพิมพ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

บุญตริกา ศีลา, กระวี ตรีอำนาจ, และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ. (2565). **การพัฒนากระบวนการแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรด**. วารสารวิชาการและวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี, ปีที่ 18 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม - มิถุนายน 2567. (อยู่ในระหว่างการตีพิมพ์เพื่อเผยแพร่)

บุญตริกา ศีลา, กระวี ตรีอำนาจ, และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ. (2566). **การพัฒนากระบวนการแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรด**. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 24 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 16. ระหว่างวันที่ 26-27 กรกฎาคม พ.ศ. 2566 ณ จังหวัดชลบุรี.

Boontarika sila, Krawee Treamnuk, and Tawarat Treamnuk. (2023). **Evaluation of Paddy Drying with Pneumatics Dryer by Artificial Neuron Network Technique**. The 8th International Conference on Advanced Technology Innovation (2023), Okinawa, Japan, April 01-05-2023.

บุญตริกา ศีลา, อภิสกดิ์ รักดีแก้ว, กระวี ตรีอำนาจ, และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ. (2565). **ผลของการหมุนเวียนอากาศทิ้งที่มีต่อการใช้พลังงานในระบบทำความร้อนอากาศ**. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14 : Electrical Engineering Network 2021 (EENET2021). ระหว่างวันที่ 25 - 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2565 ณ จังหวัดภูเก็ต.

บุญตริกา ศีลา และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ. (2565). **การอบแห้งลำไยด้วยวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน**. การประชุมวิศวกรรมอาหารแห่งชาติ (ออนไลน์) ครั้งที่ 8 ระหว่างวันที่ 4 เมษายน พ.ศ. 2565 จัดโดย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่.

Saksit Sonsomboonsuk, Boontarika Sila, Tiraporn Junyusen, Pornpimol Moolkaew and Payungsak Junyusen. (2022). **Evaluation of bioactive compounds and textural alteration of cooked germinated brown rice during storage**. The 8th FENETT 2022 Online International & National Conference held in Chiang Mai, Thailand on April 4, 2022.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14

14th Conference of Electrical Engineering Network 2022 (EENET 2022)



ผลของการหมุนเวียนอากาศที่มีต่อการใช้พลังงานในระบบทำความร้อนอากาศ
Effect of Exhaust Air Recirculation on Energy Consumption in Air Heating System

บุญจวีภา สีสาธา* อธิสิทธิ์ ปักติแก้ว กระจวี ศรีจันทร์และ เทวรัตน์ ศรีจันทร์

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ 0-3549-4014 E-mail: Boontarika.sira@gmail.com

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ 06-1114-7950 E-mail: aphsirik.pdk@gmail.com

บทคัดย่อ

การอบแห้งผลผลิตการเกษตรนิยมใช้อากาศร้อนที่ผลิตด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าหรือการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนและนำความร้อนออกจากวัสดุ แต่การดำเนินการดังกล่าวกลับมีการใช้พลังงานค่อนข้างสูง เนื่องจากไม่มีการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้พลังงานในรูปแบบไฟฟ้าของระบบทำความร้อนให้กับอากาศอบแห้ง เมื่อมีการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่ ในสัดส่วนที่แตกต่างกันจาก 0 – 70% ที่การผลิอากาศอบแห้งอุณหภูมิ 80°C ความเร็วลม 6 m/s ผลพบว่าการใช้อากาศหมุนเวียนส่งผลให้การใช้พลังงานของแหล่งผลิตอากาศร้อนลดลง โดยที่อากาศนี้ยังมีความสามารถในการรับความร้อนจากวัสดุได้ดีซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งให้สูงขึ้นได้

คำสำคัญ: การหมุนเวียนอากาศอบแห้ง, อบแห้งงอมร้อน, ข้าวเปลือก

Abstract

Nowadays, most of the drying processes of agricultural produce are using hot air produced by electric heaters or fuel combustion for convection of heat into the material and to remove moisture from the material but this method is extremely energy intensive consumption because the exhaust air is not recirculating. This research objective was to study the effect of exhaust air recirculation on the electric energy consumption of the heater by using 0 -70% exhaust recirculation fraction, drying air temperature 80 °C, and air velocity 6 m/s. Result showed that the use of recirculation exhaust air reduced the electric energy consumption of heater, while the air still has an ability to absorb moisture from the material. This technique will be an idea to increase the energy efficiency of the drying process in the future.

Keywords: exhaust air recirculation, hot air drying, paddy

1. บทนำ

ผลผลิตทางการเกษตรเป็นสินค้าส่งออกสำคัญของไทย โดยเฉพาะข้าวซึ่งเป็นสินค้าส่งออกหลักของประเทศที่ครอบคลุมพื้นที่เพาะปลูกมากที่สุด [4] ตามรายงานของสมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย ระบุว่า การส่งออกข้าวของ ไทยในปี 2564 ที่ผ่านมามีปริมาณ 6.1 ล้านตัน เป็นมูลค่า 1.07 แสนล้านบาท [5] ซึ่งถือเป็นสินค้าหลักที่นำเงินตราเข้าสู่ประเทศและมีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศอย่างมาก การจัดการผลผลิตทางการเกษตรมักประสบปัญหาความชื้นหลังการเก็บเกี่ยวมีค่าสูงซึ่งทำให้เกิดการเจริญเติบโตของเชื้อราหรือจุลินทรีย์ต่าง ๆ [6] นำไปสู่การเสื่อมคุณภาพของผลผลิตในที่สุด การลดความชื้นของวัสดุลงสู่ค่าที่เหมาะสม (การอบแห้ง) จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่จะสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ปัจจุบันมีการพัฒนาเครื่องอบแห้งที่ทางรูปแบบต่าง ๆ ใช้ในเชิงพาณิชย์และระดับชุมชนมากขึ้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น [7]

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรส่วนใหญ่นิยมใช้อากาศร้อนที่ผลิตด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าหรือการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนและนำความร้อนออกจากวัสดุ แต่การดำเนินการดังกล่าวกลับมีการใช้พลังงานค่อนข้างสูง ตามรายงานของงานวิจัยที่ศึกษามีการระบุค่าอยู่ในช่วง 2.13 – 7.15 kWh/kg... การได้ใช้เงินใช้การอบแห้งที่ไม่มีการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้นการนำอากาศร้อนที่ผ่านการอบแห้งวัสดุบางส่วนกลับมาใช้อีกครั้งร่วมกับอากาศแวดล้อมที่เข้าสู่ระบบอบแห้งใหม่ จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่จะสามารถลดการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งได้

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้พลังงานรูปแบบไฟฟ้าของระบบทำความร้อนให้กับอากาศอบแห้ง เมื่อมีการ

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14
 14th Conference of Electrical Engineering Network 2022 (EENET 2022)

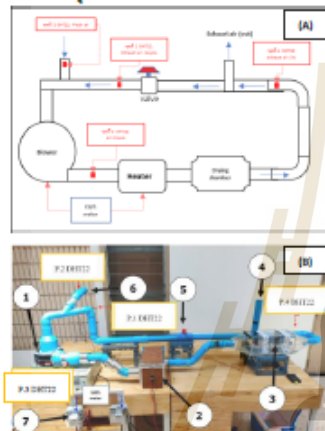


หมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน โดยทำการศึกษา กับระบบอบแห้งจำลองที่มีการเพิ่มความชื้นให้กับอากาศ เปรียบเทียบ การใช้พลังงานกับอัตราส่วนความชื้นของอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบอบแห้งที่มีการหมุนเวียนอากาศ กลับมาใช้ใหม่ในสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดต่อไป

จะไหลหมุนเวียนสู่พัดลมและเข้าไปในระบบไปเรื่อย ๆ จนสิ้นสุด กระบวนการทดสอบ ระบบที่สร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 1(B)

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 ชุดทดสอบหมุนเวียนอากาศชื้น



รูปที่ 1 (A) แผนภาพชุดทดสอบหมุนเวียนอากาศชื้น (B) ระบบต้นแบบที่สร้างขึ้น

ชุดทดสอบระบบแสดงดังรูปที่ 1(A) ประกอบด้วย 1.) พัดลมความดันสูง (Blower) ขนาด 240 W 2.) ฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1,200 W 3.) ห้องอบแห้ง 4.) ท่อระบายอากาศอบแห้ง 5.) วาล์วปรับสัดส่วนอากาศหมุนเวียน 6.) ท่อรับอากาศจากถังแวนดิวส 7.) มิเตอร์ไฟฟ้า (ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MF-37E) การทำงานของระบบเริ่มจาก เมื่อเปิดพัดลม ความดันสูง (Blower) อากาศจากถังแวนดิวสจะถูกลดเข้าสู่ระบบและไหลผ่านฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่อเพิ่มอุณหภูมิ จากนั้นอากาศร้อนจะไหลเข้าสู่ห้องอบแห้งจำลองซึ่งทำการติดตั้งเครื่องฟั่นเพื่อจำลองสถานะที่อากาศอบแห้งเข้าไปรับความชื้นจากวัสดุอบแห้งจนเกิดเป็นไอน้ำ อากาศที่ไหลออกจากห้องอบแห้งจำลองส่วนหนึ่งจะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศภายนอกและบางส่วนจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ ตามสัดส่วนที่ต้องการ โดยการปรับวาล์วควบคุมการไหล อากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่จะไหลเข้ามาผสมกับอากาศที่รับมาจากถังแวนดิวสและอากาศที่ผสมแล้วนี้

2.2 การทดสอบหมุนเวียนอากาศ

เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ชุดทดสอบหมุนเวียนอากาศเรียบร้อยแล้ว ทำการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น (ยี่ห้อ ASAIR AM2302 รุ่น DHT22) เพื่อไว้วัดคุณสมบัติของอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ แสดงดังรูปที่ 1(A) โดยเริ่มต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 AT และเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล เพื่อรับค่าและแสดงผล จากนั้นทำการทดสอบหมุนเวียนอากาศ โดยการดำเนินการปรับค่าสัดส่วนอากาศหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ 8 ระดับ คือ 0 10 20 30 40 50 60 และ 70% โดยอัตราการไหล ซึ่งในแต่ละเงื่อนไขการทดลองจะกำหนดให้ ความเร็วลมที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ที่ 6 m/s และอุณหภูมิของร้อนที่ออกจากเครื่องทำความร้อน คือ 80 °C เปิดการทำงานของระบบจนได้ค่าคงที่จึงทำการเก็บค่าอุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อนำไปคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio) ตามสมการที่ 1 [1] และความดันไอของอากาศ ตามสมการที่ 2 [1] จากนั้นคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นตามสมการที่ 3 [1]

$$\ln P_{sv} = \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3 T + C_4 T^2 + C_5 T^3 + C_6 \ln T \quad (1)$$

$$P_v = \frac{RH \cdot P_{sv}}{100} \quad (2)$$

$$W = 0.621945 \frac{P_v}{P_{atm} - P_v} \quad (3)$$

โดยที่	P_{sv}	คือ ความดันไออิ่มตัว (P_0)
	P_v	คือ ความดันไอ (P_2)
	T	คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียก (K)
	C_1	คือ $-5.8002206 \text{ E}-03$
	C_2	คือ $1.3914993 \text{ E}-00$
	C_3	คือ $-4.8640239 \text{ E}-05$
	C_4	คือ $4.1764768 \text{ E}-05$
	C_5	คือ $-1.4452093 \text{ E}-08$
	C_6	คือ $6.5459673 \text{ E}+00$
	RH	คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
	W	คือ อัตราส่วนความชื้น (kg(water) / kg (dry air))

วัดค่าการใช้พลังงานจากการใช้มิเตอร์ไฟฟ้า (ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MF-37E) ที่ต้องเข้าับเครื่องกำเนิดอากาศร้อน (Heater) โดยการทดลองเก็บค่าแต่ละครั้งใช้เวลาครั้งละ 15 นาที ทั้งหมด 3 ชั่วโมง

บทความวิจัย

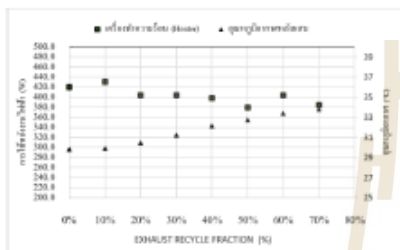
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14

14th Conference of Electrical Engineering Network 2022 (EENET 2022)



3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

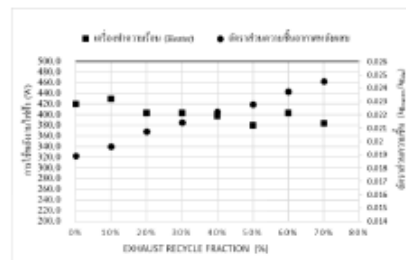
จากการทดลองวัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำความร้อนที่อัตราส่วนการหมุนเวียนอากาศกลับที่ต่างกัน ผลการทดลอง (รูปที่ 2) พบว่า เมื่อใช้สัดส่วนอากาศหมุนเวียนสูงขึ้นส่งผลให้การใช้พลังงาน



รูปที่ 2 ความสิ้นเปลืองพลังงานและอุณหภูมิอากาศผสมต่ออัตราส่วนอากาศหมุนเวียนกลับ

ไฟฟ้าของเครื่องทำความร้อน (Heater) ลดลง และพบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าเริ่มมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อใช้สัดส่วนอากาศหมุนเวียนมากกว่า 10% ซึ่งเมื่อใช้สัดส่วนอากาศหมุนเวียนที่ 70% การใช้พลังงานไฟฟ้ามีค่าลดลงประมาณ 8.77% เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มีอากาศหมุนเวียนอากาศย้อนกลับ เนื่องจากเมื่อพิจารณาอุณหภูมิอากาศทั้งหมดจากรูปที่ 2 พบว่าเมื่อใช้สัดส่วนอากาศหมุนเวียนอากาศไหลย้อนกลับมากขึ้นจะทำให้อากาศผสมก่อนเข้าสู่เครื่องทำความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสาเหตุนี้ส่งผลให้เครื่องทำความร้อนมีการใช้พลังงานที่น้อยลงในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศได้ถึง 80 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการผสมอากาศจากสิ่งแวดล้อมกับอากาศหมุนเวียนเป็นวิธีหนึ่งในการใช้พลังงานความร้อนให้เกิดประสิทธิภาพ [2] ส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องทำความร้อน (Heater) ลดลง ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับ [3] ซึ่งเขาได้ทำการศึกษาระบบหมุนเวียนอากาศและการปรับสภาพอุณหภูมิที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศแบบฟลูอิดไดรฟ์แบบพบว่า การใช้เทคนิคการหมุนเวียนอากาศสามารถลดการใช้พลังงานได้เช่นกัน

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของสัดส่วนการหมุนเวียนอากาศต่ออัตราส่วนความชื้นของอากาศหลังผสม (Humidity ratio) พบว่า เมื่อสัดส่วนของอากาศหมุนเวียนสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราส่วนความชื้นของอากาศผสมมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งค่าอัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio) คือค่าที่บ่งบอกถึง อัตราส่วนของน้ำหนักของไอน้ำที่มีอยู่จริงในอากาศ ในขณะที่เทียบกับน้ำหนักของอากาศแห้ง 1 หน่วย ดังนั้นอัตราส่วนความชื้นของอากาศหลังผสม (Humidity ratio) ที่เพิ่มขึ้นบ่งชี้ถึงปริมาณ



รูปที่ 3 ความสิ้นเปลืองพลังงานและอัตราส่วนความชื้นต่ออัตราส่วนอากาศหมุนเวียน

มวลไอน้ำในอากาศมีค่ามากขึ้นเมื่อมีการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ในสัดส่วนที่มากขึ้นซึ่งการเพิ่มขึ้นของมวลไอน้ำในอากาศนี้อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนเนื่องจาก ส่งผลให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีค่ามากขึ้นด้วย ทำให้อากาศมีความสามารถในการรับไอน้ำได้น้อยลง อย่างไรก็ตามในสัดส่วนอากาศหมุนเวียนที่น้อยกว่า 40% พบว่ามวลของไอน้ำในอากาศยังมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับอากาศที่อุณหภูมิ 80°C ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.022 kg_{water}/kg_{air} นั่นคืออากาศนี้ยังมีความสามารถที่จะรับความชื้นได้อีกเมื่อถูกใช้ในระบบอบแห้ง ซึ่งในการทดลองครั้งนี้เป็นการทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการใช้สัดส่วนของอากาศหมุนเวียนในระดับต่างๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการหาสัดส่วนอากาศที่เหมาะสมในการใช้อากาศในกระบวนการอบแห้งจริงต่อไปซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนางานวิจัยต่อเนื่องในอนาคต

3. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบทำความร้อนอากาศอบแห้ง เมื่อมีการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้สัดส่วนอากาศหมุนเวียนที่สูงขึ้น ส่งผลให้การ ใช้พลังงานของแห้งอากาศร้อนลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีอากาศหมุนเวียนอากาศพบว่า การใช้อัตราส่วนการหมุนเวียนอากาศสูงสุด 70% สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ถึง 8.77% ซึ่งบ่งชี้ว่า สามารถประยุกต์ใช้แนวคิดนี้ในกระบวนการอบแห้ง เพื่อแก้ปัญหาและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอนาคตได้

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัยในครั้งนี้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14

14th Conference of Electrical Engineering Network 2022 (EENET 2022)



เอกสารอ้างอิง

[1] ASHRAE (2009). ASHRAE Handbook: Fundamentals. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineer.

[2] A. Farzam, D. Hosain and B. Nasser, "Optimizing energetic performance of a continuous conveyor infrared-hot air dryer with air recycling system", In journal applied thermal engineering, vol. 154, 2019, pp. 358 – 367.

[3] D. Hosain, A. Mohsen and N. Badhir, "Experimental performance of mushroom fluidized-bed drying: Effect of osmotic pretreatment and air recirculation", vol. 120, 2018, pp. 201 – 208.

[4] ข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตร: การใช้ที่ดิน, สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.oae.go.th/view/1/การใช้ที่ดิน/TH-TH>.

[5] สถิติการส่งออกข้าวหอมมะลิไทย (รายประเทศ / เปรียบเทียบรายปี) เดือน มกราคม 2562; กรมการค้าต่างประเทศ, 14 มีนาคม 2565. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.dit.go.th/dit-dft-Service/Service-Data-Information/Statistic-Import-Export/Detail-dft-service-data-statistic/ArticleId/21900/2565-1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13>.

[6] ประชา บุญอาจนิชกุล, "การประเมินกระบวนการเครื่องครัวอย่างยั่งยืนสำหรับเครื่องครัวความชื้นข้าวเปลือก," วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี), กรุงเทพฯ ปีที่ 9 ฉบับที่ 9, หน้า 47-55, ม.ค.- มี.ค. 2556.

[7] พิรสิทธิ์ ทอยนาค, มณฑล ชูไวฑูร, มุสตาฟา อะลาและ ประชา บุญอาจนิชกุล, "การทบทวนพัฒนาการของอุตสาหกรรมชื้นข้าวเปลือกในทางอุตสาหกรรม," วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพฯ ปีที่ 9 ฉบับที่ 1, หน้า 68-74, ม.ค. - มี.ค. 2557.

[8] จิตรวัฒน์ จอจกิว, "การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม," วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษ, สาขาวิศวกรรมการจัดการพลังงาน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, ไทย, 2559.

[9] รุ่งตะวัน วิวัฒนาศิริกุล, ศักดิ์ชัย ครดิ และ พงษ์ภัท โท จุฒอวิทย์ทรัพย์, "การออกแบบเม็ดวัสดุทางการเกษตรชุมชนเอื้อต่อสิ่งแวดล้อมในท้องถิ่นแนวหนึ่ง," วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ, ปีที่ 7 ฉบับที่ 1, หน้า 21-31, ม.ค. - มี.ค. 2564.

[10] สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ, "การหาจุดปฏิบัติการที่เหมาะสมของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีเป่าผ่าน-หลั่นหน้า," วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษ, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, ไทย, 2557.

[11] สมชาติ โสภณรณกุลย์, "การออกแบบเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท," พิมพ์ครั้งที่ 7, กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณสิรินธร, 2540.



บุญจวิภา ดิลกา ผู้เขียน คำสั่งศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิศวกรรมเกษตร ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ การพัฒนาเทคโนโลยีอบแห้ง การจัดการพลังงานและระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเครื่องอบแห้ง



อสิริชัย ลักสิทธิ์ ผู้เขียนร่วม คำสั่งศึกษาระดับปริญญาเอก ในสาขาสาขาวิศวกรรมเครื่องกล ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ การพัฒนาเทคโนโลยีอบแห้งข้าวเปลือก การจัดการพลังงานและระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเครื่องอบแห้ง



กระวี ศรีอำนาจ ผู้เขียนร่วม จบการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเกษตร จาก ม.เกษตรศาสตร์ ในปี 2554 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ในสาขาวิศวกรรมเครื่องกล ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยที่สนใจได้แก่ การพัฒนาเครื่องจักรกลและกระบวนการในการเพาะปลูกหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลผลิตเกษตร



เพชรรัตน์ ศรีอำนาจ ผู้เขียนร่วม จบการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเกษตร จาก ม.เกษตรศาสตร์ ในปี 2551 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ในสาขาวิศวกรรมเกษตร ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยที่สนใจได้แก่ การพัฒนาเครื่องจักรกลและกระบวนการในการเพาะปลูก หลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลผลิตเกษตร และเทคโนโลยีการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร

การพัฒนากระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรด

บุญทริกา ทิลา¹ กระวี ตรีอำรรค^{2*} และ เทวรัตน์ ตรีอำรรค¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

^{1,2} 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

บทคัดย่อ

การพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบต่างๆ ขึ้นเพื่อใช้ลดความชื้นข้าวเปลือกยังคงประสบปัญหาสำคัญเรื่องความสิ้นเปลืองพลังงานที่ยังคงสูงอยู่ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรดขึ้นและศึกษาความเป็นไปได้ในการลดปัญหาดังกล่าว ทำการศึกษาเงื่อนไขการอบแห้งข้าวเปลือก 3 เงื่อนไข คือ 1) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อน 60°C 2) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อน 60°C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 50 วัตต์ 3) การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรด 800 วัตต์ ประเมินสมรรถนะการอบแห้งจากพฤติกรรมการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ของเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น โดยกำหนดให้ความเร็วลมและอัตราการป้อนข้าวเปลือกคงที่ ที่ 6 m/s และ 8.4 kg/min ตามลำดับ ทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ความชื้นเริ่มต้น 23% w.b. ครั้งละ 20 kg จนถึงความชื้นสุดท้าย 14% w.b. ผลการทดสอบพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดใช้เวลาเร็วที่สุดคือ 220 นาที อัตราการอบแห้งของวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนและวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อน 60°C ให้ค่า SEC ต่ำที่สุดคือ 14.24 ± 0.88 MJ/kg water และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า SEC เฉลี่ยพบว่า ผลลัพธ์จากวิธีการอบแห้งทั้ง 3 เงื่อนไข ยังไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

คำสำคัญ : ข้าวเปลือก; ข้าวขาวดอกมะลิ 105; เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม; รังสีอินฟราเรด;

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +664 4224 766, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: krawee@sut.ac.th

DEVELOPMENT OF AN INFRARED-ASSISTED PNEUMATIC PADDY DRYING SYSTEM

Boontarika sila¹ Krawee Treeamnu^{2*} and Tawat Treeamnu¹

¹ School of Agricultural engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

² School of Mechanical engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

^{1,2} 111 University Avenue Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

Abstract

The development of various dryers to dry paddy still faces a significant problem of high energy consumption. Therefore, this research objective was to develop an infrared-assisted pneumatic paddy drying system and study the possibility of reducing the problem. The study consists of 3 methods of drying paddy, namely: 1) drying paddy by hot air 60°C; 2) drying paddy by hot air 60°C with 50 W infrared radiation; and 3) Drying paddy with 800 W infrared radiation. In this study, 20 kg of Thai jasmine 105 paddy with initial moisture content 23%w.b. was dried until 14%w.b. at drying air velocity and paddy feed of 6 m/s and 8.4 kg/min respectively. The performance of drying was evaluated based on the drying characteristic curve, drying rate and the specific energy consumption (SEC) of the developed drying system. The results showed that hot air combined with infrared radiation in drying had fastest time 220 min in drying. Drying rate of hot air drying and hot air drying combined with infrared radiation was no statistical difference ($p < 0.05$). The lowest SEC was 14.24 ± 0.88 MJ/kg_{water} and it was not significantly different ($p < 0.05$) when comparing within all experiment methods.

Keywords: Paddy; Thai jasmine 105 rice; Pneumatic dryer; Infrared

* Corresponding Author. Tel.: +664 4224 766, E-mail Address: krawee@sut.ac.th

1. บทนำ

ข้าว นับเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ทั้งในด้านการบริโภคและการเป็นสินค้าเกษตรส่งออกของประเทศ มีพื้นที่เพาะปลูกครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศ ในปีการผลิต 2563 ไทยเป็นผู้ส่งออกข้าวอันดับ 3 ของโลก โดยมีปริมาณการส่งออกถึง 5.72 ล้านตัน [1] อย่างไรก็ตามในการรักษาคุณภาพข้าวให้ได้ตามมาตรฐานนั้นยังคงเป็นสิ่งสำคัญ ชาวนาไทยยังคงประสบกับปัญหาคุณภาพข้าวที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐานหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งปัจจัยหลักที่ทำให้ข้าวมีคุณภาพต่ำลงนั้นคือความชื้นที่สะสมในข้าวโดยข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวมีความชื้นสูงถึง 24 – 28%w.b. [2] ส่งผลให้ผลผลิตข้าวที่ได้เกิดการเน่าเสียระหว่างการเก็บรักษา อีกทั้งความชื้นที่สูงยังส่งผลต่อการแตกหักที่เด่นชัดระหว่างการสี [3] ซึ่งปัญหาความชื้นสูงในข้าวนั้นทำให้ข้าวเปลือกไม่มีคุณภาพที่ดีพอที่จะขายได้ราคาตามมาตรฐาน ส่งผลให้เกษตรกรขายข้าวเปลือกได้ในราคาต่ำและมีผลผลิตคุณภาพสูงออกสู่ตลาดน้อย ดังนั้นการควบคุมความชื้นข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวจึงเป็นสิ่งสำคัญ ความชื้นที่เหมาะสมในการเก็บรักษาเมล็ดข้าวเปลือกคือ 14%w.b. จะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาให้นานขึ้นและคุณภาพการสีสูงขึ้น [4], [5]

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เครื่องจักรและเทคโนโลยีการอบแห้งมาทดแทนการลดความชื้นแบบดั้งเดิม เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่นิยมใช้แพร่หลายที่สุดคือเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน เนื่องจากมีความสะดวกในการทำงาน เครื่องอบแห้งชนิดนี้ได้แก่ เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดไหลคลุกเคล้า (Louisiana State University หรือ LSU) อุณหภูมิลมร้อนสามารถใช้ได้สูงถึง 60°C [6] เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์-เบด สามารถใช้อุณหภูมิอบแห้งได้สูงถึง 140 - 150°C [7] เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมซึ่งอาศัยลมร้อนใช้อุณหภูมิสูงถึง 80°C [8], [9] ซึ่งหลักการทำงานคือข้าวที่มีความชื้นสูงถูกป้อนเข้ามาในห้องอบแห้งและถูกลมที่เป่าเข้ามาในห้องอบแห้ง

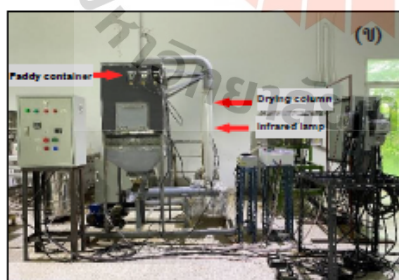
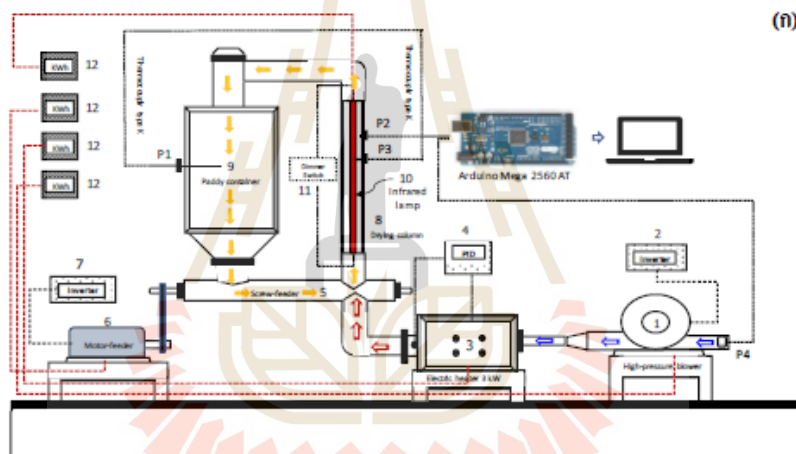
พัดลอยขึ้นไปพร้อมกัน ทั้งนี้ปัญหาหลักของการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนคือการใช้พลังงานในการอบแห้งที่สูงมาก [10] จากการให้ความร้อนกับอากาศอบแห้ง ดังนั้นจึงต้องมีการประยุกต์ใช้พลังงานจากแหล่งอื่นๆ เข้ามาใช้ร่วมกันเพื่อลดการใช้พลังงานของอากาศอบแห้งและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอบแห้งให้สูงขึ้น

รังสีอินฟราเรดเป็นทางเลือกหนึ่งของการใช้พลังงานร่วมในระบบอบแห้ง เนื่องจากมีคุณสมบัติสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อวัสดุได้โดยตรงโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง จึงมีการสูญเสียพลังงานให้กับสิ่งแวดล้อมน้อยมาก ส่งผลให้เกิดการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า [11], [12], [13] และพบว่าการใช้รังสีอินฟราเรดในการอบแห้งสามารถลดการใช้เวลาในการอบแห้งลดลงเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน [14] มีการใช้พลังงานจากรังสีอินฟราเรดในการอบแห้งวัสดุหลายชนิด ซึ่งพบว่าวัสดุที่ผ่านการอบแห้งมีคุณภาพที่สูงเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน [15] ทั้งนี้จากข้อดีดังกล่าวจึงมีการประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับการอบแห้งหลายประเภท เช่น มีการพัฒนาเทคนิคการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ฟลูอิดไซเคชันร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น [16] การอบแห้งข้าวเปลือกโดยรังสีอินฟราเรด ลมร้อนและการเทมเปอร์ริง [17] การใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนในการอบแห้งขมิ้น [18] มันเทศ [19] ถั่วเขียว [20] หัวหอม [21] แอปเปิ้ล [22] สาหร่ายเตา [23] แครอท [24] พุทรา [25] ผัก [26] และเมล็ดถั่วพิสตาชิโอ [27] เป็นต้น

เพื่อเป็นการพัฒนาการอบแห้งแบบพาหะลมด้วยอากาศร้อนให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาต้นแบบระบบอบแห้งแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยรังสีอินฟราเรดในการอบแห้งข้าวเปลือกซึ่งมีความแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมา นั่นคือวัสดุอบแห้งไม่ได้วางอยู่กับที่ โดยวัสดุมีการลอยตัวไหลไปกับลมร้อน เกิดกระบวนการการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นขณะที่วัสดุ

ลอยตัวในหอบแห้งซึ่งมี 2 แหล่งความร้อนคือลมร้อนและหลอดรังสีอินฟราเรดที่ถูกติดตั้งภายในหอบแห้ง และมีการทดสอบอบแห้งทั้งหมด 3 เวียนไข คือ 1) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อน 2) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนร่วมกับรังสี

อินฟราเรด 3) การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรด เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง และความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะ



รูปที่ 1 (ก) แผนภาพเครื่องอบแห้งที่ใช้ทดสอบ (ข) เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรดที่พัฒนาขึ้น

2.1 การพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรด

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรดที่แสดงดังรูปที่ 1ก โดยได้แสดงหมายเลขกำกับแต่ละอุปกรณ์ซึ่งประกอบไปด้วยหมายเลข 1) พัดลมความดันสูง (Blower) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น VORTEX ขนาด 1.5 KW 2) อินเวอร์เตอร์ควบคุมพัดลมความดันสูงยี่ห้อ MITSUBISHI รุ่น E700 3) ฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 3 KW 4) เครื่องควบคุมอุณหภูมิฮีตเตอร์ (Temperature control) ยี่ห้อ BERM รุ่น REX-C100 5) สกรูลำเลียงข้าว 6) มอเตอร์ขับเคลื่อนขนาด 0.75 KW 7) อินเวอร์เตอร์ควบคุมมอเตอร์ยี่ห้อ HATTEC-GR 8) หอบแห้งที่ทำจากท่ออะคริลิกขนาดเส้นผ่าน

2. อุปกรณ์และวิธีการ

ศูนย์กลาง.74 mm ยาว 1 เมตร 9) ถังเก็บข้าวขนาด 0.40 x 0.50 x 0.80 m³ 10) หลอดอินฟราเรดชนิดควอทซ์ขนาด 1 KW โดยวัสดุที่นิยมนำมาทำหลอดอินฟราเรด คือ วัสดุประเภทเซรามิกที่มีคุณสมบัติทนความร้อนสูง เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า หลอดแก้วควอทซ์ ซึ่งจะปล่อยคลื่นอินฟราเรดระยะกลางออกมา [28] มีการนำมาใช้งานแพร่หลายเนื่องจากง่ายในการควบคุม ให้ความร้อนค่อนข้างเร็ว และเป็นพลังงานที่สะอาด 11) สวิตช์ควบคุมกระแสไฟฟ้า (Dimmer Switch) ขนาด 1.6 KW และ 12) มีเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า (ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MF – 37E) การทำงานของเครื่องต้นแบบ (รูปที่ 1ข) เริ่มจากเมื่อเปิดพัดลมความดันสูง (หมายเลข 1) อากาศแวดล้อมจากภายนอกจะถูกดูดเข้าไปเพิ่มอุณหภูมิที่ฮีตเตอร์ (หมายเลข 3) จนได้อุณหภูมิ 60°C จากนั้นอากาศอุณหภูมิสูงจะถูกส่งเข้าสู่ห้องอบแห้ง (หมายเลข 8) ทางด้านล่างซึ่งภายในมีหลอดอินฟราเรด (หมายเลข 10) ติดตั้งอยู่ตรงกลางห้องเพื่อเป็นแหล่งให้ความร้อนแหล่งที่สอง ขั้นตอนการอบแห้งเริ่มจากข้าวเปลือกในถังเก็บ (หมายเลข 9) จะถูกส่งสู่ลำเลียง (หมายเลข 5) ไปยังห้องอบแห้งเพื่อสัมผัสกับลมร้อนที่เป่าเข้ามา จากนั้นข้าวจะถูกเป่าลอยขึ้นไปในห้องอบแห้ง (หมายเลข 8) พร้อมกับลมร้อนและสัมผัสกับความร้อนที่แผ่ออกมาจากหลอดอินฟราเรดไปพร้อมกัน เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นในห้องอบแห้ง หลังจากนั้นเมล็ดข้าวจะถูกลำเลียงออกจากห้องอบแห้งมาเก็บไว้ที่ถังเก็บ (หมายเลข 9) และจะถูกลำเลียงหมุนวนในระบบไปเรื่อย ๆ จนถึงความชื้นสุดท้ายจึงสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง

2.2 วิธีการทดสอบ

เมื่อทำการประกอบเครื่องอบแห้งเรียบร้อยแล้ว จากนั้นทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิอากาศโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล Type K จำนวน 4 ตำแหน่ง (P1 – P4) แสดงดังรูปที่ 1ก โดยเชื่อมต่อกับบอร์ด

ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 AT และ เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล เพื่อรับค่าและแสดงผล

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ใช้ความเร็วลมอากาศคงที่ ที่ 6 m/s (ความเร็วอื่นเวอร์เตอร์ 60 Hz) ซึ่งเป็นความเร็วลมที่ทำให้เมล็ดข้าวสามารถลอยขึ้นไปยังห้องอบแห้งได้ จากการทดสอบระบบเบื้องต้น และ อัตราการป้อนคงที่ ที่ 0.14 kg/s (ความเร็วอื่นเวอร์เตอร์ 16 Hz) ซึ่งเป็นอัตราการป้อนที่เหมาะสมในการป้อนข้าวไหลไปสัมผัสกับลมแล้วสามารถลอยขึ้นไปได้ ควบคุมอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังไม่ให้อุณหภูมิเกินกว่า 60°C เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเมล็ดข้าวในถังเก็บหลังการอบแห้งให้ไม่เกิน 45°C ซึ่งช่วยให้ควบคุมคุณภาพของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งได้ [29], [30], [31], [32], [33] ในทุกเงื่อนไขการทดสอบ แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 เงื่อนไข คือ 1) อบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนอุณหภูมิ 60°C 2) อบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ร่วมกับเปิดหลอดอินฟราเรด 50 วัตต์ (อุณหภูมิเฉลี่ยของหลอดอยู่ที่ 70°C) 3) อบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้หลอดอินฟราเรด 800 วัตต์ (อุณหภูมิเฉลี่ยของหลอดอยู่ที่ 345°C) ร่วมกับการใช้อากาศอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่มีความชื้นเริ่มต้น 23%w.b. ทดสอบครั้งละ 20 kg อบจนถึงความชื้นสุดท้าย 14%w.b. และทำซ้ำเงื่อนไขละ 3 ซ้ำ ตลอดการทดลอง

2.3 การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

2.3.1 พฤติกรรมการอบแห้ง

การประเมินพฤติกรรมการอบแห้งจะประเมินจากปริมาณความชื้น (Moisture content) ในเมล็ดข้าวที่ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นไปจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ โดยในขั้นตอนการหาความชื้นในเมล็ดข้าวสามารถทำได้จากการนำตัวอย่างเมล็ดข้าว 10 กรัมไปชั่งน้ำหนักก่อนนำไปอบหามาแล้วด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24

ข้าวโมง [34] จากนั้นนำมาซึ่งน้ำหนักหลังอบแห้ง และน้ำหนักน้ำหนักก่อน - หลังมาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก (Wet basis, %w.b.) ตามสมการที่ (1)

$$M_w = \frac{W_i - W_d}{W_i} \quad (1)$$

โดยที่ M_w = ความชื้น ณ เวลาใดๆ (เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก, %w.b.)

W_i = น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น (g)

W_d = น้ำหนักข้าวเปลือกแห้ง (g)

3.2.3 อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR)

อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกคือความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำในเมล็ดข้าวที่ลดลงต่อระยะเวลาการอบแห้ง ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t} \quad (2)$$

โดยที่ DR = อัตราการอบแห้ง ($\text{kg}_{\text{water}}/\text{h}$)

W_i = น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น (g)

W_f = น้ำหนักข้าวเปลือกหลังอบแห้ง (g)

3.2.3 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

(Specific energy consumption, SEC)

วัดค่าการใช้พลังงานจากมอเตอร์ไฟฟ้า (ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MF - 37E) ที่ต่อเข้ากับพัดลมความดันสูง Blower) มอเตอร์ไฟฟ้า มอเตอร์ และหลอดอินฟราเรด ตามลำดับ คำนวณหา SEC ได้จากสมการที่ 3 [35]

$$SEC = \frac{2.6E}{W_i - W_f} \quad (3)$$

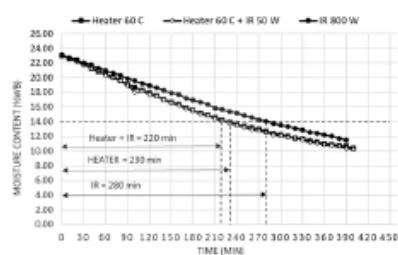
โดยที่ SEC = ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

($\text{MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$)

E = พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในกระบวนการอบแห้ง (kWh)

3. ผลการศึกษา/อภิปรายผล

3.1 พฤติกรรมการอบแห้ง



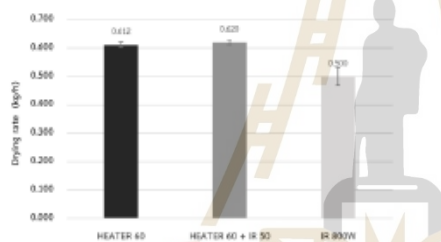
รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิอบแห้ง 60°C

พฤติกรรมการอบแห้งแสดงด้วยค่าปริมาณความชื้น (Moisture content) ในเมล็ดข้าวที่ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นไปจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ต้องการดังรูปที่ 2 จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งช่วงแรกความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีสาเหตุมาจากในช่วงแรกนั้นเมล็ดข้าวมีความชื้นที่บริเวณผิวเมล็ดแตกต่างกับภายในแกนกลางของเมล็ดมาก กล่าวคือเกิด Moisture gradient สูง จึงทำให้เกิดการระเหยของน้ำที่ผิวอย่างรวดเร็ว [16],[36] และเมื่อเปรียบเทียบเวลาในการอบแห้งพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 50 วัตต์ มีอัตราการลดลงของความชื้นถึงความชื้นสุดท้าย 14%w.b. เร็วที่สุดคือ 220 นาที รองลงมาคือ การอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 800 วัตต์ ที่เวลา 230 และ 280 นาที ตามลำดับ ซึ่งจากผลดังกล่าวพบว่ามีผลสอดคล้องกับ Atzal และคณะ [37] ซึ่งได้ศึกษาการอบแห้งข้าวบาร์เลย์โดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน พบว่าสามารถร่นระยะเวลาในการอบแห้งได้ เนื่องจากวิธีการดังกล่าวสามารถให้ความร้อนผ่าน

เข้าไปยังภายในเมล็ดข้าวเปลือกทำให้เมล็ดได้รับความร้อนพร้อมๆ กันทั้งภายในและนอกเมล็ดส่งผลให้การถ่ายเทมวลน้ำภายในเมล็ดมีอัตราการถ่ายเทที่เร็วขึ้น [38]

3.2 อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR)

จากการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกทั้ง 3 เงื่อนไข เมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้งที่แสดงดังรูปที่ 3 พบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวมีอัตราการอบแห้ง 0.612 ± 0.009 kg_{water}/h การอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้ง 0.620 ± 0.007 kg_{water}/h และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้ง 0.501 ± 0.007 kg_{water}/h



รูปที่ 3 อัตราการอบแห้งของข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยวิธีการที่ต่างกัน

ตารางที่ 1 ค่าอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR)

Methods	DR (kg _{water} /h)
HEATER 60	0.612 ± 0.009^a
HEATER 60 + IR 50 W	0.620 ± 0.007^a
IR 800 W	0.501 ± 0.007^{ab}

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึงค่าที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (p<0.05).

ซึ่งสังเกตได้ว่าการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งอีก 2 เงื่อนไข แต่อย่างไร

ก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยทางสถิติที่แสดงดังตารางที่ 1 พบว่า อัตราการอบแห้งของวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน และวิธีอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งมีสาเหตุมาจากพลังงานไฟฟ้าจากรังสีอินฟราเรดที่ใช้ร่วมกับลมร้อนถูกใช้เพียง 50 วัตต์ ทั้งนี้เนื่องจากไม่ต้องการให้ข้าวเปลือกในถังเก็บมีอุณหภูมิสูงกว่า 60°C จึงทำให้หลอดอินฟราเรดไม่เกิดการแผ่รังสีอย่างเต็มที่เพราะอุณหภูมิผิวหลอดอาจต่ำเกินไป ส่งผลให้อัตราการอบแห้งยังไม่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน และเมื่อพิจารณาการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียวพบว่าอัตราการอบแห้งต่ำที่สุด คือ 0.501 ± 0.007 kg_{water}/h ทั้งนี้อาจเป็นเพราะข้าวเปลือกมีเวลาสัมผัสกับรังสีสั้นเกินไปในขณะที่แขวนลอยกับอากาศอยู่ในหอบแห้ง ประกอบกับเมล็ดข้าวเปลือกมีขนาดเล็กเมื่อแขวนลอยในอากาศทำให้มีพื้นที่รับรังสีน้อยเกินไป ความร้อนจากการแผ่รังสีจึงเข้าสู่เมล็ดข้าวเปลือกได้น้อย

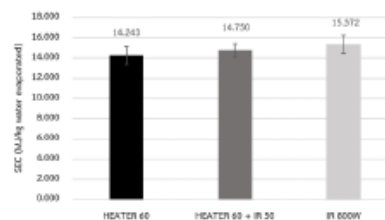
การใช้รังสีอินฟราเรดในการอบแห้งร่วมกับการพาความร้อนทั้งสองเงื่อนไข ยังไม่ส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างนัยสำคัญ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุมาจากการใช้ความเร็วลมร้อนที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากต้องใช้ในการพาให้ข้าวเปลือกแขวนลอยไปกับอากาศและเคลื่อนที่ไปในหอบแห้ง อากาศนี้จะพัดผ่านหลอดอินฟราเรดตลอดเวลาและอาจส่งผลให้ความร้อนบนผิวหลอดซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของลมร้อนสูญเสียไปด้วย รังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจากหลอดจึงส่งไปไม่ถึงเมล็ดข้าวได้อย่างสมบูรณ์ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับ Sharma และคณะ [38] ที่ได้ทำการประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดคลื่นยาวร่วมกับการพาอากาศร้อนซึ่งพบว่าการใช้ความเร็วลมร้อนที่มากกว่า 2.6 m/s ส่งผลทำให้เกิดการระบายความร้อน (Cooling effect) ที่บริเวณผิวของถังเซรามิกของหลอดอินฟราเรด

3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

(Specific energy consumption, SEC)

เมื่อพิจารณาในส่วนของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ในการทดลองทั้ง 3 เวียนไข ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4 พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวมีค่า SEC 14.24 ± 0.88 MJ/kg_{water} การอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดมีค่า SEC 14.75 ± 0.67 MJ/kg_{water} และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีค่า SEC 15.37 ± 0.91 MJ/kg_{water}

จากผลการทดลองจะสังเกตได้ว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) จะสูงที่สุดเมื่ออบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว ซึ่งมีอัตราการอบแห้งที่ต่ำที่สุด เนื่องจากใช้ระยะเวลาการอบแห้งที่ยาวนาน ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดความสิ้นเปลืองพลังงานที่สูง รองลงมาคือ การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด อันเนื่องมาจากมีแหล่งความร้อนเสริมที่เพิ่มเข้ามาทำให้ช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งช้าเปลือกและส่งผลให้ระยะเวลาการอบแห้งลดลงเมื่อเทียบกับการอบด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว และสุดท้ายคือ การอบแห้งด้วยลมร้อนมีค่า SEC ต่ำที่สุดคือ 14.24 ± 0.88 MJ/kg_{water} แต่การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด ยังไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% อันเนื่องมาจากพลังงานไฟฟ้าจากรังสีอินฟราเรดที่ใช้ร่วมกับลมร้อนถูกใช้เพียง 50 วัตต์ ซึ่งยังเป็นพลังงานที่น้อยและอาจไม่ส่งผลมากนักในการเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งภายในหอบแห้ง



รูปที่ 4 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยวิธีการที่ต่างกัน

ตารางที่ 2 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC)

Methods	SEC (MJ/kg _{water})
HEATER 60	$14.24 \pm 0.88^*$
HEATER 60 + IR 50 W	$14.75 \pm 0.67^*$
IR 800 W	$15.37 \pm 0.91^*$

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แสดงต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึงค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ผลในหัวข้ออัตราการอบแห้ง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยทางสถิติ ที่แสดงดังตารางที่ 2 พบว่า วิธีการอบแห้งทั้ง 3 เวียนไข ยังไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4. สรุป

การพัฒนาต้นแบบระบบอบแห้งแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยรังสีอินฟราเรดในการอบแห้งข้าวเปลือกและทดสอบอบแห้งทั้ง 3 เวียนไขพบว่า

พฤติกรรมการอบแห้งช่วงแรกความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วทั้ง 3 เวียนไขมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบเวลาในการอบแห้งพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด มีอัตราการลดลงของความชื้นถึงความชื้นสุดท้าย 14%w.b เร็วที่สุดคือ 220 นาที อัตราการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้งที่ต่ำที่สุดคือ 0.620

$\pm 0.007 \text{ kg water/h}$ แต่การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด ยังไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับค่า SEC พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนมีค่า SEC ต่ำที่สุดคือ $14.24 \pm 0.88 \text{ MJ/kg water}$ และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยทางสถิติพบว่า วิธีการอบแห้งทั้ง 3 เงื่อนไข ยังไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

5. ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองพบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด ยังไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งในงานวิจัยต่อไปจะมีแนวทางการปรับปรุงระดับของรังสีอินฟราเรดที่เสริมร่วมกับลมร้อนให้มีระดับที่เหมาะสมและมีนัยสำคัญยิ่งขึ้น และเพิ่มการประเมินคุณภาพข้าวหลังการอบแห้ง เพื่อศึกษาความแตกต่างของวิธีการอบแห้งทั้งสองวิธีต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีสำหรับการสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Pakdeekaew, K. Treeamnuak and T. Treeamnuak, "Study of Relationship Between Electrical Property and Moisture Content of KHAO DAWK MALI 105 Paddy," 13th Conference of Electrical Engineering Network 2021 (EENET 2021), Rajamongala University of Technology Ianna, Thailand, 2021.
- [2] B.D. De Padua. "Requirements for drying high moisture content grain in Southeast Asia, preserving grain quality by aeration and in- store drying," Proceedings of International Seminar, Kuala Lumpur, Malaysia, pp 45–49, 1985.
- [3] M. M. Banaszek, T. J. Siebenmorgen, "HEAD RICE YIELD REDUCTION RATES CAUSED BY MOISTURE ADSORPTION," American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), vol. 33, no. 3, pp 1263-1269, 1990.
- [4] O. R. Kunze and D. L. Calderwood, Systems for Drying Rice, Drying and Storage of Agricultural Crops. Published by AVI Publishing company Inc., Westport, Connecticut, USA pp.381 pp., 1980.
- [5] Ministry of agriculture and Cooperatives, "Thai agricultural standard TAS 4004-2017 (THAI RICE)," Bangkok: The Agricultural Co-operative Federation of Thailand (ACFT).
- [6] P. Tuaynak, M. Chuchonak, M. Yapha, and P. Bunyawanichakul, "Review of Development of Paddy Dried in Industry," SWU Engineering Journal (2014), vol. 9(1), pp. 68-74, 2557.
- [7] S. Soponronnarit, "Fluidized- Bed Paddy Drying," (Science Asia) vol. 25: pp. 51-56, (1999).
- [8] J. Jokkew, "Performance evaluation of paddy rice pneumatic dryer," A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Energy management

- Engineering Suranaree University of Technology. 2016.
- [9] N. Wongbubpa, K. Treeamnuak and T. Treeamnuak, "Influence of Drying Air Velocity Characteristics on Paddy Drying," *RMUTP Research Journal*, vol. 16, no. 1, January-June 2022.
- [10] S.D.F. Mihindukulasuriya, H.P.W. Jayasuriya, Mathematical modeling of drying characteristics of chilli in hot air oven and fluidized bed dryers. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol. 15, pp. 154 – 166, 2013.
- [11] A.S. Ginzburg, "Application of infrared radiation in food processing," *Chemical and Process Engineering Series*, Leonard Hill, London. 1969.
- [12] C. Sandu, Infrared radiative drying in food engineering: A process analysis. *Biotechnology Progress*, vol. 2, pp. 109 – 119, (1986).
- [13] C. Ratti, and A.S. Mujumdar, Infrared drying. *Handbook of Industrial Drying: Volume 1*, 2nd ed., Mujumdar, A.S. (Ed.), Marcel Dekker, New York, pp. 567–588, 1995.
- [14] T. Abe, and T.M. Afzal, "Thin-layer infrared radiation drying of rough rice," *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 67, pp. 289–297, 1997.
- [15] F. Niibori, and S. Motoi, "Evaporation of vegetables used by infrared rays," *Food Processing*, vol. 23, pp. 38 – 42, (1988).
- [16] N. Meeso, "Development of Paddy Drying Technique Using Combination of Fluidization and Near-infrared Radiation," full paper, Thailand Science Research and Innovation (TSRI), 2012.
- [17] J. Laohavanich, "Drying of paddy by Infrared ray, hot air and tempering," full paper, Thailand Science Research and Innovation (TSRI), 2016.
- [18] G. Jeevarathinam a,b, R. Pandiselvam c, T. Pandiarajan d, P. Preeetha, M. Balakrishnan, V. Thirupathi and A. Kothakota, "Infrared assisted hot air dryer for turmeric slices: Effect on drying rate and quality parameters," *LWT (Food Science and Technology)*, vol. 144, 2021.
- [19] D.I. Onwude, N. Hashim, K. Abdan, R. Janius and G. Chen, "The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato," *Journal of Food Engineering*, vol. 241, pp. 75–87, 2019.
- [20] C. Chen, I. Wongso, D. Putnam, R. Khir and Z. Pam, "Effect of hot air and infrared drying on the retention of cannabidiol and terpenes in industrial hemp (*Cannabis sativa* L.)," *Industrial Crops & Products*, vol. 172, 2021.
- [21] D.G. Praveen Kumar, H. Umesh Hebbbar and M.N. Ramesh, "Suitability of thin layer models for infrared-hot air-drying of onion slices," *LWT (Food Science and Technology)*, vol. 39, pp. 700-705, 2006.
- [22] H. S. EL-Mesery, R. M. Kamel and R.Z. Emara, "Influence of infrared intensity and air temperature on energy consumption and physical quality of dried apple using hybrid dryer," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 27, 2021.
- [23] N. Pothisri, S. Jaturonglamert, C. Nitawichit and C. Warit, "Combined convective and

- infrared radiation drying kinetics of *Spirogyra* sp.,” The 40th National Graduate Research Conference, Thailand, 2016, pp. 325-334.
- [24] Z. Geng, M. Torki, M. Kaveh, M. Beigi and X. Yang, “Characteristics and multi-objective optimization of carrot dehydration in a hybrid infrared /hot air dryer,” *LWT - Food Science and Technology*, vol. 172, 2022.
- [25] Q. Chen, J. Bi, X. Wu, J. Yi, L. Zhou and Y. Zhou, “Drying kinetics and quality attributes of jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) slices dried by hot-air and short- and medium-wave infrared radiation,” *LWT - Food Science and Technology*, vol. 64, pp. 759 – 766, 2015.
- [26] H. Umesh Hebbar, K.H. Vishwanathan and M.N. Ramesh, “Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables,” *Journal of Food Engineering*, vol. 65, pp. 557 – 563, 2004.
- [27] G. Jeevarathinam, R. Pandiselvam, T. Pandiarajan, P. Preetha, M. Balakrishnan, V. Thirupathi and Anjineyulu Kothakota, “Infrared assisted hot air dryer for turmeric slices: Effect on drying rate and quality parameters,” *LWT - Food Science and Technology*, vol. 144, 2021.
- [28] S. A. Aboud, A.B. Altemimi, A. R. S. Al-Hilphy, L. Yi-Chen and F. Cacciola, “A Comprehensive Review on Infrared Heating Applications in Food Processing,” *MDPI Journals*, vol. 24, no. 22, pp. 4125, 2019.
- [29] A. MÜLLER, M. T. NUNES, V. MALDANER, P. C. CORADI, R. S. de MORAES, S. MARTENS, A. F. LEAL, V. F. PEREIRA and C. K. MARIN, “Rice Drying, Storage and Processing: Effects of Post-Harvest Operations on Grain Quality,” *Rice Science*, vol. 29, no. 1, pp. 16 – 30, 2022.
- [30] S. Khomkaew, “Temperature of Recirculation batch drying the paddy had an effect on aroma (2AP),” *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, vol. 16, no. 3, pp. 1 – 9, 2021.
- [31] X. Zheng and Y. Lan, “Effects of Drying Temperature and Moisture Content on Rice Taste Quality,” *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, vol. 10, 2007.
- [32] X. Z. Zheng and X. D. Zhao, “Calculation of taste value and study on drying quality of rice,” *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, vol. 30, pp. 54 – 60, 2000.
- [33] C. N. Nguyen and O. R. Kunze, “Fissures Related to Post-Drying Treatments in Rough Rice,” *Cereal chemistry*, vol. 61, no. 1, pp. 63 – 68, 1984.
- [34] AOAC, *Official Method of Analysis of AOAC International*. Virginia: Association of Official Analytical Chemists, 1995.
- [35] N. Saelim, T. Treeamnuak and K. Treeamnuak, “Development of a Continuous Flow Paddy Dryer with Infrared Radial Radiation Technique,” *RMUTP Research Journal*, vol. 12, no. 2, Jul.-Dec. 2018.
- [36] J. Chu, A. Lane, and D. Conklin, “Evaporation of liquids into their superheated vapors,” *Ind Eng Chem*, vol. 53(3), pp. 275 – 280, 1953.
- [37] T.M. Afzal, T. Abe, and Y. Hiikida, “Energy and Quality Aspects during Combined FIR-Convection Drying of Barley,” *International*

Journal of Food Engineering, Vol. 42, pp.
177-782, 1999.

[38] G. P. Sharma, R.C Verma, and P. Pathare,

*Mathematical modeling of infrared radiation

thin layer drying of onion slices," Journal of
Food Engineering; 17(3): 282-286, 2006.



Evaluation of Paddy Drying with Pneumatics Dryer by Artificial Neuron Network Technique

Boontarika sila^{1,*}, Krawee Treeamnuk², and Tawarat Treeamnuk³

¹School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

²School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

³School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

Received 15 June 20xx; received in revised form 05 August 20xx; accepted 10 September 20xx

Abstract

This article aims to study the drying kinetics and energy consumption of the paddy drying system. The artificial neuron network (ANN) was used to predict the drying kinetics and evaluate the important factors that affected the drying process. In this study, 20 kg of Thai jasmine rice 105 (Khao Dok Mali 105) with a moisture content of 23-25%WB was dried by pneumatic dryer to reduce the moisture to 14%WB. Three conditions of heat source in drying consisting of: using only hot air drying at 80°C, hot air drying at 60°C combined with 50 W infrared, and using only 850 W infrared were tested and investigated. The result showed that 80°C hot air drying gave the least drying time of 160 min and had the lowest SEC of 13.23 MJ/kgwater. The analyzed ANN model is highly capable of predicting the moisture ratio (MR), specific energy consumption (SEC) of the drying of all heat sources with values of R² and RMSEC at 0.9964 and 0.0127, and 0.9090 and 1.1925 respectively. Moreover, the ANN analysing results showed that drying time, temperature of drying column and paddy bin are the important factors in MR prediction. The temperature of hot air, drying time, and type of heat source are the most affected factors on SEC in drying.

Keywords: Paddy; Artificial neural network; Pneumatic dryer; Infrared;

1. Introduction

Rice is Thailand's main economic crop. Paddy rice after harvest continues to suffer from moisture problems that are high as 25 – 30%WB (wet basis) [2][35][38]. This causes a number of subsequent problems such as shortening the storage period, products being destroyed by insects, and causing microbial growth during storage [29]. Post harvest paddy should have a moisture content of 14%WB to prevent the problems and also improve the quality of milling [26]. Therefore, it is necessary to use the dryer in the moisture reducing process.

Agricultural product dryers have been developed for various types, such as fluidized bed paddy dryers [36] [32], spouted bed dryers [17][37], Pneumatic Dryer [8][27][18][13] etc. The main problem of dryers that are still experiencing is an energy intensive process. Its energy consumption value is 10–15% of the total energy consumption in all industries (Keey, 1972; Mujumdar, 1997). Nowadays, the use of combination heating energy dryers is increasingly starting to be used to develop energy efficiency. Infrared radiation is one of the alternative heating that is used to assist the main heat source in dryer. The

* Corresponding author. E-mail address: Boontarika.sila@gmail.com
Tel.: +668-3-8762024; Fax:-

35 advantage of infrared radiation was presented in that its electromagnetic waves can be absorbed directly into the product
 36 without losing to the external environment. The quality of energy use causes greater energy saving [1][4][5]. In addition,
 37 products derived from infrared drying are higher quality than a traditional dryer [22][40]. According to previous research
 38 studies, there are many prototypes of infrared radiation in combine heat sources dryer, such as: development of paddy drying
 39 technique using fluidization and shortwave Infrared Radiation [23]. paddy drying project by infrared rays [3-4][14].

40 Drying kinetics in thin layer drying is an important tool in the scientific modeling of drying in agricultural products [42]
 41 [10]. Drying agricultural products is quite costly and takes a lot of processing time [35]. Thin layer drying equation is widely
 42 used, due to its easy, need less information, no complexity [31][19]. Mathematics are important tools to solve this problem for
 43 prediction the moisture ratio and drying rate at different times [30]. The Artificial Neuron Network (ANN) is a large data
 44 processing system whose behavior is similar to that of human biological neural networks [16]. At present, ANN has been
 45 applied to help predict and explain the drying behavior of agricultural materials [15][39]. ANN can be categorized based on
 46 their structure as follows: 1) the single layer feedforward network 2) the multi-layer feedforward network and 3) the recurrent
 47 network [33]. The multi-layer feedforward network is widely used to model the predictive mathematical drying behavior of
 48 agricultural materials [7]. The structure of the ANN consists of 3 parts: Input layer is the amount of independent variables, one
 49 or more hidden layers, and output layer (dependent variables) [20]. The number of hidden layers and the number of neurons
 50 depend on the complexity of the problem to be investigated [21]. The advantages of ANN is flexibility because it is able to
 51 analyze two variables that are non-linearly related [3][41] and it can produce more than one outputs simultaneously [3].

52 The purpose of this article is to study the factors affecting the drying kinetic and energy consumption of an
 53 infrared-assisted pneumatic paddy drying system, which use the ANN to analyze and predict the drying kinetics at three
 54 different drying condition.

55 2. Methodology Materials and methods

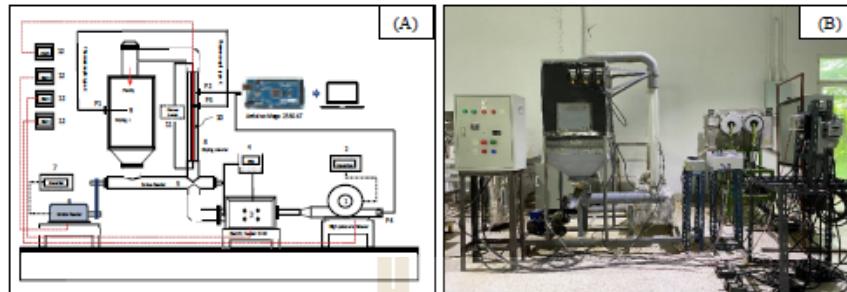
56 2.1. Samples

57 In this study, Thai jasmine paddy rice (Khao Dok Mali 105 paddy cultivar) from Northeastern Thailand with 23-25%WB
 58 initial moisture content was used as the sample in the drying test. For the drying operation, 20 kg of paddy was dried until the
 59 moisture was below 14% wet basis moisture content. The test was repeated 3 replication for each drying condition to be
 60 studied.

61 2.2. An Infrared-Assisted Pneumatic Paddy dryer

62 A schematic diagram of the experimental system is illustrated in Fig. (1). The experimental system consists of 1.) a blower
 63 (HITACHI, VORTEX, 1.5 kW), 2.) electric inverter (MITSUBISHI, E700) for blower motor controlling, 3.) 3 kW electric
 64 heater, 4.) PID temperature controller (BERM, REX-C100) for electric heater, 5.) screw feeder, 6.) 0.75 kW motor screw
 65 feeder, 7.) electric inverter (HATTEC-GR) for feeder motor controlling, 8.) Drying column (acrylic tube) with diameter of 74
 66 mm and length of 1 meter, 9.) grain storage bin with dimensions of 0.40-0.50-0.80 m³ (L×W×H), 10.) 1 kW infrared core
 67 heater (Quartz tube type) installed at the central axis of drying column, 11.) 1.6 kW Dimmer Switch for infrared heater
 68 controlling, and 12.) electric power meter (MITSUBISHI, MF – 37E) for energy consumption measuring. The drying process
 69 begins when the blower delivers ambient air to the electric heater at a flow speed of 6 m/s to generate hot air at 80°C. The hot
 70 air flows through the drying column from the bottom up while the infrared core heater emits infrared radiation inside the drying
 71 column. At the same time, the paddy from the storage bin is fed by screw into the bottom of the drying column. It causes the
 72 rice to be blown up inside the drying column and heated with hot air and infrared rays before it flows through the drying
 73 column back to the storage bin. This process operate continuous repeatedly until its moisture content reached 14%WB.

74



75

76 Fig. 1 – (A) Schematic diagram of An Infrared-Assisted Pneumatic Paddy Drying System

77 (B) Schematic of An Infrared-Assisted Pneumatic Paddy Drying System

78 2.3. Experimental procedure

79 The system was set to operate constant throughout the study at air velocity of 6 m/s (frequency 60 Hz of blower motor
 80 inverter) and a paddy feed rates of 8.4 kg/min (frequency 16 Hz of screw motor). The drying experiments include three
 81 conditions: 1) using only hot air drying at 80°C, 2) using hot air drying at 60°C and infrared emitting power at 50 Watts, and 3)
 82 using only infrared emitting power at 850 Watts. Temperatures at 4 positions (P1 to P4 in fig. 1) were measured by a
 83 thermocouple (type K) connected to a microcontroller board (Arduino Mega 2560 AT) and sent the data to the computer to be
 84 recorded.

85 2.4. The drying kinetics

86 (1) Drying rate (DR) represents the correlation of decreased water content in paddy samples to the time. it is calculated as
 87 follow Eq. (2): [25]

$$88 \quad DR = \frac{W_i - W_f}{t} \quad (2)$$

89 Where DR is Drying rate (kg_{water}/h), W_i is the initial weight of paddy samples (g), W_f is the final weight of paddy samples
 90 (g), and t is the period of drying time (hour).

91 (2) Moisture Ratio (MR) represents the amount of moisture remaining in paddy samples to that of the initial moisture
 92 content of the sample. Mathematically, it was calculated according to Eq. (3):[11]

$$93 \quad MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3)$$

94 Where M is moisture content at any time (%WB), M₀ is the initial moisture content (%WB), and M_e is the equilibrium
 95 moisture content (%WB)

96 2.5. The specific energy consumption (SEC)

97 Energy consumption of blower, electric heater, and infrared heater were measured separately by power meter
 98 (MITSUBISHI, MF – 37E). Specific energy consumption (SEC) was calculated by equation (4) to evaluate the energy
 99 efficiency of a drying system.[30]

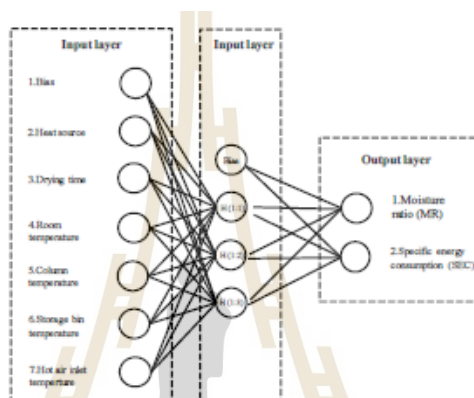
$$100 \quad SEC = \frac{3.6E}{W_i - W_f} \quad (4)$$

101 Where SEC is the specific energy consumption ($\text{kJ/kg}_{\text{solid}}$), E is the total electrical energy consumption (kJ) in drying.

102 2.6. Neural network model development

103 In this study, the multi-layer perception network was used to predict the MR and SEC value. A total of 333 data were
 104 obtained from the three test conditions. The input and output parameters were shown in fig.2. A back-propagation algorithm
 105 was used to train the model. The hidden layer consist of hyperbolic tangent function was used for hidden layer activation
 106 function, Using 1 hidden layer, which the number of neurons depend on the complexity of the problem. The total data were
 107 divided randomly into 70% of training set and 30% of test set.

108



109

Fig. 2 The Structure of multi-layer neural network scheme

110

111

112 2.7. Evaluation of drying model accuracy.

113 The Root Mean Square Error of Prediction (RMSEP) and the Coefficient of Determination (R^2) were used to indicate the
 114 accuracy of ANN models. These parameters can be calculate as follow equation (5, 6):

115

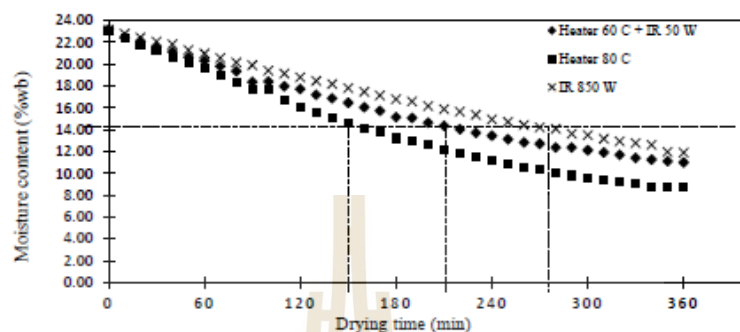
$$116 \quad R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pred} - MR_{exp})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR_{pred}} - MR_{exp})^2} \quad (5)$$

117

$$118 \quad RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp} - MR_{pred})^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

119

120 Where MR_{exp} is the moisture ratio value of each experiment, MR_{pred} is the moisture ratio value of the prediction and
 121 $\overline{MR_{pred}}$ is the average moisture ratio value of the prediction. The ANN model was carried out with the IBM SPSS Statistics
 122 version 21.

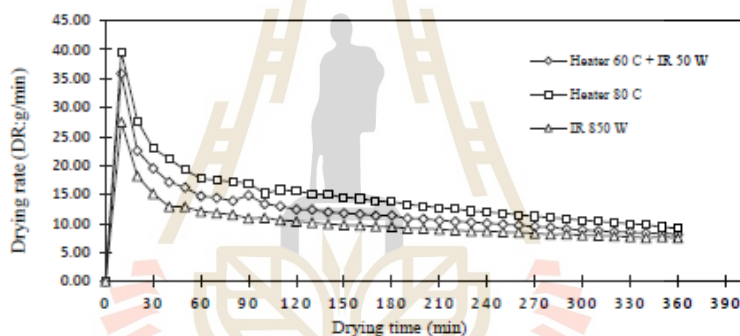
123 **3. Results and discussions**124 **3.1. Drying kinetics**

125

126

127

Fig. 3 Drying behavior of various test conditions.



128

129

130

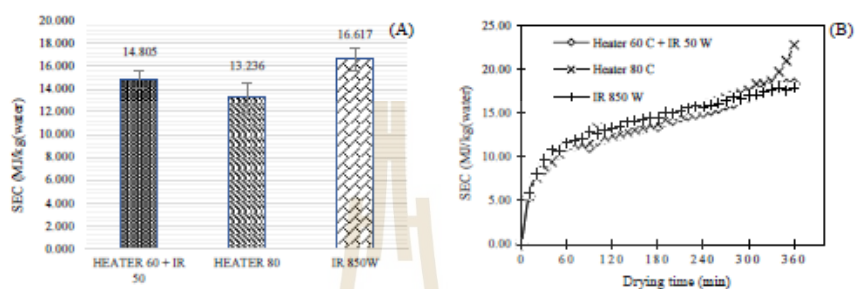
Fig. 4 Drying rate of various test conditions.

131 Fig. 3. presents the result of drying behavior during three test condition. The result demonstrates that at the early period of
 132 drying time, the moisture content continuously decreases relate to the drying time. This is due to, At the beginning of the drying
 133 process, the water in the paddy grain was transferred to its surface and rapidly evaporated [12]. In the last period of drying time,
 134 it was found that the moisture content slowly reduces because the amount of water contained in the paddy is least than in the
 135 early period [43]. At the desired moisture content of 14%WB, the drying time of each drying condition is not equal because of
 136 different heat sources. Drying with constant hot air temperature of 80°C takes the least drying time at 160 min. The use of a hot
 137 air temperature of 60°C combined with infrared radiation power of 50 W and using of only infrared radiation power of 850 W
 138 in drying was achieved at a drying time of 223 and 280 min respectively. The increasing of temperature in drying column
 139 causes the decrease in drying time and gives the increasing of drying rate (Fig. 4) . These result are corresponded to the earlier
 140 researchers [24][27][28]. The drying rate of hot air 60°C combined with infrared radiation 50 W is higher than drying by
 141 infrared radiation 850 W. This trend is relevant to other experiments [6][9][34] The flow of room temperature air used to
 142 transport paddy in the system is the main reason that carries the heat out from the drying tube. The use of only infrared

143 radiation can not produce heat enough to keep a high temperature in the drying column. Therefore, infrared radiation is not
 144 suitable for use as a single heat source. It can be seen that it has always been used as heat combined with other primary heat
 145 sources.

146 3.2. The specific energy consumption

147



148

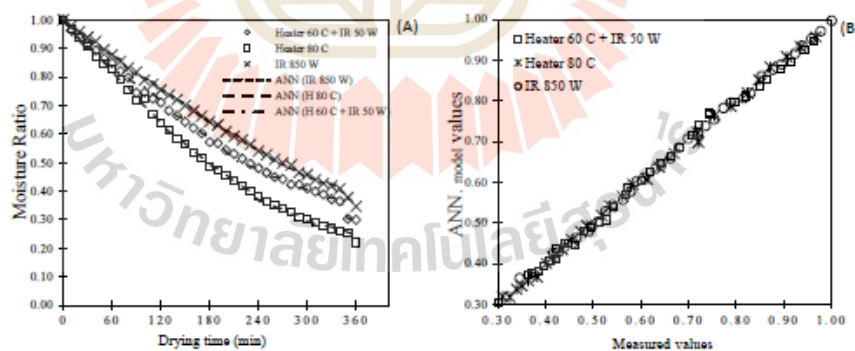
149 Fig. 5 (A) SEC of drying to 14%WB and (B) SEC VS. drying time

150

151 The specific energy consumption (SEC) under different conditions showed that 13.23 MJ/kg_{water} was the minimum SEC
 152 which occurred at constant hot air drying at 80°C (Fig. 5A). The highest SEC is 16.61 MJ/kg_{water} carried out by infrared
 153 radiation at 850 W. From Fig. 5B, the SEC depends on drying time. The longer drying time resulted in higher the SEC because
 154 the long period of drying process was extremely energy consumed. In the last period of drying, water in grain was very low
 155 (Fig. 3) and the drying rate was falling (Fig. 4) so the quality of energy using is lower than the first period.

156 3.3. Artificial neural network model

157



158

159 Fig. 6 (A) ANN predicted result of MR in drying curve, (B) comparison of prediction and measuring values

160

161 From Fig. 6A, it presents the moisture ratio prediction by using ANN model. The R^2 and RMSE of three different drying
 162 conditions when predict with the unified model that can predict all conditions were 0.9964 and 0.0127 respectively. When we
 163 compared the predicted values with the measured values from the experiment, it was found that the values obtained were very
 164 close (Fig. 6B). Therefore, ANN model analysing technique are a good choice for predicting the end time of drying a system.

165

166 **Table 1** Statistical results of the ANN model on MR prediction

No.	Condition	Hidden layer activation function	R^2 (Cal)	RMSE (cal)
1	Hot air 80 C	Hyperbolic tangent		
2	Hot air 60 C + IR. 50W	Hyperbolic tangent	0.9964	0.0127
3	IR. 850W	Hyperbolic tangent		

167

168 **Table 2** Statistically important factors affecting MR prediction

No.	Condition	Input Layer	Number of neuron (hidden layer)	Output Layer	Independent Variable Importance (%)
1	Hot air 80 C	1. Time			100
2	Hot air 60 C + IR. 50W	2. Heat source			10.3
3	IR. 850W	3. Column temp	1 - 3	MR	28.9
		4. Bin temp			27.4
		5. Hot air inlet			16.3
		6. Room temp			8.2

169

170 The result of ANN to predict the moisture ratio value (MR) were shown in table 1-2. There are six independent variables
 171 and one output variable in modelling. The multi-layer perception network was used to predict MR. The hyperbolic tangent was
 172 used to be the hidden layer activation function. The result of prediction in this case show that, The one hidden layer and three
 173 numbers of neuron was used to predic the MR, Which this result was obtained from the trial and error method of the prediction
 174 process. The performance of ANN models was determined by the indication of R^2 and RMSE with value of 0.9964 and 0.0127
 175 respectively (table 1). The important variable that effect on MR was shown in table 4. The highest normalized percentage of
 176 independent variable was the drying time, which effect on MR value of 100%. the next subsequent variable was column
 177 temperature and storage bin temperature with values of 28.9% and 27.4% respectively. Since infrared heating cannot generate
 178 high temperatures in the drying column and storage bins. Therefore it has a low drying rate as reported in section 3.1. The
 179 importance of hot air inlet of the drying column, type of heat source (condition), and room temperature on drying kinetics are
 180 low to predict MR. Accordingly, in the design of pneumatic drying system, the greatest attention should be given to the drying
 181 column temperature and the storage bin temperature.

182 **Table 3** Statistical results of the ANN model on SEC prediction.

No.	Condition	Hidden layer activation function	R^2 (Cal)	RMSE (cal)
1	Hot air 80 C	Hyperbolic tangent		
2	Hot air 60 C + IR. 50W	Hyperbolic tangent	0.9090	1.1925
3	IR. 850W	Hyperbolic tangent		

183

184

185 Table 4 Independent variable importance results of ANN models of SEC prediction.

No.	Condition	Input Layer	Number of neuron (hidden layer)	Output Layer	Independent Variable Importance (%)
1	Hot air 80 C	1. Time	1 - 5	SEC	20.6
2	Hot air 60 C + IR. 50W	2. Heat_source			21.1
3	IR 850W	3. Column temp			18.1
		4. Bin temp			100
		5. Hot air inlet			45.4
		6. Room temp			13.2

186

187 The result of ANN in SEC prediction were shown in table 3-4. Six independent variables are conducted to ANN analysis.
 188 The multi-layer perception network was also used to predict the SEC value. The hyperbolic tangent was also used to be the
 189 hidden layer activation function. The one hidden layer and five numbers of neuron was used to predic SEC which this result
 190 was obtained from the trial and error method of the prediction process. Table 3 shown that the R^2 and RMSE was 0.9090 and
 191 1.1925 respectively. The highest normalized percent of independent variable is storage bin temperature which effect on SEC of
 192 100% and the next subsequent variable are hot air inlet temperature, heat source, and drying time respectively (table 4). It was
 193 noticed that the storage bin temperature and hot air inlet temperature had extreme effect on energy consumption of this drying
 194 system. This implies that if we need to reduce the SEC of this system, the temperature control of the storage tank and hot air
 195 entering the drying column temperature must not be too high. However, it must not be too small to delay the MR reduction
 196 because it will increase the drying time and affect energy consumption (SEC) of the system in the end.

197 **4. Conclusion**

198 Drying behavior under three different conditions indicated that hot air temperature of 80°C takes the least amount of
 199 drying time at 160 min and also had the lowest of SEC value at 13.23 MJ/kg_{water}. The ANN model is able to predict MR and
 200 SEC of the system with very high statistic confidential and indicates that the drying time mostly effect on both MR and SEC
 201 while the storage bin temperature also effect on SEC. In the design of pneumatic drying system, the greatest attention should
 202 be given to the drying column temperature and the storage bin temperature. On the other hand, the temperature control of the
 203 storage tank and hot air entering the drying column temperature are important in SEC control.

204 **Conflicts of Interest**

205 The authors declare no conflict of interest.

206 **References**

- 207
 208 [1] A.S. Ginzburg, "Application of infrared radiation in food processing," Chemical and Process Engineering Series. London:
 209 Leonard Hill, 1969.
 210 [2] A. Yodrak and C. Nimmo, "Development of a combined laboratory-scale rotary dryer and infrared radiation for
 211 high-moisture paddy," The 33rd Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Udon Thani, Thailand,
 212 2019, pp. 51-58.
 213 [3] B. Huang and A. S. Mujumdar, "Use of Neural Network to Predict Industrial Dryer," *Drying Technology: An International*
 214 *Journal*, vol. 11, no. 3, 525-541, 1993.
 215 [4] C. Ratti and A.S. Mujumdar, "Infrared Drying," In *Handbook of industrial drying: Volume 1 (2nd ed.)*, Ed. Mujumdar,
 216 A.S., New York: Marcel Dekker, 1995, pp. 567-588.
 217 [5] C. Sandu, "Infrared radiative drying in food engineering: A process analysis," *Biotechnology Progress*, vol. 2, pp. 109-
 218 119, 1986.

- 219 [6] D.G. Praveen Kumar, H.U. Hebbar and M.N. Ramesh, "Suitability of thin layer models for infrared-hot air-drying of
220 onion slices," *LWT - Food Sci. Technol.(Lebensmittel-Wissenschaft-Technol.)*, vol. 39, pp. 700-705, 2006.
- 221 [7] D.I. Onwude, N. Hashim, R.B. Janius, N. Nawi and K. Abdan, "Modelling the convective drying process of pumpkin
222 (Cucurbita moschata) using an artificial neural network," *International Food Research Journal*, vol. 23(Suppl), pp.
223 237-243, 2016.
- 224 [8] F. Tanaka, T. Uchino, D. Hamanaka and G. Gregory Arungulu, "Mathematical modeling of pneumatic drying of rice
225 powder," *Journal of Food Engineering*, vol. 88, pp. 492-498, 2008.
- 226 [9] G. Jeevarathinam, R. Pandiselvam, T. Pandiarsajan, P. Preetha, M. Balakrishnan, V. Thirupathi, A. Kothakota, Infrared
227 assisted hot air dryer for turmeric slices: Effect on drying rate and quality parameters," *LWT (Lebensm.-Wiss. &
228 Technol.)*, 2021.
- 229 [10] H.B. Hasan, A.I. Hobani, "Thin layer drying of dates. *Journal of Food Process Engineering*," vol. 23, pp. 177-189, 2000.
- 230 [11] I. Doymaz, "Drying kinetics of white mulberry," *J Food Eng.* vol. 61, pp. 341-346, 2004.
- 231 [12] J. Chu, A. Lane and D. Conklin, (1953). Evaporation of liquids into their superheated vapors. *Ind Eng Chem*, vol. 53(3),
232 pp. 275 - 280.
- 233 [13] J. Jokkew, "Performance evaluation of paddy rice pneumatic dryer," M.S. thesis, Dept. Energy management. Eng.,
234 Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2016.
- 235 [14] J. Laohavanich, "Drying of paddy by Infrared ray, hot air and tempering," full paper, Thailand Science Research and
236 Innovation (TSRI), 2016.
- 237 [15] K. Erenturk and S. Erenturk, "Comparison of genetic algorithm and neural network approaches for drying process of
238 carrot," *J. Food Eng.* vol. 78, pp. 905-912, 2007.
- 239 [16] K. Movaghamejad, M. Nikzad, "Modeling of tomato drying using artificial neural network," *Computers and Electronics
240 in Agriculture*, vol. 59, pp. 78-85, 2007.
- 241 [17] K. Sathapornprasath, K. Tavecharoenatham, K. Talabthong and C. Promma-aon, "Pepper Drying Used Spouted Bed
242 Combined with Fluidized Bed," *SWU Engineering Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 1-11, 2020.
- 243 [18] K.S. Rajan, S.N. Srivastava, B. Pitchumani and K. Dhasandhan, "Experimental study of thermal effectiveness in
244 pneumatic conveying heat exchanger," *Thermal Engineering*, vol. 28, pp. 1932-1941, 2008.
- 245 [19] M. Ozdemir, and Y.O. Devres, "The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food
246 Engineering*, vol. 42, pp. 225-233, 1999.
- 247 [20] M. Omid, A. Baharlooei and H. Ahmadi, "Modelling Drying Kinetics of Pistachio Nuts with Multilayer Feed-Forward
248 Neural Network," *Drying Technology*, vol. 27, no.10, pp.1069-1077, 2009.
- 249 [21] M. Izadifar, M. Zolghadri Jahromi, "Application of genetic algorithm for optimization of vegetable oil hydrogenation
250 process," *J. Food Eng.*, vol. 78, pp. 1-8, 2007.
- 251 [22] N. Meeso, A. Nathakarakule, T. Madhiyanon and S. Soponromarit, "Influence of FIR irradiation on paddy moisture
252 reduction and milling quality after fluidized bed drying," *Journal of Food Engineering*, vol. 65, pp. 293-301, 2004.
- 253 [23] N. Meeso, "Development of Paddy Drying Technique Using Combination of Fluidization and Near-infrared Radiation,"
254 full paper, Thailand Science Research and Innovation (TSRI), 2012.
- 255 [24] N. Wongbubpha and T. Jitsomboon, "Sustain Spouted Bed Paddy Dryer with Internal Grates," The 28th Conference of the
256 Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT), Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand, 2014, pp.
257 1578-1583.
- 258 [25] N. Saelim, T. Treeammuk and K. Treeammuk, "Development of a Continuous Flow Paddy Dryer with Infrared Radial
259 Radiation Technique," *RMUTP Research Journal*, vol. 12, no. 2, Jul.-Dec. 2018.
- 260 [26] O.R. Kunze and D.L. Calderwood, "Systems for Drying Rice, Drying and Storage of Agricultural Crops," USA: AVI Pub.
261 Co.Ltd., Connecticut, 1980.
- 262 [27] P. Bunyawanichakul, G.J. Walker, J.E. Sargison and P.E. Doe, "Modelling and Simulation of Paddy Grain (Rice) Drying
263 in a Simple Pneumatic Dryer," *Biosystems Engineering*, vol. 96, no. 3, pp. 335-344, 2007.
- 264 [28] P. Fungpongphan, S. Phaitasophon, A. Tan Phumee, C. Nimmol and K. Sathapornprasat, "Influence of Drying Column
265 Dimension on the Energy Efficiency of Pneumatic Dryer," *SWU Engineering Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 1-9, 2016.
- 266 [29] P. Pei, K. Xiong, X. Wang, B. Sun, Z. Zhao, J. Xu, X. Jin, H. Ye, J. Xiao and J. Kong, "Modelling the effect of
267 environmental factors on the growth of *Aspergillus parasiticus* and mycotoxin production in paddy during storage,"
268 *Journal of Stored Products Research*, vol. 93, 101846, 2021.
- 269 [30] P. Praneetpolkrang and K. Sathapornprasath, "Thin-layer drying model of jackfruit using artificial neural network in a far
270 infrared dryer," *Engineering and Applied Science Research*, vol. 48, no. 2, pp. 181-189, 2021.

- 271 [31] P.S. Madamba, R.H. Driscoll and K.A. Buckle, "Thin-layer drying characteristics of garlic slices," *Journal of Food*
 272 *Engineering*, vol. 29, pp. 75–97, 1996.
- 273 [32] R. Sivakumar, R. Saravanan, A. Elaya Perumal and S. Iniyar, "Fluidized bed drying of some agro products – A review,"
 274 *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 61, pp. 280–301, 2016.
- 275 [33] S. Haykin, "Neural Networks: A Comprehensive Foundation, 2nd ed., New Jersey: Prentice Hall, 1999.
- 276 [34] S. Kunaporn, S. Tiravanitkul and Y. Tiravanitkul, "Drying thin-layered brown rice using infrared and electrical energy,"
 277 *The 18th Thailand Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference, 2008, Pattaya Thailand.*
- 278 [35] S. Sritunyakorn, K. Sulaksana and T. Chitsomboon, "Diffusion Coefficient Modelling of Thin-layer Drying of Paddy
 279 Using Spouted Free Fall Bed Dryer," *RMUTP Research Journal*, Vol. 14, no. 2, 2020.
- 280 [36] S. Soponronnarit, "Fluidized-Bed Paddy Drying," *Science Asia*, vol. 25, pp. 51-56, 1999.
- 281 [37] S. Wetchacamal, S. Soponronnarit, T. Swasdisevi, S. Prachayawarakorn, J. Panich-ing-orn and S. Suthicharoenpanich,
 282 "Drying of High Moisture Paddy by Two-Dimensional Spouted Bed, Technique," *Kasetsart J. (Nat. Sci.)* vol. 35, pp. 93 –
 283 103, 2001.
- 284 [38] T. Abe and T.M. Afzal, "Thin-layer infrared radiation drying of rough rice," *Journal of Agricultural Engineering*
 285 *Research*, vol. 67, pp. 289–297, 1997.
- 286 [39] W.L. Kerr, S. Kerdpiroon and S. Devahastin, "Neural network prediction of physical property changes of dried carrot as a
 287 function of fractal dimension and moisture content," *Food Res. Int.*, vol. 39, pp. 1110-1118, 2006.
- 288 [40] Y.P. Lin, T.Y. Lee, J.H. Tsen and V.A.E. King, "Dehydration of yam slices using FIR-assisted freeze drying," *Journal of*
 289 *Food Engineering*, vol. 79, pp. 1295– 1301, 2007.
- 290 [41] Y. Hashimoto, "Applications of artificial neural networks and genetic algorithms to agricultural systems," *Comput*
 291 *Electron Agr.*, vol. 18, pp. 71–72, 1997.
- 292 [42] Z. Erbay, F. Icier, "A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling, and Experimental Results," in *Critical*
 293 *Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 50, Izmir Turkey, Taylor & Francis, 2009, pp. 441 — 464.
- 294 [43] Z. Berk, *Food process engineering and technology: Dehydration*, 2009, pp. 459 – 510.
- 295



Copyright© by the authors. Licensee TAETI, Taiwan. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY-NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

298

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



TSAE 2023

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 24

และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 16

วันที่ 26-27 กรกฎาคม พ.ศ. 2566

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

ตะวันออก

การพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรด

Development of an Infrared-Assisted Pneumatic Paddy Drying System

บุญทริกา สีลา^{1*}, กระวี ตรีอำรรค², เทวรัตน์ ตรีอำรรค¹

Boontarika Sila^{1*}, Krawee Treesamruk², Tawarat Treesamruk¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 30000

¹School of Agricultural Engineering, Suranaree University, Nakhon Ratchasima, 3000, Thailand

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 30000

²School of Mechanical Engineering, Suranaree University, Nakhon Ratchasima, 3000, Thailand

*Corresponding author: Tel: +66-8-9428-3424, E-mail: Boontarika.sila@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีการที่แตกต่างกันของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมเสริมความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และคุณภาพข้าวเปลือก ซึ่งการทดลองแบ่งออกเป็น 4 เงื่อนไข คือ 1) อบแห้งโดยใช้ลมร้อน 80°C 2) อบแห้งโดยใช้ลมร้อน 80°C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 50 วัตต์ 3) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 850 วัตต์ และ 4) การอบแห้งด้วยลมร้อน 80°C กำหนดให้ความเร็วลม และอัตราการป้อนคงที่ คือ 6 m.s⁻¹ และ 8.4 kg.m⁻¹ ตามลำดับ ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ความชื้นเริ่มต้น 23% w.b. อบครั้งละ 20 kg ผลทดลองพบว่า การอบแห้งโดยใช้ลมร้อนอุณหภูมิ 80°C มีค่าอัตราการอบแห้งสูงสุด การอบแห้งโดยใช้พลังงานความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดและการอบแห้งด้วยลมร้อน 80°C ค่าอัตราการอบแห้งยังไม่มี ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และการประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดเข้ามาเป็นแหล่งความร้อนเสริมสามารถช่วยลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ในกระบวนการอบแห้งได้ แต่อย่างไรก็ตามทั้ง 4 การทดลองยังไม่มี ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเมื่อพิจารณาคุณภาพข้าวพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อน 80°C มีค่า HRY(%) น้อยที่สุด

คำสำคัญ: ข้าวเปลือก, เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม, อินฟราเรด

Abstract

The objective of this research is to evaluate the drying rate and specific energy consumption and quality of paddy rice using different drying methods of the pneumatic paddy dryer using infrared radiation as a supplementary heat source. The experiment was conducted under four conditions: 1) drying using hot air at 80°C, 2) drying using hot air at 80°C combined with infrared radiation at 50 watts, 3) drying using infrared radiation at 850 watts, and 4) drying using hot air at 80°C with a constant air velocity and feeding rate of 6 m.s⁻¹ and 8.4 kg.m⁻¹ respectively. The study used 20 kg of paddy rice of Khao Dok Mali 105 variety with an initial moisture content of 23% w.b. The results showed that the highest drying rate was achieved using hot air at 80°C. There was no statistically significant difference in drying rate between drying using hot air at 80°C combined with infrared radiation and drying using hot air at 80°C. The use of infrared radiation as a supplementary heat source was able to reduce specific energy consumption during the drying process. However, there was no statistically significant difference in the quality of the rice among the four experiments at a confidence level of 95%. Finally, The drying using hot air at 80°C had the lowest HRY (%) value.

Keywords: Paddy, Pneumatic dryer, Infrared

1 บทนำ

ข้าว เป็นสินค้าเกษตรหลักของประเทศไทย ที่นิยมปลูกและบริโภค แต่อย่างไรก็ตามความชื้นข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวยังคงอยู่ในระดับที่สูงเกินมาตรฐาน ซึ่งมากกว่า 25% มาตรฐานแห้ง (Wetchacama et al., 2001) ซึ่งจำเป็นต้องมีเทคโนโลยีการอบแห้งเข้ามาช่วยลดความชื้นข้าวหลังการเก็บเกี่ยว โดยเมล็ดข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งควรมีระดับความชื้นสุดท้ายอยู่ที่ 14% มาตรฐานเปียก (Kuze and Celderwood, 1980) ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อช่วยยืดระยะเวลาการเก็บรักษา และป้องกันความเสียหายจากเชื้อราและแบคทีเรีย (Brennan, 2011)

ในปัจจุบันมีเครื่องอบแห้งจำนวนมากที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ลดความชื้นข้าวเปลือก ซึ่งหนึ่งในเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเปลือกคือ เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic dryer) ซึ่งใช้อยู่ทั่วไปในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย เช่น อบแห้งวัสดุที่เป็นเมล็ดในอุตสาหกรรมเคมี ยา และอาหาร (Rotstein and Crapiste, 1997) การอบแห้งอาศัยหลักการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างอากาศร้อนและวัสดุในขณะเคลื่อนที่ไปพร้อมกัน (Kudra, 2012) ซึ่งมีข้อดีหลายด้านคือ ใช้ต้นทุนในการสร้างและซ่อมบำรุงต่ำเนื่องจากมีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่น้อย (Strumillo and Kudra, 1986) แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมร้อนยังคงประสบปัญหาด้านความสิ้นเปลืองพลังงาน เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศและวัสดุอบแห้งไม่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากพลังงานส่วนมากสูญเสียไปกับอากาศเสีย (Exhaust air) (Kudra, 2012)

การประยุกต์ใช้พลังงานความร้อนร่วม เข้ามามีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมการอบแห้ง ซึ่งรังสีอินฟราเรดเป็นหนึ่งในทางเลือกที่นิยมใช้เข้ามาเป็นแหล่งพลังงานความร้อนเสริมในระบบอบแห้งผลิตภัณฑทางการเกษตร ซึ่งมีข้อดีหลายประการคือ รังสีอินฟราเรดสามารถทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุได้โดยตรง โดยไม่สูญเสียพลังงานให้กับสิ่งแวดล้อม ทำให้ใช้พลังงานในการอบแห้งต่ำ และช่วยรักษาคุณภาพของวัสดุหลังการอบแห้งได้อีกด้วย (Majumdar, 1995) มีนักวิจัยหลายท่านได้ประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรด เข้ามาเป็นแหล่งความร้อนเสริมในการอบแห้งผลิตภัณฑทางการเกษตรหลายประเภท เช่น แครอท (Geng et al., 2022) หัวหอม (Praveen-Kumar et al., 2006) พุทธา (Chen et al., 2015) เป็นต้น

คณะผู้วิจัยจึงสนใจศึกษา และปรับปรุงและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม โดยการใช้รังสีอินฟราเรดเข้ามาเป็นแหล่งความร้อนร่วมกับลมร้อน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินวิธีการอบแห้งข้าวเปลือกที่แตกต่างกันที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรด

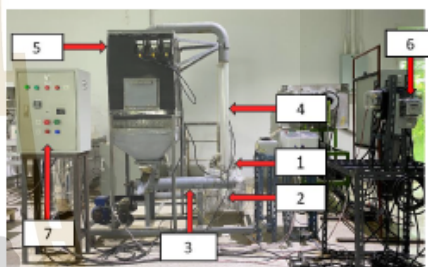


Figure 1 The Infrared-Assisted Pneumatic Paddy Drying System

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรด แสดงดัง figure 1 โดยหลักการการทำงานของเครื่องเริ่มจากตั้งค่าอุณหภูมิอบแห้ง และความถี่ของมอเตอร์เกียร์วป้อนและพัดลมความดันสูงจากตู้ control (หมายเลข 7) จากนั้นพัดลมความดันสูงยี่ห้อ HITACHI รุ่น VORTEX ขนาด 1.5 kW (หมายเลข 1) ดูดอากาศสิ่งแวดล้อมจากภายนอกเข้ามาเพิ่มอุณหภูมิที่ฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 3 kw (หมายเลข 2) จากนั้นอากาศอุณหภูมิสูงเคลื่อนที่ออกจากฮีตเตอร์ ไหลเข้าสู่ท่ออบแห้งที่ทำจากท่อคริลิคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 74 mm ยาว 1 เมตร ซึ่งภายในมีหลอดอินฟราเรดขนาด 1 kw ติดตั้งอยู่กลางท่อ (หมายเลข 4) ในขณะที่กั้นกระบวนการอบแห้งเริ่มจากเมล็ดข้าวที่พักอยู่ในถังเก็บข้าวขนาด 0.40 x 0.50 x 0.80 m³ (หมายเลข 5) ถูกสุกรั่วลำเลียง (หมายเลข 3) เพื่อไปสัมผัสกับอากาศอุณหภูมิสูงที่ไหลมาจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าบริเวณทางเข้าท่ออบแห้ง จากนั้นเมล็ดข้าวจะถูกอากาศร้อนความเร็วสูงพัดพาขึ้นไปแลกเปลี่ยนความร้อนที่บริเวณท่ออบแห้ง และไหลเวียนกลับมากักที่ถังพักข้าว จากนั้นจะถูกสุก

รูปร่างไปอบแห้งอีกครั้งเป็นวงจรรอบแห้งจนได้ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการนั้นคือ 14% wb.

2.2 วิธีการทดสอบการอบแห้ง

ในงานวิจัยนี้ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ความชื้นเริ่มต้น 23% w.b. อบแห้งครั้งละ 20 kg จนถึงความชื้นสุดท้าย 14% w.b. กำหนดความเร็วลมร้อนคงที่ 6 m.s⁻¹ และอัตราการป้อนคงที่ 0.4 kg.m⁻¹ โดยทำการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกทั้งหมด 4 เงื่อนไข ดังนี้ 1) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อน 80°C 2) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อน 80°C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 50 วัตต์ 3) การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรด 850 วัตต์ และ 4.) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อน 80°C และหลอดฮาโลเจน 3 ขั้ว จากนั้นทำการประเมินอัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และคุณภาพข้าวหลังการอบแห้งของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

2.3 การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

1) การประเมินอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการระเหยน้ำออกจากเมล็ดข้าวต่อระยะเวลาการอบแห้ง ดังสมการที่ (1)

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t} \quad (1)$$

โดยที่ DR = อัตราการอบแห้ง (kg_{water}/h)
 W_i = น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น (g)
 W_f = น้ำหนักข้าวเปลือกหลังอบแห้ง (g)

2) ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ซึ่งวัดจาก 4 อุปกรณ์ ประกอบด้วย ฮีตเตอร์ไฟฟ้า พัดลมแรงดันสูง มอเตอร์ แพลตอินฟราเรด ตามลำดับ โดยคำนวณหาค่า SEC จากสมการที่ (2)

$$SEC = \frac{3.6 E}{W_i - W_f} \quad (2)$$

โดยที่ SEC = ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg water)
 E = พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในระบบอบแห้ง (kWh)

3) การประเมินคุณภาพข้าวจากค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น HRY(%) และ ดัชนีความขาว (Whiteness index, WI)

โดยใช้วิธีเปรียบเทียบกับตัวอย่างข้าวจากการทดลองอบแห้งทั้ง 4 เงื่อนไขกับตัวอย่างควบคุมที่ทำการศึกษาให้แห้งจากการนำไปผึ่งในที่ร่ม

3 ผลและวิจารณ์

1) ผลการประเมินอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR)

จาก Figure 2 พบว่าการอบแห้งข้าวเปลือกโดยการใช้อุณหภูมิ 80 °C มีค่าอัตราการอบแห้งสูงสุด คือ 0.854±0.067 kg_{water}/h ซึ่งจะสังเกตได้ว่าการใช้อุณหภูมิการอบแห้งที่สูงส่งผลให้อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นอุณหภูมิการอบแห้งจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง(Sharada, 2013) และนอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของรังสีอินฟราเรดที่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง จะเห็นว่า วิธีการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อน 80°C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 50 วัตต์ มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 80°C เพียงอย่างเดียว

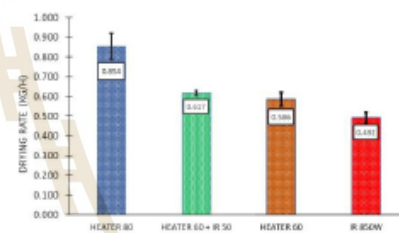


Figure 2 The Drying rate of various test conditions to 14%WB

Table 1 The Drying rate of various test conditions

Condition	DR (kg _{water} /h)
HEATER 80°C	0.854 ± 0.067 ^a
HEATER 80°C	0.586 ± 0.035 ^{abc}
HEATER 80°C + IR 50 W	0.617 ± 0.011 ^{ab}
IR 850 W	0.492 ± 0.027 ^c

หมายเหตุ a,b,c ตัวอักษรที่กำกับค่าในตารางนี้แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงค่าที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (p<0.05).

โดยมีอัตราการอบแห้งอยู่ที่ 0.617±0.011 และ 0.586±0.035 kg_{water}/h ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้ว่าการอบแห้งโดยการให้พลังงานความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดสามารถช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งได้ (Aboud et al., 2019) แต่อย่างไรก็ตาม

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติจาก Table 1 พบว่า วิธีการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อน 60°C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 50 วัตต์ และการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C ยังไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% อันเนื่องมาจากความเข้มของรังสีอินฟราเรดที่ใช้เสริมความร้อนยังอยู่ในระดับที่ต่ำทำให้เกิดการแผ่รังสีได้ไม่เต็มที่เท่าที่ควร และนอกจากนี้จากการทดลองอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียวที่ 850 W พบว่าอัตราการอบแห้งอยู่ในระดับที่ต่ำ คือ 0.492 ± 0.027 kg_{moisture}/h. ซึ่งมีสาเหตุมาจากปรากฏการณ์ (Cooling effect) ซึ่งหลอดรังสีอินฟราเรดที่สัมผัสกับลมร้อนเกิดการขยายความร้อนขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ทำให้กระบวนการแผ่รังสีเกิดได้ไม่เต็มที่ อันเนื่องมาจากการใช้ความเร็วลมในการอบแห้งที่ค่อนข้างสูง (Sharma et al., 2005)

2) ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) จาก Figure 3 พบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อน 80°C มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ต่ำที่สุด คือ 13.236 ± 1.370 MJ/kg_{moisture} ทั้งนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากการใช้อุณหภูมิการอบแห้งที่สูงส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูง และส่งผลทำให้ระยะเวลาสั้นลงในการอบแห้งจนถึงความชื้นสุดท้าย 14%WB จึงนำไปสู่การใช้พลังงานที่ต่ำลงในกระบวนการอบแห้ง ซึ่งต่ำกว่าการอบแห้งด้วยวิธีอื่นที่ใช้อุณหภูมิการอบแห้งต่ำกว่า และนอกจากนี้เมื่อพิจารณาความ

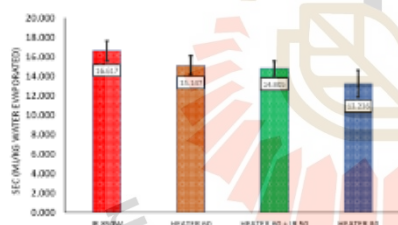


Figure 3 The Specific energy consumption (SEC) of drying to 14%WB

Table 2 The Specific energy consumption (SEC) of various test conditions

Condition	SEC (MJ/kg _{moisture})
HEATER 80°C	$13.236 \pm 1.370^*$
HEATER 60°C	$15.147 \pm 0.993^*$

HEATER 80°C + IR 50 W	$14.805 \pm 0.771^*$
IR 850 W	$16.617 \pm 1.043^*$

หมายเหตุ 3.9x3 ค่าอีกสองยกกำลังสามอังกฤษที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึงค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$).

สิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ของวิธีการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดในกระบวนการอบแห้งพบว่า การอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรด 850 วัตต์ มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ค่อนข้างสูง คือ 16.617 ± 1.043 MJ/kg_{moisture} และเมื่ออบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 50 วัตต์ พบว่าสามารถลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลงได้อยู่ที่ 14.805 ± 0.771 MJ/kg_{moisture} ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดเข้ามาเป็นแหล่งความร้อนเสริมสามารถช่วยลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในกระบวนการอบแห้งได้ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติจาก Table 2 พบว่า วิธีอบแห้งทั้ง 4 เงื่อนไขการทดลอง ยังไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4) การประเมินคุณภาพข้าวจากค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวคืน HRY(%) และ ดัชนีความขาว (Whiteness index, WI) จาก Table 1 และ Table 2 ตามลำดับ พบว่าค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวคืน HRY(%) ของการทดลองการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60 °C การอบแห้งด้วยลมร้อน 60 °C ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด 50 วัตต์ การอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด 850 วัตต์ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม และสังเกตได้ว่าการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 80°C มีค่า HRY(%) น้อยที่สุด คือ 29.429 ± 0.019 % ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้อุณหภูมิการอบแห้งที่สูงซึ่งทำให้ในกระบวนการอบแห้งเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างรวดเร็วอันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเมล็ดข้าวและอากาศร้อน จึงส่งผลทำให้เกิดความเค้นขึ้นภายในเมล็ดข้าว ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดรอยร้าวสะสมภายในเมล็ด (Gunasekaran et al., 1985) ส่งผลให้เกิดการแตกหักระหว่างการอบแห้ง นอกจากนี้พิจารณาผลของค่าดัชนีความขาว พบว่าการทดลองการอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองค่าดัชนีความขาว (Whiteness index, WI) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าดัชนีความขาวของข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง

Table 3 The head rice yield of various test conditions

Condition	HRY (%)
HEATER 80°C	29.429 ± 0.019 ^b
HEATER 60°C	41.175 ± 0.019 ^a
HEATER 60°C + IR 50 W	39.646 ± 0.025 ^a
IR 850 W	41.627 ± 0.012 ^a
QUALITY CONTROL SAMPLE	44.425 ± 0.010 ^a

หมายเหตุ: a,b,c ตัวอักษรบ่งชี้กำลังทางสถิติที่แตกต่างกันโดยวิธีที-เทสต์ในข้ออื่นนี้ด้วย
หมายเหตุ: ค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

Table 4 The Whiteness index of various test conditions

Condition	WI
HEATER 80°C	37.133 ± 0.321 ^a
HEATER 60°C	38.733 ± 0.379 ^a
HEATER 60°C + IR 50 W	38.967 ± 0.416 ^a
IR 850 W	38.633 ± 0.551 ^a
QUALITY CONTROL SAMPLE	39.100 ± 0.100 ^a

หมายเหตุ: a,b,c ตัวอักษรบ่งชี้กำลังทางสถิติที่แตกต่างกันโดยวิธีที-เทสต์ในข้ออื่นนี้ด้วย
หมายเหตุ: ค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

4 สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่ออัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่เสริมความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด การทดลองอบแห้งแบ่งออกเป็น 4 เงื่อนไข สามารถสรุปได้ว่า การอบแห้งข้าวเปลือกโดยการใช้ลมร้อนอุณหภูมิ 80°C มีค่าอัตราการอบแห้งสูงสุด คือ 0.854±0.067 kg_{fresh}/h นอกจากนี้การอบแห้งโดยการใช้พลังงานความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C เพียงอย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตามทั้ง 2 การทดลองยังไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และการประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดเข้ามาเป็นแหล่งความร้อนเสริมสามารถช่วยลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในกระบวนการอบแห้งได้ แต่อย่างไรก็ตามทั้ง 4 การทดลองยังไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และสุดท้ายการประเมินคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้งพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 80°C มีค่า HRY(%) น้อยที่สุดคือ 29.429 ± 0.019% และ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ยังไม่ส่งผลกระทบต่อค่าดัชนีความขาวของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลอง

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่เอื้อต่อสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัยในครั้งนี้

6 เอกสารอ้างอิง

- Aboud, S.A., Altemimi, A.B., Al-Hilphy, A.R.S., Yi-Chen L., Cacciola, F., 2019. A Comprehensive Review on Infrared Heating Applications in Food Processing. *Molecules* 24, 4125-4145
- Brennan, J.G. 2011. Evaporation and dehydration. In: Brennan, J.G., Grandison, A.S. (Eds), *Food Processing Handbook* (2nd ed., pp. 77 – 130). Weinheim, Germany: Wiley-VCH.
- Chen, Q., Bi, J., Wu, X., Yi, J., Zhou, L., Zhou, Y. 2015. Drying kinetics and quality attributes of jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) slices dried by hot-air and short- and medium-wave infrared radiation. *LWT - Food Science and Technology* 64, 759–766.
- Geng, Z., Torki, M., Kaveh, M., Beigi, M., Yang, X. 2022. Characteristics and multi-objective optimization of carrot dehydration in a hybrid infrared hot air dryer. *LWT-Food Science and Technology* 172.
- Gunasekaran, S., Deshpande, S.S., Paulsen, M.R., Shove, G.C. 1985. Size characterization of stress cracks in corn kernels. *Transactions of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers (USA)* 28(5), 1668-1672.
- Krudra, T. 2012. Energy Performance of Convective Dryers. *Drying Technology: An International Journal* 30(11-12), 1190-1198.
- Kunze, O. R., Caldenwood, D. L. 1980. *Systems for Drying Rice, Drying and Storage of Agricultural Crops*. AVI Pub. Co. Ltd., Connecticut, USA.
- Mujumdar, A.S. 1995. *Handbook of industrial drying*. (1, 2nd ed.). New York: Marcel Dekker.
- Praveen-Kumar, D.G., Umesh Hebbar, H., Ramesh, M.N. 2006. Suitability of thin layer models for infrared-hot air-drying of onion slices. *LWT (Food Science and Technology)* 39, 700-705.
- Rotstein, E., Crapiste, G. H. 1997. Design and performance evaluation of dryers. In: Valentas, K. J.,

- Singh, R. P., and Rotstein, E. (Eds.), Handbook of food engineering practice (pp. 121-162). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Sharada, S. 2013. Studies on effect of various operating parameters and foaming agents – drying of fruits and vegetables. In: *Int. J. Mod. Eng. Res* 3(3), 1512-1519.
- Sharma, G.P., Verma, R.C., Pathare, P., 2006. Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of Food Engineering* 17(3), 286-286.
- Strumillo, C., Kudra, T. 1986. *Drying: Principles, Application and Design*. Gordon and Breach Science Publishers, New York.
- Wetchacama, S., Soponronnarit, S., Swasdievi, T., Prachayawarakorn, S., Panich-ing-om, J., Suthicharoenpanich, S. 2001. Drying of High Moisture Paddy by Two-Dimensional Spouted Bed Technique. *Kaetsart J. (Nat. Sci.)* 35, 93 – 103.





การประชุมวิชาการวิศวกรรมอาหารแห่งชาติ ครั้งที่ 8

ขอมอบใบประกาศนียบัตรนี้เพื่อแสดงว่า

บุญทริกา ศิลา และ เทวรัตน์ ตรีอำรรค

การอบแห้งลำไยด้วยวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน

ได้เข้าร่วมการนำเสนอผลงาน ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมอาหารแห่งชาติ ครั้งที่ 8
จัดโดย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ ให้ไว้ ณ วันที่ 4 เมษายน 2565


รศ.ดร.จตุรภัทร วาฤกษ์
 ประธานงาน FENETT 2022
 สาขาวิศวกรรมอาหาร
 มหาวิทยาลัยแม่โจ้


Assoc. Prof. Dr. Farah Saleena Taip
 Co-Chair, FENETT 2022
 Dept of Process & Food Eng'g
 Universiti Putra Malaysia


รศ.จักรพงษ์ พิมพ์นิล
 คณบดีคณะวิศวกรรมและ
 อุตสาหกรรมเกษตร
 มหาวิทยาลัยแม่โจ้












CERTIFICATE OF ACHIEVEMENT

This certificate is awarded to

**Saksit Sonsomboonsuk, Boontarika sila, Tiraporn Junyusen, Pornpimol Moolkaew,
and Payungsak Junyusen**

**Evaluation of bioactive compounds and textural alteration of cooked germinated brown rice
during storage**

for their invaluable presentation/demonstration awarded a **SILVER MEDAL: International Session - Graduate
Track in Food Process Engineering Theme** during the FENETT 2022 Online International & National Conference
held in Chiang Mai, Thailand on April 4, 2022.


Assoc. Prof. Dr. Jaturapatr Varith
 Chair, FENETT 2022
 Food Engineering Program
 Maejo University


Assoc. Prof. Dr. Farah Saleena Taip
 Co-Chair, FENETT 2022
 Dept of Process & Food Eng'g
 Universiti Putra Malaysia


Assoc. Prof. J. Phumphimol
 Dean, Faculty of Engineering and
 Agro-Industry
 Maejo University










ประวัติผู้เขียน

นางสาวบุญทริกา ศิลา เกิดเมื่อวันที่ 3 มีนาคม พ.ศ. 2539 สำเร็จการศึกษาสำเร็จการศึกษา
ชั้นประถมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 จากโรงเรียนบ้านสนวน ศิริมงคลวิทยา และมีธยมศึกษาตอนต้นและตอน
ปลายจากโรงเรียนบุรีรัมย์พิทยาคม จังหวัดบุรีรัมย์ เมื่อปีการศึกษา 2558 และสำเร็จการศึกษาระดับ
ปริญญาตรี (เกียรตินิยมอันดับ 1) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2562 ต่อมาได้เข้าทำงานที่บริษัท Daikin Industries (Thailand)
Ltd. ตำแหน่ง R&D Engineer และในภาคการศึกษาที่ 1 ปีการศึกษา 2564 ได้รับทุนกิตติบัณฑิต
สนับสนุนเป็นระยะเวลา 2 ปี เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทหลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบ
กระบวนการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในระหว่างการศึกษาได้รับมอบหมายให้เป็นผู้ช่วยสอนใน
รายวิชา 521355 Agricultural Machinery Engineering Laboratory, 521356 Agricultural
Engineering Laboratory I, 521357 Agricultural Engineering Laboratory II, 521412
Agricultural and Food Engineering Laboratory II, และรายวิชา 521423 Agricultural Survey
ซึ่งการฝึกสอน ทำให้ได้รับประสบการณ์ใหม่ๆ และได้รับความรู้ใหม่ๆด้านวิศวกรรมเกษตร สามารถ
นำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้และต่อยอดในงานวิจัยได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี