



การพัฒนาเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบตสำหรับกระบวนการอบแห้ง

วิทยานิพนธ์
ของ
อาทิตย์ เพ็ชรงาม

พจน ปณฺทิตฺตํ สีโว

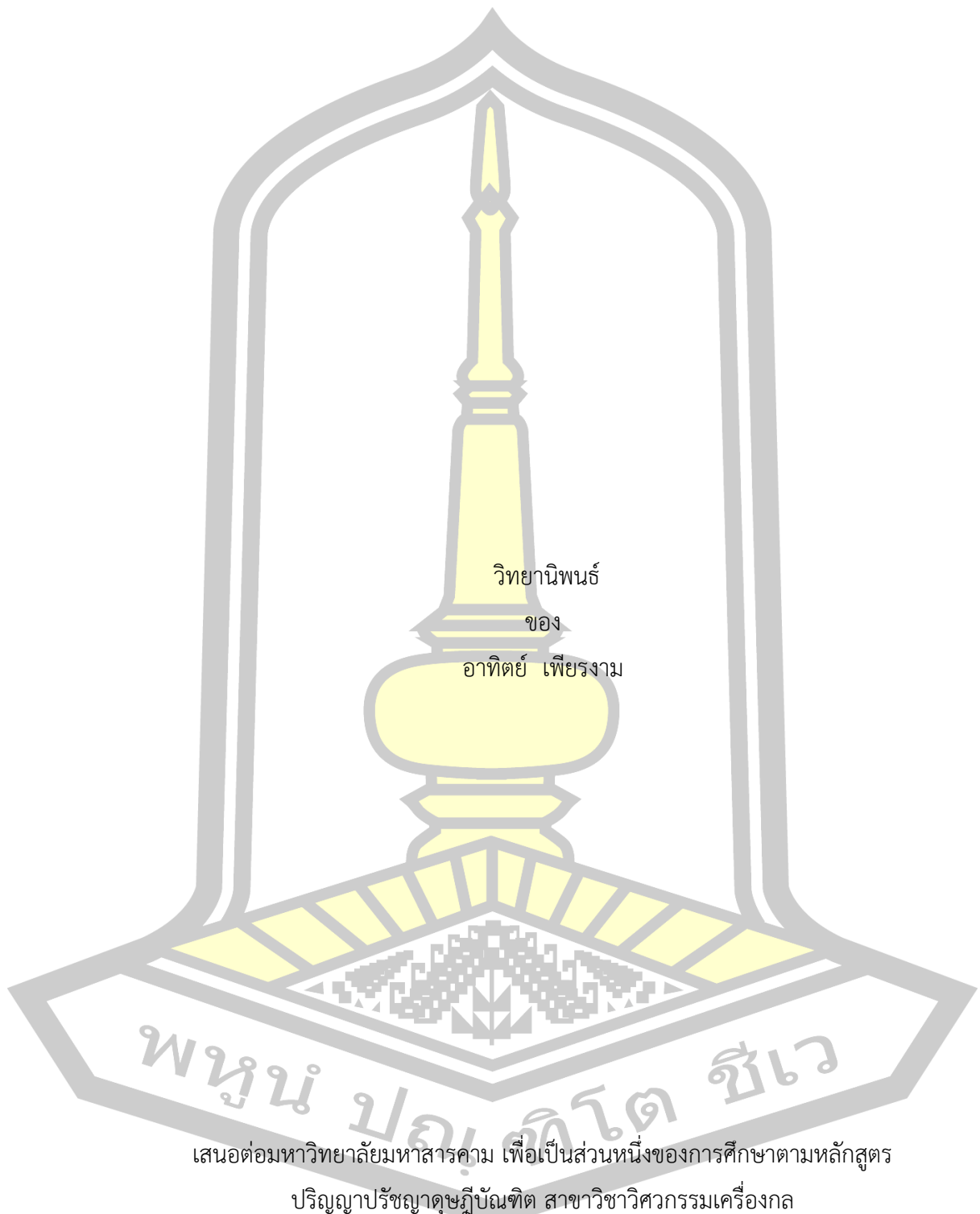
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

สิงหาคม 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การพัฒนาเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบตสำหรับกระบวนการอบแห้ง



วิทยานิพนธ์

ของ

อาทิตย์ เพ็ชรงาม

พูนัน ปองกิตโตต สีเว

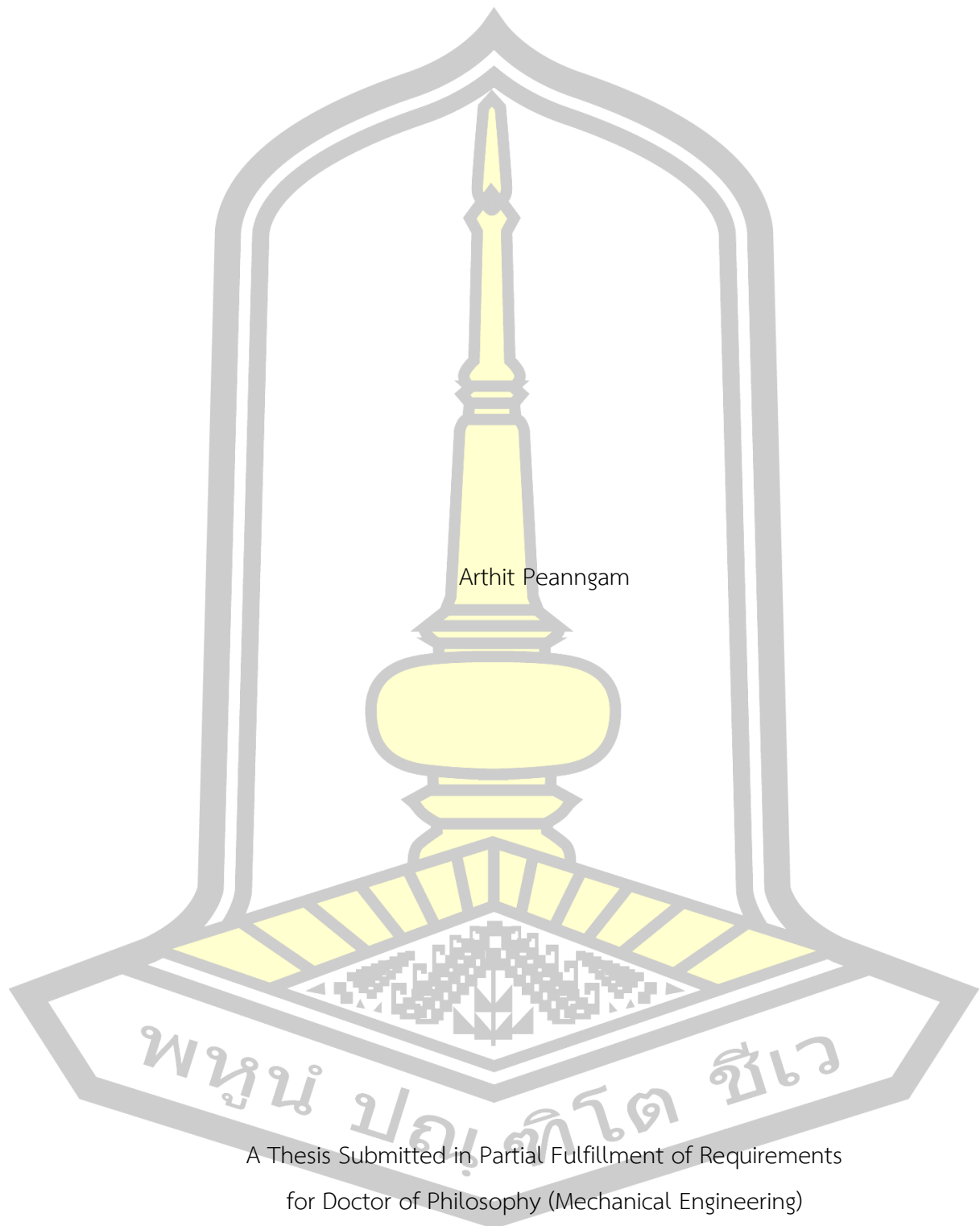
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

สิงหาคม 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Development of Spouted Bed Air Dehumidifier for Drying Process



Arthit Peanggam

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering)

August 2019

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายอาทิตย์ เพ็ชรงาม
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. นเรศ มีใส)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รศ. ดร. ศิริธร ศิริอมรพรรณ)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ณัฐพล ภูมิสะอาด)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ละมุล วิเศษ)

กรรมการ

(รศ. ดร. วรวัฒน์ เสี่ยงมวิบูล)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(รศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง การพัฒนาเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบตสำหรับกระบวนการ
อบแห้ง

ผู้วิจัย อาทิตย์ เพียรงาม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นเรศ มีโส
รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริธร ศิริอมรพรรณ

ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต **สาขาวิชา** วิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม **ปีที่พิมพ์** 2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบตสำหรับกระบวนการอบแห้ง ซึ่งเครื่องลดความชื้นในอากาศดังกล่าวจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนดูดซับความชื้นแบบดาวนคัมเมอร์ ที่ศึกษาประกอบไปด้วย ความหนาของส่วนดูดซับความชื้น 3 6 และ 9 cm อัตราการไหลเชิงมวลของสารดูดซับความชื้น 0.1 0.2 และ 0.3 kg/s อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 2.0 3.0 และ 4.0 m³/min และส่วนฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้นแบบสเปาส์ ที่ศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิอากาศ 60 70 และ 80 °C และความเร็วของอากาศ 20 22 และ 24 m/s ความสูงของ draft plate 70 80 และ 90 cm จากผลการทดลองพบว่าเครื่องลดความชื้นในอากาศแบบสเปาเต็ดเบต สามารถลดความชื้นในอากาศจากช่วง 80-85% RH ลงเหลือ 15-20 %RH เงื่อนไขที่เหมาะสมของเครื่องลดความชื้นในอากาศแบบสเปาเต็ดเบต คือความหนาส่วนดูดซับความชื้น 6 cm อัตราการไหลเชิงมวลของสารดูดซับความชื้น 0.2 kg/s อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 3.0 m³/min อุณหภูมิของอากาศฟื้นฟู 60 °C ความสูงของ draft plate 80 cm และความเร็วอากาศของส่วนฟื้นฟู 22 m/s ซึ่งภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว นำไปอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ที่กำเนิดจากเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบต เปรียบเทียบกับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอากาศร้อนทั่วไปที่มีอุณหภูมิต่ำ 40±2 °C สรุปได้ว่าสามารถลดระยะเวลาการอบแห้งได้ถึง 100 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับอากาศร้อนทั่วไป เพิ่มกำลังการผลิตการอบแห้งข้าวเปลือกไปได้ถึง 35.7% และมีคุณภาพที่ดีกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนทั่วไปที่ระดับอุณหภูมิสูง

คำสำคัญ : การลดความชื้นในอากาศ, เทคนิคสเปาเต็ดเบต, ส่วนดูดซับความชื้นแบบดาวนคัมเมอร์, ส่วนฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้นแบบสเปาส์

TITLE Development of Spouted Bed Air Dehumidifier for Drying Process

AUTHOR Arthit Peanggam

ADVISORS Assistant Professor Nares Meeso , Ph.D.
Associate Professor Sirithon Siriamornpun , Ph.D.

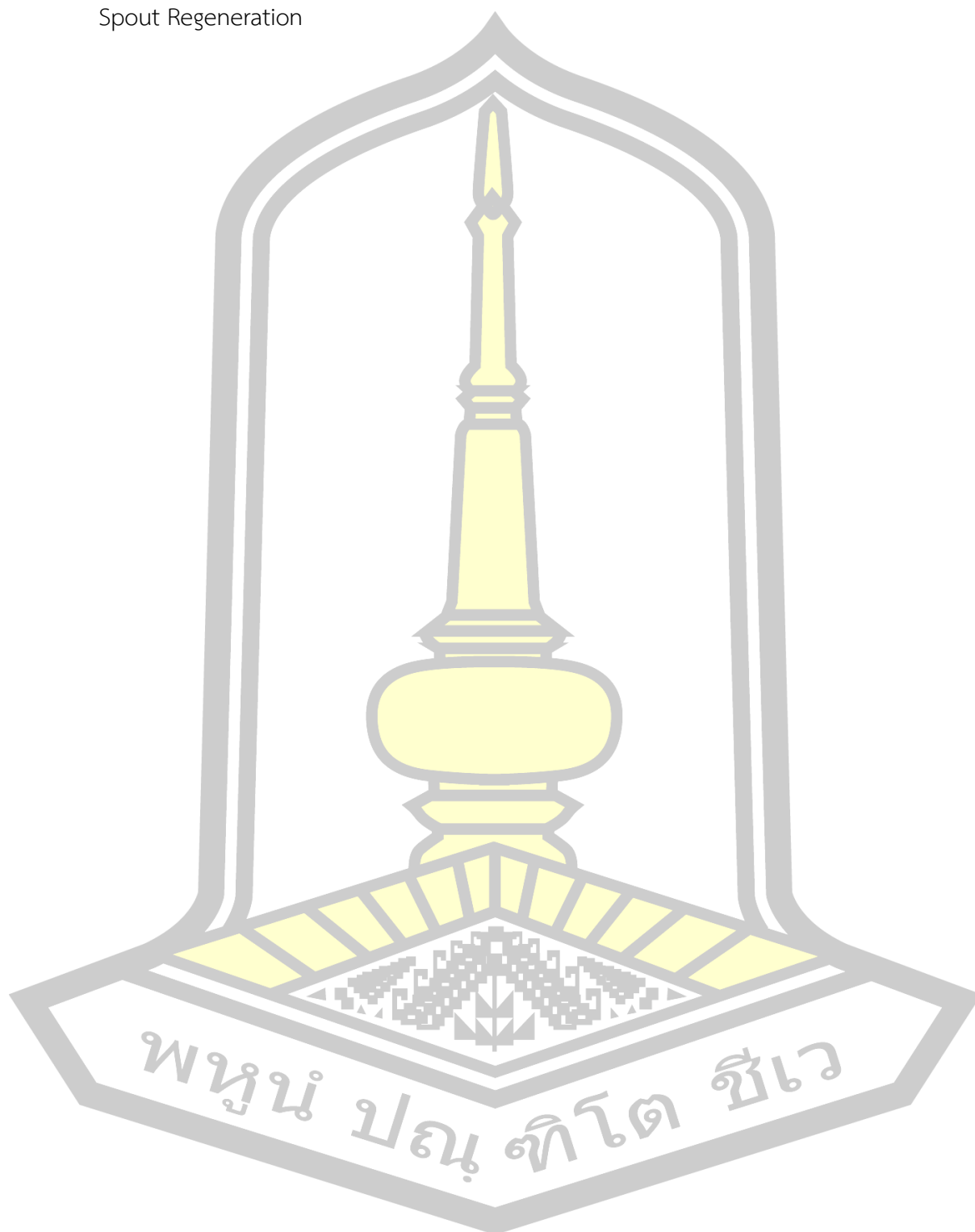
DEGREE Doctor of Philosophy **MAJOR** Mechanical Engineering

UNIVERSITY Mahasarakham **YEAR** 2019
University

ABSTRACT

The objective of this study was to develop a spouted air dehumidifier for drying process of Hom Mali rice. The spouted air dehumidification was divided into two parts; namely, downcomer absorption studied included; absorption thicknesses of 3, 6 and 9 cm, mass flow rate moisture absorbents of 0.1, 0.2 and 0.3 k/s and air flow rate of 2.0, 3.0 and 4.0 m³/min and spout regeneration studied included; air temperature of 60, 70 and 80 °C, air velocities of 20, 22 and 24 m/s and height of the draft plate of 70, 80 and 90 cm. The experimental result found that the spouted-bed air dehumidifier could reduce the air humidities ranged 80-85% RH to 15-20%RH. The optimum condition in the spouted-bed air dehumidifier was that absorption thickness of 6 cm, mass flow rate moisture absorbents 0.2 k/s and air flow rate of 3.0 m³/min. Regeneration air temperature of 60 °C, height of the draft plate 70, 80 and 90 cm and regeneration air velocity of 22 m/s. Under such conditions baked and dried by using air with low temperature and low relative humidity originated from a spouted air dehumidifier. Compared with conventional hot air paddy drying with low temperature 40 ± 2 °C, it can be concluded that the drying time can be reduced to 100 minutes when compared to general hot air. Increase the production capacity of paddy drying up to 35.7% and better quality than conventional hot air drying at high temperature levels.

Keyword : Air Dehumidification, Spouted-bed Technique, Downcomer Absorption,
Spout Regeneration



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นเรศ มีโส ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริธร ศิริอมรพรรณ

กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์ ประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ภูมิสะอาด กรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2559 ระดับปริญญาเอก โดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนการศึกษา และค่าใช้จ่ายในการวิจัยในครั้งนี้ให้ลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ห้างหุ้นส่วน จำกัด ทวีลาภพลูผล ที่ได้ความอนุเคราะห์วัสดุที่ใช้ในการวิจัย ทำให้การทำวิจัยให้ลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร (RedTec)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้คำแนะนำตลอดจนช่วยออกแบบและจัดสร้างเครื่องอบแห้งแบบถาดและเครื่องดูดซับความชื้นในการทำวิจัยให้ลุล่วงไปด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณบุพการี คุณพ่อเต็น - คุณแม่แพงดา เพ็ชรงาม และผู้มีพระคุณทุกท่าน

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์มหาวิทยาลัยมหาสารคามที่ได้ให้ความรู้และการอบรมสั่งสอนสิ่งที่ดีงามแก่ศิษย์ตลอดมาจนกระทั่งประสบความสำเร็จ คุณค่าและประโยชน์จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบบูชาพระคุณบุพการีและผู้มีพระคุณทุกท่าน

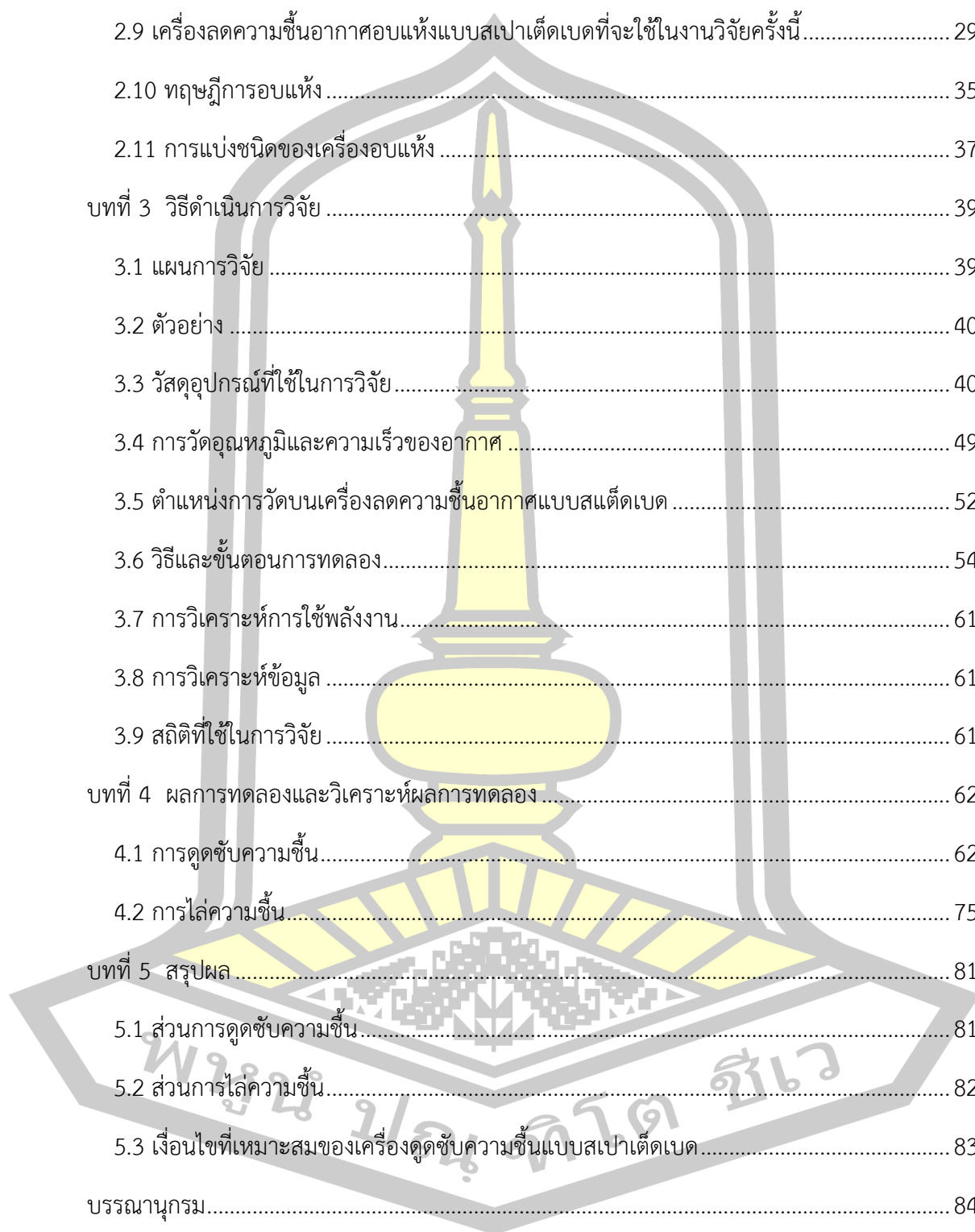
พูน ปณ ทิโต ชีเว

อาทิตย์ เพ็ชรงาม

สารบัญ

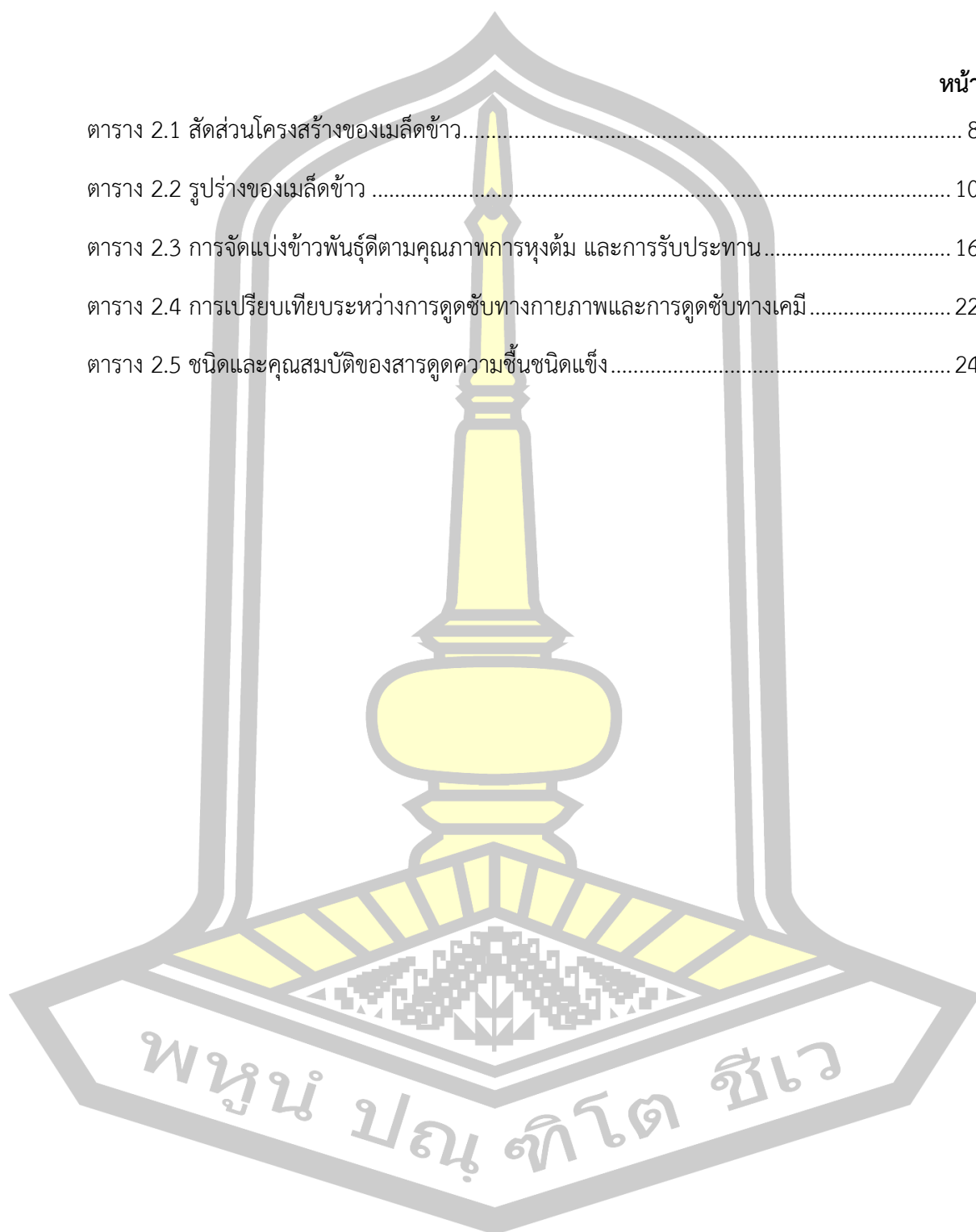
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ความสำคัญของการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.6 สถานที่ดำเนินการวิจัย.....	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ปรีทัศน์เอกสารข้อมูล.....	6
2.1 ข้าว.....	6
2.2 สัดส่วนของโครงสร้างเมล็ดข้าว.....	7
2.3 คุณภาพข้าว.....	9
2.4 คุณสมบัติของอากาศ.....	19
2.5 กระบวนการดูดซับ.....	21
2.6. คุณสมบัติสารดูดซับความชื้นอากาศชนิดแข็ง (Solid Desiccant Property).....	23
2.7 ซิลิกาเจล.....	24

2.8 เทคโนโลยีเครื่องลดความชื้นของอากาศที่ใช้อบแห้ง.....	25
2.9 เครื่องลดความชื้นอากาศอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบตที่จะใช้ในงานวิจัยครั้งนี้.....	29
2.10 ทฤษฎีการอบแห้ง.....	35
2.11 การแบ่งชนิดของเครื่องอบแห้ง.....	37
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	39
3.1 แผนการวิจัย.....	39
3.2 ตัวอย่าง.....	40
3.3 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	40
3.4 การวัดอุณหภูมิและความเร็วของอากาศ.....	49
3.5 ตำแหน่งการวัดบนเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบต.....	52
3.6 วิธีและขั้นตอนการทดลอง.....	54
3.7 การวิเคราะห์การใช้พลังงาน.....	61
3.8 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	61
3.9 สถิติที่ใช้ในการวิจัย.....	61
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	62
4.1 การดูดซับความชื้น.....	62
4.2 การไล่ความชื้น.....	75
บทที่ 5 สรุปผล.....	81
5.1 ส่วนการดูดซับความชื้น.....	81
5.2 ส่วนการไล่ความชื้น.....	82
5.3 เงื่อนไขที่เหมาะสมของเครื่องดูดซับความชื้นแบบสเปาเต็ดเบต.....	83
บรรณานุกรม.....	84
ประวัติผู้เขียน.....	86



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1 สัดส่วนโครงสร้างของเมล็ดข้าว.....	8
ตาราง 2.2 รูปร่างของเมล็ดข้าว	10
ตาราง 2.3 การจัดแบ่งข้าวพันธุ์ดีตามคุณภาพการหุงต้ม และการรับประทาน.....	16
ตาราง 2.4 การเปรียบเทียบระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี.....	22
ตาราง 2.5 ชนิดและคุณสมบัติของสารดูดความชื้นชนิดแข็ง.....	24



สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 2.1 โครงสร้างเมล็ดข้าว	7
ภาพประกอบ 2.2 การหุงข้าวในหลอดแก้วเพื่อตรวจสอบการยึดตัวของเมล็ดข้าวการขยายปริมาตร และการอุ้มน้ำของข้าวสุก	18
ภาพประกอบ 2.3 การวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียกอย่างง่าย	20
ภาพประกอบ 2.4 กระบวนการอิมิตัวแบบอะเดียบาติก	20
ภาพประกอบ 2.5 ลักษณะของสเปาเต็ดเบต	30
ภาพประกอบ 2.6 สเปาเต็ดเบตแบบสองมิติ (TDSB).....	32
ภาพประกอบ 2.7 ห้องดูดซับความชื้น (Absorption) และฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น (Regeneration) แบบสเปาเต็ดเบต	34
ภาพประกอบ 2.8 การเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างการอบแห้ง.....	35
ภาพประกอบ 2.9 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และลดลง.....	36
ภาพประกอบ 2.10 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง	36
ภาพประกอบ 3.1 เครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบตสำหรับระบบอบแห้ง.....	41
ภาพประกอบ 3.2 ซิลิกาเจลชนิดเม็ดสีน้ำเงิน	43
ภาพประกอบ 3.3 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger).....	43
ภาพประกอบ 3.4 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล	44
ภาพประกอบ 3.5 เครื่องมือวัดความเร็วลม	44
ภาพประกอบ 3.6 ชุดคอมพิวเตอร์สำหรับเก็บข้อมูล	45
ภาพประกอบ 3.7 ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven).....	45
ภาพประกอบ 3.8 อินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วของมอเตอร์ (Inverter)	46
ภาพประกอบ 3.9 เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์อากาศ.....	47
ภาพประกอบ 3.10 เครื่องควบคุมการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์อากาศ.....	48

ภาพประกอบ 3.11 เครื่องสูบน้ำ Centrifugal pump 48

ภาพประกอบ 3.12 หัวฉีดละอองน้ำแบบพลาสติก 49

ภาพประกอบ 3.13 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบด 50

ภาพประกอบ 3.14 ตำแหน่งการวัดความเร็วอากาศของเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบด
..... 51

ภาพประกอบ 3.15 ตำแหน่งการวัดค่าความชื้นสารดูดซับความชื้นของเครื่องลดความชื้นอากาศ
แบบสเปาเต็ดเบด 52

ภาพประกอบ 3.16 ตำแหน่งการวัดความสูงของแผ่นกราฟเฟลต (Draft Plate) ของเครื่องลด
ความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบด 53

ภาพประกอบ 3.17 ตำแหน่งการวัดความหนาของดาวนคัมเมอร์ (Downcomer) ของเครื่องลด
ความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบด 54

ภาพประกอบ 3.18 ขั้นตอนการอบแห้งด้วยอากาศที่ผ่านการลดความชื้นอากาศ 58

ภาพประกอบ 3.19 ขั้นตอนการอบแห้งด้วยอากาศร้อน 58

ภาพประกอบ 4.1 แสดงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับ
ความชื้นที่ส่งผลต่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้นที่ความเร็วของอากาศด้านดูด
ซับความชื้นที่ 1.7 m/s ความหนาของ downcomer กำหนดที่ 6 cm และอัตราการไหลของซิลิกา
เจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้นที่ 0.2 kg/s 63

ภาพประกอบ 4.2 แสดงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับ
ความชื้นที่ส่งผลต่อ เอนทาลปี อัตราส่วนความชื้น และ ความชื้นของซิลิกาเจล ที่ความเร็วของอากาศ
ด้านดูดซับความชื้นที่ 1.7 m/s ความหนา downcomer กำหนดที่ 6 cm และอัตราการไหลของซิลิกา
เจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้นที่ 0.2 kg/s 64

ภาพประกอบ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก่อนการดูดซับความชื้น และ อุณหภูมิหลังการดูด
ซับความชื้น ที่ความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ 1.7 m/s ความหนาของ downcomer
กำหนดที่ 6 cm และอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้นที่ 0.2 kg/s 65

ภาพประกอบ 4.4 แสดงอิทธิพลของความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ส่งผลต่อความชื้น
สัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้นและความชื้นของเม็ดซิลิกาเจลความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

ก่อนการดูดซับ ความชื้นที่ 50 % ความหนาของ downcomer ที่ 6 cm และอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้นที่ 0.2 kg/s.....	66
ภาพประกอบ 4.5 แสดงอิทธิพลของความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ส่งผลต่อเอนทาลปี และ อัตราส่วน ความชื้น ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ 50 % ความหนาของ downcomer ที่ 6 cm และอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่อง ดูดซับความชื้นที่ 0.2 kg/s67	
ภาพประกอบ 4.6 แสดงการเปลี่ยนอุณหภูมิก่อนการดูดซับความชื้น และ อุณหภูมิหลังการดูดซับการ ดูดซับความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ 50 % ความหนาของ downcomer ที่ 6 cm และอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ ช่องดูดซับความชื้นที่ 0.2 kg/s.....	68
ภาพประกอบ 4.7 แสดงอิทธิพลของความหนาของ downcomer ที่ส่งผลต่อความชื้นสัมพัทธ์ของ อากาศหลังการดูดซับความชื้นและความชื้นของเม็ดซิลิกาเจลที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการ ดูดซับความชื้นที่ 50 % ความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ 1.4 m/s และอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ ช่องดูดซับความชื้น 0.2 kg/s.....	69
ภาพประกอบ 4.8 แสดงอิทธิพลของความหนาของ downcomer ที่ส่งผลต่ออัตราส่วนความชื้น เอน ทาลปี ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ 50 % ความเร็วของอากาศด้านดูดซับ ความชื้นที่ 1.4 m/s และอัตราการไหลของ ซิลิกาเจลที่ช่องดูดซับความชื้นที่ 0.2 kg/s.....	70
ภาพประกอบ 4.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก่อนการดูดซับความชื้น และ อุณหภูมิหลังการ ดูด ซับ ความชื้น ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ 50 % ความเร็วของอากาศด้าน ดูดซับความชื้นที่ 1.4 m/s และอัตราการไหลของซิลิกาเจล ที่ช่องดูดซับความชื้นที่ 0.2 kg/s.....	71
ภาพประกอบ 4.10 แสดงอิทธิพลของอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้นที่ส่งผลต่อ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้นและความชื้นของเม็ด ซิลิกาเจล ที่ความชื้น สัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ 50 % ความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ 1.4 m/s และความหนาของ downcomer ที่ 9 cm.....	72
ภาพประกอบ 4.11 แสดงอิทธิพลของอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้นที่ส่งผลต่อ เอนทาลปี และ อัตราส่วนความชื้น ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ 50 % ความเร็วของอากาศด้านดูดซับ ความชื้นที่ 1.4 m/s และความหนาของ downcomer ที่ 9 cm ...	73
ภาพประกอบ 4.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ อุณหภูมิก่อนการดูดซับความชื้น และ อุณหภูมิ หลัง การดูดซับความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ 50 % ความเร็วของ อากาศด้านดูดซับความชื้นที่ 1.4 m/s และความหนาของ downcomer ที่ 9 cm	74

ภาพประกอบ 4.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการไล่ความชื้นและหลังการไล่ความชื้น ที่ความเร็วอากาศในการไล่ความชื้นที่ 20 m/s และความสูงของ แผ่น draft plate ที่ 80 cm.....	75
ภาพประกอบ 4.14 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อเอนทัลปี อัตราส่วนความชื้น และ ความชื้นชิลิกาเจลที่ความเร็วอากาศในการไล่ความชื้นที่ 20 m/s และความสูงของแผ่น draft plate ที่ 80 cm.....	76
ภาพประกอบ 4.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิในการไล่ความชื้นที่ 70 °C และความสูงของแผ่น draft plate ที่ 80 cm	77
ภาพประกอบ 4.16 แสดงอิทธิพลของความเร็วอากาศด้านไล่ความชื้นที่ส่งผลต่อเอนทัลปี อัตราส่วนความชื้น ความชื้นชิลิกาเจล ที่อุณหภูมิในการไล่ความชื้นที่ 70 °C และความสูงของ แผ่น draft plate ที่ 80 cm	78
ภาพประกอบ 4.17 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการไล่ความชื้นอุณหภูมิในการไล่ความชื้นที่ 70 °C และความเร็วของอากาศในการไล่ความชื้นที่ 18 m/s	79
ภาพประกอบ 4.18 แสดงอิทธิพลของความสูงของแผ่น draft plate อัตราส่วนความชื้น เอนทัลปี ความชื้นชิลิกาเจลอุณหภูมิในการไล่ความชื้นที่ 70 °C และความเร็วของอากาศ ในการไล่ความชื้นที่ 18 m/s.....	80



บทที่ 1

บทนำ

กระบวนการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรที่มีความไวต่ออากาศร้อนโดยเฉพาะข้าวหอมมะลิจะต้องใช้อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำทั่วไป (ประมาณ 60°C) ในการอบแห้งเพื่อรักษาคุณภาพของข้าวหอมมะลิในด้านความหอมไม่ให้ลดลงมากในระหว่างกระบวนการอบแห้ง เพราะถ้าการใช้อากาศร้อนที่มีอุณหภูมิสูงทั่วไป (ประมาณมากกว่า 80°C) ในการอบแห้งจะทำให้ความร้อนของอากาศไปกระตุ้นสารหอม 2-acetyl-1-pyrroline (2-AP) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้บอกปริมาณความหอมของข้าวหอมมะลิระเหยออกไปเร็วกว่าปกติ แต่อย่างไรก็ตาม กระบวนการอบแห้งข้าวหอมมะลิด้วยอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำทั่วไปจะใช้ระยะเวลาการอบแห้งค่อนข้างนาน ประมาณ 6-9 ชั่วโมง สาเหตุเนื่องจากกระบวนการอบแห้งดังกล่าวใช้อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำทั่วไปในการอบแห้งข้าวเปลือกหอมมะลิซึ่งอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำทั่วไปจะมีความชื้นสัมพัทธ์สูงจึงทำให้ข้าวเปลือกหอมมะลิมีความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) สูง ส่งผลทำให้การลดความชื้นของข้าวเปลือกหอมมะลิให้ลงถึงระดับความชื้นที่ปลอดภัยสำหรับการเก็บรักษา (ประมาณ 14-15%มาตรฐานเปียก (wet basis, w.b.) ใช้เวลานานมาก และทำให้กระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกหอมมะลิกำลังการผลิตต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในฤดูฝน ซึ่งอากาศในฤดูฝนจะมีความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่าอากาศในฤดูกาลอื่นจึงส่งผลทำให้ใช้เวลาในการลดความชื้นของข้าวเปลือกหอมมะลินานกว่าฤดูกาลอื่น

ความชื้นสมดุลของข้าวเปลือกหอมมะลินี้จะมีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้งด้วยอากาศร้อนทั่วไปมาก เพราะเมื่อทำการอบแห้งข้าวเปลือกหอมมะลิด้วยอากาศร้อนทั่วไปที่สภาวะคงที่ (เช่น อุณหภูมิและความชื้นคงที่) ความชื้นของข้าวเปลือกหอมมะลิจะลดต่ำลงจนถึงระดับๆ หนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะนั้นความชื้นในข้าวเปลือกหอมมะลิจะมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศร้อนทั่วไปที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของข้าวเปลือกหอมมะลิก็น่าจะเท่ากับอุณหภูมิของอากาศร้อนทั่วไปรอบๆ ด้วย จะเรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล ซึ่งค่าความชื้นสมดุลนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นของอากาศ

จากปัญหาดังที่กล่าวมาเบื้องต้นนี้ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่แก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นโดยการพัฒนาเครื่องลดความชื้นของอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำทั่วไปให้มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสำหรับกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกหอมมะลิเพื่อเพิ่มกำลังการผลิตและรักษาคุณภาพของข้าวหอมมะลิ เนื่องจากการอบแห้งข้าวเปลือกหอมมะลิด้วยอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำนี้ จะทำให้ความชื้นสมดุลของข้าวเปลือกหอมมะลิอยู่ในระดับต่ำกว่าการอบแห้งข้าวเปลือกหอมมะลิด้วยอากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิต่ำทั่วไป ซึ่งจะส่งผลทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกหอมมะลิที่อบแห้งด้วยอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำและ

ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำลดลงจนถึงระดับความชื้นที่ปลอดภัยสำหรับการเก็บรักษาได้เร็วกว่าข้าวเปลือกหอมมะลิที่อบแห้งด้วยอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำทั่วไป นอกจากนี้ผลพลอยได้ของการอบแห้งข้าวเปลือกหอมมะลิด้วยอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำนี้ดังกล่าวนี้ น่าจะรักษาความหอมของข้าวหอมมะลิไม่ให้ลดลงมากในระหว่างกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากใช้อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำในการอบแห้ง

สำหรับเครื่องลดความชื้นอากาศสำหรับกระบวนการอบแห้งมีการพัฒนาหลายรูปแบบซึ่งรูปแบบหนึ่งที่น่าสนใจคือ วงล้อสารดูดความชื้น (Desiccant wheel) แต่วงล้อดังกล่าวมีข้อจำกัดคือ ไม่เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกหอมมะลิที่มีห้องอบแห้งขนาดใหญ่ เช่น เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดข้าวไหลขวาง และ เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดข้าวคูลูกเคล้าหรือเครื่องอบแห้งที่ใช้อัตราการไหลของอากาศอบแห้งสูงๆ เช่น เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดเนื่องจากวงล้อสารดูดความชื้นในการกำเนิดอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ มีอัตราการไหลต่ำ ประสิทธิภาพก็จะต่ำลงด้วย รวมทั้งวงล้อสารดูดความชื้นยังมีราคาแพงมาก ทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่แก้ไขข้อจำกัดของวงล้อสารดูดความชื้นโดยการนำเอาเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบสเปาเต็ดเบดชนิดมีตัววนคัมเมอร์ด้านเดียว ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย นเรศ มีโส และ ศิริธร ศิริอมรพรรณ (2552) ที่หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการอบแห้งสำหรับผลิตผลทางการเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม มาพัฒนาเป็นเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบดสำหรับกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกหอมมะลิ เนื่องจากเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบดมีช่องของส่วนดูดซับความชื้นอากาศ และช่องของส่วนฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นอยู่กับที่ ซึ่งไม่มีการเคลื่อนที่เหมือนกับวงล้อสารดูดความชื้นจึงทำให้อากาศแวดล้อมที่ไหลเข้าสู่ส่วนดูดซับความชื้นและอากาศร้อนที่ไหลเข้าสู่ส่วนการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้นไม่เกิดการรบกวนเข้าหากัน และจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นอากาศสูง นอกจากนี้เครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบดยังมีอัตราการดูดซับความชื้นอากาศสูงและอัตราการการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นสูงจึงน่าจะประยุกต์ใช้กับกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกหอมมะลิที่มีห้องอบแห้งทุกขนาดตั้งแต่ขนาดเล็กถึงขนาดใหญ่ หรือเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกหอมมะลิที่ใช้อัตราการไหลของอากาศทุกระดับตั้งแต่ระดับต่ำถึงสูงได้รวมทั้งเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบดดังกล่าวยังมีส่วนประกอบต่างๆ และมีราคาถูกกว่าวงล้อสารดูดความชื้นมาก

1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาตัวแปรของเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบดที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติอากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิต่ำ

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการอบแห้งโดยใช้อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำจากเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบตต่อกำล้างการผลิตของกระบวนการอบแห้งข้าวหอมมะลิ

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของการอบแห้งโดยใช้อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำจากเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบตต่อต่อคุณภาพทางกายภาพ คุณภาพทางเคมี คุณภาพการหุงต้ม และคุณภาพการสีของข้าวหอมมะลิ

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

เครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบตจะสามารถเพิ่มกำลังการผลิตและรักษาคุณภาพของข้าวหอมมะลิได้

1.4 ความสำคัญของการวิจัย

ได้แนวทางในการพัฒนาเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบตสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกหอมมะลิให้สามารถเพิ่มกำลังการผลิตและรักษาคุณภาพของข้าวหอมมะลิ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 ตัวแปรของเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ด

ตัวแปรควบคุม

1) สารดูดซับความชื้นชนิดแข็งที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ซิลิกาเจลชนิดเม็ดสีน้ำเงิน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 - 5 มิลลิเมตร (2 - 5 mm blue silica gel)

2) ความชื้นเริ่มต้นของสารดูดซับความชื้น 2-4 % (d.b.)

ตัวแปรต้น

1) ส่วนดูดซับความชื้น (Absorption) ในช่องดาวน์คัมเมอร์ (Downcomer)

1.1) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมก่อนผ่านส่วนดูดซับความชื้น ระหว่าง 20- 80 %

1.2) ความเร็วอากาศที่ผ่านส่วนดูดซับความชื้น 0.5 - 2.0 m/s

1.3) อัตราการไหลของสารดูดซับความชื้นที่ผ่านส่วนดูดซับความชื้น 0.2- 0.6

kg/s

1.4) ความหนาของสารดูดซับความชื้นในส่วนดูดซับความชื้น 3-9 cm

2) ส่วนฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น (Regeneration) ในช่องสเปาต์ (spout)

2.1) ความเร็วของอากาศในส่วนฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น 18-22 m/s

2.2) ความสูงของ draft plate ในการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น 60-90 cm

2.3) อุณหภูมิอากาศที่ใช้ฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น 40-100 °C

ตัวแปรตาม

1) ส่วนดูดซับความชื้น (Absorption)

1.1) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังผ่านส่วนดูดซับความชื้น (%)

1.2) อัตราส่วนความชื้นของอากาศหลังผ่านส่วนดูดซับความชื้น (g/kg_{dry air})

1.3) เอนทาลปีของอากาศหลังผ่านส่วนดูดซับความชื้น (kJ/kg_{dry air})

2) ส่วนฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น (Regeneration)

2.1) ปริมาณความชื้นของสารดูดซับความชื้นหลังผ่านการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับ

ความชื้น (%db)

2.2) อัตราส่วนความชื้นของอากาศหลังผ่านการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น

(g/kg_{dry air})

2.3) ระยะเวลาในการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น

1.5.2 ตัวแปรของกระบวนการอบแห้งโดยใช้อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำจากเครื่องลดความชื้น

อากาศแบบสเปาต์เด็ดเบด

ตัวแปรควบคุม

1) ข้าวเปลือก ขาวดอกมะลิ 105 (Khao Dawk Mali 105) ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 25-30 % (d.b.)

2) อุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่ 40 °C

ตัวแปรต้น

1) ความชื้นสัมพัทธ์อากาศอบแห้งอยู่ระหว่าง 20-60 %

2) ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.5 - 1.5 m/s

ตัวแปรตาม

1) ปริมาณความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกหอมมะลิหลังการอบแห้งประมาณ 14 % (db.) (ค่าความชื้นที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษาข้าวเปลือกในประเทศไทย)

2) คุณภาพของข้าวหอมมะลิที่ศึกษามีดังนี้

2.1) คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ความขาว

2.2) คุณภาพทางเคมี ได้แก่ ปริมาณความชื้น และกลีโคซิลิน

2.3) คุณภาพการขัดสี ได้แก่ เปอร์เซ็นต์ตันข้าว

2.4) คุณภาพการหุงต้ม

3) การวิเคราะห์ปริมาณการใช้พลังงานในการอบแห้ง

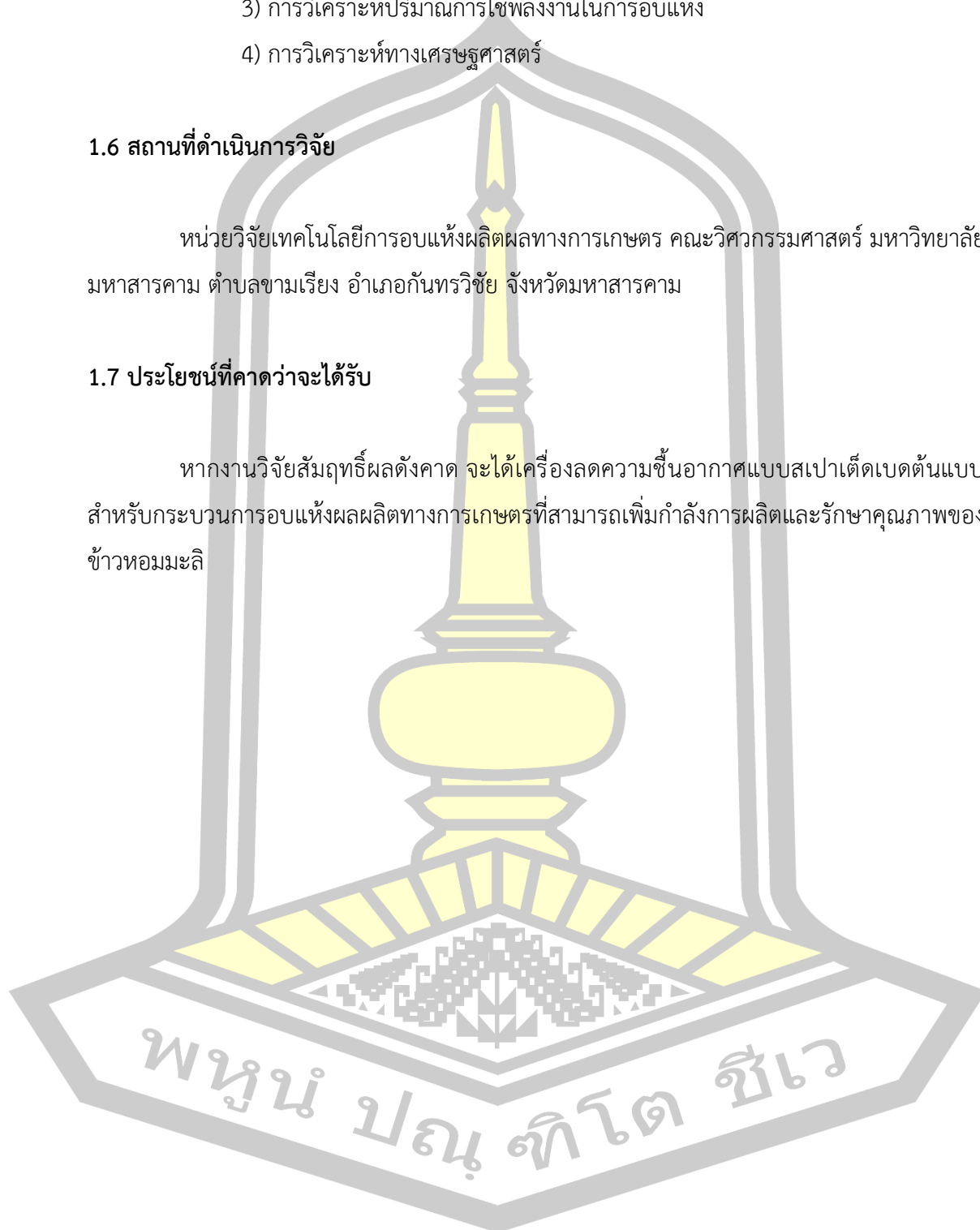
4) การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

1.6 สถานที่ดำเนินการวิจัย

หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

หากงานวิจัยสัมฤทธิ์ผลดังกล่าว จะได้เครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบดต้นแบบสำหรับกระบวนการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรที่สามารถเพิ่มกำลังการผลิตและรักษาคุณภาพของข้าวหอมมะลิ



ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

ในการวิจัยการพัฒนาเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบด สำหรับกระบวนการอบแห้ง ในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งแบ่งได้เป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

- 2.1 ข้าว
- 2.2 สัดส่วนของโครงสร้างเมล็ดข้าว
- 2.3 คุณภาพข้าว
- 2.4 คุณสมบัติของอากาศ
- 2.5 กระบวนการดูดซับ
- 2.6. คุณสมบัติสารดูดซับความชื้นอากาศชนิดแข็ง
- 2.7 ซิลิกาเจล
- 2.8 เทคโนโลยีเครื่องลดความชื้นของอากาศที่ใช้ออบแห้ง
- 2.9 เครื่องลดความชื้นอากาศอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดที่จะใช้ในงานวิจัยครั้งนี้
- 2.10 ทฤษฎีการอบแห้ง
- 2.11 การแบ่งชนิดของเครื่องอบแห้ง

2.1 ข้าว

ข้าว เป็นคำทั่วไปที่ใช้เรียก เมล็ดข้าว (rice fruit, rice grain, หรือ rice seed) ซึ่งทางพฤกษศาสตร์ จะหมายถึง ผล (fruit) ที่มีลักษณะเป็นผลเดี่ยว (single fruit) เกิดจากรังไข่อันเดียวชนิดลอยตัว (superior ovary) ของดอกเดี่ยวในแต่ละดอกย่อย ที่เกิดรวมกันอยู่เป็นช่อดอก ผลเดี่ยวนี้จะติดแน่นอยู่กับผนังของรังไข่ หรือ เยื่อหุ้มผล (pericarp) ซึ่งเมื่อผลสุกหรือแก่จะเป็นผลแห้ง (dry fruit) ที่ไม่แตก (indehiscent fruit) เรียกว่า เมล็ด (caryopsis grain) ที่มีเยื่อหุ้มผล และเปลือกหุ้มเมล็ด (seed coat หรือ testa) เชื่อมรวมกันอย่างแนบแน่นโดยตลอดผลหรือเมล็ดข้าวจะมีลักษณะแตกต่างตามพันธุ์ ในด้านขนาด รูปร่าง สี การมีหาง (awn) หรือไม่มีหาง และขน (pubescence) หรือไม่มีขนบนเปลือกแข็ง (hull หรือ hush) (เครือวัลย์ อุตตะวิริยะสุข, 2536; จำรัส โปรงศิริวัฒนา, 2534)

เมล็ดข้าว ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ (1) ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว (หรือผล) เรียกว่า แกลบ (hull หรือ hush) และ (2) ส่วนเนื้อผล หรือ ผลแท้ (true fruit หรือ caryopsis grain) หรือ ข้าวกล้อง (caryopsis หรือ brown rice) โดยมีรายละเอียดของแต่ละชั้นส่วน ดังนี้ (Juliano, 1985b,

1985a; เครือวัลย์ อัตตะวริยะสุข, 2531; จำรัส โปรงศิริวัฒนา, 2534; อรอนงค์ นัยวิกุล, 2539)

ข้าวกล้องมีโครงสร้างต่างๆ ดังภาพที่ 2.1 (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2539)

1) แกลบ (Hull, Husk) เป็นส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว ประกอบด้วยเปลือกใหญ่ (Lemma) เปลือกเล็ก (Palea) หาง (Awn) ชั่วเมล็ด (Rachilla) และกลีบรองเมล็ด (Sterile lemmas)

2) เยื่อหุ้มผล (Pericarp) เป็นเนื้อเยื่อชั้นนอก ห่อหุ้มผลอยู่ภายใน มีสารสีหรือรงควัตถุปนอยู่ ทำให้ข้าวกล้องมีสี เช่น สีน้ำตาลอ่อน สีน้ำตาลแดง เป็นต้น และยังมีโปรตีน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ

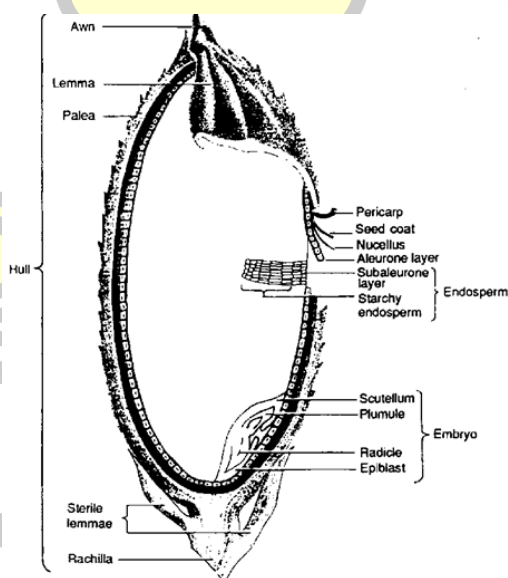
3) เยื่อหุ้มเมล็ด (Seed Coat) อยู่ถัดจากเยื่อหุ้มผลเข้ามาภายในเซลล์มีไขมันและสารสีหรือรงควัตถุ เช่นเดียวกับกับเยื่อหุ้มผล ทำให้ข้าวกล้องมีสี

4) นิวเซลลัส (Nucellus) เป็นเซลล์ชั้นที่ติดกับเยื่อหุ้มเมล็ด แต่สามารถแยกออกจากเยื่อหุ้มเมล็ดได้ง่าย เนื่องจากทาพันธะไม่แน่นมากนัก

5) เยื่อชั้นแอลิวโรน (Aleurone layer) จะอยู่ถัดจากเยื่อหุ้มเมล็ด มีความหนาที่แตกต่างไปตามพันธุ์ข้าว ส่วนของเซลล์แอลิวโรนที่ห่อหุ้มคัพภะจะบาง มีกลุ่มไขมันและโปรตีนน้อย

6) คัพภะ (Embryo) จะอยู่ที่โคนเมล็ดด้านเปลือกใหญ่ เป็นแหล่งสะสมอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของต้นอ่อน

7) เนื้อเมล็ด หรือ เนื้อข้าว (Endosperm) มีมากที่สุด ในเมล็ดข้าว ประมาณร้อยละ 80 ของน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด มีเม็ดสตาร์ชอัดแน่นรวมเป็นกลุ่มเม็ดสตาร์ช



ภาพประกอบ 2.1 โครงสร้างเมล็ดข้าว

ที่มา : Juliano (1985b)

2.2 สัดส่วนของโครงสร้างเมล็ดข้าว

จากโครงสร้างของเมล็ดข้าว ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ แกลบ และข้าวกล้อง เมื่อเปรียบเทียบส่วนต่าง ๆ ของเมล็ดข้าวจากน้ำหนักเมล็ดข้าว (ข้าวเปลือก) 100% จะมีสัดส่วนดังแสดงในตาราง 2.1

ตาราง 2.1 สัดส่วนโครงสร้างของเมล็ดข้าว

โครงสร้างเมล็ด	% สัดส่วน	
	ค่าเฉลี่ย	ช่วงของสัดส่วน
ข้าวเปลือก	100	-
แกลบ	20	16-28
กล้อง	80	72-84
ข้าวกล้อง	100	-
เยื่อหุ้มผล	1.5	1-2
เยื่อหุ้มเมล็ด	5	4-6
คัพภะ	3	2-3
เนื้อเมล็ด	90.5	89-94
คัพภะ	3	-
รากอ่อน	0.18	-
ต้นอ่อน	0.34	-
เยื่อหุ้มรากอ่อน	0.18	-
ใบเลี้ยง	1.29	1.8-1.40
ท่อน้ำ ท่ออาหาร	0.26	-
อื่นๆ	0.75	-

ที่มา : Juliano (1985b); เครือวัลย์ อุตตะวีริยะสุข (2536)

ในสัดส่วนน้ำหนักข้าวเปลือก 100% จะเป็นสัดส่วนของแกลบ 20 % และข้าวกล้อง 80% เมื่อเทียบกับน้ำหนักข้าวกล้อง 100 % จะเป็นสัดส่วนของเยื่อหุ้มต่างๆ รวมประมาณ 6.5% ส่วนของคัพภะ 3% และเนื้อเมล็ดประมาณ 90.5% ในส่วนของคัพภะประกอบด้วยใบเลี้ยงมากที่สุด (1.18-1.4%) ซึ่งสัดส่วนต่างๆ ในข้าวเปลือกนี้จะมีต่อกระบวนการแปรรูปข้าวเปลือกเป็นข้าวกล้อง

และข่าวสารในด้านปริมาณผลผลิตที่ได้และยังมีการกำหนดมาตรฐานของข้าวซึ่งนักวิชาการจะเป็นผู้ให้ข้อมูลเพื่อกำหนดราคาการซื้อขายโดยพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเมล็ดข้าว

2.3 คุณภาพข้าว

คำว่าคุณภาพข้าว เป็นคำที่เกี่ยวข้องกับข้าวหลายกลุ่มคุ้นเคย และกำหนดขึ้นเป็นเกณฑ์หรือมาตรฐานเพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ตรงกันของกลุ่มคนร่วมกัน ตามสถานะภาพที่ต้องเกี่ยวข้องกับข้าว ตั้งแต่ นักวิชาการเกษตรกรผู้ปลูกข้าว เจ้าของโรงสีผู้รับซื้อข้าวเปลือกมาแปรรูปให้เป็นข้าวสาร ผู้ค้าข้าวซึ่งมีทั้งผู้ค้าข้าวเปลือกและผู้ค้าข้าวสารขายข้าวให้ผู้ขายส่ง และผู้ขายปลีกที่ขายต่อให้ผู้บริโภค จึงจำเป็นต้องกำหนดคุณภาพข้าวเพื่อการซื้อขายต่อกัน โดยพิจารณาจากคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเมล็ดข้าว คุณภาพการสีข้าวเปลือกเป็นข้าวสาร คุณสมบัติเมล็ดในการหุงต้ม และการรับประทาน เป็นต้น นักวิชาการจะเป็นผู้ให้ข้อมูล หรือเป็นคนกลางในการตกลงเรื่องเกณฑ์และมาตรฐานข้าว ตัวอย่างเช่น คุณภาพข้าวเปลือกเพื่อการซื้อขายระหว่างกลุ่มเกษตรกรกับผู้ค้าข้าวเปลือกหรือเจ้าของโรงสี หมายถึง คุณลักษณะที่มองเห็น หรือ ชั่ง ตวง วัดได้ เป็นเกณฑ์เพื่อประเมินหรือตีราคาข้าว ซึ่งส่วนใหญ่เป็นคุณสมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือกได้แก่น้ำหนัก เม็ดต่อปริมาตรโดยการตวงเป็นถังเป็นลิตร หรือชั่งเป็นกิโลกรัม ตรวจสอบคุณสมบัติของข้าวเปลือก เช่น ฟางสีน้ำตาลแก่หรือฟางสีน้ำตาลแดง เป็นต้น ขนาดของเมล็ดเช่น เมล็ดยาว ขนาดเมล็ดสั้น และขนาดเมล็ดสั้น เป็นต้น มีรูปร่างเมล็ดเรียวยาว ค่อนข้างเรียวยาว หรืออ้วนและป้อม เป็นต้น ปริมาณสิ่งเจือปนที่ติดมากับข้าวเช่น ข้าวเมล็ดแดง ฟาง กรวด หิน และทราย เป็นต้น ซึ่งเป็นผลเสียนอน้ำหนักข้าวเปลือกที่ซื้อและผลเสียหายต่อการแปรรูปขั้นต้นส่วนคุณสมบัติทางเคมีที่นำมาเป็นเกณฑ์กำหนดคุณสมบัติข้าวเปลือกที่สำคัญ คือความชื้น เนื่องจากความชื้นเป็นดัชนีชี้วัดน้ำหนักเมล็ดข้าวเปลือกที่จะมีการเปลี่ยนแปลงในการเก็บรักษาก่อนแปรรูป และมีผลต่อคุณภาพข้าวเปลือกที่แปรรูปเป็นข้าวสาร เช่น เกณฑ์ความชื้นข้าวเปลือกอยู่ที่ 14% (มาตรฐานเปียก) จะได้ราคาที่ดีกว่าข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงกว่านี้ ยิ่งมีความชื้นมากราคายิ่งลดลงเนื่องจากข้าวเปลือกที่มีการเกี่ยวใหม่ ๆ จะมีความชื้นสูง (18-30% มาตรฐานเปียก) เมื่อนำไปสีหรือเก็บรักษาจะต้องลดความชื้นให้เหลือประมาณ 12-14% (มาตรฐานเปียก) จึงจะมีคุณภาพดี และเก็บรักษาได้นาน การลดความชื้นมีผลต่อน้ำหนักข้าวที่หายไปดังนั้นเกษตรกรจึงต้องการข้าวพันธุ์ดี ปลูกง่าย โตเร็ว ให้ผลผลิตสูง นอกจากนี้ยังมีการพยายามพัฒนาพันธุ์ข้าวที่เมื่อหุงรับประทานมีกลิ่นหอม ซึ่งเป็นที่นิยมอย่างยิ่งโดยเฉพาะข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เมื่อหุงสุกจะมีลักษณะข้าวสุกเป็นตัว ขาว เรียว นุ่มมีกลิ่นหอม และรสชาติอร่อย จึงทำให้ขายได้ราคาดีกว่าข้าวพันธุ์อื่นๆ ซึ่งจากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแบ่งคุณภาพข้าวออกเป็นข้อๆ เพื่อให้เกิดความชัดเจนและเข้าใจง่ายและนิยมใช้เป็นเกณฑ์การแบ่ง โดยสามารถแบ่งออกเป็น คุณภาพข้าวทาง

กายภาพ คุณภาพข้าวทางเคมี และคุณภาพการสี โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 คุณภาพเมล็ดข้าวทางกายภาพ

คุณภาพเมล็ดข้าวทางกายภาพกำหนดจากคุณลักษณะของเมล็ดข้าวที่มองเห็น สัมผัส และชั่ง ตวง วัดได้ ดังนี้

2.3.1.1 น้ำหนักเมล็ด กำหนดได้ 2 แบบ คือ น้ำหนักต่อปริมาตร หมายถึง การชั่งน้ำหนักข้าวด้วยปริมาตรข้าวที่คงที่เช่น กรัมต่อลิตรและแบบที่สอง คือน้ำหนักต่อจำนวนเมล็ด หมายถึงการชั่งน้ำหนักข้าวด้วยจำนวนเมล็ดที่คงที่

2.3.1.2 สีของเปลือกข้าว เป็นลักษณะประจำพันธุ์ ที่มีตั้งแต่สีขาวฟางน้ำตาลอ่อนถึงเข้ม น้ำตาลทอง ร่องน้ำตาล กระน้ำตาล น้ำตาลแดง ม่วง หรือ ดำเป็นต้น

2.3.1.3 สีข้าวกล้อง เป็นลักษณะประจำพันธุ์เช่นเดียวกับสีของข้าวเปลือกที่ควบคุมโดยยีน (gene) หลายคู่ สร้างสารประเภทแอนโทไซยานิน (anthocyanin) อยู่ในส่วนเยื่อหุ้มผล (pericarp) ที่มีสีต่างๆ กัน ขาว แดง น้ำตาลเข้ม น้ำตาลเทา และม่วงถึงม่วงเกือบดำ ซึ่งในประเทศไทยพบพันธุ์ข้าวกล้องแบ่งออกเป็น 4 ชนิด คือ ขาว น้ำตาล แดง และดำ (ม่วงดำ)

2.3.1.4 ขนาดและรูปร่าง เป็นลักษณะประจำพันธุ์ เพื่อจำแนกพันธุ์ข้าว และให้เป็นเกณฑ์มาตรฐานในการซื้อข้าวของประเทศไทย วัดรูปร่างจากอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างของเมล็ด และการวัดความหนาของเมล็ด ซึ่งขนาดของเมล็ดเป็นลักษณะสำคัญที่นักปรับปรุงพันธุ์คำนึงถึงในคุณภาพของเมล็ด เป็นลักษณะหนึ่งที่ใช้จำแนกพันธุ์ข้าว เป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มอินดิกา มีรูปร่างเรียวยาวปลุกในทวีปเอเชียเขตร้อน กลุ่ม จาวานิกา รูปร่างขนาดปานกลาง ปลุกในแถบอินโดนีเซีย และกลุ่มจาปอนิกา ซึ่งมีรูปร่างป้อมปลุกในเขตประเทศที่มีอากาศอบอุ่นเช่น เกาหลี ไต้หวัน และญี่ปุ่น เป็นต้น

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างข้าวสาร ข้าวกล้องและข้าวเปลือก รูปร่างของเมล็ดข้าวสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ เรียว ปานกลาง และป้อม (ตารางที่ 2.2) ซึ่งผลที่ได้จะบ่งบอกคุณภาพและประสิทธิภาพการขัดสีข้าวเปลือกเป็นข้าวกล้องและข้าวสารแต่ละชนิด (USDA, 1982)

ตาราง 2.2 รูปร่างของเมล็ดข้าว

รูปร่าง	ข้าวเปลือก	ข้าวกล้อง	ข้าวสาร
เรียว	3.4 หรือ >	3.1 หรือ >	3.0 หรือ >
ปานกลาง	2.3-3.3	2.1-3.0	2.0-2.9
ป้อม	2.2 หรือ <	2.0 หรือ <	1.9 หรือ <

ที่มา : USDA, (1982)

2.3.1.5 ขাঁวท้องไข่มายถึงจุดขาวขุ่นคล้ายขอลกที่เกดขึ้นในเนื้อของเมล็ดข้าว มี 3 ลักษณะ คือ จุดขาวขุ่นตรงกลางเมล็ดข้าวสาร (white center) จุดขาวขุ่นด้านข้างหรือด้านท้องของเมล็ดซึ่งเป็นข้างเดียวกับคัพพะ (white belly) และจุดขาวขุ่นด้านหลังของเมล็ดข้าวสารซึ่งเป็นด้านตรงข้ามกับคัพพะ (white back)

2.3.1.6 ความเลื่อมของเมล็ด เป็นปัจจัยที่ประเมินคุณภาพและราคาข้าว เนื่องจากข้าวกล้องที่มีความเลื่อมมันดี นำไปสีจะทำให้ข้าวไม่หัก ได้ข้าวเต็มเมล็ดมาก ข้าวหักน้อย เป็นผลเนื่องจากการดูแลขณะปลูกเป็นอย่างดี

2.3.1.7 ความขาวของข้าวสาร เมื่อนำข้าวกล้องไปขัดขาวจนได้ข้าวสารซึ่งมีสีขาวเสมอแต่อาจจะมีสีขาวแตกต่างกันขึ้นอยู่กับระดับการสี ถ้าขัดเบาๆ จะมีสีคล้ำกว่าเมื่อขัดหนักๆ เพราะยังมีส่วนของรำติดอยู่ที่ผิวขาวของเมล็ดข้าว สำหรับข้าวเปลือกที่เก็บไว้นานจะมีสีคล้ำกว่าข้าวที่เก็บเกี่ยวใหม่ๆ ดังนั้นความขาวจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานของข้าว

2.3.1.8 ความใสของเมล็ด เป็นลักษณะความโปร่งแสงโดยแสงผ่านได้ทั้งเมล็ดข้าวต่างจากท้องไข่ม ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะจุด ในข้าวเจ้าด้วยกันหรือแม้แต่พันธุ์เดียวกันจะมีความใสหรือขุ่นต่างกันขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อมในการปลูก ในขณะที่ข้าวเหนียวมีความทึบแสงซึ่งสามารถตรวจได้โดยใช้สายตาหรือเครื่องมือวัด

2.3.2 คุณภาพเมล็ดข้าวทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเมล็ดข้าวคือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และน้ำหรือความชื้น ซึ่งมีผลต่อคุณภาพของข้าวทั้งในลักษณะข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวสาร โดยคาร์โบไฮเดรตซึ่งมีสตาARCHเป็นหลัก และสตาARCHนี้ประกอบด้วยแอมิโลส และแอมิโลเพกทินในสัดส่วนต่างๆกันขึ้นอยู่กับชนิดของข้าวทำให้ข้าวมีลักษณะในการหุงต้ม และคุณภาพในการกินต่างกันไปตลอดจนมีผลต่อคุณค่าทางอาหาร เนื่องจากเป็นแหล่งสะสมพลังงาน สำหรับโปรตีนในข้าวยังนับว่าเป็นแหล่งอาหารโปรตีนหลัก ซึ่งช่วยในการเจริญเติบโตสำหรับผู้บริโภคในประเทศที่บริโภคข้าวเป็นอาหารหลัก ส่วนไขมันในข้าว จะอยู่ในกลุ่มไขมันที่มีรูปร่าง (Lipid bodies) หรือหยดกลม (spherosome) โดยอยู่ร่วมกับเม็ดสตาARCH และโปรตีน ในชั้นแอลิวโรน และคัพพะ จะมีผลในการเสื่อมเสียขณะเก็บรักษาเมล็ด รวมทั้งเมล็ดที่แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ และน้ำหรือความชื้น มีผลต่อคุณภาพของข้าวในด้านการเก็บรักษาเป็นต้นซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.2.1 คาร์โบไฮเดรต

สตาARCH เป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ที่พบมากที่สุดใเนื้อเมล็ดข้าวร้อยละ 90 จึงมีผลต่อคุณภาพข้าวมากที่สุด โดยที่โมเลกุลของสตาARCHจะประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ลักษณะคือ อะไมโลส และอะไมโลเพกทิน ซึ่งโมเลกุลทั้งสองจะจัดเรียงตัวกันแน่นจนเป็นเม็ดสตาARCH (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2539)

อะไมโลส ประกอบด้วยกลูโคสจัดเรียงตัวกันเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น (linear chain) ด้วยพันธะแอลฟา-1,4 มีโซ่กิ่ง (branched chain) อยู่ประมาณ 3-4 กิ่ง ด้วยพันธะแอลฟา-1,6 มีระดับชั้นของพอลิเมอร์ไรเซชันเฉลี่ย 1,000-1,100 มีความยาวของสายเฉลี่ย 250-320 จำนวนสายเฉลี่ย 3.4-4.0 และมีโมเลกุลที่เป็นกิ่งก้านร้อยละ 31-49 โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลส มีหลายรูปแบบ เช่น สายตรง สายพันเป็นเกลียวเดี่ยว หรือ คู่ มีลักษณะเกลียวม้วน หรือเกลียวที่คลายตัวหรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2539)

อะไมโลเพกทิน ประกอบด้วย น้ำตาลกลูโคสที่จัดเรียงตัวเป็นพอลิเมอร์ที่มีโซ่กิ่งเป็นแขนงมาก ประมาณร้อยละ 96 ต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1,4 และอีกร้อยละ 4 ต่อด้วยพันธะแอลฟา-1,6 มีระดับชั้นการพอลิเมอร์ไรเซชันเฉลี่ย 4,700-18,500 ความยาวของสายเฉลี่ย 18-21 มีจำนวนสายเฉลี่ย 220-1,000 โดยความยาวของสายภายนอกเฉลี่ย 12-14 และความยาวของสายภายในเฉลี่ย 5-6 โครงสร้างอะไมโลเพกทิน มีลักษณะกิ่งก้านในลักษณะโซ่กิ่งเกลียวคู่ จากสายที่ต่อกันด้วยกลูโคสเริ่มต้น ซึ่งมีคาร์บอนตัวที่หนึ่งเป็นหมู่รีดิวซิง ดังนั้นโมเลกุลของอะไมโลเพกทินแต่ละโมเลกุลจะประกอบด้วยสายแกนหนึ่งสายเท่านั้น (C-chain) สำหรับสายที่มาต่อกับสายนี้จะเป็นสายกิ่งเชื่อม (B-chain) ต่อกับสายอื่นๆ และสายที่มีจุดเชื่อมตำแหน่งเดียว (A-chain) รวมอยู่ในโมเลกุลของอะไมโลเพกทินจำนวน 104 - 105 สาย (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2539)

2.3.2.2 โปรตีน

โปรตีนในข้าวแตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว และโดยทั่วไปจะมีปริมาณน้อยกว่าในธัญชาติอื่น การวิเคราะห์ และคำนวณปริมาณโปรตีนในข้าวใช้แฟกเตอร์ 5.95 คูณไนโตรเจน โปรตีนที่มีในข้าวนี้เกิดขึ้นตามส่วนต่างๆ ของเมล็ด โดยมีมากในชั้นเปลือกหุ้มเมล็ด และเนื้อเมล็ดด้านนอกจะมีโปรตีนมากกว่าใจกลางเมล็ด โปรตีนในข้าวนี้จะแตกต่างจากโปรตีนจากธัญชาติอื่นๆ และเป็นความพิเศษของข้าวคือ มีปริมาณกลูเทลิน (glutelin) หรือเรียกชื่อว่า ออริซานิน (oryzenin) ซึ่งเป็นโปรตีนสะสมในปริมาณมากที่สุด และมีปริมาณโพลามิน (prolamin) น้อยที่สุด มีผลต่อลักษณะของโปรตีนข้าว ซึ่งไม่ก่อให้เกิดกลูเทิน ดังนั้นข้าว จึงถือได้ว่าเป็นอาหารหลักที่ไม่ก่อให้เกิดการแพ้กลูเทินในผู้ป่วยโรคบางคนจึงเหมาะที่เป็นอาหารเพื่อสุขภาพ

2.3.2.3 ไขมัน

ข้าวมีปริมาณไขมัน 3% คล้ายคลึงธัญชาติอื่นๆ และมีอยู่ในส่วนด้านนอกของเมล็ดมากกว่าใจกลางเมล็ด ดังนั้นการขัดสีข้าวให้ขาว ทำให้ข้าวสารเจ้ามีไขมันอยู่เพียง 0.3-0.5% (Hoseney, 1969) ซึ่งเป็นไขมันที่เกาะเกี่ยวกับสารอื่นอยู่ประมาณ 0.3-0.4% ส่วนในข้าวเหนียวมีไขมันที่เกาะเกี่ยวนี้มากกว่า 0.03% โดยไขมันมีความสัมพันธ์กับเม็ดสตาร์ช 3 ลักษณะคือ ไขมันอยู่ติดกันกับโปรตีนซึ่งอยู่ที่ผิวของเมล็ดสตาร์ชภายนอก หรืออาจอยู่รวมกับโครงสร้างของแอมิโลเพกทินภายนอก เช่น สาย A หรือ สาย B ส่วนผิวของเม็ดสตาร์ช ลักษณะที่สองไขมันอยู่ในเม็ดสตาร์ชเกาะ

เกี่ยวกับเมล็ดสตาร์ช และลักษณะที่สามอยู่ภายในเมล็ดสตาร์ช แต่ไม่เกาะเกี่ยวกับสตาร์ช (Morrison, 1988)

2.3.2.4 ปริมาณความชื้น

องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ และเกี่ยวข้องกับคุณภาพเมล็ดข้าวทั้งทางตรง และทางอ้อมคือ ปริมาณความชื้นของข้าว ทั้งในข้าวเปลือก และข้าวสาร ใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานสำคัญเพื่อการซื้อขายข้าว เนื่องจากปริมาณความชื้นสามารถบ่งบอกถึงปริมาณน้ำหนักรวมของเนื้อข้าวที่ผู้ซื้อและผู้ขายเกี่ยวข้องโดยตรงในการกำหนดราคาซื้อขาย และในทางอ้อมนั้น ความชื้นสามารถบ่งชี้การเก็บรักษาข้าวหรือบ่งบอกถึงความปลอดภัยในการเก็บรักษาให้ข้าวมีคุณภาพดี จากการทดลองพบว่า ข้าวที่มีความชื้นสูงจะเสื่อมเสียเร็วกว่าข้าวที่มีความชื้นต่ำ ระดับความชื้นทั่วไปที่ยอมรับว่าปลอดภัยต่อการเก็บรักษาข้าวที่เหมาะสม คือ 13% ซึ่งจะเก็บรักษาได้ดีภายใน 6 เดือน และถ้าข้าวมีความชื้น 12% จะทำให้เก็บรักษาได้นานขึ้น นอกจากนี้ความชื้นของข้าวยังมีผลต่อคุณภาพการสีของข้าวเปลือก โดยเป็นปัจจัยสำคัญตั้งแต่การเก็บเกี่ยวข้าวที่แก่ ความชื้นเหมาะสม 22-26% การตากข้าวเปลือกเพื่อลดความชื้นลงให้อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษาความชื้นไม่สูงกว่า 14% จนถึงเวลาการสีข้าวเปลือกที่มีความชื้นเหมาะสมก็จะทำให้ข้าวเต็มเมล็ดสูง และข้าวหักน้อย (Juliano, 1985b)

2.3.2.5 กลิ่นสารระเหยของข้าว

ข้าวบางพันธุ์มีกลิ่นสารระเหยบางชนิดที่ผู้บริโภคบางกลุ่มชอบ แต่บางกลุ่มไม่ชอบซึ่งเป็นกลิ่นที่มีอยู่ประจำพันธุ์ เช่น ข้าวหอมที่ซื้อขายในตลาดข้าวของโลก คือพันธุ์ข้าวที่มีสาร 2-แอซิติล-1-ไพร์โรลีน (2-acetyl-1-pyrroline) ซึ่งเป็นสารหลักของกลิ่นหอมจากข้าว โดยข้าวหอมที่อยู่ในรูปข้าวกล้องจะมีสารนี้ประมาณ 0.1-0.2 ไมโครกรัมต่อกรัม ในขณะที่ข้าวสารมีเพียง 0.04-0.09 ไมโครกรัมต่อกรัม ส่วนกลิ่นเหม็นอาจเกิดจากปฏิกิริยาการแปลงของกรดไขมันไม่อิ่มตัว กรดแอมิโนที่มีสารซัลเฟอร์ในโมเลกุล สารประเภทไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ หรือ แอซีทัลดีไฮด์ซึ่งเป็นกลิ่นที่ผู้บริโภคไม่ยอมรับ (Juliano, 1985b; 1985a)

2.3.3 คุณภาพการสี

กระบวนการสีข้าว มีวัตถุประสงค์แยกเปลือกรำ และคัพภะ ออกจากเนื้อเมล็ดข้าวได้เป็นข้าวสารที่มีปริมาณเต็มเมล็ดมากที่สุด หรือข้าวหักน้อยที่สุด ผ่านกระบวนการ 4 ขั้นตอนพื้นฐาน คือ การทำความสะอาด การกะเทาะ การขัดขาว และการคัดแยก โดยชนิดของเครื่องสีข้าว และการปรับตั้งเครื่องสี นับเป็นปัจจัยไม่น้อยกว่า 2 ปัจจัยที่กล่าวมาแล้ว เนื่องจากหากใช้เครื่องสีไม่เหมาะสมกับชนิดและลักษณะของเมล็ดข้าว หรือปรับเครื่องไม่เหมาะสมต่อการกะเทาะ และการขัดขาว ก็จะทำให้ข้าวหักมาก เป็นผลต่อคุณภาพการสีมาก โดยเฉพาะในด้านข้าวเต็มเมล็ดที่ได้ ดังนั้นคุณภาพสีธรรมดา หมายถึง ประสิทธิภาพการสี ให้ได้ข้าวสารตามต้องการ

ประสิทธิภาพการสี หมายถึง ปริมาณผลผลิตจากข้าวเปลือกที่ได้เป็นข้าวสารเต็มเมล็ด และต้นข้าว ถ้าได้ข้าวสารเต็มเมล็ด และต้นข้าวมาก แสดงว่ามีประสิทธิภาพการสีดี ซึ่งขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว การปฏิบัติกรก่อน และหลังการเก็บเกี่ยว และกระบวนการสีข้าว ในกระบวนการสีข้าวจะได้ผลผลิตจากข้าวเปลือกดังนี้

ข้าวเปลือกสะอาด	100 % จะได้
แกลบ	20-30 %
รำ	8-11 %
ข้าวสารผสม	66-72 %

โดยสัดส่วนของข้าวสารรวม ประกอบด้วย ข้าวเต็มเมล็ด, ต้นข้าว, ข้าวหักใหญ่, ข้าวหัก และปลายข้าว (เครือวัลย์, 2536)

ประเมินประสิทธิภาพการสีดังกล่าวจากเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบต่างๆ ของเมล็ดข้าวที่ได้จากการสี ซึ่งเป็นขบวนการจัดเปลือก, รำ และคัพภะออกจากข้าวเปลือก โดยให้มีข้าวหักน้อยที่สุด ดังนี้ (เครือวัลย์, 2531)

$$\% \text{ แกลบ} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก} - \text{น้ำหนักข้าวกล้อง}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100 \quad (2.1)$$

$$\% \text{ รำ} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวกล้อง} - \text{น้ำหนักข้าวสาร}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100 \quad (2.2)$$

$$\% \text{ ข้าวสาร} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวสารรวม}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100 \quad (2.3)$$

$$\% \text{ ข้าวหัก} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวสาร} - \text{น้ำหนักข้าวเต็มเมล็ดต้นข้าว}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100 \quad (2.4)$$

2.3.4 คุณภาพการหุงต้ม (Cooling Quality)

เนื่องจากผู้บริโภคต้องนำข้าวสารมาหุงต้มก่อนรับประทาน ดังนั้นเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก (Cooked-rice texture) จึงมีความสัมพันธ์โดยตรงซึ่งมีผลมาจากวิธีการหุงต้มจะขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว ซึ่งตรวจวัดได้จากลักษณะปรากฏของข้าวหุงสุก หรือเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก

จากการสำรวจวิธีการหุงต้มของผู้บริโภคในประเทศต่างๆ ทั่วโลกสามารถแบ่งวิธีการหุงต้มข้าวได้ 7 วิธี คือ (Juliano, 1985b)

2.3.4.1 การหุงต้มในเตาอบ (Oven cooking) ทำได้โดยการเติมน้ำเดือดประมาณ 220-260 มล. ลงในข้าว 100 กรัมในถาดแก้วไฟในเตาอบโดยมีฝาปิด หุงต้มในเตาอบที่อุณหภูมิประมาณ 176 C เป็นเวลาประมาณ 28 นาที แล้วปิดฝา อบไอน้ำในเตาอีก 5 นาที (ถ้าเป็นข้าวหนึ่งต้องใช้เวลา มากกว่าข้าวปกติ 5 นาที)

2.3.4.2 การหุงต้มด้วยปริมาณน้ำน้อย (Small amount of water) ต้มน้ำในถ้วยแก้วทนไฟมีฝาปิดจำนวน 200 มล. จนน้ำเดือดเติมข้าว 100 กรัม ต้มเดือด 2 นาที แล้วลดไฟแบบอ่อนอีก 18 นาที โดยมีแผ่นกั้นความร้อนรองและปิดฝา บางประเทศอาจใช้น้ำเย็นแทนต้มน้ำเดือด และบางประเทศแช่ข้าวก่อนต้ม เช่นข้าวเหนียวนิยมนำแช่ข้าวก่อนเสมอ ถ้าเป็นข้าวหนึ่งต้องใช้เวลาในการอุ่น 23 นาที และอาจต้องเติมน้ำมากขึ้น วิธีที่นิยมในปัจจุบันคือ การใช้หม้อหุงข้าวไฟฟ้า ที่ตั้งไฟได้โดยอัตโนมัติ เรียกว่าหุงข้าวแบบไม่เช็ดน้ำ

2.3.4.3 การหุงต้มข้าวด้วยปริมาณน้ำปานกลาง (Medium amount of water) ใช้กระทะหรือหม้ออลูมิเนียมที่มีฝาปิดใส่น้ำ 40 มล. ต้มจนเดือดแล้วเติมข้าวสารจำนวน 100 กรัม ต้มเดือด 2 นาที ลดไฟแบบอ่อน 13-18 นาที โดยมีฝาปิดเทน้ำออกเมื่อจะบริโภค หรือบางประเทศใช้น้ำเย็นหุงข้าวจนสุก แล้วเทน้ำออกแล้วดงแบบปิดฝาท่ออุณหภูมิประมาณ 176 C เป็นเวลา 5 นาที ให้น้ำระเหยจนข้าวแห้ง ถ้าเป็นข้าวหนึ่งต้องใช้เวลาอุ่น 23 นาที วิธีนี้เรียกว่าการหุงแบบเช็ดน้ำ

2.3.4.4 การหุงต้มข้าวด้วยปริมาณน้ำมาก (Large amount of water) ใช้กระทะหรือหม้ออลูมิเนียมปิดฝาเติมน้ำ 800 มล. ต้มน้ำให้เดือดใส่ข้าวสาร 100 กรัม ต้มเดือด 12 นาที หรือ 20 นาที โดยปิดฝาท่อน้ำที่เหลือออกก่อนนำไปรับประทาน บางประเทศหุงสุกแบบปิดฝา บางประเทศใช้น้ำเย็น แทนน้ำเดือด เมื่อเทน้ำออกแล้วจะปล่อยให้ไอน้ำระเหยออกทำให้ข้าวแห้ง (176 C เป็นเวลา 5 นาที) ถ้าเป็นข้าวหนึ่งใช้เวลาต้ม 25 นาที เรียกวิธีนี้ว่าการหุงแบบเช็ดน้ำเหมือนข้อที่ 2.13.4.3

2.3.4.5 การนึ่ง (Steaming) นึ่งข้าว 100 กรัมในหม้อ 2 ชั้น โดยหม้อที่ใส่ข้าวมีรูด้านล่างซึ่งจุ่มลงหม้อน้ำเดือด (100 มล.) เป็นเวลา 10 นาที แล้วยกหม้อขึ้นเหนือหม้อน้ำเดือด นึ่งต่อไป 30-45 นาที บางประเทศต้มข้าวกับน้ำ (อัตราส่วนข้าว : น้ำ เท่ากับ 1 : 1.5) จนข้าวอุ้มน้ำหมด ใช้เวลาประมาณ 5 นาที แล้วจึงนึ่งด้วยไอน้ำอีก 30 นาที

2.3.4.6 การนึ่งแบบเติมน้ำมัน (Steaming with oil added) เติมน้ำ 800 มล. ในกระทะหรือหม้ออลูมิเนียมจนเดือด ใช้ข้าวสาร 100 กรัม ใช้เวลา 5 นาที หรือ 15 นาที โดยปิดฝาแล้วเทน้ำออก เทข้าวสะเด็ดน้ำลงในหม้อนึ่งซึ่งเป็นหม้อ 2 ชั้น ชั้นในใส่ข้าวที่สะเด็ดน้ำ แล้วเติมน้ำมัน 1 ช้อนโต๊ะ (14.9 มล.) และน้ำร้อน 60 มล. นึ่งในน้ำเดือดอยู่ในหม้ออีกชั้นเป็นเวลา 15 นาที

2.3.4.7 การหุงต้มในน้ำเติมน้ำมัน (Cooking in water with oil added) ต้มข้าวสาร 100 กรัม ผสมกับน้ำมันฝ้าย 1 ช้อนโต๊ะ (14.9 มล.) ในกระทะหรือหม้ออลูมิเนียม 2-5 นาที แล้วเติมน้ำ 200 หรือ 250 มล. ลงในหม้อแล้วอุ่น 20 25 หรือ 28 นาที โดยวางหม้อข้าวบนแผ่นกั้นความร้อน

ด้านล่างอีก 15 นาที บางประเทศเติมน้ำมันลงในหม้อ 250 มล. ต้มน้ำเดือดจึงใส่ข้าวสารแล้วอุ่นในหม้อปิดฝา 30 นาที

สำหรับการหุงต้มข้าวเมล็ดยาวของประเทศไทย เพื่อให้ได้คุณภาพที่ดีที่สุดตามสภาพข้าวเช่น ข้าวที่มี แอมีโลสสูง ซึ่งเป็นข้าวร่วนแข็ง นิยมใส่น้ำมากกว่าข้าวที่ใส่อมีโลสต่ำ ซึ่งในระหว่างการหุงเมล็ดข้าวจะดูดน้ำไว้ เมื่อเมล็ดสุกแล้วแต่มียังมีน้ำเหลืออยู่ ต้องหุงต้มไปอีกสักครู่จะช่วยให้เมล็ดดูดน้ำเพิ่มขึ้น และช่วยลดความแข็งกระด้างของข้าวสุกลงได้ ในทางตรงกันข้ามการหุงข้าวแอมีโลสต่ำลงระมัดระวังน้ำหุงต้ม เพราะถ้าน้ำมากเกินไปเมล็ดข้าวจะสุกแฉะ และจากการหาความสัมพันธ์แบบถดถอย (Regression) พบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับข้าวหุงต้มสามารถคาดคะเนจากปริมาณแอมีโลสได้ดังสมการ

$$W = 0.874 + 0.056A : R^2 = 0.42 \quad (2.5)$$

เมื่อ W = ปริมาณน้ำหุงที่เหมาะสม คิดเป็นเท่าของน้ำหนักข้าวสาร
 A = ปริมาณแอมีโลส คิดเป็นร้อยละ ร้อยละของข้าวสาร

อย่างไรก็ตาม การหุงข้าวครั้งละมากๆ อัตราการระเหยของน้ำระหว่างการหุงต้มจะลดลง จึงต้องลดปริมาณน้ำส่วนนี้ลงเวลาหุง และควรปรับน้ำหนักของข้าว และน้ำให้เป็นปริมาตรเพื่อสะดวกในการปฏิบัติต่อไป สำหรับข้าวพันธุ์ดีบางพันธุ์ของประเทศไทย สามารถตามลักษณะการหุงต้มและการรับประทานได้ 3 กลุ่ม คือ ข้าวสุกนุ่มเหนียว ข้าวสุกร่วน (ข้าวอ่อน) และข้าวสุกร่วนแข็ง (ดังตาราง 2.3) (งามชื่น คงเสรี, 2536)

ตาราง 2.3 การจัดแบ่งข้าวพันธุ์ดีตามคุณภาพการหุงต้ม และการรับประทาน

พันธุ์ข้าว	เมล็ดยาว (มม.)	แอมีโลส(%)	อุณหภูมิแป้งสุก
		ข้าวสุกนุ่มและเหนียว	
ข้าวหอมมะลิ 105*	7.4	12-17	ต่ำ
กข 15*	7.5	14-17	ต่ำ
กข 21	7.3	17-20	ต่ำ
		ข้าวสุกร่วน (ข้าวอ่อน)	
ขาวปากหม้อ	7.7	24-26	ปานกลาง
ขาวตาแห้ง 17	7.5	26-28	ต่ำ-ปานกลาง

ตาราง 2.3 การจัดแบ่งข้าวพันธุ์ดีตามคุณภาพการหุงต้ม และการรับประทาน (ต่อ)

พันธุ์ข้าว	เมล็ดยาว (มม.)	แอมิโลส(%)	อุณหภูมิแป้งสุก
กข7	7.2	24-28	ปานกลาง
กข23	7.3	26-30	ปานกลาง
สุพรรณบุรี 30	7.5	19-26	ต่ำ
ข้าวสุกร่วนแข็ง			
เหลืองใหญ่ 148	7.3	30-31	ต่ำ
น้ำสกุย 19	7.6	30-31	ต่ำ
เหลืองประทิว 123	7.4	28-32	ต่ำ-ปานกลาง
เล็บมือนาง 111	7.6	29-32	ต่ำ-ปานกลาง
ปิ่นแก้ว 56	7.5	29-31	ต่ำ-ปานกลาง
นางพญา 132	7.4	31-32	ต่ำ-ปานกลาง
กข 11	7.6	29-32	ต่ำ
กข 15	6.9	30-33	ต่ำ-ปานกลาง
กข 25	7.4	30-33	ต่ำ
ปทุมธานี60*	7.5	27-32	ต่ำ
ชัยนาท 1	7.4	27-30	ต่ำ-ปานกลาง
สุพรรณบุรี 90	7.4	27-30	ต่ำ-ปานกลาง
สุพรรณบุรี 1	7.3	29	ปานกลาง

หมายเหตุ * มีกลิ่นหอม

ที่มา : งามชื่น (2539)

ดังนั้นวิธีการหุงต้มข้าวสุกจึงมีผลโดยตรงต่อคุณภาพการหุงต้ม ซึ่งเกี่ยวข้องกับพันธุ์ข้าว โดยพันธุ์ข้าวต่างกัน เช่นข้าวเจ้า และข้าวเหนียวจะต้องปรับปรุงการหุงต้มให้ได้ลักษณะเนื้อสัมผัสตามที่ผู้บริโภคต้องการ นอกจากวิธีการหุงต้มแล้ว (Juliano, 1985a) ยังได้รวบรวมวิธีการตรวจสอบคุณภาพการหุงต้ม ได้แก่การยืดตัวของเมล็ดข้าว (grain elongation) การขยายตัวของปริมาตรและการอุ้มน้ำของข้าวสุก (volume expansion and water absorption) และปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำข้าวสุก (solids in cooking water) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การยืดตัวของเมล็ดข้าว ทำได้โดยสุ้มเมล็ดข้าวสารเต็มเมล็ด 20 เมล็ด วัดความยาว 10 เมล็ด คำนวณเป็นค่าเฉลี่ยของเมล็ด นำข้าว 20 เมล็ดใส่ตะแกรงแช่น้ำเย็น 30 นาที นำ

ข้าวในตะแกรงลงต้มในน้ำเดือด 10 นาที ยกตะแกรงจากน้ำเดือดจุ่มในน้ำเย็น เทลงในจานพลาสติกที่มีฝาปิด เลือกเมล็ดที่ตรง 10 เมล็ด วัดความยาว แล้วคำนวณอัตราการยืตัวของข้าวสุกตั้งสมการ (งามชื่น คงเสรี, 2536)

$$\text{อัตราการยืตัวของข้าวสุก} = \frac{\text{ความยาวเฉลี่ยของข้าวสุก}}{\text{ความยาวเฉลี่ยของข้าวสาร}} \quad (2.6)$$

2) การขยายปริมาณและการอุ้มน้ำของข้าวสุก มีวิธีการทำหลายวิธีขึ้นอยู่กับหลักการของนักวิจัยแต่ละกลุ่ม วิธีที่สะดวกวิธีหนึ่งคือ การหุงข้าวที่วัดปริมาตรหรือความสูงของข้าวสารที่คงที่เท่ากัน ด้วยน้ำปริมาณคงที่ และเวลาหุงคงที่ในอ่างน้ำเดือด เมื่อข้าวสุกวัดปริมาตรหรือความสูงที่ข้าวสุกสูงตัวขึ้น เปรียบเทียบกับอัตราการขยายปริมาตร

$$\text{อัตราการขยายปริมาตร} = \frac{\text{ความสูงเฉลี่ย(ปริมาตรเฉลี่ย) ข้าวสุก}}{\text{ความสูงเฉลี่ย (ปริมาตรเฉลี่ย) ข้าวสาร}} \quad (2.7)$$



ภาพประกอบ 2.2 การหุงข้าวในหลอดแก้วเพื่อตรวจสอบการยืตัวของเมล็ดข้าวการขยายปริมาตรและการอุ้มน้ำของข้าวสุก

ที่มา : อรอนงค์ นัยวิกุล (2539)

3) การอุ้มน้ำของข้าวสุก อาจใช้วิธีการชั่งน้ำหนักคงที่ของข้าวสารแล้วคำนวณผลต่างของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของข้าวสุกกับข้าวสาร หรือชั่งน้ำหนักของข้าวสารก่อนและหลังจากการหุงข้าวสุก หรือชั่งน้ำหนักที่เหลือจากการอุ้มน้ำของข้าว ได้เป็นน้ำหนักน้ำที่ข้าวสุกอุ้มไว้

4) ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำข้าวสุก หาได้จากการควบคุมน้ำหนักข้าวสาร น้ำหนักน้ำที่หุง อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้หุง โดยใช้น้ำมาก ให้น้ำที่เหลือเมื่อข้าวสุก นำน้ำส่วนเกินมาระเหยด้วยไอน้ำจนแห้ง (ในภาชนะที่ชั่งน้ำหนักไว้แล้ว) ชั่งน้ำหนักภาชนะรวมของแข็งที่แห้ง คำนวณผลต่างของน้ำหนัก ได้เป็นปริมาตรของแข็งที่ละลายในน้ำข้าวสุก

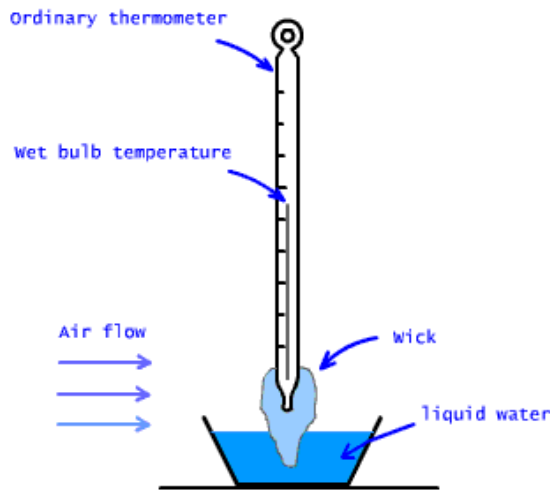
2.4 คุณสมบัติของอากาศ

อากาศซึ่งใช้เป็นตัวกลางในการพาความร้อนไปสู่วัสดุชิ้น และพาความชื้นจากวัสดุชิ้นออกมาภายนอก จะประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำ ซึ่งมีคุณสมบัติแสดงได้ด้วยตัวแปร 7 ตัว ดังนี้ (ชัยสวัสดิ์ เทียนวิบูลย์, 2523)

2.4.1 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (T_{db}) เป็นอุณหภูมิที่บอกโดยไม่มีการดัดแปลง (Modified temperature sensor) ในการบอกอุณหภูมิวัดได้ด้วยเทอร์โมมิเตอร์ทั่วไป จะหมายถึงอุณหภูมิกระเปาะแห้ง

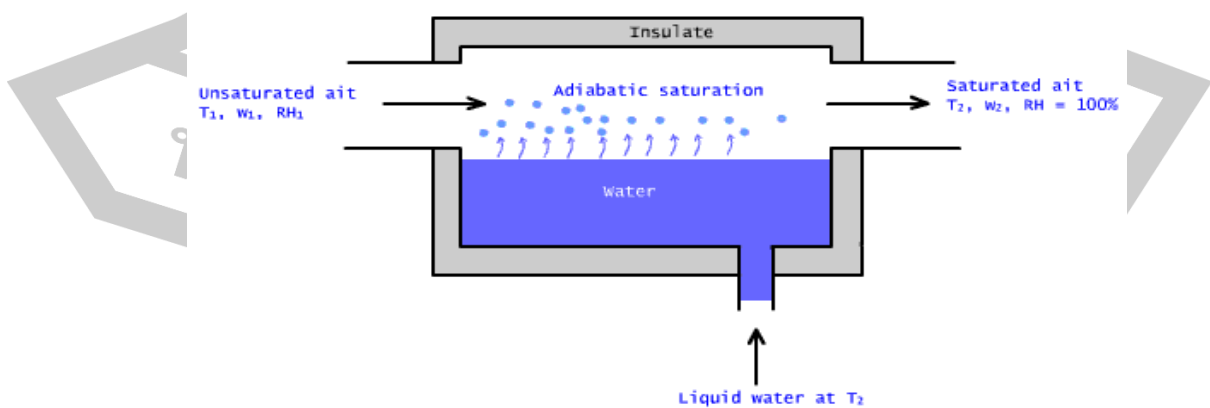
2.4.2 อุณหภูมิกระเปาะเปียก (T_{wb}) มี 2 แบบ คือ

2.4.2.1 อุณหภูมิกระเปาะเปียกทางไซโครเมตริกส์ (Psychrometric wet bulb temperature) ได้มาจากการนำเทอร์โมมิเตอร์ (Ordinary thermometer) แบบปรอทหุ้มด้วยสำลี(Wick) หรือผ้าเปียกตลอดเวลา แล้วปล่อยให้สัมผัสกับอากาศที่ไหล(Air flow) ในความเร็วสูง (5 - 10 เมตร/วินาที) หรือจะผูกเชือกกับเทอร์โมมิเตอร์ที่หุ้มผ้าสำลีที่ชุ่มน้ำ(Liquid water) แล้วเหวี่ยงเป็นวงกลมก็ทำได้เช่นกัน ความชื้นที่อยู่ในผ้าสำลีชุ่มน้ำเมื่อสัมผัสกับอากาศไม่อิ่มตัวที่อยู่ภายนอก ก็จะมีการถ่ายเทความชื้นสู่อากาศไม่อิ่มตัวเนื่องจากความดันไอของน้ำในผ้าสำลีสูงกว่าอากาศแห้ง ซึ่งกระบวนการระเหยที่เกิดขึ้นนี้จะไปมีผลทำให้เกิดการดึงความร้อนออกจากอากาศไปยังผ้าสำลี จนการระเหยอยู่ในสภาวะคงตัว อุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์จึงมีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิกระเปาะแห้ง ดังแสดงในภาพประกอบ 2.3



ภาพประกอบ 2.3 การวัดอุณหภูมิระเปาะเปียกอย่างง่าย
ที่มา : กลอยใจ เขยกลิ่นเทศ (2554)

2.4.2.2 อุณหภูมิระเปาะเปียกทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic wet bulb temperature) จะได้จากการทำให้อากาศชื้นเป็นอากาศอิ่มตัวในสภาวะอะเดียบาติก (Adiabatic saturation) ดังแสดงในภาพประกอบ 2.4 ซึ่งภายนอกจะต้องหุ้มฉนวน (Insulate) เพื่อป้องกันถ่ายเท-ความร้อนออกไปนอกระบบ อากาศไม่อิ่มตัวที่อุณหภูมิ T_1 มีความชื้น w_1 และความชื้นสัมพัทธ์ RH_1 เมื่อผ่านเข้าสู่อ่างน้ำที่ยาวมาก ๆ อากาศแห้งที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated air) จะรับเอาน้ำที่ระเหยจากอ่างที่มีฉนวนหุ้มที่ทางออกอากาศที่อิ่มตัว (saturated air) หรือมีความชื้นสัมพัทธ์ 100% แล้ววัดอุณหภูมิออกมาจะได้อุณหภูมิระเปาะเปียกทางเทอร์โมไดนามิกส์ และอากาศที่ทางออกจะมีอุณหภูมิน้อยกว่าเขาเข้ามีความชื้นสูงกว่าเขาเข้าด้วย



ภาพประกอบ 2.4 กระบวนการอิ่มตัวแบบอะเดียบาติก
ที่มา : กลอยใจ เขยกลิ่นเทศ (2554)

2.4.2.3 อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew - Point Temperature) คือ อุณหภูมิที่ไอน้ำในอากาศเริ่มควบแน่น เมื่ออากาศนั้นถูกทำให้เย็นลงที่อัตราส่วนความชื้นและความดันคงที่ ดังนั้น อุณหภูมิจุดน้ำค้างจึง หมายถึง อุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำที่ความดันนั้น ๆ

2.4.2.4 อัตราส่วนความชื้น (Humidity Ratio) คือ มวลของน้ำที่อยู่ในอากาศแห้ง คิดต่อ 1 กิโลกรัม หรือ ปอนด์ มีหน่วยเป็น $\text{kg H}_2\text{O} / \text{kg dry air}$ หรือ $\text{g H}_2\text{O} / \text{kg dry air}$ ก็ได้ นอกจากนี้ยังมีการใช้ในหน่วยอังกฤษ $\text{lb H}_2\text{O} / \text{lb dry air}$ ด้วยอากาศแห้งที่จะใช้ทำแห้งอาหาร ควรที่จะมีความแห้งมาก ๆ อาจจะทำโดยการผ่านอากาศแห้งเข้าไปในขดลวดไฟฟ้า (Heater) ก่อนเข้าไปในเครื่องอบแห้ง เมื่ออบแห้งอาหารเสร็จค่าปริมาณความชื้นของอากาศก็จะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอากาศเป็นตัวกลางในการพาน้ำในอาหารออกมานั่นเอง

2.4.2.5 เอนทาลปี (Enthalpy) เป็นพลังงานที่สะสมอยู่ในอากาศชื้น ค่าพลังงานความร้อนที่มีในอากาศชื้นต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง เมื่อเทียบกับค่าความร้อนที่อุณหภูมิอ้างอิง (นิยมใช้ 0°C ในระบบเมตริกส์)

2.4.2.6 ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume) เป็นปริมาตรอากาศชื้นต่อน้ำหนักอากาศแห้ง คือ ปริมาตรของอากาศชื้นต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง ขณะเดียวกันค่าความหนาแน่นจำเพาะนั้นเป็นส่วนกลับกับค่าปริมาตรจำเพาะ

2.4.2.7 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) คือ อัตราส่วนระหว่างมวลไอน้ำในความชื้นต่อมวลไอน้ำสูงสุดที่อากาศนั้นจะสามารถรับไว้ได้ที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน นอกจากนี้ยังหมายถึง ความดันของอากาศต่อความดันอิ่มตัวในขณะนั้นที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ

ซึ่งการอบแห้งด้วยเทคนิคที่มีการลดความชื้นอากาศโดยใช้สารดูดซับความชื้นอากาศก่อนไปอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรเพื่อรักษาคุณภาพและช่วยลดระยะเวลาอบแห้งโดยเฉพาะการอบแห้งในช่วงฤดูฝน ซึ่งหลักการดูดซับความชื้นอากาศจะมีหลักการดังจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

2.5 กระบวนการดูดซับ

กระบวนการดูดซับ (Adsorption process) หรือกระบวนการดูดซับติดที่ผิว หมายถึง กระบวนการแยกมวลสาร ซึ่งอาจอยู่ในรูปของโมเลกุลหรือคอลลอยด์ (colloid) (ทั้งในสถานะของของเหลวและแก๊ส) ที่มีอยู่ในสารละลายหรือก๊าซ ให้เกาะอยู่บนผิวของของแข็ง ซึ่งจัดอยู่ในกระบวนการบำบัดทางกายภาพ - เคมี เพื่อให้สารละลาย หรือก๊าซมีความสะอาดมากขึ้น สามารถจำแนกได้ 4 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางเคมี การดูดซับแบบแลกเปลี่ยน และการดูดซับแบบเจาะจง (ภานุมาตย์ พัฒโท, 2553) การเปรียบเทียบระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีที่นิยมใช้งานในปัจจุบันดังแสดงในตารางที่ 2.2

2.5.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เกิดจากการดูดซับโดยมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน ๆ เป็นแรงที่ไม่กำหนดทิศทาง เช่น พันธะไฮโดรเจน พบว่าไม่มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อย สามารถกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิววัสดุดูดซับได้ง่ายและอาจเกิดการดูดซับแบบเชิงซ้อนได้หลายชั้น

2.5.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) จะเกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาต่อกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากตัวถูกดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมใหม่เป็นสารประกอบใหม่ขึ้นโดยพันธะเคมีเป็นพันธะที่มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับสูง การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิววัสดุจะทำได้ยากและจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer)

2.5.3 การดูดซับแบบแลกเปลี่ยน (Exchange adsorption) จะเกิดเมื่อตัวถูกดูดซับและวัสดุดูดซับมีประจุและเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับที่เป็นไอออนที่มีประจุกับวัสดุดูดซับที่มีประจุตรงข้ามกัน หรือเกิดเนื่องจากการแทนที่ประจุที่อยู่ผิวของวัสดุดูดซับกับไอออนของตัวถูกดูดซับ

2.5.4 การดูดซับแบบเจาะจง (Specific adsorption) จะเกิดขึ้นเนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลตัวถูกดูดซับกับวัสดุดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่ที่ผิวแต่ไม่มีผลให้ตัวถูกดูดซับเปลี่ยนโครงสร้างไป พฤติกรรมดูดซับชนิดนี้จะมีค่าพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

การเปรียบเทียบระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีที่มีการใช้งานในปัจจุบันดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตาราง 2.4 การเปรียบเทียบระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล	50–400 กิโลจูลต่อโมล
2. อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
4. การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
5. การดูดซับบนแก๊ส - ของแข็ง	เกิดได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะบางระบบ
6. พลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการเกิด	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
7. รูปแบบชั้นของสารดูดซับ	Monolayer และ Multilayer	Monolayer

ที่มา: ภาณุมาตย์ พัฒโท (2553)

2.6. คุณสมบัติสารดูดซับความชื้นอากาศชนิดแข็ง (Solid Desiccant Property)

ที่มีการกล่าวถึงในงานวิจัยนี้ จะเน้นไปที่คุณสมบัติของสารดูดซับความชื้นชนิดแข็ง (Solid Desiccant) ซึ่งจะนำมาประยุกต์ใช้ในเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบต จะมีการดูดซับหรือเพิ่มความชื้นให้กับอากาศ โดยจะขึ้นอยู่กับความดันไอที่แตกต่างกันระหว่างน้ำในอากาศกับน้ำในสารดูดความชื้นนั้น ๆ ปกติแล้วไอน้ำจะถูกดูดซับอยู่บนผิวของสารดูดความชื้น สารดูดความชื้นชนิดต่าง ๆ ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป มีหลายชนิด เช่น ซิลิกาเจล (Silica gel) อลูมินาเจล (Alumina gel) โมเลกุล่าซีฟ (Molecular sieve) และแอคติเวทเต็ดอลูมินา (Activated alumina) เป็นต้น สมบัติของสารดูดความชื้นแต่ละชนิดก็จะมีผลต่อความดันลด (Pressure drop) และความสิ้นเปลืองพลังงานของระบบ (Swami et al., 1990) ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาสมบัติของสารดูดความชื้นแต่ละชนิดก่อนที่จะทำการออกแบบระบบ เพื่อให้ทราบถึงสภาวะการถ่ายเทและการไหลเวียนของอากาศภายในระบบสารดูดความชื้นที่เป็นของแข็งที่ได้รับการศึกษากันอย่างกว้างขวางชนิดหนึ่ง คือ ซิลิกาเจล ซึ่งเป็นโพลิเมอร์ของกรดซิลิซิก (Silicic acid) มีองค์ประกอบทางเคมี คือ $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ จะมีน้ำหนักอยู่ประมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนัก (Dupont et al., 1994) โดยซิลินอลกรุป (Silinal group, $-\text{Si}-\text{OH}$) มีสมบัติเป็นกรดเล็กน้อย และมีบทบาทสำคัญในการแยกสาร สำหรับพันธะไซโลเซน (Siloxane bone, $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$) มีอิทธิพลต่อการแยกสารน้อยหรือแทบจะไม่มีเลย (Mujumdar, 2000) เมื่อนำมาใช้สำหรับสภาวะการไหลแบบราบเรียบ (Lamina flow) จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสูงสุด และมีความดันลดต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับสารดูดความชื้นที่เป็นของแข็งทั้งหมด (Dupont et al., 1994) และก่อนที่จะนำมาใช้งาน ควรนำซิลิกาเจลไปอบแห้งที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 1.5 และอุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลามากกว่า 72 ชั่วโมง สารดูดความชื้นนอกจากจะช่วยลดความชื้นของอากาศแล้ว ยังทำให้อากาศที่ผ่านสารดูดความชื้นมีอุณหภูมิของอากาศสูงขึ้น (Hodali et al, 2001)

ซิลิกาเจลเป็นของแข็งที่เกิดจากการรวมตัวของตัวถูกละลายซิลิเกตซึ่งควบแน่นจากตัวทำละลายที่เป็นน้ำหรือสารอื่น ในการนำกลับมาใช้ใหม่หลังจากดูดความชื้นแล้ว จะทำโดยการอบที่อุณหภูมิประมาณ 150 - 200 °C เป็นเวลา 1 - 2 ชั่วโมง จากการเปรียบเทียบกับสารอื่นจะพบว่าซิลิกาเจลใช้อุณหภูมิและเวลาในการอบน้อยกว่า ดังนั้นสำหรับกระบวนการที่ต้องมีการดูดและไล่ความชื้นแล้วซิลิกาเจลจึงเป็นสารที่เหมาะสมแก่การใช้งาน ซึ่งสามารถจำแนกชนิดและคุณสมบัติของสารดูดความชื้นดังแสดงในตาราง 2.5

ตาราง 2.5 ชนิดและคุณสมบัติของสารดูดความชื้นชนิดแข็ง

ชนิดของสารดูดความชื้น		ซิลิกาเจล (Silica gel)	เอส/วี โซเวอร์บีด (S/V Sover bead)	โมเลคิวลาร์ซีฟ (Molecular sieve)
ตัวประกอบ		SiO ₂ nH ₂ O	กรดซิลิซิคชนิดหนึ่ง	สารซิลิโอสที่ประกอบขึ้น
ลักษณะ	ก่อนดูดความชื้น	คล้ายแก้วมัว ๆ	เม็ดกลมคล้าย ๆ แก้วมัว ๆ	ผลึกเล็ก ๆ
	หลังดูดความชื้น	ไม่เปลี่ยนแปลง	ไม่เปลี่ยนแปลง	ไม่เปลี่ยนแปลง
ความเป็นพิษ, การติดไฟและอันตราย		ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
การอ้อมตัวของการดูดความชื้น		A : ประมาณ 40 % B : ประมาณ 30 %	เกือบเหมือนซิลิกาเจล	มากกว่าซิลิกาเจล
ถังบรรจุ		ถังบรรจุทำด้วยวัสดุใดก็ได้	ถังบรรจุทำด้วยวัสดุใดก็ได้	ถังบรรจุทำด้วยวัสดุใดก็ได้
การผลิตนำมาใช้ใหม่		ผลิตมาใช้ใหม่ได้โดยทำให้ร้อนที่ 150 - 200 °C เป็นเวลา 1 - 2 ชั่วโมง	ผลิตมาใช้ใหม่ได้โดยการทำให้อุ่นที่ 200 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หรือสั้นกว่า	ผลิตมาใช้ใหม่ได้โดยทำให้ร้อนที่ 200 - 250 °C
อายุ		กึ่งถาวร	กึ่งถาวร แต่จะถูกทำลายเมื่อผสมกับน้ำในรูปของเหลว	กึ่งถาวร

ที่มา : ไพบูลย์ และเฮอิโซ (2538:130)

2.7 ซิลิกาเจล

จากที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.6 วัสดุสารดูดซับความชื้นซิลิกาเจล (Silica gel) ที่เลือกใช้ในเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบด ดังนั้นจึงจะกล่าวถึงคุณสมบัติต่างๆ ของ ซิลิกาเจล (Silica gel) ซึ่งสารสังเคราะห์ที่สกัดจากทรายขาวผสมกรดกำมะถัน มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide) มีลักษณะเป็นเม็ดกลม โดยทั่วไป ซิลิกาเจล จะมีลักษณะเป็นโพรง มีรูพรุน ทำให้มีพื้นผิวที่ใช้ในการดูดความชื้นเป็นจำนวนมากประมาณ 800 ตารางเมตรต่อน้ำหนัก 1 กรัม หรือประมาณ 40 % ของน้ำหนักตัวเอง มีประสิทธิภาพสูงสุดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส หากอุณหภูมิสูงกว่านี้ ประสิทธิภาพในการดูดความชื้นจะลดลงเรื่อย ๆ และมีโอกาสที่จะคายความชื้นออกจากตัวเอง ซึ่งสามารถแบ่งได้ 4 ชนิด ดังนี้ (Chindaruksa, 2000)

2.7.1. ชนิดเม็ดใสหรือเม็ดสีขาว (White silica gel) มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นประมาณ 35 - 40 % ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแต่ละเม็ดประมาณ 2 - 5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

2.7.2. ชนิดเม็ดสีน้ำเงิน (Blue silica gel) มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นเหมือนกับเม็ดใสทุกประการ เพียงแต่มีการเพิ่มสารชนิดพิเศษเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดปริมาณความชื้น

ที่กักเก็บไว้ ทำให้ผู้ใช้รู้ว่ามีการเก็บความชื้นไว้ในปริมาณเท่าไร โดยจะแสดงเป็นสีน้ำเงินและสีชมพู หากเม็ดที่แสดงเป็นสีน้ำเงิน หมายความว่า สารดูดความชื้นนั้นยังไม่ได้ใช้งานหรือแสดงว่ายังสามารถใช้งานได้ ส่วนเม็ดที่เป็นสีชมพูหรือสีม่วงอ่อน แสดงว่าหมดอายุในการใช้งาน ควรเปลี่ยนสารดูดความชื้นใหม่ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

2.7.3. ชนิดเม็ดสีส้ม (Orange silica gel) มีคุณสมบัติเหมือนกับเม็ดสีน้ำเงินทุกประการ การทำงานของเม็ดสีส้ม คือ จะเปลี่ยนจากสีส้มไปเป็นสีเขียวอ่อน ซึ่งซิลิกาเจลชนิดนี้ยังได้รับความนิยมในเมืองไทย เนื่องจากมีราคาค่อนข้างสูง

2.7.4. ทราย (Silica sand) มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นเหมือนกับเม็ดใสทุกประการ ซึ่งจะแตกต่างกันที่ขนาดของเม็ดสารดูดความชื้น โดยสารดูดความชื้นชนิดเม็ดทรายมีขนาดเล็กกว่า ชนิดเม็ดใสจะมีขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร

2.8 เทคโนโลยีเครื่องลดความชื้นของอากาศที่ใช้อบแห้ง

เครื่องลดความชื้นจะถูกแบ่งตามชนิดของสารดูดซับความชื้นที่นิยมใช้งานในปัจจุบันมี 2 แบบ ได้แก่ สารดูดซับความชื้นชนิดแข็งและสารดูดซับความชื้นชนิดเหลว ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ (Misha et al., 2012)

2.8.1 เครื่องลดความชื้นที่ใช้สารดูดซับความชื้นชนิดของแข็ง

ระบบลดความชื้นที่ใช้สารดูดซับความชื้นชนิดของแข็งจะมีหลักการทำงานโดยเริ่มจากการป้อนอากาศเข้าให้สัมผัสกับตัวดูดซับความชื้นชนิดของแข็ง (Solid Desiccant) ซึ่งพื้นผิวมีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งทำหน้าที่ในการดูดซับความชื้นในอากาศไว้ในรูพรุนนี้ สารดูดความชื้นที่นิยมใช้กันทั่วไปในปัจจุบันได้แก่ ซิลิกาเจล ซิลเกต (Silica Gel) แอคทีเวทอลูมิน่า (Activated Alumina), and ซีโอไลต์สังเคราะห์ (Synthetic Zeolite), ลิเทียมคลอไรด์ (Lithium Chloride), ไททาเนียมซิลิเกต (Titanium Silicate) และ พอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic Polymers) และสามารถแบ่งเป็นแบบ ดังนี้

แบบเบดนิ่ง (Fixed Bed type) หมายถึงการนำสารดูดซับความชื้นบรรจุภาชนะแล้วให้อากาศที่มีความชื้นสูงที่ต้องการลดความชื้นอากาศลงโดยไม่มีการเคลื่อนที่ของถาดหรือสารดูดซับความชื้นแต่อย่างใดและเมื่อสารดูดซับความชื้นมีการอิ่มตัวจึงนำมาฟื้นฟูสภาพก่อนที่จะมีการนำไปใช้ใหม่อีกครั้ง อาทิเช่น เครื่องลดความชื้นอากาศแบบถาดเพื่อลดความชื้นอากาศแวดล้อมก่อนเป่าเพื่อลดอุณหภูมิและรักษาคุณภาพข้าวเปลือกในที่เก็บโดยมีการศึกษาและพัฒนาด้านการวิจัยอย่างต่อเนื่องดังนี้

อดิพงษ์ นันทพันธ์ และคณะ (2005 : บทคัดย่อ) ได้ศึกษาการทดสอบสมรรถนะของชุดสารดูดความชื้นแบบถาดสำหรับกระบวนการอบแห้งลำไยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างชุดสารดูดความชื้น สำหรับใช้ในกระบวนการลดความชื้นของอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้ของเตาอบลำไย โดยชุดสารดูดความชื้นมีลักษณะเป็นชั้นบรรจุซิลิกาเจลชั้นละ 3 กิโลกรัม ขนาด $49.5 \times 49.5 \times 2.5$ เซนติเมตร จำนวน 10 ชั้นวางซ้อนกันในแนวดิ่ง โดยมีระยะห่างระหว่างชั้น 2.5 เซนติเมตร ทดสอบสมรรถนะของชุดสารดูดความชื้นทั้งในกรณีของกระบวนการดูดความชื้น และกระบวนการอบไล่ความชื้น โดยนำชุดสารดูดความชื้นไปทดสอบสมรรถนะในอุโมงค์ลม และได้ศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อุณหภูมิของอากาศด้านเข้าชุดสารดูดความชื้นและเวลาที่ใช้ทดสอบ โดยพบว่าอัตราการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นจะเพิ่มสูงขึ้น ในกรณีที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม อัตราการดูดความชื้นดังกล่าวจะลดลงในกรณีที่อุณหภูมิด้านเข้าชุดสารดูดความชื้นของอากาศเพิ่มขึ้น ในกรณีของการอบไล่ความชื้นออกจากชุดสารดูดความชื้นพบว่าปริมาณความชื้นที่ถูกขับออกมาจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศและอุณหภูมิด้านเข้าของอากาศเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณความชื้นที่ถูกขับออกมาจะลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้ยังได้พัฒนาโมเดลที่ใช้คำนวณปริมาณมวลของน้ำที่ถูกดูดหรือขับออกจากสารดูดความชื้นตลอดจนอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งโมเดลที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้เป็นอย่างดี

Hung และคณะ (2009) การศึกษาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้สารดูดซับความชื้นควบคุมความชื้นสัมพัทธ์อากาศเพื่อใช้เป่าที่เก็บข้าวแบบไซโล ในเขตที่มีอากาศร้อนชื้น โดยใช้สารดูดซับความชื้นชนิดแข็ง ซิลิกาเจล บรรจุในถาดแล้วให้อากาศวิ่งผ่านสารดูดซับความชื้นเมื่อสารดูดซับความชื้นดูดซับจนมีการอิ่มตัวจึงเปลี่ยนถาดและนำสารดูดซับความชื้นไปไล่ความชื้นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง สามารถควบคุมความชื้นในระหว่างการเก็บข้าวเปลือกและจะช่วยลดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศในระบบเติมอากาศเก็บเมล็ดข้าวภายใต้เงื่อนไขสภาวะอากาศแวดล้อมต่างๆได้

Hunga และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การนำสารดูดซับความชื้นอากาศสำหรับเป่าเติมอากาศระบายความร้อนเข้าไซโลเก็บข้าวเปลือกซึ่งแบบจำลองจะใช้สารดูดซับความชื้นบรรจุถาดจำนวน 4-6 ถาด/3.5 kg ก่อนเป่าอากาศผ่านเข้าไประบายไซโลเก็บข้าว ซึ่งจากผลการศึกษา พบว่า การประยุกต์ใช้สารลดความชื้นอากาศในการเป่าอากาศระบายความร้อนให้กับไซโลเก็บข้าวมีความเป็นไปได้ที่จะควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศก่อนป้อนเข้าไซโล

ประทีป โควันฤมิตร (2541) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะการควบคุมความชื้นโดยซิลิกาเจลสำหรับระบบการอบแห้งโดยนำซิลิกาเจลจำนวน 18 กิโลกรัม ใส่ในภาชนะของเครื่องอบแห้งแบบตู้ (ภาชนะที่มีขนาด 0.60 x 1.00 ตารางเมตร) แล้วอบแห้งผ้าสำลีที่มีความชื้นร้อยละ 200 มาตรฐานแห้ง จนมีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 50 มาตรฐานแห้ง การควบคุมความชื้นของอากาศโดยซิลิกาเจลสำหรับระบบการอบแห้งมีความเป็นไปได้ทางเทคนิค เพราะว่าเมื่อมีการนำ ซิลิกาเจลมาควบคุมความชื้นในการอบแห้งจะทำให้สมรรถนะ ในการอบแห้งสูงขึ้น และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่ำลง รวมทั้งในการสร้างส่วนควบคุมความชื้นของ อากาศไม่ยุ่งยากและใช้ต้นทุนไม่สูงมาก

2.8.2 วงล้อดูดซับความชื้น (Desiccant Wheel) คือ วงล้อที่บรรจุสารดูดซับความชื้น (Silica gel) เพื่อดูดซับความชื้นออกจากอากาศ โดยมีหลักการทำงานอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนดูดซับความชื้นและส่วนฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น (Regeneration) ซึ่งวงล้อดูดซับความชื้นจะดูดอากาศเข้าไปในเครื่องแล้วให้ซิลิกาเจลดูดซับความชื้นของอากาศไว้ แล้วให้อากาศร้อนเป่าเพื่อฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น (Silica gel) ที่ดูดซับความชื้นไว้ แล้วหมุนเวียน การดูดซับความชื้นของอากาศอย่างต่อเนื่อง โดยวงล้อดูดซับความชื้นจะทำงานได้ประสิทธิภาพสูงในอากาศที่มีอุณหภูมิไม่สูง และในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงแต่ต้องการระดับความชื้นอากาศอบแห้งต่ำมาก ซึ่งวงล้อดูดซับความชื้นมีส่วนประกอบหลัก ๆ ดังต่อไปนี้ (อาทิตย์ เพ็ญงาม, 2553)

2.8.2.1 วงล้อดูดซับความชื้น (Desiccant Wheel) คือ วงล้อที่บรรจุสารดูดซับความชื้น (Silica gel) ซึ่งมีหน้าที่ในการดูดซับความชื้นในอากาศที่ดูดผ่านวงล้อดูดซับความชื้น

2.8.2.2 มอเตอร์ มีหน้าที่ในการหมุนวงล้อเพื่อให้หมุน ทำให้สามารถดูดซับความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.8.2.3 แหล่งกำเนิดความร้อน คือ อุปกรณ์ในการเพิ่มความร้อนให้กับอากาศสำหรับนำไปฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น เพื่อนำสารดูดซับความชื้นนำกลับมาใช้ใหม่

2.8.2.4 พัดลม (Blower) คือ พัดลมที่ใช้ดูดหรือเป่าอากาศเข้าสู่หรือดูดจากวงล้อดูดซับความชื้น

ซึ่งมีศึกษาแนวทางการนำวงล้อดูดซับความชื้นมาใช้ในระบบอบแห้งอย่างมากมาย โดยที่อาทิตย์ เพ็ญงาม และคณะ (2555) ได้ทำการศึกษาการลดระยะเวลาในการอบแห้งไม้โดยใช้อากาศอบแห้งที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำโดยใช้เครื่องลดความชื้นแบบวงล้อดูดซับความชื้นสำหรับอบแห้งไม้กะบกพบว่าสามารถลดระยะเวลาได้ถึง 50 % และยังสามารถรักษาคุณภาพทางกายภาพ การปริ การแตก การบิดงอ และปริมาณความชื้นของไม้กะบกได้ดี

ภานูมาตย์ พัฒโท (2553) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีและค่าน้ำอิสระของข้าวเคลือบกระเจี๊ยบแดงภายใต้การอบแห้ง ด้วยอากาศความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ที่อุณหภูมิ 40-80°C ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 23-25% และความเร็วของอากาศ 0.1-0.5 m/s ตามลำดับ โดยใช้เครื่องลด

ความชื้นอากาศแบบวงล้อดูดซับความชื้น เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวเคลือบกระเจี๊ยบแดง ระหว่างการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนทั่วไป พบว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำแบบถาดจะดีกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนทั่วไปในสีของข้าวเคลือบกระเจี๊ยบแดง

สันติ แนวทอง (2553) ได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้วงล้อดูดซับความชื้นอากาศ ร่วมกับเครื่องอบแห้งเพื่อลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงแก๊สและรักษาคุณภาพของชาโมโรเฮยะ (ชา ปอกระเจา) โดยใช้เครื่องลดความชื้นอากาศแบบวงล้อดูดซับความชื้นอากาศอบแห้ง และศึกษาคุณภาพ ปริมาณความชื้น สี ค่าน้ำอิสระปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ ของใบชาโมโรเฮยะ พบว่าการอบแห้งด้วยอากาศความชื้นสัมพัทธ์ต่ำที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และที่ความเร็วของอากาศ 0.5 เมตรต่อวินาที มีการลดลงของปริมาณความชื้นได้ดี ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น คิดเป็น 50 % ของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนธรรมดา มีการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยกว่าการอบแห้งที่เงื่อนไขอื่น เมื่อทำการวัดสารต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH พบว่า มีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งไม่แตกต่างกัน ส่วนวิธี FRAP พบว่า มีค่าสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ $564.6 (\mu\text{mol/L})/\text{g}_{\text{sample}}$ ส่วนปริมาณสารประกอบฟีนอลิก มีค่าเท่ากับ 21.8 mg GAE/1g sample และเมื่อทำการวิเคราะห์การใช้พลังงานในการอบแห้งใบชาโมโรเฮยะ พบว่า การอบแห้งด้วยอากาศความชื้นสัมพัทธ์ต่ำที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และที่ความเร็วของอากาศ 0.5 เมตรต่อวินาที มีการใช้พลังงานความร้อน เท่ากับ 8.4 MJ/g และพลังงานไฟฟ้า เท่ากับ 2.6 kWh/g ซึ่งใช้พลังงานน้อยกว่าการอบแห้งที่เงื่อนไขอื่น

Thanid Madhiyanon et al. (2007) ได้นำระบบดูดซับความชื้นแบบวงล้อร่วมกับระบบอบแห้งด้วยอากาศร้อนสำหรับอบแห้งมะพร้าวขึ้น โดยใช้สารดูดซับความชื้น ซิลิกาเจลเป็นสารดูดซับความชื้น ประสิทธิภาพการอบแห้งมะพร้าวขึ้น พบว่า ระบบอบแห้งโดยอากาศอบแห้งที่มีการดัดแปลงคุณสมบัติอากาศให้มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าปกติ สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ถึง 25 % และมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่า ระบบอบแห้งที่ใช้อากาศร้อนเพียงอย่างเดียว อย่างมีนัยสำคัญ และสามารถรักษาสี มะพร้าวขึ้นหลังอบแห้งได้ดี แต่ระบบอบแห้งที่มีการดัดแปลงคุณสมบัติอากาศอบแห้งโดยใช้วงล้อดูดซับความชื้นอากาศ มีการใช้พลังงานที่สูง เนื่องจากจะต้องใช้อากาศร้อนในการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น (Regeneration) หรือซิลิกาเจล

Kosuke Nagaya et al. (2006) ได้ศึกษาการควบคุมการไหลของอากาศและอุณหภูมิที่ระดับอุณหภูมิต่ำ โดยระบบประกอบไปด้วย วงล้อดูดซับความชื้นอากาศ พัดลม ขดขวดไฟฟ้า ที่ใช้กำเนิดความร้อน และตัวควบคุมการไหลเวียนของอากาศ อุณหภูมิอบแห้ง 49 C และปรับการไหลของอากาศให้มีความสม่ำเสมอภายในห้องอบแห้ง หลังการอบแห้งจะทดสอบคุณภาพทางด้านกายภาพและเคมี จากผลการทดลองพบว่า สีของกะหล่ำปี มะเขือ แครอท สมุนไพร และผัก

ชม มีสีใกล้เคียงกับสีสดก่อนอบแห้ง ผักขมหลังอบแห้งด้วยระบบดังกล่าว มีปริมาณวิตามิน C สูงและมีคุณภาพดี แตกต่างกับผักขมสดเล็กน้อย โดยที่ระบบอบแห้งที่มีการใช้อุณหภูมิต่ำและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ในระบบนี้จะสามารถลดระยะเวลาอบแห้งได้ถึง 12 เท่าเมื่อเทียบกับการอบแห้งโดยใช้แสงอาทิตย์และสามารถลดระยะเวลาอบแห้งได้ถึง 6 เท่าของการอบแห้งด้วยที่ใช้อากาศที่ลดความชื้นทั่วไป

2.8.3 แบบประยุกต์ (Modified Types) คือการระบบดูดซับประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่างๆ สามารถใช้ในกระบวนการผลิตที่ต้องการควบคุมสถานะอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำ อาทิเช่น ระบบปรับอากาศ อุตสาหกรรมอาหาร โกดังเก็บสินค้า เป็นต้น (Napoleon and Kunio, 2011)

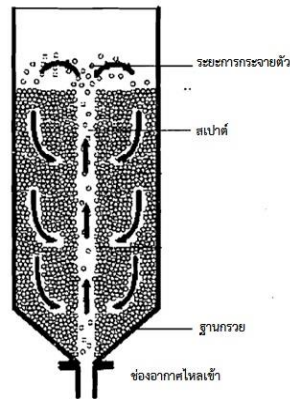
2.8.4 เครื่องลดความชื้นโดยใช้สารดูดซับความชื้นชนิดของเหลว เครื่องลดความชื้นด้วยสารดูดซับชนิดของเหลว สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ กระบวนการดูดซับความชื้นและกระบวนการเตรียมสารดูดซับความชื้นกลับมาใช้ใหม่ โดยมีขั้นตอนป้อนสารดูดซับความชื้นและสเปรย์สารบริเวณด้านบนของหอให้สวนทางกลับการไหลของอากาศป้อนเข้าทางด้านล่างของหอ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพพื้นที่สัมผัสการดูดซับความชื้นในอากาศ จากนั้นสารดูดความชื้นที่เจือจางแล้ว จะถูกเก็บรวบรวมไว้ในถังด้านล่างของหอดูดซับ แล้วป้อนสารที่เจือจางเข้าสู่กระบวนการเตรียมสารดูดซับความชื้นกลับมาใช้ใหม่ (Desiccant Regeneration) โดยใช้ความร้อนทิ้งจากระบบ เช่น ความร้อนจากไอเสีย หรือความร้อนทิ้งจากไอน้ำ ผ่านขดลวดต้านทาน (Heat Electrical) ควบคุมอุณหภูมิที่ 55°C เพื่อต้มสารให้เข้มข้นขึ้นและสามารถนำกลับไปใช้ในกระบวนการลดความชื้นได้ (ที่มา: <http://www.enconlab.com/wasteheat/index.php/menu-technology-wasteheat/7-atc-4technology-wasteheat>)

2.9 เครื่องลดความชื้นอากาศอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบตที่จะใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

2.9.1 สเปาเต็ดเบต (สมศักดิ์, 2528)

สเปาเต็ดเบต (Spouted-bed) เป็นเทคนิคที่พัฒนามาจากฟลูอิดเบตโดยนำไปใช้กับงานที่ขนาดของอนุภาคค่อนข้างใหญ่และหยาบ เนื่องจากเทคนิคฟลูอิดเบตเมื่อนำไปใช้งานกับอนุภาคเหล่านี้จะให้ผลได้ไม่ดีนัก จากภาพประกอบ 2.5 คือสเปาเต็ดเบตจะมีลักษณะการเคลื่อนที่ของเม็ดอนุภาคในรูปแบบของการหมุนวน (cycle) ขณะที่ฟลูอิดเบตจะมีการเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ สเปาเต็ดเบตเหมาะที่จะใช้อบแห้งวัสดุที่ไวต่อความร้อน เช่น ถั่วเหลือง ข้าว และข้าวโพด เนื่องจากเวลาที่อยู่ในช่องสเปาสั้น ความดันลดระหว่างการเกิดสเปาจะต่ำกว่า $1/3$ เท่าเมื่อเทียบกับฟลูอิดเบต แต่ความดันลดที่ช่วงเริ่มต้นก่อนการเกิดสเปาจะค่าสูงกว่า อุณหภูมิของอนุภาคที่

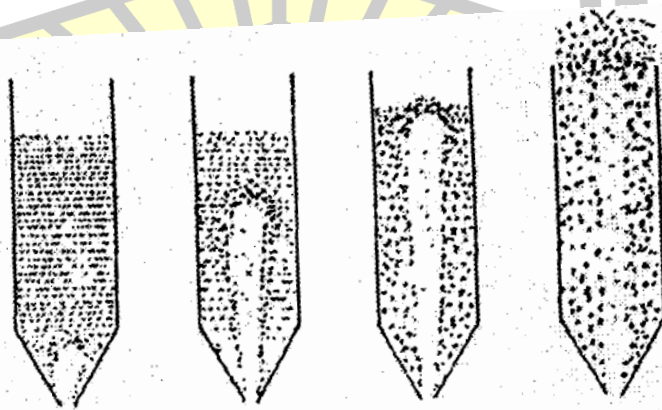
เพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิทางตอนล่างของสเปาจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากมีอัตราการหมุนเวียนของอนุภาคสูง การควบคุมอัตราการแพร่ความร้อนในการอบแห้งจะเกิดในช่วงวงแหวนรอบสเปา (annulus) ในขณะที่วัสดุเคลื่อนที่ลงความร้อนจะถูกปล่อยออกมาเพื่อการอบแห้งทำให้อุณหภูมิของอนุภาคลดลง



ภาพประกอบ 2.5 ลักษณะของสเปาเต็ดเบด

ที่มา: <http://www.mse.berkeley.edu/Groups/Evans/Asit/spout.gif>

จากภาพประกอบ 2.6 ระบบของ สเปาเต็ดเบด เราจะเรียกส่วนที่เป็นแกนกลาง ซึ่งเป็นโซนที่มีวัสดุน้อยเรียกว่า spout บริเวณนี้วัสดุจะเคลื่อนที่ขึ้นตามกระแสของของไหล ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สร้อนหรืออากาศ และอีกโซนหนึ่งที่เป็นเบดหนาแน่น บริเวณนี้จะอยู่รอบผนังของห้องอบ วัสดุจะเคลื่อนที่ตกลงมาด้านล่างของเบดที่มีลักษณะเป็นกรวย เพื่อให้วัสดุไหลเข้าหากระแสของของไหลได้ง่ายซึ่งมีลักษณะคล้ายวงแหวน และส่วนที่อยู่ด้านบนเหนือระดับของวงแหวนนั้นเรียกว่า fountain



ภาพประกอบ 2.6 ลำดับการเกิดสเปาเต็ดเบด

ที่มา: <http://www.mse.berkeley.edu/Groups/Evans/Asit/spout.gif>

เมื่อเราพิจารณาภาชนะในกรณีที่อยู่ภายใต้ภาวะเปิดและความสัมพันธ์ของวัสดุของแข็งที่หยาบๆ จะเห็นได้ว่าของไหลจะไหลเข้าไปในแนวตั้ง ผ่านเส้นผ่านศูนย์กลางที่เปิดเพียงเล็กน้อยที่ฐานของภาชนะ ถ้าของไหลมีอัตราการไหลมากพอจะมีผลให้ความเร็วของ spout สูง นำพาวัสดุให้เคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว เกิดเป็นโพรงที่แกนกลางของเบด วัสดุที่เคลื่อนที่ถึงด้านบนของเบดแล้วจะตกกลับลงมาระหว่างโพรงแกนกลางกับผนังของห้องอบ

สเปาเต็ดเบดมีลักษณะเฉพาะในการอบแห้งที่ไวต่อความร้อน เช่น ผลผลิตทางการเกษตรจำพวก ข้าวสาลี ข้าว และถั่ว เนื่องจากมีช่วงเวลาที่อยู่ในสเปา (spout) สั้น นอกจากนั้นยังสามารถใช้ได้ดีกับการอบแห้งพวกที่มีลักษณะคล้ายแป้งเปียกและพวกที่มีส่วนผสมระหว่างของเหลวกับของแข็งอีกด้วย และสามารถควบคุมการผสมกันของวัสดุได้เป็นอย่างดี ทำให้สามารถใช้อุณหภูมิอบแห้งได้สูงกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด ค่าความดันที่ลดต่ำลงระหว่างการปฏิบัติงานของเครื่อง สเปาเต็ดเบดมีค่าต่ำกว่าประมาณ 1/3 เท่าของเครื่องฟลูอิดไรซ์เบดเนื่องจากผนังของห้องอบแห้ง จะช่วยพยุงน้ำหนักของวัสดุไว้ อย่างไรก็ตามค่า ความดันลดลง (pressure drop) ในช่วงเริ่มต้นการเกิดสเปาเต็ดเบดจะมีค่าสูงกว่า ซึ่งต้องนำไปใช้ในการพิจารณาประกอบกับการออกแบบพัดลมเป่าอากาศ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของวัสดุจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและมวลสารเป็นหลัก ที่บริเวณส่วนล่างของ spout อุณหภูมิของวัสดุจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเนื่องจากมีอัตราการหมุนเวียนของวัสดุสูง ส่วนใหญ่จะควบคุมอัตราการแพร่ของความชื้นในการอบแห้งจะเกิดขึ้นในส่วนของ annulus ในขณะที่วัสดุเคลื่อนที่ลงความร้อนถูกปล่อยออกมาเพื่อการอบแห้ง ทำให้อุณหภูมิของวัสดุลดต่ำลง

วัสดุใน annulus จะมีการเคลื่อนที่แบบลูกสูบ (Plug flow) และมีการกระจายตัวของเวลาที่อยู่ในเบดได้ดีต่อมาพบว่า สเปาเต็ดเบดแบบสองมิติ (2-dimensional spouted bed) จะให้ค่าการกระจายของเวลาคงที่ (unique) มากกว่าสเปาเต็ดเบดแบบอื่น Mujumdar and Raghavan ได้กล่าวเสนอแนวคิดถึงลักษณะเฉพาะที่เป็นข้อจำกัดของ conventional spouted bed (CSB) ไว้ดังนี้

การขยายขนาดทำได้ยาก

มีข้อจำกัดสำหรับช่องว่างที่พื้นของเครื่อง

ความดันลดและอากาศที่ใช้สำหรับการอบแห้งมากเกินไป

ต้องการอัตราการถ่ายเทความร้อน/อัตราการถ่ายเทมวลสารที่เพิ่มขึ้น

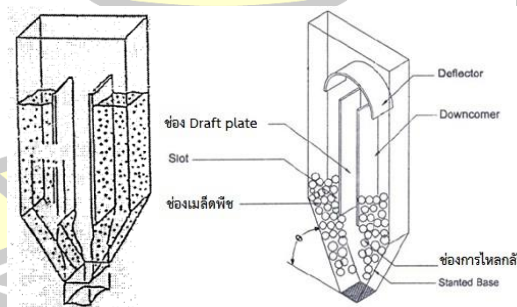
การเพิ่มประสิทธิภาพ

จากข้อจำกัดนี้จึงมีการเสนอแนวคิดของ 2-dimension spouted bed (TDSB) ขึ้นมาหลังจากปี ค.ศ. 1970 ซึ่งมีการพัฒนาเครื่องอบแห้งโดยใช้เทคนิคสเปาเต็ดเบดเพื่อประยุกต์ใช้งาน ซึ่ง สุชาติ และ คณะ (2549 : บทคัดย่อ) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบสเปาเต็ด

เบดแบบสองมิติ (TDSB) ระดับห้องปฏิบัติการ และศึกษาอัตราการอบแห้งข้าวเปลือก โดยพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่ออัตราการอบแห้งข้าวเปลือก พบว่า อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิอากาศที่ใช้อบแห้งเพิ่มขึ้น หรือเมื่อปริมาณข้าวเปลือกภายในเบดมีค่าลดลง ขณะที่ความกว้างของช่องสเปา (spout) ไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง แต่ระดับความสูงของช่องไหลลงสเปา (spout) ของข้าวเปลือก (entrance height) มีผลโดยตรงต่อปริมาณการใช้พลังงานของพัดลม โดยค่า entrance height ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 10 เซนติเมตร เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าต่ำสุด อัตราการไหลของอากาศอบแห้งต่ำสุดที่ทำให้เกิดสเปา (spout) ได้เท่ากับ 0.067 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เพื่อให้สามารถควบคุมสภาวะอากาศได้ดีจึงจำเป็นต้องมีการใช้เครื่องควบคุมความชื้นอากาศ เพื่อใช้ควบคุมสภาวะให้เป็นไปตามที่ต้องการและเหมาะสม

2.9.2 สเปาเต็ดเบดแบบสองมิติ

สเปาเต็ดเบดแบบสองมิติ(2-Dimension Spouted Bed) เป็นการปรับปรุงมาจากสเปาเต็ดเบดแบบเดิม ที่มีรูปร่างของห้องอบเป็นรูปทรงกระบอกทรงกลม (Cylindrical-conical, CSB) มาเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม (Rectangular chamber) จากนั้นได้มีการปรับปรุงรูปร่างของเบดและความสม่ำเสมอของการไหลของวัสดุกับของไหล โดยใช้ draft plate ใส่ไว้ที่แกนกลางของสเปาเต็ดเบดเพื่อแยกส่วนที่อากาศไหล นำพาวัสดุออกจากส่วนที่เป็นเบดนี้รองรับวัสดุไหลตกลงมา เพื่อป้องกันการเกิด back-mixing ทำให้การหมุนเวียนวัสดุคงที่และยังช่วยลดความดันลดลง (pressure drop) ด้วย สเปาเต็ดเบดแบบสองมิตินี้มีรูปร่างดังภาพประกอบ 2.7



ภาพประกอบ 2.6 สเปาเต็ดเบดแบบสองมิติ (TDSB)

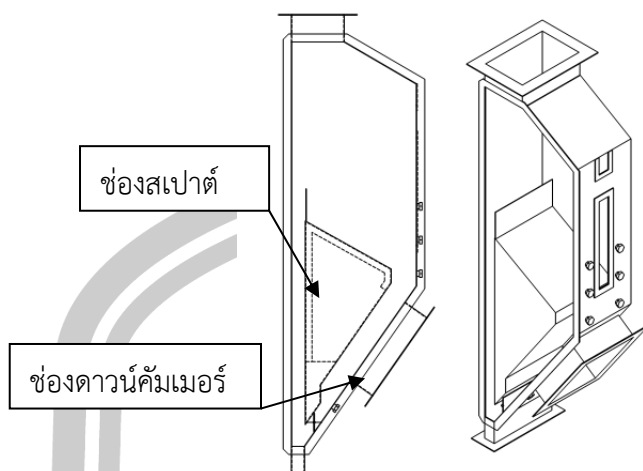
ที่มา : Kalwar และคณะ (1993)

ซึ่งเป็นห้องอบที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมตั้งฉาก มีฐานเอียงความยาวของห้องอบแห้งมีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับความกว้าง สิ่งที่ทำให้ สเปาเต็ดเบดเป็นที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งคือการใส่ดราฟเพลต (draft plate) ก๊าซจะไหลจากส่วนล่างไปด้านบนที่มีความสูงที่แน่นอน ดังนั้นช่องแผ่นกั้น

ระหว่างดราฟเพลต (draft plate) และผนังยังเป็นตัวบังคับให้วัสดุไหลเข้าไปในส่วนของกระแสอากาศด้วย รูปแบบการไหลของอากาศและวัสดุใน TDSB นั้น วัสดุได้สัมผัสกับอากาศที่ไหลออกมาใน ส่วนของการขนส่งด้วยอากาศ ระหว่างดราฟเพลต (draft plate) และการไหลแบบลูกสูบ ของวัสดุใน annulus เนื่องจากอุณหภูมิอากาศในส่วนทางเข้าและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าสูงเป็น ผลให้วัสดุร้อนอย่างรวดเร็วและระเหยความชื้นจากบริเวณใกล้กับผิววัสดุ ใน annulus วัสดุจะแยก ออกจากกระแสของการไหลตกลงมาที่เบดสัมผัสกับความเร็วและอุณหภูมิที่ต่ำของกระแสอากาศสร้าง เงื่อนไขของการถ่ายเทความร้อนอย่างอ่อนๆ นอกจากนี้ใน draft channel ดังนั้น การถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทมวลใน TDSB ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของระยะเวลาการไหลของวัสดุในดราฟเพลต (draft plate) กับดาวน์คัมเมอร์ (downcomer) การควบคุมปัจจัยต่างๆ ขึ้นอยู่กับสถานะเงื่อนไขการทำงานและรูปทรงทางเรขาคณิตของระบบ

กษมา (2543) ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวโพดโดยเทคนิคสเปาเต็ดเบดสองมิติ ทำการอบแห้งข้าวโพดที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 38 % d.b. ใช้อุณหภูมิอากาศในการอบแห้งอยู่ที่ 130 140 และ 150 C ปริมาณข้าวโพด (hold-up) 20 25 และ 30 kg พบว่าตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อ อัตราความชื้นคือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง และปริมาณข้าวโพดในห้องอบแห้ง (hold-up) และจาก การทำนายผลการทดลองการอบแห้งพบว่า ใช้สมการของ Lewis มีความเหมาะสมที่สุด ตัวแปรที่มี อิทธิพลต่อคุณภาพของเมล็ดข้าวโพดหลังการอบแห้ง ในด้านการ ร้าว การแตก และสีของเมล็ด ข้าวโพด คือ ความชื้นสุดท้ายของเมล็ดข้าวโพดซึ่งไม่ควรต่ำกว่า 22 % d.b. เพราะจะทำให้เกิดความ แตกร้าวมากขึ้น

เครื่องลดความชื้นอากาศอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบดที่จะใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ได้มีการ พัฒนาจากเครื่องอบแห้งสเปาเต็ดเบดที่มีแผ่น ดาวน์คัมเมอร์สองด้าน ดังแสดงในภาพประกอบ 2.8 ซึ่งได้อาศัยหลักการลดความชื้นอากาศโดยใช้สารดูดซับชนิดแข็งจากการศึกษาข้อมูลพบว่าเทคโนโลยี การลดความชื้นอากาศหลายรูปแบบที่ผ่านมาที่ได้รับการนิยมนำมาใช้กันคือ วงล้อดูดความชื้น (Desiccant wheel หรือ Absorption wheel) ซึ่งภายในวงล้อดังกล่าวจะแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนดูดซับ ความชื้นอากาศ และส่วนฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น (Regeneration) โดยมีการนำมาประยุกต์ใช้ งานอย่างแพร่หลายทั้งระบบปรับอากาศและระบบอบแห้ง



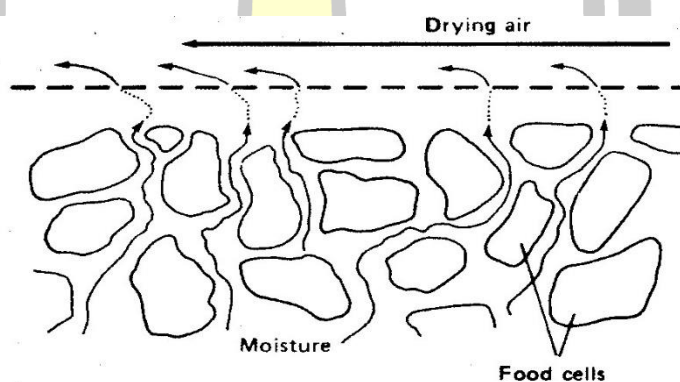
ภาพประกอบ 2.7 ห้องดูดซับความชื้น (Absorption) และฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น (Regeneration) แบบสเปาต์เต็ดเบด

แต่อย่างไรก็ตามเครื่องลดความชื้นอากาศแบบวงล้อดูดซับความชื้นดังกล่าวก็พบว่าเกิดปัญหาอากาศแวดล้อมที่ไหลเข้าสู่ส่วนดูดซับความชื้นอากาศ (Absorption) และอากาศที่ไหลเข้าสู่ส่วนฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น (Regeneration) เกิดการรั่วเข้าหากัน ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นของสารดูดซับความชื้นในวงล้อต่ำ ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ทางคณะผู้วิจัยจึงได้แก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการนำเทคนิคสเปาต์เบดแบบสเปาต์เต็ดเบดที่มีดาว์นคัมเมอร์ด้านเดียว (นเรศ มีโส และคณะ ,2556) มาประยุกต์ใช้สำหรับออกแบบเครื่องลดความชื้นอากาศโดยอากาศส่วนของช่องสเปาต์ (Spout) เป็นส่วนฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น (Regeneration) และใช้ช่องดาว์นคัมเมอร์ (Downcomer) เป็นช่องดูดซับความชื้นอากาศ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.8 เพื่อแก้ไขปัญหารั่วเข้าหากันระหว่างอากาศแวดล้อมที่ไหลผ่านส่วนลดความชื้นและอากาศที่ไหลผ่านส่วนคายความชื้น ซึ่งหลักการทำงานของสเปาต์เต็ดเบดนั้นจะอาศัยอากาศร้อนที่ความเร็วสูงปล่อยให้ไหลผ่านกึ่งกลางของชั้นของเม็ดสารดูดซับความชื้น (Desiccant Bed) ทำให้เม็ดสารดูดซับความชื้นลอยตัวสูงขึ้นเป็นลำเหนือชั้นของเม็ดสารดูดซับความชื้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้เรียกว่า สเปาต์ (Spout) และเมื่อเม็ดสารดูดซับความชื้นลอยตัวสูงขึ้นเหนือชั้นของเม็ดสารดูดซับความชื้นในระดับหนึ่ง ความเร็วของเม็ดสารดูดซับความชื้นจะลดลงจนถึงค่าหนึ่ง เม็ดสารดูดซับความชื้นจะเริ่มแยกตัวออกจากกระแสน้ำร้อน และตกลงบนชั้นของเม็ดสารดูดซับความชื้นที่อยู่รอบๆ ลำสเปาต์ในลักษณะคล้ายน้ำพุ (Fountain) ซึ่งบริเวณของชั้นเม็ดสารดูดซับความชื้นที่อยู่รอบๆ ข้างลำสเปาต์ดังกล่าวนี้จะเรียกว่า ดาว์นคัมเมอร์ (Downcomer) จากนั้นเม็ดสารดูดซับความชื้นจะเคลื่อนตัวลงด้านล่างของ

ดาว์นคัมเมอร์ และไหลไปสู่บริเวณสเปาต์อีกครั้ง โดยที่หลักการของเทคนิค-สเปาต์เต็ดเบตที่นำมาประยุกต์ใช้จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.10 ทฤษฎีการอบแห้ง

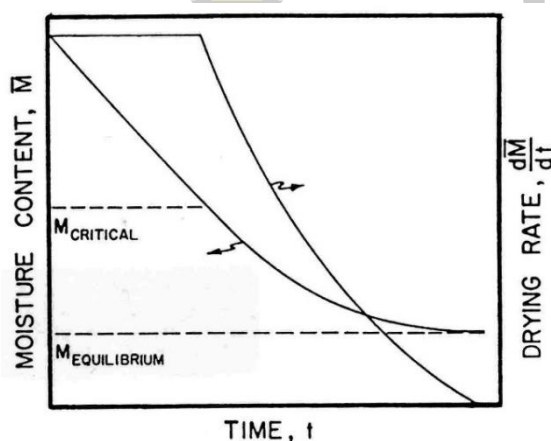
การอบแห้ง คือ กระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย จนกระทั่งมีค่าระดับความชื้นที่ได้สมดุลกับสิ่งแวดล้อม และข้อสำคัญที่สุดของการอบแห้ง คือ การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด และปริมาณความร้อนจะถ่ายเทมาน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ของความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัสดุและไอน้ำในอากาศ เพราะฉะนั้นถ้าปริมาณไอน้ำในอากาศมีน้อยจะมีการถ่ายเทน้ำออกจากวัสดุได้ดี ดังแสดงในภาพประกอบ 2.9 การอบแห้งจะทำให้สามารถที่จะเก็บหรือถนอมวัสดุไว้ได้นานขึ้น และยังสามารถลดปริมาตรและน้ำหนักของวัสดุ (เรียวโซ โทเอ. 2529: ไม่ปรากฏเลขหน้า)



ภาพประกอบ 2.8 การเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างการอบแห้ง
ที่มา: Fellows (1988)

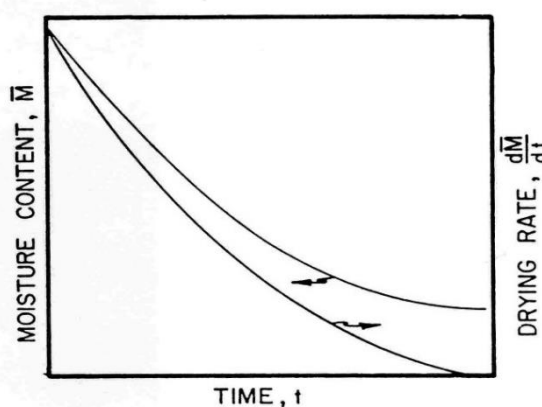
ในการอบแห้งวัสดุทั่ว ๆ ไปนั้น มักใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ความร้อนจะถ่ายเทจากกระแสอากาศไปยังผิววัสดุ ความร้อนส่วนใหญ่จะถูกใช้ไปกับการระเหยน้ำ ในขณะที่เดียวกันไอน้ำจะเคลื่อนที่จากบริเวณผิววัสดุมายังกระแสอากาศ ถ้าผิววัสดุมีปริมาณน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ด้วย ถ้าอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของกระแสอากาศมีค่าคงที่ เมื่อผิวของวัสดุมีปริมาณน้ำลดลงมากแล้ว อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัสดุย่อมเปลี่ยนแปลงไป โดยที่อุณหภูมิจะสูงขึ้นและความเข้มข้นจะลดลง ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการ

อบแห้งลดลงดังแสดงในภาพประกอบ 2.10 และภาพประกอบ 2.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นและอัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาภายใต้อุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วของกระแสอากาศที่ความชื้นที่อยู่ระหว่างช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เรียกว่า ความชื้นวิกฤติ วัสดุทางการเกษตรส่วนใหญ่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุน ซึ่งสามารถแบ่งการอบแห้งได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกในขณะที่ยังมีความชื้นสูงอยู่ การอบแห้งมักเป็นแบบอัตราการอบแห้งคงที่ เมื่อวัสดุมีความชื้นลดต่ำลง จนถึงความชื้นวิกฤติ น้ำจากภายในวัสดุจะเคลื่อนที่มายังผิววัสดุในรูปของของเหลว จะเกิดขึ้นในระยะแรกขณะที่วัสดุยังมีความชื้นสูงพอประมาณ เมื่อความชื้นลดต่ำลงมามากแล้ว น้ำอาจเคลื่อนที่ในรูปของไอน้ำ และโมเลกุลของน้ำที่เกาะภายในผนังของช่องว่างอาจมีความหนาเพียงสองสามชั้นของโมเลกุล



ภาพประกอบ 2.9 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และลดลง

ที่มา : Brooker et al. (1992)



ภาพประกอบ 2.10 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

ที่มา : Brooker et al. (1992)

ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างวัสดุและอากาศ เหมือนกับการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นขึ้นของกระเปาะของเทอร์โมมิเตอร์ ตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งคงที่ คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วอากาศ และในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤต การถ่ายเทความร้อนและมวลไม่ได้เกิดขึ้นที่ผิวดังแต่จะเกิดขึ้นภายในเนื้อของวัสดุด้วยการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุช้ากว่าการพาความชื้นจากผิวไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง อัตราการระเหยน้ำจะถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่โมเลกุลของน้ำในวัสดุ ในขณะที่อุณหภูมิของวัสดุจะสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก ซึ่งการอบแห้งที่อัตราการอบแห้งลดลงนั้นจะมีความสัมพันธ์กับอากาศแวดล้อมเนื่องจากความแตกต่างของความดันไออากาศแวดล้อม ซึ่งถ้าหากอากาศแวดล้อมมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำก็จะช่วยลดปริมาณความชื้นสมดุลของวัสดุลงด้วย และความแตกต่างของระดับความดันไออากาศที่แตกต่างจะทำให้มีการเคลื่อนที่ของมวลไอน้ำจากเนื้อวัสดุมาผิวและจากผิววัสดุไปยังอากาศจะมีอัตราเพิ่มขึ้นซึ่งจะช่วยให้สามารถลดความชื้นของวัสดุได้เร็วกว่าสภาวะอากาศปกติ ซึ่งความชื้นสมดุลของวัสดุจะมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์การอบแห้งและการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์และผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรถือว่าเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ

ความชื้นสมดุลของวัสดุที่จะกล่าวนี้มีความสำคัญต่อการศึกษากระบวนการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศร้อนที่สภาวะคงที่ (เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่) ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดๆหนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ความชื้นของวัสดุมีความดันไอเท่ากับความดันไอที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็จะเท่ากับอุณหภูมิอากาศรอบๆ ด้วย เราเรียกว่าความชื้นในขณะนั้นว่าความชื้นสมดุล ค่าความชื้นสมดุลจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ ซึ่งหลักการความชื้นสมดุลที่เกี่ยวข้องกับความชื้นสัมพัทธ์อากาศอบแห้งนั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับอบแห้งในงานวิจัยครั้งนี้ได้

2.11 การแบ่งชนิดของเครื่องอบแห้ง

เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชอาจแบ่งได้เป็น 4 ดังนี้ (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2540) เครื่องอบแห้งแบบอยู่กับที่ (fixed-bed dryer) สำหรับอบแห้งอาหารที่อยู่ในรูปแบบของแข็งไม่สามารถอบแห้งแบบเป็นกองปริมาณมาก (bulk drying) เครื่องอบแห้งแบบนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ (tunnel dryer) และเครื่องอบแห้งแบบตู้ (cabinet dryer) เครื่องอบแห้งแบบขึ้นอบแห้งเคลื่อนที่ (Moving-bed Dryer) ตัวอย่างหนึ่งเครื่องอบแห้งประเภทนี้ได้แก่ การอบแห้งโดยใช้สายพานซึ่งเคลื่อนที่มีรูให้อากาศเคลื่อนที่ผ่านได้

เครื่องอบแห้งวัสดุแขวนลอยในอากาศ วัสดุจะมีการแขวนลอยในอากาศอยู่ตลอดเวลาของการอบแห้ง ตัวอย่างเช่นเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed dryer) และเครื่องอบแห้งแบบโรตารี (rotary dryer) เครื่องอบแห้งถังทรงกระบอกหมุน (Drum Dryer) ถังทรงกระบอกหมุนรอบแกนนอนสามารถนำมาใช้ในการอบแห้งวัสดุในรูปของเหลวแบบต่อเนื่อง วัสดุจะแห้งในขณะที่แนบติดอยู่กับผิวของถังซึ่งได้รับการถ่ายเทความร้อน โดยทั่วไปนิยมใช้ไอน้ำ วัสดุที่แห้งจะถูกชูดอกโดยใช้ใบมีด ถังอาจมีเพียงใบเดียวหรือหลายใบ และยังมีเทคนิคการอบแห้งแบบอื่นๆ เช่นการอบแห้งภายใต้สุญญากาศ (vacuum drying) การอบแห้งแบบพuff (puff drying) การอบแห้งแบบแช่แข็ง (freeze drying) การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ (microwave drying) เป็นต้น



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการออกแบบและทดลองเครื่องลดความชื้นอากาศ โดยประยุกต์จากเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบตแบบดาวน์คัมเมอร์ (Downcomer) ด้านเดียวเพื่อแก้ไขปัญหาการรั่วของอากาศในเครื่องดูดซับความชื้นอากาศแบบวงล้อดูดซับความชื้นอากาศชนิดแข็ง (ซิลิกาเจล) และหาแนวทางการพัฒนากระบวนการเครื่องดูดซับความชื้นอากาศ โดยใช้เครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบตที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติอากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิต่ำและรักษาคุณภาพทางด้านกายภาพ ทางด้านเคมี คุณภาพการหุงต้ม และคุณภาพการสี

ดังที่กล่าวมาเบื้องต้น เพื่อให้งานวิจัยนี้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ผู้วิจัยจึงดำเนินการตามหัวข้อดังต่อไปนี้ คือ

- 3.1 แผนการวิจัย
- 3.2 ตัวอย่าง
- 3.3 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
- 3.4 ตำแหน่งการวัดบนเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบต
- 3.5 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและความเร็วของอากาศ
- 3.6 วิธีการดำเนินการวิจัย
- 3.7 การวิเคราะห์การใช้พลังงาน
- 3.8 การวิเคราะห์ข้อมูล
- 3.9 สถิติที่ใช้ในการวิจัย

3.1 แผนการวิจัย

การดำเนินวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยแบ่งการวิจัยออกเป็น 2 การทดลอง ซึ่งได้แก่การทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบตที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติอากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิต่ำ

การทดลองที่ 1 ทำการศึกษาและพัฒนาเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบตโดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนดูดซับความชื้นในช่องดาวน์คัมเมอร์ โดยกำหนดสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนดูดซับความชื้นอากาศอยู่ที่ 60 70 และ 80 %(RH) ความเร็วอากาศด้านลดความชื้น 1.0 1.5 และ 2.0 m/s อัตราการไหลของสารดูดซับความชื้นที่ผ่านช่องลดความชื้น

0.2 0.4 และ 0.6 kg/s แล้วทำการวิเคราะห์ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังดูดซับความชื้นอากาศ (%RH) อัตราส่วนความชื้นของอากาศหลังดูดซับความชื้นอากาศ (w (g/kg dry air)) เอนทัลปีของอากาศหลังดูดซับความชื้น (h (kJ/kg dry air)) และการส่วนพื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น โดยใช้อุณหภูมิ การส่วนพื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น 40-100 °C สารลดความชื้น โดยใช้ความสูงของดราฟเพลต (draft plate) ในการส่วนพื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น 70 80 และ 90 cm ความเร็วของอากาศในการส่วนพื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น 18 20 และ 22 m/s แล้วทำการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของสารดูดซับความชื้นหลังการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น (MC (%db)) อัตราส่วนความชื้นของอากาศหลังการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น (w (g/kg dry air)) ระยะเวลาในการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น (s) และวิเคราะห์การใช้พลังงาน

การทดลองที่ 2 วิเคราะห์คุณภาพอบแห้งข้าวเปลือกหลังอบแห้ง โดยใช้อากาศที่ผ่านการดูดซับความชื้นให้มีสภาวะความชื้นสัมพัทธ์อากาศอยู่ที่ 20-40 %RH อากาศอบแห้งที่อุณหภูมิคงที่ 40 C ความเร็วอากาศอบแห้ง 1.0 1.5 และ 2.0 m/s ซึ่งประกอบไปด้วย คุณภาพของข้าวหลังอบแห้งที่ศึกษามีดังนี้ คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ความขาวของข้าว คุณภาพทางเคมี ได้แก่ ปริมาณความชื้น กลิ่นสารละลาย คุณภาพการสี ได้แก่ เปอร์เซ็นต์ตันข้าว คุณภาพการหุงต้ม การวิเคราะห์ปริมาณการใช้พลังงานในการอบแห้งข้าวหอมมะลิ

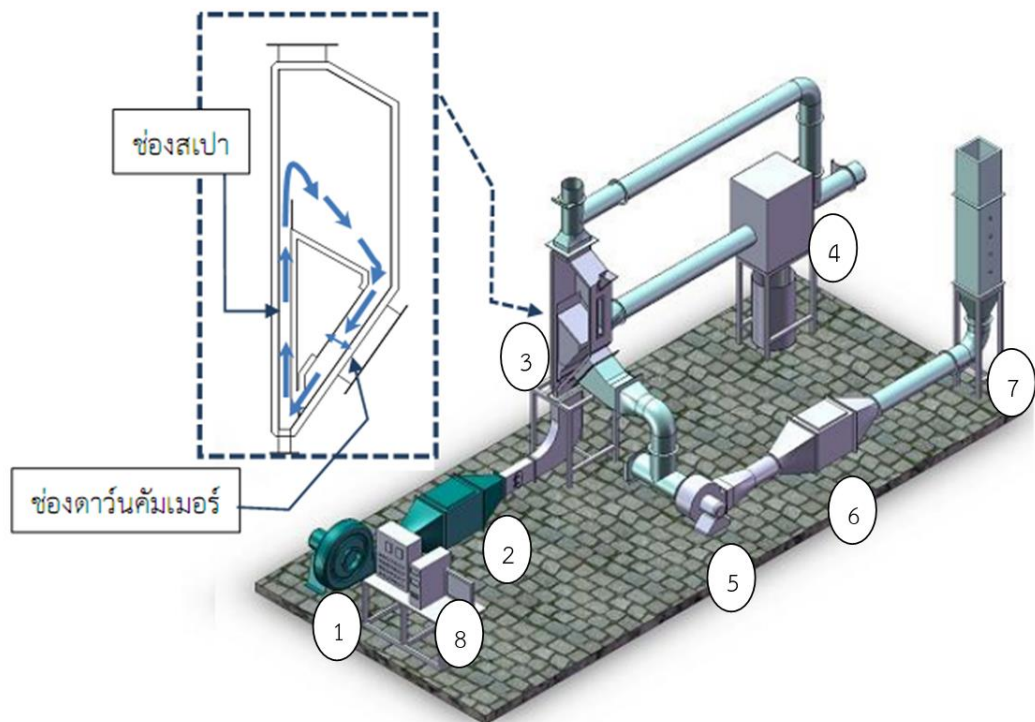
3.2 ตัวอย่าง

การทดลองที่ 2 ข้าวสารสายพันธุ์ ขาวดอกมะลิ 105 ในเขตพื้นที่จังหวัดร้อยเอ็ด

3.3 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.3.1 เครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบด

พูน ปณ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบ 3.1 เครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบตสำหรับระบบอบแห้ง

จากภาพประกอบ 3.1 จะแสดงอุปกรณ์ชิ้นส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องดูดซับความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบตโดยประยุกต์จากเครื่องอบแห้งแบบสเปาเต็ดเบตแบบดาร์วินคัมเมอร์ด้านเดียว โดยสามารถจำแนกออกตามหมายเลขที่กำกับไว้ดังนี้

หมายเลข 1 เครื่องเป่าอากาศชนิด แรงดันสูง

หมายเลข 2 เครื่องกำเนิดอากาศร้อนใช้ในการฟื้นฟูสภาพซิลิกาเจลเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่

หมายเลข 3 เครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบต

หมายเลข 4 เครื่องควบคุมสถานะอากาศแวดล้อม

หมายเลข 5 เครื่องเป่าอากาศชนิดใบพัดโค้งหลัง

หมายเลข 6 เครื่องกำเนิดอากาศร้อนเพื่อใช้ในระบบอบแห้ง

หมายเลข 7 ห้องอบแห้ง

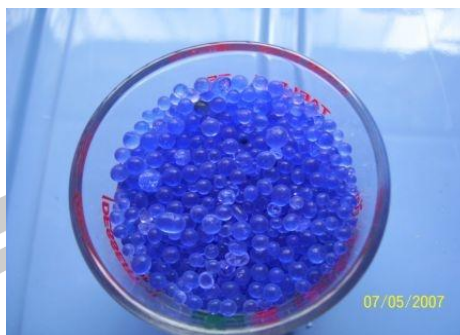
หมายเลข 8 ระบบควบคุมระบบไฟฟ้าของเครื่องเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบต เครื่องควบคุมสถานะอากาศแวดล้อม และเครื่องอบแห้ง และชุดคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะที่

คำนวณผลบันทึกข้อมูลอุณหภูมิแบบต่อเนื่องอัตโนมัติด้วยโปรแกรมซอฟต์แวร์ MX-100 Standard Yoko kava

กลไกการทำงานของเครื่องเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบตโดยที่ เครื่องเป่าอากาศแรงดันสูงหมายเลข 1 จะเป่าอากาศผ่านเครื่องกำเนิดอากาศร้อน หมายเลข 2 เพื่อให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งอากาศนี้จะผ่านเข้าไปในช่องสเปาเต็ดของเครื่องลดความชื้นแบบสเปาเต็ดเบตหมายเลข 3 เพื่อทำการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น ซึ่งหลังจากฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้นแล้วก็จะตกกลับลงมาที่ช่องของ downcomer ส่วนอากาศหลังฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น ส่วนหนึ่งก็จะถูกปล่อยออกที่ช่องด้านบนเครื่องลดความชื้นแบบสเปาเต็ดเบต และอีกส่วนหนึ่งก็จะถูกนำกลับมาใช้ในการลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการลดความชื้นเพื่อให้ต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศซึ่งจะผ่านมาตามท่ออากาศด้านโล่ความชื้นด้านบนของเครื่องเพิ่มความชื้น มาเข้าเครื่องควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหมายเลข 4 โดยมีควบคุมสภาวะอากาศแวดล้อม ด้านความชื้นสัมพัทธ์อากาศในด้วยระบบอัตโนมัติเพื่อให้ความชื้นอากาศแวดล้อมมีค่าสม่ำเสมอ แล้วอากาศก็จะผ่านเข้าไปยังส่วนดูดซับความชื้นในช่อง downcomer ซึ่งเป็นช่องดูดซับความชื้น และมีสารดูดซับความชื้นอากาศไหลผ่านอยู่เพื่อดูดซับชื้นของอากาศ แล้วก็จะตกลงมาสู่ช่องสเปาเต็ดเพื่อทำการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้นอากาศ ส่วนอากาศ ส่วนอากาศอบแห้งที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติอากาศให้มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ จะผ่านเครื่องลดความชื้นแบบสเปาเต็ดเบตผ่านมายังพัดลมหมายเลข 5 แล้วปรับระดับอุณหภูมิด้วยขดลวดไฟฟ้าหมายเลข 6 ก่อนจะนำไปอบแห้งข้าวหอมมะลิในห้องอบแห้งหมายเลข 7

3.3.2 ซิลิกาเจล (Silica gel)

ซิลิกาเจล คือสารดูดความชื้นชนิดแข็งที่มีความสามารถในการดูดซับความชื้นจากอากาศได้ดี โดยถูกบรรจุอยู่ในสเปาเต็ดเบต ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ ซิลิกาเจลชนิดเม็ดสีน้ำเงิน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 - 5 มิลลิเมตร มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นเหมือนกับเม็ดใสทุกประการ เพียงแต่มีการเพิ่มสารชนิดพิเศษเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดปริมาณความชื้นที่กักเก็บไว้ ทำให้ผู้ใช้รู้ว่ามีการเก็บความชื้นไว้ในปริมาณเท่าไร โดยจะแสดงเป็นสีน้ำเงินและสีชมพู หากเม็ดที่แสดงเป็นสีน้ำเงิน หมายความว่า สารดูดความชื้นนั้นยังไม่ได้ใช้งานหรือแสดงว่ายังสามารถใช้งานได้ ส่วนเม็ดที่เป็นสีชมพูหรือสีม่วงอ่อน แสดงว่าหมดอายุในการใช้งาน ควรเปลี่ยนสารดูดความชื้นใหม่ หรือนำมาฟื้นฟูสภาพใหม่ ดังแสดงในภาพประกอบ 3.2



ภาพประกอบ 3.2 ซิลิกาเจลชนิดเม็ดสีน้ำเงิน

3.3.3 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น MX 100 มี 40 Channel ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.3 สำหรับใช้บันทึกอุณหภูมิจุดต่างๆ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง $\pm 0.005\%$ 20V ดังแสดงในภาพประกอบ 3.3



ภาพประกอบ 3.3 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger)

3.3.4 เทอร์โมคัปเปิล แบบ K (Type Chromel V.S.Alumel) ซึ่งสายลอบทำมาจากโลหะผสมระหว่างนิกเกิล 90%+ โครเมียม 10 % และสายลอบทำจากโลหะผสมระหว่างนิกเกิล 95 + 5 ของส่วนผสมระหว่างอลูมิเนียม แมงกานีสและซิลิคอน สามารถใช้กับงานสถานะที่เป็น Oxidizing หรือ Inert และงานที่ต้องรับการแผ่รังสีโดยตรงจากแหล่งกำเนิดความร้อนได้ดี ทนต่ออุณหภูมิ ได้สูงถึง 1260°C

3.3.5 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล ดังแสดงในภาพประกอบ 3.4 ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักซิลิกาเพื่อทดสอบหาความชื้นก่อนและหลังการดูดซับความชื้นของอากาศ ทดสอบสามารถชั่งได้ไม่เกิน 4,100 g ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ $\pm 0.1\text{g}$



ภาพประกอบ 3.4 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล

3.3.6 เครื่องมือวัดความเร็วลมแบบพัดลม ยี่ห้อ TESTO Model 445 ดังแสดงในภาพประกอบ 3.5 ค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 0.2\%$ ของความเร็วอากาศ มีความเหมาะสมกับการวัดความเร็วลมที่ใช้วัดความเร็วลมที่เข้าภายในห้องอบแห้งไม้ เป็นพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมซึ่งมีความเหมาะสมเพราะมีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดน้อย



ภาพประกอบ 3.5 เครื่องมือวัดความเร็วลม

3.3.7 ชุดคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในภาพประกอบ 3.6 สำหรับเก็บและบันทึกข้อมูลไว้ในการทดลอง



ภาพประกอบ 3.6 ชุดคอมพิวเตอร์สำหรับเก็บข้อมูล

3.3.8 โวลต์ติมิเตอร์ (Volmeter) ยี่ห้อ Gssen Metrawatt Camille Bauer M2012 Made in West Germany ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด $\pm 2\%$ ใช้สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้า จำนวน 1 เครื่อง

3.3.9 แอมมิเตอร์ (Ammeter) ยี่ห้อ YOKOKAWA M&C Corporation NO.2A26804 Made in Taiwan Digital Multimeter ใช้สำหรับวัดกระแสไฟฟ้า จำนวน 1 เครื่อง

3.3.10 ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) ดังแสดงในภาพประกอบ 3.7 สำหรับหาความชื้นของซิลิกาเจล



ภาพประกอบ 3.7 ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven)

3.3.11 อินเวอร์เตอร์ (Inverter) อุปกรณ์ปรับความเร็วของมอเตอร์ด้วยระบบความถี่ไฟฟ้า แบบไฟฟ้า 3 เฟส ดังแสดงในภาพประกอบ 3.8

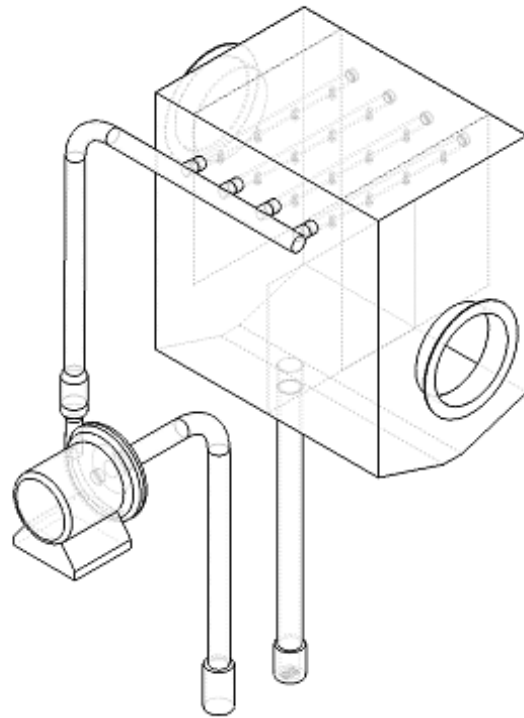


ภาพประกอบ 3.8 อินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วของมอเตอร์ (Inverter)

3.3.12 นาฬิกาจับเวลา ซึ่งจะใช้ในการบอกระยะเวลาในการทดลองตาม เงื่อนไขต่าง ๆ

3.3.13 เครื่องควบคุมสภาวะอากาศแวดล้อม สภาวะของความชื้นสัมพัทธ์อากาศในแต่ละวันมีการแปรปรวนและเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาไม่มีความแน่นอน ดังนั้นเพื่อให้สามารถกำหนดสภาวะความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมให้มีความแม่นยำ จึงต้องเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ซึ่งในงานวิจัยนี้มีการใช้เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศด้วยการฉีดละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นละอองน้ำดังแสดงในภาพประกอบ 3.9 โดยมีหลักการทำงาน โดยปั้มน้ำส่งไปยังท่อหัวฉีดพ่นละอองน้ำผสมกับอากาศทำให้อากาศแวดล้อมที่ไหลผ่านมีความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มสูงขึ้น มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ด้วยการควบคุมระบบ การจ่ายของปั้มน้ำแบบอัตโนมัติ แล้วน้ำที่ฉีดพ่นก็จะตกลงสู่ด้านล่างของเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์อากาศไปยังถังน้ำสำรองแล้วจึงมีการดูมาใช้ใหม่ หมุนเวียนอีกครั้ง

พหุ ประถม วิชา



ภาพประกอบ 3.9 เครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์อากาศ

ทำให้เกิดละอองน้ำขนาดเล็กผสมกับอากาศทำให้ความชื้นสัมพัทธ์อากาศเพิ่มขึ้นโดยมีการควบคุมด้วยอุปกรณ์การฉีดย้ำแบบอัตโนมัติโดยมีส่วนประกอบและอุปกรณ์หลักๆ ดังนี้

3.3.14 เครื่องวัดและควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ บอร์ดวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ใช้วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศโดยควบคุมการทำงานของปั้มน้ำ ซึ่งมีช่วงในการวัดความชื้นได้ตั้งแต่ 0 ถึง 99 % ความละเอียด 1% วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ - 40 ถึง 120 องศาเซลเซียส ความละเอียด 0.1 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพประกอบ 3.10

พหุบัน ปณุ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบ 3.10 เครื่องควบคุมการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์อากาศ

3.3.3.15 เครื่องสูบน้ำ Centrifugal pump คือเครื่องสูบน้ำ ใช้ในการสูบน้ำให้กับหัวฉีด ละอองน้ำเพื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้น โดยขนาดของปั้มน้ำที่ใช้คือ 0.3 แรงม้า อัตราการไหล 90 ลิตรต่อชั่วโมง ดังแสดงในภาพประกอบ 3.11



ภาพประกอบ 3.11 เครื่องสูบน้ำ Centrifugal pump

3.3.3.16 หัวฉีดละอองน้ำ หัวฉีดละอองน้ำ ใช้ในการฉีดน้ำเพื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ให้กับ อากาศก่อนการดูดซับ โดยรับน้ำป้อนจากเครื่องสูบน้ำที่อัตราการไหลประมาณ 13 - 28 ลิตร/ชม. รัศมีการพ่นละอองน้ำคือ 50 ซม. ดังแสดงในภาพประกอบ 3.12

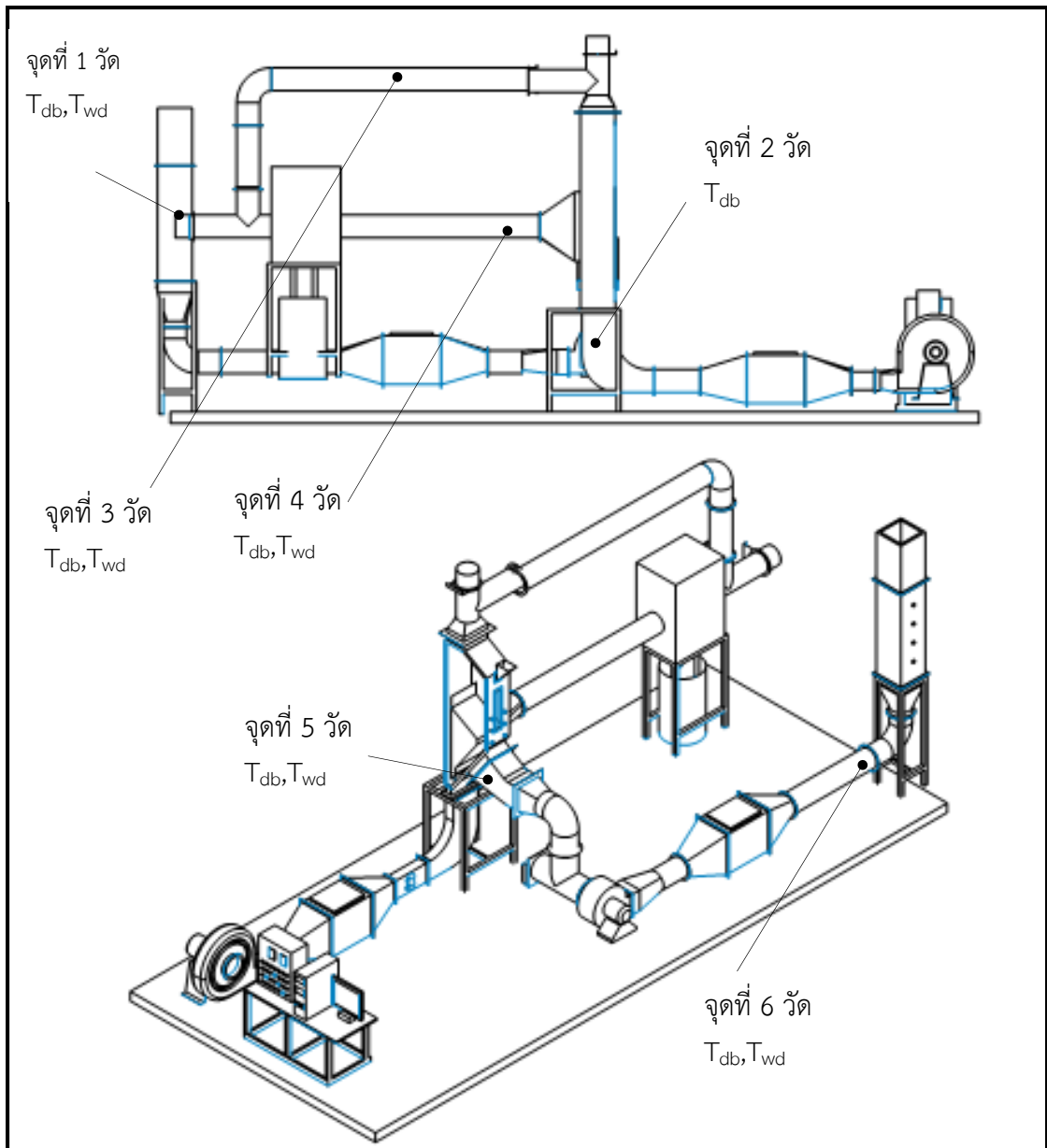


ภาพประกอบ 3.12 หัวฉีดละอองน้ำแบบพลาสติก

3.4 การวัดอุณหภูมิและความเร็วของอากาศ

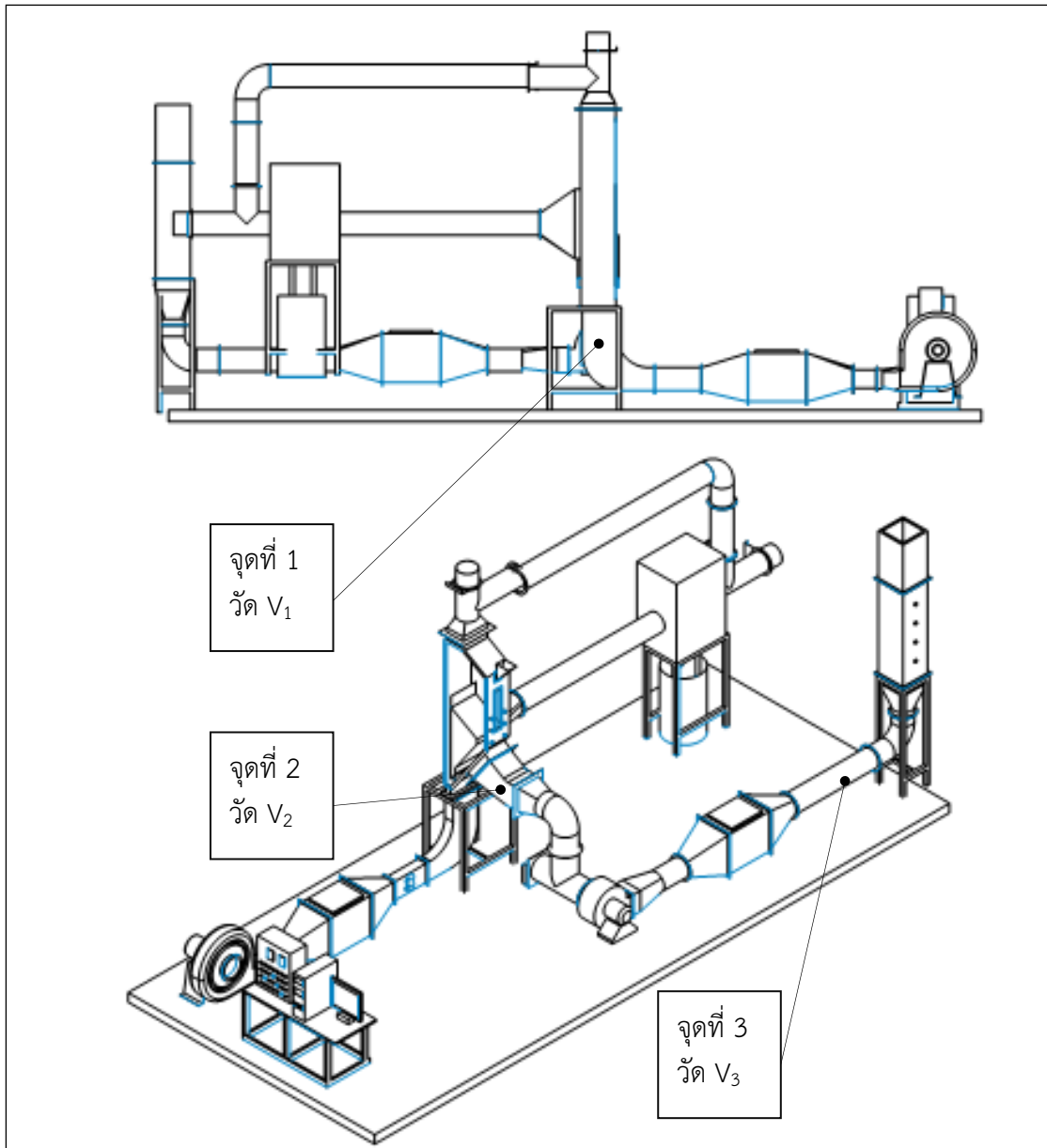
3.4.1 การวัดอุณหภูมิเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบด ในตำแหน่งต่างๆ เป็นการกำหนดจุดวัด อุณหภูมิกระเปาะเปียก (T_{wb}) กระเปาะแห้ง (T_{db}) โดยใช้เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น MX 100 มี 40 Channel ใช้สายเทอร์โมคัปเปิล แบบ K (Type Chromel V.S.Alumel) โดยมีตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่เหมาะสม ดังแสดงในภาพประกอบ 3.13

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ



ภาพประกอบ 3.13 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบด

3.4.2 การวัดความเร็วอากาศของเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบด จะวัดที่ตำแหน่งของอากาศร้อนก่อนเข้าเครื่องลดความชื้นอากาศในส่วนของช่องสเปาและความเร็วของอากาศหลังดูดซับความชื้นอากาศโดยมีการวัดจุดละ 10 ค่า แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ดังแสดงในภาพประกอบ 3.14 ซึ่งเครื่องมือวัดความเร็วอากาศในท่อเป็นแบบ Pitot tube ยี่ห้อ TESTO Model 445 ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ $\pm 0.2\%$ ของความเร็วอากาศ สำหรับใช้วัดความเร็วลมที่เข้าภายใน



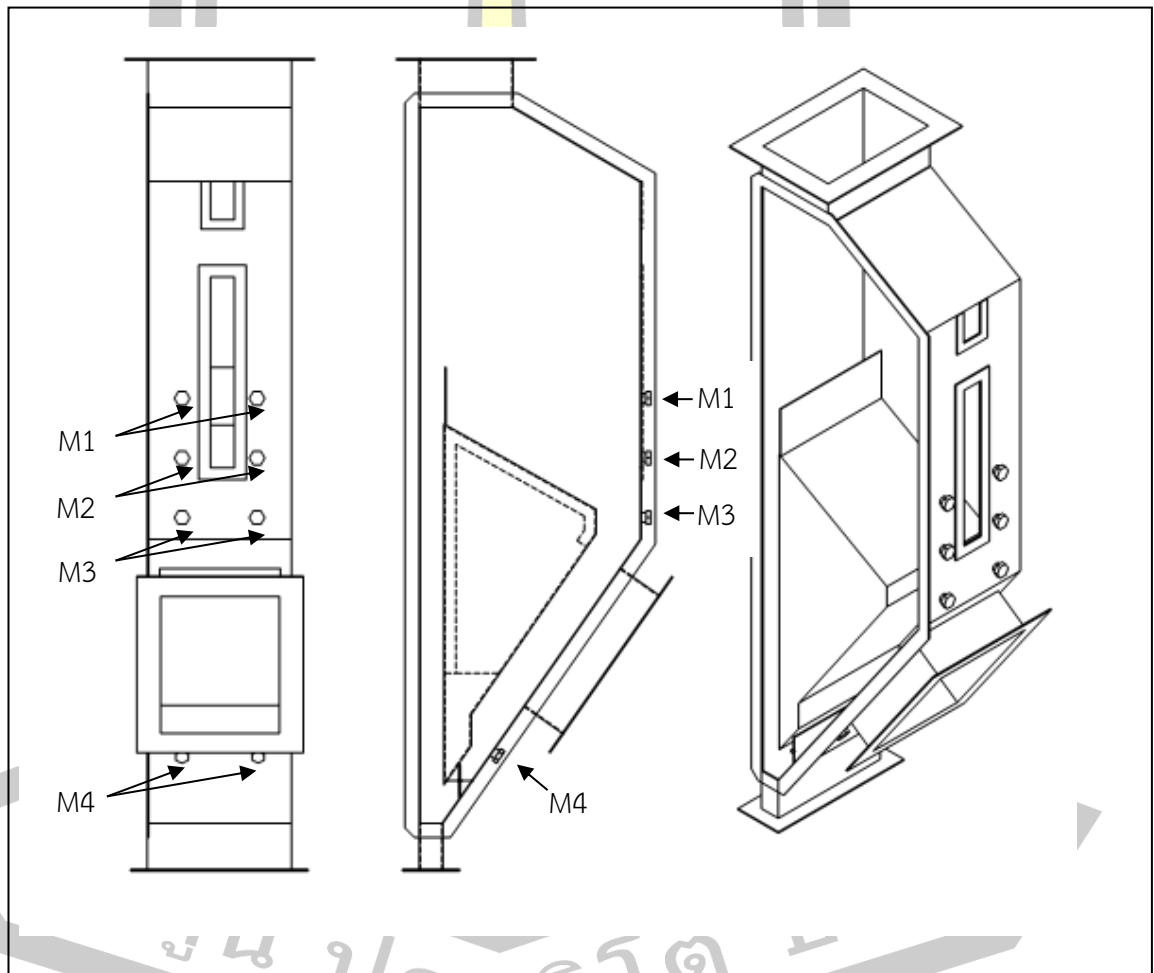
ภาพประกอบ 3.14 ตำแหน่งการวัดความเร็วอากาศของเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบด

จากการวัดการวัดอุณหภูมิและความเร็วของอากาศเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบด แล้วนำมาคำนวณหาค่าตัวแปรตามจุดวัดเหล่านี้ เช่น ค่าเอนทาลปี ($\text{kJ/kg}_{\text{dry air}}$) อัตราส่วนความชื้น ($\text{g/kg}_{\text{dry air}}$) และ ความชื้นสัมพัทธ์ก่อนการลดและหลังการลดความชื้นอากาศ

3.5 ตำแหน่งการวัดบนเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบต

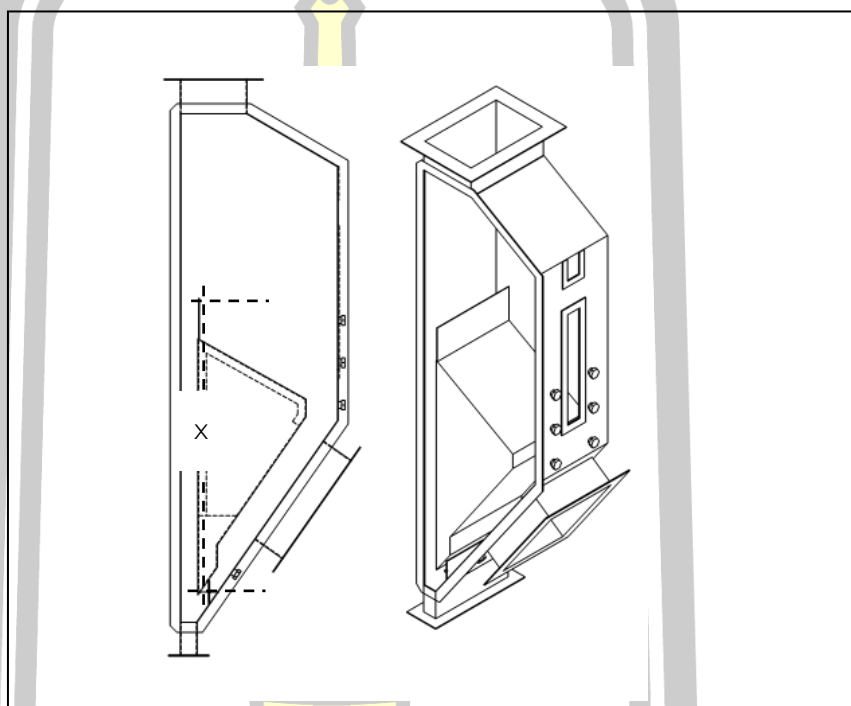
3.5.1 ตำแหน่งการวัดค่าความชื้นของสารดูดซับความชื้น

ตำแหน่งการที่มีการนำสารดูดซับความชื้นอากาศออกมาเพื่อทำการหาความชื้นสารดูดซับความชื้น (Silica gel) ของเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบตมีทั้งหมด 8 จุด โดยที่ ก่อนดูดซับความชื้นอากาศจะมีทั้งหมด 6 จุด คือ M1 2 จุด M2 2 จุด และ M3 2 จุด ส่วนจุดวัดความชื้นของสารดูดซับความชื้นหลังจากการลดความชื้นอากาศ จะมีทั้งหมด 2 จุด คือ M4 2 จุด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.15



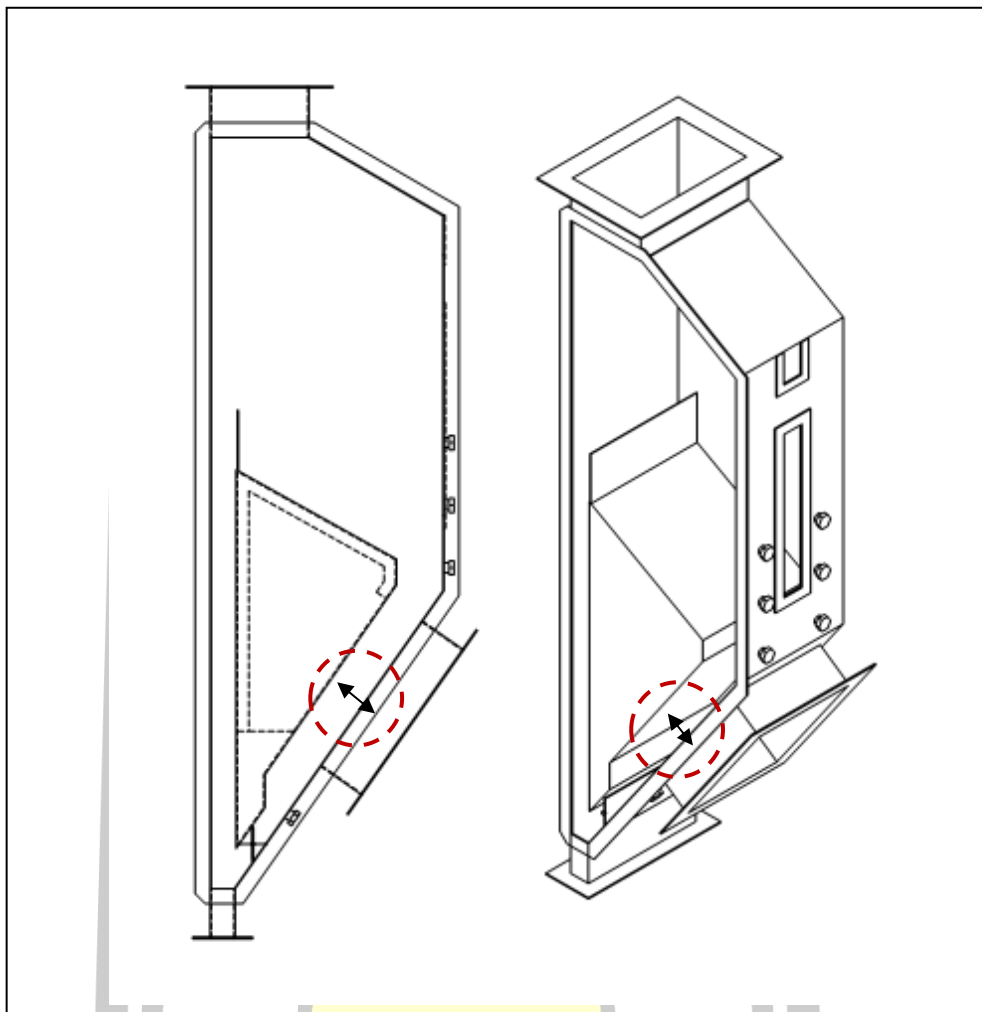
ภาพประกอบ 3.15 ตำแหน่งการวัดค่าความชื้นสารดูดซับความชื้นของเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบต

3.5.2 ตำแหน่งการวัดความสูงของแผ่น Draft Plate ความสูงของแผ่นดราฟเพลต (Draft Plate) ที่กำหนดความสูงการลอยข้ามของซิลิกาในช่องสเปาของส่วนการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้นของอากาศเพื่อหมุนเวียนสารดูดซับความชื้นอากาศมาใช้ใหม่ในงานวิจัยนี้จะมี ความสูงตั้งแต่ 70-90 cm แล้ววัดระยะเวลาการลอยข้ามแผ่นดราฟเพลต โดยความสูงจะถูกวัดดังแสดงในภาพประกอบ 3.16 ของเครื่องดูดซับความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบด



ภาพประกอบ 3.16 ตำแหน่งการวัดความสูงของแผ่นดราฟเพลต (Draft Plate) ของเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบด

3.5.3 ตำแหน่งการวัดความหนาของดาวน์คัมเมอร์ (Downcomer) ความหนาของดาวน์คัมเมอร์ (Downcomer) เป็นระดับความหนาของสารดูดซับความชื้นอากาศที่ถูกกำหนดในงานวิจัยนี้จะมี ความหนาของดาวน์คัมเมอร์ (Downcomer) ซึ่งเป็นความหนาของชั้นสารดูดซับความชื้นอากาศ ถูกกำหนด อยู่ที่ 3-9 cm ของเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบด



ภาพประกอบ 3.17 ตำแหน่งการวัดความหนาของดาวน์คัมเมอร์ (Downcomer) ของเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบต

3.6 วิธีและขั้นตอนการทดลอง

สำหรับวิธีและขั้นตอนการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนการทดลองของเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบต และส่วนการอบแห้งข้าวหอมมะลิโดยใช้อากาศอบแห้งที่ผ่านการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติอากาศให้มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสำหรับอบแห้งข้าวหอมมะลิ โดยใช้เครื่องลดความชื้นแบบสเปาเต็ดเบต

3.6.1 การทดลองของเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบต

1) เจื่อนไขในการทดลองเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบตที่ผู้วิจัยทำการศึกษาก็จะแบ่งออกเป็นสองดูดซับความชื้น และส่วนฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น (Regeneration)

1.1) ด้านส่วนดูดซับความชื้น

1.1.1) ทดลองอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนดูดซับความชื้น ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ระดับคือ 60 70 และ 80 % โดยกำหนดให้ความเร็วอากาศด้านดูดซับ 1.0 m/s ความความหนาของดาวนคัมเมอร์ (Downcomer) 9 cm และ ค่าอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้น 0.4 kg/s แล้วทำการทดลองเพื่อหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่เหมาะสมที่สุด

1.1.2) ทดลองอิทธิพลของความเร็วกาศด้านลดความชื้นซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ระดับคือ 0.5 1.0 และ 1.5 m/s โดยที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนดูดซับความชื้นอากาศที่เหมาะสมที่สุดได้จากข้อ 1.1 แล้วค่าความหนาของ ดาวนคัมเมอร์ (Downcomer) 9 cm และค่าอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องลดความชื้น 0.4 kg/s แล้วทำการทดลองเพื่อหาความเร็วกาศด้านลดที่เหมาะสมที่สุด

1.1.3) ทดลองอิทธิพลของอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้นอากาศซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ระดับคือ 0.2 0.4 และ 0.6 kg/s โดยที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการลดที่เหมาะสมที่สุดได้จากข้อ 1.1.1 ค่าความเร็วกาศด้านพื้นฟูสภาพสารดูดซับที่เหมาะสมที่สุดได้จากข้อ 1.1.2 แล้วทำการทดลองเพื่อหาค่าอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้นที่เหมาะสม ซึ่งมีขั้นตอนในการทดลองเงื่อนไขในการทดลองเครื่องลดอากาศแบบสเปาเต็ด-เบต ในส่วนดูดซับความชื้นอากาศ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 วัดความหนาของ ดาวนคัมเมอร์ (Downcomer) (ภาพประกอบ 3.17)

ขั้นตอนที่ 2 นำสารดูดซับความชื้นใส่เครื่องลดความชื้นแบบสเปาเต็ด-เบต

ขั้นตอนที่ 3 เปิดสวิตซ์เพื่อให้เครื่องทำงาน ปรับความเร็วของอากาศและอุณหภูมิ ทิ้งไว้ให้อยู่ในสภาวะคงที่ ประมาณ 30 นาที

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจเช็คความเร็วของอากาศและอุณหภูมิอีกครั้ง

ขั้นตอนที่ 5 ทำการวัดความเร็วของอากาศ (ภาพประกอบ 3.14 จุดที่ 2) โดยใช้ Pitot Tube และ วัดอุณหภูมิกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งก่อนการดูดซับความชื้นและหลังการดูดซับความชื้นอากาศ (ภาพประกอบ 3.13 จุดที่ 4 จุดที่ 5) วัดอุณหภูมิกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้ง ของอากาศแวดล้อม (ภาพประกอบ 3.13 จุดที่ 1) โดยจะใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K ต่อกับเครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ (Data Logger) ทุกๆ นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 6 ทำการจับเวลาที่สารดูดซับความชื้นอากาศผ่านช่องดูดซับความชื้นอากาศเพื่อหาอัตราการไหลที่ผ่าน ช่องดูดซับความชื้นอากาศ

ขั้นตอนที่ 7 สุ่มตัวอย่างสารดูดซับความชื้นอากาศออกจากเครื่องลดความชื้นแบบสเปาเต็ดเบต (ภาพประกอบ 3.15) ช่องที่1ทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 8 บันทึกอุณหภูมิกระเปาะเปียก และ กระเปาะแห้งเพื่อเทียบค่าจาก แผนภูมิไซโครเมตริกเพื่อหาค่า ความชื้นสัมพัทธ์ เอนทาลปี และ อัตราส่วนความชื้น พร้อมกับนำตัวอย่างสารดูดซับความชื้นอากาศออกมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาความชื้นของสารดูดซับความชื้นอากาศ

ขั้นตอนที่ 9 สารดูดซับความชื้นอากาศที่เก็บทุก ๆ 30 นาที ไปอบที่อุณหภูมิ150 องศา-เซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อหาความชื้นของสารลดความชื้น

ขั้นตอนที่ 10 นำซิลิกาเจลออกจากเครื่องอบเพื่อมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง และคำนวณความชื้นของเม็ดซิลิกาเจลตามมาตรฐานแห่ง

ขั้นตอนที่ 11 ทำการทดลองซ้ำ ในแต่ละเงื่อนไข 3 ซ้ำ

ขั้นตอนที่ 12 เมื่อเปลี่ยนเงื่อนไขการทดลองจะทำตามวิธี ตามขั้นตอนที่ 1 -

10

หลังจากได้เงื่อนไขด้านดูดซับความชื้นอากาศที่เหมาะสมที่สุดแล้วก็จะทำการทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในส่วนฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น

1.2 ส่วนฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น

1.2.1) ทดลองอิทธิพลของค่าความเร็วของอากาศซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ระดับคือ 18 20 และ 22 m/s โดยที่ค่าอุณหภูมิในการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้นเหมาะสม 70 C ค่าความสูงของ draft plate 80 cm แล้วทำการทดลองเพื่อหาค่าความเร็วของอากาศในส่วนการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้นที่เหมาะสมที่สุด

1.2.2) ทดลองอิทธิพลของความสูงของ draft plate ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ระดับคือ 70 80 และ 90 cm โดยที่ค่าอุณหภูมิในการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้นที่ 70 C และค่าความเร็วของอากาศที่เหมาะสมที่สุดได้มาจากข้อ 2.1 แล้วทำการทดลองเพื่อหาค่าความสูงของ draft plate ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อคำนวณหาระยะเวลาการเคลื่อนที่ของสารดูดซับความชื้นอากาศในช่องสเปาต์

หลังจากได้เงื่อนไขด้านการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้นที่เหมาะสมที่สุดแล้วทำการคำนวณหาค่า เอนทาลปี อัตราส่วนความชื้น ความชื้นสารดูดซับความชื้นและ ทำการเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆที่มีผลมากที่สุดเพื่อนำไปสู่ผลสรุป

ซึ่งมีขั้นตอนในการทดลองเงื่อนไขในการทดลองเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ด-เบต ในส่วนของการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น (Regeneration) ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 วัดความสูงของแผ่น Draft Plate (ภาพประกอบ 3.16)

ขั้นตอนที่ 2 นำสารดูดซับความชื้นใส่เครื่องลดความชื้นแบบสเปาเต็ดเบด

ขั้นตอนที่ 3 เปิดสวิตช์เพื่อให้เครื่องทำงาน ปรับความเร็วของอากาศและอุณหภูมิ
ทิ้งไว้ให้อยู่ในสภาวะคงที่ ประมาณ 30 นาที

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบเช็คความเร็วของอากาศและอุณหภูมิอีกครั้ง

ขั้นตอนที่ 5 ทำการวัดความเร็วของอากาศ (ภาพประกอบ 3.14 จุดที่ 2) โดยใช้ Pitot Tube และ วัดอุณหภูมิกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งก่อนการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น และหลังการฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้น(ภาพประกอบที่ 3.13 จุดที่ 4 จุดที่ 5) วัดอุณหภูมิ กระเปาะเปียกและ กระเปาะแห้ง ของอากาศแวดล้อม (ภาพประกอบที่ 3.13 จุดที่ 1) โดยจะใช้ เทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K ต่อกับเครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ (Data Logger) ทุกๆ นาที

ขั้นตอนที่ 6 สุ่มตัวอย่างสารดูดซับความชื้นออกจากเครื่องลดความชื้นอากาศ แบบสเปาเต็ดเบด (ภาพประกอบ 3.15) ช่องที่ 2 3 และ 4 ตามความสูงของแผ่น Draft Plate 70 80 และ 90 ตามลำดับ ทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 7 บันทึกอุณหภูมิกระเปาะเปียก และ กระเปาะแห้งเพื่อเทียบค่าจาก แผนภูมิ ไฮโครเมตริกเพื่อหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ เอนทาลปี และ อัตราส่วนความชื้น พร้อมกับนำ ตัวอย่างสารดูดซับความชื้นออกมาชั่งน้ำหนัก

ขั้นตอนที่ 8 นำซิลิกาเจลที่เก็บทุกๆ 30 นาที ไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 150 องศา เซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อหาความชื้นของสารดูดซับความชื้นสารดูดซับความชื้น

ขั้นตอนที่ 9 นำสารดูดซับความชื้นจากเครื่องอบเพื่อมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง และ คำนวณความชื้นของ สารดูดซับความชื้นตามกฎของมาตรฐานการหาความชื้น

ขั้นตอนที่ 10 ทำการทดลองซ้ำ ในแต่ละเงื่อนไข 3 ซ้ำ

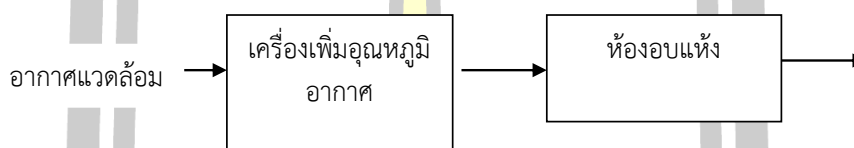
ขั้นตอนที่ 11 เมื่อเปลี่ยนเงื่อนไขการทดลองจะทำตามวิธี ตามขั้นตอนที่ 1-9

3.6.2 การทดลองการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้อากาศอบแห้งที่ผ่านการลดความชื้นอากาศ

หลังจากการทดลองเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาเต็ดเบดได้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดแล้ว จึงนำมากำหนดตัวแปรในการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้อากาศอบแห้งที่ผ่านการดูดซับความชื้นอากาศให้มีความชื้นสัมพัทธ์อากาศต่ำ ดังแสดงในภาพประกอบ 3.18 เปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนโดยทั่วไป ดังแสดงในภาพประกอบ 3.19 โดยมีขั้นตอนในการอบแห้งข้าวเปลือก ได้แก่ การเตรียมข้าวเปลือก การเก็บตัวอย่าง โดยมีรายละเอียดดังนี้



ภาพประกอบ 3.18 ขั้นตอนการอบแห้งด้วยอากาศที่ผ่านการลดความชื้นอากาศ



ภาพประกอบ 3.19 ขั้นตอนการอบแห้งด้วยอากาศร้อน

1) การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดลอง นำข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 (Khao Dawk Mali 105) ที่เก็บเกี่ยวใหม่ มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 25-30% (d.b.) โดยใช้ใส่ในภาชนะปิดเพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียความชื้น ก่อนจะนำมาเก็บในตู้เย็นที่ระดับอุณหภูมิ 4 C และเมื่อนำออกมาทดลอง ก็จะแบ่งออกมาจากตู้เย็นแล้วปล่อยให้จนกระทั่งอุณหภูมิข้าวเปลือกมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอากาศแวดล้อมโดยใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิวัดบริเวณกลางภาชนะปิดแล้วจากนั้นจึงเริ่มนำข้าวเปลือกตัวอย่างไปอบแห้งโดยใช้อากาศอบแห้งที่ผ่านการดูดซับความชื้นอากาศให้มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศต่ำ ดังแสดงในภาพประกอบ 3.18 เปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนโดยทั่วไป

2) การเก็บตัวอย่าง นำข้าวเปลือกตัวอย่างมาอบแห้งแบบเป็นวงดๆละ 1000 g โดยใช้ห้องอบแห้ง (ภาพประกอบ 3.1 หมายเลข 7) โดยการสูมออกมาซึ่งน้ำหนักและหาอัตราการอบแห้งทุกๆ 30 นาที ซึ่งปรับระดับอุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่ 40 C ความชื้นสัมพัทธ์อากาศอบแห้งอยู่ระหว่าง 25 -35 %(RH) ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.5 1.0 และ 1.5 m/s ในกรณีการอบแห้งด้วยอากาศที่ผ่านการดูดซับความชื้นอากาศ ส่วนการอบแห้งด้วยอากาศร้อนปกติจะปรับระดับอุณหภูมิอากาศอบแห้งคงที่ 60 C ความเร็วอากาศอบแห้ง 0.5 1.0 และ 1.5 m/ อบแห้งจนกระทั่งได้ความชื้นสุดท้าย 12-14 d.b. จึงหยุดทำการอบแห้ง จึงนำออกมาพักไว้ในภาชนะปิดจนอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกหลังอบแห้งเย็นตัวลง ก่อนจะนำไปวิเคราะห์คุณภาพ และทั้งสองกระบวนการนี้จะมีการเก็บข้อมูลอุณหภูมิทุกๆ 5 นาที

3) ปริมาณความชื้น (AOAC No.2000 No. 925.09) นำตัวอย่างข้าวเปลือกมาชั่งน้ำหนักก่อนเข้าห้องอบแล้วบันทึกผล หลังจากนั้นนำเข้าห้องอบแล้วเก็บน้ำหนักทุก ๆ 30 นาทีจนความชื้นสุดท้ายได้ 14 % (d.b.) แล้วนำข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งมาหาความชื้นสุดท้ายอีกครั้งเข้าตู้อบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 103.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นนำชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักข้าวเปลือกแห้ง เพื่อหาความชื้นดังสมการ 3.1

$$\text{ความชื้นมาตรฐานแห้ง (\% d.b.)} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวสาร ณ เวลาใดๆ} - \text{น้ำหนักข้าวสารแห้ง}}{\text{น้ำหนักข้าวสารแห้ง}} \quad (3.1)$$

4) ปริมาณสารหอมระเหย (แสงนวล, 2548)

การตรวจสอบสารหอมระเหยโดยใช้เครื่อง Gas-Chromatograph วิเคราะห์ปริมาณของสาร 2-acetyl-1-pyrroline โดยสกัดไอน้ำจากการหุงต้มข้าว 200 กรัม ในน้ำ 6 ลิตร อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยเติม Collidine สำหรับเป็นสารมาตรฐานภายใน (Internal standard) และใช้ Diethyl ether 120 ซีซี. เป็นตัวทำละลายที่ใช้สกัดสารระเหย (Extraction solvent) ทั้งนี้ต้องปรับสภาพของตัวทำละลายให้เป็นกรด โดยเติมสารละลายกรดกำมะถัน (Sulfuric acid) เข้มข้น 0.46 Mole ปริมาณ 82 ซีซี. ไอน้ำที่รวบรวมได้จะอยู่ใน Diethyl ether ปรับสภาพให้เป็นกลางโดยเติมสารโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO₃) แล้วเขย่าให้ทั่วกัน ตั้งทิ้งไว้จน Diethyl ether แยกชั้น และทำให้สารระเหยเข้มข้นยิ่งขึ้น โดยวางบน water bath ที่อุณหภูมิ 60°ซ. จนเหลือประมาณ 1 มล. บรรจุสารเข้มข้นนี้ในหลอดแก้วขนาดเล็ก และไล่ Ether ออก โดยแช่ใน water bath ที่อุณหภูมิ 50°ซ. จนเหลือประมาณ 0.3มล. วิเคราะห์ปริมาณของสาร 2-acetyl-1-pyrroline โดยฉีดสารละลายเข้มข้นเข้าไปในคอลัมน์ของเครื่อง Gas-Chromatograph ที่มีขนาด 1.2 ม. X 3 มม. ที่ภายในบรรจุ Chromosorb G ขนาด 80-100 mesh ที่เคลือบด้วย Carbowax 20-M ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก ช่วงความหอมของ 2-acetyl-1-pyrroline จะอยู่ได้ประมาณ 22 นาที ในขณะที่สาร Collidine ใช้เวลา 26 นาที โดยสาร Collidine มีค่า Recovery 28% ซึ่งค่า Recovery นี้จะใช้เป็นปัจจัยในการปรับหาความเข้มข้นของสาร 2-acetyl-1-pyrroline

5) คุณภาพการสี

5.1) เครื่องมือ

5.1.1) เครื่องเป่าทำความสะอาด (Aspirator)

5.1.2) เครื่องกะเทาะข้าวเปลือก (Satake)

5.1.3) เครื่องขัดขาว (Mc.Gill Miller NO.2)

5.1.4) เครื่องคัดแยก (Stizing Divider0)

5.2) ขั้นตอนการปฏิบัติ

5.2.1) ทำความสะอาดข้าวเปลือกด้วยเครื่องเป่าทำความสะอาด ตามข้อ 5.1.1 เพื่อกำจัดเมล็ดลีบ ระแ่ง และสิ่งเจือปนต่างๆ (วัตถุประสงค์การเลือกออกด้วยมือ)

5.2.2) วัดความชื้นถ้ามากกว่าร้อยละ 14% d.b. ต้องนำไปลดความชื้น

5.2.3) ชั่งข้าวเปลือกที่ทำความสะอาดแล้ว 125 กรัม

5.2.4) กะเทาะข้าวเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะ ตามข้อ 3.1.2 จนเปลือกออกหมด ชั่งน้ำหนักข้าวกล้อง บันทึก

5.2.5) ชัดข้าวกล้องด้วยเครื่องขัดขาว ตามข้อ 5.1.3 เป็นเวลา 1 นาที ครึ่งนาที แรกใส่ตุ้ม ครึ่งนาทีที่หลัง นำตุ้มออก ทิ้งข้าวสารไว้ให้เย็น ชั่งน้ำหนักบันทึก

5.2.6) นำข้าวสารทั้งหมดไปแยกข้าวเต็มเมล็ด ต้นข้าว และข้าวหัก ด้วยเครื่องคัดแยกตามข้อ 4.1.4 โดยใช้ตะแกรงเบอร์10 ข้างบน และเบอร์135 ข้างล่าง

5.2.7) เมื่อข้าวผ่านตะแกรงหมดแล้วต้องคัดเลือกข้าวเต็มเมล็ด ต้นข้าว และข้าวหักด้วยมืออีกครั้งเนื่องจากมีเหลือปนอยู่

5.2.8) ชั่งน้ำหนักข้าวเต็มเมล็ด ต้นข้าว บันทึก

5.2.9) นำน้ำหนักข้าวเปลือก ข้าวกล้อง ข้าวสาร และข้าวเต็มเมล็ด ต้นข้าว ไปคำนวณหาปริมาณแกลบ รำ และข้าวเต็มเมล็ด ต้นข้าวต่อไป ดังนี้

$$\text{ร้อยละของแกลบ} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก} - \text{น้ำหนักข้าวกล้อง}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100 \quad (3.2)$$

$$\text{ร้อยละของรำ} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก} - \text{น้ำหนักข้าวกล้อง}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100 \quad (3.3)$$

$$\text{ร้อยละของแกลบ} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวข้าวเต็มเมล็ด ต้นข้าว}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือก}} \times 100 \quad (3.4)$$

หมายเหตุ การใช้เครื่องกะเทาะข้าวเปลือก และเครื่องขัดข้าวติดต่อกันนาน ๆ จะทำให้เครื่องร้อน จึงควรพักเครื่องทุกๆ 10 ตัวอย่าง

6) ระยะเวลาในการหุงต้ม (Cooking time, นาที)

วิธีวิเคราะห์โดยนำตัวอย่างข้าวที่ได้ในแต่ละกระบวนการอบแห้งโดยใช้เครื่องลดความชื้นอากาศแล้วกะเทาะ แล้วขัดขาว มา 10 เมล็ด ใส่ในกระชอนอะลูมิเนียมขนาดเล็ก แล้วนำไป

ต้มในหม้อปิดฝาที่มีน้ำเดือด (95-100 องศาเซลเซียส) จับเวลาในการต้มทดสอบการสุกของเมล็ดข้าว ด้วยการนำแผ่นกระดาษสองแผ่นมาประกบแล้วบีบสังเกตการสุกแล้วบันทึกเวลาในการหุงต้ม

3.7 การวิเคราะห์การใช้พลังงาน

ทำการตรวจวัดการใช้พลังงานในขณะอบแห้งด้วยเครื่องวัดกำลัง แรงดันและกระแสไฟฟ้า ซึ่งปริมาณการใช้พลังงานจะแยกออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.7.1 ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ

พลังงานไฟฟ้าหาได้จากการใช้เครื่องวัดกำลัง แรงดันและกระแสไฟฟ้าวัดอุปกรณ์ทั้งหมดในระหว่างการอบแห้งซึ่งจะแสดงออกมาในหน่วย kWh

$$SEC = \frac{\text{ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้}}{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยจากวัสดุ}} \quad \text{kWh/ kg water evap.}$$

3.5.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC)

$$SEC = \frac{\text{ปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้}}{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยจากวัสดุ}} \quad \text{MJ/ kg water evap.}$$

3.8 การวิเคราะห์ข้อมูล

ในการวิจัยครั้งนี้แบ่งการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็นดังนี้

- 1) นำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- 2) สรุปผลการวิเคราะห์และรายงานในรูปตารางและกราฟ

3.9 สถิติที่ใช้ในการวิจัย

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลมีดังนี้

- 1) สถิติพื้นฐาน ได้แก่ ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- 2) สถิติที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานของการวิเคราะห์ คือ F-test สำหรับวิเคราะห์

ความแปรปรวนแบบ One-way ANOVA กรณีที่มีจำนวนซ้ำเท่ากัน โดยใช้วิธีของ DUNCAN

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

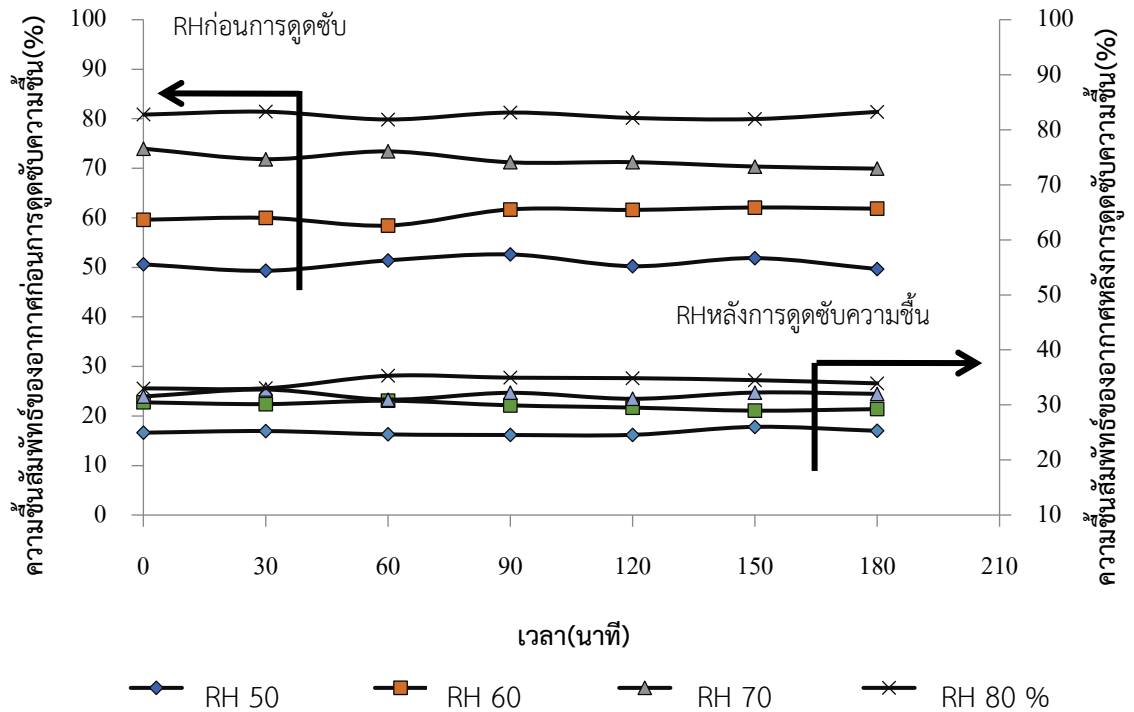
การศึกษาตัวแปรของการดูดซับความชื้น ซึ่งกลไกในการดูดซับความชื้นที่ศึกษาประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนการดูดซับความชื้น และส่วนการไล่ความชื้น ส่วนการดูดซับความชื้นประกอบด้วยปัจจัยที่ศึกษา 4 ปัจจัยคือความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้น ความหนาของ downcomer อัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้น และความเร็วของอากาศด้านดูดซับ ซึ่งประกอบด้วยความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้น 4 ระดับ คือ 50 60 70 และ 80 % ความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้น 3 ระดับคือ 1.4 1.7 และ 2 m/s ความหนาของ downcomer 3 ระดับคือ 3 6 และ 9 cm และอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้น 3 ระดับคือ 0.1 0.2 และ 0.3 kg/s

และส่วนการไล่ความชื้นประกอบไปด้วยปัจจัยที่ศึกษา 3 ปัจจัยคือ อุณหภูมิในการไล่ความชื้น ความเร็วอากาศในการไล่ความชื้น และความสูงของแผ่น draft plate ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิในการไล่ความชื้น 3 ระดับคือ 50 60 และ 70 °C ความเร็วอากาศในการไล่ความชื้น 3 ระดับคือ 18 20 และ 22 m/s และความสูงของแผ่น draft plate 3 ระดับคือ 70 80 และ 90 cm จากการศึกษาปัจจัยดังกล่าวมีรายละเอียดของผลการศึกษาดังต่อไปนี้

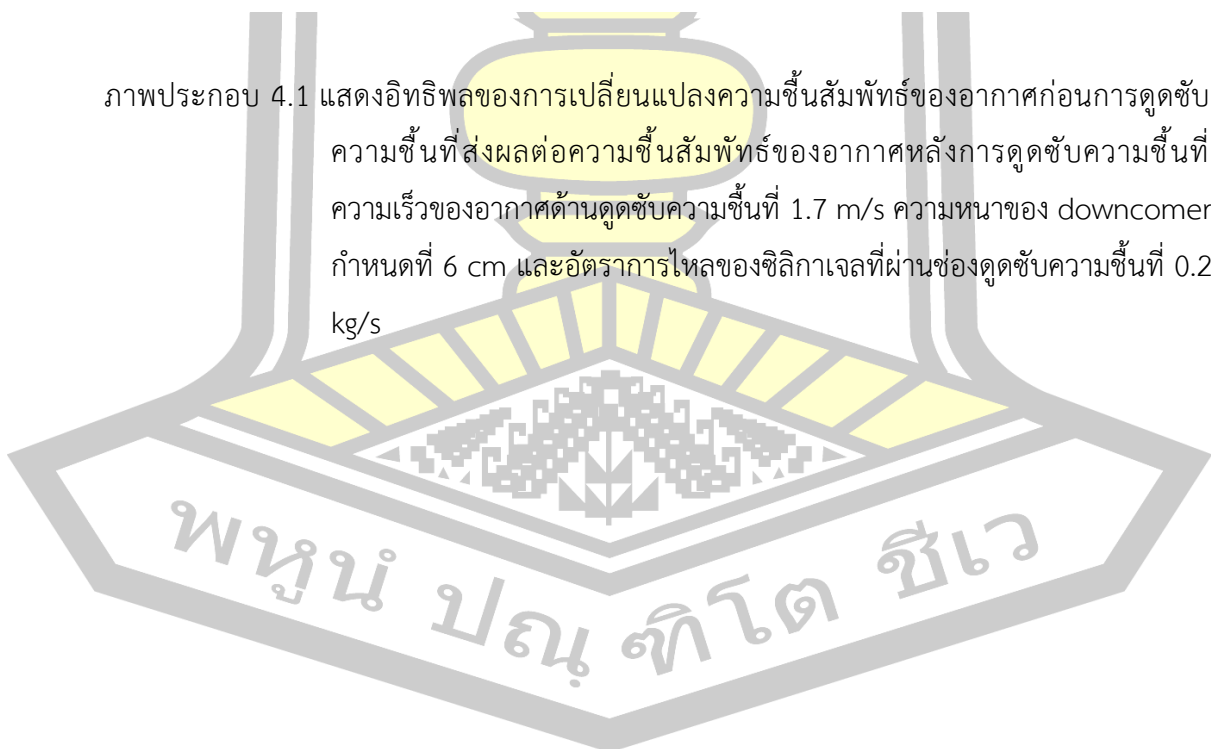
4.1 การดูดซับความชื้น

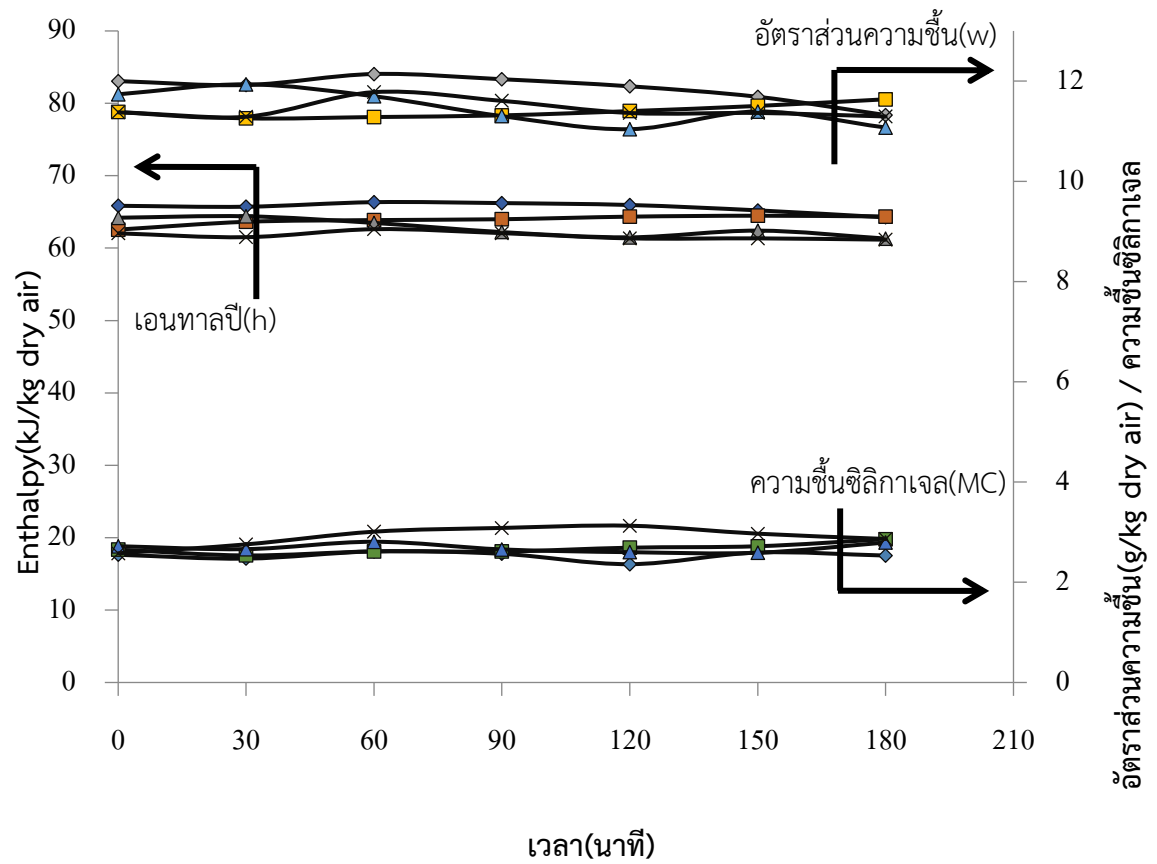
4.1.1 การศึกษาอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้น

ในการศึกษาอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ส่งผลต่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้น ความชื้นของซิลิกาเจล อัตราส่วนความชื้นและเอนทาลปีซึ่งความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ศึกษาคือ 50 60 70 และ 80 % โดยใช้ความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ 1.7 m/s ความหนาของ downcomer กำหนดที่ 6 cm และอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้นที่ 0.2 kg/s ดังแสดงในภาพประกอบ 4.1- 4.3



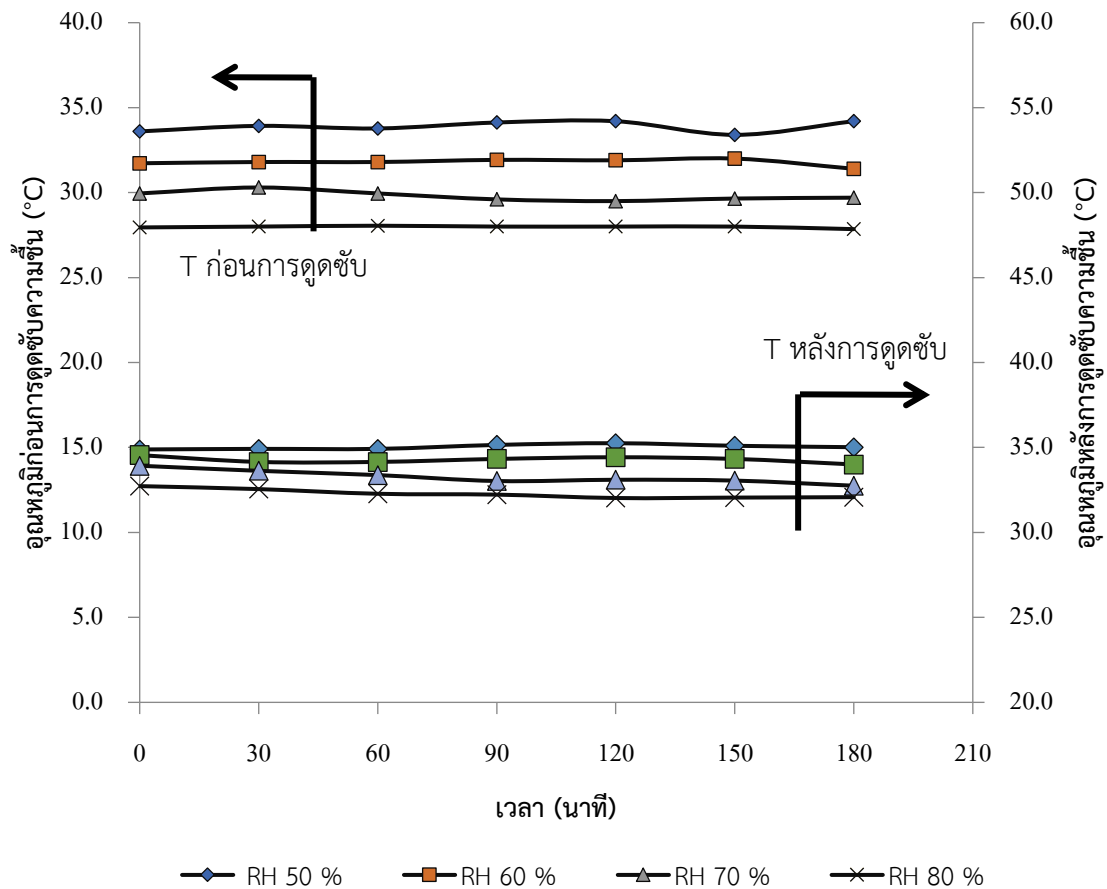
ภาพประกอบ 4.1 แสดงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ส่งผลต่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้นที่ความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ 1.7 m/s ความหนาของ downcomer กำหนดที่ 6 cm และอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้นที่ 0.2 kg/s





ภาพประกอบ 4.2 แสดงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับ ความชื้นที่ส่งผลต่อ เอนทาลปี อัตราส่วนความชื้น และ ความชื้นของซิลิกาเจล ที่ ความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ 1.7 m/s ความหนา downcomer กำหนดที่ 6 cm และอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้นที่ 0.2 kg/s

พหุ ประถม ศึกษาศาสตร์

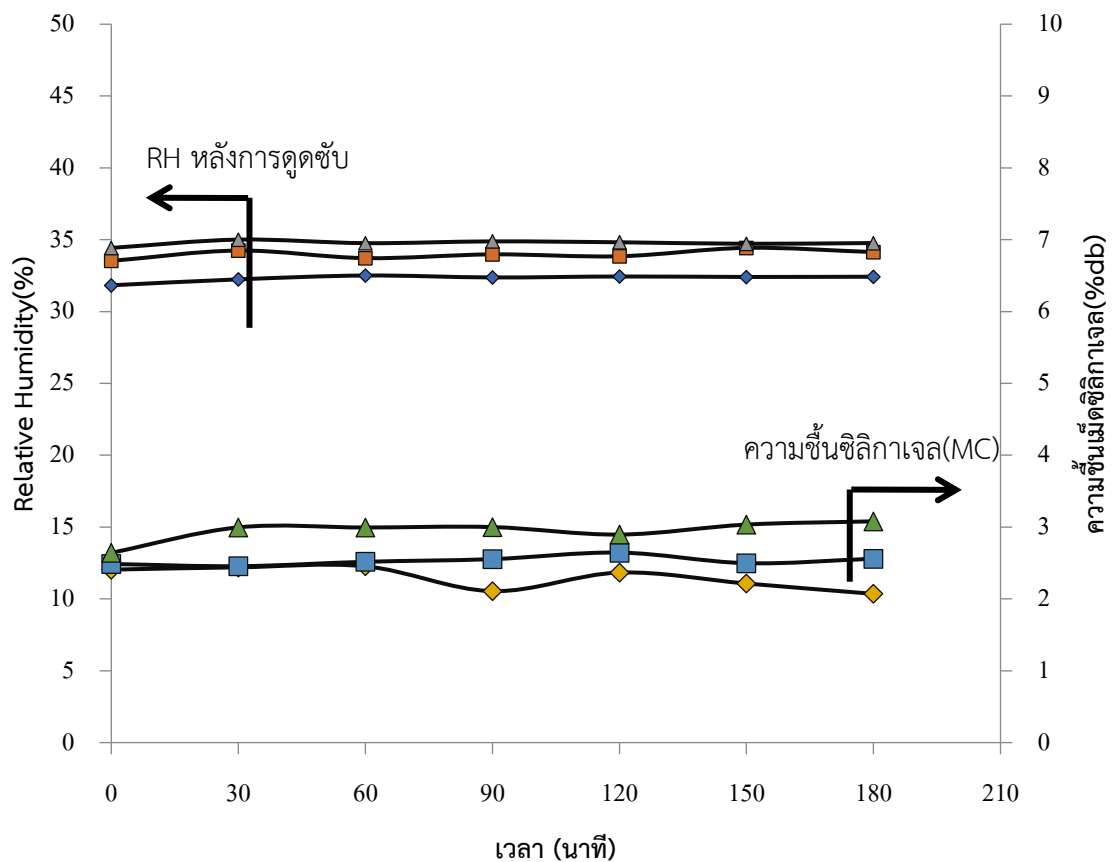


ภาพประกอบ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก่อนการดูดซับความชื้น และ อุณหภูมิหลังการดูดซับความชื้น ที่ความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ 1.7 m/s ความหนาของ downcomer กำหนดที่ 6 cm และอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้นที่ 0.2 kg/s

จากภาพประกอบ 4.1 – 4.3 จะเห็นว่าเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้นและความชื้นของเม็ดซิลิกาเจลมีค่าเพิ่ม เนื่องจากเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณไอน้ำที่อยู่ในอากาศชั้นมีค่ามากส่งผลซิลิกาเจลนั้นดูดซับปริมาณไอน้ำได้มาก จึงทำให้ซิลิกาเจลดูดซับความชื้นได้มาก ส่งผลให้ความชื้นในอากาศยังเหลืออยู่จึงทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังจากการดูดซับความชื้นมีค่ามากขึ้นด้วย แต่อัตราส่วนความชื้นและเอนทาลปีมีค่าลดลงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่เหมาะสมคือ 50 %

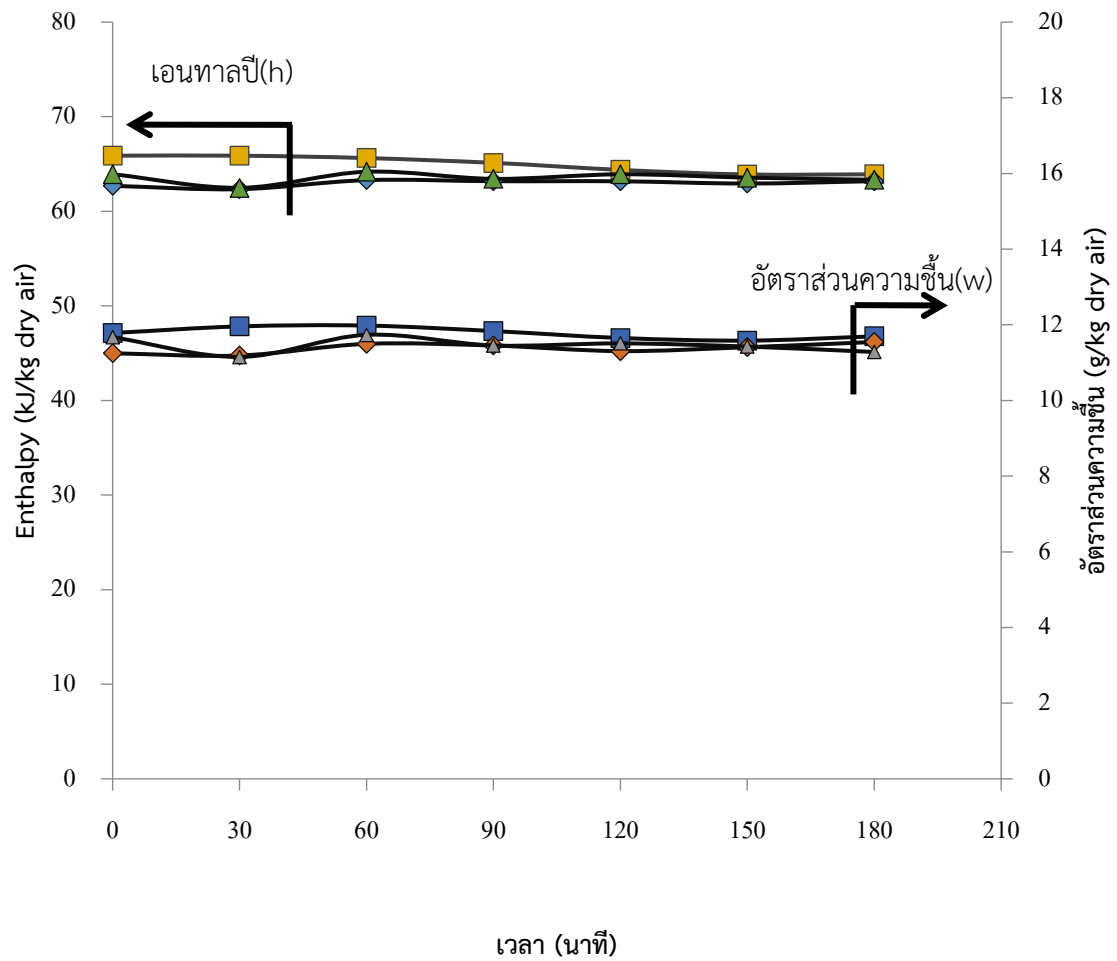
4.1.2 การศึกษาอิทธิพลของความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้น

ในการศึกษาอิทธิพลของความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ส่งผลต่อ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้น ความชื้นของซิลิกาเจล อัตราส่วนความชื้นและเอนทัลปี ซึ่งความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ศึกษาคือ 1.4 1.7 และ 2 m/s โดยใช้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ 50 % ความหนาของ downcomer ที่ 6 cm และอัตราการไหลของ ซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้นที่ 0.2 kg/s ดังแสดงในภาพประกอบ 4.4 – 4.6



◆ ความเร็วอากาศ 1.4 m/s ■ ความเร็วอากาศ 1.7 m/s ▲ ความเร็วอากาศ 2.0 m/s

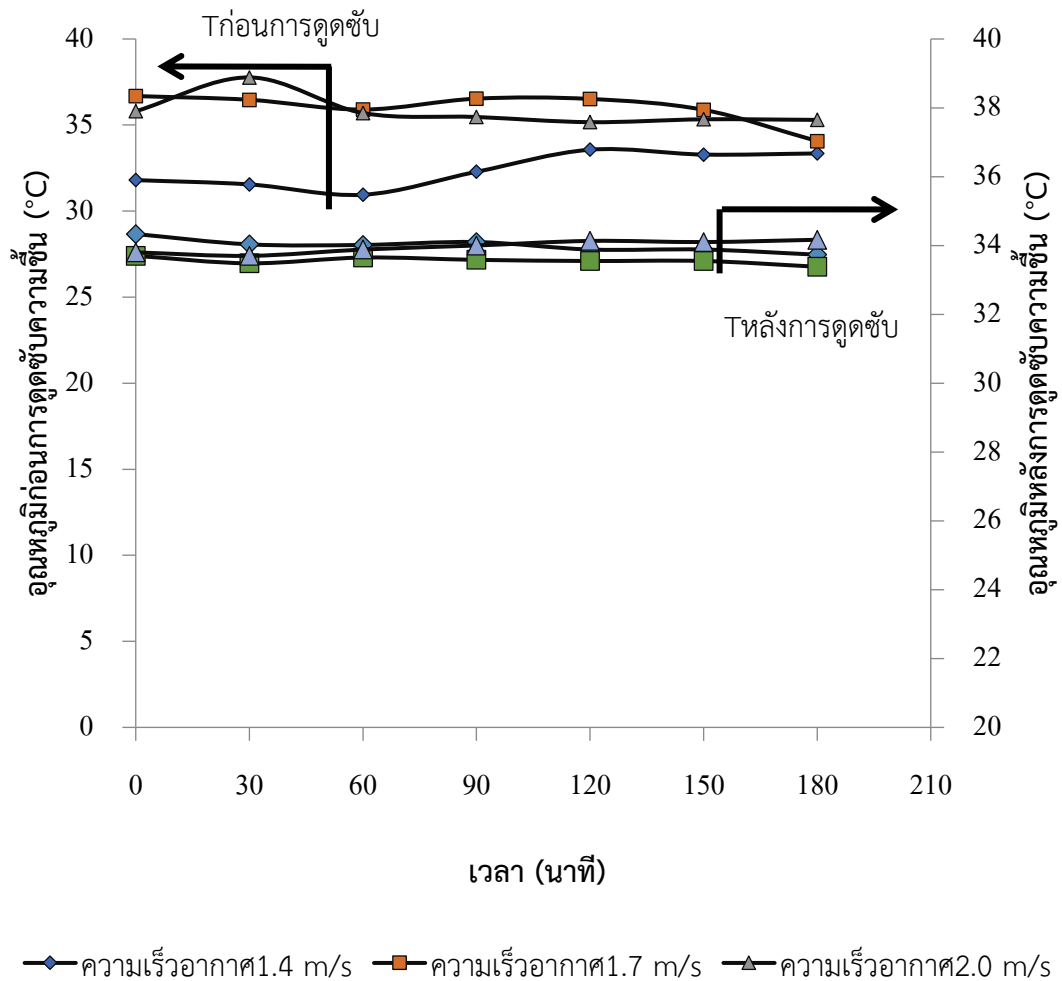
ภาพประกอบ 4.4 แสดงอิทธิพลของความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ส่งผลต่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้นและความชื้นของเม็ดซิลิกาเจล ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับ ความชื้นที่ 50 % ความหนาของ downcomer ที่ 6 cm และอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้นที่ 0.2 kg/s



■ ความเร็วอากาศ 1.4 m/s ◆ ความเร็วอากาศ 1.7 m/s ▲ ความเร็วอากาศ 2.0 m/s

ภาพประกอบ 4.5 แสดงอิทธิพลของความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ส่งผลต่อเอนทาลปี และอัตราส่วน ความชื้น ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ 50 % ความหนาของ downcomer ที่ 6 cm และอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่อง ดูดซับความชื้นที่ 0.2 kg/s

พหุ ประ โท ชี เว

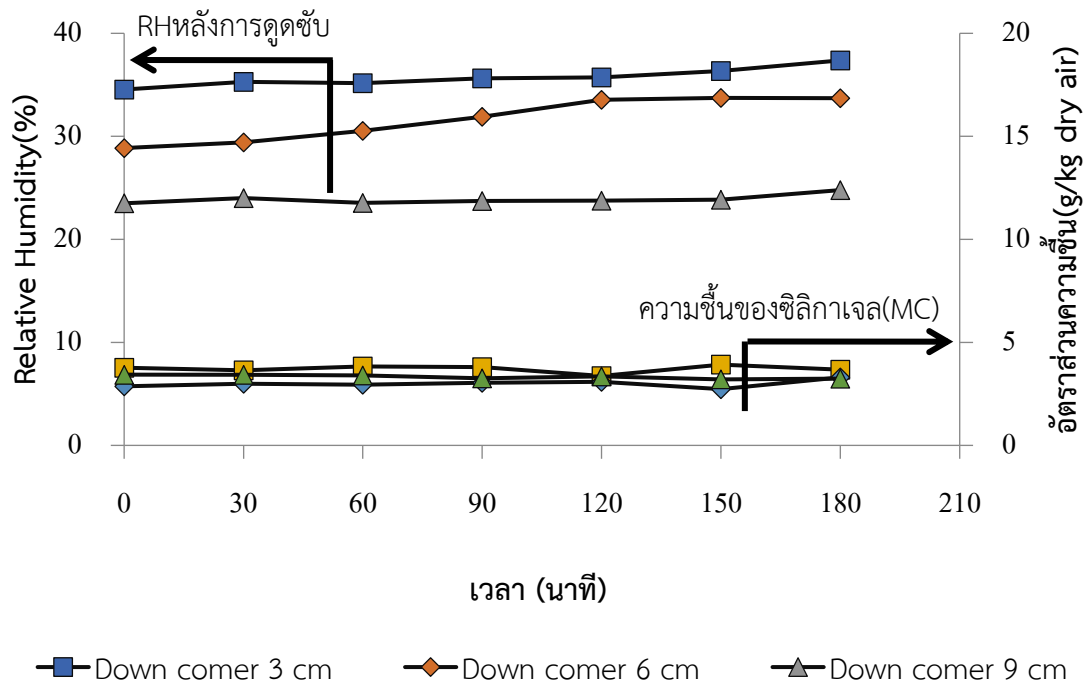


ภาพประกอบ 4.6 แสดงการเปลี่ยนอุณหภูมิก่อนการดูดซับความชื้น และ อุณหภูมิหลังการดูดซับการดูดซับความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ 50 % ความหนาของ downcomer ที่ 6 cm และอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ ช่องดูดซับความชื้นที่ 0.2 kg/s

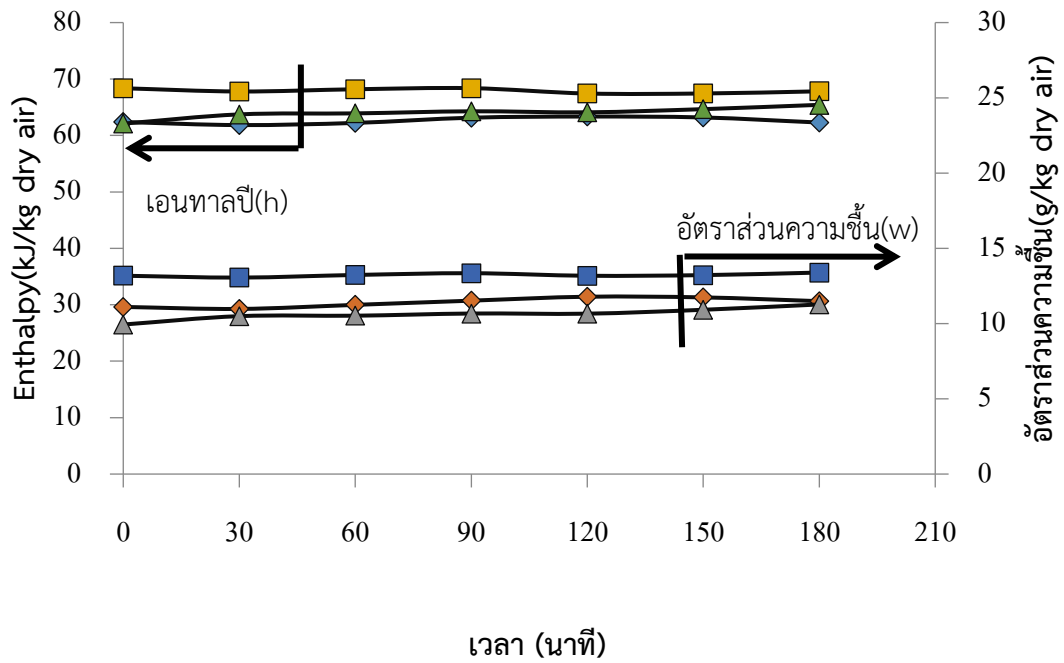
จากภาพประกอบ 4.4 - 4.6 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้นและความชื้นของเม็ดซิลิกาเจลมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มมากขึ้น การพาอากาศขึ้นก็มีค่ามากขึ้น ทำให้ เม็ดซิลิกาเจลดูดซับความชื้นได้มาก ส่งผลปริมาณความชื้นในอากาศยังเหลืออยู่จึงทำให้ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังจากการดูดซับความชื้นมีค่ามากขึ้นด้วย แต่อัตราส่วนความชื้นและเอนทาลปีมีค่าลดลง ค่าความเร็วของอากาศที่เหมาะสมที่สุดคือ 1.4 m/s

4.1.3 การศึกษาอิทธิพลของความหนาของ downcomer

ในการศึกษาอิทธิพลของความหนาของ downcomer ที่ส่งผลต่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้น ความชื้นของซิลิกาเจล อัตราส่วนความชื้นและเอนทาลปี ซึ่งความหนาของ downcomer ที่ศึกษาคือ 3.6 และ 9 cm โดยใช้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ 50 % ความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ 1.4 m/s และอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่อง ดูดซับความชื้นที่ 0.2 kg/s ดังแสดงในภาพประกอบ 4.7 - 4.9

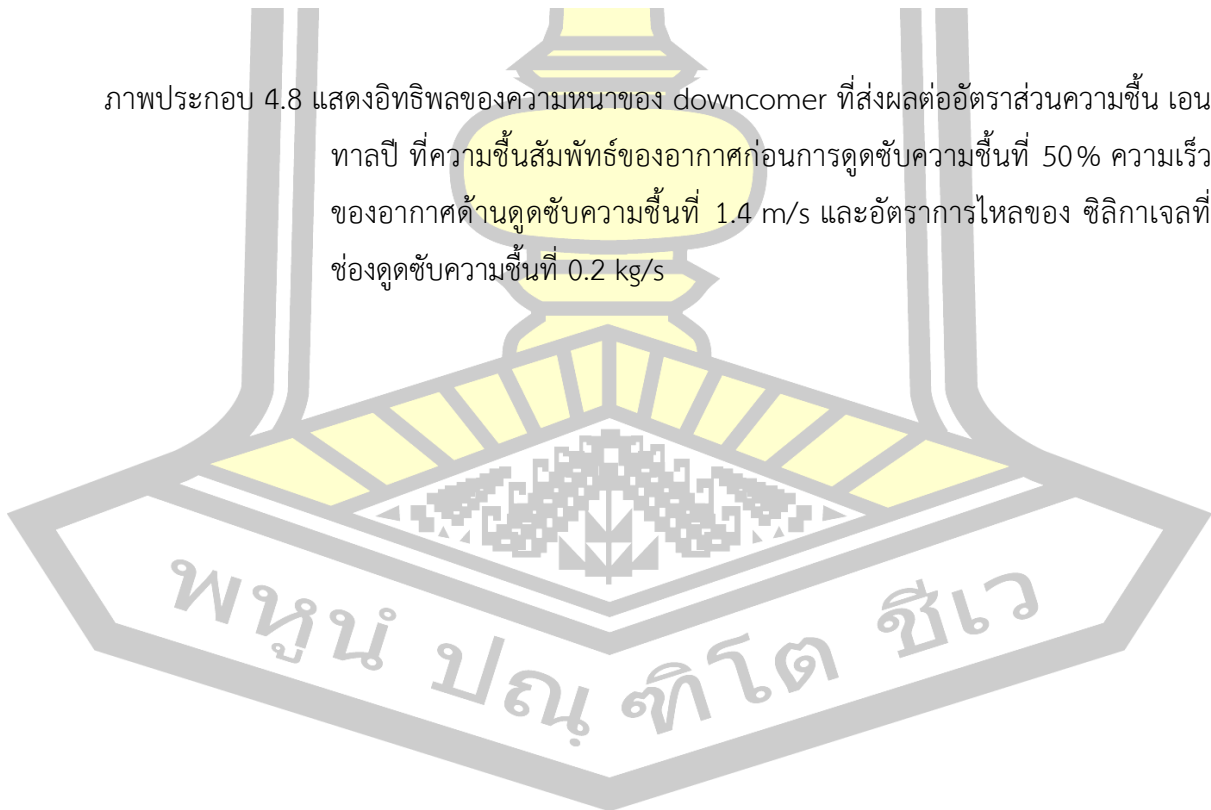


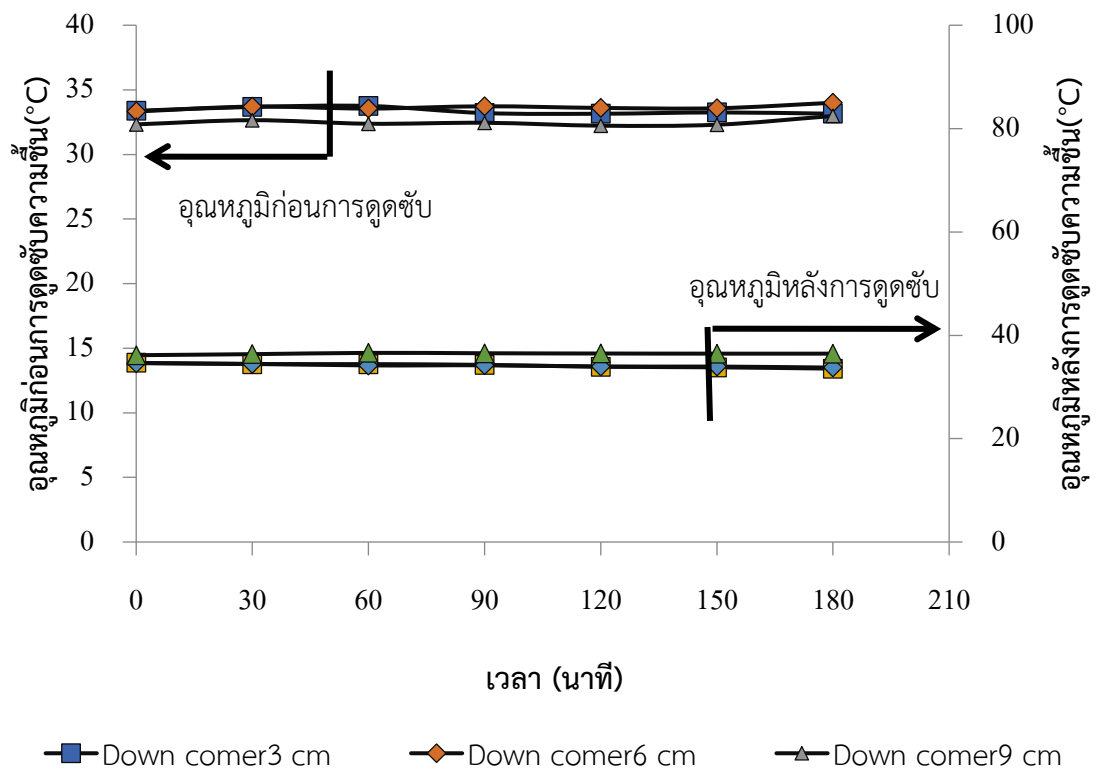
ภาพประกอบ 4.7 แสดงอิทธิพลของความหนาของ downcomer ที่ส่งผลต่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้นและความชื้นของเม็ดซิลิกาเจลที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ 50 % ความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ 1.4 m/s และอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ ช่องดูดซับความชื้น 0.2 kg/s



■ Down comer 3 cm
 ◆ Down comer 6 cm
 ▲ Down comer 9 cm

ภาพประกอบ 4.8 แสดงอิทธิพลของความหนาของ downcomer ที่ส่งผลต่ออัตราส่วนความชื้น เอนทาลปี ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ 50% ความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ 1.4 m/s และอัตราการไหลของ ซิลิกาเจลที่ช่องดูดซับความชื้นที่ 0.2 kg/s





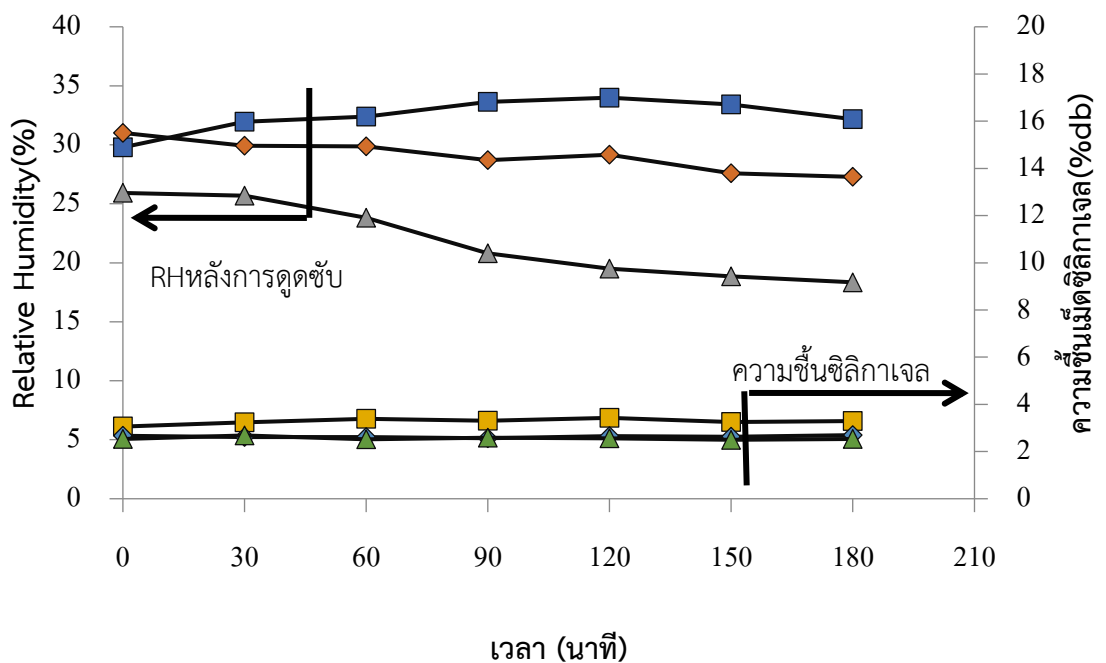
ภาพประกอบ 4.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก่อนการดูดซับความชื้น และ อุณหภูมิหลังการดูดซับความชื้น ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ 50 % ความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ 1.4 m/s และอัตราการไหลของซิลิกาเจล ที่ช่องดูดซับความชื้นที่ 0.2 kg/s

จากภาพประกอบ 4.7 - 4.9 จะเห็นว่าเมื่อความหนาของ downcomer มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผล ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้น และ ความชื้นของเม็ดซิลิกาเจลมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อความหนาของ downcomer มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้เพิ่มพื้นที่ในการดูดซับความชื้น จึงทำให้ความชื้นของอากาศนั้นมีค่าลดลง ส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้นมีค่าลดลงด้วย อัตราส่วนความชื้นและเอนทาลปีมีค่าลดลง ความหนาของ downcomer ที่เหมาะสมที่สุดคือ 9 cm

4.1.4 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้น

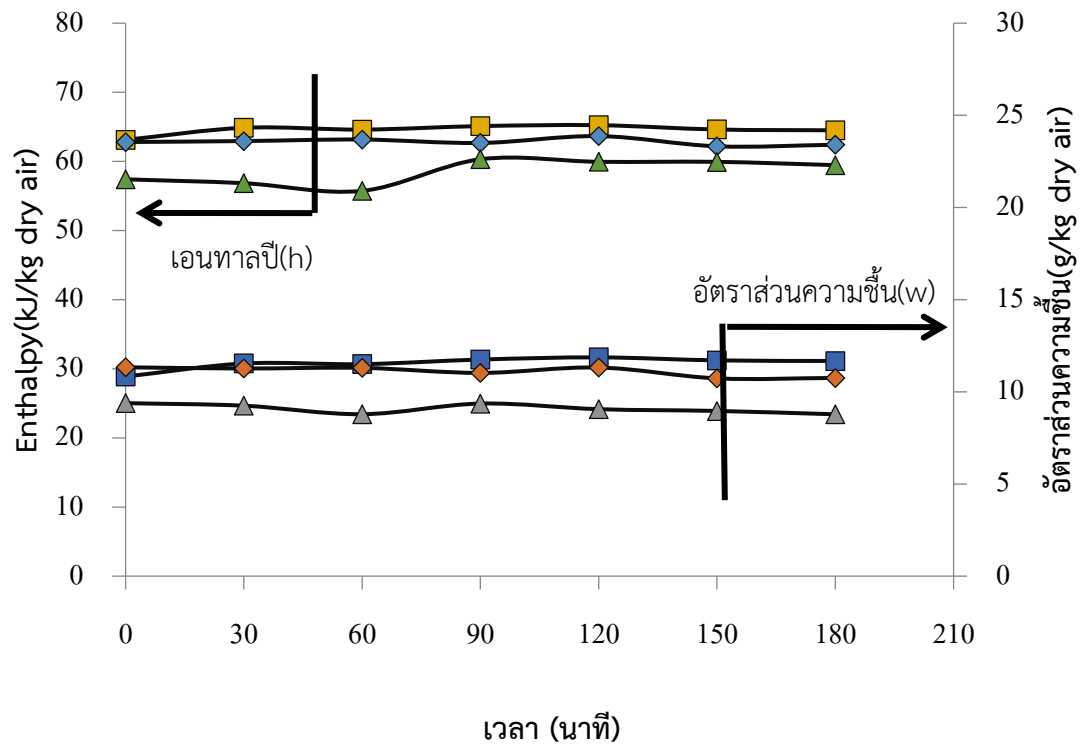
ในการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้นที่ส่งผลต่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้น อัตราการดูดซับความชื้นของซิลิกาเจล อัตราส่วนความชื้น และเอนทัลปี

ซึ่งอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้นที่ศึกษาคือ 0.1 0.2 และ 0.3 kg/s โดยใช้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ 50 % ความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ 1.4 m/s และความหนาของ downcomer ที่ 9 cm ดังแสดงในภาพประกอบ 4.10 - 4.12



- อัตราการไหลของซิลิกาเจล 0.1 kg/s
- ◆ อัตราการไหลของซิลิกาเจล 0.2 kg/s
- ▲ อัตราการไหลของซิลิกาเจล 0.3 kg/s

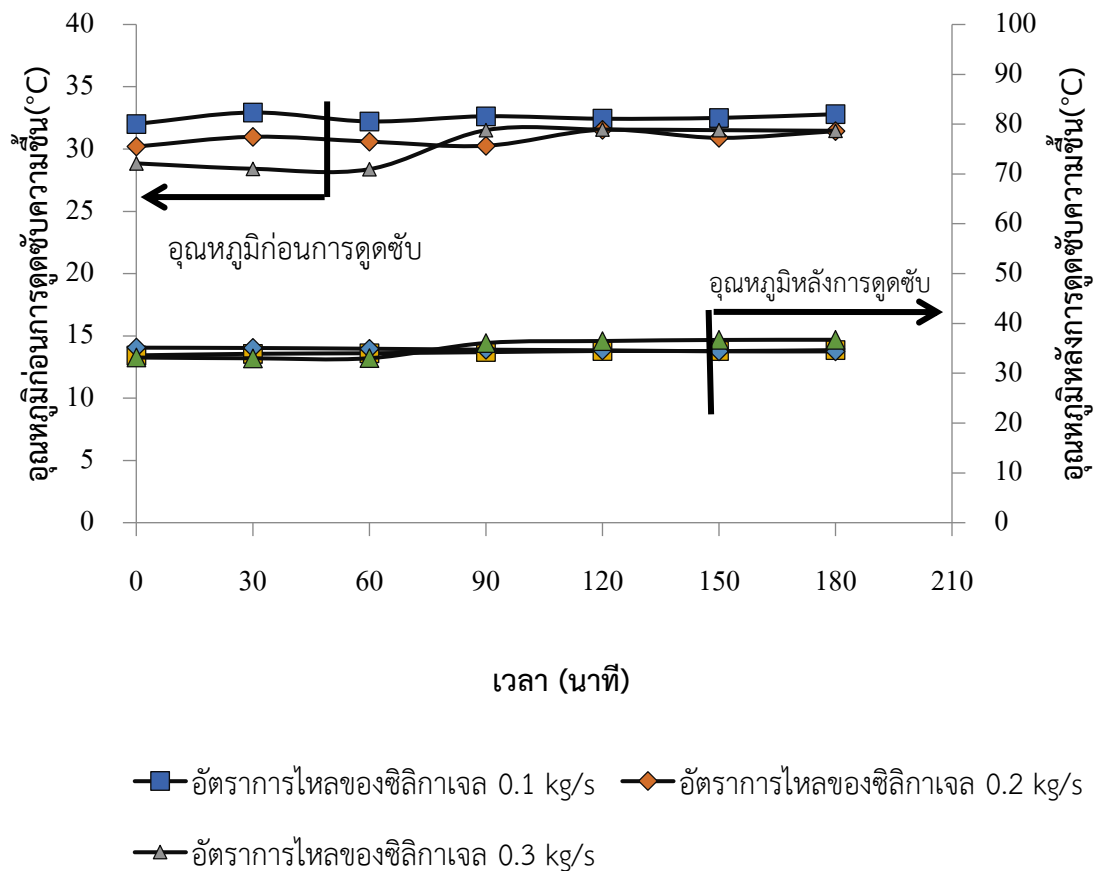
ภาพประกอบ 4.10 แสดงอิทธิพลของอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้นที่ส่งผลต่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้นและความชื้นของเม็ด ซิลิกาเจล ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ 50 % ความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ 1.4 m/s และความหนาของ downcomer ที่ 9 cm



- อัตราการไหลของซิลิกาเจล 0.1 kg/s
- ◆ อัตราการไหลของซิลิกาเจล 0.2 kg/s
- ▲ อัตราการไหลของซิลิกาเจล 0.3 kg/s

ภาพประกอบ 4.11 แสดงอิทธิพลของอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้นที่ส่งผลต่อ เอนทาลปี และ อัตราส่วนความชื้น ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับ ความชื้นที่ 50 % ความเร็วของอากาศด้านดูดซับ ความชื้นที่ 1.4 m/s และความหนาของ downcomer ที่ 9 cm





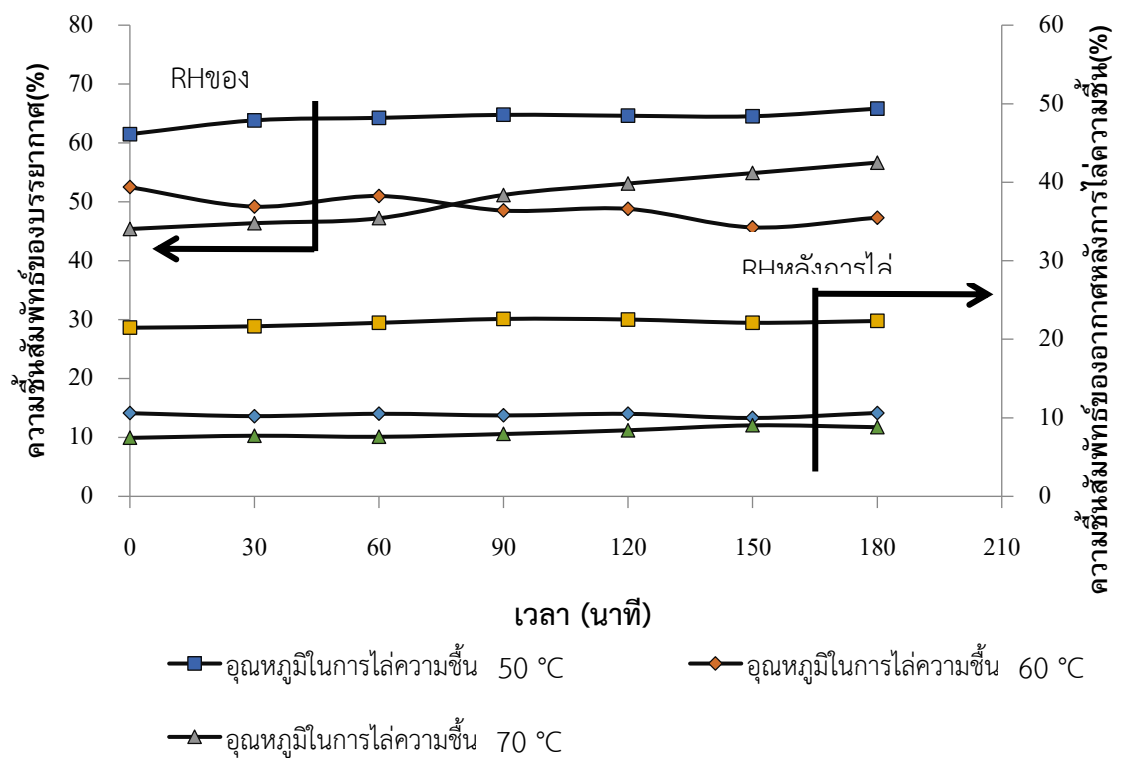
ภาพประกอบ 4.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ อุณหภูมิก่อนการดูดซับความชื้น และ อุณหภูมิ หลังการดูดซับความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ 50 % ความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ 1.4 m/s และความหนาของ downcomer ที่ 9 cm

จากภาพประกอบ 4.10 – 4.12 จะเห็นว่าเมื่ออัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้น มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้น และความชื้นของ เม็ดซิลิกาเจลมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ซิลิกาเจลเกิดความปั่นป่วนจึงทำให้การดูดซับความชื้นดูดซับได้ดีจึงทำให้ความชื้นในอากาศมีค่าลดลงส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้นมีค่าลดลง อัตราส่วนความชื้นและ เอนทาลปีมีค่าลดลง อัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้นที่เหมาะสมที่สุด 0.3 kg/s

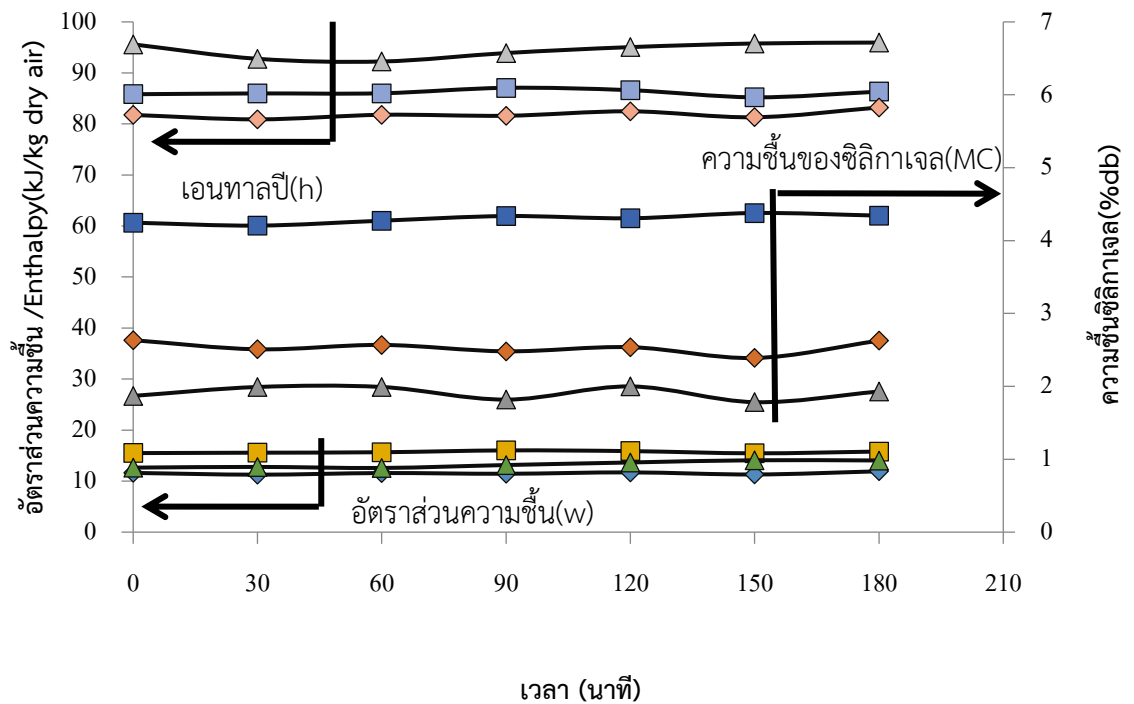
4.2 การไล่ความชื้น

4.2.1 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการไล่ความชื้น

ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการไล่ความชื้นที่ส่งผลต่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการไล่ความชื้น ความชื้นของเม็ดซิลิกาเจล อัตราส่วนความชื้นและเอนทัลปี ซึ่งอุณหภูมิในการไล่ความชื้นที่ศึกษาคือ 50 60 และ 70 °C โดยใช้ความเร็วอากาศในการไล่ความชื้นที่ 20 m/s และความสูงของแผ่น draft plate ที่ 80 cm ดังแสดงในภาพประกอบ 4.13 – 4.14



ภาพประกอบ 4.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการไล่ความชื้นและหลังการไล่ความชื้น ที่ความเร็วอากาศในการไล่ความชื้นที่ 20 m/s และความสูงของแผ่น draft plate ที่ 80 cm



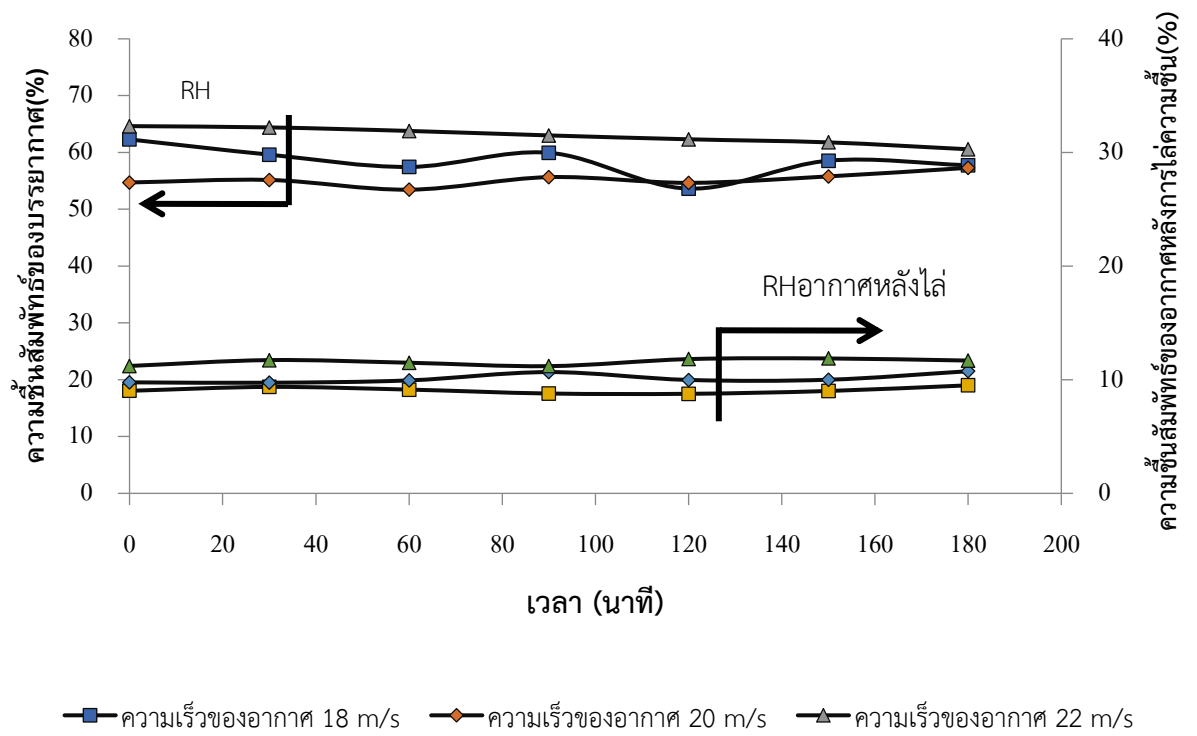
- อุณหภูมิในการไล่ความชื้น 50 °C
- ◆ อุณหภูมิในการไล่ความชื้น 60 °C
- ▲ อุณหภูมิในการไล่ความชื้น 70 °C

ภาพประกอบ 4.14 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อเอนทาลปี อัตราส่วนความชื้น และ ความชื้นซิลิกาเจลที่ความเร็วอากาศในการไล่ความชื้นที่ 20 m/s และความสูงของแผ่น draft plate ที่ 80 cm

จากภาพประกอบ 4.13 -4.14 จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิในการไล่ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการไล่ความชื้น และความชื้นของเม็ดซิลิกาเจล เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิ ในการไล่ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ความชื้นที่อยู่ในเม็ดซิลิกาเจลระเหยออกได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ปริมาณความชื้นที่อยู่ในเม็ดซิลิกาเจลมีค่าน้อยลง อัตราส่วนความชื้นและเอนทาลปีมีค่าลดลง อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือ 70 °C

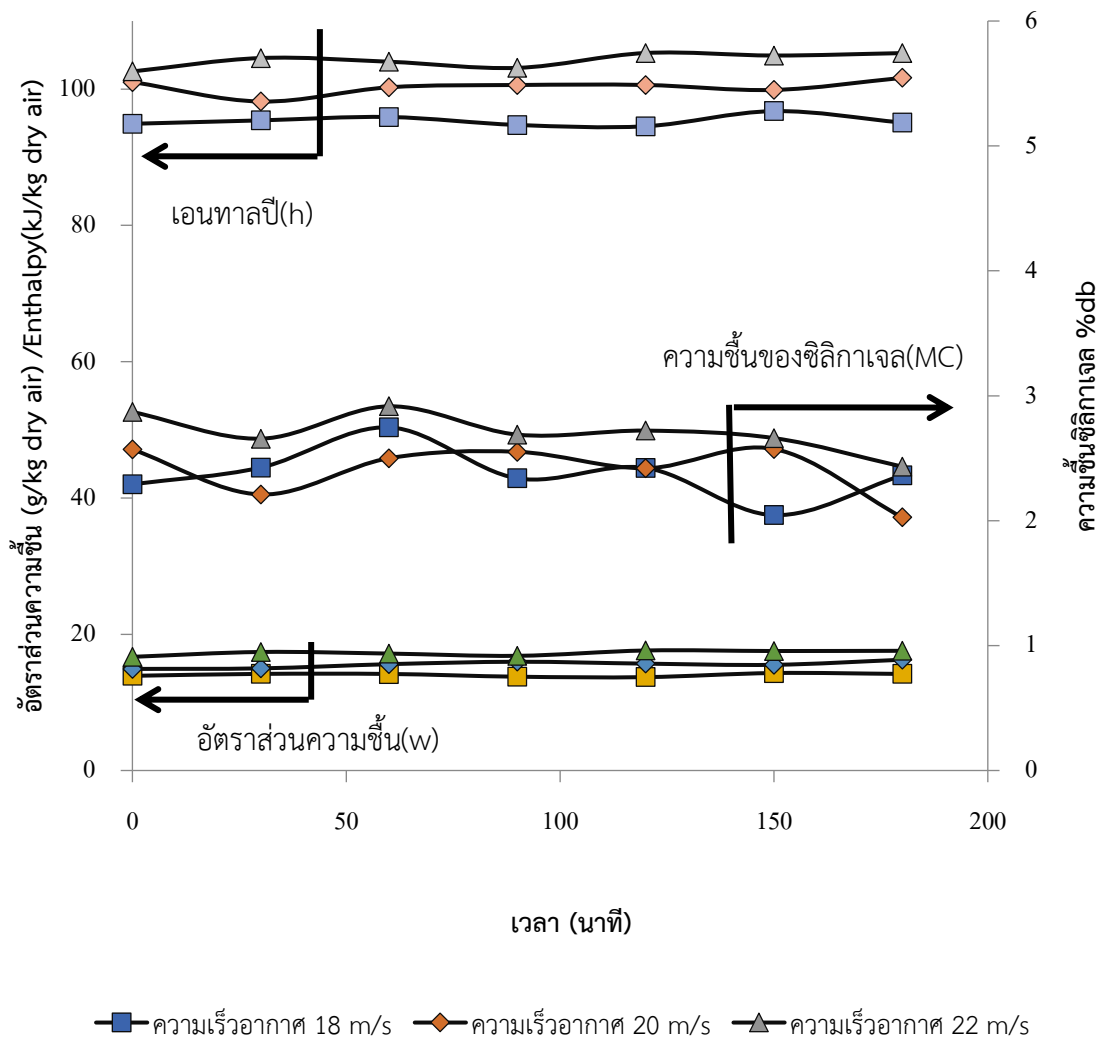
4.2.2 การศึกษาอิทธิพลของความเร็วอากาศในการไล่ความชื้น

ในการศึกษาอิทธิพลของความเร็วอากาศในการไล่ความชื้น ที่ส่งผลต่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการไล่ความชื้น ความชื้นของเม็ดซิลิกาเจล อัตราส่วนความชื้นและเอนทาลปี ซึ่งความเร็วของอากาศในการไล่ความชื้นที่ศึกษาคือ 18 20 และ 22 m/s โดยใช้อุณหภูมิในการไล่ความชื้นที่ 70 °C และความสูงของแผ่น draft plate ที่ 80 cm ดังแสดงในภาพประกอบ 4.15 - 4.16



ภาพประกอบ 4.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิในการไล่ความชื้นที่ 70 °C และความสูงของแผ่น draft plate ที่ 80 cm



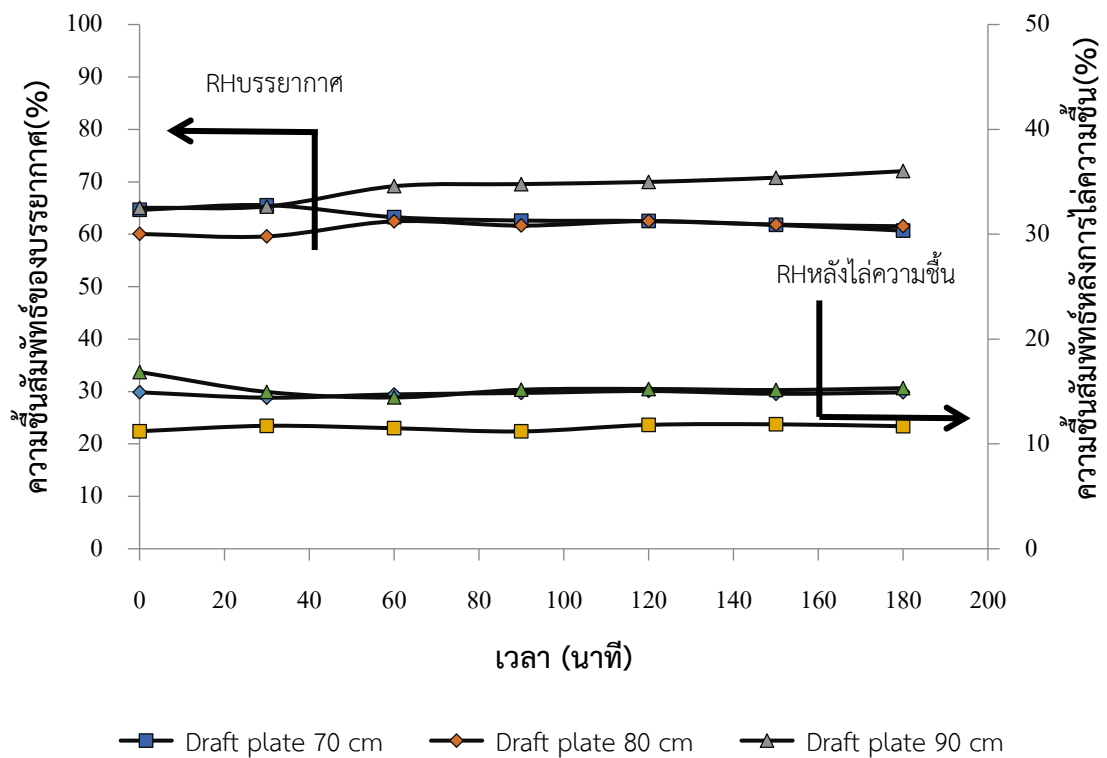


ภาพประกอบ 4.16 แสดงอิทธิพลของความเร็วอากาศด้านไล่ความชื้นที่ส่งผลต่อเอนทาลปี อัตราส่วนความชื้น ความชื้นซิลิกาเจล ที่อุณหภูมิในการไล่ความชื้นที่ 70 °C และความสูงของแผ่น draft plate ที่ 80 cm

จากภาพประกอบ 4.15 - 4.16 จะเห็นว่าเมื่อความเร็วอากาศในการไล่ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการไล่ความชื้น และความชื้นของเม็ดซิลิกาเจล เนื่องจากเมื่อความเร็วอากาศในการไล่ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นการพาเอาความชื้นที่อยู่ในเม็ดซิลิกาเจลก็ออกมาได้ดีส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์หลังการไล่ความชื้นมีค่าสูงขึ้น อัตราส่วนความชื้นและเอนทาลปีมีค่าเพิ่มขึ้น ความเร็วของอากาศในการไล่ความชื้นที่เหมาะสมคือ 18 m/s

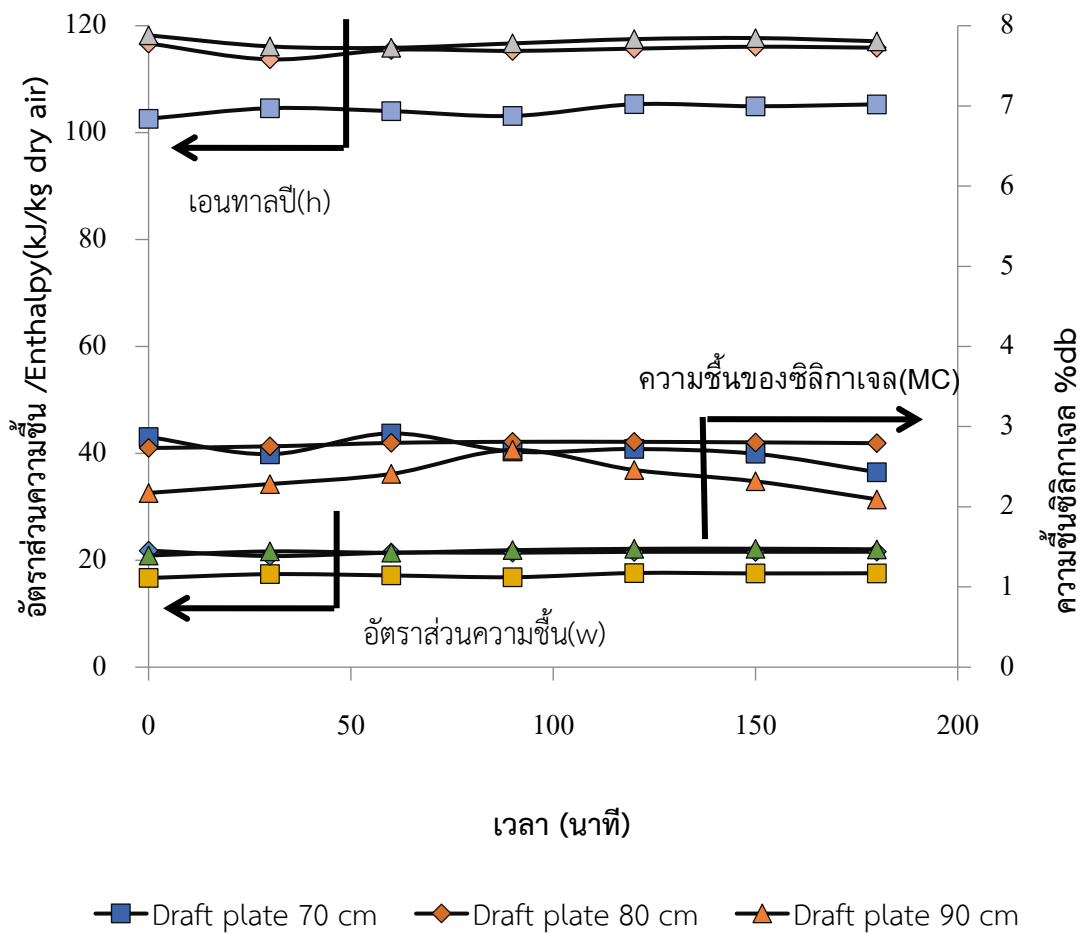
4.2.3 การศึกษาอิทธิพลของความเร็วของแผ่น draft plate

ในการศึกษาอิทธิพลของความเร็วของแผ่น draft plate ที่ส่งผลต่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการไล่ความชื้น ความชื้นของเม็ดซิลิกาเจล อัตราส่วนความชื้นและเอนทาลปี ซึ่งความเร็วของแผ่น draft plate ที่ศึกษาคือ 70 80 และ 90 cm โดยใช้อุณหภูมิในการไล่ความชื้นที่ 70 °C และ ความเร็วของอากาศในการไล่ความชื้นที่ 18 m/s ดังแสดงในภาพประกอบ 4.17 – 4.18



ภาพประกอบ 4.17 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการไล่ความชื้นอุณหภูมิในการไล่ความชื้นที่ 70 °C และ ความเร็วของอากาศในการไล่ความชื้นที่ 18 m/s

พหุ ประ โท ชี เว



ภาพประกอบ 4.18 แสดงอิทธิพลของความสูงของแผ่น draft plate อัตราส่วนความชื้น เอนทาลปี ความชื้นซิลิกาเจลอุณหภูมิในการไล่ความชื้นที่ 70 °C และความเร็วของอากาศ ในการไล่ความชื้นที่ 18 m/s

จากภาพประกอบ 4.17 - 4.18 จากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อความสูงของแผ่น draft plate มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการไล่ความชื้น และความชื้นของ เม็ดซิลิกาเจล เนื่องจากเมื่อความสูงของแผ่น draft plate มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาที่เม็ดซิลิกาเจล อยู่ในช่องสเป่า มีระยะเวลานานขึ้นส่งผลให้ความชื้นที่อยู่ในเม็ดเม็ดซิลิกาเจลออกมาเยอะขึ้น อัตราส่วนความชื้นและ เอนทาลปีมีค่าเพิ่มขึ้น ความสูงของแผ่น draft plate ที่เหมาะสมที่สุดคือ 90 cm

บทที่ 5

สรุปผล

จากการศึกษาตัวแปรของการดูดซับความชื้น ซึ่งกลไกในการดูดซับความชื้นที่ศึกษาประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนการดูดซับความชื้น และส่วนการไล่ความชื้น ซึ่งส่วนการดูดซับความชื้นประกอบด้วย 4 ปัจจัย คือความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้น 40 50 60 70 และ 80 % ความเร็วของอากาศที่ส่วนการดูดซับความชื้น 1.4 1.7 และ 2.0 m/s ความหนาของดาวน์โคเมอร์(Downcomer) 3 6 และ 9 cm และอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้น 0.1 0.2 และ 0.3 kg/s โดยจะส่งผลต่อคุณสมบัติของอากาศซึ่งประกอบด้วย ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้น ความชื้นของเม็ดซิลิกาเจล อัตราส่วนความชื้นและเอนทาลปี

ส่วนการไล่ความชื้นประกอบด้วย 3 ปัจจัยคือ อุณหภูมิในการไล่ความชื้น 50 60 และ 70 °C ความเร็วอากาศในการไล่ความชื้น 18 20 และ 22 m/s และที่ความสูงของดราฟต์เพลต (Draft plate) 70 80 และ 90 cm โดยจะส่งผลต่อคุณสมบัติของอากาศซึ่งประกอบด้วยความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้น ความชื้นของเม็ดซิลิกาเจล อัตราส่วนความชื้นและเอนทาลปี ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 ส่วนการดูดซับความชื้น

5.1.1 อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของอากาศหลังการดูดซับความชื้น โดยใช้ความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ 1.7 m/s ความหนาของดาวน์โคเมอร์ (Downcomer) ที่ 6 cm และอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้นที่ 0.2 kg/s สามารถสรุปได้คือที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ 50 % ส่งผลทำให้ปริมาณความชื้นของเม็ดซิลิกาเจลมีความชื้นประมาณ 2.67 %db ซึ่งสามารถดูดซับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นจาก 50 % จนเหลือความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้น 25 % อัตราส่วนความชื้น 11.9 g/kg dry air เอนทาลปี 65.7 kJ/kg dry air

5.1.2 อิทธิพลของความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของอากาศหลังการดูดซับความชื้น โดยใช้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ 50 % ความหนาของดาวน์โคเมอร์ (Downcomer) ที่ 6 cm และอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้นที่ 0.2 kg/s สามารถสรุปได้คือที่ความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้น 1.4 m/s ส่งผลทำให้ปริมาณความชื้นของเม็ดซิลิกาเจลมีความชื้นประมาณ 2.29 %db ซึ่งสามารถดูดซับความชื้นสัมพัทธ์ของ

อากาศก่อนการดูดซับความชื้นจาก 50 % จนเหลือความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้น 32 % อัตราส่วนความชื้น 11.8 g/kg_{dry air} เอนทาลปี 65.0 kJ/kg_{dry air}

5.1.3 อิทธิพลของความหนาของดาวนโคเมอร์ (Downcomer) ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของอากาศหลังการดูดซับความชื้น โดยใช้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้นที่ 50% ความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ 1.4 m/s และอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้นที่ 0.2 kg/s สามารถสรุปได้คือ ที่ความหนาของดาวนโคเมอร์ (Downcomer) 9 cm ส่งผลทำให้ปริมาณความชื้นของเม็ดซิลิกาเจลมีความชื้นประมาณ 2.99 %db ซึ่งสามารถดูดซับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้น 50 % จนเหลือความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้น 24 % อัตราส่วนความชื้น 10.6 g/kg_{dry air} เอนทาลปี 64.0 kJ/kg_{dry air}

ของอากาศหลังการดูดซับความชื้น โดยใช้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้น ที่ 50 % ความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้นที่ 1.4 m/s และส่วนความหนาของดาวนโคเมอร์ (Downcomer) ที่ 9 cm สามารถสรุปได้คือ ที่ อัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้น 0.3 kg/s ส่งผลทำให้ปริมาณความชื้นของเม็ดซิลิกาเจลมีความชื้นประมาณ 2.56 %db สามารถดูดซับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้น 50 % จนเหลือความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้น 22 % อัตราส่วนความชื้น 9.1 g/kg_{dry air} เอนทาลปี 58.5 kJ/kg_{dry air}

5.2 ส่วนการไล่ความชื้น

5.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิในการไล่ความชื้นที่ส่งผลต่อ คุณสมบัติของอากาศหลังการไล่ความชื้น โดยใช้ความเร็วอากาศในการไล่ความชื้นที่ 20 m/s และความสูงของแผ่นดราฟต์เพลต (Draft plate) ที่ 80 cm สามารถสรุปได้คือ ที่ อุณหภูมิ 70 °C ส่งผลทำให้ปริมาณความชื้นของเม็ดซิลิกาเจลนั้นอยู่ที่ประมาณ 1.91 %db ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการไล่ความชื้น 8 % อัตราส่วนความชื้นจะอยู่ที่ 13.3 g/kg_{dry air} เอนทาลปี 94.5 kJ/kg_{dry air}

5.2.2 อิทธิพลของความเร็วมในการไล่ความชื้นที่ส่งผลต่อ คุณสมบัติของอากาศหลังไล่ความชื้น โดยใช้อุณหภูมิในการไล่ความชื้นที่ 70 °C และความสูงของแผ่นดราฟต์เพลต (Draft plate) ที่ 80 cm สามารถสรุปได้คือ ที่ ความเร็วลม 18 m/s ส่งผลทำให้ปริมาณความชื้นของเม็ดซิลิกาเจลมีความชื้นประมาณ 2.38 %db ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการไล่ความชื้น 9 % อัตราส่วนความชื้น 14.0 g/kg_{dry air} เอนทาลปี 95.3 kJ/kg_{dry air}

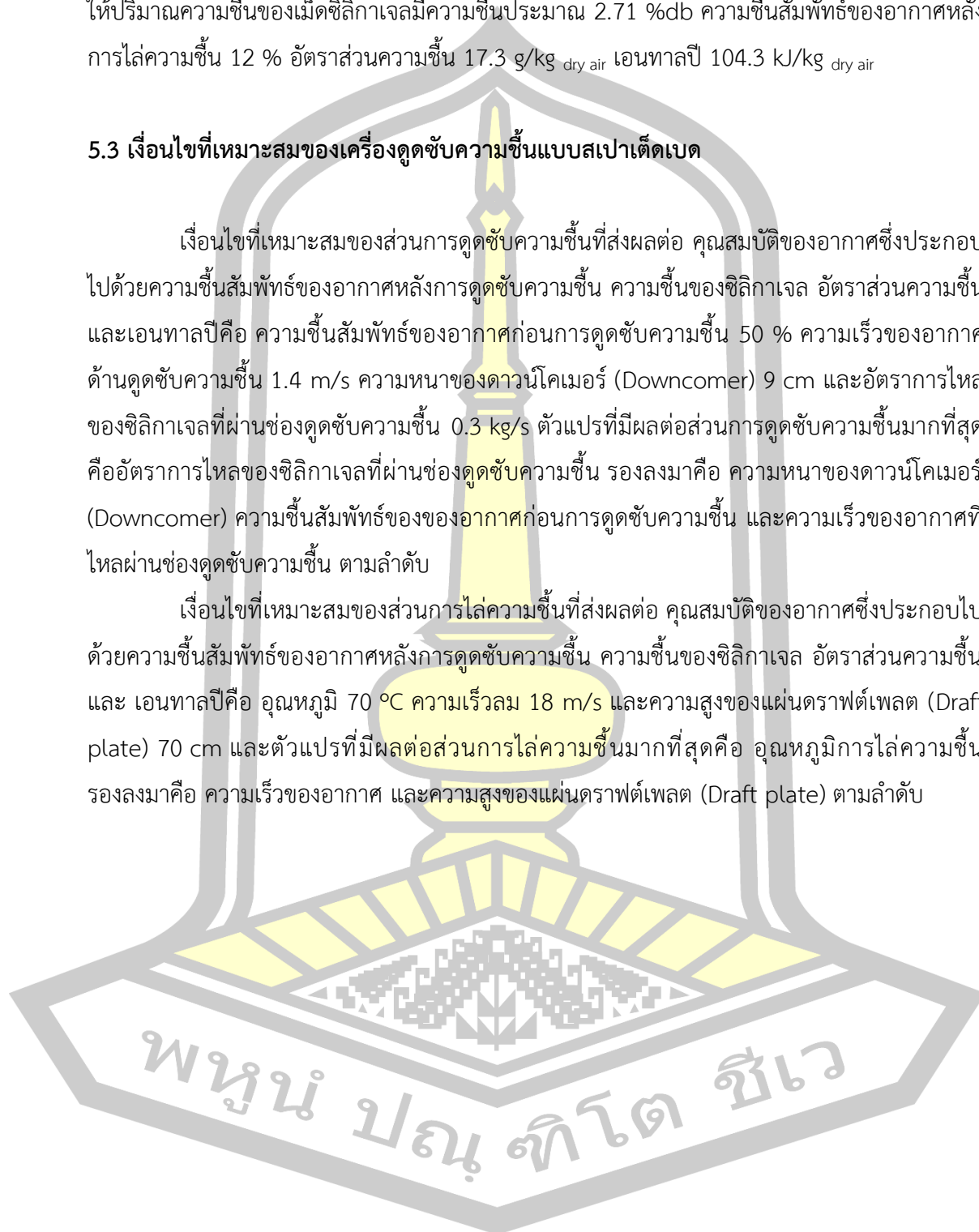
5.2.3 อิทธิพลของความสูงของแผ่นดราฟต์เพลต (Draft plate) ที่ส่งผลต่อ คุณสมบัติของอากาศหลังการไล่ความชื้น โดยอุณหภูมิในการไล่ความชื้นที่ 70 °C และความเร็วของอากาศในการไล่

ความชื้นที่ 18 m/s สามารถสรุปได้คือ ที่ความสูงของแผ่นดราฟต์เพลต (Draft plate) 70 cm ส่งผลให้ปริมาณความชื้นของเม็ดซิลิกาเจลมีความชื้นประมาณ 2.71 %db ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการไล่ความชื้น 12 % อัตราส่วนความชื้น 17.3 g/kg_{dry air} เอนทาลปี 104.3 kJ/kg_{dry air}

5.3 เงื่อนไขที่เหมาะสมของเครื่องดูดซับความชื้นแบบสเปาเต็ดเบต

เงื่อนไขที่เหมาะสมของส่วนการดูดซับความชื้นที่ส่งผลต่อ คุณสมบัติของอากาศซึ่งประกอบไปด้วยความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้น ความชื้นของซิลิกาเจล อัตราส่วนความชื้น และเอนทาลปีคือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้น 50 % ความเร็วของอากาศด้านดูดซับความชื้น 1.4 m/s ความหนาของดาวน์โคเมอร์ (Downcomer) 9 cm และอัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้น 0.3 kg/s ตัวแปรที่มีผลต่อส่วนการดูดซับความชื้นมากที่สุดคืออัตราการไหลของซิลิกาเจลที่ผ่านช่องดูดซับความชื้น รองลงมาคือ ความหนาของดาวน์โคเมอร์ (Downcomer) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการดูดซับความชื้น และความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านช่องดูดซับความชื้น ตามลำดับ

เงื่อนไขที่เหมาะสมของส่วนการไล่ความชื้นที่ส่งผลต่อ คุณสมบัติของอากาศซึ่งประกอบไปด้วยความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังการดูดซับความชื้น ความชื้นของซิลิกาเจล อัตราส่วนความชื้น และ เอนทาลปีคือ อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วลม 18 m/s และความสูงของแผ่นดราฟต์เพลต (Draft plate) 70 cm และตัวแปรที่มีผลต่อส่วนการไล่ความชื้นมากที่สุดคือ อุณหภูมิการไล่ความชื้น รองลงมาคือ ความเร็วของอากาศ และความสูงของแผ่นดราฟต์เพลต (Draft plate) ตามลำดับ



บรรณานุกรม

- กลอยใจ เชยกลิ่นเทศ. (2554). ไซโครเมทริกส์ (Psychometrics). Retrieved August 2, 2011, from http://pirun.ku.ac.th/~g4765306/mass_transfer/psychometrics.htm%0A
- กิตติคุณ แสงศร และจักรพงษ์ เกื้อนสอน. (2553). การศึกษาตัวแปรของการดูดซับความชื้นโดยใช้สารดูดซับความชื้นชนิดแข็งที่มีผลต่อคุณสมบัติของอากาศ. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- กิตติยา กิจวรดี. (2539). วิทยาการเก็บเกี่ยวข้าว. ใน *ข้าว: ความรู้คู่ชาวนา เอกสารวิทยาการครบรอบ 80 ปี ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี* (pp. 138–144). กรุงเทพฯ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- เครือวัลย์ อัดตะวิริยะสุข. (2531). คุณภาพเมล็ดข้าวทางกายภาพและมาตรฐานข้าว. ใน *การปรับปรุงคุณภาพข้าวสำหรับผู้ดำเนินการธุรกิจโรงสี* (pp. 60–76). กรุงเทพฯ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- เครือวัลย์ อัดตะวิริยะสุข. (2536). คุณภาพเมล็ดข้าวทางกายภาพและการแปรสภาพเมล็ด. ใน *เอกสารประกอบการบรรยายการฝึกอบรมหลักสูตรวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว ณ ศูนย์วิจัยข้าวพัทลุง* (pp. 1–53). กรุงเทพฯ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- งามชื่น คงเสรี. (2536). คุณภาพเมล็ดทางเคมี. ใน *เอกสารประกอบการบรรยายฝึกอบรมหลักสูตรวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว ณ ศูนย์วิจัยข้าวพัทลุง* (pp. 54–70). กรุงเทพฯ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- จำรัส โปร่งศิริวัฒนา. (2534). *ความรู้เรื่องข้าว*. กรุงเทพฯ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- ชัยสวัสดิ์ เทียนวิบูลย์. (2523). *การทำความเย็นและปรับอากาศ*. กรุงเทพฯ: ก. วิศวกรรม.
- ณัฐหทัย เอพาณิช. (2547). *การตรวจสอบคุณภาพเมล็ดข้าว*. กรุงเทพฯ: กรมวิชาการเกษตร.
- พรรคศักดิ์ ทองมา. (2542). *การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคสเปาเต็ดเบดขนาดอุตสาหกรรม*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ไพโรจิตร จันทรวงษ์, วีระศักดิ์ อนันมบุตร และวิไลศรี ลิ้มปทยอม. (2528). การเก็บรักษาข้าวสารและข้าวกล้องระยะยาว. *วารสารการเกษตร*, 3, 85–88.
- ภานุมาตย์ พัฒโท. (2553). *การปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการอบแห้งข้าวเคลือบสมุนไพรเพื่อการประหยัดพลังงานและการรักษาคุณภาพโดยการดัดแปลงคุณสมบัติของอากาศอบแห้ง*. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- วรัญญู เสมรสุต. (2549). *การพัฒนาเครื่องเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์สำหรับหมักแบบแห้ง*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- สมชาติ โสภณธนฤทธิ์. (2540). *การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท*. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สันติ แนวทอง. (2553). *การประยุกต์ใช้วงล้อดูดซับความชื้นอากาศร่วมกับเครื่องอบแห้งเพื่อลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงแก๊สและรักษาคุณภาพของชาโมโรเฮยะ (ชาปอกระเจา)*. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- อดิพงษ์ นันทพันธ์, ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ และณัฐวุฒิ ดุษฎี. (2005). การทดสอบสมรรถนะของชุดสารดูดความชื้นแบบถาดสำหรับกระบวนการอบแห้งลำไย. *Naresuan University Journal: Science and Technology (NUJST)*, 13(1), 25–36.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2539). ธัญชาติและแป้งหน่วยที่ 3. ใน *เอกสารการสอบชุดวิชาอาหารและโภชนาการ* (pp. 111–150). นนทบุรี: มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช.
- Armstrong Humidification Group. (2005). Basic Application Principles. Retrieved September 7, 2012, from <http://www.armstrongintl.com/common/hvacsource/basicprinciples.pdf>
- Ashare Handbook. (1996). Solar Energy Equipment. In *Heating, Ventilating and Air-Conditioning System and Equipment* (pp. 321–322). New York: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
- Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W., & Hall, C. W. (1992). *Drying and storage of grains and oilseeds*. New York: Van Nostrand Reinhold Press.
- ISTA. (2008). *International Rules for Seed Testing Rules*. Zurich: International Seed Testing Association.
- Juliano, B. O. (1985a). *Rice: Chemistry and Technology* (2nd ed.). Minnesota: American Association Cereal Chemists, Inc.
- Juliano, B. O. (1985b). *Rice in Human Nutrition*. Rome: The International Rice Research Institute (IRRI).
- Mujumdar, A. S. (2000). *Drying technology in agriculture and food science*. USA: Enfield (NH).
- Napoleon Enteria and Kunio Mizutani. (2011). The role of the thermally activated desiccant cooling technologies in the issue of energy and environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 4686–4707.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายอาทิตย์ เพ็ชรงาม
วันเกิด	วันที่ 22 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2531
สถานที่เกิด	อำเภอรัตนบุรี จังหวัดสุรินทร์ ประเทศไทย
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 15/2 หมู่ที่ 15 บ้านผือใหญ่ ตำบลรัตนบุรี อำเภอรัตนบุรี จังหวัดสุรินทร์ รหัสไปรษณีย์ 32130
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	ผู้เชี่ยวชาญและประสานงานโครงการวิจัย
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม รหัสไปรษณีย์ 44150
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2546 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนรัตนบุรี จังหวัดสุรินทร์ พ.ศ. 2549 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนรัตนบุรี จังหวัดสุรินทร์ พ.ศ. 2553 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล (พลังงาน) มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2555 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2562 ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนวิจัย	ทุนโครงการพัฒนาศักยภาพบุคคลากร STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics) เพื่อกำวิจัยและพัฒนาสำหรับ ภาคอุตสาหกรรม โดยสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) พ.ศ. 2560 ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษาระดับปริญญาเอก โดยสำนักงาน คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) พ.ศ. 2559 ทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสนับสนุน โดย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) พ.ศ. 2552 ทุนการศึกษานิสิตเรียนดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2553