



รายงานการวิจัย

การพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคพาหะลมหมุนเวียน  
(Development of a Paddy Dryer with Circulating  
Pneumatic-conveying Technique)



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



## รายงานการวิจัย

# การพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคพาหะลม หมุนเวียน (Development of a Paddy Dryer with Circulating Pneumatic-conveying Technique)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผศ. ดร. เทวรัตน์ ตรีอำนาจ

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ผู้ร่วมวิจัย

ผศ.ดร. กระวี ตรีอำนาจ

นายเกียรติศักดิ์ ใจโต

นางสาวจิตรารัตน์ จอกกิว

นายธีรวัฒน์ ชื่นอัศดงคต

นางสาวนากชนก ปรางปรุ

นางสาวเบญจวรรณ วานมนตรี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2562

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2560 ผู้วิจัยขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการเข้าใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง คุณกรรณิกา ประเสริฐสังข์ และนักวิจัยทุกท่านที่ได้ช่วยกันทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงลงด้วยดี



## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการออกแบบ สร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคพาหะลมหมุนเวียน เครื่องอบแห้งประกอบด้วย พัฒนาขึ้น ห้องอบแห้งซึ่งมีลักษณะเป็นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101 mm สูง 1,100 mm 2) ถังบรรจุข้าวเปลือกขนาดมิติ กว้าง 400 mm ยาว 500 mm สูง 950 mm โดยส่วนล่างของถังทำเป็นมุมเอียงลู่ลงสู่รางเกลียวลำเลียง 3) ระบบผลิตลมร้อนประกอบด้วยพัดลมขนาด 3.5 แรงม้า และห้องอุ่นอากาศซึ่งใช้ heater ไฟฟ้าแบบครีบน้ำมัน 4500 วัตต์ และ 4) ระบบควบคุมสำหรับควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งและอัตราการไหลอากาศ 5) ไซโคลนทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งด้วยการอบแห้งข้าวเปลือกครั้งละ 40 kg ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C ใน 3 รูปแบบคือ 1) อบแห้งโดยไม่ติดตั้งไซโคลน 2) อบแห้งโดยติดตั้งไซโคลน 3) อบแห้งโดยติดตั้งไซโคลนและมีการนำอากาศร้อนกลับมาใช้ใหม่ ประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งจากค่าอัตราการอบแห้ง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และปริมาณต้นข้าว ผลจากการศึกษาพบว่าการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลนที่อัตราการป้อนข้าวเปลือก 6.35 kg/min มีความเหมาะสมกับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียนที่พัฒนาขึ้นมากที่สุดเนื่องจากให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุดคือ 5.44 MJ/kg<sub>water</sub> ให้อัตราการอบแห้งสูงสุด 1.47 kg/h โดยมีปริมาณข้าวต้น 35.48 เปอร์เซ็นต์

## Abstract

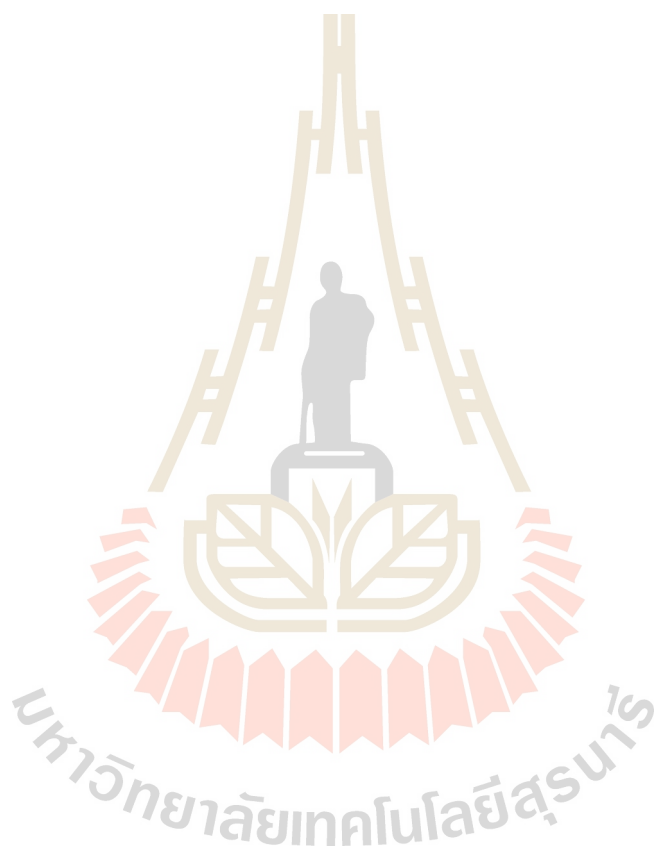
The objective of this research was to design, development, and evaluate performance of a paddy dryer with circulating pneumatic-conveying technique. The prototype of dryer consists of as follows: 1) The drying chamber, which is a transparent pipe diameter of 101 mm, height 1,100 mm 2) Paddy container, dimension width 500 mm, length 1,000 mm, height 900 mm. The bottom of the tank is a chamfer into the conveyor spiral. 3) The hot air system consists of a 3.5 horsepower fan motor and a air heating chamber that uses 4500 w of fin heater and 4) the control system for drying air temperature and air flow rate control 5) Cyclone. The drying performance test with drying 40 kg of paddy at drying temperature of 80°C in 3 types i.e. 1) drying without installing cyclone 2) drying by installing the cyclone 3) drying by installing the cyclone and reusing hot air. Evaluate the dryer performance from drying rate, specific energy consumption and the head rice yield. The results of the study showed that drying without cyclone at paddy feed rate of 6.35 kg/min was most suitable for paddy drying with the dryer because this condition give the lowest energy consumption of 5.44 MJ/kg<sub>water</sub>, highest drying rate of 1.47 kg/h and head rice yield of 35.48 percent.

## สารบัญ

### หน้า

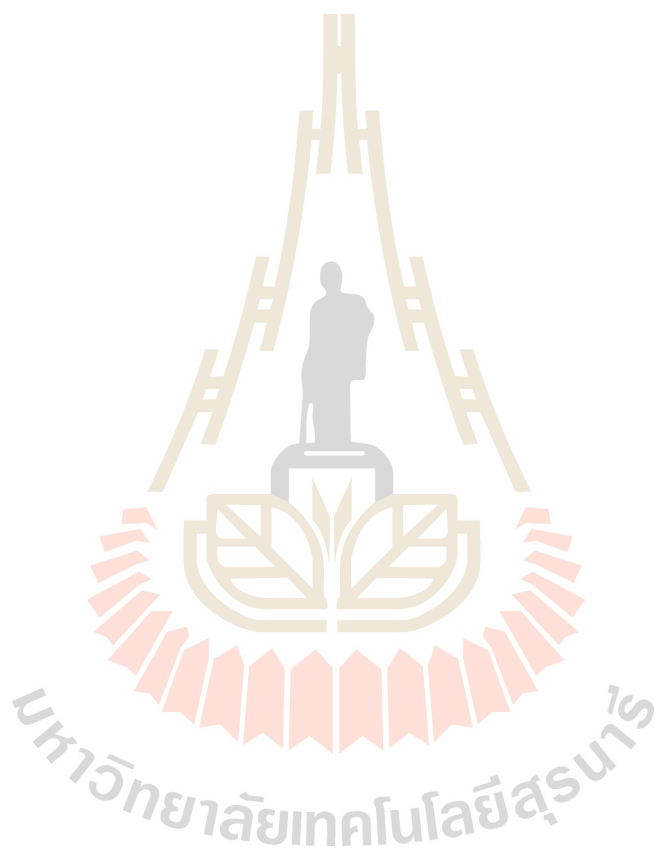
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร	
2.1 ความขึ้นของวัสดุและการอบแห้ง .....	3
2.2 ข้าว .....	6
2.3 การลดความชื้นข้าวเปลือก.....	8
2.4 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือก.....	9
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ	
3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือ และวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย .....	18
3.2 วิธีการ .....	24
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผล	
4.1 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมหมุนเวียน.....	28
4.2 ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก.....	29
4.3 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนข้าวเปลือกและ อัตราการไหลลมร้อน .....	29
4.4 ผลการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือก.....	29
4.5 ผลการประเมินคุณภาพข้าวเปลือก.....	33
4.6 ผลการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก .....	36
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินการและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	40

5.2 ข้อเสนอแนะ .....	40
เอกสารอ้างอิง.....	41
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก เอกสารเผยแพร่งานวิจัย.....	43
ภาคผนวก ข แบบเครื่องอบแห้ง.....	62
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณ.....	68
ประวัติผู้วิจัย.....	70



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนข้าวเปลือกและอัตราการไหลอากาศ.....	29
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลน.....	30
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลน.....	31





## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้ง ความชื้นและเวลา.....	5
รูปที่ 2.2 ลักษณะทั่วไปของเมล็ดข้าวเปลือก .....	6
รูปที่ 2.3 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไช้เบด .....	10
รูปที่ 2.4 ลักษณะการไหลของเมล็ดพืชและอากาศอบแห้ง .....	12
รูปที่ 2.5 เครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง .....	13
รูปที่ 2.6 เครื่องอบแห้งแบบไหลตาม.....	14
รูปที่ 2.7 ภาพตัดของเครื่องอบแห้งแบบที่มีการผสมกันของเมล็ดพืช.....	15
รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม .....	17
รูปที่ 3.1 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมหมุนเวียนที่ใช้ในการทดสอบ .....	18
รูปที่ 3.2 ตู้อบหาความร้อนแบบลมร้อน (hot air oven) .....	19
รูปที่ 3.3 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลที่ใช้ในงานวิจัย .....	19
รูปที่ 3.4 ชุดวัดความเร็วลม.....	20
รูปที่ 3.5 มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า (Watt-hour meter).....	20
รูปที่ 3.6 มัลติมิเตอร์แบบคลิป (Clip amp) .....	21
รูปที่ 3.7 เครื่องกะเทาะข้าวกล้อง.....	22
รูปที่ 3.8 เครื่องขัดข้าวข้าว.....	22
รูปที่ 3.9 ตะแกรงกลมคัดแยกเมล็ดข้าวหัก.....	22
รูปที่ 3.10 ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ใช้ในการทดสอบ .....	23
รูปที่ 3.11 การอบตัวอย่างข้าวเปลือกเพื่อหาความชื้นด้วยตู้อบลมร้อน.....	24
รูปที่ 3.12 การผึ่งข้าวเปลือกชุดควบคุมคุณภาพเพื่อลดความชื้น .....	25
รูปที่ 4.1 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมหมุนเวียนที่พัฒนาขึ้น .....	28
รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเมื่อทำการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลน.. .....	30
รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเมื่อทำการอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลน.....	31
รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเมื่อทำการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลนและ ติดตั้งไซโคลนที่อัตราการป้อนข้าวเปลือก 4.10 kg/min.....	32
รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเมื่อทำการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลนและ ติดตั้งไซโคลนที่อัตราการป้อนข้าวเปลือก 6.35 kg/min.....	32
รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเมื่อทำการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลนและ ติดตั้งไซโคลนที่อัตราการป้อนข้าวเปลือก 8.45 kg/min.....	33
รูปที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์ข้าวตันเมื่อทำการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลน.....	34

รูปที่ 4.8	เปอร์เซ็นต์ข้าวตันเมื่อทำการอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลน.....	35
รูปที่ 4.9	การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ข้าวตันที่ดีที่สุดได้จากการทดลองกับชุดควบคุม.....	35
รูปที่ 4.10	ค่าพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งเมื่อทำการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ.....	36
รูปที่ 4.11	เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกเมื่อทำการอบแห้งแบบติดตั้งและไม่ติดตั้งไซโคลน.....	37
รูปที่ 4.12	ระบบอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลนที่มีการนำอากาศร้อนหลังจากออกจากไซโคลนกลับมาผสมกับอากาศใหม่.....	38
รูปที่ 4.13	ค่า SEC และอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกเมื่อทำการอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลนและนำลมร้อนกลับมาผสมกับอากาศใหม่.....	38
รูปที่ 4.14	แสดงอัตราการใช้พลังงานเพื่ออุ่นอากาศอบแห้งเมื่อมีการนำอากาศขาออกจากไซโคลนมาผสมกับอากาศใหม่.....	39



## คำอธิบายสัญลักษณ์

M	คือความชื้นข้าวเปลือก (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก, %wb)
M <sub>d</sub>	คือความชื้นข้าวเปลือก (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง, %db)
W <sub>i</sub>	คือน้ำหนักตัวอย่างข้าวเปลือกเริ่มต้น (g)
W <sub>f</sub>	คือน้ำหนักตัวอย่างข้าวเปลือกหลังอบด้วยตู้อบลมร้อน (g)
W <sub>d</sub>	คือมวลแห้งของวัสดุ (g)
E <sub>1φ</sub>	คือค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากระบบไฟฟ้า 1 เฟส (MJ)
Pe	คือค่าหน่วยไฟฟ้าที่อ่านได้จากมิเตอร์ไฟฟ้า (kWh)
E <sub>3φ</sub>	คือค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากระบบไฟฟ้า 3 เฟส (MJ)
V	คือค่าแรงดันไฟฟ้า (V)
I	คือค่ากระแสไฟฟ้า (A)
t	คือเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (s หรือ h)
φ	คือค่าเฟคเตอร์ตัวคูณ

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

ข้าวถือเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทยโดยเป็นพืชอาหารหลักของคนไทยและเป็นพืชที่มีอิทธิพลทั้งในด้านเศรษฐกิจ การเมืองและวัฒนธรรม ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีศักยภาพในการผลิตข้าวสูง โดยสามารถผลิตข้าวได้อย่างเพียงพอสำหรับการบริโภคภายในประเทศและยังเป็นผู้ส่งออกรายใหญ่ของโลก โดยพบว่าการส่งออกข้าวของไทยเป็นอันดับหนึ่งของโลกโดยในช่วงครึ่งปีแรกของปี 2558 มีมูลค่าการส่งออกกว่า 72,000 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558) และความอุดมสมบูรณ์ของพื้นที่โดยเฉพาะในเขตพื้นที่ชลประทานเกษตรกรรมส่วนใหญ่จะทำการเพาะปลูกข้าวอย่างน้อย 2 ครั้งต่อปี ประกอบด้วยข้าวนาปีและข้าวนาปรัง จึงส่งผลให้ข้าวมีปริมาณผลผลิตที่เพิ่มมากขึ้นจนทำให้เกษตรกรมีความจำเป็นต้องนำเครื่องจักรกลต่างๆ โดยเฉพาะเครื่องเกี่ยวนวดข้าว เข้ามาใช้เพื่อช่วยทุ่นแรงของเกษตรกรเอง แต่ผลผลิตที่ได้จากเครื่องเกี่ยวนวดข้าวนั้นมักจะมีปริมาณความชื้นสูง (20-25 %wb) ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาและมีราคาขายต่ำ เกษตรกรจึงทำการลดความชื้นเบื้องต้นด้วยการตากข้าวบนลานตากหรือในกรณีของเกษตรกรที่ไม่มีพื้นที่จะใช้พื้นผิวถนนเป็นลานตากซึ่งก่อให้เกิดอันตรายต่อการสัญจร เครื่องอบแห้งข้าวจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งแต่เนื่องจากเครื่องอบแห้งข้าวในปัจจุบันมีต้นทุนของเครื่องค่อนข้างสูงจึงทำให้เกษตรกรหรือกลุ่มเกษตรกรไม่กล้าลงทุนจึงมีใช้เฉพาะในโรงสีข้าว ทางคณะผู้วิจัยเล็งเห็นถึงความสำคัญในการลดความชื้นข้าวจึงมีแนวคิดในการพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคพาหะลมแบบหมุนเวียนซึ่งเป็นการปรับปรุงด้านการถ่ายเทความร้อนและความชื้นระหว่างเมล็ดข้าวกับอากาศอบแห้งและการพัดตัวของข้าวเปลือกในขณะที่ทำการอบแห้งทำให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานและปริมาณข้าวต้น

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคพาหะลมหมุนเวียน
2. เพื่อประเมินสมรรถนะในการอบแห้งข้าวเปลือกของเครื่องอบแห้งต้นแบบที่พัฒนาขึ้น
3. เพื่อประเมินคุณภาพของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้น

#### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. การพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกนี้จะพัฒนาเป็นเครื่องต้นแบบเพื่อใช้สำหรับการศึกษาทดลองอบแห้งเฉพาะข้าวเปลือกเป็นลักษณะกึ่งแบบที่ทำการอบแห้งครั้งละไม่เกิน 100 กิโลกรัม
2. การประเมินสมรรถนะการอบแห้งจะสนใจศึกษาในเรื่องเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ประสิทธิภาพเชิงความร้อน ข้อดีและข้อเสียในการลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่พัฒนาขึ้น

3. การประเมินคุณภาพของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งประกอบด้วยปริมาณความชื้น คุณภาพการสีโดยพิจารณาเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว (head rice yield) ซึ่งเป็นสมบัติที่ส่งถึงคุณภาพของข้าว หลังการสี

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมหมุนเวียนต้นแบบ
2. ได้ทราบพฤติกรรมการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียน



## บทที่ 2

### การตรวจเอกสาร

#### 2.1 ความชื้นของวัสดุและการอบแห้ง

##### 2.1.1 ความชื้นวัสดุ

ความชื้น (moisture content) หรือน้ำในวัสดุถือเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการเก็บรักษาผลิตผลทางการเกษตรและอาหารเนื่องจากเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการเสื่อมสภาพของอาหารและผลิตผลทางการเกษตร การอ้างอิงความชื้นในวัสดุนิยมอ้างอิงใน 2 รูปแบบคือความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis) และ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis) ซึ่งมีรูปแบบการวิเคราะห์ดังนี้

ความชื้นมาตรฐานเปียก คืออัตราส่วนของปริมาณความชื้นหรือน้ำในวัสดุต่อปริมาณวัสดุรวม โดยคิดว่าวัสดุประกอบไปด้วยสองส่วนหลักคือความชื้นและมวลแห้ง (dry solid) เขียนเป็นสมการได้ดังสมการ (2.1)

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

ความชื้นมาตรฐานแห้ง คืออัตราส่วนของปริมาณความชื้นในวัสดุต่อปริมาณมวลแห้งในวัสดุเขียนเป็นสมการได้ดังสมการ (2.2)

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

เมื่อ  $M_w$  คือความชื้นมาตรฐานเปียก (%wb)

$M_d$  คือความชื้นมาตรฐานแห้ง (%db)

$W$  คือมวลของวัสดุ (g)

$W_d$  คือมวลแห้งของวัสดุ (g)

##### 2.1.2 ทฤษฎีการอบแห้งเบื้องต้น

การอบแห้งคือกระบวนการลดความชื้นด้วยการใช้ความร้อนถ่ายเทไปยังวัสดุขึ้นเพื่อไล่ความชื้นออกจากวัสดุ ซึ่งการอบแห้งจัดเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร โดยทั่วไปจะอาศัยความร้อนจากภายนอกถ่ายเทความร้อนเข้าสู่วัสดุที่ต้องการ ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าไปจะทำให้ความชื้นของวัสดุที่อยู่บริเวณผิวและเนื้อของวัสดุระเหยออกมา ทั้งนี้พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งจะถูกกำหนดโดยระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (drying time) จากความชื้นเริ่มต้นไปสู่ความชื้นที่ต้องการ

ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อพลังงานที่ใช้การอบแห้งคือสมบัติและประเภทของความชื้นในวัสดุ โดยปกติความชื้นวัสดุจะประกอบไปด้วย ความชื้นรอบผิววัสดุและความชื้นในเนื้อวัสดุ ซึ่งความชื้นรอบผิววัสดุเป็นความชื้นที่ถูกดึงออกไปได้ง่าย ส่วนความชื้นในเนื้อวัสดุเป็นความชื้นที่ถูกดึงออกไปได้ยาก นอกจากนี้ยังมีความชื้นของบรรยากาศ ซึ่งมีผลทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้นอีกด้วย โดยปกติในการอบแห้งวัสดุใดๆ ความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่ยังคงเหลืออยู่ในเนื้อวัสดุจะสมดุลกับความชื้นของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งโดยที่ความชื้นในวัสดุดังกล่าวจะไม่ลดต่ำกว่านี้อีกแม้ว่าจะใช้เวลานานเท่าใดก็ตามเราเรียกความชื้น ณ จุดนี้ว่า ค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content, )

อัตราการอบแห้ง (drying rate) เป็นตัวแปรที่ใช้บอกถึงระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ด้วยการแสดงค่าความชื้นที่สามารถระเหยออกไปได้ต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา ซึ่งหน่วยอาจเป็นปอนด์น้ำต่อตารางฟุตชั่วโมงหรือกิโลกรัมน้ำต่อตารางเมตรชั่วโมงดังรูป 2.1 โดยปกติในการอบแห้งวัสดุใดๆ จะมีอัตราการอบแห้งเกิดขึ้น 3 ช่วง ดังนี้

#### ช่วงการให้ความร้อนเริ่มต้น (preheating drying)

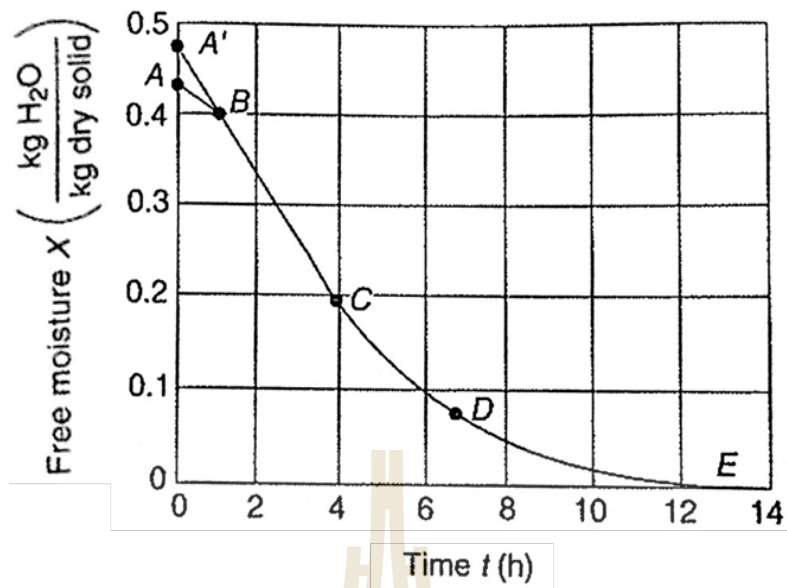
เป็นการอบแห้งในช่วงที่เริ่มให้ความร้อนแก่วัสดุ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุและน้ำในวัสดุให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิเกาะเปียกของอากาศร้อน ซึ่งอัตราการให้ความร้อนที่สูงจึงทำให้การอบแห้งในช่วงนี้มีระยะเวลาสั้น และเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงการอบแห้งต่อไปซึ่งจะมีระยะเวลา นานกว่า จึงอาจไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงการอบแห้งในช่วงนี้ก็ได้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ช่วง A-B

#### ช่วงการอบแห้งคงที่ (constant rate drying)

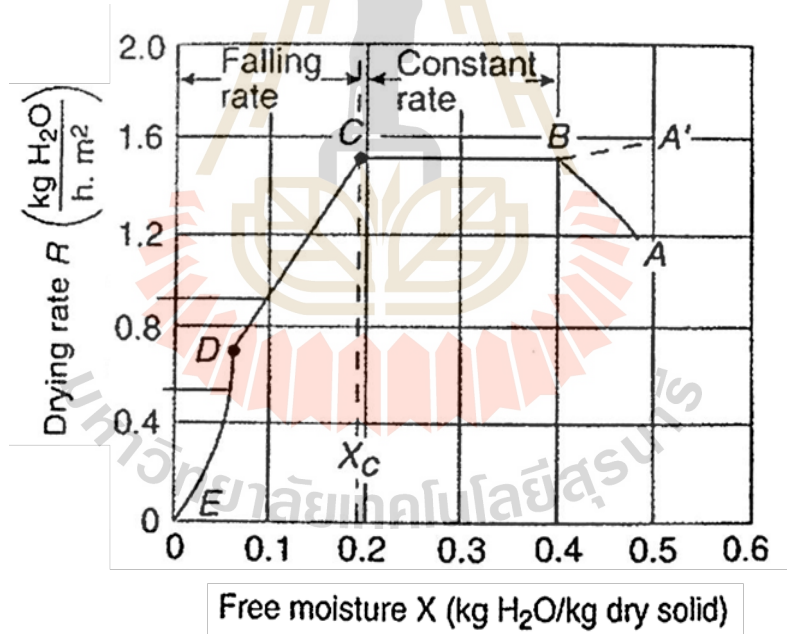
เป็นการอบแห้งในช่วงที่วัสดุมีความชื้นเหลือเพื่อ ความชื้นจึงเดินทางมาสู่บริเวณผิวหน้าได้ทันเวลากับความร้อนที่ถ่ายจากลมร้อนมาที่ผิว ส่วนใหญ่จะเป็นความชื้นรอบผิววัสดุหรือความชื้นอิสระ (unbound moisture) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ช่วง B-C

#### ช่วงการอบแห้งลดลง (falling rate drying)

เป็นการอบแห้งในช่วงที่ปริมาณน้ำที่ผิววัสดุแห้งลง เมื่อน้ำระเหยมาที่ผิวไม่ทันอัตราการระเหยต่อหน่วยพื้นที่และเวลาก็จะลด ส่วนใหญ่จะเป็นความชื้นในเนื้อวัสดุหรือความชื้นเกาะติด (bound moisture) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ช่วง C-D



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลา



(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับความชื้น

รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้ง ความชื้นและเวลา  
ที่มา: Heldman and Lund, 2007

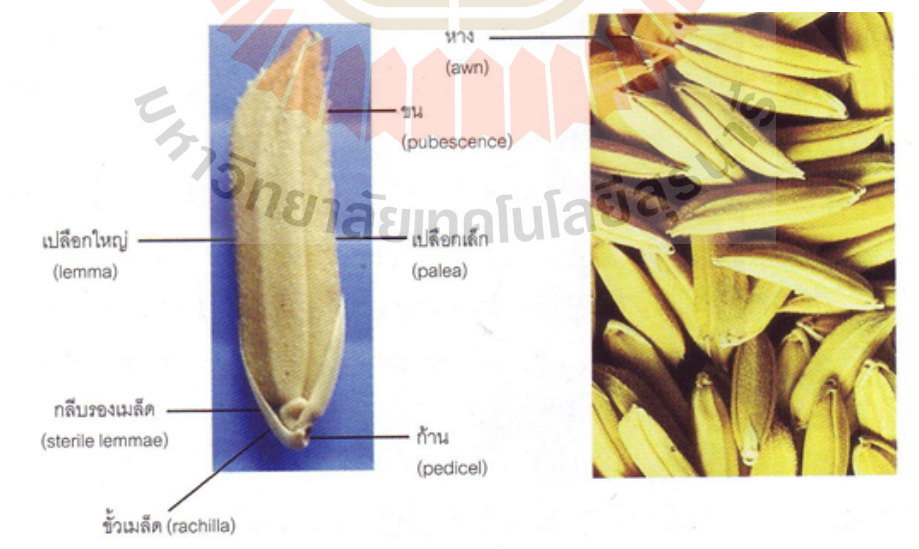


## 2.2 ข้าว

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย ประเทศไทยมีการผลิตข้าวเพื่อการบริโภคภายในประเทศและส่งออกขายยังต่างประเทศ ซึ่งในปี 2557 ไทยส่งออกข้าวได้ทั้งสิ้น 10.97 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่า 174,851 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558) โดยมีปริมาณและมูลค่าเพิ่มขึ้นจากปี 2556 ร้อยละ 65.9 และ 30.6 ตามลำดับ การปลูกข้าวของไทยส่วนใหญ่ยังเป็นข้าวนาปีซึ่งในฤดูเก็บเกี่ยวจะทำการเก็บเกี่ยวในช่วงระยะเวลาที่ใกล้เคียงกัน ประกอบกับในปัจจุบันมีการนำรถเกี่ยวขนาดข้าวมาใช้ในการเก็บเกี่ยว จึงต้องเริ่มเก็บเกี่ยวที่ความชื้นสูงโดยความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการเก็บเกี่ยวข้าวคืออยู่ในช่วง 22-25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะให้คุณภาพการสีสูงที่สุด เนื่องจากความชื้นของข้าวที่สูงนี้จะง่ายต่อความเสียหายไม่สามารถเก็บรักษาหรือนำเข้าสู่กระบวนการสีได้ต้องทำการลดความชื้นก่อนวิธีการในการลดความชื้นโดยทั่วไปที่นิยมจะแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ การตากลาน และการใช้เครื่องอบแห้ง การตากลานเป็นวิธีที่มีข้อจำกัดเรื่องสภาพดินฟ้าอากาศและพื้นที่ส่วนการใช้เครื่องอบแห้งก็มีข้อจำกัดในด้านต้นทุน และการจัดการแต่มีข้อดีคือลดปัญหาเรื่องของสภาพอากาศและพื้นที่ลงได้เนื้อหาในส่วนนี้จะเป็นการรายงานถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับข้าวและการอบแห้งข้าวด้วยเครื่องอบแห้ง

### ลักษณะทั่วไปของข้าวเปลือก

เมล็ดข้าวเปลือกมีส่วนประกอบ 2 ส่วนใหญ่ๆ คือเปลือก (husk) และเมล็ดข้าวกลิ้งอง (caryopsis หรือ brown rice) เปลือกของข้าวมีอยู่ 2 ส่วนคือ เปลือกใหญ่ (lemma) และ เปลือกเล็ก (palea) ซึ่งประกอบติดกันแบบตะขอฟัน (interlocking fold) ทั้งสองข้างตลอดความยาวของเมล็ดข้าว โดยลักษณะทั่วไปของเมล็ดข้าวเปลือกแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะทั่วไปของเมล็ดข้าวเปลือก

เมล็ดข้าวเปลือกจะมีส่วนประกอบทั่วไปเหมือนกันแต่มีลักษณะทางการกายภาพที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับภูมิประเทศ และสายพันธุ์ โดยลักษณะทางการกายภาพที่สำคัญซึ่งใช้ในการจำแนกข้าวมีดังนี้

2.2.1 สีของเปลือกข้าว (husk color) เมื่อข้าวแก่สีของข้าวจะเปลี่ยนแปลงไปจากตอนเป็นเมล็ดข้าวอ่อนอย่างสิ้นเชิง เมล็ดข้าวอ่อนที่มีเปลือกเป็นสีขาว เมื่อแก่อาจเป็นสีเหลืองทอง น้ำตาลอ่อน น้ำตาลเข้ม ดำหรือม่วงก็ได้ ในทางตรงกันข้ามเมื่อเมล็ดยังอ่อนข้าวที่มีเปลือกแตกต่างกันแต่พอเมล็ดแก่อาจกลายเป็นสีเดียวกันก็ได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การแสดงออกของยีนซึ่งควบคุมลักษณะนี้อยู่ สีเปลือกของข้าวไทยมีอยู่สองสีคือ สีฟางเช่น ข้าวหอมมะลิ และสีน้ำตาล เช่น ข้าวเหลืองปะทิว เป็นต้น

2.2.2 สีของข้าวกล้อง (pericarp color) สีของข้าวกล้องจะแสดงออกที่เยื่อหุ้มผล (pericarp) ส่วนชั้นแบ่งของข้าวทุกชนิดจะมีสีข้าวทั้งนั้น ถึงแม้ข้าวกล้องจะมีสีอื่น ๆ ก็ตามสีข้าวกล้องจะมีสีต่าง ๆ กันตั้งแต่ขาว น้ำตาลเข้ม น้ำตาลเทา และม่วงเกือบดำ สีข้าวกล้องจะถูกควบคุมโดยยีนหลายคู่ซึ่งแสดงออกในลักษณะต่าง ๆ ข้าวกล้องที่มีสีแดงและม่วงจะมีสารสีจำพวกแอนโทไซยานิน (anthocyanin pigment) อยู่ สีข้าวกล้องมีความสำคัญมากทางเศรษฐกิจ ดังจะเห็นได้จากข้าวมาตรฐานสูงที่มีราคาแพงจะไม่ยอมให้ข้าวแดงปนอยู่เลย เป็นต้น

2.2.3 น้ำหนักเมล็ด (grain weight) เป็นลักษณะที่คงที่มากที่สุด และถูกควบคุมโดยพันธุกรรม เป็นส่วนใหญ่ น้ำหนักของเมล็ดจะแปรผันไปตามขนาดและรูปร่างของเมล็ด ความชื้น ชนิดของดิน การใส่ปุ๋ย และสภาพภูมิอากาศ

2.2.4 น้ำหนักจำเพาะ (specific weight) เป็นน้ำหนักเมล็ดต่อหน่วยปริมาตร น้ำหนักจำเพาะขึ้นอยู่กับชนิดของเมล็ด ความชื้นของเมล็ดและสิ่งเจือปนและอัตราการอัดตัวของเมล็ด

2.2.5 ขนาดรูปร่างของเมล็ด (grain dimension) ขนาดรูปร่างของเมล็ดข้าวจะแตกต่างกันไปตามลักษณะภูมิประเทศ ภูมิอากาศ วิธีการปลูกและความชอบของผู้บริโภค ขนาด รูปร่างของเมล็ดเป็นลักษณะหนึ่งที่ใช้จำแนกพันธุ์ข้าว ซึ่งได้แก่ความยาว (length) ความกว้าง (width) ความหนา (thickness) ซึ่งข้าวต่างสายพันธุ์จะมีขนาดรูปร่างที่แตกต่างกันพันธุ์ข้าวจำพวกอินดิกา (indica) มีรูปร่างเรียวก่อนข้างแบน พันธุ์ข้าวจาโปนิกา (japonica) มีเมล็ดสั้นและกลม ส่วนพวกจาวานิกา (javanica) จะมีเมล็ดกว้างและหนา ขนาดรูปร่างถูกควบคุมโดยพันธุกรรมเป็นส่วนใหญ่แปรปรวนตามสิ่งแวดล้อมน้อย โดยได้มีจำแนกขนาดและรูปร่างของเมล็ดข้าวได้ดังนี้ คือขนาดเมล็ดที่จำแนกตามความยาวของเมล็ดเป็นเกณฑ์ ซึ่งแบ่งเป็น 4 พวก คือเมล็ดยาวมาก จะมีความยาวมากกว่า 7.50 มิลลิเมตร เมล็ดยาวมีความยาวระหว่าง 6.61 – 7.50 มิลลิเมตร เมล็ดยาวปานกลางมีความยาวระหว่าง 5.50- 6.60 มิลลิเมตร และเมล็ดสั้นมีความยาวน้อยกว่า 5.50 มิลลิเมตร ส่วนรูปร่างเมล็ดประเมินจากอัตราส่วนระหว่างความยาวกับความกว้าง ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 พวก คือ เมล็ดเรียวย่ออัตราส่วนความยาวกับความกว้าง ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 พวก คือเมล็ดเรียวย่ออัตราส่วนระหว่างความยาวกับความกว้างมากกว่า 3 ขึ้นไป เมล็ดปานกลางมีอัตราส่วนระหว่าง 2.1 – 3.0 ส่วนเมล็ดป้อมมีอัตราส่วนของความยาวกับความกว้างน้อยกว่า 2.0 ลงไป ข้าวพันธุ์ไทยส่วนใหญ่จะเป็นพวกเมล็ดยาวเรียวย่อ ชนิดอินดิกา

(indica) ไม่มีเมล็ดขนาดสั้นเลย ขนาดเมล็ดเป็นปัจจัยสำคัญหนึ่งที่ใช้ตราข้าวในท้องตลาด โดยข้าวเมล็ดยาวจะมีราคาดีกว่าข้าวเมล็ดสั้น

2.2.6 ลักษณะท้องไข (Chalkiness) เป็นปัจจัยที่เห็นชัดที่สุดในการประเมินราคาข้าวและลักษณะที่ไม่ต้องการทำให้ข้าวมองดูไม่สวยงามและคุณภาพการสีต่ำ สีแล้วข้าวหักมาก ผลผลิตทางอุตสาหกรรมหลายชนิดไม่ต้องการข้าวที่เป็นท้องไขและมักจะจำกัดปริมาณและชนิดของท้องไข ที่ยอมให้เอาไว้ด้วย

ท้องไขในเมล็ด หมายถึง จุดขาวขุ่นคล้ายขอลค์ที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อชั้นแบ่งของเมล็ดแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ

- (1) ท้องไขที่เกิดขึ้นตรงกลางของชั้นแบ่ง (White center or white core)
- (2) ท้องไขที่เกิดขึ้นด้านข้าง หรือด้านท้องของเมล็ดด้านเดียวกับเยื่อเจริญ (White belly)
- (3) ท้องไขที่เกิดขึ้นด้านหลังของเมล็ด ด้านตรงข้ามกับเยื่อเจริญ (White back)

ข้าวไทยส่วนใหญ่เป็นท้องไขน้อย ยกเว้นข้าวชั้นน้ำมักเป็นชนิดที่เกิดขึ้นทางด้านข้างหรือด้านท้องของเมล็ดเดียวกับเยื่อเจริญ (White belly) ซึ่งชาวบ้าน เรียกว่า ข้าวท้องปลาชิวเป็นส่วนมาก ส่วนแบบอื่นเกือบไม่มีเลย

2.2.7 ลักษณะการดูดและคายความชื้น (Hygroscopic) เมล็ดพืชส่วนใหญ่ประกอบด้วยแป้งและโปรตีน ซึ่งได้กล่าวมาแล้วว่าแป้งนั้นประกอบด้วย โมเลกุลเล็ก ๆ ของน้ำตาลต่อเชื่อมกันเป็นโมเลกุลใหญ่ๆ คือ อามัยโลส และอามัยโลเปคติน แป้งและโปรตีนเป็นสารชอบน้ำ ซึ่งสามารถดูดเอาโมเลกุลของน้ำเข้าไปบรรจุระหว่างเส้นใยของอามัยโลส อามัยโลเปคติน และโปรตีน การที่น้ำเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ระหว่างเส้นใยกลางของสารดังกล่าว จะทำให้เมล็ดข้าวมีการขยายตัว และจะเกิดการหดตัวเมื่อเอาโมเลกุลของน้ำออกจากเมล็ด การดูดซึมน้ำของเมล็ดที่อุณหภูมิแป้งสูงนี้มีขอบเขตจำกัด เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของเมล็ดมีการขยายตัวในขอบเขตจำกัด เมล็ดส่วนมากจะสามารถดูดซึมน้ำได้จนมีความชื้นประมาณกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักเปียกเท่านั้น ในการดูดซึมน้ำความชื้นเข้าไปในเมล็ดจะใช้พลังงานน้อยกว่าการคายความชื้นออกจากเมล็ด

### 2.3 การลดความชื้นข้าวเปลือก

ข้าวเปลือกที่มีระยะสุกแก่ที่เหมาะสมต่อการเก็บเกี่ยวคือ 28-30 วันหลังออกดอกและมีความชื้นเมล็ดประมาณ 22-25%wb. เพื่อให้ได้ข้าวที่มีคุณภาพที่ดี (กรมวิชาการเกษตร, 2547) ข้าวเปลือกที่ผ่านการเก็บเกี่ยวมาแล้วยังคงมีความชื้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการลดความชื้นลงเพื่อลดอัตราการหายใจ และการเสื่อมสภาพของข้าว โดยวิธีการลดความชื้นข้าวมี 2 วิธีหลักคือ วิธีการลดความชื้นตามธรรมชาติและวิธีการใช้เครื่องอบแห้ง (เรื่องวิทย์และคณะ, ม.ป.ป)

2.3.1 วิธีธรรมชาติ (natural drying หรือ sun drying) โดยการใช้ความร้อนจากแสงแดดและอากาศแวดล้อมในการลดชื้นซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ วิธีแรกทำการตากข้าวทิ้งไว้ในนาหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งวิธีนี้จะทำให้ข้าวเสื่อมคุณภาพลงตามระยะเวลาที่ตากทิ้งไว้ และวิธีที่สองคือการตากลาน ซึ่งจะได้ข้าวเปลือกที่มีคุณภาพดีกว่าการตากข้าวทิ้งไว้ในนา ซึ่งการตากข้าวในลานให้ได้ผลดีมีข้อปฏิบัติ ดังนี้

(1) ทำความสะอาดลานตาก ควรมีวัสดุสะอาดและแห้งรองรับเมล็ด เช่นผ้าใบหรือเสื่อที่สานด้วยไม้ไผ่ ฯลฯ ไม่ควรตากกับพื้นซีเมนต์หรือถนนโดยตรง เพราะเมล็ดอาจได้รับความร้อนสูงเกินไป

(2) ความหนาของกองข้าวที่ตากควรหนาประมาณ 5-10 ซม. การตากหนาเกินไปจะทำให้การระบายอากาศไม่ดี ข้าวแห้งช้า การตากบางเกินไป ทำให้อุณหภูมิข้าวสูงมีผลต่อความงอกของข้าวได้ ระหว่างการตากควรหมั่นกลับกองข้าวทุก ๆ 2 ชั่วโมงหรือวันละ 4 ครั้ง เพื่อให้ลดความชื้นได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ

(3) ความชื้นสัมพัทธ์ขณะลดความชื้นควรต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของเมล็ด การลดความชื้นจึงจะได้ผลทั้งนี้ความชื้นสัมพัทธ์ไม่ควรจะเกิน 60%

(4) เวลากลางคืนควรใช้วัสดุคลุมกองเมล็ดข้าวเพื่อป้องกันน้ำค้างหรือฝน

(5) ไม่ควรตากข้าวนานเกินไป ระยะเวลาในการตากข้าว ขึ้นอยู่กับความชื้นเริ่มต้น ความหนาบางของข้าวขณะตาก และความบ่อยครั้งในการกลับ ตลอดจนระดับความชื้นที่ต้องการโดยทั่วไป หากความชื้นลดลงเหลือประมาณ 12-14 % จึงหยุดตาก

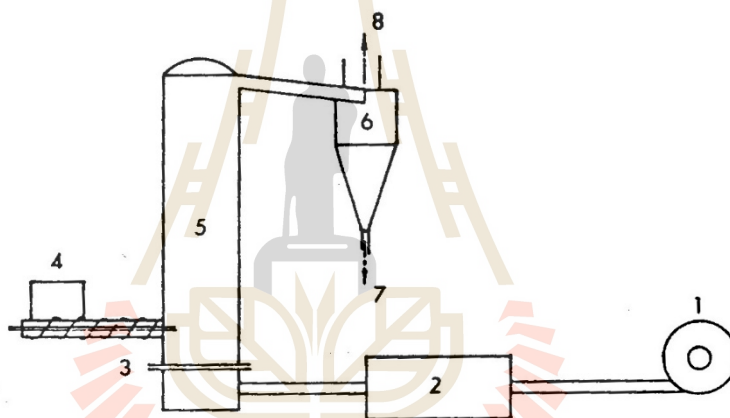
2.3.2 การใช้เครื่องอบลดความชื้น (artificial drying) การใช้เครื่องอบแห้งมีข้อดีคือ สามารถทำการลดความชื้นข้าวเปลือกได้ทุกสภาวะอากาศแม้ขณะที่ฝนตกหรือมีแสงแดดน้อย ไม่เปลืองลานตาก สามารถควบคุมการลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้ ใช้เวลาในการลดความชื้นไม่นานและยังสามารถป้องกันการสูญเสียคุณภาพการสีได้ดีกว่าวิธีธรรมชาติแต่มีข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายสูง การเปรียบเทียบคุณภาพการสีข้าวที่ตากลดความชื้นและการใช้เครื่องอบแห้งพบว่า วิธีการผึ่งแดดจะได้ข้าวเต็มเมล็ดและต้นข้าวระหว่าง 40-50% และน้อยกว่า 40% การใช้เครื่องอบแห้งได้ข้าวเต็มเมล็ดและข้าวต้นระหว่าง 50-60%

## 2.4 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือก

เครื่องอบลดความชื้นหรือเครื่องอบแห้งเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการปฏิบัติการหลังการเก็บเกี่ยวข้าวผลิตผลทางการเกษตรโดยเฉพาะเมล็ดพืช (grain) ข้าวเปลือกก็เช่นเดียวกันเมื่อการเก็บเกี่ยวเปลี่ยนแปลงไปจากการใช้แรงงานคนเป็นการใช้เครื่องเกี่ยวมัดข้าว การลดความชื้นด้วยการตากลานก็จะประสบกับปัญหาในเรื่องพื้นที่และสภาพอากาศเครื่องอบแห้งจึงเข้ามามีบทบาทมากขึ้นโดยเครื่องอบแห้งที่นิยมใช้สำหรับการอบแห้งข้าวในปัจจุบันมีดังนี้

#### 2.4.1 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด (fluidized bed dryer)

เครื่องอบแห้งแบบนี้ วัสดุอบแห้งอยู่ในลักษณะของแข็งชิ้นเล็ก ๆ ลมร้อนถูกเป่าด้วยความเร็วสูงพอที่จะเอาชนะแรงโน้มถ่วงของวัสดุ และทำให้วัสดุลอยตัวอยู่ในอากาศได้ ทำให้มีคุณลักษณะเหมือนของไหล ความเร็วลมที่นิยมใช้กันอยู่ในช่วง 100-200 m/min ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ขนาดและรูปร่างของวัสดุ รูปที่ 2.3 แสดงเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด ซึ่ง พัดลม (1) เป่าอากาศผ่านตัวทำอากาศร้อน (2) และไหลผ่านแผ่นตะแกรง (3) วัสดุไหลเข้าเครื่องโดยเกลียวลำเลียง (4) และปะทะกับกระแสอากาศทำให้แขวนลอยอยู่ในห้องอบแห้ง (5) วัสดุที่แห้งแล้วจะเบาขึ้น ทำให้ลอยได้สูงขึ้น และไหลไปที่เครื่องแยกคัดแบบไซโคลน (6) โดยอากาศขึ้นออกทางด้านบน (8) และวัสดุที่แห้งแล้วถูกรวบรวมที่ (7) ซึ่งเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดเป็นเครื่องอบแห้งที่ได้รับความนิยมจากนักวิจัยในการนำมาใช้อบแห้งข้าวเปลือกทั้งในรูปแบบฟลูอิดไคซ์เบดทั่วไปและพัฒนาปรับปรุงระบบให้มีประสิทธิภาพขึ้นดังนี้



รูปที่ 2.3 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด (สมชาติ, 2540)

อดิเทพและคณะ (2542) ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไคซ์เบดเพื่อเพิ่มปริมาณข้าวเต็มเมล็ด โดยจากผลการศึกษาพบว่า เมื่อทำการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นระหว่าง 23-31 %wb ที่อุณหภูมิ 140-150 °C จะสามารถเพิ่มปริมาณข้าวเต็มเมล็ดได้สูงขึ้นกว่าเดิมถึง 50 %

อรอนงค์ (2536) ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีฟลูอิดไคซ์เบดแบบต่อเนื่อง โดยจากผลการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมต่อการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 30 %db คือการอบแห้งที่อุณหภูมิเท่ากับ 115 °C ความสูงของเบดเท่ากับ 10 cm อัตราการไหลของอากาศจำเพาะ 0.043 kg/s-kg<sub>dry matter</sub> อัตราการหมุนเวียนกลับของอากาศเท่ากับ 80 % จะให้ข้าวเปลือกที่มีคุณภาพดี และเมื่อคำนวณค่าใช้จ่ายในการอบแห้งกรณีใช้น้ำมันเตาและน้ำมันดีเซลเป็น

เชื้อเพลิงจะมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการเท่ากับ  $1.07 \text{ บาท/kg}_{\text{water}}$  และ  $1.61 \text{ บาท/kg}_{\text{water}}$  ตามลำดับ

สรายุทธ์ (2542) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เซชันในระดับอุตสาหกรรม (โรงสี) พบว่าในการอบแห้งข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้นสูง ( $30\% \text{db.}$ ) จะมีอัตราการลดความชื้นได้ดีกว่าที่ความชื้นเริ่มต้นต่ำกว่า ( $22\% \text{db.}$ ) และค่าความชื้นต่ำสุดที่ทำได้อยู่ที่  $19\% \text{db.}$  ( $15.96\% \text{wb.}$ ) ซึ่งถือว่ายังมีความชื้นสูงอยู่จึงจำเป็นต้องนำข้าวที่ผ่านการอบแห้งแล้วไปทำการอบแห้งต่อด้วยเครื่องอบแห้งแบบ LSU ร่วมกับเครื่องอบแห้งแบบไหลขวางเพื่อทำการปรับสภาพข้าว จากการทดสอบพบว่า การอบแห้งด้วยเทคนิคใช้พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะ  $9.3 \text{ MJ/kg}_{\text{water evap.}}$  สำหรับด้านคุณภาพข้าวพบว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน ความขาวและคุณภาพการบริโภคมีค่าไม่ต่างจากข้าวอ้างอิงมากนัก

กรกช (2545) ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิดไชน์เบด (การจ่ายลมเป็นจังหวะ) โดยการประเมินสมรรถนะ วิเคราะห์การใช้พลังงาน ค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง และทดสอบคุณภาพข้าวรวมทั้งเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิดไชน์เบดกับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดจากงานวิจัยที่ผ่านมา โดยมีเงื่อนไขการทดลองคืออุณหภูมิอบแห้ง  $144\text{--}154 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ความสูงเบด  $11.6\text{--}12.3 \text{ cm.}$  และความเร็วของอากาศเข้าห้องอบแห้ง  $1.6\text{--}1.8 \text{ m/s}$  ผลการทดลองพบว่าเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิดไชน์เบดสามารถอบแห้งข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ  $29\% \text{ d.b.}$  เหลือประมาณ  $24\% \text{ d.b.}$  โดยคุณภาพข้าวเปลือกไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก พลังงานความร้อนจำเพาะเฉลี่ยอยู่ในช่วง  $6.23\text{--}9.37 \text{ MJ/kg-water evap.}$  และใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ยอยู่ในช่วง  $0.18\text{--}0.25 \text{ MJ/kg-water evap.}$  การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิดไชน์เบดจะมีปริมาณการใช้พลังงานความร้อนจำเพาะเฉลี่ยใกล้เคียงกับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบด แต่ใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ยน้อยกว่าเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบด

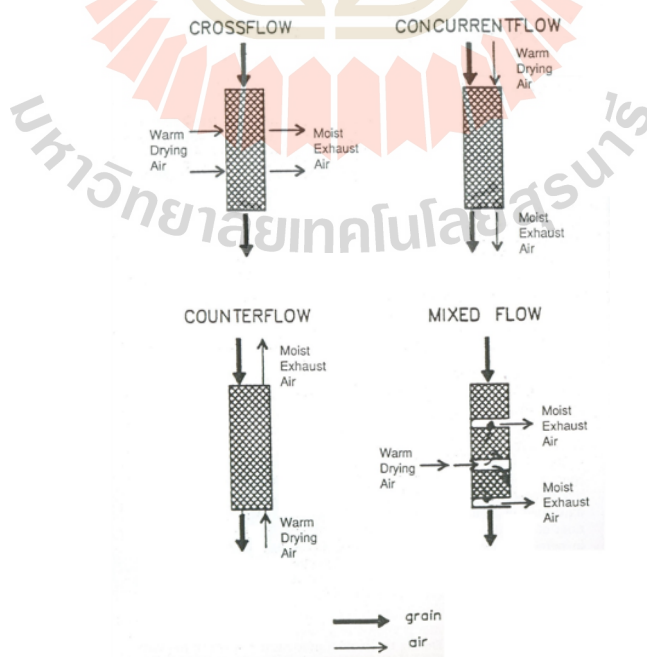
#### 2.4.2 เครื่องอบแห้งแบบถ่วงหมุน (rotary dryer)

กิตติพงษ์ (2537) ศึกษากระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกแบบถ่วงหมุนกระบอกหมุน โดยจากผลการศึกษาพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อค่าการกระจายของเวลา (residence time distribution) ของข้าวเปลือกประกอบด้วย อัตราการไหลของอากาศ มุมเอียง และอัตราการหมุนของตัวถังถ่วงหมุน เมื่อตัวแปรเหล่านี้มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ข้าวมีค่าการกระจายของเวลาลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า สภาวะที่เหมาะสมต่อการอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอากาศเข้าเท่ากับ  $115 \text{ }^{\circ}\text{C}$  คือ อัตราการไหลของอากาศจำเพาะ  $0.016 \text{ kg/s-kg dry hold-up}$  และอัตราการหมุนเวียนกลับของอากาศเท่ากับ  $75\%$

ยงยุทธ (2529) ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบถังหมุน โดยจากผลการศึกษาพบว่า เมื่อแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ระบบซึ่งประกอบด้วย การอบแห้งแบบต่อเนื่อง, การอบแห้งแล้วพักข้าวไว้ในกระสอบเป็นเวลา 60 นาที ก่อนอบครั้งต่อไป, การอบแห้งแล้วผึ่งข้าวไว้กับพื้นเป็นเวลา 30 นาที ก่อนอบครั้งต่อไป และการอบแห้งแล้วผึ่งข้าวไว้กับพื้นเป็นเวลา 60 นาที ก่อนอบครั้งต่อไป จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้าวที่ผึ่งลมและข้าวที่ตากแดดพบว่า การอบแห้งแล้วผึ่งข้าวไว้กับพื้นเป็นเวลา 60 นาที ก่อนทำการอบครั้งต่อไป จะให้อัตรการอบแห้งสูงและมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับข้าวที่ผึ่งลม

#### 2.4.3 เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล

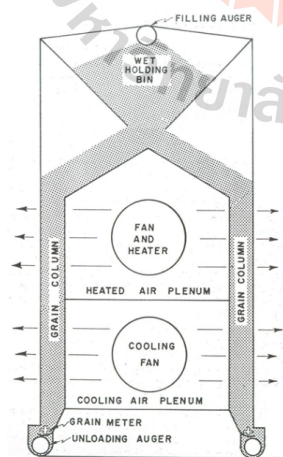
เครื่องอบแห้งแบบนี้เมล็ดพืชจะมีการไหลในขณะที่ทำการอบแห้ง โดยทั่วไปเมล็ดพืชจะไหลลงสู่ที่ต่ำโดยแรงโน้มถ่วง อัตราการไหลของเมล็ดพืชขึ้นอยู่กับตัวควบคุมการไหล ซึ่งอาจใช้คนปรับโดยดูจากความชื้นของเมล็ดพืชเป็นช่วงๆ หรืออาจควบคุมโดยอัตโนมัติโดยใช้เทอร์โมสแตทเป็นตัวควบคุมการทำงานของตัวควบคุมการไหล เมล็ดพืชที่แห้งแล้วจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการระเหยของน้ำมีน้อย หรืออาจใช้เครื่องวัดความชื้น ซึ่งอาจวัดได้ถูกต้องดี แต่ราคาจะแพงกว่ามาก เครื่องอบแห้งชนิดนี้สามารถแบ่งย่อยได้อีก 4 แบบคือ แบบไหลขวาง (cross-flow dryer) แบบไหลตาม (concurrent-flow dryer) แบบไหลสวนทาง (counter-flow dryer) และแบบผสม (mixed flow) ตามทิศทางการไหลของเมล็ดพืชและอากาศอบแห้งดังแสดงในรูปที่ 2.4 เครื่องอบแห้งทั้งสามแบบนี้เหมาะกับงานในระดับกลางและใหญ่ เพราะใช้อุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศสูง ทำให้การอบแห้งเป็นไปอย่างรวดเร็ว



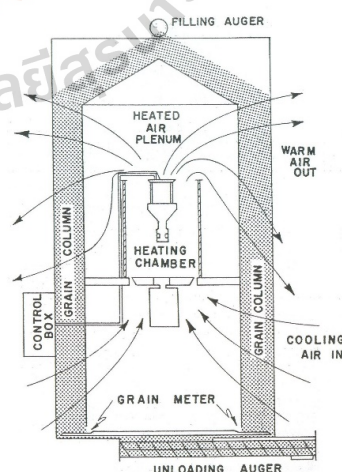
รูปที่ 2.4 ลักษณะการไหลของเมล็ดพืชและอากาศอบแห้ง (Brooker et al., 1992)

(1) เครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง อากาศที่ใช้อบแห้งจะไหลตัดผ่านทิศทางการไหลของเมล็ดพืชดังแสดงในรูปที่ 2.5 ที่ทางด้านบนของเครื่องอบแห้งจะมีที่เก็บเมล็ดพืช เมล็ดพืชจะไหลลงด้านล่างผ่านช่องแคบซึ่งกว้างประมาณ 0.30-0.45 เมตร และไหลออกทางด้านล่างของเครื่องอบแห้งด้วยตัวควบคุมการไหล ช่องแคบที่เมล็ดพืชไหลลงนี้แบ่งได้เป็น 2 ส่วน ส่วนบนเป็นส่วนอบแห้งและส่วนล่างเป็นส่วนที่ทำให้เมล็ดพืชเย็นลงหลังอบแห้งแล้วเสร็จ การไหลของเมล็ดพืชและอากาศจะมีทิศทางตั้งฉากกัน อัตราการไหลของอากาศแปรระหว่าง  $38-76 \text{ m}^3/\text{min-m}^3$  เมล็ดพืช อัตราการไหลของเมล็ดพืชขึ้นอยู่กับตัวควบคุมการไหล ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ส่วนล่างของเครื่องอบแห้ง ปัญหาของเครื่องอบแห้งชนิดนี้ก็เช่นเดียวกับเครื่องอบแห้งแบบเป็นวงวน คือการเกิดเกรเดียนต์ความชื้นในชั้นเมล็ดพืช เมล็ดพืชชั้นและแห้งจะผสมกันเป็นบางส่วนตรงทางออกของเครื่องอบแห้ง ทำให้ลดปัญหานี้ลงได้เป็นบางส่วน ปัญหาที่มักเกิดขึ้นเสมอคือการอุดตันที่ช่องทางออกของเครื่องอบแห้ง ดังนั้นจึงต้องตรวจสอบตัวควบคุมการไหลอย่างสม่ำเสมอ

ความแตกต่างของเครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง 2 ชนิด ตามรูปที่ 2.5 (ก) และ (ข) อยู่ที่ช่วงทำให้เมล็ดพืชเย็นลงหลังอบแห้ง ทิศทางการไหลของอากาศจะตรงกันข้ามเครื่องอบแห้งที่มีทิศทางการไหลของอากาศเย็นจากด้านบนนอกเครื่องอบแห้งผ่านเมล็ดพืชและเข้าไปด้านในของเครื่องอบแห้งจะมีข้อดีตรงที่ว่าอากาศที่ใช้ทำให้เมล็ดพืชเย็นลงจะร้อนขึ้น และจะร้อนขึ้นอีกโดยตัวอุ่นอากาศ ก่อนที่จะนำไปใช้ในการอบแห้งต่อไป ซึ่งสามารถช่วยประหยัดพลังงานได้ส่วนหนึ่ง ข้อดีอีกอย่างหนึ่งคืออากาศส่วนที่เย็นที่สุดจะสัมผัสกับเมล็ดพืชส่วนที่เย็นที่สุด และอากาศส่วนที่ร้อนที่สุดจะสัมผัสกับเมล็ดพืชที่ร้อนที่สุดเช่นกัน การแตกตัวของเมล็ดพืชขึ้นเนื่องมาจากความเค้นภายในเมล็ดพืชน่าจะลดลง และทำให้ความเสียหายในรูปของเมล็ดแตกหักอันเนื่องมาจากการขนถ่ายเมล็ดพืชมีน้อยลงด้วย อย่างไรก็ตามระบบนี้มีข้อเสียตรงที่ว่าเศษผงและสิ่งสกปรกมีโอกาสสะสมในห้องเผาไหม้ได้มากกว่า ดังนั้นจึงต้องทำความสะอาดบ่อยขึ้น



(ก)

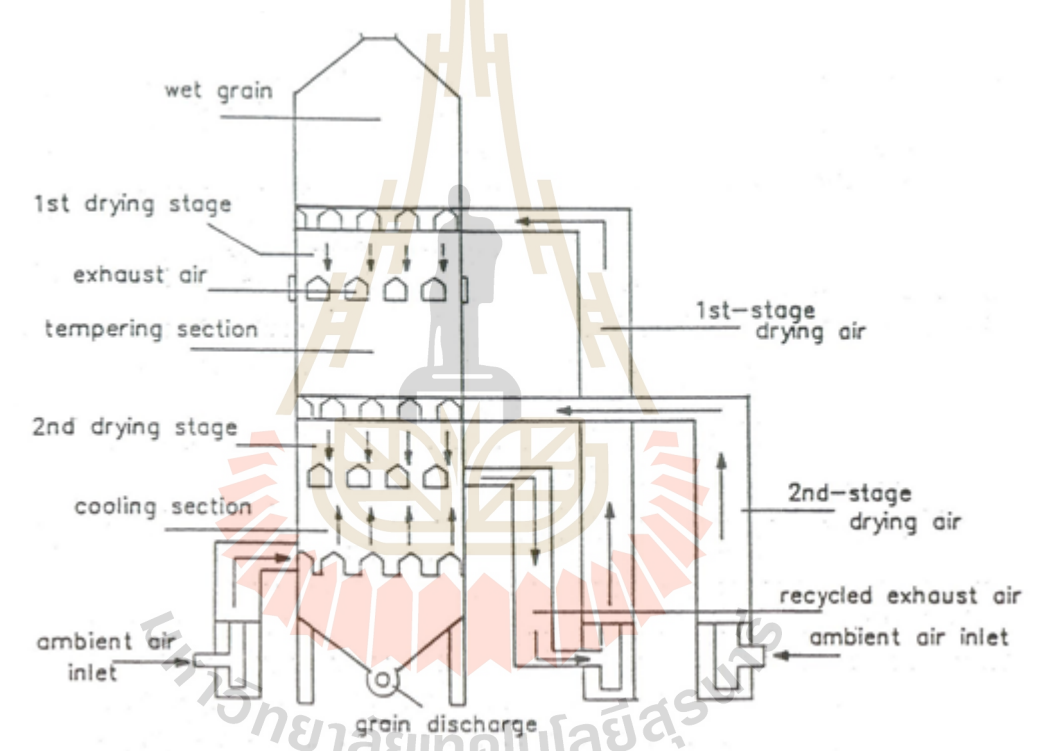


(ข)

รูปที่ 2.5 เครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง (Brooker et al., 1992)



(2) เครื่องอบแห้งแบบไหลตาม การไหลของเมล็ดพืชและของอากาศอบแห้งจะขนานกัน และมีทิศทางเดียวกัน เมล็ดพืชส่วนที่ขึ้นที่สุดจะสัมผัสกับอากาศส่วนที่ร้อนที่สุด เมื่อเมล็ดพืชไหลต่ำลงมาอากาศอบแห้งจะเริ่มเย็นลงและเมล็ดพืชจะมีความชื้นลดลง เมล็ดพืชที่แห้งแล้วจะไม่สัมผัสกับอากาศที่ร้อนจัดเลย ดังนั้นจึงสามารถใช้อากาศอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมากได้ (อาจสูงถึง 150-250 °C) ทำให้สามารถอบแห้งได้เร็ว ข้อดีอีกอย่างหนึ่งคือการแตกตัวของเมล็ดพืชจะมีน้อยเพราะเมล็ดพืชส่วนที่แห้งที่สุดจะสัมผัสกับอากาศอบแห้งที่เย็นที่สุด เมล็ดพืชที่แห้งแล้วจะไหลออกสู่ด้านล่างด้วยตัวควบคุมการไหลซึ่งถูกควบคุมโดยตัวควบคุมอุณหภูมิหรือความชื้นเมล็ดพืช เมล็ดพืชจะถูกทำให้เย็นลงก่อนที่จะไหลออกจากเครื่องอบแห้ง ความหนาของชั้นอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบนี้ควรหนากว่า 1 เมตร ทั้งนี้เพื่อให้การอบแห้งเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ รูปที่ 2.6 แสดงเครื่องอบแห้งแบบไหลตามแบบหนึ่ง

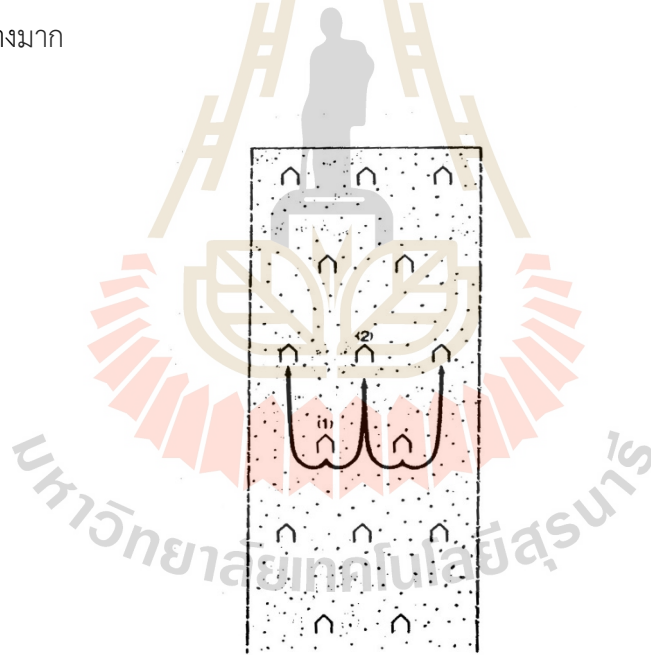


รูปที่ 2.6 เครื่องอบแห้งแบบไหลตาม (Brooker et al., 1992)

(3) เครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง การไหลของเมล็ดพืชและของอากาศอบแห้งขนานกัน แต่มีทิศทางตรงกันข้าม เมล็ดพืชจะไหลลงด้านล่าง และอากาศอบแห้งจะไหลขึ้นด้านบน เมล็ดพืชส่วนที่อยู่ล่างสุดจะแห้งที่สุด แต่จะไม่แห้งเกินไปเพราะจะถูกขนย้ายออกจากเครื่องอบแห้งก่อนที่จะแห้งเกินกว่าที่ต้องการ อัตราการขนย้ายเมล็ดพืชถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิหรือความชื้นเมล็ดพืชซึ่งติดตั้งอยู่เหนือพื้นเครื่องอบแห้ง เมล็ดพืชที่ขนย้ายออกไปแล้วจะถูกทำให้เย็นลงในภายหลัง

เครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทางมีข้อดีคือ การใช้ความร้อนสัมผัสในอากาศอบแห้ง เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากเมล็ดพืชที่อยู่ชั้นล่างไม่แห้งเกินไปและอากาศอบแห้งตรงทางออก จะสัมผัสกับเมล็ดพืชส่วนที่ชื้นที่สุด ทำให้อุณหภูมิของอากาศอบแห้งตรงทางออกต่ำ ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นคือ การควบแน่นของน้ำที่ใกล้ทางออกของเครื่องอบแห้ง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่อากาศที่อึดตัวด้วยไอน้ำสัมผัสกับเมล็ดพืชที่ชื้นอยู่ด้านบน ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า ปัญหานี้อาจหลีกเลี่ยงได้โดยการเลือกอัตราการไหลของอากาศอบแห้งให้เหมาะสมกับความหนาของชั้นเมล็ดพืช แม้ว่าเครื่องอบแห้งแบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูง แต่ก็ต้องการอุปกรณ์ขนย้ายเมล็ดพืชออกจากเครื่องอบแห้งที่ค่อนข้างยุ่งยากและมีราคาแพง

นอกจากการแบ่งเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหลตามลักษณะการไหลของเมล็ดพืชและกระแสอากาศแล้ว เราอาจแบ่งตามลักษณะการผสมกันของเมล็ดพืชชั้นและเมล็ดพืชแห้งในขณะไหล รูปที่ 2.7 แสดงภาพตัดของเครื่องอบแห้งที่มีการผสมกันของเมล็ดพืชโดยทั่วไปมักเรียกกันว่าเครื่องอบแห้งแบบ LSU ซึ่งเป็นชื่อย่อของ Louisiana State University ซึ่งเป็นผู้คิดค้น การผสมกันของเมล็ดพืชจะเกิดขึ้นในขณะไหลผ่านท่ออากาศร้อนหรือเย็น ทำให้ปัญหาเรื่องเกรเดียนต์ความชื้นในชั้นเมล็ดพืชลดลงอย่างมาก



รูปที่ 2.7 ภาพตัดของเครื่องอบแห้งแบบที่มีการผสมกันของเมล็ดพืช (สมชาติ, 2540)

เนื่องจากความยุ่งยากที่เพิ่มขึ้นของเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบไหล ดังนั้นจึงควรมีหลักการจัดการซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

(1) ควรมีการตรวจสอบความชื้นเมล็ดพืชหลังอบแห้งอย่างสม่ำเสมอว่าได้ตามที่ต้องการหรือไม่ เพื่อที่จะได้ทราบว่าตัวควบคุมอุณหภูมิหรือความชื้นเมล็ดพืชทำงานตามปกติหรือไม่

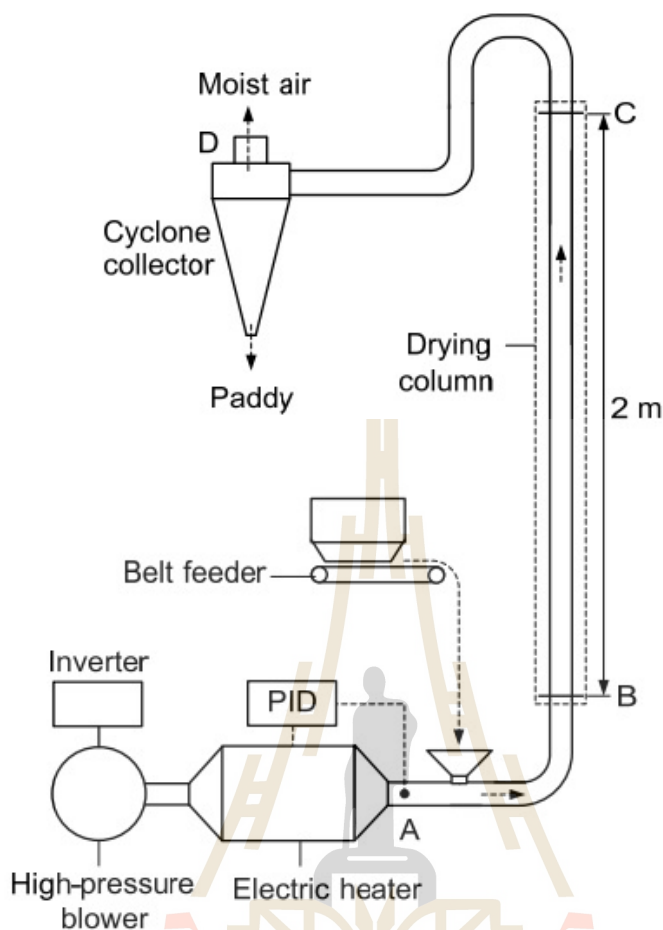
(2) อุณหภูมิอากาศตรงทางออกของเครื่องอบแห้งควรได้รับการตรวจสอบเป็นครั้งคราว เพื่อที่จะได้ทราบว่า การไหลของอากาศอบแห้งเป็นไปอย่างทั่วถึงหรือไม่

(3) ควรทำความสะอาดห้องอุ่นอากาศร้อนอย่างสม่ำเสมอ

(4) ควรตรวจสอบตัวควบคุมการไหลของเมล็ดพืชอย่างสม่ำเสมอ เพื่อดูว่าการอุดตันของสิ่งสกปรกหรือไม่

#### 2.4.4 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic Dryer)

เครื่องอบแห้งชนิดนี้มีส่วนประกอบหลักดังแสดงในรูปที่ 2.8 หลักการทำงาน คือ วัสดุอบจะถูกผสมกับลมร้อนที่มีความเร็วสูงในหอบแห้ง (drying column) การสัมผัสกันอย่างใกล้ชิดกันของวัสดุอบกับลมร้อนจะทำให้เกิดการลดความชื้นอย่างรวดเร็วบางครั้งเรียกว่าเครื่องอบแห้งแบบ flash dryer วัสดุอบและลมร้อนจะถูกแยกออกโดยใช้ไซโคลน (Kudra and Mujumdar, 2002) ในกรณีต้องการปล่อยลมร้อนออก สูบบรรยากาศอาจจะต้องทำการดักฝุ่นละเอียดออกอีกครั้งโดยใช้ Water Scrubber ข้อดีของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม คือ ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น ขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบโรตารี อย่างไรก็ตามจะมีต้นทุนในการกำเนิดลมสูงเพราะใช้ปริมาณลมร้อนที่สูงกว่า นอกจากนี้ยังมีขีดจำกัดคือ วัสดุอบจะต้องมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา หรือความหนาแน่นต่ำ และสามารถลอยตัวในอากาศได้ มีการประยุกต์ใช้เครื่องอบแห้งนี้กับเชื้อเพลิงชีวมวล คือ เปลือกไม้ ยูคาลิปตัส ทะลายปาล์ม และ ชูยมะพร้าว (ธนรัช, 2555) เนื่องจากเทคนิคการอบแห้งแบบพาหะลมนิยมใช้กับวัสดุที่มีลักษณะเป็นอนุภาค วัสดุเกษตรอย่างเช่นข้าวเปลือกจึงสามารถนำเทคนิคการอบแห้งรูปแบบนี้มาประยุกต์ใช้ได้โดย ปิยะพลและคณะ (2559) ได้ศึกษาอิทธิพลของขนาดหอบแห้งที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมกับข้าวเปลือก แต่การศึกษาของปิยะพลและคณะ (2559) มีข้อจำกัดคือทำการศึกษการอบแห้งเพียง 2 รอบจึงทำให้ไม่สามารถทราบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งที่แท้จริงของการอบแห้งได้เนื่องจากพฤติกรรมการอบแห้งของวัสดุเกษตรจะมีช่วงของการอบแห้งหลักอยู่สองช่วงคือช่วงการอบแห้งคงที่ และช่วงการอบแห้งลดลงซึ่งผลการศึกษานี้การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกอยู่ในช่วงของการอบแห้งคงที่ อย่างไรก็ตามจะพบว่าเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการอบแห้งข้าวเปลือกได้แต่ต้องมีการปรับปรุงลักษณะของเครื่องและทำการทดสอบเพิ่มเติม



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (ปิยะพลและคณะ, 2559)

จากรูปแบบของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่ผ่านมาจะพบว่า การเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยลมร้อนสามารถทำได้โดยการให้ข้าวเปลือกสัมผัสกับลมร้อนได้ทั่วถึงมากที่สุดโดยแนวคิดนี้ได้นำมาสู่การพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไดซ์เบด และเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบด (เทวรัตน์และกระวี, 2557) แต่อย่างไรก็ตามลักษณะรูปร่างของข้าวเปลือกสามารถที่จะประยุกต์ใช้เทคนิคการอบแห้งแบบพาหะลมได้และมีนักวิจัยได้ทำการศึกษาการนำงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เทคนิคพาหะลมหมุนเวียนขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการหาเทคนิคการอบแห้งข้าวเปลือกที่เหมาะสมสำหรับการลดความชื้นข้าวเปลือก

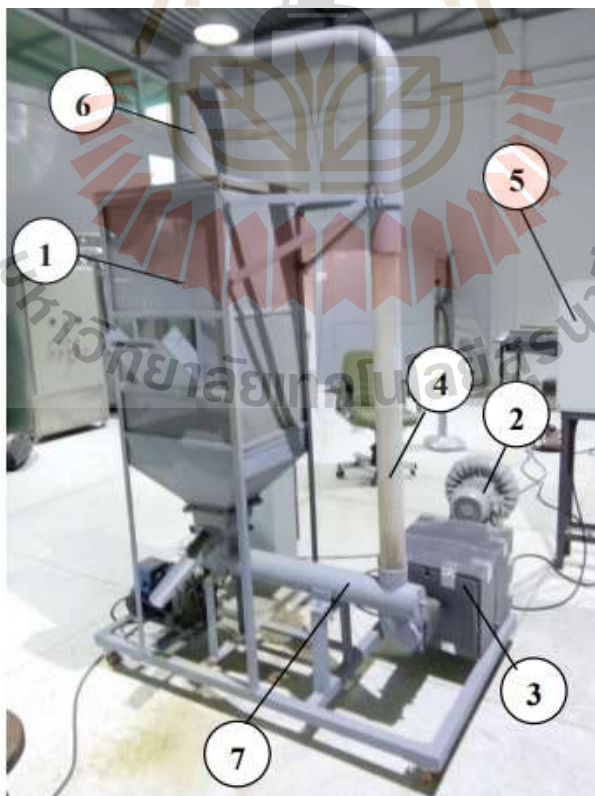
### บทที่ 3

#### อุปกรณ์และวิธีการ

#### 3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือ และวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

##### 3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมหมุนเวียนที่พัฒนาขึ้น ซึ่งมีส่วนประกอบของเครื่องดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยเครื่องอบแห้งนี้มีหลักการทำงานดังนี้ เริ่มจากการบรรจุข้าวลงในถังเก็บข้าวเปลือก (หมายเลข 1) ข้าวเปลือกจะไหลเข้าสู่ท่อลำเลียง (หมายเลข 7) ซึ่งภายในมีเกลียวลำเลียงทำหน้าที่ป้อนข้าวเปลือกเข้าสู่ห้องอบแห้ง (หมายเลข 4) ขณะเดียวกันลมร้อนที่ได้จากการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ชุด heater (หมายเลข 3) ถูกส่งด้วยพัดลมแรงดันสูง (หมายเลข 2) มาเข้าสู่ห้องอบผสมกับข้าวเปลือกที่ถูกป้อนเข้ามาอากาศร้อนจะทำหน้าที่ในการลดความชื้นข้าวเปลือกและพาข้าวเปลือกกลับเข้าสู่ถังเก็บข้าวเปลือก (หมายเลข 1) หมุนเวียนจนกระทั่งข้าวเปลือกลดความชื้นถึงค่าที่กำหนดไว้ โดยลมร้อนและข้าวเปลือกที่กลับเข้าสู่ถังจะทำหน้าที่ในการให้ความร้อนเบื้องต้น (pre-heat) กับชั้นข้าวที่อยู่ถัดไปหากไม่ทำการติดตั้งไซโคลน (หมายเลข 6) แต่ถ้าหากติดตั้งไซโคลนจะทำหน้าที่ในการแยกข้าวเปลือกออกจากลมร้อน



รูปที่ 3.1 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมหมุนเวียนที่ใช้ในการทดสอบ

2. ตู้อบลมร้อน (hot air oven) ใช้สำหรับหาความชื้นเมล็ดข้าวที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 3.2 ตู้อบความร้อนแบบลมร้อน (hot air oven)

3. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล (รูปที่ 3) พิกัด  $200 \pm 0.01$  kg สำหรับชั่งข้าวเปลือกที่นำมาทดสอบอบแห้ง พิกัด  $2500 \pm 0.01$  g สำหรับชั่งตัวอย่างข้าวเปลือกที่นำไปตรวจสอบคุณภาพข้าว และขนาดพิกัด  $220 \pm 0.0001$  g สำหรับชั่งน้ำหนักข้าวเปลือกเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าความชื้น



(ก) พิกัด  $200 \pm 0.01$ kg



(ข) พิกัด  $2500 \pm 0.01$  g



(ค) พิกัด  $220 \pm 0.0001$ g

รูปที่ 3.3 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลที่ใช้ในงานวิจัย

4. ชุดวัดความเร็วลมใช้วัดความเร็วลมของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง (รูปที่ 3.4)



รูปที่ 3.4 ชุดวัดความเร็วลม

5. อุปกรณ์วัดพลังงานไฟฟ้า (Watt-hour meter) ใช้วัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองอบแห้งซึ่งใช้ไฟฟ้าแบบ single phase



รูปที่ 3.5 มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า (Watt-hour meter)

6. มัลติมิเตอร์แบบคลิป (Clip amp) ยี่ห้อ ITT Instrument รุ่น MX 200 ใช้สำหรับวัดค่ากระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ใช้ไฟฟ้า 3 เฟส



รูปที่ 3.6 มัลติมิเตอร์แบบคลิป (Clip amp)

7. เครื่องกะเทาะข้าวกล้อง รุ่น NW-150 ใช้สำหรับสีข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งเพื่อตรวจสอบคุณภาพ



รูปที่ 3.7 เครื่องกะเทาะข้าวกล้อง



8. เครื่องตัดข้าวข้าวใช้สำหรับตัดข้าวข้าวกล้อง



รูปที่ 3.8 เครื่องตัดข้าวข้าว

9. เครื่องแยกเมล็ดข้าวหัก ตระแกรงกลมยาว



รูปที่ 3.9 ตระแกรงกลมคัดแยกเมล็ดข้าวหัก

10. ห้องเย็นใช้สำหรับเก็บตัวอย่างข้าวเปลือก
11. ข้าวเปลือกพันธุ์ ขาวดอกมะลิ 105



รูปที่ 3.10 ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ใช้ในการทดสอบ

### 3.2 วิธีการ

#### 3.2.1 การศึกษาการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียนเบื้องต้น

ทำการศึกษารอบแห้งข้าวเปลือกเบื้องต้นด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียน ที่ออกแบบสร้างขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยใช้ข้าวขาวดอกมะลิ 105 เป็นตัวอย่างในการทดสอบโดยมีวิธีการดังนี้

##### 1. การวิเคราะห์ค่าความชื้น

ทำการหาค่าความชื้นของข้าวเปลือกโดยการนำตัวอย่างข้าวเปลือกจำนวน 10 g ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียม จากนั้นนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ  $105 \pm 1^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ค่าความชื้นข้าวเปลือกสามารถคำนวณได้จากสมการ (1)

$$M = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ  $M$  คือความชื้นข้าวเปลือก (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก, %wb)

$W_i$  คือน้ำหนักตัวอย่างข้าวเปลือกเริ่มต้น (g)

$W_f$  คือน้ำหนักตัวอย่างข้าวเปลือกหลังอบด้วยตู้อบลมร้อน (g)



รูปที่ 3.11 การอบตัวอย่างข้าวเปลือกเพื่อหาความชื้นด้วยตู้อบลมร้อน

## 2. ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนข้าวเปลือกและความเร็วลม

หลังการออกแบบสร้าง และติดตั้งเครื่องอบแห้งจนพร้อมใช้งาน ทำการปรับระดับความเร็วลมที่ทำให้ข้าวลอยตัวโดยทำการปรับเพิ่มและลดอัตราการป้อนข้าวเปลือกของเกลียวให้ทำงานเหมาะสม กับความเร็วลม ณ ขณะนั้น ๆ โดยทำการกำหนดอัตราการไหลของอากาศอบแห้งที่ใช้ในการทดสอบ 3 ระดับคือ  $0.0451 \text{ m}^3/\text{s}$   $0.0512 \text{ m}^3/\text{s}$  และ  $0.0631 \text{ m}^3/\text{s}$  (วัดขณะทดสอบแบบติดตั้งไซโคลนเนื่องจากการสูญเสียพลังงานในการไหลมากที่สุด) จากนั้นทำการหาอัตราการไหลข้าวเปลือกด้วยวิธีจับเวลา โดยการปล่อยให้ข้าวเปลือกไหลลงสู่ภาชนะเป็นเวลา 20 วินาที นำข้าวเปลือกที่ได้ไปชั่งแล้วคำนวณหาอัตราการไหลข้าวเปลือกโดยทำซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งจากการทดสอบนี้ทำให้ได้อัตราการไหลข้าวที่สัมพันธ์กับอัตราการไหลของลมร้อนคือ 4.10 6.35 และ 8.45 kg/min

### 3.2.2 การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือก

ทำการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกใน 2 รูปแบบคือ แบบไม่ติดตั้งไซโคลน การอบแห้งรูปแบบนี้ต้องการให้ลมร้อนที่ออกจากเครื่องอบแห้งไปพร้อมกับข้าวเปลือกช่วยในการอุ่นข้าวเปลือกที่อยู่ชั้นถัดไป โดยมีสมมติฐานว่าการอุ่นข้าวเปลือกก่อนเข้าอบแห้งในห้องอบจริงจะช่วยเพิ่มอัตราการลดความชื้นข้าวเปลือกลงได้ซึ่งจำเป็นต้องทำการทดสอบเปรียบเทียบกับแบบที่ 2 คือแบบติดตั้งไซโคลน วิธีการอบแห้งแบบนี้อากาศร้อนจะถูกแยกออกจากเมล็ดข้าวแล้วปล่อยอากาศทิ้งสู่บรรยากาศ

1. นำข้าวเปลือก 40 kg ใส่ลงถังบรรจุข้าวเปลือก ทำการปรับอัตราการไหลของข้าวเปลือกและลมร้อนให้สัมพันธ์กัน ตามข้อ 2 ในหัวข้อ 3.2.1
2. ปรับตั้งอุณหภูมิอากาศอบแห้งไว้ที่ 80 °C ซึ่งเป็นค่าที่แนะนำสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกตามรายงานของเทวรัตน์ และคณะ (2557)
3. บันทึกค่าเริ่มต้นบนมิเตอร์ไฟฟ้า
4. เมื่อเดินเครื่องแล้วให้เริ่มจับ เวลา ทุก 1 รอบวัฏจักรของถัง แล้วสูมเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกไปหาความชื้น ทำการวัดอุณหภูมิของลมร้อนขาออก และบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จากมิเตอร์ และวัดกระแสไฟฟ้าด้วยมัลติมิเตอร์สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า 3 เฟส
5. ทำการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เวลาในการอบแห้งทั้งหมด 600 นาที
6. นำข้าวเปลือกที่ผ่านการลดความชื้นแล้วไปประเมินคุณภาพโดยการหาเปอร์เซ็นต์ข้าวตัน

### 3.2.3 การเตรียมตัวอย่างข้าวชดควบคุมคุณภาพ

ข้าวเปลือกชดควบคุมสำหรับใช้ประเมินคุณภาพข้าวที่ได้หลังการอบแห้ง ทำการเตรียมโดยแบ่งตัวอย่างข้าวเปลือกที่นำมาใช้ในการทดสอบอบแห้งกลายเป็นชั้นบางบนตระแกรง (รูปที่ 3.12) แล้วนำผึ่งลดความชื้นในที่ร่มซึ่งมีการหมุนเวียนของลม แล้วทำการตรวจสอบความชื้นของชุดข้าวเปลือกควบคุมนี้ทุก ๆ วันจนมีความชื้นของข้าวต่ำกว่า 14%wb



รูปที่ 3.12 การผึ่งข้าวเปลือกชดควบคุมคุณภาพเพื่อลดความชื้น

### 3.2.4 การประเมินคุณภาพข้าวเปลือก

ประเมินผลกระทบที่เกิดจากการอบแห้งข้าวเปลือกโดยดูจากเปอร์เซ็นต์ข้าวตันที่ได้หลังการสีโดยข้าวเปลือกตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งโดยทำการเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกจากเครื่องอบแห้งที่มี

ความชื้นอยู่ในช่วง 15-12 %wb และข้าวเปลือกชุดควบคุมที่ทำการลดความชื้นด้วยการผึ่งลดความชื้น ถูกนำไปหาเปอร์เซ็นต์ข้าวตันตามวิธีการดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้ว จำนวน 125 กรัม
2. นำไปกะเทาะเอาเปลือกออกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกข้าวกล้อง ปรับระยะห่างระหว่างลูกยางกะเทาะให้ห่างกันเล็กน้อย และปรับอัตราการป้อนข้าวเปลือกให้เหมาะสม
3. นำข้าวที่ผ่านการกะเทาะเปลือกมาชั่งข้าว รอให้ข้าวสารมีอุณหภูมิเย็นลง แล้วจึงชั่งน้ำหนัก
4. นำข้าวสารที่ได้ไปคัดแยกข้าวหักและปลายข้าวด้วยเครื่อง laboratory indented cylinder โดยใช้ตะแกรงกลมเบอร์ 5.7 มิลลิเมตร ปรับมุมเอียงถาดรองรับข้าวหักและปลายข้าว ที่ประมาณ 40 องศา (จากแนวตั้ง) ใช้เวลาในการคัดแยกประมาณ 1.30 นาที
5. นำเอาต้นข้าวสารที่คัดได้มาชั่งน้ำหนักจดบันทึกผล หาข้าวตันตัวอย่างละ 3 ซ้ำ การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ข้าวตันด้วยสมการ (2)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ข้าวตัน} = (\text{น้ำหนักข้าวเต็มเมล็ดและข้าวตัน} / \text{น้ำหนักข้าวเปลือก}) \times 100 \quad \dots(2)$$

### 3.2.5 การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก

#### 1. การประเมินด้านการใช้พลังงาน

การประเมินการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกจะพิจารณาในรูปของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) โดยค่า SEC นี้เป็นการบ่งบอกถึงค่าพลังงานรวมทั้งหมดที่ใช้ในการลดความชื้นหนึ่งหน่วยมวล โดยปกตินิยมใช้เป็นค่าพลังงานต่อปริมาณความชื้นที่ระเหย 1 kg โดยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกนี้ใช้พลังงานไฟฟ้า โดยค่าพลังงานไฟฟ้า 1 เฟส สามารถอ่านได้จากมิเตอร์โดยตรง ซึ่งสามารถคำนวณเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (3)

$$E_{1\phi} = 3.6(P_e) \quad (3)$$

เมื่อ  $E_{1\phi}$  คือค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากระบบไฟฟ้า 1 เฟส (MJ)

$P_e$  คือค่าหน่วยไฟฟ้าที่อ่านได้จากมิเตอร์ไฟฟ้า (kWh)

สำหรับค่าพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้า 3 เฟส สามารถคำนวณได้จากสมการ (4)

$$E_{3\phi} = \sqrt{3}\phi(V)(I)(t) \times 10^{-6} \quad (4)$$

เมื่อ  $E_{3\phi}$  คือค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากระบบไฟฟ้า 3 เฟส (MJ)

$V$  คือค่าแรงดันไฟฟ้า (V)

$I$  คือค่ากระแสไฟฟ้า (A)

$t$  คือเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (s)

$\phi$  คือค่าเฟคเตอร์ตัวคูณ

ซึ่งจากค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งส่วนดังกล่าวข้างต้นสามารถนำมาคำนวณหาค่า SEC ของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมหมุนเวียนที่พัฒนาขึ้นได้ดังสมการที่ (5)

$$SEC = \frac{E_{1\phi} + E_{3\phi}}{m_{\text{evap}}} \quad (5)$$

เมื่อ SEC คือค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ)

$m_{\text{evap}}$  คือมวลของความชื้นที่ระเหยออกจากข้าวเปลือก (kg)

เนื่องจากเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียนนี้ได้มีการออกแบบให้มีการแยกข้าวเปลือกกับลมร้อนออกจากกันด้วยไซโคลน ดังนั้นเมื่อทำการทดสอบอบแห้งตามหัวข้อ 3.2.2 แล้วจึงได้มีการทดสอบเพิ่มเติมโดยการเลือกสภาวะการอบแห้งที่ดีที่สุดของกรณีการอบแห้งด้วยไซโคลนมาทำการทดสอบอบแห้งโดยมีอัตราส่วนของอากาศร้อนต่ออากาศใหม่ 2 ระดับคือ 1:3 และ 2:3 ส่วน

## 2. การประเมินด้านอัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้งเป็นพารามิเตอร์หนึ่งซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการอบแห้งของเครื่องอบแห้งโดยอัตราการอบแห้งสามารถหาได้จากสมการ (6)

$$DR = \frac{m_{\text{evap}}}{t} \quad (6)$$

เมื่อ DR คืออัตราการอบแห้ง (kg/h)

$t$  คือเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

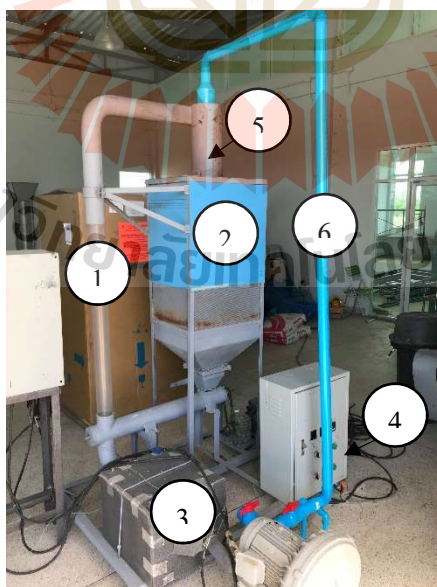
## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบ สร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียน โดยในการทดสอบอบแห้ง ได้ทำการอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะละ 105 จำนวน 40 kg ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่ 80°C ใน 2 รูปแบบคือแบบไม่ติดตั้งไซโคลน และแบบติดตั้งไซโคลน ในการทดสอบแบบติดตั้งไซโคลนเมื่อได้ทราบสภาวะการทำงานที่ดีที่สุดแล้วได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการใช้พลังงานโดยการนำลมร้อนขาออกมาผสมกับอากาศใหม่เพื่อลดภาระเครื่องอุ่นอากาศซึ่งผลการดำเนินการที่ได้เป็นดังนี้

#### 4.1 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมหมุนเวียน

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมหมุนเวียนที่พัฒนาขึ้นรูปที่ 4.1 โดยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 1) ห้องอบแห้งซึ่งมีลักษณะเป็นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101 mm สูง 1,100 mm 2) ถังบรรจุข้าวเปลือกขนาดมิติ กว้าง 400 mm ยาว 500 mm สูง 950 mm โดยส่วนล่างของถังทำเป็นมุมเอียงลู่ลงสู่รางเกลียวลำเลียง 3) ระบบผลิตลมร้อนประกอบด้วยพัดลมขนาด 3.5 แรงม้า และห้องอุ่นอากาศซึ่งใช้ heater ไฟฟ้าแบบครีบน้ำมัน 4500 วัตต์ และ 4) ระบบควบคุมสำหรับควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้งและอัตราการไหลอากาศ 5) ไซโคลน 6) ท่อลมกลับสำหรับนำลมร้อนหลังอบแห้งมาผสมกับอากาศใหม่



รูปที่ 4.1 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมหมุนเวียนที่พัฒนาขึ้น

## 4.2 ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก

ข้าวเปลือกที่นำมาใช้ในการทดสอบอบแห้งครั้งนี้มีความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 32-33 %wb ซึ่งถือว่าเป็นความชื้นที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากช่วงที่ทำการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกนั้นเป็นช่วงปลายฝนจึงทำให้ข้าวเปลือกที่นำมาทดสอบมีความชื้นที่สูงกว่าที่ควรจะเป็น โดยข้าวเปลือกที่เหมาะสมต่อการเก็บเกี่ยวจะมีความชื้นอยู่ในช่วง 22-25 %wb

## 4.3 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนข้าวเปลือกและอัตราการไหลลมร้อน

จากการทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนข้าวเปลือกและอัตราการไหลของลมร้อนพบว่าหากมีการป้อนข้าวเปลือกด้วยอัตราที่เพิ่มขึ้นจำเป็นต้องใช้อัตราการไหลลมที่เพิ่มขึ้นเพื่อช่วยพาข้าวเปลือกเข้าสู่ห้องอบแห้งโดยอัตราการไหลที่ก่อให้เกิดการไหลปั่นป่วนและสามารถพาข้าวเปลือกที่อัตราการป้อนต่าง ๆ กันไปกับกระแสอากาศได้แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนข้าวเปลือกและอัตราการไหลอากาศ

อัตราการป้อนข้าวเปลือก (kg/min)	อัตราการไหลอากาศ (m <sup>3</sup> /s)
4.10	0.0451
6.35	0.0512
8.45	0.0631

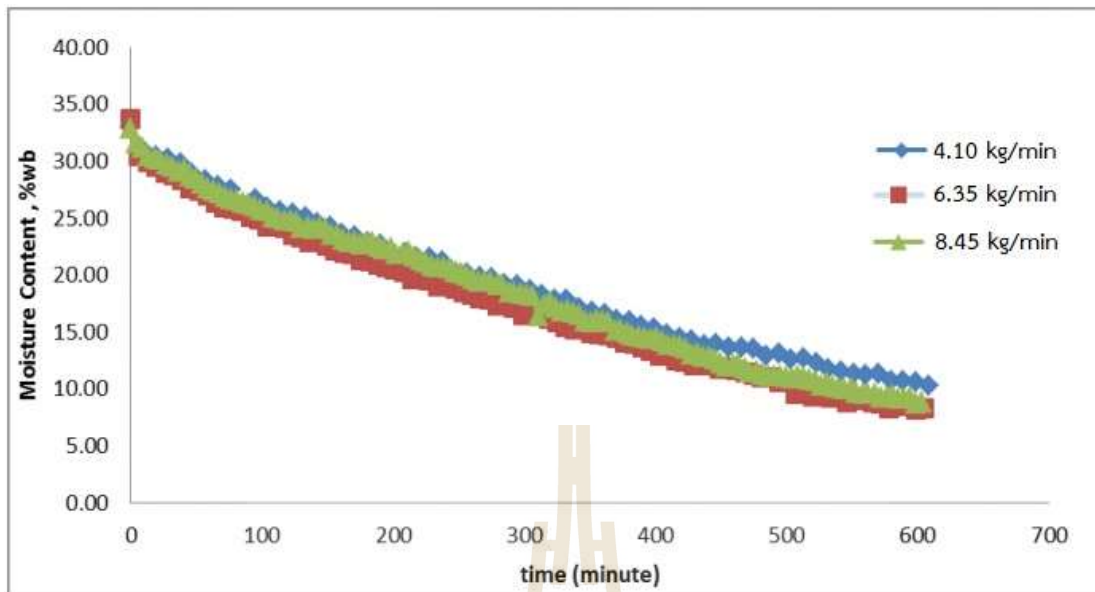
จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าที่ระดับอัตราการป้อนข้าวเปลือกค่าใดค่าหนึ่งหากอัตราการไหลอากาศต่ำกว่าค่าที่ปรากฏในตารางที่ 4.1 จะทำให้เกิดการตกค้างของข้าวเปลือกบางส่วนที่ช่องทางป้อนและหากเพิ่มอัตราการไหลจะทำให้ความเร็วในการพาข้าวเปลือกออกจากห้องอบแห้งเพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในห้องอบแห้งสั้นเกินไปจึงต้องทำการหมุนเวียนอบแห้งซ้ำหลาย ๆ รอบซึ่งการกระทำเช่นนั้นเป็นผลเสียต่อคุณภาพข้าวเนื่องจากข้าวเปลือกจะถูกกระทำทางกลมากขึ้นทำให้ปริมาณข้าวตันที่ได้ลดลง

## 4.4 ผลการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือก

### 4.4.1 ผลการอบแห้งข้าวเปลือกแบบไม่ติดตั้งไซโคลน

ผลการอบแห้งข้าวเปลือกแบบไม่ติดตั้งไซโคลนที่อัตราการป้อนข้าวเปลือกต่าง ๆ กันตามตารางที่ 4.1 แสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นว่าอัตราการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันโดยที่อัตราการป้อนข้าวเปลือกสูงสุดคือ 8.45 kg/min มีอัตราการลดลงของความชื้นมากที่สุด





รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเมื่อทำการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลน

จากการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียนนี้มีข้อสังเกตที่พบคือการอบแห้งรูปแบบนี้ทำให้อากาศร้อนที่พาข้าวเปลือกกลับลงสู่ถังเก็บยังช่วยให้ความร้อนและความชื้นออกจากข้าวเปลือกบริเวณด้านบนได้อย่างต่อเนื่องซึ่งเมื่อพิจารณาการอบแห้งข้าวเปลือกให้ได้ความชื้น 14%wb หรือต่ำกว่าเล็กน้อยแล้วพบว่าการอบแห้งที่อัตราการการป้อนข้าวเปลือก 6.35 kg/min สามารถลดความชื้นได้ดีกว่าดังแสดงในตารางที่ 4.2

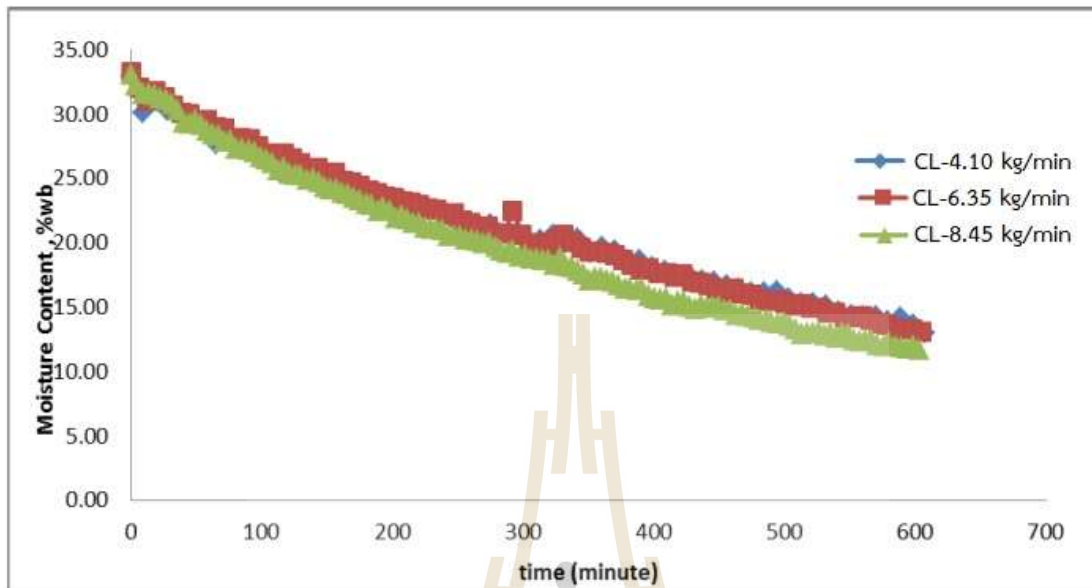
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลน

อัตราการป้อนข้าวเปลือก (kg/min)	อัตราการไหลอากาศ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	ความชื้นเริ่มต้น (%wb)	ความชื้นสุดท้าย (%wb)	เวลาในการอบแห้ง (min)
4.10	0.0451	32.96	13.96	446.50
6.35	0.0512	33.68	14.06	377.00
8.45	0.0631	32.88	13.81	409.50

#### 4.4.2 ผลการอบแห้งข้าวเปลือกแบบติดตั้งไซโคลน

เมื่อทำการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียนแบบติดตั้งไซโคลนพบว่าเมื่ออัตราการป้อนข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น (ซึ่งต้องเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ) จะทำให้

ความชื้นในข้าวเปลือกลดลงได้เร็วกว่าที่อัตราการป้อนที่ต่ำกว่า (รูปที่ 4.3) โดยที่อัตราการป้อนข้าวเปลือก 4.10 และ 6.35 kg/min มีอัตราการลดลงของความชื้นไม่ต่างกันมากนัก



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเมื่อทำการอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลน

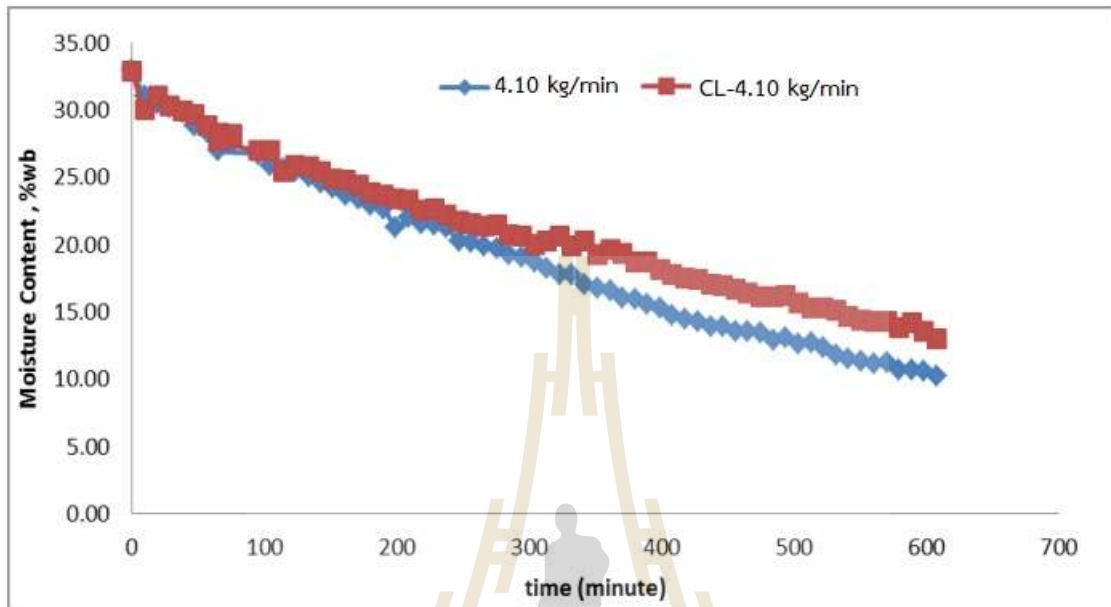
การติดตั้งไซโคลนเป็นการแยกลมร้อนขึ้นที่ผ่านการอบแห้งแล้วออกจากระบบลมร้อนส่วนนี้จึงไม่ได้ช่วยเพิ่มอุณหภูมิให้กับข้าวเปลือกในถังเก็บข้าวเปลือกที่รอป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง จะเกิดแค่การถ่ายเทความร้อนจากเมล็ดข้าวที่ตกลงสู่ถังเก็บด้านบนเท่านั้น เมื่อพิจารณาที่ความชื้น 14 %wb พบว่าการป้อนเข้าเปลือกด้วยอัตรา 8.45 kg/min ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งเมื่อเทียบกับการไม่ติดตั้งไซโคลนแล้วพบว่าใช้เวลาในการอบแห้งที่นานกว่า

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลน

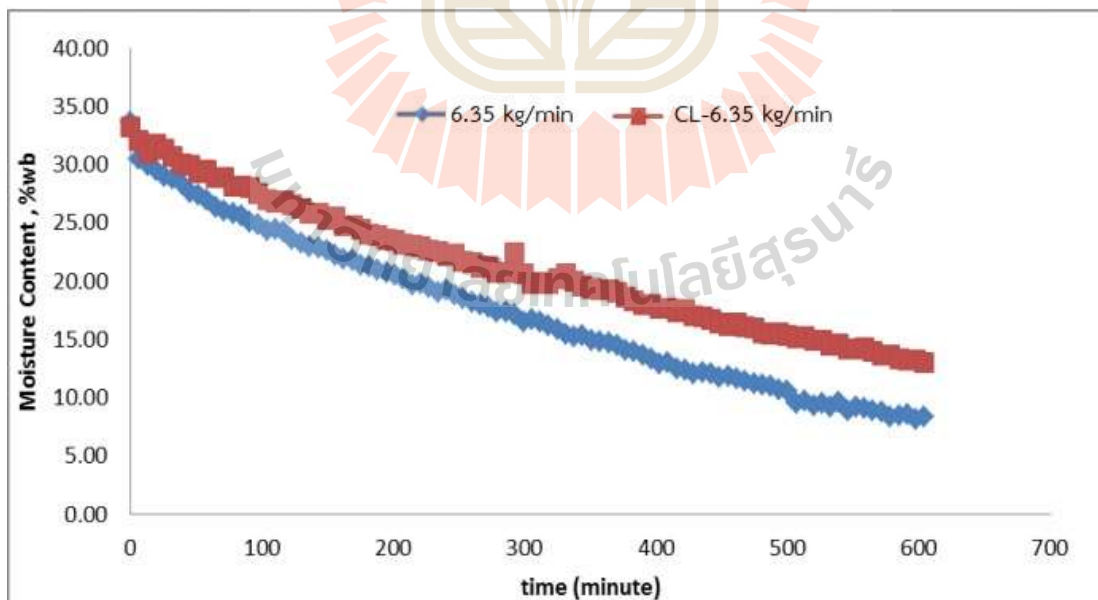
อัตราการป้อนข้าวเปลือก (kg/min)	อัตราการไหลอากาศ (m <sup>3</sup> /s)	ความชื้นเริ่มต้น (%wb)	ความชื้นสุดท้าย (%wb)	เวลาในการอบแห้ง (min)
4.10	0.0451	32.89	13.88	579.50
6.35	0.0512	33.21	14.00	565.50
8.45	0.0631	33.09	14.00	486.00

#### 4.4.3 ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการอบแห้ง

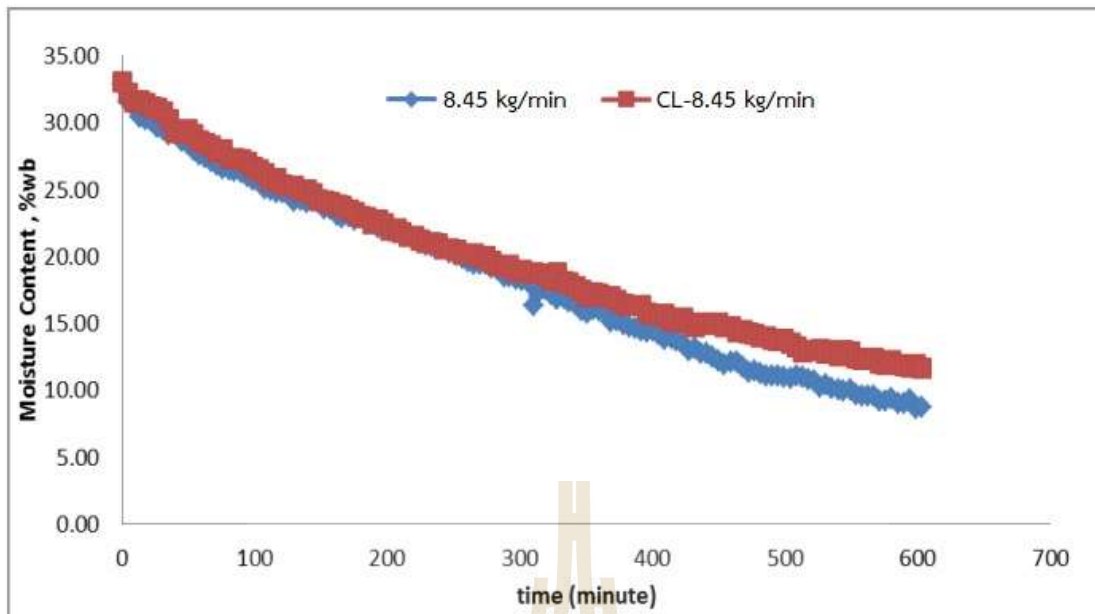
เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปแบบการอบแห้งที่อัตราการไหลของข้าวเปลือกต่าง ๆ กันดังแสดงในรูปที่ 4.4 ถึง 4.6



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเมื่อทำการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลนและติดตั้งไซโคลนที่อัตราการป้อนข้าวเปลือก 4.10 kg/min



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเมื่อทำการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลนและติดตั้งไซโคลนที่อัตราการป้อนข้าวเปลือก 6.35 kg/min



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกเมื่อทำการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลนและติดตั้งไซโคลนที่อัตราการป้อนข้าวเปลือก 8.45 kg/min

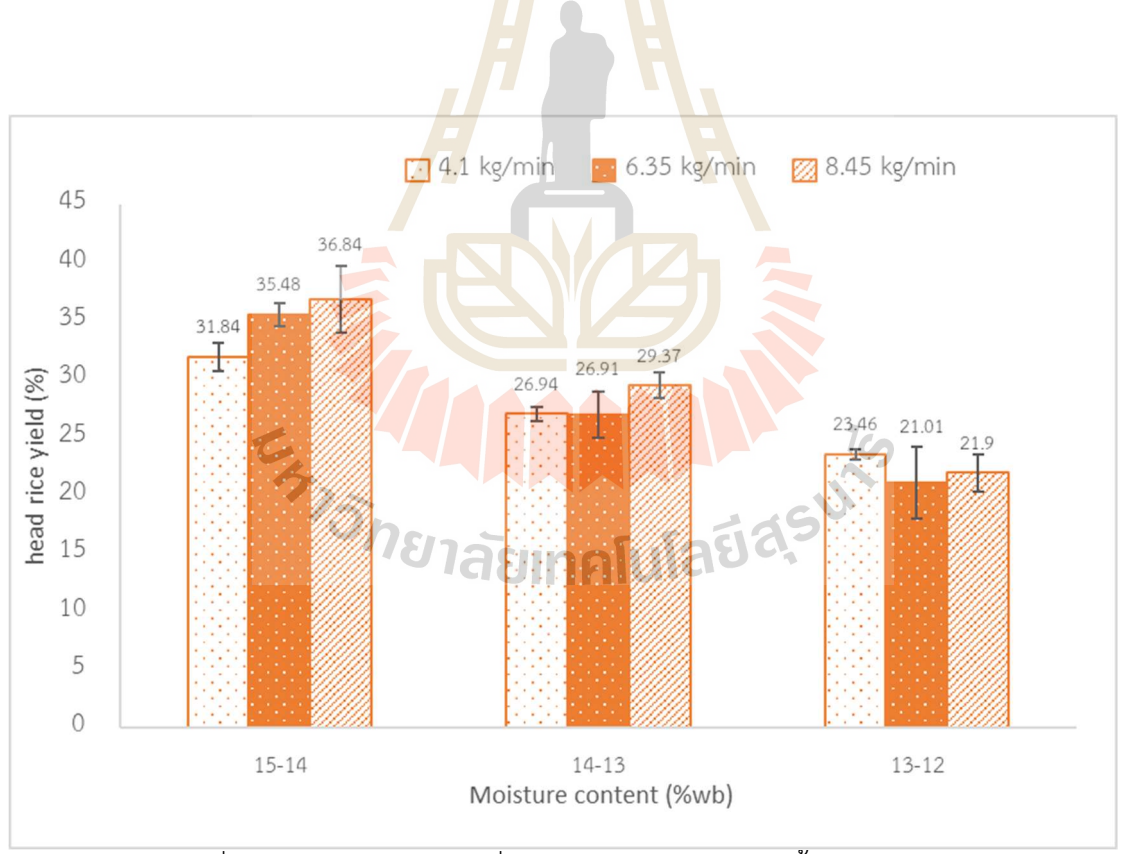
จากรูปที่ 4.4 ถึง 4.6 จะเห็นได้ชัดเจนว่ารูปแบบการอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้งข้าวเปลือกโดยข้าวเปลือกที่ทำการอบแห้งในแบบที่ไม่ติดตั้งไซโคลนจะมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่ากรณีที่ติดตั้งไซโคลนโดยจะเห็นว่าการลดลงของความชื้นเกิดขึ้นเร็วกว่าในทุก ๆ อัตราการป้อนข้าวเปลือก ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลนลมร้อนและข้าวเปลือกขาออกจากห้องอบแห้งจะช่วยทำให้เมล็ดข้าวเปลือกที่อยู่ในถังมีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็นการอุ่นข้าวเปลือกเบื้องต้น (pre-heated) เมื่อข้าวเปลือกนี้ถูกป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งจึงรับพลังงานจากลมร้อนเพื่อใช้ในการระเหยความชื้นน้อยกว่าการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลนที่มีการแยกอากาศร้อนออกไป ซึ่งเมื่อพิจารณาปัจจัยร่วมของอัตราการป้อนและการไหลของอากาศร้อนแล้วพบว่าการอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการป้อน 6.35 kg/min และมีอัตราการไหลของอากาศร้อน 0.0512 m<sup>3</sup>/s แบบไม่ติดตั้งไซโคลนมีความสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้เร็วกว่าการอบแห้งที่สภาวะอื่น ๆ ซึ่งเราจำเป็นต้องพิจารณาถึงคุณภาพของข้าวที่ได้หลังการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งด้วย

#### 4.5 ผลการประเมินคุณภาพข้าวเปลือก

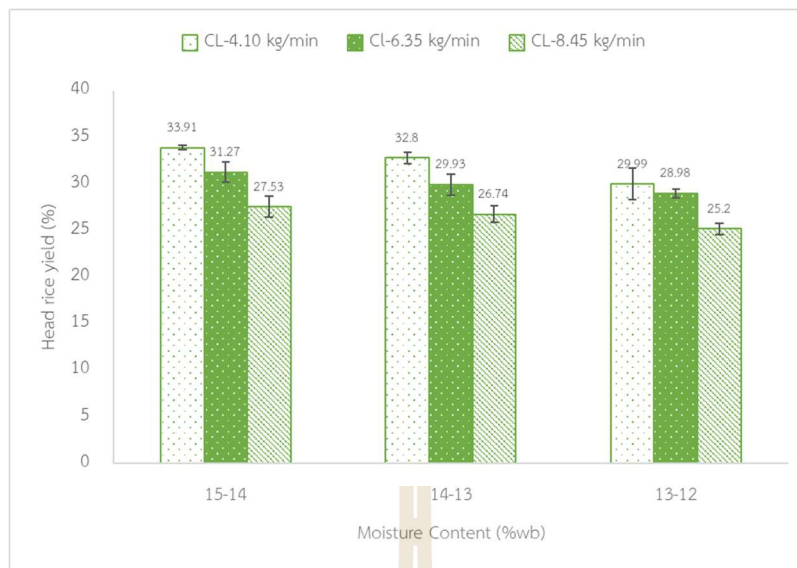
เมื่อทำการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียนที่ออกแบบขึ้นใน 2 รูปแบบคือแบบไม่ติดตั้งไซโคลนและแบบติดตั้งไซโคลน พบว่าการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลนนั้นมีความสามารถอบแห้งได้ดีกว่าแบบติดตั้งไซโคลนดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เมื่อทำการพิจารณาถึงคุณภาพของข้าวเปลือกที่ได้จากการอบแห้งในรูปของเปอร์เซ็นต์ข้าวตันพบว่าเมื่อความชื้นข้าวเปลือกที่

นำไปทำการกะเทาะเปลือกแล้วขัดขาวมีค่าลดลงเปอร์เซ็นต์ข้าวตันที่ได้มีแนวโน้มลดลงด้วย โดยข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลนและแบบติดตั้งไซโคลนมีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตันแสดงอยู่ในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าช่วงความชื้นที่เหมาะสมในการสีข้าวคือ 14-15%wb เนื่องจากให้อัตราการอบแห้งที่สูงขึ้นในทุกอัตราการป้อนข้าวเปลือก

เมื่อพิจารณาถึงเปอร์เซ็นต์ข้าวตันซึ่งเป็นตัวชี้ว่าข้าวที่ผ่านการขัดสี มีการแตกหักมากน้อยเท่าใดจะพบว่าการอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลนจะมีเปอร์เซ็นต์ข้าวตันที่น้อยกว่าการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลน ทั้งนี้เนื่องจากการแยกข้าวเปลือกออกจากลมร้อนด้วยไซโคลนก่อให้เกิดการปะทะของข้าวเปลือกกับผนังของไซโคลนในทุก ๆ รอบของการอบแห้งข้าวเปลือก การอบแห้งให้ความชื้นที่ต่ำลงข้าวจะต้องผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งด้วยจำนวนรอบที่เพิ่มมากขึ้นจึงก่อให้เกิดความเสียหายทางกลที่เพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวตันที่ได้มีค่าน้อยลง เมื่อพิจารณาที่อัตราการป้อนข้าวในช่วงความชื้น 14-15 %wb ซึ่งให้เปอร์เซ็นต์ข้าวตันสูงสุคนั้นการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลนพบว่ามีแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์ข้าวตันที่เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนเพิ่มขึ้นซึ่งตรงข้ามกับการอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลนที่จะมีแนวโน้มลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.8

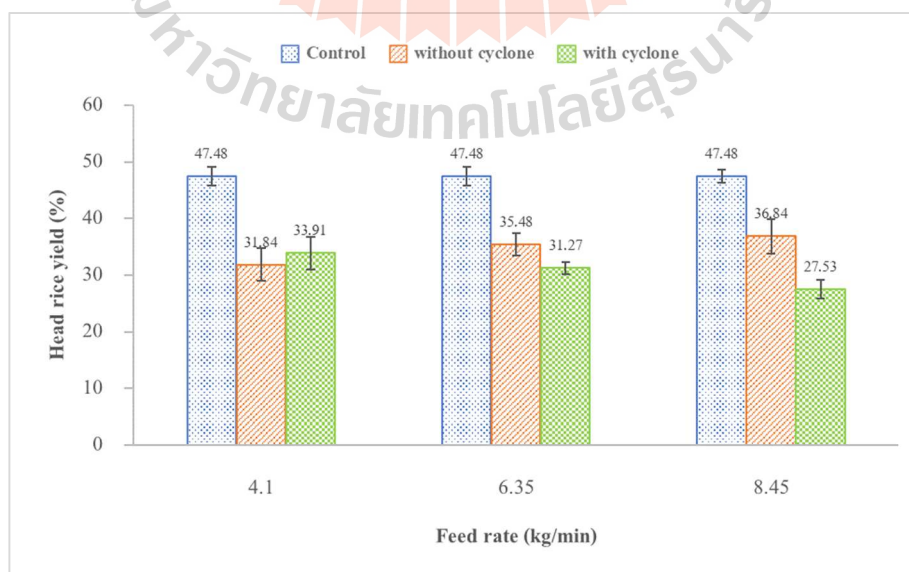


รูปที่ 4.7 เปอร์เซนต์ข้าวตันเมื่อทำการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลน



รูปที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์ข้าวตันเมื่อทำการอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลน

เมื่อนำค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตันที่ได้ไปเทียบกับเปอร์เซ็นต์ข้าวตันของข้าวชุดควบคุมพบว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียนที่พัฒนาขึ้นยังให้เปอร์เซ็นต์ข้าวตันที่ต่ำกว่าข้าวชุดควบคุมมาก ทั้งนี้เนื่องจากระบบของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียนมีส่วนที่ก่อให้เกิดความเสียหายทางกลทั้งจากระบบลำเลียงและการที่ข้าวตกลงกระทบกับถังเก็บ ซึ่งจำเป็นต้องมีการพัฒนาต่อไป จากรูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ข้าวตันที่ดีที่สุดจากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียนคือการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลนที่อัตราการป้อนข้าวเปลือก 8.45 kg/min และจะพบว่าปริมาณข้าวตันเมื่ออัตราการป้อนข้าว 6.35 และ 8.45 kg/min ของการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลนจะมีค่าสูงกว่ายกเว้นที่อัตราการป้อนข้าว 4.10 kg/min แต่เมื่อพิจารณาจากค่า Error bar จะเห็นว่าที่อัตราการป้อนนี้ปริมาณข้าวตันที่ได้ไม่แตกต่างกัน

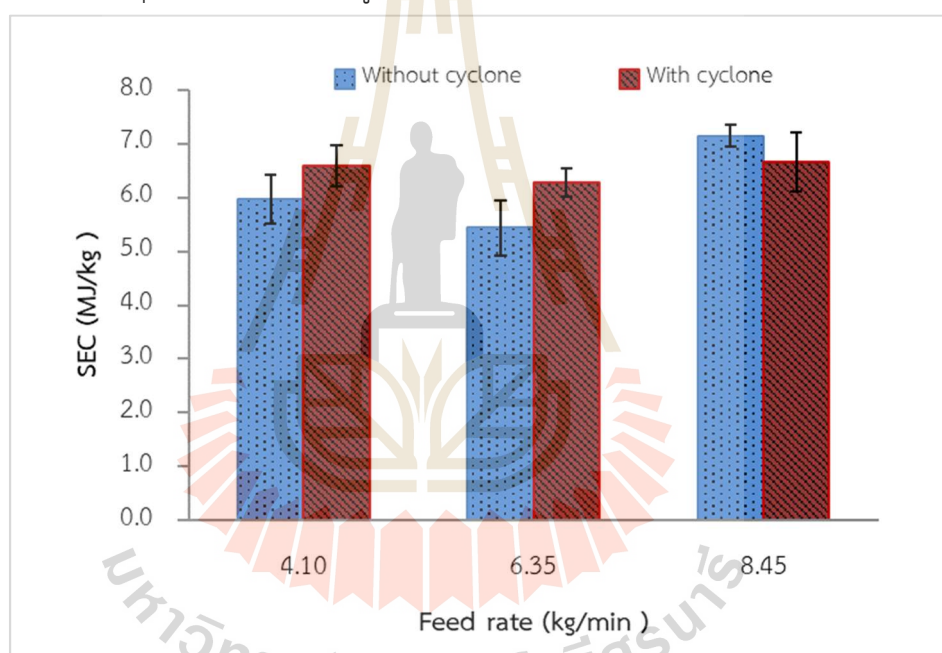


รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ข้าวตันที่ดีที่สุดได้จากการทดลองกับชุดควบคุม

## 4.6 ผลการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก

### 4.5.1 ผลการประเมินด้านการใช้พลังงาน

จากการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียนที่พัฒนาขึ้นพบว่ารูปแบบการอบแห้งมีผลต่อค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งข้าวเปลือกโดยการอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลนนั้นใช้พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำออกจากข้าวเปลือกสูงกว่าการอบแห้งแบบไม่ใช้ไซโคลน (รูปที่ 4.10) ที่อัตราการป้อนข้าว 4.10 และ 6.35 kg/min แต่เมื่ออัตราการป้อนข้าวสูงขึ้นเป็น 8.45 kg/min ค่าพลังงานจำเพาะของการอบแห้งข้าวเปลือกแบบติดตั้งไซโคลนมีค่าต่ำกว่าแบบไม่ติดตั้งไซโคลน โดยอิทธิพลของอัตราการป้อนข้าวเปลือกส่งผลต่อค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในกรณีติดตั้งไซโคลนน้อยกว่าแบบไม่ติดตั้งไซโคลนซึ่งจะเห็นว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในกรณีติดตั้งไซโคลนจะมีค่าใกล้เคียงกันในทุกอัตราการป้อนทั้งนี้เนื่องจากการติดตั้งไซโคลนไม่อิทธิพลของอากาศขาออกที่ใช้ในการอุ่นข้าวเพราะอากาศถูกแยกตัวออกไป



รูปที่ 4.10 ค่าพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งเมื่อทำการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ

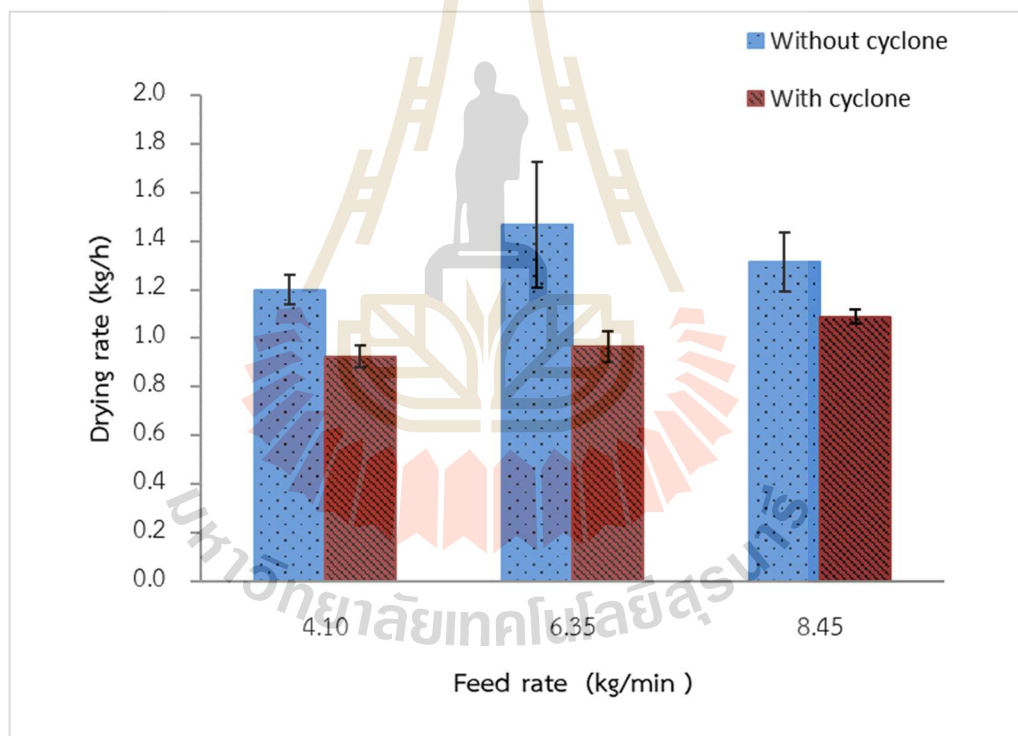
เนื่องค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะขึ้นอยู่กับความสามารถในการระเหยน้ำหรือความชื้นออกจากตัววัสดุซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลที่ได้ในหัวข้อ 4.3

### 4.5.2 อัตราการอบแห้ง

เมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกซึ่งแสดงอยู่ในรูปของปริมาณน้ำที่ระเหยต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าการอบแห้งที่ไม่ติดตั้งไซโคลนให้อัตราการระเหยน้ำสูงกว่า

การอบแห้งที่ติดตั้งไซโคลน ทั้งนี้เนื่องจากผลของการ pre-heat ข้าวเปลือกในถังเก็บข้าวเปลือกก่อนที่ จะถูกป้อนไปลดความชื้นในห้องอบแห้ง

เนื่องจากการศึกษาอบแห้งในครั้งนี้ได้ใช้อัตราการป้อนข้าวเปลือกและอัตราการไหลของลม ร้อนที่เหมือนกันในทุกการทดสอบดังนั้นปัจจัยที่ส่งผลต่อการอัตราการอบแห้งและค่าความสิ้นเปลือง พลังงานจำเพาะคือการนำลมร้อนกลับมาใช้ประโยชน์ซึ่งการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลนมีการใช้ ประโยชน์จากลมร้อนมาช่วยอุ่นข้าวเปลือกก่อนเข้าเครื่องอบแห้งจึงทำให้เกิดการระเหยความชื้นได้ ดีกว่าจึงใช้เวลาในการอบแห้งให้ถึงค่าความชื้นที่ต้องการคือ 14 %wb ได้เร็วกว่าส่งผลให้อัตราการ อบแห้งสูงกว่าแบบไม่ติดตั้งไซโคลน ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้คิณำอากาศร้อนที่ทางออกของไซโคลนนำ กลับมาผสมกับอากาศใหม่เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการลดค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลงโดย ทำการปรับปรุงเครื่องอบแห้งดังแสดงในรูปที่ 4.12 แล้วเลือกทดสอบที่อัตราการป้อนข้าวที่ให้ อัตราการอบแห้งสูงสุดนั้นคืออัตราการป้อนข้าว 8.45 kg/min ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.13

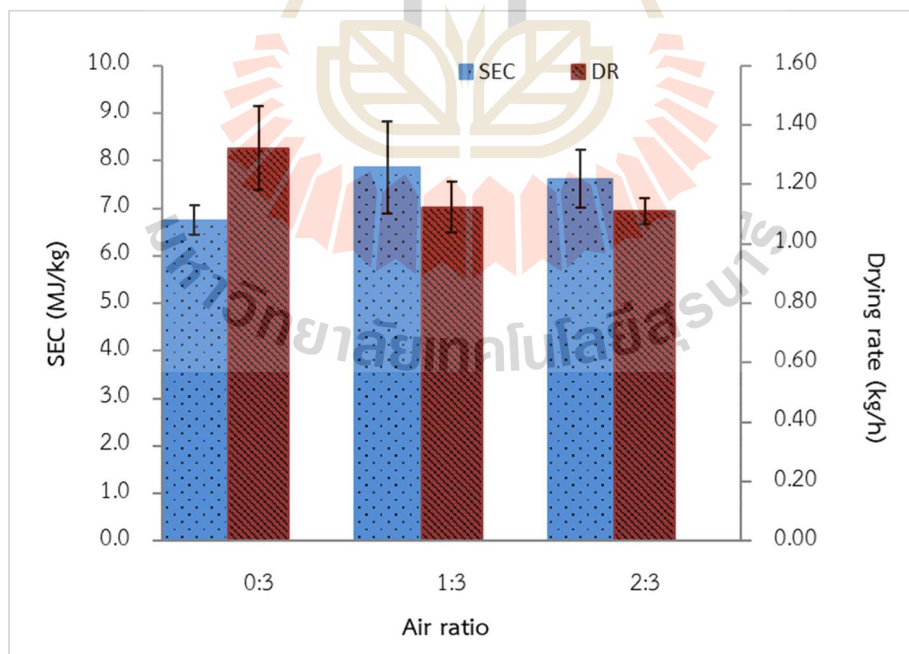


รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกเมื่อทำการอบแห้งแบบติดตั้งและไม่ติดตั้งไซโคลน



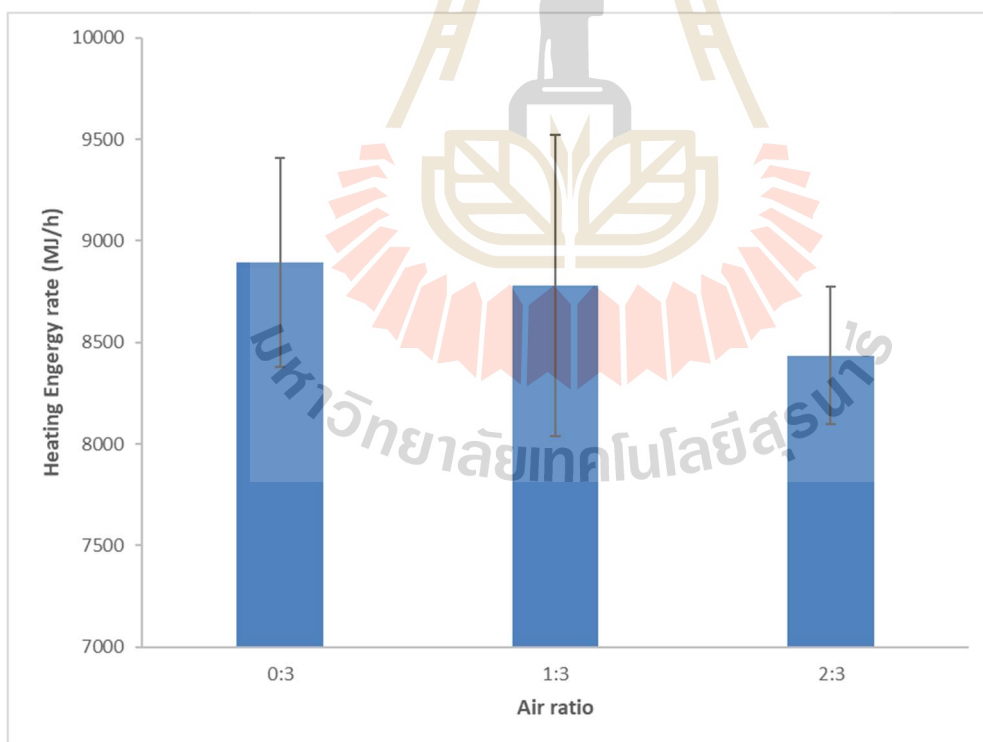


รูปที่ 4.12 ระบบอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลนที่มีการนำอากาศร้อนหลังออกจากไซโคลนกลับมาผสมกับอากาศใหม่



รูปที่ 4.13 ค่า SEC และอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกเมื่อทำการอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลนและนำลมร้อนกลับมาผสมกับอากาศใหม่

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.13 จะพบว่าการนำอากาศร้อนขึ้นกลับมาผสมกับอากาศใหม่ไม่ช่วยให้ค่า SEC ของการอบแห้งลดลง ซึ่งดูเหมือนจะขัดกับทางสมมติฐานที่วางไว้จึงได้ ทำการพิจารณาพลังงานที่ใช้ในการอุ่นอากาศซึ่งพบว่าอัตราการใช้พลังงานในการอุ่นอากาศมีค่าลดลงเมื่อนำอากาศร้อนเข้ามาผสมกับอากาศใหม่ดังแสดงในรูปที่ 4.14 แต่อย่างไรก็ตามค่าที่ลดลงไม่มากเพียงพอเมื่อเทียบกับค่าอัตราการอบแห้งที่ลดลงทำเนื่องจากอากาศอบแห้งที่มีความชื้นมากกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการนำอากาศร้อนขึ้นกลับมาใช้ใหม่จึงส่งผลให้ค่า SEC เพิ่มขึ้น และแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนอากาศที่นำมาผสมใหม่คือ 1:3 และ 2:3 ไม่ใช่ค่าที่เหมาะสม ดังนั้นเมื่อพิจารณาโดยภาพรวมแล้วการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียนนี้การอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลนที่อัตราการป้อนข้าวเปลือก 6.35 kg/min จึงมีความเหมาะสมมากที่สุดเนื่องจากให้อัตราการอบแห้งสูงที่สุด มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด และมีเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงใกล้เคียงกับที่ระดับอัตราการป้อน 8.45 kg/min แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาด้านการใช้พลังงานรวมต่อปริมาณน้ำระเหย 1 กิโลกรัมแล้วพบว่ามีความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำกว่าเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดของ สรายุทธ์ (2542) แต่ทั้งนี้อาจเนื่องจากระดับการทดสอบที่ต่างกัน และใช้พลังงานต่ำกว่าเครื่องอบแห้งฟอสฟลูอิดไชน์เบดของกรกช (2545)



รูปที่ 4.14 แสดงอัตราการใช้พลังงานเพื่ออุ่นอากาศอบแห้งเมื่อมีการนำอากาศขาออกจากไซโคลนมาผสมกับอากาศใหม่

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินการและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมหมุนเวียนที่พัฒนาขึ้นมีส่วนประกอบหลัก 6 ส่วนคือ 1) ถังเก็บข้าวเปลือก 2) ชุดเกลียวลำเลียงข้าวเปลือก 3) ห้องอบข้าวเปลือกทรงกระบอกใส 4) ชุดอุ่นอากาศ 5) พัดลมแรงดันสูงพร้อมมอเตอร์ 6) โซโคลน และ 7) ชุดควบคุม

จากการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นใน 2 รูปแบบคือแบบติดตั้งโซโคลนและแบบไม่ติดตั้งโซโคลนพบว่าการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งโซโคลนให้อัตราการอบแห้ง และเปอร์เซ็นต์ข้าวตันที่สูงกว่าแบบติดตั้งโซโคลน โดยมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ต่ำกว่า เนื่องจากการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งโซโคลนมีการใช้ประโยชน์จากความร้อนขาออกจากห้องอบแห้งในการช่วยอุ่นเมล็ดข้าวเปลือกที่อยู่ในถังเก็บเป็นการ pre-heat ก่อนที่จะถูกลำเลียงเข้าสู่ห้องอบแห้ง นอกจากนี้การอบแห้งแบบไม่ติดตั้งโซโคลนยังได้รับการกระทำทางกลที่น้อยกว่าการอบแห้งแบบติดตั้งโซโคลนจึงทำให้ข้าวมีคุณภาพที่ดีกว่าคือมีเปอร์เซ็นต์ข้าวตันที่สูงกว่า

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

การอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียนนี้เหมาะสมสำหรับการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งโซโคลนเนื่องจากการใช้ประโยชน์จากอากาศร้อนหลังอบแห้งแต่อย่างไรก็ตามข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งยังมีค่าเปอร์เซ็นต์ข้าวตันที่ต่ำอยู่เนื่องจากยังมีจุดที่ก่อให้เกิดความเสียหายทางกลคือการที่ข้าวเปลือกหมุนเวียนหลายรอบต้องถูกลำเลียงออกจากห้องอบด้วยเกลียวลำเลียงอาจหารูปแบบการป้อนอื่นที่เหมาะสม หรือทำการอบแห้งโดยหน่วงเวลาให้ข้าวสามารถอยู่ภายในห้องอบแห้งได้นานมากขึ้นเพื่อเพิ่มระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อนและความชื้นกับอากาศ และตรวจสอบค่าความเสียหายเนื่องจากความร้อนเพิ่มเติม

### เอกสารอ้างอิง

- กรมวิชาการเกษตร. 2547. คุณภาพและการตรวจสอบข้าวหอมมะลิไทย. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
- กรกช ภูไพบูลย์. 2545. การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิดไคซ์เบด. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- กิตติพงษ์ กุลมาตย์. 2537. การอบแห้งข้าวเปลือกแบบถึงทรงกระบอกหมุน. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- เทวรัตน์ ตรีอำนาจ และกระวี ตรีอำนาจ. 2557. การพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคสเปาเต็ดเบด. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ภายใต้แผนงานวิจัยมุ่งเป้าตอบสนองความต้องการในการพัฒนาประเทศโดยเร่งด่วนเรื่อง : ข้าว ประจำปีงบประมาณ 2557.
- ธนัช มุขพันธ์. 2555. การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในกระบวนการอบแห้งข้าวมวล. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ปิยะพล ฟุ้งพงศ์พันธ์, ศุภณัฐ ไผทโสภณ, อานนท์ ต้นภูมิ, ฉัตรชัย นิยมผล, กิตติ สถาพรประสาน. 2559. อิทธิพลของขนาดหอบแห้งที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ปีที่11(1), หน้า1-9.
- ยงยุทธ์ พิษกมุทร. 2529. เครื่องอบแห้งแบบหมุน, น. 15-27. ใน รายงานการประชุมทางวิชาการประจำปีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 24. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- เรืองวิทย์ บัวเนียม, พัทธนี ตั้งตรงสิทธิกุล, อุบลรัตน์ ทองโชติ, สิริกาญจน์ ชัยธรรมวิทย์, ปราโมทย์ ปันเทพ, ธีชรินทร์ สุขใจ, สุขใจ ยินดี. ม.ป.ป. การลดความชื้นข้าวเปลือก. หน่วยส่งเสริมและพัฒนาสหกรณ์ สำนักงานสหกรณ์จังหวัดปทุมธานี.
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 338 หน้า.
- สรายุทธ์ สมิตะโยธิน. 2542. การศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิดไคซ์เซชันระดับอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2558. ระบบการแสดงผลข้อมูลทางสถิติ: สถิติการส่งออกข้าวรวม ปริมาณและมูลค่าการส่งออกรายเดือน. ระบบออนไลน์สืบค้นเมื่อ 5 กรกฎาคม 2558:  
[http://www.oae.go.th/oae\\_report/export\\_import/export\\_result.php](http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export_result.php)

- อดิเทพ ทวีรัตน์พาณิชย์, สมชาติ โสภณรณฤทธิ, สมบูรณ์ เวชกามา, งามชื่น คงเสรี และสุนันทา วงศ์  
ปิยชน. 2542. การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันเพื่อการเพิ่มปริมาณข้าวเต็ม  
เมล็ด. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. ปีที่ 33 (1), หน้า 134-145.
- อรอนงค์ ศรีพวาทกุล. 2536. การศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยวิธีฟลูอิดไดซ์แบบต่อเนื่อง.  
วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Brooker D. B., Fred W. Bakker-Arkema and Carl W. Hall. 1992. Drying and Storage of  
Grains and Oilseeds. An AVI Book, Van Nostrand Reinhold, Newyork. 450p
- Kudra, T. and A. S. Mujumdar. 2002. Advance drying Technology. Marcel Dekker, Inc.  
New York. 459 p



## ภาคผนวก ก

### เอกสารเผยแพร่งานวิจัย

1. จิตรรัตน์ จอกแก้ว กระจวี ตรีอำนาจ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ และเกียรติศักดิ์ ใจโต. 2561. ผลของการติดตั้งไซโคลนที่มีต่อสมรรถนะเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม. วารสาร สจล.ชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ปีที่ 1(1), หน้า 23-28.
2. เกียรติศักดิ์ ใจโต นาฏชนก ปรากฏพร เทวรัตน์ ตรีอำนาจ กระจวี ตรีอำนาจ และธีรวัฒน์ ชื่นอัสดงคต. 2561. การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมหมุนเวียน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 19 วันที่ 26-27 เมษายน 2561 ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติจุฬาลงกรณ์ และวรวนา อ.หัวหิน จ.ประจวบคีรีขันธ์, หน้า 185-188.
- 3 . Krawee Treamnuk, Tawarat Treamnuk, Jittrarat Jokkew, Kaittisak Jaito. 2017. Performance Evaluation of Paddy Rice Pneumatic Dryer. *In* proceeding of The Asian Conference on Sustainability, Energy & the Environment, 8–11 June, 2017, Art Center Kobe, Japan, 155-162.

## ผลของการติดตั้งไซโคลนที่มีต่อสมรรถนะเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม Effect of Cyclone Installation on Performance of Pneumatic Paddy dryer

จิตรรัตน์ จอกแก้ว<sup>1</sup> กระวี ตรีอำรรค<sup>1\*</sup> เทวรัตน์ ตรีอำรรค<sup>2</sup> และ เกียรติศักดิ์ ใจโต<sup>2</sup>  
Jittrarat Jokkew<sup>1</sup>, Krawee Treemnu<sup>1\*</sup>, Tawarat Treemnu<sup>2</sup> and Kaittisak Jaito<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
\*Corresponding author: krawee@sut.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการติดตั้งไซโคลนกับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมที่พัฒนาขึ้นที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งเปรียบเทียบกับแบบที่ไม่ได้ติดตั้งไซโคลน โดยใช้ข้าวหอมมะลิ พันธุ์ 105 เป็นวัสดุตัวอย่างสำหรับการอบแห้ง ทำการทดสอบด้วยข้าวเปลือกครั้งละ 40 kg ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งเท่ากับ 80°C สมรรถนะของเครื่องอบแห้งประเมินจากระยะเวลาอบแห้ง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และอัตราอบแห้ง ผลการทดลองพบว่าระบบอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลนสามารถลดปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกได้รวดเร็วกว่าระบบอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลน โดยสภาวะที่เหมาะสมต่อการอบแห้งคืออัตราการไหลอากาศ 0.0512 m<sup>3</sup>/s มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 7.252323 MJ/kg<sub>water</sub> หากพิจารณาในเชิงคุณภาพข้าวหลังอบแห้งพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งคือแบบไม่ติดตั้งไซโคลนที่อัตราการไหลอากาศ 0.0631 m<sup>3</sup>/s  
**คำสำคัญ:** การอบแห้ง, ข้าวเปลือก, เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม, ไซโคลน

### Abstract

This research objective was to study the effect of cyclone installation with the developed pneumatic dryer on the performance of paddy drying by comparing with the dryer without cyclone installation. Thai jasmine rice 105 was selected to be a sample for drying. In experiment, 40 kg of paddy was dried at drying temperature of 80°C. The performance of drying was assessed from drying period, specific energy consumption (SEC) and drying rate. The experimental result showed that the drying system without cyclone can reduce the moisture content of paddy faster than the drying system with cyclone. The appropriate drying condition was performed at air flow rate of 0.0512 m<sup>3</sup>/s, specific energy consumption of 7.25 MJ/kg<sub>water</sub>. For considering in term of dried rice quality, the appropriate drying condition of system without cyclone was performed at air flow rate of 0.0631 m<sup>3</sup>/s.

**Keywords:** Drying, Paddy, Pneumatic dryer, Cyclone

### บทนำ

ข้าว ถือเป็นธัญญาหารหลักในวงจรดำรงชีวิตของชาวไทย รวมถึงประเทศที่บริโภคข้าวเป็นอาหารหลัก เช่น ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน ญี่ปุ่น ซิลิเบีย และมาเลเซีย เป็นต้น แต่หลังจากการเก็บเกี่ยวมักจะพบว่าข้าวเปลือกส่วนใหญ่มีความชื้นสะสมสูงมากโดยเฉพาะการเก็บเกี่ยวในฤดูฝน ทำให้ได้ราคาซื้อต่ำและส่งผลกระทบต่อข้าวเสื่อมคุณภาพเร็วขึ้น ดังนั้นการลดความชื้นในระดับที่เหมาะสม จึงเป็นอีกกระบวนการผลิตข้าวที่ต้องให้ความสำคัญ โดยความชื้นที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษามีค่าประมาณ 14 %db (มาตรฐานแห้ง) เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของข้าวเปลือกและลดความสูญเสียของข้าวหลังกระบวนการสีข้าว สำหรับการลดความชื้นนั้นหลายวิธีการโดยจะขึ้นอยู่กับค่าความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก

วิธีการลด ความชื้นของข้าวเปลือกมีหลายวิธี แต่วิธีที่ง่ายที่สุดคือ การตากแดดในลาน (Sun drying) ซึ่งเป็นวิธีที่อาศัยพลังงานความร้อนจากธรรมชาติ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย แต่มีข้อจำกัดเนื่องจากใช้เวลานาน ซึ่งเป็น

ผลมาจากความไม่แน่นอนของแสงแดดในแต่ละวัน จึงทำให้ไม่สามารถควบคุมความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือกได้ ส่วนอีกวิธีเป็นการใช้เครื่องอบแห้ง (Artificial drying) มาช่วยในการลดความชื้นของข้าวเปลือก ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถใช้งานได้ทุกสภาวะอากาศ สามารถควบคุมความชื้นได้ตามระดับที่ต้องการ ยกตัวอย่างเช่น เครื่องอบแห้งแบบคลุกเคล้าหรือ LSU เป็นเครื่องอบแห้งที่นิยม แต่มีข้อเสียคือจะทำให้คุณภาพของเมล็ดข้าวหลังผ่านการสีต่ำกว่าปกติ ซึ่งส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวคั้นที่ได้น้อยลง เครื่องอบแห้งชนิดอื่นคือ เครื่องอบแห้งฟลูอิดไช้เบด เป็นวิธีที่ช่วยลดความชื้นได้อย่างรวดเร็ว และทำให้มีความชื้นสม่ำเสมอทั่วเมล็ด แม้จะมีความชื้นเริ่มต้นที่แตกต่างกัน ข้อจำกัดของเครื่องอบแห้งชนิดนี้คือเมล็ดข้าวเปลือกที่ป้อนเข้ามาใหม่มีโอกาสที่จะออกมาโดยไม่ถูกไล่ความชื้นและใช้พลังงานที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งชนิดอื่น แต่การอบแห้งในระบบเดิมยังต้องใช้พลังงานที่สูงและการทำงานของเครื่องอบแห้งไม่เพียงพอต่อปริมาณข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวได้ในแต่ละวัน ซึ่งปัจจุบันได้มีงานวิจัยเพื่อศึกษาการลดความชื้นของข้าวเปลือกเป็นจำนวนมาก รวมถึงการพัฒนาและปรับปรุงระบบการทำงานของเครื่องอบแห้ง เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการทำงาน โดยใช้พลังงานให้น้อยลงแต่ยังคงมีคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานที่ตลาดต้องการ

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะควบคุมที่เหมาะสมในการอบแห้ง สำหรับงานวิจัยนี้มีการควบคุมอุณหภูมิคงที่ตลอดการทดลองและศึกษาอัตราการไหลของอากาศ 3 ระดับคือ 0.0451 0.0512 และ 0.0631  $m^3/s$  (ระดับต่างๆ เป็นความเร็วของลมร้อนที่สามารถทำให้ข้าวเปลือกลอยตัวได้) พร้อมทั้งประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง เพื่อเป็นแนวทางการใช้พลังงานที่มีอยู่ให้เกิดความคุ้มค่า พร้อมทั้งมีประสิทธิภาพและมีความเหมาะสมต่อการอบแห้งของข้าวเปลือกมากที่สุด

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์การทดสอบ

การทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมมีลักษณะ ดัง Figure 1 เริ่มจากบรรจุข้าวใส่ลงในถังเก็บข้าวเปลือก (1) ข้าวจะไหลเข้าสู่เกลียวป้อน (2) ซึ่งถูกขับด้วยมอเตอร์ไปตามท่อส่ง เพื่อส่งผ่านเข้ามายังห้องอบแห้ง (3) ขณะที่ลมร้อนจากพัดลมความดันสูง (4) จะเป่าอากาศผ่านชุดทำความร้อน (5) เข้าสู่ห้องอบแห้งและผสมกับข้าวเปลือก สำหรับข้าวเปลือกที่แห้งจะเบาขึ้นทำให้ลอยได้สูงขึ้นและไหลไปรวบรวมที่ถังเก็บข้าวเปลือก โดยอุณหภูมิและอัตราการไหลของลมร้อนจะถูกควบคุมด้วยชุดควบคุม (6) และกรณีทดสอบสำหรับระบบอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลน จะมีการติดตั้งอุปกรณ์ไซโคลน (7)



Figure 1 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่พัฒนาขึ้น



### การทดสอบ

การทดสอบอบแห้งในงานวิจัยนี้ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งเป็นข้าวเปลือกที่ได้หลังกระบวนการเก็บเกี่ยว แล้วนำมาทดสอบทันที ข้าวเปลือกบางส่วนที่ได้ถูกนำมาเก็บรักษาในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 4°C โดยทดสอบ 3 ซ้ำการทดลองและในแต่ละการทดลองจะมีการสุ่มเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกเพื่อนำไปหาความชื้นมาตรฐานเปียก และมีการจดบันทึกพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละรอบด้วย (อุปกรณ์ที่ใช้ คือ มัลติมิเตอร์สำหรับใช้วัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์เกียร์ล้าเสียง, มาตรวัดไฟฟ้าสำหรับวัดพลังงานที่ใช้ในการทำความร้อนและพลังงานที่ป้อนเข้าที่ดรัมแรงดันสูง) สำหรับการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งนั้นจะพิจารณาจากสองส่วน คือประสิทธิภาพเชิงความร้อน และประสิทธิภาพในการอบแห้ง

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งสามารถบอกได้ในรูปของ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption, SEC) ซึ่งเป็นค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ

$$SEC = \frac{Q_A}{(W_i - W_f)} \quad (1)$$

เมื่อ	SEC	คือ	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (kJ/kg <sub>water</sub> )
	Q <sub>A</sub>	คือ	พลังงานรวมทั้งหมดที่ใช้ในระบบอบแห้ง (kJ)
	W <sub>i</sub>	คือ	น้ำหนักเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือก (g)
	W <sub>f</sub>	คือ	น้ำหนักสุดท้ายของเมล็ดข้าวเปลือกหลังอบแห้ง (g)

ในการพิจารณาประสิทธิภาพในการอบแห้งจะประเมินจากค่าอัตราการอบแห้ง (drying rate, DR)

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

เมื่อ	DR	คือ	อัตราการอบแห้ง (kg/h)
	hr	คือ	ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งของระบบ (hr)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ข้าวคืน} = (\text{น้ำหนักข้าวเต็มเมล็ดและข้าวคืน} / \text{น้ำหนักข้าวเปลือก}) \times 100 \quad (3)$$

### ผลและวิจารณ์ผล

การศึกษากการทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม มีการทดสอบ 2 วิธีการ คือระบบที่ติดตั้งไซโคลน และระบบที่ไม่ติดตั้งไซโคลน โดยมีผลการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

#### 1. ระยะเวลาการอบแห้ง

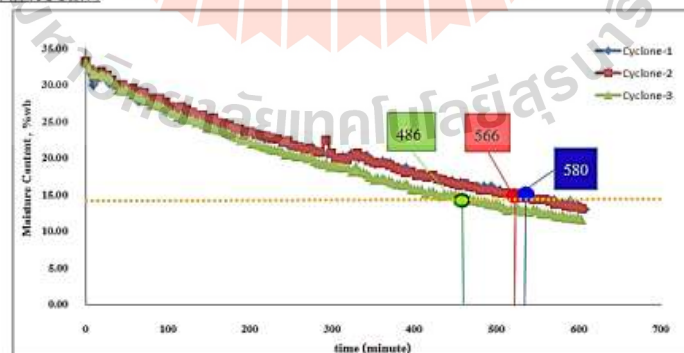


Figure 2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของเครื่องอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลน

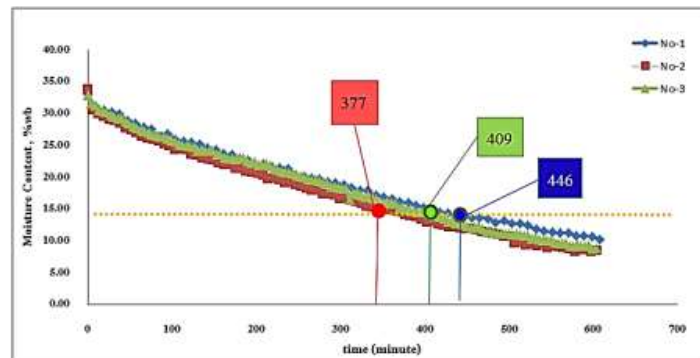


Figure 3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของเครื่องอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลน

จาก Figure (3) แนวโน้มการลดลงของความชื้นที่ทุกระดับอัตราการไหลอากาศใกล้เคียงกันมากและไปในทิศทางเดียวกัน ข้อสังเกตที่พบคือ ระบบอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลนทำให้อากาศร้อนที่พาข้าวเก็บลงสู่ถังเก็บส่วนหนึ่งยังช่วยให้ความร้อนและพาความชื้นออกจากข้าวเปลือกบริเวณผิวด้านบนในถังเก็บได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งจากการทดลองพบว่า ที่ระดับอัตราการไหลอากาศ  $0.0512 \text{ m}^3/\text{s}$  ใช้เวลาอบแห้งประมาณ 377 นาที สามารถลดความชื้นได้ตามต้องการ สำหรับระดับของอัตราการไหล  $0.0451 \text{ m}^3/\text{s}$  และ  $0.0631 \text{ m}^3/\text{s}$  ใช้เวลาสำหรับการอบแห้ง 446 นาที และ 410 นาที ตามลำดับ ดัง Table 1

Table 1 ผลการทดสอบอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

ระดับ	อัตราการไหลอากาศ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	อัตราการป้อนข้าวเปลือก ( $\text{kg}/\text{min}$ )	เงื่อนไข	ค่าความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก (%wb)	ค่าความชื้นสุดท้ายข้าวเปลือก (%wb)	เวลาอบแห้ง (min)
1	0.0451	4.10	ติดตั้งไซโคลน	$32.89 \pm 0.13$	$13.88 \pm 5.19$	579.50
			ไม่ติดตั้งไซโคลน	$32.96 \pm 0.39$	$13.96 \pm 6.28$	446.50
2	0.0512	6.35	ติดตั้งไซโคลน	$33.21 \pm 0.07$	$14.00 \pm 5.47$	565.50
			ไม่ติดตั้งไซโคลน	$33.68 \pm 0.06$	$14.06 \pm 6.60$	377.00
3	0.0631	8.45	ติดตั้งไซโคลน	$33.09 \pm 0.65$	$14.00 \pm 5.91$	486.00
			ไม่ติดตั้งไซโคลน	$32.88 \pm 0.03$	$13.86 \pm 6.61$	409.50

## 2. ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption)

จาก Figure 4 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่แต่ละเงื่อนไขการทดลอง จะเห็นว่าค่า SEC สำหรับระบบที่ไม่ติดตั้งไซโคลนที่อัตราการไหลอากาศ  $0.0512 \text{ m}^3/\text{s}$  ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานมีค่าน้อยที่สุดโดยใช้เวลาน้อยที่สุดเพื่อลดความชื้นข้าวเปลือกให้ถึง 14 %wb และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานของระบบที่ติดตั้งไซโคลนที่อัตราการไหลอากาศ  $0.0631 \text{ m}^3/\text{s}$  ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดและใช้เวลานานที่สุดเพื่อลดความชื้นให้ถึงค่าความชื้นสุดท้าย (14 %wb)

การใช้พลังงานของระบบอบแห้งที่ติดตั้งไซโคลน มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และมีแนวโน้มที่สังเกตได้คือ ระบบที่ใช้อัตราการไหลอากาศยิ่งสูง แนวโน้มการใช้พลังงานจะมีค่าลดลง เป็นผลที่ได้จากการนำลมร้อนกลับมาใช้ออบแห้งต่อภายในถังเก็บข้าวเปลือก (ระบบอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลน) สามารถช่วยลดพลังงานได้ในทุกระดับอัตราการไหลอากาศ

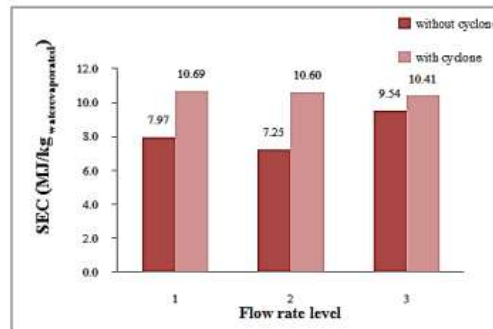


Figure 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะกับอัตราการไหลของอากาศร้อน

### 3. อัตราการอบแห้ง (Drying rate)

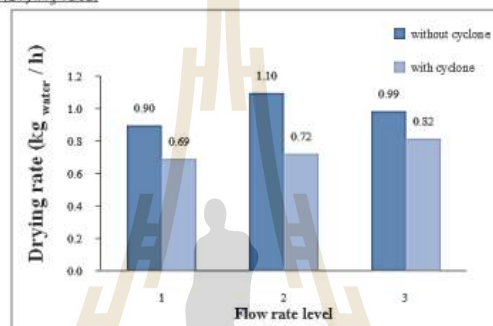


Figure 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับความเร็วลม

จาก Figure 5 ระบบอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลนมีแนวโน้มของค่าอัตราการระเหยของน้ำสูงขึ้น เมื่อใช้อัตราการไหลอากาศเพิ่มขึ้น และมีค่าที่ต่ำสุดเท่ากับ 0.82 kg/h ที่อัตราการไหลอากาศ 0.0631 m<sup>3</sup>/s ในขณะที่ระบบอบแห้งที่ไม่ติดตั้งไซโคลน ได้รับอิทธิพลของการอบแห้งต่อเนื่องถึงเก็บข้าวเปลือก ทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นทุกระดับอัตราการไหลอากาศ โดยมีอัตราการอบแห้งที่ต่ำเท่ากับ 1.10 kg/h ที่อัตราการไหลอากาศ 0.0512 m<sup>3</sup>/s ซึ่งสอดคล้องกับผลของระยะเวลาการอบแห้งที่กล่าวไว้ข้างต้น

### สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาทดลองเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม โดยทำการทดลองทั้งระบบที่ติดตั้งไซโคลนและไม่ติดตั้งไซโคลน ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า ระบบที่ไม่ติดตั้งไซโคลนสามารถลดความชื้นได้เร็วกว่าระบบที่ติดตั้งไซโคลน เนื่องจากมีการอบแห้งต่อเนื่องถึงเก็บข้าวเปลือก จึงทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น แต่ยังคงมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในระบบลดลง โดยสภาวะที่เหมาะสมต่อกรอบแห้งที่อัตราการไหลอากาศ 0.0512 m<sup>3</sup>/s มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 7.25 MJ/kg หากพิจารณาในเชิงคุณภาพข้าวหลังอบแห้งพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งคือแบบไม่ติดตั้งไซโคลนที่อัตราการไหลอากาศ 0.0631 m<sup>3</sup>/s

วารสาร สงส.ชมพรเขตรอุดมศักดิ์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 1 ฉบับที่ 1 : มกราคม – มิถุนายน 2561

#### เอกสารอ้างอิง

- กิตติยา กิจควรดี และกัญญา เชื้อพันธ์. 2545. คุณภาพข้าวและการตรวจสอบข้าวปนในข้าวหอมมะลิไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร : บริษัทจีรวัฒน์เอ็กซ์เพรส จำกัด.
- เทวรัตน์ ตรีอานรรค และกระวี ตรีอานรรค. 2557. รายงานการวิจัยเรื่องการพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคสเปาเต็ดเบด. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 51 หน้า
- เรียวโซ โทเอ. 2525. อุปกรณ์อบแห้งในอุตสาหกรรม. โดยวิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- วัญญู รอดประพัฒน์, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และมนตรี หวังจิ. 2542. ระบบอบแห้งข้าวเปลือกในโรงสี. ว.เกษตรศาสตร์ (วิทย.) ปีที่ 33 ฉบับที่ 1: 126-133.
- Jame E. Wimberly. 1983. Drying Technical Handbook for the paddy Rice Postharvest Industry in Developing Countries. International Rice Reseach Institute. Los Banos, Laguna, Philippines.
- Somchaet Soponronnarit. 1995. Solar drying in Thailand. Energy for sustainable development. Vol.2, pp. 19-25.
- Chatchai Nimmol and Sakamon Devahastin. 2010. Evaluation of performance and energy consumption of an impinging stream dryer fer paddy., Applied Thermal Engineering 30 (2010) 2204-2212.
- M.S.H. Sarker, M. Nordin Ibrahim, N. Ab. Aziz and P. Mohd. Salleh. 2014. Energy and rice quality aspects during drying of freshly harvested paddy with industrial inclined bed dryer. Energy Conversion and Management 77 (2014) 389–395.
- S. Prachayawarakorn, S. Ruengnarong and S. Soponronnarit. 2006. Characteristics of heat transfer into dimensional spouted bed, Journal of feed engineering, Vol.76, pp. 327-333.
- W. Rordprapat, A. Nathakaranakule, W. Tia and S. Soponronnarit. 2005. Comparative study of fluidized bed paddy drying using hot air and superheated steam, Journal of food engineering, Vol.71, pp. 28-36.
- N. Meeso, A. Nathakaranakule, T. Madhiyanon and S. Soponronnarit. 2004. Influence of FIR irradiation on paddy moisture reduction and milling quality after fluidized bed drying. Journal of food engineering, Vol.65, pp. 293-301.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



## การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียน

## Paddy Drying with Circulating Pneumatic Dryer

เกียรติศักดิ์ ใจโต<sup>1\*</sup>, นาฏชนก ปรางปรุ<sup>1</sup>, เทวรัตน์ ตรีอำนาจ<sup>1</sup>, จิตรารัตน์ จอกแก้ว<sup>2</sup>, กระจวี ตรีอำนาจ<sup>2</sup>, ธีรวัฒน์ ชื่นอัครดงคต<sup>2</sup>  
Kiattisak Jaito<sup>1\*</sup>, Nartchanok Prangpru<sup>1</sup>, Tawarat Treeamnu<sup>1</sup>, Jittrarat Jokkew<sup>2</sup>, Krawee Treeeamnu<sup>2</sup>,  
Teerawat chuenatsadongkot<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 30000

<sup>2</sup>School of Agricultural Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

<sup>3</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 30000

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

\*Corresponding author: Tel: +66-8-12776460, E-mail: ball-417@hotmail.com

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียนที่พัฒนาขึ้น โดยทำการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จำนวน 40 kg ที่อุณหภูมิ 80 °C อัตราการป้อน 3 ระดับคือ 4.10 6.35 และ 8.45 kg min<sup>-1</sup> ใน 2 รูปแบบคือ การอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลน และติดตั้งไซโคลน ทำการประเมินคุณภาพข้าวจากค่าความชื้นและค่าร้อยละต้นข้าว รวมทั้งประเมินสมรรถนะในการอบแห้งจากค่าอัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ผลการทดสอบพบว่า การอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลนที่อัตราการป้อน 6.35 kg min<sup>-1</sup> ให้คุณภาพข้าวเปลือกหลังอบแห้งที่ดีที่สุดและอัตราการอบแห้งสูงสุด โดยมีค่า SEC ต่ำสุด เท่ากับ 5.44 MJ kg<sub>water</sub><sup>-1</sup> ขณะที่การอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลนนั้นสามารถนำอากาศที่ผ่านการอบแห้งแล้วกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นจึงได้เลือกสภาวะการอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลนที่มีค่าอัตราการอบแห้งสูงสุดมาทดสอบอบแห้งเพื่อดูอิทธิพลของการนำอากาศอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ต่อค่า SEC ผลการทดลองพบว่าการนำอากาศที่ผ่านการอบแห้งแล้วกลับมาใช้ใหม่นั้นไม่สามารถทำให้ค่า SEC ของการอบแห้งลดลงได้

คำสำคัญ: เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม, การอบแห้ง, ข้าวเปลือก

## Abstract

This research aims to study the appropriate drying paddy with developed circulating pneumatic dryer. Each experiment of drying was used 40 kg of Khao Dawk Mali 105 variety with drying condition of 80 °C of drying temperature, 3 levels of feed rate of 4.1, 31 6.35 and 8.45 kg min<sup>-1</sup>. The dryer was set in 2 types i.e. drying without cyclone and drying with cyclone. Quality of rice was evaluated in terms of moisture content and head rice yield, the drying performance was evaluated in terms of drying rate and specific energy consumption (SEC). The results found that when drying without cyclone at feed rate equals of 6.35 kg min<sup>-1</sup> gave the best quality of rice and highest drying rate with lowest in SEC of 5.44 MJ kg<sub>water</sub><sup>-1</sup>. For drying with cyclone, the highest drying rate condition was used to improve the energy efficiency by mix the exhaust air with the fresh air. The results showed that recirculated air cannot able to reduced SEC.

Keywords: Pneumatic dryer, Drying, Paddy

## 1 บทนำ

ข้าวเป็นพืชอาหารที่สำคัญชนิดหนึ่งของโลก โดยเฉพาะในภูมิภาคเอเชียที่นิยมรับประทานข้าวเป็นอาหาร โดยส่วนใหญ่ข้าวที่จะผลิตได้จะบริโภคภายในประเทศ ประเทศที่มีบทบาทสำคัญในการส่งออกข้าวได้แก่ ไทย เวียดนาม อินเดีย จีนและพม่า ดังนั้นข้าวจึงเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทยมี

ปริมาณการส่งออกข้าวรวม 8.71 ล้านตันในปี 2560 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2560) ปัจจุบันยังมีความต้องการของตลาดทั้งภายในและนอกประเทศ ข้าวจึงเป็นพืชที่เกษตรกรไทยนิยมปลูกจำนวนมาก เนื่องจากข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวส่วนใหญ่มีความชื้นสูงไม่เหมาะแก่การเก็บรักษา รวมทั้งการซื้อขายข้าวเปลือกจะมีการอ้างอิงราคากับความชื้นของข้าวเปลือก กระบวนการลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมจึงมี

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 19 วันที่ 26-27 เมษายน 2561

ความสำคัญ ส่งผลต่อการเก็บรักษาและคุณภาพข้าวสารหลังกระบวนการสีข้าว โดยความชื้นที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาและแปรรูปข้าวเปลือกมีความชื้นอยู่ที่ 14 %wb (วิบูลย์, 2561) การลดความชื้นข้าวเปลือกมีหลายวิธีแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป วิธีที่ง่ายและประหยัด (บุญมีและคณะ, 2546) คือการตากแดดบนลานโดยอาศัยความร้อนจากแสงอาทิตย์ แต่ก็มีข้อเสียคือใช้พื้นที่จำนวนมากในการตากประกอบกับต้องพึ่งพาธรรมชาติเป็นตัวแปรที่ไม่แน่นอนอีกทั้งยังใช้ระยะเวลานานในการลดความชื้น โดยเฉพาะในฤดูฝนไม่สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้ เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์ (พิรสิทธิ์และคณะ, 2557) มีหลายรูปแบบ เช่นเครื่องอบแห้งแบบ LSU เป็นเครื่องอบแห้งที่นิยมใช้ แต่ด้วยราคาของเครื่องอบแห้งมีราคาสูงจึงเหมาะแก่โรงงานอุตสาหกรรม ทำให้เกษตรกรต้องขายข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงได้ราคาขายต่ำ จึงมีงานวิจัยสร้างเครื่องอบแห้งในรูปแบบต่าง ๆ เกิดขึ้นจำนวนมาก เช่น การอบแห้งเมล็ดพืชโดยเทคนิคสเปาเต็ดเบต ฐานิตย์ (2544) พบว่าเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคสเปาเต็ดเบต สามารถลดความชื้นลงได้ 14-25%db โดยที่คุณภาพข้าวหลังการสีอยู่ในเกณฑ์ดี ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ห่ออบแห้งชนิดท่อเกลียว ฉัตรชัย (2555) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิอบแห้ง ความเร็วของอากาศ และอัตราการป้อนข้าวเปลือกส่งผลต่อความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกและค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง และการพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบถังหมุนประหยัดพลังงานโดยระบบนำอากาศร้อนเวียนกลับมาใช้ใหม่ ภาณุวัฒน์ (2556) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเปลือกคือ 70-80°C โดยนำอากาศร้อนกลับมาใช้ใหม่ส่งผลทำให้ค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งลดลง 0.4-0.6 MJ kg<sub>water</sub><sup>-1</sup>

ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาและพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมหมุนเวียนเป็นเครื่องต้นแบบ โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียน ประกอบด้วยความเร็วลม อุณหภูมิ และประเมินคุณภาพข้าวหลังกระบวนการสี เพื่อเป็นแนวทางในการลดความชื้นของข้าวเปลือกต่อไป

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียน

เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียนที่พัฒนาขึ้นแสดงดัง Figure 1 ขั้นตอนการอบแห้งจะเริ่มจากการบรรจุข้าวเข้าถังพัก (หมายเลข 1) ถังพักมีขนาด 40 x 50 x 80 cm ตั้งค่าอุณหภูมิอบแห้งและความเร็วรอบของอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่ตัว Control (หมายเลข 2) จากนั้นข้าวเปลือกจะถูกลำเลียงด้วยเกลียวลำเลียงเข้าคอลัมน์อบแห้ง (หมายเลข 3) ทำจากกระบอก

อะคริลิกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 cm ยาว 1 m ในขณะเดียวกันฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2600 W ให้ความร้อน 80°C (หมายเลข 4) กับลมเป่าด้วยพัดลมแรงดันสูง ขนาด 3 hp (หมายเลข 5) ลมร้อนจะเป่าข้าวเปลือกขึ้นไปในคอลัมน์อบแห้งกลับเข้าสู่ถังพักทางด้านบน การอบแห้งเป็นการไหลเวียนจนกว่าข้าวเปลือกจะมีความชื้นประมาณ 14%wb

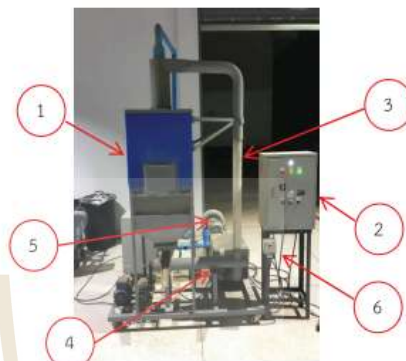


Figure 1 The developed pneumatic dryer

2.2 การทดสอบการอบแห้ง

การทดสอบการอบแห้งในครั้งนี้ทำการอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 จำนวน 40 kg ที่อุณหภูมิ 80°C อัตราการป้อน 3 ระดับคือ 4.10 6.35 และ 8.45 kg min<sup>-1</sup> (ตั้งค่าความถี่บน inverter) การอบแห้งมี 2 รูปแบบ คือ การอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลน และติดตั้งไซโคลน ทำการทดสอบ 3 ชั่วโมงที่ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แล้วทำการประเมินสมรรถนะของการอบแห้งจาก 1) ความชื้นของข้าวเปลือก 2) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ความสิ้นเปลืองพลังงานของการอบแห้งประกอบด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ฮีตเตอร์ไฟฟ้าและ พัดลมแรงดันสูงสามารถวัดได้ด้วยมาตรวัดความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า (kilowatt-hour meter) และพลังงานที่ป้อนให้กับมอเตอร์สกรูลำเลียง โดยค่า SEC (Sharma & Prasad, 2006) สามารถคำนวณได้จากสมการ (1)

$$SEC = \frac{E}{m_{water}} \quad (1)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ kg<sup>-1</sup>)  
 E คือ พลังงานรวมในระบบอบแห้ง (MJ)  
 m<sub>water</sub> คือ ปริมาณน้ำที่ถูกนำออกจากข้าวเปลือก (kg)

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 19 วันที่ 26-27 เมษายน 2561

3) อัตราการอบแห้งเป็นการบ่งบอกถึงความสามารถในการระเหยน้ำออกจากข้าวเปลือกหาได้จากสมการ (2)

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

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง (kg h<sup>-1</sup>)  
 W<sub>i</sub> คือ น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น (kg)  
 W<sub>f</sub> คือ น้ำหนักข้าวเปลือกสุดท้าย (kg)  
 t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

การอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลนยังสามารถนำอากาศอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ได้ จึงเลือกทำการทดสอบที่สภาวะการอบแห้งจากข้างต้นโดยพิจารณาจากอัตราการอบแห้งเพื่อนำมาทดสอบสภาวะติดตั้งไซโคลนที่นำอากาศกลับมาใช้และทำการประเมินสมรรถนะการอบแห้ง 4) ประเมินคุณภาพข้าวจากร้อยละข้าวต้นและทำการเปรียบเทียบค่าคุณภาพข้าวกับชุดควบคุมที่ผ่านการลดความชื้นด้วยวิธีการที่ใหม่

**3 ผลและวิจารณ์**

ผลการศึกษาพบว่าการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียนแบบไม่ติดตั้งไซโคลนมีค่าการใช้พลังงานจำเพาะค่าที่สุดที่อัตราการป้อนข้าวเปลือกที่ 6.35 kg min<sup>-1</sup> ดังแสดงใน Figure 2 เนื่องจากที่อัตราการป้อนเพิ่มขึ้นทำให้ต้องใช้พลังงานในการเป่าลมเพื่อพาข้าวเปลือกไหลขึ้นไปยังถังพักเพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลให้ใช้พลังงานเพิ่มขึ้น ส่วนที่อัตราการป้อนที่ 4.1 kg min<sup>-1</sup> ปริมาณการไหลข้าวเปลือกในคอลัมน์อบแห้งน้อยลงส่งผลให้ค่าความร้อนที่สามารถพาความชื้นออกจากข้าวเปลือกเหลือทิ้งในอากาศทำให้ใช้จำนวนรอบในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ส่วนผลของการอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลนพบว่ามีพฤติกรรมแบบเดียวกับการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลน

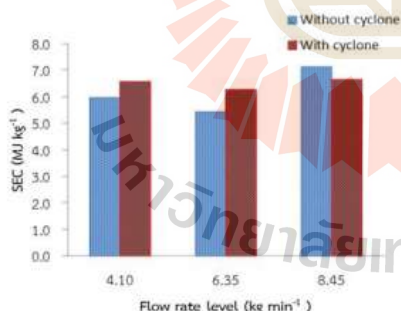


Figure 2 Comparison of specific energy consumption by cyclone and without cyclone installation.

เมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้งในรูปของอัตราการระเหยน้ำดังแสดงใน Figure 3 พบว่าการอบแห้งที่ไม่ติดตั้งไซโคลนให้อัตราการระเหยน้ำสูงกว่าการอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลนเพราะหลังกระบวนการอบแห้งในคอลัมน์อบแห้งแล้วอากาศร้อนไหลเข้าไปในถังพักข้าวเปลือกช่วยระเหยความชื้นของข้าวเปลือกในถังพัก

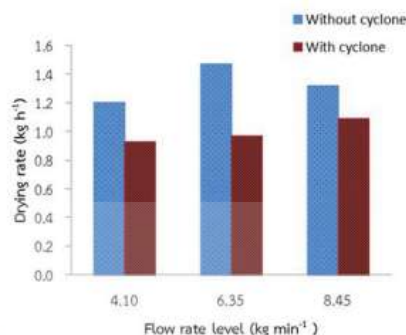


Figure 3 Comparison of drying rate by cyclone and without cyclone installation.

จากลักษณะของไซโคลนที่สามารถนำอากาศอบแห้งกลับมาใช้ใหม่จึงเลือกสภาวะที่อัตราการอบแห้งสูงสุดคือที่อัตราการป้อนข้าวเปลือกที่ 8.45 kg min<sup>-1</sup> ของสภาวะติดตั้งไซโคลนมาทดสอบการอบแห้งแบบการนำอากาศอบแห้งกลับมาผสมอากาศขาเข้าที่อัตราส่วน 1:3 2:3 และไม่นำอากาศมาผสมเนื่องจากมีการเพิ่มข้อต่อของอากาศทางเข้า จากผลการทดลองพบว่าค่าความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะของการอบแห้งที่นำอากาศกลับมาใช้ใหม่มีค่าการใช้พลังงานที่สูงขึ้นดังแสดงใน Figure 4 เนื่องจากอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่มีความชื้นสูงทำให้ลดความสามารถในการระเหยน้ำออกจากข้าวเปลือกในคอลัมน์ลดลงทำให้จำนวนรอบในการอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาพร้อมกับผลของอัตราการอบแห้งที่ลดลง

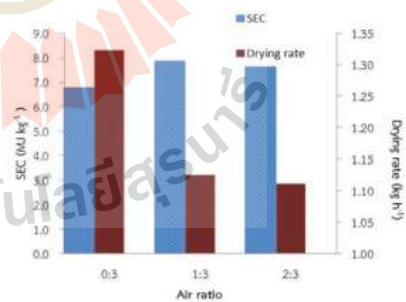


Figure 4 Comparison of specific energy consumption and drying rate by reusable air drying.

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 19 วันที่ 26-27 เมษายน 2561

จากนั้นทำการประเมินคุณภาพข้าวด้วยปริมาณร้อยละข้าวต้นดัง Table 1 พบว่าผลของการอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลนและไม่ติดตั้งไซโคลนทุกอัตราการไหลเทียบกับสภาวะควบคุมที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% การอบแห้งแบบใช้ลมหมุนเวียนที่อัตราส่วนของอากาศ 0:3 1:3 และ 2:3 กับชุดควบคุมดัง Table 2 พบว่าการติดท่อนำอากาศร้อนกลับมาใช้ใหม่ที่อัตราส่วนต่าง ๆ กันไม่ส่งผลต่อร้อยละข้าวต้น แต่ส่งผลให้ค่าร้อยละข้าวต้นแตกต่างกับชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียนที่พัฒนาขึ้นจึงไม่จำเป็นต้องติดตั้งไซโคลนและติดตั้งท่อนำอากาศกลับมาใช้ใหม่เนื่องจากการอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลนสามารถทิ้งลมร้อนที่ถึงพักเพื่อให้ความร้อนข้าวเปลือกขณะเข้าคอลัมน์อบแห้งได้

Table 1 Comparison of head rice yield by control, cyclone and without cyclone installation.

Condition	Paddy feed rate (kg min <sup>-1</sup> )	Head rice yeild (%)
Without cyclone	4.1	30.84 <sup>a</sup>
	6.35	35.48 <sup>a</sup>
	8.45	36.84 <sup>a</sup>
With cyclone	4.1	33.91 <sup>a</sup>
	6.35	31.27 <sup>a</sup>
	8.45	27.53 <sup>a</sup>
Control		35.52 <sup>a</sup>

a=Different letters in the same column indicate significant differences (p<0.05).

Table 2 Comparison of head rice yield by control with reusable air drying.

Condition	Air ratio	Head rice yeild (%)
reusable air drying	0:3	41.58 <sup>b</sup>
	1:3	40.68 <sup>b</sup>
	2:3	40.86 <sup>b</sup>
Control		49.89 <sup>a</sup>

a=Different letters in the same column indicate significant differences (p<0.05)

#### 4 สรุป

จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียนที่ใช้อบแห้งข้าวเปลือกคือสภาวะที่ไม่ติดตั้งไซโคลนที่อัตราการป้อนข้าวเปลือกที่ 6.35 kg min<sup>-1</sup> มีค่าการใช้พลังงาน SEC ต่ำสุด เท่ากับ 5.44 MJ kg<sub>water</sub><sup>-1</sup> และให้อัตราการอบแห้งสูงสุดที่ 1.47 kg h<sup>-1</sup> และให้ค่าคุณภาพร้อยละข้าวต้นหลังกระบวนการจัดสีไม่แตกต่างจากชุดควบคุม

#### 5 กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนการวิจัย

#### 6 เอกสารอ้างอิง

- ฉัตรชัย นิยมมล. 2555. ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ท่ออบแห้งชนิดท่อเกลียว. วารสารวิจัย มช. 17(1), 97-109.
- ฐานิตย์ เมธิยานนท์. 2544. การอบแห้งเมล็ดพืชโดยเทคนิคสเปาเต็คเบต. วิทยานิพนธ์ศึกษิตบัณฑิต. กรุงเทพมหานคร: บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- บุญมี ศิริ, สุภัญญา วงศ์พรชัย, ศักดิ์ดา จงแก้ววัฒนา, ศิริพร ศรีล้อม. 2546. ผลการลดความชื้น และระยะเวลาการเก็บรักษาต่อคุณภาพการขัดสีของข้าวหอมมะลิ 105. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร.
- พิรสิทธิ์ ทวยนาค, มณฑล ชูโซนาค, มุस्ताฟา ยะกา, ประชาบุญยานิชกุล. 2557. การทบทวนพัฒนาการของการลดความชื้นข้าวเปลือกในทางอุตสาหกรรม. วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 9(1), 68-74
- ภาณุวัฒน์ ทรัพย์ปรุง, อนุรัลค์ ครองทรัพย์, ประสิทธิ์ โสภา. 2556. การพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบถังหมุนประหยัดพลังงานโดยระบบนำอากาศร้อนเวียนกลับมาใช้ใหม่. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร. ฉบับพิเศษ, 201-207.
- วิบูลย์ เทเพนทร์. 2561. การวัดความชื้นเมล็ดพืช. สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร. แหล่งข้อมูล : <http://www.doa.go.th/aeri/files/KW/moisture%202.pdf> เข้าถึงเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2561.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2561. สถานการณ์การผลิตและการตลาด. แหล่งข้อมูล : [http://www.oae.go.th/ewt\\_news.php?nid=23870&filename=new](http://www.oae.go.th/ewt_news.php?nid=23870&filename=new) เข้าถึงเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2561.
- Sharma, G. P., Prasad, S. 2006. Specific energy consumption in microwave drying of garlic cloves. Energy, 31(12), 1921-1926.



***Performance Evaluation of Paddy Rice Pneumatic Dryer***

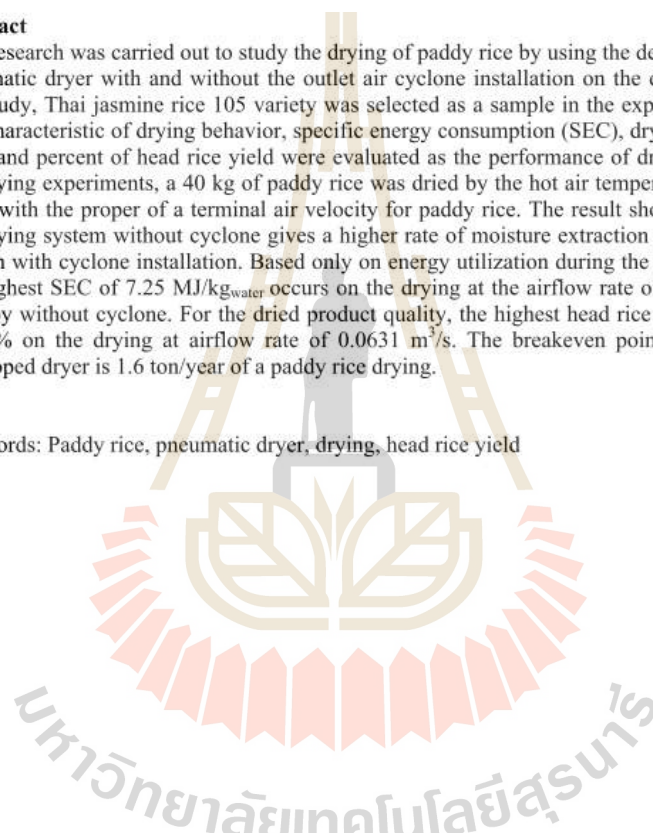
Krawee Treeamnuk, Suranaree University of Technology, Thailand  
Tawarat Treeamnuk, Suranaree University of Technology, Thailand  
Jittrarat Jokkew, Suranaree University of Technology, Thailand  
Kattisak Jaito, Suranaree University of Technology, Thailand

The Asian Conference on Sustainability, Energy & the Environment 2017  
Official Conference Proceedings

**Abstract**

This research was carried out to study the drying of paddy rice by using the developed pneumatic dryer with and without the outlet air cyclone installation on the dryer. In this study, Thai jasmine rice 105 variety was selected as a sample in the experiment. The characteristic of drying behavior, specific energy consumption (SEC), drying rate (DR) and percent of head rice yield were evaluated as the performance of dryer. For the drying experiments, a 40 kg of paddy rice was dried by the hot air temperature of 80°C with the proper of a terminal air velocity for paddy rice. The result shown that the drying system without cyclone gives a higher rate of moisture extraction than the system with cyclone installation. Based only on energy utilization during the process, the highest SEC of 7.25 MJ/kg<sub>water</sub> occurs on the drying at the airflow rate of 0.0512 m<sup>3</sup>/s by without cyclone. For the dried product quality, the highest head rice yield of 36.84% on the drying at airflow rate of 0.0631 m<sup>3</sup>/s. The breakeven point of the developed dryer is 1.6 ton/year of a paddy rice drying.

Keywords: Paddy rice, pneumatic dryer, drying, head rice yield

**iafor**

The International Academic Forum  
[www.iafor.org](http://www.iafor.org)

## Introduction

Rice is a kind of grain, which is a staple food in Thailand and Asia such as China, Japan and Malaysia. After the paddy harvesting, the moisture content (MC) in a paddy rice is height especially in a rainy season and it can cause the low quality of rice after the milling process. Therefore, the moisture reduction in paddy rice is a very important post-harvest process and the right moisture content of paddy rice for a long storage life is around 14%db (dry basis) [1]. At this moisture, the rice after milled are less in grain damage and high in head rice yield percentage. There are many methods to reduce the moisture of paddy. In Thailand, the traditional way is sun drying. This naturally method is easy and save the cost of heat energy. However, this way has a localization because the problems of labor and drying area intensive, long drying period, seasons and cannot control the final moisture content of the paddy rice. Another method to reduce the moisture of paddy rice is using of the dryer. It is a favorite method because it can operate in year round, faster than sun drying and able to control the desired paddy moisture. Notwithstanding the advantage of the dryer, the energy consume, drying capacity and the rice quality is a major problems in the moisture reduction by the dryer. There are a lot of currently research about how to reduce the moisture of paddy and also develop the system of dryer machines in order to use low energy consume but give a high capacity such as developing solar air heaters by modifying the roof of building [2], using stream dryers [3], designing inclined bed dryers [4] and using spouted bed [5].

The well known artificial drying for the paddy rice are LSU and fluidized bed dryer. They can reduce moisture by the less time, high capacity and have a well moisture distribution in paddy. There have been attempts to develop LSU and fluidized bed dryers with other drying techniques such as using Far-infrared (FIR) [6] to reduce moisture and using hot air and superheated steam for drying system [7]. However, both LSU and fluidized bed still use relatively high energy when compared to other drying systems. Therefore, pneumatic dryers are the interest technique to researcher because the dryers can be operated with low hot air temperature and have low initial cost.

Accordingly, this research aim to evaluate the performance of pneumatic dryer, quality of milled rice after drying and discover the appropriate operating condition of the dryer. In the future, the result of this study will use as a guideline for the application of efficiently drying energy.

## Experimental detail and methods

The developed pneumatic dryer shown in figure 1. The paddy rice was contained within the bin (No.2) with a dimension of 500 mm (W) x 400 mm (L) x 800 mm (H). The drying process begins by the feed auger (No.5) at the bottom of the bin conveyed the paddy rice to the drying column (No.1) that was made from an acrylic cylinder with a diameter of 76 mm and 1,000 mm in height. At the same time, the 80°C of hot air produced by 3 kW of electric heater (No.3) charged to the drying column (No. 1) by the 3 HP of air blower and carried the paddy grains by the terminal velocity of the air. The moisture from paddy grain was removed by the hot air during paddy grain-hot air mixing and blow pass the drying column. Finally, the mixer flow into the

cyclone (No.6) to separate the dried paddy and send it to the bin. This process continue circulatory runs until the paddy rice was dried.

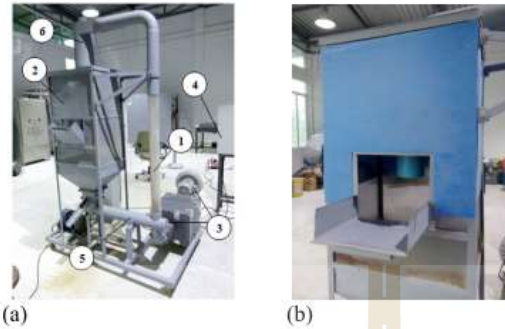


Figure 1. (a) The developed pneumatic dryer (b) the paddy bin wall.

Testing in this experiment, Thai jasmine rice 105 variety was used to be the samples. For the drying experiment, a 40 kg of paddy was dried at 80°C of hot air drying temperature. The air volume flow rate and their related paddy feed rate were varied to 3 levels (set by the frequency on the blower motor inverter). The effect of cyclone installation are compared investigation. The drying behavior, specific energy consumption (SEC) by eq.1 (in MJ/kg<sub>water</sub>), drying rate (DR) by eq.2 (in kg<sub>water</sub>/hr) and percent of head rice yield (%) by eq.3 were evaluated as the performance.

$$SEC = \frac{Q_A}{(W_i - W_f)} \quad (1)$$

Where SEC = Specific Energy Consumption (MJ/kg<sub>water</sub>)  
 $Q_A$  = Apply electric energy (MJ)  
 $W_i$  = Initial weight of paddy (kg)  
 $W_f$  = Final weight of paddy (kg)

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

Where DR = Drying Rate (kg<sub>water</sub>/hr)  
 hr = Drying time (hr)

$$\text{Percent of head rice yield} = \frac{\text{weight of only full grain rice (kg)}}{\text{weight of paddy rice (kg)}} \times 100 \quad (3)$$

## Results and Discussions

### *The drying behavior.*

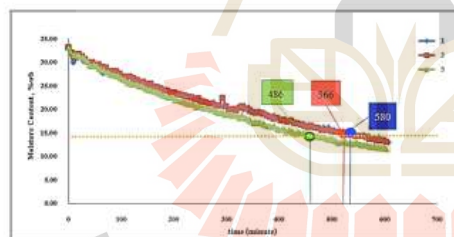
At the airflow rate of 0.0512 m<sup>3</sup>/s, the system without cyclone uses a 377 minutes (around 6 hours) in the drying period. It is the fastest times in the moisture reducing from initial paddy rice to the finishing of moisture at around 14%wb (Table 1.). For

the system with cyclone, the results showed that the airflow rate of  $0.0631 \text{ m}^3/\text{s}$  gives a fastest time in the reducing of moisture content of paddy rice. It uses a 486 minutes (around 8 hours) in drying time (Table 1.). Therefore, the drying by pneumatic dryer without the cyclone installed on the system can reduce the moisture of paddy rice faster than the system with cyclone.

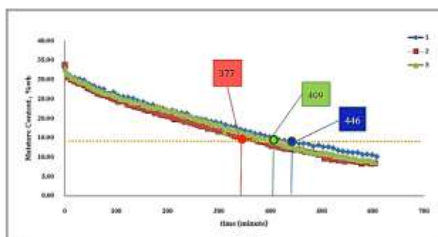
Table 1. The result of a pneumatic dryer without cyclone.

Flow rate level	Air flow rate ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Paddy feed rate ( $\text{kg}/\text{min}$ )	Condition	Initial paddy MC (%wb)	Final paddy MC (%wb)	Drying time (min)
1	0.0451	4.10	With cyclone	$32.89 \pm 0.13$	$13.88 \pm 5.19$	579.50
			Without cyclone	$32.96 \pm 0.39$	$13.96 \pm 6.28$	446.50
2	0.0512	6.35	With cyclone	$33.21 \pm 0.07$	$14.00 \pm 5.47$	565.50
			Without cyclone	$33.68 \pm 0.06$	$14.06 \pm 6.60$	377.00
3	0.0631	8.45	With cyclone	$33.09 \pm 0.65$	$14.00 \pm 5.91$	486.00
			Without cyclone	$32.88 \pm 0.03$	$13.86 \pm 6.61$	409.50

From both conditions, it was coincided that high airflow rates can well reduce moisture content of paddy rice because it generates the turbulence flow in the drying column. This situation leads the paddy rice well diffused within the hot air too and cause the high moisture extraction together and the drying behavior were shown in figure 2.



(a)



(b)

Figure 2. Behavior of paddy drying system (a) with cyclone (b) without cyclone

*Specific energy consumption*

In Figure 3, the results of the specific energy consumption of pneumatic dryer without cyclone showed that the airflow rate of 0.0512 m<sup>3</sup>/s yielded the best specific energy consumption (7.25 MJ / kg<sub>water</sub>). For the dryer system with cyclone, it was found that the airflow rate of 0.0631 m<sup>3</sup>/s have the best specific energy consumption (10.41 MJ/kg<sub>water</sub>).

*Drying Rates*

The drying rates of the pneumatic dryer without cyclone showed that the airflow rate of 0.0512 m<sup>3</sup>/s generated the best drying rate (1.10 kg<sub>water</sub>/hr) (Figure 3). For the dryer system with cyclone, it was found that the airflow rate of 0.0631 m<sup>3</sup>/s yielded better drying rate (0.82 kg<sub>water</sub>/hr).

From the results, the pneumatic dryer without cyclone provided the better drying rates than those of the dryer with cyclone. Because after the drying process in the drying column, it can make a secondary drying on the surface of paddy rice in the bin during the hot air from drying column was released to the bin with paddy rice.

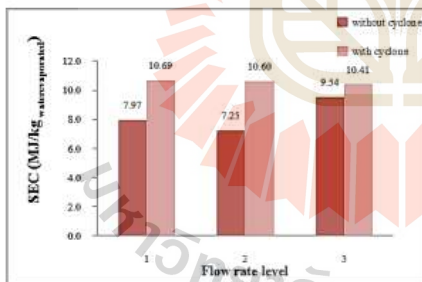


Figure 2. Comparison of specific energy consumption by cyclone and without cyclone installation.

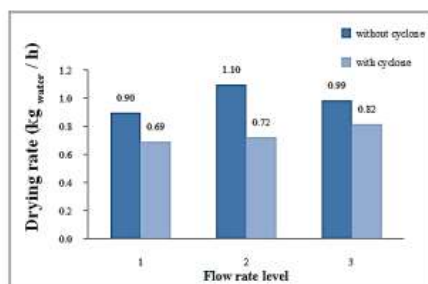


Figure 3. Comparison of drying rate by cyclone and without cyclone installation.

#### Head rice yield

The percent of head rice yield was used as a quality index of dried paddy rice (Figure 4). However, because the long experiment time (30 days in overall experiments), the quality of paddy rice sample must decrease and take an effect to the percent of head rice yield too. For the system with the cyclone, the higher airflow rate level might reduce the head rice yield of paddy because the high speed of airflow can make more damage on the paddy too. Especially when the paddy rice hits to the cyclone in the system with cyclone. It was found that the airflow rate of  $0.0451 \text{ m}^3/\text{s}$  yielded better head rice yield percentage of 33.91%.

For the system without cyclone, the higher airflow rate level might increase the head rice yield of paddy because the shortest time in drying and it has no mechanical damage by the cyclone and the airflow rate of  $0.0631 \text{ m}^3/\text{s}$  generated the best head rice yield of 36.84%.

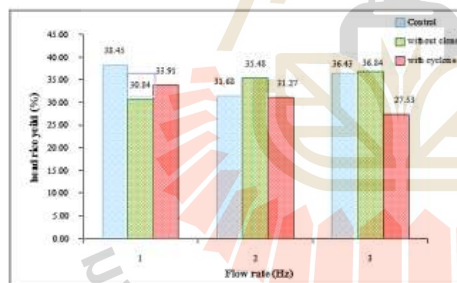


Figure 4. Comparison of head rice yield by sun drying, cyclone and without cyclone installation.

#### Conclusion

The drying system without cyclone gives a higher rate of moisture extraction than the system with cyclone installation. Based only on energy utilization during the process, the highest SEC of  $7.25 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$  occurs on the drying at the airflow rate of  $0.0512 \text{ m}^3/\text{s}$  by without cyclone. For the dried product quality, the highest head rice yield of

36.84% on the drying at airflow rate of  $0.0631 \text{ m}^3/\text{s}$ . The breakeven point of the developed dryer is 1.6 ton/year of a paddy rice drying.

#### **Acknowledgement**

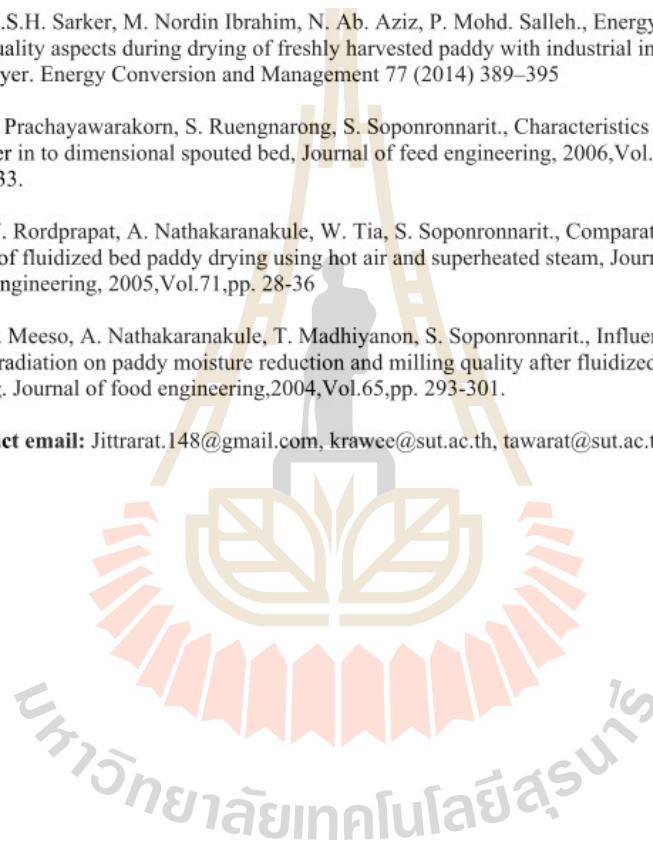
This research was supported by School of Mechanical Engineering and School of Agricultural and Food Engineering Suranaree University of Technology.



### References

- [1] Jame E. Wimberly. Drying. Technical Handbook for the paddy Rice Postharvest Industry in Developing Countries. International Rice Reseacher Institute. Los Banos, Laguna, Philippines, 1983.
- [2] Somchaet Soponronnarit, Solar drying in Thailand. Energy for sustainable development, 1995, Vol.2, pp. 19-25.
- [3] Chatchai Nimmol and Sakamon Devahastin, Evaluation of performance and energy consumption of an impinging stream dryer fer paddy., Applied Thermal Engineering 30 (2010) 2204e2212
- [4] M.S.H. Sarker, M. Nordin Ibrahim, N. Ab. Aziz, P. Mohd. Salleh., Energy and rice quality aspects during drying of freshly harvested paddy with industrial inclined bed dryer. Energy Conversion and Management 77 (2014) 389–395
- [5] S. Prachayawarakorn, S. Ruengnarong, S. Soponronnarit., Characteristics of heat transfer in to dimensional spouted bed, Journal of feed engineering, 2006, Vol.76, pp. 327-333.
- [6] W. Rordprapat, A. Nathakaranakule, W. Tia, S. Soponronnarit., Comparative study of fluidized bed paddy drying using hot air and superheated steam, Journal of food engineering, 2005, Vol.71, pp. 28-36
- [7] N. Meeso, A. Nathakaranakule, T. Madhiyanon, S. Soponronnarit., Influence of FIR irradiation on paddy moisture reduction and milling quality after fluidized bed drying. Journal of food engineering, 2004, Vol.65, pp. 293-301.

**Contact email:** Jittrarat.148@gmail.com, krawee@sut.ac.th, tawarat@sut.ac.th,





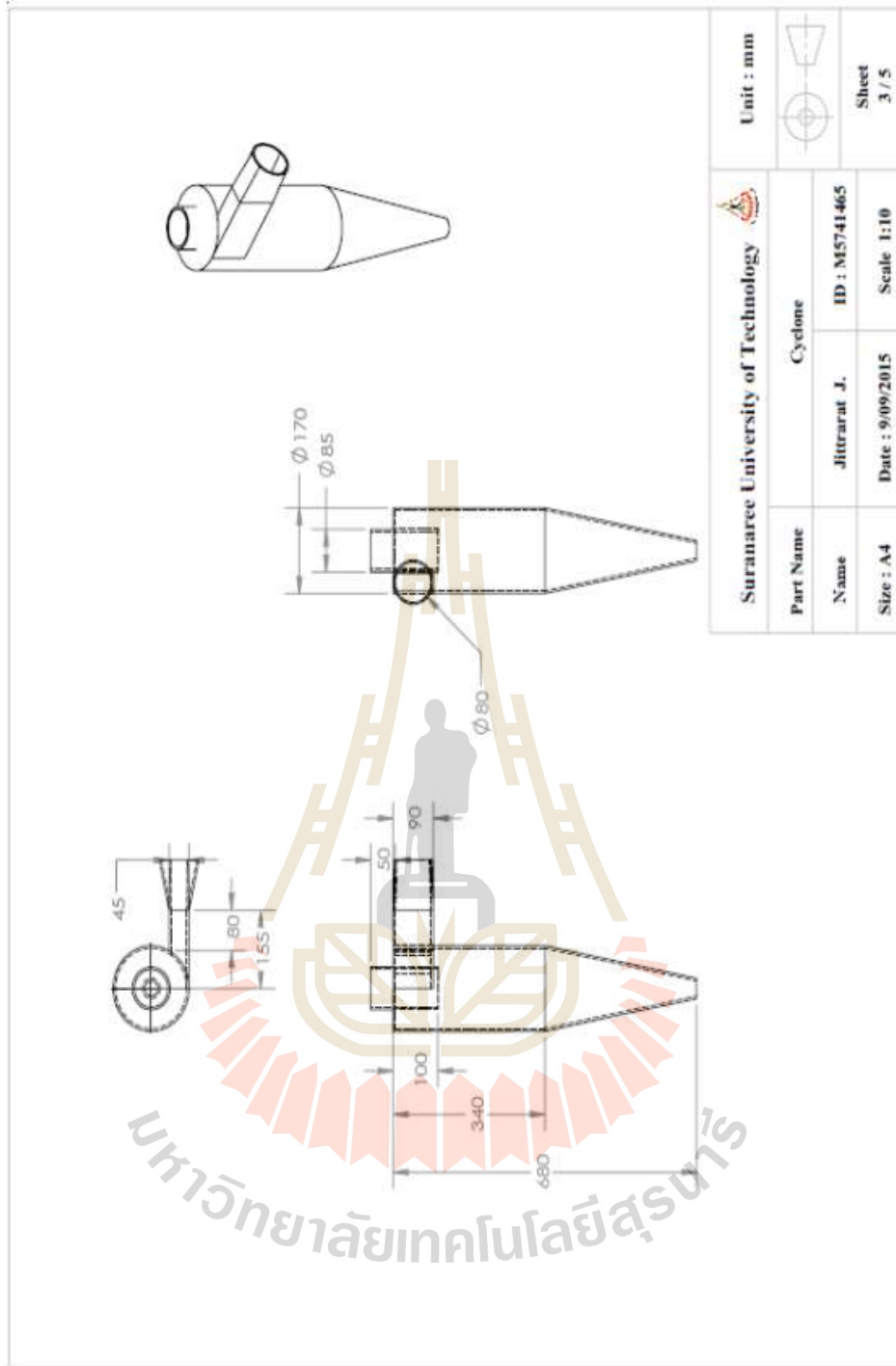
ภาคผนวก ข  
แบบเครื่องอบแห้ง

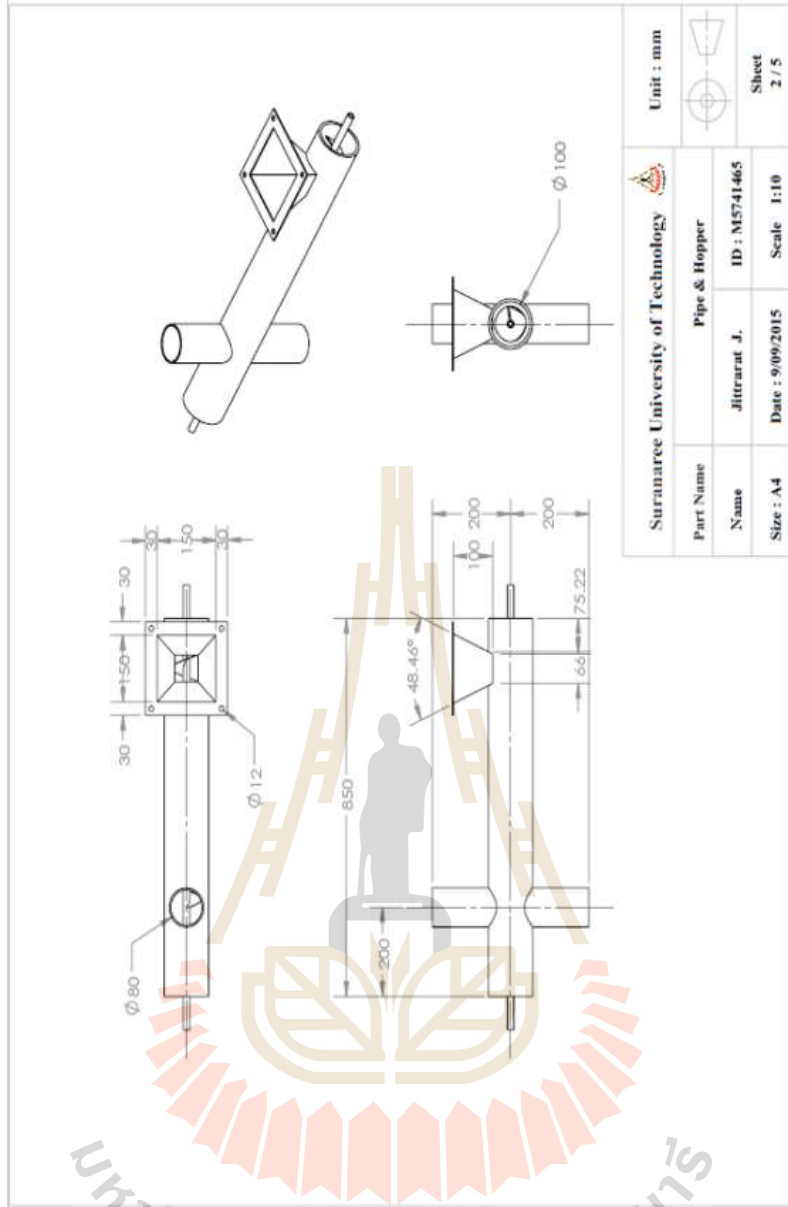


ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	Temp. Controller	1
2	Paddy's Bin	1
3	FEEDER&HOPPER	1
4	Acrylic pipe	1
5	Blower	1
6	Heater	1

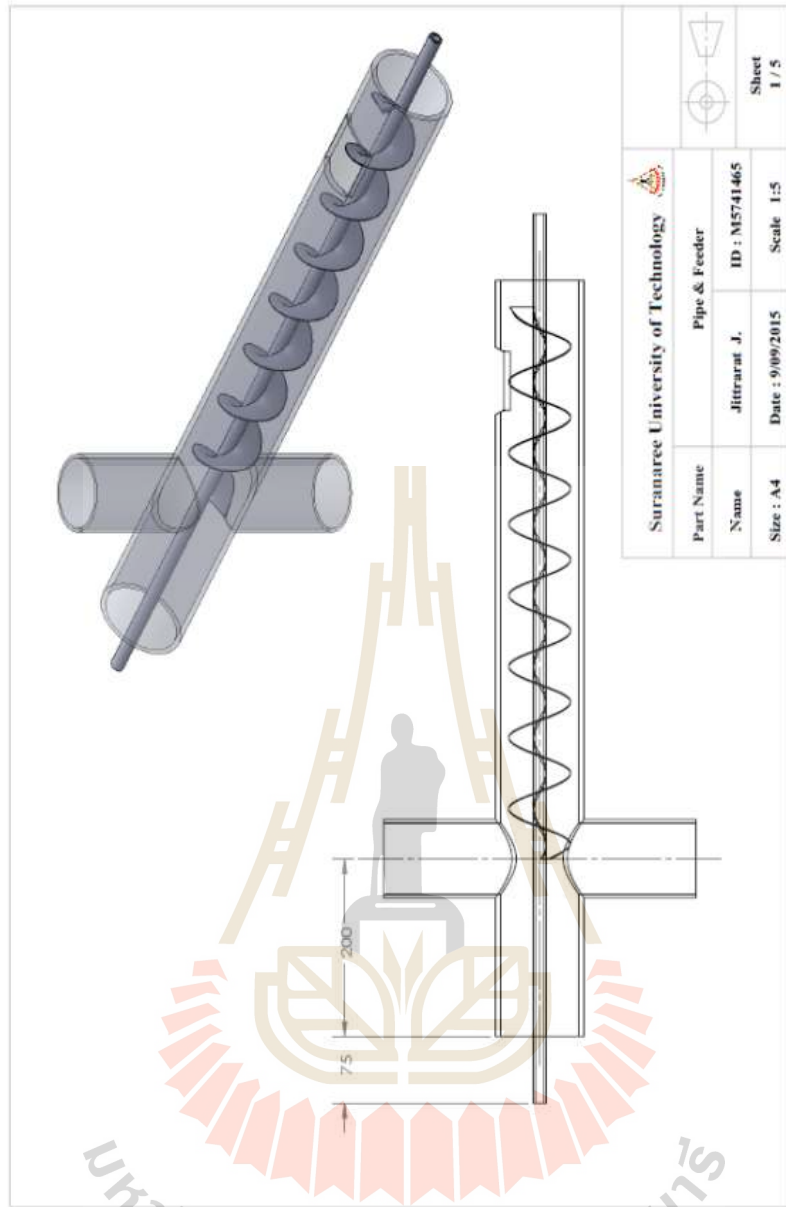
Suranaree University of Technology		Unit : mm	
Part Name	Assembly		
Name	Jittrarat J.	ID : M5741465	
Size : A4	Date : 9/09/2015	Scale :	Sheet 5 / 5







มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



### 1. การคำนวณหาค่า SEC

น้ำหนักข้าวเปลือกก่อนการอบแห้ง	40 kg
น้ำหนักข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง	31.16 kg
เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง	445 นาที
ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้จากมิเตอร์	13.50 kWh
กระแสไฟฟ้า 3 เฟสสำหรับมอเตอร์เกียร์วลำเลียง 0.3 A	

จากสมการที่ (5)

$$\begin{aligned}
 \text{SEC} &= \frac{E_{1\Phi} + E_{3\Phi}}{m_{\text{evap}}} \\
 &= \frac{3.6(13.50) + \sqrt{3 \times 380 \times 0.8 \times 0.3 \times 445 \times 60 \times 10^{-6}}}{40 - 31.16} \\
 &= \frac{48.6 + 4.22}{8.84} \\
 &= 5.97 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}
 \end{aligned}$$

### 2. การคำนวณหาค่าอัตราการอบแห้ง

จากสมการ (6)

$$\text{DR} = \frac{m_{\text{evap}}}{t}$$

ใช้ข้อมูลเดียวกับข้อ 1 แทนลงในสมการ จะได้

$$\text{DR} = \frac{8.84}{445 / 60} = 1.19 \text{ kg/h}$$



### ประวัตินักวิจัย

1. ชื่อ  
 (ภาษาไทย) นางเทวรัตน์ ตริอำนาจรรค  
 (ภาษาอังกฤษ) Ms. Tawarat Treamnuk
2. ตำแหน่งปัจจุบัน  
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร
3. หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้  
 สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
 111 ถ. มหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 300000  
 โทร. 044-224583  
 E-mail: tawarat@sut.ac.th
4. ประวัติการศึกษา  
 วศ.บ (วิศวกรรมเกษตร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2542  
 วศ.ม (วิศวกรรมเกษตร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2545  
 วศ.ด (วิศวกรรมเกษตร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2551
5. ผลงานวิชาการ / ผลงานวิจัย
  - 1) บัณฑิต จริโมภาส, ชัยพร ทองปัญญา, เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, นฤมล บุญกระจ่าง และ มาลัย ไกรทอง. 2543. การศึกษาการยวบตัวของส้มเขียวหวานในบรรจุภัณฑ์ขายส่งระหว่างการขนส่งทางบก. วารสารวิชาการเกษตร, ปีที่ 18 (2), หน้า 137-147.
  - 2) สมยศ เชิญอักษร และ เทวรัตน์ ทิพย์วิมล. 2546. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งระบบป้อนความร้อน. รายงานการประชุมวิชาการประจำปี 2546 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. หน้า 367-374.
  - 3) บัณฑิต จริโมภาส และ เทวรัตน์ ทิพย์วิมล. 2547. ภาพนะสัณฐานอากาศสำหรับการทดสอบรอยร้าวของบรรจุภัณฑ์อ่อนตัว .2547. บทความวิจัย เสนอในการประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 1 จัดโดย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม วันที่ 7-9 ธันวาคม.
  - 4) เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และ สมยศ เชิญอักษร. 2548. การอบแห้งพริกด้วยระบบลมร้อนและไมโครเวฟ. รายงานการประชุมวิชาการประจำปี 2548 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. หน้า 113-114.

- 5) เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และ สมยศ เชิญอักษร. 2549. การอบสมุนไพรด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง. รายงานการประชุมวิชาการประจำปี 2549 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. หน้า 112.
- 6) เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และ สมยศ เชิญอักษร. 2550. การอบแห้งพริกชี้ฟ้าด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ. วารสารวิชาการเกษตร. ปีที่ 25 (1), หน้า 46-57.
- 7) เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, สมยศ เชิญอักษร, ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์, อนุพันธ์ เทิดวงศ์วรกุล และเชาว์ อินประสิทธิ์. 2550. การอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. ปีที่ 13 (1), หน้า 23-29.
- 8) เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และสมยศ เชิญอักษร. 2251. ความชื้นสมดุลและจลศาสตร์การอบแห้งของไพล. รายงานการประชุมวิชาการประจำปี 2551 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. หน้า 86.
- 9) เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และสมยศ เชิญอักษร. 2551. การอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ: การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. ปีที่ 39 ฉบับที่ 3 (พิเศษ), หน้า 164-167.
- 10) ธนรัช มุขพันธ์, เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, พรรษา ลิบลับ และวีรชัย อัจหาญ. 2552. การอบแห้งมันเส้นด้วยเครื่องอบแห้งหมุนแบบกะ. รายงานการประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 6., หน้า 582-588.
- 11) เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, เกียรติศักดิ์ ใจโต, ธรรมรัตน์ ขาวสำอางค์ และกระวี ตรีอำนาจ. 2554. เครื่องแยกแกลบจากข้างกลิ้งซ้อมมือแบบประหยัด. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร ปีที่ 42 ฉบับที่ 3 (พิเศษ): 517-520.
- 12) พยุงศักดิ์ จุลยุเสน, คธา วาทกิจ, พรรษา ลิบลับ, เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และวีรชัย อัจหาญ. 2554. การออกแบบและทดสอบเครื่องทำความสะอาดมันสำปะหลัง. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร ปีที่ 42 ฉบับที่ 3 (พิเศษ): 501-504.
- 13) ปัทมา แก้วธรรม, วันพิทักษ์ คงสนุน, กระวี ตรีอำนาจ และเทวรัตน์ ทิพย์วิมล. 2554. การอบแห้งสับปะรดแช่อบด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน-ไมโครเวฟ. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร ปีที่ 42 ฉบับที่ 3 (พิเศษ): 493-496.
- 14) เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และสมยศ เชิญอักษร. 2554. ความชื้นสมดุลและคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของไพล. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร ปีที่ 42 ฉบับที่ 1 (พิเศษ): 139-142.
- 15) เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และวีรชัย อัจหาญ. 2554. การอบแห้งแครอทด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการครั้งที่ 12 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, 31 มีนาคม – 1 เมษายน 2554 ณ ชลจันทร์ พัทยา รีสอร์ท จังหวัดชลบุรี.

- 16) วิเชียร ดวงสีเสน, เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และวีรัชย์ ออาจหาญ. 2555. การศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน. การประชุมสัมมนาวิชาการครั้งที่ 13 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, 4-5 เมษายน 2555 ณ โรงแรมอิมพีเรียลแม่ปิง จังหวัดเชียงใหม่, หน้า 660-666.
- 17) เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, ปรีศนา แสงรุ่ง ปัตตะนี สุดตะนะ. 2555. สมบัติทางกายภาพและความร้อนของข้าวขาวดอกมะลิ 105. การประชุมสัมมนาวิชาการครั้งที่ 13 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, 4-5 เมษายน 2555 ณ โรงแรมอิมพีเรียลแม่ปิงจังหวัดเชียงใหม่, หน้า 526-531.
- 18) ศักยะ สมบัติไพรวัน, เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และกระวี ตรีอำนาจ. 2555. การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้ภายหลังการเก็บเกี่ยว. การประชุมสัมมนาวิชาการครั้งที่ 13 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, 4-5 เมษายน 2555 ณ โรงแรมอิมพีเรียลแม่ปิงจังหวัดเชียงใหม่, หน้า 518-525.
- 19) เทวรัตน์ ตรีอำนาจ, เกียรติศักดิ์ ใจโต, วีรัชย์ ออาจหาญ และกระวี ตรีอำนาจ. 2555. การอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งหมุน. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร ปีที่ 43 ฉบับที่ 3 (พิเศษ): 135-138.
- 20) กระวี ตรีอำนาจ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ. 2556. การพัฒนาและทดสอบเครื่องรีดและกรีดยเส้นฝักตบชาสำหรับงานหัตถกรรม. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, ปีที่ 19 (1), หน้า 25-30.
- 21) วิเชียร ดวงสีเสน เทวรัตน์ ตรีอำนาจ นัยวัฒน์ สุขทั้ง วีรัชย์ ออาจหาญ. 2556. การศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, ปีที่ 19 (1), หน้า 7-13.
- 22) เทวรัตน์ ตรีอำนาจ อธิพรรณ ชันธเสน และ กระวี ตรีอำนาจ. 2556. เครื่องคัดขนาดกลีบกระเทียม. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 44:3 (พิเศษ): 466-469
- 23) นาฏชนก ปรางปรุ วิเชียร ดวงสีเสน เทวรัตน์ ตรีอำนาจ และเกียรติศักดิ์ ใจโต. 2556. การทำแห้งกากมันสำปะหลังด้วยพลังงานแสงอาทิตย์, ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 14, หน้า 382-386, สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 1-4 เมษายน 2556, ณ โรงแรมหัวหินแกรนด์ แอนด์ พลาซ่า จ. ประจวบคีรีขันธ์.
- 24) เบญจวรรณ วานมนตรี เทวรัตน์ ตรีอำนาจ ภัทรา จิตกุล และวุฒิชนา สิงห์คง. 2556. การศึกษาการอบแห้งจักข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูปด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง, ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 14, หน้า 520-523, สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 1-4 เมษายน 2556, ณ โรงแรมหัวหินแกรนด์ แอนด์ พลาซ่า จ. ประจวบคีรีขันธ์.

- 25) ธนากร แนวกลาง เทวรัตน์ ตริอำนาจรรค วีรชัย อัจหาญ และกระวี ตริอำนาจรรค. 2556. การปกป้องผลแอปเปิ้ลด้วยวัสดุกันกระแทกจากฟางข้าว, ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 14, หน้า 680-684, สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 1-4 เมษายน 2556, ณ โรงแรมหัวหินแกรนด์ แอนด์ พลาซ่า จ. ประจวบคีรีขันธ์.
- 26) เกียรติศักดิ์ ใจโต เทวรัตน์ ตริอำนาจรรค และกระวี ตริอำนาจรรค. 2556. เครื่องรีดและกรีดผักตบชวา, ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 14, หน้า 266-270, สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 1-4 เมษายน 2556, ณ โรงแรมหัวหินแกรนด์ แอนด์ พลาซ่า จ. ประจวบคีรีขันธ์.
- 27) กระวี ตริอำนาจรรค, สถาพร แต่งสี, วรุฒ เนตรสว่าง และเทวรัตน์ ตริอำนาจรรค. 2557. การทดสอบและประเมินผลเครื่องคว้านลำไยกึ่งอัตโนมัติ. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, 45(3/1)(พิเศษ), หน้า 317-320.
- 28) เทวรัตน์ ตริอำนาจรรค, ธนากร แนวกลาง, พยงค์ ลบแจ้ง, วรณวิษา ไยงเหลือ้ม และกระวี ตริอำนาจรรค. 2557. การศึกษาความสามารถในการปกป้องผลแอปเปิ้ลของวัสดุกันกระแทกจากกระดากฟางข้าว. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, 45(3/1)(พิเศษ), หน้า 369-372.
- 29) เกียรติศักดิ์ ใจโต, เทวรัตน์ ตริอำนาจรรค, นาฏชนก ปรางปรุ, เบญจวรรณ วานมนตรี, และกระวี ตริอำนาจรรค. 2557. ผลกระทบของค่าความชื้นต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและความร้อนของเนื้อมะพร้าวชูด. ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 15 (หน้า 557-561), สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 2-4 เมษายน 2557, ณ โรงแรมกรุงศรีริเวอร์ จ.อยุธยา.
- 30) เบญจวรรณ วานมนตรี, เทวรัตน์ ตริอำนาจรรค, เกียรติศักดิ์ ใจโต, และนาฏชนก ปรางปรุ. 2557. อิทธิพลของสภาวะไฮโดรสแตติกต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของไข่เป็ด. ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 15 (หน้า 573-578), สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 2-4 เมษายน 2557, ณ โรงแรมกรุงศรีริเวอร์ จ.อยุธยา.
- 31) เทวรัตน์ ตริอำนาจรรค ธนากร แนวกลาง และกระวี ตริอำนาจรรค. 2558. ความสามารถในการปกป้องผลแอปเปิ้ลของวัสดุกันกระแทกจากกระดากฟางข้าวภายใต้สภาวะการสั่นสะเทือนจำลอง. วารสาร วิทยาศาสตร์เกษตร 46:3/1 (พิเศษ) : 473-476
- 32) เกียรติศักดิ์ ใจโต เทวรัตน์ ตริอำนาจรรค และกระวี ตริอำนาจรรค. 2558. ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อการอบแห้งมะพร้าวชูดด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบด. ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตร แห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 16. หน้า 505-508. สมาคม

วิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 17-19 มีนาคม 2558. ณ ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทคบางนา, กรุงเทพมหานคร

- 33) ธนากร แนวกลาง, เทวรัตน์ ตรีอำนรรค , วีรชัย อัจหาญ และ กระวี ตรีอำนรรค . 2558. การทดสอบความสามารถในการปกป้องผลแอปเปิ้ลด้วยกระดาษจากฟางข้าวด้วย วิธีการทดสอบแบบ ballistic pendulum. ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16. หน้า 509-513. สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 17-19 มีนาคม 2558. ณ ศูนย์นิทรรศการ และการประชุมไบเทคบางนา, กรุงเทพมหานคร.
- 34) นาฏชนก ปรางปรุ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค และกระวี ตรีอำนรรค. 2558. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ของสารตัวพาที่มีผลต่อกระบวนการทำแห้งน้ำมะขามเปียกด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง. ใน การประชุม วิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 16. หน้า 480-485. สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 17-19 มีนาคม 2558. ณ ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทคบางนา, กรุงเทพมหานคร.
- 35) เบญจวรรณ วานมนตรี และเทวรัตน์ ตรีอำนรรค. 2558. การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงภายในไข่เยี่ยว ม้าที่ผลิตภายใต้สภาวะความดันสูงเทียบกับผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาด. ใน การประชุม วิชาการสมาคม วิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 16. หน้า 475-476. สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่ง ประเทศไทย. 17-19 มีนาคม 2558. ณ ศูนย์นิทรรศการและ การประชุมไบเทคบางนา, กรุงเทพมหานคร
- 36) จีรศักดิ์ ปาประกอบ นายวัฒน์ สุขทั้ง เทวรัตน์ ตรีอำนรรค และวีรชัย อัจหาญ. 2558. การอบแห้ง มั่นเส้นสะอาดด้วยเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน. ใน การประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29. 1-3 กรกฎาคม 2558 จังหวัดนครราชสีมา.
- 37) Tawarat Tipyavimol and Somyot Chirnaksorn. 2006. Thai aroma herb drying with microwave assisted heat pump dryer. Proceedings of the 13th Tri-University International Joint Seminar & Symposium 2006, Oct. 29-Nov. 2. Mie University, Japan. Pp. 278-281.
- 38) Tawarat Tipyavimol and Somyot Chirnaksorn. 2007. Performance Study of Heat pump-Microwave Combination Dryer. Proceeding of International Conference on Agricultural, Food and Biological Engineering & Post Harvest/Production Technology, 21-24 January, Sofitel Raja Orchid Hotel, Khon Kean, Thailand. Page 35.
- 39) Nartchanok PRANGPRU, Kaittisak JAITO, Benjawan VANMONTREE, Tawarat TREEAMNUK and Krawee Treamnuk. 2014. Comparing the Efficiency of Carrier Type on Drum Drying of Tamarind Juice, in 7th International

Conference on Agricultural Engineering, 2nd – 4th April 2014, Krungsri river Hotel Pranakhornsriayothanya, 114-120

- 40) Prangpru, N. Treeamnuk, T., Jaito, K. Vanmontree, B. & Treeamnuk, K. 2015. Comparing the Efficiency of Two Carrier Types on Drum Drying of Tamarind Juice. Thai Society of Agricultural Engineering Journal, 21(1): 1-6.
- 41) Benjawan Vanmontree, Tawarat Treeamnuk, Kaittisak Jaito, Nartchanok Prangpru, Krawee Treeamnuk. 2017. Effect of Hydrostatic Pressure and Vacuum on characteristics of century egg. International Journal of Food Engineering. Vol. 3, no. 2, pp 122-126.
- 43) Nartchanok Prangpru, Tawarat Treeamnuk, Kaittisak Jaito, Benjawan Vanmontree, Krawee Treeamnuk. 2017. Effect of Temperature on the Physicochemical Properties of Tamarind (*Tamarindus Indica*) Powder. International Journal of Food Engineering. Vol. 3, no. 2, pp 127-131.
- 44) Chalermchart Saowarat, Krawee Treeamnuk, Tawarat Treeamnuk. 2018. Mathematical Model for Exact Solution Method of Fogging Process Control in Climate Greenhouse System. International Journal of Mechanical and Production Engineering. Vol. 6(1), 24-28.
- 45) Teerawat Chuenatsadongkot, Tawarat Treeamnuk, Krawee Treeamnuk. 2018. Comparison of the Ability to Evaluation of “Monthong” durian Maturity using Color Value from Spectrometer and Image Processing. International Journal of Mechanical and Production Engineering. Vol. 6(1), 19-23.
- 46) Kaittisak Jaito, Tawarat Treeamnuk, Krawee Treeamnuk. 2018. The Performance Study of Double Drum Dryer for Moisture Reduction of Cassava Pulp. International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering. Vol 4(6), 82-85.
- 47) Nartchanok Prangpru, Tawarat Treeamnuk, Krawee Treeamnuk. 2019. Optimization of Carrier Agents Using Mixture Design for Tamarind Powder Production. Songklanakarin Journal of Science and Technology. Vol 41(1), 65-73.