

ระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมในท่อแนวตั้ง
ด้วยการจ่ายอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2564

VERTICAL CHAMBER PNEUMATIC DRYING SYSTEM
BY PULSE FLOW HOT AIR SUPPLYING



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy Program in Mechanical and Process System
Engineering Suranaree University of Technology
Academic Year 2021

ระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมในท่อแนวตั้งด้วยการจ่ายอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.ปรีดา ปราบกวม)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.กระวี ตรีอำรรค)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.กীরติ สุกข์เกษม)

กรรมการ



(ผศ. ดร.การุญ พิงสุวรรณรักษ์)

กรรมการ



(ผศ. ดร.เทวรัตน์ ตรีอำรรค)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติชูช่าง)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา : ระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมในท่อแนวดิ่งด้วยการจ่าย
อากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (VERTICAL CHAMBER PNEUMATIC DRYING SYSTEM
BY PULSE FLOW HOT AIR SUPPLYING) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร.กระวี ตรีอำนรรค, 210 หน้า.

คำสำคัญ: การไหลแบบเป็นช่วง/เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม/เครื่องอบแห้งข้าวเปลือก

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างและทดสอบระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมใน
ท่อแนวดิ่งด้วยการจ่ายอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) อากาศอบแห้งถูกทำให้ไหล
เป็นช่วงจากการปรับเปลี่ยนเวลาการเปิด - ปิดวาล์วระบายอากาศอบแห้งออกจากระบบเพื่อให้
ความเร็วอากาศอบแห้งลดลงเป็นช่วง ๆ ทำการศึกษาถึงอิทธิพลที่มีต่อสมรรถนะของระบบและ
คุณภาพของข้าวเปลือกที่ได้โดยทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์หอมปทุม น้ำหนัก 15 kg
อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 8.68 m/s ที่อัตราการป้อนข้าวเปลือก
1.00 kg/min ผลการทดสอบพบว่ารูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงนั้นทำให้เกิด
การหน่วงเวลาการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกให้เมล็ดอยู่ในท่ออบแห้งได้นานขึ้น ซึ่งช่วยให้
เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและถ่ายเทความชื้นในระหว่างที่เมล็ดข้าวเปลือกลอยอยู่ในท่อ
อบแห้งได้ดีขึ้น การใช้ช่วงเวลาลดการจ่ายอากาศที่นานขึ้นทำให้ค่าความชื้นข้าวเปลือกลดลงได้
อย่างรวดเร็ว อัตราการอบแห้งสูง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำ พลังงานกระตุ้น
สำหรับการอบแห้งต่ำ และได้ปริมาณข้าวเปลือกที่สูญเสียน้ำที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ทำกร
ทดสอบอบแห้งที่ใช้ช่วงเวลาลดการจ่ายอากาศสั้นกว่าและกรณีที่ทำกรทดสอบอบแห้งแบบจ่าย
อากาศต่อเนื่องตามปกติ ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการไหลของอากาศที่ถูก
พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการอบแห้งนี้มีศักยภาพที่สามารถนำไปใช้ในการลดความชื้นขั้นต้นของ
ข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงได้ ช่วยให้สามารถอบแห้งข้าวเปลือกได้อย่างรวดเร็ว ประหยัด
พลังงาน และได้คุณภาพข้าวที่ดีหลังจากการอบแห้ง

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนักศึกษา ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.กระวี ตรีอำนรรค

NUTTAPONG WONGBUBPA : VERTICAL CHAMBER PNEUMATIC DRYING SYSTEM
BY PULSE FLOW HOT AIR SUPPLYING. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KRAWEE
TREAMNUK, Ph.D., 210 PP.

Keyword: PULSE FLOW/PNEUMATIC DRYER/PADDY DRYER

The objective of this research was to fabricate and test the paddy drying system with a vertical pneumatic drying chamber by pulse flow hot air supplying technique. The pulse flow air is flowed intermittently by controlling the opening - closing period of vent valve in the system. Study the system performance and quality of paddy product by drying test for 15 kg Pathum Thani 1 (HOMPATUM) paddy rice at drying air temperature 80°C and velocity 8.68 m/s with paddy feed rate 1 kg/min. The results showed that the pulse flow drying air causes a delay in the movement of the paddy, allowing the grains to stay in the drying tube for longtime. This effect results in better heat exchange and moisture transfer during the paddy floating in the drying tube. Supplying the pulse flow drying air with long closing period allows the moisture of paddy decreasing rapidly, get a high drying rate, low specific energy consumption, the activation energy is low and higher quantity of brown rice yield when compared to the case of shorter closing period and in the case of continuous flow drying air supplying. Moreover, drying with pulse flow developed technique has potential to be used in the primary dehumidification of high moisture grains. It can dry paddy rapidly, save energy and get a good rice product quality after drying.

School of Mechanical Engineering
Academic Year 2021

Student's Signature Nuttapong Wongbubpa.
Advisor's Signature Krawee Treemnuke.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาและความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการและด้านอื่น ๆ จากบุคคลและกลุ่มคนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นทั้งผู้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านวิชาการ หากมิได้คำแนะนำดี ๆ ในการแก้ไขปัญหาจากท่านงานวิจัยนี้คงสำเร็จลุล่วงไปไม่ได้ จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ ผู้วิจัยซาบซึ้งในความปรารถนาดี และจะปฏิบัติตามคำสอนของท่านตลอดไป

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิริติ สุกฤษณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การุญ พิงสุวรรณรักษ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา ปรากูมาก รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบุญ และครูอาจารย์ในอดีตทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณมารดา บิดา ผู้เป็นที่รักยิ่งที่ให้การอบรมเลี้ยงดู และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาตลอด แม้จะด้วยความลำบากสักเพียงใด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตได้

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้อ่านเพื่อพัฒนาองค์ความรู้สืบต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ท
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ธ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 แนวคิดของเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
2 คำจำกัดความและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ความสำคัญของการอบแห้ง.....	5
2.2 การอบแห้งเมล็ดพืช.....	6
2.3 หลักการอบแห้งเมล็ดพืช.....	6
2.4 ภูมิหลังของการอบแห้งเมล็ดพืช.....	7
2.5 เครื่องอบแห้งเมล็ดพืช.....	8
2.5.1 เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่.....	8
2.5.2 เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล.....	12
2.6 ความชื้นในวัสดุ.....	16
2.6.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก.....	17
2.6.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง.....	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 ความชื้นสมบูรณ์.....	17
2.8 ความชื้นสัมพัทธ์.....	17
2.9 ความชื้นสมดุลของวัสดุ.....	18
2.10 การถ่ายเทความร้อน.....	18
2.10.1 การนำความร้อน.....	19
2.10.2 การพาความร้อน.....	20
2.10.3 การแผ่รังสีความร้อน.....	21
2.11 การถ่ายเทมวล.....	23
2.11.1 การถ่ายเทมวลโดยการแพร่ของโมเลกุล.....	24
2.11.2 การถ่ายเทมวลสารแบบการพา.....	25
2.12 กลไกการแพร่ความชื้นภายในเมล็ด.....	26
2.13 วิธีการหาความชื้นในเมล็ดพืช.....	26
2.13.1 วิธีตรง.....	26
2.13.2 วิธีอ้อม.....	27
2.14 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุเกษตร.....	27
2.14.1 ขนาดมิติ.....	27
2.14.2 ความหนาแน่น.....	28
2.14.3 เปอร์เซ็นต์การหดตัว.....	28
2.14.4 ความเสียดทาน.....	29
2.14.5 มุมเสียดทานภายในและมุมกอง.....	29
2.14.6 ความร้อนจำเพาะ.....	30
2.14.7 ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ.....	30
3 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
4 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมในท่อแนวดิ่ง.....	59
4.1 ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมในท่อแนวดิ่ง.....	59
4.2 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมในท่อแนวดิ่ง.....	60
5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	70

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1	การหาคำตอบโดยวิธีเชิงวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศรอบแท่ง แบบขนานในหอบแห้งแนวตั้งแบบเป็นช่วงด้วยกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน.....	70
5.1.1	แรงลอยตัวของข้าวเปลือก.....	72
5.1.2	การเคลื่อนที่ของเมล็ดของข้าวเปลือกในสภาวะการไหลแบบเป็นช่วง.....	73
5.1.3	การประเมินระยะทางรวมที่เมล็ดข้าวเปลือกเคลื่อนที่ได้.....	77
5.1.4	การประเมินค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของเมล็ดข้าวเปลือก.....	77
5.2	การเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งแบบลมร้อนด้วยวิธีจำลองด้วย CFD - DEM เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการไหลของอากาศรอบแท่งแบบเป็นช่วง.....	78
5.2.1	สมบัติทางกายภาพของวัสดุและพารามิเตอร์ต่าง ๆ.....	79
5.2.2	เงื่อนไขการจำลอง.....	81
5.2.3	แบบจำลอง CFD - DEM.....	82
5.3	การทดสอบอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกต้นแบบที่สร้างขึ้น.....	84
5.3.1	รูปแบบแบบการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือก.....	85
5.3.2	การเตรียมข้าวเปลือกขึ้น.....	87
5.3.3	การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือก.....	88
5.3.4	การวิเคราะห์ค่าความชื้นข้าวเปลือก.....	90
5.3.5	การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง.....	91
	- อัตราการอบแห้ง.....	91
	- อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ.....	92
	- ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง.....	92
	- พลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแห้ง.....	93
	- การทดสอบคุณภาพข้าว.....	94
5.3.6	สถานที่ทำการวิจัย.....	97
5.4	แบบจำลองเอมพิริคัลชั้นบางเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือก ด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในท่อแนวตั้ง.....	97
6	ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล.....	100

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.1	ผลการศึกษาการหาคำตอบโดยวิธีเชิงวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบขนานในหอบแห้งแนวตั้งแบบเป็นช่วงด้วยกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน.....	100
6.1.1	ตำแหน่งการเคลื่อนที่และความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือก.....	100
6.1.2	เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือก.....	102
6.1.3	ระยะทางรวมของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งเมื่อพิจารณาเวลา.....	104
	สรุปผล.....	105
6.2	ผลการศึกษาการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งแบบลมร้อนด้วยวิธีการจำลองด้วย CFD - DEM เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง.....	106
6.2.1	ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือก.....	106
6.2.2	ความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือก.....	107
6.2.3	เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือก.....	109
6.2.4	ระยะทางรวมของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งเมื่อพิจารณาเวลา.....	113
	สรุปผล.....	114
6.3	ผลการศึกษาการทดสอบอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกต้นแบบที่สร้างขึ้น.....	115
	ผลการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งตลอดกระบวนการทดสอบ.....	115
6.3.1	พฤติกรรมการอบแห้ง.....	115
6.3.2	อัตราการอบแห้ง.....	117
6.3.3	อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ.....	118
6.3.4	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง.....	119
	สรุปผล.....	120

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ผลการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยการควบคุมให้อากาศอบแห้งไหลเข้าไปในหอบแห้งแบบเป็นช่วง ผ่านการเปิด-ปิดวาล์วระบายอากาศตามเวลาที่กำหนด.....	121
6.3.5 พฤติกรรมการอบแห้ง.....	121
6.3.6 อัตราการอบแห้ง.....	123
6.3.7 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ.....	124
6.3.8 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง.....	126
6.3.9 พลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแห้ง.....	127
6.3.10 คุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง.....	128
สรุปผล.....	130
6.4 ผลการศึกษาแบบจำลองเอมพิริคัลชั้นบางเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในท่อแนวตั้ง (ของการทดสอบที่ 2).....	131
สรุปผล.....	139
7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	140
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	140
7.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการทำวิจัยต่อไป.....	141
รายการอ้างอิง.....	142
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. เครื่องมือและข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย.....	149
ก.1 เครื่องเป่าลม.....	150
ก.2 Orifice plate.....	151
ก.3 เครื่องทำความร้อน.....	154
ภาคผนวก ข. การวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัย.....	156
ข.1 การวิเคราะห์หาค่าพลังงานที่สูญเสียในตำแหน่งควบคุมพฤติกรรมอากาศ.....	157

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

	ข.2	การวิเคราะห์หาค่าความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยตลอดกระบวนการทดสอบในท่ออบแห้ง.....	157
	ข.3	การวิเคราะห์หาค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแห้ง.....	158
ภาคผนวก ค.		การออกแบบเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย.....	163
	ค.1	การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ในท่ออบแห้งแนวดิ่ง.....	164
ภาคผนวก ง.		ข้อมูลจากการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือก.....	171
ประวัติผู้เขียน.....			209



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1	สมบัติวัสดุและพารามิเตอร์ในการจำลองด้วย CFD - DEM.....79
5.2	แบบจำลองสภาวะการไหลแบบเป็นช่วง โดยใช้เวลาในการหยุดและจ่ายอากาศคอบแห้ง CFD - DEM 4 แบบ.....82
5.3	เงื่อนไขการทดสอบอบแห้งสำหรับรูปแบบความเร็วอากาศคอบแห้ง ด้วยการปรับลดความเร็ว ของการทดสอบที่ 1.....85
5.4	เงื่อนไขการทดสอบอบแห้งสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วง ตามเวลาที่ใช้ในการเปิด - ปิดวาล์ว ของการทดสอบที่ 2.....86
5.5	แบบจำลองที่ใช้ทำนายการอบแห้งข้าวเปลือก (Khaengkarn, S. et al., 2011).....97
6.1	ค่าคงที่แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับแต่ละแบบจำลองในการใช้งาน.....131
ก.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Inverter set point ค่าความดันตกคร่อม Orifice Plate และค่าความเร็วอากาศคอบแห้งเฉลี่ยในตำแหน่งทางเข้าท่ออบแห้ง.....150
ข.1	แสดงค่าความชื้นจากวิธีกราฟฟิค (Graphical method) และค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับ การอบแห้งจากการคำนวณตามสมการ (ข.9).....162
ค.1	แสดงข้อมูลการออกแบบของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่ใช้ศึกษาในงานวิจัย.....164
ง.1	ลำดับการทดลองแบบสุ่มจากเงื่อนไขการทดสอบอบแห้ง.....172
ง.2	ข้อมูลเริ่มต้นในวันที่ทำการทดสอบอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศ แบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 3 ปิด 3) ของการทดลองที่ 1.....173
ง.3	ข้อมูลเริ่มต้นในวันที่ทำการทดสอบอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศ แบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 5 ปิด 3) ของการทดลองที่ 2.....174
ง.4	ข้อมูลเริ่มต้นในวันที่ทำการทดสอบอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศ แบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 4 ปิด 3) ของการทดลองที่ 3.....175
ง.5	ข้อมูลเริ่มต้นในวันที่ทำการทดสอบอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศ แบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (ปิดตลอด) ของการทดลองที่ 4.....176
ง.6	ข้อมูลเริ่มต้นในวันที่ทำการทดสอบอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศ แบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 3 ปิด 3) ของการทดลองที่ 5.....177

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง.18	ข้อมูลความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงตามเวลาจากการอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 3 ปิด 3) ของการทดลองที่ 5.....189
ง.19	ข้อมูลความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงตามเวลาจากการอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 5 ปิด 3) ของการทดลองที่ 6.....190
ง.20	ข้อมูลความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงตามเวลาจากการอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 5 ปิด 3) ของการทดลองที่ 7.....191
ง.21	ข้อมูลความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงตามเวลาจากการอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 3 ปิด 3) ของการทดลองที่ 8.....192
ง.22	ข้อมูลความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงตามเวลาจากการอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 4 ปิด 3) ของการทดลองที่ 9.....193
ง.23	ข้อมูลความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงตามเวลาจากการอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิดตลอด) ของการทดลองที่ 10.....194
ง.24	ข้อมูลความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงตามเวลาจากการอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิดตลอด) ของการทดลองที่ 11.....195
ง.25	ข้อมูลความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงตามเวลาจากการอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 4 ปิด 3) ของการทดลองที่ 12.....196
ง.26	ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 1.....197
ง.27	ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 2.....198

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง.28 ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 3.....	199
ง.29 ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 4.....	200
ง.30 ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 5.....	201
ง.31 ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 6.....	202
ง.32 ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 7.....	203
ง.33 ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 8.....	204
ง.34 ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 9.....	205
ง.35 ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 10.....	207
ง.36 ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 11.....	207
ง.37 ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 12.....	208

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ระบบของเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
2.1	เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบถักเก็บ (Brooker, D. B. et al., 1992).....	9
2.2	เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบเป็นชั้น (Brooker, D. B. et al., 1992).....	11
2.3	เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบเป็นวง (Brooker, D. B. et al., 1992).....	12
2.4	ลักษณะการไหลของเมล็ดพืชและอากาศอบแห้ง (Brooker, D. B. et al., 1992).....	13
2.5	เครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง (Brooker, D. B. et al., 1992).....	14
2.6	เครื่องอบแห้งแบบไหลตาม (Brooker, D. B. et al., 1992).....	15
2.7	ภาพตัดของเครื่องอบแห้งแบบที่มีการผสมกันของเมล็ดพืช (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540).....	16
2.8	การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นโดยการนำ การพา และการแผ่รังสี (Rohsenow, W. M. et al., 1998).....	19
2.9	การพัฒนาชั้นขอบเขตในการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนแบบบังคับ (Cengel, Y. A., 2003).....	21
2.10	การถ่ายเทมวลสารโดยการแพร่ในระบบก๊าซผสม 2 ชนิด (Cengel, Y. A., 2006).....	23
2.11	มุกกองของเมล็ดพืช (Montanari, D. et al., 2017).....	29
3.1	แผนผังเครื่องอบแห้งสเปาเต็ดเบดแบบสองมิติ (Prachayawarakorn, S. et al., 2006).....	39
3.2	(ก) ลักษณะของหอบอบแห้ง (ข) แผ่นกระจายลมแบบเกลียว (อำนาจ บุญลอย และคณะ, 2549).....	40
3.3	แผนผังเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ (ทวิช จิตรสมบูรณ์ และคณะ, 2549).....	41
3.4	อัตราการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบทั่วไป (ทวิช จิตรสมบูรณ์ และคณะ, 2549).....	42
3.5	แผนผังเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระที่ใช้ในการทดลองอบแห้งอย่างต่อเนื่อง (เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว และคณะ, 2551).....	43
3.6	แผนภาพแสดงระบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบลำเลียงด้วยลมแนวตั้ง (Rajan, K. S. et al., 2008).....	44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7	แผนผังเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม (ฉัตรชัย นิยมมล, 2555).....46
3.8	แผนผังเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นหวงติดตะแกรง (ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา และ ทวีช จิตรสมบุญ, 2557).....47
3.9	แผนผังเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นที่เป็นช่องอ (ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา และ ทวีช จิตรสมบุญ, 2558).....48
3.10	แผนผังเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบ BAU - STR (Aktar, S. et al., 2016).....49
3.11	ระบบของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนทำงานร่วมกับเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (ธนระวีชต์ วิจิณธนสาร และคณะ, 2554).....50
3.12	ห้องอบแห้งข้าวเปลือกที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลแบบกระแสวน (Vortex flow) (Chokphoemphun, Sua. and Chokphoemphun, Sur., 2018).....52
3.13	แผนผังโครงสร้างของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิค การแผ่รังสีความร้อนในแนวนอน (ณัฐพล แซ่ลิ้ม และคณะ, 2561).....52
3.14	ใบพัดแบบเกลียวแนวยาว (Twisted tape swirl) (Chuwattanakul, V. and Eiamsa - ard, S., 2019).....55
3.15	ภาพแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ ขึ้น - ลง ของเมล็ดข้าวเปลือกในท่ออบแห้ง (ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา และคณะ, 2564).....56
3.16	ระบบของเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ทดสอบ (ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา และคณะ, 2565).....57
4.1	ระบบของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมในท่อแนวตั้งต้นแบบ ที่ใช้ในงานวิจัย.....61
4.2	เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมในท่อแนวตั้งต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย.....61
4.3	ด้านข้างของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมในท่อแนวตั้งต้นแบบ ที่ใช้ในงานวิจัย.....62
4.4	เครื่องเป่าลม (Blower) ของ Ventex รุ่น 2RB 710 H16 ขนาด 2.2 kW.....63
4.5	Pressure transmitter ของ Kimo รุ่น CP103 - PO.....63
4.6	Inverter ของ Frecon รุ่น F003b - 4 ขนาด 2.2 kW.....64
4.7	Orifice Plate ที่ใช้ในงานวิจัย สร้างขึ้นตามมาตรฐาน ISO 5167.....64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8	เครื่องทำความร้อน (Heater) ใช้ขดลวดความร้อนขนาด 4 kW ภายในท่อเหล็ก.....65
4.9	PID Temperature controller ของ Shinko รุ่น JCS - 33A.....65
4.10	ตำแหน่งติดตั้ง Thermocouple type K สำหรับวัดค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ที่ทางเข้าท่ออบแห้ง.....66
4.11	(ก) แสดงรูปทรงสี่เหลี่ยมภายนอกของถังพักข้าวเปลือก (Paddy container) ที่ทำจากสังกะสี (ข) และ (ค) แสดงตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกภายในถังพัก.....66
4.12	(ก) และ (ข) อุปกรณ์ป้อนข้าวเปลือก (Feeder) ที่ทำจากสแตนเลส.....67
4.13	(ก) มอเตอร์เกียร์ ของ Taili Motor รุ่น 2IK6RGN - C ขนาด 6 W (ข) อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของการหมุน (Speed Motor).....67
4.14	โซลินอยด์วาล์วทองเหลือง รุ่น 2W - 400 - 40 ขนาด 1.5 in.....67
4.15	ชุดควบคุมเวลา (Timer Relay) แบบปรับตั้งค่าได้ ช่วงเวลารับค่าได้ตั้งแต่ 0.1 s ถึง 999 min.....68
4.16	มิเตอร์ไฟฟ้า 1 Phase ของ LUZINO รุ่น DD28 -15(45).....68
4.17	มิเตอร์ไฟฟ้า 3 Phase ของ International Power Group รุ่น IPG862 - 15(45).....69
5.1	แผนผังแสดงชุดทดสอบต้นแบบเพื่อแสดงทิศทางการปล่อยอากาศสู่ท่ออบแห้ง.....71
5.2	ภาพแสดงแรงที่กระทำกับเมล็ดข้าวเปลือกขณะลอยในกระแสอากาศ.....72
5.3	ภาพแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ ขึ้น - ลง ของเมล็ดข้าวเปลือกในท่ออบแห้ง.....74
5.4	การทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุ (ก) สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (ข) สัมประสิทธิ์การคืนตัว.....80
5.5	รูปทรงของเมล็ดข้าวเปลือกแบบ Multi - sphere.....81
5.6	ตำแหน่งปล่อยเมล็ดข้าวเปลือกในท่ออบแห้ง.....82
5.7	การชนกันของอนุภาคของแข็ง (Hong - Wei L. et al., 2020).....83
5.8	เครื่องทำความสะอาดเมล็ดพันธุ์.....87
5.9	ตู้อบลมร้อน (Hot air oven).....90
5.10	ตู้ดูดความชื้น (Desiccator).....90
5.11	เครื่องกะเทาะข้าวเปลือก (Rice Huller).....94

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12 เครื่องขัดขาว (Rice Miller).....	95
5.13 เครื่องคัดแยกปลายข้าว (Cylinder Separator).....	96
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวและเวลา ของทั้ง 3 แบบจำลอง.....	101
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของเมล็ดข้าวและเวลา ของทั้ง 3 แบบจำลอง.....	102
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าว ของแบบจำลองที่ 1.....	103
6.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าว ของแบบจำลองที่ 2.....	103
6.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าว ของแบบจำลองที่ 3.....	104
6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางรวมของเมล็ดข้าวในท่ออบแห้งและเวลา ของทั้ง 3 แบบจำลอง.....	105
6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวและเวลา ของทั้ง 4 แบบจำลอง.....	107
6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของเมล็ดข้าวและเวลา ของทั้ง 4 แบบจำลอง.....	108
6.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าว ของแบบจำลองที่ 1.....	110
6.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าว ของแบบจำลองที่ 2.....	111
6.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าว ของแบบจำลองที่ 3.....	111
6.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าว ของแบบจำลองที่ 4.....	112

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวของแบบจำลองที่ 5.....	112
6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางรวมของเมล็ดข้าวในท่ออบแห้งและเวลา ของทั้ง 4 แบบจำลอง เทียบกับกรณีที่ไม่ได้ปรับการไหลของอากาศให้เป็นแบบช่วง.....	113
6.15 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกกับเวลา ของการทดสอบที่ 1.....	116
6.16 อุณหภูมิข้าวเปลือกในถังเก็บตลอดการทดสอบ ของการทดสอบที่ 1.....	117
6.17 อัตราการอบแห้งข้าวเปลือก ของการทดสอบที่ 1.....	118
6.18 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ของการทดสอบที่ 1.....	119
6.19 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งกับเวลา ของการทดสอบที่ 1.....	120
6.20 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกกับเวลา ของการทดสอบที่ 2.....	121
6.21 อุณหภูมิข้าวเปลือกในถังเก็บตลอดการทดสอบ ของการทดสอบที่ 2.....	122
6.22 อัตราการอบแห้งข้าวเปลือก ที่เงื่อนไขการทดสอบ สำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลา ของการทดสอบที่ 2.....	123
6.23 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ที่เงื่อนไขการทดสอบ สำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลา ของการทดสอบที่ 2.....	124
6.24 พลังงานสูญเสียไปในตำแหน่งควบคุมพฤติกรรมอากาศ ที่เงื่อนไขการทดสอบ สำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลา ของการทดสอบที่ 2.....	125
6.25 ความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยตลอดกระบวนการทดสอบในท่ออบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบ สำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลา ของการทดสอบที่ 2.....	126
6.26 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งกับเวลา ของการทดสอบที่ 2.....	127
6.27 พลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบ สำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลา ของการทดสอบที่ 2.....	128
6.28 ปริมาณข้าวตันในรูปร้อยละของข้าวกลิ้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบ สำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาและการตากแห้งแบบธรรมชาติ ของการทดสอบที่ 2.....	129
6.29 ผลของพารามิเตอร์ค่า a และ n จากแบบจำลองของ Midilli et al. (2002).....	133
6.30 ผลของพารามิเตอร์ค่า k และ b จากแบบจำลองของ Midilli et al. (2002).....	134

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.31 อัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งที่ได้จากการทดลอง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (แบบปิดตลอด) และการทำนายด้วยแบบจำลอง.....	135
6.32 อัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งที่ได้จากการทดลอง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (แบบเปิด 3 ปิด 3) และการทำนายด้วยแบบจำลอง.....	135
6.33 อัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งที่ได้จากการทดลอง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (แบบเปิด 4 ปิด 3) และการทำนายด้วยแบบจำลอง.....	136
6.34 อัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งที่ได้จากการทดลอง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (แบบเปิด 5 ปิด 3) และการทำนายด้วยแบบจำลอง.....	136
6.35 ผลของค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) กับแบบจำลองการอบแห้งแบบขั้นบันได ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลา.....	137
6.36 ผลของค่าไคกำลังสอง (χ^2) กับแบบจำลองการอบแห้งแบบขั้นบันได ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลา.....	138
6.37 ผลของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) กับแบบจำลองการอบแห้งแบบขั้นบันได ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลา.....	138
ก.1 แผนภาพลักษณะของท่อ Orifice Plate และจุดต่อสำหรับวัดค่าความแตกต่างของความดันแบบ ระยะ D และ 0.5D (Vena Contracta Taps).....	151
ก.2 แผนผังวงจรที่ต่อร่วมกับ Magnetic Contactor, PID Temperature Control และ Thermocouple Type K เพื่อใช้ควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้ง.....	155
ข.1 การหาค่าความเร็วอากาศอบแห้งด้วยวิธีกราฟฟิก (Graphical method).....	158
ข.2 การหาค่าความชื้น (m) จาก semi - logarithmic plot.....	159
ข.3 ค่าความชื้น (m) จาก semi - logarithmic plot ด้วยวิธีกราฟฟิก (Graphical method)	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วง ตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (แบบปิดตลอด).....	160
ข.4 ค่าความชื้น (m) จาก semi - logarithmic plot ด้วยวิธีกราฟฟิก (Graphical method) ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วง ตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (แบบเปิด 3 ปิด 3).....	160
ข.5 ค่าความชื้น (m) จาก semi - logarithmic plot ด้วยวิธีกราฟฟิก (Graphical method) ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วง ตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (แบบเปิด 4 ปิด 3).....	161
ข.6 ค่าความชื้น (m) จาก semi - logarithmic plot ด้วยวิธีกราฟฟิก (Graphical method) ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วง ตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (แบบเปิด 5 ปิด 3).....	161
ค.1 แผนภาพแสดงขนาดระบบของเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ทดสอบ.....	166
ค.2 ชุดทดสอบต้นแบบของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในท่ออบแห้งแนวตั้ง (ก) แสดงภาพด้านหน้าของเครื่องอบแห้ง (ข) แสดงภาพด้านข้างของเครื่องอบแห้ง.....	170

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

M_w	=	ความชื้นมาตรฐานเปียก, เศษส่วน
M_d	=	ความชื้นมาตรฐานแห้ง, เศษส่วน
W	=	มวลของวัสดุชื้น, kg
W_d	=	มวลของวัสดุแห้ง, kg
ω	=	อัตราส่วนความชื้น, kg_v/kg_a
m_v	=	มวลไอน้ำในอากาศชื้น, kg_v
m_a	=	มวลอากาศแห้ง, kg_a
%RH	=	ร้อยละความชื้นสัมพัทธ์, kg_v/kg_g
m_g	=	มวลไอน้ำในอากาศอิ่มตัว, kg_g
q	=	อัตราการถ่ายเทความร้อน, W
k	=	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัตถุ, $W/m \cdot ^\circ C$
A	=	พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนไหลผ่าน, m^2
$\frac{dT}{dx}$	=	ความชันของอุณหภูมิในเนื้อวัตถุ, $^\circ C/m$
q	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากวัตถุแข็ง, W
h'	=	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2 \cdot ^\circ C$
A	=	พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็ง ข้าวเปลือก และของไหล, m^2
T_s	=	อุณหภูมิที่ผิวของเม็ดของแข็ง, $^\circ C$
T_∞	=	อุณหภูมิของกระแสของไหล, $^\circ C$
q	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนของวัตถุปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, W
\mathcal{E}	=	สภาพเปล่งรังสี
σ	=	Stefan - Boltzmann Constant, $W/m^2 \cdot K^4$
A	=	พื้นที่ผิวของวัตถุที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, m^2
T_s^4	=	อุณหภูมิของวัตถุที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, K
T_∞^4	=	อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม, K
Nu_0	=	ค่าตัวเลขนัสเซิลต์
Re	=	ค่าตัวเลขเรย์โนลด์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Pr	=	ค่าตัวเลขพรีน့်เทิล
N_A	=	ปริมาณของมวลสารที่ถ่ายเท, kg/s
D_{AB}	=	สัมประสิทธิ์การฟุ้งกระจาย, m^2/s
A	=	พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็ง และของไหล, m^2
c_A	=	ความเข้มข้นของมวลสาร A ต่อหนึ่งปริมาตร, kg/m^3
x	=	ระยะทางที่มวลสารเคลื่อนที่ไป, m
N_A	=	ปริมาณของมวลสาร A ที่ถ่ายเท, kg/s
h'_D	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร
A	=	พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็ง และของไหล, m^2
C_A	=	ความเข้มข้นของมวลสาร A ในของไหล
C_{AS}	=	ความเข้มข้นของมวลสาร A ที่อิ่มตัว
\mathcal{E}	=	สัดส่วนช่องว่างอากาศ
ρ_b	=	ความหนาแน่นปรากฏ, kg/m^3
ρ_t	=	ความหนาแน่นจริง, kg/m^3
ρ	=	ความหนาแน่น, kg/m^3
M	=	ความชื้นวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
S	=	เปอร์เซ็นต์การหดตัว, %
M_{w0}	=	ความชื้นเริ่มต้นของมอลต์, %wb
M_w	=	ความชื้นของมอลต์, %wb
H	=	ความสูงของกองเมล็ดพืช, m
D	=	ความกว้างของฐานของกองเมล็ดพืช, m
d	=	ความกว้างของช่องอุปกรณ์ที่ปล่อยเมล็ดพืชลงมา, m
C_{pg}	=	ความร้อนจำเพาะของวัสดุ, $kJ/kg \cdot ^\circ C$
M_w	=	ความชื้นข้าวเปลือก, %wb
L	=	ความยาว, mm
W	=	ความกว้าง, mm
T	=	ความหนา, mm
F_B	=	แรงลอยตัว, N
F_D	=	แรงต้านอากาศ, N

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ρ	=	ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m^3
g	=	ความเร่งเข้าสู่แกนกลางโลก, m/s^2
V	=	ปริมาตรข้าวเปลือก, m^3
C_D	=	สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ
v_{air}	=	ความเร็วอากาศอบแห้ง, m/s
s_1	=	ตำแหน่งของเมล็ดข้าวเปลือกที่เคลื่อนที่ไป, m
s_0	=	ตำแหน่งเดิมของเมล็ดข้าวเปลือกที่เคลื่อนที่ได้, m
v_0	=	ความเร็วต้นของเมล็ดข้าวเปลือก, m/s
v_1	=	ความเร็วที่เปลี่ยนไปของเมล็ดข้าวเปลือก, m/s
t	=	เวลา ณ ขณะนั้น, s
Δt	=	ความแตกต่างของเวลาปัจจุบันและเวลาเดิม, s
i	=	ลำดับครั้งที่เปลี่ยนไปของการเคลื่อนที่
n	=	จำนวนครั้งทั้งหมดของการเคลื่อนที่ตลอดความยาวท่อตามเวลา
Δv	=	ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอากาศอบแห้งอบแห้งและความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือก, m/s
μ	=	ความหนืดของอากาศ, $\text{kg/m}\cdot\text{s}$
D	=	ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางเมล็ด, m
ρ	=	ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m^3
ρ_s	=	ความหนาแน่นจริง, kg/m^3
μ_s	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต
α	=	มุมเอียงของแผ่นระนาบ, องศา
e	=	สัมประสิทธิ์การคืนตัว
h_r	=	ความสูงของเมล็ดข้าวเปลือกหลังจากตกกระทบพื้นแล้วสะท้อนกลับขึ้นในแนวตั้ง, m
h_i	=	ความสูงเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือกก่อนตกกระทบพื้น, m
m_i	=	มวล, kg
v_i	=	ความเร็ว, m/s
I_i	=	โมเมนต์ความเฉื่อย, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
ω_i	=	ความเร็วของการหมุนตัว, rad/s
n_c	=	จำนวนของอนุภาคที่สัมผัสกับอนุภาค
$F_{c,ij}$	=	แรงจากการชน การปะทะ, $\text{kg}\cdot\text{m/s}$

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$F_{d,ij}$	=	แรงจากความหน่วง, $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$
$F_{d,g-l}$	=	แรงต้าน, N
$F_{p,g-l}$	=	แรงดัน, Pa
$m_i g$	=	แรงโน้มถ่วง, m/s^2
μ_s	=	ความต้านทานการไหลของไหลแบบเฉือน, Pa·s
ε_s	=	ความพรุน หรือสัดส่วนช่องว่างในวัสดุ
μ_t	=	ความต้านทานการไหลของไหลแบบปั่นป่วน, Pa·s
ρ_s	=	ความหนาแน่นของส่วนที่เป็นแก๊ส หรืออากาศ, kg/m^3
$F_{p,x}$	=	แรงที่กระทำในทิศทาง x
$F_{p,y}$	=	แรงที่กระทำในทิศทาง y
M_w	=	เศษส่วนความชื้นมาตรฐานเปียก, เศษส่วน
W_i	=	น้ำหนักเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือก, g
W_f	=	น้ำหนักสุดท้ายของเมล็ดข้าวเปลือกหลังจากนำออกจากตู้อบลมร้อน, g
DR	=	อัตราการอบแห้ง, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{h}$
W_i	=	น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น, kg
W_f	=	น้ำหนักข้าวเปลือกหลังอบแห้ง, kg
t	=	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, h
SEC	=	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, $\text{MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$
E	=	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศอบแห้ง และที่ใช้ในการขับเคลื่อน, kWh
Q_{evap}	=	ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ, kJ
W_d	=	มวลแห้งของวัสดุ, kg
M_i	=	ความชื้นวัสดุก่อนอบแห้ง, เศษส่วนร้อยละมาตรฐานแห้ง
M_f	=	ความชื้นวัสดุหลังอบแห้ง, เศษส่วนร้อยละมาตรฐานแห้ง
h_{fg}	=	ความร้อนแฝงของน้ำที่อุณหภูมิ T_{p2} , kJ/kg
Q_s	=	ปริมาณความร้อนที่ใช้ในเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ, kJ
C_{pd}	=	ความร้อนจำเพาะของวัสดุแห้ง, $\text{kJ}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$
C_{pw}	=	ความร้อนจำเพาะของน้ำ, $\text{kJ}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$
T_{p1}	=	อุณหภูมิวัสดุก่อนอบแห้ง, $^{\circ}\text{C}$

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

T_{p2}	=	อุณหภูมิวัสดุหลังอบแห้ง, °C
Q_a	=	ปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ, kJ
\dot{m}_a	=	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง, kg _{dry air} /h
C_a	=	ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง, kJ/kg _{dry air} ·°C
C_v	=	ความร้อนจำเพาะของไอน้ำ, kJ/kg _{water} ·°C
H_1	=	อัตราส่วนความชื้นของอากาศ, kg _{water} /kg _{dry air}
T_1	=	อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องทำความร้อน, °C
T_2	=	อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องทำความร้อน, °C
D_{eff}	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล, m ² /s
D_o	=	ค่าคงที่ของสมการอาร์เรเนียส, m ² /s
E_a	=	ค่าพลังงานกระตุ้น, J/mol
R	=	ค่าคงที่ของก๊าซ, 8.314 J/mol·K
T	=	อุณหภูมิข้าวเปลือก, K
MR_t	=	อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใด ๆ
t	=	เวลาในการอบแห้ง, s
L	=	ความหนาของเมล็ดข้าวเปลือก, m
%BRY	=	ปริมาณข้าวกล้องต้น, %
%HRY	=	ปริมาณข้าวขาวต้น, %
MR	=	อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย
\bar{M}	=	ความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใด ๆ, db
M_e	=	ความชื้นสมดุล, db
M_i	=	ความชื้นเริ่มต้น, db
rh	=	เศษส่วนความชื้นสัมพัทธ์
T	=	อุณหภูมิอากาศอบแห้ง, °C
RMSE	=	รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย
χ^2	=	ไคกำลังสอง
r	=	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
MR_{exp}	=	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

MR_{pre}	=	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนาย
N	=	จำนวนข้อมูล
Z	=	จำนวนพารามิเตอร์ในแบบจำลอง
ε	=	สัมประสิทธิ์การขยายตัว
C_d	=	สัมประสิทธิ์อัตราไหล
P_1	=	ความดันสัมบูรณ์ที่ท่อก่อนถึง Orifice Plate, Pa
ΔP	=	ผลต่างความดันตกคร่อมที่ Orifice Plate, Pa
k	=	อัตราส่วนความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่
SEC_{lose}	=	ค่าพลังงานที่สูญเสียในตำแหน่งควบคุมพฤติกรรมอากาศ, MJ/kg
E_{lose}	=	พลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศอบแห้ง, kWh
W_1	=	น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น, kg
W_f	=	น้ำหนักข้าวเปลือกหลังอบแห้ง, kg
\dot{m}_a	=	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง, kg _{dry air} /h
Δh	=	ค่าความร้อนที่ให้แก่อากาศเพื่อเพิ่มความร้อนให้กับอากาศ, kJ/ kg _{dry air}
$t_{open valve}$	=	เวลารวมทั้งหมดที่ใช้ในการเปิดวาล์วตลอดช่วงทำการทดสอบ, min
ρ	=	ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m ³
A	=	พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนไหลผ่าน, m ²
V	=	ความเร็วอากาศตำแหน่งเปิดวาล์ว, m/s
x_0	=	เวลาเริ่มต้นก่อนเปิดวาล์ว, min
x_1	=	เวลาสิ้นสุดการเปิดวาล์ว หรือเวลาเริ่มต้นการปิดวาล์ว, min
x_2	=	เวลาสิ้นสุดการปิดวาล์ว, min
y_0	=	ความเร็วอากาศอบแห้งนาที่ที่ศูนย์, m/s
y_1	=	ความเร็วอากาศอบแห้งในท่ออบแห้งเมื่อทำการเปิดวาล์ว, m/s
y_2	=	ความเร็วอากาศอบแห้งในท่ออบแห้งเมื่อทำการปิดวาล์ว, m/s
ΔP	=	ความดันรวมที่สูญเสีย, Pa
P_v	=	ความดันความเร็ว, Pa
f_D	=	แฟคเตอร์ความเสียดทาน
L	=	ความยาวท่อ, m

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

- D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ, m
 ρ = ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิ, kg/m^3
K = สัมประสิทธิ์การสูญเสียแรง



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจและเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญของไทย จากข้อมูลของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรระบุว่า ในปี พ.ศ. 2563 ประเทศไทยมีพื้นที่รวมทั้งประเทศในการปลูกข้าวรวม (นาปีและนาปรัง) ถึง 68.859 ล้านไร่ และได้ผลผลิต 29.556 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่าได้ 271,409 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2563) ซึ่งไม่รวมการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวข้าวที่สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตรได้ทำการประเมินไว้ และในลักษณะเดียวกันนี้ ปี พ.ศ. 2555 ได้มีประเมินการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวข้าวซึ่งคิดเป็นประมาณ 30 % มีมูลค่า 42,892.8 ล้านบาท จะเห็นว่าการสูญเสียนี้นี้มีมูลค่ามหาศาล หนึ่งในมูลค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากความชื้นที่สูงในช่วงของการเก็บเกี่ยว ทำให้การเก็บรักษาผลผลิตนั้นทำได้ยาก เกิดความเสียหายอื่นตามมาและส่งผลกระทบต่อคุณภาพข้าวลดต่ำลง จึงเป็นที่มาของมูลค่าความเสียหายเหล่านั้น ดังนั้นการค้นคว้าวิจัยเพื่อลดความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยวจึงเป็นสิ่งที่จะต้องทำเป็นอย่างยิ่งเพื่อที่จะช่วยลดปัญหาด้านการเก็บรักษา และควรได้รับการพัฒนาเพื่อลดการสูญเสียและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตข้าวทั้งระบบ

การอบแห้งผลผลิตการเกษตรหลังเก็บเกี่ยวโดยเฉพาะข้าวเปลือกเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อการถนอมรักษาคุณภาพ และเพื่อการเก็บรักษาให้ยาวนาน เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น (Spouted bed dryer) กำลังเป็นวิทยาการอบแห้งที่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีความรวดเร็วในการทำงานแต่ยังมีปัญหาเรื่องการสิ้นเปลืองพลังงานและความยุ่งยากในการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบ งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะพัฒนาระบบอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic drying) แบบใหม่ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นที่สามารถหน่วงเวลาการอบแห้งให้ยาวนานขึ้นกว่าปกติ อีกทั้งระบบนี้คาดว่าจะช่วยให้เกิดการคลุกเคล้าระหว่างข้าวเปลือกและอากาศอบแห้งได้ดียิ่งขึ้น เป็นผลทำให้การอบแห้งรวดเร็วขึ้นและมีการใช้พลังงานความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบอบแห้งพาหะลมรูปแบบเดิม ระบบมีความซับซ้อนน้อยกว่าเดิมเพราะไม่ต้องนำความร้อนทิ้งจากเครื่องอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการออกแบบสร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมที่สามารถหน่วงเวลาการอบแห้งได้ ระบบต้นแบบในงานวิจัยนี้เป็นระดับห้องปฏิบัติการ ออกแบบให้หอบแห้งวางตัวในแนวตั้งเพื่อให้อากาศอบแห้งไหลจากด้านล่างและพาเอาข้าวเปลือกขึ้นให้ไหลขึ้นไปสู่ด้านบน ในขณะที่ทำการให้ความร้อนแก่ข้าวเปลือกไปพร้อม ๆ กัน ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้วจะถูกพ่นลงในถังบรรจุที่มีลักษณะกลมยาวแบบไซโล

ก่อนที่ข้าวเปลือกที่ด้านล่างของถังจะถูกลำเลียงเข้าสู่หอบแห้งอีกครั้งในรอบต่อไป โดยจะประเมินหาอัตราการอบแห้งที่เปลี่ยนไปตามอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิอากาศอบแห้ง ความเร็วและรูปแบบอัตราการไหลของอากาศอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งและเปรียบเทียบผลกับการอบแห้งแบบพาหะลมปกติ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการนี้คือ ได้ระบบการอบแห้งข้าวเปลือกแบบใหม่ที่มีความรวดเร็วและประหยัดพลังงานมากยิ่งขึ้น รวมทั้งช่วยประหยัดงบประมาณในการลงทุนสร้างเครื่องอบแห้ง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ออกแบบและสร้างระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมในท่อแนวตั้งที่สามารถหมุนวงเวลาการอบแห้งได้ ด้วยการจ่ายอากาศอบแห้งเป็นแบบช่วง

1.2.2 ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกจากระบบที่สร้างขึ้น โดยพิจารณาผลของความเร็วของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง และรูปแบบความเร็วของอากาศอบแห้ง ซึ่งจะใช้เป็นเงื่อนไขในการพิจารณาถึงอัตราการอบแห้ง การใช้พลังงาน และคุณภาพข้าวเปลือกที่ได้จากการอบแห้ง

1.2.3 สร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยระบบอบแห้งชนิดนี้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมในท่อแนวตั้ง โดยเครื่องอบแห้งนี้จะเป็นเครื่องอบแห้งขนาดเล็กระดับห้องปฏิบัติการ

1.3.2 ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้นมีค่าอยู่ในช่วงการเก็บเกี่ยวจริงประมาณ 22 - 25 %wb

1.3.3 ความชื้นข้าวเปลือกหลังการอบแห้งมีค่าประมาณ 14 %wb

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงแนวปฏิบัติการของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกตามชนิดที่ได้คิดค้นขึ้น ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับอิทธิพลของความเร็วอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง และรูปแบบความเร็วของอากาศอบแห้ง ที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง พลังงานที่ใช้ และคุณภาพข้าวหลังการอบแห้ง

1.4.2 ได้แนวทางการพัฒนาการอบแห้งข้าวเปลือกสำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบใหม่ และได้วิธีการอบแห้งวัสดุการเกษตรแบบใหม่ที่รวดเร็วและประหยัดพลังงานมากยิ่งขึ้น

1.5 แนวคิดของเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่คิดค้นขึ้นในงานวิจัยนี้ เป็นการพัฒนาการอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมแนวใหม่ที่จะอาศัยรูปแบบการไหลของอากาศให้เป็นตัวกลางสำหรับการอบแห้ง จากการศึกษา งานวิจัยจำนวนมากนักวิจัยพยายามเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายในท่อลมร้อนเพื่อ

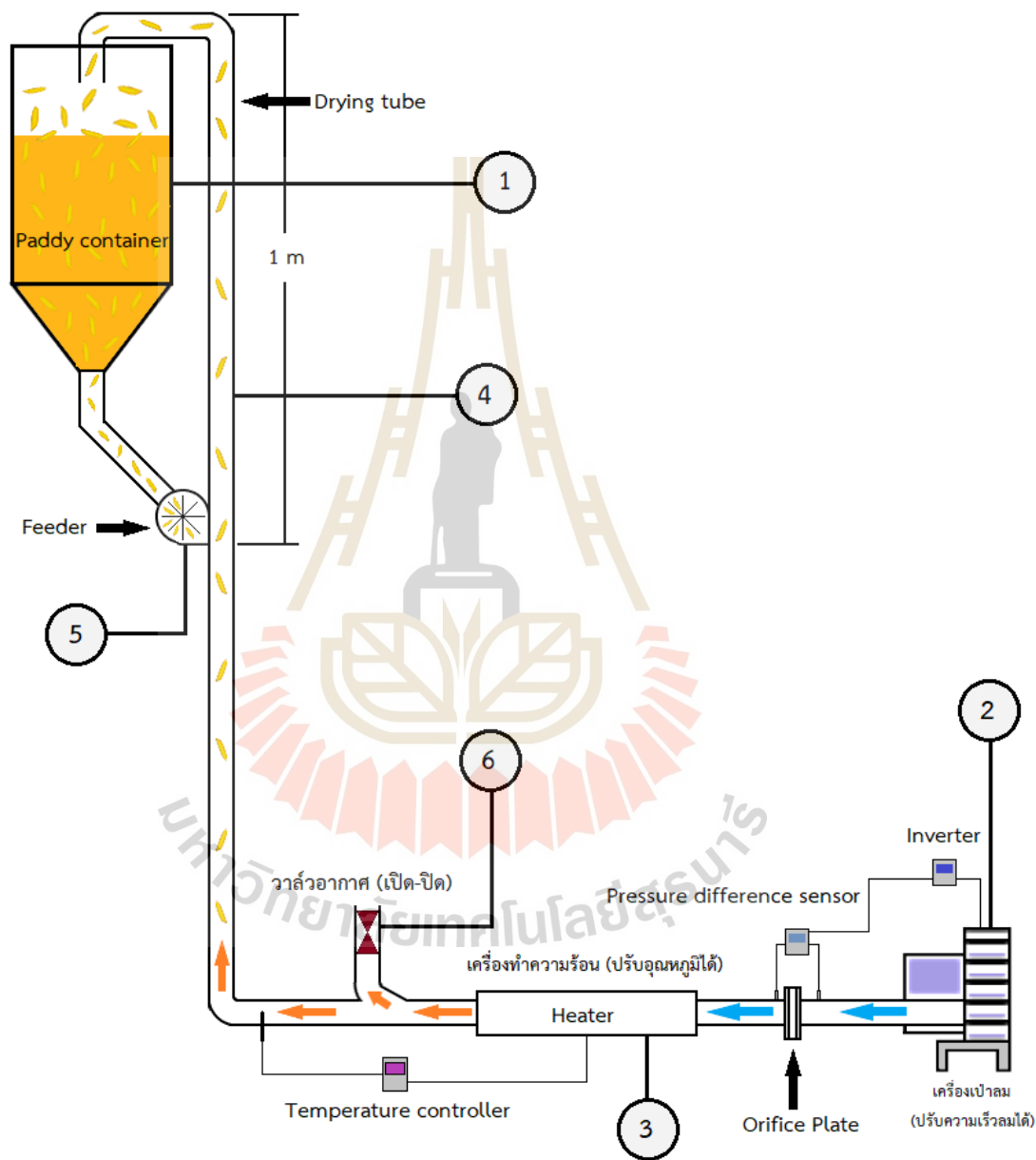
ประโยชน์ต่อการนำความร้อนจากอากาศไปใช้ต่ออย่างเกิดประโยชน์สูงสุด เช่นเดียวกับกับงานวิจัยทางด้านกรอบแห้งข้าวเปลือกนักวิจัยก็มีความมุ่งหวังต่อการใช้ประโยชน์จากลมร้อนเพื่อใช้ในการอบแห้งในขณะที่ไม่ลัดข้าวเปลือกอยู่ในหอบแห้งเช่นกัน และมีงานวิจัยจำนวนมากได้ทำการวิจัยถึงการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อเสริมสร้างการไหลแบบหมุนควงภายในท่อลมร้อนซึ่งเรียกว่า Passive technique (Liu, S. and Sakr, M., 2013) โดยหวังว่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายในท่อลมร้อนได้ดียิ่งขึ้น จากการศึกษาของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อเสริมสร้างการไหลแบบหมุนควงภายในท่อลมร้อนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายในท่อลมร้อนได้มากขึ้นจริง ซึ่งหากนำมาประยุกต์ใช้เป็นหอบแห้งข้าวเปลือกก็จะเป็นประโยชน์ต่อการอบแห้งเป็นอย่างมากด้วยเช่นกัน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในบริเวณแลกเปลี่ยนความร้อนหรือหอบแห้ง อาศัยเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบ Passive technique ชนิดไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์เสริมสร้างการไหลภายในหอบแห้ง โดยจะพัฒนารูปแบบการไหลของอากาศให้มีการไหลแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ด้วยการป้อนอากาศอบแห้งจากด้านล่างของหอบแห้ง เมล็ดข้าวเปลือกที่เคลื่อนที่ในหอบแห้งภายใต้การไหลของลมร้อนแบบดังกล่าวจะเกิดการเคลื่อนที่แบบ ขึ้น - ลง ตลอดความสูงของหอบแห้งซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่หลายแบบภายในหอบแห้ง ทั้งแบบไหลไปพร้อมอากาศ (Co - current flow) แบบไหลสวนทางกัน (Counter current flow) และแบบไหลขวาง (Cross current flow) โดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์ขวางภายในหอบแห้ง (เครื่องอบแห้งต้นแบบแสดงดังรูปที่ 1.1) ซึ่งเชื่อว่าจะช่วยให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทความร้อนขึ้นระหว่างอากาศกับเมล็ดข้าวเปลือกได้ดีและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และจะเป็นแนวทางที่ดีต่อการนำไปปรับใช้ในการอบแห้งวัสดุเกษตรชนิดอื่น ๆ ที่มีลักษณะเป็นเมล็ดเช่นเดียวกัน

หลักการทํางานของระบบเริ่มจากบรรจุข้าวลงในถังบรรจุ (หมายเลข 1) อากาศแวดล้อมถูกอัดด้วยเครื่องเป่าลมที่สามารถปรับความเร็วลมได้ (หมายเลข 2) ไหลผ่านเครื่องทำความร้อนที่สามารถปรับอุณหภูมิได้ (หมายเลข 3) จากนั้นลมร้อนไหลไปตามท่อแนวดิ่งหรือท่ออบแห้ง (หมายเลข 4) ด้วยความเร็วตามที่กำหนด ในขณะเดียวกันเมล็ดข้าวเปลือกจะถูกลำเลียงออกจากถังบรรจุเข้าสู่ส่วนของท่อตรงแนวดิ่งหรือท่ออบแห้ง (หมายเลข 4) ผ่านการขับเคลื่อนการไหลด้วยชุดป้อนข้าวเปลือก (หมายเลข 5) ในจังหวะที่เมล็ดข้าวเปลือกผ่านเข้ามาในบริเวณหอบแห้งแล้วนั้นจะทำให้เมล็ดข้าวเปลือกสัมผัสกับอากาศร้อน (อากาศอบแห้ง) ที่ไหลมาจากด้านล่างของหอบแห้งทำให้เกิดการพัดพาและหอบเอาเมล็ดข้าวเปลือกจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนของหอบแห้งไปตามแนวท่อ เมล็ดข้าวเปลือกจะถูกส่งออกไปตามแนวท่อแล้วตกลงในถังบรรจุเพื่อรอการอบแห้งในรอบต่อ ๆ ไป ระบบอบแห้งจะหมุนวนซ้ำ ๆ จนกระทั่งได้ความชื้นสุดท้ายตามที่ต้องการจึงจะยุติการทำงาน

ในส่วนของการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในขณะที่อยู่ในบริเวณหอบแห้งนั้น จะเป็นไปตามรูปแบบการไหลของอากาศที่ปล่อยให้ไหลเข้าไปตามท่อแนวดิ่ง ซึ่งจะควบคุมอากาศที่ไหลเข้าไปให้เป็น

การไหลแบบเป็นช่วง (Pulse flow) โดยควบคุมผ่านการเปิด - ปิดวาล์ว (หมายเลข 6) เพื่อลดแรงดันอากาศที่วิ่งภายในท่อ ซึ่งพฤติกรรมของการไหลของอากาศในรูปแบบดังกล่าวจะช่วยให้เมล็ดข้าวเปลือกเกิดการเคลื่อนตัวเป็นไปตามกัน



รูปที่ 1.1 ระบบของเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย

บทที่ 2

คำจำกัดความและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การอบแห้ง (Drying) เป็นกระบวนการแปรสภาพของเหลว ของเหลวกึ่งของแข็ง หรือแม้กระทั่งของแข็ง ให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายในรูปของแข็งโดยขจัดเอาของเหลว (น้ำ) ออกด้วยการระเหยส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดออกไปจากวัสดุด้วยการให้ความร้อน ทั้งนี้การอบแห้งดังที่กล่าวมามีความแตกต่างกับการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze Drying) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดร่วมสาม (Triple Point) กล่าวคือของเหลวที่ถูกขจัดออกจากกรณีดังกล่าวจะเกิดขึ้นจากการระเหิดของของแข็งไปเป็นไอโดยตรงไม่ผ่านวัฏภาคของเหลว เช่น น้ำแข็ง อีกทั้งการอบแห้งยังมีความแตกต่างจากกระบวนการขจัดน้ำด้วยวิธีทางกล (Mechanical Dewatering) เช่น การกรอง (Filtration) การหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) และการตกตะกอน (Sedimentation) อีกด้วย (สั๊กมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและคำจำกัดความที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยแบ่งเป็นความสำคัญของการอบแห้ง การอบแห้งเมล็ดพืช หลักการอบแห้งเมล็ดพืช ภูมิหลังของการอบแห้งเมล็ดพืช เครื่องอบแห้งเมล็ดพืช ความชื้นในวัสดุ ความชื้นสัมบูรณ์ ความชื้นสัมพัทธ์ ความชื้นสมดุลของวัสดุ การถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทมวล กลไกการแพร่ความชื้นภายในเมล็ดพืช วิธีการหาความชื้นในเมล็ดพืช คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุเกษตร ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ความสำคัญของการอบแห้ง

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญมากที่สุดกระบวนการหนึ่งในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร เยื่อและกระดาษ เทคโนโลยีชีวภาพ ยา และพอลิเมอร์ เป็นต้น สำหรับประเทศไทยซึ่งมีผลผลิตทางการเกษตรและอาหารหลากหลายชนิด การอบแห้งนับเป็นกระบวนการสำคัญในการถนอมรักษาผลผลิตเหล่านั้นเพื่อให้สามารถเก็บรักษาไว้ได้ยาวนานและเป็นที่ต้องการของผู้บริโภคทั้งในและต่างประเทศได้ อันจะส่งผลให้เกิดการสร้างมูลค่าเพิ่มกับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอาหารของประเทศเป็นอย่างมาก ในแง่ของการใช้พลังงานการอบแห้งนับเป็นกระบวนการที่สิ้นเปลืองพลังงานมากที่สุดกระบวนการหนึ่ง ส่งผลให้การอบแห้งเป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายสูง ความรู้ความเข้าใจที่ถูกต้องเกี่ยวกับกระบวนการอบแห้งจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยนำไปสู่ความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง การประหยัดพลังงาน และการลดต้นทุนการผลิตของอุตสาหกรรมการอบแห้งอาหารและวัสดุประเภทต่าง ๆ ได้

โดยทั่วไปแล้ววัตถุประสงค์หลักของการอบแห้งคือ การยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ (โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลผลิตทางการเกษตรและอาหาร) เนื่องจากการอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้น (น้ำ) ในวัสดุ (ผลผลิตทางการเกษตร) ซึ่งมีผลให้จุลินทรีย์ที่ทำให้วัสดุเกิดการเน่าเสียไม่สามารถเจริญเติบโตได้ อีกทั้งยังมีผลต่อปฏิกิริยาเคมี เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งมีอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate of Reaction) ที่ต่ำลงเมื่อปริมาณความชื้นในวัสดุลดลง นอกจากนี้การอบแห้งยังมีข้อดีที่ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ และยังเป็นส่วนสำคัญในกระบวนการแปรรูปอาหารอีกมากมายด้วยเช่นกัน (สั๊กมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)

2.2 การอบแห้งเมล็ดพืช

เนื่องจากผลผลิตทางการเกษตร อันได้แก่ ข้าวเปลือก ข้าวโพด และเมล็ดพืชอื่น ๆ จะมีเป็นฤดูกาล แต่การบริโภคจะมีตลอดทั้งปี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเก็บรักษาที่ดีเพื่อรักษาทั้งคุณภาพและปริมาณ ปัจจัยสำคัญในการเก็บรักษาที่สำคัญปัจจัยหนึ่งคือเมล็ดพืชเหล่านี้จะต้องมีความชื้นที่เหมาะสม คือไม่สูงเกินไป ระยะเวลาของการเก็บรักษาได้โดยปลอดภัยขึ้นอยู่กับความชื้นของเมล็ดพืช ถ้าความชื้นต่ำก็จะเก็บรักษาได้นาน แต่การที่อบแห้งเมล็ดพืชให้แห้งมาก ๆ นั้นก็ไม่มีประโยชน์ เพราะนอกจากจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการอบแห้งเพิ่มมากขึ้นโดยไม่จำเป็นแล้ว ยังทำให้เกิดความเสียหาย (เมล็ดแตกหัก) ระหว่างการขนถ่ายเมล็ดพืชได้ง่าย และทำให้สูญเสียน้ำหนักในเชิงพาณิชย์อีกด้วย ความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษามีค่าระหว่าง 13 - 15 %wb สำหรับเมล็ดพืชพวกแป้ง และประมาณ 10 %wb สำหรับพืชน้ำมัน (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ์, 2540) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ต้องการเก็บรักษา

2.3 หลักการอบแห้งเมล็ดพืช

โดยทั่วไปเรามักใช้อากาศที่มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ทั้งนี้เพราะสามารถอบแห้งได้เร็ว และได้ความชื้นของเมล็ดพืชต่ำตามที่ต้องการอุณหภูมิของอากาศจะสูงเท่าไรนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการนำเมล็ดพืชไปใช้งาน วิธีและเทคนิคที่ใช้ในการอบแห้ง โดยมากเรามักจะเลือกเอาอุณหภูมิสูงสุดที่ยอมให้ได้โดยคุณภาพของเมล็ดพืชไม่เสียหาย เพราะจะทำให้อบแห้งบางวิธีเราอาจใช้อากาศแวดล้อมในการอบแห้ง เช่นวิธีการอบแห้งในถังเก็บ คืออบแห้งเมล็ดพืชภายในตัวถังที่ใช้เก็บรักษา การใช้อากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้เมล็ดพืชทางด้านล่างของถังซึ่งสัมผัสกับลมร้อนก่อนแห้งเกินกว่าที่ต้องการ ส่วนเมล็ดพืชทางด้านบนของถังซึ่งสัมผัสกับลมร้อนทีหลังจะยังชื้นอยู่

ในขณะที่อากาศร้อนเคลื่อนที่ผ่านชั้นเมล็ดพืช จะเกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลขึ้นพร้อม ๆ กัน ความร้อนจากอากาศจะถ่ายเทไปยังเมล็ดพืช และทำให้น้ำที่บริเวณผิวเมล็ดระเหยเข้าสู่อากาศ เป็นผลให้อากาศมีอุณหภูมิลดลง และความชื้นสัมพัทธ์อากาศสูงขึ้น ส่วนเมล็ดพืชจะมี

ความชื้นลดต่ำลง และหากความชื้นลดลงมากพอแล้วอุณหภูมิของเมล็ดพืชจะเริ่มสูงขึ้นด้วย จนในที่สุดเมล็ดพืชจะมีอุณหภูมิสูงเท่ากับอุณหภูมิอากาศที่ใช้ออบแห้ง หากว่าความชื้นลดลงจนถึงความชื้นสมดุล เมื่อเมล็ดพืชแห้งดีแล้ว เรามักจะผ่านอากาศแวดล้อมเข้าชั้นเมล็ดพืชเพื่อให้อุณหภูมิลดลง หากเก็บเมล็ดพืชทั้งที่ยังมีอุณหภูมิสูงอยู่อาจเกิดปัญหาการไหลเวียนของอากาศโดยธรรมชาติอันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งมีผลให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำในอากาศ ทำให้เมล็ดพืชในบริเวณที่มี การควบแน่นมีความชื้นสูงขึ้น โดยมากมักจะเป็นที่ชั้นบน ๆ และจะเป็นจุดเริ่มต้นของการแพร่เชื้อราและแมลงต่อไป (เทวรัตน์ ทิพยวิมล, 2554)

2.4 ภูมิหลังของการอบแห้งเมล็ดพืช

โดยปกติแล้วข้าวเปลือกจะมีความชื้นเมล็ดหลังการเก็บเกี่ยวอยู่ที่ 20 - 25 %wb จึงจำเป็นต้องลดความชื้นก่อนเก็บรักษา ในอดีตเกษตรกรจะเกี่ยวข้าวในขณะความชื้นเมล็ดข้าวไม่สูงนัก แล้ววางรวงข้าวไว้ในนาทิ้งตากแดดไว้ประมาณ 2 - 3 วันเพื่อให้เมล็ดแห้งและให้ฟางยุบตัว หลังจากนั้นจะใช้ตอกมัดฟ่อนในตอนเช้าหรือเย็นเพื่อป้องกันไม่ให้เมล็ดข้าวร่วงจากรวงมาก แล้วทยอยขนฟ่อนข้าวเก็บเข้าลานนวด สำหรับข้าวนาปรังนั้นมีการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างไปจากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ทั้งนี้เนื่องจากการเกี่ยวเกี่ยวข้าวนาปรังจะตรงกับฤดูฝน เมื่อเกษตรกรเกี่ยวข้าวก็จะทำการมัดฟ่อนทันทีแล้ววางไว้บนตอซังเพื่อให้พื้นน้ำหรือพื้นดินที่เปียกชื้น โดยให้ทางรวงข้าวห้อยลงมาให้ให้น้ำไหลลงเร็วขณะฝนตก เกษตรกรบางรายจะเกี่ยวและมัดฟ่อนแล้วขนย้ายเข้าลานนวดทันทีเพื่อทำการตากให้แห้ง แต่มักประสบปัญหาเนื่องจากฝนตกและพื้นที่สำหรับตากแห้งมีไม่เพียงพอ ปัญหาเมล็ดข้าวขึ้นจะเกิดกับข้าวนาปรังเป็นส่วนใหญ่ เมล็ดข้าวขึ้นเมื่อเก็บไว้จะมีอุณหภูมิสูง ทำให้ข้าวเป็นฟืนหนู (เมล็ดข้าวสารมีสีเหลือง) ขายไม่ได้ราคา จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่าวิธีการปฏิบัติของเกษตรกรทำให้เกิดความสูญเสียที่ค่อนข้างสูงทั้งด้านปริมาณและคุณภาพ ทั้งนี้เนื่องจากเมล็ดพืชถูกทิ้งไว้ในไร่นาและหรือใช้เวลาในการทำให้เมล็ดพืชแห้งนานเกินไป เป็นผลให้เกิดการสูญเสียด้านปริมาณ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจาก นก หนู แมลง การร่วงหล่น เป็นต้น และเกิดการสูญเสียด้านคุณภาพ เช่น ข้าวแตกหักจากการเกิดวงจรเปียก - แห้ง ข้าวฟืนหนู ข้าวงอก หรือเชื้อราและสารพิษที่เกิดจากเชื้อรา ความชื้นที่เหมาะสมขณะเก็บเกี่ยวอาจอยู่ระหว่าง 20 - 30 %wb ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเมล็ดพืช

การตากแห้งข้าวเปลือกแบบเป็นชั้นบาง ๆ บนลานคอนกรีตในโรงสีข้าวสมัยก่อนเป็นที่นิยมกันค่อนข้างมากเนื่องจากเทคโนโลยีเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกยังไม่เป็นที่แพร่หลาย การตากแห้งบนลานจะทำโดยสร้างลานให้มีลักษณะเหมือนหลังเต่าเพื่อป้องกันน้ำซังและให้ข้าวเปลือกแห้งอย่างทั่วถึง วิธีนี้จะมีการเกลี่ยข้าวเปลือกวันละหลาย ๆ ครั้ง เมื่อมีฝนตก จะมีการรวบรวมให้เป็นกองข้าวแล้วคลุมทับด้วยผ้าใบ เมื่อฝนหยุดตกแล้วก็จะเกลี่ยข้าวเป็นชั้นบางใหม่ ระยะเวลาที่ใช้ในการตากแดดอาจใช้เวลาเป็นวันหรือหลายวัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความชื้นของเมล็ดพืชและ

สภาวะอากาศ อุปกรณ์รุนแรงที่ใช้กันมาก ได้แก่ รถเกรด และรถดัก แม้ว่าวิธีนี้จะลงทุนน้อยแต่ต้องใช้แรงงานและพื้นที่มาก นอกจากนี้การทำงานยังต้องขึ้นกับสภาวะของอากาศด้วย (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ์, 2540)

2.5 เครื่องอบแห้งเมล็ดพืช

ในปัจจุบันผลผลิตทางการเกษตรโดยเฉพาะข้าวเปลือกนิยมใช้รถเก็บเกี่ยวกันมากขึ้น ซึ่งการเก็บเกี่ยวด้วยรถเกี่ยวจำเป็นต้องกระทำในขณะที่ข้าวเปลือกยังมีความชื้นสูงอยู่ เพื่อป้องกันการหลุดร่วงของเมล็ดออกจากรวงข้าวขณะเก็บเกี่ยว (ข้าวเปลือกที่มีความชื้นต่ำ เมล็ดจะหลุดร่วงจากรวงได้ง่าย) ดังนั้นข้าวเปลือกที่ได้มามากจะยังมีความชื้นที่สูงอยู่เสมอไม่ว่าจะเป็นข้าวนาปีหรือนาปรัง เครื่องอบแห้งจึงมีบทบาทมากขึ้นที่จะนำมาช่วยในกระบวนการลดความชื้นนี้ ดังจะเห็นได้จากการที่โรงสีข้าวต่างเริ่มลงทุนติดตั้งเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก ด้วยมีนโยบายสนับสนุนทางการเงินจากรัฐบาล อีกทั้งมีนักวิจัยจำนวนมากได้เข้ามาเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาต่อยอดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอบแห้ง ช่วยให้สามารถลดต้นทุนในการอบแห้ง และได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดีเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการอีกด้วย

ผลผลิตทางการเกษตรและอาหารมีความแตกต่างกันทางกายภาพอยู่มากแล้วแต่ประเภท ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีเครื่องอบแห้งหลาย ๆ แบบเพื่อให้เหมาะกับชนิดของวัสดุที่นำมาทำการอบแห้ง ความผิดพลาดในการเลือกประเภทเครื่องอบแห้งจะก่อให้เกิดปัญหาในการปฏิบัติงานแม้ว่าเครื่องอบแห้งจะทำงานได้ แต่ความสามารถในการอบแห้งก็จะลดลงอย่างมาก (เทวรัตน์ ทิพยวิมล, 2554) ในบทนี้จึงจะกล่าวถึงลักษณะของเครื่องอบแห้งที่ใช้สำหรับการอบแห้งวัสดุเกษตรและอาหารในแบบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบอยู่กับที่ (Fixed - bed dryer) และเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล (Moving - bed dryer) ซึ่งแต่ละชนิดยังสามารถแบ่งย่อยได้อีก ซึ่งมีข้อดีข้อเสียก็แตกต่างกันออกไป (เทวรัตน์ ทิพยวิมล, 2554) ดังนี้

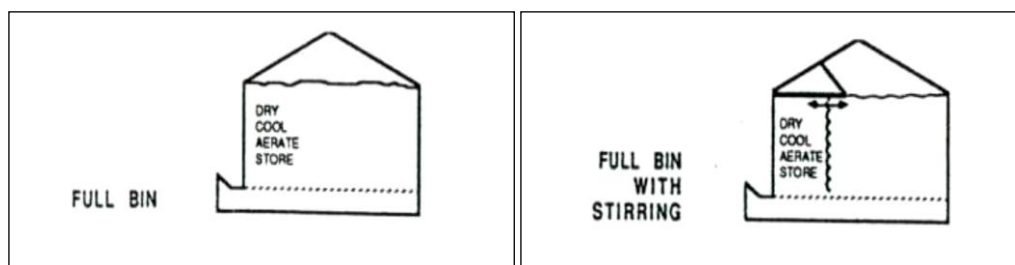
2.5.1 เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ (Fixed - bed dryer)

เครื่องอบแห้งแบบนี้อาจแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ แบบถังเก็บ (In - bin drying) แบบเป็นชั้น (Layer drying) และแบบเป็นงวด (Batch - in - bin drying) ในเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่โดยทั่วไปแล้วอัตราการไหลของอากาศภายในจะค่อนข้างต่ำ

ก. เครื่องอบแห้งแบบถังเก็บ (In - bin drying)

เมล็ดพืชหลังเก็บเกี่ยวจะถูกขนย้ายมาไว้ในถังเก็บซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องอบแห้งด้วย (เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบถังเก็บแสดงดังรูปที่ 2.1) ความสูงของชั้นเมล็ดพืชในเครื่องอบแห้งแบบนี้จะมากกว่าในเครื่องอบแห้งชนิดอื่นโดยอาจจะ

สูงถึง 6 เมตร อุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศที่ใช้อบแห้งมักจะต่ำ อากาศที่ใช้อาจเป็นอากาศแวดล้อมอัตราการไหลของอากาศที่ใช้กันมีค่าอยู่ในช่วง $0.5 - 5 \text{ m}^3/\text{min} - \text{m}^3_{\text{เม็ล็ดพืช}}$ การอบแห้งจะดำเนินไปอย่างช้า ๆ โดยอาจล่วงเวลาไปหลายสัปดาห์ การลดลงของความชื้นเกิดขึ้นได้ช้าและอาจทำให้การเจริญเติบโตของเชื้อราอาจเกิดขึ้นได้ง่าย เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้ความชื้นเริ่มต้นของเม็ล็ดพืชที่นำมาอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งนี้ไม่ควรมีค่าสูงเกินไป ในสหรัฐอเมริกาซึ่งมีสภาวะอากาศแบบอบอุ่นความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพดควรต่ำกว่า 24 % ส่วนในประเทศเขตร้อนชื้นความชื้นเริ่มต้นของเม็ล็ดควรต่ำกว่านั้น โดยความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกที่อบแบบถึงเก็บภายใต้สภาวะอากาศร้อนชื้นไม่ควรสูงกว่า 20 % อากาศที่ใช้อบแห้งอาจถูกทำให้ร้อนขึ้นถ้าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูงเกินไป โดยทั่วไปเรามักจะใช้ตัวควบคุมความชื้น (Humidistat) เป็นตัวควบคุมการทำงานของตัวอุ่นอากาศ กล่าวคือเมื่อความชื้นสัมพัทธ์อากาศสูงตัวควบคุมจะให้ตัวอุ่นอากาศร้อนทำงานสำหรับการอบแห้งข้าวโพด ซึ่งอาจตั้งตัวควบคุมที่ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 55 % เพื่อให้ระบบอบแห้งมีความง่ายเราอาจไม่ใช้ตัวควบคุมความชื้นก็ได้ แต่ใช้ตัวทำอากาศร้อนที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิของอากาศได้ประมาณ $3 - 6^\circ\text{C}$ วิธีนี้มีข้อเสียคือ อากาศอาจแห้งเกินไปและเป็นผลให้เม็ล็ดพืชแห้งเกินกว่าที่ต้องการ ในกรณีที่ใช้อากาศร้อนในการอบแห้งจะต้องทำให้เม็ล็ดพืชเย็นลงหลังจากที่เม็ล็ดพืชแห้งแล้วโดยการเป่าอากาศแวดล้อม มิฉะนั้นอาจเกิดปัญหาการถ่ายเทความชื้นในถังเก็บอันเนื่องมาจากการไหลเวียนของอากาศ ซึ่งเกิดขึ้นจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในกองเม็ล็ดพืชเป็นผลให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำในอากาศในบริเวณที่เม็ล็ดพืชมีอุณหภูมิต่ำทำให้เม็ล็ดพืชในบริเวณนี้มีความชื้นสูงขึ้น จนเป็นเหตุให้เกิดการลุกลามของเชื้อราและการระบาดของแมลงในที่สุด (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2554)



รูปที่ 2.1 เครื่องอบแห้งเม็ล็ดพืชแบบถึงเก็บ (In - bin drying) (Brooker, D. B. et al., 1992)

เครื่องอบแห้งแบบถังมีข้อดีและข้อเสียที่พอสรุปได้ดังนี้

ข้อดี

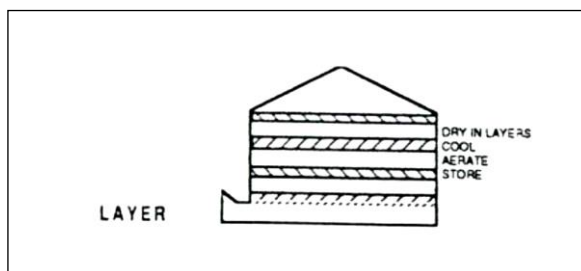
1. จะเก็บเกี่ยวเมล็ดพืชด้วยอัตราใดก็ได้
2. การจัดการง่าย
3. ขั้นตอนการขนย้ายเมล็ดพืชมีน้อย ทำให้ประหยัดและลดการแตกร้าวของเมล็ดพืช
4. ใช้ความร้อนสัมผัสในอากาศที่ใช้ออบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ
5. เมล็ดพืชหลังการอบไม่แห้งเกินไป
6. การใช้อุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดการร้าวของเมล็ดพืชน้อย
7. ประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย

ข้อเสีย

1. ไม่สามารถเก็บเมื่อเมล็ดมีความชื้นสูงมาก
2. ระยะเวลาการอบแห้งยาวนาน ทำให้ต้องเสียเวลาในการจัดการมาก

ข. เครื่องอบแห้งแบบเป็นชั้น (Layer drying)

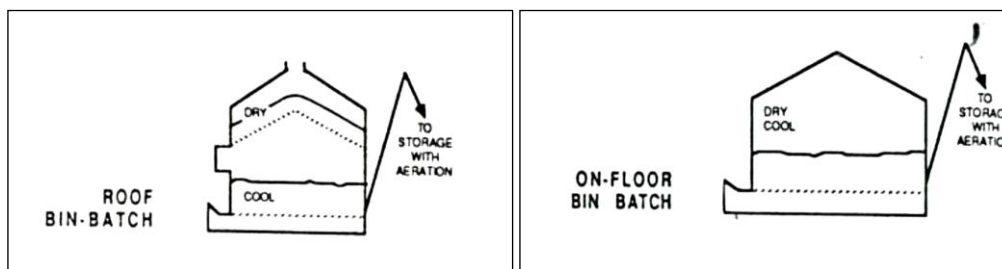
การอบแห้งแบบเป็นชั้นมีความคล้ายคลึงกับการอบแห้งแบบถังเก็บจะแตกต่างกันเพียงแต่ปริมาณการเก็บเกี่ยวแต่ละครั้งไม่มากนัก (เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบเป็นชั้นแสดงดังรูปที่ 2.2) โดยเมล็ดพืชที่เก็บเกี่ยวในแต่ละวันจะถูกนำไปไว้ในถังเก็บซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องอบแห้งไปในตัว การอบแห้งจะเริ่มทันทีเมื่อเมล็ดพืชที่มีความชื้นงวดแรกมาถึง และเมื่อเมล็ดพืชงวดถัดไปมาถึงถึงเก็บเมล็ดพืชงวดแรกจะถูกย้ายไปในถังถัดไป เมล็ดพืชจะถูกขนย้ายไปในถังเก็บอันต่อไปต่อเนื่องแบบนี้ไปเรื่อย ๆ ในขณะที่เมล็ดพืชงวดใหม่ ๆ ก็ทยอยเติมเข้ามา จะเห็นได้ว่าลักษณะการดำเนินการอบแห้งจะเกิดขึ้นแบบเป็นชั้น ๆ เมล็ดพืชที่เก็บเกี่ยวก่อนจะมีความชื้นสูง ในขณะที่ความหนาแน่นของชั้นเมล็ดพืชจะยังน้อยอยู่ ดังนั้นอัตราการไหลของอากาศจะสูง เมล็ดพืชที่เก็บเกี่ยวครั้งหลังโดยปกติจะมีความชื้นต่ำกว่าเมื่อเก็บเกี่ยวครั้งแรก ในขณะที่ความหนาแน่นของชั้นเมล็ดพืชจะเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลให้อัตราการไหลของอากาศลดลง การอบแห้งด้วยวิธีนี้ทำให้สามารถเก็บเกี่ยวเมล็ดพืชที่มีความชื้นสูงได้ แต่จะต้องมีการจัดการที่ดีพอโดยเฉพาะการเก็บเกี่ยว ถ้าเก็บเกี่ยวในแต่ละครั้งมากเกินไปจะทำให้การอบแห้งสำหรับชั้นนั้นใช้เวลานานและเมล็ดพืชอาจเสียหายได้ วิธีการอบแห้งแบบเป็นชั้นนี้น่าจะนำมาใช้กับประเทศในเขตร้อนชื้นได้ (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2554)



รูปที่ 2.2 เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบเป็นชั้น (Layer drying) (Brooker, D. B. et al., 1992)

ค. เครื่องอบแห้งแบบเป็นงวด (Batch - in - bin drying)

เมล็ดพืชจะถูกอบในเครื่องอบแห้งแล้วทำให้เย็นลงก่อนนำไปเก็บไว้ในถังเก็บอากาศที่ใช้อบแห้งมีอุณหภูมิสูงกว่าเครื่องอบแห้งสองชนิดแรกที่ได้กล่าวมาแล้ว คือประมาณ 49 - 71°C อัตราการไหลของอากาศก็สูงกว่ามาก คือประมาณ 6 - 11 m³/min - m³เมล็ดพืช และความหนาของชั้นเมล็ดพืชน้อยกว่า เพียงแค่ประมาณ 1 เมตร หรืออาจน้อยกว่า การอบแห้งจะเป็นไปอย่างรวดเร็วโดยอาจแล้วเสร็จภายใน 12 - 24 ชั่วโมง (เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบเป็นงวดแสดงดังรูปที่ 2.3) ปัญหาของระบบนี้คือการเกิดเกรเดียนต์ของความชื้น (Moisture gradient) ในชั้นเมล็ดพืชอันเนื่องมาจากการใช้อุณหภูมิสูงในการอบแห้ง โดยเมล็ดพืชที่บริเวณทางเข้าของอากาศจะแห้งเกินไป และเมล็ดพืชที่ตรงทางออกอาจมีความชื้นเท่ากับความชื้นเริ่มต้น ในขณะที่ความชื้นเฉลี่ยได้ตามที่ต้องการแล้ว ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้เป็นบางส่วนโดยขณะที่เมล็ดพืชไหลออกจากเครื่องอบแห้งเพื่อนำไปเก็บรักษาจะเกิดการผสมกันระหว่างเมล็ดพืชแห้งและชื้นซึ่งต้องใช้เวลาหลายวันสำหรับการแพร่ความชื้นระหว่างเมล็ด นอกจากนี้การเป่าอากาศเพื่อให้เมล็ดพืชเย็นลงหลังการอบแห้งแล้วเสร็จ สามารถช่วยลดเกรเดียนต์ความชื้นได้อีกเล็กน้อย และทำให้ความชื้นเฉลี่ยลดลงเล็กน้อย ด้วยการเป่าลมเย็นอาจใช้เวลาประมาณ 1 - 2 ชั่วโมง การทำให้เกรเดียนต์ความชื้นในชั้นเมล็ดพืชลดลงอาจทำได้โดยการใช้ตัวกวน หรือตัวหมุนเวียนเมล็ดพืช หรือทำได้โดยการควบคุมความหนาของชั้นเมล็ดพืชที่อบแห้ง ซึ่งความหนาของชั้นเมล็ดพืชนี้อาจลดลงมาให้เหลือเพียงแค่ 0.30 - 0.45 เมตร (เทวรัตน์ทิพย์วิมล, 2554)

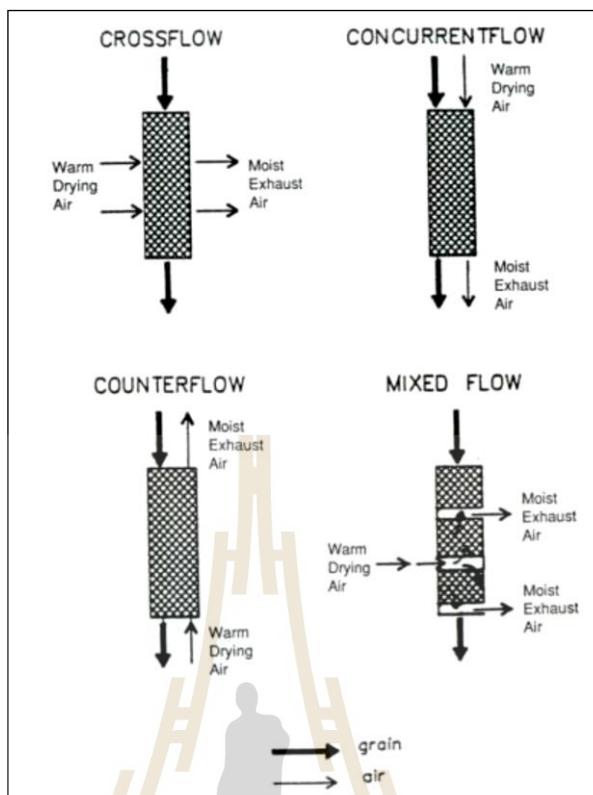


รูปที่ 2.3 เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบเป็นงวด (Batch - in - bin drying) (Brooker, D. B. et al., 1992)

อีกหนึ่งปัญหาที่สำคัญสำหรับระบบอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ก็คือการกระจายของกระแสอากาศ ระดับของเมล็ดพืชควรที่จะเท่ากันตลอดเพื่อให้การไหลของอากาศเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การใช้เกลียวลำเลียงในแนวราบ ซึ่งอยู่เหนือพื้นเครื่องอบแห้งเล็กน้อยเพื่อใช้กวาดเมล็ดพืชเข้าสู่จุดศูนย์กลางของเครื่องอบแห้งอาจทำให้เศษผงและสิ่งสกปรกมารวมกันอยู่ที่จุดศูนย์กลางของเครื่องอบแห้ง ทำให้บริเวณนี้รับกระแสอากาศน้อยกว่าบริเวณที่อยู่รอบนอก เศษผงและสิ่งสกปรกเหล่านี้ควรได้รับการและกำจัดออกเป็นครั้งคราว

2.5.2 เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล (Moving - bed dryer)

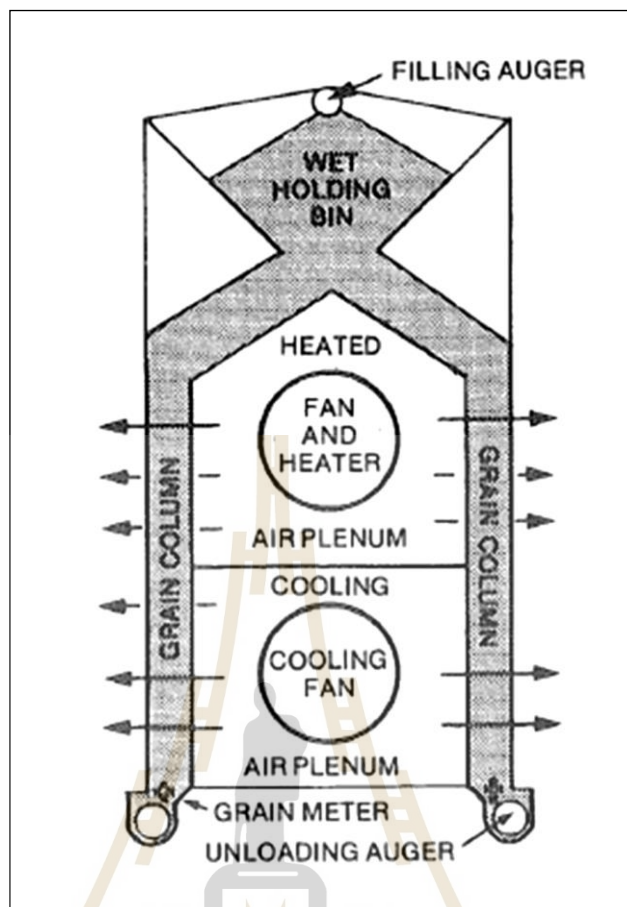
เครื่องอบแห้งแบบนี้แตกต่างกับเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ตรงที่เมล็ดพืชมีการไหลในขณะที่ทำการอบแห้ง โดยทั่วไปเมล็ดพืชจะไหลลงสู่ที่ต่ำด้วยแรงโน้มถ่วง อัตราการไหลของเมล็ดพืชขึ้นอยู่กับตัวควบคุมการไหล ซึ่งอาจใช้คนปรับโดยดูจากความชื้นของเมล็ดพืชเป็นช่วง ๆ หรืออาจควบคุมโดยอัตโนมัติโดยใช้เทอร์โมสแตทเป็นตัวควบคุมการทำงานของตัวควบคุมการไหล เมล็ดพืชที่แห้งแล้วจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการระเหยของน้ำมีน้อย หรืออาจใช้เครื่องวัดความชื้นซึ่งอาจวัดได้ถูกต้องดี แต่ราคาอาจสูงมากตาม เครื่องอบแห้งชนิดนี้สามารถแบ่งย่อยได้อีก 4 แบบตามทิศทางการไหลของเมล็ดพืชและอากาศอบแห้ง ประกอบด้วย แบบไหลขวาง (Cross - flow dryer) แบบไหลตาม (Concurrent - flow dryer) แบบไหลสวนทาง (Counter - flow dryer) และแบบผสม (Mixed flow) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เครื่องอบแห้งที่กล่าวมานี้มีความเหมาะสมกับงานในระดับกลางและใหญ่ เพราะใช้อุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศสูง ทำให้การอบแห้งเป็นไปอย่างรวดเร็ว (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2554)



รูปที่ 2.4 ลักษณะการไหลของเมล็ดพืชและอากาศอบแห้ง (Brooker, D. B. et al., 1992)

ก. เครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง (Cross - flow dryer)

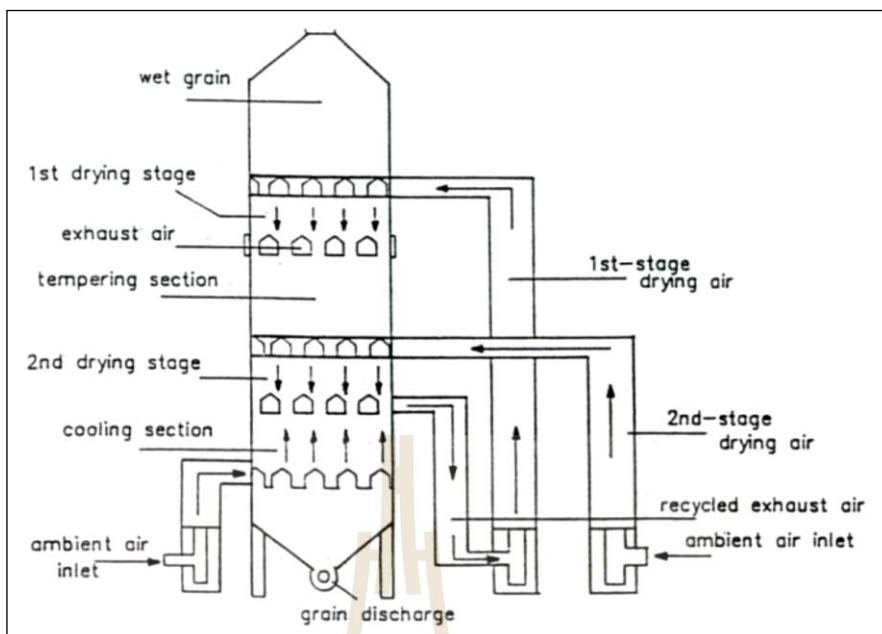
สำหรับเครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง อากาศที่ใช้ออบแห้งจะไหลตัดผ่านทิศทางการไหลของเมล็ดพืชดังรูปแสดงในที่ 2.5 ที่ทางด้านบนของเครื่องอบแห้งจะมีที่เก็บเมล็ดพืช เมล็ดพืชจะไหลลงด้านล่างผ่านช่องแคบซึ่งกว้างประมาณ 0.30 - 0.45 เมตร และไหลออกทางด้านล่างของเครื่องอบแห้งด้วยตัวควบคุมการไหล ช่องแคบที่เมล็ดพืชไหลลงนี้แบ่งได้เป็น 2 ส่วน ส่วนบนเป็นส่วนอบแห้งและส่วนล่างเป็นส่วนที่ทำให้เมล็ดพืชเย็นลงหลังอบแห้งแล้วเสร็จ การไหลของเมล็ดพืชและอากาศจะมีทิศทางตั้งฉากกัน อัตราการไหลของอากาศมีค่าอยู่ระหว่าง 38 - 76 $\text{m}^3/\text{min} - \text{m}^3$ เมล็ดพืช อัตราการไหลของเมล็ดพืชขึ้นอยู่กับตัวควบคุมการไหลซึ่งติดตั้งอยู่ที่ส่วนล่างของเครื่องอบแห้ง ปัญหาของเครื่องอบแห้งชนิดนี้ก็เช่นเดียวกับเครื่องอบแห้งแบบเป็นวง คือการเกิดเกรเดียนต์ความชื้นในชั้นเมล็ดพืช เมล็ดพืชขึ้นและแห้งจะผสมกันเป็นบางส่วนตรงทางออกของเครื่องอบแห้ง ทำให้ลดปัญหานี้ลงได้เป็นบางส่วน ปัญหาที่มักเกิดขึ้นเสมอคือการอุดตันที่ช่องทางออกของเครื่องอบแห้ง ดังนั้นจึงต้องตรวจสอบตัวควบคุมการไหลอย่างสม่ำเสมอ (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2554)



รูปที่ 2.5 เครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง (Brooker, D. B. et al., 1992)

ข. เครื่องอบแห้งแบบไหลตาม (Concurrent - flow dryer)

สำหรับเครื่องอบแห้งแบบไหลตาม การไหลของเมล็ดพืชและของอากาศอบแห้งจะขนานกันและมีทิศทางเดียวกัน เมล็ดพืชส่วนที่ชื้นที่สุดจะสัมผัสกับอากาศส่วนที่ร้อนที่สุด เมื่อเมล็ดพืชไหลต่ำลงมาอากาศอบแห้งจะเริ่มเย็นลงและเมล็ดพืชจะมีความชื้นลดลง เมล็ดพืชที่แห้งแล้วจะไม่สัมผัสกับอากาศที่ร้อนจัดเลย ดังนั้นจึงสามารถใช้อากาศอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมากได้ (อาจสูงถึง 150 - 250°C) ทำให้สามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็ว ข้อดีอีกอย่างหนึ่งคือการแตกตัวของเมล็ดพืชจะมีน้อยเพราะเมล็ดพืชส่วนที่แห้งที่สุดจะสัมผัสกับอากาศอบแห้งที่เย็นที่สุด เมล็ดพืชที่แห้งแล้วจะไหลออกสู่ด้านล่างด้วยตัวควบคุมการไหลซึ่งถูกควบคุมโดยตัวควบคุมอุณหภูมิหรือความชื้นเมล็ดพืช เมล็ดพืชจะถูกทำให้เย็นลงก่อนที่จะไหลออกจากเครื่องอบแห้ง ทั้งนี้เพื่อให้การอบแห้งเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพความหนาของชั้นอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบนี้ควรหนากว่า 1 เมตร (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2554) เครื่องอบแห้งแบบไหลตามแสดงดังรูปที่ 2.6



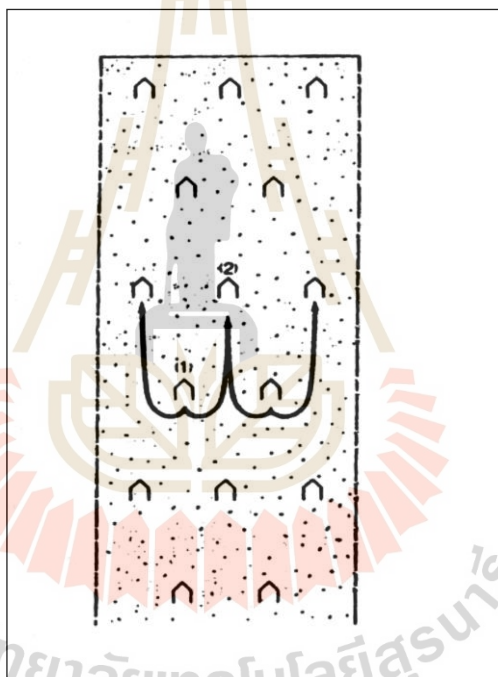
รูปที่ 2.6 เครื่องอบแห้งแบบไหลตาม (Brooker, D. B. et al., 1992)

ค. เครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง (Counter - flow dryer)

สำหรับเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง การไหลของเมล็ดพืชและของอากาศอบแห้งขนานกัน แต่มีทิศทางตรงกันข้าม เมล็ดพืชจะไหลลงด้านล่างและอากาศอบแห้งจะไหลขึ้นด้านบน เมล็ดพืชส่วนที่อยู่ล่างสุดจะแห้งที่สุด แต่จะไม่แห้งเกินไปเพราะจะถูกขนย้ายออกจากเครื่องอบแห้งก่อนที่จะแห้งเกินกว่าที่ต้องการ อัตราการขนย้ายเมล็ดพืชถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิหรือตัวควบคุมความชื้นเมล็ดพืชซึ่งติดตั้งอยู่เหนือพื้นเครื่องอบแห้ง เมล็ดพืชที่ขนย้ายออกไปแล้วจะถูกทำให้เย็นลงในภายหลัง เครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทางมีข้อดีคือ การใช้ความร้อนสัมผัสในอากาศอบแห้งเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากเมล็ดพืชที่อยู่ชั้นล่างไม่แห้งเกินไปและอากาศอบแห้งตรงทางออกจะสัมผัสกับเมล็ดพืชส่วนที่ชื้นที่สุด ทำให้อุณหภูมิของอากาศอบแห้งตรงทางออกต่ำปัญหาที่อาจเกิดขึ้นคือการควบแน่นของน้ำที่ไกล่ทางออกของเครื่องอบแห้ง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่อากาศที่อึมตัวด้วยไอน้ำสัมผัสกับเมล็ดพืชที่ชื้นอยู่ด้านบนซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าปัญหานี้อาจหลีกเลี่ยงได้โดยการเลือกอัตราการไหลของอากาศอบแห้งให้เหมาะสมกับความหนาของชั้นเมล็ดพืช และถึงแม้ว่าเครื่องอบแห้งแบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูง แต่ก็ต้องการอุปกรณ์ขนย้ายเมล็ดพืชออกจากเครื่องอบแห้งที่ค่อนข้างยุ่งยากและมีราคาแพง (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2554)

ง. เครื่องอบแห้งแบบผสม (Mixed flow)

นอกจากเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชที่แบ่งตามลักษณะการไหลของเมล็ดพืชและ กระแสอากาศแล้วจาก 3 รูปแบบที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น เราอาจแบ่งตามลักษณะ การผสมกันของเมล็ดพืชขึ้นและเมล็ดพืชแห้งในขณะที่ไหล ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เป็นภาพตัดของเครื่องอบแห้งที่มีการผสมกันของเมล็ดพืชโดยทั่วไปมักเรียกกันว่า เครื่องอบแห้งแบบ LSU ซึ่งเป็นชื่อย่อของ Luisiana State University ซึ่งเป็นผู้ คิดค้น การผสมกันของเมล็ดพืชจะเกิดขึ้นในขณะที่ไหลผ่านท่ออากาศร้อนหรือ เย็น ทำให้ปัญหาเรื่องเกรเดียนต์ความชื้นในชั้นเมล็ดพืชลดลงอย่างมาก (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2554)



รูปที่ 2.7 ภาพตัดของเครื่องอบแห้งแบบที่มีการผสมกันของเมล็ดพืช (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540)

นอกจากเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหลตาม (Moving - bed dryer) ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ข้างต้นแล้ว ยังมีเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดเซชันและเครื่องอบแห้งแบบโรตารีซึ่งใช้กันมากใน อุตสาหกรรมและสามารถประยุกต์ใช้กับการอบแห้งเมล็ดพืชได้

2.6 ความชื้นในวัสดุ

ความชื้นเป็นสิ่งที่บอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุ ความชื้นในวัสดุ สามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ คือ (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2554)

2.6.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก

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

2.6.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง

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

เมื่อ	M_w	คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (เศษส่วน)
	M_d	คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (เศษส่วน)
	W	คือ มวลของวัสดุขึ้น (kg)
	W_d	คือ มวลของวัสดุแห้ง (kg)

2.7 ความชื้นสัมบูรณ์

การที่เราจะพิจารณาว่าอากาศในสภาวะใดมีความชื้นมากหรือน้อยกว่ากันจะสามารถพิจารณาได้จากปริมาณไอน้ำในอากาศเป็นสำคัญ การอ้างปริมาณไอน้ำในอากาศจะอ้างอิงด้วย อัตราส่วนความชื้น (Humidity Ratio) หรืออาจเรียกว่า ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute Humidity) หรือเรียกว่า ความชื้นจำเพาะ (Specific Humidity) ทั้งหมดนี้จะมีความหมายเดียวกันคือ อัตราส่วนมวลของไอน้ำในอากาศต่อมวลของอากาศแห้งในอากาศนั้น (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ์, 2540)

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (2.3)$$

เมื่อ	ω	คือ อัตราส่วนความชื้น (kg_v/kg_a)
	m_v	คือ มวลไอน้ำในอากาศขึ้น (kg_v)
	m_a	คือ มวลอากาศแห้ง (kg_a)

2.8 ความชื้นสัมพัทธ์

การบ่งบอกสภาวะของอากาศที่เข้าใกล้สภาวะอากาศอิ่มตัวหรือไม่นั้นจะสามารถเทียบได้โดยอัตราส่วนระหว่างมวลของไอน้ำในอากาศเทียบกับมวลของไอน้ำในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิของ

อากาศนั้นซึ่งเรียกว่า ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าระหว่าง 0 - 100% (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ, 2540)

$$\%RH = \left(\frac{m_v}{m_g} \right) \cdot 100 \quad (2.4)$$

เมื่อ $\%RH$ คือ ร้อยละความชื้นสัมพัทธ์ (kg_v/kg_g)

m_v คือ มวลไอน้ำในอากาศชื้น (kg_v)

m_g คือ มวลไอน้ำในอากาศอิ่มตัว (kg_g)

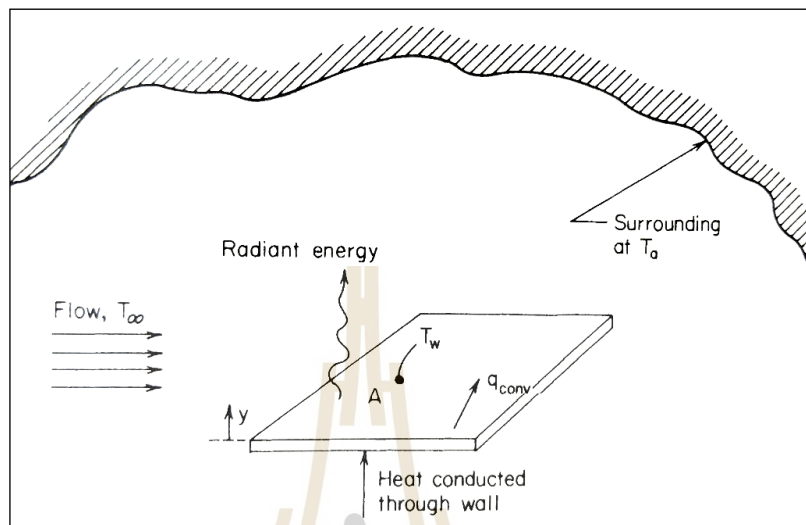
2.9 ความชื้นสมดุลของวัสดุ

ความชื้นสมดุลของวัสดุมีความสำคัญต่อการศึกษาระบบการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ (เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่) ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุด ๆ หนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะนั้นความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบ ๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ด้วย เราเรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล ค่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุล และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง เรียกว่าเส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอร์ม (Equilibrium Moisture Isotherm) (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ, 2540)

2.10 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อน คือ การส่งผ่านพลังงานความร้อนซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสองสิ่งใด ๆ ทิศทางการถ่ายเทความร้อนจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ดังนั้นเมื่อใดก็ตามที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้นในตัวกลางหรือระหว่างตัวกลางการถ่ายเทความร้อนมักจะเกิดขึ้นได้ ดังรูปที่ 2.8 แสดงการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบต่าง ๆ เมื่อมีเกรเดียนต์อุณหภูมิ (Temperature Gradient) เกิดขึ้นในตัวกลางที่อยู่หนึ่ง เช่นของแข็ง หรือของไหล เทอมของการนำความร้อน (Conduction) จะเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นผ่านตัวกลาง ในขณะที่การพาความร้อน (Convection) จะเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวและของไหลที่เคลื่อนที่เมื่อมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ส่วนการแผ่รังสีความร้อน (Thermal Radiation) จะเป็นการที่ทุกพื้นที่ผิวที่มีอุณหภูมิหนึ่งจะปล่อยพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ดังนั้นในสภาวะที่ปราศจากตัวกลางใด ๆ จะมีการถ่ายเท

ความร้อนสุทธิที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิวที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันได้ (Rohsenow, W. M. et al, 1998)



รูปที่ 2.8 การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นโดยการนำ การพา และการแผ่รังสี (Rohsenow, W. M. et al, 1998)

2.10.1 การนำความร้อน (Conduction)

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนเพียงวิธีเดียวที่เกิดขึ้นในวัตถุที่เป็นตัวกลางทึบแสง เมื่อมีความลาดชันของอุณหภูมิสามารถเกิดได้ทั้งในของแข็งของเหลว และแก๊ส แต่เนื่องจากการไหลหมุนเวียนเกิดขึ้นในของเหลวและแก๊ส แต่สำหรับในของแข็งทึบแสงจะไม่มีเคลื่อนไหวภายในวัสดุจะมีแต่การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำเพียงอย่างเดียว อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนจะเป็นสัดส่วนกับค่าความลาดชันของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) คูณกับพื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนไหลผ่าน แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดังสมการ Fourier's Law of Heat Conduction ดังสมการที่ (2.5) (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ, 2540)

$$q = -kA \cdot \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (2.5)$$

เมื่อ	q	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)
	k	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัตถุ (W/m·°C)
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนไหลผ่าน (m ²)
	$\frac{dT}{dx}$	คือ ความชันของอุณหภูมิในเนื้อวัตถุ (°C/m)

2.10.2 การพาความร้อน (Convection)

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาประกอบด้วยกลไก 2 อย่าง คือ พลังงานเกิดการถ่ายเทอันมีผลเนื่องมาจากการเคลื่อนที่หรือการแพร่แบบสุ่มของโมเลกุล และผลเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของของไหลการถ่ายเทลักษณะนี้เกิดขึ้นได้ เช่น ในระบบที่มีเกรเดียนต์อุณหภูมิจะมีการถ่ายเทความร้อนได้ และเนื่องจากโมเลกุลในกลุ่มของไหลจะมีการเคลื่อนที่แบบสุ่มอยู่ด้วย ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นจึงเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่แบบสุ่มของโมเลกุลและการเคลื่อนที่ของของไหลส่วนใหญ่ การถ่ายเทความร้อนโดยการพา แบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ

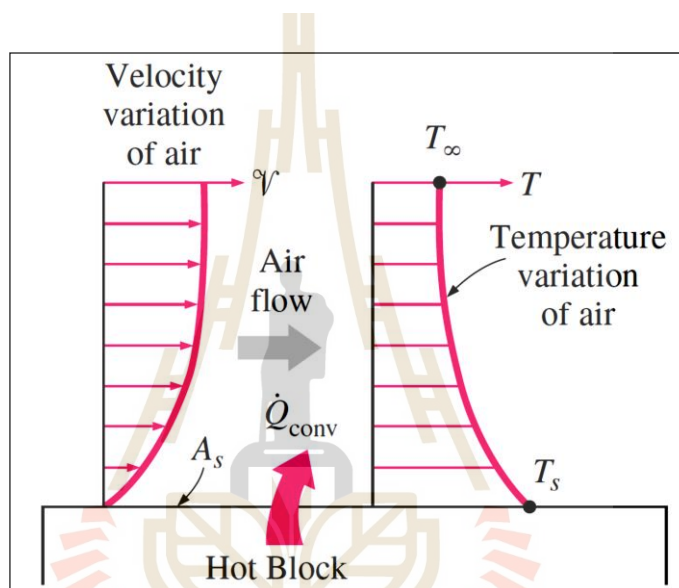
- ก. การพาความร้อนแบบอิสระ (Free Convection) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ไม่มีกลไกใด ๆ ที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ แต่ของไหลที่อยู่ใกล้กับผิวของของแข็งก็อาจเคลื่อนที่ได้โดยแรงลอยตัวของของไหลเอง แรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหลขึ้น
- ข. การพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็งโดยกลไกภายนอก เช่น พัดลม หรือ เครื่องสูบน้ำ

พิจารณาการพาความร้อนที่เกิดขึ้นในของไหลเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวของแข็งที่มีอุณหภูมิต่างกัน ดังรูป 2.9 ที่แสดงการถ่ายเทความร้อนโดยการพาระหว่างพื้นผิวร้อนกับของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านไปบนแผ่นวัสดุ ซึ่งแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเร็วและอุณหภูมิ จุดที่น่าสนใจก็คือ ความเร็วจะลดน้อยลงในทิศทางที่วิ่งเข้าสู่ผิวของวัสดุด้วยผลของแรงจากความเสียดทานที่เนื่องมาจากความหนืดของของไหลและเนื่องจากของไหลชั้นที่อยู่ติดกับผิวนั้นมีความเร็วเป็นศูนย์ ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ระหว่างผิวของแผ่นวัสดุกับของไหลชั้นดังกล่าวเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการนำอย่างเดียว ของไหลที่มีความเร็วสูงจะให้ค่าความลาดชันของอุณหภูมิสูง ทำให้มีอัตราการนำความร้อนสูงตามไปด้วย

การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพานั้นเป็นสิ่งยุ่งยาก เมื่อพิจารณาแล้ว มีหลายสิ่งหลายอย่างที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการพานี้ เช่น คุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหล เช่น ความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ ความหนืด ความเร็วของของไหล ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นผิวของของแข็ง และของไหล เป็นต้น นิวตัน (Newton) ได้ตัดปัญหาความยุ่งยากเหล่านี้ โดยเสนอสมการสำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพา ดังสมการที่ (2.6) (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540)

$$q = h'A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2.6)$$

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



รูปที่ 2.9 การพัฒนาชั้นขอบเขตในการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนแบบบังคับ
 (Cengel, Y. A., 2003)

2.10.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อน คือการที่พลังงานถูกปล่อยออกมาจากวัตถุที่มีอุณหภูมิที่แน่นอน โดยวัตถุนั้นอาจเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซก็ได้ พลังงานของสนามการแผ่รังสีมีการถ่ายเทโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอน (Photons) ในขณะที่การถ่ายเทพลังงานโดยการนำหรือการพาความร้อนจะต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเท การถ่ายเทโดยการแผ่รังสีไม่ต้องอาศัยตัวกลางใด ๆ และจะเกิดการถ่ายเทได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาวะที่เป็นสุญญากาศอัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิของวัตถุที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสดงได้ด้วยสมการ Stefan - Boltzmann Law ดังสมการที่ (2.7) (Rohsenow, W. M. et al, 1998)

$$q = \epsilon \sigma A \cdot (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (2.7)$$

เมื่อ	q	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของวัตถุปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (W)
	\mathcal{E}	คือ สภาพเปล่งรังสี (Emissivity) มีค่าในช่วง $(0 \leq \mathcal{E} \leq 1)$
	σ	คือ Stefan - Boltzmann Constant = 5.67×10^{-8} (W/m ² ·K ⁴)
	A	คือ พื้นที่ผิวของวัตถุที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (m ²)
	T_s^4	คือ อุณหภูมิของวัตถุที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (K)
	T_∞^4	คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (K)

เนื่องจากการอบแห้งเมล็ดพืช (เมล็ดของแข็ง) ที่เป็นแบบบังคับพา (เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม) ความร้อนของอากาศอบแห้งจะไหลผ่านและเคลื่อนที่ไปพร้อมเมล็ด ดังนั้นจึงพิจารณาการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นขีดผิวของเมล็ดเมื่อระบบอยู่ในสมดุล และสมมติว่ามีการแผ่รังสีความร้อนน้อยมาก อัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาจากกระแสการไหลจะมีค่าเท่ากับการนำความร้อนที่ผิวของเมล็ด ดังสมการที่ (2.8)

$$h'A \cdot (T_s - T_\infty) = -kA \cdot \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (2.8)$$

เมื่อคูณด้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเมล็ด D_p และจัดเทอมใหม่จะได้ว่า

$$\frac{h'D_p}{k} = - \frac{D_p}{(T_s - T_\infty)} \cdot \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (2.9)$$

เทอม $\frac{h'D_p}{k}$ นี้เรียกว่าตัวเลขนัสเซลต์ (Nusselt Number, Nu) ซึ่งเป็นสัดส่วนที่

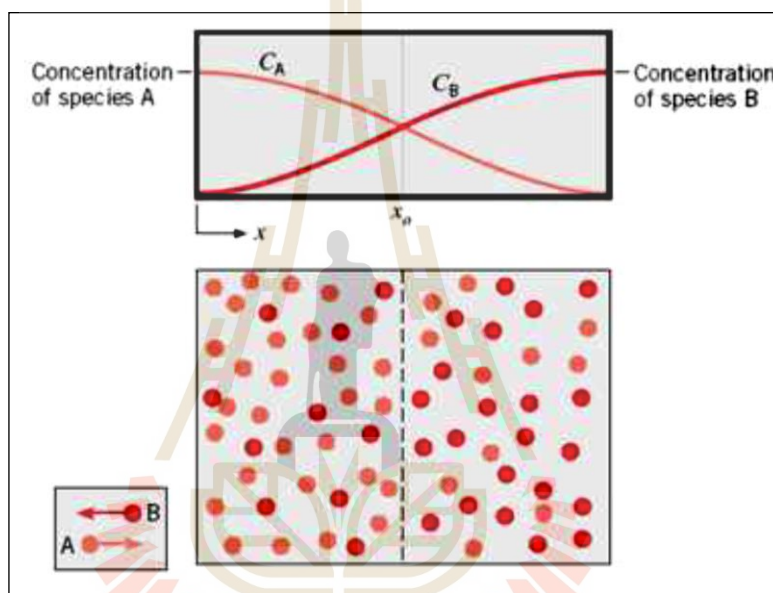
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการพาความร้อนจากกระแสของไหลกับการนำความร้อนในเมล็ดของแข็ง สำหรับอุณหภูมิในกระแสของไหลขึ้นอยู่กับขนาดการไหลและคุณสมบัติทางกายภาพของระบบทั้งหมด เมื่อกระจายเทอมด้านขวาของสมการแล้วสามารถแสดงในเทอมของตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number, Re) และตัวเลขพรันด์เทิล (Prandtl Number, Pr) จากการศึกษาโดยการวิเคราะห์เทอมไม่มีหน่วย มักได้ความสัมพันธ์ของตัวเลขต่าง ๆ ดังสมการที่ (2.10) (สมชาติ โสภณธนฤทธิ, 2540)

$$Nu = Nu_0 + aRe^m Pr^n \quad (2.10)$$

เมื่อ Nu_0 คือ ค่าตัวเลขนัสเซิลต์จากการถ่ายเทแบบการนำเพียงอย่างเดียว

2.11 การถ่ายเทมวล

การถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เมื่อมีความเข้มข้นของมวลสารที่แตกต่างกัน (Concentration Gradient) ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบที่มีสาร 2 องค์ประกอบขึ้นไป ก็จะทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารเช่นกัน โดยจะมีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในตำแหน่งที่มีความเข้มข้นสูงไปยังตำแหน่งที่มีความเข้มข้นต่ำ แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การถ่ายเทมวลสารโดยการแพร่ในระบบก้ำขผสม 2 ชนิด (Cengel, Y. A., 2006)

รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างการถ่ายเทมวลสารหรือการแพร่ จะเห็นว่าด้านซ้ายมีโมเลกุล A มากกว่าในขณะที่ด้านขวามีโมเลกุล B มากกว่า เมื่อทำการดึงแผ่นกั้นกลางออก โมเลกุล A จะเคลื่อนที่ไปด้านขวาในขณะที่โมเลกุล B จะเคลื่อนที่ไปด้านซ้ายเพื่อให้เกิดสมดุลของโมเลกุลทั้งสองในทุก ๆ ตำแหน่งของปริมาตรนี้ ตัวอย่างที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวันได้แก่ การละลายของน้ำตาลในกาแฟไปทั่วแก้วและการส่งกลิ่นหอมของน้ำหอมที่ทาไว้ที่ต้นคอไปยังผู้คนรอบข้าง ตัวอย่างที่เกิดในกระบวนการอุตสาหกรรมได้แก่ การละลายสารมลพิษจากก๊าซที่ปล่อยจากโรงงานด้วยของเหลว (Stripping of Flue Gas) และการดูดซึมของสารด้วยตัวกลางที่มีรูพรุน (Absorption by Porous Media) นอกจากการถ่ายเทมวลสารจะเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นแล้ว ความแตกต่างของอุณหภูมิ ความดัน หรือแรงภายนอกก็สามารถทำให้เกิดการถ่ายเทมวลได้ การแพร่ของมวลสารที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ เรียกว่า Thermal Diffusion หรือ Soret Effect การแพร่ของมวลสารที่เกิดจากความแตกต่าง

ของความดัน เรียกว่า Pressure Diffusion และการแพร่ของมวลสารที่เกิดจากแรงภายนอก เช่น แรงเคลื่อนไฟฟ้า แรงแม่เหล็ก เรียกว่า Forced Diffusion สำหรับกรณีที่ก๊าซมีความหนาแน่นน้อยมาก ๆ หรือกรณีที่ก๊าซแพร่ผ่านรูพรุนขนาดเล็กมาก ๆ โมเลกุลก๊าซจะเกิดการชนกับผนังบ่อยกว่าชนกันเอง ทำให้ฟลักซ์หรืออัตราการแพร่ลดลง การแพร่แบบนี้จะเรียกว่า การแพร่แบบนุเซ็น (Knudsen Diffusion) (Cengel, Y. A., 2006) การถ่ายเทมวลสารมี 2 กรณีได้แก่

2.11.1 การถ่ายเทมวลโดยการแพร่ของโมเลกุล (Molecular Diffusion)

การถ่ายเทมวลโดยการแพร่ของโมเลกุล (Molecular Diffusion) ซึ่งโดยมากเกี่ยวข้องกับเคลื่อนที่ของโมเลกุลแต่ละโมเลกุลผ่านสารด้วยพลังงานความร้อน (Thermal Energy) ที่มีอยู่ในโมเลกุลที่มีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์สัมบูรณ์ (Absolute Zero) โดยที่โมเลกุลแต่ละโมเลกุลจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงแบบไม่เป็นระเบียบ (Random Motion) ด้วยความเร็วคงที่เมื่อมีการชนกันของโมเลกุล ความเร็วและทิศทางเคลื่อนที่จะเปลี่ยนไป ระยะทางเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลโดยที่ไม่มีการชนกับโมเลกุลอื่นเรียกว่าเส้นทางการอิสระเฉลี่ย (Mean Free Path) และความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่จะขึ้นกับอุณหภูมิ การถ่ายเทมวลสารแบบนี้จึงเป็นการแพร่อย่างช้า ๆ ถึงแม้จะมีการเพิ่มอัตราการแพร่ได้ถ้าความดันระบบลดลง (ลดอัตราการชนกันของโมเลกุล) และเพิ่มอุณหภูมิ (เพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่) ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเกิดในของไหลที่หยุดนิ่ง (Stagnant Fluid) เมื่อเทียบกับการถ่ายโอนความร้อนแล้ว การถ่ายเทมวลสารระดับโมเลกุลจะเปรียบเสมือนการนำความร้อน ธรรมชาติของสารทำให้สามารถแบ่งแยกการแพร่ได้เป็น 3 แบบ ดังนี้

- ก. โมเลกุล A ในของผสมเท่านั้นที่มีการเคลื่อนที่ไปสู่หรือจากพื้นผิว ทำให้การไหลสุทธิ (Total Flow) ของของผสมมีค่าเท่ากับการไหลของโมเลกุล A ตัวอย่างเช่น การดูดซับก๊าซลงในของเหลว การแพร่แบบนี้เป็นการแพร่ของโมเลกุลเดียว (Unimolecular Diffusion)
- ข. การแพร่ของโมเลกุล A ที่เท่ากับและตรงกันข้ามกับการแพร่ของโมเลกุล B ทำให้การไหลสุทธิเป็นศูนย์ ตัวอย่างเช่นการกลั่นซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงการไหลโดยปริมาตรของก๊าซแต่มีการเปลี่ยนแปลงในของเหลวเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้น การแพร่แบบนี้เป็นการแพร่ของโมลที่เท่ากันในทิศตรงกันข้าม (Equimolar Counterdiffusion)
- ค. การแพร่ของโมเลกุล A และโมเลกุล B ในทางตรงกันข้ามแต่ไม่เท่ากัน กรณีนี้มักเกิดขึ้นเมื่อมีปฏิกิริยาเคมีเกี่ยวข้อง (Molecular Diffusion With Chemical Reaction)

ฟิค (Fick) ได้เสนอว่า ในระบบของผสม 2 ชนิดที่มีอุณหภูมิและความดันคงที่ (Isothermal And Isobaric System) เมื่อมีการแพร่ของโมเลกุลเป็นแบบฟังก์กระจายในทิศทาง z พลิกซ์เชิงโมลที่เทียบกับความเร็วเฉลี่ยเชิงโมลมีค่าดังแสดงใน Fick's Law of Diffusion ดังสมการที่ (2.11) (สมชาติ โสภณธนฤทธิ, 2540)

$$N_A = -D_{AB}A \cdot \left(\frac{dc_A}{dx} \right) \quad (2.11)$$

เมื่อ	N_A	คือ ปริมาณของมวลสารที่ถ่ายเท (kg/s)
	D_{AB}	คือ สัมประสิทธิ์การฟังก์กระจาย (m^2/s)
	A	คือ พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็ง และของไหล (m^2)
	c_A	คือ ความเข้มข้นของมวลสาร A ต่อหนึ่งปริมาตร (kg/m^3)
	x	คือ ระยะทางที่มวลสารเคลื่อนที่ไป (m)

ซึ่งจะเปรียบเทียบกับกฎของฟูเรียร์ในการนำความร้อน (Fourier's Law of Heat Conduction) โดยที่เครื่องหมายติดลบบ่งบอกถึงการแพร่จากความเข้มข้นสูงไปสู่ความเข้มข้นต่ำ และ D_{AB} เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusivity or Diffusion Coefficient) จากสาร A ในสาร

2.11.2 การถ่ายเทมวลสารแบบการพา (Convective Mass Transfer)

การถ่ายเทมวลสารแบบการพา ซึ่งโดยมากเกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล เช่นการไหลของของไหลผ่านพื้นผิว หรือระหว่างการไหลของของไหล 2 ชนิดที่ไม่ละลายกัน (Immiscible Moving Fluids) การถ่ายเทมวลสารชนิดนี้ส่วนใหญ่เกิดจากการกวน หรือการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) จึงเรียกว่าการแพร่แบบคลื่น (Eddy Diffusion) หรือการแพร่แบบปั่นป่วน (Turbulent Diffusion) เช่นเดียวกับการถ่ายโอนความร้อน ถ้ามีการใช้แรงภายนอกให้เกิดการพา เช่น ป้อนขับเคลื่อนของเหลว จะเป็นการพาแบบบังคับ (Forced Convective) แต่ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากความหนาแน่นที่แตกต่าง ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากความเข้มข้นหรืออุณหภูมิที่แตกต่าง จะเป็นการพาแบบอิสระ (Free or Natural Convective) เมื่อเทียบกับการถ่ายโอนความร้อนแล้ว การถ่ายเทมวลสารแบบการพาจะเปรียบเสมือนการพาความร้อน

สมการอัตราการถ่ายเทมวลโดยการพามีความคล้ายคลึงกับกฎของนิวตันสำหรับการหล่อเย็น (Newton's Law of Cooling) โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.12) (สมชาติ โสภณธนฤทธิ, 2540)

$$N_A = h'_D A \cdot (C_{AS} - C_A) \quad (2.12)$$

เมื่อ	N_A	คือ ปริมาณของมวลสาร A ที่ถ่ายเท (kg/s)
	h'_D	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร
	A	คือ พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็ง และของไหล (m^2)
	C_A	คือ ความเข้มข้นของมวลสาร A ในของไหล
	C_{AS}	คือ ความเข้มข้นของมวลสาร A ที่อิ่มตัว

2.12 กลไกการแพร่ความชื้นภายในเมล็ดพืช

การส่งผ่านความชื้นเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน แม้ในปัจจุบันก็ยังไม่เป็นที่กระจ่างชัดเต็มที่ ทฤษฎีมากมายจึงถูกนำเสนอเพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของความชื้นในวัสดุทางการเกษตร การลำเลียงความชื้นในวัสดุอาจเกิดด้วยกลไกการถ่ายเทมวลดังต่อไปนี้ (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ์, 2540)

- การเคลื่อนที่ของน้ำเนื่องจากแรงแคปิลารีซึ่งเป็นผลจากแรงตึงผิว
- การเคลื่อนที่ของน้ำและไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างความเข้มข้นของความชื้น
- การเคลื่อนที่ของน้ำเนื่องจากการแพร่ของความชื้นบนผิวของรูพรุนเล็ก ๆ
- การเคลื่อนที่ของน้ำและไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม
- การเคลื่อนที่ของน้ำและไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ

2.13 วิธีการหาความชื้นในเมล็ดพืช

การหาความชื้นอาจแบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ วิธีตรงและวิธีอ้อม การเก็บตัวอย่างเพื่อหาความชื้นเป็นปัญหาสำคัญอันหนึ่ง เนื่องจากอาจได้ตัวอย่างที่ไม่ได้เป็นตัวแทนที่เหมาะสมของเมล็ดพืชหรืออาหารทั้งหมด นอกจากนี้ควรเก็บตัวอย่างไว้ในภาชนะที่สามารถป้องกันไม่ให้เกิดการถ่ายเทความชื้นระหว่างตัวอย่างและอากาศก่อนที่จะทำการหาความชื้น

2.13.1 วิธีตรง

วิธีการหาความชื้นโดยตรงมีหลายวิธี เช่น การใช้ตู้อบ และการกลั่น ซึ่งวิธีตรงนี้เป็นวิธีที่ต้องใช้เวลามากในการหาค่า

ก. การใช้ตู้อบ

การหาความชื้นของเมล็ดพืชโดยใช้ตู้อบ จะกระทำโดยนำเมล็ดพืชไปอบที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 h (ซึ่งน้ำหนักก่อนนำเข้าตู้อบ และหลังนำออกจากตู้อบ) น้ำหนักที่หายไปหลังนำออกจากตู้อบสามารถนำไปคำนวณค่าความชื้นได้ (AOAC., 2000) (รายละเอียดแสดงดังหัวข้อที่ 5.3.4)

ข. การใช้วิธีกลั่น

วิธีกลั่นนี้ทำได้โดยใส่ตัวอย่างอาหารไว้ในน้ำมันและทำให้ร้อน เนื่องจากน้ำมีจุดเดือดต่ำกว่าน้ำมัน ดังนั้นน้ำจึงระเหยออกมาก่อน โดยผ่านไอน้ำเข้าเครื่องควบแน่นจะได้หยดน้ำ น้ำส่วนนี้คือปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหาร (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ์, 2540)

2.13.2 วิธีอ้อม

การหาค่าความชื้นของวัสดุแบบวิธีอ้อม (Indirect Measurement) นั้นจะใช้วิธีการวัดสมบัติบางอย่างของวัสดุที่ขึ้นอยู่กับความชื้น เช่น ความต้านทานไฟฟ้า (Resistance) การเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance) หรือสมบัติทางไดอิเล็กตริก (Dielectric) สำหรับการหาค่าความชื้นแบบวิธีอ้อมเป็นวิธีที่ทำได้รวดเร็วไม่ซับซ้อน ใช้ตัวอย่างทดสอบน้อยจึงเป็นที่นิยมใช้ในวงการค้าทั่วไปแต่จะต้องตรวจสอบเครื่องมือ และสอบเทียบกับการหาค่าความชื้นวิธีตรงก่อน เนื่องจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังกล่าวอาจแปรเปลี่ยนตามชนิดของพันธุ์ พื้นที่ปลูกความชื้น อุณหภูมิ ความหนาแน่นของการบรรจุ ตลอดจนวิธีการใช้เครื่องมือที่ถูกต้องและเหมาะสมอีกด้วย (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ์, 2540)

2.14 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุเกษตร

คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุเกษตรนั้นมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์การอบแห้งและการเก็บรักษาผลผลิตเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติต่าง ๆ มีผลต่อการออกแบบเพื่อสร้างเครื่องอบแห้งและที่ทำการเก็บรักษาเพื่อให้สามารถคงคุณภาพที่ดีของผลิตภัณฑ์ไว้ได้ โดยคุณสมบัติทางกายภาพที่จะกล่าวถึงในที่นี้ได้แก่ ขนาดมิติ (Physical dimension) ความหนาแน่น (Density) เปอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage) ความเสียดทาน (Friction) มุมเสียดทานภายในและมุมกอง (Angle of internal friction and angle of repose) เป็นต้น ส่วนคุณสมบัติทางความร้อนประกอบด้วย ความร้อนจำเพาะ (Specific heat) และความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (Heat of vaporization) ซึ่งมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้ (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2554)

2.14.1 ขนาดมิติ (Physical dimension)

ขนาดมิติของเมล็ดพืชมีส่วนสำคัญในการออกแบบอุปกรณ์คัดแยกขนาดและอุปกรณ์ทำความสะอาด นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับการอบแห้งเมล็ดพืชด้วย ตัวอย่างเช่น เมล็ดพืชชนิดเดียวกันที่มีขนาดต่างกันเมื่อนำมาอบแห้งจะให้อัตราการอบแห้งที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เกิดจากพื้นที่ผิวของการถ่ายโอนความร้อนและการส่งผ่านความร้อนภายในเมล็ด นอกจากนี้ขนาดมิติยังช่วยในการออกแบบขนาดของห้องอบแห้งที่เหมาะสมกับวัสดุที่ต้องการนำมาอบแห้งอีกด้วย ขนาดมิติของวัสดุสามารถหาได้โดยตรงจากเครื่องมือวัด เช่น เวอร์เนียร์แคลิเปอร์ หรือไมโครมิเตอร์ เป็นต้น

2.14.2 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นถือเป็นพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์การอบแห้งเช่นกัน ความหนาแน่นแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ความหนาแน่นจริง (True density) หมายถึง อัตราส่วนของมวลวัสดุต่อปริมาตรของวัสดุ และความหนาแน่นรวมหรือความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density) หมายถึง อัตราส่วนของมวลวัสดุต่อปริมาตรทั้งหมดซึ่งรวมปริมาตรของวัสดุและปริมาตรของอากาศที่แทรกตัวอยู่ตามช่องว่างของวัสดุไว้ด้วย สัดส่วนช่องว่างอากาศ ความหนาแน่นจริง และความหนาแน่นปรากฏมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (2.13)

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_t} \quad (2.13)$$

เมื่อ ε คือ สัดส่วนช่องว่างอากาศ
 ρ_b คือ ความหนาแน่นปรากฏ (kg/m^3)
 ρ_t คือ ความหนาแน่นจริง (kg/m^3)

การหาความหนาแน่นปรากฏทำได้โดยการนำเมล็ดพืชตัวอย่างจำนวนหนึ่งมาใส่ในภาชนะที่ทราบปริมาตร จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักและคำนวณหาผลรวมเมล็ดพืชต่อปริมาตร ค่าความหนาแน่นปรากฏมีค่าไม่คงที่แปรเปลี่ยนไปตามความชื้นของเมล็ดพืช โดยทั่วไปแล้วความหนาแน่นจริงและความหนาแน่นปรากฏจะมีความสัมพันธ์กับความชื้นอยู่ในรูปเชิงเส้นซึ่งสามารถเขียนได้ตามแสดงในสมการที่ (2.14)

$$\rho = a + bM \quad (2.14)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)
 M คือ ความชื้นวัสดุ (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)
 a, b คือ ค่าคงที่ (หาได้จากการพิตกราฟเข้ากับการทดลอง)

2.14.3 เปอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage)

ในขณะที่ทำการอบแห้งเมล็ดพืชนั้น วัสดุที่อยู่ในกระบวนการจะเกิดการหดตัวเนื่องจากสูญเสียความชื้น ซึ่งพฤติกรรมหดตัวของวัสดุจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ เช่น Bala, B. K. (1983) ได้ทำการหาความสัมพันธ์การลดลงของความชื้นกับการหดตัวของมอลท์ที่มีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ (2.15)

$$S = 15.91 \left[1 - \exp \left(- 0.0966 \left(M_{w_0} - M_w \right) \right) \right] \quad (2.15)$$

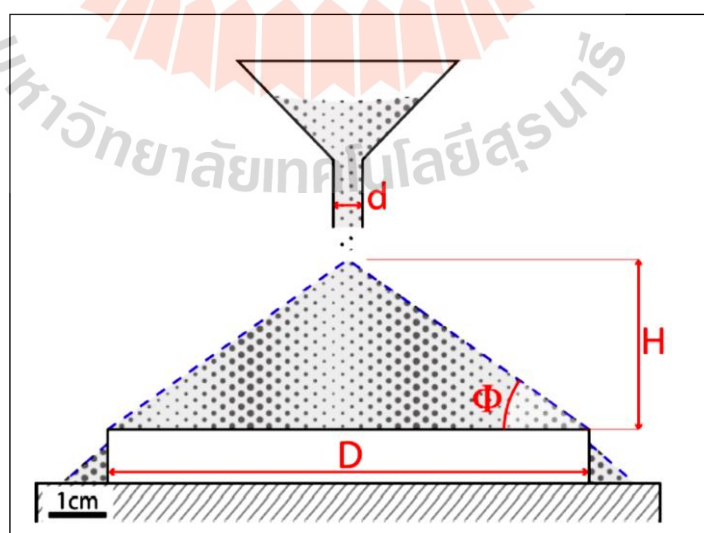
เมื่อ S คือ เปอร์เซ็นต์การหดตัว (%)
 M_{w_0} คือ ความชื้นเริ่มต้นของมอลท์ (%wb)
 M_w คือ ความชื้นของมอลท์ (%wb)

2.14.4 ความเสียดทาน (Friction)

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างเมล็ดพืชกับเมล็ดพืช และระหว่างเมล็ดพืชกับพื้นผิววัสดุ (พื้นผิวของภาชนะหรืออุปกรณ์ที่ใช้บรรจุเมล็ดพืช) ก็มีความสำคัญต่อการออกแบบถังเก็บเมล็ดพืช ไซโล และโครงสร้างอื่น ๆ ที่ใช้สำหรับการเก็บรักษา นอกจากนี้ความเสียดทานก็ยังมีมีความสำคัญในการออกแบบเครื่องมือที่ใช้ในการลำเลียงและแปรรูปผลิตภัณฑ์อีกด้วยเช่นกัน

2.14.5 มุมเสียดทานภายในและมุมกอง (Angle of internal friction and angle of repose)

สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างวัสดุที่เป็นอนุภาค (Granular materials) คือ แทนเจนต์ของมุมเสียดทานภายในของวัสดุสำหรับมุมกอง (Angle of repose) เป็นมุมที่ด้านข้างของกองวัสดุกระทำกับแนวระดับดังแสดงในรูปที่ 2.11 สำหรับวัสดุเกษตรทั่วไปแล้วมุมกองจะเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับความชื้นวัสดุและปริมาณของวัสดุแปลกปลอมที่ปะปนอยู่ โดยทั่วไปในทางวิศวกรรมจะประมาณให้ค่ามุมเสียดทานภายในของวัสดุเกษตรที่เป็นอนุภาคมีค่าเท่ากับมุมกองของวัสดุ ซึ่งค่าประมาณนี้จะเป็นจริงเมื่อวัสดุนั้น ๆ ไม่ได้เป็นวัสดุที่มีแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาค



รูปที่ 2.11 มุมกองของเมล็ดพืช (Montanari, D. et al., 2017)

มุมกองของวัสดุแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ มุมกองสถิต (Static angle of repose) เป็นมุมเสียดทานที่เกิดจากวัสดุ (เมล็ดพืช) เคลื่อนที่บนตัววัสดุเอง และมุมกองพลวัต (Dynamic angle of repose) เป็นมุมเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะวัสดุเกิดการเคลื่อนที่ สำหรับค่ามุมกองสถิตของวัสดุแสดงตามสมการที่ (2.16)

$$\text{Static angle of repose } (\Phi) = \tan\left(\frac{2H}{D-d}\right) \quad (2.16)$$

เมื่อ	H	คือ ความสูงของกองเมล็ดพืช (m)
	D	คือ ความกว้างของฐานของกองเมล็ดพืช (m)
	d	คือ ความกว้างของช่องอุปกรณ์ที่ปล่อยเมล็ดพืชลงมา (m)

2.14.6 ความร้อนจำเพาะ (Specific heat)

ความร้อนจำเพาะ หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้วัสดุหนึ่งหน่วยมวลมีอุณหภูมิสูงขึ้นหนึ่งองศาที่ความดันหรือปริมาตรคงที่ ในการอบแห้งและการเก็บรักษาผลผลิตทางการเกษตร ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่จะเข้ามาเกี่ยวข้องกับเสมอ โดยที่ค่าของความร้อนจำเพาะของของแข็งและของเหลวมีค่าแปรเปลี่ยนเล็กน้อยเมื่อความดันเปลี่ยนและในช่วงอุณหภูมิที่ไม่สูงหรือต่ำมากจนเกินไป การคำนวณในช่วงที่อุณหภูมิไม่แตกต่างกันมากอาจสมมติให้ค่าความร้อนจำเพาะของเมล็ดพืชมีค่าคงที่ และในปี 1987 Bala, B. K. et al. ได้เสนอสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณหาค่าความร้อนจำเพาะของเมล็ดข้าวเปลือก (Rough rice) ไว้แสดงตามสมการที่ (2.17)

$$C_{pg} = 1.620 + 0.03144(M_w) \quad (2.17)$$

เมื่อ	C_{pg}	คือ ความร้อนจำเพาะของวัสดุ (kJ/kg·°C)
	M_w	คือ ความชื้นข้าวเปลือก (%wb)

2.14.7 ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (Heat of vaporization)

ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ หมายถึงพลังงานที่ต้องใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารจากของเหลวให้เป็นไอที่อุณหภูมิและความดันคงที่ ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำในวัสดุเกษตรและอาหารจะมีค่าสูงกว่าน้ำที่อยู่อย่างอิสระโดยเฉพาะเมื่อวัสดุนั้นมีความชื้นต่ำ จากข้อมูลความชื้นสมมูลสามารถคำนวณหาความร้อนแฝงของการระเหยได้ ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำจากวัสดุขึ้นอยู่กับความชื้นและอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุต่ำค่าความร้อนแฝงของการระเหยจะสูง

บทที่ 3

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ แสดงได้ดังนี้

เธียรชัย สันดุษฐ (2535) ได้ศึกษาถึงการถ่ายเทอากาศในเมล็ดพืชซึ่งจะใช้พัดลมเป็นตัวกลางในการนำพาอากาศโดยรอบที่มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมให้ไหลผ่านกองของเมล็ดพืชด้วยอัตราการไหลต่ำ การถ่ายเทอากาศในเมล็ดพืชนี้จะช่วยป้องกันการเกิดการเสื่อมสภาพของเมล็ดในระหว่างการเก็บรักษา ช่วยรักษาระดับของอุณหภูมิเมล็ดพืช ขจัดไล่ความชื้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการหายใจของเมล็ดพืช อีกทั้งยังช่วยลดอัตราการเสียหายอันเนื่องมาจากการทำลายของแมลง หนู และเชื้อราได้อีกด้วย ซึ่งการรักษาระดับของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการเก็บเมล็ดพืชให้อยู่ในระดับต่ำ และการถ่ายเทอากาศในเมล็ดพืชไม่สามารถกระทำได้ในทุกฤดูกาล ดังนั้นการทราบค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ในแต่ละเดือนในรอบ 5 ปีที่ผ่านมาจะเป็นประโยชน์ในการตัดสินใจว่าจะเลือกใช้การถ่ายเทอากาศในเมล็ดพืชในช่วงเวลาใด

Sarker, N. N., Kunze, O. R. and Strouboulis, T. (1994) ได้ศึกษาการนำวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์มาใช้ในการจำลองการอบแห้งข้าวเปลือก เพื่ออธิบายลักษณะการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้กลไกการแพร่ความชื้นในเมล็ดข้าว ซึ่งพบว่าการแพร่ความชื้นในระหว่างการอบแห้งข้าวเปลือกสามารถจำลองได้โดยใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ วิธีนี้จะสามารถคาดคะเนความชื้นช่วงเวลาที่จุดใด ๆ ภายในเมล็ดข้าวได้ โดยเริ่มแรกจะต้องหาค่า Diffusivity ของเมล็ดข้าวก่อน ซึ่งจะพบว่าข้าวสารจะมีค่า Diffusivity สูงสุด รองลงมาคือแกลบและรำข้าวตามลำดับ จากผลการทดลองและจำลองแสดงให้เห็นว่าวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์สามารถนำมาใช้ในการทำนายการอบแห้งข้าวเปลือกได้เป็นอย่างดีซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับการทดลอง

Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn. S. (1994) ได้ทำการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน รวมถึงตัวแปรการอบแห้งที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ความสามารถในการอบแห้ง และความสัมพันธ์ของพลังงาน ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกถูกควบคุมโดยการแพร่ความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือก ส่วนความสามารถในการอบแห้งของเครื่องจะสูงขึ้นตามอัตราการไหลของอากาศจำเพาะ และอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ความสัมพันธ์ของพลังงานจะลดลงเมื่ออัตราการไหลของอากาศจำเพาะลดลง หรือเมื่ออัตราการหมุนเวียนอากาศกลับเพิ่มขึ้น ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดที่แนะนำคือ 115°C และเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพค่าความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกควรอยู่

ระหว่าง 24 - 25 %db ผลการจำลองที่ได้จากการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นว่าค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ดีที่สุดควรเป็นไปตามนี้ อัตราการหมุนเวียนอากาศกลับ 80 % ความเร็วลม 4.4 m/s ความหนาของเบด 9.5 cm อัตราการไหลของอากาศจำเพาะ 0.1 kg/s·kg_{ของวัสดุที่แห้ง} การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ แสดงว่าราคาการอบแห้งรวมคือ 0.08 เหรียญสหรัฐ/kgของน้ำที่ระเหยไป นั่นคือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาสำหรับการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบกะได้ และผลจากการจำลองจะถูกนำไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่อเนื่องต่อไป

Lu, R., Siebenmorgen, T. J., Costello, T. A. and Fryar Jr, E. O. (1995) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณความชื้นในข้าวในช่วงเวลาเก็บเกี่ยวในเชิงเศรษฐศาสตร์ ซึ่งอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่า FY (Rice field yield), PMR (Percent milled rice) และ PHR (Percent head rice) ในรูปฟังก์ชันของปริมาณความชื้นในข้าวโดยเฉลี่ย และอาศัยแบบจำลองในการทำนายค่าปริมาณความชื้นในข้าวตลอดฤดูกาลเก็บเกี่ยว ซึ่งแบบจำลองนี้ใช้ได้กับข้าวเมล็ดยาวที่ปลูกใน Arkansas เท่านั้น จากการศึกษาพบว่าราคาการอบข้าวแห้งในหน่วยดอลลาร์ต่อพื้นที่เพาะปลูกจะมีค่าสูงสุดเมื่อเก็บเกี่ยวข้าวที่ความชื้น 22 % สำหรับ Flat rate schedule และ 24 % สำหรับ Incremental rate schedule ส่วนรายได้ทั้งหมดจะต่ำสุดเมื่อเก็บเกี่ยวข้าวที่มีความชื้นระหว่าง 17 - 22 % และจะสูงสุดเมื่อเก็บเกี่ยวข้าวที่ความชื้นต่ำกว่า 19 % สำหรับ Incremental rate schedule ส่วน Flat rate schedule รายได้ทั้งหมดจะสูงสุดเมื่อเก็บเกี่ยวข้าวที่ความชื้นระหว่าง 19 - 22 % ราคาของข้าวที่แตกหักมีผลกระทบต่อรายได้ทั้งหมด และยังผลกระทบต่อค่าความชื้นช่วงเก็บเกี่ยวที่ดีที่สุดอีกด้วย ซึ่งค่าความชื้นช่วงเก็บเกี่ยวที่ดีที่สุดจะขึ้นกับอัตราการสูญเสียของ FY และการสูญเสียในรายได้ทั้งหมดจะเกิดขึ้นถ้าข้าวถูกเก็บเกี่ยวที่ความชื้นต่ำกว่า 15 % หรือสูงกว่า 22 %

สมชาติ โสภณรณฤทธิ (2538) ได้เสนอแนวทางที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาข้าวเปลือกชื้นด้วยวิธีการเป่าอากาศแวดล้อมไปในกองข้าวเปลือกเพื่อระบายความร้อนออกจากข้าวขณะที่รอกการอบแห้ง ซึ่งเป็นการอบแห้งแบบสองระยะคือ 1 ใช้อุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศสูง ทำการอบแห้งอย่างช้า ๆ ส่วนในระยะที่ 2 ใช้อากาศแวดล้อมเป่าเข้าไปในกองข้าวเปลือกภายในฉางเก็บรักษา และเป่าเป็นระยะ ๆ อาจจะเป็น 1 - 3 ชั่วโมงต่อสัปดาห์ เพื่อให้ความร้อนออกจากกองข้าวและทำให้อุณหภูมิภายในกองสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นผลให้สามารถเก็บรักษาข้าวได้เป็นระยะเวลาหลาย ๆ เดือน โดยแนะนำว่าสามารถใช้อัตราการไหลของอากาศที่ค่อนข้างต่ำ 0.35 m³/min·m³ ของข้าวเปลือก เพื่อชะลอความเสียหายของกองข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 22 %wb ได้นานกว่า 1 - 2 เดือน ในระยะที่ 1 นี้จะใช้ลมร้อนในการอบแห้งข้าวเปลือกจนเหลือความชื้นประมาณ 19 %wb ซึ่งเครื่องอบแห้งที่จะใช้ในช่วงแรกนี้อาจจะเป็นเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด ส่วนในช่วงที่ 2 จะทำการอบแห้งข้าวเปลือกจากความชื้นประมาณ 19 %wb จนเหลือความชื้นประมาณ 14 %wb ซึ่งเทคนิคที่จะใช้ในช่วงนี้อาจเป็นการอบแห้งข้าวเปลือกภายในฉางเก็บรักษาโดยใช้อากาศแวดล้อม อัตราการไหลที่แนะนำประมาณ 0.5 - 1 m³/min·m³ ของข้าวเปลือก และควรเป่าอากาศเฉพาะในช่วงกลางวันเท่านั้น

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, พิพัฒน์ อมตฉายา, สมเกียรติ ปรีชญาวารากร, อติศักดิ์ นาถรณกุล และ สิทธิชัย อินทร์จันทร์ (2540) ได้ศึกษาถึงการอบแห้งข้าวเปลือกในขณะที่ยกและการเก็บรักษาในสถานที่ใช้งานจริงโดยใช้อากาศแวดล้อมเป่าผ่านกองข้าวเปลือกขนาด 105 ton ด้วยอัตราการไหล $0.57 \text{ m}^3/\text{min}\cdot\text{m}^3$ ของข้าวเปลือก ซึ่งจะพบว่าในการลดความชื้นข้าวเปลือกโดยเฉลี่ย 17 %wb ให้เหลือ 11.6 %wb จะใช้เวลาอบแห้ง 9 สัปดาห์ โดยชั้นที่มีความลึกมากกว่าจะให้อัตราการลดความชื้นเร็วกว่าชั้นที่มีความลึกน้อย หลังจากที่ยกแล้วก็จะเก็บรักษาต่อไปอีก 19 สัปดาห์ ซึ่งจะพบว่าความชื้นเฉลี่ยในแต่ละระดับความลึกอยู่ในเกณฑ์ดี และการอบแห้งโดยวิธีนี้สามารถรักษาเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดให้อยู่ในสภาวะคงเดิมได้ดี

อรรถพร อภิพัฒนานานุกูล, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, ทิพาพร อยู่วิทยา และ อติศักดิ์ นาถรณกุล (2540) ได้ศึกษาการชะลอความเสียหายของกองข้าวเปลือกขึ้นด้วยการระบายอากาศ โดยทดสอบกับข้าวเปลือก (ข้าวเจ้าพันธุ์ผสม) ที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 21 22.2 และ 26 %wb โดยแบ่งการทดลองออกเป็นดังนี้ ที่ความชื้นเริ่มต้น 22.2 และ 26 %wb จะทำการเป่าด้วยอากาศเย็นอย่างต่อเนื่อง และเป่าด้วยอากาศแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง ส่วนที่ความชื้น 21 %wb จะทำการเป่าด้วยอากาศเย็น และเป่าด้วยอากาศแวดล้อมเฉพาะช่วงกลางวัน (9.00 - 17.00 น.) โดยอากาศเย็นที่ใช้มีอุณหภูมิ $15 \pm 8^\circ\text{C}$ และอากาศแวดล้อมที่ใช้มีอุณหภูมิ $30 \pm 8^\circ\text{C}$ อัตราการไหลอากาศ $0.35 \text{ m}^3/\text{min}\cdot\text{m}^3$ ของข้าวเปลือก จากการทดลองพบว่า การระบายอากาศในกองข้าวเปลือกนอกจากจะลดอุณหภูมิของกองข้าวเปลือกได้แล้ว ยังสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้อีกด้วย ที่ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น 21 - 26 %wb สามารถรักษาคุณภาพในแง่ความขาวของข้าวให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้นานกว่า 1 เดือน ทั้งโดยวิธีเป่าด้วยอากาศเย็นหรืออากาศแวดล้อม คุณภาพข้าวเปลือกหลังการสีในแง่ของความขาวของข้าวเปลือกที่เป่าด้วยอากาศเย็นดีกว่าข้าวเปลือกที่เป่าด้วยอากาศแวดล้อม

นิรชรา ศรีสุบัตติ, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และ ทิพาพร อยู่วิทยา (2540) ได้ทำการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการเหือดของข้าว พร้อมทั้งหาสมการเอมไพริคัลแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ โดยทำการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกขึ้นด้วยอากาศแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ค่าต่าง ๆ ในระบบปิด ควบคุมอุณหภูมิของระบบโดยใช้ตู้อบไฟฟ้า ทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ 5 ค่า คือ 35 45 55 60 และ 65°C ในแต่ละอุณหภูมิจะเลือกใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวที่ทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 3 ช่วง คือ 79.3 - 80 % 82 - 86 % และ 94.9 - 96.7 % นำข้าวที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ความชื้น เปอร์เซ็นต์ข้าวตัน ความขาวความเหลือง (ค่า b ในระบบการวัดสีของ Hunter) ปริมาณกลูโคส และปริมาณไลซีน โดยระยะเวลาในการทดลองและความถี่ในการเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์จะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเหลืองที่เห็นได้ชัดเจน ซึ่งจะแตกต่างกันไปแต่ละสภาวะที่ทดลอง โดยอาศัยข้อมูลจากงานวิจัยก่อนหน้านี้

จากการศึกษาอัตราการเหือดของข้าวพบว่าอัตราการเหือดของข้าวเปลือกเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ โดยมีค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy) อยู่ในช่วง 130 - 145 kJ/mole และพบว่าค่าคงที่อัตราการเหือด (k) กับอุณหภูมิจึงมีความสัมพันธ์กันแบบเอกซ์โปเนนเชียล ส่วนความสัมพันธ์

ระหว่างค่าคงที่อัตราการเหลืองกับ Water activity ของข้าวนั้นเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง จึงสามารถเขียนสมการทำนายอัตราการเหลืองได้ดังสมการที่ 3.1

$$\ln(k) = a - da_w - e/T + (ya_w)T \quad (3.1)$$

เมื่อ k คือค่าคงที่อัตราการเหลือง (b unit/day), a_w คือ Water activity 100, T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ ส่วน a d e และ y คือ ค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 71.87 25.32 25,919.13 และ 10,712.78 ตามลำดับ โดยสมการนี้ใช้ได้ที่อุณหภูมิ 35 - 65°C และ Water activity (คือค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเมื่อวัดและอากาศอยู่ในสภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์) 0.8 - 0.95 ส่วนผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าคงที่อัตราการเหลืองพบว่าอุณหภูมิ Water activity และปฏิสัมพันธ์ของทั้งสองปัจจัยมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนความเหลืองของข้าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

อรอนงค์ ศรีพวาทกุล, สมชาติ โสภณธรณฤทธิ และ สมเกียรติ ประชญาวารากร (2540) ได้ทำการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกโดยวิธีฟลูอิดไดซ์เบดอย่างต่อเนื่อง เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการอบแห้งข้าวเปลือกที่ช่วงความชื้นสูงโดยวิธีฟลูอิดไดซ์เบดอย่างต่อเนื่อง โดยจะทำการพิจารณาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการผลิต ความสิ้นเปลืองพลังงาน และคุณภาพของข้าวเปลือก อีกทั้งยังได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอัตราการอบแห้ง และการใช้พลังงาน จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิของอากาศ 115°C เป็นอุณหภูมิสูงสุดที่ข้าวเปลือกยังมีคุณภาพดีอยู่ และที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก 30 %db พบว่าอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศจำเพาะและอุณหภูมิของอากาศ โดยที่อัตราการไหลของอากาศจำเพาะต่ำจะสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ ที่อัตราการหมุนเวียนอากาศกลับและความสูงของชั้นข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานต่ำลง ไม่ควรอบแห้งข้าวเปลือกให้มีความชื้นต่ำกว่า 22 %db เนื่องจากจะทำให้ข้าวหลังการสีมีคุณภาพต่ำ และพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถใช้ในการทำนายอัตราการอบแห้งและการใช้พลังงานได้ดีพอสมควร การศึกษาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ความสูงของแผ่นกั้น (Weir) อัตราการไหลของอากาศจำเพาะ และอัตราการหมุนเวียนอากาศกลับ โดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 115°C พบว่าจุดที่เหมาะสมในการอบแห้งคือ ที่ความสูงของแผ่นกั้น 10 cm อัตราการไหลของอากาศจำเพาะ 0.043 kg/s·kg_{dry matter} อัตราการหมุนเวียนกลับของอากาศ 80 % จะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิ 7.9 MJ/kg_{water} แบ่งเป็นพลังงานไฟฟ้า 2.46 MJ/kg_{water} และพลังงานความร้อน 5.44 MJ/kg_{water} มีค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง ในกรณีที่ใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง 2.06 บาท/kg_{water} แบ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่อง 0.99 บาท/kg_{water} ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ 1.07 บาท/kg_{water} ในกรณีที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง 2.60 บาท/kg_{water} แบ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่อง 0.99 บาท/kg_{water} ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ 1.61 บาท/kg_{water}

Wetchacama, S., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S. and Wangil, M. (1998) ได้ทำการศึกษาถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด ขนาดอุตสาหกรรม เพื่อหาข้อตกลงร่วมกันสำหรับข้อมูลจากการคำนวณที่ได้จากการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลที่ได้จากการทดลอง โดยในขั้นตอนการทดลองได้ทำการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง โดยมีสภาวะการอบแห้งเป็นดังนี้ ความสามารถในการอบแห้ง 9.5 ton/h ความเร็วของลมร้อน 2.33 m/s อุณหภูมิของอากาศขาเข้าอยู่ในช่วง 115 - 130°C ความลึกของเบด (Bed depth) 15 cm ส่วนในขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มีการพัฒนามาแล้วโดยนักวิจัยท่านอื่น ๆ โดยทั้งสองกรณีนี้พิจารณาถึงค่าความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งข้าวเปลือก ผลการศึกษาแสดงว่าค่าความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งข้าวเปลือกที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งจัดอยู่ในระดับดีพอใช้

Soponronnarit, S., Rordprapat, W. and Wetchacama, S. (1998) ได้ทำการออกแบบสร้าง และทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไดซ์เบดชนิดเคลื่อนที่ได้ เครื่องอบแห้งนี้สามารถอบแห้งได้ 2.5 - 4.0 ton/h ซึ่งเครื่องอบแห้งนี้จะติดตั้งไว้บนรถพ่วง (Trailer) สำหรับสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่แนะนำไว้เป็นดังนี้ ความสามารถในการอบแห้ง (Drying capacity) 3.8 ton/h ความเร็วลม 2.8 m/s อุณหภูมิอากาศอบแห้งโดยเฉลี่ย 144°C ความสูงของเบด (Bed height) 13.5 cm อัตราการหมุนเวียนอากาศกลับ 80 % ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความชื้นข้าวเปลือกลดลงจาก 32.6 %db เป็น 25.8 %db ความสิ้นเปลืองพลังงาน 4.2 MJ/kg_{water evaporated} ราคาการอบแห้งข้าวเปลือก 1.48 บาท/kg_{water evaporated} คุณภาพของข้าวเปลือกในด้านความขาวและเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดอยู่ในเกณฑ์ที่ดีเมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง (ข้าวเปลือกที่ถูกทำให้แห้งโดยอุณหภูมิแวดล้อม)

Swasdisevi, T., Soponronnarit, S., Shujinda, A., Wetchacama, S. and Thepent, V. (1998) ได้ทำการวิจัยในเรื่องเตาเผาชนิดใช้แก๊สจากข้าวสำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไดซ์เบด เพื่อศึกษาออกแบบ สร้าง และทดสอบเตาเผาชนิดใช้แก๊สจากข้าวสำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไดซ์เบด ที่มีความสามารถในการอบแห้ง 10 ton/h เตาเผาแบบชนิดใช้แก๊สมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.37 m ความสูง 2.75 m อัตราการป้อนแก๊ส 120 - 150 kg/h และอัตราการไหลของอากาศก่อนป้อนเข้าเครื่องเป่าลมเป็น 1.16 kg/s อากาศและแก๊สถูกป้อนในห้องเผาไหม้ในทิศทางที่สัมผัสกับลมหมุนวน อุณหภูมิของอากาศที่ทางออกของเตาโดยเฉลี่ยเป็น 504°C และก่อนที่จะเข้าเครื่องเป่าลมเป็น 293 - 297°C อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม 32 - 34°C ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาชนิดใช้แก๊สและระบบเตาเผาเป็น 59 % และ 58 % ตามลำดับ และยังได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของก๊าซ ซึ่งได้แก่ CO CO₂ N₂ และ NO₂ ที่ได้จากการเผาไหม้ในเตาเผาชนิดใช้แก๊สที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อมและเจ้าหน้าที่ด้วย

Taweerattanapanish, A. (1998) ได้ทำการวิจัยในเรื่องสภาวะการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด สำหรับการเพิ่มคุณภาพของข้าวเปลือกเพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันสำหรับการเพิ่มคุณภาพของข้าวเปลือก โดยข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 23 - 31 %wb ถูกทำให้แห้งจนเหลือความชื้นสุดท้าย 13 - 28 % โดยใช้ลมร้อนที่มีอุณหภูมิ 140 และ 150°C ค่าปริมาณต้นข้าวสัมพัทธ์จะสูงสุดเมื่อข้าวเปลือกถูกทำให้แห้งจนเหลือความชื้นสุดท้าย 20 - 22 % ข้าวเปลือกที่มีความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 18 % เมื่อนำมาผ่านการทำ Tempering เป็นเวลามากกว่า 2 h จะสามารถเพิ่มปริมาณข้าวต้นได้ ส่วนความขาวของข้าวสารส่วนใหญ่ผ่านเกณฑ์ และข้าวที่ไม่ผ่านการ Tempering จะมีลักษณะไม่แตกต่างจากข้าวอ้างอิง ขณะที่ข้าวที่ผ่านการ Tempering จะมีปัญหาในเรื่องกลิ่นเหม็นของข้าวที่เพิ่มสูงขึ้น และความขาวของข้าวสุกที่ลดลง

อดิเทพ ทวีรัตน์พาณิชย์, สมชาติ โสภณธณฤทธิ์, สมบูรณ์ เวชกามา, งามรีน คงเสรี และ สุนันทา วงศ์ปิยชน (2541) ได้ศึกษาถึงผลพลอยได้จากการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน โดยทดลองกับข้าวเปลือกที่มีความชื้น 23 - 31 %wb และใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 140 และ 150°C อบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด ชนิดอบแห้งเป็นวง จนเหลือความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 13 - 29 %wb แล้วนำข้าวที่ผ่านการอบแห้งไปปฏิบัติต่อใน 2 ลักษณะ คือ

ลักษณะที่ 1 นำข้าวที่ผ่านการอบแห้งมาปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องประมาณ 20 - 30 min แล้วนำไปเป่าด้วยอากาศเย็นในเครื่องอบแห้งแบบถาดจนเหลือความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่ 14 %wb จากนั้นนำข้าวไปสี

ลักษณะที่ 2 นำข้าวที่ผ่านการอบแห้งมาผ่านการ Tempering (คือการนำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งมาให้ความร้อนต่อทันทีในขวดอับอากาศภายในตู้อบเป็นเวลา 12 h) แล้วนำข้าวไปเป่าด้วยอากาศเย็นในเครื่องอบแห้งแบบถาดจนเหลือความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก 14 %wb จากนั้นนำข้าวไปสี

จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่ทำให้ปริมาณข้าวต้นสูงขึ้นอยู่ระหว่าง 140 - 150°C โดยช่วงความชื้นเริ่มต้นที่สามารถเพิ่มปริมาณข้าวต้นให้สูงขึ้นอยู่ระหว่าง 23 - 31 %wb ช่วงที่สามารถเพิ่มปริมาณข้าวต้นได้สูงสุดคือ เมื่ออบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้าย 19 - 22 %wb เมื่ออบแห้งจนความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 19 %wb ปริมาณข้าวต้นจะลดลง โดยข้าวที่ผ่านการ Tempering จะมีปริมาณข้าวต้นที่สูงกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการ Tempering การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศอบแห้งระหว่าง 140 และ 150°C จะได้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นใกล้เคียงกัน ส่วนความขาวของข้าวสารส่วนใหญ่ผ่านเกณฑ์ และข้าวที่ไม่ผ่านการ Tempering จะมีลักษณะไม่แตกต่างจากข้าวอ้างอิง ในขณะที่ข้าวที่ผ่านการ Tempering จะมีปัญหาในเรื่องกลิ่นเหม็นของข้าวที่เพิ่มสูงขึ้น และความขาวของข้าวสุกที่ลดลง

Soponronnarit, S., Wetchacama, S., Swasdisevi, T. and Poomsa - ad, N. (1999) ได้ทำการวิจัยในเรื่องการจัดการข้าวเปลือกขึ้นโดยการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เซชัน การทำ Tempering และการระบายด้วยอากาศแวดล้อมเพื่อค้นหายุทธศาสตร์ในการลดความชื้นข้าวเปลือกให้เหลือ 16.5 %db โดยการใช้อุณหภูมิอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด การทำ Tempering และการระบายด้วยอากาศ

แวดล้อม เกณฑ์การพิจารณาคือ เวลาที่ใช้ทั้งหมดและคุณภาพการสี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าหลังจากผ่านทั้ง 3 กระบวนการแล้ว ความชื้นลดลงจาก 33 %db ภายในเวลา 53 min โดยในกระบวนการแรก เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดถูกใช้ในการลดความชื้นให้เหลือ 19.5 %db ภายในเวลา 3 min จากนั้นนำข้าวเปลือกมาผ่านการ Tempering เป็นเวลา 30 min สุดท้ายจะถูกปล่อยให้เย็นลงโดยอากาศแวดล้อมด้วยความเร็วลม 0.15 m/s เป็นเวลา 20 min ส่วนคุณภาพของข้าวเปลือกในด้านปริมาณข้าวตัน และความขาว อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ การทำ Tempering เป็นประโยชน์สำหรับการเพิ่มปริมาณข้าวตัน และเพิ่มการลดความชื้นในระหว่างการระบายด้วยอากาศแวดล้อม การระบายด้วยอากาศแวดล้อมที่ความเร็วต่ำสามารถลดความชื้นในข้าวเปลือกได้ดีกว่าการระบายด้วยอากาศแวดล้อมที่ความเร็วสูง

Soponronnarit, S. (1999) ได้ทำการศึกษาและรวบรวมผลงานวิจัยที่ผ่านมาของนักวิจัยทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศในเรื่องที่เกี่ยวกับการอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งเริ่มด้วยเครื่องอบแห้งแบบกะในเชิงทดลองและจบด้วยเครื่องอบแห้งแบบไหลต่อเนื่องในเชิงพาณิชย์ อีกทั้งได้กล่าวถึงความเป็นมาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งสรุปคร่าว ๆ ได้ดังนี้ เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งที่อาศัยลมร้อนทั่ว ๆ ไป พบว่ามีความได้เปรียบมากกว่าโดยเฉพาะที่ระดับความชื้นสูง ๆ ความได้เปรียบในที่นี้เช่น ความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ ราคาต่ำ และคุณภาพข้าวอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ การศึกษาในขั้นพื้นฐานจะเป็นการศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้ง และปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของข้าวเปลือก อัตราการลดความชื้น และความสิ้นเปลืองพลังงาน ส่วนสภาวะการอบแห้งเป็นไปตามนี้ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 140 - 150°C อัตราการหมุนเวียนอากาศกลับ 80 % ความเร็วลมประมาณ 2 - 2.3 m/s และความหนาเบด (Bed thickness) 10 - 15 cm ที่ค่าความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกสูง ๆ (สูงกว่า 29.9 %) และอุณหภูมิอากาศสูง ๆ (140 - 150°C) มีผลทำให้ ปริมาณข้าวตันเพิ่มขึ้น 50 % เมื่อเทียบกับการอบแห้งโดยใช้อากาศแวดล้อม ส่วนความยอมรับในการบริโภคพบว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดไม่ต่างไปจากข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศแวดล้อม

Fan, J., Siebenmorgen T. J. and Marks, B. P. (2000) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของความหลากหลายของพันธุ์ข้าวและค่าความชื้นในช่วงเก็บเกี่ยวที่มีผลต่อค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) ในข้าว โดยให้ข้อมูลเกี่ยวกับค่าความชื้นสมดุลสำหรับข้าว 3 พันธุ์ คือ พันธุ์ Bengal ซึ่งเป็นข้าวเมล็ดปานกลาง พันธุ์ Kaybonnet และพันธุ์ Cypress เป็นข้าวเมล็ดยาว ที่ปลูกอยู่ในสหรัฐ ซึ่งถูกวัดที่อุณหภูมิ 4 21 และ 38°C และได้หาผลกระทบของค่าความชื้นช่วงเก็บเกี่ยวรวมทั้งตำแหน่งที่ตั้งในการเก็บเกี่ยวที่มีผลต่อค่าความชื้นสมดุลในเมล็ดข้าวเปลือกและเมล็ดข้าวสารด้วย จากการศึกษาพบว่าที่ทุก ๆ อุณหภูมิการทดลองข้าวเปลือกพันธุ์ Bengal มีค่าความชื้นสมดุลสูงกว่าพันธุ์ Kaybonnet และพันธุ์ Cypress เมื่อพิจารณาที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์สูง ๆ ยังพบว่าค่าความชื้นช่วงเก็บเกี่ยวและตำแหน่งที่ตั้งในการเก็บเกี่ยวจะไม่มีผลกระทบต่อค่าความชื้นสมดุล ซึ่งข้าวที่เก็บเกี่ยวในช่วงความชื้นต่ำกว่าจะมีค่าความชื้นสมดุลต่ำกว่าข้าวที่เก็บเกี่ยวในช่วงความชื้นสูง (เมื่อพิจารณาที่ความชื้น

สัมพัทธ์สูง ๆ) ทั้งนี้เป็นผลมาจาก Hysteresis effect ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด ค่าความชื้นสมดุลของ กองข้าวเปลือกพันธุ์ Bengal พันธุ์ Kaybonnet และพันธุ์ Cypress ที่มีค่าประมาณอยู่ในช่วง 20 - 80 % ซึ่งสูงกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการการหาค่าความชื้นสมดุล

Wiset, L., Szednicki, G., Driscoll, R. H., Nimmuntavin, C. and Siwapornrak, P. (2001) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของอุณหภูมิอบแห้งสูง ๆ ที่มีผลต่อคุณภาพของข้าว เพื่อหาผลกระทบของ อุณหภูมิอบแห้งสูง ๆ ที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเมล็ดข้าวซึ่งอาจจะเป็นผลในการ เปลี่ยนแปลงในคุณลักษณะการหุงต้ม โดยนำข้าวเปลือกมาเพิ่มความชื้นแล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิมืดที่ 4°C รอ จนกระทั่งข้าวเปลือกมีความชื้นประมาณ 30 %wb จากนั้นนำข้าวเปลือกไปปฏิบัติการต่อใน 3 ลักษณะคือ

ลักษณะที่ 1 อบแห้งขั้นตอนเดียวด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidised bed dryer) ที่อุณหภูมิประมาณ 85 - 90°C เป็นเวลา 11 min อบจนข้าวเปลือกมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 14 %wb ด้วยอัตราการไหล (Airflow rate) 66 m³/min จากนั้นนำข้าวเปลือกที่ได้ไปสี เพื่อวัดคุณภาพ

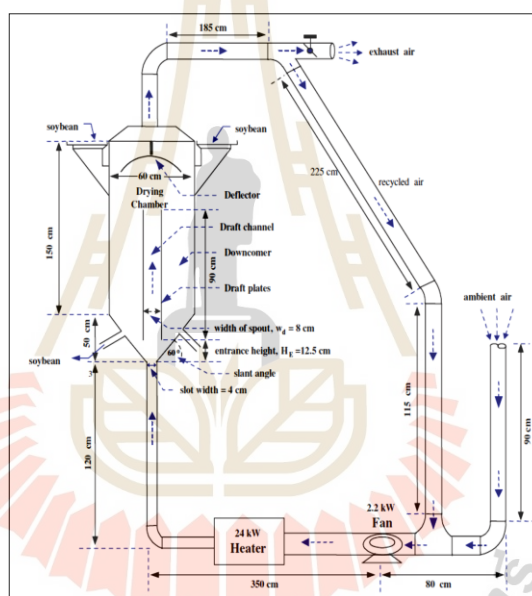
ลักษณะที่ 2 อบแห้ง 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกจะอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidised bed dryer) เป็นเวลา 4 min จนกระทั่งข้าวเปลือกเหลือความชื้นประมาณ 18 %wb ภายใต้สภาวะเหมือนที่กล่าวมาแล้ว ส่วนขั้นตอนที่ 2 จะเป็นการอบแห้งข้าวเปลือกในที่เก็บ (In - store dryer) ด้วยอุณหภูมิแวดล้อมจนกระทั่งเหลือความชื้นเป็น 14 %wb ด้วยอัตราการไหลอากาศ (Airflow rate) 66 m³/min จากนั้นนำข้าวเปลือกที่ได้ไปสีเพื่อวัดคุณภาพ

ลักษณะที่ 3 เป็นการอบแห้งขั้นตอนเดียว คืออบแห้งในที่เก็บ (In - store dryer) ภายใต้ สภาวะเหมือนที่กล่าวมาข้างต้น จากนั้นนำข้าวเปลือกที่ได้ไปสีเพื่อวิเคราะห์คุณภาพ

จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่าข้าวที่ผ่านการปฏิบัติในลักษณะที่ 1 จะให้ Head rice yield ลดลง ส่วนข้าวที่ผ่านการปฏิบัติในลักษณะที่ 2 จะให้ Head rice yield ที่ดีที่สุด รองลงมาจะเป็นข้าวที่ ผ่านการปฏิบัติในลักษณะที่ 3

Prachayawarakom, S., Ruengnarong, S. and Soponronnarit, S. (2006) ได้ทำการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเมล็ดพืชสามชนิดคือ เมล็ดข้าวเปลือก เมล็ดข้าวโพด และเมล็ดถั่วเหลืองในเครื่องอบแห้งสเปาเต็ดแบบสองมิติ ซึ่งในระหว่างดำเนินการทดลองจะมีอากาศไหลผ่าน เครื่องอบแห้งอยู่สองส่วนคือ ส่วนแรกเป็นส่วนของ Draft channel คือบริเวณที่กระแสอากาศหลักไหล ผ่านหรือเรียกว่าบริเวณสเปาต์ ส่วนที่สองเป็นส่วนของดาวน์คัมเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 จากการ ทดสอบตามของชนิดของวัสดุเกษตรในการทดลองพบว่าปริมาณอากาศที่สามารถแทรกซึมผ่านเข้าสู่ บริเวณดาวน์คัมเมอร์นั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุเกษตรเนื่องจากขนาดและรูปร่างของวัสดุเกษตรนั้นมี ขนาดที่แตกต่างกัน ความพรุนระหว่างวัสดุเกษตรก็ต่างกันด้วย สัดส่วนความพรุนของอากาศที่อยู่ในถัง ขณะที่เครื่องทำงานในบริเวณดาวน์คัมเมอร์สำหรับเมล็ดข้าวเปลือกประมาณ 28 % ส่วนเมล็ดข้าวโพด และเมล็ดถั่วเหลืองประมาณ 21 % ดังนั้นความเร็วอากาศสูงสุดที่สามารถแทรกซึมผ่านเข้าสู่บริเวณ ดาวน์คัมเมอร์จะเกิดขึ้นกับเมล็ดข้าวเปลือก เมล็ดข้าวโพด และเมล็ดถั่วเหลืองตามลำดับ และลักษณะ

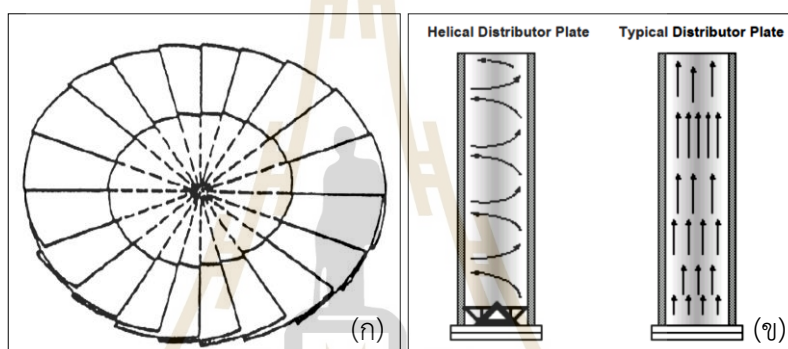
ของกระแสลมดังกล่าวจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนขึ้นต่ออนุภาคในบริเวณสเปาต์ เมื่อเทียบกับบริเวณของดาวน์คัมเมอร์ และจากผลการทดลองพบว่าบริเวณสเปาต์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอยู่ระหว่าง 57 ถึง 123 W/m²·K และที่บริเวณดาวน์คัมเมอร์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอยู่ระหว่าง 19 ถึง 32 W/m²·K ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในบริเวณสเปาต์และบริเวณดาวน์คัมเมอร์แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของความเร็วอากาศในการเป่าพรมมีความสำคัญต่อบริเวณสเปาต์มากกว่าบริเวณดาวน์คัมเมอร์ นอกจากนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณดาวน์คัมเมอร์จะเพิ่มขึ้นตามความเร็วที่อากาศที่ใช้ในการอบแห้ง และเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอัตราส่วนความสูงของเมล็ดพืชที่กองทับกันอยู่ในถังต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเมล็ดพืช (H/d_p) ในบริเวณดาวน์คัมเมอร์เมื่อความเร็วของอากาศไหลเข้าระบบเริ่มคงที่ทั่วทั้งบริเวณ



รูปที่ 3.1 แผนผังเครื่องอบแห้งสเปาต์เคเบดแบบสองมิติ (Prachayawarakorn, S. et al., 2006)

อำนาจ บุญลอย, ดาริห์ จันทรแสงสุข และ พงษ์เจต พรหมวงศ์ (2549) ทำการศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งเมล็ดพริกไทยแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีแผ่นกระจายลมแบบเกลียว โดยเป็นการออกแบบลักษณะการไหลของอากาศ มีแนวความคิดว่าการเพิ่มระยะทางการไหลของลมร้อนให้มากขึ้นภายในหอบจะช่วยให้ลมร้อนสัมผัสกับเมล็ดพืชได้มากขึ้น และการกระจายตัวกันของเมล็ดพริกไทยในหอบจะช่วยให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้มากขึ้นด้วย ลักษณะของหอบและแผ่นกระจายลมแบบเกลียวแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 (ก) และ (ข) ซึ่งได้ทำการอบในหอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.13 m สูง 1 m ด้านล่างของหอบทดลองจะมีแผ่นกระจายแบบเกลียวซึ่งจะเป็นตัวทำให้เกิดการหมุนควงของลมร้อนภายในหอบ ในการทำการทดลองแต่ละครั้งใช้เมล็ดพริกไทยที่มีความชื้นเริ่มต้น

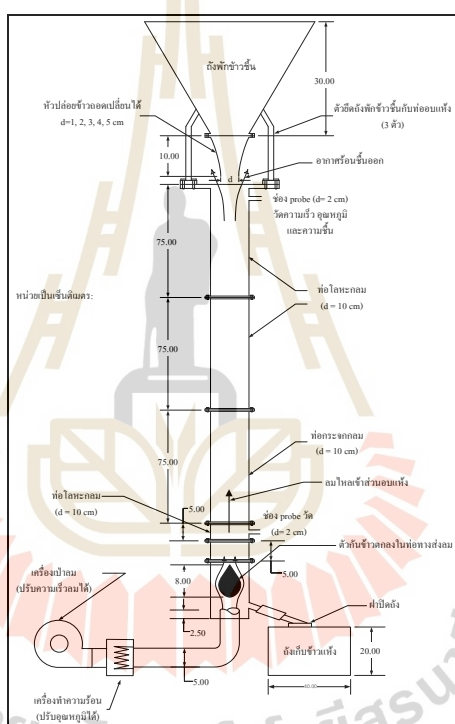
ประมาณ 80 %wb ปริมาณ 0.2 kg อุณหภูมิในการอบแห้ง 80°C และความเร็วของอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน (U_{mf}) ภายในท่อใช้คือ $1.3U_{mf}$ $1.6U_{mf}$ และ $2U_{mf}$ เวลาที่ใช้ในการทดลองในแต่ละกรณี 180 min และทำการวัดความชื้นเมล็ดพริกไทยทุก 10 min จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดา (ไม่มีแผ่นกระจายลมแบบเกลียว) จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีแผ่นกระจายลมแบบเกลียวให้ผลที่ดีกว่าการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดธรรมดา คือปริมาณความชื้นของเมล็ดพริกไทยจะลดลงเร็วกว่า ทั้งนี้เนื่องจากแผ่นกระจายลมแบบเกลียวทำให้เกิดการสั่นและการไหลอย่างปั่นป่วนของลมร้อน และยังช่วยทำให้เมล็ดพริกไทยเกิดการกระจายตัวกันทั่วหอบ จึงทำให้ลมร้อนสามารถสัมผัสได้กับที่บริเวณผิวของเมล็ดพริกไทยได้มากขึ้น โดยพบว่าสามารถลดเวลาในการอบแห้งได้มากถึง 30 %



รูปที่ 3.2 (ก) ลักษณะของหอบแห้ง (ข) แผ่นกระจายลมแบบเกลียว (อำนาจ บุญลอย และคณะ, 2549)

ทวิช จิตรสมบูรณ์, โศรฎา แข็งการ และ เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว (2549) ทำการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ และเครื่องอบแห้งได้ถูกติดตั้งดังรูปที่ 3.3 ซึ่งมีหลักการทำงานคือ ลมร้อนจากทางด้านล่างของท่ออบแห้งที่ตั้งในแนวตั้งจะเคลื่อนที่ออกขึ้นไปทางด้านบนของท่อ สวนทางกับข้าวเปลือกที่ตกลงจากถังพักด้านบนอย่างอิสระด้วยแรงโน้มถ่วง ในช่วงที่เกิดการสวนทางกันระหว่างเมล็ดข้าวเปลือกกับทิศทางของลมร้อนนั้น ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและความชื้นในท่ออบแห้งระหว่างเมล็ดข้าวเปลือกและอากาศแห้งโดยวิธีการพาแบบบังคับ (Forced convection) สำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระนี้ เมล็ดพืชที่ไหลลงมาจากด้านบนของท่ออบจะไหลลงมาอย่างหลวม ๆ ด้วยความเร็วสูงและมีความพุนมาก ทำให้มีพื้นที่สัมผัสในการถ่ายเทความร้อนและความชื้นเกิดมากขึ้น ในการทำการทดลองได้ทำการอบแห้งข้าวเปลือกซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 23.75 %db ปริมาณ 600 g ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างกัน 3 ค่า (80 100 และ 120°C) และใช้อากาศอบแห้งเฉลี่ย 6.642 m/s (เป็นการเฉลี่ยแบบ Mass average) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระสามารถอบแห้งข้าวเปลือกได้อย่างรวดเร็วภายในเวลา 30 s จนได้ความชื้นสุดท้ายที่ 15.5 %db โดยมีการใช้พลังงานปฏุมภูมิเท่า 2.4 3.14 และ 3.03 MJ/kg ที่

อุณหภูมิอากาศสำหรับการอบแห้งคือ 80 100 และ 120°C ตามลำดับ อีกทั้งเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของข้าวเปลือกเปรียบเทียบกับเวลา มีลักษณะลดลงเกือบจะเป็นเส้นตรง นั้นหมายความว่า การอบแห้งข้าวด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระไม่เกิดช่วงอัตราการอบแห้งถดถอยเหมือนดังกรณีการอบแห้งโดยวิธีอื่น ผู้ทำงานวิจัยได้สันนิษฐานการอบแห้งด้วยวิธีนี้โดยไม่เกิดอัตราการถดถอยในช่วงความชื้นต่ำว่าเกิดจากการที่ความเร็วสัมพัทธ์สูงมาก ซึ่งทำให้เกิดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการพาที่ผิวเมล็ดข้าวสูงตลอดเวลา ซึ่งสูงกว่าอัตราการแพร่ความร้อนภายในเมล็ดข้าวที่แพร่ออกมายังผิวข้าว อีกทั้งอัตราการแพร่ความร้อนของเมล็ดข้าวก็สูงตลอดเวลาด้วย เนื่องจากความชันของความชื้นที่ผิวสูง (Moisture gradient) อันเป็นผลมาจากอัตราการพาที่สูงนั่นเอง

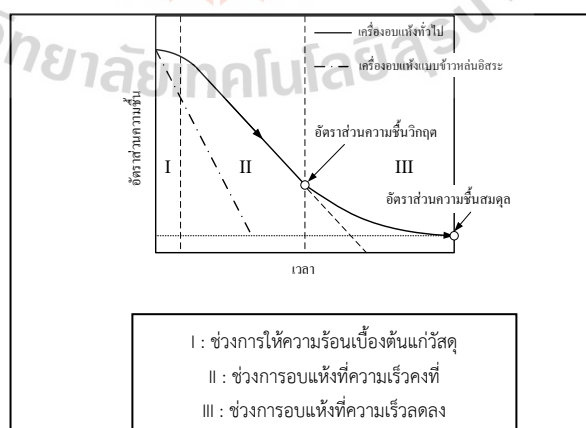


รูปที่ 3.3 แผนผังเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ (ทวีช จิตรสมบูรณ์ และคณะ, 2549)

ทวีช จิตรสมบูรณ์, โศรฎา แซ่กัการ และ เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว (2549) ทำการทดลองต่อเนื่องจากงานวิจัยของตนด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระโดยการศึกษาผลกระทบของลมหมุนวนต่อประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งนี้ ทำการทดลองด้วยการใส่ปีกหมุนวนลมเข้ากับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ และทำการทดลองที่ความเร็วอากาศสำหรับการอบแห้งเฉลี่ย 6.642 m/s (เป็นการเฉลี่ยแบบ Mass average) ปริมาณข้าวเปลือก 600 g ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งต่างกัน 3 ค่า (80 100 และ 120°C) ความชื้นเริ่มต้น 23.75 %db จนกระทั่งความชื้นลดลงเหลือ 15.5 %db จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่ปีกหมุนวนลมที่ทางเข้าอากาศอบแห้ง ทำ

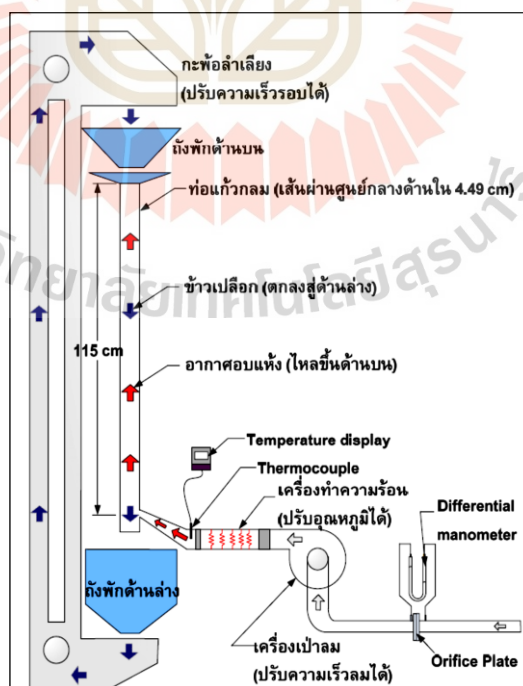
ให้ลมร้อนหมุนควงแบบส่ววนเข้าไปในท่ออบแห้งซึ่งเป็นการเพิ่มระยะทางสัมผัสระหว่างอากาศอบแห้งและเมล็ดข้าวเปลือกส่งผลให้เวลาในการอบแห้งน้อยลงและประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการที่ไม่ได้ใส่ปีกหมุนวนลม

จากงานวิจัยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระที่ผ่านมา อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกที่ได้ค่อนข้างคงที่ตลอดทั้งกระบวนการ เนื่องจากในการทำการทดลองนั้นเป็นการทดลองแบบเป็นชั๊ก คือไม่ได้ทำการทดลองแบบต่อเนื่องทั้งกระบวนการ ดังนั้นจึงส่งผลให้ข้าวเปลือกที่ออกจากกระบวนการอบแห้งในแต่ละรอบมีระยะพักตัวช่วงหนึ่งสำหรับการอบแห้งในรอบต่อไป ซึ่งก็พบว่าระยะพักตัวนั้นมีผลโดยตรงต่ออัตราการอบแห้ง โดยในช่วงแรก ๆ ของการอบแห้งยังเป็นช่วงที่ข้าวเปลือกยังคงมีความชื้นที่ผิวอยู่มาก อากาศอบแห้งจึงสามารถดึงความชื้นที่ผิวออกไปได้โดยง่าย ดังนั้นอัตราการอบแห้งจึงค่อนข้างคงที่ในช่วงแรก แต่หลังจากที่ความชื้นที่ผิวข้าวเปลือกเริ่มหมดไป การแพร่ความชื้นจากภายในเมล็ดข้าวเปลือกจึงจะเริ่มเกิดขึ้น โดยจะค่อย ๆ แพร่จากภายในเมล็ดข้าวเปลือกมาที่บริเวณผิวข้าวเปลือก หากการทำการทดลองแบบเป็นชั๊ก (ทำให้มีเวลาสำหรับการพักข้าวเพื่อรอการอบแห้งในรอบต่อไป) จะส่งผลให้อัตราการแพร่ความชื้นจากภายในเมล็ดข้าวเปลือกออกมาที่ผิวข้าวเปลือกค่อนข้างคงที่และแพร่ความชื้นออกมาที่ผิวข้าวเปลือกอย่างสมบูรณ์ก่อนที่จะถูกอบในรอบต่อไป จึงทำให้อัตราการอบในช่วงท้ายลดลงอย่างคงที่ด้วยเช่นกัน แต่หากการทำการทดลองแบบต่อเนื่องทั้งกระบวนการ (ทำให้ไม่มีเวลาสำหรับการพักข้าวเพื่อรอการอบแห้งในรอบต่อไป) จะส่งผลให้อัตราการแพร่ความชื้นจากภายในเมล็ดข้าวเปลือกออกมาที่ผิวข้าวเปลือกค่อนข้างช้าลงเรื่อย ๆ ในแต่ละรอบ เมื่อความชื้นที่ผิวของข้าวเปลือกมีน้อย (เนื่องจากการแพร่ออกมาจากภายในเมล็ดทำได้น้อย) จึงทำให้อัตราการอบแห้งในช่วงหลังของการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องลดลงอย่างถดถอยดังรูปที่ 3.4



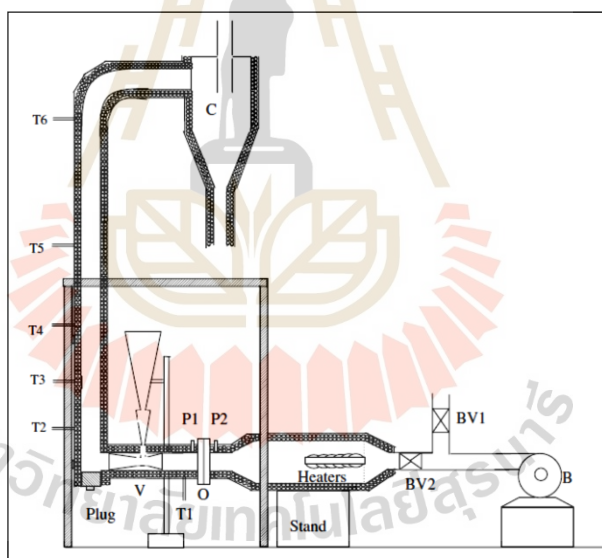
รูปที่ 3.4 อัตราการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบทั่วไป (ทวีช จิตรสมบูรณ์ และคณะ, 2549)

เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว, สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวีข จิตรสมบุรณ์ (2551) ทำการศึกษาผลของความเร็วอากาศต่ออัตราการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีข้าวหล่นอิสระอย่างต่อเนื่อง เครื่องอบแห้งชนิดนี้ถูกพัฒนาจากเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ (อบแห้งแบบขยัก) ให้สามารถอบแห้งแบบต่อเนื่องได้ เครื่องอบแห้งชนิดนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3.5 ความต่อเนื่องของการอบแห้งข้าวคือ ข้าวจะถูกลำเลียงด้วยกระพ้อลำเลียงจากถังพักข้าวด้านล่างขึ้นสู่ถังพักข้าวด้านบนอย่างต่อเนื่อง (กระพ้อลำเลียงสามารถปรับความเร็วรอบได้) แล้วปล่อยข้าวเปลือกให้ไหลลงในท่อสำหรับการอบแห้ง สวนกับทิศทางของอากาศร้อนที่ถูกเป่าพ่นจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนในการทำการทดลอง ใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90 และ 120°C ความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ย 1 2 3 และ 4 m/s ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกประมาณ 26 %wb ปริมาณข้าวเปลือกขึ้น 2.5 kg ทำการทดลองจนกระทั่งได้ค่าความชื้นข้าวที่ต้องการประมาณ 14 %wb และมีอัตราการป้อนข้าวเปลือก 15.37 kg/min ผลการศึกษาพบว่า อัตราการอบแห้งแปรผันโดยตรงกับความเร็วอากาศอบแห้งของอุณหภูมิอบแห้งทั้งสองค่า โดยมีระยะเวลาการอบแห้งลดลงจาก 150 min เหลือประมาณ 82 min และ 130 min เหลือประมาณ 60 min เมื่อเปลี่ยนความเร็วอากาศอบแห้งจาก 1 m/s ถึง 4 m/s ในกรณีอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 90 และ 120°C เมื่อพิจารณาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะที่ใช้ พบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วอากาศอบแห้งสูงขึ้นแต่มีแนวโน้มที่ลู่เข้าสู่ค่าคงที่ ซึ่งหมายความว่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐมภูมิจำเพาะจะไม่ขึ้นกับความเร็วอากาศอบแห้งเมื่อความเร็วอากาศอบแห้งมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 3.5 แผนผังเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระที่ใช้ในการทดลองอบแห้งอย่างต่อเนื่อง (เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว และคณะ, 2551)

Rajan, K. S., Srivastava, S. N., Pitchumani, B. and Dhasandhan, K. (2008) ได้รายงานผลการวิจัยเกี่ยวกับ ปฏิกริยาระหว่างแก๊สกับของแข็งในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบลำเลียงด้วยลมแนวตั้ง แสดงดังรูปที่ 3.6 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนในการลำเลียงด้วยลมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การทดลองเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนด้วยอากาศและของแข็งได้ดำเนินการในแท่นทดสอบการลำเลียงด้วยลมในแนวตั้งที่ออกแบบมาเป็นพิเศษซึ่งประกอบด้วยท่อเหล็กชุบสังกะสีที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 54 mm และสูง 2.2 m โดยใช้ยิปซัม (Gypsum) เป็นตัวกลางที่เป็นของแข็งและอากาศร้อนเป็นตัวกลางของแก๊ส จากการทดลองพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศและของแข็งในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบลำเลียงด้วยลมแนวตั้งจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนของแข็งที่เพิ่มขึ้น และจะเพิ่มขึ้นในขั้นต้นด้วยความเร็วลมจนกระทั่งถึงค่าสูงสุดก่อนที่จะลดลงตามความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นต่อไป ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคมีอิทธิพลค่อนข้างต่ำต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศและของแข็ง ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของของแข็งลดลงตามอัตราการป้อนของแข็งและถึงค่าสูงสุดที่ความเร็วลมที่เหมาะสม ก่อนที่จะลดลงอีกครั้งตามความเร็วลมที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงระบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบลำเลียงด้วยลมแนวตั้ง
(Rajan, K. S. et al., 2008)

สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบุญ (2552) ทำการศึกษาเงื่อนไขการอบแห้งข้าวเปลือกที่ให้คุณภาพข้าวสารที่ดีในเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระเป็นเครื่องอบแห้งที่ทดสอบแล้วว่าสามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็วและประหยัดพลังงาน จึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับผลผลิตหลังการอบแห้งข้าวด้วยเครื่องอบแห้งข้าวชนิดนี้เพิ่มเติม โดยเฉพาะในเรื่องของการสูญเสียคุณภาพของการผลิต อันเนื่องมาจากความชื้นของความร้อนและความชื้นที่เกิดขึ้นระหว่างการ

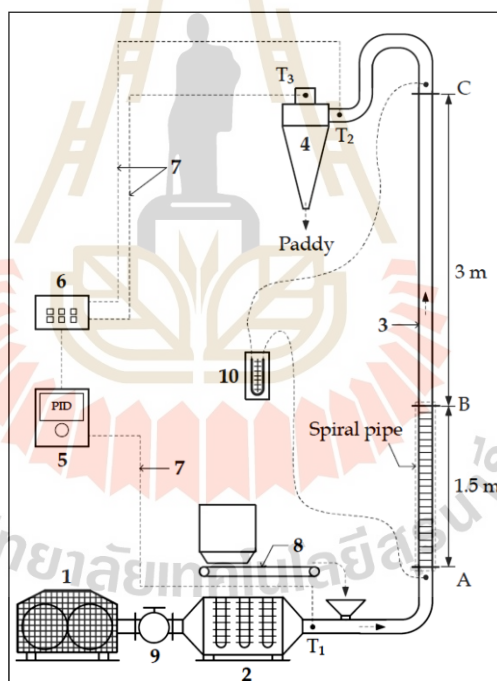
อบแห้ง งานวิจัยนี้ทำการศึกษาปริมาณข้าวต้นและความขาวของข้าวสารโดยใช้อากาศอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 60 100 130 และ 150°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 2 และ 3 m/s และระยะเวลาพักข้าวเปลือก 0 1 2 และ 4 min ผลการทดลองพบว่าการพักข้าวเปลือกเป็นเวลา 1 - 4 min/รอบ เป็นผลดีอย่างมากต่อการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ โดยสามารถให้ปริมาณข้าวต้นได้มากถึง 55 - 60 % ทั้งที่ความเร็วอากาศต่ำและสูง และที่อุณหภูมิกาศต่ำและสูง (ที่ความชื้นข้าวเปลือกสุดท้าย 12 - 14 %wb) แต่หากทำการอบแห้งอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการพักจะได้ปริมาณข้าวต้นที่ต่ำมาก ซึ่งเป็นผลมาจากความเค้นอันเนื่องมาจากความชื้นของความชื้นที่สูงมากซึ่งนำไปสู่รอยร้าวในข้าวเปลือกและเกิดการแตกหักของข้าวสาร

Ghalavand, Y., Hatamipour, M. S. and Rahimi, A. (2010) ได้ทำการทดลองและศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรของการอบแห้งเมล็ดถั่วเขียวแบบสเปาเต็ดเบด การอบแห้งเมล็ดถั่วเขียวได้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการของสเปาเต็ดเบดและทำการทดลองที่สภาพเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ผลของอุณหภูมิกาศที่ทางเข้า อัตราการไหล ความสูงของท่อสำหรับการอบแห้ง มวลเริ่มต้นสำหรับอนุภาคที่เปียกชื้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค ได้ถูกนำมาเป็นตัวแปรสำหรับการดำเนินงานบนเครื่องอบแห้งและอัตราการอบแห้ง จากผลการทดลองสำหรับการอบแห้งถั่วเขียวแสดงให้เห็นว่าอัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับสภาพเงื่อนไขในการดำเนินการทดลองดังที่ได้กล่าวมาทั้งหมด และพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและอัตราการไหลของอากาศมีผลทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มความสูงของท่อสำหรับการอบแห้งนั้นมีผลทำให้อัตราการอบแห้งลดลงเนื่องจากการทำให้ความชื้นอากาศรอบอนุภาคมากขึ้น เช่นเดียวกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่มากขึ้นก็จะทำให้อัตราการอบแห้งลดลงเช่นกัน โดยผลของอุณหภูมิกาศที่ทางเข้าเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดสำหรับอัตราการอบแห้ง ในขณะที่ผลกระทบต่ออัตราการอบแห้งที่รองลงมาคืออัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้า มวลเริ่มต้นของอนุภาคที่เปียกชื้น และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค ตามลำดับ

Kahyaoglu, L. N., Sahin, S. and Sumnu, G. (2012) ทำการศึกษาผลกระทบของการอบแห้งข้าวสาลีแบบสเปาเต็ดเบด และแบบสเปาเต็ดเบดโดยใช้ไมโครเวฟช่วยในการอบแห้ง ในการทดลองได้มีการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของข้าวสาลี โดยทำการทดลองที่ปริมาณข้าว 200 g อุณหภูมิที่ต่างกัน 3 ค่า (50 70 และ 90°C) และนอกจากนั้นสำหรับการอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดโดยใช้ไมโครเวฟช่วยในการอบแห้งยังได้เลือกใช้ไมโครเวฟที่กำลังต่างกัน 2 กำลังคือ 3.5 W/g และ 7.5 W/g จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดโดยใช้ไมโครเวฟช่วยในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C ที่กำลังของไมโครเวฟ 3.5 W/g และ 7.5 W/g ช่วยลดเวลาการอบแห้งได้อย่างน้อยร้อยละ 60 % และ 85 % ตามลำดับ ในขณะที่การอบแห้งแบบสเปาเต็ดที่อุณหภูมิจาก 50°C ถึง 90°C ช่วยลดเวลาได้เพียงร้อยละ 61 % และเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น สำหรับการอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดที่อุณหภูมิ 50°C มีค่าอยู่ในช่วง $1.44 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ถึง $3.32 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสำหรับการอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดโดยใช้ไมโครเวฟช่วยในการ

อบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C มีค่าอยู่ในช่วง $5.06 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ถึง $11.3 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ที่กำลังของไมโครเวฟ 3.5 W/g และ 7.5 W/g ตามลำดับ จากการทดลองจึงเป็นผลสรุปได้ว่า การควบคุมกำลังของไมโครเวฟซึ่งใช้เป็น ตัวช่วยสำหรับการอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบตนั้นสามารถลดเวลาในการอบแห้งได้มากกว่าการควบคุมอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ทางเข้า

ฉัตรชัย นิยมล (2555) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการลดความชื้น ข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียว กระบวนการลดความชื้นของ วัสดุของเครื่องอบแห้งแบบนี้จะเกิดขึ้นภายในท่อแนวตั้งที่เรียกว่าหอบแห้ง (Drying column) ซึ่ง อากาศร้อนที่ใช้จะเป็นตัวกลางในการลดความชื้นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงไปพร้อมกับวัสดุที่ ต้องการลดความชื้น ส่งผลให้ความชื้นในวัสดุระเหยไปพร้อมออกไปยังกระแสอากาศ หอบแห้งชนิดท่อ เกลียวได้ถูกติดตั้งแทนหอบแห้งแบบดั้งเดิม (ท่อเรียบ) ดังรูปที่ 3.7 เพื่อเป็นการเพิ่มความปั่นป่วนใน การไหลของอากาศซึ่งถูกใช้เป็นตัวกลางในการอบแห้ง

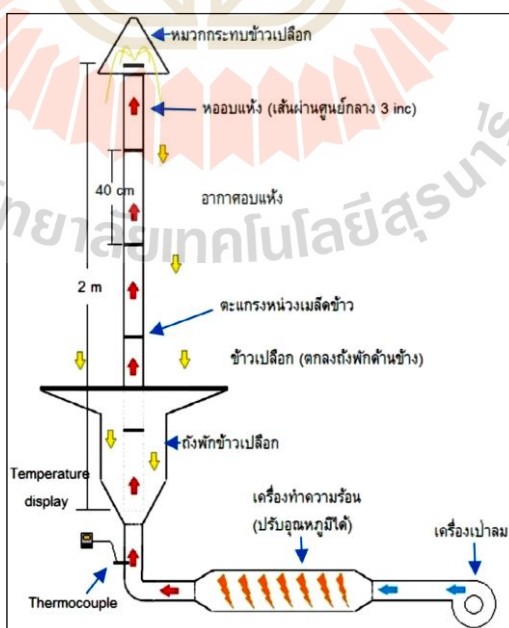


รูปที่ 3.7 แผนผังเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลม (ฉัตรชัย นิยมล, 2555)

จากการทดลองที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ $28 \% \text{db}$ ผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิของอากาศขาเข้า (อุณหภูมิอากาศอบแห้ง) ความเร็วของอากาศ อัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มีต่อความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งได้ถูกทดลอง และจากการทดลองพบว่าเครื่องอบแห้งที่พัฒนาโดยใช้หอบแห้งชนิดเกลียวนั้นสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้ถึง 4.4% ถึง $10.3 \% \text{db}$ ภายในระยะเวลาอันสั้น (ต่ำกว่า 5 s) และความชื้นต่ำสุดของ

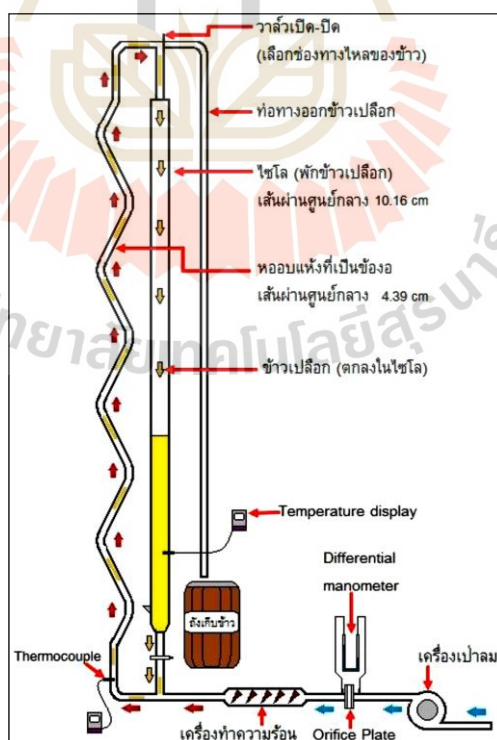
ข้าวเปลือกที่ผ่านการลดความชื้นมีค่าเท่ากับ 17.7 %db ซึ่งต่ำกว่าความชื้นของข้าวเปลือกที่ผ่านการลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมแบบดั้งเดิม (ใช้หอบแห้งชนิดท่อเรียบ) นอกจากนี้ยังพบว่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะหรือ SEC ของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียวมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกรณีใช้หอบแห้งชนิดท่อเรียบในทุกเงื่อนไขการทดลอง โดยค่า SEC ต่ำสุดที่ได้ในงานวิจัยนี้คือ $1.78 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C ความเร็วของอากาศ 30 m/s และอัตราการป้อนข้าวเปลือก $150 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพสูงมากที่จะนำไปใช้ในการลดความชื้นขั้นต้นของข้าวเปลือก (โดยเฉพาะข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวมาใหม่ซึ่งมักมีความชื้นสูง)

ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา และ ทวิช จิตรสมบูรณ์ (2557) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นหมุนวนติดตะแกรง แสดงดังรูปที่ 3.8 โดยได้มีการสร้างและทดลองเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหมุนวนแบบใหม่ที่มีการใส่ตะแกรงภายในท่ออบแห้ง เพื่อให้ตะแกรงทำหน้าที่ขวางและหน่วงการไหลของเมล็ดข้าวและลมร้อนในท่ออบแห้ง ซึ่งเป็นการเพิ่มเวลาสัมผัสระหว่างข้าวและลมร้อน มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเปรียบเทียบการปฏิบัติงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นที่มีตะแกรงและไม่มีตะแกรงขวาง ที่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้งที่เปลี่ยนไปตามปัจจัยต่าง ๆ คือ อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 110 130 และ 150°C ความเร็ว อากาศแห้งเฉลี่ย 7.80 8.40 และ 9.08 m/s จากผลการทดลองพบว่าความร้อนและความเร็วลมที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งตะแกรงที่ใส่เพิ่มเข้าไปมีผลทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น รวมทั้งช่วยให้ประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 3.8 แผนผังเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นหมุนวนติดตะแกรง
(ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา และ ทวิช จิตรสมบูรณ์, 2557)

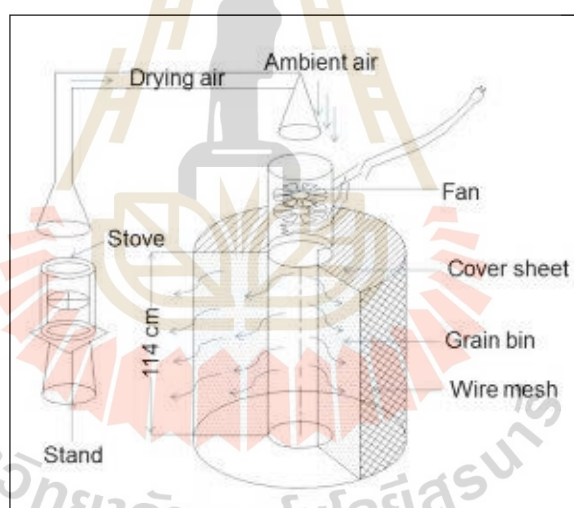
ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา และ ทวีช จิตรสมบุญ (2558) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นที่เป็นช่องอ แสดงดังรูปที่ 3.9 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้สร้างเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นแนวใหม่ที่มีความรวดเร็วในการทำงาน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกชนิดนี้ ด้วยการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 100 และ 120°C ความเร็วลมในการอบแห้ง 14 15 และ 16 m/s อบแห้งในหอบแห้งที่เป็นห้องแบบ 8 ช่องอ และแบบ 16 ช่องอ ที่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้งเฉลี่ยและพลังงานในการอบแห้ง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยการนำข้าวเปลือกมาอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นที่มีหอบแห้งเป็นช่องอสลับฟันปลาไปมา เพื่อหน่วงเวลาการเป่าพ่นให้ยาวนานขึ้นกว่าปกติ และยังทำให้มีการคลุกเคล้าระหว่างเมล็ดพืชกับอากาศร้อนที่มากขึ้นอีก ซึ่งน่าจะทำให้เกิดการอบแห้งที่รวดเร็วและใช้พลังงานความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าเดิม จากการทดลองพบว่าการอบแห้งในหอบแห้งที่เป็นห้องแบบ 16 ช่องอ นั้นให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยมากกว่าการอบแห้งในหอบแห้งที่เป็นห้องแบบ 8 ช่องอ และการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงก็ให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ อีกทั้งการอบแห้งในหอบแห้งที่เป็นห้องแบบ 16 ช่องอ ยังใช้พลังงานในการอบแห้งต่ำกว่าการอบแห้งในหอบแห้งที่เป็นห้องแบบ 8 ช่องอ ซึ่งอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมภูมิจำเพาะในการลดความชื้นอยู่ในช่วงประมาณ 3.87 - 8.42 MJ/kg น้ำที่ระเหย



รูปที่ 3.9 แผนผังเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นที่เป็นช่องอ
(ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา และ ทวีช จิตรสมบุญ, 2558)

Ondokmai, P., Homdoun, N., Dussadee, N., Yongphet, P., Bouchareon S. and Ramaraj, R. (2016) ทำการวิจัยเชิงสำรวจเพื่อประเมินสมรรถนะการอบแห้งของเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกที่มีลักษณะเป็นโดม ทำงานร่วมกับเครื่องเติมอากาศโดยใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิง ภายในโดมมี 3 ชั้น ที่ความชื้นเริ่มต้น 25 %wb พบว่ารังสีดวงอาทิตย์ 350 W/m² และอุณหภูมิภายในโดม 48°C ในขณะที่ภายนอก 30°C เมื่ออุณหภูมิภายในโดมเพิ่มขึ้น 25°C และมีการใช้ระบบเชื้อเพลิงร่วมด้วยนั้นสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกเหลือ 15 %wb ได้

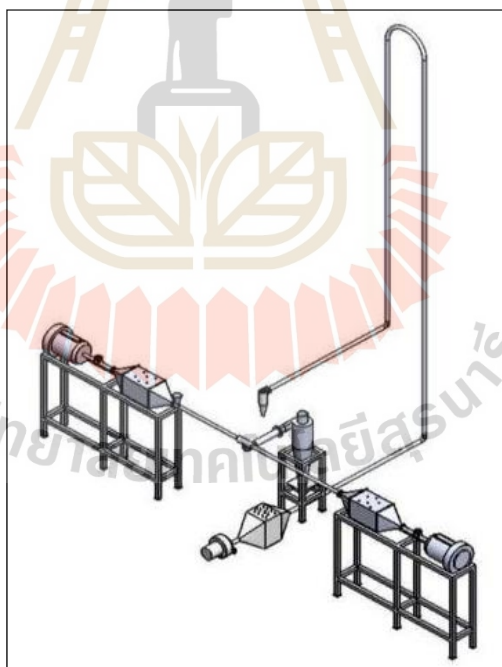
Aktar, S., Kibria, R., Alam, M. M., Kabir, M. and Saha, C. K. (2016) ได้ศึกษาการดำเนินการเพื่อประเมินประสิทธิภาพทางเทคนิคของเครื่องอบแห้งแบบ Low cost mechanical batch dryer (STR) ในประเทศบังคลาเทศ ซึ่งเป็นการอบแห้งในลักษณะที่อากาศอบแห้งไหลผ่านเมล็ดพืชในถังเก็บ แสดงดังรูปที่ 3.10 สำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 38°C ถึง 42°C ความจุในการอบแห้ง 300 kg พบว่าประสิทธิภาพการอบแห้งและการถ่ายเทความร้อนมีค่าคงที่ ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องอบแห้งมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 22.7 ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพของชุดเครื่องอบแห้งแบบมาตรฐาน



รูปที่ 3.10 แผนผังเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบ BAU - STR (Aktar, S. et al., 2016)

Saha, C. K., Alam, Md. A., Alam, Md. M., Kalita, P. K. and Harvey, J. (2017) จากมหาวิทยาลัย Bangladesh Agricultural University (BAU) ในประเทศบังคลาเทศ ได้เผยแพร่บทความวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งที่ถูกพัฒนาโดยมหาวิทยาลัยของตนเอง โดยให้ชื่อว่า BAU - STR ซึ่งมีความจุข้าวเปลือกในการอบแห้งที่ 500 kg ใช้เวลาในการอบแห้ง 4 - 4.7 h ซึ่งเครื่องอบแห้งดังกล่าวมีความสามารถในการกระจายความร้อนของอุณหภูมิอากาศอบแห้งผ่านถังบรรจุเมล็ดข้าวได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นผลดีต่อการอบแห้ง ประสิทธิภาพของเครื่องอยู่ในเกณฑ์ดี และเครื่องอบแห้งดังกล่าวอาจถูกพัฒนาให้สามารถนำไปใช้งานในประเทศที่กำลังพัฒนาได้

ธนรัชต์ วิจิณธนสาร, วิโรจน์ ฤทธิทอง และ กิตติ สถาพรประสาธน์ (2554) ได้นำเสนอผลการวิจัยเกี่ยวกับการลดความชื้นข้าวเปลือก โดยงานวิจัยมุ่งเน้นการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสนทำงานร่วมกับเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 3.11 ซึ่งเป็นครั้งแรกของการรวมเอาข้อดีของเครื่องอบแห้งทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดความชื้นของข้าวเปลือกให้ได้มากขึ้น ช่วงของการอบแห้งข้าวเปลือกที่ศึกษาจะอยู่ในช่วงที่อัตราการอบแห้งคงที่เท่านั้น โดยที่ข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 28 - 30 %db ส่วนห้องอบแห้งของระบบกระแสนถูกสร้างขึ้นจากท่อสแตนเลสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.09 m ยาว 0.25 m ระยะห่างในการขนเทเท่ากับ 0.20 m ท่ออากาศขาเข้าทั้งสองด้านมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.04 เมตร ส่วนระบบพาหะลมใช้ท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.04 m ความยาวของห้องอบแห้ง 6 m ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 70 90 และ 110°C อัตราการป้อนข้าวเปลือก 22 47 และ 62 kg/h จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 110°C และอัตราการป้อนข้าวเปลือก 62 kg/h นั้นสามารถลดความชื้นได้ถึง 10.78 %db โดยที่คุณภาพของข้าวเปลือกที่ผ่านการลดความชื้น ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และใช้เวลาเฉลี่ยของข้าวเปลือกที่อยู่ในระบบประมาณ 4 s

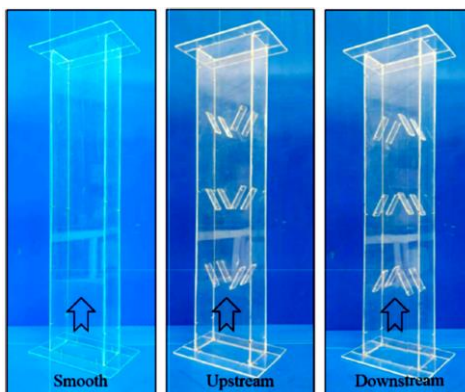


รูปที่ 3.11 ระบบของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนทำงานร่วมกับเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม
(ธนรัชต์ วิจิณธนสาร และคณะ, 2554)

ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์ (2561) ได้ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อที่มีการไหลแบบปั่นป่วนผ่านแผ่นปีกสามเหลี่ยม โดยได้นำเสนออิทธิพลของการใส่แผ่นปีกสามเหลี่ยมในท่อภายใต้สภาวะพลาซซ์

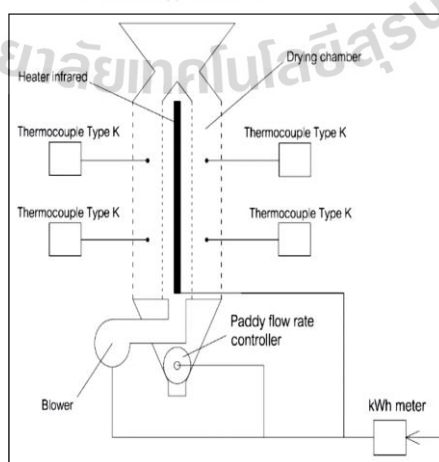
ความร้อนที่ผิวคงที่ต่อพฤติกรรมทางความร้อนและการต้านทานการไหล ในการทดลองแผ่นปีกสามเหลี่ยมทำมุมปะทะ 45° ถูกใส่ภายในท่อโดยมีสัดส่วนความสูงปีกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 3 ค่า ($b/D = 0.1, 0.15$ และ 0.2) และสัดส่วนระยะพิทช์ปีกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 3 ค่า ($P/D = 1, 2$ และ 3) อากาศถูกใช้เป็นของไหลทดสอบซึ่งไหลผ่านท่อโดยแสดงในเทอมของเลขเรย์โนลด์ในช่วง 4,200 ถึง 25,800 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใส่แผ่นปีกสามเหลี่ยมสามารถเพิ่มค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ถึง 4.06 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ขณะที่ตัวประกอบความเสียหายมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 31.63 เท่า เมื่อสัดส่วนความสูงปีกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเพิ่มขึ้นส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียหายมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่สัดส่วนระยะพิทช์ปีกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเพิ่มขึ้นการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียหายจะมีค่าลดลง ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของการใส่แผ่นปีกสามเหลี่ยมภายในท่อมีค่าอยู่ในช่วง 1.16 - 1.51 โดยมีค่าสูงสุดในกรณี $b/D = 0.15$ และ $P/D = 1$

Chokphoemphun, Sua. and Chokphoemphun, Sur. (2018) ได้ศึกษาการทำนายปริมาณความชื้นของการทำให้ข้าวเปลือกแห้งในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดเบดด้วยเครื่องอุปกรณสร้างการไหลแบบกระแสวน (Vortex flow) โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม โดยในงานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาเชิงตัวเลขและการทดลองเพื่อปรับปรุงกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดเบดทรงสี่เหลี่ยม โดยใช้หลักการสร้างการไหลแบบกระแสวน (Vortex flow) กระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกถูกเปรียบเทียบกับห้องอบแห้งที่แตกต่างกันสามแบบคือ ห้องอบแห้งที่มีพื้นผิวเรียบ (Smooth) ห้องอบแห้งที่มีแผ่นกั้นลาดเอียงที่ต้นทาง (Upstream) และห้องอบแห้งที่มีแผ่นกั้นลาดเอียงที่ปลายทาง (Downstream) แสดงดังรูปที่ 3.12 สำหรับแต่ละกรณีศึกษาอุณหภูมิอากาศอบแห้งสองค่า (60 และ 80°C) และความเร็วการไหลของอากาศสองอัตรา (2.24 ± 0.02 และ 2.52 ± 0.02 m/s ที่ความเร็วฟลูอิดเบดต่ำสุดประมาณ $1.6U_{mf}$ และ $1.8U_{mf}$ เท่า ตามลำดับ) ภายใน 5 hr ของเวลาในการอบแห้ง ซอฟต์แวร์ Rapid - Miner Studio 7 ถูกใช้เพื่อออกแบบโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม (Multi - Layered, Feed - Forward, Artificial Neural Network, MLFF - ANN) แบบพิดฟอร์เวิร์ดหลายชั้นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายอัตราส่วนความชื้นของข้าวเปลือกในระหว่างกระบวนการทำอบแห้ง โครงสร้างของโมเดล MLFF - ANN ที่มีจำนวนเลเยอร์ที่ซ่อนอยู่ต่างกัน หมายเลขโหนดเซลล์ประสาทในเลเยอร์ที่ซ่อนอยู่ ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัมและ Training epoch numbers จะถูกตรวจสอบผลการวิจัยพบว่าแผ่นกั้นแบบเอียงมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมการไหลและอัตราการอบแห้ง ห้องอบแห้งฟลูอิดเบดที่มีแผ่นกั้นช่วยลดเวลาในการทำอบแห้งได้ประมาณ 7 - 18 % เมื่อเทียบกับฟลูอิดเบดที่มีพื้นผิวเรียบที่มีความชื้น 13 %w.d. โมเดล MLFF - ANN ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดประกอบด้วยสี่เลเยอร์ โดยจำนวนโหนดของเซลล์ประสาทในแต่ละเลเยอร์คือ 3 2 2 และ 1 ตามลำดับ ที่ Training epoch number อยู่ที่ 1500 และค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัมอยู่ที่ 0.4 ผลการทำนายมีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของการกำหนด (R^2) ที่ 0.99556 ความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) ที่ 1.988×10^{-4} และค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) ที่ 0.00127



รูปที่ 3.12 ห้องอบแห้งข้าวเปลือกที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลแบบกระแสวน (Vortex flow)
(Chokphoemphun, Sua. and Chokphoemphun, Sur., 2018)

ณัฐพล แซ่ลิ้ม, เทวรัตน์ ตรีอำนาจ และ กระจวี ตรีอำนาจ (2561) ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมี แสดงดังรูปที่ 3.13 โดยอาศัยการแผ่รังสีความร้อนจากการติดตั้งฮีตเตอร์อินฟราเรดไฟฟ้าเข้าไปที่แกนกลางของชุดทดสอบทรงกระบอกที่สร้างขึ้น ทำการทดสอบกับข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 23 - 26 มาตรฐานเปียก อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C โดยปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของข้าวเปลือก 0.837 1.228 1.875 และ 2.308 kg/min ผลการทดสอบพบว่าอัตราการไหลของข้าวเปลือกมีอิทธิพลต่อสมรรถนะการอบแห้งเป็นอย่างมาก โดยสำหรับอัตราการไหลที่ 1.875 kg/min คือค่าที่เหมาะสมต่อสมรรถนะการอบแห้งที่ดีที่สุดเนื่องจากให้ค่าอัตราการอบแห้งสูงสุด ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด อีกทั้งยังให้ค่าร้อยละข้าวต้นและดัชนีความขาวของเมล็ดข้าวใกล้เคียงกับชุดควบคุมมากที่สุดอีกด้วย



รูปที่ 3.13 แผนผังโครงสร้างของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมี (ณัฐพล แซ่ลิ้ม และคณะ, 2561)

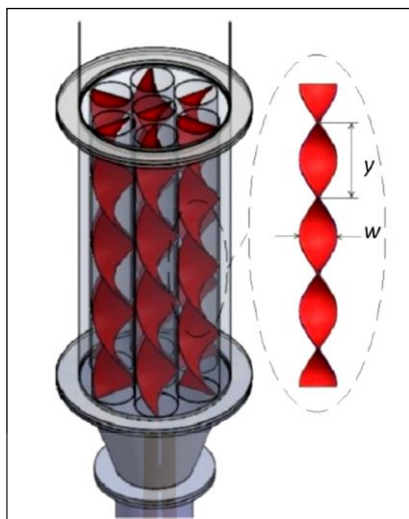
ปริดา ปรากฏมาก (2562) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งและก๊าซ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์หลักในระบบฟลูอิดซ์เบดแบบสองเฟส โดยเสนอแนวทางการคำนวณของพลศาสตร์ของไหลควบคู่ไปกับวิธีการคำนวณอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (Computational Fluid Dynamics and Discrete Element Method, CFD - DEM) เพื่อจำลองพฤติกรรมและอันตรกิริยาระหว่างของไหลกับอนุภาคของแข็งในเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบต่อเนื่อง ซึ่งแบบจำลอง DEM จะถูกใช้เพื่อจำลองระบบอนุภาคแบบเม็ด ในขณะที่ CFD จะถูกใช้ในการจำลองการไหลของของไหลโดยการแก้สมการนาเวียร์ - สโตกส์ (Navier - Stokes) อิทธิพลของความเร็วอากาศ อัตราการไหลเชิงมวล อุณหภูมิของอนุภาคและระยะเวลา (Residence time) การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในห้องอบแห้งที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้ง ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลอง CFD - DEM สามารถทำนายการเคลื่อนที่ของอนุภาคในระบบฟลูอิดซ์เบดแบบต่อเนื่องได้ การเกิดฟลูอิดซ์เซชันของระบบสามารถถ่ายเทอนุภาคด้วยอัตราการไหลเชิงมวลเข้า - ออกระบบที่มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวลป้อนเข้าระบบจะทำให้อนุภาคเกิดฟลูอิดซ์เซชันที่ความเร็วสูงขึ้นและมีอัตราการถ่ายเทอนุภาคออกจากระบบเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิเฉลี่ยของอนุภาคจะมีค่าต่ำเนื่องจาก Residence time ลดลง การกำหนดความเร็วอากาศเข้า Chamber สุดท้ายให้มีค่าสูงกว่า Chamber ก่อนหน้าจึงทำให้การถ่ายเทอนุภาคออกจากระบบมีอัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้น

ปริดา ปรากฏมาก (2562) ได้รายงานผลการวิจัยเกี่ยวกับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดซ์เซชัน (U_{mf}) สำหรับตัวกลางก๊าซ - ของแข็ง โดยใช้แบบจำลอง Computational Fluid Dynamics and Discrete Element Method (CFD - DEM) ในบทความวิจัยนี้ได้ศึกษาการใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ร่วมกับวิธีวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (DEM) เพื่อจำลองการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดซ์เซชันของอนุภาคในกระบวนการฟลูอิดซ์เบด เทคนิคนี้ใช้ระเบียบวิธีของ Eulerian และ Lagrangian เพื่อแก้ปัญหาในเฟสของไหลและอนุภาคของแข็งตามลำดับ การเคลื่อนที่ของอนุภาคถูกคำนวณด้วยวิธีปริมาตรเฉลี่ยแบบคาบเกี่ยวกันของสมการอนุรักษณ์พลังงาน มวล และโมเมนตัมบนโดเมนที่ถูกแบ่งเป็นช่วงระยะเล็ก ๆ ส่วนอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับอนุภาค และอนุภาคกับผนังห้องฟลูอิดซ์เบดถูกจำลองโดยประยุกต์สมการการสัมผัสกันของ Hertz - Mindlin ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดซ์เซชัน (U_{mf}) และความดันคร่อมเบตสูงสุด (ΔP_{max}) โดยใช้อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน 5 ค่า คือ 0.5 1 1.5 2 และ 2.5 mm จากผลการจำลองพบว่าอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กจะมีค่าความดันคร่อมเบตสูงกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ นอกจากนี้พบว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดซ์เซชัน (U_{mf}) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มจำนวนอนุภาคในเบตจะทำให้ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดซ์เซชัน (U_{mf}) และความดันคร่อมเบตสูงสุด (ΔP_{max}) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ข้อมูลเหล่านี้ช่วยในการคำนวณหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดซ์เซชันสำหรับวัสดุการเกษตรหรือผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างเป็นเม็ดสม่ำเสมอในเครื่องฟลูอิดซ์เบดชนิดคอลัมน์ และแบบจำลองนี้สามารถใช้กับวัสดุที่มีขนาดเล็กมากถึงขนาดใหญ่ซึ่งอาจช่วย

ประหยัดเวลาและลดค่าใช้จ่ายในการทดลอง อีกทั้งผลการจำลองนี้ยังมีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงทฤษฎีของงานวิจัยอื่น ๆ อีกด้วย

ปรีดา ปรากฏมาก และ สถาพร วังฉาย (2562) ได้รายงานผลการวิจัยเกี่ยวกับการจำลองลักษณะของฟลูอิดซ์เบดโดยใช้วิธีวิเคราะห์อนุภาคไม่ต่อเนื่องร่วมกับการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics and Discrete Element Method, CFD - DEM) เพื่อจำลองลักษณะของฟลูอิดซ์เบดและปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลกับอนุภาค การเคลื่อนที่ของอนุภาครูปทรงรีถูกอธิบายด้วยแบบจำลองแยกส่วนชนิดหนาแน่น (Dense Discrete Particle Model, DDPM) บนพื้นฐานของกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันซึ่งนำมาประยุกต์ใช้กับอนุภาคแต่ละตัว ส่วนการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องของของไหลในแต่ละตำแหน่งอธิบายด้วยสมการนาเวียร์ - สโตกส์ (Navier - Stokes) ซึ่งในแบบจำลองนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของความเร็วอากาศขาเข้าที่มีต่อการเคลื่อนที่และการชนกันของอนุภาค โดยการเคลื่อนที่ของอนุภาคแต่ละตัวขึ้นอยู่กับแรงสัมผัสระหว่างอนุภาคและแรงของอากาศที่กระทำต่ออนุภาค ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดซ์เซชัน (U_{mf}) มีค่าเท่ากับ 1.65 m/s และความดันตกคร่อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนอนุภาคในเบด ความเร็วของอากาศที่สูงขึ้นทำให้เกิดโพรงอากาศขนาดใหญ่ทั่วทั้งเบดและทำให้อัตราการผสมกันของอนุภาคสูงขึ้นอีกด้วย หลังจาก 2 s ของการเกิดฟลูอิดซ์เซชันอนุภาคมีการผสมกันอย่างทั่วถึง ข้อสังเกตเหล่านี้ช่วยให้ความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเบดระหว่างการเกิดฟลูอิดซ์เซชัน

Chuwattanakul, V. and Eiamsa-ard, S. (2019) ได้นำเสนอการออกแบบแห้งเมล็ดพริกในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนวน (Swirling Fluidized Bed Dryer, S - FBD) ที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดการหมุนอากาศอบแห้งด้วยใบพัดแบบเกลียวแนวยาว (Twisted tape swirl) หลาย ๆ ตัวในหอบแห้ง แสดงดังรูป 3.14 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่จะช่วยทำให้เกิดการไหลของอากาศอบแห้งแบบหมุนวนภายในหอบแห้ง ชุดเครื่องกำเนิดการหมุนอากาศอบแห้งดังกล่าวจะติดตั้งไว้ที่ทางด้านล่างของหอบแห้ง โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของ Superficial air velocity ($U^* = U/U_{mf} = 1.0, 1.1$ และ 1.2) ต่อปริมาณความชื้น (MC) อัตราส่วนความชื้น (MR) และอัตราการทำให้แห้ง (DR) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งแบบ S - FBD สามารถลดความชื้นของพริกได้เร็วกว่าเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด (FBD) ทั่วไป เครื่องอบแห้งแบบ S - FBD ให้ DR ที่สูงขึ้นและเวลาในการอบแห้งลดลงเมื่อเทียบกับเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด (FBD) ผลลัพธ์ยังระบุด้วยว่าการทำงานที่ Superficial air velocity ที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิด DR มากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการทำให้แห้ง อีกทั้งเมื่อทำการอบแห้งที่ Superficial air velocity สูง ($U^* = 1.2$) ทำให้การลดลงของ MC MR และ DR ดีกว่าที่ Superficial air velocity ต่ำ ($U^* = 1.0$ และ 1.1) เนื่องจากปริมาณของตัวพาความชื้น (อากาศ) ที่เพิ่มขึ้นและความปั่นป่วนที่รุนแรงขึ้น นอกจากนี้การคาดคะเนลักษณะการอบแห้งพริกไทยสำหรับ S - FBD โดยใช้ลอการิทึมโมเดล (Logarithmic model) ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลอง ($R^2 = 0.9962915$) มากกว่ารุ่นอื่น ๆ



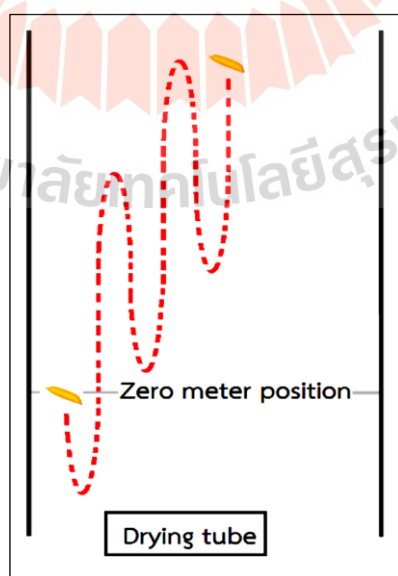
รูปที่ 3.14 ใบพัดแบบเกลียวแนวยาว (Twisted tape swirl) (Chuwattanukul, V. and Eiamsa-ard, S., 2019)

Hong - Wei, L., Wang, L., Wang, T. and Chang - he, D. (2020) ได้รายงานผลการวิจัยเกี่ยวกับการเกิดฟลูอิดแบบพัลส์ (Pulsed fluidized beds) ที่จะช่วยทำให้เกิดการผสมและสัมผัสระหว่างส่วนที่เป็นอากาศร้อนและอนุภาคที่มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลที่ดีต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของอนุภาคที่นำมาอบแห้ง โดยการไหลทั้งหมดประกอบด้วย การไหลของอากาศร้อนคงที่และการไหลของอากาศร้อนฟลูอิดแบบพัลส์ (Pulsed fluidized beds) วิธีการจำลองเชิงตัวเลขจะถูกคำนวณร่วมกันระหว่าง Computational Fluid Dynamics and Discrete Element Method (CFD - DEM) เพื่อศึกษาลักษณะการผสมของอนุภาค การเคลื่อนที่ และการถ่ายเทความร้อนภายใต้ความถี่พัลส์ (Pulse frequencies) และอัตราส่วนการไหลที่แตกต่างกัน ผลการวิจัยพบว่าอนุภาคในฟลูอิดแบบพัลส์ (Pulsed fluidized beds) มีการเคลื่อนที่เป็นช่วง ๆ ตลอดเวลา ซึ่งจะช่วยให้เกิดการผสมของอนุภาคและอากาศอบแห้งได้เป็นอย่างดี การเพิ่มความเร็วของอากาศอบแห้งที่เหมาะสมทำให้อัตราส่วนของการไหลของอากาศร้อนฟลูอิดแบบพัลส์ (Pulsed fluidized beds) เพิ่ม ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นและอัตราการอบแห้งดีขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อความเร็วของการไหลของอากาศทั้งหมดสูงเกินไปการเพิ่มหรือลดอัตราส่วนของการไหลของอากาศร้อนฟลูอิดแบบพัลส์ (Pulsed fluidized beds) จากทั้งหมดการไหลของอากาศจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งลดลง ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของการไหลของก๊าซอากาศร้อนฟลูอิดแบบพัลส์ (Pulsed fluidized beds) ผลของการผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อรักษาความเร็วของอากาศร้อนฟลูอิดแบบพัลส์ (Pulsed fluidized beds) ไว้ที่ 1.1 m/s

Wongbubpa, N., Treamnuk, K. and Treamnuk, T. (2020) ได้นำเสนอการคำนวณเชิงตัวเลขรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบขนานในหอบแห้งแนวตั้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ขึ้น

โดยเป็นการป้อนอากาศอบแห้งจากด้านล่างของหอบแห้ง เมล็ดข้าวเปลือกที่เคลื่อนที่ในหอบแห้ง ภายใต้การไหลของลมร้อนแบบตั้งกล่าวจะเกิดการเคลื่อนที่แบบ ขึ้น - ลง ตลอดความสูงของหอบแห้ง แสดงดังรูปที่ 3.15 ซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่หลายแบบภายในหอบแห้ง ทั้งแบบไหลไปพร้อมอากาศ (Co - current flow) แบบไหลสวนทางกัน (Counter current flow) และแบบไหลขวาง (Cross current flow) โดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์ขวางภายในหอบแห้งเลย ซึ่งเชื่อว่าจะช่วยให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทความชื้นระหว่างอากาศกับเมล็ดข้าวเปลือกได้ดีและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และเชื่อว่าจะเป็นแนวทางที่ดีต่อการนำไปปรับใช้ในการอบแห้งวัสดุเกษตรชนิดอื่น ๆ ที่มีลักษณะเป็น เมล็ดเช่นเดียวกัน

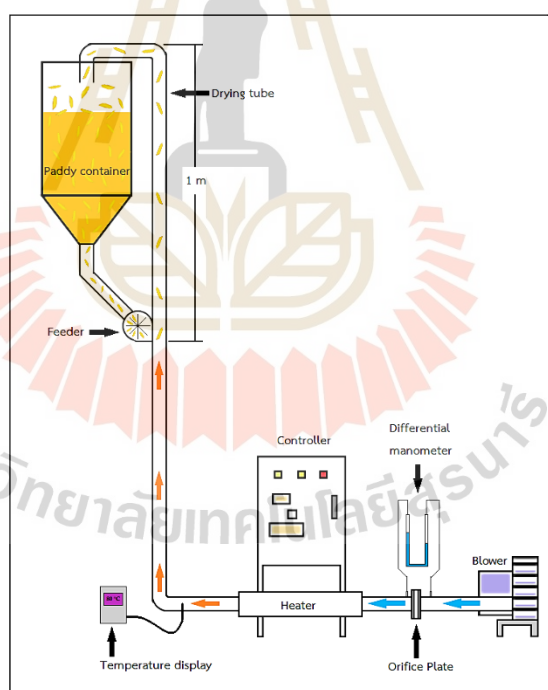
ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา, ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน, กระวี ตรีอำรรค, เทวรัตน์ ตรีอำรรค และ ปรีดา ปรากฏมาก (2564) ได้รายงานผลการศึกษากการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งแบบลมร้อน ด้วยวิธีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบเป็น ช่วง (Pulse flow) ที่จะส่งผลต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกภายในหอบแห้ง โดยได้ ทำการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งการเคลื่อนที่ ความเร็ว เรย์โนลด์นัมเบอร์ และระยะทางรวมของ การเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกเมื่ออยู่ในหอบแห้งภายในระยะเวลา 3 s ที่ความยาวหอบแห้ง 2 m ผลการจำลองพบว่าการสร้างการไหลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) สามารถเพิ่มระยะ การเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งได้มากกว่าความยาวของหอบแห้ง ความเร็วของการ ไหลในหอบแห้งมีสภาวะไม่คงที่ขึ้นอยู่กับรูปแบบของช่วงอากาศที่กำหนด ซึ่งทำให้เกิดความปั่นป่วน สำหรับการไหลได้เป็นอย่างดีและส่งผลต่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 3.15 ภาพแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ ขึ้น - ลง ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้ง

(Wongbubpa, N. et al., 2020)

ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา, กระจวี ตรีอำนาจ และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ (2565) ได้รายงานผลการวิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือก เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งที่มีผลต่อการอบแห้งข้าวเปลือก เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมต้นแบบถูกใช้ในการศึกษานี้แสดงดังรูปที่ 3.16 ทำการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือก 15 kg ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 22 - 25 มาตรฐานเปียก อบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 80°C จนมีความชื้นเป็นร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก โดยใช้ความเร็วอากาศอบแห้งสองแบบคือ ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ตลอดกระบวนการทดลองที่ 12.80 m/s และความเร็วอากาศอบแห้งที่ปรับลดทุก 15 s ตลอดกระบวนการทดสอบ (มีค่าจาก 12.80 - 8.44 m/s) อบแห้งในหอบแห้งแบบท่อตั้งตรงแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.81 cm สูง 1 m ผลการทดสอบพบว่า การอบแห้งที่ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ใช้เวลาอบแห้งน้อยกว่า มีอัตราการอบแห้งสูงกว่า ใช้พลังงานจำเพาะป้อนน้อยกว่า และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าในช่วงความชื้นข้าวเปลือกสูง เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งที่มีการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งในระหว่างกระบวนการทดสอบ



รูปที่ 3.16 ระบบของเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ทดสอบ (ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา และคณะ, 2565)

จากรายงานผลการวิจัยของ ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา และคณะ (2565) พบว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูง ซึ่งต้องอาศัยอุณหภูมิของอากาศอบแห้งในการถ่ายเทความร้อนให้กับเมล็ดข้าว แต่การเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งจะทำให้ค่าความชื้นเปลี่ยนแปลง

พลังงานปฐมภูมิจำเพาะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากต้องใช้พลังงานในการทำความร้อนให้อากาศมากขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งที่สำคัญ คือความเร็วอากาศอบแห้งและระยะเวลาที่ข้าวเปลือกสัมผัสกับอากาศอบแห้งเพื่อถ่ายเทความร้อน โดยที่ต้องไม่ทำให้ความเร็วของอากาศอบแห้งลดลง ซึ่งปัจจัยดังกล่าวสามารถช่วยเพิ่มอุณหภูมิให้กับข้าวเปลือกได้ดีและความชื้นที่ถ่ายเทออกจากข้าวเปลือกยังสามารถระบายสู่อากาศอบแห้งที่เป็นตัวกลางได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นแล้วการเพิ่มอัตราการอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมจึงควรเป็นการเพิ่มความเร็วอากาศอบแห้งหรือปรับเปลี่ยนรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งในแบบอื่น ที่ช่วยหน่วงเวลาการสัมผัสถ่ายเทความร้อนได้โดยไม่มีผลทำให้ความเร็วอากาศอบแห้งลดลง การศึกษารูปแบบการไหลของอากาศแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ของ Wongbubpa, N. et al. (2020) และ ญัฐพงษ์ วงศ์บับพา และคณะ (2564) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ช่วยหน่วงเวลาการเคลื่อนที่ของข้าวเปลือกในระบบการอบแห้งแบบพาหะลมได้ จึงอาจเป็นแนวทางหนึ่งที่มีความน่าสนใจ ซึ่งต้องมีการศึกษาเพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมต่อไป



บทที่ 4

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมในท่อแนวดิ่ง

ในบทนี้จะอธิบายถึงเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมในท่อแนวดิ่งต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย โดยจะอธิบายถึงส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งดังต่อไปนี้

4.1 ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมในท่อแนวดิ่ง

รายละเอียดเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นที่เป็นช่องอ แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 และ 4.3 ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

4.1.1 เครื่องเป่าลม (Blower) ขนาด 2.2 kW ของ Ventex รุ่น 2RB 710 H16 (รูปที่ 4.4) ความเร็วรอบมอเตอร์สูงสุด 2,850 rpm ติดตั้งควบคู่กับระบบควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อควบคุมความเร็วอากาศอบแห้งให้คงที่ ด้วยการวัดอัตราการไหลอากาศอบแห้งผ่านความดันอากาศตกคร่อม Orifice Plate ด้วย Pressure transmitter ของ Kimo รุ่น CP103 - PO (รูปที่ 4.5) ช่วงการวัด 0 - 50 kPa และส่งสัญญาณแรงดันแบบ 0 - 10 V ป้อนกลับไปยัง Inverter ของ Frecon รุ่น F003b - 4 (รูปที่ 4.6) ขนาด 2.2 kW เพื่อให้ Inverter เปรียบเทียบค่าสัญญาณป้อนกลับกับค่า Set point และทำการปรับแรงดันและความถี่กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเครื่องเป่าลมด้วยชุดควบคุมแบบ PID ระบบดังกล่าวสามารถทำความเร็วอากาศที่ตำแหน่งท่อลมเข้าได้สูงสุดประมาณ 25 m/s

4.1.2 ตำแหน่งทางเข้าอากาศอบแห้งมีชุด Orifice Plate (รูปที่ 4.7) สร้างขึ้นโดยออกแบบตามมาตรฐาน ISO 5167 (เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว และคณะ, 2551) เป็นแบบ Concentric Orifice Plate (Square edge) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Orifice Plate 2 cm จุดต่อสำหรับวัดค่าความดันแตกต่างแบบระยะ D และ 0.5D (Vena Contracta Taps) เป็นระยะ 4.4 และ 2.2 cm ตามลำดับ (รายละเอียดการออกแบบแสดงในภาคผนวก ก.2)

4.1.3 เครื่องทำความร้อน (Heater) ใช้ขดลวดความร้อนขนาด 4 kW ถูกประกอบและสวมเข้าไปภายในท่อเหล็กหุ้มฉนวนกันไฟฟ้า (รูปที่ 4.8) ติดตั้งควบคู่กับ PID Temperature controller ของ Shinko รุ่น JCS - 33A (รูปที่ 4.9) เพื่อควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อน และวัดค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ตำแหน่งก่อนเข้าท่ออบแห้งด้วย Thermocouple type K (รูปที่ 4.10)

4.1.4 ท่ออบแห้ง (Drying tube) เป็นท่ออะคริลิกใส มีลักษณะเป็นท่อตรงยาวและวางตัวในแนวดิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 หน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3.81 cm (1.5 in) ปลายด้านล่างของท่ออบแห้งต่อกับท่อส่งอากาศอบแห้งที่ผ่านมาจากเครื่องทำความร้อน ส่วนปลายด้านบนท่อ

แห้งจะต่อไปยังถังพักข้าวเปลือกเพื่อส่งข้าวเปลือกกลับไปในถังพักรอสำหรับการอบแห้งในรอบต่อ ๆ ไป

4.1.5 ถังพักข้าวเปลือก (Paddy container) ทำจากแผ่นเหล็กอบสังกะสีรูปทรงสี่เหลี่ยม สามารถบรรจุข้าวเปลือกได้ 40 kg (รายละเอียดการออกแบบแสดงในภาคผนวก ค.1) ภายในถังพักข้าวเปลือกจะติดตั้งอุปกรณ์วัดบันทึกอุณหภูมิอากาศอบแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ที่ทางออกท่ออบแห้ง (ปลายท่อดังกล่าวได้ถูกต่อและหย่อนลงในถังพักข้าวเปลือก) ของ Elitech รุ่น GSP - 6 ช่วงการวัดอุณหภูมิ -40 ถึง +85°C ช่วงการวัดความชื้นสัมพัทธ์ 0 - 100%RH และติดตั้งอุปกรณ์วัดบันทึกอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกภายในท่ออบแห้ง ของ Elitech รุ่น RC - 4 ช่วงการวัดอุณหภูมิ -40 ถึง +85°C (รูปที่ 4.11)

4.1.6 อุปกรณ์ป้อนข้าวเปลือก (Feeder) (รูปที่ 4.12) ทำจากสแตนเลส มีลักษณะเป็นกังหันล้อใบพัดติดตั้งควบคู่กับมอเตอร์เกียร์ ขนาด 6 W ของ Taili Motor รุ่น 2IK6RGN - C (รูปที่ 4.13 (ก)) ควบคุมความเร็วรอบได้ ความเร็วรอบมอเตอร์สูงสุด 20 rpm โดยมอเตอร์จะถูกควบคุมด้วยอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของการหมุน (Speed Motor) (รูปที่ 4.13 (ข))

4.1.7 การควบคุมพฤติกรรมลมของอากาศ ใช้โซลินอยด์วาล์วทองเหลือง ของ Power Tech รุ่น 2W - 400 - 40 ขนาด 1.5 in แบบปกติปิด จ่ายไฟเปิด 12 VDC (รูปที่ 4.14) ต่อเข้ากับชุดควบคุมเวลา (Timer Relay) แบบปรับตั้งค่าได้ ช่วงเวลาปรับค่าได้ตั้งแต่ 0.1 s ถึง 999 min (รูปที่ 4.15)

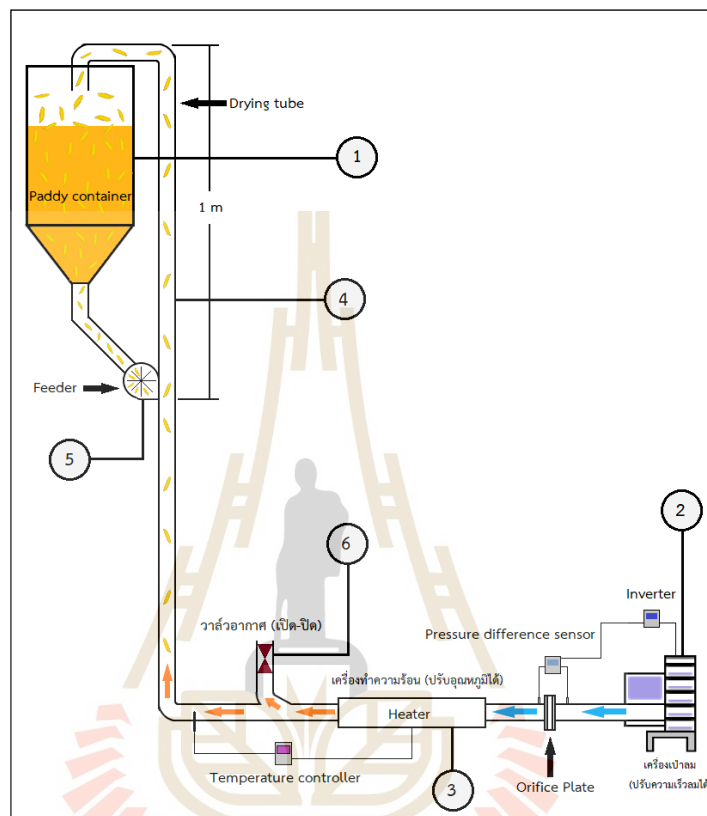
4.1.8 อุปกรณ์วัดค่าพลังงานไฟฟ้า ใช้มิเตอร์ไฟฟ้า 1 Phase ของ LUZINO รุ่น DD28 - 15(45) (รูปที่ 4.16) สำหรับวัดค่าพลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำความร้อน (Heater) และใช้มิเตอร์ไฟฟ้า 3 Phase ของ International Power Group รุ่น IPG862 - 15(45) สำหรับวัดค่าพลังงานไฟฟ้าของเครื่องเป่าลม (Blower) (รูปที่ 4.17)

4.2 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมในท่อแนวดิ่ง

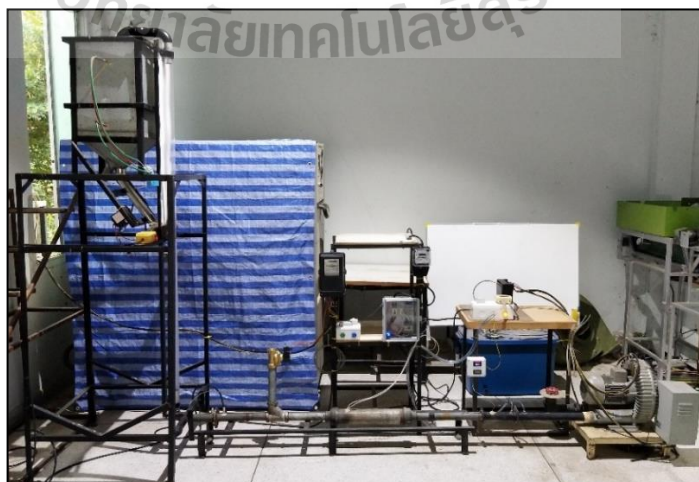
การทำงานเริ่มจากบรรจุข้าวลงในถังบรรจุ (หมายเลข 1) อากาศแวดล้อมถูกอัดด้วยเครื่องเป่าลมที่สามารถปรับความเร็วลมได้ (หมายเลข 2) ไหลผ่านเครื่องทำความร้อนที่สามารถปรับอุณหภูมิได้ (หมายเลข 3) จากนั้นลมร้อนไหลไปตามท่อแนวดิ่งหรือท่ออบแห้ง (หมายเลข 4) ด้วยความเร็วตามที่กำหนด ในขณะเดียวกันเมล็ดข้าวเปลือกจะถูกปล่อยออกจากถังบรรจุเข้าสู่ส่วนของท่อตรงแนวดิ่งหรือท่ออบแห้ง (หมายเลข 4) ผ่านการขับเคลื่อนการไหลด้วยชุดป้อนข้าวเปลือก (หมายเลข 5) ในจังหวะที่เมล็ดข้าวเปลือกผ่านเข้ามาในบริเวณท่ออบแห้งแล้วนั้นจะทำให้เมล็ดข้าวเปลือกเกิดการสัมผัสกับอากาศร้อน (อากาศอบแห้ง) ที่ไหลมาจากด้านล่างของท่ออบแห้งทำให้เกิดการพัดพาและหอบเอาเมล็ดข้าวเปลือกจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนของท่ออบแห้งไปตามแนวท่อ เมล็ดข้าวเปลือกจะถูกส่งออกไปตามแนวท่อแล้วตกลงคืนลงในถังบรรจุเพื่อรอการอบแห้งในรอบต่อ ๆ ไป ระบบอบแห้งจะหมุนวนซ้ำ ๆ จนกระทั่งได้ความชื้นสุดท้ายตามที่ต้องการจึงจะยุติการทำงาน

ในส่วนของการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในขณะที่อยู่ในบริเวณท่ออบแห้งนั้น จะเป็นไปตามรูปแบบการไหลของอากาศที่ปล่อยให้ไหลเข้าไปตามท่อแนวดิ่ง ซึ่งจะควบคุมอากาศที่ไหลเข้าไปให้เป็น

การไหลแบบเป็นช่วง (Pulse flow) โดยควบคุมผ่านการเปิด - ปิด วาล์ว (หมายเลข 6) เพื่อลดแรงดันอากาศที่วิ่งภายในท่อ ซึ่งพฤติกรรมการไหลของอากาศในรูปแบบดังกล่าวจะช่วยให้เมล็ดข้าวเปลือกเกิดการเคลื่อนตัวเป็นไปตามกัน



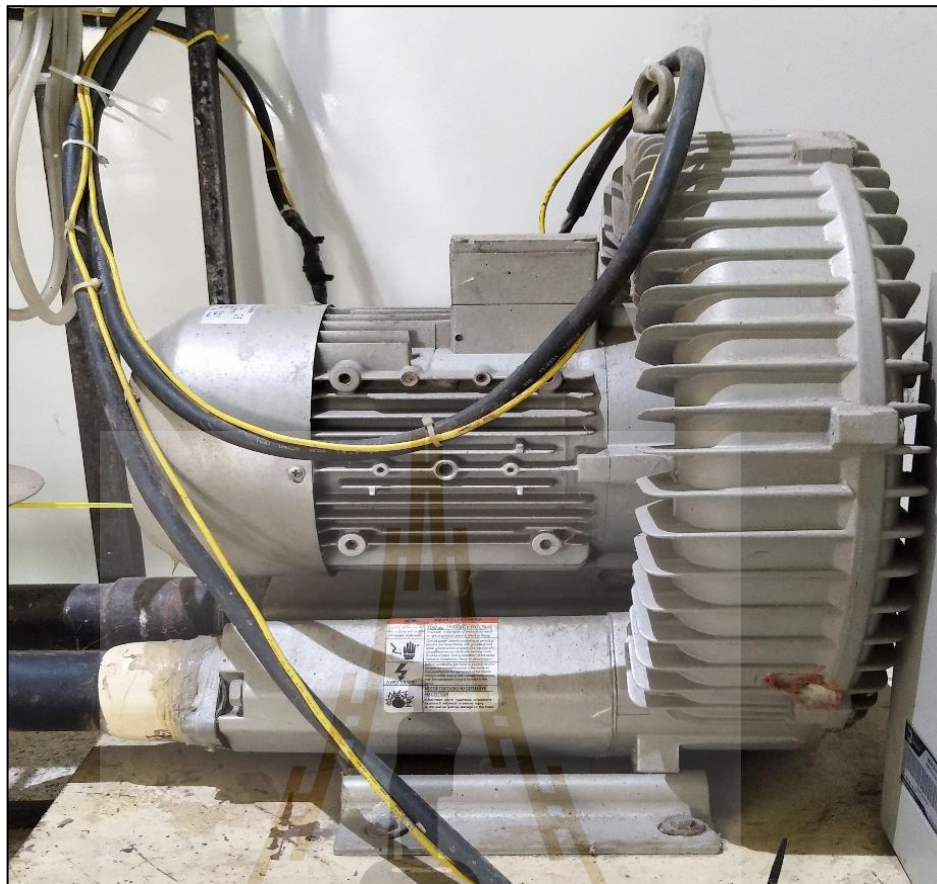
รูปที่ 4.1 ระบบของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมในท่อแนวตั้งต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 4.2 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมในท่อแนวตั้งต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย



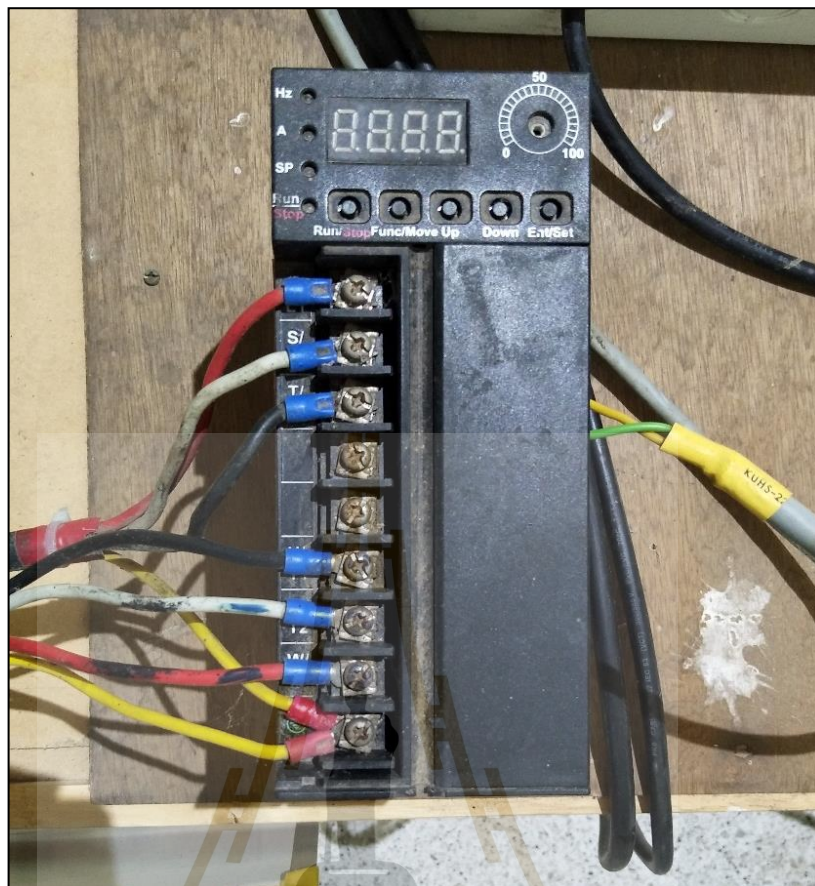
รูปที่ 4.3 ด้านข้างของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมในท่อแนวตั้งต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 4.4 เครื่องเป่าลม (Blower) ของ Ventex รุ่น 2RB 710 H16 ขนาด 2.2 kW



รูปที่ 4.5 Pressure transmitter ของ Kimo รุ่น CP103 - PO



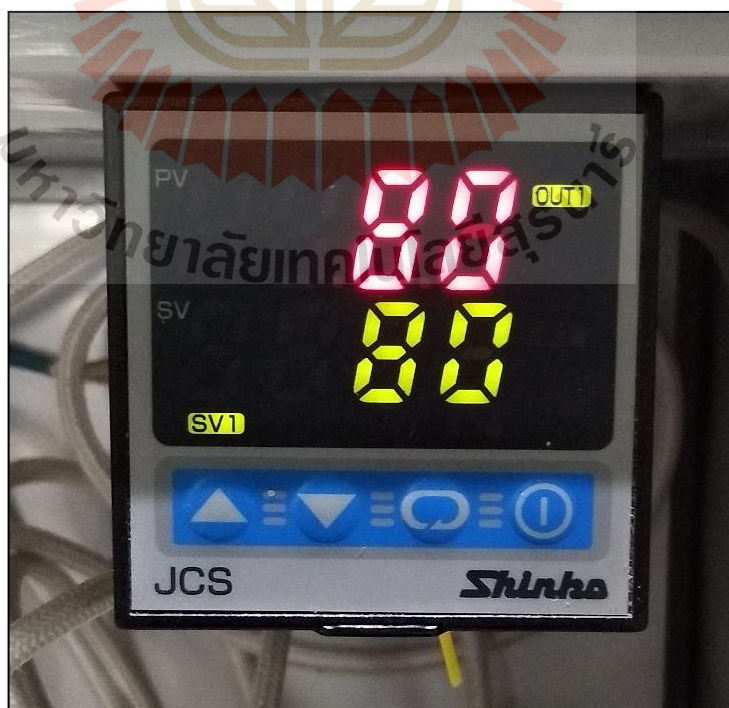
รูปที่ 4.6 Inverter ของ Frecon รุ่น F003b - 4 ขนาด 2.2 kW



รูปที่ 4.7 Orifice Plate ที่ใช้ในงานวิจัย สร้างขึ้นตามมาตรฐาน ISO 5167



รูปที่ 4.8 เครื่องทำความร้อน (Heater) ใช้ขดลวดความร้อนขนาด 4 kW ภายในท่อเหล็ก



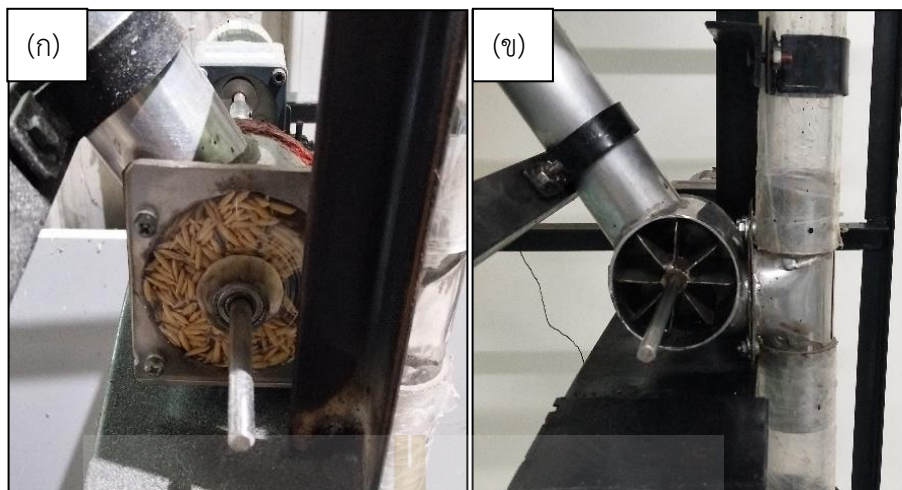
รูปที่ 4.9 PID Temperature controller ของ Shinko รุ่น JCS - 33A



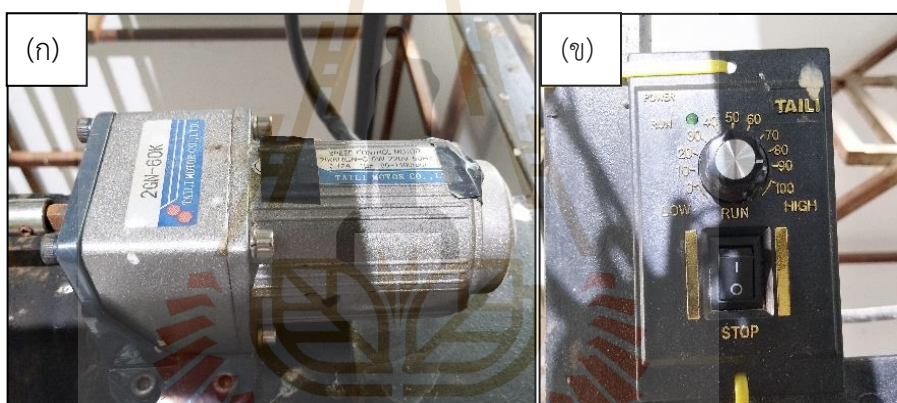
รูปที่ 4.10 ตำแหน่งติดตั้ง Thermocouple type K สำหรับวัดค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ทางเข้าท่ออบแห้ง



รูปที่ 4.11 (ก) แสดงรูปทรงสี่เหลี่ยมภายนอกของถังพักข้าวเปลือก (Paddy container) ที่ทำจากแผ่นเหล็กอบสังกะสี (ข) และ (ค) แสดงตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกภายในถังพัก



รูปที่ 4.12 (ก) และ (ข) อุปกรณ์ป้อนข้าวเปลือก (Feeder) ที่ทำจากสแตนเลส



รูปที่ 4.13 (ก) มอเตอร์เกียร์ ของ Taili Motor รุ่น 2K6RGN - C ขนาด 6 W
(ข) อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของการหมุน (Speed Mortor)



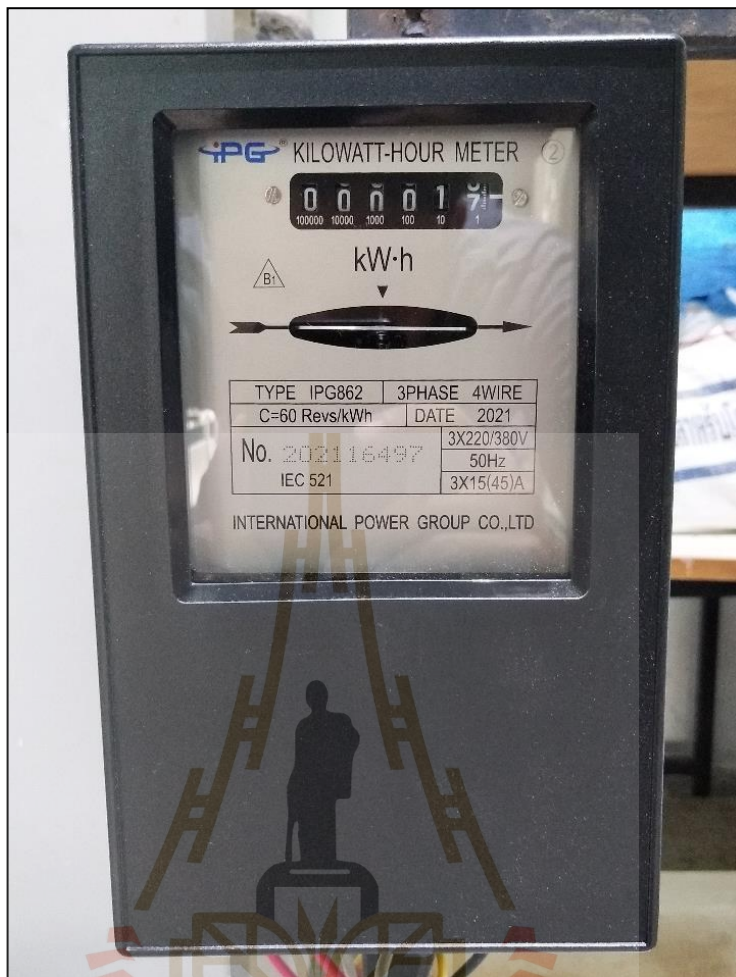
รูปที่ 4.14 โซลินอยด์วาล์วทองเหลือง ของ Power Tech รุ่น 2W - 400 - 40 ขนาด 1.5 in



รูปที่ 4.15 ชุดควบคุมเวลา (Timer Relay) แบบปรับตั้งค่าได้ ช่วงเวลาปรับค่าได้ตั้งแต่ 0.1 s ถึง 999 min



รูปที่ 4.16 มิเตอร์ไฟฟ้า 1 Phase ของ LUZINO รุ่น DD28 - 15(45)



รูปที่ 4.17 มิเตอร์ไฟฟ้า 3 Phase ของ International Power Group รุ่น IPG862 - 15(45)

บทที่ 5

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้อธิบายวิธีดำเนินการวิจัยโดยแบ่งเป็น 4 ส่วนคือ

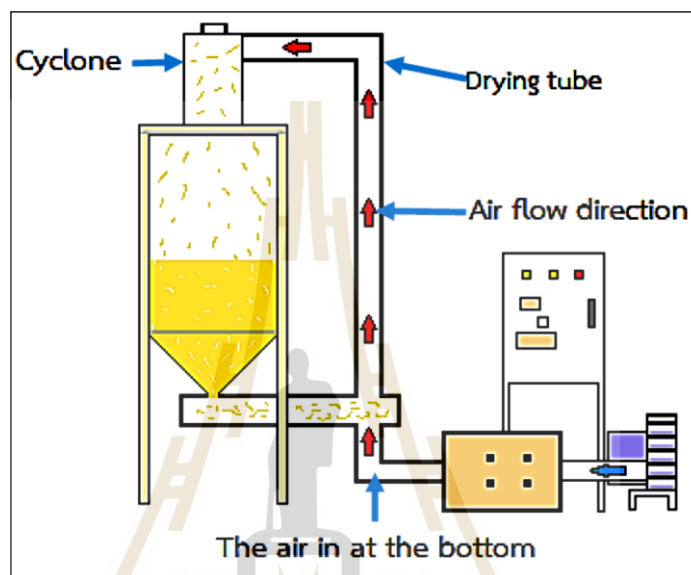
- 1) ศึกษาการหาคำตอบโดยวิธีเชิงวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบขนานในท่ออบแห้งแนวตั้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ด้วยกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน
 - 2) ศึกษาการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในท่ออบแห้งแบบลมร้อนด้วยวิธีการจำลองด้วย CFD - DEM เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow)
 - 3) ศึกษาการทดสอบอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกต้นแบบที่สร้างขึ้น
 - 4) ศึกษาแบบจำลองเอมพิริคัลชั้นบางเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในท่อแนวตั้ง
- มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 การหาคำตอบโดยวิธีเชิงวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบขนานในท่ออบแห้งแนวตั้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ด้วยกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน

งานวิจัยส่วนนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบลักษณะการไหลของอากาศอบแห้ง (ลมร้อน) ที่มีการไหลของอากาศแบบเป็นช่วง (Pulse flow) และส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของเมล็ดข้าวเปลือกในบริเวณท่ออบแห้ง ลักษณะเป็นท่อแนวตั้งที่มีความยาว 2 เมตร ซึ่งได้รับอากาศอบแห้งเข้าจากทางด้านล่าง โดยการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกมีอิทธิพลมาจากการปล่อยกระแสอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ให้ไหลเข้าสู่ส่วนล่างของท่ออบแห้ง กล่าวคือกระแสอากาศที่ไหลเข้าสู่ส่วนล่างของท่ออบแห้งจะทำหน้าที่ในการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกพร้อมทั้งเป็นตัวกลางในการขับเคลื่อนให้เมล็ดข้าวเปลือกเคลื่อนที่ ขึ้น - ลง ตามรูปแบบการไหลของกระแสอากาศจากส่วนล่างของท่ออบแห้งและไปออกที่ปลายด้านบนสิ้นสุดตามความยาวท่อ แสดงดังรูปที่ 5.1 โดยจะทำการวิเคราะห์แบบจำลองการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในท่ออบแห้งแนวตั้ง 3 รูปแบบด้วยกัน ประกอบด้วย

- 1) การเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกเมื่อไม่คิดความเร็วสัมพัทธ์
- 2) การเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกโดยคิดความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอากาศกับเมล็ดข้าวเปลือก
- 3) การเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกโดยคำนวณความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอากาศกับเมล็ดข้าวเปลือก เมื่อคำนวณในช่วงผลต่างเวลา (Delta Time) น้อยมาก ๆ

จากทั้ง 3 แบบจำลองที่ทำการศึกษา ผู้วิจัยมีความมุ่งหวังที่จะหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด เพื่อใช้ในการประเมินถึงสถานะการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในท่ออบแห้งอันเป็นผลมาจากการไหลของอากาศแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ที่จะส่งผลต่อการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือก โดยจะทำการวิเคราะห์ถึงตำแหน่งการไหลของข้าวเปลือก เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number) และระยะทางรวมของการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเมื่ออยู่ในท่ออบแห้ง



รูปที่ 5.1 แผนผังแสดงชุดทดสอบต้นแบบเพื่อแสดงทิศทางการปล่อยอากาศสู่ท่ออบแห้ง (Wongbubpa, N. et al., 2020)

งานวิจัยนี้ได้อ้างอิงข้อมูลของข้าวเปลือกสายพันธุ์ Fajr (Gharekhani, M. et al., 2013) ซึ่งจะถูกจำลองเป็นข้าวเปลือกชิ้นที่จะใช้อบแห้ง โดยนำค่าคุณสมบัติของเมล็ดข้าวเปลือกอันประกอบด้วย น้ำหนัก (Mass, m) ความยาว (Length, L) ความกว้าง (Width, W) และ ความหนา (Thickness, T) ที่ความชื้น 25 %wb มาเพื่อใช้ในการคำนวณหาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Gharekhani, M. et al., 2013) แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางเมล็ด (D); } D = (LWT)^{1/3} \quad (5.1)$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัดตามแนวยาวของเมล็ด (A_r); } A_r = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot WL \quad (5.2)$$

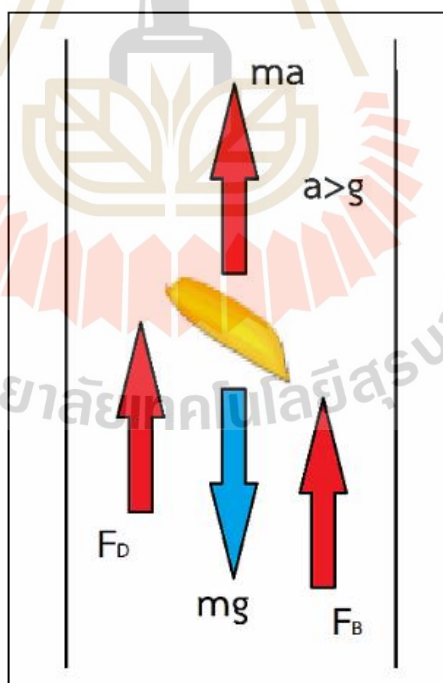
$$\text{ปริมาตรของเมล็ด (V); } V = A_r L \quad (5.3)$$

เมื่อ L คือ ความยาว (mm)
 W คือ ความกว้าง (mm)
 T คือ ความหนา (mm)

การศึกษาด้วยการหาคำตอบโดยวิธีเชิงวิเคราะห์ของระบบบอบแห้ง มีสมการที่เกี่ยวข้องกับการลอยตัวของเมล็ดข้าวเปลือก รูปแบบการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในสภาวะการไหลแบบเป็นช่วง (Pulse Flow) การประเมินระยะทางรวม (Displacement) ที่เมล็ดข้าวเปลือกเคลื่อนที่ได้ และการประเมินค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number) ของเมล็ดข้าวเปลือก ดังนี้

5.1.1 แรงลอยตัวของข้าวเปลือก

เมื่อทำการพิจารณาการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือก 1 เมล็ด ที่จะสามารถลอยตัวจากส่วนล่างขึ้นสู่ด้านบนของท่ออบแห้งได้นั้น เมล็ดข้าวเปลือกจะต้องมีความเร่ง (Acceleration of paddy) ขึ้นสู่ด้านบนเอาชนะความเร่งโน้มถ่วงของโลก แสดงดังรูปที่ 5.2 และใช้กฎข้อที่สองของนิวตัน (Second law of Newton's) ผลรวมของแรงที่กระทำกับเมล็ดข้าวเท่ากับมวลคูณความเร่ง (Ferdinand, P. B. et al., 2007)



รูปที่ 5.2 ภาพแสดงแรงที่กระทำกับเมล็ดข้าวเปลือกขณะลอยในกระแสดอากาศ

พิจารณาแรงที่กระทำกับเมล็ดข้าวเพื่อหาความเร่ง (Acceleration of paddy) ของเมล็ดข้าวเปลือกขณะลอยขึ้นด้านบน แสดงดังสมการ

$$\text{กฎข้อที่สองของนิวตัน : } \Sigma F = ma \quad (5.4)$$

$$\text{ผลรวมของแรงที่กระทำกับเมล็ด : } \Sigma F = -mg + F_B + F_D \quad (5.5)$$

$$\text{ดังนั้น : } -mg + F_B + F_D = ma \quad (5.6)$$

$$\text{ความเร่งของเมล็ด (a); } a = \frac{-mg + F_B + F_D}{m} \quad (5.7)$$

เมื่อ F_B คือ แรงลอยตัว (Buoyant force [N])

F_D คือ แรงต้านอากาศ (Drag force [N])

$$\text{แรงลอยตัว (} F_B \text{); } F_B = \rho g V \quad (5.8)$$

$$\text{แรงต้านอากาศ (} F_D \text{); } F_D = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot C_D \cdot \left[\rho \cdot (v_{\text{air}})^2 \cdot A_f\right] \quad (5.9)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (Density of air, kg/m³)

g คือ ความเร่งเข้าสู่แกนกลางโลก (Gravity force, m/s²)

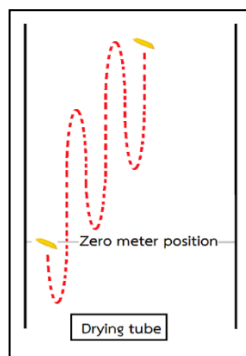
V คือ ปริมาตรข้าวเปลือก (Volume of paddy, m³)

C_D คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (Drag coefficient) (Gharekhani, M. et al., 2013)

v_{air} คือ ความเร็วอากาศอบแห้ง (Velocity of air, m/s)

5.1.2 การเคลื่อนที่ของเมล็ดของข้าวเปลือกในสภาวะการไหลแบบเป็นช่วง (Pulse flow)

เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีการออกแบบให้อากาศไหลแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ในท่ออบแห้ง กล่าวคือจะมีการจ่าย - หยุดจ่าย อากาศที่ต้นทางของท่ออบแห้งเพื่อให้ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือก วิธีการคำนวณจะเริ่มจากวินาทีที่ศูนย์ โดยเริ่มที่การปล่อยเมล็ดข้าวลงจากจุดปล่อยภายในท่ออบแห้ง (ตำแหน่ง 0 m) ลักษณะดังกล่าวนี้เรียกว่า “ช่วงหยุดจ่ายอากาศ” ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกร่วงลงด้านล่างตามแรงโน้มถ่วงของโลก เมื่อเมล็ดข้าวเปลือกร่วงลงด้านล่างตามระยะเวลาที่กำหนดแล้ว จะเริ่มทำการจ่ายอากาศสำหรับการอบแห้งให้ไหลเข้าสู่ท่ออบแห้ง ซึ่งจะทำให้เมล็ดข้าวเปลือกได้รับแรงปะทะของอากาศและลอยกลับขึ้นสู่ด้านบน ลักษณะดังกล่าวนี้เรียกว่า “ช่วงจ่ายอากาศ” ลักษณะการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกแสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ภาพแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ ขึ้น - ลง ของเมล็ดข้าวเปลือกในท่ออบแห้ง

สมการที่ใช้ในการพิจารณาค่าแห่งของการเคลื่อนที่เมล็ดข้าวเปลือกแบ่งตามแบบจำลองดังนี้

ก) การเคลื่อนที่แบบ Classic Physics กำหนดให้วัตถุเคลื่อนที่ภายใต้แรงโน้มถ่วงคงที่และไม่คำนวนความเร็วสัมพัทธ์ (แบบจำลองที่ 1)

ก.1) ช่วงหยุดจ่ายอากาศ

- ระยะทางการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในช่วงนี้ ประเมินได้ตามสมการ (5.10)

$$s_i = v_i t + \left(\frac{1}{2}\right) \cdot at^2 \quad (5.10)$$

- ความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือกในช่วงนี้ ประเมินได้ตามสมการ (5.11)

$$v_{i+1} = v_i + at \quad (5.11)$$

- ความเร่งของเมล็ดข้าวเปลือก (Acceleration of paddy) ในช่วงนี้เท่ากับความเร่งโน้มถ่วงของโลก (Gravity)

ก.2) ช่วงจ่ายอากาศ

- ระยะทางการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในช่วงนี้ ประเมินได้ตามสมการ (5.12)

$$s_{i+1} = s_i + v_{i+1} t + \left(\frac{1}{2}\right) \cdot at^2 \quad (5.12)$$

- ความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือกในช่วงช่วงนี้ ประเมินได้ตามสมการ (5.13)

$$v_{i+2} = v_{i+1} + at \quad (5.13)$$

- ความเร่งของเมล็ดข้าวเปลือกในช่วงช่วงนี้ ประเมินได้ตามสมการที่ (5.7)

ข) การเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของความเร็วอากาศที่มีผลต่อแรง F_D ซึ่งทำให้ความเร่งของระบบมีค่าไม่คงที่ และคำนวณความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอากาศกับเมล็ดข้าวเปลือก (แบบจำลองที่ 2)

ข.1) ช่วงหยุดจ่ายอากาศ

- ระยะทางการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในช่วงนี้ ประเมินได้ตามสมการ (5.14)

$$s_i = v_i t + \left(\frac{1}{2}\right) \cdot at^2 \quad (5.14)$$

- ความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือกในช่วงนี้ ประเมินได้ตามสมการ (5.15)

$$v_{i+1} = v_i + at \quad (5.15)$$

- ความเร่งของเมล็ดข้าวเปลือกในช่วงนี้ ประเมินได้ตามสมการ (5.16)

$$a = \frac{F_B + \left(\frac{1}{2}\right) \cdot C_D \left[\rho \cdot (v_{i+1})^2 \cdot A_f \right] - mg}{m} \quad (5.16)$$

ข.2) ช่วงจ่ายอากาศ

- ระยะทางการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในช่วงนี้ ประเมินได้ตามสมการ (5.17)

$$s_{i+1} = s_i + v_{i+1} t + \left(\frac{1}{2}\right) \cdot at^2 \quad (5.17)$$

- ความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือกในช่วงช่วงนี้ ประเมินได้ตามสมการ (5.18)

$$v_{i+2} = v_{i+1} + at \quad (5.18)$$

- ความเร่งของเมล็ดข้าวเปลือกในช่วงช่วงนี้ ประเมินได้ตามสมการ (5.19)

$$a = \frac{F_B + \left(\frac{1}{2}\right) \cdot C_D \cdot \left[\rho \cdot (v_{\text{air}} - v_{i+1})^2 \cdot A_f\right] - mg}{m} \quad (5.19)$$

- ค) การเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของความเร็วกาศที่มีผลต่อแรง F_D ซึ่งทำให้ความเร่งของระบบมีค่าไม่คงที่ และคำนวณความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอากาศกับเมล็ดข้าวเปลือกเมื่อความเร่งที่แท้จริงของระบบมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เคลื่อนที่ โดยทำการคำนวณค่าตัวแปรต่าง ๆ ใหม่ทุกครั้งเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปทุก ๆ Δt ตลอดการเคลื่อนที่ (แบบจำลองที่ 3)

ค.1) ช่วงหยุดจ่ายอากาศ

- ระยะทางการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในช่วงนี้ ประเมินได้ตามสมการ (5.20)

$$s_{i+1} = s_i + v_i \Delta t + \left(\frac{1}{2}\right) [a \cdot (\Delta t)^2] \quad (5.20)$$

- ความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือกในช่วงนี้ ประเมินได้ตามสมการ (5.21)

$$v_{i+1} = v_i + a \Delta t \quad (5.21)$$

- ความเร่งของเมล็ดข้าวเปลือกในช่วงนี้ ประเมินได้ตามสมการ (5.22)

$$a = \frac{F_B + \left(\frac{1}{2}\right) \cdot C_D \cdot \left[\rho \cdot (v_{i+1})^2 \cdot A_f\right] - mg}{m} \quad (5.22)$$

ค.2) ช่วงจ่ายอากาศ

- ระยะทางการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในช่วงนี้ ประเมินได้ตามสมการ (5.23)

$$s_{i+1} = s_i + v_i \Delta t + \left(\frac{1}{2}\right) [a \cdot (\Delta t)^2] \quad (5.23)$$

- ความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือกในช่วงนี้ ประเมินได้ตามสมการ (5.24)

$$v_{i+1} = v_i + a\Delta t \quad (5.24)$$

- ความเร่งของเมล็ดข้าวเปลือกในช่วงนี้ ประเมินได้ตามสมการ (5.25)

$$a = \frac{F_B + \left(\frac{1}{2}\right) \cdot C_D \cdot \left[\rho \cdot (v_{\text{air}} - v_{i+1})^2 \cdot A_f\right] - mg}{m} \quad (5.25)$$

เมื่อ s_1 คือ ตำแหน่งของเมล็ดข้าวเปลือกที่เคลื่อนที่ไป (m)
 s_0 คือ ตำแหน่งเดิมของเมล็ดข้าวเปลือกที่เคลื่อนที่ได้ (m)
 v_0 คือ ความเร็วต้นของเมล็ดข้าวเปลือก (m/s)
 v_1 คือ ความเร็วที่เปลี่ยนไปของเมล็ดข้าวเปลือก (m/s)
 t คือ เวลา ณ ขณะนั้น (s)
 Δt คือ ความแตกต่างของเวลาปัจจุบันและเวลาเดิม (s)

5.1.3 การประเมินระยะทางรวม (Displacement) ที่เมล็ดข้าวเปลือกเคลื่อนที่ได้

เนื่องจากเมล็ดข้าวเปลือกเคลื่อนที่ ขึ้น - ลง ตามแนวท่อดลอดระยะเวลาของการอบแห้ง จึงส่งผลให้ระยะทางรวม (s_{total}) การเคลื่อนที่ของเมล็ดมีระยะทางที่มากกว่าความยาวท่อด โดยพิจารณาตามสมการ (5.26)

$$s_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n |s_i| \quad (5.26)$$

เมื่อ i คือ ลำดับครั้งที่เปลี่ยนไปของการเคลื่อนที่
 n คือ จำนวนครั้งทั้งหมดของการเคลื่อนที่ตลอดความยาวท่อดตามเวลา

5.1.4 การประเมินค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number) ของเมล็ดข้าวเปลือก

เนื่องจากเมล็ดข้าวเปลือกเคลื่อนที่ ขึ้น - ลง ตามแนวท่อดลอดระยะเวลาของการอบแห้ง ส่งผลให้ความเร็วของเมล็ดในตำแหน่งต่าง ๆ มีการเปลี่ยนแปลงไป ความเร็วที่เปลี่ยนไปในแต่

ละช่วงความยาวนั้นทำให้ เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number) ของเมล็ดข้าวเปลือกเปลี่ยนไปด้วย โดยพิจารณาตามสมการ (5.27) (Cengel, Y. A. and Cimbala, J. M., 2014)

$$Re = \frac{\rho \cdot (\Delta v) \cdot D}{\mu} \quad (5.27)$$

- เมื่อ Δv คือ ความเร็วสัมพัทธ์ (Relative Velocity) ระหว่างอากาศอบแห้งอบแห้งและความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือก (m/s)
- μ คือ ความหนืดของอากาศ (Viscosity of air, kg/m·s)
- D คือ ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางเมล็ด (m)
- ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (Density of air, kg/m³)

การสร้างชุดสมการและลำดับการคำนวณทั้งหมด จะถูกจำลองการเคลื่อนที่เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม Spread Sheet บนคอมพิวเตอร์ โดยกำหนดให้มีการจ่ายอากาศเข้าส่วนล่างของท่ออบแห้งด้วยความเร็ว 9 m/s และกำหนดการหยุดจ่ายและจ่ายอากาศแบบเป็นคาบที่เวลา 0.15 วินาที และ 0.75 วินาที ตามลำดับ

5.2 การเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งแบบลมร้อนด้วยวิธีการจำลองด้วย CFD - DEM เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow)

งานวิจัยส่วนนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษการเคลื่อนที่ของอนุภาค (เมล็ดข้าวเปลือก) ในหอบแห้งที่ใช้อากาศอบแห้งแบบไหลเป็นช่วง (Pulse flow) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการไหลของอากาศด้วยการจำลองบนคอมพิวเตอร์โดยใช้วิธีการ CFD - DEM Coupling วิธีของ DEM นั้นจะทำการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามกฎของนิวตันโดยพิจารณาถึงปฏิสัมพันธ์ (Interactive) ที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคกับอนุภาค และอนุภาคกับของไหล ส่วนการเคลื่อนที่ของของไหลจะใช้วิธี CFD เพื่อคำนวณอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างอนุภาคกับของไหล การศึกษาจะใช้แบบจำลองหอบแห้งที่มีขนาดความสูง 2 m เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 in จำลองการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งภายใต้การไหลของอากาศแบบเป็นช่วงแตกต่างกัน 4 แบบจำลอง ทำการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งการเคลื่อนที่ ความเร็ว เรย์โนลด์นัมเบอร์ และระยะทางรวมของการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกเมื่ออยู่ในหอบแห้งภายในระยะเวลา 3 s หากเข้าใจถึงพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกตามการจำลองที่สร้างขึ้นนี้ได้จะสามารถนำข้อมูลนี้ไปช่วยออกแบบระบบการอบแห้งแบบ Pulse flow ได้ดียิ่งขึ้น และเชื่อว่าจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาอุตสาหกรรมอาหารและการอบแห้งได้ดีด้วยเช่นกัน

5.2.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุและพารามิเตอร์ต่าง ๆ

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแสดงดังตารางที่ 5.1 มีวิธีการคำนวณดังนี้

ตารางที่ 5.1 สมบัติวัสดุและพารามิเตอร์ในการจำลองด้วย CFD - DEM

Paddy	Value
Density, ρ_s (kg/m ³)	1,331.85
Volume, V (m ³)	3.35x10 ⁻⁸
Mass, m _s (kg)	3.15x10 ⁻⁵
Poisson ratio, ν_s	0.25
Shear modulus, Gp (Pa)	3.75x10 ⁸
Drying tube	Value
Density, ρ_{tube} (kg/m ³)	6,000
Poisson ratio, ν_{tube}	0.25
Shear modulus, Gp (Pa)	1.0x10 ⁸
Paddy - Paddy	Value
Restitution Coefficient, e	0.6
Coefficient of static friction, μ_s	0.3
Coefficient of rolling friction, μ_r	0.01
Paddy - Drying tube	Value
Restitution Coefficient, e	0.5
Coefficient of static friction, μ_s	0.2
Coefficient of rolling friction, μ_r	0.01
Simulation	Value
Grid type	Hexahedron
Grid number (CFD)	7557
CFD time step (s)	3.0x10 ⁻⁴
EDEM time step (s)	3.0x10 ⁻⁶
Number of particles	100 (900 pcs)
Simulation duration (s)	3

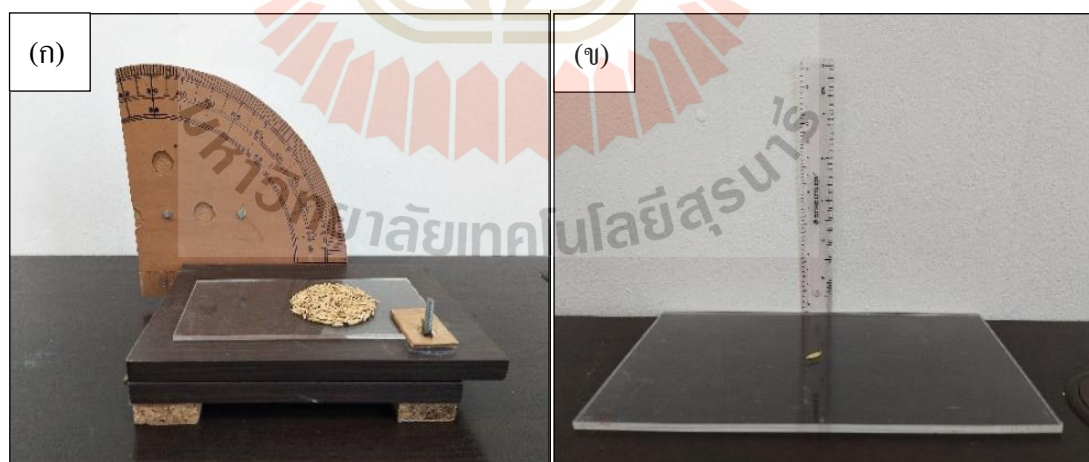
ความหนาแน่นจริง (Solid density, ρ_s) คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักวัสดุต่อปริมาตร ได้จากการทดสอบและคำนวณโดย ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน และคณะ (2564)

สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Coefficient of static friction, μ_s) ได้จากการทดสอบโดยนำเมล็ดข้าวเปลือกวางบนพื้นผิวระนาบของวัสดุที่ใช้ทำหอบแห้ง (ในการจำลองนี้เลือกใช้พลาสติกอะคริลิกรูปทรงกระบอกกลมเป็นหอบแห้ง) แสดงดังรูปที่ 5.4 (ก) จากนั้นปรับมุมเอียง (α) ของแผ่นระนาบเพิ่มอย่างช้า ๆ จนกระทั่งเมล็ดข้าวเปลือกเริ่มเคลื่อนที่ตามแนวแผ่นระนาบลงสู่ด้านล่าง บันทึกค่ามุมยกที่อ่านได้ คำนวณดังสมการที่ (5.28)

$$\mu_s = \tan(\alpha) \quad (5.28)$$

สัมประสิทธิ์การคืนตัว (Coefficient of restitution, e) คืออัตราส่วนรากที่สองของความสูงระหว่าง ความสูงของเมล็ดข้าวเปลือกหลังจากตกกระทบพื้นแล้วสะท้อนกลับขึ้นในแนวตั้ง (h_r) หารด้วยความสูงเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือกก่อนตกกระทบพื้น (h_i) (Teffo V.B. and Natasia, N., 2013) การทดลองแสดงดัง แสดงดังรูปที่ 5.4 (ข) คำนวณดังสมการที่ (5.29)

$$e = \sqrt{h_r/h_i} \quad (5.29)$$



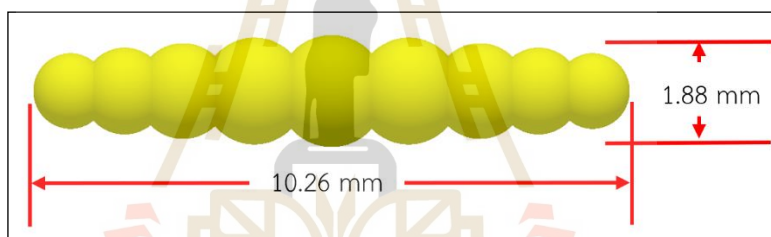
รูปที่ 5.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

(ก) สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต

(ข) สัมประสิทธิ์การคืนตัว

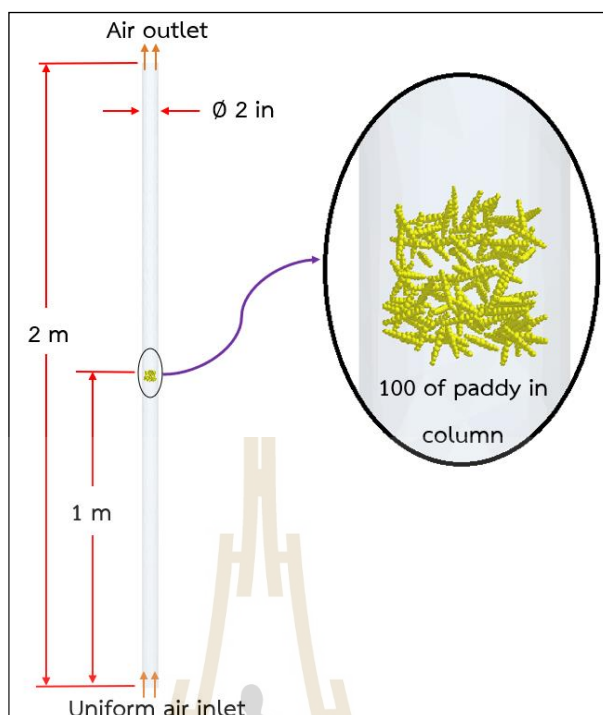
5.2.2 เงื่อนไขการจำลอง

การจำลองรูปร่างของอนุภาคจะสร้างให้มีสัญญาณใกล้เคียงกับเมล็ดข้าวเปลือกทรงรี ขนาดความยาว 10.26 mm กว้าง 2.61 mm หนา 1.88 mm (ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน และคณะ, 2564) และเพื่อให้ได้รูปทรงที่คล้ายกับเมล็ดข้าวเปลือกจึงเลือกใช้วิธีการอนุภาคนำทรงกลมขนาดต่างกันมาเรียงต่อกันทั้งหมดจำนวน 9 ทรงกลม ตามวิธีของ Multi Sphere method (Norouzi, H. R. et al., 2016) ซึ่งจะมีบางส่วนของทรงกลมทับซ้อนกัน แสดงดังรูปที่ 5.5 กำหนดจำนวนอนุภาคในระบบเพื่อการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เท่ากับ 900 อนุภาค (หรือเท่ากับเมล็ดข้าวเปลือก 100 เมล็ด) ทั้งนี้เพื่อให้เหมาะสมกับสมรรถนะการคำนวณของเครื่องคอมพิวเตอร์ระดับส่วนบุคคล โดยขนาดหอบแห้งที่ใช้ในการจำลองนี้เป็นท่ออะคลิลิกทรงกระบอกกลมตรงที่มีขนาดความสูง 2 m เส้นผ่านศูนย์กลางท่อภายใน 2 in กำหนดให้ Grid ที่สร้างขึ้นสำหรับหอบแห้งเป็นแบบ Hexahedral Mesh type ซึ่งจะเป็น Grid ที่ค่อนข้างหยาบ ทั้งนี้เพื่อลดจุดในการคำนวณให้น้อยลงทำให้การจำลองรวดเร็วขึ้นโดยไม่ส่งผลกระทบต่อคำตอบที่ได้



รูปที่ 5.5 รูปทรงของเมล็ดข้าวเปลือกแบบ Multi - sphere

การจำลองจะเริ่มจากการปล่อยแบบจำลองเมล็ดข้าวเปลือกจำนวน 100 เมล็ด จากตำแหน่งกึ่งกลางของท่อตามแนวตั้ง แสดงดังรูปที่ 5.6 (ตำแหน่งที่ปล่อยเมล็ดข้าวจะเรียกว่าตำแหน่ง 0 m และเวลาในขณะที่เริ่มปล่อยเมล็ดข้าวจะเป็นเวลาเริ่มต้น $t = 0$ s เช่นกัน) เมล็ดข้าวเปลือกตกลงตามแรงโน้มถ่วงของโลกลงสู่ด้านล่างของหอบแห้ง ในขณะหนึ่งก่อนที่จะเริ่มปล่อยให้อากาศร้อนไหลเข้าสู่หอบแห้งจากส่วนล่างของท่อด้วยความเร็ว 10 m/s อากาศที่ไหลเข้าไปนี้จะเป็นตัวกลางในการหอบพาให้เมล็ดข้าวชะลอความเร็วการตกจนกระทั่งหยุดการเคลื่อนที่และเกิดการเคลื่อนที่กลับทิศเป็นการเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนตามความสูงของหอบแห้งแทน และเมื่อจ่ายอากาศครบตามคาบเวลาที่กำหนดแล้ว อากาศในหอบแห้งจะถูกจำลองให้หยุดการไหลอีกครั้งเพื่อให้เมล็ดข้าวร่วงลงสู่ด้านล่างตามแนวท่อ ลักษณะการจ่ายอากาศเข้าสู่หอบแห้งแบบเป็นช่วง ๆ นี้จะกระทำต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ ตามช่วงเวลาที่กำหนดขึ้น แสดงดังตารางที่ 5.2 ทำการจำลองสภาวะการไหลแบบเป็นช่วง (Pulse flow) เป็น 4 แบบจำลอง และกำหนดคาบเวลาการจำลองระบบในช่วง 3 s จึงจะยุติการทำงานของระบบลง



รูปที่ 5.6 ตำแหน่งปล่อยเมล็ดข้าวเปลือกในท่ออบแห้ง

ตารางที่ 5.2 แบบจำลองสภาวะการไหลแบบเป็นช่วง โดยใช้เวลาในการหยุดและจ่ายอากาศอบแห้ง
CFD - DEM 4 แบบ

ความเร็วอากาศ อบแห้ง (m/s)	เวลาที่ใช้ในการหยุดและจ่ายอากาศอบแห้ง (s)			
	แบบจำลองที่ 1	แบบจำลองที่ 2	แบบจำลองที่ 3	แบบจำลองที่ 4
0 (หยุด)	0.3	0.3	0.3	0.3
10 (จ่าย)	0.7	0.8	0.9	1.0

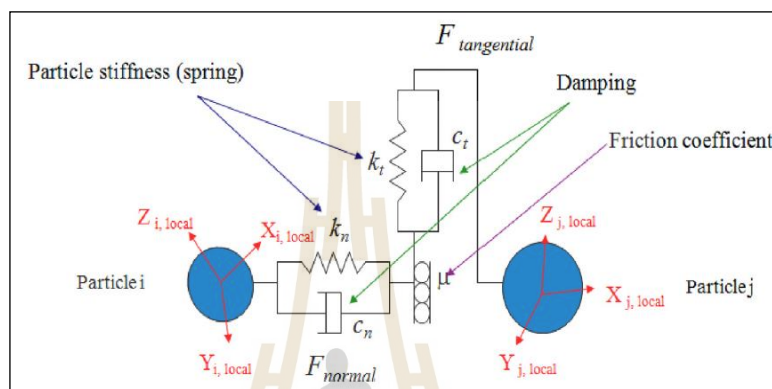
5.2.3 แบบจำลอง CFD - DEM

แบบจำลองการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกที่สร้างขึ้นนี้ เป็นการเคลื่อนที่อันเนื่องมาจากการขับเคลื่อนของอากาศ ซึ่งจะส่งผลให้เมล็ดข้าวเปลือกมีพฤติกรรมเคลื่อนที่คล้ายกับของไหล ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจำลองการไหลของอากาศ (CFD) ด้วยวิธี Eulerian - Lagrangian ร่วมกับการวิเคราะห์อนุภาคไม่ต่อเนื่อง (DEM) ภายใต้สมการควบคุม (Governing equation) ดังนี้

ก) สมการควบคุมสำหรับส่วนที่เป็นของแข็ง (Solid phase)

การชนกันของอนุภาคของแข็งอ้างอิงทฤษฎีของ Cundall and Strack (Cundall, P. A. and Strack, O. D. L., 1979) ซึ่งการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคในแบบจำลองนี้จะสัมพันธ์

(Contract) กันด้วยอนุภาค i และ j ผ่านกลไกทางกลสามชนิดคือ Spring damper และ Friction block แสดงดังรูปที่ 5.7 โดยใช้กฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) แสดงดังสมการที่ (5.30) และในขณะที่อนุภาคกำลังเคลื่อนตัวอยู่นั้นอาจเกิดการหมุนร่วมอยู่ด้วยซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ (5.31) และทั้งหมดนั้นจะถูกนำมาคำนวณใน Gidaspow model (Gidaspow, D., 1986)



รูปที่ 5.7 การชนกันของอนุภาคของแข็ง (Hong - Wei L. et al., 2020)

$$m_i \cdot \left(\frac{dv_i}{dt} \right) = \sum_{j=1}^{n_c} (F_{c,ij} + F_{d,ij}) + F_{d,g-i} + F_{p,g-i} + m_i g \quad (5.30)$$

$$I_i \cdot \left(\frac{d\omega_i}{dt} \right) = \sum_{j=1}^{n_c} (T_{t,ij} + T_{r,ij}) \quad (5.31)$$

- เมื่อ m_i คือ มวล (mass)
 v_i คือ ความเร็ว (translational velocities)
 I_i คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (moment of inertia)
 ω_i คือ ความเร็วของการหมุนตัว (rotational velocities)
 n_c คือ จำนวนของอนุภาคที่สัมผัส (Contract) กับอนุภาค i
 $F_{c,ij}$ คือ แรงจากการชน - การปะทะ (collision force)
 $F_{d,ij}$ คือ แรงจากความหน่วง (viscous damping force)
 $F_{d,g-i}$ คือ แรงต้าน (gas - solid drag force)
 $F_{p,g-i}$ คือ แรงดัน (pressure)
 $m_i g$ คือ แรงโน้มถ่วง (gravity)

ข) สมการควบคุมสำหรับส่วนที่เป็นก๊าซ (Gas phase)

การเคลื่อนไหวของส่วนที่เป็นก๊าซอธิบายได้ด้วย The continuity equation และ The momentum equation ดังสมการที่ (5.32) (5.33) และ (5.34) โดยสมการที่ใช้สำหรับความปั่นป่วนของของไหล (Turbulent) เป็นแบบ Standard $\kappa-\varepsilon$ (Wilcox, D. C., 1998)

$$\frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g)}{\partial t} + \frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g u_y)}{\partial y} = S_p \quad (5.32)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g u_x)}{\partial t} + \frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g u_x u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g u_y u_x)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\varepsilon_g \cdot (\mu_g + \mu_t) \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\varepsilon_g \cdot (\mu_g + \mu_t) \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \right] + \varepsilon_g S_x + F_{p,x} \quad (5.33)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g u_y)}{\partial t} + \frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g u_x u_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g u_y u_y)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\varepsilon_g \cdot (\mu_g + \mu_t) \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\varepsilon_g \cdot (\mu_g + \mu_t) \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right) \right] + \varepsilon_g S_y + F_{p,y} \quad (5.34)$$

เมื่อ μ_g คือ shear viscosities of fluids

ε_g คือ porosity

μ_t คือ turbulent viscosities of fluids

ρ_g คือ gas phase density

$F_{p,x}$ คือ แรงที่กระทำในทิศทาง x

$F_{p,y}$ คือ แรงที่กระทำในทิศทาง y

5.3 การทดสอบอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกต้นแบบที่สร้างขึ้น

การทดสอบอบแห้งนี้แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ

1) การทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือก ด้วยการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งตลอดกระบวนการทดสอบ

2) การทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือก ด้วยการควบคุมให้อากาศอบแห้งไหลเข้าไปในหอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ผ่านการเปิด - ปิด วาล์วระบายอากาศตามเวลาที่กำหนด

โดยแบ่งวิธีดำเนินการวิจัยเป็นหัวข้อดังนี้ การออกแบบการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือก การเตรียมข้าวเปลือกขึ้น การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือก การวิเคราะห์ค่าความชื้นข้าวเปลือก และการประเมินสมรรถนะการในอบแห้งซึ่งจะพิจารณาจากอัตราการอบแห้ง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (พลังงานป้อนภูมิและพลังงานทุติยภูมิ) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง พลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแห้ง และคุณภาพข้าว ดังนี้

5.3.1 รูปแบบการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือก

การศึกษาอิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือก ด้วยการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งตลอดกระบวนการทดสอบ

การทดสอบส่วนนี้ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศที่ส่งผลต่อการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งตลอดกระบวนการทดสอบ โดยพิจารณาผลการอบแห้งจากพฤติกรรมการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ทำการทดสอบเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยความเร็วอากาศสองรูปแบบ คือ ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ 12.80 m/s และความเร็วอากาศอบแห้งที่ถูกปรับลดต่อเนื่องระหว่างทดสอบ ซึ่งจะปรับลดลงให้สัมพันธ์กับน้ำหนักของข้าวเปลือกที่ลดลงทุกหนึ่งรอบของการป้อนข้าวเปลือกจนหมดถัง (เท่ากับเวลา 15 นาที คำนวณได้จากอัตราการป้อนข้าวเปลือก) ตลอดการทดสอบ ซึ่งพบว่ามีค่าลดลงจาก 12.80 จนถึง 8.44 m/s อ่านค่าเพื่อปรับตั้งความเร็วทั้งสองรูปแบบจากชุด Pressure transmitter และ Orifice Plate ที่ติดตั้งในระบบ ศึกษาการอบแห้งโดยใช้ข้าวเปลือกพันธุ์หอมปทุม (ข้าวหอมปทุมธานี 1) น้ำหนัก 15 kg อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C อัตราการป้อนข้าวเปลือก 1.00 kg/min เงื่อนไขการทดสอบอบแห้งแสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 เงื่อนไขการทดสอบอบแห้งสำหรับรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งด้วยการปรับลดความเร็ว ของการทดสอบที่ 1

การทดสอบ	รูปแบบความเร็วอากาศอบแห้ง	จำนวนซ้ำการทดสอบ
การทดสอบที่ 1	ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ (12.80 m/s)	3
การทดสอบที่ 2	ความเร็วอากาศอบแห้งปรับลดตามเวลา (12.80 จนถึง 8.44 m/s)	3

การศึกษาอิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือก ด้วยการควบคุมให้อากาศอบแห้งไหลเข้าไปในหอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ผ่านการเปิด - ปิดวาล์วระบายอากาศตามเวลาที่กำหนด

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาการอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมแนวใหม่ที่อาศัยรูปแบบการไหลของอากาศให้เป็นตัวกลางสำหรับการอบแห้ง โดยได้พัฒนารูปแบบการไหลของอากาศให้มีการไหลแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ด้วยการป้อนหรือจ่ายอากาศอบแห้งจากด้านล่างของหอบแห้ง เมล็ดข้าวเปลือกที่เคลื่อนที่ในหอบแห้งภายใต้การไหลของลมร้อนแบบดังกล่าวจะเกิดการเคลื่อนที่แบบ ขึ้น - ลง ตลอดความสูงของหอบแห้ง ซึ่งอากาศอบแห้งจะถูกควบคุมให้ไหลเข้าไปในหอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ผ่านการเปิด - ปิดวาล์วระบายอากาศตามเวลาที่กำหนดเพื่อลดอัตราการไหลและความดันอากาศภายในห่อ พฤติกรรมการไหลของอากาศในรูปแบบดังกล่าวจะช่วยให้เมล็ดข้าวเปลือกเกิดการเคลื่อนตัวเป็นไปตามกระแสอากาศ และส่งผลให้เกิดการหมุนเมล็ดข้าวเปลือกไว้ในหอบแห้งได้นานยิ่งขึ้น ดังนั้นปัจจัยสำคัญสำหรับการอบแห้งที่ต้องการศึกษาจึงมุ่งเน้นไปที่การจ่ายอากาศอบแห้งที่ต้นทาง โดยอาศัยการควบคุมปรับเปลี่ยนเวลาเปิด - ปิดวาล์วระบายอากาศ ศึกษาการอบแห้งโดยใช้ข้าวเปลือกพันธุ์หอมปทุม (ข้าวหอมปทุมธานี 1) น้ำหนัก 15 kg อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C ความเร็วอากาศอบแห้ง 8.68 m/s อัตราการป้อนข้าวเปลือก 1.00 kg/min โดยเงื่อนไขการทดสอบอบแห้งแสดงดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 เงื่อนไขการทดสอบอบแห้งสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาที่ใช้ในการเปิด - ปิดวาล์ว ของการทดสอบที่ 2

การทดสอบ	เวลาการเปิด - ปิดวาล์วระบายอากาศ		จำนวนซ้ำการทดสอบ
	เปิด (s)	ปิด (s)	
การทดสอบที่ 1	-	ตลอดการทดสอบ	3
การทดสอบที่ 2	3	3	3
การทดสอบที่ 3	4	3	3
การทดสอบที่ 4	5	3	3

5.3.2 การเตรียมข้าวเปลือกชั้น

งานวิจัยนี้ใช้ข้าวพันธุ์หอมปทุม เป็นข้าวนาปรังที่เพาะปลูกในบริเวณจังหวัดนครราชสีมา ทำการเก็บเกี่ยวด้วยรถเกี่ยวขนาด ในเดือนพฤษภาคม 2564 โดยนำข้าวเปลือกที่ได้จากการเก็บเกี่ยวไปคัดแยกเมล็ดเต็มออกจากเศษฟางและเมล็ดลีบด้วยเครื่องทำความสะอาดเมล็ดพันธุ์ (รูปที่ 5.8) บรรจุข้าวเปลือกเมล็ดเต็มที่ได้ในถุงพลาสติกปิดสนิท ถุงละ 15 kg และจัดเก็บในห้องแช่เย็นที่มีอุณหภูมิประมาณ 4°C เพื่อชะลอการเจริญเติบโตของเชื้อราและรักษาคุณภาพข้าวเปลือกก่อนถึงวันทดสอบ

เนื่องจากความชื้นข้าวเปลือกที่ได้จากการเก็บเกี่ยวในช่วงดังกล่าวมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ โดยมีค่าอยู่ที่ประมาณร้อยละ 18 มาตรฐานเปียก ผู้วิจัยจึงทำการจำลองความชื้นให้มีค่าใกล้เคียงกับข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวใหม่จากแปลง ซึ่งมีความชื้นอยู่ที่ประมาณร้อยละ 22 - 25 มาตรฐานเปียก (กิตติยา กิจควรดี, 2547) ด้วยการพ่นละอองน้ำลงในกองข้าวเปลือกและคลุกเคล้าให้ทั่วกัน (Limpiti, S. and Changrue, V., 1996) จากนั้นนำไปเก็บในพาชนะที่บดแสงและจัดเก็บในห้องแช่เย็นที่มีอุณหภูมิประมาณ 4°C เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 h ในงานวิจัยนี้เลือกความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยที่ประมาณร้อยละ 25 มาตรฐานเปียก และจะทำการลดความชื้นด้วยชุดทดสอบต้นแบบที่สร้างขึ้นโดยให้ความชื้นลดลงเหลือประมาณร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก ซึ่งเป็นความชื้นที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา (กิตติยา กิจควรดี, 2547) และเมื่อถึงวันทดสอบจะนำถุงข้าวเปลือกออกจากห้องแช่เย็น และพักในสภาพอากาศแวดล้อมประมาณ 12 h (สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ, 2557) เพื่อให้อุณหภูมิข้าวเปลือกสูงขึ้นเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อมอย่างช้า ๆ ก่อนจะนำไปอบแห้งด้วยเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นต่อไป



รูปที่ 5.8 เครื่องทำความสะอาดเมล็ดพันธุ์

5.3.3 การทดสอบอบแห้งข้าวเปลือก

การทดสอบที่ 1 ศึกษาอิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งตลอดกระบวนการทดสอบ

ขั้นตอนการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือก ประกอบด้วย

- ก) ตั้งค่า Inverter set point เพื่อให้มีค่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่อลมเข้าตามค่าที่กำหนด จากนั้นเปิดเครื่องเป่าลม
- ข) เปิดเครื่องทำความร้อน แล้วปรับเครื่องควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าตามที่กำหนด
- ค) จับเวลาทำการอุ่นเครื่องอบแห้ง 30 min
- ง) เก็บตัวอย่างข้าวเปลือกเริ่มต้นประมาณ 15 g ลงในถุงพลาสติกปิดสนิท เพื่อเตรียมสำหรับนำไปวิเคราะห์ค่าความชื้น
- จ) เมื่อครบระยะเวลาอุ่นเครื่องอบแห้งแล้วทำการปิดเครื่องทำความร้อนและเครื่องเป่าลม
- ฉ) เทข้าวเปลือกขึ้นจากถุงพลาสติกตามมวลที่กำหนด ลงไปในถังพักข้าวเปลือก
- ช) เปิดเครื่องเป่าลม เครื่องทำความร้อน (ทำการทดสอบอบแห้งตามเงื่อนไขการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.3) พร้อมกับเริ่มจับเวลาการอบแห้ง
- ซ) ทำการอบแห้งจนกระทั่งข้าวเปลือกมีความชื้นต่ำกว่า 14 %wb จึงยุติการทดลอง (สำหรับการทดสอบที่ 1 ใช้เวลายุติการทดลองที่ 3 h 20 min และสำหรับการทดสอบที่ 2 ใช้เวลายุติการทดลองที่ 4 h เวลาที่ใช้ในยุติการทดลองนั้นพิจารณาจากการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกแบบใช้เวลายาวนานกับเงื่อนไขการทดสอบทุกกรณี จากนั้นพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่ลดลงกับเวลา จึงทำให้ทราบถึงเวลาที่ข้าวเปลือกมีความชื้นต่ำกว่า 14 %wb และสามารถยุติการทดลองลงได้)
- ฌ) ในขณะที่ทำการอบแห้งจะเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกทุก ๆ 20 min จำนวนตัวอย่างละประมาณ 15 g บรรจุในถุงพลาสติกปิดสนิท เพื่อเตรียมสำหรับนำไปวิเคราะห์ค่าความชื้นที่ลดลง
- ญ) หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง นำตัวอย่างข้าวเปลือกที่เก็บได้ไปพักในอุณหภูมิบรรยากาศประมาณ 48 h โดยนำไปวางไว้ในตู้คงความชื้น เพื่อให้อุณหภูมิข้าวเปลือกลดลง คลายความเครียดที่ผิว และให้เกิดการกระจายความชื้นอย่างสม่ำเสมอตลอดเมล็ดข้าว
- ฎ) นำตัวอย่างข้าวเปลือกไปวิเคราะห์ค่าความชื้นข้าวเปลือก และการประเมินสมรรถนะการในอบแห้งประกอบด้วยอัตราการอบแห้ง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (พลังงานป้อนภูมิและพลังงานหุติภูมิ) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

การทดสอบที่ 2 ศึกษาอิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยการควบคุมให้อากาศอบแห้งไหลเข้าไปในหอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ผ่านการเปิด - ปิดวาล์วระบายอากาศตามเวลาที่กำหนด

ขั้นตอนการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือก ประกอบด้วย

- ก) ตั้งค่า Inverter set point เพื่อให้มีค่าความเร็วลมเฉลี่ยในท่อลมเข้าตามค่าที่กำหนด จากนั้นเปิดเครื่องเป่าลม
- ข) เปิดเครื่องทำความร้อน แล้วปรับเครื่องควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าตามที่กำหนด
- ค) จับเวลาทำการอุ่นเครื่องอบแห้ง 30 min
- ง) เก็บตัวอย่างข้าวเปลือกเริ่มต้นประมาณ 15 g ลงในถุงพลาสติกปิดสนิท เพื่อเตรียมสำหรับนำไปวิเคราะห์ค่าความชื้น
- จ) เมื่อครบระยะเวลาอุ่นเครื่องอบแห้งแล้วทำการปิดเครื่องทำความร้อนและเครื่องเป่าลม
- ฉ) เทข้าวเปลือกขึ้นจากถุงพลาสติกตามมวลที่กำหนด ลงไปในถังพักข้าวเปลือก
- ช) เปิดเครื่องเป่าลม เครื่องทำความร้อน และเปิดสวิตช์ชุดควบคุมเวลา (Timer Relay) ที่ใช้ในการควบคุมการเปิด - ปิดวาล์ว (ตามเงื่อนไขการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.4) พร้อมกับเริ่มจับเวลาการอบแห้ง
- ช) ทำการอบแห้งจนกระทั่งข้าวเปลือกมีความชื้นเข้าสู่สภาวะสมดุล (ต่ำกว่า 14 %wb) จึงยุติการทดลอง (ในการทดสอบอบแห้งใช้เวลายุติการทดลองเท่ากันทุก ๆ การทดลองที่ 6 h)
- ฉ) ในขณะที่ทำการอบแห้งจะเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกทุก ๆ 20 min จำนวนตัวอย่างละประมาณ 15 g บรรจุในถุงพลาสติกปิดสนิท เพื่อเตรียมสำหรับนำไปวิเคราะห์ค่าความชื้นที่ลดลง
- ญ) ในขณะที่ทำการอบแห้งเมื่อความชื้นข้าวเปลือกลดลงไปที่ 14 %wb จะเก็บตัวอย่างข้าวเปลือก 500 g บรรจุในถุงพลาสติกปิดสนิท เพื่อเตรียมสำหรับนำไปทดสอบหาคุณภาพข้าว (ที่ความชื้น 14 %wb นั้นพิจารณาจากเวลาของการอบแห้ง โดยทำการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกแบบใช้เวลายาวนานกับเงื่อนไขการทดสอบทุกกรณี จากนั้นพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่ลดลงกับเวลา จึงทำให้ทราบถึงช่วงเวลาที่สามารถเก็บตัวอย่างเมล็ดข้าวเปลือกได้ในความชื้นนั้น)
- ฎ) หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง นำตัวอย่างข้าวเปลือกที่เก็บได้ไปพักในอุณหภูมิบรรยากาศประมาณ 48 h โดยนำไปวางไว้ในตู้คงความชื้น เพื่อให้อุณหภูมิข้าวเปลือกลดลงคลายความเครียดที่ผิว และให้เกิดการกระจายความชื้นอย่างสม่ำเสมอตลอดเมล็ดข้าว
- ฏ) นำตัวอย่างข้าวเปลือกไปวิเคราะห์ค่าความชื้นข้าวเปลือก และการประเมินสมรรถนะการในอบแห้งประกอบด้วยอัตราการอบแห้ง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (พลังงานป้อนและพลังงานสูญเสีย) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง พลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแห้ง และคุณภาพข้าว ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

5.3.4 การวิเคราะห์ค่าความชื้นข้าวเปลือก

การวิเคราะห์ค่าความชื้นข้าวเปลือก วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน Association of Official Analytical Chemists (AOAC., 2000) ดังนี้

- ก) นำถั่วยอะลูมิเนียมไปอบไล่ความชื้นในตู้อบลมร้อน (รูปที่ 5.9) ที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 h (ขณะนำถั่วยอะลูมิเนียมออกจากตู้อบใช้คีมคีบวางในถาดบรรจุอย่างระมัดระวังอย่าใช้มือสัมผัสถั่วยอะลูมิเนียม)



รูปที่ 5.9 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)

- ข) นำถั่วยอะลูมิเนียมไปวางให้เย็นตัวในตู้ดูดความชื้น (รูปที่ 5.10) ประมาณ 30 min



รูปที่ 5.10 ตู้ดูดความชื้น (Desiccator)

- ค) ชั่งน้ำหนักถ้วยอะลูมิเนียมบันทึกค่าแล้วกด reset เพื่อให้ค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์จากนั้นใส่ตัวอย่างเมล็ดข้าวเปลือกลงในถ้วยอะลูมิเนียมประมาณ 10 g และบันทึกค่าน้ำหนักของข้าวเปลือก
- ง) นำถ้วยอะลูมิเนียมพร้อมตัวอย่างเมล็ดข้าวเปลือกที่ชั่งน้ำหนักแล้วไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 h โดยไม่ต้องปิดฝา
- จ) เมื่อครบเวลาปิดฝาด้วยอะลูมิเนียมแล้วนำไปวางให้เย็นตัวในตู้ดูดความชื้นประมาณ 30 min
- ฉ) เปิดฝาลงแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก ค่าที่ชั่งได้เป็นน้ำหนักของข้าวเปลือกแห้งรวมกับน้ำหนักถ้วยอะลูมิเนียม จากนั้นลบกับน้ำหนักของถ้วยอะลูมิเนียมจะได้เป็นน้ำหนักของข้าวเปลือกแห้ง
- ช) นำค่ามาคำนวณหาค่าความชื้นข้าวเปลือก ดังสมการที่ (5.35)

$$M_w = \frac{W_i - W_f}{W_i} \quad (5.35)$$

เมื่อ M_w คือ เศษส่วนความชื้นมาตรฐานเปียก (เศษส่วน)

W_i คือ น้ำหนักเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือก (g)

W_f คือ น้ำหนักสุดท้ายของเมล็ดข้าวเปลือกหลังนำออกจากตู้อบลมร้อน (g)

5.3.5 การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

การประเมินสมรรถนะการในอบแห้งพิจารณาจากอัตราการอบแห้ง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (พลังงานป้อนภูมิและพลังงานหุติภูมิ) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง พลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแห้ง และคุณภาพข้าว ซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้

- ก) อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR)

นำข้อมูลการทดสอบมาวิเคราะห์หาปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง การคำนวณแสดงดังสมการที่ (5.36) (ณัฐพล แซ่ลิ้ม และคณะ, 2561)

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t} \quad (5.36)$$

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

W_i คือ น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น (kg)

W_f คือ น้ำหนักข้าวเปลือกหลังอบแห้ง (kg)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

- ข) อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)
พลังงานที่ใช้ในกระบวนการลดความชื้นแบ่งพิจารณาเป็นสองส่วนคือ ความสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ (พลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง, SEC_{Heater}) และความสิ้นเปลืองพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ (พลังงานที่ใช้ในการขับลม, SEC_{Blower}) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (5.37) และ (5.38) (ณัฐพล แซ่ลิ้ม และคณะ, 2561)

$$SEC_{\text{Heater}} = \frac{3.6E}{W_i - W_f} \quad (5.37)$$

$$SEC_{\text{Blower}} = \frac{3.6E}{W_i - W_f} \quad (5.38)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ($\text{MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$)

E คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศอบแห้ง และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับลม (kWh)

- ค) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง (Thermal Efficiency of Paddy Drying, η_{dry})
พิจารณาจากผลรวมของปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำและปริมาณความร้อนที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิให้กับเมล็ดข้าวเปลือกส่วนด้วยปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ แสดงดังสมการ (5.39) (5.40) (5.41) และ (5.42) (เทวรัตน์ ทิพยวิมล, 2554)

$$\eta_{\text{dry}} = \left(\frac{Q_{\text{evap}} + Q_s}{Q_a} \right) \cdot 100 \quad (5.39)$$

$$Q_{\text{evap}} = W_d \cdot (M_i - M_f) \cdot h_{\text{fg}} \quad (5.40)$$

$$Q_s = W_d C_{\text{pd}} \cdot (T_{\text{p2}} - T_{\text{p1}}) + W_d C_{\text{pw}} \cdot (T_{\text{p2}} - T_{\text{p1}}) \cdot M_i \quad (5.41)$$

$$Q_a = \dot{m}_a \cdot (C_a + C_v H_1) (T_2 - T_1) \quad (5.42)$$

เมื่อ Q_{evap} คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ (kJ)

W_d	คือ มวลแห้งของวัสดุ (kg)
M_i	คือ ความชื้นวัสดุก่อนอบแห้ง (เศษส่วน ร้อยละมาตรฐานแห้ง)
M_f	คือ ความชื้นวัสดุหลังอบแห้ง (เศษส่วน ร้อยละมาตรฐานแห้ง)
h_{fg}	คือ ความร้อนแฝงของน้ำที่อุณหภูมิ T_{p2} (kJ/kg)
Q_s	คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ (kJ)
C_{pd}	คือ ความร้อนจำเพาะของวัสดุแห้ง (kJ/kg \cdot °C)
C_{pw}	คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg \cdot °C)
T_{p1}	คือ อุณหภูมิวัสดุก่อนอบแห้ง (°C)
T_{p2}	คือ อุณหภูมิวัสดุหลังอบแห้ง (°C)
Q_a	คือ ปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ (kJ)
\dot{m}_a	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง (kg _{dry air} /h)
C_a	คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง (kJ/kg _{dry air} \cdot °C)
C_v	คือ ความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (kJ/kg _{water} \cdot °C)
H_1	คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศ (kg _{water} /kg _{dry air})
T_1	คือ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องทำความร้อน (°C)
T_2	คือ อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องทำความร้อน (°C)

ง) พลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแห้ง (Activation energy)

พลังงานกระตุ้นหรือพลังงานที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการระเหยน้ำออกจากเมล็ดข้าวเปลือก การวิเคราะห์หาค่าพลังงานกระตุ้นประเมินตามสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) แสดงดังสมการที่ (5.43) (Afzal, T. M. and Abe, T., 1998) และสัมประสิทธิ์การแพร่ ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) สำหรับการอบแห้งที่ใช้ระยะเวลานาน การคำนวณแสดงดังสมการ (5.44) (Crank J., 1975)

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (5.43)$$

เมื่อ	D_{eff}	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m ² /s)
	D_0	คือ ค่าคงที่ของสมการอาร์เรเนียส (m ² /s)
	E_a	คือ ค่าพลังงานกระตุ้น (J/mol)
	R	คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 J/mol \cdot K)

T คือ อุณหภูมิข้าวเปลือก (K)

$$MR_t = \left(\frac{8}{\pi^2} \right) \exp \left(\frac{-D_{\text{eff}} \pi^2 t}{4L^2} \right) \quad (5.44)$$

เมื่อ MR_t คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใด ๆ (ไม่มีหน่วย)

t คือ เวลาในการอบแห้ง (s)

L คือ ความหนาของเมล็ดข้าวเปลือก (m)

จ) การทดสอบคุณภาพข้าว

ในการทดสอบคุณภาพข้าวจะต้องนำข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง (ที่ความชื้น 14 %wb) ไปกะเทาะเปลือกเอาข้าวสาร สำหรับการทดสอบนี้ใช้ข้าวเปลือกตัวอย่างที่จะทำการกะเทาะเปลือกปริมาณ 500 g โดยมีขั้นตอนคือการกะเทาะเปลือก การขัดขาว และการคัดแยก ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

จ.1) การกะเทาะเปลือก

เครื่องกะเทาะข้าวเปลือก (Rice Huller) ที่ใช้เป็นของบริษัท ที.เอส.เอ็ม ซานน์ รุ่น NW - 150 (รูปที่ 5.11)



รูปที่ 5.11 เครื่องกะเทาะข้าวเปลือก (Rice Huller)

เครื่องกะเทาะข้าวเปลือกประกอบด้วยลูกกลิ้งโลหะหุ้มด้วยยาง 2 ลูกหมุนเข้าหากันด้วยอัตราเร็วที่ต่างกันเพื่อให้เกิดแรงดึงแยกส่วนเปลือกออกจากเมล็ดด้านใน ซึ่งเมื่อผ่านการกะเทาะเปลือกจะได้ข้าวกล้องและแกลบ ข้อควรระวังสำหรับการใช้เครื่องกะเทาะเปลือกคือการตั้งระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งถ้าตั้งระยะชิดเกินไปจะทำให้เมล็ดข้าวเกิดการแตกหักจำนวนมากเนื่องจากการบดทับของลูกกลิ้ง หากตั้งระยะห่างเกินไปจะทำให้ปริมาณข้าวกล้องที่ได้มีน้อยเนื่องจากเปลือกหลุดออกจากเมล็ดน้อย สำหรับการทดลองนี้ตั้งระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งไว้ที่ประมาณ 1 mm โดยทำการทดสอบก่อนที่จะทดลองจริงพบว่าให้ปริมาณข้าวกล้องอยู่ในเกณฑ์ที่สูง

จ.2) การขัดขาว

เครื่องขัดขาว (Rice Miller) ที่ใช้เป็นของบริษัท ที.เอส.เอ็ม ซานน์ มีความจุประมาณ 100 g (รูปที่ 5.12) ข้าวกล้องที่ผ่านการกะเทาะเปลือกจะนำมาขัดขาว ซึ่งเครื่องจะทำการขัดสีเอารำออกและได้ข้าวขาวกับรำออกมา หลักการทำงานของเครื่องขัดขาวจะประกอบด้วยแกนเหล็กขัดขาวที่มีใบมีดติดอยู่และวางตัวในแนวระดับ ด้านล่างของแกนมีตะแกรงขัดขาวที่มีรูลักษณะเป็นรูปวงรีเพื่อให้เมล็ดข้าวอยู่ภายในรู และใบมีดที่ติดกับแกนเหล็กก็จะทำหน้าที่ขัดเอารำออก



รูปที่ 5.12 เครื่องขัดขาว (Rice Miller)

จ.3) การคัดแยกปลายข้าว

เครื่องคัดแยกปลายข้าว (Cylinder Separator) ที่ใช้เป็นของของบริษัท ที.เอส.เอ็ม ซานน์ (รูปที่ 5.13) เครื่องคัดแยกปลายข้าวจะเป็นลักษณะทรงกระบอกกลวงโดยที่ผิวด้านในของทรงกระบอกจะเป็นหลุมรูปทรงกระบอกกระจายเต็มพื้นผิว เมื่อทำการหมุนและใส่ข้าวที่ผ่านการขัดขาวลงไป ข้าวเต็มเมล็ด (ข้าวตัน) ที่มีน้ำหนักมากกว่าจะเคลื่อนตัวไปอยู่ภายในหลุมบริเวณด้านข้างของทรงกระบอกส่วนปลายข้าวที่มีน้ำหนักเบากว่าจะเคลื่อนตัวออกมาทางช่องทางออกจะทำให้สามารถแยกข้าวตันและปลายข้าวจากกันได้



รูปที่ 5.13 เครื่องคัดแยกปลายข้าว (Cylinder Separator)

จ.4) การวิเคราะห์คุณภาพข้าว

เมื่อผ่านกระบวนการคัดแยกปลายข้าวเรียบร้อยแล้วจะนำข้าวกล้องเต็มเมล็ดและข้าวขาวเต็มเมล็ดมาวิเคราะห์คุณภาพข้าว แสดงการคำนวณได้ตามสมการ (5.45) และ (5.46) ดังต่อไปนี้ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2560)

- ปริมาณข้าวตันในรูปร้อยละข้าวกล้อง (ข้าวกล้องเต็มเมล็ด)

$$\%BRY = (\text{น้ำหนักข้าวกล้องตัน} / \text{น้ำหนักข้าวเปลือก}) \cdot 100\% \quad (5.45)$$

- ปริมาณข้าวตันในรูปร้อยละข้าวขาว (ข้าวขาวเต็มเมล็ด)

$$\%HRV = (\text{น้ำหนักข้าวขาวตัน/น้ำหนักข้าวเปลือก}) \cdot 100\% \quad (5.46)$$

5.3.6 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการจักรกลเกษตร อาคารจักรกลเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5.4 แบบจำลองเอมพิริคัลชั้นบางเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในท่อแนวตั้ง

งานวิจัยส่วนนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองเอมพิริคัลชั้นบางในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย (MR) กับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (t) เปรียบเทียบกับผลการทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในท่อแนวตั้ง เพื่อทำนายผลจลนพลศาสตร์การอบแห้งภายใต้เงื่อนไขข้อเท็จจริงของมวลข้าวเปลือก 15 kg อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C และความเร็วอากาศอบแห้ง 8.68 m/s ผลการทดสอบจะถูกนำไปใช้เปรียบเทียบกับแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย 6 แบบจำลอง แสดงดังตารางที่ 5.5 เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมโดยจะพิจารณาจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)

ตารางที่ 5.5 แบบจำลองที่ใช้ทำนายการอบแห้งข้าวเปลือก (Khaengkarn, S. et al., 2011)

No.	Name Model	Equation
1	Newton (1921)	$MR = \exp(-kt)$
2	Page (1943)	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis (1961)	$MR = a \cdot \exp(-kt)$
4	Wang and Singh (1978)	$MR = 1 + at + bt^2$
5	Logarithmic (1984)	$MR = a \cdot \exp(-kt) + c$
6	Midilli et al. (2002)	$MR = a \cdot \exp(-kt^n) + bt$

อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยเป็นสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในเมล็ดเทียบกับความชื้นเริ่มต้น ดังสมการที่ (5.47) ค่าความชื้นสมดุลของข้าวเปลือกทำนายโดยใช้รูปแบบจำลองของ Modified Henderson (Chakraverty, A. and Singh, R. P., 2001) ดังสมการที่ (5.48)

$$MR = \frac{\bar{M} - M_c}{M_i - M_c} \quad (5.47)$$

$$1 - rh = \exp \left[-a \cdot (T + c) (100M_c)^b \right] \quad (5.48)$$

เมื่อ	MR	คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย
	\bar{M}	คือ ความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใด ๆ (d.b.)
	M_e	คือ ความชื้นสมดุล (d.b.)
	M_i	คือ ความชื้นเริ่มต้น (d.b.)
	rh	คือ เศษส่วนความชื้นสัมพัทธ์
	T	คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง (°C)
	a, b, c	คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองขึ้นกับชนิดของเมล็ดพืชที่ใช้อบแห้ง มีค่าเท่ากับ 1.9187×10^{-5} , 2.4451 และ 51.161 ตามลำดับ (Brooker, D. B. et al., 1992)

การวิเคราะห์พิจารณาจากค่าตัวแปรทางสถิติดังนี้ รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ไคกำลังสอง (χ^2) และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ดังสมการที่ (5.49) - (5.53) ตามลำดับ (Erbay, Z. and Icier, F., 2010) เพื่อเปรียบเทียบหาแบบจำลองที่ให้ความแม่นยำในการทำนายผล

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N}} \quad (5.49)$$

$$\chi^2 = RMSE^2 \left(\frac{N}{N - z} \right) \quad (5.50)$$

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} \cdot MR_{exp,i}) - \sum_{i=1}^N MR_{pre,i} \cdot \sum_{i=1}^N MR_{exp,i}}{\Delta MR_{pre} \cdot \Delta MR_{exp}} \quad (5.51)$$

$$\Delta MR_{pre} = \sqrt{N \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i})^2 - \left(\sum_{i=1}^N MR_{pre,i} \right)^2} \quad (5.52)$$

$$\Delta MR_{\text{exp}} = \sqrt{N \sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i})^2 - \left(\sum_{i=1}^N MR_{\text{exp},i} \right)^2} \quad (5.53)$$

- เมื่อ MR_{exp} คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง
 MR_{pre} คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนาย
 N คือ จำนวนข้อมูล
 z คือ จำนวนพารามิเตอร์ในแบบจำลอง



บทที่ 6

ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

บทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาดำเนินการวิจัยในบทที่ 5 โดยแบ่งเป็น 4 ส่วนประกอบด้วย

- 1) ผลการศึกษาการหาคำตอบโดยวิธีเชิงวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบขนานในหอบแห้งแนวตั้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ด้วยกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน
 - 2) ผลการศึกษาการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งแบบลมร้อนด้วยวิธีการจำลองด้วย CFD - DEM เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow)
 - 3) ผลการศึกษาการทดสอบอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกต้นแบบที่สร้างขึ้น
 - 4) ผลการศึกษาแบบจำลองเอมพิริคัลชั้นบางเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในท่อแนวตั้ง
- มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

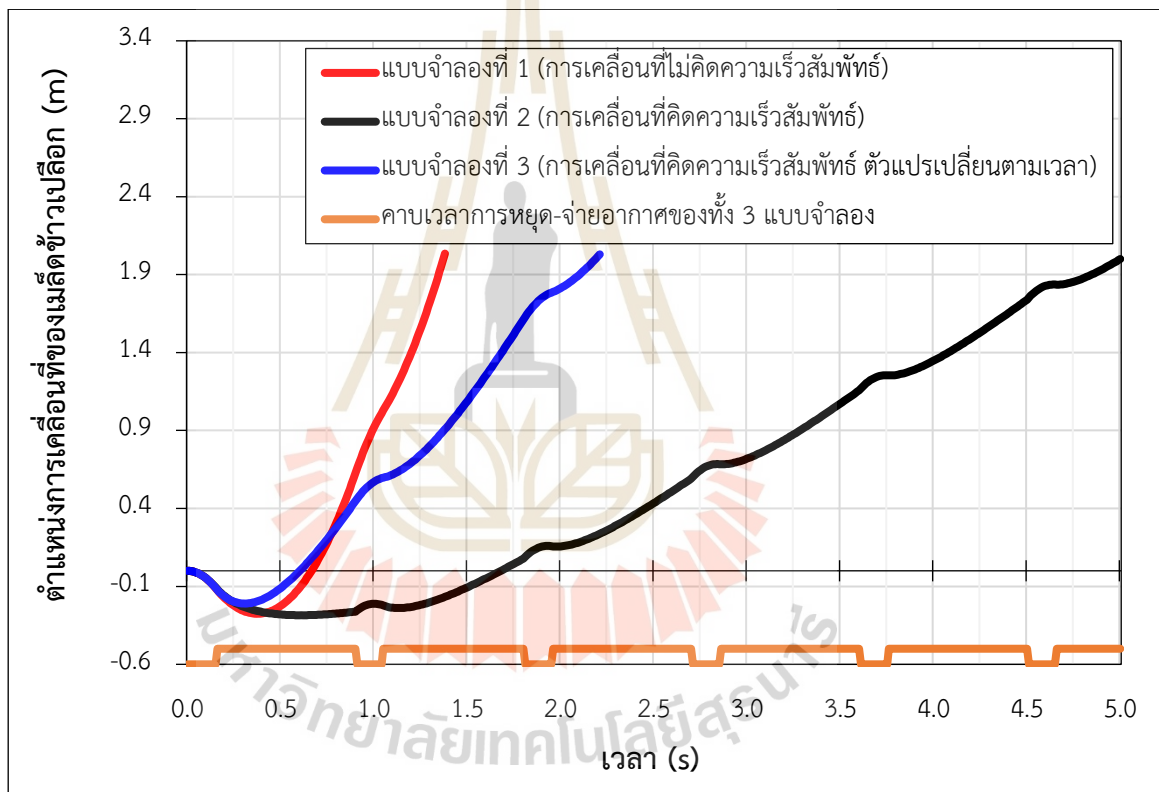
6.1 ผลการศึกษาการหาคำตอบโดยวิธีเชิงวิเคราะห์รูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบขนานในหอบแห้งแนวตั้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ด้วยกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน

จากการศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบลักษณะการไหลของอากาศที่มีการไหลแบบเป็นช่วง (Pulse flow) โดยศึกษาด้วยการหาคำตอบโดยวิธีเชิงวิเคราะห์ 3 แบบจำลองที่สร้างขึ้น ทำให้ได้ข้ออภิปรายเกี่ยวกับทั้งสามแบบจำลอง โดยแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อหลักดังนี้

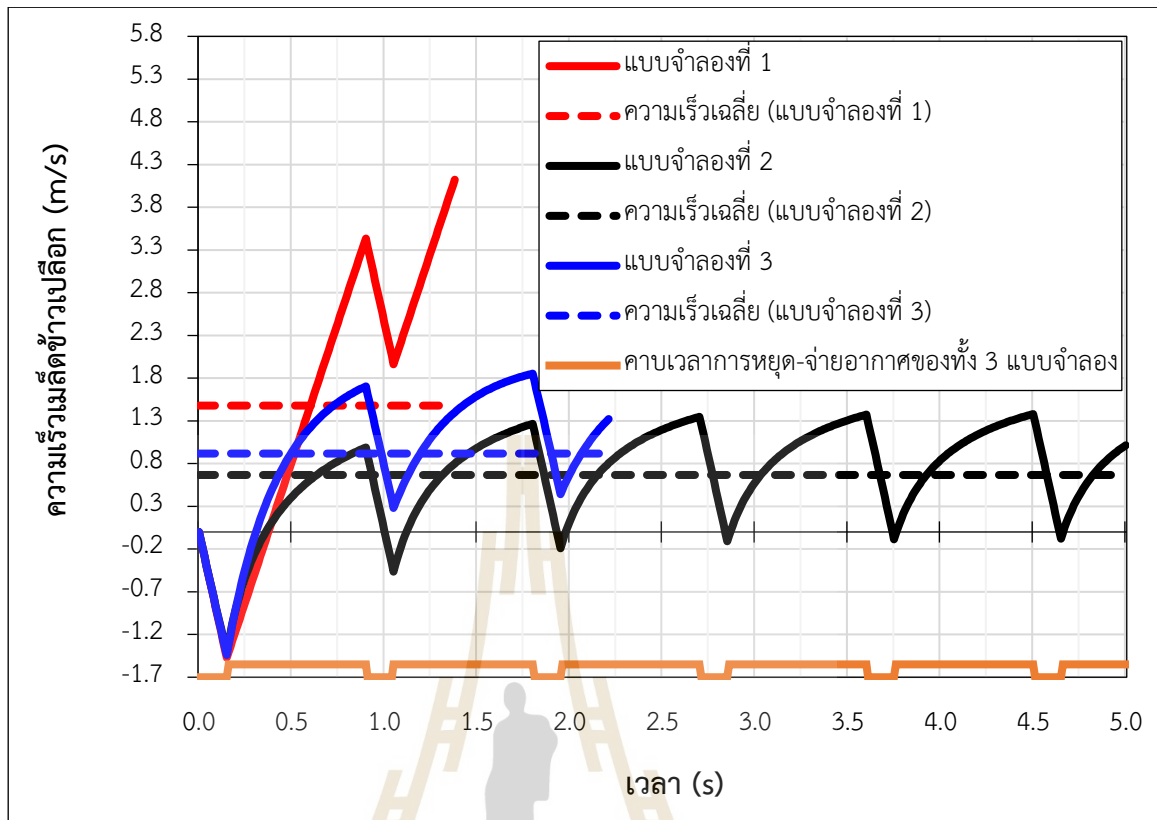
6.1.1 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ และความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือก

เมื่อเมล็ดข้าวเปลือกเคลื่อนที่ภายใต้การจ่ายอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ผลจากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทั้งสามแสดงให้เห็นว่า ในช่วงที่หยุดจ่ายอากาศเมล็ดข้าวจะเคลื่อนที่ตกจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำ และในช่วงที่มีการจ่ายอากาศเมล็ดข้าวก็จะได้รับแรงปะทะจากอากาศและลอยกลับขึ้นด้านบน พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกจะเป็นเช่นนี้ไปจนกระทั่งสิ้นสุดความยาวท่อ และมีลักษณะไปในทิศทางเดียวกันทั้งสามแบบจำลอง แสดงดังรูปที่ 6.1 และในขณะเดียวกันนั้นเมื่อทำการพิจารณาถึงความเร็วของเมล็ดขณะอยู่ในท่ออบแห้งพบว่า ในช่วงที่หยุดจ่ายอากาศความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือกจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยพบว่าเส้นกราฟในช่วงดังกล่าวมีความลาดเอียงเป็นเส้นตรง และมีลักษณะไปในทิศทางเดียวกันทั้งสามแบบจำลอง และในช่วงที่มีการจ่ายอากาศความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือกจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงแบบลาดเอียงในแบบจำลองที่ 1 สำหรับแบบจำลองที่ 2 และ 3 ความเร็วจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงแบบลาดเอียงในช่วงต้นและค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ

ในตอนปลาย โดยลักษณะเส้นกราฟในช่วงนั้นจะมีความโค้งในตอนปลาย พฤติกรรมของกราฟในลักษณะดังกล่าวของแบบจำลองที่ 2 และ 3 เป็นผลมาจากค่าแรงต้านอากาศที่ถูกคำนวณในสมการความเร่งของเมล็ดข้าวเปลือกในช่วงจ่ายอากาศ (5.19) และ (5.25) ซึ่งมีส่วนของความเร็วอากาศที่ใช้ในการคำนวณจะถูกคำนวณเป็นกำลังสองสัมบูรณ์ของค่าความแตกต่างระหว่างความเร็วอากาศที่จ่ายเข้าไปในหอบแห้งและความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือกที่ตกลงมา แสดงดังรูปที่ 6.2 โดยค่าเฉลี่ยของความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือกในแบบจำลองที่ 1 2 และ 3 มีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.48 0.67 และ 0.92 m/s ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นไปตามรูปแบบของความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือกตลอดช่วงของการคำนวณในแต่ละแบบจำลอง



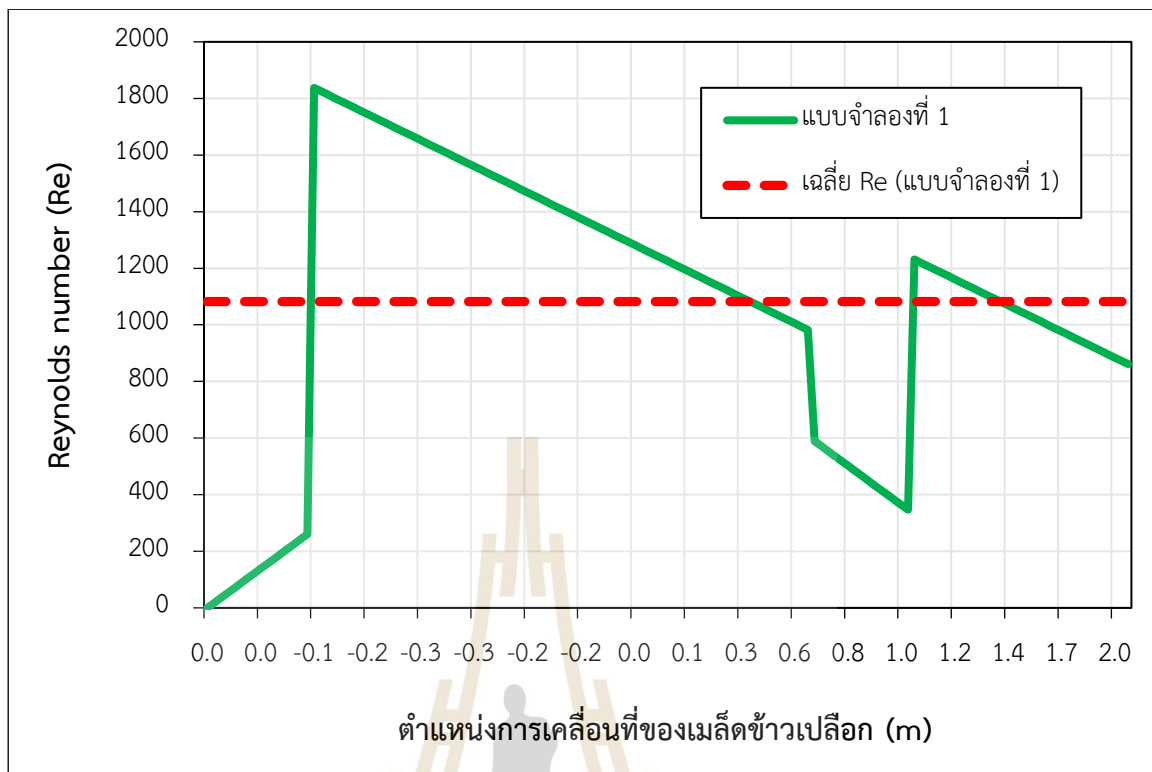
รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวและเวลา ของทั้ง 3 แบบจำลอง



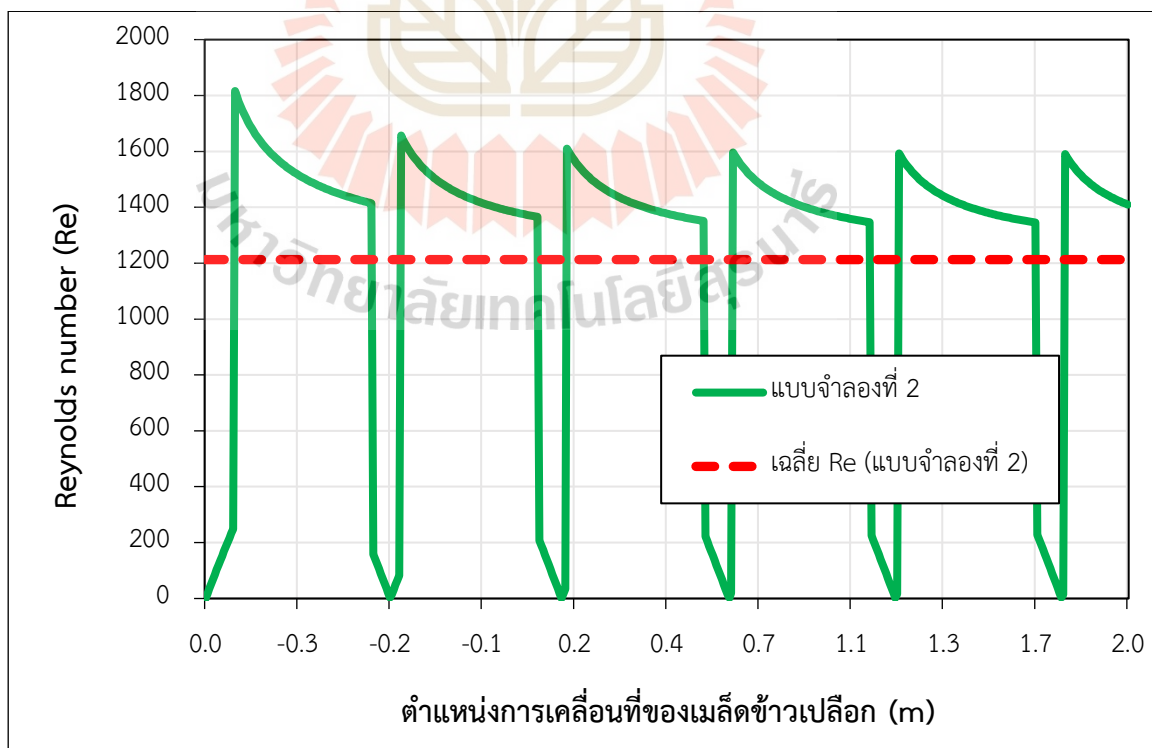
รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของเม็ล็ดข้าวและเวลา ของทั้ง 3 แบบจำลอง

6.1.2 เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number) และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเม็ล็ดข้าวเปลือก

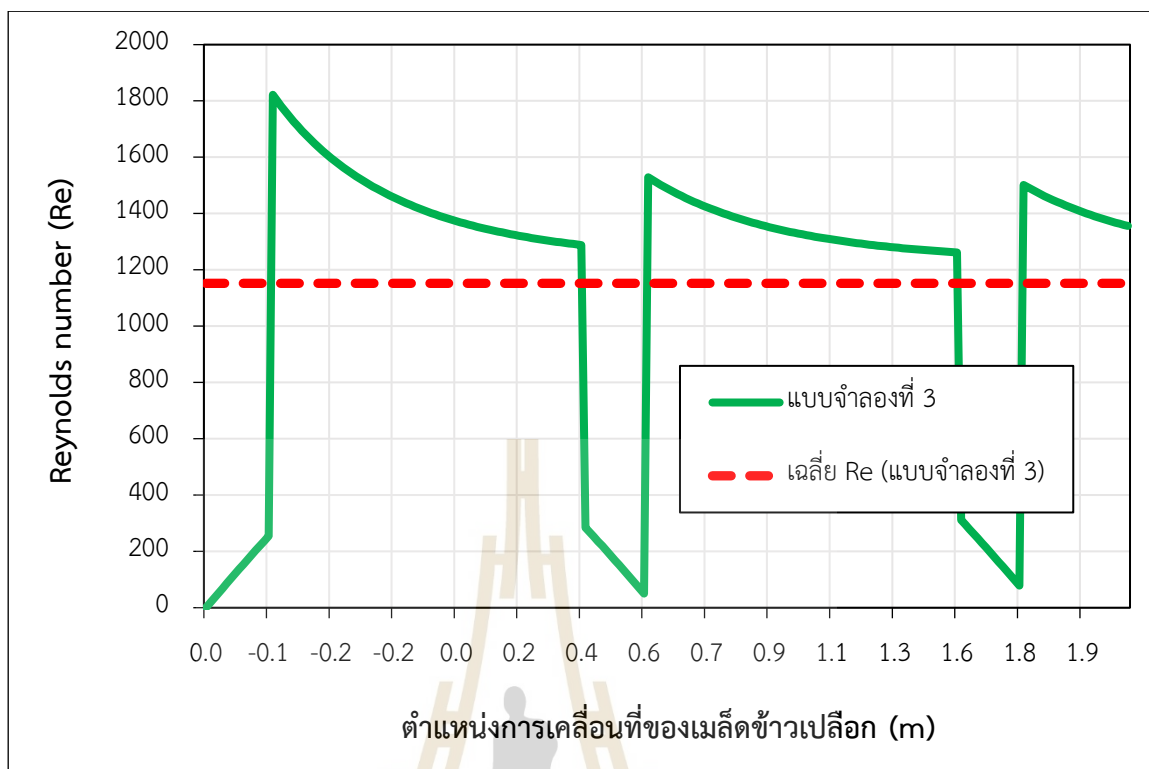
ผลการศึกษาพบว่าค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์แปรผันไปตามตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเม็ล็ดข้าวเปลือก โดยเมื่อเม็ล็ดข้าวเคลื่อนที่ตกลงจากตำแหน่งหยุดนิ่ง จากบน - ลงล่าง ซึ่งเป็นช่วงหยุดจ่ายอากาศเรย์โนลด์นัมเบอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นทีละน้อย เนื่องจากความเร็วเพิ่มขึ้นตามความเร่งโน้มถ่วงของโลก เมื่อถึงเวลาที่กำหนดจะทำการจ่ายอากาศให้ไหลสวนทางกับทิศทางของเม็ล็ดข้าว ส่งผลเม็ล็ดข้าวเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่โดยลอยกลับขึ้นสู่ด้านบน ในช่วงเวลานั้นความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างเม็ล็ดข้าวและอากาศจะสูงมากส่งผลให้เรย์โนลด์นัมเบอร์พุ่งสูงขึ้นตาม และหลังจากนั้นเรย์โนลด์นัมเบอร์จะค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ จนกระทั่งถึงช่วงที่หยุดจ่ายอากาศอีกรอบ เรย์โนลด์นัมเบอร์จึงจะลดลงอย่างรวดเร็ว พฤติกรรมของเรย์โนลด์นัมเบอร์จะเป็นแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งเม็ล็ดข้าวเคลื่อนที่ออกจากท่ออบแห้ง และมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันในทั้ง 3 แบบจำลอง แสดงดังรูปที่ 6.3 6.4 และ 6.5 โดยค่าเฉลี่ยของเรย์โนลด์นัมเบอร์ในแบบจำลองที่ 1 2 และ 3 มีค่าอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน เฉลี่ยประมาณ 1,082 1,213 และ 1,152 ตามลำดับ อาจแตกต่างกันเล็กน้อยเป็นไปตามรูปแบบของเรย์โนลด์นัมเบอร์ในแต่ละแบบจำลอง



รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าว ของแบบจำลองที่ 1



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าว ของแบบจำลองที่ 2

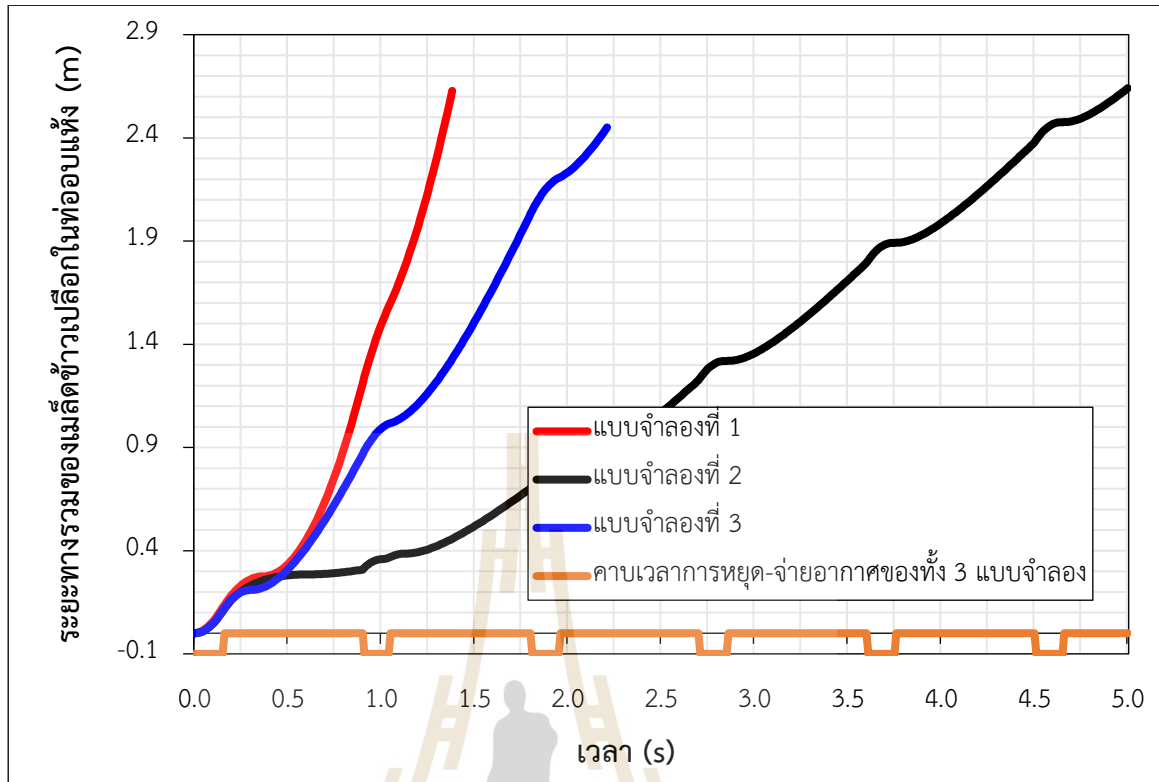


รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าว ของแบบจำลองที่ 3

เมื่อทำการพิจารณาถึงการลดลงของค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ในช่วงที่มีการจ่ายอากาศเข้า หอบแห้งนั้นจะเห็นได้ว่าแบบจำลองที่ 1 มีลักษณะการลดลงของกราฟเป็นเส้นตรงแบบลาดเอียง ในขณะที่แบบจำลองที่ 2 และ 3 มีลักษณะการลดลงของกราฟเป็นเส้นโค้งหงายแบบลาดเอียง พฤติกรรมของกราฟในลักษณะดังกล่าวนี้เป็นผลมาจากความเร็วที่ใช้ในแบบจำลองที่ 2 และ 3 เป็นความเร็วสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างเมล็ดข้าวเปลือกกับอากาศอบแห้ง ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการใช้ความเร็วสัมพัทธ์สำหรับการวิเคราะห์เป็นสิ่งที่สมจริงตามลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุในทางฟิสิกส์ (ต่างจากแบบจำลองที่ 1 ที่ไม่ได้คิดเรื่องความเร็วสัมพัทธ์) อีกทั้งค่าความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือกในช่วงจ่ายอากาศที่ถูกคำนวณตามสมการที่ (5.18) และ (5.24) จะมีเทอมของความเร่งตามสมการ (5.19) และ (5.25) ที่แตกต่างไปจากแบบจำลองที่ 1 อันมีส่วนของความเร็วอากาศที่ใช้ในการคำนวณตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.1.1

6.1.3 ระยะทางรวมของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้ง เมื่อพิจารณาตามเวลา

จากการศึกษาพบว่าเมล็ดข้าวจะเคลื่อนที่ได้ระยะทางที่มากกว่าความยาวหอบแห้ง เนื่องจากการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวได้รับอิทธิพลมาจากรูปแบบการไหลของอากาศในลักษณะ ขึ้น - ลง ตลอดช่วงเวลาของการอบแห้ง โดยพิจารณาที่ความยาวท่อ 2 m แบบจำลองที่ 1 2 และ 3 ใช้เวลาในการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวประมาณ 1.3 5.0 และ 2.2 s ได้ระยะทางรวม 2.6 2.7 และ 2.5 m ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางรวมของเมล็ดข้าวในท่ออบแห้งและเวลา ของทั้ง 3 แบบจำลอง

สรุปผล

จากการศึกษาผลการจำลองการเคลื่อนที่เชิงตัวเลขของเมล็ดข้าวเปลือกทั้ง 3 แบบจำลอง พบจำนวนการเคลื่อนที่แบบ ขึ้น - ลง ตลอดแนวความยาวท่อ 2 m ในแบบจำลองที่ 1 2 และ 3 เท่ากับ 4 12 และ 6 ครั้ง ตามลำดับ โดยตำแหน่งที่เมล็ดข้าวเปลือกเคลื่อนที่ลงต่ำสุดจะเกิดขึ้นในช่วงต้นของการคำนวณทั้งสามแบบจำลอง แบบจำลองที่ 1 2 และ 3 ค่าแนวค่าตำแหน่งต่ำสุดได้ -0.27 m -0.28 m และ -0.21 m ตามลำดับ ค่าความเร็วมากที่สุดของการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในแบบจำลองที่ 1 2 และ 3 ค่าแนวค่าได้ 4.12 1.37 และ 1.85 m/s ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือกในแบบจำลองที่ 1 2 และ 3 มีค่าประมาณ 1.48 0.67 และ 0.92 m/s ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์แบบจำลองทั้งสามให้ค่ามากที่สุดจากการคำนวณที่ใกล้เคียงกัน แบบจำลองที่ 1 2 และ 3 ค่าแนวค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ได้ 1,837 1,816 และ 1,821 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าเฉลี่ยเรย์โนลด์นัมเบอร์ในแบบจำลองที่ 1 2 และ 3 มีค่าใกล้เคียงกันเช่นกัน เฉลี่ยประมาณ 1,082 1,213 และ 1,152 ตามลำดับ สำหรับระยะทางรวมของการเคลื่อนที่เมล็ดข้าวพบว่า แบบจำลองที่ 2 เคลื่อนที่ได้ระยะทางรวมมากที่สุดคือ 2.7 m ในเวลา 5.0 s และ แบบจำลองที่ 1 เคลื่อนที่ได้ระยะทางรวม 2.6 m ในเวลา 1.3 s และสุดท้ายคือแบบจำลองที่ 3 เคลื่อนที่ได้ระยะทางรวม 2.5 m ในเวลา 2.2 s เมื่อพิจารณาผลการคำนวณตามพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากทั้งสามแบบจำลองแล้ว ผู้วิจัยมีความเห็นว่าแบบจำลองที่ 3 มีความ

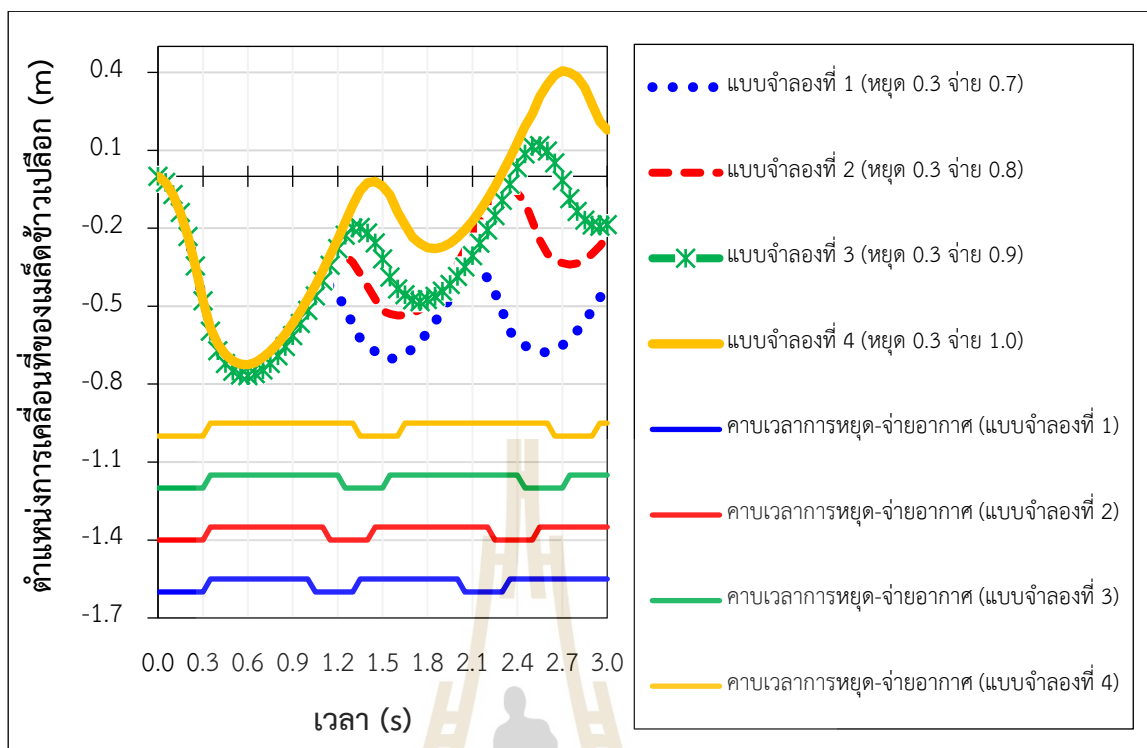
ใกล้เคียงกับการเคลื่อนที่จริงในระบบมากที่สุด เนื่องจากแบบจำลองที่ 3 ได้พยายามรวบรวมตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ไว้มากที่สุด อย่างไรก็ตามจำเป็นจะต้องวิเคราะห์ผลการเคลื่อนที่จริงของเมล็ดข้าวเปลือกจากการทดสอบในชุดทดสอบต้นแบบ ร่วมกับการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยโปรแกรม DEM ร่วมด้วย

6.2 ผลการศึกษาการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งแบบลมร้อนด้วยวิธีการจำลองด้วย CFD - DEM เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow)

จากการศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งแบบลมร้อนด้วยวิธีการจำลองด้วย CFD - DEM ทำให้ได้ข้อสรุปเกี่ยวกับการจำลอง โดยแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อหลักดังนี้

6.2.1 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือก

จากผลการจำลองโดยใช้วิธีวิเคราะห์การไหลของอนุภาคคำนวณร่วมกับพลศาสตร์ของไหล (CFD - DEM Coupling) เมื่อทำการศึกษาพฤติกรรมภายในหอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกด้วยการจ่ายอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) จำลองด้วยการปรับเปลี่ยนรูปแบบการไหลของอากาศตามช่วงเวลาของการจ่ายและหยุดจ่ายอากาศในหอบแห้ง (ดังแสดงในตารางที่ 5.2) ทั้ง 4 แบบจำลองแสดงให้เห็นว่าในช่วงที่หยุดจ่ายอากาศเมล็ดข้าวเปลือกจะเคลื่อนที่จากที่สูงลงสู่ที่ต่ำ โดยแบบจำลองที่ 1 2 3 และ 4 ให้ค่าตำแหน่งต่ำสุดของการเคลื่อนที่ที่ใกล้เคียงกัน คือ $-0.76\text{ m} - 0.74\text{ m} - 0.77\text{ m}$ และ -0.73 m ตามลำดับ และในช่วงที่มีการจ่ายอากาศเมล็ดข้าวก็จะได้รับแรงปะทะจากอากาศและลอยกลับขึ้นด้านบน พฤติกรรมเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกเฉลี่ยจะเกิดขึ้นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งสิ้นสุดเวลา (Simulation duration) ที่กำหนด และมีลักษณะไปในทิศทางเดียวกันทั้ง 4 แบบจำลอง แสดงดังรูปที่ 6.7 ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวมีความสอดคล้องกันกับผลการศึกษาการคำนวณเชิงตัวเลขในหัวข้อที่ 6.1.1 (รูปที่ 6.1) แต่อาจแตกต่างกันในแง่ของเวลาและตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้ง อันเนื่องมาจากการกำหนดช่วงจ่ายและหยุดจ่ายอากาศที่ต่างกัน อีกทั้งความเร็วอากาศอบแห้งที่ใช้จำลองก็แตกต่างกัน



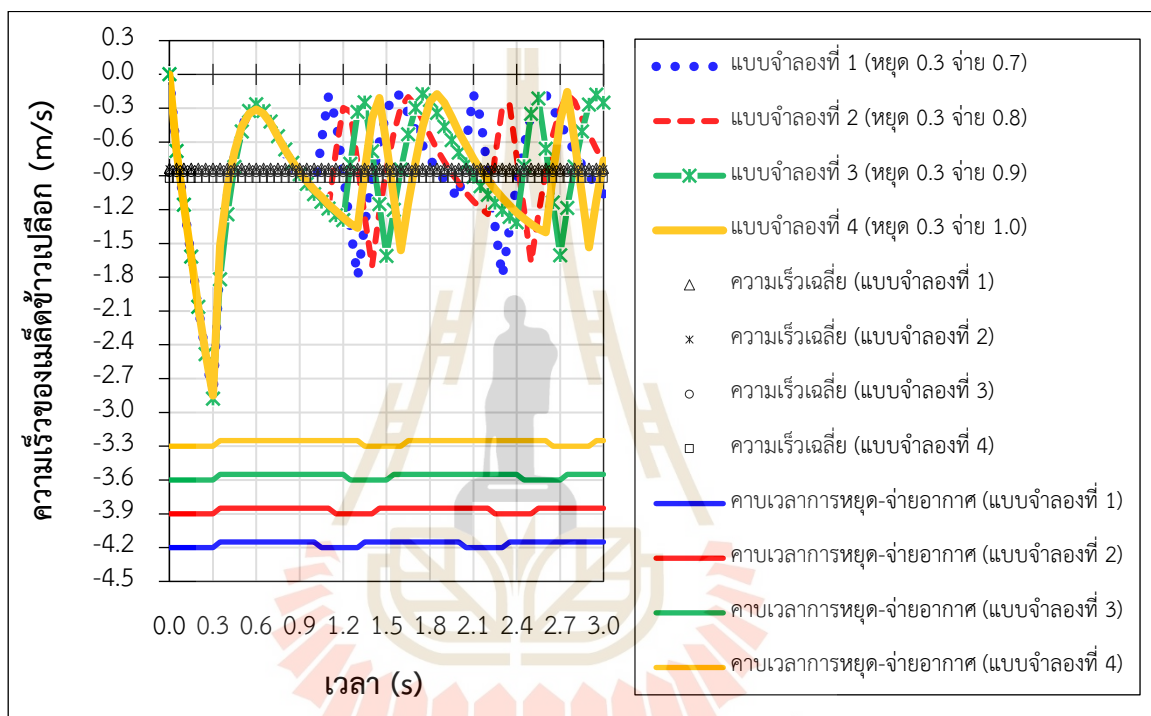
รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเม็ล็ดข้าวเปลือกและเวลา ของทั้ง 4 แบบจำลอง

เมื่อพิจารณาถึงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเม็ล็ดข้าวเปลือกตามแนวท่อเทียบกับเวลา จากทั้ง 4 แบบจำลองจะพบว่าตั้งแต่ช่วงเวลาที่ 1.0 s เป็นต้นไป ตำแหน่งการเคลื่อนตัวของเม็ล็ดข้าวเปลือกจะเริ่มขยับได้แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการปรับช่วงเวลาของการจ่ายอากาศในแต่ละแบบจำลองให้ยาวนานยิ่งขึ้น โดยในแบบจำลองที่ 4 จะมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งที่สูงกว่าแบบจำลองอื่นในทุก ๆ ช่วงเวลา ซึ่งนั่นอาจหมายความว่าเม็ล็ดข้าวเปลือกที่กำลังเคลื่อนที่ในหอบแห้งด้วยแบบจำลองสภาวะการไหลที่ 4 จะมีการเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนและหลุดออกจากหอบแห้งได้เร็วกว่าแบบจำลองอื่น ๆ หากพิจารณาในแง่ที่ต้องการให้เม็ล็ดข้าวเปลือกอยู่ในหอบแห้งให้นานขึ้นเพื่อที่เม็ล็ดข้าวเปลือกจะได้มีเวลาในการสัมผัสกับลมร้อน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนและความชื้นและส่งผลทำให้เม็ล็ดข้าวเปลือกแห้งได้เร็วขึ้นนั้น สภาวะการไหลของแบบจำลองที่ 1 จะให้ผลในทางที่ดีกว่าแบบจำลองอื่น ๆ เนื่องจากเม็ล็ดข้าวเปลือกอยู่ในหอบแห้งได้นานก่อนที่จะหลุดพ้นออกจากหอบแห้ง อย่างไรก็ตามเม็ล็ดข้าวเปลือกจะแห้งได้เร็วหรือช้าอาจมีปัจจัยอื่นนอกเหนือจากที่กล่าวมาที่ส่งผลร่วมด้วย

6.2.2 ความเร็วของเม็ล็ดข้าวเปลือก

ความเร็วเฉลี่ยของเม็ล็ดข้าวเปลือกขณะอยู่ในหอบแห้งนี้มีผลต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและความชื้นระหว่างเม็ล็ดข้าวเปลือกและอากาศอบแห้ง จากทั้ง 4 แบบจำลองพบว่าในช่วงที่หยุดจ่ายอากาศความเร็วของเม็ล็ดข้าวเปลือกจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยพบว่ามีความเร็ว

เฉลี่ยมากที่สุดใกล้เคียงกันที่ 2.85 m/s (จาก 0 m/s ถึง -2.85 m/s) และเส้นกราฟในช่วงดังกล่าวมีความลาดเอียงเป็นเส้นตรงมีลักษณะไปในทิศทางเดียวกันทั้ง 4 แบบจำลอง ส่วนช่วงที่มีการจ่ายอากาศความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือกจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงแบบลาดเอียงในช่วงต้นและค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในตอนปลาย โดยลักษณะเส้นกราฟในช่วงนั้นจะมีความโค้งในตอนปลาย พบค่าเฉลี่ยมากที่สุดของความเร็วเมล็ดข้าวเปลือกในช่วงจ่ายอากาศที่ใกล้เคียงกันทั้ง 4 แบบจำลอง มีค่า 2.54 m/s (จาก -2.85 m/s ถึง -0.31 m/s) แสดงดังรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของเมล็ดข้าวและเวลา ของทั้ง 4 แบบจำลอง

พฤติกรรมของเส้นกราฟ (รูปที่ 6.8) มีความสอดคล้องกันกับผลการศึกษาคำนวณเชิงตัวเลขในหัวข้อที่ 6.1.1 (รูปที่ 6.2 ในแบบจำลองที่ 2 และ 3) แต่อาจแตกต่างกันในแง่ของความเร็วเมล็ดข้าวเปลือกและช่วงเวลา อันเนื่องมาจากความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือกที่ใช้ในแบบจำลองเป็นความเร็วเฉลี่ยของเมล็ดทั้งหมดที่ใช้ในการจำลอง (100 เมล็ด) ในขณะที่การศึกษาคำนวณเชิงตัวเลขในหัวข้อที่ 6.1.1 เป็นการคำนวณจากเมล็ดข้าวเปลือกเพียงเมล็ดเดียว อีกทั้งเมล็ดข้าวเปลือกที่ใช้ในการจำลองจากโปรแกรม DEM นั้น ได้จากการสร้างเมล็ดข้าวเปลือกโดยการนำทรงกลมมาต่อกันให้ได้รูปทรงที่ใกล้เคียงกับเมล็ดข้าวเปลือกเพื่อการคำนวณ หากสามารถนำทรงกลมมาต่อกันได้มากเท่าไร (เพื่อให้ได้รูปทรงเสมือนจริง) ผลการคำนวณก็จะเสมือนจริงมากยิ่งขึ้น แต่ในงานวิจัยนี้ใช้ทรงกลมสำหรับการจำลองเมล็ดข้าวเปลือกเพียง 9 ทรงกลม (ข้อจำกัดทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ)

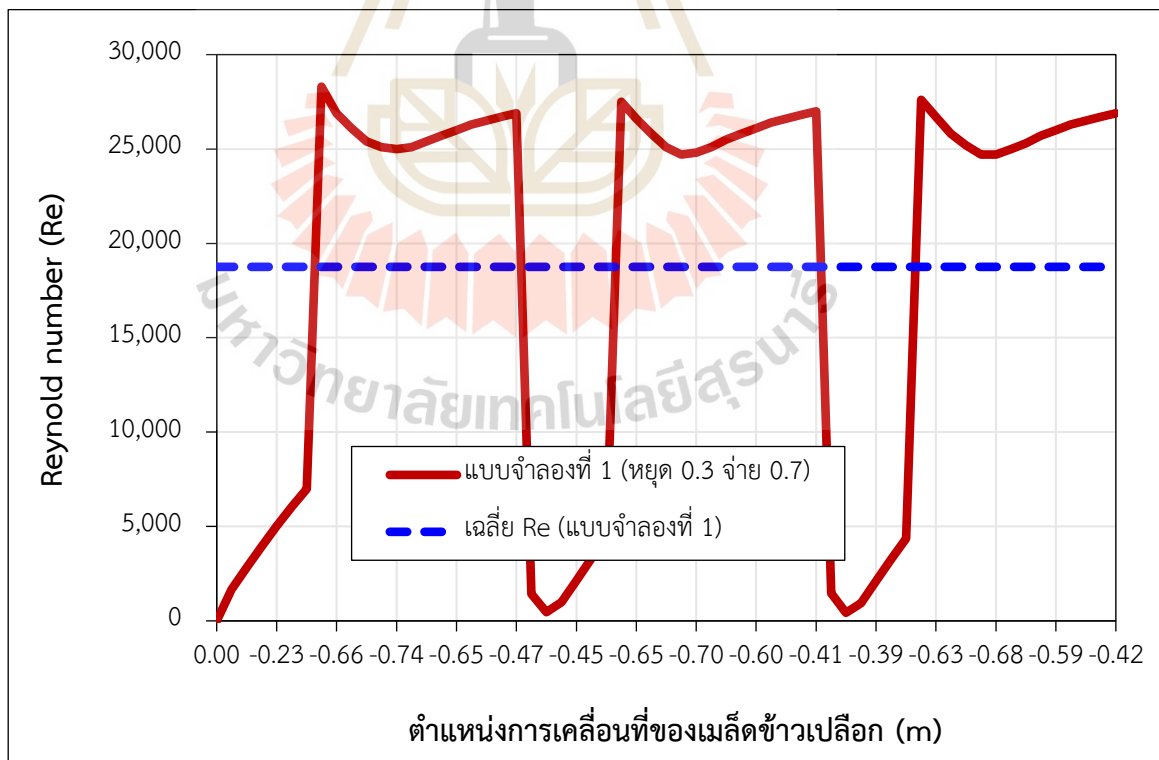
จึงอาจจะยังให้ผลที่ยังไม่แม่นยำพอ โดยค่าเฉลี่ยของความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือกในแบบจำลองที่ 1 2 3 และ 4 มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกันประมาณ -0.83 -0.84 -0.87 และ -0.92 m/s ตามลำดับ (เครื่องหมายลบหน้าความเร็วแสดงถึงความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือกช่วงที่ร่วงหล่นตามแนวหอบแห้งที่สามารถเอาชนะความเร็วอากาศอบแห้งที่ไหลเข้าไปในหอบแห้งได้) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาคำนวณเชิงตัวเลข (หัวข้อที่ 6.1.1 รูปที่ 6.2 ในแบบจำลองที่ 3) จะเห็นได้ว่าค่าความเร็วเมล็ดข้าวเปลือกมีค่าที่ใกล้เคียงกันกับแบบจำลองที่คำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ทั้ง 4 แบบจำลองเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องด้วยแบบจำลองที่ 3 (จากหัวข้อที่ 6.1) ในการศึกษาการคำนวณเชิงตัวเลข รูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งถือว่ามีความใกล้เคียงกับการเคลื่อนที่จริงในระบบ เพราะสามารถรวบรวมตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ไว้มากที่สุดในแบบจำลองนั้น

6.2.3 เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number) และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือก

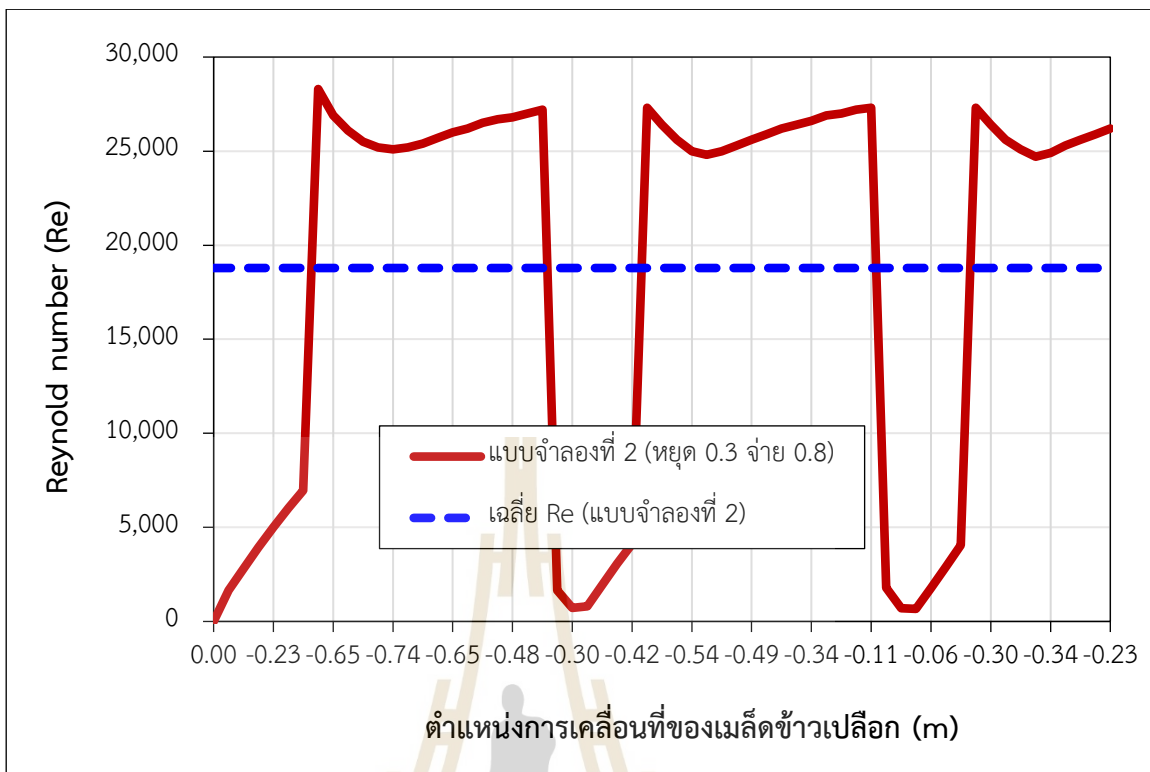
จากการศึกษาพบว่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าเป็นไปตามตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือก โดยเมื่อเมล็ดข้าวเคลื่อนที่จากตำแหน่งหยุดนิ่ง จากบน - ลงล่าง ซึ่งเป็นช่วงหยุดจ่ายอากาศ เรย์โนลด์นัมเบอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นทีละน้อย เนื่องจากความเร็วเพิ่มขึ้นตามความเร่งในแนวแกนโลก เมื่อถึงเวลาที่กำหนดจะทำการจ่ายอากาศให้วิ่งสวนทางกับทิศทางของเมล็ดข้าว ส่งผลเมล็ดข้าวจะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่โดยลอยกลับขึ้นที่ด้านบน ในช่วงเวลานั้นความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างเมล็ดข้าวและอากาศจะสูงมากส่งผลให้เรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วตาม และหลังจากนั้นเรย์โนลด์นัมเบอร์จะค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ จนกระทั่งถึงช่วงที่หยุดจ่ายอากาศอีกรอบ เรย์โนลด์นัมเบอร์จึงจะลดลงอย่างรวดเร็ว พฤติกรรมของเรย์โนลด์นัมเบอร์จะเป็นแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งเมล็ดข้าวเคลื่อนที่ออกจากหอบแห้ง และมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันในทั้ง 4 แบบจำลอง แสดงดังในรูปที่ 6.9 6.10 6.11 และ 6.12 ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวมีความสอดคล้องกันกับผลการศึกษาคำนวณเชิงตัวเลขในหัวข้อที่ 6.1.2 (รูปที่ 6.4 และ 6.5 ในแบบจำลองที่ 2 และ 3) แตกต่างกันเพียงในช่วงปลายของกราฟในช่วงที่มีการจ่ายอากาศอบแห้งเส้นกราฟจะลาดเอียงขึ้นอีกเล็กน้อยในตอนปลาย แล้วจึงจะตกลงอีกครั้งเมื่อถึงช่วงหยุดจ่ายอากาศ ความแตกต่างระหว่างผลจากจำลองด้วยคอมพิวเตอร์และการคำนวณเชิงตัวเลขนี้ (หัวข้อที่ 6.1.2) อาจเป็นไปตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา (หัวข้อ 6.2.2) ในเรื่องของจำนวนเมล็ดข้าวเปลือกที่ใช้ และการสร้างเมล็ดข้าวเปลือกในแบบจำลองด้วยเช่นกัน ค่าเฉลี่ยของเรย์โนลด์นัมเบอร์ในแบบจำลองที่ 1 2 3 และ 4 มีค่าอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน เฉลี่ยประมาณ 18,754 18,786 18,854 และ 18,985 ตามลำดับ อาจแตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งเป็นไปตามรูปแบบของเรย์โนลด์นัมเบอร์ในแต่ละแบบจำลอง ในขณะที่ค่าเฉลี่ยของเรย์โนลด์นัมเบอร์ในแบบจำลองที่ 5 กรณีควบคุม (รูปที่ 6.13) มีค่าเพียง 2,926 ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ต่ำในแบบจำลองที่ 5 นี้เนื่องจากการจำลองนี้ไม่ได้ปรับให้มีการไหลของอากาศอบแห้งให้เป็นช่วง (Pulse flow) ดังนั้นเมล็ดข้าวเปลือกจึงเคลื่อนที่ขึ้นแนวดิ่งตลอดตามทิศทางไหลของอากาศที่ไหลเข้าไปในหอบแห้ง ไม่มีช่วงจังหวะที่เมล็ดข้าวเปลือกจะไหลตกลงด้านล่าง

ของหอบแห้งแล้วสวนทางกับทิศทางลม จึงทำให้ความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือกขณะเคลื่อนที่ไม่สูง (เนื่องจากไม่ใช่ความเร็วสัมพัทธ์ของเมล็ดข้าวเปลือกที่สวนทางกันกับทิศทางลม แต่เป็นความเร็วสัมพัทธ์ในทิศทางเดียวกันกับลม) ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ค่าเฉลี่ยของเรย์โนลด์นัมเบอร์ในแบบจำลองที่ 5 มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่ 1 2 3 และ 4

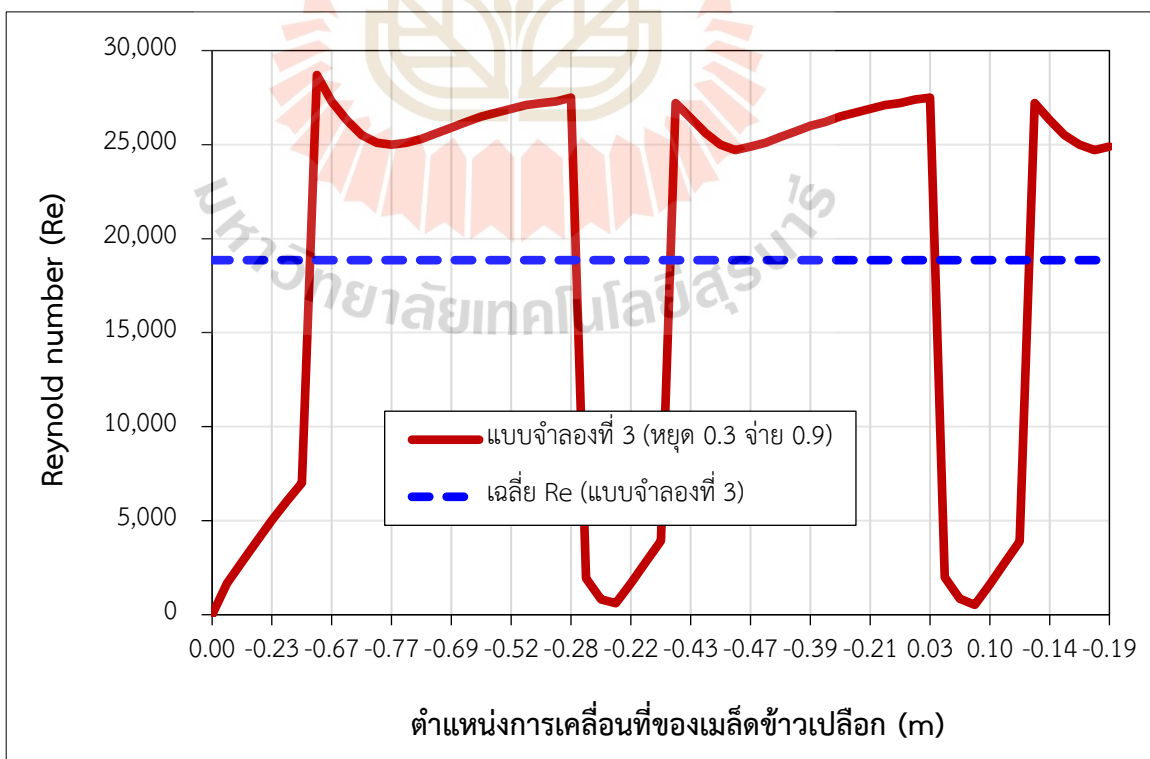
ผลของค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์มีค่าแตกต่างกับผลของค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ได้จากการศึกษาการคำนวณเชิงตัวเลขค่อนข้างมาก ทั้งนี้อาจเกิดการกำหนดช่วงจ่ายและหยุดจ่ายอากาศอบแห้งที่ต่างกัน ความเร็วอากาศอบแห้งที่ใช้จำลองแตกต่างกัน ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมา อีกทั้งจำนวนเมล็ดข้าวเปลือกที่ใช้แตกต่างกันซึ่งจำนวนเมล็ดมีผลทำให้รูปแบบการเคลื่อนที่แตกต่างกันไปด้วย กล่าวคือการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (100 เมล็ด) เคลื่อนที่ไม่เป็นแนวตั้งเหมือนการคำนวณเชิงตัวเลข (1 เมล็ด) เมล็ดข้าวเปลือกจำนวนมากที่ใช้จำลองในระหว่างการเคลื่อนที่นั้นอาจเกิดการปะทะกันในแนวด้านข้างทำให้เกิดกระเด็นออกจากกันในแนวรัศมีของหอบแห้ง และในขณะเดียวกันนั้นเองก็อาจเกิดการหมุนตัวของเมล็ดในระหว่างที่ปะทะกันอยู่ด้วย รวมถึงความเสมือนจริงในการสร้างเมล็ดข้าวเปลือกในแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ จึงทำให้ได้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่แตกต่างกัน



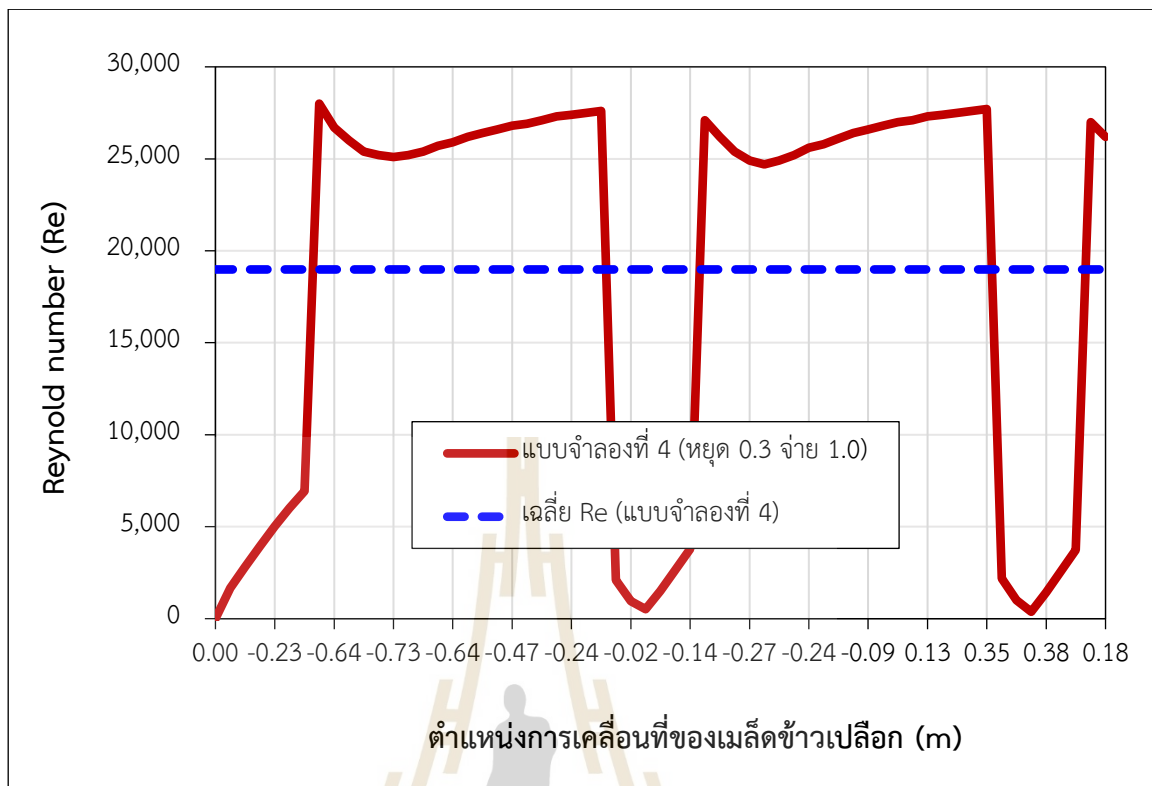
รูปที่ 6.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าว ของแบบจำลองที่ 1



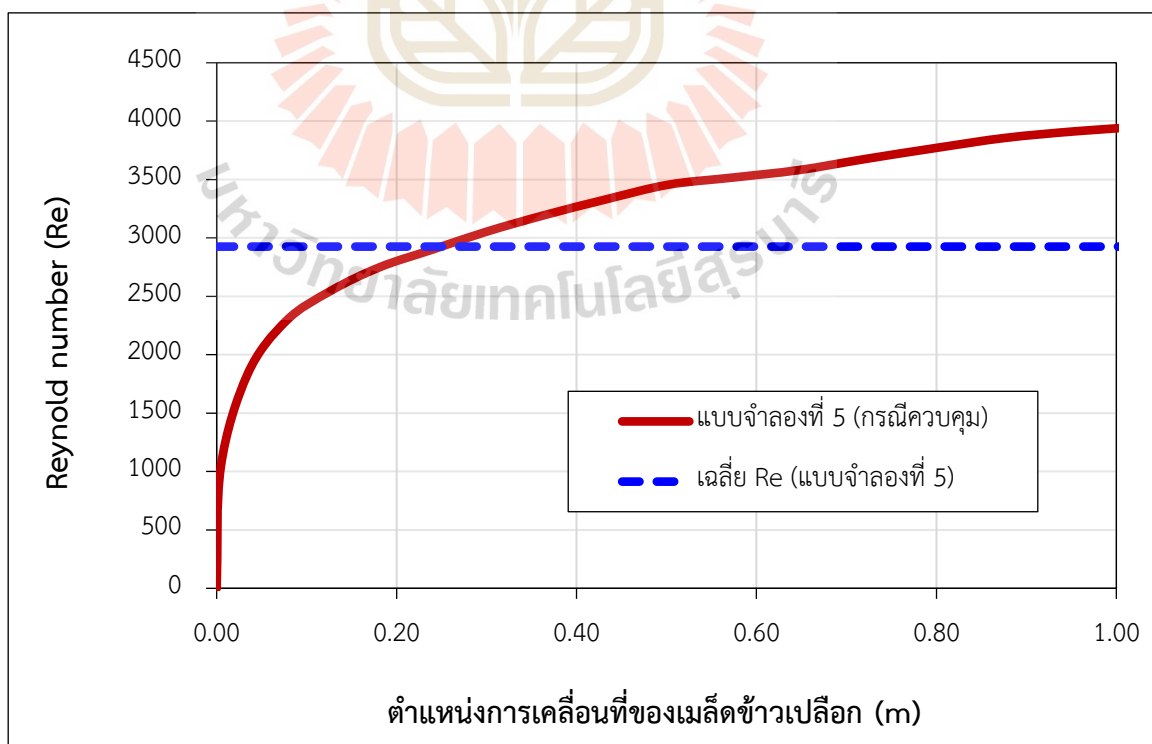
รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเม็ล็ดข้าว ของแบบจำลองที่ 2



รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเม็ล็ดข้าว ของแบบจำลองที่ 3



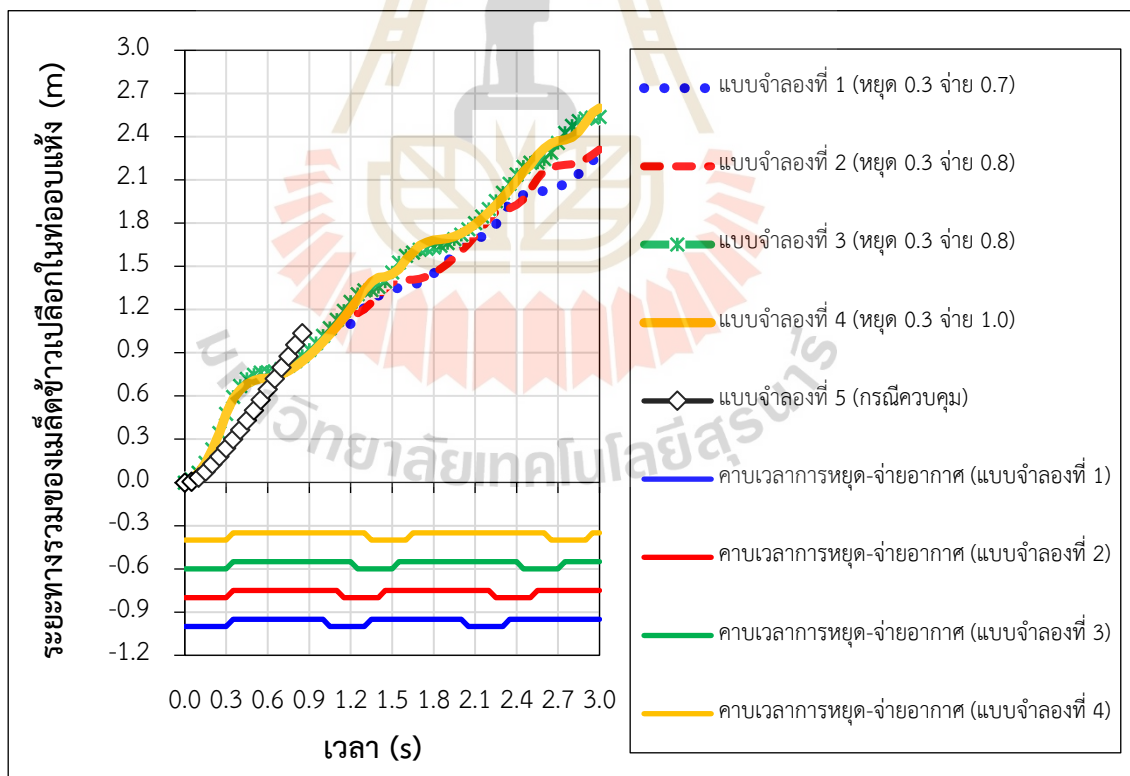
รูปที่ 6.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าว ของแบบจำลองที่ 4



รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าว ของแบบจำลองที่ 5

6.2.4 ระยะทางรวมของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้ง เมื่อพิจารณาตามเวลา

จากการจำลองพบว่าเมล็ดข้าวเปลือกจะเคลื่อนที่ได้ระยะทางที่มากกว่าความยาวหอบแห้งเนื่องจากการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวได้รับอิทธิพลมาจากรูปแบบการไหลของอากาศในลักษณะขึ้น - ลง ตลอดช่วงเวลาของการอบแห้ง โดยพิจารณาที่ความยาวท่อ 2 m แบบจำลองที่ 1 2 3 และ 4 เคลื่อนที่ได้ระยะทางรวม 2.28 2.31 2.54 และ 2.59 m ตามลำดับ ภายในเวลา 3 s (Simulation duration) ทุกแบบจำลอง ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบผลกับแบบจำลองที่ 5 (กรณีควบคุม) ไม่ได้ปรับการไหลของอากาศให้เป็นแบบช่วง (Pulse flow) เมล็ดข้าวเปลือกจะเคลื่อนที่หลุดพ้นออกนอกหอบแห้งภายในเวลาประมาณ 0.85 s ด้วยระยะทาง 1 m จากตำแหน่งที่ปล่อยเมล็ดข้าว แสดงดังรูปที่ 6.14 ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวมีความสอดคล้องกันกับผลการศึกษาคำนวณเชิงตัวเลขในหัวข้อที่ 6.1.3 ในส่วนของเวลาและระยะทางรวมของการเคลื่อนที่เมล็ดข้าวเปลือกจากการคำนวณเชิงตัวเลข และการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ที่ให้ค่าแตกต่างกันนั้น เนื่องจากการกำหนดช่วงจ่ายและหยุดจ่ายอากาศที่ต่างกัน ความเร็วอากาศอบแห้งที่ใช้ต่างกัน และยังเป็นผลเช่นเดียวกับคำอธิบายในหัวข้อที่ 6.2.2 ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วด้วยเช่นกัน



รูปที่ 6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางรวมของเมล็ดข้าวในหอบแห้งและเวลา ของทั้ง 4 แบบจำลอง เทียบกับแบบจำลองที่ไม่ได้ปรับการไหลของอากาศให้เป็นแบบช่วง

ดังจะเห็นได้จากข้อมูลและกราฟที่นำเสนอนี้ การที่เมล็ดข้าวสามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย เป็นช่วงแบบ ขึ้น - ลง จะส่งผลให้ได้ระยะทางรวมการเคลื่อนที่มากกว่าความยาวของหอบบแห้งหรือกล่าวได้ว่าข้าวเปลือกมีเวลาสัมผัสสตุกเคล้ากับอากาศอบแห้งได้นานกว่าการใช้อากาศอบแห้งแบบไม่ เป็นช่วง ซึ่งจะส่งผลดีต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนและความชื้นในขณะที่เมล็ดข้าวเปลือกเคลื่อนที่อยู่ภายใน หอบบแห้ง

สรุปผล

แบบจำลอง CFD - DEM ที่ถูกสร้างมาเพื่อศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือก ผ่านรูปแบบการไหลของอากาศแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ภายในหอบบแห้งนี้สามารถจำลอง ลักษณะพฤติกรรมเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกภายในหอบบแห้งได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังเป็น ประโยชน์ที่ช่วยให้สามารถคาดการณ์การปรับเปลี่ยนช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการจ่ายและหยุดจ่าย อากาศที่ทางเข้าหอบบแห้ง เพื่อให้เมล็ดข้าวเปลือกเกิดพฤติกรรมเคลื่อนที่แบบเป็นช่วง (Pulse flow) ได้ จากการศึกษาผลการจำลองการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกด้วยคอมพิวเตอร์ทั้ง 4 แบบจำลอง พบว่าตำแหน่งที่เมล็ดข้าวเปลือกเคลื่อนที่ลงต่ำสุดจะเกิดขึ้นในช่วงต้นของการจำลองทั้ง 4 แบบ โดยแบบจำลองที่ 1 2 3 และ 4 ให้ค่าตำแหน่งต่ำสุดของการเคลื่อนที่ที่ใกล้เคียงกัน คือ -0.76 m -0.74 m -0.77 m และ -0.73 m ตามลำดับ ระยะทางรวมของการเคลื่อนที่เมล็ดข้าวเปลือกตลอด ความยาวท่อ 2 m พบว่าแบบจำลองที่ 4 เคลื่อนที่ได้ระยะทางรวมมากที่สุดคือ 2.59 m และแบบจำลอง ที่ 1 เคลื่อนที่ได้ระยะทางรวมน้อยสุดที่ 2.28 m ในเวลา 3 s ค่าความเร็วมากที่สุดการเคลื่อนที่ของเมล็ด ข้าวเปลือกในช่วงจ่ายอากาศมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกันทั้ง 4 แบบจำลอง พบว่ามีค่า 2.54 m/s (จาก - 2.85 m/s ถึง -0.31 m/s) ส่วนช่วงหยุดจ่ายอากาศพบว่ามีค่าเฉลี่ยมากที่สุดใกล้เคียงกันที่ 2.85 m/s (จาก 0 m/s ถึง -2.85 m/s) ในขณะที่ค่าเฉลี่ยของความเร็วของเมล็ดข้าวเปลือกในแบบจำลอง ที่ 1 2 3 และ 4 มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกันประมาณ -0.83 -0.84 -0.87 และ -0.92 m/s ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาเรย์โนลด์นัมเบอร์แบบจำลองทั้ง 4 ให้ค่ามากที่สุดจากการจำลองที่ใกล้เคียงกัน โดย แบบจำลองที่ 1 2 3 และ 4 ให้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ 28,300 28,300 28,700 และ 28,000 ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยของเรย์โนลด์นัมเบอร์ในแบบจำลองที่ 1 2 3 และ 4 ก็มีค่าอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียง กันเช่นกัน เฉลี่ยประมาณ 18,754 18,786 18,854 และ 18,985 ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของความเร็ว ของเมล็ดข้าวเปลือกและค่าเฉลี่ยของเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ใกล้เคียงกันระหว่างแบบจำลองทั้ง 4 นี้ อาจ แสดงให้เห็นว่าการจำลองรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ไม่ได้ส่งผลให้ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Nusselt Number, Nu) ของอากาศอบแห้งสู่มูลเมล็ดข้าวเปลือกแตกต่างกันมากนัก ดังสมการ (2.10) เนื่องจากสัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะมีเทอมของเรย์โนลด์นัมเบอร์เป็น องค์ประกอบ และเรย์โนลด์นัมเบอร์เองก็มีความสัมพันธ์กับความเร็วการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าว หาก เมล็ดข้าวเปลือกมีความเร็วเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน ก็จะทำให้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ในแต่ละแบบจำลอง

(แบบจำลอง 1 2 3 และ 4) มีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Nusselt Number, Nu) ไม่แตกต่างกัน (แตกต่างกันน้อย) การถ่ายเทความร้อนออกจากเมล็ดข้าวเปลือกก็จะไม่แตกต่างกันมากเช่นกัน กล่าวคือหากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Nusselt Number, Nu) สูงก็จะสามารถพาความร้อนสู่เมล็ดข้าวเปลือกได้มากกว่าการถ่ายเทความร้อนออกจากเมล็ดก็เกิดขึ้นได้มากตาม ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าการสร้างรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) สามารถสร้างเรย์โนลด์นัมเบอร์สำหรับอากาศอบแห้งที่สูงได้ ซึ่งจะส่งผลดีต่อการอบแห้งเมื่อเทียบกับการจำลองด้วยที่ไม่ได้สร้างการไหลของอากาศอบแห้งให้เป็นแบบช่วง (แบบจำลองที่ 5) แต่อาจไม่ใช่อิทธิพลที่สำคัญต่อการอบแห้งเมื่อเทียบกับการอบแห้งภายใต้รูปแบบการไหลของอากาศแบบเดียวกัน (แบบจำลอง 1 2 3 และ 4) อย่างไรก็ตามในขณะที่เมล็ดข้าวเปลือกถูกอบแห้งภายในหอบแห้งนั้น พฤติกรรมเคลื่อนที่ในลักษณะดังกล่าวทางผู้วิจัยเชื่อว่าจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกได้เป็นอย่างดีอันเนื่องมาจากอิทธิพลของการหน่วงเวลาที่ให้เมล็ดพืชสัมผัสกับอากาศอบแห้งภายในหอบแห้ง อีกทั้งพฤติกรรมการเคลื่อนที่ในลักษณะดังกล่าวจะช่วยชะลอความเสียหายของเมล็ดข้าวในระหว่างกระบวนการอบแห้งได้ดีด้วยเช่นกัน เพื่อพิสูจน์ข้อเท็จจริงยังจำเป็นต้องเปรียบเทียบผลการจำลองนี้กับการทดสอบระบบอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการถึงพฤติกรรมการอบแห้งด้วยอากาศอบแห้งแบบไหลเป็นช่วงต่อไป

6.3 ผลการศึกษาการทดสอบอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกต้นแบบที่สร้างขึ้น

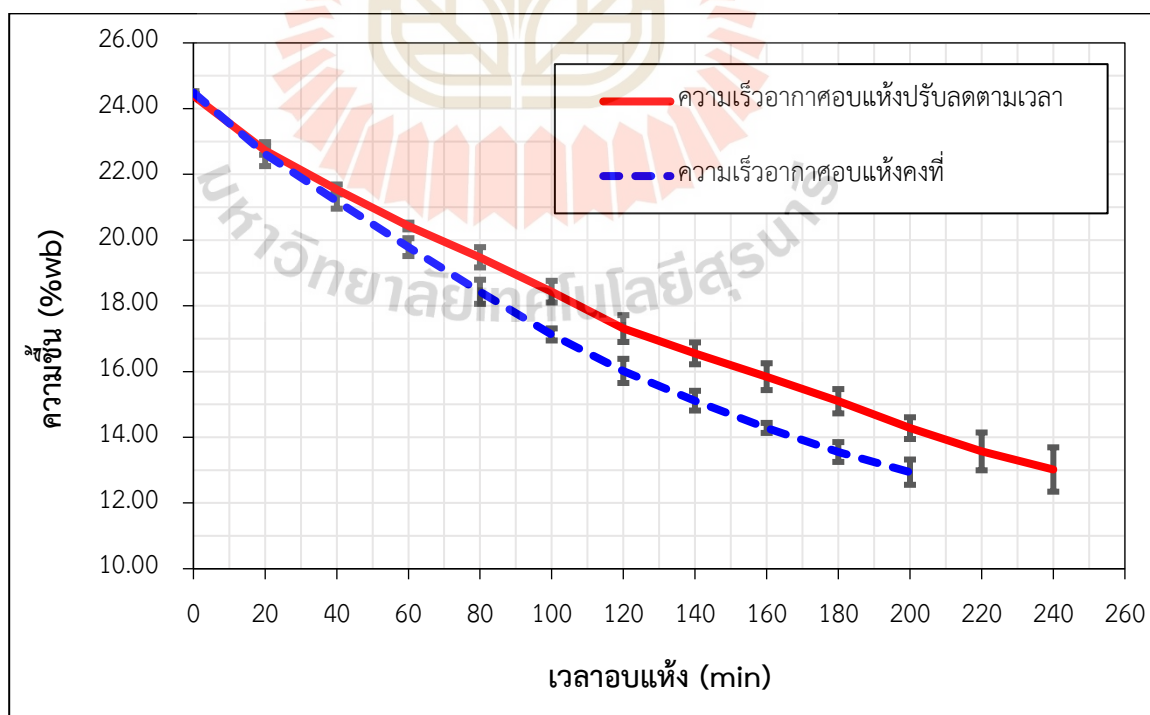
จากการศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกต้นแบบที่สร้างขึ้น ทำให้ได้ข้อสรุปเกี่ยวกับผลการทดสอบ โดยแบ่งผลการทดสอบออกเป็น 2 รูปแบบ คือ 1) ผลการศึกษาของชุดการทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งตลอดกระบวนการทดสอบ และ 2) ผลการศึกษาของชุดการทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยการควบคุมให้อากาศอบแห้งไหลเข้าไปในหอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ผ่านการเปิด - ปิด วาล์วระบายอากาศตามเวลาที่กำหนด

ผลการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งตลอดกระบวนการทดสอบ

6.3.1 พฤติกรรมการอบแห้ง (Drying Behavior)

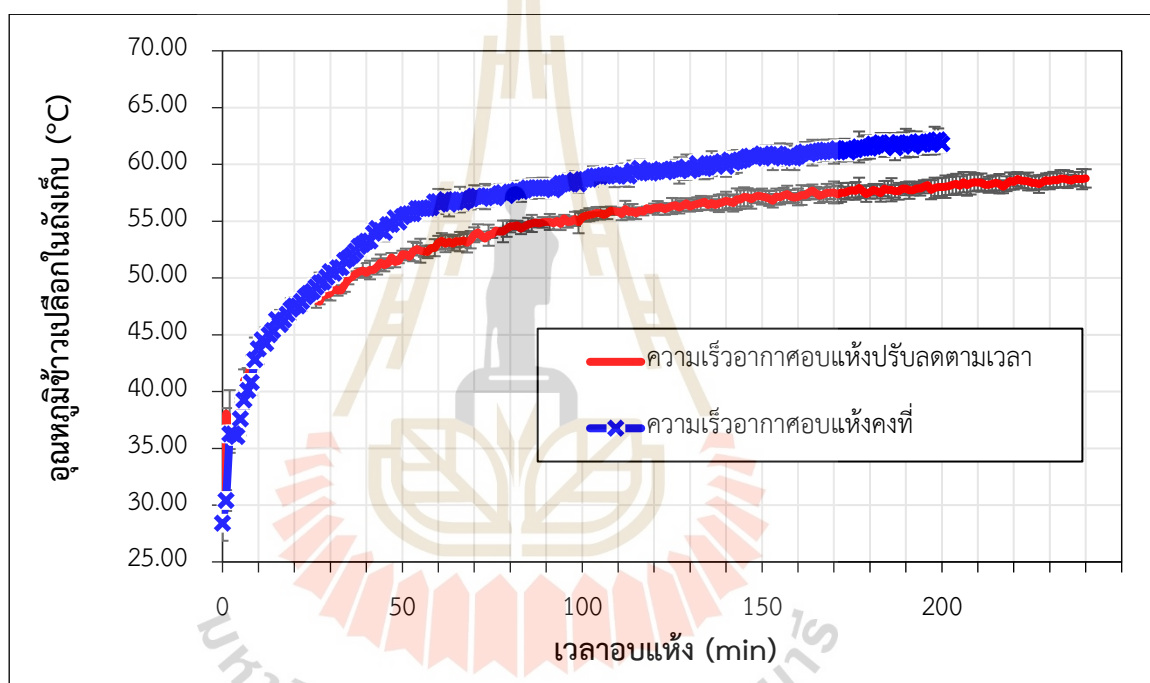
ผลการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบ เปรียบเทียบพฤติกรรมการลดลงของความชื้นระหว่างรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ และความเร็วอากาศอบแห้งที่ถูกปรับลดลงตลอดการทดสอบ (ตารางที่ 5.3) ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C มีลักษณะดังรูปที่ 6.15

เมื่อพิจารณาการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลาในการอบแห้ง (รูปที่ 6.15) พบว่ามีลักษณะลดลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปตลอดช่วงที่ทำการศึกษา จากรูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า หลังจากเวลาผ่านไป 20 นาที การใช้ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่จะทำให้ความชื้นข้าวลดลงต่ำกว่าการใช้ความเร็วอากาศที่มีการปรับลดความเร็วลงอย่างเห็นได้ชัด และในทางกลับกันเมื่อพิจารณาที่ความชื้นค่าเดียวกัน (หลังจากที่เวลาอบแห้งผ่านไป 20 นาที) การปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งก็จะใช้เวลาอบแห้งที่นานมากกว่าการทดสอบในกรณีที่มีความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วอากาศอบแห้งถือเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการอบแห้งที่ทำหน้าที่ช่วยในการระเหยความชื้นออกจากเมล็ดข้าว อีกทั้งความเร็วอากาศอบแห้งทำหน้าที่ช่วยในการถ่ายเทความร้อนจากอากาศสู่เมล็ดข้าวเปลือก ในกรณีการอบแห้งที่ใช้อากาศอบแห้งแบบคงที่ 12.80 m/s จะสามารถถ่ายเทความร้อนจากอากาศเข้าสู่เมล็ดข้าวเปลือกได้ดีกว่าในกรณีการอบแห้งที่มีการปรับลดความเร็วจาก 12.80 - 8.44 m/s ซึ่งหากการอบแห้งมีการถ่ายเทความร้อนไปยังเมล็ดข้าวได้สูง ความร้อนนี้จะช่วยในการขับความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้ดีตามด้วยเช่นกัน ผลของพฤติกรรมกรอบแห้งนี้สอดคล้องกันกับผลการเก็บข้อมูลอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บตลอดการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 6.16 ที่จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บกรณีทำการทดสอบอบแห้งด้วยความเร็วอากาศอบแห้งแบบคงที่จะมีอุณหภูมิสูงกว่ากรณีทำการทดสอบอบแห้งที่มีการปรับลดความเร็ว และความแตกต่างนี้เริ่มสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนที่เวลา 20 นาทีเช่นกัน ความแตกต่างระหว่างความเร็วอากาศอบแห้งดังกล่าวมีค่าประมาณ 5°C ตลอดการทดสอบ



รูปที่ 6.15 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกกับเวลา ของการทดสอบที่ 1

แม้ว่าการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งจะช่วยชะลอเวลาให้ข้าวเปลือกสัมผัสกับอากาศอบแห้งในหอบแห้งได้นานขึ้นแต่กลับมีพฤติกรรมการอบแห้งแตกต่างกับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ (ทวิช จิตรสมบูรณ์ และคณะ, 2549) และการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นที่เป็นช่องอ (ณัฐพงษ์ วงศ์บัพพา และ ทวิช จิตรสมบูรณ์, 2558) ซึ่งระบบอบแห้งทั้งสองแบบมีการชะลอการเคลื่อนที่ของข้าวเปลือกเพื่อหน่วงเวลาให้ข้าวเปลือกสัมผัสอากาศร้อนได้นานขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้เพราะระบบทั้งสองใช้การหน่วงการเคลื่อนที่ของข้าวเปลือกโดยไม่มีการลดความเร็วของอากาศอบแห้ง จึงทำให้สองระบบนั้นมีข้อได้เปรียบทั้งในเรื่องความเร็วอากาศและระยะเวลาที่ข้าวเปลือกสัมผัสอากาศร้อนที่นานเช่นกัน จึงทำให้อัตราการอบแห้งสูงกว่านั่นเอง

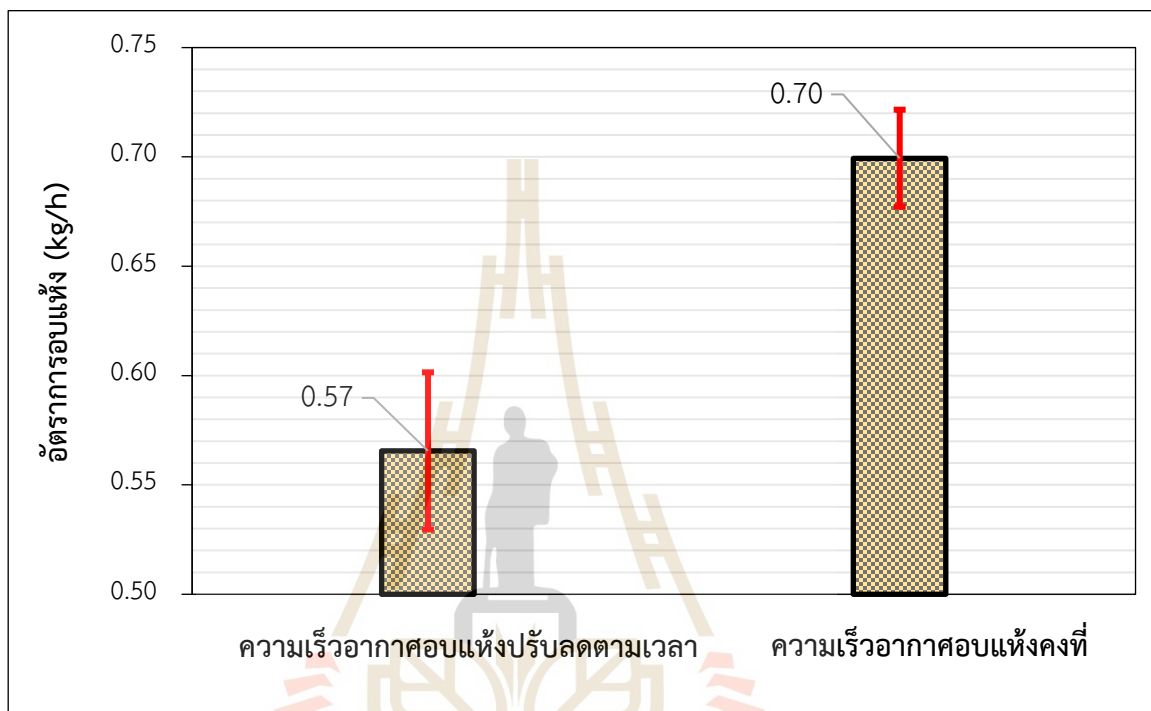


รูปที่ 6.16 อุณหภูมิข้าวเปลือกในถังเก็บตลอดการทดสอบ ของการทดสอบที่ 1

6.3.2 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR)

คือปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้นจนกระทั่งลดลงถึงความชื้นร้อยละ 14 มาตรฐานเปียกต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (รูปที่ 6.17) พบว่าการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งลงนั้นให้อัตราการอบแห้งอยู่ที่ $0.57 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$ ซึ่งต่ำกว่าการทดสอบในกรณีที่มีความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ $0.70 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$ เนื่องจากอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เมล็ดข้าวเปลือกได้รับ หากเมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้สามารถถ่ายเทมวลความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้ดีขึ้นและอิทธิพลของความเร็วอากาศอบแห้งที่แม้จะมีอุณหภูมิเท่ากันแต่ความเร็วที่สูงกว่าย่อมทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงกว่าและทำให้ข้าวเปลือกอุณหภูมิ

สูงกว่าไปด้วย ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการของ Fick's Law Diffusion (Cengel, Y. A., 2006) สอดคล้องกันกับผลในรูปที่ 6.16 กล่าวคือการทดสอบในกรณีที่มีความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ ค่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บมีค่าสูงกว่าการทดสอบในกรณีที่มีการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้ง ทำให้ความสามารถในการถ่ายเทมวลสารออกจากเมล็ดได้ดี จึงทำให้มีอัตราการอบแห้งสูงกว่า

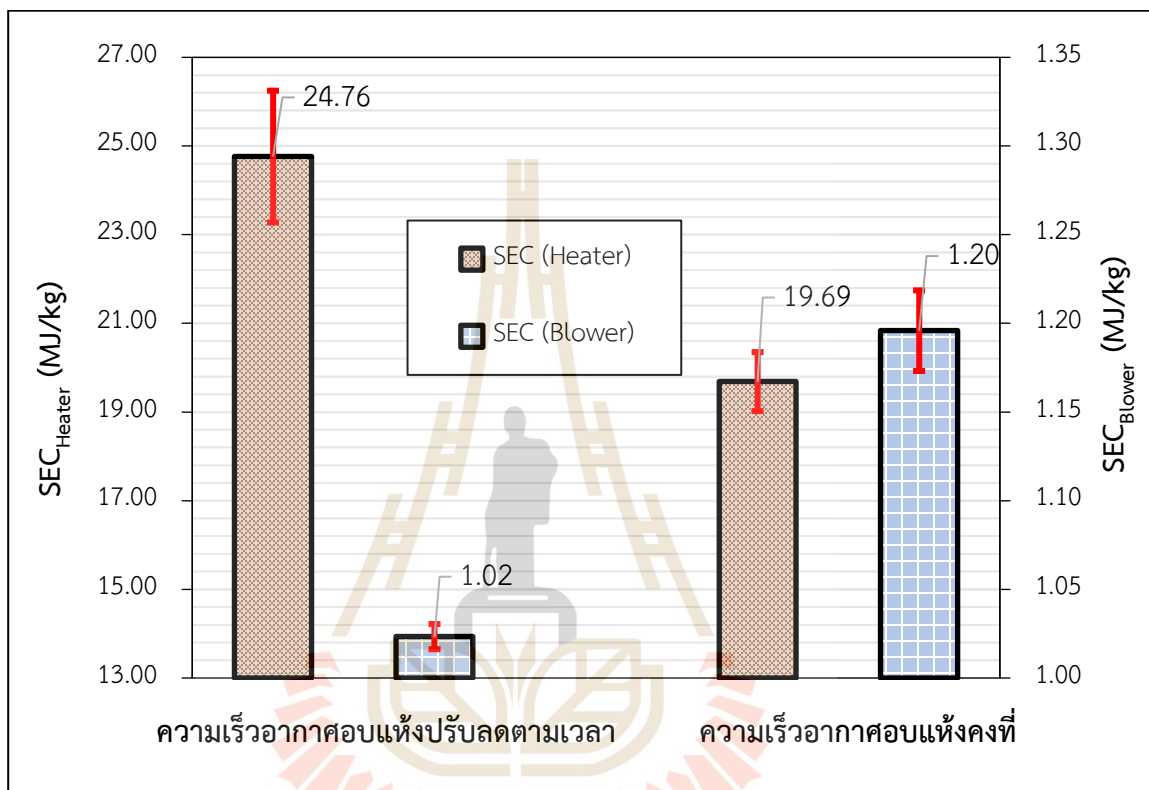


รูปที่ 6.17 อัตราการอบแห้งข้าวเปลือก ของการทดสอบที่ 1

6.3.3 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

ค่าพลังงานที่ใช้ในกระบวนการลดความชื้นตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งลดความชื้นได้ร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก แบ่งพิจารณาเป็นสองส่วนคือ ความสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ (พลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง, SEC_{Heater}) ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 19.69 และ 24.76 MJ/kg_{water} และความสิ้นเปลืองพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ (พลังงานที่ใช้ในการขับลม, SEC_{Blower}) ที่คำนวณได้ มีค่าเท่ากับ 1.02 และ 1.20 MJ/kg_{water} แสดงดังรูปที่ 6.18 จากรูปแสดงให้เห็นว่าการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งจะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะที่สูงกว่าการทดสอบในกรณีที่ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ อันเป็นผลมาจากระยะเวลาการอบแห้งที่ยาวนานกว่าซึ่งสอดคล้องกันกับรูปที่ 6.15 ทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่าและทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะสูงตามไปด้วย ในขณะที่การทดสอบในกรณีที่มีการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้งจะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานทุติยภูมิจำเพาะต่ำกว่าการทดสอบในกรณีที่ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่ อัน

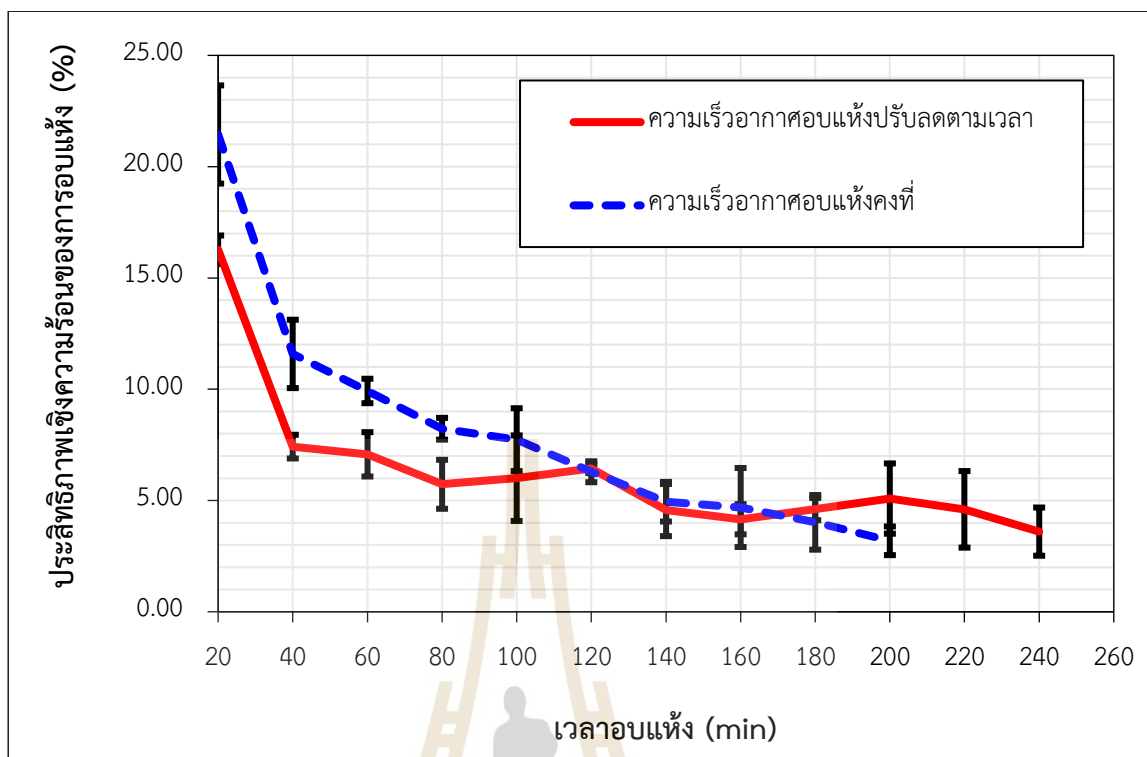
เป็นผลมาจากเครื่องเป่าลม (Blower) มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ต่ำกว่าเนื่องจากอากาศอบแห้งถูกปรับลดความเร็วลงตลอดกระบวนการทดลอง จึงทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานทุติยภูมิจำเพาะนั้นต่ำลง (วัดและบันทึกค่าพลังงานของเครื่องเป่าลมและเครื่องทำความร้อนด้วยเครื่องมือวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าของ Chauvin Arnoux รุ่น C.A 8435 และรุ่น C.A 8334 ตามลำดับ)



รูปที่ 6.18 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ของการทดสอบที่ 1

6.3.4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง (Thermal Efficiency of Paddy Drying, η_{dyr})

เมื่อนำข้อมูลการทดสอบมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง โดยพิจารณาทุก ๆ 20 นาที (รูปที่ 6.19) พบว่าในช่วงต้นของการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งในกรณีที่มีความเร็วอากาศอบแห้งคงที่มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่มากกว่าในกรณีที่มีการปรับลดความเร็วอากาศอบแห้ง และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเวลาของการอบแห้งนานขึ้น (มีลักษณะที่สอดคล้องกันทั้งสองกรณีการทดสอบ) เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นอุณหภูมิของข้าวเปลือกมีค่าสูงและเริ่มจะมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงท้ายการทดลอง (มีการเปลี่ยนแปลงค่าน้อยลง ดังรูปที่ 6.16) ทำให้ปริมาณความร้อนที่ข้าวเปลือกรับไว้และใช้ในการระเหยน้ำในแต่ละรอบเวลาดันน้อยลง เป็นผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งมีแนวโน้มที่ลดลงตามเวลาที่มากขึ้น



รูปที่ 6.19 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งกับเวลา ของการทดสอบที่ 1

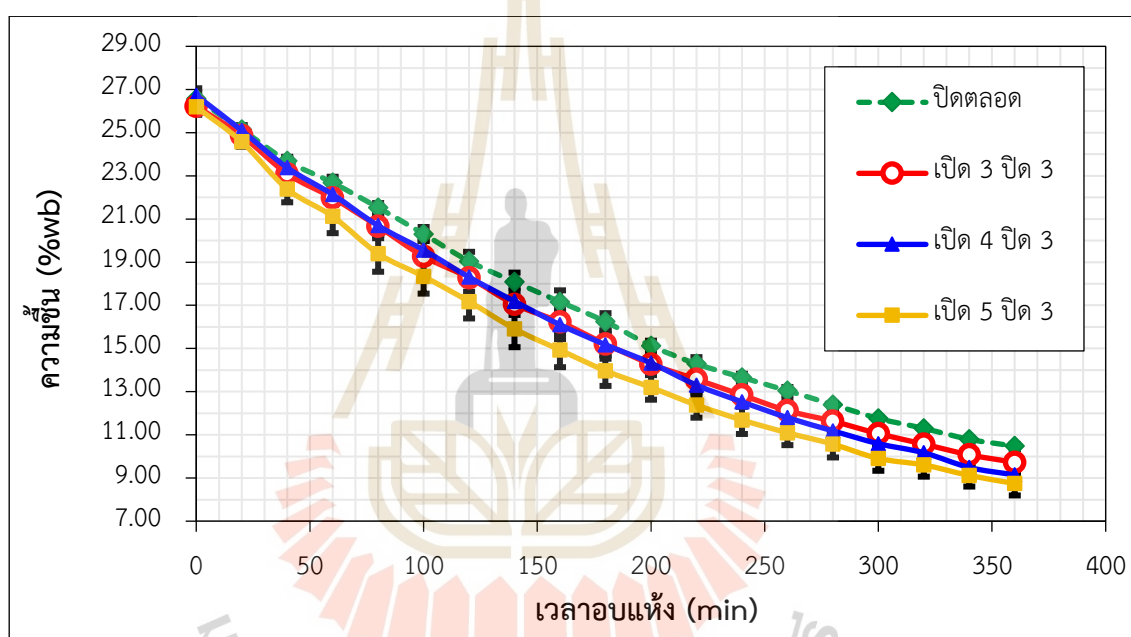
สรุปผล

จากผลการทดสอบทั้งหมดนี้ พบว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูง ซึ่งต้องอาศัยอุณหภูมิของอากาศอบแห้งในการถ่ายเทความร้อนให้กับเมล็ดข้าว แต่การเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งจะทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากต้องใช้พลังงานในการทำความร้อนให้อากาศมากขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งที่สำคัญคือความเร็วอากาศอบแห้งและระยะเวลาที่ข้าวเปลือกสัมผัสกับอากาศอบแห้งเพื่อถ่ายเทความร้อน โดยที่ต้องไม่ทำให้ความเร็วของอากาศอบแห้งลดลง ซึ่งปัจจัยดังกล่าวสามารถช่วยเพิ่มอุณหภูมิให้กับข้าวเปลือกได้ดีและความชื้นที่ถ่ายเทออกจากข้าวเปลือกยังสามารถระบายสู่อากาศอบแห้งที่เป็นตัวกลางได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นแล้วการเพิ่มอัตราการอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมจึงควรเป็นการเพิ่มความเร็วอากาศอบแห้งหรือปรับเปลี่ยนรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งในแบบอื่น ที่ช่วยหน่วงเวลาการสัมผัสถ่ายเทความร้อนได้โดยไม่มีผลทำให้ความเร็วอากาศอบแห้งลดลง การศึกษารูปแบบการไหลของอากาศแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ของ Wongbubpa, N. et al. (2020) และ ญัฐพงษ์ วงศ์บับพา และคณะ (2564) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ช่วยหน่วงเวลาการเคลื่อนที่ของข้าวเปลือกในระบบการอบแห้งแบบพาหะลมได้ จึงอาจเป็นแนวทางหนึ่งที่มีความน่าสนใจ ซึ่งต้องมีการศึกษาเพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมต่อไป

ผลการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยการควบคุมให้อากาศอบแห้งไหลเข้าไปในหอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ผ่านการเปิด - ปิด วาล์วระบายอากาศตามเวลาที่กำหนด

6.3.5 พฤติกรรมการอบแห้ง (Drying Behavior)

ผลการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบ เปรียบเทียบระหว่างพฤติกรรมการลดลงของความชื้นตามเวลา และเงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงตามเวลาที่ใช้ในการเปิด - ปิดวาล์ว (ตารางที่ 5.4) ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่ 80°C มีลักษณะดังรูปที่ 6.20

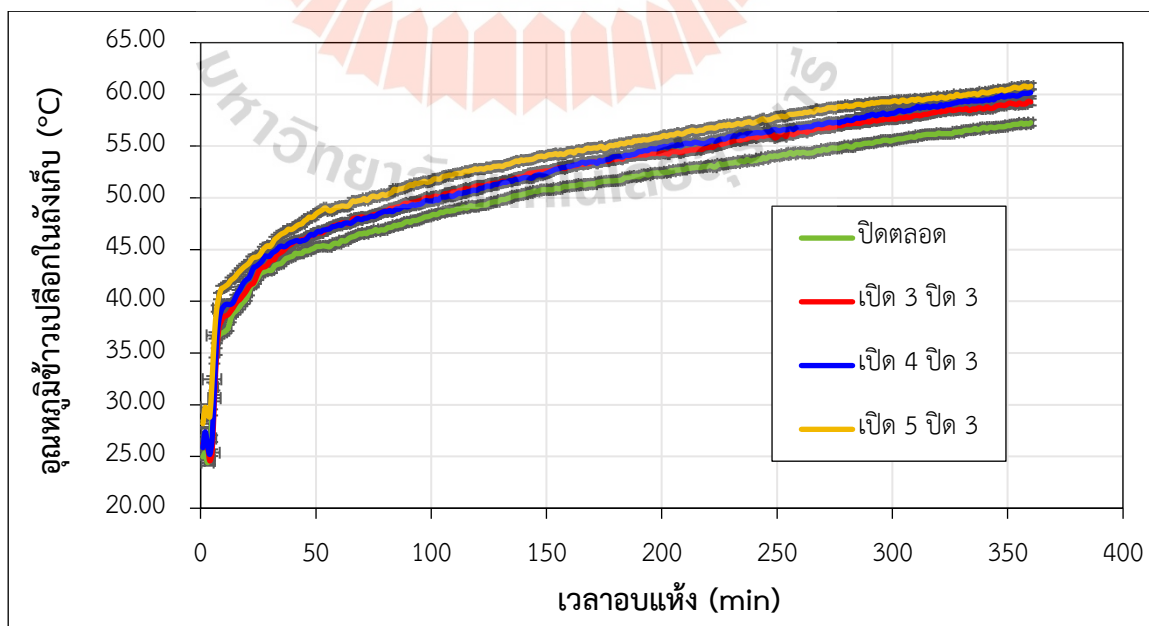


รูปที่ 6.20 การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกกับเวลา ของการทดสอบที่ 2

เมื่อพิจารณาการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกเทียบกับเวลาในการอบแห้ง (รูปที่ 6.20) พบว่ามีลักษณะลดลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปตลอดช่วงที่ทำการศึกษา จากรูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการจ่ายอากาศอบแห้งตามเวลาการเปิด - ปิดวาล์ว เพื่อให้เกิดพฤติกรรมการไหลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ช่วยให้ทำให้ความชื้นข้าวเปลือกลดลงต่ำกว่าการอบแห้งแบบปกติ (ปิดตลอด) ทุกกรณี และเมื่อเวลาอบแห้งผ่านไปได้ประมาณ 20 นาที เส้นแนวโน้มการลดลงของความชื้นจะแยกออกจากกันอย่างเห็นได้ชัด โดยพบว่าเมื่อใช้เวลาสำหรับการเปิดวาล์วที่นานขึ้นจะทำให้ความชื้นข้าวเปลือกลดลงตาม เนื่องจากการเปิดวาล์วเป็นการระบายอากาศอบแห้งออกก่อนเข้าเข้าสู่หอบแห้ง ซึ่งจะช่วยลดอัตราการไหลและความดันอากาศอบแห้งภายในหอบแห้ง ส่งผลให้เกิดการหมุนเวียนการเคลื่อนตัวของเมล็ดข้าวเปลือกภายในหอบแห้งให้นานขึ้น ดังจะเห็นได้จากข้อมูลผลการศึกษการ

คำนวณเชิงตัวเลขรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบขนานในหอบแห้งแนวตั้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ในหัวข้อที่ 6.1 และข้อมูลผลการศึกษาค่าการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งแบบลมร้อนด้วยวิธีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ในหัวข้อที่ 6.2 ว่าการสร้างพฤติกรรมการไหลของอากาศแบบเป็นช่วง (Pulse flow) สามารถช่วยห้วงเวลาการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งได้นานขึ้น กล่าวอีกนัยคือเมล็ดข้าวเปลือกสามารถเคลื่อนที่ได้ระยะทางรวมที่มากกว่าความยาวของหอบแห้งในหนึ่งรอบของการอบแห้ง

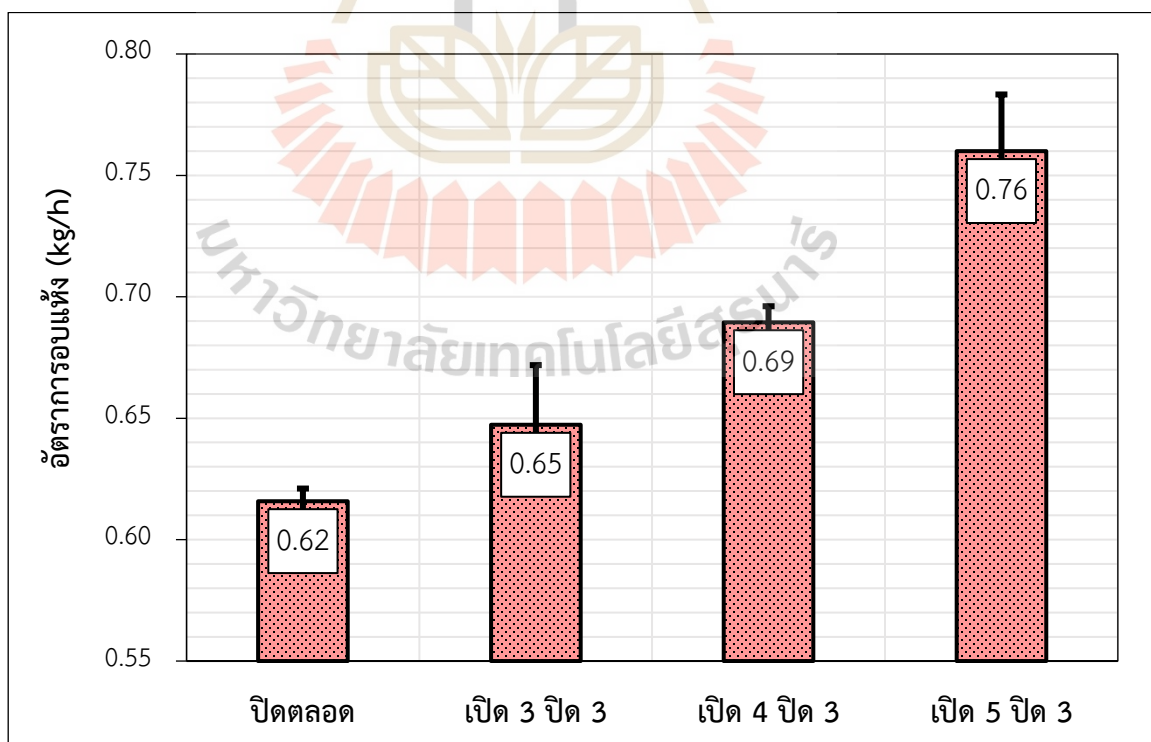
การที่เมล็ดข้าวเปลือกสามารถใช้เวลาที่นานในหอบแห้งจะเป็นผลดีที่ช่วยให้สามารถรับพลังงานความร้อนจากอากาศอบแห้งได้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องอากาศอบแห้งถือเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการอบแห้งที่ทำหน้าที่ช่วยในการระเหยความชื้นออกจากเมล็ดข้าว (Wiset, L., et al., 2001) (ทวิช จิตรสมบูรณ์ และคณะ, 2549) (Kahyaoglu, L. N., et al., 2012) (ณัฐพงษ์ วงศ์บัพพา และ ทวิช จิตรสมบูรณ์, 2557) (ณัฐพงษ์ วงศ์บัพพา และ ทวิช จิตรสมบูรณ์, 2558) (ชนะรัชต์ วิจิณธนสาร และคณะ, 2554) หากเมล็ดข้าวได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนได้มาก ความร้อนนี้จะช่วยในการขับความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้ดีตามไปด้วยเช่นกัน การรับพลังงานความร้อนได้มากขึ้นแสดงได้ด้วยระดับอุณหภูมิของข้าวเปลือกที่จะต้องเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งผลของพฤติกรรมการอบแห้งนี้สอดคล้องกันกับผลการเก็บข้อมูลอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บตลอดการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 6.21 ที่จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังเก็บในกรณีที่ใช้เวลาสำหรับเปิดวาล์วที่นานขึ้นจะมีอุณหภูมิสูงกว่ากรณีที่ทำกรทดสอบอบแห้งที่ใช้เวลาสำหรับเปิดวาล์วที่น้อย และมากกว่ากรณีที่ทำกรทดสอบอบแห้งที่ไม่เปิดวาล์วเลย (ปิดตลอด)



รูปที่ 6.21 อุณหภูมิข้าวเปลือกในถังเก็บตลอดการทดสอบ ของการทดสอบที่ 2

6.3.6 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR)

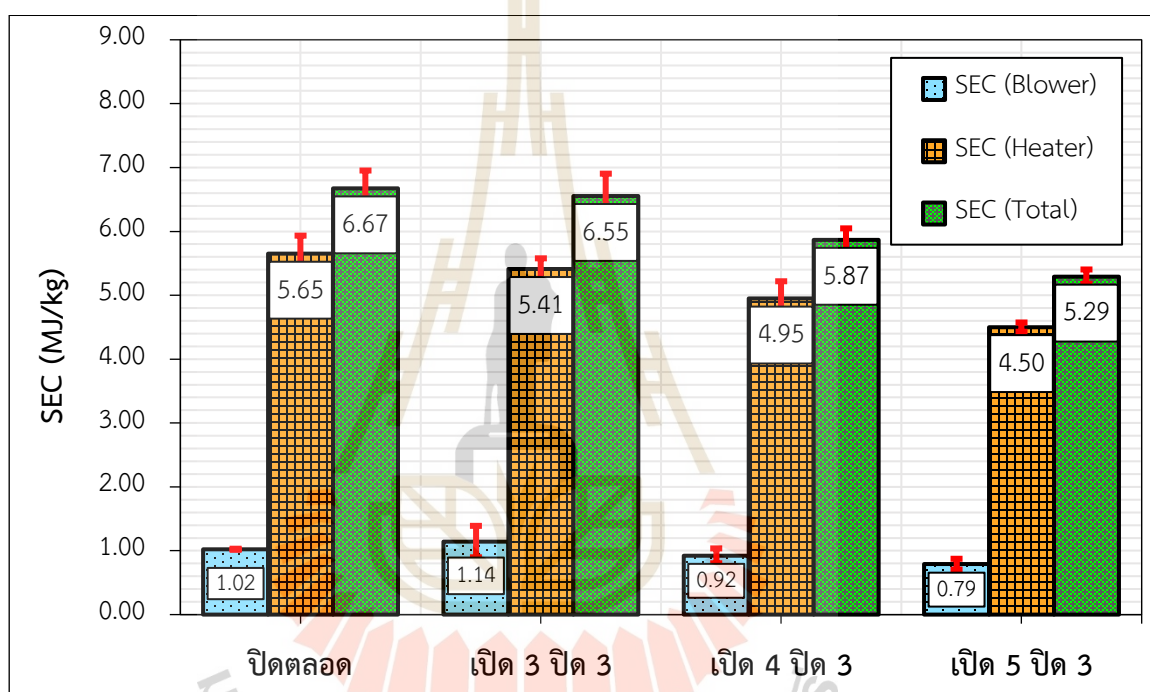
ผลการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบ เปรียบเทียบระหว่างอัตราการอบแห้งกับเงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงตามเวลาที่ใช้ในการเปิด - ปิดวาล์ว ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่ 80°C วิเคราะห์อัตราการอบแห้งพิจารณาจากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือกในช่วงความชื้นเริ่มต้นจนกระทั่งความชื้นลดลงถึงร้อยละ 14 มาตรฐานเปียกต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง มีลักษณะดังรูปที่ 6.22 จากผลการทดสอบอบแห้งพบว่าเมื่อใช้เวลาสำหรับการเปิดวาล์วที่นานขึ้นจะทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นตาม เนื่องจากอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เมล็ดข้าวเปลือกได้รับ หากเมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้สามารถถ่ายเทมวลความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้ดีขึ้นตาม ทั้งนี้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่สูงขึ้นนั้นเป็นผลเกี่ยวเนื่องมาจากอิทธิพลรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งที่สามารถหน่วงเวลาการเคลื่อนที่ให้แก่เมล็ดข้าวเปลือกเคลื่อนตัวออกจากท่ออบแห้งได้ช้าลง ส่งผลให้เมล็ดข้าวเปลือกมีเวลาในการสัมผัสและรับพลังงานความร้อนที่นานขึ้น เมล็ดข้าวเปลือกจึงสามารถเก็บและสะสมความร้อนได้มาก (สอดคล้องกับคำอธิบายในหัวข้อที่ 6.3.5) จึงทำอัตราการอบแห้งสูงขึ้นตาม อุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกที่สูงขึ้นนี้สอดคล้องกันกับผลในรูปที่ 6.21 อัตราการอบแห้งสำหรับการทดสอบมีค่าอยู่ในช่วง 0.62 - 0.76 kg_{water}/h



รูปที่ 6.22 อัตราการอบแห้งข้าวเปลือก ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการทดสอบที่ 2

6.3.7 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

ค่าพลังงานที่ใช้ในกระบวนการลดความชื้นตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งลดความชื้นได้ร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก แบ่งพิจารณาเป็นสามส่วนคือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะ (พลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง, SEC_{Heater}) ที่คำนวณได้จากการทดสอบมีค่าอยู่ในช่วง 4.50 - 5.65 MJ/kg_{water} อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ (พลังงานที่ใช้ไปสำหรับเครื่องเป่าลม, SEC_{Blower}) ที่คำนวณได้จากการทดสอบมีค่าอยู่ในช่วง 0.79 - 1.02 MJ/kg_{water} และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวม (SEC_{Total}) มีค่าอยู่ในช่วง 5.29 - 6.67 MJ/kg_{water} แสดงดังรูปที่ 6.23

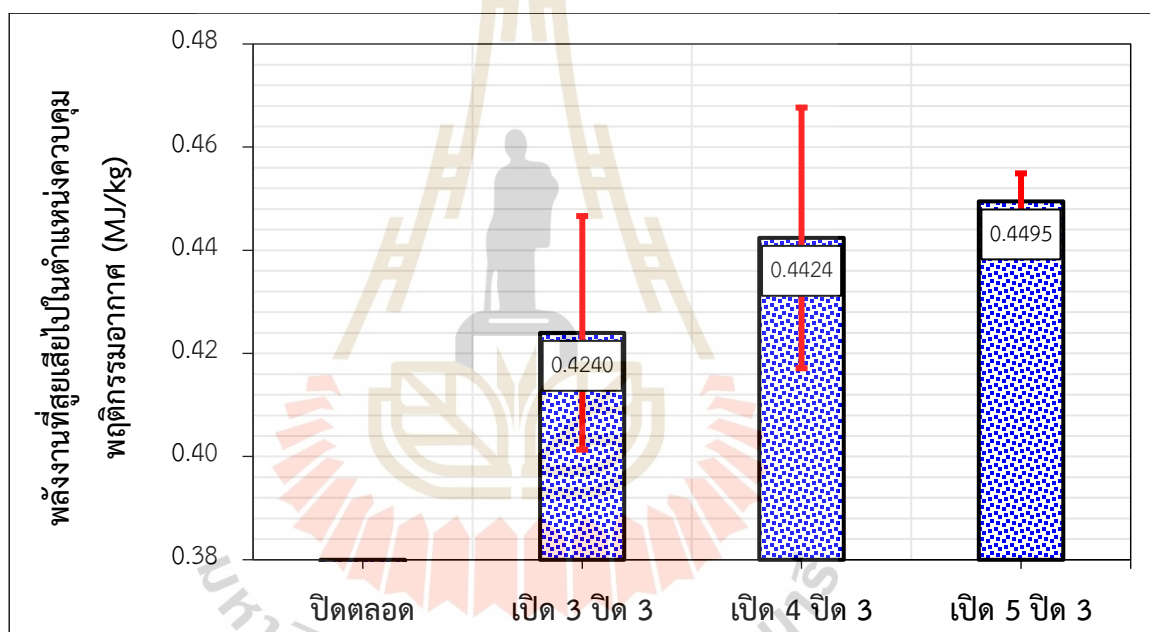


รูปที่ 6.23 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการทดสอบที่ 2

จากผลการทดสอบอบแห้ง (รูปที่ 6.23) พบว่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะ (SEC_{Heater}) มีแนวโน้มที่ลดลง เช่นเดียวกับอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ (SEC_{Blower}) เมื่อทำการทดสอบอบแห้งโดยใช้เวลาสำหรับการเปิดวาล์วที่นานขึ้น การวิเคราะห์ถึงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานทั้งสองส่วนเป็นไปตามสมการ (ในหัวข้อ 5.3.5) มีเทอมของค่าพลังงานไฟฟ้าที่วัดและถูกใช้ไปตามเวลาในระหว่างการทดสอบซึ่งถูกติดตั้งไปในชุดอุปกรณ์การทดลอง และเนื่องด้วยผลการทดสอบอบแห้งในกรณีที่ใช้เวลาสำหรับการเปิดวาล์วที่นาน ใช้เวลาในการอบแห้งที่น้อย (พิจารณาที่ร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก) ซึ่งเป็นเหตุและผลดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.3.5 และ 6.3.6 ดังจะเห็นได้จากข้อมูลผลการทดสอบดังรูปที่ 6.20 เมื่อการทดสอบอบแห้งใช้เวลาน้อยจึงทำให้

อัตราการบริโภคไฟฟ้าน้อยลงตาม ส่งผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ พลังงานทุติยภูมิจำเพาะ และพลังงานรวมจำเพาะลดลงตามไปด้วย (อุปกรณ์วัดค่าพลังงานของเครื่องทำความร้อนและเครื่องเป่าลมแสดงดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ)

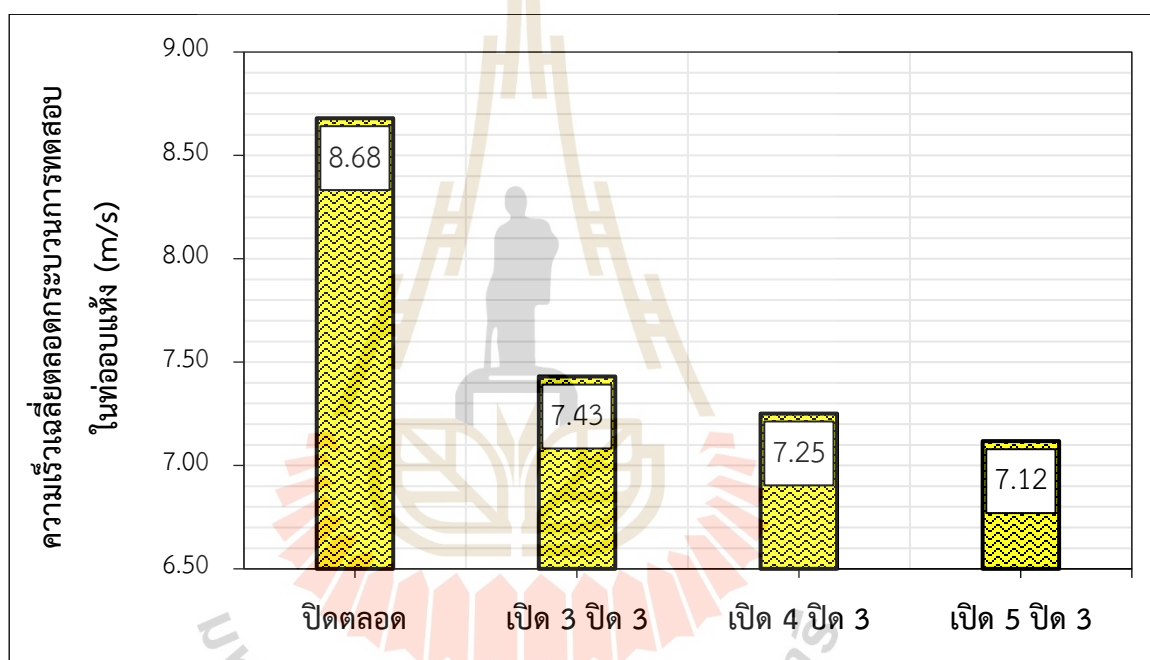
เนื่องด้วยระบบอบแห้งข้าวเปลือกที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อสร้างพฤติกรรมการไหลของอากาศและเมล็ดข้าวเปลือกในขณะที่อยู่ในห้องอบแห้งให้มีลักษณะการไหลแบบเป็นช่วง (Pulse flow) นั้น ระบบได้ทำการระบายอากาศอบแห้งออกก่อนเข้าสู่ห้องอบแห้งด้วยโซลินอยด์วาล์ว (รูปที่ 4.14) ดังนั้นพลังงานส่วนหนึ่งจึงสูญเสียออกจากระบบไปด้วย ค่าพลังงานสูญเสียในตำแหน่งควบคุมพฤติกรรมอากาศ (ตำแหน่งเปิดลมออกที่โซลินอยด์วาล์ว) แสดงดังรูปที่ 6.24 (การวิเคราะห์หาค่าพลังงานที่สูญเสียแสดงตามภาคผนวก ข.1)



รูปที่ 6.24 พลังงานสูญเสียไปในตำแหน่งควบคุมพฤติกรรมอากาศ ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลา ของการทดสอบที่ 2

จากรูปที่ 6.24 จะเห็นว่าค่าพลังงานสูญเสียที่คำนวณได้มีแนวโน้มที่มากขึ้นเมื่อทำการทดสอบอบแห้งโดยใช้เวลาสำหรับการเปิดวาล์วที่นาน เนื่องจากค่าพลังงานสูญเสียถูกพิจารณาไปตามเวลาที่ใช้ในการระบายอากาศอบแห้ง หรือเวลาที่ใช้ในการควบคุมการจ่ายลมออกที่ตำแหน่งต้นทางก่อนทางเข้าห้องอบแห้ง (ดังสมการที่ ข.1 ในภาคผนวก ข.1) ตลอดระยะเวลาของการอบแห้ง ซึ่งหากสามารถนำพลังงานที่สูญเสียในส่วนนี้หมุนวนกลับเข้ามาสู่ระบบ เช่น นำพลังงานกลับมาวนใช้ใหม่ อาจจะช่วยทำให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ พลังงานทุติยภูมิจำเพาะ และพลังงานรวมจำเพาะลดลงต่ำกว่าค่าที่รายงานได้

ค่าพลังงานสูญเสียในตำแหน่งควบคุมพฤติกรรมอากาศ (รูปที่ 6.24) มีความสัมพันธ์แบบผกผันกับความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยตลอดกระบวนการทดสอบในท่ออบแห้ง กล่าวคือถ้าพลังงานสูญเสียในตำแหน่งควบคุมพฤติกรรมอากาศมาก ความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยตลอดกระบวนการทดสอบจะมีค่าน้อย เนื่องจากค่าพลังงานสูญเสียแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการระบายอากาศอบแห้ง เมื่อเวลาการระบายอากาศออกที่ตำแหน่งต้นทางมากจะทำให้สูญเสียพลังงานในส่วนนี้มากตามไปด้วย และในขณะเดียวกันความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยตลอดกระบวนการทดสอบในท่ออบแห้งก็จะลดลง แสดงดังรูปที่ 6.25 (การวิเคราะห์หาค่าความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยตลอดกระบวนการทดสอบในท่ออบแห้งแสดงตามภาคผนวก ข.2)

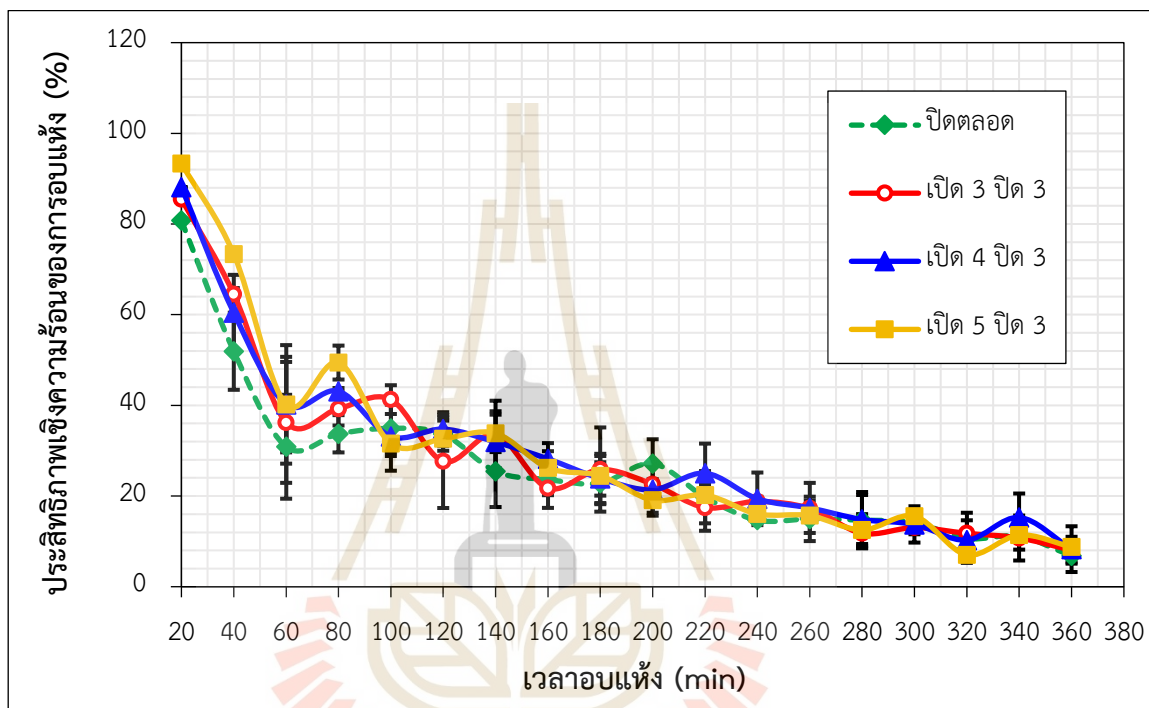


รูปที่ 6.25 ความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยตลอดกระบวนการทดสอบในท่ออบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบ สำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลา ของการทดสอบที่ 2

6.3.8 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง (Thermal Efficiency of Paddy Drying, η_{dr})

เมื่อนำข้อมูลการทดสอบมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง โดยพิจารณาค่าทุก ๆ 20 นาที ตลอดการทดสอบ พบว่าในช่วงต้นของการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งในกรณีที่ทำกรทดสอบอบแห้งโดยใช้เวลาการเปิดวาล์วที่นาน ระบบมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่มากกว่าในกรณีที่ทำกรทดสอบอบแห้งที่ใช้เวลาสำหรับเปิดวาล์วที่สั้นกว่า และมากกว่ากรณีที่ทำกรทดสอบอบแห้งที่ไม่เปิดวาล์วเลย (ปิดตลอด) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาของการอบแห้งนานขึ้น (มีลักษณะที่สอดคล้องกัน

ในทุกกรณีการทดสอบ) เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นอุณหภูมิของข้าวเปลือกมีค่าสูงและเริ่มจะมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงท้ายการทดลอง (มีการเปลี่ยนแปลงค่าน้อยลง ดังรูปที่ 6.21) ทำให้ปริมาณความร้อนที่ข้าวเปลือกเก็บไว้และใช้ในการระเหยน้ำในแต่ละรอบเวลาลดน้อยลง เป็นผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งมีแนวโน้มที่ลดลงตามเวลาที่มากขึ้น ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งแสดงดังรูปที่ 6.26



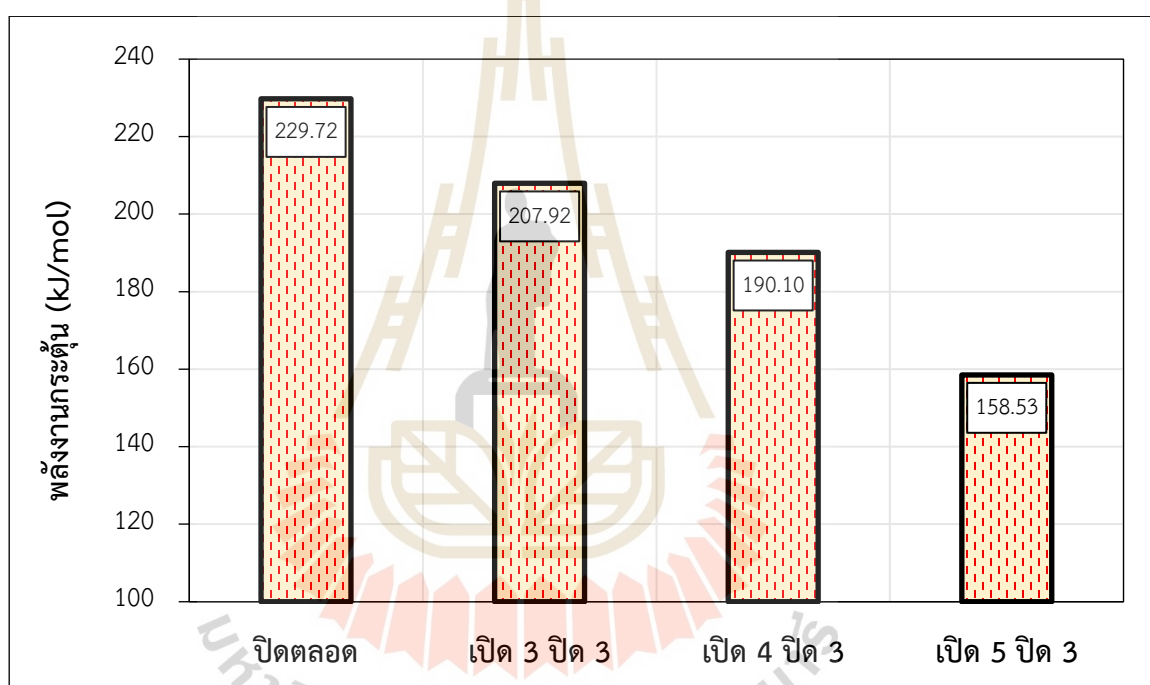
รูปที่ 6.26 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้งกับเวลา ของการทดสอบที่ 2

6.3.9 พลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแห้ง (Activation energy)

ผลการทดสอบอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบพบว่าค่าพลังงานกระตุ้นหรือพลังงานต่ำสุดที่กระตุ้นให้เกิดการระเหยน้ำออกจากเมล็ดข้าวเปลือก มีค่าอยู่ระหว่าง 158.53 - 229.72 kJ/mol แสดงดังรูปที่ 6.27

จากที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ผ่านมาว่าการทดสอบอบแห้งโดยใช้เวลาสำหรับการเปิดวาล์วที่นานขึ้นจะทำให้ความชื้นข้าวเปลือกลดลงได้เร็ว และอัตราการอบแห้งสูงขึ้น จะเห็นได้จากค่าพลังงานกระตุ้นของการทดสอบอบแห้งแสดงดังรูปที่ 6.27 สนับสนุนการวิเคราะห์ผลดังกล่าว ทั้งนี้พบว่ากรณีที่ทำกรทดสอบอบแห้งโดยใช้เวลาสำหรับการเปิดวาล์วที่นานจะให้ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการระเหยน้ำน้อยกว่าการอบแห้งในกรณีที่ทำกรทดสอบอบแห้งที่ใช้เวลาสำหรับเปิดวาล์วที่น้อย และกรณีที่ทำกรทดสอบอบแห้งที่ไม่เปิดวาล์วเลย (ปิดตลอด) ตามลำดับ เนื่องจากกรณีที่ทำกร

ทดสอบอบแห้งโดยใช้เวลาสำหรับการเปิดวาล์วที่นานสามารถสร้างพฤติกรรมการไหลของอากาศและ เมล็ดข้าวเปลือกแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ได้นานมากขึ้นตลอดระยะเวลาที่เมล็ดข้าวเคลื่อนตัวอยู่ใน ท่ออบแห้ง ซึ่งจะส่งผลดีต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนและถ่ายเทความชื้นออกจากเมล็ด อีกทั้งกรณีการ อบแห้งแบบดังกล่าวก่อให้เกิดการสะสมความร้อนภายในเมล็ดได้เป็นอย่างดี (ดังแสดงในรูปที่ 6.21) ซึ่ง จะเป็นผลดีที่ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกสามารถถ่ายเทความชื้นออกจากเมล็ดได้ง่ายโดยใช้พลังงานกระตุ้น ในการระเหยน้ำที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ทำการศึกษาทดสอบอบแห้งที่ใช้เวลาสำหรับเปิดวาล์วที่น้อย และ กรณีที่ทำการศึกษาทดสอบอบแห้งที่ไม่เปิดวาล์วเลย (ปิดตลอด) (การวิเคราะห์หาค่าพลังงานกระตุ้นแสดง ตามภาคผนวก ข.3)

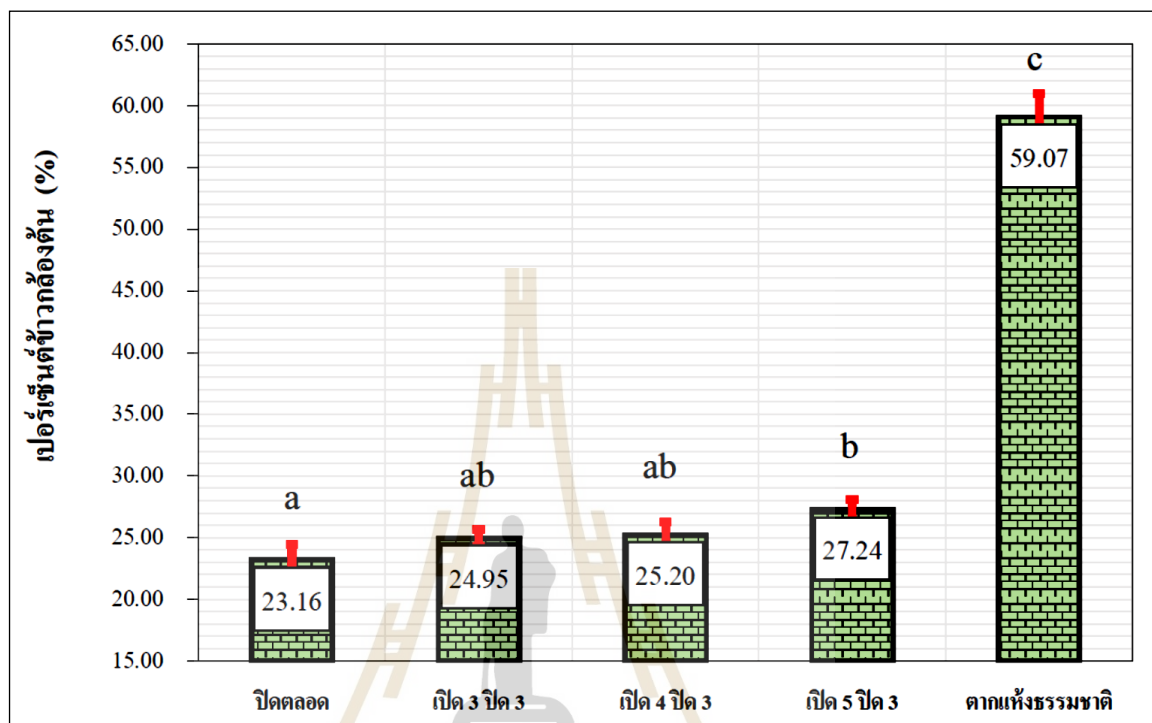


รูปที่ 6.27 พลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลา ของการทดสอบที่ 2

6.3.10 คุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณภาพข้าวหลังการอบแห้ง ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะในส่วน ของ ปริมาณข้าวตันของข้าวกล้องเนื่องจากข้าวกล้องเต็มเมล็ดที่ผ่านมาจากกระบวนการกะเทาะ ข้าวเปลือกมีปริมาณข้าวเต็มเมล็ดที่ค่อนข้างต่ำ โดยจะวิเคราะห์ปริมาณข้าวตันในรูปของร้อยละข้าว กล้องทั่วไป %BRY (เปอร์เซ็นต์ข้าวกล้องตัน) ดังที่แสดงวิธีการคำนวณตามสมการที่ (5.45) ผลการ ทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบ เปรียบเทียบระหว่างปริมาณข้าวตันในรูปร้อย ละของข้าวกล้องกับเงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงตามเวลาที่ใช้ใน

การเปิด - ปิดวาล์ว ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่ 80°C และการตากแห้งแบบธรรมชาติ ที่ความชื้น ร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก แสดงดังรูปที่ 6.28



หมายเหตุ อักษรที่เหมือนกันบนแท่งกราฟ (กรณีการทดสอบบอบแห้ง) ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$)

รูปที่ 6.28 ปริมาณข้าวต้นในรูปร้อยละของข้าวกล้อง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบ เป็นช่วงตามเวลาและการตากแห้งแบบธรรมชาติ ของการทดสอบที่ 2

จากรูปที่ 6.28 จะเห็นว่าปริมาณข้าวต้นในรูปร้อยละของข้าวกล้อง (ข้าวกล้องต้น) มีแนวโน้มที่มากขึ้นเมื่อทำการทดสอบบอบแห้งโดยใช้เวลาสำหรับการเปิดวาล์วที่นาน เนื่องจากกรณีที่ทำการทดสอบโดยใช้เวลาสำหรับการเปิดวาล์วที่นานจะใช้เวลารวมของการอบแห้งที่สั้นกว่ากรณีที่ทำการทดสอบโดยใช้เวลาสำหรับการเปิดวาล์วที่น้อย เวลารวมสำหรับการอบแห้งที่สั้นนั้นจะช่วยลดภาระกรรมของเมล็ดข้าวเปลือกจากการรับอุณหภูมิอากาศอบแห้งแบบซ้ำไปซ้ำมาในขณะที่เมล็ดข้าวเปลือกทำการอบแห้งได้ อีกทั้งยังช่วยลดจำนวนรอบของการที่เมล็ดข้าวเปลือกถูกลำเลียงผ่านอุปกรณ์ (กังหันล้อใบพัด) บ้อนเมล็ดข้าวเปลือกเข้าที่อบแห้ง ซึ่งถือเป็นส่วนที่ทำให้เมล็ดข้าวเกิดความเสียหายทางโครงสร้างได้เช่นกัน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของปริมาณข้าวกล้องต้นในกลุ่มของข้าวเปลือกที่นำไปอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งและปริมาณข้าวกล้องต้นของข้าวเปลือกในกลุ่มที่ตากแห้งแบบธรรมชาติ โดยทำการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างตัวแปรมากกว่า 2 ตัว โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (ONEWAY ANOVA) และการเปรียบเทียบความแตกต่างแบบราย

คู่ด้วยวิธี Tukey HSD ถึงความแตกต่างระหว่างกลุ่ม พบว่าผลของปริมาณข้าวกล้องต้นมีความแตกต่างกันระหว่างกลุ่มอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (รูปที่ 6.28) เนื่องด้วยข้าวเปลือกที่นำมาทดสอบอบแห้งนั้น ก่อนทำการทดสอบได้ทำการเพิ่มความชื้นให้กับข้าวเปลือกด้วยการพรมน้ำให้ได้ความชื้นเสมือนจริงจากการเก็บเกี่ยว จึงอาจส่งผลทำให้เซลล์ของเมล็ดข้าวเปลือกเกิดการขยายตัวใหม่อีกครั้งหลังได้รับความชื้นจากการพรมน้ำ และเมื่อนำข้าวเปลือกขึ้นไปทำการอบให้แห้งใหม่อีกรอบด้วยเครื่องอบแห้ง ข้าวเปลือกอาจได้รับความเค้นจากการขยายและหดตัวอย่างรวดเร็วจากการถ่ายเทความชื้นออกจากเมล็ด อันเนื่องมาจากอุณหภูมิและความเร็วของอากาศอบแห้ง อีกทั้งข้าวเปลือกที่นำไปอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งนั้นในกระบวนการลำเลียงเมล็ดข้าวเปลือกเข้าสู่ท่ออบแห้งจะใช้กังหันล้อใบพัดเป็นตัวช่วยลำเลียง ซึ่งในจังหวะที่เมล็ดข้าวเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์ลำเลียงดังกล่าวอาจเกิดการเสียดสีกันระหว่างเมล็ดข้าวเปลือกกับเมล็ดข้าวเปลือก และเมล็ดข้าวเปลือกกับอุปกรณ์ลำเลียง จนกระทั่งทำลายโครงสร้างของเมล็ดข้าวเปลือกทำให้เกิดรอยร้าวและนำไปสู่การแตกหักในตอนที่แห้งได้ จึงทำให้ปริมาณข้าวกล้องต้นของข้าวเปลือกในกลุ่มนี้มีค่าค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับการตากแห้งแบบธรรมชาตินั่นเอง

ในขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบถึงความแตกต่างของปริมาณข้าวกล้องต้นภายในกลุ่มของข้าวเปลือกที่นำไปอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง พบว่ากรณีที่ทำกรทดสอบอบแห้งที่ไม่เปิดวาล์วเลย (ปิดตลอด) มีความแตกต่างกับกรณีที่ทำกรทดสอบโดยใช้เวลาสำหรับการเปิดวาล์วที่ 5 วินาที อย่างมีนัยสำคัญ และพบว่ากรณีที่ทำกรทดสอบอบแห้งที่ไม่เปิดวาล์วเลย (ปิดตลอด) และกรณีที่ทำกรทดสอบโดยใช้เวลาสำหรับการเปิดวาล์วที่ 3 วินาที และ 4 วินาที ไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกันกับกลุ่มของกรณีที่ทำกรทดสอบโดยใช้เวลาสำหรับการเปิดวาล์วที่ 3 4 และ 5 วินาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (รูปที่ 6.28)

สรุปผล

จากการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์หอมปทุมด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในท่อแนวตั้งที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาที่แตกต่างกันพบว่า รูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งที่มีลักษณะการไหลแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นตามเวลาที่จ่ายอากาศเข้าท่ออบแห้ง (หรือเวลาสำหรับการเปิดวาล์วเพื่อหรือลมออกที่ต้นทางก่อนทางเข้าท่ออบแห้ง) สามารถสร้างการหน่วงเวลาสำหรับการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกให้เมล็ดอยู่ในท่ออบแห้งได้นานขึ้นก่อนถูกเป่าพ่นออกนอกท่ออบแห้ง ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวส่งผลที่ดีต่อการอบแห้งที่จะช่วยให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและถ่ายเทความชื้นในระหว่างที่เมล็ดข้าวเปลือกลอยอยู่ในท่ออบแห้งได้อีกทั้งพฤติกรรมการไหลของอากาศแบบดังกล่าวยังช่วยส่งเสริมการสะสมอุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวเปลือกให้มีอุณหภูมิที่สูงเพิ่มขึ้นได้อีกด้วย การทดสอบอบแห้งโดยใช้เวลาสำหรับการเปิดวาล์วที่นานขึ้นค่าความชื้นข้าวเปลือกจะลดลงได้เร็ว อัตราการอบแห้งจะสูงขึ้น อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยลง พลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแห้งต่ำ และได้ปริมาณข้าวกล้องต้นที่สูงขึ้น เมื่อเทียบกับกรณี

ทำการทดสอบอบแห้งที่ใช้เวลาสำหรับเปิดวาล์วที่น้อย และกรณีทำการทดสอบอบแห้งที่ไม่เปิดวาล์วเลย (ปิดตลอด) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการไหลของอากาศที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการอบแห้งนี้มีศักยภาพที่สามารถนำไปใช้ในการลดความชื้นขั้นต้นของข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูง เช่น ข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวใหม่ หรือวัสดุเกษตรที่มีลักษณะเป็นเมล็ดได้ด้วยเช่นกัน

6.4 ผลการศึกษาแบบจำลองเอมพิริคัลชั้นบางเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในท่อแนวตั้ง (ของการทดสอบที่ 2)

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าการอบแห้งวัสดุเกษตรโดยเฉพาะข้าวเปลือกเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารออกจากเมล็ดข้าวเปลือก ตลอดจนมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่าง ๆ ของเมล็ดข้าวเปลือกในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งเป็นกระบวนการที่ขึ้นกับเวลา อีกทั้งยังได้รับอิทธิพลจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระหว่างการอบแห้งเช่น มวลของข้าวเปลือกที่ใช้ในการอบแห้ง อุณหภูมิอากาศอบแห้ง ความเร็วของอากาศอบแห้ง เป็นต้น หากต้องการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งวัสดุชนิดใดชนิดหนึ่งอาจจะต้องทำการทดลองหลายครั้ง เพื่อหาข้อมูลผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในบางครั้งไม่สามารถทำการทดลองได้หลาย ๆ ครั้ง เนื่องจากต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงเป็นอีกหนึ่งวิธีที่อาจนำมาใช้เพื่อช่วยในการแก้ไขปัญหาข้างต้นได้

จากผลการทดสอบอบแห้งถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางทั้ง 6 แบบจำลอง (ตารางที่ 5.5) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการใช้งาน โดยจะพิจารณาจากแบบจำลองที่ให้ค่า r เข้าใกล้ 1 และให้ค่า RMSE และ χ^2 ต่ำสุด ซึ่งการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะกระทำโดยใช้โปรแกรมเมทแลบผ่านฟังก์ชัน `fmincon` ในการช่วยคำนวณ พิจารณาถึงผลกระทบของมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น และอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ผลการคำนวณให้ค่าคงที่แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับแต่ละแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ค่าคงที่แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับแต่ละแบบจำลองในการใช้งาน

No.	พารามิเตอร์	ปิดตลอด	เปิด 3 ปิด 3	เปิด 4 ปิด 3	เปิด 5 ปิด 3
1	k	0.005063233	0.00558406	0.005902945	0.006561874
2	k	0.003154003	0.003724688	0.003524415	0.005015902
	n	1.090140749	1.077786725	1.099476389	1.052453173

ตารางที่ 6.1 ค่าคงที่แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับแต่ละแบบจำลองในการใช้งาน (ต่อ)

No.	พารามิเตอร์	ปิดตลอด	เปิด 3 ปิด 3	เปิด 4 ปิด 3	เปิด 5 ปิด 3
3	a	1.020326125	1.020650831	1.021385942	1.013658881
	k	0.005186644	0.005716337	0.006043136	0.006658703
4	a	-0.004238162	-0.004616754	-0.004731809	-0.005238335
	b	5.2241E-06	6.122E-06	6.23228E-06	7.6321E-06
5	a	1.106558901	1.077240669	1.114366616	1.049922781
	k	0.004264926	0.004938035	0.004774624	0.005940798
	c	-0.103880052	-0.071508953	-0.117149476	-0.049675532
6	a	0.99410001	1.000593019	0.998018988	1.00338207
	k	0.003346232	0.004330458	0.005103582	0.006573532
	n	1.069309877	1.040229858	1.00434191	0.987004906
	b	-6.68873E-05	-7.24943E-05	-0.000194923	-0.000112128

หมายเหตุ No. 1 คือ แบบจำลองของ Newton (1921)

2 คือ แบบจำลองของ Page (1943)

3 คือ แบบจำลองของ Henderson and Pabis (1961)

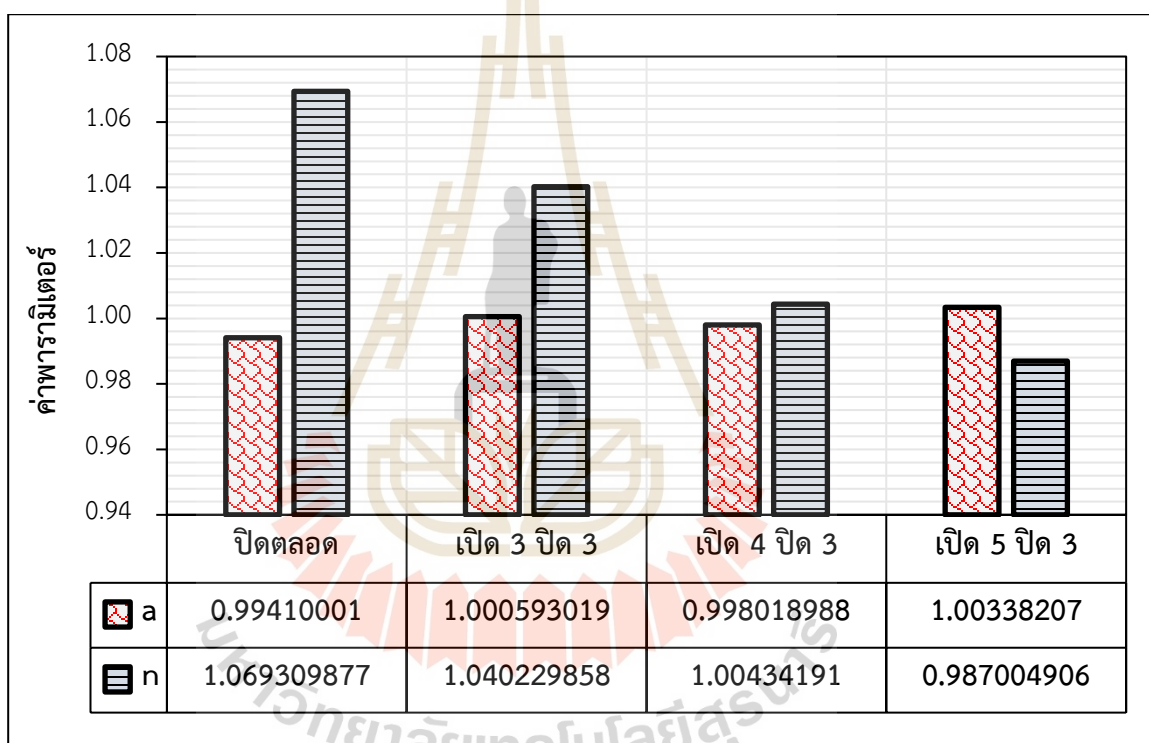
4 คือ แบบจำลองของ Wang and Singh (1978)

5 คือ แบบจำลองของ Logarithmic (1984)

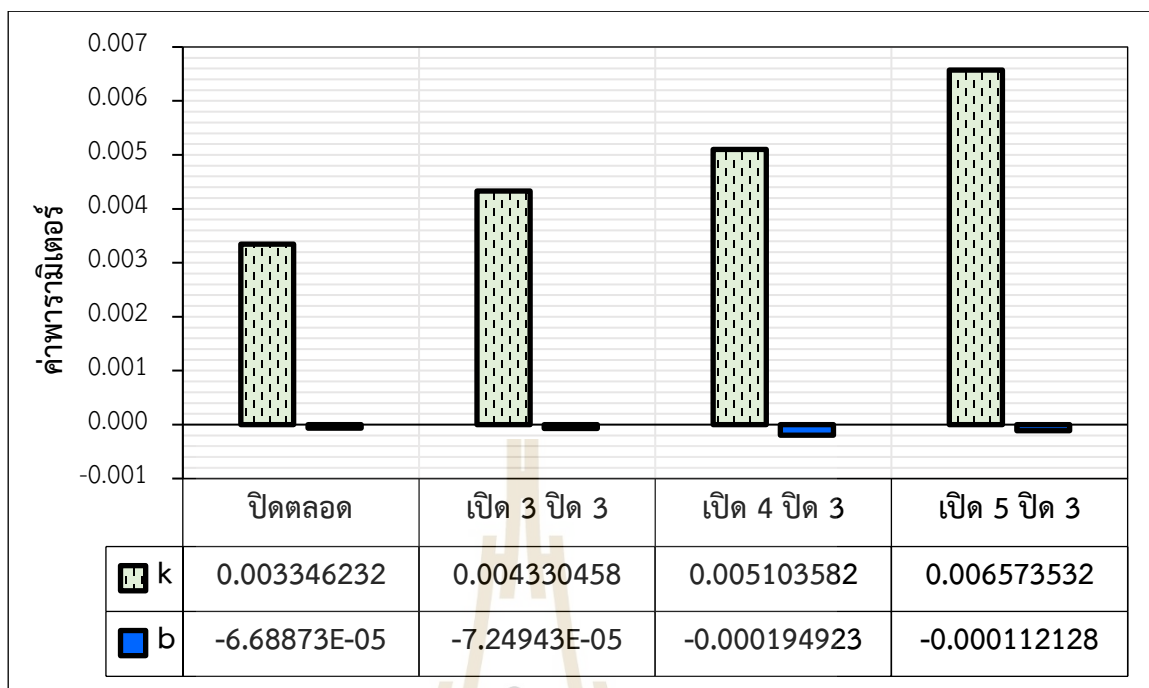
6 คือ แบบจำลองของ Midilli et al. (2002)

จากตารางที่ 6.1 จะเห็นได้ว่าผลของการทดสอบอบแห้งที่ได้ส่งผลต่อค่าของพารามิเตอร์ในแบบจำลอง โดยเมื่อพิจารณาถึงค่า k ในแบบจำลองที่ 1 2 3 5 และ 6 พบว่าการทดสอบอบแห้งโดยใช้เวลาสำหรับการเปิดวาล์วที่นานขึ้นจะให้ค่า k ในแบบจำลองที่สูงขึ้นตาม เนื่องจากค่า k ในแบบจำลองเหล่านี้มีโครงสร้างเป็นความสัมพันธ์แบบฟังก์ชันเลขชี้กำลัง (Exponential Function) ของเวลาในสมการอย่างชัดเจน (สมการแสดงในตารางที่ 5.5) เช่นเดียวกันกับค่า a ในแบบจำลองที่ 3 และ 6 ในขณะที่ค่า a ในแบบจำลองที่ 4 ของ Wang and Singh (1978) มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อทำการทดสอบอบแห้งโดยใช้เวลาสำหรับการเปิดวาล์วที่นานขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของสมการ (แบบจำลองที่ 4) มีความสัมพันธ์เป็นแบบฟังก์ชันพหุนาม (Polynomial Function) การเพิ่มเวลาสำหรับการเปิดวาล์วระบายอากาศที่นานขึ้นจึงส่งผลต่อสัมประสิทธิ์ของเวลาทั้งหมดที่เป็นกำลังหนึ่งและเทอมที่เป็นกำลังสอง การใช้อากาศอบแห้งในลักษณะที่เป็นช่วง (Pulse flow) แบบนี้ไม่ค่อยส่งผลต่อค่าคงที่อื่น ๆ ของ

สมการ ดังจะเห็นได้ว่าค่า a ในแบบจำลองที่ 5 มีค่าไม่แน่นอนเมื่อพิจารณาตามเงื่อนไขการทดสอบ
 อบแห้ง เมื่อทำการพิจารณาถึงค่า n ในแบบจำลองที่ 2 และ 6 พบว่าการทดสอบอบแห้งโดยใช้เวลา
 สำหรับการเปิดวาล์วที่นานขึ้นจะให้ค่า n ในแบบจำลองมีแนวโน้มลดลงตาม เมื่อพิจารณาถึงค่า b ใน
 แบบจำลองที่ 4 พบว่าการทดสอบอบแห้งโดยใช้เวลาสำหรับการเปิดวาล์วที่นานขึ้นจะให้ค่า b ใน
 แบบจำลองที่สูงขึ้นตาม ในขณะที่ค่า b ในแบบจำลองที่ 6 มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อทำการทดสอบอบแห้ง
 โดยใช้เวลาสำหรับการเปิดวาล์วที่นานขึ้น ส่วนค่า c ในแบบจำลองที่ 5 นั้นมีค่าไม่แน่นอนเมื่อพิจารณา
 ตามเงื่อนไขการทดสอบอบแห้ง แสดงตัวอย่างผลของพารามิเตอร์ค่า a n และ k b จากแบบจำลองของ
 Midilli et al. (2002) ดังรูปที่ 6.29 และ 6.30 ตามลำดับ

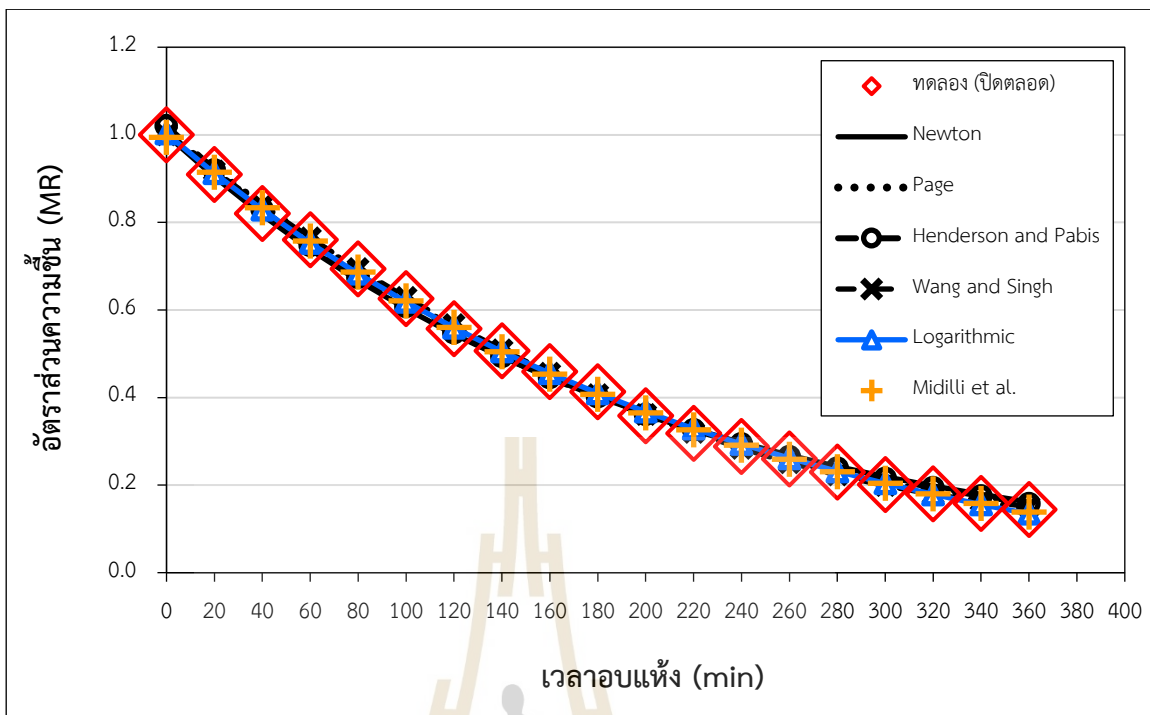


รูปที่ 6.29 ผลของพารามิเตอร์ค่า a และ n จากแบบจำลองของ Midilli et al. (2002)

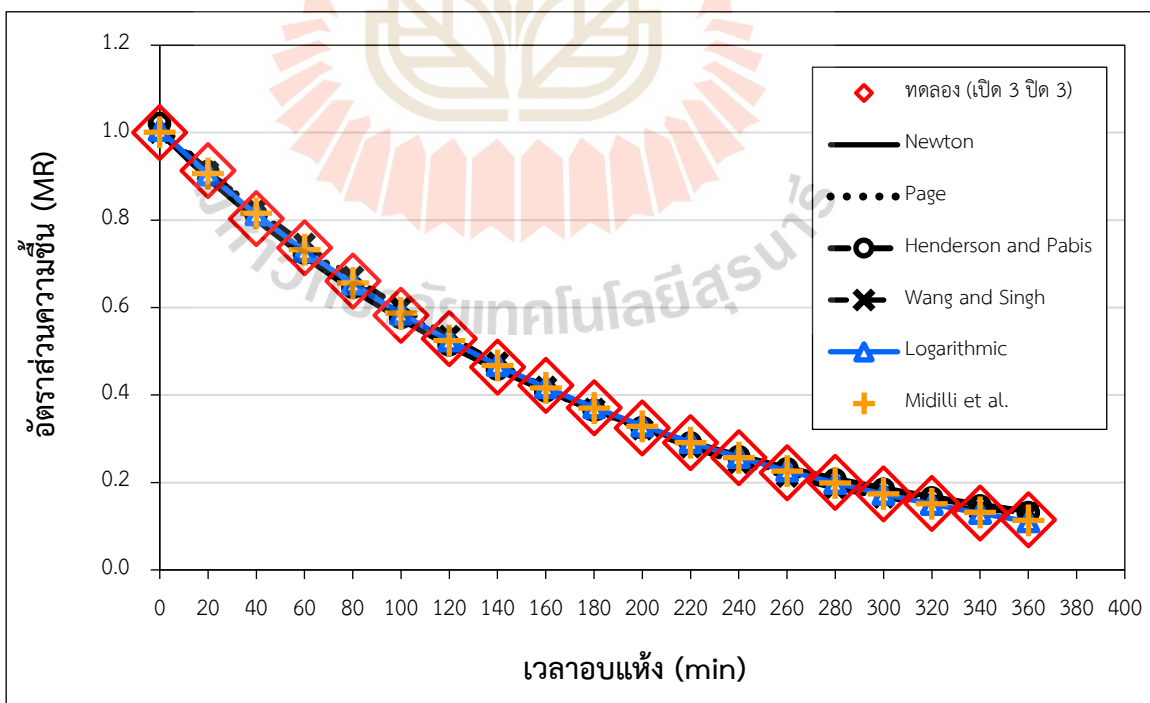


รูปที่ 6.30 ผลของพารามิเตอร์ค่า k และ b จากแบบจำลองของ Midilli et al. (2002)

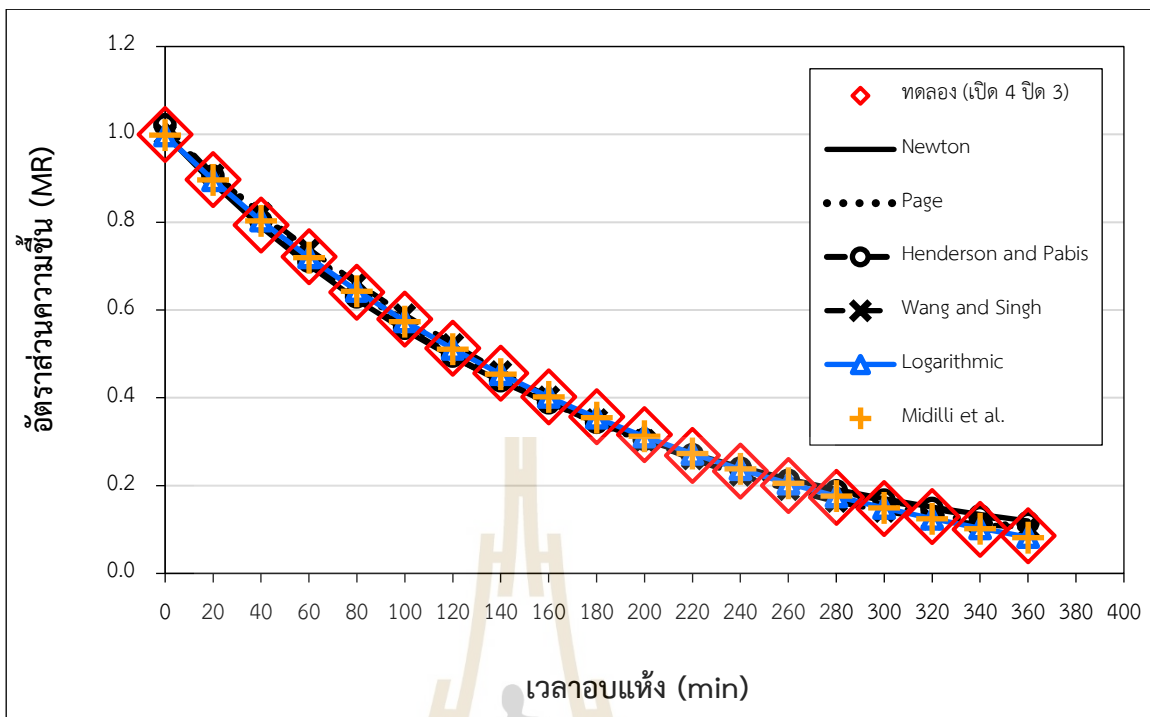
จากการศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองเอมพิริคัลชั้นบางเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในท่อแนวตั้ง เพื่อทำนายผลจนพลศาสตร์การอบแห้งภายใต้อิทธิพลของมวลข้าวเปลือก 15 kg อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C และความเร็วอากาศอบแห้ง 8.68 m/s ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ตามเวลาที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบจะถูกนำไปวิเคราะห์หาอัตราส่วนที่ลดลงตามเวลาและใช้เปรียบเทียบกับแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย 6 แบบจำลอง (ดังตารางที่ 5.5) แสดงดังรูปที่ 6.31 6.32 6.33 และ 6.34 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาอบแห้งมากขึ้นอัตราส่วนความชื้นข้าวเปลือกมีค่าลดลงตามกล่าวอีกนัยคือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้งเป็นกระบวนการที่ขึ้นกับเวลา (Time-dependent Process) (สีกกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555) ซึ่งเป็นผลที่สอดคล้องกันกับข้อมูลของพฤติกรรมกรอบแห้ง (ในหัวข้อที่ 6.3.5) อันเนื่องจากเมล็ดข้าวเปลือกได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิและความเร็วของอากาศอบแห้งตามเวลา จึงส่งผลต่อพฤติกรรมกรอบแห้งของอัตราส่วนความชื้นในแบบนั้นนั่นเอง และจากทั้ง 4 รูปจะเห็นได้ว่าการทดสอบอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกต้นแบบที่สร้างขึ้นไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมกรอบแห้ง (การเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งอัตราส่วนความชื้นกับเวลา) ของแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบ เนื่องจากเส้นกราฟจากการทดสอบอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบมีความโค้งลดลงที่สอดคล้องกันกับเส้นกราฟของแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบด้วยทั้งหมด จึงประมาณได้ว่าแบบจำลองทั้ง 6 แบบนั้นสามารถใช้อธิบายการอบแห้งด้วยการใช้อากาศแบบเป็นช่วงได้ดีเช่นกัน



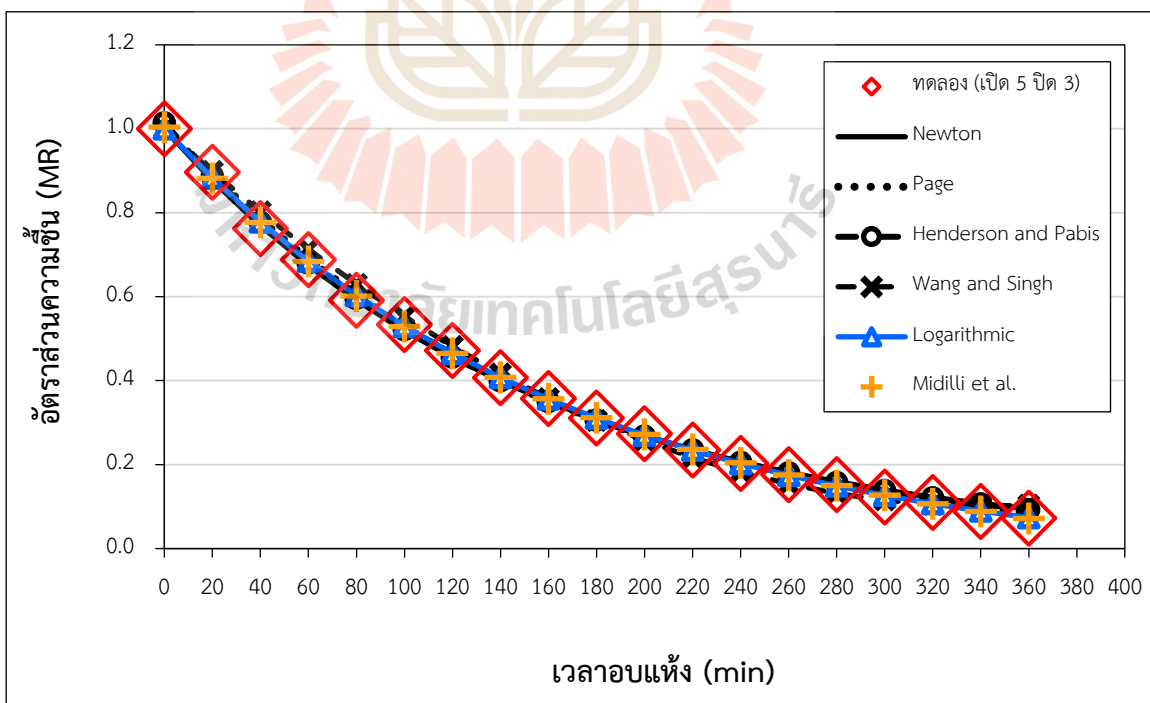
รูปที่ 6.31 อัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งที่ได้จากการทดลอง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (แบบปิดตลอด) และการทำนายด้วยแบบจำลอง



รูปที่ 6.32 อัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งที่ได้จากการทดลอง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (แบบเปิด 3 ปิด 3) และการทำนายด้วยแบบจำลอง



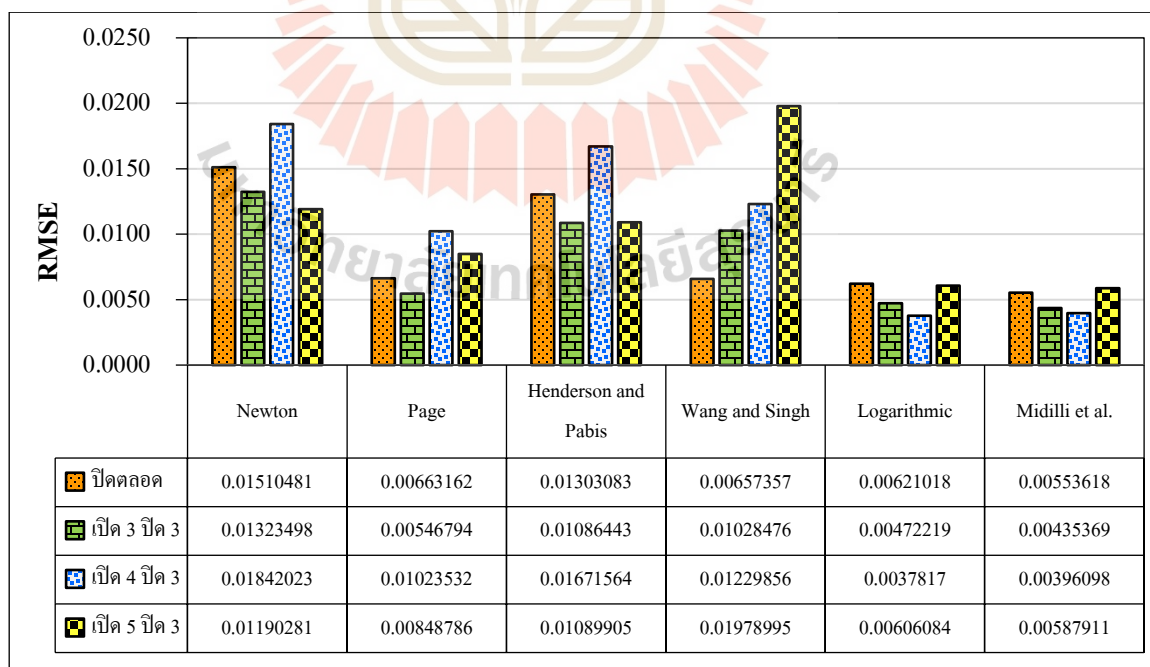
รูปที่ 6.33 อัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งที่ได้จากการทดลอง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (แบบเปิด 4 ปิด 3) และการทำนายด้วยแบบจำลอง



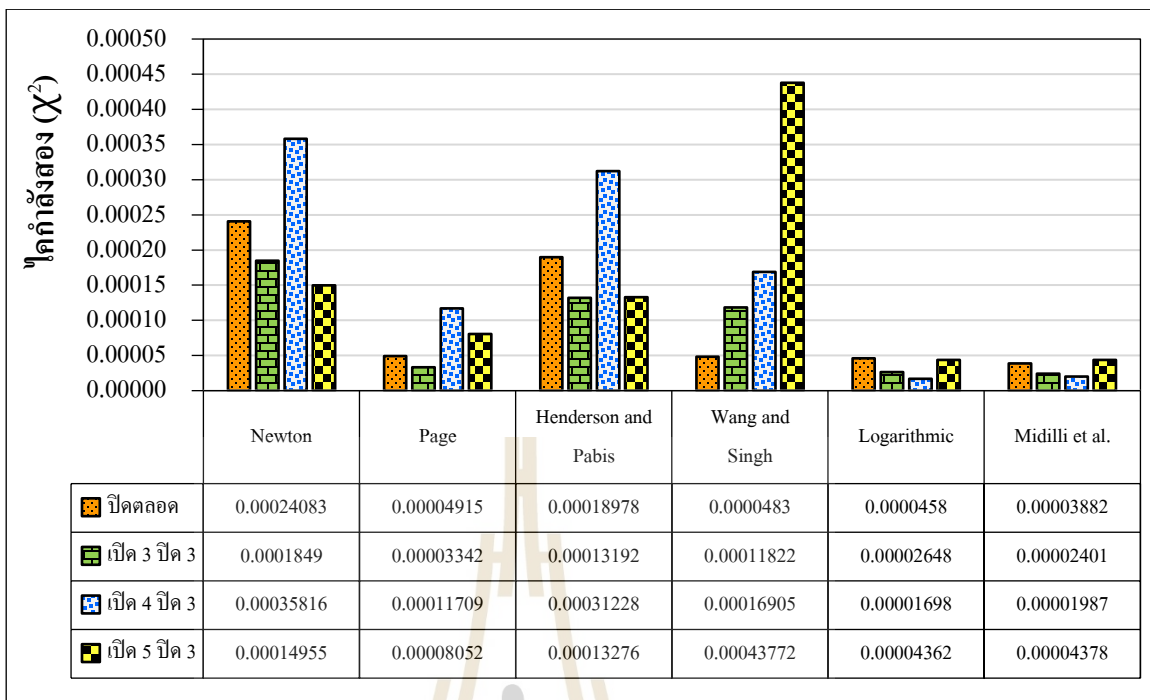
รูปที่ 6.34 อัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งที่ได้จากการทดลอง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (แบบเปิด 5 ปิด 3) และการทำนายด้วยแบบจำลอง

เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมผลการทดสอบจะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางทั้ง 6 แบบจำลอง (ดังตารางที่ 5.5) โดยจะพิจารณาจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ค่าโคคกำลังสอง (χ^2) ที่ต่ำที่สุด และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ที่เข้าใกล้ 1 ที่สุด (ดังสมการที่ 5.49 5.50 และ 5.51 ในหัวข้อที่ 5.4) ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 6.35 6.36 และ 6.37

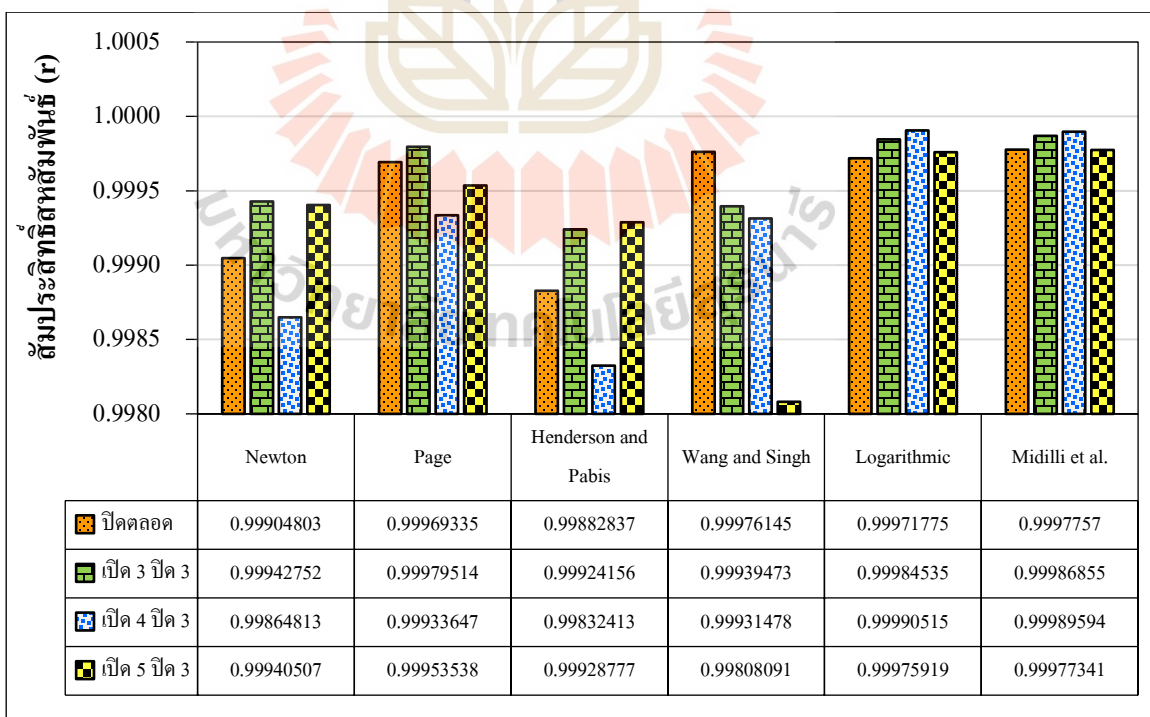
จากการวิเคราะห์ข้อมูล (รูปที่ 6.35 6.36 และ 6.37) พบว่าแบบจำลอง Midilli et al. (2002) มีความแม่นยำมากที่สุด โดยมีค่า RMSE และ χ^2 ต่ำสุดอยู่ที่ 0.00396098 - 0.0058791 และ 0.00001987 - 0.00004378 ตามลำดับ มีค่า r สูงสุด (เข้าใกล้ 1 มากสุด) อยู่ที่ 0.99977341 - 0.99989594 แบบจำลองที่มีความแม่นยำรองลงมาคือ Logarithmic (1984) และเมื่อทำการพิจารณาแบบจำลองของ Midilli et al. (2002) และ Logarithmic (1984) ถึงผลการทดสอบการเพิ่มเวลาสำหรับการเปิดวาล์วระบายอากาศที่นานขึ้นที่มีต่อค่า RMSE χ^2 และ r (รูปที่ 6.35 6.36 และ 6.37 ตามลำดับ) จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าเหล่านั้นไม่มีแนวทางการเพิ่มขึ้นหรือลดลงที่ชัดเจน แต่อย่างไรก็ตามค่าของข้อมูลเหล่านั้นไม่ได้แตกต่างกันมาก ความแตกต่างนี้แทบไม่นับสำคัญเลย แบบจำลองของ Midilli et al. (2002) และ Logarithmic (1984) จึงเป็นแบบจำลองที่ปกติจะถูกนำไปใช้กับการอบแห้งในสภาวะอากาศอบแห้งแบบต่อเนื่อง สามารถนำมาใช้กับระบบแบบระบายอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงได้ดี ส่วนแบบจำลองอื่นก็ให้ค่า RMSE χ^2 และ r ที่มีทิศทางไม่ชัดเจนเช่นกัน เว้นแต่แบบจำลองของ Wang and Singh (1978) สำหรับค่า RMSE และ χ^2 จะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาสำหรับการเปิดวาล์วระบายอากาศที่นานขึ้น ส่วนค่า r จะมีแนวโน้มที่ลดลง



รูปที่ 6.35 ผลของค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) กับแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบาง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลา



รูปที่ 6.36 ผลของค่าไคกำลังสอง (χ^2) กับแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบาง ที่เงื่อนไขการทดสอบ สำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลา



รูปที่ 6.37 ผลของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) กับแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบาง ที่เงื่อนไขการทดสอบ สำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลา

สรุปผล

จากผลการทดสอบพบว่าแบบจำลองของ Midilli et al. (2002) (แบบจำลองที่ 6) เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาอธิบายอัตราส่วนความชื้นที่ลดลงตามเวลาของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในท่อแนวตั้งนี้ได้ โดยมีค่า RMSE และ χ^2 ต่ำสุดอยู่ที่ 0.00396098 - 0.0058791 และ 0.00001987 - 0.00004378 ตามลำดับ มีค่า r สูงสุด (เข้าใกล้ 1 มากสุด) อยู่ที่ 0.99977341 - 0.99989594 ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของนักวิจัยหลายท่านเช่น Aghbashlo, M. et al. (2011) และ Doymaz, I. and Kocayigit, F. (2011) ที่ระบุว่าแบบจำลองของ Midilli et al. สามารถนำไปใช้ในการจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งของอาหารและวัสดุชีวภาพหลากหลายชนิดได้เป็นอย่างดี เช่นเดียวกับรายงานการวิจัยของ ศิวกร ศรีธีรญาณกร (2562) ที่ระบุว่าแบบจำลองของ Midilli et al. (2002) มีความแม่นยำมากที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองในงานวิจัยของตนเอง และนอกจากนั้นในแบบจำลองอื่น ๆ ที่เหลือเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกต้นแบบที่สร้างขึ้น พบว่าไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมการอบแห้งที่มากนัก (การเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งอัตราส่วนความชื้นกับเวลา) จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองที่เหลืออยู่ (แบบจำลอง 1 2 3 4 และ 5) ก็สามารถใช้อธิบายการอบแห้งด้วยการใช้อากาศแบบเป็นช่วงได้ดีและแม่นยำอยู่เช่นกัน

การทราบถึงแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งที่ทำการวิจัยเป็นข้อดีที่จะนำไปสู่การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Condition) ของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งชนิดนั้น ๆ ได้ หากสามารถเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมได้แล้วการจำลองทางคณิตศาสตร์จะช่วยให้ได้ข้อมูลจำนวนมาก และจะเป็นอีกหนึ่งวิธีที่จะนำมาใช้เพื่อช่วยในการแก้ไขปัญหาข้อจำกัดเรื่องการทำ การทดลองหลาย ๆ ครั้ง ค่าใช้จ่ายสำหรับการทดลอง และเวลาที่ใช้ในการทดลองในครั้งต่อ ๆ ไปได้

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้กล่าวในบทที่ 6 สามารถสรุปได้ดังนี้

ก. จากการศึกษาคำนวณเชิงตัวเลขรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบขนานในหอบแห้งแนวตั้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) พบว่าแบบจำลองที่ 3 มีความใกล้เคียงกับการเคลื่อนที่จริงในระบบมากที่สุด เนื่องจากการรวบรวมตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ไว้มากที่สุด

ข. จากการศึกษากการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งแบบลมร้อนด้วยวิธีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ พบว่าแบบจำลอง CFD - DEM ที่สร้างขึ้นสามารถจำลองลักษณะพฤติกรรม การเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกภายในหอบแห้งได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังเป็นประโยชน์ที่ช่วยให้สามารถคาดการณ์การปรับเปลี่ยนช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการจ่ายและหยุดจ่ายอากาศที่ทางเข้าหอบแห้ง เพื่อให้เมล็ดข้าวเปลือกเกิดพฤติกรรมเคลื่อนที่แบบเป็นช่วง (Pulse flow) ได้

ค. จากการศึกษาคำนวณเชิงตัวเลขรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบขนานในหอบแห้งแนวตั้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) และการศึกษาการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งแบบลมร้อนด้วยวิธีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นว่าเมล็ดข้าวเปลือกสามารถเคลื่อนตัวตามพฤติกรรมการไหลของอากาศที่ถูกควบคุมด้วยเวลาที่ใช้ในการจ่ายอากาศในตำแหน่งทางเข้าหอบแห้งข้าวเปลือกแบบแนวตั้งได้ ซึ่งสามารถช่วยสร้างการหน่วงเวลาสำหรับการเคลื่อนตัวของเมล็ดข้าวเปลือกให้เมล็ดอยู่ในหอบแห้งได้นานขึ้นก่อนถูกเป่าพ่นออกนอกหอบแห้ง

ง. แนวทางที่ได้จากการศึกษาคำนวณเชิงตัวเลขรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบขนานในหอบแห้งแนวตั้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) และการศึกษาการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งแบบลมร้อนด้วยวิธีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ นำไปต่อยอดการสร้างชุดทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกต้นแบบขนาดห้องปฏิบัติการ ชื่อเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมในท่อแนวตั้ง เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลการไหลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ในหอบแห้งที่ส่งผลต่อการอบแห้งข้าวเปลือก

จ. จากการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ พบว่าลักษณะของความชื้นข้าวเปลือกที่นำมาอบแห้งลดลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปตลอดช่วงที่ทำการศึกษา เมื่อเวลาอบแห้งมากขึ้นความชื้นค่อย ๆ ลดลงตาม เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ขึ้นกับเวลา (Time - dependent process)

ฉ. จากการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยการสร้างรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งที่มีลักษณะการไหลแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ด้วยวิธีการปรับเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว ในตำแหน่งจ่ายอากาศที่ทางเข้าท่ออบแห้ง พบว่าการทดสอบสำหรับการเปิดวาล์วที่นานขึ้น ค่าความชื้นข้าวเปลือกจะลดลงได้เร็ว อัตราการอบแห้งจะสูงขึ้น อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยลง พลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแห้งต่ำ และได้ปริมาณข้าวกลองตันที่สูงขึ้น เมื่อเทียบกับกรณีที่ทำกรทดสอบอบแห้งที่ใช้เวลาสำหรับเปิดวาล์วที่น้อย และกรณีที่ทำกรทดสอบอบแห้งที่ไม่เปิดวาล์วเลย (ปิดตลอด)

ช. จากการศึกษเกี่ยวกับแบบจำลองเอมพิริคัลซึ่งบางเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในท่อแนวตั้ง เพื่อทำนายผลจลนพลศาสตร์การอบแห้ง สำหรับการหาแบบจำลองที่เหมาะสมพบว่าแบบจำลองของ Midilli et al. (2002) มีความแม่นยำมากที่สุด โดยมีค่า RMSE และ χ^2 ต่ำสุดอยู่ที่ 0.00396098 - 0.0058791 และ 0.00001987 - 0.00004378 ตามลำดับ มีค่า r สูงสุด (เข้าใกล้ 1 มากสุด) อยู่ที่ 0.99977341 - 0.99989594

7.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการทำวิจัยต่อไป

ก. ปรับปรุงอุปกรณ์ป้อนข้าวเปลือก (Feeder) เข้าท่ออบแห้ง เพื่อลดความเสียหายทางกลต่อเมล็ดข้าวเปลือก

ข. ทำการทดสอบด้วยข้าวเปลือกขึ้นจากการเก็บเกี่ยวใหม่ในฤดูการเก็บเกี่ยว (หลีกเลี่ยงการเพิ่มความชื้นให้กับเมล็ดข้าวเปลือก) เพื่อลดความเสียหายที่อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเมล็ดข้าวเปลือกอันจะนำไปสู่รอยร้าวและเกิดการแตกหักตามมา

ค. ควรหาวิธีนำพลังงานที่สูญเสียในตำแหน่งควบคุมพฤติกรรมอากาศกลับมาใช้ใหม่อีกครั้งเพื่อที่จะช่วยลดอัตราการใช้พลังงานจำเพาะลงได้

ง. ระบบอบแห้งควรมีการหุ้มฉนวนบริเวณท่อทางไหลของอากาศร้อน เพื่อป้องกันอากาศร้อนถ่ายเทออกสู่สิ่งแวดล้อม

จ. เพื่อที่จะอธิบายผลของพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของเมล็ดข้าวเปลือกให้ชัดเจนยิ่งขึ้น จะต้องทำการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ให้รัดกุมมากขึ้นกว่าเดิม

เอกสารอ้างอิง

- กิตติยา กิจควรวดี. (2547). การเก็บเกี่ยวและปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อให้ได้ข้าวคุณภาพดี. งามชื่น คง เสรี (บรรณาธิการ). **คุณภาพและการตรวจสอบข้าวหอมมะลิไทย**. (หน้า 1 - 15). กรุงเทพฯ: บริษัทเจริญภัณฑ์เอ็กซ์เพรส จำกัด.
- เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว, สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวีช จิตรสมบูรณ์. (2551). ผลของความเร็วดวงอากาศต่ออัตราการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีข้าวหล่นอิสระอย่างต่อเนื่อง. **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22**. 15 - 17 ตุลาคม 2551. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ฉัตรชัย นิยมมล (2555). ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้หอบแห้งชนิดท่อเกลียว. **วารสาร มข.** 17(1): 97 - 109.
- ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา และ ทวีช จิตรสมบูรณ์. (2557). เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นหมุนวงติดตะแกรง. **งานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28**. ระหว่างวันที่ 15 - 17 ตุลาคม พ.ศ. 2557 ณ จังหวัดขอนแก่น.
- ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา และ ทวีช จิตรสมบูรณ์. (2558). ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นที่เป็นข้ออ. **งานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29**. ระหว่างวันที่ 1 - 3 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 ณ จังหวัดนครราชสีมา.
- ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา, กระจวี ตรีอำรรค และ เทวรัตน์ ตรีอำรรค. (2565). อิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือก. **วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร**. 16(1).
- ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา, ธรรมรัตน์ แยมสูงเนิน, กระจวี ตรีอำรรค, เทวรัตน์ ตรีอำรรค และ ปรีดา ปรากฏมาก. (2564). การศึกษาการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งแบบลมร้อนด้วยวิธีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์. **การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22**. 12 - 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2564. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ณัฐพล แซ่ลิ้ม, เทวรัตน์ ตรีอำรรค และ กระจวี ตรีอำรรค. (2561). การพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีความร้อนในแนวรัศมี. **วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร**. 12(2).
- ทวีช จิตรสมบูรณ์, โศรฎา แข็งการ และ เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว. (2549). เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ: รวดเร็วและประหยัดพลังงาน. **การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 2**. 27 - 29 กรกฎาคม 2549. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

- ทวิช จิตรสมบูรณ์, โศรฎา แข็งการ และ เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว. (2549). ผลกระทบของลมหมุนวนต่อประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ. **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20**. 18 - 20 ตุลาคม 2549. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- เทวรัตน์ ทิพยวิมล. (2554). **การทำแห้งและการเก็บรักษาผลผลิตเกษตร**. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ชนะรัชต์ วิจิณธนาสาร, วิโรจน์ ฤทธิ์ทอง และ กิตติ สถาพรประสาธน์. (2554). การลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสนทำงานร่วมกับเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม. **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25**. 19 - 21 ตุลาคม 2554.
- ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน, กระจวี ตริอำนาจ และ เทวรัตน์ ตริอำนาจ. (2564). อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือก. **การประชุมวิชาการสมาคมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22**. 12 - 13 พฤษภาคม 2564. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- เชียรชัย สันดุขฎี. (2535). การถ่ายเทอากาศในเมล็ดพืช. **วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร**. ปีที่ 9 (ฉบับที่ 2): 60.
- นิรชรา ศรีสุบัตติ, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และ ทิพาพร อยู่วิทยา. (2540). การศึกษาผลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่มีผลต่ออัตราการเหลืองของข้าวเปลือกขึ้น. **บทความวิจัยและบทความวิชาการ**. กรุงเทพฯ: คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ปรีดา ปรากฏมาก. (2562). แบบจำลอง CFD - DEM ของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์เซชันสำหรับตัวกลางก๊าซ - ของแข็ง. **วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย**. ปีที่ 25 ฉบับที่ 1 (2562). 19 - 27.
- ปรีดา ปรากฏมาก. (2562). แบบจำลอง CFD - DEM สำหรับพลศาสตร์ของก๊าซ - ของแข็งในระบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบต่อเนื่อง. **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33**. 2 - 5 กรกฎาคม พ.ศ. 2562 จังหวัดอุดรธานี.
- ปรีดา ปรากฏมาก และ สถาพร ว่างาย. (2562). การจำลองลักษณะของฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้วิธีวิเคราะห์อนุภาคไม่ต่อเนื่องร่วมกับการคำนวณพลศาสตร์ของไหล. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่**. 26(2). 231 - 242.
- ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์. (2561). การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อที่มีการไหลแบบปั่นป่วนผ่านแผ่นปีกสามเหลี่ยม. **วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**. 28(3).
- ศิวกกร ศรีธัญญากร. (2562). การทดลองและแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคเป่าพ่นหล่นอิสระ. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**.

- สั๊กมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา. (2555). การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. กรุงเทพฯ: ท้อป.
- สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ. (2557). การทดลองเพื่อหาจุดปฏิบัติการที่ดีที่สุดของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีเป่าพ่น - หล่นหน่วง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์. (2552). เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ : เจื่อนไขการอบแห้งที่ให้คุณภาพข้าวสารที่ดี. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23. 4 - 7 พฤศจิกายน 2552. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (2540). การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2538). แนวทางการจัดการข้าวเปลือกชื้น. การประชุมราชบัณฑิต. กรุงเทพฯ: สำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน.
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, พิพัฒน์ อมตฉายา, สมเกียรติ ปรัชญาวารากร, อติศักดิ์ นาถกรณกุล และ สิทธิชัย อินทร์จันทร์. (2540). การอบแห้งข้าวเปลือกในที่เก็บและการเก็บรักษาในสถานที่ใช้งานจริง. บทความวิจัยและบทความวิชาการ. กรุงเทพฯ: คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2563). สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2563. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ. 241 หน้า.
- อดิเทพ ทวีรัตนพาณิชย์, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, สมบูรณ์ เวชกามา, งามรินทร์ คงเสรี และ สุนันทา วงศ์ปิยชน. (2541). ผลพลอยได้จากการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดเซชัน. การประชุมราชบัณฑิต. กรุงเทพฯ: สำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน.
- อรรถพร อภิวฒนานุกูล, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, ทิพาพร อยู่วิทยา และ อติศักดิ์ นาถกรณกุล. (2540). การชะลอความเสียหายของกองข้าวเปลือกชื้นโดยการระบายอากาศ. บทความวิจัยและบทความวิชาการ. กรุงเทพฯ: คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2560). ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 366 หน้า.
- อรอนงค์ ศรีพวาทกุล, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และ สมเกียรติ ปรัชญาวารากร. (2540). การศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยวิธีฟลูอิดไดซ์เบดอย่างต่อเนื่อง. บทความวิจัยและบทความวิชาการ. กรุงเทพฯ: คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อำนาจ บุญลอย, ดำริห์ จันทร์แสงสุข และ พงษ์เจต พรหมวงศ์. (2549). การอบแห้งเมล็ดพริกไทยแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีแผ่นกระจายแบบเกลียว. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล

แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20. 18 - 20 ตุลาคม 2549. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- Afzal, T. M. and Abe, T. (1998). Diffusion in potato during far infrared radiation drying. **Journal of food engineering**, 37(4), pp. 353 - 365.
- Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., (2011). Modelling the Carrot Thin - Layer Drying in a Semi - Industrial Continuous Band Dryer. **Czech J. Food Sci.** 29(5): pp. 528 - 538.
- Aktar, S., Kibria, R., Alam, M. M., Kabir, M. and Saha, C. K. (2016). Performance Study of STR Dryer for Paddy. **J. Agril. Mach. Bioresour. Eng.** 7(1), 9 - 16.
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). (2000). **Official Methods of Analysis.** 17th ed., Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, Maryland.
- Bala, B. K. (1997). **Drying and Storage of Cereal Grains.** Science Publishers, Inc., U.S.A., 302 p.
- Brooker, D. B., Bakker - Arkema, F. W. and Hall, C. W. (1992). **Drying and Storage of Grains and Oilseeds.** An AVI Book, U.S.A., 450 p.
- Cengel, Y. A. and Boles, M. A. (2010). **Thermodynamics : An Engineering Approach 7th Edition.** New York: McGraw - Hill Education.
- Cengel, Y. A. and Cimbala, J. M. (2014). **Fluid Mechanics Fundamentals and Applications.** Third edition, The McGraw - Hill Companies, Inc., Americas, New York.
- Chakraverty, A. and Singh, R. P. (2001). **Postharvest Technology.** Science Publishers, Inc., U.S.A., 356 p.
- Cengel, Y. A. (2003). **Heat Transfer a Practical Approach.** second edition, Published by McGraw - Hill.
- Cengel, Y. A. (2006). **Heat and Mass Transfer.** third edition, Published by McGraw - Hill.
- Chokphoemphun, Sua. and Chokphoemphun, Sur. (2018). Moisture content prediction of paddy drying in a fluidized - bed dryer with a vortex flow generator using an artificial neural network. **Applied Thermal Engineering**, Vol. 145. 630 - 636.
- Chuwattanakul, V. and Eiamsa - ard, S. (2019). Hydrodynamics investigation of pepper drying in a swirling fluidized bed dryer with multiple-group twisted tape swirl generators. **Case Studies in Thermal Engineering**, Vol. 13.
- Crank J., (1975). **The Mathematics of Diffusion**, second ed. Clarendon Press, Oxford, pp. 47 - 53.

- Cundall, P. A. and Strack, O. D. L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. **Int. J. Geotech**, 29(1), pp. 47 - 65.
- Doymaz, I. and Kocayigit, F. (2011). Drying and Rehydration Behaviors of Convection Drying of Green Peas. **Drying technology**, 29: pp. 1273 - 1282.
- Erbay, Z. and Icier, F. (2010). A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling, and Experimental Results. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 50: pp. 441 - 464.
- Fan, J., Siebenmorgen T. J. and Marks, B. P. (2000). Effects of variety and Harvest Moisture Content on Equilibrium Moisture Contents of Rice. **Applied Engineering in Agriculture**, 16(3): 245 - 251.
- Ferdinand, P. B., Johnston, Jr. E. R. and Clausen, W. E. (2007). **Vector Mechanics for Engineers**. eighth edition, The McGraw - Hill Companies, Inc., Americas, New York.
- Ghalavand, Y., Hatamipour, M. S. and Rahimi, A. (2010). Experimental and parametric study on drying of green peas in spouted bed. **International Journal of Food Science and Technology Research**, Vol. 45, 2546 - 2552.
- Gharekhani, M., Kashaninejad, M., Garmakhany, A. D. and Ranjbari, A. (2013). Physical and aerodynamic properties of paddy and white rice as a function of moisture content. **Quality Assurance and Safety of Crops & Foods**, 5(3), pp.187 - 197.
- Gidaspow, D. (1986). Hydrodynamics of fluidization and heat transfer: Supercomputer modeling. **Int. J. Appl. Mech. Rev.** 39, pp. 1 - 23.
- Hong - Wei, L., Wang, L., Wang, T. and Chang - he, D. (2020). Experimental and CFD - DEM numerical evaluation of flow and heat transfer characteristics in mixed pulsed fluidized beds. **Advanced Powder Technology**, 31(8). 3144 - 3157.
- Kahyaoglu, L. N., Sahin, S. and Sumnu, G. (2012). Spouted bed and microwave - assisted spouted bed drying of parboiled wheat. **Food and Bioproducts Processing Research**, Vol. 90, 301 - 308.
- Khaengkarn, S., Meesukchaosumran, S. and Chitsomboon, T. (2011). Genetic algorithm for the selection of rough rice drying model for the free - fall paddy dryer. **Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering**, 1(1): pp. 63 - 75.
- Limpiti, S. and Changrue, V. (1996). Effects of Rewetting on Milling Quality of Wet Season Japanese Rice. **Journal of Agricultural**, 12(2), pp. 134 - 139.

- Lu, R., Siebenmorgen, T. J., Costello, T. A. and Fryar Jr, E. O. (1995). Effect of Rice Moisture Content and Harvest on Economic Return. **Applied Engineering in Agriculture**, 11(5): 685 - 690.
- Liu, S. and Sakr, M. (2013). A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Vol. 19, pp. 64 - 81.
- Montanari, D., Agostini, A., Bonini, M., Corti, G. and Ventisette, C. D. (2017). The Use of Empirical Methods for Testing Granular Materials in Analogue Modelling. **Journal materials 2017**, 10, 635.
- Norouzi, H. R., Zarghami, R., Sotudeh - Gharebagh, R. and Mostoufi, N. (2016). **Coupled CFD - DEM Modeling Formulation Implementation and Application to Multiphase Flows**. John Wiley & Sons.
- Ondokmai, P., Homdoug, N., Dussadee, N., Yongphet, P., Bouchareon S. and Ramaraj, R. (2016). Performance of Paddy Greenhouse Solar Dryer Operate with Hybrid Gasification Technology. **Proceeding of 23rd Tri - U International Joint Seminar and Symposium**, Agricultural University, Indonesia.
- Prachayawarakorn, S., Ruengnarong, S. and Soponronnarit, S. (2006). Characteristic of heat transfer in two - dimensional spouted bed. **International Journal of Food Engineering Research**, Vol. 76, 327 - 333.
- Rajan, K. S., Srivastava, S. N., Pitchumani, B. and Dhasandhan, K. (2008). Experimental study of thermal effectiveness in pneumatic conveying heat exchanger. **Applied Thermal Engineering**, 28(2008): 1932 - 1941.
- Rohsenow, W. M., Hartnett, J. P. and Cho, Y. I. (1998). **Handbook of Heat Transfer**. third edition, Published by McGraw - Hill.
- Saha, C. K., Alam, Md. A., Alam, Md. M., Kalita, P. K. and Harvey, J. (2017). Field Performance of BAU - STR Paddy Dryer in Bangladesh. **ASABE Annual International Meeting**, Spokane, United States. Duration: Jul 16 2017 - Jul 19 2017.
- Sarker, N. N., Kunze, O. R. and Strouboulis, T. (1994). Finite Element Simulation of Rough Rice Drying. **Drying Technology**, 12(4): 761 - 775.
- Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn. S. (1994). Optimum Strategy for Fluidized Bed Paddy Drying. **Drying Technology**, 12(7): 1667 - 1686.
- Soponronnarit, S. (1999). Fluidized - Bed Paddy Drying. **Science Asia**, 25: 51 - 56.

- Soponronnarit, S., Rordprapat, W. and Wetchacama, S. (1998). Mobile Fluidized Bed Paddy Dryer. **Drying Technology**, 16(7): 1501 - 1513.
- Swasdisevi, T., Soponronnarit, S., Shujinda, A., Wetchacama, S. and Thepent, V. (1998). Rice Husk Furnace for Fluidized Bed Paddy Dryer. **บทความวิจัยและบทความวิชาการ**. กรุงเทพฯ: คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Soponronnarit, S., Wetchacama, S., Swasdisevi, T. and Poomsa - ad, N. (1999). Managing Moist Paddy by Fluidization Drying, Tempering and Ambient Air. **Drying Technology**, 17(1 - 2): 335 - 343.
- Taweerattanapanish, A. (1998). Operating Condition of Fluidized Bed Dryer for Increasing Paddy Quality. **บทความวิจัยและบทความวิชาการ**. กรุงเทพฯ: คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Teffo V.B. and Natasia, N. (2013). Determination of the coefficients of restitution, static and rolling friction of Eskom - grade coal for discrete element modelling. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy** 113, pp. 351 - 356.
- Wetchacama, S., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S. and Wangil, M. (1998). Mathematical Model for Industrial Scale Fluidized Bed Paddy Dryer. **บทความวิจัยและบทความวิชาการ**. กรุงเทพฯ: คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Wilcox, D. C. (1998). **Turbulence Modeling for CFD**. (2nd ed.), Anaheim: DCW Industries.
- Wiset, L., Srzednicki, G., Driscoll, R. H., Nimmuntavin, C. and Siwapomrak, P. (2001). Effects of High Temperature Drying on Rice Quality. **Agricultural Engineering International: The CIGR Journal of Scientific Research and Development**, Manuscript FP 01 003. Vol. 3.
- Wongbubpa, N., Treeamnuak, K. and Treeamnuak, T. (2020). Kinematics motion of paddy in hot air pulse flow. **The 13th TSAE International Conferences 187**, Suranaree University of Technology, Thailand.



ภาคผนวก ก

เครื่องมือและข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

ก.1 เครื่องเป่าลม (Blower)

เครื่องเป่าลม (blower) มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 2.2 kW ควบคุมเครื่องเป่าลมให้สร้างอากาศอบแห้งที่มีความเร็วคงที่ด้วยการวัดความดันอากาศตกคร่อม Orifice Plate โดยใช้ Pressure transmitter และส่งสัญญาณจาก Pressure transmitter ป้อนกลับไปยัง Inverter แล้วเปรียบเทียบค่าสัญญาณป้อนกลับกับค่า Set point ของ Inverter เพื่อให้ Inverter ปรับแรงดันและความถี่กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้เครื่องเป่าลมด้วยตัวควบคุมแบบ PID เพื่อให้ได้ความเร็วอากาศอบแห้งที่ต้องการ

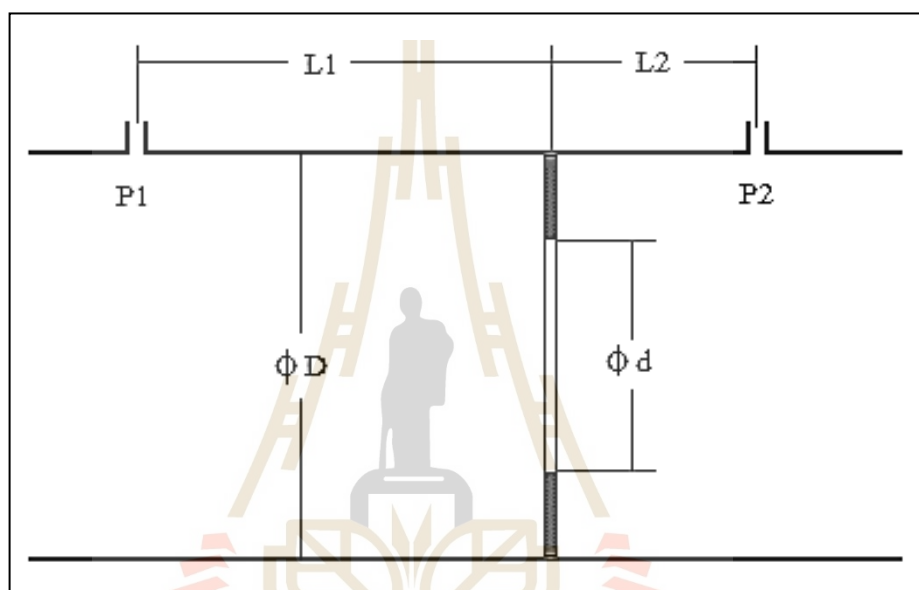
การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่า Set point ของ Inverter กับความดันตกคร่อม Orifice Plate ที่ Pressure transmitter วัดได้เพื่อนำไปคำนวณค่าความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยในตำแหน่งทางเข้าท่ออบแห้ง พบว่าความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ Set point ของ Inverter มีค่าเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์แสดงตาราง ก.1

ตารางที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Inverter set point ค่าความดันตกคร่อม Orifice Plate และค่าความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยในตำแหน่งทางเข้าท่ออบแห้ง

Inverter set point (%)	ความดันตกคร่อม Orifice Plate (kPa)	ความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยในตำแหน่งทางเข้าท่ออบแห้ง (m/s)
5.5	1.7	8.44
6.0	1.8	8.68
6.5	2.0	9.15
7.0	2.1	9.38
7.5	2.3	9.81
8.0	2.4	10.0
8.5	2.6	10.4
9.0	2.7	10.6

ก.2 Orifice plate

ในงานวิจัยนี้วัดความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่ผ่านเข้าสู่เครื่องอบแห้งด้วยแผ่นออริฟิส ที่ออกแบบและสร้างตามมาตรฐาน ISO 5167 (เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว และคณะ, 2551) มีลักษณะเป็นแบบ Concentric Orifice Plate (Square Edge) จุดต่อสำหรับวัดค่าความดันแตกต่างแบบระยะ D และ $0.5D$ (Vena Contracta Taps) แสดงดังรูป ก.1 มีรายละเอียดของขนาดชุดออริฟิส ที่ใช้ในการคำนวณความเร็วดังนี้



รูปที่ ก.1 แผนภาพลักษณะของท่อ Orifice Plate และจุดต่อสำหรับวัดค่าความแตกต่างของความดันแบบระยะ D และ $0.5D$ (Vena Contracta Taps)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ; $D = 44.00$ mm

เส้นผ่านศูนย์กลาง Orifice Plate; $d = 20.00$ mm

อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง ($0.2 \leq \beta \leq 0.75$); $\beta (d/D) = 0.4545$

ระยะด้านเหนือน้ำ $D \pm 0.1D$ ในงานวิจัยเลือกใช้ระยะ = 44.00 mm

ระยะด้านปลายน้ำ $0.5D \pm 0.01D$ ในงานวิจัยเลือกใช้ระยะ = 22.00 mm

พิจารณาการไหลของของไหลระหว่างสองจุดใด ๆ โดยใช้สมการเบอร์นูลลี ภายใต้สมมติฐานคือไม่มีการส่งผ่านความร้อนทั้งโดยตรงโดยอ้อมและไม่มีการส่งผ่านงาน กำหนดให้ตำแหน่งที่ 1 เป็นตำแหน่งของท่อขนาดใหญ่และตำแหน่งที่ 2 เป็นตำแหน่งเส้นผ่านศูนย์กลาง Orifice Plate (รูปที่ ก.1) สามารถเขียนสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{\bar{V}_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{\bar{V}_2^2}{2g} \quad (\text{ก.1})$$

จัดรูปสมการใหม่

$$\bar{V}_2^2 - \bar{V}_1^2 = 2g \cdot \left[\frac{(P_1 - P_2)}{\rho g} + (Z_1 - Z_2) \right] \quad (\text{ก.2})$$

จากสมการอนุรักษ์มวล

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (\text{ก.3})$$

$$\rho_1 A_1 \bar{V}_1 = \rho_2 A_2 \bar{V}_2 \quad (\text{ก.4})$$

พิจารณาว่าอนุหภูมิของอากาศที่ผ่าน Orifice Plate มีความแตกต่างกันน้อยจึงประมาณได้ว่า

$$\rho_1 \approx \rho_2$$

ดังนั้น

$$A_1 \bar{V}_1 = A_2 \bar{V}_2 \quad (\text{ก.5})$$

$$\bar{V}_1 = \frac{\left(\frac{\pi d^2}{4} \right)}{\left(\frac{\pi D^2}{4} \right)} \cdot \bar{V}_2 = \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cdot \bar{V}_2 \quad (\text{ก.6})$$

นำ \bar{V}_1 กลับไปแทนในสมการ (ก.2)

$$\bar{V}_2^2 - \left(\left(\frac{d}{D} \right)^2 \cdot \bar{V}_2 \right)^2 = 2g \cdot \left[\frac{(P_1 - P_2)}{\rho g} + (Z_1 - Z_2) \right] \quad (\text{ก.7})$$

$$\bar{V}_2 = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} \right) \cdot \sqrt{2g \cdot \left[\frac{(P_1 - P_2)}{\rho g} + (Z_1 - Z_2) \right]} \quad (\text{ก.8})$$

$$\bar{V}_2 = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \right) \cdot \sqrt{2g \cdot \left[\frac{(P_1 - P_2)}{\rho g} + (Z_1 - Z_2) \right]} \quad (\text{ก.9})$$

ดังนั้นสามารถหาค่าอัตราไหลปริมาตรที่ตำแหน่ง Orifice Plate ได้ดังนี้

$$Q_2 = A_2 \bar{V}_2 = \left(\frac{A_2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \right) \cdot \sqrt{2g \cdot \left[\frac{(P_1 - P_2)}{\rho g} + (Z_1 - Z_2) \right]} \quad (\text{ก.10})$$

สมการที่ได้มาเป็นอัตราไหลปริมาตรโดยทางทฤษฎี ซึ่งต้องมีค่าสูงกว่าความเป็นจริงเนื่องจากไม่ได้คิดความฝืดที่ต้านทานการไหล ดังนั้นในการนำไปใช้งานจริงต้องกำหนดค่าสัมประสิทธิ์อัตราไหล (C_d) และสัมประสิทธิ์การขยายตัว (ϵ) เพื่อสามารถนำไปใช้ได้กับการวัดค่าจริง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (ก.11)

$$Q_2 = A_2 \bar{V}_2 = \left(\frac{C_d \epsilon A_2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \right) \cdot \sqrt{2g \cdot \left[\frac{(P_1 - P_2)}{\rho g} + (Z_1 - Z_2) \right]} \quad (\text{ก.11})$$

ชุดออร์ฟิสมี ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว (ϵ) มีค่าเท่ากับ 0.940088 และสัมประสิทธิ์อัตราไหล (C_d) มีค่าเท่ากับ 0.6087 (Reader - Harris/Gallagher) ตามสมการ (ก.12) และ (ก.13) ตามลำดับ

$$\epsilon = 1 - \left(0.41 + 0.35\beta^4 \right) \left(\frac{\Delta P}{kP_1} \right) \quad (\text{ก.12})$$

เมื่อ P_1 คือ ความดันสัมบูรณ์ที่ท่อก่อนถึง Orifice Plate, Pa

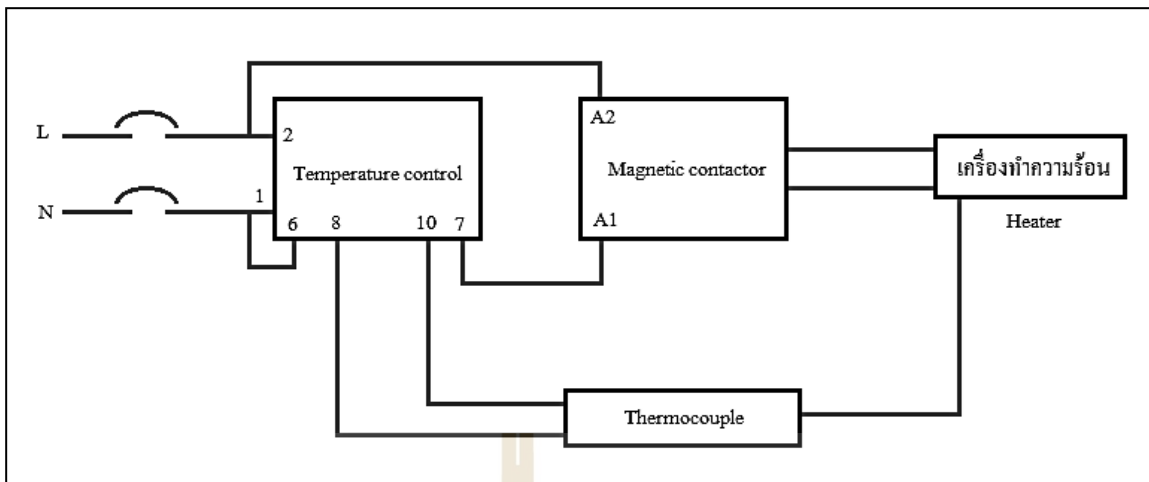
ΔP คือ ผลต่างความดันตกคร่อมที่ Orifice Plate, Pa
 k คือ Specific Heat Ratio = 1.4 (ที่อุณหภูมิอากาศ 60°C)

$$\begin{aligned}
 C_d = & 0.5961 + 0.0261\beta^2 - 0.216\beta^8 + 0.000521 \left(\frac{10^6 \beta}{Re_D} \right)^{0.7} \\
 & + \left(0.0188 + 0.0063 \left(\frac{19000\beta}{Re_D} \right)^{0.8} \right) \cdot \beta^{3.5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0.3} \\
 & + \left(0.043 + 0.8e^{-10L_1} - 0.123e^{-7L_1} \right) \left(1 - 0.11 \left(\frac{19000\beta}{Re_D} \right)^{0.8} \right) \left(\frac{\beta^4}{1 - \beta^4} \right) \\
 & - 0.31 \left(\left(\frac{2L'_2}{1 - \beta} \right) - 0.8 \left(\frac{2L'_2}{1 - \beta} \right)^{1.1} \right) \cdot \beta^{1.3} \\
 & + \left(0.011(0.75 - \beta) \left(2.8 - \frac{D}{25.4} \right) \right)
 \end{aligned} \tag{ก.13}$$

เมื่อ L_1 คือ 1
 L'_2 คือ 0.47

ก.3 เครื่องทำความร้อน (Heater)

เครื่องทำความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 4 kW ติดตั้งควบคู่กับ Magnetic Contactor ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังเครื่องทำความร้อน และ Magnetic Contactor จะถูกต่อด้วยวงจรทางไฟฟ้าไว้กับ PID Temperature Control ของ Shinko รุ่น JCS - 33A ซึ่ง Temperature Control จะทำหน้าที่ในการรับค่าอุณหภูมิในตำแหน่งที่ติดตั้ง Thermocouple Type K ไว้แล้วส่งสัญญาณควบคุมไปยัง Magnetic Contactor เพื่อให้ทำการตัดการจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อพบว่าอุณหภูมิเกินค่าที่ตั้งไว้ หรือเพื่อให้ต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อพบว่าอุณหภูมียังไม่ถึงค่าที่ตั้งไว้ วงจรการควบคุมเครื่องทำความร้อนแสดงดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 แผนผังวงจรที่ต่อร่วมกับ Magnetic Contactor, PID Temperature Control และ Thermocouple Type K เพื่อใช้ควบคุมอุณหภูมิอากาศอบแห้ง





ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัย

ข.1 การวิเคราะห์หาค่าพลังงานที่สูญเสียในตำแหน่งควบคุมพฤติกรรมอากาศ

การวิเคราะห์หาค่าพลังงานที่สูญเสียในตำแหน่งควบคุมพฤติกรรมอากาศ แสดงการคำนวณดังสมการที่ (ข.1)

$$SEC_{\text{lose}} = \frac{3.6E_{\text{lose}}}{W_i - W_f} \quad (\text{ข.1})$$

$$E_{\text{lose}} = \dot{m}_a \Delta h \cdot (t_{\text{open valve}}) \quad (\text{ข.2})$$

$$\dot{m}_a = \rho AV \quad (\text{ข.3})$$

เมื่อ SEC_{lose} = ค่าพลังงานที่สูญเสียในตำแหน่งควบคุมพฤติกรรมอากาศ (MJ/kg)

E_{lose} = พลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศอบแห้ง (kWh)

W_i = น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น (kg)

W_f = น้ำหนักข้าวเปลือกหลังอบแห้ง (kg)

\dot{m}_a = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง ($\text{kg}_{\text{dry air}}/\text{h}$)

Δh = ค่าความร้อนที่ให้แก่อากาศเพื่อเพิ่มความร้อนให้กับอากาศ ($\text{kJ}/\text{kg}_{\text{dry air}}$)

$t_{\text{open valve}}$ = เวลารวมทั้งหมดที่ใช้ในการเปิดวาล์วตลอดช่วงทำการทดสอบ (min)

ρ = ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

A = พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนไหลผ่าน (m^2)

V = ความเร็วอากาศตำแหน่งเปิดวาล์ว (m/s)

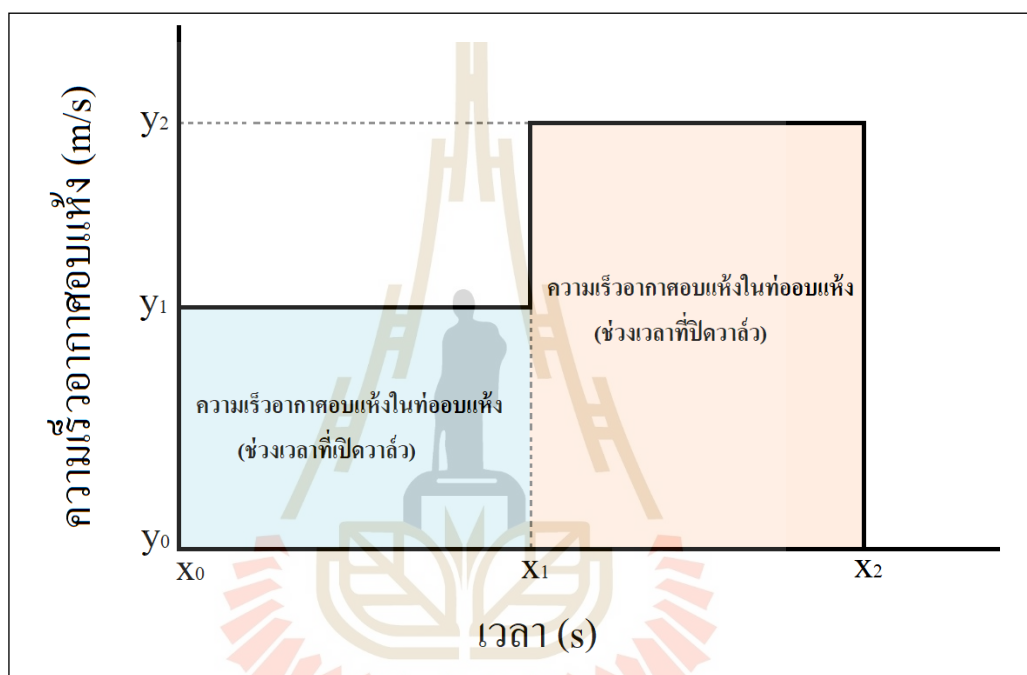
ข.2 การวิเคราะห์หาค่าความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยตลอดกระบวนการทดสอบในท่ออบแห้ง

การวิเคราะห์หาค่าความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ยตลอดกระบวนการทดสอบในท่ออบแห้ง ดำเนินการด้วยวิธีกราฟฟิค (Graphical method) ดังแสดงในรูปที่ ข.1

การคำนวณแสดงดังสมการที่ (ข.4)

$$V_{\text{avg}} = \frac{(y_1 - y_0) \cdot (x_1 - x_0) + (y_2 - y_1) \cdot (x_2 - x_1)}{(x_2 - x_0)} \quad (\text{ข.4})$$

- เมื่อ x_0 = เวลาเริ่มต้นก่อนเปิดวาล์ว (min)
 x_1 = เวลาสิ้นสุดการเปิดวาล์ว หรือเวลาเริ่มต้นการปิดวาล์ว (min)
 x_2 = เวลาสิ้นสุดการปิดวาล์ว (min)
 y_0 = ความเร็วอากาศรอบแหงในท่อบนที่ศูนย์ (m/s)
 y_1 = ความเร็วอากาศรอบแหงในท่อบนแหงเมื่อทำการเปิดวาล์ว (m/s)
 y_2 = ความเร็วอากาศรอบแหงในท่อบนแหงเมื่อทำการปิดวาล์ว (m/s)



รูปที่ ข.1 การหาค่าความเร็วอากาศรอบแหงด้วยวิธีกราฟฟิค (Graphical method)

ข.3 การวิเคราะห์หาค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแหง

การวิเคราะห์หาค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแหง ดำเนินการด้วยวิธีกราฟฟิค (Graphical method) ดังนี้

จากสมการ (5.43) ค่าพลังงานกระตุ้นของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\ln(D_{\text{eff}}) = \ln(D_0) + \left(\frac{-E_a}{RT} \right) \quad (\text{ข.5})$$

หรือ

$$\ln(D_{\text{eff}}) = \left(\frac{-E_a}{R} \right) \cdot \left(\frac{1}{T} \right) + \ln(D_0) \quad (\text{ข.6})$$

เมื่อนำสมการ (ข.6) เทียบกับสมการเส้นตรงใน (ข.7)

$$y = mx + c \quad (\text{ข.7})$$

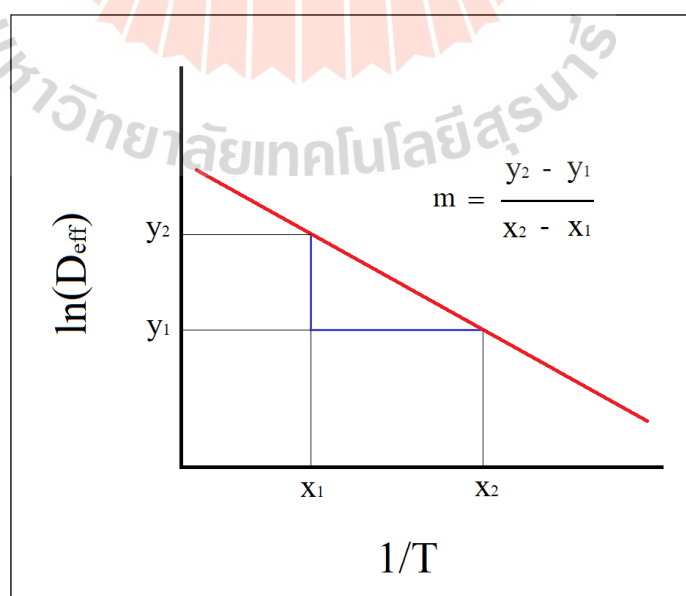
$$\text{จะได้ว่า } y = \ln(D_{\text{eff}}), \quad m = \frac{-E_a}{R}, \quad x = \frac{1}{T}, \quad c = \ln(D_0)$$

เมื่อทำการพล็อตกราฟจากสมการ (ข.6) จะได้เส้นตรงที่มีความชัน (m) เป็นลบ ดังแสดงในรูปที่ ข.2 ค่าความชันที่ได้จากกราฟนำไปคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแห้งตามสมการที่ (ข.8)

$$m = \frac{-E_a}{R} \quad (\text{ข.8})$$

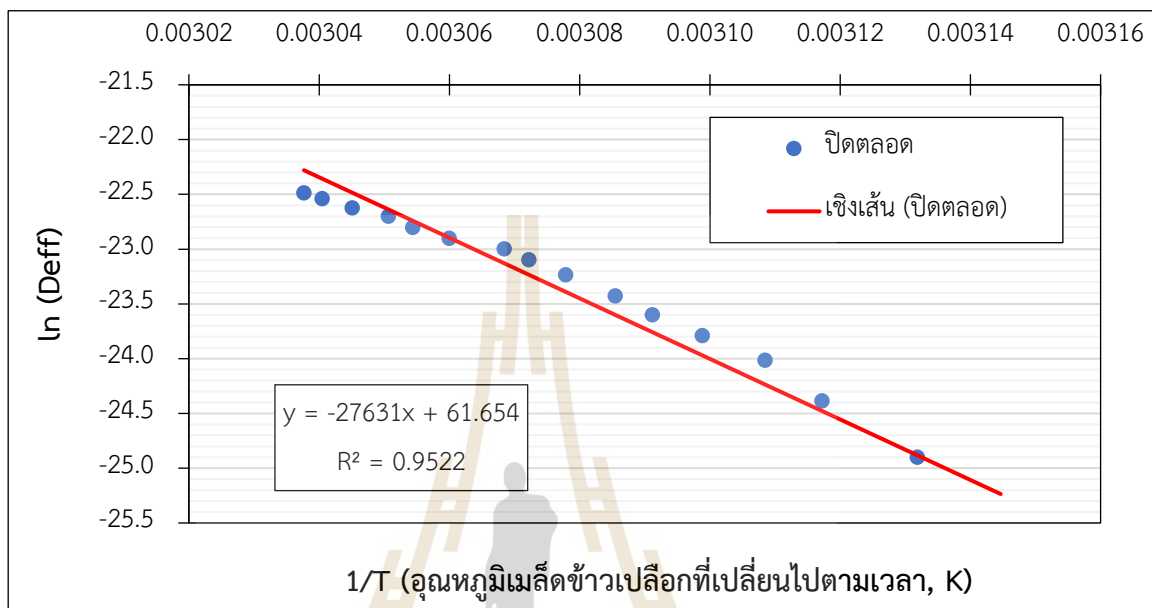
หรือ

$$-E_a = mR \quad (\text{ข.9})$$

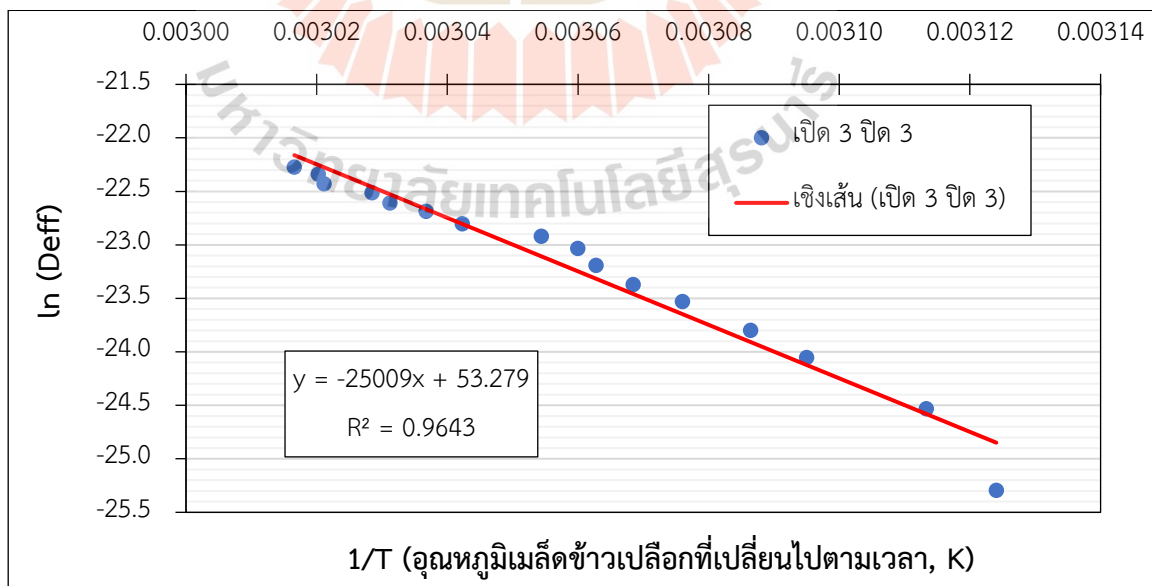


รูปที่ ข.2 การหาค่าความชัน (m) จาก semi - logarithmic plot

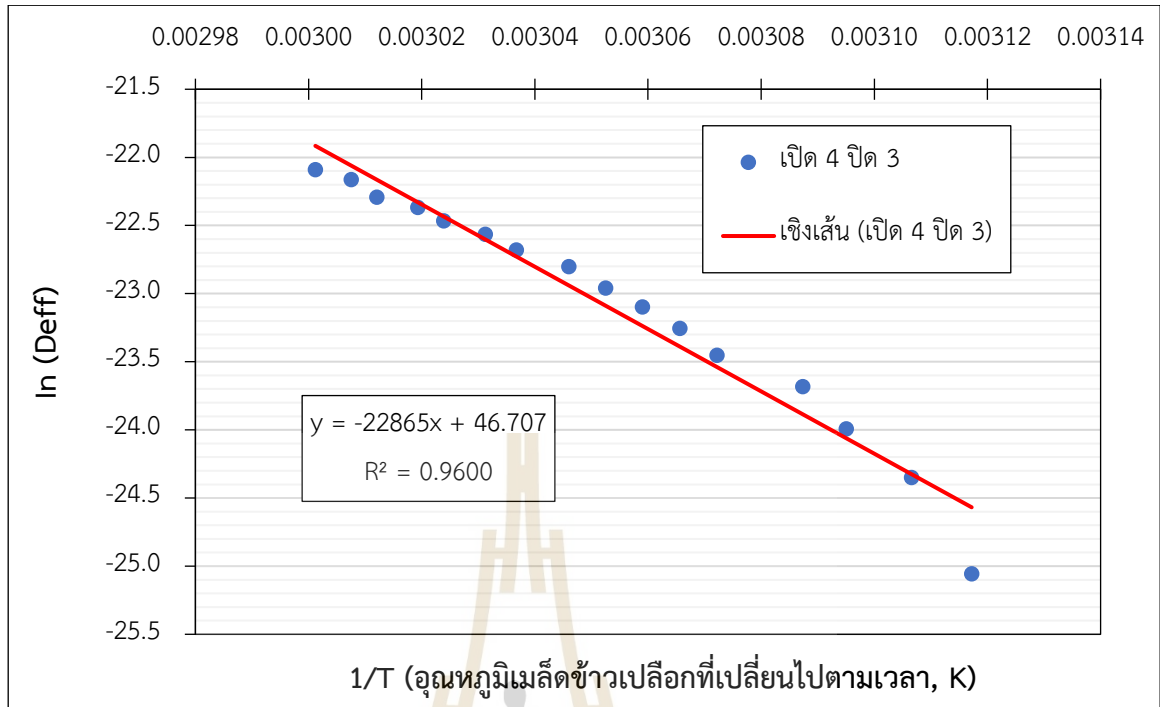
ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทำการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล $\ln(D_{eff})$ และเศษส่วนของอุณหภูมิข้าวเปลือก $1/T$ ที่เวลาต่าง ๆ เพื่อหาค่าความชื้น (m) แล้วนำไปคำนวณค่าพลังงานกระตุ้น แสดงดังรูปที่ ข.3 ข.4 ข.5 และ ข.6



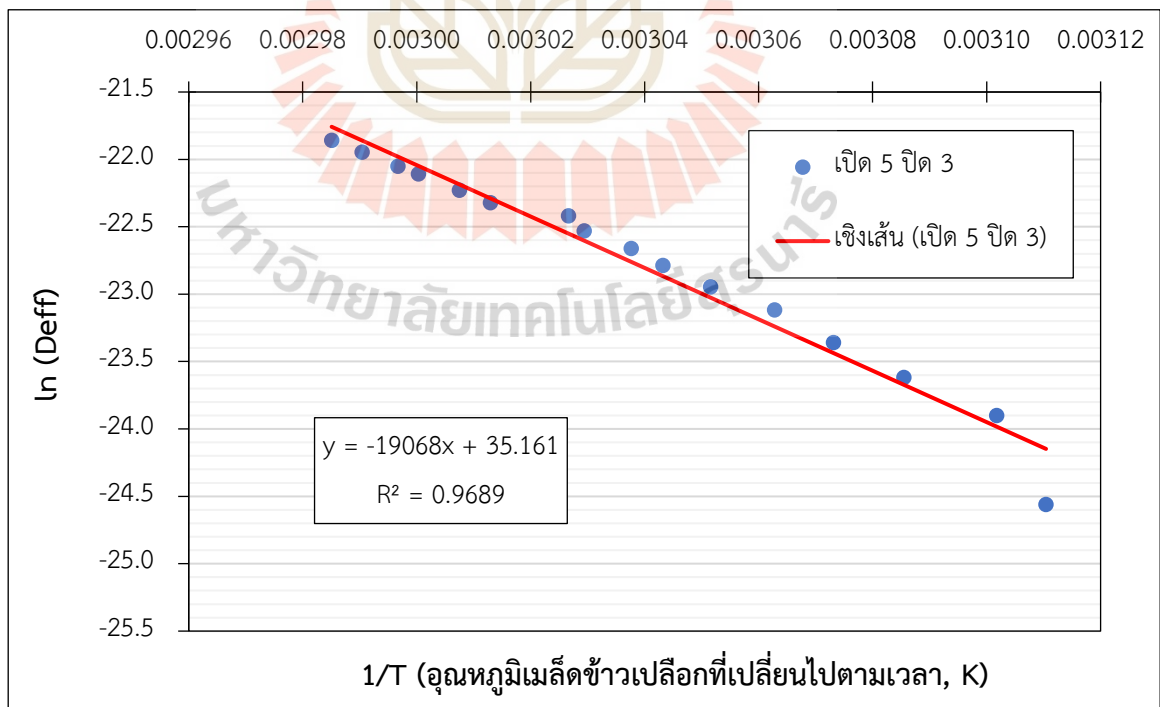
รูปที่ ข.3 ค่าความชื้น (m) จาก semi - logarithmic plot ด้วยวิธีการกราฟฟิค (Graphical method) ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (แบบปิดตลอด)



รูปที่ ข.4 ค่าความชื้น (m) จาก semi - logarithmic plot ด้วยวิธีการกราฟฟิค (Graphical method) ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (แบบเปิด 3 ปิด 3)



รูปที่ ข.5 ค่าความชื้น (m) จาก semi - logarithmic plot ด้วยวิธีการกราฟิก (Graphical method) ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (แบบเปิด 4 ปิด 3)

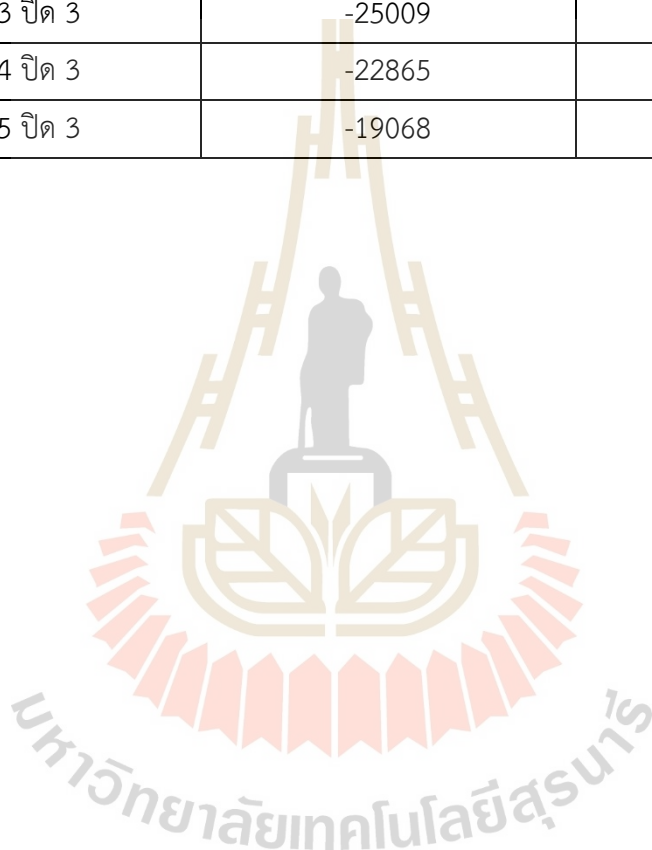


รูปที่ ข.6 ค่าความชื้น (m) จาก semi - logarithmic plot ด้วยวิธีการกราฟิก (Graphical method) ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (แบบเปิด 5 ปิด 3)

จากข้อมูลในรูปที่ ข.3 ข.4 ข.5 และ ข.6 แสดงผลของค่าความชื้นจากวิธีกราฟฟิก (Graphical method) และสามารถนำไปคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแห้งได้ดังตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าความชื้นจากวิธีกราฟฟิก (Graphical method) และค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการอบแห้งจากการคำนวณตามสมการ (ข.9)

เงื่อนไขการทดสอบอบแห้ง	ค่าความชื้น	ค่าพลังงานกระตุ้น (kJ/mol)
ปิดตลอด	-27631	229.72
เปิด 3 ปิด 3	-25009	207.92
เปิด 4 ปิด 3	-22865	190.10
เปิด 5 ปิด 3	-19068	158.53





ภาคผนวก ค

การออกแบบเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ค.1 การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในท่ออบแห้งแนวดิ่ง

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกสามารถจำแนกตามวิธีการให้ความร้อนแก่วัสดุอบแห้งได้หลายแบบ เช่น เครื่องอบแห้งแบบพาความร้อน เครื่องอบแห้งแบบนำความร้อน เครื่องอบแห้งแบบแผ่รังสีความร้อน เครื่องอบแห้งแบบไมโครเวฟ และเครื่องอบแห้งแบบผสมรวมชนิดต่าง ๆ แต่ที่คิดค้นขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องอบแห้งแบบพาความร้อน (ใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง) ซึ่งมีรายละเอียดของการออกแบบสร้างเครื่องดังตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 แสดงข้อมูลการออกแบบของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่ใช้ศึกษาในงานวิจัย

ข้อมูลการออกแบบ	หน่วย	Value
1. อุณหภูมิอากาศแวดล้อม	°C	32
2. ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ	%RH	65
3. ความชื้นเริ่มต้นข้าวเปลือก	%wb	26
4. ความชื้นสุดท้ายข้าวเปลือก	%wb	14
5. อุณหภูมิข้าวเปลือกขาเข้า	°C	32
6. อุณหภูมิข้าวเปลือกขาออก	°C	65
7. อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า (อากาศอบแห้ง)	°C	80
8. อุณหภูมิอากาศขาออก	°C	50
9. ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (h_{fg} ที่อุณหภูมิข้าวเปลือกขาออก 65 °C)	kJ/kg	2345.4
10. ความหนาแน่นของข้าวเปลือกที่ 14 %wb	Kg/m ³	587.9
11. Diameter of dryer	cm	35
12. Hopper angle	องศา (°)	45
13. Drying time (t)	ชั่วโมง (h)	4 h (240 min)

***(9 อ้างอิงข้อมูลจาก Cengel, Y. A. and Boles, M. A., 2010)

***(10 อ้างอิงข้อมูลจาก Chakraverty, A. and Singh, R. P., 2001)

ขั้นตอนการออกแบบมีดังต่อไปนี้

1. หาขนาดห้องอบแห้งหรือถังพักข้าวเปลือก (Chakraverty, A. and Singh, R. P., 2001)

Height of the drying

$$H_2 = \left(\frac{35 - 3.81}{2} \right) \cdot \tan 45^\circ$$

$$H_2 = 15.5 \text{ cm (เลือกใช้ 16 cm)}$$

Volume of the drying chamber

$$V = (35)(35)(H_1) + \left(\frac{16}{3} \right) \cdot (35^2 + (35)(3.81) + 3.81^2)$$

$$V = (1,225 \text{ cm}^2) \cdot H_1 + 7,321.95 \text{ cm}^3 \quad (\text{ค.1})$$

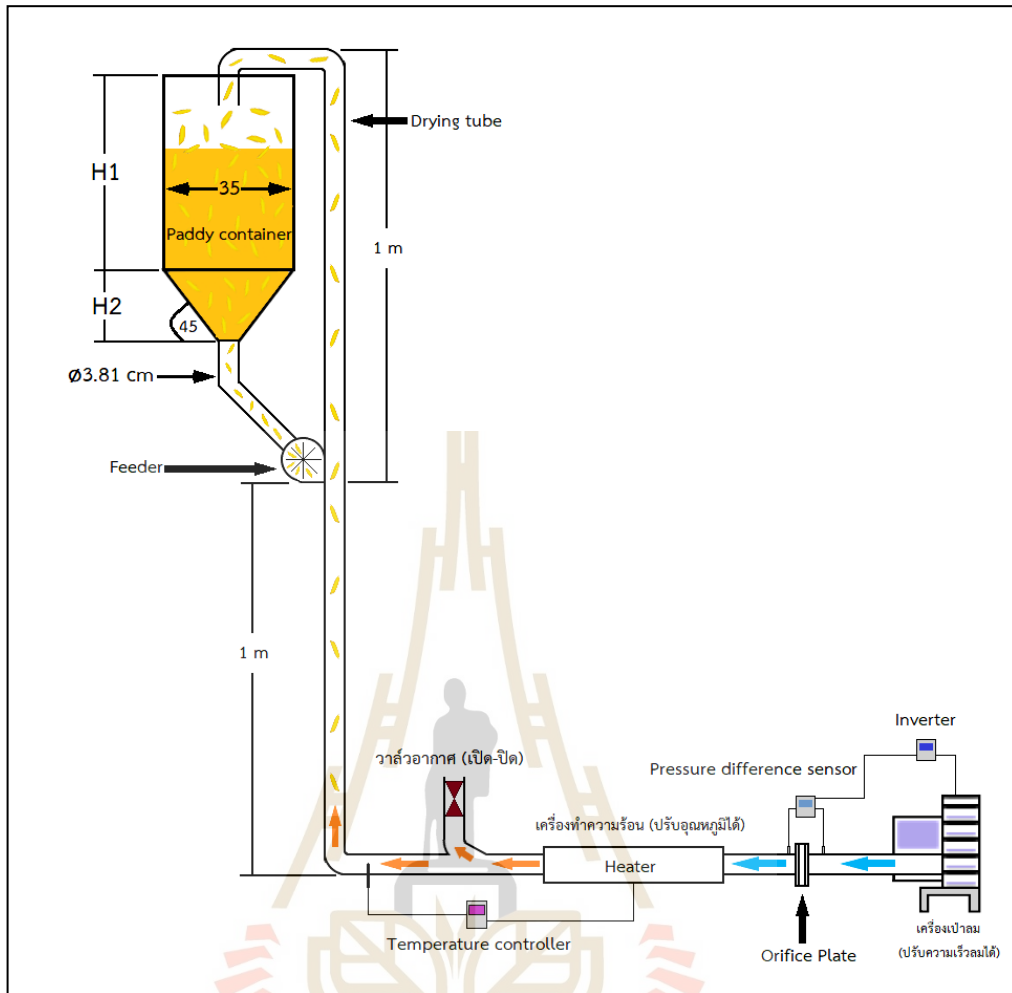
เงื่อนไขการออกแบบกำหนดให้สามารถบรรจุข้าวเปลือกได้ 40 kg ซึ่งมีค่า Bulk density (ที่ 14 %wb) เท่ากับ 587.9 Kg/m³ ดังนั้นจะต้องใช้ห้องอบแห้งที่มีปริมาตร

$$V_c = \frac{40 \text{ kg}}{587.9 \text{ kg/m}^3} = 69,565.22 \text{ cm}^3 \quad (\text{ค.2})$$

เนื่องจาก $V = V_c$ ดังนั้น (ค.1) = (ค.2)

$$(1,225 \text{ cm}^2) \cdot H_1 + 7,321.95 \text{ cm}^3 = 69,565.22 \text{ cm}^3$$

$$H_1 = 50.81 \text{ cm (เลือกใช้ 50 cm)}$$



รูปที่ ค.1 แผนภาพแสดงขนาดระบบของเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ทดสอบ

- หาปริมาณลมที่ใช้ในการอบแห้ง (Chakraverty, A. and Singh, R. P., 2001) คำนวณจากสมการ

$$\dot{m}_a = \frac{Q_{evap} + Q_s}{(C_a + C_v H_1)(T_2 - T_1) \cdot t} \tag{ค.3}$$

$$Q_{evap} = W_d(M_i - M_f) \cdot h_{fg} \tag{ค.4}$$

$$Q_s = W_d C_{pd}(T_{p2} - T_{p1}) + W_d C_{pw}(T_{p2} - T_{p1}) \cdot M_i \tag{ค.5}$$

ข้อมูลการคำนวณประกอบไปด้วย

(ก) Bone dry paddy (W_d); $W_d = (40 \text{ kg})(1 - 0.14) = 12.9 \text{ kg}_{\text{dry solid}}$

(ข) Initial moisture content (M_i); $M_i = \frac{0.26}{1 - 0.26} = 0.3514$

(ค) Final moisture content (M_f); $M_f = \frac{0.14}{1 - 0.14} = 0.1628$

(ง) Humidity ratio (H_1) at 32 °C, 65 %RH; $H_1 = 0.0197 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dryair}}$

(จ) Specific volume (V_{sa}) at 32 °C, 65 %RH; $V_{sa} = 0.892 \text{ m}^3/\text{kg}_{\text{dryair}}$

(ฉ) ความร้อนจำเพาะของน้ำ (C_{pw}); $C_{pw} = 4.22 \text{ kJ}/\text{kg}_{\text{water}} \cdot ^\circ\text{C}$

(ช) ความร้อนจำเพาะของวัสดุอบแห้ง (C_{pd}); $C_{pd} = 1.737 \text{ kJ}/\text{kg}_{\text{solid}} \cdot ^\circ\text{C}$

(ซ) ความร้อนจำเพาะของของอากาศแห้ง ที่ 32 °C (C_a); $C_a = 1.0053 \text{ kJ}/\text{kg}_{\text{dryair}} \cdot ^\circ\text{C}$

(ฌ) ความร้อนจำเพาะของของไอน้ำ ที่ 32 °C (C_v); $C_v = 0.7183 \text{ kJ}/\text{kg}_{\text{water}} \cdot ^\circ\text{C}$

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

*** (ฉ, ช, ฌ อ้างอิงข้อมูลจาก Cengel, Y. A. and Boles, M. A., 2010)

$$Q_{\text{evap}} = (12.9)(0.3514 - 0.1628)(2345.4) = 5,706.22 \text{ kJ}$$

$$Q_s = (12.9)(1.737)(65 - 32) + (12.9)(4.22)(65 - 32)(0.3514) = 1,370.71 \text{ kJ}$$

$$(C_a + C_v H_1)(T_2 - T_1)t = (1.0053 + (0.7183)(0.0197))(80 - 32)(240) = 11,744.07 \text{ kJ} \cdot \text{min}/\text{kg}_{\text{dryair}}$$

คิดการสูญเสียความร้อนออกจากระบบ 10 % ดังนั้นปริมาณความร้อนสุทธิที่ต้องการคือ

$$Q_{\text{net}} = \frac{Q_{\text{evap}} + Q_s}{0.9} = \frac{5,706.22 + 1,370.71}{0.9} = 7,863.26 \text{ kJ}$$

แทนค่าลงสมการ (ค.3)

$$\dot{m}_a = \frac{7,863.26 \text{ kJ}}{11,744.07 \text{ kJ} \cdot \text{min}/\text{kg}_{\text{dryair}}} = 0.6696 \frac{\text{kg}_{\text{dryair}}}{\text{min}}$$

ดังนั้นอัตราการไหลอากาศที่ต้องการคือ

$$\left(\dot{m}_a \right) \left(V_{\text{sa}} \right) = \left(0.6696 \frac{\text{kg}_{\text{dryair}}}{\text{min}} \right) \left(0.892 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{\text{dryair}}} \right) = 0.5972 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

จึงเลือกใช้อัตราการไหลอากาศเป็น $0.60 \text{ m}^3/\text{min}$

3. การคำนวณกำลังของพัดลม

ความต้านทานการไหลในท่อ (สมชาติ โสภณธนฤทธิ, 2540)

(ก) ท่อตรง

ในขณะที่อากาศไหลในท่อตรงความดันสูญเสียส่วนใหญ่มาจากความเสียดทาน สามารถคำนวณได้ตามสมการของ Darcy - Weisbach

$$\Delta P_{\text{major}} = f_D \cdot (L/D) \cdot P_V \quad (\text{ค.6})$$

$$P_V = \left(\frac{V}{1.29} \right)^2 \quad (\text{ค.7})$$

เมื่อ ΔP = ความดันรวมที่สูญเสีย (Pa)

P_V = ความดันความเร็ว (Pa)

f_D = แฟคเตอร์ความเสียดทาน (ไร้นหน่วย)

L = ความยาวท่อ (3 m รวมความยาวของท่อทางไหลอากาศต่อแห้ง)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)

ดังนั้น

$$\Delta P_{\text{major}} = f_D \cdot (L/D) \left(\frac{V}{1.29} \right)^2 \quad (\text{ค.8})$$

แทนค่าลงสมการ (ค.8)

$$\Delta P_{\text{major}} = (0.0359) \left(\frac{3}{3.81 \times 10^{-2}} \right) \left(\frac{8.68}{1.29} \right)^2 = 127.98 \text{ Pa}$$

(ข) ข้ออ

เมื่ออากาศไหลผ่านข้ออทิศทางการไหลของอากาศจะเปลี่ยนไป ความดันความดันสูญเสียส่วนใหญ่เกิดจากการสูญเสียเชิงจลน์ คำนวณตามสมการ (ค.9)

$$\Delta P_{\text{minor}} = \rho \cdot \left(\frac{KV^2}{2} \right) \quad (\text{ค.9})$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิ 80°C

(1.000 kg/m³ อ้างอิงข้อมูลจาก Cengel, Y. A. and Boles, M. A., 2010)

K = สัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง

(0.45 อ้างอิงข้อมูลจาก สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2540)

แทนค่าลงสมการ (ค.9)

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

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

ดังนั้นความต้านทานรวมสำหรับการไหลในท่อมี่ค่าเท่ากับ

$$\Delta P_{\text{total}} = \Delta P_{\text{major}} + \Delta P_{\text{minor}} = 161.88 \text{ Pa}$$

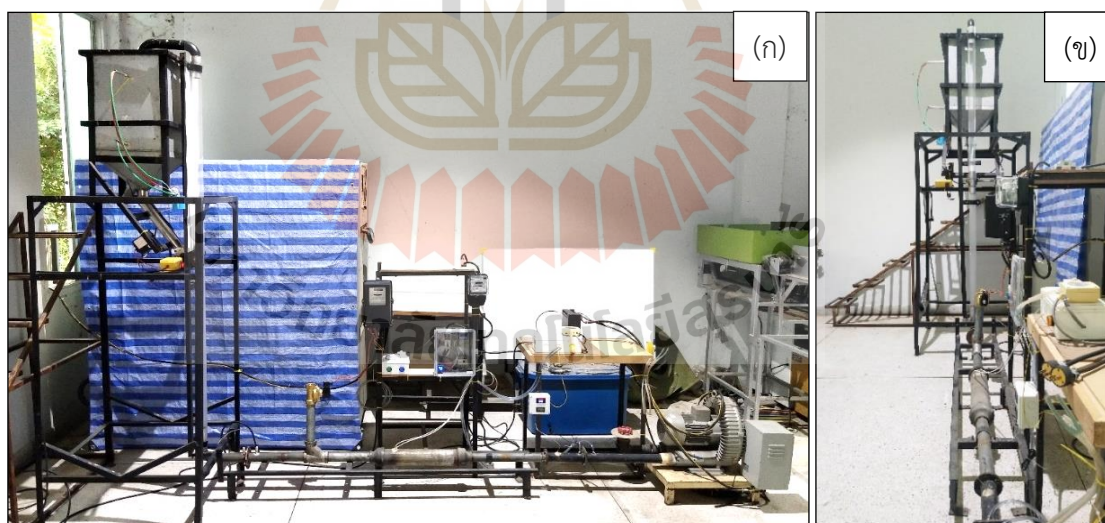
การคำนวณหาขนาดพัดลม (Blower) (Chakraverty, A. and Singh, R. P., 2001)

หากพัดลมและมอเตอร์มีประสิทธิภาพ 75 และ 85 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังนั้นเรา
จะต้องการกำลังสำหรับขับพัดลม คือ

$$\text{HP} = \frac{(\Delta P) \cdot Q}{(746)(0.75)(0.85)} = \frac{\left(161.88 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}\right) \left(0.60 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}\right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right)}{(746)(0.75)(0.85)}$$

$$= 3.40 \times 10^{-3} \text{ hp or } 2.54 \text{ w}$$

ซึ่งในชุดทดสอบต้นแบบได้ใช้พัดลม (Blower) ขนาด 2.2 kW (ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีอยู่
แล้ว และเพียงพอต่อการใช้งานสำหรับกำลังขับ ตามที่ได้คำนวณมาในข้างต้น) ชุด
ทดสอบต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นจริงแสดงดังรูปที่ ค.2



รูปที่ ค.2 ชุดทดสอบต้นแบบของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในท่ออบแห้งแนวตั้ง

(ก) แสดงภาพด้านหน้าของเครื่องอบแห้ง

(ข) แสดงภาพด้านข้างของเครื่องอบแห้ง



ภาคผนวก ง

ข้อมูลจากการทดสอบบั้งข้าวเปลือก

จากการออกแบบการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกของการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยการควบคุมให้อากาศอบแห้งไหลเข้าไปในหอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ผ่านการเปิด - ปิดวาล์วระบายอากาศตามเวลาที่กำหนด (หัวข้อที่ 5.3.1 ในบทที่ 5) แสดงเงื่อนไขการทดสอบอบแห้งดังตารางที่ 5.4 มีทั้งหมด 4 ชุดการทดสอบ การทดสอบละ 3 ครั้ง (เป็นการทดลองซ้ำ) ทำให้ได้การทดลองทั้งหมด 12 การทดลองดังแสดงในตารางที่ ง.1 (ทำการทดลองสุ่ม ไม่ลำดับตามกลุ่มเงื่อนไขการทดสอบ)

ตารางที่ ง.1 ลำดับการทดลองแบบสุ่มจากเงื่อนไขการทดสอบอบแห้ง

การทดลองที่	เงื่อนไขการทดสอบอบแห้ง
1	เปิด 3 ปิด 3
2	เปิด 5 ปิด 3
3	เปิด 4 ปิด 3
4	ปิดตลอด
5	เปิด 3 ปิด 3
6	เปิด 5 ปิด 3
7	เปิด 5 ปิด 3
8	เปิด 3 ปิด 3
9	เปิด 4 ปิด 3
10	ปิดตลอด
11	ปิดตลอด
12	เปิด 4 ปิด 3

ข้อมูลทดลองที่ถูกเก็บมาและข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ ง.2 - ง.37

ตารางที่ ง.2 ข้อมูลเริ่มต้นในวันที่ทำการทดสอบอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 3 ปิด 3) ของการทดลองที่ 1

การทดลองที่ 1	เปิด 3 ปิด 3	วัน/เดือน/ปี 23/09/64	
Inverter set point	%	6.00	
Orifice plate	kPa	1.80	
ความเร็วอากาศอบแห้ง	m/s	8.68	
อัตราการไหลข้าวเปลือกในระบบ	Kg/min	0.99	
อุณหภูมิอากาศอบแห้ง	°C	80.0	
อุณหภูมิอากาศทางเข้า Blower	°C	30.5	
ความชื้นอากาศทางเข้า Blower	%RH	64	
อุณหภูมิอากาศที่ออกจาก Blower	°C	36.9	
เวลาเริ่ม	h:m:s	09:48:00	
เวลาสิ้นสุด	h:m:s	15:48:00	
การบันทึกบันทึกมิเตอร์ไฟฟ้าระหว่างกระบวนการทดสอบ (kW.h)	Heater	ก่อนทดลอง	0.80
		ทดลองเสร็จ	6.50
	Blower	ก่อนทดลอง	2.20
		ทดลองเสร็จ	3.70
	Heater	ที่ความชื้น	4.30
	Blower	14 %w.b.	3.10
กำลัง Heater	kW.h	3.50	
กำลัง Blower	kW.h	0.90	
เวลาอบแห้ง	min	220	
น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น	Kg	15.00	
น้ำหนักข้าวเปลือกสุดท้าย	Kg	12.72	

ตารางที่ ง.3 ข้อมูลเริ่มต้นในวันที่ทำการทดสอบอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 5 ปิด 3) ของการทดลองที่ 2

การทดลองที่ 2	เปิด 5 ปิด 3	วัน/เดือน/ปี 30/09/64	
Inverter set point	%	6.00	
Orifice plate	kPa	1.80	
ความเร็วอากาศอบแห้ง	m/s	8.68	
อัตราการไหลข้าวเปลือกในระบบ	Kg/min	0.99	
อุณหภูมิอากาศอบแห้ง	°C	80.0	
อุณหภูมิอากาศทางเข้า Blower	°C	32.6	
ความชื้นอากาศทางเข้า Blower	%RH	62	
อุณหภูมิอากาศที่ออกจาก Blower	°C	39.1	
เวลาเริ่ม	h:m:s	09:40:00	
เวลาสิ้นสุด	h:m:s	15:40:00	
การบันทึกบันทึกมิเตอร์ไฟฟ้าระหว่างกระบวนการทดสอบ (kW.h)	Heater	ก่อนทดลอง	12.10
		ทดลองเสร็จ	17.70
	Blower	ก่อนทดลอง	4.75
		ทดลองเสร็จ	5.75
	Heater	ที่ความชื้น	14.90
	Blower	14 %w.b.	5.25
กำลัง Heater	kW.h	2.80	
กำลัง Blower	kW.h	0.50	
เวลาอบแห้ง	min	180	
น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น	Kg	15.00	
น้ำหนักข้าวเปลือกสุดท้าย	Kg	12.80	

ตารางที่ ง.4 ข้อมูลเริ่มต้นในวันที่ทำการทดสอบอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 4 ปิด 3) ของการทดลองที่ 3

การทดลองที่ 3	เปิด 4 ปิด 3	วัน/เดือน/ปี 01/10/64	
Inverter set point	%	6.00	
Orifice plate	kPa	1.80	
ความเร็วอากาศอบแห้ง	m/s	8.68	
อัตราการไหลข้าวเปลือกในระบบ	Kg/min	0.99	
อุณหภูมิอากาศอบแห้ง	°C	80.0	
อุณหภูมิอากาศทางเข้า Blower	°C	32.9	
ความชื้นอากาศทางเข้า Blower	%RH	60	
อุณหภูมิอากาศที่ออกจาก Blower	°C	39.6	
เวลาเริ่ม	h:m:s	09:51:00	
เวลาสิ้นสุด	h:m:s	15:51:00	
การบันทึกบันทึกมิเตอร์ไฟฟ้าระหว่างกระบวนการทดสอบ (kW.h)	Heater	ก่อนทดลอง	17.90
		ทดลองเสร็จ	23.30
	Blower	ก่อนทดลอง	5.80
		ทดลองเสร็จ	7.00
	Heater	ที่ความชื้น	21.05
	Blower	14 %w.b.	6.50
กำลัง Heater	kW.h	3.15	
กำลัง Blower	kW.h	0.70	
เวลาอบแห้ง	min	210	
น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น	Kg	15.00	
น้ำหนักข้าวเปลือกสุดท้าย	Kg	12.60	

ตารางที่ ง.5 ข้อมูลเริ่มต้นในวันที่ทำการทดสอบอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (ปิดตลอด) ของการทดลองที่ 4

การทดลองที่ 4	ปิดตลอด	วัน/เดือน/ปี 04/10/64	
Inverter set point	%	6.00	
Orifice plate	kPa	1.80	
ความเร็วอากาศอบแห้ง	m/s	8.68	
อัตราการไหลข้าวเปลือกในระบบ	Kg/min	0.99	
อุณหภูมิอากาศอบแห้ง	°C	80.0	
อุณหภูมิอากาศทางเข้า Blower	°C	32.2	
ความชื้นอากาศทางเข้า Blower	%RH	57	
อุณหภูมิอากาศที่ออกจาก Blower	°C	38.3	
เวลาเริ่ม	h:m:s	09:38:00	
เวลาสิ้นสุด	h:m:s	15:38:00	
การบันทึกบันทึกมิเตอร์ไฟฟ้าระหว่างกระบวนการทดสอบ (kW.h)	Heater	ก่อนทดลอง	23.40
		ทดลองเสร็จ	29.00
	Blower	ก่อนทดลอง	7.00
		ทดลองเสร็จ	8.10
	Heater	ที่ความชื้น	27.10
	Blower	14 %w.b.	7.70
กำลัง Heater	kW.h	3.70	
กำลัง Blower	kW.h	0.70	
เวลาอบแห้ง	min	240	
น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น	Kg	15.00	
น้ำหนักข้าวเปลือกสุดท้าย	Kg	12.56	

ตารางที่ ง.6 ข้อมูลเริ่มต้นในวันที่ทำการทดสอบอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 3 ปิด 3) ของการทดลองที่ 5

การทดลองที่ 5	เปิด 3 ปิด 3	วัน/เดือน/ปี 05/10/64	
Inverter set point	%	6.00	
Orifice plate	kPa	1.80	
ความเร็วอากาศอบแห้ง	m/s	8.68	
อัตราการไหลข้าวเปลือกในระบบ	Kg/min	0.99	
อุณหภูมิอากาศอบแห้ง	°C	80.0	
อุณหภูมิอากาศทางเข้า Blower	°C	32.1	
ความชื้นอากาศทางเข้า Blower	%RH	56	
อุณหภูมิอากาศที่ออกจาก Blower	°C	38.8	
เวลาเริ่ม	h:m:s	09:18:00	
เวลาสิ้นสุด	h:m:s	15:18 :00	
การบันทึกบันทึกมิเตอร์ไฟฟ้าระหว่างกระบวนการทดสอบ (kW.h)	Heater	ก่อนทดลอง	29.15
		ทดลองเสร็จ	34.80
	Blower	ก่อนทดลอง	8.10
		ทดลองเสร็จ	9.20
	Heater	ที่ความชื้น	32.60
	Blower	14 %w.b.	8.80
กำลัง Heater	kW.h	3.45	
กำลัง Blower	kW.h	0.70	
เวลาอบแห้ง	min	220	
น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น	Kg	15.00	
น้ำหนักข้าวเปลือกสุดท้าย	Kg	12.62	

ตารางที่ ง.7 ข้อมูลเริ่มต้นในวันที่ทำการทดสอบอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 5 ปิด 3) ของการทดลองที่ 6

การทดลองที่ 6	เปิด 5 ปิด 3	วัน/เดือน/ปี 10/10/64	
Inverter set point	%	6.00	
Orifice plate	kPa	1.80	
ความเร็วอากาศอบแห้ง	m/s	8.68	
อัตราการไหลข้าวเปลือกในระบบ	Kg/min	0.99	
อุณหภูมิอากาศอบแห้ง	°C	80.0	
อุณหภูมิอากาศทางเข้า Blower	°C	31.9	
ความชื้นอากาศทางเข้า Blower	%RH	60	
อุณหภูมิอากาศที่ออกจาก Blower	°C	38.8	
เวลาเริ่ม	h:m:s	14:15:00	
เวลาสิ้นสุด	h:m:s	20:15:00	
การบันทึกบันทึกมิเตอร์ไฟฟ้าระหว่างกระบวนการทดสอบ (kW.h)	Heater	ก่อนทดลอง	34.90
		ทดลองเสร็จ	40.70
	Blower	ก่อนทดลอง	9.20
		ทดลองเสร็จ	10.10
	Heater	ที่ความชื้น	37.80
	Blower	14 %w.b.	9.65
กำลัง Heater	kW.h	2.90	
กำลัง Blower	kW.h	0.45	
เวลาอบแห้ง	min	180	
น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น	Kg	15.00	
น้ำหนักข้าวเปลือกสุดท้าย	Kg	12.67	

ตารางที่ ง.8 ข้อมูลเริ่มต้นในวันที่ทำการทดสอบอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 5 ปิด 3) ของการทดลองที่ 7

การทดลองที่ 7	เปิด 5 ปิด 3	วัน/เดือน/ปี 11/10/64	
Inverter set point	%	6.00	
Orifice plate	kPa	1.80	
ความเร็วอากาศอบแห้ง	m/s	8.68	
อัตราการไหลข้าวเปลือกในระบบ	Kg/min	0.99	
อุณหภูมิอากาศอบแห้ง	°C	80.0	
อุณหภูมิอากาศทางเข้า Blower	°C	31.1	
ความชื้นอากาศทางเข้า Blower	%RH	62	
อุณหภูมิอากาศที่ออกจาก Blower	°C	37.6	
เวลาเริ่ม	h:m:s	10:52:00	
เวลาสิ้นสุด	h:m:s	16:52:00	
การบันทึกบันทึกมิเตอร์ไฟฟ้าระหว่างกระบวนการทดสอบ (kW.h)	Heater	ก่อนทดลอง	40.85
		ทดลองเสร็จ	46.50
	Blower	ก่อนทดลอง	10.10
		ทดลองเสร็จ	11.20
	Heater	ที่ความชื้น	43.70
	Blower	14 %w.b.	10.65
กำลัง Heater	kW.h	2.85	
กำลัง Blower	kW.h	0.55	
เวลาอบแห้ง	min	180	
น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น	Kg	15.00	
น้ำหนักข้าวเปลือกสุดท้าย	Kg	12.69	

ตารางที่ ง.9 ข้อมูลเริ่มต้นในวันที่ทำการทดสอบอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 3 ปิด 3) ของการทดลองที่ 8

การทดลองที่ 8	เปิด 3 ปิด 3	วัน/เดือน/ปี 12/10/64	
Inverter set point	%	6.00	
Orifice plate	kPa	1.80	
ความเร็วอากาศอบแห้ง	m/s	8.68	
อัตราการไหลข้าวเปลือกในระบบ	Kg/min	0.99	
อุณหภูมิอากาศอบแห้ง	°C	80.0	
อุณหภูมิอากาศทางเข้า Blower	°C	31.4	
ความชื้นอากาศทางเข้า Blower	%RH	63	
อุณหภูมิอากาศที่ออกจาก Blower	°C	38.1	
เวลาเริ่ม	h:m:s	10:00:00	
เวลาสิ้นสุด	h:m:s	16:00:00	
การบันทึกบันทึกมิเตอร์ไฟฟ้าระหว่างกระบวนการทดสอบ (kW.h)	Heater	ก่อนทดลอง	46.60
		ทดลองเสร็จ	52.75
	Blower	ก่อนทดลอง	11.25
		ทดลองเสร็จ	12.35
	Heater	ที่ความชื้น	50.35
	Blower	14 %w.b.	11.90
กำลัง Heater	kW.h	3.75	
กำลัง Blower	kW.h	0.65	
เวลาอบแห้ง	min	220	
น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น	Kg	15.00	
น้ำหนักข้าวเปลือกสุดท้าย	Kg	12.54	

ตารางที่ ง.10 ข้อมูลเริ่มต้นในวันที่ทำการทดสอบอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 4 ปิด 3) ของการทดลองที่ 9

การทดลองที่ 9	เปิด 4 ปิด 3	วัน/เดือน/ปี 14/10/64	
Inverter set point	%	6.00	
Orifice plate	kPa	1.80	
ความเร็วอากาศอบแห้ง	m/s	8.68	
อัตราการไหลข้าวเปลือกในระบบ	Kg/min	0.99	
อุณหภูมิอากาศอบแห้ง	°C	80.0	
อุณหภูมิอากาศทางเข้า Blower	°C	31.4	
ความชื้นอากาศทางเข้า Blower	%RH	62	
อุณหภูมิอากาศที่ออกจาก Blower	°C	38.3	
เวลาเริ่ม	h:m:s	10:41:00	
เวลาสิ้นสุด	h:m:s	16:41:00	
การบันทึกบันทึกมิเตอร์ไฟฟ้าระหว่างกระบวนการทดสอบ (kW.h)	Heater	ก่อนทดลอง	52.80
		ทดลองเสร็จ	58.75
	Blower	ก่อนทดลอง	12.40
		ทดลองเสร็จ	13.35
	Heater	ที่ความชื้น	56.30
	Blower	14 %w.b.	12.95
กำลัง Heater	kW.h	3.50	
กำลัง Blower	kW.h	0.55	
เวลาอบแห้ง	min	210	
น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น	Kg	15.00	
น้ำหนักข้าวเปลือกสุดท้าย	Kg	12.60	

ตารางที่ ง.11 ข้อมูลเริ่มต้นในวันที่ทำการทดสอบอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (ปิดตลอด) ของการทดลองที่ 10

การทดลองที่ 10	ปิดตลอด	วัน/เดือน/ปี 18/10/64	
Inverter set point	%	6.00	
Orifice plate	kPa	1.80	
ความเร็วอากาศอบแห้ง	m/s	8.68	
อัตราการไหลข้าวเปลือกในระบบ	Kg/min	0.99	
อุณหภูมิอากาศอบแห้ง	°C	80.0	
อุณหภูมิอากาศทางเข้า Blower	°C	26.5	
ความชื้นอากาศทางเข้า Blower	%RH	68	
อุณหภูมิอากาศที่ออกจาก Blower	°C	32.8	
เวลาเริ่ม	h:m:s	10:38:00	
เวลาสิ้นสุด	h:m:s	16:38:00	
การบันทึกบันทึกมิเตอร์ไฟฟ้าระหว่างกระบวนการทดสอบ (kW.h)	Heater	ก่อนทดลอง	58.90
		ทดลองเสร็จ	65.00
	Blower	ก่อนทดลอง	13.40
		ทดลองเสร็จ	14.50
	Heater	ที่ความชื้น	63.00
	Blower	14 %w.b.	14.10
กำลัง Heater	kW.h	4.10	
กำลัง Blower	kW.h	0.70	
เวลาอบแห้ง	min	240	
น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น	Kg	15.00	
น้ำหนักข้าวเปลือกสุดท้าย	Kg	12.53	

ตารางที่ ง.12 ข้อมูลเริ่มต้นในวันที่ทำการทดสอบอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (ปิดตลอด) ของการทดลองที่ 11

การทดลองที่ 11	ปิดตลอด	วัน/เดือน/ปี 19/10/64	
Inverter set point	%	6.00	
Orifice plate	kPa	1.80	
ความเร็วอากาศอบแห้ง	m/s	8.68	
อัตราการไหลข้าวเปลือกในระบบ	Kg/min	0.99	
อุณหภูมิอากาศอบแห้ง	°C	80.0	
อุณหภูมิอากาศทางเข้า Blower	°C	29.3	
ความชื้นอากาศทางเข้า Blower	%RH	67	
อุณหภูมิอากาศที่ออกจาก Blower	°C	35.7	
เวลาเริ่ม	h:m:s	08:38:00	
เวลาสิ้นสุด	h:m:s	14:38:00	
การบันทึกบันทึกมิเตอร์ไฟฟ้าระหว่างกระบวนการทดสอบ (kW.h)	Heater	ก่อนทดลอง	65.10
		ทดลองเสร็จ	70.80
	Blower	ก่อนทดลอง	14.50
		ทดลองเสร็จ	15.55
	Heater	ที่ความชื้น	68.90
	Blower	14 %w.b.	15.20
กำลัง Heater	kW.h	3.80	
กำลัง Blower	kW.h	0.70	
เวลาอบแห้ง	min	240	
น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น	Kg	15.00	
น้ำหนักข้าวเปลือกสุดท้าย	Kg	12.52	

ตารางที่ ง.13 ข้อมูลเริ่มต้นในวันที่ทำการทดสอบอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 4 ปิด 3) ของการทดลองที่ 12

การทดลองที่ 12	เปิด 4 ปิด 3	วัน/เดือน/ปี 20/10/64	
Inverter set point	%	6.00	
Orifice plate	kPa	1.80	
ความเร็วอากาศอบแห้ง	m/s	8.68	
อัตราการไหลข้าวเปลือกในระบบ	Kg/min	0.99	
อุณหภูมิอากาศอบแห้ง	°C	80.0	
อุณหภูมิอากาศทางเข้า Blower	°C	31.1	
ความชื้นอากาศทางเข้า Blower	%RH	68	
อุณหภูมิอากาศที่ออกจาก Blower	°C	37.5	
เวลาเริ่ม	h:m:s	09:19:00	
เวลาสิ้นสุด	h:m:s	15:19:00	
การบันทึกบันทึกมิเตอร์ไฟฟ้าระหว่างกระบวนการทดสอบ (kW.h)	Heater	ก่อนทดลอง	71.00
		ทดลองเสร็จ	76.60
	Blower	ก่อนทดลอง	15.60
		ทดลองเสร็จ	16.70
	Heater	ที่ความชื้น	74.30
	Blower	14 %w.b.	16.20
กำลัง Heater	kW.h	3.30	
กำลัง Blower	kW.h	0.60	
เวลาอบแห้ง	min	210	
น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น	Kg	15.00	
น้ำหนักข้าวเปลือกสุดท้าย	Kg	12.56	

ตารางที่ ง.14 ข้อมูลความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงตามเวลาจากการอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 3 ปิด 3) ของการทดลองที่ 1

เวลา (นาที)	การทดลองที่ 1			
	เปิด 3 ปิด 3			
	นน.ก่อน (g)	นน.หลัง (g)	%w.b.	%d.b.
0	10.1980	7.5508	25.9580	35.0585
20	10.4487	7.8873	24.5141	32.4750
40	10.0823	7.7425	23.2070	30.2202
60	10.4125	8.0991	22.2175	28.5637
80	10.2830	8.1346	20.8927	26.4106
100	10.1995	8.2521	19.0931	23.5988
120	10.9262	8.9195	18.3659	22.4979
140	10.1111	8.3798	17.1228	20.6604
160	10.2277	8.5235	16.6626	19.9941
180	10.2845	8.6775	15.6255	18.5192
200	10.5182	8.9753	14.6689	17.1905
220	10.2552	8.8296	13.9012	16.1457
240	10.3383	8.9699	13.2362	15.2555
260	10.3355	9.0257	12.6728	14.5119
280	10.2902	9.0352	12.1961	13.8901
300	10.6029	9.3585	11.7364	13.2970
320	10.3738	9.2237	11.0866	12.4690
340	10.5080	9.3814	10.7214	12.0089
360	10.9056	9.7695	10.4176	11.6290

ตารางที่ ง.15 ข้อมูลความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงตามเวลาจากการอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 5 ปิด 3) ของการทดลองที่ 2

เวลา (นาที)	การทดลองที่ 2			
	เปิด 5 ปิด 3			
	นน.ก่อน (g)	นน.หลัง (g)	%w.b.	%d.b.
0	10.0110	7.3681	26.4000	35.8695
20	10.3230	7.7596	24.8319	33.0352
40	10.4179	8.0117	23.0968	30.0336
60	10.3997	8.1102	22.0151	28.2299
80	10.2634	8.1748	20.3500	25.5492
100	10.6550	8.6030	19.2586	23.8521
120	10.9573	8.9777	18.0665	22.0502
140	10.1430	8.4306	16.8826	20.3117
160	10.2158	8.6011	15.8059	18.7732
180	10.4120	8.8766	14.7464	17.2972
200	10.7481	9.2609	13.8369	16.0589
220	10.5255	9.1518	13.0512	15.0102
240	10.7621	9.4243	12.4307	14.1952
260	10.0786	8.8971	11.7229	13.2796
280	10.0820	8.9483	11.2448	12.6694
300	10.2964	9.2100	10.5513	11.7959
320	10.5752	9.4944	10.2201	11.3836
340	10.0639	9.0887	9.6901	10.7298
360	10.6062	9.6134	9.3606	10.3273

ตารางที่ ง.16 ข้อมูลความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงตามเวลาจากการอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 4 ปิด 3) ของการทดลองที่ 3

เวลา (นาที)	การทดลองที่ 3			
	เปิด 4 ปิด 3			
	นน.ก่อน (g)	นน.หลัง (g)	%w.b.	%d.b.
0	10.1689	7.4856	26.3873	35.8462
20	10.8433	8.1204	25.1114	33.5316
40	10.2200	7.8653	23.0401	29.9378
60	10.3380	8.0807	21.8350	27.9345
80	10.3382	8.2566	20.1350	25.2113
100	10.3577	8.3754	19.1384	23.6681
120	10.4431	8.5861	17.7821	21.6280
140	10.9672	9.1443	16.6214	19.9348
160	10.3835	8.7497	15.7346	18.6726
180	10.3853	8.8663	14.6264	17.1323
200	10.4882	9.0106	14.0882	16.3985
220	10.1509	8.8475	12.8402	14.7318
240	10.1930	8.9372	12.3202	14.0514
260	10.0701	8.9191	11.4299	12.9049
280	10.3887	9.2607	10.8580	12.1805
300	10.0087	8.9868	10.2101	11.3711
320	10.2490	9.2167	10.0722	11.2003
340	10.2907	9.3267	9.3677	10.3359
360	10.4489	9.5039	9.0440	9.9433

ตารางที่ ง.17 ข้อมูลความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงตามเวลาจากการอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการ
การจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (ปิดตลอด) ของการทดลองที่ 4

เวลา (นาที)	การทดลองที่ 4			
	ปิดตลอด			
	นน.ก่อน (g)	นน.หลัง (g)	%w.b.	%d.b.
0	10.2806	7.5832	26.2378	35.5707
20	10.1577	7.5894	25.2843	33.8406
40	10.2223	7.8194	23.5065	30.7300
60	10.3451	7.9986	22.6822	29.3364
80	10.3524	8.1056	21.7032	27.7191
100	10.8200	8.5836	20.6691	26.0543
120	10.5390	8.5055	19.2950	23.9081
140	10.5470	8.5922	18.5342	22.7509
160	10.9304	8.9875	17.7752	21.6178
180	10.1768	8.4792	16.6811	20.0208
200	10.7554	9.1016	15.3765	18.1704
220	10.7336	9.1642	14.6214	17.1253
240	10.1091	8.7083	13.8568	16.0858
260	10.6781	9.2865	13.0323	14.9852
280	10.4149	9.1195	12.4379	14.2047
300	10.2422	9.0343	11.7934	13.3702
320	10.1448	9.0039	11.2462	12.6712
340	10.9628	9.7863	10.7317	12.0219
360	10.5672	9.4598	10.4796	11.7064

ตารางที่ ง.18 ข้อมูลความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงตามเวลาจากการอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 3 ปิด 3) ของการทดลองที่ 5

เวลา (นาที)	การทดลองที่ 5			
	เปิด 3 ปิด 3			
	นน.ก่อน (g)	นน.หลัง (g)	%w.b.	%d.b.
0	10.4683	7.7432	26.0319	35.1935
20	10.6070	7.9787	24.7789	32.9415
40	10.5905	8.1766	22.7931	29.5221
60	10.0016	7.8392	21.6205	27.5844
80	10.4038	8.3024	20.1984	25.3108
100	10.5171	8.4960	19.2173	23.7888
120	10.5371	8.6442	17.9641	21.8979
140	10.8193	9.0017	16.7996	20.1917
160	10.6866	9.0178	15.6158	18.5056
180	10.7213	9.1503	14.6531	17.1688
200	10.1228	8.7103	13.9536	16.2164
220	10.6995	9.2776	13.2894	15.3262
240	10.2024	8.9272	12.4990	14.2844
260	10.3419	9.1306	11.7125	13.2664
280	10.1958	9.0491	11.2468	12.6720
300	10.1240	9.0304	10.8021	12.1102
320	10.4463	9.3784	10.2228	11.3868
340	10.3377	9.3461	9.5921	10.6098
360	10.1043	9.1702	9.2446	10.1863

ตารางที่ ง.19 ข้อมูลความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงตามเวลาจากการอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 5 ปิด 3) ของการทดลองที่ 6

เวลา (นาที)	การทดลองที่ 6			
	เปิด 5 ปิด 3			
	นน.ก่อน (g)	นน.หลัง (g)	%w.b.	%d.b.
0	10.3619	7.6709	25.9701	35.0806
20	10.3580	7.8339	24.3686	32.2202
40	10.9437	8.5403	21.9615	28.1419
60	10.6391	8.4489	20.5863	25.9229
80	10.4090	8.4569	18.7540	23.0829
100	10.4400	8.5748	17.8659	21.7521
120	10.8420	9.0437	16.5864	19.8846
140	10.3344	8.7513	15.3187	18.0899
160	10.3466	8.8715	14.2569	16.6274
180	10.5928	9.1763	13.3723	15.4365
200	10.3088	8.9949	12.7454	14.6072
220	10.3768	9.1357	11.9603	13.5852
240	10.3703	9.2055	11.2321	12.6533
260	10.7523	9.6127	10.5987	11.8551
280	10.9854	9.8824	10.0406	11.1613
300	10.3683	9.3861	9.4731	10.4644
320	10.6996	9.7161	9.1919	10.1224
340	10.1088	9.2303	8.6904	9.5176
360	10.6814	9.7948	8.3004	9.0517

ตารางที่ ง.20 ข้อมูลความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงตามเวลาจากการอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการ
การจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 5 ปิด 3) ของการทดลองที่ 7

เวลา (นาที)	การทดลองที่ 7			
	เปิด 5 ปิด 3			
	นน.ก่อน (g)	นน.หลัง (g)	%w.b.	%d.b.
0	10.3957	7.6712	26.2080	35.5160
20	10.5312	7.9468	24.5404	32.5213
40	10.6800	8.3182	22.1142	28.3932
60	10.3792	8.2238	20.7665	26.2093
80	10.5941	8.5718	19.0889	23.5925
100	10.7392	8.8176	17.8933	21.7928
120	10.9382	9.0920	16.8785	20.3058
140	10.4623	8.8377	15.5281	18.3826
160	10.7879	9.1996	14.7230	17.2649
180	10.2826	8.8643	13.7932	16.0001
200	10.5724	9.1969	13.0103	14.9561
220	10.2094	8.9706	12.1339	13.8096
240	10.1686	9.0091	11.4027	12.8703
260	10.7500	9.5710	10.9674	12.3185
280	10.7387	9.6200	10.4175	11.6289
300	10.7809	9.7359	9.6931	10.7335
320	10.2067	9.2467	9.4056	10.3821
340	10.6574	9.7006	8.9778	9.8633
360	10.2237	9.3475	8.5703	9.3736

ตารางที่ ง.21 ข้อมูลความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงตามเวลาจากการอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับ
การจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 3 ปิด 3) ของการทดลองที่ 8

เวลา (นาที)	การทดลองที่ 8			
	เปิด 3 ปิด 3			
	นน.ก่อน (g)	นน.หลัง (g)	%w.b.	%d.b.
0	10.3603	7.5974	26.6681	36.3664
20	10.4697	7.8202	25.3064	33.8802
40	10.5501	8.0937	23.2832	30.3495
60	10.4195	8.1178	22.0903	28.3537
80	10.5142	8.3194	20.8746	26.3817
100	10.3086	8.3001	19.4837	24.1985
120	10.5556	8.6017	18.5106	22.7153
140	10.6847	8.8460	17.2087	20.7857
160	10.5849	8.8476	16.4130	19.6358
180	10.2916	8.7118	15.3504	18.1340
200	10.3229	8.8563	14.2072	16.5600
220	10.7748	9.3182	13.5186	15.6318
240	10.1737	8.8716	12.7987	14.6772
260	10.4645	9.2113	11.9757	13.6050
280	10.1814	9.0153	11.4532	12.9347
300	10.6180	9.4893	10.6301	11.8944
320	10.2831	9.2131	10.4054	11.6139
340	10.2416	9.2262	9.9145	11.0056
360	10.6876	9.6710	9.5120	10.5118

ตารางที่ ง.22 ข้อมูลความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงตามเวลาจากการอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับการจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 4 ปิด 3) ของการทดลองที่ 9

เวลา (นาที)	การทดลองที่ 9			
	เปิด 4 ปิด 3			
	นน.ก่อน (g)	นน.หลัง (g)	%w.b.	%d.b.
0	10.2913	7.5087	27.0384	37.0583
20	10.2458	7.6660	25.1791	33.6525
40	10.1270	7.7068	23.8985	31.4034
60	10.7449	8.3075	22.6843	29.3398
80	10.5223	8.2817	21.2938	27.0548
100	10.5832	8.4643	20.0214	25.0334
120	10.4182	8.4316	19.0686	23.5614
140	10.3644	8.5131	17.8621	21.7465
160	10.3757	8.6257	16.8663	20.2882
180	10.3296	8.6880	15.8922	18.8950
200	10.4466	8.9000	14.8048	17.3775
220	10.4903	9.0428	13.7985	16.0072
240	10.5465	9.1987	12.7796	14.6521
260	10.4209	9.1368	12.3224	14.0542
280	10.2395	9.0602	11.5172	13.0163
300	10.5311	9.3978	10.7615	12.0592
320	10.5716	9.4864	10.2652	11.4395
340	10.2078	9.2524	9.3595	10.3260
360	10.3337	9.3978	9.0568	9.9587

ตารางที่ ง.23 ข้อมูลความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงตามเวลาจากการอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับ
การจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (ปิดตลอด) ของการทดลองที่ 10

เวลา (นาที)	การทดลองที่ 10			
	ปิดตลอด			
	นน.ก่อน (g)	นน.หลัง (g)	%w.b.	%d.b.
0	10.1233	7.4170	26.7334	36.4878
20	10.6780	8.0180	24.9110	33.1754
40	10.2388	7.8167	23.6561	30.9862
60	10.1725	7.8936	22.4026	28.8702
80	10.1492	7.9878	21.2963	27.0588
100	10.3387	8.2667	20.0412	25.0644
120	10.5513	8.5952	18.5389	22.7581
140	10.1857	8.3853	17.6758	21.4709
160	10.6409	8.8518	16.8134	20.2117
180	10.6273	8.9357	15.9175	18.9308
200	10.2202	8.6961	14.9126	17.5262
220	10.1944	8.7664	14.0077	16.2895
240	10.7290	9.2712	13.5875	15.7240
260	10.2080	8.8937	12.8752	14.7779
280	10.6106	9.3041	12.3132	14.0422
300	10.1745	8.9842	11.6989	13.2488
320	10.1160	8.9665	11.3632	12.8199
340	10.3990	9.2773	10.7866	12.0908
360	10.4063	9.3245	10.3956	11.6017

ตารางที่ ง.24 ข้อมูลความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงตามเวลาจากการอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับ
การจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (ปิดตลอด) ของการทดลองที่ 11

เวลา (นาที)	การทดลองที่ 11			
	ปิดตลอด			
	นน.ก่อน (g)	นน.หลัง (g)	%w.b.	%d.b.
0	10.0256	7.3447	26.7405	36.5012
20	10.1067	7.5550	25.2476	33.7750
40	10.4896	7.9828	23.8980	31.4025
60	10.1915	7.8516	22.9593	29.8016
80	10.5216	8.2501	21.5889	27.5330
100	10.3255	8.2394	20.2034	25.3186
120	10.7095	8.6430	19.2960	23.9095
140	10.1713	8.3356	18.0478	22.0224
160	10.1134	8.4045	16.8974	20.3332
180	10.3658	8.6936	16.1319	19.2348
200	10.4410	8.8646	15.0982	17.7831
220	10.6008	9.0910	14.2423	16.6076
240	10.2942	8.9002	13.5416	15.6626
260	10.3577	8.9881	13.2230	15.2379
280	10.3129	9.0282	12.4572	14.2299
300	10.8873	9.6037	11.7899	13.3657
320	10.2458	9.0896	11.2846	12.7200
340	10.7148	9.5509	10.8625	12.1863
360	10.8722	9.7245	10.5563	11.8021

ตารางที่ ง.25 ข้อมูลความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลงตามเวลาจากการอบแห้ง ที่เงื่อนไขการทดสอบสำหรับ
การจ่ายอากาศแบบเป็นช่วงตามเวลาของการเปิด - ปิดวาล์ว (เปิด 4 ปิด 3) ของการทดลองที่ 12

เวลา (นาที)	การทดลองที่ 12			
	เปิด 4 ปิด 3			
	นน.ก่อน (g)	นน.หลัง (g)	%w.b.	%d.b.
0	10.6526	7.8014	26.7653	36.5473
20	10.6862	8.0132	25.0136	33.3575
40	10.7100	8.2252	23.2007	30.2096
60	10.4351	8.1509	21.8896	28.0239
80	10.3850	8.2409	20.6461	26.0178
100	10.8222	8.7083	19.5330	24.2745
120	10.0300	8.2177	18.0688	22.0536
140	10.8635	9.0093	17.0682	20.5810
160	10.2373	8.6298	15.7024	18.6273
180	10.2219	8.6878	15.0080	17.6581
200	10.1451	8.7159	14.0876	16.3976
220	10.1282	8.7828	13.2837	15.3186
240	10.5721	9.2517	12.4895	14.2720
260	10.1075	8.9308	11.6419	13.1758
280	10.8628	9.6480	11.1831	12.5912
300	10.6360	9.4867	10.8058	12.1149
320	10.2919	9.2451	10.1711	11.3228
340	10.4239	9.4092	9.7344	10.7841
360	10.6129	9.6228	9.3292	10.2891

ตารางที่ ง.26 ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 1

Time (min)	T_{paddy} (°C)	h_{fg} (kJ/kg)	$T_{p2}-T_{p1}$ (°C)	Q_{evap} (kJ)	Q_s (kJ)	Q_a (kJ)	η_{dry} (%)
0	22.1	2448.6	0.0	0.0000	0.0000	1563.6111	0.0000
20	40.4	2405.0	18.3	690.0815	653.7322	1563.6111	85.9430
40	45.3	2393.2	4.9	599.3107	169.1098	1563.6111	49.1440
60	47.1	2388.9	1.8	439.5118	60.2197	1563.6111	31.9601
80	48.2	2386.3	1.1	570.6156	35.9469	1563.6111	38.7924
100	50.1	2381.7	1.9	743.7734	60.1729	1563.6111	51.4160
120	51.0	2379.5	0.9	290.9511	27.3169	1563.6111	20.3547
140	52.1	2376.8	1.1	485.0531	32.8197	1563.6111	33.1203
160	52.9	2374.9	0.8	175.7360	23.1799	1563.6111	12.7216
180	53.5	2373.4	0.6	388.7987	17.1976	1563.6111	25.9653
200	53.8	2372.7	0.3	350.1238	8.3914	1563.6111	22.9287
220	54.4	2371.3	0.6	275.1675	16.4091	1563.6111	18.6476
240	55.7	2368.1	1.3	234.1368	34.9166	1563.6111	17.2072
260	56.3	2366.6	0.6	195.4416	15.8650	1563.6111	13.5140
280	56.9	2365.2	0.6	163.3317	15.6559	1563.6111	11.4471
300	57.2	2364.5	0.3	155.7572	7.7405	1563.6111	10.4564
320	58.0	2362.5	0.8	217.2655	20.4190	1563.6111	15.2010
340	58.1	2362.3	0.1	120.7129	2.5136	1563.6111	7.8809
360	58.5	2361.3	0.4	99.6087	9.9680	1563.6111	7.0079

$$C_{pd} = 1.737$$

$$H_1 = 0.0177$$

$$C_{pw} = 4.22$$

$$T_2 - T_1 = 43.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_a = 35.6399 \text{ kg/h}$$

$$C_a = 1.0052 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

$$C_v = 0.71821 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

ตารางที่ ง.27 ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 2

Time (min)	T_{paddy} (°C)	h_{fg} (kJ/kg)	$T_{p2}-T_{p1}$ (°C)	Q_{evap} (kJ)	Q_s (kJ)	Q_a (kJ)	η_{dry} (%)
0	25.5	2440.5	0.0	0.0000	0.0000	1485.7649	0.0000
20	43.3	2398.0	17.8	750.3463	638.8004	1485.7649	93.4971
40	46.7	2389.9	3.4	791.9659	117.5285	1485.7649	61.2139
60	48.5	2385.5	1.8	475.0193	59.7038	1485.7649	35.9897
80	49.4	2383.4	0.9	705.3486	29.0956	1485.7649	49.4321
100	51.1	2379.3	1.7	445.7866	52.8353	1485.7649	33.5599
120	52.4	2376.1	1.3	472.6913	39.3756	1485.7649	34.4649
140	53.5	2373.4	1.1	455.5199	32.3944	1485.7649	32.8393
160	54.7	2370.5	1.2	402.6414	34.3674	1485.7649	29.4131
180	55.6	2368.3	0.9	385.9200	25.1304	1485.7649	27.6659
200	56.2	2366.9	0.6	323.5618	16.3410	1485.7649	22.8773
220	57.1	2364.7	0.9	273.7905	23.9923	1485.7649	20.0424
240	57.4	2364.0	0.3	212.6886	7.8509	1485.7649	14.8435
260	58.9	2360.3	1.5	238.5873	38.6848	1485.7649	18.6619
280	59.5	2358.8	0.6	158.8934	15.2180	1485.7649	11.7186
300	60.3	2356.9	0.8	227.3050	20.0632	1485.7649	16.6492
320	60.7	2355.9	0.4	107.2414	9.8688	1485.7649	7.8821
340	61.4	2354.2	0.7	169.9108	17.1360	1485.7649	12.5893
360	62.0	2352.7	0.6	104.5591	14.5052	1485.7649	8.0137

$$C_{pd} = 1.737$$

$$H_1 = 0.0194$$

$$C_{pw} = 4.22$$

$$T_2 - T_1 = 40.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_a = 35.6399 \text{ kg/h}$$

$$C_a = 1.0052 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

$$C_v = 0.71834 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

ตารางที่ ง.28 ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 3

Time (min)	T_{paddy} (°C)	h_{fg} (kJ/kg)	$T_{p2}-T_{p1}$ (°C)	Q_{evap} (kJ)	Q_s (kJ)	Q_a (kJ)	η_{dry} (%)
0	27.3	2436.2	0.0	0.0000	0.0000	1467.3177	0.0000
20	42.5	2400.0	15.2	613.3711	545.4209	1467.3177	78.9735
40	46.0	2391.6	3.5	949.0364	121.8156	1467.3177	72.9802
60	47.8	2387.2	1.8	528.0721	59.6338	1467.3177	40.0531
80	48.9	2384.6	1.1	717.0104	35.4160	1467.3177	51.2790
100	50.1	2381.7	1.2	405.8444	37.1130	1467.3177	30.1882
120	50.9	2379.7	0.8	536.0765	24.1667	1467.3177	38.1815
140	52.5	2375.9	1.6	444.1906	46.8124	1467.3177	33.4626
160	53.2	2374.2	0.7	330.8898	19.9281	1467.3177	23.9088
180	53.9	2372.5	0.7	403.5249	19.5164	1467.3177	28.8309
200	54.6	2370.8	0.7	192.1013	19.0140	1467.3177	14.3878
220	55.3	2369.1	0.7	435.9770	18.7747	1467.3177	30.9920
240	56.3	2366.6	1.0	177.8174	26.0444	1467.3177	13.8935
260	56.9	2365.2	0.6	299.4212	15.4364	1467.3177	21.4580
280	57.7	2363.2	0.8	189.0226	20.1544	1467.3177	14.2557
300	58.2	2362.0	0.5	211.0949	12.4278	1467.3177	15.2334
320	59.0	2360.1	0.8	44.5107	19.5827	1467.3177	4.3681
340	59.5	2358.8	0.5	225.1395	12.1994	1467.3177	16.1750
360	60.2	2357.1	0.7	102.1895	16.7972	1467.3177	8.1091

$$C_{pd} = 1.737$$

$$H_1 = 0.0191$$

$$C_{pw} = 4.22$$

$$T_2 - T_1 = 40.4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_a = 35.6399 \text{ kg/h}$$

$$C_a = 1.0054 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

$$C_v = 0.71835 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

ตารางที่ ง.29 ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 4

Time (min)	T_{paddy} (°C)	h_{fg} (kJ/kg)	$T_{p2}-T_{p1}$ (°C)	Q_{evap} (kJ)	Q_s (kJ)	Q_a (kJ)	η_{dry} (%)
0	21.9	2449.1	0.0	0.0000	0.0000	1512.6549	0.0000
20	39.1	2408.1	17.2	460.9724	616.2288	1512.6549	71.2126
40	43.5	2397.6	4.4	825.1860	154.0855	1512.6549	64.7386
60	45.0	2394.0	1.5	369.1358	50.3506	1512.6549	27.7318
80	46.3	2390.8	1.3	427.8118	42.7912	1512.6549	31.1111
100	47.8	2387.2	1.5	439.7125	48.2418	1512.6549	32.2581
120	48.7	2385.0	0.9	566.3689	28.2455	1512.6549	39.3093
140	49.7	2382.6	1.0	305.0577	30.3818	1512.6549	22.1755
160	50.5	2380.7	0.8	298.4590	23.8732	1512.6549	21.3090
180	51.1	2379.3	0.6	420.4283	17.5875	1512.6549	28.9568
200	51.9	2377.3	0.8	486.6955	22.8534	1512.6549	33.6857
220	52.5	2375.9	0.6	274.7323	16.6217	1512.6549	19.2611
240	52.9	2374.9	0.4	273.1547	10.8859	1512.6549	18.7776
260	53.8	2372.7	0.9	288.9359	24.0565	1512.6549	20.6916
280	54.4	2371.3	0.6	204.7701	15.7293	1512.6549	14.5770
300	54.8	2370.3	0.4	218.8726	10.3405	1512.6549	15.1530
320	55.4	2368.8	0.6	183.1971	15.2769	1512.6549	13.1209
340	55.9	2367.6	0.5	170.0816	12.5676	1512.6549	12.0747
360	56.2	2366.9	0.3	82.6314	7.4496	1512.6549	5.9552

$$C_{pd} = 1.737$$

$$H_1 = 0.0174$$

$$C_{pw} = 4.22$$

$$T_2 - T_1 = 41.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_a = 35.6399 \text{ kg/h}$$

$$C_a = 1.0053 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

$$C_v = 0.71831 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

ตารางที่ ง.30 ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 5

Time (min)	T_{paddy} (°C)	h_{fg} (kJ/kg)	$T_{p2}-T_{p1}$ (°C)	Q_{evap} (kJ)	Q_s (kJ)	Q_a (kJ)	η_{dry} (%)
0	22.1	2448.6	0.0	0.0000	0.0000	1494.0867	0.0000
20	40.4	2405.0	18.3	600.9242	654.2358	1494.0867	84.0085
40	45.3	2393.2	4.9	907.9569	170.0112	1494.0867	72.1490
60	47.1	2388.9	1.8	513.5685	59.5712	1494.0867	38.3605
80	48.2	2386.3	1.1	601.9946	35.4067	1494.0867	42.6616
100	50.1	2381.7	1.9	402.1722	59.1343	1494.0867	30.8755
120	51.0	2379.5	0.9	499.2233	27.3697	1494.0867	35.2451
140	52.1	2376.8	1.1	449.9380	32.4779	1494.0867	32.2883
160	52.9	2374.9	0.8	444.2927	22.9812	1494.0867	31.2749
180	53.5	2373.4	0.6	352.0209	16.7622	1494.0867	24.6828
200	53.8	2372.7	0.3	250.7258	8.1933	1494.0867	17.3296
220	54.4	2371.3	0.6	234.2311	16.1191	1494.0867	16.7561
240	55.7	2368.1	1.3	273.7095	34.3829	1494.0867	20.6208
260	56.3	2366.6	0.6	267.3202	15.5764	1494.0867	18.9344
280	56.9	2365.2	0.6	155.9849	15.2904	1494.0867	11.4635
300	57.2	2364.5	0.3	147.3790	7.5617	1494.0867	10.3703
320	58.0	2362.5	0.8	189.6212	19.9541	1494.0867	14.0270
340	58.1	2362.3	0.1	203.6614	2.4604	1494.0867	13.7958
360	58.5	2361.3	0.4	110.9579	9.6960	1494.0867	8.0754

$$C_{pd} = 1.737$$

$$H_1 = 0.0170$$

$$C_{pw} = 4.22$$

$$T_2 - T_1 = 41.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_a = 35.6399 \text{ kg/h}$$

$$C_a = 1.0053 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

$$C_v = 0.71831 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

ตารางที่ ง.31 ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 6

Time (min)	T_{paddy} (°C)	h_{fg} (kJ/kg)	$T_{p2}-T_{p1}$ (°C)	Q_{evap} (kJ)	Q_s (kJ)	Q_a (kJ)	η_{dry} (%)
0	25.5	2440.5	0.0	0.0000	0.0000	1495.1235	0.0000
20	43.3	2398.0	17.8	761.6846	635.9509	1495.1235	93.4796
40	46.7	2389.9	3.4	1082.3378	116.9164	1495.1235	80.2110
60	48.5	2385.5	1.8	587.7986	58.4568	1495.1235	43.2242
80	49.4	2383.4	0.9	751.6395	28.2926	1495.1235	52.1651
100	51.1	2379.3	1.7	351.6133	51.1791	1495.1235	26.9404
120	52.4	2376.1	1.3	492.7597	38.3262	1495.1235	35.5212
140	53.5	2373.4	1.1	472.9937	31.4672	1495.1235	33.7404
160	54.7	2370.5	1.2	384.9714	33.3187	1495.1235	27.9770
180	55.6	2368.3	0.9	313.1910	24.3722	1495.1235	22.5776
200	56.2	2366.9	0.6	217.9767	15.9133	1495.1235	15.6435
220	57.1	2364.7	0.9	268.3646	23.5202	1495.1235	19.5225
240	57.4	2364.0	0.3	244.6227	7.6964	1495.1235	16.8761
260	58.9	2360.3	1.5	209.1957	37.8269	1495.1235	16.5219
280	59.5	2358.8	0.6	181.7532	14.9063	1495.1235	13.1534
300	60.3	2356.9	0.8	182.3796	19.6150	1495.1235	13.5102
320	60.7	2355.9	0.4	89.4802	9.6769	1495.1235	6.6320
340	61.4	2354.2	0.7	158.1097	16.8223	1495.1235	11.7002
360	62.0	2352.7	0.6	121.6993	14.2491	1495.1235	9.0928

$$C_{pd} = 1.737$$

$$H_1 = 0.0180$$

$$C_{pw} = 4.22$$

$$T_2 - T_1 = 41.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_a = 35.6399 \text{ kg/h}$$

$$C_a = 1.0053 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

$$C_v = 0.71829 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

ตารางที่ ง.32 ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 7

Time (min)	T_{paddy} (°C)	h_{fg} (kJ/kg)	$T_{p2}-T_{p1}$ (°C)	Q_{evap} (kJ)	Q_s (kJ)	Q_a (kJ)	η_{dry} (%)
0	25.5	2440.5	0.0	0.0000	0.0000	1538.3799	0.0000
20	43.3	2398.0	17.8	794.8804	637.5275	1538.3799	93.1115
40	46.7	2389.9	3.4	1092.0216	117.0189	1538.3799	78.5918
60	48.5	2385.5	1.8	576.6422	58.4803	1538.3799	41.2852
80	49.4	2383.4	0.9	690.3529	28.3221	1538.3799	46.7164
100	51.1	2379.3	1.7	473.9691	51.4193	1538.3799	34.1521
120	52.4	2376.1	1.3	391.0937	38.2278	1538.3799	27.9074
140	53.5	2373.4	1.1	505.2257	31.5826	1538.3799	34.8944
160	54.7	2370.5	1.2	293.2767	33.3757	1538.3799	21.2335
180	55.6	2368.3	0.9	331.5437	24.5619	1538.3799	23.1481
200	56.2	2366.9	0.6	273.5174	16.0201	1538.3799	18.8209
220	57.1	2364.7	0.9	300.1081	23.5913	1538.3799	21.0416
240	57.4	2364.0	0.3	245.7666	7.7031	1538.3799	16.4764
260	58.9	2360.3	1.5	144.1768	37.8574	1538.3799	11.8329
280	59.5	2358.8	0.6	180.0389	14.9883	1538.3799	12.6774
300	60.3	2356.9	0.8	233.5997	19.7267	1538.3799	16.4671
320	60.7	2355.9	0.4	91.6316	9.6961	1538.3799	6.5867
340	61.4	2354.2	0.7	135.1833	16.8532	1538.3799	9.8829
360	62.0	2352.7	0.6	127.5199	14.3002	1538.3799	9.2188

$$C_{pd} = 1.737$$

$$H_1 = 0.0178$$

$$C_{pw} = 4.22$$

$$T_2 - T_1 = 42.4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_a = 35.6399 \text{ kg/h}$$

$$C_a = 1.0052 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

$$C_v = 0.71825 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

ตารางที่ ง.33 ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 8

Time (min)	T_{paddy} (°C)	h_{fg} (kJ/kg)	$T_{p2}-T_{p1}$ (°C)	Q_{evap} (kJ)	Q_s (kJ)	Q_a (kJ)	η_{dry} (%)
0	22.1	2448.6	0.0	0.0000	0.0000	1520.9095	0.0000
20	40.4	2405.0	18.3	657.7059	658.5722	1520.9095	86.5455
40	45.3	2393.2	4.9	929.4389	170.6841	1520.9095	72.3332
60	47.1	2388.9	1.8	524.4411	59.7502	1520.9095	38.4107
80	48.2	2386.3	1.1	517.6339	35.4950	1520.9095	36.3683
100	50.1	2381.7	1.9	571.9602	59.5702	1520.9095	41.5232
120	51.0	2379.5	0.9	388.2193	27.3054	1520.9095	27.3208
140	52.1	2376.8	1.1	504.4829	32.6159	1520.9095	35.3143
160	52.9	2374.9	0.8	300.3750	23.0041	1520.9095	21.2622
180	53.5	2373.4	0.6	392.0752	16.9328	1520.9095	26.8923
200	53.8	2372.7	0.3	410.8172	8.2573	1520.9095	27.5542
220	54.4	2371.3	0.6	242.1066	16.0762	1520.9095	16.9756
240	55.7	2368.1	1.3	248.6603	34.2716	1520.9095	18.6028
260	56.3	2366.6	0.6	279.1012	15.5518	1520.9095	19.3735
280	56.9	2365.2	0.6	174.4030	15.2532	1520.9095	12.4699
300	57.2	2364.5	0.3	270.5527	7.5332	1520.9095	18.2842
320	58.0	2362.5	0.8	72.9070	19.7023	1520.9095	6.0891
340	58.1	2362.3	0.1	158.0610	2.4498	1520.9095	10.5536
360	58.5	2361.3	0.4	128.2520	9.6861	1520.9095	9.0694

$$C_{pd} = 1.737$$

$$H_1 = 0.0184$$

$$C_{pw} = 4.22$$

$$T_2 - T_1 = 41.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_a = 35.6399 \text{ kg/h}$$

$$C_a = 1.0053 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

$$C_v = 0.71826 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

ตารางที่ ง.34 ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 9

Time (min)	T_{paddy} (°C)	h_{fg} (kJ/kg)	$T_{p2}-T_{p1}$ (°C)	Q_{evap} (kJ)	Q_s (kJ)	Q_a (kJ)	η_{dry} (%)
0	27.3	2436.2	0.0	0.0000	0.0000	1513.3296	0.0000
20	42.5	2400	15.2	894.5880	549.1067	1513.3296	95.3986
40	46.0	2391.6	3.5	588.6735	120.9336	1513.3296	46.8905
60	47.8	2387.2	1.8	539.1598	60.3247	1513.3296	39.6136
80	48.9	2384.6	1.1	596.3107	35.8167	1513.3296	41.7706
100	50.1	2381.7	1.2	526.9109	37.8064	1513.3296	37.3162
120	50.9	2379.7	0.8	383.3708	24.4574	1513.3296	26.9491
140	52.5	2375.9	1.6	471.9128	47.8270	1513.3296	34.3441
160	53.2	2374.2	0.7	378.9160	20.3376	1513.3296	26.3825
180	53.9	2372.5	0.7	361.7425	19.8661	1513.3296	25.2165
200	54.6	2370.8	0.7	393.7397	19.4157	1513.3296	27.3011
220	55.3	2369.1	0.7	355.2962	18.9251	1513.3296	24.7283
240	56.3	2366.6	1.0	350.9900	26.4030	1513.3296	24.9379
260	56.9	2365.2	0.6	154.7724	15.4663	1513.3296	11.2493
280	57.7	2363.2	0.8	268.4329	20.4008	1513.3296	19.0860
300	58.2	2362.0	0.5	247.4039	12.5108	1513.3296	17.1750
320	59.0	2360.1	0.8	160.0579	19.6637	1513.3296	11.8759
340	59.5	2358.8	0.5	287.4700	12.1467	1513.3296	19.7985
360	60.2	2357.1	0.7	94.7398	16.6454	1513.3296	7.3603

$$C_{pd} = 1.737$$

$$H_1 = 0.0181$$

$$C_{pw} = 4.22$$

$$T_2 - T_1 = 41.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_a = 35.6399 \text{ kg/h}$$

$$C_a = 1.0053 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

$$C_v = 0.71826 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

ตารางที่ ง.35 ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 10

Time (min)	T_{paddy} (°C)	h_{fg} (kJ/kg)	$T_{p2}-T_{p1}$ (°C)	Q_{evap} (kJ)	Q_s (kJ)	Q_a (kJ)	η_{dry} (%)
0	21.9	2449.1	0.0	0.0000	0.0000	1708.5781	0.0000
20	39.1	2408.1	17.2	876.6381	619.4038	1708.5781	87.5606
40	43.5	2397.6	4.4	576.8281	151.6927	1708.5781	42.6390
60	45.0	2394.0	1.5	556.7200	50.1905	1708.5781	35.5214
80	46.3	2390.8	1.3	475.9587	42.2227	1708.5781	30.3282
100	47.8	2387.2	1.5	523.2238	47.4583	1708.5781	33.4010
120	48.7	2385.0	0.9	604.5242	27.6425	1708.5781	36.9996
140	49.7	2382.6	1.0	337.0354	29.6443	1708.5781	21.4611
160	50.5	2380.7	0.8	329.4553	23.2379	1708.5781	20.6425
180	51.1	2379.3	0.6	334.9367	17.0780	1708.5781	20.6028
200	51.9	2377.3	0.8	366.9621	22.2954	1708.5781	22.7825
220	52.5	2375.9	0.6	322.9368	16.3307	1708.5781	19.8567
240	52.9	2374.9	0.4	147.5980	10.6577	1708.5781	9.2624
260	53.8	2372.7	0.9	246.7010	23.7438	1708.5781	15.8286
280	54.4	2371.3	0.6	191.7224	15.5660	1708.5781	12.1322
300	54.8	2370.3	0.4	206.6727	10.2408	1708.5781	12.6956
320	55.4	2368.8	0.6	111.6491	15.1405	1708.5781	7.4208
340	55.9	2367.6	0.5	189.7212	12.5176	1708.5781	11.8367
360	56.2	2366.9	0.3	127.2278	7.4091	1708.5781	7.8801

$$C_{pd} = 1.737$$

$$H_1 = 0.0149$$

$$C_{pw} = 4.22$$

$$T_2 - T_1 = 47.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_a = 35.6399 \text{ kg/h}$$

$$C_a = 1.0050 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

$$C_v = 0.71798 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

ตารางที่ ง.36 ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 11

Time (min)	T_{paddy} (°C)	h_{fg} (kJ/kg)	$T_{p2}-T_{p1}$ (°C)	Q_{evap} (kJ)	Q_s (kJ)	Q_a (kJ)	η_{dry} (%)
0	21.9	2449.1	0.0	0.0000	0.0000	1606.5763	0.0000
20	39.1	2408.1	17.2	721.4096	619.4497	1606.5763	83.4607
40	43.5	2397.6	4.4	625.0749	152.9013	1606.5763	48.4245
60	45.0	2394.0	1.5	421.1685	50.4752	1606.5763	29.3571
80	46.3	2390.8	1.3	596.0055	42.7800	1606.5763	39.7607
100	47.8	2387.2	1.5	580.9001	47.7835	1606.5763	39.1319
120	48.7	2385.0	0.9	369.2968	27.7459	1606.5763	24.7136
140	49.7	2382.6	1.0	494.0874	30.1754	1606.5763	32.6323
160	50.5	2380.7	0.8	441.9314	23.4402	1606.5763	28.9667
180	51.1	2379.3	0.6	287.1648	17.1101	1606.5763	18.9393
200	51.9	2377.3	0.8	379.2538	22.4061	1606.5763	25.0010
220	52.5	2375.9	0.6	306.8954	16.4006	1606.5763	20.1233
240	52.9	2374.9	0.4	246.6390	10.7157	1606.5763	16.0188
260	53.8	2372.7	0.9	110.7191	23.7159	1606.5763	8.3678
280	54.4	2371.3	0.6	262.6826	15.6924	1606.5763	17.3272
300	54.8	2370.3	0.4	225.0921	10.2746	1606.5763	14.6502
320	55.4	2368.8	0.6	168.0663	15.1715	1606.5763	11.4055
340	55.9	2367.6	0.5	138.8665	12.4932	1606.5763	9.4213
360	56.2	2366.9	0.3	99.9127	7.4217	1606.5763	6.6809

$$C_{pd} = 1.737$$

$$H_1 = 0.0173$$

$$C_{pw} = 4.22$$

$$T_2 - T_1 = 44.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_a = 35.6399 \text{ kg/h}$$

$$C_a = 1.0051 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

$$C_v = 0.71814 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

ตารางที่ ง.37 ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง ของการทดลองที่ 12

Time (min)	T_{paddy} (°C)	h_{fg} (kJ/kg)	$T_{p2}-T_{p1}$ (°C)	Q_{evap} (kJ)	Q_s (kJ)	Q_a (kJ)	η_{dry} (%)
0	27.3	2436.2	0.0	0.0000	0.0000	1543.8576	0.0000
20	42.5	2400.0	15.2	840.9815	547.5608	1543.8576	89.9398
40	46.0	2391.6	3.5	827.0127	120.9075	1543.8576	61.3995
60	47.8	2387.2	1.8	573.1755	59.5543	1543.8576	40.9837
80	48.9	2384.6	1.1	525.5069	35.2797	1543.8576	36.3237
100	50.1	2381.7	1.2	456.0937	37.3710	1543.8576	31.9631
120	50.9	2379.7	0.8	580.5834	24.2675	1543.8576	39.1779
140	52.5	2375.9	1.6	384.3608	46.8877	1543.8576	27.9332
160	53.2	2374.2	0.7	509.5305	20.0355	1543.8576	34.3015
180	53.9	2372.5	0.7	252.6018	19.4015	1543.8576	17.6184
200	54.6	2370.8	0.7	328.2752	19.0870	1543.8576	22.4996
220	55.3	2369.1	0.7	280.8209	18.6780	1543.8576	19.3994
240	56.3	2366.6	1.0	272.0922	26.1826	1543.8576	19.3201
260	56.9	2365.2	0.6	284.8222	15.4185	1543.8576	19.4474
280	57.7	2363.2	0.8	151.7482	20.1514	1543.8576	11.1344
300	58.2	2362.0	0.5	123.6001	12.4591	1543.8576	8.8129
320	59.0	2360.1	0.8	205.3615	19.7580	1543.8576	14.5816
340	59.5	2358.8	0.5	139.5689	12.1651	1543.8576	9.8282
360	60.2	2357.1	0.7	128.1769	16.8564	1543.8576	9.3942

$$C_{pd} = 1.737$$

$$H_1 = 0.0195$$

$$C_{pw} = 4.22$$

$$T_2 - T_1 = 42.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_a = 35.6399 \text{ kg/h}$$

$$C_a = 1.0052 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

$$C_v = 0.71821 \text{ kJ/Kg}\cdot\text{K}$$

ประวัติผู้เขียน

นายณัฐพงษ์ วงศ์บับพา เกิดเมื่อวันที่ 26 เมษายน พ.ศ. 2532 ที่อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี เริ่มศึกษาระดับชั้นอนุบาลที่โรงเรียนเทศบาล 1 โพนศรี จังหวัดอุดรธานี ระดับประถมศึกษาชั้นปีที่ 1 - 6 และระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 1 - 6 ที่โรงเรียนอุดรพิทยานุกูล จังหวัดอุดรธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (หลักสูตรวิศวกรรมอากาศยาน) ในปี พ.ศ. 2554 และปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล) ในปี พ.ศ. 2557 จากสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล (หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ) ณ สถาบันการศึกษาเดิม โดยในขณะศึกษาได้เป็นผู้ช่วยสอนในของสาขาวิศวกรรมเครื่องกลอยู่หลายวิชารายวิชา เช่น วิชาเขียนแบบทางวิศวกรรม วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล วิชาคณิตศาสตร์สำหรับวิศวกรรม และวิชาเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นต้น

ผลงานวิจัยที่นำเสนอขณะที่กำลังศึกษาในระดับปริญญาโท

ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา และ ทวีช จิตรสมบุญ. (2557). **เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่น** **หน่วยติดตะแกรง**. ในงานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 ระหว่างวันที่ 15 - 17 ตุลาคม พ.ศ. 2557 ณ จังหวัดขอนแก่น.

ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา และ ทวีช จิตรสมบุญ. (2558). **ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง** **ข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นที่เป็นช่องอ**. ในงานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29 ระหว่างวันที่ 1 - 3 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 ณ จังหวัดนครราชสีมา.

ผลงานวิจัยที่นำเสนอขณะที่กำลังศึกษาในระดับปริญญาเอก

Nuttapong Wongbubpa, Krawee Treamnuk and Tawarat Treamnuk. (2020). **Kinematics motion of paddy in hot air pulse flow**. The 13th TSAE International Conferences 187, Suranaree University of Technology, Thailand, 2020.

ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา, ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน, กระวี ตรีอำนาจ, เทวรัตน์ ตรีอำนาจ และ ปรีดา ปรากฏมาก. (2564). การศึกษาการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งแบบลมร้อนด้วยวิธีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์. ในการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 22 ระหว่างวันที่ 12 - 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2564 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา, กระวี ตรีอำนาจ และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ. (2565). อิทธิพลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วงต่อการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม. ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 7 วันที่ 29 มีนาคม พ.ศ. 2565 คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (รางวัลบทความดีเด่น)

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ขณะที่กำลังศึกษาในระดับปริญญาเอก

ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา, กระวี ตรีอำนาจ และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ. (2565). อิทธิพลของรูปแบบความเร็วอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือก. วารสารวิชาการและวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 16(1).

ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา และ ทวีช จิตรสมบูรณ์. (2565). การศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบเป่าฟันในท่อพ่นปลา. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 17(1).