

การอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรด



นายวิชาญณรงค์ วงศ์บับพา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2568

CONTINUOUS PADDY DRYING PROCESS  
USING AN INFRARED DRYING SYSTEM

WICHANNARONG WONGBUBPA



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 2025

ឯកសារយោង

នាយកដ្ឋានបច្ចេកទេស  
(២០២២ ឆ្នាំ ២០២២ ទិន្នន័យ ២០២២)

គណៈកម្មាធិការជាតិរៀបចំការបោះឆ្នោត  
(ក្រសួងមហាផ្ទៃ ឆ្នាំ ២០២២ ទិន្នន័យ ២០២២)

*[Handwritten signature]*

*[Handwritten signature]*

នាយកដ្ឋាន  
(គណៈកម្មាធិការជាតិរៀបចំការបោះឆ្នោត ឆ្នាំ ២០២២ ទិន្នន័យ ២០២២)

*[Handwritten signature]*

នាយកដ្ឋាន  
(គណៈកម្មាធិការជាតិរៀបចំការបោះឆ្នោត ឆ្នាំ ២០២២ ទិន្នន័យ ២០២២)

*[Handwritten signature]*

(នាយកដ្ឋានបច្ចេកទេស) នាយកដ្ឋាន  
(គណៈកម្មាធិការជាតិរៀបចំការបោះឆ្នោត ឆ្នាំ ២០២២ ទិន្នន័យ ២០២២)

*[Handwritten signature]*

នាយកដ្ឋានបច្ចេកទេស  
(គណៈកម្មាធិការជាតិរៀបចំការបោះឆ្នោត ឆ្នាំ ២០២២ ទិន្នន័យ ២០២២)

*[Handwritten signature]*

នាយកដ្ឋានបច្ចេកទេស

គណៈកម្មាធិការជាតិរៀបចំការបោះឆ្នោត

គណៈកម្មាធិការជាតិរៀបចំការបោះឆ្នោត ឆ្នាំ ២០២២ ទិន្នន័យ ២០២២

គណៈកម្មាធិការជាតិរៀបចំការបោះឆ្នោត ឆ្នាំ ២០២២ ទិន្នន័យ ២០២២

วิทยุณรรค์ วงศ์บับพา : การอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรด (CONTINUOUS PADDY DRYING PROCESS USING AN INFRARED DRYING SYSTEM) อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค์, 175 หน้า.

คำสำคัญ เครื่องอบแห้ง ตัวขบวนการไหล รังสีอินฟราเรด

งานวิจัยนี้แบ่งการทดสอบออกเป็นสามส่วน โดยส่วนแรกศึกษาผลของตัวขบวนการไหลภายในหอบแห้งต่อเวลาในการทำให้เมล็ดร้อนถึง 42–43 °C การใช้พลังงานไฟฟ้า และพฤติกรรม การอบแห้ง โดยใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 น้ำหนัก 1.5 kg ความชื้นเริ่มต้น 24 % w.b. ใช้ฮีตเตอร์อินฟราเรดขนาด 700 W ภายใต้อุณหภูมิ 60 และ 80 °C อัตราการไหล 1.5 kg/min เปรียบเทียบหอบแห้งเปล่ากับครีบลับพื้นปลาและตะแกรงเหล็กฉีก ผลพบว่าหอบแห้งเปล่าที่ 80 °C ใช้เวลาน้อยที่สุด 3.3 นาที และที่ 60 °C ทั้งหอบเปล่าและครีบลับพื้นปลาใช้พลังงานต่ำสุด 0.10 kWh โดยหอบเปล่าใช้เวลาอบแห้งสั้นที่สุด 95 นาที เร็วกว่าครีบลับพื้นปลา 47.37 % ส่วนที่สอง เลือกหอบแห้งเปล่าและครีบลับพื้นปลาที่ 60 °C ติดตั้งพัดลมความดันสูงเพื่อหมุนวนเมล็ด เทียบกับการตากแดด โดยใช้ข้าวเปลือก 2 kg ความชื้นเริ่มต้นและสุดท้าย 24 และ 14 % w.b. ที่อัตราการไหล 2 kg/min พบว่าหอบแห้งเปล่าใช้เวลาอบสั้นสุด (125 min) อัตราการอบสูงสุด (0.10 kg/h) ใช้พลังงานต่ำสุด (15.38 MJ/kg<sub>water</sub>) และได้เปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้นมากที่สุด (30.07 %) ส่วนที่สาม เลือกหอบแห้งเปล่า 60 °C และมีการปรับปรุงฮีตเตอร์อินฟราเรดให้มี อุณหภูมิสม่ำเสมอเพื่อให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยปรับอัตราการไหลเป็น 2, 3 และ 4 kg/min ใช้ข้าว 15 kg ความชื้นเริ่มต้นและสุดท้าย 24 และ 14 % w.b. เทียบกับการตากแดด พบว่าทุกอัตราใช้เวลา อบ 180 นาที แต่ 4 kg/min ให้อัตราการอบสูงสุด (0.63 kg/h) ขณะที่ 2 kg/min ใช้พลังงานต่ำสุด (2.58 MJ/kg<sub>water</sub>) ซึ่งเป็นผลจากการปรับปรุงอินฟราเรดและได้เปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้นมากที่สุด (32.82 %) สรุปว่าหอบแห้งเปล่าที่ 60 °C ช่วยลดเวลา ประหยัดพลังงาน และรักษาคุณภาพเมล็ดได้ ดีที่สุด

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา 2568

ลายมือชื่อนักศึกษา... **วิทยุณรรค์ วงศ์บับพา** .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา... **NEO ศรีอัมพร** .....

WICHANNARONG WONGBUBPA: CONTINUOUS PADDY DRYING  
PROCESS USING AN INFRARED DRYING SYSTEM. THESIS ADVISOR:  
ASST. PROF. KRAWEE TREEAMNUK, D.Eng., 175 PP.

Keywords: Drying System Flow Obstructor Infrared Radiation

This research was divided into three parts. The first part examined the effect of internal flow obstructions in a drying column on heating time, energy consumption, and drying behavior. Jasmine rice (KDML 105) of 1.5 kg with an initial moisture of 24 % w.b. was dried using a 700 W infrared heater at 60 °C and 80 °C with an airflow rate of 1.5 kg/min. Three configurations—Hollow drying chamber, Truncated cone fins, and Expanded metal—were compared. The Hollow chamber at 80 °C provided the shortest heating time (3.3 min), while at 60 °C both Hollow and Truncated cone fins required the lowest energy (0.10 kWh). The Hollow chamber also yielded the shortest total drying time (95 min), 47.37% faster than the Truncated cone fins. In the second part, the Hollow and Truncated cone fins at 60 °C were tested with a high-pressure blower and compared with sun drying of 2 kg of paddy (24–14 % w.b.) at 2 kg/min. The Hollow chamber achieved the shortest drying time (125 min), highest drying rate (0.10 kg/h), lowest energy consumption (15.38 MJ/kg<sub>water</sub>), and greatest brown-rice yield (30.07%). The third part evaluated airflow rates of 2, 3, and 4 kg/min using 15 kg of paddy. All required 180 min, but 4 kg/min gave the highest drying rate (0.63 kg/h), whereas 2 kg/min consumed the least energy (2.58 MJ/kg<sub>water</sub>) and produced the highest head-rice yield (32.82%). Overall, the Hollow drying chamber at 60 °C provided optimal drying performance with lower energy use and superior grain quality.

School of Mechanical Engineering

Student's Signature Nichannarong Wongbubpa.

Academic year 2025

Advisor's Signature Krawee Treeamnuk

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ตามวัตถุประสงค์ ด้วยความเมตตาและการสนับสนุนจากบุคคลและหน่วยงานหลายฝ่าย ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำรรค อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้มีพระคุณอันยิ่งใหญ่ในการให้ทุนการศึกษาระดับมหาบัณฑิต และมอบการสนับสนุนค่าใช้จ่ายตลอดการดำเนินงานวิจัย พร้อมทั้งกรุณาให้คำแนะนำและชี้แนะแนวทางการทำงานอย่างใกล้ชิด จนผู้วิจัยสามารถพัฒนางานให้บรรลุตามเป้าหมายได้อย่างสมบูรณ์

ผู้วิจัยขอแสดงความขอบพระคุณต่อ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำรรค ที่ได้ให้คำปรึกษาในเชิงวิชาการ คอยชี้แนะทางที่ถูกต้องในการทำงานวิจัย และเมตตารับหน้าที่เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ยังใคร่ขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การุณ พิงสุวรรณรักษ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา ปราบกุ่มมาก ที่ได้กรุณามอบข้อเสนอนแนะอันทรงคุณค่าในการปรับปรุงเล่มวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น พร้อมทั้งปฏิบัติหน้าที่กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ด้วยความเอื้อเฟื้อ

ในส่วนของการสนับสนุนด้านทรัพยากร ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ที่จำเป็นสำหรับงานวิจัย รวมทั้ง สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) และ ฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสิ่งอำนวยความสะดวกซึ่งมีส่วนสำคัญต่อความสำเร็จของงานวิจัยในครั้งนี้

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดระยะเวลาการศึกษา และขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาที่เป็นแรงสนับสนุนและกำลังใจที่มั่นคง อีกทั้งขอขอบคุณรุ่นพี่ รุ่นน้อง และเพื่อน ๆ ในสาขาวิศวกรรมเกษตรและวิศวกรรมเครื่องกล ที่คอยมอบความช่วยเหลือ คำปรึกษา และแรงใจในการทำงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

วิชาญณรงค์ วงศ์บัวพา

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.1 ความหมายของข้าว.....	4
2.1.2 โครงสร้างและส่วนประกอบภายในเมล็ดข้าว.....	4
2.1.3 บทบาทและความจำเป็นของการอบแห้ง.....	6
2.1.4 กระบวนการกำจัดความชื้นออกจากเมล็ดพืช.....	6
2.1.5 วิธีการอบแห้งที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน.....	7
2.1.6 หลักการอบแห้งเมล็ดพืช.....	8
2.1.7 เครื่องอบแห้งเมล็ดพืช.....	8

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.8	ความชื้นในวัสดุ.....18
2.1.9	ความชื้นสัมพัทธ์.....19
2.1.10	วิธีการหาความชื้นในเมล็ดพืช.....20
2.1.11	การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง.....21
2.1.12	การตรวจสอบคุณภาพของการขัดสี.....23
2.1.13	ดัชนีความขาวของข้าว (Whiteness Index, WI) .....24
2.1.14	การถ่ายเทความร้อน.....25
2.1.15	รังสีอินฟราเรด (Infrared : IR) .....29
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....30
<b>3</b>	<b>วิธีการดำเนินการวิจัย.....34</b>
3.1	วัสดุอบแห้งสำหรับการทดลอง.....34
3.1.1	ข้าวเปลือก.....34
3.1.2	การเตรียมข้าวเปลือก.....35
3.2	เครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดลอง.....37
3.2.1	ส่วนประกอบของเครื่อง.....38
3.2.2	หลักการทำงานของเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นเพื่อใช้อบแห้งข้าวเปลือก.....43
3.3	เครื่องมือและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับการวัดค่าในการทดลอง.....49
3.3.1	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 AT.....49
3.3.2	โมดูลเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ Thermocouple type k, Max6675 Module .....49
3.3.3	มิเตอร์ไฟฟ้า.....50
3.3.4	เครื่องกะเทาะข้าวเปลือก.....51
3.3.5	เครื่องแยกเมล็ดข้าวหัก.....51
3.3.6	เครื่องชั่งน้ำหนัก.....52

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.7	ห้องเย็นใหญ่.....	52
3.3.8	เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน.....	53
3.4	การตากแห้งข้าวเพื่อใช้เป็นชุดควบคุมคุณภาพ.....	53
3.5	การทดสอบเครื่องอบแห้งต้นแบบ.....	54
3.5.1	การทดสอบในส่วนที่หนึ่ง.....	55
3.5.2	การทดสอบในส่วนที่สอง.....	56
3.5.3	การทดสอบในส่วนที่สาม.....	56
3.6	การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง.....	57
3.6.1	พฤติกรรมการอบแห้ง (Drying behavior) .....	57
3.6.2	อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) .....	57
3.6.3	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) .....	58
3.6.4	การทดสอบคุณภาพข้าว (Quality of rice) .....	58
3.7	สถานที่ทำการทดลอง.....	61
3.8	ระยะเวลาทำการทดลอง.....	61
4	<b>ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....</b>	<b>62</b>
4.1	ผลการทดสอบการพัฒนาปรับปรุงเครื่องต้นแบบที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง.....	63
4.1.1	ผลการทดสอบในส่วนที่หนึ่ง.....	63
4.1.2	ผลการทดสอบในส่วนที่สอง.....	67
4.2	ผลการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกส่วนที่สาม เพื่อประเมินสมรรถนะการทำงาน.....	70
4.2.1	ประเมินสมรรถนะด้านพฤติกรรมการอบแห้ง.....	70
4.2.2	ประเมินสมรรถนะด้านอัตราการอบแห้ง.....	72
4.2.3	ประเมินสมรรถนะด้านค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ.....	80

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.4	ประเมินสมรรถนะด้านเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้น.....	81
4.2.5	ประเมินสมรรถนะด้านดัชนีความขาว (Whiteness index, WI).....	86
<b>5</b>	<b>สรุปและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>88</b>
5.1	สรุปผลงานวิจัย.....	88
5.1.1	การทดสอบในส่วนที่หนึ่ง.....	88
5.1.2	การทดสอบในส่วนที่สอง.....	89
5.1.3	การทดสอบในส่วนที่สาม.....	89
5.1.4	การทดสอบในส่วนที่หนึ่งถึงสาม.....	91
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	92
	รายการอ้างอิง.....	94
	ภาคผนวก.....	100
	ภาคผนวก ก ตารางผลการทดลอง.....	101
	ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ.....	154
	ภาคผนวก ค การออกแบบเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น.....	158
	ภาคผนวก ง แบบวิศวกรรมเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น.....	169
	ภาคผนวก จ การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์.....	173
	ประวัติผู้เขียน.....	175

## สารบัญตาราง

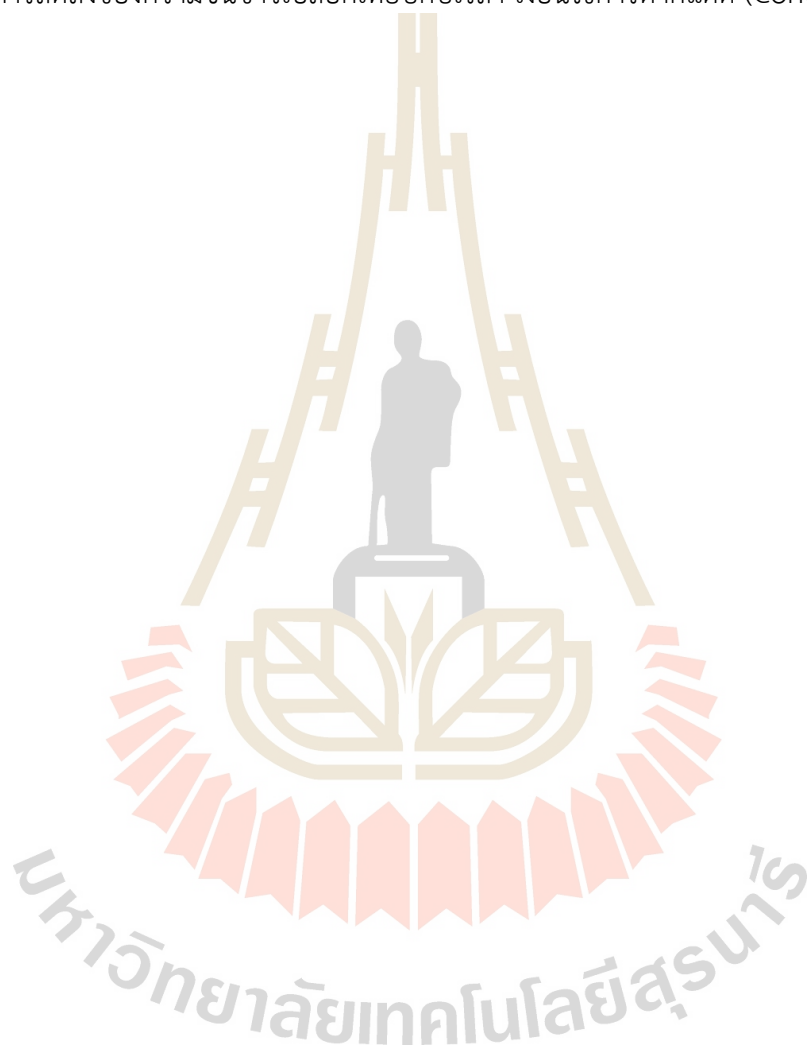
ตารางที่	หน้า
4.1 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR).....	73
4.2 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC).....	81
4.3 การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้น(Brown rice yield, BRY (%)).....	86
4.4 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าดัชนีความขาว (Whiteness index, WI).....	87
ก.1 เวลาที่ใช้ทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิ 42-43 องศาเซลเซียส.....	101
ก.2 ค่าพลังงานที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิข้าวเปลือกให้มีอุณหภูมิ 42-43 องศาเซลเซียส.....	102
ก.3 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขแบบหอบแห้งเปล่า.....	104
ก.4 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขแบบครีบล้างพื้นปลา.....	105
ก.5 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขแบบครีบล้างพื้นปลา.....	106
ก.6 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขแบบหอบแห้งเปล่า.....	109
ก.7 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขการตากแดด (Control).....	112
ก.8 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขอัตราการไหล 2 kg/min.....	115
ก.9 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขอัตราการไหล 3 kg/min.....	118
ก.10 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขอัตราการไหล 4 kg/min.....	121
ก.11 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของข้าวเปลือกและอากาศในหอบแห้ง ที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที.....	123
ก.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและเวลาของสิ่งแวดล้อมในห้อง ที่ทำการทดสอบและปล่อยระบายความชื้นที่เครื่องอบแห้ง ที่อัตราการไหลของ เมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที.....	132
ก.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก (เส้นสีเขียว, แกน Y1) และค่า ความชื้นสัมพัทธ์ในปล่อยระบายความชื้น (เส้นสีแดง, แกน Y2) กับเวลา (แกน X) ภายใต้อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2, 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที.....	142
ก.14 การประเมินสมรรถนะด้านเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้น (Brown rice yield, BRY (%)).....	151

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

ก.15 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขการตากแดด (Control)..... 152



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว.....	5
2.2 เครื่องอบแห้งแบบถังเก็บ.....	10
2.3 เครื่องอบแห้งแบบเป็นชั้น.....	11
2.4 เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบเป็นวง.....	12
2.5 รูปแบบการเคลื่อนที่ของเมล็ดพืชและการไหลเวียนของอากาศในกระบวนการอบแห้ง...	14
2.6 เครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง.....	15
2.7 เครื่องอบแห้งแบบไหลตาม.....	16
2.8 ผังแสดงโครงสร้างภายในเครื่องอบแห้งที่มีการไหลแบบผสม.....	18
2.9 การถ่ายเทพลังงานความร้อน.....	26
2.10 การถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวที่ร้อนสู่อากาศโดยการพาความร้อน.....	28
2.11 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของรังสีอินฟราเรด.....	29
3.1 ตัวอย่างเมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ใช้ในการทดลอง.....	34
3.2 เครื่องคัดแยกสิ่งเจือปนและเมล็ดข้าวลิบออกจากข้าวเปลือกตัวอย่าง.....	35
3.3 ขั้นตอนการหาความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการอบลมร้อน.....	37
3.4 การเติมน้ำเพื่อเพิ่มความชื้นข้าวเปลือก.....	37
3.5 หอบแห้งที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.6 (A) ฮีตเตอร์อินฟราเรด (B) ตรีเมอร์ควบคุมฮีตเตอร์อินฟราเรด.....	39
3.7 ตัววางการไหล (A) แบบครีบลับฟันปลา (B) แบบตะแกรงเหล็กฉีก.....	39
3.8 มอเตอร์สั่น (Vibrator motor).....	40
3.9 (A) พัดลม (Blower) ยี่ห้อ Ventex รุ่น 2RB 710 H16 ขนาด 2.2 กิโลวัตต์.....	40
3.10 (A) มอเตอร์ขนาด 12 VDC ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที.....	41
3.11 (A) มอเตอร์ขนาด 12 VDC ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที.....	42
3.12 สปริงป้อนข้าวเปลือก.....	42
3.13 PID Temperature Controller รุ่น Rex-c100.....	42

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 มอเตอร์สั่น (Vibrator motor) 12 VDC ความเร็ว 3800 รอบ/นาที และตัวควบคุม.....	43
3.15 (A) แผนภาพเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองในส่วนที่หนึ่ง.....	44
3.16 (C) แผนภาพเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองในส่วนที่สอง.....	46
3.17 (E) แผนภาพเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองในส่วนที่สาม.....	48
3.18 บอร์ด Arduino Mega 2560 AT.....	49
3.19 Thermocouple type k และ Max6675 Module.....	49
3.20 แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อวัดค่าอุณหภูมิ.....	50
3.21 มิเตอร์ไฟฟ้า 1 Phase ยี่ห้อ Mitsubishi Electric รุ่น MF-37E.....	50
3.22 เครื่องกะเทาะข้าวเปลือกระบบลูกยาง.....	51
3.23 เครื่องแยกเมล็ดข้าวหัก.....	51
3.24 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล.....	52
3.25 ห้องเย็นใหญ่.....	52
3.26 เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน.....	53
3.27 การตากแห้งข้าวเพื่อใช้เป็นชุดควบคุมคุณภาพ.....	54
3.28 ชั่งน้ำหนักข้าวเปลือกตัวอย่าง.....	58
3.29 การกะเทาะเปลือกด้วยเครื่องสีข้าวระบบลูกยาง.....	59
3.30 เครื่องคัดแยกเมล็ดข้าวหัก.....	59
3.31 การชั่งน้ำหนักข้าวเต็มเมล็ด.....	60
3.32 เครื่องขัดข้าวเมล็ดข้าว.....	60
3.33 เครื่องวัดสี ยี่ห้อ HunterLab รุ่น UltraScan VIS.....	61
4.1 แผนการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่อเนื่องด้วยรังสีอินฟราเรดทั้ง 3 ส่วน.....	62
4.2 อุณหภูมิข้าวเปลือกก่อนการอบ (A) อุณหภูมิข้าวเปลือกหลังการอบ (B).....	63
4.3 เวลาที่ใช้ทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิ 42-43 องศาเซลเซียส.....	64
4.4 ค่าพลังงานที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิข้าวเปลือกให้มีอุณหภูมิ 42-43 องศาเซลเซียส.....	65

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเมื่อเทียบกับเวลา.....	66
4.6 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกที่ทดสอบอบแห้งด้วยเงื่อนไขที่ต่างกัน.....	67
4.7 ผลของอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง.....	68
4.8 ผลของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC).....	69
4.9 ผลของเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้นในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง.....	70
4.10 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกที่ทดสอบอบแห้งด้วยเงื่อนไขที่ต่างกัน.....	71
4.11 ผลของอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง.....	72
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของข้าวเปลือกและอากาศในหอบแห้งที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 กิโลกรัมต่อนาที.....	73
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของข้าวเปลือกและอากาศในหอบแห้งที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 3 กิโลกรัมต่อนาที.....	74
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของข้าวเปลือกและอากาศในหอบแห้งที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 4 กิโลกรัมต่อนาที.....	74
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของข้าวเปลือก ที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที.....	75
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและเวลาของสิ่งแวดล้อม และปล่อยระบายความชื้นที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 กิโลกรัมต่อนาที.....	76
4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและเวลาของสิ่งแวดล้อม และปล่อยระบายความชื้นที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 3 กิโลกรัมต่อนาที.....	77
4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและเวลาของสิ่งแวดล้อม และปล่อยระบายความชื้นที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 4 กิโลกรัมต่อนาที.....	77
4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก (เส้นสีเขียว, แกน Y1) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ในปล่อยระบายความชื้น (เส้นสีแดง, แกน Y2) กับเวลา (แกน X) ภายใต้อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 กิโลกรัมต่อนาที.....	78

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก (เส้นสีเขียว, แกน Y1) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ในปล่องระบายความชื้น (เส้นสีแดง, แกน Y2) กับเวลา (แกน X) ภายใต้อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 3 กิโลกรัมต่อนาที.....	79
4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก (เส้นสีเขียว, แกน Y1) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ในปล่องระบายความชื้น (เส้นสีแดง, แกน Y2) กับเวลา (แกน X) ภายใต้อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 4 กิโลกรัมต่อนาที.....	79
4.22 ผลของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC).....	80
4.23 ผลของเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้นในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง.....	82
4.24 โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่มีความชื้น 11 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก.....	83
4.25 โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่ลดความชื้นด้วยการตากแดด (Control).....	84
4.26 โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยหอบแห้งเป่าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 กิโลกรัมต่อนาที.....	84
4.27 โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยหอบแห้งเป่าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 3 กิโลกรัมต่อนาที.....	85
4.28 โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยหอบแห้งเป่าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 4 กิโลกรัมต่อนาที.....	85
4.29 ค่าดัชนีความขาวของข้าวหลังการอบแห้งด้วยเงื่อนไขการอบแห้งที่แตกต่างกัน.....	86
ค.1 ถังพักข้าวทรงลูกบาศก์.....	159
ค.2 ถังพักข้าวทรงพีระมิดสี่เหลี่ยมยอดตัด.....	159
ค.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 24 % w.b. ให้เหลือ 14 % w.b.....	161
ง.1 ส่วนประกอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรด...	169
ง.2 แบบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรด.....	170
ง.3 ขนาดเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรด.....	170

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$M_w$	=	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
$W$	=	มวลของวัสดุขึ้น, (kg)
$W_d$	=	มวลของวัสดุแห้ง, (kg)
$M_d$	=	ความชื้นมาตรฐานแห้ง (% d.b.)
$W$	=	มวลของวัสดุขึ้น, (kg)
$W_d$	=	มวลของวัสดุแห้ง, (kg)
$RH$	=	ความชื้นสัมพัทธ์, ( $kg_v/ka_g$ )
$m_v$	=	มวลไอน้ำในอากาศที่อุณหภูมิอากาศ, T, $kg_v$
$m_g$	=	มวลไอน้ำในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิอากาศ T เดียวกัน, $kg_g$
$M_w$	=	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
$W_i$	=	น้ำหนักเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือก (g)
$W_f$	=	น้ำหนักสุดท้ายของเมล็ดข้าวเปลือกหลังการอบด้วยตู้อบลมร้อน (g)
$\eta$	=	ประสิทธิภาพการอบแห้ง (%)
$\eta'_{dry}$	=	ประสิทธิภาพรวมการอบแห้งเมื่อรวมความร้อนสัมผัส (%)
$Q_{evap}$	=	ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ (kJ)
$Q_s$	=	ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ (kJ)
$Q_a$	=	ปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ (kJ)
SEC	=	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ( $MJ/kg_{water}$ )
$E$	=	พลังงานรวมทั้งหมดที่ใช้ในระบบอบแห้ง (kWh)
$W_i$	=	น้ำหนักวัสดุก่อนอบแห้ง (kg)
$W_f$	=	น้ำหนักวัสดุหลังอบแห้ง (kg)
DR	=	อัตราการอบแห้ง (kg/h หรือ % d.b./h)
$W_i$	=	น้ำหนักวัสดุก่อนอบแห้ง (kg)
$W_f$	=	น้ำหนักวัสดุหลังอบแห้ง (kg)
$M_i$	=	ความชื้นวัสดุก่อนอบแห้ง (% d.b.)
$M_f$	=	ความชื้นวัสดุหลังอบแห้ง (% d.b.)

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$t$	=	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)
$L^*$	=	ค่าความสว่าง (0 = ดำ, 100 = ขาว)
$a^*$	=	พิกัดสีในแกนเขียว-แดง (ค่าลบ = เขียว, ค่าบวก = แดง)
$b^*$	=	พิกัดสีในแกนฟ้า-เหลือง (ค่าลบ = ฟ้า, ค่าบวก = เหลือง)
$q$	=	อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)
$k$	=	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ ( $W/m \cdot ^\circ C$ )
$A$	=	พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนไหลผ่าน ( $m^2$ )
$\frac{dT}{dx}$	=	ความชันของอุณหภูมิในเนื้อวัสดุ $^\circ C / m$
$q$	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากวัตถุแข็ง (W)
$h'$	=	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
$A$	=	พื้นที่สัมผัสระหว่างเมล็ดของแข็ง (ข้าวเปลือก) และของไหล ( $m^2$ )
$T_s$	=	อุณหภูมิที่ผิวของเมล็ดของแข็ง ( $^\circ C$ )
$T_\infty$	=	อุณหภูมิของกระแสของไหล ( $^\circ C$ )
$q$	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนของวัตถุปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (W)
$\epsilon$	=	สภาพเปล่งรังสี (Emissivity) มีค่าในช่วง ( $0 \leq \epsilon \leq 1$ )
$\sigma$	=	Stefan-Boltzmann Constant = $5.67 \times 10^{-8}$ ( $W/m^2 \cdot K^4$ )
$A$	=	พื้นที่ผิวของวัตถุที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ( $m^2$ )
$T_s^4$	=	อุณหภูมิของวัตถุที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (K)
$T_\infty^4$	=	อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (K)

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

หลังการเก็บเกี่ยว ข้าวเปลือกมักมีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 20 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก (กองวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว, 2559) ความชื้นดังกล่าวอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตและการเพิ่มปริมาณของจุลินทรีย์และเชื้อรา ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลผลิต (Penggane et al., 2021) กล่าวคือ ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของเมล็ด เช่น การเกิดรา การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและการเสื่อมสภาพของเมล็ด (Banaszek and Siebenmorgen, 1990) ในช่วงเวลาการเก็บรักษาข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยว การรักษาความชื้นของข้าวเปลือกให้อยู่ในระดับไม่เกิน 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียกช่วยส่งผลให้คุณภาพการสีดีขึ้นและสามารถยืดอายุการเก็บรักษาข้าวเปลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Kunze and Calderwood, 1980) แต่หากความชื้นสูงกว่านี้จะทำให้ข้าวเสื่อมคุณภาพได้อย่างรวดเร็ว ในปัจจุบันการควบคุมและลดระดับความชื้นของข้าวเปลือกในช่วงหลังการเก็บเกี่ยวถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพื่อเพิ่มอายุการเก็บรักษาพร้อมทั้งรักษาคุณลักษณะของเมล็ดให้คงอยู่เหมาะสมต่อการแปรรูป โดยทั่วไปจึงนิยมใช้วิธีการอบแห้ง ถึงแม้ว่ากระบวนการนี้จะแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการลดความชื้นได้ดี แต่ปัญหาสำคัญที่ยังคงอยู่คือค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่สูงเกินไปและความสิ้นเปลืองพลังงาน นอกจากนี้คุณภาพของเมล็ดยังมีการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันตามสภาวะการอบแห้งที่ถูกนำมาใช้ เทคนิคการอบแห้งที่ถูกนำมาเปรียบเทียบกับมีหลายรูปแบบ โดยอ้างอิงตามลักษณะของอุปกรณ์และแหล่งความร้อนที่ใช้ เช่น การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งประหยัดพลังงานแต่ใช้เวลานาน การอบแห้งแบบเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้แม่นยำกว่า ไปจนถึงการอบแห้งเชิงอุตสาหกรรมที่มีการประยุกต์ใช้เครื่องจักรกลที่วิธีการต่าง ๆ เหล่านี้มีทั้งข้อดีและข้อจำกัดที่ไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะเป้าหมายการประยุกต์ใช้และเงื่อนไขของการดำเนินงาน (Mihindukulasuriya and Jayasuriya, 2013)

มีงานวิจัยหลายฉบับได้สะท้อนถึงความสนใจของนักวิจัยต่อประเด็นการประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดในกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากคุณสมบัติของรังสีชนิดนี้สามารถแทรกซึมเข้าสู่เนื้อวัสดุได้

โดยตรง โดยปราศจากการกักเก็บความร้อนสะสมภายในตัวกลาง จึงช่วยลดการสูญเสียพลังงานไปสู่สิ่งแวดล้อม ส่งผลให้กระบวนการอบแห้งมีประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานสูงขึ้น (Ginzburg, 1969) นอกจากนี้ รังสีอินฟราเรดยังสามารถทำให้เกิดความร้อนจากชั้นในของวัสดุได้โดยตรง ช่วยเร่งกระบวนการถ่ายเทความร้อนภายในวัตถุ (Abe and Afzal, 1997) รายงานวิจัยยังแสดงให้เห็นว่าการใช้รังสีอินฟราเรดในกระบวนการอบแห้งพืชผลทางการเกษตรสามารถยกระดับคุณภาพได้ เนื่องจากการให้พลังงานที่มีความเฉพาะเจาะจงต่อวัสดุโดยไม่ทำให้เกิดการไหม้ที่ผิวภายนอก (Nibori and Motoi, 1988) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยบางชิ้นพบข้อจำกัด เช่น ความเร็วลมที่ใช้ไล่ความชื้นมีผลต่อการลดความชื้นเพียงเล็กน้อย และแทบไม่ช่วยใช้เวลาในการอบแห้งสั้นลง (Hany S. EL-Mesery et al., 2021) รวมถึงปัญหาในด้านคุณภาพของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ซึ่งยังไม่สามารถคงสภาพเมล็ดข้าวให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมได้ทั้งหมด Yuanjie Du et al. (2023) ผลกระทบด้านคุณภาพของเมล็ดหลังการอบแห้งยังคงเป็นอุปสรรคในการทำงาน

การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนที่มีการหน่วงการไหลเพื่อยืดระยะเวลาให้ข้าวเปลือกคลุกเคล้ากับลมร้อนถูกจัดว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงาน อีกทั้งยังช่วยลดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวหลังการอบแห้ง (ณัฐพงษ์ และคณะ, 2557; ณัฐพงษ์ และคณะ, 2567) และในปี 2565 จากงานวิจัยข้างต้นที่กล่าวมาผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งด้วยวิธีการขวางการไหลหรือหน่วงการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกมีอิทธิพลต่อกระบวนการอบแห้ง กระบวนการดังกล่าวนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพของอัตราการอบแห้ง การลดช่วงเวลาในการดำเนินการ และการประหยัดพลังงานในระบบโดยรวม

ดังนั้นงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือก โดยการประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งให้ความร้อนทำงานร่วมกับการหน่วงการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบอบแห้ง โดยคาดว่าจะสามารถเพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณหอบอบแห้งได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากการทำให้เมล็ดข้าวเปลือกอยู่ในหอบอบแห้งนานขึ้น และทำให้เมล็ดข้าวเปลือกเกิดการกระจายตัวในหอบอบแห้งได้ดีขึ้น ซึ่งจะช่วยให้เกิดการคลุกเคล้าระหว่างข้าวเปลือกกับอากาศร้อนได้ดีขึ้น และส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการแลกเปลี่ยนความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้ดียิ่งขึ้นตามไปด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาต้นแบบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกพลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรด

1.2.2 เพื่อทดสอบและประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องต้นแบบ โดยพิจารณาพฤติกรรมการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้นและดัชนีความขาวของข้าว

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ชาวดอกมะลิ 105 ที่เพาะปลูกใน อ.พิมาย จ.นครราชสีมา ในการทดสอบ

1.3.2 ใช้พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีของฮีตเตอร์อินฟราเรดขนาด 700 W สำหรับทำความร้อนให้กับระบบ โดยมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนในช่วง 18-30 kW/m<sup>2</sup> และใช้ PID Controller ในการควบคุมอุณหภูมิ

1.3.3 ทดสอบการวางการไหล 3 รูปแบบ คือ แบบครีบลับพื้นปลา แบบตะแกรงเหล็กฉีกแบบข้าวเปลือกเต็มหอบ (หอบแห้งเปล่า)

1.3.4 ความชื้นข้าวเปลือกก่อนอบแห้งคือ 22-25 % มาตรฐานเปียก และความชื้นสุดท้ายที่ต้องการหลังอบแห้งคือ 14-15 % w.b.

1.3.5 ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 ในการควบคุมระบบ

1.3.6 ใช้ K-Type Thermocouple (MAX 6675) Module with Temperature Sensor Probe ร่วมกับ Arduino Mega 2560 สำหรับวัดอุณหภูมิข้าวเปลือก

1.3.7 ใช้ Sensor DHT22 ร่วมกับ Arduino Mega 2560 สำหรับวัดความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ

1.3.8 อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งคือ 60 และ 80 °C

1.3.9 ใช้เครื่องเป่าลม (Blower) ยี่ห้อ Ventex รุ่น 2RB 710 H16 ขนาด 2.2 กิโลวัตต์

1.3.10 วัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ด้วย มิเตอร์ไฟฟ้า 1 Phase ยี่ห้อ Mitsubishi Electric รุ่น MF-37E

1.3.11 เครื่องอบแห้งที่ใช้ทดสอบเป็นเครื่องอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ต้นแบบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกพลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรด

1.4.2 ได้ทราบถึงสมรรถนะการทำงานของเครื่องต้นแบบ กล่าวคือ พฤติกรรมการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้นและดัชนีความขาวของข้าว

## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 ความหมายของข้าว

ข้าวถือเป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่มีความสำคัญต่อมนุษย์ทั่วโลก เนื่องจากสามารถนำเมล็ดมาใช้เป็นอาหารหลักได้ โดยจำแนกออกเป็น 2 สปีชีส์สำคัญ ได้แก่ *Oryza glaberrima* ซึ่งปลูกในทวีปแอฟริกา และ *Oryza sativa* ที่แพร่หลายไปทั่วโลก สำหรับ *Oryza sativa* เองยังแบ่งออกเป็นหลายกลุ่มย่อย เช่น Javanica, Japonica และ Indica โดยแต่ละชนิดมีความแตกต่างด้านลักษณะทางพันธุกรรมและพื้นที่ปลูก ประเทศไทยจัดให้ข้าวเป็นพืชอาหารที่มีคุณค่าและความสำคัญมากที่สุด และมีบทบาทหลากหลาย ทั้งในด้านเศรษฐกิจ สังคม และวัฒนธรรม เนื่องจากประเทศไทยถือเป็นประเทศผู้ผลิตและผู้ส่งออกข้าวรายสำคัญ ที่มีอิทธิพลต่อการค้าข้าวในตลาดโลก คุณประโยชน์ทางโภชนาการของข้าวเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้มีการบริโภคอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในกลุ่มประชากรที่ต้องการแหล่งพลังงานหลักจากอาหาร ในฐานะที่นึ่งเชิงโภชนาการ ข้าวจัดเป็นอาหารที่ให้พลังงานหลักจากคาร์โบไฮเดรต พร้อมทั้งมีวิตามินในปริมาณที่ช่วยเสริมความสมดุลทางอาหาร ไขมัน โปรตีน และแร่ธาตุที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิต นอกจากนี้ งานวิจัยด้านโภชนาการยังพบว่าการรับประทานข้าวอย่างสม่ำเสมอมีความเกี่ยวข้องกับการป้องกันและลดโอกาสการเกิดโรคไม่ติดต่อเรื้อรังหลายชนิด เช่น โรคเบาหวาน โรคหัวใจและหลอดเลือด และโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่ ข้าวจึงไม่เพียงเป็นอาหารหลักที่ให้พลังงานเท่านั้น แต่ยังมีบทบาทในฐานะพืชอาหารที่นอกจากจะเกี่ยวพันกับการดำรงสุขภาพและคุณภาพชีวิตของประชาชนแล้ว ข้าวยังมีความสำคัญเชิงเศรษฐกิจอย่างยิ่งในฐานะสินค้าส่งออกที่ช่วยสร้างรายได้จำนวนมากแก่ประเทศ (สำนักงานเกษตรและสหกรณ์ จังหวัดสุรินทร์, 2563)

##### 2.1.2 โครงสร้างและส่วนประกอบภายในเมล็ดข้าว

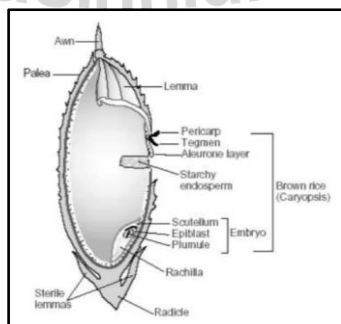
เมล็ดข้าวเป็นผลชนิดหนึ่งที่เรียกว่าคาริออปซิส (Caryopsis) ซึ่งเป็นผลแห้งชนิดผลเดี่ยว ประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ เปลือกนอก (Husk) และเนื้อผล (Caryopsis rice) หรือข้าวกล้อง (อรอนงค์นัยวิกุล, 2547)

### 2.1.2.1 เปลือกนอกหรือแกลบ (Husk):

- ประกอบด้วยเปลือกใหญ่ (Lemma) และเปลือกเล็ก (Palea) เชื่อมกันโดยโครงสร้างพิเศษที่เรียกว่า Hook-shaped
- ทำหน้าที่ป้องกันเมล็ดจากเชื้อราและแมลง
- ชั้นนอกของเปลือกมีขนหนาม (Trichomes) และส่วนประกอบหลัก ได้แก่ ลิกนิน (30 %), เซลลูโลส (25 %) และเถ้า (21 %)
- มีน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 20 % ของน้ำหนักเมล็ดข้าว

### 2.1.2.2 เนื้อผลหรือข้าวกล้อง (Brown rice):

- เยื่อหุ้มผล (Pericarp): บริเวณผิวชั้นนอกของข้าวกล้องประกอบด้วยเยื่อหุ้มผล (Pericarp) ที่มีความหนาเฉลี่ยราว 10 ไมครอน ประกอบด้วย Epicarp, Mesocarp และ Endocarp มีโปรตีน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส
- เยื่อหุ้มเมล็ด (Seed coat): บริเวณที่ถัดจากเยื่อหุ้มผลคือชั้นเยื่อหุ้มเมล็ด (Seed coat) หนาประมาณ 0.5 ไมครอน มีไขมันมาก
- ชั้นอัลูโลน (Aleurone layer): ห่อหุ้มทั้งเนื้อเมล็ด ในแต่ละสายพันธุ์ข้าวอาจมีจำนวนชั้นที่ไม่เท่ากัน โดยชั้นดังกล่าวมีส่วนประกอบสำคัญ ได้แก่ ไขมัน วิตามิน โปรตีนและแป้งเล็กน้อย
- เนื้อเมล็ดหรือเนื้อข้าว (Endosperm): น้ำหนักของเมล็ดข้าวส่วนใหญ่ประมาณ 80 % อยู่ในรูปของข้าวสารทั้งหมด องค์ประกอบหลักของข้าวสารคือคาร์โบไฮเดรตในรูปของแป้ง โดยแป้งดังกล่าวสามารถจำแนกออกเป็นอะไมโลเพกติน (Amylopectin) และอะไมโลส (Amylose)
- คัพพะ (Embryo): ส่วนที่เจริญเป็นต้นอ่อน ประกอบด้วย Embryonic axis และ Scutellum มีโปรตีน ไขมัน เถ้า และวิตามินสูง แต่ไม่มีแป้ง (อรอนงคัณยวิกุล, 2547)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว ที่มา : (Kennedy,2002)

### 2.1.3 บทบาทและความจำเป็นของการอบแห้ง

การอบแห้งจัดเป็นเทคนิคพื้นฐานที่มีการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายที่มีบทบาทสำคัญต่อหลายภาคอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นเกษตรและอาหาร เครื่องนุ่งห่ม เคมีภัณฑ์ ยา ไปจนถึงอุตสาหกรรมพลังงาน เนื่องจากขั้นตอนนี้มีผลโดยตรงส่งผลให้สามารถเก็บรักษาผลผลิตได้ยาวนานขึ้น คงคุณภาพวัตถุดิบให้เหมาะสม และช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในกระบวนการขนส่งและการเก็บรักษา สำหรับภาคการเกษตรของไทย การอบแห้งยังเป็นปัจจัยหลักที่ช่วยสนับสนุนการแปรรูปและเพิ่มมูลค่าของผลผลิต เช่น ข้าวเปลือก มันสำปะหลัง และพืชไร่อื่น ๆ ซึ่งจำเป็นต้องปรับระดับความชื้นของผลผลิตให้อยู่ในค่าที่เหมาะสมก่อนนำไปเก็บรักษาหรือเข้าสู่กระบวนการผลิตขั้นต่อไป

จุดมุ่งหมายหลักของกระบวนการอบแห้งจึงไม่ได้มีเพียงการควบคุมความชื้นให้อยู่ในช่วงที่ไม่ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพของผลผลิตต่อการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ แต่ยังรวมถึงการพัฒนาประสิทธิภาพเชิงการผลิต โดยยังคงความเสถียรด้านโครงสร้างกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของผลผลิตให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม เช่น การตากแดดหรือการใช้เตาเผา จะสามารถทำได้ง่ายและต้นทุนต่ำ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดด้านการควบคุมคุณภาพและความสม่ำเสมอของผลลัพธ์ ดังนั้น การพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งที่สามารถปรับปรุงทั้งคุณภาพ ประสิทธิภาพ และความคุ้มค่าในการผลิต จึงเป็นหัวใจสำคัญที่ภาคการเกษตรและอุตสาหกรรมควรให้ความสนใจและต่อยอด (สีกมณ เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)

### 2.1.4 กระบวนการกำจัดความชื้นออกจากเมล็ดพืช

การเก็บรักษาผลผลิตทางการเกษตรกรรม โดยเฉพาะข้าวและข้าวโพดและธัญพืชชนิดอื่น ๆ จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการที่ช่วยมีบทบาทในการยืดระยะเวลาการเก็บรักษา พร้อมทั้งรักษาคุณภาพของเมล็ดพืชให้คงเดิม ซึ่งวิธีการที่ถือเป็นมาตรฐานและนิยมใช้ทั่วไปคือการปรับปริมาณความชื้นของเมล็ดให้อยู่ในค่าที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา เนื่องจากหากปริมาณความชื้นยังคงสูงเป็นปัจจัยที่เอื้อให้เกิดการแพร่กระจายและการขยายตัวของเชื้อราและจุลินทรีย์ ซึ่งอาจทำให้เมล็ดเน่าเสีย สูญเสียคุณภาพ และไม่ปลอดภัยต่อการบริโภค ดังนั้น การอบแห้งจึงถือเป็นปัจจัยหลักที่กำหนดระดับความปลอดภัยของระบบและคุณภาพของผลผลิต

#### 2.1.4.1 ความสำคัญของความชื้น

ค่าความชื้นที่เหมาะสมในการเก็บรักษาข้าวเปลือกและธัญพืชส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 13–15 % w.b. ขณะที่เพื่อให้สามารถเก็บรักษาโดยไม่เสื่อมคุณภาพในระยะยาวและต้องการลดความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนหรือการเสื่อมสภาพ ค่าความชื้นอาจต้องลดลงถึง 10 % หรือต่ำกว่า

ทั้งนี้การควบคุมระดับความชื้นให้อยู่ในช่วงที่กำหนดมีผลโดยตรงต่อการยืดอายุการเก็บรักษา ลดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยว และรักษาคุณภาพเมล็ดให้ใกล้เคียงกับสภาพเดิมมากที่สุด

#### 2.1.4.2 ระดับความชื้นที่เหมาะสม

- สำหรับพืชแป้ง เช่น ข้าว ความชื้นที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 13-15 % w.b.
- สำหรับพืชน้ำมัน ความชื้นที่เหมาะสมประมาณ 10 % w.b.

#### 2.1.4.3 ผลกระทบของความชื้นไม่เหมาะสม

- เมล็ดที่มีความชื้นมากเกินไปเกินกำหนดจะไม่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาในระยะยาว และอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อคุณภาพเมล็ดได้ง่าย
- การทำให้เมล็ดพืชมีความแห้งเกินความจำเป็น อาจก่อให้เกิดความแปรปรวนของเมล็ด ส่งผลให้แตกหักได้ง่ายในระหว่างการขนส่งและการเก็บรักษา

ดังนั้น การควบคุมระดับปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในเมล็ดพืชขณะเก็บรักษาเป็นเงื่อนไขที่ช่วยรักษามาตรฐานคุณภาพและยืดอายุการใช้งานของผลผลิตให้พร้อมใช้ได้อย่างต่อเนื่องได้ในปริมาณที่ต้องการ (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2540)

#### 2.1.5 วิธีการอบแห้งที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

การเก็บรักษาข้าวเปลือกในปัจจุบันมักเผชิญปัญหาความชื้นที่สูง ซึ่งหากไม่มีการจัดการที่เหมาะสมอาจก่อให้เกิดการเสื่อมคุณภาพของผลผลิต โดยทั่วไปแล้วเมล็ดข้าวเปลือกที่เพิ่งเก็บเกี่ยวจะมีความชื้นเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 20–25 % ซึ่งถือว่าสูงเกินกว่ามาตรฐานที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษาในระยะยาว ดังนั้นกระบวนการลดความชื้นจึงมีบทบาทสำคัญ เพื่อป้องกันการงอก การเสื่อมสภาพ และการปนเปื้อนจากจุลินทรีย์ที่ก่อโรค โดยเกษตรกรจำนวนมากยังคงใช้วิธีการตากแดดในช่วงเวลา 2–3 วันเพื่อให้ข้าวแห้งลง อย่างไรก็ตามวิธีนี้ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ หากมีฝนตกหรือสภาพอากาศไม่เหมาะสมอาจทำให้เมล็ดข้าวเสียหายหรือเสื่อมคุณภาพได้

สำหรับเกษตรกรที่ไม่มีพื้นที่หรือสิ่งอำนวยความสะดวกในการตากแดด การเก็บรักษามักทำได้ยาก ส่งผลให้ข้าวมีโอกาสขึ้นรา เสื่อมคุณภาพ หรือเกิดความเสียหายได้ง่าย ดังนั้นการนำเทคโนโลยีด้านการอบแห้งเข้ามาใช้จึงเป็นแนวทางที่จำเป็น โดยเฉพาะการอบแห้งด้วยเครื่องจักรที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้ จะช่วยให้กระบวนการทำงานมีประสิทธิภาพและได้ผลผลิตที่มีคุณภาพสูงกว่า

การตากข้าวในโรงสีข้าวมักเป็นชั้นบางบนลานคอนกรีตเหมือนหลังเต่าเพื่อป้องกันน้ำขัง เมื่อสภาพอากาศไม่เอื้ออำนวย เช่น มีฝนตก เกษตรกรมักจะกวาดเมล็ดข้าวให้รวมเป็นกองแล้วใช้ผ้าใบคลุมป้องกันความชื้น การตากข้าวแดดในลักษณะนี้อาจใช้เวลาตั้งแต่ครึ่งวันจนถึงหลายวัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศในขณะนั้น ระดับความชื้นในเมล็ดพืชและ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวมีความสำคัญ เช่น รถเกรด และรถตัก การทำงานนี้ต้องขึ้นอยู่กับสภาพอากาศอีกด้วย

ปัจจุบันการใช้รถเก็บเกี่ยวที่สามารถนวดข้าวได้ในตัวเริ่มแพร่หลายมากขึ้น ส่งผลให้ผลผลิตทั้งจากนาปีและนาปรังเข้าสู่กระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวได้รวดเร็วกว่าเดิม ดังนั้น เครื่องอบแห้งจึงกลายเป็นเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญต่อการรักษาคุณภาพเมล็ดข้าว ขณะเดียวกันยังเป็นการลงทุนที่ภาครัฐมีนโยบายสนับสนุนด้านการเงิน จึงมีแนวโน้มว่าเครื่องอบแห้งจะเป็นอุปกรณ์จำเป็นที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในการผลิตข้าวยุคใหม่ (ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา, 2557)

### 2.1.6 หลักการอบแห้งเมล็ดพืช

โดยทั่วไป อากาศที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการอบแห้งจะถูกปรับให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม โดยเฉพาะในระดับความชื้นต่ำ เพื่อช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและเร่งการสูญเสียน้ำจากวัตถุดิบได้อย่างมีประสิทธิภาพ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งขึ้นอยู่กับลักษณะของการใช้งานเมล็ดพืชและเทคนิคที่ใช้ โดยทั่วไปเราจะเลือกใช้อุณหภูมิสูงสุดที่ไม่ทำให้คุณภาพของเมล็ดพืชเสียหาย เพื่อให้การอบแห้งเป็นไปตามวิธีที่เรากำหนด เช่นการใช้อากาศแวดล้อมในการอบแห้ง

เมื่ออากาศร้อนเคลื่อนผ่านชั้นของเมล็ดพืช จะเกิดการถ่ายโอนความร้อนและความชื้นขึ้นพร้อมกัน ความร้อนจากอากาศจะแพร่เข้าสู่เมล็ดพืชและทำให้ความชื้นภายในระเหยออกสู่บรรยากาศ ส่งผลให้อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศรอบเมล็ดเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นสะสมมากพอ อุณหภูมิในเมล็ดจะสูงขึ้นจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง กระบวนการนี้ส่งผลให้เกิดการแพร่ของไอน้ำและความชื้นจากภายในสู่ผิวเมล็ด และเมื่อบริเวณผิวมีความชื้นสูงขึ้น ก็จะเป็นจุดเริ่มต้นของการเจริญเติบโตของเชื้อราและจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมคุณภาพเมล็ดในระหว่างการเก็บรักษา (ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา, 2557)

### 2.1.7 เครื่องอบแห้งเมล็ดพืช

ในกระบวนการผลิตทางการเกษตร เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชถือเป็นเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการผลิตข้าว เนื่องจากหลังการเก็บเกี่ยวเมล็ดพืชมักมีความชื้นสูง ซึ่งหากไม่ได้รับการจัดการอย่างเหมาะสมจะก่อให้เกิดการเสื่อมคุณภาพ เช่น การงอกก่อนเวลา การเกิดเชื้อรา รวมถึงการสูญเสียสารอาหารสำคัญ กระบวนการอบแห้งจึงมีความจำเป็นเพื่อให้ระดับความชื้นของเมล็ดอยู่ในช่วงที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษาและการขนส่ง ในเชิงเศรษฐกิจ เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชช่วยลดความเสี่ยงจากการสูญเสียผลผลิตที่มีมูลค่าสูง และยังเป็นเครื่องมือที่เพิ่มศักยภาพด้านการแข่งขันในตลาดโลก โดยสามารถยืดอายุการจัดเก็บ ลดความเสียหายจากศัตรูพืช และรักษาคุณภาพของผลผลิตให้คงเดิมยาวนานขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น การใช้เครื่องอบแห้งยังตอบสนองต่อโจทย์ความต้องการด้านความปลอดภัยทางอาหาร (food safety) ซึ่งกำลังได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เนื่องจากผู้บริโภคให้ความสำคัญกับคุณภาพ ความสะอาด และการลดสารปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมาก การพัฒนางานวิจัยด้านเครื่องอบแห้งในปัจจุบันไม่ได้หยุดเพียงการเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงาน แต่ยังมีมุ่งเน้นไปที่การลดผลกระทบต่อคุณภาพของเมล็ด เช่น การคงคุณค่าทางโภชนาการ การรักษาลักษณะทางกายภาพ และการลดการแตกร้าวของเมล็ด ทั้งนี้แนวโน้มใหม่ยังมุ่งไปที่การบูรณาการกับพลังงานหมุนเวียน เช่น การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบควบคุมอัตโนมัติ เพื่อสร้างกระบวนการอบแห้งที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ต้นทุนต่ำ และยั่งยืนสอดคล้องกับนโยบายการผลิตที่ยั่งยืน

ดังนั้นเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชไม่เพียงทำหน้าที่เป็นเครื่องจักรกลเพื่อจัดการกับความชื้นเท่านั้น แต่ยังเป็นเทคโนโลยีเชิงกลยุทธ์ที่ช่วยรักษาคุณภาพ ลดต้นทุน และสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลผลิตทางการเกษตร ตลอดจนมีศักยภาพในการต่อยอดไปสู่ระบบอุตสาหกรรมการผลิตอาหารที่ยั่งยืนในอนาคตขึ้น ในแง่เทคนิค เครื่องอบแห้งแบ่งออกเป็นหลายประเภท โดยทั่วไปสามารถจำแนกเป็นเครื่องอบแห้งแบบอยู่กับที่ (Fixed-bed dryer) และเครื่องอบแห้งแบบเคลื่อนที่ (Moving-bed dryer) เครื่องอบแห้งแบบอยู่กับที่เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการควบคุมง่ายและมีต้นทุนต่ำ แต่ข้อจำกัดคือไม่สามารถรองรับผลผลิตปริมาณมากได้ ส่วนเครื่องอบแห้งแบบเคลื่อนที่ถูกรออกแบบมาเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยสามารถทำงานต่อเนื่อง มีความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนตามสภาวะการผลิต และเหมาะกับสถานการณ์ที่ต้องการรองรับเมล็ดพืชจำนวนมาก (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2554) ดังนี้

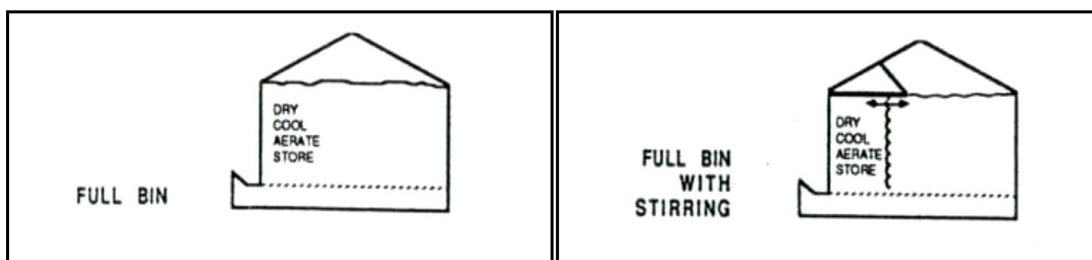
### 2.1.7.1 เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ (Fixed-bed dryer)

เครื่องอบแห้งชนิดถังเก็บจัดเป็นระบบที่ใช้กันแพร่หลายในการลดความชื้นของเมล็ดพืชหลังการเก็บเกี่ยว เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและสะดวกต่อการใช้งาน อากาศร้อนจะถูกเป่าให้ไหลผ่านมวลเมล็ดพืชที่บรรจุอยู่ภายในถัง โดยอัตราการไหลของอากาศจะค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับเครื่องอบชนิดอื่น การทำงานในลักษณะนี้ช่วยให้เมล็ดพืชค่อย ๆ สูญเสียความชื้นและคงคุณภาพได้ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญหลายประการ เช่น ความสูงของชั้นเมล็ดพืชที่บรรจุในถัง ความเร็วลมที่เป่าเข้าไป รวมถึงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง เครื่องอบแห้งแบบนี้อาจแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ

#### ก. เครื่องอบแห้งแบบถังเก็บ (In-bin drying)

สำหรับเครื่องอบแห้งถังเก็บแบบ In-bin drying นั้น ความชื้นสูงสุดที่สามารถจัดการได้อย่างมีประสิทธิภาพอยู่ที่ชั้นเมล็ดประมาณ 6 เมตร แต่หากความสูงของชั้นเมล็ดเกินกว่านี้ การไหลของอากาศมักไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เมล็ดส่วนบนยังคงมีความชื้นสูงในขณะที่ชั้นล่างแห้งเกินไป ปัญหานี้มักสัมพันธ์กับสถานะอุณหภูมิที่ไม่สมดุลในระบบ ซึ่งอาจทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพของเมล็ดพืชได้

การควบคุมความชื้นในถังเก็บต้องอาศัยการจัดการอัตราการไหลของอากาศให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม เช่น  $0.5-5 \text{ m}^3/\text{min}$  ต่อปริมาตรเมล็ดพืช 1 ตัน หากอัตราการไหลต่ำเกินไป เมล็ดพืชจะใช้เวลาานกว่าจะถึงระดับความชื้นที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา แต่หากสูงเกินไป อาจทำให้สิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็น ดังนั้นการออกแบบและปรับตั้งระบบจึงต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับสภาพการผลิตและชนิดของเมล็ดพืช แม้ว่าการอบแห้งด้วยถังเก็บจะสามารถลดความชื้นของเมล็ดได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ก็มีข้อจำกัดสำคัญ คือ ความสม่ำเสมอในการกระจายอากาศและความร้อน หากไม่สามารถควบคุมได้ดีอาจก่อให้เกิดเมล็ดแห้งไม่สม่ำเสมอหรือเกิดการแตกร้าวของเมล็ด ทั้งนี้งานวิจัยจำนวนมากแนะนำให้ปรับปรุงระบบ เช่น การเพิ่มท่ออากาศภายในถัง การติดตั้งพัดลมเสริม หรือการควบคุมสถานะอุณหภูมิ-ความชื้นของอากาศที่เป่าให้คงที่ เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2554)



รูปที่ 2.2 เครื่องอบแห้งแบบถังเก็บ

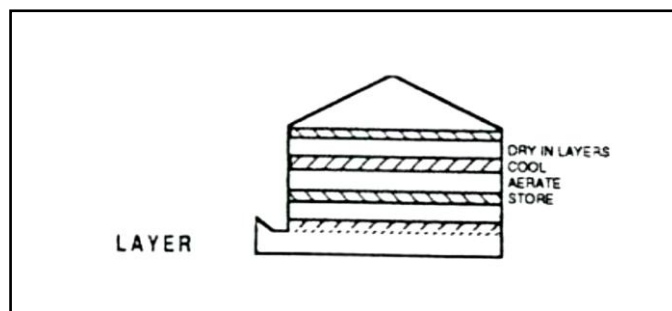
ที่มา : (In-bin drying) (Brooker, D. B. et al., 1992)

ข. เครื่องอบแห้งแบบเป็นชั้น (Layer drying)

เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบเป็นชั้น (Layer drying) เป็นกระบวนการที่มีลักษณะคล้ายกับการอบแห้งในถังเก็บ แต่แตกต่างกันตรงที่เมล็ดพืชถูกบรรจุในปริมาณไม่มากนัก และจะถูกทยอยเคลื่อนย้ายจากชั้นหนึ่งไปยังอีกชั้นหนึ่งตามลำดับ กระบวนการนี้ทำให้เมล็ดที่เพิ่งบรรจุใหม่อยู่ในชั้นบนซึ่งมีความชื้นสูง ขณะที่เมล็ดที่อยู่ชั้นล่างจะได้รับอากาศร้อนถ่ายเทตลอดเวลา จึงค่อย ๆ ลดความชื้นลงอย่างต่อเนื่อง

ข้อดีของการอบแห้งในลักษณะนี้คือสามารถควบคุมการไหลเวียนของอากาศร้อนให้ผ่านเมล็ดพืชแต่ละชั้นได้อย่างทั่วถึง อีกทั้งยังช่วยให้การอบแห้งเกิดขึ้นเป็นขั้นตอน ลดความเสี่ยงจากการที่เมล็ดบางส่วนได้รับความร้อนมากเกินไปและเกิดความเสียหาย อย่างไรก็ตาม การไหลเวียนอากาศที่ผ่านชั้นบนก่อนย่อมทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่ชั้นล่าง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการอบแห้งในช่วงท้ายลดลง

ดังนั้น เครื่องอบแห้งแบบเป็นชั้นจึงเหมาะกับการใช้งานในระดับครัวเรือนหรือการผลิตขนาดเล็ก ที่ไม่ต้องการความต่อเนื่องของกระบวนการมากนัก แต่ยังคงต้องการคุณภาพเมล็ดที่ดีและลดความเสียหายให้น้อยที่สุด หากนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม จำเป็นต้องปรับปรุงระบบการควบคุมอุณหภูมิ ความเร็วลม และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ เพื่อให้สามารถรักษาคุณภาพเมล็ดพืชได้อย่างเหมาะสมตลอดกระบวนการอบแห้ง(เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2554)



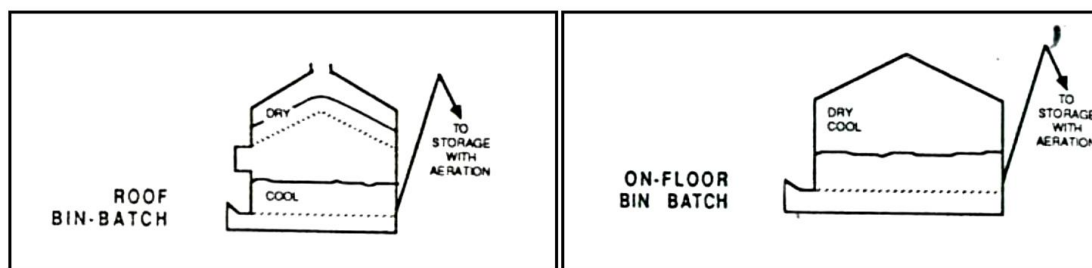
รูปที่ 2.3 เครื่องอบแห้งแบบเป็นชั้น

ที่มา : (Layer drying) (Brooker, D. B. et al., 1992)

#### ค. เครื่องอบแห้งแบบเป็นงวด (Batch-in-bin drying)

เป็นกระบวนการที่เมล็ดพืชถูกนำมาใส่ในถังอบแห้ง แล้วใช้อากาศร้อนเป่าไหลผ่านจนกว่าความชื้นจะลดลงสู่ระดับที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา โดยทั่วไป อุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 49–71 °C ในขณะที่อัตราการไหลของอากาศอยู่ประมาณ 6–11 m<sup>3</sup>/min-m<sup>3</sup> ซึ่งเหมาะสมกับการลดความชื้นของเมล็ดพืชในปริมาณไม่มากนัก แต่สามารถกระจายความร้อนได้สม่ำเสมอ อัตราความเร็วของอากาศดังกล่าวช่วยลดเวลาการอบแห้งลงให้เหลือเพียง 12–24 ชั่วโมงเท่านั้น

ปัญหาที่สำคัญของการอบแห้งในลักษณะนี้คือ การเกิดความแตกต่างของความชื้น (Moisture gradient) ภายในเมล็ด เนื่องจากความชื้นบริเวณผิวแห้งเร็วกว่าส่วนแกนกลาง ส่งผลให้เกิดการสะสมความร้อนและอาจทำให้คุณภาพเมล็ดลดลง หากควบคุมไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงต้องมีการจัดการด้านการไหลเวียนของอากาศ และการควบคุมอุณหภูมิอย่างรอบคอบเพื่อป้องกันการแตกร้าวหรือการสูญเสียคุณภาพของเมล็ดพืชในระหว่างกระบวนการ แม้ว่าการอบแห้งแบบ Batch-in-bin จะมีข้อจำกัดในแง่ของความไม่สม่ำเสมอของการลดความชื้น แต่ข้อดีที่สำคัญคือสามารถประหยัดพลังงานและลดต้นทุนการดำเนินงาน เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอบแห้งเชิงพาณิชย์ขนาดใหญ่ที่ต้องใช้อุปกรณ์ซับซ้อนกว่า นอกจากนี้ยังเหมาะสำหรับเกษตรกรรายย่อยหรือผู้ประกอบการขนาดเล็กที่ต้องการลดปริมาณความชื้นให้อยู่ในระดับ 12–16 % ภายในเวลา 1–2 วัน ซึ่งถือว่าเพียงพอสำหรับการเก็บรักษาเมล็ดพืชในระยะสั้นและการนำไปจำหน่ายต่อไป (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2554)



รูปที่ 2.4 เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบเป็นงวด

ที่มา : (Brooker, D. B. et al., 1992)

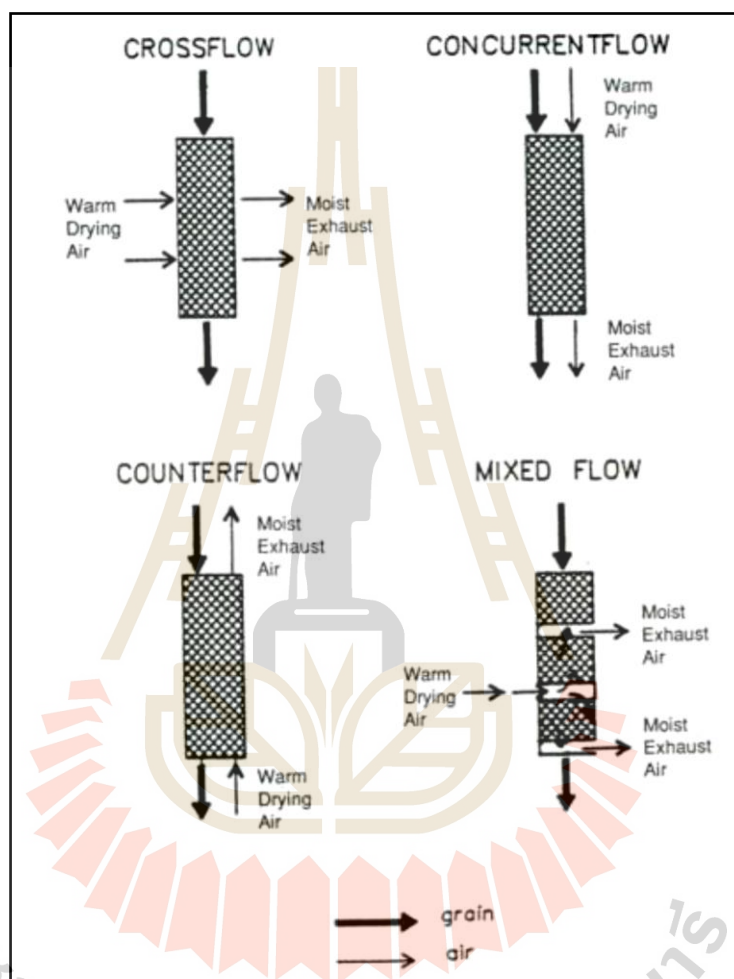
อีกหนึ่งอุปสรรคสำคัญของระบบอบแห้งเมล็ดพืชชนิดตู้หรือถังเก็บ คือปัญหาการไหลเวียนของอากาศร้อนภายใน ซึ่งมักไม่สามารถกระจายตัวได้ทั่วถึงทุกชั้นของเมล็ดพืช ส่งผลให้บางส่วนได้รับความร้อนมากกว่าหรือน้อยกว่าเกณฑ์ที่เหมาะสม การสะสมของเมล็ดพืชในบริเวณใกล้กันถึงหรือศูนย์กลางของเครื่องอบแห้งมักเผชิญภาวะความชื้นตกค้าง ในขณะที่ชั้นบนหรือรอบนอกกลับแห้งเร็วกว่าปกติ ความไม่สม่ำเสมอนี้ทำให้คุณภาพเมล็ดที่ได้ไม่สอดคล้องกัน และอาจเป็นสาเหตุของการเสื่อมสภาพหรือต้องนำไปผ่านกระบวนการอบซ้ำเพิ่มเติม ดังนั้น การออกแบบระบบควบคุมการกระจายอากาศที่มีประสิทธิภาพจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการลดความแตกต่างภายในเครื่องอบแห้งแต่ละครั้ง

### 2.1.7.2 เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล (Moving-bed dryer)

เครื่องอบแห้งชนิดนี้ทำงานโดยให้เมล็ดพืชเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องผ่านกระแสลมร้อนภายในหอบหรือตู้อบ โดยอากาศร้อนจะไหลสวนทาง (counter-flow) หรือไหลในทิศเดียวกัน (co-current flow) กับเมล็ดพืช ขึ้นอยู่กับการออกแบบของระบบ จุดเด่นคือสามารถทำให้เมล็ดพืชแห้งได้อย่างสม่ำเสมอมากกว่าเครื่องอบแห้งแบบอยู่กับที่ เนื่องจากมีการเคลื่อนที่ของวัสดุอย่างต่อเนื่อง ทำให้ลดปัญหาการเกิดความชื้นสะสมบริเวณใดบริเวณหนึ่งของชั้นเมล็ดพืช

ข้อดีคือเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและความชื้น เพราะเมล็ดพืชไม่คงที่ แต่มีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา อีกทั้งยังให้ความชื้นสุดท้ายใกล้เคียงกัน ระหว่างเมล็ดพืชแต่ละส่วน ช่วยลดความเสียหายของเมล็ดและเหมาะกับการผลิตเชิงพาณิชย์ เนื่องจากรองรับปริมาณการอบแห้งที่มากและต่อเนื่อง แต่มีข้อจำกัดคือมีโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่าเครื่องอบแห้งแบบคงที่ ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูงกว่า และต้องการระบบควบคุมการไหลของอากาศและการเคลื่อนที่ของเมล็ดพืชที่แม่นยำ หากควบคุมไม่ดี อาจทำให้เกิดการอบแห้งไม่สม่ำเสมอ

เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหลมักถูกนำไปใช้ในการอบข้าวเปลือก ข้าวโพด ถั่วเหลือง และเมล็ดพืชอื่น ๆ ที่ต้องการลดความชื้นลงอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและลดความเสี่ยงจากเชื้อราและจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มคุณภาพในการสีหรือแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรในขั้นตอนต่อไป (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2554)



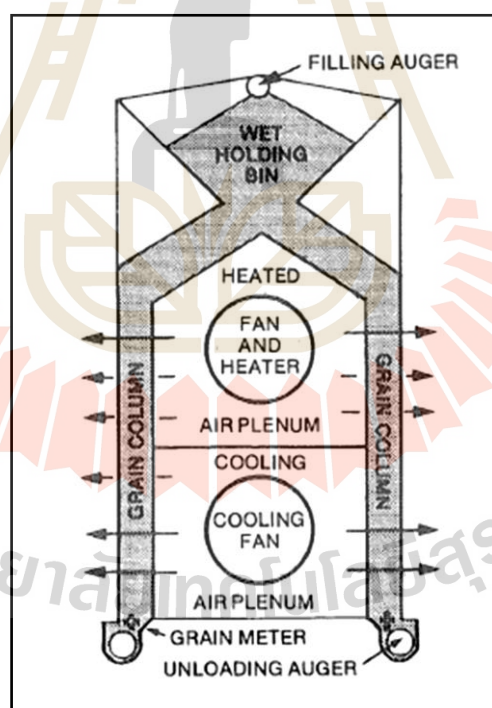
รูปที่ 2.5 รูปแบบการเคลื่อนที่ของเมล็ดพืชและการไหลเวียนของอากาศในกระบวนการอบแห้ง  
ที่มา : (Brooker, D. B. et al., 1992)

#### ก. เครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง (Cross-flow dryer)

เครื่องอบแห้งชนิดไหลขวางทำงานโดยให้อากาศร้อนเคลื่อนที่ตัดผ่านทิศทางการเคลื่อนที่ของเมล็ดพืชที่อยู่ภายในเครื่องอบแห้ง โดยอากาศร้อนจะไหลผ่านช่องด้านข้างของชั้นเมล็ด ซึ่งมักมีความหนาเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.30–0.45 เมตร แล้วระบายออกไปอีกด้านหนึ่ง ลักษณะการไหลของอากาศเช่นนี้จะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลความชื้นจากเมล็ดสู่กระแสอากาศอย่างต่อเนื่อง เมล็ดพืชที่อยู่ในชั้นจะถูกแบ่งเป็นสองส่วนหลัก ส่วนบนใกล้

แหล่งลมร้อนจะได้รับการลดความชื้นเร็วกว่าส่วนล่างซึ่งอยู่ห่างออกไป ความแตกต่างของอัตราการไหล ของอากาศระหว่างชั้นบนและชั้นล่าง ทำให้เมล็ดในแต่ละชั้นแห้งไม่สม่ำเสมอ จำเป็นต้องมีการกลับกองหรือเคลื่อนย้ายเมล็ดภายในเพื่อให้การกระจายความร้อนและการลดความชื้นมีประสิทธิภาพมากขึ้น อัตราการไหลของอากาศในเครื่องอบชนิดนี้โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 38–76  $\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{m}^3$  เมล็ดพืช ทั้งนี้ ปริมาณและความเร็วของอากาศจะต้องถูกควบคุมให้เหมาะสม หากอัตราการไหลไม่เพียงพอจะทำให้เมล็ดบางส่วนยังคงมีความชื้นสูง ในขณะที่หากอัตราการไหลสูงเกินไปก็อาจ ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานโดยไม่จำเป็น

ข้อจำกัดสำคัญของระบบอบแห้งแบบไหลขวางคือความแตกต่างของค่าความชื้นระหว่างเมล็ดที่อยู่ด้านใกล้กับทางลมร้อนและเมล็ดที่อยู่ห่างออกไป ทำให้ได้เมล็ดที่มีความชื้นไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของเมล็ดในระยะยาว อย่างไรก็ตาม เครื่องอบชนิดนี้ได้รับความนิยมใช้ในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ต้นทุนการผลิตต่ำ และสามารถทำงานได้ต่อเนื่อง (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2554)

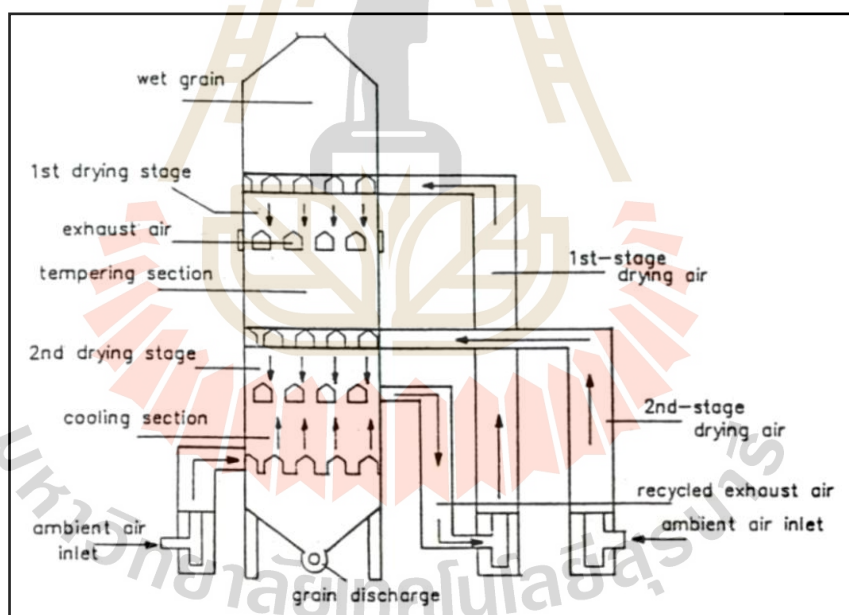


รูปที่ 2.6 เครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง

ที่มา : (Brooker, D. B. et al., 1992)

### ข. เครื่องอบแห้งแบบไหลตาม (Concurrent-flow dryer)

เครื่องอบแห้งแบบไหลตาม (Concurrent-flow dryer) เป็นระบบที่อาศัยการเคลื่อนที่ของเมล็ดพืชและอากาศร้อนในทิศทางเดียวกัน ซึ่งทำให้เมล็ดพืชสัมผัสกับอุณหภูมิสูงสุดบริเวณด้านบนของเครื่อง หลังจากนั้นเมื่อเมล็ดพืชเคลื่อนตัวลงมาด้านล่าง อุณหภูมิของอากาศจะแปรผันลดลงเรื่อย ๆ ส่งผลให้เมล็ดพืชค่อย ๆ สูญเสียความชื้นโดยไม่เกิดการไหม้หรือเสียหายจากความร้อนจัด แม้ว่าอากาศที่ใช้จะมีอุณหภูมิสูงถึง 150-250 °C แต่ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในทิศทางเดียวกันนี้เอื้อต่อการทำให้ความชื้นลดลงได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว ข้อสังเกตสำคัญของระบบนี้ คือ เมื่อเมล็ดพืชเคลื่อนที่ผ่านลงไปยังส่วนล่างของเครื่อง อากาศที่ใช้จะแปรผันเข้าสู่สถานะเย็นลงและควบคุมอุณหภูมิได้เหมาะสมยิ่งขึ้น ทำให้เมล็ดพืชไม่เกิดความเสียหายจากความร้อนส่วนเกิน ส่งผลให้การอบแห้งเป็นไปอย่างต่อเนื่องและมีคุณภาพสม่ำเสมอ ตลอดจนช่วยยืดอายุการเก็บรักษาเมล็ดพืชได้ดี (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2554) เครื่องอบแห้งแบบไหลตามแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เครื่องอบแห้งแบบไหลตาม

ที่มา : (Brooker, D. B. et al., 1992)

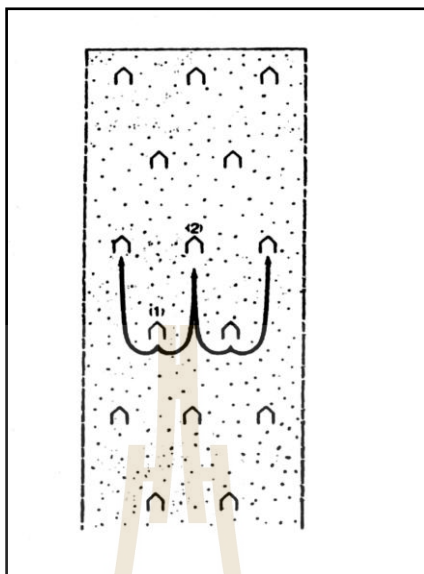
### ค. เครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง (Counter-flow dryer)

เครื่องอบแห้งชนิดไหลสวนทางเป็นระบบที่กระแสนการเคลื่อนที่ของเมล็ดพืชและอากาศร้อนในระหว่างกระบวนการอบแห้งไหลสวนทางกัน กล่าวคือ เมล็ดพืชที่มีความชื้นสูงสุดจะเคลื่อนเข้าสู่ส่วนที่มีอุณหภูมิสูงสุด ขณะที่เมล็ดที่มีความชื้นน้อยจะเคลื่อนผ่านไป

ยังบริเวณที่อุณหภูมิต่ำกว่า กลไกดังกล่าวทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและการระเหยของความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อได้เปรียบที่สำคัญของเครื่องอบแห้งชนิดนี้คือ ความสามารถในการทำให้เมล็ดพืชที่มีปริมาณความชื้นสูงลดลงได้ในอัตราที่รวดเร็ว เนื่องจากการสัมผัสกับอากาศร้อนโดยตรง อย่างไรก็ตาม แม้ว่าเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทางจะให้ประสิทธิภาพสูง แต่กลับพบปัญหาการสูญเสียคุณภาพของเมล็ด เนื่องจากบริเวณที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้เมล็ดแตกร้าวหรือสูญเสียคุณสมบัติทางกายภาพไปบางส่วน เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว การออกแบบและใช้งานเครื่องอบแห้งชนิดนี้จึงต้องอาศัยการควบคุมอุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศอย่างเหมาะสม เพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนเกินก่อให้เกิดความเสียหาย ขณะเดียวกันยังต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าด้านพลังงานและต้นทุนการผลิต ซึ่งหากมีการปรับปรุงระบบให้มีความสมดุลระหว่างอุณหภูมิและในมิติของอุตสาหกรรมการอบแห้ง เครื่องอบที่ออกแบบให้มีการไหลสวนทางระหว่างอากาศกับวัตถุดิบได้รับการยอมรับว่าเป็นทางเลือกที่เหมาะสม เนื่องจากช่วยให้กระบวนการลดความชื้นดำเนินไปอย่างรวดเร็ว ขณะเดียวกันยังมีข้อได้เปรียบด้านการใช้พื้นที่ที่ประหยัดกว่าเครื่องอบแบบอื่น (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2554)

#### ง. เครื่องอบแห้งแบบผสม (Mixed flow)

นอกเหนือจากเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชที่จำแนกตามลักษณะการไหลของอากาศแล้วยังมีการพัฒนารูปแบบที่เรียกว่า เครื่องอบแห้งแบบผสม (Mixed flow dryer) ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อตอบสนองต่อการแก้ปัญหาข้อจำกัดของระบบอบแห้งทั่วไปที่มักประสบปัญหาการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไม่เท่ากันและความชื้นในเมล็ดพืชขณะอบแห้ง เครื่องอบแห้งชนิดนี้มีลักษณะการทำงานโดยให้อากาศร้อนเคลื่อนผ่านมวลเมล็ดพืชในทิศทางผสมผสาน ทั้งแบบไหลขวางและไหลตามหรือต้านกระแสอากาศ ทำให้การแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนและการสูญเสียน้ำออกจากวัสดุเป็นไปอย่างทั่วถึงมากกว่าเครื่องอบแห้งชนิดเดียว รูปแบบดังกล่าวช่วยลดความแตกต่างของอุณหภูมิและความชื้นระหว่างเมล็ดพืชที่อยู่ในตำแหน่งต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้ง อีกทั้งยังช่วยป้องกันไม่ให้เมล็ดพืชส่วนหนึ่งถูกทำให้แห้งเร็วเกินไป ในขณะที่อีกส่วนยังคงมีความชื้นสูง นอกจากนี้ เครื่องอบแห้งแบบผสมยังถูกนำไปเป็นพื้นฐานสำคัญที่สามารถประยุกต์ใช้ในการศึกษาวิจัยและนวัตกรรมทางวิศวกรรมการเกษตร เช่น Louisiana State University (LSU dryer) ซึ่งเป็นตัวอย่างสำคัญของการนำหลักการผสมผสานนี้ไปใช้จริง โดยจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีแนวโน้มในการปรับปรุงความสม่ำเสมอได้มากขึ้นของคุณภาพเมล็ดพืชหลังการอบแห้ง และช่วยลดความเสียหายเชิงโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2554)



รูปที่ 2.8 ผังแสดงโครงสร้างภายในเครื่องอบแห้งที่มีการไหลแบบผสม

ที่มา : (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ, 2540)

นอกจากเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชชนิด Moving-bed dryer ที่ได้กล่าวถึงแล้ว ยังมีเครื่องอบแห้งรูปแบบอื่นที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในระดับอุตสาหกรรม เช่น เครื่องอบแห้งแบบ Fluidized-bed ซึ่งอาศัยกลไกการไหลของอากาศความเร็วสูงเพื่อยกเมล็ดพืชให้ลอยตัว ส่งเสริมให้กระบวนการถ่ายเทความร้อนและการกำจัดความชื้นเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังมีเครื่องอบแห้งแบบกระบอกหมุน (Rotating Drum Dryer) ที่ใช้ถังหมุนขนาดใหญ่ในการคลุกเคล้าเมล็ดพืชให้เมื่อวัตถุดิบได้รับการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนอย่างทั่วถึง จะก่อให้เกิดการลดความชื้นที่มีความรวดเร็วและมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ด้วยข้อเด่นที่มีอยู่ เครื่องอบแห้งทั้งสองรูปแบบจึงถูกมองว่าเป็นตัวเลือกที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเหมาะสมในกระบวนการแปรรูปเมล็ดพืชหลากหลายชนิดในเชิงอุตสาหกรรม

### 2.1.8 ความชื้นในวัสดุ

ความชื้นในวัสดุ หมายถึง ปริมาณน้ำที่ยังคงหลงเหลืออยู่ภายในวัตถุดิบหรือเมล็ดพืช เมื่อเปรียบเทียบกับมวลแห้งของวัตถุดิบนั้น ๆ การกำหนดระดับความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งในการวิเคราะห์คุณภาพและความเหมาะสมต่อการเก็บรักษาหรือกระบวนการแปรรูป (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2566) ทั้งนี้ การแสดงค่าความชื้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบหลัก ดังนี้

**2.1.8.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis, % w.b.)** คือ อัตราส่วนมวลของน้ำในวัสดุต่อมวลวัสดุชื้น สามารถหาค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ดังสมการ (2.1) (Brooker, Bakker-Arkema, & Hall, 1992)

$$M_w = \frac{W - W_d}{W} \times 100 \quad (2.1)$$

เมื่อ  $M_w$  คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)

$W$  คือ มวลของวัสดุชื้น, (kg)

$W_d$  คือ มวลของวัสดุแห้ง, (kg)

**2.1.8.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis, % d.b.)** คือ เป็นการคำนวณในลักษณะอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเปรียบเทียบกับมวลรวมของวัสดุที่ยังชื้นอยู่ โดยผลลัพธ์สามารถนำมาแสดงในรูปเปอร์เซ็นต์ ซึ่งวิธีนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถอธิบายปริมาณน้ำในวัตถุได้อย่างชัดเจนและสื่อสารได้ง่าย ดังสมการ (2.2) (Brooker, Bakker-Arkema, & Hall, 1992)

$$M_d = \frac{W - W_d}{W_d} \times 100 \quad (2.2)$$

เมื่อ  $M_d$  คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (% d.b.)

$W$  คือ มวลของวัสดุชื้น, (kg)

$W_d$  คือ มวลของวัสดุแห้ง, (kg)

**2.1.8.3 การแปลงความชื้นมาตรฐานเปียกไปเป็นมาตรฐานแห้ง**

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

**2.1.8.4 การแปลงความชื้นมาตรฐานแห้งไปเป็นมาตรฐานเปียก**

$$M_w = \frac{M_d}{1 + M_d} \quad (2.4)$$

**2.1.9 ความชื้นสัมพัทธ์**

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างปริมาณไอน้ำที่มีอยู่จริงในบรรยากาศกับปริมาณไอน้ำสูงสุดที่อากาศสามารถกักเก็บไว้ได้ ณ อุณหภูมิหนึ่ง ๆ

โดยทั่วไป RH จะแสดงเป็นร้อยละ ซึ่งบ่งบอกระดับความอึดตัวของอากาศ หากค่า RH เท่ากับ 100 % หมายความว่าอากาศอยู่ในสภาวะอึดตัว ไม่สามารถกักเก็บไอน้ำเพิ่มได้อีก (Rotronic Technical Note, n.d.; OpenStax, 2022; ScienceDirect Topics, n.d.) แสดงดังสมการ (2.5)

$$RH = \frac{m_v}{m_g} \quad (2.5)$$

เมื่อ	RH	คือ	ความชื้นสัมพัทธ์, ( $kg_v/kg_g$ )
	$m_v$	คือ	มวลไอน้ำในอากาศที่อุณหภูมิอากาศ, T, $kg_v$
	$m_g$	คือ	มวลไอน้ำในอากาศอึดตัวที่อุณหภูมิอากาศ T เดียวกัน, $kg_g$

### 2.1.10 วิธีการหาความชื้นในเมล็ดพืช

การวัดค่าความชื้นในเมล็ดพืชถือเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากความชื้นที่คงอยู่ภายในเมล็ดสัมพันธ์โดยตรงกับคุณภาพ การเก็บรักษา และอายุการใช้งานของผลผลิตทางการเกษตร หากมีความชื้นสูงเกินไปจะก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพและปัญหาการเก็บรักษาได้ง่าย ดังนั้นจึงมีการกำหนดวิธีการตรวจสอบความชื้นเพื่อใช้ควบคุมคุณภาพวัตถุดิบ โดยวิธีการวัดสามารถแบ่งออกเป็น 2 แนวทางหลัก ได้แก่ วิธีตรง และ วิธีอ้อม

#### 2.1.10.1 วิธีตรง

การวัดความชื้นด้วยวิธีตรงสามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น การใช้ตู้อบลมร้อนเพื่อลดปริมาณน้ำออกจากเมล็ดพืช หรือการใช้วิธีการกลั่นเพื่อแยกน้ำออกจากตัวอย่าง วิธีเหล่านี้แม้จะให้ค่าที่ถูกต้องและเชื่อถือได้สูง แต่ต้องอาศัยเวลาในการดำเนินการค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอ้อม

##### ก. การใช้ตู้อบในการหาความชื้นของเมล็ดพืช

การหาความชื้นของเมล็ดพืชด้วยการใช้ตู้อบเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและแม่นยำ โดยขั้นตอนหลัก ๆ มีดังนี้ นำเมล็ดพืชที่จะทดสอบชั่งน้ำหนักก่อนนำเข้าตู้อบและใส่เมล็ดพืชลงในตู้อบที่ตั้งอุณหภูมิไว้ที่  $105 \pm 2$  °C และอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นการชั่งน้ำหนักหลังอบเมื่อครบเวลา 24 ชั่วโมง นำเมล็ดพืชออกจากตู้อบและปล่อยให้เย็นลง แล้วชั่งน้ำหนักอีกครั้ง น้ำหนักที่หายไปหลังจากการอบสามารถใช้ในการคำนวณค่าความชื้นของเมล็ดพืชได้ (AOAC., 2000) โดยสูตรคำนวณค่าจากสมการ (2.9) การใช้ตู้อบเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการหาค่าความชื้นของเมล็ดพืช เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและเชื่อถือได้ ทั้งยังเป็นการประเมินความชื้นที่สำคัญในการจัดเก็บและแปรรูปเมล็ดพืชอีกด้วย

$$M_w = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \quad (2.6)$$

เมื่อ	$M_w$	คือ	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
	$W_i$	คือ	น้ำหนักเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือก (g)
	$W_f$	คือ	น้ำหนักสุดท้ายของเมล็ดข้าวเปลือกหลังการอบด้วยตู้อบลมร้อน (g)

#### ข. การใช้วิธีการในการหาความชื้นของเมล็ดพืช

การกลั่นด้วยวิธีใช้อีทานอลเป็นอีกหนึ่งเทคนิคที่ใช้ตรวจหาปริมาณความชื้นในเมล็ดพืช โดยหลักการคือ นำตัวอย่างอาหารใส่ลงในภาชนะที่บรรจุน้ำมัน จากนั้นให้ความร้อนเพื่อให้น้ำที่มีอยู่ในตัวอย่างระเหยออกมา เนื่องจากน้ำมีจุดเดือดต่ำกว่าน้ำมัน ไอน้ำที่ระเหยจะถูกพาเข้าสู่เครื่องควบแน่น ทำให้ควบแน่นเป็นหยดน้ำและถูกรวบรวมอยู่ในหลอดรับซึ่งเชื่อมต่อกับภาชนะกลั่น ปริมาณน้ำที่สะสมในหลอดรับสะท้อนถึงปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในเมล็ดพืชหรือวัตถุดิบทดสอบนั้น ๆ (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ์, 2540)

#### 2.1.10.2 วิธีอ้อม

การวัดความชื้นทางอ้อมของวัสดุสามารถประยุกต์ใช้วิธีการได้หลายแบบอาศัยคุณสมบัติทางฟิสิกส์บางประการที่สัมพันธ์กับปริมาณน้ำ เช่น ความต้านทานไฟฟ้า (Resistance) การเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) ของวัสดุ วิธีนี้ไม่จำเป็นต้องทำลายตัวอย่างและคุณสมบัติที่สามารถนำกลับมาใช้งานได้ซ้ำหลายรอบ โดยยังคงประสิทธิภาพเดิม มีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในงานที่เน้นการตรวจสอบค่าความชื้นอย่างเร่งด่วน โดยเฉพาะในสถานะที่ต้องการผลลัพธ์ทันทีอย่างไรก็ตาม ผลการวัดอาจแปรผันตามชนิดพันธุ์พืช ระดับการเจริญเติบโต อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อมการเก็บรักษา การสอบเทียบเครื่องมือจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ์, 2540)

#### 2.1.11 การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง

การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งสามารถทำได้โดยพิจารณาจากสองปัจจัยหลัก ได้แก่ ประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานความร้อน และ ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบการอบแห้ง (จิตรรัตน์ จอกแก้ว, 2559)

##### 2.1.11.1 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง

เป็นการวัดระดับความสามารถในการนำพลังงานความร้อนที่ได้รับมาไปใช้ในการถ่ายเทออกจากแหล่งความร้อนสู่ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการลดความชื้น ซึ่งถือเป็นการสะท้อนว่า

พลังงานที่ใช้ไปมีสัดส่วนเท่าใดที่เกิดประโยชน์จริงในกระบวนการอบแห้ง โดยทั่วไปจะอ้างอิงตามสมการความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ถูกใช้และพลังงานที่สูญเสียไป (ตามสมการที่ 2.7 และ 2.8) (Brooker, Bakker-Arkema, & Hall, 1992)

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

หรือ

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

เมื่อ	$\eta$	คือ	ประสิทธิภาพการอบแห้ง (%)
	$\eta'_{\text{dry}}$	คือ	ประสิทธิภาพรวมการอบแห้งเมื่อรวมความร้อนสัมผัส (%)
	$Q_{\text{evap}}$	คือ	ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ (kJ)
	$Q_s$	คือ	ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ (kJ)
	$Q_a$	คือ	ปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ (kJ)

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

$$\text{SEC} = \frac{3.6E}{W_i - W_f} \quad (2.9)$$

เมื่อ	SEC	คือ	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg <sub>water</sub> )
	E	คือ	พลังงานรวมทั้งหมดที่ใช้ในระบบอบแห้ง (kWh)
	$W_i$	คือ	น้ำหนักวัสดุก่อนอบแห้ง (kg)
	$W_f$	คือ	น้ำหนักวัสดุหลังอบแห้ง (kg)

### 2.1.11.2 สมรรถนะของระบบอบแห้ง

พิจารณาสมรรถนะในการอบแห้งประเมินจาก อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) หมายถึง ค่าที่ได้จากการนำปริมาณน้ำที่ถูกระเหยออกจากวัสดุมาเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการอบแห้ง หรืออาจคำนวณจากปริมาณความชื้นที่ลดลงต่อหน่วยเวลา ดังสมการที่ 2.10 และ 2.11

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

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

เมื่อ	DR	คือ	อัตราการอบแห้ง (kg/h หรือ % d.b./h)
	$W_i$	คือ	น้ำหนักวัสดุก่อนอบแห้ง (kg)
	$W_f$	คือ	น้ำหนักวัสดุหลังอบแห้ง (kg)
	$M_i$	คือ	ความชื้นวัสดุก่อนอบแห้ง (% d.b.)
	$M_f$	คือ	ความชื้นวัสดุหลังอบแห้ง (% d.b.)
	t	คือ	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

### 2.1.12 การตรวจสอบคุณภาพของการขัดสี

ในการสีข้าวเชิงอุตสาหกรรม หนึ่งในตัวชี้วัดคุณภาพที่สำคัญคือสัดส่วนของข้าวเต็มเมล็ดหรือ Head rice ซึ่งสะท้อนถึงมูลค่าทางการตลาดที่สูงกว่าข้าวหัก การสูญเสียเมล็ดในกระบวนการสีเกิดจากหลายปัจจัย เช่น ระดับความชื้นของเมล็ดก่อนเข้าสี และความแข็งแรงของโครงสร้างเมล็ด ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อผลผลิตข้าวเต็มเมล็ดที่ได้ (Head rice yield: HRY)

หลักการวัดผลผลิตจากการสีมักใช้ตัวชี้วัดสองส่วน คือ ปริมาณข้าวเต็มเมล็ด (Whole grain หรือ Head rice) และปริมาณข้าวหัก (Broken rice) โดยทั่วไปการได้เมล็ดเต็มในสัดส่วนที่สูงบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการสีที่ดี และคุณภาพการเก็บรักษาข้าวเปลือกก่อนเข้าสีก็มีบทบาทสำคัญต่อการคงคุณภาพนี้ กระบวนการสีที่มีประสิทธิภาพจะช่วยให้ได้สัดส่วนข้าวเต็มเมล็ดมากที่สุด ขณะที่ปริมาณข้าวหักเป็นตัวสะท้อนถึงการสูญเสียที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ (Rice milling)

หลังจากผ่านการสี ข้าวจะถูกจำแนกออกเป็นชนิดต่าง ๆ เช่น ข้าวกล้อง ข้าวขาว ข้าวเต็มเมล็ด และข้าวหัก โดยใช้เกณฑ์ทั้งด้านน้ำหนักและปริมาณที่ได้มาเปรียบเทียบ เพื่อประเมินคุณภาพการสีอย่างเป็นระบบ (ตามหลักการที่แสดงในสมการ 2.12-2.14) (Juliano, 1985)

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

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

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

### 2.1.13 ดัชนีความขาวของข้าว (Whiteness Index, WI)

ดัชนีความขาว (Whiteness Index, WI) เป็นคุณลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของเมล็ดข้าวสาร ซึ่งสะท้อนถึงระดับความสว่าง ความสะอาด และความน่ารับประทานของเมล็ด โดยทั่วไปข้าวสารที่มีค่าดัชนีความขาวสูงมักได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคและมีราคาจำหน่ายสูงกว่า เนื่องจากแสดงถึงการขัดสีที่มีประสิทธิภาพและการปนเปื้อนของชั้นรำข้าวที่น้อย (Paul et al., 2019) อย่างไรก็ตาม การขัดที่มากเกินไปแม้จะช่วยเพิ่มค่าความขาว แต่กลับส่งผลให้สูญเสียสารอาหารในชั้นรำข้าว เช่น วิตามิน แร่ธาตุ และสารต้านอนุมูลอิสระ (Pan et al., 2007)

การวัดค่าดัชนีความขาวของข้าวสามารถทำได้โดยใช้เครื่องวัดความขาว (*Whiteness Meter*) หรือ *Spectrophotometer* ซึ่งมีหลักการคือการวัดการสะท้อนแสงของเมล็ดข้าวภายใต้สภาวะแสงมาตรฐาน แล้วนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับแผ่นมาตรฐานสีขาว เช่น แบเรียมซัลเฟต ( $\text{BaSO}_4$ ) หรือแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) จากนั้นแสดงผลในรูปตัวเลขที่เรียกว่าดัชนีความขาว (Goto et al., 2014)

สมการเชิงดัชนีความขาวของ CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) เมื่อใช้ระบบพิกัดสี CIE Lab ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) สามารถคำนวณค่า WI ได้ตามสมการ (AATCC, 2011)

$$WI = 100 - \sqrt{(100-L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (2.15)$$

โดยที่

$L^*$  = ค่าความสว่าง (0 = ดำ, 100 = ขาว)

$a^*$  = พิกัดสีในแกนเขียว-แดง (ค่าลบ = เขียว, ค่าบวก = แดง)

$b^*$  = พิกัดสีในแกนฟ้า-เหลือง (ค่าลบ = ฟ้า, ค่าบวก = เหลือง)

สมการนี้สะท้อนระดับ “ความขาวเชิงการรับรู้” (perceived whiteness) ของเมล็ดข้าวซึ่งสัมพันธ์อย่างมากกับการประเมินทางประสาทสัมผัส (Goto et al., 2014)

ปัจจัยที่มีผลต่อดัชนีความขาวของข้าว

- พันธุ์ข้าว: พันธุ์ที่มีองค์ประกอบแป้งและโครงสร้างชั้นรำต่างกันทำให้ค่าความขาวแตกต่างกัน

- ระดับการขัดข้าว (Degree of Milling; DoM): การขัดมากขึ้นจะเพิ่มค่า WI แต่ทำให้สูญเสียสารอาหาร (Paul et al., 2019)

- การอบแห้งและการเก็บรักษา: การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงหรือการเก็บรักษาในสภาพที่ไม่เหมาะสมทำให้เมล็ดเกิดการเหี่ยวและทำให้ค่าความขาวลดลง (ScienceDirect, 2023)

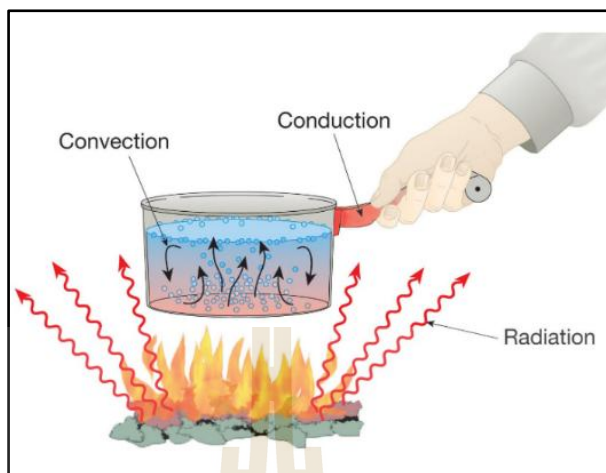
- สิ่งเจือปน: เมล็ดทองไข่ เมล็ดแดง และสิ่งปนเปื้อนอื่น ๆ ทำให้ค่าความขาวเฉลี่ยลดลง

ดังนั้น ดัชนีความขาวของข้าวจึงเป็นตัวชี้วัดสำคัญที่ใช้ประเมินคุณภาพของข้าวทั้งในเชิงวิชาการและอุตสาหกรรม อีกทั้งยังมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการยอมรับของตลาดและมูลค่าทางเศรษฐกิจของผลผลิต

#### 2.1.14 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อน หมายถึงกระบวนการที่พลังงานความร้อนเคลื่อนย้ายจากพื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังพื้นที่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวัตถุสองชนิดหรือระหว่างชั้นของสารที่สัมผัสกัน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและนำไปสู่การสร้างสมดุลความร้อนภายในระบบ กลไกการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายลักษณะ ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของตัวกลางที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การนำความร้อน (Conduction) ซึ่งเกิดจากการถ่ายโอนพลังงานความร้อนผ่านการชนของอนุภาคหรืออิเล็กตรอนในของแข็ง การพาความร้อน (Convection) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของของไหล เช่น อากาศหรือของเหลว ที่พบความไม่สม่ำเสมอในการกระจายอุณหภูมิและการแผ่รังสีความร้อน (Thermal Radiation) ซึ่งเป็นการส่งผ่านพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวกลาง

กลไกเหล่านี้ล้วนมีบทบาทสำคัญต่อการถ่ายโอนพลังงานความร้อนในกระบวนการอบแห้งและการถนอมผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งการเข้าใจหลักการถ่ายเทความร้อนแต่ละประเภทมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์การใช้งาน



รูปที่ 2.9 การถ่ายเทพลังงานความร้อน

ที่มา : (SIMSCALE, 2023)

#### 2.1.14.1 การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อน (Conduction) เป็นกลไกการถ่ายเทพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสองตำแหน่งภายในตัวกลางแข็งหรือก๊าซที่ไม่เคลื่อนที่ โดยพลังงานจะถูกส่งผ่านไปยังโมเลกุลที่อยู่ติดกันภายในวัสดุผ่านการสั่นสะเทือนและการถ่ายโอนพลังงานเชิงจลน์ของอนุภาค แม้ไม่มีการเคลื่อนที่เชิงมวลเหมือนการพาความร้อน แต่การนำความร้อนก็ยังคงทำให้เกิดการกระจายความร้อนภายในวัตถุได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในกรณีที่อุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำจะเกิดขึ้นจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยมี ตัวแปรสำคัญคือความชันของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) และคุณสมบัติการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของวัสดุนั้น ๆ ซึ่งสามารถอธิบายเชิงปริมาณได้โดยกฎของฟูเรียร์ (Fourier's Law of Heat Conduction) ที่แสดงให้เห็นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราการถ่ายโอนความร้อนกับความชันของอุณหภูมิ ดังสมการที่ (2.16) (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ์, 2540)

$$q = -kA \cdot \left( \frac{dT}{dx} \right) \quad (2.16)$$

เมื่อ	$q$	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)
	$k$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ ( $W/m \cdot ^\circ C$ )
	$A$	คือ	พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนไหลผ่าน ( $m^2$ )
	$\frac{dT}{dx}$	คือ	ความชันของอุณหภูมิในเนื้อวัตถุ $^\circ C/m$

### 2.1.14.2 การพาความร้อน (Convection)

การพาความร้อนเป็นกลไกการถ่ายเทพลังงานความร้อนที่อาศัยการเคลื่อนที่ของของไหล โดยสามารถแบ่งได้เป็นสองลักษณะหลัก ได้แก่

#### 1. การพาความร้อนแบบอิสระ (Free Convection)

เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิในระบบ ทำให้ความหนาแน่นของของไหลแตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ตามแรงลอยตัวโดยไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์ภายนอก ตัวอย่างเช่น การลอยตัวของอากาศร้อนขึ้นด้านบนขณะการอบแห้งเมล็ดพืช

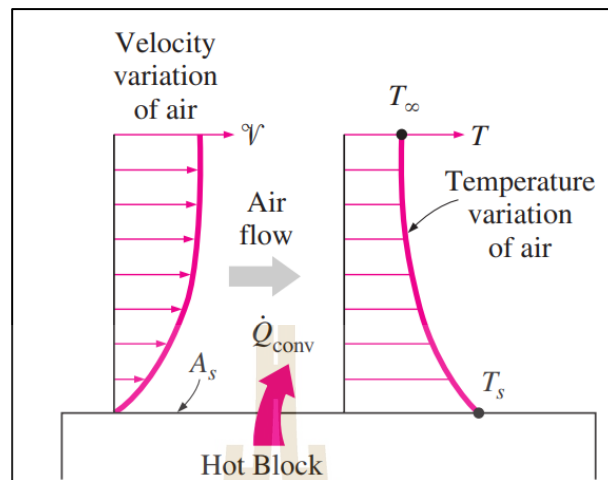
#### 2. การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection)

เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการใช้พลังงานภายนอก เช่น พัดลมหรือปั๊ม เพื่อเร่งการไหลเวียนของของไหล ส่งผลให้การกระจายความร้อนมีความรวดเร็วและสม่ำเสมอมากขึ้น จึงมักถูกประยุกต์ใช้ในระบบอบแห้งเชิงอุตสาหกรรมที่ต้องการควบคุมประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนในของไหลเกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลโมเลกุล ซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกับบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยความเร็วของการไหล ความหนาแน่น และคุณสมบัติทางกายภาพของของไหล เช่น ความหนืด และค่าการนำความร้อน ล้วนเป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการพาความร้อน ในเชิงทฤษฎี การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาจะสามารถอธิบายได้จากสมการของนิวตัน (Newton's Law of Cooling) ซึ่งระบุว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นสัดส่วนตรงกับผลต่างอุณหภูมิระหว่างผิวของวัตถุกับของไหลรอบข้าง สมการพื้นฐานสามารถเขียนได้ดังสมการ (2.17) (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ์, 2540)

$$q = h'A(T_s - T_\infty) \quad (2.17)$$

เมื่อ	$q$	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากวัตถุแข็ง (W)
	$h'$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
	$A$	คือ	พื้นที่สัมผัสระหว่างเมล็ดของแข็ง (ข้าวเปลือก) และของไหล ( $m^2$ )
	$T_s$	คือ	อุณหภูมิที่ผิวของเมล็ดของแข็ง ( $^\circ C$ )
	$T_\infty$	คือ	อุณหภูมิของกระแสของไหล ( $^\circ C$ )



รูปที่ 2.10 การถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวที่ร้อนสู่อากาศโดยการพาความร้อน

ที่มา : (Cengel, Y. A., 2003)

### 2.1.14.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) คือการส่งผ่านพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอน (Photons) จากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูง โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเท เมื่อวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงปล่อยพลังงานออกมา พลังงานดังกล่าวจะถูกแผ่กระจายออกสู่อากาศหรือสู่วัตถุอื่นโดยตรง พลังงานรังสีนี้สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในสถานะสุญญากาศและในบรรยากาศทั่วไป อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพสูงในการถ่ายเทความร้อน อัตราการถ่ายโอนพลังงานความร้อนด้วยการแผ่รังสีจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิยกกำลังสี่ของวัตถุที่เป็นแหล่งกำเนิด ตามกฎของ Stefan-Boltzmann ซึ่งสามารถเขียนอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.18)

$$q = \epsilon \sigma A \cdot (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (2.18)$$

เมื่อ	$q$	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนของวัตถุปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (W)
	$\epsilon$	คือ	สภาพเปล่งรังสี (Emissivity) มีค่าในช่วง $(0 \leq \epsilon \leq 1)$
	$\sigma$	คือ	Stefan-Boltzmann Constant = $5.67 \times 10^{-8}$ (W/m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> )
	$A$	คือ	พื้นที่ผิวของวัตถุที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (m <sup>2</sup> )
	$T_s^4$	คือ	อุณหภูมิของวัตถุที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (K)
	$T_\infty^4$	คือ	อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (K)

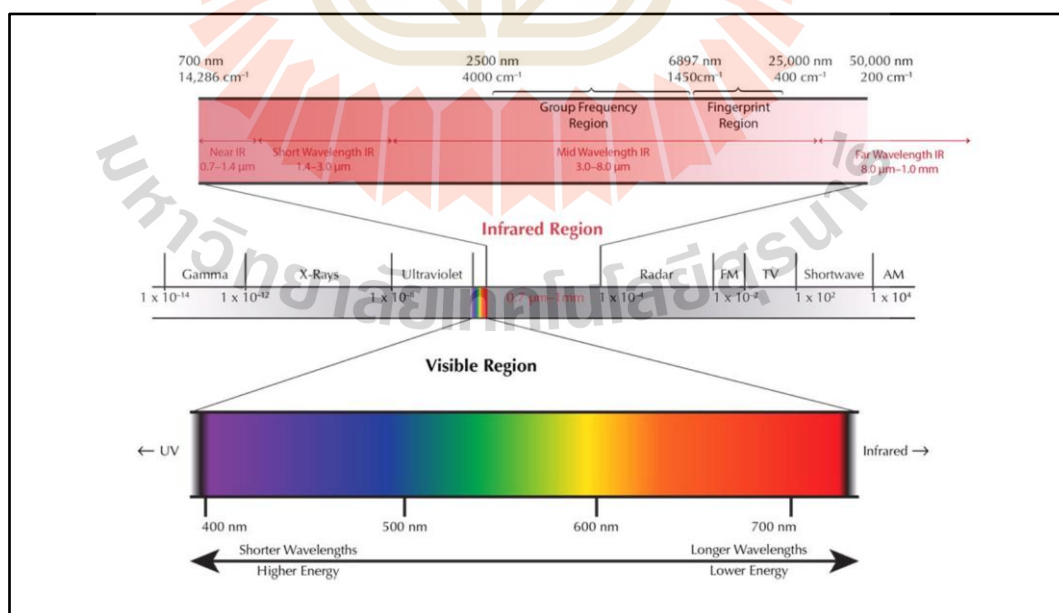
### 2.1.15 รังสีอินฟราเรด (Infrared : IR)

อินฟราเรด (Infrared; IR) เป็นช่วงของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นยาวกว่าช่วงแสงที่ตามนุษย์มองเห็น แต่สั้นกว่าคลื่นไมโครเวฟ โดยครอบคลุมช่วงประมาณ 0.75 ถึง 1000 ไมโครเมตร พลังงานจากอินฟราเรดเมื่อถูกดูดกลืนโดยวัสดุ จะทำให้โมเลกุลน้ำและสารอินทรีย์เกิดการสั่นสะเทือน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปเป็นความร้อนโดยตรง ฮีตเตอร์อินฟราเรดเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานความร้อนให้กลายเป็นรังสีอินฟราเรด ซึ่งสามารถถ่ายโอนพลังงานสู่ชิ้นงานได้โดยตรงโดยไม่จำเป็นต้องอาศัยอากาศหรือตัวกลางนำความร้อน การแผ่รังสีดังกล่าวมีลักษณะเป็นการถ่ายเทพลังงานในรูปคลื่น จึงมีความรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีการถ่ายเทความร้อนแบบการนำและการพาในหลายกรณี นอกจากนี้ฮีตเตอร์อินฟราเรดยังมีข้อได้เปรียบคือสามารถควบคุมการให้ความร้อนได้อย่างแม่นยำ ปรับระดับพลังงานได้หลากหลาย และให้ความร้อนที่สม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นที่

คุณสมบัติของรังสีอินฟราเรด

รังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีช่วงความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 0.75 ถึง 1000 ไมโครเมตร โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ย่าน (Metaxas & Meredith, 1983) ได้แก่

- 1) อินฟราเรดใกล้ (Near-IR) ความยาวคลื่น 0.75–3 $\mu\text{m}$
- 2) อินฟราเรดกลาง (Mid-IR) ความยาวคลื่น 3–6  $\mu\text{m}$
- 3) อินฟราเรดไกล (Far-IR) ความยาวคลื่น 6–1000  $\mu\text{m}$



รูปที่ 2.11 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของรังสีอินฟราเรด

ที่มา : (www.thailandindustry.com)

### ฮีตเตอร์อินฟราเรดที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก

การนำฮีตเตอร์อินฟราเรดมาใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือกถือเป็นแนวทางที่ได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและความชื้นได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อรังสีอินฟราเรดตกกระทบเมล็ดข้าวเปลือก พลังงานจะถูกดูดซับเข้าสู่ชั้นผิวและบางส่วนทะลุเข้าสู่เนื้อใน ทำให้โมเลกุลน้ำภายในเมล็ดเกิดการกระตุ้นและระเหยออกมา การทำงานในลักษณะนี้ทำให้เกิดการกระจายความร้อนได้สม่ำเสมอ ลดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเปลือกและแกนกลางของเมล็ด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการป้องกันการแตกข้าวและช่วยรักษาคุณภาพของเมล็ดหลังการอบแห้ง

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการอบแห้งด้วยอินฟราเรด

- 1) ความยาวคลื่นของรังสี – เลือกย่านที่สอดคล้องกับการดูดกลืนของน้ำ
- 2) กำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิของฮีตเตอร์ – มีผลโดยตรงต่ออัตราการแผ่รังสี
- 3) ระยะห่างระหว่างฮีตเตอร์และวัสดุ – ระยะที่เหมาะสมจะช่วยให้การ

ถ่ายเทพลังงานมีประสิทธิภาพ

- 4) การไหลเวียนของอากาศ – มีส่วนช่วยพาความชื้นออก ลดการสะสมบน

ผิวเมล็ด

- 5) คุณสมบัติเมล็ดข้าว – เช่น ขนาด ความหนาแน่น และความชื้นเริ่มต้น

(Mongpraneet et al., 2002; Sharma et al., 2014)

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ณัฐพล แซ่ลิ้ม (2560) ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่อง โดยประยุกต์ใช้ เทคโนโลยีการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดในแนวนอน เครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น ประกอบด้วยห้องอบทรงกระบอกสองชั้น สูง 1 เมตร โดยทรงกระบอกด้านในมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 26.5 เซนติเมตร และชั้นนอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 29.5 เซนติเมตร ผลิตจากเหล็กตะแกรงเจาะรูขนาด 1.75 มิลลิเมตร บริเวณกึ่งกลางติดตั้งฮีตเตอร์อินฟราเรดขนาด 1,200 วัตต์ พร้อมระบบควบคุมการไหลของข้าวเปลือกและการระบายอากาศด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์ จากนั้นจึงประเมินสมรรถนะของเครื่องอบโดยพิจารณาจาก อัตราการลดความชื้น ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และคุณภาพของเมล็ดข้าว โดยใช้วิธีเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความขาวของเมล็ดข้าวเปลือก 15 กิโลกรัมที่มีความชื้นเริ่มต้น 23–26 % ผลการทดลองที่ใช้อัตราการไหลของอากาศ 1.075 และ 2.150 ลูกบาศก์เมตร/นาที่ และอัตราการไหลของข้าวเปลือก 0.837, 1.228, 1.875 และ 2.308

กิโลกรัม/นาที่ พบว่า เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดคือ อัตราการไหลของอากาศ 1.075 ลูกบาศก์เมตร/นาที่ ร่วมกับอัตราการไหลของข้าว 1.875 กิโลกรัม/นาที่ ซึ่งให้ประสิทธิภาพการอบที่ดีที่สุด โดยให้ค่าอัตราการอบแห้ง 1.1397 กิโลกรัม/น้ำ/ชั่วโมง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 3.7920 เมกะจูล/กิโลกรัม น้ำ ได้ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน 39.09 % และค่าดัชนีความขาวเท่ากับ 38.03

ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา (2557) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นที่มีลักษณะพิเศษ โดยปรับท่อพ่นให้เป็นช่องอแบบสลับฟันปลา เพื่อช่วยห้วงเวลาการไหลของเมล็ดข้าวให้อยู่นานขึ้นและเพิ่มการคลุกเคล้าในขณะทำการอบ อุปกรณ์ทดลองมีความสูง 3 เมตร และท่อเอียงทำมุม 45 องศาในแนวซ้าย-ขวา เพื่อให้ลมร้อนสามารถกระจายและซึมผ่านเมล็ดข้าวเปลือกได้อย่างทั่วถึง ข้าวจะถูกพ่นเข้าสู่ท่ออบและผ่านเข้าสู่ถังพัก ก่อนถูกดูดออกไปยังท่ออบอีกรอบในรอบถัดไป โดยทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการอบแห้งตามตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วลม และจำนวนช่องอในท่ออบแห้ง เพื่อศึกษาผลต่ออัตราการอบแห้ง คุณภาพเมล็ด และการใช้พลังงาน ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า การใช้ท่อช่องอแบบสลับฟันปลาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งได้อย่างชัดเจน ทั้งในด้านการลดระยะเวลาในการทำให้ความชื้นลดลง และการเพิ่มอัตราการระเหยน้ำ ส่งผลให้ได้ปริมาณข้าวตันที่สูงขึ้น อีกทั้งยังช่วยประหยัดพลังงาน สรุปได้ว่าการทำงานที่เหมาะสมที่สุดคือ การอบที่อุณหภูมิ 120 °C ความเร็วลม 14 m/s โดยใช้อุปกรณ์ข้อพับ 16 ขยัก ซึ่งให้ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดที่ 4.74 MJ/kg น้ำระเหย

บุญชริกา ศิลา (2565) ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมผสมรังสีอินฟราเรด เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานจริง จุดประสงค์หลักเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดการสิ้นเปลืองพลังงานในกระบวนการอบ โดยออกแบบให้มีหลอดอินฟราเรดติดตั้งภายในห้องอบในตำแหน่งกึ่งกลาง ทำหน้าที่เป็นแหล่งความร้อนเสริมเพิ่มเติมจากการใช้ลมร้อนที่เป่าเข้าสู่ห้องอบแห้ง ข้าวเปลือกในถังเก็บจะถูกลำเลียงไปยังห้องอบพร้อมกับลมร้อนและสัมผัสความร้อนที่แผ่ออกมาจากรังสีอินฟราเรด ส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น งานวิจัยนี้ทำการทดสอบในเงื่อนไขการอบแห้ง 5 รูปแบบ ได้แก่ 1. การอบด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 60 °C 2. การใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C ร่วมกับอินฟราเรด 50 W, 3. การใช้เฉพาะอินฟราเรด 850 W, 4. การใช้รังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 80 °C และ 5. การใช้ลมร้อน 60 °C ร่วมกับอินฟราเรด 850 W. ผลการทดลองโดยกำหนดความเร็วลม 6 m/s และอัตราป้อนข้าวเปลือก 8.4 kg/min พบว่า การใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนสามารถช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งและลดเวลาที่ใช้ลงได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยในแง่ของการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) พบว่า การอบด้วยลมร้อนที่ 80 °C ให้ค่า SEC ต่ำสุด 13.236 MJ/kg<sub>water</sub> ส่วนในด้านคุณภาพเมล็ดข้าวเปลือก พบว่า การอบด้วยรังสีอินฟราเรด 850 W ให้ผลผลิตข้าวเต็มเมล็ด (HRY) และค่าดัชนีความขาว (WI) สูงที่สุด

ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา (2565) ได้ทำการศึกษาถึงความสามารถขั้นต้นในการลดความชื้นของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นในท่อพ่นปลา เครื่องอบแห้งต้นแบบนี้ใช้แนวคิดใหม่ที่สามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็วโดยการบังคับให้ข้าวเปลือกไหลในท่ออบแห้งแบบเป็นช่องสลับไปมา เทคนิคนี้ช่วยห้วงเวลาการเป่าพ่นให้ยาวนานขึ้นกว่าปกติและ ยังทำให้เกิดการคลุกเคล้าระหว่างเมล็ดพืชกับอากาศร้อนที่มากขึ้น ซึ่งจะเกิดการอบแห้งที่รวดเร็วและใช้พลังงานความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการทำงานขั้นต้นด้วยการอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 น้ำหนัก 4 kg ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 100 และ 120° C ความเร็วลมในการอบแห้ง 16 m·s<sup>-1</sup> อบแห้งในท่ออบแห้งที่ทำจากช่องอมุม 90 องศา แบบ 8 ช่อง และแบบ 16 ช่อง ผลการทดสอบพบว่า การอบแห้งในท่อแบบ 16 ช่อง ให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าแบบ 8 ช่อง การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ การอบแห้งในท่อแบบ 16 ช่อง ใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะ (Primary Specific Energy Consumption, SEC<sub>Heater</sub>) ในการอบแห้งต่ำกว่าการอบแห้งในท่อแบบ 8 ช่อง ในขณะที่พลังงานทุติยภูมิจำเพาะ (Secondary Specific Energy Consumption, SEC<sub>Blower</sub>) สำหรับการอบแห้งในท่อแบบ 8 ช่อง มีค่าต่ำกว่าการอบแห้งในท่อแบบ 16 ช่อง การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำให้ค่าพลังงานกระตุ้นที่ทำให้เกิดการระเหยออกจากเมล็ดข้าวเปลือกมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง เช่นเดียวกับการอบแห้งในท่อแบบ 8 ช่อง จะให้ค่าพลังงานกระตุ้นที่มากกว่าการอบแห้งในท่อแบบ 16 ช่อง ค่าพลังงานกระตุ้นของการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 43.78–170.74 kJ·mol<sup>-1</sup>

ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา (2557) ได้ออกแบบและทดสอบเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นที่ปรับโครงสร้างใหม่ โดยเพิ่มตะแกรงภายในท่ออบเพื่อให้ตะแกรงทำหน้าที่ช่วยห้วงการไหลและควบคุมการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวพร้อมกับการไหลของลมร้อนในท่อ ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างข้าวกับกระแสลมร้อน และเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานกับท่ออบแบบเดิมที่ไม่มีตะแกรงจากการทดลองที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 °C ร่วมกับการปรับความเร็วลม พบว่า การใส่ตะแกรงช่วยให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งในแง่ของการลดความชื้นสุดท้ายของเมล็ดข้าวและการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพมากกว่าเครื่องอบแบบปกติ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงดังกล่าวทำให้กระบวนการอบแห้งเร็วขึ้น และยังช่วยลดปริมาณพลังงานสิ้นเปลือง รวมถึงเพิ่มความคุ้มค่าในการใช้งานโดยรวม

ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา (2567) ได้ศึกษาอิทธิพลของท่ออบแห้งที่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลของอากาศภายในท่อซึ่งจะส่งผลต่อการอบแห้งข้าวเปลือก เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกต้นแบบนี้ถูกใช้ในการศึกษาเพื่อทดสอบข้าวเปลือกพันธุ์ กข79 น้ำหนักทดสอบ 5 กิโลกรัม ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 22 - 25 มาตรฐานเปียก อบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และลดความชื้นลงจนมีความชื้นเป็นร้อยละ 14 การทดสอบจะใช้ท่ออบแห้งสองแบบคือ ท่ออบแห้งที่เป็นท่อตรงและท่อ

อบแห้งที่เป็นท่อกระเปาะ ทั้งสองแบบนี้จะมีขนาดความยาวโดยรวมของท่อที่ 2.5 เมตร ความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยที่ 25.3 เมตรต่อวินาที การทดสอบอบแห้ง ข้าวเปลือกด้วยเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นมานี้เพื่อศึกษาผลจากการอบแห้ง พฤติกรรมการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง และค่าพลังงานกระตุ้นที่ทำให้น้ำระเหยออกจากเมล็ดข้าวเปลือก จากผลการทดสอบพบว่า การอบแห้งโดยใช้ท่ออบแห้งที่เป็นท่อแบบกระเปาะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า มีอัตราการอบแห้งสูงกว่า และมีค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแห้งที่สูงกว่า เมื่อเทียบกับการ อบแห้งในการทดสอบที่เป็นท่อตรง

Yuanjie Du et al. (2023) ได้ทำการศึกษา จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดที่ใช้กราฟีนเป็นแหล่งกำเนิดรังสี โดยระบบอบที่ใช้สามารถปรับอุณหภูมิรังสีได้ในช่วง 35–60 °C ระยะห่างของแผ่นกำเนิดรังสี 25–40 มิลลิเมตร อัตราการไหลของข้าวเปลือก 5–9 กิโลกรัม/นาที และความเร็วลมในการไล่ความชื้น 4–8.5 เมตร/วินาที การทดลองได้ประเมินสมรรถนะโดยพิจารณาความเร็วในการลดความชื้น ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และคุณภาพของเมล็ดข้าวเปลือก ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลอง Midilli สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งได้เหมาะสมที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ชื้น (Deff) อยู่ระหว่าง  $4.83\text{--}16.37 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  และค่าพลังงานกระตุ้น 47.44 kJ/mol การเพิ่มอุณหภูมิรังสีและการลดระยะห่างแผ่นรังสีช่วยให้เวลาอบแห้งสั้นลงและเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดถึงร้อยละ 71.11 ที่อุณหภูมิ 60 °C อย่างไรก็ตาม อัตราการไหลของเมล็ดที่มากเกินไปและความเร็วลมสูงเกินไปอาจทำให้ผิวเมล็ดเย็นลง ซึ่งกระทบต่อประสิทธิภาพการคายน้ำและคุณภาพเมล็ดข้าวเปลือก งานวิจัยนี้จึงชี้ให้เห็นว่าเทคโนโลยีอินฟราเรดที่ใช้กราฟีนสามารถช่วยย่นระยะเวลาอบแห้ง ประหยัดพลังงาน และรักษาคุณภาพของเมล็ดได้ หากควบคุมตัวแปรกระบวนการให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้รังสีอินฟราเรดเป็นตัวทำความร้อนและใช้แนวคิดหน่วยการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกให้อยู่ในหอบแห้งนานขึ้น เพื่อประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องที่สร้างขึ้นในด้าน พฤติกรรมการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้นและดัชนีความขาวของข้าว

ซึ่งบทนี้จะอธิบายถึง อุปกรณ์และเครื่องมือการวัดในการทดลอง และขั้นตอนการดำเนินงานต่าง ๆ โดยจะแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

#### 3.1 วัสดุอบแห้งสำหรับการทดลอง

##### 3.1.1 ข้าวเปลือก

การทดสอบนี้ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่เก็บเกี่ยวช่วงเดือนพฤษภาคม พ.ศ.2567 ซึ่งเพาะปลูกใน อ.พิมาย จ.นครราชสีมา แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างเมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่ใช้ในการทดลอง

### 3.1.2 การเตรียมข้าวเปลือก

#### 3.1.2.1 การคัดแยกสิ่งเจือปนและเมล็ดข้าวลีบออกจากข้าวเปลือก

เนื่องจากในกระบวนการเก็บเกี่ยวข้าวจะมีสิ่งเจือปนหรือสิ่งแปลกปลอมอยู่รวมกันกับเมล็ดข้าวเปลือก เช่น ดอกหญ้า ดิน หิน และฟางข้าว รวมไปถึงเมล็ดข้าวลีบด้วย ดังนั้นเพื่อควบคุมตัวอย่างข้าวที่นำมาทดลองให้มีคุณภาพ จำเป็นต้องทำการคัดแยกสิ่งเจือปนต่าง ๆ ออกจากข้าวให้ได้มากที่สุด ก่อนนำมาทำการทดลอง ในการคัดแยกนี้จะใช้เครื่องทำความสะอาดด้วยตะแกรงและการใช้ลม ยี่ห้อ SEEDBORO รุ่น LA-LS ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยมีการทำงานคือ จะมีการสั่นของตะแกรงซึ่งมี 2 ชั้น เพื่อคัดแยกสิ่งเจือปนกับเมล็ดข้าวที่มีขนาดที่แตกต่างกัน เช่น หิน เศษหญ้า เศษฟาง และดิน โดยพัดลม (Blower) จะทำหน้าที่ในการเป่าสิ่งเจือปนออกจากเมล็ดข้าวเปลือก ซึ่งแรงลมน้อยกว่าแรงลอยตัวของข้าวเปลือกจึงทำให้ข้าวเปลือกจะตกลงสู่ถังพักข้าวด้านล่าง



รูปที่ 3.2 เครื่องคัดแยกสิ่งเจือปนและเมล็ดข้าวลีบออกจากข้าวเปลือกตัวอย่าง

ข้าวเปลือกที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นข้าวเก่าที่ผ่านการเก็บเกี่ยวมาแล้วเมื่อปลายปี พ.ศ. 2567 ส่งผลให้ความชื้นที่สะสมอยู่ในเมล็ดข้าวลดลงเนื่องจากการลดความชื้นข้าวเปลือกให้มีค่าที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาได้ และส่วนหนึ่งความชื้นก็มีการลดลงตามเวลาการเก็บรักษา ดังนั้นเพื่อให้ข้าวเปลือกที่นำมาทดลองมีความชื้นเริ่มต้น 23-24 % w.b. ซึ่งเป็นความชื้นที่มีค่าใกล้เคียงกับข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยว ดังนั้นจำเป็นต้องเพิ่มความชื้นก่อนการทดลองทุกครั้ง โดยมีขั้นตอนการเพิ่มความชื้นข้าวดังนี้

### 3.1.2.2 นำข้าวเปลือกที่จะทดลองมาวัดหาความชื้นเริ่มต้น

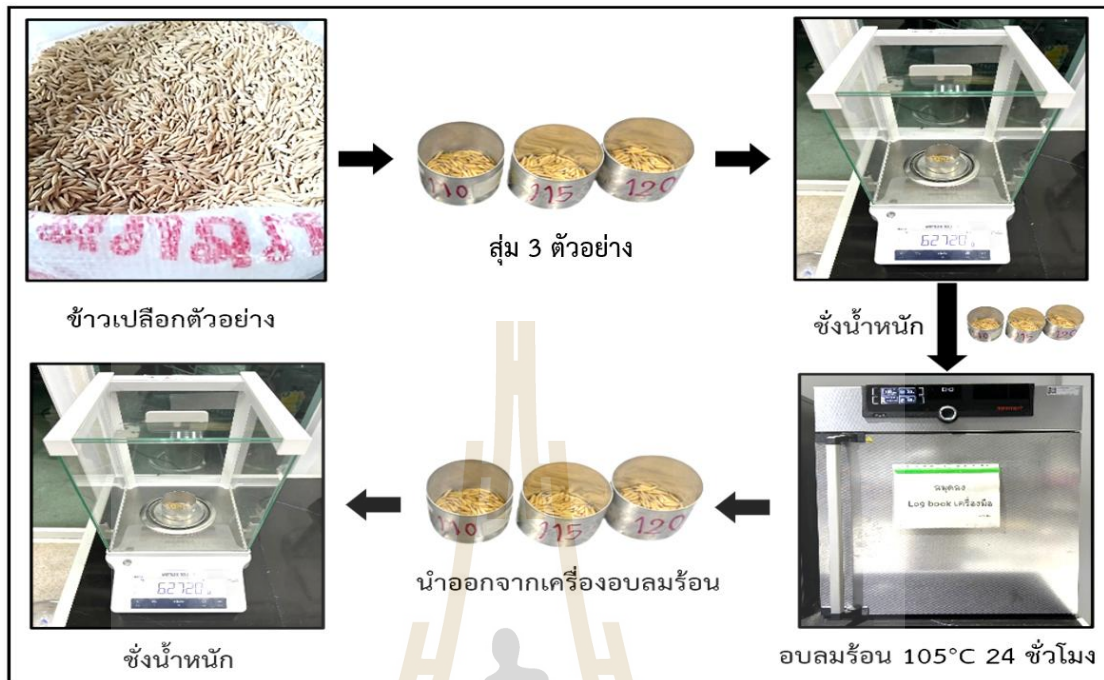
เพื่อใช้ในการคำนวณหาปริมาณน้ำที่จะต้องเติมเข้าไปเพื่อเพิ่มความชื้นให้เมล็ดข้าวเปลือก โดยขั้นตอนการหาความชื้นเริ่มต้น จะทำการสุ่มตัวอย่างข้าวเปลือก 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 5 กรัม และนำมาชั่งน้ำหนัก ก่อนนำไปอบในเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (AOAC, 2000) จากนั้นนำออกมาชั่งน้ำหนักหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบลมร้อน และทำการคำนวณหาความชื้นเริ่มต้นตามสมการที่ 2.1 ที่แสดงในบทที่ 2

### 3.1.2.3 การคำนวณปริมาณน้ำที่จะเพิ่มเข้าไปในข้าวเปลือก

เพื่อให้ได้ความชื้นที่ต้องการ แสดงดังสมการที่ 3.1 (อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว, 2564) หลังจากนั้นเพิ่มความชื้นให้ข้าวเปลือกโดยการพ่นละอองน้ำให้ปะปนกับข้าวเปลือกและคลุกเคล้าให้เข้ากัน จากนั้นนำไปเก็บใส่ภาชนะที่บดแสงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ข้าวมีความชื้นที่สม่ำเสมอทั่วถึงกัน จึงนำมาทดสอบ

$$M_{\text{water, add}} = \frac{100(m_{w,\text{net}} - m_{d,\text{net}}) - (M_{w,\text{target}} \times m_{w,\text{net}})}{(M_{w,\text{target}} - 100)} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $m_{\text{water, add}}$  = ปริมาณน้ำที่ต้องเติมให้กับข้าวเปลือก (กิโลกรัม)  
 $m_{w, \text{target}}$  = ความชื้นข้าวเปลือกที่ต้องการ (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก)  
 $m_{w, \text{net}}$  = มวลวัสดุเปียก (กิโลกรัม)  
 $m_{d, \text{net}}$  = มวลวัสดุแห้ง (กิโลกรัม)



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการหาความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการอบลมร้อน



รูปที่ 3.4 การเติมน้ำเพื่อเพิ่มความชื้นข้าวเปลือก

### 3.2 เครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดลอง

การทดสอบนี้ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 งานวิจัยนี้แบ่งการทดสอบออกเป็นสามส่วน โดยทำการทดสอบอบข้าวเปลือกโดยแบ่งออกเป็น 3 เงื่อนไข คือ 1. ติดตั้งอุปกรณ์วางการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกด้วยคริสป์สลับฟันปลาในหอบแห้ง 2. ติดตั้งอุปกรณ์วางการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกด้วยตะแกรงเหล็กฉีกในหอบแห้ง และ 3. หอบแห้งที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์วางการไหล (หอบแห้งเปล่า) เครื่องอบแห้งต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองนี้จะมีส่วนประกอบดังนี้

### 3.2.1 ส่วนประกอบของเครื่อง

เครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นที่ใช้ในการทดลองในส่วนที่หนึ่ง สามารถแสดงดังรูปที่ 3.15(A) และ 3.15(B) ซึ่งมีส่วประกอบของเครื่องดังนี้

1) หอบแห้งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกจำนวน 2 ชั้นทำจากแก้ว ทรงกระบอกชั้นในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร ความสูง 45 เซนติเมตร ทรงกระบอกชั้นนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร ความสูง 48 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 หอบแห้งที่ใช้ในการทดลอง

2) ฮีตเตอร์อินฟราเรดขนาด 700 วัตต์ ยาว 40 เซนติเมตร เป็นแหล่งทำความร้อนให้กับระบบด้วยรูปแบบการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมี ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (A)

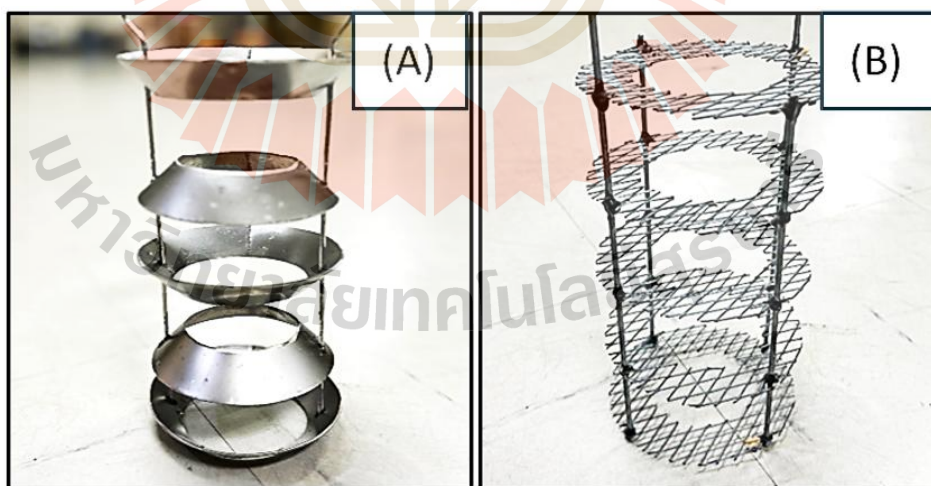
3) เครื่องเมอร์ รุ่น DM1600 ขนาด 1600 W AC 220 V.50 Hz ใช้ควบคุมกำลังไฟที่จ่ายให้กับหลอดอินฟราเรด ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (B)



รูปที่ 3.6 (A) ฮีตเตอร์อินฟราเรด (B) ดริมเมอร์ควบคุมฮีตเตอร์อินฟราเรด

4) ครีบสแตนเลสหนา 2 มิลลิเมตร เอียง 30 องศา จำนวน 5 ชั้นวางสลับกัน หายกว่า แต่ละชั้นห่างกัน 5 เซนติเมตร เป็นอุปกรณ์สำหรับขวางการไหลเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.7(A)

5) ตะแกรงเหล็กฉีก V&P รุ่น No22 ขนาดตาตะแกรง 8.6 x 20 มิลลิเมตร จำนวน 5 ชั้น แต่ละชั้นห่างกัน 5 เซนติเมตร เป็นอุปกรณ์สำหรับขวางการไหลเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.7(B)



รูปที่ 3.7 ตัวขวางการไหล (A) แบบครีบสลับฟันปลา (B) แบบตะแกรงเหล็กฉีก

6) มอเตอร์สั่น (Vibrator motor) 2 ขนาดคือ ขนาด 17 x 6 มิลลิเมตร และขนาด 10.27 x 10.34 มิลลิเมตร แรงดันไฟฟ้า 3 - 6 VDC ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 มอเตอร์สั่น (Vibrator motor)

เครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นที่ใช้ในการทดลองในส่วนที่สอง เป็นการพัฒนาเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองในส่วนที่หนึ่ง แสดงดังรูปที่ 3.16 (C) และ 3.16 (D) ซึ่งมีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อหมุนวนข้าวเปลือกดังนี้

7) พัดลม (Blower) ยี่ห้อ Ventex รุ่น 2RB 710 H16 ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ถูกควบคุมโดยอินเวอร์เตอร์ (Variable-frequency drive, VFD) ใช้ในการเป่าข้าวเพื่อให้เกิดการหมุนวนในระบบ แสดงในรูปที่ 3.9 (A)

8) อินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ Haitec-GR สำหรับควบคุมความเร็วรอบของพัดลม (Blower) แสดงในรูปที่ 3.9 (B)

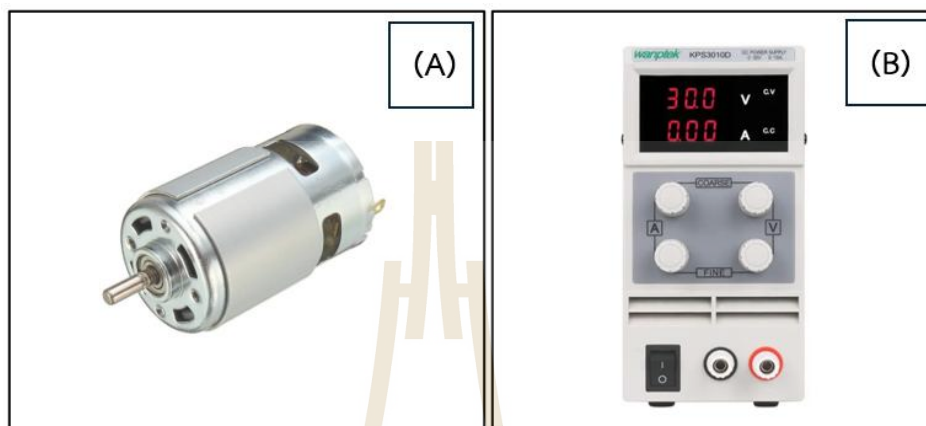


รูปที่ 3.9 (A) พัดลม (Blower) ยี่ห้อ Ventex รุ่น 2RB 710 H16 ขนาด 2.2 กิโลวัตต์

(B) อินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ Haitec-GR ควบคุมความเร็วรอบของพัดลม (Blower)

9) มอเตอร์ขนาด 12 VDC ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที แสดงในรูปที่ 3.10(A)

10) เพาเวอร์ซัพพลาย ยี่ห้อ Wanptek รุ่น KPS3010D ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ เพื่อปรับอัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก แสดงในรูปที่ 3.10(B)



รูปที่ 3.10 (A) มอเตอร์ขนาด 12 VDC ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที

(B) เพาเวอร์ซัพพลาย ยี่ห้อ Wanptek รุ่น KPS3010D

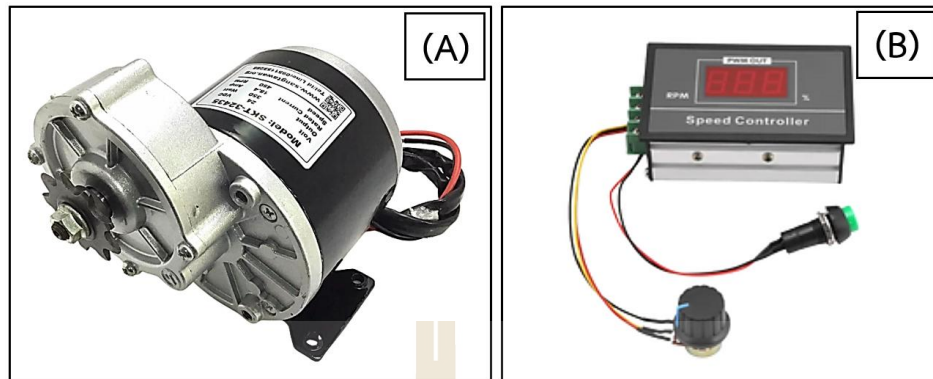
เครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นที่ใช้ในการทดลองในส่วนที่สาม เป็นการพัฒนาเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองในส่วนที่หนึ่งและสอง แสดงดังรูปที่ 3.17(E) และ 3.17(F) ซึ่งมีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม ดังนี้

11) หอบแห้งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกจำนวน 2 ชั้นทำจากแก้ว ทรงกระบอกชั้นในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร ความสูง 126 เซนติเมตร ทรงกระบอกชั้นนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร ความสูง 135 เซนติเมตร (มีลักษณะเช่นเดียวกับรูปที่ 3.5 แต่ยาวกว่า)

12) ฮีตเตอร์อินฟราเรดขนาด 700 วัตต์ ยาว 100 เซนติเมตร เป็นแหล่งทำความร้อนให้กับระบบด้วยรูปแบบการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมี (มีลักษณะเช่นเดียวกับรูปที่ 3.6A แต่ยาวกว่า)

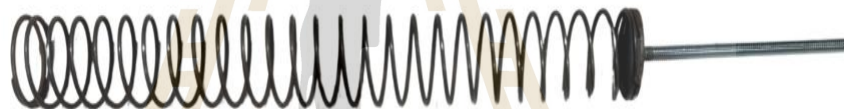
13) มอเตอร์ขนาด 12 VDC ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที แสดงในรูปที่ 3.11(A)

14) โมดูลควบคุมความเร็วมอเตอร์ดิจิทัล DC 6–60 V PWM 30A แสดงในรูปที่ 3.11(B)



รูปที่ 3.11 (A) มอเตอร์ขนาด 12 VDC ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที  
(B) โมดูลควบคุมความเร็วมอเตอร์ดิจิทัล DC 6-60V PWM 30 A

15) สปริงป้อนข้าวเปลือก แสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 สปริงป้อนข้าวเปลือก

16) PID Temperature Controller รุ่น Rex-c100 แสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 PID Temperature Controller รุ่น Rex-c100

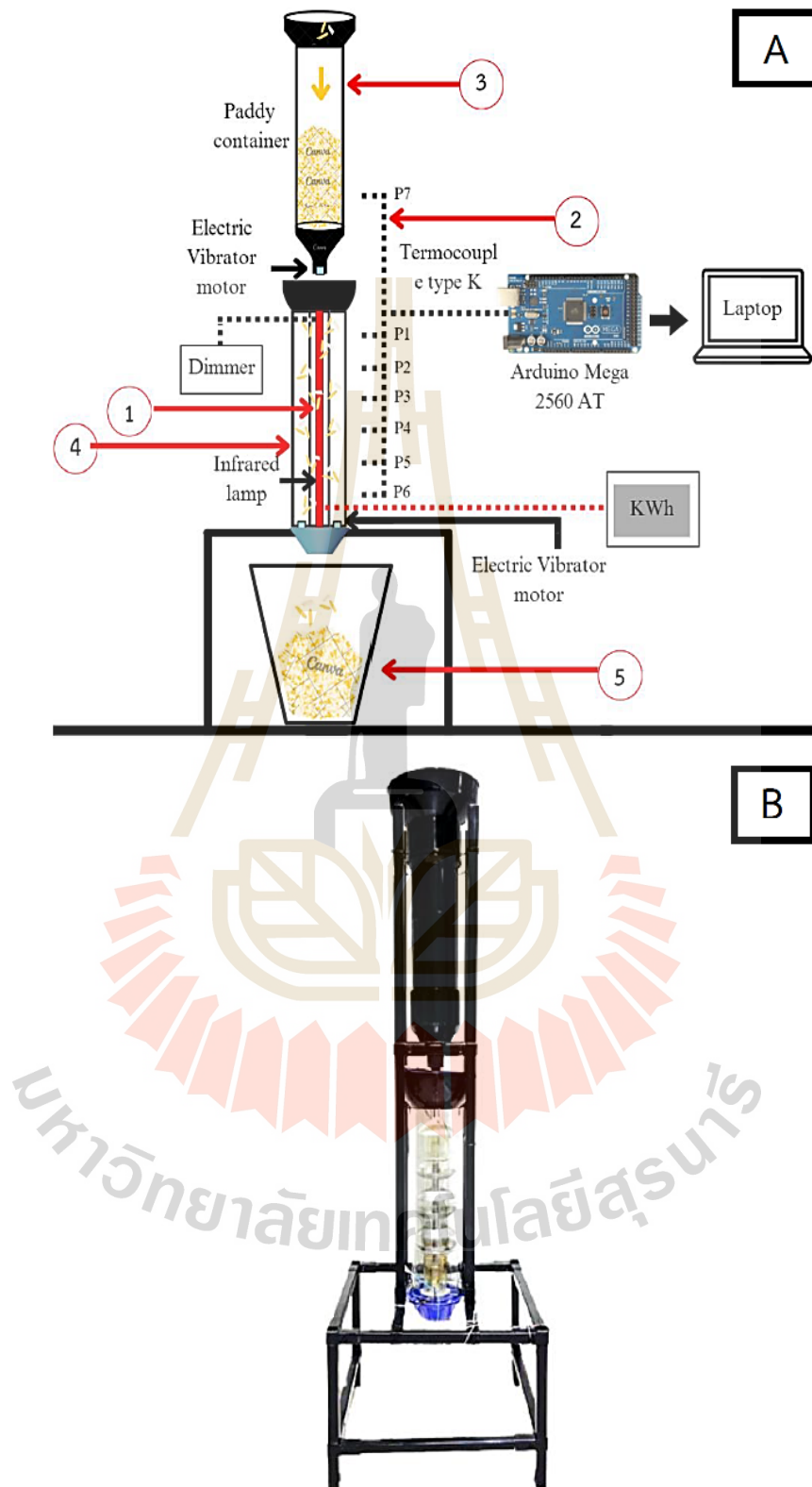
17) มอเตอร์สั่น (Vibrator motor) 12 VDC ความเร็วรอบ 3800 รอบ/นาที และ  
ตัวควบคุม แสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 มอเตอร์สั่น (Vibrator motor) 12 VDC ความเร็วรอบ 3800 รอบ/นาที และตัวควบคุม

### 3.2.2 หลักการทำงานของเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นเพื่อใช้อบแห้งข้าวเปลือก

การทดสอบในส่วนที่ 1 ระบบของเครื่องสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.15(A) โดยหลักการทำงานของคือ เริ่มจากเปิดฮีตเตอร์อินฟราเรด (หมายเลข 1) และวัดอุณหภูมิเฉลี่ยในหอบแห้ง 6 จุด จาก thermocouple type k (หมายเลข 2) จนกระทั่งได้อุณหภูมิที่ต้องการคือ 60 และ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นก็ปล่อยให้ข้าวเปลือกที่ถึงพักข้าวด้านบน (หมายเลข 3) ไหลผ่านหอบแห้ง (หมายเลข 4) จากด้านบนลงสู่ด้านล่างด้วยอัตราการไหล 1.5 กิโลกรัมต่อนาที ข้าวเปลือกจะตกไปพักอยู่ที่ถังเก็บข้าวที่อยู่ด้านล่าง (หมายเลข 5) เพื่อรอสำหรับการเวียนกลับ

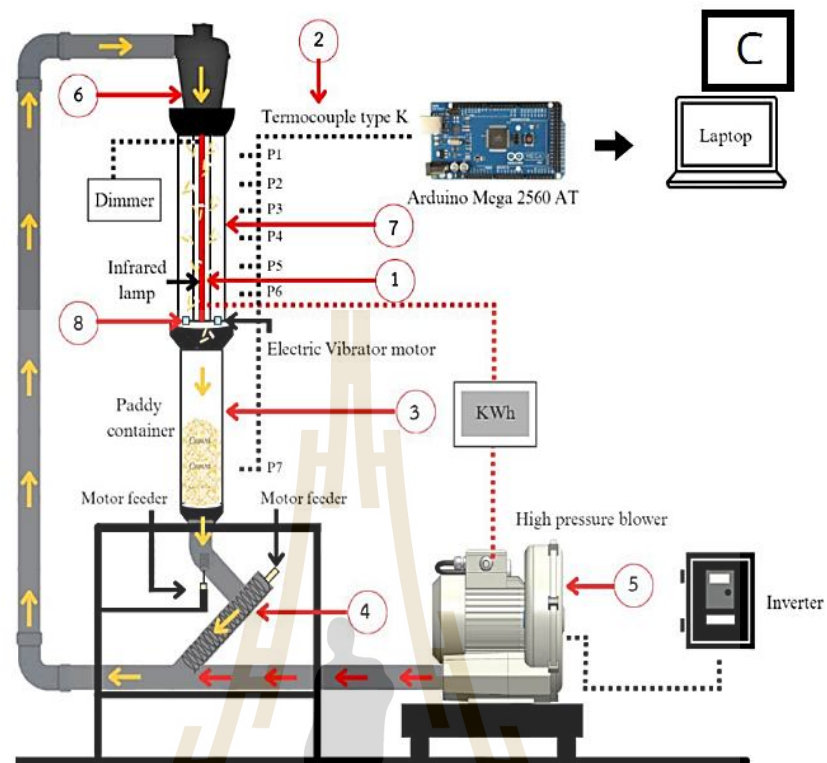


รูปที่ 3.15 (A) แผนภาพเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองใน ส่วนที่ 1

(B) เครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองใน ส่วนที่ 1

การทดสอบในส่วนที่ 2 ระบบของเครื่องสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.16(C) สำหรับการอบแห้งด้วยรูปแบบคริสตัลล์พ่นปลามีหลักการทำงานของคือ เริ่มจากเปิดฮีตเตอร์อินฟราเรด (หมายเลข 1) และวัดอุณหภูมิเฉลี่ยในหอบแห้ง 6 จุด จาก thermocouple type k (หมายเลข 2) จนกระทั่งได้อุณหภูมิที่ต้องการคือ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นก็ปล่อยให้ข้าวเปลือกที่ถึงพักข้าว ด้านล่าง (หมายเลข 3) ไหลผ่านท่อที่มีการติดตั้งสปริงเกลียวเพื่อป้อนข้าวเปลือกให้ไหลด้วยอัตรา 2 กิโลกรัมต่อนาที (หมายเลข 4) หลังจากนั้นข้าวจะถูกเป่าขึ้นด้านบนสู่หอบแห้งด้วยพัดลม (Blower) (หมายเลข 5) โดยไซโคลน (หมายเลข 6) จะทำหน้าที่ในการแยกลมและข้าวโดยลมที่มีมวลน้อยกว่า ข้าวจะถูกเป่าออกด้านบนและข้าวที่หนักกว่าจะตกลงสู่หอบแห้งจากบนลงด้านล่างตามแรงโน้มถ่วงของโลก (หมายเลข 7) หลังจากนั้นข้าวจะตกลงสู่ถังพักข้าวด้านล่างอีกครั้งเพื่อรอป้อนสำหรับการอบแห้งในรอบถัดไป

การทดสอบในส่วนที่ 2 ระบบของเครื่องสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.16(C) สำหรับการอบแห้งด้วยรูปแบบหอบแห้งเปลามีหลักการทำงานของคือ เริ่มจากเปิดฮีตเตอร์อินฟราเรด (หมายเลข 1) และวัดอุณหภูมิเฉลี่ยในหอบแห้ง 6 จุด จาก thermocouple type k (หมายเลข 2) จนกระทั่งได้อุณหภูมิที่ต้องการคือ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นก็ปล่อยให้ข้าวเปลือกที่ถึงพักข้าว ด้านล่าง (หมายเลข 3) ไหลผ่านท่อที่มีการติดตั้งสปริงเกลียวเพื่อป้อนข้าวเปลือกให้ไหลขณะแรงของพัดลมได้ (หมายเลข 4) หลังจากนั้นข้าวจะถูกเป่าขึ้นด้านบนสู่หอบแห้งด้วยพัดลม (Blower) (หมายเลข 5) โดยไซโคลน (หมายเลข 6) จะทำหน้าที่ในการแยกลมและข้าวโดยลมที่มีมวลน้อยกว่า ข้าวจะถูกเป่าออกด้านบนและข้าวที่หนักกว่าจะตกลงสู่หอบแห้งจากบนลงด้านล่างตามแรงโน้มถ่วงของโลก (หมายเลข 7) ซึ่งด้านล่างของหอบแห้งจะมีการติดตั้งครีบนวงกลมไหลและติดตั้งมอเตอร์ สั่น (หมายเลข 8) เพื่อควบคุมให้ข้าวเปลือกไหลในอัตรา 2 กิโลกรัมต่อนาที หลังจากนั้นข้าวจะตกลงสู่ ถังพักข้าวด้านล่างอีกครั้งเพื่อรอป้อนสำหรับการอบแห้งในรอบถัดไป

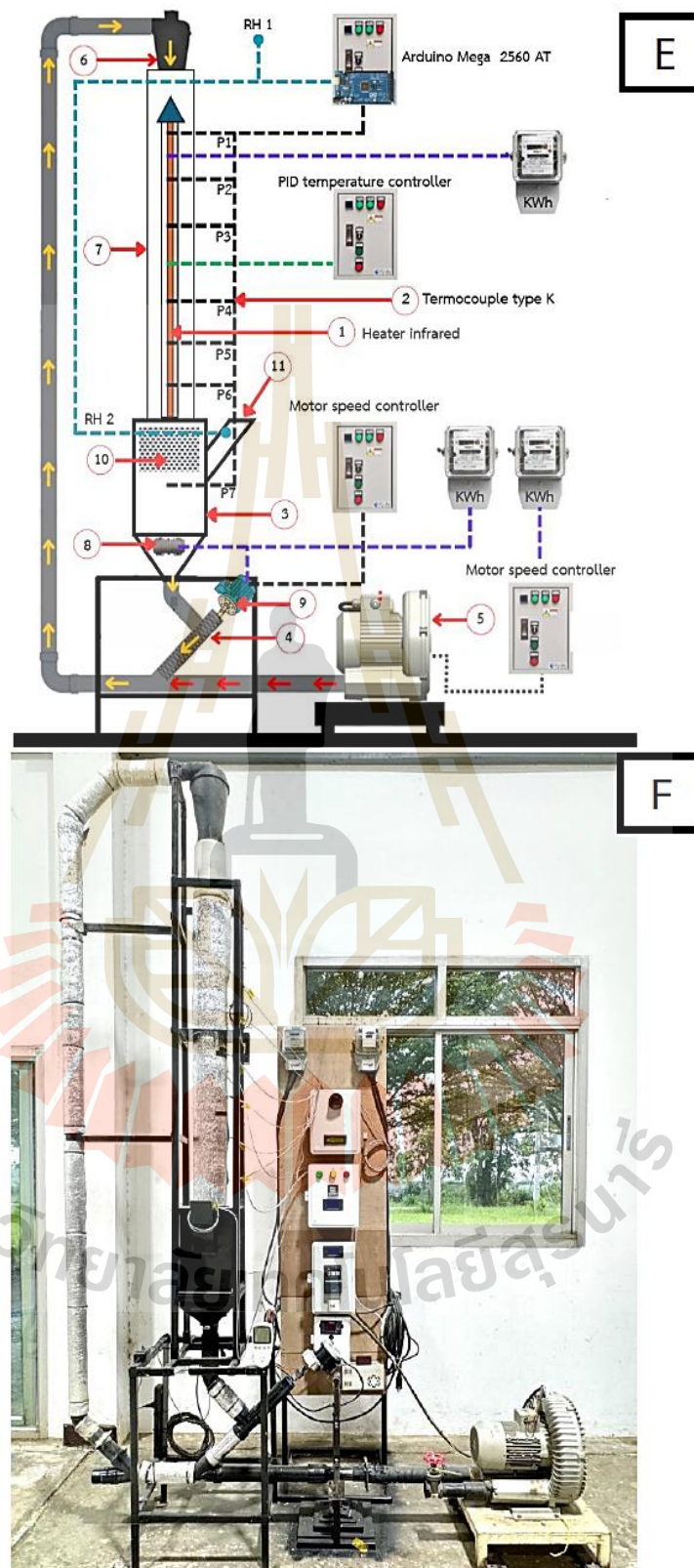


รูปที่ 3.16 (C) แผนภาพเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองใน ส่วนที่ 2

(D) เครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองใน ส่วนที่ 2

การทดสอบในส่วนที่ 3 ระบบของเครื่องสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.17(E) สำหรับการอบแห้ง ด้วยรูปแบบหอบแห้งเป่ามีหลักการทำงานของคือ เริ่มจากเปิดฮีตเตอร์อินฟราเรด (หมายเลข 1) และวัดอุณหภูมิเฉลี่ยในหอบแห้ง 6 จุด จาก thermocouple type k (หมายเลข 2) จนกระทั่งได้ อุณหภูมิที่ต้องการคือ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นก็ปล่อยให้ข้าวเปลือกที่ถึงพักข้าวด้านล่าง (หมายเลข 3) ที่มีการติดตั้งมอเตอร์สั่น (หมายเลข 8) เพื่อให้เมล็ดข้าวเปลือกเกิดการเคลื่อนตัวและไหลลงท่อที่มีการติดตั้งสปริงเกลียว (หมายเลข 4) เพื่อป้อนข้าวเปลือกให้ไหลขณะแรงของพัดลมได้ และสปริงเกลียวถูกติดตั้งกับแกนมอเตอร์ไฟฟ้า (หมายเลข 9) ที่สามารถควบคุมความเร็วรอบได้เพื่อควบคุม อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกแบบคงที่ ซึ่งมีการปรับ 3 ค่าคือ 2, 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที หลังจากนั้นข้าวเปลือกจะถูกเป่าขึ้นด้านบนสู่หอบแห้งด้วยพัดลม (Blower) (หมายเลข 5) โดยไซโคลน (หมายเลข 6) จะทำหน้าที่ในการแยกลมและข้าวโดยลมที่มีมวลน้อยกว่าข้าวจะถูกเป่า ออกด้านบนและข้าวที่หนักกว่าจะตกลงสู่หอบแห้งจากบนลงด้านล่างตามแรงโน้มถ่วงของโลก (หมายเลข 7) และไหลลงไปเก็บไว้ที่ถึงพักข้าวด้านล่าง ที่มีการเจาะรูที่ถึงพักข้าวเพื่อระบายความชื้น (หมายเลข 10, 11) ซึ่งมีการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความชื้นหนึ่งจุด และอีกหนึ่งจุดจะวัดความชื้นของ สิ่งแวดล้อมในห้องทดสอบ หลังจากนั้นข้าวจะตกลงสู่ท่อลำเลียงข้าวเปลือกด้านล่างอีกครั้งเพื่อรอ ป้อนสำหรับการอบแห้งในรอบถัดไป





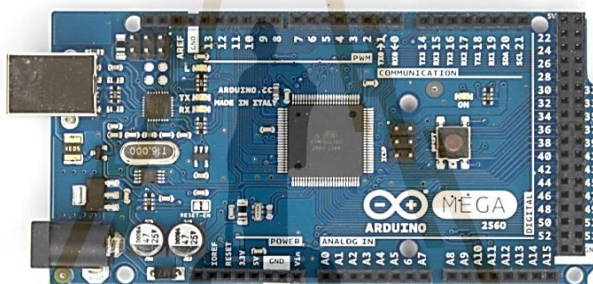
รูปที่ 3.17 (E) แผนภาพเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองในส่วนที่ 3  
(F) เครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองในส่วนที่ 3

### 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับการวัดค่าในการทดลอง

เนื่องจากในการทดลองมีการเก็บข้อมูลที่สำคัญและเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ผลการทดลอง เช่น การวัดและเก็บค่าอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ใช้ตลอดกระบวนการอบแห้ง การถ่ายภาพความร้อน การวัดค่าการใช้พลังงาน เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 AT

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 AT เป็นบอร์ดสำหรับวัดค่าและประมวลผลจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ โดยต้องเขียนโปรแกรมภาษา C/C++ และแสดงผลผ่านโปรแกรม Arduino IDE ควบคุมการทำงานของระบบวัด แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 บอร์ด Arduino Mega 2560 AT

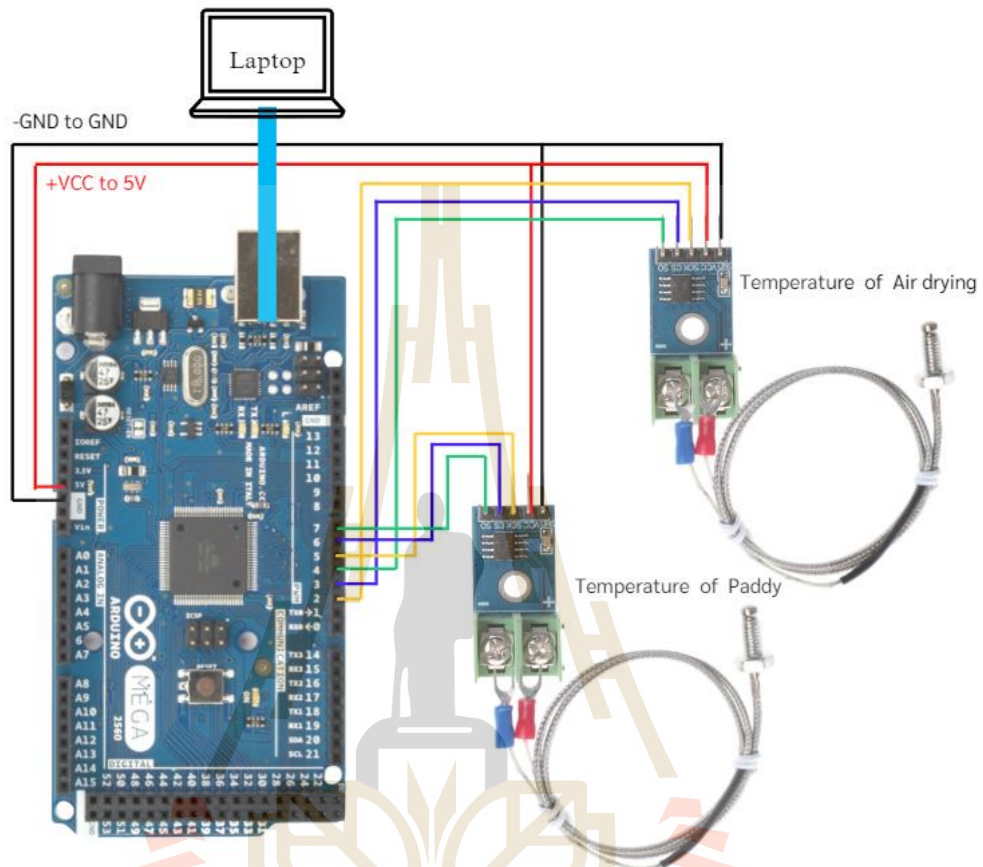
#### 3.3.2 โมดูลเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ Thermocouple type K และ Max6675 Module

ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิอากาศและวัดอุณหภูมิข้าวเปลือกในกระบวนการอบแห้ง แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 Thermocouple type k และ Max6675 Module

ในการวัดอุณหภูมิต้องมีการเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้าด้วยกันเพื่อให้สามารถวัดค่า แสดงผลข้อมูลและเก็บบันทึกข้อมูลได้ การเชื่อมต่อสามารถแสดงดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อวัดค่าอุณหภูมิ

3.3.3 มิเตอร์ไฟฟ้า ใช้สำหรับวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง แสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 มิเตอร์ไฟฟ้า 1 Phase ยี่ห้อ Mitsubishi Electric รุ่น MF-37E

### 3.3.4 เครื่องกะเทาะข้าวเปลือก

เครื่องกะเทาะข้าวเปลือกระบบลูกยาง รุ่น NW-150 ใช้สำหรับกะเทาะข้าวเปลือกที่ทำการทดสอบเพื่อตรวจสอบคุณภาพข้าวที่ก่อน และหลังกระบวนการอบแห้ง แสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 เครื่องกะเทาะข้าวเปลือกระบบลูกยาง

### 3.3.5 เครื่องแยกเมล็ดข้าวหัก

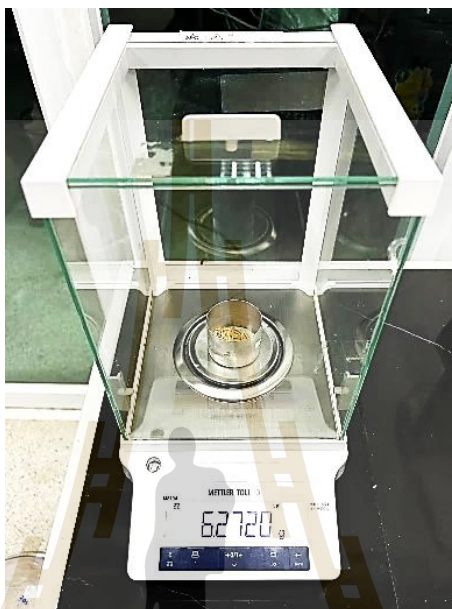
เครื่องแยกเมล็ดข้าวหักใช้สำหรับแยกข้าวต้นกับข้าวหักออกจากกันเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นที่ได้ แสดงดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 เครื่องแยกเมล็ดข้าวหัก

### 3.3.6 เครื่องชั่งน้ำหนัก

เครื่องชั่งน้ำหนักตัวอย่างวัสดุอบแห้งที่ใช้ในการทดลองโดยเป็นเครื่องชั่งดิจิตอลที่มีพิกัด 220 กรัม มีความละเอียด 0.0001 กรัม แสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล

### 3.3.7 ห้องเย็นใหญ่

ห้องเย็นใหญ่ใช้ในการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ผ่านการเพิ่มความชื้นแล้ว มีอุณหภูมิประมาณ 8 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 3.25 และ



รูปที่ 3.25 ห้องเย็นใหญ่

### 3.3.8 เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนยี่ห้อ UNI-T รุ่น Uti-165K Thermal Image Thermometer ใช้วัดอุณหภูมิและถ่ายภาพความร้อนของข้าวเปลือกก่อนและหลังอบแห้ง แสดงดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

## 3.4 การตากแห้งข้าวเพื่อใช้เป็นชุดควบคุมคุณภาพ

ขั้นตอนการตากแห้งข้าวเพื่อใช้เป็นชุดควบคุมคุณภาพมีขั้นตอนการทำดังต่อไปนี้

- 1) นำข้าวเปลือกที่เตรียมไว้ ซึ่งมีความชื้นประมาณ 24 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ไปตากแดดในภาชนะ มีความหนาของชั้นข้าวเปลือกประมาณ 2 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.27
- 2) ทำการชั่งตัวอย่างข้าวเปลือกที่ตากแดดมาเพื่อหาปริมาณความชื้น โดยจะมีการชั่งเก็บตัวอย่างทุก 5 นาที เก็บไปจนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้าย ประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก
- 3) นำข้าวเปลือกที่ได้จากชุดควบคุมคุณภาพไปวิเคราะห์ผลการทดลอง ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการตากแห้ง อัตราการตากแห้ง และ เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น



รูปที่ 3.27 การตากแห้งข้าวเพื่อใช้เป็นชุดควบคุมคุณภาพ

### 3.5 การทดสอบเครื่องอบแห้งต้นแบบ

ในงานวิจัยนี้จะแบ่งการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกเป็น 3 ส่วน คือ

1) การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยรูปแบบการขวางการไหลที่ต่างกัน โดยจะใช้เครื่องอบแห้งต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.15(A) และ 3.15 (B) ในการทดลอง เพื่อศึกษา ค่าเวลา และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 42-43 องศาเซลเซียส เพื่อนำเงื่อนไขที่ดีที่สุดไปทดสอบต่อเนื่องในส่วนถัดไป โดยเป็นการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือก เครื่องที่ใช้ในการทดสอบเป็นเครื่องอบแห้งต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 (A) และ 3.15 (B) โดยนำ 2 เงื่อนไขที่ดีที่สุดของการทดสอบในส่วนที่หนึ่งมาทำการทดสอบต่อเนื่อง เป็นการอบแห้งข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 24 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก จนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้ายที่ประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก เพื่อศึกษาพฤติกรรมการอบแห้ง และนำทั้ง 2 เงื่อนไขไปทดสอบต่อในส่วนที่สอง

2) การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือก โดยเป็นการนำทั้ง 2 เงื่อนไขทดสอบในส่วนที่หนึ่งมาทดสอบต่อในส่วนที่สอง ซึ่งมีการติดตั้งระบบหมุนวนข้าวเพิ่มเติม และใช้เครื่องอบแห้งต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 (C) และ 3.16 (D)

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และคุณภาพของข้าวหลังกระบวนการอบแห้งในแง่ของเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้น

3) การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือก เครื่องที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องอบแห้งต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.17 (E) และ 3.17 (F) โดยนำเงื่อนไขที่ดีที่สุดเพียงเงื่อนไขเดียวของการทดสอบในส่วนที่สองมาทำการทดสอบต่อ เป็นการอบแห้งข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 24 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก จนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้ายที่ประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก เพื่อศึกษา

พฤติกรรมการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และคุณภาพของข้าวหลังกระบวนการอบแห้งในแง่ของเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้อง และดัชนีความขาวของข้าว

### 3.5.1 การทดสอบในส่วนที่หนึ่ง

การทดสอบในส่วนที่หนึ่งทำการอบแห้งข้าวเปลือก โดยใช้อุณหภูมิอากาศในหอบแห้งคือ 60 และ 80 องศาเซลเซียส ในขั้นแรกจะเปิดฮีตเตอร์อินฟราเรดก่อนจนกระทั่งมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงค่าที่กำหนด ข้าวจะถูกปล่อยจากถังพักข้าวด้านบนลงสู่หอบแห้งด้านล่างที่มีตัวขวางการไหลที่ต่างกันทั้ง 3 รูปแบบ คือ แบบหอบแห้งเปล้า แบบครีบสลับพื้นปลา และแบบตะแกรงเหล็กฉีก ในการทดสอบนี้ใช้ข้าวเปลือกครั้งละ 1.5 กิโลกรัม ควบคุมอัตราการไหลของข้าวเปลือกคงที่ที่ 1.5 กิโลกรัมต่อนาที วัดอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ถังพักข้าวด้านล่างทุกรอบ ทำซ้ำจนกว่าข้าวเปลือกจะมีอุณหภูมิประมาณ 42 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาค่าเวลา และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เพื่อนำผลการทดลองที่เหมาะสมไปทดลองต่อเนื่อง

การทดสอบต่อเนื่องเป็นการอบแห้งข้าวเปลือก ในขั้นแรกจะเปิดฮีตเตอร์อินฟราเรดก่อนจนกระทั่งมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงค่าที่กำหนด ข้าวจะถูกปล่อยจากถังพักข้าวด้านบนลงสู่หอบแห้งด้านล่าง ในการทดสอบนี้ใช้ข้าวเปลือกครั้งละ 1.5 กิโลกรัม ควบคุมอัตราการไหลของข้าวเปลือกคงที่ที่ 1.5 กิโลกรัมต่อนาที และเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกจากถังพักข้าวทุก ๆ 5 นาที จนกระทั่งถึงความชื้นที่ต้องการคือ 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ซึ่งเป็นความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาข้าวเปลือก จึงยุติการทดสอบ ทดสอบซ้ำรูปแบบละ 3 ซ้ำ วัดและบันทึกค่าอุณหภูมิอากาศที่หอบแห้งและวัดอุณหภูมิข้าวที่ถังพักข้าว

ตัวอย่างข้าวเปลือกที่เก็บไว้จะนำไปประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้ง โดยพิจารณาจากพฤติกรรมการอบแห้ง ด้วยวิธีหาความชื้น ตามมาตรฐานของ Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2000) โดยนำเมล็ดข้าวเปลือกน้ำหนักประมาณ 5 กรัม ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียม จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ  $105 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาแล้วจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียดสูง ทศนิยม 4 ตำแหน่ง แล้วจึงคำนวณหาค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.6)

$$M_w = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \quad (2.6)$$

เมื่อ  $M_w$  คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)

$W_i$	คือ	น้ำหนักเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือก (g)
$W_f$	คือ	น้ำหนักสุดท้ายของเมล็ดข้าวเปลือกหลังการอบด้วยตู้อบลมร้อน (g)

### 3.5.2 การทดสอบในส่วนที่สอง

หลังการพิจารณาเวลา พฤติกรรมการอบแห้ง และค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้แล้ว นำเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดสอบในส่วนที่หนึ่งมาทำการทดสอบต่อในส่วนที่สอง ในขั้นแรกจะเปิดฮีตเตอร์อินฟราเรดก่อนจนกระทั่งมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงค่าที่กำหนด ข้าวจะถูกปล่อยจากถังพักข้าวด้านล่างสู่ท่อลำเลียงที่ติดตั้งสปริงป้อนข้าวและพัดลมโบว์เวอร์เพื่อหมุนวนข้าวกลับไปที่ยอบแห้งด้านบน โดยทำการอบแห้งข้าวเปลือกครั้งละ 2 กิโลกรัม ควบคุมอัตราการไหลผ่านหอบแห้งของข้าวเปลือกคงที่ ที่ 2 กิโลกรัมต่อนาที โดยส่วนที่สองนี้เป็นการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้นประมาณ 24 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียกอบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก เพื่อเปรียบเทียบกับการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการตากแดด ซึ่งมีความหนาชั้นข้าวเปลือก 2 เซนติเมตร เก็บตัวอย่างข้าวทุก 5 นาที ทั้ง 3 เงื่อนไขใช้เวลาในการอบแห้ง 6 ชั่วโมง

### 3.5.3 การทดสอบในส่วนที่สาม

หลังการพิจารณาเวลา พฤติกรรมการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้นแล้ว นำเงื่อนไขที่เหมาะสมมาทำการทดสอบต่อในส่วนที่สาม ซึ่งเป็นการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้นประมาณ 24 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก อบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก โดยมีการเพิ่มปริมาณข้าวเปลือกที่ใช้ในการอบแห้งจาก 2 กิโลกรัมเป็น 15 กิโลกรัม และมีการปรับอัตราการไหลข้าวเปลือก 3 ค่าคือ 2, 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที ในขั้นแรกจะเปิดฮีตเตอร์อินฟราเรดก่อนจนกระทั่งมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงค่าที่กำหนด ข้าวจะถูกปล่อยจากถังพักข้าวด้านล่างซึ่งมีการติดตั้งมอเตอร์สั่นเพื่อให้เมล็ดข้าวเกิดการขยับตัวเพื่อลงสู่ท่อลำเลียงที่ติดตั้งสปริงป้อนข้าวและพัดลมโบว์เวอร์เพื่อหมุนวนข้าวกลับไปที่ยอบแห้งด้านบน โดยทำการอบแห้งข้าวเปลือกครั้งละ 15 กิโลกรัม ควบคุมอัตราการไหลผ่านหอบแห้งของข้าวเปลือกคงที่ ที่ 2, 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที เพื่อเปรียบเทียบกับการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการตากแดด ซึ่งมีความหนาชั้นข้าวเปลือก 2 เซนติเมตร เก็บตัวอย่างข้าวทุก 10 นาที ทั้ง 3 เงื่อนไขใช้เวลาในการอบแห้ง 10 ชั่วโมง

### 3.6 การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

การประเมินสมรรถนะการอบแห้งในงานวิจัยนี้จะพิจารณาจาก พฤติกรรมการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) และ การทดสอบคุณภาพข้าวที่ได้จากกระบวนการอบแห้งในแง่ของ เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น (Head rice yield, HRY) ซึ่งมีวิธีการดังนี้

#### 3.6.1 พฤติกรรมการอบแห้ง (Drying behavior)

พฤติกรรมการอบแห้ง สามารถแสดงได้ด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกที่เวลาใด ๆ เทียบกับเวลา ซึ่งจะให้เห็นถึงพฤติกรรมลดลงของความชื้นที่เวลาต่าง ๆ ความชื้นที่เวลาใด ๆ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.6)

$$M_w = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \quad (2.6)$$

เมื่อ	$M_w$	คือ	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
	$W_i$	คือ	น้ำหนักเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือก (g)
	$W_f$	คือ	น้ำหนักสุดท้ายของเมล็ดข้าวเปลือกหลังการอบด้วยตู้อบลมร้อน (g)

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

อัตราการอบแห้งสามารถพิจารณาได้จากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.10)

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

เมื่อ	DR	คือ	อัตราการอบแห้ง ( $\text{kg}_{\text{water}}/\text{h}$ )
	$W_i$	คือ	น้ำหนักวัสดุก่อนอบแห้ง (kg)
	$W_f$	คือ	น้ำหนักวัสดุหลังอบแห้ง (kg)
	t	คือ	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

### 3.6.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC)

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง สามารถพิจารณาจากค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง (เมกะจูล) ต่อมวลน้ำทั้งหมดที่ระเหยออกจากข้าวเปลือก (กิโลกรัม) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.9)

$$SEC = \frac{3.6E}{W_i - W_f} \quad (2.9)$$

เมื่อ	SEC	คือ	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg <sub>water</sub> )
	E	คือ	พลังงานรวมทั้งหมดที่ใช้ในระบบอบแห้งประกอบด้วยพลังงานไฟฟ้าจาก ฮีตเตอร์อินฟราเรด พัดลมความดันสูง (kWh)
	W <sub>i</sub>	คือ	น้ำหนักวัสดุก่อนอบแห้ง (kg)
	W <sub>f</sub>	คือ	น้ำหนักวัสดุหลังอบแห้ง (kg)

### 3.6.4 การทดสอบคุณภาพข้าว (Quality of rice)

คุณภาพข้าวหลังการอบแห้งในงานวิจัยนี้จะพิจารณา 2 ส่วนคือ พิจารณาจากเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องตัน ซึ่งข้าวกล้องตันคือเมล็ดข้าวที่มีการเอาเปลือกข้าวออก (การสีข้าว) โดยที่เมล็ดข้าวไม่ผ่านการขัดสี (ขัดขาว) และอีกส่วนพิจารณาจากดัชนีความขาวของข้าว ทั้งสองส่วนมีวิธีการดังต่อไปนี้

- 1) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างข้าวเปลือกที่ได้หลังกระบวนการอบแห้งที่ความชื้นประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ตัวอย่างละ 500 กรัม ดังแสดงในรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 ชั่งน้ำหนักข้าวเปลือกตัวอย่าง

2) นำไปกะเทาะเปลือกด้วยเครื่องสีข้าวระบบลูกยาง (Model : NW-150) ดังแสดง  
ในรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 การกะเทาะเปลือกด้วยเครื่องสีข้าวระบบลูกยาง

3) นำข้าวที่ผ่านการกะเทาะเปลือกมาคัดแยกเมล็ดข้าวหักและคัดแยกปลายข้าวออก โดยใช้เครื่องคัดแยกข้าวหัก (Cylinder Separator) เป็นเครื่องที่ผลิตจากบริษัท ที.เอส.เอ็ม ซายน์ จำกัด เครื่องจะทำการหมุนแยกเมล็ดข้าวตันและเมล็ด ข้าวหักแยกออกจากกัน ซึ่งเมล็ดข้าวตันจะถูกแยกให้ตกลงไปยังถาดรองสีเขียว ในส่วนของเมล็ดข้าวหักจะถูกแยกให้ตกลงในถาดรองลักษณะเอียงมุม 45 องศา ดังแสดงในรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 เครื่องคัดแยกเมล็ดข้าวหัก

4) นำข้าวเต็มเมล็ดที่ผ่านการคัดแยกเมล็ดแล้วมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียดสูง ทศนิยม 4 ตำแหน่ง แสดงดังรูป 3.31 และบันทึกค่า จากนั้นนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้น (% BRV) ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการที่ (2.14)



รูปที่ 3.31 การชั่งน้ำหนักข้าวเต็มเมล็ด

$$BRV = \left( \frac{m_{\text{head}}}{m_{\text{total}}} \right) \times 100 \quad (2.14)$$

เมื่อ  $BRV$  = ร้อยละผลผลิตข้าวกล้อง (%)  
 $m_{\text{head}}$  = น้ำหนักข้าวกล้อง (กิโลกรัม)  
 $m_{\text{total}}$  = น้ำหนักข้าวเปลือก (กิโลกรัม)

5) นำข้าวกล้องต้นที่ได้ไปขัดขาวโดยใช้เครื่องขัดขาว โดยปริมาณข้าวกล้องต้นที่ใช้ในการขัดขาวต่อ 1 รอบคือครั้งละ 100 กรัม เครื่องจะทำงานอัตโนมัติประมาณ 1 นาทีเมื่อกดปุ่มสีเขียว หลังจากนั้นก็จะได้เป็นเมล็ดข้าวที่ผ่านการขัดขาวแล้ว เครื่องขัดขาวเมล็ดข้าวดังแสดงในรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 เครื่องขัดขาวเมล็ดข้าว

6) นำข้าวขาวที่ได้จากกระบวนการขัดสีไปวิเคราะห์ดัชนีความขาวของข้าวโดยใช้เครื่องวัดสี ยี่ห้อ HunterLab รุ่น UltraScan VIS แสดงในรูปที่ 3.33 ค่าที่ได้จากเครื่องจะเป็นค่า  $L^*$   $a^*$   $b^*$  จากนั้นนำค่าเหล่านี้ไปคำนวณค่าดัชนีความขาวได้จากสมการที่ (2.15)

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (2.15)$$

โดยที่

$L^*$  = ค่าความสว่าง (0 = ดำ, 100 = ขาว)

$a^*$  = พิกัดสีในแกนเขียว-แดง (ค่าลบ = เขียว, ค่าบวก = แดง)

$b^*$  = พิกัดสีในแกนฟ้า-เหลือง (ค่าลบ = ฟ้า, ค่าบวก = เหลือง)



รูปที่ 3.33 เครื่องวัดสี ยี่ห้อ HunterLab รุ่น UltraScan VIS

**3.7 สถานที่ทำการทดลอง**

ห้องปฏิบัติการจักรกลเกษตร อาคารจักรกลเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

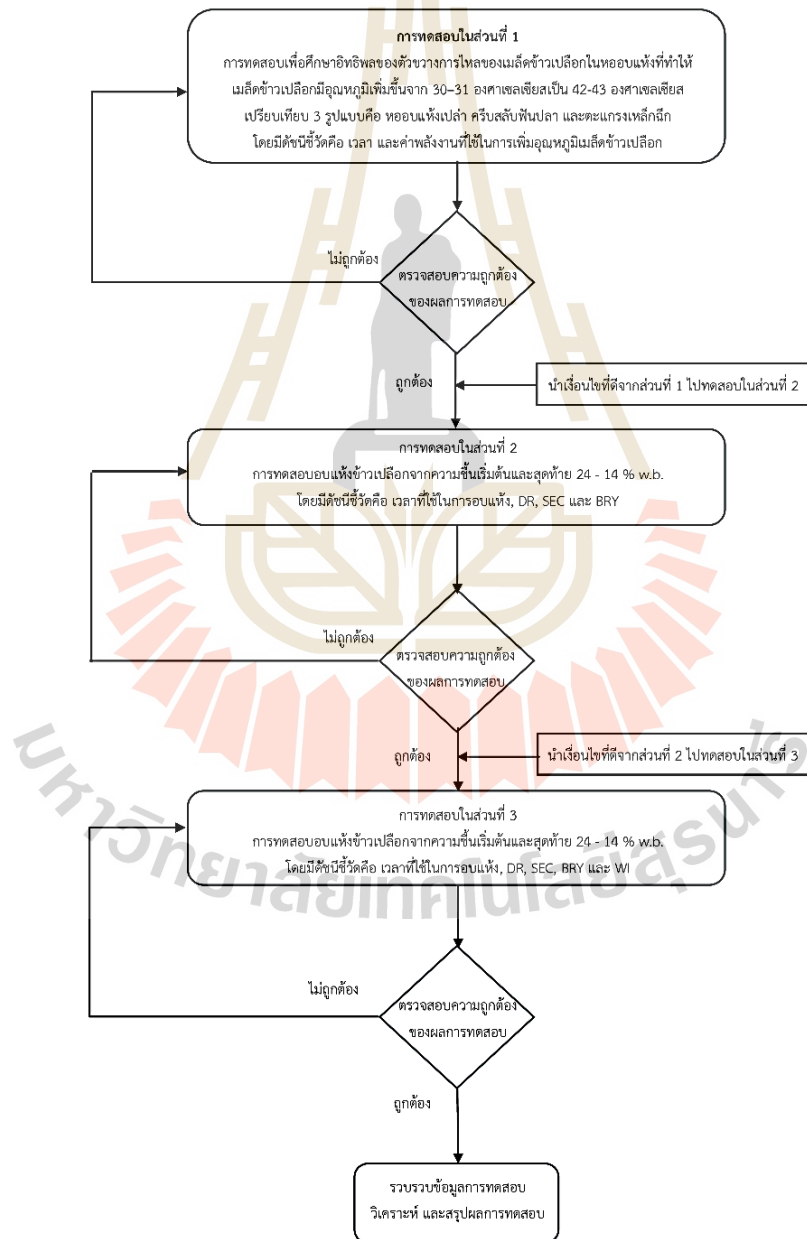
**3.8 ระยะเวลาทำการทดลอง**

เริ่มทำวิทยานิพนธ์ เดือน กุมภาพันธ์ ปี พ.ศ. 2567–กันยายน ปี พ.ศ. 2568

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับการรายงานผลการทดสอบที่ได้อธิบายหัวข้อการทดสอบและวิธีการทดสอบไว้ในบทที่ 3 ซึ่งหัวข้อการทดสอบที่จําแนกรายงานผลและวิเคราะห์ผลประกอบด้วย 3 ส่วนคือ โดยแผนการทดสอบสามารถแสดงได้ดัง รูปที่ 4.1

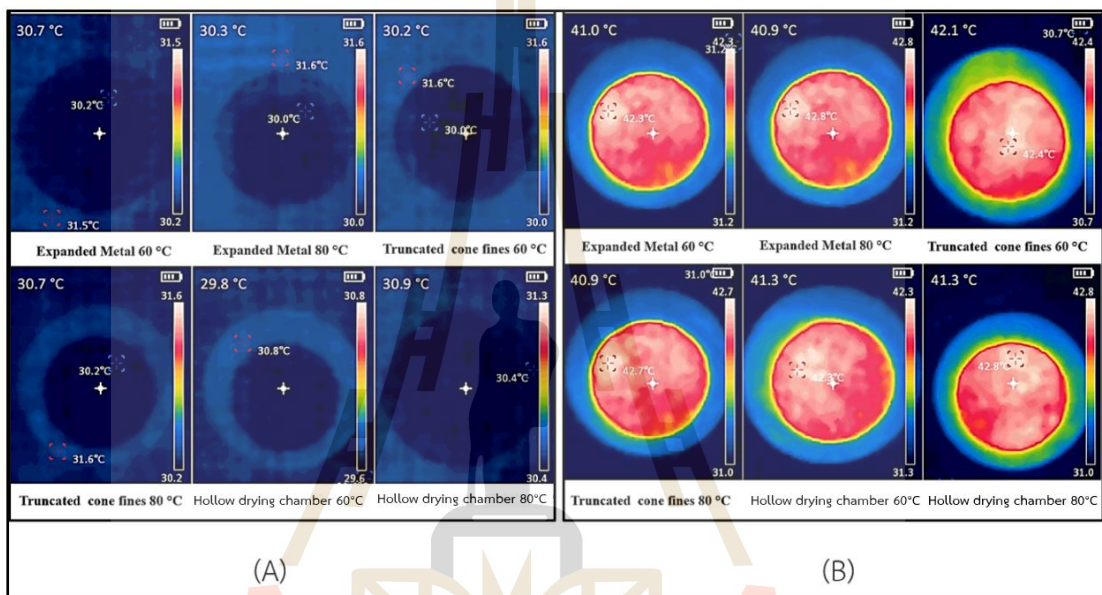


รูปที่ 4.1 แผนการทดสอบอบแห้งเหล็กหล่อแบบต่อเนื่องด้วยรังสีอินฟราเรดทั้ง 3 ส่วน

## 4.1 ผลการทดสอบการพัฒนา ปรับปรุงเครื่องต้นแบบที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง

### 4.1.1 ผลการทดสอบในส่วนที่หนึ่ง

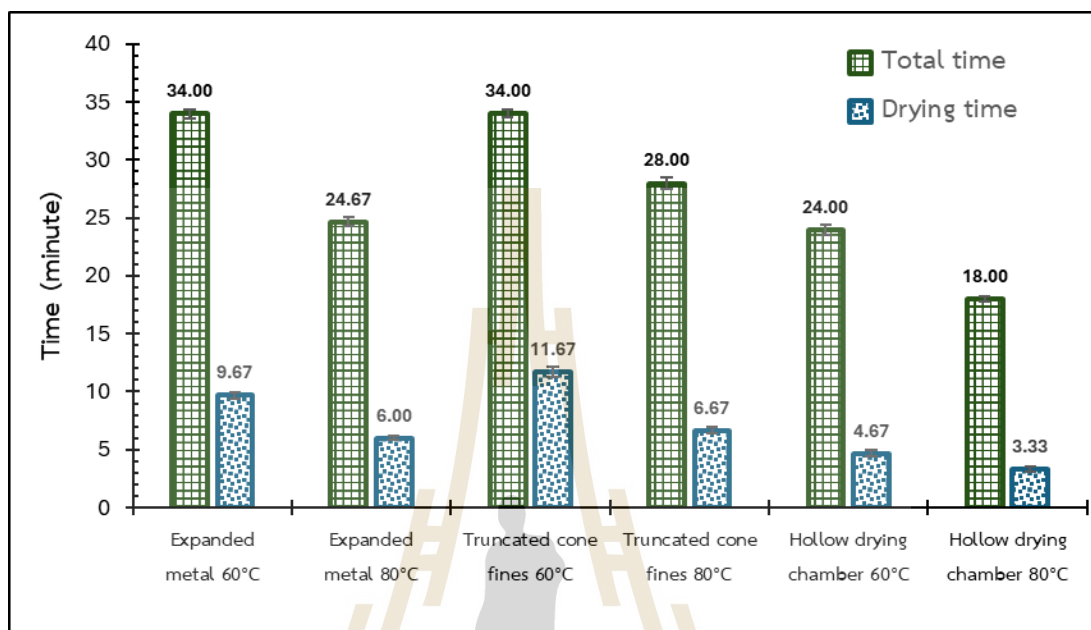
ผลการทดสอบในส่วนที่หนึ่ง ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวขวางการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งที่ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30–31 องศาเซลเซียสเป็น 42-43 องศาเซลเซียส ดังแสดงใน รูปที่ 4.2 (A) และ (B)



รูปที่ 4.2 อุณหภูมิข้าวเปลือกก่อนการอบ (A) อุณหภูมิข้าวเปลือกหลังการอบ (B)

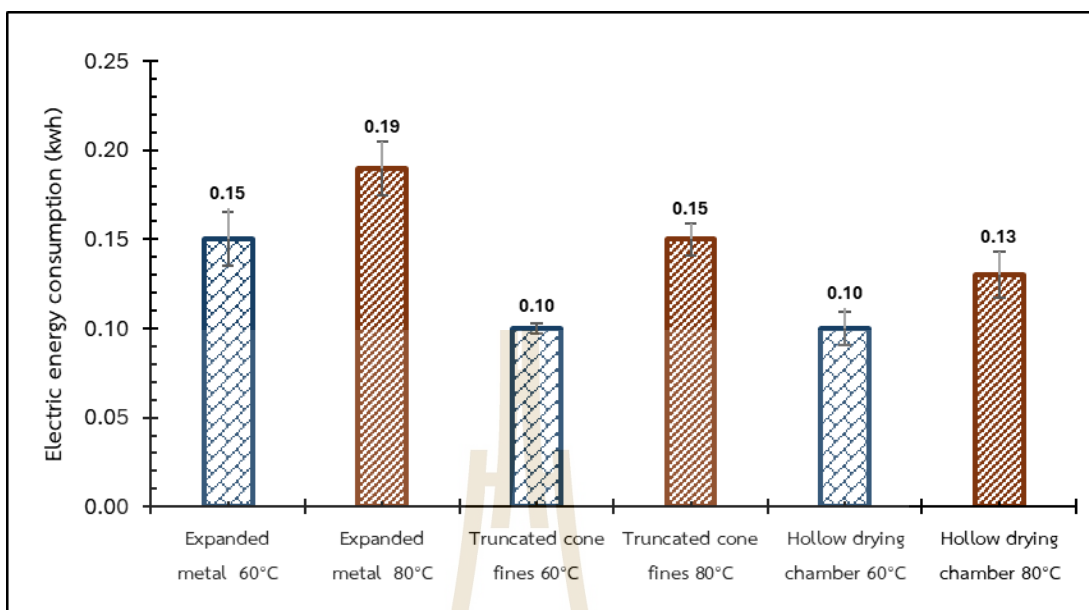
จากรูปที่ 4.2 พบว่าทั้ง 3 เงื่อนไขการอบแห้งสามารถเพิ่มอุณหภูมิข้าวเปลือกจากประมาณ 30 องศาเซลเซียส ไปเป็นอุณหภูมิประมาณ 42 องศาเซลเซียสได้ ในระหว่างทำการทดสอบเมื่อพิจารณาพบว่ารูปแบบการอบแห้งแบบติดตั้งตัวขวางการไหลทั้ง 2 รูปแบบ คือแบบครีบลับฟันปลา และแบบตะแกรงเหล็กฉีก สามารถทำให้ข้าวเปลือกได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอและทั่วถึงกว่ารูปแบบการอบแห้งแบบหอบแห้งเปล่า เนื่องจากตัวขวางการไหลทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีการกระจายตัวในหอบแห้ง จึงส่งผลให้ได้รับความร้อนอย่างทั่วถึง ต่างจากรูปแบบหอบแห้งเปล่า เมล็ดข้าวเปลือกมีการไหลอย่างช้า ๆ ในหอบแห้งและมีความหนาของชั้นข้าวเปลือกประมาณ 2 เซนติเมตร จึงทำให้ข้าวเปลือกชั้นนอกไม่ได้รับความร้อน ถ้าสังเกตจากรูปที่ 4.2 อาจจะไม่เห็นถึงความแตกต่างเนื่องจากในขณะที่ทำการทดลองข้าวต้องหมุนวนหลายรอบในการอบทำให้ข้าวเปลือกมีการคลุกเคล้าไปในตัวจึงทำให้อุณหภูมิข้าวเปลือกที่ได้หลังกระบวนการอบมีค่าใกล้เคียงกันทุกกรณี

เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 42-43 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าตัววางการไหลมีอิทธิพลต่อระยะเวลาที่ทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 เวลาที่ใช้ทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิ 42-43 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.3 พบว่าการทดสอบอบแห้งแบบหอบเปล้าที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศ 80 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิ 42-43 องศาเซลเซียส น้อยที่สุดคือ 3.33 นาที รองลงมาจะเป็นเงื่อนไขการทดสอบอบแห้งแบบหอบเปล้าที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศ 60 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 4.67 นาที เนื่องจากรูปแบบการอบแห้งแบบหอบเปล้าเมล็ดข้าวเปลือกมีการไหลอย่างช้า ๆ ภายในหอบแห้งที่มีการควบคุมอัตราการไหลที่ด้านล่างของหอบแห้ง 1.5 กิโลกรัมต่อนาที ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีเวลาอยู่ในหอบแห้งนานกว่าตัววางการไหลอีกสองรูปแบบ จึงทำให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่า ส่งผลให้ใช้นเวลาน้อยกว่าในการทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในขณะที่รูปแบบการอบแห้งที่ใช้ตัววางการไหลแบบตะแกรงเหล็กฉีก (Truncated cone) และครีบลับฟันปลา (Expanded metal) เป็นการปล่อยให้เมล็ดข้าวเปลือกไหลจากถังพักข้าวด้านบน ที่มีการควบคุมอัตราการไหล 1.5 กิโลกรัมต่อนาที จากนั้นตกลงสู่หอบแห้งที่มีตัววางการไหล ซึ่งเมล็ดข้าวเปลือกตกลงอย่างอิสระภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลกทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีเวลาอยู่ในหอบแห้งเพียงชั่วขณะ ส่งผลให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำกว่าจึงทำให้ใช้เวลามากกว่าในการทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับเมล็ดข้าวเปลือกสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 4.4

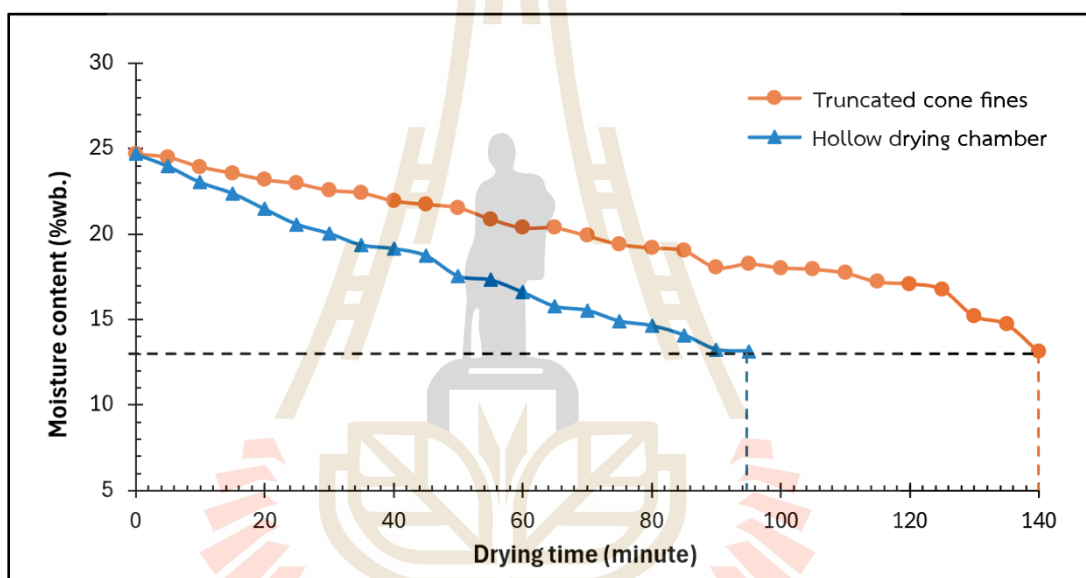


รูปที่ 4.4 ค่าพลังงานที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิข้าวเปลือกให้มีอุณหภูมิ 42-43 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.4 พบว่าเงื่อนไขการอบแห้งแบบหอบเป่าที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศ 60 องศาเซลเซียส มีการใช้พลังงานเท่ากับกับเงื่อนไขการทดสอบอบแห้งที่มีตัววางการไหลแบบครีปสลับฟันปลาที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งมีการใช้พลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 0.10 กิโลวัตต์ - ชั่วโมง เนื่องจากในการทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 42-43 องศาเซลเซียส หอบเป่าที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศ 60 องศาเซลเซียส ใช้กำลังไฟฟ้า 250 วัตต์ เป็นเวลา 24 นาที ในขณะที่ตัววางการไหลแบบครีปสลับฟันปลาที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศ 60 องศาเซลเซียส ใช้กำลังไฟฟ้า 180 วัตต์ เป็นเวลา 34 นาที เมื่อพิจารณาผลคูณของกำลังไฟฟ้าและเวลาในหน่วยชั่วโมงของ ทั้งสองรูปแบบการอบพบว่ามีค่าเท่ากันคือ 0.10 กิโลวัตต์-ชั่วโมง จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่าทั้งสองรูปแบบการอบใช้อุณหภูมิอากาศเท่ากันคือ 60 องศาเซลเซียส แต่ใช้กำลังไฟฟ้าไม่เท่ากันเนื่องจากตัววางการไหลแบบครีปสลับฟันปลาทำจากสแตนเลสซึ่งมีความสามารถในการดูดซับความร้อนจากการแผ่รังสีของฮีตเตอร์อินฟราเรดทำให้ใช้กำลังไฟฟ้าต่ำกว่าแบบหอบเป่าในการทำให้อุณหภูมิอากาศในหอบแห้งเป็น 60 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงนำ 2 รูปแบบนี้มาทำการทดสอบต่อเนื่องเพื่อประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้ง ในแง่ของพฤติกรรมการอบแห้ง

ผลการทดสอบในส่วนที่หนึ่งทำให้ได้เงื่อนไขการอบแห้งคือ เงื่อนไขการทดสอบอบแห้งแบบหอบแห้งเป่า และแบบครีปสลับฟันปลาที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส ทั้ง 2 รูปแบบ โดยการทดสอบเพิ่มเติมเป็นการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกจำนวน 1.5 กิโลกรัม จากความชื้นเริ่มต้น

ประมาณ 24 เปอร์เซ็นต์ มาตรฐานเปียก จนกระทั่งเหลือความชื้น 14 เปอร์เซ็นต์ มาตรฐานเปียก และควบคุมอัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 1.5 กิโลกรัมต่อนาที จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาในแง่ของพฤติกรรมการอบแห้งพบว่า ความชื้นข้าวเปลือกมีการลดลงแบบคงที่ทั้ง 2 รูปแบบการอบแห้ง เนื่องจากเมื่อใช้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิของข้าวเปลือกมีค่าสูงขึ้น ทำให้น้ำที่อยู่ภายในชั้นเนื้อข้าวเกิดการเคลื่อนตัวออกมาสู่บริเวณเปลือกของเมล็ดข้าวและทำให้ความชื้นภายในเมล็ดข้าวเปลือกลดลงอย่างสม่ำเสมอ และพบว่า การทดสอบในเงื่อนไขหอบแห้งเปล้าใช้เวลาในการอบแห้งเพียง 95 นาที ซึ่งต่ำกว่าแบบคริสสลับฟันปลาที่ใช้เวลาในการอบแห้งถึง 140 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.5



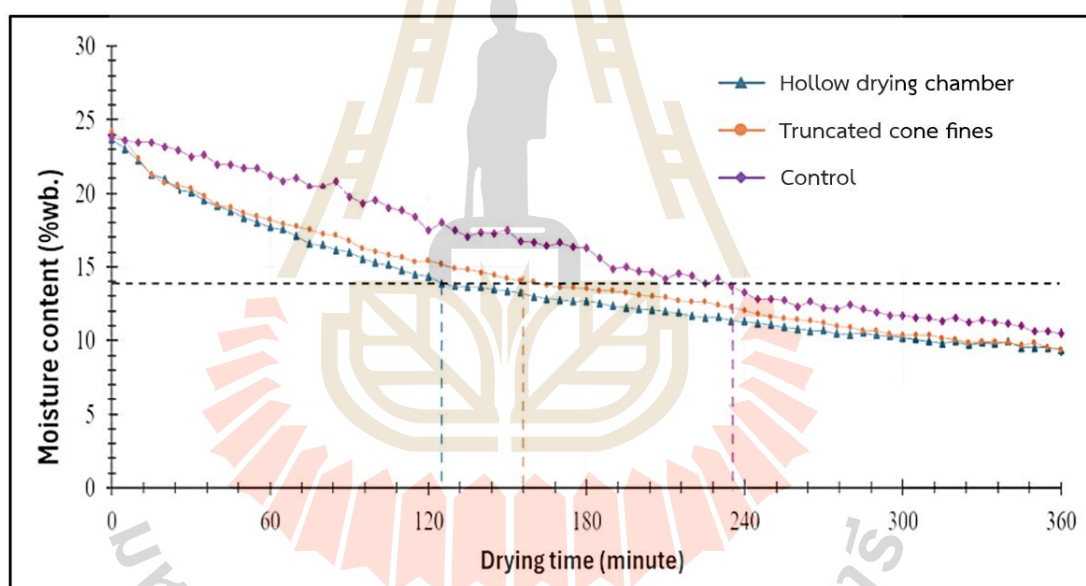
รูปที่ 4.5 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเมื่อเทียบกับเวลา

จากรูปที่ 4.5 เนื่องจากรูปแบบการอบแห้งแบบหอบเปล้า เมล็ดข้าวเปลือกมีการไหลอย่างช้า ๆ ภายในหอบแห้งที่มีการควบคุมอัตราการไหลเมล็ดข้าวเปลือกที่ด้านล่างของหอบแห้ง 1.5 กิโลกรัมต่อนาที ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีเวลาอยู่ในหอบแห้งนานกว่าตัววางการแบบคริสสลับฟันปลา จึงทำให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่า ส่งผลให้ใช้เวลาน้อยกว่าในการลดความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกจาก 24 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียกให้เหลือ 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ในขณะที่รูปแบบการอบที่ใช้ตัววางการไหลแบบคริสสลับฟันปลาเป็นการปล่อยให้เมล็ดข้าวเปลือกไหลจากถังพักข้าวด้านบนที่มีการควบคุมอัตราการไหล 1.5 กิโลกรัมต่อนาที จากนั้นตกลงสู่หอบแห้งที่มีตัววางการไหลซึ่งเมล็ดข้าวเปลือกตกลงอย่างอิสระภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีเวลาอยู่ในหอบแห้งเพียงชั่วขณะส่งผลให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำกว่า จึงทำให้ใช้เวลา

มากกว่าในการลดความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกจาก 24 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียกให้เหลือ 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก

#### 4.1.2 ผลการทดสอบในส่วนที่สอง

ผลการทดสอบในส่วนที่สองได้จากการพิจารณาผลการทดสอบในส่วนที่หนึ่งคือ ได้เงื่อนไขการอบแห้งแบบหอบแห้งเปล้าและแบบ crib slab ฟันปลาที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส ทั้ง 2 รูปแบบ เพื่อเปรียบเทียบกับ การลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการตากแดด (ชุดควบคุม, Control) จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาในแง่ของพฤติกรรมของการอบแห้งพบว่าการอบแห้งแบบหอบแห้งเปล้า แบบติดตั้ง crib slab ฟันปลา และวิธีการตากแดด ใช้เวลาในการอบแห้งการอบแห้ง 125 156 และ 235 นาที ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.6

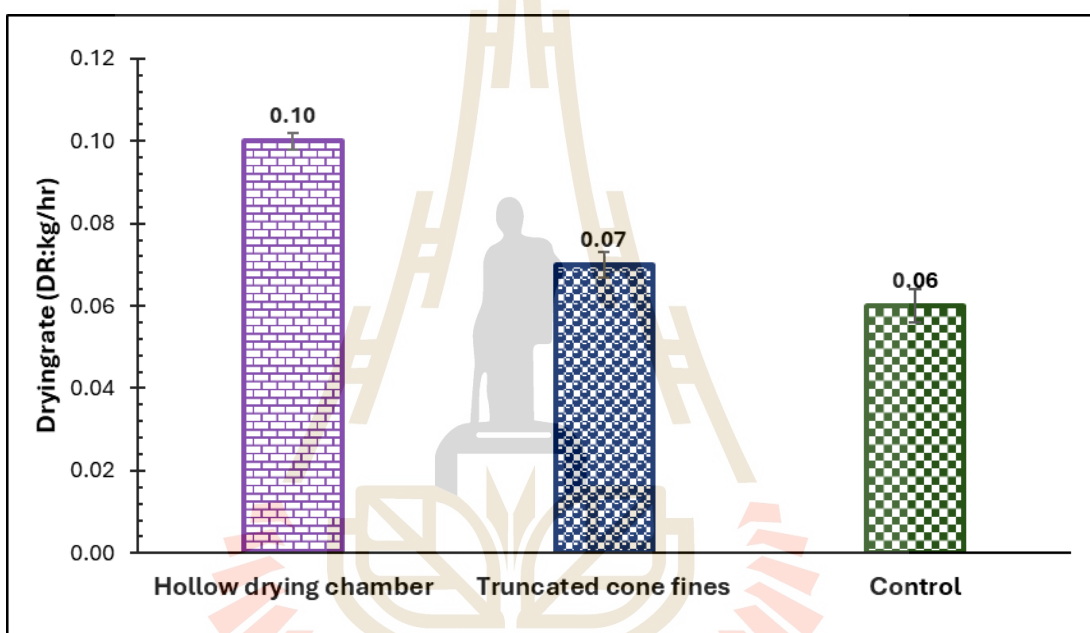


รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกที่ทดสอบอบแห้งด้วยเงื่อนไขที่ต่างกัน

จากรูปที่ 4.6 จะพบว่า การอบแห้งแบบหอบแห้งเปล้าใช้เวลาในการอบแห้งการอบแห้งน้อยที่สุด เนื่องจากรูปแบบการอบแห้งแบบหอบแห้งเปล้าเมล็ดข้าวเปลือกมีการไหลอย่างช้า ๆ ภายในหอบแห้งที่มีการควบคุมอัตราการไหลที่ด้านล่างของหอบแห้ง 2 กิโลกรัมต่อนาที ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีเวลาอยู่ในหอบแห้งนานกว่า จึงมีการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่า ส่งผลให้ใช้เวลาในการลดความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกน้อยกว่า ต่างจากการอบแห้งที่ใช้ตัวขวางแบบ crib slab ฟันปลา ที่เป็นการปล่อยให้เมล็ดข้าวเปลือกไหลจากถังพักข้าวด้านล่างและถูกเป่าพ่นขึ้นสู่หอบแห้งด้านบนที่มีตัวขวางการไหล ซึ่งเมล็ดข้าวเปลือกตกลงอย่างอิสระภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลกทำให้เมล็ด

ข้าวเปลือกมีเวลาอยู่ในหอบแห้งเพียงชั่วขณะ ส่งผลให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำกว่า จึงใช้เวลามากกว่า และในกรณีวิธีการตากแดดใช้เวลาในการอบแห้งนานที่สุด เนื่องจากการตากข้าวจะมีความหนาของชั้นข้าวเปลือกประมาณ 2 เซนติเมตร ทำให้ข้าวได้รับความร้อนจากแสงแดดไม่สม่ำเสมอและระหว่างการตากแดดก็จะมีสภาพอากาศแบบ แดดสลับครึ้มเนื่องจากมีเมฆมาก ทำให้ใช้เวลานานที่สุด

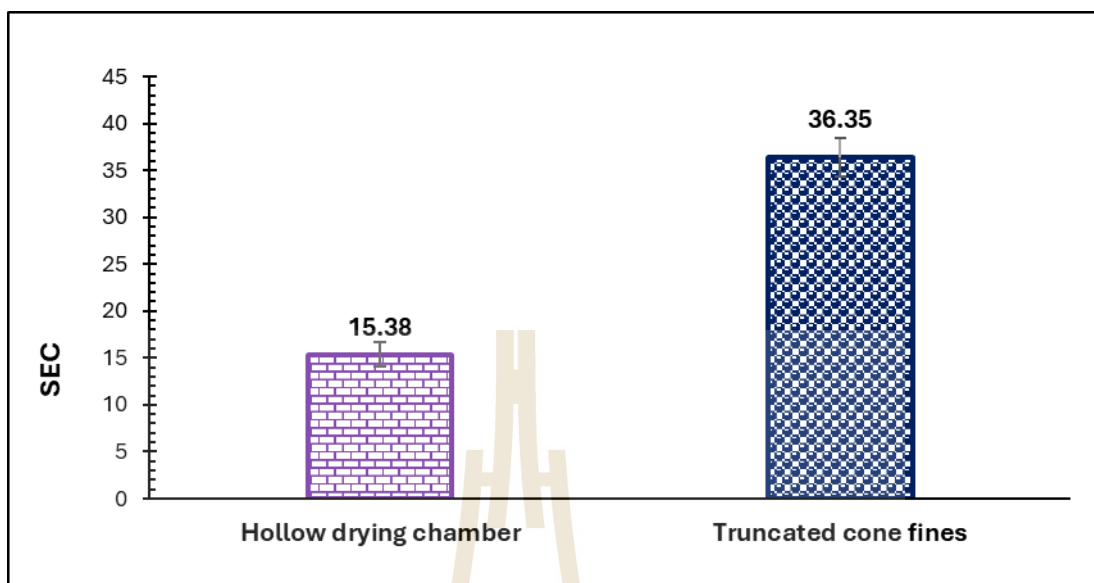
ประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งจากอัตราการอบแห้ง พบว่ารูปแบบการอบแห้งแบบหอบแห้งเปล่า แบบติดตั้งครีบลับพื้นปลา และวิธีการตากแดด(Control) มีค่าอัตราการอบแห้ง 0.1009 0.0701 และ 0.0598 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ผลของอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

จากรูปที่ 4.7 พบว่าการอบแห้งแบบหอบแห้งเปล่ามีอัตราการอบแห้งสูงสุด และในกรณีการตากแดดมีอัตราการอบแห้งต่ำที่สุด ซึ่งพิจารณาได้จากสมการที่ 4 กล่าวคือ ค่าอัตราการอบแห้งจะแปรผกผันกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าการอบแห้งแบบหอบแห้งเปล่าใช้เวลาที่น้อยที่สุด เป็นผลทำให้มีค่าอัตราการอบแห้งมากที่สุด และในกรณีการตากแดด ใช้เวลามากที่สุด เป็นผลทำให้มีค่าอัตราการอบแห้งน้อยที่สุด

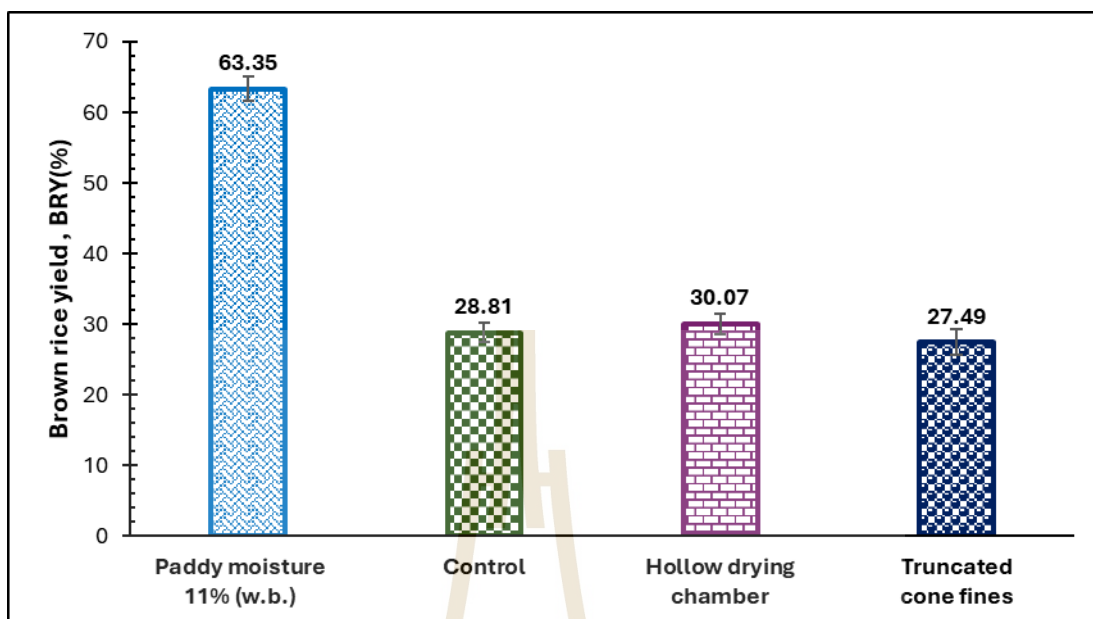
เมื่อพิจารณาในส่วนของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะพบว่า รูปแบบการอบแห้งแบบหอบแห้งเปล่า และรูปแบบการอบแห้งแบบติดตั้งครีบลับพื้นปลา มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน 15.3768 และ 36.3532 MJ/kg<sub>water</sub> ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ผลของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

จากรูปที่ 4.8 จะพบว่ารูปแบบการอบแห้งแบบหอบแห้งเปล่านั้นมีความสิ้นเปลืองพลังงานน้อยที่สุด เนื่องจากการอบแห้งแบบหอบแห้งเปล่านั้นมีการใช้ฮีตเตอร์อินฟราเรดที่ใช้กำลังไฟฟ้า 236 วัตต์ ใช้เวลาในการอบแห้ง 125 นาที ในขณะที่แบบติดตั้งครีบลับพื้นปลาใช้ฮีตเตอร์อินฟราเรดที่ใช้กำลังไฟฟ้า 510 วัตต์ ใช้เวลาในการอบแห้ง 156 นาที ซึ่งใช้กำลังไฟฟ้าและเวลามากกว่าแบบหอบแห้งเปล่า 2.16 เท่า และ 31 นาที ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากไส้ของหลอดฮีตเตอร์อินฟราเรดมีความร้อนไม่สม่ำเสมอ และอีกหนึ่งปัจจัยเป็นผลมาจากการใช้ลมในระบบหมุนวนข้าวทำให้ลมพาความร้อนออกจากบริเวณหอบแห้ง จึงต้องใช้กำลังไฟฟ้าสูงขึ้นเพื่อให้มีอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศในหอบแห้งเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้กำลังไฟฟ้าต่างจากกรณีเดียวกันที่ยังไม่มีระบบลมหมุนวนข้าว ที่ใช้กำลังไฟฟ้าเพียง 180 วัตต์ ต่างกันถึง 2.83 เท่า

เมื่อพิจารณาในส่วนของเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้นพบว่า ข้าวเปลือกก่อนเพิ่มความชื้นซึ่งมีความชื้นอยู่ที่ประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก รูปแบบการอบแห้งเปล่า รูปแบบการตากแดด (Control) แบบติดตั้งครีบลับพื้นปลา มีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้นคือ 63.3508 28.8126 30.0705 และ 27.4888 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลของเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้นในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

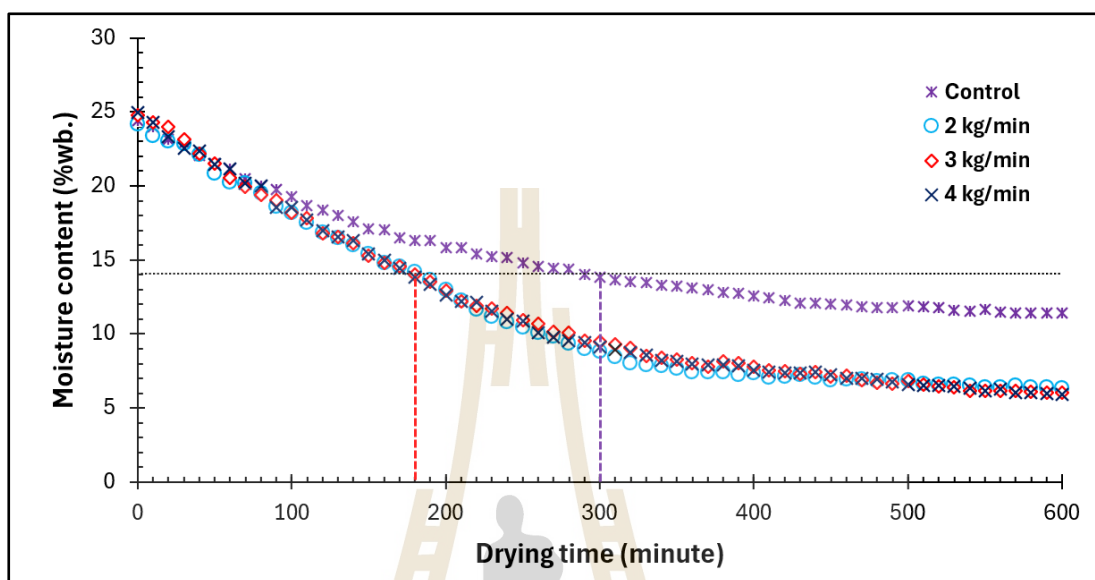
จากรูปที่ 4.9 จะพบว่า ข้าวเปลือกความชื้น 11 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียกมีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้นมากกว่าทั้ง 3 เงื่อนไขข้างต้น ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้นมากกว่าทั้ง 3 เงื่อนไขประมาณ 33.28 ถึง 35.86 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกจากประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก เป็น 24 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ซึ่งเป็นการเพิ่มความชื้นแบบรวดเร็ว ทำให้โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวเปลือกเกิดการเสียหาย

## 4.2 ผลการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกส่วนที่สาม เพื่อประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องต้นแบบ

### 4.2.1 ประเมินสมรรถนะด้านพฤติกรรมการอบแห้ง

ผลการทดสอบในส่วนที่สามได้จากการพิจารณาผลการทดลองในส่วนที่สองคือ ได้เงื่อนไขการอบแห้งแบบหอบแห้งเปล่าที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 กิโลกรัมต่อนาที และมีการศึกษาเพิ่มเติมคือมีการปรับค่าอัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 3 ค่า ได้แก่ 2, 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที เพื่อเปรียบเทียบกับการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการตากแดด (Control) จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาในแง่ของพฤติกรรมการอบแห้งพบว่า การอบแห้งแบบหอบแห้งเปล่าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2, 3, 4 กิโลกรัมต่อนาที ใช้เวลาในการอบแห้งในช่วงเวลาเดียวกันคือ 180 นาที ซึ่งใช้เวลาการอบแห้งน้อยกว่าวิธีการ

ตากแดด (Control) ถึง 120 นาที โดยวิธีการตากแดด (Control) ใช้เวลาในการอบแห้ง 300 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.10



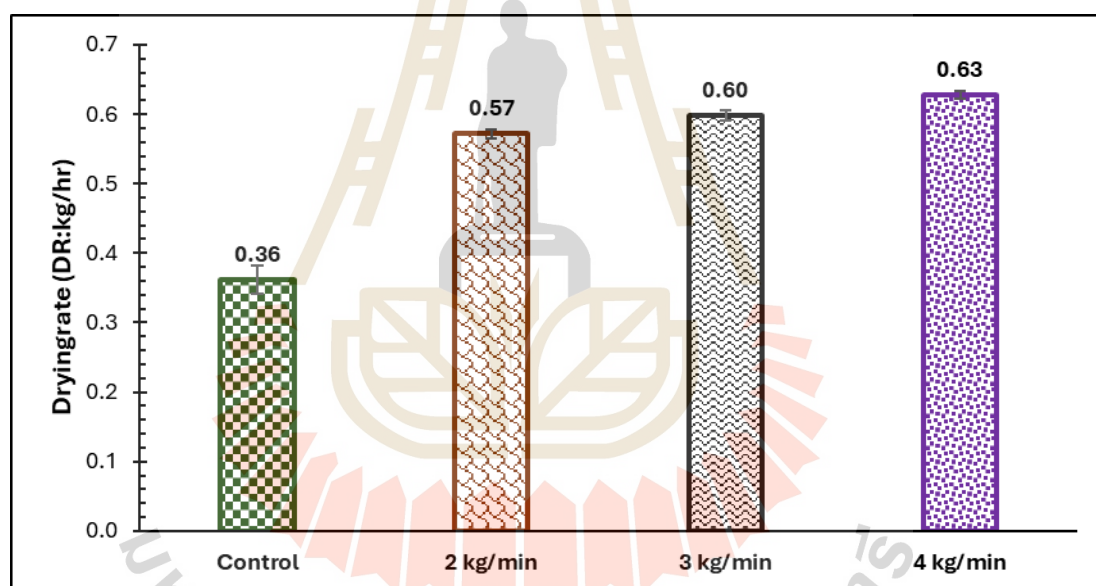
รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกที่ทดสอบอบแห้งด้วยเงื่อนไขที่ต่างกัน

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าการอบแห้งแบบหอบแห้งเป่าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2, 3, และ 4 กิโลกรัมต่อนาที ใช้เวลาในการอบแห้งในช่วงเวลาเดียวกันคือ 180 นาที แต่เมื่อพิจารณาความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกในแต่ละอัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกพบว่า การอบแห้งที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 4 กิโลกรัมต่อนาที จะมีความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกคือ 13.82 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ซึ่งต่ำกว่าการอบแห้งที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 3 และ 2 กิโลกรัมต่อนาที ซึ่งมีค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกคือ 14.00 14.22 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าที่ได้แตกต่างกันไม่มากนัก เนื่องจากกระบวนการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกมักแบ่งได้เป็น 2 ระยะเวลาสำคัญ คือ ช่วงอัตราคงที่ (Constant-rate period) และช่วงอัตราลดลง (Falling-rate period) โดยในระยะแรกการระเหยน้ำเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากน้ำที่อยู่บนผิวเมล็ดสามารถระเหยออกสู่บรรยากาศได้โดยตรง จึงมีความไวต่อปัจจัยจากภายนอก เช่น ความเร็วลมหรืออัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก แต่เมื่อความชื้นผิวระเหยจนหมด ระบบจะเข้าสู่ระยะอัตราลดลง ซึ่งเป็นช่วงที่ใช้เวลานานที่สุดในการอบแห้ง ในระยะ falling-rate กลไกหลักไม่ได้ขึ้นอยู่กับถ่ายเทจากผิวอีกต่อไป แต่จำกัดอยู่ที่การแพร่ของน้ำภายในโครงสร้างเมล็ด (diffusion-controlled process) น้ำจากแกนกลางจำเป็นต้องค่อย ๆ เคลื่อนผ่านผนังเซลล์ออกมาสู่ผิวก่อน จึงจะสามารถระเหยออกได้ ส่งผลให้ความเร็วของการอบแห้งลดลงอย่างชัดเจน และการเพิ่มอัตรา

การไหลของเมล็ดข้าวเปลือกแทบไม่ช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ และเหตุผลที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกไม่ส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเนื่องจากการทดลองที่ใช้อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2, 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที ซึ่งมีความใกล้เคียงกัน กล่าวคือการเพิ่มอัตราการไหลเพียงเล็กน้อยจึงไม่สามารถเร่งการกระจายน้ำจากแกนกลางของเมล็ดออกสู่ผิวได้ จึงทำให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

#### 4.2.2 ประเมินสมรรถนะด้านอัตราการอบแห้ง

พบว่า การอบแห้งแบบหอบแห้งเปล่าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2, 3, 4 กิโลกรัมต่อนาที และวิธีการตากแดด(Control) มีค่าอัตราการอบแห้ง 0.57 0.60 0.63 และ 0.36 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ผลของอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

จากรูปที่ 4.11 พบว่าการอบแห้งแบบหอบแห้งเปล่าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 4 กิโลกรัมต่อนาที มีอัตราการอบแห้งสูงสุดคือ 0.63 กิโลกรัมต่อชั่วโมง รองลงมาจะเป็นหอบแห้งเปล่าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 3 และ 2 กิโลกรัมต่อนาที มีอัตราการอบแห้งคือ 0.60 0.57 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ และในกรณีการตากแดดมีอัตราการอบแห้งต่ำที่สุดคือ 0.36 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งการเพิ่มอัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกจาก 2 เป็น 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที ส่งผลให้ปริมาณความชื้นที่เข้าสู่ระบบในแต่ละหน่วยเวลามีค่ามากขึ้น อีกทั้งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกภายในหอบแห้งช่วยเพิ่มการพลิกตัวและทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสต่ออากาศร้อนมากขึ้น

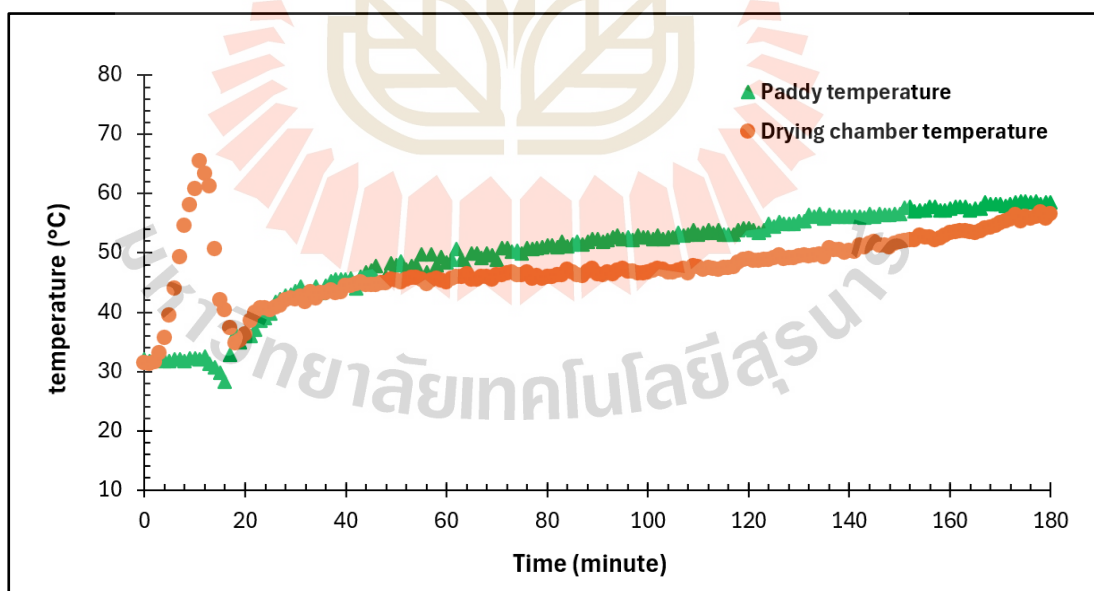
ทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนและการแพร่ของไอน้ำสูงขึ้น โดยเรียงลำดับจากต่ำไปสูงที่ 2, 3 และ 4 kg/min ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี ANOVA (Analysis of Variance) ร่วมกับ Tukey's HSD Multiple Comparison test ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR)

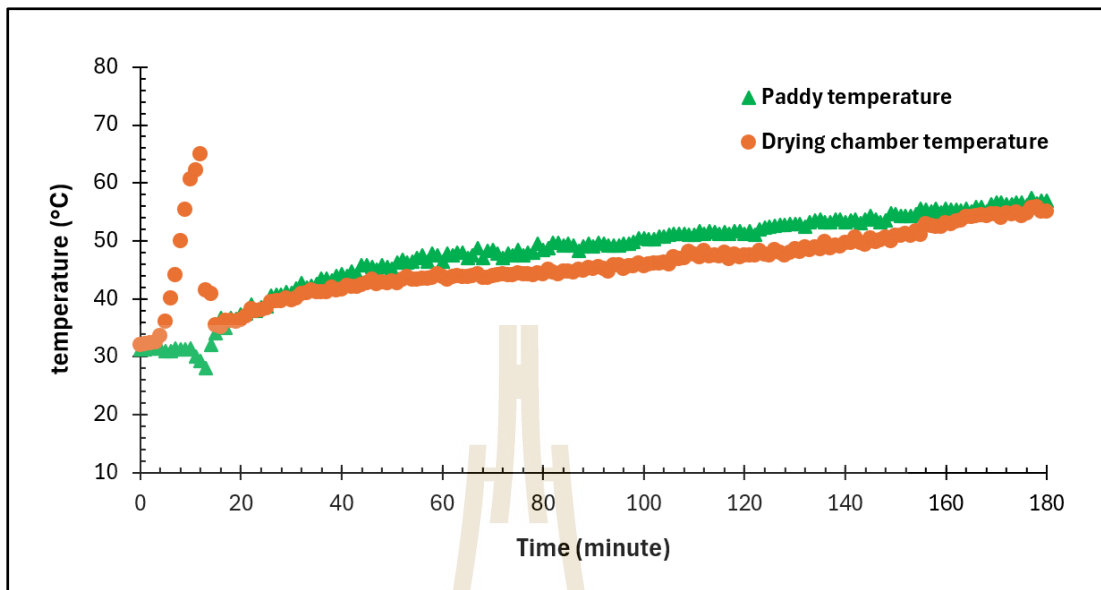
Methods	DR (kg <sub>water</sub> /h)
2 kg/min	0.571 ± 0.006 <sup>c</sup>
3 kg/min	0.598 ± 0.007 <sup>b</sup>
4 kg/min	0.627 ± 0.006 <sup>a</sup>

หมายเหตุ <sup>a, b, c</sup> ตัวอักษรยกกำลังภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึงค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ( $p < 0.05$ )

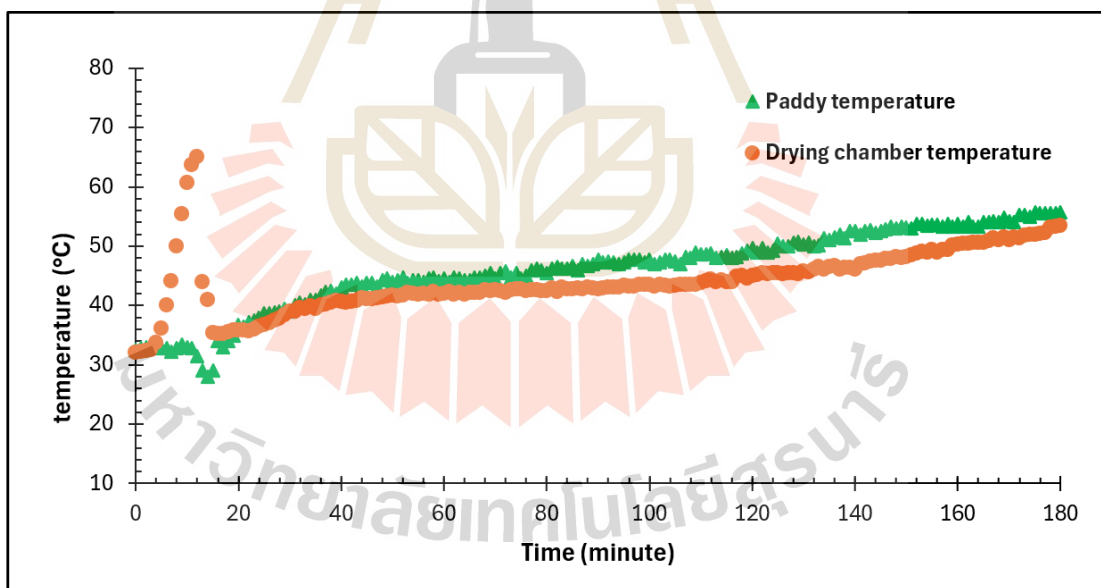
เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของข้าวเปลือกและอากาศในหอบแห้งที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.12-4.14



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของข้าวเปลือกและอากาศในหอบแห้งที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 กิโลกรัมต่อนาที



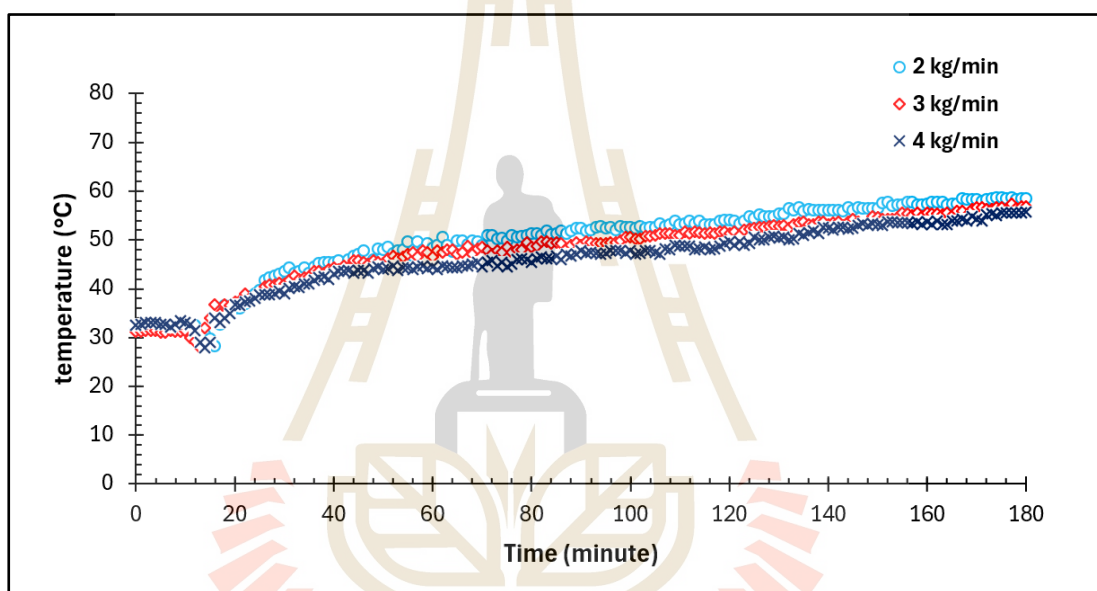
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของข้าวเปลือกและอากาศในหอบแห้งที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 3 กิโลกรัมต่อนาที



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของข้าวเปลือกและอากาศในหอบแห้งที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 4 กิโลกรัมต่อนาที

จากรูปที่ 4.12-4.14 เมื่อพิจารณาในช่วงแรกของการอบแห้งพบว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ถึงพักข้าวและอุณหภูมิเฉลี่ยของหอบแห้งมีค่าประมาณ 30 องศาเซลเซียส แต่เมื่อเวลาในการ

อบแห้งเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ถึงพักข้าวและอุณหภูมิเฉลี่ยของหอบแห้งก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตลอดระยะเวลาในการอบแห้ง และเมื่อพิจารณาการทดสอบทั้ง 3 อัตราการไหลพบว่า อุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ถึงพักข้าวมีแนวโน้มสูงกว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของหอบแห้งเล็กน้อย เนื่องจากถึงพักข้าวอยู่ด้านล่างหอบแห้งจึงทำให้ข้าวมีอุณหภูมิสะสมสูงขึ้น สะท้อนให้เห็นว่าการใช้รังสีอินฟราเรดในการอบแห้งมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงเลยทำให้อุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ถึงพักข้าวและอุณหภูมิเฉลี่ยของหอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกันในทุก ๆ ช่วงเวลาของการอบแห้ง เมื่อนำอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่ถึงพักข้าวทั้ง 3 อัตราการไหลมาเปรียบเทียบกัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.15

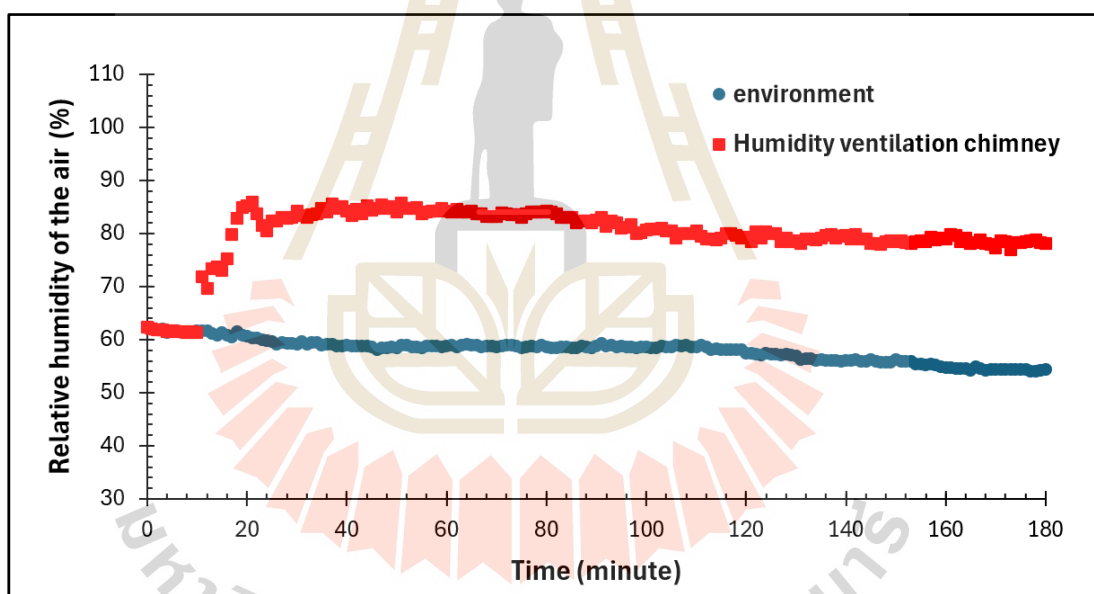


รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของข้าวเปลือก ที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที

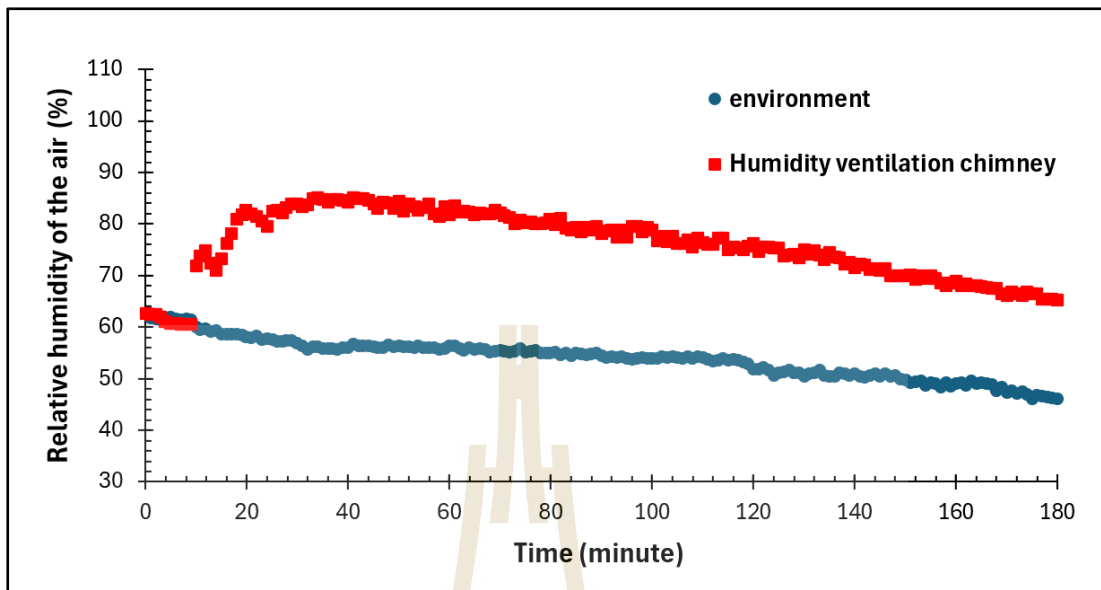
จากรูปที่ 4.15 ผลการเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของข้าวเปลือกทั้ง 3 อัตราการไหล พบว่าอัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกแต่ละระดับส่งผลให้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวมีค่าที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยเส้นของอัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 กิโลกรัมต่อนาทีอยู่ในระดับสูงสุดตลอดการทดลอง รองลงมาคือ 3 กิโลกรัมต่อนาที และต่ำสุดคือ 4 กิโลกรัมต่อนาที โดยอัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกส่งผลโดยตรงต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของเมล็ดที่ได้กล่าวคือ ที่อัตราการไหล 2 กิโลกรัมต่อนาที ซึ่งมีค่าเวลาในการพำนักในหอบแห้งหรือเรสซิเดนซ์ไทม์เท่ากับ 67 นาที 40 วินาที เมล็ดข้าวมีเวลาอยู่ในหอบแห้งนานที่สุด ทำให้ได้รับพลังงานความร้อนมากกว่าและมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด ขณะที่อัตราการไหล 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที มีค่าเวลา

เรสซิเดนซ์ใหม่ลดลงเหลือ 61 นาที 6 วินาที และ 56 นาที 24 วินาที ตามลำดับ ส่งผลให้อุณหภูมิของเมล็ดเพิ่มขึ้นช้ากว่า เนื่องจากเมล็ดมีเวลาสัมผัสกับอากาศร้อนภายในหอบแห้งน้อยลง กล่าวคือเมื่ออัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น เวลาที่อยู่ในหอบแห้งจะลดลง และพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่เมล็ดข้าวต่อรอบจะลดลงตามไปด้วย ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยรวมของระบบลดลง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าค่าเวลาเรสซิเดนซ์ใหม่เป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลโดยตรงต่ออุณหภูมิของเมล็ดและประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่อเนื่อง

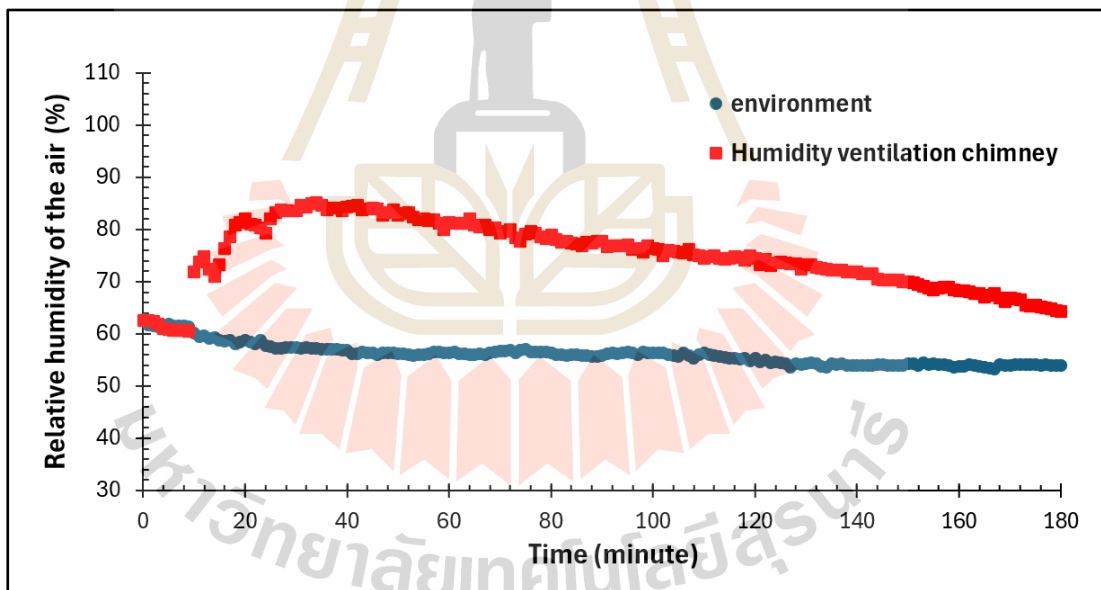
เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและเวลาของสิ่งแวดล้อมและปล่องระบายความชื้นที่เครื่องอบแห้ง ที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2.3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.16 - 4.18



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและเวลาของสิ่งแวดล้อมและปล่องระบายความชื้นที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 กิโลกรัมต่อนาที



รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและเวลาของสิ่งแวดล้อมและปล่องระบายความชื้นที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 3 กิโลกรัมต่อนาที

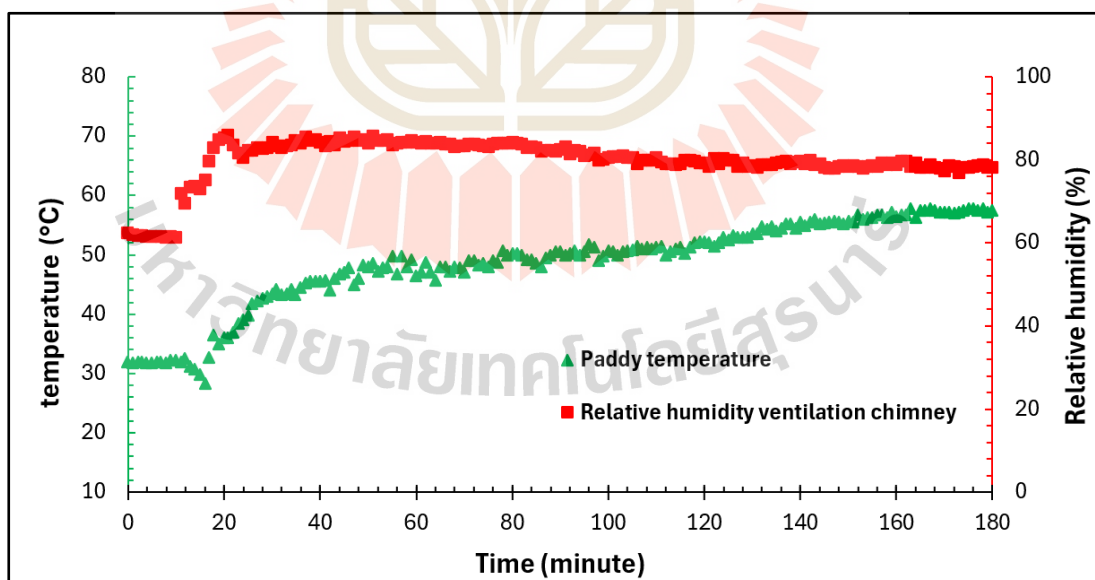


รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและเวลาของสิ่งแวดล้อมและปล่องระบายความชื้นที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 4 กิโลกรัมต่อนาที

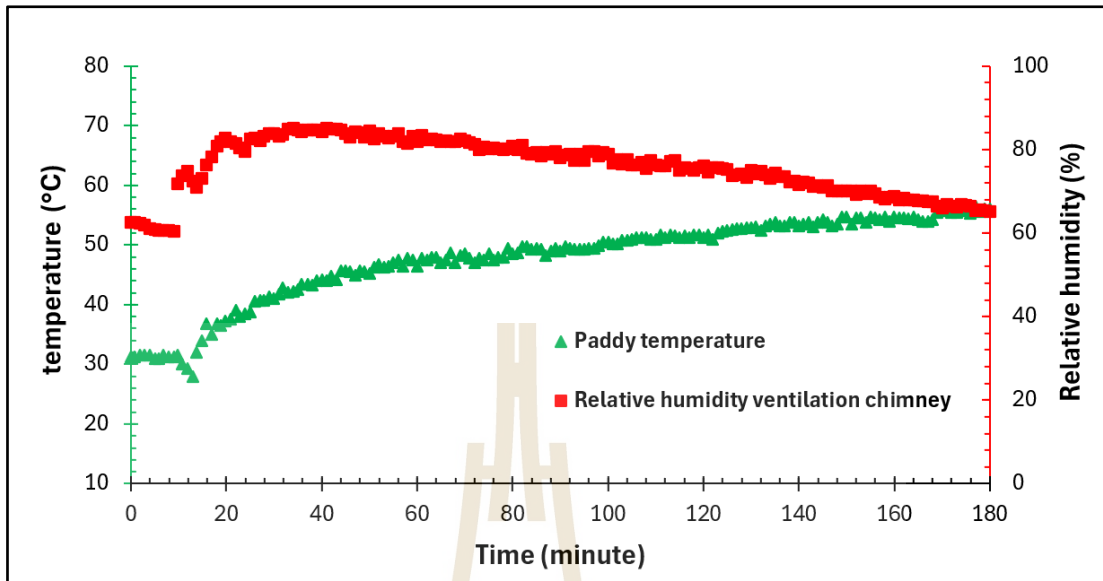
จากรูปที่ 4.16-4.18 จากการพิจารณารูปพบว่าระดับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในบริเวณปล่องระบายความชื้นของถังพักข้าวมีค่ามากกว่าสภาพแวดล้อมภายนอกอย่างชัดเจนในทุกอัตราการไหลของข้าวเปลือกที่ทำการทดลอง ทั้ง 2, 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที โดยในกรณีที่อัตราการไหลอยู่ที่ 2 กิโลกรัมต่อนาที ค่าความชื้นในปล่องระบายเพิ่มสูงขึ้นรวดเร็วในช่วงแรก จากนั้นค่อย ๆ

ทรงตัวและลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาผ่านไป ขณะที่ความชื้นของสิ่งแวดล้อมภายนอกมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะลดลงช้าและมีเสถียรภาพมากกว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 3 กิโลกรัมต่อนาที พบว่าลักษณะของเส้นกราฟใกล้เคียงกับอัตรา 2 กิโลกรัมต่อนาที แต่ความชื้นในปล่องระบายลดลงต่อเนื่องและชัดเจนขึ้นในช่วงเวลายาวนาน ขณะที่เส้นของสิ่งแวดล้อมยังคงแสดงการลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นกัน สำหรับการทดลองที่อัตราการไหล 4 กิโลกรัมต่อนาที ความชื้นในปล่องระบายมีการเพิ่มขึ้นในช่วงต้นเช่นเดียวกัน แต่มีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะเวลา แตกต่างจากอัตราการไหลของข้าวเปลือกที่ต่ำกว่าซึ่งค่ามีแนวโน้มคงตัวนานกว่า ส่วนความชื้นของสิ่งแวดล้อมยังคงลดลงช้าเช่นเดิม จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าอัตราการไหล 4 กิโลกรัมต่อนาที ทำให้ค่าความชื้นบริเวณปล่องระบายลดลงได้ต่อเนื่องและชัดเจนกว่าที่อัตรา 2 และ 3 กิโลกรัมต่อนาที สาเหตุเนื่องจากการป้อนเมล็ดข้าวเปลือกในปริมาณมากก่อให้เกิดการระเหยน้ำอย่างเข้มข้นในระยะเริ่มต้น แต่ในขณะเดียวกันก็เร่งการถ่ายเทมวลอากาศขึ้นนอกระบบได้มีประสิทธิภาพกว่า ส่งผลให้ความชื้นที่สะสมในปล่องถูกระบายออกไปอย่างต่อเนื่อง ทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ลดลงเด่นชัดกว่ากรณีอัตราการไหลที่ต่ำกว่า

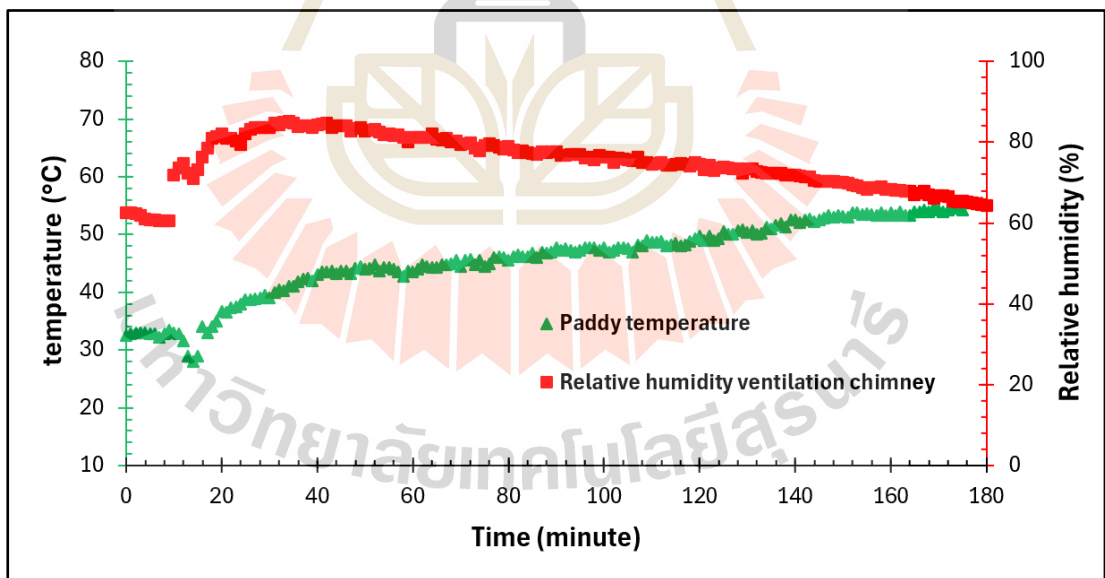
เมื่อพิจารณารูปภาพความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก (เส้นสีเขียว, แกน Y1) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ในปล่องระบายความชื้น (เส้นสีแดง, แกน Y2) กับเวลา (แกน X) ภายใต้อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2, 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.19 - 4.21



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก (เส้นสีเขียว, แกน Y1) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ในปล่องระบายความชื้น (เส้นสีแดง, แกน Y2) กับเวลา (แกน X) ภายใต้อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 กิโลกรัมต่อนาที



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก (เส้นสีเขียว, แกน Y1) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ในปล่องระบายความชื้น (เส้นสีแดง, แกน Y2) กับเวลา (แกน X) ภายใต้อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 3 กิโลกรัมต่อนาที

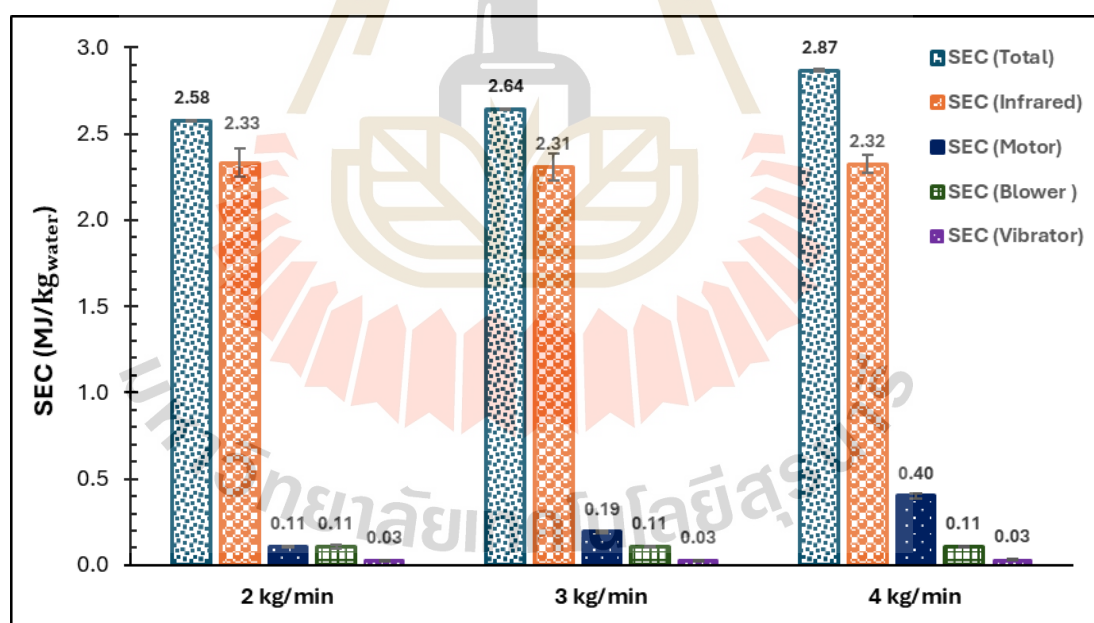


รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก (เส้นสีเขียว, แกน Y1) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ในปล่องระบายความชื้น (เส้นสีแดง, แกน Y2) กับเวลา (แกน X) ภายใต้อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 4 กิโลกรัมต่อนาที

จากรูปที่ 4.19-4.21 การทดสอบที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกที่ 2, 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที พบว่าอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก (เส้นสีเขียว) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาและคงตัวในช่วงท้าย ขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์บริเวณปล่องระบาย (เส้นสีแดง) มีค่าเพิ่มสูงในระยะแรกก่อนจะลดลงต่อเนื่อง โดยอัตราการไหลที่สูงขึ้นทำให้การถ่ายเทความร้อนสู่เมล็ดรวดเร็วและการระบายอากาศชั้นมีประสิทธิภาพมากกว่า ส่งผลให้กรณี 4 กิโลกรัมต่อนาที มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและการลดลงของความชื้นที่ชัดเจนกว่ากรณี 2 และ 3 กิโลกรัมต่อนาที สะท้อนถึงศักยภาพในการลดความชื้นของระบบที่ดีกว่า

#### 4.2.3 ประเมินสมรรถนะด้านค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC)

เมื่อพิจารณาในส่วนของคุณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะพบว่าการอบแห้งแบบหอบแห้งเป่าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2, 3, 4 กิโลกรัมต่อนาที มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานรวม 2.58 2.64 และ 2.87 MJ/kg<sub>water</sub> ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ผลของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

จากรูปที่ 4.22 เมื่อวิเคราะห์ในส่วนของคุณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมากที่สุดในทุกอัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกพบว่าฮีตเตอร์อินฟราเรด (Infrared) มีค่าความสิ้นเปลือง

พลังงานจำเพาะมากที่สุดและใกล้เคียงกันเนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิอากาศในหอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียสเท่ากัน และพบว่ารูปแบบการอบแห้งแบบหอบแห้งเปล่าทุกอัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก ที่มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของส่วนต่าง ๆ ที่ใกล้เคียงกันคือ ฮีตเตอร์อินฟราเรด (Infrared) โบว์เวอร์ (Blower) และมอเตอร์สั่นสะเทือน (Vibrator) และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในส่วนที่ค่อนข้างแตกต่างกันคือ มอเตอร์ที่ใช้ควบคุมอัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก กล่าวคือ ในกรณีที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 4 กิโลกรัมต่อนาที จะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมากกว่าในกรณีที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 3 และ 2 กิโลกรัมต่อนาที ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมในแต่ละเงื่อนไขการทดสอบพบว่าในกรณีที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกสูง (4 กิโลกรัมต่อนาที) จะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมากกว่าในกรณีที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกต่ำ (2 กิโลกรัมต่อนาที) ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี ANOVA (Analysis of Variance) ร่วมกับ Tukey's HSD Multiple Comparison test ดังแสดงในตารางที่ 4.2

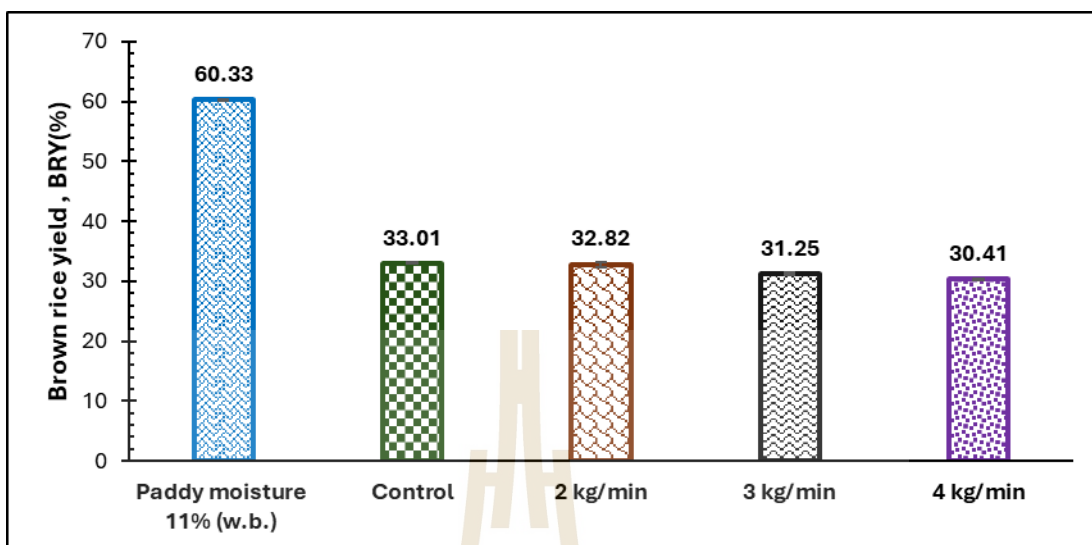
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC)

Methods	SEC <sub>total</sub> (MJ/kg water)
2 kg/min	2.578 ± 0.001 <sup>c</sup>
3 kg/min	2.645 ± 0.003 <sup>b</sup>
4 kg/min	2.874 ± 0.007 <sup>a</sup>

หมายเหตุ <sup>a, b, c</sup> ตัวอักษรยกกำลังภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึงค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ( $p < 0.05$ )

#### 4.2.4 ประเมินสมรรถนะด้านเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องตัน (Brown rice yield, BRY (%))

เมื่อพิจารณาในส่วนของเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องตันพบว่า ข้าวเปลือกก่อนเพิ่มความชื้นซึ่งมีความชื้นอยู่ที่ประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก รูปแบบการตากแดด (Control) และการอบแห้งแบบหอบแห้งเปล่าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2, 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที มีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องตันคือ 60.33 33.01 32.82 31.25 และ 30.41 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.23



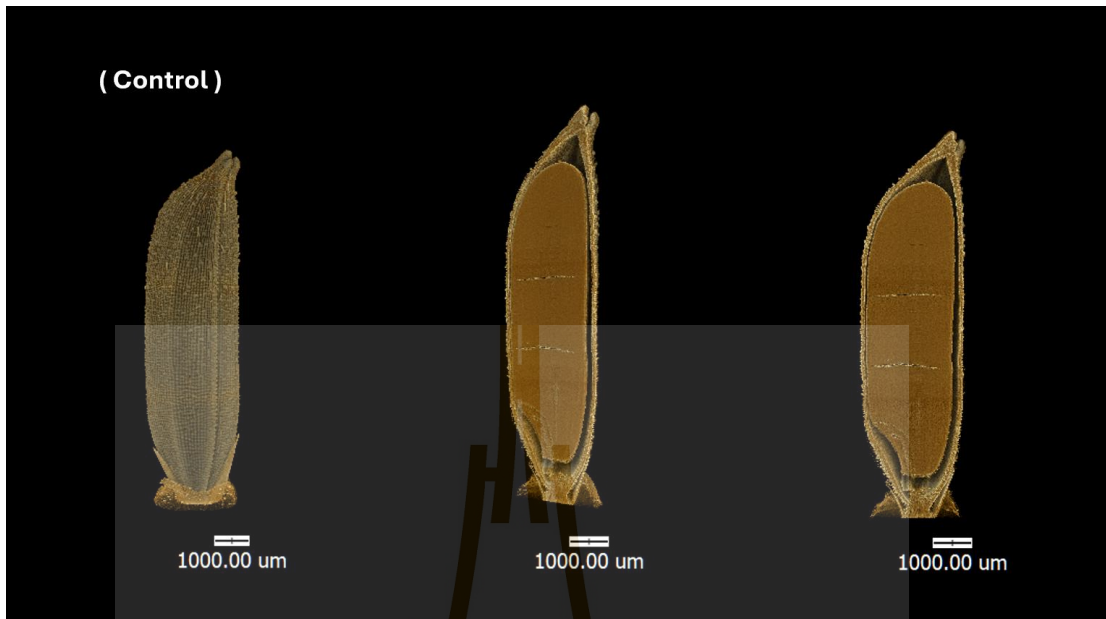
รูปที่ 4.23 ผลของเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้นในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

จากรูปที่ 4.23 จะพบว่า ข้าวเปลือกความชื้น 11 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียกมีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้นสูงถึง 60.33 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้นมากกว่าทั้ง 4 เงื่อนไขการอบแห้ง ประมาณ 27.51 ถึง 29.92 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มความชื้นข้าวเปลือกจาก 11 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก เป็น 24 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ซึ่งเป็นการเพิ่มความชื้นแบบรวดเร็ว ทำให้โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวเปลือกเกิดการเสียหาย กล่าวคือ เกิดรอยร้าวที่โครงสร้างของเมล็ดข้าวเปลือกซึ่งสังเกตได้จากภาพถ่าย SR-XTM ดังรูปที่ 4.23-4.27 เมื่อพิจารณารูปที่ 4.23 เป็นกรณีของเมล็ดข้าวเปลือกความชื้น 11 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก พบว่าโครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวเปลือกไม่มีรอยร้าวใด ๆ เกิดขึ้นเลยจึงส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้นที่ได้ค่อนข้างสูง เมื่อพิจารณารูปที่ 4.24 เป็นกรณีของการลดความชื้นด้วยวิธีการตากแดดจะเห็นว่าเกิดรอยร้าวในแนวตามขวางที่โครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวเปลือกแม้ไม่มีแรงทางกลมาเกี่ยวข้องในกระบวนการ จึงส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้นที่ได้ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับกรณีของเมล็ดข้าวเปลือกความชื้น 11 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก เช่นเดียวกันกับในกรณีของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหอบแห้งเปลาที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2, 3, 4 กิโลกรัมต่อนาที พบว่าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 4 กิโลกรัมต่อนาที ทำให้โครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวเปลือกเกิดรอยร้าวทั้งในแนวตามขวางและตามยาวมากกว่าการอบแห้งที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 3 และ 2 กิโลกรัมต่อนาที ตามลำดับ เนื่องจากที่อัตราการไหล 4 กิโลกรัมต่อนาทีเมล็ดข้าวเปลือกมีการหมุนวนในระบบมากที่สุดถึง 47 รอบ ในขณะที่อัตราการไหล 3 และ 2 กิโลกรัมต่อนาที มีการหมุนวนในระบบ 39 และ 29 รอบ ตามลำดับ ซึ่งการที่เมล็ดข้าวเปลือกหมุนเวียนภายในระบบอบแห้งหลายรอบส่งผลให้เกิดการแตกหักของเมล็ดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมล็ดข้าวต้องผ่านกระบวนการเคลื่อนที่และกระแทกซ้ำ ๆ

กับผนังหอบบแห้ง ท่อหมุนวน และอุปกรณ์ภายในระบบ ซึ่งทำให้เกิดแรงเฉือนและแรงกระแทกเชิงกล ต่อโครงสร้างของเมล็ดข้าว ดังแสดงในรูปถ่าย SR-XTM รูปที่ 4.24-4.28 ซึ่งภาพถ่าย SR-XTM ดังกล่าวก็สอดคล้องกับค่าของเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้นที่ได้รายงานมาแล้วในข้างต้น และเมื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี ANOVA (Analysis of Variance) ร่วมกับ Tukey's HSD Multiple Comparison test พบว่าในกรณีที่อบแห้งด้วยอัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกที่สูง (4 กิโลกรัมต่อนาที) ทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้นต่ำกว่าในกรณีที่อบแห้งด้วยอัตราการไหลเมล็ดข้าวเปลือกที่ต่ำ (2 กิโลกรัมต่อนาที) ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.24 โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่มีความชื้น 11 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก



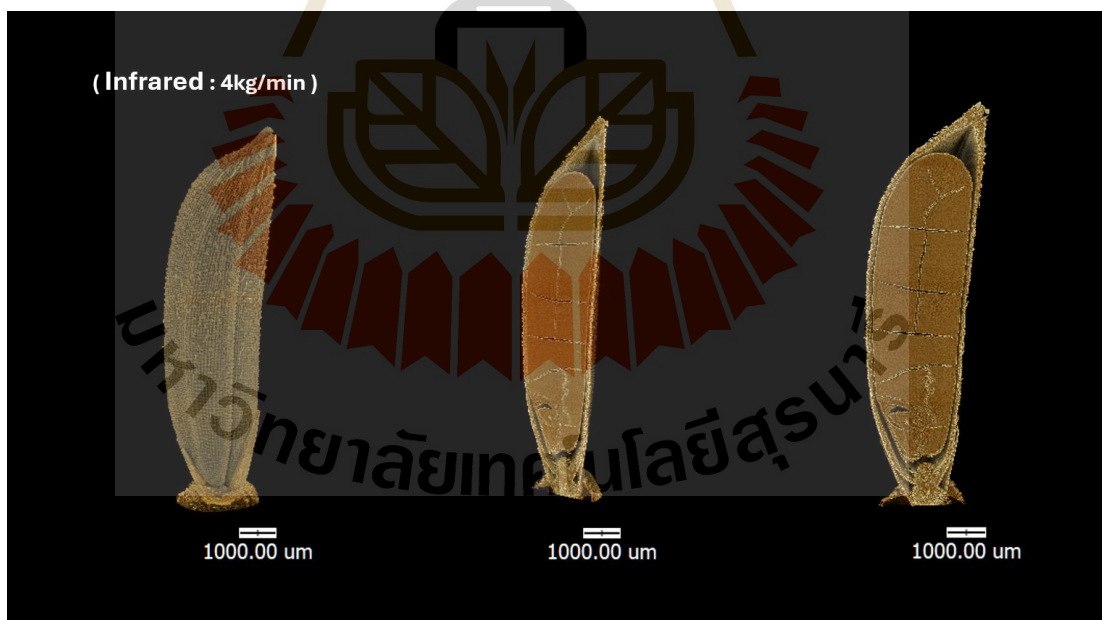
รูปที่ 4.25 โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่ลดความชื้นด้วยการตากแดด (Control)



รูปที่ 4.26 โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยหอบแห้งเป่าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 กิโลกรัมต่อนาที



รูปที่ 4.27 โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยหอบแห้งเป่าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 3 กิโลกรัมต่อนาที



รูปที่ 4.28 โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยหอบแห้งเป่าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 4 กิโลกรัมต่อนาที

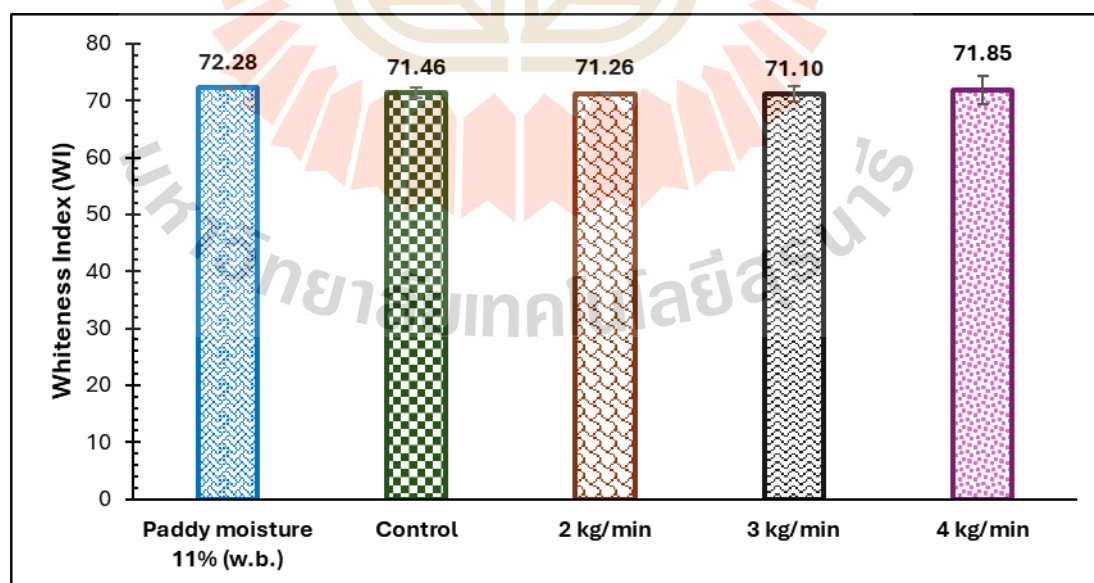
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้น(Brown rice yield, BRY (%))

Methods	Brown rice yield, BRY (%)
Control	33.01 ± 0.098 <sup>a</sup>
2 kg/min	32.817 ± 0.412 <sup>b</sup>
3 kg/min	31.254 ± 0.154 <sup>c</sup>
4 kg/min	30.413 ± 0.082 <sup>d</sup>

หมายเหตุ <sup>a, b, c, d</sup> ตัวอักษรยกกำลังภาษาอังกฤษที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกัน หมายถึงค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (p<0.05)

#### 4.2.5 ประเมินสมรรถนะด้านดัชนีความขาว (Whiteness index, WI)

เมื่อพิจารณาในส่วนของคุณค่าดัชนีความขาวของข้าวหลังการอบแห้งด้วยเงื่อนไขการอบแห้งที่แตกต่างกันพบว่า ข้าวเปลือกก่อนเพิ่มความชื้นซึ่งมีความชื้นอยู่ที่ประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก มีค่าดัชนีความขาวของข้าวมากที่สุดคือ 72.28 รองลงมาเป็นการอบแห้งแบบหอบแห้งเปล่าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 4 กิโลกรัมต่อนาที รูปแบบการตากแดด (Control) การอบแห้งแบบหอบแห้งเปล่าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 กิโลกรัมต่อนาที การอบแห้งแบบหอบแห้งเปล่าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 3 กิโลกรัมต่อนาที ซึ่งมีค่าคือ 71.85 71.46 71.26 และ 71.10 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 ค่าดัชนีความขาวของข้าวหลังการอบแห้งด้วยเงื่อนไขการอบแห้งที่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาค่าดัชนีความขาวของข้าวหลังการอบแห้งด้วยเงื่อนไขการอบแห้งที่แตกต่างกัน พบว่าในการอบแห้งแบบหอบแห้งเปล่าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2, 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที เมื่อนำค่าดัชนีความขาวของข้าวหลังการอบแห้งมาเปรียบเทียบกับ 2 ตัวอย่าง คือ ข้าวเปลือกความชื้น 11 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียกและข้าวเปลือกที่ผ่านการลดความชื้นด้วยการตากแดด (Control) พบว่าค่าดัชนีความขาวที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันอย่างมาก และเมื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี ANOVA (Analysis of Variance) ร่วมกับ Tukey's HSD Multiple Comparison test พบว่าทั้ง 3 เงื่อนไขการอบแห้งและ 2 ตัวอย่างที่ใช้เปรียบเทียบมีค่าดัชนีความขาวของข้าวหลังการอบแห้งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าดัชนีความขาว (Whiteness index, WI)

Methods	WHITENESS INDEX (WI)
Paddy moisture 11 % w.b.	69.817 ± 0.238 <sup>a</sup>
Control	71.465 ± 0.884 <sup>a</sup>
2 kg/min	72.235 ± 1.132 <sup>a</sup>
3 kg/min	71.095 ± 1.376 <sup>a</sup>
4 kg/min	71.852 ± 2.467 <sup>a</sup>

หมายเหตุ <sup>a</sup> ตัวอักษรยกกำลังภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึงค่าดังกล่าวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ( $p < 0.05$ )

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาการอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่อเนื่องในเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ซึ่งมีแนวคิดในการพัฒนาเครื่องอบแห้งโดยใช้รูปแบบการหมุนเวียนข้าวเปลือกให้อยู่ในหอบแห้งได้นานขึ้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาการอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่อเนื่องในเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรด เพื่อทดสอบและประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องต้นแบบ ซึ่งสามารถสรุปงานวิจัยได้เป็น 3 ส่วนการทดสอบดังนี้

##### 5.1.1 การทดสอบในส่วนที่ 1

เมื่อพิจารณาในส่วนของการทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวขวางการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งที่ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30–31 องศาเซลเซียส เป็น 42-43 องศาเซลเซียส พบว่าทั้ง 3 เงื่อนไขสามารถเพิ่มอุณหภูมิข้าวเปลือกได้ โดยแบบหอบเป่าที่อบด้วยอุณหภูมิอากาศ 80 องศาเซลเซียส ใช้เวลาน้อยที่สุดคือ 3.33 นาที รองลงมาจะเป็นเงื่อนไขแบบหอบเป่าที่อบด้วยอุณหภูมิอากาศ 60 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 4.67 นาที ในขณะที่แบบครีบลับฟันทปลาเป็นเงื่อนไขที่ใช้เวลามากที่สุดคือ 11.67 นาที และพบว่าเงื่อนไขแบบหอบเป่าและแบบครีบลับฟันทปลาที่อบด้วยอุณหภูมิอากาศ 60 องศาเซลเซียส มีการใช้พลังงานต่ำที่สุดและมีค่าเท่ากับคือ 0.10 กิโลวัตต์-ชั่วโมง เนื่องจากยังไม่มีดัชนีบ่งชี้ด้านคุณภาพของข้าวหลังการอบผู้วิจัยจึงเลือกเงื่อนไขที่ประหยัดพลังงานที่สุดไปทดสอบอบแห้งลดความชื้นข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้น 24 % w.b. ให้เหลือ 14 % w.b. พบว่าแบบหอบแห้งเป่าใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดคือ 95 นาที ในขณะที่แบบครีบลับฟันทปลาใช้เวลาถึง 140 นาที อย่างไรก็ตามการทดลองในส่วนนี้ยังไม่มี การติดตั้งระบบหมุนวนข้าว จึงได้นำเอา 2 เงื่อนไขที่ดีที่สุดจากการทดสอบในส่วนที่ 1 นี้ไปทดสอบต่อในการทดสอบส่วนที่ 2 สำหรับเครื่องที่ใช้ในการทดสอบส่วนที่ 1 นี้พบว่ามีข้อจำกัดคือ ไม่มีระบบหมุนวนข้าวเปลือก รองรับการผลิตข้าวแค่ 1.5 กิโลกรัม ซึ่งจะมีการปรับปรุงในการทดสอบส่วนที่ 2

### 5.1.2 การทดสอบในส่วนที่ 2

ผลการทดสอบในส่วนที่สองได้จากการพิจารณาผลการทดสอบในส่วนที่หนึ่งคือ ได้เงื่อนไขการอบแห้งแบบหอบแห้งเป่าและแบบครีบลับพื้นปลาที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส ทั้ง 2 รูปแบบ เพื่อเปรียบเทียบกับ การลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีการตากแดด (ชุดควบคุม, Control) ในส่วนแรกเป็นการทดสอบอบแห้งลดความชื้นข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้น 24 % w.b. ให้เหลือ 14 % w.b. พบว่าแบบหอบแห้งเป่าใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดคือ 125 นาที ในขณะที่แบบครีบลับพื้นปลาใช้เวลา 156 นาที และ Control ใช้เวลามากที่สุดคือ 235 นาที เมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้งพบว่าแบบหอบแห้งเป่ามีค่ามากที่สุดในขณะที่ Control มีค่าต่ำที่สุดคือ 0.10 และ 0.06 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ แบบหอบแห้งเป่ามีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุดคือ 15.38 MJ/kg<sub>water</sub> ในขณะที่แบบครีบลับพื้นปลาสูงถึง 36.35 MJ/kg<sub>water</sub> เมื่อพิจารณาในส่วนของเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้นพบว่า ข้าวเปลือกความชื้น 11 % w.b. มีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้นมากที่สุด ในขณะที่แบบ Control หอบแห้งเป่า และแบบครีบลับพื้นปลา มีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้นคือ 28.81 30.07 และ 27.49 % ตามลำดับ ผลจากการทดสอบในส่วนนี้ชี้ให้เห็นว่าแบบหอบแห้งเป่าที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส เป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุด จึงได้นำไปทดสอบต่อในการทดสอบส่วนที่ 3 สำหรับเครื่องที่ใช้ในการทดสอบส่วนที่ 2 นี้พบว่า มีข้อจำกัดคือ รองรับการทดสอบข้าวแค่ 2 กิโลกรัม และพบว่าการทดสอบนี้มีการใช้พลังงานจำเพาะค่อนข้างสูงเนื่องจาก ฮีตเตอร์อินฟราเรดรุ่นที่ใช้ทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากใช้งานไปนาน ๆ จะทำให้ไส้ฮีตเตอร์ไหลลงมาอยู่ด้านล่างจึงทำให้อุณหภูมิในหอบแห้งไม่สม่ำเสมอตามที่ต้องการและต้องใช้กำลังไฟสูงในการรักษาอุณหภูมิในหอบแห้ง ดังนั้นในการทดสอบส่วนต่อไปจะมีการปรับปรุงข้อบกพร่องจุดนี้ให้ดีขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนและประหยัดพลังงานในกระบวนการอบแห้ง ซึ่งจะมีการปรับปรุงในการทดสอบส่วนที่ 3

### 5.1.3 การทดสอบในส่วนที่ 3

เป็นการนำเงื่อนไขที่ดีที่สุดจากการทดสอบในส่วนที่ 2 มา คือแบบหอบแห้งเป่าที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส เมื่อแบ่งตามดัชนีชี้วัดทั้ง 5 ด้าน ประกอบด้วย พฤติกรรมการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ปริมาณเปอร์เซ็นต์กล้องข้าวต้น และดัชนีความขาวของข้าว สามารถสรุปได้ดังนี้

**5.1.3.1 พฤติกรรมการอบแห้ง** พบว่าการอบแห้งแบบหอบแห้งเปล้าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2, 3, 4 กิโลกรัมต่อนาที ใช้เวลาในการอบแห้งอยู่ในช่วงเดียวกันคือ 180 นาที ซึ่งใช้เวลาการอบแห้งน้อยกว่าวิธีการตากแดด (Control) ถึง 120 นาที โดยวิธีการตากแดด (Control) ใช้เวลาในการอบแห้ง 300 นาที แต่เมื่อพิจารณาความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกในแต่ละอัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกพบว่าการอบแห้งที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 4 กิโลกรัมต่อนาทีจะมีความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกคือ 13.82 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ซึ่งต่ำกว่าการอบแห้งที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 3 และ 2 กิโลกรัมต่อนาที ซึ่งมีค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกคือ 14.00 14.22 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ตามลำดับ

**5.1.3.2 อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR)** พบว่าการอบแห้งแบบหอบแห้งเปล้าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 4 กิโลกรัมต่อนาที มีอัตราการอบแห้งสูงสุดคือ 0.63 กิโลกรัมต่อชั่วโมง รองลงมาจะเป็นหอบแห้งเปล้าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 3 และ 2 กิโลกรัมต่อนาที มีอัตราการอบแห้งคือ 0.60 0.56 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ และในกรณีการตากแดดมีอัตราการอบแห้งต่ำที่สุดคือ 0.36 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เมื่อนำข้อมูลอัตราการอบแห้งไปวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าการอบแห้งแบบหอบแห้งเปล้าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกสูง (4 กิโลกรัมต่อนาที) ส่งผลให้ค่าอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 3 และ 2 กิโลกรัมต่อนาที อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

**5.1.3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC)** พบว่าการอบแห้งแบบหอบแห้งเปล้าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 กิโลกรัมต่อนาที มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุดคือ 2.58 MJ/kg<sub>water</sub> รองลงมาจะเป็นการอบแห้งแบบหอบแห้งเปล้าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที ซึ่งมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะคือ 2.64 และ 2.87 MJ/kg<sub>water</sub> ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมในแต่ละเงื่อนไขการทดสอบไปวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าในกรณีที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกสูง (4 กิโลกรัมต่อนาที) จะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมากกว่าในกรณีที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกต่ำ (2 กิโลกรัมต่อนาที) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

**5.1.3.4 ปริมาณเปอร์เซ็นต์กล้องข้าวตัน (Head rice yield, HRY)** พบว่าข้าวเปลือกที่ลดความชื้นด้วยวิธีการตากแดดมีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตันมากที่สุดคือ 35.57 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาจะเป็นการอบแห้งแบบหอบแห้งเปล้าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2, 3, 4 กิโลกรัม

ต่อหน้าที่ ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ขาวต้น 32.82 31.25 และ 30.41 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลปริมาณเปอร์เซ็นต์ขาวต้นไปวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าในกรณีที่อบแห้งด้วยอัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกที่สูง (4 กิโลกรัมต่อหน้าที่) ทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ขาวกลองต้นต่ำกว่าในกรณีที่อบแห้งด้วยอัตราการไหลเมล็ดข้าวเปลือกที่ต่ำ (2 กิโลกรัมต่อหน้าที่) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

**5.1.3.5 ในส่วนของดัชนีความขาว (Whiteness index, WI) พบว่าในการอบแห้งแบบหอบแห้งเป่าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 4 กิโลกรัมต่อหน้าที่ มีค่าดัชนีความขาวมากที่สุดคือ 71.85 รองลงมาเป็นข้าวเปลือกที่ลดความชื้นด้วยวิธีการตากแดด การอบแห้งแบบหอบแห้งเป่าที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 และ 3 กิโลกรัมต่อหน้าที่ ซึ่งมีค่าดัชนีความขาว 71.46 71.26 และ 71.10 ตามลำดับ และเมื่อนำข้อมูลของดัชนีความขาวไปวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าทั้ง 3 เงื่อนไขการอบแห้งและ 2 ตัวอย่างที่ใช้เปรียบเทียบมีค่าดัชนีความขาวของข้าวหลังการอบแห้งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์**

สำหรับเครื่องที่ใช้ในการทดสอบส่วนที่ 3 นี้พบว่ามีข้อจำกัดคือ รองรับการทดสอบข้าวเพียง 15 กิโลกรัม และพบว่ามีข้อจำกัดในส่วนของเมล็ดข้าวเปลือกได้รับความร้อนไม่สม่ำเสมอทั่วถึงกันเท่าที่ควร เนื่องจากแบบหอบแห้งเป่าในหอบจะมีความหนาของชั้นของเปลือกประมาณ 2 เซนติเมตร จึงทำให้ข้าวเปลือกชั้นด้านนอกไม่ได้รับความร้อนจากอินฟราเรด ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำครีบล้อกลับฟลามาติดตั้งในหอบแห้งเป่าและเป็นการทดสอบแบบข้าวเต็มหอบเช่นเดียวกับการทดสอบแบบหอบแห้งเป่า เพื่อให้เมล็ดข้าวเปลือกเกิดการไหลแบบเลี้ยวไปมาในหอบแห้งซึ่งจะทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีโอกาสได้รับความร้อนจากอินฟราเรดมากขึ้น และจะเป็นการเพิ่มการคลุกเคล้ากันไปในตัวด้วย ซึ่งอาจจะทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นลง อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ประหยัดพลังงาน และได้ความชื้นสุดท้ายของข้าวมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น สำหรับข้อจำกัดดังกล่าวจะมีการปรับปรุงในการทดสอบครั้งต่อไป

#### 5.1.4 การทดสอบในส่วนที่ 1-3

จากการทดสอบในส่วนที่ 1-3 สามารถสรุปได้ว่าเงื่อนไขการอบแห้งแบบหอบแห้งเป่าที่อุณหภูมิอากาศ 60 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 2 กิโลกรัมต่อหน้าที่ เป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดเนื่องจากมีค่าอัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เปอร์เซ็นต์ขาวกลองต้น และดัชนีความขาวของข้าว อยู่ในเกณฑ์ที่ดี กล่าวคือ สามารถลดเวลาในการอบแห้ง ประหยัดพลังงาน และรักษาคุณภาพของเมล็ดข้าวได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ปรับปรุงเครื่องอบแห้งในส่วนของท่าน้ำของท่อลำเลียงเมล็ดข้าวเปลือกให้สามารถปรับอัตราการไหลได้แตกต่างกันเพิ่มมากขึ้นเพื่อเพิ่มช่วงของอัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกในการทดลองเพื่อจะได้วิเคราะห์ได้ละเอียดเพิ่มมากขึ้น

5.2.2 เจาะรูถังพักข้าวเปลือกให้มีรูสำหรับระบายความชื้นเพิ่มขึ้น รวมไปถึงการติดตั้งพัดลมระบายความชื้นที่ปล่องระบายความชื้น ซึ่งจะทำความชื้นสามารถระบายออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้เร็วยิ่งขึ้น

5.2.3 ใช้ข้าวเปลือกสดหลังการเก็บเกี่ยวตามฤดูกาลมาใช้ในการทดสอบอบแห้ง เพื่อลดปัญหาการแตกหักของเมล็ดข้าวเปลือกที่เกิดจากการเพิ่มความชื้น





รายการอ้างอิง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายการอ้างอิง

- กองวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว. (2559). องค์ความรู้เรื่องข้าว. สืบค้นจาก <https://newwebs2.ricethailand.go.th/webmain/rkb3/index.htm>
- จิตรรัตน์ จอกแก้ว. (2559). การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- เทวรัตน์ ทิพย์วิมล. (2554). การทำแห้งและการเก็บรักษาผลผลิตเกษตร. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ภราดร หนูทอง, ไพรัชต์ดิฐ คณารักษ์กุล, รัชตวรรณ เอ็มโอช, & อนุชา พรหมสิทธิ์. (2014). การวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนของเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน. *Journal of Engineering and Innovation*, 7(2), 73-81.
- สั๊กมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา. (2555). การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. กรุงเทพฯ: ท้อป.
- สมชาติ โสภณธณฤทธิ (2450). การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สำนักงานเกษตรและสหกรณ์ จังหวัดสุรินทร์, (2563). ข้าว ประโยชน์ของข้าวไทย ข้าวหอมมะลิ ข้าวกล้อง ข้าวกล้องงอก. สืบค้นจาก [https://www.opsmoac.go.th/surin-local\\_wisdom-preview-422891791846](https://www.opsmoac.go.th/surin-local_wisdom-preview-422891791846)
- อภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว. (2564). การพัฒนาวิธีการวัดและประเมินความชื้นข้าวเปลือกตามเวลาจริง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. pp. 34-35.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2547). ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน คณะอุตสาหกรรมเกษตร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร.

- AATCC. (2011). Evaluation procedure 110: Whiteness of textiles (CIE method). American Association of Textile Chemists and Colorists.
- Abe, T. & Afzal, T.M. (1997). Thin-layer infrared radiation drying of rough rice. *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 67, pp. 289–297.
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). (2000). *Official Methods of Analysis*. 17th ed., Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, Maryland.
- AATCC. (2011). *AATCC Technical Manual*. American Association of Textile Chemists and Colorists.
- Banaszek, M. M. & Siebenmorgen, T. J. (1990). Head Rice Yield Reduction Rates Caused by Moisture Adsorption. *American Society of Agricultural*, 33(4).
- Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W. and Hall, C. W. (1992). *Drying and Storage of Grains and Oilseeds*. An AVI Book, U.S.A., 450 p.
- Cengel, Y. A. (2003). *Heat Transfer a Practical Approach*. second edition, Published by McGraw–Hill.
- Chakraverty, A. and Singh, R. P. (2001). *Postharvest Technology*. Science Publishers, Inc., U.S.A., 356 p.
- Chua, K. J., Chou, S. K., & Ho, J. C. (2019). Energy and economic analysis of infrared drying systems for food and agricultural products. *Drying Technology*, 37(2), 123–136.
- EL-Mesery, H. S., Kamel, R. M., & Emara, R. Z. (2021). Influence of infrared intensity and air temperature on energy consumption and physical quality of dried apple using hybrid dryer. *Case Studies in Thermal Engineering*, 27, 101365. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101365>
- Ginzburg, A.S. (1969). *Application of infrared radiation in food processing*. Chemical and Process Engineering Series, Leonard Hill, London.

- Goto, H., Asanome, N., Suzuki, K., Sano, T., Saito, H., Abe, Y., Chuba, M., & Nishio, T. (2014). Objective evaluation of whiteness of cooked rice and rice cakes using a portable spectrophotometer. *Breeding Science*, 63(5), 489–494. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.63.489>
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6th ed.). John Wiley & Sons, New York.
- Juliano, B. O. (1985). *Rice chemistry and technology* (2nd ed.). American Association of Cereal Chemists (AACC).
- Kumar, A., Singh, S., & Mishra, R. (2021). Performance evaluation and energy analysis of hybrid infrared dryer for grain drying applications. *Renewable Energy*, 174, 187–196.
- Kunze O R, Calderwood D L (1980). *Systems for Drying Rice, Drying and Storage of Agricultural Crops* AVI Pub. Co. Ltd., Connecticut, USA
- Kennedy G, Burlingame B, Nguyen N. (2002). Nutrient impact assessment of rice in major rice-consuming countries. Food and Agriculture Organization of the United Nations. [Online] Retrieved from :<http://www.fao.org/3/Y6159T/y6159t04.htm#Note1>.
- Metaxas, A. C., & Meredith, R. J. (1983). *Industrial microwave heating*. London: Peter Peregrinus Ltd.
- Mihindukulasuriya, S.D.F., Jayasuriya, H.P.W. (2013). Mathematical modeling of drying characteristics of chilli in hot air oven and fluidized bed dryers. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol. 15, pp. 154 – 166.
- Mongpraneet, S., Abe, T., & Tsurusaki, T. (2002). Accelerated drying of rough rice by far-infrared radiation under relatively low air humidity. *Journal of Food Engineering*, 55(2), 147–156. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00054-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00054-4)

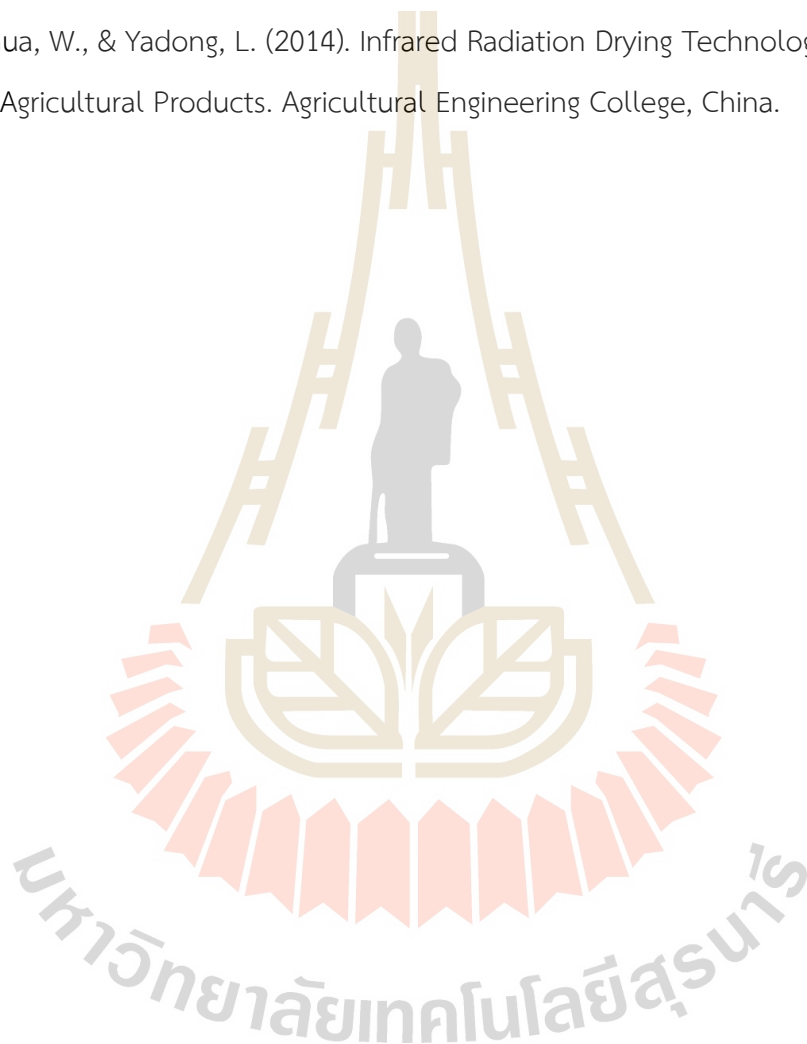
- Niibori, F. and Motoi, S. (1988). Evaporation of vegetables used by infrared rays. *Food Processing*, vol. 23, pp. 38 – 42.
- OpenStax. (2022). *College Physics 2e: Humidity, Evaporation, and Boiling*. OpenStax. Retrieved from <https://openstax.org/books/college-physics-2e/pages/13-6-humidity-evaporation-and-boiling>
- Pan, Z., Amaratunga, K. S. P., & Thompson, J. F. (2007). Relationship between rice sample milling conditions and milling quality. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1307–1313. <https://doi.org/10.13031/2013.23607>
- Paul, H., Nath, B. C., Bhuiyan, M. G. K., Paul, S., Islam, S., Huda, M. D., & Shozib, H. B. (2019). Effect of degree of milling on rice grain quality. *Journal of Agricultural Engineering*, 42(4), 69–76.
- Penggang Pei, Ke Xiong, Xiaoyi Wang, Baoguo Sun, Zhiyao Zhao, Jiping Xu, Xuebo jin, Hong Ye, Junsong Xiao, Jianlei Kong (2021). Modelling the effect of environmental factors on the growth of *Aspergillus parasiticus* and mycotoxin production in paddy during storage, 93, 101846, Beijing, 100048, China.
- Relative Humidity. (n.d.). *ScienceDirect Topics*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/relative-humidity>
- Rotronic Technical Note. (n.d.). *Humidity Definitions*. Rotronic. Retrieved from [https://www.rotronic.com/media/productattachments/files/h/u/humidity\\_definitions\\_weba.pdf](https://www.rotronic.com/media/productattachments/files/h/u/humidity_definitions_weba.pdf)
- Saelim N. (2017). *Continuous Flow Paddy Drying With Infrared Radial Radiation Technique*. M.S. Thesis, Mechanical Engineering, Suranaree University of technology.
- ScienceDirect. (2023). *Postharvest changes in rice grain quality during storage*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com>

- Sharma, G. P., Prasad, S., & Arai, N. (2014). Optimization of infrared radiation drying of onion slices. *International Journal of Food Engineering*, 10(3), 479–490. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2013-0060>
- Sila, B. (2022). Development of a hybrid infrared-assisted paddy dryer for improving energy efficiency and rice quality. M.S. Thesis, Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology.
- SIMSCALE. (2023). การถ่ายเทความร้อนคืออะไร?  
สืบค้นจาก:<https://www.simscale.com/docs/simwiki/heat-transfer-thermal-analysis/what-is-heat-transfer/>
- Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S., & Rordprapat, W. (2018). Energy efficiency and drying characteristics of paddy using infrared radiation. *Journal of Stored Products Research*, 78, 45–53.
- Thailandindustry. (n.d.). Infrared radiation spectrum. Retrieved from <http://www.thailandindustry.com>
- Wongbubpa N. (2014). Operating Curves of The Elbowed Spouted Bed Paddy Dryer. M.S. Thesis, Mechanical Engineering, Suranaree University of technology.
- Wongbubpa N and Chitsomboon T. (2014). Sustain Spouted Bed Paddy Dryer with Internal Grates, The 28th Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand; 2014 October 15-17; Khon Kaen, Thailand.
- Wongbubpa N and Chitsomboon T. (2022). The Study of Paddy Drying in Zig Zag Pipe Spouted Bed Dryer. *Srinakharinwirot University Engineering Journal* (2022) 17(1), 53-63
- Wongbubpa N, Phucronghin K, Muangklang E, Somwang P, Kogphimai D, Oranon K and Wongbubpa W. (2024, July). Spouted Bed Paddy Dryer Swirling In The Bulb. The 38th Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand. Pathum Thani, Thailand.

Yuanjie Du, Jianchun Yan, Hai Wei, Huanxiong Xie, Yanghua Wu, Jinge Zhou,

Drying kinetics of paddy drying with graphene far-infrared drying equipment at different IR temperatures, radiations-distances, grain-flow, and dehumidifying-velocities, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 43,2023, 102780, ISSN 2214-157X, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102780>.

Zhonghua, W., & Yadong, L. (2014). *Infrared Radiation Drying Technology of Agricultural Products*. Agricultural Engineering College, China.





ภาคผนวก ก

ตารางผลการทดลอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## ภาคผนวก ก

ในบทนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับการรายงานตารางบันทึกผลการทดสอบ ซึ่งหัวข้อการทดสอบที่จะรายงานผลประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ตารางบันทึกผลการทดสอบส่วนที่ 1 2 และ 3 แสดงดังนี้

### ตารางบันทึกผลการทดสอบส่วนที่ 1

ตารางที่ ก.1 เวลาที่ใช้ทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิ 42-43 องศาเซลเซียส

เงื่อนไขการอบแห้ง	ครั้งที่	เวลาที่ใช้ทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเพิ่มเป็น 42-43 °C			
		เวลาที่ใช้ทั้งหมด (เริ่ม-จบ)	ค่าเฉลี่ย	เวลาที่ใช้ในการอบเพิ่มอุณหภูมิ	ค่าเฉลี่ย
		(minute)			
Expanded metal 60 °C	1	33.6	34.00	9.4	9.67
	2	34.4		9.9	
	3	34		9.7	
Expanded metal 80 °C	1	24.4	24.67	5.8	6.00
	2	25.1		6.2	
	3	24.5		6	
Truncated cone fines 60 °C	1	34.2	34.00	11.2	11.67
	2	33.6		12.1	
	3	34.2		11.7	
Truncated cone fines 80 °C	1	27.8	28.00	6.4	6.67
	2	28.6		6.9	
	3	27.6		6.7	
Hollow drying chamber 60 °C	1	24.3	24.00	4.4	4.67
	2	23.5		4.9	
	3	24.2		4.7	

ตารางที่ ก.1 เวลาที่ใช้ทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิ 42-43 องศาเซลเซียส (ต่อ)

เงื่อนไขการอบแห้ง	ครั้งที่	เวลาที่ใช้ทำให้ข้าวเปลือก มีอุณหภูมิเพิ่มเป็น 42-43 °C			
		เวลาที่ใช้ ทั้งหมด (เริ่ม-จบ)	ค่าเฉลี่ย	เวลาที่ใช้ในการ อบเพิ่มอุณหภูมิ	ค่าเฉลี่ย
		(minute)			
Hollow drying chamber 80 °C	1	17.8	18.00	3.1	3.33
	2	18.3		3.5	
	3	17.9		3.4	

ตารางที่ ก.2 ค่าพลังงานที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิข้าวเปลือกให้มีอุณหภูมิ 42-43 องศาเซลเซียส

เงื่อนไขการอบแห้ง	ครั้งที่	ค่าพลังงานที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิข้าวเปลือก ให้มีอุณหภูมิ 42-43 องศาเซลเซียส	
		ค่าพลังงานที่ใช้ ในแต่ละครั้ง	ค่าเฉลี่ย
		(kWh)	
Expanded metal 60 °C	1	0.136	0.15
	2	0.163	
	3	0.139	
Expanded metal 80 °C	1	0.204	0.19
	2	0.2	
	3	0.176	
Truncated cone fines 60 °C	1	0.098	0.10
	2	0.104	
	3	0.1	
Truncated cone fines 80 °C	1	0.157	0.15
	2	0.14	
	3	0.151	

ตารางที่ ก.2 ค่าพลังงานที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิข้าวเปลือกให้มีอุณหภูมิ 42-43 องศาเซลเซียส (ต่อ)

เงื่อนไขการอบแห้ง	ครั้งที่	ค่าพลังงานที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิข้าวเปลือกให้มีอุณหภูมิ 42-43 องศาเซลเซียส	
		ค่าพลังงานที่ใช้ในแต่ละครั้ง	ค่าเฉลี่ย
		(kWh)	
Hollow drying chamber 60 °C	1	0.104	0.10
	2	0.108	
	3	0.091	
Hollow drying chamber 80 °C	1	0.136	0.13
	2	0.142	
	3	0.117	

ตารางที่ ก.3 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขแบบหอบแห้งเปล่า

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักเริ่มต้นของเมล็ด ข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของเมล็ด ข้าวเปลือกหลังการอบด้วย ตู้อบลมร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐาน เปียก (% w.b.)
0	5.59	4.50	24.70
5	6.72	5.42	23.99
10	5.34	4.34	23.04
15	5.41	4.42	22.40
20	5.09	4.19	21.48
25	5.39	4.47	20.58
30	5.21	4.34	20.05
35	5.24	4.39	19.36
40	5.35	4.49	19.15
45	5.45	4.59	18.74
50	5.36	4.56	17.54
55	6.91	5.89	17.32
60	5.41	4.64	16.59
65	5.14	4.44	15.77
70	5.43	4.70	15.53
75	5.63	4.90	14.90
80	5.56	4.85	14.64
85	5.75	5.04	14.09
90	5.13	4.53	13.25
95	5.25	4.64	13.15

ตารางที่ ก.4 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขแบบครีบลับพื้นปลา

เวลา (นาที)	น้ำหนักเริ่มต้นของเมล็ด ข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของเมล็ด ข้าวเปลือกหลังการอบด้วย ตู้อบลมร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐาน เปียก (% w.b.)
0	5.20	4.17	24.70
5	5.18	4.16	24.52
10	5.33	4.3	23.95
15	5.24	4.24	23.58
20	5.47	4.44	23.20
25	5.46	4.44	22.97
30	5.32	4.34	22.58
35	5.24	4.28	22.43
40	5.22	4.28	21.96
45	5.15	4.23	21.75
50	5.30	4.36	21.56
55	5.15	4.26	20.89
60	5.08	4.22	20.38
65	5.73	4.76	20.38
70	5.36	4.47	19.91
75	5.23	4.38	19.41
80	5.09	4.27	19.20
85	5.44	4.57	19.04
90	5.10	4.32	18.06
95	5.18	4.38	18.26
100	4.45	3.77	18.04
105	4.27	3.62	17.96
110	5.31	4.51	17.74
115	5.31	4.53	17.22
120	5.41	4.62	17.10
125	5.29	4.53	16.78

ตารางที่ ก.4 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขแบบครีบลับพื้นปลา (ต่อ)

เวลา (นาท)	น้ำหนักเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของเมล็ดข้าวเปลือกหลังการอบด้วยตู้อบลมร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
130	5.30	4.60	15.22
135	5.45	4.75	14.74
140	5.26	4.65	13.12

ตารางบันทึกผลการทดลองในการทดสอบส่วนที่ 2

ตารางที่ ก.5 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขแบบครีบลับพื้นปลา

เวลา (นาท)	น้ำหนักเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของเมล็ดข้าวเปลือกหลังการอบด้วยตู้อบลมร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
0	5.32	4.05	23.87
5	5.24	4	23.66
10	5.37	4.13	23.09
15	5.09	3.93	22.79
20	5.24	4.07	22.33
25	5.36	4.18	22.01
30	5.12	4.02	21.48
35	5.31	4.19	21.09
40	5.03	3.99	20.68
45	5.11	4.07	20.35
50	5.1	4.08	20.00
55	4.9	3.94	19.59
60	5.32	4.3	19.17
65	5.08	4.13	18.70
70	5.2	4.24	18.46
75	5.32	4.36	18.05

ตารางที่ ก.5 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขแบบครีบลับพื้นปลา (ต่อ)

เวลา (นาที)	น้ำหนักเริ่มต้น ของเมล็ด ข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของ เมล็ดข้าวเปลือกหลังการอบ ด้วยตู้อบลมร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
80	5.31	4.37	17.70
85	5.37	4.43	17.50
90	5.18	4.3	16.99
95	5.09	4.25	16.50
100	5.18	4.34	16.22
105	4.78	4.02	15.90
110	4.84	4.09	15.50
115	4.87	4.13	15.20
120	4.95	4.22	14.75
125	5.3	4.52	14.72
130	4.97	4.25	14.49
135	5.11	4.36	14.68
140	5.52	4.73	14.31
145	5.11	4.38	14.29
150	5.38	4.61	14.31
155	4.97	4.26	14.19
160	5.15	4.42	13.92
165	4.96	4.27	13.91
170	5.12	4.4	14.06
175	5.41	4.66	13.86
180	4.77	4.11	13.84
185	5.31	4.58	13.75
190	5.26	4.54	13.69
195	5.05	4.37	13.47
200	4.84	4.19	13.43
205	5.22	4.52	13.41

ตารางที่ ก.5 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขแบบครีบลับพื้นปลา (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักเริ่มต้น ของเมล็ด ข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของ เมล็ดข้าวเปลือกหลังการอบ ด้วยตู้อบลมร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
210	5.07	4.4	13.21
215	5.26	4.57	13.12
220	5.21	4.53	13.05
225	5.6	4.88	12.86
230	5.14	4.48	12.84
235	4.94	4.32	12.55
240	5.24	4.58	12.60
245	5.25	4.6	12.38
250	5.54	4.85	12.45
255	5.41	4.75	12.20
260	5.29	4.65	12.10
265	5.57	4.9	12.03
270	4.9	4.32	11.84
275	5.04	4.45	11.71
280	4.97	4.39	11.67
285	5.1	4.51	11.57
290	4.86	4.3	11.52
295	5.36	4.75	11.38
300	5.14	4.57	11.09
305	4.83	4.3	10.97
310	4.95	4.41	10.91
315	5.28	4.71	10.80
320	5.41	4.83	10.72
325	5.7	5.1	10.53
330	5.8	5.2	10.34
335	5.3	4.76	10.19

ตารางที่ ก.5 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เจริญไขแบบครึ่งสลับฟันปลา (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักเริ่มต้น ของเมล็ด ข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของ เมล็ดข้าวเปลือกหลังการอบ ด้วยตู้อบลมร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
340	4.95	4.45	10.10
345	4.67	4.2	10.06
350	5.27	4.75	9.87
355	5	4.51	9.80
360	5.1	4.61	9.61

ตารางที่ ก.6 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เจริญไขแบบหอบแห้งเปล่า

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักเริ่มต้นของ เมล็ดข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของเมล็ด ข้าวเปลือก หลังการอบด้วยตู้อบลมร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
0	5.28	4.01	24.05
5	4.94	3.78	23.48
10	5.39	4.15	23.01
15	5.44	4.21	22.61
20	4.71	3.67	22.08
25	4.87	3.82	21.56
30	5.23	4.13	21.03
35	5.12	4.07	20.51
40	5.2	4.15	20.19
45	4.99	4.01	19.64
50	5.42	4.38	19.19
55	5.39	4.39	18.55
60	5.22	4.27	18.20
65	5.48	4.51	17.70
70	5.32	4.39	17.48

ตารางที่ ก.6 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขแบบหอบแห้งเปล่า (ต่อ)

เวลา (นาที)	น้ำหนักเริ่มต้นของ เมล็ดข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของเมล็ด ข้าวเปลือก หลังการอบด้วยตู้อบลมร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
75	4.99	4.14	17.03
80	5.29	4.41	16.64
85	4.96	4.16	16.13
90	5.42	4.56	15.87
95	5.19	4.39	15.41
100	5.15	4.38	14.95
105	5.03	4.3	14.51
110	5.51	4.72	14.34
115	5.16	4.45	14.25
120	5.09	4.41	14.11
125	5.11	4.43	13.98
130	5.33	4.63	13.13
135	5.29	4.59	13.23
140	5.3	4.61	13.02
145	5.31	4.62	12.99
150	5.74	4.99	13.07
155	5.1	4.44	12.94
160	5.07	4.42	12.82
165	5	4.36	12.80
170	5.35	4.68	12.52
175	5.48	4.79	12.59
180	5.17	4.53	12.38
185	4.99	4.37	12.42
190	4.99	4.38	12.22
195	5.36	4.71	12.13

ตารางที่ ก.6 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขแบบหอบแห้งเปล่า (ต่อ)

เวลา (นาที)	น้ำหนักเริ่มต้นของ เมล็ดข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของเมล็ด ข้าวเปลือก หลังการอบด้วยตู้อบลมร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
200	5.39	4.73	12.24
205	5.34	4.7	11.99
210	5.03	4.43	11.93
215	5.26	4.64	11.79
220	5.23	4.62	11.66
225	5.25	4.65	11.43
230	5.42	4.79	11.62
235	5.26	4.66	11.41
240	5.37	4.76	11.36
245	5.22	4.63	11.30
250	5.27	4.69	11.01
255	5.36	4.77	11.01
260	4.84	4.31	10.95
265	5.12	4.57	10.74
270	5.08	4.54	10.63
275	5.04	4.51	10.52
280	5.13	4.6	10.33
285	5.57	5	10.23
290	4.98	4.47	10.24
295	5.44	4.89	10.11
300	4.78	4.3	10.04
305	5.12	4.61	9.96
310	5.24	4.72	9.92
315	5.35	4.82	9.91
320	5.38	4.85	9.85

ตารางที่ ก.6 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขแบบหอบแห้งเปล่า (ต่อ)

เวลา (นาที)	น้ำหนักเริ่มต้นของ เมล็ดข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของเมล็ด ข้าวเปลือก หลังการอบด้วยตู้อบลมร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
325	5.4	4.88	9.63
330	5.11	4.62	9.59
335	5.08	4.6	9.45
340	5.41	4.9	9.43
345	5.15	4.67	9.32
350	4.88	4.43	9.22
355	4.92	4.46	9.35
360	4.97	4.51	9.26

ตารางที่ ก.7 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขการตากแดด (Control)

เวลา (นาที)	น้ำหนักเริ่มต้นของ เมล็ดข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของเมล็ด ข้าวเปลือก หลังการอบด้วยตู้อบลมร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
0	5.05	3.84	23.96
5	5.16	3.94	23.64
10	5.47	4.18	23.58
15	5.24	4.01	23.47
20	5.16	3.96	23.26
25	4.94	3.81	22.87
30	4.78	3.69	22.80
35	5.08	3.93	22.64
40	5.19	4.03	22.35
45	5.64	4.39	22.16
50	5.23	4.09	21.80

ตารางที่ ก.7 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขการตากแดด (Control) (ต่อ)

เวลา (นาที)	น้ำหนักเริ่มต้นของ เมล็ดข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของเมล็ด ข้าวเปลือก หลังการอบด้วยตู้อบลมร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
55	5.45	4.26	21.83
60	5.08	3.98	21.65
65	4.9	3.87	21.02
70	4.96	3.93	20.77
75	5.02	3.99	20.52
80	5.73	4.58	20.07
85	4.99	4.01	19.64
90	5.41	4.36	19.41
95	4.97	4.03	18.91
100	5.43	4.42	18.60
105	5.3	4.33	18.30
110	5.16	4.24	17.83
115	5.19	4.28	17.53
120	5.04	4.17	17.26
125	5.31	4.41	16.95
130	5.09	4.23	16.90
135	4.89	4.08	16.56
140	4.88	4.07	16.60
145	5.24	4.39	16.22
150	5.59	4.69	16.10
155	5.24	4.4	16.03
160	5.17	4.35	15.86
165	5.27	4.44	15.75
170	5.53	4.67	15.55
175	5.25	4.45	15.24

ตารางที่ ก.7 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขการตากแดด (Control) (ต่อ)

เวลา (นาที)	น้ำหนักเริ่มต้นของ เมล็ดข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของเมล็ด ข้าวเปลือก หลังการอบด้วยตู้อบลมร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
180	5.1	4.32	15.29
185	5.48	4.65	15.15
190	5.31	4.51	15.07
195	5.58	4.76	14.70
200	5.25	4.48	14.67
205	4.89	4.18	14.52
210	4.86	4.16	14.40
215	5.61	4.81	14.26
220	5.63	4.84	14.03
225	5.16	4.43	14.15
230	5.1	4.4	14.11
235	5.57	4.8	14.05
240	4.92	4.25	13.62
245	4.98	4.31	13.45
250	5.36	4.65	13.25
255	5.1	4.43	13.14
260	5.2	4.53	12.88
265	5.16	4.5	12.79
270	5.28	4.62	12.50
275	5.55	4.86	12.43
280	5.22	4.58	12.26
285	5.36	4.71	12.13
290	4.69	4.13	11.94
295	5.19	4.58	11.75
300	4.99	4.41	11.62

ตารางที่ ก.7 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขการตากแดด (Control) (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักเริ่มต้นของ เมล็ดข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของเมล็ด ข้าวเปลือก หลังการอบด้วยตู้อบลมร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
305	4.9	4.33	11.63
310	4.98	4.42	11.24
315	5.12	4.55	11.13
320	5.43	4.83	11.05
325	4.87	4.34	10.88
330	5.21	4.65	10.75
335	5.08	4.54	10.63
340	5.12	4.59	10.35
345	5.45	4.89	10.28
350	5.33	4.8	10.25
355	5.53	4.98	10.22
360	5.16	4.66	10.18

ตารางบันทึกผลการทดลองในการทดสอบส่วนที่ 3

ตารางที่ ก.8 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขอัตราการไหล 2 kg/min

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักเริ่มต้นของ เมล็ดข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของ เมล็ดข้าวเปลือก หลังการอบด้วยตู้อบ ลมร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
0	6.2061	4.7191	23.96
10	5.5579	4.2440	23.64
20	4.1940	3.2051	23.58
30	3.2490	2.4865	23.47
40	2.7525	2.1123	23.26

ตารางที่ ก.8 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขอัตราการไหล 2 kg/min (ต่อ)

เวลา (นาที)	น้ำหนักเริ่มต้นของ เมล็ดข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของ เมล็ดข้าวเปลือก หลังการอบด้วยตู้อบ ลมร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
50	3.2751	2.5261	22.87
60	3.0341	2.3423	22.8
70	2.9261	2.2636	22.64
80	3.2044	2.4882	22.35
90	2.4401	1.8994	22.16
100	2.9972	2.3438	21.8
110	2.4508	1.9158	21.83
120	2.9560	2.3160	21.65
130	3.4879	2.7547	21.02
140	3.1113	2.4651	20.77
150	3.2349	2.5711	20.52
160	3.6920	2.9510	20.07
170	3.5551	2.8569	19.64
180	4.5574	3.6728	19.41
190	3.1005	2.5142	18.91
200	3.7813	3.0780	18.6
210	3.0518	2.4933	18.3
220	2.5345	2.0826	17.83
230	2.8736	2.3699	17.53
240	2.9521	2.4426	17.26
250	3.2935	2.7353	16.95
260	3.1243	2.5963	16.9
270	2.8062	2.3415	16.56
280	3.2844	2.7392	16.6
290	3.0742	2.5756	16.22

ตารางที่ ก.8 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขอัตราการไหล 2 kg/min (ต่อ)

เวลา (นาที)	น้ำหนักเริ่มต้นของ เมล็ดข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของ เมล็ดข้าวเปลือก หลังการอบด้วยตู้อบ ลมร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
300	3.6965	3.1014	16.1
310	3.1558	2.6499	16.03
320	3.1077	2.6148	15.86
330	3.0252	2.5487	15.75
340	3.2869	2.7758	15.55
350	2.8680	2.4309	15.24
360	3.1415	2.6612	15.29
370	2.7689	2.3494	15.15
380	2.7047	2.2971	15.07
390	2.7116	2.3130	14.7
400	2.6577	2.2678	14.67
410	2.9279	2.5028	14.52
420	3.0523	2.6128	14.4
430	3.5523	3.0457	14.26
440	3.9040	3.3563	14.03
450	3.1911	2.7396	14.15
460	3.3431	2.8714	14.11
470	3.7661	3.2370	14.05
480	3.4294	2.9623	13.62
490	4.4708	3.8695	13.45
500	4.2061	3.6488	13.25
510	4.0356	3.5053	13.14
520	3.0817	2.6848	12.88
530	3.0941	2.6984	12.79
540	3.2106	2.8093	12.5

ตารางที่ ก.8 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขอัตราการไหล 2 kg/min (ต่อ)

เวลา (นาที)	น้ำหนักเริ่มต้นของ เมล็ดข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของ เมล็ดข้าวเปลือก หลังการอบด้วยตู้อบ ลมร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
550	2.8612	2.5056	12.43
560	2.5776	2.2616	12.26
570	3.9658	3.4847	12.13
580	4.0330	3.5515	11.94
590	3.3703	2.9743	11.75
600	5.0728	4.4833	11.62

ตารางที่ ก.9 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขอัตราการไหล 3 kg/min

เวลา (นาที)	น้ำหนักเริ่มต้นของ เมล็ดข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของ เมล็ดข้าวเปลือกหลัง การอบด้วยตู้อบลม ร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
0	3.7874	2.8497	24.76
10	2.1783	1.6492	24.29
20	2.6861	2.0411	24.01
30	2.3607	1.8148	23.12
40	2.6428	2.0574	22.15
50	2.1393	1.6797	21.48
60	2.3475	1.8655	20.53
70	2.6089	2.0879	19.97
80	2.0651	1.6649	19.38
90	1.8502	1.4979	19.04
100	2.0021	1.6374	18.22
110	2.6057	2.1417	17.81

ตารางที่ ก.9 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขอัตราการไหล 3 kg/min (ต่อ)

เวลา (นาที)	น้ำหนักเริ่มต้นของ เมล็ดข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของ เมล็ดข้าวเปลือกหลัง การอบด้วยตู้อบลม ร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
120	2.0732	1.7248	16.80
130	1.7036	1.4218	16.54
140	1.9587	1.6422	16.16
150	2.721	2.3051	15.28
160	2.2398	1.9083	14.80
170	2.3241	1.9863	14.54
180	2.3133	1.9893	14.01
190	2.2237	1.9230	13.52
200	2.3697	2.0634	12.93
210	2.3214	2.0378	12.22
220	2.077	1.8293	11.93
230	1.8699	1.6506	11.73
240	2.4142	2.1385	11.42
250	2.1342	1.9012	10.92
260	2.4898	2.2236	10.69
270	4.1021	3.6850	10.17
280	4.0081	3.6044	10.07
290	3.9003	3.5293	9.51
300	3.4307	3.1045	9.51
310	3.1753	2.8797	9.31
320	3.0333	2.7593	9.03
330	2.8975	2.6517	8.48
340	2.1106	1.9337	8.38
350	2.1674	1.9881	8.27
360	1.7014	1.5646	8.04

ตารางที่ ก.9 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขอัตราการไหล 3 kg/min (ต่อ)

เวลา (นาที)	น้ำหนักเริ่มต้นของ เมล็ดข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของ เมล็ดข้าวเปลือกหลัง การอบด้วยตู้อบลม ร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
370	1.6614	1.5320	7.79
380	2.2671	2.0821	8.16
390	2.4078	2.2150	8.01
400	2.5953	2.3924	7.82
410	1.9444	1.7971	7.58
420	2.8353	2.6237	7.46
430	2.1506	1.9933	7.31
440	2.175	2.0135	7.43
450	2.1237	1.9729	7.10
460	2.5086	2.3289	7.16
470	2.1388	1.9914	6.89
480	2.2418	2.0912	6.72
490	2.0568	1.9199	6.66
500	2.3857	2.2234	6.80
510	2.608	2.4368	6.56
520	2.6764	2.5041	6.44
530	2.9711	2.7816	6.38
540	3.256	3.0562	6.14
550	3.0765	2.8871	6.16
560	3.0393	2.8527	6.14
570	3.7317	3.5025	6.14
580	3.5497	3.3334	6.09
590	3.8758	3.6422	6.03
600	4.6482	4.3680	6.03

ตารางที่ ก.10 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขอัตราการไหล 4 kg/min

เวลา (นาที)	น้ำหนักเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของเมล็ดข้าวเปลือกหลังการอบด้วยตู้อบลมร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
0	3.4321	2.5758	24.9497
10	2.3869	1.8074	24.2769
20	3.0433	2.3337	23.3168
30	2.0471	1.5860	22.5245
40	2.6131	2.0291	22.3489
50	2.2187	1.7423	21.4720
60	3.8109	3.0046	21.1567
70	4.0571	3.2379	20.1928
80	2.3613	1.8889	20.0038
90	1.8619	1.5161	18.5724
100	2.4221	1.9724	18.5665
110	2.1162	1.7416	17.7015
120	1.892	1.5704	16.9979
130	2.2398	1.8693	16.5417
140	1.9869	1.6625	16.3269
150	2.4548	2.0767	15.4025
160	2.139	1.8185	14.9816
170	1.8786	1.6078	14.4131
180	1.8917	1.6303	13.8201
190	2.3224	2.0123	13.3526
200	2.0391	1.7813	12.6428
210	2.212	1.9423	12.1926
220	3.703	3.2542	12.1199
230	1.5739	1.3921	11.5509
240	1.5741	1.4009	11.0031

ตารางที่ ก.10 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขอัตราการไหล 4 kg/min (ต่อ)

เวลา (นาที)	น้ำหนักเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของเมล็ดข้าวเปลือกหลังการอบด้วยตู้อบลมร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
250	2.2257	1.9842	10.8505
260	2.5388	2.2829	10.0796
270	1.5791	1.4242	9.8094
280	1.7376	1.5717	9.5477
290	3.4825	3.1542	9.4271
300	1.7399	1.5813	9.1155
310	1.8546	1.6894	8.9076
320	1.8943	1.7284	8.7579
330	1.9391	1.7734	8.5452
340	2.0548	1.8859	8.2198
350	2.5548	2.3465	8.1533
360	2.1438	1.9724	7.9951
370	2.398	2.2082	7.9149
380	1.9913	1.8333	7.9367
390	1.5657	1.4428	7.8477
400	2.3409	2.1638	7.5653
410	1.8736	1.7342	7.4419
420	2.457	2.2759	7.3714
430	1.9011	1.7606	7.3902
440	2.7305	2.5286	7.3960
450	2.6146	2.4245	7.2717
460	1.8345	1.7056	7.0279
470	2.3612	2.1954	7.0216
480	2.4844	2.3118	6.9465
490	2.5494	2.3770	6.7605

ตารางที่ ก.10 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลา เงื่อนไขอัตราการไหล 4 kg/min (ต่อ)

เวลา (นาที)	น้ำหนักเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักสุดท้ายของเมล็ดข้าวเปลือกหลังการอบด้วยตู้อบลมร้อน (g)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)
500	1.7368	1.6221	6.6050
510	2.4804	2.3193	6.4948
520	3.599	3.3648	6.5075
530	3.6107	3.3777	6.4543
540	3.8952	3.6477	6.3546
550	2.2151	2.0785	6.1679
560	4.1123	3.8530	6.3064
570	2.2686	2.1321	6.0150
580	2.83	2.6595	6.0265
590	2.9541	2.7776	5.9757
600	2.4433	2.2990	5.9053

ตารางที่ ก.11 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของข้าวเปลือกและอากาศในหอบแห้งที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที

เวลา (นาที)	เงื่อนไขการอบแห้ง					
	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	อุณหภูมิข้าวเปลือกที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิอากาศที่หอบแห้ง °C	อุณหภูมิข้าวเปลือกที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิอากาศที่หอบแห้ง °C	อุณหภูมิข้าวเปลือกที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิอากาศที่หอบแห้ง °C
0	32.00	31.50	31.25	32.13	32.50	32.13
1	31.75	31.33	31.25	32.21	32.75	32.21
2	32.00	31.63	31.50	32.38	33.00	32.38

ตารางที่ ก.11 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของข้าวเปลือกและอากาศในหอบแห้ง  
ที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	เงื่อนไขการอบแห้ง					
	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C
3	32.00	33.04	31.50	32.46	33.00	32.46
4	31.75	35.63	31.50	33.67	33.00	33.67
5	31.75	39.42	31.00	36.13	32.75	36.13
6	32.00	43.96	31.00	40.08	32.75	40.08
7	32.00	49.33	31.50	44.13	32.25	44.13
8	31.75	54.63	31.25	50.00	32.75	50.00
9	32.25	58.08	31.25	55.38	33.50	55.38
10	32.25	60.75	31.50	60.63	33.00	60.63
11	32.00	65.58	30.00	62.25	32.75	63.68
12	32.50	63.46	29.25	65.00	31.50	65.00
13	31.25	61.21	28.00	41.42	29.00	44.00
14	30.75	50.71	32.00	40.92	28.00	40.92
15	29.75	42.00	34.00	35.46	29.00	35.46
16	28.25	40.33	36.75	35.17	34.00	35.17
17	32.75	37.42	35.00	36.17	33.00	35.25
18	36.50	34.79	36.75	36.29	34.00	35.54
19	35.00	35.17	36.50	36.13	35.00	35.83
20	36.00	36.29	37.25	36.46	36.75	35.79
21	36.00	38.58	37.50	37.00	36.50	35.83
22	37.00	39.88	39.00	38.17	37.25	35.75
23	38.50	40.75	38.00	38.00	37.50	36.04

ตารางที่ ก.11 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของข้าวเปลือกและอากาศในหอบแห้ง  
ที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	เงื่อนไขการอบแห้ง					
	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C
24	39.00	40.71	38.50	38.13	38.00	36.38
25	39.75	40.42	38.75	38.46	38.75	36.79
26	41.75	40.79	40.50	39.46	38.75	37.00
27	42.25	41.21	40.75	39.58	38.80	37.46
28	42.75	42.04	40.75	39.67	39.05	37.83
29	43.00	42.33	41.25	40.04	39.45	38.42
30	43.50	42.17	41.00	39.79	39.00	39.04
31	44.25	42.71	41.75	40.08	40.00	39.00
32	43.25	41.75	42.75	40.79	40.50	39.63
33	43.50	43.46	42.00	41.08	40.25	39.46
34	44.25	42.29	42.25	41.54	41.00	39.92
35	43.25	43.25	42.50	41.13	41.00	39.46
36	44.50	43.25	43.50	41.25	41.75	40.08
37	45.25	43.67	43.50	41.25	42.25	40.17
38	45.50	43.25	43.25	41.88	42.50	40.54
39	45.50	43.46	44.00	41.42	42.00	40.88
40	45.50	44.42	44.25	41.63	43.00	40.67
41	45.75	44.42	44.00	42.29	43.50	40.50
42	44.00	44.83	44.75	42.13	43.50	40.63
43	46.00	45.00	44.25	42.04	43.75	40.79
44	46.75	44.58	45.75	42.42	43.25	41.29

ตารางที่ ก.11 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของข้าวเปลือกและอากาศในหอบแห้ง  
ที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	เงื่อนไขการอบแห้ง					
	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C
45	47.00	44.67	45.75	42.79	43.75	41.08
46	47.75	44.67	45.50	43.33	43.75	41.17
47	45.00	44.92	45.00	42.54	43.25	41.21
48	46.00	44.92	45.75	42.83	44.23	41.46
49	48.25	45.54	45.50	42.79	44.50	41.58
50	48.00	45.42	45.25	42.96	44.00	41.67
51	48.50	45.00	46.25	42.71	44.23	41.54
52	47.25	45.54	46.75	43.29	44.75	41.75
53	47.75	45.79	46.25	43.79	43.75	42.13
54	48.00	45.83	46.50	43.38	44.25	42.08
55	49.75	45.58	47.00	43.29	44.25	41.79
56	46.75	44.83	47.50	43.50	44.00	42.08
57	49.75	45.38	46.50	43.42	44.50	41.92
58	48.00	45.63	47.75	43.63	44.75	42.25
59	49.25	45.38	47.50	44.21	44.17	41.79
60	48.39	45.13	46.50	43.79	44.54	42.04
61	48.89	45.75	47.75	43.38	44.00	42.29
62	50.64	46.00	47.50	43.75	44.75	41.83
63	48.89	46.00	48.00	44.00	44.50	42.21
64	47.64	46.50	48.00	43.79	44.25	41.92
65	49.89	45.50	47.00	43.88	44.25	42.17

ตารางที่ ก.11 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของข้าวเปลือกและอากาศในหอบแห้ง  
ที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	เงื่อนไขการอบแห้ง					
	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C
66	49.89	45.58	47.50	43.92	44.75	42.13
67	49.14	45.92	48.75	44.29	44.75	42.17
68	49.89	45.92	47.00	43.63	45.00	42.54
69	49.64	45.50	48.25	43.71	45.50	42.46
70	48.89	46.33	48.50	43.92	44.50	42.58
71	50.89	46.33	47.75	44.13	45.50	42.50
72	50.89	46.63	47.00	44.33	45.75	42.21
73	50.14	46.71	47.75	44.13	44.75	42.67
74	50.39	46.33	47.50	44.08	45.50	42.75
75	49.89	46.33	48.50	44.42	44.50	42.83
76	50.89	46.67	47.50	44.21	45.00	42.42
77	50.64	45.71	48.00	44.33	46.00	42.67
78	50.75	46.13	48.00	44.13	46.25	42.67
79	51.00	45.75	49.50	44.38	46.00	42.42
80	51.25	45.96	48.50	44.21	45.50	42.46
81	51.25	46.04	48.75	45.08	46.25	42.92
82	51.00	46.21	49.75	44.54	46.50	42.33
83	51.89	46.25	49.75	44.29	46.25	43.13
84	51.14	47.13	49.25	44.71	46.25	42.71
85	51.39	46.71	49.50	44.79	46.75	42.83
86	51.89	46.25	49.25	44.54	46.00	42.92

ตารางที่ ก.11 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของข้าวเปลือกและอากาศในหอบแห้ง  
ที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	เงื่อนไขการอบแห้ง					
	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C
87	51.39	46.08	48.25	45.00	47.00	42.71
88	51.89	46.83	49.00	44.88	46.75	43.00
89	52.39	47.29	49.50	45.29	47.00	42.92
90	52.39	46.38	49.00	45.25	47.75	42.83
91	51.89	46.21	49.75	45.46	47.25	42.96
92	52.14	46.75	49.50	45.17	47.50	43.08
93	52.64	46.38	49.25	44.79	47.25	43.00
94	52.89	47.08	49.25	45.83	47.00	43.00
95	52.39	47.38	49.25	45.79	47.25	43.33
96	52.64	46.88	49.50	45.21	47.75	43.25
97	52.14	46.96	49.50	45.67	47.75	43.25
98	52.89	46.63	49.90	45.71	47.75	43.46
99	52.64	46.63	50.50	46.13	47.25	43.58
100	52.64	46.75	50.50	45.58	47.75	43.46
101	52.39	47.00	50.25	45.92	47.00	43.29
102	52.89	47.29	50.25	46.13	47.25	43.54
103	52.39	47.25	50.75	46.13	47.75	43.38
104	52.59	46.79	50.75	46.29	47.75	43.21
105	52.69	46.79	51.00	45.96	47.50	43.33
106	53.39	47.00	51.25	47.21	47.00	43.58
107	52.89	47.38	51.25	46.83	48.25	43.50

ตารางที่ ก.11 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของข้าวเปลือกและอากาศในหอบแห้ง  
ที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาท)	เงื่อนไขการอบแห้ง					
	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C
108	53.14	46.63	51.25	47.08	48.00	43.50
109	53.89	47.75	51.00	48.17	48.96	43.46
110	53.14	47.71	51.00	47.71	48.67	43.75
111	53.39	47.21	51.75	47.17	48.71	44.13
112	53.89	47.54	51.25	48.25	48.75	44.42
113	53.39	47.33	51.75	47.42	48.00	44.04
114	53.89	47.21	51.50	47.58	48.25	44.33
115	53.14	47.50	51.25	47.33	48.50	43.96
116	53.14	47.46	51.50	47.92	48.00	44.04
117	53.14	47.63	51.25	46.92	48.25	44.80
118	53.89	48.38	51.75	47.71	48.75	44.97
119	54.14	48.92	51.75	47.13	49.25	44.55
120	54.14	48.96	51.25	47.54	49.75	44.97
121	53.89	48.67	51.75	47.58	49.00	45.18
122	53.39	48.71	51.00	47.46	49.75	45.43
123	53.89	48.83	52.00	48.21	49.00	45.26
124	54.89	48.92	52.25	47.67	49.25	45.51
125	54.39	49.18	52.50	47.50	50.50	45.43
126	55.14	49.56	52.60	48.38	50.00	45.33
127	54.89	49.06	52.70	48.00	50.00	45.46
128	54.89	49.23	52.80	47.58	50.67	45.46

ตารางที่ ก.11 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของข้าวเปลือกและอากาศในหอบแห้ง  
ที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	เงื่อนไขการอบแห้ง					
	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C
129	54.89	49.10	52.90	48.00	50.79	45.33
130	55.39	49.46	52.89	48.63	50.33	45.83
131	55.39	49.63	52.98	48.13	50.63	45.58
132	56.43	49.50	52.50	48.88	50.04	46.04
133	56.14	49.67	53.23	48.50	50.17	46.50
134	56.64	49.79	53.46	48.92	51.33	46.04
135	55.89	49.33	53.75	48.67	51.04	46.46
136	56.39	50.75	53.25	49.83	51.54	46.67
137	56.14	50.58	53.25	48.75	51.92	46.08
138	56.17	50.54	53.75	49.25	51.33	46.38
139	56.14	50.04	53.75	49.13	52.57	46.42
140	56.12	50.38	53.25	49.75	52.50	46.08
141	56.09	50.17	53.50	49.71	52.00	46.92
142	56.07	51.33	53.75	50.54	52.57	47.13
143	56.00	51.04	53.00	49.71	52.69	47.42
144	56.64	51.54	53.75	49.42	52.23	47.58
145	56.14	51.92	54.25	50.50	52.53	47.54
146	56.64	51.33	53.75	49.88	52.90	47.83
147	56.43	51.33	53.25	50.17	53.37	47.96
148	56.47	51.04	53.50	50.67	53.00	48.13
149	56.51	51.54	54.75	50.04	53.30	48.08

ตารางที่ ก.11 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของข้าวเปลือกและอากาศในหอบแห้ง  
ที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	เงื่อนไขการอบแห้ง					
	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C
150	56.55	51.92	54.60	50.92	53.21	48.17
151	57.59	52.07	54.35	50.96	53.00	48.46
152	57.75	52.23	54.35	51.21	53.75	48.79
153	57.00	52.23	54.35	50.96	53.75	49.08
154	57.25	52.90	54.60	51.67	53.50	48.92
155	57.25	52.57	55.60	51.04	53.63	49.33
156	57.75	52.69	55.35	52.92	53.54	48.96
157	57.75	52.23	55.10	52.58	53.38	49.46
158	57.25	52.53	55.60	52.46	53.75	49.38
159	57.25	52.90	54.85	52.50	53.25	50.08
160	57.50	53.33	55.60	53.00	53.75	50.25
161	57.75	53.52	55.35	52.92	53.25	50.50
162	57.75	53.75	55.35	53.42	54.00	50.38
163	57.75	53.63	55.19	53.58	53.25	50.67
164	57.25	53.54	55.49	54.08	53.25	50.58
165	57.50	53.38	55.10	54.21	54.00	50.58
166	57.50	53.63	55.85	54.25	54.00	50.96
167	58.50	54.13	55.85	54.42	54.25	51.29
168	58.25	54.34	55.10	54.38	54.00	51.13
169	58.25	54.64	56.35	54.54	54.75	51.46
170	58.25	55.13	56.60	54.63	54.20	51.13

ตารางที่ ก.11 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของข้าวเปลือกและอากาศในหอบแห้ง  
ที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	เงื่อนไขการอบแห้ง					
	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพักข้าว °C	อุณหภูมิ อากาศ ที่หอ อบแห้ง °C
171	58.00	55.34	56.60	54.04	54.00	51.54
172	58.25	55.64	56.35	54.75	55.23	51.42
173	58.50	56.44	56.35	54.67	55.34	51.79
174	58.75	55.32	56.60	54.92	55.00	51.96
175	58.75	56.12	56.60	54.38	55.65	51.96
176	58.50	55.79	56.10	54.75	55.50	52.17
177	58.75	56.09	57.40	55.67	55.60	52.29
178	58.25	56.89	56.40	55.92	55.64	53.21
179	58.50	55.77	56.90	55.12	55.64	53.30
180	58.50	56.57	56.90	55.12	55.67	53.50

ตารางที่ ก.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและเวลาของสิ่งแวดล้อมในห้องที่ทำ  
การทดสอบและปล่อยระบายความชื้นที่เครื่องอบแห้ง ที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2  
3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที

เวลา (นาที)	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)
1	62.2	62	61.7	62.5	61.7	62.5

ตารางที่ ก.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและเวลาของสิ่งแวดล้อมในห้องที่ทำการทดสอบและปล่อยระบายความชื้นที่เครื่องอบแห้ง ที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)
2	61.8	61.9	61.6	62.4	61.6	62.4
3	62	61.9	61.4	61.9	61.4	61.9
4	61.4	61.5	61.4	61	61.4	61
5	61.5	61.6	61.9	60.8	61.9	60.8
6	61.7	61.5	61.6	60.7	61.6	60.7
7	61.4	61.5	61.5	60.6	61.5	60.6
8	61.5	61.4	61.6	60.6	61.6	60.6
9	61.4	61.5	61.4	60.5	61.4	60.5
10	61.7	61.4	60.1	71.9	60.1	71.9
11	61.6	71.9	59.5	73.7	59.5	73.7
12	61.6	69.6	59.6	74.8	59.6	74.8
13	61.2	73.4	59.2	72.4	59.2	72.4
14	60.9	73.7	59.3	71	59.3	71
15	61.3	73	58.7	73.2	58.7	73.2
16	60.9	75.2	58.6	76.3	58.6	76.3
17	60.5	79.8	58.6	78.2	58.8	78.6
18	61.5	82.9	58.7	80.9	58	80.9
19	60.8	84.9	58.5	81.8	58.4	81.4
20	60.6	85.3	58.1	82.7	58.8	82
21	60.4	86	57.9	82	58.5	81
22	60.3	83.7	58.2	81.5	58	80.9

ตารางที่ ก.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและเวลาของสิ่งแวดล้อมในห้องที่ทำการทดสอบและปล่อยระบายความชื้นที่เครื่องอบแห้ง ที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)
23	60	81.6	57.6	80.5	58.7	80.4
24	59.9	80.5	57.7	79.5	57.7	79.3
25	59.6	82.3	57.5	82.5	57.5	82.1
26	59.1	82.3	57.3	82.7	57.3	83.2
27	59.4	83	57.3	82.1	57.3	83.7
28	59.3	82.8	57.4	83.2	57.4	83.6
29	59.3	83	57.4	83.8	57.4	83.6
30	59.2	84.3	56.9	83.9	57.45	83.6
31	59.6	83.4	56.4	83.3	57.3	84.7
32	59.2	83	55.6	83.7	57.32	84.3
33	59.5	83.5	56.2	85	57.21	85
34	59.4	83.7	56.2	85.1	57.23	85.1
35	58.9	84.8	55.8	84.7	57.11	84.7
36	59.2	84	55.9	84.2	57.09	83.8
37	59.1	85.6	55.9	84.7	57.05	84.1
38	58.8	84.7	55.7	84.8	57	84.1
39	58.8	85	56.1	84.6	56.95	83.6
40	58.9	84.3	56.1	84.3	56.91	84.2
41	58.8	83.4	56.7	85.1	56.2	84.5
42	58.8	84.5	56.4	85	56.2	84.7
43	58.8	83.7	56.3	84.9	56.5	83.7

ตารางที่ ก.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและเวลาของสิ่งแวดล้อมในห้องที่ทำการทดสอบและปล่อยระบายความชื้นที่เครื่องอบแห้ง ที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)
44	58.8	85.3	56.4	84.6	56.3	84
45	58.6	84.4	56.2	83.8	56.4	84.1
46	58.1	84.7	56	83	56.1	84
47	58.4	85.5	56.1	84.2	56.4	82.8
48	58.4	84.7	56.5	84.1	56.4	83.3
49	58.7	85	56.2	83	56.4	83.7
50	58.4	84	56.3	84.4	56.2	82.8
51	58.9	85.8	56.2	82.5	56.2	83
52	58.9	84.8	56.2	83.9	56.1	83.2
53	58.6	84.8	56	83.3	55.9	82.45
54	58.7	84.9	56.3	82.7	56	81.8
55	58.5	83.7	56.1	83.1	56.1	82.1
56	58.8	84	56.1	83.9	56.2	81.65
57	58.8	84.3	56	81.9	56.5	81.8
58	58.8	84.2	55.7	81.5	56.6	81.23
59	58.7	84.7	55.9	83.3	56.3	80
60	58.8	84.2	56.3	81.8	56.3	81.29
61	59	84.1	56.4	83.5	56.6	81.19
62	58.7	84.5	55.8	82.3	56.2	81.23
63	58.9	84	55.5	82.5	56.2	81.1
64	59.1	84.1	56	82.4	56	82

ตารางที่ ก.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและเวลาของสิ่งแวดล้อมในห้องที่ทำการทดสอบและปล่อยระบายความชื้นที่เครื่องอบแห้ง ที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)
65	58.9	84.3	55.7	81.8	56.1	80.8
66	59	83.8	55.8	82.1	56.2	80.5
67	58.6	83.8	55.6	82	56.1	80.87
68	58.8	83.2	55.2	82	56.3	80
69	58.8	83.3	55.3	82.6	56.5	80.27
70	58.7	83.3	55.5	82.12	56.7	79.34
71	58.8	83.9	55.3	81.6	56.7	79.64
72	58.9	83.8	55.1	81.2	56.8	79.94
73	58.9	83.6	55.3	80	56.4	78.49
74	58.8	83.5	55.8	80.7	56.8	77.79
75	58.5	83.1	55.2	80.2	57	79.09
76	58.7	83.8	55.3	80.32	56.5	79.6
77	58.8	84.1	55.5	80.1	56.5	79.25
78	58.7	84	55	80	56.6	78.65
79	59	84	55	80.2	56.5	78.32
80	58.7	84.2	55	80.9	56.3	78.95
81	58.5	84	55.1	79.9	56.1	78
82	58.5	83.8	54.7	81.1	56.1	77.51
83	58.7	83	54.9	79.1	55.8	77.81
84	58.7	83.1	54.5	78.9	56	77.38
85	58.5	83	55	79.4	56.1	77.13

ตารางที่ ก.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและเวลาของสิ่งแวดล้อมในห้องที่ทำการทดสอบและปล่อยระบายความชื้นที่เครื่องอบแห้ง ที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)
86	58.5	82	54.8	78.4	55.8	76.89
87	58.8	82.3	54.6	79.4	55.8	77.64
88	58.7	82.4	54.8	78.8	55.7	77.4
89	58.5	82.1	54.9	79.5	55.7	77.65
90	58.8	82.5	54.5	78.1	55.8	77.7
91	59.3	83.1	54.1	78.6	56.2	76.76
92	58.8	81.4	54.3	78.8	56.4	76.81
93	59	82.4	54.1	77.4	56.2	76.87
94	58.7	82	54.2	78.8	56.4	76.92
95	58.8	81	54	77.4	56.5	76.97
96	58.6	81.25	53.8	79.5	56.4	76.12
97	58.6	81.65	54	79.56	56.1	76.41
98	58.5	80	54.1	78.4	56.6	75.71
99	58.6	80.2	54	79.3	56.3	76.81
100	58.6	80.7	53.9	78.8	56.4	76.31
101	58.4	80.85	53.9	76.7	56.4	76.21
102	58.5	80.8	54.2	77.7	56.4	74.99
103	58.8	81	54.1	76.5	56	76.03
104	58.7	80.5	54.2	77.7	55.8	75.82
105	58.7	80.5	54.1	76.3	55.7	75.63
106	59	79.1	53.9	76.3	56.3	75.44

ตารางที่ ก.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและเวลาของสิ่งแวดล้อมในห้องที่ทำการทดสอบและปล่อยระบายความชื้นที่เครื่องอบแห้ง ที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)
107	58.8	80	54.2	76.9	55.9	76.26
108	58.9	80	54	75.5	55.4	75.07
109	58.6	80	54.2	77.3	56.1	74.89
110	58.7	80.5	54.1	76.4	56.3	74.5
111	58.9	79.5	53.8	76	56.1	74.8
112	58.6	79	53.4	76	55.9	74.9
113	58.2	79	53.5	77.2	55.7	74.4
114	58.3	78.8	53.9	77.3	55.5	74.2
115	58.2	79.1	53.6	75	55.4	74.5
116	58.1	80	53.8	75.6	55.4	74.8
117	58.2	79.98	53.6	75.4	55.2	74.6
118	58.1	79.65	53.2	75	55.4	74.1
119	58.2	79.2	52.8	75.7	54.8	75
120	57.52	79.35	51.9	76.2	55.3	74.5
121	57.37	78.5	51.9	74.7	54.7	73.3
122	57.22	80.3	52.1	75.6	55	74.2
123	57.07	79.1	51.6	75.6	54.5	73
124	57.4	80.3	50.7	75.4	54.6	73.6
125	57.3	80	51.1	75.3	54.4	73.8
126	57.2	80	51.3	73.8	54.3	73.6
127	57.05	78.5	51.6	74	53.6	73.43

ตารางที่ ก.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและเวลาของสิ่งแวดล้อมในห้องที่ทำการทดสอบและปล่อยระบายความชื้นที่เครื่องอบแห้ง ที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)
128	57.32	79.2	51.2	74.1	54.3	73.4
129	57.17	78.4	51.1	73.4	54.1	72.35
130	57.02	78.6	50.4	75	54.3	73.33
131	56.3	78.2	50.9	74.2	54.4	73.31
132	56.4	78.9	51.1	74.8	54.3	72.8
133	56.5	78.95	51.6	74	53.8	72.5
134	56.1	78.8	50.7	73	53.6	72.4
135	56.2	79.2	50.5	74.4	54.3	72.3
136	56.15	79.6	50.5	73.6	54.1	72.3
137	56.1	79.8	51.2	73.5	54.3	72.29
138	56.05	79.13	51	72.3	54	71.95
139	56	79.43	50.6	72.5	53.9	71.89
140	56.1	79.73	51	71.5	54	71.88
141	56.1	79.03	50.5	72.2	54	71.58
142	56.2	79.9	50.2	72	54	71.5
143	56	78.9	50.6	71.2	54	71.46
144	55.9	78.98	51	71.3	54.1	70.45
145	56.2	78.12	50.4	71	54.1	70.35
146	55.9	78.1	50.9	71.3	54	70.4
147	55.8	78	50.5	70	54	70.3
148	55.7	78.5	50.7	70.03	54	70.3

ตารางที่ ก.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและเวลาของสิ่งแวดล้อมในห้องที่ทำการทดสอบและปล่อยระบายความชื้นที่เครื่องอบแห้ง ที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)
149	55.7	78.6	50	70	54	70
150	56.3	78.45	49.7	70	54.3	70
151	55.9	78.69	49.3	70.1	54.3	69.8
152	56	78.37	49.4	69.3	54	69.5
153	55.9	78.1	49.5	70	54.4	69.1
154	55.4	78.5	48.7	69.4	54.1	68.77
155	55.4	78.6	49.2	70	54.3	68.42
156	55.3	78.4	49.1	69.4	54.2	68.77
157	55.4	79.4	48.4	68.5	54.1	68.87
158	55.3	78.8	49.2	68.1	54	68.9
159	54.9	79.2	48.6	68.6	53.6	68.34
160	54.8	78.9	49	68.9	53.8	68.23
161	54.8	79.8	49.3	68	53.7	68.2
162	54.49	79.7	48.7	68.4	54.1	68.1
163	54.49	78.4	49.6	67.98	54	67.8
164	54.48	79.2	49.1	67.95	53.75	67.8
165	54.17	78.2	49.3	67.8	53.6	67
166	54.87	78.3	49.1	67.65	53.43	67.4
167	54.56	78.8	48.8	67.59	53.25	67.8
168	54.26	78.2	47.6	67.5	54.2	66.9
169	54.45	78	48.3	66.43	54	66.1

ตารางที่ ก.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและเวลาของสิ่งแวดล้อมในห้องที่ทำการทดสอบและปล่อยระบายความชื้นที่เครื่องอบแห้ง ที่อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)	ความชื้น สิ่งแวดล้อม ห้องทดสอบ (%)	ความชื้นที่ ปล่อย ระบาย ความชื้น (%)
170	54.45	77.3	47.3	66.07	54	66.85
171	54.44	78.6	47.7	66.78	54.2	66.68
172	54.43	78.4	47.1	66.49	54.1	66.51
173	54.43	77	47.5	66.16	54.2	65.45
174	54.42	78.3	46.9	66.86	54.2	65.28
175	54.42	78.29	46.01	66.55	54.1	65.41
176	54.41	78.46	46.82	66.44	54	65.19
177	53.99	78.64	46.63	65.4	54.1	64.98
178	54.12	78.82	46.44	65.49	54	64.76
179	54.25	78.23	46.25	65.38	53.96	64.54
180	54.37	78.18	46.06	65.24	53.92	64.33

ตารางที่ ก.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก (เส้นสีเขียว, แกน Y1) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ในปล่องระบายความชื้น (เส้นสีแดง, แกน Y2) กับเวลา (แกน X) ภายใต้อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2, 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที

เวลา (นาที)	เงื่อนไขการอบแห้ง					
	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ก ที่ถังพัก ข้าว °C	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ก ที่ถังพัก ข้าว °C	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ก ที่ถังพัก ข้าว °C
0	62.4	32	62.6	31.25	62.6	32.5
1	62	31.75	62.5	31.25	62.5	32.75
2	61.9	32	62.4	31.5	62.4	33
3	61.9	32	61.9	31.5	61.9	33
4	61.5	31.75	61	31.5	61	33
5	61.6	31.75	60.8	31	60.8	32.75
6	61.5	32	60.7	31	60.7	32.75
7	61.5	32	60.6	31.5	60.6	32.25
8	61.4	31.75	60.6	31.25	60.6	32.75
9	61.5	32.25	60.5	31.25	60.5	33.5
10	61.4	32.25	71.9	31.5	71.9	33
11	71.9	32	73.7	30	73.7	32.75
12	69.6	32.5	74.8	29.25	74.8	31.5
13	73.4	31.25	72.4	28	72.4	29
14	73.7	30.75	71	32	71	28
15	73	29.75	73.2	34	73.2	29
16	75.2	28.25	76.3	36.75	76.3	34
17	79.8	32.75	78.2	35	78.6	33
18	82.9	36.5	80.9	36.75	80.9	34
19	84.9	35	81.8	36.5	81.4	35

ตารางที่ ก.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก (เส้นสีเขียว, แกน Y1) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ในปล่องระบายความชื้น (เส้นสีแดง, แกน Y2) กับเวลา (แกน X) ภายใต้อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2, 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	เงื่อนไขการอบแห้ง					
	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพัก ข้าว °C	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพัก ข้าว °C	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพัก ข้าว °C
20	85.3	36	82.7	37.25	82	36.75
21	86	36	82	37.5	81	36.5
22	83.7	37	81.5	39	80.9	37.25
23	81.6	38.5	80.5	38	80.4	37.5
24	80.5	39	79.5	38.5	79.3	38
25	82.3	39.75	82.5	38.75	82.1	38.75
26	82.3	41.75	82.7	40.5	83.2	38.75
27	83	42.25	82.1	40.75	83.7	38.8
28	82.8	42.75	83.2	40.75	83.6	39.05
29	83	43	83.8	41.25	83.6	39.45
30	84.3	43.5	83.9	41	83.6	39
31	83.4	44.25	83.3	41.75	84.7	40
32	83	43.25	83.7	42.75	84.3	40.5
33	83.5	43.5	85	42	85	40.25
34	83.7	44.25	85.1	42.25	85.1	41
35	84.8	43.25	84.7	42.5	84.7	41
36	84	44.5	84.2	43.5	83.8	41.75
37	85.6	45.25	84.7	43.5	84.1	42.25
38	84.7	45.5	84.8	43.25	84.1	42.5
39	85	45.5	84.6	44	83.6	42
40	84.3	45.5	84.3	44.25	84.2	43

ตารางที่ ก.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก (เส้นสีเขียว, แกน Y1) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ในปล่องระบายความชื้น (เส้นสีแดง, แกน Y2) กับเวลา (แกน X) ภายใต้อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2, 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	เงื่อนไขการอบแห้ง					
	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพัก ข้าว °C	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพัก ข้าว °C	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพัก ข้าว °C
41	83.4	45.75	85.1	44	84.5	43.5
42	84.5	44	85	44.75	84.7	43.5
43	83.7	46	84.9	44.25	83.7	43.75
44	85.3	46.75	84.6	45.75	84	43.25
45	84.4	47	83.8	45.75	84.1	43.75
46	84.7	47.75	83	45.5	84	43.75
47	85.5	45	84.2	45	82.8	43.25
48	84.7	46	84.1	45.75	83.3	44.23
49	85	48.25	83	45.5	83.7	44.5
50	84	48	84.4	45.25	82.8	44
51	85.8	48.5	82.5	46.25	83	44.23
52	84.8	47.25	83.9	46.75	83.2	44.75
53	84.8	47.75	83.3	46.25	82.45	43.75
54	84.9	48	82.7	46.5	81.8	44.25
55	83.7	49.75	83.1	47	82.1	44.25
56	84	46.75	83.9	47.5	81.65	44
57	84.3	49.75	81.9	46.5	81.8	43.5
58	84.2	48	81.5	47.75	81.23	42.75
59	84.7	49.25	83.3	47.5	80	43.75
60	84.2	46.5	81.8	46.5	81.29	43.5

ตารางที่ ก.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก (เส้นสีเขียว, แกน Y1) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ในปล่องระบายความชื้น (เส้นสีแดง, แกน Y2) กับเวลา (แกน X) ภายใต้อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2, 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	เงื่อนไขการอบแห้ง					
	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถังพัก ข้าว °C	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถังพัก ข้าว °C	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถังพัก ข้าว °C
61	84.1	47	83.5	47.75	81.19	44
62	84.5	48.75	82.3	47.5	81.23	44.75
63	84	47	82.5	48	81.1	44.5
64	84.1	45.75	82.4	48	82	44.25
65	84.3	48	81.8	47	80.8	44.25
66	83.8	48	82.1	47.5	80.5	44.75
67	83.8	47.25	82	48.75	80.87	44.75
68	83.2	48	82	47	80	45
69	83.3	47.75	82.6	48.25	80.27	45.5
70	83.3	47	82.12	48.5	79.34	44.5
71	83.9	49	81.6	47.75	79.64	45.5
72	83.8	49	81.2	47	79.94	45.75
73	83.6	48.25	80	47.75	78.49	44.75
74	83.5	48.5	80.7	47.5	77.79	45.5
75	83.1	48	80.2	48.5	79.09	44.5
76	83.8	49	80.32	47.5	79.6	45
77	84.1	48.75	80.1	48	79.25	46
78	84	50.75	80	48	78.65	46.25
79	84	50	80.2	49.5	78.32	46
80	84.2	50.25	80.9	48.5	78.95	45.5

ตารางที่ ก.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก (เส้นสีเขียว, แกน Y1) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ในปล่องระบายความชื้น (เส้นสีแดง, แกน Y2) กับเวลา (แกน X) ภายใต้อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2, 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	เงื่อนไขการอบแห้ง					
	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ก ที่ถังพัก ข้าว °C	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ก ที่ถังพัก ข้าว °C	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ก ที่ถังพัก ข้าว °C
81	84	50.25	79.9	48.75	78	46.25
82	83.8	50	81.1	49.75	77.51	46.5
83	83	49.25	79.1	49.75	77.81	46.25
84	83.1	49.25	78.9	49.25	77.38	46.25
85	83	48.5	79.4	49.5	77.13	46.75
86	82	48	78.4	49.25	76.89	46
87	82.3	49.5	79.4	48.25	77.64	47
88	82.4	50	78.8	49	77.4	46.75
89	82.1	50.5	79.5	49.5	77.65	47
90	82.5	50.5	78.1	49	77.7	47.75
91	83.1	50	78.6	49.75	76.76	47.25
92	81.4	50.25	78.8	49.5	76.81	47.5
93	82.4	50.75	77.4	49.25	76.87	47.25
94	82	50	78.8	49.25	76.92	47
95	81	50.5	77.4	49.25	76.97	47.25
96	81.25	51.75	79.5	49.5	76.12	47.75
97	81.65	51.25	79.56	49.5	76.41	47.75
98	80	49	78.4	49.9	75.71	47.75
99	80.2	49.75	79.3	50.5	76.81	47.25
100	80.7	50.75	78.8	50.5	76.31	47.75

ตารางที่ ก.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก (เส้นสีเขียว, แกน Y1) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ในปล่องระบายความชื้น (เส้นสีแดง, แกน Y2) กับเวลา (แกน X) ภายใต้อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2, 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	เงื่อนไขการอบแห้ง					
	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ก ที่ถึงพัก ข้าว °C	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ก ที่ถึงพัก ข้าว °C	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ก ที่ถึงพัก ข้าว °C
101	80.85	50.5	76.7	50.25	76.21	47
102	80.8	50	77.7	50.25	74.99	47.25
103	81	50.5	76.5	50.75	76.03	47.75
104	80.5	50.7	77.7	50.75	75.82	47.75
105	80.5	50.8	76.3	51	75.63	47.5
106	79.1	51.5	76.3	51.25	75.44	47
107	80	51	76.9	51.25	76.26	48.25
108	80	51.25	75.5	51.25	75.07	48
109	80	51	77.3	51	74.89	48.96
110	80.5	51.25	76.4	51	74.5	48.67
111	79.5	51.5	76	51.75	74.8	48.71
112	79	50	76	51.25	74.9	48.75
113	79	50.5	77.2	51.75	74.4	48
114	78.8	51	77.3	51.5	74.2	48.25
115	79.1	51.25	75	51.25	74.5	48.5
116	80	50.25	75.6	51.5	74.8	48
117	79.98	51.25	75.4	51.25	74.6	48.25
118	79.65	52	75	51.75	74.1	48.75
119	79.2	52.25	75.7	51.75	75	49.25
120	79.35	52.25	76.2	51.25	74.5	49.75

ตารางที่ ก.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก (เส้นสีเขียว, แกน Y1) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ในปล่องระบายความชื้น (เส้นสีแดง, แกน Y2) กับเวลา (แกน X) ภายใต้อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2, 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	เงื่อนไขการอบแห้ง					
	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ก ที่ถังพัก ข้าว °C	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ก ที่ถังพัก ข้าว °C	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ก ที่ถังพัก ข้าว °C
121	78.5	52	74.7	51.75	73.3	49
122	80.3	51.5	75.6	51	74.2	49.75
123	79.1	52	75.6	52	73	49
124	80.3	53	75.4	52.25	73.6	49.25
125	80	52.5	75.3	52.5	73.8	50.5
126	80	53.25	73.8	52.6	73.6	50
127	78.5	53	74	52.7	73.43	50
128	79.2	53	74.1	52.8	73.4	50.67
129	78.4	53	73.4	52.9	72.35	50.79
130	78.6	53.5	75	52.89	73.33	50.33
131	78.2	53.5	74.2	52.98	73.31	50.63
132	78.9	54.75	74.8	52.5	72.8	50.04
133	78.95	54.25	74	53.23	72.5	50.17
134	78.8	54.75	73	53.46	72.4	51.33
135	79.2	54	74.4	53.75	72.3	51.04
136	79.6	54.5	73.6	53.25	72.3	51.54
137	79.8	55.25	73.5	53.25	72.29	51.92
138	79.13	55.25	72.3	53.75	71.95	51.33
139	79.43	54.5	72.5	53.75	71.89	52.57
140	79.73	55.5	71.5	53.25	71.88	52.5

ตารางที่ ก.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก (เส้นสีเขียว, แกน Y1) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ในปล่องระบายความชื้น (เส้นสีแดง, แกน Y2) กับเวลา (แกน X) ภายใต้อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2, 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	เงื่อนไขการอบแห้ง					
	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ก ที่ถังพัก ข้าว °C	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ก ที่ถังพัก ข้าว °C	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ก ที่ถังพัก ข้าว °C
141	79.03	55	72.2	53.5	71.58	52
142	79.9	55.5	72	53.75	71.5	52.57
143	78.9	56	71.2	53	71.46	52.69
144	78.98	55.25	71.3	53.75	70.45	52.23
145	78.12	55.35	71	54.25	70.35	52.53
146	78.1	55.55	71.3	53.75	70.4	52.9
147	78	55.75	70	53.25	70.3	53.37
148	78.5	55.5	70.03	53.5	70.3	53
149	78.6	55.25	70	54.75	70	53.3
150	78.45	55.75	70	54.75	70	53.21
151	78.69	55.5	70.1	53.5	69.8	53
152	78.37	56.75	69.3	54.5	69.5	53.75
153	78.1	56	70	54.5	69.1	53.75
154	78.5	56.25	69.4	53.75	68.77	53.5
155	78.6	56.25	70	54.75	68.42	53.63
156	78.4	56.75	69.4	54.5	68.77	53.54
157	79.4	56.75	68.5	54.25	68.87	53.38
158	78.8	56.25	68.1	54.75	68.9	53.75
159	79.2	57.25	68.6	54	68.34	53.25
160	78.9	56.5	68.9	54.75	68.23	53.75

ตารางที่ ก.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก (เส้นสีเขียว, แกน Y1) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ในปล่องระบายความชื้น (เส้นสีแดง, แกน Y2) กับเวลา (แกน X) ภายใต้อัตราการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก 2, 3 และ 4 กิโลกรัมต่อนาที (ต่อ)

เวลา (นาที)	เงื่อนไขการอบแห้ง					
	2 kg/min 180 min		3 kg/min 180 min		4 kg/min 180 min	
	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพัก ข้าว °C	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพัก ข้าว °C	ความชื้นที่ ปล่อง ระบาย ความชื้น (%)	อุณหภูมิ ข้าวเปลือก ที่ถึงพัก ข้าว °C
161	79.8	56.75	68	54.5	68.2	53.25
162	79.7	56.75	68.4	54.5	68.1	54
163	78.4	57.75	67.98	54.34	67.8	53.25
164	79.2	56.25	67.95	54.64	67.8	53.25
165	78.2	57.5	67.8	54.25	67	54
166	78.3	57.5	67.65	54	67.4	54
167	78.8	57.75	67.59	54	67.8	54.25
168	78.2	57.5	67.5	54.25	66.9	54
169	78	57.25	66.43	55.5	66.1	54.75
170	77.3	57.25	66.07	55.75	66.85	54.2
171	78.6	57.25	66.78	55.75	66.68	54
172	78.4	57	66.49	55.5	66.51	54.25
173	77	57.25	66.16	55.5	65.45	55
174	78.3	57.5	66.86	55.75	65.28	54.5
175	78.29	57.75	66.55	55.75	65.41	54.25
176	78.46	57.75	66.44	55.25	65.19	55.5
177	78.64	57.5	65.4	56.55	64.98	55.6
178	78.82	57.75	65.49	55.55	64.76	55.34
179	78.23	57.25	65.38	56.05	64.54	55.44
180	78.18	57.5	65.24	56.05	64.33	55.12

ตารางที่ ก.14 การประเมินสมรรถนะด้านเปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องต้น (Brown rice yield, BRY (%))

เงื่อนไขการอบแห้ง	ครั้งที่	น้ำหนักข้าวเปลือก (g)	น้ำหนักข้าวกล้อง (g)	น้ำหนักข้าวเต็มเมล็ด (g)	น้ำหนักข้าวกล้อง (g)	% ของกลบ	% ของรำ	ข้าวกล้องเต็มเมล็ด (%)
ข้าวเปลือกความชื้น 11 % (ตัวอย่างข้าวก่อนเพิ่มความชื้น)	1.00	500.00	369.01	297.50	316.35	26.20	10.53	59.50
	2.00	500.03	364.54	301.67	318.46	27.10	9.22	60.33
	3.00	500.10	363.95	305.86	323.10	27.22	8.17	61.16
อัตราการไหลเมล็ด ข้าวเปลือก 2 kg/min	1.00	500.13	362.19	162.54	251.60	27.58	22.11	32.50
	2.00	500.00	362.43	164.00	242.26	27.51	24.03	32.80
	3.00	500.00	371.77	165.80	248.80	25.65	24.59	33.16
อัตราการไหลเมล็ด ข้าวเปลือก 3 kg/min	1.00	500.05	364.85	155.02	266.65	27.04	19.64	31.00
	2.00	500.00	367.37	157.00	274.95	26.53	18.48	31.40
	3.00	500.00	367.33	156.75	275.22	26.53	18.42	31.35
อัตราการไหลเมล็ด ข้าวเปลือก 4 kg/min	1.00	500.16	372.05	151.05	277.42	25.61	18.92	30.20
	2.00	500.00	369.94	152.50	262.06	26.01	21.58	30.50
	3.00	500.00	369.57	152.65	254.96	26.09	22.92	30.53
ตากแดด (Control)	1.00	500.00	371.91	162.54	296.80	25.62	15.02	32.50
	2.00	500.00	370.00	165.05	295.45	26.00	14.91	33.01
	3.00	500.00	370.98	167.60	292.25	25.80	15.75	33.52

ตารางที่ ก.15 การประเมินสมรรถนะด้านดัชนีความขาว (Whiteness index, WI)

เงื่อนไขการอบแห้ง	ครั้งที่	L*	a*	b*	ดัชนีความขาว เมล็ดข้าว	ค่าเฉลี่ย ดัชนี ความขาว เมล็ดข้าว
ตากแดด (Control)	1	73.11	-0.47	11.53	70.74	71.46
	2	74.85	-0.67	11.23	72.45	
	3	73.70	-0.48	11.71	71.21	
ข้าวเปลือกความชื้น 11 % (ตัวอย่างข้าวก่อนเพิ่ม ความชื้น)	1	75.00	0.60	12.05	72.24	72.28
	2	75.20	0.90	12.17	72.36	
	3	75.10	0.70	12.25	72.24	
อัตราการไหลเมล็ด ข้าวเปลือก 2 kg/min	1	73.10	-0.60	10.10	71.26	71.26
	2	73.75	-0.45	11.70	71.26	
	3	73.41	-0.32	10.90	71.26	
อัตราการไหลเมล็ด ข้าวเปลือก 3 kg/min	1	71.30	-0.71	10.02	69.59	71.10
	2	73.99	-0.26	11.89	71.40	
	3	74.70	-0.60	11.28	72.29	
อัตราการไหลเมล็ด ข้าวเปลือก 4 kg/min	1	70.69	-0.68	10.01	69.02	71.85
	2	75.63	-0.59	11.62	73.00	
	3	76.11	-0.61	11.36	73.54	



ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

## ภาคผนวก ข

### 1. การหาความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการหาความชื้นข้าวเปลือกด้วยวิธีตรง โดยการใช้เครื่องอบลมร้อน โดยมีน้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้นคือ 5.6531 กรัม และน้ำหนักข้าวเปลือกหลังการอบด้วยเครื่องอบลมร้อนคือ 5.0107 กรัม

$$M_w = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100$$

$$M_w = \frac{5.6531 - 5.0107}{5.6531} \times 100$$

$$M_w = 11.3637 (\% \text{ w.b.})$$

ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกเท่ากับ 11.3637 (% w.b.)

### 2. การหาปริมาณน้ำสำหรับเพิ่มความชื้นข้าวเปลือก

หลังจากคำนวณหาความชื้นข้าวเปลือกที่นำมาทำการทดสอบ ทำให้ทราบว่ามีความชื้นประมาณเริ่มต้นประมาณ 11.3637 % w.b. โดยความชื้นข้าวเปลือกที่ต้องการคือ 24 % w.b. โดยมวลของข้าวเปลือกทั้งหมดที่นำมาเตรียมตัวอย่าง ( $m_{w, net}$ ) คือ 12 กิโลกรัม ดังนั้นมวลแห้งของข้าวเปลือกทั้งหมด ( $m_{d, net}$ ) มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ ข1

$$m_{d, net} = m_{w, net} - \left( \frac{M_w}{100} \times m_{w, net} \right) \quad (\text{ข1})$$

$$m_{d, net} = 12 - \left( \frac{11.3637}{100} \times 12 \right)$$

$$m_{d, net} = 10.6364$$

แทนค่าในสมการ เพื่อหาปริมาณน้ำที่ต้องเติมสำหรับเพิ่มความชื้นข้าวเปลือก จะได้ว่า

$$M_{\text{watwr, add}} = \frac{100(m_{\text{w,net}} - m_{\text{d,net}}) - (M_{\text{w,target}} \times m_{\text{w,net}})}{(M_{\text{w,target}} - 100)}$$

$$M_{\text{watwr, add}} = \frac{100(12 - 10.6364) - (24 \times 12)}{(24 - 100)}$$

$$M_{\text{watwr, add}} = 1.9953$$

ดังนั้นปริมาณน้ำที่ต้องเติมเข้าไปมีค่าเท่ากับ 1.9953 กิโลกรัม

### 3. อัตราการอบแห้ง

โดยคำนวณจากตัวอย่างการทดลองเงื่อนไขแบบติดตั้งตัวขวางการไหลแบบครีบลับพื้นปลา ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส ข้าวที่นำมาทำการทดสอบมีน้ำหนักก่อนและหลังการอบแห้งคือ 2 กิโลกรัม และ 1.754 กิโลกรัม ตามลำดับ โดยใช้เวลาในการอบแห้ง 156 นาที

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

$$DR = \frac{2 - 1.754}{2.6}$$

$$DR = 0.0945$$

ดังนั้นอัตราการอบแห้งเท่ากับ 0.0945 kg<sub>water</sub>/h

### 4. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

โดยคำนวณจากตัวอย่างการทดลองเงื่อนไขแบบติดตั้งตัวขวางการไหลแบบครีบลับพื้นปลา ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส ข้าวที่นำมาทำการทดสอบมีน้ำหนักก่อนและหลังการอบแห้งคือ 2 กิโลกรัม และ 1.754 กิโลกรัม ตามลำดับ โดยใช้พลังงานไฟฟ้า 2.478 kWh

$$SEC = \frac{3.6E}{W_i - W_f}$$

$$SEC = \frac{3.6(2.478)}{2 - 1.754}$$

$$\text{SEC} = 36.2634$$

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 36.2634 MJ/kg<sub>water</sub>

### 5. เปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องตัน

โดยคำนวณจากตัวอย่างการทดลองเงื่อนไขแบบติดตั้งตัวขวางการไหลแบบครีบลับพื้นปลา ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส ข้าวที่นำมาทำการทดสอบมีน้ำหนักข้าวกล้องและข้าวเปลือกคือ 27.6490 กรัม และ 100.0375 กรัม ตามลำดับ

$$\text{BRY} = \left( \frac{m_{\text{head}}}{m_{\text{total}}} \right) \times 100$$

$$\text{BRY} = \left( \frac{27.6490}{100.0375} \right) \times 100$$

$$\text{BRY} = 27.6386$$

เปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องตันเท่ากับ 27.6386 %

### 6. ดัชนีความขาว

โดยคำนวณจากตัวอย่างการทดลองเงื่อนไขแบบหอบแห้งเปล่า ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของข้าวเปลือก 2 กิโลกรัมต่อนาที ครั้งที่ 1 ของการทดสอบส่วนที่สาม มีค่า  $L^*$   $a^*$   $b^*$  คือ 73.10, -0.60, 10.10 ตามลำดับ

$$\text{WI} = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2}$$

$$\text{WI} = 100 - \sqrt{(100 - 73.10)^2 + (-0.6)^2 + (10.10)^2} = 71.26$$

ดัชนีความขาวเท่ากับ 71.26



ภาคผนวก ค

การออกแบบเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## ภาคผนวก ค

### ค.1 การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่แผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมี

ในงานวิจัยนี้เลือกฮีตเตอร์อินฟราเรดเป็นแหล่งทำความร้อนให้กับระบบ เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นคือ ไม่อาศัยตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน สามารถทะลุทะลวงเข้าเนื้อวัสดุได้ดี ทำให้พลังงานความร้อนสูญเสียสู่สิ่งแวดล้อมน้อยมาก เป็นผลทำให้เกิดการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า โดยหอบแห้งจะทำจากแก้ว เนื่องจากรังสีอินฟราเรดสามารถทะลุผ่านได้ และทำให้สามารถเห็นพฤติกรรม การไหลของเมล็ดข้าวภายในหอบแห้งได้ มีลักษณะเป็นทรงกระบอก 2 ชั้น คือชั้นในและชั้นนอก ข้าวเปลือกจะอยู่บริเวณช่องว่างระหว่างชั้นนอกและชั้นใน ซึ่งเป็นการอบแห้งแบบชั้นบาง และมีการติดตั้งตัววางการไหลเพิ่มในรูปแบบที่ต่างกัน เพื่อชะลอการไหลของเมล็ดข้าวเปลือกและเกิดการกระจายตัวในหอบแห้งเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้ข้าวเปลือกสามารถรับความร้อนในแนวรัศมีได้อย่างสม่ำเสมอ ขั้นตอนการออกแบบมีดังนี้

#### 1. การออกแบบหาขนาดของห้องอบแห้ง

ออกแบบหอบแห้งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกจำนวน 2 ชั้นทำจากแก้ว ทรงกระบอกชั้นในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร ความสูง 45 เซนติเมตร ทรงกระบอกชั้นนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร ความสูง 48 เซนติเมตร มีความหนาของชั้นข้าวเปลือกประมาณ 2 เซนติเมตร ดังนั้นสามารถคำนวณหาปริมาณข้าวเปลือกภายในหอบแห้งได้จากขนาดหอบแห้งที่กล่าวในข้างต้น โดยกำหนดให้ข้าวเปลือกที่นำมาทดสอบมีความชื้นเริ่มต้น 24 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก สามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นกองของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ได้ดังสมการ (ค.1) (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และคณะ (2555))

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

โดยที่ M คือ ความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 (% w.b.)

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

$$m = [(0.559 \times 24) + 553.52] \times \left[ \frac{\pi}{4} \times (0.12^2 - 0.06^2) \times 1.35 \right] = 6.49$$

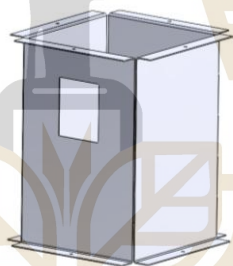
ดังนั้นภายในห้องอบแห้งจะสามารถบรรจุข้าวเปลือกได้ปริมาณ 6.49 กิโลกรัม

## 2. การออกแบบหาขนาดของถังพักข้าว

ออกแบบถังพักข้าวเป็นทรงลูกบาศก์ที่มีขนาดความกว้าง ยาว และสูงคือ 19.8 19.8 และ 30.43 เซนติเมตร ตามลำดับ และมีปลายเป็นทรงพีระมิดสี่เหลี่ยมยอดตัด สามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นกองของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ได้ตั้งสมการ (ค.1) (เทวรัตน์ ธิพยวิมล และคณะ (2555))

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

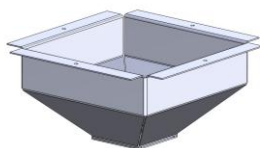
โดยที่ M คือ ความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 (% w.b.)



รูปที่ ค.1 ถังพักข้าวทรงลูกบาศก์

$$m = \rho V = \rho (\text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{สูง})$$

$$m = [(0.559 \times 24) + 553.52] (0.198 \times 0.198 \times 0.3043) = 6.76$$



รูปที่ ค.2 ถังพักข้าวทรงพีระมิดสี่เหลี่ยมยอดตัด

$$m = \rho V = \rho ((\text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{สูง}) + \frac{h}{3} (a^2 + ab + b^2))$$

$$m = [(0.559 \times 24) + 553.52] \left( (0.2 \times 0.2 \times 0.05) + \frac{0.17}{3} (0.2^2 + 0.2 \times 0.073 + 0.073^2) \right)$$

$$m = 3.06$$

ดังนั้นภายในถังพักข้าวจะสามารถบรรจุข้าวเปลือกได้ปริมาณ 9.82 กิโลกรัม

เมื่อคิดรวมพื้นที่ทั้งสองส่วนคือความจุภายในห้องอบแห้ง และความจุภายในถังพักข้าวจะมีปริมาณที่สามารถบรรจุข้าวเปลือกได้ปริมาณ 16.31 กิโลกรัม

### 3. การออกแบบระบบให้ความร้อน

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่สร้างขึ้นติดตั้งฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบแห้งขนาด 700 วัตต์ ที่บริเวณจุดศูนย์กลางของหอบแห้ง ในงานการออกแบบนี้ นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอินฟราเรดของ Ipsita Das et al. สามารถแสดงดังสมการ (ค.2) มาใช้ออกแบบระบบ เพื่อวิเคราะห์เวลาที่ใช้ในการลดความชื้นของข้าวเปลือก 15 กิโลกรัม โดยเป็นการลดความชื้นจาก 24 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก จนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้าย 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก โดยความเข้มของการแผ่รังสีอินฟราเรดหาได้จากสมการที่ (ค.5) (ภราดร หนูทอง และคณะ)

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

$$k = 0.0916 + 0.002R_1 - 0.0014G_B + 0.0001R_1^2 - 0.0035G_B^2 \quad (R^2=0.965) \quad (\text{ค.3})$$

$$n = 0.9504 - 0.0009R_1G_B - 0.0365G_B + 0.0001R_1^2 - 0.0009G_B^2 \quad (R^2=0.989) \quad (\text{ค.4})$$

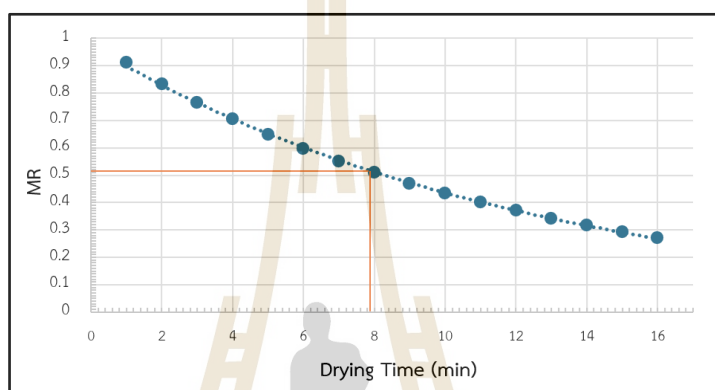
$$R_1 = 0.0008P + 0.0091T - 0.0682 \quad (R^2=0.959) \quad (\text{ค.5})$$

โดยที่

k	คือ	drying constant in Page Model
n	คือ	drying exponent
R <sub>1</sub>	คือ	radiation intensity (kW/m <sup>2</sup> )
G <sub>B</sub>	คือ	grain bed depth (m)

t คือ drying time (min)

จากการวิเคราะห์การออกแบบระบบให้ความร้อนพบว่า ในการลดความชื้นข้าวเปลือก จาก 24 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ให้เหลือ 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก จะมีสัดส่วนความชื้นจะเท่ากับ 0.515 (ณัฐพล แซ่ลิ้ม, 2560) ซึ่งพบว่าข้าวเปลือกจะต้องเคลื่อนที่ในหอบแห้งเป็นเวลา 7.85 นาที ดังแสดงในรูปที่ ค.3



รูปที่ ค.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือก จาก 24 % w.b. ให้เหลือ 14 % w.b.

### 3.1 การคำนวณหาขนาดของฮีตเตอร์อินฟราเรด

#### หลักการคำนวณพลังงานความร้อนจากหลอดอินฟราเรด

กระบวนการถ่ายเทความร้อนในเครื่องอบแห้งที่ใช้ทดสอบนี้ส่วนใหญ่จะเป็นพลังงานจากการแผ่รังสีของหลอดอินฟราเรด ดังนั้นผู้วิจัยจึงคิดแค่การแผ่รังสีความร้อนซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการสเตฟาน-โบลต์ซมาน (Stefan-Boltzmann law) ดังสมการ (ค.6) (Incropera, DeWitt, Bergman, & Lavine, 2007)

$$Q_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_a^4) \quad (\text{ค.6})$$

โดยที่

$Q_{\text{rad}}$  = พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสี (W)

$\epsilon$  = ค่าการแผ่รังสีของผิวหลอดอินฟราเรด ( $\approx 0.9$  สำหรับควอตซ์เคลือบ)

$\sigma$  = ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann =  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

$A$  = พื้นที่ผิวของหลอด =  $\pi DL$

$T_s$  = อุณหภูมิผิวหลอด (K)

$T_a$  = อุณหภูมิของอากาศรอบหลอด (K)

ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย	หมายเหตุ
D	0.012	m	เส้นผ่านศูนย์กลางหลอดควอตซ์
L	1.0	m	ความยาวหลอด
A	0.0377	m <sup>2</sup>	พื้นที่ผิวคำนวณจาก $\pi DL$
$T_s$	873	K ( $\approx 600$ °C)	ผิวหลอดอินฟราเรด
$T_a$	333	K ( $\approx 60$ °C)	อากาศในหอบแห้ง
$\epsilon$	0.9	-	ค่าการแผ่รังสีของควอตซ์

การคำนวณ

$$Q_{\text{rad}} = 0.9 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 0.0377 \times (5.78 \times 10^{11} - 1.23 \times 10^{10})$$

$$Q_{\text{rad}} = 1.088 \times 10^3 \text{ W}$$

เมื่อหักการสูญเสียความร้อนจากการสะท้อนและการกระจาย (ประมาณ 30–35 %) (Zhonghua & Yadong, 2014) พลังงานที่มีผลจริงต่อเมล็ดข้าวคำนวณดังสมการ (ค.7)

$$Q_{\text{eff}} = 1088 \times (1 - 0.35) = 707.2 \text{ W} \quad (\text{ค.7})$$

การเปรียบเทียบกับพลังงานที่ต้องการระเหยน้ำ

พลังงานที่ต้องใช้ในการลดความชื้นของข้าวเปลือกจาก 24 % w.b. ให้เหลือ 14 % w.b. น้ำหนักข้าวเปลือก 15 kg คำนวณดังสมการ (ค.8) (Brooker, Bakker-Arkema, & Hall, 1992)

$$Q_{\text{req}} = m_w L_v \quad (\text{ค.8})$$

โดยที่

$$m_w = \text{มวลน้ำที่ระเหยออก} = 1.74 \text{ kg}$$

$$L_v = \text{ความร้อนแฝงการระเหยของน้ำ} = 2.26 \times 10^6 \text{ J/kg}$$

$$Q_{\text{req}} = 1.74 \times 2.26 \times 10^6 = 3.93 \times 10^6 \text{ J}$$

เมื่อเวลาอบแห้งคือ 180 นาที (10,800 s):

$$\dot{Q}_{\text{req}} = \frac{3.93 \times 10^6}{10,800} = 363.89 \text{ W}$$

จากการคำนวณพบว่าพลังงานสุทธิจากการแผ่รังสีของหลอดอินฟราเรดขนาด 700 วัตต์อยู่ที่ประมาณ 707.2 วัตต์ ซึ่งมากกว่าค่าพลังงานที่ระบบต้องการในการลดความชื้นของข้าวเปลือก (ประมาณ 364 วัตต์) แสดงว่าหลอดอินฟราเรดชนิดนี้สามารถจ่ายพลังงานความร้อนได้เพียงพอสำหรับกระบวนการอบแห้งโดยไม่จำเป็นต้องอาศัยการพาความร้อนเพิ่มเติม อีกทั้งกำลังไฟที่ใช้ยังสอดคล้องกับขนาดหอบแห้งและปริมาตรวัสดุที่ทดลอง จึงถือว่าเหมาะสมต่อระบบอบแห้งที่ออกแบบในงานวิจัยนี้

#### 4. การคำนวณหาปริมาณลมที่ใช้ในการอบแห้ง (Chakraverty, A. and Singh, R. P., 2001)

คำนวณได้จากสมการ

$$\dot{m}_a = \frac{Q_{\text{evap}} + Q_s}{(C_a + C_v H_1)(T_2 - T_1) \cdot t} \quad (\text{ค.9})$$

$$Q_{\text{evap}} = W_d (M_{d,i} - M_{d,f}) h_{fg} \quad (\text{ค.10})$$

$$Q_s = W_d C_{pd} (T_{p2} - T_{p1}) + W_d C_{pw} (T_{p2} - T_{p1}) M_i \quad (\text{ค.11})$$

ข้อมูลการคำนวณประกอบไปด้วยต่อไปนี้

(ก) Bone dry paddy ( $W_d$ );

$$W_d = (2)(1 - 0.14) = 1.72 \text{ kg}_{\text{dry solid}}$$

(ข) Initial moisture content;

$$M_{d,i} = \frac{0.24}{1 - 0.24} = 0.3158$$

(ค) Final moisture content;

$$M_{d,f} = \frac{0.14}{1 - 0.14} = 0.1628$$

(ง) Humidity ratio ( $H_1$ ) at 32 °C, 65 % RH;

$$H_1 = 0.0197 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$$

(จ) Specific volume ( $V_{sa}$ ) at 32 °C, 65 % RH;

$$V_{sa} = 0.892 \text{ m}^3 / \text{kg}_{\text{dryair}}$$

(ฉ) ความร้อนจำเพาะของน้ำ ( $C_{pw}$ );

$$C_{pw} = 4.22 \text{ kJ/kg}_{\text{water}} \cdot ^\circ\text{C}$$

(ช) ความร้อนจำเพาะของวัสดุอบแห้ง ( $C_{pd}$ );

$$C_{pd} = 1.737 \text{ kJ/kg}_{\text{solid}} \cdot ^\circ\text{C}$$

(ซ) ความร้อนจำเพาะของของอากาศแห้ง ที่  $32^\circ\text{C}$  ( $C_a$ );

$$C_a = 1.0053 \text{ kJ/kg}_{\text{dryair}} \cdot ^\circ\text{C}$$

(ฌ) ความร้อนจำเพาะของของไอน้ำ ที่  $32^\circ\text{C}$

$$(C_v); C_v = 0.7183 \text{ kJ/kg}_{\text{water}} \cdot ^\circ\text{C}$$

\*\*\* (ง, จ, ช อ้างอิงข้อมูลจาก Chakraverty, A. and Singh, R. P., 2001)

\*\*\* (ฉ, ซ, ฌ อ้างอิงข้อมูลจาก Cengel, Y. A. and Boles, M. A., 2003)

(ญ) ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ ( $h_{fg}$  ของอุณหภูมิข้าวเปลือกที่ถึงพักข้าว  $42^\circ\text{C}$ )

$$h_{fg} = 2,410.8 \text{ kJ/kg}$$

(ฎ) อุณหภูมิข้าวเปลือกขาเข้า  $32^\circ\text{C}$

(ฏ) อุณหภูมิข้าวเปลือกขาออก  $42^\circ\text{C}$

(ฐ) อุณหภูมิอากาศอบแห้ง  $60^\circ\text{C}$

(ฑ) เวลาที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก 156 นาที

$$Q_{\text{evap}} = (1.72)(0.3514 - 0.1628)(2410.8) = 782.0442 \text{ kJ}$$

$$Q_s = (1.72)(1.737)(42 - 32) + (12.9)(4.22)(42 - 32) (0.3158) = 201.7916 \text{ kJ}$$

$$(C_a + C_v H_1)(T_2 - T_1) \cdot t = (1.0053 + (0.7183)(0.0197))(60-32)(156) = 4,452.9598$$

$$\text{kJ} \cdot \text{min} / \text{kg}_{\text{dryair}}$$

คิดการสูญเสียความร้อนออกจากระบบ 10 % ดังนั้นปริมาณความร้อนสุทธิที่ต้องการคือ

$$Q_{\text{net}} = \frac{Q_{\text{evap}} + Q_s}{0.9}$$

$$Q_{\text{net}} = \frac{782.0442 + 201.7916}{0.9} = 1,093.1509 \text{ kJ}$$

แทนค่าลงสมการ (ข.6) จะได้

$$\dot{m}_a = \frac{1,093.1509 \text{ kJ}}{4,452.9598 \text{ kJ} \cdot \text{min} / \text{kg}_{\text{dryair}}} = 0.2455 \frac{\text{kg}_{\text{dryair}}}{\text{min}}$$

ดังนั้นอัตราการไหลอากาศที่ต้องการคือ

$$(\dot{m}_a)(v_{sa}) = \left( 0.2455 \frac{\text{kg}_{\text{dryair}}}{\text{min}} \right) \left( 0.892 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{\text{dryair}}} \right) = 0.2189 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

จึงเลือกใช้อัตราการไหลอากาศเป็น  $0.30 \text{ m}^3 / \text{min}$

## 5. การคำนวณกำลังของพัดลม

ระบบหมุนวนข้าวเปลือกที่ใช้ในระบบอบแห้งข้าวเปลือกจะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นท่อตรง และท่องอ ซึ่งท่อทั้งสองรูปแบบจะมีต้านอากาศหรือแรงเสียดทานภายในท่อที่แตกต่างกัน สามารถคำนวณหาได้ดังต่อไปนี้

### 5.1 ความต้านทานการไหลในท่อ (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2540)

(1) ในกรณีท่อตรง ในขณะที่อากาศไหลในท่อตรงความดันสูญเสียส่วนใหญ่มาจากความเสียดทาน สามารถคำนวณได้ตามสมการของ Darcy–Weisbach ดังแสดงในสมการที่ (ค.12) (ค.13) และ (ค.14)

$$\Delta P_{\text{major}} = f_D \cdot \left(\frac{L}{D}\right) \cdot P_V \quad (\text{ค.12})$$

$$P_V = \left(\frac{V}{1.29}\right)^2 \quad (\text{ค.13})$$

โดยที่

$\Delta P$  = ความดันรวมที่สูญเสีย (Pa)

$P_V$  = ความดันความเร็ว (Pa)

$f_D$  = แฟคเตอร์ความเสียดทาน (ไร้นหน่วย)

$L$  = ความยาวท่อ (2.6 m รวมความยาวของท่อทางไหลอากาศอบแห้ง)

$D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)

$V$  = ความเร็วลมที่สามารถทำให้ข้าวลอยตัวได้ (8.68 m/s)

ดังนั้น

$$\Delta P_{\text{major}} = f_D \cdot \left(\frac{L}{D}\right) \cdot \left(\frac{V}{1.29}\right)^2 \quad (\text{ค.14})$$

แทนค่าลงในสมการ จะได้

$$\Delta P_{\text{major}} = (0.0359) \cdot \left(\frac{2.6}{0.0508}\right) \cdot \left(\frac{8.68}{1.29}\right)^2 = 83.19 \text{ Pa}$$

(2) ในกรณีข้ออ เมื่ออากาศไหลผ่านข้ออทิศทางการไหลของอากาศจะเปลี่ยนไป ความดัน ความดันสูญเสียส่วนใหญ่เกิดจากการสูญเสียเชิงจลน์ สามารถคำนวณได้ดังสมการ (ค.15)

$$\Delta P_{\text{minor}} = \rho \cdot \left( \frac{KV^2}{2} \right) \quad (\text{ค.15})$$

โดยที่

$\rho$  = ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิ 80°C (1.000 kg/m<sup>3</sup>อ้างอิงข้อมูลจาก Cengel, Y. A. and Boles, M. A., 2010)

$K$  = สัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง (0.45 อ้างอิงข้อมูลจาก สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540)

แทนค่าลงสมการ (ค.15)

$$\Delta P_{\text{minor}} = (1.000) \left( \frac{(0.45)(8.68^2)}{2} \right) = 16.95 \text{ Pa}$$

เนื่องจากมีข้ออ 2 ตำแหน่ง ดังนั้น  $\Delta P_{\text{minor}} = 33.90 \text{ Pa}$

ดังนั้นความต้านทานรวมสำหรับการไหลในท่อมี่ค่าเท่ากับ

$$\Delta P_{\text{total}} = \Delta P_{\text{major}} + \Delta P_{\text{minor}} = 100.14 \text{ Pa}$$

## 5.2 การคำนวณหาขนาดพัดลม (Blower)

หากพัดลมและมอเตอร์มีประสิทธิภาพ 75 และ 85 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังนั้นเรา จะต้องการกำลังสำหรับขับพัดลม (Chakraverty, A. and Singh, R. P., 2001) คือ

$$HP = \frac{(\Delta P) \cdot Q}{(746)(0.75)(0.85)} = \frac{\left( 100.14 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \right) \left( 0.30 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right) \left( \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right)}{(746)(0.75)(0.85)} = 1.05 \times 10^{-3} \text{ hp หรือ } 0.79 \text{ W}$$

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้พัดลม (Blower) ขนาด 2.2 kW ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้ว และเพียงพอ ต่อการใช้งานสำหรับกำลังขับที่ต้องการ ตามการคำนวณที่แสดงในข้างต้น

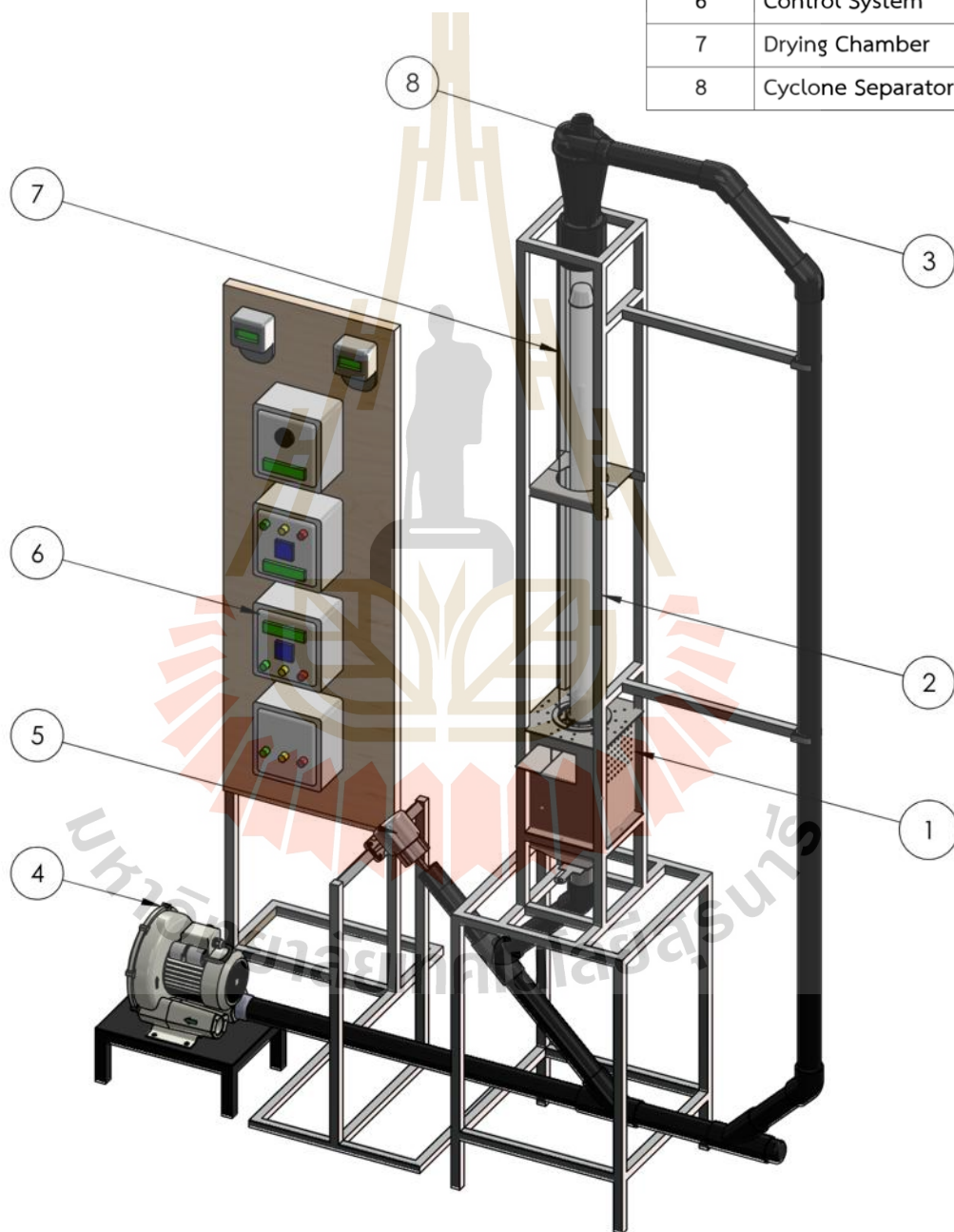


ภาคผนวก ง

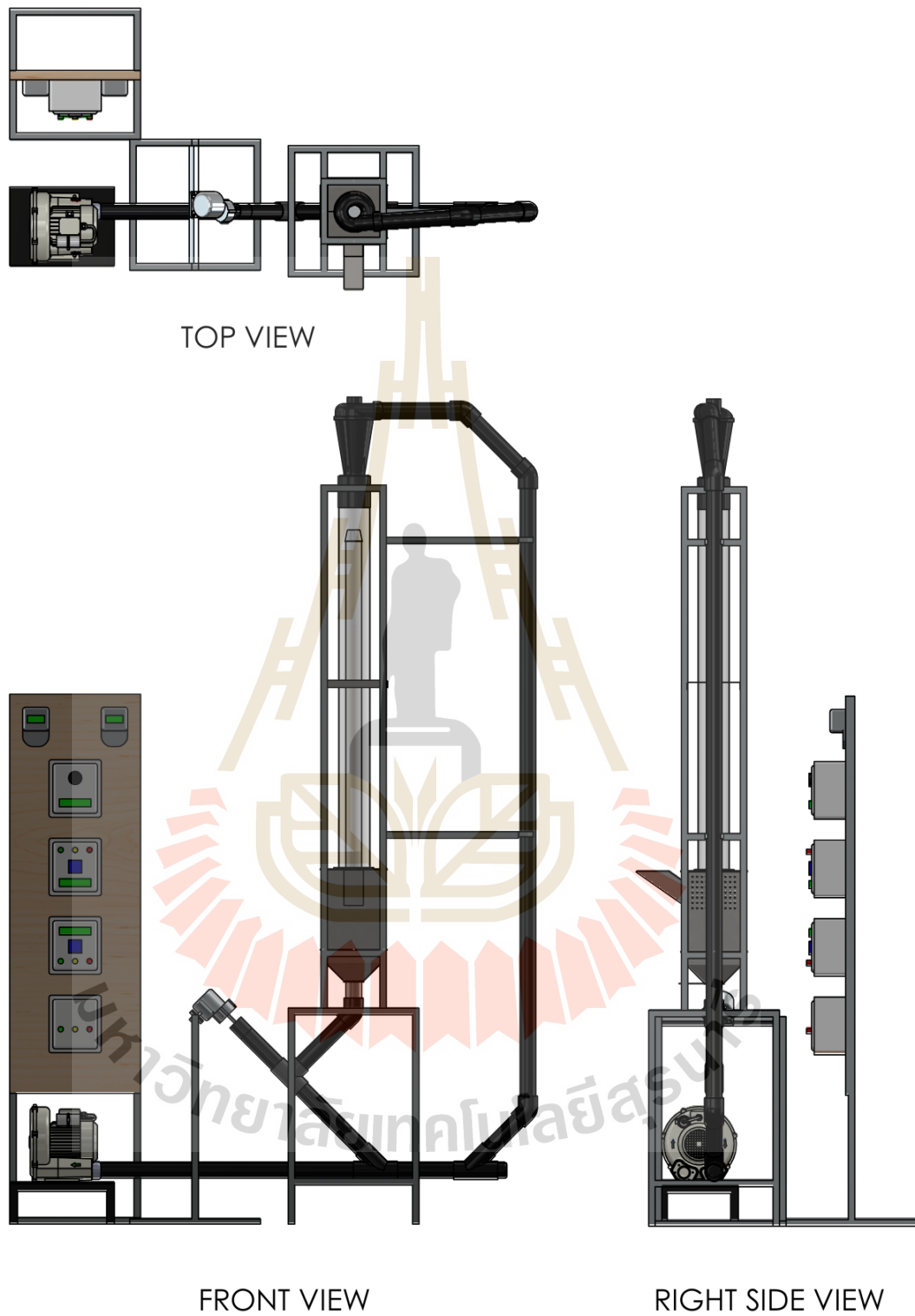
แบบวิศวกรรมเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

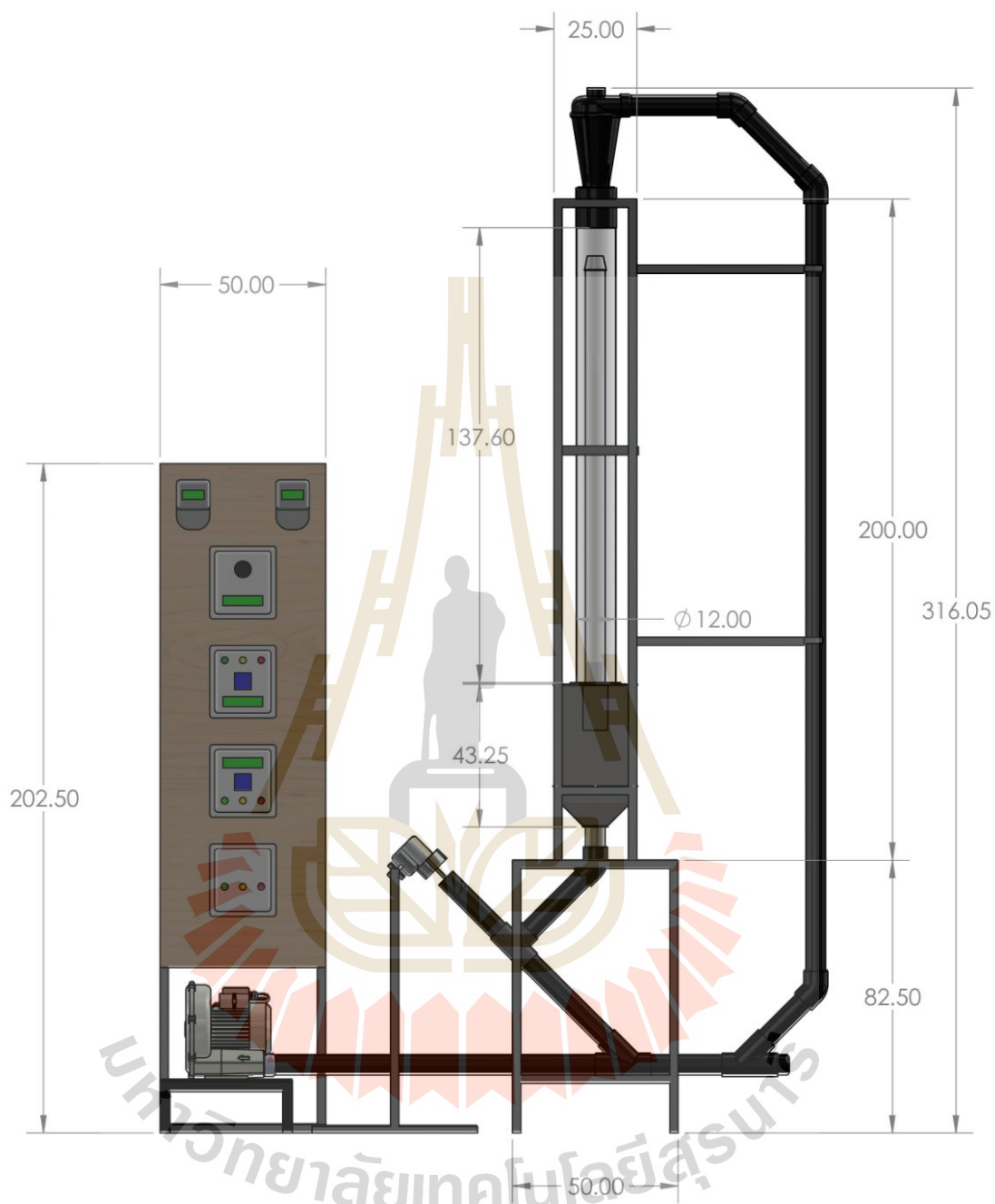
ITEM No.	PART NAME
1	Paddy Storage Tank
2	Machine Frame
3	Paddy Circulation Pipe
4	Blower
5	Motor
6	Control System
7	Drying Chamber
8	Cyclone Separator



รูปที่ ง.1 ส่วนประกอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรด



รูปที่ ง.2 แบบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรด



รูปที่ ง.3 ขนาดเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรด



ภาคผนวก จ

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก  
แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรด

เพื่อประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดที่พัฒนาขึ้น ได้ทำการคำนวณค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) ต้นทุนพลังงาน และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period, PP) ตามหลักเกณฑ์การวิเคราะห์ระบบอบแห้งเชิงวิศวกรรม (Kumar et al., 2021; Chua et al., 2019) โดยใช้สมการดังนี้

$$SEC = \frac{E}{m_{\text{evap}}} \quad (\text{จ.1})$$

โดยที่

E คือ พลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้ในการอบแห้ง (MJ) และ  
 $m_{\text{evap}}$  คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ ( $\text{kg}_{\text{water}}$ )

$$PP = \frac{C_{\text{machine}}}{(B - C_{\text{oper}})} \quad (\text{จ.2})$$

โดยที่

$C_{\text{machine}}$  คือ ต้นทุนเครื่องอบแห้ง (บาท)  
 B คือ รายได้รวมต่อปี (บาท/ปี)  
 $C_{\text{oper}}$  คือ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่อปี (บาท/ปี)

เครื่องอบแห้งต้นแบบมีราคาก่อสร้าง 10,000 บาท ใช้หลอดอินฟราเรดกำลังไฟฟ้ารวม 700 วัตต์ (0.7 kW) โดยใช้เวลาอบแห้งข้าวเปลือก 3 ชั่วโมง ต่อบรรอบ (น้ำหนักข้าวเปลือก 15 กิโลกรัม ความชื้นเริ่มต้น 24 % w.b. ลดลงเหลือ 14 % w.b.) ผลการวัดการใช้พลังงานพบว่ามีค่า SEC เท่ากับ  $2.58 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$  ซึ่งอยู่ในระดับต่ำมากเมื่อเทียบกับเครื่องอบลมร้อนทั่วไปที่มีค่าอยู่ในช่วง 8–12  $\text{MJ/kg}_{\text{water}}$  (Soponronnarit et al., 2018; Kumar et al., 2021)

จากค่า SEC ที่ได้ สามารถคำนวณพลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้ต่อบรรอบได้ดังนี้

$$E = SEC \times m_{\text{evap}} = 2.58 \times 1.5 = 3.87 \text{ MJ} = 1.075 \text{ kWh}$$

ดังนั้น ค่าไฟฟ้าต่อบรรอบจะเท่ากับ

$$1.075 \times 4.5 = 4.84 \text{ บาท/รอบ}$$

โดยรายได้จากการเพิ่มมูลค่าข้าวหลังการอบ (เพิ่มขึ้น 1 บาท ต่อกิโลกรัม) คิดเป็น 15 บาท ต่อรอบ เมื่อหักต้นทุนพลังงานแล้ว ได้กำไรสุทธิต่อรอบ 10.16 บาท และหากใช้งาน 5 รอบ ต่อวัน จำนวน 300 วัน ต่อ ปี จะมีกำไรสุทธิ 15,240 บาท ต่อปี

นำค่าดังกล่าวมาคำนวณระยะเวลาคืนทุนจากสมการ (จ.2) ได้ว่า

$$PP = \frac{10,000}{15,240} = 0.66 \text{ ปี (ประมาณ 8 เดือน)}$$

ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งอินฟราเรดต้นแบบที่ใช้หลอดอินฟราเรด กำลังไฟฟ้ารวม 700 วัตต์ มีค่าการใช้พลังงานจำเพาะเพียง 2.58 MJ/kg<sub>water</sub> ซึ่งต่ำกว่าค่าที่รายงาน โดย Soponronnarit et al. (2018) สำหรับเครื่องอบลมร้อนและ Chua et al. (2019) สำหรับระบบ IR-air ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 6–10 MJ/kg<sub>water</sub> แสดงถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของระบบที่พัฒนาได้ดี เนื่องจากพลังงานจากรังสีอินฟราเรดถูกส่งตรงไปยังผิวเมล็ดข้าวโดยไม่สูญเสียผ่านการพาความร้อนมากนัก

ด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่าต้นทุนพลังงานต่อรอบอยู่ที่เพียง 4.84 บาท เมื่อเทียบกับรายได้จากมูลค่าข้าวที่เพิ่มขึ้น 15 บาท ต่อรอบ จึงให้ผลกำไร 10.16 บาท ต่อรอบ และสามารถคืนทุนภายใน 0.66 ปี หรือ ประมาณ 8 เดือน ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลงทุนในระดับครัวเรือนหรือเกษตรกรรายย่อย หากเพิ่มประสิทธิภาพเพิ่มเติมโดยปรับปรุงการกระจายรังสีของหลอด SEC อาจลดลงได้อีก 10–20 % ส่งผลให้ต้นทุนพลังงานต่อรอบต่ำกว่า 4 บาท และระยะเวลาคืนทุนสั้นลงเหลือเพียง ครึ่งปี ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Kumar et al. (2021) ที่พบว่าเครื่องอบอินฟราเรดขนาดเล็กสามารถคืนทุนได้ภายใน 6–12 เดือน เมื่อมี SEC ต่ำกว่า 3 MJ/kg<sub>water</sub>

โดยสรุป เครื่องอบแห้งอินฟราเรดต้นแบบนี้มีประสิทธิภาพด้านพลังงานและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในระดับสูง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการอบข้าวเปลือกหรือพืชผลทางการเกษตรอื่น เพื่อช่วยลดต้นทุนพลังงานและเพิ่มมูลค่าผลผลิตในระดับชุมชนได้อย่างมีศักยภาพ

## ประวัติผู้เขียน

นายวิชาญณรงค์ วงศ์บับพา เกิดเมื่อวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2538 ที่อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี เริ่มศึกษาในระดับชั้นอนุบาลถึงมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนเทศบาล 5 สีหรัักษ์วิทยา จังหวัดอุดรธานี และระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนประจักษ์ศิลปาคาร จังหวัดอุดรธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล (หลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2561 และในปี พ.ศ.2566 เข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล (หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยในขณะศึกษาได้เป็นผู้ช่วยสอนของสาขาวิศวกรรมเครื่องกลในหลายรายวิชา เช่น วิชาเขียนแบบทางวิศวกรรม1 วิชาเขียนแบบทางวิศวกรรม2 วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล1 ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล2

**ผลงานวิจัยในระดับปริญญาโท ได้นำเสนอบทความวิชาการดังนี้**

### 1.การประชุมวิชาการระดับชาติ

วิชาญณรงค์ วงศ์บับพา, กระจวี ตรีอำรรค, เทวรัตน์ ตรีอำรรค และ กมลทิพย์ ปรีเปรม. (2567). อิทธิพลของตัวขวางการไหลในหอบแห้งแบบอินฟราเรดที่มีต่ออุณหภูมิของข้าวเปลือก. การประชุมวิชาการระดับชาติเชิงสร้างสรรค์ครั้งที่ 9 (CreTech 2024), โรงแรมเคปราชา ศรีราชา จังหวัดชลบุรี, 21-23 สิงหาคม พ.ศ. 2567.

### 2.การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

Wichannarong Wongbubpa, Krawee Treeamnuak, Tawarat Treeamnuak, Kamontip Preeprem and Nuttapong Wongbubpa. (2024). Paddy dehumidification with obstructed grain flow in infrared dryer. 7<sup>th</sup> Global Conference on Engineering and Applied Science (GCEAS 2024), Taipei Taiwan, 21-23 November 2024.

**ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ขณะที่กำลังศึกษาในระดับปริญญาโท**

วิชาญณรงค์ วงศ์บับพา, กระจวี ตรีอำรรค, เทวรัตน์ ตรีอำรรค และ กมลทิพย์ ปรีเปรม. (2567). อิทธิพลของตัวขวางการไหลในหอบแห้งแบบอินฟราเรดที่มีต่ออุณหภูมิของข้าวเปลือก. วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ, 19(1), 24–30.