

การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยไมโครเทอร์โมอิเล็กทริก



นายทินกร เพ็งประโคน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2564

DESIGN AND CONSTRUCTION OF RICE SEED DRYER WITH  
THERMOELECTRIC MODULE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the  
Degree of Master of Engineering in Mechanical and Process  
System Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2021

## การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยไมโครเทอร์โมอิเล็กทริก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.ปรีดา ปราบกวม)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.กระวี ตรีอำนรรค)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)




(ผศ. ดร.กীরติ สุลักษณ์)

กรรมการ



(ผศ. ดร.การุญ พิงสุวรรณรักษ์)

กรรมการ



(ผศ. ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค)

กรรมการ



(รศ. ดร.นัตถชัย โชติชูช่างูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นายทินกร เพ็ญประโคน : การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าว ด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก (DESIGN AND CONSTRUCTION OF RICE SEED DRYER WITH THERMOELECTRIC MODULE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กระวี ตรีอำรรค, 154 หน้า.

คำสำคัญ : เครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าว เทอร์โมอิเล็กทริก บั้มความร้อน

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการออกแบบ สร้างและทดสอบเครื่องอบแห้ง บั้มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งมีขนาดห้องอบแห้ง 200 ลิตร สำหรับทำการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าว โดยนำเอาอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น TEC12710 มาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งด้วยเทคนิค บั้มความร้อน แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกดังกล่าวเมื่อได้รับไฟฟ้ากระแสตรงจะทำให้ด้านหนึ่งเกิด ความร้อนขึ้นและด้านตรงข้ามเกิดความเย็นซึ่งสามารถนำด้านร้อนมาใช้อุ่นอากาศอบแห้งและ ด้านเย็นนำมาใช้ลดอุณหภูมิของอากาศอบแห้งจนทำให้อุณหภูมิในอากาศเกิดการควบแน่นเป็นหยดน้ำ และทำให้อากาศมีความชื้นลดลงได้เช่นเดียวกับเครื่องอบแห้งแบบบั้มความร้อนทำการติดตั้ง โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเข้ากับระบบอบแห้งและควบคุมการผสมอากาศด้านลดความชื้น กับด้านอุ่นร้อนก่อนนำเข้าสู่ห้องอบแห้งในอัตราส่วนเท่ากับ 1:9 เพื่อให้ได้อุณหภูมิของอากาศอบแห้ง เท่ากับ 42°C ทำการทดสอบอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 จำนวน 6 kg จนกระทั่งความชื้น ในเมล็ดพันธุ์ข้าวเหลือ 14%wb ผลการทดสอบพบว่า เครื่องอบแห้งต้นแบบสามารถอบแห้ง เมล็ดพันธุ์ข้าวได้อย่างดี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) เท่ากับ 0.4 อัตราการอบแห้ง (DR) เท่ากับ 0.089 kg<sub>water</sub>/h, อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) เท่ากับ 0.163 kg<sub>water</sub>/kWh และ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เท่ากับ 22.068 MJ/kg<sub>water</sub> นอกจากนี้ ยังได้ ทำการทดสอบหาอัตราการงอก (Germination test) ของเมล็ดพันธุ์ข้าวหลังการอบแห้งพบว่า มีค่าเท่ากับ 97% ซึ่งมีความมากกว่าอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ใช้การผึ่งแห้งที่มีค่าเท่ากับ 95%

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนักศึกษา.....ทินกร

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....ดร. กระวี

TINNAKORN PENGPRAKHON : DESIGN AND CONSTRUCTION OF RICE SEED DRYER WITH THERMOELECTRIC MODULE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KRAWEE TREEAMNUK, D.Eng., 154 PP.

Keyword : RICE SEED DRYER/THERMOELECTRIC/HEAT PUMP

The objective of this research was to design, construct and test the rice seed heat pump dryer with the thermoelectric module. The drying chamber was 200 liters and the thermoelectric module's model TEC12710 was used in the heat pump dryer. The thermoelectric plate can generate heat on one side of the plate and cools the opposite side when direct current is supplied to it. This behavior can be applied in a heat pump drying system by using the hot side for heating and the cold side for dehumidifying the drying air. The thermoelectric module was installed in the drying system and the mixture of dehumidified air and heated air was controlled in a 1:9 ratio to maintain the drying air temperature at 42°C. Jasmine 105 rice seed 6 kg was dried test until the moisture content was 14%wb. The results showed that the prototype dryer was able to dry the rice seeds well with the coefficient of performance of 0.4, the drying rate of 0.089 kg<sub>water</sub>/h, the specific moisture evaporation rate of 0.163 kg<sub>water</sub>/kWh, and the specific energy consumption of 22.068 MJ/kg<sub>water</sub>. Furthermore, the germination test results showed that the germination of rice seeds from the dryer was 97%, which was higher than the germination rate of 95% of the natural dried rice seeds.

School of Mechanical Engineering  
Academic Year 2021

Student's Signature.....Tinnakorn.....  
Advisor's Signature...Krawee Treeamnuk.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้มีอุปการะคุณทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ตลอดจน การช่วยเหลือต่าง ๆ ทั้งในด้านวิชาการก็ดี การดำเนินงานก็ดี จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สามารถบรรลุ ตามวัตถุประสงค์ โดยขอแสดงความขอบคุณบุคคลดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำรรค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนให้คำปรึกษาทั้งในด้านความรู้ทางวิชาการและการทำงานวิจัย ชี้แนะแนวทาง ในการเขียนงานวิจัย นอกจากนี้ยังช่วยตรวจสอบบทความวิจัยต่าง ๆ รวมไปถึงวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จลุล่วงสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำรรค อาจารย์และหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้มอบความรู้ คำชี้แนะต่าง ๆ ทั้งในด้านวิชาการและการทำงานวิจัย ตลอดจนได้อำนวยสถานที่ และอุปกรณ์มากมายในการทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วง

นางสาวจันทนา สีลาน้ำเที่ยง เพื่อนบัณฑิตศึกษาที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำ ในการสอบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น

นายณนทพัทธ์ สุทธิมล เพื่อนบัณฑิตศึกษาที่ได้ให้ความช่วยเหลือในเรื่องของการประกอบ กล่องอะคริลิกในชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก

นายสุริยา ป้องทองกลาง เพื่อนบัณฑิตที่ได้ให้ความช่วยเหลือในเรื่องของการประกอบ กล่องอะคริลิกและแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก

บิดา มารดา ที่คอยอบรมเลี้ยงดู ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนในเรื่องต่างๆ ทั้งในด้าน การช่วยชี้แนะแนวทางสำหรับเตรียมการทดสอบอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์ และงานอื่น ๆ จนสำเร็จลุล่วงสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้แก่ผู้ทำวิจัย ตลอดจนผู้ที่มีได้กล่าวถึงมา ณ ที่นี้ ที่ได้ช่วยเหลือผู้ทำวิจัยจนประสบผลสำเร็จ ในการศึกษาตลอดมา

ทินกร เฟื่องประโคน

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ท
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>2 ปรัชญ์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 ข้าวหอมมะลิไทย.....	4
2.2 ข้าวชาวดอกมะลิ 105.....	6
2.3 การผลิตเมล็ดพันธุ์ข้าว.....	6
2.4 ทฤษฎีการอบแห้ง.....	8
2.5 ปริมาณความชื้นในวัสดุ.....	9
2.6 ความชื้นสมดุล.....	10
2.7 ไอโซเทอมความชื้น.....	11
2.8 เครื่องอบแห้งเมล็ดพืช.....	12
2.9 เครื่องอบแห้งอาหารและวัสดุเกษตรอื่น ๆ.....	16
2.10 การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน.....	25
2.11 แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก.....	29

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	34
3.1	การทดลองหาไอโซเทอมความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105.....	34
3.2	การสอบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT 22.....	38
3.3	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	41
3.4	การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์.....	42
3.4.1	ห้องอบแห้ง (Drying chamber).....	42
3.4.2	ชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก.....	42
3.4.3	การทดสอบแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกด้านการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศ อบแห้ง (ห้องที่ 1).....	46
3.4.4	การทดสอบแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกด้านการลดความชื้นให้แก่อากาศ อบแห้ง (ห้องที่ 2).....	50
3.4.5	การคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับจ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ในการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้ง (ห้องที่ 1).....	56
3.4.6	การติดตั้งอุปกรณ์เครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก.....	61
3.4.7	ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนเทอร์โม อิเล็กทริก.....	63
3.5	การทดสอบเครื่องอบแห้งด้วยการอบแห้งเมล็ดพันธุ์.....	65
3.5.1	การเตรียมตัวอย่างเมล็ดพันธุ์ข้าวก่อนการอบแห้ง.....	65
3.5.2	การอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าว.....	67
3.5.3	การประเมินความชื้นของเมล็ดพันธุ์เพื่อประมาณหาจุดยุติในการ อบแห้ง.....	67
3.6	การลดความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยการผึ่งในร่ม.....	70
3.7	การหาค่าความชื้นของตัวอย่างเมล็ดพันธุ์ข้าว.....	70
3.8	การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งต้นแบบ.....	71
3.8.1	สมรรถนะทางพลังงานของปั๊มความร้อน.....	71
3.8.2	สมรรถนะในการอบแห้ง.....	73
3.8.2.1	อัตราการใช้พลังงานเฉลี่ย (DR).....	73



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.8.2.2	อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER).....	73
3.8.2.3	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC).....	73
3.9	การทดสอบคุณภาพเมล็ดพันธุ์.....	74
3.10	สถานที่ทำการทดลอง.....	74
3.11	ระยะเวลาทำการทดลอง.....	74
<b>4</b>	<b>ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....</b>	<b>75</b>
4.1	การหาค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105.....	75
4.2	การสอบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT 22.....	85
4.2.1	ผลการสอบเทียบและการหาสมการปรับแก้ (Calibration equation).....	85
4.2.2	การทดสอบความแม่นยำของสมการปรับแก้.....	89
4.2.3	การเปรียบเทียบผลการสอบเทียบของเซนเซอร์ 2 ตัวที่สภาวะเดียวกัน.....	90
4.3	การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งต้นแบบ.....	93
4.3.1	การประเมินความชื้นของเมล็ดพันธุ์เพื่อประมาณจุดยุติ การอบแห้ง.....	93
4.3.2	กราฟพฤติกรรมการอบแห้ง (Drying curve).....	94
4.3.3	ค่าสมรรถนะของการอบแห้ง.....	98
4.3.4	ผลการลดความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยวิธีการผึ่งในร่ม.....	100
4.4	การทดสอบคุณภาพของเมล็ดพันธุ์.....	101
<b>5</b>	<b>สรุปและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>103</b>
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	103
5.1.1	การหาค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105.....	103
5.1.2	การสอบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT 22.....	103
5.1.3	การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งต้นแบบ.....	104
5.1.3.1	การประเมินความชื้นของเมล็ดพันธุ์เพื่อประมาณหาจุดยุติ ในการอบแห้ง.....	104
5.1.3.2	กราฟพฤติกรรมการอบแห้ง (Drying curve).....	104
5.1.3.3	ค่าสมรรถนะของการอบแห้ง.....	104

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.3.4 ผลการลดความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยวิธีการฝังในร่ม.....	105
5.1.4 การทดสอบคุณภาพของเมล็ดพันธุ์.....	105
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	105
รายการอ้างอิง.....	106
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ตารางผลการเก็บข้อมูล.....	113
ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณ.....	119
ภาคผนวก ค. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ระหว่างการศึกษา.....	124
ประวัติผู้เขียน.....	154



## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1	ลักษณะประจำพันธุ์ข้าวหอมมะลิไทย.....5
2.2	มาตรฐานเมล็ดพันธุ์ข้าวชั้นพันธุ์จำหน่าย.....7
3.1	สมบัติของสารละลายเกลืออิมิตัวที่ใช้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในภาชนะ.....35
3.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ทำนายไอโซเทอมความชื้นในข้าวขาวดอกมะลิ 105.....37
4.1	ค่าคงที่และค่าทางสถิติในแต่ละจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับไอโซเทอมการดูดความชื้น (Adsorption isotherms) ในข้าวขาวดอกมะลิ 105.....77
4.2	ค่าคงที่และค่าทางสถิติในแต่ละจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption isotherms) ในข้าวขาวดอกมะลิ 105.....78
4.3	ค่าสมรรถนะของการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบ.....98
ก.1	ผลการเก็บข้อมูลของค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ของไอโซเทอมการดูดความชื้นและการคายความชื้นที่อุณหภูมิ 25°C.....114
ก.2	ผลการเก็บข้อมูลของค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ของไอโซเทอมการดูดความชื้นและการคายความชื้นที่อุณหภูมิ 40°C.....114
ก.3	ผลการเก็บข้อมูลของค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ของไอโซเทอมการดูดความชื้นและการคายความชื้นที่อุณหภูมิ 60°C.....114
ก.4	ผลการเก็บข้อมูลของค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ของไอโซเทอมการดูดความชื้นและการคายความชื้นที่อุณหภูมิ 70°C.....115
ก.5	ผลการเก็บข้อมูลของค่าความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในการทดสอบเครื่องอบแห้งในการทดลองที่ 1.....115
ก.6	ผลการเก็บข้อมูลของค่าความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในการทดสอบเครื่องอบแห้งในการทดลองที่ 2.....116
ก.7	ผลการเก็บข้อมูลของค่าความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในการทดสอบเครื่องอบแห้งในการทดลองที่ 3.....117
ก.8	ผลการทดสอบหาอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105.....117

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง

หน้า

- ก.9 ผลการปรับสภาพอากาศของชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนโมเอิลีทริก โดยอ้างอิง  
ข้อมูลจากผลการอบแห้งในรอบที่ 2 ที่เวลาในการอบแห้งเท่ากับ 180 นาที.....118



## สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 ข้าวหอมมะลิไทย.....	4
2.2 ข้าวขาวดอกมะลิ 105.....	6
2.3 ช่วงของการอบแห้ง.....	9
2.4 ไอโซเทอมความชื้นแต่ละชนิด.....	11
2.5 การเคลื่อนที่ของอากาศในเครื่องอบแห้ง.....	13
2.6 ลักษณะการไหลของอากาศอบแห้งและเมล็ดพืช.....	14
2.7 เครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง.....	15
2.8 เครื่องอบแห้งแบบไหลตาม.....	16
2.9 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์.....	17
2.10 เครื่องอบแห้งแบบตู้.....	18
2.11 เครื่องอบแห้งแบบสายพาน.....	19
2.12 เครื่องอบแห้งพ่นฝอยแบบไหลสวนทาง.....	20
2.13 เครื่องอบแห้งพ่นฝอยแบบไหลตาม.....	20
2.14 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด.....	21
2.15 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง.....	22
2.16 เครื่องอบแห้งแบบบีบความร้อน.....	23
2.17 เครื่องอบแห้งบีบความร้อนแบบต่าง ๆ.....	24
2.18 แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก.....	29
3.1 อุปกรณ์และขั้นตอนการทดลองหาค่าไอโซเทอมความชื้น.....	35
3.2 อุปกรณ์และวิธีการสอบเทียบเซนเซอร์ DHT 22.....	39
3.3 แบบห้องอบแห้ง.....	42
3.4 ชุดอุปกรณ์บีบความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก.....	43
3.5 ชุดอุปกรณ์บีบความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก (ภาพจริง).....	43
3.6 การติดตั้งชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกบนแผ่นอะคริลิค.....	44

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
3.7 การติดตั้งอุปกรณ์ภายในตู้ไฟฟ้าสำหรับชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก.....	45
3.8 การติดตั้งอุปกรณ์ภายในตู้ไฟฟ้าสำหรับพัดลม DC.....	46
3.9 การต่อชุดอุปกรณ์การทดลองเทอร์โมอิเล็กทริกด้านเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง (ห้องที่ 1).....	47
3.10 ชุดอุปกรณ์ทดลองเทอร์โมอิเล็กทริกด้านเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง (ห้องที่ 1) ภาพจริง.....	47
3.11 การเปรียบเทียบอุณหภูมิและค่าแรงดันไฟฟ้าที่สัดส่วนของอากาศผสม (Air ratio) เท่ากับ 1:9 2:8 3:7 และ 4:6 ดังรูปย่อย ก ข ค และ ง ตามลำดับ ที่อุณหภูมิทดสอบ 45°C.....	48
3.12 เส้นสภาวะของอากาศในกระบวนการ Cooling and dehumidifying.....	50
3.13 การเปรียบเทียบผลการทำความเย็นของอากาศจากด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ในแต่ละสัดส่วนของอากาศผสม ที่อุณหภูมิทดสอบ 40°C.....	52
3.14 ผลกระทบจากการลดอุณหภูมิของอากาศหลังจากการผสม ( $T_1-T_4$ ) ในแต่ละสัดส่วนอากาศผสม (Air ratio) ของแต่ละสภาวะอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง ณ แรงดันไฟฟ้า 4 V.....	53
3.15 การควบแน่นของไอน้ำในอากาศด้วยชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก.....	54
3.16 อัตราการควบแน่นไอน้ำในอากาศเปรียบเทียบกับค่าสัดส่วนของอากาศผสมในแต่ละค่าแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะอุณหภูมิ 40°C.....	55
3.17 การผสมอากาศสำหรับนำไปใช้อบแห้งจากปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก.....	57
3.18 เส้นสภาวะของอากาศในแต่ละกระบวนการของชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก.....	57
3.19 การติดตั้งอุปกรณ์เครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก.....	61
3.20 การติดตั้งอุปกรณ์เครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก (ภาพจริง).....	61
3.21 สภาวะอากาศในแต่ละบริเวณของเครื่องอบแห้ง.....	62
3.22 การติดตั้งอุปกรณ์ภายในตู้ไฟฟ้าสำหรับระบบควบคุม.....	63
3.23 ผังงาน (Flow chart) ของระบบควบคุม.....	64
3.24 เครื่องคัดแยกเมล็ดพันธุ์.....	66
3.25 การบรรจุเมล็ดพันธุ์ข้าวภายในห้องอบแห้ง.....	66

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
3.26 การชั่งน้ำหนักข้าวในถุงตัวอย่าง.....	68
3.27 การวางถุงตัวอย่างข้าวในห้องอบแห้ง.....	69
3.28 การวางถุงตัวอย่างข้าวในห้องอบแห้ง (ภาพจริง).....	69
3.29 การฝั่งเมล็ดพันธุ์ข้าวในที่ร่ม.....	70
3.30 การอบแห้งเมล็ดพันธุ์ด้วยตู้อบลมร้อน.....	71
3.31 การทดสอบหาอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์.....	74
4.1 ไอโซเทอมการดูดความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ อุณหภูมิ 25 40 60 และ 70°C.....	75
4.2 ไอโซเทอมการคายความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ อุณหภูมิ 25 40 60 และ 70°C.....	76
4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุด 4 แบบ ของไอโซเทอมการดูดความชื้น (Adsorption isotherms) ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 อุณหภูมิ 25 40 60 และ 70°C ตั้งรูป ก ข ค และ ง ตามลำดับ.....	81
4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุด 4 แบบ ของไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption isotherms) ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 อุณหภูมิ 25 40 60 และ 70°C ตั้งรูป ก ข ค และ ง ตามลำดับ.....	81
4.5 Sorption hysteresis จากแบบจำลองของ Henderson ที่อุณหภูมิ 25 40 60 และ 70°C.....	82
4.6 อนุพันธ์อันดับหนึ่งของปรากฏการณ์ Sorption hysteresis ที่อุณหภูมิ 25 40 60 และ 70°C.....	83
4.7 ค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่วัดได้จากเซนเซอร์ DHT 22 เปรียบเทียบกับค่าจาก เครื่องมือวัดอ้างอิง.....	85
4.8 ค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่วัดได้จากเซนเซอร์ DHT 22 เปรียบเทียบกับค่าจาก เครื่องมือวัดอ้างอิงและสมการสอบเทียบค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่อุณหภูมิ 25 40 55 และ 65°C.....	86
4.9 ความสัมพันธ์ของค่าความชื้น (m) และค่าคงที่ (c) เทียบกับค่าอุณหภูมิของ อากาศแวดล้อม.....	87
4.10 สมการการสอบเทียบอุณหภูมิของเซนเซอร์ DHT 22.....	88

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.11 การเปรียบเทียบค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่วัดได้จากเซนเซอร์ DHT 22 สมการ สอบเทียบและเครื่องมือวัดอ้างอิง.....	90
4.12 การเปรียบเทียบค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศระหว่างค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ที่ผลิต จากบริษัทเดียวกัน ที่สภาวะอุณหภูมิ 25 40 55 และ 65°C ดังรูป ก ข ค และ ง ตามลำดับ.....	91
4.13 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิระหว่างค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ที่ผลิตจากบริษัทเดียวกัน.....	92
4.14 การเปรียบเทียบระหว่างผลการอบแห้งเฉลี่ย (Average) และค่าความชื้นที่คำนวณได้ จากถุงตัวอย่างเฉลี่ย (Sample).....	93
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ถูกอบแห้งเปรียบเทียบ กับเวลาที่ใช้.....	95
4.16 การเปรียบเทียบผลการอบแห้งของถาด (Tray) ในแต่ละชั้น.....	96
4.17 อัตราการควบแน่นน้ำที่ทำได้ในชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก ระหว่างการอบแห้ง.....	97
4.18 ผลการทดสอบอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105.....	101
4.19 การงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105.....	101



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$M_w$	=	ความชื้นมาตรฐานเปียก
$W$	=	มวลของวัสดุ, kg
$W_w$	=	มวลของความชื้นหรือปริมาณน้ำในวัสดุ, kg
$W_d$	=	มวลแห้งของวัสดุ, kg
$M_d$	=	ความชื้นมาตรฐานแห้ง
COP	=	ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ
$Q_{in}$	=	ค่าพลังงานความร้อนที่อากาศได้รับ, kW
$W_{in}$	=	ค่าพลังงานที่ใช้, kW
DR	=	อัตราการอบแห้งเฉลี่ย, kg <sub>water</sub> /h
$m_i$	=	มวลของผลิตภัณฑ์ก่อนการอบแห้ง, kg
$m_f$	=	มวลของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง, kg
t	=	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, h
$MC_d$	=	ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง, %db
SMER	=	อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ, kg <sub>water</sub> /kWh
$P_e$	=	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้, kWh
SEC	=	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, MJ/kg <sub>water</sub>
$a_w$	=	ค่าแอกติวิตี้, ทศนิยม
p	=	ความดันไอในวัสดุ, kPa
$p_o$	=	ความดันไอของไอน้ำ, kPa
ERH	=	ค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลอากาศ, %
EMC	=	ค่าความชื้นสมดุล, kg <sub>water</sub> /kg <sub>d</sub>
A, B, C, D	=	ค่าคงที่ของแบบจำลอง
T	=	อุณหภูมิ, °C
$M_{e,ex}$	=	ความชื้นสมดุลของวัสดุที่ได้จากการทดลอง, %db
$M_{e,pred}$	=	ความชื้นสมดุลของวัสดุที่ได้จากการทำนาย, %db
N	=	จำนวนค่าสังเกต

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$n$	=	จำนวนค่าคงที่ในแบบจำลอง
DHT 22	=	ชื่อของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น
$Y_{cal}$	=	ค่าอุณหภูมิและความชื้นจากสมการปรับแก้, °C และ %
$Y_{ref}$	=	ค่าอุณหภูมิและความชื้นจากเครื่องมือวัดอ้างอิง, °C และ %
$\bar{Y}$	=	ค่าเฉลี่ยของค่าอุณหภูมิและความชื้นจากเครื่องมือวัดอ้างอิง, °C และ %
$N$	=	จำนวนค่าที่ทำการสอบเทียบ
$\dot{Q}_H$	=	พลังงานความร้อนจากกระบวนการให้ความร้อน, kW
$\dot{m}_{a_2}$	=	อัตราการไหลของอากาศแห้งที่ไหลผ่านบริเวณหมายเลข 2, $\text{kg}_{\text{dry air}}/\text{s}$
$\dot{m}_{a_3}$	=	อัตราการไหลของอากาศแห้งที่ไหลผ่านบริเวณหมายเลข 3, $\text{kg}_{\text{dry air}}/\text{h}$
$\dot{m}_{a_4}$	=	อัตราการไหลของอากาศแห้งที่ไหลผ่านบริเวณหมายเลข 4, $\text{kg}_{\text{dry air}}/\text{s}$
$h_1$	=	ค่าเอนทัลปีจำเพาะ (Enthalpy) ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 1, $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{dry air}}$
$h_2$	=	ค่าเอนทัลปีจำเพาะ (Enthalpy) ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 2, $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{dry air}}$
$h_3$	=	ค่าเอนทัลปีจำเพาะ (Enthalpy) ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 3, $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{dry air}}$
$h_4$	=	ค่าเอนทัลปีจำเพาะ (Enthalpy) ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 4, $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{dry air}}$
MER	=	ค่าอัตราการควบแน่น, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{h}$
$\omega_1$	=	ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 1, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$
$\omega_2$	=	ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 2, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$
$\omega_3$	=	ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 3, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$
$\omega_4$	=	ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 4, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$
$T_1$	=	อุณหภูมิของอากาศบริเวณทางเข้าหมายเลข 1, °C
$T_2$	=	อุณหภูมิของอากาศหลังเพิ่มอุณหภูมิที่บริเวณหมายเลข 2, °C
$T_3$	=	อุณหภูมิของอากาศหลังลดความชื้นที่บริเวณหมายเลข 3, °C
$T_4$	=	อุณหภูมิของอากาศหลังการผสมที่บริเวณหมายเลข 4, °C
$\dot{m}_w$	=	อัตราการไหลของน้ำที่ถูกควบแน่นออกจากอากาศอบแห้ง, $\text{kg}_{\text{dry air}}/\text{s}$

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$h_{fg}$	=	ค่าเอนทัลปีจำเพาะของน้ำที่ถูกควบแน่นออกจากอากาศอบแห้ง, $\text{kJ}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{water}}$
$T_w$	=	อุณหภูมิน้ำที่ถูกควบแน่นออกจากอากาศอบแห้ง, $^{\circ}\text{C}$
$\text{RH}_{\text{Sensor}}$	=	ค่าความชื้นที่วัดได้จากเซนเซอร์ DHT 22, %
$\text{RH}_{\text{Ref.}}$	=	ค่าความชื้นที่วัดได้จากเครื่องมือวัดอ้างอิง, %
$m$	=	ค่าความชื้นของสมการเส้นตรง, % <sub>Sensor</sub> / % <sub>Ref.</sub>
$c$	=	ค่าคงที่ของสมการเส้นตรง, % <sub>Sensor</sub>
$T_{\text{Sensor}}$	=	ค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเซนเซอร์ DHT 22, $^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{Ref.}}$	=	ค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเครื่องมือวัดอ้างอิง, $^{\circ}\text{C}$



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ข้าว ถือได้ว่าเป็นพืชพันธุ์ธัญญาหารหลักของคนไทยมาช้านาน เนื่องจากประเทศไทย เป็นประเทศที่มีภูมิประเทศและภูมิอากาศที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกข้าว จึงทำให้สามารถปลูกข้าว ได้ในปริมาณที่มากเพียงพอต่อการบริโภคทั้งในประเทศและยังสามารถส่งออกไปยังต่างประเทศ ได้อีกด้วย ดังตัวอย่างข้อมูลในปี พ.ศ.2563 ซึ่งเป็นปีที่ประเทศไทยมีปริมาณการส่งออกข้าวมากถึง 5.72 ล้านตัน มีมูลค่ากว่า 115,915 ล้านบาท (Thai Rice Exporters Association, 2021) และ ยังได้รับรางวัล World's Best Rice Award 2020 จากงาน World Rice Conference ซึ่งเป็น การได้แชมป์ครั้งที่ 6 จากการจัดงานมาแล้วทั้งหมด 12 ครั้ง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2552 (Department of International Trade Promotion, 2020) จากข้อมูลข้างต้นชี้ให้เห็นว่าข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจหลัก ที่สำคัญต่อประเทศไทยเป็นอย่างมาก โดยข้าวหลังจากการเก็บเกี่ยวจะต้องมีการคัดแยกเมล็ดพันธุ์ ข้าวส่วนหนึ่งเอาไว้สำหรับการเพาะปลูกในครั้งถัดไป ซึ่งเมล็ดพันธุ์ข้าวหลังจากการเก็บเกี่ยวโดยทั่วไป จะมีความชื้นสูงประมาณ 22-24%wb ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องลดความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าว ก่อนการเก็บรักษา เนื่องจากค่าความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเสื่อมคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ และทำให้อัตรการงอกลดลง โดยค่าความชื้นสูงสุดของเมล็ดพันธุ์ข้าวในการเก็บรักษาควรมีค่าไม่เกิน 14%wb (มาตรฐานเปียก) นอกจากนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวต้องไม่เกิน 43°C มิฉะนั้นจะเกิดความเสียหายต่อเมล็ดพันธุ์ซึ่งนำไปสู่การเสื่อมคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ได้ (วีไล ปาละวิสุทธิ, 2549)

สำหรับวิธีการลดความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าวหลัก ๆ มี 2 วิธี วิธีแรกคือ การลดความชื้น โดยอาศัยธรรมชาติ (Natural drying) เช่น การตากแดด ซึ่งเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย มีต้นทุนต่ำและ มีความเสี่ยงในเรื่องของการใช้อุณหภูมิที่ร้อนเกินไปน้อยที่สุด แต่มีข้อเสียคือเป็นวิธีที่ต้องพึ่งพา สภาพอากาศ ไม่สามารถทำได้ในขณะที่ฝนตกและยังมีปัญหาของนกหรือสัตว์ชนิดอื่น ๆ เข้ามากัดกิน เมล็ดข้าวขณะทำการตากแดดอีกด้วยและวิธีที่สองคือ การลดความชื้นด้วยวิธีการอบแห้ง (Drying) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้โดยไม่ต้องพึ่งพาสภาพอากาศ สามารถควบคุมอุณหภูมิอากาศในการอบแห้งเท่าใดก็ได้ โดยเทคนิคที่มักนิยมใช้มากในการอบแห้งคือ การอบแห้งโดยใช้ป้มความร้อนระบบอัดไอ ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการอบแห้ง เมล็ดพันธุ์ข้าวได้ เนื่องจากระบบนี้สามารถสร้างอากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิและความชื้นของอากาศต่ำ

สามารถนำไปใช้ในการอบแห้งวัสดุที่ไวต่อการเสื่อมสภาพทางความร้อนได้และยังเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูง (เทอร์ตัน ทิพยวิมล, 2552) ซึ่งเป็นสิ่งที่เหมาะสมในการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าว แต่อย่างไรก็ตามปั๊มความร้อนระบบอัดไอน์นั้นมีการใช้สารทำความเย็น (Refrigerant) เป็นสารทำงาน (Working Fluid) ในระบบ ซึ่งถ้าหากเกิดการรั่วไหลจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและระบบอัดไอน์นั้นมีต้นทุนในการติดตั้งระบบที่ค่อนข้างสูง และยังมี การติดตั้งอุปกรณ์ในระบบที่ค่อนข้างซับซ้อน โดยหากมีอุปกรณ์ใดเกิดการชำรุด จะต้องทำการแยกระบบเพื่อติดตั้งใหม่ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ยุ่งยากและใช้เวลานาน แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิและลดความชื้นของอากาศได้ นั่นคืออุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric module) ซึ่งเป็นวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำ (Semi-conductor) โดยเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับอุปกรณ์แล้วจะทำให้เกิดด้านร้อนและด้านเย็นบนแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งได้ โดยอุปกรณ์ดังกล่าวนี้มีราคาต่ำ มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาต่อการติดตั้งและรีไซเคิลหากเกิดการชำรุดเสียหายซึ่งสะดวกต่อการใช้งาน นอกจากนี้ยังไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วยเนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้สารทำความเย็นในระบบ

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำเอาอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งด้วยเทคนิคปั๊มความร้อน สำหรับการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ต้องใช้อากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิและความชื้นของอากาศต่ำ ทั้งนี้เพื่อลดต้นทุนในการสร้างเครื่องอบแห้งจากระบบเดิมที่มีต้นทุนที่สูงและเพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง นอกจากนี้ยังเพื่อเป็นแนวทางแก่ผู้ประกอบการหรือเกษตรกรรายย่อยในการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวหรือผลผลิตทางการเกษตรที่มีความจำเป็นต้องทำการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อออกแบบและทำการสร้างเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริก
- 1.2.2 เพื่อประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำต้นแบบที่สร้างขึ้น
- 1.2.3 เพื่อประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ภายหลังการอบแห้ง

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 สร้างเครื่องอบแห้งต้นแบบขนาด 200 ลิตร
- 1.3.2 การอบแห้งในงานวิจัยนี้เป็นการอบแห้งแบบชั้นบาง
- 1.3.3 เครื่องอบแห้งต้นแบบใช้อุณหภูมิในการอบแห้งไม่เกิน 43°C
- 1.3.4 ทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้งต้นแบบโดยใช้เมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 เป็นตัวอย่างในการอบแห้ง โดยอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวจำนวน 6 kg

1.3.5 ประเมินคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ข้าวหลังจากอบแห้งด้วยการทดสอบหาอัตราการงอกของเมล็ด

#### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้เครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริก

1.4.2 ทราบสถานะของอากาศอบแห้งที่เหมาะสมในการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบ

1.4.3 ทราบหลักการทำงานและพฤติกรรมของเครื่องอบแห้งที่ใช้เทอร์โมอิเล็กทริก

1.4.4 ทราบพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งของเครื่องอบแห้งต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก

1.4.5 ทราบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างขึ้น

## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับบทนี้ได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานสำคัญที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ในเรื่องข้าวหอมมะลิไทย ข้าวขาวดอกมะลิ 105 การผลิตเมล็ดพันธุ์ข้าว ทฤษฎีการอบแห้ง การหาปริมาณความชื้นในวัสดุ ความชื้นสมดุล ไอโซเทอมความชื้น เครื่องอบแห้งเมล็ดพืช เครื่องอบแห้งอาหารและวัสดุเกษตรแบบอื่นๆ โดยเฉพาะเครื่องอบแห้งแบบป้อนความร้อนซึ่งเป็นการอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ รวมไปถึงการประเมินประสิทธิภาพในการอบแห้งแบบป้อนความร้อน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรด้วยป้อนความร้อน และอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ ตลอดจนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกในด้านต่างๆ

#### 2.1 ข้าวหอมมะลิไทย

ข้าวหอมมะลิไทย (Thai Hom Mali Rice) มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Oryza sativa* L. วงศ์ Gramineae หรือ Poaceae ซึ่งเป็นพันธุ์ข้าวที่มีความสำคัญต่อคนไทยมาช้านาน เป็นข้าวที่มีกลิ่นหอมตามธรรมชาติ ข้าวหุงสุกมีความอ่อนนุ่มเป็นที่นิยมทั้งชาวไทยและชาวต่างชาติและเป็นข้าวที่ปลูกในประเทศไทยในฤดูนาปี โดยตามมาตรฐานสินค้าทางการเกษตรได้แบ่งข้าวหอมมะลิไทยตามระดับการแปรสภาพข้าวได้ 3 ประเภท คือ ข้าวเปลือก ข้าวกล้องและข้าวขาว



รูปที่ 2.1 ข้าวหอมมะลิไทย

ที่มา: (เอซีนิวส์, 2561)

สำหรับพันธุ์ข้าวหอมมะลิไทยที่ผลิตเป็นการค้าซึ่งทางกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ มีมาตรฐานรับรองคือพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และพันธุ์ กข 15 (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2560) โดยข้าว 2 สายพันธุ์ดังกล่าวนี้เป็นพันธุ์ข้าวที่ได้รับความนิยมปลูกมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เนื่องจากเป็นเขตที่มีพื้นที่และสภาวะแวดล้อมเหมาะสมต่อการเพาะปลูก เพราะเป็นพันธุ์ข้าวที่ทนแล้ง (กรมวิชาการเกษตร, 2547) โดยมีลักษณะประจำพันธุ์ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลักษณะประจำพันธุ์ข้าวหอมมะลิไทย (ดัดแปลงจาก กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2560 และ กรมวิชาการเกษตร, 2547)

ลักษณะประจำพันธุ์	พันธุ์ข้าวหอมมะลิไทย	
	ขาวดอกมะลิ 105 (Khao Dawk Mali 105)	กข15 (RD 15)
ปริมาณแอมิโลส (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	13.0 ถึง 18.0	13.0 ถึง 18.0
ความไวต่อช่วงแสง	ไวต่อช่วงแสง	ไวต่อช่วงแสง
สีของข้าวเปลือก	ฟาง	ฟาง
หางของข้าวเปลือก	ไม่มี	ไม่มี
ความยาวเมล็ดข้าวเปลือก (มิลลิเมตร)	9.7 ถึง 11.5	9.8 ถึง 11.6
ความยาวเมล็ดข้าวกล้อง (มิลลิเมตร)	7.0 ถึง 8.1	7.0 ถึง 8.1
อัตราส่วนความยาวต่อความ กว้างของเมล็ดข้าวกล้อง	$\geq 3.2 : 1$	$\geq 3.2 : 1$
น้ำหนักของข้าวเปลือก 100 เมล็ด (กรัม)	2.50 ถึง 2.97	2.50 ถึง 2.97
ระดับค่าการสลายเมล็ดในต่าง	6.0 ถึง 7.0	6.0 ถึง 7.0



## 2.2 ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (Khao Dawk Mali 105) ซึ่งมีชื่อในทางการค้าคือ ข้าวหอมมะลิ เป็นข้าวที่มีเมล็ดข้าวสารมีลักษณะรูปร่างเรียวยาว เมล็ดใส ท้องไข่น้อย ความสูงถึงคอรวงเฉลี่ย 140 cm ความยาวจากคอรวงถึงปลายรวงเฉลี่ย 33 cm กอตั้ง ปล้องสีเหลืองอ่อน กาบใบและใบสีเขียว มีขนบนใบ ปลายใบตกร ลิ่นใบขาวรูปร่างแหลมมี 2 ยอด หูใบและข้อต่อใบมีสีเขียวอ่อน มีระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 8 สัปดาห์ และยังเป็นพันธุ์ข้าวที่ทนต่อสภาพดินเปรี้ยวและดินเค็ม ทนแล้งได้ดี แต่มีข้อจำกัดคือไม่ต้านทานต่อโรคแมลงโดยพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการปลูกข้าวสายพันธุ์นี้คือ บริเวณพื้นที่นาข้าวในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือของประเทศไทย (กรมการข้าว, 2553)



รูปที่ 2.2 ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ที่มา: (สยามคูโบต้า, 2559)

## 2.3 การผลิตเมล็ดพันธุ์ข้าว

โดยปกติแล้วหลังจากการเก็บเกี่ยวข้าวจะมีการคัดเมล็ดพันธุ์ไว้และนำมาผ่านกระบวนการลดความชื้นจนถึงค่าที่เหมาะสมในการเก็บรักษา ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญ ทั้งนี้เพื่อเป็นการรักษาพันธุ์ข้าวเอาไว้และเพื่อให้ได้เมล็ดพันธุ์ที่มีคุณภาพสำหรับการปลูกในครั้งถัดไป ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเมล็ดพันธุ์ข้าวหลังจากการเก็บเกี่ยวจะมีค่าความชื้นประมาณ 22–24%wb โดยมักจะถูกเก็บเกี่ยวในระยะเวลาประมาณ 31-33 วัน หลังข้าวออกดอก ซึ่งจะต้องมีการลดความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวก่อนการเก็บรักษา เนื่องจากค่าความชื้นที่สูงมีผลทำให้อัตราการเสื่อมคุณภาพของเมล็ดพันธุ์เพิ่มขึ้น โดยจำเป็นต้องทำการลดความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวหลังจากการเก็บเกี่ยว

ภายใน 24 ชั่วโมง และอุณหภูมิของอากาศอบแห้งต้องไม่เกิน 43°C (วีไล ปาละวิสุทธิ์, 2549) โดยตามมาตรฐานการผลิตเมล็ดพันธุ์ข้าวซึ่งทางกรมการข้าวได้กำหนดไว้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานเมล็ดพันธุ์ข้าวชั้นพันธุ์จำหน่าย (วีไล ปาละวิสุทธิ์, 2549)

คุณภาพ	ศูนย์เมล็ดพันธุ์ข้าว	สหกรณ์การเกษตร
เมล็ดพันธุ์บริสุทธิ์ ต่ำสุด (%)	98	98
สิ่งเจือปน สูงสุด (%)	2	2
เมล็ดพืชอื่น สูงสุด (%)	0.2	0.5
ข้าวแดง สูงสุด (%)	0.1	0.2
ความชื้น สูงสุด (%)	14	14
ความงอก ต่ำสุด (%)	80	80

สำหรับวิธีการตรวจสอบความงอกของเมล็ด (Germination Test) นั้นเป็นการตรวจสอบคุณภาพของเมล็ดพันธุ์เพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการงอกของกองเมล็ดพันธุ์ (Seed lot) โดยตามมาตรฐานสากลของสมาคมทดสอบเมล็ดพันธุ์นานาชาติ (ISTA) ได้กำหนดรูปแบบการทดสอบโดยกำหนดให้มีการทดสอบการงอกครั้งละ 100 เมล็ด โดยทำ 3-4 ซ้ำ และนำไปเพาะในบริเวณที่มีความชื้นเหมาะสมเป็นระยะเวลา 7-14 วัน จากนั้นจึงทำการประเมินอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์

โดยการประเมินผลการทดสอบอัตราการงอกของเมล็ดจะประเมินจากเมล็ดที่มีลักษณะการงอกของต้นอ่อนที่จัดเป็นต้นอ่อนสมบูรณ์ (Normal seedling) ซึ่งเป็นต้นอ่อนที่สามารถเจริญเติบโตไปเป็นต้นปกติได้ เมื่อถูกนำไปปลูกในดินที่อุดมสมบูรณ์และอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เหมาะสม โดยต้นอ่อนที่จัดว่าเป็นต้นอ่อนสมบูรณ์มีอยู่ 3 ประเภทด้วยกันดังนี้

- 1) ต้นอ่อนที่มีส่วนประกอบครบถ้วนสมบูรณ์ ซึ่งเป็นต้นอ่อนที่มีระบบต่างๆ สมบูรณ์ดังนี้
  - ระบบรากสมบูรณ์ คือมีรากแรก รากฝอย ยาวเรียวและอยู่ในสภาพดี
  - มีส่วนของลำต้นเจริญเติบโตดี คือมีลำต้นใต้ใบเลี้ยงยาวเรียวตั้งตรง
  - มีจำนวนใบเลี้ยง 1 ใบ (พืชใบเลี้ยงเดี่ยว) สีเขียวลักษณะเหมือนใบ
  - มีใบจริงใบแรกแผ่กว้างและมีสีเขียว 1 ใบ
  - มีปลายยอดหรือตายอด
  - มีปลอกหุ้มยอดอ่อนซึ่งมีลักษณะเป็นตั้งตรง มีใบสีเขียวอยู่ภายในและไหล่พ้นออกมา

2) ต้นอ่อนที่มีส่วนประกอบบางส่วนเสียหายเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นต้นอ่อนที่ยังคงมีส่วนประกอบครบถ้วนสมบูรณ์ แต่มีความเสียหายเล็กน้อยซึ่งยังสามารถเจริญเติบโตไปเป็นต้นปกติได้ โดยพิจารณา ดังนี้

- รากแรกมีความเสียหายบางส่วน มีสีเปลี่ยนไป มีจุดต่าง มีรอยแตกที่ไม่ลึกหรือ รอยแตกที่เชื่อมติดกันแล้ว

- ลำต้นมีความเสียหายเล็กน้อย เช่น มีสีเปลี่ยน มีจุดต่าง มีรอยแตกที่ไม่ลึกหรือ รอยแตกที่เชื่อมติดกันแล้วหรือลำต้นมีการบิดงอเล็กน้อย

- ใบเลี้ยงมีความเสียหายเล็กน้อย เช่น มีสีเปลี่ยนไป มีจุดต่าง หรือใบเลี้ยงมีความเสียหายไม่เกิน 50%

- ใบจริงใบแรกเสียหายเล็กน้อย เช่น สีเปลี่ยนไป มีจุดต่าง ใบมีลักษณะผิดปกติหรือเสียหายไม่เกิน 50%

- ปลอกหุ้มยอดอ่อน เสียหายเล็กน้อย สีเปลี่ยนไปหรือมีจุดต่าง

3) ต้นอ่อนที่เป็นโรคเนื่องจากการเข้าทำลายจากภายนอกที่ไม่ได้มาจากเมล็ดเอง ซึ่งยังเป็นต้นอ่อนที่มีส่วนประกอบตามที่ได้กล่าวมาเจริญเติบโตครบถ้วนปกติ และเห็นได้ชัดว่าการเป็นโรคนั้นเกิดจากเชื้อจากภายนอกเมล็ด ซึ่งยังสามารถจัดได้ว่าเป็นต้นอ่อนสมบูรณ์ (ณัฐหทัย เอพาณิช, 2547)

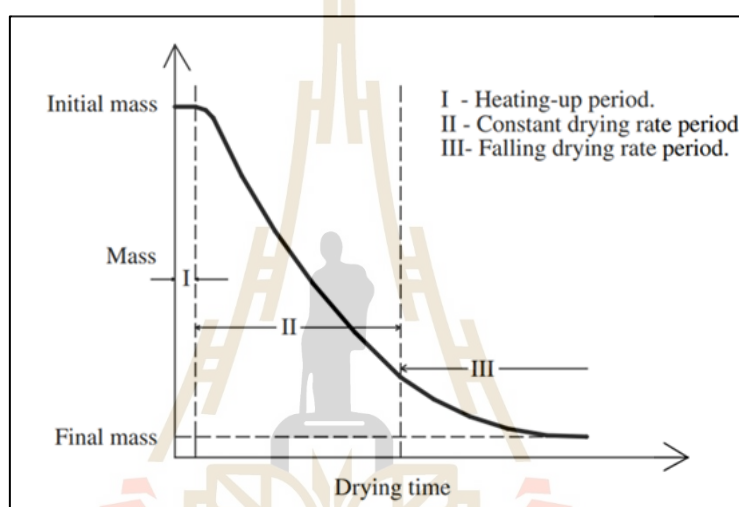
## 2.4 ทฤษฎีการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ การนำความชื้นออกจากวัสดุโดยอาศัยความร้อน ทำให้ความชื้นในวัสดุลดลง เพื่อป้องกันการเสื่อมคุณภาพของวัสดุเนื่องจากความชื้น และยังช่วยยืดอายุในการเก็บรักษา โดยการอบแห้งนี้ถือเป็นกระบวนการที่สำคัญในทางเกษตร ซึ่งวัสดุทางการเกษตรที่นิยมนำมาผ่านการอบแห้ง ได้แก่ เมล็ดพืช สมุนไพร ผลไม้ ผัก เป็นต้น (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2552) การอบแห้งแบ่งออกเป็น 3 ช่วงด้วยกันคือ

1. ช่วงการให้ความร้อนในช่วงต้น (Heating Up Period)
2. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Period)
3. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period)

การอบแห้งในช่วงแรกนั้นจะเป็นช่วงที่เกิดการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนเข้าสู่วัสดุจนถึงอุณหภูมิระเหย เรียกช่วงดังกล่าวว่า การให้ความร้อนในช่วงต้น (Heating Up Period) จากนั้นน้ำบริเวณที่ผิวหน้าของวัสดุจะเกิดการระเหย ทำให้ความชื้นที่ผิววัสดุลดลง และน้ำโครงสร้างชั้นในวัสดุจะเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่น้ำที่ผิววัสดุเพื่อทดแทนความชื้นที่สูญเสียไป โดยอัตราการถ่ายเทมวลของน้ำในโครงสร้างวัสดุนั้นมีความสมดุลกับอัตราการระเหยของน้ำที่ผิววัสดุ เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงอัตรา

การอบแห้งคงที่ (Constant Rate Period) โดยช่วงดังกล่าวนี้จะดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งความชื้นในวัสดุลดลงถึงจุดที่ทำให้อัตราการเคลื่อนที่ออกมาของน้ำภายในโครงสร้างวัสดุมีค่าน้อยกว่าอัตราการระเหยของน้ำที่ผิววัสดุ ซึ่งค่าความชื้นของวัสดุที่จุดนี้เรียกว่า ความชื้นวิกฤติ (Critical Moisture Content) ทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าลดลง และเรียกช่วงดังกล่าวนี้ว่า ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period) ซึ่งค่าความชื้นในวัสดุนั้นจะลดลงจนมีค่าคงที่เรียกค่าความชื้นนี้ว่า ค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) (ฤทธิชัย อัครวาณิชย์, 2554)



รูปที่ 2.3 ช่วงของการอบแห้ง

ที่มา: ดัดแปลงจาก (Idris et al., 2004)

## 2.5 ปริมาณความชื้นในวัสดุ (Moisture Content)

ปริมาณความชื้นในวัสดุคือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นที่อยู่ในวัสดุต่อปริมาณของวัสดุโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

1. ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis, wb) คืออัตราส่วนของปริมาณความชื้นหรือน้ำในวัสดุต่อปริมาณวัสดุรวม โดยคิดวัสดุประกอบไปด้วยสองส่วนหลักคือความชื้นและมวลแห้ง (Dry solid) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$M_w = \frac{\text{Mass of moisture}}{\text{Mass of material}} \quad (2.1)$$

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

โดยที่  $M_w$  คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก  
 $W$  คือ มวลของวัสดุ, kg  
 $W_w$  คือ มวลของความชื้นหรือปริมาณน้ำในวัสดุ, kg  
 $W_d$  คือ มวลแห้งของวัสดุ, kg

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis, db) คืออัตราส่วนของปริมาณความชื้นในวัสดุต่อปริมาณมวลแห้งในวัสดุเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$M_d = \frac{\text{Mass of moisture}}{\text{Mass of dry solid}} \quad (2.3)$$

$$M_d = \frac{W_w}{W_d} = \frac{W - W_d}{W_d} \quad (2.4)$$

โดยที่  $M_d$  คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง

ความชื้นมาตรฐานแห้งนิยมในการวิเคราะห์ทางทฤษฎี เนื่องจากการเปรียบเทียบค่าความชื้นกระทำบนค่าคงที่ (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2552)

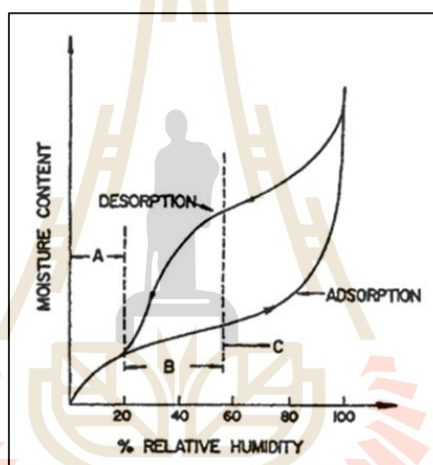
## 2.6 ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, EMC)

ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, EMC) คือค่าความชื้นที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้น้ำภายในวัสดุเกิดการระเหย ณ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อมในขณะนั้น ซึ่งค่าความชื้นสมดุลดังกล่าวนี้ถือได้ว่าเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในกระบวนการอบแห้ง (Drying) และในการเก็บรักษา (Storage) วัสดุที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนความชื้นได้ดี (Hygroscopic material) โดยค่านี้เป็นส่วนหนึ่งในค่าที่สำคัญอีกค่าหนึ่งคือ ไอโซเทอมความชื้น (Moisture sorption isotherm)

## 2.7 ไอโซเทอมความชื้น (Moisture sorption isotherm)

ไอโซเทอมความชื้น (Moisture sorption isotherm) คือความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสมดุลในวัสดุ (Equilibrium moisture content, EMC) กับค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศ (Equilibrium relative humidity) ณ อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ในขณะนั้น โดยไอโซเทอมความชื้นนั้นแบ่งออกเป็น 2 ชนิด

1. ไอโซเทอมการดูดความชื้น (Adsorption isotherms) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสมดุลในวัสดุที่เพิ่มขึ้นกับค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลในอากาศที่เพิ่มขึ้น
2. ไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption isotherms) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสมดุลในวัสดุที่ลดลงกับค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลในอากาศที่ลดลง



รูปที่ 2.4 ไอโซเทอมความชื้นแต่ละชนิด

ที่มา: (Al-Muhtaseb et al., 2002)

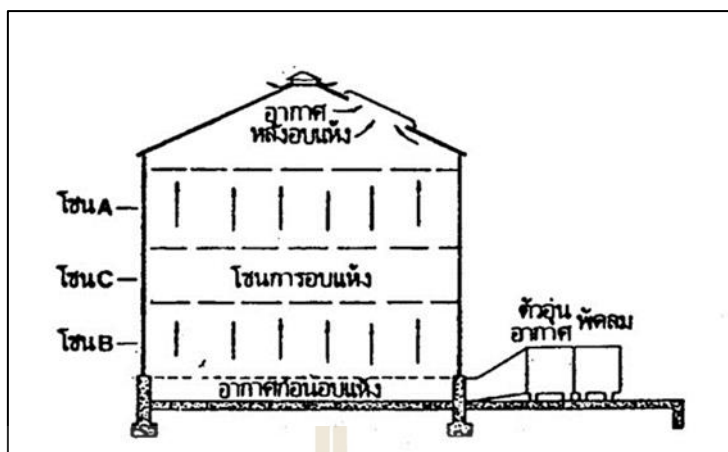
โดยวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าไอโซเทอมความชื้นที่แตกต่างกัน ซึ่งในแต่ละวัสดุนั้นล้วนมีความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับของแข็งที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากแรงแคปิลารี (Capillary effect) และผลของแรงดึงดูดของโมเลกุลระหว่างความชื้นกับโมเลกุลบริเวณผิวของวัสดุ (Surface interaction) ที่แตกต่างกัน จากรูปจะเห็นว่าถึงจะเป็นไอโซเทอมของวัสดุชนิดเดียวกัน แต่ก็มีกราฟความสัมพันธ์ระหว่างไอโซเทอมการดูดความชื้นและการคายความชื้นที่ไม่เป็นเส้นเดียวกัน จากผลดังกล่าวทำให้การดูดและการคายความชื้นเป็นปรากฏการณ์ย้อนกลับไม่ได้ (Hysteresis effect) และเรียกช่องว่างระหว่างไอโซเทอมการดูดและการคายความชื้นนี้ว่า Hysteresis (ชนันท์ ราชภูนิยม และสุนทร สืบคำ, 2555)

ถ้าหากทราบไอโซเทอมความชื้นของวัสดุที่ต้องการอบแห้งแล้วนั้น จะทำให้สามารถออกแบบกระบวนการอบแห้ง เช่น การออกแบบสภาวะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องอบแห้ง (Drying chamber) เพื่อนำไปสู่ผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งที่มีค่าความชื้นตามที่ต้องการได้และยังสามารถนำไปใช้การเลือกสภาวะอุณหภูมิและความชื้นในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เพื่อให้ได้ค่าความชื้นตามที่ต้องการได้อีกด้วย (Henderson and Perry, 1997) มีงานวิจัยต่างๆ มากมายที่ได้ศึกษาไอโซเทอมความชื้นในวัสดุทางการเกษตรชนิดต่างๆ เช่น การหาไอโซเทอมของเมล็ดพืช (Pagano and Mascheroni, 2005) การหาไอโซเทอมของข้าวฟ่าง (Goneli et al., 2010) การหาไอโซเทอมของใบสะระแหน่ (Andrade and Hensel, 2013) และการหาไอโซเทอมของใบกระวาน (Ouafi et al., 2015) โดยจากการศึกษาวิจัยเหล่านี้พบว่าได้มีการนำเอาสมการทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการอธิบายและทำนายค่าไอโซเทอมความชื้นของวัสดุที่ได้จากการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ซึ่งความแม่นยำในการทำนายค่าไอโซเทอมความชื้นของแต่ละสมการนั้นจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดและช่วงอุณหภูมิของวัสดุที่แตกต่างกัน (Roman and Hensel, 2010) โดยความแม่นยำในการทำนายค่าของแต่ละสมการนั้นจะถูกพิจารณาจากค่าทางสถิติที่สำคัญ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) และค่าการลดลงไคกำลังสอง ( $\chi^2$ ) เป็นต้น

## 2.8 เครื่องอบแห้งเมล็ดพืช

ผลผลิตทางการเกษตรนั้นมีมากมายทั้งที่มีสมบัติทางกายภาพที่คล้ายคลึงกันและแตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการอบแห้งหลายชนิด เพื่อให้เหมาะสมต่อผลผลิตทางการเกษตรที่มีอยู่อย่างหลากหลาย โดยถ้าหากเลือกชนิดเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมกับผลผลิตทางการเกษตรจะช่วยป้องกันความผิดพลาดจากการอบแห้ง และเพื่อให้ได้ผลผลิตทางการเกษตรหลังการอบแห้งที่มีคุณภาพเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบ่งออกเป็น 2 ชนิด หลักๆ คือ เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบอยู่กับที่ (fixed-bed dryer) และเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล (moving-bed dryer)

1. เครื่องอบแห้งเมล็ดแบบอยู่กับที่ (fixed-bed dryer) เป็นเครื่องอบแห้งที่ไม่มีการเคลื่อนย้ายเมล็ดพืชในห้องอบแห้ง และยังมีอัตราการไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้งที่ต่ำเนื่องจากอากาศจะต้องเคลื่อนที่ผ่านชั้นเมล็ดพืชภายในเครื่องที่อยู่นิ่งแต่ละโซน โดยเครื่องอบแห้งเมล็ดแบบอยู่กับที่แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้



รูปที่ 2.5 การเคลื่อนที่ของอากาศในเครื่องอบแห้ง

ที่มา : (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ, 2540)

1.1 เครื่องอบแห้งแบบถังเก็บ เป็นเครื่องอบแห้งที่ทำหน้าที่เป็นทั้งถังเก็บเมล็ดพืช ภายหลังจากการเก็บเกี่ยวและเป็นเครื่องอบแห้ง เครื่องอบแห้งนี้มีความสูงของชั้นเมล็ดพืชมากกว่า เครื่องอบแห้งชนิดอื่น อาจมีความสูงได้ถึง 6 เมตร ซึ่งเครื่องอบแห้งดังกล่าวนี้จะมีอัตราการไหล และอุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่ต่ำ โดยมีอัตราการไหลของอากาศประมาณ  $0.5-5 \text{ m}^3/\text{min-m}^3$  จากเหตุผลดังกล่าวทำให้การอบแห้งต้องใช้เวลาที่ยาวนาน โดยอาจใช้เวลาหลายสัปดาห์ด้วยกัน ทำให้มักประสบปัญหาการเจริญเติบโตของเชื้อราและทำให้เกิดการสูญเสียมวลแห้งของเมล็ดพืชได้ ดังนั้นเพื่อที่จะลดเวลาการอบแห้งดังกล่าวนี้ จึงไม่ควรนำเครื่องอบแห้งชนิดนี้อบเมล็ดพืชที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงเกินไป อบแห้งด้วยการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ข้อดีของเครื่องอบแห้งชนิดนี้ คือสามารถเก็บเกี่ยวเมล็ดพืชในอัตราเท่าใดก็ได้ ขั้นตอนการขนย้ายเมล็ดมีน้อย ประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย

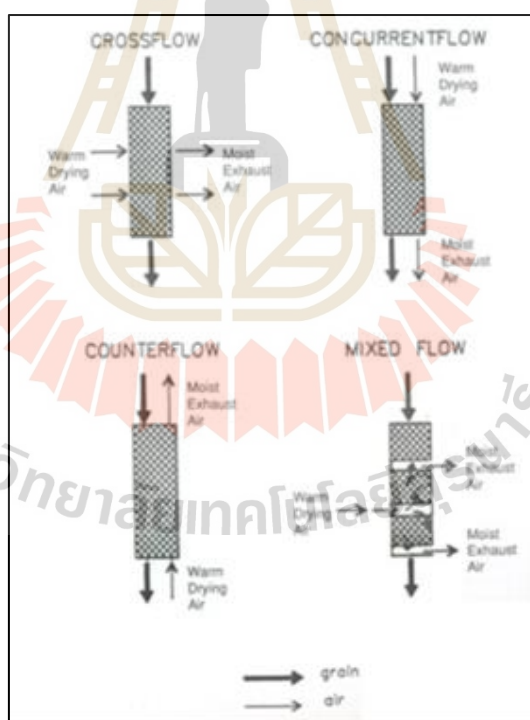
1.2 เครื่องอบแห้งแบบเป็นชั้น เป็นเครื่องอบแห้งที่มีหลักการคล้ายกับเครื่องอบแห้งแบบถังเก็บ แต่ต่างกันที่ปริมาณการเก็บเกี่ยวแต่ละครั้งมีน้อยกว่า โดยจะมีการอบแห้งเกิดขึ้นเมื่อเมล็ดพืชชั้นแรกมาถึง และในวันต่อ ๆ มาจะมีเมล็ดพืชถูกนำเข้ามาเพิ่มอีก ซึ่งในขณะนั้นเมล็ดพืชที่มาก่อนหน้านี้แห้งแล้ว โดยจะเห็นว่า การอบแห้งนั้นได้กระทำต่อไปเป็นชั้น ๆ โดยการอบแห้งด้วยวิธีนี้สามารถอบแห้งเมล็ดพืชที่มีความชื้นสูงได้ แต่ต้องมีการจัดการปริมาณการอบแห้งแต่ละครั้งในปริมาณที่พอเหมาะ เพื่อไม่ให้เกิดการอบแห้งในแต่ละครั้งใช้เวลานานเกินไป เพราะเมล็ดพืชอาจเกิดการเสียหายได้

1.3 เครื่องอบแห้งแบบเป็นวงด เป็นเครื่องอบแห้งที่ใช้อากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิสูงกว่า เครื่องอบแห้ง 2 ชนิดแรก คือประมาณ  $49-71^\circ\text{C}$  และมีอัตราการไหลของอากาศอบแห้งที่มากกว่า



คือประมาณ 6-11 m<sup>3</sup>/min-m<sup>3</sup> แต่มีความหนาของชั้นเมล็ดพืชที่น้อยกว่า คือประมาณ 1 เมตร โดยใช้เวลาในการอบแห้งแต่ละครั้งภายใน 24 ชั่วโมง โดยเมล็ดพืชหลังจากการอบแห้ง จะถูกทำให้เย็นลงก่อนนำไปไว้ในถังเก็บ แต่การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งนี้มักมีปัญหาคือ เกิดเกรเดียนต์ความชื้น (Moisture gradient) เนื่องจากใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่สูง ซึ่งเมล็ดพืชที่บริเวณทางเข้าของอากาศจะแห้งเกินไปและเมล็ดพืชที่ทางออกของอากาศอาจมีความชื้นเท่ากับ ความชื้นเริ่มต้น

**2. เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล** เครื่องอบแห้งชนิดนี้เมล็ดพืชจะมีการไหลในขณะที่ทำการอบแห้ง โดยปกติแล้วเมล็ดพืชจะไหลจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำตามแรงโน้มถ่วงโลก และมีตัวควบคุมการไหลควบคุมอัตราการไหลของเมล็ดพืช ซึ่งสามารถควบคุมได้โดยพิจารณาจากความชื้นของเมล็ด ในแต่ละช่วง โดยเครื่องอบแห้งชนิดนี้แบ่งออกเป็น 4 แบบ คือแบบไหลขวาง (Cross-flow dryer) แบบไหลตาม (Concurrent-flow dryer) แบบไหลสวนทาง (Counter-flow dryer) และแบบผสม (Mixed flow)

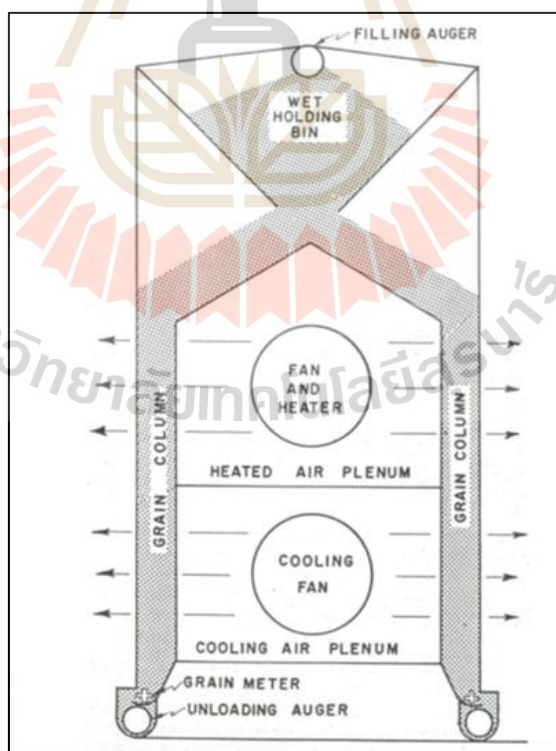


รูปที่ 2.6 ลักษณะการไหลของอากาศอบแห้งและเมล็ดพืช

ที่มา: (Brooker et al., 1992)

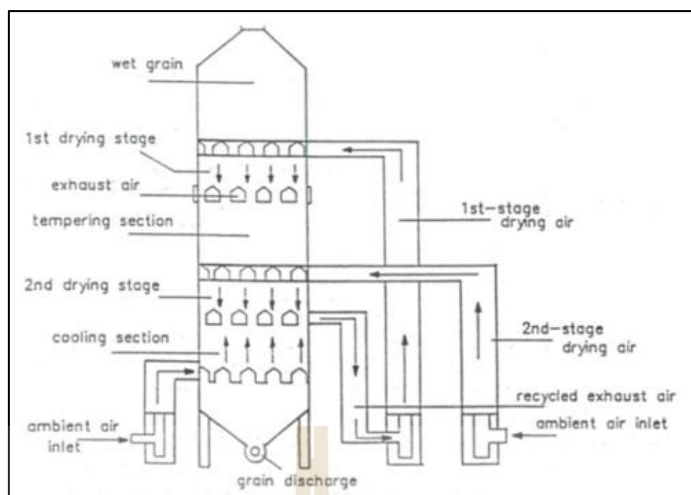
2.1 เครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง อากาศอบแห้งจะไหลในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเมล็ดพืช อัตราการไหลประมาณ  $38-76 \text{ m}^3/\text{min-m}^3$  โดยบริเวณด้านบนบนเครื่องอบแห้งจะเป็นที่เก็บเมล็ด และเมล็ดพืชจะไหลจากด้านบนลงด้านล่าง ผ่านช่องแคบกว้างประมาณ  $0.30-0.45 \text{ m}$  โดยช่องแคบมี 2 ส่วนคือ ส่วนอบแห้งและส่วนที่ทำให้เมล็ดเย็นลงหลังอบแห้งเสร็จ โดยปัญหาของเครื่องอบแห้งชนิดนี้คือเกิดเกรเดียนต์ความชื้น (Moisture gradient) ในเมล็ดพืชและปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยในเครื่องอบแห้งชนิดนี้คือการอุดตันที่ทางออกของเครื่องอบแห้ง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องหมั่นตรวจสอบตัวควบคุมอัตราการไหลเสมอ

2.2 เครื่องอบแห้งแบบไหลตาม ทิศทางการไหลของอากาศอบแห้งและเมล็ดพืชขนานกันและไปในทิศทางเดียวกัน ด้วยวิธีนี้เมล็ดพืชที่ชื้นที่สุดจะสัมผัสกับอากาศอบแห้งที่ร้อนที่สุด และเมื่อเมล็ดพืชไหลลงมาอุณหภูมิอากาศอบแห้งจะค่อย ๆ ลดลงและความชื้นในเมล็ดพืชจะค่อย ๆ ลดลง โดยเมล็ดพืชที่แห้งแล้วจะไม่สัมผัสกับอากาศที่อุณหภูมิสูงเลย ทำให้สามารถอบแห้งที่อุณหภูมิสูงได้ ( $150-250^\circ\text{C}$ ) ทำให้ใช้เวลาอบแห้งน้อยและการแตกตัวของเมล็ดพืชน้อย เนื่องจากเมล็ดพืชที่แห้งที่สุดจะสัมผัสอากาศที่เย็นที่สุด โดยเมล็ดพืชที่แห้งแล้วจะไหลออกจากด้านล่างโดยมีตัวควบคุมการไหลซึ่งถูกควบคุมโดยตัวควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในเมล็ดพืช



รูปที่ 2.7 เครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง

ที่มา : (Brooker et al., 1992)



รูปที่ 2.8 เครื่องอบแห้งแบบไหลตาม

ที่มา : (Brooker et al., 1992)

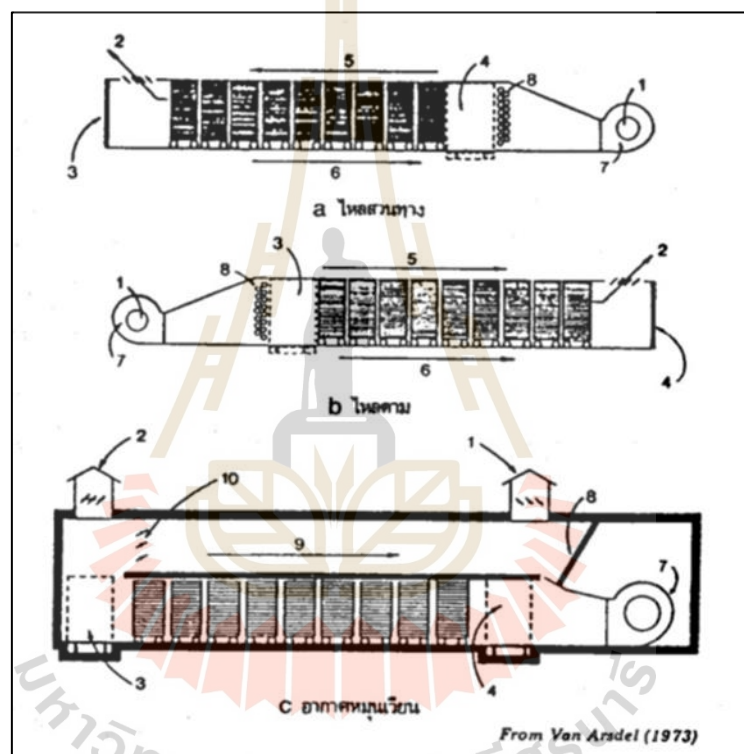
2.3 เครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง การไหลของเมล็ดพืชและอากาศอบแห้งขนานกันแต่มีทิศทางการไหลตรงข้ามกัน โดยอากาศจะไหลขึ้นด้านบนและเมล็ดพืชจะไหลลงด้านล่าง โดยที่เมล็ดพืชบริเวณด้านล่างจะแห้งที่สุด แต่ก็มีได้แห้งจนเกินไป เนื่องจากถูกนำออกจากเครื่องอบแห้งก่อนที่จะแห้งเกินความต้องการ ซึ่งอัตราการไหลของเมล็ดพืชถูกควบคุมโดยตัวควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในเมล็ดพืช ซึ่งถูกติดตั้งไว้บริเวณเหนือพื้นที่อบแห้ง และมีการทำให้เมล็ดพืชที่ขนย้ายออกไปเย็นลงภายหลังการอบแห้ง เครื่องอบแห้งชนิดนี้มีข้อดีคือ ใช้ความร้อนสัมผัสของอากาศอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะอากาศอบแห้งบริเวณทางออกจะสัมผัสกับเมล็ดพืชที่มีความชื้นที่สุด ทำให้อุณหภูมิของอากาศอบแห้งบริเวณทางออกต่ำ แม้ว่าเครื่องอบแห้งชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพสูง แต่ก็ต้องการอุปกรณ์ในการขนย้ายเมล็ดพืชออกจากเครื่องอบแห้งที่ยุ้งยากและมีค่าใช้จ่ายสูง

## 2.9 เครื่องอบแห้งอาหารและวัสดุเกษตรแบบอื่นๆ

เทคนิคในการอบแห้งวัสดุๆ แต่ละชนิดนั้นมีมากมาย ดังนั้นสิ่งที่สำคัญคือการเลือกใช้วิธีการอบแห้งให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุที่นำมาอบแห้ง

1. เครื่องอบแห้งแบบถาดอยู่กับที่ (Fixed-tray dryer) เหมาะกับอาหารที่อยู่ในรูปเป็นของแข็ง ที่ไม่สามารถอบรวมกันเป็นกองในปริมาณมากได้ (bulk drying) แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ (Tunnel dryer) และเครื่องอบแห้งแบบตู้ (Cabinet dryer)

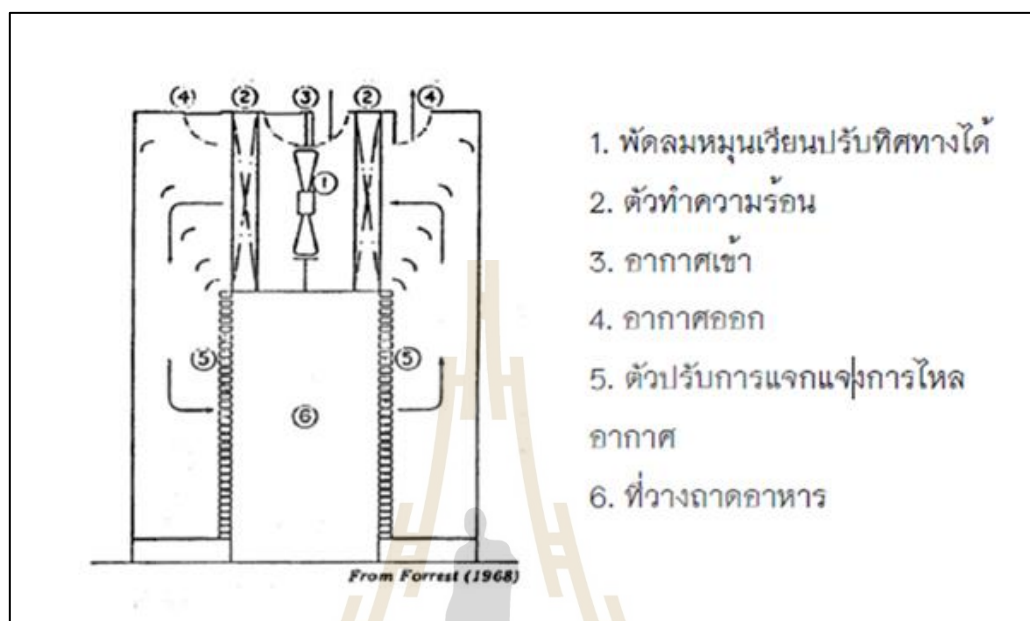
1.1 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ เครื่องอบแห้งจะเป็นลักษณะที่มีการบรรจุวัสดุที่ต้องการอบแห้งเข้าไปในอุโมงค์อบแห้ง โดยจำนวนรถเข็นในอุโมงค์จะขึ้นอยู่กับขนาดของรถเข็นและความยาวของอุโมงค์ เมื่อวัสดุที่ต้องการอบแห้งดีแล้วจะถูกนำออกจากเครื่องอบแห้งในด้านตรงข้ามและจะมีรถเข็นขนวัสดุเปียกเข้ามาแทนที่ ซึ่งจำนวนรถเข็นในอุโมงค์จะมีจำนวนคงที่ตลอดและอัตราการอบแห้งยังสอดคล้องกับรถเข็นที่เข้าและออกในเครื่องอบแห้ง โดยเครื่องอบแห้งชนิดนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามการเคลื่อนที่ของอากาศและรถเข็นคือ เครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทางและแบบไหลตาม



รูปที่ 2.9 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์  
ที่มา : (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ, 2540)

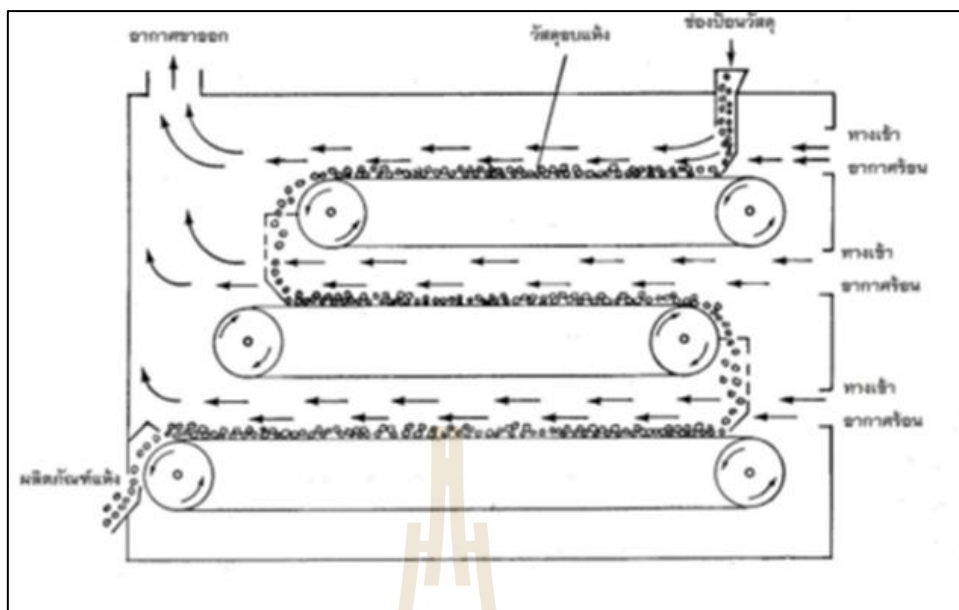
1.2 เครื่องอบแห้งแบบตู้ คล้ายเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ วัสดุถูกวางบนถาดที่ซ้อนกัน จากนั้นลมร้อนจะไหลผ่านวัสดุเพื่อลดความชื้น โดยมีทิศทางการไหลขนานกับถาดที่บรรจุวัสดุ ทิศทางการไหลของอากาศสามารถกลับทางได้ โดยอากาศเข้าทางช่องหมายเลข 3 ซึ่งจะถูกผสมกับอากาศที่ใช้ออบแห้งแล้วไหลผ่านขดลวดความร้อนหมายเลข 2 แล้วจึงไหลไปยังถาดที่บรรจุวัสดุขึ้นก่อนที่จะไหลออกที่ช่องหมายเลข 4 บางส่วน และยังมีอากาศหลังการอบแห้งบางส่วนไหลกลับไปผสมกับอากาศแวดล้อม เพื่อนำกลับมาใช้ออบแห้งอีกครั้ง ปัญหาของเครื่องอบแห้งชนิดนี้คือ

การกระจายลมร้อนที่ไม่ทั่วถึงทำให้วัสดุในแต่ละที่แห้งไม่เท่ากัน ซึ่งอาจแก้ไขโดยใช้ตัวบังคับทิศทางลม และปัญหาอีกอย่างคือวัสดุที่ทางเข้าลมร้อนจะแห้งกว่า



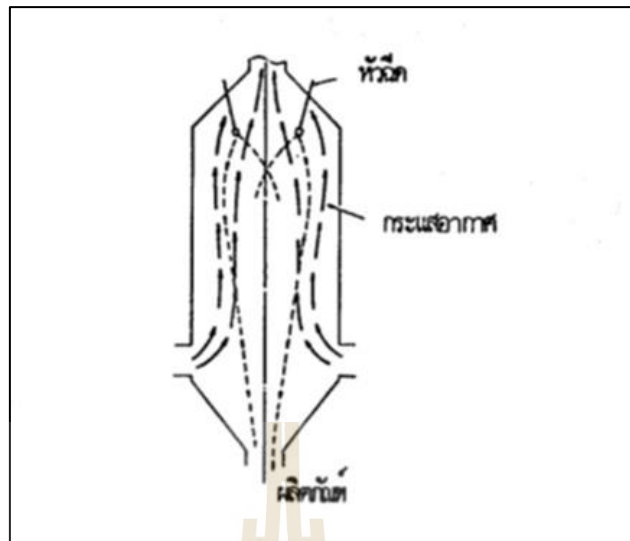
รูปที่ 2.10 เครื่องอบแห้งแบบตู้  
ที่มา : (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ, 2540)

2. เครื่องอบแห้งแบบชั้นอบแห้งเคลื่อนที่ (Moving-bed dryer) ตัวอย่างของเครื่องอบแห้งชนิดนี้ เช่น เครื่องอบแห้งแบบสายพาน โดยวัสดุที่ต้องการอบแห้งอยู่บนสายพานที่เคลื่อนที่และมีรูให้อากาศไหลผ่าน ซึ่งลมร้อนจะไหลขึ้นไปด้านบนหรือด้านล่างนั้นขึ้นอยู่กับวัสดุอบแห้ง ซึ่งสามารถกลับทิศทางลมร้อนได้กรณีที่ต้องการอบแห้งไม่ทั่วถึง และสามารถเปลี่ยนแปลงสภาวะอากาศได้ตามระยะของสายพาน

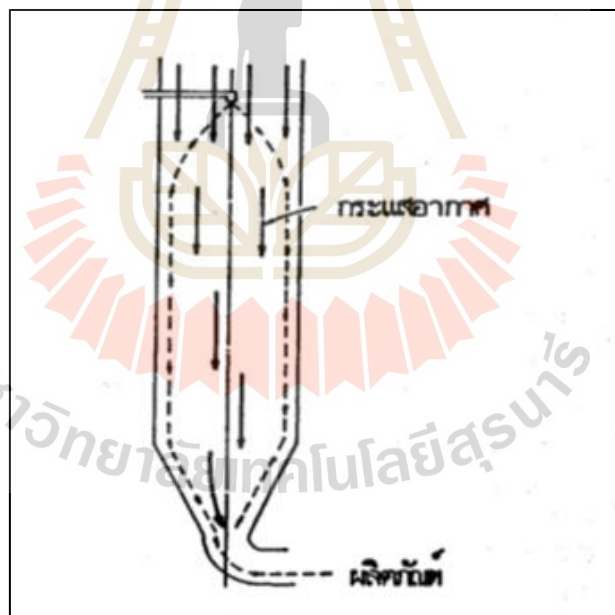


รูปที่ 2.11 เครื่องอบแห้งแบบสายพาน  
ที่มา : (ดัดแปลงจาก วิไล รังสาทอง, 2547)

3. เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying) เหมาะสำหรับวัสดุอบแห้งที่เป็นของเหลว เมื่อผ่านการอบแห้งแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปเม็ดเล็กๆ เช่น ผงกาแฟ นมผง เป็นต้น โดยเครื่องอบแห้งชนิดนี้ใช้วิธีการทำให้วัสดุที่ต้องการอบแห้งเป็นละอองโดยใช้เครื่องทำละออง (Atomizer) เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน โดยเครื่องอบแห้งชนิดนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ แบบไหลสวนทางและแบบไหลตาม ซึ่งข้อดีของแบบไหลสวนทางคือการใช้ความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อเสียคือ วัสดุหลังการอบแห้งมีคุณภาพที่ไม่ค่อยดีนัก เพราะวัสดุที่แห้งแล้วจะสัมผัสกับอากาศร้อนจัดและสำหรับเครื่องอบแห้งแบบไหลตามมีข้อดีตรงที่วัสดุหลังการอบแห้งมีคุณภาพสูงแต่มีการใช้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพที่ไม่มากนัก



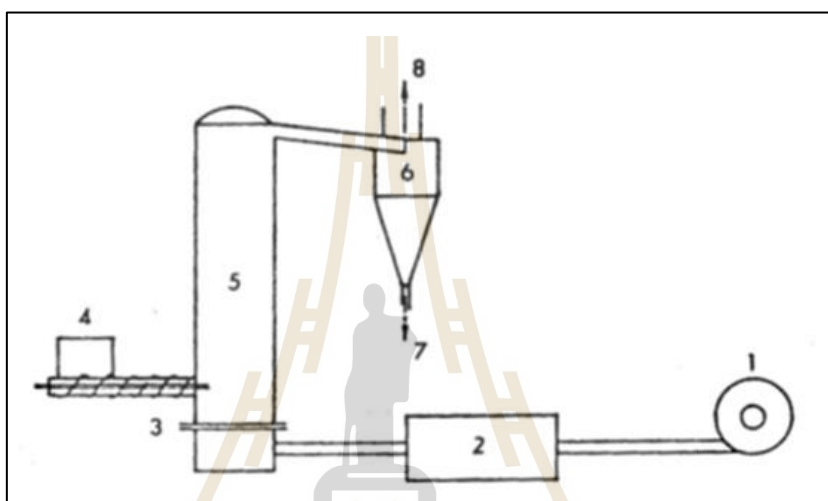
รูปที่ 2.12 เครื่องอบแห้งพ่นฝอยแบบไหลสวนทาง  
ที่มา : (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ, 2540)



รูปที่ 2.13 เครื่องอบแห้งพ่นฝอยแบบไหลตาม  
ที่มา : (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ, 2540)

4. เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบด (Fluidized bed dryer) เครื่องอบแห้งชนิดนี้ใช้วิธีการปล่อยลมร้อนที่มีความเร็วสูง เพื่อที่จะเอาชนะแรงโน้มถ่วงของวัสดุ ทำให้วัสดุถูกเป่าลอยไป

ในอากาศจนมีลักษณะคล้ายของไหล โดยความเร็วลมร้อนที่ใช้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ขนาดและรูปทรงของวัสดุ โดยวัสดุที่ใช้ต้องมีลักษณะเป็นชิ้นเล็กๆ โดยพัดลมหมายเลข 1 จะทำการเป่าอากาศผ่านแหล่งกำเนิดความร้อนหมายเลข 2 และผ่านไปยังตะแกรงหมายเลข 3 จากนั้นวัสดุจะเคลื่อนที่มาด้วยเกลิยวลำเลียงหมายเลข 4 เพื่อมาพบกับอากาศร้อนที่บริเวณหมายเลข 5 วัสดุที่แห้งแล้วจะมีน้ำหนักเบาขึ้น จึงลอยขึ้นด้านบนและไหลไปยังเครื่องคัดแยกแบบไซโคลนเพื่อแยกอากาศกับวัสดุที่หมายเลข 6 โดยอากาศจะไหลออกด้านบนที่หมายเลข 8 และวัสดุแห้งจะตกลงด้านล่างที่หมายเลข 7



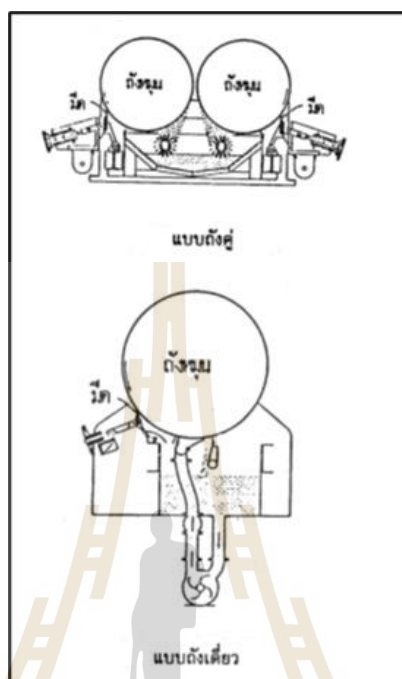
รูปที่ 2.14 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไช้เบต  
ที่มา : (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ, 2540)

5. **เครื่องอบแห้งแบบโรตารี (Rotary dryer)** เครื่องอบแห้งชนิดนี้ตัวเครื่องทำด้วยถังทรงกระบอกหมุน วางเอียงในแนวราบเล็กน้อย โดยวัสดุจะไหลเข้าทางปลายด้านบนแล้วไหลออกที่ปลายด้านต่ำ ซึ่งภายในตัวถังจะมีแผ่นครีบบมีหน้าที่ตักวัสดุจากด้านล่างขึ้นด้านบน จากนั้นจึงตกลงมาตามแรงโน้มถ่วง พร้อมไปกับการเคลื่อนที่ไปด้านหน้าและลมร้อนจะไหลเข้ามาภายในถังเพื่อลดความชื้นของวัสดุไปพร้อมๆ กัน ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็ว

6. **เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum dryer)** เป็นเครื่องอบแห้งที่ใช้ลูกกลิ้งหนึ่งลูก (Single drum dryer) หรือสองลูก (Double drum dryer) ซึ่งภายในกลวงและมีแหล่งความร้อนภายใน เช่น ไฟฟ้าหรือไอน้ำ โดยเครื่องอบแห้งชนิดนี้เหมาะสำหรับการอบแห้งวัสดุที่มีความเหลวหรือวัสดุที่มีความหนืด โดยใช้วิธีการให้ตัวเครื่องป้อนวัสดุที่มีความชื้นและหนืดไปเคลือบผิวลูกกลิ้งในลักษณะฟิล์มบาง ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนจากจากผิวลูกกลิ้งไปยังวัสดุ



และเมื่อลูกกลิ้งหมุนไปครบรอบจะทำให้วัสดุแห้ง จากนั้นจึงทำการชูดอกด้วยใบมีด วัสดุแห้งที่ได้นั้นจะมีลักษณะเป็นแผ่นบาง

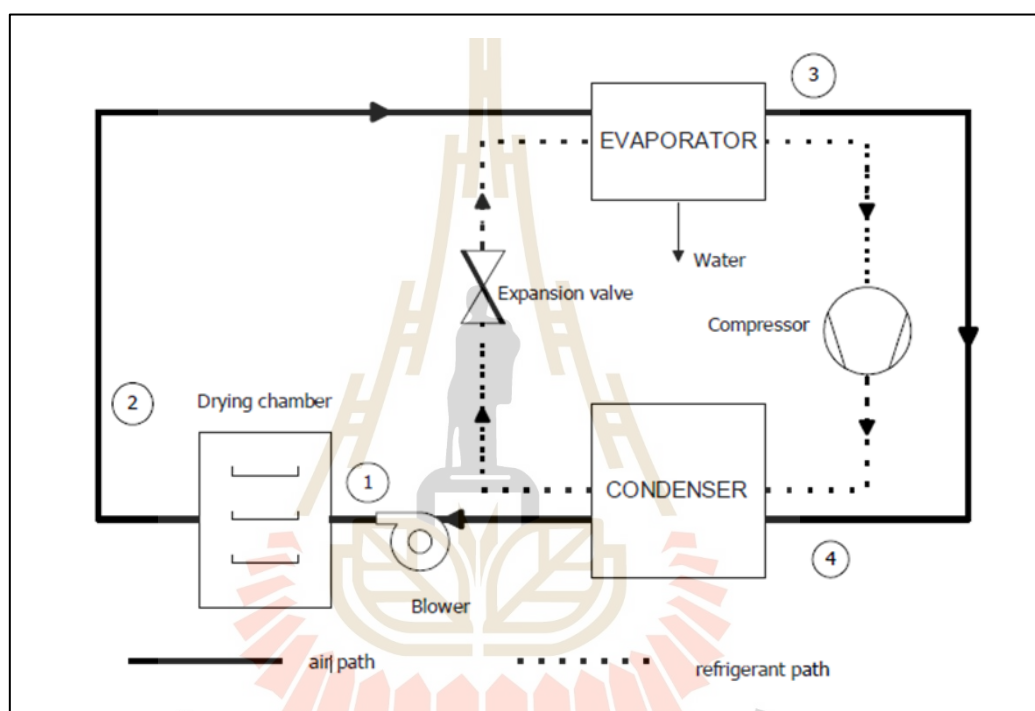


รูปที่ 2.15 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง  
ที่มา : (สมชาติ โสภณธนฤทธิ, 2540)

7. การอบแห้งด้วยสถานะสูญญากาศ (Vacuum dryer) เป็นระบบการอบแห้งที่มีการลดความดันภายในห้องอบแห้งลดต่ำกว่าบรรยากาศทำให้ความดันไอน้ำในอากาศลดลง ซึ่งเป็นผลให้น้ำในเนื้อวัสดุสามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้สามารถลดพลังงานในการอบแห้งลงได้ (Jaya and Das, 2003) และยังสามารถนำไปใช้ในการอบแห้งวัสดุที่ไวต่อการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนได้ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะยังคงมีสี กลิ่น รสชาติและสารอาหารที่ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์สด เนื่องจากผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำและใช้เวลาน้อยเมื่อเทียบกับระบบอบแห้งอื่น ๆ (Akai et al., 2007)

8. เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน (Heat pump dryer) เป็นการนำระบบอัดไอ (Vapor compression system) มาประยุกต์เข้ากับระบบการอบแห้งดังรูปที่ 2.16 โดยลมร้อนจะไหลเข้าสู่ห้องอบแห้ง (Drying chamber) ที่หมายเลข 1 อากาศหลังอบแห้งจะเป็นอากาศที่ร้อนขึ้นจะเคลื่อนที่ออกมาที่หมายเลข 2 เข้าสู่เครื่องทำระเหย (Evaporator) เพื่อทำการควบแน่นไอน้ำในอากาศเพื่อลดความชื้น โดยกระบวนการจากหมายเลข 2 ไปยังหมายเลข 3 นั้นความร้อนแฝง

ในการระเหยจะถูกใช้ระเหยสารทำความเย็นในเครื่องระเหย หลังจากนั้นสารทำความเย็นจะถูกอัดที่เครื่องอัดไอ (Compressor) ทำให้มีความดันและอุณหภูมิสูงขึ้น แล้วจึงเคลื่อนที่ไปยังเครื่องควบแน่น (Condenser) โดยอากาศเย็นที่ถูกลดความชื้นจะได้รับความร้อน ส่วนสารทำความเย็นนั้นจะไหลออกจากเครื่องควบแน่นไปยังเครื่องทำระเหย ซึ่งจะผ่านวาล์วลดความดัน (Expansion valve) เพื่อลดความดันลงก่อนเข้าเครื่องทำระเหย โดยการอบแห้งแบบปั๊มความร้อนสามารถแบ่งตามลักษณะการทำงานได้ 3 ระบบดังนี้

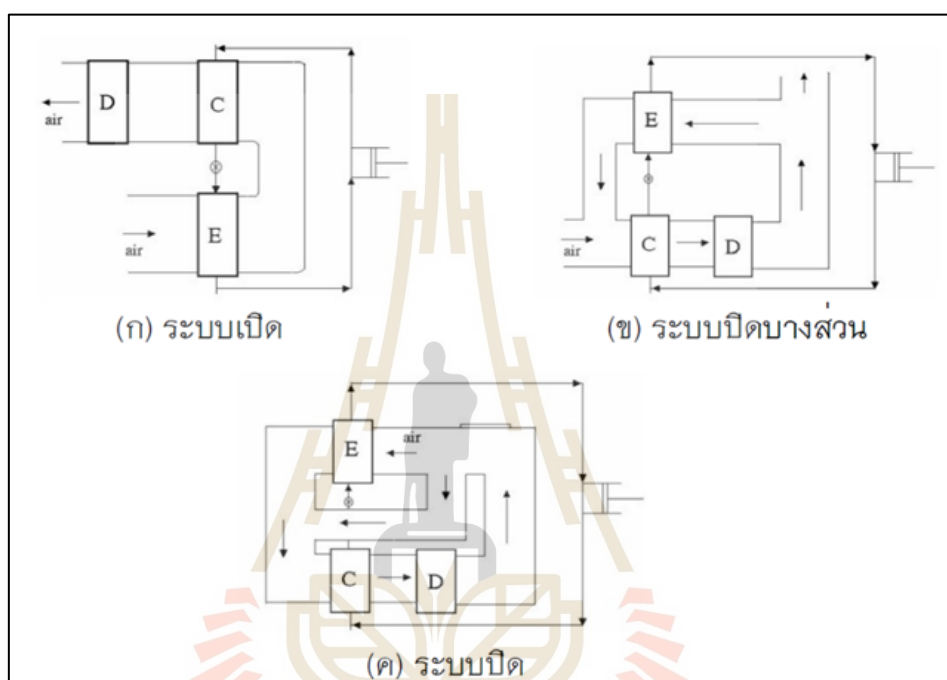


รูปที่ 2.16 เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน  
ที่มา: (ดัดแปลงจาก Chua et al., 2000)

8.1 การอบแห้งระบบเปิด (Open system) เป็นระบบที่มีการทิ้งอากาศหลังจากการอบแห้งออกสู่บรรยากาศภายนอกทั้งหมด ดังนั้นในการอบแห้งระบบเปิดนี้ จะมีการใช้ปั๊มความร้อนเพื่ออุ่นอากาศหรืออาจมีการลดความชื้นของอากาศหลังอบแห้งก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศเพียงเท่านั้น

8.2 การอบแห้งระบบปิดบางส่วน (Partial closed system) ระบบนี้จะมีการปล่อยทิ้งอากาศหลังจากการอบแห้งซึ่งเป็นอากาศร้อนขึ้นบางส่วนออกสู่บรรยากาศ และส่วนที่เหลือจะถูกนำกลับไปลดความชื้นก่อนนำมาผสมกับอากาศใหม่ เนื่องจากอากาศเดิมยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่

8.3 การอบแห้งระบบปิด (Close system) เป็นการอบแห้งที่มีการนำเอาอากาศหลังจากการอบแห้งเวียนกลับมาใช้ทั้งหมด โดยแบ่งอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งจะถูกนำไปลดความชื้นที่เครื่องทำระเหย (Evaporator) ส่วนที่สองจะถูกนำไปผสมกับอากาศส่วนที่หนึ่งซึ่งถูกลดความชื้นแล้ว ซึ่งการอบแห้งระบบปิดนี้จะมีการใช้ประโยชน์จากป้อนความร้อนทั้งการอุ่นอากาศและการลดความชื้นในอากาศ



รูปที่ 2.17 เครื่องอบแห้งป้อนความร้อนแบบต่าง ๆ

ที่มา: (ดัดแปลงจาก Saensabai and Prasertsan, 2003)

การอบแห้งด้วยระบบป้อนความร้อนนี้จัดว่าเป็นการอบแห้งที่มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบอื่นๆ เนื่องจากระบบดังกล่าวนี้มีการนำความร้อนหลังจากการอบแห้งกลับคืนสู่ระบบที่เครื่องทำระเหย เพื่อที่จะสามารถทำการควบแน่นความชื้นออกจากอากาศอบแห้ง ทำให้ได้อากาศอบแห้งที่มีความชื้นต่ำ ทำให้สามารถนำไปใช้ในการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรที่ง่ายต่อการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน หรือสามารถทำการอบแห้งวัสดุที่อุณหภูมิที่ต่ำได้ เช่น นำไปอบสมุนไพร โดยการอบแห้งด้วยระบบป้อนความร้อนมีข้อดีและข้อเสียดังนี้ (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2552)

### ข้อดี

1. มีช่วงอุณหภูมิในการอบแห้งที่กว้างประมาณ -20 ถึง 100°C
2. ได้ผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งที่มีคุณภาพมากกว่าระบบการอบแห้งด้วยลมร้อนทั่วไป
3. มีประสิทธิภาพทางพลังงานสูงกว่าระบบทั่วไป

### ข้อเสีย

1. เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมหากสารทำความเย็นเกิดการรั่วไหล
2. มีต้นทุนในการสร้างเครื่องที่สูง

## 2.10 การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

สำหรับสมรรถนะของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนนั้นได้พิจารณาจาก 2 ส่วนหลักๆ ดังนี้

1. สมรรถนะทางพลังงานของปั๊มความร้อน พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of performance, COP)

$$\text{COP} = \frac{\text{Useful heat output}}{\text{Power input}} = \frac{Q_{in}}{W_{in}} \quad (2.7)$$

2. สมรรถนะของการอบแห้ง สามารถพิจารณาจากค่าดังต่อไปนี้

2.1 อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) ซึ่งพิจารณาจากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์อบแห้งต่อระยะเวลาของการอบแห้ง

$$\text{DR} = \frac{m_i - m_f}{t} \quad (2.8)$$

$$\text{DR} = \frac{MC_{di} - MC_{df}}{t} \quad (2.9)$$

2.2 อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific moisture evaporation rate, SMER) เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าปริมาณน้ำที่ระเหยจากผลิตภัณฑ์อบแห้งต่อพลังงานที่ใช้

$$\text{SMER} = \frac{m_i - m_f}{P_e} \quad (2.10)$$

2.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) เป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์อบแห้งและยังเป็นส่วนกลับของค่า SMER (เพชร ว่องไพศาลกิจ, 2562)

$$SEC = \frac{3.6P_e}{m_i - m_f} \quad (2.11)$$

โดยที่	COP	คือ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ
	$Q_{in}$	คือ ค่าพลังงานความร้อนที่อากาศได้รับ, kW
	$W_{in}$	คือ ค่าพลังงานที่ใช้, kW
	DR	คือ อัตราการอบแห้ง, $kg_{water}/h$ หรือ %db/h
	$m_i$	คือ มวลของผลิตภัณฑ์ก่อนการอบแห้ง, kg
	$m_f$	คือ มวลของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง, kg
	t	คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, h
	$MC_d$	คือ ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง, %db
	SMER	คือ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ, $kg_{water}/kWh$
	$P_e$	คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้, kWh
	SEC	คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, $MJ/kg_{water}$

เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนนี้ได้ถูกนำมาใช้ในการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรอย่างแพร่หลายไม่ว่าจะเป็นการอบแห้งสมุนไพร เช่นในงานวิจัยของ นัฐราช แสนมีมา และคณะ (2555) ที่ได้นำเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชัน โดยใช้ห้องอบแห้งขนาด  $0.6 \times 0.6 \times 0.8 \text{ m}^3$  ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 50 และ  $50^\circ\text{C}$  ความเร็วลม 5 m/s อบแห้งขมิ้นชันที่มีค่าความชื้นจาก 525-565%db จนกระทั่งเหลือ 10%db โดยจากการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ดังเช่นที่อุณหภูมิ  $55^\circ\text{C}$  ใช้เวลาอบแห้งน้อยที่สุดคือ 360 min มีอัตราการอบแห้ง (DR) เท่ากับ 0.57  $kg_{water} \text{ evap./h}$  และยังมีค่าอัตราการระเหยจำเพาะสูงสุด (SMER) เท่ากับ 0.014  $kg_{water} /kWh$  และที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งเท่ากับ  $45^\circ\text{C}$  มีค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ต่ำที่สุดคือ 2.257  $MJ/kg_{water}$  นอกจากนี้ยังนำมาใช้ในการอบแห้งผักกึ่งสำเร็จรูปโดย เทวรัตน์ ทิพยวิมล (2555) ได้ทำการออกแบบสร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนสำหรับอบแห้งผักกึ่งสำเร็จรูป โดยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้นมีขนาด  $70 \times 70 \times 85 \text{ cm}^3$  ทำการทดสอบอบแห้งแครอท

หอมสับและข้าวโพดหวานที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งเท่ากับ 45 50 และ 55°C โดยพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งคือที่ 50°C ซึ่งทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์อยู่ในระดับคุณภาพดีไม่แตกต่างจากการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า แต่ใช้เวลาในการอบแห้งที่น้อยกว่าและยังช่วยในการประหยัดพลังงานมากกว่าอีกด้วย เช่นโดยในการอบแห้งหอมสับที่อุณหภูมิ 50°C มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ต่ำที่สุดคือ 7.26 MJ/kg ยังมีค่าอัตราการระเหยจำเพาะสูงสุด (SMER) เท่ากับ 0.014  $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kWh}$  หรือในการอบแห้งแครอทที่อุณหภูมิ 50°C มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ต่ำที่สุดคือ 3.37 MJ/kg โดยได้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน (COP) ในการอบแห้งแครอท หอมสับ และข้าวโพดหวานเท่ากับ 3.04 3.08 และ 3.07 ตามลำดับ

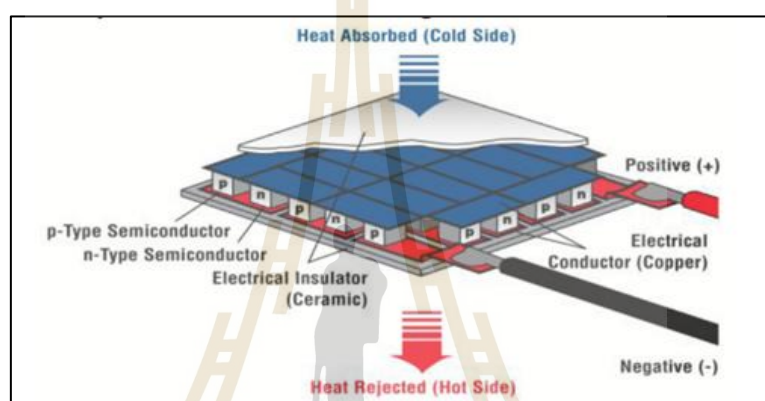
โดยการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนนี้เป็นวิธีที่สามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้สามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ภายหลังจากการอบแห้งเอาไว้ได้ดีกว่าการอบแห้งด้วยวิธีอื่นๆ เช่น Aktas et al. (2019) ได้นำเอาเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนแบบ Close loop มาประยุกต์ใช้ในการอบกากองุ่น (Grape pomace) ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือหลังจากการผลิตไวน์และน้ำองุ่นประกอบไปด้วยเปลือกองุ่นและเมล็ดองุ่น โดยนำมาทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 และ 50°C โดยจากการทดลองพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยให้สามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์และสมบัติทางชีวภาพไว้ได้มากกว่าที่อุณหภูมิสูง เช่นค่า Total phenolic ที่อุณหภูมิ 45 และ 50°C มีค่าเท่ากับ 55.6 และ 45.0 mg GAE/g<sub>dw</sub> ตามลำดับ หรือ ค่า Total tannin เท่ากับ 81.0 และ 61.1 mg TAE/g<sub>dw</sub> ตามลำดับ เป็นต้น นอกจากนี้ Soponronnarit et al. (1998) ได้ทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนสำหรับอบแห้งมะละกอแช่แข็ง โดยใช้อุณหภูมิของอากาศอบแห้งเท่ากับ 50°C ทำการอบแห้งมะละกอแช่แข็งจากค่าความชื้นเริ่มต้น 74%db จนมีค่าความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 23%db โดยจากการทดลองพบว่ามะละกอแช่แข็งหลังจากการอบแห้งมีสีแดงอมส้มอ่อนๆ ( light reddish-orange ) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์สีที่มีคุณภาพดี โดยได้สีที่มีความสว่างมากกว่ามะละกอแช่แข็งที่อบด้วยเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์เนื่องจากการอบแห้งด้วยวิธีนี้สามารถใช้อุณหภูมิของอากาศอบแห้งได้ต่ำกว่าเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ และเพชร ว่องไพศาลกิจ และคณะ (2563) ได้นำเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนที่เสริมการทำงานด้วยเครื่องอุ่นอากาศเทอร์โมอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งพริกชี้หนูแดง โดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 54°C โดยใช้ระยะเวลาในการอบแห้งทั้งสิ้น 10 ชั่วโมง ซึ่งลดค่าความชื้นจากค่าความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 80%wb จนเหลือ 14%wb โดยจากการทดลองพบว่าการอบแห้งด้วยวิธีดังกล่าวนี้ทำให้พริกชี้หนูแดงมีสีภายหลังจากการอบแห้งที่เปลี่ยนจากสีแดงเพียงเล็กน้อยซึ่งแตกต่างจากการอบแห้งทางธรรมชาติด้วยวิธีการตากแดดที่ทำให้ได้พริกที่มีสีค่อนข้างคล้ำและวิธีการอบแห้งด้วยวิธีนี้ยังสามารถลดอัตราส่วนความชื้นได้ต่ำกว่าการอบแห้งด้วยวิธีการตากแดดที่ 14%wb

นอกจากนี้ยังได้มีการนำเอาเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ เนื่องจากสามารถทำการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้สามารถลดความเสียหายเนื่องจากความร้อนให้แก่เมล็ดพันธุ์ ส่งผลให้เมล็ดพันธุ์มีอัตราการงอกที่สูงขึ้น ดังเช่นในงานวิจัยของ กิตติคุณ ปิตุพรหมพันธุ์ (2555) ได้นำเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนมาใช้ในการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกพันธุ์ กข 6 ที่อุณหภูมิ 45 50 และ 55°C และใช้ความเร็วลม 0.5 m/s โดยเมล็ดพันธุ์มีความชื้นเริ่มต้น 23%wb ทำการอบแห้งจนความชื้นมีค่าเท่ากับ 10%wb จากนั้นจึงสุ่มตัวอย่างไปทดสอบหาอัตราการงอก พบว่าที่อุณหภูมิ 45 50 และ 55°C ได้ค่าอัตราการงอกของเมล็ดเท่ากับ 92 87 และ 78% ตามลำดับ โดยจากงานวิจัยดังกล่าวจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิในการอบแห้งที่ลดลงนั้นส่งผลทำให้เมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์ กข 6 มีอัตราการงอกที่เพิ่มขึ้นและ Soponronnarit et al. (2000) ได้นำเอาการอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับการอบแห้งแบบไหลผสม(LSU) มาอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าว โดยทำการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวที่อุณหภูมิของอากาศอบแห้งเท่ากับ 43°C อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 63 m<sup>3</sup>/min โดยความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดพันธุ์เท่ากับ 22%wb อบจนมีค่าความชื้นเท่ากับ 12.4%wb ซึ่งจากการอบแห้งพบว่าเมล็ดพันธุ์ข้าวหลังการอบแห้งมีอัตราการงอกเท่ากับ 97% และยังมีค่าความแข็งแรงของเมล็ดพันธุ์ (Vigour) เท่ากับ 95% ทำให้สรุปได้ว่าการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ด้วยระบบปั๊มความร้อนยังคงสามารถคงคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ที่ดีไว้ได้ นอกจากการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวแล้วยังมีการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ของพืชชนิดอื่น ๆ ด้วย เช่น เมล็ดพันธุ์ถั่วแระโดย Zhao Yang et al. (2018) ได้นำเอาการอบแห้งแบบปั๊มความร้อนที่เสริมการทำงานด้วยคลื่นความถี่สูงมาใช้ในการอบแห้งเมล็ดถั่วแระ โดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 30 35 และ 40°C โดยจากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการงอกของเมล็ดถั่วลดลง นอกจากนี้ Zongyu Yang et al. (2020) ก็ได้ทำการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ถั่วอะซูกิโดยใช้ปั๊มความร้อนที่เสริมการทำงานด้วยคลื่นความถี่สูง เพื่อลดค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) และเพิ่มอัตราการงอกของเมล็ดด้วยวิธีการพื้นที่ผิวตอบสนอง (Respond surface) โดยได้ค่าอุณหภูมิของอากาศอบแห้งเท่ากับ 37.10°C ใช้พลังงานสำหรับคลื่นความถี่สูงเท่ากับ 102.80 W ที่ความเร็วของอากาศอบแห้ง 0.7 m/s โดยจากผลการทดลองพบว่าได้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เท่ากับ 0.3485 kWh/g และได้ค่าเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดถั่วหลังจากการอบแห้งเท่ากับ 95.3%

จะเห็นได้ว่าเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรได้และยังสามารถคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ปั๊มความร้อนนั้นใช้ระบบอัดไอเป็นระบบในการสร้างความร้อน ซึ่งมีการใช้สารทำความเย็น (Refrigerant) เป็นสารทำงาน (Working Fluid) ในระบบ ซึ่งถ้าหากเกิดการรั่วไหลจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและระบบอัดไอนั้นมีต้นทุนในการติดตั้งระบบที่ค่อนข้างสูงและยังมีการติดตั้ง

อุปกรณ์ในระบบที่ค่อนข้างซับซ้อน โดยถ้าหากมีอุปกรณ์ใดเกิดการชำรุด จะต้องทำการแยกระบบ เพื่อติดตั้งใหม่ซึ่งเป็นกระบวนการที่ยุ่งยากและใช้เวลานาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดในการประยุกต์ นำเอาอุปกรณ์ชนิดอื่นมาใช้ในการสร้างความร้อนให้แก่อากาศอบแห้งและทำความเย็นเพื่อ ลดความชื้นในอากาศอบแห้งแทนปั๊มความร้อนระบบอัดไอ นั่นคือแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric module)

## 2.11 แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric module)



รูปที่ 2.18 แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก  
ที่มา: (Yadav et al., 2014)

แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric module) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน โดยทั่วไปมีขนาด  $4.0 \times 4.0 \text{ cm}^2$  และหนาประมาณ  $0.4 \text{ cm}$  โดยแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมีโครงสร้างเบื้องต้นประกอบไปด้วยสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) สองชนิดคือ ชนิดพี (P-Type) และชนิดเอ็น (N-Type) ซึ่งใช้หลักการการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าผ่านสารกึ่งตัวนำแบบ พี-เอ็น (P-N Type) โดยเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current) เข้าไปยังแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเมื่อแรงดันไฟฟ้าถูกจ่ายให้ไหลผ่านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type) จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากขั้วลบไปยังขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนซึ่งถูกดูดกลืนจากด้านหนึ่ง (Absorbed heat) ไปยังอีกด้านหนึ่งเพื่อระบายออก (Released heat) ทำให้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเกิดด้านเย็นซึ่งก็คือด้านที่เกิดการดูดกลืนความร้อนและด้านร้อนที่เป็นด้านที่เกิดการระบายความร้อนออก ซึ่งสามารถนำด้านทั้งสองนี้ไปใช้ประโยชน์ได้ ตัวอย่างเช่น ด้านเย็นสามารถนำไปใช้ในระบบทำความเย็นได้ แต่มีข้อแม้คือจะต้องมีการระบายความร้อนในด้านร้อน



ออกให้ทัน มิฉะนั้นจะทำให้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมีการสะสมพลังงาน แล้วทำให้เกิดการคายความร้อนออกมาทั้งสองด้านได้ และด้านร้อนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการอุ่นอากาศในระบบปั๊มความร้อนได้ (พชร ว่องไพศาลกิจ, 2562)

ปัจจุบันได้มีการนำเอาคุณสมบัติในการสร้างด้านร้อนและด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นในด้านการทำความเย็น (Refrigeration) โดย Enescu et al. (2017) ได้นำเทอร์โมอิเล็กทริกมาใช้ในการทำตู้เย็นขนาดพกพาที่สามารถเคลื่อนย้ายไปที่ใดก็ได้ และไม่ต้องใช้ปั๊มความร้อนจากระบบทำความเย็นแบบอัดไอที่มีอันตรายจากสารทำความเย็นหากเกิดการรั่วไหล โดยระบบดังกล่าวสามารถทำอุณหภูมิอากาศภายในตู้เย็นลดลงต่ำที่สุดถึง  $8^{\circ}\text{C}$  และสามารถบรรจุขวดน้ำขนาด 1 l ได้มากที่สุดถึง 7 ขวด หรือจะเป็นงานวิจัยของ He et al. (2017) ที่ได้มีการนำเอาเทอร์โมอิเล็กทริกมาใช้ในการสร้างกล่องทำความเย็น (Refrigeration Box) ขนาดพกพา และทำการหาจุดที่เหมาะสมที่สุดในการทำงานของระบบสำหรับใช้ในการเก็บรักษา ยา วัคซีน และเซรุ่มทางการแพทย์ โดยจากการทดลองพบว่าสามารถลดอุณหภูมิภายในกล่องลงไปได้ถึง  $20.11^{\circ}\text{C}$  ตามที่ต้องการโดยสามารถนำไปใช้งานได้จริงและประหยัดพลังงานอีกด้วย โดยมีค่า Coefficient of performance (COP) มากที่สุดคือ 0.685 ซึ่งจุดที่เหมาะสมที่สุดในการทำงานของระบบคือจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้ระบบ 10-11 V และกระแสไฟฟ้า 4.9-5.4 A โดยยิ่งทั้งความร้อนผ่านด้านร้อนได้มากเท่าไร ก็จะทำให้ลดอุณหภูมิด้านเย็นได้มากเท่านั้น นอกจากนี้ยังสามารถนำสมบัติการสร้างด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกมาใช้ทั้งสองด้าน โดยปฐมพงศ์ จิโน และคณะ (2557) ได้นำเทอร์โมอิเล็กทริกมาใช้ในการทำน้ำร้อนและน้ำเย็นร่วมกับโซลาร์เซลล์ โดยสร้างตู้น้ำที่สามารถผลิตน้ำร้อนและน้ำเย็นฝั่งละ 0.6 l โดยใช้ด้านร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิน้ำและด้านเย็นสำหรับลดอุณหภูมิน้ำ โดยสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อนได้เฉลี่ย  $0.35^{\circ}\text{C}/\text{min}$  และลดอุณหภูมิน้ำเย็นได้เฉลี่ย  $0.25^{\circ}\text{C}/\text{min}$  และมีอัตราการใช้พลังงานเมื่อเทียบกับตู้ไฟฟ้าทั่วไป สำหรับน้ำร้อนประหยัดไป 467 W/h และน้ำเย็น 8 W/h ซึ่งสามารถผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิสูงสุดถึง  $66.9^{\circ}\text{C}$  และผลิตน้ำเย็นได้อุณหภูมิต่ำที่สุดถึง  $15.4^{\circ}\text{C}$

นอกจากนี้เทอร์โมอิเล็กทริกยังถูกนำมาใช้ในการระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยสมชาย มณีวรรณ และคณะ (2549) ได้นำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลรุ่น Tianjinan model TEC1-12708 ขนาด  $4.0 \times 4.0 \times 0.4 \text{ cm}^3$  มาใช้ในระบบระบายความร้อนซีพียู โดยใช้อากาศและทำการเปรียบเทียบกับระบบระบายความร้อนด้วยสารทำงานคือ เอทิลีนไกลคอล โดยพบว่า ณ อุณหภูมิทำงานของซีพียู  $55.8^{\circ}\text{C}$  ในห้องไม่ปรับอากาศที่มีอุณหภูมิอากาศแวดล้อม  $30^{\circ}\text{C}$  ระบบระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกและระบบระบายความร้อนด้วยเอทิลีนไกลคอลสามารถลดอุณหภูมิซีพียูลงได้ 4.3 และ  $11.5^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ โดยมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้เทอร์โมอิเล็กทริก 4 V และในห้องปรับอากาศที่มีอุณหภูมิอากาศแวดล้อม  $25^{\circ}\text{C}$  ระบบระบายความร้อน

ด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกและระบบระบายความร้อนด้วยเอทิลีนไกลคอลสามารถลดอุณหภูมิซีพียูลงได้ 15.8°C และ 15.5°C ตามลำดับ โดยมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้เทอร์โมอิเล็กทริก 2 V โดยมีค่าความสามารถในการทำความเย็นและสมรรถนะในการทำความเย็นเท่ากับ 22.3 W และ 1.3 ที่ 30°C และ 17.7 W และ 1.6 ที่ 25°C ทำให้เห็นว่าการใช้เทอร์โมอิเล็กทริกทำความเย็นให้กับระบบระบายความร้อนซีพียูจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สำคัญ นอกจากนี้ Li et al. (2011) ได้นำเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น TEC1-6308 ขนาด 40 mm x 20 mm มาใช้ในระบบระบายความร้อนของ high-power light-emitting diodes หรือ LED กำลังสูง ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่สภาวะการทำความเย็นที่ดีที่สุดนั้นสามารถลดอุณหภูมิของหลอด LED ได้ถึง 17°C เนื่องจากความร้อนถูกดูดซับอย่างรวดเร็วผ่านเทอร์โมอิเล็กทริก โดยจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นสามารถระบายความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากการใช้งานเทอร์โมอิเล็กทริกในการระบายความร้อนหรือทำความเย็นให้กับวัสดุหรืออุปกรณ์ชนิดต่าง ๆ แล้วยังสามารถนำมาใช้ในการทำความเย็นให้กับตัวบุคคลได้อีกด้วย ดังเช่น Cao et al. (2017) ได้ทำการออกแบบหมวกนิรภัยสำหรับผู้ปฏิบัติงานในพื้นที่อุณหภูมิสูง ซึ่งภายในหมวกนิรภัยมีการติดตั้งแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น TEC-12706 ร่วมกับพัดลมระบายความร้อน สำหรับลดอุณหภูมิภายในหมวกนิรภัย ซึ่งสามารถทำอุณหภูมิภายในหมวกได้น้อยที่สุดถึง 24°C หรือจะเป็นในด้านการปรับอากาศในตัวบุคคล โดย Lou et al. (2020) ได้นำเอาเทอร์โมอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้ในการสร้างเสื้อชั้นในสำหรับปรับอากาศภายในตัวบุคคลที่มีน้ำหนัก 994 g โดยมีโครงข่ายท่อในการส่งลมเย็นและลมร้อนไปยังบริเวณต่างๆ ในร่างกาย ซึ่งระบบดังกล่าวสามารถทำความเย็นมากที่สุดถึง 15.5 W และทำความร้อนได้ถึง 18.1 W โดยมีค่า Coefficient of performance (COP) มากกว่า 0.4

ในด้านการอบแห้ง พชร ว่องไพศาลกิจ และคณะ (2562) ได้นำเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น TEC-12710 ขนาด 4.0 x 4.0 x 0.4 cm<sup>3</sup> มาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งพริกชี้หนูแดงโดยใช้ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกในการอุ่นอากาศและใช้ด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกในการลดความชื้นของอากาศอบแห้งก่อนนำมาผสมกันแล้วนำเข้าฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้งสำหรับการอบแห้ง โดยจากการทดลองพบว่าด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถเพิ่มอุณหภูมิของอากาศได้มากที่สุดถึง 52.3°C และด้านเย็นสามารถลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศได้จาก 77% เป็น 57%

ในด้านการเกษตรก็สามารถนำเทอร์โมอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้ได้อีกด้วย โดยศรัณรัตน์ คงมัน (2564) ได้นำเอาเทอร์โมอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำสารละลาย สำหรับปลูกผักสลัดด้วยวิธีแอโรโพนิกส์ซึ่งเป็นวิธีการปลูกพืชโดยไม่ใช้น้ำ แต่ปล่อยให้รากลอยในอากาศและทำการพ่นธาตุอาหารผ่านสเปรย์ไปสู่รากพืช โดยมีการใช้เทอร์โมอิเล็กทริก

สำหรับลดอุณหภูมิสารละลายธาตุอาหารให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อพืชที่ประมาณ 20-25°C โดยเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถลดอุณหภูมิในชุดทดลองลงได้ประมาณ 7-11°C เมื่อเทียบกับอุณหภูมิอากาศภายนอก และมีการใช้พลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 0.108 kWh และระบบดังกล่าวยังสามารถควบคุมอุณหภูมิในกล่องการทดลองได้ในระดับคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิภายนอกได้ดีกว่าระบบที่ไม่มีเทอร์โมอิเล็กทริกช่วยควบคุมอุณหภูมิ ช่วยให้ผักสลัดมีการเจริญเติบโตเมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ได้ดีกว่าระบบที่ไม่มีเทอร์โมอิเล็กทริก

นอกจากนี้ยังมีการใช้เทอร์โมอิเล็กทริกในการกลั่นน้ำดื่ม โดย Al-Madhhachi and Min (2017) ได้นำเอาเทอร์โมอิเล็กทริกมาใช้ในการทำเครื่องกลั่นน้ำดื่ม โดยใช้งานทั้งด้านร้อนและด้านเย็นในแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้ด้านร้อนสำหรับการระเหยน้ำและใช้ด้านเย็นในการควบแน่นน้ำเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำไปพร้อมกัน โดยสามารถผลิตน้ำได้ 28.5 ml/h ใช้พลังงาน 0.00114 kWh/ml และจากการทดลองยังทำให้เห็นว่าเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถสร้างความแตกต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นได้มากที่สุดถึง 42.3°C โดยด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำได้มากถึงจาก 24.1°C ถึง 50.5°C และอิทธิเทพ พิงเมือง (2559) ได้นำเทอร์โมอิเล็กทริกด้านเย็นมาใช้ในการสร้างเครื่องควบแน่นน้ำ ซึ่งสามารถผลิตน้ำได้สูงสุดอยู่ที่ 24.9 ml ในเวลา 3 h โดยใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกขนาด 40 x 40 mm<sup>2</sup> จำนวน 2 ชุด ซึ่งรองรับไฟฟ้ากระแสตรง 12 V 4.5 A โดยจะต้องจ่ายค่าไฟไปทั้งหมด 1.6191 บาท โดยจากการทดลองพบว่าไม่ควรใช้อัตราการไหลของอากาศผ่านด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกสูง เนื่องจากจะทำให้อุณหภูมิต่ำที่ผิวควบแน่นไม่สามารถลดลงจนถึงอุณหภูมิจุดน้ำค้างได้ ส่งผลให้ไม่เกิดการกลั่นตัวของหยดน้ำ

จะเห็นได้ว่าแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric module) นั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ ได้มากมาย เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาไม่สูง มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ง่ายต่อการติดตั้งและรีไซเคิลหากเกิดการชำรุดเสียหาย นอกจากนี้ยังไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วยเนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้สารทำความเย็นในระบบ ใช้เพียงการจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าไปในระบบเท่านั้น

จากเนื้อหาที่กล่าวมาข้างต้นในบทที่ 2 นี้จะเห็นได้ว่าการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนระบบอัดไอนั้นได้ถูกนำมาใช้ในการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรชนิดต่าง ๆ มากมาย และเนื่องจากการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนดังกล่าวนี้สามารถทำการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำได้ ทำให้มักถูกนำมาใช้ในการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรที่ไวต่อการเสื่อมคุณภาพด้วยความร้อน และยังรวมถึงการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ที่ต้องระวังเรื่องอุณหภูมิในการอบแห้งเพื่อรักษาอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์เอาไว้ให้ได้มากที่สุด แต่เนื่องจากข้อเสียของเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนระบบอัดไอที่ได้นำมาข้างต้น ทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดในการนำเอาแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้แทนระบบอัดไอในการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยใช้ด้านร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้งและ

ใช้ด้านเย็นในการลดอุณหภูมิของอากาศอบแห้งจนถึงอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature) เพื่อลดความชื้นในอากาศอบแห้ง จากนั้นจึงนำอากาศจากบริเวณทั้งสองมาผสมกัน ในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ได้อากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิและมีความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ต่อไป



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

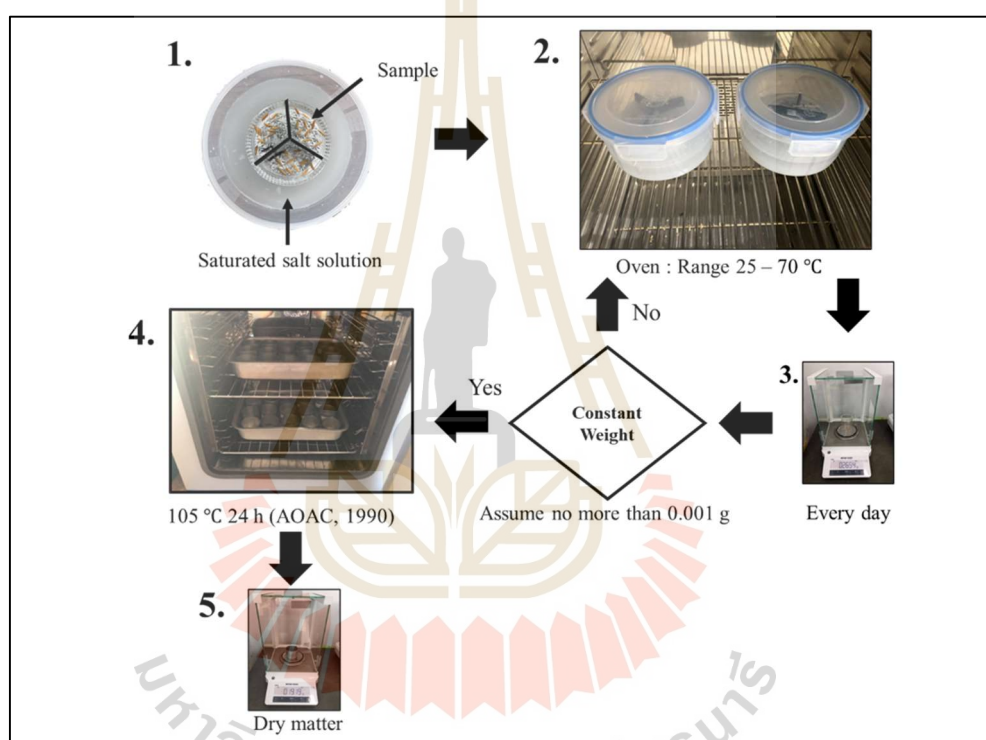
#### 3.1 การทดลองหาไอโซเทอมความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

การออกแบบระบบการอบแห้งวัสดุในแต่ละชนิดนั้น มีความจำเป็นที่จะต้องทราบสมบัติบางประการที่สำคัญของวัสดุนั้นก่อน โดยขั้นตอนนี้เป็น การทดลองหาไอโซเทอมความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และเปรียบเทียบเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในแต่ละช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน สำหรับใช้ในการออกแบบสภาวะการอบแห้งของเครื่องอบแห้งและการเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ข้าวต่อไป

ข้าวเปลือกข้าวดอกมะลิ 105 (*Oryza sativa* L.) ที่ใช้ในการทดลองเป็นข้าวเก่าที่ผ่านการเก็บเกี่ยวมาแล้วเป็นเวลา 8 เดือน จากพื้นที่ตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ได้ถูกแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ ข้าวขึ้นสำหรับการหาไอโซเทอมการคายความชื้น ซึ่งถูกเตรียมโดยนำข้าวเปลือกไปคั้นความชื้นกลับด้วยการพ่นละอองน้ำและคลุกเคล้าให้ทั่วกัน ก่อนนำไปบรรจุในถุงทึบแสงปิดสนิท จากนั้นปล่อยให้ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ในที่อุณหภูมิต่ำ (เก็บในตู้เย็น) เพื่อให้น้ำซึมเข้าสู่เมล็ดและกลายเป็นข้าวขึ้น (Abe and Afzal, 1997 ; Saelim, 2017) สม่่าเสมอกันและอีกกลุ่มคือ ข้าวแห้งสำหรับการหาไอโซเทอมการดูดความชื้น ซึ่งถูกเตรียมโดยการนำข้าวไปอบด้วยตู้อบเพื่อกำจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (AOAC, 1990) จากนั้น แบ่งข้าวออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มละ 10 เม็ด บรรจุในภาชนะทนความร้อนแบบโปร่งแสงมีฝาปิดสนิท ปริมาตร 1,360 cm<sup>3</sup> (Bingol et al., 2012) ใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว (Saturated salt solution) สำหรับควบคุมสภาวะความชื้นภายในกล่อง ซึ่งสารละลายเกลืออิ่มตัวแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ได้แตกต่างกัน นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิรอบ ๆ สารละลายด้วย สำหรับการทดลองนี้ ได้ใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว 5 ชนิด สำหรับสร้างสภาวะความชื้นดังตารางที่ 3.1 (ดัดแปลงจาก Greenspan, 1977 ; Andrade and Hensel, 2013)

ตารางที่ 3.1 สมบัติของสารละลายเกลืออิ่มตัวที่ใช้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในภาชนะ

Salt solution	25°C	40°C	60°C	70°C
KOH	8.23	6.26	5.49	5.32
MgCl <sub>2</sub>	32.78	31.60	29.26	27.77
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	52.89	48.42	43.00	-
NaCl	75.29	74.68	74.50	75.06
KCl	84.34	82.32	80.25	79.49



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์และขั้นตอนการทดลองหาค่าไอโซเทอมความชื้น

บรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัว (Saturated salt solutions) ปริมาตร 250 cm<sup>3</sup> ในภาชนะ แล้วปิดให้สนิท (รูปที่ 3.1 หมายเลข 1) นำภาชนะดังกล่าวใส่ในตู้อบลมร้อน Universal Oven รุ่น UF160 จากบริษัท Memmert เพื่อจำลองสถานะอุณหภูมิ 4 สถานะด้วยกันคือ 25 40 60 และ 70°C (รูปที่ 3.1 หมายเลข 2) ตัวอย่างข้าวที่อุณหภูมิและความชื้นต่างๆ จะถูกนำไปชั่งน้ำหนักทุกวัน ด้วยเครื่อง Analytical Balance ME204/M ของบริษัท Mettler Toledo (ความละเอียด 0.0001 g) (รูปที่ 3.1 หมายเลข 3) โดยก่อนชั่งแต่ละครั้งจะรอให้อุณหภูมิของตัวอย่างลดลงจนมีค่าเท่ากับ อุณหภูมิห้อง และจะชั่งจนกว่าน้ำหนักของข้าวจะคงที่ (มีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.001 g

ใช้เวลาประมาณ 14-18 วัน) ซึ่งหมายถึงความชื้นในข้าวถึงจุดสมดุลแล้ว หลังจากนั้นข้าวจะถูกนำมาหาค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, EMC) โดยการนำไปอบในตู้อบลมร้อนเพื่อกำจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (AOAC, 1990) ดังหมายเลข 4 ต่อจากนั้นจึงนำข้าวแห้งมาชั่งน้ำหนัก ดังหมายเลข 5 และนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณหาความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis) ตามสมการที่ 3.1 (ดัดแปลงจาก Bejar et al., 2012)

$$M_d = \frac{W - W_d}{W_d} \times 100\% \quad (3.1)$$

โดยที่  $M_d$  คือ ค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง, %db  
 $W$  คือ น้ำหนักเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์, g  
 $W_d$  คือ น้ำหนักผลิตภัณฑ์แห้ง, g

แปลงค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศ (Equilibrium relative humidity, ERH) ให้อยู่ในรูปค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Water activity,  $a_w$ ) โดยค่าวอเตอร์แอกติวิตีคือปริมาณน้ำที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ มีผลทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเน่าเสียหรือเสื่อมคุณภาพ โดยเป็นความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนความดันไอในวัสดุ (Partial pressure of water vapor in product) ต่อค่าความดันไอของไอน้ำ (pressure of pure water) ดังสมการที่ 3.2 (ดัดแปลงจาก Troller, 2012)

$$a_w \times 100 = \frac{p}{p_0} \times 100 = ERH \quad (3.2)$$

โดยที่  $a_w$  คือ ค่าวอเตอร์แอกติวิตี, ทศนิยม  
 $p$  คือ ความดันไอในวัสดุ, kPa  
 $p_0$  คือ ความดันไอของไอน้ำ, kPa  
 ERH คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลอากาศ, %

สำหรับไอโซเทอมความชื้นในข้าวที่ได้จากการทดลองนั้น จะถูกนำมาใช้ในการสร้างสมการสำหรับทำนายค่าไอโซเทอมความชื้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยสมการทางคณิตศาสตร์ที่ถูกนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลในการศึกษานี้แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ทำนายไอโซเทอมความชื้นในข้าวขาวดอกมะลิ

105

Model	Equation	Reference
GAB	$EMC = \frac{ABCa_w}{(1-Ba_w)(1-Ba_w + BCa_w)}$	(Sinija and Mishra, 2008)
Peleg	$EMC = A(a_w)^B + C(a_w)^D$	(Bahloul et al., 2008)
Oswin	$EMC = A \left[ \frac{a_w}{(1-a_w)} \right]^B$	(Sinija and Mishra, 2008)
Henderson	$EMC = \left[ \frac{\ln(1-a_w)}{-AT} \right]^{\frac{1}{B}}$	(Barrozo et al., 2008)
Henderson & Thompson	$EMC = \left[ \frac{\ln(1-a_w)}{-A(T+B)} \right]^{\frac{1}{C}}$	(Barrozo et al., 2008)
Chung & Pfof	$EMC = \frac{1}{-A} \ln \left[ \frac{(T+B) \ln a_w}{-C} \right]$	(Barrozo et al., 2008)
Halsey	$EMC = \left[ \frac{-A}{T \ln(a_w)} \right]^{\frac{1}{B}}$	(Goula et al., 2008)

โดยที่ EMC คือ ค่าความชื้นสมดุล,  $kg_{water}/kg_d$   
 A B C และ D คือ ค่าคงที่ของแบบจำลอง  
 T คือ อุณหภูมิ, °C

ประเมินค่าความแม่นยำของสมการในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ว่าสมการใดมีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับช่วงอุณหภูมินั้นโดยพิจารณาจากค่าทางสถิติ 2 ค่า คือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) และค่าการลดลงไคกำลังสอง ( $\chi^2$ ) ซึ่งสมการทางสถิติดังกล่าวมีดังนี้ (Jain and Pathare, 2004 ; Shama et al., 2005)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (M_{e,ex} \times M_{e,pred})}{\sqrt{\left( \sum_{i=1}^n M_{e,ex}^2 \right) \left( \sum_{i=1}^n M_{e,pred}^2 \right)}} \quad (3.3)$$



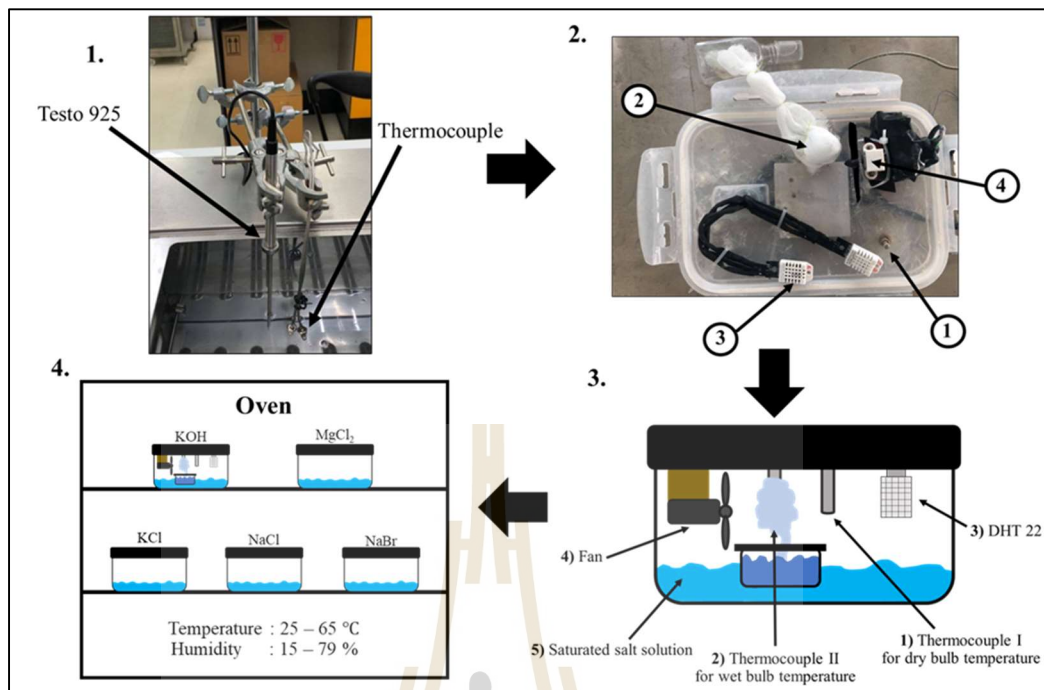
$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{e,ex} - M_{e,pred})^2}{N-n} \quad (3.4)$$

- โดยที่  $M_{e,ex}$  คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุที่ได้จากการทดลอง, %db  
 $M_{e,pred}$  คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุที่ได้จากการทำนาย, %db  
 $N$  คือ จำนวนค่าสังเกต  
 $n$  คือ จำนวนค่าคงที่ในแบบจำลอง

### 3.2 การสอบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT 22

การนำเซนเซอร์มาใช้ในงานวิจัยนั้น มีความจำเป็นที่จะต้องมีการสอบเทียบก่อนการใช้งานเสมอ โดยสำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการสอบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT 22 จากบริษัท MaxDetect Technology โดยสามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง  $-40-80^{\circ}\text{C}$  และวัดความชื้นสัมพัทธ์อากาศอยู่ในช่วง  $0-100\%$  มีค่าความละเอียดของเครื่องมือวัด (Resolution) ทั้งอุณหภูมิและความชื้นอยู่ที่  $0.1$

สำหรับการสอบเทียบเซนเซอร์ DHT 22 ใช้ Thermocouple Type K รุ่น MAX6675ISA ของบริษัท Maxim Integrated Products ที่สามารถวัดอุณหภูมิในช่วง  $-20-85^{\circ}\text{C}$  มีค่าความละเอียดของเครื่องมือวัด (Resolution) อยู่ที่  $0.25^{\circ}\text{C}$  เป็นเครื่องมือวัดอ้างอิง ซึ่ง Thermocouple Type K ดังกล่าวได้ผ่านการสอบเทียบมาแล้วจากเครื่องวัดอุณหภูมิมาตรฐาน Testo 925 ที่ใช้โพรบวัด Waterproof stainless steel food probe (TC type K) ของบริษัท Testo ที่สามารถวัดอุณหภูมิในช่วง  $-60-400^{\circ}\text{C}$  โดยมีค่าความละเอียดของเครื่องมือวัด (Resolution) อยู่ที่  $0.1^{\circ}\text{C}$  และมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ  $\pm (0.5^{\circ}\text{C} + 0.3\% \text{ of mV})$  และ  $\pm (0.7^{\circ}\text{C} + 0.5\% \text{ of mV})$  โดยใช้ Waterbath รุ่น WNE 45 จากบริษัท Memmert สำหรับสร้างสภาวะอุณหภูมิ (ดังรูปที่ 3.2 ภาพหมายเลข 1)



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์และวิธีการสอบเทียบเซนเซอร์ DHT 22

Thermocouple Type K รุ่น MAX6675ISA ซึ่งได้ผ่านการสอบเทียบจากเครื่องวัดอุณหภูมิมาตรฐานแล้วนั้นได้ถูกนำมาทำการสอบเทียบกับเซนเซอร์ DHT 22 โดยใช้วิธีการจำลองสภาวะอุณหภูมิและความชื้นภายในภาชนะที่ทนความร้อนแบบโปร่งแสงและปิดสนิทปริมาตร 1,500 cm<sup>3</sup> โดยติดตั้ง Thermocouple Type K ไว้ที่ฝากล่อง 2 ตัวด้วยกัน ตัวแรกใช้สำหรับวัดอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry bulb temperature) (รูปที่ 3.2 ภาพหมายเลข 2 เลขบ่งชี้ที่ 1) และตัวที่ 2 ซึ่งถูกหุ้มด้วยผ้าขาวบางเปียกสำหรับทำการวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature) (รูปที่ 3.2 ภาพหมายเลข 2 เลขบ่งชี้ที่ 2) และทำการติดตั้งเซนเซอร์ DHT 22 ที่ต้องการสอบเทียบไว้ที่ฝากล่อง (รูปที่ 3.2 ภาพหมายเลข 2 เลขบ่งชี้ที่ 3) จากนั้นทำการติดตั้งพัดลม Keyes L9110 ของบริษัท Shenzhen KEYES Robot สำหรับสร้างสภาวะการไหลของอากาศในช่วง 3.2 - 3.4 m/s (รูปที่ 3.2 ภาพหมายเลข 2 เลขบ่งชี้ที่ 4) ซึ่งวัดผ่านเครื่องวัดความเร็วลม ยี่ห้อ AHJ รุ่น AHJ-503 ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียกที่ต้องมีความเร็วของอากาศไม่ต่ำกว่า 2 m/s ไหลผ่านกระเปาะเปียก (Legg, 2017) ดังรูปที่ 3.2 ภาพหมายเลข 2 และ 3 จากนั้นจึงทำการสอบเทียบโดยใช้วิธีการปิดฝากล่องที่มีเซนเซอร์ในภาชนะที่ใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว (Saturated salt solution) สำหรับสร้างสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ โดยสารละลายเกลืออิ่มตัวมีคุณสมบัติในการควบคุมความชื้นของอากาศเหนือสารละลาย ซึ่งสารละลายเกลืออิ่มตัวแต่ละชนิดมีความสามารถในการควบคุมความชื้นที่แตกต่างกันและยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ

สารละลายอีกด้วย โดยสำหรับการทดลองนี้ใช้สารละลายอิมิตัว 5 ชนิดด้วยกันคือ KOH MgCl<sub>2</sub> NaBr NaCl และ KCl เพื่อสร้างสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 5 สภาวะ ตั้งแต่ 15-79% (Greenspan, 1977) โดยภาชนะที่บรรจุสารละลายอิมิตัวแต่ละชนิดดังกล่าวจะถูกนำไปไว้ในตู้อบลมร้อน Universal Oven รุ่น UF160 จากบริษัท Memmert สำหรับจำลองสภาวะอุณหภูมิ 4 สภาวะด้วยกัน คือ 25 40 55 และ 65°C ดังรูปที่ 3.2 ภาพหมายเลข 4 ในการสอบเทียบในแต่ละสภาวะความชื้นจะกระทำผ่านการย้ายฝาภาชนะที่มีเซนเซอร์ติดตั้งเอาไว้จนครบทั้ง 5 สภาวะความชื้น โดยในการเปลี่ยนสภาวะความชื้นแต่ละครั้งจะต้องรอให้อุณหภูมิของตู้อบลมที่ก่อน จากนั้นจึงรออีกประมาณ 5 นาที เพื่อให้สภาวะอากาศภายในภาชนะที่ทำการสอบเทียบเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยสังเกตจากค่าอุณหภูมิ กระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งของเครื่องมือวัดอ้างอิงที่มีค่าประมาณคงที่ (เปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 0.5°C) จากนั้นจึงบันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นของเซนเซอร์ โดยทำทั้งสิ้น 5 ซ้ำ ซึ่งจะบันทึกค่าสลับกันระหว่างเครื่องมือวัดอ้างอิงและเซนเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบไปเรื่อย ๆ โดยทำเช่นนี้จนครบทั้ง 5 สภาวะความชื้น แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาสมการปรับแก้ต่อไป

สำหรับการประเมินความแม่นยำของสมการปรับแก้ นั้นจะพิจารณาจากค่าทางสถิติ 2 ค่าด้วยกันคือ คือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R<sup>2</sup>) และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) (Aptula et al., 2005 ; Bahloul et al., 2008) ซึ่งสมการดังกล่าวมีดังนี้

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{cal} - Y_{ref})^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{Y} - Y_{ref})^2} \quad (3.5)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^N Y_{ref}}{N} \quad (3.6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_{cal} - Y_{ref})^2}{N}} \quad (3.7)$$

โดยที่	$Y_{cal}$	คือ ค่าอุณหภูมิและความชื้นจากสมการปรับแก้, °C และ %
	$Y_{ref}$	คือ ค่าอุณหภูมิและความชื้นจากเครื่องมือวัดอ้างอิง, °C และ %
	$\bar{Y}$	คือ ค่าเฉลี่ยของค่าอุณหภูมิและความชื้นจากเครื่องมือวัดอ้างอิง, °C และ %
	$N$	คือ จำนวนค่าที่ทำการสอบเทียบ

### 3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

สำหรับการสร้างเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยเทคนิคปั๊มความร้อนโดยประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกและทดสอบเครื่องอบแห้งรวมถึงผลผลิตทางการเกษตรที่ใช้ทดสอบมีดังนี้

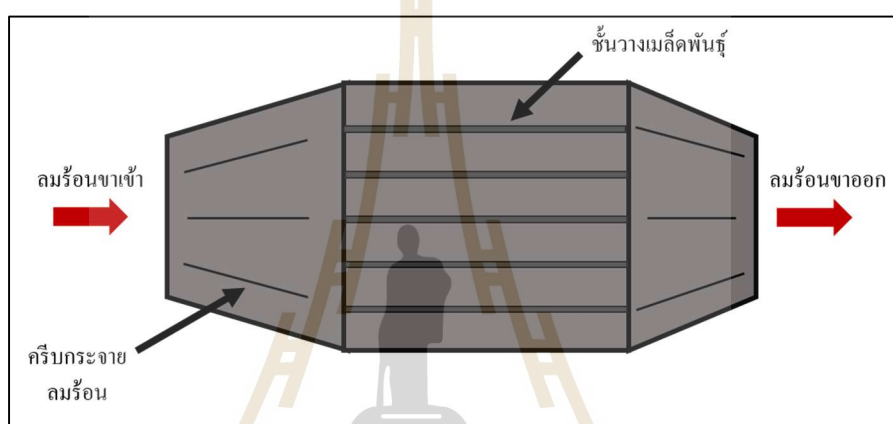
1. เครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยเทคนิคปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric module)
2. ตู้อบลมร้อน Universal Oven รุ่น UF160 จากบริษัท Memmert สำหรับใช้ในการหามวลแห้งของผลผลิตเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความชื้น
3. เครื่องวัดความเร็วลมชนิดขดลวดความร้อน (Hot wire anemometer) รุ่น TM-4002 จากบริษัท TENMARS สำหรับใช้ในการวัดความเร็วลมในเครื่องอบแห้ง
4. เครื่องวัดความเร็วลม Digital Anemometer รุ่น GM8901 จากบริษัท BENETECH สำหรับใช้วัดความเร็วลมในการทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริก
5. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลรุ่น ATX224R จากบริษัท SHIMADZU (ความละเอียด 0.0001 g) สำหรับใช้หามวลของผลผลิตที่ใช้ทดสอบ
6. เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT 22 จากบริษัท MaxDetect Technology
7. รีเลย์ ยี่ห้อ SONGLE สำหรับใช้ควบคุมการทำงานของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก
8. บอร์ด Arduino รุ่น UNO R3 สำหรับใช้ควบคุมการทำงานของรีเลย์และเซนเซอร์ DHT 22
9. แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Module) รุ่น TEC-12710 ขนาด 4x4 cm<sup>2</sup> หนา 0.4 cm จากบริษัท Hebei I.T. Co., Ltd
10. พัดลมไฟฟ้า (Blower) DC 24 V 5.5 A สำหรับสร้างอัตราการไหลของอากาศหมุนเวียนภายในเครื่องอบแห้ง
11. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับค่าได้ (DC Power supply)
12. เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าแบบดิจิตอล (Digital Power meter) สำหรับวัดพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง
13. เมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งเป็นข้าวเก็บเกี่ยวใหม่ฤดูกาลเพาะปลูก 2564 จากอำเภอประโคนชัย จังหวัดบุรีรัมย์ ใช้เป็นวัสดุทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้ง

### 3.4 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์

ในส่วนของการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ด้วยเทคนิคปั๊มความร้อน โดยประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกนี้ ประกอบไปด้วยกระบวนการหลักๆ ที่สำคัญดังนี้

#### 3.4.1 ห้องอบแห้ง (Drying chamber)

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้ห้องอบแห้ง (Drying chamber) ที่มีระยะความกว้าง 0.6 m ความสูง 0.6 m และความลึก 0.6 m โดยมีปริมาตร 216 ลิตร และบรรจุข้าว 6 kg ต่อการอบแห้งหนึ่งครั้ง ดังรูปที่ 3.3



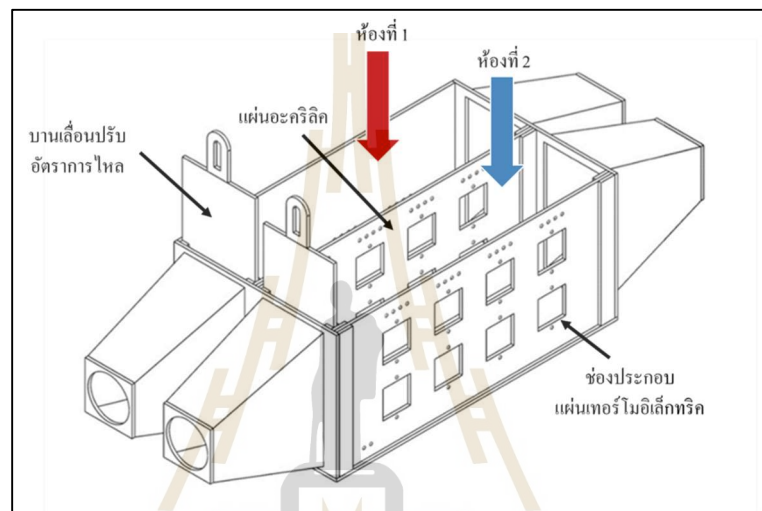
รูปที่ 3.3 แบบห้องอบแห้ง

บริเวณผนังห้องอบแห้งเป็นแผ่นเหล็กอาบสังกะสี และมีการบุฉนวนกันความร้อนไว้ภายในระหว่างผนังห้องอบแห้งด้านในและผนังด้านนอก มีฐานรองที่สามารถวางตะแกรงวัสดุอบแห้งเอาไว้ทั้งหมด 4 ชั้น แต่ละชั้นสูงห่างกัน 12 cm โดยตะแกรงที่ใช้สำหรับวางวัสดุอบแห้งมีทั้งหมด 4 ตะแกรง ขนาด 50 x 60 cm นอกจากนั้นยังมีการติดตั้งครีบกกระจายลมร้อนสำหรับบังคับทิศทางของลมร้อนที่ไหลไปในแต่ละชั้นทั้งทางเข้าและทางออกของลมร้อน

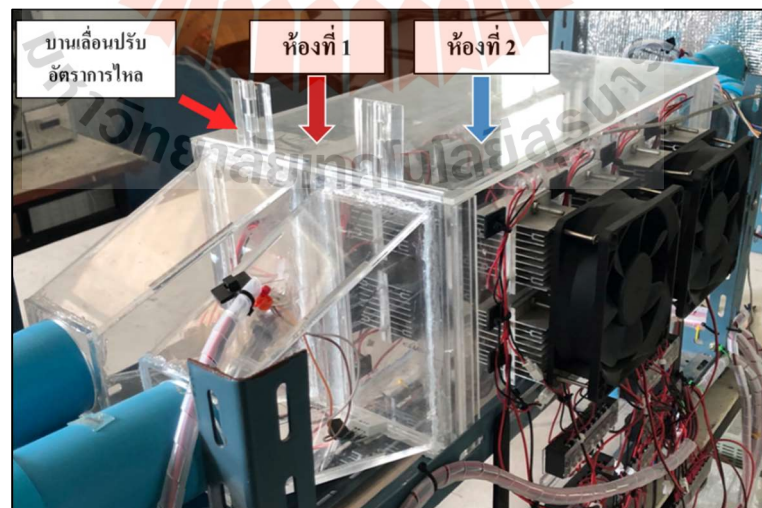
#### 3.4.2 ชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก

สำหรับชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกนี้ เป็นตู้อะคริลิกที่ประกอบขึ้นมาจากแผ่นอะคริลิกใสหนา 4 mm โดยตู้ดังกล่าวนี้มีขนาดความกว้าง 24 cm ความยาว 41 cm และความสูง 18 cm และภายในตู้ได้ถูกแบ่งออกเป็นห้องหลักจำนวน 2 ห้อง คือ ห้องที่ 1 (ฝั่งซ้าย) ใช้สำหรับเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งและห้องที่ 2 (ฝั่งขวา) ใช้สำหรับทำความเย็นเพื่อลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้ง ซึ่งภายในมีการออกแบบให้มีช่องสำหรับประกอบแผ่นอะคริลิกที่ภายในมีการเจาะรูไว้ขนาด 4 cm x 4 cm สำหรับติดตั้งแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก โดยมีทั้งหมด 2 แผ่น แผ่นแรก

(ด้านซ้าย) ใช้สำหรับเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้งในห้องที่ 1 โดยใช้ประโยชน์จากด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นหลัก (เห็นด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเข้าหาห้องที่ 1) และแผ่นที่สอง (ด้านขวา) ใช้สำหรับลดความชื้นของอากาศอบแห้งในห้องที่ 2 โดยใช้ประโยชน์จากด้านเย็นเป็นหลัก (เห็นด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกออกสู่บรรยากาศภายนอกกล่องอะคริลิก) นอกจากนี้ ได้มีการออกแบบช่องสำหรับใส่บานเลื่อนสำหรับปรับอัตราการไหลของอากาศอบแห้งในแต่ละห้องไว้ดังรูปที่ 3.4 และ 3.5

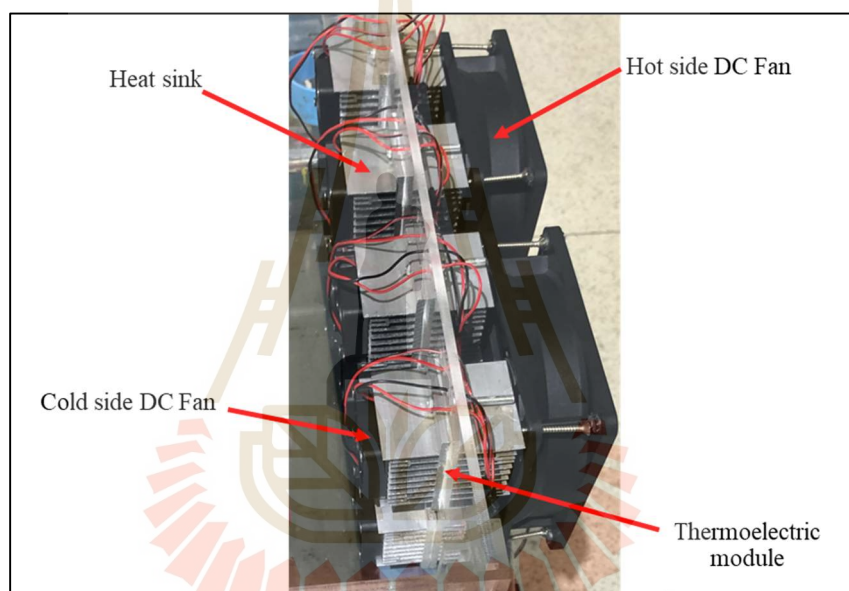


รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์เพิ่มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก



รูปที่ 3.5 ชุดอุปกรณ์เพิ่มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก (ภาพจริง)

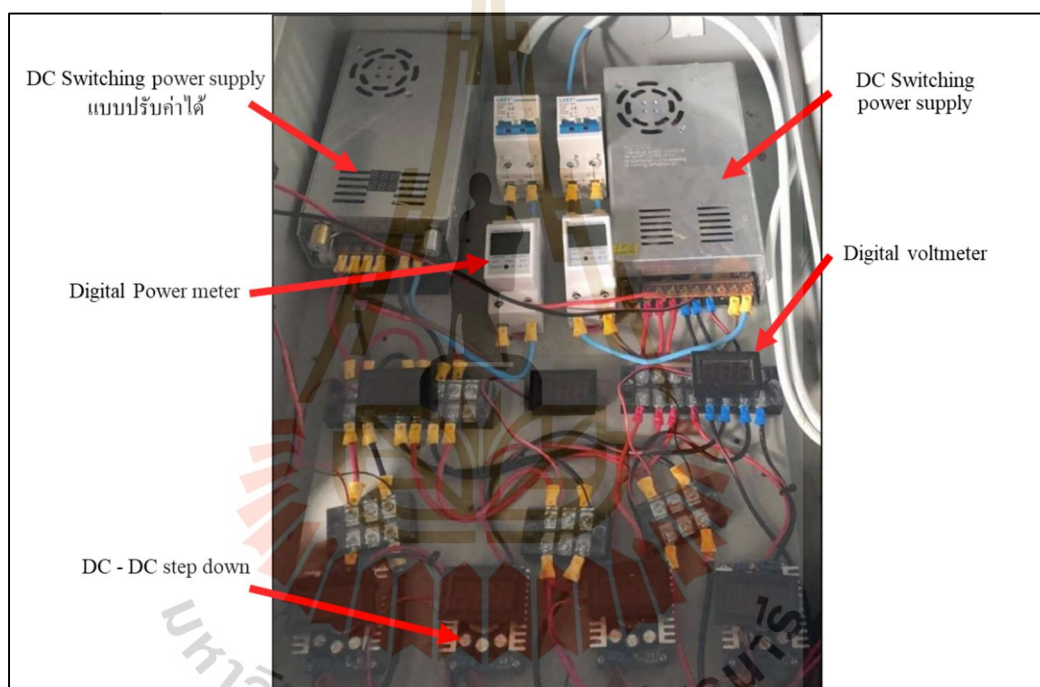
นอกจากนั้นยังได้มีการติดตั้งครีบริบายความร้อน (Heatsink) ที่มีขนาดความกว้าง 4.5 cm ความยาว 6 cm และความสูง 2.8 cm สำหรับช่วยในการถ่ายเทความร้อนให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในแต่ละแผ่นทั้งด้านร้อนและด้านเย็น โดยใช้กาวซิลิโคนยี่ห้อ Arctic Cooling MX-4 ที่มีค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) อยู่ที่ 8.5 W/mK สำหรับเชื่อมครีบริบายความร้อนและแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเอาไว้ นอกจากนี้ยังได้ติดตั้งพัดลม DC 12 V 0.30 A ขนาด 12 cm x 12 cm ยี่ห้อ CYJ เพื่อช่วยในการระบายความร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในด้านร้อนและพัดลม DC 12 V 0.12 A ขนาด 4 cm x 4 cm ยี่ห้อ CYJ สำหรับสร้างอากาศหมุนเวียนในด้านเย็นไว้อีกด้วย ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การติดตั้งชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกบนแผ่นอะคริลิก

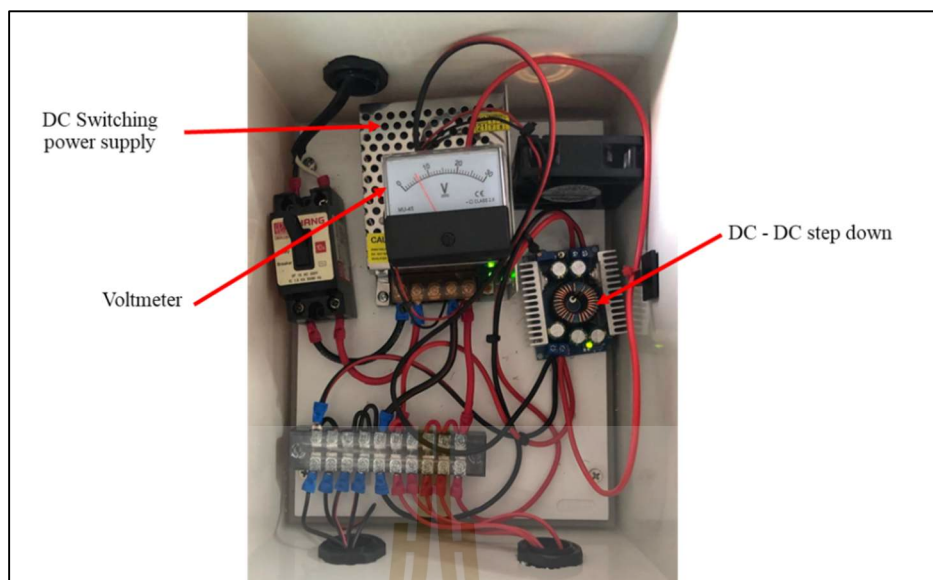
โดยชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเหล่านี้ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current) เป็นแหล่งพลังงานในการถ่ายเทความร้อนจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อทำให้เกิดด้านร้อนและด้านเย็นขึ้นในแผ่นอุปกรณ์ โดยสำหรับการทดลองนี้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก 2 ชนิด ด้วยกันคือ DC Switching power supply แบบปรับค่าได้ 0-12 V 40 A รุ่น S-480-0-12 V สำหรับจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่ถูกติดตั้งในแผ่นอะคริลิกแผ่นแรก (ด้านซ้าย) ในห้องที่ 1 และ DC Switching power supply 12 V<sub>DC</sub> 30 A รุ่น S-360-12 พร้อมทั้งมีการใช้งานอุปกรณ์ปรับค่าแรงดันไฟฟ้า DC - DC step down สำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่ถูกติดตั้งในอะคริลิกแผ่นที่สอง

(ด้านขวา) ในห้องที่ 2 นอกจากนั้นยังได้มีการติดตั้ง Digital Power meter สำหรับวัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงทั้งสอง และติดตั้ง Digital voltmeter สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายไปยังชุดอุปกรณ์แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกไว้อีกด้วย โดยอุปกรณ์เหล่านี้ได้ถูกติดตั้งไว้ภายในตู้ควบคุมไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และในส่วนของพัลลัม DC ที่ถูกติดตั้งทั้งในฝั่งด้านร้อนและด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกได้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง DC Switching power supply 12 V<sub>DC</sub> 5 A รุ่น S-60-12 เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าและมีการใช้งานอุปกรณ์ปรับค่าแรงดันไฟฟ้า DC - DC step down ร่วมกับ Voltmeter สำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่พัลลัม DC ฝั่งด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกอีกด้วยดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 การติดตั้งอุปกรณ์ภายในตู้ไฟฟ้าสำหรับชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก



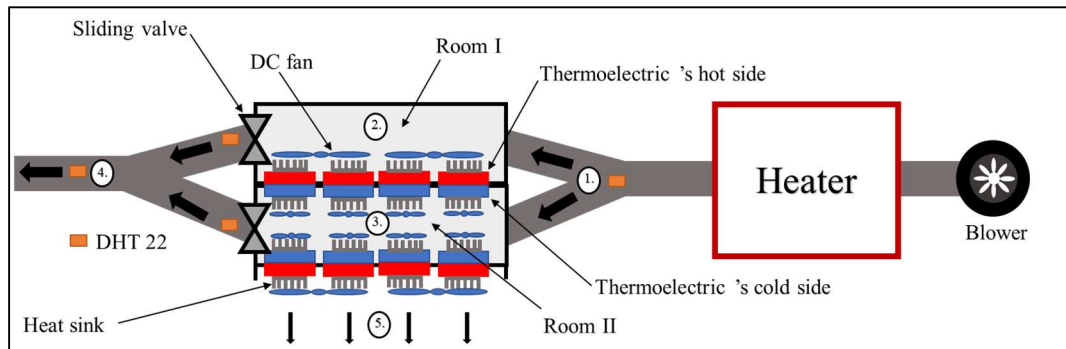


รูปที่ 3.8 การติดตั้งอุปกรณ์ภายในตู้ไฟฟ้าสำหรับพัดลม DC

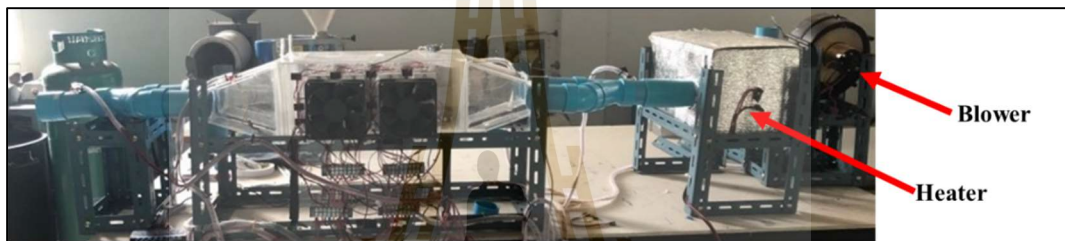
### 3.4.3 การทดสอบแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกด้านการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้ง (ห้องที่ 1)

สำหรับการทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลสมรรถนะและอิทธิพลจากอัตราส่วนการผสมอากาศจากห้องที่ 1 และห้องที่ 2 ของชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกในการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้ง (ห้องที่ 1) ค่าที่ได้จากการทดสอบนี้จะถูกนำไปคำนวณประกอบกับการทดสอบแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกด้านลดความชื้นอากาศอบแห้ง (ห้องที่ 2) สำหรับใช้ในการเลือกแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในห้องที่ 1 ในลำดับถัดไป

สำหรับการทดลองนี้ได้ทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกเข้ากับฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Heater) ขนาด 1,200 W เพื่อจำลองสภาวะการทำงานให้คล้ายกับการอบแห้งจริงที่มีการเวียนอากาศหลังจากการอบแห้งกลับมาใช้ใหม่และมีการติดตั้งพัดลมไฟฟ้า (Blower) DC 24 V 5.5 A สำหรับสร้างอัตราการไหลของอากาศในระบบดังรูปที่ 3.9 และ 3.10



รูปที่ 3.9 การต่อชุดอุปกรณ์การทดลองเทอร์โมอิเล็กทริกด้านเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง (ห้องที่ 1)

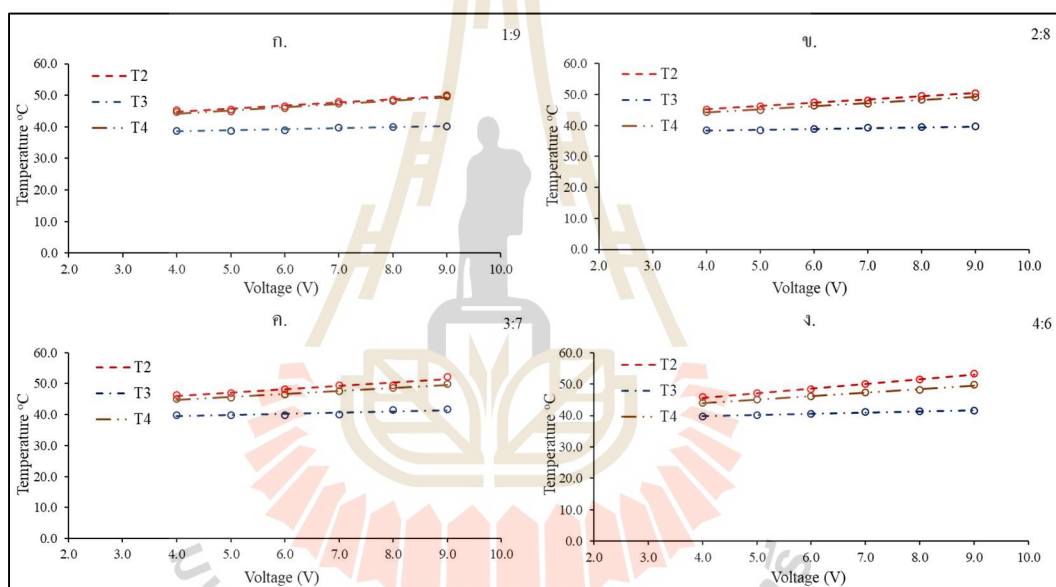


รูปที่ 3.10 ชุดอุปกรณ์ทดลองเทอร์โมอิเล็กทริกด้านเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง (ห้องที่ 1) ภาพจริง

จากรูปที่ 3.9 พัดลมไฟฟ้า (Blower) จะดูดอากาศผ่านเข้ามายังฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Heater) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศ จากนั้นอากาศจะไหลจากบริเวณหมายเลข 1 เข้าไปยังชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกโดยแยกไหลออกเป็น 2 ทาง คือเข้าห้องที่ 1 (Room 1) ที่บริเวณหมายเลข 2 เพื่อรับความร้อนจากบริเวณด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ทำให้อุณหภูมิของอากาศเพิ่มสูงขึ้น และเข้าห้องที่ 2 (Room 2) ที่บริเวณหมายเลข 3 ผ่านด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อทำความเย็นลดความชื้น หลังจากนั้นอากาศจากด้านทั้งสองจะมาผสมกันที่บริเวณหมายเลข 4 โดยอัตราส่วนผสมของอากาศจากทั้ง 2 บริเวณ จะถูกปรับผ่านบานเลื่อนปรับอัตราการไหล (Sliding valve) เพื่อนำไปใช้ทำการอบแห้งต่อไป

โดยสำหรับการทดลองนี้ได้ทำการปรับค่าอุณหภูมิของอากาศขาเข้าชุดอุปกรณ์การทดลองเทอร์โมอิเล็กทริก 3 ค่าด้วยกัน คือ 35 40 และ 45°C สำหรับศึกษาพฤติกรรมของชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกในช่วงค่าอุณหภูมิที่ถูกนำไปใช้ในการอบแห้งคือ 42°C พร้อมกับการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก 6 ค่าด้วยกันตั้งแต่ 4-9 V ร่วมกับการปรับสัดส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ระหว่างอากาศจากบริเวณหมายเลข 3 (Room II) กับบริเวณหมายเลข 2 (Room I) เป็นจำนวน 4 ค่าด้วยกันคือ 1:9 2:8 3:7 และ 4:6 โดยปรับค่าแรงดันไฟฟ้า

ที่จ่ายให้กับพัดลมไฟฟ้า (Blower) เพื่อควบคุมอัตราเร็วของอากาศผสมในบริเวณทางออกชุดอุปกรณ์ การทดลองเทอร์โมอิเล็กทริกไว้ที่ 10.6 m/s (พชร ว่องไพศาลกิจ, 2562) ซึ่งวัดผ่าน Digital Anemometer โดยทุกสภาวะจะใช้เวลาทดสอบนาน 15 นาที หลังจากนั้นจึงทำการเก็บข้อมูลค่าอุณหภูมิและความชื้นของอากาศโดยใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT 22 ที่บริเวณหมายเลข 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ โดยจากผลการทดลองพบว่า เมื่อนำค่าอุณหภูมิของอากาศที่มาจากบริเวณหมายเลข 2 3 และ 4 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์เพื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่จ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในแต่ละค่าส่วนผสมของอากาศทั้ง 4 ค่าพบว่ากราฟที่ได้ในแต่ละค่าอุณหภูมิมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจึงขอแสดงกราฟความสัมพันธ์เพียงค่าอุณหภูมิเดียวคือที่ 45°C ไว้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การเปรียบเทียบอุณหภูมิและค่าแรงดันไฟฟ้าที่สัดส่วนของอากาศผสม (Air ratio) 1:9 2:8 3:7 และ 4:6 ดังรูปย่อย ก ข ค และ ง ตามลำดับ ที่อุณหภูมิทดสอบ 45°C

จากรูปที่ 3.11 พบว่าเมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศหลังจากผ่านบริเวณหมายเลข 2 3 และ 4 เพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยได้ลักษณะกราฟความสัมพันธ์อยู่ในรูปกราฟเส้นตรง (Linear Graph) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกจะส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากด้านเย็นไปสู่ด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลให้อุณหภูมิอากาศที่มาจากบริเวณหมายเลข 2 (Room I) เพิ่มขึ้น จากนั้นเมื่ออากาศจากบริเวณหมายเลข 2 ที่มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ไหลมาผสมกับอากาศที่มาจากบริเวณหมายเลข 3 (Room II) จึงส่งผลให้อากาศบริเวณหมายเลข 4

มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ในขณะเดียวกันอากาศด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่มาจากบริเวณหมายเลข 3 ควรมีอุณหภูมิลดลงตามอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น แต่พบว่ากลับมีค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มมากขึ้น จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกกลับมีอัตราการระบายความร้อนสู่อากาศน้อยกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนภายในแผ่นที่มาจากด้านเย็น ส่งผลให้ความร้อนบางส่วนจากด้านร้อนเกิดการนำความร้อนภายในแผ่นย้อนกลับมาที่ด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ส่งผลให้ความสามารถในการลดอุณหภูมิของอากาศด้านเย็นลดลง อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์นี้ไม่ได้ส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศที่ผ่านบริเวณหมายเลข 3 เพิ่มขึ้นมากกว่าอุณหภูมิของอากาศขาเข้าที่บริเวณหมายเลข 1 แต่อย่างใดและนอกจากนั้นยังพบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ในบริเวณหมายเลข 3 (ด้านทำความเย็นลดความชื้น) เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศหลังผสมที่บริเวณหมายเลข 4 ลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มสัดส่วนการผสมอากาศที่บริเวณหมายเลข 3 ส่งผลให้อากาศที่มีอุณหภูมิสูงที่ไหลมาจากบริเวณหมายเลข 2 มีอัตราการไหลของอากาศเข้ามาลดลงและอากาศที่อุณหภูมิต่ำที่มาจากบริเวณหมายเลข 3 มีอัตราการไหลเข้ามาผสมเพิ่มมากขึ้น และเมื่ออากาศจากทั้ง 2 บริเวณนี้ผสมกันจึงส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศผสมที่บริเวณหมายเลข 4 ลดลง

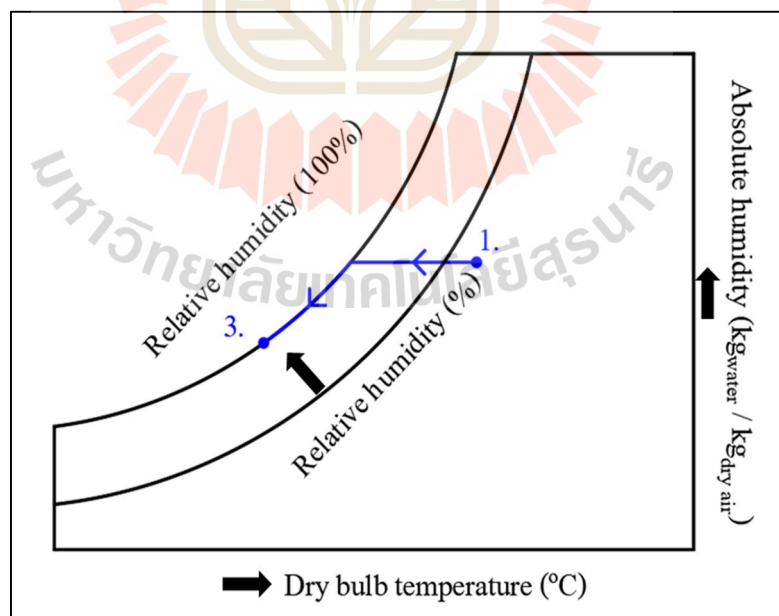
หลังจากนั้นทำการคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนที่อากาศได้รับ ( $\dot{Q}_H$ ) จากบริเวณหมายเลข 2 ซึ่งเป็นกระบวนการให้ความร้อน (Heating) เพื่อเก็บข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ร่วมกับการทดลองหาแรงดันไฟฟ้าสำหรับจ่ายให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกด้านลดความชื้นของอากาศอบแห้ง (Room II) ที่จะทำการทดลองถัดไป เพื่อใช้ในการหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในด้านที่เพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง (Room I) เพื่อให้ได้อุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่ต้องการต่อไป โดยค่าพลังงานความร้อนนี้หาได้จากสมการที่ 3.8

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_{a_2} (h_2 - h_1) \quad (3.8)$$

โดยที่  $\dot{Q}_H$  คือ พลังงานความร้อนจากกระบวนการให้ความร้อน, kW  
 $\dot{m}_{a_2}$  คือ อัตราการไหลโดยมวลของอากาศแห้งที่ไหลผ่านบริเวณหมายเลข 2,  $\text{kg}_{\text{dry air}}/\text{s}$   
 $h_2$  คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะ (Enthalpy) ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 2,  $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{dry air}}$   
 $h_1$  คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะ (Enthalpy) ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 1,  $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{dry air}}$

### 3.4.4 การทดสอบแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกด้านการลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้ง (ห้องที่ 2)

สำหรับการทดลองนี้เป็นการทดลองหาค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับจ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในด้านที่ทำหน้าที่ลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้ง (ห้องที่ 2) และเพื่อทำการหาค่าสัดส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ของชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่เหมาะสมสำหรับทำความความเย็นเพื่อลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้งได้ โดยชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกดังกล่าวได้ถูกติดตั้งอยู่ตรงกลางระหว่างบริเวณหมายเลข 3 และบริเวณหมายเลข 5 ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.9 โดยการทดลองนี้ยังคงใช้รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ในรูปแบบเดิมดังรูปที่ 3.9 แต่ได้ทำการเปลี่ยนจุดพิจารณาเป็นชุดเทอร์โมอิเล็กทริกในส่วนของกระบวนการลดความชื้นของอากาศอบแห้งแทน โดยสำหรับการทดลองนี้อากาศที่ไหลผ่านบริเวณดังกล่าวจะเกิดกระบวนการลดอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ (Cooling and dehumidifying) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นโดยเริ่มแรกอากาศที่ไหลผ่านบริเวณนี้ จะถูกลดอุณหภูมิลงไปเรื่อย ๆ จนถึงอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature) ซึ่งก็คือจุดที่อากาศมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) เท่ากับ 100% หลังจากนั้นไอน้ำในอากาศจะเริ่มเกิดการกลั่นตัวออกมาเป็นหยดน้ำ ส่งผลให้ความชื้นของอากาศที่ไหลผ่านบริเวณดังกล่าวนี้มีค่าลดลง โดยกระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายผ่าน Psychrometric chart ได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เส้นสภาวะของอากาศในกระบวนการ Cooling and dehumidifying

โดยสำหรับการทดลองนี้ได้ทำการปรับค่าอุณหภูมิของอากาศขาเข้าชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกอยู่ 3 ค่าด้วยกันเช่นเดิม คือ 35 40 และ 45°C พร้อมทั้งทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก 4 ค่าด้วยกันคือ 4 5 6 และ 7 V ร่วมกับการปรับสัดส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ระหว่างอากาศจากบริเวณหมายเลข 3 (Room II) กับบริเวณหมายเลข 2 (Room I) เป็นจำนวน 4 ค่าเช่นเดิมคือ 1:9 2:8 3:7 และ 4:6 โดยปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับพัดลมไฟฟ้า (Blower) เพื่อควบคุมอัตราเร็วของอากาศผสมในบริเวณทางออกชุดอุปกรณ์การทดลองเทอร์โมอิเล็กทริกไว้ที่ 10.6 m/s (พชร ว่องไพศาลกิจ, 2562) ซึ่งวัดผ่าน Digital Anemometer โดยทุกสภาวะจะใช้ระยะเวลา 15 นาที หลังจากนั้นจึงทำการเก็บข้อมูลค่าอุณหภูมิและความชื้นของอากาศโดยใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT 22 ที่บริเวณหมายเลข 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ

หลังจากนั้นทำการหาค่าอัตราการควบแน่นความชื้นออกจากอากาศที่ไหลผ่านบริเวณที่ 3 นี้ได้จากการคำนวณอัตราการควบแน่น (Moisture extraction rate, MER) ซึ่งก็คือปริมาณความชื้นที่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถควบแน่นออกจากอากาศได้ดังสมการที่ 3.9 (พชร ว่องไพศาลกิจ, 2562)

$$MER = \dot{m}_{a_3} (\omega_1 - \omega_3) \quad (3.9)$$

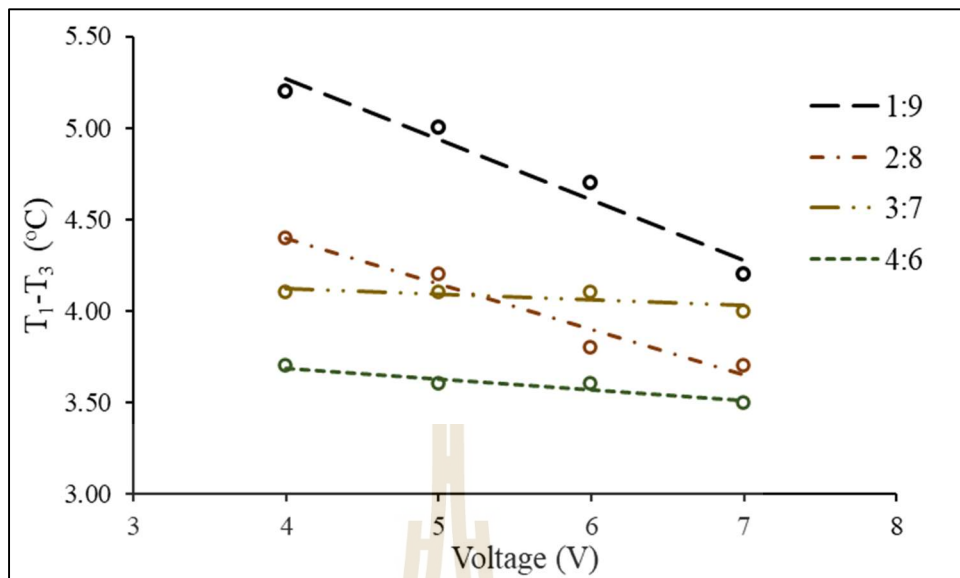
โดยที่ MER คือ ค่าอัตราการควบแน่น,  $\text{kg}_{\text{water}}/\text{h}$

$\dot{m}_{a_3}$  คือ อัตราการไหลโดยมวลของอากาศแห้งที่ไหลผ่านบริเวณหมายเลข 3,  $\text{kg}_{\text{dry air}}/\text{h}$

$\omega_1$  คือ ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 1,  $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$

$\omega_3$  คือ ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 3,  $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$

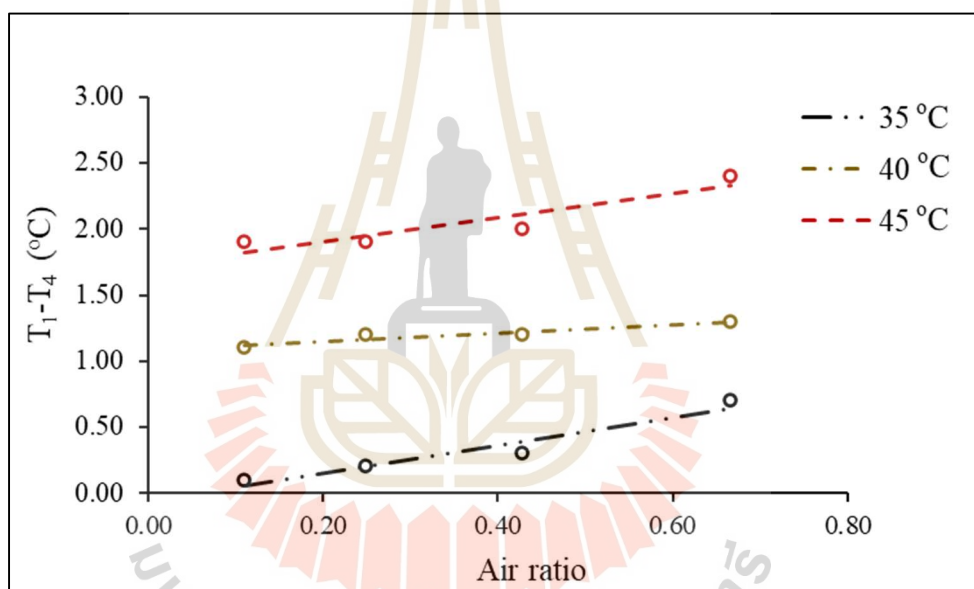
จากการทดลองเมื่อนำค่าอุณหภูมิของอากาศที่ผ่านบริเวณหมายเลข 1 ( $T_1$ ) ซึ่งก็คืออากาศขาเข้าชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกมาหาค่าผลต่างกับอุณหภูมิของอากาศที่ได้จากบริเวณหมายเลข 3 ( $T_3$ ) ซึ่งเป็นอุณหภูมิของอากาศที่ผ่านด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก เปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในแต่ละค่าสัดส่วนของอากาศผสม (Air ratio) เพื่อเปรียบเทียบหาสภาวะที่ได้ค่าการลดอุณหภูมิของอากาศหลังจากออกจากบริเวณที่ 3 มากที่สุดสำหรับนำไปใช้ในการลดความชื้นของอากาศอบแห้ง โดยจากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิทั้ง 3 ค่าได้กราฟที่มีแนวโน้มเดียวกัน ดังนั้นจึงได้แสดงผลกราฟไว้เพียงที่อุณหภูมิ 40°C ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การเปรียบเทียบผลการทำความเย็นของอากาศจากด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ในแต่ละสัดส่วนของอากาศผสม ที่อุณหภูมิทดสอบ 40°C

จากรูปที่ 3.13 พบว่าเมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นจะทำให้ได้ค่าการทำความเย็นของอากาศจากบริเวณที่ 3 ( $T_1-T_3$ ) ลดลงโดยได้กราฟความสัมพันธ์อยู่ในรูปกราฟเส้นตรง (Linear Graph) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก จะทำให้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมีอัตราการถ่ายเทความร้อนจากด้านเย็นไปสู่ด้านร้อนที่เพิ่มขึ้นดังสังเกตได้จากผลการทดลองรูปที่ 3.11 แต่ในขณะเดียวกันด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกกลับมีอัตราการระบายความร้อนน้อยกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มาจกด้านเย็น ส่งผลให้ความร้อนบางส่วนเกิดการนำความร้อนย้อนกลับมาที่ด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ส่งผลให้ความสามารถในการลดอุณหภูมิของอากาศด้านเย็นลดลงและเมื่อพิจารณาผลการทดลองในแต่ละค่าสัดส่วนของอากาศผสม (Air ratio) พบว่า เมื่อค่าสัดส่วนของอากาศผสมด้านเย็นเพิ่มขึ้นจะทำให้ได้ค่าการทำความเย็น ( $T_1-T_3$ ) ของอากาศจากบริเวณที่ 3 ลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มค่าสัดส่วนของอากาศผสมด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกจะทำให้อากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิสูงไหลเข้ามาเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกทำการถ่ายเทความร้อนไปยังฝั่งด้านร้อนได้ในอัตราการถ่ายเทความร้อนที่น้อยกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศที่เข้ามาส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมเช่นเดียวกัน โดยจากการทดลองพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าและค่าอัตราส่วนผสมอากาศที่ทำให้ได้ค่าการทำความเย็นของอากาศจากบริเวณที่ 3 ( $T_1-T_3$ ) มากที่สุดคือที่ 4 V และที่สัดส่วนของอากาศผสม 1:9 ตามลำดับ

เมื่อทำการนำค่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศขาเข้าชุดอุปกรณ์ป้อนความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก ( $T_1$ ) และค่าอุณหภูมิของอากาศผสมหลังออกจากชุดอุปกรณ์ป้อนความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก ( $T_4$ ) มาเปรียบเทียบกับค่าสัดส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ที่เปลี่ยนไปในแต่ละสภาวะอุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเดียวกัน โดยการทดลองดังกล่าวนี้มิได้เปิดใช้งานแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในด้านร้อนของบริเวณห้องที่ 1 แต่อย่างใด ทั้งนี้เพื่อที่จะศึกษาผลกระทบของการลดอุณหภูมิจากการลดความชื้นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกของอากาศในบริเวณที่ 3 ที่มีผลต่อการลดอุณหภูมิของอากาศหลังผสม ( $T_1-T_4$ ) โดยจากการทดลองพบว่าได้กราฟของทั้ง 4 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงได้แสดงผลกราฟไว้เพียงที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 4 V ไว้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ผลกระทบจากการลดอุณหภูมิของอากาศหลังจากการผสม ( $T_1-T_4$ ) ในแต่ละสัดส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ของแต่ละสภาวะอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง ณ แรงดันไฟฟ้า 4 V

จากรูปที่ 3.14 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่าสัดส่วนของอากาศผสม (Air ratio) พบว่าทำให้ได้ค่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและขาออกจากชุดอุปกรณ์ป้อนความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก ( $T_1-T_4$ ) ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่าทำให้ได้อุณหภูมิของอากาศหลังการผสม ( $T_4$ ) ที่จะนำไปทำการอบแห้งลดลง โดยได้กราฟความสัมพันธ์อยู่ในรูปกราฟเส้นตรง (Linear Graph) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนของอากาศจากบริเวณที่ 3 ซึ่งเป็นอากาศจากด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น ทำให้อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำไหลเข้ามาทำการผสมเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศหลังผสม ( $T_4$ ) ที่ได้มีค่าลดลงและในขณะเดียวกันเมื่ออุณหภูมิของอากาศขาเข้า

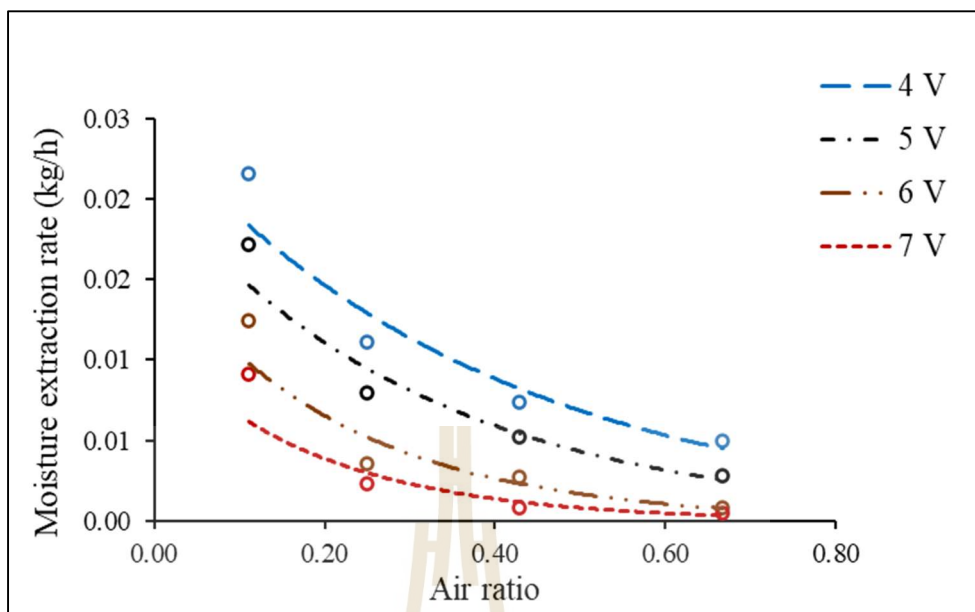


ชุดอุปกรณ์เพิ่มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก ( $T_1$ ) เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและขาออกจากชุดอุปกรณ์เพิ่มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก ( $T_1-T_4$ ) เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของอากาศขาเข้าชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น ( $T_1$ ) แต่ในขณะเดียวกันนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจากด้านเย็นไปยังด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อระบายออกสู่อากาศภายนอกในบริเวณหมายเลข 5 ยังคงเท่าเดิม ทำให้ความสามารถในการทำมาเย้นเพื่อลดความชื้นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกคงเดิม ในขณะที่อุณหภูมิของอากาศขาเข้าเพิ่มขึ้น จึงส่งผลทำให้ผลต่างผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและขาออกจากชุดอุปกรณ์เพิ่มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก ( $T_1-T_4$ ) เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่าสัดส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ที่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิของอากาศอบแห้งน้อยที่สุดคือที่ 1:9 ซึ่งจะยังคงทำให้ได้อากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิลดลงน้อยที่สุดหลังจากการผสม

เมื่อทำการคำนวณอัตราการควบแน่น (Moisture extraction rate) ของไอน้ำในการลดความชื้นของอากาศจากบริเวณที่ 3 ซึ่งเป็นด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ดังรูปที่ 3.15 จากนั้นนำค่าดังกล่าวที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์เพื่อเปรียบเทียบกับค่าสัดส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ที่เปลี่ยนไป ในแต่ละค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ณ สภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกัน พบว่าที่สภาวะอุณหภูมิทั้ง 3 สภาวะ ให้กราฟที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงได้แสดงผลกราฟเพียงที่อุณหภูมิ  $40^{\circ}\text{C}$  ไว้ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 การควบแน่นของไอน้ำในอากาศด้วยชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก



รูปที่ 3.16 อัตราการควบแน่นไอน้ำในอากาศเปรียบเทียบกับค่าสัดส่วนของอากาศผสมในแต่ละค่าแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะอุณหภูมิ 40°C

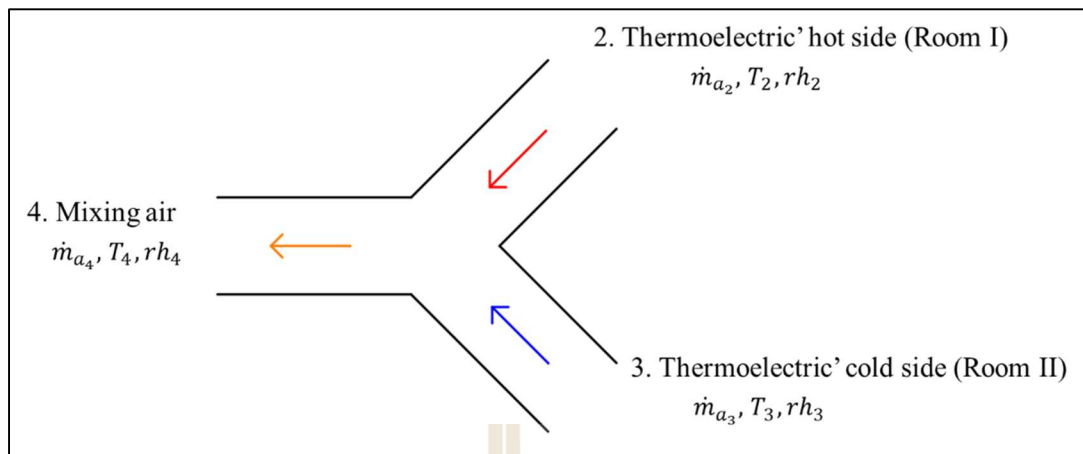
จากรูปที่ 3.16 พบว่า เมื่อค่าสัดส่วนของอากาศผสม (Air ratio) เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าอัตราการควบแน่นไอน้ำ (Moisture extraction rate) ของอากาศลดลง โดยได้กราฟความสัมพันธ์อยู่ในรูปกราฟเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เมื่อเพิ่มค่าสัดส่วนของอากาศผสมจะทำให้ค่าอัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านบริเวณที่ 3 เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวควบแน่นของครีปความร้อน (Heat sink) เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการถ่ายเทความร้อนจากอากาศเข้ามายังผิวของครีปความร้อนเพิ่มขึ้นเพราะอากาศมีอัตราการไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ของอากาศบริเวณที่ผิวครีปความร้อนลดลง นั่นคืออากาศอึดตัวน้อยลง จึงทำให้อัตราการควบแน่นไอน้ำของอากาศที่บริเวณผิวครีปความร้อนลดลง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่าสัดส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ที่ทำให้ได้ค่าอัตราการควบแน่นไอน้ำ (Moisture extraction rate) ของอากาศมากที่สุดคือที่ 1:9 นอกจากนี้ยังพบว่าที่ค่าสัดส่วนของอากาศผสม (Air ratio) เดียวกัน เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าอัตราการควบแน่นไอน้ำ (Moisture extraction rate) ของอากาศลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จะทำให้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมีอัตราการถ่ายเทความร้อนจากด้านเย็นไปสู่ด้านร้อนเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกกลับมีอัตราการระบายความร้อนน้อยกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มาจากด้านเย็น ส่งผลให้ความร้อนบางส่วนเกิดการนำความร้อนย้อนกลับภายในแผ่นมาที่ด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก จึงทำให้อุณหภูมิที่ผิวควบแน่นของครีปความร้อน

(Heat sink) เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าอัตราการควบแน่นไอน้ำลดลง โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้ได้อัตราการควบแน่นไอน้ำมากที่สุดคือที่ 4 V

จากการทดสอบการทำงานของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในการลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้ง (ห้องที่ 2) เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับจ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในด้านที่ทำหน้าที่ในการลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้ง (ห้องที่ 2) และทำการหาค่าสัดส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ของชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อที่จะสามารถทำความเข้าใจเพื่อลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้งได้ โดยจากผลการทดลองพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมคือที่ 4 V และค่าสัดส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ที่เหมาะสมคือที่ 1:9

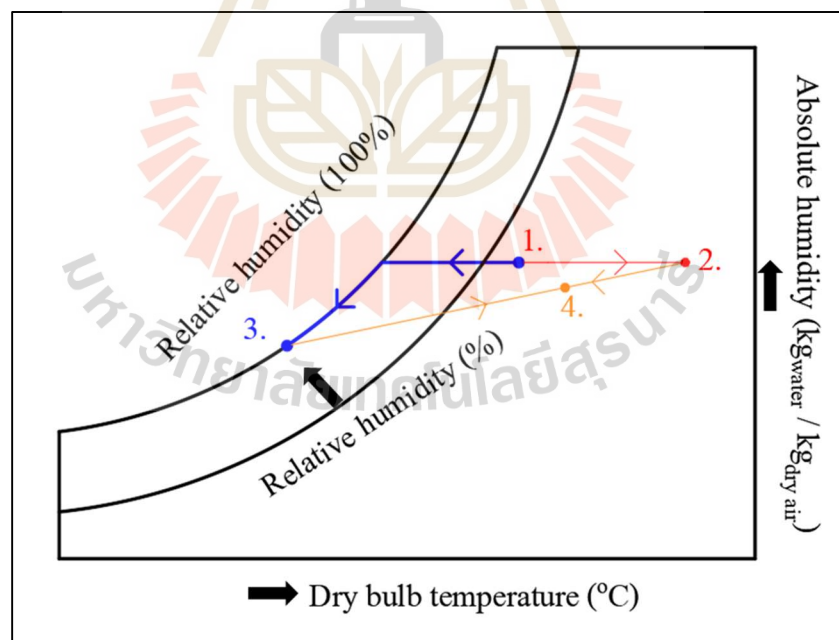
### 3.4.5 การคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับจ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้ง (ห้องที่ 1)

สำหรับขั้นตอนนี้จะเป็นการเลือกค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับจ่ายให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้งบริเวณหมายเลข 2 (ห้องที่ 1) เพื่อที่จะสามารถเพิ่มอุณหภูมิของอากาศแล้วไปผสมกับอากาศที่มาจากบริเวณหมายเลข 3 ซึ่งเป็นบริเวณลดความชื้นของอากาศอบแห้ง (ห้องที่ 2) ทำให้ได้ค่าอุณหภูมิของอากาศผสมสำหรับอบแห้งตามที่ต้องการ โดยสำหรับการอบแห้งในครั้งนี้เป็นการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยต้องการอุณหภูมิของอากาศอบแห้งเท่ากับ  $40^{\circ}\text{C}$  แต่เพื่อป้องกันความร้อนสูญเสียระหว่างการถ่ายเทจากชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกมายังห้องอบแห้ง (Drying chamber) จึงได้ประมาณค่าอุณหภูมิของอากาศผสมเพิ่มเป็น  $42^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมการข้าว โดยอุณหภูมิของอากาศอบแห้งต้องไม่เกิน  $43^{\circ}\text{C}$  (วิไล ปาละวิสุทธิ, 2549) โดยแผนภาพของการผสมอากาศเป็นดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การผสมอากาศสำหรับนำไปใช้อบแห้งจากปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก

จากรูปที่ 3.17 เป็นกระบวนการผสมอากาศ (Mixing) โดยเมื่อนำกระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมดในชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกในบริเวณหมายเลข 1 2 3 และ 4 ในรูปที่ 3.9 มาเขียนอธิบายด้วย Psychrometric chart จะได้เส้นทางของกระบวนการดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 เส้นสภาวะของอากาศในแต่ละกระบวนการของชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก

จากรูปที่ 3.18 ที่สภาวะเริ่มต้นอากาศขาเข้าชุดอุปกรณ์เพิ่มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกที่หมายเลข 1 ได้ถูกแยกไหลออกเป็น 2 ทาง คือไปยังด้านเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้ง (ห้องที่ 1) ซึ่งเป็นกระบวนการให้ความร้อน (Heating) จากหมายเลข 1 ไปยังหมายเลข 2 โดยกระบวนการดังกล่าวนี้ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ (Absolute humidity) จะคงที่ และทางที่ 2 คือไปยังด้านลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้ง (ห้องที่ 2) โดยเป็นกระบวนการลดอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ (Cooling and dehumidifying) จากหมายเลข 1 ไปยังหมายเลข 3 จากนั้นอากาศจากหมายเลข 2 และ 3 จะมาผสมกันได้เป็นอากาศที่สภาวะหมายเลข 4 ทำให้ได้อากาศผสมที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นและมีความชื้นลดลงเมื่อเทียบกับสภาวะเริ่มต้นที่หมายเลข 1 สำหรับนำไปใช้ในการอบแห้งต่อไป

สำหรับชุดอุปกรณ์เพิ่มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกในตอนนี้ได้ทราบแรงดันไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในด้านลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้ง (ห้องที่ 2) แล้วเท่ากับ 4 V และทราบสัดส่วนของอากาศผสม (Air ratio) แล้วเท่ากับ 1:9 แต่ยังไม่ทราบแรงดันไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกด้านเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้ง (ห้องที่ 1) เพื่อให้ได้อุณหภูมิของอากาศผสมเท่ากับ 42°C ดังนั้นจึงได้ใช้วิธีการคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนที่ต้องใช้ในกระบวนการให้ความร้อน ( $\dot{Q}_H$ ) ในเส้นกระบวนการหมายเลข 1 ไป 2 เพื่อนำไปใช้ประกอบการเลือกแรงดันไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกจากข้อมูลผลการทดลองข้อ 3.4.3 โดยเมื่อทำการวิเคราะห์สมดุลมวล (Mass balance) ของอากาศแห้ง (Dry air) ในรูปที่ 3.17 จะได้ดังสมการที่ 3.10

$$\dot{m}_{a_2} + \dot{m}_{a_3} = \dot{m}_{a_4} \quad (3.10)$$

โดยที่  $\dot{m}_{a_4}$  คือ อัตราการไหลโดยมวลของอากาศแห้งที่ไหลผ่านบริเวณหมายเลข 4,  $\text{kg}_{\text{dry air}}/\text{s}$

เมื่อทำการวิเคราะห์สมดุลมวลของไอน้ำ (Water vapor) ของอากาศผสมได้ดังสมการที่ 3.11

$$\dot{m}_{a_2} \omega_2 + \dot{m}_{a_3} \omega_3 = \dot{m}_{a_4} \omega_4 \quad (3.11)$$

โดยที่  $\omega_2$  คือ ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 2,  $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$

$\omega_4$  คือ ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 4,  $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$

เมื่อทำการวิเคราะห์สมดุลพลังงาน (Energy balance) ของอากาศผสมจะได้ดังสมการที่ 3.12

$$\dot{m}_{a_2} h_2 + \dot{m}_{a_3} h_3 = \dot{m}_{a_4} h_4 \quad (3.12)$$

โดยที่  $h_4$  คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะ (Enthalpy) ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 4, kJ/kg<sub>dry air</sub>

ทำการจัดรูปใหม่เพื่อหาค่าเอนทัลปีจำเพาะของอากาศจากบริเวณหมายเลข 2 (Enthalpy,  $h_2$ ) สำหรับนำไปใช้ในการหาค่า  $\dot{Q}_H$  ได้ดังสมการที่ 3.13

$$h_2 = \frac{(\dot{m}_{a_2} + \dot{m}_{a_3}) h_4 - \dot{m}_{a_3} h_3}{\dot{m}_{a_2}} \quad (3.13)$$

จากสมการที่ 3.13 พบว่าทราบค่า  $\dot{m}_{a_2}$  เท่ากับ 0.0278 kg<sub>dry air</sub>/s  $\dot{m}_{a_3}$  เท่ากับ 0.0032 kg<sub>dry air</sub> /s และ  $h_3$  เท่ากับ 79.58 kJ/kg<sub>dry air</sub> (จากการทดลองที่ 3.4.4 โดยสถานะอุณหภูมิของอากาศทางเข้าอุปกรณ์เท่ากับ 40°C ที่สัดส่วนของอากาศผสมเท่ากับ 1:9 และภายใต้การจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกเท่ากับ 4 V) แต่ยังไม่ทราบค่าเอนทัลปีจำเพาะของอากาศหลังการผสม (Enthalpy,  $h_4$ ) ที่อุณหภูมิ 42°C ดังนั้นจึงต้องทำการคำนวณผ่านสมการที่ 3.14 (ASHRAE, 2001)

$$h_4 = 1.006T_4 + \omega_4 (2501 + 1.805T_4) \quad (3.14)$$

โดยที่  $T_4$  คือ อุณหภูมิของอากาศหลังการผสมที่บริเวณหมายเลข 4, °C

จากสมการที่ 3.14 พบว่าต้องหาค่าความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศผสม (Absolute humidity,  $\omega_4$ ) ซึ่งสามารถหาได้ผ่านการจัดรูปสมการที่ 3.11 ได้ดังสมการที่ 3.15

$$\omega_4 = \frac{\dot{m}_{a_2} \omega_2 + \dot{m}_{a_3} \omega_3}{\dot{m}_{a_2} + \dot{m}_{a_3}} \quad (3.15)$$

โดยจากกระบวนการให้ความร้อน (Heating) จากหมายเลข 1 ไปหมายเลข 2 จะได้

$$\omega_1 = \omega_2 \quad (3.16)$$

แทนสมการที่ 3.16 ในสมการที่ 3.15 จะได้ตั้งสมการที่ 3.17

$$\omega_4 = \frac{\dot{m}_{a_2} \omega_1 + \dot{m}_{a_3} \omega_3}{\dot{m}_{a_2} + \dot{m}_{a_3}} \quad (3.17)$$

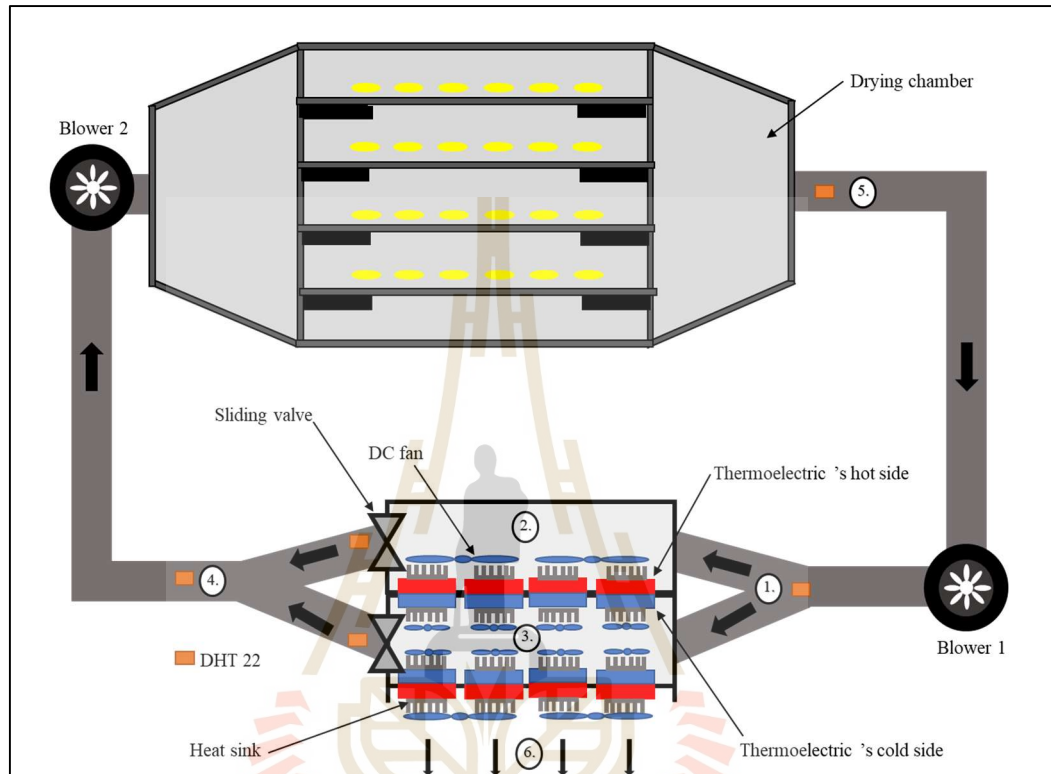
จากนั้นทำการคำนวณค่า  $\omega_4$  จากสมการที่ 3.17 โดยมีค่า  $\omega_1$  เท่ากับ 0.0194 kg<sub>water</sub>/kg<sub>dry air</sub> และค่า  $\omega_3$  เท่ากับ 0.0175 kg<sub>water</sub>/kg<sub>dry air</sub> (จากสภาวะการทดลองเดียวกันกับค่า  $h_3$ ) จะได้ค่า  $\omega_4$  เท่ากับ 0.0191 kg<sub>water</sub>/kg<sub>dry air</sub> จากนั้นจึงนำค่า  $\omega_4$  ที่ได้ไปคำนวณหาค่า  $h_4$  ในสมการที่ 3.14 ได้ค่า  $h_4$  เท่ากับ 91.63 kJ/kg<sub>dry air</sub> นำค่า  $h_4$  ที่ได้มาคำนวณหาค่าเอนทัลปีจำเพาะของอากาศหลังผ่านกระบวนการให้ความร้อน ( $h_2$ ) ในสมการที่ 3.13 โดยได้ค่า  $h_2$  เท่ากับ 93.01 kJ/kg<sub>dry air จากนั้นทำการคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่อากาศได้รับ ( $\dot{Q}_H$ ) ในกระบวนการให้ความร้อน (Heating) จากเส้นกระบวนการหมายเลข 1 ไปยังหมายเลข 2 ตามสมการที่ 3.8 โดยมีค่า  $h_1$  เท่ากับ 89.84 kJ/kg<sub>dry air</sub> (จากสภาวะการทดลองเดียวกันกับค่า  $h_3$ ) จะได้ค่า  $\dot{Q}_H$  เท่ากับ 0.08813 kW</sub>

นำค่า  $\dot{Q}_H$  ที่ได้ไปใช้ในการเลือกแรงดันไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกจากผลการทดลองของการทดลองที่ 3.4.3 โดยจากผลการทดลองพบว่า ณ สภาวะอุณหภูมิของอากาศทางเข้าอุปกรณ์เท่ากับ 40°C ที่สัดส่วนของอากาศผสมเท่ากับ 1:9 และภายใต้การจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเท่ากับ 8 V และ 9 V ชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถให้พลังงานความร้อนแก่อากาศอบแห้ง ( $\dot{Q}_H$ ) ได้เท่ากับ 0.08583 kW และ 0.1339 kW ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกแรงดันไฟฟ้าสำหรับจ่ายให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้งบริเวณหมายเลข 2 (ห้องที่ 1) เท่ากับ 9 V

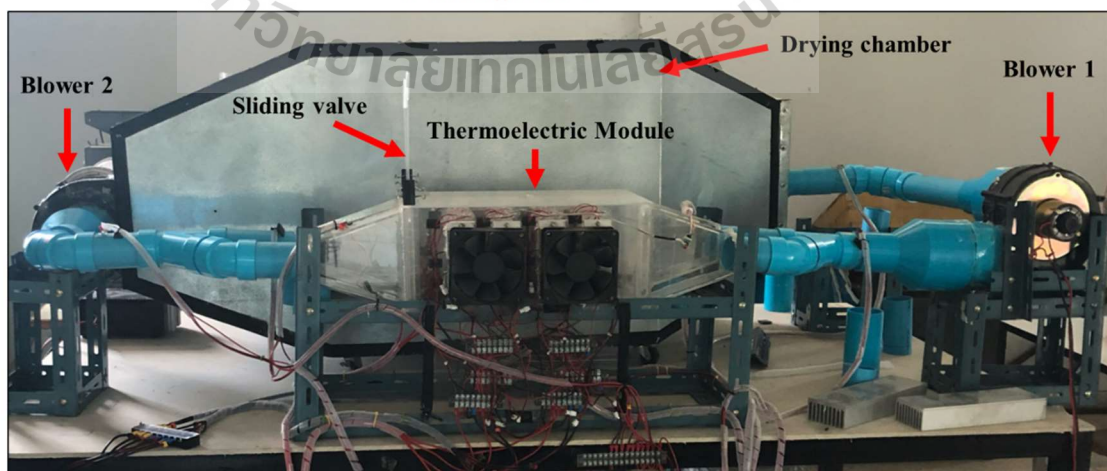
ดังนั้นจากการทดลองเพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้กับชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกและหาสัดส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ของเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกพบว่า ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับจ่ายให้กับชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกด้านที่เพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้ง (ห้องที่ 1) เท่ากับ 9 V ค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับจ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในด้านที่ทำหน้าที่ในการลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้ง (ห้องที่ 2) เท่ากับ 4 V และค่าสัดส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ระหว่างห้องที่ 2 และห้องที่ 1 เท่ากับ 1:9

### 3.4.6 การติดตั้งอุปกรณ์เครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก

สำหรับการติดตั้งเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีการติดตั้งอุปกรณ์ไว้ดังรูปที่ 3.19 และ 3.20



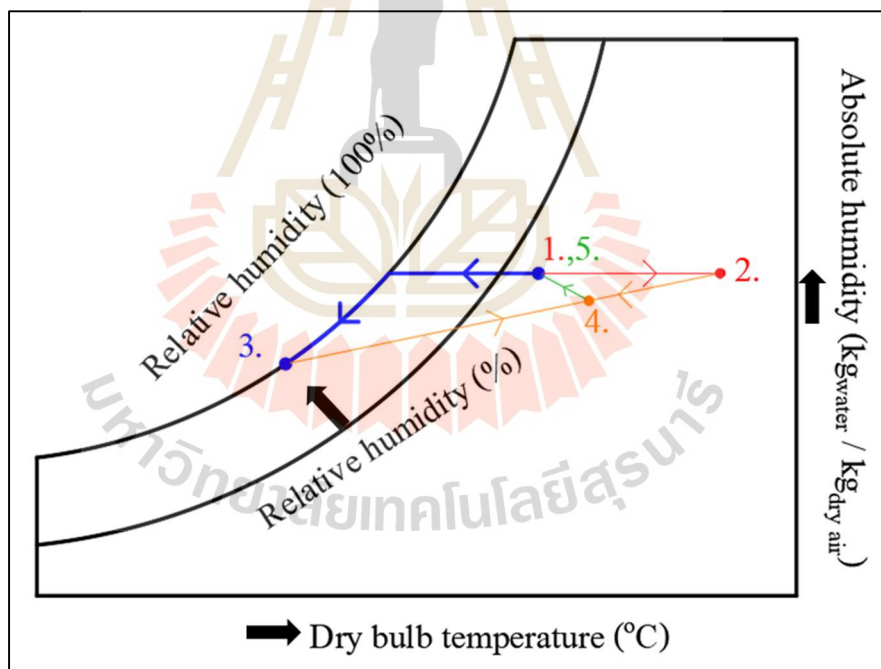
รูปที่ 3.19 การติดตั้งอุปกรณ์เครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก



รูปที่ 3.20 การติดตั้งอุปกรณ์เครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก (ภาพจริง)



จากรูปที่ 3.19 อากาศจากพัดลมไฟฟ้าตัวที่ 1 (Blower 1) ที่บริเวณหมายเลข 1 จะแยกไหลเป็น 2 ทิศทางคือไหลไปยังฝั่งด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่บริเวณหมายเลข 2 สำหรับการอุ่นอากาศอบแห้ง และฝั่งด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่บริเวณหมายเลข 3 สำหรับการลดความชื้นของอากาศอบแห้ง หลังจากนั้นอากาศจากบริเวณหมายเลข 2 และ 3 จะเข้ามาผสมกันที่บริเวณหมายเลข 4 โดยอัตราการไหลของอากาศจากบริเวณทั้ง 2 ถูกปรับผ่านบานเลื่อนปรับอัตราการไหล (Sliding valve) ในสัดส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ระหว่างบริเวณหมายเลข 3 และ 2 เท่ากับ 1:9 ทำให้อากาศบริเวณหมายเลข 3 และ 2 มีอัตราการไหลเท่ากับ  $0.0032 \text{ kg}_{\text{dry air}} / \text{s}$  และ  $0.0278 \text{ kg}_{\text{dry air}} / \text{s}$  ตามลำดับ เพื่อให้ได้อากาศผสมที่มีอุณหภูมิ  $42^{\circ}\text{C}$  ก่อนถูกดูดโดยพัดลมไฟฟ้าตัวที่ 2 (Blower 2) เข้าสู่ห้องอบแห้ง (Drying chamber) เพื่อทำการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวต่อไป หลังจากนั้นอากาศหลังจากการอบแห้งที่หมายเลข 5 จะถูกเวียนกลับมาใช้ใหม่และทำวนไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ค่าความชื้นของเมล็ดพันธุ์ที่ต้องการ โดยสำหรับเส้นกระบวนการของอากาศที่ไหลผ่านในแต่ละตำแหน่งสามารถอธิบายผ่าน Psychrometric chart ได้ดังรูปที่ 3.21



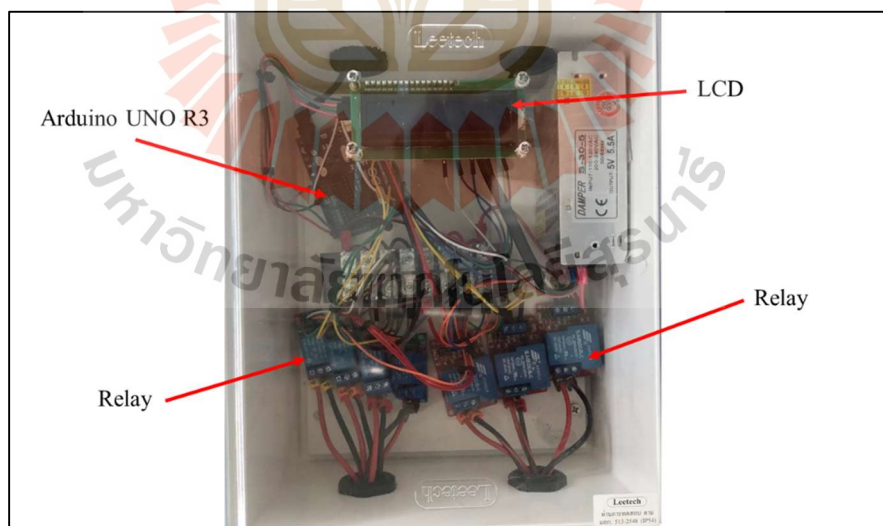
รูปที่ 3.21 สภาวะอากาศในแต่ละบริเวณของเครื่องอบแห้ง

จากรูปที่ 3.21 ที่สภาวะเริ่มต้นอากาศจะไหลเข้าสู่ชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกที่บริเวณหมายเลข 1 ได้ถูกแยกไหลออกเป็น 2 ทาง คือไปยังบริเวณหมายเลข 2 เพื่อรับความร้อนทำให้อุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งเรียกว่ากระบวนการให้ความร้อน (Heating)

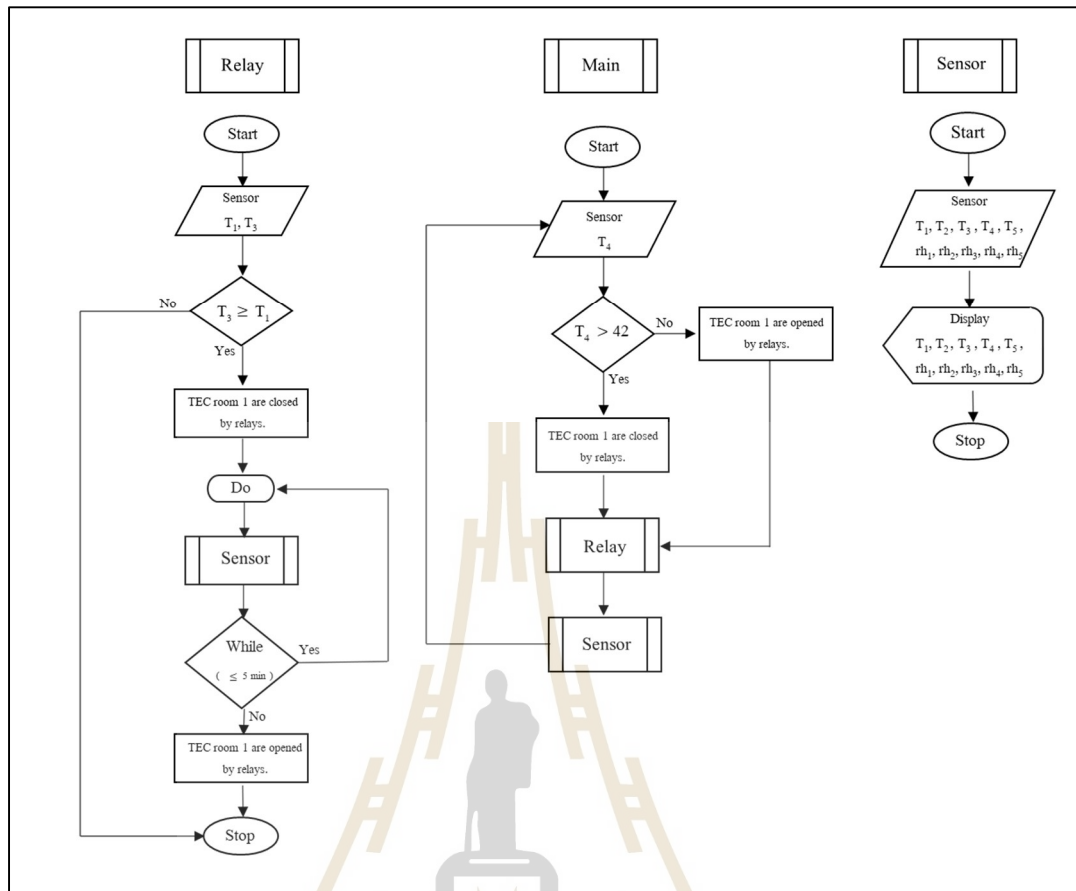
แบบค่าความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute humidity) คงที่ และไปยังบริเวณหมายเลข 3 เพื่อลดอุณหภูมิของอากาศจนถึงอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature) ทำให้ไอน้ำในอากาศเกิดการกลั่นตัวออกมาเป็นหยดน้ำ ส่งผลให้อากาศที่ไหลผ่านบริเวณดังกล่าวมีความชื้นสัมบูรณ์ลดลง โดยเรียกกระบวนการนี้ว่าการลดอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ (Cooling and dehumidifying) จากนั้นอากาศจากบริเวณหมายเลข 2 และ 3 จะมาผสมกันได้เป็นอากาศผสมที่บริเวณหมายเลข 4 ผ่านกระบวนการผสมอากาศ (Mixing) จากนั้นอากาศผสมจะถูกนำไปใช้ในการอบแห้งเมล็ดพันธุ์และออกจากห้องอบแห้งเป็นอากาศที่บริเวณที่ 5 ซึ่งกระบวนการจากบริเวณหมายเลข 4 ไป 5 นี้เป็นกระบวนการเพิ่มความชื้นของอากาศแบบความร้อนคงที่ (Adiabatic humidification) โดยอากาศจะมีอุณหภูมิลดลง แต่มีค่าเอนทัลปีจำเพาะ (Enthalpy) คงที่ โดยกระบวนการนี้จะดำเนินไปตามเส้นกระเปาะเปียกคงที่ โดยกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นในช่วงการอบแห้งคงที่ (Constant rate period)

### 3.4.7 ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องอบแห้งป้อนความร้อนโมเอเล็กทรอนิกส์

สำหรับระบบควบคุมการทำงานของเครื่องอบแห้งดังกล่าวนี้ ได้ทำการควบคุมผ่านการเขียนโปรแกรมลงในบอร์ด Arduino UNO R3 โดยใช้เซนเซอร์วัดความอุณหภูมิและความชื้น DHT 22 เป็นอุปกรณ์รับข้อมูล ใช้รีเลย์ยี่ห้อ SONGLE สำหรับใช้ควบคุมการทำงานของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก และใช้จอ LCD สำหรับแสดงผลค่าอุณหภูมิและความชื้นที่วัดได้จากเซนเซอร์ โดยได้ทำการติดตั้งไว้ในตู้ไฟฟ้าดังรูปที่ 3.22 และมีผังงาน (Flow chart) ของระบบควบคุมดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.22 การติดตั้งอุปกรณ์ภายในตู้ไฟฟ้าสำหรับระบบควบคุม



รูปที่ 3.23 ผังงาน (Flow chart) ของระบบควบคุม

จากรูปที่ 3.23 จะเห็นว่าระบบควบคุมการทำงานของเครื่องอบแห้งประกอบด้วย ผังงาน (Flow chart) ทั้งหมด 3 ส่วนด้วยกัน โดยผังตรงกลางจะเป็นผังงานหลัก (Main) ที่มีการควบคุมอุณหภูมิของอากาศอบแห้งและมีการเรียกใช้งานฟังก์ชันจากผังงานย่อย 2 ผัง ด้วยกันคือ ผังด้านซ้ายเป็นฟังก์ชันการเรียกใช้งานรีเลย์ (Relay) สำหรับป้องกันปรากฏการณ์ Self-heating และด้านขวาเป็นฟังก์ชันการเรียกใช้งานเซนเซอร์ DHT 22 (Sensor) แสดงผลค่าอุณหภูมิและความชื้นของอากาศอบแห้ง โดยเริ่มต้นเมื่อระบบควบคุมทำงานจะมีการเปิดรับค่าอุณหภูมิของอากาศผสมจากเซนเซอร์ในบริเวณที่ 4 ของรูปที่ 3.19 สำหรับทำการตรวจสอบอุณหภูมิของอากาศอบแห้งว่ามากกว่า 42°C หรือไม่ (เป็นจริง) ถ้าไม่เป็นจริงบอร์ดจะทำการสั่งให้รีเลย์เปิดการทำงานของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในบริเวณห้องที่ 1 สำหรับเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้ง แต่ถ้าเป็นจริงบอร์ดจะสั่งให้รีเลย์ทำการปิดการทำงานของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกห้องที่ 1 แทน จากนั้นบอร์ดจะทำการเรียกใช้ฟังก์ชันรีเลย์สำหรับทำการตรวจสอบว่าเกิดปรากฏการณ์ Self-heating หรือไม่ (เป็นจริง) โดยสำหรับฟังก์ชันรีเลย์นั้นเริ่มแรกเซนเซอร์จะทำการวัดค่าอุณหภูมิของอากาศจากบริเวณที่ 1 และ

3 ของชุดอุปกรณ์เพิ่มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกโดยจะทำการตรวจสอบว่าอุณหภูมิจากบริเวณที่ 3 ซึ่งเป็นบริเวณทำความเย็นเพื่อลดความชื้นของอากาศว่ามากกว่าหรือเท่ากับบริเวณที่ 1 ซึ่งเป็นบริเวณอากาศทางเข้าอุปกรณ์หรือไม่ (เป็นจริง) ถ้าเป็นจริงแสดงว่าเกิดปรากฏการณ์ Self-heating บอร์ด จะทำการสั่งให้รีเลย์ปิดการทำงานของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในบริเวณห้องที่ 1 หลังจากนั้นระบบควบคุมจะเข้าสู่ Do While Loop สำหรับการเรียกใช้งานฟังก์ชันเซนเซอร์สำหรับวัดและแสดงผลค่าอุณหภูมิและความชื้นของอากาศทั้ง 5 บริเวณในรูปแบบที่ 3.19 วนไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งครบ 5 นาที ที่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถกลับมาทำงานได้อีกครั้ง บอร์ดจึงทำการสั่งให้เปิดการทำงานของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในบริเวณห้องที่ 1 และจบการทำงานสำหรับฟังก์ชันนี้ ถัดจากนั้นบอร์ด จะทำการเรียกใช้งานฟังก์ชันเซนเซอร์สำหรับวัดและแสดงผลค่าอุณหภูมิและความชื้นของอากาศทั้ง 5 บริเวณ และเมื่อจบฟังก์ชันเซนเซอร์แล้วระบบจะวนกลับมายังขั้นตอนตรวจสอบอุณหภูมิของอากาศอบแห้งอีกครั้งและวนเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ

### 3.5 การทดสอบเครื่องอบแห้งด้วยการอบแห้งเมล็ดพันธุ์

สำหรับขั้นตอนนี้เป็นกรนำเอาเครื่องอบแห้งที่ได้สร้างขึ้นรวมถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองก่อนหน้าในหัวข้อที่ 3.4 มาใช้ในการเดินเครื่องอบแห้ง สำหรับการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ตลอดจนการเตรียมเมล็ดพันธุ์ข้าวก่อนการอบแห้ง และวิธีการสำหรับการประเมินหาจุดยุติการอบแห้งเมื่อถึงค่าความชื้นที่ต้องการแล้วอีกด้วย โดยมีขั้นตอนดังนี้

#### 3.5.1 การเตรียมตัวอย่างเมล็ดพันธุ์ข้าวก่อนการอบแห้ง

ทำการเตรียมตัวอย่างเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยเมล็ดพันธุ์ที่ใช้เป็นข้าวใหม่ซึ่งถูกเก็บเกี่ยว ณ อำเภอประโคนชัย จังหวัดบุรีรัมย์ ในวันที่ 24 พฤศจิกายน พุทธศักราช 2564 โดยมีค่าความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ 21%wb หลังจากนั้นได้นำเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ได้มาทำความสะอาดด้วยเครื่องคัดแยกรุ่น LSA-LS-020896 จากบริษัท Westrup เพื่อคัดแยกน้ำเศษไม้ วัชพืช แมลง เมล็ดไร่น้ำหนัก และเมล็ดข้าวลีบ ฯลฯ ออกไปจากเมล็ดพันธุ์ ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 เครื่องคัดแยกเมล็ดพันธุ์

นำเมล็ดพันธุ์ข้าวหลังจากการคัดแยกมาบรรจุในหีบอบแห้งปริมาณ 6 kg โดยแบ่งเป็น 4 ชั้นด้วยกัน ชั้นละ 1.5 kg ใส่ไว้ในถุงตาข่ายไนลอนและวางบนตะแกรงดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 การบรรจุเมล็ดพันธุ์ข้าวภายในหีบอบแห้ง

### 3.5.2 การอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าว

สำหรับสภาวะของอากาศอบแห้ง ได้ควบคุมผ่านปรับค่าอุปกรณ์ต่างๆ ตามผลที่ได้จากการทดลองชุดอุปกรณ์การทดลองเทอร์โมอิเล็กทริกในข้อ 3.4 ไว้ดังต่อไปนี้

1. แรงดันไฟฟ้าสำหรับจ่ายให้กับชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก ด้านเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้ง (ห้องที่ 1) เท่ากับ 9 V

2. แรงดันไฟฟ้าสำหรับจ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในด้านลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้ง (ห้องที่ 2) เท่ากับ 4 V

3. สัดส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ระหว่างห้องที่ 2 และห้องที่ 1 เท่ากับ 1:9

4. ปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ Blower แต่ละตัวเพื่อให้ได้อัตราการไหลของอากาศจากห้องที่ 1 และ 2 เท่ากับ  $0.0278 \text{ kg}_{\text{dry air}}/\text{s}$  และ  $0.0032 \text{ kg}_{\text{dry air}}/\text{s}$  ตามลำดับ โดยใช้ Hot wire anemometer วัดอัตราเร็วอากาศผสมบริเวณทางออกของที่บริเวณหมายเลข 4 ของชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก

5. ตั้งอุณหภูมิของอากาศอบแห้งไว้ที่  $42^{\circ}\text{C}$  ควบคุมผ่านบอร์ด Arduino UNO R3 โดยการทดสอบเครื่องอบแห้งได้ทำการเก็บข้อมูลไว้ดังนี้

1. เก็บตัวอย่างข้าวทั้ง 4 ชั้น ชั้นละ 20 g ทุก 30 นาที ระหว่างการอบแห้ง

2. เก็บค่าอุณหภูมิและความชื้นผ่านเซนเซอร์ DHT 22 ทั้ง 5 บริเวณในรูปที่ 3.19 ทุก 30 นาที

3. เก็บค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง โดยใช้ Digital Power meter และ Power supply ทั้งหมด

### 3.5.3 การประเมินความชื้นของเมล็ดพันธุ์เพื่อประมาณหาจุดยุติในการอบแห้ง

สำหรับกระบวนการอบแห้งดังกล่าวนี้จะทำการอบแห้งจนกระทั่งเมล็ดพันธุ์มีค่าความชื้นสุดท้ายเท่ากับ  $14\% \text{wb}$  ตามมาตรฐานการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวของกรมการข้าว (วิไล ปาละวิสุทธิ์, 2549) โดยใช้วิธีการประเมินค่าความชื้นของข้าวในห้องอบแห้งทางอ้อมผ่านการคำนวณความชื้นที่ลดลงในถุงข้าวตัวอย่าง โดยเริ่มต้นทำการสุ่มข้าวตัวอย่างที่จะทำการอบแห้งที่ทราบค่าความชื้นเริ่มต้น ( $M_{w_i}$ ) แล้วมาบรรจุไว้ในถุงไนลอนพร้อมทำการชั่งหามวลรวมของข้าว ( $W_1$ ) ด้วยเครื่องชั่งสองตำแหน่งรุ่น BSA3202S-CW จากบริษัท sartorius (ความละเอียด 0.01 g) ดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 การชั่งน้ำหนักข้าวในถุงตัวอย่าง

จากนั้นทำการคำนวณหามวลแห้งของเมล็ดพันธุ์ข้าวในถุงตัวอย่างตามสมการความชื้นมาตรฐานเปียกตามสมการที่ 3.18

$$M_w = \frac{W - W_d}{W} \quad (3.18)$$

โดยที่  $M_w$  คือ ค่าความชื้นมาตรฐานเปียกของวัสดุ

$W$  คือ มวลรวมของวัสดุ, kg

$W_d$  คือ มวลแห้งของวัสดุ, kg

จัดรูปเพื่อหามวลแห้งของเมล็ดพันธุ์ข้าวได้ดังสมการที่ 3.19

$$W_d = W - M_w W \quad (3.19)$$

โดยมวลแห้งของเมล็ดพันธุ์จะมีค่าคงที่ตลอดการอบแห้ง แต่สิ่งที่เปลี่ยนไปคือ มวลน้ำที่ลดลงเนื่องจากการอบแห้ง ซึ่งส่งผลให้มวลรวมของวัสดุ ( $W$ ) ลดลง โดยสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นเริ่มต้น ( $M_{w_1}$ ) และค่าความชื้นสุดท้าย ( $M_{w_2}$ ) ที่ต้องการหลังจากอบแห้งผ่านความสัมพันธ์ของมวลแห้งที่เท่ากัน ( $W_{d_1} = W_{d_2}$ ) ได้ดังสมการที่ 3.20

$$W_1 - M_{w_1} W_1 = W_2 - M_{w_2} W_2 \quad (3.20)$$

ทำการจัดรูปเพื่อหาค่ามวลรวมของวัสดุที่ค่าความชื้นสุดท้าย ( $W_2$ ) ได้ดังสมการที่

3.21

$$W_2 = \frac{W_1 - M_{w_1} W_1}{1 - M_{w_2}} \quad (3.21)$$

จะเห็นว่า เมื่อทราบค่าความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างข้าวที่ต้องการอบแห้ง ( $M_{w_1}$ ) ค่ามวลเริ่มต้นของตัวอย่างข้าวที่สุ่มมาบรรจุในถุงตัวอย่าง ( $W_1$ ) และค่าความชื้นสุดท้ายที่ต้องการหลังจากการอบแห้ง ( $M_{w_2}$ ) จะทำให้สามารถคำนวณมวลรวมของข้าวที่ค่าความชื้นสุดท้ายในถุงตัวอย่าง ( $W_2$ ) ได้โดยในช่วงเริ่มต้นการอบแห้ง ข้าวที่บรรจุในถุงตัวอย่างจะถูกนำไปไว้ในห้องอบแห้งร่วมกับข้าวที่ต้องการอบแห้ง โดยจะถูกวางไว้บริเวณชั้นที่ 2 จากด้านล่างที่ตำแหน่งชิดประตูห้องอบแห้งและอยู่บริเวณส่วนที่ถูกอากาศอบแห้งในส่วนท้ายของห้องอบแห้ง ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับลมร้อนน้อยกว่าบริเวณอื่น ๆ ในห้องอบแห้งดังรูปที่ 3.27 และ 3.28



รูปที่ 3.27 การวางถุงตัวอย่างข้าวในห้องอบแห้ง



รูปที่ 3.28 การวางถุงตัวอย่างข้าวในห้องอบแห้ง (ภาพจริง)



จากนั้นข้าวในถุงตัวอย่างจะถูกชั่งน้ำหนักทุก 30 นาที ตลอดการอบแห้ง เพื่อตรวจสอบว่ามวลรวมของข้าวในถุงตัวอย่างลดลงจนมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าค่ามวลรวมของข้าวในถุงตัวอย่างที่ค่าความชื้นสุดท้าย ( $W_2$ ) ตามที่คำนวณไว้แล้วหรือไม่ ถ้าถึงแล้วจึงจะสามารถทำการยุติการอบแห้งได้

### 3.6 การลดความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยการผึ่งในที่ร่ม

สำหรับขั้นตอนนี้เป็นการลดความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยวิธีการทางธรรมชาติที่นิยมใช้กันทั่วไป เพื่อมาเปรียบเทียบกับวิธีการของงานวิจัยนี้ในเรื่องของคุณภาพผลิตภัณฑ์ภายหลังจากการลดความชื้น โดยได้นำเมล็ดพันธุ์ข้าวชุดเดียวกันกับที่ทำการอบแห้งปริมาณ 1 kg มาบรรจุในถุงไนลอน แล้วผึ่งไว้ในที่ร่มบริเวณห้องปฏิบัติการจักรกลเกษตร อาคารจักรกลเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างข้าวทุกวันด้วยเครื่องชั่งสองตำแหน่ง รุ่น BSA3202S-CW จากบริษัท sartorius (ความละเอียด 0.01 g) โดยจะชั่งจนกว่าน้ำหนักข้าวในถุงตัวอย่างจะประมาณคงที่ (เปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 0.5 g) โดยใช้เวลารวมทั้งสิ้น 12 วัน จากนั้นจึงนำตัวอย่างข้าวมาทำการหาค่าความชื้นสุดท้ายต่อไป



รูปที่ 3.29 การผึ่งเมล็ดพันธุ์ข้าวในที่ร่ม

### 3.7 การหาค่าความชื้นของตัวอย่างเมล็ดพันธุ์ข้าว

สำหรับค่าความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าวหลังจากการอบแห้งในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาอยู่ในรูปค่าความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis) เนื่องจากเป็นค่าความชื้นที่ทางกรมการข้าวนิยมใช้ในการพิจารณาคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ข้าว และยังเป็นที่ยอมรับใช้ในทางการค้า สำหรับค่าความชื้นมาตรฐานเปียกนี้ได้ถูกคำนวณตามสมการที่ 3.18 โดยมวลแห้งของวัสดุ ( $W_d$ ) หาได้โดยนำเมล็ดพันธุ์ข้าวภายหลังจากการอบแห้งที่ถูกสุ่มออกมาระหว่างการอบแห้ง ตัวอย่างละประมาณ

20 g มาใส่ในถ้วยอะลูมิเนียม จากนั้นนำไปอบในตู้อบลมร้อน Universal Oven เพื่อกำจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (AOAC, 1990) ดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 การอบแห้งเมล็ดพันธุ์ด้วยตู้อบลมร้อน

จากนั้นนำเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ถูกอบไล่ความชื้นจนแห้งแล้วมาชั่งด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลรุ่น ATX224R จากบริษัท SHIMADZU (ความละเอียด 0.0001 g) เพื่อหามวลแห้งของเมล็ดพันธุ์ข้าว สำหรับหาค่าความชื้นมาตรฐานเป็ยกต่อไป

### 3.8 การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งต้นแบบ

การอบแห้งนั้นเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานอย่างสิ้นเปลืองเพื่อลดความชื้นในวัสดุ ดังนั้นสมรรถนะในการอบแห้งจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อการวิเคราะห์และพัฒนาเครื่องอบแห้ง สำหรับการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวต้นแบบนี้ได้ประเมินจากข้อมูลที่ได้จากการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในช่วงเวลาของการอบแห้ง โดยพิจารณา 2 ส่วนหลักๆ ดังนี้

#### 3.8.1 สมรรถนะทางพลังงานของปั๊มความร้อน

โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of performance, COP) โดยสำหรับพลังงานความร้อนต้องการ ( $\dot{Q}_{in}$ ) ของเครื่องอบแห้งนี้ จะพิจารณาจากผลรวมของพลังงานความร้อนจากกระบวนการให้ความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้ง ( $\dot{Q}_H$ ) และพลังงานความร้อนที่ถูกดึงออกเพื่อทำความเย็นลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้ง ( $\dot{Q}_L$ ) ดังสมการที่ 3.22 (เพชร ว่องไพศาลกิจ, 2562)

$$\text{COP} = \frac{\text{Useful heat output}}{\text{Power input}} = \frac{\dot{Q}_{\text{in}}}{\dot{W}_{\text{in}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{H}} + \dot{Q}_{\text{L}}}{\dot{W}_{\text{in}}} \quad (3.22)$$

- โดยที่ COP คือ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ
- $\dot{Q}_{\text{in}}$  คือ ค่าความร้อนที่ทำได้, kW
- $\dot{Q}_{\text{H}}$  คือ พลังงานความร้อนจากกระบวนการให้ความร้อน, kW
- $\dot{Q}_{\text{L}}$  คือ พลังงานความร้อนที่ถูกดึงออกเพื่อทำความเย็นลดความชื้นอากาศอบแห้ง, kW
- $\dot{W}_{\text{in}}$  คือ ค่าพลังงานที่ใช้, kW

จากสมการที่ 3.22 จะพบว่าค่า  $\dot{Q}_{\text{H}}$  เป็นค่าพลังงานความร้อนจากกระบวนการให้ความร้อน (Heating) โดยสามารถคำนวณจากสมการที่ 3.8 และ  $\dot{Q}_{\text{L}}$  เป็นค่าพลังงานความร้อนที่ถูกดึงออกจากอากาศในกระบวนการลดอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ (Cooling and dehumidifying) ดังรูปที่ 3.12 โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.23

$$\dot{Q}_{\text{L}} = \dot{m}_{\text{a}_3} (h_1 - h_3) + \dot{m}_{\text{w}} h_{\text{fg}@T_{\text{w}}} \quad (3.23)$$

- โดยที่  $h_1$  คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะ (Enthalpy) ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 1, kJ/kg<sub>dry air</sub>
- $h_3$  คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะ (Enthalpy) ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 3, kJ/kg<sub>dry air</sub>
- $\dot{m}_{\text{a}_3}$  คือ อัตราการไหลโดยมวลของอากาศแห้งที่ไหลผ่านบริเวณหมายเลข 3, kg<sub>dry air</sub>/s
- $\dot{m}_{\text{w}}$  คือ อัตราการไหลโดยมวลของน้ำที่ถูกควบแน่นออกจากอากาศอบแห้ง, kg<sub>dry air</sub>/s
- $h_{\text{fg}}$  คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะของน้ำที่ถูกควบแน่นออกจากอากาศอบแห้ง, kJ<sub>water</sub>/kg<sub>water</sub>
- $T_{\text{w}}$  คือ อุณหภูมิน้ำที่ถูกควบแน่นออกจากอากาศอบแห้ง, °C

จากสมการที่ 3.23 พบว่าค่า  $\dot{m}_{\text{w}}$  สามารถคำนวณได้จากค่าอัตราส่วนของปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเมล็ดพันธุ์ข้าวต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งหรือเรียกว่าค่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ย (Drying rate, DR) ซึ่งได้มีการแสดงสมการคำนวณไว้แล้วดังสมการที่ 3.24 ในเนื้อหาลำดับถัดไป

### 3.8.2 สมรรถนะในการอบแห้ง

#### 3.8.2.1 อัตราการอบแห้งเฉลี่ย (Drying rate, DR)

พิจารณาจากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเมล็ดพันธุ์ข้าวต่อระยะเวลาของการอบแห้ง โดยได้วิเคราะห์อัตราการอบแห้งเฉลี่ยของข้าวจากข้อมูลการทดลองเมื่อทำการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวจนมีค่าความชื้นเท่ากับ 14%wb ตามมาตรฐานการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวของกรมการข้าว (วิไล ปาละวิสุทธิ, 2549) ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ 3.24 (เพชร ว่องไพศาลกิจ, 2562)

$$DR = \frac{m_i - m_f}{t} \quad (3.24)$$

โดยที่ DR คือ อัตราการอบแห้งเฉลี่ย, kg<sub>water</sub>/h  
 $m_i$  คือ มวลของผลิตภัณฑ์ก่อนการอบแห้ง, kg  
 $m_f$  คือ มวลของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง, kg  
 $t$  คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, h

#### 3.8.2.2 อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific moisture evaporation rate, SMER)

เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าปริมาณน้ำที่ระเหยจากเมล็ดพันธุ์ข้าวต่อพลังงานที่ใช้ โดยได้ทำการวิเคราะห์จากข้อมูลการทดลองเมื่อทำการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวจนมีค่าความชื้นเท่ากับ 14%wb ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ 3.25

$$SMER = \frac{m_i - m_f}{P_e} \quad (3.25)$$

โดยที่ SMER คือ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ, kg<sub>water</sub>/kWh  
 $P_e$  คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้, kWh

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

เป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเมล็ดพันธุ์ข้าว โดยได้ทำการวิเคราะห์จากข้อมูลการทดลองเมื่อทำการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวจนมีค่าความชื้นเท่ากับ 14%wb และยังเป็นส่วนกลับของค่า SMER ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ 3.26 (เพชร ว่องไพศาลกิจ, 2562)

$$SEC = \frac{3.6P_c}{m_i - m_f} \quad (3.26)$$

โดยที่ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, MJ/kg<sub>water</sub>

### 3.9 การทดสอบคุณภาพเมล็ดพันธุ์

ในส่วนของการตรวจสอบคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ภายหลังจากการอบแห้ง ได้ทดสอบผ่านการหาอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์ โดยมีการสุ่มเมล็ดพันธุ์ที่ได้จากการอบแห้งหลังจากสิ้นสุดระยะเวลาการพักตัวเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ มาทดสอบหาอัตราการงอกซ้ำละ 100 เมล็ด จำนวน 4 ซ้ำ จากนั้นนำไปเพาะบนกระดาษเพาะเมล็ดที่วางไว้บนผ้าเปียกที่มีความชื้นเหมาะสมในถาดเพาะเมล็ดเป็นระยะเวลา 10 วัน ตามมาตรฐานสากลของสมาคมทดสอบเมล็ดพันธุ์นานาชาติ (ISTA) จากนั้นจึงทำการประเมินอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์ (ณัฐหทัย เอพาณิช, 2547) โดยได้ทำการทดสอบอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าวหลังจากการอบแห้งเปรียบเทียบกับวิธีการผึ่งในร่มที่ใช้กันทั่วไป ดังรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 การทดสอบหาอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์

### 3.10 สถานที่ทำการทดลอง

ห้องปฏิบัติการจักรกลเกษตร อาคารจักรกลเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### 3.11 ระยะเวลาทำการทดลอง

ระยะเวลาตั้งแต่วันที่ 19 กันยายน 2563 – 14 กุมภาพันธ์ 2565

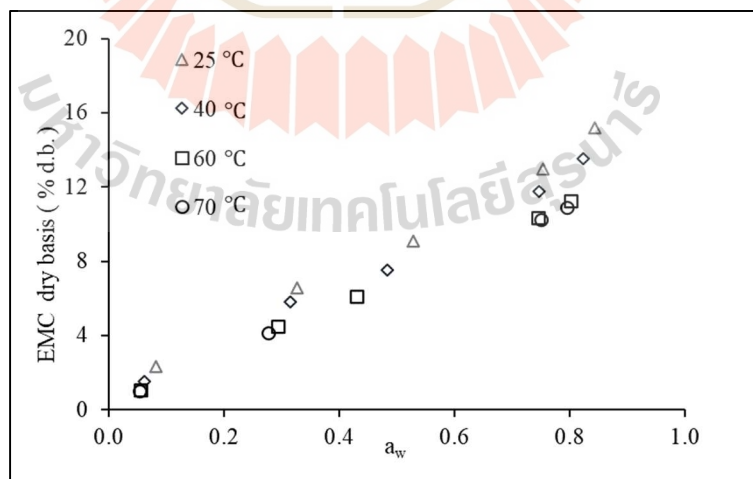
## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

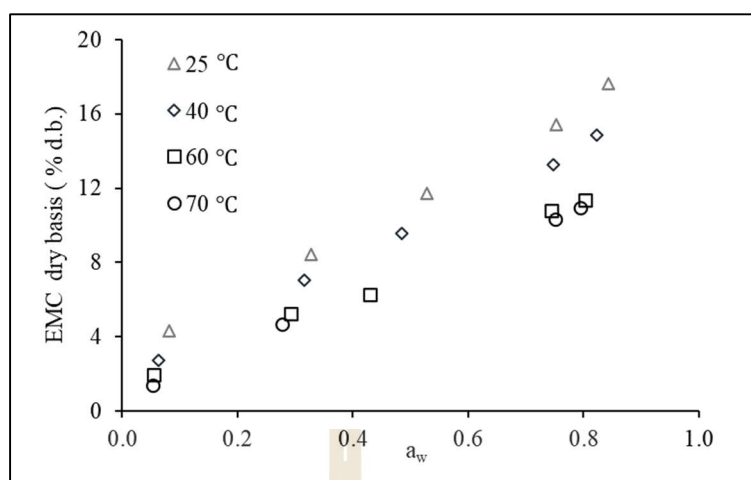
สำหรับในส่วนของหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองตั้งแต่การทดลองหาไอโซเทอมความชื้น (Moisture sorption isotherms) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 สำหรับนำไปใช้ในการออกแบบสภาวะของอากาศอบแห้งตลอดจนถึงสภาวะในการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ข้าวหลังการอบแห้ง การสอบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT 22 สำหรับนำไปใช้ในเครื่องอบแห้งรวมถึงผลการทดสอบเครื่องอบแห้ง การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งต้นแบบและการทดสอบคุณภาพของเมล็ดพันธุ์

#### 4.1 การหาค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการทดลองหาค่าไอโซเทอมความชื้น (Moisture sorption isotherms) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 25 40 60 และ 70°C ในช่วงค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 5.49 – 80.25% ได้ความสัมพันธ์ของค่าไอโซเทอมการดูดความชื้น (Adsorption isotherms) ดังรูปที่ 4.1 และค่าไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption isotherms) ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ไอโซเทอมการดูดความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 25 40 60 และ 70°C



รูปที่ 4.2 ไอโซเทอมการคายความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 25 40 60 และ 70°C

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, EMC) ของข้าวลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้โมเลกุลน้ำในข้าวได้รับพลังงานเพิ่มมากขึ้นจนสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ทำให้น้ำบางส่วนระเหยออกไปสู่อากาศเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมินั้นมีผลต่อไอโซเทอมความชื้นของข้าว ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้ดังกล่าวสอดคล้องกับทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ของไอโซเทอมความชื้น (Moisture sorption isotherms) (Hossain et al., 2001) และยังพบว่าเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิเดียวกัน เมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุล (EMC) ของข้าวเพิ่มขึ้นในกรณีไอโซเทอมการดูดความชื้น เนื่องจากเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศเพิ่มขึ้น ทำให้ความดันไอของไอน้ำในอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้ไอน้ำในอากาศเกิดการถ่ายโอนเข้าสู่เมล็ดข้าวที่น้ำมีความดันไอน้อยกว่าเพิ่มมากขึ้น และสำหรับกรณีไอโซเทอมการคายความชื้นเมื่อความดันไอของไอน้ำในอากาศเพิ่มมากขึ้น ทำให้น้ำในข้าวที่มีความดันไอน้อยกว่าถ่ายโอนออกสู่อากาศรอบนอกได้ลดลง

จากกราฟไอโซเทอมความชื้นที่แสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นว่าลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ที่ได้นั้นเป็นรูปตัว S (S-Sigmoid) ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของไอโซเทอมความชื้นสำหรับวัสดุทางการเกษตร (Brunauer et al., 1940)

จากผลการทดลองที่ได้ตามรูปที่ 4.1 และ 4.2 ได้ถูกนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าไอโซเทอมความชื้น โดยใช้แบบจำลองจากตารางที่ 3.2 ด้วยซอฟต์แวร์ทางสถิติ ได้ค่าคงที่ของแบบจำลอง (A B C และ D) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) และค่าการลดลงไคกำลังสอง ( $\chi^2$ ) ในแต่ละแบบจำลองได้ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่และค่าทางสถิติในแต่ละแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับไอโซเทอมการดูดความชื้น (Adsorption isotherms) ในข้าวขาวดอกมะลิ 105

Model	Adsorption				
	Constant	25°C	40°C	60°C	70°C
GAB	A	0.027	0.037	0.073	0.017
	B	0.976	0.893	0.586	1.071
	C	-4.073	-2.278E+09	4.865	-4.860
	R <sup>2</sup>	0.950	0.981	1.000	0.978
	χ <sup>2</sup>	0.00131808	0.00039622	0.00000107	0.00027773
Peleg	A	108.614	-0.843	0.122	-0.866
	B	0.881	0.916	0.831	0.910
	C	-108.444	0.999	0.029	1.000
	D	0.881	0.916	4.542	0.910
	R <sup>2</sup>	0.998	0.998	1.000	1.000
χ <sup>2</sup>	0.00010003	0.00007336	0.00000102	0.00000057	
Oswin	A	0.083	0.074	0.064	0.060
	B	0.379	0.408	0.429	0.467
	R <sup>2</sup>	0.997	0.997	0.996	0.998
	χ <sup>2</sup>	0.00005227	0.00004530	0.00003564	0.00003019
Henderson	A	2.011	1.207	0.909	0.692
	B	1.754	1.665	1.618	1.553
	R <sup>2</sup>	1.000	1.000	0.999	1.000
	χ <sup>2</sup>	0.00000724	0.00001449	0.00000975	0.00000623
Henderson & Thompson	A	1.925	1.178	0.895	0.682
	B	1.110	1.012	0.998	0.996
	C	1.754	1.665	1.618	1.553
	R <sup>2</sup>	0.997	0.999	0.999	1.000
	χ <sup>2</sup>	0.00001448	0.00002899	0.00001956	0.00000623



ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ค่าคงที่และค่าทางสถิติในแต่ละแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับไอโซเทอมการดูดความชื้น (Adsorption isotherms) ในข้าวขาวดอกมะลิ 105

Model	Adsorption				
	Constant	25°C	40°C	60°C	70°C
Chung & Pfoest	A	20.988	22.211	25.119	25.323
	B	3.610	0.005	80.732	-32.943
	C	121.627	158.606	537.854	138.406
	$R^2$	1.000	1.000	1.000	1.000
	$\chi^2$	0.00001017	0.00000972	0.00000396	0.00000174
Halsey	A	0.112	0.234	0.374	0.676
	B	1.980	1.790	1.667	1.458
	$R^2$	0.991	0.989	0.989	0.992
	$\chi^2$	0.00025309	0.00022106	0.00016509	0.00009211

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่และค่าทางสถิติในแต่ละแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption isotherms) ในข้าวขาวดอกมะลิ 105

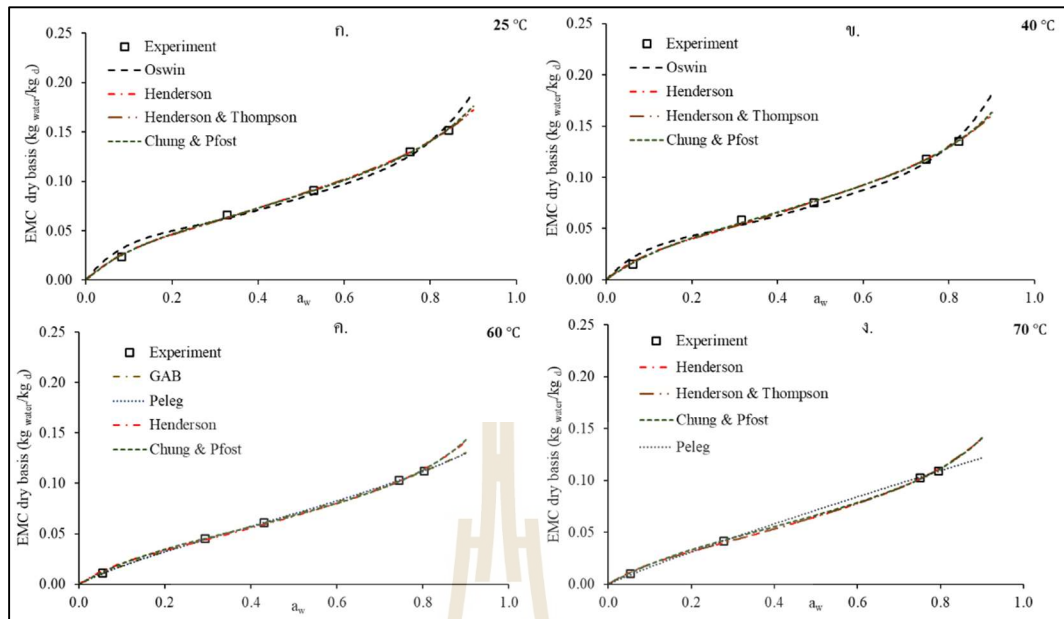
Model	Desorption				
	Constant	25°C	40°C	60°C	70°C
GAB	A	-0.108	0.030	-0.065	0.017
	B	-4.359	0.968	-4.371	1.067
	C	1.123	-4.562	1.142	-4.527
	$R^2$	0.999	0.953	0.999	0.974
	$\chi^2$	0.00005253	0.00129274	0.00002199	0.00033150
Peleg	A	0.095	1.735	0.067	1.761
	B	0.689	0.728	0.783	0.787
	C	0.095	-1.568	0.067	-1.631
	D	0.689	0.728	0.783	0.787
	$R^2$	0.998	0.999	0.998	1.000
	$\chi^2$	0.00018358	0.00005730	0.00007949	0.00000118

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ค่าคงที่และค่าทางสถิติในแต่ละแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption isotherms) ในข้าวขาวดอกมะลิ 105

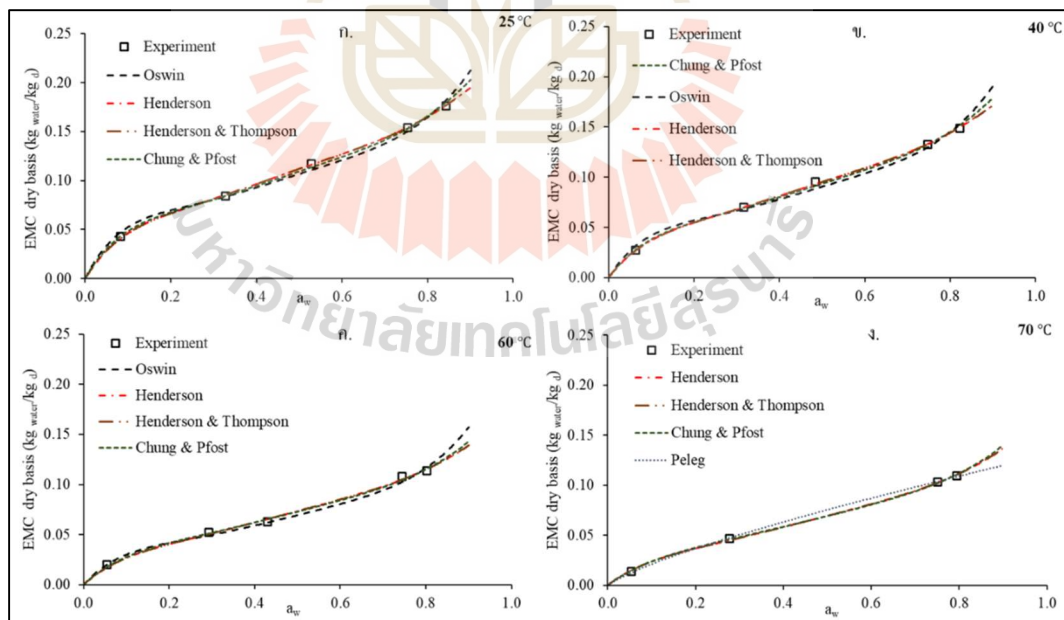
Model	Desorption				
	Constant	25°C	40°C	60°C	70°C
Oswin	A	0.106	0.090	0.069	0.064
	B	0.316	0.342	0.375	0.415
	R <sup>2</sup>	0.998	0.997	0.998	0.998
	$\chi^2$	0.00004041	0.00004936	0.00001923	0.00002850
Henderson	A	3.097	2.028	1.552	1.108
	B	2.149	2.023	1.875	1.766
	R <sup>2</sup>	1.000	1.000	0.999	1.000
	$\chi^2$	0.00000267	0.00000674	0.00001036	0.00000546
Henderson & Thompson	A	2.962	1.977	1.526	1.093
	B	1.141	1.026	1.029	1.000
	C	2.149	2.023	1.875	1.766
	R <sup>2</sup>	1.000	1.000	0.999	1.000
	$\chi^2$	0.00000534	0.00001347	0.00002073	0.00000546
Chung & Pfoest	A	20.029	21.887	26.786	26.559
	B	-22.431	0.005	-41.022	-35.495
	C	15.719	212.962	92.192	149.478
	R <sup>2</sup>	1.000	1.000	0.999	1.000
	$\chi^2$	0.00002739	0.00003411	0.00002175	0.00000205
Halsey	A	0.081	0.547	0.239	0.466
	B	2.343	1.484	1.888	1.628
	R <sup>2</sup>	0.994	0.973	0.993	0.993
	$\chi^2$	0.00024532	0.00074249	0.00010900	0.00009261

จากการแก้สมการหาค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายค่าไอโซเทอมความชื้นทั้ง 7 แบบ คือ GAB Peleg Oswin Henderson Henderson & Thompson Chung & Pfof และ Halsey พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายค่าไอโซเทอมความชื้นได้ใกล้เคียงกับค่าจากการทดลองจริงซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) และค่าการลดลงไคกำลังสอง ( $\chi^2$ ) ในแต่ละแบบจำลอง โดยพบว่า กรณีไอโซเทอมการดูดความชื้น (Adsorption isotherms) ที่อุณหภูมิ 25°C แบบจำลองของ Henderson มีความเหมาะสมที่สุดโดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 1.000 และมีค่า  $\chi^2$  เท่ากับ 0.00000724 ที่อุณหภูมิ 40°C พบว่าแบบจำลองของ Chung & Pfof มีความเหมาะสมที่สุดโดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 1.000 และมีค่า  $\chi^2$  เท่ากับ 0.00000972 ที่อุณหภูมิ 60°C พบว่าแบบจำลองของ Peleg มีความเหมาะสมที่สุดโดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 1.000 และมีค่า  $\chi^2$  เท่ากับ 0.00000102 และที่อุณหภูมิ 70°C พบว่าแบบจำลองของ Peleg มีความเหมาะสมที่สุดโดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 1.000 และมีค่า  $\chi^2$  เท่ากับ 0.00000057 และที่กรณีไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption isotherms) ที่อุณหภูมิ 25°C พบว่าแบบจำลองของ Henderson มีความเหมาะสมที่สุดโดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 1.000 และมีค่า  $\chi^2$  เท่ากับ 0.00000267 ที่อุณหภูมิ 40°C พบว่าแบบจำลองของ Henderson มีความเหมาะสมที่สุดโดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 1.000 และมีค่า  $\chi^2$  เท่ากับ 0.00000674 ที่อุณหภูมิ 60°C พบว่าแบบจำลองของ Henderson มีความเหมาะสมที่สุดโดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.999 และมีค่า  $\chi^2$  เท่ากับ 0.00001036 และที่อุณหภูมิ 70°C พบว่าแบบจำลองของ Peleg มีความเหมาะสมที่สุดโดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 1.000 และมีค่า  $\chi^2$  เท่ากับ 0.00000118

จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุด 4 แบบของแต่ละอุณหภูมิได้ถูกนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ เพื่อเทียบกับผลการทดลองจริง ทั้งกรณีไอโซเทอมการดูดความชื้น (Adsorption isotherms) และไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption isotherms) ได้ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



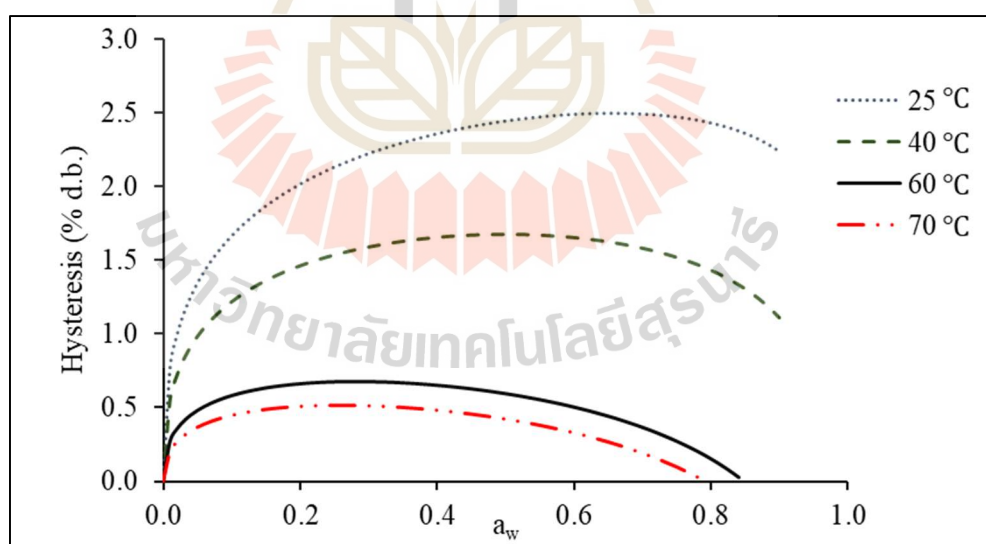
รูปที่ 4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุด 4 แบบ ของไอโซเทอมการดูดความชื้น (Adsorption isotherms) ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 อุณหภูมิ 25 40 60 และ 70°C ดังรูป ก ข ค และ ง ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุด 4 แบบ ของไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption isotherms) ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 อุณหภูมิ 25 40 60 และ 70°C ดังรูป ก ข ค และ ง ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าเกิด Sorption hysteresis ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ความแตกต่างของค่าความชื้นสมดุล (EMC) ระหว่างพฤติกรรมไอโซเทอมการคายความชื้นและไอโซเทอมการดูดความชื้นของวัสดุชนิดเดียวกันที่สภาวะอุณหภูมิเดียวกัน ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้เกิดจากผลของแรงแคปิลลารีระหว่างน้ำกับวัสดุที่มีรูพรุน โดยที่ไอโซเทอมการคายความชื้นมีค่าความชื้นสมดุลที่สูงกว่าไอโซเทอมการดูดความชื้นที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเดียวกัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่สภาวะเริ่มต้นของไอโซเทอมการคายความชื้น รูพรุนในวัสดุจะเต็มไปด้วยน้ำที่ถูกดึงดูดด้วยแรงแคปิลลารีระหว่างน้ำกับวัสดุ ซึ่งการที่น้ำในรูพรุนจะระเหยออกไปได้ก็ต่อเมื่อความดันไอของน้ำในรูพรุนสูงกว่าความดันไอของอากาศรอบ ๆ วัสดุ ซึ่งแตกต่างจากกรณีไอโซเทอมการดูดความชื้นที่ในสภาวะเริ่มต้นรูพรุนในวัสดุนั้นว่างเปล่า ไอโซเทอมการคายความชื้นนั้นน้ำในรูพรุนของวัสดุจะระเหยออกมาได้ยากกว่ามาก เนื่องจากมีแรงแคปิลลารีดึงดูดเอาไว้ จึงทำให้ที่สภาวะสมดุลค่าความชื้นสมดุลของวัสดุในไอโซเทอมการคายความชื้นจึงสูงกว่าไอโซเทอมการดูดความชื้น (Andrade and Hensel, 2013)

จากการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 มาใช้หาค่าไอโซเทอมความชื้นทั้งกรณีไอโซเทอมการดูดความชื้นและไอโซเทอมการคายความชื้นในแต่ละอุณหภูมิ จากนั้นนำค่าที่ได้มาหาผลต่าง เพื่อหาค่า Hysteresis ของแต่ละอุณหภูมิได้ผลดังรูปที่ 4.5

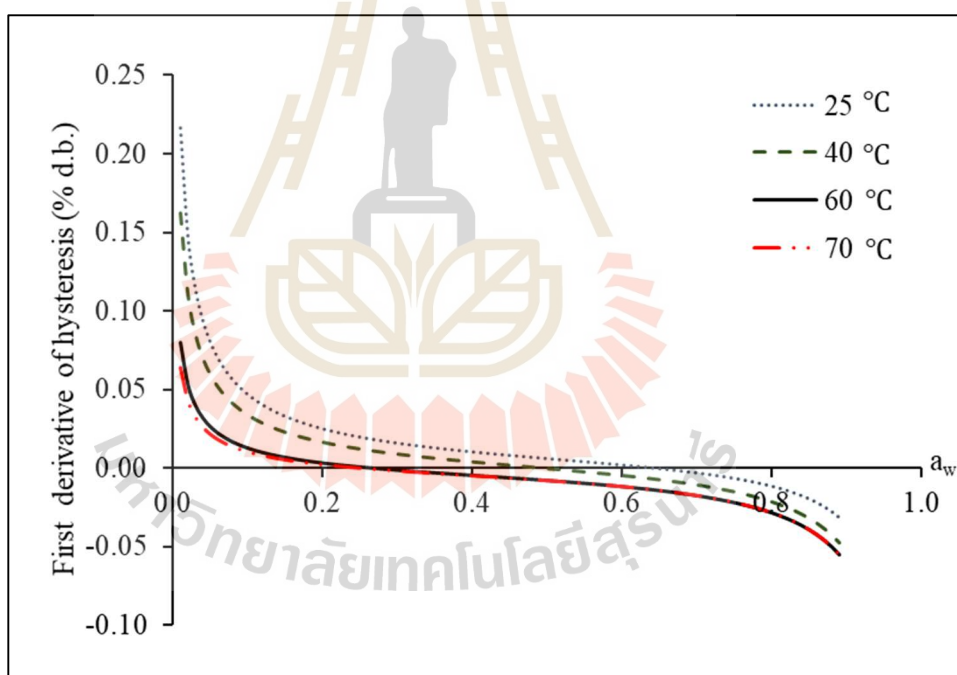


รูปที่ 4.5 Sorption hysteresis จากแบบจำลองของ Henderson ที่อุณหภูมิ 25 40 60 และ 70°C

จากรูปที่ 4.5 พบว่า เมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิด Hysteresis ลดลง สังเกตได้จากช่องว่างระหว่างไอโซเทอมการคายความชื้นและไอโซเทอมการดูดความชื้นของวัสดุที่ลดลง

ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำภายในรูพรุนของวัสดุที่ถูกดึงดูดไว้ด้วยแรงแคปิลลารีได้รับพลังงานเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความดันไอของน้ำในรูพรุนเพิ่มขึ้น จนมากกว่าความดันไอของน้ำในอากาศรอบ ๆ ทำให้น้ำในรูพรุนระเหยออกจากวัสดุเพิ่มมากขึ้น จนทำให้ความชื้นสมดุลของวัสดุลดลง จากผลการทดลองที่ได้นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ (Aviara et al., 2006 ; Campos et al., 2016 ; Goneli et al., 2010 ; Goneli et al., 2016 ; Souza et al., 2015) ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวนี้ จะเห็นว่าอุณหภูมินั้นมีผลต่อปรากฏการณ์ Hysteresis อย่างชัดเจน

จากการวิเคราะห์หาบริเวณที่เกิดปรากฏการณ์ Sorption hysteresis ในแต่ละช่วงอุณหภูมิ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson เพื่อหาว่าปรากฏการณ์ Sorption hysteresis เกิดขึ้นในช่วงค่าวอเตอร์แอคทีวิตีเท่าใด โดยทำการปรับปรุงข้อมูล (Data pretreatment) ด้วยวิธีการหาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง (First derivative) (Rinnan et al., 2009) ได้ผลดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 อนุพันธ์อันดับหนึ่งของปรากฏการณ์ Sorption hysteresis ที่อุณหภูมิ 25 40 60 และ 70°C

จากรูปที่ 4.6 พบว่าช่วงที่ค่า First derivative มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ (ช่วงประมาณ  $\pm 0.01$ ) จะเป็นบริเวณที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า Hysteresis ที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับบริเวณอื่น หรือกล่าวได้ว่าเป็นบริเวณที่ความชันของของกราฟในรูปที่ 4.5 มีค่าประมาณศูนย์ นั่นหมายความว่า

เป็นช่วงที่มีค่า Hysteresis สูงสุด ทำให้บริเวณดังกล่าวนี้เป็นบริเวณที่เกิดปรากฏการณ์ Sorption hysteresis อย่างเห็นได้ชัดจนที่สุด โดยจากผลการทดลองดังกล่าวพบว่าที่อุณหภูมิ 25°C เกิดขึ้นในช่วงค่าวอเตอร์แอกติวิตี 0.42 - 0.78 ที่อุณหภูมิ 40°C เกิดขึ้นในช่วง 0.29 - 0.68 ที่อุณหภูมิ 60°C เกิดขึ้นในช่วง 0.13 - 0.56 และที่อุณหภูมิ 70°C เกิดขึ้นในช่วง 0.11 - 0.56

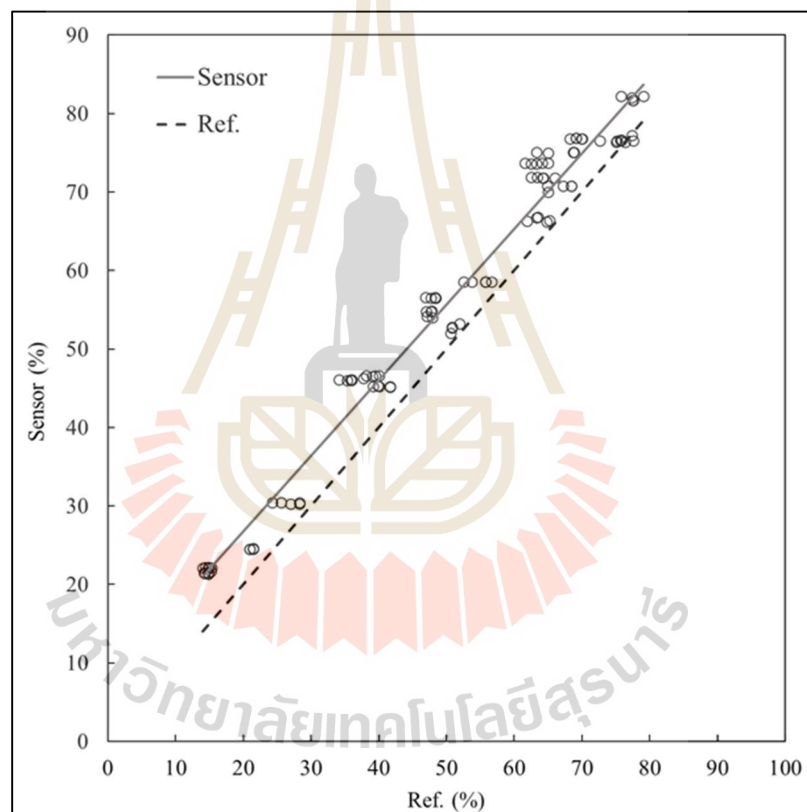
จากการทดลองหาค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 25 40 60 และ 70°C ในช่วงค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศตั้งแต่ 5.32 - 84.34% ทำให้สามารถคำนวณหาสภาวะของอากาศอบแห้งสำหรับการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวได้ โดยต้องการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวให้มีค่าความชื้นสุดท้ายเหลือเท่ากับ 14%wb และเมื่อทำการแปลงค่าความชื้นมาตรฐานเปียกให้อยู่ในรูปค่าความชื้นมาตรฐานแห้งสำหรับการวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมความชื้นได้เท่ากับ 16%db และได้ใช้อุณหภูมิของอากาศอบแห้งเท่ากับ 40°C พบว่าเมื่อคำนวณค่าความชื้นของอากาศอบแห้งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson ในกรณีของไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption isotherms) ดังในตารางที่ 4.2 พบว่าต้องใช้อากาศอบแห้งที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศเท่ากับ 86% ซึ่งเป็นค่าความชื้นของอากาศที่มากที่สุดที่สามารถใช้ได้ในการอบแห้งเพื่อให้ได้เมล็ดพันธุ์ที่มีค่าความชื้นเท่ากับ 14%wb นอกจากนี้ยังทำให้ทราบสภาวะสำหรับการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์หลังจากการอบแห้งระหว่างอยู่ในระยะพักตัวเพื่อนำไปทดสอบหาอัตราการงอกต่อไปได้ โดยเมื่อคำนวณค่าความชื้นของอากาศในการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ข้าวเพื่อรักษาความชื้นไว้เท่ากับ 14 %wb ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson ในกรณีของไอโซเทอมการดูดความชื้น (Adsorption isotherms) ดังในตารางที่ 4.1 ที่สภาวะอุณหภูมิการเก็บรักษาเท่ากับ 25°C พบว่าต้องเก็บรักษาไว้ในสภาวะแวดล้อมที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเท่ากับ 87% ซึ่งเป็นค่าความชื้นของอากาศมากที่สุดที่สามารถใช้ได้ในการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ข้าวสำหรับการรักษาความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวไว้เท่ากับหรือน้อยกว่า 14%wb เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของเมล็ดพันธุ์ข้าว

## 4.2 การสอบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT 22

สำหรับผลการสอบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT 22 เพื่อนำผลการสอบเทียบที่ได้ ไปใช้ในเครื่องอบแห้งป้อนความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกนั้น มีวิธีการวิเคราะห์เพื่อหาสมการสอบเทียบดังนี้

### 4.2.1 ผลการสอบเทียบและการหาสมการปรับแก้ (Calibration equation)

จากการสอบเทียบค่าความชื้นที่วัดได้จากเซนเซอร์ DHT 22 ในช่วงอุณหภูมิ 25 - 65 °C และค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศตั้งแต่ 15-79% โดยนำมาเปรียบเทียบกับค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่วัดได้จากเครื่องมือวัดอ้างอิงได้ผลดังรูปที่ 4.7



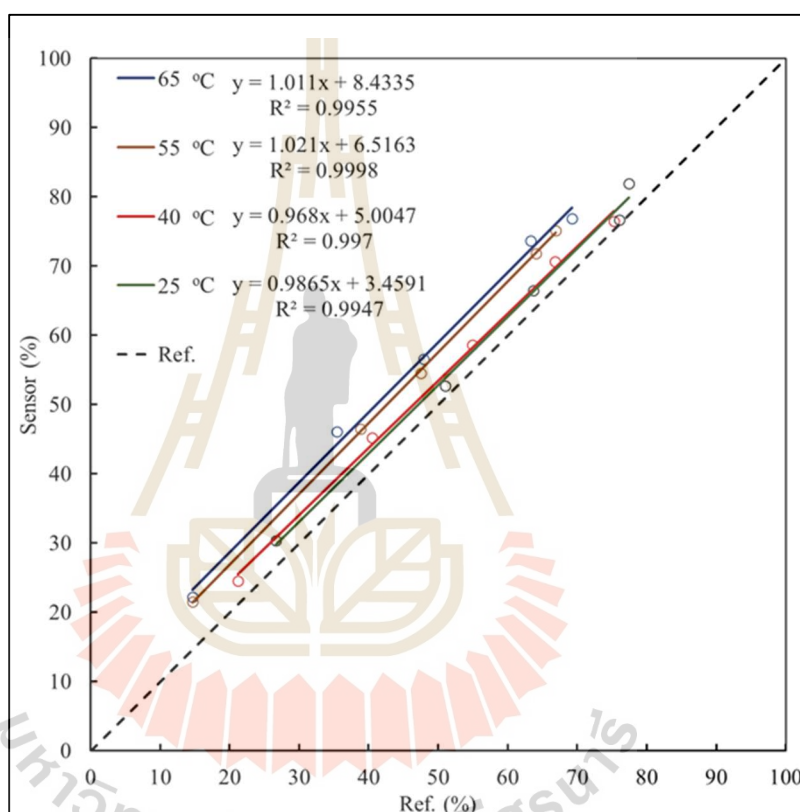
รูปที่ 4.7 ค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่วัดได้จากเซนเซอร์ DHT 22 เปรียบเทียบกับค่าจากเครื่องมือวัดอ้างอิง

จากรูปที่ 4.7 พบว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการวัดด้วยเซนเซอร์ DHT 22 จะได้ค่าที่สูงกว่าค่าจากการวัดด้วยเครื่องมือวัดอ้างอิง ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัย



ที่มีการนำเซนเซอร์ DHT 22 มาใช้ในการวัดค่าความชื้นของอากาศแล้วทำการเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิงของงานนั้น ๆ (Kusriyanto and Putra, 2018 ; Sihombing and Listiari, 2020)

เมื่อนำผลของการสอบเทียบที่ได้ในแต่ละสภาวะอุณหภูมิทั้ง 4 สภาวะคือ 25 40 55 และ 65°C มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ พร้อมทั้งหาสมการทำนายระหว่างค่าความชื้นที่วัดได้จากเซนเซอร์ DHT 22 และค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดอ้างอิงและทำการเปรียบเทียบกับผลการวัดจากเครื่องมือวัดอ้างอิงได้ผลดังรูปที่ 4.8



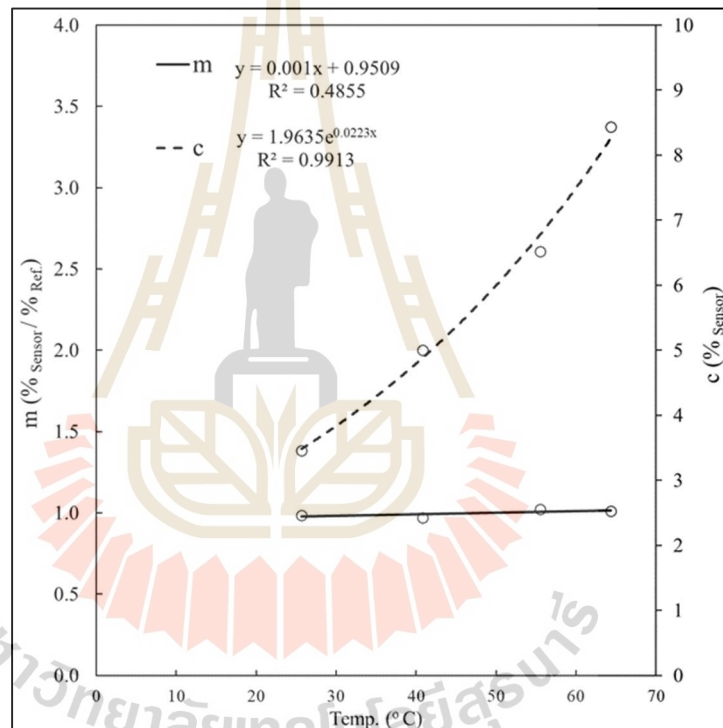
รูปที่ 4.8 ค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่วัดได้จากเซนเซอร์ DHT 22 เปรียบเทียบกับค่าจากเครื่องมือวัดอ้างอิงและสมการสอบเทียบค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่อุณหภูมิ 25 40 55 และ 65°C

จากรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อนำเซนเซอร์ DHT 22 ไปใช้สำหรับวัดค่าความชื้นในบริเวณที่มีอุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยสมการปรับแก้ที่ได้ในแต่ละสภาวะอุณหภูมิเป็นสมการเส้นตรง (Linear equation) ดังในรูปที่ 4.8 ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูปแบบดังสมการที่ 4.1

$$RH_{\text{Sensor}} = mRH_{\text{Ref.}} + c \quad (4.1)$$

- โดยที่  $RH_{\text{Sensor}}$  คือ ค่าความชื้นที่วัดได้จากเซนเซอร์ DHT 22 , %  
 $RH_{\text{Ref.}}$  คือ ค่าความชื้นที่วัดได้จากเครื่องมือวัดอ้างอิง , %  
 $m$  คือ ค่าความชันของสมการเส้นตรง, %  $\text{Sensor} / \% \text{Ref.}$   
 $c$  คือ ค่าคงที่ของสมการเส้นตรง, %  $\text{Sensor}$

จากสมการที่ 4.1 เมื่อนำค่าความชื้น ( $m$ ) และค่าคงที่ ( $c$ ) ของสมการปรับแก้ที่ได้ จากรูปที่ 4.8 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์เพื่อเปรียบเทียบกับค่าสถานะอุณหภูมิที่ทำการสอบเทียบ และหาสมการทำนายได้ผลดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของค่าความชื้น ( $m$ ) และค่าคงที่ ( $c$ ) เทียบกับค่าอุณหภูมิของอากาศแวดล้อม

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าค่าความชื้น ( $m$ ) ของสมการสอบเทียบมีลักษณะความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรงและค่าคงที่ ( $c$ ) ของสมการสอบเทียบมีลักษณะความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) ดังสมการที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

$$m = 0.001T_{\text{Ref.}} + 0.9509 \quad (4.2)$$

$$c = 1.9635e^{0.0223T_{Ref.}} \quad (4.3)$$

โดยที่  $T_{Ref.}$  คือ ค่าอุณหภูมิจากเครื่องมือวัดอ้างอิง, °C

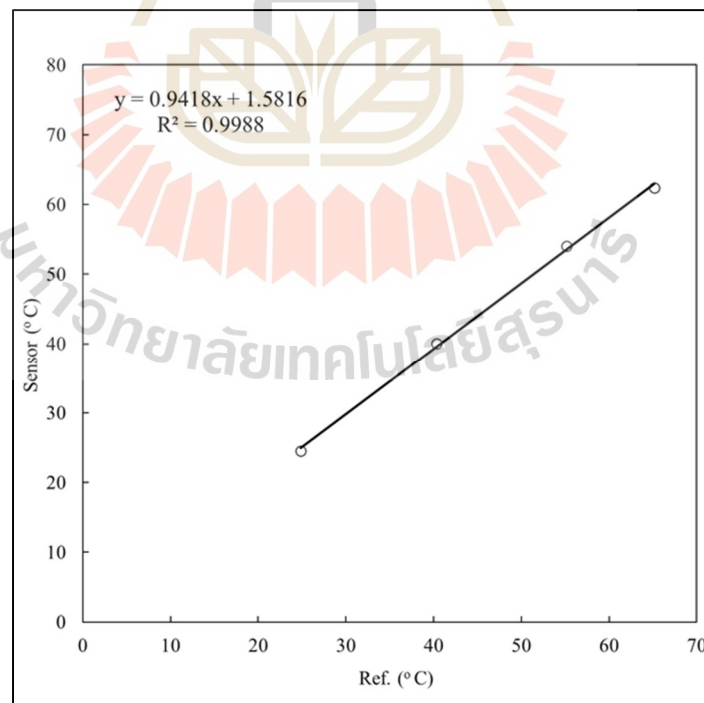
เมื่อนำสมการที่ 4.2 และ 4.3 แทนในสมการที่ 4.1 จะได้ดังสมการที่ 4.4

$$RH_{Sensor} = (0.001T_{Ref.} + 0.9509)RH_{Ref.} + 1.9635e^{0.0223T_{Ref.}} \quad (4.4)$$

จากนั้นทำการจัดรูปเพื่อหาสมการปรับแก้ดังสมการที่ 4.5

$$RH_{Ref.} = \frac{(RH_{Sensor} - 1.9635e^{0.0223T_{Ref.}})}{(0.001T_{Ref.} + 0.9509)} \quad (4.5)$$

จากการสอบเทียบอุณหภูมิของเซนเซอร์ DHT 22 ในช่วงอุณหภูมิ 25 - 65 °C ได้ผลดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 สมการการสอบเทียบอุณหภูมิของเซนเซอร์ DHT 22

จากรูปที่ 4.10 พบว่าได้กราฟการสอบเทียบอุณหภูมิเป็นลักษณะกราฟเส้นตรง ดังสมการที่ 4.6

$$T_{\text{Sensor}} = 0.9418T_{\text{Ref.}} + 1.5816 \quad (4.6)$$

โดยที่  $T_{\text{Sensor}}$  คือ ค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเซนเซอร์ DHT 22, °C  
 $T_{\text{Ref.}}$  คือ ค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเครื่องมือวัดอ้างอิง, °C

ทำการจัดรูปสมการเพื่อหาสมการปรับแก้สำหรับค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเซนเซอร์ DHT 22 ได้ดังสมการที่ 4.7

$$T_{\text{Ref.}} = \frac{T_{\text{Sensor}} - 1.5816}{0.9418} \quad (4.7)$$

โดยสมการปรับแก้สำหรับค่าอุณหภูมิที่ได้นี้มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.999 และค่า RMSE เท่ากับ 0.539 จากนั้นนำสมการที่ 4.7 แทนในสมการที่ 4.5 เพื่อหาสมการปรับแก้สำหรับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่วัดได้จากเซนเซอร์ DHT 22 ได้ดังสมการที่ 4.8

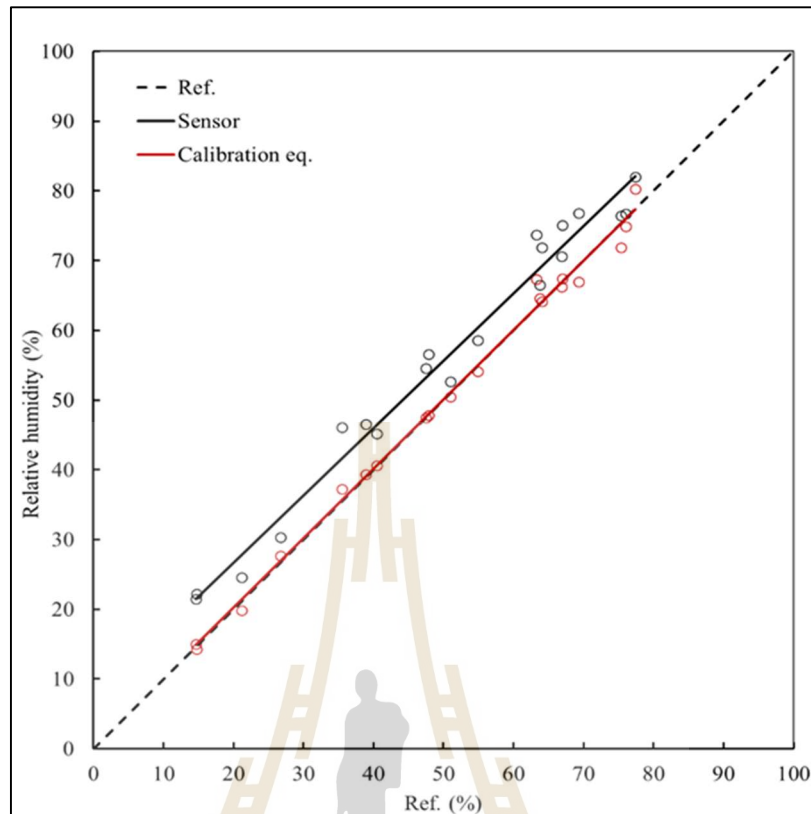
$$RH_{\text{Ref.}} = \frac{RH_{\text{Sensor}} - (1.9635 e^{\frac{0.0223(T_{\text{Sensor}} - 1.5816)}{0.9418}})}{0.001(\frac{T_{\text{Sensor}} - 1.5816}{0.9418}) + 0.9509} \quad (4.8)$$

ทำการจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ 4.9

$$RH_{\text{Ref.}} = \frac{RH_{\text{Sensor}} - 1.9635 e^{(0.02368T_{\text{Sensor}} - 0.03745)}}{0.001062T_{\text{Sensor}} + 0.9492} \quad (4.9)$$

#### 4.2.2 การทดสอบความแม่นยำของสมการปรับแก้

เมื่อนำสมการปรับแก้ของค่าความชื้นที่ได้จากสมการที่ 4.9 มาสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้จากเซนเซอร์และจากเครื่องมือวัดอ้างอิงภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 25 – 65°C ได้ผลดังรูปที่ 4.11

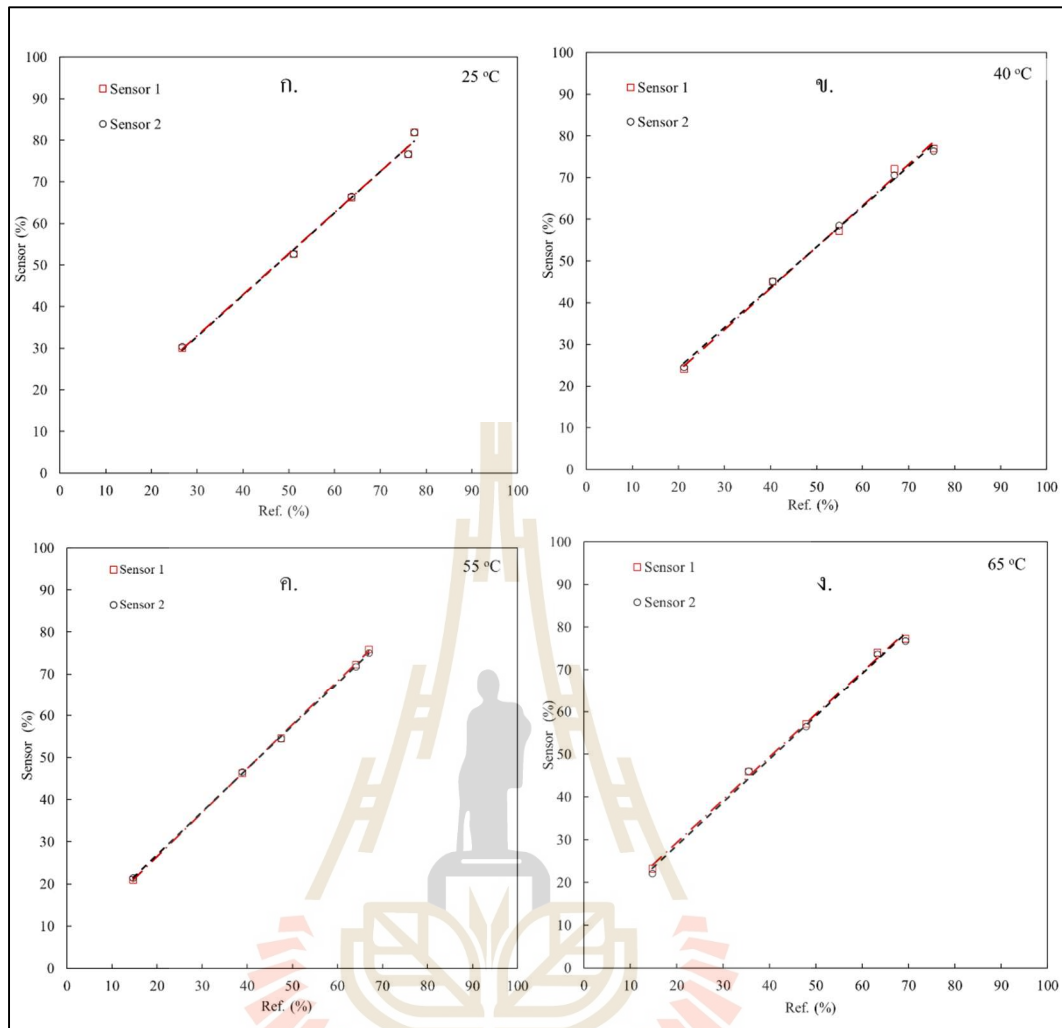


รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่วัดได้จากเซนเซอร์ DHT 22 สมการสอบเทียบและเครื่องมือวัดอ้างอิง

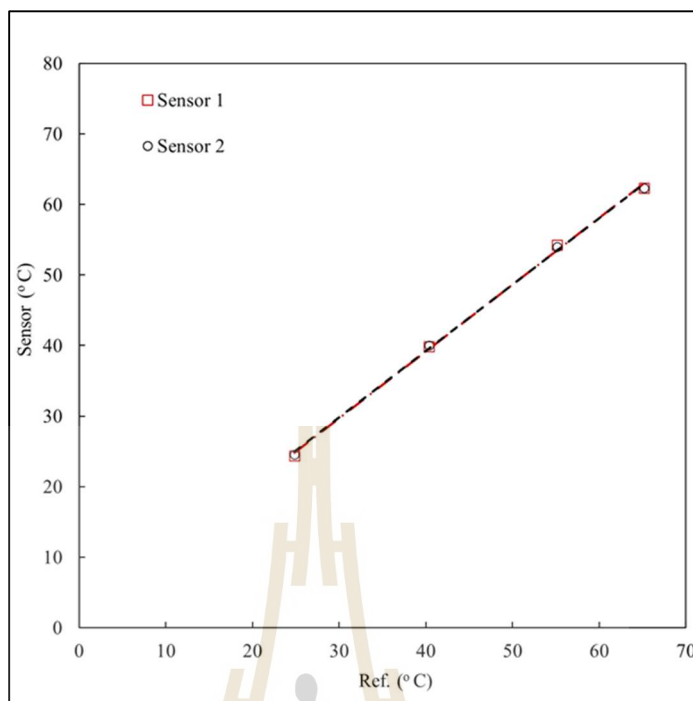
จากรูปที่ 4.11 พบว่าสมการปรับแก้สามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์ DHT 22 ได้จนมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดอ้างอิง ดังสังเกตได้จากเส้นกราฟที่ทับกันพอดี ระหว่างค่าจากสมการปรับแก้และเครื่องมือวัดอ้างอิงและเมื่อนำสมการปรับแก้ของค่าความชื้นที่ได้ไปคำนวณหาค่าทางสถิติ 2 ค่า คือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เพื่อประเมินหาความแม่นยำในการทำนายของสมการปรับแก้ ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.993 และได้ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยเท่ากับ 1.616 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

#### 4.2.3 การเปรียบเทียบผลการสอบเทียบของเซนเซอร์ 2 ตัวที่สภาวะเดียวกัน

จากการติดตั้งอุปกรณ์การสอบเทียบเซนเซอร์ DHT 22 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 พบว่าสามารถทำการสอบเทียบเซนเซอร์ได้ 2 ตัวต่อการสอบเทียบ 1 ครั้งหรือ 1 สภาวะ โดยเมื่อนำผลการสอบเทียบค่าความชื้นและอุณหภูมิของเซนเซอร์ที่ได้ทั้ง 2 ตัว ซึ่งผลิตจากบริษัทเดียวกัน มาพล็อตกราฟเปรียบเทียบได้ผลดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศระหว่างค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ที่ผลิตจากบริษัทเดียวกัน ที่สภาวะอุณหภูมิ 25 40 55 และ 65°C ดังรูป ก ข ค และ ง ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิระหว่างค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ที่ผลิตจากบริษัทเดียวกัน

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 พบว่าเซนเซอร์ทั้ง 2 ตัว ได้ค่าจากการวัดความชื้นและอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน ดังสังเกตได้จากกราฟซึ่งมีเส้นแนวโน้มที่ทับกัน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าในกรณีของเซนเซอร์ที่ถูกผลิตจากบริษัทเดียวกันสามารถให้ค่าจากการวัดที่ใกล้เคียงกัน เป็นผลให้สามารถใช้สมการปรับแก้ตัวเดียวกันได้ โดยเมื่อนำสมการปรับแก้ค่าความชื้นของเซนเซอร์ตัวที่ 1 ดังสมการที่ 4.9 ไปใช้กับเซนเซอร์ตัวที่ 2 พบว่าได้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.994 และได้ค่า RMSE เท่ากับ 1.591 และเมื่อนำสมการปรับแก้ของค่าอุณหภูมิที่ได้ดังสมการที่ 4.7 ไปใช้งานเช่นเดียวกัน พบว่าได้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.998 และได้ค่า RMSE เท่ากับ 0.614 ซึ่งได้ค่าที่จัดอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

สำหรับสมการปรับแก้ที่ได้จากการสอบเทียบเซนเซอร์ DHT 22 นั้นสามารถใช้งานได้ในช่วงของค่าอุณหภูมิและความชื้นภายใต้สภาวะของการสอบเทียบเท่านั้น คือในช่วงอุณหภูมิ 25 – 65°C และในช่วงความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 15–79% โดยไม่สามารถนำไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิและค่าความชื้นที่สูงหรือต่ำกว่านี้ได้ เนื่องจากอาจก่อให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนของค่าที่ได้จากสมการปรับแก้ที่เพิ่มสูงขึ้น

จากการสอบเทียบเซนเซอร์ DHT 22 เพื่อหาสมการปรับแก้ที่ได้ดังสมการที่ 4.7 และ 4.9 นั้นได้มาจากการสอบเทียบโดยใช้เครื่องมือวัดอ้างอิงที่มีค่าความละเอียดของเครื่องมือวัด (Resolution) ตามที่ได้กล่าวมาในส่วนของอุปกรณ์และวิธีการทดลองข้างต้นแล้ว ดังนั้นสำหรับการนำสมการปรับแก้

ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาผลกระทบของค่าความละเอียดของเครื่องมือวัดในส่วนนี้ด้วย

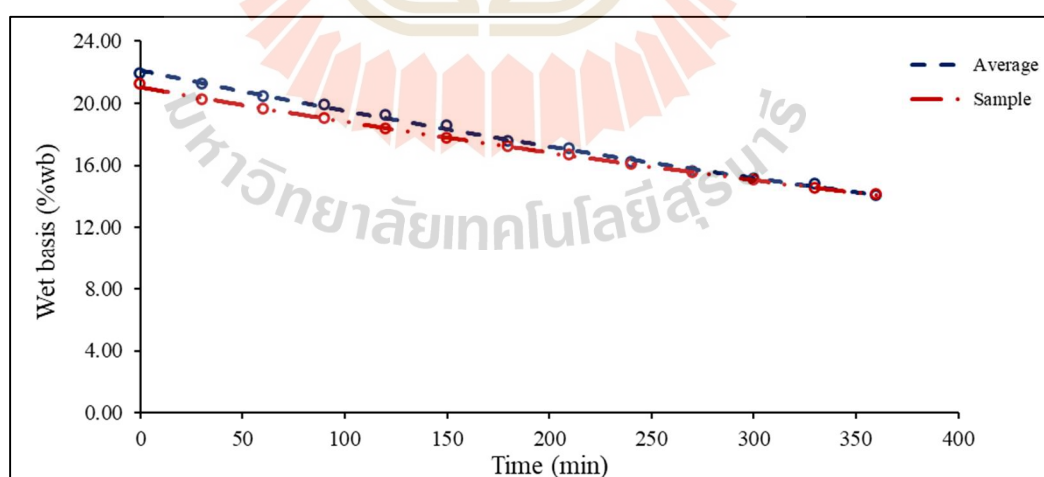
ดังนั้นจากการสอบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT 22 ทำให้ได้ผลการสอบเทียบสำหรับนำไปใช้เป็นเครื่องมือวัดในเครื่องอบแห้งป้อนความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ต่อไป

#### 4.3 การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งต้นแบบ

จากผลการทดลองตั้งแต่การทดสอบหาแรงดันไฟฟ้าของชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกตลอดจนรวมไปถึงการหาไอโซเทอมความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าวและการสอบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT 22 ได้นำไปสู่การทดสอบเครื่องอบแห้งต้นแบบและได้ผลการทดสอบการอบแห้งดังต่อไปนี้

##### 4.3.1 การประเมินความชื้นของเมล็ดพันธุ์เพื่อประมาณจุดยุติการอบแห้ง

จากการใช้วิธีการประเมินค่าความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวในห้องอบแห้งทางอ้อมผ่านการคำนวณความชื้นที่ลดลงในถุงข้าวตัวอย่างเพื่อประมาณหาจุดยุติในการอบแห้ง โดยเมื่อนำผลการอบแห้งเฉลี่ยของทั้ง 3 ซ้ำ (Average) และค่าความชื้นที่คำนวณได้จากถุงตัวอย่างเฉลี่ย (Sample) มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ โดยมีจุดยุติการอบแห้งคือ เมื่อค่าความชื้นของเมล็ดพันธุ์มีค่าเท่ากับ 14%wb ได้ดังรูปที่ 4.14



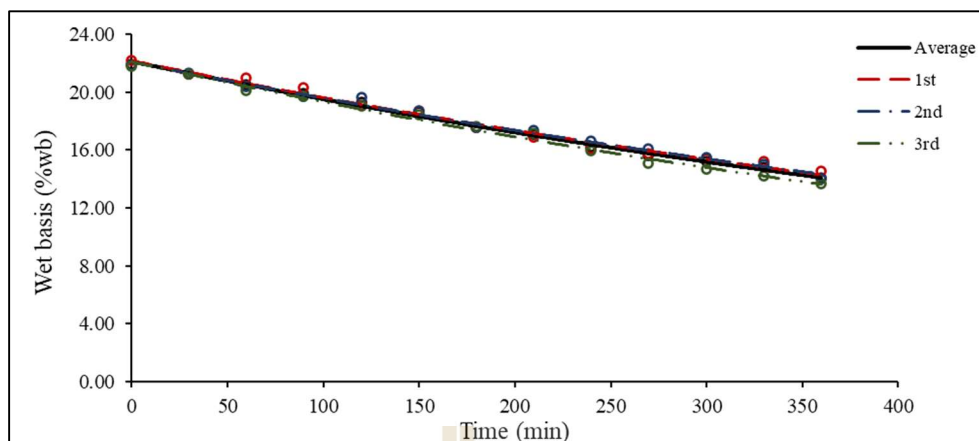
รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบระหว่างผลการอบแห้งเฉลี่ย (Average) และค่าความชื้นที่คำนวณได้จากถุงตัวอย่างเฉลี่ย (Sample)



จากรูปที่ 4.14 พบว่าการประเมินค่าความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวในห้องอบแห้งทางอ้อมด้วยวิธีการดังกล่าวนี้ สามารถทำนายค่าความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวได้อย่างแม่นยำ ดังสังเกตได้จากเส้นกราฟทั้ง 2 เส้น ที่มีแนวโน้มลู่เข้าหากันจนเส้นกราฟทั้งสองเส้นทับกัน โดยจะเห็นว่าค่าความชื้นในเมล็ดพันธุ์จากการอบแห้งนั้นมีค่ามากกว่าค่าความชื้นที่คำนวณจากถุงตัวอย่างในช่วงต้นของการอบแห้ง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการคำนวณจากถุงตัวอย่างมาจากการชั่งน้ำหนักตัวอย่างเดิมในถุงเดิมและวางในตำแหน่งเดิมตลอดการอบแห้ง แต่ค่าความชื้นของผลการอบแห้งนี้มาจากการสุ่มตัวอย่างข้าวทั่วทั้งภาตในระหว่างการอบแห้งซึ่งในช่วงต้นของการอบแห้งอาจสุ่มไปเจอข้าวจากบริเวณที่มีค่าความชื้นที่สูง (บริเวณตอนกลางและท้ายของห้องอบแห้ง) ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับอากาศอบแห้งต่อจากบริเวณอื่น ทำให้น้ำระเหยออกไปได้น้อยกว่าบริเวณอื่นเพราะในช่วงต้นของการอบแห้งนั้นน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์มีอยู่ที่บริเวณผิวของเมล็ดพันธุ์ในปริมาณมากส่งผลให้ได้รับความร้อนและทำการระเหยง่ายกว่าในช่วงท้ายการอบแห้งเป็นผลให้อากาศอบแห้งในช่วงเริ่มต้นการอบแห้งนั้นได้รับความชื้นจากผลิตภัณฑ์ในบริเวณด้านทางเข้าห้องอบแห้งในปริมาณมากและพ้ออากาศเคลื่อนที่มายังด้านท้ายของห้องอบแห้งอากาศจึงมีความสามารถในการรับน้ำได้น้อยลง แต่ในช่วงท้ายของการอบแห้งนั้นอากาศอบแห้งจะมีค่าความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่าในช่วงแรก เนื่องจากความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าวลดลงจนเหลือน้อยแล้วเมื่อเทียบกับในช่วงแรกและน้ำที่ระเหยยังเป็นน้ำที่อยู่ภายในเมล็ดพันธุ์ ซึ่งระเหยได้ยากกว่าน้ำที่ผิวเมล็ดพันธุ์อีกด้วย ส่งผลให้แม้ว่าจะสุ่มตัวอย่างไปเจอบริเวณที่รับอากาศอบแห้งต่อจากบริเวณอื่นแล้วแต่อากาศก็ยังสามารถที่จะรับน้ำเพิ่มได้อีก อย่างไรก็ตามผลต่างระหว่างค่าที่ได้ทั้งสองก็มีค่ามากที่สุดไม่เกิน 1%wb ดังนั้นวิธีการดังกล่าวนี้จึงสามารถนำไปใช้ในการหาค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ทางอ้อมเพื่อหาจุดยุติของการอบแห้งขณะทำการอบแห้งได้

#### 4.3.2 กราฟพฤติกรรมการอบแห้ง (Drying curve)

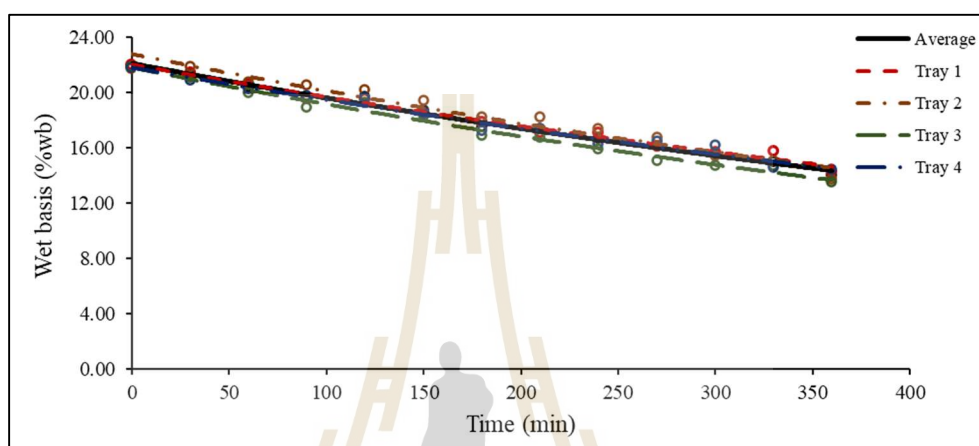
จากการทดสอบเครื่องอบแห้งต้นแบบด้วยการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยอบแห้งจนกระทั่งเมล็ดพันธุ์มีค่าความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 14 %wb โดยได้อบแห้ง 3 ครั้ง แต่แต่ละครั้งใช้เวลาโดยเฉลี่ย 360 นาที จากนั้นนำตัวอย่างเมล็ดพันธุ์ที่ถูกสุ่มเก็บระหว่างการอบแห้งมาหาค่าความชื้นเพื่อสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับระยะเวลาที่ใช้อบแห้งได้ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ถูกอบแห้งเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้

จากรูปที่ 4.15 พบว่าจากการอบแห้งทั้ง 3 ครั้ง ได้กราฟการลดลงของความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าวเทียบกับเวลาที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ดังสังเกตได้จากเส้นกราฟของการอบแห้งทั้ง 3 เส้น ที่มีแนวโน้มลู่เข้าหากันและมีบางช่วงที่กราฟทับกัน ซึ่งมีค่าความชื้นแต่ละครั้งที่แตกต่างกันมากที่สุดไม่ถึง 1%wb โดยจากกราฟพบว่าเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ค่าอัตราการลดลงของค่าความชื้นในเมล็ดพันธุ์หรือค่าความชื้นของกราฟจะมีค่าลดลง โดยกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นกราฟเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) ซึ่งถ้าหากยังคงอบแห้งต่อไปในระยะเวลาที่มากกว่านี้ ค่าความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าวจะมีแนวโน้มที่ลดลงจนมีค่าคงที่หรือถึงค่าความชื้นสมดุลตามหลักการของไอโซเทอมความชื้น (Sorption isotherm) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการอบแห้งช่วงเริ่มต้นนั้น น้ำที่ระเหยออกจากเมล็ดพันธุ์ข้าวจะเป็นน้ำที่อยู่บริเวณผิวของเมล็ดพันธุ์ซึ่งมีพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่มาก ส่งผลให้สามารถรับความร้อนและทำการระเหยได้ง่าย โดยเมื่อความชื้นที่ผิวเมล็ดพันธุ์ข้าวลดลง น้ำในโครงสร้างชั้นในของเมล็ดพันธุ์ข้าวจะเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่น้ำที่ผิวเมล็ดพันธุ์ข้าวเพื่อทดแทนความชื้นที่เสียไป โดยปริมาณน้ำภายในเมล็ดพันธุ์ข้าวจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เป็นผลให้อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำที่ออกมาจากโครงสร้างชั้นในของเมล็ดพันธุ์ข้าวมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ตามปริมาณน้ำภายในเมล็ดพันธุ์ข้าวเช่นกัน ส่งผลให้อัตราการลดลงของค่าความชื้นที่ได้มีค่าลดลงอย่างไรก็ตามการทดลองดังกล่าวนี้มีความจำเป็นต้องนำเมล็ดพันธุ์ข้าวหลังจากการอบแห้งไปทดสอบหาอัตราการงอก เพื่อทดสอบคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ข้าวหลังการอบแห้งจึงไม่สามารถอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวจนถึงค่าความชื้นสมดุลได้ ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายเนื่องจากความร้อนในเมล็ดพันธุ์ข้าว ดังนั้นจึงได้ทำการอบแห้งจนกระทั่งเมล็ดพันธุ์ข้าวมีค่าความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 14%wb (วิล ปาละวิสุทธิ์, 2549)

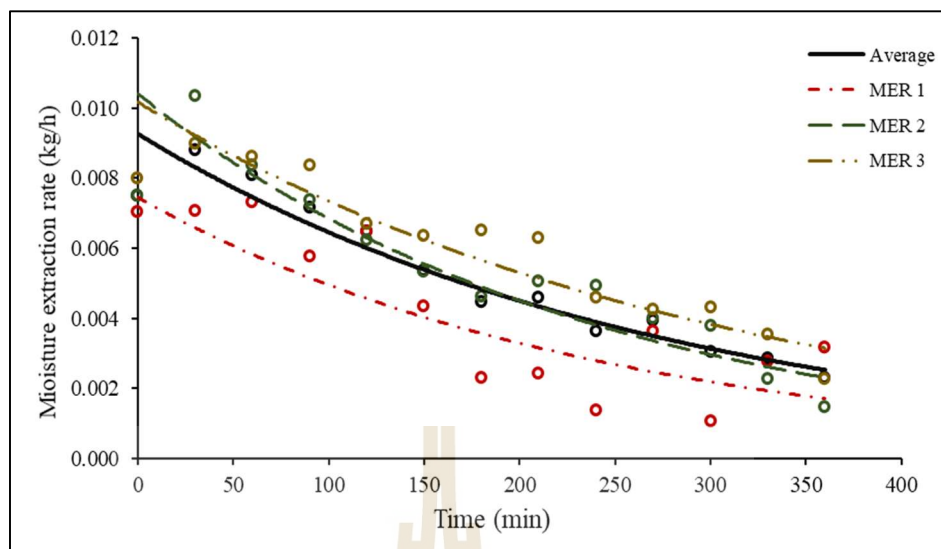
นอกจากนั้นเมื่อนำผลการอบแห้งของเมล็ดพันธุ์ข้าวในรอบย่อยซึ่งได้ผ่านการพิสูจน์มาแล้วว่าทั้ง 3 รอบมีผลการอบแห้งที่ใกล้เคียงกันมาสร้างกราฟความสัมพันธ์เพื่อเปรียบเทียบผลการอบแห้งในแต่ละถาด (Tray) ที่อยู่คนละชั้น โดยได้ใช้ผลการอบแห้งในรอบที่ 2 ซึ่งอยู่ตรงกลางระหว่างการอบแห้งทั้ง 3 รอบ โดยทำการอบแห้งจนกระทั่งเมล็ดพันธุ์มีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 14%wb และใช้เวลาโดยเฉลี่ย 360 นาที ได้ผลดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบผลการอบแห้งของถาด (Tray) ในแต่ละชั้น

จากรูปที่ 4.16 พบว่าจากการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบนั้น อากาศอบแห้งมีการกระจายตัวภายในห้องอบแห้ง (Drying chamber) อย่างทั่วถึง ดังสังเกตได้จากผลการอบแห้งในทั้ง 4 ถาด (เรียงลำดับจากชั้นบนสุดลงมาถึงชั้นล่างสุดเป็นถาดที่ 1-4) ที่ให้ผลการอบแห้งใกล้เคียงกัน ซึ่งสังเกตได้จากเส้นกราฟของการอบแห้งทั้ง 4 เส้น ที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกันทุกถาด โดยมีค่าความชื้นที่แตกต่างกันมากที่สุดไม่ถึง 2%wb ดังนั้นจึงสามารถอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ได้ในถาดทั้ง 4 ชั้น โดยยังคงให้ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้ใกล้เคียงกัน

นอกจากนั้นเมื่อทำการคำนวณค่าอัตราการควบแน่น (Moisture extraction rate, MER) โดยใช้ค่าความชื้นที่วัดได้จากเซนเซอร์ DHT 22 ที่บริเวณด้านลดความชื้นในชุดอุปกรณ์ ป้อนความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกระหว่างการอบแห้งจนกระทั่งถึงจุดยุติการอบแห้ง เมื่อเมล็ดพันธุ์ข้าวมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 14%wb มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ เพื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งในทั้ง 3 ชั้น ได้ผลดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 อัตราการควบแน่นน้ำที่ทำได้ในชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนโมอิลีเกทริกระหว่างการอบแห้ง

จากรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าอัตราการควบแน่นน้ำในอากาศอบแห้งที่ได้มีค่าลดลง โดยได้กราฟที่มีลักษณะเป็นกราฟเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในการอบแห้งช่วงเริ่มต้นนั้นน้ำที่ระเหยออกจากเมล็ดพันธุ์ข้าวจะเป็นน้ำที่อยู่บริเวณผิวของเมล็ดพันธุ์ข้าว ส่งผลให้สามารถรับความร้อนและทำการระเหยได้ง่าย ทำให้อากาศหลังจากการอบแห้งในช่วงแรกนั้นมีค่าความชื้นที่สูงและเมื่ออากาศหลังจากการอบแห้งเคลื่อนที่ผ่านด้านลดความชื้นในชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนโมอิลีเกทริกจึงเป็นผลให้ได้ค่าอัตราการควบแน่นน้ำมีค่ามากกว่าช่วงอื่น ๆ และเมื่อทำการอบแห้งต่อไปเรื่อย ๆ ค่าความชื้นที่ผิวเมล็ดพันธุ์ข้าวจะลดลง น้ำในโครงสร้างชั้นในของเมล็ดพันธุ์ข้าวจะเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่น้ำที่ผิวเมล็ดพันธุ์ข้าวเพื่อทดแทนความชื้นที่เสียไป โดยปริมาณน้ำภายในเมล็ดพันธุ์ข้าวจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เป็นผลให้อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำที่ออกมาจากโครงสร้างชั้นในของเมล็ดพันธุ์ข้าวมีค่าลดลงตามการลดลงของปริมาณน้ำภายในเมล็ดพันธุ์ข้าวเช่นกัน จึงทำให้ปริมาณความชื้นในอากาศหลังการอบแห้งมีค่าลดลง เนื่องจากน้ำในเมล็ดพันธุ์ข้าวระเหยเข้ามาน้อยลง และเมื่ออากาศหลังจากการอบแห้งเคลื่อนที่ผ่านด้านลดความชื้นในชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนโมอิลีเกทริก จึงเป็นผลให้ได้ค่าอัตราการควบแน่นน้ำที่ลดลง โดยลักษณะของกราฟที่ได้จะสัมพันธ์กับกราฟพฤติกรรมการอบแห้งเพราะมีสาเหตุมาจากปรากฏการณ์เดียวกัน

### 4.3.3 ค่าสมรรถนะของการอบแห้ง

จากการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิของอากาศอบแห้งเท่ากับ  $42^{\circ}\text{C}$  ด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ถูกสร้างขึ้น โดยระหว่างการอบแห้งได้ทำการเก็บข้อมูลตัวอย่างเมล็ดพันธุ์ข้าว ตลอดจนค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง เพื่อนำไปคำนวณหา ค่าสมรรถนะของการอบแห้งต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลของการอบแห้งตั้งแต่เริ่มต้นอบแห้งจนเมล็ดพันธุ์ มีค่าความชื้นสุดท้ายเท่ากับ  $14\%wb$  ได้ค่าสมรรถนะของการอบแห้งเฉลี่ยทั้ง 3 ซ้ำ ดังในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าสมรรถนะของการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบ เมื่อยุติการอบแห้งที่ความชื้น  $14\%wb$

Drying performance	
COP	$0.4 \pm 0.044$
DR ( $\text{kg}_{\text{water}}/\text{h}$ )	$0.089 \pm 0.006$
SMER ( $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kWh}$ )	$0.163 \pm 0.003$
SEC ( $\text{MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$ )	$22.068 \pm 0.401$

จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) มีค่ากับ 0.4 โดยเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยปั๊มความร้อนระบบอัดไอของ Soponronnarit et al. (2000) ที่ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ  $43^{\circ}\text{C}$  พบว่าได้ค่า COP เฉลี่ยเท่ากับ 4.64 จะเห็นว่าเครื่องอบแห้งต้นแบบมีค่า COP ที่น้อยกว่าปั๊มความร้อนระบบอัดไอ เนื่องจากเมื่อพิจารณาที่ชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกจะเห็นว่ายังมีค่าการถ่ายเทความร้อน ( $\dot{Q}_H$ ) ในฝั่งเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้งเพียง 0.0897 kW ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าพลังงานการถ่ายเทความร้อนของงานวิจัยที่ถูกนำมาเปรียบเทียบซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.7 kW ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกยังมีการระบายความร้อนออกมาจากด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่ไม่มากเท่าที่ควรเพราะมีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดครีบความร้อน (Heat sink) และพัดลมระบายความร้อน (Fan) บนครีบความร้อนที่สามารถใช้ขนาดที่ใหญ่กว่านี้ในการเพิ่มพื้นที่ผิวและอัตราการไหลอากาศเพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ แต่เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องของขนาดชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกและตัวเลือกของอุปกรณ์ที่มีอยู่อย่างจำกัดในท้องตลาด ซึ่งควรมีการออกแบบและสั่งทำครีบความร้อน และพัดลมระบายความร้อนให้มีขนาดสัมพันธ์กับขนาดของชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกจะเป็นทางเลือกที่ดีในการพัฒนาต่อไป แต่เมื่อพิจารณาที่องค์ประกอบและต้นทุนในการติดตั้งอุปกรณ์ จะเห็นว่าปั๊มความร้อนระบบอัดไอนั้นมีการติดตั้งอุปกรณ์เป็นจำนวนมาก ได้แก่การติดตั้งเครื่องควบแน่น เครื่องระเหย คอมเพรสเซอร์ วาล์วลดความดัน ระบบควบคุม และอุปกรณ์อื่น ๆ

อีกมากมาย ซึ่งทำให้ระบบมีความซับซ้อนและส่งผลให้มีต้นทุนในการติดตั้งอุปกรณ์ที่สูงถึง 323,407 บาท ซึ่งมากกว่าเครื่องอบแห้งต้นแบบของงานวิจัยนี้ที่เท่ากับ 22,791 บาท เนื่องจากเครื่องอบแห้งต้นแบบใช้อุปกรณ์ที่น้อยกว่า ตัวอย่างเช่น แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับเครื่องต้นแบบนี้สามารถทดแทนอุปกรณ์หลักในปั๊มความร้อนระบบอัดไอได้ถึง 2 อุปกรณ์ด้วยกันคือด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกแทนเครื่องควบแน่นและด้านเย็นแทนเครื่องระเหยและนอกจากนั้นปั๊มความร้อนระบบอัดไอนี้ยังใช้สารทำความเย็น R-22 ซึ่งถ้าหากเกิดการรั่วไหลจะเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเครื่องอบแห้งต้นแบบนี้ไม่ได้ใช้ แต่ใช้เพียงการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่ระบบเพียงเท่านั้น

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาค่าอัตราการอบแห้ง (DR) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.089 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$  โดยนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีการสร้างเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนที่เสริมการทำงานด้วยเครื่องอุ่นอากาศเทอร์โมอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งพริกชี้หนูแดงของพชร ว่องไพศาลกิจ (2562) โดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ  $54^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเครื่องอบแห้งดังกล่าวนี้มีรูปแบบของระบบการอบแห้งที่คล้ายคลึงกัน เนื่องจากเป็นงานวิจัยที่ถูกนำมาพัฒนาต่อเป็นเครื่องอบแห้งต้นแบบของงานวิจัยนี้พบว่าได้ค่าอัตราการอบแห้งเท่ากับ  $0.084 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$  จะเห็นว่าเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ถูกสร้างขึ้นมีค่าอัตราการอบแห้งที่สูงกว่างานวิจัยตัวอย่าง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเครื่องอบแห้งต้นแบบนี้ได้มีการติดตั้งพัดลมระบายอากาศเพิ่มบนครีบความร้อนที่เชื่อมกับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากครีบความร้อนเข้าสู่อากาศอบแห้ง นอกจากนี้ยังได้มีการปรับปรุงในส่วนของท่อบริเวณทางเข้าและออกของชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกให้มีลักษณะเป็นข้อต่อเปลี่ยนขนาดเพื่อลดค่าการสูญเสียรอง (Minor losses) ในการไหลของอากาศอบแห้งที่เข้าและออกจากชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกที่ต่อกับท่ออากาศอบแห้งที่มีขนาดของพื้นที่หน้าตัดแตกต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยดังกล่าวนี้ไม่มี และยังได้มีการทดสอบและคำนวณเพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้แก่ชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกรวมไปถึงค่าอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ที่เหมาะสมในการสร้างอากาศอบแห้ง ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวได้ยึดค่าอัตราส่วนตามงานวิจัยอื่นอีกที มิได้ทำการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนของอากาศผสมที่เหมาะสมกับระบบ

และเมื่อพิจารณาที่ค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ซึ่งเป็นค่าที่เป็นส่วนกลับกันได้เท่ากับ  $0.163 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kWh}$  และ  $22.068 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$  ตามลำดับ โดยเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ พชร ว่องไพศาลกิจ (2562) เช่นเดิมพบว่าได้ค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) เท่ากับ  $0.0723 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kWh}$  และ  $49.823 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$  ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าเครื่องอบแห้งต้นแบบมีค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะที่มากกว่าและยังมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่น้อยกว่างานวิจัย

ดังกล่าว ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเป็นไปตามเหตุผลที่ได้กล่าวมาในส่วนของทฤษฎีการวิเคราะห์ค่าอัตราการอบแห้ง นอกจากนี้เครื่องอบแห้งต้นแบบนี้เป็นระบบปิด (Close loop) ที่มีการหมุนเวียนอากาศ หลังจากการอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยที่ยกตัวอย่างมานั้นเป็นระบบเปิด (Open loop) ที่ปล่อยอากาศหลังการอบแห้งทิ้งไป นอกจากนี้เครื่องอบแห้งต้นแบบนี้ยังใช้เพียงแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในการสร้างอากาศอบแห้งซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยดังกล่าวที่ใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในการอุ่นอากาศก่อนเข้าสู่ฮีตเตอร์ (Heater) ซึ่งเป็นแหล่งความร้อนหลักในการสร้างอากาศอบแห้งซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้ามาเป็นพลังงานความร้อนทำให้ใช้พลังงานสูงกว่าแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพียงเพื่อถ่ายเทความร้อนจากด้านหนึ่งมายังอีกด้านหนึ่งของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเท่านั้น

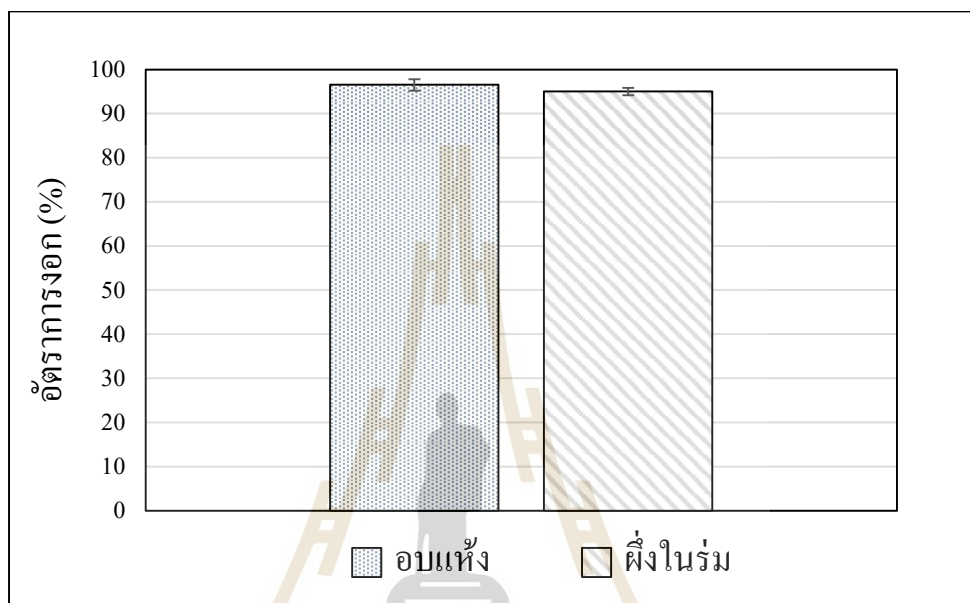
แต่อย่างไรก็ตามเครื่องอบแห้งจากทั้ง 2 งานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุอบแห้งที่ต่างชนิดกัน และมีค่าความชื้นเริ่มต้นที่ต่างกัน นอกจากนี้ในพริกยังมีสารเคลือบ (Wax of chilies) ซึ่งส่งผลให้น้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างพริกเคลื่อนที่ออกมาที่ผิวได้ยาก (พชร ว่องไพศาลกิจ, 2562) ดังนั้นจึงควรพิจารณาในส่วนนี้ด้วยเมื่อต้องการเปรียบเทียบการทำงานของระบบทั้งสองด้วยกัน

#### 4.3.4 ผลการลดความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยวิธีการผึ่งในร่ม

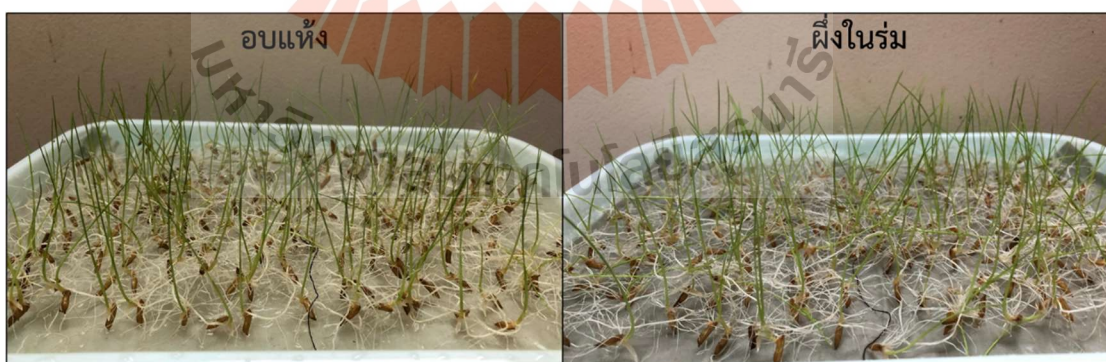
จากการลดความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ด้วยวิธีการผึ่งในร่ม โดยได้ทำการผึ่งเมล็ดพันธุ์ข้าวไว้ในที่ร่มซึ่งมีน้ำหนักเริ่มต้นเท่ากับ 1 kg จนกระทั่งน้ำหนักของเมล็ดพันธุ์ข้าวมีค่าคงที่ (มีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.5 g) ซึ่งหมายถึงความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าวถึงจุดสมดุลแล้ว โดยใช้เวลารวมทั้งสิ้น 12 วัน จากนั้นจึงสุ่มตัวอย่างของเมล็ดพันธุ์ข้าวไปหาค่าความชื้นได้เท่ากับ 11%wb และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson ในกรณีไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption isotherms) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ดังในตารางที่ 4.2 โดยใช้สภาวะอากาศที่อุณหภูมิห้องในที่ร่มคือประมาณ 25°C และที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศเฉลี่ยเท่ากับ 69% โดยอ้างอิงจากข้อมูลสภาวะอากาศในจังหวัดนครราชสีมาของกรมอุตุนิยมวิทยา (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2565) พบว่าได้ค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดพันธุ์ข้าวเท่ากับ 12%wb จะเห็นได้ว่าค่าความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันโดยแตกต่างกันเพียง 1%wb ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105

#### 4.4 การทดสอบคุณภาพของเมล็ดพันธุ์

สำหรับการทดสอบคุณภาพเมล็ดพันธุ์ข้าวหลังจากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบนั้น ได้ใช้วิธีการทดสอบหาอัตราการงอก (Germination test) จากนั้นนำค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ผ่านการลดความชื้นด้วยวิธีการผึ่งในร่มได้ผลดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105



รูปที่ 4.19 การงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากรูปที่ 4.18 พบว่าได้ค่าอัตราการงอกเฉลี่ยของเมล็ดพันธุ์ข้าวจากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน โดยจากการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Student t test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าค่าเฉลี่ยของ 2 กลุ่มนี้แตกต่างกัน นั่นคือกลุ่มเครื่องอบแห้งมีค่า 97% ซึ่งสูงกว่ากลุ่มผึ่งในร่ม



ที่มีค่า 95% โดยค่าอัตราการงอกจากวิธีการทั้งสองมีค่ามากกว่า 80% ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของเมล็ดพันธุ์ข้าวของกรมการข้าว ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการอบแห้งด้วยวิธีการผึ่งในร่มนั้นได้ใช้เวลาถึง 3 วัน จึงจะมีค่าความชื้นสุดท้ายของเมล็ดพันธุ์ข้าวน้อยกว่า 14%wb ซึ่งนานกว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้เวลาเพียง 6 ชั่วโมง ทำให้เมล็ดพันธุ์ที่ผ่านการลดความชื้นด้วยการผึ่งในร่มนั้นอยู่ในสภาวะเมล็ดพันธุ์ข้าวขึ้นเป็นเวลานานกว่าวิธีการอบแห้ง ซึ่งค่าความชื้นนั้นมีผลต่อการเสื่อมสภาพของเมล็ดพันธุ์ (วิลโล ปาละวิสุทธิ, 2549) จึงทำให้เมล็ดพันธุ์ที่ผ่านการลดความชื้นด้วยวิธีการผึ่งในร่มนี้มีค่าอัตราการงอกที่น้อยกว่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสามารถนำเครื่องอบแห้งต้นแบบดังกล่าวนี้ใช้ในการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวได้



## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

สำหรับการสร้างเครื่องอบแห้งป้อนความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกนั้น ในช่วงเริ่มต้นได้มีการทดลองหาค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งเป็นวัสดุอบแห้งเพื่อนำผลการทดลองที่ได้มาใช้ในการออกแบบสภาวะอากาศอบแห้งและสภาวะสำหรับการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ข้าวหลังการอบแห้ง การสอบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT 22 สำหรับนำไปติดตั้งในเครื่องอบแห้งต้นแบบ เพื่อนำไปสู่การสร้างเครื่องอบแห้งต้นแบบสำหรับการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ตลอดจนการประเมินประสิทธิภาพในการอบแห้งและคุณภาพของเมล็ดพันธุ์หลังการอบแห้ง โดยได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

##### 5.1.1 การหาค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการหาไอโซเทอมความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อค่าไอโซเทอมความชื้น โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุลลดลงที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีหรือค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเดียวกัน และจากการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายค่าไอโซเทอมความชื้น พบว่าที่อุณหภูมิ 25°C แบบจำลองของ Henderson มีความเหมาะสมที่สุด ที่อุณหภูมิ 40°C กรณีไอโซเทอมการดูดความชื้นแบบจำลองของ Chung & Pfof มีความเหมาะสมที่สุด กรณีไอโซเทอมการคายความชื้นแบบจำลองของ Henderson มีความเหมาะสมที่สุด ที่อุณหภูมิ 60°C กรณีไอโซเทอมการดูดความชื้นแบบจำลองของ Peleg มีความเหมาะสมที่สุด กรณีไอโซเทอมการคายความชื้นแบบจำลองของ Henderson มีความเหมาะสมที่สุดและที่อุณหภูมิ 70°C แบบจำลองของ Peleg มีความเหมาะสมที่สุด

##### 5.1.2 การสอบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT 22

จากการสอบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT 22 พบว่าเซนเซอร์วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศได้สูงกว่าค่าจากเครื่องมือวัดอ้างอิง โดยเมื่อนำเซนเซอร์ดังกล่าวนี้ไปวัดค่าความชื้นในบริเวณที่มีอุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าที่วัดได้มีค่าความคลาดเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าเซนเซอร์ที่ถูกผลิตจากบริษัทเดียวกัน เมื่อนำมาวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นที่สภาวะเดียวกันจะทำให้ได้ค่าผลการวัดที่ใกล้เคียงกัน เป็นผลให้สามารถใช้สมการปรับแก้ตัวเดียวกันได้

### 5.1.3 การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งต้นแบบ

จากผลการทดสอบเครื่องอบแห้งต้นแบบพบว่า ได้ข้อสรุปของการทดสอบการอบแห้งดังต่อไปนี้

#### 5.1.3.1 การประเมินความชื้นของเมล็ดพันธุ์เพื่อประมาณจุดยุติการอบแห้ง

ในส่วนของการประเมินค่าความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวในห้องอบแห้งทางอ้อมผ่านการคำนวณความชื้นที่ลดลงในถุงข้าวตัวอย่าง เพื่อประมาณหาจุดยุติในการอบแห้งพบว่าวิธีการดังกล่าวนี้สามารถทำนายค่าความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวได้อย่างแม่นยำ โดยผลต่างระหว่างค่าความชื้นจากการอบแห้งเฉลี่ยทั้ง 3 ซ้ำ กับค่าความชื้นที่คำนวณได้จากถุงตัวอย่างเฉลี่ย (Sample) มีค่ามากที่สุดไม่เกิน 1%wb ดังนั้นวิธีการดังกล่าวนี้จึงสามารถนำไปใช้ในการหาค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ทางอ้อมเพื่อหาจุดยุติของการอบแห้งขณะทำการอบแห้งได้

#### 5.1.3.2 กราฟพฤติกรรมของการอบแห้ง (Drying curve)

จากการทดสอบเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ถูกสร้างขึ้นด้วยการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่าสามารถทำการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวจนถึงค่าความชื้นที่ต้องการได้ โดยจากกราฟพบว่าเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ค่าอัตราการลดลงของค่าความชื้นในเมล็ดพันธุ์หรือค่าความชื้นของกราฟจะมีค่าลดลง นอกจากนั้นยังพบอีกว่าผลการอบแห้งในถัง 4 ถาด ให้ผลการอบแห้งที่ใกล้เคียงกันโดยมีค่าความชื้นที่แตกต่างกันมากที่สุดไม่ถึง 2%wb ดังนั้นจึงสามารถอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ได้ในถาดทั้ง 4 ชั้น โดยยังคงให้ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ใกล้เคียงกัน

#### 5.1.3.3 ค่าสมรรถนะของการอบแห้ง

จากการคำนวณหาค่าสมรรถนะของการอบแห้ง พบว่าได้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) เท่ากับ 0.4 ซึ่งเป็นค่าที่น้อย เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับปั๊มความร้อนระบบอัดไอที่มีการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวเช่นกัน แต่ก็มีข้อดีตรงที่มีความซับซ้อนและต้นทุนในการติดตั้งอุปกรณ์ที่น้อยกว่า นอกจากนั้นยังมีได้ใช้สารทำความเย็นในระบบอีกด้วย และในส่วน of ค่าอัตราการอบแห้ง (DR) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.089 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$  ค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) ที่มีค่าเท่ากับ  $0.163 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kWh}$  และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ที่มีค่าเท่ากับ  $22.068 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$  พบว่าเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ถูกสร้างขึ้นมีค่าอัตราการอบแห้งและค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะที่เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นยังได้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ลดลง เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสมรรถนะของการอบแห้งจากงานวิจัยที่มีการสร้างเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนที่เสริมการทำงานด้วยเครื่องอุ่นอากาศเทอร์โมอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งพริกชี้หนูแดง ซึ่งเครื่องอบแห้งดังกล่าวนี้มีรูปแบบของระบบการอบแห้งที่คล้ายคลึงกันและเป็นงานวิจัยที่ถูกนำมาพัฒนาต่อเป็นเครื่องอบแห้งต้นแบบของงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นระบบเปิดและมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าในระบบอีกด้วย

#### 5.1.3.4 ผลการลดความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าวด้วยวิธีการผึ่งในร่ม

จากการลดความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ด้วยวิธีการผึ่งในร่ม พบว่าได้ค่าความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 11%wb และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson ในกรณีไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption isotherms) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่สภาวะเดียวกัน พบว่าได้ค่าความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ใกล้เคียงกันโดยแตกต่างกันเพียง 1%wb ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105

#### 5.1.4 การทดสอบคุณภาพของเมล็ดพันธุ์

จากการทดสอบคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ข้าวหลังจากการอบแห้งของเครื่องอบแห้งต้นแบบด้วยวิธีการทดสอบหาอัตราการงอก (Germination test) และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการลดความชื้นด้วยวิธีการผึ่งในร่ม พบว่าค่าอัตราการงอกเฉลี่ยของเมล็ดพันธุ์ข้าวของทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกันและมีค่ามากกว่า 80% ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของเมล็ดพันธุ์ข้าวของกรมการข้าว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสามารถนำเครื่องอบแห้งต้นแบบดังกล่าวนี้ไปใช้อบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกนั้น ยังคงมีการระบายความร้อนออกมาจากด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่ไม่มากเท่าที่ควรเพราะมีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดครีบริบความร้อน (Heat sink) และพัดลมระบายความร้อน (Fan) บนครีบริบความร้อนที่สามารถใช้ขนาดที่ใหญ่กว่านี้ในการเพิ่มพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนและอัตราการไหลอากาศในการถ่ายเทความร้อนได้ แต่เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องของขนาดชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกและตัวเลือกของอุปกรณ์ที่มีอยู่อย่างจำกัดในท้องตลาด ซึ่งควรมีการออกแบบและสั่งทำครีบริบความร้อนและพัดลมระบายความร้อนให้มีขนาดสัมพันธ์กับขนาดของชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกจะเป็นทางเลือกที่ดีในการพัฒนาต่อไป

## รายการอ้างอิง

- กรมการข้าว. (2553). ข้าวขาวดอกมะลิ 105. กรุงเทพฯ: สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว.
- กรมวิชาการเกษตร. (2547). ข้าว. กรุงเทพฯ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- กรมอุตุนิยมวิทยา. (2565). สรุปลักษณะอากาศรายเดือน. สืบค้น 27 มกราคม 2565. จาก <https://www.tmd.go.th/programs/uploads/monthlySummary/%E0%B8%98%E0%B8%84%202564.pdf>
- กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2560). มาตรฐานสินค้าเกษตร มกษ. 4000 - 2560 ข้าวหอมมะลิไทย. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ .
- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2561). การทบทวนอัตราค่าไฟฟ้า. สืบค้น 14 กุมภาพันธ์ 2565. จาก [https://www.pea.co.th/Portals/0/demand\\_response/ElectricityReconsiderNov61.pdf?ver=2019-01-25-100804-110](https://www.pea.co.th/Portals/0/demand_response/ElectricityReconsiderNov61.pdf?ver=2019-01-25-100804-110).
- กิตติคุณ ปิตุพรหมพันธุ์, ญัฐพล ภูมิสะอาด และละมุล วิเศษ. (2556). การอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกโดย เครื่องอบแห้งแบบบีบความร้อน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 32(5), 622-625.
- ชนันท์ ราชภูนิยม และสุนทร สืบคำ. (2555). การหาไอโซเทอมความชื้นของวัสดุที่ แลกเปลี่ยนความชื้นได้ดี. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, 18(1), 43-51.
- ญัฐหทัย เอพาณิช. (2547). การตรวจสอบคุณภาพเมล็ดพันธุ์. กรุงเทพฯ: สำนักวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ กรมวิชาการเกษตร.
- เทวรัตน์ ทิพยวิมล. (2552). การอบแห้งและการเก็บรักษาผลผลิตทางการเกษตร: เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 96-114.
- เทวรัตน์ ทิพยวิมล. (2555). การคงคุณภาพฝักรอบแห้งที่สำเร็จรูปด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบบีบความร้อน. รายงานการวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- นัฐราช แสนมีมา, ญัฐพล ภูมิสะอาด และละมุล วิเศษ. (2013). การอบแห้งขี้มันชันด้วยเครื่องอบแห้งแบบบีบความร้อน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 32(5), 631-635.
- ปฐมพงษ์ จิโน, ถิรายุ ปิ่นทอง และโกเมน หมายมัน. (2014). การ ศึกษาระบบทำน้ำร้อนและน้ำเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์ร่วมกับโซลาร์เซลล์. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 19(3), 231-243.

- เพชร ว่องไพศาลกิจ. (2562). การประยุกต์ใช้ไมโครเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในระบบการอบแห้งอุณหภูมิต่ำ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- เพชร ว่องไพศาลกิจ, กระจวี ตรีอำนาจ และเทวรัตน์ ตรีอำนาจ. (2563). การอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้ง อุณหภูมิต่ำที่เสริมการทำงานด้วย เครื่องอุ่นอากาศเทอร์โมอิเล็กทริก. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร, 14(1), 82-96.
- ฤทธิชัย อัครราชันย์. (2554). การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วย คลื่นไมโครเวฟ. วิศวกรรมสาร เกษมบัณฑิต, 1(2), 31-42.
- วิไล ปาละวิสุทธิ. (2549). เทคโนโลยีการผลิตเมล็ดพันธุ์ข้าวเชิงพาณิชย์. พิษณุโลก: กรมวิชาการ เกษตร.
- วิไล รังสาดทอง. (2547). เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. กรุงเทพฯ: ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม เกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ศรัณรัตน์ คงมั่น. (2564). การประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกทำความเย็นสารละลายปุ๋ยสำหรับปลูกผักสลัดด้วยวิธีแอโรโพนิกส์. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, 27(1), 7-7.
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ. (2540). การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สมชาย มณีวรรณ, มานพ ทองเกษม และนิวัฒน์ หอมทวล. (2549). ระบบระบายความร้อนซีพียูโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล. วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 14(3), 1-10.
- สยามคูโบต้า. (2559). ที่มาของข้าวขาวดอกมะลิ 105 และความรู้เกี่ยวกับข้าวไวแสง. สืบค้น 10 เมษายน 2564. จาก <https://www.kubotasolutions.com/knowledge/rice/detail/37>
- อิทธิพล พึ่งเมือง. (2559). เครื่องควบแน่นน้ำโดยประยุกต์ใช้เพลเทียร์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- เอชินิวส์. (2561). ข้าวหอมมะลิไทยไปฮ่องกงทะเล 2 แสนตันครั้งแรกในรอบ 10 ปี. สืบค้น 10 เมษายน 2564. จาก [http://www.acnews.net/detailnews.php?news\\_id=N256122716](http://www.acnews.net/detailnews.php?news_id=N256122716)
- Abe, T., & Afzal, T. (1997). Thin-layer infrared radiation drying of rough rice. Journal of Agricultural Engineering Research, 67(4), 289-297.

- Aktas, M., Taseri, L., Sevik, S., Gulcu, M., Uysal Seckin, G. and Dolgun, E. C. (2019). Heat pump drying of grape pomace: Performance and product quality analysis. *Drying Technology*, 37(14), 1766-1779.
- Al-Madhhachi, H. and Min, G. (2017). Effective use of thermal energy at both hot and cold side of thermoelectric module for developing efficient thermoelectric water distillation system. *Energy Conversion and Management*, 133, 14-19.
- Al-Muhtaseb, A., McMinn, W. and Magee, T. (2002). Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review. *Food and bioproducts processing*, 80(2), 118-128.
- Andrade, S. P. C. and Hensel, O. (2013). Experimental determination and mathematical fitting of sorption isotherms for Lemon Balm (*Melissa officinalis* L.). *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(1), 139-145.
- AOAC, O. (1990). *Official Methods of Analysis*. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA.
- Aptula, A. O., Jeliaskova, N. G., Schultz, T. W. and Cronin, M. T. (2005). The better predictive model: high  $q^2$  for the training set or low root mean square error of prediction for the test set *Qsar & Combinatorial Science*, 24(3), 385-396.
- ASHRAE. (2001). *ASHRAE Fundamentals Handbook (SI)*: American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Aviara, N., Ajibola, O., Aregbesola, O. and Adedeji, M. (2006). Moisture sorption isotherms of sorghum malt at 40 and 50 C. *Journal of stored products research*, 42(3), 290-301.
- Bahloul, N., Boudhrioua, N. and Kechaou, N. (2008). Moisture desorption-adsorption isotherms and isosteric heats of sorption of Tunisian olive leaves (*Olea europaea* L.). *Industrial crops and products*, 28(2), 162-176.
- Barrozo, M., Silva, A. and Oliveira, D. (2008). The use of curvature and bias measures to discriminate among equilibrium moisture equations for mustard seed. *Journal of stored products research*, 44(1), 65-70.
- Bejar, A. K., Mihoubi, N. B. and Kechaou, N. (2012). Moisture sorption isotherms- Experimental and mathematical investigations of orange (*Citrus sinensis*) peel and leaves. *Food Chemistry*, 132(4), 1728-1735.

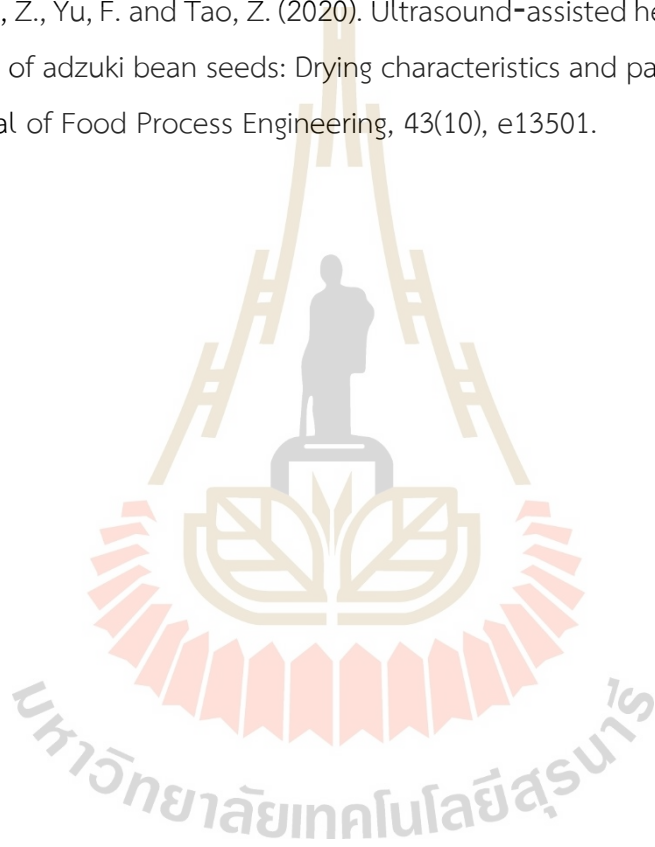
- Bingol, G., Prakash, B. and Pan, Z. (2012). Dynamic vapor sorption isotherms of medium grain rice varieties. *LWT-Food Science and Technology*, 48(2), 156-163.
- Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W. and Hall, C. W. (1992). *Drying and storage of grains and oilseeds*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Brunauer, S., Deming, L. S., Deming, W. E. and Teller, E. (1940). On a theory of the van der Waals adsorption of gases. *Journal of the American Chemical society*, 62(7), 1723-1732.
- Campos, R. C., Corrêa, P. C., Fernandes, L. S., Baptestini, F. M., Costa, C. F. and Bustos-Vanegas, J. D. (2016). Bean grain hysteresis with induced mechanical damage. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(10), 930-935.
- Chua, K., Mujumdar, A., Chou, S., Ho, J. and Hawlader, M. (2000). Heat pump drying systems: Principles, applications and potential. *Developments in Drying*, 2, 95-134.
- Department of International Trade Promotion. (2020). 12th The Rice Trader World Rice Conference. Retrieved 20 May 2020 from [https://www.ditp.go.th/korea/ewt\\_news.php?nid=762&filename=foreignbuyer](https://www.ditp.go.th/korea/ewt_news.php?nid=762&filename=foreignbuyer)
- Enescu, D., Ciocia, A., Mazza, A. and Russo, A. (2017). Solutions based on thermoelectric refrigerators in humanitarian contexts. *sustainable energy technologies and assessments*, 22, 134-149.
- Goneli, A. L., Correa, P. C., de Oliveira, G. H., Resende, O. and Mauad, M. (2016). Moisture sorption isotherms of castor beans. Part 1: Mathematical modeling and hysteresis. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(8), 751-756.
- Goneli, A. L. D., Correa, P. C., De Oliveira, G. H. H., Gomes, C. F. and Botelho, F. M. (2010). Water sorption isotherms and thermodynamic properties of pearl millet grain. *International journal of food science & technology*, 45(4), 828-838.
- Goula, A. M., Karapantsios, T. D., Achilias, D. S. and Adamopoulos, K. G. (2008). Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp. *Journal of food engineering*, 85(1), 73-83.
- Greenspan, L. (1977). Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *Journal of research of the national bureau of standards*, 81(1), 89-96.



- He, R.-R., Zhong, H.-Y., Cai, Y., Liu, D. and Zhao, F.-Y. (2017). Theoretical and experimental investigations of thermoelectric refrigeration box used for medical service. *Procedia Engineering*, 205, 1215-1222.
- Henderson, S. M. and Perry, R. L. (1997). *Principles of process engineering: Kenya Agricultural Research Institute (KARI)*.
- Hossain, M., Bala, B., Hossain, M. and Mondol, M. (2001). Sorption isotherms and heat of sorption of pineapple. *Journal of food engineering*, 48(2), 103-107.
- Idris, A., Khalid, K. and Omar, W. (2004). Drying of silica sludge using microwave heating. *Applied thermal engineering*, 24(5-6), 905-918.
- Jain, D. and Pathare, P. B. (2004). Selection and evaluation of thin layer drying models for infrared radiative and convective drying of onion slices. *Biosystems Engineering*, 89(3), 289-296.
- Kusriyanto, M. and Putra, A. A. (2018). Weather Station Design Using IoT Platform Based On Arduino Mega. Paper presented at the 2018 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD).
- Legg, R. (2017). *Air conditioning system design*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Li, J., Ma, B., Wang, R. and Han, L. (2011). Study on a cooling system based on thermoelectric cooler for thermal management of high-power LEDs. *Microelectronics Reliability*, 51(12), 2210-2215.
- Lou, L., Shou, D., Park, H., Zhao, D., Wu, Y. S., Hui, X. and Fan, J. (2020). Thermoelectric air conditioning undergarment for personal thermal management and HVAC energy saving. *Energy and Buildings*, 226, 110374.
- Ouafi, N., Moghrani, H., Benaouada, N., Yassaa, N., Maachi, R. and Younsi, R. (2015). Moisture sorption isotherms and heat of sorption of Algerian bay leaves (*Laurus nobilis*). *Maderas. Ciencia y tecnología*, 17(4), 759-772.
- Pagano, A. M. and Mascheroni, R. H. (2005). Sorption isotherms for amaranth grains. *Journal of Food Engineering*, 67(4), 441-450.
- Rinnan, A., Van Den Berg, F. and Engelsens, S. B. (2009). Review of the most common pre-processing techniques for near-infrared spectra. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 28(10), 1201-1222.

- Román, F. and Hensel, O. (2010). Sorption isotherms of celery leaves (*Apium graveolens* var. *secalinum*). *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 12(3-4), 137-141.
- Saelim, N. (2017). Continuous flow paddy drying with infrared radial radiation technique. (Degree of Master of Engineering in Mechanical and Process System Engineering). Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima.
- Saensabai, P. and Prasertsan, S. (2003). Effects of component arrangement and ambient and drying conditions on the performance of heat pump dryers. *Drying technology*, 21(1), 103-127.
- Sharma, G., Verma, R. and Pathare, P. (2005). Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of food engineering*, 71(3), 282-286.
- Sihombing, Y. A. and Listiari, S. (2020). Detection of air temperature, humidity and soil pH by using DHT22 and pH sensor based Arduino nano microcontroller. The 1st International Conference on Physics and Applied Physics (The 1st ICP&AP) 2019 at Universitas Sumatera Utara, Medan, 12-13 September: 100008.
- Sinija, V. and Mishra, H. (2008). Moisture sorption isotherms and heat of sorption of instant (soluble) green tea powder and green tea granules. *Journal of food engineering*, 86(4), 494-500.
- Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A., Wetchacama, S., Swasdisevi, T. and Rukprang, P. (1998). Fruit drying using heat pump. *International Energy Journal*, 20(1), 39-53.
- Soponronnarit, S., Wetchacama, S. and Kanphukdee, T. (2000). Seed drying using a heat pump. *International Energy Journal*, 1(2), 97-102.
- Souza, S. J. F. d., Alves, A. I., Vieira, E. N. R., Vieira, J. A. G., Ramos, A. M. and Telis-Romero, J. (2015). Study of thermodynamic water properties and moisture sorption hysteresis of mango skin. *Food Science and Technology*, 35(1), 157-166.
- Thai Rice Exporters Association. (2021). Rice Export Quantity and Value : 2020. Retrieved 20 May 2021 from [http://www.thairiceexporters.or.th/statistic\\_2020.html](http://www.thairiceexporters.or.th/statistic_2020.html)

- Troller, J. (2012). Water activity and food. New York: A Subsidiary of Harcourt Brace Jovanovich.
- Yadav, A. K., Singh, S. and Gupta, G. (2014). Solar Air-Conditioning: Design for a Compressor-Less System using Peltier Effect. International Journal, 2(2), 429-432.
- Yang, Z., Li, X., Tao, Z., Luo, N. and Yu, F. (2018). Ultrasound-assisted heat pump drying of pea seed. Drying Technology, 36(16), 1958-1969.
- Yang, Z., Yang, Z., Yu, F. and Tao, Z. (2020). Ultrasound-assisted heat pump intermittent drying of adzuki bean seeds: Drying characteristics and parameter optimization. Journal of Food Process Engineering, 43(10), e13501.





ภาคผนวก ก  
ตารางผลการเก็บข้อมูล

ตารางที่ ก.1 ผลการเก็บข้อมูลของค่าความชื้นสมมูลของเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ของ  
ไอโซเทอมการดูดความชื้นและการคายความชื้นที่อุณหภูมิ 25°C

%RH	ไอโซเทอมการดูดความชื้น (%db)				ไอโซเทอมการคายความชื้น (%db)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
8.23	2.29	2.39	2.39	2.36	4.23	4.26	4.42	4.30
32.78	6.68	6.47	6.57	6.57	8.31	8.46	8.52	8.43
52.89	9.01	9.16	9.12	9.10	11.73	11.83	11.55	11.70
75.29	12.96	13.00	12.96	12.97	15.40	15.46	15.39	15.42
84.34	15.40	15.03	15.11	15.18	17.67	17.63	17.58	17.62

ตารางที่ ก.2 ผลการเก็บข้อมูลของค่าความชื้นสมมูลของเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ของ  
ไอโซเทอมการดูดความชื้นและการคายความชื้นที่อุณหภูมิ 40°C

%RH	ไอโซเทอมการดูดความชื้น (%db)				ไอโซเทอมการคายความชื้น (%db)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
6.26	1.53	1.46	1.52	1.50	2.91	2.70	2.58	2.73
31.60	5.85	5.79	5.82	5.82	7.20	6.86	7.03	7.03
48.42	7.58	7.48	7.48	7.52	9.85	9.46	9.40	9.57
74.68	11.94	11.92	11.47	11.78	13.45	13.15	13.18	13.26
82.32	13.77	13.48	13.32	13.53	15.08	14.92	14.63	14.87

ตารางที่ ก.3 ผลการเก็บข้อมูลของค่าความชื้นสมมูลของเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ของ  
ไอโซเทอมการดูดความชื้นและการคายความชื้นที่อุณหภูมิ 60°C

%RH	ไอโซเทอมการดูดความชื้น (%db)				ไอโซเทอมการคายความชื้น (%db)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
6.26	1.14	1.11	1.03	1.09	1.83	2.08	2.03	1.98
31.60	4.64	4.51	4.37	4.51	5.27	5.39	5.12	5.26
48.42	6.05	6.31	5.97	6.11	6.33	6.47	6.09	6.29
74.68	10.68	10.20	10.10	10.33	11.00	10.83	10.55	10.79
82.32	11.50	11.13	11.09	11.24	11.48	11.45	11.15	11.36

ตารางที่ ก.4 ผลการเก็บข้อมูลของค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ของ  
ไอโซเทอมการดูดความชื้นและการคายความชื้นที่อุณหภูมิ 70°C

%RH	ไอโซเทอมการดูดความชื้น (%db)				ไอโซเทอมการคายความชื้น (%db)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
5.32	0.96	1.01	1.02	1.00	1.35	1.37	1.47	1.39
27.77	4.18	4.10	4.15	4.14	4.69	4.69	4.66	4.68
75.06	10.30	10.26	10.24	10.27	10.28	10.37	10.33	10.33
79.49	10.94	10.92	10.91	10.92	10.97	10.93	10.90	10.94

ตารางที่ ก.5 ผลการเก็บข้อมูลของค่าความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ในการทดสอบ  
เครื่องอบแห้งในการทดลองที่ 1

เวลา (min)	ความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าว (%wb)				
	ถาดที่ 1	ถาดที่ 2	ถาดที่ 3	ถาดที่ 4	เฉลี่ย
0	22.34	22.30	21.89	22.18	22.18
30	21.15	21.44	20.84	21.29	21.18
60	20.85	20.88	21.00	20.96	20.92
90	19.90	20.70	19.88	20.75	20.31
120	19.07	19.69	18.73	18.81	19.08
150	18.17	19.56	17.96	18.99	18.67
180	17.54	18.80	17.28	16.50	17.53
210	16.54	17.23	16.89	16.73	16.85
240	15.73	15.77	15.63	16.96	16.02
270	15.91	15.87	15.43	15.79	15.75
300	15.35	15.43	15.01	15.70	15.37
330	14.26	15.09	15.12	16.18	15.16
360	14.17	15.35	13.50	14.98	14.50
390	14.45	14.37	13.11	14.48	14.10
420	14.28	14.15	13.60	13.91	13.98
450	13.30	13.60	12.80	13.84	13.38

ตารางที่ ก.6 ผลการเก็บข้อมูลของค่าความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในการทดสอบ  
เครื่องอบแห้งในการทดลองที่ 2

เวลา (min)	ความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าว (%wb)				เฉลี่ย
	ถาดที่ 1	ถาดที่ 2	ถาดที่ 3	ถาดที่ 4	
0	21.99	21.68	21.86	21.73	21.82
30	21.40	21.86	21.05	20.86	21.29
60	20.55	20.71	19.94	20.19	20.35
90	19.52	20.49	18.86	19.76	19.66
120	19.55	20.16	19.24	19.59	19.63
150	18.48	19.35	18.28	18.47	18.64
180	17.85	18.17	16.86	17.19	17.52
210	17.06	18.21	16.70	17.33	17.33
240	17.08	17.31	15.86	16.20	16.61
270	16.09	16.68	15.02	16.40	16.05
300	15.63	15.39	14.66	16.18	15.47
330	15.75	15.02	14.68	14.52	14.99
360	14.25	13.70	13.47	14.38	13.95
390	14.20	13.84	13.25	14.30	13.90
420	12.92	13.32	13.25	13.38	13.22
450	12.58	13.30	12.56	13.32	12.94

ตารางที่ ก.7 ผลการเก็บข้อมูลของค่าความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในการทดสอบ  
เครื่องอบแห้งในการทดลองที่ 3

เวลา (min)	ความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าว (%wb)				เฉลี่ย
	ถาดที่ 1	ถาดที่ 2	ถาดที่ 3	ถาดที่ 4	
0	21.71	21.59	21.93	21.77	21.75
30	21.28	21.18	21.80	20.69	21.24
60	20.41	20.00	20.41	19.52	20.09
90	19.71	20.41	19.01	19.46	19.65
120	19.03	18.63	19.12	19.33	19.03
150	18.24	18.87	17.45	19.06	18.40
180	17.15	17.66	16.64	18.82	17.57
210	16.89	16.39	16.43	18.68	17.10
240	15.21	15.80	15.16	17.49	15.91
270	14.87	15.09	14.14	15.98	15.02
300	13.72	15.14	13.99	15.66	14.63
330	13.95	14.60	13.50	14.67	14.18
360	13.91	13.77	13.78	13.20	13.67
390	13.31	13.12	12.43	12.91	12.94
420	13.48	11.93	12.15	12.43	12.50
450	12.67	11.61	11.58	12.40	12.07

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบหาอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105

หมายเลขการทดสอบ	อัตราการงอก (%)	
	การรอบแห้ง	การผึ่งในร่ม
1	95	94
2	97	95
3	96	95
4	98	96
เฉลี่ย	97	95



ตารางที่ ก.9 ผลการปรับสภาวะอากาศของชุดอุปกรณ์ทำความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก โดยอ้างอิง  
ข้อมูลจากผลการอบแห้งในรอบที่ 2 ที่เวลาในการอบแห้งเท่ากับ 180 นาที

Air input (Number 1)	Temperature (°C)	37.3
	Relative humidity (%)	34.2
	Abs humidity ( $g_{\text{water}}/kg_{\text{Dry air}}$ )	13.585
TEC's hot side (Number 2)	Temperature (°C)	42.4
	Relative humidity (%)	25.6
	Abs humidity ( $g_{\text{water}}/kg_{\text{Dry air}}$ )	13.349
TEC's cold side (Number 3)	Temperature (°C)	32.7
	Relative humidity (%)	42.4
	Abs humidity ( $g_{\text{water}}/kg_{\text{Dry air}}$ )	13.043
Mixing air (Number 4)	Temperature (°C)	41.9
	Relative humidity (%)	26.3
	Abs humidity ( $g_{\text{water}}/kg_{\text{Dry air}}$ )	13.359

ภาคผนวก ข  
ตัวอย่างการคำนวณ



ในส่วนของการคำนวณค่าต่าง ๆ ที่สำคัญในการสร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งนั้น ได้ยกตัวอย่างการคำนวณโดยใช้ผลการทดลองทั้งจากการทดลองหาค่าไอโซเทอมความชื้น การทดสอบชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกและจากการทดสอบเครื่องอบแห้ง

### ข.1 การคำนวณพลังงานความร้อนจากกระบวนการให้ความร้อน (Heating)

จากการทดลองในข้อที่ 3.4.5 ได้ค่า  $\dot{m}_{a_2}$  เท่ากับ  $0.0278 \text{ kg}_{\text{dry air}}/\text{s}$  ค่า  $h_2$  เท่ากับ  $93.01 \text{ kJ/kg}_{\text{dry air}}$  และค่า  $h_1$  เท่ากับ  $89.84 \text{ kJ/kg}_{\text{dry air}}$

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_{a_2} (h_2 - h_1) = 0.0278(93.01 - 89.84) = 0.08813 \text{ kJ/s หรือ kW}$$

### ข.2 การคำนวณอัตราการควบแน่นน้ำ (Moisture extraction rate, MER)

จากการทดสอบในหัวข้อที่ 3.4.4 ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับจ่ายให้กับชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกเท่ากับ  $4 \text{ V}$  ค่าสัดส่วนของอากาศผสมเท่ากับ 1:9 และอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง  $40^\circ\text{C}$  พบว่าได้ค่า  $\dot{m}_{a_3}$  เท่ากับ  $0.003165 \text{ kg}_{\text{dry air}}/\text{s}$  ค่า  $\omega_1$  เท่ากับ  $0.01936 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$  และค่า  $\omega_3$  เท่ากับ  $0.01747 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$

$$\begin{aligned} \text{MER} &= \dot{m}_{a_3} (\omega_1 - \omega_3) = 0.003165(0.01936 - 0.01747) = 5.982 \times 10^{-6} \text{ kg}_{\text{water}}/\text{s} \\ &= 5.982 \times 10^{-6} \times 3600 \\ &= 0.02153 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h} \end{aligned}$$

### ข.3 การคำนวณค่าความชื้นในเมล็ดพันธุ์ข้าว

#### 3.1 ค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง

จากผลการทดลองหาค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 กรณีไอโซเทอมการดูดความชื้นที่อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเท่ากับ  $8.23\%$  ในซ้ำที่ 1 พบว่าได้มวลรวมของข้าวเท่ากับ  $0.2454 \text{ g}$  และมวลแห้งของข้าวเท่ากับ  $0.2399 \text{ g}$

$$M_d = \frac{W - W_d}{W_d} = \frac{0.2454 - 0.2399}{0.2399} \times 100 = 2.29 \% \text{db}$$

### 3.2 ค่าความชื้นมาตรฐานเปียก

จากผลการทดสอบเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าว โดยอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าว 6 kg จนกระทั่งเมล็ดพันธุ์ข้าวมีค่าความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 14%wb ในการทดลองที่ 2 ที่เวลาในการอบแห้งเท่ากับ 180 นาที พบว่าได้มวลรวมของตัวอย่างเมล็ดพันธุ์ข้าวที่สุ่มมาจากในถาดที่ 1 เท่ากับ 19.85 g และมวลแห้งเท่ากับ 16.31 g

$$M_w = \frac{W - W_d}{W} = \frac{19.85 - 16.31}{19.85} \times 100 = 17.83 \%wb$$

#### ข.4 การคำนวณหาผลของเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ค่าความชื้นสุดท้ายในถาดตัวอย่าง

สำหรับการประเมินค่าความชื้นของข้าวในห้องอบแห้งทางอ้อมผ่านการคำนวณความชื้นที่ลดลงในถาดตัวอย่าง โดยใช้ผลการทดลองจากการทดลองที่ 2 โดยเมื่อสุ่มตัวอย่างของเมล็ดพันธุ์ข้าวหลังจากการเก็บเกี่ยวมาหาค่าความชื้นพบว่าได้เท่ากับ 21%wb ( $M_{w_1}$ ) และมวลรวมเมล็ดพันธุ์ข้าวในถาดตัวอย่างเริ่มต้นเท่ากับ 132.47 g ( $W_1$ ) ต้องการความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 14%wb ( $M_{w_2}$ ) จะได้มวลรวมของเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ค่าความชื้นสุดท้ายในถาดตัวอย่าง ( $W_2$ ) ดังนี้

$$W_2 = \frac{W_1 - M_{w_1} W_1}{1 - M_{w_2}} = \frac{132.47 - 0.21(132.47)}{1 - 0.14} = 121.69 \text{ g}$$

#### ข.5 การคำนวณค่าสมรรถนะของการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าว

สำหรับการคำนวณค่าสมรรถนะของการอบแห้งนั้นได้ใช้ข้อมูลจากการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวจากการทดลองที่ 2 โดยอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าว 6 kg จนกระทั่งเมล็ดพันธุ์ข้าวมีค่าความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 14%wb

##### 5.1 ค่าอัตราการอบแห้ง (DR)

ทำการคำนวณหาผลของเมล็ดพันธุ์ข้าวหลังจากการอบแห้ง โดยจากการทดลองพบว่ามวลรวมของเมล็ดพันธุ์ข้าวเริ่มต้น ( $W_1 = m_1$ ) เท่ากับ 6 kg ค่าความชื้นของตัวอย่างเฉลี่ยทั้ง 4 ถาด ที่ถูกสุ่มออกมาในนาทีที่ 0 ของการอบแห้ง ( $M_{w_1}$ ) เท่ากับ 21.82%wb

$$W_d = W_1 - M_{w_1} W_1 = 6 - 0.2182(6) = 4.691 \text{ kg}$$

จากนั้นทำการคำนวณมวลรวมของเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ค่าความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 14%wb

$$m_f = W_2 = \frac{W_d}{1 - M_{w_2}} = \frac{4.691}{1 - 0.14} = 5.455 \text{ kg}$$

โดยการอบแห้งใช้เวลา 6 ชั่วโมง จะได้

$$\begin{aligned} DR &= \frac{m_i - m_f}{t} = \frac{6 - 5.455}{6} = 0.091 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h} \\ &= 0.091/3600 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{s} \\ &= 0.000025 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{s} \end{aligned}$$

## 5.2 อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER)

จากผลการทดลองพบว่าใช้พลังงานไฟฟ้า ( $P_e$ ) ไปทั้งสิ้น 3.295 kWh

$$SMER = \frac{m_i - m_f}{P_e} = \frac{6 - 5.455}{3.295} = 0.1664 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kWh}$$

## 5.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC)

$$SEC = \frac{3.6P_e}{m_i - m_f} = \frac{3.6(3.295)}{6 - 5.455} = 21.63 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$$

## 5.4 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of performance, COP)

5.4.1 พลังงานความร้อนจากกระบวนการให้ความร้อนแก่อากาศอบแห้ง ( $\dot{Q}_H$ )

จากผลการทดลองการอบแห้งนาที่ที่ 180 พบว่าได้ได้ค่า  $\dot{m}_{a_2}$  เท่ากับ 0.02786 kg<sub>dry air</sub>/s ค่า  $h_2$  เท่ากับ 75.70 kJ/kg<sub>dry air</sub> และค่า  $h_1$  เท่ากับ 72.67 kJ/kg<sub>dry air</sub>

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_{a_2} (h_2 - h_1) = 0.02786(75.70 - 72.67) = 0.08442 \text{ kW}$$

จากนั้นทำการคำนวณหาค่า  $\dot{Q}_H$  เฉลี่ยตลอดระยะเวลาการอบแห้งได้เท่ากับ 0.1054 kW

5.4.2 พลังงานความร้อนที่ถูกดึงออกเพื่อลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้ง ( $\dot{Q}_L$ ) จากผลการทดลองการอบแห้งนาที่ที่ 180 พบว่าได้ค่า  $\dot{m}_{a_3}$  เท่ากับ 0.003198 kg<sub>dry air</sub>/s ค่า  $h_3$  เท่ากับ 67.42 kJ/kg<sub>dry air</sub> ค่า  $h_1$  เท่ากับ 72.67 kJ/kg<sub>dry air</sub> โดยจากการคำนวณค่า DR ได้ค่า  $\dot{m}_w$  เท่ากับ 0.000025 kg<sub>water</sub>/s และค่า  $h_{fg}$  ของน้ำ ณ อุณหภูมิทางออกจากด้านลดความชื้นในชุดอุปกรณ์ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกเฉลี่ยที่ 32.8°C เท่ากับ 2423.14 kJ/kg<sub>water</sub>

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_{a_3} (h_1 - h_3) + \dot{m}_w h_{fg} = 0.003198(72.67 - 67.42) + 0.000025(2423.14) = 0.07737 \text{ kW}$$

จากนั้นทำการคำนวณหาค่า  $\dot{Q}_L$  เฉลี่ยตลอดระยะเวลาการอบแห้งได้เท่ากับ 0.0801 kW

จากนั้นจึงคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) โดยจากการทดลองได้ใช้พลังงานไปทั้งหมด ( $\dot{W}_{in}$ ) เท่ากับ 0.4394 kW โดยวัดจากเครื่อง Digital power meter ที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก รวมไปถึงค่าจาก Power supply ที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับพัดลมระบายอากาศบนครีบบความร้อนและพัดลมไฟฟ้าทั้งหมด

$$\text{COP} = \frac{\text{Useful heat output}}{\text{Power input}} = \frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{W}_{in}} = \frac{\dot{Q}_H + \dot{Q}_L}{\dot{W}_{in}} = \frac{0.1054 + 0.0801}{0.4394} = 0.4$$

#### ข.6 การคำนวณต้นทุนในการอบแห้ง

เครื่องอบแห้งต้นแบบนั้นมีต้นทุนในการอบแห้ง โดยคำนวณจากผลการอบแห้งในรอบที่ 2 ได้ผลดังนี้

- ค่าไฟหน่วยละ 4.2218 บาท (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2561)
- เครื่องอบแห้งต้นแบบราคา 22,791 บาท
- อบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวครั้งละ 6 kg
- โดยใช้พลังงานทั้งสิ้น 3.295 kWh

$$\text{ต้นทุนในการอบแห้ง} = \frac{4.2218 \times 3.295}{6} = 2.32 \text{ บาท/kgข้าวเปลือก}$$

ภาคผนวก ค  
บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ระหว่างการศึกษา



## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่และได้รับการตอบรับการตีพิมพ์ ในระหว่างการศึกษา

ทินกร เพ็งประโคน, กระจวี ตรีอำนาจ และเทวรัตน์ ตรีอำนาจ. (2564). การศึกษาค่าความชื้นสมมูลของข้าวขาวดอกมะลิ 105. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ระหว่างวันที่ 12-14 พฤษภาคม พ.ศ. 2564.

ทินกร เพ็งประโคน, กระจวี ตรีอำนาจ และเทวรัตน์ ตรีอำนาจ. (2565). การทดสอบชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อการผลิตอากาศอบแห้งสำหรับป้อนความร้อน. การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 21. เชียงใหม่: โรงแรมวินทรี ซิตี้ รีสอร์ท. ระหว่างวันที่ 10-11 มีนาคม พ.ศ. 2565.

ทินกร เพ็งประโคน, กระจวี ตรีอำนาจ และเทวรัตน์ ตรีอำนาจ. (2565). ค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ปีที่ 16 ฉบับที่ 2. (ได้รับการตอบรับการตีพิมพ์)



การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 22  
12 – 13 พฤษภาคม 2564 จัดประชุมโดย มหาวิทยาลัยขอนแก่น



การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22  
วันที่ 12-13 พฤษภาคม พ.ศ. 2564  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



การศึกษาค่าความชื้นสมดุลของข้าวขาวดอกมะลิ 105

Study of Equilibrium Moisture Content of Khao Dawk Mali 105

ทินกร เพ็งประโคน<sup>1\*</sup>, กระวี ตรีอำนรรค<sup>1</sup> และ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค<sup>2</sup>

Tinnakorn Pengprakhon<sup>1\*</sup>, Krawee Treeamnuk<sup>1</sup>, Tawarat Treeamnuk<sup>2</sup>

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

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000

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

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

\*\*Corresponding author: Tel: +66-8-3124-8484, E-mail: Tinnakornsut@gmail.com

#### บทคัดย่อ

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการหาค่าความชื้นสมดุล และ เปรียบเทียบหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 60°C ซึ่งทำการทดลองโดยการนำตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 บรรจุในกล่อง ที่สภาวะอากาศ ถูกควบคุมความชื้นด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัว ในช่วงค่าแอกติวิตี 0.05-0.80 จนกว่ามวลของตัวอย่างจะมีค่าคงที่ จากนั้น จึงนำตัวอย่างมาหาค่าความชื้นสมดุล และทำการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ GAB, Peleg, Oswin, Henderson, Henderson & Thompson, Chung & Pfof และ Halsey มาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยจากผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิเดียวกันนั้น เมื่อค่าแอกติวิตีเพิ่มขึ้น ค่าความชื้นสมดุลจะเพิ่มขึ้น และจากการทดลองยังพบว่าแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าความชื้นสมดุลของ Henderson มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ทำนายค่าความชื้นสมดุล ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 60°C

คำสำคัญ: ข้าวขาวดอกมะลิ 105, ความชื้นสมดุล, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

#### Abstract

The objectives of this research were to determine the equilibrium moisture content and the mathematical models of equilibrium moisture content which was suitable for Khao Dawk Mali 105 at 60°C. The experiment was made by placing samples in a container where the humidity was controlled by Standard saturated salt solutions at water activity ( $a_w$ ) range of 0.05 to 0.80 until the mass of samples was constant and then the equilibrium moisture content was determined. The Mathematical models which consisted of GAB, Peleg, Oswin, Henderson, Henderson & Thompson, Chung & Pfof and Halsey were used to analyze the results. The experiment found that at the same temperature when the water activity increased the equilibrium moisture content would increase and this experiment found that The Mathematical model which was suitable for predicting the humidity of Khao Dawk Mali 105 at 60°C was Henderson model.

Keywords: Khao Dawk Mali 105, equilibrium moisture content, mathematical models

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 22  
12 – 13 พฤษภาคม 2564 จัดประชุมโดย มหาวิทยาลัยขอนแก่น

### บทนำ

ข้าวถือเป็นอาหารหลักสำคัญของคนไทย ซึ่งประเทศไทยสามารถส่งออกข้าวเพื่อไปจำหน่ายยังต่างประเทศนอกเหนือจากการบริโภคภายในประเทศได้อีกด้วย โดยประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกข้าวมากเป็นอันดับต้น ๆ ของโลก ในปีพุทธศักราช 2561 ประเทศไทยมีปริมาณการส่งออกข้าวสูงถึง 11.09 ล้านตัน (Thai Rice Exporters, 2019) ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวทำให้ข้าวเป็นพืชที่มีความสำคัญต่อประเทศไทยเป็นอย่างมาก ตามปกติแล้วหลังจากการเก็บเกี่ยวข้าวจะพบข้าวที่มีความชื้นอยู่ในปริมาณที่สูง ซึ่งค่าความชื้นนี้ไม่เพียงแต่มีผลทำให้ข้าวเสื่อมคุณภาพอย่างรวดเร็วแล้ว ยังส่งผลให้ราคาข้าวลดลงอีกด้วย เพื่อป้องกันความเสียหายเหล่านี้ จึงต้องมีการลดความชื้นของข้าวหลังการเก็บเกี่ยว โดยค่าความชื้นที่เหมาะสมของข้าวสำหรับการเก็บรักษาควรมีค่าประมาณ 13-14 %wb (มาตรฐานเปียก) (Hall, 1970) โดยวิธีการลดความชื้นของข้าวที่สำคัญคือ การอบแห้ง เนื่องด้วยเป็นวิธีที่ไม่ต้องพึ่งพาสภาพอากาศเหมือนกับการตากแดดบนลานตามวิธีดั้งเดิม โดยสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบกระบวนการอบแห้งข้าว นั้น จำเป็นต้องทราบปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการอบแห้งคือ ค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, EMC)

ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, EMC) คือ ปริมาณความชื้น เมื่อความดันของน้ำในวัสดุไปถึงจุดสมดุลกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งตัวแปรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้งเพื่อบอกปริมาณความชื้นที่น้อยสุดที่สามารถมีอยู่ได้ในวัสดุระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ ของสภาวะสิ่งแวดล้อม (Shimhare et al., 2004) ซึ่งถือเป็นค่าที่สำคัญในการออกแบบกระบวนการอบแห้ง และการเลือกสภาวะที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาข้าวได้อีกด้วย จากการศึกษาของนักวิจัยการหาค่าความชื้นสมดุลในวัสดุต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น การหาค่าความชื้นสมดุลของยางพาราแผ่น (Jeentada, 2012) หรือ การหาไอโซเทอมของเมล็ดฝักโก๋ (Pagano & Mascheroni, 2005) พบว่ามีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ มาใช้ในการทำนายค่าความชื้นสมดุลของวัสดุ จากนั้นจึงเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับวัสดุนั้น ๆ

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการหาค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, EMC) และ เปรียบเทียบหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับข้าวขาวดอกมะลิ 105

ที่อุณหภูมิ 60°C โดยเป็นค่าอุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 25-70°C ของโครงการวิจัยเพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบระบบกระบวนการอบแห้งข้าวต่อไป

### อุปกรณ์และวิธีการ

สำหรับการทดลองนี้เป็นการหาค่าความชื้นสมดุลใน ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (*Oryza sativa* L.) โดยข้าวที่ถูกทดลองนั้นเป็นข้าวชื้น ซึ่งถูกเตรียมโดยนำข้าวไปผสมรวมกับน้ำ แล้วปล่อยให้ทิ้งไว้ 24 hr เพื่อให้ให้น้ำซึมเข้าไปในเมล็ดข้าวกลายเป็นข้าวชื้น เพื่อจำลองสภาวะให้เหมือนกับข้าวชื้นหลังการเก็บเกี่ยว หลังจากนั้นแบ่งข้าวเป็น 3 ชุดการทดลองด้วยกัน ชุดละ 10 เม็ด บรรจุในกล่องใส่อาหารที่มีปริมาตรเท่ากับ 1,360 ml โดยมีลักษณะเป็นกล่องใส, หนาความร้อน และ กันรั่วซึม ต่อจากนั้นจึงมีการใช้ตู้อบลมร้อน Universal Oven รุ่น UF160 จากบริษัท Memmert เพื่อจำลองสภาวะอุณหภูมิที่ 60°C และใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว (Saturated salt solution) สำหรับจำลองสภาวะความชื้นภายในกล่อง โดยสารละลายเกลืออิ่มตัวแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ได้ไม่เท่ากัน สำหรับการทดลองนี้ได้ใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว 5 ชนิด สำหรับการสร้างสภาวะความชื้นที่อุณหภูมิ 60°C ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Water activity ( $a_w$ ) of Saturated salt solutions at 60°C.

Saturated salt solution	$a_w$ (at 60°C)
KOH	0.0549
MgCl <sub>2</sub>	0.2930
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.4300
NaCl	0.7450
KCl	0.8025

หมายเหตุ: ดัดแปลงจาก Greenspan, 1977 และ Andrade & Hensel, 2013

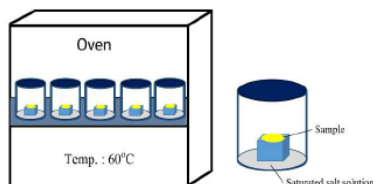


Figure 1 Equipment installation of the experiment.

ภายในห้องบรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัว (Saturated salt solutions) 250 ml และตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ Figure 1 ซึ่งจะมีการนำตัวอย่างไปชั่งทุกวันด้วยเครื่องชั่งที่ตำแหน่ง Analytical Balance ME204/M ของบริษัท Mettler Toledo โดยก่อนชั่งจะรอให้อุณหภูมิของตัวอย่างลดลงจนมีค่าเท่ากับอุณหภูมิห้อง ซึ่งจะซึ่งจนกว่าน้ำหนักของข้าวคงที่ (มีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.001 g) จากนั้นข้าวจะถูกนำมาหาค่าความชื้นสมดุล (EMC) โดยการนำไปอบในเตาอบเพื่อกำจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 hr (AOAC, 1990) จากนั้นจึงนำข้าวแห้งที่ได้มาชั่งน้ำหนัก แล้วจึงนำค่าที่วัดได้ไปหาค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis) ตามสมการที่ 1

$$M_d = \frac{w-d}{d} \times 100\% \quad (1)$$

- โดยที่  $M_d$  คือค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง (%db)  
 $W$  คือน้ำหนักเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ (g)  
 $D$  คือน้ำหนักผลิตภัณฑ์แห้ง (g)

สำหรับค่าความชื้นของข้าวที่ได้จากการทดลองนั้นจะถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, EMC) โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลค่าความชื้นสมดุล มีดัง Table 2

Table 2 Mathematical models for fitting equilibrium moisture content of Khao Dawk Mali 105.

Model	Equation	Reference
GAB	$EMC = \frac{ABCa_w}{(1 - Ba_w)(1 - Ba_w + Ba_w)}$	(Sinija & Mishra, 2008)
Peleg	$EMC = A(a_w)^B + C(a_w)^D$	(Bahlout et al., 2008)
Oswin	$EMC = A \left[ \frac{a_w}{(1 - a_w)} \right]^B$	(Sinija & Mishra, 2008)
Henderson	$EMC = \left[ \frac{\ln(1 - a_w)}{-AT} \right]^B$	(Barrozo et al., 2008)
Henderson & Thompson	$EMC = \left[ \frac{\ln(1 - a_w)}{-A(T + B)} \right]^B$	(Barrozo et al., 2008)
Chung & Pfost	$EMC = \frac{1}{-A} \ln \left[ \frac{(T + B) \ln a_w}{-C} \right]$	(Barrozo et al., 2008)
Halsey	$EMC = \left[ \frac{-A}{T \ln(a_w)} \right]^B$	(Goula et al., 2008)

- โดยที่ EMC คือค่าความชื้นสมดุล (kg<sub>water</sub> kg<sup>-1</sup> d)  
 $a_w$  คือค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (decimal)  
 A, B, C และ D คือ ค่าคงที่ของแบบจำลอง  
 T คืออุณหภูมิ (°C)

เมื่อได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, EMC) แล้วจึงนำแบบจำลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าแบบจำลองที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายค่าความชื้นสมดุลของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 60°C โดยพิจารณาจากค่าทางสถิติ 2 ค่าด้วยกัน คือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) และค่าการลดลงโคกำลังสอง ( $\chi^2$ ) โดยสำหรับค่า  $R^2$  เป็นค่าทางสถิติที่บอกถึงคุณภาพของรูปแบบสมการ ยิ่งค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าสมการมีความแม่นยำมาก และค่า ( $\chi^2$ ) เป็นค่าทางสถิติที่บอกถึงความผิดพลาดในการทำนายค่าของสมการ ซึ่งสมการที่ดีควรมีค่า  $\chi^2$  ที่น้อย โดยสมการทางสถิตินี้ (Jain & Pathare, 2004; Sharma et al., 2005)

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (M_{e,ex} \cdot M_{e,pred})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n M_{e,ex}^2\right) \left(\sum_{i=1}^n M_{e,pred}^2\right)}} \right]^2 \quad (2)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{e,ex} - M_{e,pred})^2}{N - n} \quad (3)$$

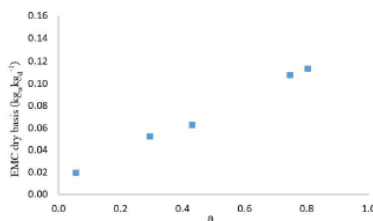


Figure 2 Equilibrium Moisture Content of Khao Dawk Mali 105 at 60°C.

- โดย  $M_{e,ex}$  คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุที่ได้จากการทดลอง (%db)
- $M_{e,pred}$  คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุที่ได้จากการทำนาย (%db)
- N คือ จำนวนค่าสังเกต
- N คือ จำนวนค่าคงที่ในแบบจำลอง

**ผลและวิจารณ์**

จากการทดลองหาความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, EMC) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 60°C ในช่วงค่าวอเตอร์แอคทิวิตี ( $a_w$ ) 0.55-0.84 ได้ผลดัง Figure 2

จากผลการทดลองตามรูปที่ 2 พบว่าพิจารณาที่อุณหภูมิเดียวกัน เมื่อค่าวอเตอร์แอคทิวิตี ( $a_w$ ) เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, EMC) เพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อค่าวอเตอร์แอคทิวิตี ( $a_w$ ) เพิ่มขึ้น อากาศจะมีความสามารถในการรับน้ำได้น้อยลงหรืออากาศมีความอึดตัวเพิ่มขึ้น ทำให้มีการถ่ายเทความชื้นเข้าวัสดุมากขึ้น และมีความชื้นออกจากวัสดุเข้าสู่อากาศน้อยลง

จากการหาค่าความชื้นสมดุลใน Figure 2 พบว่าได้ลักษณะกราฟความสัมพันธ์เป็นรูปตัว S (S-Sigmoid) ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของความชื้นสมดุลสำหรับวัสดุทางการเกษตร (Brunauer et al., 1940)

จากการนำข้อมูลผลการทดลองที่ได้ตามรูปที่ 2 มาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าความชื้นสมดุล โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน Table 2 ได้ค่าคงที่ของแบบจำลอง (A, B, C และ D) และ ค่าทางสถิติ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) และค่าการลดลงโคกกำลังสอง ( $\chi^2$ ) ของแต่ละแบบจำลองได้ดัง Table 3

Table 3 Parameters and statistical value for comparison mathematical models.

Model	A	B	C	D	$R^2$	$\chi^2$
GAB	-0.065	-4.371	1.142	-	0.9986	0.0000220
Peleg	0.067	0.783	0.067	0.783	0.9975	0.0000795
Oswin	0.069	0.375	-	-	0.9982	0.0000192
Henderson	1.552	1.875	-	-	0.9993	0.0000104
Henderson&Thomson	1.526	1.029	1.875	-	0.9993	0.0000207
Chung & Pforst	26.786	-41.022	92.192	-	0.9993	0.0000218
Halsey	0.239	1.888	-	-	0.9931	0.0001090

จากการหาค่าคงที่ และเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าความชื้นสมดุลทั้ง 7 แบบ คือ GAB, Peleg, Oswin, Henderson, Henderson&Thomson, Chung & Pfost และ Halsey พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายค่าได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง สังเกตได้จากค่า สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) และค่าการลดลงโคกำลังสอง ( $\chi^2$ ) ของแต่ละแบบจำลอง โดยแบบจำลองที่มีความแม่นยำมากที่สุด ดังสังเกตได้จากค่า  $R^2$  ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุด

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าความชื้นสมดุลของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 60°C คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสมดุล (EMC) และค่าตัวแปรแอดคิวิตี ( $a_w$ ) สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson เทียบกับ ผลการทดลองจริง Figure 3

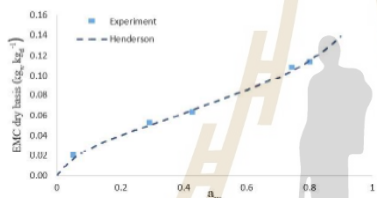


Figure 3 Comparison between Henderson model and results.

จากการเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลอง 4 แบบที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจาก ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) และค่าการลดลงโคกำลังสอง ( $\chi^2$ ) เพื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสมดุล (EMC) และ ค่าตัวแปรแอดคิวิตี  $a_w$  เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงได้ดัง Figure 4

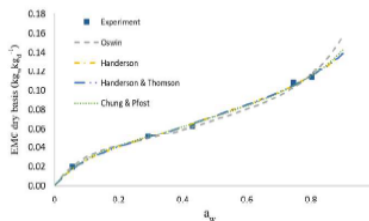


Figure 4 Comparison of mathematical models and results

**สรุป**

จากการหาค่าความชื้นสมดุลของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 60°C พบว่า เมื่อค่าตัวแปรแอดคิวิตี ( $a_w$ ) เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, EMC) เพิ่มขึ้น และจากการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 7 แบบ พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson มีความเหมาะสมที่สุดในการใช้ทำนายค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, EMC) สำหรับข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 60°C

**กิตติกรรมประกาศ**

สำหรับงานวิจัยนี้ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้สนับสนุนในด้านทั้งเงินทุน อุปกรณ์การทดลอง รวมไปถึงสถานที่สำหรับการทดลอง นี้จึงสำเร็จลุล่วงโดยสมบูรณ์

**เอกสารอ้างอิง**

Andrade, S. P. C., & Hensel, O. (2013). Experimental determination and mathematical fitting of sorption isotherms for Lemon Balm (*Melissa officinalis* L.). *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(1), 139-145.

AOAC, O. (1990). *Official Methods of Analysis*. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA.

- Bahloul, N., Boudhrioua, N., & Kechaou, N. (2008). Moisture desorption–adsorption isotherms and isosteric heats of sorption of Tunisian olive leaves (*Olea europaea* L.). *Industrial crops and products*, 28(2), 162-176.
- Barozo, M., Silva, A., & Oliveira, D. (2008). The use of curvature and bias measures to discriminate among equilibrium moisture equations for mustard seed. *Journal of Stored Products Research*, 44(1), 65-70.
- Brunauer, S., Deming, L. S., Deming, W. E., & Teller, E. (1940). On a theory of the van der Waals adsorption of gases. *Journal of the American Chemical society*, 62(7), 1723-1732.
- Goula, A. M., Karapantsios, T. D., Achilias, D. S., & Adamopoulos, K. G. (2008). Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp. *Journal of Food Engineering*, 85(1), 73-83.
- Greenspan, L. (1977). Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *Journal of research of the national bureau of standards*, 81(1), 89-96.
- Hall, D. W. (1970). *Handling and storage of food grains in tropical and subtropical areas*: Food & Agriculture Org.
- Jain, D., & Pathare, P. B. (2004). Selection and evaluation of thin layer drying models for infrared radiative and convective drying of onion slices. *Biosystems Engineering*, 89(3), 289-296.
- Jeentada, W. J. (2012). Comparison of mathematical models equilibrium moisture content for sheet rubber. *Engineering and Applied Science Research*, 39(1), 11-21.
- Pagano, A. M., & Mascheroni, R. H. (2005). Sorption isotherms for amaranth grains. *Journal of Food Engineering*, 67(4), 441-450.
- Sharma, G., Verma, R., & Pathare, P. (2005). Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of food engineering*, 71(3), 282-286.
- Shivhare, U., Arora, S., Ahmed, J., & Raghavan, G. (2004). Moisture adsorption isotherms for mushroom. *LWT-Food Science and Technology*, 37(1), 133-137.
- Sinjia, V., & Mishra, H. (2008). Moisture sorption isotherms and heat of sorption of instant (soluble) green tea powder and green tea granules. *Journal of food engineering*, 86(4), 494-500.
- Thai Rice Exporters Association. 2019. Report of rice export situation Trends and directions for Thai rice exports in 2019. Available at: <http://www.thairiceexporters.or.th/Pres%20release/2019/TREA%20Press%20Release%20Thai%20Rice%20Situation%20&%20Trend%20Year%202019-30012019.pdf>. Accessed on 8 August 2020.

การทดสอบชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อการผลิตอากาศอบแห้งสำหรับปั๊มความร้อน  
EXPERIMENT OF THERMOELECTRIC MODULE FOR DRYING AIR PRODUCTION  
FOR HEAT PUMP

ทินกร เพ็ญประโคน<sup>1</sup>  
กระวี ตรีอำนรรค์<sup>1</sup>  
เทวรัตน์ ตรีอำนรรค์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สำนักวิศวกรรมศาสตร์  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง  
จังหวัดนครราชสีมา  
30000

<sup>2</sup>สำนักวิศวกรรมศาสตร์  
สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง  
จังหวัดนครราชสีมา  
30000

\*E-mail: Tinnakomsut@gmail.com

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric, TEC Module) ในการผลิตอากาศอบแห้ง เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของแรงดันไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้กับ TEC Module และอัตราส่วนอากาศผสมระหว่างด้านเย็นและด้านร้อนของ TEC module ในการผลิตอากาศอบแห้งที่มีค่าอุณหภูมิและความชื้นที่ต้องการ สำหรับนำไปติดตั้งเป็นเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก ชุดทดสอบได้ติดตั้ง TEC Module เข้ากับฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Heater) เพื่อจำลองอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง ที่ 35 40 และ 45°C ทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ TEC Module และค่าอัตราส่วนของอากาศผสมระหว่างด้านทำความเย็นเพื่อลดความชื้นต่อด้านทำความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้ง 4 ค่าด้วยกันคือ 1:9 2:8 3:7 และ 4:6 ตามลำดับจากการทดลองพบว่า เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทำให้การทำความร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันกลับทำให้การทำทำความเย็นลดลงและเมื่ออัตราส่วนของอากาศผสมระหว่างด้านเย็นและด้านร้อนเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการควบแน่นไอน้ำ (Moisture extraction rate) ในอากาศลดลง จากการทดสอบชุด TEC Module พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับใช้ TEC Module เป็นเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกได้แก่แรงดันไฟฟ้าด้านร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้งคือ 9 V และแรงดันไฟฟ้าด้านเย็นสำหรับลดความชื้นอากาศอบแห้งคือ 4 V ที่อัตราส่วนของอากาศผสมระหว่างด้านเย็นและด้านร้อนเท่ากับ 1:9

**คำสำคัญ:** เทอร์โมอิเล็กทริก, อากาศอบแห้ง, ปั๊มความร้อน

**Abstract**

This research aims to determine the appropriate input voltage for the thermoelectric module and the air mixing ratio between a cold side and hot side thermoelectric to produce the mixing air which has enough temperature and humidity if it is used as the thermoelectric heat pump module in drying air production for drying system. This experiment was prepared by connecting the thermoelectric module with the air heater that was varied the air temperatures into 3 level: 35, 40, and 45°C. The input voltage of thermoelectric module and the air ratio between a hot side and cold side of a thermoelectric were adjusted with air ratio of 1:9, 2:8, 3:7, and 4:6. The experiment found that when the input voltage was increased, the heat transfer from a hot side increased but the air cooling from a cold side decreased. Furthermore, when the air ratio was increased, the moisture extraction rate in a cold side was decreased. The test of the thermoelectric module found that the input voltage which was used for the thermoelectric to increase the air temperature was 9 V and to decrease the humidity in the air was 4 V and the air ratio air was 1:9.

**Keyword:** Thermoelectric, Drying air, Heat pump

1. บทนำ

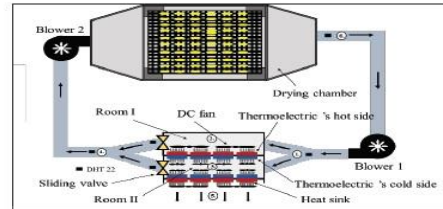
ปั๊มความร้อนระบบอัดไอ ถือเป็นระบบทำความร้อนและเป็น ที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นการใช้งานในระบบปรับอากาศที่อยู่อาศัยตลอดจนการใช้งานในภาคอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ปั๊มความร้อนเป็นอุปกรณ์อบแห้งวัสดุทางการเกษตรต่างๆ อีกด้วย โดยเฉพาะผลผลิตที่ต้องการการอบแห้ง ที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากระบบดังกล่าวนี้สามารถสร้างอากาศอบแห้งที่มี อุณหภูมิและความชื้นที่ต่ำได้ ซึ่งสามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ภายหลังจากการอบแห้งเอาไว้ได้ ตัวอย่างเช่น การนำระบบปั๊มความร้อนมาใช้ในการอบแห้งกาแฟ [1] การอบแห้งมะละกอแช่ขี้ผึ้ง [2] และการอบแห้งเมล็ดถั่ว [3] แต่ปั๊มความร้อนระบบอัดไอนั้นต้องใช้สารทำความเย็น (Refrigerant) เป็นสารทำงาน (Working Fluid) ใน ระบบ ซึ่งถ้าหากสารทำความเย็นเกิดการรั่วไหลจะทำให้เกิดอันตราย ต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังมีต้นทุนในการติดตั้งอุปกรณ์ที่สูง อุปกรณ์มีความซับซ้อน หากเกิดการชำรุดจะต้องแยกระบบเพื่อติดตั้ง ใหม่ ซึ่งก่อให้เกิดความยุ่งยากและใช้เวลานาน ปัจจุบันได้มีการ ประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถปั๊มความร้อนได้เช่นเดียวกับ ปั๊มความร้อนแบบอัดไอ นั่นคือ อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Module, TEC Module)

TEC Module เป็นอุปกรณ์ประเภทสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) โดยเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current) ให้กับ อุปกรณ์จะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากด้านหนึ่งไปยังอีก ด้านหนึ่งของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก เกิดเป็นด้านร้อนและด้านเย็นบน แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก โดยอุปกรณ์ดังกล่าวนี้มีราคาไม่สูง มีขนาดเล็ก กระทัดรัดและน้ำหนักเบา ง่ายต่อการรื้อถอนและติดตั้งใหม่หากเกิดการชำรุดเสียหาย ทำให้สะดวกต่อการใช้งาน และไม่เป็อันตรายต่อ สิ่งแวดล้อมเนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้สารทำความเย็นในระบบ ซึ่งใน ปัจจุบันได้มีงานวิจัยจำนวนมากได้นำอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกมา ประยุกต์ใช้ ในด้านต่างๆ อาทิ ด้านการทำความเย็น เช่น การทำตู้เย็น ขนาดพกพา [4] การระบายความร้อนให้กับหลอดไฟ LED กำลังสูง [5] หรือจะเป็นการใช้ทั้งด้านร้อนและด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ในการทำตู้เย็นน้ำเย็น [6] และในด้านการทำความร้อนและทำความ เย็นเพื่อลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้งในการอบแห้งการอบแห้งฟริก ซีทหนูแดง [7] นอกจากนี้ยังได้มีการใช้ด้านเย็นของแผ่นเทอร์โม อิเล็กทริกในการทำความเย็นเพื่อควบแน่นน้ำออกจากอากาศ เช่น การ สร้างเครื่องควบแน่นน้ำ [8]

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดในการนำ TEC Module มา ประยุกต์ใช้ทดแทนปั๊มความร้อนระบบอัดไอ โดยใช้ด้านร้อนในการ เพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้งและใช้ด้านเย็นในการลดอุณหภูมิเพื่อ ลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้ง โดยสำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นการ ทดสอบชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกในการสร้างอากาศอบแห้งเพื่อหา ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ต้องจ่ายให้กับชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกและอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) สำหรับนำไปใช้ในการ สร้างเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

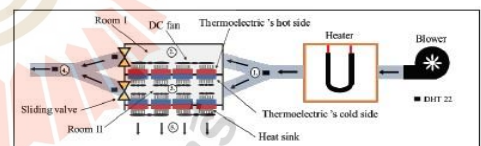
2.1 ปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก  
TEC Module จะถูกนำไปติดตั้งในเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อน เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่ออบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าว ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก

อากาศจากโบลเวอร์ตัวที่ 1 (Blower 1) บริเวณหมายเลข 1 ได้ถูกแยกไหลเป็น 2 ทาง โดยไหลไปยังด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่บริเวณหมายเลข 2 เพื่อเพิ่มอุณหภูมิ อากาศอีกส่วนไหลไปยังด้าน เย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่บริเวณหมายเลข 3 สำหรับลดอุณหภูมิ และความชื้นออกจากอากาศอบแห้ง จากนั้นอากาศจากบริเวณ หมายเลข 2 และ 3 จะไหลมาผสมกันในบริเวณหมายเลข 4 โดยอัตราการ ไหลของอากาศจากบริเวณทั้ง 2 ถูกปรับผ่านวาล์วเลื่อนปรับอัตราการไหล (Sliding valve) เพื่อให้ได้อากาศผสมที่มีอุณหภูมิประมาณ 42°C ตาม ต้องการ [9] ก่อนถูกดูดโดยโบลเวอร์ตัวที่ 2 (Blower 2) เข้าสู่ห้องอบแห้ง (Drying chamber) สำหรับอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวต่อไป หลังจากนั้นอากาศ หลังการอบแห้งบริเวณหมายเลข 5 จะถูกดึงกลับมาใช้ใหม่และวนไปเรื่อย ๆ จนกว่าความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวจะลดลงถึงค่าที่ต้องการ ดังนั้นจึงมี ความจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อที่จะ ทราบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้กับชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกรวมถึง อัตราส่วนผสมของอากาศผสมอากาศ (Air ratio) จากบริเวณหมายเลข 2 และ 3 เพื่อให้ได้ค่าอุณหภูมิและความชื้นของอากาศอบแห้งที่ต้องการ

2.2 ชุดทดสอบอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Module)



รูปที่ 2 ชุดทดสอบอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก



จากรูปที่ 2 เป็นการแยกชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกจากเครื่องอบแห้งที่มีความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับใช้ในการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวออกมามีติดตั้งเป็นชุดทดสอบอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกโดยติดตั้งเข้ากับฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Heater) ขนาด 1,200 W เพื่อจำลองสภาวะอากาศอบแห้งให้เหมือนกับการอบแห้งจริงที่มีการเวียนอากาศอบแห้งอุณหภูมิสูงกลับมาใช้งาน นอกจากนี้ยังได้ติดตั้งโบลเวอร์ (Blower) DC 24 V 5.5 A เพื่อสร้างอัตราการไหลของอากาศในระบบสำหรับชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกนั้นประกอบขึ้นจากท่ออะคริลิกใสหนา 4 มม กว้าง 24 ซม ยาว 41 ซม และความสูง 18 ซม และภายในตู้ได้ถูกแบ่งออกเป็นสองห้อง คือ ห้องที่ 1 (Room I) สำหรับเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง และห้องที่ 2 (Room II) สำหรับทำความเย็นเพื่อควบคุมความชื้นออกจากอากาศอบแห้ง ซึ่งภายในชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกได้ทำการติดตั้งแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Module) รุ่น TEC-12710 ขนาด 4 x 4 cm<sup>2</sup> หนา 0.4 ซม จากบริษัท Hebei L.T. Co., Ltd โดยมีทั้งหมด 2 ชุด ชุดละ 8 ตัว โดยชุดแรก (ด้านบน) ใช้สำหรับเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้งในห้องที่ 1 โดยใช้ประโยชน์จากด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นหลัก และชุดที่สอง (ด้านล่าง) ใช้ลดความชื้นของอากาศอบแห้งในห้องที่ 2 โดยใช้ประโยชน์จากด้านเย็นเป็นหลักและมีการเจาะรูที่บริเวณด้านล่างของกล่องอะคริลิกฝั่งลดความชื้นเพื่อระบายน้ำที่ควบแน่นออกมา นอกจากนี้ยังได้มีการติดตั้งบานเลื่อนปรับอัตราการไหล (Sliding valve) เพื่อให้สามารถปรับอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) จากทั้ง 2 ห้อง ติดตั้งครีบบความร้อน (Heatsink) ที่มีความกว้าง 4.5 ซม ความยาว 6 ซม และความสูง 2.8 ซม เพื่อช่วยในการถ่ายเทความร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละแผ่นทั้งบริเวณด้านร้อนและด้านเย็น ติดตั้งพัดลม DC 12 V 0.12 A ขนาด 4 ซม x 4 ซม ยี่ห้อ CYJ สำหรับสร้างการไหลหมุนเวียนอากาศในด้านเย็น และ พัดลม DC 12 V 0.30 A ขนาด 12 ซม x 12 ซม ยี่ห้อ CYJ เพื่อช่วยในการระบายความร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในด้านร้อน ชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเหล่านี้ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current) เป็นแหล่งพลังงาน

2.3 การทดสอบการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้งชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Room I)

ทำการควบคุมฮีตเตอร์เพื่อปรับค่าอุณหภูมิของอากาศทางเข้าชุดอุปกรณ์การทดลองเทอร์โมอิเล็กทริกเป็น 3 ค่า คือ 35 40 และ 45°C ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก 6 ค่า คือ 4 - 9 V และได้ปรับอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ระหว่างบริเวณหมายเลข 3 และ 2 จำนวน 4 ค่า คือ 1:9 2:8 3:7 และ 4:6 โดยปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโบลเวอร์ไฟฟ้าในการควบคุมอัตราเร็วของอากาศหลังจากการผสมที่บริเวณที่ 4 ไว้ที่ 10.6 m/s [7] วัดอัตราเร็วด้วย Digital Anemometer รุ่น GM8901 จากบริษัท BENETECH ทุกสภาวะการทดสอบจะเปิดระบบเป็นเวลา 15 นาที ก่อนทำการเก็บข้อมูลค่าอุณหภูมิและความชื้นของอากาศบริเวณที่ 1 - 4 โดยใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT 22 ซึ่งผ่านการสอบ

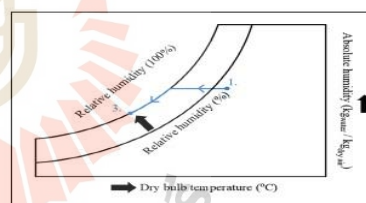
เทียบมาแล้ว จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาพลังงานความร้อนที่อากาศได้รับ ( $\dot{Q}_H$ ) เมื่อไหลผ่านบริเวณหมายเลข 2 ซึ่งเป็นกระบวนการให้ความร้อน (Heating) เพื่อเก็บข้อมูลสำหรับนำไปวิเคราะห์ร่วมกับการทดสอบการทำความเย็นเพื่อลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้งของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (Room II) ต่อไป เพื่อใช้ในการหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้ง (Room I) เพื่อให้ได้อุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่ต้องการต่อไป โดยค่าพลังงานความร้อนนี้หาได้จากสมการที่ 1

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_{a_2} (h_2 - h_1) \tag{1}$$

โดยที่  $\dot{Q}_H$  คือ ค่าพลังงานความร้อนที่อากาศได้รับ (kW)  
 $\dot{m}_{a_2}$  คือ ค่าอัตราการไหลโดยมวลของอากาศแห้งที่ไหลผ่านบริเวณหมายเลข 2 (Kg<sub>dry air</sub>/s)  
 $h_2$  คือ เอนทัลปีจำเพาะ (Enthalpy) ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 2 (kJ/kg<sub>dry air</sub>)  
 $h_1$  คือ เอนทัลปีจำเพาะ (Enthalpy) ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 1 (kJ/kg<sub>dry air</sub>)

2.4 การทดสอบการทำความเย็นเพื่อลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้งชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Room II)

ทำการทดสอบเพื่อหาแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในการลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้งบริเวณที่ 3 (Room II) และหาอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) โดยอากาศที่ไหลผ่านบริเวณหมายเลข 3 จะเกิดกระบวนการลดอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ (Cooling and dehumidifying) ซึ่งเกิดขึ้นโดยเริ่มต้นอากาศที่ไหลผ่านบริเวณนี้จะถูกลดอุณหภูมิลงไปเรื่อย ๆ จนถึงอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature) ซึ่งเป็นจุดที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Relative humidity) มีค่าเท่ากับ 100% หลังจากนั้นไอน้ำในอากาศจะเริ่มเกิดการควบแน่นเป็นหยดน้ำ ส่งผลให้ความชื้นของอากาศที่ไหลผ่านบริเวณดังกล่าวนี้มีค่าลดลง โดยกระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายผ่าน Psychrometric chart ได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เส้นกระบวนการ Cooling and dehumidifying

ติดตั้งและแปรค่าตัวแปรต่าง ๆ เช่นเดียวกับข้อ 2.3 จากนั้นทำการเก็บข้อมูลค่าอุณหภูมิและความชื้นของอากาศแต่ละบริเวณตั้งแต่ 1-4 โดยใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT 22 เช่นเดิม จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาอัตราการควบแน่นความชื้นออกจากอากาศ โดยคำนวณจากอัตราการควบแน่น (Moisture extraction rate, MER) ซึ่งเป็นปริมาณความชื้นที่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถควบแน่นออกจากอากาศได้ดังสมการที่ 2

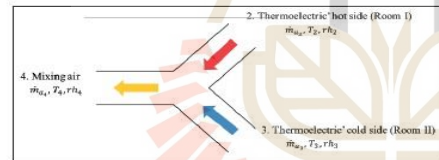
$$MER = \dot{m}_a (w_1 - w_3) \quad (2)$$

โดยที่ MER คือ อัตราการควบแน่น ( $kg_{water}/h$ )  
 $\dot{m}_a$  คือ อัตราการไหลโดยมวลของอากาศแห้งที่ไหลผ่านบริเวณหมายเลข 3 ( $kg_{dry\ air}/h$ )

$w_1$  คือ ค่าความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 1 ( $kg_{water}/kg_{dry\ air}$ )

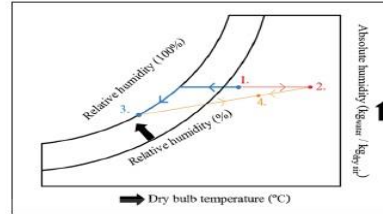
$w_3$  คือ ค่าความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 3 ( $kg_{water}/kg_{dry\ air}$ )

2.5 การคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้ง (Room I) และการวิเคราะห์เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้งบริเวณที่ 2 (Room I) เพื่อให้ได้อากาศจากบริเวณที่ 2 ที่มีอุณหภูมิเพียงพอสำหรับไปผสมกับอากาศจากบริเวณที่ 3 ซึ่งผ่านการทำความเย็นเพื่อลดความชื้นมาแล้วได้อากาศผสมที่มีอุณหภูมิตามที่ต้องการสำหรับนำไปใช้ในการอบแห้งต่อไป โดยจากการทดลองดังกล่าวนี้ต้องการอุณหภูมิของอากาศหลังการผสมเท่ากับ 42°C โดยการผสมอากาศเป็นดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 กระบวนการผสมอากาศในชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

จากรูปที่ 4 เป็นกระบวนการผสมอากาศอากาศ (Mixing) โดยกระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมดในชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกในบริเวณหมายเลข 1 2 3 และ 4 ในรูปที่ 2 อธิบายได้ด้วย Psychrometric chart ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 สภาวะของอากาศในชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

จากรูปที่ 5 ที่สภาวะเริ่มต้นอากาศบริเวณทางเข้าชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่หมายเลข 1 ได้แยกไหลเป็น 2 ทิศทาง คือไปยังบริเวณหมายเลข 2 เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้ง (Room I) ซึ่งเป็นกระบวนการให้ความร้อน (Heating) จากหมายเลข 1 ไปยังหมายเลข 2 โดยกระบวนการดังกล่าวนี้ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ (Absolute humidity) มีค่าคงที่ และอีกทิศทาง คือ ไปยังบริเวณหมายเลข 3 เพื่อลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้ง (Room II) โดยเป็นกระบวนการลดอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ (Cooling and dehumidifying) จากหมายเลข 1 ไปยังหมายเลข 3 จากนั้นอากาศจากบริเวณหมายเลข 2 และ 3 จะไหลมาผสมกันได้อากาศผสมที่สภาวะหมายเลข 4 ทำให้ได้อากาศผสมที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นและมีความชื้นลดลงเมื่อเทียบกับอากาศที่สภาวะเริ่มต้นที่บริเวณหมายเลข 1 สำหรับใช้อบแห้งต่อไป

จากการทดสอบชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกในข้อ 2.3 และข้อ 2.4 จะทำให้ทราบค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับจ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในด้านลดความชื้นของอากาศอบแห้ง (Room II) และทราบอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) แต่ยังไม่ทราบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในด้านเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้ง (Room I) เพื่อให้ได้อุณหภูมิของอากาศผสม 42°C ดังนั้นจึงได้ใช้วิธีการคำนวณพลังงานความร้อนจากกระบวนการให้ความร้อน ( $\dot{Q}_H$ ) ดังเส้นกระบวนการ 1 ไป 2 ในรูปที่ 5 เพื่อนำไปใช้ในการเลือกแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกจากข้อมูลผลการทดลองในข้อที่ 2.2 โดยเมื่อทำการวิเคราะห์จากสมการสมดุลมวล (Mass balance) ของอากาศแห้งในกระบวนการผสมอากาศจะได้ดังสมการที่ 3

$$\dot{m}_{a_2} + \dot{m}_{a_3} = \dot{m}_{a_4} \quad (3)$$



โดยที่  $\dot{m}_{a_4}$  คือ อัตราการไหลโดยมวลของอากาศแห้งที่ไหลผ่านบริเวณหมายเลข 4 ( $\text{kg}_{\text{dry air}}/\text{h}$ )

เมื่อทำการวิเคราะห์สมดุลมวลของไอน้ำ (Water vapor) ในอากาศผสมได้ตั้งสมการที่ 4

$$\dot{m}_{a_2} w_2 + \dot{m}_{a_3} w_3 = \dot{m}_{a_4} w_4 \quad (4)$$

โดยที่  $w_2$  คือ ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศจากบริเวณ

หมายเลข 2 ( $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$ )

$w_4$  คือ ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 4 ( $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$ )

เมื่อทำการวิเคราะห์สมดุลพลังงาน (Energy balance) ของอากาศผสมจะได้ตั้งสมการที่ 5

$$\dot{m}_{a_2} h_2 + \dot{m}_{a_3} h_3 = \dot{m}_{a_4} h_4 \quad (5)$$

โดยที่  $h_4$  คือ เอนทัลปีจำเพาะ (Enthalpy) ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 4 ( $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{dry air}}$ )

จัดรูปสมการเพื่อคำนวณหาเอนทัลปีจำเพาะของอากาศจากบริเวณหมายเลข 2 (Enthalpy,  $h_2$ ) สำหรับใช้ในการหาค่า ( $\dot{Q}_2$ ) ได้ตั้งสมการที่ 6

$$h_2 = \frac{(\dot{m}_{a_2} + \dot{m}_{a_3}) h_4 - \dot{m}_{a_3} h_3}{\dot{m}_{a_2}} \quad (6)$$

จากสมการที่ 6 จะพบว่าจะไม่ทราบค่าเอนทัลปีจำเพาะของอากาศหลังผสม (Enthalpy,  $h_4$ ) ที่อุณหภูมิ  $42^\circ\text{C}$  จึงต้องคำนวณผ่านสมการที่ 7 [10]

$$h_4 = 1.006T_4 + w_4 (2501 + 1.805T_4) \quad (7)$$

โดยที่  $T_4$  คือ อุณหภูมิของอากาศหลังการผสมที่บริเวณหมายเลขที่ ( $^\circ\text{C}$ )

จากสมการที่ 7 พบว่าต้องหาค่าความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศผสม (Absolute humidity,  $w_4$ ) ซึ่งสามารถหาได้ผ่านการจัดรูปสมการที่ 4 ได้ตั้งสมการที่ 8

$$w_4 = \frac{\dot{m}_{a_2} w_2 + \dot{m}_{a_3} w_3}{\dot{m}_{a_2} + \dot{m}_{a_3}} \quad (8)$$

โดยจากกระบวนการให้ความร้อน (Heating) จะได้

$$w_1 = w_2 \quad (9)$$

แทนสมการที่ 9 ในสมการที่ 8 จะได้ตั้งสมการที่ 10

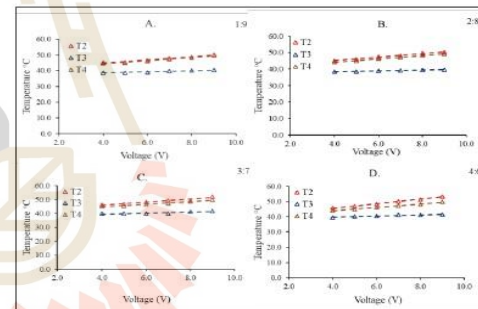
$$w_4 = \frac{\dot{m}_{a_2} w_1 + \dot{m}_{a_3} w_3}{\dot{m}_{a_2} + \dot{m}_{a_3}} \quad (10)$$

จากนั้นคำนวณค่า  $w_4$  เพื่อนำไปคำนวณค่า  $h_4$  จากสมการที่ 7 และนำค่า  $h_4$  ไปคำนวณหาค่า  $h_2$  ในสมการที่ 6 เพื่อนำไปคำนวณค่า  $\dot{Q}_2$  จากสมการที่ 1 สำหรับใช้ในการเลือกค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกต่อไป

### 3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการทดสอบเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้งของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (Room I)

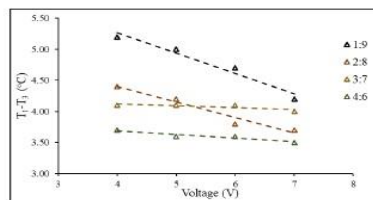
พบว่าอุณหภูมิของอากาศที่บริเวณหมายเลข 2 3 และ 4 มีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่จ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในแต่ละค่าอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ทั้ง 4 ค่า พบว่าทั้ง 3 อุณหภูมิอากาศอบแห้งมีลักษณะความสัมพันธ์คล้ายกัน รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ ณ อุณหภูมิ  $45^\circ\text{C}$



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบระหว่างค่าอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าที่ค่าอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) 1:9 2:8 3:7 และ 4:6 ดังรูปย่อย A B C และ D ตามลำดับ

จากรูปที่ 6 พบว่าเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มมากขึ้น จะทำให้อุณหภูมิอากาศหลังผ่านบริเวณหมายเลข 2 3 และ 4 เพิ่มขึ้นแบบแปรผันตรง (Linear equation) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากด้านเย็นไปสู่ด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิอากาศที่มาจากบริเวณหมายเลข 2 (Room I) เพิ่มขึ้น จากนั้นเมื่ออากาศจากบริเวณหมายเลข 2 ที่เพิ่มขึ้นไหลมาผสมกับอากาศที่มาจากบริเวณหมายเลข 3 (Room II) จึงส่งผลให้อากาศผสมที่บริเวณหมายเลข 4 มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่เดียวกันอากาศที่ด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่มาจากบริเวณหมายเลข 3 ควรมีอุณหภูมิลดลงตามอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น แต่พบว่ากลับมีค่าเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มมากขึ้นจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น แต่การระบายความร้อนออกจากด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมีอัตราน้อยกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มาจากด้านเย็น ส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมในแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกและเกิดการนำความร้อนภายในแผ่นย้อนกลับไปที่ด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ส่งผลให้ความสามารถในการลดอุณหภูมิของอากาศด้านเย็นลดลง ปฏิกิริยาการนี้ไม่ส่งผลให้ผลต่างอุณหภูมิของอากาศที่ผ่านบริเวณหมายเลข 3 เทียบกับอุณหภูมิของอากาศขาเข้าที่บริเวณหมายเลข 1 เพิ่มขึ้นแต่อย่างใด และยังพบอีกว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ในบริเวณหมายเลข 3 เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศหลังผสมที่บริเวณหมายเลข 4 ลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เมื่อเพิ่มเพิ่มอัตราส่วนของอากาศผสมที่บริเวณหมายเลข 3 ส่งผลให้อากาศที่มีอุณหภูมิสูงซึ่งมาจากบริเวณหมายเลข 2 มีอัตราการไหลเข้ามาลดลงและอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำที่มาจากบริเวณหมายเลข 3 มีอัตราการไหลมาผสมเพิ่มขึ้น และเมื่ออากาศจากทั้ง 2 บริเวณผสมกันจึงทำให้อุณหภูมิของอากาศผสมที่บริเวณหมายเลข 4 ลดลง

3.2 ผลการทดสอบการทำความเย็นเพื่อลดความชื้นให้แก่อาคารอบแห้งของชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Room II)  
เมื่อนำค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านบริเวณหมายเลข 1 ( $T_1$ ) ซึ่งเป็นอากาศทางเข้าชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกมาคำนวณค่าผลต่างกับอุณหภูมิอากาศจากบริเวณหมายเลข 3 ( $T_3$ ) ซึ่งเป็นอุณหภูมิอากาศที่ผ่านด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก เปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในแต่ละค่าอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) เพื่อเปรียบเทียบสำหรับหาสภาวะที่ได้ผลการลดอุณหภูมิของอากาศหลังจากบริเวณที่ 3 มากที่สุด สำหรับใช้ลดความชื้นของอาคารอบแห้ง โดยจากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิทั้ง 3 ค่า พบว่าได้กราฟความสัมพันธ์ที่มีแนวโน้มคล้าย รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ ณ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง  $40^{\circ}\text{C}$

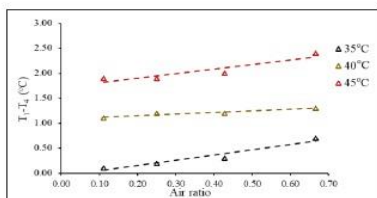


รูปที่ 7 การเปรียบเทียบการทำความเย็นในอากาศจากด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ในแต่ละค่าอัตราส่วนของอากาศผสม

จากรูปที่ 7 พบว่าเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น ทำให้ได้ค่าการทำความเย็นของอากาศจากบริเวณที่ 3 ( $T_1 - T_3$ ) ลดลงโดยได้กราฟความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรง (Linear equation) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ทำให้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมีอัตราการถ่ายเทความร้อนจากด้านเย็นไปยังด้านร้อนเพิ่มขึ้น สังเกตได้จากผลการทดลองรูปที่ 6 แต่ในขณะที่เดียวกันด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกกลับมีอัตราการระบายความร้อนน้อยกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มาจากด้านเย็น ทำให้ความร้อนบางส่วนเกิดการนำความร้อนกลับมาที่ด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ส่งผลให้ความสามารถในการลดอุณหภูมิของอากาศที่ด้านเย็นลดลง และเมื่อพิจารณาผลการทดลองในแต่ละค่าอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) พบว่า เมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนของอากาศผสมด้านเย็นเพิ่มขึ้นจะทำให้การทำความเย็น ( $T_1 - T_3$ ) ของอากาศจากบริเวณหมายเลข 3 ลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนของอากาศผสมด้านเย็นเพิ่มขึ้นจะทำให้การทำความเย็นที่น้อยกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศที่เข้ามา ส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมเช่นเดียวกัน โดยจากการทดลองพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้า และค่าอัตราส่วนผสมอากาศที่ทำให้ได้ค่าการทำความเย็นของอากาศจากบริเวณที่ 3 ( $T_1 - T_3$ ) มากที่สุดคือที่ 4 V และที่อัตราส่วนของอากาศผสม 1:9 ตามลำดับ

และเมื่อนำค่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศทางเข้าชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ( $T_1$ ) และอุณหภูมิอากาศผสม ( $T_4$ ) มาเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ที่เปลี่ยนไปในแต่ละสภาวะอุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเท่ากัน โดยการทดลองดังกล่าวนี้มิได้เปิดใช้งานแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในด้านร้อนของบริเวณหมายเลข 1 (Room I) แต่อย่างใด ทั้งนี้เพื่อที่จะศึกษาผลกระทบของการลดอุณหภูมิจากการลดความชื้นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกของอากาศในบริเวณหมายเลข 3 ที่มีผลต่อการลดอุณหภูมิของอากาศหลังผสม ( $T_1 - T_4$ ) จากการทดลองพบว่าได้กราฟในทั้ง

4 ค่าแรงดันไฟฟ้ามีแนวโน้มเดียวกัน ดังนั้นจึงแสดงผลกราฟไว้เพียงที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 4 V ดังรูปที่ 8

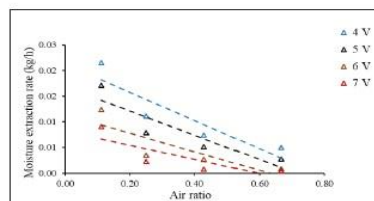


รูปที่ 8 ผลจากการลดอุณหภูมิของอากาศหลังผสม ( $T_1-T_2$ ) ในแต่ละอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ที่แต่ละสภาวะอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง ณ แรงดันไฟฟ้าเดียวกัน

จากรูปที่ 8 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่าอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ทำให้ได้ค่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและขาออกจากชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ( $T_1-T_2$ ) เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงทำให้ได้อุณหภูมิของอากาศผสม ( $T_2$ ) ที่ถูกนำไปใช้อบแห้งลดลง โดยได้กราฟอยู่ในรูปกราฟเส้นตรง (Linear equation) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนของอากาศจากบริเวณที่ 3 ซึ่งเป็นอากาศขาเข้าของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น ทำให้อากาศที่มีอุณหภูมิค่าไหลเข้ามาผสมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศหลังผสม ( $T_2$ ) มีค่าลดลง และในขณะเดียวกันเมื่ออุณหภูมิของอากาศทางเข้าชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ( $T_1$ ) เพิ่มขึ้น ทำให้ได้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศทางเข้าและทางออกจากชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ( $T_1-T_2$ ) เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของอากาศทางเข้าชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น ( $T_1$ ) แต่ในขณะเดียวกันนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจากด้านเย็นไปยังด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อระบายออกสู่อากาศภายนอกในบริเวณหมายเลข 5 ยังคงเท่าเดิม ทำให้ความสามารถในการทำความเย็นเพื่อลดความชื้นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าเท่าเดิมในขณะที่อุณหภูมิของอากาศทางเข้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลต่างผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศทางเข้าและทางออกจากชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ( $T_1-T_2$ ) เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ที่มีผลต่ออุณหภูมิของอากาศอบแห้งน้อยที่สุดคือที่ 1:9 ซึ่งยังคงทำให้ได้อากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิลดลงต่ำที่สุดหลังจากทำการผสม

เมื่อคำนวณอัตราการควบแน่น (Moisture extraction rate) ของไอน้ำในอากาศ ในการลดความชื้นของอากาศบริเวณหมายเลข 3 ซึ่งเป็นด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก จากนั้นนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์เพื่อเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ที่เปลี่ยนไป ในแต่ละแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นเทอร์โม

อิเล็กทริกที่สภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกัน พบว่าที่สภาวะอุณหภูมิทั้ง 3 ค่าให้กราฟที่มีแนวโน้มเดียวกัน ดังนั้นจึงแสดงผลกราฟไว้เพียงที่อุณหภูมิ 40°C ไว้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 อัตราการควบแน่นไอน้ำของอากาศเทียบกับอัตราส่วนของอากาศผสม ในแต่ละค่าแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะอุณหภูมิ 40°C

จากรูปที่ 9 พบว่า เมื่อค่าอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าอัตราการควบแน่นไอน้ำ (Moisture extraction rate) ของอากาศลดลง โดยได้กราฟความสัมพันธ์อยู่ในรูปกราฟเส้นตรง (Linear equation) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนของอากาศผสม ทำให้ค่าอัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านบริเวณหมายเลข 3 เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวควบแน่นของครีความร้อน (Heat sink) เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการถ่ายเทความร้อนจากอากาศเข้ามาที่ผิวของครีความร้อนเพิ่มมากขึ้นเพราะอากาศมีอัตราการไหลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ของอากาศบริเวณผิวครีความร้อนเพิ่มขึ้น หรือก็คืออากาศอิ่มตัวน้อยลง ทำให้อัตราการควบแน่นไอน้ำของอากาศบริเวณผิวครีความร้อนมีค่าลดลง ดังนั้นจะเห็นว่าค่าอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ที่ทำให้ได้ค่าอัตราการควบแน่นไอน้ำ (Moisture extraction rate) ของอากาศมากที่สุดคือที่ 1:9 นอกจากนี้ยังพบอีกว่าที่ค่าอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) เดียวกัน เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าอัตราการควบแน่นไอน้ำ (Moisture extraction rate) ในอากาศลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ทำให้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมีอัตราการถ่ายเทความร้อนจากด้านเย็นไปสู่ด้านร้อนเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกกลับมีอัตราการระบายความร้อนน้อยกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มาจากด้านเย็น ทำให้ความร้อนบางส่วนเกิดการนำความร้อนย้อนกลับมาที่ด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ทำให้อุณหภูมิที่ผิวควบแน่นของครีความร้อน (Heat sink) เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าอัตราการควบแน่นไอน้ำลดลง โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้ได้ค่าอัตราการควบแน่นไอน้ำมากที่สุดคือที่ 4 V

จากการทดสอบการทำงานของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในการลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้ง (Room II) เพื่อหาว่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับจ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในตำแหน่งที่ทำการลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้ง และทำการหาอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ของ

ชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อที่จะสามารถทำความเย็นเพื่อลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้งได้ โดยจากผลการทดลองพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมคือที่ 4 V และค่าอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ที่เหมาะสมคือที่ 1:9

จากการทดลองจำลองอุณหภูมิของอากาศอบแห้งด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Heater) เพื่อนำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้ง (Room I) ซึ่งได้คำนวณตามวิธีการในข้อ 2.4 โดยเริ่มต้นทราบค่าทราบค่า  $\dot{m}_a$  เท่ากับ  $0.0278 \text{ kg}_{\text{dry air}}/\text{s}$   $\dot{m}_a$  เท่ากับ  $0.0032 \text{ kg}_{\text{dry air}}/\text{s}$  และ  $h_3$  เท่ากับ  $79.58 \text{ kJ/kg}_{\text{dry air}}$  (จากการทดลองที่ 2.3 โดยสภาวะอุณหภูมิของอากาศทางเข้าอุปกรณ์เท่ากับ  $40^\circ\text{C}$  ที่อัตราส่วนของอากาศผสมเท่ากับ 1:9 และจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกเท่ากับ 4 V) แต่ยังไม่ทราบค่า  $h_4$  ที่อุณหภูมิ  $42^\circ\text{C}$  จึงต้องทำการคำนวณผ่านสมการที่ 7 แต่จากสมการที่ 7 พบว่ายังไม่ทราบค่าความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศผสม ( $w_4$ ) จึงต้องทำการคำนวณผ่านสมการที่ 10 ก่อน โดยมีค่า  $w_1$  เท่ากับ  $0.0194 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$  (จากการทดลองเดียวกันกับค่า  $h_3$ ) จะได้ค่า  $w_4$  เท่ากับ  $0.0191 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$  จากนั้นจึงนำค่า  $w_4$  ที่ใส่ไปคำนวณหาค่า  $h_4$  ในสมการที่ 7 ได้ค่า  $h_4$  เท่ากับ  $91.63 \text{ kJ/kg}_{\text{dry air}}$  นำค่า  $h_4$  ที่ได้มาคำนวณหาค่าเอนทัลปีจำเพาะของอากาศหลังจากผ่านกระบวนการให้ความร้อน ( $h_2$ ) ในสมการที่ 8 โดยได้ค่า  $h_2$  เท่ากับ  $93.01 \text{ kJ/kg}_{\text{dry air}}$  จากนั้นทำการคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่อากาศได้รับ ( $\dot{Q}_H$ ) ในกระบวนการให้ความร้อน (Heating) ตามสมการที่ 1 โดยมีค่า  $h_1$  เท่ากับ  $89.84 \text{ kJ/kg}_{\text{dry air}}$  (จากสภาวะการทดลองเดียวกันกับค่า  $h_3$ ) จะได้ค่า  $\dot{Q}_H$  เท่ากับ  $0.0879 \text{ kW}$  นำค่า  $\dot{Q}_H$  ที่คำนวณได้ไปใช้ในการเลือกแรงดันไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกจากผลการทดลองของผลการทดลองที่ 2.2 โดยจากผลการทดลองพบว่า ที่แรงดันไฟฟ้า 8 V และ 9 V ชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถให้พลังงานความร้อนแก่อากาศอบแห้ง ( $\dot{Q}_H$ ) ได้เท่ากับ  $0.0858 \text{ kW}$  และ  $0.1339 \text{ kW}$  ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกแรงดันไฟฟ้าสำหรับจ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้งบริเวณหมายเลข 2 (Room I) เท่ากับ 9 V โดยจากการทดลองพบว่าชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกมีความสามารถเพียงพอในการผลิตอากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิ  $42^\circ\text{C}$  ซึ่งสามารถถูกตัดแปลงสำหรับนำมาใช้ในการสร้างเครื่องอบแห้งบีมความร้อนแทนบีมความร้อนระบบอัดไอที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ภายในระบบที่ค่อนข้างซับซ้อน และมีการใช้สารทำความเย็นในระบบที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมหากเกิดการรั่วไหลสำหรับงานวิจัยถัดไปได้

ดังนั้นจากการทดสอบเพื่อหาว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้กับชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกและหาอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) เพื่อให้ได้อากาศอบแห้งหลังจากการผสมที่มีค่าอุณหภูมิตามที่ต้องการและมีค่าความชื้นที่ลดลง สำหรับนำไปใช้ต่อไปในระบบการอบแห้ง พบว่าได้ค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับจ่ายให้กับชุดอุปกรณ์เทอร์

โมอิเล็กทริกด้านที่เพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้ง (Room I) เท่ากับ 9 V ค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับจ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในด้านที่ทำหน้าที่ในการลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้ง (Room II) เท่ากับ 4 V และค่าอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) เท่ากับ 1:9

#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับนำไปใช้ในเครื่องอบแห้งบีมความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นพบว่า เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากด้านเย็นมายังด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านบริเวณด้านร้อนเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันถ้าหากด้านร้อนไม่สามารถระบายความร้อนออกได้มากกว่าความร้อนที่ถ่ายเทเข้ามาจากด้านเย็น จะส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนย้อนกลับมายังด้านเย็น นอกจากนั้นยังพบอีกว่าเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น ทำให้ได้ค่าการทำความเย็นของอากาศลดลง และเมื่อทำการเพิ่มค่าอัตราส่วนของอากาศผสม (Air ratio) ทำให้ได้ค่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและขาออกจากชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงทำให้ได้อุณหภูมิของอากาศผสมที่ถูกนำไปใช้อบแห้งลดลง นอกจากนั้นยังพบว่าเมื่ออัตราส่วนของอากาศผสมเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าอัตราการควบแน่นไอน้ำ (Moisture extraction rate) ของอากาศลดลง และจากการทดสอบเพื่อหาว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้กับชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกและหาอัตราส่วนของอากาศผสม พบว่าได้ค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับจ่ายให้กับชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกด้านที่เพิ่มอุณหภูมิให้แก่อากาศอบแห้งเท่ากับ 9 V ค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับจ่ายให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในด้านที่ทำหน้าที่ในการลดความชื้นให้แก่อากาศอบแห้งเท่ากับ 4 V และค่าอัตราส่วนของอากาศผสมเท่ากับ 1:9

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Aktas, M., Taseri, L., Sevik, S., Gülcü, M., Uysal Seğin, G., & Doğun, E. C. (2019). Heat pump drying of grape pomace: Performance and product quality analysis. *Drying technology*, 37(14), 1766-1779.
- [2] Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A., Welchacama, S., Swasdisevi, T., & Rukprang, P. (1998). Fruit drying using heat pump. *International Energy Journal*, 20(1), 39-53.
- [3] Yang, Z., Li, X., Tao, Z., Luo, N., & Yu, F. (2018). Ultrasound-assisted heat pump drying of pea seed. *Drying technology*, 36(16), 1958-1969.
- [4] Enescu, D., Ciocia, A., Mazza, A., & Russo, A. (2017). Solutions based on thermoelectric refrigerators in humanitarian contexts. *sustainable energy technologies and assessments*, 22, 134-149.

- [5] Li, J., Ma, B., Wang, R., & Han, L. (2011). Study on a cooling system based on thermoelectric cooler for thermal management of high-power LEDs. *Microelectronics Reliability*, 51(12), 2210-2215.
- [6] ปฐมพงศ์ จิโน, ถิรายุ ปิ่นทอง และ โทเมน หมายมัน. (2014). การศึกษาระบบทำน้ำร้อนและน้ำเย็น ด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์ ร่วมกับโซล่า เซลล์. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 19(3), 231-243.
- [7] พรรว่องไพศาลกิจ. (2562). การประยุกต์ใช้โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในระบบการอบแห้งอุณหภูมิต่ำ. *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี*.
- [8] อธิพิพล พึ่งเมือง. (2559). เครื่องควบคุมอุณหภูมิโดยประยุกต์ใช้เพลเทียร์. *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี*.
- [9] วิไล ปาละวิสุทธิ. (2549). เทคโนโลยีการผลิตเมล็ดพันธุ์ข้าวเชิงพาณิชย์. *พิษณุโลก: กรมวิชาการเกษตร*.
- [10] ASHRAE. (2001). *ASHRAE Fundamentals Handbook (SI)*: American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

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

## ค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

ทินกร เพ็งประโคน<sup>1\*</sup> กระวี ตรีอำรรค<sup>2</sup> และ เทวรัตน์ ตรีอำรรค<sup>3</sup>

สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ ..... แก้ไขบทความ..... ตอบรับบทความ ..... (ผู้เขียนไม่ต้องกำหนด)

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการหาไอโซเทอมความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และเปรียบเทียบเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ตัวอย่างข้าวถูกบรรจุในกล่องปิดผนึกที่เดิม สารละลายเกลืออิ่มตัวเพื่อใช้ควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศให้อยู่ในช่วง 5.32 – 84.34 เปอร์เซ็นต์ โดยประมาณ ใช้ตู้อบลมร้อนจำลองสภาวะอุณหภูมิ 2 ค่า คือ 25 และ 70 องศาเซลเซียส ปล่อยให้ข้าวตัวอย่างเข้าสู่สมดุลความชื้นกับอากาศในกล่องจนคงที่ บันทึกค่าน้ำหนักเพื่อคำนวณเป็นความชื้นของข้าว ผลการทดลองพบว่า ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุลของข้าวลดลง ซึ่งแตกต่างกับที่สภาวะอุณหภูมิเดียวกันเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุลข้าวเพิ่มขึ้น การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดเส้นใจ ( $R^2$ ) และ ค่าการลดลงโคกกำลังสอง ( $\chi^2$ ) ในแต่ละสภาวะอุณหภูมิพบว่า ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แบบจำลองของ Henderson มีความเหมาะสมที่สุด และที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส แบบจำลองของ Chung & Pfof มีความเหมาะสมที่สุด

**คำสำคัญ :** ไอโซเทอมความชื้น; ข้าวข้าวดอกมะลิ 105; ความชื้นสมดุล; สารละลายเกลืออิ่มตัว

\* ผู้มีพันธะประสานงาน โทร: +668 6515 7035, อีเมล: krawee@sut.ac.th



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

## Moisture sorption isotherms of Khao Dawk Mali 105 Paddy

---

Received .....; Revised.....; Accepted ..... (Do not assign)

### Abstract

The objectives of this research were the determination of sorption isotherms and the comparison of mathematical models to determine a suitable model in different temperature ranges for Khao Dawk Mali 105. This experiment was made by placing samples in containers which were contained saturated salt solutions to control the humidity in the ranges of 5.32 – 84.34 %RH and the hot air oven was used to provide temperature conditions at 25 and 70 °C. The samples were in containers until the mass of samples was constant so the equilibrium between the samples and the surrounding was reached and then the equilibrium moisture content was determined. The experiment found that for the same relative humidity in the air when the temperature increased, the equilibrium moisture content would decrease and for the same temperature in the air when the relative humidity increased, the equilibrium moisture content would increase. Furthermore, the comparison of models by analysis from R-Squared ( $R^2$ ) and Chi-Square ( $\chi^2$ ) in each temperature found that Henderson model was a suitable model at 25 °C and Chung & Pfost was a suitable model at 70 °C.

**Keywords :** Moisture Sorption Isotherms; Khao Dawk Mali 105; Equilibrium Moisture Content; Saturated Salt Solution

---

\* Corresponding Author. Tel.: +668 6515 7035, E-mail Address: [krawee@sut.ac.th](mailto:krawee@sut.ac.th)

## 1. บทนำ

ข้าว ถือเป็นธัญพืชอาหารหลักของมนุษย์มาช้านาน ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีที่ตั้งทางภูมิศาสตร์เหมาะสมต่อการเพาะปลูกข้าวทำให้สามารถผลิตข้าวไม่เพียงแต่เฉพาะเพื่อบริโภคภายในประเทศเท่านั้น แต่ยังสามารถส่งออกข้าวเพื่อไปจำหน่ายยังต่างประเทศได้อีกด้วย โดยพันธุ์ข้าวที่มีชื่อเสียงและเป็นอาหารหลักของคนไทยมาอย่างยาวนานคือข้าวหอมมะลิไทย (Khao Dawk Mali 105) ซึ่งเป็นข้าวที่เมล็ดมีลักษณะรูปร่างเรียวยาว เมล็ดใส มีกลิ่นหอมตามธรรมชาติ และข้าวที่หุงสุกแล้วจะมีความอ่อนนุ่มมีรสชาติที่เป็นเอกลักษณ์ ทำให้เป็นที่นิยมไม่เพียงแต่เฉพาะคนไทยเท่านั้นแต่ยังรวมไปถึงชาวต่างชาติอีกด้วย โดยในปี พ.ศ. 2563 ประเทศไทยมีปริมาณการส่งออกข้าวสูงถึง 1.19 ล้านตัน ซึ่งมีมูลค่ากว่า 40,999 ล้านบาท [1] ซึ่งสามารถสร้างรายได้มากมายให้แก่เกษตรกรไทยและประเทศไทย ดังนั้น ข้าวจึงเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญต่อประเทศไทยอย่างยิ่ง โดยทั่วไปแล้วผลผลิตข้าวหลังการเก็บเกี่ยวนั้นจะมีค่าความชื้นที่สูง ซึ่งความชื้นนี้ทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพของข้าวที่เร็วขึ้น อันเป็นสาเหตุให้ราคาจำหน่ายข้าวลดลงอีกด้วย ดังนั้นข้าวภายหลังจากการเก็บเกี่ยวจะต้องถูกนำมาลดความชื้นลงก่อนทำการเก็บรักษา โดยความชื้นที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษามีค่าประมาณร้อยละ 13-14 มาตรฐานเปียก [2] การลดความชื้นในข้าวที่สำคัญและได้รับความนิยมมากที่สุดในระดับอุตสาหกรรมคือกระบวนการอบแห้งข้าวด้วยเครื่องอบแห้งเพราะสามารถทำงานได้ทุกสภาวะอากาศและยังสามารถควบคุมความชื้นหลังการอบแห้งให้ได้ค่าตามที่ต้องการได้

กระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกนั้นมีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการอยู่หลายปัจจัยด้วยกัน เช่น อัตราการป้อนข้าว ขนาดของห้องอบแห้ง อุณหภูมิของอากาศอบแห้ง [4] และค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการประเมินกระบวนการอบแห้งปัจจัยหนึ่ง ค่าความชื้นสมดุล คือ ปริมาณความชื้นที่ต่ำที่สุดที่สามารถมีอยู่ในวัสดุที่

อุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสภาวะแวดล้อมขณะนั้น [5] โดยค่าความชื้นสมดุลนี้เป็นส่วนหนึ่งของไอโซเทอมความชื้น (Moisture sorption isotherms) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสมดุลของวัสดุกับความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศ (Equilibrium relative humidity) ที่อุณหภูมินั้น ๆ โดยความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลของวัสดุที่ลดลงที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศเรียกว่า ไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption isotherms) และความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลของวัสดุที่เพิ่มขึ้นที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศขึ้นเรียกว่า ไอโซเทอมการดูดความชื้น (Adsorption isotherms) [6] โดยไอโซเทอมความชื้นนี้ถูกใช้ในการออกแบบกระบวนการอบแห้ง และการเลือกสภาวะที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาข้าวได้อีกด้วย [7] จากการศึกษางานวิจัยไอโซเทอมความชื้นของวัสดุต่าง ๆ เช่น ไอโซเทอมของใบกระวาน [8] การทำไอโซเทอมของใบสะระแหน่ [9] การทำไอโซเทอมของเมล็ดผักโขม [10] และการทำไอโซเทอมของข้าวฟ่างไข่มุก [11] พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวนมากได้ถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าและอธิบายไอโซเทอมความชื้นของวัสดุ ซึ่งความแม่นยำในการทำนายค่าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิและชนิดของวัสดุที่แตกต่างกันออกไป [9] โดยพิจารณาความแม่นยำจากค่าทางสถิติที่สำคัญ ๆ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และ ค่าการลดลงโคเกิ้ลสองงานวิจัยในปัจจุบัน นักวิจัยได้ทดลองหาค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวชนิดต่าง ๆ หลายชนิดด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นการหาค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวสายพันธุ์ Lido cultivar [12] หรือจะเป็นการทำไอโซเทอมของข้าวสายพันธุ์ Kaybonnet และ Cypress รวมไปถึงข้าวสายพันธุ์ Bengal [13] และการทำไอโซเทอมของข้าวสายพันธุ์ Baldo [14] แต่ทว่ายังไม่พบรายงานถึงการหาค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวเมล็ดยาวสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ของประเทศไทย พบแต่เพียงการทำไอโซเทอมความชื้นของผลิตภัณฑ์จากข้าวหอมมะลิที่ผ่านการแปรรูปแล้วคือ

ไอโซเทอมความชื้นของข้าวพอง (Rice Cracker) [15] และ ฟลาวร์ข้าว (Rice Flours) [16] ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการพัฒนากระบวนการผลิต โดยเฉพาะกระบวนการอบแห้งและการเก็บรักษาสภาพผลิต

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการทดลองหาไอโซเทอมความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้อธิบายและเปรียบเทียบเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สภาวะการเก็บรักษาทั่วไป และ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิอบแห้ง เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบเครื่องอบแห้งและสภาวะการเก็บรักษาสะเต็มขั้นต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

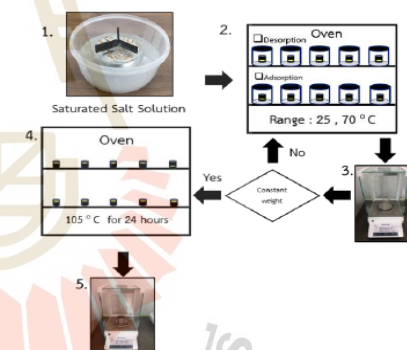
ข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 (*Oryza sativa L.*) ซึ่งเป็นข้าวเก่าที่ผ่านการเก็บเกี่ยวมาแล้วเป็นเวลา 8 เดือน จากบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยที่ใช้ในการทดลอง ได้ถูกแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ ข้าวขึ้นสำหรับการหาไอโซเทอมการคายความชื้น ซึ่งถูกเตรียมโดยนำข้าวเปลือกไปคืนความชื้นกลับด้วยการสเปรย์น้ำและคลุกเคล้าให้ทั่วกัน ก่อนนำไปบรรจุในถุงทึบแสงปิดสนิท จากนั้นปล่อยให้ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ในที่อุณหภูมิต่ำ (ตู้เย็น) เพื่อให้น้ำซึมเข้าไปในเมล็ดข้าวและกลายเป็นข้าวขึ้น [18], [19] และอีกกลุ่มคือ ข้าวแห้งสำหรับการหาไอโซเทอมการดูดความชื้น ซึ่งถูกเตรียมโดยการนำข้าวเปลือกไปอบในเตาอบเพื่อกำจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [20] จากนั้น แบ่งข้าวออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มละ 10 เม็ด บรรจุในภาชนะทนความร้อนแบบโปร่งแสงมีฝาปิดสนิท ปริมาตร 1,360 ลูกบาศก์เซนติเมตร [21] ใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว (Saturated salt solution) สำหรับควบคุมสภาวะความชื้นภายในกล่อง ซึ่งสารละลายเกลืออิ่มตัวมี

คุณสมบัติในการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเหนือสารละลายได้ โดยสารละลายเกลืออิ่มตัวแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ได้ไม่เท่ากัน นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิรอบ ๆ สารละลายด้วย สำหรับการทดลองนี้ได้ใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว 5 ชนิด สำหรับสร้างสภาวะความชื้นดังตารางที่ 1 ดัดแปลงจาก [9], [17]

ตารางที่ 1 ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในภาชนะที่บรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัว (ทศนิยม) [9], [17]

Salt solution	25°C	70°C
KOH	8.23	5.32
MgCl <sub>2</sub>	32.78	27.77
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	52.89	-
NaCl	75.29	75.06
KCl	84.34	79.49

2.2 ขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 1 อุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง  
บรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัว (Saturated salt solutions) ปริมาตร 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ตั้งหมายเลข 1 ในภาชนะแล้วปิดให้สนิท นำภาชนะดังกล่าวใส่ในตู้อบลมร้อน Universal Oven รุ่น UF160 จากบริษัท Memmert เพื่อจำลองสภาวะอุณหภูมิ 2 สภาวะด้วยกันคือ 25 และ 70 องศาเซลเซียส  
 ตั้งหมายเลข 2 ตัวอย่างข้าวที่อุณหภูมิและความชื้นต่างๆ จะถูกนำไปชั่งน้ำหนักทุกวัน ด้วยเครื่อง Analytical Balance ME204/M ของบริษัท Mettler Toledo (ความละเอียด 0.0001 กรัม) ตั้งหมายเลข 3 โดยก่อนชั่งแต่ละครั้งจะรอให้อุณหภูมิของตัวอย่างลดลงจนมีค่าเท่ากับอุณหภูมิห้อง และจะชั่งจนกว่าน้ำหนักของข้าวจะคงที่ (มีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.001 กรัม ใช้เวลาประมาณ 14-18 วัน) ซึ่งหมายถึงถึงความชื้นในข้าวถึงจุดสมดุลแล้ว หลังจากนั้นข้าวจะถูกนำมาหาค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content) โดยการนำไปอบในเตาอบเพื่อกำจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [20]  
 ตั้งหมายเลข 4 ต่อจากนั้นจึงนำข้าวแห้งมาชั่งน้ำหนัก

ตั้งหมายเลข 5 และนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณหา ค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis) ตั้งสมการที่ (1) ดัดแปลงจาก [22]

$$M_d = \frac{w-d}{d} \times 100\% \quad (1)$$

โดยที่

$M_d$  = ค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

$w$  = น้ำหนักเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ (กรัม)

$d$  = น้ำหนักผลิตภัณฑ์แห้ง (กรัม)

สำหรับไอโซเทอมความชื้นในข้าวที่ได้จากการทดลองนั้น จะถูกนำมาใช้ในการสร้างสมการสำหรับทำนายค่าไอโซเทอมความชื้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยสมการทางคณิตศาสตร์ที่ถูกนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลในการศึกษานี้แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 6 แบบ สำหรับใช้ทำนายค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105

Model	Equation	Reference
GAB	$EMC = \frac{A \cdot B \cdot C \cdot RH}{(1 - B \cdot RH)(1 - B \cdot RH + B \cdot C \cdot RH)}$	[23]
Oswin	$EMC = A \left[ \frac{RH}{1 - RH} \right]^B$	[24]
Henderson	$EMC = \left[ \frac{\ln(1 - RH)}{-A} \right]^{\frac{1}{B}}$	[25]
Henderson & Thompson	$EMC = \left[ \frac{\ln(1 - RH)}{-A(T + B)} \right]^{\frac{1}{C}}$	[26]
Chung & Pfost	$EMC = \frac{1}{-A} \ln \left[ \frac{(T + B) \ln RH}{-C} \right]$	[26]
Halsey	$EMC = \left[ \frac{-A}{T \ln(RH)} \right]^{\frac{1}{B}}$	[27]

โดยที่

$EMC$  = ค่าความชื้นสมดุลของวัสดุแบบมาตรฐาน  
แห้ง (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมมวลแห้ง)

$A, B, C$  และ  $D$  = ค่าคงที่ของแบบจำลอง

$T$  = อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

$RH$  = ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ทศนิยม)

ประเมินหาค่าความแม่นยำของสมการในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ว่าสมการใดมีความเหมาะสมมากที่สุด สำหรับช่วงอุณหภูมินั้นโดยพิจารณาจากค่าทางสถิติ 2 ค่า คือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และค่าการลดลงโค้งกำลังสอง ซึ่งสมการทางสถิติดังกล่าวมีดังนี้ [28], [29]

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (M_{e,ex} \cdot M_{e,pred})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n M_{e,ex}^2\right) \left(\sum_{i=1}^n M_{e,pred}^2\right)}} \quad (2)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{e,ex} - M_{e,pred})^2}{N - n} \quad (3)$$

โดยที่

$M_{e,ex}$  = ความชื้นสมดุลของวัสดุที่ได้จากการทดลอง (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมมวลแห้ง)

$M_{e,pred}$  = ความชื้นสมดุลของวัสดุที่ได้จากการทำนาย (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมมวลแห้ง)

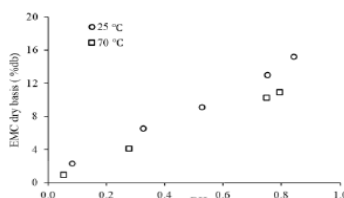
$N$  = จำนวนค่าที่สังเกต

$n$  = จำนวนค่าคงที่ในแบบจำลอง

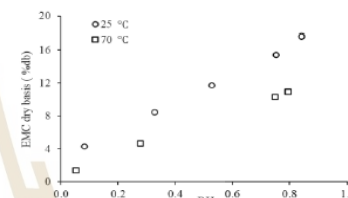
### 3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากการทดลองหาไอโซเทอมความชื้น (Moisture sorption isotherms) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ อุณหภูมิ 25 และ 70 องศาเซลเซียส ในช่วงค่าความชื้นสัมพัทธ์ 5.32 – 84.34 เปอร์เซ็นต์ ได้ความสัมพันธ์ของค่าไอโซเทอมการดูดความชื้น

(Adsorption isotherms) และไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption isotherms) ใน รูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 2 ไอโซเทอมการดูดความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 25 และ 70 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3 ไอโซเทอมการคายความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 25 และ 70 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองในรูปที่ 2 และ 3 พบว่าที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเดียวกันเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content) ของข้าวลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้โมเลกุลน้ำในข้าวเปลือกได้รับพลังงานเพิ่มมากขึ้นจนสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ทำให้น้ำบางส่วนระเหยออกไปสู่อากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมินั้นมีผลต่อไอโซเทอมความชื้นของข้าวเปลือก ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้ดังกล่าว สอดคล้องกับทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ของไอโซเทอมความชื้น (Moisture sorption

isotherms) [30] และยังพบอีกว่าเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิเดียวกัน เมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุลของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นในกรณีไอโซเทอมการดูดความชื้นเนื่องจากเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้ความดันไอของไอน้ำในอากาศสูงขึ้น ทำให้ไอน้ำในอากาศเกิดการถ่ายโอนเข้าสู่ข้าวเปลือกที่น้ำมีความดันไอน้ำน้อยกว่าเพิ่มมากขึ้น และสำหรับกรณีไอโซเทอมการคายความชื้นเมื่อความดันไอของไอน้ำในอากาศเพิ่มมากขึ้น ทำให้ไอน้ำในข้าวเปลือกที่มีความดันไอน้ำต่ำกว่าถ่ายโอนออกสู่อากาศรอบนอกได้ลดลง

จากกราฟไอโซเทอมความชื้นที่แสดงในรูปที่ 2 และ 3 จะเห็นว่าลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ที่ได้เป็นรูปตัวเอส (S-Sigmoid) ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของไอโซเทอมความชื้นสำหรับวัสดุทางการเกษตร [31]

จากผลการทดลองที่ได้ตามรูปที่ 2 และ 3 ได้ถูกนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าไอโซเทอมความชื้น โดยใช้แบบจำลองจากตารางที่ 2 ด้วยซอฟต์แวร์ทางสถิติ ได้ค่าคงที่ของแบบจำลอง, ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และค่าการลดลงค่ากำลังสอง ในแต่ละแบบจำลองได้ดังตารางที่ 3

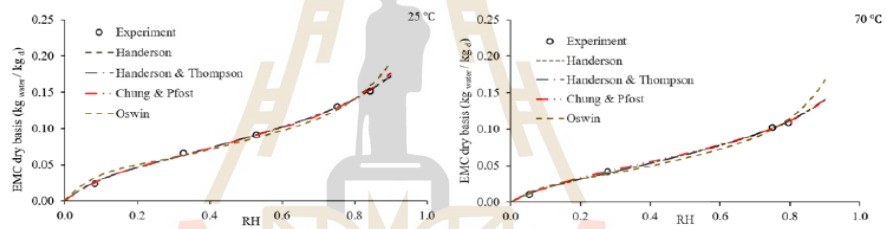
ตารางที่ 3 ค่าคงที่ และค่าทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับไอโซเทอมความชื้นในข้าวขาวดอกมะลิ 105

Model	Adsorption			Desorption		
	Constant	25 °C	70 °C	Constant	25 °C	70 °C
GAB	A	0.027	0.017	A	-0.108	0.017
	B	0.976	1.071	B	-4.359	1.067
	C	-4.073	-4.860	C	1.123	-4.527
	R <sup>2</sup>	0.950	0.978	R <sup>2</sup>	0.999	0.974
	χ <sup>2</sup>	0.00131808	0.00027773	χ <sup>2</sup>	0.00005253	0.00033150
Oswin	A	0.083	0.060	A	0.106	0.064
	B	0.379	0.467	B	0.316	0.415
	R <sup>2</sup>	0.997	0.998	R <sup>2</sup>	0.998	0.998
	χ <sup>2</sup>	0.00005227	0.00003019	χ <sup>2</sup>	0.00004041	0.00002850
	Henderson	A	2.011	0.692	A	3.097
B		1.754	1.553	B	2.149	1.766
R <sup>2</sup>		1.000	1.000	R <sup>2</sup>	1.000	1.000
χ <sup>2</sup>		0.00000724	0.00000623	χ <sup>2</sup>	0.00000267	0.00000546
Henderson & Thompson		A	1.925	0.682	A	2.962
	B	1.110	0.996	B	1.141	1.000
	C	1.754	1.553	C	2.149	1.766
	R <sup>2</sup>	0.997	1.000	R <sup>2</sup>	1.000	1.000
	χ <sup>2</sup>	0.00001448	0.00000623	χ <sup>2</sup>	0.00000534	0.00000546
Chung & Pfof	A	20.988	25.323	A	20.029	26.559
	B	3.610	-32.943	B	-22.431	-35.495
	C	121.627	138.406	C	15.719	149.478
	R <sup>2</sup>	1.000	1.000	R <sup>2</sup>	1.000	1.000
	χ <sup>2</sup>	0.00001017	0.00000174	χ <sup>2</sup>	0.00002739	0.00000205
Halsey	A	0.112	0.676	A	0.081	0.466
	B	1.980	1.458	B	2.343	1.628
	R <sup>2</sup>	0.991	0.992	R <sup>2</sup>	0.994	0.993
	χ <sup>2</sup>	0.00025309	0.00009211	χ <sup>2</sup>	0.00024532	0.00009261

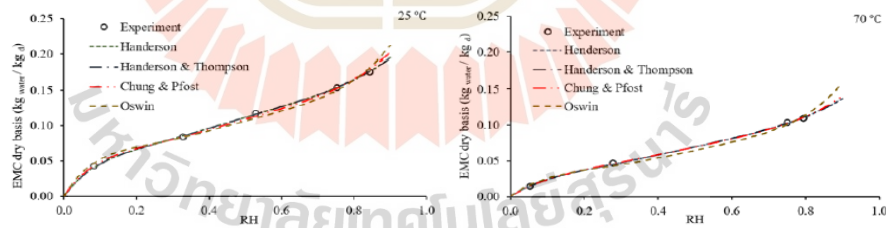
จากการแก้สมการหาค่าคงที่และค่าทางสถิติ สำหรับเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายค่าไอโซเทอมความชื้นทั้ง 6 แบบคือ GAB, Oswin, Henderson, Henderson & Thompson, Chung & Pfof และ Halsey พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายค่าไอโซเทอมความชื้นได้ใกล้เคียงกับค่าจากการทดลองจริง ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และ ค่าการลดลงโคกำลังสอง ในแต่ละแบบจำลอง โดยพบว่า กรณีสอดคล้อง (Adsorption isotherms) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แบบจำลองของ Henderson มีความเหมาะสมที่สุดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 1.000 และ มีค่าการลดลงโคกำลังสองเท่ากับ 0.00000724 และ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่าแบบจำลองของ Chung & Pfof มีความเหมาะสมที่สุดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

เท่ากับ 1.000 และ มีค่าการลดลงโคกำลังสองเท่ากับ 0.00000174 และที่กรณีไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption isotherms) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่าแบบจำลองของ Henderson มีความเหมาะสมที่สุดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 1.000 และ มีค่าการลดลงโคกำลังสองเท่ากับ 0.00000267 และ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่าแบบจำลองของ Chung & Pfof มีความเหมาะสมที่สุดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 1.000 และ มีค่าการลดลงโคกำลังสองเท่ากับ 0.00000205

จากตารางที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุดทั้ง 4 แบบ ของแต่ละอุณหภูมิได้ถูกนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ เพื่อเทียบกับผลการทดลองจริง ทั้งกรณีไอโซเทอมการดูดความชื้น (Adsorption isotherms) และ ไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption isotherms) ได้ดัง รูปที่ 4 - 5



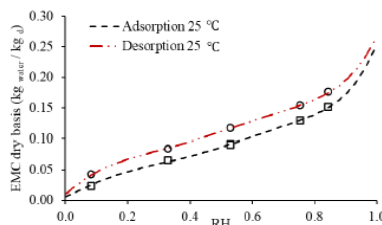
รูปที่ 4 แบบจำลองที่ดีที่สุดของไอโซเทอมการดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 25 และ 70 องศาเซลเซียส



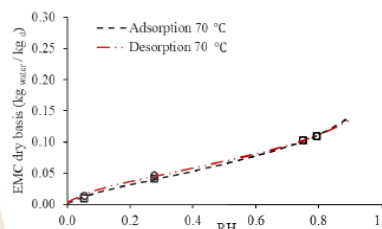
รูปที่ 5 แบบจำลองที่ดีที่สุดของไอโซเทอมการคายความชื้นที่อุณหภูมิ 25 และ 70 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4 - 5 พบว่าเกิดฮิสเทอรีซิส (Sorption hysteresis) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ความแตกต่างของค่าความชื้นสมดุลระหว่างพฤติกรรมไอโซเทอมการคายความชื้นและไอโซเทอมการดูดความชื้นของวัสดุชนิดเดียวกันที่สภาวะอุณหภูมิเดียวกัน ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้เกิดจากผลของแรงแคปิลลารีระหว่างน้ำกับวัสดุที่มีรูพรุน โดยที่ไอโซเทอมการคายความชื้นมีค่าความชื้นสมดุลที่สูงกว่าไอโซเทอมการดูดความชื้นที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเดียวกัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่สภาวะเริ่มต้นของไอโซเทอมการคายความชื้น รูพรุนในวัสดุจะเต็มไปด้วยน้ำที่ถูกดึงดูดด้วยแรงแคปิลลารีระหว่างน้ำกับวัสดุ ซึ่งการที่น้ำในรูพรุนจะระเหยออกไปได้ก็ต่อเมื่อความดันไอของน้ำในรูพรุนสูงกว่าความดันไอของอากาศรอบ ๆ วัสดุ ซึ่งแตกต่างจากกรณีไอโซเทอมการดูดความชื้นที่ในสภาวะเริ่มต้นรูพรุนในวัสดุนั้นว่างเปล่า ไอโซเทอมการคายความชื้นนั้นน้ำในรูพรุนของวัสดุจะระเหยออกมาได้ยากกว่ามาก เนื่องจากมีแรงแคปิลลารีดึงดูดเอาไว้จึงทำให้ในสภาวะสมดุลค่าความชื้นสมดุลของวัสดุในไอโซเทอมการคายความชื้นจึงสูงกว่าไอโซเทอมการดูดความชื้น [9]

จากการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson ที่ได้จากตารางที่ 3 มาใช้ในการหาค่าไอโซเทอมความชื้นทั้งกรณีไอโซเทอมการดูดความชื้นและไอโซเทอมการคายความชื้นในแต่ละอุณหภูมิ เพื่อทำการศึกษาปรากฏการณ์ฮิสเทอรีซิส ของแต่ละอุณหภูมิพร้อมกับแสดงผลการทดลองจริงประกอบ ทั้งกรณีไอโซเทอมการดูดความชื้นและไอโซเทอมการคายความชื้นได้ผลดังรูปที่ 6 และ 7



รูปที่ 6 การเกิดฮิสเทอรีซิสที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 7 การเกิดฮิสเทอรีซิสที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 6 และ 7 พบว่า เมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดฮิสเทอรีซิสลดลง สังเกตได้จากช่องว่างระหว่างไอโซเทอมการคายความชื้นและไอโซเทอมการดูดความชื้นของวัสดุที่ลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำภายในรูพรุนของวัสดุที่ถูกดึงดูดไว้ด้วยแรงแคปิลลารีได้รับพลังงานเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความดันไอของน้ำในรูพรุนเพิ่มขึ้นจนมากกว่าความดันไอของอากาศรอบ ๆ ทำให้น้ำในรูพรุนระเหยออกมาจากวัสดุเพิ่มมากขึ้นจนทำให้ค่าความชื้นสมดุลของวัสดุลดลง จากผลการทดลองที่ได้บันทึกสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ [11], [32]-[35] ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวนี้ จะเห็นว่าอุณหภูมินั้นมีผลต่อปรากฏการณ์ฮิสเทอรีซิสอย่างชัดเจน





#### 4. สรุป

จากการหาไอโซเทอมความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 25 และ 70 องศาเซลเซียส ในช่วงค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเท่ากับ 5.32 – 84.34 เปอร์เซ็นต์ พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อค่าไอโซเทอมความชื้น โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุลลดลงที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเดียวกัน และ จากการแก้สมการหาค่าคงที่และ หาค่าทางสถิติ 2 ค่า คือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจและค่าการลดลงไคกำลังสอง สำหรับเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายค่าไอโซเทอมความชื้น พบว่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสแบบจำลองของ Henderson มีความเหมาะสมที่สุด และ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส แบบจำลองของ Chung & Pfof มีความเหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเกิดฮิสเทอรีซิส โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดฮิสเทอรีซิสลดลง

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

สำหรับงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้สนับสนุนในด้านเงินทุน อุปกรณ์การทดลอง รวมไปถึงสถานที่สำหรับการทำวิจัย

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Thai Rice Exporters Association. "Rice Export Quantity and Value : 2020." [http://www.thairiceexporters.or.th/statistic\\_2020.html](http://www.thairiceexporters.or.th/statistic_2020.html) (accessed 20 May 2021).
- [2] D. W. Hall, *Handling and storage of food grains in tropical and subtropical areas* (no. 90). Food & Agriculture Org., 1970.
- [3] Department of International Trade Promotion. "12th The Rice Trader World Rice Conference." [https://www.ditp.go.th/korea/ewt\\_news.php?nid=762&filename=foreignbuyer](https://www.ditp.go.th/korea/ewt_news.php?nid=762&filename=foreignbuyer) (accessed 20 May 2021).
- [4] C. Nimmol and S. Devahastin, "Evaluation of performance and energy consumption of an impinging stream dryer for paddy," *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, no. 14-15, pp. 2204-2212, 2010.
- [5] U. Shivhare, S. Arora, J. Ahmed, and G. Raghavan, "Moisture adsorption isotherms for mushroom," *LWT-Food Science and Technology*, vol. 37, no. 1, pp. 133-137, 2004.
- [6] A. Al-Muhtaseb, W. McMinn, and T. Magee, "Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review," *Food and bioproducts processing*, vol. 80, no. 2, pp. 118-128, 2002.
- [7] O. Oyelade, T. Tunde-Akintunde, J. Igbeke, M. Oke, and O. Raji, "Modelling moisture sorption isotherms for maize flour," *Journal of Stored Products Research*, vol. 44, no. 2, pp. 179-185, 2008.
- [8] N. Ouafi, H. Moghrani, N. Benaouada, N. Yassaa, R. Maachi, and R. Younsi, "Moisture sorption isotherms and heat of sorption of Algerian bay leaves (*Laurus nobilis*)," *Maderas. Ciencia y tecnología*, vol. 17, no. 4, pp. 759-772, 2015.
- [9] S. P. C. Andrade and O. Hensel, "Experimental determination and mathematical fitting of sorption isotherms for Lemon Balm (*Melissa officinalis* L.),"

- Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 139-145, 2013.
- [10] A. M. Pagano and R. H. Mascheroni, "Sorption isotherms for amaranth grains," *Journal of Food Engineering*, vol. 67, no. 4, pp. 441-450, 2005.
- [11] A. L. D. Goneli, P. C. Corrêa, G. H. H. De Oliveira, C. F. Gomes, and F. M. Botelho, "Water sorption isotherms and thermodynamic properties of pearl millet grain," *International journal of food science & technology*, vol. 45, no. 4, pp. 828-838, 2010.
- [12] A. Iguaz and P. Virseda, "Moisture desorption isotherms of rough rice at high temperatures," *Journal of Food Engineering*, vol. 79, no. 3, pp. 794-802, 2007.
- [13] J. Fan, T. Siebenmorgen, and B. Marks, "Effects of variety and harvest moisture content on equilibrium moisture contents of rice," *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 16, no. 3, p. 245, 2000.
- [14] H. Toğrul and N. Arslan, "Moisture sorption behaviour and thermodynamic characteristics of rice stored in a chamber under controlled humidity," *Biosystems Engineering*, vol. 95, no. 2, pp. 181-195, 2006.
- [15] U. Siripatrawan and P. Jantawat, "Determination of moisture sorption isotherms of jasmine rice crackers using BET and GAB models," *Food Science and Technology International*, vol. 12, no. 6, pp. 459-465, 2006.
- [16] T. Suwonsichon, P. Pongpangan, P. Chompreeda, and V. Haruthaithanasan, "Application of mathematical models to predict moisture sorption isotherm of rice flours," in *Proceedings of the 39th Kasetsart University Annual Conference: Fisheries, Agro-Industry*, Bangkok (Thailand), 2001, Bangkok (Thailand): Ministry of University Affairs.
- [17] L. Greenspan, "Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions," *Journal of research of the national bureau of standards*, vol. 81, no. 1, pp. 89-96, 1977.
- [18] T. Abe and T. Afzal, "Thin-layer infrared radiation drying of rough rice," *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 67, no. 4, pp. 289-297, 1997.
- [19] N. Saelim, "Continuous flow paddy drying with infrared radial radiation technique," Degree of Master of Engineering in Mechanical and Process System Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 2017.
- [20] O. AOAC, "Official Methods of Analysis," *Association of Official Analytical Chemists*, Arlington, VA, 1990.
- [21] G. Bingol, B. Prakash, and Z. Pan, "Dynamic vapor sorption isotherms of medium grain rice varieties," *LWT-Food Science and Technology*, vol. 48, no. 2, pp. 156-163, 2012.

- [22] A. K. Bejar, N. B. Mihoubi, and N. Kechaou, "Moisture sorption isotherms—Experimental and mathematical investigations of orange (*Citrus sinensis*) peel and leaves," *Food Chemistry*, vol. 132, no. 4, pp. 1728-1735, 2012.
- [23] S. Lahsasni, M. Kouhila, and M. Mahrouz, "Adsorption–desorption isotherms and heat of sorption of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*)," *Energy Conversion and Management*, vol. 45, no. 2, pp. 249-261, 2004.
- [24] F. Román and O. Hensel, "Sorption isotherms of celery leaves (*Apium graveolens* var. *secalinum*)," *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol. 12, no. 3-4, pp. 137-141, 2010.
- [25] M. Barrozo, A. Silva, and D. Oliveira, "The use of curvature and bias measures to discriminate among equilibrium moisture equations for mustard seed," *Journal of Stored Products Research*, vol. 44, no. 1, pp. 65-70, 2008.
- [26] D. Cordeiro, G. Raghavan, and W. Oliveira, "Equilibrium moisture content models for *Maytenus ilicifolia* leaves," *Biosystems Engineering*, vol. 94, no. 2, pp. 221-228, 2006.
- [27] A. M. Goula, T. D. Karapantsios, D. S. Achilias, and K. G. Adamopoulos, "Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp," *Journal of Food Engineering*, vol. 85, no. 1, pp. 73-83, 2008.
- [28] D. Jain and P. B. Pathare, "Selection and evaluation of thin layer drying models for infrared radiative and convective drying of onion slices," *Biosystems Engineering*, vol. 89, no. 3, pp. 289-296, 2004.
- [29] G. Sharma, R. Verma, and P. Pathare, "Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices," *Journal of food engineering*, vol. 71, no. 3, pp. 282-286, 2005.
- [30] M. Hossain, B. Bala, M. Hossain, and M. Mondol, "Sorption isotherms and heat of sorption of pineapple," *Journal of Food Engineering*, vol. 48, no. 2, pp. 103-107, 2001.
- [31] S. Brunauer, L. S. Deming, W. E. Deming, and E. Teller, "On a theory of the van der Waals adsorption of gases," *Journal of the American Chemical society*, vol. 62, no. 7, pp. 1723-1732, 1940.
- [32] N. Aviara, O. Ajibola, O. Aregbesola, and M. Adedeji, "Moisture sorption isotherms of sorghum malt at 40 and 50 C," *Journal of stored products research*, vol. 42, no. 3, pp. 290-301, 2006.
- [33] R. C. Campos, P. C. Corrêa, L. S. Fernandes, F. M. Baptestini, C. F. Costa, and J. D. Bustos-Vanegas, "Bean grain hysteresis with induced mechanical damage," *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 20, no. 10, pp. 930-935, 2016.
- [34] A. L. Goneli, P. C. Corrêa, G. H. de Oliveira, O. Resende, and M. Mauad, "Moisture

sorption isotherms of castor beans. Part 1: Mathematical modeling and hysteresis," *Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental*, vol. 20, no. 8, pp. 751-756, 2016.

- [35] S. J. F. d. Souza, A. I. Alves, É. N. R. Vieira, J. A. G. Vieira, A. M. Ramos, and J. Telis-Romero, "Study of thermodynamic water properties and moisture sorption hysteresis of mango skin," *Food Science and Technology*, vol. 35, no. 1, pp. 157-166, 2015.



## ประวัติผู้เขียน

นายทินกร เพ็ญประโคน เกิดเมื่อวันที่ 16 สิงหาคม พ.ศ. 2540 สำเร็จการศึกษา  
ชั้นประถมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 จากโรงเรียนอนุบาลประโคนชัย และชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6  
จากโรงเรียนประโคนชัยพิทยาคม อำเภอประโคนชัย จังหวัดบุรีรัมย์ ต่อมาได้รับทุนการศึกษา  
เฉลิมพระเกียรติ 84 พรรษา เพื่อเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรีและสำเร็จการศึกษาระดับ  
ปริญญาตรี เกียรตินิยมอันดับที่ 1 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2563 และได้รับทุนกิตติบัณฑิตเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท  
หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในปีเดียวกัน  
โดยระหว่างการศึกษาได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ในรายวิชา  
Engineering Graphic II

