

การอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีอินฟราเรดใน  
แนวรัศมี



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2560

**CONTINUOUS FLOW PADDY DRYING WITH  
INFRARED RADIAL RADIATION  
TECHNIQUE**



**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 2017**

## การอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีอินฟราเรดในแนวรัศมี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร. พงศ์ศักดิ์ จุลยุเสนา)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. กระวี ตรีอำรรค)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร. เทวรัตน์ ตรีอำรรค)

กรรมการ

(อ. ดร. สามารถ บุญอาจ)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ปรีดา ปราบกุ่ม)

กรรมการ

(ศ. ดร. สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล

(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ณัฐพล แซ่ลิ้ม : การอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีอินฟราเรด  
ในแนวรัศมี (CONTINUOUS FLOW PADDY DRYING WITH INFRARED  
RADIAL RADIATION TECHNIQUE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์  
ดร. กระวี ตรีอำนรรค, 134 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหล  
ต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีอินฟราเรดในแนวรัศมี เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกต้นแบบที่พัฒนาขึ้น  
ประกอบด้วยห้องอบแห้งทรงกระบอก 2 ชั้น สูง 1 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกระบอกชั้นในซึ่ง  
ผลิตจากกระจกใสมีค่า 26.5 เซนติเมตร ทรงกระบอกชั้นนอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 29.5 เซนติเมตร  
ผลิตจากเหล็กตะแกรงเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 มิลลิเมตร ที่จุดศูนย์กลางทรงกระบอก  
ติดตั้งฮีตเตอร์อินฟราเรดไฟฟ้าขนาด 1,200 วัตต์ ด้านบนติดตั้งฮอปเปอร์ ด้านล่างติดตั้งชุดควบคุม  
การไหลข้าวเปลือกและพัดลมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์ ประเมินสมรรถนะของเครื่อง  
อบแห้งด้วยอัตราการอบแห้ง ค่าความชื้นเปลือกพลังงานจำเพาะ และคุณภาพข้าวด้วยเปอร์เซ็นต์ข้าว  
ต้นและดัชนีความขาว โดยการอบแห้งข้าวเปลือก 15 กิโลกรัม ที่มีความชื้นเริ่มต้น 23-26 เปอร์เซ็นต์  
มาตรฐานเปียก ด้วยสภาวะการอบแห้งที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 และ 2.150 ลูกบาศก์เมตรต่อ  
นาที่ และอัตราการไหลของข้าวเปลือก 0.837 1.228 1.875 และ 2.308 กิโลกรัมต่อนาที่ ผลจากการ  
ทดสอบพบว่าที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที่ และอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก  
1.875 กิโลกรัมต่อนาที่ เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้ง  
ข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้น เนื่องจากที่สภาวะนี้เป็นสภาวะการอบแห้งที่มี  
ประสิทธิภาพสูงสุดโดยมีอัตราการอบแห้ง 1.1397 กิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมง ค่าความชื้นเปลือกพลังงาน  
จำเพาะ 3.7920 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำ และมีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น 39.09 เปอร์เซ็นต์ และค่าดัชนี  
ความขาวเท่ากับ 38.03

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา ณัฐพล แซ่ลิ้ม  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร. กระวี ตรีอำนรรค  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. นพ. นพ.

NUTTAPHON SAELIM : CONTINUOUS FLOW PADDY DRYING WITH  
INFRARED RADIAL RADIATION TECHNIQUE. THESIS ADVISOR :

ASST. PROF. KRAWEE TREEAMNUK, D.Eng., 134 PP.

PADDY DRYER/INFRARED/RADIAL RADIATION

The objective of this research was to design and develop a continuous flow paddy dryer with infrared radial radiation technique. The prototype of dryer consists of two concentric circular cylinders, which the paddy drying chamber is height of 1 m. The inner cylinder has diameter of 26.5 cm made from glasses and the outer cylinder has diameter of 29.5 cm made from perforated (1.75 mm) steel sheet. A 1,200 W electric infrared heater was installed at the center of cylinders. A hopper was installed on the top of the chamber while blower 24 VDC and paddy flow controller were installed at bottom of chamber. The performance of the dryer in terms of specific energy consumption (SEC), drying rate (DR) and quality of paddy i.e. head rice yield (HRY) and whiteness index (WI) were evaluated by drying 15 kg of paddy with initial moisture content of 23-26%<sub>wb</sub> by using the drying conditions of 1.075 and 2.150 m<sup>3</sup>/min of air flow rate and 0.837, 1.228 1.875 and 2.308 kg/min of paddy flow rate. The results indicated that the most suitable drying condition was 1.075 m<sup>3</sup>/min of air flow rate and 1.875 kg/min of paddy flow rate because it gave the highest of efficiency of drying paddy process with DR of 1.1397 kg<sub>water</sub>/h, SEC of 3.7920 MJ/kg<sub>water</sub>, HRY of 39.0933% and WI of 38.0333.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature Nuttaphon Saelim

Advisor's Signature Krawee Treeamnuk

Co-Advisor's Signature T. Treeamnuk

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่มีความเมตตาให้การอบรมสั่งสอน ชี้แนะในการทำการศึกษาวิจัย อีกทั้งยังสนับสนุนเงินทุนสำหรับการทำงานวิจัย และการเดินทางไปร่วมงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ ตลอดจนการให้คำปรึกษา ชี้แนะ และช่วยแก้ไขตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำแนะนำในกระบวนการทำปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย อีกทั้งยังช่วยชี้แนะ และช่วยแก้ไขบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติและเอกสารเข้าร่วมการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ รวมไปถึงเนื้อหาวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พวงศัคดี จุลยุเสณ ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และช่วยชี้แนะส่วนที่ผิดพลาดในเนื้อหาวิทยานิพนธ์ เพื่อให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

อาจารย์ ดร.สามารถ บุญอาจ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ตรวจทาน และชี้แนะส่วนที่ผิดพลาดในเนื้อหาวิทยานิพนธ์ เพื่อให้มีความถูกต้องโดยสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริดา ปรากฏมาก กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำชี้แนะเกี่ยวกับการทำงานวิจัยนี้ อีกทั้งช่วยตรวจทานและชี้แนะส่วนที่ผิดพลาดในเนื้อหาวิทยานิพนธ์ เพื่อให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการศึกษาระดับมหาบัณฑิต รวมถึงบุคลากรสำนักวิศวกรรมศาสตร์และบุคลากรสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้คำแนะนำในเรื่องการดำเนินการเอกสารต่าง ๆ

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับผู้วิจัยตลอดมา และที่สำคัญที่สุดขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่ง ที่อบรมสั่งสอน ส่งเสริมการศึกษา ให้การสนับสนุนในการทำวิจัยเป็นอย่างดี และให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา อีกทั้งขอขอบคุณนางสาวสุภาวดี สังข์ในเมือง และเพื่อน ๆ ที่ให้คำแนะนำ เตือนสติช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจให้ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ณัฐพล แซ่ลิ่ม

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>3</b>
2.1 บทนำ.....	3
2.2 ข้าว.....	3
2.2.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของข้าว .....	3
2.2.2 การแบ่งประเภทของข้าว.....	4
2.3 การอบแห้ง.....	5
2.3.1 การอบแห้ง.....	5
2.3.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง .....	7
2.3.3 ความชื้นวัสดุ.....	7
2.4 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือก.....	8
2.4.1 เครื่องลดความชื้นแบบข้าวเปลือกบรรจุในกระสอบ.....	8
2.4.2 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบกระบะ.....	9

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.3	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบถังหมุนเวียน .....	10
2.4.4	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบคอตัมน์ .....	10
2.4.5	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบเมล็ดไหลคลุกเคล้า .....	12
2.4.6	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบโรตารี .....	13
2.4.7	เครื่องลดความชื้นแบบฟลูอิดไดซ์-เบด .....	13
2.4.8	เครื่องลดความชื้นแบบสเปาเต็คเบด .....	14
2.4.9	เครื่องอบอินฟราเรด เครื่องอบไมโครเวฟ .....	15
2.5	การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง .....	15
2.5.1	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง .....	15
2.5.2	ประสิทธิภาพในการอบแห้ง .....	16
2.5.3	คุณภาพการสี (milling quality) .....	17
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	18
<b>3</b>	<b>วิธีการดำเนินการวิจัย .....</b>	<b>21</b>
3.1	ตัวอย่างวัสดุอบแห้ง .....	21
3.1.1	ข้าวเปลือกสดที่ใช้ในการทดสอบ .....	21
3.1.2	ข้าวเปลือกที่ผ่านการปรับความชื้นก่อนการทดสอบ .....	22
3.2	เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้น .....	23
3.3	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	25
3.3.1	เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่อง ด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมีที่พัฒนาขึ้น .....	25
3.3.2	เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพืช .....	25
3.3.3	เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลพิกัด 2,200 g .....	26
3.3.4	เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลพิกัด 150 kg .....	26
3.3.5	แอนิเมเตอร์ .....	27
3.3.6	วัตต์มิเตอร์ .....	27
3.3.7	Thermocouple Type K .....	28



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.8 นาฬิกาจับเวลา.....	28
3.3.9 เครื่องสีข้าวระบบลูกยาง .....	29
3.3.10 เครื่องขัดข้าวข้าว .....	29
3.3.11 เครื่องแยกเมล็ดข้าวหัก (ตะแกรงกลมขาว).....	30
3.3.12 เครื่องวัดความขาว.....	30
3.3.13 ห้องเย็น .....	31
3.4 การฝักรอบแห้งข้าวเปลือกเพื่อใช้เป็นชุดควบคุมคุณภาพ .....	31
3.5 การทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือก .....	32
3.5.1 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก ของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรด แบบไหลต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้น .....	32
3.5.2 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลอากาศ ของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรด แบบไหลต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้น .....	33
3.6 การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง .....	33
3.6.1 พฤติกรรมการอบแห้ง .....	33
3.6.2 อัตราการอบแห้ง .....	34
3.6.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ .....	34
3.6.4 เปอรเซ็นต์ข้าวคืน.....	35
3.6.5 ดัชนีความขาว .....	38
<b>4 ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผล .....</b>	<b>40</b>
4.1 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก ของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรด แบบไหลต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้น.....	40
4.1.1 พฤติกรรมการอบแห้ง .....	40
4.1.2 อัตราการอบแห้ง .....	44
4.1.3 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ .....	45

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2	การศึกษาอิทธิพลของอัตราการใช้พลังงาน ของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรด แบบไหลต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้น.....	49
4.2.1	พฤติกรรมการอบแห้ง .....	49
4.2.2	อัตราการใช้พลังงาน .....	53
4.2.3	ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ .....	54
4.3	ผลการประเมินคุณภาพตัวอย่างทดสอบหลังการอบแห้ง.....	57
4.3.1	เปอร์เซ็นต์ข้าวคั่ว .....	57
4.3.2	ดัชนีความขาว .....	58
5	บทสรุป .....	61
5.1	สรุปผลงานวิจัย.....	61
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	61
	รายการอ้างอิง.....	62
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก ตารางผลการทดลอง.....	64
	ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ .....	94
	ภาคผนวก ค การออกแบบเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น .....	100
	ภาคผนวก ง แบบเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น .....	108
	ภาคผนวก จ บทความที่ตีพิมพ์ .....	112
	ประวัติผู้เขียน .....	134

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ การอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m <sup>3</sup> /min .....	47
4.2 อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ การอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m <sup>3</sup> /min .....	47
4.3 อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ การอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 และ 2.150 m <sup>3</sup> /min .....	56
4.4 เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นของการอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m <sup>3</sup> /min .....	58
4.5 ค่าดัชนีความขาวของการอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m <sup>3</sup> /min .....	60
ก1 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m <sup>3</sup> /min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 2.308 kg/min การทดลองที่ 1 .....	65
ก2 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m <sup>3</sup> /min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 2.308 kg/min การทดลองที่ 2 .....	66
ก3 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m <sup>3</sup> /min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 2.308 kg/min การทดลองที่ 3 .....	67
ก4 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m <sup>3</sup> /min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 2.308 kg/min .....	68
ก5 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m <sup>3</sup> /min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.875 kg/min การทดลองที่ 1 .....	69
ก6 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m <sup>3</sup> /min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.875 kg/min การทดลองที่ 2 .....	70





## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก26 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m <sup>3</sup> /min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.228 kg/min การทดลองที่ 2 .....	87
ก27 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m <sup>3</sup> /min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.228 kg/min การทดลองที่ 3 .....	88
ก28 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m <sup>3</sup> /min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.228 kg/min .....	89
ก29 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m <sup>3</sup> /min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 0.837 kg/min การทดลองที่ 1 .....	89
ก30 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m <sup>3</sup> /min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 0.837 kg/min การทดลองที่ 2 .....	90
ก31 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m <sup>3</sup> /min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 0.837 kg/min การทดลองที่ 3 .....	90
ก32 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m <sup>3</sup> /min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 0.837 kg/min .....	91
ก33 ผลการทดสอบคุณภาพหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรด ที่พัฒนาขึ้นที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m <sup>3</sup> /min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 2.308 kg/min.....	91
ก34 ผลการทดสอบคุณภาพหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรด ที่พัฒนาขึ้นที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m <sup>3</sup> /min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.875 kg/min.....	92

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก35 ผลการทดสอบคุณภาพหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรด ที่พัฒนาขึ้นที่อัตราการไหลอากาศ $1.075 \text{ m}^3/\text{min}$ ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก $1.228 \text{ kg}/\text{min}$ .....	92
ก36 ผลการทดสอบคุณภาพหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรด ที่พัฒนาขึ้นที่อัตราการไหลอากาศ $1.075 \text{ m}^3/\text{min}$ ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก $0.837 \text{ kg}/\text{min}$ .....	93
ก37 ผลการทดสอบคุณภาพของชุดควบคุมคุณภาพ.....	93
ค1 ผลการทดสอบหาอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก.....	106
ค2 อุณหภูมิอากาศหลังผ่านฮีตเตอร์อินฟราเรด.....	107

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ส่วนประกอบของเมล็ดข้าว ..... 3
2.2	การลดลงของความชื้นวัสดุ..... 6
2.3	เครื่องลดความชื้นแบบข้าวเปลือกบรรจุในกระสอบ ..... 9
2.4	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบกระเบะ..... 9
2.5	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบถังหมุนเวียน..... 10
2.6	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบคอลัมน์ชนิดข้าวเปลือกไม่ไหลคลุกเคล้า..... 11
2.7	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบคอลัมน์ชนิดข้าวเปลือกไหลคลุกเคล้า..... 11
2.8	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบเมล็ดไหลคลุกเคล้า..... 12
2.9	เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบโรตารี..... 13
2.10	เครื่องลดความชื้นแบบฟลูอิดไดซ์-เบด..... 14
2.11	เครื่องลดความชื้นแบบสเปาเต็ดเบด..... 14
3.1	ตัวอย่างเมล็ดข้าวเปลือกสดที่ใช้ในการอบแห้ง..... 21
3.2	วัดความชื้นของข้าวเปลือกที่จะนำมาปรับความชื้น..... 22
3.3	เพิ่มความชื้นให้ข้าวเปลือกโดยการพรมน้ำให้ทั่ว..... 23
3.4	ภาพแสดงแผนผัง โครงสร้างของเครื่องอบแห้ง..... 24
3.5	เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้น..... 24
3.6	เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพืช..... 25
3.7	เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลพิกัด 2,200 g..... 26
3.8	เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลพิกัด 150 kg..... 26
3.9	แอนิโมมิเตอร์..... 27
3.10	วัตต์มิเตอร์..... 27
3.11	Thermocouple Type K..... 28
3.12	นาฬิกาจับเวลา..... 28
3.13	เครื่องสีข้าวระบบลูกยาง..... 29
3.14	เครื่องขัดขาวข้าว..... 29



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 เครื่องแยกเมล็ดข้าวหัก(ตะแกรงกลมขาว) .....	30
3.16 เครื่องวัดความขาว .....	30
3.17 ห้องเย็น .....	31
3.18 ผังข้าวเปลือกในที่รม .....	31
3.19 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบ 250 g .....	32
3.20 การวัดความชื้นตัวอย่างทดสอบ .....	33
3.21 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบ 125 g .....	35
3.22 นำตัวอย่างทดสอบมากะเทาะเปลือก .....	36
3.23 ชั่งน้ำหนักข้าวกล้อง.....	36
3.24 ขัดข้าวข้าวกล้องด้วยเครื่องขัดขาว.....	37
3.25 ข้าวตันที่ได้จากการแยกด้วยเครื่องแยกเมล็ดข้าวหัก.....	37
3.26 ข้าวหักที่ได้จากการแยกด้วยเครื่องแยกเมล็ดข้าวหัก.....	38
3.27 ชั่งน้ำหนักข้าวตันที่ได้จากการแยกด้วยเครื่องแยกเมล็ดข้าวหัก.....	38
3.28 วัดค่าดัชนีความขาวด้วยเครื่องวัดความขาว .....	39
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้อบแห้ง ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m <sup>3</sup> /min .....	41
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้อบแห้ง ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m <sup>3</sup> /min .....	42
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้อบแห้ง ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m <sup>3</sup> /min .....	43
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้อบแห้ง ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m <sup>3</sup> /min .....	43
4.5 อัตราการอบแห้งของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหล ชั้นข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m <sup>3</sup> /min .....	44
4.6 อัตราการอบแห้งของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหล ชั้นข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m <sup>3</sup> /min .....	45

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งข้าวเปลือก ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ $1.075 \text{ m}^3/\text{min}$ .....	46
4.8 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งข้าวเปลือก ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ $2.150 \text{ m}^3/\text{min}$ .....	46
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้ออบแห้ง ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก $2.308 \text{ kg}/\text{min}$ .....	49
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ออบแห้ง ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก $2.308 \text{ kg}/\text{min}$ .....	50
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้ออบแห้ง ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก $1.875 \text{ kg}/\text{min}$ .....	50
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ออบแห้ง ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก $1.875 \text{ kg}/\text{min}$ .....	51
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้ออบแห้ง ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก $1.228 \text{ kg}/\text{min}$ .....	51
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ออบแห้ง ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก $1.228 \text{ kg}/\text{min}$ .....	52
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้ออบแห้ง ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก $0.837 \text{ kg}/\text{min}$ .....	52
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ออบแห้ง ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก $0.837 \text{ kg}/\text{min}$ .....	53
4.17 อัตราการอบแห้งของการอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหล ชั้นข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ $1.075$ และ $2.150 \text{ m}^3/\text{min}$ .....	54
4.18 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหล ชั้นข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ $1.075$ และ $2.150 \text{ m}^3/\text{min}$ .....	55
4.19 เปอร์เซนต์ข้าวต้นของข้าวหลังผ่านการอบแห้งที่อัตราการไหล ชั้นข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ $1.075 \text{ m}^3/\text{min}$ .....	58

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 ค่าดัชนีความขาวของข้าวหลังผ่านการอบแห้งที่อัตราการไหล ชั้นข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m <sup>3</sup> /min .....	59
ค1 ความสามารถในการทะลุผ่านแก้วของคลื่นต่าง ๆ .....	101
ค2 ภาพตัดขวางด้านบนบริเวณห้องอบแห้ง .....	102
ค3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการลดความชื้น ข้าวเปลือกจาก 24%wb ให้เหลือ 14%wb .....	104
ค4 รายละเอียด Superlene ในชุดควบคุมอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก .....	105
ง1 แบบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่อง .....	109
ง2 ส่วนต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่อง .....	110
ง3 ภาพตัดบริเวณห้องอบแห้ง .....	111

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$M_d$	=	ความชื้นมาตรฐานแห้ง (kg/kg (db))
$M_w$	=	ความชื้นมาตรฐานเปียก (kg/kg (wb))
$w$	=	มวลของวัสดุที่เวลาใด ๆ (kg)
$d$	=	มวลแห้งของวัสดุ (kg)
$\eta_{dry}$	=	ประสิทธิภาพของการอบแห้ง (%)
$\eta'_{dry}$	=	ประสิทธิภาพของการอบแห้งเมื่อรวมความร้อนสัมผัส (%)
$Q_{evap}$	=	ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ (kJ)
$Q_a$	=	ปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ (kJ)
$Q_s$	=	ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ (kJ)
$W_i$	=	น้ำหนักวัสดุก่อนอบแห้ง (kg)
$W_f$	=	น้ำหนักวัสดุหลังอบแห้ง (kg)
$M_i$	=	ความชื้นวัสดุก่อนอบแห้ง (%db)
$M_f$	=	ความชื้นวัสดุหลังอบแห้ง (%db)
MR	=	อัตราส่วนความชื้น
$M_t$	=	ความชื้นที่เวลาใด ๆ ของข้าวเปลือก (%db)
$M_{eq}$	=	ความชื้นสมดุลของข้าวเปลือก (%db)
DR	=	อัตราการอบแห้ง (kg <sub>water</sub> /h)
SEC	=	ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg <sub>water</sub> )
E	=	พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในกระบวนการอบแห้ง (kWh)
AFR	=	อัตราการไหลอากาศ (Air flow rate) (m <sup>3</sup> /min)
PFR	=	อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก (Paddy flow rate) (kg/min)
HRV	=	Head Rice Yield (%)
WI	=	Whiteness Index

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ข้าวเป็นพืชที่มีความสำคัญต่อประเทศไทยเป็นอย่างมาก เนื่องจากข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศที่สามารถสร้างรายได้จากการส่งออกได้เป็นจำนวนมากและอีกทั้งยังเป็นธัญพืชที่คนไทยบริโภคเป็นอาหารหลักในชีวิตประจำวัน ซึ่งสำหรับประเทศไทยนั้นจะสามารถปลูกข้าวได้ตลอดทั้งปีโดยขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและภูมิประเทศของแต่ละพื้นที่ จากการที่ประเทศไทยสามารถปลูกข้าวได้ตลอดทั้งปีนั้นจึงทำให้มีปริมาณข้าวมากพอที่จะส่งออกไปยังต่างประเทศได้ และเนื่องจากข้าวมีปริมาณมากจึงต้องมีกระบวนการจัดการที่ดีเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหาย

หลังจากการเก็บเกี่ยวข้าวแล้วเกษตรกรจำเป็นต้องลดระดับความชื้นของข้าวเปลือกให้อยู่ในช่วง 12-14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก เพื่อยืดอายุในการเก็บรักษา ดังนั้น เกษตรกรจะนำข้าวเปลือกหลังจากการเก็บเกี่ยวมาผ่านกระบวนการลดความชื้น ซึ่งในปัจจุบันวิธีการลดความชื้นข้าวเปลือกมีหลายวิธี โดยที่แต่ละวิธีก็จะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป วิธีการลดความชื้นข้าวเปลือกที่นิยมใช้คือ การตากภายใต้แสงอาทิตย์ซึ่งวิธีการนี้จะใช้พลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์และใช้อากาศช่วยในการพาความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือก ดังนั้นวิธีการนี้จึงเป็นวิธีการที่ประหยัดและทำได้ง่าย แต่ข้อจำกัดของวิธีการนี้คือการใช้แรงงานคนและใช้พื้นที่ในการตากจำนวนมาก อีกทั้งยังไม่สามารถควบคุมแหล่งพลังงานความร้อนได้ ซึ่งจะส่งผลให้ไม่สามารถกำหนดระยะเวลาในการตากที่แน่นอนได้และไม่สามารถควบคุมระดับความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกได้เช่นกัน อีกวิธีคือการใช้เครื่องอบแห้งซึ่งข้อดีของวิธีการนี้คือสามารถควบคุมระดับความชื้นให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้ แต่ข้อจำกัดคือค่าใช้จ่ายที่สูงในด้านของพลังงานที่ใช้ ราคาของเครื่องอบแห้งและการบำรุงรักษา

จากข้อจำกัดของวิธีการลดความชื้นข้าวเปลือกโดยการตากภายใต้แสงอาทิตย์และการใช้เครื่องอบแห้งนั้นจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาเครื่องอบแห้งที่ใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากอุปกรณ์ที่มีราคาไม่สูงมากและสามารถใช้งานได้ง่าย ดังนั้นจึงเลือกใช้ฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบแท่งเป็นแหล่งพลังงานความร้อน ซึ่งในปัจจุบันมีการนำฮีตเตอร์อินฟราเรดไปใช้ในการอบแห้งวัสดุต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย โดยฮีตเตอร์อินฟราเรดจะให้พลังงานความร้อนในรูปรังสีความร้อนและรังสีนี้สามารถให้ความร้อนกับวัสดุที่นำมาอบแห้งได้โดยตรงโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางโดยกระบวนการแผ่รังสี

ปัจจุบันมีการนำรังสีอินฟราเรด ไปประยุกต์ใช้ในการอบแห้งแบบถาดซึ่งทำงานเป็นกะ ยังไม่สามารถนำรังสีอินฟราเรดไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งแบบไหลต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบอบแห้งข้าวเปลือกโดยเป็นการประยุกต์เทคนิคการแผ่รังสีอินฟราเรดในแนวรัศมีสร้างเป็นเครื่องอบแห้งแบบไหลต่อเนื่อง และประเมินสมรรถนะของต้นแบบเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นและประเมินคุณภาพของข้าวเปลือกหลังจากการอบด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่พัฒนาขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องโดยใช้รังสีอินฟราเรดแบบแผ่รังสีในแนวรัศมี
- 2) เพื่อประเมินสมรรถนะของต้นแบบเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นและประเมินคุณภาพของข้าวเปลือกหลังจากการอบด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่พัฒนาขึ้น
- 3) เพื่อศึกษาเงื่อนไขการทำงานที่ดีที่สุดของระบบอบแห้งข้าวเปลือกที่พัฒนาขึ้น

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1) ต้นแบบเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นเป็นขนาดสำหรับห้องปฏิบัติการ ขนาดการอบแห้งครั้งละไม่เกิน 15 กิโลกรัม
- 2) ใช้ฮีตเตอร์อินฟราเรดไฟฟ้าขนาด 1,200 W เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนในเครื่องอบแห้ง
- 3) ประเมินสมรรถนะการอบแห้งจากเวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่พัฒนาขึ้น
- 4) การศึกษาคุณภาพของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งประกอบไปด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นและค่าดัชนีความขาว

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมี
- 2) ทราบถึงสมรรถนะของต้นแบบเครื่องอบแห้งรังสีอินฟราเรดแบบแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมีที่พัฒนาขึ้น
- 3) ทราบเงื่อนไขการทำงานที่ดีที่สุดของต้นแบบเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น
- 4) ทราบคุณภาพข้าวเปลือกที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่พัฒนาขึ้น

## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

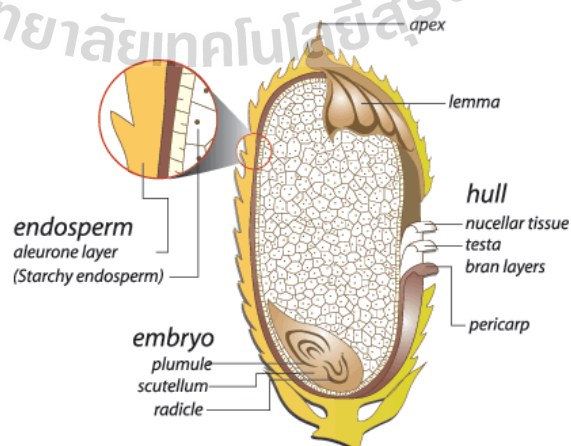
#### 2.1 บทนำ

ในบทนี้ กล่าวถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก อินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมี ได้แก่ ทฤษฎีการอบแห้ง เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือก การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 2.2 ข้าว

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนปนนท์ (2559) ได้รายงานไว้ว่า ข้าวเป็นธัญญาหารหลักของชาวโลก จัดเป็นพืชสายพันธุ์เดียวกับหญ้าที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในโลก และมีความหลากหลายทางชีวภาพ สามารถปลูกขึ้นได้ง่าย มีความทนทานต่อทุกสภาพภูมิประเทศในโลก ไม่ว่าจะปลูกในดินแห้งแล้งแบบทะเลทราย พื้นที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึง หรือแม้กระทั่งบนเทือกเขาที่หนาวเย็น ส่วนประกอบหลักของข้าว คือ สตาร์ช ซึ่งประกอบด้วย Amylose และ Amylopectin ซึ่งมีผลต่อเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก

##### 2.2.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของข้าว



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเมล็ดข้าว (Kristiz16, 2014)

เมล็ดข้าวหุ้มด้วยชั้นเปลือกหลายชั้น(รูปที่ 2.1) ชั้นนอกสุดเป็นเกลบ (Husk) ซึ่งเป็นเซลลูโลส (Cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เมื่อสีเอาชั้นเกลบออกจะได้ข้าวกล้อง

เมล็ดข้าวกล้องประกอบด้วยจุกข้าวหรือคัพกะ (Germ หรือ Embryo) และส่วนเอนโดสเปิร์มหรือข้าวขาวห่อหุ้มด้วยชั้นรำข้าว (Rice bran) ซึ่งประกอบด้วยเยื่อหุ้มเมล็ดหลายชั้นเยื่อออลูโรน (Aleurone layer) หรือชั้นรำละเอียดเป็นชั้นในสุดที่ติดกับเอนโดสเปิร์มมีโปรตีนและไขมันสูง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วย Cellulose และ Hemicellulose

จุกข้าว (Germ) อยู่ติดกับ Endosperm ทางด้าน Lemma เป็นส่วนที่จะเจริญเป็นต้นต่อไปประกอบด้วย ต้นอ่อน (Plumule) รากอ่อน (Radicle) เยื่อหุ้มต้นอ่อน (Coleoptile) เยื่อหุ้มรากอ่อน (Coleorhiza) ท่อน้ำท่ออาหาร (Epiblast) และใบเลี้ยง (Scutellum) มีโปรตีนและลิพิด วิตามิน และแร่ธาตุสูง

เอนโดสเปิร์ม (Endosperm) คือส่วนเมล็ดข้าวสารที่นำมารับประทาน มีส่วนประกอบส่วนใหญ่ คือคาร์โบไฮเดรตที่เป็นสตาร์ช ซึ่งมี Amylose และ Amylopectin เป็นส่วนประกอบหลัก อยู่รวมเป็นเม็ดสตาร์ช (Starch granule) โปรตีนในข้าวที่ขัดสีแล้วมีปริมาณร้อยละ 7-8 โดยสามารถจำแนกตามความสามารถในการละลายได้ 4 ชนิด คือ Albumin Globulin Prolamin และ Glutelin ซึ่งโปรตีนเหล่านี้มีบทบาทในการขัดขวางการพองตัวของเม็ดสตาร์ช (Starch granule)

## 2.2.2 การแบ่งประเภทของข้าว

ข้าวที่นิยมปลูกเป็นอาหารนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ข้าว *Oryza sativa* (ปลูกในทวีปเอเชีย) และ *Oryza glaberrima* (ปลูกในทวีปแอฟริกา) แต่ข้าวที่ปลูกและซื้อขายกันในตลาดโลกเกือบทั้งหมดจะเป็นข้าวจากทวีปเอเชีย ซึ่งสามารถจำแนกได้ดังต่อไปนี้

จำแนกชนิดของข้าวตามลักษณะและพื้นที่ปลูก

- ข้าวอินดิกา (Indica rice) มีลักษณะเมล็ดยาวรี ต้นสูง เป็นข้าวที่ปลูกในเอเชียเขตร้อน ตั้งแต่ จีน เวียดนาม ฟิลิปปินส์ ไทย อินโดนีเซีย อินเดีย และศรีลังกา
- ข้าวจาปอนิกา (Japonica rice) เป็นข้าวที่ปลูกในเขตอบอุ่น เช่น จีน ญี่ปุ่น เกาหลี มีลักษณะเมล็ดป้อมกลมรี ต้นเตี้ย
- ข้าวจาวานิกา (Javanica rice) ปลูกในอินโดนีเซียและฟิลิปปินส์ มีเมล็ดป้อมใหญ่ แต่ไม่ได้รับความนิยมเพราะให้ผลผลิตต่ำ

ข้าวที่ปลูกในไทยเป็นพันธุ์ข้าวเมล็ดยาว คือ ข้าวอินดิกา พันธุ์ที่สร้างชื่อเสียงให้กับไทยมากที่สุด คือ ข้าวหอมพันธุ์ข้าวดอกมะลิ (Jasmine rice)



จำแนกชนิดของข้าวตามประเภทของเนื้อในหรือองค์ประกอบทางเคมีในเมล็ดข้าวสาร สามารถแบ่งได้เป็นข้าวเจ้าและข้าวเหนียว ซึ่งมีต้นและลักษณะอย่างอื่นเหมือนกันทุกอย่าง แตกต่างกันที่ประเภทของเนื้อแข็งในเมล็ด

- ข้าวเจ้า สตาร์ช จากข้าวเจ้า ประกอบด้วย อะไมโลส (Amylose) ประมาณร้อยละ 9-33 พันธุ์ข้าวเจ้า ได้แก่ ขาวดอกมะลิ 105, ปทุมธานี 60, กข 7, เหลืองประทิว 123, ขาวตาแห้ง 17, พัทลุง 60, สุพรรณบุรี 1, สุรินทร์ 1
- ข้าวเหนียว สตาร์ช จากข้าวเหนียว ประกอบด้วยอะไมโลเพกทิน (Amylopectin) เป็นส่วนใหญ่และมี Amylose เพียงเล็กน้อย ประมาณร้อยละ 5-7 เท่านั้น พันธุ์ข้าวเหนียว ได้แก่ สันป่าตอง 1, สกลนคร กข 2, กข 6, กข 8

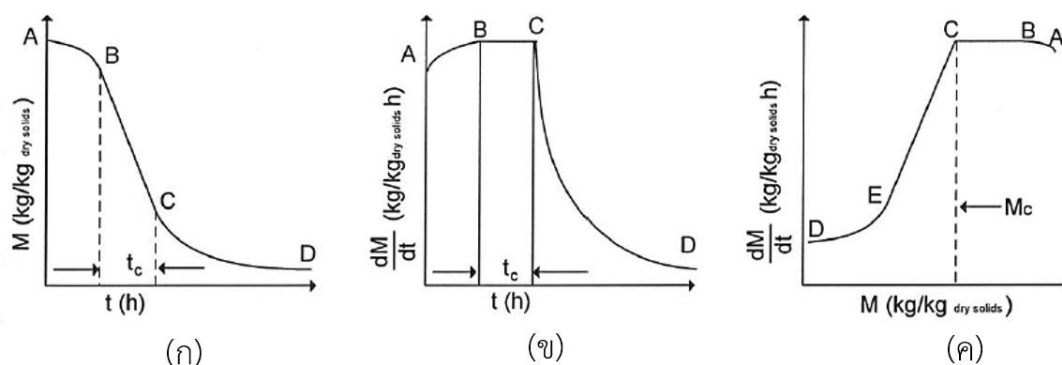
จำแนกชนิดของข้าวเจ้าตามปริมาณ Amylose และเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก โดยพันธุ์ข้าวเจ้าที่ปลูกในประเทศไทย แบ่งตามปริมาณ Amylose ได้ 3 กลุ่ม คือ

- ข้าวที่มีปริมาณ Amylose ต่ำ (9-20%) ได้แก่ ข้าวหอมมะลิ 105, กข 15, ปทุมธานี 1 และ กข 21 ลักษณะข้าวสุกจะเหนียวและนุ่ม
- ข้าวที่มีปริมาณ Amylose ปานกลาง (20-25%) ได้แก่ กข 23, กข 7, สุพรรณบุรี 2 และ สุพรรณบุรี 60 ลักษณะข้าวสุกจะค่อนข้างเหนียวและนุ่ม
- ข้าวที่มีปริมาณ Amylose สูง (25-33%) ได้แก่ เหลืองประทิว 123, ชัยนาท 1 และ สุพรรณบุรี 90 ลักษณะข้าวสุกจะร่วนและแข็ง

## 2.3 การอบแห้ง

### 2.3.1 การอบแห้ง

การอบแห้งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ขึ้นเพื่อไล่ความชื้นออก โดยการระเหย ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย (เทวัตต์นั ทิพยวิมล, 2552) โดยพฤติกรรมการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการพาความร้อนออกจากวัสดุ เมื่อสมมติให้อุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วของอากาศเหนือผิวของวัสดุอบแห้งมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการและมีการถ่ายเทความร้อนสู่วัสดุโดยการพาความร้อน การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุตลอดกระบวนการอบแห้งแสดงในรูปที่ 2.2 โดยแบ่งการอบแห้งออกเป็น 3 ช่วง คือ



รูปที่ 2.2 การลดลงของความชื้นวัสดุ (ดัดแปลงจาก เทวรัตน์ ทิพยวิมล, 2552)

- ช่วง A-B ช่วงนี้เป็นช่วงสภาวะที่ผิวของวัสดุเข้าสู่สมดุลกับอากาศเกิดขึ้นเมื่อเริ่มทำการอบแห้ง ความร้อนจากลมร้อนจะถ่ายเทสู่ผิววัสดุจนถึงค่า ๆ หนึ่งซึ่งมีความสมดุลระหว่างผิววัสดุกับอากาศ
- ช่วง B-C ช่วงนี้เป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period of drying) ช่วงนี้ผิววัสดุยังคงชุ่มไปด้วยน้ำซึ่งจะถูกนำออกจากผิววัสดุด้วยการระเหยซึ่งอัตราการอบแห้งในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนไปยังผิวของการอบแห้ง อัตราการถ่ายเทมวลมีความสมดุลกับอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงทำให้อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุอบแห้งคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศอบแห้ง
- ช่วง C-D ช่วงนี้เป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period) เนื่องจากปริมาณความชื้นภายในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่มาสู่ผิวด้านนอกลดลง ณ จุด C ในรูปที่ 2.2 อัตราการอบแห้งเริ่มลดลงความชื้นของวัสดุที่จุดนี้เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินต่อไปอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการ โดยปกติช่วงอัตราการอบแห้งลดลงประกอบไปด้วยสองช่วงคือ ช่วงของการอบแห้งลดลงส่วนที่ 1 (C-E) ช่วงนี้ผิวของวัสดุจะแห้งและอัตราการอบแห้งลดลง ช่วงของการอบแห้งลดลงส่วนที่ 2 (E-D) ช่วงนี้ระนาบของการระเหยจะเคลื่อนตัวเข้าสู่ภายในเนื้อวัสดุและผลกระทบจากปัจจัยภายนอก เช่น อัตราการไหลของอากาศมีค่าน้อยลง เมื่อพิจารณาตลอดกระบวนการอบแห้งจะพบว่าช่วงของการอบแห้งลดลงเป็นช่วงหลักที่เกิดขึ้น

### 2.3.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง

- 1) ลักษณะทางธรรมชาติของวัสดุ : เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง ถ้าสภาพทางธรรมชาติของวัสดุเอื้ออำนวยต่อการส่งผ่านความร้อนไปยังโมเลกุลของน้ำภายในเนื้อของวัสดุและเอื้ออำนวยต่อการเคลื่อนที่ของไอน้ำออกจากวัสดุ
- 2) ขนาดและรูปร่างของวัสดุ : วัสดุที่มีขนาดและรูปร่างที่ทำให้อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรมากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านความร้อนให้ทั่วชิ้นวัสดุ ทำให้การระเหยน้ำออกจากเนื้อวัสดุดีขึ้น อัตราการอบแห้งจึงเร็วขึ้น
- 3) ปริมาณและการจัดเรียง : ถ้านำวัสดุมาจัดเรียงซ้อนกันหลายชั้นมากเกินไปจะทำให้วัสดุที่อยู่บริเวณตรงกลางได้รับความร้อนไม่ทั่วถึง ทำให้บริเวณนั้นมีอัตราการอบแห้งที่ช้า
- 4) อุณหภูมิของอากาศร้อน : เมื่ออุณหภูมิของอากาศร้อนสูงขึ้นอัตราการอบแห้งจะเร็วขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนกับวัสดุมีมากทำให้การถ่ายเทความร้อนสู่น้ำในเนื้อวัสดุทำได้จึงทำให้น้ำในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่และระเหยได้เร็ว แต่ต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ในการอบแห้งด้วย
- 5) ความชื้นของอากาศร้อน : หากความชื้นของอากาศร้อนมีค่ามากจะมีผลให้การเคลื่อนที่ของน้ำและการระเหยของไอน้ำออกจากเนื้อวัสดุทำได้ยาก
- 6) ความดันของบรรยากาศ : หากมีการลดความดันของบรรยากาศในขณะที่ทำการอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากทำให้จุดเดือดของน้ำลดลง
- 7) ความเร็วลมร้อน : ถ้าความเร็วลมร้อนมีค่ามากจะทำให้เกิดการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าวัสดุได้ดีขึ้น ทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น
- 8) คุณสมบัติเชิงความร้อนและฟิสิกส์ของวัสดุ : คุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งคือ ความร้อนจำเพาะ สภาพการนำความร้อนและการแพร่ความร้อน ส่วนคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ ความหนาแน่นจริง ความหนาแน่นปรากฏและสัดส่วนช่องว่างอากาศในกองวัสดุ

### 2.3.3 ความชื้นวัสดุ

ความชื้นในวัสดุ (Moisture content) เป็นดัชนีที่ใช้บ่งชี้ถึงปริมาณน้ำที่อยู่ในวัสดุ เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุชิ้นหรือมวลของวัสดุแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้สองรูปแบบ กล่าวคือความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis moisture content) และความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis moisture content) (เกียรติศักดิ์ ใจโต, 2558) โดยความชื้นทั้งสองรูปแบบสามารถหาได้จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) ตามลำดับ

$$M_d = \frac{w - d}{d} \quad (2.1)$$

$$M_w = \frac{w - d}{w} \quad (2.2)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นมาตรฐานแห้งและความชื้นมาตรฐานเปียกแสดงได้ด้วยสมการที่ (2.3)

$$M_w = \frac{M_d}{1 + M_d} \quad (2.3)$$

โดยที่  $M_d$  คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (kg/kg (db))

$M_w$  คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (kg/kg (wb))

$W$  คือ มวลของวัสดุที่เวลาใด ๆ (kg)

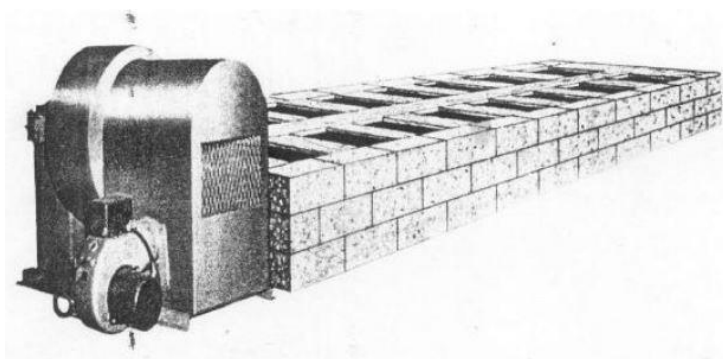
$d$  คือ มวลแห้งของวัสดุ (kg)

## 2.4 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือก

พิริสิทธิ์ ทวยนาค, มณฑล ชูโชนาค, มุสตาฟา ยะกา และ ประชา บุญยวานิชกุล (2557) ได้แบ่งเครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกออกเป็น ดังนี้

### 2.4.1 เครื่องลดความชื้นแบบข้าวเปลือกบรรจุในกระสอบ

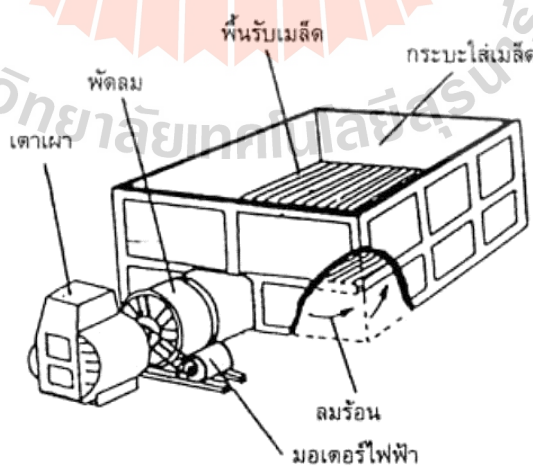
ส่วนใหญ่ใช้กับการลดความชื้นของเมล็ดพันธุ์ ตัวเครื่องประกอบด้วยห้องกำเนิดอากาศร้อนซึ่งมีช่องว่างทางด้านบนเพื่อใช้วางกระสอบของข้าวเปลือกที่ต้องการอบแห้ง สามารถวางข้าวเปลือกได้ครั้งละหลายกระสอบตามจำนวนของช่องว่าง ลมร้อนจะถูกเป่าผ่านช่องว่างของข้าวเปลือกที่บรรจุอยู่ในกระสอบ เครื่องอบแห้งชนิดนี้ใช้อุณหภูมิอบแห้งต่ำไม่เกิน 45°C และในระหว่างการอบแห้งจะต้องมีการพลิกกลับกระสอบเป็นระยะ ๆ เพื่อให้การถ่ายเทความร้อนและมวลสารทั่วถึงทั้งด้านบนและด้านล่างของกระสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เครื่องลดความชื้นแบบข้าวเปลือกบรรจุในกระสอบ (พิริสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ, 2557)

#### 2.4.2 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบกระบะ

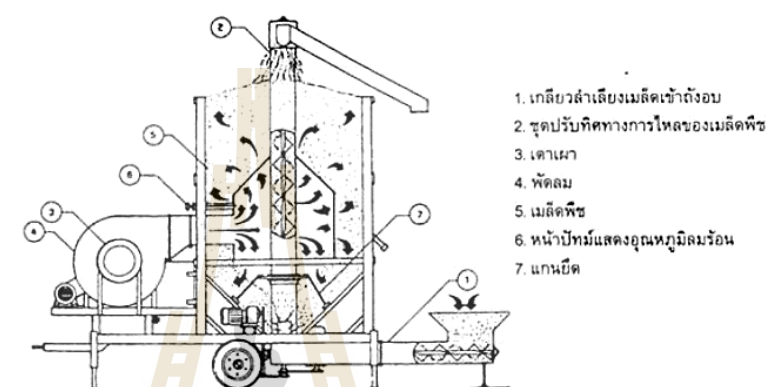
ประกอบด้วยกระบะที่บรรจุข้าวเปลือกอยู่บนตะแกรง โดยด้านล่างของตะแกรงเป็นห้องอากาศร้อนที่ต่อเข้ากับพัดลมและชุดกำเนิดอากาศร้อน อากาศร้อนจะไหลผ่านชั้นของข้าวเปลือกที่อยู่บนแผ่นตะแกรงจากด้านล่างสู่ด้านบน ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างเมล็ดข้าวเปลือกกับอากาศร้อน โดยความชื้นของข้าวเปลือกทางด้านล่างจะลดลงเร็วกว่าทางด้านบน เครื่องลดความชื้นแบบนี้ใช้อุณหภูมิในการอบแห้งไม่เกิน  $50^{\circ}\text{C}$  และที่ใช้ในประเทศไทยส่วนใหญ่จะใช้กับเมล็ดพันธุ์เนื่องจากเมล็ดข้าวอยู่กับที่จึงไม่ส่งผลต่อการแตกตัวของเมล็ด ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบกระบะ (พิริสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ, 2557)

### 2.4.3 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบถังหมุนเวียน

ประกอบด้วยถังบรรจุข้าวเปลือกจะทำด้วยตะแกรงเป็นรูปทรงกระบอกแนวตั้ง ส่วนตรงกลางของถังมีท่อลมทำด้วยตะแกรงรูปทรงกระบอกซ้อนอยู่ภายใน ลมร้อนถูกเป่าให้ไหลผ่านเมล็ดตามแนวรัศมีจากประตูตะแกรงออกสู่ภายนอก ข้าวเปลือกที่อยู่ด้านล่างจะถูกถ้ำเลียงขึ้นไปด้วยด้านบนใหม่หลายเที่ยวจนกว่าจะแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.5

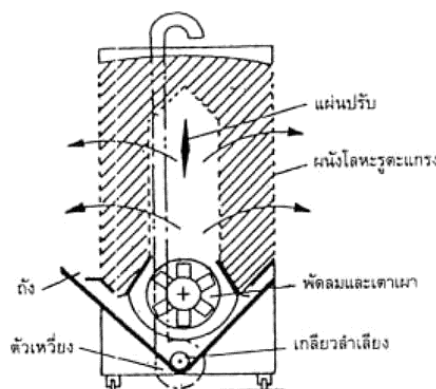


รูปที่ 2.5 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบถังหมุนเวียน (พิริสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ, 2557)

### 2.4.4 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบคอลัมน์

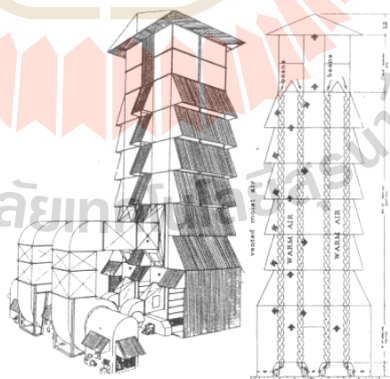
ภายนอกจะเห็นเป็นถังบรรจุเมล็ดพืชเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมแนวตั้งสูงกว่า 3 เมตร ถังบรรจุข้าวเปลือกต่อเข้ากับท่อลมร้อนทางด้านข้างซึ่งมีเตาลมร้อนและพัดลมเป็นส่วนประกอบ ส่วนทางด้านล่างของถังบรรจุเมล็ดจะมีชุดควบคุมการไหลของข้าวเปลือก เครื่องลดความชื้นแบบนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

1) ชนิดข้าวเปลือกไม่ไหลคลุกเคล้า : ภายในถังบรรจุข้าวเปลือกของเครื่องลดความชื้นแบบนี้จะประกอบด้วย ช่องบรรจุข้าวเปลือกที่ด้านข้างทั้ง 2 ด้านเป็นตะแกรงเพื่อให้ลมร้อนผ่านได้อย่างสะดวก โดยออกแบบให้มีช่องว่างอย่างน้อย 2 ช่อง ตรงกลางของเครื่องซึ่งใช้เป็นห้องลมร้อน ที่จะไหลผ่านข้าวเปลือกและไหลออกทางแนวข้างทั้ง 2 ช่อง เครื่องลดความชื้นแบบนี้มีข้อเสีย คือ ข้าวเปลือกที่อยู่ชิดห้องลมร้อนจะแห้งเร็วกว่าทางด้านท่อลมออกทำให้เครื่องลดความชื้นแบบนี้ใช้ปริมาณลมร้อนจำเพาะสูง เพื่อให้ความแตกต่างระหว่างความชื้นข้าวเปลือกส่วนที่ติดห้องลมร้อนกับด้านลมออกน้อย อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งประมาณ  $54^{\circ}\text{C}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบคอลัมน์ชนิดข้าวเปลือกไม่ไหล  
คลุกเคล้า (พิรสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ, 2557)

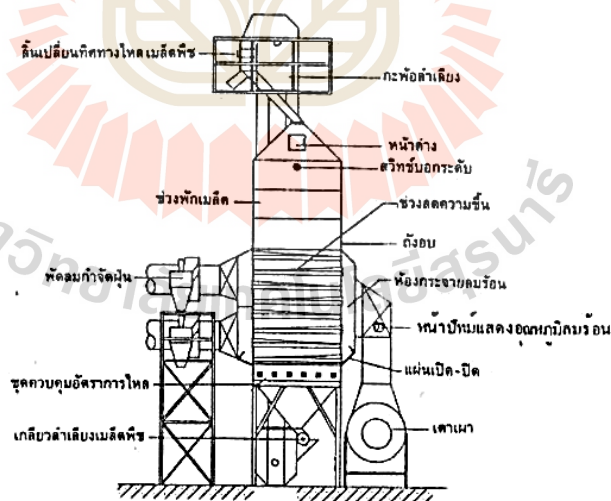
2) ชนิดข้าวเปลือกมีการไหลคลุกเคล้า : ต่างจากชนิดข้าวเปลือกไม่ไหลคลุกเคล้า คือ ภายในห้องอบแห้งระหว่างห้องลมร้อนกับช่องบรรจุข้าวเปลือกจะถูกกั้นด้วยแผ่นทึบที่ทำเป็นแนวกลับทิศการไหลของข้าวเปลือกสลับกันไปมา ซึ่งในระหว่างแผ่นจะมีช่องว่างให้ลมไหลผ่านได้ ข้าวเปลือกที่ไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่างมีโอกาสสัมผัสลมร้อนเท่า ๆ กัน เนื่องจากข้าวเปลือกมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบคอลัมน์ชนิดข้าวเปลือกไหลคลุกเคล้า  
(พิรสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ, 2557)

## 2.4.5 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบเมล็ดไหลคลุกเคล้า

เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบเมล็ดไหลคลุกเคล้า โดยทั่วไปเรียกว่า แบบ LSU (Louisiana State University) เครื่องลดความชื้นแบบนี้ดูจากภายนอกมีลักษณะเช่นเดียวกันกับแบบ คอลัมน์ คือ ถังบรรจุข้าวเปลือกจะเป็นแบบถังทรงสี่เหลี่ยมแนวตั้ง ข้าวเปลือกไหลจากด้านบนลงด้านล่างโดยมีอุปกรณ์ควบคุมการไหลของเมล็ด ภายในถังอบประกอบด้วยท่อลมเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นจะมีท่อลมหลายท่อ ท่อลมแต่ละชั้นจะเป็นท่อลมร้อนเข้าและท่อลมออกสลับกันท่อลมร้อนเข้านี้จะพัด ผ่านข้าวเปลือกในถังอบและไหลออกทางท่อลมออกที่อยู่ชั้นด้านบนและด้านล่างท่อลม แต่ละท่อจะมีลักษณะเป็นรางคว่ำ ด้านบนแหลม ด้านล่างเปิดว่างในแนวขนานกับพื้นยาวตลอดถัง ที่ปลายรางด้านหนึ่งจะเจาะช่องต่อเข้ากับห้องรวบรวมลม ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะปิดท่อลมแต่ละชั้น โดยมีช่องที่เจาะเข้ากับห้องรวบรวมลมสลับกัน โดยชั้นหนึ่งจะต่อเข้าทางด้านห้องลมร้อนเข้า และอีกชั้นหนึ่งจะต่อเข้ากับห้องลมออก เครื่องลดความชื้นแบบนี้ทำให้เกิดการไหลข้าวเปลือกแบบ ไหลกลับไปกลับมา และทำให้ข้าวเปลือกมีโอกาสสัมผัสกับลมร้อนที่ไหลเข้าและเกิดการถ่ายเท ความชื้นกับลมที่ไหลออก ทำให้เกิดการลดความชื้นสม่ำเสมอเท่ากันตลอดทั้งถังบรรจุอุณหภูมิ ลมร้อนที่ใช้จะ ได้สูงกว่าแบบคอลัมน์คือ  $66^{\circ}\text{C}$  สำหรับการใช้น้ำก็เช่นเดียวกันกับแบบ คอลัมน์ คือ ใช้อบแบบเป็นครั้งหรือเป็นงวดและใช้ออบแบบไหลต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบเมล็ดไหลคลุกเคล้า (พิริสิทธิ์ ทวยนาถ และคณะ, 2557)



#### 2.4.6 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบโรตารี

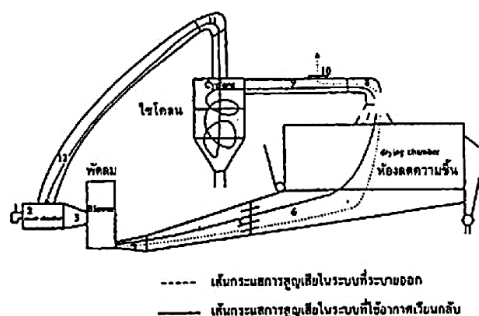
นิยมใช้สำหรับการลดความชื้นข้าวหนึ่งในช่วงแรกหลังจากข้าวเปลือกผ่านการนึ่งมาแล้ว ตัวเครื่องเป็นรูปถังทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-2 เมตร ความยาว 15-30 เมตร วางเอียง 2-4 องศาจากแนวนอน ถังหมุนด้วยความเร็วรอบ 4-8 รอบต่อนาที โดยทั่วไปข้าวเปลือกจะอยู่ในถังประมาณ 10-20 นาที อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ 121-288°C ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบ โรตารี (พิรสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ, 2557)

#### 2.4.7 เครื่องลดความชื้นแบบฟลูอิดไดซ์-เบด

ใช้งานในลักษณะไหลต่อเนื่องและใช้ปริมาณลมสูง หี้ออบเป็นห้องปิดมีตะแกรงอยู่ด้านล่างที่ปลายทั้ง 2 ด้าน มีอุปกรณ์สำหรับการป้อนเมล็ดพืชเข้าและออกจากหี้ออบ (รูปที่ 2.10) ลมร้อนเป่าผ่านชั้นเมล็ดพืชที่วางอยู่บนตะแกรงโดยมีความหนาไม่เกิน 10 เซนติเมตร ด้วยความเร็วของอากาศร้อนประมาณ 1.9 เมตรต่อวินาที เพื่อให้ข้าวเปลือกลอยตัว อุณหภูมิลมร้อนที่จะใช้มากกว่า 100°C และช่วงระยะเวลาที่เมล็ดสัมผัสลมร้อนเป็นเวลาประมาณ 3-5 นาที เหมาะสำหรับการใช้ลดความชื้นข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงมากกว่า 20%wb เนื่องจากเครื่องลดความชื้นแบบนี้ใช้ปริมาณลมและความร้อนสูงเป่าผ่านข้าวเปลือกในระยะเวลาอันสั้น เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานจึงมีการนำเอาความร้อนที่ผ่านข้าวเปลือกแล้วหมุนเวียนกลับมาประมาณ 80% และเป่าทิ้งไป 20% ข้าวเปลือกเมื่อผ่านเครื่องลดความชื้นแบบนี้เพียงเที่ยวเดียวจะมีความชื้นลดลง 5-10%wb ทำให้มีอัตราการทำงานสูงเหมาะกับตลาดกลางที่มีปริมาณข้าวเปลือกความชื้นสูงเข้ามาในปริมาณมาก ข้าวเปลือกที่ผ่านเครื่องลดความชื้นแบบนี้แล้ว สามารถนำไปอบแห้งในถังเก็บที่มีการเป่าอากาศผ่านกองข้าวเปลือกได้หรืออาจใช้ร่วมกับเครื่องลดความชื้นแบบอื่น ๆ ก็ได้



รูปที่ 2.10 เครื่องลดความชื้นแบบฟลูอิดไคซ์-เบด (พิรสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ, 2557)

#### 2.4.8 เครื่องลดความชื้นแบบสเปาเต็ดเบด

เป็นเครื่องอบแห้งที่มีหลักการทำงานคล้ายกับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด โดยในระบบของฟลูอิดไคซ์เบดอากาศจะถูกระบายทิ้งห้องอบแห้งด้วยแผ่นกระจายอากาศแต่ระบบสเปาเต็ดเบดอากาศจะไหลผ่านเข้ามาภายในห้องอบแห้งโดยมีลักษณะเป็นลำอากาศเข้ามา ตรงบริเวณจุดกึ่งกลางของห้องอบแห้งทรงกรวยจากทางด้านล่าง ข้าวเปลือกจะกระจายตัวภายในส่วนของห้องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดที่บริเวณทางเข้าของอากาศที่ใช้ออบแห้ง ทำให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสารอย่างรวดเร็ว เมล็ดข้าวเปลือกจะมีการเคลื่อนที่และหมุนเวียน โดยเมล็ดข้าวลอยขึ้นด้านบนภายในห้องอบแห้งส่วนของสเปาและเคลื่อนที่ตกลงในส่วนของ Annulus ซึ่งจะมีการเคลื่อนที่แบบนี้ตลอดเวลาของการอบแห้ง ข้อดีของเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดเมื่อเปรียบเทียบกับฟลูอิดไคซ์เบดเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดคือสามารถนำไปใช้ออบแห้งวัสดุชนิดอื่น ๆ ที่มีขนาดใหญ่กว่า 5 มิลลิเมตร ได้และสามารถใช้กับวัสดุที่มีขนาดแตกต่างกันได้ แต่เครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดนั้นยังคงมีข้อจำกัดคือเป็นเครื่องอบแห้งที่ทำงานแบบเป็นงวด ๆ ยังไม่สามารถพัฒนาเป็นเครื่องอบแห้งที่ทำงานแบบต่อเนื่องได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 เครื่องลดความชื้นแบบสเปาเต็ดเบด (พิรสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ, 2557)

## 2.4.9 เครื่องอบอินฟราเรด เครื่องอบไมโครเวฟ

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน (2004) ได้กล่าวว่า การแผ่รังสีอินฟราเรดและแผ่รังสีไมโครเวฟเป็นการปลดปล่อยพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การแผ่รังสีอินฟราเรดจะใช้ช่วงความยาวคลื่น 0.76-1,000 ไมโครเมตร ส่วนไมโครเวฟมีความยาวคลื่น 1-1,000 มิลลิเมตร (โดยทั่วไปเราจะแสดงความถี่ด้วยความยาวคลื่น ซึ่งเทียบเท่ากับความถี่ 300 MHz-300 GHz) ทั้งนี้ เนื่องจากความยาวคลื่นมีค่าแตกต่างกันถึงแสนเท่า กลไกการกำเนิดความร้อนและอุปกรณ์ต่าง ๆ จึงมีความแตกต่างกันอย่างมาก ในการแผ่รังสี Near infrared ซึ่งใช้หลอดไฟอินฟราเรด รังสีจะทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อวัตถุได้้น้อยมาก ตั้งแต่อดีตที่ผ่านมาจึงใช้ในการอบน้ำยาเคลือบหมึกพิมพ์หรือกาว รังสี Far infrared หรือคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อวัตถุได้มาก หากใช้ในการอบช่วงอัตราการอบแห้งลดลงจะมีประสิทธิภาพสูง และสามารถป้องกันการให้ความร้อนมากเกินไปในช่วงอบด้วยอัตราการอบแห้งลดลงได้จึงใช้ในการอบเวชภัณฑ์และอาหารต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบัน มีการอบอาหารด้วย Far infrared กันมาก การป้อนความร้อนแฝงในการระเหยที่ต้องใช้ในการอบในรูปพลังงานการแผ่รังสีทั้งหมดจะทำให้ต้นทุนสูง ดังนั้น จึงมักใช้ร่วมกับการอบด้วยลมร้อนหรืออบด้วยการนำความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงระเหยน้ำจากผิวหนังซึ่งวัตถุดิบยังมีอัตราความชื้นสูงอยู่จะใช้วิธีอบด้วยลมร้อน เมื่ออัตราความชื้นลดต่ำลงและพื้นผิวระเหยเคลื่อนที่ลึกเข้าไปในเนื้อวัตถุแล้ว จึงนำการอบด้วยการแผ่รังสีเหล่านี้มาใช้ร่วมด้วย จะทำให้ภายในวัตถุดิบมีความชื้นสม่ำเสมอและเพิ่มอัตราเร็วในการอบให้สูงขึ้น

## 2.5 การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง

ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งนั้นจะพิจารณาจากสองส่วนคือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประสิทธิภาพในการอบแห้ง (จิตรรัตน์ จอกแก้ว, 2559)

### 2.5.1 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ ออกจากวัสดุต่อปริมาณความร้อนที่ให้แก่เครื่องอบแห้ง ดังสมการที่ (2.4) และ (2.5)

$$\eta_{\text{dry}} = \frac{Q_{\text{evap}}}{Q_a} \times 100 \quad (2.4)$$

หรือ

$$\eta'_{\text{dry}} = \frac{Q_{\text{evap}} + Q_s}{Q_a} \times 100 \quad (2.5)$$

นอกจากนี้สามารถบอกประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งได้ในรูปของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ซึ่งเป็นค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยน้ำออกจากวัสดุ ค่า SEC นี้หาได้จากสมการที่ (2.6)

$$\text{SEC} = \frac{Q_a}{W_i - W_f} \quad (2.6)$$

### 2.5.2 ประสิทธิภาพในการอบแห้ง

ในการพิจารณาประสิทธิภาพในการอบแห้งจะประเมินจากค่าอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาในการอบแห้ง หรือปริมาณความชื้นต่อระยะเวลาในการอบแห้ง ดังสมการที่ (2.7) และ (2.8)

$$\text{DR} = \frac{W_i - W_f}{t} \quad (2.7)$$

หรือ

$$\text{DR} = \frac{M_i - M_f}{t} \quad (2.8)$$

- เมื่อ  $\eta_{\text{dry}}$  คือ ประสิทธิภาพของการอบแห้ง (%)  
 $\eta'_{\text{dry}}$  คือ ประสิทธิภาพของการอบแห้งเมื่อรวมความร้อนสัมผัส (%)  
 DR คือ อัตราการอบแห้ง (kg/h หรือ %db/h)  
 SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (kJ/kg<sub>water</sub>)  
 $Q_{\text{evap}}$  คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ (kJ)  
 $Q_a$  คือ ปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ (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)

สำหรับประสิทธิภาพในการอบแห้งนอกจากจะพิจารณาได้จากอัตราการอบแห้งแล้ว จะต้องพิจารณาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ควบคู่กันไปด้วย นั่นคือความชื้นที่เหลือในผลิตภัณฑ์จะต้องมีค่าไม่เกินมาตรฐานและมีความสม่ำเสมอทั่วทุกส่วนของผลิตภัณฑ์ สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารแห้งคุณภาพที่ต้องคำนึงถึงยังรวมไปถึง รูป รส กลิ่น สี ตลอดจนคุณค่าทางโภชนาการ ความสะอาด อายุการเก็บรักษา (Shelf life) และรสสัมผัส (ความกรอบ/ความนุ่ม) เป็นต้น

### 2.5.3 คุณภาพการสี (Milling quality)

คุณภาพการสีของข้าวประเมินได้จากปริมาณข้าวเต็มเมล็ด (Whole grain) และข้าวต้น (Head rice) ข้าวที่มีคุณภาพการสีดี ข้าวที่ผ่านกระบวนการขัดสีแล้วได้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและข้าวต้นสูง มีปริมาณข้าวหัก (Broken rice) น้อย ดังนั้น การประเมินคุณภาพการสีของข้าวจึงเกี่ยวข้องกับการแปรสภาพข้าวหรือการสีข้าว (Rice milling) ซึ่งหมายถึง การทำให้เปลือก รำ และคัพพะออก จากเมล็ดข้าว

นำน้ำหนักข้าวเปลือก ข้าวกล้อง ข้าวขาว และข้าวเต็มเมล็ด ข้าวต้น ไปคำนวณหาปริมาณแกลบ รำ และข้าวเต็มเมล็ด ข้าวต้น ดังสมการที่ (2.9) – (2.11) (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2555)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของแกลบ} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก} - \text{น้ำหนักข้าวกล้อง}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100 \quad (2.9)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของรำ} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวกล้อง} - \text{น้ำหนักข้าวขาว}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100 \quad (2.10)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น} = \frac{\text{น้ำหนักต้นข้าว}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100 \quad (2.11)$$

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Juckamas Laohavanich and Seree Wongpichet (2007) และ Juckamas Laohavanich and Seree Wongpichet (2008) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบใช้แก๊ส โดยที่ถาดใส่ข้าวเปลือกถูกทำให้สั่นด้วยความถี่ 450 รอบ/นาที่ และมีแอมพลิจูดประมาณ 0.01 เมตรตามแนวดิ่ง ทดสอบอบข้าวเปลือกที่มีระดับสัดส่วนความชื้นเริ่มต้น มาตรฐานแห้ง 0.22, 0.27, 0.32 และ 0.37 และขนาดความยาวคลื่นของอินฟราเรดที่ใช้อบแห้งคือ 2.70, 2.58 และ 2.47  $\mu\text{m}$  ซึ่งจากการทดลองพบว่าพฤติกรรมการอบแห้งข้าวเปลือกที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period) และสามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นได้ดีที่สุดจากสมการ Modified Page และจากการศึกษาพบว่าเมื่อความยาวคลื่นอินฟราเรดลดลงข้าวเปลือกจะสามารถดูดกลืนพลังงานได้มากขึ้นส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นลง ส่วนที่ระดับความชื้นเริ่มต้นมากจะส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งมากขึ้น ระดับความชื้นเริ่มต้นและระยะเวลาอบแห้งที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น (Head rice yield) เพิ่มขึ้นและระยะเวลาอบแห้งและระยะเวลาอบคืนตัว (Tempering time) เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ดัชนีความขาว (Whiteness index) ลดลง

Tohidi, Sadeghi, and Harchegani (2016) ได้ศึกษาการใช้พลังงานและคุณภาพของเครื่องอบแห้งแบบ Fixed deep bed โดยในการทดลองได้ใช้พัดลมนำอากาศผ่านฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก ซึ่งจะทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของอากาศที่ใช้อบแห้งให้มีความชื้นสัมพัทธ์ 40 50 60 และ 70% ความเร็วลม 0.5 0.8 และ 1.1 m/s และอุณหภูมิของอากาศ 40 50 60 70 และ 80°C จากการทดลองพบว่าถ้าอากาศที่ใช้อบแห้งมีความชื้นสัมพัทธ์สูงจะใช้เวลาในการอบแห้งมากขึ้น และถ้าอากาศที่ใช้อบแห้งมีความเร็วลมสูงหรืออุณหภูมิของอากาศสูง จะใช้เวลาอบแห้งลดลง ซึ่งปริมาณพลังงานที่ใช้ของเครื่องอบแห้งแบบ Fixed deep bed นี้คิดเป็นพลังงานเชิงความร้อน 94.48% และพลังงานเชิงกล 5.52% และคุณสมบัติของอากาศที่ใช้อบแห้งที่มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานดีที่สุด คือ อากาศที่มีอุณหภูมิสูง ความเร็วอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำ โดยในการอบแห้งถ้าอัตราอบแห้งสูงจะส่งผลให้ข้าวเปลือกเสียหายมากขึ้น

Das, Das, and Bal (2009) ได้ศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงด้วยรังสีอินฟราเรดจากหลอดไส้ โดยที่ถาดใส่ข้าวเปลือกสั่นด้วยความถี่ 21-22 Hz และแอมพลิจูด 8-9 mm ซึ่งในการทดสอบจะใช้ความเข้มของรังสีอินฟราเรด 1,509 2,520 3,510 4,520 และ 5,514  $\text{W/m}^2$  และความหนาของชั้นข้าวเปลือก 3 6 12 และ 25 mm ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเมื่อความเข้มของรังสีอินฟราเรดมากขึ้นจะส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง และเมื่อเพิ่มความหนาของชั้นข้าวเปลือกจะส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น และสามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงได้ดีที่สุดด้วยสมการของ Page

Abe และ Afzal (1997) ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกแบบชั้นบางด้วยรังสีอินฟราเรด โดยในการทดสอบจะใช้ความเข้มของรังสีอินฟราเรด 0.167 0.333 0.500 และ 0.625 W/cm<sup>2</sup> ความเร็วของอากาศขาเข้า 0.3 0.5 และ 0.7 m/s และปริมาณความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกมาตรฐานแห้ง 0.25 0.35 และ 0.47 จากการทดลองพบว่าถ้าความเข้มของรังสีอินฟราเรดและความเร็วของอากาศขาเข้าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งลดลง ส่วนปริมาณความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกมากจะส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น สำหรับการอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรดแบบชั้นบางนั้นพบว่า ความเข้มของรังสีอินฟราเรดและความเร็วของอากาศขาเข้ามีความสัมพันธ์กับสมการ Exponential model สมการของ Page และ สมการ Approximation of the diffusion ส่วนปริมาณความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกมีความสัมพันธ์กับสมการ Diffusion แต่สมการที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรดแบบชั้นบางได้ดีที่สุดคือ สมการของ Page

Cihan, Kahveci, and Hacıhafizoglu (2006) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกแบบชั้นบาง โดยในการทดลองจะใช้พัดลมนำอากาศผ่านฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก ซึ่งจะศึกษาระยะเวลาการอบคืนตัวว่าส่งผลพฤติกรรมของการอบแห้งข้าวเปลือกแบบชั้นบางอย่างไร จากการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งจะลดลงเมื่อระยะเวลาการอบคืนตัวนานขึ้น และสมการที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งข้าวเปลือกแบบชั้นบางได้ดีที่สุดคือ สมการของ Midilli

Hacıhafizoglu, Cihan, and Kahveci (2008) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกแบบชั้นบาง โดยในการทดลองจะใช้พัดลมนำอากาศผ่านฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก ซึ่งจากการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิของอากาศที่ใช้ออบแห้งเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลง และสมการของ Midilli เป็นสมการที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งแบบชั้นบางของข้าวเปลือก

Sharma, Verma, and Pathare (2005) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งหอมใหญ่สไลด์ โดยในการทดลองใช้แท่งอินฟราเรดอุ่นอากาศให้มีอุณหภูมิประมาณ 35°C แล้วนำอากาศที่ผ่านแท่งอินฟราเรดไปใช้ออบแห้งโดยให้มีความเร็วขาเข้าประมาณ 1.25 m/s ออบจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 6%db ซึ่งจากการทดลองพบว่าสมการของ Page สามารถอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งหอมใหญ่สไลด์ได้ดีที่สุด

Celma, Cuadros, and Rodríguez (2008) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งมะเขือเทศ โดยในการทดลองใช้แท่งอินฟราเรดเป็นแหล่งความร้อน ทดสอบที่อุณหภูมิ 100 120 140 และ 160°C ออบจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 5.26%db ซึ่งจากการทดลองพบว่าสมการของ Midilli สามารถอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งมะเขือเทศได้ดีที่สุด

Celma, Rojas, and Rodríguez (2007) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเปลือกมะกอก โดยในการทดลองใช้แท่งอินฟราเรดเป็นแหล่งความร้อน ทดสอบที่อุณหภูมิ 80 100 120 และ 140°C อบจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 8.69%db ซึ่งจากการทดลองพบว่าสมการของ Midilli สามารถอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งเปลือกมะกอกได้ดีที่สุด

Celma, Rodríguez, and Blázquez (2008) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเมล็ดคองุ่น โดยในการทดลองใช้แท่งอินฟราเรดเป็นแหล่งความร้อน ทดสอบที่อุณหภูมิ 100 120 140 และ 160°C อบจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 38.89%db ซึ่งจากการทดลองพบว่าสมการของ Midilli สามารถอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งเมล็ดคองุ่นได้ดีที่สุด

ยุทธนา ภูริระวิชย์กุล และสุภวรรณ ภูริระวิชย์กุล (2553) ได้ทำการศึกษากระบวนการอบแห้งข้าวกล้องนึ่ง โดยการพาความร้อนด้วยลมร้อน การแผ่รังสีอินฟราเรด และพลังงานความร้อนร่วม (รังสีอินฟราเรดและพลังงานไฟฟ้า) และทำการศึกษาคุณภาพของข้าวในด้านปริมาณข้าวต้น ความเหลืองของข้าวกล้องและข้าวท้องไข่ จากการทดสอบพบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้อบแห้งเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น การใช้พลังงานความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานไฟฟ้าจะช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งได้มากกว่าการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียวและพลังงานความร้อนจากกระแสไฟเพียงอย่างเดียวตามลำดับ และข้าวกล้องนึ่งที่ผ่านกระบวนการนึ่งและนำไปอบแห้งด้วยพลังงานงานร่วม (รังสีอินฟราเรดและพลังงานไฟฟ้า) จะมีร้อยละของข้าวเต็มเมล็ดสูงกว่าข้าวนึ่งที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดและการอบแห้งด้วยลมร้อนตามลำดับ ส่วนความขาวของข้าวสารจะลดลงตามอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้น

อำไพศักดิ์ ทิบุญมา และ สักชัย จงจำ (2553) ได้ศึกษาการอบแห้งจึงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดและหาสมการการอบแห้งขึ้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งจึง โดยทำการทดลองอบแห้งภายใต้เงื่อนไขความดันสัมบูรณ์ 5 10 และ 15 กิโลปาสกาล และอุณหภูมิอบแห้ง 40 50 และ 60°C ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษา คือ อัตราส่วนความชื้นอัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อลดความดันสัมบูรณ์หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า สมการของ Modified Henderson and Pabis สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งจึงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดได้ดีที่สุด

ซึ่งจากการศึกษาจะพบว่าการนำรังสีอินฟราเรดมาใช้อบแห้งนั้นสามารถนำไปใช้กับวัสดุทางการเกษตรได้หลากหลายชนิด อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับการอบแห้งแบบอื่นซึ่งสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการอบแห้งได้ดียิ่งขึ้น



### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึง รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบที่ใช้ อุปกรณ์และเครื่องมือวัดประกอบไปด้วย ชื่อ รุ่น ขนาด และมาตรฐาน รวมทั้งขั้นตอนการดำเนินงาน ได้แก่ การเตรียมตัวอย่างทดสอบ และหาค่าควบคุมคุณภาพ การทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่พัฒนาขึ้น การศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้ง การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งโดยประเมินจากอัตราการอบแห้ง ค่าความชื้นเปลือกพลังงานจำเพาะ เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นและค่าดัชนีความขาวหลังจากการอบแห้งได้ดังต่อไปนี้

#### 3.1 ตัวอย่างวัสดุอบแห้ง

##### 3.1.1 ข้าวเปลือกสดที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบอบแห้งในงานวิจัยนี้ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (รูปที่ 3.1) ที่เก็บเกี่ยวจากแปลงของเกษตรกรที่อำเภอโนนสูง จังหวัดนครราชสีมา เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2560 แล้วนำมาทดสอบทันที และข้าวบางส่วนที่ได้นำไปเก็บรักษาในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 4°C



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างเมล็ดข้าวเปลือกสดที่ใช้ในการอบแห้ง

### 3.1.2 ข้าวเปลือกที่ผ่านการปรับความชื้นก่อนการทดสอบ

เนื่องจากการทดสอบอบแห้งในงานวิจัยนี้ปริมาณข้าวเปลือกสดที่ใช้ในการทดสอบไม่เพียงพอจึงต้องนำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้วมาปรับความชื้นก่อนการทดสอบ ซึ่งการปรับความชื้นให้ข้าวเปลือกนั้นสามารถทำได้โดยวิธีการดังต่อไปนี้

- 1) นำข้าวเปลือก 30 kg ที่จะนำมาปรับความชื้นมาผึ่งในที่ร่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เข้าสู่ความชื้นสมดุล
- 2) ชั่งน้ำหนักของข้าวเปลือกทั้งหมดที่จะนำมาปรับความชื้น
- 3) นำข้าวเปลือก 250 g มาวัดความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้นเมล็ดพืช (model SB900, The Steinlite Corporation, Atchison, Kansas USA) จำนวน 3 ครั้งแล้วนำมาหาค่าความชื้นเฉลี่ย ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วัดความชื้นของข้าวเปลือกที่จะนำมาปรับความชื้น

- 4) คำนวณหาปริมาณน้ำที่ต้องเติมเข้าไปเพิ่มเพื่อให้ได้ระดับความชื้นที่ต้องการจากสมการ (2.2)
- 5) เติมน้ำให้ข้าวเปลือกทำโดยการพรมน้ำใส่กองข้าวเปลือกตามปริมาณน้ำที่คำนวณไว้และทำการคลุกเคล้าให้ทั่ว ดังรูปที่ 3.3

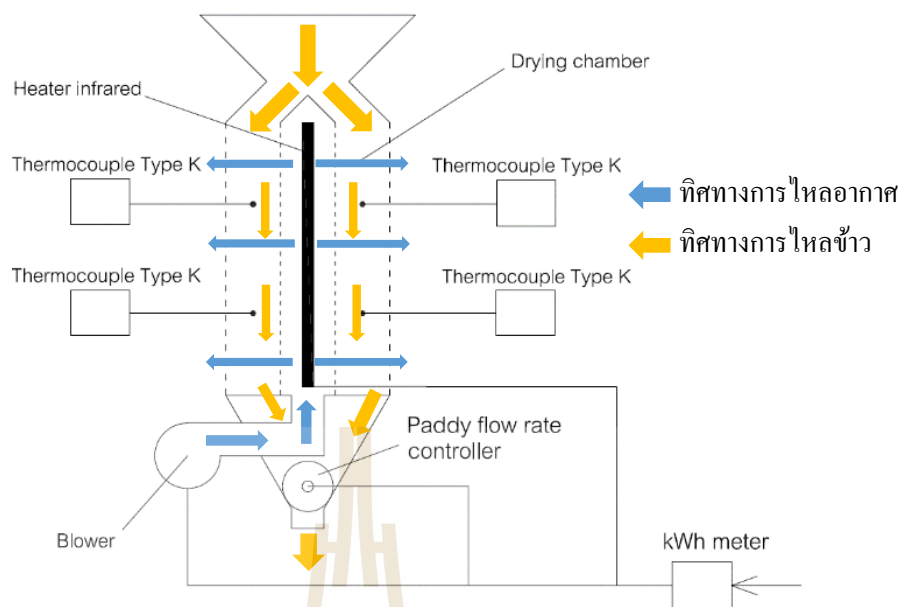


รูปที่ 3.3 เพิ่มความชื้นให้ข้าวเปลือกโดยการพรมน้ำให้ทั่ว

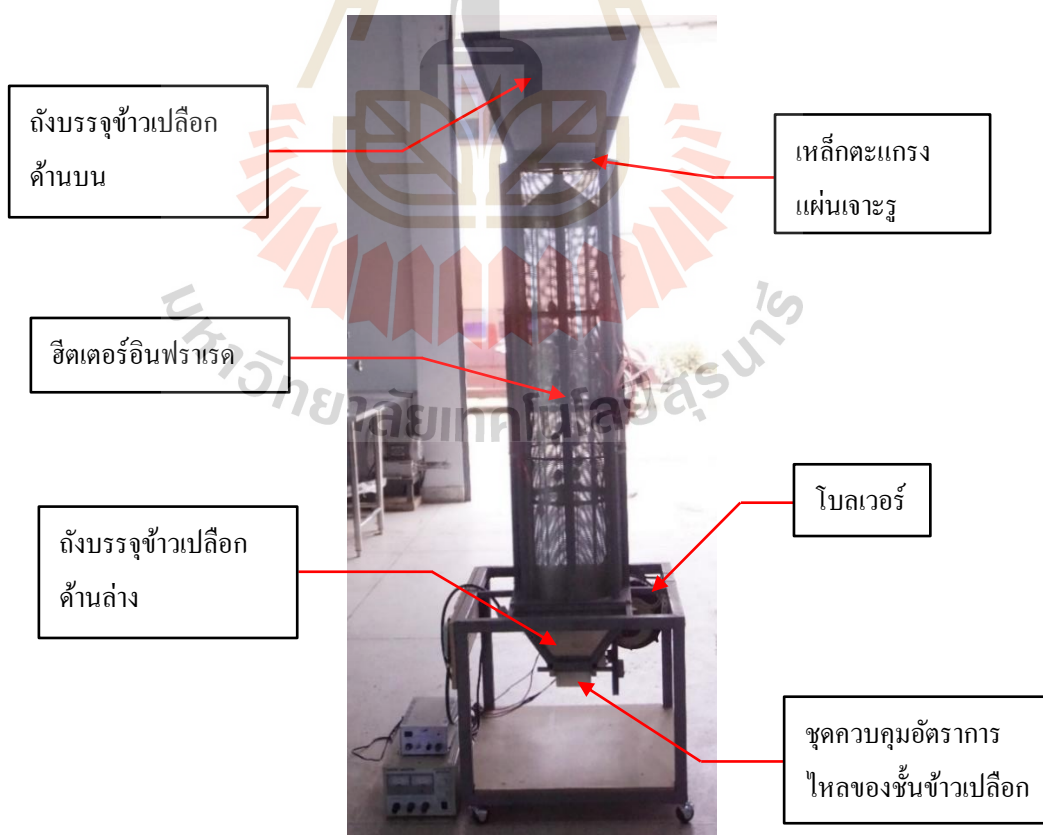
6) เก็บใส่ถุงดำและมัดปากถุงให้แน่นเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่ร่ม 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาทดสอบการอบแห้ง

### 3.2 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้น

การทำงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมีที่พัฒนาขึ้น มีลักษณะดังรูปที่ 3.4 เริ่มจากบรรจุข้าวใส่ลงในถังบรรจุข้าวเปลือก จากนั้นข้าวเปลือกจะไหลลงสู่บริเวณห้องอบแห้ง ซึ่งข้าวเปลือกที่อยู่ภายในห้องอบแห้ง จะได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีของฮีตเตอร์อินฟราเรด ความชื้นที่ออกมาจากข้าวเปลือกจะถูกนำออกด้วยลมที่มาจากโบลเวอร์ตามท่ออากาศเข้า โดยที่ความชื้นจะถูกถ่ายเทออกตามผนังของห้องอบแห้งที่ทำจากเหล็กแผ่นเจาะรู จากนั้นข้าวเปลือกจะไหลลงสู่บริเวณด้านล่างของห้องอบแห้งและจะถูกนำออกจากห้องอบแห้งโดยชุดควบคุมอัตราการไหลของชั้นข้าวเปลือก ซึ่งโบลเวอร์และชุดควบคุมอัตราการไหลของชั้นข้าวเปลือกสามารถควบคุมได้ด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้ ต้นแบบเครื่องอบแห้งแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 ภาพแสดงแผนผัง โครงสร้างของเครื่องอบแห้ง



รูปที่ 3.5 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้น

### 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.3.1 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมีที่พัฒนาขึ้น

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่พัฒนาขึ้นมีลักษณะดังรูปที่ 3.5 ประกอบด้วย

- 1) ถังบรรจุข้าวเปลือกด้านบนห้องอบแห้ง ทำจากสังกะสีแผ่นเรียบ
- 2) ห้องอบแห้ง ความสูง 1.05 m ผนังด้านในห้องอบแห้งรูปทรง 16 เหลี่ยม ทำจากกระจกใสขนาด 5 x 25 cm, 5 x 35 cm และ 5 x 45 cm นำกระจกมาต่อกันด้วยกาวอีพ็อกซีดินน้ำมันยึดไว้กับโครงเหล็ก ผนังด้านนอกห้องอบแห้งรูปทรงกระบอกทำจากเหล็กแผ่นเจาะรูเบอร์ 7 (ขนาดรู 1.75 mm) ยึดกับโครงเหล็ก โดยผนังด้านในของห้องอบแห้งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 26.5 cm และผนังด้านนอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 29.5 cm

- 3) ฮีตเตอร์อินฟราเรด รุ่น HDRB-17 (หลอดสีดำแบบติดตั้งแนวตั้ง-แนวนอน) กำลังไฟฟ้า 1,200 W ความยาวช่วงให้ความร้อน 1,000 mm แรงดันไฟฟ้า 220 V

- 4) ถังบรรจุข้าวเปลือกด้านล่างห้องอบแห้ง ทำจากสังกะสีแผ่นเรียบ

- 5) ชุดควบคุมอัตราการไหลขึ้นข้าวเปลือก ทำจากซูเปอร์ลินทรงกระบอกขนาด 10 x 10 x 10 cm เซาะร่องรูปทรงสี่เหลี่ยม 4 ร่อง ขนาดร่อง 2 x 2 x 10 cm

- 6) โบลเวอร์กระแสตรง 24 V, 5 A

- 7) มอเตอร์กระแสตรง 15 W, 12 V อัตราทด 1:6.1 ความเร็วรอบ 100 rpm

- 8) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 24 V, 5A

- 9) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 12 V, 5A

#### 3.3.2 เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพืช

สำหรับการวัดความชื้นตัวอย่างทดสอบใช้เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพืช model SB900, The Steinlite Corporation, Atchison, Kansas USA (รูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพืช

### 3.3.3 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลพิกัด 2,200 g

สำหรับชั่งน้ำหนักตัวอย่างวัสดุอบแห้งในการทดสอบใช้เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลพิกัด 2,200 g ที่มีความละเอียด 0.01 g (รูปที่ 3.7)



รูปที่ 3.7 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลพิกัด 2,200 g

### 3.3.4 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลพิกัด 150 kg

สำหรับชั่งน้ำหนักตัวอย่างวัสดุอบแห้งก่อนอบแห้งในการทดสอบใช้เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลพิกัด 150 kg ที่มีความละเอียด 0.001 kg (รูปที่ 3.8)



รูปที่ 3.8 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลพิกัด 150 kg

### 3.3.5 แอนนิโมมิเตอร์

สำหรับการวัดอัตราการไหลของอากาศทางเข้าโบลเวอร์ใช้แอนนิโมมิเตอร์ รุ่น AM-4836V (รูปที่ 3.9)



รูปที่ 3.9 แอนนิโมมิเตอร์

### 3.3.6 วัดต์มิเตอร์

สำหรับการวัดพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งใช้วัดต์มิเตอร์ 3,000 วัตต์ รุ่น D02A (รูปที่ 3.10)



รูปที่ 3.10 วัดต์มิเตอร์

### 3.3.7 Thermocouple Type K

สำหรับการวัดอุณหภูมิชั่วเปลื้องขณะอบแห้ง อุณหภูมิอากาศทางเข้าและทางออก เครื่องอบแห้งในการทดสอบใช้ Thermocouple Type K (รูปที่ 3.11)



รูปที่ 3.11 Thermocouple Type K

### 3.3.8 นาฬิกาจับเวลา

ระหว่างการทดสอบใช้นาฬิกาจับเวลาเพื่อจับเวลาสำหรับการวัดความชื้นตัวอย่างทดสอบ (รูปที่ 3.12)



รูปที่ 3.12 นาฬิกาจับเวลา



### 3.3.9 เครื่องสีข้าวระบบลูกยาง

สำหรับการสีข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งเพื่อตรวจสอบคุณภาพใช้เครื่องสีข้าวระบบลูกยาง รุ่น NW-150 (รูปที่ 3.13)



รูปที่ 3.13 เครื่องสีข้าวระบบลูกยาง

### 3.3.10 เครื่องขัดขาวข้าว

สำหรับการขัดขาวข้าวกล้องที่ผ่านการกะเทาะเปลือกเพื่อตรวจสอบคุณภาพใช้เครื่องขัดขาวข้าว (รูปที่ 3.14)



รูปที่ 3.14 เครื่องขัดขาวข้าว

### 3.3.11 เครื่องแยกเมล็ดข้าวหัก (ตะแกรงกลมยาว)

สำหรับการแยกข้าวต้นกับข้าวหักเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นใช้เครื่องแยกเมล็ดข้าวหัก (ตะแกรงกลมยาว) (รูปที่ 3.15)



รูปที่ 3.15 เครื่องแยกเมล็ดข้าวหัก(ตะแกรงกลมยาว)

### 3.3.12 เครื่องวัดความขาว

สำหรับการทดสอบหาค่าดัชนีความขาวข้าวใช้เครื่องวัดความขาว Model : Kett C-600, Kett Electronic Laboratory Corporation, Tokyo, Japan (รูปที่ 3.16)



รูปที่ 3.16 เครื่องวัดความขาว

### 3.3.13 ห้องเย็น

การเก็บรักษาข้าวเปลือกสดสามารถทำได้โดยเก็บในห้องเย็นที่อุณหภูมิประมาณ 4°C (รูปที่ 3.17)



รูปที่ 3.17 ห้องเย็น

### 3.4 การผึ่งแห้งข้าวเปลือกเพื่อใช้เป็นชุดควบคุมคุณภาพ

การผึ่งแห้งข้าวเปลือกเพื่อใช้เป็นชุดควบคุมคุณภาพสามารถทำได้โดยวิธีการดังต่อไปนี้

- 1) นำข้าวเปลือกมาผึ่งในที่ร่ม (รูปที่ 3.18)



รูปที่ 3.18 ผึ่งข้าวเปลือกในที่ร่ม

- 2) วัดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องวัดความชื้นเมล็ดพืชทุกวัน จนกระทั่งเหลือความชื้นประมาณ 14%wb
- 3) เก็บข้าวเปลือกที่มีความชื้นประมาณ 14%wb ในถุงซิปล็อกเพื่อใช้เป็นชุดควบคุมคุณภาพ
- 4) นำข้าวเปลือกที่เป็นชุดควบคุมคุณภาพไปหาเปอร์เซ็นต์ข้าวตันและค่าดัชนีความขาว

### 3.5 การทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือก

#### 3.5.1 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้น

ในการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกนั้นจะทดสอบที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 4 ระดับ คือ 0.837 1.228 1.875 และ 2.308 kg/min และอัตราการไหลอากาศ 2 ระดับ คือ 1.075 และ 2.150 m<sup>3</sup>/min ทำการทดลองที่สภาวะละ 3 ซ้ำ ซึ่งวิธีการดำเนินการทดลองเป็นไปตามวิธีการดังต่อไปนี้

- 1) เปิดการทำงานของระบบก่อนเริ่มทำการทดลองประมาณ 30 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของระบบคงที่
- 2) บรรจุข้าวเปลือกเก่าปริมาณ 15 kg เข้าไปในห้องอบแห้ง จากนั้นค่อย ๆ บรรจุข้าวเปลือกสดที่ใช้เป็นตัวอย่างทดสอบปริมาณ 15 kg เข้าไปในห้องอบแห้ง เนื่องจากต้องการให้ข้าวเปลือกที่เป็นตัวอย่างทดสอบได้รับความร้อนตามระยะเวลาที่กำหนด
- 3) นำตัวอย่างทดสอบปริมาณ 250 g (รูปที่ 3.19) มาวัดความชื้นทุก ๆ 6.5 8 12.5 และ 18 นาที (รูปที่ 3.20) ซึ่งระยะเวลาที่วัดความชื้นจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก โดยที่ระยะเวลาที่วัดความชื้นเป็นเวลาที่ข้าวเปลือกเคลื่อนที่ในห้องอบแห้งครบ 1 รอบ



รูปที่ 3.19 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบ 250 g



รูปที่ 3.20 การวัดความชื้นตัวอย่างทดสอบ

- 4) ทำการอบแห้งตัวอย่างทดสอบจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 14%wb
- 5) บันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง
- 6) เก็บตัวอย่างทดสอบที่ความชื้นสุดท้ายประมาณ 14%wb ปริมาณ 250 g เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบคุณภาพ

### 3.5.2 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลอากาศของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้น

ในการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลอากาศนั้นจะทดสอบที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 4 ระดับ คือ 0.837 1.228 1.875 และ 2.308 kg/min และอัตราการไหลอากาศ 2 ระดับ คือ 1.075 และ 2.150 m<sup>3</sup>/min ซึ่งวิธีการดำเนินการทดลองทำเช่นเดียวกับการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้น

## 3.6 การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

การประเมินสมรรถนะในการอบแห้งจะพิจารณาในรูปของพฤติกรรมของการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) เปอร์เซ็นต์ข้าวตัน (Head rice yield, HRY) และค่าดัชนีความขาวของข้าว (Whiteness index, WI)

### 3.6.1 พฤติกรรมของการอบแห้ง

การศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งนั้นจะแสดงด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของตัวอย่างทดสอบที่เวลาใด ๆ เทียบกับเวลา หรือการเปลี่ยนแปลงค่า

อัตราส่วนความชื้นของตัวอย่างทดสอบที่เวลาใด ๆ เทียบกับเวลา โดยค่าอัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.1)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} \quad (3.1)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น

$M_t$  คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ ของข้าวเปลือก (%db)

$M_i$  คือ ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก (%db)

$M_{eq}$  คือ ความชื้นสมดุลของข้าวเปลือก (%db)

### 3.6.2 อัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้งสามารถพิจารณาได้จากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง สามารถคำนวณได้ตามสมการ (3.2)

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t} \quad (3.2)$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง ( $\text{kg}_{\text{water}}/\text{h}$ )

$W_i$  คือ น้ำหนักเริ่มต้นของข้าวเปลือก (kg)

$W_f$  คือ น้ำหนักข้าวเปลือกหลังอบแห้ง (kg)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

### 3.6.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสามารถพิจารณาได้จากพลังงานทั้งหมดในกระบวนการอบแห้ง (MJ) ต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือก (kg) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.3)

$$SEC = \frac{3.6E}{W_i - W_f} \quad (3.3)$$

เมื่อ SEC คือ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ( $\text{MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$ )  
 E คือ พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในกระบวนการอบแห้ง (kWh)

ในการประเมินสมรรถนะของการอบแห้งด้วยพฤกษกรรมการอบแห้ง อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะนั้นจะทำการเปรียบเทียบค่าอัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่สภาวะการทดสอบที่อัตราการไหลชื้นข้าวเปลือก 4 ระดับ คือ 0.837 1.228 1.875 และ 2.308  $\text{kg}/\text{min}$  และที่อัตราการไหลอากาศ 2 ระดับ คือ 1.075  $\text{m}^3/\text{min}$  และ 2.150  $\text{m}^3/\text{min}$

### 3.6.4 เปรอร์เซ็นต์ข้าวต้น

การหาเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นนั้นจะใช้ตัวอย่างทดสอบที่สภาวะอัตราการไหลชื้นข้าวเปลือก 4 ระดับ คือ 0.837 1.228 1.875 และ 2.308  $\text{kg}/\text{min}$  โดยที่อัตราการไหลอากาศคงที่ด้วยอัตราการไหล 1.075  $\text{m}^3/\text{min}$  ซึ่งสามารถทำได้โดยวิธีการดังต่อไปนี้

1) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบที่พัฒนาขึ้นที่มีความชื้นประมาณ 14%wb ปริมาณ 125 g (รูปที่ 3.21)



รูปที่ 3.21 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบ 125 g

2) นำตัวอย่างทดสอบมาแกะทะาะเปลือกด้วยเครื่องสีข้าวระบบลูกยาง (Model : NW-150) (รูปที่ 3.22)



รูปที่ 3.22 นำตัวอย่างทดสอบมากะเทาะเปลือก

- 3) นำข้าวกล้องที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก (รูปที่ 3.23) และนำไปขัดขาวด้วยเครื่องขัดขาว (รูปที่ 3.24)



รูปที่ 3.23 ชั่งน้ำหนักข้าวกล้อง





รูปที่ 3.24 ขัดข้าวข้าวกล้องด้วยเครื่องขัดข้าว

4) ทำการแยกข้าวตังและข้าวหักออกจากกันด้วยเครื่องแยกเมล็ดข้าวหัก (รูปที่ 3.25 และ 3.26) จากนั้นชั่งน้ำหนักข้าวตังและบันทึกข้อมูล (รูปที่ 3.27) โดยที่เปอร์เซ็นต์ข้าวตังสามารถคำนวณได้ตามสมการ (3.4)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ข้าวตัง} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวตัง}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100 \% \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.25 ข้าวตังที่ได้จากการแยกด้วยเครื่องแยกเมล็ดข้าวหัก



รูปที่ 3.26 ข้าวหักที่ได้จากการแยกด้วยเครื่องแยกเมล็ดข้าวหัก



รูปที่ 3.27 ชั่งน้ำหนักข้าวตันที่ได้จากการแยกด้วยเครื่องแยกเมล็ดข้าวหัก

### 3.6.5 ดัชนีความขาว

การหาดัชนีความขาวนั้นจะใช้ตัวอย่างทดสอบที่สภาวะอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 4 ระดับ คือ 0.837 1.228 1.875 และ 2.308 kg/min โดยที่อัตราการไหลอากาศคงที่ด้วยอัตราการไหล 1.075 m<sup>3</sup>/min ซึ่งสามารถทำได้โดยการนำข้าวตันไปวัดค่าดัชนีความขาวด้วยเครื่องวัดความขาว (รูปที่ 3.28) ซึ่งจะทำการวัด 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.28 วัดค่าดัชนีความขาวด้วยเครื่องวัดความขาว

ในการประเมินสมรรถนะของการอบแห้งด้วยเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นและค่าดัชนีความขาวนั้น จะทำการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ของเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นและค่าดัชนีความขาวระหว่างข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบที่พัฒนาขึ้นและชุดควบคุม(ข้าวเปลือกที่ผ่านการลดความชื้นด้วยการ ผึ่งไว้ในที่ร่ม)

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้กล่าวถึง ผลการศึกษาการทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเปลือก โดยใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมี จากพฤติกรรมของการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นและดัชนีความขาว ซึ่งได้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

#### 4.1 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้น

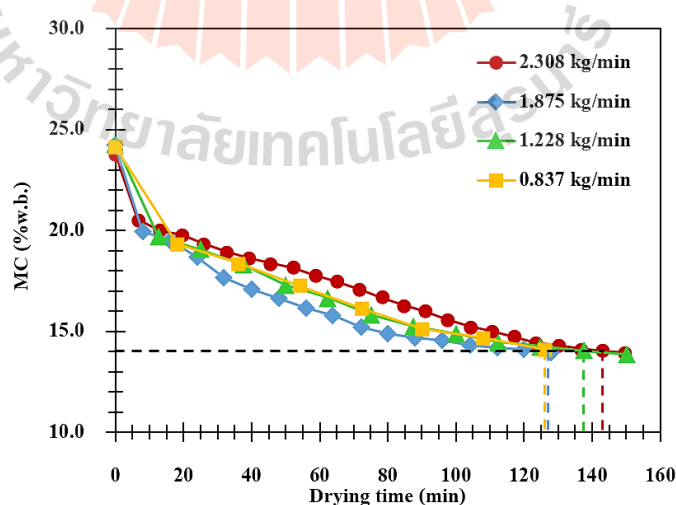
ในการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกนั้น ได้ทำการทดสอบที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 4 ระดับ คือ 0.837 1.228 1.875 และ 2.308 kg/min และอัตราการไหลอากาศ 2 ระดับ คือ 1.075 และ 2.150 m<sup>3</sup>/min โดยข้าวเปลือกที่นำมาทดสอบสำหรับสภาวะอัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min เป็นข้าวเปลือกสด แต่ที่สภาวะอัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min ใช้ข้าวเปลือกที่ผ่านการเพิ่มความชื้น เนื่องจากปริมาณข้าวเปลือกไม่เพียงพอต่อการทดสอบ ซึ่งข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดสอบจะมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 23–26%wb ทดสอบการอบแห้งครั้งละ 15 kg และทำการวัดความชื้นของตัวอย่างทดสอบตามเวลาที่กำหนดด้วยเครื่องวัดความชื้นเมล็ดพืช ซึ่งการศึกษาดังกล่าวจะพิจารณาจากลักษณะของพฤติกรรมของการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

##### 4.1.1 พฤติกรรมของการอบแห้ง

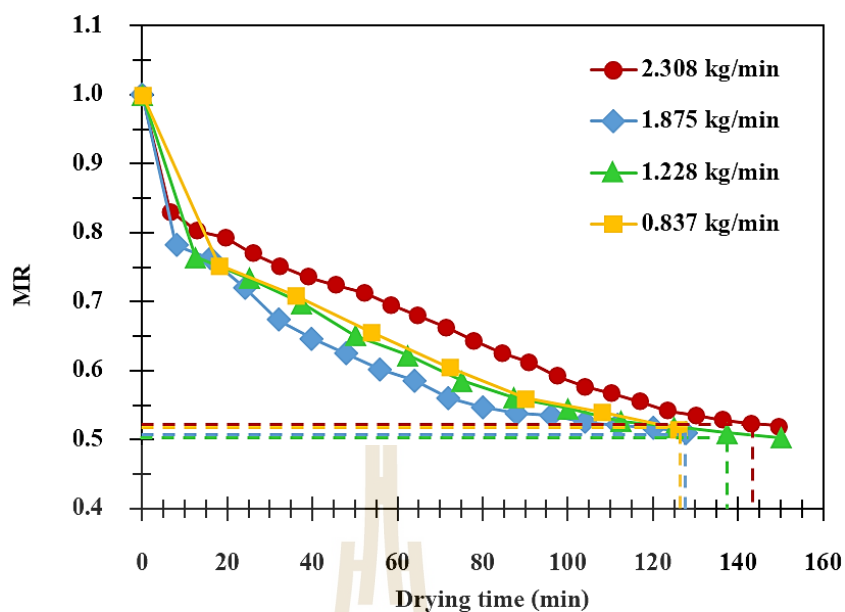
จากการทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น โดยทำการทดสอบที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 4 ระดับ ซึ่งลักษณะของพฤติกรรมของการอบแห้งข้าวเปลือกนั้นสามารถแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ออบแห้ง จากการทดสอบพบว่า พฤติกรรมของกระบวนการอบแห้งส่วนใหญ่เกิดในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period) โดยในช่วงแรกของการอบแห้งนั้นความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วและหลังจากนั้นความชื้นจะค่อย ๆ ลดลง เนื่องจากกระบวนการระเหยน้ำของข้าวเปลือกในช่วงแรกจะเกิดขึ้นที่ผิวของข้าวเปลือกแต่เมื่อเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นกระบวนการระเหยน้ำของข้าวเปลือกจะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถึง 4.4 จากการพิจารณาผลกระทบจากอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก

พบว่าที่อัตราการไหลอากาศ  $1.075 \text{ m}^3/\text{min}$  เมื่ออัตราการไหลของชื้นข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นจาก  $0.837$  ถึง  $1.875 \text{ kg}/\text{min}$  การเปลี่ยนแปลงความชื้นเทียบกับเวลามีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของชื้นข้าวเปลือกเป็น  $2.308 \text{ kg}/\text{min}$  กลับพบว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นเทียบกับเวลามีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ส่วนที่อัตราการไหลอากาศ  $2.150 \text{ m}^3/\text{min}$  นั้นทุกอัตราการไหลชื้นข้าวเปลือกมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นเทียบกับเวลาที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4

เมื่อพิจารณาจากอิทธิพลของอัตราการไหลชื้นข้าวเปลือก ที่อัตราการไหลอากาศ  $1.075 \text{ m}^3/\text{min}$  พบว่าที่อัตราการไหลชื้นข้าวเปลือก  $0.837$   $1.228$  และ  $1.875 \text{ kg}/\text{min}$  มีแนวโน้มการลดลงของความชื้นในลักษณะเดียวกันเนื่องจากมีอัตราการไหลชื้นข้าวเปลือกต่ำทำให้ชื้นข้าวเปลือกมีเวลาอยู่ในห้องอบแห้งมากส่งผลให้รับรังสีอินฟราเรดได้มากจึงเกิดความร้อนภายในข้าวเปลือกจากผลของการแผ่รังสี ประกอบกับลมที่เป่าเข้ามาได้รับความร้อนจากแท่งอินฟราเรดเมื่อไหลผ่านชั้นข้าวเปลือกได้ส่งผ่านความร้อน โดยการพาที่ผิวข้าวเปลือก จึงสามารถระบายความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจากการทดสอบพบว่าปริมาณลมที่ใช้มีค่าน้อยเกินกว่าที่จะนำความชื้นออกจากห้องอบแห้งได้ทัน ส่งผลให้การระบายความชื้นส่วนใหญ่เกิดขึ้นเมื่อข้าวเปลือกออกจากห้องอบแห้ง ทำให้พบว่าเส้นอัตราการไหลชื้นข้าวเปลือก  $1.875 \text{ kg}/\text{min}$  มีแนวโน้มลดลงเร็วกว่าที่อัตราการไหล  $0.837$  และ  $1.228 \text{ kg}/\text{min}$  แต่เมื่อชื้นข้าวเปลือกเคลื่อนที่เร็วขึ้นด้วยอัตราการไหล  $2.308 \text{ kg}/\text{min}$  จะทำให้ชื้นข้าวเปลือกมีเวลาอยู่ในห้องอบแห้งน้อยลงส่งผลให้มีระยะเวลาที่ได้รับความร้อนจากรังสีอินฟราเรดน้อยลง จึงให้มีอัตราการลดลงของความชื้นน้อยกว่าชื้นข้าวเปลือกที่เคลื่อนที่ช้า (อัตราการไหลน้อยกว่า) โดยพฤติกรรมดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2

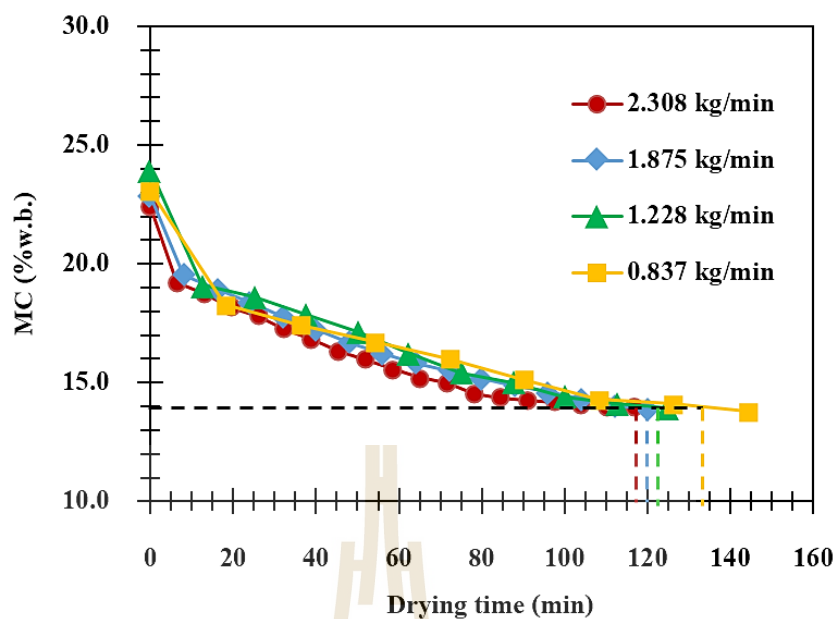


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้ออบแห้งที่อัตราการไหลชื้นข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ  $1.075 \text{ m}^3/\text{min}$

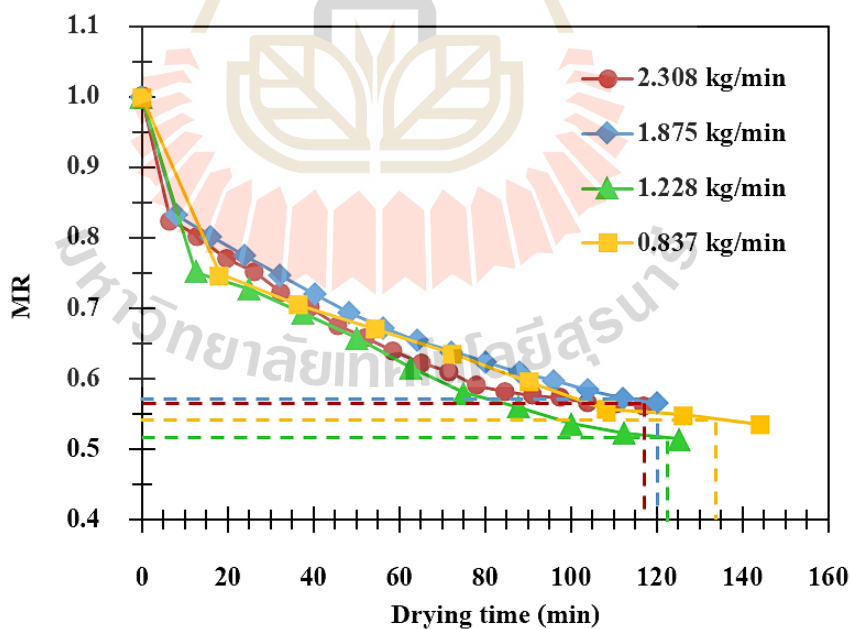


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ออบแห้งที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min

เมื่อเพิ่มอัตราการไหลอากาศเป็น 2.150 m<sup>3</sup>/min จะพบว่า ทุกอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกนั้นมีการลดลงของความชื้นที่ใกล้เคียงกัน โดยสังเกตได้จากพฤติกรรมกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 เนื่องจากปริมาณอากาศที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้สามารถแทรกตัวผ่านเมล็ดข้าวเปลือกได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลให้สามารถนำความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือกที่ได้รับความร้อนได้ดียิ่งขึ้นถึงแม้ว่าจะมีระยะเวลาที่ชั้นข้าวเปลือกอยู่ในห้องอบแห้งแตกต่างกันก็ตาม



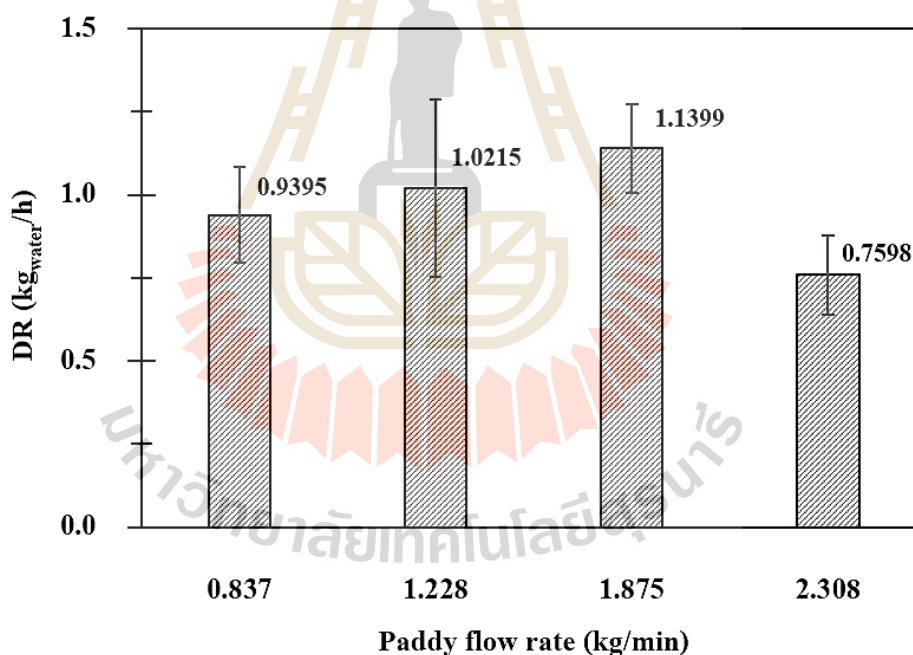
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้อบแห้งที่อัตราการไหลชื้น  
ข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้อบแห้งที่อัตราการไหลชื้น  
ข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min

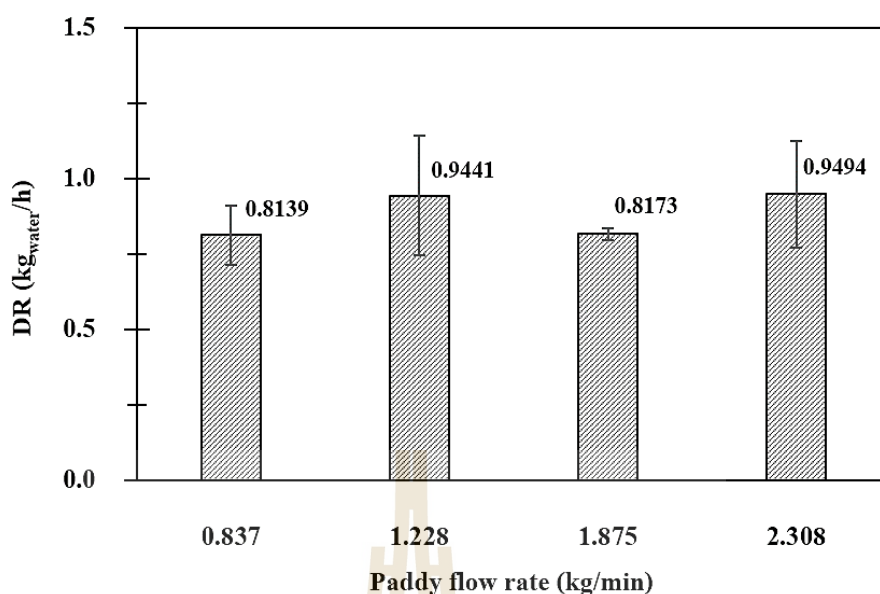
#### 4.1.2 อัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้งสามารถพิจารณาได้จากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง โดยปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.2) และอัตราการอบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.2) เมื่อพิจารณาผลกระทบจากอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก ที่อัตราการไหลอากาศ  $1.075 \text{ m}^3/\text{min}$  พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกจาก  $0.837$  เป็น  $1.875 \text{ kg}/\text{min}$  อัตราการอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของข้าวเปลือกเป็น  $2.308 \text{ kg}/\text{min}$  พบว่าอัตราการอบแห้งมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ส่วนที่อัตราการไหลอากาศ  $2.150 \text{ m}^3/\text{min}$  เมื่อเพิ่มอัตราการไหลอากาศพบว่าไม่สามารถสังเกตแนวโน้มของค่าอัตราการอบแห้งได้ ซึ่งอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก  $2.308 \text{ kg}/\text{min}$  มีอัตราการอบแห้งสูงสุดที่  $0.949 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$  และที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก  $0.837 \text{ kg}/\text{min}$  มีอัตราการอบแห้งต่ำสุดที่  $0.814 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 อัตราการอบแห้งของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ  $1.075 \text{ m}^3/\text{min}$

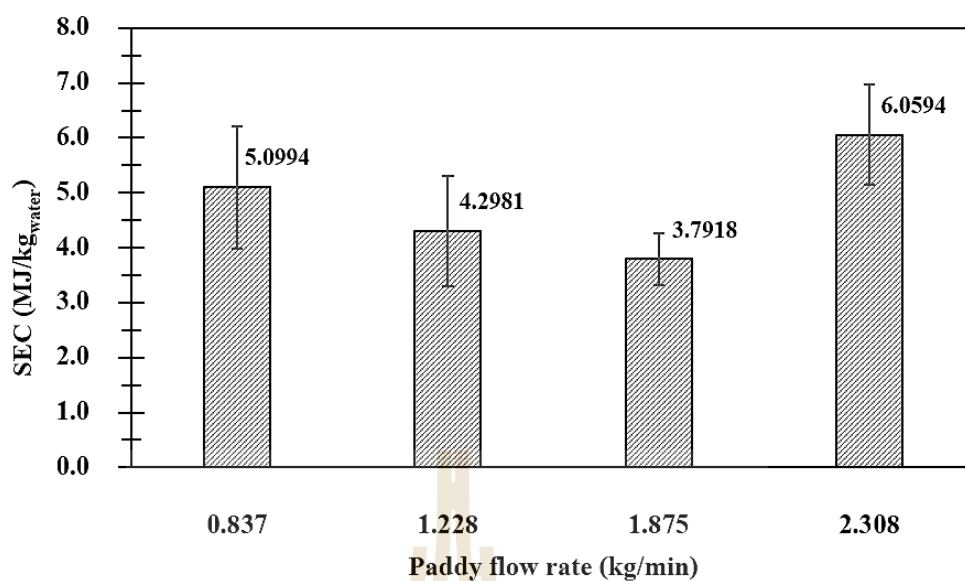




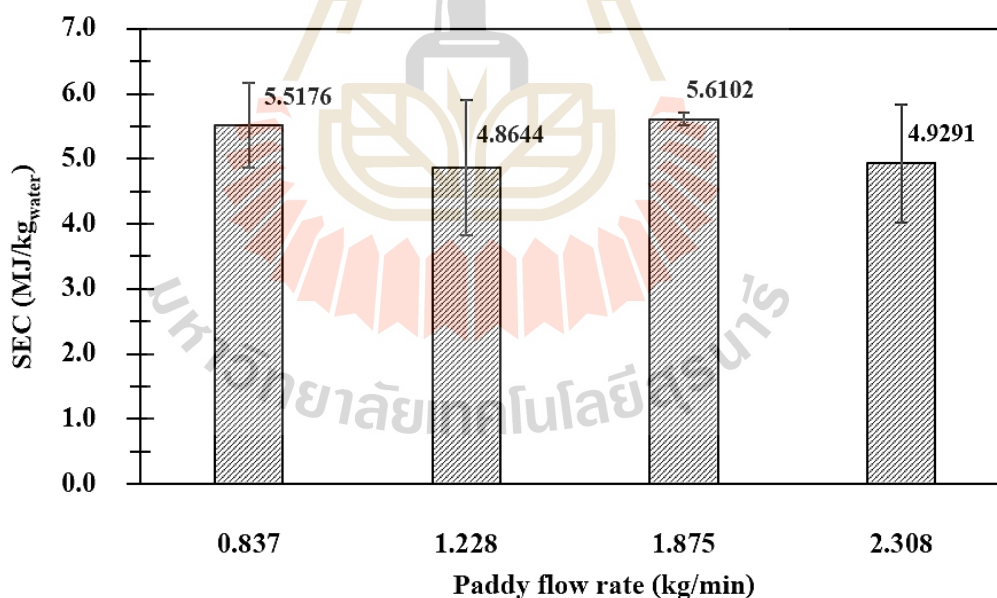
รูปที่ 4.6 อัตราการอบแห้งของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min

#### 4.1.3 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะคือพลังงานทั้งหมดของเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการกำจัดน้ำออกจากเมล็ดข้าวเปลือก โดยพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้งสามารถวัดได้จากวัตต์มิเตอร์และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.3) เมื่อพิจารณาผลกระทบจากอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกพบว่า ที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งข้าวเปลือกมีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมการอบแห้งและอัตราการอบแห้ง นั่นคือที่อัตราการไหลของข้าวเปลือก 1.875 kg/min เป็นอัตราการไหลที่ทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด โดยค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นจนถึง 1.875 kg/min และจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นเป็น 2.308 kg/min ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ส่วนที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min ไม่สามารถสังเกตแนวโน้มของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้ ซึ่งที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.228 kg/min มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดที่ 4.864 MJ/kg<sub>water</sub> และที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.875 kg/min มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงสุดที่ 5.610 MJ/kg<sub>water</sub> ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min



รูปที่ 4.8 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min

ตารางที่ 4.1 อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min

Drying conditions	DR (kg <sub>water</sub> /h)*	SEC (MJ/kg <sub>water</sub> )**
AFR 1.075 m <sup>3</sup> /min, PFR 0.837 kg/min	0.9397±0.14347 <sup>ab</sup>	5.0993±1.10790 <sup>ab</sup>
AFR 1.075 m <sup>3</sup> /min, PFR 1.228 kg/min	1.0217±0.26643 <sup>ab</sup>	4.2980±1.00248 <sup>ab</sup>
AFR 1.075 m <sup>3</sup> /min, PFR 1.875 kg/min	1.1397±0.13336 <sup>b</sup>	3.7920±0.47327 <sup>a</sup>
AFR 1.075 m <sup>3</sup> /min, PFR 2.308 kg/min	0.7597±0.11894 <sup>a</sup>	6.0597±0.92032 <sup>b</sup>

\*,\*\* Different letters within the column indicate significant differences (p<0.05)

จากการวิเคราะห์ทางสถิติของอัตราการอบแห้งร่วมกับความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่สภาวะการอบแห้งที่อัตราการไหลอากาศ (AFR) 1.075 m<sup>3</sup>/min (ตารางที่ 4.1) พบว่า อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก (PFR) 0.837 1.228 และ 1.875 kg/min มีค่าอัตราการอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะไม่แตกต่างกันทางสถิติ และจากการพิจารณาอัตราการอบแห้งร่วมกับความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะพบว่า ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.875 kg/min เป็นสภาวะที่มีอัตราการอบแห้งสูงสุดและมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด

ตารางที่ 4.2 อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min

Drying conditions	DR (kg <sub>water</sub> /h)*	SEC (MJ/kg <sub>water</sub> )**
AFR 2.150 m <sup>3</sup> /min, PFR 0.837 kg/min	0.8137±0.09780 <sup>a</sup>	5.5177±0.64724 <sup>a</sup>
AFR 2.150 m <sup>3</sup> /min, PFR 1.228 kg/min	0.9440±0.19734 <sup>a</sup>	4.8647±1.04297 <sup>a</sup>
AFR 2.150 m <sup>3</sup> /min, PFR 1.875 kg/min	0.8173±0.01986 <sup>a</sup>	5.6100±0.09473 <sup>a</sup>
AFR 2.150 m <sup>3</sup> /min, PFR 2.308 kg/min	0.9493±0.17757 <sup>a</sup>	4.9290±0.90180 <sup>a</sup>

\*,\*\* Same letters within the column indicate no significant differences (p≥0.05)

จากการพิจารณาอัตราการอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกที่สภาวะอัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 นั้นพบว่าไม่สามารถอธิบายลักษณะแนวโน้มของพฤติกรรมการอบแห้งได้ จึงทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางสถิติของอัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่อัตราการไหลอากาศ (AFR) 2.150 m<sup>3</sup>/min (ตารางที่ 4.2) พบว่า ที่อัตราการไหล

ชั้นข้าวเปลือก (PFR) ทุกอัตราการไหล มีค่าอัตราการอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะไม่แตกต่างกันทางสถิติ

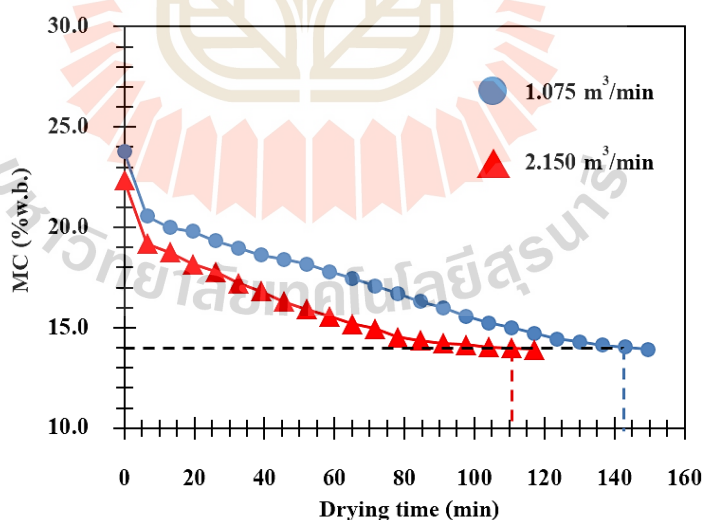
จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกที่อัตราการไหลอากาศต่าง ๆ โดยในการทดสอบที่อัตราการไหลอากาศ  $1.075 \text{ m}^3/\text{min}$  จะพบว่าที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก  $1.875 \text{ kg}/\text{min}$  จะมีอัตราการลดลงของความชื้นมากที่สุด และที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก  $0.837$  และ  $1.228 \text{ kg}/\text{min}$  จะมีอัตราการลดลงของความชื้นใกล้เคียงกัน ส่วนที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก  $2.308 \text{ kg}/\text{min}$  จะมีอัตราการลดลงของความชื้นที่น้อยที่สุด เนื่องจากที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก  $0.837$  และ  $1.228 \text{ kg}/\text{min}$  ชั้นข้าวเปลือกอยู่ในห้องอบแห้งเป็นเวลานานจึงได้รับความร้อนจากรังสีอินฟราเรดมากขึ้นทำให้ความชื้นในข้าวเปลือกเกิดการระเหยตัวมากขึ้นแต่ไม่สามารถถ่ายเทความชื้นออกจากชั้นข้าวเปลือกได้มากนักเนื่องจากอิทธิพลของความดันไอที่บริเวณชั้นข้าวเปลือกและชั้นข้าวเปลือกขวางการไหลอากาศที่จะพาความชื้นออกจากห้องอบแห้ง เมื่อเพิ่มอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกเป็น  $1.875 \text{ kg}/\text{min}$  จะส่งผลให้ชั้นข้าวเปลือกมีระยะเวลาอยู่ในห้องอบแห้งลดลงและได้รับความร้อนจากรังสีอินฟราเรดลดลง แต่สามารถระบายความชื้นออกจากชั้นข้าวเปลือกได้ดียิ่งขึ้นเนื่องจากชั้นข้าวเปลือกไหลเร็วขึ้นทำให้ชั้นข้าวเปลือกสามารถสัมผัสกับอากาศหลังออกจากห้องอบแห้งได้มากยิ่งขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกเป็น  $2.308 \text{ kg}/\text{min}$  จะส่งผลให้ชั้นข้าวเปลือกไหลเร็วเกินไปซึ่งทำให้ชั้นข้าวเปลือกได้รับความร้อนจากรังสีอินฟราเรดเป็นระยะเวลาสั้นทำให้เกิดกระบวนการระเหยความชื้นภายในชั้นข้าวเปลือกลดลงจึงส่งผลให้อัตราการอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นจาก  $0.837$  ถึง  $1.875 \text{ kg}/\text{min}$  และจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกเป็น  $2.308 \text{ kg}/\text{min}$  ส่วนค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นจาก  $0.837$  ถึง  $1.875 \text{ kg}/\text{min}$  และเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกเป็น  $2.308 \text{ kg}/\text{min}$  ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และสำหรับการทดสอบที่อัตราการไหลอากาศ  $2.150 \text{ m}^3/\text{min}$  จะพบว่าทุกค่าอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกจะมีลักษณะการลดลงของความชื้นที่คล้ายกันดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลอากาศจะทำให้มีปริมาณอากาศที่เข้าสู่ห้องอบแห้งมากขึ้นซึ่งส่งผลให้อากาศสามารถแทรกตัวผ่านชั้นข้าวเปลือกได้ดียิ่งขึ้นจึงทำให้กระบวนการถ่ายเทความชื้นออกจากชั้นข้าวเปลือกมีพฤติกรรมการลดลงของความชื้นที่คล้ายกันจึงส่งผลให้อัตราการอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน ดังแสดงในตาราง 4.2

## 4.2 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลอากาศของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้น

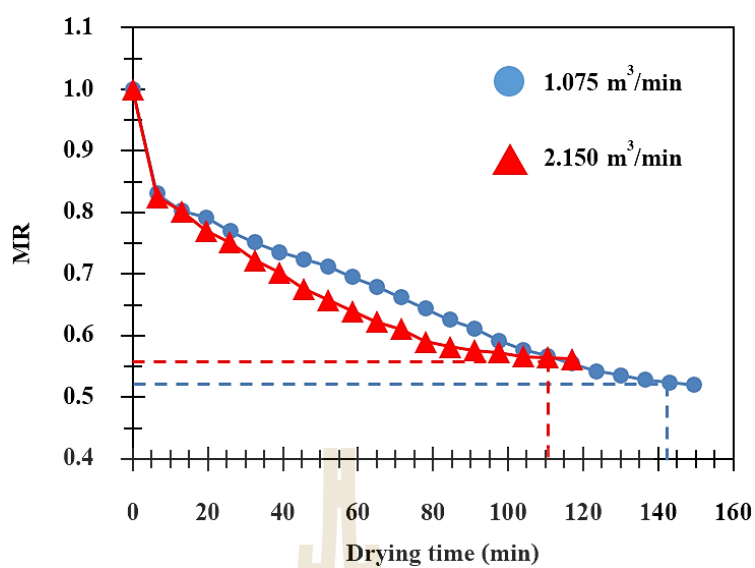
ในการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลอากาศนั้นจะนำข้อมูลการทดสอบที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก มาทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลอากาศ โดยพิจารณาจากลักษณะของพฤติกรรมของการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง ค่าความชื้นเปลือกพลังงานจำเพาะ

### 4.2.1 พฤติกรรมของการอบแห้ง

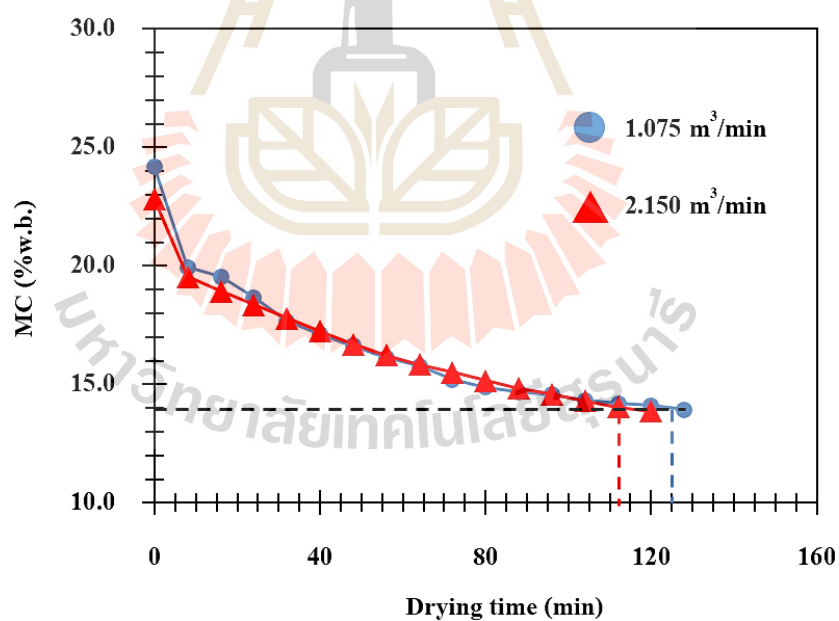
จากการทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น โดยศึกษาอิทธิพลจากอัตราการไหลอากาศ โดยทำการพิจารณาจากลักษณะพฤติกรรมของการอบแห้งที่สภาวะอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกเดียวกันแต่อัตราการไหลอากาศแตกต่างกัน ซึ่งจากการทดสอบพบว่าที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 2.308 1.875 และ 1.228 kg/min ที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min ใช้ระยะเวลาในการลดความชื้นให้เหลือประมาณ 14%wb น้อยกว่าที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ส่วนที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 0.837 kg/min นั้นที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min จะใช้ระยะเวลาในการลดความชื้นให้เหลือประมาณ 14%wb มากกว่าที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ดังแสดงในรูปที่ 4.9 – 4.16 แต่อย่างไรก็ตามควรพิจารณาจากตัวอย่างทดสอบที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากันเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น



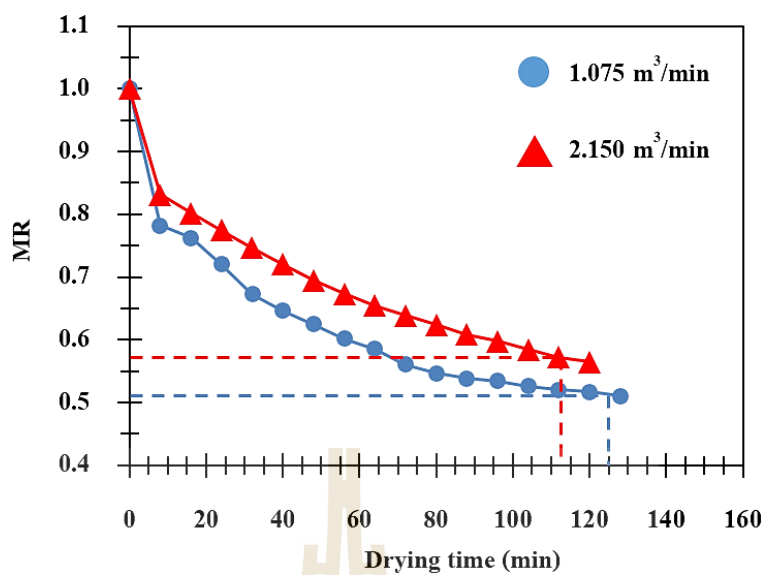
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้อบแห้งที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 2.308 kg/min



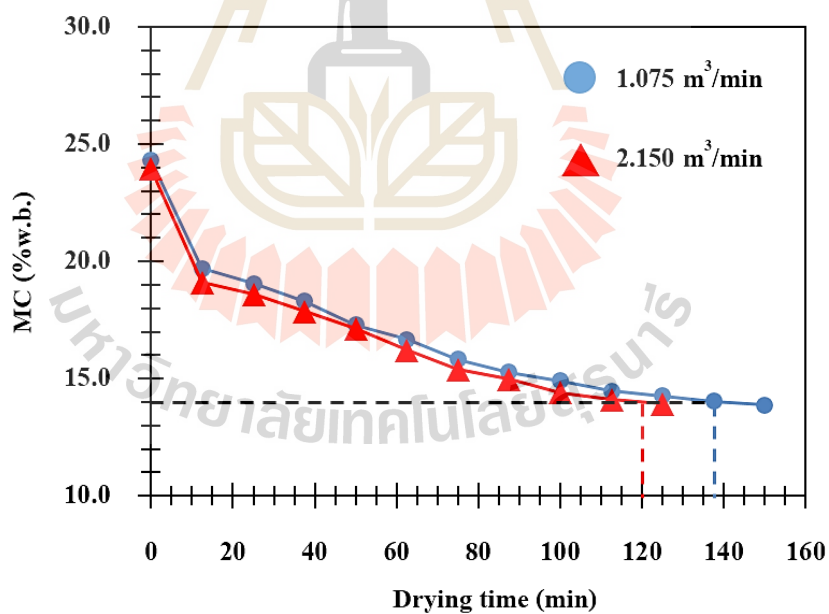
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้อบแห้งที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 2.308 kg/min



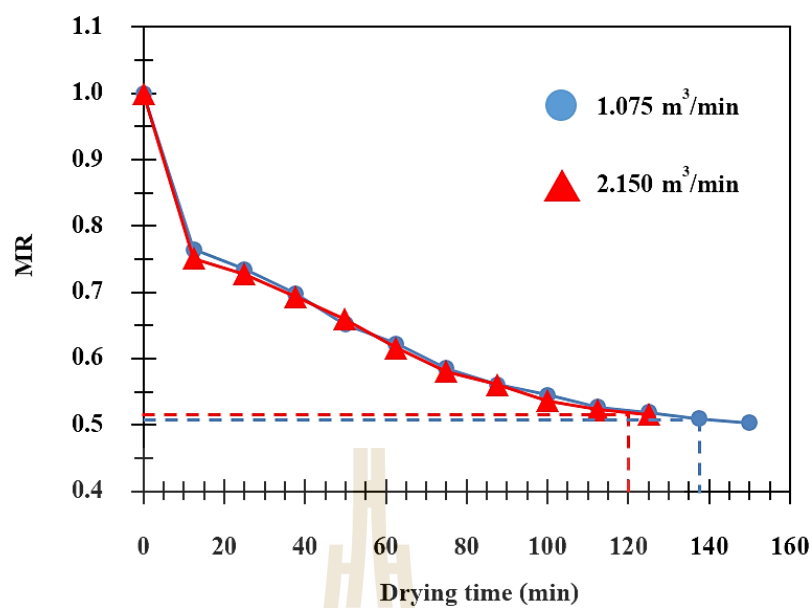
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้อบแห้งที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.875 kg/min



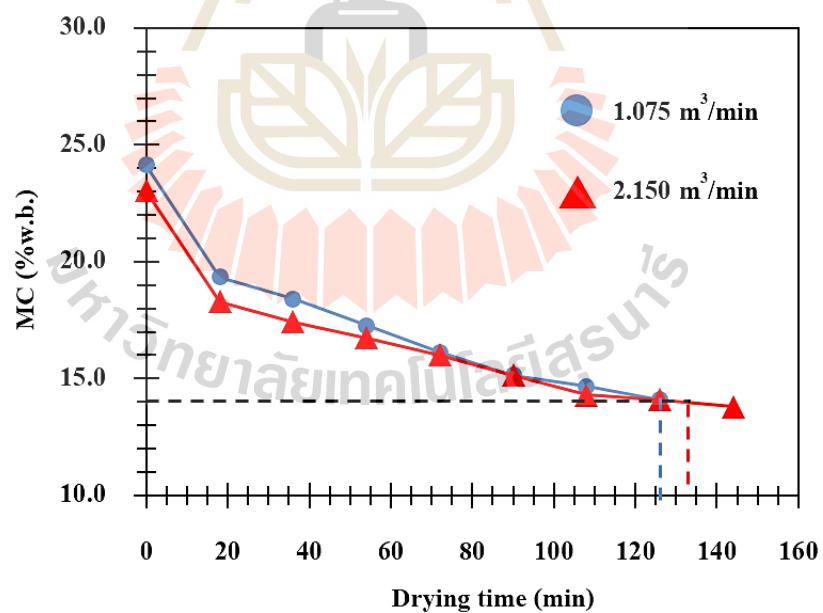
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้อบแห้งที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.875 kg/min



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้อบแห้งที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.228 kg/min

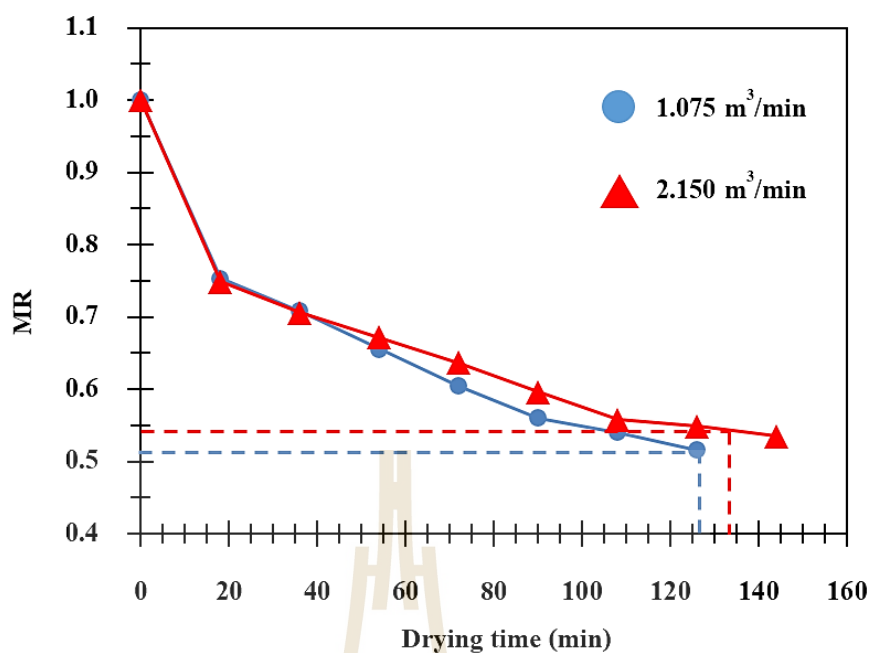


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้อบแห้งที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.228 kg/min



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเวลาที่ใช้อบแห้งที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 0.837 kg/min

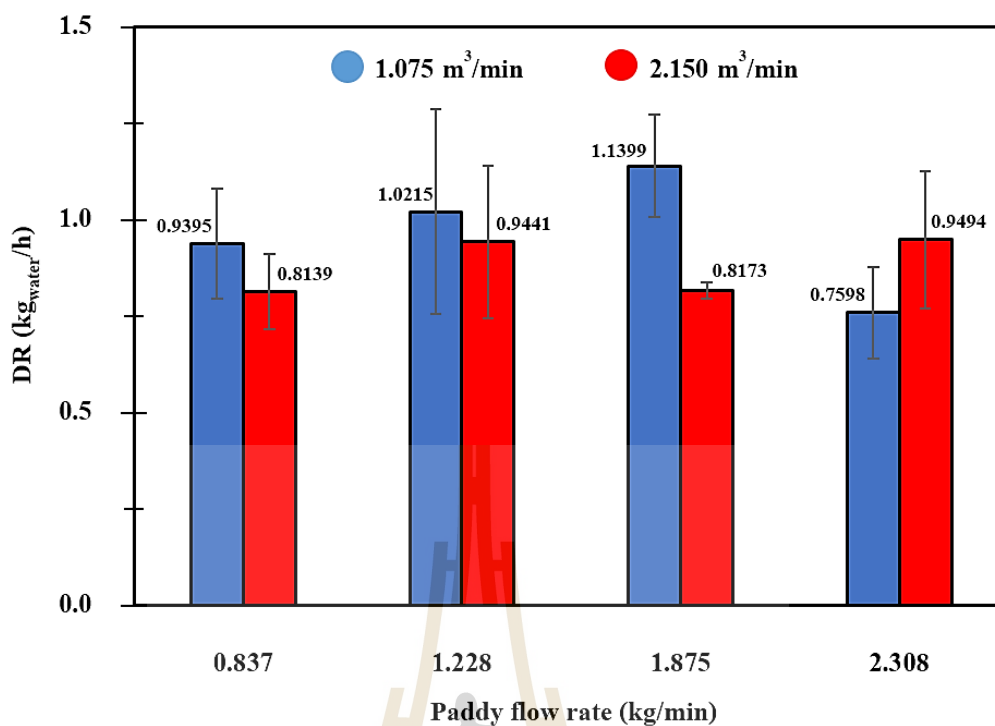




รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้อบแห้งที่อัตราการไหลชื้นข้าวเปลือก 0.837 kg/min

#### 4.2.2 อัตราการอบแห้ง

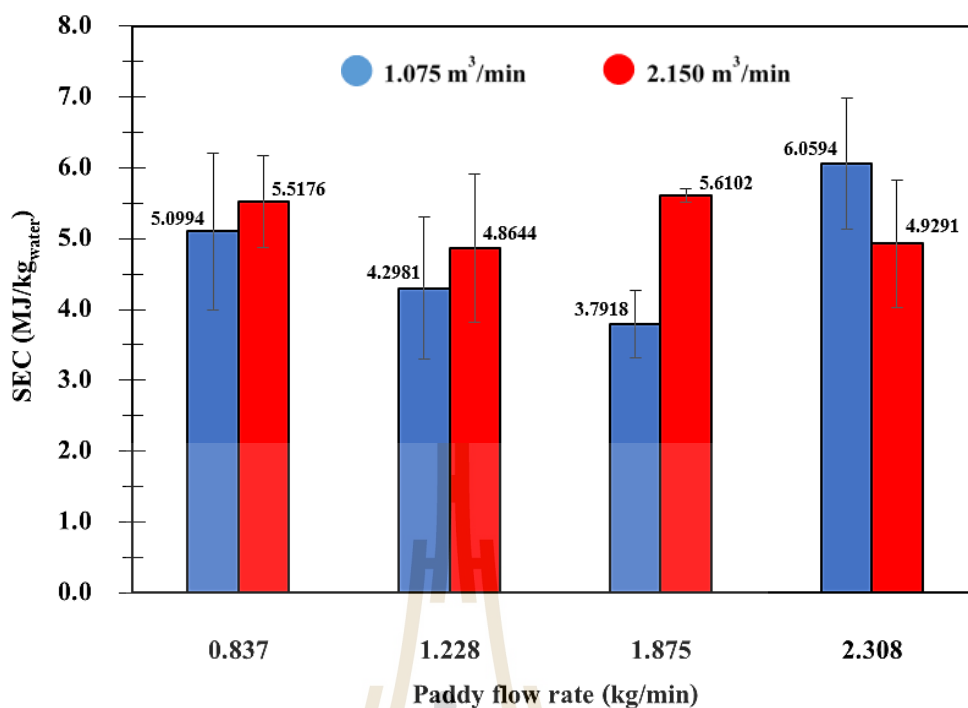
จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลอากาศของการอบแห้งที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการอบแห้งพบว่า เมื่ออัตราการไหลอากาศเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ที่อัตราการไหลชื้นข้าวเปลือก 0.837 1.228 และ 1.875 kg/min มีอัตราการอบแห้งลดลง แต่ที่อัตราการไหลชื้นข้าวเปลือก 2.308 kg/min นั้นจะมีอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 อัตราการอบแห้งของการอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 และ 2.150 m<sup>3</sup>/min

#### 4.2.3 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลอากาศของการอบแห้งที่ส่งผลกระทบต่อค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะพบว่า เมื่ออัตราการไหลอากาศเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 0.837 1.228 และ 1.875 kg/min มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น แต่ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 2.308 kg/min นั้นจะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 และ 2.150 m<sup>3</sup>/min

จากการวิเคราะห์ทางสถิติของอัตราการอบแห้งร่วมกับความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่สภาวะการอบแห้งที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกเดียวกันแต่อัตราการไหลอากาศต่างกันจะพบว่าที่สภาวะอัตราการไหลอากาศ 1.075 และ 2.150 m<sup>3</sup>/min นั้นที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 0.837 1.228 และ 2.308 kg/min มีค่าอัตราการอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะไม่แตกต่างกันทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 และ 2.150 m<sup>3</sup>/min

Drying conditions	DR (kg <sub>water</sub> /h)*	SEC (MJ/kg <sub>water</sub> )**
AFR 1.075 m <sup>3</sup> /min, PFR 0.837 kg/min	0.9397±0.14347 <sup>ab</sup>	5.0993±1.10790 <sup>abc</sup>
AFR 1.075 m <sup>3</sup> /min, PFR 1.228 kg/min	1.0217±0.26643 <sup>ab</sup>	4.2980±1.00248 <sup>ab</sup>
AFR 1.075 m <sup>3</sup> /min, PFR 1.875 kg/min	1.1397±0.13336 <sup>b</sup>	3.7920±0.47327 <sup>a</sup>
AFR 1.075 m <sup>3</sup> /min, PFR 2.308 kg/min	0.7597±0.11894 <sup>a</sup>	6.0597±0.92032 <sup>c</sup>
AFR 2.150 m <sup>3</sup> /min, PFR 0.837 kg/min	0.8137±0.09780 <sup>a</sup>	5.5177±0.64724 <sup>bc</sup>
AFR 2.150 m <sup>3</sup> /min, PFR 1.228 kg/min	0.9440±0.19734 <sup>ab</sup>	4.8647±1.04297 <sup>abc</sup>
AFR 2.150 m <sup>3</sup> /min, PFR 1.875 kg/min	0.8173±0.01986 <sup>a</sup>	5.6100±0.09473 <sup>bc</sup>
AFR 2.150 m <sup>3</sup> /min, PFR 2.308 kg/min	0.9493±0.17757 <sup>ab</sup>	4.9290±0.90180 <sup>abc</sup>

\*,\*\* Different letters within the same column indicate significant differences (p<0.05)

จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลอากาศที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกต่าง ๆ นั้น พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลอากาศจะไม่ส่งผลต่อลักษณะพฤติกรรมการอบแห้งมากนัก โดยในช่วงแรกความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นความชื้นจะลดลงด้วยอัตราคงที่ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 4.9–4.16 และเมื่อพิจารณาจากอัตราการอบแห้งจะพบว่าอัตราการอบแห้งมีแนวโน้มที่ลดลง ดังตารางที่ 4.3 เนื่องจากปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อากาศที่ผ่านฮีตเตอร์อินฟราเรดมีอุณหภูมิลดลงจาก 80°C เหลือประมาณ 55°C (ตารางผนวกที่ ค2) ซึ่งส่งผลให้ชั้นข้าวเปลือกมีอุณหภูมิลดลงจึงทำให้กระบวนการระเหยความชื้นที่ชั้นข้าวเปลือกลดลงตามไปด้วย ดังนั้นค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังตารางที่ 4.3

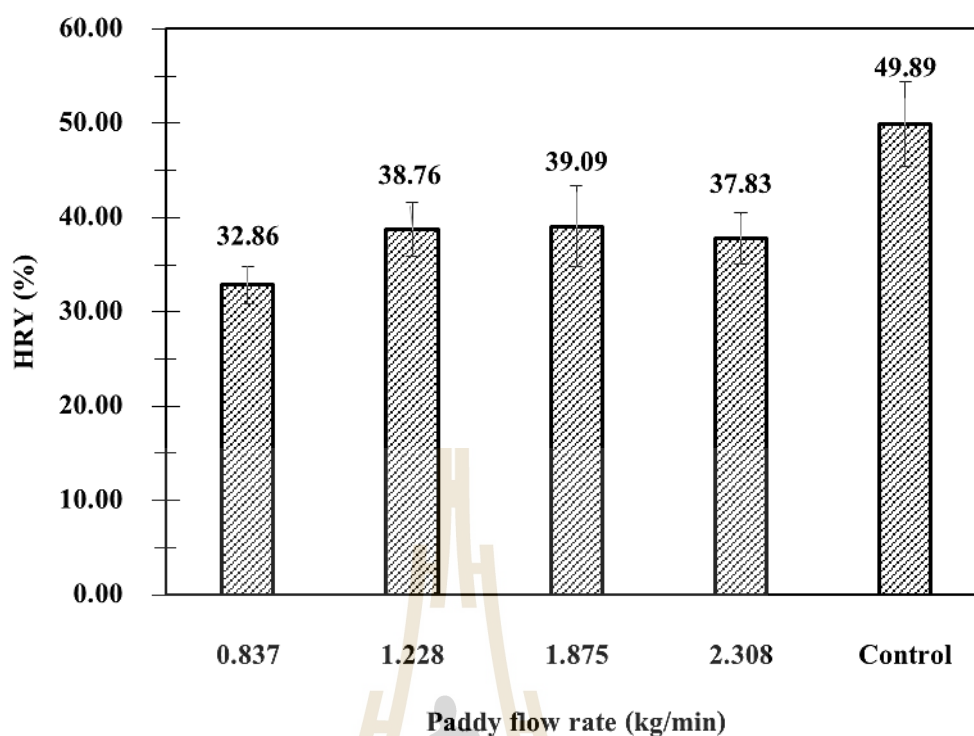
จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกและอัตราการไหลอากาศของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่พัฒนาขึ้น ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติของอัตราการอบแห้งร่วมกับความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจากการทดสอบที่สภาวะอัตราการไหลอากาศ 1.075 และ 2.150 m<sup>3</sup>/min พบว่า ที่สภาวะอัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min และอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.875 kg/min เป็นสภาวะที่ให้อัตราการอบแห้งสูงสุดและมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำสุด ดังนั้นการอบแห้งข้าวเปลือกที่สภาวะนี้จึงเป็นการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการทดสอบนี้

### 4.3 ผลการประเมินคุณภาพตัวอย่างทดสอบหลังการอบแห้ง

ในการประเมินคุณภาพของตัวอย่างทดสอบหลังการอบแห้งนั้นจะประเมินจากเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นและค่าดัชนีความขาว โดยตัวอย่างทดสอบที่นำมาใช้ในการประเมินคุณภาพนั้นจะใช้ตัวอย่างทดสอบที่ทำการทดสอบที่สภาวะอัตราการไหลอากาศ  $1.075 \text{ m}^3/\text{min}$  เนื่องจากที่อัตราการไหลอากาศ  $1.075 \text{ m}^3/\text{min}$  และอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก  $1.875 \text{ kg}/\text{min}$  เป็นสภาวะการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมีที่พัฒนาขึ้น โดยการประเมินคุณภาพของตัวอย่างทดสอบหลังการอบแห้งนั้นจะศึกษาอิทธิพลจากอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกที่ส่งผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นและค่าดัชนีความขาว

#### 4.3.1 เปอร์เซนต์ข้าวต้น

หลังการทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น จะนำตัวอย่างจากการทดสอบที่มีความชื้นประมาณ  $14\% \text{wb}$  ถูกนำไปกะเทาะเปลือกและขัดขาวเพื่อทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ข้าวต้น โดยเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสามารถคำนวณได้ตามสมการ (3.4) และเมื่อพิจารณาจากผลกระทบของอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกพบว่าที่อัตราการไหลต่ำข้าวเปลือกจะอยู่ในเครื่องอบแห้งนานทำให้ได้อิทธิพลจากรังสีอินฟราเรดนานกว่าจึงทำให้เกิดความร้อนสะสมภายในทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นมีค่าน้อยกว่าข้าวเปลือกที่ไหลด้วยอัตราที่สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกสูงถึง  $2.308 \text{ kg}/\text{min}$  กลับพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการที่อัตราการไหลของข้าวเปลือกที่สูงมากเกินไปทำให้จำนวนรอบในการวนกลับเข้าสู่ห้องอบแห้งเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เกิดความเสียหายทางกลต่อเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นมีค่าลดลง (รูปที่ 4.19) และเมื่อเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นระหว่างตัวอย่างข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกับชุดควบคุมคุณภาพ พบว่าข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นน้อยกว่าชุดตัวอย่างควบคุมทุกอัตราการไหล และจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิตินั้นจะพบว่า ทุกค่าอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก  $1.875 \text{ kg}/\text{min}$  เป็นอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกที่ตัวอย่างทดสอบมีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.19 เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นของข้าวหลังผ่านการอบแห้งที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min

ตารางที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นของการอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min

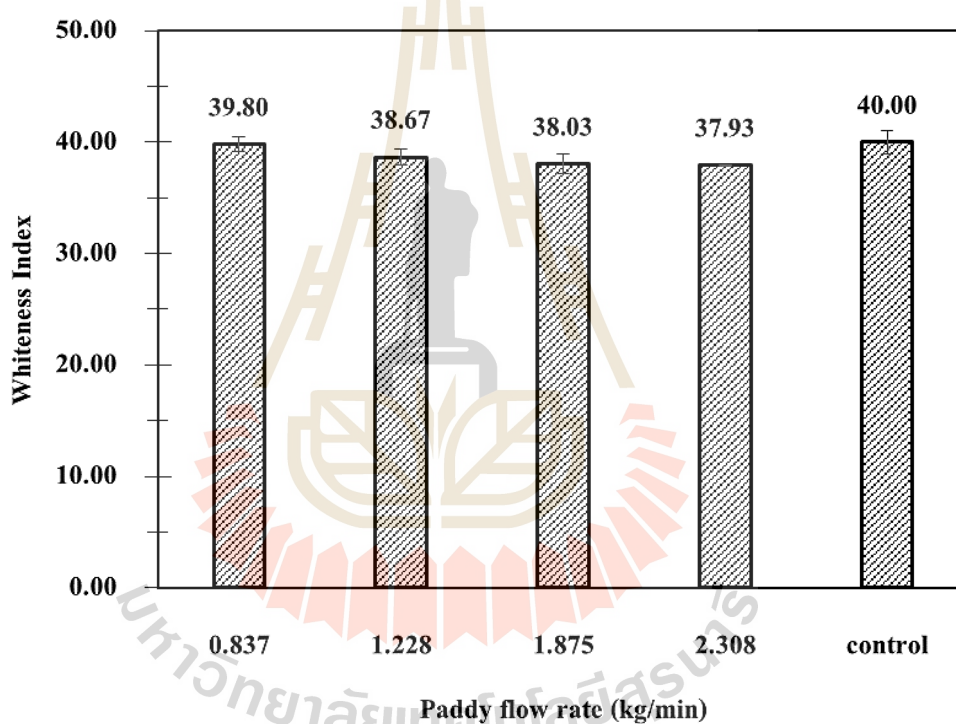
Drying conditions	HRV (%)*
AFR 1.075 m <sup>3</sup> /min, PFR 0.837 kg/min	32.8613±1.98413 <sup>a</sup>
AFR 1.075 m <sup>3</sup> /min, PFR 1.228 kg/min	38.7600±2.90976 <sup>a</sup>
AFR 1.075 m <sup>3</sup> /min, PFR 1.875 kg/min	39.0933±4.30561 <sup>a</sup>
AFR 1.075 m <sup>3</sup> /min, PFR 2.308 kg/min	37.8347±2.71357 <sup>a</sup>
Quality control sample	49.8933±4.47165 <sup>b</sup>

\* Different letters within the column indicate significant differences (p<0.05)

#### 4.3.2 ดัชนีความขาว

การทดสอบดัชนีความขาวนั้นจะนำตัวอย่างทดสอบที่ผ่านการหาเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นไปทดสอบดัชนีความขาวด้วยเครื่องวัดความขาว และจากการพิจารณาค่าดัชนีความขาวของชุดตัวอย่างควบคุมกับข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดพบว่า ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีค่าดัชนีความขาวใกล้เคียงกับชุดตัวอย่างควบคุม เนื่องจากอุณหภูมิของ

อากาศที่ผ่านฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีอุณหภูมิประมาณ  $80^{\circ}\text{C}$  (ตารางผนวกที่ ค2) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ไม่สูงมากเกินไป และเมื่อพิจารณาผลกระทบจากอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกที่มีต่อค่าดัชนีความขาวจะพบว่าที่ทุกค่าอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกนั้นค่าดัชนีความขาวจะน้อยกว่าค่าดัชนีความขาวของชุดตัวอย่างควบคุม และค่าดัชนีความขาวจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.20) และจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิตินั้นจะพบว่า ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.228 1.875 และ 2.308 kg/min ค่าดัชนีความขาวไม่แตกต่างกันทางสถิติ ดังนั้นที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 0.837 kg/min จึงเป็นอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกที่ส่งผลให้ตัวอย่างทดสอบมีค่าดัชนีความขาวสูงที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.20 ค่าดัชนีความขาวของข้าวหลังผ่านการอบแห้งที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกต่างกันที่อัตราการไหลอากาศ  $1.075 \text{ m}^3/\text{min}$

ตารางที่ 4.5 ค่าดัชนีความขาวของการอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min

Drying conditions	WI*
AFR 1.075 m <sup>3</sup> /min, PFR 0.837 kg/min	39.8000±0.65574 <sup>a</sup>
AFR 1.075 m <sup>3</sup> /min, PFR 1.228 kg/min	38.6667±0.68069 <sup>ab</sup>
AFR 1.075 m <sup>3</sup> /min, PFR 1.875 kg/min	38.0333±0.89629 <sup>b</sup>
AFR 1.075 m <sup>3</sup> /min, PFR 2.308 kg/min	37.9333±0.05774 <sup>b</sup>
Quality control sample	40.0000±1.01489 <sup>a</sup>

\* Different letters within the column indicate significant differences (p<0.05)

จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกและอัตราการไหลอากาศของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้นที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการอบแห้ง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นและค่าดัชนีความขาว ซึ่งจากการทดสอบพบว่า ที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min และอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.875 kg/min นั้นเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้น เนื่องจากที่สภาวะนี้เป็นสภาวะที่มีอัตราการอบแห้งสูงสุด ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงสุดและค่าดัชนีความขาวอยู่ในระดับที่ไม่ต่ำจากชุดควบคุมคุณภาพมากนัก ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากอัตราการอบแห้ง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นและค่าดัชนีความขาวร่วมกันสภาวะนี้จึงเป็นสภาวะที่การอบแห้งมีประสิทธิภาพสูงที่สุด แต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้นควรใช้ตัวอย่างทดสอบที่มีความชื้นหลังการอบแห้งที่มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด

แต่อย่างไรก็ตามจากการทดสอบได้พบข้อสังเกตว่ากระบวนการถ่ายเทความชื้นออกจากชั้นข้าวเปลือกส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นหลังจากชั้นข้าวเปลือกไหลออกจากห้องอบแห้งและขณะทำการโรยป้อนข้าวเปลือกวนเข้าสู่ห้องอบแห้ง เนื่องจากข้าวเปลือกที่ได้รับความร้อนจากรังสีอินฟราเรดจะสัมผัสกับอากาศได้ดียิ่งขึ้นหลังจากไหลออกจากห้องอบแห้งทำให้ถ่ายเทความชื้นได้มากกว่าขณะที่อยู่ในห้องอบแห้ง และการถ่ายเทความชื้นขณะโรยป้อนข้าวเปลือกวนกลับเข้าสู่ห้องอบแห้งจะเกิดขึ้นมากกว่าข้าวเปลือกระหว่างรอบป้อนกลับเข้าห้องอบแห้ง ซึ่งเป็นผลมาจากข้าวเปลือกที่รอการป้อนกลับเข้าห้องอบแห้งจะอยู่ในลักษณะเป็นกองดังนั้นการถ่ายเทความชื้นจะเกิดที่บริเวณด้านนอกของกองข้าวเปลือกเนื่องจากเป็นส่วนที่สัมผัสกับอากาศภายนอกได้ดีกว่า ส่วนการโรยป้อนข้าวเปลือกวนกลับเข้าสู่ห้องอบแห้งนั้นข้าวเปลือกจะสัมผัสกับอากาศภายนอกอย่างทั่วถึงมากกว่า



## บทที่ 5

### บทสรุป

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกและอัตราการไหลอากาศของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้น เพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้ง การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งด้วยค่าอัตราการอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ การประเมินคุณภาพของตัวอย่างทดสอบหลังการอบแห้งด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตังและค่าดัชนีความขาว ทั้งนี้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้น ซึ่งจากการศึกษาสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

จากการทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้น โดยศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกและอัตราการไหลอากาศ พบว่าที่อัตราการไหลอากาศ  $1.075 \text{ m}^3/\text{min}$  และอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก  $1.875 \text{ kg}/\text{min}$  เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้น เนื่องจากที่สภาวะนี้เป็นสภาวะการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีอัตราการอบแห้ง  $1.1397 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$  ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดที่  $3.7920 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$  ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตัง  $39.09\%$  และค่าดัชนีความขาว  $38.03$

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องนี้ยังต้องปรับปรุงให้ข้าวเปลือกไหลในหีบอบแห้งอย่างสม่ำเสมอโดยการปรับปรุงวิธีการควบคุมอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกและควรมีการควบคุมสภาวะอากาศ (อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์) ก่อนเข้าหีบอบแห้งเพื่อให้เห็นพฤติกรรมของการอบแห้งได้อย่างถูกต้องมากยิ่งขึ้น ในส่วนของการทดสอบควรใช้ตัวอย่างทดสอบ (ข้าวเปลือก) ที่มีความชื้นเริ่มต้นใกล้เคียงกันเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น และควรเพิ่มช่วงของอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกให้ต่างกันมากยิ่งขึ้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมจากอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกได้มากยิ่งขึ้น

## รายการอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2004). การอนุรักษ์พลังงาน ในระบบอื่น ๆ (ระบบการกลั่น การระเหย การควบแน่น และการอบแห้ง). ตำราฝึกอบรม ผู้รับผิดชอบด้านพลังงานอาวุโส (ผอส.) ด้านความร้อน. 4-36.
- เกียรติศักดิ์ ใจโต. (2558). การพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดสำหรับอบแห้งมะพร้าวขูด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 10.
- จิตรรัตน์ จอกิ้ว. (2559). การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 24-25.
- เทวรัตน์ ทิพย์วิมล. (2552). การอบแห้งและการเก็บรักษาผลผลิตเกษตร. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 3-7 .
- เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, ปริศนา แสงรุ่ง และ ปัตตะนิ สุตตะนา. (2555). สมบัติทางกายภาพและความร้อนของข้าวขาวดอกมะลิ 105. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13. 526-531.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนานันท์. (2559). Rice / ข้าว [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1657/rice-ข้าว>.
- พิรสิทธิ์ ทายนาค, มณฑล ชูชนาค, มุस्ताฟา ยะกา และ ประชา บุญวานิชกุล. (2557). การทบทวนพัฒนาการของการลดความชื้นข้าวเปลือกในทางอุตสาหกรรม. SWU Engineering Journal (2014) 9(1), 68-74.
- ยุทธนา ภูริระวิชย์กุล และ สุภวรรณ ภูริระวิชย์กุล. (2553). แนวทางการอบแห้งข้าวกล้องงอกโดยใช้พลังงานความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและไฟฟ้า. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6.
- สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2555). มาตรฐานสินค้าเกษตร เรื่องข้าว. 28.
- อำไพศักดิ์ ทีบุญมา และ ศักชัย จงจำ. (2553). การอบแห้งขิงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 15 (2553) 2 : 76-86.

- Abe, T., and Afzal, T.M. (1997). Thin-Layer Infrared Radiation Drying of Rough Rice. *J. agric. Engng Res.* (1997) 67, 289 – 297.
- Alpen. (2018). Heat Transfer and Visibility in Commercial Windows and Glass [On-line]. Available: <https://thinkalpen.com/resources/heat-transfer-and-visibility-in-commercial-windows-and-glass>.
- Cihan, A., Kahveci, K., and Hacıhafızoglu, O. (2006). Modelling of intermittent drying of thin layer rough rice. *Journal of Food Engineering* 79 (2007) 293–298.
- Celma, A. R., Rojas, S., and Rodríguez, F. L. (2007). Mathematical modelling of thin-layer infrared drying of wet olive husk. *Chemical Engineering and Processing* 47 (2008) 1810–1818.
- Celma, A. R., Cuadros, F., and Rodríguez, F.L. (2008). Characterisation of industrial tomato by-products from infrared drying process. *food and bioproducts processing* 87 (2009) 282–291.
- Celma, A. R., Rodríguez, F. L., and Blázquez, F. C. (2008). Experimental modelling of infrared drying of industrial grape by-products. *food and bioproducts processing* 87 (2009) 247–253.
- Das, I., Das, S. K., and Bal, S. (2009). Drying kinetics of high moisture paddy undergoing vibration-assisted infrared (IR) drying. *Journal of Food Engineering* 95 (2009) 166–171.
- Hacıhafızoglu, O., Cihan, A., and Kahveci, K. (2008). Mathematical modelling of drying of thin layer rough rice. *food and bioproducts processing* 86 (2008) 268–275.
- Kristiz16. (2014). Tips on How To Reduce Cholesterol Levels [On-line]. Available: <https://kristiz16.wordpress.com>.
- Laohavanich, J. and Wongpichet, S. (2007). Drying characteristics and milling quality aspects of paddy dried with gas-fired infrared. *Journal of Food Process Engineering* 32 (2009) 442–461.
- Laohavanich, J. and Wongpichet, S. (2008). Thin layer drying model for gas-fired infrared drying of paddy. *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 30 (3), 343-348, 2008.
- Sharma, G. P., Verma, R. C., and Pathare, P. (2005). Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of Food Engineering* 71 (2005) 282–286.
- Tohidi, M., Sadeghi, M., and Harchegani, M. T. (2016). Energy and quality aspects for fixed deep bed drying of paddy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70 (2017) 519–528.



ภาคผนวก ก

ตารางผลการทดสอบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 2.308 kg/min การทดลองที่ 1

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	24.5	32.5	1.000				
6.5	20.6	25.9	0.800				
13	20.0	25.0	0.770				
19.5	19.8	24.7	0.761				
26	19.2	23.8	0.732				
32.5	18.7	23.0	0.709				
39	18.4	22.5	0.695				
45.5	18.1	22.1	0.681				
52	17.9	21.8	0.672				
58.5	17.5	21.2	0.654				
65	17.2	20.8	0.640	25.6	19.1	43-47	2.564
71.5	16.7	20.0	0.618				
78	16.2	19.3	0.596				
84.5	15.8	18.8	0.578				
91	15.5	18.3	0.565				
97.5	15.1	17.8	0.548				
104	14.8	17.4	0.535				
110.5	14.6	17.1	0.527				
117	14.3	16.7	0.514				
123.5	13.9	16.1	0.497				

ตารางผนวกที่ ก2 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 2.308 kg/min การทดลองที่ 2

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	23.0	29.9	1.000				
6.5	20.3	25.5	0.853				
13	19.7	24.5	0.821				
19.5	19.5	24.2	0.811				
26	19.3	23.9	0.801				
32.5	19.1	23.6	0.790				
39	18.7	23.0	0.770				
45.5	18.4	22.5	0.755				
52	18.1	22.1	0.740				
58.5	17.7	21.5	0.720				
65	17.2	20.8	0.695				
71.5	17.0	20.5	0.686	24.5	19.4	44-47	2.856
78	16.6	19.9	0.666				
84.5	16.2	19.3	0.647				
91	15.9	18.9	0.633				
97.5	15.5	18.3	0.614				
104	15.2	17.9	0.600				
110.5	14.8	17.4	0.582				
117	14.7	17.2	0.577				
123.5	14.5	17.0	0.568				
130	14.3	16.7	0.559				
136.5	14.0	16.3	0.545				

ตารางผนวกที่ ก3 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 2.308 kg/min การทดลองที่ 3

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	23.8	31.2	1.000				
6.5	20.8	26.3	0.841				
13	20.3	25.5	0.815				
19.5	20.1	25.2	0.805				
26	19.5	24.2	0.776				
32.5	19.1	23.6	0.756				
39	18.8	23.2	0.741				
45.5	18.7	23.0	0.736				
52	18.5	22.7	0.727				
58.5	18.2	22.2	0.712				
65	18.0	22.0	0.703				
71.5	17.6	21.4	0.684	22.9	20.5	40-45	3.177
78	17.3	20.9	0.670				
84.5	16.9	20.3	0.651				
91	16.6	19.9	0.637				
97.5	16.1	19.2	0.614				
104	15.7	18.6	0.596				
110.5	15.6	18.5	0.592				
117	15.2	17.9	0.574				
123.5	14.9	17.5	0.561				
130	14.7	17.2	0.552				
136.5	14.5	17.0	0.543				
143	14.2	16.6	0.530				
149.5	13.9	16.1	0.517				

ตารางผนวกที่ ก4 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่อง  
ที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก  
2.308 kg/min

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	Power (kWh)
0	23.8	31.2	1.000	
6.5	20.6	25.9	0.831	
13	20.0	25.0	0.802	
19.5	19.8	24.7	0.792	
26	19.3	24.0	0.769	
32.5	19.0	23.4	0.752	
39	18.6	22.9	0.735	
45.5	18.4	22.6	0.724	
52	18.2	22.2	0.713	
58.5	17.8	21.7	0.695	
65	17.5	21.2	0.679	
71.5	17.1	20.6	0.662	
78	16.7	20.1	0.644	2.865
84.5	16.3	19.5	0.626	
91	16.0	19.1	0.612	
97.5	15.6	18.4	0.592	
104	15.2	18.0	0.577	
110.5	15.0	17.7	0.567	
117	14.7	17.3	0.555	
123.5	14.4	16.9	0.542	
130	14.3	16.7	0.536	
136.5	14.1	16.5	0.528	
143	14.0	16.3	0.524	
149.5	13.9	16.2	0.520	



ตารางผนวกที่ ก5 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.875 kg/min การทดลองที่ 1

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	23.2	30.2	1.000				
8	19.4	24.1	0.797				
16	19.1	23.6	0.782				
24	18.1	22.1	0.732				
32	17.1	20.6	0.683				
40	16.5	19.8	0.654				
48	16.0	19.0	0.631	28.9	25.8	46-50	1.803
56	15.2	17.9	0.593				
64	15.0	17.6	0.584				
72	14.6	17.1	0.566				
80	14.2	16.6	0.548				
88	14.1	16.4	0.543				

ตารางผนวกที่ ก6 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.875 kg/min การทดลองที่ 2

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	22.8	29.5	1.000				
8	19.4	24.1	0.815				
16	19.0	23.5	0.794				
24	17.9	21.8	0.738				
32	16.7	20.0	0.679				
40	16.1	19.2	0.650	33.0	27.9	47-52	1.398
48	15.6	18.5	0.626				
56	15.1	17.8	0.602				
64	14.5	17.0	0.574				
72	13.9	16.1	0.547				

ตารางผนวกที่ ก7 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.875 kg/min การทดลองที่ 3

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	26.6	36.2	1.000				
8	21.0	26.6	0.734				
16	20.5	25.8	0.712				
24	20.0	25.0	0.690				
32	19.2	23.8	0.656				
40	18.7	23.0	0.635				
48	18.3	22.4	0.618				
56	18.1	22.1	0.610				
64	17.8	21.7	0.598	29.3	24.4	48-52	2.502
72	17.1	20.6	0.569				
80	16.5	19.8	0.545				
88	16.0	19.0	0.526				
96	15.7	18.6	0.514				
104	15.0	17.6	0.487				
112	14.6	17.1	0.472				
120	14.3	16.7	0.460				
128	13.8	16.0	0.442				

ตารางผนวกที่ ก8 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่อง  
ที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก  
1.875 kg/min

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	Power (kWh)
0	24.2	32.0	1.000	
8	19.9	24.9	0.782	
16	19.5	24.3	0.762	
24	18.7	23.0	0.720	
32	17.7	21.5	0.672	
40	17.1	20.7	0.646	
48	16.6	20.0	0.625	
56	16.1	19.3	0.602	
64	15.8	18.8	0.585	1.901
72	15.2	18.0	0.561	
80	14.9	17.5	0.547	
88	14.7	17.2	0.539	
96	14.6	17.1	0.535	
104	14.3	16.7	0.526	
112	14.2	16.6	0.521	
120	14.1	16.4	0.517	
128	13.9	16.2	0.511	

ตารางผนวกที่ ก9 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.228 kg/min การทดลองที่ 1

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	23.1	30.0	1.000				
12.5	19.4	24.1	0.801				
25	19.0	23.5	0.781				
37.5	18.1	22.1	0.736				
50	17.1	20.6	0.687	29.4	26.2	47-52	2.158
62.5	16.2	19.3	0.644				
75	15.5	18.3	0.611				
87.5	14.7	17.2	0.574				
100	14.3	16.7	0.555				
112.5	13.6	15.7	0.524				

ตารางผนวกที่ ก10 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.228 kg/min การทดลองที่ 2

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	23.7	31.1	1.000				
12.5	18.8	23.2	0.745				
25	17.6	21.4	0.688				
37.5	16.8	20.2	0.650	34.3	26.8	47-53	1.456
50	15.5	18.3	0.591				
62.5	15.2	17.9	0.577				
75	14.2	16.6	0.533				

ตารางผนวกที่ ก11 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่  
อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.228 kg/min  
การทดลองที่ 3

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	26.1	35.3	1.000				
12.5	20.9	26.4	0.748				
25	20.6	25.9	0.735				
37.5	20.0	25.0	0.708				
50	19.3	23.9	0.677				
62.5	18.6	22.9	0.647				
75	17.8	21.7	0.613	29.3	24.4	48-52	2.989
87.5	16.9	20.3	0.576				
100	16.2	19.3	0.547				
112.5	15.6	18.5	0.523				
125	15.0	17.6	0.500				
137.5	14.3	16.7	0.472				
150	13.8	16.0	0.453				

ตารางผนวกที่ ก12 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหล ต่อเนื่องที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.228 kg/min

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	Power (kWh)
0	24.3	32.1	1.000	
12.5	19.7	24.5	0.765	
25	19.1	23.6	0.734	
37.5	18.3	22.4	0.698	
50	17.3	21.0	0.651	
62.5	16.7	20.0	0.623	
75	15.8	18.8	0.586	2.201
87.5	15.3	18.0	0.561	
100	14.9	17.5	0.545	
112.5	14.5	16.9	0.527	
125	14.3	16.6	0.519	
137.5	14.0	16.3	0.510	
150	13.9	16.1	0.503	

ตารางผนวกที่ ก13 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่  
อัตราการไหลอากาศ  $1.075 \text{ m}^3/\text{min}$  ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก  $0.837 \text{ kg}/\text{min}$   
การทดลองที่ 1

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	24.3	32.1	1.000				
18	19.3	23.9	0.745				
36	18.5	22.7	0.707				
54	17.5	21.2	0.661				
72	16.7	20.0	0.625	27.5	25.5	51-56	2.790
90	15.5	18.3	0.571				
108	14.7	17.2	0.537				
126	14.1	16.4	0.511				

ตารางผนวกที่ ก14 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่  
อัตราการไหลอากาศ  $1.075 \text{ m}^3/\text{min}$  ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก  $0.837 \text{ kg}/\text{min}$   
การทดลองที่ 2

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	23.5	30.7	1.000				
18	18.1	22.1	0.719				
36	17.4	21.1	0.686				
54	15.9	18.9	0.615	33.2	27.2	49-57	1.761
72	14.7	17.2	0.561				
90	14.0	16.3	0.530				



ตารางผนวกที่ ก15 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่ อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 0.837 kg/min การทดลองที่ 3

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	24.6	32.6	1.000				
18	20.6	25.9	0.795				
36	19.3	23.9	0.733				
54	18.4	22.5	0.691				
72	17.0	20.5	0.628	28.4	25.2	52-59	2.947
90	15.9	18.9	0.579				
108	15.3	18.1	0.554				
126	14.2	16.6	0.507				

ตารางผนวกที่ ก16 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 0.837 kg/min

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	Power (kWh)
0	24.1	31.8	1.000	
18	19.3	24.0	0.753	
36	18.4	22.6	0.709	
54	17.3	20.9	0.656	
72	16.1	19.3	0.604	2.499
90	15.1	17.8	0.560	
108	14.7	17.2	0.540	
126	14.1	16.4	0.516	

ตารางผนวกที่ ก17 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่  
อัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 2.308 kg/min  
การทดลองที่ 1

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	22.3	28.7	1.000				
6.5	19.3	23.9	0.833				
13	18.8	23.2	0.807				
19.5	18.3	22.4	0.780				
26	17.8	21.7	0.755				
32.5	17.1	20.6	0.719				
39	16.7	20.0	0.699				
45.5	16.2	19.3	0.674	28.6	24.8	42-46	1.949
52	15.9	18.9	0.659				
58.5	15.6	18.5	0.644				
65	15.2	17.9	0.625				
71.5	14.9	17.5	0.610				
78	14.5	17.0	0.591				
84.5	14.2	16.6	0.577				
91	14.0	16.3	0.567				

ตารางผนวกที่ ก18 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่  
อัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 2.308 kg/min  
การทดลองที่ 2

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	22.2	28.5	1.000				
6.5	18.9	23.3	0.817				
13	18.4	22.5	0.790				
19.5	17.7	21.5	0.754				
26	17.3	20.9	0.733				
32.5	16.6	19.9	0.698				
39	16.3	19.5	0.682	31.7	25.4	44-49	1.653
45.5	15.7	18.6	0.653				
52	15.3	18.1	0.633				
58.5	14.9	17.5	0.614				
65	14.4	16.8	0.590				
71.5	14.3	16.7	0.585				
78	13.8	16.0	0.561				

ตารางผนวกที่ ก19 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่  
อัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 2.308 kg/min  
การทดลองที่ 3

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	22.6	29.2	1.000				
6.5	19.4	24.1	0.824				
13	19.1	23.6	0.809				
19.5	18.5	22.7	0.777				
26	18.3	22.4	0.767				
32.5	18.0	22.0	0.752				
39	17.5	21.2	0.726				
45.5	17.0	20.5	0.701				
52	16.6	19.9	0.682				
58.5	16.2	19.3	0.662	24.5	19.1	39-43	2.446
65	16.0	19.0	0.652				
71.5	15.7	18.6	0.638				
78	15.3	18.1	0.619				
84.5	15.1	17.8	0.609				
91	14.9	17.5	0.600				
97.5	14.7	17.2	0.590				
104	14.3	16.7	0.571				
110.5	14.2	16.6	0.567				
117	14.0	16.3	0.558				

ตารางผนวกที่ ก20 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหล ต่อเนื่องที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 2.308 kg/min

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	Power (kWh)
0	22.4	28.8	1.000	
6.5	19.2	23.8	0.825	
13	18.8	23.1	0.802	
19.5	18.2	22.2	0.771	
26	17.8	21.7	0.752	
32.5	17.2	20.8	0.723	
39	16.8	20.2	0.702	
45.5	16.3	19.5	0.676	
52	15.9	19.0	0.658	
58.5	15.6	18.4	0.640	2.016
65	15.2	17.9	0.622	
71.5	15.0	17.6	0.611	
78	14.5	17.0	0.590	
84.5	14.4	16.8	0.582	
91	14.2	16.6	0.576	
97.5	14.2	16.5	0.573	
104	14.0	16.3	0.567	
110.5	14.0	16.3	0.565	
117	13.9	16.2	0.562	

ตารางผนวกที่ ก21 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่  
อัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.875 kg/min  
การทดลองที่ 1

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	22.5	29.0	1.000				
8	19.5	24.2	0.867				
16	18.9	23.3	0.840				
24	18.2	22.2	0.809				
32	17.8	21.7	0.791				
40	17.0	20.5	0.756				
48	16.6	19.9	0.738				
56	16.2	19.3	0.720	25.9	19.5	42-46	2.351
64	15.7	18.6	0.698				
72	15.3	18.1	0.680				
80	15.1	17.8	0.671				
88	14.8	17.4	0.658				
96	14.6	17.1	0.649				
104	14.3	16.7	0.636				
112	13.9	16.1	0.618				

ตารางผนวกที่ ก22 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่  
อัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.875 kg/min  
การทดลองที่ 2

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	23.1	30.0	1.000				
8	19.8	24.7	0.822				
16	19.1	23.6	0.786				
24	18.5	22.7	0.756				
32	18.0	22.0	0.731				
40	17.5	21.2	0.706				
48	17.0	20.5	0.682				
56	16.5	19.8	0.658				
64	16.1	19.2	0.639	23.6	19.0	42-46	2.553
72	15.8	18.8	0.625				
80	15.5	18.3	0.611				
88	15.0	17.6	0.587				
96	14.8	17.4	0.578				
104	14.4	16.8	0.560				
112	14.3	16.7	0.555				
120	13.8	16.0	0.533				

ตารางผนวกที่ ก23 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่  
อัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.875 kg/min  
การทดลองที่ 3

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	22.9	29.7	1.000				
8	19.3	23.9	0.805				
16	18.8	23.2	0.780				
24	18.4	22.5	0.759				
32	17.6	21.4	0.719				
40	17.2	20.8	0.699				
48	16.5	19.8	0.665				
56	16.0	19.0	0.641	26.4	20.1	43-48	2.396
64	15.7	18.6	0.627				
72	15.4	18.2	0.613				
80	14.9	17.5	0.589				
88	14.7	17.2	0.580				
96	14.4	16.8	0.566				
104	14.2	16.6	0.557				
112	13.9	16.1	0.544				



ตารางผนวกที่ ก24 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหล ต่อเนื่องที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.875 kg/min

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	Power (kWh)
0	22.8	29.6	1.000	
8	19.5	24.3	0.831	
16	18.9	23.4	0.802	
24	18.4	22.5	0.775	
32	17.8	21.7	0.747	
40	17.2	20.8	0.720	
48	16.7	20.0	0.695	
56	16.2	19.4	0.673	
64	15.8	18.8	0.655	2.434
72	15.5	18.3	0.639	
80	15.2	17.9	0.624	
88	14.8	17.4	0.608	
96	14.6	17.1	0.598	
104	14.3	16.7	0.584	
112	14.0	16.3	0.572	
120	13.9	16.1	0.565	

ตารางผนวกที่ ก25 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่  
อัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.228 kg/min  
การทดลองที่ 1

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	24.2	31.9	1.000				
12.5	19.0	23.5	0.735				
25	18.6	22.9	0.716				
37.5	17.9	21.8	0.683				
50	17.2	20.8	0.651	25.3	19.4	41-46	2.330
62.5	16.1	19.2	0.602				
75	15.3	18.1	0.566				
87.5	14.9	17.5	0.548				
100	14.4	16.8	0.527				
112.5	13.8	16.0	0.501				

ตารางผนวกที่ ก26 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่  
อัตราการไหลอากาศ  $2.150 \text{ m}^3/\text{min}$  ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก  $1.228 \text{ kg}/\text{min}$   
การทดลองที่ 2

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	24.8	33.0	1.000				
12.5	19.4	24.1	0.730				
25	18.6	22.9	0.693				
37.5	17.5	21.2	0.643				
50	16.9	20.3	0.617	31.5	21.5	45-50	2.069
62.5	15.9	18.9	0.573				
75	15.1	17.8	0.539				
87.5	14.7	17.2	0.523				
100	14.0	16.3	0.494				

ตารางผนวกที่ ก27 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่  
อัตราการไหลอากาศ  $2.150 \text{ m}^3/\text{min}$  ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก  $1.228 \text{ kg}/\text{min}$   
การทดลองที่ 3

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	22.8	29.5	1.000				
12.5	18.9	23.3	0.789				
25	18.6	22.9	0.774				
37.5	18.2	22.2	0.753				
50	17.3	20.9	0.708				
62.5	16.6	19.9	0.674	25.9	21.2	42-46	2.559
75	15.8	18.8	0.635				
87.5	15.3	18.1	0.612				
100	14.8	17.4	0.588				
112.5	14.5	17.0	0.574				
125	14.0	16.3	0.551				

ตารางผนวกที่ ก28 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 1.228 kg/min

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	Power (kWh)
0	23.9	31.5	1.000	
12.5	19.1	23.6	0.751	
25	18.6	22.9	0.727	
37.5	17.9	21.8	0.693	
50	17.1	20.7	0.659	
62.5	16.2	19.3	0.616	2.320
75	15.4	18.2	0.580	
87.5	15.0	17.6	0.561	
100	14.4	16.8	0.536	
112.5	14.1	16.4	0.523	
125	13.9	16.2	0.515	

ตารางผนวกที่ ก29 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 0.837 kg/min การทดลองที่ 1

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	22.5	29.0	1.000				
18	18.0	22.0	0.756				
36	17.2	20.8	0.716				
54	16.5	19.8	0.681	30.5	22.7	43-49	2.236
72	15.5	18.3	0.632				
90	14.6	17.1	0.589				
108	13.9	16.1	0.556				

ตารางผนวกที่ ก30 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่  
อัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 0.837 kg/min  
การทดลองที่ 2

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	23.3	30.4	1.000				
18	18.6	22.9	0.752				
36	18.1	22.1	0.728				
54	17.1	20.6	0.679				
72	16.5	19.8	0.650	25.8	19.8	44-48	2.939
90	15.9	18.9	0.622				
108	15.0	17.6	0.581				
126	14.4	16.8	0.554				
144	13.5	15.6	0.514				

ตารางผนวกที่ ก31 ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่องที่  
อัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 0.837 kg/min  
การทดลองที่ 3

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	T <sub>air</sub> (db) (°C)	T <sub>air</sub> (wb) (°C)	T <sub>paddy</sub> (°C)	Power (kWh)
0	23.3	30.4	1.000				
18	18.3	22.4	0.737				
36	17.0	20.5	0.674				
54	16.6	19.9	0.655	31.4	21.9	45-50	2.233
72	16.0	19.0	0.627				
90	14.9	17.5	0.576				
108	14.0	16.3	0.536				

ตารางผนวกที่ ก32 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหล ต่อเนื่องที่อัตราการไหลอากาศ 2.150 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 0.837 kg/min

Time (min)	MC (%wb)	MC (%db)	MR	Power (kWh)
0	23.0	29.9		
18	18.3	22.4	1.000	
36	17.4	21.1	0.737	
54	16.7	20.1	0.674	
72	16.0	19.1	0.655	2.469
90	15.1	17.8	0.627	
108	14.3	16.7	0.576	
126	14.1	16.4	0.536	
144	13.8	16.0		

ตารางผนวกที่ ก33 ผลการทดสอบคุณภาพหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรด ที่พัฒนาขึ้นที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 2.308 kg/min

No.	MC <sub>final</sub> (%wb)	W <sub>paddy</sub> (g)	W <sub>milling</sub> (g)	W <sub>polishing</sub> (g)	W <sub>head rice</sub> (g)	W <sub>broken rice</sub> (g)	HRY (%)	WI
1	13.9	125.00	91.09	75.85	49.61	26.24	39.69	37.9
2	14.0	125.00	91.70	78.82	48.87	29.95	39.10	37.9
3	13.9	125.00	92.12	78.04	43.40	34.64	34.72	38.0
average	13.9	125.00	91.64	77.57	47.29	30.28	37.83	37.9

ตารางผนวกที่ ก34 ผลการทดสอบคุณภาพหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรด  
ที่พัฒนาขึ้นที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก  
1.875 kg/min

No.	MC <sub>final</sub> (%wb)	W <sub>paddy</sub> (g)	W <sub>milling</sub> (g)	W <sub>polishing</sub> (g)	W <sub>head rice</sub> (g)	W <sub>broken rice</sub> (g)	HRY (%)	WI
1	13.0	125.00	87.92	78.98	47.18	31.80	37.74	38.6
2	13.9	125.00	92.28	80.81	54.89	25.92	43.91	37.0
3	13.8	125.00	91.40	77.57	44.53	33.04	35.62	38.5
average	13.6	125.00	90.53	79.12	48.87	30.25	39.09	38.0

ตารางผนวกที่ ก35 ผลการทดสอบคุณภาพหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรด  
ที่พัฒนาขึ้นที่อัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก  
1.228 kg/min

No.	MC <sub>final</sub> (%wb)	W <sub>paddy</sub> (g)	W <sub>milling</sub> (g)	W <sub>polishing</sub> (g)	W <sub>head rice</sub> (g)	W <sub>broken rice</sub> (g)	HRY (%)	WI
1	13.0	125.00	89.29	78.72	45.87	32.85	36.70	39.2
2	13.0	125.00	91.10	81.45	52.61	28.84	42.09	37.9
3	13.8	125.00	90.91	78.86	46.87	31.99	37.50	38.9
average	13.3	125.00	90.43	79.68	48.45	31.23	38.76	38.7



ตารางผนวกที่ ก36 ผลการทดสอบคุณภาพหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรด  
ที่พัฒนาขึ้นที่อัตราการไหลอากาศ  $1.075 \text{ m}^3/\text{min}$  ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก  
 $0.837 \text{ kg}/\text{min}$

No.	MC <sub>final</sub> (%wb)	W <sub>paddy</sub> (g)	W <sub>milling</sub> (g)	W <sub>polishing</sub> (g)	W <sub>head rice</sub> (g)	W <sub>broken rice</sub> (g)	HRY (%)	WI
1	12.6	125.00	88.13	76.79	38.38	38.41	30.70	39.7
2	12.4	125.00	85.48	75.88	41.59	34.29	33.27	40.5
3	14.2	125.00	89.53	74.68	43.26	31.42	34.61	39.2
average	13.1	125.00	87.71	75.78	41.08	34.71	32.86	39.8

ตารางผนวกที่ ก37 ผลการทดสอบคุณภาพของชุดควบคุมคุณภาพ

No.	MC <sub>final</sub> (%wb)	W <sub>paddy</sub> (g)	W <sub>milling</sub> (g)	W <sub>polishing</sub> (g)	W <sub>head rice</sub> (g)	W <sub>broken rice</sub> (g)	HRY (%)	WI
1	14.9	125.00	93.84	80.61	55.91	24.32	44.73	39.1
2	13.9	125.00	93.62	81.18	65.63	15.35	52.50	39.8
3	13.9	125.00	93.56	81.02	65.56	15.38	52.45	41.1
average	14.2	125.00	93.67	80.94	62.37	18.35	49.89	40.0



ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## 1 การหาปริมาณน้ำสำหรับการเพิ่มความชื้นข้าวเปลือก

ใช้ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณน้ำสำหรับการเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกโดยกำหนดให้ข้าวเปลือกปริมาณ 15 kg มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 14.0%wb และทำการเพิ่มความชื้นเป็น 24.0%wb

$$M_w = \frac{w_i - d}{w_i}$$

$$0.14 = \frac{15 - d}{15}$$

$$d = 12.9$$

ข้าวเปลือกปริมาณ 15 kg ที่ความชื้น 14.0%wb จะมีมวลแห้งของข้าวเปลือกเท่ากับ 12.9 kg

$$M_w = \frac{w_f - d}{w_f}$$

$$0.24 = \frac{w_f - 12.9}{w_f}$$

$$w_f = 16.974$$

เมื่อเพิ่มความชื้นเป็น 24.0%wb แล้วข้าวเปลือกจะมีน้ำหนักเท่ากับ 16.974 kg

$$w_f - w_i = 16.974 - 15 = 1.974$$

ดังนั้นปริมาณน้ำที่ต้องเติมเข้าไปจึงเท่ากับ 1.974 kg

## 2 ประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

### 2.1 การแปลงค่าเปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียกเป็นเปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง

ใช้ตัวอย่างการคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นที่สภาวะการอบแห้งอัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชื้นข้าวเปลือก 2.308 kg/min ที่เวลา 6.5 นาที ของการทดลองครั้งที่ 1 (ตารางผนวกที่ ก1)

$$M_d = \frac{M_w}{1 - M_w}$$

$$M_d = \frac{0.206}{1 - 0.206} = 0.259$$

### 2.2 อัตราส่วนความชื้น

ใช้ตัวอย่างการคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นที่สภาวะการอบแห้งอัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชื้นข้าวเปลือก 2.308 kg/min ที่เวลา 6.5 นาที ของการทดลองครั้งที่ 1 (ตารางผนวกที่ ก1)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}}$$

เนื่องจากการอบแห้งด้วยอินฟราเรดนั้นตัวอย่างทดสอบอาจมีความชื้นเท่ากับ ความชื้นของวัสดุแห้งนั้น ๆ (A.R. Celma และคณะ, 2009)

$$MR = \frac{20.6}{24.5} = 0.841$$

### 2.3 อัตราส่วนความชื้น

ใช้ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณน้ำระเหยในการอบแห้งข้าวเปลือกที่สภาวะการอบแห้งอัตราการไหลอากาศ  $1.075 \text{ m}^3/\text{min}$  ที่อัตราการไหลชื้นข้าวเปลือก  $2.308 \text{ kg}/\text{min}$  ของการทดลองครั้งที่ 1 (ตารางผนวกที่ ก1)

$$M_w = \frac{w_i - d}{w_i}$$

$$0.245 = \frac{15 - d}{15}$$

$$d = 11.325$$

ข้าวเปลือกปริมาณ 15 kg ที่ความชื้น 24.5%wb จะมีมวลแห้งของข้าวเปลือกเท่ากับ 11.325 kg

$$M_w = \frac{w_f - d}{w_f}$$

$$0.139 = \frac{w_f - 11.325}{w_f}$$

$$w_f = 13.153$$

เมื่อลดความชื้นเป็น 13.9%wb แล้วข้าวเปลือกจะเหลือหนักเท่ากับ 13.153 kg

$$w_i - w_f = 15 - 13.153 = 1.847$$

ปริมาณน้ำที่ระเหยออกเท่ากับ 1.847 kg

## 2.4 อัตราการอบแห้ง

ใช้ตัวอย่างการคำนวณหาอัตราการอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งอัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชื้นข้าวเปลือก 2.308 kg/min ของการทดลองครั้งที่ 1 (ตารางผนวกที่ ก1)

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t}$$

$$DR = \left( \frac{15 - 13.153}{123.5} \right) \times 60$$

$$DR = 0.8972$$

อัตราการอบแห้งเท่ากับ 0.8972 kg<sub>water</sub>/h

## 2.5 อัตราการอบแห้ง

ใช้ตัวอย่างการคำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่สภาวะการอบแห้งอัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชื้นข้าวเปลือก 2.308 kg/min ของการทดลองครั้งที่ 1 (ตารางผนวกที่ ก1)

$$SEC = \frac{3.6E}{w_i - w_f}$$

$$SEC = \frac{3.6 \times 2.564}{15 - 13.153}$$

$$SEC = 4.998$$

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 4.998 MJ/kg<sub>water</sub>

## 2.6 เปอร์เซ็นต์ข้าวตัง

ใช้ตัวอย่างการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ข้าวตังที่สภาวะการอบแห้งอัตราการไหลอากาศ 1.075 m<sup>3</sup>/min ที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก 2.308 kg/min ของการทดลองครั้งที่ 1 (ตารางผนวกที่ ก33)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ข้าวตัง} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวตัง}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100 \%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ข้าวตัง} = \frac{49.61}{125.00} \times 100 \%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ข้าวตัง} = 39.69 \%$$



ภาคผนวก ค

การออกแบบเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

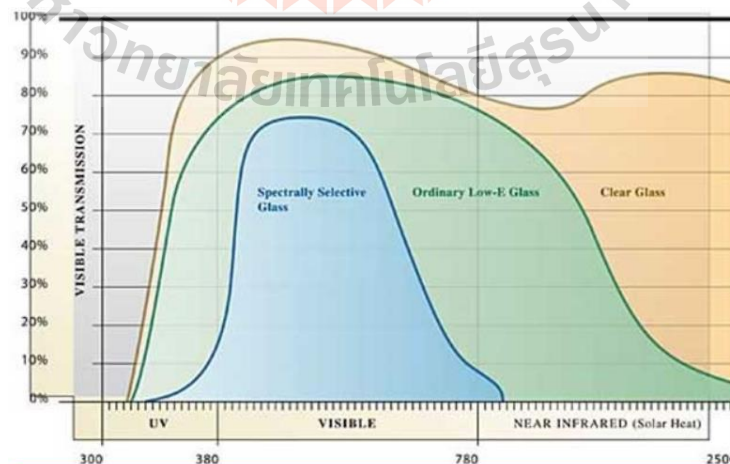


## 1 เกณฑ์การออกแบบเครื่องต้นแบบ

- 1) เครื่องอบแห้งทำงานในลักษณะเป็นกะ (Batch Type)
- 2) เครื่องอบแห้งสามารถบรรจุข้าวเปลือกได้ 15 kg
- 3) ให้ความร้อนข้าวเปลือกโดยฮีตเตอร์อินฟราเรดชนิดแห้ง

## 2 กรอบแนวคิดของการออกแบบเครื่องต้นแบบ

กำหนดให้เป็นการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีความร้อนเพียงอย่างเดียวและเป็นการอบแห้งแบบชั้นบางเพื่อให้สะดวกต่อการวิเคราะห์ โดยแหล่งความร้อนจะใช้ฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบแห้ง ห้องอบแห้งสร้างเป็นรูปทรงกระบอกเพื่อให้สามารถรับพลังงานความร้อนตามแนวรัศมีจากฮีตเตอร์อินฟราเรดและเพื่อให้เครื่องอบแห้งใช้พื้นที่น้อยที่สุด โดยผนังด้านในของห้องอบแห้งทำด้วยกระจกใสเนื่องจากรังสีอินฟราเรดสามารถทะลุผ่านกระจกใสได้ดังแสดงในรูปผนวกที่ ค1 อีกทั้งกระจกยังสามารถทนต่อการสึกหรอจากการถูเมล็ดข้าวเสียดสีได้อีกด้วย ส่วนผนังด้านนอกห้องอบแห้งจะใช้ตะแกรงเหล็กเจาะรูเนื่องจากจะทำให้สามารถระบายความชื้นออกตามรูของผนังด้านนอกห้องอบแห้งได้ ติดตั้งโบลเวอร์เพื่อเป่าอากาศเข้าห้องอบแห้งเพื่อระบายความชื้นออกจากห้องอบแห้งและป้องกันไม่ให้กระจกใสและฮีตเตอร์อินฟราเรดมีอุณหภูมิที่สูงเกินไปซึ่งอาจเกิดความเสียหายขึ้น และชุดลำเลียงข้าวเปลือกออกจากห้องอบแห้งเลือกใช้ Superlene เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความแข็งไม่มากนักเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายทางกลต่อเมล็ดข้าวมาก

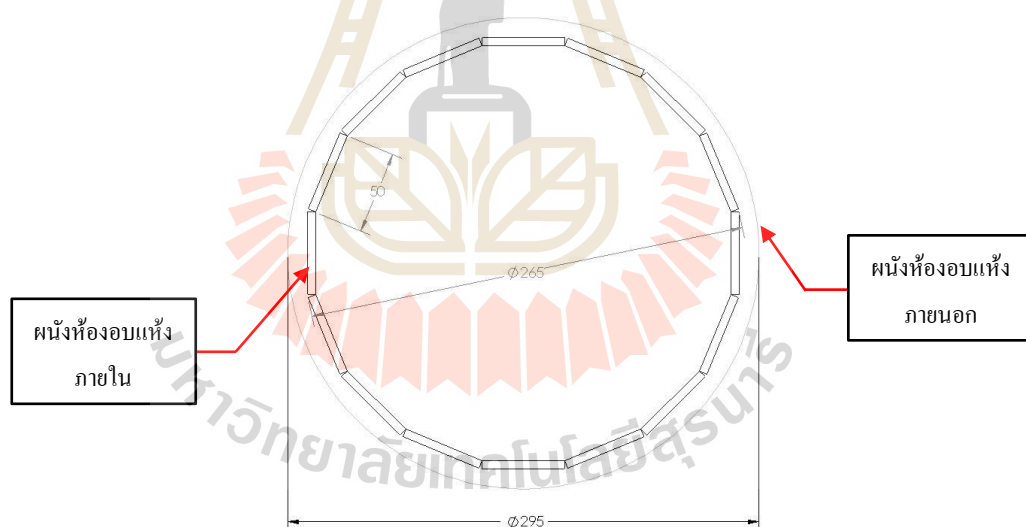


รูปผนวกที่ ค1 ความสามารถในการทะลุผ่านแก้วของคลื่นต่าง ๆ (Alpen, 2018)

### 3 การออกแบบเครื่องต้นแบบ

#### 3.1 การออกแบบขนาดของห้องอบแห้ง

ได้ทำการกำหนดให้เป็นการอบแห้งแบบชั้นบางซึ่งกำหนดความหนาของชั้นข้าวเปลือกประมาณ 1.5 cm และกำหนดให้ความสูงของห้องอบแห้งประมาณ 1 m ในการออกแบบนั้น ได้ออกแบบให้ผนังห้องอบแห้งภายในทำจากกระจกใสเพื่อให้รังสีอินฟราเรดสามารถทะลุผ่านได้และผนังด้านนอกทำจากตะแกรงเหล็กเจาะรูเพื่อให้สามารถระบายความชื้นจากการอบแห้งได้ ซึ่งจากการออกแบบพบว่า ผนังห้องอบแห้งภายในได้ออกแบบเป็นลักษณะ 16 เหลี่ยมเนื่องจากไม่สามารถม้วนกระจกให้โค้งและเจาะรูเพื่อให้อากาศผ่านไปยังชั้นข้าวเปลือกได้ จึงได้ออกแบบเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยม โดยกระจกใสที่ใช้มีความหนา 5 mm ซึ่งขนาดความกว้างน้อยที่สุดที่สามารถตัดได้คือขนาด 5 cm ดังนั้นผนังห้องอบแห้งด้านในจึงมีลักษณะดังรูปผนวกที่ ค2 ซึ่งผนังด้านในของห้องอบแห้งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 26.5 cm และผนังด้านนอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 29.5 cm ซึ่งทำให้ข้าวเปลือกที่ไหลในห้องอบแห้งมีความหนา 1.5 cm



รูปผนวกที่ ค2 ภาพตัดขวางด้านบนบริเวณห้องอบแห้ง

จากขนาดของห้องอบแห้งที่ได้จากการออกแบบนั้น ได้คำนวณหาปริมาณข้าวเปลือกภายในห้องอบแห้ง โดยกำหนดให้ข้าวเปลือกสดที่นำมาทดสอบมีความชื้นเริ่มต้น 24%wb ซึ่งสามารถคำนวณค่าความหนาแน่นกองของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ได้จากสมการ(ผ.1) ของเทวรัตน์ ทิพย์วิมล และคณะ (2555)

$$\rho_b = 0.559M + 553.52 \quad (R^2 = 0.9578) \quad (\text{ผ.1})$$

โดยที่  $M$  คือ ความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ (%wb)

$$m = \rho V = \rho \left[ \frac{\pi}{4} \times (D^2 - d^2) \times h \right]$$

$$m = [(0.559 \times 24) + 553.52] \times \left[ \frac{\pi}{4} \times (0.295^2 - 0.265^2) \times 1 \right] = 7.481$$

ดังนั้น ภายในห้องอบแห้งจะมีปริมาณข้าวบรรจุอยู่ 7.481 kg

### 3.2 การออกแบบระบบให้ความร้อน

ในระบบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่พัฒนาขึ้นนี้ ได้ติดตั้งฮีตเตอร์อินฟราเรดชนิดแท่งขนาด 1,200 W ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 17 mm และมีช่วงให้ความร้อนยาว 1,000 mm บริเวณศูนย์กลางทรงกระบอกห้องอบแห้ง โดยในการออกแบบนั้น ได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรดของ Ipsita Das และคณะ ตามสมการที่ (ผ.2) มาใช้ในการออกแบบระบบเพื่อวิเคราะห์ระยะเวลาที่ใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือก 15 kg โดยลดความชื้นจาก 24%wb ให้เหลือ 14%wb

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} = \exp[-kt^n] \quad (\text{ผ.2})$$

$$k = 0.0916 + 0.002R - 0.0014G_B + 0.0001R^2 - 0.0035G_B^2 \quad (R^2=0.965) \quad (\text{ผ.3})$$

$$n = 0.9504 - 0.0009RG_B - 0.0365G_B + 0.0001R^2 - 0.0009G_B^2 \quad (R^2=0.989) \quad (\text{ผ.4})$$

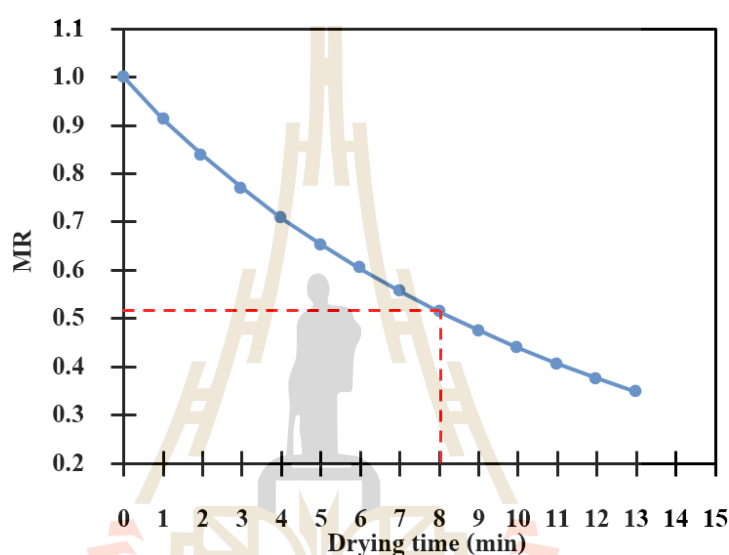
โดยที่  $k$  คือ drying constant in Page Model

$n$  คือ drying exponent

R คือ radiation intensity ( $\text{kW/m}^2$ )

$G_b$  คือ grain bed depth (m)

จากการวิเคราะห์การออกแบบระบบให้ความร้อนจะพบว่า ในการลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 24%wb ให้เหลือ 14%wb นั้นสัดส่วนความชื้นจะเท่ากับ 0.515 (รูปผนวกที่ ค3) ซึ่งพบว่าข้าวเปลือกจะต้องเคลื่อนที่ในห้องอบแห้งเป็นเวลา 8 นาที



รูปผนวกที่ ค3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 24 %wb ให้เหลือ 14 %wb

### 3.3 การออกแบบระบบควบคุมอัตราการไหลข้าวเปลือก

จากการวิเคราะห์ระบบการให้ความร้อนนั้นพบว่าข้าวเปลือกจะต้องเคลื่อนที่ภายในห้องอบแห้งจากด้านบนลงมาด้านล่างเป็นระยะเวลา 8 นาที และห้องอบแห้งมีความสูง 1 m ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาอัตราการไหลของชั้นข้าวเปลือกได้ดังต่อไปนี้

$$v = \frac{s}{t} = \frac{1}{8} = 0.125$$

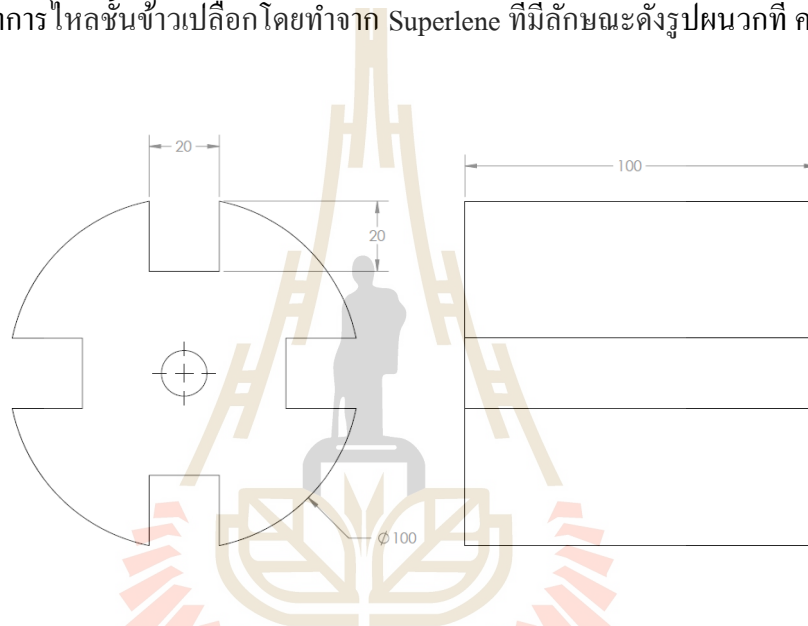
ดังนั้น ชั้นข้าวเปลือกจะเคลื่อนที่ในห้องอบแห้งด้วยความเร็ว 0.125 m/min

$$\dot{m} = \rho Av$$

$$\dot{m} = [(0.559 \times 24) + 553.52] \times \left[ \frac{\pi}{4} \times (0.295^2 - 0.265^2) \right] \times 0.125 = 0.935$$

ดังนั้น อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกเท่ากับ 0.935 kg/min

จากการคำนวณอัตราการไหลของชั้นข้าวเปลือกนั้นได้ทำการออกแบบระบบควบคุมอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกโดยทำจาก Superlenc ที่มีลักษณะดังรูปผนวกที่ ค4



รูปผนวกที่ ค4 รายละเอียด Superlenc ในชุดควบคุมอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก

จากการออกแบบชุดควบคุมอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกนั้นสามารถเลือกมอเตอร์ได้ดังต่อไปนี้

$$m = \rho V$$

$$m = 4 \times [(0.559 \times 24) + 553.52] \times (0.02 \times 0.02 \times 0.1) = 0.091$$

เมื่อชุดควบคุมอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกหมุน 1 รอบจะสามารถนำข้าวเปลือกออกจากระบบได้ 0.091 kg ดังนั้นความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เหมาะสมสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\text{ความเร็วรอบมอเตอร์} = \frac{\text{อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก}}{\text{ปริมาณข้าวเปลือกที่ไหลออกต่อรอบ}} = \frac{0.935}{0.091} = 10.275 \text{ rpm}$$

จากความเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับชุดควบคุมอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกเท่ากับ 10.275 rpm ดังนั้นจึงเลือกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรง 12 V ขนาด 15 W ความเร็วรอบมอเตอร์ 100 rpm โดยใช้พูลเลย์ขับเคลื่อนผ่านศูนย์กลาง 2 in และพูลเลย์ตามขนาด 6 in

### 3.4 การหาอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก

ชุดควบคุมอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรง 12 V ซึ่งในการทดสอบได้ปรับอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกโดยการป้อนกระแสไฟฟ้าให้มอเตอร์ด้วยแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันและทำการบรรจุข้าวเปลือกในห้องอบแห้งแล้วจับเวลาที่ใช้ในการลำเลียงข้าวออกจากห้องอบแห้ง ซึ่งจากการทดสอบได้ผลดังตารางผนวกที่ ก1

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการทดสอบหาอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก

แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์ ( V )	อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก ( kg/min )			
	No.1	No.2	No.3	avg
4.5	0.834	0.826	0.852	0.837
6	1.179	1.203	1.301	1.228
9	1.814	1.886	1.925	1.875
12	2.108	2.426	2.391	2.308

### 3.5 การหาอัตราการไหลอากาศ

การป้อนอากาศเข้าภายในห้องอบแห้งเพื่อนำความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือกนั้นได้ใช้โบลเวอร์กระแสตรง 24 V โดยในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบที่อัตราการไหลอากาศ 2 ค่า โดยค่าอัตราการไหลอากาศค่าแรกนั้นได้จากอัตราการไหลอากาศที่ส่งผลให้อากาศที่ผ่านฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีอุณหภูมิประมาณ 80°C และค่าอัตราการไหลอากาศค่าที่สองนั้นจะเป็น 2 เท่าของค่าอัตราการไหล

อากาศค่าแรก ซึ่งในการทดสอบนั้นจะใช้แอนนิโมมิเตอร์วัดความเร็วอากาศที่บริเวณทางเข้าของโบลเวอร์และจากการทดสอบนั้นที่อัตราการไหลอากาศค่าแรกนั้นจะมีความเร็วอากาศ 5.4 m/s และอัตราการไหลอากาศค่าที่สองจะมีความเร็วอากาศ 10.8 m/s ดังนั้นการคำนวณหาอัตราการไหลอากาศสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$Q = Av$$

โดยที่หน้าตัดของแอนนิโมมิเตอร์มีขนาด 6.5 cm

$$Q_1 = \left[ \frac{\pi}{4} \times (0.065^2) \right] \times 5.4 \times 60 = 1.075 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$Q_2 = \left[ \frac{\pi}{4} \times (0.065^2) \right] \times 10.8 \times 60 = 2.150 \text{ m}^3/\text{min}$$

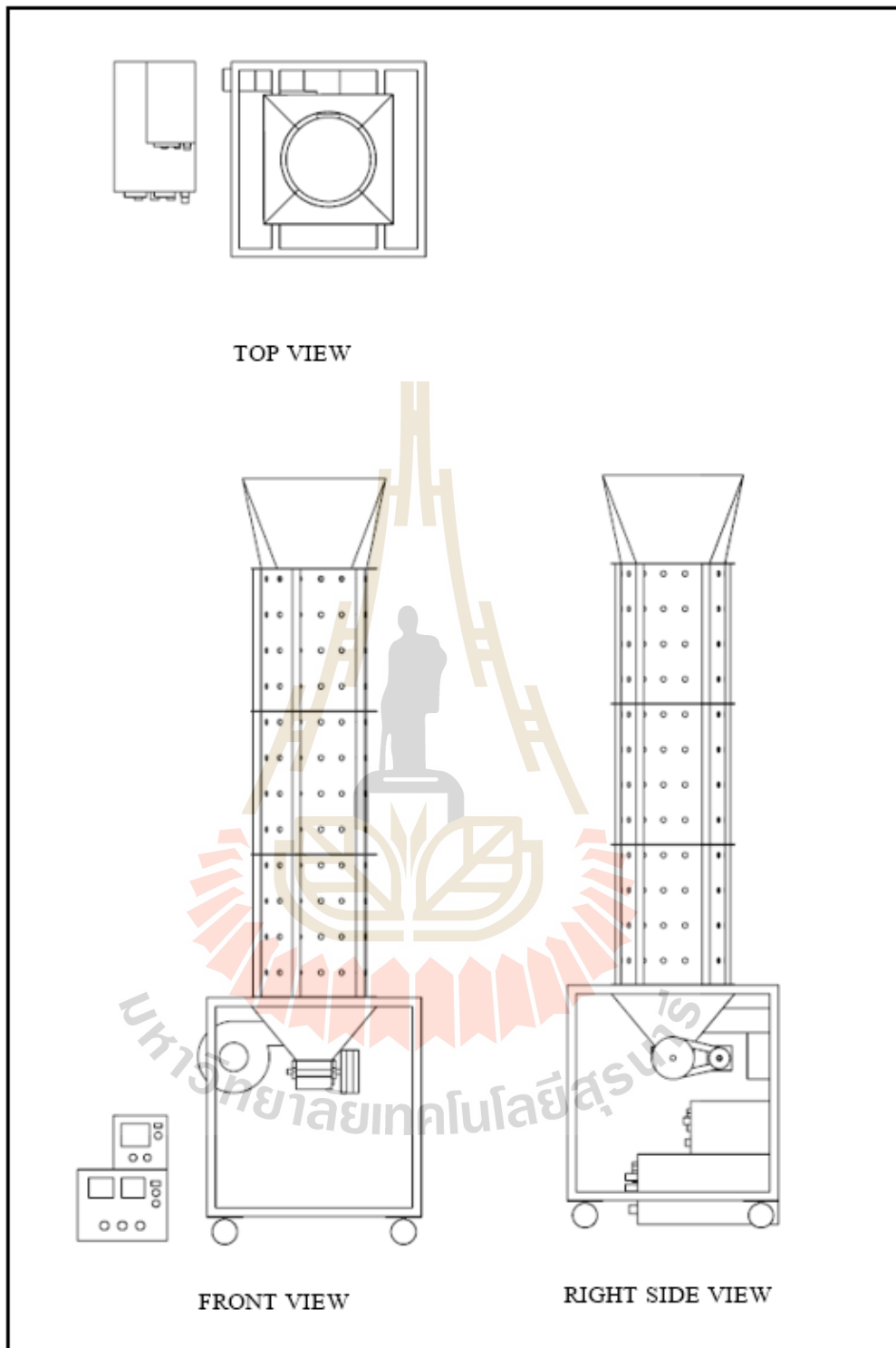
ดังนั้นที่ความเร็วอากาศ 5.4 m/s จะมีอัตราการไหลอากาศเท่ากับ 1.075 m<sup>3</sup>/min และที่ความเร็วอากาศ 10.8 m/s จะมีอัตราการไหลอากาศเท่ากับ 2.150 m<sup>3</sup>/min

ตารางผนวกที่ ค2 อุณหภูมิอากาศหลังผ่านฮีตเตอร์อินฟราเรด

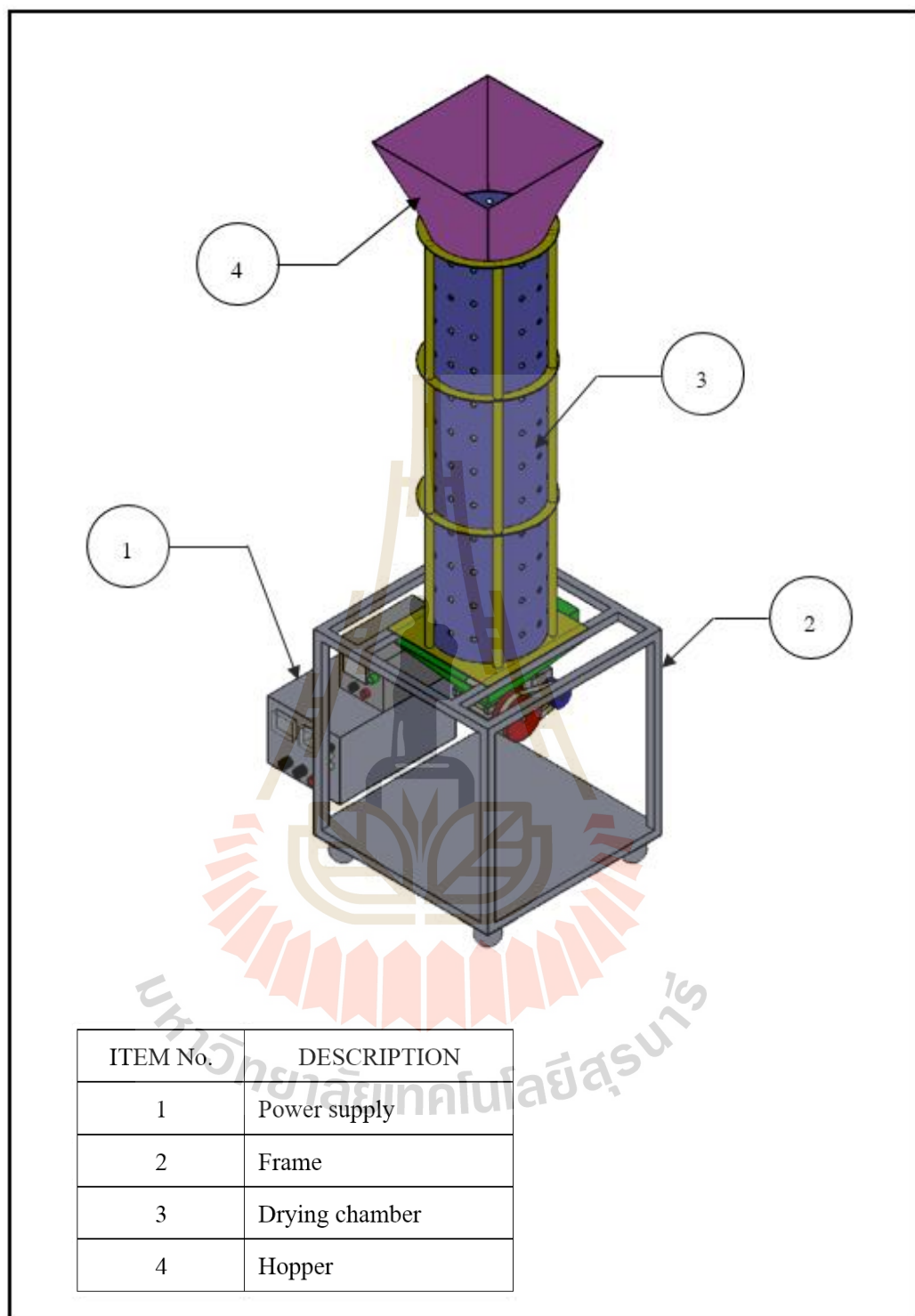
อัตราการไหลอากาศ (m <sup>3</sup> /min)	อุณหภูมิอากาศหลังผ่านฮีตเตอร์อินฟราเรด (°C)			
	No.1	No.2	No.3	avg
1.075	79.8	80.1	80.0	79.97
2.150	54.9	54.8	55.2	54.97



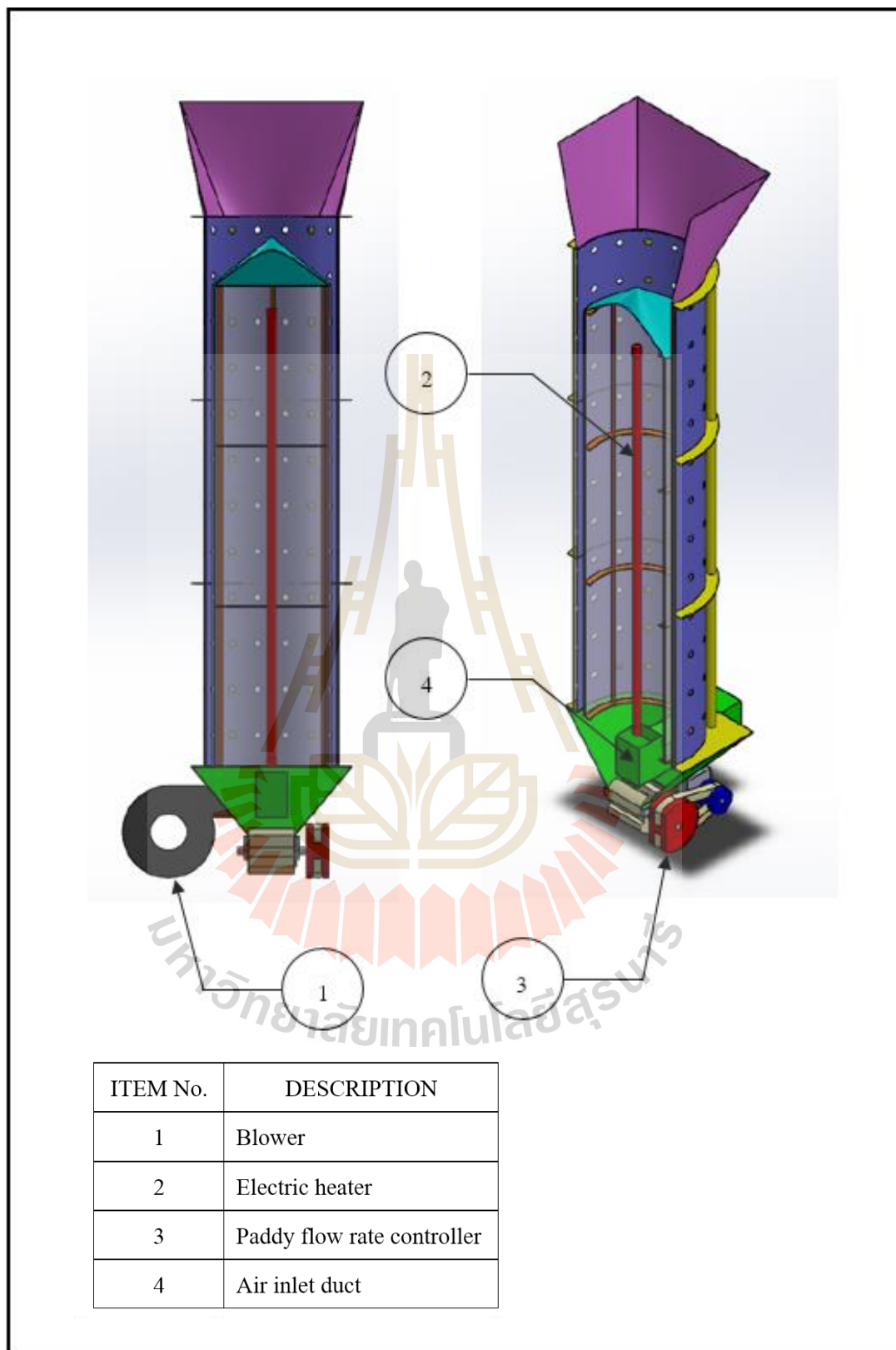




รูปผนวกที่ ง1 แบบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่อง



รูปผนวกที่ 2 ส่วนต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกอินฟราเรดแบบไหลต่อเนื่อง



รูปผนวกที่ ง3 ภาพตัดบริเวณห้องอบแห้ง



ภาคผนวก จ

บทรความที่ตีพิมพ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Nuttaphon Saelim, Krawee Treeamnuk and Tawarat Treeamnuk. (2018). **Development of Infrared Radial Radiation Dryer for Paddy**. THE IRED 8th INTERNATIONAL CONFERENCE, 30 – 34 pp. Conference Place & Date: Kuala Lumpur, Malaysia 04-02-2018.

Proc. of the Eighth International Conference On Advances in Mechanical, Aeronautical and Production Techniques - MAPT 2018  
Copyright © Institute of Research Engineers and Doctors. All rights reserved.  
ISBN: 978-1-63248-147-4 doi: 10.15224/ 978-1-63248-147-4-24

### Development of Infrared Radial Radiation Dryer for Paddy

Nuttaphon Saelim, Krawee Treeamnuk, Tawarat Treeamnuk

**Abstract**— An infrared radial radiation heating system was developed for drying paddy. A cylindrical drying chamber was installed 1,200 W of infrared heater at center for radial radiation heating. Paddy drying behavior and performance of the paddy dryer in terms of drying rate (DR), specific energy consumption (SEC) and quality of paddy i.e. head rice yield (HRV) and whiteness index (WI) were evaluated by drying 15 kg of paddy with initial moisture content of 23-26% (w.b.) by using the drying conditions of 80°C of drying temperature, 334.2 m<sup>3</sup>/min of air flow rate and 0.837, 1.228 and 1.875 kg/min of thin layer paddy flow rate. The results indicated that the drying rate and head rice yield were increased when increase the flow rate of thin layer paddy but in contrast of SEC and whiteness index.

**Keywords**—paddy dryer, infrared, radial radiation

#### 1. Introduction

Rice is one of the major food crops in the world and global paddy production in year 2016 is 751.9 million tons [1]. Normally, fresh paddy harvested at moisture content 24-35% dry basis higher than safety storage moisture content, so, drying is the important post-harvest process.

The drying paddy process can be done in several techniques. For the example, dehumidification by solar energy has the advantage is easy to operation and low energy costs but the disadvantage is cannot control the heat source. Dehumidification by dryer has the advantage is can be operating in every climate and can control moisture content level, but the disadvantage is high operating cost. In present, infrared (IR) drying has been gaining traction in agro-industry because of its high thermal efficiency [2]. The IR radiation is band of electromagnetic spectrum cover wavelengths in the range of 0.75-1000  $\mu$ m. Several investigations have been performed on the IR heating of foodstuffs for different purposes such as drying, cooking, baking, roasting, and blanching [3]. For drying, IR radiation can penetrate into the material result in the inside material is high temperature than the surface material. As a result, the outer surface of material does not wrinkle and properties of the product are similar to the material before drying.

IR drying has been the subject of investigations by several recent researchers for several agricultural materials i.e. Sharma *et al.* [4] were drying onion slice with IR. The thin layer drying of onion slices was carried out at of 300, 400 and 500W of IR power levels, air temperatures of 35, 40 and 45°C and air velocities of 1.0, 1.25 and 1.5 m/s. The drying occurred in the falling rate period. Drying rate increased with increase in IR power at a given air temperature and velocity and thus reduced the drying time. The drying time increased with increase in air velocity at a given IR power and air temperature because of the increased cooling effect at the surface of the product. A Ruiz Celma *et al.* [5] were studied thin-layer IR drying behavior of industrial grape by-products in the temperature range from 100 to 160°C. They found that, the drying rate was increase with temperature, thus reducing the total drying time. In particular, as drying temperature was raised from 100°C up to 160°C, the time period needed to reduce the moisture content of the sample from 204.32% down to 38.89% by weight (dry basis) decreased from 60.5 to 21 minutes. II. Unesh Hebbar *et al.* [6] were developed a combined IR and hot air dryer for vegetables. The performance evaluation studies indicated that combination drying of carrot and potato at 80°C with air at a velocity of 1 m/s and temperature of 40°C reduced the drying time by 48%, besides consuming less energy (63%) compared to hot air heating. Combination drying also gave better results over infrared heating alone. The energy utilization efficiency of the dryer was estimated to be 38% for both carrot and potato drying.

For paddy drying by IR, Juekamas Laohvanich and Sree Wongpichet [7] were study behavior of paddy drying process by GAS-FIRED INFRARED (GIR). In the experiment, the tray was vibrated with frequency at 450 cycles/min and the amplitude of vibration was approximately 0.01 m in the vertical direction, conducted using 0.5 kg of wet paddy samples with three replications at four initial moisture contents ( $M_0$ ) of 0.22, 0.27, 0.32 and 0.37 decimal (d.b.). Three IR radiations were applied at specific emitted maximum wavelengths ( $\lambda_{max}$ ), which were close to the absorption peak of moist materials in the infrared ray (IR) range of 2.70, 2.58 and 2.47  $\mu$ m. The drying experiment found that the drying time was significantly reduced with the increase of intensity level (decreased IR peak wavelength value,  $\lambda_{max}$ ), as higher energy was absorbed by the paddy. The effect of the drying process on wet paddy at different initial moisture content levels was observed to be that GIR drying time was influential in causing an increase in head rice yield. In addition, both GIR drying and tempering time directly affected a decrease in the whiteness index. Ipsita Das *et al.* [8] were study behavior of paddy drying process by IR. In the experiment, the soaked paddy was placed on the drying tray to the desired depth and subjected to vibration in IR field. The frequency and amplitude of the vibration was held at the optimum level of 21–22 Hz and 8–9 mm. The drying experiments were conducted at five radiation intensities

Nuttaphon Saelim  
School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology  
Thailand

Krawee Treeamnuk  
School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology  
Thailand

Tawarat Treeamnuk  
School of Agricultural Engineering, Suranaree University of Technology  
Thailand

(1509, 2520, 3510, 4520 and 5514 W/m<sup>2</sup>) for four different grain bed depths (single kernel thickness of 3, 6, 12 and 25 mm). The drying experiment found that the drying rate increase with increase in radiation intensity, while decrease with the increase in bed depth. Mojtaba Tohidi *et al.* [9] were study energy and quality attributes for fix deep bed drying of paddy. The drying experiment using centrifugal fan blew air into a heater containing 7 kW electrical heating coils and then passed the heated air into drying chamber. In experiments were conducted freshly harvested paddy at different levels of drying air parameters including temperature (T=40, 50, 60, 70 and 80°C), velocity (V=0.5, 0.8 and 1.1 m/s) and relative humidity (RH=40%, 50%, 60% and 70%). The results of energy analysis showed that the energy efficiency was improved at higher temperatures, and lower levels of velocity and relative humidity for drying air. Furthermore, it was found that the number of fissured kernels was directly related to drying rate where damaged kernels increased with increasing drying rate.

Although several reports are available on the IR or IR combination with hot air for paddy drying, no reports on IR radial radiation dryer. The objective of this research was to develop a continuous flow paddy dryer with IR radial radiation and evaluate performance of the paddy drying.

## ii. Materials and methods

### A. Paddy sample in experiment

Samples of fresh long-grain paddy of Khao Dawk Mali 105 variety with initial moisture contents about 23-26% (w.b.) were used for all tests. The samples were harvested in Nakhon Ratchasima (Thailand's northeast region) in November 2017.

### B. Development of dryer

A continuous flow with IR radial radiation dryer was developed for drying of paddy. The schematic picture of the dryer is given in Fig. 1. The dryer consists of two concentric circular cylinders, which the paddy drying chamber is height of 1 m. The inner cylinder has diameter of 26.5 cm made from glass pieces which welding gap of 1 mm consistently and the outer cylinder has diameter of 29.5 cm made from perforated (1.75 mm) steel sheet cause to the 3 mm of paddy drying layer. The hopper on top of the chamber use to feed paddy grain into the annular space drying chamber. An infrared heater (tube type) of 1200 W having diameter of 17 mm and heating length of 1000 mm was fitted at center of cylinder along surface of the drying chamber. A 24V DC blower blows the surround air into the drying chamber passes through grain moving downward and pick up moisture from paddy and then comes out of the outer perforated cylinder. Thin layer paddy flow rate controller made from superlene, it has diameter 10 cm, length 10 cm, 4 boring groove which dimension of 2 x 2 x 10 cm, driven with 12V DC. The temperature of paddy while drying was measure by 4 Thermocouples Type K. The whole dryer is supported by the structure frame. The Fig. 2 showed paddy dryer in experiment.

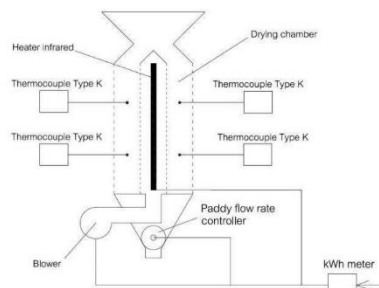


Figure 1. Schematic picture of the IR paddy dryer.



Figure 2. The IR paddy dryer in experiment.

### C. Experiment of paddy drying

The drying experiments were used to evaluate the performance of the dryer. The effect of thin layer flow rate on the performance of paddy drying in terms of drying rate, SEC, HRY and WI. The heating time by infrared radiation of paddy depend on thin layer paddy flow rate, it affect to moisture content level of paddy and energy of drying process. In the experiment, running system 30 minutes before paddy drying for temperature of system steady, set the flow rate of thin layer paddy of 0.837, 1.228 and 1.875 kg/min, and air flow rate was fix at 334.2 m<sup>3</sup>/min (measure by anemometer), contain 15 kg of paddy in chamber and then moisture content of samples were measured every 18, 13 and 8 min (vary from thin layer paddy flow rate) by moisture tester meter (model SB900, The Steinlite Corporation, Atchison, Kansas USA). Paddy samples were circulated drying until final moisture content is about 14% (w.b.). During the experiments, the total electrical energy (include blower, thin layer paddy flow rate controller and infrared heater) of drying process were measured by kWh-meter. All drying conditions were test in 3 replicates.

### D. Drying behavior and performance of dryer

In this studied, paddy drying behavior and the performance of the IR dryer that influenced from thin layer paddy flow rate in terms of DR, SEC, HRY and WI were investigated.

- Paddy drying behaviors

Paddy drying behaviors in each conditions of thin layer paddy flow rate are shown in drying curve. The moisture content values from experiments were converted into the moisture ratio (MR). The dimensionless moisture ratio can be calculated as in (1). However, the moisture ratio was simplified to  $M_t/M_i$ , where  $M_t$  and  $M_i$  are the moisture content at any given time and the initial moisture content, respectively, since in IR drying, samples may be dried as much as dry matter content (equilibrium moisture equal to zero) [10].

$$MR = \frac{M_t}{M_i} \quad (1)$$

- Drying rate (DR)

The DR determined from water removal from paddy per drying time. It can be calculated as in (2), where  $W_i$ ,  $W_f$  and  $t$  are the initial weight of paddy, final weight of paddy and drying time, respectively.

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

- Specific energy consumption (SEC)

The SEC determined from total energy of drying process (MJ) per kilograms of water removal from paddy. It can be calculated as in (3), where  $E$  is the total energy of drying process (measured by kWh-meter).

$$SEC = \frac{3.6E}{W_i - W_f} \quad (3)$$

- Head rice yield (HRY)

Taking 125 g of paddy samples after drying with the IR dryer and paddy sample from solar drying (control) at moisture content about 14% (w.b.). The both paddy samples were milled by laboratory rubber roll huller (model NW-150) and then brown rice was whitened by an abrasive roller polisher. Separate head rice and broken rice from rice samples by screening machine, weigh the head rice and record data. HRY can be calculated as in (4).

$$HRY = \frac{\text{weight of head rice}}{\text{weight of paddy}} \times 100\% \quad (4)$$

- Whiteness index (WI)

From the rice sample, the rice whiteness of milled rice was measured using a digital whiteness tester (Kett C-300, Kett Electronic Laboratory Corporation, Tokyo, Japan).

### III. RESULTS AND DISCUSSION

#### A. Drying curve

Paddy drying behavior at difference level of thin layer paddy flow rate shown in Fig. 3 and Fig. 4. The experiments results shown that most of behavior drying process occur in the falling rate period. In the initial period, moisture content

reduce rapidly and after that moisture content reduce slowly because water evaporation process took place initially at the surface of the paddy samples, but it begins to be less important as the drying time was added. Considering influenced of thin layer paddy flow rate found that the thin layer paddy flow rate increase affect to mass transfer increase because the paddy can be more moving contact with fresh air than the lower flow rate level.

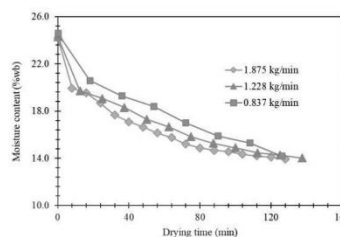


Figure 3. Variation in the paddy moisture content for different levels of thin layer paddy flow rate.

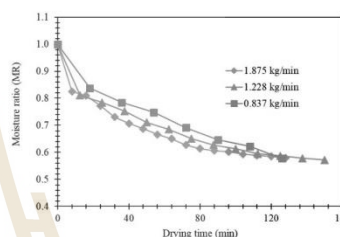


Figure 4. Variation in the paddy moisture ratio for different levels of thin layer paddy flow rate.

#### B. Drying rate (DR)

DR of paddy drying is the rate of water removal from paddy kernel. Considering influenced of thin layer paddy flow rate found that the thin layer paddy flow rate increase affect to DR increase because thin layer paddy flow rate increase affect to the paddy can be transfer more moisture to air than lower flow rate levels (Fig. 5).

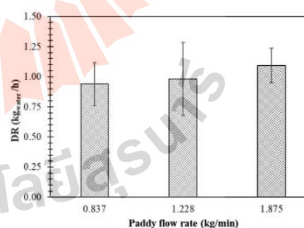


Figure 5. Drying rate of paddy dryer.

### C. Specific energy consumption

SEC is the total energy use for removal water from paddy kernel. Considering influenced of thin layer paddy flow rate found that the thin layer paddy flow rate increase affects to decrease SEC because thin layer paddy flow rate increase affect to the paddy can be transfer more moisture to air than lower flow rate level (Fig.6). Therefore, the drying process for evaporate moisture to desired moisture content use less time.

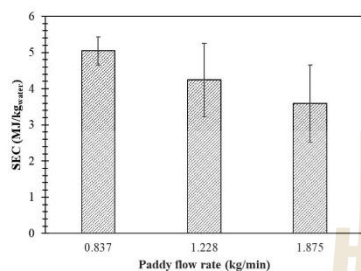


Figure 6. Specific energy consumption of paddy dryer.

### D. Effect of thin layer paddy flow rate with quality of paddy after drying process

#### • Head rice yield (HRY)

Considering influenced of thin layer paddy flow rate found that the thin layer paddy flow rate increase affects to increase HRY (Fig. 7) because the higher thin layer paddy flow rate takes the paddy kernel stay in chamber less time than the lower flow rate, so, paddy kernel at lower thin layer paddy flow rate receive heat from infrared radiation for a long time cause the damage of paddy increased when decreasing thin layer paddy flow rate. When compare HRY from IR drying with control (sun drying) found that all condition of IR drying have lower HRY than control.

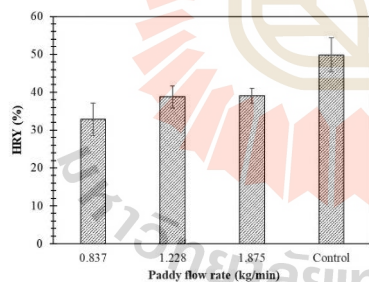


Figure 7. Head rice yield of paddy.

#### • Whiteness index (WI)

Consideration WI value of control sample and samples of paddy after IR drying found that the samples of paddy after IR drying have WI close to control sample. Consider effect of thin layer paddy flow rate affect to WI found that WI of each thin layer paddy flow rate are tend to decrease when thin layer paddy flow rate increase.

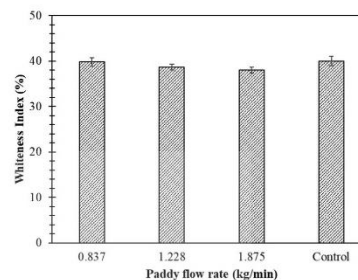


Figure 8. Whiteness index of rice.

## IV. Conclusion

From experiment of the paddy drying by IR drying with different thin layer paddy flow rate found that the flow rate of thin layer paddy was increased affect to DR and HRY were increase but SEC and WI were decrease. The thin layer paddy flow rate of 1.875 kg/min is suitable for paddy drying because this condition gave the highest DR and HRY and lowest in SEC with WI close to control.

## Acknowledgment

The author would like to thank the Biosystem Engineering and Technology Research Laboratory and Suranaree University of Technology for support this research.

## References

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nation, "Rice Market Monitor," vol. XX, No. 1, Apr. 2017.
- [2] Juckamas Laohavanich, and Seree Wongpichet, "Thin layer drying model for gas-fired infrared drying of paddy," Songklanakarin J. Sci. Technol, vol.30 (3), pp. 343-348, May-Jun 2008.
- [3] Darinsh Zare, Hossein Naderi, and Mohsen Ranjbaran, "Energy and quality attributes of combined hot-air/infrared drying of paddy," Drying Technology, vol. 33, pp 579-582, February 2015.
- [4] G.P. Sharma, R.C. Verma, and Pankaj Pathare, "Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices," Journal of Food Engineering, vol. 71(3), pp. 282-286, December 2005.
- [5] A. Ruiz, Celma, F.López-Rodríguez, and F.Cuadros, "Experimental modelling of infrared drying of industrial grape by-products," Food and Bioprocess Processing, vol. 87(4), pp. 247-253, December 2009.
- [6] 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(4), pp.557-563, December 2004.
- [7] Juckamas Laohavanich, and Seree Wongpichet, "Drying characteristics and milling quality aspects of paddy dried gas-fired



Proc. of the Eighth International Conference On Advances in Mechanical, Aeronautical and Production Techniques - MAPT 2018  
 Copyright © Institute of Research Engineers and Doctors. All rights reserved.  
 ISBN: 978-1-63248-147-4 doi: 10.15224/978-1-63248-147-4-24

- infrared," *Journal of Food Process Engineering*, vol. 32(3), pp. 442-461, June 2009.
- [8] Ipsita Das, S.K. Das, and Satish Bal, "Drying Kinetics of high moisture paddy undergoing vibration-assisted infrared (IR) drying," *Journal of Food Engineering*, vol.95(1), pp. 166-171, November 2009.
- [9] Mojtaba Tohidi, Morteza Sadeghi, and Mehdi Torki-Harhegani, "Energy and quality aspects for fixed deep bed drying of paddy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.70, pp. 519-528, April 2017.
- [10] A. Ruiz Celma, F. Cuadros, and F.López-Rodríguez, "Characterisation of industrial tomato by-products from infrared drying process," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 87 (4), pp. 282-291, December 2009.

#### About Authors:



**Nuttaphon Saelim** was born in Nakhon Ratchasima province, Thailand on April 7, 1994. He received his 1<sup>st</sup> class honors B.Eng.(Mechanical Engineering) from Suranaree University of Technology, Thailand. Currently, he is a master degree student in Mechanical Engineering Program, Suranaree University of Technology.



**Krawee Treeamnuak**, D. Eng. He is currently an Assistant Professor at School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology (Thailand). His research interest is mainly in the area of post-harvest machines and process, non-destructive technique, thermal process in agricultural system.



**Tawarat Treeamnuak**, D. Eng. She is currently an Assistant Professor at School of Agricultural engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology (Thailand). Her areas of research interests are food processing, post-harvest technology, drying.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ณัฐพล แซ่ลิ้ม, เทวรัตน์ ตรีอำนรรค และ กระจวี ตรีอำนรรค. (2560). การพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมี. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร. ปีที่ 12 ฉบับที่ 2 (2561). (รออนไลน์).

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ปีที่ ... ฉบับที่ ..., xxx-xxx...,xxxx

1

<http://journal.rmutp.ac.th/>

## การพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมี

ณัฐพล แซ่ลิ้ม<sup>1</sup> เทวรัตน์ ตรีอำนรรค<sup>2\*</sup> และ กระจวี ตรีอำนรรค<sup>3</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<sup>1, 2, 3</sup>111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ ; ตอรับบทความ (ไม่ต้องกำหนด)

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมี เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกต้นแบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยห้องอบแห้งทรงกระบอก 2 ชั้น สูง 1 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกระบอกชั้นในซึ่งผลิตจากกระจกใส 26.5 เซนติเมตร ทรงกระบอกชั้นนอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 29.5 เซนติเมตร ผลิตจากเหล็กเจาะรูขนาด 1.75 มิลลิเมตร ที่จุดศูนย์กลางทรงกระบอกติดตั้งฮีตเตอร์อินฟราเรดไฟฟ้าขนาด 1200 วัตต์ ด้านบนติดตั้งฮอปเปอร์ ด้านล่างติดตั้งชุดควบคุมการไหลข้าวเปลือก และพัดลมขนาด 120 วัตต์ ประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งด้วยค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงงานจำเพาะ (SEC) อัตราการอบแห้ง (DR) และคุณภาพข้าวในเทอมของเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน (HRY) และดัชนีความขาว (WI) โดยการอบแห้งข้าวเปลือก 15 กิโลกรัม ที่มีความชื้นเริ่มต้น 23.26 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ด้วยสภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิห้องอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลอากาศ 1.075 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และอัตราการไหลของข้าวเปลือก 0.837-1.228-1.875 และ 2.308 กิโลกรัมต่อวินาที พบว่าอัตราการไหลของข้าวเปลือกมีอิทธิพลต่อสมรรถนะการอบแห้งโดยที่อัตราการไหล 1.875 กิโลกรัมต่อวินาที เป็นค่าที่เหมาะสมเนื่องจากให้ค่า DR สูงสุดและ SEC ต่ำสุดโดยที่คุณภาพข้าวในเทอมของ HRY และ WI ใกล้เคียงกับชุดควบคุมมากที่สุด

คำสำคัญ : เครื่องอบแห้งข้าวเปลือก; อินฟราเรด; การแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมี

\* ผู้เขียนี่ประสานงาน โทร: +66-44-224-583, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: tawarat@sut.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

## Development of a Continuous Flow Paddy Dryer with Infrared Radial Radiation Technique

Nuttaphon Saelim<sup>1</sup> Tawarat Treemnu<sup>2\*</sup> and Krawee Treemnu<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

<sup>2</sup>School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

<sup>1,2,3</sup>111 University Avenue, Suranaree, Muang, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

---

Received ; accepted (Do not assign)

### Abstract

The objective of this research was to design and development of a continuous flow paddy dryer with infrared radial radiation technique. The prototype of dryer consists of two concentric circular cylinders, which the paddy drying chamber is height of 1 m. The inner cylinder has diameter of 26.5 cm made from glasses and the outer cylinder has diameter of 29.5 cm made from perforated (1.75 mm) steel sheet. At the center of cylinders installed 1,200 W of electric infrared heater. A hopper was installed on the top of the chamber while 120 W of blower and paddy flow control were installed at bottom of chamber. The performance of the dryer in terms of specific energy consumption (SEC), drying rate (DR) and quality of paddy i.e. head rice yield (HRY) and whiteness index (WI) were evaluated by drying 15 kg of paddy with initial moisture content of 23-26% (w.b.) by using the drying conditions of 80°C of drying chamber temperature, 1.075 m<sup>3</sup>/min of air flow rate and 0.837, 1.228 1.875 and 2.308 kg/min of paddy flow rate. The results found that paddy flow rate at 1.875 kg/min is the optimum condition because gave the highest DR, lowest SEC and rice qualities (HRY and WI) closely to control.

**Keywords** : paddy dryer; infrared; radial radiation

---

\* Corresponding Author. Tel.: +66-44-224-583, E-mail Address: [tawarat@sut.ac.th](mailto:tawarat@sut.ac.th)

## 1. บทนำ

ข้าวเป็นธัญพืชที่สำคัญชนิดหนึ่งของโลก ซึ่งผลผลิตข้าวเปลือกทั่วโลกในปี 2016 มีปริมาณ 751.9 ล้านตัน [1] โดยปกติแล้วข้าวเปลือกที่ทำการเก็บเกี่ยวจะมีความชื้นประมาณ 24-35 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ซึ่งเป็นระดับความชื้นที่สูงกว่าระดับความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษา ดังนั้นกระบวนการลดความชื้นจึงเป็นกระบวนการที่สำคัญกระบวนการหนึ่งของข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งการลดความชื้นข้าวเปลือกสามารถทำได้หลายวิธี ตัวอย่างเช่น การลดความชื้นด้วยการตากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถดำเนินการได้ง่ายและต้นทุนการดำเนินการต่ำ แต่ข้อเสียคือไม่สามารถควบคุมแหล่งพลังงานความร้อนได้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและสภาพอากาศ กระบวนการลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้งมีข้อดีคือ สามารถดำเนินการได้ทุกสภาพอากาศและสามารถควบคุมระดับความชื้นที่ต้องการได้ แต่ข้อเสียคือค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง

ปัจจุบันการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วง 0.75-100 ไมโครเมตร กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ในอุตสาหกรรมเกษตรและอาหารเนื่องจากมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง [2] มีการนำการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดไปใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารด้วยกรรมวิธีที่หลากหลาย เช่น การอบแห้ง การปรุงสุกอาหาร การบึ่งย่างหรือการลวก [3] สำหรับการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดนั้นรังสีอินฟราเรดจะสามารถทะลุเข้าไปในเนื้อของวัสดุได้จึงทำให้ภายในของวัสดุมีอุณหภูมิสูงกว่าผิวภายนอก ซึ่งส่งผลให้ผิวด้านนอกของวัสดุที่ผ่านการอบแห้งไม่เหี่ยวแห้งและยังคงคุณสมบัติของวัสดุไว้

ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรด้วยรังสีอินฟราเรดอย่างมากมาย ตัวอย่างเช่น G.P. Sharma et al. [4] ได้ทำการอบแห้งหอมหัวใหญ่ด้วยรังสีอินฟราเรด ซึ่งทำการอบแห้งด้วยระดับกำลังของรังสีอินฟราเรดที่ 300 400 และ 500 วัตต์

อุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง 35 40 และ 45 องศาเซลเซียส ความเร็วอากาศ 1.0 1.25 และ 1.5 เมตรต่อวินาที ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การอบแห้งเกิดในช่วงอัตรา การอบแห้งลดลง โดยที่อัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังของรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ ความเร็วของอากาศที่ใช้ออบแห้งเดียวกัน ส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งลดลง แต่เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศที่ กำลังของรังสีอินฟราเรดและอุณหภูมิของอากาศเดียวกัน เนื่องจากผลกระทบของการระบายความร้อนที่ผิวของผลิตภัณฑ์ A.R. Celma et al. [5] ได้ศึกษาพฤติกรรม การอบแห้งแบบชั้นบางของเมล็ดคองงู โดยอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 100-160 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการศึกษาพบว่า อัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งลดลง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ การอบแห้งจาก 100 เป็น 160 องศาเซลเซียส จะทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์จาก 204.32 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ลงเหลือ 38.89 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ลดลงจาก 60.5 นาทีเหลือ 21 นาที H.U. Hebbbar et al. [6] ได้พัฒนาเครื่องอบแห้ง ผักความร้อนรวมจากลมร้อนและรังสีอินฟราเรด ซึ่งจากการศึกษาประสิทธิภาพของการอบแห้งแบบความร้อนร่วมของแครอทและมันฝรั่งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ด้วยอุณหภูมิอากาศ 40 องศาเซลเซียส ความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที พบว่าการอบแห้งแบบความร้อนร่วมสามารถลดระยะเวลาที่ใช้ออบแห้งลง 48 เปอร์เซ็นต์ นอกเหนือจากนั้นยังสามารถลดปริมาณการใช้พลังงานลงได้ 63 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนและการอบแห้งแบบ ความร้อนร่วมยังให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว ซึ่งประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งนี้คิดเป็น 38 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการอบแห้งแครอทและมันฝรั่ง U. Teeboonma and S. Jongjam [7] ได้ศึกษาการอบแห้งซึ่งด้วยเทคนิคสุญญากาศ ร่วมกับอินฟราเรดและหาสมการการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งซึ่ง โดย

ทำการทดลองอบแห้งภายใต้เงื่อนไขความดันสัมบูรณ์ 5 10 และ 15 กิโลปาสกาล และอุณหภูมิอบแห้ง 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษา คือ อัตราส่วนความชื้น อัตราการอบแห้ง และ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อลดความดันสัมบูรณ์หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะทำให้ อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวกับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรดนั้น J. Laohavanich and S. Wongpichet [8] ได้ศึกษาพฤติกรรม การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีการ GAS-FIRED INFRARED (GIR) ซึ่งในการทดลองนั้นสภาพที่ใส่ตัวอย่างทดสอบจะสั้นด้วยความถี่ 450 รอบต่อวินาที และมีแอมพลิจูดของการสั่นในแนวตั้งประมาณ 0.01 เมตร ทำการทดสอบ 3 ชั่วโมง โดยใช้ตัวอย่างข้าวเปลือก 0.5 กิโลกรัม ที่มีสัดส่วนความชื้นเริ่มต้น 0.22 0.27 0.32 และ 0.37 (มาตรฐานแห้ง) และความยาวคลื่นสูงสุดของรังสีอินฟราเรด 2.70 2.58 และ 2.47 ไมโครเมตร จากการศึกษาพบว่าระยะเวลาในการอบแห้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มระดับความเข้มของรังสีอินฟราเรด(ลดความยาวคลื่นสูงสุดของรังสีอินฟราเรด) เนื่องจากข้าวเปลือกสามารถดูดกลืนพลังงานได้มากขึ้นและจากระยะเวลาในการอบแห้งที่ลดลงนั้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าทั้งระยะเวลาที่ใช้ออบแห้ง และ Tempering ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของดัชนีความขาว I. Das et al. [9] ได้ศึกษาพฤติกรรม การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอินฟราเรด โดยในการทดลองได้นำข้าวเปลือกวางบนภาชนะที่ใช้ในการอบแห้งที่วางไว้ห่างจากรังสีอินฟราเรดตามระยะที่ต้องการและภาชนะที่ใช้ในการอบแห้งสั้นด้วยความถี่ 21-22 เฮิร์ต และมีแอมพลิจูด 8-9 มิลลิเมตร ทดสอบที่ความเข้มของรังสีอินฟราเรด 5 ระดับ (1509 2520 3510 4520 และ 5514 วัตต์ต่อตารางเมตร) ความหนาชั้นข้าวเปลือก 4 ระดับ (3 6 12 และ 25 มิลลิเมตร) ซึ่งจากการทดลองพบว่าอัตราการ

อบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเข้มรังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้น และอัตราการอบแห้งลดลงเมื่อความหนาของชั้นข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น M. Tohidi et al. [10] ได้ศึกษาการใช้พลังงานและคุณภาพของเครื่องอบแห้งแบบ fixed deep bed โดยในการทดลองจะใช้พัดลมนำอากาศผ่านฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก ซึ่งจะทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของอากาศที่ใช้ออบแห้ง เช่น ระดับความชื้นสัมพัทธ์ (40 50 60 และ 70 เปอร์เซ็นต์) ความเร็วลม(0.5 0.8 และ 1.1 เมตรต่อวินาที) และ อุณหภูมิของอากาศ (40 50 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส) ซึ่งจากการวิเคราะห์พลังงานแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานจะดีขึ้นเมื่ออากาศที่ใช้ในการอบแห้งมีอุณหภูมิสูง ความเร็วและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำ โดยในการอบแห้งถ้าอัตราอบแห้งสูงจะส่งผลให้ข้าวเปลือกเสียหายมากขึ้น

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้รังสีอินฟราเรดหรือการใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนเพื่อใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก แต่ยังไม่มียานวิจัยที่เกี่ยวกับเครื่องอบแห้งด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมีและเป็นการอบแห้งแบบไหลต่อเนื่อง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมีและศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลข้าวเปลือกต่อสมรรถนะการอบแห้ง

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

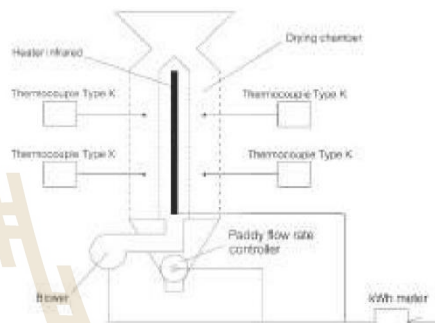
### 2.1 การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งต้นแบบ

การออกแบบเครื่องอบแห้งได้กำหนดให้ห้องอบแห้งสามารถบรรจุข้าวเปลือกได้ 15 กิโลกรัม ที่ความชื้นเริ่มต้น 24 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก โดยอ้างอิงค่าความหนาแน่นจากรายงานของ T. Tipyavimol et al. [11] และกำหนดให้ความหนาของ

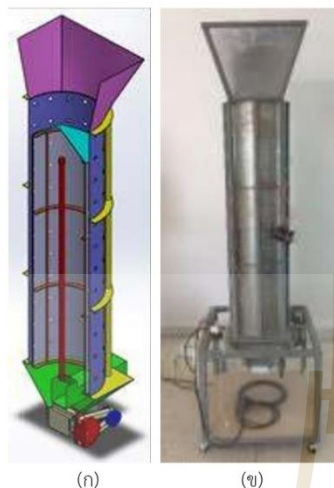
ชั้นอบแห้งข้าวเปลือกที่รับความร้อนจากรังสีอินฟราเรดมีค่า 1.5 เซนติเมตร จากนั้นได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกแบบชั้นบางของ I. Das et al. [9] มาใช้เพื่อการคำนวณหาอัตราการไหลข้าวเปลือกที่สัมพันธ์กับความเข้มของรังสีอินฟราเรด จึงได้ออกแบบเครื่องอบแห้งดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยห้องอบแห้งรูปทรงกระบอกที่มีความสูง 1 เมตร โดยที่ผนังด้านในของห้องอบแห้งทำด้วยกระจกใสที่นำมาต่อกันโดยมีระยะห่างกันประมาณ 1 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 26.5 เซนติเมตร และผนังด้านนอกห้องอบแห้งทำด้วยเหล็กแผ่นเจาะรู (ขนาดรู 1.75 มิลลิเมตร) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 29.5 เซนติเมตร ซึ่งทำให้ข้าวเปลือกที่ไหลในห้องอบแห้งมีความหนา 1.5 เซนติเมตร ถึงบรรจุข้าวเปลือกติดตั้งอยู่บริเวณด้านบนห้องอบแห้งเพื่อป้องกันข้าวเปลือกหลุดห้องอบแห้งติดตั้งฮีตเตอร์อินฟราเรดชนิดทรงขนาด 1200 วัตต์ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 17 มิลลิเมตร และมีช่วงให้ความร้อนยาว 1000 มิลลิเมตร บริเวณศูนย์กลางทรงกระบอกห้องอบแห้ง โบลเวอร์กระแสตรง 24 โวลต์ 120 วัตต์ เป่าอากาศจากภายนอกเข้าสู่ห้องอบแห้งผ่านเมล็ดข้าวเปลือกที่เคลื่อนที่ลงเพื่อนำความชื้นที่ออกมาจากเมล็ดข้าวออกไปตามรูของผนังด้านนอกห้องอบแห้งชุดปล่อยข้าวเพื่อควบคุมอัตราการไหลข้าวเปลือกทำจากซูเปอร์ลีนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความยาว 10 เซนติเมตร ความกว้าง 4 ร่องที่มีขนาด 2x2x10 เซนติเมตร ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรง 12 โวลต์ อุณหภูมิของข้าวเปลือกในขณะอบแห้งวัดด้วย Thermocouple type K 4 ตัว และทุกส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งถูกติดตั้งอยู่บนโครงรับน้ำหนักของเครื่องอบแห้ง (รูปที่ 2) ขณะทำการอบแห้ง วัดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยใช้ กิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์

## 2.2 ตัวอย่างข้าวเปลือกในการทดลอง

ในการทดลองใช้ข้าวเมล็ดยาวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่มีความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 23-26 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ซึ่งเป็นข้าวที่เก็บเกี่ยวในจังหวัดนครราชสีมาช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2560 ความชื้นของข้าวเปลือกหาโดยการวัดด้วยเครื่องวัดความชื้นเมล็ดพืช(model SB900, The Steinlite Corporation, Atchison, Kansas USA)



รูปที่ 1 ภาพแสดงแผนผังโครงสร้างของเครื่องอบแห้ง



รูปที่ 2 (ก) ภาพตัดบริเวณห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งต้นแบบ (ข) เครื่องอบแห้งต้นแบบ

### 2.3 การอบแห้งข้าวเปลือก

การทดลองการอบแห้งเพื่อศึกษาลักษณะของอัตราการไหลของชั้นข้าวเปลือกที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งในรูปแบบของอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) และคุณภาพข้าวในรูปของเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน (Head rice yield, HRY) และดัชนีความขาว (Whiteness index, WI) โดยที่ระยะเวลาที่ชั้นข้าวเปลือกได้รับความร้อนจากรังสีอินฟราเรดนั้นขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของชั้นข้าวเปลือก ซึ่งจะส่งผลต่อระดับความชื้นของข้าวเปลือกและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง ในการทดลองนั้นจะเปิดระบบทิ้งไว้ก่อนทำการทดลอง 30 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของระบบคงที่ จากนั้นทำการอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหลของเปลือก 0.837 1.228 1.875 และ 2.308 กิโลกรัมต่อนาที อัตราการไหลอากาศ 1.075 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที โดยทำการบรรจุข้าวเปลือก 15 กิโลกรัม ลงในห้องอบแห้งและทำการวัด

ความชื้นตัวอย่างข้าวเปลือกทุก ๆ 18 13 8 และ 6.5 นาที (ระยะเวลาขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของข้าวเปลือก) ด้วยเครื่องวัดความชื้น ทำการอบแห้งจนกระทั่งตัวอย่างข้าวเปลือกเหลือความชื้นประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก พลังงานทั้งหมดของกระบวนการอบแห้ง (ประกอบไปด้วยโบลเวอร์ ชุดควบคุมอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือก และฮีตเตอร์อินฟราเรด) สามารถวัดได้จาก กิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์ และทุกสภาวะของการทดลองจะทำการทดลอง 3 ซ้ำ

### 2.4 การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

การประเมินสมรรถนะการอบแห้งเพื่อดูอิทธิพลของอัตราการไหลข้าวเปลือกนั้นสามารถประเมินได้จากพฤติกรรมการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะดังนี้

#### 2.4.1 พฤติกรรมการอบแห้ง

พฤติกรรมการอบแห้งข้าวเปลือกสามารถแสดงได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น (Moisture content) หรืออัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) กับเวลาที่ใช้ออบแห้ง โดยที่ค่าความชื้น ณ เวลาใดๆ ที่ได้จากการทดลองนั้นจะถูกแปลงเป็นค่าอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) ซึ่งค่าอัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้ตามสมการ (1) อย่างไรก็ตามอัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้จาก  $M_t/M_i$  เนื่องจากการอบแห้งด้วยอินฟราเรดนั้นตัวอย่างทดสอบอาจจะมีน้ำความชื้นเท่ากับน้ำของวัสดุแห้งนั้นๆ [12]

$$MR = \frac{M_t}{M_i} \quad (1)$$

โดยที่

MR = อัตราส่วนความชื้น

$M_t$  = ความชื้น ณ เวลาใดๆ (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก)

$M_i$  = ความชื้นเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก)

#### 2.4.2 อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR)

อัตราการอบแห้งสามารถพิจารณาได้จากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง สามารถคำนวณได้ตามสมการ (2)

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

โดยที่

DR = อัตราการอบแห้ง (กิโลกรัม/น้ำต่อชั่วโมง)

$W_i$  = น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น (กิโลกรัม)

$W_f$  = น้ำหนักข้าวเปลือกหลังอบแห้ง (กิโลกรัม)

t = เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (ชั่วโมง)

#### 2.4.3 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC)

ค่า SEC สามารถพิจารณาได้จากพลังงานทั้งหมดในกระบวนการอบแห้ง (เมกะจูล) ต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือก (กิโลกรัม) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3)

$$SEC = \frac{3.6E}{W_i - W_f} \quad (3)$$

โดยที่

SEC = ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (เมกะจูลต่อกิโลกรัม/น้ำ)

E = พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในกระบวนการอบแห้ง (กิโลวัตต์ ชั่วโมง)

#### 2.4.4 เปอร์เซ็นต์ข้าวตัน (Head rice yield, HRY)

นำตัวอย่างข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบที่พัฒนาขึ้นและข้าวเปลือกที่ผ่านการลดความชื้นด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีความชื้นประมาณ

14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก อย่างละ 125 กรัม มาแกะห่อเปลือกด้วยเครื่องสีข้าวระบบลูกยาง (Model : NW-150) และนำข้าวกลิ้งที่ได้ไปขัดขาวด้วยเครื่องขัดขาว ทำการแยกข้าวตันและข้าวหักออกจากกันด้วยเครื่องคัดแยกขนาดเมล็ด จากนั้นชั่งน้ำหนักข้าวตันและบันทึกข้อมูล โดยที่เปอร์เซ็นต์ข้าวตันสามารถคำนวณได้ตามสมการ (4)

$$HRY = \frac{\text{weight of headrice}}{\text{weight of paddy}} \times 100 \% \quad (4)$$

#### 2.4.5 ดัชนีความขาว (Whiteness index, WI)

จากตัวอย่างข้าวเปลือกที่นำไปขัดขาวแล้วจะนำไปวัดค่าดัชนีความขาวด้วยเครื่องวัดดัชนีความขาว (Model : Kett C 600, Kett Electronic Laboratory Corporation, Tokyo, Japan)

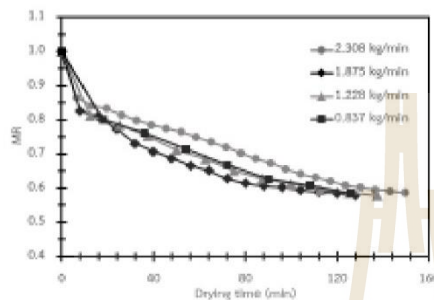
### 3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

#### 3.1 พฤติกรรมการอบแห้ง

พฤติกรรมการอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหลของชั้นข้าวเปลือกต่างกันนั้นมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3 จากผลการทดลองพบว่าพฤติกรรมของกระบวนการอบแห้งส่วนใหญ่จะเกิดในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงโดยในช่วงแรกของการอบแห้งนั้นความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วและหลังจากนั้นความชื้นจะค่อยๆลดลงเนื่องจากกระบวนการระเหยน้ำของข้าวเปลือกในช่วงแรกจะเกิดขึ้นที่ผิวของข้าวเปลือกแต่เมื่อเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นกระบวนการระเหยน้ำของข้าวเปลือกจะลดลง จากการพิจารณาผลกระทบจากอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกพบว่าเมื่ออัตราการไหลของชั้นข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นจาก 0.837 ถึง 1.875 กิโลกรัม/ต่อนาที อัตราการอบแห้งจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของข้าวเปลือกเป็น 2.308 กิโลกรัม/ต่อนาที กลับพบว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นเทียบกับเวลามีค่าลดลงทั้งนี้



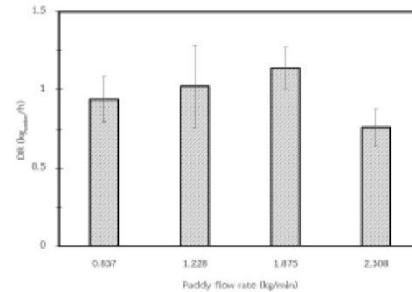
เนื่องจากอัตราการไหลข้าวเปลือกที่มากเกินไปทำให้ข้าวเปลือกสัมผัสกับรังสีอินฟราเรดได้น้อยลงการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลจึงเกิดขึ้นได้น้อยกว่าในอัตราการไหลที่ต่ำกว่า



รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ออบแห้งที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกต่างกัน

### 3.2 อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR)

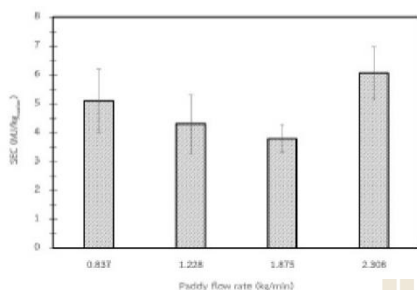
เมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิการอบแห้งและอัตราการไหลอากาศ ทำให้พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลข้าวเปลือกจาก 0.837 เป็น 1.875 กิโลกรัมต่อนาที อัตราการอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของข้าวเปลือกเป็น 2.308 กิโลกรัมต่อนาที จะพบว่าอัตราการอบแห้งมีค่าลดลง (รูปที่ 4) ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการอบแห้งที่เกิดขึ้นใน รูปที่ 3 ดังนั้นเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นนี้จึงเหมาะสมต่ออัตราการไหลข้าวเปลือกที่อัตรา 1.875 กิโลกรัมต่อนาที เมื่อทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลอากาศ 1.075 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที เมื่อพิจารณาในเรื่องของอัตราการอบแห้งซึ่งจะทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งที่น้อยกว่าการอบแห้งในอัตราการไหลอื่น ๆ



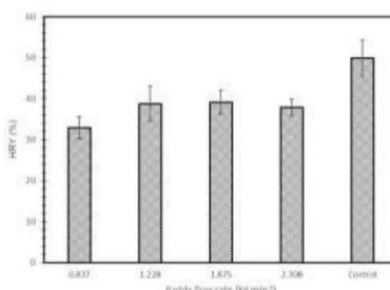
รูปที่ 4 อัตราการอบแห้งของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกต่างกัน

### 3.3 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC)

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะคือพลังงานทั้งหมดของเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการกำจัดน้ำออกจากเมล็ดข้าวเปลือก เมื่อพิจารณาผลกระทบจากอัตราการไหลชั้นบางข้าวเปลือกพบว่า ค่า SEC ของการอบแห้งข้าวเปลือกมีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมการอบแห้งและอัตราการอบแห้ง นั่นคือที่อัตราการไหลของข้าวเปลือก 1.875 กิโลกรัมต่อนาที เป็นอัตราการไหลที่ให้ค่า SEC ต่ำสุด โดยค่า SEC จะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการไหลข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นจนถึง 1.875 กิโลกรัมต่อนาที และจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นเป็น 2.308 กิโลกรัมต่อนาที ดังแสดงใน รูปที่ 5



รูปที่ 5 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกต่างกัน



รูปที่ 6 เปอร์เซนต์ข้าวตันของข้าวหลังผ่านการอบแห้งที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกต่างกัน

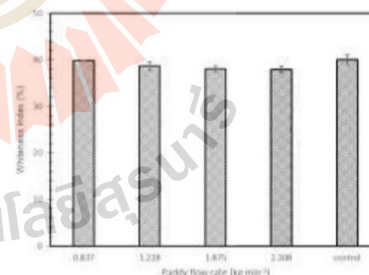
### 3.4 ผลกระทบของอัตราการไหลชั้นบางข้าวเปลือกต่อคุณภาพของข้าวเปลือกหลังกระบวนการอบแห้ง

#### 3.4.1 เปอร์เซนต์ข้าวตัน (Head rice yield, HRY)

เมื่อพิจารณาจากผลกระทบของอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกพบว่าอัตราการไหลต่ำข้าวเปลือกจะอยู่ในเครื่องอบแห้งนานทำให้ได้อิทธิพลจากรังสีอินฟราเรดนานกว่าจึงทำให้เกิดความร้อนสะสมภายในทำให้ค่า HRY มีค่าน้อยกว่าข้าวเปลือกที่ไหลด้วยอัตราที่สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราการไหลข้าวเปลือกสูงถึง 2.308 กิโลกรัมต่อนาที กลับพบว่าค่า HRY มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากว่าการที่อัตราการไหลของข้าวเปลือกที่สูงมากเกินไปทำให้จำนวนเที่ยวในการวนกลับเข้าสู่ห้องอบแห้งเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เกิดความเสียหายทางกลต่อเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ค่า HRY มีค่าลดลง (รูปที่ 6) และเมื่อเปรียบเทียบค่า HRY ระหว่างตัวอย่างข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดกับชุดตัวอย่างควบคุม (ข้าวเปลือกที่ลดความชื้นด้วยพลังงานแสงอาทิตย์) พบว่าข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีค่า HRY น้อยกว่าชุดตัวอย่างควบคุมทุกอัตราการไหล

#### 3.4.2 ดัชนีความขาว (Whiteness index, WI)

จากการพิจารณาค่า WI ของชุดตัวอย่างควบคุมกับข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดพบว่า ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีค่าดัชนีความขาวใกล้เคียงกับชุดตัวอย่างควบคุมและเมื่อพิจารณาผลกระทบจากอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกที่มีต่อค่าดัชนีความขาวจะพบว่า ที่ทุกค่าอัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกนั้นค่าดัชนีความขาวจะน้อยกว่าค่าดัชนีความขาวของชุดตัวอย่างควบคุม และค่าดัชนีความขาวจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 ค่าดัชนีความขาวของข้าวหลังผ่านการอบแห้งที่อัตราการไหลชั้นข้าวเปลือกต่างกัน

#### 4. สรุป

จากการทดลองการอบแห้งข้าวเปลือกด้วย อัตราการไหลชั้นบางข้าวเปลือกที่แตกต่างกันพบว่า อัตราการไหลข้าวเปลือกมีผลต่อสมรรถนะการอบแห้ง ข้าวเปลือกโดยค่าอัตราการไหลข้าวเปลือกที่เหมาะสม ต่อการอบแห้งข้าวเปลือกแบบอินฟราเรดที่ใช้ความร้อน ในแนวรัศมีที่พัฒนาขึ้นคือ 1.875 กิโลกรัมต่อนาที ซึ่งจะ ให้ค่าอัตราการอบแห้งสูงสุด ใช้พลังงานต่ำสุด โดยที่ คุณภาพของข้าวเมื่อพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์ข้าวตันและ ดัชนีความขาวมีค่าใกล้เคียงกับข้าวชุดควบคุม

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ สนับสนุนทุนวิจัยและสนับสนุนด้านเครื่องมือในการทำ วิจัยครั้งนี้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nation, "Rice Market Monitor," vol. XX, No. 1, Apr. 2017.
- [2] J. Laohavanich and S. Wongpichet, "Thin layer drying model for gas-fired infrared drying of paddy.Songklanakarin," J. Sci. Technol vol.30 (3), pp. 343-348, May Jun. 2008.
- [3] D. Zare, H. Naderi and M. Ranjbaran, "Energy and quality attributes of combined hot air/infrared drying of paddy," Drying Technology vol. 33, pp 570-582, Feb. 2015.
- [4] G.P. Sharma, R.C. Verma and P. Pathare, " Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices," Journal of Food Engineering vol. 71(3), pp. 282-286, Dec. 2005.
- [5] A.R. Celma, F. López-Rodríguez and F. Cuadros, " Experimental modelling of infrared drying of industrial grape by-products," Food and Bioproducts Processing vol. 87(4), pp. 247-253, Dec. 2009.
- [6] H.U. Hebbar, K.H. Vishwanathan and M.N. Ramesh, " Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables," Journal of Food Engineering vol. 65(4), pp.557-563, Dec. 2004.
- [7] U. Teeboonma and S. Jongjam, " Ginger Drying Using Infrared Vacuum Technique," Burapha Sci. J. 15 (2), 76-86, 2010.
- [8] J. Laohavanich and S. Wongpichet, "Drying characteristics and milling quality aspects of paddy dried gas fired infrared," Journal of Food Process Engineering vol. 32(3), pp. 442-461, Jun. 2009.
- [9] I. Das, S.K. Das and S. Bal, " Drying kinetics of high moisture paddy undergoing vibration assisted infrared (IR) drying," Journal of Food Engineering vol.95 (1), pp. 166-171, Nov. 2009.
- [10] M. Tohidi, M. Sadeghi and M. Torchi-Harchegani, " Energy and quality aspects for fixed deep bed drying of paddy," Renewable and Sustainable Energy Reviews vol.70, pp. 519-528, Apr. 2017.
- [11] T. Tipavimol, P. Sangrung, and P. Sudtana. "Physical and Thermal Properties of Khao Dawk Mali 105 Rice" in *proceeding of the*

- 13<sup>th</sup> TSAE national conference, Chiang-mai, Thailand, 4-5 Apr. 2012, pp. 526-531.
- [12] A.R. Celma, F. Cuadros and F. López-Rodríguez, "Characterisation of industrial tomato by-products from infrared drying process," Food and Bioproducts Processing vol. 87 (4), pp. 282-291, Dec. 2009.



ณัฐพล แซ่ลิ้ม, กระจวี ตรีอำนรรค และ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค. (2560). การวิเคราะห์การออกแบบระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมี. การประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 4, 24 - 25 พฤศจิกายน 2560, โรงแรมวีวิช อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น.



การประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 4  
24 - 25 พฤศจิกายน 2560 ณ โรงแรมวีวิช อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น

## การวิเคราะห์การออกแบบระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมี

### Design Analysis of Continuous Flow Paddy Drying System by Use Infrared Radial Radiation Technique

ณัฐพล แซ่ลิ้ม<sup>1</sup>, กระจวี ตรีอำนรรค<sup>1</sup> และ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 30000  
<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 30000

\*ติดต่อ: nuttaphon.mark@gmail.com

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์การออกแบบระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมี แบบจำลองคณิตศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรดของ Ipsita Das และคณะ (2009) ได้ถูกใช้ในการวิเคราะห์ระบบ ต้นแบบระบบอบแห้งข้าวเปลือกที่ออกแบบเป็นขนาดห้องปฏิบัติการ ใช้ฮีตเตอร์อินฟราเรดไฟฟ้าขนาด 1,200 W เป็นแหล่งให้ความร้อนโดยถูกติดตั้งอยู่ที่กลางห้องอบแห้ง ทรงกระบอกแบบชั้นบางความสูง 1 m ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขพบว่าการอบข้าวเปลือกปริมาณ 10 kg จากความชื้นเริ่มต้น 22%wb ให้เหลือ 14%wb ชั้นบางของข้าวเปลือกจะต้องเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 14.3 cm/min ที่ความหนาของชั้นบาง 15 mm และข้าวเปลือกจะต้องใช้เวลาอบแห้งรวม 9.38 นาที ด้วยอัตราการอบแห้ง 5.79 kg<sub>water</sub>/h และมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 0.74 MJ/kg<sub>water</sub> อย่างไรก็ตาม เนื่องจากอิทธิพลของการพาความร้อนและการควบคุมอุณหภูมิของชั้นบางข้าวเปลือกให้มีค่าไม่เกิน 100°C ต้นแบบเครื่องอบแห้งจริงที่จะสร้างขึ้น จำเป็นต้องมีการทดสอบสมรรถนะที่แท้จริงของเครื่องและคุณภาพของข้าวเปลือกที่ได้จากการอบแห้งอีกครั้ง

**คำหลัก:** การแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมี, ระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่อง, ฮีตเตอร์อินฟราเรด

**Abstract**

This article presents the design analysis of continuous flow paddy dryer by using the infrared radial radiation technique. The mathematic model of high moisture paddy drying under infrared radiation from Ipsita et. al. (2009) was used in analysis and design of the prototype system. The designed system is a laboratory scale and uses the 1,200 W electric infrared heater as the heat source of drying system. A 1 m in height of the thin layer vertical cylindrical drying chamber was installed the heater at the center inside of the chamber. The numerical analysis found that the drying of 10 kg of wet paddy sample with initial moisture content about 22 percent wet basis (w.b.) to 14 percent (w.b.) consumes a 9.38 min in drying time. A 15 mm of thin layer paddy thickness must move with a flowrate of 14.3 cm/min in chamber. The drying rate (DR) and specific energy consumption (SEC) are 5.79 kg<sub>water</sub>/h and 0.74 MJ/kg<sub>water</sub> respectively. However, because the influence of convection flow and the controlled temperature of paddy at 100°C the real performance of fabricated prototype and the rice quality are necessary to evaluate again.

**Keywords:** infrared radial radiation, continuous flow paddy drying system, infrared heater



FEAT  
Faculty of Engineering and Architecture  
Bansomabhorn, Vidyadevi, Jomtien  
การประชุมวิชาการวิศวกรรมพารามและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 4  
24 - 25 พฤศจิกายน 2560 ณ โรงแรมวิรัช ย่านกอบเมือง จังหวัดขอนแก่น

## 1. บทนำ

ข้าวเป็นพืชที่มีความสำคัญต่อประเทศไทยเป็นอย่างมาก เนื่องจากข้าวเป็นธัญพืชที่คนไทยบริโภคเป็นอาหารหลักในชีวิตประจำวันและยังเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศที่สามารถสร้างรายได้จากการส่งออกได้เป็นจำนวนมาก ในประเทศไทยนั้นจะสามารถปลูกข้าวได้ตลอดทั้งปีโดยขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและภูมิประเทศของแต่ละพื้นที่ ดังนั้นจึงต้องมีการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวที่ดีจึงสามารถยืดอายุการเก็บรักษาข้าวได้ โดยทั่วไปเกษตรกรจะเก็บเกี่ยวข้าวเมื่อข้าวมีความชื้นอยู่ในช่วง 18-26 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ซึ่งความชื้นระดับนี้ข้าวจะถูกทำลายได้โดยง่ายจากเชื้อจุลินทรีย์ ระดับความชื้นของข้าวเปลือกที่เหมาะสมสำหรับเก็บรักษาหรือก่อนนำไปสีอยู่ในช่วง 12-14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก วิธีการลดความชื้นที่เกษตรกรนิยมใช้คือการตากแดดซึ่งมักจะประสบกับปัญหาต่างๆ เช่น สภาพดิน ฟ้าอากาศ มีสัตว์มารบกวนและพื้นที่ตากแห้งไม่เพียงพอทำให้ข้าวเปลือกเกิดความสูญเสียทั้งด้านปริมาณและคุณภาพ [2]

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีในกระบวนการลดความชื้นขึ้นมาอย่างหลากหลาย ซึ่งการนำรังสีอินฟราเรดมาเป็นแหล่งผลิตความร้อนให้กับเครื่องอบแห้งกำลังเป็นที่นิยม เนื่องจากรังสีอินฟราเรดสามารถแผ่ทะลุเข้าไปในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุสั่นและเกิดความร้อน ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิในเนื้อวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว ส่งผลให้ผิวภายนอกของวัสดุอบแห้งไม่เหี่ยวเหิน และยังคงสมบัติของผลิตภัณฑ์ไว้ใกล้เคียงกับวัตถุดิบที่นำมาอบแห้ง นอกจากนี้รังสีอินฟราเรดยังให้ความร้อนได้อย่างรวดเร็ว และกระจายความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอติดตั้งง่าย ประหยัดพลังงานและลดระยะเวลาในการอบแห้ง[3] แต่อย่างไรก็ตามการบ้อนความร้อนแฝงในการระเหยที่ต้องใช้ในการอบในรูปพลังงานการแผ่รังสีทั้งหมดจะทำให้ต้นทุนสูง ดังนั้น จึงมักใช้ร่วมกับการอบด้วยลมร้อนหรืออบด้วยการนำความร้อน

โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงระเหยน้ำจากผิวหน้าซึ่งวัตถุดิบยังมีอัตราความชื้นสูงอยู่จะใช้วิธีอบด้วยลมร้อน เมื่ออัตราความชื้นลดต่ำลงและพื้นผิวระเหยเคลื่อนที่ลึกเข้าไปในเนื้อวัตถุดิบแล้วจึงนำการอบด้วยการแผ่รังสีเหล่านี้มาใช้ร่วมด้วย จะทำให้ภายในวัตถุดิบมีอัตราความชื้นสม่ำเสมอและเพิ่มอัตราเร็วในการอบให้สูงขึ้น [4]

จากข้อจำกัดของการลดความชื้นข้าวเปลือกโดยวิธีการตากแดดและข้อดีของการนำรังสีอินฟราเรดมาใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนในการอบแห้งนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำรังสีอินฟราเรดมาพัฒนาเพื่อใช้ในระบบลดความชื้นข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของข้าวเปลือก

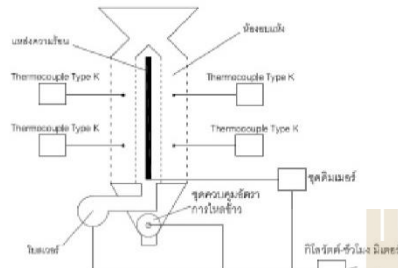
## 2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา

### 2.1 อุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 1 แสดงรายละเอียดเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่ทำการออกแบบ ซึ่งประกอบไปด้วยห้องอบแห้งทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 26.5 เซนติเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 29.5 เซนติเมตร สูง 1 เมตร ใช้ฮีทเตอร์อินฟราเรดขนาด 1200 วัตต์เป็นแหล่งให้ความร้อนโดยติดตั้งบริเวณตรงกลางของห้องอบแห้งโดยใช้ชุดคีมเมอร์ควบคุมไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 2000 วัตต์ในการควบคุมอุณหภูมิของข้าวเปลือกขณะอบแห้งและใช้ Thermocouple Type K จำนวน 4 ตัววัดอุณหภูมิของข้าวเปลือก ใช้โวลเวอร์กระแสตรง 24 โวลต์สำหรับการไล่ความชื้นออกจากระบบโดยความชื้นจะถูกขับบริเวณผนังห้องอบแห้งที่มีรูพรุน ใช้ตัวปล่อยข้าวลงสู่ตุลกลูกยางกระเพาะเปลือกในการควบคุมความเร็วการเคลื่อนที่ของชั้นข้าวเปลือกขณะอบแห้ง ทำการหาค่าความชื้นได้โดยการนำตัวอย่างทดสอบมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลและคำนวณหาความชื้น วัดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยใช้กิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์



การประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 4  
24 - 25 พฤศจิกายน 2560 ณ โรงแรมวิรัช สยามเมือง จังหวัดขอนแก่น



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่ทำกรอกแบบ

## 2.2 การวิเคราะห์การออกแบบระบบ

ในงานวิจัยนี้ได้นำแบบจำลองคณิตศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรดของ Ipsita Das และคณะมาใช้ในการออกแบบระบบ โดยได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ (1) มาใช้ในการวิเคราะห์หาระยะเวลาที่ใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือก 10 กิโลกรัม โดยลดความชื้นจาก 22 %wb ให้เหลือ 14%wb

$$MR = \frac{M - M_a}{M_0 - M_a} = \exp[-k_3 t^{n_1}] \quad (1)$$

$$k_3 = 0.0916 + 0.002R_1 - 0.0014G_B + 0.0001R_1^2 - 0.0035G_B^2 \quad (R^2 = 0.965) \quad (2)$$

$$n_1 = 0.9504 - 0.0009R_1 - 0.0365G_B + 0.0001R_1^2 - 0.0009G_B^2 \quad (R^2 = 0.989) \quad (3)$$

โดยที่  $k_3$  คือ drying constant in Page Model

$n_1$  คือ drying exponent

$R_1$  คือ radiation intensity ( $kW/m^2$ )

$G_B$  คือ grain bed depth (m)

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้คำนวณหาความหนาแน่นของของข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 จากสมการที่(4) [1] เพื่อที่จะนำไปคำนวณหาอัตราการใช้ของ

ชั้นข้าวเปลือกขณะอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับระบบการลดความชื้นข้าวเปลือกนี้

$$\rho_b = 0.559M + 553.52, \quad R^2 = 0.9578 \quad (4)$$

โดยที่  $M$  คือ ความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ (%wb)

## 2.3 การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้ง

ในการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งที่ทำกรอกแบบนั้นสามารถประเมินได้จากค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

1. อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) ( $kg_{water}/h$ )

อัตราการอบแห้งสามารถพิจารณาได้จากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาในการอบแห้งซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (5)

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t} \quad (5)$$

โดยที่  $W_i$  คือ น้ำหนักวัสดุก่อนอบแห้ง (kg)

$W_f$  คือ น้ำหนักวัสดุหลังอบแห้ง (kg)

$t$  คือ เวลาที่ใช้อบแห้ง (ชั่วโมง)

2. ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption, SEC) ( $MJ/kg_{water}$ )

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเป็นค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยน้ำออกจากวัสดุ ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (6)

$$SEC = \frac{E}{W_i - W_f} \quad (6)$$

โดยที่  $E$  คือ พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง (MJ)

3. พฤติกรรมการอบแห้ง

การวิเคราะห์พฤติกรรมการอบแห้งจะใช้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (moisture ratio, MR) กับเวลาที่ใช้ออบแห้ง โดยที่อัตราส่วนความชื้น ณ เวลาใดๆสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (7)



การประจําภาควิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 4  
24 - 25 พฤศจิกายน 2560 ณ โรงแรมวิรัช อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} \quad (7)$$

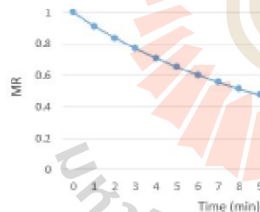
โดยที่  $MR$  คือ อัตราส่วนความชื้น  
 $M_t$  คือ ความชื้นของวัสดุที่เวลาใดๆ  
(เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)  
 $M_{eq}$  คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ  
(เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

### 3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Ipsita Das และคณะ โดยวิเคราะห์การอบแห้งข้าวเปลือกปริมาณ 10 kg ด้วยฮีตเตอร์อินฟราเรดขนาด 1,200 W จากความชื้นเริ่มต้น 22%wb ให้เหลือ 14%wb ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

#### 3.1 พฤติกรรมการอบแห้ง

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Ipsita Das และคณะ สามารถนำไปทำนายพฤติกรรมการอบแห้งของระบบที่ทำการวิเคราะห์ที่ได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ออบแห้ง

จากรูปที่ 2 นั้นสามารถอธิบายได้ว่าการลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 22%wb ให้เหลือ 14%wb นั้นอัตราส่วนความชื้นจะเท่ากับ 0.57 และที่อัตราส่วนความชื้นนี้ข้าวเปลือกจะต้องเคลื่อนที่จากด้านบนถึง

ด้านล่างของห้องอบแห้งด้วยระยะเวลาประมาณ 7 นาที และจากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปวิเคราะห์ความเร็วการเคลื่อนที่ของชั้นข้าวเปลือกในห้องอบแห้งและระยะเวลาในการอบแห้งทั้งหมด ซึ่งจากการวิเคราะห์จะพบว่าชั้นข้าวเปลือกจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 14.3 cm/min และใช้ระยะเวลาในการอบแห้งข้าวเปลือก 10 กิโลกรัม ทั้งหมด 9.38 นาที

#### 3.2 อัตราการอบแห้ง

จากการวิเคราะห์ระบบอบแห้งข้าวเปลือกนี้พบว่าเมื่อลดความชื้นข้าวเปลือกลงเหลือ 14%wb นั้นข้าวเปลือกจะมีน้ำเหลือเท่ากับ 9.07 กิโลกรัม ซึ่งจากระยะเวลาการอบแห้งทั้งหมดสามารถระเหยน้ำออกจากข้าวเปลือกได้ 0.93 กิโลกรัม ดังนั้นอัตราการอบแห้งของระบบนี้เท่ากับ 5.79 kg<sub>water</sub>/h

#### 3.3 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

จากการวิเคราะห์ระบบอบแห้งข้าวเปลือกนี้พบว่าในการลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 22%wb ลงเหลือ 14%wb นั้นจะใช้พลังงานทั้งหมด 0.69 MJ ดังนั้นค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบนี้เท่ากับ 0.74 MJ/kg<sub>water</sub>

#### 3.4 ต้นทุนพลังงานของการอบแห้ง

พิจารณาให้ดำเนินการวันละ 8 ชั่วโมง ซึ่งจะอบแห้งได้ประมาณ 50 รอบ ใน 1 เดือนดำเนินการทั้งหมด 24 วัน

ในการอบแห้งข้าว 1 รอบ หรือ 10 กิโลกรัม ใช้พลังงาน 0.193 kWh ดังนั้นใน 1 วันจะใช้พลังงานเท่ากับ 9.65 kWh และใน 1 เดือน จะใช้พลังงานเท่ากับ 231.6 kWh ซึ่งคิดเป็นค่าใช้จ่ายต่อเดือนเท่ากับ 893.22 บาท (คำนวณจากการประเมินค่าไฟฟ้าประเภทที่ 1 บ้านอยู่อาศัยอัตรา 1.1 (อัตราปกติแบบก้าวหน้า) ของการไฟฟ้านครหลวง) สามารถอบแห้งข้าวได้ทั้งหมด 12,000 กิโลกรัม





การประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 4  
24 - 25 พฤศจิกายน 2560 ณ โรงแรมวีวีช อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น

ดังนั้นราคาต้นทุนพลังงานของการอบแห้งเท่ากับ  
0.075 บาท/กิโลกรัม

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (2) และ (3) จะพบว่า  
เมื่อเปลี่ยนค่า Radiation intensity ( $R_1$ ) และ Grain  
bed depth ( $G_B$ ) จะส่งผลต่อค่า drying constant in  
Page Model ( $k_3$ ) และค่า drying exponent ( $n_1$ ) ซึ่ง  
อาจจะทำให้การทำนายพฤติกรรมการอบแห้งของ  
ระบบอาจจะผิดพลาดได้ ทั้งนี้เนื่องจากในการอบแห้ง  
แต่ละสภาวะจะมีสัมประสิทธิ์ของการอบแห้งที่แตกต่าง  
กันไป ดังนั้นการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการอบแห้งนั้น  
ควรจะต้องทำการทดสอบจริงที่สภาวะที่ต้องการ  
เพื่อที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์ของการอบแห้งไปใช้ในการ  
ทำนายพฤติกรรมการอบแห้ง

#### 4.สรุป

จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขจากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์ของ Ipsita Das และคณะ พบว่าการอบ  
ข้าวเปลือกปริมาณ 10 kg จากความชื้นเริ่มต้น  
22%wb ให้เหลือ 14%wb ชั้นบางของข้าวเปลือก  
จะต้องเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 14.3 cm/min ที่ความ  
หนาของชั้นบาง 15 mm และข้าวเปลือกจะต้องใช้เวลา  
อบแห้งรวม 9.38 นาที ด้วยอัตราการอบแห้ง 5.79  
kg<sub>water</sub>/h ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 0.74  
MJ/kg<sub>water</sub> และต้นทุนพลังงานของการอบแห้งเท่ากับ  
0.075 บาท/กิโลกรัม

#### 5.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกลุ่มวิจัย Biosystem Engineering and  
Technology Research Laboratory และมหาวิทยาลัย  
เทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัย

#### 6.เอกสารอ้างอิง

[1] เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และคณะ (2555). สมบัติทาง  
กายภาพและความร้อนของข้าวขาวดอกมะลิ 105,

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13, จังหวัดเชียงใหม่.

- [2] พิริสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ (2557). การทบทวน  
พัฒนาการของการลดความชื้นข้าวเปลือกในทาง  
อุตสาหกรรม, SWU Engineering Journal,  
(2014) 9(1), 68-74.
- [3] อำไพศักดิ์ ที่บุญมา และ ศักชัย จงจำ (2553). การ  
อบแห้งขิงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับ  
อินฟราเรด, วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, (2553)  
15(2), 76-86.
- [4] iEnergyGuru (ม.ป.ป). การอบแห้ง (Drying),  
URL: <https://ienergyguru.com/2015/09/drying/>,  
access on 10/10/2017.
- [5] Ipsita Das, S.K. Das, Satish Bal. (2009). Drying  
kinetics of high moisture paddy undergoing  
vibration-assisted infrared (IR) drying, Journal  
of Food Engineering, 2009 (95), 166–171.

## ประวัติผู้เขียน

นายณัฐพล แซ่ลี้ม เกิดเมื่อวันที่ 7 เมษายน พ.ศ. 2537 ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่บุญวัฒนา จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล (เกียรตินิยม อันดับ 2) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2558

ปี พ.ศ. 2558 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัย :

ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการ วิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 4, 24-25 พฤศจิกายน พ.ศ. 2560, โรงแรมวิวิซช อำเภอมือง จังหวัดขอนแก่น. การวิเคราะห์การออกแบบระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมี.

ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการ the IRED 8th INTERNATIONAL CONFERENCE. Conference Place & Date: Kuala Lumpur, Malaysia 04-02-2018. Development of Infrared Radial Radiation Dryer for Paddy.

ได้เสนอบทความตีพิมพ์เผยแพร่ วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร. ปีที่ 12 ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม-ธันวาคม 2561. การพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมี.