



การพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัสทีโฟล
DEVELOPMENT OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF MUST FLOW PADDY DRYER



สุรัชัย เหมหิรัญ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2563

การพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัลติโพล



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

DEVELOPMENT OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF MUST FLOW PADDY DRYER



A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY
(Mechanical Engineering)

Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

2020

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง
การพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัลติโฟล
ของ
สุรัชย์ เหมหิรัญ

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก	 ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยวานิชกุล)	(รองศาสตราจารย์ ดร.วสันต์ เขียวสุวรรณ)
	 กรรมการ
	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมมาศ แก้วล้วน)

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัลติโฟล
ผู้วิจัย	สุรัชย์ เหมหิรัญ
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
ปีการศึกษา	2563
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ประชา บุญยวานิชกุล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัลติโฟล โดยเครื่องอบแห้งมีพื้นที่ห้องอบแห้งขนาดกว้าง 0.015 เมตร ยาว 1.0 เมตร ข้าวเปลือกเคลื่อนที่บนแผ่นกระจายความร้อนผ่านห้องอบแห้งด้วยการสั่นสะเทือนจากการหมุนเยื้องศูนย์กลางของชุดเขย่าห้องอบแห้งและติดตั้งเตาแบบอินฟราเรด เพื่อสร้างอากาศร้อนในการอบแห้ง ระบบควบคุมประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่อ่านและบันทึกข้อมูลจากตัวรับรู้ต่าง ๆ และผู้วิจัยได้ดำเนินการพัฒนาระบบควบคุมของเครื่องอบแห้งแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนแรกเป็นการสร้างและทดสอบระบบควบคุมแบบปิดเพื่อควบคุมความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วและความเร็วอากาศที่ไหลออกจากห้องอบแห้ง ขั้นตอนที่สองทดสอบการอบแห้งด้วยการปรับตั้งการควบคุมตามเงื่อนไขการทดสอบ โดยกำหนดเงื่อนไขดังนี้ อุณหภูมิอากาศร้อนเฉลี่ย 130 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนของชุดเขย่าห้องอบแห้งเป็น 110 รอบต่อนาที ความเร็วของอากาศไหลออกจากเครื่องอบแห้งเป็น 2.0, 2.5 และ 3.0 เมตรต่อวินาที ที่ความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์ว 2, 4 และ 6 รอบต่อนาที ตามลำดับ และขั้นตอนสุดท้ายเป็นการออกแบบและสร้างระบบควบคุมแบบอัตโนมัติเพื่อการปรับตั้งและการควบคุมการทำงาน และประเมินความชื้นที่ลดลงในขณะอบแห้ง ผลการทดสอบพบว่าการควบคุมแบบปิดสามารถควบคุมชุดการหมุนของโรตารีวาล์วและความเร็วอากาศออกจากห้องอบแห้งได้ตามต้องการ และการทดสอบการอบแห้งพบว่าการปรับตั้งความเร็วของอากาศไหลออกจากห้องอบแห้งเป็น 2.5 เมตรต่อวินาที ที่ความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วเป็น 2 รอบต่อนาที สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้นช่วง 20-21%wb จนมีความชื้นสุดท้ายที่ 14.8%wb (ระดับที่ต้องการ) และสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 18.2 MJ/kg water removed นอกจากนี้ข้าวเปลือกภายหลังจากการอบแห้งมีอัตราการกะเทาะเปลือกคิดเป็นร้อยละ 94.8 และท้ายที่สุดพบว่าระบบควบคุมอัตโนมัติที่ได้รับการพัฒนาสามารถลดความชื้นจนมีความชื้นสุดท้ายตามต้องการ โดยยังคงใช้พลังงานในระดับที่น้อยกว่าการทดลองข้างต้นกรณีการปรับตั้งการทำงานที่เหมาะสม นอกจากนี้ระบบควบคุมสามารถลดการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงร้อยละ 33.2

คำสำคัญ : ระบบควบคุมอัตโนมัติ, เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัลติโฟล

Title	DEVELOPMENT OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF MUST FLOW PADDY DRYER
Author	SURACHAI HEMHIRUN
Degree	DOCTOR OF PHILOSOPHY
Academic Year	2020
Thesis Advisor	Associate Professor Dr. Pracha Bunyawanichakul

This research aims to develop an automatic control system for must flow paddy dryer. The dryer has drying area of 0.015 meters, with a width and length of 1.0 meter. The paddy moves on the distributor plate through the drying chamber, using the vibration generated by the eccentric rotational drive. An infrared gas burner was installed in the hot-air chamber to generate a hot-air feed into the drying chamber. The control system consists of a microcontroller to read and record data from each sensor. The system was developed by the researcher in the following three steps: the first step was to design and test a closed control system to control the rotation speed of the rotary valve and the velocity of the exhaust air. The second step was a manually controlled drying test using the average hot air temperature of 130 degrees Celsius and a fixed rotational speed of the eccentric drive of the drying chamber at 110 rpm. The velocity of the exhaust air varied between 2.0, 2.5, and 3.0 m/s at various rotation speeds of the rotary valve feeder at two, four, and six rpm, respectively. The final step was to design and install an automatic control system for the configuration, operational control, and evaluation of the moisture content reduction during drying. The control system test showed that the closed control system could control the rotary valve rotation set and the exhaust air velocity as desired and the drying test of the exhaust air velocity of 2.5 m/s and the rotation speed of the rotary valve at two rpm could reduce the moisture content of the paddy from the initial range of moisture content of 20-21% wet basis to the final moisture content of 14.8%, a wet basis using a specific energy consumption of 18.2 MJ / kg. of water removed with a husking rate of 94.8%. Finally, it was found that developed automatic control systems were able to reduce the moisture content of the paddy to the desired final moisture content, while still using less energy than the manual control system in the case of optimal operation settings. In addition, it was found that the developed system could reduce the specific energy consumption (SEC) by 33.2%.

Keyword : Automatic control system, Must flow paddy dryer

กิตติกรรมประกาศ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิตในหัวข้อเรื่องการพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัลติโฟล

โดยผู้วิจัยได้รับการสนับสนุนด้านอุปกรณ์วัดที่ได้มาตรฐานและสิ่งสนับสนุนสำหรับการดำเนินการจนแล้วเสร็จ

ผู้วิจัยขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยวานิชกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ช่วยให้คำแนะนำในด้านวิชาการ และจัดหาอุปกรณ์ที่ส่งเสริมให้งานวิจัยมีมาตรฐานมากขึ้น

และรองศาสตราจารย์ ดร.วสันต์ เจริญสุวรรณ ซึ่งเป็นประธานในการสอบท่านได้ให้แนวทางที่เหมาะสมและเพิ่มเติมในด้านวิชาการที่สมบูรณ์มากขึ้น รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมมาส แก้วล้วน ซึ่งได้ให้แนวทางและข้อควรระวังในการดำเนินการวิจัย

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ นายโสภณ เหมศิริ (บิดา) และนางสุรีย์ ปานโต (มารดา) รวมถึงญาติๆ พี่ๆ น้องๆ ที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสมอมา

ท้ายสุดนี้ คุณประโยชน์ที่เกิดจากปฏิญานิพนธ์ ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดาและมารดา รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่าน เพื่อตอบแทนพระคุณที่ได้ช่วยเหลือให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการศึกษา

สุรัชย์ เหมศิริ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ภูมิหลังและความเป็นมาของปัญหา.....	1
ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	4
ประโยชน์ของการวิจัย.....	4
ขอบเขตของการวิจัย.....	4
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	5
กรอบแนวคิดในงานวิจัย.....	5
สมมติฐานในการวิจัย.....	7
บทที่ 2 หลักการทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
หลักการพื้นฐานของการอบแห้ง.....	8
ความสำคัญของการอบแห้ง.....	8
ความชื้นในเมล็ดพืช.....	9
การหาน้ำหนักของเมล็ดพืชที่ลดลง.....	11
การวัดความชื้นเมล็ดพืช.....	11
สมบัติของอากาศชื้น (properties of moist air).....	14

การอบแห้ง (Drying)	16
การหาค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)	18
ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการอบแห้ง	19
ประเภทของการอบแห้ง	19
การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัลติโฟล	20
การดำเนินการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง (แบบควบคุมด้วยมือ)	20
ปัญหาที่พบจากการดำเนินการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง	22
การปรับปรุงการควบคุมชุดอุปกรณ์และส่วนควบ (แบบควบคุมด้วยไฟฟ้า)	22
การควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (dc-motor speed controller)	23
การควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (ac-motor speed controller)	25
ตัวรับรู้ของเครื่องอบแห้ง	26
ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับอุปกรณ์ส่วนควบ	31
ระบบควบคุมแบบสัดส่วนบวกบวกอนุพันธ์ (PID-Control)	32
ผลการตอบสนองในโดเมนเวลา	33
การปรับแต่งตัวควบคุม (controller tuning)	34
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	37
การทดสอบการดำเนินการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ	37
เครื่องอบแห้งแบบมัลติโฟล	37
เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคเบด	40
เครื่องอบแห้งแบบถังหมุน	42
เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ	43
เครื่องอบแห้งแบบท่อหรือแบบพาหะลม	44
เครื่องอบแห้งแบบกระแสน	47

เครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบด.....	48
การเพิ่มประสิทธิภาพของการอบแห้งรวมถึงการประหยัดพลังงาน.....	51
ข้อได้เปรียบและการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งแบบมัลติโฟล.....	52
วิธีการควบคุมการลดความชื้นของเครื่องอบแห้งและแนวทางประยุกต์.....	53
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	55
ข้อมูลเฉพาะเครื่องอบแห้งแบบมัลติโฟล.....	55
การปรับปรุงชุดอุปกรณ์ส่วนควบของเครื่องอบแห้ง.....	57
การพัฒนาระบบควบคุมของชุดอุปกรณ์ส่วนควบ.....	60
การทดสอบระบบควบคุมของเครื่องอบแห้ง.....	62
อุปกรณ์และเครื่องมือวัด (equipment and measuring Instrument).....	63
การเตรียมตัวอย่างก่อนการทดสอบ.....	64
การทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบมัลติโฟล.....	65
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	70
ผลลัพธ์การพัฒนาระบบควบคุมอุปกรณ์ส่วนควบ.....	70
การพัฒนาระบบควบคุมชุดอัตราการป้อนของเมล็ดพืช.....	70
ระบบควบคุมการไหลของอากาศร้อนผ่านห้องอบแห้ง.....	73
ผลลัพธ์การทดสอบการอบแห้ง (ระบบควบคุมแบบปรับตั้งพารามิเตอร์).....	76
ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก.....	90
ปริมาณการผลิต (Quantity).....	90
การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC).....	91
คุณภาพข้าวภายหลังการอบแห้ง.....	92
การสร้างขั้นตอนวิธีของระบบควบคุมอัตโนมัติ.....	93
ผลลัพธ์การทดสอบการอบแห้ง (ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ).....	103

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	108
สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล.....	108
ข้อเสนอแนะ	109
บรรณานุกรม.....	110
ภาคผนวก.....	119
ประวัติผู้เขียน.....	147



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ความสัมพันธ์ของข้อแม่เหล็กกับความถี่ที่ส่งผลต่อความเร็วรอบของมอเตอร์.....	26
ตาราง 2 ผลกระทบของค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบ P, I และ D.....	35
ตาราง 3 ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบต่าง ๆ โดยวิธีปฏิบัติของกระบวนการ.....	36
ตาราง 4 ลักษณะการไหลและการเปลี่ยนแปลงพลังงานของเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ	49
ตาราง 5 ข้อมูลเฉพาะของเครื่องอบแห้งแบบมัลติฟลู	56
ตาราง 6 การเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะ (ที่อัตราการป้อนเฉลี่ย 75 kg/h).....	79
ตาราง 7 การเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะ (ที่อัตราการป้อนเฉลี่ย 150 kg/h).....	84
ตาราง 8 การเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะ (ที่อัตราการป้อนเฉลี่ย 220 kg/h).....	88
ตาราง 9 ประมาณราคาจำหน่ายภายหลังการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะ.....	91
ตาราง 10 ข้อมูลการประเมินความชื้นสุดท้ายด้วยการสมดุลมวล.....	96
ตาราง 11 เปรียบเทียบผลการประเมินความชื้นกับเครื่องมือวัดความชื้น.....	97
ตาราง 12 การถดถอยเชิงเส้นของการปรับความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์ว.....	102
ตาราง 13 การถดถอยเชิงเส้นของการปรับความเร็วการไหลของอากาศ.....	102
ตาราง 14 การเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะของระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ.....	106

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 การหักลดน้ำหนักรตามปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก.....	1
ภาพประกอบ 2 ลักษณะการไหลของอากาศร้อนและเมล็ดพืช.....	2
ภาพประกอบ 3 การพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องอบแห้งแบบมัลติโพล.....	6
ภาพประกอบ 4 เส้นความชื้นสมดุลของเมล็ดข้าวโพด ที่อุณหภูมิ 22 °C.....	8
ภาพประกอบ 5 ส่วนประกอบของน้ำหนักในเมล็ดพืช.....	9
ภาพประกอบ 6 ตู้อบไฟฟ้าสำหรับห้องปฏิบัติการ.....	12
ภาพประกอบ 7 เครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบแท่งตะเกียบ.....	12
ภาพประกอบ 8 เครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบบด.....	13
ภาพประกอบ 9 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของอากาศในการดำเนินการอบแห้ง.....	16
ภาพประกอบ 10 อัตราการแห้งของผลิดผลการเกษตร.....	17
ภาพประกอบ 11 อุปกรณ์และส่วนควบของเครื่องอบแห้งแบบมัลติโพล.....	21
ภาพประกอบ 12 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบปรับค่าความต้านทาน.....	23
ภาพประกอบ 13 การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบปรับค่าแรงดัน.....	23
ภาพประกอบ 14 สัญญาณ PWM แสดงค่า duty cycles ต่างกัน.....	24
ภาพประกอบ 15 อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	25
ภาพประกอบ 16 อุปกรณ์เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศ.....	27
ภาพประกอบ 17 อุปกรณ์เซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิล แบบเค (K-Type Thermocouple).....	28
ภาพประกอบ 18 อุปกรณ์เซนเซอร์วัดความชื้นเมล็ดพืช.....	28
ภาพประกอบ 19 อุปกรณ์เซนเซอร์วัดความเร็วรอบการหมุน.....	29
ภาพประกอบ 20 อุปกรณ์วัดการไหลชนิดท่อปีโตต์ (pitot tube).....	30
ภาพประกอบ 21 อุปกรณ์เซนเซอร์วัดความดันอากาศ.....	30

ภาพประกอบ 22	บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบ PID-Control	32
ภาพประกอบ 23	การตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของระบบควบคุม	33
ภาพประกอบ 24	การตอบสนองของระบบโดยวิธีปฏิกิริยาของกระบวนการ.....	36
ภาพประกอบ 25	การรับ-ส่งข้อมูลสถานะของเครื่องอบแห้ง	54
ภาพประกอบ 26	เครื่องอบแห้งแบบมัลติโฟล ที่ได้พัฒนา	55
ภาพประกอบ 27	ชุดปรับอัตราการป้อนเมล็ดพืช (rotary feed valve set).....	57
ภาพประกอบ 28	ชุดปรับการไหลของอากาศร้อน (hot air outlet set)	59
ภาพประกอบ 29	ชุดบังคับการเคลื่อนตัวของเมล็ดพืช (eccentric set).....	59
ภาพประกอบ 30	ชุดสร้างอากาศร้อน (hot air generator set)	60
ภาพประกอบ 31	ระบบควบคุมความเร็วรอบการป้อนเมล็ดพืช.....	61
ภาพประกอบ 32	ระบบควบคุมการไหลของอากาศร้อน.....	62
ภาพประกอบ 33	เครื่องบันทึกอุณหภูมิ และเครื่องวัดความเร็วอากาศ.....	63
ภาพประกอบ 34	เครื่องมือวัดความชื้นเมล็ดพืช ความชื้นอากาศและเครื่องชั่งน้ำหนัก	64
ภาพประกอบ 35	การเตรียมและการบรรจุข้าวเปลือกเพื่อปรับความชื้น	65
ภาพประกอบ 36	การเตรียมวัสดุก่อนการทดสอบ	66
ภาพประกอบ 37	เครื่องมือวัดความชื้น.....	66
ภาพประกอบ 38	การบันทึกข้อมูลการใช้ไฟฟ้าและน้ำหนักเชื้อเพลิงที่ลดลง	67
ภาพประกอบ 39	การเตรียมตัวอย่างก่อนการทดสอบ	69
ภาพประกอบ 40	การทดสอบหาประสิทธิภาพการกะเทาะเปลือก	69
ภาพประกอบ 41	น้ำหนักที่กะเทาะเปลือกออก(ซ้าย) และกะเทาะเปลือกไม่ออก(ขวา).....	69
ภาพประกอบ 42	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกับความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์ว	71
ภาพประกอบ 43	ผลตอบสนองของความเร็วยรอบการหมุนของระบบวงเปิด	72
ภาพประกอบ 44	ผลตอบสนองของความเร็วยรอบการหมุนของระบบวงปิด	73

ภาพประกอบ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความเร็วของอากาศร้อน.....	73
ภาพประกอบ 46 ผลตอบสนองของความเร็วอากาศที่ทางออกของระบบวงเปิด.....	74
ภาพประกอบ 47 ผลตอบสนองของความเร็วการไหลของอากาศของระบบวงปิด	75
ภาพประกอบ 48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศที่ทางออกกับเวลาในการอบแห้ง กรณี ความเร็วอากาศเป็น 2.0, 2.5 และ 3.0 m/s ที่อัตราการป้อนเฉลี่ย 75 kg/h	76
ภาพประกอบ 49 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ที่ทางออกกับเวลาในการอบแห้ง กรณี ความเร็วอากาศเป็น 2.0, 2.5 และ 3.0 m/s ที่อัตราการป้อนเฉลี่ย 75 kg/h	77
ภาพประกอบ 50 ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายภายหลังการทดสอบการอบแห้ง	78
ภาพประกอบ 51 แผนภูมิความสัมพันธ์ของความชื้นสุดท้ายต่อร้อยละการกะเทาะเปลือก	80
ภาพประกอบ 52 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศที่ทางออกกับเวลาในการอบแห้ง กรณี ความเร็วการไหลอากาศเป็น 2.0, 2.5 และ 3.0 m/s ที่อัตราการป้อนเฉลี่ย 150 kg/h.....	81
ภาพประกอบ 53 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ที่ทางออกกับเวลาในการอบแห้ง กรณี ความเร็วอากาศเป็น 2.0, 2.5 และ 3.0 m/s ที่อัตราการป้อนเฉลี่ย 150 kg/h	82
ภาพประกอบ 54 ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายภายหลังการทดสอบการอบแห้ง	83
ภาพประกอบ 55 แผนภูมิความสัมพันธ์ของความชื้นสุดท้ายต่อร้อยละการกะเทาะเปลือก	84
ภาพประกอบ 56 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศที่ทางออกกับเวลาในการอบแห้ง กรณี ความเร็วการไหลอากาศเป็น 2.0, 2.5 และ 3.0 m/s ที่อัตราการป้อนเฉลี่ย 220 kg/h.....	85
ภาพประกอบ 57 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ที่ทางออกกับเวลาในการอบแห้ง	86
ภาพประกอบ 58 ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายภายหลังการทดสอบการอบแห้ง	87
ภาพประกอบ 59 แผนภูมิความสัมพันธ์ของความชื้นสุดท้ายต่อค่าร้อยละการกะเทาะเปลือก	89
ภาพประกอบ 60 ปริมาณการผลิตต่อชั่วโมงจากการทดสอบการอบแห้ง.....	90
ภาพประกอบ 61 เปรียบเทียบค่าร้อยละการกะเทาะเปลือก	93
ภาพประกอบ 62 การสมดุลมวลภายในห้องอบแห้ง	94
ภาพประกอบ 63 การประเมินความชื้นขณะดำเนินการอบแห้ง	97

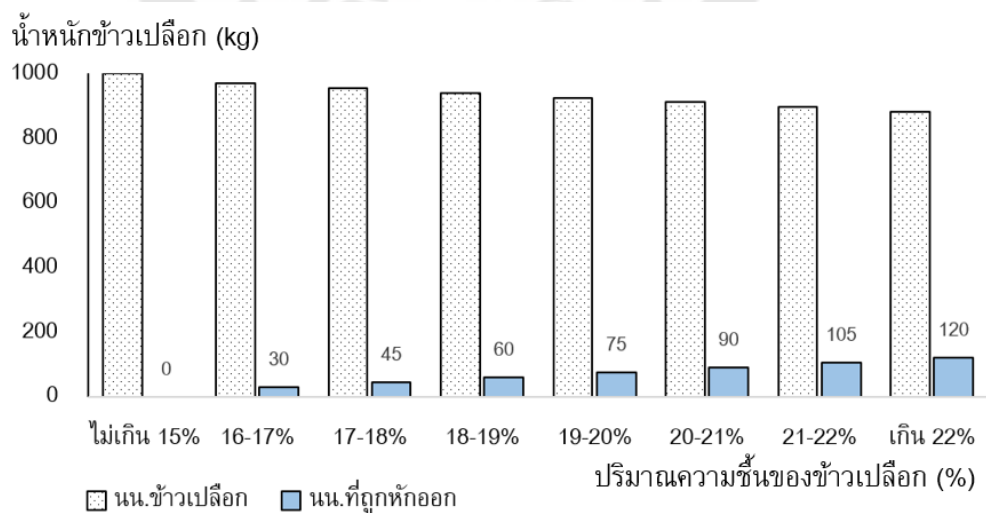
ภาพประกอบ 64 การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายหลังการดำเนินการอบแห้ง	98
ภาพประกอบ 65 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วกับอุณหภูมิและ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ออกจากเครื่องอบแห้ง	99
ภาพประกอบ 66 ความสัมพันธ์ของความเร็วของอากาศกับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของ อากาศที่ออกจากเครื่องอบแห้ง.....	99
ภาพประกอบ 67 พื้นผิวการปรับความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิและ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศออกจากเครื่องอบแห้ง	100
ภาพประกอบ 68 พื้นผิวการปรับความเร็วอากาศที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของ อากาศออกจากเครื่องอบแห้ง.....	100
ภาพประกอบ 69 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศที่ทางออกกับเวลาในการอบแห้ง	104
ภาพประกอบ 70 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่ทางออกกับเวลาในการ อบแห้ง กรณี ความเร็วการไหลของอากาศและอัตราการป้อนแบบอัตโนมัติ.....	104
ภาพประกอบ 71 แผนภูมิความสัมพันธ์ของความชื้นสุดท้ายต่อค่าร้อยละการกะเทาะเปลือก ..	107

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลังและความเป็นมาของปัญหา

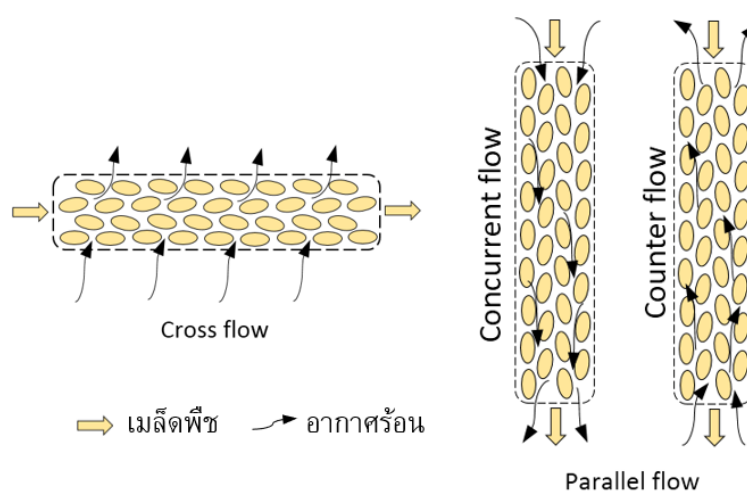
ข้าว ถือเป็นอาหารหลักของประชากรในภูมิภาคเอเชีย โดยทั่วไปการปลูกข้าว เมื่อครบกำหนดระยะเวลาการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือก (Drying) ข้าวเปลือกมักมีความชื้นค่อนข้างสูง (ความชื้นเริ่มต้น) ประมาณ 22 ถึง 26% (ความชื้นฐานเปียก) (คงเสรี งามชื่น, 2547) และ (วันชัย สุตะพันธ์, ทองสุภา พุ่มชุมพล, & อำไพศักดิ์ ธิบุญมา, 2013) ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ ฤดูกาล หรือภัยทางธรรมชาติจึงจำเป็นต้องดำเนินการภายหลังจากการเก็บเกี่ยวที่ถูกต้องเหมาะสมด้วยการลดความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก (paddy dehydration) เพื่อลดอัตราการหายใจ ลดการเจริญเติบโตของเชื้อราซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพของข้าวเปลือก การลดความชื้นในปริมาณ 13 ถึง 14% (ความชื้นฐานเปียก) เป็นความชื้นที่เหมาะสมที่สามารถเก็บรักษาไว้ในสภาพที่ไม่มีการควบคุมสภาพแวดล้อมหรืออุณหภูมิไว้ได้นาน 2-3 เดือน (Wimberly., 1983) หรือที่ปริมาณความชื้นไม่เกิน 15% เมื่อนำไปจำหน่ายให้กับโรงสีประจำท้องถิ่นจะไม่ถูกหักลดน้ำหนักออกจากจำนวนของน้ำหนักข้าวเปลือกสดทั้งหมด ดังภาพประกอบ 1 แผนภูมิการหักลดน้ำหนักตามปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก



ภาพประกอบ 1 การหักลดน้ำหนักตามปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก

ดังนั้นการดำเนินการลดความชื้นภายหลังการเก็บเกี่ยวทำให้สามารถขายข้าวเปลือกได้ในราคาที่ดีขึ้นหรือเป็นการเพิ่มมูลค่า (value-added) ให้กับผลผลิตทางการเกษตร ดังมีผู้วิจัย (Suwannarat, 2011) ได้รายงานถึงการลดความยากจนของเกษตรกรในประเทศไทยและเสนอแนวทางให้เกษตรกรพ้นจากความยากจน ซึ่งในกรณีที่ไม่มี การดำเนินการลดความชื้นเมื่อนำข้าวเปลือกจำหน่ายจะต้องถูกหักลดน้ำหนักของข้าวเปลือกตามสัดส่วนของปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นไปตามข้อกำหนดของกรมการค้าภายในสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Poramacom, 2014) ที่ได้ศึกษาราคาขายข้าวที่สัมพันธ์กับนโยบายการค้าข้าวทำให้เกษตรกรมีรายได้จากการจำหน่ายราคาข้าว

จากการนำข้าวเปลือกที่มีปริมาณความชื้นสูงไปจำหน่ายให้กับโรงสีจะได้ราคาจำหน่ายที่ถูกกว่าข้าวเปลือกที่มีปริมาณความชื้นต่ำซึ่งในขั้นตอนการลดความชื้นส่วนใหญ่จะทำการดำเนินการด้วยเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ โดยการใช้อากาศร้อนเคลื่อนที่ผ่านชั้นของเมล็ดพืชทำให้เกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลชื้นพร้อม ๆ กัน (สมชาติ โสภณธณฤทธิ, 2540) ความร้อนจากอากาศร้อนจะถ่ายเทไปยังเมล็ดพืช จากหลักการลดความชื้นนี้สามารถแบ่งชนิดของเครื่องอบแห้งได้เป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ และเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหลหรือเคลื่อนที่ (Brooker, Bakker-Arkema, & Hall, 1992) เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชเคลื่อนที่ยังสามารถแบ่งตามลักษณะการไหลของอากาศร้อนและการไหลของเมล็ดพืช คือ แบบอากาศร้อนไหลขนานกับเมล็ดพืช (parallel flow) และแบบอากาศร้อนไหลตั้งฉากกับเมล็ดพืช (cross flow) ดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 ลักษณะการไหลของอากาศร้อนและเมล็ดพืช

จากลักษณะการไหลของอากาศดังกล่าวมีผู้วิจัยศึกษาการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งอาทิ เช่น เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ, เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม, เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด และเครื่องอบแห้งแบบมัลติโฟล ต่อมาได้มีผู้วิจัยได้ทบทวนพัฒนาการของการลดความชื้นข้าวเปลือกในทางอุตสาหกรรม (พิรสิทธิ์ ทวยนาค, มณฑล ชูโชนาค, มุสตาฟา ยะภา, & ประชา บุญยวานิชกุล, 2014) ซึ่งแสดงถึงลักษณะการทำงานและข้อได้เปรียบของเครื่องอบแห้งแบบมัลติโฟลที่ใช้กลไกการสว้างแรงสั่นสะเทือนจากการหมุนเยื้องศูนย์กลางของชุดเขย่าห้องอบแห้งผลักดันให้เกิดการเคลื่อนตัวของวัสดุภายในห้องอบแห้งทำให้ใช้พลังงานในการดำเนินการอบแห้งน้อยกว่าร้อยละ 20 เมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดที่ใช้กลไกการไหลของอากาศผลักดันให้เกิดการเคลื่อนตัวของวัสดุภายในห้องอบแห้ง (Mustafa Yapha, Pracha Bunyawanichakul, & Nifahmee Hayinilah, 2014) ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาและพัฒนาเครื่องอบแห้งชนิดนี้ แต่ทว่าการดำเนินการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งจะใช้การกำหนดเงื่อนไขการอบแห้งในแต่ละกรณีตามความชื้นเริ่มต้น (initial moisture content, IMC) ของเมล็ดพืชที่ต้องการลดความชื้น จากนั้นทำการปรับตั้งเครื่องอบแห้งให้ได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด โดยยังคงรักษาคุณภาพของเมล็ดพืชไว้ได้ เช่นปรับตั้งอัตราการป้อนเมล็ดพืช อุณหภูมิการอบแห้ง ความเร็วของอากาศร้อนที่ดูดออก ตัวแปร (parameter) ทั้งหมดนี้ต้องมีการปรับตั้งหรือกำหนดขึ้นก่อนการเดินเครื่องอบแห้งในแต่ละรอบการทดลองซึ่งการปรับตั้งดังกล่าวต้องอาศัยผู้มีความรู้และประสบการณ์เกี่ยวกับเครื่องอบแห้งถึงจะสามารถดำเนินการได้ เนื่องจากการปรับตั้งเครื่องที่เหมาะสมส่งผลต่อค่าความชื้นสุดท้าย (final moisture content, FMC) และการสิ้นเปลืองพลังงานในการดำเนินการอบแห้ง (specific energy consumption, SEC)

ด้วยเหตุนี้ ผู้จัดทำปริญญานิพนธ์มีแนวคิดที่จะพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัลติโฟล ให้สามารถควบคุมอัตราการป้อนเมล็ดพืช การไหลของอากาศร้อน ด้วยการควบคุมแบบป้อนกลับพื้นฐาน (feedback control) เพื่อชดเชยและลดความซับซ้อนในการปรับตั้งเครื่องใหม่ในแต่ละรอบการทดลอง หรือกรณีปริมาณความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกไม่คงที่ (unconstraint moisture content, UMC) อีกทั้งเป็นการพัฒนาเครื่องอบแห้งให้มีความทันสมัยต่อการใช้งานในภาคเกษตรชุมชนทำให้ชุมชนมีความเข้มแข็ง และพึ่งพาตนเองได้

ความมุ่งหมายของงานวิจัย

ความมุ่งหมายของงานวิจัยในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้คือ พัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัลติโพลที่สามารถชดเชยระบบได้ในกรณีปริมาณความชื้นไม่คงที่ โดยดำเนินการ

1. จัดสร้างระบบการควบคุมการอบแห้งข้าวเปลือกของเครื่องอบแห้งแบบมัลติโพล
2. ทดสอบความสามารถในการควบคุมการอบแห้งข้าวเปลือกของระบบที่สร้างขึ้น

ประโยชน์ของการวิจัย

1. ได้ระบบควบคุมการอบแห้งข้าวเปลือกของเครื่องอบแห้งแบบมัลติโพล เพื่อลดความซับซ้อนในการควบคุมการทำงานของเครื่องอบแห้ง
2. ส่งเสริมให้มีการร่วมกลุ่มเกษตรกร สหกรณ์ หรือกลุ่มชุมชนผู้ปลูกข้าวให้ดำเนินการกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกก่อนการขายให้กับโรงสี เพื่อลดการหักราคาข้าวเปลือกตามปริมาณความชื้นตามข้อกำหนดของกรมการค้าภายใน
3. ส่งเสริมการเก็บรักษาข้าวเปลือกไว้เป็นเมล็ดพันธุ์ข้าว ในปีต่อไป (มูลค่าเมล็ดพันธุ์ข้าวจะสูงกว่าการขายข้าวเปลือกตามรอบปี) และช่วยแก้ปัญหาข้าวราคาตกต่ำ
4. เป็นระบบควบคุมขั้นพื้นฐานของเครื่องอบแห้งแบบอัตโนมัติ โดยสามารถที่จะเพิ่มเติมระบบการทำงานอื่น ๆ ภายหลังได้

ขอบเขตของการวิจัย

1. ใช้ข้าวเปลือก สายพันธุ์ กข31 (ปทุมธานี 80) ชนิดข้าวเจ้าในการทดสอบ
2. พิจารณาเฉพาะการควบคุมการป้อน (feed control: F_{feed}), การไหลของอากาศร้อน (air flow control: F_{air}) และศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศออกจากห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งเท่านั้น
3. การทดสอบจะกระทำภายในห้องที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์น้อย ในการทดสอบการตอบสนองของระบบควบคุมการอบแห้งที่สร้างขึ้น
4. ใช้การจำลองสภาวะค่าความชื้นเริ่มต้นที่ไม่คงที่ของข้าวเปลือก (unconstraint initial moisture content, UIMC) เฉลี่ยที่ 18-19%, 20-21% และ 22-23% (ความชื้นฐานเปียก) ในการทดสอบระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ
5. ประเมินค่าปริมาณความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก (final moisture content, FMC) ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

6. พิจารณาการเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง และตรวจสอบอัตราการกะเทาะของข้าวเปลือกภายหลังการดำเนินการอบแห้ง

7. ใช้ตัวควบคุมแบบ P เป็นพื้นฐาน แล้วทดสอบผลตอบสนองของการควบคุม โดยปรับอัตราขยาย P และเพิ่มการควบคุม I, D ตามความเหมาะสม

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. การลดความชื้น หมายถึงการใช้อากาศร้อนไหลผ่านชั้นของเมล็ดพืชทำให้เกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลชื้นพร้อม ๆ กัน

2. เครื่องอบแห้งแบบมัลติฟลู หมายถึงเครื่องจักรที่มีลักษณะการไหลของอากาศร้อนตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของเมล็ดวัสดุที่เคลื่อนที่ในแนวระดับ (cross-flow) ประกอบด้วยโครงสร้างฐานและโครงห่ออบแห้ง โดยโครงห่ออบแห้งจะรองรับด้วยสปริงแผ่นยืดและใช้การสร้างแรงสั่นสะเทือนด้วยการหมุนเยื้องศูนย์กลางส่งถ่ายกำลังด้วยชิ้นต่อโยงสู่โครงห่ออบแห้งเพื่อให้เมล็ดพืชหรือวัสดุอบแห้งเคลื่อนตัวบนแผ่นกระจายความร้อนผ่านพื้นที่อบแห้ง

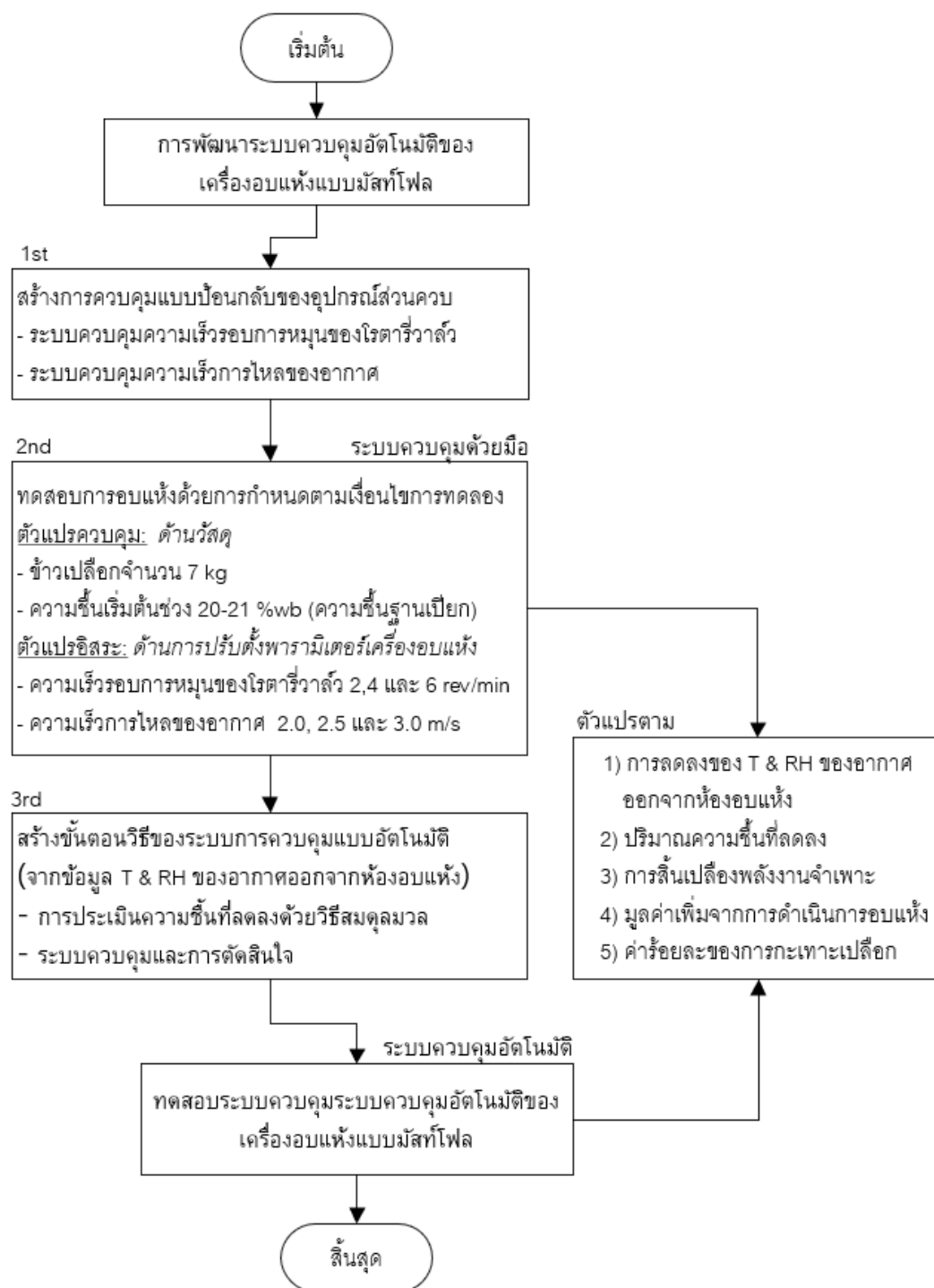
3. การควบคุมแบบอัตโนมัติ หมายถึงระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับค่าที่วัดได้ด้วยตัวรับรู้สถานะหรือเซ็นเซอร์จากนั้นส่งค่าที่วัดได้กลับมายังส่วนควบคุม เพื่อกำหนดและจ่ายสัญญาณควบคุมที่เหมาะสม

4. ตัวรับรู้สถานะหรือเซ็นเซอร์ หมายถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่ตรวจวัดสถานะต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความดันของอากาศและความเร็วรอบการหมุนของอุปกรณ์ โดยเปลี่ยนค่าจากการตรวจวัดเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อส่งสัญญาณสู่ระบบควบคุมนำไปใช้ในการทำงานต่าง ๆ ต่อไป

กรอบแนวคิดในงานวิจัย

จากความต้องการลดความชื้นของข้าวเปลือกสดภายหลังการเก็บเกี่ยวของชุมชนขนาดเล็กให้มีความชื้นในระดับที่เหมาะสมก่อนจำหน่ายให้กับโรงสีข้าวประจำท้องถิ่น หรือเก็บรักษาเพื่อเป็นเมล็ดพันธุ์ใช้ปลูกในฤดูกาลถัดไปและการจำหน่ายข้าวเปลือกสดจะถูกหักลดราคาขายลงตามระดับความชื้น ดังนั้นการลดความชื้นของข้าวเปลือกจึงมีความสำคัญยิ่งแต่ทว่าการดำเนินการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบมัลติฟลูนั้นจะต้องมีการปรับตั้งพารามิเตอร์ (การควบคุมด้วยมือ) ทำให้ต้องอาศัยความรู้และประสบการณ์ของผู้ควบคุม เพื่อให้สามารถลดความชื้นในระดับที่ต้องการ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะที่เหมาะสม ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงเกิดแนวคิดที่จะสร้าง

และพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องอบแห้งชนิดนี้ ตามภาพประกอบ 3 เพื่อลดความซับซ้อนในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ส่งผลต่อการความชื้นของข้าวเปลือก



ภาพประกอบ 3 การพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องอบแห้งแบบมัลท์โฟล

สมมติฐานในการวิจัย

งานวิจัยในปริญญานพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดสมมติฐานไว้ 2 สมมติฐานดังนี้

สมมติฐานวิจัยที่ 1 ผลลัพธ์การสร้างการควบคุมแบบปิด (แบบที่พัฒนาขึ้น) เปรียบเทียบกับการควบคุมแบบเปิด (แบบเดิม) ของความเร็วรอบการหมุนของชุดโรตารีวาล์วและ ความเร็วการไหลของอากาศ ที่สภาวะคงตัวไม่แตกต่างกัน

สมมติฐานวิจัยที่ 2 การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบควบคุม (แบบที่ พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับการอบแห้ง (แบบเดิม)) มีผลลัพธ์ที่น้อยกว่าหรือเทียบเท่า

ตัวแปรควบคุมในงานวิจัย ได้แก่

1. จำนวนข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดสอบต่อรอบการทดสอบ เป็น 7 kg
2. ปริมาณความชื้นเริ่มต้นช่วง 20-21 %wb (ความชื้นฐานเปียก)
3. ความเร็วรอบการหมุนของชุดสร้างการลั่นสะเทือน (eccentric set) เป็น 110

rev/min

4. อุณหภูมิห้องอากาศร้อน (hot-air chamber) เป็น 130 °C

ตัวแปรอิสระในสมมติฐานการวิจัย ได้แก่

1. ความเร็วรอบการหมุนของชุดโรตารีวาล์ว (rotary valve set) เป็น 2, 4 และ 6

rev/min

2. ความเร็วการไหลของอากาศออกจากเครื่องอบแห้ง เป็น 2, 2.5 และ 3 m/s

ตัวแปรตามในสมมติฐานการวิจัย ได้แก่

1. ค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว (steady-state error, e_{ss}) สำหรับระบบ

ควบคุมของตัวแปรอิสระ

2. อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศออกจากเครื่องอบแห้งปริมาณ

ความชื้นสุดท้าย

3. การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการดำเนินการอบแห้ง

บทที่ 2

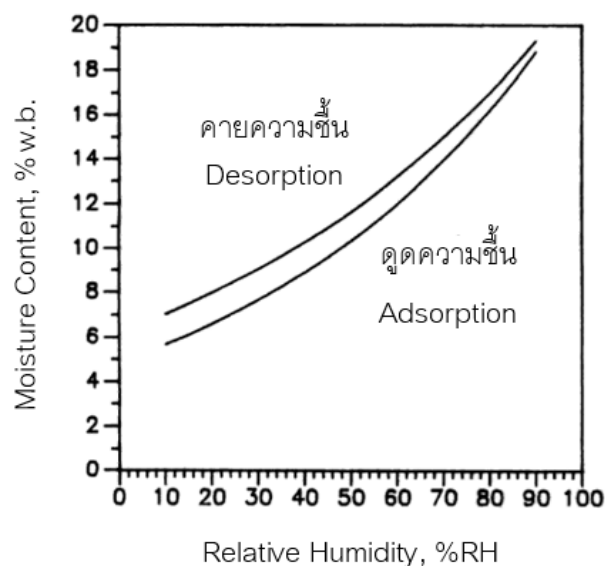
หลักการทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการลดความชื้นหรือการอบแห้งเมล็ดพืช เครื่องอบแห้งแบบอากาศร้อนไหลตั้งฉาก หรือเครื่องอบแห้งแบบมัลติโฟล พื้นฐานการควบคุม อุปกรณ์ส่วนควบด้วยไฟฟ้า เช่น การบ้อนเมล็ดพืช การเคลื่อนตัวของเมล็ดพืช และการไหลของ อากาศร้อน รวมถึงการควบคุมการควบคุมแบบป้อนกลับ และผลงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

หลักการพื้นฐานของการอบแห้ง

ความสำคัญของการอบแห้ง

การอบแห้งคือกระบวนการลดปริมาณน้ำหรือความชื้นภายในของเมล็ดพืชเป็นการ ทำให้น้ำภายในเมล็ดพืชเคลื่อนตัวออกสู่บรรยากาศภายนอกด้วยการระเหยเป็นไอ ซึ่งเมล็ดพืชจะ ประกอบด้วยโมเลกุลจำพวกแป้งและโปรตีนนี้สามารถดูดความชื้นและคายความชื้นได้ดี เมล็ด สามารถดูดความชื้นได้มากกว่าคายความชื้น ดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 เส้นความชื้นสมดุลของเมล็ดข้าวโพด ที่อุณหภูมิ 22 °C

ที่มา: (Brooker et al., 1992) p. 80.

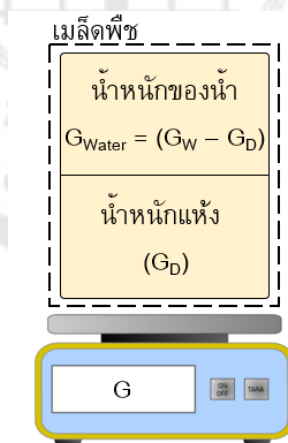
กระบวนการลดความชื้นซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังเมล็ดพืชที่มีความชื้น เพื่อไล่ความชื้นออก โดยการระเหยนํ้าออกจากเมล็ดพืชจากการรับความร้อนในรูปความร้อนแฝงของการระเหย ซึ่งประโยชน์ของการอบแห้งเมล็ดพืช เช่นข้าวเปลือก มีดังต่อไปนี้

1. เพื่อการถนอมเก็บรักษา คือเมล็ดพืชและอาหารที่แห้งสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานโดยไม่เสียหายหรือเสื่อมคุณภาพ เนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีน้อย
2. เพื่อลดปริมาณ และน้ำหนัก คือเมล็ดพืชและอาหารที่แห้งแล้วจะมีปริมาตรและน้ำหนักลดลงทำให้สามารถลดต้นทุนในการเก็บรักษาและการขนส่ง
3. เพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตดีขึ้น กรณีข้าวเปลือกมีการอบแห้งก่อนเข้ากระบวนการสีข้าวเพื่อแปรรูป

อีกทั้งการอบแห้งยังสามารถช่วยให้เปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดสูง ทำให้สามารถนำไปเพาะปลูกได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมล็ดพืชที่อบแห้งแล้วมีคุณภาพสูงสามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน ทำให้เกษตรกรสามารถรอเวลาในการจำหน่ายในช่วงที่ผลผลิตมีราคาดี

ความชื้นในเมล็ดพืช

ความชื้นในเมล็ดพืช (The moisture content of grains) คือปริมาณของน้ำที่มีอยู่เทียบกับมวลของเมล็ดพืชนั้น ดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 ส่วนประกอบของน้ำหนักในเมล็ดพืช

เช่นเมื่อนำเมล็ดพืชที่มีความชื้นหรือเมล็ดพืชเปียกนำมาชั่งน้ำหนัก สามารถแบ่งได้ 2 ส่วน คือส่วนแรกเป็นน้ำหนักของเมล็ดพืชแห้ง (G_D) และส่วนที่สองเป็นน้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ในเมล็ดพืช (G_{Water}) การหาเปอร์เซ็นต์ของปริมาณความชื้นทำได้ด้วยการย่อยเมล็ดพืชให้มีขนาดเล็ก

และทำการลดปริมาณความชื้นด้วยความร้อนจนกระทั่งเมล็ดพืชแห้ง ปริมาณน้ำหนักที่หายไป คือ ปริมาณความชื้นภายในเมล็ด โดยได้แบ่งการหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดพืชเป็น 2 รูปแบบ คือ

ความชื้นฐานเปียก (wet-basis moisture content, MC_w)

ความชื้นแบบนี้นิยมใช้กันในการการค้า เช่น โรงสีข้าวใช้ความชื้นแบบนี้เป็นเกณฑ์ ในการกำหนดราคาซื้อขายตามข้อกำหนดของกรมการค้าภายใน โดยสามารถหาความชื้นฐานเปียก ได้จากสมการ 2.1 ที่อ้างอิงในรูปของร้อยละเช่นเดียวกับ (ASAE, 2005)

$$MC_w = \left(\frac{G_w - G_D}{G_w} \right) \times 100 \quad (2.1)$$

ความชื้นฐานแห้ง (dry-basis moisture content, MC_D)

ความชื้นแบบนี้นิยมใช้กันในการวิเคราะห์ คำนวณ กระบวนการอบแห้ง เนื่องจากมวลของวัสดุแห้งมีค่าคงตัวหรือเกือบจะคงตัวระหว่างการอบแห้งเนื่องจากผลผลิตทางการเกษตรอาจเรียกได้ว่าเป็นสิ่งมีชีวิตจากการหายใจของเมล็ดพืชเองทำให้เกิดการเผาผลาญ สารอาหารทำให้มวลแห้งลดลงแต่ส่วนใหญ่แล้วมวลแห้งจะลดลงน้อยมาก โดยสามารถหาความชื้นฐานแห้งได้จากสมการ 2.2 ที่อ้างอิงในรูปของร้อยละ (ASAE, 2005)

$$MC_D = \left(\frac{G_w - G_D}{G_D} \right) \times 100 \quad (2.2)$$

- เมื่อ MC_w คือ ความชื้นฐานเปียก, ร้อยละ หรือ %w.b.
 MC_D คือ ความชื้นฐานแห้ง, ร้อยละ หรือ %d.b.
 G_w คือ มวลของเมล็ดพืชทั้งหมด, kg
 G_D คือ มวลของเมล็ดพืชแห้ง, kg

การหาน้ำหนักของเมล็ดพืชที่ลดลง

การลดความชื้นของเมล็ดพืช เช่นข้าวเปลือกด้วยการอบแห้งเพื่อให้ข้าวเปลือกมีความชื้นประมาณ 15 %w.b. เหมาะสมต่อการขายตามข้อกำหนดของกรมการค้าภายใน หรือความชื้นประมาณ 14 %w.b. ก็จะปลอดภัยแก่การเก็บรักษาและถ้ามีการลดความชื้นต่ำกว่านี้จะทำให้น้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ในข้าวเปลือกถูกระเหยไปทำให้น้ำหนักของข้าวเปลือกลดลง ซึ่งสามารถคำนวณหาน้ำหนักที่ลดลงจากดังสมการ 2.3 เช่นเดียวกับ (Drying, 2013)

$$m_2 = \frac{(100 - \text{IMC})}{(100 - \text{FMC})} \times m_1 \quad (2.3)$$

เมื่อ	m_1	คือ	มวลข้าวเปลือกก่อนลดความชื้น, kg
	m_2	คือ	มวลข้าวเปลือกหลังลดความชื้น, kg
	IMC	คือ	ความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น, %
	FMC	คือ	ความชื้นภายหลังลดความชื้น, %

การวัดความชื้นเมล็ดพืช

การวัดความชื้นในเมล็ดพืชสามารถแบ่งวิธีการหาได้ 2 วิธี คือ ทางตรง และทางอ้อม โดยการเก็บตัวอย่างเพื่อใช้เป็นตัวแทนของความชื้นทั้งกองของเมล็ดพืช ควรเก็บตัวอย่างไว้ในภาชนะที่สามารถป้องกันมิให้เกิดการถ่ายเทความชื้นระหว่างตัวอย่างกับอากาศก่อนที่จะทำการวัดความชื้น และดำเนินการตามเอกสารแนวทางการวัดความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกดัง (Sinhaneti, Keawprasert, Puuntharo, & Triarun, 2017)

การวัดความชื้นทางตรง (direct method)

การวัดความชื้นทางตรงให้ความแม่นยำสูง สามารถใช้อ้างอิงได้แต่ต้องเสียเวลาในการปฏิบัติงานมีขั้นตอนมาก ซึ่งการวัดวิธีนี้ส่วนใหญ่ใช้ในห้องปฏิบัติการ เช่น การใช้ตู้อบไฟฟ้า (Hot air oven) เป็นการไล่ความชื้นหรือน้ำออกจากเมล็ดพืชตัวอย่างที่ทราบมวลแน่นอนก่อนนำเข้าตู้อบไฟฟ้า ดังภาพประกอบ 6 จากนั้นจึงชั่งมวลเมล็ดพืชอีกครั้งภายหลังจากการไล่ความชื้นออกไปจนหมด เพื่อนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นในเมล็ดพืชได้ สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของเมล็ดพืชและมาตรฐานที่ใช้วัดด้วย



ภาพประกอบ 6 ตู้อบไฟฟ้าสำหรับห้องปฏิบัติการ

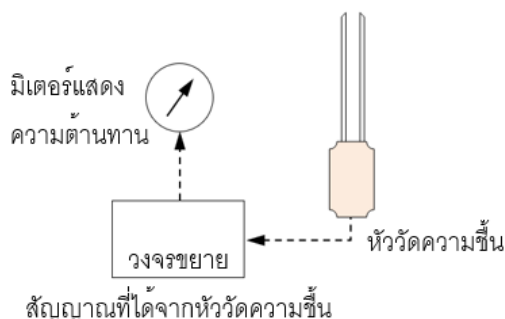
ที่มา: <https://www.indiamart.com/proddetail/laboratory-drying-oven-18637935888.html>

การวัดความชื้นทางอ้อม (indirect method)

การวัดความชื้นทางอ้อมสามารถตรวจวัดค่าความชื้นในเมล็ดวัสดุได้รวดเร็วกว่า โดยอาศัยการวัดสมบัติบางอย่างที่ขึ้นกับความชื้น แบ่งออกเป็น 2 วิธี

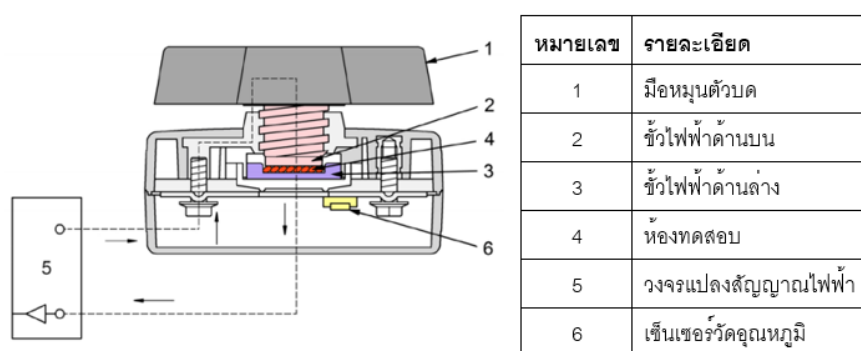
1. วิธีการวัดความต้านทานกระแสไฟฟ้า (electrical resistance method)

เนื่องจากการนำไฟฟ้าหรือความต้านทานของเมล็ดพืชขึ้นอยู่กับความชื้น ภายใน ดังนั้นเมื่อทราบความต้านทานไฟฟ้าของเมล็ดพืชก็สามารถเปรียบเทียบเป็นค่าความชื้นได้ ซึ่งการวัดความต้านทานไฟฟ้าของเมล็ดพืชสามารถแบ่งได้ 2 แบบคือ แบบเมล็ดพืชไม่ถูกบด และ แบบเมล็ดพืชถูกบด โดยแบบเมล็ดพืชไม่ถูกบดใช้แท่งหัววัดความชื้น ดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 เครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบแท่งตะเกียบ

หัววัดความชื้นมีลักษณะเป็นแท่ง 2 แท่ง (แบบตะเกียบ) ที่มีความห่างคงที่ การวัดทำได้ด้วยการเทียบแท่งวัดความชื้นลงในวัสดุเพื่อประมาณค่าความชื้น การใช้แท่งวัดแบบนี้จะสามารถวัดความชื้นในช่วงจำกัด และเป็นการตรวจสอบความชื้นแบบหยาบ ๆ เท่านั้น และแบบเมล็ดพีชถูกบดด้วยเกรียวที่ภายในมีแผ่นโลหะทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าเช่นเดียวกับหัววัดแบบแท่งวัดความชื้นจากนั้นส่งค่าความต้านทานไฟฟ้าเข้าวงจรขยายสัญญาณเพื่อแปรผลเป็นระดับความชื้นต่อไป ดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 เครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบบด

ที่มา: (Forum, 2017)

2. วิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าของเมล็ดพีช (dielectric methods)

ค่าความจุไฟฟ้าจากคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของเมล็ดพีชที่อยู่ระหว่างแผ่นคู่ขนานของตัวเก็บประจุ โดยเมล็ดพีชที่มีความชื้นหรือเปียกจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง และส่วนเมล็ดพีชที่มีความชื้นน้อยหรือแห้งก็จะมีค่าไดอิเล็กตริกต่ำ ทั้งนี้ค่าความชื้นในเมล็ดพีชที่ได้จากการวัดค่าความจุไฟฟ้าจะมีปัญหาเรื่องความผิดพลาดน้อยกว่าค่าที่ได้จากการวัด โดยใช้ค่าความต้านทาน เนื่องจากการกระจายตัวของความชื้นในเมล็ดภายในและภายนอกเมล็ดไม่ส่งผลต่อการวัดด้วยวิธีนี้ อีกทั้งยังมีช่วงการวัดที่กว้างกว่าแต่ใช้จำนวนตัวอย่างในการทดสอบในแต่ละครั้งมากกว่าแบบการใช้ความต้านทานไฟฟ้า (วิบูลย์ เทพนนท์, 2557) อีกทั้งมีผู้วิจัยสร้างและทดสอบเครื่องมือวัดความชื้นที่ใช้หลักของค่าความจุไฟฟ้าของข้าวเปลือกการศึกษพบว่าเครื่องมือวัดที่สร้างมีความไม่แน่นอนเป็น 1.23% ในช่วงความชื้นของข้าวเปลือก 14-20 % (Klombok, Kuntinugunetanon, & Wongkokua, 2017)

สมบัติของอากาศชื้น (properties of moist air)

อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้งเมล็ดพืชด้วยการผ่านอากาศไปที่วัสดุที่ต้องการทำให้แห้ง อากาศนี้เรียกว่าอากาศชื้นซึ่งประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำ โดยอากาศแห้งประกอบด้วยก๊าซ ไนโตรเจน (N_2) ออกซิเจน (O_2) เป็นส่วนใหญ่ ส่วนไอน้ำที่ปะปนในอากาศมีผลต่อกระบวนการอบแห้ง ดังนั้นจึงต้องทำความเข้าใจคำจำกัดความที่แสดงถึงสมบัติอากาศชื้น เช่น ความดันบรรยากาศ ความดันไอ อุณหภูมิ อัตราส่วนความชื้น ปริมาตรจำเพาะ และเอนทัลปี มีรายละเอียดดังนี้

1. ความดันบรรยากาศ (standard atmosphere, P_{atm}) คือ ที่ระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลระดับต่าง ๆ จะมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งความดันบรรยากาศที่ความสูงระดับน้ำทะเล อุณหภูมิ 14 องศาเซลเซียส จะมีค่าความดันบรรยากาศ 101.325 kPa

2. ความดันไอ (vapor pressure, P_v) คือ ความดันที่สามารถจะทำให้สารเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ ซึ่งความดันไอจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิด้วย กล่าวคือที่อุณหภูมิสูงความความดันไอของสารจะมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ และถ้าอากาศอิ่มตัวด้วยไอน้ำจะเรียกว่าความดันไ่อิ่มตัว (saturated vapor pressure, P_{vs})

3. อุณหภูมิ (temperature, T) คือ ค่าตัวเลขที่ใช้ระบุระดับพลังงานจลน์ภายในอะตอมของชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์จุด ๆ นั้นว่ามีค่ามากน้อยแค่ไหน ซึ่งระบุในระบบของศาสัมบูรณ์ (absolute temperature, T_{abs}) แต่สำหรับสภาวะอากาศชื้นต้องทำความเข้าใจเรื่องอุณหภูมิ กระเปาะแห้ง อุณหภูมิกระเปาะเปียก และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (dry-bulb temperature, T_{db}) คือมวลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศแห้งหนึ่งหน่วยมวลซึ่งสามารถอ่านค่าอุณหภูมิได้จากเทอร์โมมิเตอร์โดยตรง อุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet-bulb temperature, T_{wb}) คือความสามารถในการระเหยน้ำของสภาวะอากาศนั้น ๆ การวัดใช้เทอร์โมมิเตอร์ที่คลุมหรือหุ้มด้วยผ้าที่เปียกน้ำและมีลมเป่าผ่านด้วยความเร็วอย่างน้อย 4.6 m/s เมื่อสภาวะอากาศมีความแห้งจะทำให้การระเหยได้ง่ายทำให้ผลต่างของอุณหภูมิกระเปาะแห้งกับกระเปาะเปียกมีค่าแตกต่างกันมาก และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew-point temperature, T_{dp}) คืออุณหภูมิที่อากาศชื้นถูกทำให้เย็นลงเมื่อถึงจุดหนึ่งจะทำให้ไอน้ำเกิดการอิ่มตัวและกลั่นตัวควบแน่นเป็นหยดน้ำ (condensate) ที่ความดันคงที่

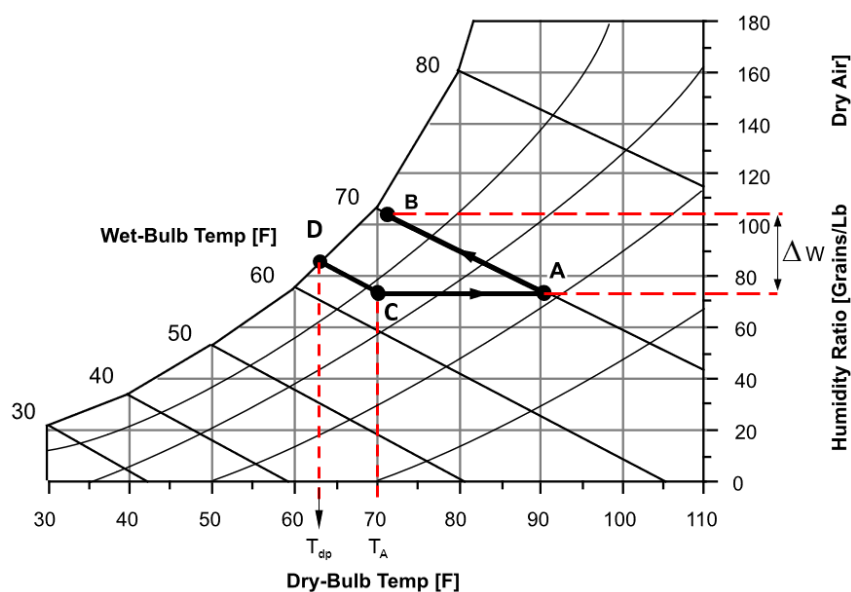
4. อัตราส่วนความชื้น (humidity ratio, W) หรือความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity) คือ มวลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศต่อมวลของอากาศแห้งหนึ่งหน่วยมวล

5. ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity, ϕ หรือ RH) คืออัตราส่วนของเศษส่วนเชิงมวล (mole fraction) หรือความดันไอของไอน้ำในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศเดียวกัน ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

6. เอนทัลปีของอากาศชื้น (enthalpy, h) คือค่าที่แสดงปริมาณพลังงานความร้อนที่สะสมอยู่ในอากาศชื้น (เทียบกับอุณหภูมิอ้างอิงที่กำหนดขึ้น) ต่อหนึ่งหน่วยมวลของอากาศแห้ง การคำนวณทั่วไปจะเกี่ยวข้องกับความแตกต่างของเอนทัลปี ดังนั้นอุณหภูมิอ้างอิงจะเป็นอุณหภูมิใด ๆ ก็ได้ เช่นการอ้างอิงน้ำเป็น 32°F ในระบบอังกฤษ (British Systems, BS) และอุณหภูมิอ้างอิงของน้ำและอากาศเป็น 0°C ในระบบเมตริกและระบบสากล (The International System of Units, SI)

7. ปริมาตรจำเพาะ (specific volume, v) คือปริมาตรของอากาศชื้นต่อ 1 หน่วยน้ำหนักของอากาศแห้ง

ในการดำเนินการอบแห้งอุณหภูมิกะเปาะแห้ง (T_A) ของอากาศจะลดลงในขณะที่อุณหภูมิกะเปาะเปียกจะมีค่าคงที่ ดังแสดงได้ด้วยเส้น CD เมื่อคุณสมบัติของอากาศตามที่ C ที่ เป็นอากาศชื้นเมื่อถูกทำให้ร้อนขึ้นโดยไม่มีการเพิ่มหรือลดปริมาณไอน้ำ อัตราส่วนความชื้นจะคงที่ แสดงได้ด้วยเส้นตรง CA ถ้าอากาศร้อนนี้ไหลผ่านห้องอบแห้งที่มีเมล็ดพืชที่มีความชื้นอยู่ อุณหภูมิกะเปาะแห้งจะลดลงและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องอบแห้งจะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากอากาศร้อนถ่ายเทความร้อนให้กับเมล็ดวัสดุและรับเอาความชื้นจากเมล็ดวัสดุเข้ามา การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของอากาศนี้แสดงได้ด้วยเส้นตรง AB จากตัวแปรของคุณสมบัติของอากาศแห้งมีความสัมพันธ์ ซึ่งสามารถแสดงเป็นแผนภูมิเรียกว่าแผนภูมิอากาศชื้น (psychrometric chart) ในการดำเนินการอบแห้งสมบัติของอากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงดัง ภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของอากาศในการดำเนินการอบแห้ง

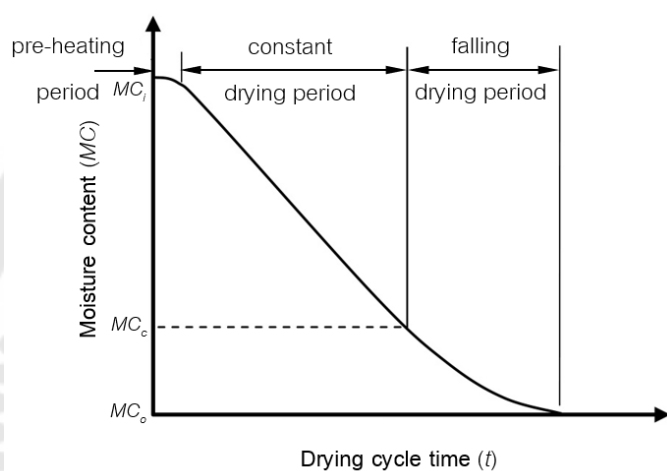
การอบแห้ง (Drying)

การอบแห้งเป็นการผลักดันน้ำที่อยู่ภายในเมล็ดพืชออก โดยทำให้เปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำด้วยการให้ความร้อน สำหรับการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรมักอาศัยการพาความร้อน (convective drying) ด้วยการบังคับให้อากาศร้อนไหลผ่านเมล็ดพืชที่มีความชื้นความร้อนจากอากาศจะถ่ายเทไปยังเมล็ดพืชทำให้เมล็ดพืชนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้น้ำที่อยู่ภายในวัสดุเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำซึ่งความดันไอน้ำนี้จะระเหยสู่ผิวของเมล็ดพืช การถ่ายเทมวลของน้ำจากเมล็ดพืชไปยังอากาศร้อนจะหยุดเมื่อความดันไอน้ำที่ผิวของเมล็ดพืชเท่ากับความดันไอน้ำในอากาศร้อน ดังสมการที่ 2.4

$$P_{v,sur} = P_v \quad (2.4)$$

เมื่อ	$P_{v,sur}$	คือ	ความดันของไอน้ำที่ผิวเมล็ดพืช, Pa
	P_v	คือ	ความดันไอน้ำในอากาศร้อน, Pa

การเคลื่อนตัวของน้ำในรูปไอน้ำจากภายในเมล็ดพืชที่มีความชื้นออกมาที่ผิวเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนที่ขึ้นกับโครงสร้างภายในของเมล็ดพืชชนิดนั้น ๆ กระบวนการเหล่านี้ได้แก่ การแพร่ (diffusion) การไหลภายในท่อเล็ก ๆ ในโครงสร้างของเมล็ดพืช (capillary flow) การไหลจากความดันออสโมติก (osmotic pressure) และการไหลเนื่องจากแรงโน้มถ่วง เป็นต้น ซึ่งในการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรการลดลงของความชื้นจะแสดงในรูปอัตราการแห้ง (drying rate) ดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 อัตราการแห้งของผลิตผลการเกษตร

โดยทั่วไปอัตราการแห้งของผลิตผลการเกษตรสามารถแบ่งได้ 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงอัตราการแห้งคงที่ (constant rate) ซึ่งเป็นช่วงแรกของการอบแห้งและช่วงอัตราการแห้งลดลง (falling rate) ต่อจากช่วงแรก โดยช่วงอัตราการแห้งคงที่การระเหยของน้ำจะเกิดที่ผิวของเมล็ดพืชลักษณะการระเหยจะคล้ายกับการระเหยน้ำจากภาชนะ สามารถเขียนการแห้งในช่วงเวลานี้เป็นสมการได้ดังสมการ 2.5

$$\frac{dM}{dt} = \frac{h_c A}{L} (T_a - T_{sur}) \quad (2.5)$$

เมื่อ	dM/dt	คือ อัตราการแห้ง, kg/s
	h_c	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฟิล์มอากาศ (thermal conductance of air film), $W/m^2 \cdot K$
	A	คือ พื้นที่ผิวของเมล็ดพืช, m^2
	L	คือ ความร้อนแฝงของน้ำในเมล็ดพืช, J/kg
	T_a	คือ อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง, K
	T_{sur}	คือ อุณหภูมิที่ผิวของเมล็ดพืช, K

สำหรับช่วงอัตราการแห้งลดลง สามารถเขียนอัตราการแห้ง ดังสมการ 2.6

$$\frac{dM}{dt} = -k(MC - MC_e) \quad (2.6)$$

เมื่อ	k	คือ ค่าคงที่การอบแห้ง (drying constant), s^{-1}
	MC	คือ ความชื้นของเมล็ดพืช, %db
	MC_e	คือ ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content), %db

การหาค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเป็นดัชนีที่ระบุการใช้พลังงานในการดำเนินการอบแห้งต่อหน่วยการผลิตของกระบวนการ ซึ่งในบริภูณานิพนธ์เล่มนี้หน่วยการผลิตของกระบวนการคือน้ำที่ระเหยออกจากเมล็ดพืชนั่นเอง ดัชนีดังกล่าวมีประโยชน์ในการเปรียบเทียบและเป็นข้อมูลการใช้พลังงานเฉลี่ยกระบวนการอบแห้ง ดังสมการที่ 2.7

$$SEC = \frac{E_{thermal} + E_{electrical}}{m_{water_removed}} \quad (2.7)$$

เมื่อ	SEC	คือ ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, $MJ/kg_{water\ removed}$
	$E_{thermal}, E_{electrical}$	คือ ปริมาณพลังงานความร้อน และพลังงานไฟฟ้า, MJ
	$m_{water\ removed}$	คือ มวลของน้ำที่ระเหยออก, $kg_{water\ removed}$

ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการอบแห้ง

ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการอบแห้งหรือการลดความชื้นของเมล็ดพืช มีดังนี้

1. อุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าสูงอัตราการแห้ง (drying rate) จะมีค่าสูงกว่ากรณีของอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ
2. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศโดยรอบ เนื่องจากอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะสามารถรับความชื้นที่ถ่ายเทจากเมล็ดพืชได้มากกว่า อากาศที่มีความชื้นสูง
3. ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านเมล็ดพืช โดยความเร็วอากาศมีค่าสูงความชื้นจากเมล็ดพืชจะถูกถ่ายเทออกมาสู่อากาศได้ดีกว่าการให้อากาศนิ่งอยู่กับที่หรือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ ทั้งนี้ผลของการปรับลดความเร็วอากาศจะส่งผลกระทบต่ออัตราการแห้งของเมล็ดพืชค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับผลจากอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ตามลำดับข้างต้น

ประเภทของการอบแห้ง

การอบแห้งแบบพาความร้อน โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

1. การอบแห้งชั้นบาง (thin layer drying) คือ วัสดุชั้นจะเรียงชั้นบาง ๆ หรือเพียงหนึ่งชั้นของเมล็ดพืชแบบชั้นบาง การลดของความชื้นสามารถเขียนดังสมการ 2.8 (Bruce, 1985)

$$\frac{MC(t) - MC_e}{IMC - MC_e} = \exp(-kt) \quad (2.8)$$

เมื่อ $MC(t)$ คือ ความชื้นขณะเวลา t , %db

IMC คือ ความชื้นเริ่มต้น (initial moisture content), %db

2. การอบแห้งชั้นหนา (deep bed drying) คือ การวางวัสดุมีความสูงหรือมีความหนา เช่น การอบแห้งข้าวเปลือกแบบเบตนิ่ง (fix deep bed drying) ที่ใช้อากาศร้อนเป่าเข้าหอบอบแห้ง (drying column) ในการคำนวณการลดลงของความชื้นจะพิจารณาว่าการอบแห้งชั้นหนาประกอบด้วย การอบแห้งชั้นบาง และทำการหาสมการสมดุลของเอนทาลปีของอากาศ สมดุลเอนทาลปีของเมล็ดพืช และสมดุลความชื้น ตามระยะความสูงของชั้นข้าวเปลือก จากนั้นจึงใช้สมการการอบแห้งแบบชั้นบางพิจารณา (Srivastava & John, 2002)

การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัสทโฟล

เครื่องอบแห้งสามารถลดความชื้นให้กับเมล็ดข้าวเปลือกสดจากการเก็บเกี่ยวตามฤดูกาล ซึ่งในแต่ละรอบการดำเนินการอบแห้งนั้นมีความแปรปรวนในการดำเนินการอบแห้งที่ไม่คงที่ตลอด เช่น ความชื้นเริ่มต้น (IMC) ของเมล็ดข้าวเปลือก สภาพอากาศในแต่ละช่วงเวลา และการปรับตั้งเครื่องอบแห้งที่เหมาะสม ทั้งหมดนี้ทำให้การดำเนินการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้องอาศัยผู้ที่มีความรู้ ทักษะ และประสบการณ์ หรือต้องทำการศึกษาทดลองสภาวะที่เหมาะสมในแต่ละกรณี เพื่อผลการอบแห้งสุดท้ายที่ต้องการ คือความชื้นสุดท้าย (FMC) การสิ้นเปลืองพลังงานและคุณภาพการอบแห้งที่เหมาะสม โดยผู้วิจัยนำเสนอปัญหาการดำเนินการอบแห้งตลอดจนเสนอแนวทางในการพัฒนา เพื่อให้เครื่องอบแห้งสามารถควบคุมการดำเนินการอบแห้งได้ในรูปแบบอัตโนมัติ สามารถขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ 1. การดำเนินการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง (แบบควบคุมด้วยมือ) 2. ปัญหาที่พบจากการดำเนินการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง และ 3. การปรับปรุงการควบคุมชุดอุปกรณ์และส่วนควบของเครื่องอบแห้ง (แบบควบคุมด้วยไฟฟ้า)

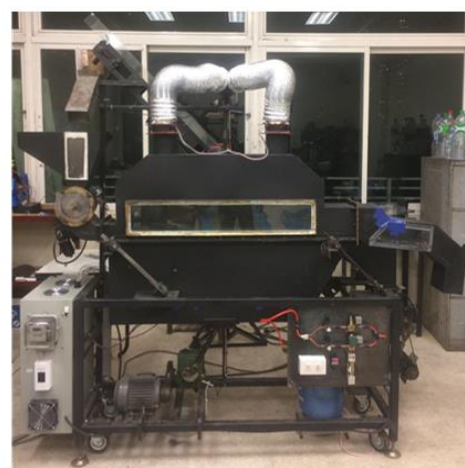
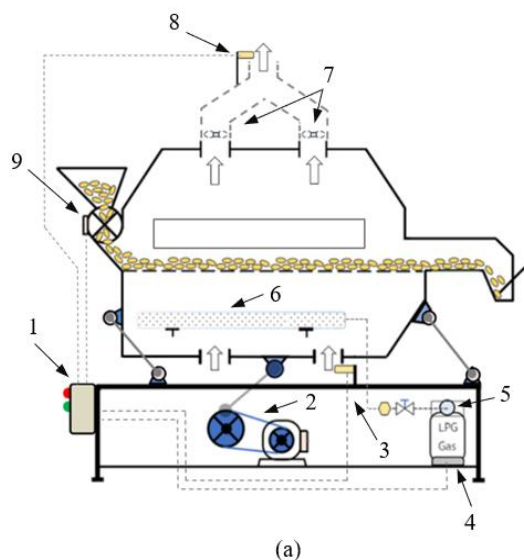
การดำเนินการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง (แบบควบคุมด้วยมือ)

การศึกษาการทำงานของเครื่องอบแห้งที่ประกอบด้วยอุปกรณ์และส่วนควบ สามารถแบ่งขั้นตอนได้ 2 ขั้นตอน ดังนี้

1. การดำเนินการก่อนการอบแห้ง (pre-drying operation) โดยเริ่มจากการบรรจุเมล็ดพืชที่ต้องการอบแห้งลงในอุปกรณ์ หมายเลข 6 (feed inlet) จากนั้นเมล็ดพืชจะถูกป้อนเข้าอุปกรณ์ป้อนเมล็ดพืช หมายเลข 7 (rotary valve feeder) เมล็ดพืชจะเคลื่อนตัวอยู่บนแผ่นกระจายอากาศ หมายเลข 3. (air distributor plate) ในแนวระดับ ซึ่งการเคลื่อนตัวของเมล็ดพืชเกิดจากการเขย่าตัวของชุดอุปกรณ์หมุนเยื้องศูนย์กลาง หมายเลข 8 (eccentric set) และส่งกำลังผ่านก้านต่อโยงไปยังโครงห้องอบแห้งที่มีการรองรับน้ำหนักด้วยสปริงแบบแผ่น หมายเลข 11 (leaf spring) ผู้ควบคุมเครื่องอบแห้งจะต้องปรับตั้งพารามิเตอร์ หมายเลข 7, 8 และ เปิดพัดลมดูดอากาศ หมายเลข 10 (air outlet) อากาศจะไหลจากช่องทางเข้า หมายเลข 9 (air inlet) ผ่านห้องสร้างอากาศร้อน หมายเลข 2 (hot air chamber) ผ่านแผ่นกระจายความร้อน ผ่านชั้นเมล็ดพืชเข้าสู่ห้องอบแห้ง หมายเลข 4 (drying chamber) และถูกพัดลมดูดอากาศออกสู่ภายนอกสิ้นสุดในขณะเดียวกันเปิดชุดควบคุมมวลการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG: liquefied petroleum gas) หมายเลข 13 (mass flow rate) ก๊าซไหลผ่านระบบท่อนำก๊าซเข้าสู่เตาอินฟราเรด หมายเลข 1 (infrared catalytic gas burner) ที่ติดตั้งอยู่ภายในห้องสร้างอากาศร้อน จากนั้นระบบจุดก๊าซจะเริ่มทำงานอากาศที่ไหลผ่านห้องสร้างอากาศร้อนจะเกิดการสันดาปขึ้นและสร้างอากาศร้อนให้กับห้องอบแห้งและรักษาระดับความร้อนให้คงที่ตามเงื่อนไขการศึกษาทดลอง ดังภาพประกอบ 11 (a)

แสดงอุปกรณ์ส่วนควบหลัก ดังนี้ 1) แผงควบคุมหลัก (Control panel), 2) ชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนเยื้องศูนย์กลางและก้านตอโยงเพื่อเขย่าหรือสร้างการสั่นสะเทือนให้กับห้องอบแห้ง (Motor driver eccentric set), 3) ตัวรับรู้อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม (Temperature & humidity sensor at air inlet: DHT22), 4) เครื่องชั่งน้ำหนักก๊าซ (Digital scales), 5) ถังก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Cooking gas cylinder), 6) เตาเผาแบบอินฟราเรด (Infrared gas burner), 7) พัดลมดูดอากาศออกจากห้องอบแห้ง (Axial fan), 8) ตัวรับรู้อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศออกจากห้องอบแห้ง (Temperature & humidity sensor at air outlet: EE31), 9) โรตารีวาล์วสำหรับป้อนเมล็ดพืชเข้าห้องอบแห้ง (Rotary valve feeder), 10) ห้องอากาศร้อน (Hot air chamber) และภาพประกอบ 11 (b) แสดงภาพถ่ายจริงของเครื่องอบแห้งแบบมัสทิโฟล (Real image of a Must flow paddy dryer)

2. การดำเนินการอบแห้ง (drying operation) เมื่อปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ หมายเลข 7, 8, 11 และกำหนดระดับอุณหภูมิของอากาศร้อน หมายเลข 13 ของอุปกรณ์ส่วนควบในการดำเนินการอบแห้ง ในระหว่างนี้ผู้ควบคุมเครื่องต้องติดตามและสังเกตการทำงานหรือการดำเนินการอบแห้งและปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ชุดเซตให้กับระบบแบบควบคุมด้วยมือ (manual system)



(b)

ภาพประกอบ 11 อุปกรณ์และส่วนควบของเครื่องอบแห้งแบบมัสทิโฟล

ปัญหาที่พบจากการดำเนินการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง

จากการดำเนินการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งดังที่ได้กล่าวข้างต้น เพื่อลดความชื้นของข้าวเปลือกให้มีความชื้นสุดท้ายลดลงในระดับที่สามารถนำไปจำหน่ายให้กับโรงสีข้าว หรือเก็บรักษาเป็นเมล็ดพันธุ์ใช้ปลูกในปีต่อไป (ข้าวปลูก) และยังคงมีคุณภาพที่เหมาะสมต่อการนำไปสีเพื่อแปรรูปต่อไปด้วย โดยจากการดำเนินการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่ควบคุมพารามิเตอร์ด้วยมือ พบปัญหาดังนี้

1. ปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกที่นำเข้าเครื่องอบ(ความชื้นเริ่มต้น) มีความแตกต่างกันในแต่ละรอบการผลิต
 2. จากความแตกต่างกันของความชื้นเริ่มต้นทำให้ต้องปรับตั้งพารามิเตอร์ของเครื่องอบแห้งในทุกรอบการผลิต
 3. การปรับตั้งพารามิเตอร์ของเครื่องอบแห้งมีความซับซ้อนต้องอาศัยความรู้ทักษะ และประสบการณ์ของผู้ควบคุมเครื่อง
 4. ผลการอบแห้งทำให้ข้าวเปลือกภายหลังจากการอบแห้งมีความชื้นสุดท้ายไม่ได้ไม่เหมาะสมต่อการนำไปจำหน่าย หรือนำไปเก็บรักษา เนื่องจากปัญหาตามข้อ 1, 2 และ 3
- จากปัญหาที่พบตามข้อ 1, 2, 3 และ 4 ทำให้ผู้วิจัยเริ่มทำการปรับปรุงเครื่องอบแห้งด้วยการควบคุมชุดอุปกรณ์และส่วนควบของเครื่องอบแห้งให้สามารถควบคุมได้ด้วยไฟฟ้า ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

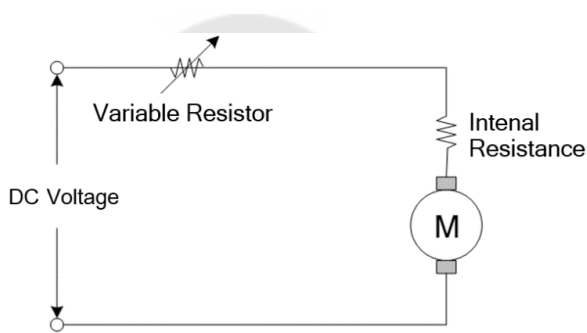
การปรับปรุงการควบคุมชุดอุปกรณ์และส่วนควบ (แบบควบคุมด้วยไฟฟ้า)

การพัฒนาระบบควบคุมให้กับเครื่องอบแห้งนั้นต้องศึกษาหลักการควบคุมด้วยไฟฟ้า และการปรับการทำงานในระหว่างการดำเนินการอบแห้ง โดยพารามิเตอร์ที่ผู้ควบคุมเครื่องต้องทำการปรับตั้งซึ่งเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล หรือเรียกว่า “มอเตอร์ (motor)” ประกอบด้วย 1. มอเตอร์กระแสตรงของอุปกรณ์บดเมล็ดพืช (หมายเลข 7) 2. มอเตอร์กระแสตรงของพัดลมดูดอากาศร้อน (หมายเลข 10) 3. มอเตอร์เซอร์โวของอุปกรณ์ควบคุมการไหลก๊าซ (หมายเลข 13) 4. มอเตอร์กระแสสลับของอุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนตัวของเมล็ดพืช (หมายเลข 8) (อ้างอิงหมายเลขอุปกรณ์และส่วนควบ ดังภาพประกอบ 11) สำหรับการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ แบ่งการควบคุมออกเป็น 2 แบบ คือแบบการควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรง และแบบการควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสสลับ อีกทั้งการจะต้องศึกษาถึงตัวรับรู้ (sensor) และตัวขับของอุปกรณ์ส่วนควบของเครื่องอบแห้ง ด้วยซึ่งมีรายละเอียดการควบคุมดังนี้

การควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (dc-motor speed controller)

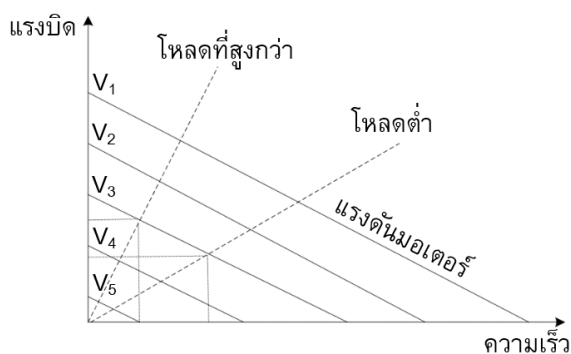
การควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

1. แบบปรับค่าความต้านทานเป็นการใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ต่ออนุกรมกับมอเตอร์ โดยตัวต้านทานเป็นตัวกำหนดความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ ดังภาพประกอบ 12 วิธีนี้ไม่มีประสิทธิภาพเพราะกำลังไฟที่ให้กับมอเตอร์จะสูญเสียไปในตัวความต้านทาน ซึ่งนิยมใช้กับมอเตอร์ขนาดเล็ก ๆ ทั้งนี้การควบคุมวิธีนี้ให้คุณสมบัติที่ดีในการสตาร์ทดี (ให้แรงบิดสูงที่ความเร็วต่ำ) และให้ความเร็วรอบสูงเมื่อมอเตอร์อยู่ในภาวะที่มีโหลดน้อย ๆ



ภาพประกอบ 12 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบปรับค่าความต้านทาน

2. แบบปรับค่าแรงดัน เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปรับค่าความต้านทานจะดีกว่าแต่จะซับซ้อนกว่าเนื่องจากต้องใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีอัตราขยายกำลังสูง และมอเตอร์จะถูกป้อนด้วยแรงดันที่เปลี่ยนแปลงค่าได้ ข้อได้เปรียบ คือมอเตอร์ได้รับแรงบิดเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์เพิ่ม เพื่อรักษาระดับความเร็วให้คงที่ ดังภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบปรับค่าแรงดัน

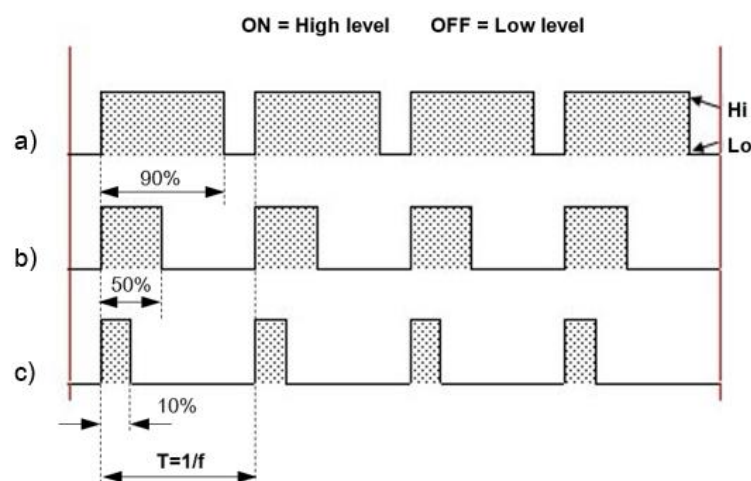
3. แบบปรับคาบสัญญาณ หรือแบบ PWM (pulse width modulation) เป็น การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบปรับคาบสัญญาณหรือแบบ PWM เป็นการควบคุมวงจร ทางด้านฮาร์ดแวร์โดยใช้สัญญาณเอาต์พุตแบบดิจิทัล (digital control) จาก ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีการกำหนดค่าความถี่ของคาบสัญญาณเวลา (T) คงที่และค่าความกว้าง (width) ของลูกคลื่นสัญญาณเรียกว่าพัลส์ (pulse) ระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณสูง (high level) เรียกว่า duty cycle ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ดังภาพประกอบ 12 แสดงสัญญาณ PWM ที่แตกต่างกัน 3 สัญญาณ ดังภาพประกอบ 14

a) PWM ที่ 90% duty cycle คือ สัญญาณเปิด (ON) เป็น 90% และ สัญญาณปิด เป็น 10% ของคาบสัญญาณเวลา (T)

b) PWM ที่ 50% duty cycle คือ สัญญาณเปิด (ON) เป็น 50% และ สัญญาณปิด เป็น 50% ของคาบสัญญาณเวลา (T)

c) PWM ที่ 10% duty cycle คือ สัญญาณเปิด (ON) เป็น 10% และ สัญญาณปิด เป็น 90% ของคาบสัญญาณเวลา

ตัวอย่างคือ ถ้าแหล่งจ่ายแรงดันไฟให้กับมอเตอร์ (power supply) มี 12VDC ใช้การควบคุมแบบ PWM ที่ 10% duty cycle อุปกรณ์จะจ่ายแรงดันไฟให้กับมอเตอร์ เพียง 1.2VDC



ภาพประกอบ 14 สัญญาณ PWM แสดงค่า duty cycles ต่างกัน

การควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (ac-motor speed controller)

ความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสามารถควบคุมได้ด้วยการปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้า และเพื่อความสะดวกในการปรับความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าก็สามารถใช้อุปกรณ์ที่ช่วยเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ไฟฟ้า เรียกว่า “อินเวอร์เตอร์” (inverter) หรือ “เอซีไดรฟ์” (AC Drive) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. การควบคุมความเร็วด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่เป็นอุปกรณ์เปลี่ยนแปลงความถี่สามารถแปลงไฟฟ้า 1 เฟส เป็นไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าแบบ 3 เฟส แรงดันไฟฟ้า 220 หรือ 380 โวลต์ ได้ และยังสามารถควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังภาพประกอบ 15 ซึ่งความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับสมการสนามแม่เหล็กหมุน (N_s : synchronous speed) ดังสมการที่ 2.9

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (2.9)$$

เมื่อ	N_s	คือ	ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้า, RPM
	f	คือ	ความถี่ของกระแสไฟฟ้า, Hz
	P	คือ	จำนวนขั้วแม่เหล็ก, Pole



ภาพประกอบ 15 อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

ที่มา : <http://thai.vfd-variablefrequencydrive.com/>

พิจารณาจากสมการ 2.9 เมื่อความถี่ของกระแสไฟฟ้ามากจะทำให้ความเร็วเชิงโคโรนหรือความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์มากตามไปด้วย ซึ่งในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ในแต่ละตัวที่จะมีจำนวนขั้วแม่เหล็กเป็น 2, 4 และ 6 ขั้ว และเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความถี่เป็น 30, 40 และ 50 Hz สามารถสรุปได้ตามตาราง 1

ตาราง 1 ความสัมพันธ์ของขั้วแม่เหล็กกับความถี่ที่ส่งผลต่อความเร็วรอบของมอเตอร์

ความถี่ของ กระแสไฟฟ้า (Hz)	จำนวนขั้วแม่เหล็ก (Saengpole)		
	2	4	6
30	1,800 RPM	900 RPM	600 RPM
40	2,400 RPM	1,200 RPM	800 RPM
50	3,000 RPM	1,500 RPM	1,000 RPM

หมายเหตุ: ตามสมการ 2.4

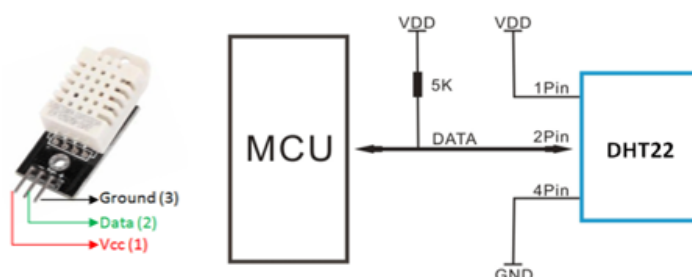
ตัวรับรู้ของเครื่องอบแห้ง

การรับรู้สภาวะการทำงานของอุปกรณ์ส่วนควบต่าง ๆ และแสดงผลสถานะการทำงานจะช่วยให้ผู้ควบคุมเครื่องอบแห้งสามารถตัดสินใจและพิจารณาการปรับตั้งพารามิเตอร์สำหรับการอบแห้งให้เหมาะสม โดยเครื่องอบแห้งแบบมัลติฟูลที่ได้ปรับปรุงมีการติดตั้งตัวรับรู้หรือ เซนเซอร์ (sensor) เพื่อวัดสภาวะอากาศ ทั้งภายนอกและภายใน เช่น การวัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศ การวัดอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง การวัดความเร็วอากาศร้อนที่ไหลผ่านห้องอบแห้ง และการวัดความเร็วรอบการหมุนของอุปกรณ์ เช่น รอบการหมุนของชุดโรตารีวาล์ว (rotary valve set) และรอบการหมุนของชุดควบคุมการเคลื่อนตัวของเมล็ดพืช (eccentric set)

ตัวรับรู้อุณหภูมิและความชื้นอากาศ

อุปกรณ์ที่ใช้รับรู้วัดอุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่ไหลเข้าและออกเครื่องอบแห้ง ได้แก่ อุปกรณ์เซนเซอร์ AM2302 DHT22 temperature and humidity sensor (ST1173) โดยสามารถวัดค่าอุณหภูมิได้ในช่วง -40 ถึง 80°C มีความแม่นยำ (accuracy) 0.5°C และการวัดค่าความชื้นได้ในช่วง $0-100\% \text{RH}$ (relative humidity) มีความแม่นยำ (accuracy) ± 2 ถึง $5\% \text{RH}$ (Adsong) ตัวเซนเซอร์สามารถส่งข้อมูลแบบดิจิตอลและส่งข้อมูลให้กับบอร์ด

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (micro controller: MCU) เพื่อบันทึก คำนวณและแสดงผลข้อมูลการทดลอง ดังภาพประกอบ 16



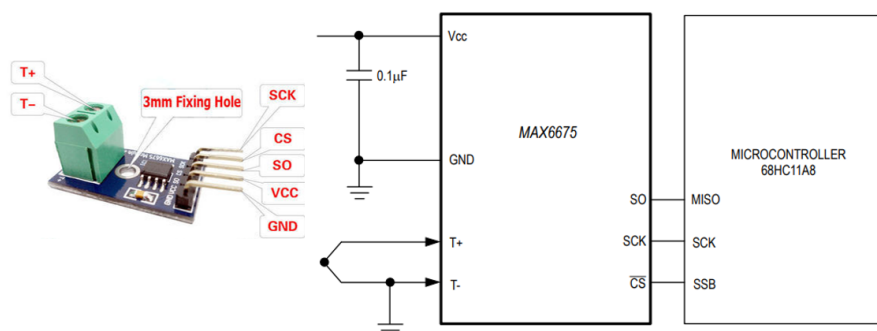
ภาพประกอบ 16 อุปกรณ์เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศ

ที่มา: <https://components101.com/sensors/dht22-pinout-specs-datasheet>

การประยุกต์ใช้ตัวรับรู้อุณหภูมิและและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพื่อศึกษาสภาวะของอากาศภายในห้องอบแห้งเพื่อควบคุมปริมาณการไหลของอากาศเพื่อให้เกิดการถ่ายเทมวลและความร้อนของการอบแห้งมันฝรั่งแผ่น (Fandri Christanto, Rasional Sitepu, & Joewono, 2017) อีกทั้งยังมีงานวิจัยที่ได้ศึกษาการใช้ตัวรับรู้ชนิดนี้เป็นเครื่องมืออ่านและบันทึกข้อมูลโดยมีค่าความแม่นยำและค่าความผิดพลาดในช่วง $\pm 1^\circ\text{C}$ (Medojevic, Stojanovic, Lazarevic, Cosic, & Sremcevic)

ตัวรับรู้อุณหภูมิอากาศร้อน

อากาศร้อนภายในห้องสร้างอากาศร้อน (hot air chamber) และห้องอบแห้ง (drying chamber) ใช้อุปกรณ์เซนเซอร์วัดอุณหภูมิที่ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า เรียกว่า “เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple)” ทำจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัว นำปลายมาเชื่อมต่อกันเป็นจุดวัดอุณหภูมิ งานวิจัยนี้ใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบเค (K-Type Thermocouple: MAX6675) สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง 0 ถึง 800°C และมีความละเอียด (resolution) 0.25°C และส่งข้อมูลให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (micro controller) เพื่อบันทึก คำนวณ และแสดงผลข้อมูลการทดลอง ดังภาพประกอบ 17

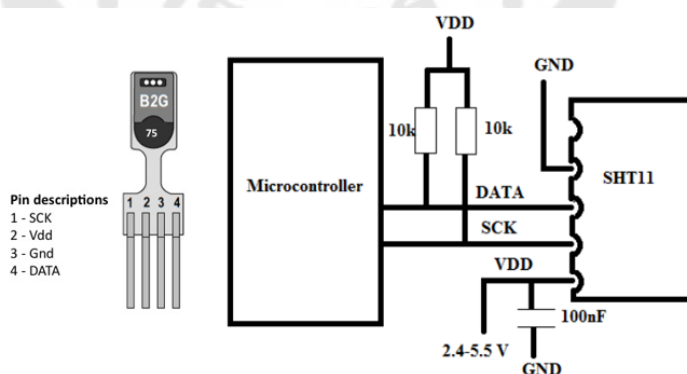


ภาพประกอบ 17 อุปกรณ์เซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิล แบบเค (K-Type Thermocouple)

ที่มา: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675.pdf>

ตัวรับรู้ความชื้นของข้าวเปลือก

การวัดความชื้นเมล็ดพืชด้วยวิธีทางอ้อมได้มีนักวิจัยนำเซนเซอร์วัดความชื้นและอุณหภูมิ เบอร์ SHT-11 (ธนากร สุนทรวัฒน์, 2557) มาใช้เพื่อวัดประมาณค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก โดยมีค่าความผิดพลาดเป็น 5.35% (ความชื้นฐานเปียก) ซึ่งตัวเซนเซอร์จะส่งข้อมูลการวัดความชื้นและอุณหภูมิให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (micro controller) เพื่อบันทึกคำนวณและแสดงผลข้อมูลการทดลอง ดังภาพประกอบ 18

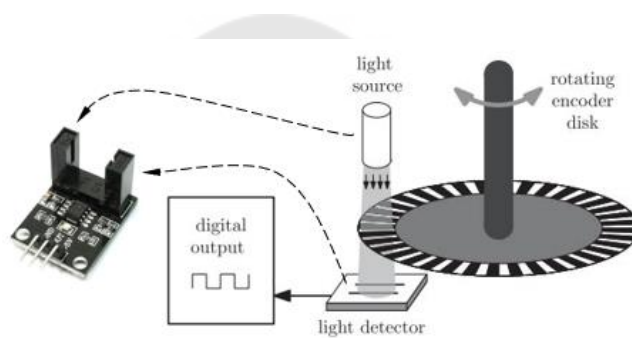


ภาพประกอบ 18 อุปกรณ์เซนเซอร์วัดความชื้นเมล็ดพืช

ที่มา: (K C Gouda1, 2014, July)

ตัวรับรู้ความเร็วรอบการหมุน

การวัดความเร็วรอบการหมุนของเครื่องอบแห้งใช้เซนเซอร์วัดความเร็วรอบการหมุนของชุดอุปกรณ์ส่วนควบ จำนวน 2 อุปกรณ์ คือ 1) วัดความเร็วรอบการหมุนชุดโรตารีวาล์ว (rotary valve set) เพื่อควบคุมปริมาณการป้อนเมล็ดพืชเข้าสู่ห้องอบแห้ง และ 2) วัดความเร็วรอบการหมุนชุดควบคุมการเคลื่อนตัวของเมล็ดพืช (eccentric set) โดยในงานวิจัยนี้ใช้โมดูลวัดความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ (motor speed counter module) ดังภาพประกอบ 19

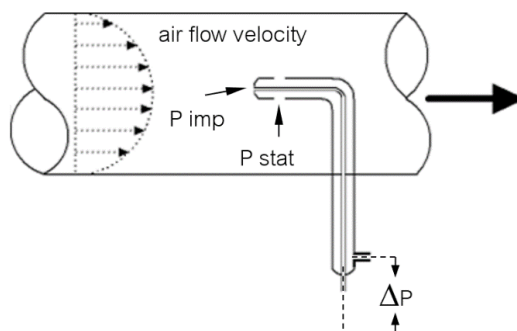


ภาพประกอบ 19 อุปกรณ์เซนเซอร์วัดความเร็วรอบการหมุน

ที่มา: <https://www.teachmemicro.com/lm393-ir-module-motor-speed-sensor/>

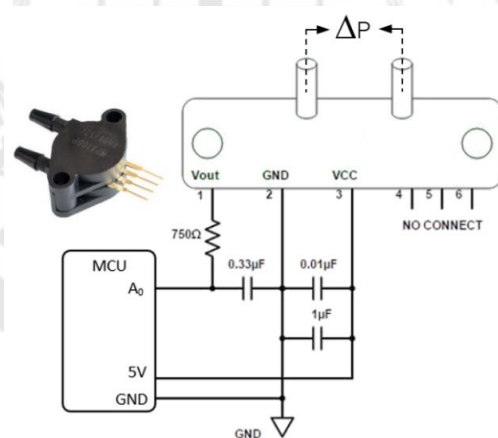
ตัวรับรู้ความดันอากาศ

การวัดความเร็วของไหล (flow measurement) ด้วยท่อปีโตต์ (pitot tube) เป็นอุปกรณ์วัดการไหลที่มีลักษณะเป็นโพรงทรงกระบอก 2 ส่วนสวมเข้าด้วยกัน โดยการวัดความเร็วของไหล อาศัยการแปลงความดันเชิงความเร็ว (velocity head) เป็นความดันกระทบ (impact pressure, P_{imp}) บริเวณปลายท่อตรงกลางด้านในเป็นปลายเปิด และความดันสถิต (static pressure, P_{stat}) บริเวณส่วนปลายท่อด้านนอกมีช่องเปิดที่ผนังท่อ 2-3 ช่อง สามารถวัดความดันแตกต่าง (differential pressure, ΔP) ระหว่างความดันกระทบกับความดันสถิตได้ ดังภาพประกอบ 20



ภาพประกอบ 20 อุปกรณ์วัดการไหลชนิดท่อปีโตต์ (pitot tube)

การอาศัยการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ (kinetic energy) ของการไหลเป็นพลังงานศักย์ (potential energy) ทำให้สามารถวัดความดัน โดยในงานวิจัยนี้ใช้เซ็นเซอร์แบบ MPX10DP port for differential pressure sensor ซึ่งสามารถวัดความดันได้ในช่วง 0-10 kPa ดังภาพประกอบ 21



ภาพประกอบ 21 อุปกรณ์เซ็นเซอร์วัดความดันอากาศ

ที่มา: <https://forum.arduino.cc/index.php?topic=320577.0>

ความแตกต่างของความดันที่วัดได้จากท่อปีโตนั้น สามารถนำมาใช้คำนวณค่าความเร็วของไหล โดยใช้ทฤษฎีของเบอร์นูลลี (Bernoulli's theorem) ดังสมการที่ 2.10

$$V = \sqrt{\frac{2(P_{\text{imp}} - P_{\text{stat}})}{\rho}} \quad (2.10)$$

เมื่อ	V	คือ	ความเร็วของไหล, m/s
	P_{imp}	คือ	ความดันกระทบหรือความดันที่จุดหยุดนิ่ง, N/m^2
	P_{stat}	คือ	ความดันสถิตภายในท่อ, N/m^2 หรือ Pa
	ρ	คือ	ค่าความหนาแน่นของไหล, kg/m^3

ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับอุปกรณ์ส่วนควบ

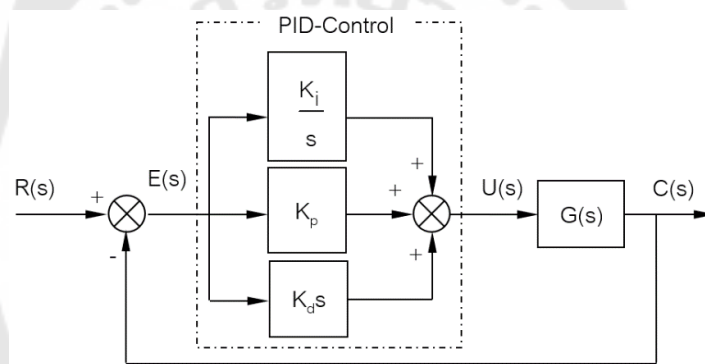
อุปกรณ์ส่วนควบที่มีการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ตามสภาวะของความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกในแต่ละรอบการผลิต สำหรับเครื่องอบแห้งแบบมัลติโฟลนี้มีชุดการควบคุมอัตโนมัติที่สำคัญ 2 ชุด คือ 1) ชุดควบคุมการป้อนเมล็ดพืชเข้าห้องอบแห้ง และ 2) ชุดควบคุมการดูดอากาศร้อนผ่านห้องอบแห้ง ซึ่งทั้ง 2 ชุด นี้ใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback control system) หรือการควบคุมแบบวงปิด (closed-loop) โดยการควบคุมแบบอัตโนมัตินี้จะทำการเปรียบเทียบสัญญาณที่วัดได้จริงจากระบบด้วยตัวรับรู้หรือเซนเซอร์ (sensor) แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ต้องการ เพื่อวิเคราะห์สิ่งที่เกิดขึ้นแล้วสร้างสัญญาณควบคุมที่สามารถลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นให้มีค่าเป็นศูนย์หรือมีค่าน้อยที่สุด ในงานวิจัยนี้พิจารณาตัวควบคุมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายก็คือ PID Controller มาใช้กับระบบที่ทำการวิจัย โดยเลือกใช้ตัวควบคุมตัวใดตัวหนึ่งหรือจับคู่ระหว่าง PD หรือ PI มาควบคุมทั้งนี้ตัวควบคุมต้องยังคงที่จะรักษาคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ต้องการได้อย่างครบถ้วน (สราวุฒิ สุจิตจร, 2546) โดยสามารถแบ่งระบบควบคุมได้ดังนี้

ระบบควบคุมแบบสัดส่วนบวกบวกอนุพันธ์ (PID-Control)

ระบบควบคุมแบบ PID นั้นเป็นการนำคุณสมบัติที่ดีของทั้ง สามตัวที่กล่าวมาข้างต้น มาปรับใช้กับระบบให้ได้การตอบสนองที่เพียงพอต่อความต้องการ มีรูปสมการดังนี้

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.11)$$

นำสมการ 2.11 แปลงรูปลาปลาซ เขียนเป็นรูปบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมได้ ดังภาพประกอบ 22

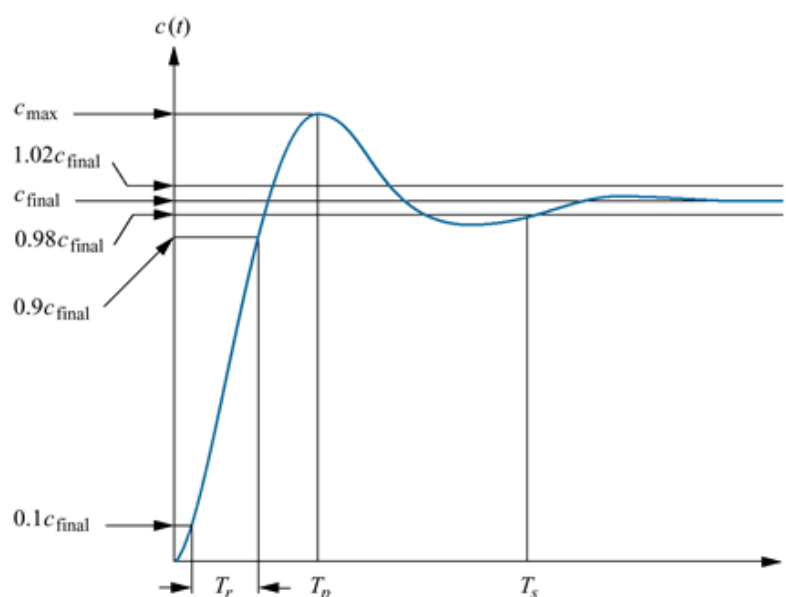


ภาพประกอบ 22 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบ PID-Control

จากสมการค่าอินพุตที่ป้อนให้ระบบขึ้นอยู่กับค่าเกน K_p , K_i และ K_d ค่าเกนส่งผลถึงความไว (sensitivity) ของระบบการควบคุมของอุปกรณ์ส่วนควบของเครื่องอบแห้ง ความไวของการตอบสนองเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง เนื่องจากระบบที่มีความไวมากเกินไป การควบคุมจะส่งผลให้เกิดความรุนแรง ทำให้อุปกรณ์เสียหายหรือส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมได้ หรือในทางกลับกัน ถ้าช้าเกินไป การตอบสนองอาจไม่ทันต่อความต้องการควบคุมระบบ การนำการควบคุมแบบต่าง ๆ เช่น PI, PD หรือ PID การใช้การควบคุมแบบใดนั้นจำเป็นต้องศึกษาถึงการตอบสนองของระบบด้วย

ผลการตอบสนองในโดเมนเวลา

การตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบควบคุมผู้วิจัยสามารถปรับจูนตัวควบคุมให้เหมาะสม เพื่อควบคุมความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์ว และควบคุมความเร็วอากาศออกจากเครื่องอบแห้ง โดยการตอบสนองของระบบสามารถอ้างอิงระบบอันดับสองมาตรฐานต่อการตอบสนองสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย และวิเคราะห์คุณสมบัติบางประการของระบบควบคุม (สรวุฒิ สุจิตจร, 2546) ดังภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 23 การตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของระบบควบคุม

ที่มา: (สรวุฒิ สุจิตจร, 2546)

การตอบสนองโดยรวมประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ การตอบสนองชั่วคราว และการตอบสนองในสภาวะอยู่ตัว

การตอบสนองชั่วคราว มี 2 ประการ คือ

- 1) ความว่องไวของการตอบสนองซึ่งมีช่วงเวลาดำเนิน (rise time, T_r) และช่วงเวลาสูง (peak time, T_p) เป็นตัวบ่งชี้ ซึ่งในการควบคุมที่เหมาะสม
- 2) ความใกล้เคียงของการตอบสนองจริงกับการตอบสนองที่กำหนดซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (percent overshoot, %P.O) และช่วงเวลาเข้าที่ (settling time, T_s)

การตอบสนองทั้ง 2 ประการนี้เป็นสิ่งบ่งชี้ ในการพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติของ เครื่องอบแห้งแบบมีสัฟโฟล

การตอบสนองในสภาวะคงตัว คือค่าที่จะใช้พิจารณาความสามารถของการควบคุม ในการวิจัยนี้ คือ ค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว (steady-state error, e_{ss}) โดยเมื่อผ่าน ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time, T_s) จะแสดงค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวขึ้น ดังนี้

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (2.12)$$

เมื่อ	$e(t)$	คือ ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น
	$r(t)$	คือ ค่าอินพุตที่ต้องการให้ระบบทำงาน
	$c(t)$	คือ เอาต์พุตที่วัดได้จากตัวรับรู้ (sensor)

การพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติในงานวิจัยนี้มีการควบคุมอัตราการป้อนเมล็ดพืช และการไหลของอากาศร้อนภายในห้องอบแห้งซึ่งการควบคุมทั้งสองนี้ส่งผลต่อการลดความชื้น หรือการอบแห้งเมล็ดพืช เพื่อให้ได้ปริมาณความชื้นของเมล็ดพืชตามความต้องการในช่วงเวลาที่ เหมาะสมด้วยการปรับจูนค่าอัตราขยาย K_p จะทำให้ช่วงเวลาขึ้น (rise time) ลดลง แต่ยังคงมีค่า ความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (e_{ss}) ค่าอัตราขยาย K_i จะมีหน้าที่ลดค่าความผิดพลาดในสถานะ อยู่ตัวให้หมดไป การปรับอัตราขยาย K_d มีหน้าที่ในการลดเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (percent overshoot, %P.O.)

การปรับแต่งตัวควบคุม (controller tuning)

การปรับแต่งค่าอัตราขยายของตัวควบคุม (gain) ที่มีด้วยกัน 3 ตัวคือ K_p , K_i และ K_d การกำหนดค่าอัตราขยายหรือการปรับแต่งตัวควบคุมนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของระบบ ควบคุมนั้น ๆ ทำให้มีผู้คิดค้นชื่อซีกเกลอร์และนิโคลส์ (Ziegler–Nichols) ได้พัฒนาวิธีการปรับค่า อัตราขยายตัวควบคุมแบบ P, I และ D ขึ้นโดยอาศัยการทดลองและวิเคราะห์ผลตอบสนองชั่วคราว และผลตอบสนองในสถานะอยู่ตัว ทั้งนี้แนวทางในการปรับแต่งตัวควบคุมสามารถแบ่งได้ 2 แนวทาง มีรายละเอียดดังนี้

1) การปรับแต่งด้วยมือ (manual tuning)

วิธีการนี้เริ่มโดยการเซตค่าอัตราขยาย K_i และ K_d เป็นศูนย์ และค่อย ๆ ปรับแต่งค่าอัตราขยาย K_p เรื่อย ๆ จนกระทั่งระบบที่ต้องการควบคุมเกิดการแกว่ง (oscillate) แล้วจึงตั้งค่าอัตราขยาย K_p เป็นครึ่งหนึ่งของค่าที่ทำให้ระบบเกิดการแกว่ง จากนั้นให้เริ่มเพิ่มค่าอัตราขยาย K_i จนได้ผลการตอบสนองในสภาวะคงตัวของระบบที่ต้องการ หากต้องการเพิ่มค่าอัตราขยาย K_d จนกระทั่งการควบคุมเร็วพอที่ยอมรับได้ เมื่อเทียบกับระบบควบคุมถูกรบกวน (disturbance) ดังแสดงในตาราง 2 ผลกระทบของค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบ P, I และ D

ตาราง 2 ผลกระทบของค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบ P, I และ D

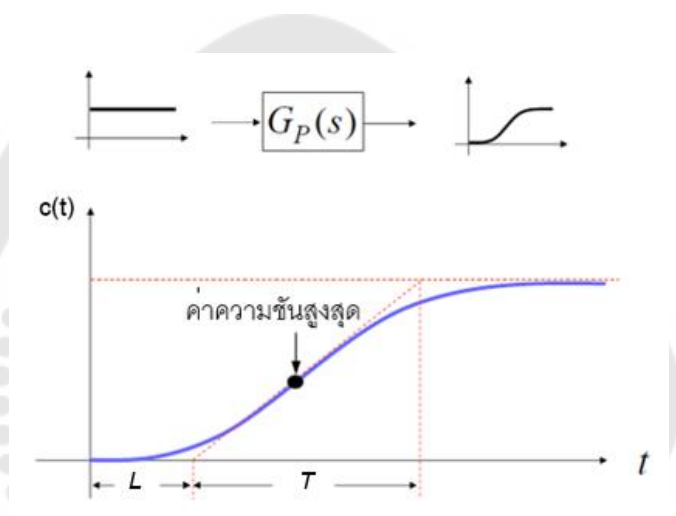
ค่าอัตราขยาย ของตัวควบคุม	ช่วงเวลาขึ้น (T_r)	เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (%P.O.)	ช่วงเวลาเข้าที่ (Chemists & Chemists)	ค่าความผิดพลาด ในสถานะอยู่ตัว (e_{ss})
K_p	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เปลี่ยนน้อย	ลดลง
K_i	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น	ลดลงจนหมด
K_d	เปลี่ยนน้อย	ลดลง	ลดลง	เปลี่ยนเล็กน้อย

2) การปรับแต่งด้วยวิธีซีเกอร์-นิโคลส์ (Ziegler–Nichols Method)

การปรับแต่งต้องอาศัยการทดลองและวิเคราะห์ผลโดยเปรียบเทียบกับกระบวนการต่าง ๆ โดยมีสัญญาณอินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย (unit-step input) และการปรับแต่งค่าอัตราขยายของตัวควบคุมตามวิธีปฏิกิริยาของกระบวนการ (process reaction method) ด้วยการป้อนอินพุตให้กับระบบ ดังสมการที่ 2.12 นำมาแปลงรูปลาปลาซ ซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ (transfer function: $G(s)$) ดังสมการที่ 2.13

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.13)$$

วิธีปฏิกิริยาของกระบวนการ (process reaction method) วิธีนี้ใช้การปรับค่าอัตราขยายของระบบควบคุมแบบวงเปิด (open-loop system) โดยเริ่มจากป้อนอินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย (unit-step function) ไปยังกระบวนการดังภาพประกอบ 24 หลังจากป้อนอินพุตแล้วทำการวัดผลการตอบสนองของกระบวนการ ด้วยการวัดเส้นสัมผัสกราฟที่มีความชันสูงสุด (slope, R), หาค่าเวลาหน่วง (time delay, L), ค่าคงที่ของเวลา (time constant, T) และคำนวณหาค่าอัตราขยายต่าง ๆ ตามสมการที่ 2.13 ซึ่งค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเป็นไปตามตาราง 3



ภาพประกอบ 24 การตอบสนองของระบบโดยวิธีปฏิกิริยาของกระบวนการ

ตาราง 3 ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบต่าง ๆ โดยวิธีปฏิกิริยาของกระบวนการ

ชนิดของตัวควบคุม	K_p	K_i	K_d
P-control	T / L	-	-
PI-control	$0.9(T / L)$	$0.3K_p/L$	-
PID-control	$1.2(T / L)$	$0.5K_p/L$	$0.5K_pL$

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดความชื้นหรือการอบแห้งเมล็ดพืชด้วยเครื่องอบแห้ง ผู้วิจัยได้แบ่งกลุ่มงานวิจัยที่ออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

1. การทดสอบการดำเนินการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งชนิดต่าง ๆ รวมถึงการสร้างแบบจำลองของเครื่องอบแห้งกับวัสดุที่มีลักษณะเป็นเม็ด (granular materials) เช่น เมล็ดธัญพืช ข้าวเปลือก กากถั่วเหลือง มันสำปะหลัง อนุภาคเรซิน เป็นต้น
2. การเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้งรวมถึงการประหยัดพลังงาน
3. การควบคุมการลดความชื้นของเครื่องอบแห้งและแนวทางประยุกต์หรือการพัฒนากระบวนการควบคุม

การทดสอบการดำเนินการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ

หัวข้อนี้จะแสดงถึงการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ โดยในการสร้างเครื่องอบแห้งจะยังคงใช้หลักการของ 2 องค์ประกอบหลักของการอบแห้ง คือการไหลของอากาศร้อนกับการเคลื่อนที่ของเมล็ดพืช ซึ่งสามารถแบ่งลักษณะการไหลขององค์ประกอบหลักดังที่ได้กล่าวมา เป็นแบบแบบอากาศร้อนไหลขนานกับเมล็ดพืช (parallel flow) และแบบอากาศร้อนไหลตั้งฉากกับเมล็ดพืช (cross flow) ที่ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวล เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการลดความชื้น ดังแสดงในรายงานผลวิจัยและผลการทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้งในแบบต่าง ๆ เช่น แบบมัสทิโฟล แบบหล่นอิสระ แบบท่อหรือแบบพาหะลม แบบคลุกเคล้าหมุนเวียนเมล็ดในถัง แบบกระแสน แบบสเปาเต็ดเบด และแบบฟลูอิดไรเซด ตามลำดับ ดังมีรายละเอียดดังนี้

เครื่องอบแห้งแบบมัสทิโฟล

โดยเครื่องอบแห้งมีลักษณะการไหลของเมล็ดพืชในแนวระดับและอากาศร้อนไหลในแนวตั้ง (cross flow) ซึ่งการเคลื่อนที่ของวัสดุผ่านห้องอบแห้งเกิดจากกลไกสร้างแรงสั่นสะเทือนด้วยการหมุนของชุดเขย่าห้องอบแห้งบังคับให้เมล็ดพืชลอยตัวสัมผัสกับอากาศร้อนภายในห้องอบแห้งเป็นจังหวะ ขณะเดียวกันอากาศร้อนจะถูกดูดผ่านห้องอบแห้งด้วยความเร็วลมที่เหมาะสม ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลไอน้ำจากเมล็ดพืชสู่ผิวของเมล็ดพืชและระเหยสู่อากาศร้อนโดยรอบทำให้ความชื้นของเมล็ดพืชลดลง ซึ่งกลไกสร้างแรงสั่นสะเทือนนี้ยังทำให้เมล็ดพืชที่มีความชื้นน้อยกว่าเคลื่อนที่ผ่านห้องอบแห้งได้เร็วกว่าเมล็ดพืชที่มีความชื้นมากกว่า ด้วยข้อได้เปรียบนี้จึงมี คณะวิจัยทำการสร้างเครื่องอบแห้งและทดสอบการดำเนินการอบแห้ง ซึ่งในช่วงแรก ปี 2556-2559 เป็นการศึกษาพฤติกรรมการทำงาน อิทธิพลและผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังรายงานการวิจัยของ (พิรสิทธิ์ ทวายนาค, มณฑล ชูชนาค, มุสตาฟา ยะ

ภา, & ประชา บุญยวานิชกุล, 2556), (พีรสิทธิ์ ทวยนาค, มณฑล ชูโชินาค, มุสตาฟา ยะภา, & ประชา บุญยวานิชกุล, 2557) ได้ศึกษาพฤติกรรมการทำงานและผลกระทบของอัตราการไหลและอุณหภูมิของอากาศร้อนต่อการลดความชื้นข้าวเปลือก รวมถึงผลกระทบของกระแสความเร็วของอากาศร้อนต่อการลดความชื้นกรณีศึกษาของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัลติโพล ที่มีพื้นที่อบแห้ง พบว่าอุณหภูมิอากาศร้อน 150 °C สามารถดำเนินการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 22%wb ความชื้นฐานเปียก จนมีความชื้นสุดท้ายเป็น 16%wb นอกจากนี้ยังพบว่ากระแสความเร็วของอากาศร้อนที่ความเร็ว 1.5, 1.8, 2.0 และ 2.3 m/s ส่งผลต่อค่าความชื้นสุดท้ายไม่มากนัก โดยการดำเนินการอบแห้งใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นเป็น 22%wb ความชื้นฐานเปียก อุณหภูมิของอากาศร้อน 100 °C ภายหลังจากการอบแห้งข้าวเปลือกมีความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 18%wb และสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เป็น 2.78 MJ/kg-water และ

จากรายงานการศึกษาของ (ณัฐพล มณีโชติ, มุสตาฟา ยะภา, มณฑล ชูโชินาค, & ประชา บุญยวานิชกุล, 2556), (ณัฐพล มณีโชติ, มณฑล ชูโชินาค, มุสตาฟา ยะภา, & ประชา บุญยวานิชกุล, 2559) ที่ได้ศึกษาอิทธิพลของความหนาของชั้นข้าวเปลือกต่อความดันและความเร็วของกระแสอากาศ และผลกระทบของขนาดรูเปิดของแผ่นกระจายอากาศและความหนาของชั้นข้าวเปลือกต่อคุณลักษณะการทำงานของเครื่องอบแห้ง พบว่าการเพิ่มความหนาของชั้นข้าวเปลือกตั้งแต่ 1-10 cm ทำให้ความดันภายในห้องอบแห้งลดลงไอน้ำที่ผิวของข้าวเปลือกสามารถระเหยสู่อากาศได้มากขึ้นแต่กระแสอากาศไหลได้น้อยลง ทั้งนี้จะส่งผลต่อความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกภายหลังการดำเนินการอบแห้ง นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้งมีการกระจายตัวของความชื้นอย่างสม่ำเสมออีกด้วย

ต่อมา (พงศกร สุวโท & มณฑล ชูโชินาค, 2557) ได้รายงานผลของอิทธิพลของความหนาของชั้นข้าวเปลือกที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของข้าวเปลือก และ (พิชญา เทวยุรัง & มณฑล ชูโชินาค, 2557) ได้ศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบของระยะยกห้องอบแห้งต่อความดันตกคร่อมในเครื่องอบ พบว่าความเร็วของอากาศที่เหมาะสมส่งผลต่อค่าความพรุนของชั้นข้าวเปลือกทำให้ทราบว่าความพรุนที่สูงขึ้นจะทำให้อากาศร้อนมีการถ่ายเทความร้อนและมวลได้มากกว่าชั้นเบดที่มีความพรุนน้อย เป็นต้น ในช่วงเวลาเดียวกัน (พงศสฤติย์ ศรีภักดี, ชูรัตน์ ธารารักษ์, ธเนศ ไชยชนะ, & ณัฐวุฒิ ดุษฎี, 2559) ได้รายงานผลการศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัลติโพลขนาด 2 ตันต่อชั่วโมง ทดสอบพารามิเตอร์อัตราการไหลของอากาศตั้งแต่ 0-0.3 m³/s เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05 m³/s ความเร็วรอบการหมุนของชุดเขย่าห้องอบแห้ง 100, 120 และ 140 rpm ที่ความสูงของเบด 1, 2 และ 3 cm พบว่าอัตราการไหลของอากาศส่งผลต่อการ

เคลื่อนที่ของข้าวเปลือกผ่านห้องอบแห้ง เช่นช่วง 0-0.10 m³/s การเคลื่อนที่ที่ค่าลดลง และช่วง 0.15-0.3 m³/s การเคลื่อนที่ที่มีค่าใกล้เคียงกัน และอัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นของข้าวเปลือกภายในห้องอบแห้งลดลงแต่ความพรุนจะมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังให้ข้อแนะนำถึงการเลือกใช้ความเร็วรอบการหมุนของชุดเขย่าที่เหมาะสมเลือกจากการเคลื่อนตัวของข้าวเปลือกผ่านห้องอบแห้งข้าวสุก และใช้ค่าที่ที่แนะนำนี้ในการดำเนินการต่อไป

จากการศึกษาพารามิเตอร์และตัวแปรในการปรับตั้งเครื่องต่าง ๆ ที่เหมาะสมดังรายงานวิจัยที่ได้กล่าวข้างต้นต่อมาจะเป็นรายงานผลการวิจัยของผู้วิจัยที่ทดสอบการอบแห้ง การประเมินการใช้พลังงาน รวมถึงความเป็นไปได้ในการขยายกำลังการผลิตของเครื่องเชิงพาณิชย์อีกด้วย โดยในปี 2560 (พงศ์สฤติย์ ศรภักดี, ชูรัตน์ ธารารักษ์, ธเนศ ไชยชนะ, & ณัฐวุฒิ ดุษฎี, 2560) ได้ประเมินการใช้พลังงานเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัลติฟิลโดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวล และกำหนดพารามิเตอร์ควบคุม เช่นอุณหภูมิอากาศร้อนเป็น 160 °C ที่ความสูงของเบด 1, 2 และ 3 cm ความเร็วรอบการหมุนของชุดเขย่าห้องอบแห้งเป็น 110 rpm อัตราการผลิต 4 ton/day และมีขนาดพื้นที่อบแห้ง 0.625 m² พบว่าการปรับตั้งพารามิเตอร์การอบแห้งที่อัตราการไหลของอากาศ 0.2 m³/s ความสูงของชั้นเบด 1 cm สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้น 28-29 %wb ความชื้นฐานเปียก เหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 18.2 %wb โดยใช้เวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในห้องอบแห้ง 148-150 วินาที และสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เท่ากับ 1.94 MJ/kg-water removed สามารถระเหยน้ำออกประมาณ 70 kg/h รวมถึงมีรายงานวิจัยของ (Mustafa Yapha et al., 2014) ที่ขยายการผลิตที่สูงขึ้นเป็น 400 ton/day ที่ปรับตั้งพารามิเตอร์เครื่องอบแห้ง ใช้อุณหภูมิอากาศร้อน 130 °C และมีพื้นที่อบแห้ง ผลการทดสอบสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้น 36.30 %wb จนมีความชื้นสุดท้ายเป็น 15.11 %wb สิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เป็น 3.89 MJ/kg-water removed และอัตราการผลิตเชิงพาณิชย์ที่ 700 ton/day (Yapha, Bunyawannichakul, & Hayinilah, 2014)

เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรเซชัน

ในปี 2536 อรอนงค์ ศรีพาทกุล วิจัยเกี่ยวกับการสร้างและการพัฒนาศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเปลือกที่ช่วงความชื้นที่สูง โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ควบคู่ไปกับผลการทดลองซึ่งพิจารณาที่อัตราการผลิตสูงความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานต่ำและข้าวที่ได้มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ดีจากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 115°C ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก 30 %db. ความชื้นสุดท้าย 24 %db. อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม 30°C ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม 70% ความสูงของเบด 10 cm. อัตราการไหลของอากาศจำเพาะ 0.043 kg/s/kg dry matter อัตราการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่ 80% มีอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้ระเหยต่ออัตราการผลิตต่ำสุดโดยจะสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิ 7.9 MJ/ kg dry matter มีค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง 2.05 Baht/kg-water evap. (อรอนงค์ ศรีพาทกุล, 2536)

ต่อมาในปี พ.ศ. 2537 มุสตาฟา ยะภา ได้ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่ใช้เทคนิคฟลูอิดไรเซชันอย่างต่อเนื่องชนิดอากาศไหลขวางมีกำลังผลิต 1 ton/hr สำหรับอุตสาหกรรมสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกเริ่มต้นจาก 45 %db. ให้เหลือความชื้นสุดท้าย 24 %db. โดยกำหนดเงื่อนไขการอบแห้งนาน 3 min อุณหภูมิในการอบแห้งช่วง $100\text{--}120^{\circ}\text{C}$ อัตราการไหลของอากาศร้อน 0.86 m/s ความเร็วของความอากาศร้อนในห้องอบแห้ง 1.9 m/s อัตราการไหลเวียนอากาศร้อนกลับมาใช้ใหม่ประมาณ 66.7 % ใช้กำลังไฟฟ้า 6,559 W ใช้เชื้อเพลิงดีเซลเฉลี่ย 5.73 L/hr มีความสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิ 270 MJ/kg dry matter ที่ความสามารถในการระเหยน้ำได้ $14.6\text{ kg-water evap./hr}$ มีความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง $1.9\text{ MJ/kg-water evap.}$ (มุสตาฟา ยะภา, 2537) และในปี 2547 (Tirawanichakul, Prachayawarakorn, Varanyanond, Tungtrakul, & Soponronnarit, 2004) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อพารามิเตอร์คุณภาพต่าง ๆ ของข้าวเปลือก การศึกษาใช้ข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 และปทุมธานี 1 ที่มีความชื้นเริ่มต้นเป็น 25.0, 28.8 และ 32.5 % db. ความชื้นฐานแห้ง โดยอบแห้งจนมีความชื้นสุดท้ายเป็น $22.5 \pm 1.2\%$ db. ที่อุณหภูมิอากาศ 40 ถึง 150°C เพิ่มระดับที่ละ 10°C ภายหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแล้วนำมาทำให้เย็นลงด้วยอากาศจนข้าวเปลือกมีความชื้นสุดท้ายเป็น $16.3 \pm 0.5\%$ db. ผลการศึกษาพบว่าผลผลิตข้าวต้นของข้าวสุพรรณบุรี 1 มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิการอบแห้งและความชื้นเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญ และข้าวปทุมธานี 1 กลับไม่มีนัยสำคัญในด้านความชื้นของข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์จะลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มระดับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง นอกจากนี้จำนวนข้าวต้นมีความแตกต่างกันไม่มากนักเมื่อเทียบกับข้าวสุพรรณบุรี 1 และ (Majumder, Sinha, Mishra, & Gupta, 2020) ในปีต่อมา(Tirawanichakul, Prachayawarakorn,

& Soponronnarit, 2005) มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อตรวจสอบการแพร่กระจายของความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกยาวรวมถึงการใช้พลังงานจำเพาะของระบบในการอบแห้งที่กำหนดเงื่อนไข อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 40-150 °C ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก 25%, 28.8% และ 32.5% จากผลการทดลองใช้วิธีถดถอยแบบไม่เชิงเส้นเพื่อแสดงการแพร่ที่เกิดขึ้น โดยพบว่าการแพร่กระจายที่มีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการอบแห้ง นอกจากนี้ยังพบว่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบมีค่าในช่วง 20.01 ถึง 24.37 MJ/kg water removed กรณีไม่มีระบบหมุนเวียนอากาศ และเมื่อมีระบบหมุนเวียนอากาศที่ 90% ทำให้ลดการสิ้นเปลืองพลังงานลง ในช่วง 8.92 to 11.99 MJ/kg water removed ซึ่งสอดคล้องกับ (Prachayawarakorn, Poomsaad, & Soponronnarit, 2005)

ต่อมาในปี 2561 (Khanali, Khakpour Giglou, & Rafiee, 2018) ได้ศึกษาแบบจำลองในการทำนายการดำเนินการอบแห้งโดยใช้การสมดุลมวลของความชื้นภายในวัสดุ ภายใต้ปริมาตรควบคุมและการไหลของของเหลวตามแกน (the axial dispersion phenomenon) และใช้สมการเชิงอนุพันธ์ในการแก้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของแบบจำลองด้วยวิธี finite difference method เพื่อตรวจสอบแบบจำลองจากการศึกษาการอบแห้งที่อัตราการป้อนวัสดุ 245, 420 และ 565 g/min และอุณหภูมิการอบแห้ง 6 ระดับจาก 50 ถึง 100 °C เพิ่มขึ้นทีละ 10 °C ที่แผ่นกันก่อนทางออก (weir) สูงเป็น 0.025 และ 0.05 m ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองที่สร้างสามารถทำนายความชื้นได้อย่างถูกต้องตามตำแหน่งตลอดความยาวของห้องอบแห้ง นอกจากนี้แบบจำลองยังสามารถทำนายผลกระทบของอุณหภูมิของอากาศร้อนเข้า ความสูงของแผ่นกัน และอัตราการป้อนที่เหมาะสม พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศร้อนและแผ่นกันทำให้ความชื้นของวัสดุลดลง แต่ทว่าการเพิ่มของอัตราการป้อนจะทำให้ความชื้นของวัสดุภายหลังการอบแห้งลดลงนั่นเองและจากการใช้ความร้อนระดับสูงจะทำให้เกิดการแตกร้าวหรือคุณภาพการข้าวหลังการสีข้าวต่ำลง ดังรายงานวิจัยของ (Pourbagher, Rahmati, & Alizadeh, 2016) ได้ศึกษาถึงอุณหภูมิและความชื้นสุดท้ายต่อเวลาในการอบแห้งและคุณภาพของข้าวภายหลังการอบแห้งของเครื่องอบแห้งสองแบบ โดยการทดสอบกำหนดอุณหภูมิอากาศ 40, 50 และ 60 °C และความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ 8-9%, 9-10% และ 10-11% d.b. ผลการศึกษาพบว่าในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวจะเกิดการแตกหักในช่วง 8-11% ซึ่งข้อมูลนี้สามารถใช้สำหรับผลการอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ ได้

เครื่องอบแห้งแบบถังหมุน

ปี 2537 กิตติพงษ์ กุลมัตย์ ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกแบบถังทรงกระบอก หมุนพบว่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะโดยคิดในรูปพลังงานป้อนต่อปริมาณน้ำที่ระเหยมีค่าประมาณ 8-25 MJ/kg-water เมื่อความชื้นข้าวเปลือกลดลงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำนอกจากนี้ในปี 2552 วีรัชย์ อาหาญ และคณะได้ศึกษาการอบแห้งมันเส้น พบว่าเครื่องอบแห้งสามารถทำการระเหยน้ำออกจากมันเส้นได้ในอัตรา 140.18 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ 10.07 MJ/kg-water สามารถลดความชื้นของมันเส้นให้มีค่าต่ำกว่า 13%w.b. จากความชื้นเริ่มต้น 60%w.b. (กิตติพงษ์ กุลมัตย์, 2537)

ในปี 2560 (Firouzi, Alizadeh, & Haghtalab, 2017) ได้รายงานการใช้พลังงานและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (ข้าวเปลือกในประเทศอิหร่านตอนเหนือ) ภายหลังจากการอบแห้งที่ได้มีการเปรียบเทียบระหว่างเครื่องอบแห้งที่ได้รับการออกแบบใหม่ (industrial horizontal rotary dryer, IHRD) กับเครื่องอบแห้งแบบเบดอยู่กับที่แบบทั่วไป (the conventional industrial batch-type bed dryer, IBBD) พบว่า IHRD สิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะระหว่าง 5.5 และ 17.41 MJ ต่อ 1 กิโลกรัมการระเหยน้ำเปรียบเทียบกับ IBBD สิ้นเปลืองพลังงานเป็น 2.64-7.48 MJ/kg water evaporated ที่ซึ่งทำให้ความชื้นสุดท้ายเป็น 12.0% - 8.0% (wb.) นอกจากนี้การประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานเป็น 38.8% และ 26.3% ของ IBBD และ IHRD ตามลำดับ ที่ช่วงความชื้นลดลง 14.5% - 12% wb. ในด้านคุณภาพการสีที่ได้จากเครื่อง IHRD เหนือกว่า IBBD อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังได้เสนอการปรับการไหลเวียนอากาศและการหมุนของเครื่องอบแห้ง IHRD เพื่อปรับปรุงการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอีกด้วย ในปี 2563 (Havlik, Dlouhy, & Sabatini, 2020) ได้รายงานการพัฒนาการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถังหมุนที่ใช้ความร้อนจากไอน้ำร้อนความดันต่ำส่งเข้าท่อภายในถังหมุนของเครื่องอบแห้งเป็นการให้ความร้อนแบบทางอ้อม (the indirect drying) เพื่อดำเนินการอบแห้งชิ้นวัสดุเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น เศษไม้หั่นชิ้น (wood chips) และเปลือกไม้ (wet bark) ที่มีความชื้นเริ่มต้นระหว่าง 60 ถึง 66 %wt และความชื้นที่ใช้ในการอบแห้งประมาณ 80 °C ที่อัตราการป้อน (filling ratio, FR) 12%, 16% และ 25% ผลการทดสอบพบว่า การดำเนินการอบแห้งที่อัตราการป้อนสูงกว่า 20% ทำให้การสิ้นเปลืองพลังงานลดลงเนื่องจากวัสดุถูกระเหยน้ำออกไปมากโดยไม่ทำให้ปริมาณพลังงานความร้อนแตกต่างกัน และสามารถลดความชื้นของวัสดุเป็น 40%wt สิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพียง 2.9 MJ ต่อ 1 kg ของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุชีวภาพ

เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ

โดยมีลักษณะการไหลของวัสดุที่ต้องการอบแห้งในแนวดิ่งและอากาศร้อนไหลภายในท่สวนทาง (counter flow) ซึ่งเกิดกระบวนการอบแห้งขึ้นภายในท่อ ดังมีนักวิจัยได้รายงานการทดสอบและการศึกษา ดังนี้ ในปี 2549 ทวิช จิตรสมบูรณ์ และคณะ ได้รายงานผลการศึกษาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ: รวดเร็วและประหยัดพลังงาน ที่ได้สร้างขึ้นใช้วัสดุในการอบแห้งเป็นข้าวเปลือกจำนวน 1.5 kg และกำหนดเงื่อนไขการอบแห้งที่ระดับอุณหภูมิอากาศร้อนเป็น 100 °C ความเร็วของอากาศเป็น 6.64 m/s การทดสอบใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 23.75 %db. (อยู่ในระดับความชื้นปานกลาง) ใช้การอบแบบต่อเนื่อง ผลการทดสอบพบว่าเครื่องอบแห้งชนิดนี้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นๆ ประมาณ 25 วินาที ด้วยการอบแบบต่อเนื่องจำนวน 20 รอบ และใช้เวลาพัก 1 นาทีต่อในแต่ละรอบการผลิต สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกจนมีความชื้นสุดท้ายเป็น 15.5 %db. และสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพียง 1.4 MJ/kg น้ำที่ระเหย

ต่อมาในปี 2551 เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และทวิช จิตรสมบูรณ์ ได้เสนอแนวคิดใหม่ในการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ด้วยเครื่องอบแห้งแบบข้าวหล่นอิสระในแนวดิ่ง และได้ศึกษาถึงผลของความเร็วอากาศร้อนต่ออัตราการอบแห้งข้าวเปลือกในการทดสอบนี้ใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท 1 ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 26% wb. อัตราการป้อนเมล็ดพืช 15.37 kg/min อุณหภูมิในการอบแห้ง 90 และ 120 °C ความเร็วอากาศอบแห้ง 1, 2, 3 และ 4 m/s ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าอัตราการอบแห้งแปรผันโดยตรงกับความเร็วอากาศอบแห้งของอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ได้กำหนดเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งจะทำให้ระยะเวลาการอบแห้งลดลง ในด้านอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะเพิ่มขึ้นตามความเร็วอากาศอบแห้ง คือ 2.92 - 6.32 MJ/kg water evap และ 3.52 – 6.00 MJ/kg water evap (เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว, สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ, & ทวิช จิตรสมบูรณ์, 2551, 15-17 ตุลาคม) ต่อมาในปี 2552 สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ และทวิช จิตรสมบูรณ์ ได้ทดสอบเครื่องอบแห้งที่ใช้การไหลของอากาศร้อนสวนทางกับเมล็ดพืชและกำหนดเงื่อนไขการอบแห้งที่ให้คุณภาพข้าวสารที่ดี งานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณข้าวต้นและความขาวของข้าวสาร โดยใช้อากาศอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 °C ถึง 150 °C ความเร็วอากาศอบแห้ง 1 ถึง 3 m/s และพิจารณาถึงเวลาการพักข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้ง ผลการทดลองทำให้ทราบว่าเครื่องอบแห้งสามารถใช้อากาศร้อนในช่วงดังกล่าวในการอบแห้งโดยยังคงได้ปริมาณข้าวต้นและความขาวข้าวสารใกล้เคียงกับตัวอย่างอ้างอิง (สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ & ทวิช จิตรสมบูรณ์, 2552) ต่อมา

ในปี 2561 (Meesukchaosumran & Chitsomboon, 2018) ได้รายงานผลการศึกษาถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งและระยะเวลาพักระหว่างการดำเนินการอบแห้ง โดยอุณหภูมิการอบแห้งที่ศึกษาตั้งแต่ 40 °C ถึง 140 °C ซึ่งเพิ่มขึ้นครั้งละ 30 °C ที่ความเร็วลมเป็น 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที ศึกษาช่วงพักตั้งแต่ 1 ถึง 4 นาที ผลการทดสอบพบว่ามีการใช้พลังงานในการดำเนินการอบแห้ง 2-4 MJ/kg water removed ที่ช่วงเวลาพักสูงกว่า 1 นาที นอกจากนี้การเพิ่มระยะเวลาพักนานขึ้นจะทำให้ปริมาณข้าวต้นเพิ่มขึ้นอีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการพักข้าวภายหลังการอบแห้งทำให้ลดการแตกร้าวของเมล็ดข้าวเปลือกที่รับความร้อนในขณะดำเนินการอบแห้ง

ทั้งนี้จากข้อมูลการทดสอบการดำเนินการอบแห้งตามเงื่อนไขการทดสอบที่สอดคล้องกันซึ่งเกิดเป็นองค์ความรู้ทำให้กลุ่มนักวิจัยได้ยกระดับเครื่องอบแห้งด้วยการพัฒนาให้เครื่องอบแห้งมีความสะดวกต่อการใช้งานและศึกษาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นรวมถึงการสร้างแบบจำลองและโปรแกรมสำหรับคำนวณผลการอบแห้งในรูปแบบต่าง ๆ

เครื่องอบแห้งแบบท่อหรือแบบพาหะลม

โดยมีลักษณะการไหลของวัสดุทดสอบในทิศทางเดียวกับกระแสอากาศร้อนหรืออากาศร้อน (concurrent flow) ซึ่งกระบวนการอบแห้งเกิดขึ้นภายในท่ออบแห้งดังมีนักวิจัยศึกษาและรายงานผลการทดสอบเครื่องดังนี้ ในปี 2549 (Kaensup, Kulwong, & Wongwises, 2006) ได้รายงานการศึกษาที่ตรวจสอบผลความชื้นสุดท้ายของวัสดุในการอบแห้ง อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ ปริมาณข้าวเต็มเมล็ด อัตราการอบแห้ง การสิ้นเปลืองพลังงานต่อหนึ่งหน่วยการระเหยน้ำออกจากวัสดุและลักษณะทางกายภาพของวัสดุที่นำมาอบแห้ง โดยการศึกษากำหนดเงื่อนไขการทดสอบ ดังนี้ ใช้วัสดุในการอบแห้งเป็นข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้นช่วง 22-26 %wb ความชื้นฐานเปียกใช้อุณหภูมิในการอบแห้งเป็น 35-70 °C กำหนดความเร็วของอากาศเป็น 20 m/s ถึง 30 m/s อัตราการป้อนเมล็ดพืชที่ 150 kg/h ถึง 350 kg/h ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งชนิดนี้สามารถดำเนินการอบแห้งให้กับวัสดุที่มีความชื้นสูงได้หรือมีความชื้นเริ่มต้นมากกว่า 24 %wb (เปียก) ได้อย่างรวดเร็วโดยไม่มีทำให้คุณภาพของข้าวลดลง เช่นการแตกร้าวภายในเมล็ดพืช และสามารถลดความชื้นจนวัสดุมีความชื้นสุดท้ายเป็น 18%wb หรือประมาณ 5-6% ของความชื้นเริ่มต้นภายใน 3-4 นาที ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50-60 °C และจากการเปรียบเทียบผลการดำเนินการอบแห้งของเครื่องดังกล่าวกับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดาเบด (Soponronnarit Somchart, Yapha Mustafa, & Pracbayawarakorn Somkiat, 1995) ที่มีต้นทุนในการผลิตเป็น 4,772,250 บาทต่อ 1,000 กิโลกรัมวัสดุเปียกก่อนการอบแห้ง ต่อชั่วโมงหรือ (150,000 \$USD per ton/h ที่อัตราการ

แลกเปลี่ยน 1 USD = 31.82 THB) และสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเป็น 2.32 MJ/kg water removed ใช้เวลาในการอบแห้ง 3-5 นาที และปริมาณข้าวต้นเป็น 52-56% เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งนี้มีต้นทุนด้านพลังงานในการผลิตเป็น 39,767 บาทต่อตันต่อชั่วโมง หรือ (1,250 \$USD per ton/h) และการสิ้นเปลืองพลังงานเป็น 0.83 MJ/kg water removed แต่ในด้านปริมาณของข้าวต้นมีความใกล้เคียงกัน และในปี 2550 (Bunyawanichakul, Walker, Sargison, & Doe, 2007) ได้ทำการสร้างแบบจำลองการอบแห้งหนึ่งมิติซึ่งประกอบด้วยการสมดุลมวลและความร้อนและจลศาสตร์การอบแห้งของการแพร่ภายในเมล็ดพืชระบบสมการเชิงอนุพันธ์สามัญแบบไม่เชิงเส้นที่ใช้แสดงความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกและกระแสน้ำอากาศตลอดความยาวของท่ออบแห้ง เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของอากาศจำเพาะขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออบแห้งและความเร็วของอากาศเข้าเครื่องอบแห้งต่อความชื้นสุดท้ายและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกกับการไหลของอากาศ ผลการประเมินด้วยแบบจำลองที่สร้างขึ้นพบว่าอัตราส่วนของอากาศจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออบแห้งและความเร็วของอากาศเข้าในทางตรงกันข้ามอัตราอากาศจำเพาะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนข้าวเปลือกลดลง นอกจากนี้การเพิ่มอัตราส่วนของอากาศยังช่วยเพิ่มอุณหภูมิที่อากาศสมดุล (T_{eq}) และทำให้อัตราการแพร่กระจายของความชื้นภายในสูงขึ้นนั่นเอง นอกจากนี้ยังมีข้อเสนอแนะด้านการปรับปรุงเพื่อให้สามารถอบแห้งวัสดุที่มีความชื้นสูงขึ้นด้วยการเพิ่มความยาวของท่อเพื่อให้เพิ่มเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนมากขึ้นนั่นเองซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (C Kemp, 1994)

ปี 2559 ปิยะพล พึ่งพงศ์พันธุ์ และคณะ (ปิยะพล พึ่งพงศ์พันธุ์, ศุภณัฐ ไพทโสภณ, อานันท์ ตันภูมิ, ฉัตรชัย นิยมผล, & กิตติ สถาพรประสาธน์, 2016) ได้ศึกษาอิทธิพลของขนาดท่ออบแห้งที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมและรายงานในเทอมของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ของการดำเนินการอบแห้งหลายรอบ การทดสอบใช้ข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 30%(db.) การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ตอน คือ การอบแห้ง 1 รอบและการอบแห้ง 2 รอบ จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิ อัตราการป้อน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออบแห้งมีผลให้ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าลดลง โดยค่าต่ำสุดของการทดสอบเป็น 1.6 MJ/kg water removed ที่การอบแห้ง 1 รอบและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออบแห้งเป็น 50 mm ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 130 °C อัตราการป้อน 20 kg/h สามารถลดความชื้นให้กับวัสดุจนมีความชื้นสุดท้ายเป็น 19.3%d.b. เกิดขึ้นที่การอบแห้ง 2 รอบ ที่อุณหภูมิและอัตราการป้อนเดียวกัน ทั้งนี้ผลการศึกษางานวิจัยนี้สอดคล้องกับแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องอบแห้งดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นของนักวิจัย (Bunyawanichakul et al., 2007) และ

ในปี 2561 (Suherman & Hidayati, 2018) ได้รายงานการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งชนิดนี้ การทดสอบใช้วัสดุเป็นมันสำปะหลังที่มีความชื้นเริ่มต้น 40 % wb ความชื้นฐานเปียก เครื่องอบแห้งสามารถความชื้นได้ต่ำกว่า 13 %wb โดยงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่ 60 ถึง 100 °C อัตราการป้อนที่สัมพันธ์กับการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นจาก 1.224 kJ/h ถึง 2.736 kJ/h ขณะที่ประสิทธิภาพการใช้พลังงานอยู่ระหว่าง 30-40 % นอกจากนี้ผลการประเมินด้านความขาวของวัสดุภายหลังการดำเนินการอบแห้งมีระดับความขาว 98%ตามมาตรฐานของผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง (the standard of cassava starch:SNI) อีกด้วย

ในปี 2563 (Nimmol, Yodrux, & Hirunwat, 2020) ได้นำข้อได้เปรียบของเครื่องอบแห้งชนิดที่ที่สามารถอบแห้งวัสดุที่มีความชื้นสูงได้ด้วยเวลาที่รวดเร็วและได้ปรับปรุงท่ออบแห้งจากผิวเรียบให้มีผิวแบบลูกฟูก (corrugated-surface) และทำการอบแห้งหลายขั้นตอนทั้ง 1 รอบ และ 2 รอบการทดลองเช่นเดียวกับงานวิจัยที่ได้กล่าวข้างต้นของ (ปิยะพล พึ่งพงศ์พันธุ์ et al., 2016) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งสำหรับข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูง ในการศึกษานี้ได้เสนอการกำหนดอัตราส่วนระหว่างความยาวของพื้นผิวลูกฟูก (C) และความยาวทั้งหมดของท่ออบแห้ง (drying column, L) หรือ C/L ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งเป็น 120 °C, 150 °C และ 180 °C ของ C/L เป็น 0, 0.5 และ 1.0 9 ตามลำดับ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการอบแห้งและการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้ง ดังนั้นค่าคอэффици์การอบแห้งสูงทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งสำหรับการอบแห้ง 1 รอบ การปรับปรุงผิวภายในท่ออบแห้งสามารถลดการใช้พลังงานลงได้ 14% ถึง 44% เมื่อเทียบกับท่อความร้อนแบบเรียบ สำหรับการอบแห้งรอบที่ 2 ท่ออบแห้งแบบลูกฟูกใช้พลังงานมากกว่าอย่างไรก็ตามการลดความชื้นของข้าวเปลือกก็ยังเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญหลังการอบแห้งรอบที่ 2

ทั้งนี้จากการศึกษาทบทวนงานวิจัยของเครื่องอบแห้งแบบแบบท่อหรือแบบพาหะลม มีจุดเด่นในด้านใช้ระยะเวลาในการอบแห้งรวดเร็วจากการออกแบบเครื่องมีข้อได้เปรียบจากการสร้างความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอากาศกับเมล็ดพืชที่มีค่าสูงทำให้เกิดการพาความร้อนที่ผิวของวัสดุอบแห้งช่วยให้เกิดการถ่ายเทมวลและความร้อนได้รวดเร็ว เหมาะสำหรับลดความชื้นให้กับวัสดุที่มีความชื้นสูงดังรายงานวิจัยที่ได้กล่าวมาตลอดจนมีผู้สร้างแบบจำลองเพื่อใช้ช่วยในการออกแบบและศึกษาผลกระทบของขนาดท่ออบแห้งต่อความเร็วของอากาศเข้าอีกด้วย

เครื่องอบแห้งแบบกระแสน

ในปี 2550 (Sathapornprasath, Sakamon, & Somchart, 2007) รายงานผลการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งสำหรับวัสดุผง (particulate materials) ที่มีความชื้นผิวสูง งานวิจัยศึกษาตัวแปรการดำเนินการอบแห้ง เช่น อุณหภูมิอากาศเข้า 110, 130 และ 150 °C, ความเร็วลม 16, 45 m/s, อัตราการป้อนของอนุภาคเป็น 10 และ 20 kg/h และระยะห่างระหว่างกระแสนไหล 2 การไหลเป็น 5 และ 15 cm การศึกษาใช้วัสดุเรซินที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงประมาณ 81-85% (db.) พบว่ามีอัตราการระเหยน้ำสูงประมาณ 110 kg_{water}/m³h และมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเชิงปริมาตรเป็น 880 W/m³ K ที่อนุภาคอยู่ภายในการอบแห้งเฉลี่ย 2 วินาที และในปีเดียวกันได้มีการพัฒนาเพิ่มเติม (Sathapornprasath, Devahastin, & Soponronnarit, 2007) และ (Supakumnerd & Sathapornprasath, 2013) สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา และฉัตรชัย นิยมล. ได้ปรับปรุงเครื่องอบแห้งต้นแบบของ (Sathapornprasath, Sakamon, et al., 2007) ให้เหมาะสมสำหรับการอบแห้งวัสดุที่มีความชื้นสูง โดยใช้กากถั่วเหลืองเป็นวัสดุทดสอบ ผลการทดสอบพบว่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดประมาณ 520 kg-water/m³ h ด้านสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดประมาณ 4,500 W/m³ K นอกจากนี้ยังพบว่าเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในระบบมีค่าประมาณ 0.97-1.74 วินาที ด้านการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าต่ำสุดประมาณ 5.6 MJ/kg-water (สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา & ฉัตรชัย นิยมล, 2552) และในปี 2555 (สุชาติ ธนสุขประเสริฐ, ธนิต สวัสดิ์เสวี, สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, & สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2012) ได้รายงานการศึกษาการอบแห้งใช้ข้าวเปลือกพันธุ์พิษณุโลก 2 ที่ความชื้นเริ่มต้น 29.6%(db.) ใช้อุณหภูมิอากาศ 130, 150 และ 170 °C ความเร็วอากาศเข้าเครื่อง 20 m/s ระยะห่างของกระแสนเท่ากับ 5 cm และอัตราการป้อนวัสดุ 90 kg/h ผลการทดสอบพบว่าข้อมูลที่น่าสนใจคือกรณีอุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นจะทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกและร้อยละต้นข้าวลดลงในขณะที่อัตราการระเหยน้ำเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น โดยงานวิจัยได้รายงานอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเป็น 216, 280.8 และ 377.2 kg_{water}/m³h (ในรอบแรกการทดสอบ) ผลที่ได้สอดคล้องกับผลของ (Sathapornprasath, Sakamon, et al., 2007) และจากการทบทวนเครื่องอบแห้งแบบกระแสนเหมาะสมและมีความเป็นไปได้สำหรับการลดความชื้นของวัสดุที่มีความชื้นสูงและมีลักษณะเป็นเม็ดดินหรือผงอนุภาค ทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและอุตสาหกรรมชุมชนดังรายงานวิจัยของ (Supakumnerd & Sathapornprasath, 2013) และในปี 2563 (Kumklam, Prachayawarakorn, Devahastin, & Soponronnarit, 2020) เสนอทางเลือกสำหรับการอบแห้งข้าวหนึ่ง โดยทำการอบแห้งข้าวหนึ่งที่มีความชื้นเริ่มต้นช่วง 48-50

%db. ใช้ความเร็วของอากาศอบแห้งเป็น 15-25 m/s อัตราการป้อนวัสดุเป็น 80, 110 และ 160 kg_{dry solid}/h และ อุณหภูมิกระแสอากาศ 150, 170 และ 190 °C ตามลำดับ ผลการทดสอบรายงานว่าการเลือกความเร็วอากาศและอัตราการป้อนมีความสำคัญต่อการใช้พลังงาน นอกจากนี้ยังแนะนำว่าการใช้ความเร็วอากาศร้อนเป็น 15 m/s และอุณหภูมิ 190 °C เหมาะสำหรับการอบข้าว ซึ่งสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเป็น 8.5 MJ/kg water removed ที่อัตราการป้อนข้าวเปลือกเป็น 160 kg/h

ทั้งนี้จากการศึกษาทบทวนงานวิจัยของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำมีจุดเด่นในด้านความสามารถอบแห้งวัสดุที่มีความชื้นสูงซึ่งจะมีการเกาะตัวกันของวัสดุและอีกประการหนึ่งคือสามารถดำเนินการอบแห้งได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องมีระยะเวลาพักข้าวในระหว่างการอบแห้ง

เครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบด

ในปี 2552 มีนักวิจัยทำการประมาณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งกากถั่วเหลืองด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบด ซึ่งพบว่า SEC ที่คำนวณได้อยู่ในช่วง 1.62-4.06 MJ/kg-water ซึ่งผลของอุณหภูมิการอบแห้งที่มีต่อ SEC เฉลี่ย พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งในช่วง 55-110 °C จะทำให้ SEC มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ SEC เฉลี่ยมีค่าสูงสุด ประมาณ 3.42 MJ/kg-water เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °C และในทางตรงกันข้ามการอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 °C จะให้ SEC มีค่าต่ำกว่า 3.14 MJ/kg-water ที่อุณหภูมิ 110 °C เนื่องจากการใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ 130 °C ทำให้อัตราการดึงน้ำออกสูงในช่วงเวลาที่สั้นมากซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานสูงขึ้นด้วย สำหรับผลของความเร็วอากาศขาเข้าต่อค่า SEC เฉลี่ย พบว่าที่ความเร็วอากาศ 0.65 m/s ทำให้ SEC เฉลี่ยมีค่าสูงกว่าการใช้ความเร็วอากาศ 0.55 m/s เนื่องจากการใช้ความเร็วอากาศสูงต้องการพลังงานที่ใช้สูงกว่าแต่ไม่ได้ทำให้อัตราการระเหยน้ำเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก (Wachiraphansakul & Devahastin, 2007) ต่อมา

ปี 2556 (Jittanit, Srzednicki, & Driscoll, 2013) ได้รายงานการเปรียบเทียบระหว่างเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดกับเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบด โดยพิจารณาประสิทธิภาพการอบแห้งเมล็ดพืชที่มีความชื้นสูงช่วง 20-25 %wb. ถึงความชื้นปานกลาง 18 %wb. การทดสอบใช้เมล็ดข้าวเปลือกและข้าวสาลีเพื่อเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งและคุณภาพผลิตภัณฑ์และการใช้พลังงาน พบว่าเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดดีกว่าในด้านอัตราการแห้งของวัสดุ และเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดดีในด้านการใช้พลังงานจำเพาะ ในกรณีการอบแห้งข้าวเปลือกสิ้นเปลืองพลังงานในช่วง 6.9 ถึง 58.0 MJ/kg water removed นอกจากนี้ในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไม่สามารถสรุปได้ชัดเจน

ตาราง 4 ลักษณะการไหลและการสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ

ชื่อเครื่องอบแห้ง (Types of dryers)	ลักษณะการทำงาน	การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ (งานวิจัยอ้างอิง)
แบบมัสท์โฟล (Must flow dryer)	- การไหลของอากาศ ในแนวดิ่งเพื่อดูด ความชื้นออกและ เมล็ดพืชเคลื่อนที่ใน แนวราบ (cross flow)	มีค่าในช่วง 1.94 ถึง -3.89 MJ/kg-water 1.94 MJ/kg-water ขนาดพื้นที่อบแห้ง 0.625 m ² (พงศ์สถิตย์ ศรศักดิ์ et al., 2560) 2.78 MJ/kg-water ขนาดพื้นที่อบแห้ง 0.20 m ² (พิรสิทธิ์ ทวยนาค, มณฑล ชูไชนาค, มุस्ताฟา ยะฟา, & ประชา บุญยวานิชกุล, 2557) 3.89 MJ/kg-water (Mustafa Yapha et al., 2014)
แบบฟลูอิดไรซ์เบด (Fluidized bed dryer)	การไหลของอากาศร้อน พัดดันให้เมล็ดพืชให้ อยู่ในสภาวะลอยตัว - (cross flow)	มีค่าในวง 14.6 – 24.37 MJ/kg-water 14.6 MJ/kg-water (มุस्ताฟา ยะฟา, 2537) 20.01 – 24.37 MJ/kg-water (Tirawanichakul et al., 2005) 3.87 – 4.42 MJ/kg-water (Jittanit, Saeteaw, & Charoenchaisri, 2010) และ 6.63 (Sarker, Ibrahim, Ab Aziz, & Punan, 2014)
แบบกังหัน (Rotary dryer)	การหมุนของกังหัน เพื่อโรยเมล็ดวัสดุให้ สัมผัสกับอากาศร้อน (cross flow)	มีค่าในช่วง 2.64 ถึง 10.07 MJ/kg-water และ 10.07 MJ/kg-water (กิตติพงษ์ กุลมัตย์, 2537) และ 4.6 – 9.2 MJ/kg-water (Havlik et al., 2020) 2.64-7.48 MJ/kg-water (Firouzi et al., 2017)
แบบหล่นอิสระ (Free-fall dryer)	- การไหลของอากาศ ร้อนสวนทางกับเมล็ด พืชในแนวดิ่งจากที่สูง (parallel flow)	มีค่าในช่วง 0.83 ถึง 6.32 MJ/kg-water 2.92 ถึง 6.32 MJ/kg-water (เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว et al., 2551, 15-17 ตุลาคม) และช่วง 2- 4 MJ/kg-water (Meesukchaosumran & Chitsomboon, 2018) และ 0.83 - 2.32 MJ/kg-water (Kaensup et al., 2006)

ตาราง 4 (ต่อ)

ชื่อเครื่องอบแห้ง (Types of dryers)	ลักษณะการทำงาน	การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ (งานวิจัยอ้างอิง)
แบบท่อหรือแบบพาหะลม (Pneumatic dryer)	- การไหลของเมล็ดพืชตามทิศทางการไหลของอากาศร้อน (parallel flow)	มีค่าในช่วง 1.78 ถึง 10.41 MJ/kg-water สำหรับหอบแห้งชนิดท่อเรียบ และ 1.78 ถึง 3.09 MJ/kg-water สำหรับหอบแห้งชนิดท่อเกลียว (ฉัตรชัย นิยมล, 2555) และ 1.6 MJ/kg-water (ปิยะพล และคณะ, 2016) และช่วง 7.25-10.41 MJ/kg-water (Krawee Treeamnuk, Tawarat Treeamnuk, Jittrarat Jekkew, & Jaito, 2017)
แบบกระแสน (Impinging dryer)	กระแสนอากาศร้อน 2 กระแสนมาชนกัน โดย 1 ใน 2 กระแสนอากาศร้อนจะเป็นตัวพาเมล็ดวัสดุเข้าสู่ตัวเครื่อง (parallel flow)	มีค่าในช่วง 8.5-11.99 MJ/kg-water (สัณณ เทพหัสดิน ณ อยุธยา & ฉัตรชัย นิยมล, 2552) และ 8.5 MJ/kg-water (Kumklam et al., 2020) 8.92 – 11.99 MJ/kg-water (Tirawanichakul et al., 2005)
แบบสปอตเทดเบด (Spouted bed dryer)	กระแสน้ำเจ็ดของของไหลไหลผ่านเข้าเบด ผลักดันให้เมล็ดพืชลอยตัวขึ้นตามแนวแกนของภาชนะ (parallel flow)	มีค่าในช่วง 1.62-58.0 MJ/kg-water 1.62 ถึง 4.06 MJ/kg-water (Wachiraphansakul & Devahastin, 2007) 6.9 – 58.0 MJ/kg-water (Jittanit et al., 2013)

จากงานวิจัยที่ดำเนินการอบแห้งหรือลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้งชนิดต่าง ๆ รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของการอบแห้ง เพื่อลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำออกจากเมล็ดพืชและเป็นการตรวจสอบประสิทธิภาพและความคุ้มค่าการใช้พลังงานต่อการดำเนินการอบแห้งของเครื่องอบแห้งชนิดต่าง ๆ ที่มีความแตกต่างกันในลักษณะการทำงาน

ของเครื่องอบแห้ง ซึ่งสามารถเปรียบเทียบลักษณะการไหลของอากาศร้อนและเมล็ดพืชหรือลักษณะการทำงาน และการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ ดังตาราง 4 และ 5

การเพิ่มประสิทธิภาพของการอบแห้งรวมถึงการประหยัดพลังงาน

ส่วนนี้เป็นงานวิจัยที่กล่าวถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของการอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การเปลี่ยนพื้นที่ผิวที่อบแห้งแบบเรียบเป็นแบบกรวย และการควบคุมจังหวะการป้อนกระแสอากาศ ทำให้การอบแห้งประหยัดพลังงานลงไป ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ในปี 2555 ฉัตรชัย นิยมล ได้ศึกษาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม โดยในงานวิจัยได้เปรียบเทียบอบแห้งจากเดิมเป็นแบบเรียบเป็นแบบกรวย เพื่อเพิ่มความปั่นป่วนในการไหลของอากาศ ทำให้สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้ถึง 4.4-10.3% db ความชื้นฐานแห้ง ในระยะเวลา 5 วินาที อีกทั้งยังพบว่าค่า SEC ของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ต่ำสุดมีค่า 1.78 MJ/kg_{water} เมื่อใช้หอบแห้งแบบกรวยที่อุณหภูมิ 100 °C ความเร็วของอากาศ 30 m/s และอัตราการป้อนข้าวเปลือก 150 kg_{dry solid}/h (ฉัตรชัย นิยมล, 2555) ต่อมาในปี 2557 ฉัตรชัย นิยมล ศึกษาการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรด้วยเจ็ตสเปาเต็ดเบดเป็นจังหวะ วัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์แนวคิดการอบแห้งเป็นจังหวะเข้ากับเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาเต็ดเบด ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิอบแห้ง และรูปแบบการอบแห้งที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งพริกไทย และความสัมพันธ์พลังงานในกระบวนการอบแห้ง รวมถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ รูปแบบการอบแห้งเป็นจังหวะที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือการจ่ายพลังงานความร้อนเข้า และจ่ายอากาศสู่ระบบเป็นช่วง ๆ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้แนวคิดการอบแห้งเป็นจังหวะที่เหมาะสมกับเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาเต็ดเบดสามารถลดการใช้พลังงานในการอบแห้งลงได้ 30% (ฉัตรชัย นิยมล, 2557) และในปี 2560 (Bolaji, Olayanju, & Falade, 2011) ได้ศึกษาการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและอัตราการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่เพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องด้วยการติดตั้งท่อลมแบบไซโคลนกับแบบท่อปกติในการทดสอบใช้ข้าวหอมมะลิ 105 จำนวน 40 kg โดยใช้เงื่อนไขการอบแห้งใช้อุณหภูมิอากาศร้อน 80 °C ที่อัตราการไหลของอากาศ 0.0512 m³/s โดยในท่อแบบติดตั้งไซโคลนมีการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเป็น 7.25 MJ/kg water removed และในปีเดียวกัน (โสทรภา แฉิงการ) ได้พัฒนาและวิจัยเพื่อการปรับปรุงเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระในรูปแบบวิทยานิพนธ์ที่ได้แยกส่วนงานวิจัยออกเป็น 5 ส่วน คือการปรับปรุงเครื่องให้มีระบบลำเลียงเพื่อการทำงานอย่างต่อเนื่อง การหาแบบจำลองการอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น รหัสวิธีเชิงพันธุกรรม วิธีการเชิงตัวเลข และการวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติ การดำเนินการอบแห้งกำหนดเงื่อนไขการอบแห้งที่ความเร็วอากาศอบแห้ง

คงที่เท่ากับ 2 m/s อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100, 130 และ 150 °C และอัตราการไหลของข้าวเปลือกที่ 52.4 kg/min และช่วงพักระหว่างรอบการอบแห้ง 1 นาที การใช้การพักระหว่างการอบแห้งนี้เนื่องจากเครื่องอบแห้งประเภทนี้มีจุดเด่นในด้านการลดความชื้นที่ผิวได้อย่างรวดเร็วแต่เนื่องจากการใช้อุณหภูมิอากาศร้อนสูงทำให้เกิดความเครียดและเกิดการแตกร้าวภายในซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ (Meesukchaosumran & Chitsomboon, 2018) ที่ได้รายงานว่าการพักระหว่างรอบการผลิตมากกว่า 1 นาทีจะสามารถเพิ่มค่าร้อยละของข้าวเต็มเมล็ดได้ อีกทั้งรายงานของ (จักรชัย นิยมล, 2557) ที่มีการให้ความร้อนเป็นจังหวะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งได้ นอกจากนี้ผลงานวิจัยที่ได้ทดสอบเมื่อนำไปเทียบกับการสร้างแบบจำลองและสร้างโปรแกรมจำลองการอบแห้งได้ผลใกล้เคียงกับการทดลองข้างต้น

ข้อได้เปรียบและการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งแบบมัลติโฟล

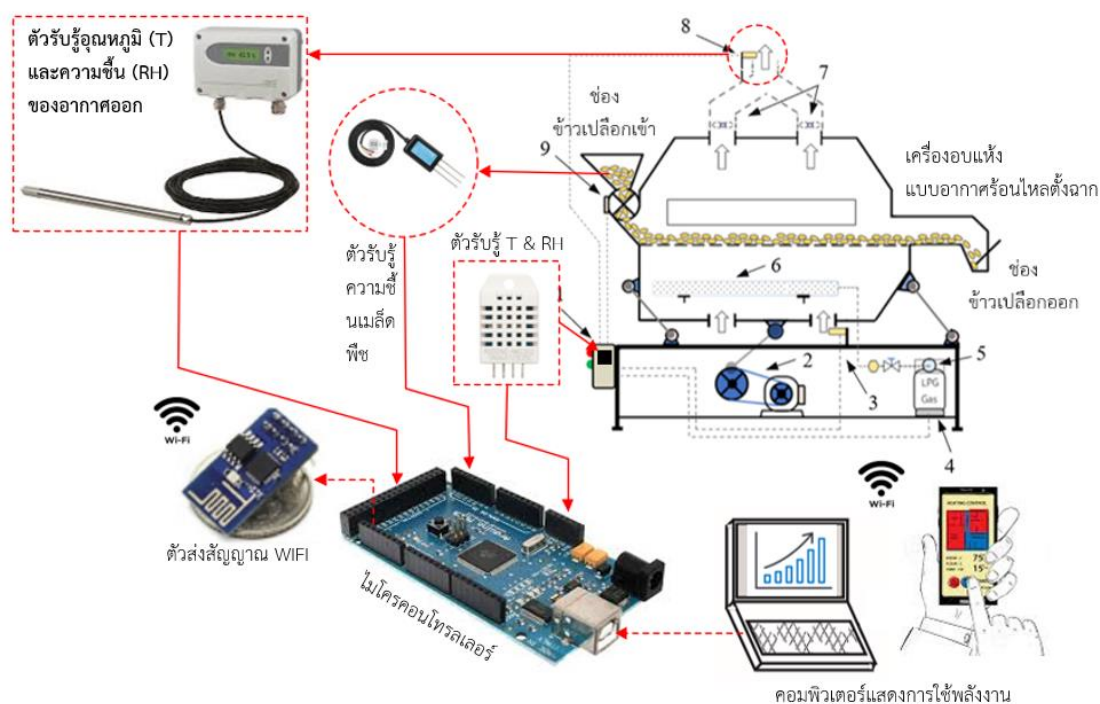
จากลักษณะการไหลของอากาศร้อนในทิศทางขนานกับทิศทางของเมล็ดพืช (parallel flow) และบางชนิดมีทิศทางการไหลของอากาศร้อนขวางหรือตั้งฉากกับทิศทางของเมล็ดพืช (cross flow) ในส่วนนี้ทำให้เกิดความได้เปรียบในการถ่ายเทความร้อน นอกจากนี้ในด้านการบังคับให้เมล็ดพืชเคลื่อนตัวผ่านห้องอบแห้งมีเครื่องอบแห้งบางแบบใช้กระแสอากาศผลักดันให้เกิดการไหลของเมล็ดพืชผ่านห้องอบแห้ง เช่น เครื่องอบแห้งแบบท่อหรือแบบพาหะลม เครื่องอบแห้งแบบกระแสน และเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด เป็นต้น ทำให้ใช้พลังงานส่วนหนึ่งไปกับมอเตอร์พัดลมอัดอากาศนอกจากพลังงานที่ใช้กับการสร้างความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าหรือเชื้อเพลิง อีกทั้งเครื่องอบแห้งบางแบบใช้การหมุนของถังอบแห้งเพื่อยกเมล็ดพืชและโปรยลงแบบต่อเนื่อง เช่นเครื่องอบแห้งแบบถังหมุน ทำให้ใช้พลังงานในส่วนมอเตอร์ที่น้อยกว่า

ทำให้มีผู้วิจัยได้ผสมผสานหลักการบางส่วนและสร้างเครื่องอบแห้งแบบมัลติโฟลขึ้นที่มีลักษณะการไหลของทิศทางอากาศร้อนขวางกับทิศทางการไหลของเมล็ดพืช (cross flow) และในส่วนของการเคลื่อนตัวของเมล็ดพืชใช้การเขย่าห้องอบแห้งเพื่อให้เมล็ดพืชลอยตัวและเคลื่อนที่ผ่านห้องอบแห้งสามารถลดการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้าลงได้

วิธีการควบคุมการลดความชื้นของเครื่องอบแห้งและแนวทางประยุกต์

งานวิจัยที่กล่าวถึงวิธีการควบคุมการอบแห้งแบบต่าง ๆ โดยในปี 2543 (Temple, Tambala, & van Bostel, 2000) ตามการรายงานการศึกษาได้มีการพัฒนาใช้การบันทึกข้อมูล เพื่อดูและติดตามควบคุมสายการผลิตผลิตภัณฑ์ชาและประยุกต์ใช้แบบจำลองสำหรับพัฒนาการควบคุมแบบใหม่ ต่อมาในปี 2559 สุรัชย์ เหมหิรัญ และประชา บุญยวานิชกุล ได้นำเสนอวิธีการควบคุมการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบต่างๆ โดยเสนอปัญหาที่พบในการอบแห้ง และตรวจสอบถึงวิธีการควบคุมที่จะสามารถใช้ควบคุมได้แบ่งได้ 4 แบบ คือ การควบคุมแบบ บ้อนกลับ การควบคุมแบบบ้อนไปด้านหน้า การควบคุมตรรกศาสตร์คลุมเคลือ และการควบคุม โครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งวิธีในการควบคุมดังกล่าวได้มีการวิจัยและนำไปประยุกต์ใช้กับการ ควบคุมการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ อาทิ เช่น เครื่องอบแห้งแบบสายพาน เครื่อง อบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด และเครื่องอบแห้งแบบหมุน จากการศึกษาพบว่าการประยุกต์ใช้วิธีการ ควบคุมการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบต่างๆ นั้นสามารถแก้ปัญหาในการอบแห้งดังนี้ (รักษา ความชื้นสุดท้ายของวัสดุได้ตามต้องการ ลดการใช้พลังงาน และลดระยะเวลาเมื่อความชื้นของวัสดุ มีการเปลี่ยนแปลง (สุรัชย์ เหมหิรัญ & ประชา บุญยวานิชกุล, 2560) งานวิจัยที่เป็นแนวทางในการ ประยุกต์ใช้การควบคุมที่มีการปรับแต่งค่าอัตราขยายให้สอดคล้องกับความต้องการของระบบ เพื่อให้สามารถทนต่อการถูกรบกวน (disturbance) โดยในปี 2554 Surachai Hemhirun and Annop Ruangwiset ได้นำเสนอวิธีการควบคุมที่สามารถควบคุมการเปลี่ยนทิศทางของ เฮลิคอปเตอร์ขนาดเล็กขณะเกิดลมปะทะในงานวิจัยนี้ได้ใช้การปรับแต่งตัวควบคุมแบบ PD-Control ที่มีค่าอัตราขยาย K_p และ K_d คงที่จนสามารถเปลี่ยนทิศทางของเฮลิคอปเตอร์ขนาดเล็ก ได้ตามต้องการ จากนั้นนำการควบคุมนี้ไปทดสอบขณะเกิดลมปะทะในทิศทางต่างๆ จนได้ข้อ มูลค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวของการเปลี่ยนทิศทางของเฮลิคอปเตอร์ และได้เติมการ ควบคุมแบบ I-Control ที่มีค่าอัตราขยาย K_i คงที่ ทำให้ช่วยลดค่าความผิดพลาดจากสภาวะของลม สุดท้ายผู้วิจัยได้ใช้เงื่อนไขการเติมการควบคุมแบบ I-Control ตามข้อมูลค่าความผิดพลาดใน สถานะอยู่ตัวข้างต้น โดยใช้การควบคุมแบบปิด-เปิด (on-off control) เข้ามาช่วยในกรณีที่ต้องการ เปลี่ยนทิศทางของเฮลิคอปเตอร์ในสภาวะที่มีลมปะทะ (Surachai & Annop, 2011, September 13-18) ซึ่งสามารถนำเอาเทคนิควิธีการนี้มาใช้ในการตัดสินใจในการควบคุมพารามิเตอร์ของ กระบวนการในระหว่างการดำเนินการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งชนิดนี้ ซึ่งมีแนวทางเช่นเดียวกับการใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายพารามิเตอร์ที่เหมาะสมดังเช่นผู้วิจัยที่ได้รายงาน ในปี 2563 (Kalathingai, Basak, & Mitra, 2020) และในปีเดียวกันได้มีนักวิจัย (Dürr, Seidel,

Neugebauer, & Bück, 2020) รายงานการศึกษาการปรับการควบคุมสำหรับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชด์แบบต่อเนื่อง และนอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่สนับสนุนให้มีการส่งข้อมูลระหว่างการดำเนินการอบแห้งและบันทึกข้อมูลเพื่อนำไปแสดงประสิทธิภาพและการใช้พลังงานอีกด้วย ดังแสดงแนวทางในการพัฒนาเครื่องอบแห้ง ดังภาพประกอบ 25



ภาพประกอบ 25 การรับ-ส่งข้อมูลสถานะของเครื่องอบแห้ง

บทที่ 3

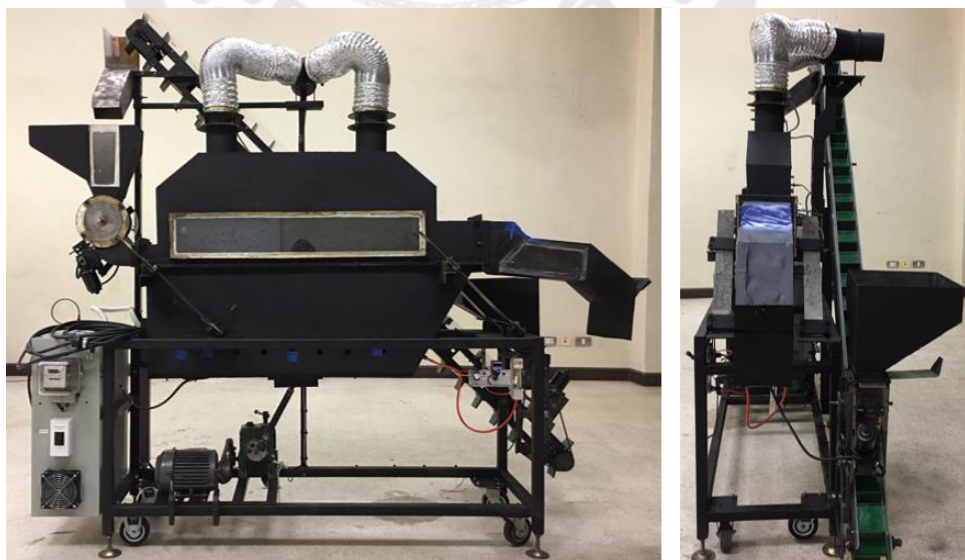
วิธีดำเนินการวิจัย

เนื่องจากการดำเนินการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งมีความซับซ้อนในการปรับตั้ง ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจำเป็นต้องอาศัยความรู้และประสบการณ์ เพื่อให้สามารถลดความชื้นของเมล็ดพืชให้มีความชื้นตามที่เกษตรกรต้องการ ดังนั้นผู้วิจัยมีความสนใจที่จะปรับปรุงและพัฒนา ระบบควบคุมของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัลติฟอยล์ โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

1. ข้อมูลเฉพาะของเครื่องอบแห้งแบบมัลติฟอยล์
2. การปรับปรุงชุดอุปกรณ์ส่วนควบของเครื่องอบแห้ง
3. การทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง
4. การนำเสนอผลลัพธ์การทดสอบ

ข้อมูลเฉพาะเครื่องอบแห้งแบบมัลติฟอยล์

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัลติฟอยล์ โดยโครงสร้างของเครื่องอบแห้ง สร้างจากเหล็กกล่องขนาด 2 x 2 นิ้ว ดังภาพประกอบ 26 แสดงภาพด้านหน้าและด้านข้างของ เครื่องอบแห้ง และมีพื้นที่ห้องอบแห้งมีขนาด (กว้าง x ยาว) เป็น 150 x 1,000 มิลลิเมตร



ภาพประกอบ 26 เครื่องอบแห้งแบบมัลติฟอยล์ ที่ได้พัฒนา

โดยข้อมูลเฉพาะของเครื่องอบแห้งประกอบด้วยข้อมูลอุปกรณ์ส่วนควบและช่วงพารามิเตอร์ที่สามารถทำงานได้ ถูกแสดงดังตาราง 6

ตาราง 5 ข้อมูลเฉพาะของเครื่องอบแห้งแบบมัลติโฟล

ข้อมูลอุปกรณ์ส่วนควบ	ช่วงพารามิเตอร์ของเครื่องอบแห้ง
ขนาดเครื่องอบแห้ง (กว้าง x ยาว x สูง)	อัตราการป้อนเมล็ดพืช
400 x 1,400 x 1,800 mm.	ความเร็วรอบของโรตารีวาล์ว 2-6 RPM
พื้นที่อบแห้ง (กว้าง x ยาว)	อัตราการไหลของอากาศร้อน
150 x 1,000 mm หรือ (0.15 m ²)	0.02-0.05 m ³ /s
ชุดปรับการป้อนเมล็ดพืช ประกอบด้วย โรตารีวาล์ว ขนาด 6 in มอเตอร์ขับเคลื่อนใช้ ขนาด 12 VDC กินกระแส 0.5 A	อุณหภูมิอากาศร้อน: 80-140 °C
ชุดปรับการไหลของอากาศ ประกอบด้วย พัดลมแบบอากาศไหลตามแกนพร้อมติดตั้งมอเตอร์ ขนาด 24 VDC กินกระแส 0.25 A	การเคลื่อนตัวของเมล็ดพืช:ปรับความเร็ว รอบของชุดเยื้องศูนย์กลาง 118-120 rpm
ชุดสร้างอากาศร้อน ประกอบด้วย หัวเตาเผาแบบอินฟราเรด ทำงานที่ความดัน 3-4 kPa ทำงานร่วมกับกล่องควบคุม ขนาด 230/16 kV และแกนนีล็คโทรด	
ชุดบังคับการเคลื่อนตัวของเมล็ดพืช หรือ ชุดเขย่า ห้องอบแห้งด้วยการสั่น ประกอบด้วย มอเตอร์กระแสสลับขนาด ½ hp, 220 VAC ขับเคลื่อนทำงานร่วมกับ	

การปรับปรุงชุดอุปกรณ์ส่วนควบของเครื่องอบแห้ง

การปรับปรุงและพัฒนาให้เครื่องอบแห้งแบบมัลติฟีดมีระบบการควบคุมจะช่วยให้ลดความซับซ้อนในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ในระหว่างดำเนินการอบแห้งที่ปรับตั้งการทำงานด้วยมือ โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์ที่สามารถปรับการทำงานด้วยไฟฟ้า เช่น อุปกรณ์ป้อนเมล็ดพืช อุปกรณ์บังคับการไหลของอากาศร้อน อุปกรณ์บังคับการเคลื่อนตัวของเมล็ดพืชผ่านห้องอบแห้ง และอุปกรณ์สร้างอากาศร้อน มีรายละเอียดดังนี้

1. อุปกรณ์ป้อนเมล็ดพืช (rotary feed valve) ทำหน้าที่ลำเลียงเมล็ดข้าวเปลือกเข้าสู่ห้องอบแห้ง ดังภาพประกอบ 27 การทำงานของอุปกรณ์ป้อนเมล็ดพืช ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ โรตารีวาล์ว (rotary valve) และมอเตอร์ไฟฟ้าแบบกระแสตรง (DC-motor) ซึ่งแกนหมุนของโรตารีวาล์ว หรือแกนโรเตอร์ (rotor) จะถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบกระแสตรงผ่านการส่งถ่ายกำลังการหมุนด้วยโซ่ ดังนั้นการปรับแรงดันไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ (motor drive board) รุ่น SE-HB-100 (รายละเอียดการใช้งานดังภาคผนวก ง) ซึ่งสามารถหาอัตราการเชิงมวลผ่านอุปกรณ์ป้อนเมล็ดพืชได้ดังสมการที่ 3.1



ภาพประกอบ 27 ชุดปรับอัตราการป้อนเมล็ดพืช (rotary feed valve set)

1.1 อัตราการป้อนเมล็ดพืชเชิงมวล

$$\dot{m}_s = \rho_p V_n N \eta \times 60 \quad (3.1)$$

เมื่อ $\dot{m}_s$ คือ อัตราการป้อนเมล็ดพืช, kg/h

ρ_p คือ ความหนาแน่นของเมล็ดพืช, kg/m³

- V คือ ปริมาตรของหนึ่งช่องโรทารีวาล์ว, m^3
 n คือ จำนวนของช่องของโรทารี, (8 ช่อง)
 N คือ ความเร็วรอบการหมุนของโรทารีวาล์ว, rpm
 η คือ ประสิทธิภาพการเติมลงช่องโรทารีวาล์ว, decimal

2. ชุดปรับการไหลของอากาศร้อน (hot air outlet set) ทำหน้าที่บังคับให้อากาศร้อนจากห้องอากาศร้อน (hot air chamber) ไหลผ่านชั้นข้าวเปลือกที่มีความขึ้นบนแผ่นกระจายความร้อน (distributor plate) ภายในห้องอบแห้งและดูดอากาศร้อนออกทางช่องทางออก (air outlet) ขนาด 4 นิ้ว ด้วยพัดลมดูดอากาศ ขนาด 24 โวลต์ ดังภาพประกอบ 28 ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราการไหล ได้ 2 ลักษณะ คือการไหลเชิงปริมาตร และเชิงมวลของอากาศร้อนได้ดังสมการ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

2.1 การไหลเชิงปริมาตร

$$\frac{\text{volume flow rate}}{\text{time}} : Q = \frac{V_{\text{air}}}{t} = \frac{As}{t} = Av \quad (3.2)$$

2.2 การไหลเชิงมวล

$$\frac{\text{mass flow rate}}{\text{time}} : \dot{m} = \frac{m}{t} = \frac{\rho V_{\text{air}}}{t} = \frac{\rho As}{t} = \rho Av \quad (3.3)$$

เมื่อ	Q	คือ	อัตราการไหลของอากาศร้อนเชิงปริมาตร, m^3/h
	V_{air}	คือ	ปริมาณการไหลของอากาศร้อน, m^3
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดท่อระบายอากาศร้อน, m^2
	s	คือ	ระยะทางการเคลื่อนที่ของอากาศร้อน, m
	v	คือ	ความเร็วการไหลของอากาศร้อน, m/s
	ρ_a	คือ	ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m^3
	t	คือ	เวลา, s



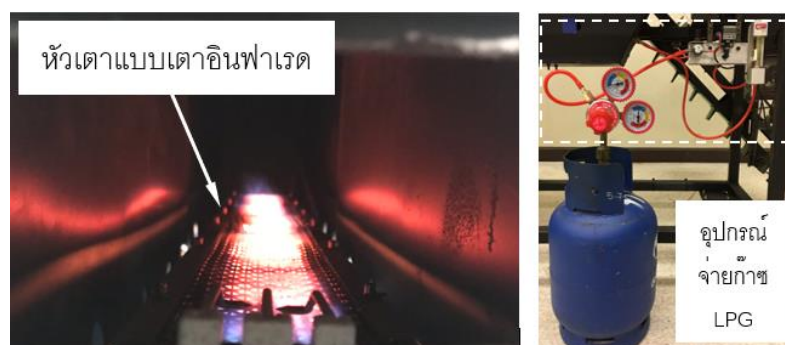
ภาพประกอบ 28 ชุดปรับการไหลของอากาศร้อน (hot air outlet set)

3. ชุดบังคับการเคลื่อนตัวของเมล็ดพืช (eccentric set) ทำหน้าที่บังคับให้เมล็ดข้าวเปลือกจากทางเข้า (paddy inlet) เคลื่อนที่ผ่านห้องอบแห้งบนแผ่นกระจายความร้อนตามความยาวของห้องอบแห้ง โดยการบังคับให้โครงเครื่องอบแห้งที่รองรับด้วยสปริงแบบแผ่น (leaf spring) เกิดการเขย่าตัวไปมาในระนาบ x-y ด้วยชุดก้านส่งกำลังต่อเข้ากับแกนหมุนเยื้องศูนย์กลาง ทั้งนี้การหมุนของแกนหมุนเยื้องศูนย์กลางมีอัตราทดเป็น 10:1 ที่ต่อกับต้นกำลังเป็นมอเตอร์ 1 เฟส ขนาด $\frac{1}{2}$ แรงม้า รายละเอียดดังภาพประกอบ 29



ภาพประกอบ 29 ชุดบังคับการเคลื่อนตัวของเมล็ดพืช (eccentric set)

4. ชุดสร้างอากาศร้อน (hot air generator set) ทำหน้าที่สร้างอากาศร้อนจากการสันดาประหว่างก๊าซปิโตรเลียมเหลว (liquefied petroleum gas: LPG) กับอากาศด้วยหัวเตาแบบอินฟราเรด (infrared gas burner) ที่ความดัน 3-6 กิโลปาสกาล (kPa) ดังภาพประกอบ 30



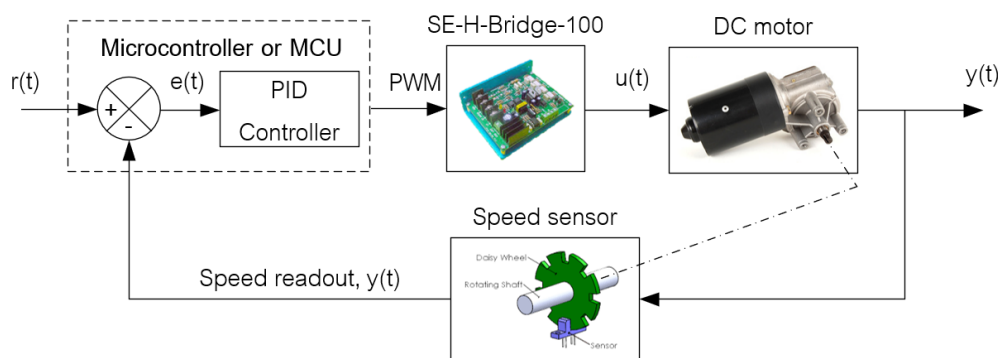
ภาพประกอบ 30 ชุดสร้างอากาศร้อน (hot air generator set)

การพัฒนาระบบควบคุมของชุดอุปกรณ์ส่วนควบ

เนื่องจากเครื่องอบแห้งแบบมัลติฟิลมีความซับซ้อนในการปรับตั้งเครื่องและปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในหลายตัวแปรให้สอดคล้องกับปริมาณความชื้นเริ่มต้น (IMC) ของเมล็ดพืชที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละรอบของการผลิต (การอบแห้ง) เพื่อให้ผลการดำเนินการอบแห้งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ และจากผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการอบแห้ง ดังที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 2 ผู้วิจัยลำดับความสำคัญของชุดอุปกรณ์ส่วนควบที่ต้องพัฒนาระบบควบคุมมี 2 ชุดอุปกรณ์ คือ ชุดปรับการป้อนของเมล็ดพืช และชุดปรับการไหลของอากาศร้อน โดยการพัฒนาระบบควบคุมส่วนควบนี้ให้มีระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback control) มีรายละเอียด ดังนี้

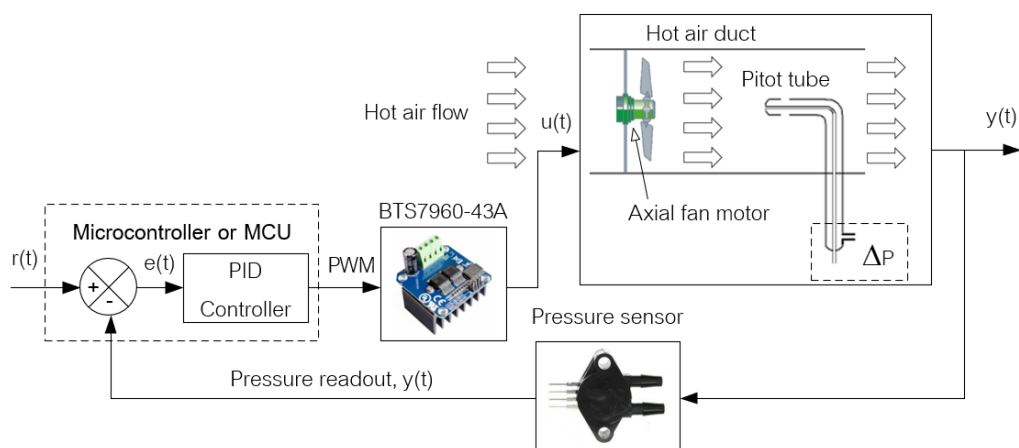
1. ชุดปรับการป้อนของเมล็ดพืช หรือการควบคุมความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วเพื่อป้อนเมล็ดพืช (speed controller of grain feeder) เริ่มจากการติดตั้งตัวรับรู้ความเร็วรอบการหมุน (speed sensor) เข้ากับแกนโรตารีวาล์ว (rotary valve) และป้อนกลับสัญญาณความเร็วรอบนี้ (speed feedback, $y(t)$) เปรียบเทียบกับค่าสัญญาณความเร็วรอบที่ต้องการ (speed reference signal, $r(t)$) ด้วยการเปรียบเทียบสัญญาณ (comparator) ภายในชิปประมวลผลคอมพิวเตอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller หรือ MCU) จะมีขั้นตอนวิธี (algorithm) ของระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID-control) ได้สัญญาณ PWM ส่งงานตัวควบคุมมอเตอร์ (motor driver: SE-Bridge-100) และเกิดสัญญาณควบคุม (control signal, $u(t)$) ส่งไป

ยังมอเตอร์ควบคุมการหมุนของโรตารีวาล์วต่อไป ดังแสดงแผนผังกล่องควบคุมระบบป้อนกลับ (block diagram of a feedback control system) ดังภาพประกอบ 31



ภาพประกอบ 31 ระบบควบคุมความเร็วรอบการป้อนเมล็ดพืช

2. ชุดปรับการไหลของอากาศร้อน หรือการควบคุมการไหลของอากาศร้อน (hot air flow rate controller) จากการติดตั้งท่อปีโตต์ (pitot tube) ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดการไหลของอากาศ (flow measurement) สามารถวัดความดันแตกต่าง (differential pressure, ΔP) โดยค่าความดันแตกต่างถูกนำไปแปลงผลเป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยตัวรับรู้ความดัน (pressure sensor) รุ่น MPX10DP จากนั้นส่งสัญญาณป้อนกลับ (pressure readout, $y(t)$) เข้าสู่ชิปประมวลผลคอมพิวเตอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller หรือ MCU) เพื่อแปลงค่าสัญญาณไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของความเร็วการไหลของอากาศ จากนั้นเปรียบเทียบกับสัญญาณการไหลของอากาศที่ต้องการ (reference signal, $r(t)$) ร่วมกับขั้นตอนวิธี (algorithm) ของระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID-control) ได้สัญญาณ PWM สั่งงานตัวควบคุมมอเตอร์ (motor driver: BTS7960-43A) ได้สัญญาณควบคุม (control signal, $u(t)$) ส่งไปยังมอเตอร์พัดลมดูดอากาศ (axial fan motor) ต่อไป ดังแสดงแผนผังกล่องควบคุมระบบป้อนกลับ (block diagram of a feedback control system) ดังภาพประกอบ 32



ภาพประกอบ 32 ระบบควบคุมการไหลของอากาศร้อน

การทดสอบระบบควบคุมของเครื่องอบแห้ง

เนื่องจากการดำเนินการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งนั้นต้องอาศัยความรู้และประสบการณ์ของผู้ควบคุมในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์หรือตัวแปรต่าง ๆ ที่ทำให้ผลของการอบแห้งข้าวเปลือกเป็นไปตามความต้องการ ดังนั้นผู้วิจัยจึงพัฒนาระบบการควบคุมอัตโนมัติของเครื่องอบแห้งจะช่วยส่งเสริมให้เกษตรกรผู้ปลูกข้าวนำข้าวเปลือกภายหลังการเก็บเกี่ยวมาลดความชื้นหรืออบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งเพื่อให้ข้าวเปลือกมีความชื้นอยู่ในระดับที่สามารถนำไปจำหน่ายให้กับโรงสีข้าวตามข้อกำหนดของกรมการค้าภายใน ผู้วิจัยดำเนินการทดสอบตามรายละเอียดในหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

อุปกรณ์และเครื่องมือวัด (equipment and measuring Instrument)

การศึกษาสมรรถนะของระบบควบคุมในด้านการดำเนินการอบแห้งจำเป็นต้องทราบข้อมูลสภาวะต่าง ๆ ต้องอาศัยเครื่องมือวัดดังภาพประกอบ 33 และ 34



ภาพประกอบ 33 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ และเครื่องวัดความเร็วอากาศ

จากภาพประกอบ 33 (ก) แสดงจุดติดตั้งหัววัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิลแบบเค (thermocouple type K) ทั้งหมดจำนวน 10 จุด แบ่งออกเป็น 5 จุด ตามความยาวห้องอบแห้ง และอีก 5 จุด ตามความยาวห้องอากาศร้อน สายของเทอร์โมคัปเปิลต่อเข้ากับเครื่องวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิ ยี่ห้อ Yokogawa ความละเอียด 0.1°C และภาพประกอบ 33 (ข) แสดงจุดติดตั้งท่อปีโตต์ (pitot tube) ที่ทางออกของอากาศร้อนของเครื่องอบแห้งและอ่านค่าความดันแตกต่างด้วยเครื่องวัดความเร็วของอากาศ ยี่ห้อ fluke รุ่น FKS 1DP-PBM สามารถวัดความดันช่วง $\pm 1.2 \text{ kPa}$ ความแม่นยำที่ 25°C เป็น $\pm 0.1\%$



ภาพประกอบ 34 เครื่องมือวัดความชื้นเมล็ดพืช ความชื้นอากาศและเครื่องชั่งน้ำหนัก

จากภาพประกอบ 34 (ก) แสดงเครื่องมือวัดความชื้นของเมล็ดพืชแบบปิด (grain moisture tester) ยี่ห้อ KETT รุ่น Riceter F-512 การทำงานใช้ระบบการต้านทานกระแสไฟฟ้า (electric resistance) สามารถวัดความชื้นข้าวเปลือกได้ในช่วง 10.0-35.0 % ความแม่นยำ 0.5% ภาพประกอบ 34 (ข) เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ยี่ห้อ Lutron รุ่น HT-3009 มีความละเอียดของการวัดอุณหภูมิ 0.01°C และความชื้นสัมพัทธ์ $0.01\% \text{RH}$ และ ภาพประกอบ 34 (ค) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลแบบตั้งพื้น ยี่ห้อ OHAUS รุ่น D31P150BL มี พิกัด 150 kg ค่าความละเอียด 0.01 kg

การเตรียมตัวอย่างก่อนการทดสอบ

การทดสอบใช้เมล็ดพืชข้าวเปลือกเจ้าพันธุ์ กข 29 (ชัณษาท 80) หรือข้าวพันธุ์ชัณษาท ที่ปลูกในพื้นที่ภาคเหนือตอนล่างเป็นข้าวอายุสั้นปลูกได้ปีละ 3 ครั้ง ในการทดสอบ การเตรียม ตัวอย่างข้าวเปลือกอ้างอิงตามงานวิจัย (ประชา บุญยวานิชกุล, 2556, มกราคม-มิถุนายน) ที่ได้ เสนอกระบวนการเตรียมตัวอย่างอ้างอิง ดึงนี้นำข้าวเปลือกที่ได้จากการเก็บเกี่ยวมาทำความสะอาด คัดแยกสิ่งเจือปน และข้าวเมล็ดลีบออก จากนั้นทำการวัดปริมาณความชื้นในเมล็ด ข้าวเปลือกด้วยเครื่องมือวัดความชื้นแบบความต้านทาน สามารถแยกความชื้นของข้าวเปลือก ภายหลังการเก็บเกี่ยวได้ 3 ช่วงระดับ (ความชื้นฐานเปียก) ดังนี้

- 1) ระดับความชื้นต่ำ ความชื้น 18-19 %wb
- 2) ความชื้นปานกลาง 20-21%wb
- 3) ความชื้นสูง 22-23 %wb

กรณีความชื้นต่ำกว่าและเกินกว่า 3 ช่วงระดับ ดังที่กล่าวมาจะดำเนินการดังนี้ กรณีระดับความชื้นมีระดับต่ำกว่าใช้การคำนวณปริมาณน้ำกลั่นที่ต้องเติมเข้าไปในข้าวเปลือกและคลุกเคล้าข้าวเปลือกให้ทั่วและบรรจุในภาชนะปิด เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 2-5 °C เช่นเดียวกับผู้วิจัย (Tohidi, Sadeghi, & Torki-Harchegani, 2017) และกรณีความชื้นมีระดับสูงกว่าใช้การผึ่งในลานหรือใช้การอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศร้อน 60 °C ให้ระดับความชื้นลดลง จากนั้นทำการเก็บรักษาดังภาพประกอบ 35



ภาพประกอบ 35 การเตรียมและการบรรจุข้าวเปลือกเพื่อปรับความชื้น

การทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบมัสทโฟล

การทดสอบการอบแห้งตามขอบเขตของปริญญานิพนธ์มีขั้นตอนในการทดสอบการอบแห้งด้วยการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์คงที่ (กำหนดเงื่อนไขการทดลอง) โดยกำหนดตัวแปรควบคุม, ตัวแปรต้น และตัวแปรตามดังต่อไปนี้

ตัวแปรควบคุม คือ การดำเนินการอบแห้งปริมาณความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก (initial moisture content, IMC) ช่วง 20-21 % (ความชื้นฐานเปียก), อุณหภูมิห้องอากาศร้อนเฉลี่ย 130 องศาเซลเซียส (°C) และความเร็วยรอบการหมุนของชุดเขย่าห้องอบแห้ง (eccentric set) เฉลี่ย 110 rev/min ในแต่ละรอบการทดสอบใช้ข้าวเปลือกจำนวน 7 กิโลกรัม ดังภาพประกอบ 36 และภาพประกอบ 37 และดำเนินการอบแห้งแบบต่อเนื่อง



ภาพประกอบ 36 การเตรียมวัสดุก่อนการทดสอบ



(a)



(b)

ภาพประกอบ 37 เครื่องมือวัดความชื้น

ตัวแปรต้น คือ การปรับตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ส่วนควบ แบ่งออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

- 1) กรณี ปรับตั้งพารามิเตอร์ชุดควบคุมการความเร็วของอากาศออกจากห้องอบแห้งเป็น เป็น 2.0 m/s, 2.5 m/s และ 3.0 m/s ตามลำดับ และปรับตั้งพารามิเตอร์ชุดควบคุมความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วคงที่ เป็น 2.0 rpm
- 2) กรณี ปรับตั้งพารามิเตอร์ชุดควบคุมการความเร็วของอากาศ หรืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ) เป็น 2.0 m/s, 2.5 m/s และ 3.0 m/s ตามลำดับ และปรับตั้งพารามิเตอร์ชุดควบคุมความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วคงที่ เป็น 4 rpm

3) กรณี ปรับตั้งพารามิเตอร์ชุดควบคุมความเร็วของอากาศ หรืออัตรา
การไหลเชิงปริมาตรของอากาศ) เป็น 2.0 m/s, 2.5 m/s และ 3.0 m/s ตามลำดับ และปรับตั้ง
พารามิเตอร์ชุดควบคุมความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วคงที่ เป็น 6 rpm

ตัวแปรตาม คือ ศักยภาพของอุณหภูมิ (Temperature outlet, T_o) และความชื้น
สัมพัทธ์(Relative humidity outlet, RH_o) ของอากาศร้อนที่ไหลออกจากห้องอบแห้งขณะ
ดำเนินการอบแห้งที่ส่งผลถึงปริมาณความชื้นสุดท้าย (final moisture content, FMC) ซึ่งการวัด
ความชื้นสุดท้ายจะดำเนินการวัดปริมาณความชื้นเช่นเดียวกับการวัดความชื้นเริ่มต้นดังที่กล่าว
มาแล้ว และการสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิจำเพาะ (specific energy consumption, SEC) มี
วิธีการบันทึกข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าและการลดลงของเชื้อเพลิง รวมถึงสมการที่ใช้ในการ
คำนวณ ดังต่อไปนี้

1. การบันทึกข้อมูลการใช้ไฟฟ้าและน้ำหนักเชื้อเพลิงที่ลดลง ดัง

ภาพประกอบ 38



ภาพประกอบ 38 การบันทึกข้อมูลการใช้ไฟฟ้าและน้ำหนักเชื้อเพลิงที่ลดลง

2. การนำปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า และการลดลงของเชื้อเพลิงก๊าซ
ปิโตรเลียมเหลวมาคำนวณหาการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะภายหลังการดำเนินการอบแห้ง มี
รายละเอียดดังนี้

2.1) การหาค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า (Electrical energy, $E_{\text{electrical}}$) ได้
จากการอ่านค่าจากมิเตอร์วัดไฟฟ้า แบบ 1 เฟส (single phase kilowatt-hour meter) ขนาด 5
แอมแปร์ดังภาพประกอบ 45 (ด้านซ้ายมือ) โดยมีมิเตอร์แสดงในหน่วยกิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh) ซึ่งค่า

พลังงานที่ใช้ในการคำนวณดังสมการ 2.7 นั้นค่าพลังงานไฟฟ้าจะมีหน่วยเป็นเมกะจูล (MJ) ทำให้ต้องนำมาคูณค่าคงที่ 3.6 เพื่อแปลงหน่วยจากกิโลวัตต์ชั่วโมง เป็น เมกะจูล

2.2) การหาค่าการใช้พลังงานความร้อน (Thermal energy, $E_{thermal}$) ได้จากค่าผลต่างของมวลเชื้อเพลิงที่ลดลงคูณกับค่าความร้อนทางสูงของเชื้อเพลิงต่อ 1 หน่วยมวล (Higher Heating Value, HHV) แสดงในหน่วยเมกะจูลต่อหน่วยมวลเชื้อเพลิง (MJ/kg) ดังสมการที่ 3.4

$$E_{thermal} = \Delta m_{LPG} \times HHV \quad (3.4)$$

เมื่อ	$E_{thermal}$	คือ ค่าพลังงานความร้อน, MJ
	Δm_{LPG}	คือ ผลต่างของมวลเชื้อเพลิงเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดสอบ, m^3
	HHV	คือ ค่าความร้อนทางสูงของเชื้อเพลิงต่อกิโลกรัม, MJ/kg

ทั้งนี้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงก๊าซปิโตรเลียมเหลว (liquefied petroleum gas, LPG) มีค่าความร้อนสูง เท่ากับ 50.22 MJ/kg ("ค่าความร้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงและก๊าซ", 2552) นอกจากนี้ข้าวเปลือกภายหลังการอบแห้งจะถูกนำไปกะเทาะเปลือกเพื่อหาค่าอัตราการกะเทาะที่เกิดขึ้น ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานแบ่งเป็น 2 ส่วน ขั้นตอนดำเนินการอ้างอิงและสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ (สุรัชย์ ศิริพัฒน์, อดุลย์ ณ วิเชียร, ณพรัตน์ วิชิตชลชัย, & และนุชนาฏ ณ ระนอง, 2015, 20 มกราคม-มีนาคม)

การกะเทาะเปลือกเพื่อหาค่าอัตราการกะเทาะ แบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. ขั้นตอนเตรียมตัวอย่างก่อนการทดสอบหาอัตราการกะเทาะเปลือก

- 1.1 นำตัวอย่างข้าวเปลือกภายหลังการดำเนินการอบแห้ง จำนวน 500 กรัม
- 1.2 เข้าเครื่องเป่าไล่ทำความสะอาดและไล่เมล็ดลีบออกและคัดเลือก

ตัวอย่างจำนวน 125 กรัม (เพื่อเป็นตัวอย่างในการทดสอบ) ดังภาพประกอบ 39

2. ขั้นตอนการหาค่าอัตราการกะเทาะเปลือก ดังภาพประกอบ 40 และ 41

2.1 ปรับตั้งระยะห่างของลูกยางตามคำแนะนำและตามข้อมูลขนาดเฉลี่ยของเมล็ดพืชที่นำมาทดสอบ

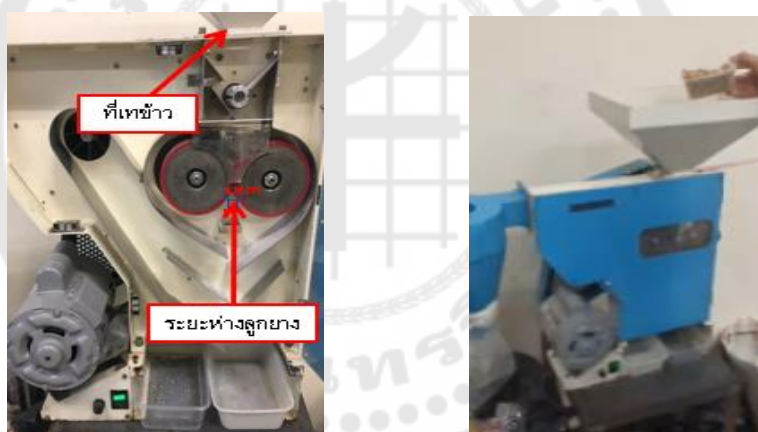
2.2 เทตัวอย่างจำนวน 125 กรัม เข้าเครื่องกะเทาะดำเนินการต่อเนื่องจำนวน

3 รอบ

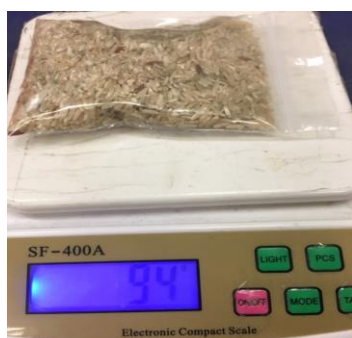
2.3 เมื่อสิ้นสุดการทดสอบนำข้าวกลิ้งมาแยกข้าวที่ไม่กะเทาะกับข้าวกลิ้ง
ซึ่งน้ำหนัก เทียบกับน้ำหนักข้าวก่อนการทดสอบ เพื่อหาประสิทธิภาพการกะเทาะ



ภาพประกอบ 39 การเตรียมตัวอย่างก่อนการทดสอบ



ภาพประกอบ 40 การทดสอบหาประสิทธิภาพการกะเทาะเปลือก



ภาพประกอบ 41 น้ำหนักที่กะเทาะเปลือกออก(ข้าว) และกะเทาะเปลือกไม่ออก(ขาว)

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

บทนี้จะนำเสนอผลการดำเนินงานวิจัยที่ได้จากการวิธีดำเนินการวิจัยทั้งหมด มาแสดงในรูปแบบกราฟ และตารางข้อมูล โดยมีขบวนการศึกษาจนกระทั่งประเมินผลลัพธ์และประสิทธิภาพของระบบที่ได้พัฒนาขึ้นตามวัตถุประสงค์ที่กำหนด ซึ่งแบ่งออกได้ 5 ขั้นตอน ดังนี้

1. ผลลัพธ์การพัฒนาระบบควบคุมอุปกรณ์ส่วนควบ
2. ผลลัพธ์การทดสอบการอบแห้ง (ระบบควบคุมแบบปรับตั้งพารามิเตอร์)
3. การสร้างขั้นตอนวิธีของระบบควบคุมอัตโนมัติ
4. ผลลัพธ์การทดสอบการอบแห้ง (ระบบควบคุมอัตโนมัติ)
5. การเปรียบเทียบผลลัพธ์การทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง ที่ได้รับการพัฒนา (ระหว่างระบบควบคุมแบบปรับตั้งพารามิเตอร์กับระบบควบคุมอัตโนมัติ)

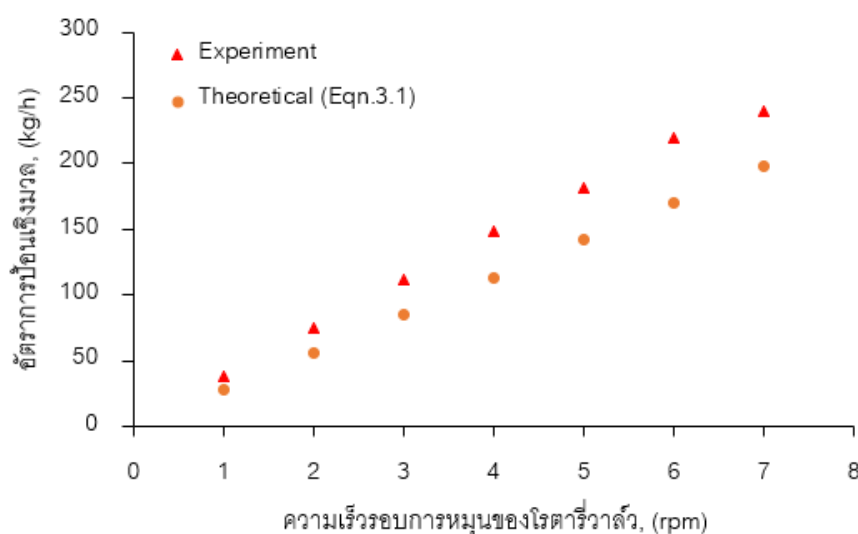
ผลลัพธ์การพัฒนาระบบควบคุมอุปกรณ์ส่วนควบ

ผลการดำเนินการ มี 2 ส่วนดังนี้ ส่วนแรกเป็นการพัฒนาระบบควบคุมชุดอัตราการป้อนของเมล็ดพืช และส่วนที่สองเป็นการพัฒนาระบบควบคุมชุดอัตราการไหลของอากาศร้อน การศึกษาตามขบวนการวิจัย แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ 1) ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนของเมล็ดพืชกับความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์ว และ 2) ผลการสร้างการควบคุมตามขั้นตอนวิธีซีเกอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols Method) ดังนี้

การพัฒนาระบบควบคุมชุดอัตราการป้อนของเมล็ดพืช

1) ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนของเมล็ดพืชกับความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์ว พบว่าในช่วงการปรับความเร็วรอบของแกนโรตารีวาล์ว 1-7 รอบต่อนาที ซึ่งแนวโน้มของอัตราการป้อนเชิงมวลสัมพันธ์กับความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วแบบเชิงเส้นและเมื่อเปรียบเทียบระหว่างอัตราการป้อนที่คำนวณด้วยสมการ 3.1 กับอัตราการป้อนจากการทดสอบ พบว่าอัตราการป้อนจากการทดสอบจะมีค่าสูงกว่า เนื่องจากในการทดสอบความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วเป็นความเร็วรอบเฉลี่ยที่มีค่ามากกว่าความเร็วรอบที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการจึงส่งผลให้อัตราการป้อนที่ได้จากการคำนวณมีอัตราการป้อนเชิงมวลน้อยกว่า และของอัตราการป้อนเชิงมวลยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งนี้จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าความผิดพลาดจากการทดสอบกับการคำนวณด้วยสมการมีค่าความผิดพลาดสูงสุด

ร้อยละ 20 ดังภาพประกอบ 42 นอกจากนี้ยังพบว่า การควบคุมความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วสามารถนำมากำหนดอัตราการป้อนเมล็ดพืชเข้าสู่ห้องอบแห้งได้ เช่น การทดสอบกำหนดความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วเป็น 2 รอบต่อนาที (rev/min หรือ rpm) จะมีอัตราการป้อนเชิงมวลเฉลี่ยเป็น 75 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (kg/h) และเมื่อกำหนดความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วเป็น 4 และ 6 rpm จะมีอัตราการป้อนเชิงมวลเฉลี่ยเป็น 150 และ 220 kg/h ตามลำดับ

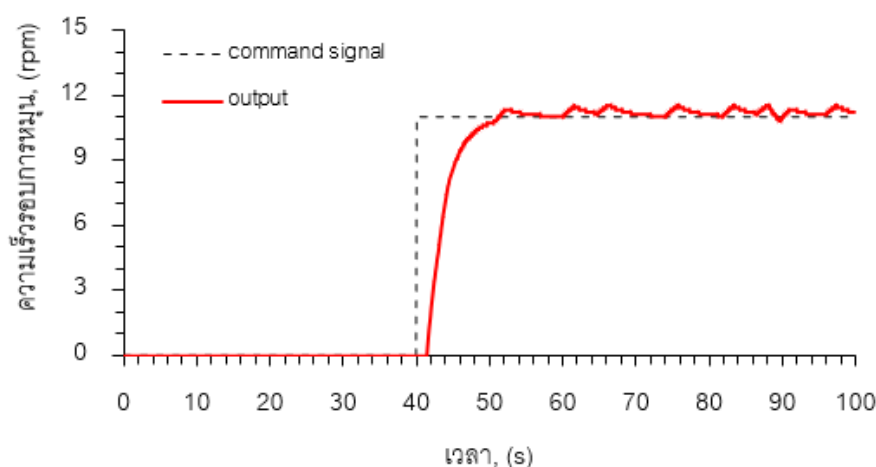


ภาพประกอบ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกับความเร็วยรอบการหมุนของโรตารีวาล์ว

ดังนั้นในการทดสอบต่อไปจะทำการควบคุมความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วซึ่งสามารถควบคุมอัตราการป้อนเชิงมวลของเมล็ดพืชได้ดังที่กล่าวข้างต้น

2) ผลการสร้างระบบควบคุมตามขั้นตอนวิธีซีเกอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols Method) สำหรับการควบคุมอัตราการป้อนของเมล็ดพืชด้วยการสร้างการควบคุมความเร็วรอบการหมุนของแกนโรตารีวาล์วนั้น สามารถแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

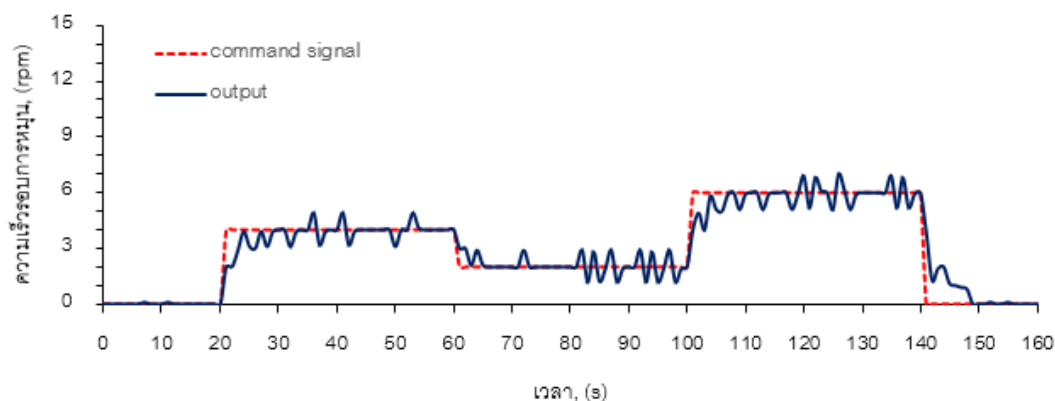
ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาผลตอบสนองของระบบวงเปิด (open-loop system) ด้วยการให้สัญญาณควบคุม (command signal) สูงสุดแบบขั้นบันได (unit-step) กับระบบ และพิจารณาผลตอบสนอง (output) ดังภาพประกอบ 43



ภาพประกอบ 43 ผลตอบสนองของความเร็วรอบการหมุนของระบบวงเปิด

โดยผลการตอบสนองเมื่อส่งสัญญาณควบคุมออกแบบขั้น (unit-step) ที่เวลา 40 วินาที ระบบตอบสนองและเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady-state time, T_s) ใช้เวลาประมาณ 12 วินาที โดยมีค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (steady-state errors, e_s) สูงสุด 11.5 rpm, ต่ำสุด 10.8 rpm และมีค่าเฉลี่ยเป็น 11.2 rpm หรือมีค่าความผิดพลาดร้อยละ 6.1 และการตอบสนองคำสั่งควบคุมมีความชัน (slope, $R = 2.65$) , หาค่าเวลาหน่วง (time delay, $L = 1.3$ s), ค่าคงที่ของเวลา (time constant, $T = 10.7$ s) จากนั้นนำค่า R , L และ T เพื่อประมาณค่า อัตราขยายการควบคุมตามวิธีปฏิกิริยาของกระบวนการ (process reaction method) ดังตารางที่ 3 และใน

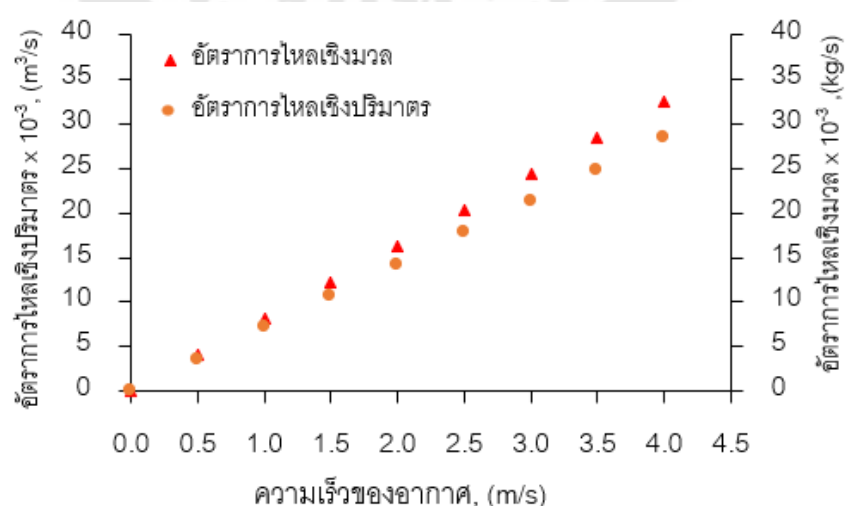
ขั้นตอนที่ 2 ผลตอบสนองของระบบวงเปิด (close-loop system) ด้วย อัตราขยายที่คำนวณตามคำแนะนำจากตารางที่ 3 และการปรับจูนด้วยมือ จนทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วรอบการหมุนของแกนโรตารีวาล์วเป็นไปตามคำสั่งสัญญาณควบคุม (command signal) โดยมีลำดับการเปลี่ยนแปลงคำสั่งควบคุมเป็นขั้นดังนี้ เริ่มจาก 0 rpm เป็น 4 rpm และ 2 rpm และ 6 rpm ในทุก 20 วินาที ตามลำดับ โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยไม่เกิน ± 1 rpm และใช้เวลาในการตอบสนองจนถึงสภาวะอยู่ตัวเพียง 5 วินาที ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการทดสอบระบบแบบวงเปิดดังที่ได้แสดงข้างต้น ดังแสดงผลการตอบสนองดังภาพประกอบ 44



ภาพประกอบ 44 ผลตอบสนองของความเร็วรอบการหมุนของระบบวงปิด

ระบบควบคุมการไหลของอากาศร้อนผ่านห้องอบแห้ง

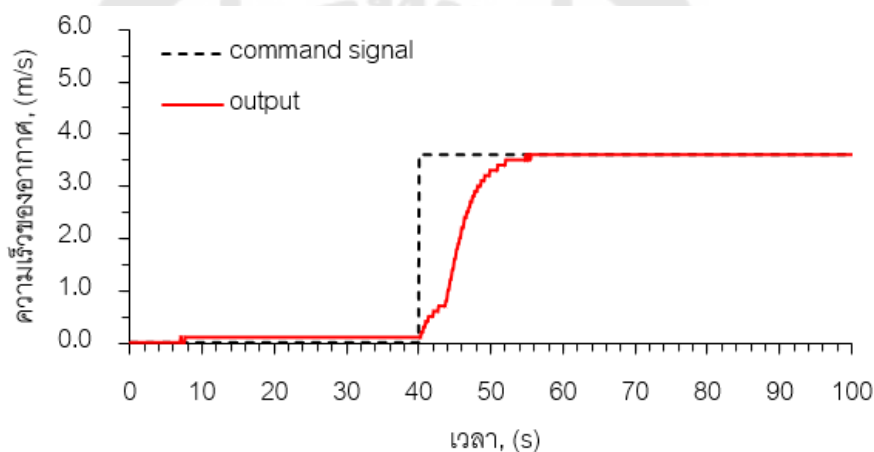
1) ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรกับความเร็วของอากาศร้อน พบว่าในช่วงการปรับความเร็วของอากาศร้อน 0.0 – 4.0 m/s แนวโน้มของอัตราการไหลเชิงปริมาตรและอัตราการไหลเชิงมวลเป็นเชิงเส้น ดังภาพประกอบ 45 นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าความเร็วของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องอบแห้งจะแปรผันตรง ดังสมการที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าการกำหนดความเร็วการไหลของอากาศออกจากเครื่องอบแห้งสามารถประมาณอัตราการไหลเชิงมวลและเชิงปริมาตรได้



ภาพประกอบ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความเร็วของอากาศร้อน

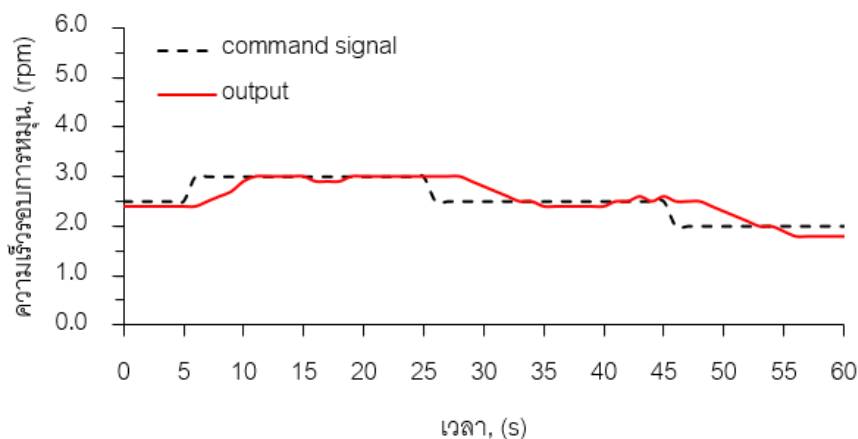
2) ผลการสร้างระบบควบคุมตามขั้นตอนวิธีซีเกอร์-นิโกลส์ (Ziegler–Nichols Method) สำหรับการควบคุมอัตราการไหลของอากาศร้อน สามารถแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาผลตอบสนองของระบบวงเปิด (open-loop system) ด้วยการให้สัญญาณการควบคุม (command signal) สูงสุดกับระบบ และพิจารณาผลการตอบสนอง ดังภาพประกอบ 46 พบว่าการตอบสนองเมื่อส่งสัญญาณควบคุมแบบขั้น (unit-step) ที่เวลา 40 วินาที ระบบมีการตอบสนองและเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady-state time, T_s) ใช้เวลาประมาณ 14 วินาที มีค่าความผิดพลาดสูงสุด 3.6 m/s, ต่ำสุด 3.5 m/s และมีค่าเฉลี่ยเป็น 3.55 m/s หรือมีความผิดพลาดร้อยละ 2.8 และมีความชัน (slope, $R = 0.64$) , ค่าเวลาหน่วง (time delay, $L = 2.5$ s), ค่าคงที่ของเวลา (time constant, $T = 5.6$ s) ต่อไป



ภาพประกอบ 46 ผลตอบสนองของความเร็วอากาศที่ทางออกของระบบวงเปิด

ขั้นตอนที่ 2 ผลตอบสนองของความเร็วอากาศที่ออกจากเครื่องอบแห้งของระบบวงปิด (close-loop system) ด้วยอัตราขยายที่คำนวณตามคำแนะนำจากตารางที่ 3 และการปรับจูนด้วยมือจากนั้นทดสอบตามเงื่อนไขการทดลอง (command signal) มีลำดับการเปลี่ยนแปลงคำสั่งควบคุมแบบขั้น (unit-step) ดังนี้ เริ่มจาก 2.5 m/s เป็น 3.0 m/s และกลับมาที่ความเร็วอากาศ 2.5 m/s และ 2.0 m/s ในทุก 20 วินาที ตามลำดับ แสดงผลการตอบสนองดังภาพประกอบ 47 ผลการตอบสนองพบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในสภาวะอยู่ตัว (steady-state errors, e_{ss}) ไม่เกิน ± 0.2 m/s และใช้เวลาในการตอบสนองจนถึงสภาวะอยู่ตัว 15 วินาที ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบระบบแบบวงเปิดดังที่ได้แสดงข้างต้น



ภาพประกอบ 47 ผลตอบสนองของความเร็วการไหลของอากาศของระบบวงปิด

สรุปผลลัพธ์การพัฒนาระบบควบคุมของชุดอุปกรณ์ส่วนควบ : ระบบควบคุมแบบวงปิด (close-loop control system) ที่พัฒนาระบบควบคุมตามวิธีปฏิกิริยาของกระบวนการ (process reaction method) ที่ใช้อัตราขยายการควบคุม K_p , K_i และ K_d ที่คำนวณตามคำแนะนำจาก ตารางที่ 3 และการปรับจูนด้วยมือจนผลการตอบสนองสามารถควบคุมชุดป้อนเมล็ดพืช และชุดควบคุมการไหลของอากาศออกจากเครื่องอบแห้งได้ตามเงื่อนไขการทดลอง ผลจากการพัฒนาในส่วนนี้ทำให้เครื่องอบแห้งสามารถควบคุมและปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของชุดอุปกรณ์ส่วนควบของเครื่องอบแห้งได้ ต่อจากนี้จะเป็นการทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องแบบมัลติโฟลที่มีระบบควบคุมแบบปรับตั้งค่าพารามิเตอร์

ผลลัพธ์การทดสอบการอบแห้ง (ระบบควบคุมแบบปรับตั้งพารามิเตอร์)

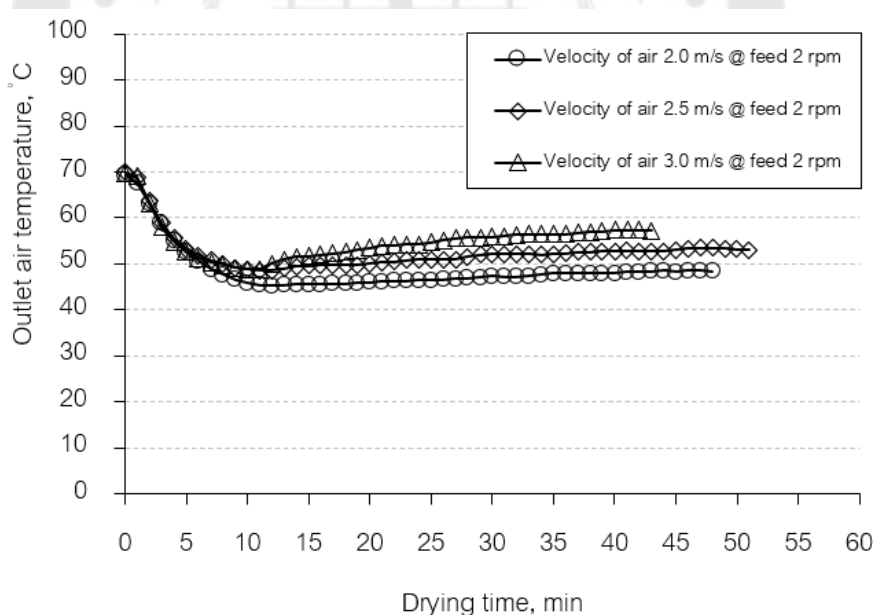
ในส่วนเป็นการนำเสนอผลลัพธ์จากการทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง โดยผลลัพธ์ของการทดสอบการอบแห้งจะพิจารณาดังตัวแปรตามที่ได้กำหนดข้างต้น แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่แรก: ขณะการดำเนินการอบแห้งจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และความชื้นของอากาศที่ออกจากห้องอบแห้งในขณะทำการทดลอง และ

ส่วนที่สอง: สิ้นสุดการดำเนินการอบแห้งจะพิจารณาความชื้นสุดท้าย (final moisture content, FMC), การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และร้อยละการกะเทาะเปลือก

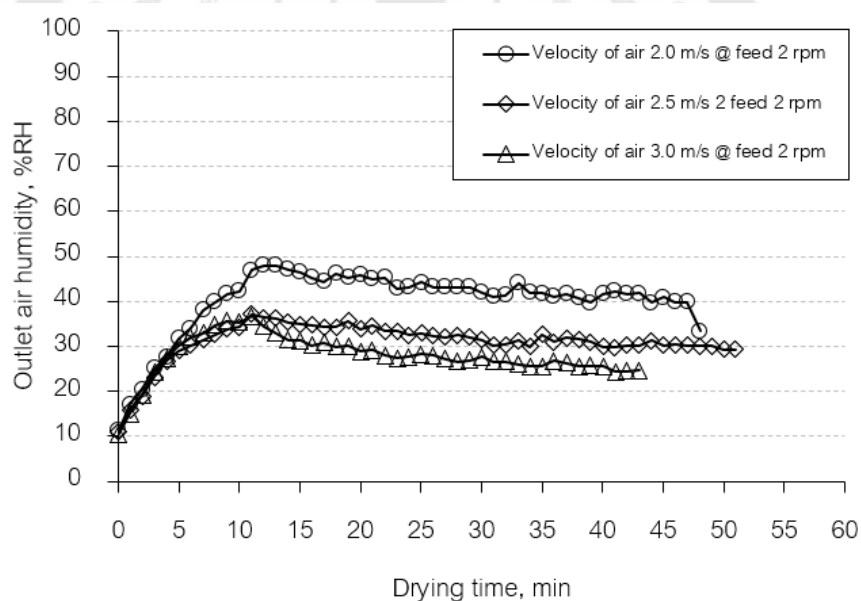
โดยแบ่งการทดสอบย่อยออกเป็น 3 กรณี ดังแสดงในบทที่ 3 (การทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง)

1) กรณี ปรับตั้งพารามิเตอร์ชุดควบคุมความเร็วการไหลของอากาศ เป็น 2.0 m/s, 2.5 m/s และ 3.0 m/s ตามลำดับ ที่ปรับตั้งพารามิเตอร์ชุดควบคุมความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์ว คงที่เป็น 2.0 rpm หรืออัตราการป้อนเฉลี่ยเป็น 75 kg/h



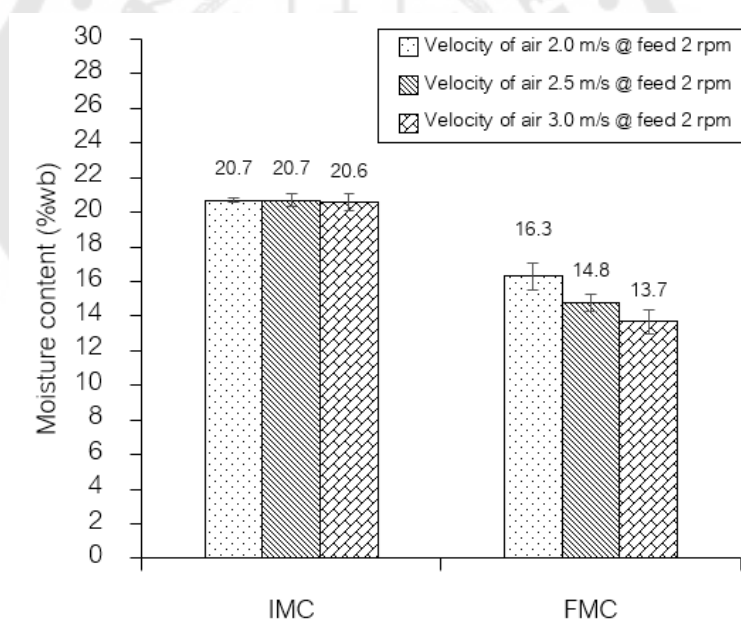
ภาพประกอบ 48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศที่ทางออกกับเวลาในการอบแห้ง กรณี ความเร็วอากาศเป็น 2.0, 2.5 และ 3.0 m/s ที่อัตราการป้อนเฉลี่ย 75 kg/h

จากภาพประกอบ 48 ขณะการดำเนินการอบแห้ง ด้านการเปลี่ยนแปลงของ อุณหภูมิอากาศร้อนบริเวณทางออกของเครื่องอบแห้ง ผลลัพธ์การทดสอบแสดงให้เห็นว่าในช่วง เริ่มต้น 10 min แรก อุณหภูมิของอากาศร้อนลดลงอย่างต่อเนื่องจากนั้นจะเริ่มคงที่และมีการ เพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเมื่อปรับตั้งชุดควบคุมความเร็วการไหลของอากาศเป็น 2.0 m/s, 2.5 m/s และ 3.0 m/s ทำให้อุณหภูมิอากาศร้อนออกจากห้องอบแห้งเมื่อสิ้นสุดการทดสอบเป็น 48.4 °C, 50.3 °C และ 57.2 °C ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากช่วง 10 นาทีแรกเมล็ดพืชที่ถูกป้อนเข้าห้องอบแห้งมี อุณหภูมิต่ำกว่าอากาศร้อนจึงเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศร้อนกับเมล็ดพืชทำให้ อุณหภูมิอากาศที่ไหลออกจากเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิลดลงอย่างต่อเนื่อง และจากการถ่ายเท ความร้อนเมล็ดพืชจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้น้ำที่อยู่ภายในเมล็ดพืชเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำและ ระเหยสู่อากาศของเมล็ดพืช และถ่ายเทไปสู่อากาศร้อน ซึ่งในช่วงการดำเนินการอบแห้งเมื่อความชื้น ถูกพาออกจากเมล็ดพืชทำให้น้ำภายในเมล็ดพืชมีปริมาณน้ำลดลงในระหว่างนี้อุณหภูมิของอากาศที่ ไหลออกจากห้องอบแห้งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นสอดคล้องกับผลการทดลองข้างต้น



ภาพประกอบ 49 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ที่ทางออกกับเวลาในการอบแห้ง กรณี ความเร็วอากาศเป็น 2.0, 2.5 และ 3.0 m/s ที่อัตราการป้อนเฉลี่ย 75 kg/h

ภาพประกอบ 49 ขณะการดำเนินการอบแห้ง ด้านการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity, RH) บริเวณทางออกของเครื่องอบแห้ง ผลลัพธ์การทดสอบแสดงให้เห็นว่าขณะเริ่มการทดสอบถึงช่วง 10 นาทีแรกนั้นความชื้นสัมพัทธ์ที่อ่านค่าได้มีการเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจากนั้นก็เริ่มคงที่หรือลดลงต่อเนื่องจนสิ้นสุดการทดลอง โดยเมื่อปรับตั้งชุดควบคุมความเร็วการไหลของอากาศเป็น 2.0 m/s, 2.5 m/s และ 3.0 m/s ทำให้ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์เมื่อสิ้นสุดการทดสอบเป็น 39.7%RH, 29.3%RH และ 24.7%RH ตามลำดับ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างเมล็ดพืชกับอากาศร้อนทำให้อุณหภูมิของเมล็ดพืชสูงขึ้นเกิดทำให้การแพร่ของน้ำสู่บริเวณผิวของเมล็ดพืชในรูปความดันของไอน้ำที่ผิวเมล็ดพืชสูงกว่าความดันไอน้ำในอากาศจนเกิดการถ่ายเทมวลไอน้ำสู่อากาศร้อนซึ่งในช่วงนี้ความดันไอน้ำในอากาศจะสูงขึ้นเมื่อเทียบกับความดันไอน้ำในอากาศอิมตัว เป็นผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีค่าสูงขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองข้างต้น



ภาพประกอบ 50 ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายภายหลังการทดสอบการอบแห้ง กรณี ความเร็วอากาศเป็น 2.0, 2.5 และ 3.0 m/s ที่อัตราการป้อนเฉลี่ย 75 kg/h

ด้านเวลาที่ใช้ในการอบดำเนินการอบแห้ง (drying time) เฉลี่ย 47 min ที่อัตราการป้อนข้าวเปลือกเข้าห้องอบแห้งเฉลี่ย 75 kg/h หรือควบคุมความเร็วรอบการหมุนของแกนชุดโรตารี

วาล์ว (rotary valve feeder) เป็น 2.0 rpm ตลอดการทดสอบ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงการตัวแปรต้นในการทดสอบการปรับตั้งความเร็วการไหลของอากาศร้อนให้มีค่าสูงขึ้นจาก 2.0 m/s, 2.5 m/s และ 3.0 m/s ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วการไหลของอากาศไม่ส่งผลกับเวลาในการดำเนินการอบแห้งมากนัก โดยเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ภายในห้องอบแห้งเฉลี่ย (mean residence time) เป็น 7.8 min

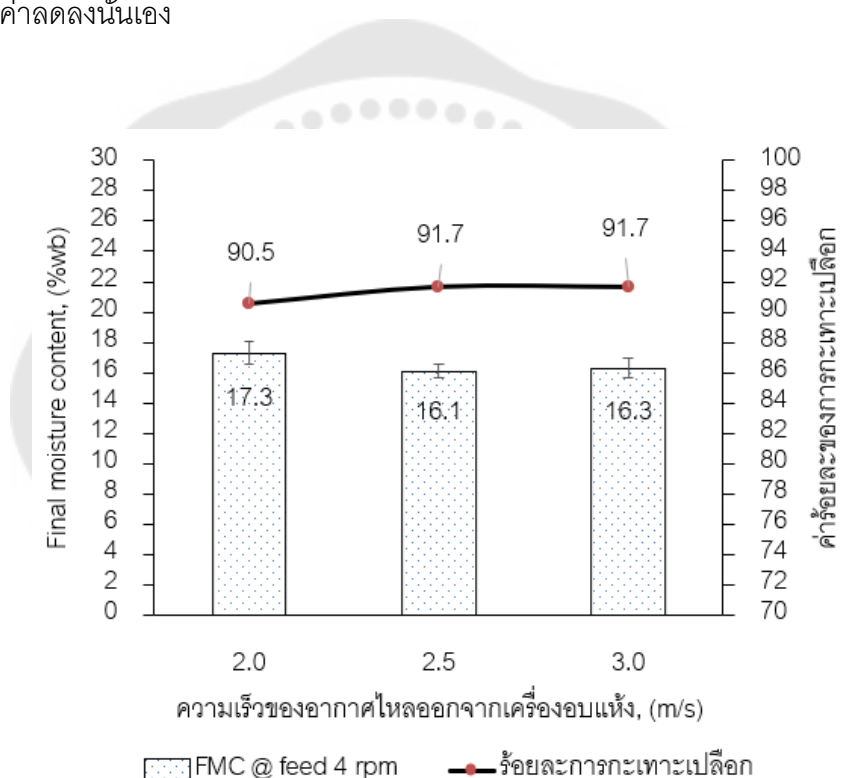
เมื่อสิ้นสุดการทดสอบ กรณีที่ 1) ผลลัพธ์การทดสอบการอบแห้งของระบบควบคุมแบบปรับตั้งพารามิเตอร์คงที่ เมื่อป้อนข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นในช่วง 20-21 %wb (การทดสอบวัดความชื้นเริ่มต้น (initial moisture content, IMC) เฉลี่ยเป็น 20.7%wb และการปรับตั้งพารามิเตอร์ความเร็วการไหลของอากาศร้อนให้มีค่าสูงขึ้นจาก 2.0 m/s, 2.5 m/s และ 3.0 m/s

ด้านปริมาณ การลดความชื้นพบว่าสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกจนมีความชื้นสุดท้าย (final moisture content, FMC) เป็น 16.3%wb, 14.8%wb และ 13.7%wb และมีค่าเบี่ยงเบน (deviation) เป็น 0.8, 0.5 และ 0.7 ตามลำดับ นอกจากนี้ ดังภาพประกอบ 50 และการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ พบว่ามีการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงเมื่อความเร็วการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความเร็วการไหลของอากาศทำให้อัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 3.3 ด้วยเหตุนี้มวลของอากาศร้อนที่ดูดซับความชื้นจากการระเหยไอน้ำจากผิวของเมล็ดพืชมีจำนวนมากขึ้นทำให้เมล็ดพืชมีความชื้นสุดท้ายซึ่งเมื่อเทียบกับการสิ้นเปลืองพลังงานทำให้การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเป็น 17.8, 18.2 และ 16.7 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 7

ตาราง 6 การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (ที่อัตราการป้อนเฉลี่ย 75 kg/h)

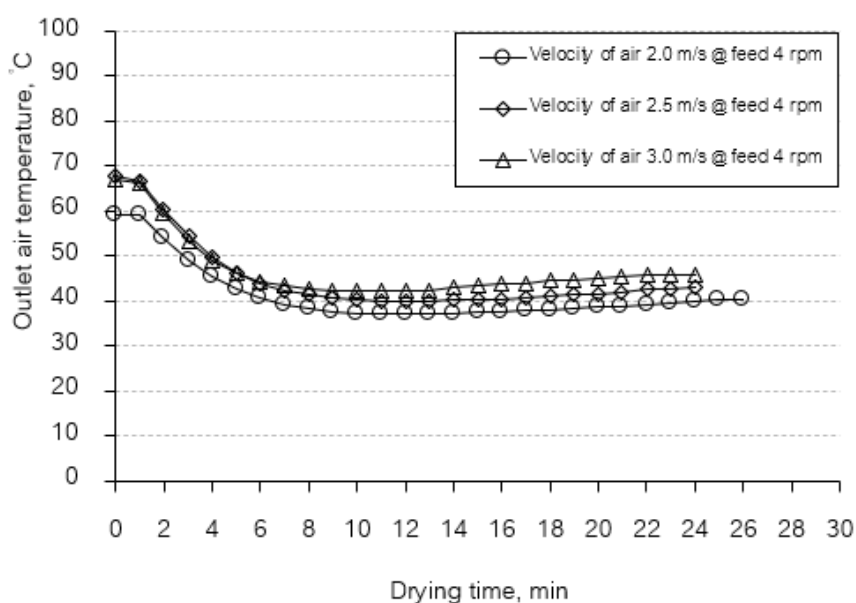
Drying condition			Mass of water	Energy consumption		SEC
hot-air temp.	speed of rotary valve	velocity of air	removed	$E_{thermal}$	$E_{electrical}$	
°C	rpm	m/s	kg	MJ	MJ	
130	2.0	2.0	0.41	6.53	0.547	17.3
		2.5	0.49	8.04	0.587	17.6
		3.0	0.56	8.54	0.522	16.2

ด้านคุณภาพในแง่ของผลของผลผลิตที่ได้ภายหลังจากดำเนินการอบแห้ง เมื่อนำมากระเทาะเปลือกตามวิธีที่ได้กล่าวข้างต้น พบว่าปริมาณความชื้นสุดท้ายที่น้อยกว่าหรือต่ำกว่าจะส่งผลให้ค่าร้อยละของการกระเทาะเปลือกสูงขึ้นตามไปด้วย โดยมีค่าร้อยละการกระเทาะเปลือกสูงสุดร้อยละ 95.9 ที่ความชื้นสุดท้าย (FMC) เป็น 13.7%wb ดังแสดงในภาพประกอบ 51 ทั้งนี้จากหลักการของเครื่องกระเทาะเปลือกนั้นใช้การหมุนของลูกกลิ้งทั้งสองที่ความเร็วแตกต่างกันเล็กน้อยทำให้เกิดแรงขัดเฉือนทำให้เปลือกของเมล็ดพืชหลุดออกนั้น ทำให้เมล็ดพืชที่มีความชื้นอยู่ภายในมากจะเกิดการเกาะติดกันระหว่างตัวเมล็ดข้าวกับเปลือกซึ่งส่งผลให้ผลของร้อยละการกระเทาะเปลือกมีค่าลดลงนั่นเอง



ภาพประกอบ 51 แผนภูมิความสัมพันธ์ของความชื้นสุดท้ายต่อร้อยละการกระเทาะเปลือก (ที่อัตราการป้อนเฉลี่ย 75 kg/h)

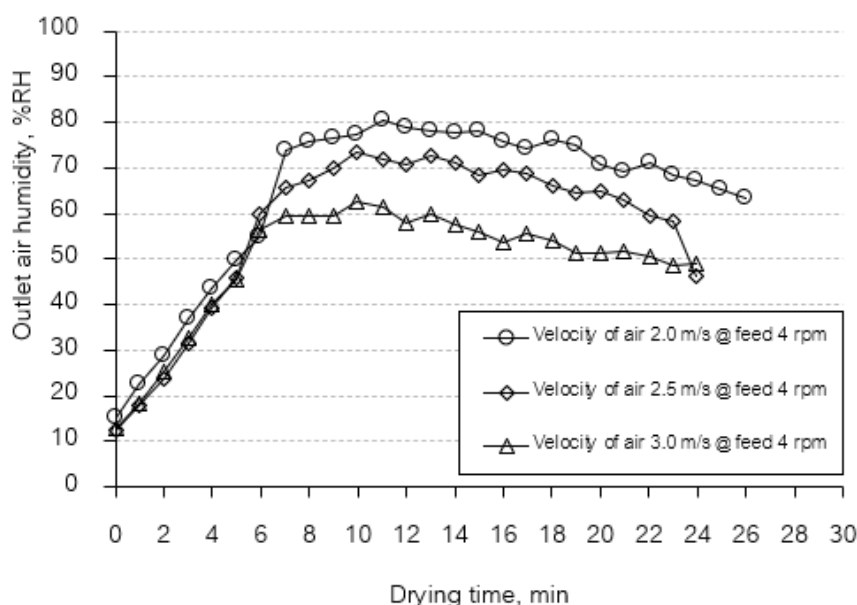
2) กรณี ปรับตั้งพารามิเตอร์ชุดควบคุมความเร็วของอากาศ เป็น 2.0 m/s, 2.5 m/s และ 3.0 m/s ตามลำดับ และปรับตั้งพารามิเตอร์ชุดควบคุมความเร็วรอบการหมุนของโรตารี วาล์ว คงที่เป็น 4.0 rpm หรืออัตราการป้อนเมล็ดพืชเฉลี่ยเป็น 150 kg/h



ภาพประกอบ 52 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศที่ทางออกกับเวลาในการอบแห้ง กรณี ความเร็วการไหลอากาศเป็น 2.0, 2.5 และ 3.0 m/s ที่อัตราการป้อนเฉลี่ย 150 kg/h

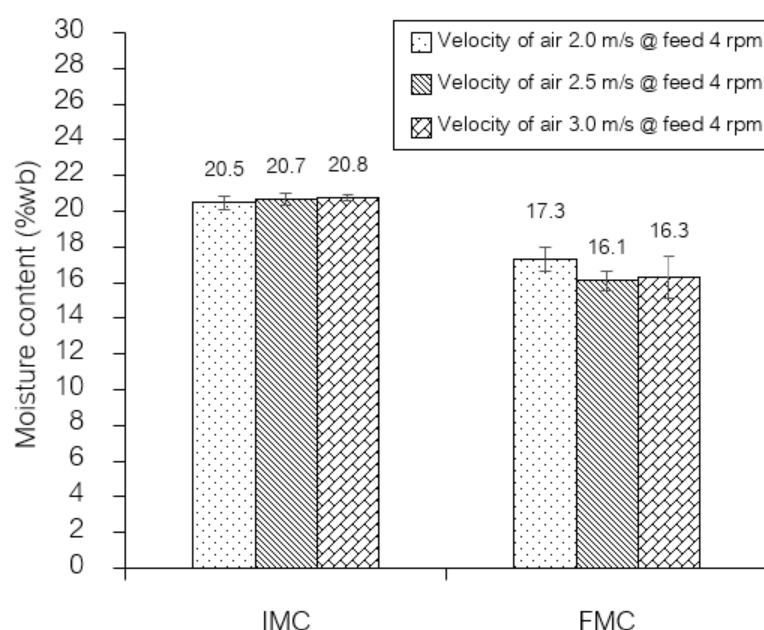
จากภาพประกอบ 52 ขณะการดำเนินการอบแห้ง ด้านการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศร้อนบริเวณทางออกของเครื่องอบแห้ง ผลลัพธ์การทดสอบแสดงให้เห็นว่าในช่วงเริ่มดำเนินการทดสอบถึง 7 min แรก อุณหภูมิของอากาศร้อนภายในห้องอบแห้ง (drying chamber) ลดลงอย่างต่อเนื่องจากนั้นจะเริ่มคงที่และเริ่มมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งขึ้นเล็กน้อยตลอดจนถึงสิ้นสุดการทดสอบ โดยเมื่อปรับตั้งชุดควบคุมความเร็วการไหลของอากาศเป็น 2.0 m/s, 2.5 m/s และ 3.0 m/s ทำให้อุณหภูมิอากาศร้อนออกจากห้องอบแห้งเมื่อสิ้นสุดการทดสอบเป็น 40.2 °C, 42.9 °C และ 45.9 °C ตามลำดับ เนื่องจากเมล็ดพืชที่ถูกป้อนเข้าห้องอบแห้งมีอุณหภูมิต่ำกว่าอากาศร้อนเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศร้อนกับเมล็ดพืชทำให้อุณหภูมิอากาศที่ไหลออกจากเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิลดลงอย่างต่อเนื่อง และจากการถ่ายเทความร้อนเมล็ดพืชจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้น้ำที่อยู่ภายในเมล็ดพืชเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำและระเหยสู่อากาศ และถ่ายเทไปสู่อากาศร้อน ซึ่งในช่วงการดำเนินการอบแห้งความชื้นถูกพา

ออกจากเมล็ดพืชทำให้ภายในเมล็ดพืชมีปริมาณน้ำลดลงซึ่งในระหว่างนี้อุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากห้องอบแห้งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นสอดคล้องกับผลการทดลองข้างต้น



ภาพประกอบ 53 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ที่ทางออกกับเวลาในการอบแห้ง กรณี ความเร็วอากาศเป็น 2.0, 2.5 และ 3.0 m/s ที่อัตราการป้อนเฉลี่ย 150 kg/h

ภาพประกอบ 53 ขณะการดำเนินการอบแห้ง ด้านการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity, RH) บริเวณทางออกของเครื่องอบแห้ง ผลลัพธ์การทดสอบแสดงให้เห็นว่าขณะเริ่มการทดสอบถึงช่วง 7 นาทีแรกนั้นความชื้นสัมพัทธ์ที่อ่านค่าได้มีการเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง จากนั้นก็เริ่มคงที่หรือลดลงต่อเนื่องจนสิ้นสุดการทดลอง โดยเมื่อปรับตั้งชุดควบคุมความเร็วการไหลของอากาศเป็น 2.0 m/s, 2.5 m/s และ 3.0 m/s ทำให้ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์เมื่อสิ้นสุดการทดสอบเป็น 63.3%RH, 58.2%RH และ 49.1%RH ตามลำดับ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างเมล็ดพืชกับอากาศร้อนทำให้อุณหภูมิของเมล็ดพืชสูงขึ้นเกิดทำให้การแพร่ของน้ำสู่บริเวณผิวของเมล็ดพืชในรูปความดันของไอน้ำที่ผิวเมล็ดพืชสูงกว่าความดันไอน้ำในอากาศจนเกิดการถ่ายเทมวลไอน้ำสู่อากาศร้อนซึ่งในช่วงนี้ความดันไอน้ำในอากาศจะสูงขึ้นเมื่อเทียบกับความดันไอน้ำในอากาศมืดัว เป็นผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีค่าสูงขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองข้างต้น



ภาพประกอบ 54 ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายภายหลังการทดสอบการอบแห้ง
กรณี ความเร็วอากาศเป็น 2.0, 2.5 และ 3.0 m/s ที่อัตราการป้อนเฉลี่ย 150 kg/h

ด้านเวลาที่ใช้ในการอบดำเนินการอบแห้ง (drying time) เฉลี่ย 25 min ที่อัตราการป้อนข้าวเปลือกเข้าห้องอบแห้งเฉลี่ยเช่นเดียวกันที่ 150 kg/h หรือควบคุมความเร็วรอบการหมุนของแกนชุดโรตารีวาล์ว (rotary valve feeder) เป็น 4.0 rpm ตลอดการทดสอบ ดังภาพประกอบ 52 และ 53 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงการตัวแปรต้นในการทดสอบเมื่อปรับตั้งความเร็วการไหลของอากาศร้อนให้มีค่าสูงขึ้นจาก 2.0 m/s, 2.5 m/s และ 3.0 m/s ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วการไหลของอากาศไม่ส่งผลกับเวลาในการดำเนินการอบแห้งมากนัก โดยเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ภายในห้องอบแห้งเฉลี่ย (mean residence time) เป็น 4.2 min

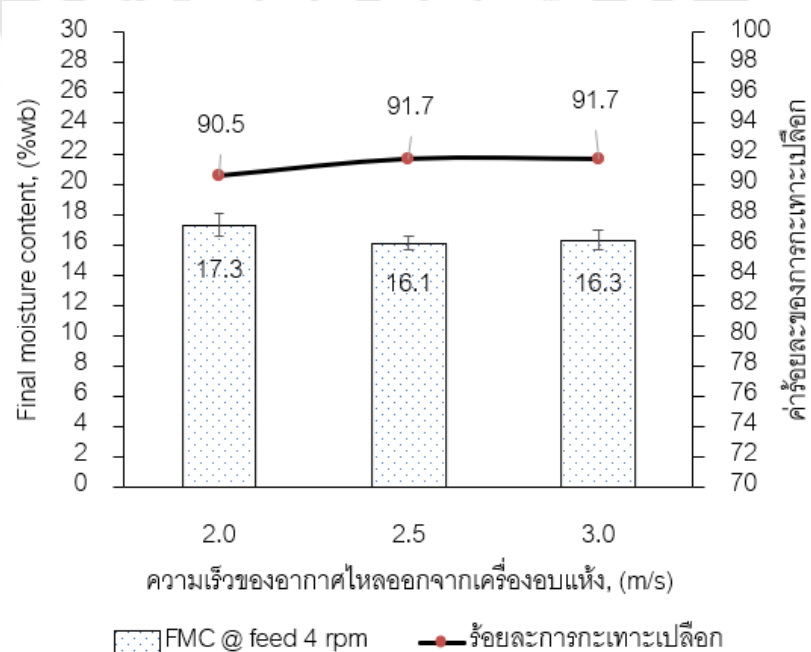
เมื่อสิ้นสุดการทดสอบ กรณีที่ 2) ผลลัพธ์การทดสอบการอบแห้งของระบบควบคุมแบบปรับตั้งพารามิเตอร์คงที่ ดังภาพประกอบ 60 ผลลัพธ์การทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง เมื่อป้อนข้าวเปลือกที่มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นในช่วง 20-21 %wb (การทดสอบวัดปริมาณความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเป็น 20.7%wb

ด้านปริมาณ การลดความชื้นพบว่าสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกจนมีความชื้นสุดท้าย (final moisture content, FMC) เป็น 17.3%wb, 16.1%wb และ 16.3%wb และ

มีค่าเบี่ยงเบน (deviation) เป็น 0.7, 0.5 และ 1.2 ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 54 และการสิ้นเปลืองพลังงาน พบว่าการสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งลดลงเมื่อความเร็วการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มความเร็วของการไหลของอากาศทำให้อัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 3.3 ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีมวลของอากาศร้อนจำนวนมากขึ้นมาทำการถ่ายเทมวลความชื้นออกจากห้องอบแห้ง โดยมีการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเป็น 22.4, 12.3 และ 12.1 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 8

ตาราง 7 การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (ที่อัตราการป้อนเฉลี่ย 150 kg/h)

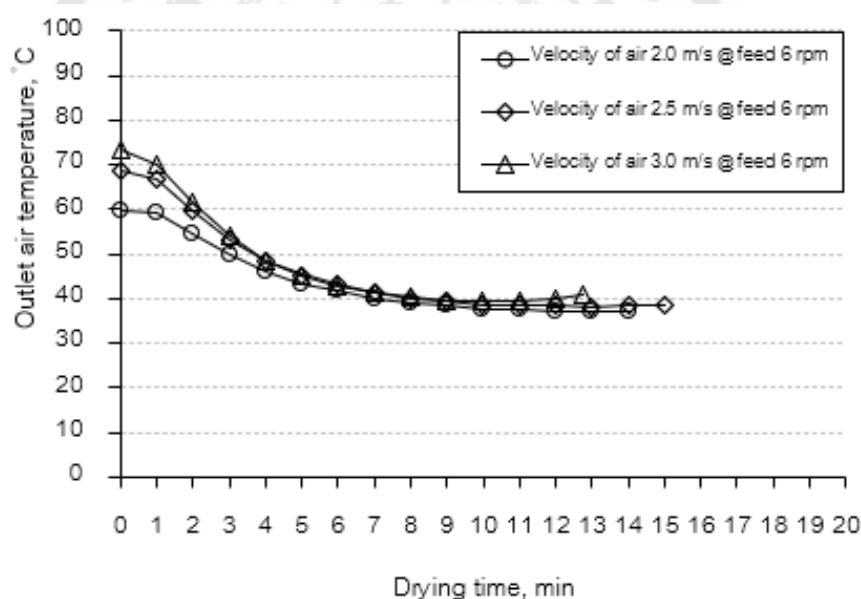
Drying condition			Mass of water	Energy consumption		SEC
hot-air temp.	speed of rotary valve	velocity of air	removed	E _{thermal}	E _{electrical}	
°C	rpm	m/s	kg	MJ	MJ	
130	4.0	2.0	0.20	4.02	0.328	21.7
		2.5	0.32	3.52	0.299	11.9
		3.0	0.37	4.02	0.302	11.7



ภาพประกอบ 55 แผนภูมิความสัมพันธ์ของความเร็วลมสุดท้ายต่อร้อยละการกะเทาะเปลือก (ที่อัตราการป้อนเฉลี่ย 150 kg/h)

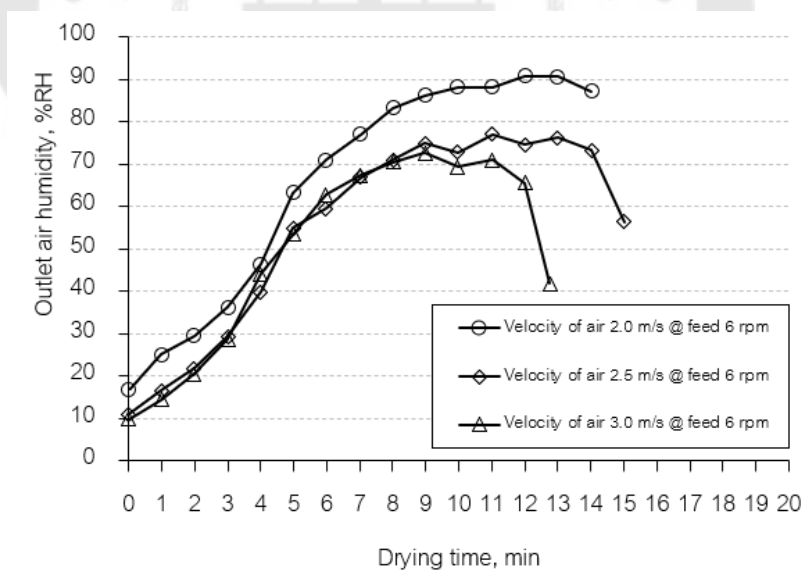
ด้านคุณภาพในแง่ของความชื้นสุดท้ายที่ได้เมื่อนำมากะเทาะเปลือกตามวิธี ดังที่ได้กล่าวข้างต้น พบว่าปริมาณความชื้นสุดท้ายต่ำส่งผลให้ค่าร้อยละของการกะเทาะเปลือก สูงขึ้นตามไปด้วยโดยมีค่าร้อยละการกะเทาะเปลือกสูงสุดร้อยละ 91.7 ที่ความชื้นสุดท้าย (FMC) เฉลี่ยเป็น 16.2%wb ดังแสดงในภาพประกอบ 55 ทั้งนี้จากหลักการของเครื่องกะเทาะเปลือกนั้น ใช้การหมุนของลูกกลิ้งทั้งสองที่ความเร็วแตกต่างกันเล็กน้อยทำให้เกิดแรงขัดเฉือนทำให้เปลือกของ เมล็ดพืชหลุดออกนั้น ทำให้เมล็ดพืชที่มีความชื้นอยู่ในมากจะเกิดการเกาะติดกันระหว่างตัว เมล็ดข้าวกับเปลือกซึ่งส่งผลให้ผลของร้อยละการกะเทาะมีค่าลดลงนั่นเอง

3) กรณี ปรับตั้งพารามิเตอร์ชุดควบคุมความเร็วของอากาศ หรืออัตราการไหล (เชิงปริมาตรของอากาศ) เป็น 2.0 m/s, 2.5 m/s และ 3.0 m/s ตามลำดับ และปรับตั้งพารามิเตอร์ ชุดควบคุมความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์ว คงที่เป็น 6.0 rpm หรืออัตราการป้อนเมล็ดพืช เฉลี่ยเป็น 220 kg/h



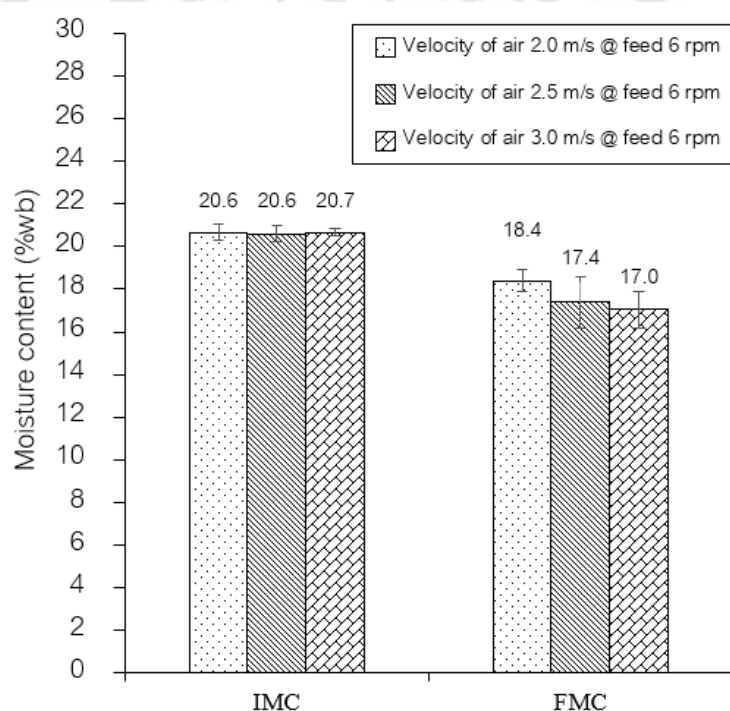
ภาพประกอบ 56 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศที่ทางออกกับเวลาในการอบแห้ง กรณี ความเร็วการไหลอากาศเป็น 2.0, 2.5 และ 3.0 m/s ที่อัตราการป้อนเฉลี่ย 220 kg/h

ภาพประกอบ 56 ขณะการดำเนินการอบแห้ง ด้านการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศร้อนบริเวณทางออกของเครื่องอบแห้ง ผลลัพธ์การทดสอบแสดงให้เห็นว่าในช่วงเริ่มดำเนินการทดสอบถึง 7 min แรก อุณหภูมิของอากาศร้อนภายในห้องอบแห้ง (drying chamber) ลดลงอย่างต่อเนื่องจากนั้นจะเริ่มคงที่หรือเริ่มมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งขึ้นเล็กน้อยตลอดจนถึงสิ้นสุดรอบการทดสอบ โดยเมื่อปรับตั้งชุดควบคุมความเร็วการไหลของอากาศเป็น 2.0 m/s, 2.5 m/s และ 3.0 m/s ทำให้อุณหภูมิอากาศร้อนออกจากห้องอบแห้งเมื่อสิ้นสุดการทดสอบเป็น 37.0 °C, 38.5 °C และ 41.1 °C ตามลำดับ เนื่องจากเมล็ดพืชที่ถูกป้อนเข้าห้องอบแห้งมีอุณหภูมิต่ำกว่าอากาศร้อนเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศร้อนกับเมล็ดพืชทำให้อุณหภูมิอากาศที่ไหลออกจากเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิลดลงอย่างต่อเนื่อง และจากการถ่ายเทความร้อนเมล็ดพืชจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้น้ำที่อยู่ภายในเมล็ดพืชเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำและระเหยสู่อากาศของเมล็ดพืช และถ่ายเทไปสู่อากาศร้อน ซึ่งในช่วงการดำเนินการอบแห้งเมื่อความชื้นถูกพาออกจากเมล็ดพืชทำให้อุณหภูมิในเมล็ดพืชมีปริมาณน้ำลดลงซึ่งในระหว่างนี้อุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากห้องอบแห้งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นสอดคล้องกับผลการทดลองข้างต้น



ภาพประกอบ 57 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ที่ทางออกกับเวลาในการอบแห้ง กรณี ความเร็วอากาศร้อนเป็น 2.0, 2.5 และ 3.0 m/s ที่อัตราการป้อนเฉลี่ย 220 kg/h

ภาพประกอบ 57 ขณะการดำเนินการอบแห้ง ด้านการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity, RH) บริเวณทางออกของเครื่องอบแห้ง ผลลัพธ์การทดสอบแสดงให้เห็นว่าขณะเริ่มการทดสอบถึงช่วง 7 นาทีแรกนั้นความชื้นสัมพัทธ์ที่อ่านค่าได้มีการเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง จากนั้นก็เริ่มคงที่หรือลดลงต่อเนื่องจนสิ้นสุดการทดลอง โดยเมื่อปรับตั้งชุดควบคุมความเร็วการไหลของอากาศเป็น 2.0 m/s, 2.5 m/s และ 3.0 m/s ทำให้ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์เมื่อสิ้นสุดการทดสอบเป็น 39.7%RH, 29.3%RH และ 24.7%RH ตามลำดับ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างเมล็ดพืชกับอากาศร้อนทำให้อุณหภูมิของเมล็ดพืชสูงขึ้นเกิดทำให้การแพร่ของน้ำสู่บริเวณผิวของเมล็ดพืชในรูปความดันของไอน้ำที่ผิวเมล็ดพืชสูงกว่าความดันไอน้ำในอากาศจนเกิดการถ่ายเทมวลไอน้ำสู่อากาศร้อนซึ่งในช่วงนี้ความดันไอน้ำในอากาศจะสูงขึ้นเมื่อเทียบกับความดันไอน้ำในอากาศอิมตัว เป็นผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ในในอากาศมีค่าสูงขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองข้างต้น



ภาพประกอบ 58 ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายภายหลังการทดสอบการอบแห้ง
กรณี ความเร็วอากาศเป็น 2.0, 2.5 และ 3.0 m/s ที่อัตราการป้อนเฉลี่ย 220 kg/h

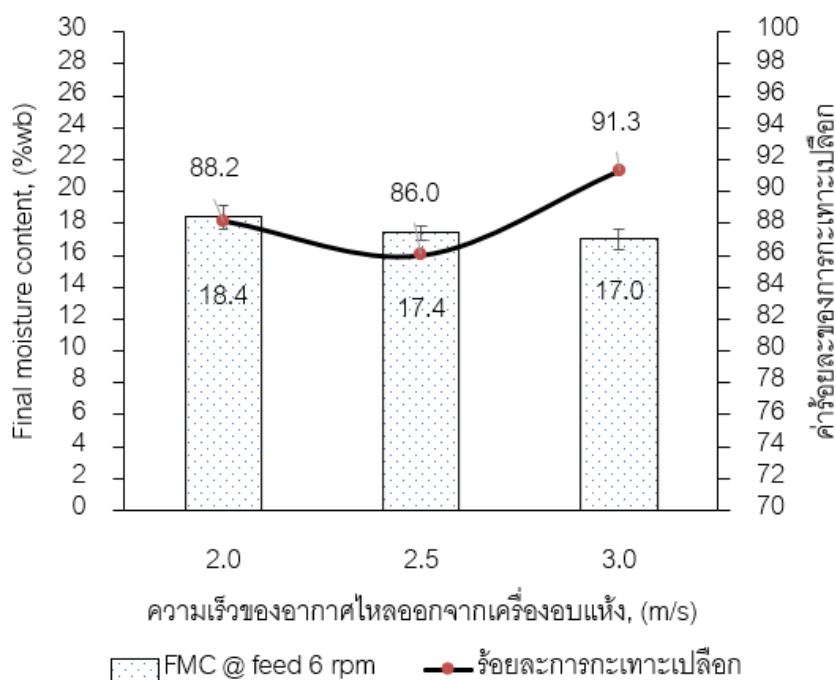
ด้านเวลาที่ใช้ในการอบดำเนินการอบแห้ง (drying time) เฉลี่ย 14 min ที่อัตราการป้อนข้าวเปลือกเข้าห้องอบแห้งเฉลี่ยเช่นเดียวกันที่ 220 kg/h หรือควบคุมความเร็วรอบการหมุนของแกนชุดโรตารีวาล์ว (rotary valve feeder) เป็น 6.0 rpm ตลอดการทดสอบ ดังภาพประกอบ 48 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงการตัวแปรต้นในการทดสอบเมื่อปรับตั้งความเร็วการไหลของอากาศร้อนให้มีค่าสูงขึ้นจาก 2.0 m/s, 2.5 m/s และ 3.0 m/s ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วการไหลของอากาศไม่ส่งผลกับเวลาในการดำเนินการอบแห้งมากนัก โดยเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในภายในห้องอบแห้งเฉลี่ย (mean residence time) เป็น 2.3 min

เมื่อสิ้นสุดการทดสอบ กรณีที่ 3) ผลลัพธ์การทดสอบการอบแห้งของระบบควบคุมแบบปรับตั้งพารามิเตอร์คงที่ ดังภาพประกอบ 64 ผลลัพธ์การทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง เมื่อป้อนข้าวเปลือกที่มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นในช่วง 20-21 %wb (การทดสอบวัดปริมาณความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเป็น 20.6%wb

ด้านปริมาณ การลดความชื้นพบว่าสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกจนมีความชื้นสุดท้าย (final moisture content, FMC) เป็น 18.4%wb, 17.4%wb และ 17.0%wb และมีค่าเบี่ยงเบน (deviation) เป็น 0.5, 1.2 และ 0.9 ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 58 การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ พบว่าการสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งลดลงเมื่อความเร็วการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มความเร็วของการไหลของอากาศทำให้อัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 3.3 ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีมวลของอากาศร้อนจำนวนมากขึ้นมาทำการถ่ายเทมวลความชื้นออกจากห้องอบแห้ง โดยมีการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเป็น 11.9, 13.3 และ 13.2 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 9

ตาราง 8 การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (ที่อัตราการป้อนเฉลี่ย 220 kg/h)

Drying condition			Mass of water	Energy consumption		SEC
hot-air temp.	speed of rotary valve	velocity of air	removed	E _{thermal}	E _{electrical}	
°C	rpm	m/s	kg	MJ	MJ	MJ/kg
130	6.0	2.0	0.19	2.01	0.184	11.5
		2.5	0.21	2.51	0.194	12.9
		3.0	0.21	2.51	0.162	12.7



ภาพประกอบ 59 แผนภูมิความสัมพันธ์ของความชื้นสุดท้ายต่อค่าร้อยละการกะเทาะเปลือก (ที่อัตราการป้อนเฉลี่ย 220 kg/h)

ด้านคุณภาพ ในแง่มุมของความชื้นสุดท้ายต่อค่าร้อยละการกะเทาะเปลือกตามวิธีที่ได้กล่าวข้างต้น พบว่าปริมาณความชื้นสุดท้ายต่ำส่งผลให้ค่าร้อยละการกะเทาะเปลือกสูงขึ้นตามไปด้วย โดยมีค่าร้อยละการกะเทาะเปลือกสูงสุดร้อยละ 91.3 ที่ความชื้นสุดท้าย (FMC) เฉลี่ยเป็น 17.0%wb ดังแสดงในภาพประกอบ 59

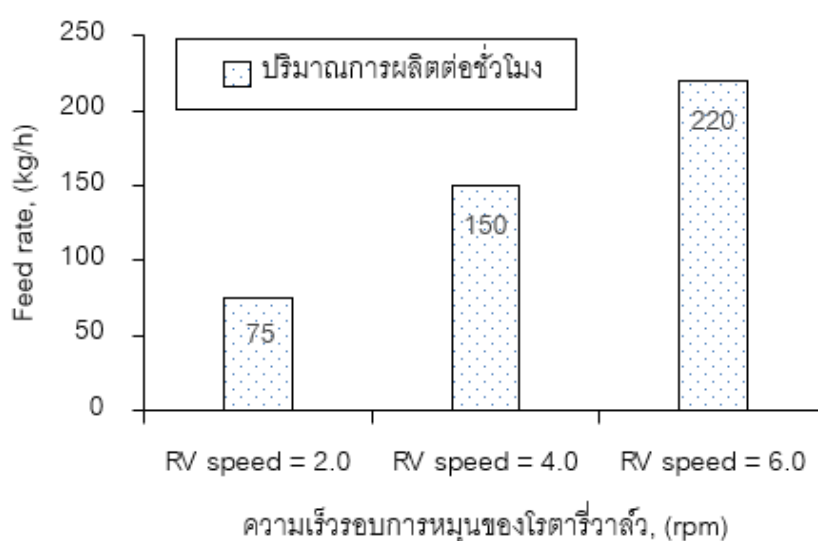
สรุปผลการทดสอบทั้ง 3 กรณี พบว่าตัวแปรควบคุมส่งผลต่อความชื้นสุดท้ายของเมล็ดพืชภายหลังการดำเนินการอบแห้ง นอกจากนี้ยังพบว่าในทุกกรณี เมื่อความเร็วการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศร้อนมีค่าสูงขึ้นเนื่องอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่เพิ่มขึ้นทำให้ต้องใช้มวลอากาศเข้าเครื่องอบแห้งสันดาปร่วมกับมวลของเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นด้วย และในทางตรงกันข้ามทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่บริเวณทางออกเครื่องอบแห้งมีค่าเฉลี่ยลดลงตามความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้น และการปรับความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วสูงขึ้นทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศออกจากเครื่องอบแห้งมีค่าร้อยละมากขึ้น ดังที่ได้อธิบายในตอนต้น

ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก

โดยในส่วนนำเสนอประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก ซึ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ปริมาณการผลิตต่อชั่วโมง และการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการดำเนินการอบแห้ง

ปริมาณการผลิต (Quantity)

แสดงปริมาณการผลิตต่อชั่วโมงของแต่ละความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์ว ที่ทำหน้าที่ป้อนเมล็ดข้าวเปลือกเข้าห้องอบแห้งอย่างต่อเนื่อง



ภาพประกอบ 60 ปริมาณการผลิตต่อชั่วโมงจากการทดสอบการอบแห้ง ที่ความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์ว ต่าง ๆ

ภาพประกอบ 60 แสดงปริมาณการผลิตต่อชั่วโมงสูงสุดของเครื่องอบแห้งเป็น 220 kg/h ซึ่งอัตราการผลิตของเครื่องอบแห้งนี้จะแปรตามชั่วโมงการดำเนินการผลิต ตัวอย่างเช่น ถ้ากลุ่มเกษตรกรต้องการลดความชื้นของข้าวเปลือกสดที่ได้จากการเก็บเกี่ยวก่อนนำไปจำหน่าย และใช้เวลาในการดำเนินการอบแห้งเฉลี่ย 8 ชั่วโมง เครื่องนี้ก็มีกำลังผลิตสูงสุดถึง 1,760 kg/day ทั้งนี้เป็นการดำเนินการเพื่อไล่ความชื้นของข้าวเปลือกเท่านั้น ซึ่งหากต้องการความชื้นสุดท้ายในระดับที่เหมาะสมจะต้องดำเนินการอบแห้งต่อเนื่องจนกว่าความชื้นอยู่ในระดับที่ต้องการ

การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC)

จากที่ได้เสนอปริมาณการผลิตต่อชั่วโมง เพื่อใช้เป็นข้อมูลการบริหารจัดการที่สอดคล้องกับผลผลิตที่ได้จากชุมชนหรือกลุ่มเกษตรกร นอกจากนี้ยังมีอีกตัวแปรที่ต้องพิจารณาสำหรับตัดสินใจในการดำเนินลดความชื้นให้กับข้าวเปลือกสด คือการใช้พลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งจากผลการทดสอบทั้ง 3 กรณี เพื่อเปรียบเทียบ ราคาจำหน่าย ต้นทุนพลังงาน และ การใช้พลังงานจำเพาะ ดังแสดงในตาราง 10

ตาราง 9 ประมาณราคาจำหน่ายภายหลังการอบแห้งและการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

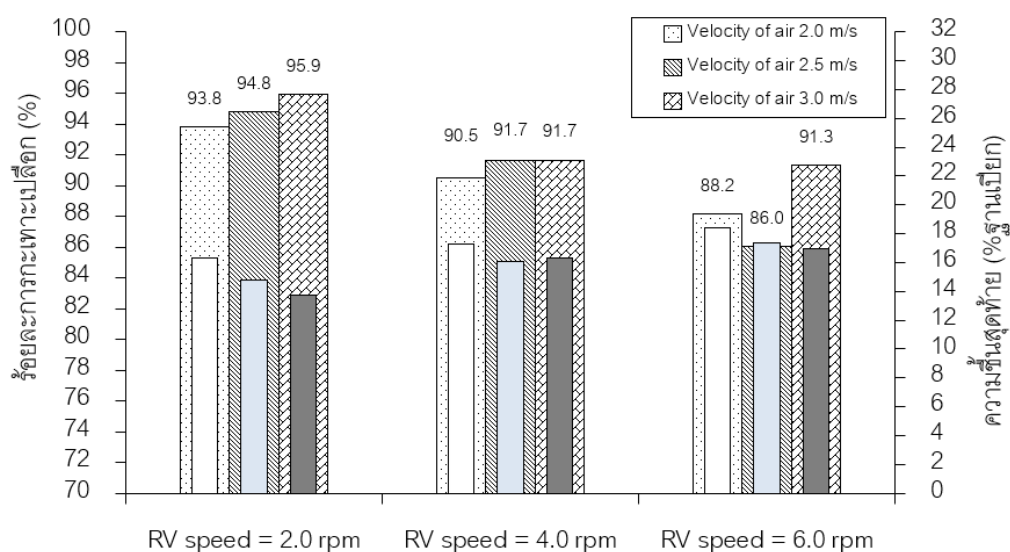
Drying condition			Moisture content (MC)		Selling price/ton				Drying cost/ton		Profit	SEC
temp.	RV speed	velocity of air	Initial	final	before	after	true	diff.	E _{thermal}	E _{electrical}		
°C	rpm	m/s	%wb			THB			THB			MJ/kg
130	2.0	2.0	20.7	16.3		14,775	13,998	348	449	109	-210	17.3
		2.5	20.7	14.8		15,000	13,961	311	553	116	-359	17.6
		3.0	20.6	13.7		15,000	13,801	151	588	104	-114	16.2
	4.0	2.0	20.5	17.3		14,550	13,987	337	277	65	-5	21.7
		2.5	20.7	16.1	13,650	14,775	13,965	315	242	59	14	11.9
		3.0	20.8	16.3		14,775	13,981	331	277	60	-6	11.7
	6.0	2.0	20.6	18.4		14,325	13,939	289	138	36	114	11.5
		2.5	20.6	17.4		14,550	13,986	336	173	39	125	12.9
		3.0	20.7	17.0		14,550	13,901	251	173	32	46	12.7

ตารางที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบการประเมินราคาจำหน่ายภายหลังการอบแห้ง จากผลลัพธ์ของการอบแห้งทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกมีความชื้นลดลงเป็นผลให้ราคาจำหน่ายสูงขึ้นตามการกำหนดราคาขายดังที่ได้กล่าวไว้ในเนื้อหาบทที่ 1 ดังแสดงราคาในช่องราคาจำหน่ายต่อน้ำหนักข้าวเปลือก 1 ตัน (selling price/ton) ช่อง (selling price/ton: after) มีราคาจำหน่ายสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับราคาขายขณะความชื้นเริ่มต้น ช่อง (selling price/ton: before) ทั้งนี้ตามความเป็นจริงเมื่อพิจารณาข้าวเปลือกสดจำนวน 1,000 kg หรือ 1 ton นั้นเมื่อเกษตรกรนำมอลดความชื้นด้วยเครื่องแล้วมีความชื้นสุดท้ายลดลงจะทำให้น้ำหนักลดลงด้วย ตัวอย่างเช่น ข้าวเปลือกจำนวน 1,000 kg มีความชื้นเริ่มต้นเป็น 20.7 %wb (ความชื้นฐานเปียก) ถ้าจำหน่ายสามารถประมาณราคา 13,650 บาท ภายหลังการอบแห้งความชื้นลดลงเหลือ 14.8 %wb ที่ความชื้นระดับนี้น้ำหนักข้าวเปลือกลดลงเหลือ 931 kg ทำให้จำหน่ายในราคาจริงเป็น 13,961 บาท ดังแสดงช่อง (selling price/ton: true) จากผลการศึกษาเมื่อพิจารณาน้ำหนักที่ลดลงแล้วราคาขายภายหลังการดำเนินการอบแห้งมีความแตกต่างกันไม่มากนัก นอกจากนี้หาก

พิจารณาถึงต้นทุนการใช้พลังงานปฐมภูมิ (primary cost) คือการใช้พลังงานความร้อนและไฟฟ้า ในการดำเนินการอบแห้งข้าวเปลือกจำนวน 1,000 กิโลกรัม งานวิจัยนี้ประเมินต้นทุนพลังงาน ความร้อนจากราคาขายก๊าซปิโตรเลียมเหลว (liquefied petroleum gas, LPG) ตามกรมการค้า ภายในในแจ้งการจำหน่ายตามราคาที่กระทรวงพลังงานกำหนด (ข่าวกรมการค้าภายใน, 2563) โดยมีราคาประมาณ 24.2 บาทต่อหนึ่งกิโลกรัม และต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้า ประมาณ 5 บาทต่อ หนึ่งหน่วย ดังแสดงช่อง (drying cost/ton) ทำให้เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนพลังงานความร้อนสูงเฉลี่ย คิดเป็นร้อยละ 78 ของการใช้พลังงานไฟฟ้า เนื่องจากเครื่องอบแห้งเครื่องต้นแบบสำหรับชุมชนใช้ พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงก๊าซปิโตรเลียมเหลวทำให้เป็นต้นทุนการอบแห้งต่อน้ำหนัก ข้าวเปลือก 1,000 กิโลกรัม สูงมากหากเกษตรกรผู้ใช้เครื่องมีการปรับตั้งเครื่องอบแห้งไม่เหมาะสม ดังที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งถ้ามีการใช้ความร้อนจากเชื้อเพลิงชีวมวล (biomass) เช่นเศษวัสดุเหลือทิ้ง จากการเกษตร เช่น ฟางข้าว เศษลำต้นข้าว แกลบ เป็นต้น จะทำให้ต้นทุนพลังงานความร้อน ลดลง สุดท้ายการเปรียบเทียบการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งพบว่าการปรับตั้ง ความเร็วการไหลของอากาศสูงขึ้นจะทำให้การสิ้นเปลืองพลังงานมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนภายในห้องอบแห้งสูงขึ้น

คุณภาพข้าวภายหลังการอบแห้ง

ส่วนนี้จะแสดงถึงคุณภาพข้าวภายหลังการอบแห้ง โดยในงานวิจัยนี้จะนำเสนอถึง ปริมาณความชื้นสุดท้าย (final moisture content, FMC) ที่สัมพันธ์หรือส่งผลให้ค่าร้อยละการ กะเทาะของข้าวเปลือกสูงดังภาพประกอบที่ 61 แสดงการเปรียบเทียบค่าความชื้นสุดท้ายภายหลัง การอบแห้งและค่าร้อยละของการกะเทาะเปลือกที่ความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์ว ต่าง ๆ ค่าร้อยละการกะเทาะเปลือกสามารถอ่านค่าได้จากแกนของแผนภาพทางซ้ายมือ และปริมาณ ความชื้นสุดท้ายสามารถอ่านค่าจากแกนของแผนภาพทางขวามือที่ความเร็วรอบการหมุนของ โรตารีวาล์ว เป็น 2.0 rpm, 4.0 rpm และ 6.0 rpm ตามลำดับ ผลลัพธ์การเปรียบเทียบพบว่า ความชื้นสุดท้ายมีผลต่อค่าร้อยละการกะเทาะออกของเปลือกข้าวโดยที่ความชื้นสุดท้ายในช่วง 14-15 %wb จะทำให้ค่าร้อยละการกะเทาะเปลือกข้าวออกสูงเกินร้อยละ 90 ซึ่งเหมาะสมและ สอดคล้องกับการรับซื้อข้าวเปลือกที่ความชื้นระดับนี้เพื่อนำไปแปรรูปต่อไป



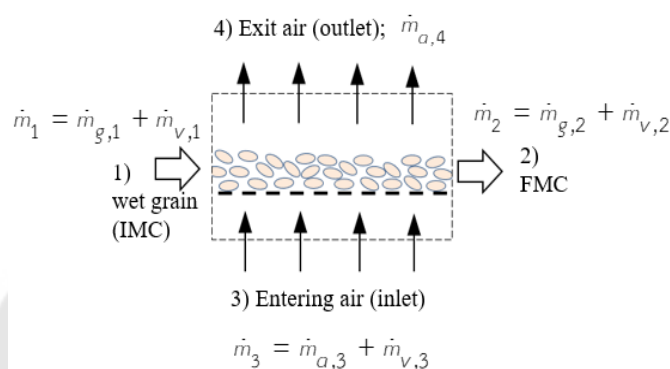
ภาพประกอบ 61 เปรียบเทียบค่าร้อยละการกะเทาะเปลือก
ที่ความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์ว ต่าง ๆ

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาระหว่างต้นทุนพลังงานป้อนกับการสิ้นเปลืองพลังงาน
จำเพาะ ดังแสดงในตาราง 10 มีข้อสังเกตว่าในกรณีความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วเป็น 2
rpm ในทุกความเร็วการไหลของอากาศ และกรณีความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วเป็น 4
rpm ที่ความเร็วการไหลของอากาศเป็น 2 m/s พบว่ามีการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูง
สอดคล้องกับต้นทุนพลังงาน ทำให้ชี้ชัดว่าการปรับตั้งพารามิเตอร์เช่นนี้อาจไม่คุ้มค่าค่าใช้จ่ายใน
การดำเนินการอบแห้ง จึงมีความจำเป็นเร่งด่วนในการสร้างขั้นตอนวิธีของระบบควบคุมอัตโนมัติ
ดังต่อไปนี้

การสร้างขั้นตอนวิธีของระบบควบคุมอัตโนมัติ

จากการทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่ใช้ระบบควบคุมแบบปรับตั้งพารามิเตอร์
คงที่ตามเงื่อนไขการทดลองดังที่ได้แสดงข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการปรับตั้งพารามิเตอร์ที่ไม่
เหมาะสมกับความเร็วรอบการหมุนของโรตารี วาล์วและความเร็วของอากาศร้อนจะส่งผลให้เกิด
การสิ้นเปลืองพลังงานที่สูงขึ้น อีกทั้งยังต้องไม่คุ้มค่าต่อต้นทุนการใช้พลังงานในการดำเนินการ
อบแห้งอีกด้วย ดังนั้นในส่วนนี้จะเสนอแนวทางการสร้างขั้นตอนวิธีของระบบควบคุมอัตโนมัติของ
เครื่องอบแห้ง โดยมีส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ การประเมินความชื้นที่ลดลงขณะดำเนินการอบแห้ง
และ การกำหนดลำดับการปรับการควบคุมจากข้อมูลการทดสอบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การประเมินความชื้นที่ลดลงขณะดำเนินการอบแห้ง งานวิจัยนี้เสนอการประเมินความชื้นที่ลดลงทางอ้อมด้วยวิธีสมดุลมวล (mass balance method) ระหว่างมวลของอากาศร้อนที่กับมวลของข้าวเปลือกที่ถูกป้อนเข้าเครื่องอบแห้ง ซึ่งมีลำดับและผลลัพธ์การดำเนินการวิจัยดังนี้



ภาพประกอบ 62 การสมดุลมวลภายในห้องอบแห้ง

ภาพประกอบ 62 แสดงขอบเขตการควบคุม (boundary condition) ภายในห้องอบแห้งขณะดำเนินการอบแห้งอ้างอิงจากหมายเลข 1) คือ ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น (IMC) หรือ (wet paddy) ที่ป้อนเข้าห้องอบแห้ง (drying chamber) และ 2) คือ ข้าวเปลือกที่ผ่านห้องอบแห้งที่มีความชื้นสุดท้าย (FMC) 3) คือ อากาศร้อนที่เข้าสู่ห้องอบแห้ง และ 4) คือ อากาศร้อนออกจากห้องอบแห้ง ซึ่งสามารถพิจารณาการถ่ายเทมวลของไอน้ำและมวลของอากาศได้ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2

1.1 สมดุลมวลของน้ำภายในเมล็ดพืช ($\dot{m}_v$):

$$\dot{m}_{v,1} = \dot{m}_{v,2} + \dot{m}_{v,3} \quad (4.1)$$

1.2 สมดุลมวลของอากาศ ($\dot{m}_a$):

$$\dot{m}_{a,3} = \dot{m}_{a,4} = \frac{A \times V}{v} \quad (4.2)$$

เมื่อ $\dot{m}_v$ คือ อัตราการไหลของน้ำภายในเมล็ดพืช, kg/s

$\dot{m}_a$ คือ อัตราการไหลของอากาศแห้ง, kg/s

- A คือ พื้นที่ช่องท่อก๊าซออกจากห้องอบแห้ง, m^2
 V คือ ความเร็วการไหลของอากาศ, m/s
 v คือ ปริมาตรจำเพาะของอากาศ, m^3/kg

ตัวห้อย 1, 2, 3 และ 4 หมายถึงสถานะที่ตามทีระบุในภาพประกอบ 68
 ทั้งนี้ในการคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นของอากาศต้องอาศัยค่าความดันไอน้ำของอากาศ
 (partial pressure of water vapor), ค่าความดันไออิ่มตัว และค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ดัง
 แสดงดังสมการ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

1.3 ความดันไอน้ำของอากาศ (P_v):

$$P_v = P_{vs} \times \left[\frac{RH}{100} \right] \quad (4.3)$$

1.4 อัตราส่วนความชื้น (w):

$$w = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_a} = \frac{0.622 P_v}{P - P_v} \quad (4.4)$$

- เมื่อ P_v คือ ความดันไอน้ำของอากาศ, Pa
 P_{vs} คือ ความดันไออิ่มตัวของอากาศ, Pa
 w คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศ, kg of water/kg dry air

จากการประยุกต์ใช้ตัวรับรู้อุณหภูมิและความชื้นที่ติดตั้งในตำแหน่ง
 ช่องทางเข้าและช่องทางออกของเครื่องอบแห้งร่วมกับการคำนวณดังสมการ 4.1 ถึง 4.4 ทำให้
 สามารถประมาณค่าปริมาณความชื้นที่เกิดการถ่ายเทมวลให้กับอากาศได้ดังสมการที่ 4.5 และ
 นำไปคำนวณหาค่าความชื้นสุดท้ายได้ดังสมการที่ 4.6 ดังแสดงต่อไปนี้

1.5 มวลไอน้ำที่ระเหยออกที่สภาวะ 4 ($m_{v,4}$):

$$m_{v,4} = (w_4 - w_3) \times \dot{m}_{a,3} \times n \quad (4.5)$$

1.6 ความชื้นสุดท้ายที่สภาวะ 4 (FMC_4):

$$FMC_4 = \frac{m_{r,1} IMC_1 - 100 m_{v,4}}{m_{r,1} - m_{v,4}} \quad (4.6)$$

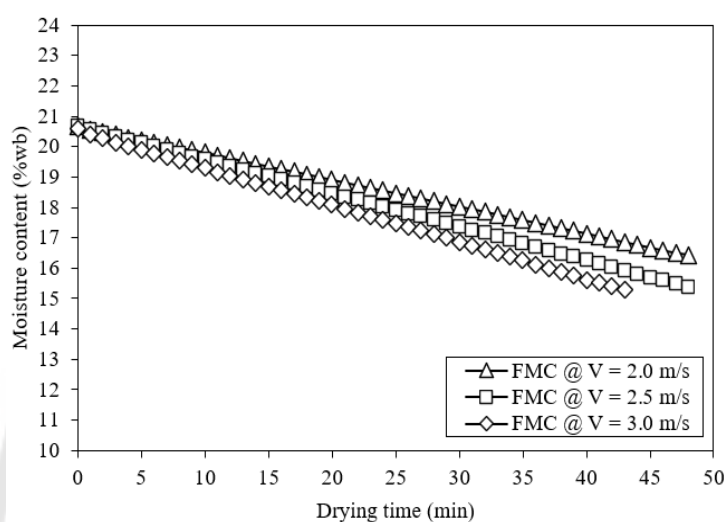
- เมื่อ FMC คือ ความชื้นสุดท้ายภายหลังการอบแห้ง, %wb
 IMC คือ ความชื้นเริ่มต้นก่อนอบแห้ง, %wb
 m_r คือ มวลของข้าวเปลือกก่อนการทดสอบ, kg
 m_v คือ มวลไอน้ำที่ระเหยออก, kg
 n คือ ตัวประกอบการระเหยไอน้ำออกจากเมล็ดพืช, ทศนิยม

จากลำดับการคำนวณเพื่อประมาณค่าความชื้นสุดท้าย (FMC) ภายหลังจากการดำเนินการอบแห้งสามารถนำพัฒนาระบบควบคุมการดำเนินการอบแห้งในด้านการแสดงข้อมูลความชื้นสุดท้ายขณะดำเนินการอบแห้ง ทำให้ผู้ใช้ทราบระดับความชื้นที่ลดลง ด้วยการนำข้อมูลอุณหภูมิของอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ที่เข้าและทางออกของเครื่องอบแห้งมาหาค่าอัตราส่วนความชื้น ซึ่งผลต่างของอัตราส่วนความชื้นในช่วง 10 นาทีจะถูกบันทึกและคำนวณหาความชื้นที่ลดลงด้วยการคูณกับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศไหลออกจากเครื่องอบแห้ง ดังตาราง 11

ตาราง 10 ข้อมูลการประเมินความชื้นสุดท้ายด้วยการสมดุลมวล

Drying condition	Drying time	DHT22 sensor		EE31 sensor		Humidity ratio (ω) (kg water/kg dry air)			IMC	FMC
		T_3 (°C)	RH_3 (%)	T_4 (°C)	RH_4 (%)	ω_3	ω_4	$(\omega_4 - \omega_3)$		
$V = 2.0$ m/s	(start)	28.8	48.0	69.3	11.3	0.012	0.022	0.010	20.7	20.7
	10	29.5	48.0	45.8	42.4	0.012	0.027	0.015		19.8
	20	29.7	49.0	46.0	45.8	0.013	0.030	0.017		18.9
	30	29.9	50.0	47.3	42.0	0.013	0.029	0.016		18.0
	40	30.1	51.1	48.0	41.7	0.014	0.030	0.016		17.1
	(finish) 48	30.4	51.2	48.4	33.4	0.014	0.024	0.010		16.4
$V = 2.5$ m/s	(start)	27.6	46.1	57.5	16.1	0.011	0.018	0.007	20.7	20.7
	10	28.5	46.2	44.1	46.3	0.011	0.027	0.016		19.6
	20	29.1	47.4	47.2	41.5	0.012	0.029	0.017		18.5
	30	29.6	48.3	49.6	36.2	0.013	0.028	0.016		17.4
	40	29.9	49.8	50.7	34.1	0.013	0.028	0.015		16.3
	(finish) 48	30.1	50.0	51.9	33.4	0.013	0.029	0.016		15.4
$V = 3.0$ m/s	(start)	27.6	47.0	69.6	10.6	0.011	0.021	0.010	20.6	20.6
	10	28.4	47.8	48.9	34.8	0.012	0.026	0.014		19.3
	20	29.0	49.7	53.5	28.9	0.012	0.027	0.015		18.1
	30	29.5	50.8	55.8	27.6	0.013	0.029	0.016		16.9
	40	29.8	52.3	57.3	25.6	0.014	0.029	0.015		15.6
	(finish) 43	29.9	52.9	57.2	24.7	0.014	0.028	0.014		15.3

ผลประเมินหาค่าความชื้นสุดท้ายด้วยวิธีสมมูลมวล (FMC) และแสดงการลดลงของความชื้นขณะทำการทดสอบในช่วงอัตราการแห้งคงที่ (constant rate) ดังภาพประกอบ 63



ภาพประกอบ 63 การประเมินความชื้นขณะดำเนินการอบแห้ง

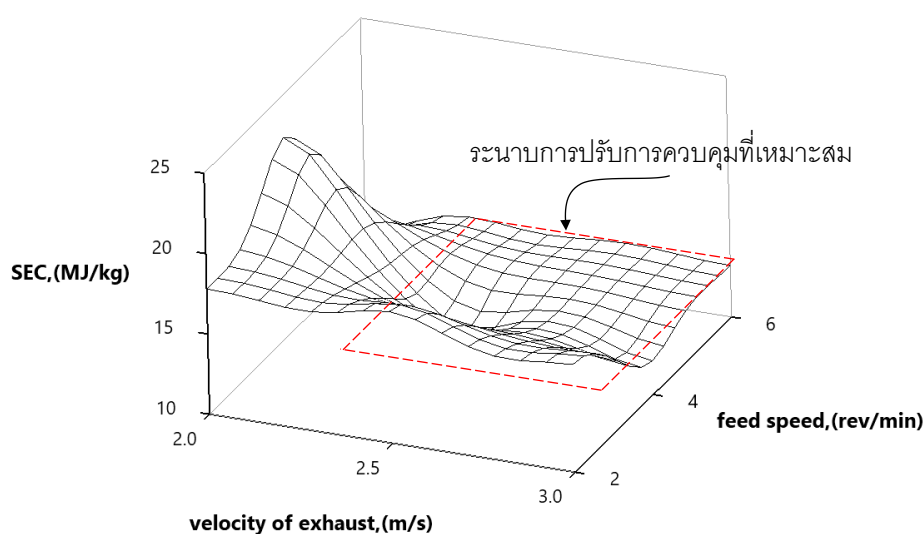
นอกจากนี้ผลการประเมินยังถูกนำไปเปรียบเทียบกับการวัดความชื้นสุดท้ายด้วยเครื่องมือวัด (moisture detector) พบว่าผลการประเมินมีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 4.3 ดังตาราง 12 และสามารถนำผลประเมิน แสดงผลข้อมูลให้ผู้ใช้ เลือกพิจารณาว่าจะดำเนินการลดความชื้นให้กับเมล็ดพืชถึงระดับใด ตามต้องการ

ตาราง 11 เปรียบเทียบผลการประเมินความชื้นกับเครื่องมือวัดความชื้น

drying condition		final moisture content (FMC)				% error
hot air temp.	velocity air flow	grain detector		estimated		
		avg.	dev.	avg.	dev.	
130	2.0	16.3	0.8	15.3	0.5	6.1
	2.5	14.8	0.5	13.9	0.6	6.1
	3.0	13.7	0.7	13.8	0.4	0.7
average error						4.3

2) การกำหนดลำดับการปรับการควบคุมจากข้อมูลการทดสอบ หรือการสร้างการควบคุมแบบอัตโนมัติ

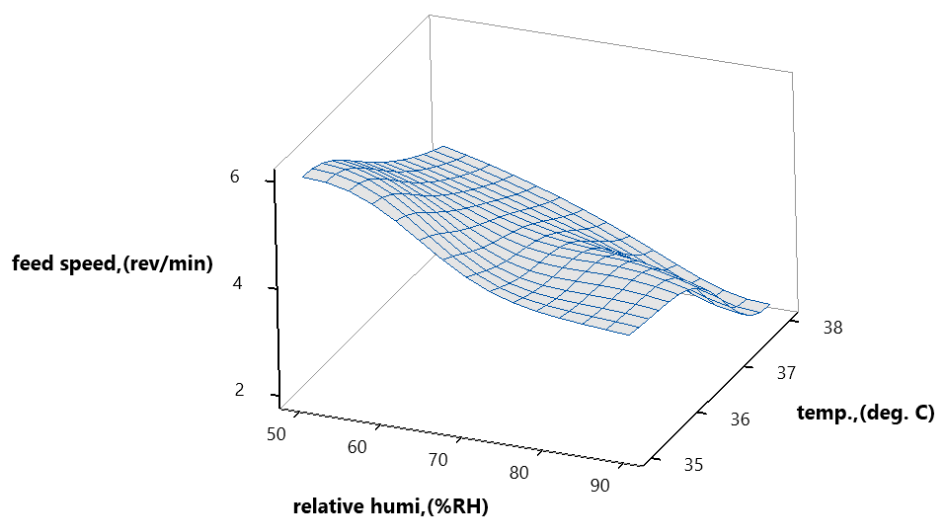
เมื่อนำข้อมูลการปรับตั้งพารามิเตอร์ตามการทดลองข้างต้นต่อผลการดำเนินการอบแห้งที่ใช้ดัชนีการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ดังภาพประกอบ 64 เพื่อระบุว่าการปรับตั้งพารามิเตอร์เหมาะสมและคุ้มค่าต่อการดำเนินการอบแห้ง



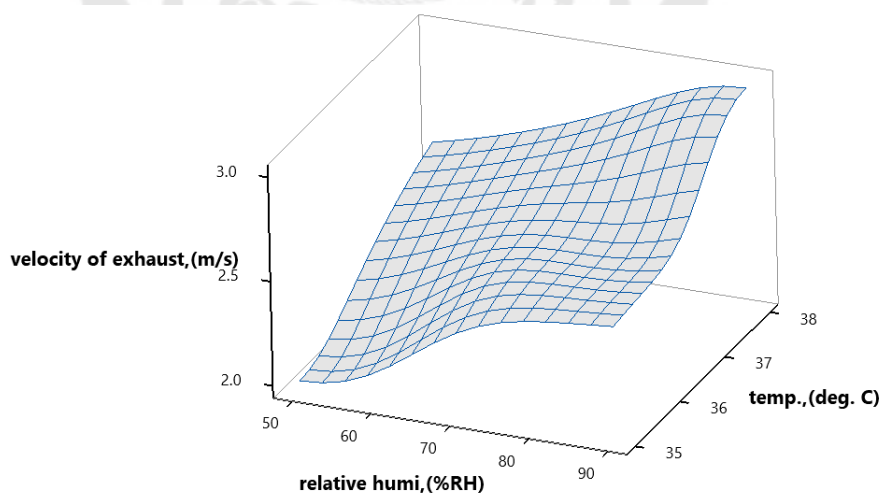
ภาพประกอบ 64 การสิ้นเปลืองพลังงานภายหลังการดำเนินการอบแห้ง

ดังภาพประกอบ 64 ผู้วิจัยสามารถกำหนดขอบเขตข้อมูลการปรับตั้งพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ที่ไม่เหมาะสม และการปรับตั้งความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์ว และการปรับตั้งความเร็วการไหลของอากาศต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นของอากาศร้อนที่ออกจากเครื่องอบแห้ง แสดงดังภาพประกอบ 65 และภาพประกอบ 66 ตามลำดับ พบว่าการปรับตั้งค่าความเร็วของอากาศออก เป็น 2 m/s ที่ความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์ว 2 และ 4 rev/min เกิดการใช้สิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่สูง ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้จากทางออกของเครื่องอบแห้ง ทั้งนี้ เนื่องมาจากการปริมาณความชื้นของวัสดุที่ป้อนเข้าห้องอบแห้งมีปริมาณน้อยและนอกจากนี้การปรับตั้งความเร็วอากาศน้อยทำให้มวลอากาศดูดซับความชื้นออกจากวัสดุมีค่าน้อยตามไปด้วย และในทางตรงกันข้ามที่ความเร็ว 4 และ 6 rpm (rev/min) ส่งผลให้ปริมาณความชื้นภายในห้องอบแห้งสูงขึ้นใกล้เคียงกับค่าความความชื้นสูงสุดที่อากาศจะสามารถดูดซับไว้ได้ในช่วงความเร็ว

ของอากาศไหลออกจากห้องอบแห้งเป็น 2.5 และ 3.0 m/s ทำให้มวลอากาศไหลผ่านห้องอบแห้ง
ดูดซับความชื้นได้มากขึ้น เป็นผลให้การปรับตั้งดังกล่าวส่งผลต่อการสิ้นเปลืองพลังงานลดลง
แสดงตามภาพประกอบที่ 66



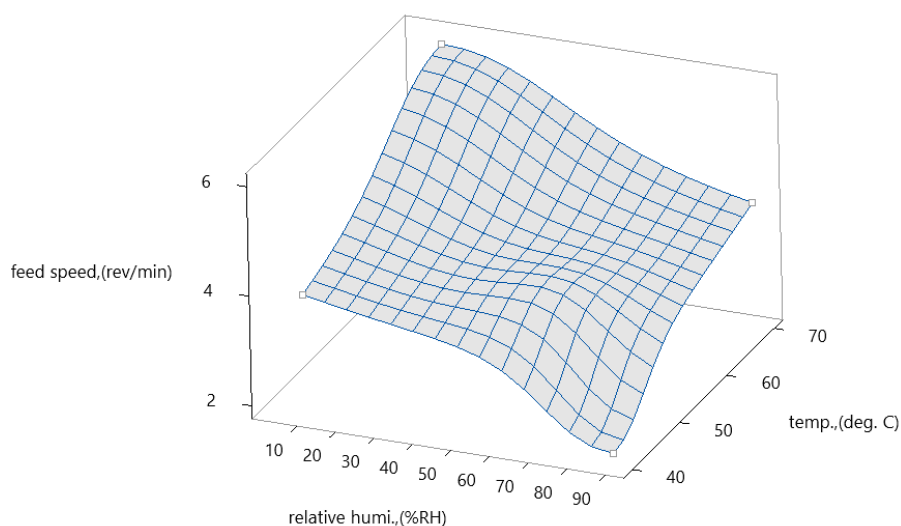
ภาพประกอบ 65 ความสัมพันธ์ของความเร็วยรอบการหมุนของโรตารีวาล์วกับอุณหภูมิและ
ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ออกจากเครื่องอบแห้ง



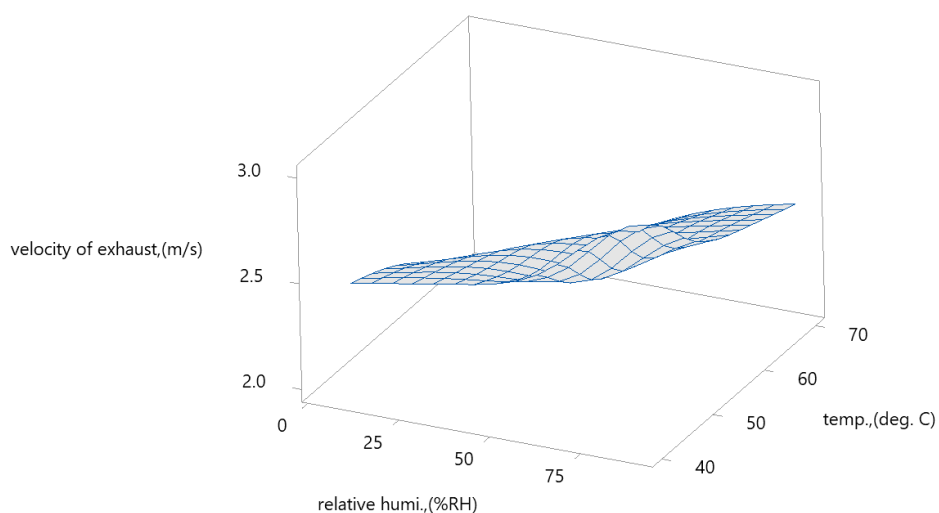
ภาพประกอบ 66 ความสัมพันธ์ของความเร็วยของอากาศกับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของ
อากาศที่ออกจากเครื่องอบแห้ง

การสร้างการปรับตั้งพารามิเตอร์การอบแห้งแบบอัตโนมัติ มี 2 ขั้นตอนดังนี้

- 1) ใช้ข้อมูลการทดลองเพื่อกำหนดพื้นผิวการปรับการควบคุม
- 2) สร้างสมการถดถอยเชิงเส้น (linear regression) จากข้อมูลตามข้อ 1)



ภาพประกอบ 67 พื้นผิวการปรับความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศออกจากเครื่องอบแห้ง



ภาพประกอบ 68 พื้นผิวการปรับความเร็วอากาศที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศออกจากเครื่องอบแห้ง

การกำหนดพื้นที่ผิวควบคุมของการปรับพารามิเตอร์ความเร็วรอบการหมุน และความเร็วของอากาศไหลออกจากเครื่องอบแห้งนั้น มีรายละเอียด ดังภาพประกอบ 67 แสดงถึงการกำหนดพารามิเตอร์การปรับความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วตามความอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศออกจากเครื่องอบแห้ง ดังนี้ โดยเมื่ออุณหภูมิของอากาศต่ำเป็น 40°C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูงเป็น $90\% \text{RH}$ จะต้องปรับความเร็วการหมุนของโรตารีวาล์วน้อยสุดเป็น 2 rpm และในทางตรงกันข้าม เมื่ออุณหภูมิอากาศสูงขึ้นเป็น 70°C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำลงเป็น $10\% \text{RH}$ จะต้องปรับความเร็วการหมุนของโรตารีวาล์วมากที่สุดเป็น 6 rpm ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วส่งผลให้ความชื้นเข้าสู่ห้องอบแห้งในปริมาณที่สูงซึ่งดังนั้นเครื่องอบแห้งต้องปรับการควบคุมให้สอดคล้องกับความสามารถของการถ่ายเทความร้อนและมวลออกจากเครื่องอบแห้งด้วย ดังภาพประกอบ 68 แสดงถึงการกำหนดพารามิเตอร์การปรับความเร็วการไหลของอากาศตามความอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศออกจากเครื่องอบแห้ง ดังนี้ โดยเมื่ออุณหภูมิของอากาศต่ำเป็น 40°C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูงเป็น $90\% \text{RH}$ จะต้องปรับความเร็วการไหลของอากาศมากที่สุดเป็น 3.0 m/s และในทางตรงกันข้าม เมื่ออุณหภูมิอากาศสูงขึ้นเป็น 70°C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำลงเป็น $10\% \text{RH}$ จะต้องปรับความเร็วการไหลของอากาศน้อยสุดเป็น 2.0 m/s ทั้งนี้เนื่องจากการปรับความเร็วการไหลของอากาศที่ไม่เหมาะสมและสอดคล้องจะทำให้สูญเสียความร้อนออกจากเครื่องอบแห้ง ส่งผลต่อการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะโดยตรงดังผลการทดลองที่ได้นำเสนอข้างต้น

การสร้างสมการการปรับความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศออกจากเครื่องอบแห้ง โดยใช้ฟังก์ชันของโปรแกรม Microsoft office Excel 2016 (Data Analysis) ดังตาราง 13 และ 14 ซึ่งผลการถดถอยเชิงเส้นให้ค่าความสมบูรณ์ของสมการกับข้อมูล (R Square) เท่ากับ 1 หรือ 100% และให้ค่าสัมประสิทธิ์ Intercept, X Variable 1 และ X Variable 2 ตามลำดับ

ตาราง 12 การถดถอยเชิงเส้นของการปรับความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์ว

<i>Regression Statistics</i>				
R Square	1			
ANOVA				
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>
Regression	2	8	4	-
Residual	0	0	65535	
Total	2	8		
<i>Standard</i>				
	<i>Coefficients</i>	<i>Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>
Intercept	36	0	65535	-
X Variable 1	-0.4	0	65535	-
X Variable 2	-0.2	0	65535	-

ตาราง 13 การถดถอยเชิงเส้นของการปรับความเร็วการไหลของอากาศ

<i>Regression Statistics</i>				
R Square	1			
ANOVA				
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>
Regression	2	0.5	0.25	-
Residual	0	0	65535	
Total	2	0.5		
<i>Standard</i>				
	<i>Coefficients</i>	<i>Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>
Intercept	-5.5	0	65535	-
X Variable 1	0.1	0	65535	-
X Variable 2	0.05	0	65535	-

นำที่ได้แทนค่าลงในการควบคุมอัตโนมัติดังสมการที่ 4.7 และ 4.8 แสดง ส่วนควบคุมอัตโนมัติจากการสร้างการปรับตั้งพารามิเตอร์การอบแห้งอัตโนมัติที่ได้จากการถดถอยข้อมูล

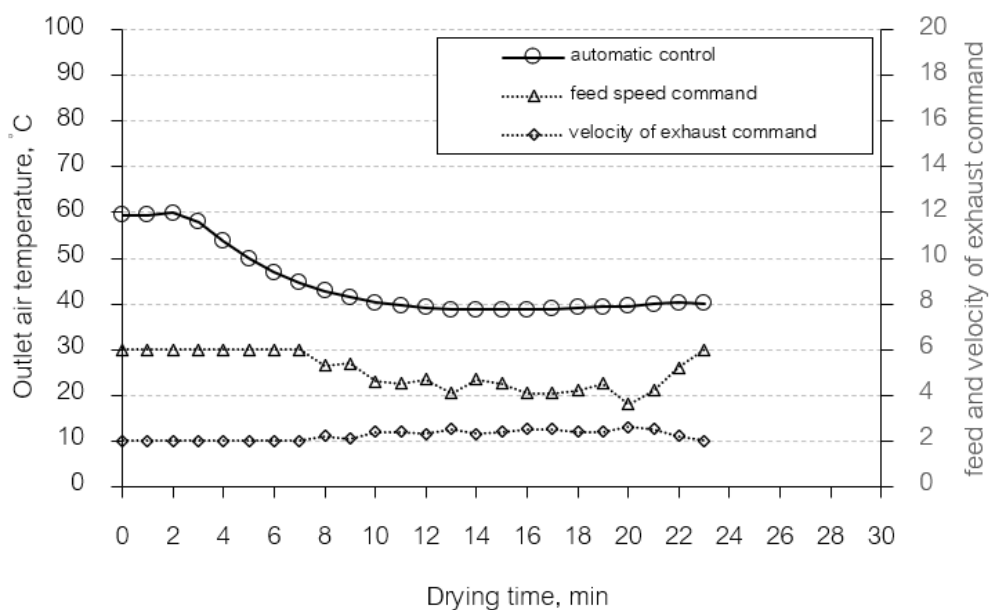
$$\text{com_feed} = 36 - 0.4 * (\text{Temp_AirOUT}) - 0.2 * (\text{Humi_AirOUT}); \quad (4.7)$$

$$\text{com_wind} = -5.5 + 0.1 * (\text{Temp_AirOUT}) + 0.05 * (\text{Humi_AirOUT}); \quad (4.8)$$

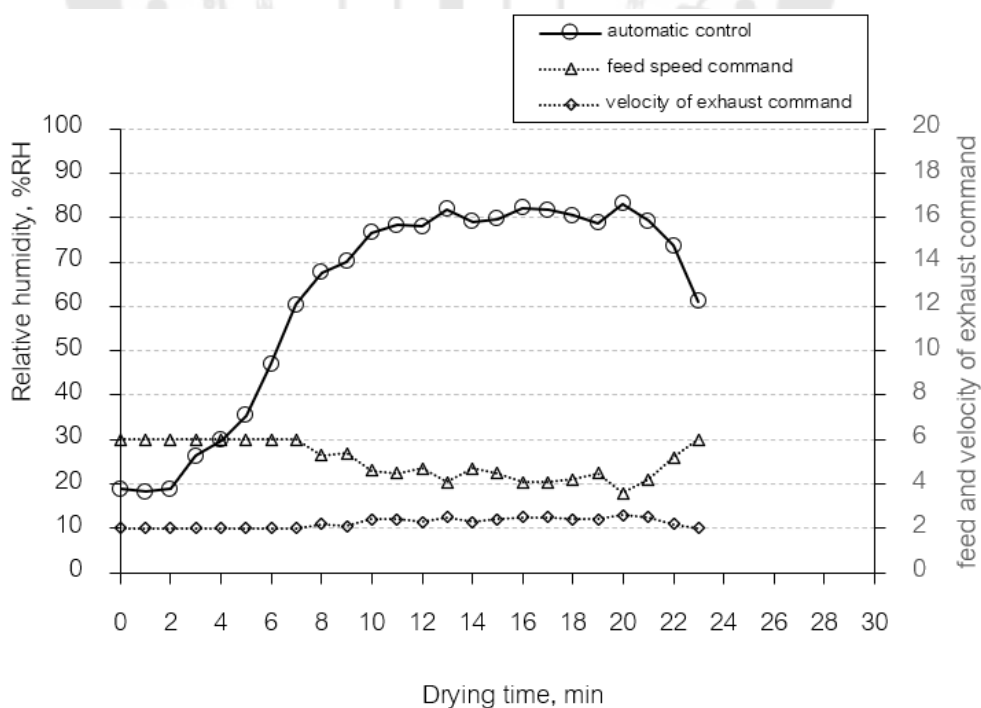
จากนั้นใช้การระบบควบคุมแบบอัตโนมัตินี้ทดสอบการอบแห้ง โดยมีผลลัพธ์การทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ผลลัพธ์การทดสอบการอบแห้ง (ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ)

การทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยตัวแปรควบคุม เช่นเดียวกับการทดสอบการอบแห้ง (ระบบควบคุมแบบปรับตั้งพารามิเตอร์) ผลการทดสอบพบว่าระบบการควบคุมสามารถปรับความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์ว เป็น 6 rev/min และปรับความเร็วของอากาศไหลออกจากเครื่องอบแห้ง เป็น 2 m/s เนื่องจากในช่วงก่อนการทดลองอุณหภูมิอากาศมีค่าสูงและความชื้นสัมพัทธ์มีค่าต่ำ ต่อมาความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซปิโตรเลียมเหลวกับอากาศทำให้อากาศภายในห้องอบแห้งสูงขึ้น และภายหลังการป้อนข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นช่วง 20-21 % wb ความชื้นฐานเปียก เข้าสู่ห้องอบแห้งในช่วงนาที่ที่ 2 พบว่าอุณหภูมิของอากาศลดลงอย่างต่อเนื่อง และขณะเดียวกันความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูงขึ้นตามลำดับจนใกล้กับความชื้นสูงสุดที่อากาศจะดูดซับได้ ระบบควบคุมที่สร้างสามารถปรับความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วลดลง เพื่อรักษาอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศร้อนให้คงที่ตลอดการดำเนินการอบแห้ง ดังภาพประกอบ 69 และภาพประกอบ 70



ภาพประกอบ 69 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศที่ทางออกกับเวลาในการอบแห้ง
กรณี ความเร็วการไหลของอากาศและอัตราการป้อนแบบอัตโนมัติ



ภาพประกอบ 70 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่ทางออกกับเวลาในการ
อบแห้ง กรณี ความเร็วการไหลของอากาศและอัตราการป้อนแบบอัตโนมัติ

ด้านเวลาที่ใช้ในการดำเนินการอบแห้ง (drying time) ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ เริ่มนับเวลาภายหลังป้อนเมล็ดข้าวเปลือกเข้าห้องอบแห้ง การทดสอบข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นช่วง 20-21 %wb เช่นเดียวกับการทดสอบการอบแห้งก่อนหน้านี้ และดำเนินการอบแห้งต่อเนื่องขณะดำเนินการอบแห้งระบบควบคุมที่พัฒนาจะแสดงผลระดับความชื้นของเมล็ดพืชที่ลดลง ทำให้ผู้รับรู้ถึงระดับความชื้นเพื่อพิจารณาตัดสินใจสิ้นสุดการดำเนินการอบแห้งที่ระดับความชื้นเพียงใด ตามความเหมาะสม ทั้งนี้ระบบควบคุมการอบแห้งที่พัฒนาขึ้นใช้เวลาในการดำเนินการอบแห้งจนมีความชื้นสุดท้ายเป็น 16.0 %wb ซึ่งเป็นความชื้นที่เหมาะสมตามความต้องการของผู้ควบคุม โดยใช้เวลาเฉลี่ยเพียง 21 min โดยเวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ภายในห้องอบแห้งเฉลี่ย (mean residence time) เป็น 3 min

เมื่อสิ้นสุดการทดสอบ ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ ผลลัพธ์การทดสอบการอบแห้งด้วยระบบควบคุมที่ได้พัฒนาสามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์การควบคุมความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์ว และความเร็วการไหลของอากาศออกจากเครื่องอบแห้ง ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ เพื่อชดเชยและลดการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ไม่เหมาะสม เมื่อสิ้นสุดการดำเนินการอบแห้ง

กรณีป้อนข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น (IMC) เป็น 20.2 %wb ความชื้นฐานเปียก ระบบควบคุมที่ได้พัฒนาสามารถติดตามและแสดงผลระดับความชื้นที่ลดลงตลอดระยะเวลาการดำเนินการอบแห้ง และสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เป็น 14.5 MJ/kg-water removed หรือสามารถลดการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลงร้อยละ 33.2 เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบการอบแห้งด้วยระบบควบคุมแบบปรับตั้งพารามิเตอร์คงที่ หรือแบบดั้งเดิมกรณีการปรับตั้งพารามิเตอร์ไม่เหมาะสมที่สิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงถึง 21.7 MJ/kg-water removed นอกจากนี้ผู้วิจัยยังทดสอบระบบที่พัฒนา กรณีป้อนข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้นลดลงและเพิ่มขึ้น จากความชื้นเริ่มต้นที่ได้ใช้สำหรับพัฒนาระบบควบคุม โดยผลลัพธ์การทดสอบกรณีความชื้นเริ่มต้น (IMC) ลดลงที่ 18.8 %wb และเพิ่มขึ้นที่ 22.8%wb ความชื้นฐานเปียก พบว่าระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นสามารถดำเนินการอบแห้งและปรับพารามิเตอร์การควบคุมจนสิ้นสุดการดำเนินการอบแห้งสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เพียง 14.1 MJ/kg-water removed และ 10.9 MJ/kg-water removed ตามลำดับ ดังตารางที่ 15

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการสิ้นเปลืองพลังงาน (SEC) ของระบบควบคุมอัตโนมัติที่ได้พัฒนาขึ้นเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาดังที่สรุปการสิ้นเปลืองพลังงาน ดังตาราง 4 และ 5 กล่าวได้ว่า สิ้นเปลืองพลังงานกว่า และเมื่อนำเครื่องอบแห้งแบบมัลติฟอลที่ได้รับการพัฒนาระบบ

ควบคุมแบบอัตโนมัติ กับงานวิจัยที่ผ่านมาพบเครื่องอบแห้งแบบมัลติโพล ที่ปรับตั้งพารามิเตอร์ที่เหมาะสมภายหลังการทดสอบสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ดังตาราง 4 พบว่าค่า SEC ต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากความชื้นเริ่มต้น (IMC) สูง ช่วง 36.30 %wb ความชื้นฐานเปียก ด้วยความชื้นของวัสดุที่สูงนี้จึงทำให้มวลความชื้นในรูปไอน้ำระเหยถ่ายเทสู่อากาศต่อหน่วยการใช้พลังงานน้อย เป็นผลให้สิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำ นั่นเอง

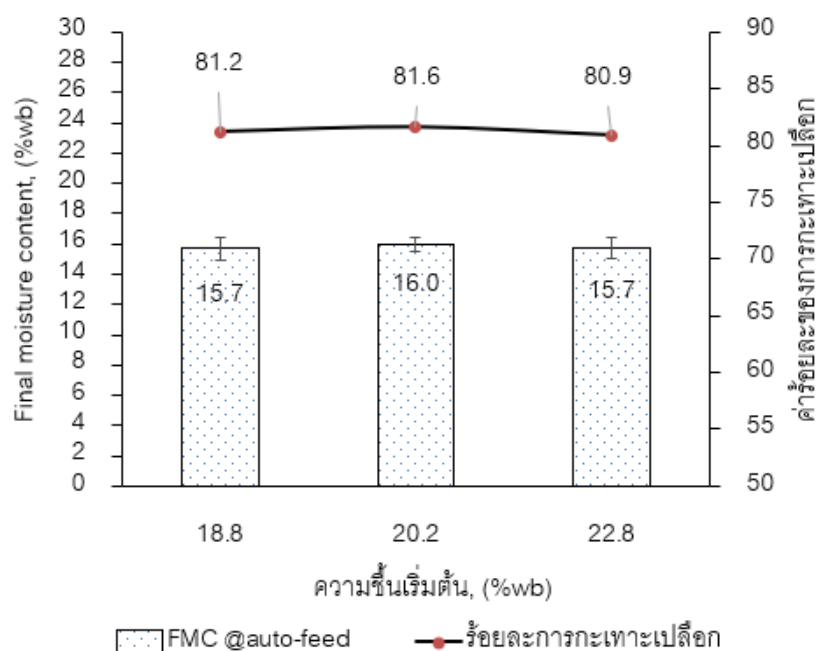
ตาราง 14 การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ

Drying condition			Mass of water	Energy consumption		SEC
IMC	speed of rotary valve	velocity of air	removed	E _{thermal}	E _{electrical}	
%wb.	rpm	m/s	kg	MJ	MJ	
18.8			0.23	3.01	0.238	14.1
20.2*	2.0-6.0	2.0-3.0	0.26	3.52	0.245	14.5
22.8			0.60	6.03	0.536	10.9

*หมายเหตุ: ที่ความชื้นเริ่มต้นช่วงเดียวกับการทดสอบการอบแห้งแบบเดิม

ด้านปริมาณ การลดความชื้นพบว่าระบบควบคุมที่พัฒนาสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกจนมีความชื้นสุดท้าย (final moisture content, FMC) เป็น 15.4%wb, 16.0%wb และ 15.7%wb และมีค่าเบี่ยงเบน (deviation) เป็น 0.7, 0.4 และ 0.9 ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 71 สำหรับการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดเป็น 10.9 MJ/kg-water removed

ด้านคุณภาพ ในแง่มุมของความชื้นสุดท้ายต่อค่าร้อยละการกะเทาะเปลือก พบว่าความชื้นสุดท้ายภายหลังการดำเนินการอบแห้งด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติที่ได้พัฒนาขึ้นมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อนำไปกะเทาะเปลือกมีค่าร้อยละการกะเทาะเปลือกเฉลี่ยร้อยละ 81.2 หรือมีอัตรากะเทาะในช่วง 8:2 นั่นเอง ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการค่าร้อยละการกะเทาะเปลือกจากการทดสอบที่ผ่านมาเล็กน้อย โดยเมื่อเปรียบเทียบผลการกะเทาะเปลือกภายหลังการการอบแห้งซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ (สุรัชย์ ศิริพัฒน์ et al., 2015, 20 มกราคม-มีนาคม) ที่อัตราการกะเทาะจะอยู่ระหว่าง 9:1 ถึง 8:2



ภาพประกอบ 71 แผนภูมิความสัมพันธ์ของค่าความชื้นสุดท้ายต่อค่าร้อยละการกะเทาะเปลือก
ของระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ

สรุปผลการทดสอบการอบแห้งด้วยระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ

ระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นสามารถปรับการควบคุมของพารามิเตอร์ ความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วและความเร็วของอากาศออกจากห้องอบแห้ง และในขณะดำเนินการอบแห้ง ระบบควบคุมนี้จะแสดงระดับค่าความชื้นสุดท้ายของเมล็ด เพื่อเป็นข้อมูลให้ผู้ควบคุมเครื่องตัดสินใจสิ้นสุดการดำเนินการอบแห้งเมื่อระดับค่าความชื้นสุดท้ายอยู่ในระดับที่ต้องการ ผลลัพธ์การทดสอบเมื่อป้อนข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น (IMC) ช่วง 20-21 %wb ความชื้นฐานเปียก พบว่าเมื่อดำเนินการอบแห้งด้วยระบบควบคุมที่สร้างขึ้นสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เพียง 14.5 MJ/kg-water removed เมื่อเทียบกับการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงสุดของการทดสอบการอบแห้งด้วยระบบควบคุมแบบปรับตั้งค่าพารามิเตอร์คงที่เป็น 21.7 MJ/kg-water removed

แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมที่สร้างสามารถลดการสิ้นเปลืองพลังงานลงร้อยละ 33.2 จากการปรับตั้งเครื่องที่ไม่เหมาะสม นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมความชื้นสุดท้ายในระดับที่เหมาะสมสำหรับการดำเนินการอบแห้งข้าวเปลือกสดก่อนการนำไปจำหน่าย อีกทั้งระบบควบคุมยังให้ผลการดำเนินการอบแห้งเทียบเคียงกันในกรณีป้อนข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น (IMC) ลดลงช่วง 18-10%wb และกรณีป้อนข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น (IMC) เพิ่มขึ้นช่วง 22-23%wb

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัลติโฟล โดยเริ่มจากการศึกษาถึงตัวแปรหรือพารามิเตอร์ที่ต้องปรับตั้งขณะเครื่องอบแห้งทำงาน จากนั้นติดตั้งตัวรับรู้ (sensor) ตัวขับเคลื่อน (actuator) และสร้างการควบคุมแบบป้อนกลับจากวิธีปฏิกิริยาของกระบวนการ (process reaction method) ให้กับชุดควบคุมการป้อนของเมล็ดพืช และชุดควบคุมความเร็วการไหลของอากาศ ทำให้สามารถกำหนดคำสั่งควบคุมได้ตามต้องการ จากนั้นทดสอบอบแห้งเบื้องต้นด้วยการกำหนดพารามิเตอร์คงที่ตามเงื่อนไขการทดลอง พบว่าสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้ถึงจนมีความชื้นสุดท้าย (FMC) แตกต่างกันขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ที่ปรับตั้ง และบางกรณีการทดสอบแสดงถึงการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูง อีกทั้งยังไม่สามารถรู้ถึงความชื้นสุดท้ายของเมล็ดพืชในขณะดำเนินการอบแห้ง

ดังนั้นแนวทางในการพัฒนาให้เครื่องอบแห้งสามารถแสดงปริมาณความชื้นสุดท้ายที่ลดลงขณะดำเนินการอบแห้ง และลดการปรับตั้งพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูง งานวิจัยนี้จึงเสนอแนวทางในการประเมินความชื้นสุดท้ายทางอ้อมด้วยวิธีการสมดุลมวล (mass balance method) โดยขั้นแรกเริ่มจากติดตั้งตัวรับรู้อุณหภูมิและอากาศร้อน เข้า-ออกของเครื่องอบแห้ง จากนั้นนำข้อมูลนี้มาคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นของอากาศ และความชื้นสุดท้ายตามลำดับ ทำให้สามารถแสดงค่าความชื้นสุดท้ายในขณะดำเนินการอบแห้งได้ โดยมีค่าความผิดพลาดไม่สูงนัก และในส่วนของปรับตั้งพารามิเตอร์นั้นเสนอแนวทางการปรับตั้งให้สัมพันธ์กับอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศออกจากเครื่องอบแห้ง

จากนั้นทำการทดสอบการอบแห้งด้วยการกำหนดปริมาณความชื้นเริ่มต้นเช่นเดียวกับการทดสอบข้างต้น ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมอัตโนมัติที่สร้างสามารถประเมินความชื้นสุดท้ายได้และแสดงข้อมูลการลดลงของระดับความชื้นขณะดำเนินการอบแห้ง เพื่อให้ผู้ควบคุมเครื่องพิจารณาความชื้นสุดท้ายในระดับที่ต้องการ โดยมีค่าความผิดพลาดจากการประเมินเมื่อเทียบกับเครื่องมือวัดความชื้นของข้าวเปลือกคิดเป็นร้อยละ 4.3 นอกจากนี้การปรับตั้งพารามิเตอร์ของชุดอุปกรณ์ส่วนควบที่สร้างทำให้เมื่อสิ้นสุดการอบแห้งสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงได้ถึงร้อยละ 33.2

ข้อเสนอแนะ

การควบคุมที่สร้างขึ้นเพื่อควบคุมชุดอุปกรณ์ส่วนควบหลักของเครื่องอบแห้งเป็นการควบคุมแบบพื้นฐานที่ใช้ตัวควบคุมแบบ P, I และ D ที่มีวิธีการปรับค่าอัตราขยายของการควบคุมตามขั้นตอนวิธีซีเกอร์-นิโคลส์ (Ziegler–Nichols Method) จากปฏิกิริยาของกระบวนการ (process reaction method) นั้นทำให้ชุดควบคุมสามารถตอบสนองการควบคุมได้ตามต้องการเท่านั้น จึงไม่ได้พิจารณาถึงค่าความผิดพลาดที่มีความแม่นยำที่สูงขึ้น และการตอบสนองที่รวดเร็ว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องอบแห้ง ดังนั้นจึงยังมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาการควบคุมชุดอุปกรณ์ส่วนควบให้มีความแม่นยำมากขึ้นหรือมีผลตอบสนองที่ดีขึ้นได้

นอกจากนี้ขอบเขตของงานวิจัยนี้เป็นเพียงการเสนอแนวทางการประเมินค่าความชื้นสุดท้ายเพื่อแสดงข้อมูลระดับความชื้นของวัสดุที่นำมาอบแห้ง (ข้าวเปลือก) ที่ลดลงขณะดำเนินการอบแห้งให้ผู้ควบคุมเครื่องพิจารณาตัดสินใจดำเนินการอบแห้งต่อไปหรือหยุดการดำเนินการอบแห้งเมื่อความชื้นอยู่ในระดับที่ต้องการเท่านั้น จึงยังมีแนวทางในการพัฒนาต่อยอดให้เกิดการเรียนรู้สภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องจักรในขั้นสูงได้ต่อไป

บรรณานุกรม

- Adsong. Temperature and humidity module AM2302 Product Manual. Retrieved from <https://enimages.ofweek.com/Uploads/20180525/5b078b2766a59.pdf>
- ASAE, S. (2005). Moisture relationship of plant-based agricultural products. *St. Joseph, Mich: ASAE*.
- Bolaji, B. O., Olayanju, T. M., & Falade, T. O. (2011). Performance evaluation of a solar wind-ventilated cabinet dryer.
- Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W., & Hall, C. W. (1992). *Drying and storage of grains and oilseeds*: Springer Science & Business Media.
- Bruce, D. M. (1985). Exposed-layer barley drying: Three models fitted to new data up to 150°C. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 32(4), 337-348.
- Bunyawonichakul, P., Walker, G. J., Sargison, J. E., & Doe, P. E. (2007). Modelling and Simulation of Paddy Grain (Rice) Drying in a Simple Pneumatic Dryer. *Biosystems Engineering*, 96(3), 335-344.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.11.004>
- C Kemp, I. (1994). SCALE-UP OF PNEUMATIC CONVEYING DRYERS. *Drying Technology*, 12(1-2), 279-297. doi:10.1080/07373939408959957
- Chemists, A. o. O. A., & Chemists, A. o. O. A. (1921). *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists* (Vol. 2): Association of Official Analytical Chemists.
- Drying, I. P. (2013). International Rice Research Institute (IRRI). *Postharvest Unit, CESD, Version, 2*.
- Dürr, R., Seidel, C., Neugebauer, C., & Bück, A. (2020). Self-tuning control of continuous fluidized bed drying of baker's yeast pellets. *Drying Technology*, 38(5-6), 646-654.
doi:10.1080/07373937.2019.1662800
- Fandri Christanto, Rasional Sitepu, & Joewono, A. (2017). Chips dryer applications using liquid petroleum gas power. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12, 7070-7076.

- Firouzi, S., Alizadeh, M. R., & Haghtalab, D. (2017). Energy consumption and rice milling quality upon drying paddy with a newly-designed horizontal rotary dryer. *Energy*, 119, 629-636.
- Forum, A. P. L. M. (2017). Guide Document on Rice Moisture Measurement. Retrieved from https://www.aplmf.org/uploads/5/7/4/7/57472539/aplmf_guide_6_-_rice_moisture_measurement_-_may_2017.pdf
- Havlík, J., Dlouhý, T., & Sabatini, M. (2020). THE EFFECT OF THE FILLING RATIO ON THE OPERATING CHARACTERISTICS OF AN INDIRECT DRUM DRYER. *Acta Polytechnica*, 60(1), 49-55.
- Jittanit, W., Saeteaw, N., & Charoenchaisri, A. (2010). Industrial paddy drying and energy saving options. *Journal of stored products research*, 46(4), 209-213. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jspr.2010.04.005>
- Jittanit, W., Szrednicki, G., & Driscoll, R. H. (2013). Comparison Between Fluidized Bed and Spouted Bed Drying for Seeds. *Drying Technology*, 31(1), 52-56. doi:10.1080/07373937.2012.714827
- K C Gouda¹, P. V. R., M N Shanmukha Swamy (2014, July). Microcontroller Based Real Time Weather Monitoring Device with GSM. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, 3(7), 1960-1963.
- Kaensup, W., Kulwong, S., & Wongwises, S. (2006). A Small-Scale Pneumatic Conveying Dryer of Rough Rice. *Drying Technology*, 24(1), 105-113. doi:10.1080/07373930500538899
- Kalathingal, M. S. H., Basak, S., & Mitra, J. (2020). Artificial neural network modeling and genetic algorithm optimization of process parameters in fluidized bed drying of green tea leaves. *Journal of Food Process Engineering*, e13128.
- Khanali, M., Khakpour Giglou, A., & Rafiee, S. (2018). Model development for shelled corn drying in a plug flow fluidized bed dryer. *Engineering in agriculture, environment and food*, 11(1), 1-8. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eaef.2017.09.002>
- Klomklao, P., Kuntinugunetanon, S., & Wongkokua, W. (2017). *Moisture content measurement in paddy*. Paper presented at the Journal of Physics: Conference

Series.

Krawee Treeamnuk, Tawarat Treeamnuk, Jittrarat Jokkew, & Jaito, K. (2017). *Performance Evaluation of Paddy Rice Pneumatic Dryer*. Paper presented at the The Asian Conference on Sustainability, Energy & the Environment.

Kumklam, P., Prachayawarakorn, S., Devahastin, S., & Soponronnarit, S. (2020). Effects of operating parameters of impinging stream dryer on parboiled rice quality and energy consumption. *Drying Technology*, 38(5-6), 634-645.
doi:10.1080/07373937.2019.1660673

Laitinen, A., Orava, R., Peltola, A., Salasmaa, O., & Yloenen, A.-L. (1985). Energy saving in grain harvesting. *Publication Series of Work Efficiency Association (Finland)*.

Majumder, P., Sinha, A., Mishra, L., & Gupta, R. (2020). Prediction of Moisture Ratios (MRs) During Fluidized Bed Drying of Ginger (*Zingiber Officinale*) Cubes by Using Mathematical Modeling and Experimental Validation. In *Advances in Mechanical Engineering* (pp. 729-740): Springer.

Medojevic, M., Stojanovic, A., Lazarevic, M., Cosic, I., & Sremcev, N. Development and testing of Arduino-based Relative Humidity and Dry Bulb Temperature data logger.

Meesukchaosumran, S., & Chitsomboon, T. (2018). EFFECTS OF RESTING PERIODS, AIR TEMPERATURES, AND AIR VELOCITIES ON FREE-FALL PADDY DRYER PERFORMANCES. *Suranaree Journal of Science & Technology*, 25(1).

Mustafa Yapha, Pracha Bunyawaniachakul, & Nifahmee Hayinilah. (2014). *MUST FLOW DRYER FOR ROUGH RICE*. Paper presented at the The Second International Conference on Green Computing, Technology and Innovation (ICGCTI2014), Malaysia.

Nimmol, C., Yodrux, A., & Hirunwat, A. (2020). *Rapid Drying of High-Moisture Paddy Using a Pneumatic Dryer with Corrugated-Surface Drying Column*. Paper presented at the E3S Web of Conferences.

Poramacom, N. (2014). Rice production, prices and related policy in Thailand. *International Journal of Business and Social Science*, 5(10).

Pourbagher, R., Rahmati, M. H., & Alizadeh, M. R. (2016). Air temperature and final grain

- moisture effects on drying time and milling quality in two types of fluidized bed dryer. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 18(2), 449-456.
- Prachayawarakorn, S., Poomsa-ad, N., & Soponronnarit, S. (2005). Quality maintenance and economy with high-temperature paddy-drying processes. *Journal of stored products research*, 41(3), 333-351. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jspr.2004.05.001>
- Saengpole, K. (1997). แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งข้าวแบบไหลตามกัน.
- Sarker, M. S. H., Ibrahim, N., Ab Aziz, N., & Punan, M. S. (2014). Application of simulation in determining suitable operating parameters for industrial scale fluidized bed dryer during drying of high impurity moist paddy. *Journal of stored products research*, 61. doi:10.1016/j.jspr.2014.12.004
- Sathapornprasath, K., Devahastin, S., & Soponronnarit, S. (2007). Performance evaluation of an impinging stream dryer for particulate materials. *Drying Technology*, 25(6), 1111-1118.
- Sathapornprasath, K., Sakamon, D., & Somchart, S. (2007). Performance evaluation of an impinging stream dryer for particulate materials. *Drying Technology*, 25(1), 1121-1128.
- Sinhaneti, T., Keawprasert, T., Puuntharo, P., & Triarun, W. (2017). Quality Assurance of Rice and Paddy Moisture Measurements in Thailand. *International Journal of Thermophysics*, 38(10), 154.
- Soponronnarit Somchart, Yapha Mustafa, & Pracbayawarakorn Somkiat. (1995). Cross-flow fluidized bed paddy dryer: prototype and commercialization. *Drying Technology*, 13(8-9), 2207-2216.
- Srivastava, V. K., & John, J. (2002). Deep bed grain drying modeling. *Energy Conversion and Management*, 43, 1689-1708.
- Suherman, S., & Hidayati, N. (2018). Evaluation Performance of Pneumatic Dryer for Cassava Starch. *Reaktor*, 18(04), 216-223.
- Supakumnerd, K., & Sathapornprasath, K. (2013). A review of the impinging stream dryer. *Srinakharinwirot Engineering Journal*, 8(1).
- Surachai, H., & Annop, R. (2011, September 13-18). *The Use of PD and I Control Relative*

- to Wind in the Direction Control of Helicopter. Paper presented at the SICE Annual Conference, Waseda University, Tokyo, Japan.
- Suwannarat, P. (2011). Agricultural productivity and poverty reduction in Thailand. *Faculty of Economics, Thammasat University, Bangkok, Thailand*.
- Temple, S. J., Tambala, S. T., & van Boxtel, A. J. B. (2000). Monitoring and control of fluid-bed drying of tea. *Control Engineering Practice*, 8(2), 165-173.
doi:[https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(99\)00145-8](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(99)00145-8)
- Tirawanichakul, S., Prachayawarakorn, S., & Soponronnarit, S. (2005). Drying Strategies based on Diffusion model and Energy Analysis for Fluidized-Bed Drying of Paddy.
- Tirawanichakul, S., Prachayawarakorn, S., Varayanond, W., Tungtrakul, P., & Soponronnarit, S. (2004). Effect of fluidized bed drying temperature on various quality attributes of paddy. *Drying Technology*, 22(7), 1731-1754.
- Tohidi, M., Sadeghi, M., & Torki-Harchegani, M. (2017). Energy and quality aspects for fixed deep bed drying of paddy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 519-528.
- Wachiraphansakul, S., & Devahastin, S. (2007). Performance evaluation of an impinging stream dryer for particulate materials. *LWT-Food Science and Technology*, 40, 207-219.
- Wimberly, J. E. (1983). *Paddy Rice Postharvest Industry in Developing Countries* (1st ed.). Philippines: International Rice Research Institute.
- Yapha, M., Bunyawanichakul, P., & Hayinilah, N. (2014). Coarse Rice Products by Must Flow Fluidization Techniques Diabetes Patents. *International Journal at Science and Research) IJSR* (, issn: 2319-7064, Vol. 3 issue 6, 5-10.
- เกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว, สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ, & ทวีข จิตรสมบุญ. (2551, 15-17 ตุลาคม). ผลของความเร็วอากาศร้อนต่ออัตราอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีข้าวหล่นอิสระอย่างต่อเนื่อง. *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย*, 22(1), 166-170.
- ไศรฎา แข็งการ. การพัฒนาและวิจัยเพื่อการปรับปรุงเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ. *สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, กิตติพงษ์ กุลมัตย์. (2537). การอบแห้งข้าวเปลือกแบบถังทรงกระบอกหมุน. (วิทยานิพนธ์ ปริญญา*

- โท). คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- ข่าวกรรมการค้าภายใน. (2563). กรรมการค้าภายในเตือนต้องจำหน่ายก๊าซหุงต้มตามราคาที่กระทรวงพลังงานกำหนด. Retrieved from https://www.dit.go.th/FILE/CONTENT_FILE/256304271106217542768.pdf
- คงเสรีงามขึ้น. (2547). คุณภาพและการตรวจสอบข้าวหอมมะลิไทย (พิมพ์ครั้งที่ 1 ed.). กรุงเทพฯ: กรมวิชาการเกษตร.
- ค่าความร้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงและก๊าซ. (2552). Retrieved from <http://www.gasthai.com/energy/article/html/130.html>
- ฉัตรชัย นิยมล. (2555). ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้หอบแห้งชนิดกรวย. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น, 17(1), 97-109.
- ฉัตรชัย นิยมล. (2557). ศึกษาการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรด้วยเจตสเปาเต็ดเบดเป็นจังหวะ วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 20(3).
- ณัฐพล มณีโชติ, มณฑล ชูไชนาค, มุสตาฟา ยะภา, & ประชา บุญยวานิชกุล. (2559). ผลกระทบของขนาดรูเปิดของแผ่นกระจายอากาศและความหนาของชั้นข้าวเปลือกต่อคุณลักษณะการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบมัลติโฟล. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 11(1), 61-69.
- ณัฐพล มณีโชติ, มุสตาฟา ยะภา, มณฑล ชูไชนาค, & ประชา บุญยวานิชกุล. (2556, 16-18 ตุลาคม). อิทธิพลของความหนาของชั้นข้าวเปลือกต่อความดันและความเร็วของกระแสอากาศในเครื่องอบแห้งแบบมัลติโฟลว์. Paper presented at the การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, พัทยา จังหวัดชลบุรี.
- ธนากร สุนทรวัฒน์. (2557). เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพืช. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์, Retrieved from <http://repository.rmutr.ac.th/bitstream/handle/123456789/559/Fulltext.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (19 สิงหาคม 2562)
- ประชา บุญยวานิชกุล. (2556, มกราคม-มิถุนายน). การประเมินกระบวนการเตรียมตัวอย่างอ้างอิงสำหรับเครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือก. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี), 5(9), 47-55.
- ปิยะพล พึ่งพงศ์พันธุ์, ศุภณัฐ ไผท ไสภณ, อานันท์ ตันนุมี, ฉัตรชัย นิยมล, & กิตติ สถาพรประสาธน์.

- (2016). อิทธิพลของขนาดหอบแห้งที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม. *Srinakharinwirot Engineering Journal*, 11(1).
- พงศกร สุวโท, & มณฑล ชูโซนาค. (2557, 13-14 มีนาคม). อิทธิพลของความหนาของชั้นข้าวเปลือกที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบมัสท์โฟล. Paper presented at the การถ่ายทอด พลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ, ณ เจ้าหลวง คาบาน่า รีสอร์ท จังหวัดจันทบุรี.
- พงศ์สถิตย์ ศรีภักดี, ชูรัตน์ ธารารักษ์, ธเนศ ไชยชนะ, & ณัฐวุฒิ ดุษฎี. (2559, 8 – 10 มิถุนายน). การศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัสท์โฟลขนาด 2 ตันต่อชั่วโมง Paper presented at the การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย, ณ โรงแรม วังจันทร์ริเวอร์วิว จังหวัดพิษณุโลก.
- พงศ์สถิตย์ ศรีภักดี, ชูรัตน์ ธารารักษ์, ธเนศ ไชยชนะ, & ณัฐวุฒิ ดุษฎี. (2560, 31 พฤษภาคม - 2 มิถุนายน). การประเมินการใช้พลังงานเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัสท์โฟลโดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวล. Paper presented at the การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย, ณ โรงแรม ดิเอ็มเพรส เชียงใหม่.
- พิชญา เทวบุรุษ, & มณฑล ชูโซนาค. (2557, 13-14 มีนาคม). ผลกระทบของความเร็วยรอบของระยะยกหอบแห้งต่อความดันตกคร่อมในเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัสท์โฟล. Paper presented at the การถ่ายทอด พลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ, ณ เจ้าหลวง คาบาน่า รีสอร์ท จังหวัดจันทบุรี.
- พิรสิทธิ์ ทวยนาค, มณฑล ชูโซนาค, มุสตาฟา ยะภา, & ประชา บุญยวนิชกุล. (2014). การทบทวนพัฒนาการของการลดความชื้นข้าวเปลือกในทางอุตสาหกรรม. *Srinakharinwirot Engineering Journal*, 9(1).
- พิรสิทธิ์ ทวยนาค, มณฑล ชูโซนาค, มุสตาฟา ยะภา, & ประชา บุญยวนิชกุล. (2556, 16-18 ตุลาคม). ผลกระทบของอัตราการไหลและอุณหภูมิของอากาศร้อนต่อการลดความชื้นข้าวเปลือก (กรณีศึกษาของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัสท์โฟล). Paper presented at the การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, พัทยา จังหวัดชลบุรี.
- พิรสิทธิ์ ทวยนาค, มณฑล ชูโซนาค, มุสตาฟา ยะภา, & ประชา บุญยวนิชกุล. (2557). ผลกระทบของกระแสความเร็วของอากาศร้อนต่อการลดความชื้นข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัสท์โฟล. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 9(1), 28-35.

- พีรสิทธิ์ ทวยนาค, มณฑล ชูชนาค, มุस्ताฟา ยะภา, & ประชา บุญยวานิชกุล. (2557, 13-14 มีนาคม 2557). การศึกษาพฤติกรรมการทำงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัลติโฟล. Paper presented at the การถ่ายเท พลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน และกระบวนการ, ณ เจ้าหลวง คาบาน่า รีสอร์ท จังหวัดจันทบุรี.
- มุस्ताฟา ยะภา. (2537). การออกแบบและทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไรเซด แบบต่อเนื่องขนาดต้นแบบสำหรับอุตสาหกรรม. (วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (เทคโนโลยีพลังงาน)). คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- วันชัย สุตะพันธ์, ทรงสุภา พุ่มชุมพล, & อำไพศักดิ์ ทีบุญมา. (2013). การประเมินสมรรถนะเครื่องอบข้าวเปลือกแบบไหลคลุกเคล้า: กรณีศึกษา โรงสีข้าวพรเจริญ. *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, 32(4), 418-421.
- วิบูลย์ เทเพนทร์. (2557). การวัดความชื้นเมล็ดพืช. Retrieved from http://www.doa.go.th/aerix/files/research/vb_moisture_measure.pdf
- สมชาติ โสภณธนฤทธิ์. (2540). การอบแห้งเมล็ดธัญพืช (พิมพ์ครั้งที่ 5 ed.). กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สรวุฒิ สุจิตจร. (2546). การควบคุมอัตโนมัติ (พิมพ์ครั้งที่ 1 ed.). เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า: กรุงเทพฯ.
- ลักกมณ เทพหัสดิน ณ อยุธยา, & ฉัตรชัย นิยมล. (2552). การปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำสำหรับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ.
- สุชาติ ธนสุขประเสริฐ, ธนิต สวัสดิ์เสวี, ลักกมณ เทพหัสดิน ณ อยุธยา, & สมชาติ โสภณธนฤทธิ์. (2012). การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำ. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, 1(2), 1-10.
- สุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ, & ทวีช จิตรสมบุญ. (2552). เครื่องอบแห้งแบบหล่นอิสระ: เงื่อนไขการอบแห้งที่ให้คุณภาพข้าวสารที่ดี. การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, 23(1), TSF-03527.
- สุรัช ศิริพัฒน์, อุดุลย์ ณ วิเชียร, ณพรัตน์ วิจิตรชัย, & และนุชนาฏ ณ ระนอง. (2015, 20 มกราคม-มีนาคม). ผลการกะเทาะและคุณภาพการสีข้าวของลูกยางสีข้าวจากยางพารา. *วารสารยางพารา*, 20, 2-8.
- สุรัช เหมหิรัญ, & ประชา บุญยวานิชกุล. (2560). การทบทวนวิธีการควบคุมการลดความชื้น

ข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบต่างๆ. วารสารวิศวกรรมศาสตรมหาวิทยาลัยเชียงใหม่,
24(1), 60-68.

อรอนงค์ ศรีพวาทกุล. (2536). การอบแห้งข้าวเปลือกโดยวิธีฟลูอิดไดซ์เบดอย่างต่อเนื่อง. (วิทยานิพนธ์
วศ.ม.ช (วิศวกรรมอาหาร)). คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
กรุงเทพฯ.





ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ข้อมูลผลการทดลอง



การทดสอบการอบแห้งกำหนดเงื่อนไข ดังนี้

ตัวแปรควบคุม : ความชื้นเริ่มต้นช่วง 20-21%wb,

การปรับตั้งเครื่องอบแห้ง: อุณหภูมิห้องอากาศร้อนเฉลี่ย 130°C , ความเร็วรอบ

การหมุนของชุดเขย่าหน้าอบแห้งเฉลี่ยเป็น 110 rpm

ตาราง ก.1 ข้อมูลการทดสอบ กรณี ความเร็วของอากาศร้อนเป็น 2.0 m/s ที่ความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วเป็น 2.0 rpm

Time	Time	Temp_AirOUT	Humi_AirOUT	LPG_Weight	Elec_Power
	min	$^{\circ}\text{C}$	%RH	kg	kWh
17:05:19	0	69.3	11.3	0.00	4.837
17:06:19	1	67.7	17.2	0.00	4.840
17:07:18	2	63.2	20.4	0.00	4.843
17:08:18	3	58.8	25.1	-0.01	4.846
17:09:21	4	55.1	27.6	-0.01	4.850
17:10:20	5	52.6	31.8	-0.01	4.853
17:11:20	6	50.6	34.0	-0.02	4.856
17:12:23	7	48.9	38.1	-0.02	4.859
17:13:22	8	47.7	39.8	-0.02	4.863
17:14:22	9	46.6	41.7	-0.02	4.866
17:15:21	10	45.9	42.3	-0.03	4.869
17:16:24	11	45.4	46.9	-0.03	4.872
17:17:24	12	45.2	47.9	-0.03	4.875
17:18:23	13	45.4	48.0	-0.03	4.878
17:19:26	14	45.5	47.1	-0.04	4.882
17:20:26	15	45.5	46.4	-0.04	4.885
17:21:26	16	45.6	45.2	-0.05	4.888
17:22:25	17	45.7	44.3	-0.05	4.891
17:23:28	18	45.7	46.2	-0.05	4.894
17:24:28	19	45.8	45.2	-0.05	4.897
17:25:27	20	46	45.8	-0.05	4.901

ตาราง ก.1 (ต่อ)

Time	Time	Temp_AirOUT	Humi_AirOUT	LPG_Weight	Elec_Power
	min	°C	%RH	kg	kWh
17:26:27	21	46.2	45.0	-0.06	4.904
17:27:30	22	46.3	45.2	-0.06	4.907
17:28:29	23	46.3	42.9	-0.06	4.910
17:29:29	24	46.5	43.2	-0.06	4.913
17:30:32	25	46.5	44.2	-0.07	4.917
17:31:31	26	46.6	43.1	-0.07	4.920
17:32:31	27	46.8	43.2	-0.07	4.923
17:33:30	28	46.9	43.1	-0.07	4.926
17:34:33	29	47.1	43.1	-0.08	4.929
17:35:33	30	47.3	42.0	-0.08	4.932
17:36:32	31	47.2	41.0	-0.08	4.935
17:37:32	32	47.2	41.4	-0.09	4.938
17:38:35	33	47.3	44.0	-0.09	4.942
17:39:34	34	47.6	41.9	-0.09	4.945
17:40:34	35	47.9	41.8	-0.09	4.948
17:41:33	36	48.0	41.1	-0.10	4.951
17:42:36	37	48.0	41.7	-0.10	4.954
17:43:36	38	47.9	40.8	-0.10	4.957
17:44:35	39	48.0	39.7	-0.10	4.960
17:45:38	40	48.0	41.7	-0.11	4.964
17:46:38	41	48.2	42.3	-0.11	4.967
17:47:37	42	48.3	41.6	-0.11	4.970
17:48:37	43	48.4	41.8	-0.11	4.973
17:49:40	44	48.5	39.7	-0.12	4.976
17:50:40	45	48.3	40.9	-0.12	4.979
17:51:39	46	48.5	39.9	-0.12	4.982
17:52:39	47	48.5	39.8	-0.12	4.985
17:53:42	48	48.4	39.7	-0.13	4.989

ตาราง ก.2 ข้อมูลการทดสอบ กรณี ความเร็วของอากาศร้อนเป็น 2.5 m/s ที่ความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วเป็น 2.0 rpm

Time	Time	Temp_AirOUT	Humi_AirOUT	LPG_Weight	Elec_Power
	min	°C	%RH	kg	kWh
17:16:49	0	69.9	11.2	0.00	7.351
17:17:49	1	68.7	16.0	0.00	7.354
17:18:48	2	63.6	18.9	-0.01	7.357
17:19:51	3	58.9	23.1	-0.01	7.360
17:20:51	4	55.6	26.8	-0.01	7.363
17:21:50	5	53.3	29.0	-0.02	7.366
17:22:50	6	51.9	30.3	-0.02	7.370
17:23:53	7	50.8	31.4	-0.02	7.373
17:24:53	8	50.0	32.7	-0.02	7.376
17:25:52	9	49.1	33.8	-0.03	7.379
17:26:52	10	48.8	34.3	-0.03	7.382
17:27:55	11	48.5	37.2	-0.04	7.386
17:28:54	12	48.6	36.4	-0.04	7.389
17:29:54	13	49.0	36.2	-0.04	7.392
17:30:57	14	49.4	35.4	-0.04	7.395
17:31:56	15	49.6	34.9	-0.05	7.398
17:32:56	16	49.7	34.7	-0.05	7.402
17:33:55	17	49.8	34.3	-0.05	7.405
17:34:58	18	49.8	34.3	-0.06	7.408
17:35:58	19	49.8	35.7	-0.06	7.411
17:36:57	20	50.1	33.9	-0.06	7.414
17:37:57	21	50.3	34.6	-0.07	7.417
17:39:00	22	50.5	33.4	-0.07	7.421
17:39:59	23	50.8	33.4	-0.07	7.424
17:40:59	24	50.9	32.5	-0.07	7.427
17:42:02	25	50.9	32.9	-0.08	7.430
17:43:01	26	50.9	32.3	-0.08	7.433

ตาราง ก.2 (ต่อ)

Time	Time	Temp_AirOUT	Humi_AirOUT	LPG_Weight	Elec_Power
	min	°C	%RH	kg	kWh
17:44:01	27	51.0	32.0	-0.08	7.436
17:45:00	28	51.5	32.5	-0.09	7.440
17:46:03	29	52.0	32.0	-0.09	7.443
17:47:03	30	52.2	31.4	-0.09	7.446
17:48:02	31	52.1	30.3	-0.10	7.449
17:49:02	32	52.1	30.4	-0.10	7.452
17:50:05	33	52.1	31.3	-0.10	7.455
17:51:04	34	52.0	29.9	-0.10	7.459
17:52:04	35	52.1	32.7	-0.11	7.462
17:53:04	36	52.3	31.0	-0.11	7.465
17:54:07	37	52.6	31.9	-0.11	7.468
17:55:06	38	52.6	31.6	-0.12	7.471
17:56:06	39	52.7	31.0	-0.12	7.474
17:57:09	40	52.8	29.9	-0.12	7.477
17:58:08	41	52.9	29.8	-0.13	7.481
17:59:08	42	52.8	30.2	-0.13	7.484
18:00:07	43	52.7	30.2	-0.13	7.487
18:01:10	44	52.8	31.3	-0.13	7.490
18:02:10	45	53.1	30.3	-0.14	7.493
18:03:09	46	53.4	30.4	-0.14	7.496
18:04:09	47	53.5	30.3	-0.14	7.499
18:05:12	48	53.5	30.1	-0.15	7.503
18:06:11	49	53.4	30.0	-0.15	7.506
18:07:11	50	53.2	29.3	-0.15	7.509
18:08:10	51	53.0	29.3	-0.15	7.512

ตาราง ก.3 ข้อมูลการทดสอบ กรณี ความเร็วของอากาศร้อนเป็น 3.0 m/s ที่ความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วเป็น 2.0 rpm

Time	Time	Temp_AirOUT	Humi_AirOUT	LPG_Weight	Elec_Power
	min	°C	%RH	kg	kWh
19:37:01	0	69.6	10.6	0.00	6.055
19:38:00	1	69.0	15.0	0.00	6.058
19:39:00	2	63.2	19.2	0.00	6.061
19:40:03	3	58.0	24.2	-0.01	6.065
19:41:03	4	54.8	27.3	-0.01	6.068
19:42:02	5	52.7	30.0	-0.02	6.072
19:43:02	6	51.2	32.0	-0.02	6.075
19:44:05	7	50.3	33.0	-0.03	6.079
19:45:04	8	49.7	34.8	-0.03	6.082
19:46:04	9	49.2	35.6	-0.03	6.085
19:47:03	10	48.9	35.3	-0.04	6.088
19:48:06	11	48.9	36.7	-0.04	6.092
19:49:06	12	50.1	34.5	-0.05	6.095
19:50:05	13	51.0	32.9	-0.05	6.099
19:51:08	14	51.6	31.4	-0.06	6.102
19:52:08	15	51.7	31.3	-0.06	6.105
19:53:07	16	52.0	30.2	-0.06	6.109
19:54:07	17	52.3	30.8	-0.07	6.112
19:55:10	18	52.6	29.9	-0.07	6.115
19:56:09	19	53.1	30.0	-0.07	6.119
19:57:09	20	53.5	28.9	-0.08	6.122
19:58:08	21	53.9	29.2	-0.08	6.125
19:59:11	22	54.1	27.9	-0.09	6.128

ตาราง ก.3 (ต่อ)

Time	Time	Temp_AirOUT	Humi_AirOUT	LPG_Weight	Elec_Power
	min	°C	%RH	kg	kWh
20:00:11	23	54.2	27.4	-0.09	6.132
20:01:10	24	54.3	27.7	-0.09	6.135
20:02:10	25	54.7	28.2	-0.10	6.138
20:03:13	26	55.1	27.9	-0.10	6.142
20:04:12	27	55.5	27.2	-0.10	6.145
20:05:12	28	55.7	26.6	-0.11	6.148
20:06:15	29	55.7	26.9	-0.11	6.152
20:07:14	30	55.8	27.6	-0.12	6.155
20:08:14	31	56.0	26.6	-0.12	6.158
20:09:14	32	56.3	26.6	-0.12	6.161
20:10:17	33	56.4	26.0	-0.13	6.165
20:11:16	34	56.5	25.6	-0.13	6.168
20:12:16	35	56.4	25.6	-0.14	6.171
20:13:15	36	56.4	26.8	-0.14	6.175
20:14:18	37	56.7	26.3	-0.14	6.178
20:15:18	38	56.9	25.6	-0.14	6.181
20:16:17	39	57.1	25.7	-0.15	6.184
20:17:20	40	57.3	25.6	-0.15	6.188
20:18:20	41	57.4	24.3	-0.16	6.191
20:19:19	42	57.3	24.5	-0.16	6.194
20:20:19	43	57.2	24.7	-0.16	6.197

ตาราง ก.4 ข้อมูลการทดสอบ กรณี ความเร็วของอากาศร้อนเป็น 2.0 m/s ที่ความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วเป็น 4.0 rpm

Time	Time	Temp_AirOUT	Humi_AirOUT	LPG_Weight	Elec_Power
	min	°C	%RH	kg	kWh
23:23:22	0	59.0	15.2	0.000	8.438
23:24:21	1	59.2	22.5	0.000	8.441
23:25:21	2	54.2	28.7	-0.010	8.445
23:26:24	3	49.0	37.0	-0.010	8.448
23:27:23	4	45.3	43.6	-0.010	8.452
23:28:23	5	42.6	49.9	-0.020	8.455
23:29:22	6	40.5	55.0	-0.020	8.459
23:30:25	7	39.1	74.0	-0.020	8.462
23:31:25	8	38.3	75.7	-0.030	8.466
23:32:24	9	37.7	76.4	-0.030	8.469
23:33:24	10	37.3	77.2	-0.030	8.472
23:34:27	11	37.1	80.4	-0.030	8.476
23:35:27	12	37.2	79.0	-0.040	8.480
23:36:26	13	37.3	78.1	-0.040	8.483
23:37:29	14	37.3	77.8	-0.040	8.487
23:38:29	15	37.4	78.0	-0.050	8.490
23:39:28	16	37.7	75.8	-0.050	8.493
23:40:28	17	37.9	74.3	-0.050	8.497
23:41:31	18	38.0	76.2	-0.050	8.500
23:42:30	19	38.4	75.2	-0.060	8.504
23:43:30	20	38.7	70.6	-0.060	8.507
23:44:29	21	38.9	69.1	-0.060	8.511
23:45:32	22	39.2	71.1	-0.060	8.514
23:46:32	23	39.6	68.3	-0.070	8.518
23:47:31	24	39.9	67.4	-0.070	8.521
23:48:31	25	40.1	65.5	-0.080	8.524
23:49:34	26	40.2	63.3	-0.080	8.528

ตาราง ก.5 ข้อมูลการทดสอบ กรณี ความเร็วของอากาศร้อนเป็น 2.5 m/s ที่ความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วเป็น 4.0 rpm

Time	Time	Temp_AirOUT	Humi_AirOUT	LPG_Weight	Elec_Power
	min	°C	%RH	kg	kWh
21:38:43	0	67.8	12.4	0.00	8.840
21:39:42	1	66.7	18.0	0.00	8.844
21:40:42	2	60.5	23.8	-0.01	8.847
21:41:45	3	54.3	31.4	-0.01	8.851
21:42:44	4	49.7	39.4	-0.01	8.854
21:43:44	5	46.2	45.8	-0.01	8.857
21:44:43	6	43.9	59.7	-0.01	8.861
21:45:46	7	42.3	65.7	-0.01	8.864
21:46:46	8	41.5	67.3	-0.02	8.868
21:47:45	9	40.7	70.1	-0.03	8.871
21:48:45	10	40.2	73.6	-0.03	8.875
21:49:48	11	39.9	72.0	-0.03	8.878
21:50:47	12	39.8	70.7	-0.03	8.881
21:51:47	13	39.8	72.8	-0.04	8.885
21:52:50	14	40.1	71.3	-0.04	8.888
21:53:49	15	40.3	68.3	-0.04	8.892
21:54:49	16	40.4	69.4	-0.05	8.895
21:55:48	17	40.6	68.9	-0.05	8.899
21:56:51	18	41.0	66.2	-0.05	8.902
21:57:51	19	41.3	64.4	-0.06	8.906
21:58:50	20	41.6	65.0	-0.06	8.909
21:59:50	21	42.0	63.1	-0.06	8.912
22:00:53	22	42.5	59.3	-0.07	8.916
22:01:52	23	42.7	58.2	-0.07	8.919
22:02:52	24	42.9	46.1	-0.07	8.923

ตาราง ก.6 ข้อมูลการทดสอบ กรณี ความเร็วของอากาศร้อนเป็น 3.0 m/s ที่ความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วเป็น 4.0 rpm

Time	Time	Temp_AirOUT	Humi_AirOUT	LPG_Weight	Elec_Power
	min	°C	%RH	kg	kWh
00:27:30	0	67.1	13.0	0.00	9.080
00:28:29	1	66.4	18.4	-0.01	9.083
00:29:29	2	59.6	25.4	-0.01	9.087
00:30:32	3	53.4	32.7	-0.01	9.090
00:31:31	4	49.1	39.9	-0.01	9.094
00:32:31	5	46.2	45.6	-0.02	9.097
00:33:30	6	44.1	56.4	-0.02	9.101
00:34:33	7	43.3	59.4	-0.02	9.104
00:35:33	8	42.7	59.5	-0.03	9.108
00:36:32	9	42.2	59.4	-0.03	9.111
00:37:32	10	42.1	62.5	-0.03	9.115
00:38:35	11	42.3	61.4	-0.04	9.118
00:39:34	12	42.3	57.9	-0.04	9.122
00:40:34	13	42.4	59.7	-0.04	9.125
00:41:37	14	43.1	57.6	-0.05	9.129
00:42:36	15	43.5	55.8	-0.05	9.132
00:43:36	16	43.7	53.8	-0.06	9.136
00:44:35	17	44.0	55.4	-0.05	9.139
00:45:38	18	44.5	53.9	-0.06	9.143
00:46:38	19	44.7	51.5	-0.07	9.146
00:47:38	20	44.9	51.3	-0.07	9.149
00:48:37	21	45.3	51.8	-0.07	9.153
00:49:40	22	45.7	50.7	-0.07	9.156
00:50:40	23	45.9	48.5	-0.08	9.160
00:51:39	24	45.9	49.1	-0.08	9.163

ตาราง ก.7 ข้อมูลการทดสอบ กรณี ความเร็วของอากาศร้อนเป็น 2.0 m/s ที่ความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วเป็น 6.0 rpm

Time	Time	Temp_AirOUT	Humi_AirOUT	LPG_Weight	Elec_Power
	min	°C	%RH	kg	kWh
00:14:38	0	59.8	16.8	0.00	9.913
00:15:38	1	59.5	25.0	0.00	9.917
00:16:37	2	54.8	29.5	0.00	9.920
00:17:40	3	49.7	36.2	-0.01	9.924
00:18:40	4	46.1	46.4	-0.01	9.927
00:19:39	5	43.5	63.3	-0.01	9.931
00:20:39	6	41.7	71.0	-0.02	9.934
00:21:42	7	40.1	77.0	-0.02	9.938
00:22:41	8	39.1	83.2	-0.02	9.941
00:23:41	9	38.4	86.2	-0.02	9.945
00:24:40	10	37.7	88.1	-0.03	9.948
00:25:43	11	37.5	88.1	-0.03	9.952
00:26:43	12	37.2	90.8	-0.03	9.955
00:27:42	13	37.1	90.6	-0.03	9.959
00:28:45	14	37.0	87.2	-0.03	9.962

ตาราง ก.8 ข้อมูลการทดสอบ กรณี ความเร็วของอากาศร้อนเป็น 2.5 m/s ที่ความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วเป็น 6.0 rpm

Time	Time	Temp_AirOUT	Humi_AirOUT	LPG_Weight	Elec_Power
	min	°C	%RH	kg	kWh
20:26:21	0	68.7	11.0	0.00	9.602
20:27:21	1	67.0	16.5	-0.01	9.606
20:28:20	2	59.9	21.8	-0.01	9.609
20:29:23	3	53.1	29.3	-0.01	9.613
20:30:23	4	48.5	39.8	-0.01	9.617
20:31:22	5	45.4	54.8	-0.02	9.620
20:32:22	6	43.1	59.5	-0.02	9.624
20:33:25	7	41.3	66.9	-0.02	9.627
20:34:24	8	39.9	71.0	-0.02	9.631
20:35:24	9	39.3	74.8	-0.03	9.634
20:36:24	10	38.8	72.7	-0.03	9.638
20:37:27	11	38.5	77.0	-0.03	9.642
20:38:26	12	38.4	74.5	-0.03	9.645
20:39:26	13	38.3	76.2	-0.04	9.648
20:40:29	14	38.4	73.3	-0.04	9.652
20:41:28	15	38.5	56.4	-0.04	9.655

ตาราง ก.9 ข้อมูลการทดสอบ กรณี ความเร็วของอากาศร้อนเป็น 3.0 m/s ที่ความเร็วรอบการหมุนของโรตารีวาล์วเป็น 6.0 rpm

Time	Time	Temp_AirOUT	Humi_AirOUT	LPG_Weight	Elec_Power
	min	°C	%RH	kg	kWh
17:47:46	0	73.2	9.8	0.00	6.577
17:48:46	1	70.1	14.4	0.00	6.581
17:49:45	2	61.6	20.5	-0.01	6.584
17:50:48	3	53.9	28.7	-0.01	6.588
17:51:48	4	48.5	44.0	-0.01	6.591
17:52:47	5	45.2	53.4	-0.02	6.595
17:53:47	6	42.9	62.8	-0.02	6.598
17:54:50	7	41.3	67.4	-0.02	6.602
17:55:49	8	40.3	70.4	-0.03	6.605
17:56:49	9	39.7	72.5	-0.03	6.609
17:57:48	10	39.5	69.3	-0.04	6.612
17:58:51	11	39.6	70.9	-0.04	6.616
17:59:51	12	39.8	65.6	-0.04	6.619
18:00:37	13	41.1	41.7	-0.05	6.622



ภาคผนวก ข
ข้อมูลทางเทคนิคของตัวรับรู้ และการสอบเทียบ

DHT-11



ภาพประกอบ ข.1 DHT-11

ข้อมูลทางเทคนิค

การใช้แรงดันไฟฟ้า	:	3 ถึง 5V
การใช้กระแสไฟฟ้าสูงสุด	:	2.5mA (ขณะทำการวัดค่า)
ช่วงการวัดความชื้นระดับ	:	20-80% โดยมีความผิดพลาดในการวัดไม่เกิน 5%
ช่วงการวัดอุณหภูมิ	:	0-50°C โดยมีความผิดพลาดในการวัดไม่เกิน $\pm 2^{\circ}\text{C}$
ความถี่ในการวัด	:	1 Hz (อ่านค่าได้วินาทีละครั้ง)
ขนาด (กว้างxยาวxสูง)	:	15.5mm x 12mm x 5.5mm

Elitech RC-4 Datalogger



ภาพประกอบ ข.2 Elitech RC-4 Datalogger

ข้อมูลทางเทคนิค

หน่วยการวัดอุณหภูมิ	:	°C
ช่วงการวัดอุณหภูมิ	:	-30°C ถึง 60°C หรือ -40°C ถึง 85°C (External sensor)
ช่วงอุณหภูมิที่เครื่องทำงานได้ดี	:	-30°C ถึง 60°C
ความแม่นยำ	:	±1°C
ความละเอียด	:	0.1°C
บันทึกข้อมูลได้สูงสุด	:	16,000 ข้อมูล
ปรับค่า sampling rate	:	10 วินาที ถึง 24 ชั่วโมง
ประเภทเซ็นเซอร์	:	internal NTC thermal resistor
การเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์	:	USB
แหล่งพลังงาน	:	แบตเตอรี่ CR2450
อายุการใช้งานแบตเตอรี่	:	ประมาณ 1 ปี

TSI 7565-x



ภาพประกอบ ข.3 TSI 7565-x

ข้อมูลทางเทคนิค

อุณหภูมิ

- : ชนิดเทอร์มิสเตอร์
- : ช่วงการวัด 0 ถึง 60 °C
- : ความคลาดเคลื่อน ± 0.6 °C
- : ความละเอียด 0.1 °C
- : เวลาในการอ่านค่า 30 วินาที

ความชื้นสัมพัทธ์

- : ชนิดเซนเซอร์ฟิล์มบาง
- : ช่วงการวัด 5 ถึง 95%
- : ความคลาดเคลื่อน $\pm 3\%$ RH
- : ความละเอียด 0.1 % RH
- : เวลาในการอ่านค่า 20 วินาที

ขนาดของเครื่อง (กว้างxยาวxสูง) : 9.7 cm x 21.1 cm x 5.3 cm

ขนาดแบตเตอรี่ : AA 4 ก้อน หรือ การชาร์จไฟ AC จาก adapter 6 VDC,
ความจุ 300 mA

PM-450



ภาพประกอบ ข.4 PM-450

ข้อมูลทางเทคนิค

- การใช้งาน : สำหรับวัดค่าความชื้นของข้าวเปลือกเมล็ดยาว
- ช่วงการวัด : 9-35 %
- ปริมาตรตัวอย่าง : 0 – 40 องศาเซลเซียส
- ค่าความถูกต้อง : (ความชื้น) ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน 0.5% หรือน้อยกว่า
- การทำงานอื่นๆ : การคำนวณค่าความชื้นเฉลี่ย, การปิดการทำงานของเครื่องอัตโนมัติ
- จอแสดงผล : แบบดิจิตอล (LCD)
- แหล่งจ่ายไฟฟ้า : แบตเตอรี่ (แรงดันไฟฟ้า 1.5 โวลต์ ขนาด “R6” หรือ “AA” จำนวน 4 ก้อน)
- การใช้พลังงานไฟฟ้า : 240 มิลลิวัตต์
- ขนาดและน้ำหนัก : 125 (กว้าง) x 205 (ลึก) x 245 (สูง) มิลลิเมตร, 1.3 กิโลกรัม
- อุปกรณ์เสริม : กรวยเทตัวอย่าง, ฮอปเปอร์เทตัวอย่างด้วยมือ, แปรงทำความสะอาดช่องวัดความชื้นตัวอย่าง, แบตเตอรี่ (แรงดันไฟฟ้า 1.5 โวลต์ ขนาด “R6” หรือ “AA” จำนวน 4 ก้อน) และคู่มือการใช้งาน

Riceter f521



ภาพประกอบ ข.5 Riceter f521

ข้อมูลทางเทคนิค

- การทำงาน : ใช้ระบบการต้านทานกระแสไฟฟ้า
- โปรแกรมตรวจวัดความชื้น : ข้าวเปลือก, ข้าวสาร และข้าวกล้อง
- การแสดงผลข้อมูล : รายงานผลเป็นดิจิตอลบนจอ LCD black light
- ช่วงความชื้น : 9-35%
- ค่าความแม่นยำ : ผิดพลาดไม่เกิน 0.5% [S.E.D. 0.5%(9-20%)]
- ฟังก์ชันพิเศษ : Thermistor ปรับชดเชยอุณหภูมิ 0-40 องศาเซลเซียส, คำนวณหาค่าเฉลี่ย
- พลังงาน : ถ่านแบตเตอรี่ 1.5 โวลต์ (Laitinen, Orava, Peltola, Salasmaa, & Yloenen) 4 ก้อน
- ขนาดเครื่อง (กว้างxลึกxสูง) : 164 x 94 x 65 มม.
- น้ำหนักตัวเครื่อง : 443 กรัม
- อุปกรณ์ครบชุด : จานใส่ตัวอย่าง (2 ชุด) แปรงทำความสะอาด (1 ชุด) ที่คีบปลายซ้อน
ดวง
(1 ชุด) หนังสือคู่มือและกระเป๋ใส่เครื่อง (1 ชุด) ถ่าน AA (4 ก้อน)

Wind Speed Sensor



ภาพประกอบ ข.6 Wind Speed Sensor

ข้อมูลทางเทคนิค

ลักษณะ	: รูปถ้วย 3 ใบ
วัสดุ	: อลูมิเนียมอัลลอยด์
สัญญาณขาออก	: 0.-5 V (Voltage signal)/ 4 – 20 mA
แรงดันไฟฟ้า	: DC 9 – 24 V
การใช้พลังงาน	: แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.3 W
ความเร็วลมเริ่มต้น	: 0.4-0.8 m/s
ความละเอียด	: 0.1 m/s
ช่วงการวัดความเร็วลมที่มีประสิทธิภาพ	: 0.30 m/s
ค่าความคลาดเคลื่อน	: $\pm 3\%$
ระยะการส่งสัญญาณ	: มากกว่า 1000 m
สื่อการส่งสัญญาณ	: สัญญาณเคเบิล
โหมดการเชื่อมต่อ	: ระบบสามสาย
อุณหภูมิในการทำงาน	: -40°C - 80°C
ความชื้นในการทำงาน	: 35% - 85%

AN100 CFM/CMM Mini Thermo-Anemometer



ภาพประกอบ ข.7 AN100 CFM/CMM Mini Thermo-Anemometer

ข้อมูลทางเทคนิค

การแสดงผล : การไหลของอากาศ, ความเร็วลม และอุณหภูมิ

การแสดงผลข้อมูล : วัดค่าสูงสุด, ต่ำสุดได้

ความเร็วลม

: ช่วงการวัด 0.40 – 30.00 m/s

: ความละเอียด 0.01 m/s

: ความแม่นยำ $\pm 3\%$

อุณหภูมิ

: ช่วงการวัด -10 - 60°C

: ความละเอียด 0.1°C

: ความแม่นยำ $\pm 6\%$

กระแสลม

: ช่วงการวัด 0-9999 CMM (3 m/s)

: ความละเอียด 0.1 m/s

ฟังก์ชันเสริม

: ปิดเครื่องอัตโนมัติ

SF-400A



ภาพประกอบ ข.8 SF-400A

ข้อมูลทางเทคนิค

ความละเอียด	: 1 กรัม
หน่วยการวัด	: กรัม, ออนซ์, กิโล และ ปอนด์
ความละเอียดการชั่งน้ำหนัก	: 10000 - 1 กรัม
แบตเตอรี่	: AA 2 ก้อน มีช่องเสียบหม้อแปลงไฟฟ้า DC 9-12 V
ฟังก์ชันเสริม	: TARE ชดเชยน้ำหนักถาดใส่ของ
ปิดอัตโนมัติ	: เมื่อไม่ใช้งานหลังจาก 60 วินาที
ระบบไฟ	: Backlight ที่หน้าจอ สามารถมองเห็นหน้าจอได้ในที่มืด
ขนาดเครื่อง (กว้างxยาวxสูง)	: 225x160x43 mm
ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม	: 5°C - 35°C
จอแสดงผล	: ดิจิตอล 5 หลัก
น้ำหนักรวมของระบบ	: 560 กรัม



การหาอัตราการไหลเชิงมวล

$$\dot{m}_{feed} = \rho \dot{v}$$

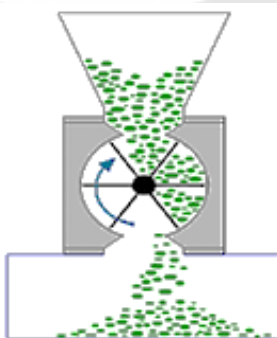
เมื่อ	$\dot{m}_{feed}$	คือ อัตราการไหลเชิงมวล, kg/h
	ρ	คือ ความหนาของเมล็ดพืช, kg/m ³
	$\dot{v}$	คือ อัตราการไหล, m ³ /h

การหาความเร็วของโรตารีวาล์ว

$$V = r\omega$$

เมื่อ	V	คือ ความเร็วของโรตารีวาล์ว, m/s
	r	คือ รัศมี, m
	ω	คือ ความเร็วเชิงมุม, rad/s

ความเร็วเชิงมุม, ω หาได้จากการนำความเร็วรอบของโรตารีวาล์วในหน่วย รอบต่อนาที แปลงหน่วยให้เป็น rad/s



ภาพประกอบ ค.1 โรตารีวาล์ว

การหาค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (specific energy consumption: SEC)

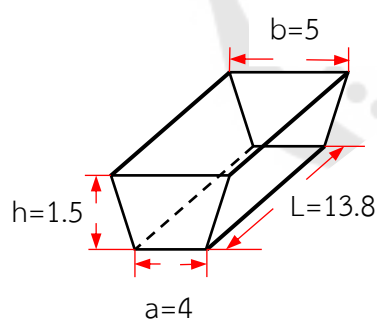
$$SEC = \frac{E_{thermal} + (3.6 \times E_{electrical})}{m_{water\ removed}}$$

เมื่อ	SEC	คือ ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ, MJ/kg-water removed
	$E_{thermal}$	คือ ปริมาณพลังงานความร้อน, MJ
	$E_{electrical}$	คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้า, kWh
	$m_{water\ removed}$	คือ มวลของน้ำที่ระเหยออก, kg

$$E_{thermal} = [m_{LPG} \times HHV]$$

เมื่อ	m_{LPG}	คือ มวลของก๊าซที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง, kg
	HHV	คือ High Heating Value ของเชื้อเพลิง, MJ/kg

การหาอัตราการป้อนของเมล็ดพืช



$$V = 0.5 \times (a+b) \times h \times L$$

$$V = 0.5 \times (4+5) \times 1.5 \times 13.8$$

$$V = 93.2 \text{ cm}^3$$

$$V = 93.2 \text{ cm}^3 \times \frac{1 \text{ m}^3}{(100)^3 \text{ cm}^3}$$

$$V = 0.000094 \text{ m}^3$$



V ทั้งหมด 8 ช่อง ต่อ 1 รอบของโรตารีวาล์ว

$$V_{\text{total}} = 8 \times V$$

$$V_{\text{total}} = 0.000094 \times 8$$

$$V_{\text{total}} = 0.000752 \text{ m}^3$$

การหมุนของโรตารีวาล์ว 6 รอบต่อนาที, rpm

$$V_{\text{total}} = 0.000752 \text{ m}^3 \times 6 \text{ rpm}$$

$$V_{\text{total}} = 0.004512 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

ใน 1 ชั่วโมง; $V_{\text{total}} = 0.004512 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}}$

$$V_{\text{total}} = 0.268272 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad \text{note: } \rho_{\text{paddy}} = 748.8 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m} = \rho V_{\text{total}}$$

$$\dot{m} = 748.8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.27072 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\dot{m} = 203 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายสุรชัย เหมหิรัญ
วัน เดือน ปี เกิด	4 มิถุนายน 2523
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลทหารเรือ กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลเทคนิคกรุงเทพ, 2550 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2553
ที่อยู่ปัจจุบัน	5/337 ซอย 16 หมู่บ้านไอลีฟ พาร์ค ถนนพระราม 2 ตำบลพันท้ายนรสิงห์ อำเภอเมืองสมุทรสาคร จังหวัดสมุทรสาคร 74000
ผลงานตีพิมพ์	Surachai Hemhirun and Pracha Bunyawanichakul. (2020). Cross- Flow Paddy Dryer Application Using Infrared Gas Burner. International of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET), Volume 11, Issue 6 June, 204-214.