

การประเมินประสิทธิภาพของการลดความชื้นอากาศและการฟื้นฟูสภาพของ  
สารดูดความชื้นในคอลัมน์แบบหลายชั้น  
PERFORMANCE EVALUATION OF DEHUMIDIFICATION AND  
REGENERATION OF THE MULTILAYER DESICCANT BED COLUMN

พฤกษา สวาทสุข  
PRUEKSA SAWARDSUK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2565  
KMITL-2022-EN-D-118-091

PERFORMANCE EVALUATION OF DEHUMIDIFICATION AND  
REGENERATION OF THE MULTILAYER DESICCANT BED COLUMN

PRUEKSA SAWARDSUK

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2022

KMITL-2022-EN-D-118-091

COPYRIGHT 2022

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินประสิทธิภาพของการลดความชื้นอากาศและการฟื้นฟูสภาพของ
	สารดูดความชื้นในคอลัมน์แบบหลายชั้น
นักศึกษา	นางสาวพุกษา สวาทสุข
รหัสประจำตัว	59601033
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร
พ.ศ.	2565
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.เอกพงษ์ ชีวีโตโสภณ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและประเมินประสิทธิภาพการทำงานของโครงสร้างบรรจุสารดูดความชื้นภายในคอลัมน์ลดความชื้นอากาศ ซิลิกาเจลซึ่งเป็นสารดูดความชื้นชนิดของแข็งถูกนำมาใช้เพื่อดูดซับความชื้นจากอากาศ โครงสร้างเบตบรรจุสารดูดความชื้นหลายแบบถูกทดสอบเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสภาวะอากาศหลังผ่านคอลัมน์ลดความชื้นอากาศภายใต้อัตราการไหลอากาศ  $1.2 \text{ m}^3/\text{min}$  อัตราการลดความชื้นอากาศ ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ และประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศของโครงสร้างเบตบรรจุแบบต่าง ๆ ถูกเปรียบเทียบกับเบตควบคุมซึ่งเป็นเบตบรรจุเต็ม การแบ่งชั้นเบตเป็นหลายชั้น (มีช่องอากาศและไม่มีช่องอากาศ) ทำให้อัตราการลดความชื้นอากาศและประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศมีค่าสูงกว่าแบบเบตบรรจุเต็มอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งอัตราการลดความชื้น ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ และประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศ โดยโครงสร้างเบตแบบหลายชั้นมีช่องอากาศจำนวน 15 ชั้น (15A) มีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด อัตราการลดความชื้นอากาศเฉลี่ย  $5.22 \text{ g water}/\text{min}$  และประสิทธิภาพการลดความชื้นเฉลี่ย  $16.99\%$  ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศและการฟื้นฟูสภาพซิลิกาเจลของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นแบบ 15A พบว่าปริมาณความชื้นอากาศและอัตราการไหลของอากาศส่งผลต่อประสิทธิภาพการลดความชื้น อุณหภูมิลมร้อนและอัตราการไหลของลมร้อนส่งผลต่อการฟื้นฟูสภาพของซิลิกาเจล การลดความชื้นอากาศแบบต่อเนื่องประกอบด้วยกระบวนการลดความชื้นอากาศและการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น การกำหนดเวลาสลับการทำงานของคอลัมน์ระหว่างการลดความชื้นอากาศและการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นพบว่า 10 นาทีเป็นเวลาที่เหมาะสม อัตราการไหลและอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานแบบครบรอบของชุดลดความชื้นอากาศแบบหลายชั้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนส่งผลให้ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศต่ำลง การกำหนดค่าการทำงานของระบบลดความชื้นอากาศนี้สามารถทำงานได้หลายเงื่อนไขโดยพิจารณาจากอัตราการฟื้นฟูสารดูดความชื้นเฉลี่ยสะสมต้องมีค่าอย่างน้อยเท่ากับอัตราการลดความชื้นอากาศสะสมซึ่งทำให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง การตั้งค่าทำงานของชุดลดความชื้นอากาศแบบหลายชั้นที่อัตราการไหลของอากาศที่  $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$  และฟื้นฟูสภาพซิลิกาเจลที่  $70^\circ\text{C}$  อัตราการไหลลมร้อน  $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$  ให้ประสิทธิภาพการทำงานแบบครบรอบสูงสุดและการใช้พลังงานจำเพาะต่ำที่สุด

<b>Thesis</b>	Performance evaluation of dehumidification and regeneration of the multilayer desiccant bed column
<b>Student</b>	Ms. Prueksa Sawardsuk
<b>Student ID.</b>	59601033
<b>Degree</b>	Doctor of Engineering
<b>Program</b>	Food Engineering
<b>Year</b>	2022
<b>Thesis Advisor</b>	Assist.Prof.Dr.Ekkapong Cheevitsopon

## ABSTRACT

The objective of this study was to design and evaluate the performance of the desiccant bed structure inside the air dehumidification column. Silica gel, a solid desiccant, is used as a moisture absorber. Air passed through three desiccant bed structures (type A, B and C) were evaluated for its properties at the constant air flow rate of 1.2 m<sup>3</sup>/min. Air dehumidification rate, amount of moisture absorbed, and air dehumidification efficiency of the bed structures were compared to those of the control packed bed. The multilayer bed provided higher air dehumidification rate and air dehumidification efficiency than the packed bed. These three parameters were the highest when using the multilayer bed structure of 15 layers with air duct (15A). The average air dehumidification rate and the average dehumidification efficiency were 5.22 g water/min and 16.99%, respectively. Then, factors affecting the air dehumidification and silica gel regeneration efficiencies provided by the 15A columns were investigated. Air humidity ratio and flow rate had effects on the dehumidification efficiency while air temperature and flow rate had effects on the regeneration efficiency. The cyclic air dehumidification and desiccant regeneration operation of the multilayer desiccant bed column was performed. The optimum switching time of the desiccant column from dehumidification to regeneration processes was 10 minutes. The flow rate and hot air temperature used in the desiccant regeneration were the main factors affecting the cyclic efficiency of the multilayer desiccant bed column. An increase in the hot air temperature resulted in a decrease in the air dehumidification efficiency. This air dehumidification system can be operated under several conditions provided that the average cumulative regeneration rate must be at least equal to the average cumulative dehumidification rate to allow the system to be run continuously. The best cycle performance and the lowest specific energy consumption of the multilayer desiccant bed air dehumidifier system were obtained when using the dehumidification airflow rate of 2.4 m<sup>3</sup>/min and the regeneration hot air temperature and flow rate of 70°C and 2.4 m<sup>3</sup>/min, respectively.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.เอกพงษ์ ชีวีตโสภณ และ ผศ.ดร.จิราพร ศรีภิญโญวิชย์ จงยิ่งเจริญ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ที่สนับสนุนงบประมาณการวิจัยในการสร้างชุดลดความชื้นอากาศ

สุดท้ายต้องขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้า คุณวรารุช สวาทสุข และคุณอัคร สวาทสุข ที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยสร้างเครื่องมือให้สำเร็จด้วยดี คุณศุภฤกษ์ นัยสุนทร ที่คอยเป็นกำลังใจให้ตลอดเวลา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

พฤษภา สวาทสุข

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผลของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ชุ้ดลดความชื้นอากาศ.....	4
2.2 แผนภูมิไซโครเมตริกของกระบวนการลดความชื้นอากาศ.....	5
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับความชื้น (Adsorption).....	7
2.3.1 ชนิดสารดูดความชื้น.....	8
2.3.2 อัตราส่วนความชื้นในอากาศ (Humidity ratio).....	10
2.3.3 อัตราการไหลของอากาศ.....	10
2.3.4 อุณหภูมิอากาศ.....	11
2.3.5 ระดับการฟื้นฟูสารดูดความชื้น.....	11
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการฟื้นฟูสารดูดความชื้น (Regeneration).....	11
2.4.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟู.....	11
2.4.2 อัตราการไหลของอากาศ.....	12
2.4.3 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ.....	12
2.4.4 โครงสร้างชั้นบรรจุสารดูดความชื้น.....	12
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อความดันตกคร่อมในคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้น.....	12
2.6 ชุ้ดปรับสภาวะอากาศ.....	14
2.7 การถ่ายเทมวลในกระบวนการดูดความชื้น.....	16
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบชุ้ดลดความชื้นอากาศ.....	18
2.9 งานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้ชุ้ดลดความชื้นอากาศกับกระบวนการแปรรูป ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอาหาร.....	22

## สารบัญ

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....	26
3.1 การเตรียมซิลิกาเจล.....	26
3.2 ชุดปรับสภาพอากาศ (Inlet air controller).....	27
3.3 การออกแบบเบดบรรจุซิลิกาเจล.....	27
3.3.1 ความดันตกคร่อมของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้น.....	28
3.3.2 ศึกษาผลของโครงสร้างเบดบรรจุต่อการลดความชื้นอากาศ.....	29
3.3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	30
3.4 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของชุดลดความชื้นอากาศ.....	30
3.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการลดความชื้นอากาศ (Dehumidification).....	31
3.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการฟื้นฟูสารดูดความชื้น (Regeneration).....	32
3.4.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นอากาศกับเวลาในขณะลดความชื้นอากาศและฟื้นฟูซิลิกาเจลของหอดูดความชื้น.....	34
3.5 การทดลองการทำงานแบบครบรอบ (Cyclic operation)	34
3.5.1 ระยะเวลาสลับการทำงานของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้น.....	35
3.5.2 ผลของอัตราการไหลลมร้อนและอุณหภูมิการฟื้นฟูสารดูดความชื้นต่อประสิทธิภาพการทำงานทั้งหมดของระบบ.....	36
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	39
4.1 การออกแบบเบดบรรจุซิลิกาเจล	39
4.1.1 ความดันตกคร่อมของคอลัมน์ลดความชื้น.....	39
4.1.2 การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักซิลิกาเจลหลังผ่านกระบวนการลดความชื้นอากาศ.....	39
4.1.3 การเปลี่ยนแปลงของสภาวะอากาศออก.....	40
4.1.4 สมรรถนะการลดความชื้นอากาศ.....	43
4.1.5 ประสิทธิภาพการลดความชื้นอุณหภูมิต่ำ.....	46
4.2 กระบวนการลดความชื้นอากาศ.....	48
4.3 กระบวนการฟื้นฟูสารดูดความชื้น.....	55
4.4 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อการลดความชื้นอากาศและการฟื้นฟูสารดูดความชื้น.....	61
4.5 การทำงานแบบครบรอบของชุดลดความชื้นอากาศ.....	72
4.5.1 ระยะเวลาสลับการทำงานของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้น.....	72
4.5.2 ผลของอัตราการไหลอากาศและอุณหภูมิการฟื้นฟูสารดูดความชื้นต่อประสิทธิภาพการทำงานทั้งหมดของระบบ.....	76

## สารบัญ

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	81
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	81
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	83
บรรณานุกรม.....	88
ภาคผนวก.....	89
ภาคผนวก ก. ประวัติผู้เขียน.....	90
ภาคผนวก ข. งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	91

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของระบบลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นชนิดของแข็งและของเหลว.....	5
2.2 ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย ( % ) ของประเทศไทยในช่วงฤดูกาลต่าง ๆ (พ.ศ. 2524-2553).....	10
2.3 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทยในช่วงฤดูกาลต่าง ๆ (พ.ศ. 2524-2553).....	10
2.4 ค่าคงที่ของสมการถดถอยกับอุณหภูมิอากาศเข้า.....	18
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบชุดลดความชื้นอากาศแบบเบดบรรจุหนึ่ง.....	22
4.1 ความดันตกคร่อมของคอลัมน์ลดความชื้นที่มีโครงสร้างเบดภายในต่างกัน.....	40
4.2 น้ำหนักซิลิกาเจลหลังการใช้ลดความชื้นอากาศนาน 60 min.....	40
4.3 อัตราลดความชื้นอากาศเฉลี่ยและประสิทธิภาพการลดความชื้นเฉลี่ยของคอลัมน์ลดความชื้นอากาศที่โครงสร้างเบดบรรจุภายในต่างกัน.....	46
4.4 ประสิทธิภาพการลดความชื้นอุณหภูมิต่อของโครงสร้างเบดบรรจุแบบต่าง ๆ.....	48
4.5 ค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการลดความชื้นอากาศ.....	49
4.6 ค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการฟื้นฟูสารดูดความชื้น.....	56
4.7 สมการทำนายค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการลดความชื้นอากาศ.....	61
4.8 สมการทำนายค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการฟื้นฟูสารดูดความชื้น.....	68
4.9 ประสิทธิภาพการทำงานของชุดลดความชื้นอากาศเมื่อทำงานแบบครบรอบ.....	78
4.10 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของชุดลดความชื้นอากาศเมื่อทำงานแบบครบรอบ 60 min.....	78

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ชุดลดความชื้นอากาศแบบเบตบรจุ (Desiccant column) และแบบวงล้อหมุน.....	5
2.2 กระบวนการดูดความชื้นและคายความชื้นของสารดูดความชื้น.....	6
2.3 แผนภูมิไซโครเมตริก.....	6
2.4 แผนภูมิไซโครเมตริกของการลดความชื้นอากาศด้วยสารดูดความชื้น.....	7
2.5 ความสามารถในการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นชนิดต่าง ๆ.....	9
2.6 ไอโซเทอมสมดุลการดูดซับความชื้นของซิลิกาเจล.....	9
2.7 ปริมาณการคายความชื้นของซิลิกาเจลเมื่อทำการฟื้นฟูที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	12
2.8 ความดันตกคร่อมในเบตสารดูดความชื้นเมื่อใช้อุณหภูมิขนาดต่าง ๆ (1-10 mm) ที่ระดับความเร็วลมต่าง ๆ (0.1 – 1.0 m/s).....	13
2.9 ชุดปรับสภาวะอากาศแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองลดความชื้นอากาศ.....	16
2.10 สมดุลมวลของเบตบรจุนึ่ง.....	16
2.11 ชุดสารดูดความชื้นแบบถาดสำหรับกระบวนการอบแห้งลำไย.....	19
2.12 ชั้นลดความชื้นแบบไหลตามแนวรัศมี.....	20
2.13 โครงร่างระบบทำแห้งสำหรับยี่ห้อที่อุณหภูมิต่ำด้วยอากาศที่ลดความชื้น.....	24
2.14 ปริมาณน้ำในสำหรับยี่ห้อที่แห้งด้วยอากาศที่ผ่านและไม่ผ่านสารดูดความชื้นซีโอไลท์.....	24
3.1 ซิลิกาเจล.....	26
3.2 โครงสร้างชุดปรับสภาพอากาศและทิศทางการไหลของอากาศ.....	27
3.3 โครงสร้างเบตบรจุ (A) แบบบรจุเป็นชั้นและมีช่องอากาศ, (B) แบบบรจุเป็นชั้นและ (C) แบบบรจุเต็ม.....	28
3.4 แผนการทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างเบตบรจุสารดูดความชื้น.....	30
3.5 การทดลองเพื่อการศึกษาการทำงานของชุดลดความชื้นอากาศแบบชั้นบางหลายชั้น.....	31
3.6 แผนการทดลองเพื่อการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการลดความชื้นอากาศ (A) และการฟื้นฟูสารดูดความชื้น (B).....	33
3.7 แผนผังระบบการไหลอากาศของการทดสอบกระบวนการฟื้นฟูสารดูดความชื้น.....	34
3.8 ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการลดความชื้นอากาศ.....	37
3.9 คอลัมน์บรจุสารดูดความชื้น.....	37
3.10 ชุดอุ่นอากาศ (Air preheater).....	38
3.11 ห้องทำแห้ง (Drying chamber).....	38
4.1 อุณหภูมิอากาศออกของคอลัมน์บรจุสารดูดความชื้นแบบหลายชั้นที่มีช่องอากาศ.....	41
4.2 อุณหภูมิอากาศออกของคอลัมน์บรจุสารดูดความชื้นแบบหลายชั้น.....	41
4.3 ความชื้นอากาศออกของคอลัมน์บรจุสารดูดความชื้นแบบหลายชั้นที่มีช่องอากาศ.....	42

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.4 ความชื้นอากาศออกของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นแบบหลายชั้น.....	43
4.5 อัตราการลดความชื้นอากาศออกของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นแบบหลายชั้นมีช่องอากาศ.....	44
4.6 อัตราการลดความชื้นอากาศออกของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นแบบหลายชั้น.....	44
4.7 ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศออกของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นแบบหลายชั้นมีช่องอากาศ.....	45
4.8 ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศออกของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นแบบหลายชั้น.....	45
4.9 การเปลี่ยนแปลงค่า enthalpy ของอากาศออกที่ 1 min.....	47
4.10 การเปลี่ยนแปลงค่า enthalpy ของอากาศออกที่ 10 min.....	47
4.11 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศออกในกระบวนการลดความชื้นอากาศที่อัตราส่วนความชื้นอากาศ A: 19 g/kg dry air, B: 22 g/kg dry air และ C: 25 g/kg dry air.....	50
4.12 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของอากาศออกในกระบวนการลดความชื้นอากาศที่อัตราส่วนความชื้นอากาศ A: 19 g/kg dry air, B: 22 g/kg dry air และ C: 25 g/kg dry air.....	51
4.13 อัตราการลดความชื้นอากาศที่ระดับอัตราการไหลอากาศต่างกันที่อัตราส่วนความชื้นอากาศ A: 19 g/kg dry air, B: 22 g/kg dry air และ C: 25 g/kg dry air.....	52
4.14 ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศที่ระดับอัตราการไหลอากาศต่างกันที่อัตราส่วนความชื้นอากาศ A: 19 g/kg dry air, B: 22 g/kg dry air และ C: 25 g/kg dry air.....	54
4.15 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของอากาศออกของการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น A: 70°C, B: 80°C และ C: 90°C.....	57
4.16 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศออกระหว่างกระบวนการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น A: 70°C, B: 80°C และ C: 90°C.....	58
4.17 อัตราการฟื้นฟูสารดูดความชื้นที่อุณหภูมิลมร้อน A: 70°C, B: 80°C และ C: 90°C.....	59
4.18 ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสารดูดความชื้นที่อุณหภูมิลมร้อน A: 70°C, B: 80°C และ C: 90°C.....	60
4.19 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของอากาศออกจากการทดลอง ( $w_{exp}$ ) และค่าทำนาย ( $w_{est}$ ) ที่สภาวะอากาศเข้า 19 g/kg dry air โดย A: 1.2 m <sup>3</sup> /min, B: 2.4 m <sup>3</sup> /min และ C: 3.6 m <sup>3</sup> /min.....	62
4.20 เปรียบเทียบปริมาณความชื้นของอากาศออกจากการทดลอง ( $w_{exp}$ ) และค่าทำนาย ( $w_{est}$ ) ที่สภาวะอากาศเข้า 22 g/kg dry air โดย A : 1.2 m <sup>3</sup> /min, B : 2.4 m <sup>3</sup> /min และ C : 3.6 m <sup>3</sup> /min.....	63

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.21 เปรียบเทียบปริมาณความชื้นของอากาศออกจากการทดลอง ( $w_{exp}$ ) และค่าทำนาย ( $w_{est}$ ) ที่สภาวะอากาศเข้า 25 g/kg dry air โดย A : 1.2 m <sup>3</sup> /min, B : 2.4 m <sup>3</sup> /min และ C : 3.6 m <sup>3</sup> /min.....	64
4.22 DCA จากการทดลอง ( $DCA_{exp}$ ) และค่าทำนาย ( $DCA_{est}$ ) ที่สภาวะอากาศเข้า 19 g/kg dry air โดย A : 1.2 m <sup>3</sup> /min, B : 2.4 m <sup>3</sup> /min และ C : 3.6 m <sup>3</sup> /min.....	65
4.23 DCA จากการทดลอง ( $DCA_{exp}$ ) และค่าทำนาย ( $DCA_{est}$ ) ที่สภาวะอากาศเข้า 22 g/kg dry air โดย A : 1.2 m <sup>3</sup> /min, B : 2.4 m <sup>3</sup> /min และ C : 3.6 m <sup>3</sup> /min.....	66
4.24 DCA จากการทดลอง ( $DCA_{exp}$ ) และค่าจากการทำนาย ( $DCA_{est}$ ) ที่สภาวะอากาศเข้า 25 g/kg dry air โดย A : 1.2 m <sup>3</sup> /min, B : 2.4 m <sup>3</sup> /min และ C : 3.6 m <sup>3</sup> /min.....	67
4.25 RCA จากการทดลอง (exp) และค่าจากการทำนาย (est) เมื่อพื้นฟูสารดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 70°C โดย A : 2.4 m <sup>3</sup> /min, B : 3.6 m <sup>3</sup> /min และ C : 4.8 m <sup>3</sup> /min.....	69
4.26 RCA จากการทดลอง (exp) และค่าจากการทำนาย (est) เมื่อพื้นฟูสารดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 80°C โดย A : 2.4 m <sup>3</sup> /min, B : 3.6 m <sup>3</sup> /min และ C : 4.8 m <sup>3</sup> /min.....	70
4.27 RCA จากการทดลอง (exp) และค่าจากการทำนาย (est) เมื่อพื้นฟูสารดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 90°C โดย A : 2.4 m <sup>3</sup> /min, B : 3.6 m <sup>3</sup> /min และ C : 4.8 m <sup>3</sup> /min.....	71
4.28 ค่าเฉลี่ยสะสมอัตราของการลดความชื้น (DCA) และค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการฟื้นฟู (RCA).....	73
4.29 ปริมาณความชื้นของอากาศออกหลังผ่านชุดลดความชื้นที่เวลาสลับการทำงาน 5 min อัตราการไหลอากาศ 2.4 m <sup>3</sup> /min อุณหภูมิ 90°C.....	74
4.30 ปริมาณความชื้นของอากาศออกหลังผ่านชุดลดความชื้นที่เวลาสลับการทำงาน 10 min อัตราการไหลอากาศ 2.4 m <sup>3</sup> /min อุณหภูมิ 90°C.....	75
4.31 ปริมาณความชื้นของอากาศออกหลังผ่านชุดลดความชื้นเมื่อพื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นด้วยลมร้อนที่อัตราการไหล 2.4 m <sup>3</sup> /min อุณหภูมิ 70 และ 90°C.....	76
4.32 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นของอากาศออกหลังผ่านชุดลดความชื้นที่อัตราการไหลอากาศเข้า 2.4 m <sup>3</sup> /min และพื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นที่อัตราการไหลลมร้อน 2.4 m <sup>3</sup> /min 70°C.....	79
4.33 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นของอากาศออกหลังผ่านชุดลดความชื้นที่อัตราการไหลอากาศเข้า 2.4 m <sup>3</sup> /min และพื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นที่อัตราการไหลลมร้อน 2.4 m <sup>3</sup> /min 90°C.....	80

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 หลักการและเหตุผลของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในปัจจุบันชุดลดความชื้นอากาศมีการใช้แพร่หลายและส่วนใหญ่มักใช้ในระบบปรับอากาศสำหรับอาคาร โครงสร้างชุดลดความชื้นอากาศที่มีจำหน่ายแบบการค้ำมีทั้งแบบเบตบรรจุ (Packed bed) ซึ่งเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน ไม่มีการเคลื่อนไหวของเบตบรรจุสารดูดความชื้นจึงทำให้การดูแลรักษาง่าย และแบบวงล้อหมุน (Rotary wheel) ที่มีระบบกลไกซับซ้อนกว่า อย่างไรก็ตามแบบเบตบรรจุมีข้อดีสูงกว่าแบบวงล้อหมุนในเรื่องของความดันตกคร่อม (Pressure drop) ซึ่งมีมากกว่า แต่มีจุดเด่นในการลดความชื้นได้ปริมาณมาก แบบวงล้อหมุนให้อากาศที่ผ่านการลดความชื้นแล้วมีความสม่ำเสมอมากกว่าแบบเบตบรรจุ (Misha et al., 2012) ชุดลดความชื้นอากาศแบบเบตบรรจุต้องใช้เครื่องเป่าอากาศเพื่อให้อากาศไหลผ่านสารดูดความชื้น ปริมาณความชื้นของอากาศที่ถูกดูดซับด้วยสารดูดความชื้นสัมพันธ์กับระยะทางที่อากาศนั้นสัมผัสกับสารดูดความชื้น ดังนั้นความหนาของชั้นสารดูดความชื้นต้องมีระยะทางเพียงพอที่จะสามารถลดความชื้นอากาศลงสู่ระดับที่ต้องการได้ การเพิ่มปริมาณสารดูดความชื้นยังส่งผลให้คอลัมน์ลดความชื้นอากาศนั้นสามารถทำงานได้นานขึ้น แต่ก็ส่งผลต่อพลังงานที่ใช้ในการเป่าอากาศที่ต้องเพิ่มขึ้นเช่นกัน นักวิจัยส่วนใหญ่มักจะออกแบบชุดลดความชื้นแบบต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการลดความชื้น (Chen et al., 2015; Yang et al., 2018) หรือปรับปรุงรูปแบบให้เหมาะสมกับพื้นที่การใช้งาน (Yang et al., 2017) สารดูดความชื้นที่ใช้ในการดูดซับความชื้นอากาศมีทั้งที่เป็นของเหลวและของแข็ง ชุดลดความชื้นอากาศที่ใช้สารดูดความชื้นชนิดของแข็งจะมีความซับซ้อนน้อยกว่าชุดลดความชื้นอากาศที่ใช้สารดูดความชื้นชนิดของเหลว (Misha et al., 2012) สารดูดความชื้นชนิดของแข็งนิยมใช้ในชุดลดความชื้นอากาศแบบเบตบรรจุ (Baghapour et al., 2015; Yang et al., 2017; Yang et al., 2018) แบบเคลือบพื้นผิว (Chang et al., 2005) และแบบวงล้อหมุน (Cheevitsopon & Jongyingcharoen, 2019) ส่วนใหญ่การออกแบบชุดลดความชื้นอากาศมักมีวัตถุประสงค์เพื่อการใช้ปรับสภาพอากาศในอาคาร การออกแบบเพื่อใช้กับระบบทำแห้งอาหารยังคงพบน้อยมาก จากการรวบรวมข้อมูลพบว่าการออกแบบชุดลดความชื้นอากาศใช้ร่วมกับระบบทำแห้งแบบอินฟาเรดโดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดูดความชื้น ซึ่งช่วยลดเวลาการทำแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรได้ถึง 44% (Punlek et al., 2009) ซิลิกาเจลเป็นสารดูดความชื้นชนิดของแข็งที่นิยมใช้โดยทั่วไป ซึ่งสามารถดูดซับความชื้นได้มากถึง 40% ของน้ำหนักและยังไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงขนาดแม้จะดูดซับความชื้นเข้าไปแล้ว (El-Samadony, 2014) เนื่องจากซิลิกาเจลไม่มีความเป็นพิษจึงนำมาใช้กับการควบคุมความชื้นของอาหารและยาได้ ซิลิกาเจลจึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมในการนำมาใช้เพื่อลดความชื้นอากาศในกระบวนการผลิตอาหาร

การทำแห้งอาหารเป็นกระบวนการถนอมอาหารที่ใช้กันมายาวนาน ซึ่งการทำแห้งนั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธีการแต่การทำแห้งด้วยลมร้อนนั้นยังคงเป็นที่นิยมและใช้กันอย่างทั่วไป ในกระบวนการทำแห้งอาหารด้วยลมร้อนนั้นความร้อนที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดอาหาร โดยทั่วไปมักไม่เกิน 100°C และใช้เวลานานเพื่อให้อาหารแห้งจนกระทั่งความชื้นอาหารลดลงอยู่ในระดับที่ปลอดภัย การใช้ความร้อนต่ำจะช่วยส่งผลในการรักษาคุณค่าทางอาหารและคุณลักษณะของอาหารที่ดี การใช้ความร้อนที่สูงทำให้ระยะเวลาทำแห้งสั้นลงแต่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การปรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในกระบวนการทำแห้งถูกนำเข้ามาใช้เพื่อปรับปรุงกระบวนการทำแห้งของผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ เช่น ข้าว ผัก มันเทศ สาหร่าย ชিং เนื้อมะเขือเทศ ด้วยการนำ

เครื่องลดความชื้นอากาศปรับค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, RH) ของอากาศก่อนเข้าสู่ระบบทำแห้ง (Attkan et al., 2014; Goula & Adamopoulos, 2005; Ju et al., 2018; Nagaya et al., 2006; Ondier et al., 2010; Osaie et al., 2020) เมื่อลดความชื้นอากาศในการทำแห้งส่งผลให้อัตราการทำแห้งดีขึ้นและรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ Attkan (2014) ใช้เครื่องลดความชื้นแบบวงล้อหมุนร่วมกับระบบอบแห้งแบบลาดที่อุณหภูมิอบแห้งต่ำเพื่อทำแห้งผัก พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้ให้สีที่สดและยังคงปริมาณวิตามินไว้สูง

ในการใช้งานชุดลดความชื้นแบบคอลัมน์จำเป็นต้องมีคอลัมน์ 2 ชุด เมื่อชุดหนึ่งทำงานจนไม่สามารถลดความชื้นได้ในระดับที่ต้องการ จำเป็นต้องทำการฟื้นฟูสารดูดความชื้นในคอลัมน์นั้นและสลับไปใช้คอลัมน์อีกชุดเพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง นักวิจัยหลายท่านได้ปรับปรุงชุดลดความชื้นอากาศให้มีโครงสร้างชั้นบรรจุสารดูดความชื้นที่แตกต่างกันเพื่อให้ได้ตรงตามวัตถุประสงค์การใช้งาน การเพิ่มความหนาของชั้นสารดูดความชื้นในคอลัมน์ทรงกระบอกกลางช่วยให้การดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้น (Awad et al., 2008) การเพิ่มความสูงของของสารดูดความชื้นในชุดลดความชื้นแบบคอลัมน์ส่งผลให้การดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นและประสิทธิภาพการทำงานครบรอบ (Cyclic efficiency) เพิ่มสูงขึ้น แต่ต้องใช้เวลาในการฟื้นฟูสารดูดความชื้นนานขึ้น (Ramzy et al., 2013) การเปลี่ยนลักษณะการฟื้นฟูสารดูดความชื้นจากเบตบรรจุชั้นเดียวเป็นการเพิ่มขึ้นบรรจุสารดูดความชื้นสามารถช่วยให้ระยะเวลาการฟื้นฟูสารดูดความชื้นลดลงได้ (Singh & Singh, 1998) หากเพิ่มระยะทางที่อากาศสัมผัสกับสารดูดความชื้นและเพิ่มจำนวนชั้นเบตอาจช่วยให้การลดความชื้นอากาศมีประสิทธิภาพดีขึ้น เนื่องจาก การดูดซับความชื้นของอากาศเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารดูดความชื้นกับอากาศ ชุดลดความชื้นแบบเบตบรรจุ มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและสามารถสร้างได้ด้วยงบประมาณที่ไม่สูงจึงมีความเหมาะสมกับการนำมาประยุกต์กับกระบวนการทำแห้งอาหารในระดับอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม จากการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของเบตบรรจุสารดูดความชื้นที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดความชื้นในหลากหลายโครงสร้างและใช้ชนิดสารดูดความชื้นที่ต่างกัน พบว่าโครงสร้างเบตบรรจุสารดูดความชื้นแบบชั้นบางหลายชั้นเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอากาศกับสารดูดความชื้นยังไม่มีการศึกษา จึงเป็นที่มาของการศึกษาและออกแบบชุดลดความชื้นอากาศแบบชั้นบางหลายชั้น ใช้ลักษณะโครงสร้างของชุดลดความชื้นแบบเบตบรรจุซึ่งมีลักษณะเป็นคอลัมน์ที่มีการปรับปรุงโครงสร้างชั้นบรรจุสารดูดความชื้นภายในและศึกษาประสิทธิภาพในการทำงาน ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานทั้งสภาวะอากาศเข้า อัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิที่ใช้ฟื้นฟูสารดูดความชื้น และการประมาณระยะเวลาสลับการทำงานของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นเพื่อนำไปใช้กับการทำงานร่วมกับระบบทำแห้ง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างบรรจุสารดูดความชื้นที่มีต่อปริมาณการลดความชื้นอากาศ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของสภาวะอากาศที่มีผลต่อการลดความชื้นอากาศ และอิทธิพลของอัตราการไหลอากาศร้อนและอุณหภูมิอากาศร้อนที่มีผลต่อการฟื้นฟูซิลิกาเจลในชุดลดความชื้น
- 1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของคอลัมน์ลดความชื้นอากาศแบบหลายชั้น

## 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

คาดว่าหอดูดความชื้นแบบชั้นบางหลายชั้นและเว้นช่องอากาศมีความดันตกคร่อมที่ต่ำกว่าหอดูดความชื้นแบบบรรจุเต็มที่มีปริมาณซิลิกาเจลเท่ากัน เนื่องจากอากาศไหลผ่านผิวหน้าแต่ละชั้นของซิลิกาเจลและไหลผ่านทะลุชั้นซิลิกาเจลที่บางกว่าแบบเบตบรรจุเต็ม ทำการทดสอบกับอากาศที่สภาวะต่างกันเพื่อหาความสัมพันธ์ของความชื้นอากาศกับเวลา ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการประมาณระยะเวลาสลับการทำงานของ

กระบวนการลดความชื้นอากาศและกระบวนการฟื้นฟูซิลิกาเจล เนื่องจากในการใช้งานจริงระบบต้องสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยสลับการทำงานของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้น 2 คอลัมน์ เมื่อคอลัมน์หนึ่งทำหน้าที่ดูดความชื้นจนสมดุลแล้วต้องมีการฟื้นฟูสารดูดความชื้นและสลับให้อีกคอลัมน์หนึ่งทำหน้าที่ดูดความชื้นอากาศ

#### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ความสามารถในการลดความชื้นอากาศของคอลัมน์ลดความชื้นอากาศขึ้นกับระยะเวลาหรือระยะทางที่อากาศสัมผัสกับสารดูดความชื้นที่ถูกบรรจุอยู่ภายใน โดยทั่วไปสามารถทำได้โดยการใช้อัตราการไหลอากาศที่ต่ำหรือเพิ่มปริมาณสารดูดความชื้นจะทำให้ดูดซับความชื้นได้มากขึ้น ในงานวิจัยนี้มีแนวคิดว่าการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอากาศกับสารดูดความชื้นจะช่วยลดความชื้นอากาศได้มากขึ้น โดยการพยายามบังคับทิศทางของการไหลของอากาศให้เคลื่อนที่ผ่านสารดูดความชื้นทั้งผิวด้านบนและด้านล่าง เปรียบเทียบโครงสร้างชั้นบรรจุสารดูดความชื้นแบบบรรจุเต็มกับโครงสร้างที่แบ่งเป็นชั้นย่อย ๆ และมีช่องอากาศที่ด้านหนึ่งของชั้นย่อย ซึ่งถูกวางในทิศทางตรงกันข้ามสลับไปมาเพื่อให้การไหลอากาศเป็นแบบซิกแซก คาดว่าการออกแบบนี้จะทำให้ความสามารถในการลดความชื้นอากาศของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น

#### 1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 สารดูดความชื้นชนิดของแข็งแบบซิลิกาเจล (Commercial grade)

1.5.2 หอดูดความชื้นแบบคอลัมน์ลักษณะทรงกระบอก

1.5.3 สภาพอากาศสำหรับการทดลองลดความชื้นอากาศอยู่ในช่วง 25-35°C และอัตราส่วนความชื้นอากาศในช่วง 15-20 g/kg dry air

#### 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1.6.1 ศึกษาลักษณะการจัดเรียงชั้นบรรจุสารดูดความชื้นที่มีความสามารถในการลดความชื้นอากาศสูงสุด

1.6.2 ทดสอบประสิทธิภาพการลดความชื้นและการฟื้นฟูสารดูดความชื้นของโครงสร้างชั้นบรรจุสารดูดความชื้นที่ถูกเลือกที่สภาวะอากาศต่างกัน

1.6.3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์เพื่อใช้ทำนายอัตราการลดความชื้นอากาศและอัตราการการฟื้นฟูสารดูดความชื้น และทดสอบสมการ

1.6.4 วิเคราะห์เวลาสลับการทำงานของคอลัมน์ลดความชื้นอากาศ

1.6.5 ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของคอลัมน์ลดความชื้นอากาศแบบชั้นบาง

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ชุดลดความชื้นอากาศ (Dehumidifier)

ชุดลดความชื้นอากาศ หรือ Dehumidifier มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบปรับอากาศสำหรับอาคารและอุตสาหกรรม สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ เครื่องลดความชื้นแบบใช้สารทำความเย็น ซึ่งอากาศจะถูกดึงเข้ามาให้ผ่านคอยล์เย็นเพื่อให้เกิดการกลั่นตัวของความชื้นในอากาศ ทำให้อากาศนั้นแห้ง และเครื่องลดความชื้นที่ใช้สารดูดความชื้น โดยสารดูดความชื้นที่ใช้มีทั้งชนิดของแข็งและสารดูดความชื้นชนิดของเหลวโดยแต่ละระบบมีคุณสมบัติต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1 เมื่อพิจารณาถึงความร้อนที่ใช้ในการฟื้นฟูสารดูดความชื้นชนิดของแข็งต้องใช้พลังงานที่สูงกว่าสารดูดความชื้นชนิดของเหลวและมีความดันตกคร่อมของระบบที่สูงกว่า แต่การใช้สารดูดความชื้นชนิดของแข็งนั้นไม่มีการปนเปื้อนของสารดูดความชื้นในอากาศแห้ง (ศิริพันธ์และคณะ, 2559) ระบบลดความชื้นอากาศแบบสารดูดความชื้นชนิดของแข็งที่พบโดยทั่วไปมี 2 ประเภท คือ แบบเบดบรรจุ (Bed) และแบบวงล้อหมุน (Wheel) (Misha et al., 2012) โดยมีลักษณะโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งทั้งสองประเภทมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันโดยแบบวงล้อหมุนสามารถลดความชื้นได้สม่ำเสมอเนื่องจากชั้นสารดูดความชื้นจะหมุนตลอดเวลาเพื่อให้อากาศนั้นผ่านทั้งด้านที่ต้องการดูดความชื้นอากาศและด้านฟื้นฟูสารดูดความชื้น ส่วนแบบเบดบรรจุสามารถลดความชื้นในปริมาณที่มากกว่าและมีระบบการทำงานที่ซับซ้อนน้อยกว่าแบบวงล้อหมุน (Abou-Ziyan et al., 2017; Chang et al., 2004) เบดบรรจุสารดูดความชื้นอยู่ภายในคอลัมน์อากาศถูกดูดเข้าสู่คอลัมน์ด้วยพัดลมไปตามท่ออากาศและไหลผ่านสารดูดความชื้น เมื่ออากาศผ่านสารดูดความชื้นไอน้ำในอากาศจะถูกดูดซับทำให้อากาศแห้งขึ้น เมื่อระบบทำงานไประยะหนึ่งประสิทธิภาพในการดูดความชื้นจะลดลง สารดูดความชื้นภายในคอลัมน์ต้องได้รับการฟื้นฟูเพื่อให้สารดูดความชื้นคายความชื้นที่ดูดซับไว้ออกมา กระบวนการดูดความชื้นและคายความชื้นของสารดูดความชื้นแสดงในรูปที่ 2.2 ที่จุด A เมื่อสารดูดความชื้นดูดซับความชื้นจากอากาศ ความชื้นในสารดูดความชื้นจะเพิ่มสูงขึ้นและอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากความร้อนของการดูดซับถูกปล่อยออกมาจนกระทั่งถึงจุดสมดุลที่จุด B จากนั้นสารดูดความชื้นถูกฟื้นฟูด้วยความร้อนเพื่อให้ได้ความชื้นออกจากสารดูดความชื้น การลดอุณหภูมิสารดูดความชื้นจากจุด C มาจุด A เป็นการลดแรงดันไอที่ผิวของสารดูดความชื้น ทำให้อากาศดูดความชื้นสามารถกลับมาดูดความชื้นได้อีกครั้ง ดังนั้นในระบบการทำงานของชุดลดความชื้นอากาศ กระบวนการดูดความชื้นและคายความชื้นของสารดูดความชื้นในชุดลดความชื้นอากาศนั้นจะเกิดขึ้นพร้อมกันเพื่อให้การทำงานของระบบดำเนินได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นชุดลดความชื้นเป็นแบบเบดบรรจุ มักจะมีคอลัมน์หรือหอดูดความชื้น 2 หอ โดยข้างหนึ่งทำหน้าที่ลดความชื้นอากาศในขณะที่อีกข้างหนึ่งจะถูกฟื้นฟูสารดูดความชื้น เมื่อประสิทธิภาพการดูดความชื้นลดลงแล้วท่ออากาศจะสลับทิศทางเพื่อให้หอดูดความชื้นที่ผ่านการฟื้นฟูแล้วมาใช้ลดความชื้นอากาศ ขณะเดียวกันให้อากาศร้อนไหลเข้าหอดูดความชื้นที่ใช้งานก่อนหน้าเพื่อฟื้นฟูสารดูดความชื้นต่อไป

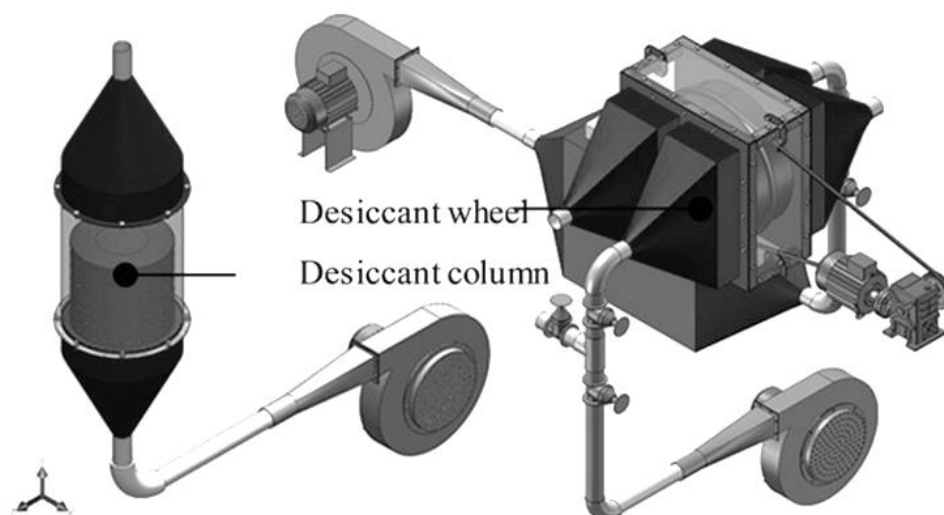
## 2.2 แผนภูมิไซโครเมตริกของกระบวนการลดความชื้นอากาศ

แผนภูมิไซโครเมตริกเป็นแผนภูมิที่แสดงความสัมพันธ์สมบัติของอากาศโดยแสดงค่าสมบัติต่าง ๆ ของอากาศ คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry-bulb temperature) อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet-bulb temperature) อุณหภูมิจุดกลั่นตัว (Dew-point temperature) ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, RH) อัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio) หรือความชื้นจำเพาะ (Specific humidity) ปริมาตรจำเพาะของอากาศ (Specific volume) และเอนทัลปี (Enthalpy) ดังแสดงในรูป 2.3

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบสมบัติของระบบลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นชนิดของแข็งและของเหลว

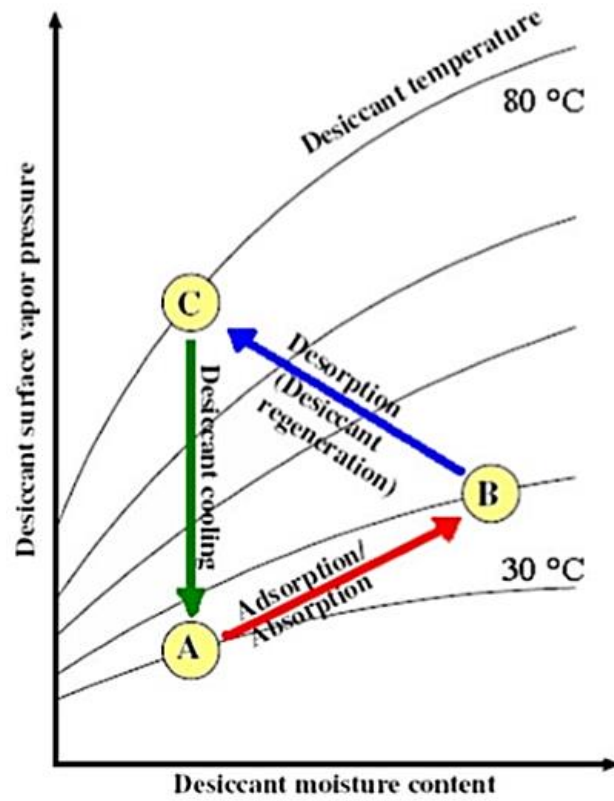
คุณสมบัติ	ชนิดของระบบลดความชื้น	
	สารดูดความชื้นชนิดของแข็ง	สารดูดความชื้นชนิดของเหลว
กลไกการลดความชื้น	การดูดซับ	การดูดซึม
ความดันตกคร่อมของระบบ	สูง	ต่ำ
ความร้อนในการฟื้นฟูสารดูดความชื้น	สูง	ต่ำ
ความซับซ้อนของระบบ	ไม่ซับซ้อน	ซับซ้อน
การกัดกร่อน	ไม่กัดกร่อน	กัดกร่อน
การปนเปื้อนของสารดูดความชื้นในอากาศแห้ง	ไม่ปนเปื้อน	อาจจะปนเปื้อน
ตัวอย่างสารดูดความชื้น	ซิลิกาเจล โลเลกุลลาร์ซีฟ แคลเซียมซิลเฟต	สารละลายลิเทียมคลอไรด์ ไตรเอทิลีน-ไกลคอล

ที่มา: ศิริพันธ์, 2559

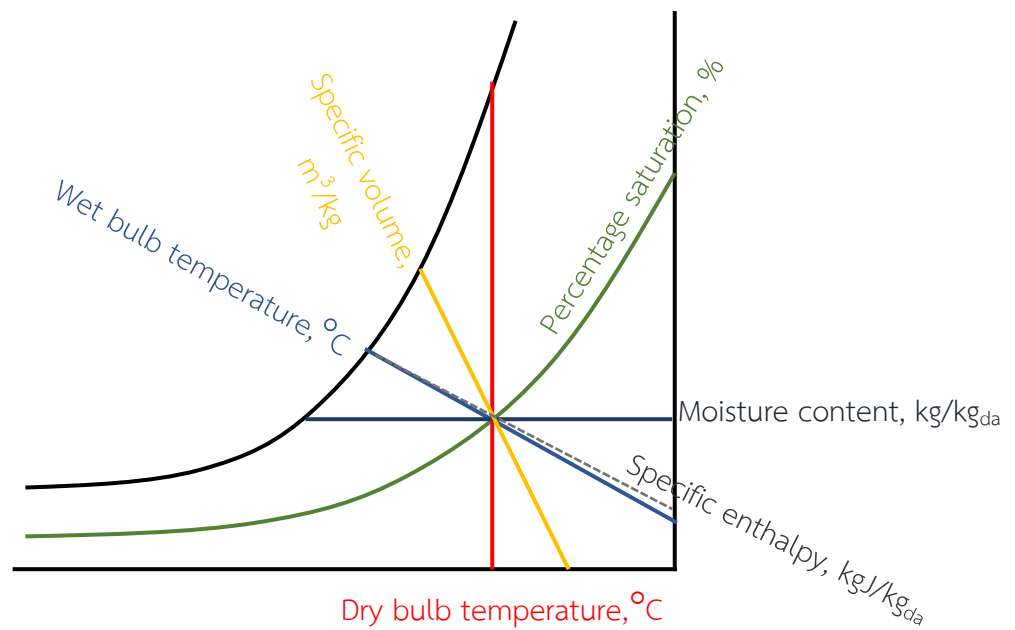


รูปที่ 2.1 ชุดลดความชื้นอากาศแบบเบดบรรจุ (Desiccant column) และแบบวงล้อหมุน (Desiccant wheel)

ที่มา : Taweekun and Akvanich, 2013

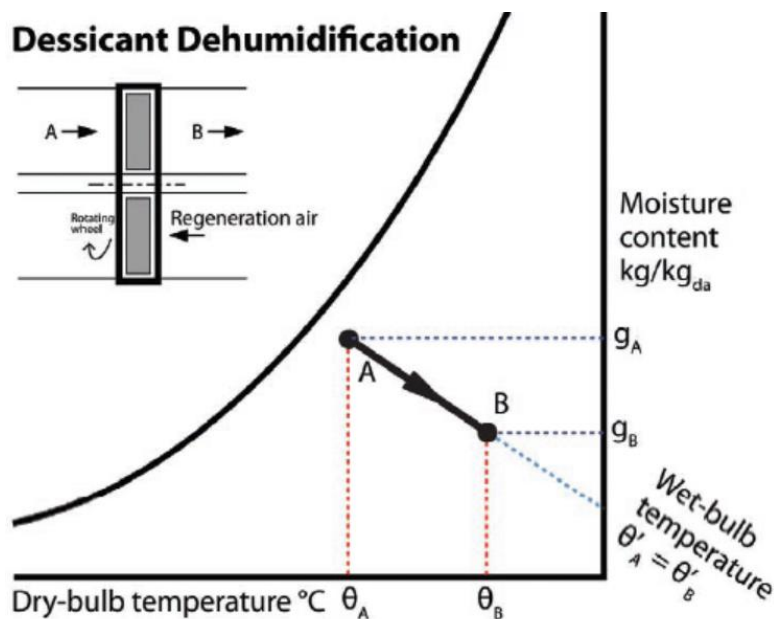


รูปที่ 2.2 กระบวนการดูดความชื้นและคายความชื้นของสารดูดความชื้น  
ที่มา: Rady, 2009



รูปที่ 2.3 แผนภูมิไซโครเมตริก

ที่มา: <https://www.cibsejournal.com/cpd/modules/2009-10/>



รูปที่ 2.4 แผนภูมิไซโครเมตริกของการลดความชื้นอากาศด้วยสารดูดความชื้น  
ที่มา: <https://www.cibsejournal.com/cpd/modules/2009-12/>

การลดความชื้นอากาศเมื่อสารดูดความชื้นทำการดูดความชื้นในอากาศไประยะหนึ่งความสามารถในการดูดความชื้นจะลดลงต้องทำการคายความชื้นออกจากสารดูดความชื้นเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2.3 ในกระบวนการลดความชื้นอากาศด้วยสารดูดความชื้นเป็นการย้อนกลับของกระบวนการเพิ่มความชื้นแบบอะเดียบาติก (Humidification adiabatic) ดังแสดงในรูป 2.4 ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานในระหว่างกระบวนการ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศหลังผ่านกระบวนการลดความชื้นมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศเข้าเนื่องจากได้รับความร้อนที่คายออกมาจากสารดูดความชื้นในระหว่างกระบวนการดูดซับ หรือ Heat of adsorption

### 2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับความชื้น (Adsorption)

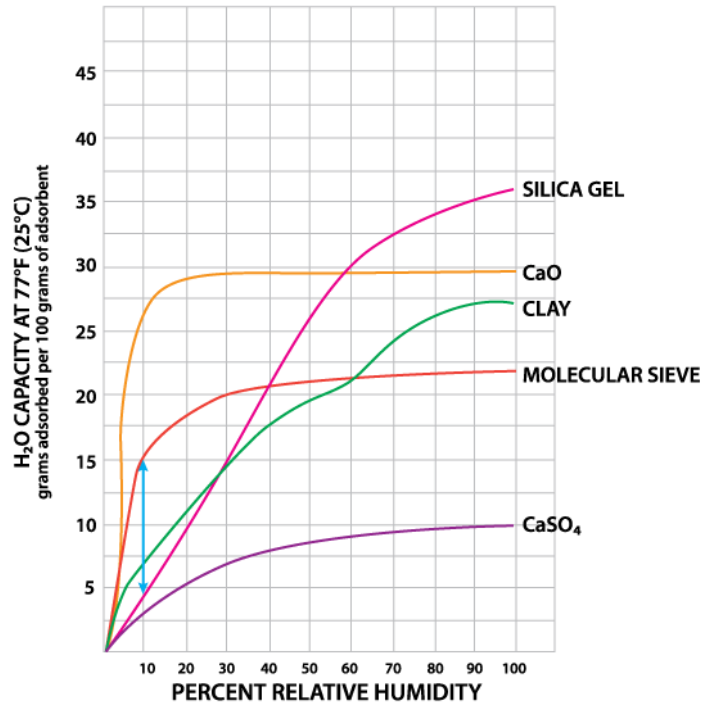
การลดความชื้นอากาศ (Dehumidification) ด้วยสารดูดความชื้นชนิดของแข็งเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เมื่อสารดูดความชื้นสัมผัสกับไอน้ำในอากาศ ไอน้ำจะถูกดูดซับเข้าสู่สารดูดความชื้นทำให้อากาศแห้งขึ้นซึ่งในระหว่างกระบวนการการดูดความชื้นนี้ส่งผลให้มีการปล่อย “ความร้อนของการดูดซับ (Heat of adsorption)” ทำให้อุณหภูมิในชั้นสารดูดความชื้นสูงขึ้นและยังส่งผลสู่กระแสอากาศ จึงทำให้อุณหภูมิของอากาศหลังผ่านการลดความชื้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นและมีความชื้นสัมพัทธ์ลดลง (El-Samadony et al., 2013) กระบวนการนี้เป็นกระบวนการแบบ adiabatic โดยความร้อนของการดูดซับที่ปล่อยออกมานั้นมีค่าเท่ากับความร้อนแฝงของการระเหย (Latent heat of evaporation) รวมกับปริมาณความร้อนของการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ผิวของสารดูดความชื้น (Yeboah & Darkwa, 2016) ปัจจัยที่มีผลต่อการลดความชื้นขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

### 2.3.1 ชนิดสารดูดความชื้น

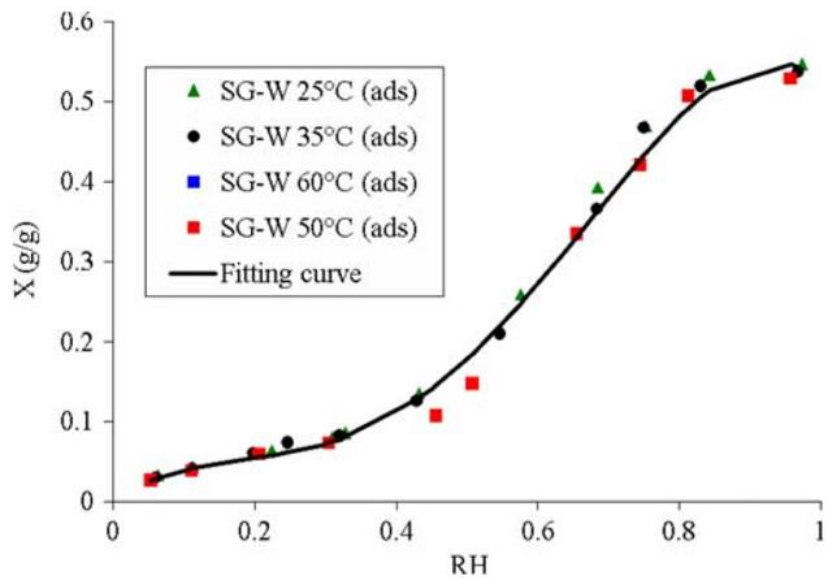
ชนิดของสารดูดความชื้นมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดความชื้นเช่นกัน แต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดความชื้นที่สภาวะอากาศต่างกัน สารดูดความชื้นอื่น ๆ ที่นิยมใช้กันทั่วไปในปัจจุบัน ได้แก่ ซิลิกาเจล, Activated Alumina, Natural and Synthetic Zeolite, Lithium Chloride, Titanium Silicate และ Synthetic Polymers รูปที่ 2.5 แสดงความสามารถในการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 25 °C สังเกตได้ว่าซิลิกาเจล (SiO<sub>2</sub>) มีความสามารถในการดูดความชื้นได้เพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 60% และสูงกว่าสารดูดความชื้นอื่น ประสิทธิภาพการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นชนิดของแข็งขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศ ปริมาตรของรูพรุนที่ผิวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน การดูดความชื้นของ Commercial silica gel และ Modified silica gel ที่ถูกปรับปรุงให้มีปริมาตรรูพรุนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมากกว่าแต่ยังคงมีพื้นที่ผิวเท่ากัน พบว่า Modified silica gel มีความต้านทานการถ่ายเทมวลต่ำกว่า Commercial silica gel (Chang et al., 2004)

#### 2.3.1.1 ซิลิกาเจล (Silica Gel)

ซิลิกาเจลเป็นสารดูดความชื้นชนิดของแข็งประเภทหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซิลิกาเจลที่ใช้โดยทั่วไปในทางการค้า (Commercial silica gel) มี 2 ประเภทที่นิยมใช้ คือ Type A และ Type B ซึ่งต่างกันในขนาดรูพรุน โดย Type A มีขนาดรูพรุน 2-3 nm Type B มีขนาดรูพรุนที่ใหญ่กว่าซึ่งมีขนาดประมาณ 7 nm และมีพื้นที่ผิวประมาณ 650 m<sup>2</sup>/g (Type A) และ 450 m<sup>2</sup>/g (Type B) (Suzuki, 1990) ซิลิกาเจลเป็นตัวดูดซับชนิดสังเคราะห์และมีขนาดรูพรุนเป็นแบบ Micro pore ซึ่งมีความขรุขระและมีขนาด 3-60 อังสตรอม สามารถดูดซับความชื้นได้ในปริมาณที่มากประมาณ 30% ของน้ำหนักตัว ซิลิกาเจลจะสามารถดูดซับความชื้นได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิปกติ (25°C) และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง คุณสมบัติทั่วไปของซิลิกาเจลที่มีจำหน่ายในทางการค้ามีพื้นที่ผิว 600-800 m<sup>2</sup>/g ความหนาแน่น (Apparent density) 1100-1300 kg/m<sup>3</sup> (M. M. Awad et al., 2008; Finocchiaro et al., 2016) นอกจากนี้ซิลิกาเจลยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการอบที่อุณหภูมิสูงนอกจากนี้ซิลิกาเจลยังมีคุณสมบัติไม่สึกกร่อน ไม่มีความเป็นพิษ สามารถนำไปใช้เป็นสารดูดความชื้นในผลิตภัณฑ์จำพวกอาหารและยาได้ ซิลิกาเจลมีทั้ง แบบสีน้ำเงิน สีส้มและใส โดยแบบสีน้ำเงินมีการใส่สารโคบอลต์คลอไรด์ (CoCl<sub>2</sub>) เมื่อดูดความชื้นอิมตัวสีจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีชมพู ซิลิกาเจลสีส้มมีการเติม Methyl violet มีการเปลี่ยนสีจากส้มเป็นเขียวเมื่อมีการดูดความชื้นอิมตัว และแบบใสซึ่งไม่มีการเติมสีเพื่อบ่งบอกสถานะการดูดความชื้น ไอโซเทอมสมดุลการดูดซับความชื้นของซิลิกาเจลแสดงดังในรูปที่ 2.6 จากรูปแสดงให้เห็นว่าที่ระดับอุณหภูมิ 25 - 60°C ความชื้นที่ซิลิกาเจลดูดซับได้ ณ จุดสมดุลมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน และเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นซิลิกาเจลสามารถดูดซับความชื้นได้เพิ่มขึ้น (Rady, 2009) โดยประเทศไทยมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยทั้งปีอยู่ในช่วง 72-80% ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยฤดูร้อนความชื้นสัมพัทธ์จะลดลงต่ำสุดในรอบปี เมื่อพิจารณาจากสภาพอากาศประเทศไทยซิลิกาเจลจึงเป็นสารดูดความชื้นที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการลดความชื้นอากาศ



รูปที่ 2.5 ความสามารถในการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นชนิดต่าง ๆ  
 ที่มา: <https://www.sorbentsystems.com/images/figure2.png>



รูปที่ 2.6 ไอโซเทอมสมดุลการดูดซับความชื้นของซิลิกาเจล  
 ที่มา: Rady, 2009

**ตารางที่ 2.2** ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย ( % ) ของประเทศไทยในช่วงฤดูกาลต่าง ๆ (พ.ศ. 2524-2553)

ภาค	ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%)			
	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	ฤดูฝน	ตลอดปี
เหนือ	73	62	81	74
ตะวันออกเฉียงเหนือ	69	65	80	72
กลาง	71	69	79	73
ตะวันออก	71	74	81	76
ใต้ฝั่งตะวันออก	81	77	78	79
ใต้ฝั่งตะวันตก	77	76	84	80

ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา, 2561

**ตารางที่ 2.3** ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทยในช่วงฤดูกาลต่าง ๆ (พ.ศ. 2524-2553)

ภาค	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)		
	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	ฤดูฝน
เหนือ	23.4	28.1	27.3
ตะวันออกเฉียงเหนือ	24.2	28.6	27.6
กลาง	26.2	29.7	28.2
ตะวันออก	26.7	29.1	28.3
ใต้ฝั่งตะวันออก	26.3	28.2	27.8
ใต้ฝั่งตะวันตก	27.0	28.4	27.5

ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา, 2561

### 2.3.2 อัตราส่วนความชื้นในอากาศ (Humidity ratio)

ปริมาณความชื้นในอากาศแสดงแทนด้วยอัตราส่วนความชื้นซึ่งเป็นสัดส่วนของปริมาณน้ำในอากาศต่อปริมาณอากาศแห้ง การลดความชื้นอากาศด้วยการผ่านชั้นสารดูดความชื้น activated alumina ที่เงื่อนไขการทำงานเดียวกัน เมื่ออากาศเข้ามีอัตราส่วนความชื้นในอากาศสูงส่งผลให้อากาศออกมีอัตราส่วนความชื้นในอากาศสูงขึ้นและอุณหภูมิสูงขึ้น (Abou-Ziyan et al., 2017) อัตราการดูดซับความชื้นของซิลิกาเจลเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความชื้นอากาศเข้า (อติพงศ์ และคณะ, 2548 ; Kabeel, 2009; Yang et al., 2017) ความแตกต่างระหว่างความชื้นอากาศเข้าและอากาศออกจะมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มความชื้นอากาศเข้า (Kabeel, 2009)

### 2.3.3 อัตราการไหลของอากาศ

การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศทำให้สารดูดความชื้นเข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้นทำให้ระยะเวลาในการดูดซับความชื้นสั้นลง (El-Samadony et al., 2013) ซิลิกาเจลมีอัตราการดูดซับความชื้นสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ (อติพงศ์ และคณะ, 2548; Kabeel, 2009)

### 2.3.4 อุณหภูมิของอากาศ

การเพิ่มอุณหภูมิของอากาศเข้าก่อนทำการลดความชื้นด้วย Activated alumina ส่งผลให้อากาศออกมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นและทำให้อัตราส่วนความชื้นของอากาศออกมีค่าสูงขึ้น (Abou-Ziyan et al., 2017) การลดความชื้นอากาศด้วยซิลิกาเจลมีอัตราการดูดความชื้นลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศเข้า (อติพงศ์ และคณะ, 2548; Yang et al., 2017)

### 2.3.5 ระดับการฟื้นฟูสารดูดความชื้น

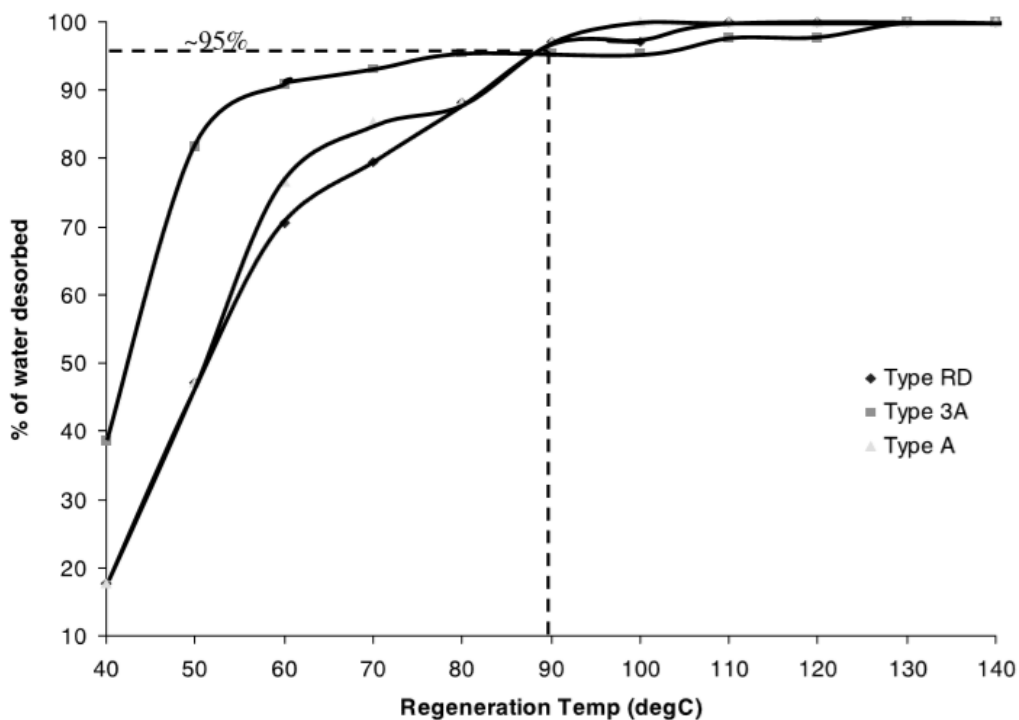
ระดับการฟื้นฟูสารดูดความชื้นมีผลต่อปริมาณการดูดซับของสารดูดความชื้น (Chang et al., 2004) การเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการฟื้นฟูสารดูดความชื้นส่งผลให้ช่วงเวลาการดูดซับความชื้นมีเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงความชื้นในสารดูดความชื้นถูกขับออกได้ในปริมาณมากกว่าอุณหภูมิต่ำ (El-Samadony et al., 2013) ในการลดความชื้นอากาศด้วยสาร Activated alumina พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศออกมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ฟื้นฟู (Abou-Ziyan et al., 2017)

## 2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการฟื้นฟูสารดูดความชื้น (Regeneration)

เมื่อชุดลดความชื้นอากาศมีประสิทธิภาพในการลดความชื้นลดลงจำเป็นต้องมีการทำให้สารดูดความชื้นคายความชื้น (Desorption) ที่อยู่ภายในออกไปเพื่อให้สามารถกลับมาดูดความชื้นได้ กระบวนการนี้เรียกว่า การฟื้นฟูสารดูดความชื้น (Regeneration) โดยการให้ความร้อนเพื่อให้ความชื้นภายในสารดูดความชื้นคายออกมาสู่อากาศ ปริมาณความร้อนที่ให้นั้นต้องสูงเพียงพอและมีระยะเวลาเพียงพอที่จะขจัดความชื้นภายในสารดูดความชื้นออกไปจนสารดูดความชื้นกลับมามีสภาพพร้อมใช้งาน ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการฟื้นฟูสารดูดความชื้นนอกจากปริมาณความร้อนและเวลาแล้ว อัตราการไหลของลมร้อนที่ใช้ก็มีผลเช่นเดียวกันเนื่องจากลมจะเป็นตัวพาความชื้นที่ถูกขับออกมา การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนและความเร็วลมส่งผลต่อเวลาที่ใช้เพื่อการฟื้นฟูสารดูดความชื้นนั้นลดลง

### 2.4.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟู

อุณหภูมิมีผลอย่างมากกับเวลาที่ใช้ในการฟื้นฟูสารดูดความชื้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศต่ำ ในทางกลับกันเมื่ออัตราการไหลของอากาศสูงที่ระดับหนึ่งอุณหภูมิจะมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการฟื้นฟูสารดูดความชื้นลดลง (Singh & Singh, 1998) ความแตกต่างระหว่างความชื้นอากาศเข้ากับความชื้นอากาศออกขึ้นอยู่กับความชื้นของอากาศเข้าและอุณหภูมิที่ใช้ในการคายความชื้น (Kabeel, 2009) อัตราการคายความชื้นมีความสัมพันธ์อย่างมากกับอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสารดูดความชื้น อัตราการคายความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการฟื้นฟูสารดูดความชื้น (Abou-Ziyan et al., 2017; Kabeel, 2009) ปริมาณความชื้นที่ถูกขับออกจากสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศด้านเข้าเพิ่มสูงขึ้น (Ng et al., 2001; อติพงศ์ และคณะ, 2005) ลักษณะการคายความชื้นของซิลิกาเจล Type RD, Type 3A และ Type A ที่อุณหภูมิ 40°C - 140°C ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความชื้นด้วยอินฟราเรด โดยวัดค่าความแตกต่างของน้ำหนักสารดูดความชื้นที่อยู่ในสถานะอิ่มตัวกับน้ำหนักสุดท้ายเมื่อกระบวนการคายความชื้นสิ้นสุด พบว่าที่อุณหภูมิ 90°C เพียงพอสำหรับการฟื้นฟูสารดูดความชื้นได้ 95% ของซิลิกาเจลทั้ง 3 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ในส่วนของอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจลนั้นพบว่ามีความสัมพันธ์กับทั้งเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ (Ng et al., 2001)



รูปที่ 2.7 ปริมาณการคายความชื้นของซิลิกาเจลเมื่อทำการฟื้นฟูที่อุณหภูมิต่างๆ  
ที่มา: Ng et al., 2001

#### 2.4.2 อัตราการไหลของอากาศ

การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศทำให้เวลาที่ใช้ในการฟื้นฟูสารดูดความชื้นลดลง (Singh & Singh, 1998) ปริมาณความชื้นที่ถูกขับออกมาจากสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ (อติพงศ์ และคณะ, 2548)

#### 2.4.3 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

การเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์อากาศเข้าขณะทำการฟื้นฟูสารดูดความชื้นส่งผลให้ปริมาณความชื้นที่ถูกขับออกจากสารดูดความชื้นลดลง (อติพงศ์ และคณะ, 2548)

#### 2.4.4 โครงสร้างชั้นบรรจุสารดูดความชื้น

กระบวนการฟื้นฟูสภาพของสารดูดความชื้นการเปลี่ยนเบตบรรจุเต็มเป็นบรรจุแยกชั้น ช่วยทำให้ความชื้นของสารดูดความชื้นลดลงสู่ค่าที่กำหนดเร็วขึ้น และการเพิ่มจำนวนชั้นบรรจุสารดูดความชื้นทำให้ใช้เวลาการฟื้นฟูลดลง (Singh & Singh, 1998)

### 2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อความดันตกคร่อมในคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้น

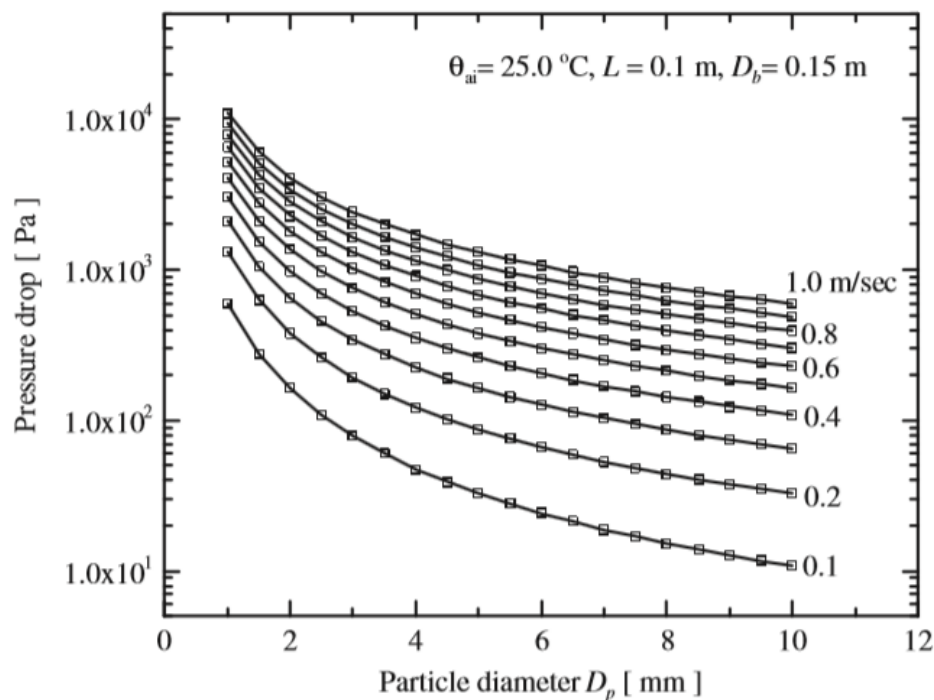
ค่าความดันตกคร่อมขึ้นอยู่กับความสูงของเบตบรรจุ ขนาดอนุภาคสารดูดความชื้น ความพรุนของเบต ความหนืดของของไหลและความเร็วของของไหลที่ผ่านชั้นสารดูดความชื้น (Kabeel, 2009) รูปที่ 2.8 แสดงความดันตกคร่อมของเบตบรรจุสารดูดความชื้นที่ขนาดสารดูดความชื้นต่าง ๆ และที่ความเร็วลมต่าง ๆ จากกราฟแสดงว่าการเพิ่มความเร็วของอากาศทำให้ความดันตกคร่อมมีค่าสูงขึ้น การเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดความชื้นส่งผลให้ความดันตกคร่อมลดลง (Ramzy et al., 2012) ความดันตกคร่อมของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นเป็นปัจจัยที่เป็นตัวชี้วัด

ประสิทธิภาพของชุดลดความชื้นอากาศ การวัดอัตราการไหลอากาศที่ผ่านคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นโดยวัดที่ทางเข้าและทางออกของอากาศจะแสดงความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้น ความดันตกคร่อมที่สูงส่งผลให้ชุดส่งอากาศต้องใช้พลังงานมากขึ้น นอกจากนี้ถ้าการไหลของอากาศนั้นกระจายไม่สม่ำเสมอจะไปลดประสิทธิภาพการทำงานของสารดูดความชื้น สารดูดความชื้นเนื่องจากมีสารดูดความชื้นบางส่วนที่ไม่ได้สัมผัสอากาศ ศิริพันธ์ และคณะ (2559) ศึกษาผลของการลดความชื้นในเบตบรรจุพบว่า เมื่อเพิ่มความสูงของชั้นซิลิกาเจลค่าความดันตกคร่อมจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก Ergun equation ในสมการที่ 2.1 นิยมนำมาใช้เพื่อใช้ในการทำนายความดันตกคร่อม (Pesic et al., 2014)

$$\frac{-\Delta P}{H} = 150 \frac{\mu U(1 - \varepsilon)^2}{d_p^2 \varepsilon^3} + 1.75 \frac{\rho_f U^2(1 - \varepsilon)}{d_p \varepsilon^3} \quad (2.1)$$

โดย

$f$	Particle friction factor	$U$	Fluid superficial velocity (m/s)
$\Delta P$	แรงดันลด (Pa)	$\rho_f$	ความหนาแน่นของไหล (kg/m <sup>3</sup> )
$H$	ความสูงของชั้นสารดูดความชื้น (m)	$d_p$	ขนาดอนุภาค (m)
$\varepsilon$	ความพรุน (porosity)	$Re$	เลขเรย์โนลด์ ขึ้นอยู่กับ superficial velocity ของก๊าซ ในท่อ, $Re = \rho U d / \mu$
$\mu$	ความหนืดของไหล (Pa.s)		

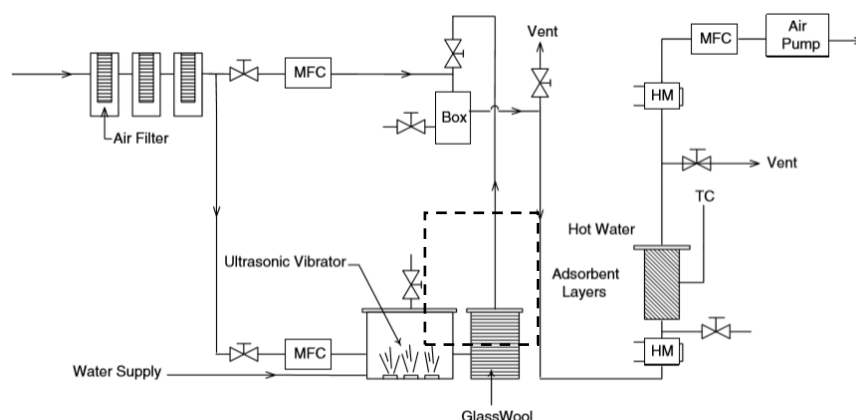


รูปที่ 2.8 ความดันตกคร่อมในเบตสารดูดความชื้นเมื่อใช้อนุภาคขนาดต่าง ๆ (1-10 mm) ที่ระดับความเร็วลมต่าง ๆ (0.1 – 1.0 m/s)

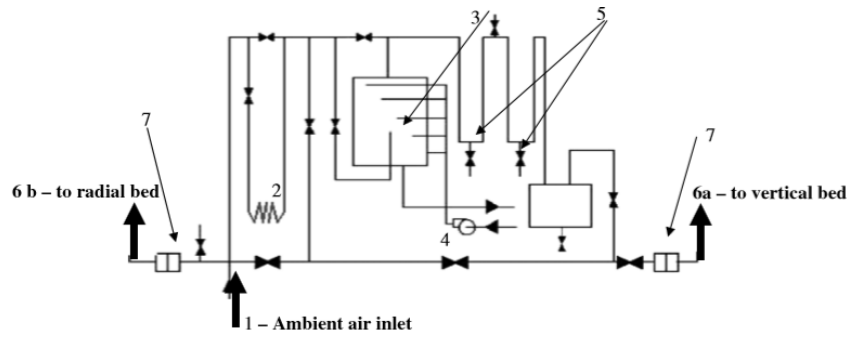
ที่มา: Ramzy et al., 2012

## 2.6 ชุดปรับสภาวะอากาศ

เนื่องจากสมบัติของอากาศทั้งอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์หรืออัตราส่วนความชื้นล้วนมีผลต่ออัตราการดูดความชื้นและคายความชื้นของสารดูดความชื้น ดังนั้นในการทดลองชุดลดความชื้นอากาศหลายๆ งานวิจัยมีการนำชุดเพิ่มความชื้นอากาศเข้ามาใช้ปรับสภาวะอากาศให้ได้ระดับความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิในช่วงที่ต้องการเพื่อควบคุมสภาวะการทดลอง ซึ่งชุดเพิ่มความชื้นอากาศนี้มีการออกแบบไว้หลากหลายแบบดังแสดงในรูปที่ 2.9 เช่น Chang et al. (2004) ใช้ชุดเพิ่มความชื้นอากาศเพื่อปรับสภาวะอากาศในการศึกษาผลของปัจจัยการฟื้นฟูต่อกระบวนการลดความชื้นของเบดบรรจุซิลิกาเจล และใช้ชุดเพิ่มความชื้นอากาศเพื่อปรับสภาวะอากาศในการศึกษาผลกระทบของความหนาและขนาดอนุภาคซิลิกาเจลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและมวลของเบดเคลือบซิลิกาเจลโดยใช้ Ultrasonic vibrator วางในห้องปิดขนาด 35 ลิตร และควบคุมปริมาณน้ำที่ทำให้อากาศชื้น อากาศถูกส่งผ่านเข้าห้องปรับความชื้นและจากนั้นอากาศจะถูกปรับความชื้นอีกครั้งด้วยการผสมกับอากาศภายนอกก่อนเข้าสู่ชุดลดความชื้นอากาศ M. Awad et al. (2008) ทดลองของการไหลอากาศตามแนวรัศมีของชั้นสารดูดความชื้น มีชุดเพิ่มความชื้นอากาศโดยน้ำถูกปั๊มและฉีดเข้าสู่ชุดเพิ่มความชื้นอากาศโดยตรง ระบบดักจับละอองน้ำถูกติดตั้งหลังจากชุดเพิ่มความชื้นอากาศเพื่อกำจัดหยดน้ำที่ปนมากับอากาศที่ปรับความชื้นแล้ว Kabeel (2009) ใช้อุปกรณ์ฟั่นน้ำ (Air washer) สำหรับปรับความชื้นอากาศเพื่อทดสอบการทำงานดูดความชื้นและคายความชื้นของชุดบรรจุสารดูดความชื้นหลายชั้นเพื่อประยุกต์ใช้ในกระบวนการลดความชื้น Ramzy et al. (2013) ใช้ชุดเพิ่มความชื้นให้อากาศก่อนเพื่อการทดลองลดความชื้นด้วยเบดบรรจุซิลิกาเจล โดยปลายท่ออากาศเข้าถูกวางบริเวณด้านล่างสุดของขวดที่มีหินกรวดและน้ำบรรจุอยู่ภายใน ท่ออากาศออกของชุดเพิ่มความชื้นอากาศถูกต่ออยู่ด้านบนโดยไม่สัมผัสกับผิวน้ำ ท่ออากาศออกต่อเข้ากับชุดทดลองลดความชื้นด้วยเบดบรรจุซิลิกาเจล Abou-Ziyan et al. (2017) ศึกษาประสิทธิภาพของ Activated Alumina แบบชั้นบางหลายชั้น ใช้ชุดให้ความร้อนและเครื่องกำเนิดไอน้ำเพื่อปรับความชื้นและอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าชั้นสารดูดความชื้น โดยพัดลมดูดอากาศผ่านชุดให้ความร้อนและเข้าสู่ห้องปรับความชื้นด้วยการฟั่นน้ำที่มาจากเครื่องกำเนิดไอน้ำ

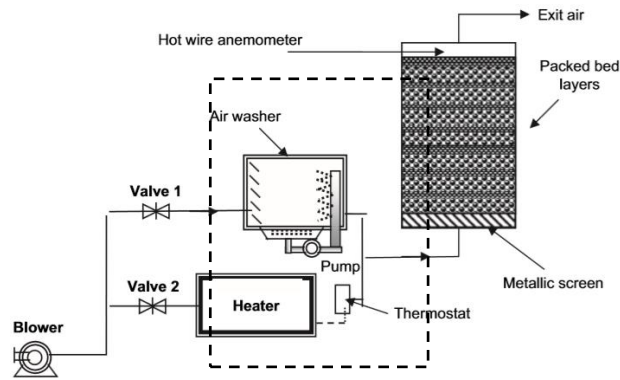


(a) Ultrasonic vibrator (Chang et al., 2004)

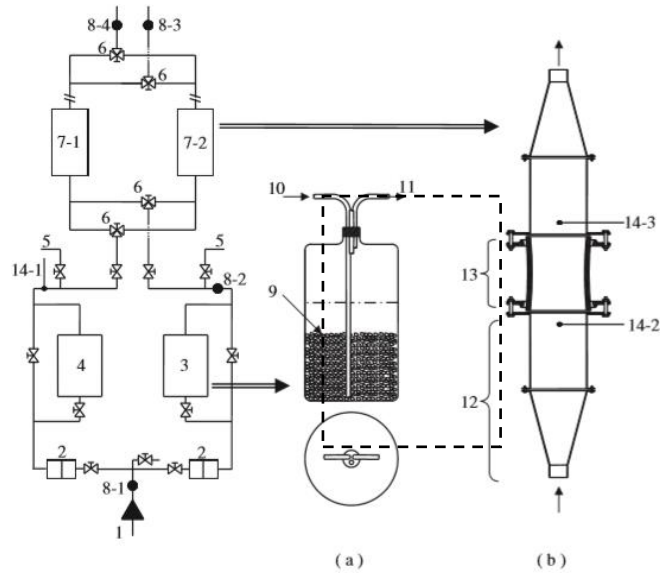


- 1 - Ambient air from the
- 2 - Air heater
- 3 - Air humidifier with water
- 4 - Water injection pump
- 5 - Water droplets trapping system
- 6-a,b Processed air
- 7 - Orifice meters

(b) ชุดเพิ่มความชื้นอากาศโดยตรง (Awad et al., 2008)

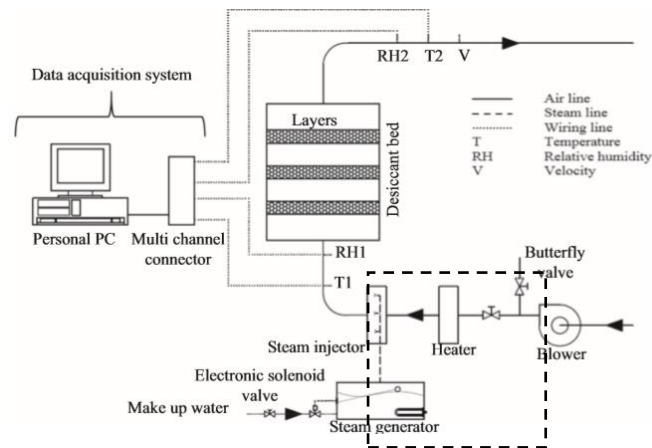


(c) Air washer (Kabeel, 2009)



- 1 Air inlet to the system
- 2 Orifice meters with U-tube manometers
- 3 Air humidifier
- 4 Air heater
- 5 Air exits to attain steady state
- 6 3 way valves
- 7 Test sections of silica gel packed beds
- 8 Position of hygrometer probe
- 9 Packed bed of gravels
- 10 Air inlet to the humidifier
- 11 Air exit from humidifier
- 12 Inlet section air flow strainer
- 13 Glass column containing silica gel Packed bed
- 14 Thermocouples

(d) Air humidifier (Ramzy et al., 2013)



(e) ชุดให้ความร้อนและเครื่องกำเนิดไอน้ำเพื่อปรับความชื้น (Abou-Ziyan et al., 2017)

รูปที่ 2.9 ชุดปรับสภาวะอากาศแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองลดความชื้นอากาศ

## 2.7 การถ่ายเทมวลในกระบวนการดูดความชื้น

สมการสำหรับการถ่ายเทมวลในการดูดซับของเบดบรรจุนิ่ง (Fixed bed) ได้จากการสมดุลมวลสารที่ถูกดูดซับในเบด (dL) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในของไหลกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนของแข็ง อัตราการสะสมในของไหลและของแข็งเป็นผลต่างระหว่างการไหลเข้าและการไหลออกจากชั้นสารดูดซับ โดยที่ไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลม superficial (McCabe et al., 1993)

$$\epsilon dL \frac{\partial c}{\partial t} + (1 - \epsilon) dL \rho_p \frac{\partial w}{\partial t} = u_0 - u_0(c + dc) \quad (2.3)$$

$$\text{หรือ} \quad \epsilon \frac{\partial c}{\partial t} + (1 - \epsilon) \rho_p \frac{\partial w}{\partial t} = -u_0 \frac{\partial c}{\partial L} \quad (2.4)$$

โดย

$\epsilon$  คือ สัดส่วนปริมาตรช่องว่างของเบด

$c$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในของไหล ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

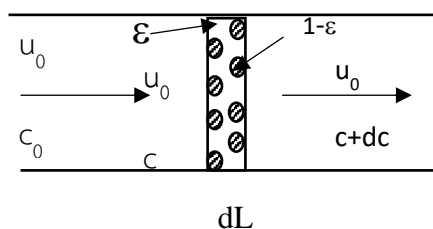
$W$  คือ ความเข้มข้นตัวถูกดูดซับในของแข็ง ( $\text{g}/\text{g}$ )

$\rho_p$  คือ ความหนาแน่นของซิลิกาเจล ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$L$  คือ ระยะทางที่ไหลผ่าน (m)

$u_0$  คือ ความเร็วลม ( $\text{m}/\text{s}$ )

$t$  คือ เวลา (s)



รูปที่ 2.10 สมดุลมวลของเบดบรรจุนิ่ง

Awad et al. (2008) ทดลองชั้นลดความชื้นแบบไหลตามแนวรัศมีของสารดูดความชื้นซิลิกาเจล กล่าวว่าพื้นที่ถ่ายเทมวลในการถ่ายเทจากอากาศไหลไปยังรูพรุนของอนุภาคซิลิกาเจลเป็นไปตามกฎอัตราการถ่ายเทมวล (rate law) ซึ่งเป็นไปตามสมการสมดุลเทอร์โมไดนามิก ระบุสัมประสิทธิ์การถ่ายเทเชิงปริมาตรซึ่งเท่ากับค่า  $k$  คูณ  $a$  ของผลิตภัณฑ์ โดย  $a$  คือ พื้นที่ถ่ายเทมวลต่อหน่วยปริมาตรของชั้นบรรจุ ( $m^2/m^3$ ) และ  $k$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ( $kg/(m^2 s)$ )  $dR$  คือ อัตราการดูดซับความชื้น ( $kg/s$ ) สามารถหาได้จากการคูณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทเชิงปริมาตร  $ka$  โดยแรงขับเคลื่อนและคูณด้วยปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของชั้นบรรจุ  $2\pi r L dr$

$$dR = ka(w - w^*)2\pi r L dr \quad (2.5)$$

โดย

$W$  คือ ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ ( $kg \text{ water}/kg \text{ dry air}$ )

$W^*$  คือ ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศในภาวะสมดุลกับอนุภาคซิลิกาเจลที่มีอยู่ ( $kg \text{ water}/kg \text{ dry air}$ )

$2\pi r L dr$  คือ พื้นที่การไหลที่รัศมี  $r$  ( $m^2$ )

$L$  คือ ความหนาชั้นบรรจุ ( $m$ )

Kabeel (2009) ศึกษาการดูดซับและการคายความชื้นของเบตบรรจุเต็มโดยมีซิลิกาเจลเป็นสารดูดความชื้นสำหรับการประยุกต์ใช้ในกระบวนการลดความชื้น จากการสมดุลมวลของเบตบรรจุในกระบวนการดูดซับและกระบวนการคายความชื้นได้สมการของอัตราส่วนความชื้นได้ดังสมการที่ 2.6

$$\frac{(W_i^* - W)}{(W_i^* - W_0)} = \exp \left[ \frac{-\rho_g}{\rho_s} \frac{1}{1 - \varepsilon} \frac{u_0}{L} K_2 t \right] \quad (2.6)$$

โดย

$W_i^*$  คือ อัตราส่วนปริมาณน้ำที่อยู่ในซิลิกาเจลที่อยู่ในสภาวะสมดุล ( $kg \text{ water}/kg \text{ dry silica gel}$ )

$W_0$  คือ อัตราส่วนปริมาณน้ำที่อยู่ในซิลิกาเจลเริ่มต้น ( $kg \text{ water}/kg \text{ dry silica gel}$ )

$\rho_s$  คือ ความหนาแน่นของซิลิกาเจล ( $kg/m^3$ )

$\rho_g$  คือ ความหนาแน่นของอากาศ ( $kg/m^3$ )

$\varepsilon$  คือ อัตราส่วนช่องว่างของซิลิกาเจล

$u_0$  คือ ความเร็วลม superficial (ความเร็วลมขาออกจากเบต) ( $m/s$ )

$t$  คือ เวลา ( $s$ )

$L$  คือ ความหนาของชั้นสารดูดความชื้น ( $m$ )

$K_2$  คือ ค่าคงที่ของสมการถดถอยซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิขาเข้าในระหว่างกระบวนการดูดความชื้นดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าคงที่ของสมการถดถอยกับอุณหภูมิอากาศเข้า

อุณหภูมิ (°C)	$K_1$	$K_2$
25.2	-0.000483	0.0330948
27.9	-0.000556	0.0397986
28.8	-0.000582	0.0422896
31.4	-0.000663	0.0502858

ที่มา: Awad et al., 2008

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบชุดลดความชื้นอากาศ

Singh and Singh (1998) ทำการฟื้นฟูซิลิกาเจลใน Regenerator แบบหลายชั้น อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูซิลิกาเจลอยู่ในช่วง 42-72 °C ความเร็วลม 0.175-0.55 m/s เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ฟื้นฟูซิลิกาเจลระหว่างการบรรจุแบบชั้นเดียวของซิลิกาเจลที่ดูดซับความชื้นแล้วจำนวน 3 kg กับการแบ่งเป็นชั้น 2-4 ชั้น จากการทดลองสรุปได้ว่าระยะเวลาที่ใช้ฟื้นฟูซิลิกาเจลจากความชื้น 42.8% ลดเหลือ 15% มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมร้อนสำหรับทุกระดับความเร็วลมและจำนวนชั้น การเพิ่มความเร็วลมทำให้เวลาฟื้นฟูซิลิกาเจลลดลงเช่นกันสำหรับทุกระดับอุณหภูมิและจำนวนชั้น เมื่อพิจารณาจำนวนการแบ่งชั้นบรรจุซิลิกาเจลพบว่า การเพิ่มขึ้นของชั้นทำให้เวลาการทำแห้งซิลิกาเจลลดลง แต่การลดลงของเวลาทำแห้งนี้มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วลม

อติพงศ์ และคณะ (2548) ทดสอบสมรรถนะของชุดสารดูดความชื้นแบบถาดสำหรับกระบวนการอบแห้งลำไย ได้ออกแบบและสร้างชุดลดความชื้นอากาศสำหรับใช้ในกระบวนการอบลำไย มีลักษณะเป็นชั้นบรรจุซิลิกาเจลชั้นละ 3 kg ขนาด 49.5 x 49.5 x 2.5 cm จำนวน 10 ชั้นวางซ้อนกันในแนวตั้ง โดยมีระยะห่างระหว่างชั้น 2.5 cm ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ให้อากาศไหลผ่านช่องว่างระหว่างชั้นตามแนวระนาบเพื่อให้มีค่าความดันตกคร่อมต่ำ พบว่าเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณความชื้นที่ซิลิกาเจลดูดซับจะสูงขึ้นตามไปด้วย ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับจะต่ำสุดที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเท่ากับ 0.182 kg/s มีค่าสูงสุดที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเท่ากับ 0.931 kg/s ซึ่งส่งผลให้อัตราการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้น และได้พัฒนาโมเดลเพื่อทำนายสถานะของอากาศหลังจากผ่านสารดูดความชื้นเมื่อทราบสถานะอากาศขาเข้า ได้เป็นโมเดลการดูดความชื้นและโมเดลของทำนายมวลของความชื้นที่ถูกขับออกจากสารดูดความชื้นดังแสดงในสมการที่ 2.13 และ 2.14 ตามลำดับ

$$M_{w,ad} = 34.412 m_a^{0.51427} RH^{1.3343} T_{ai}^{-1.2989} t^{0.51022} \quad (2.13)$$

$$M_{w,de} = 9.9704 \times 10^{-4} m_a^{0.2993} RH^{-0.6090} T_{ai}^{1.2531} t^{0.4805} \quad (2.14)$$

โดย

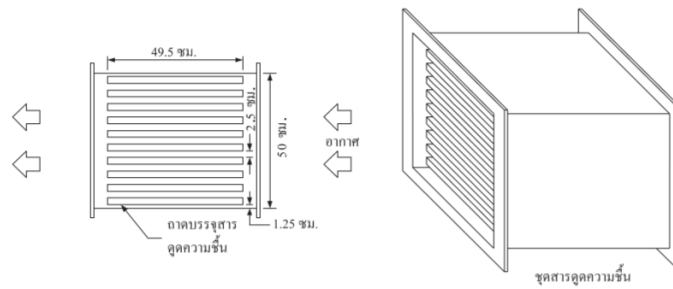
$M_{w,ad}$  คือ ปริมาณความชื้นในสารดูดความชื้น ณ เวลาต่างๆ (kg)

$M_{w,de}$  คือ ปริมาณความชื้นที่ถูกขับออกจากสารดูดความชื้น ณ เวลาต่างๆ (kg)

$m_a$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)

RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (จุดทศนิยม)

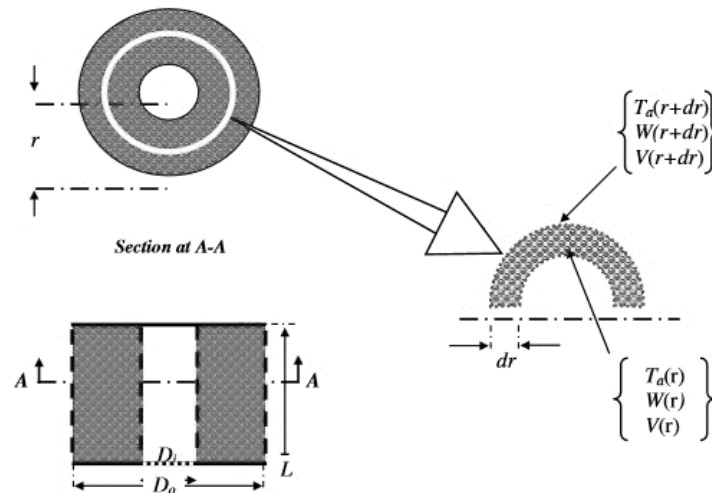
t คือ เวลา (min)



**รูปที่ 2.11** ชุดสารอุณหภูมิแบบถาดสำหรับกระบวนการอบแห้งลำไย  
ที่มา: อติพงศ์ และคณะ, 2548

Chang et al. (2005) ใช้ซิลิกาเจลที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน 3 ระดับ เคลือบผิวท่อแอสแตนเลสที่อยู่ในชุดดูดความชื้นโดยมีความหนาต่างกัน 3 ระดับ เพื่อศึกษาผลของความหนาและขนาดอนุภาคที่มีต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลและความร้อนสำหรับการลดความชื้นในระบบปรับอากาศ พบว่าขนาดของอนุภาคซิลิกาเจลไม่มีผลต่อปริมาณการดูดซับไอน้ำอย่างมีนัยสำคัญแต่ขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นสามารถลดความต้านทานการถ่ายเทมวลของชั้นซิลิกาเจล ชั้นเคลือบที่บางมีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าจึงทำให้ซิลิกาเจลที่เคลือบชั้นบางคายความชื้นได้ดีกว่าชั้นหนา ขนาดซิลิกาเจลไม่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน การเคลือบผิวท่อด้วยซิลิกาเจลขนาดใหญ่และความหนาต่ำทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลของระบบดี การเคลือบชั้นซิลิกาเจลมีอัตราการถ่ายเทความร้อนเร็วและอุณหภูมิที่ผิวคงที่ในระหว่างการฟื้นฟูสารดูดความชื้น

Awad et al. (2008) ศึกษาทดลองชั้นลดความชื้นแบบไหลตามแนวรัศมีของสารดูดความชื้นแบบแข็ง โดยใช้ซิลิกาเจล มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 3 mm ถูกใช้เป็นสารดูดความชื้นในเครื่องลดความชื้น เเบดบรรจุสารดูดความชื้นภายใต้การศึกษามีการไหลตามแนวรัศมีและเป็นทรงกระบอก ชุดทดสอบทรงกระบอกกลวง 5 ชุด ซึ่งมีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $D_o/D_i$ ) แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.12 ปริมาณของซิลิกาเจลในชั้นบรรจุมีปริมาณเกือบเท่ากัน ผลปรากฏว่าประสิทธิภาพการทำงาน of ชั้นบรรจุทรงกระบอกกลวงมีช่วงเวลารีดความชื้นถูกจำกัดที่ 15 นาทีสำหรับอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.2 ช่วงเวลานี้เพิ่มขึ้นเมื่อลดอัตราการไหลของอากาศและอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นบรรจุ การเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มค่าความดันตกคร่อมภายในชั้นบรรจุ และเพิ่มความสามารถดูดซับของชั้นบรรจุสำหรับช่วงการทำงานสั้นๆ ตัวแปรที่ออกแบบชั้นบรรจุสามารถเลือกตามวัตถุประสงค์ของกระบวนการ ในกรณีที่ต้องการความดันตกคร่อมต่ำต้องเลือกอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าต่ำ ในทางกลับกันถ้าต้องการลดความชื้นอากาศให้ได้มากแนะนำให้ใช้ชั้นบรรจุสารดูดความชื้นที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าสูง ผลกระทบของอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อการดูดซับความชื้นและความดันตกคร่อมพบว่าแรงดันลดเพิ่มเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังนั้นค่าที่สูงขึ้นของอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางสามารถนำมาใช้ปรับปรุงอัตราการดูดความชื้นสำหรับการทำงานระยะเวลาสั้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มประสิทธิภาพที่เฉพาะเจาะจงจำเป็นต้องเลือกใช้อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นบรรจุที่เหมาะสม



รูปที่ 2.12 ชั้นลดความชื้นแบบไหลตามแนวรัศมี

ที่มา: Ramzy et al., 2008

Kabeel (2009) ศึกษาการทำงานของเครื่องลดความชื้นและคายความชื้นของชุดบรรจุสารดูดความชื้นหลายชั้นเพื่อประยุกต์ใช้ในกระบวนการลดความชื้น มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของความสูงชั้นบรรจุสารดูดความชื้นต่อประสิทธิภาพของทั้งกระบวนการดูดและคายความชื้น โดยบรรจุซิลิกาเจลเป็นชั้นเท่าๆ กัน จำนวน 8 ชั้นและวางต่อกันโดยไม่มีช่องว่างระหว่างชั้น แต่ละชั้นมีความสูง 10 cm ถูกบรรจุรวมกันในท่อแก้วความสูง 100 cm เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ชั้นแรกที่สัมผัสกับอากาศเข้ามีอัตราการดูดความชื้นสูงสุดและค่อย ๆ ลดลงเมื่อชั้นสูงขึ้น การเพิ่มความเร็วมหรืออัตราการไหลของอากาศเพิ่มอัตราการดูดความชื้น ความแตกต่างระหว่างอัตราการดูดความชื้นในชั้นแรกกับชั้นสุดท้ายมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที และจากนั้นค่อนข้างคงที่ ที่ความเร็วม 9.6 m/s การคายความชื้นพบว่า ความแตกต่างอัตราการคายความชื้นระหว่างชั้นแรกกับชั้นสุดท้ายเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วมเพิ่มขึ้น อัตราการคายความชื้นมีความสัมพันธ์อย่างมากกับอุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการคายความชื้น ความแตกต่างระหว่างความชื้นอากาศเข้ากับความชื้นอากาศออกขึ้นอยู่กับความชื้นของอากาศเข้าและอุณหภูมิที่ใช้ในการคายความชื้น ชุดลดความชื้นนี้มีอัตราการลดความชื้นอากาศ 0.23 และ 0.44 g/min เมื่ออากาศเข้ามีความชื้น 12.2 และ 17.5 g water/kg dry air

Taweekun and Akvanich (2013) ทำการจำลองและศึกษาปัจจัยการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับคอลัมน์สารดูดความชื้นในระบบ Radiant Cooling วัดค่าความดันตกคร่อมและอัตราการดูดซับของสารดูดความชื้นของชั้นบรรจุสารดูดความชื้นแบบอากาศไหลตามแนวตั้งและตามแนวรัศมีดังแสดงในรูปที่ 2.7 ภายในบรรจุซิลิกาเจล 10 kg คอลัมน์มีปริมาตร 0.045 m<sup>3</sup> การเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์แบบอากาศไหลแนวตั้งส่งผลให้ความดันตกคร่อมในคอลัมน์ลดลง การเพิ่มรัศมีเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์อากาศไหลตามแนวรัศมีส่งผลให้ทั้งความดันตกคร่อมและอัตราการดูดความชื้นเพิ่มขึ้น สมการถดถอยของความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกของคอลัมน์อากาศไหลตามแนวรัศมีได้ถูกสร้างขึ้น พบว่าทั้งเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

Ramzy et al. (2013) ได้ทดลองและศึกษาทฤษฎีของการดูดความชื้นที่อุณหภูมิแกว่งแบบครบรอบของกระบวนการลดความชื้นโดยใช้เบดบรรจุซิลิกาเจล ปริมาณซิลิกาเจลถูกบรรจุในชั้นที่ระดับความสูงต่าง ๆ โดยเบดบรรจุซิลิกาเจลมีสองชุด ขณะที่ชุดหนึ่งกำลังลดความชื้นของอากาศ ซิลิ

กาเจลในชุดที่สองจะถูกให้ความร้อนเพื่อไล่ความชื้นออกจากซิลิกาเจล เมื่อซิลิกาเจลชุดแรกไม่สามารถดูดความชื้นอากาศได้อีกต่อไป ระบบจะสลับการไหลของอากาศเพื่อให้นเบตบรรจุซิลิกาเจลชุดแรกได้รับความร้อนและชุดที่สองทำหน้าที่ดูดความชื้นของอากาศต่อ ทำศึกษาผลของความสูงเบตซิลิกาเจล รอบเวลาในการเปลี่ยนระบบจากกระบวนการดูดความชื้นเป็นคายความชื้น อุณหภูมิที่ใช้ในการคายในการความชื้นต่อประสิทธิภาพของการลดความชื้นอากาศ พบว่าปริมาณความชื้นในอากาศที่ผ่านชุดลดความชื้นมาแล้วมีค่าลดลงเมื่อความสูงของเบตซิลิกาเจลเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันอุณหภูมิอากาศออกมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความสูงเบตซิลิกาเจลเนื่องจากอัตราการดูดความชื้นที่สูงกว่า การเพิ่มความสูงเบตซิลิกาเจลทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นซึ่งช่วยลดภาระของระบบควบคุม ประสิทธิภาพของการดูดความชื้นที่อุณหภูมิแกว่งตื้นเมื่อความสูงเบตซิลิกาเจลเพิ่ม การเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการคายความชื้นของซิลิกาเจลทำให้เวลา Regeneration ลดลง ประสิทธิภาพการทำงานแบบครบรอบสูงสุดเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ Regeneration เหมาะสม แต่หากใช้อุณหภูมิสูงกว่าค่าที่เหมาะสมไม่ส่งผลต่อการลดความชื้นอากาศจึงทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง งานวิจัยนี้แนะนำให้มีความเย็นกับอากาศก่อนผ่านกระบวนการลดความชื้นอากาศซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานแบบครบรอบ อย่างไรก็ตามการลดอุณหภูมิอากาศต้องคำนึงถึงอุณหภูมิจุดน้ำค้างด้วย การลดอุณหภูมิอากาศเข้าทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น เวลาการทำงานของกระบวนการลดความชื้นอากาศจะนานขึ้นในกรณีที่อัตราส่วนความเร็วลมของกระบวนการลดความชื้นต่อความเร็วลม Regeneration มีค่าน้อย เพื่อให้อัตราส่วนความชื้นของอากาศออกมีค่าต่ำ ประสิทธิภาพการทำงานแบบครบรอบสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วลมของอากาศเข้า อัตราส่วนความชื้นของอากาศออกที่ต้องการเป็นตัวกำหนดขีดจำกัดความเร็วสูงสุดของอากาศเข้า ประสิทธิภาพการทำงานแบบครบรอบของเบตเพิ่มขึ้นจาก 0.18 เป็น 0.28 เมื่อเบตมีความสูงเพิ่มขึ้นจาก 0.05 m เป็น 0.3 m และใช้อุณหภูมิ Regeneration ที่ 120°C

Abou-Ziyan et al. (2017) สารดูดความชื้น Activated alumina ถูกบรรจุในชั้นตะแกรงความสูง 3 cm ซึ่งอยู่ให้หอสีเหลี่ยมขนาด 0.60 x 0.35 m สูง 1.1 m ทดลองใช้บรรจุชั้นสารดูดความชื้น 1, 2 และ 3 ชั้นโดยวางกระจายตามความสูงของหอทดลอง ลักษณะการถ่ายเทมวลของชั้น Activated Alumina หลายชั้น ระหว่างกระบวนการดูดความชื้นและกระบวนการ regeneration ได้ถูกทำการทดลองและศึกษาภายใต้เงื่อนไขอากาศอุ่นและชื้น, อากาศอุ่นและชื้นมาก และอากาศร้อนและชื้นมาก ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ออกจากชั้นสารดูดความชื้นลดลงจาก 28 เหลือ 20% เมื่ออุณหภูมิอากาศเข้าเพิ่มขึ้นจาก 28 เป็น 36°C และความชื้นสัมพัทธ์อากาศออกเพิ่มขึ้นจาก 16 เป็น 39% เมื่อจำนวนชั้นสารดูดความชื้นลดลงจาก 3 ชั้นเหลือ 1 ชั้น จำนวนชั้นของ Activated alumina มีผลอย่างมีนัยสำคัญกับอัตราการดูดความชื้นและคายความชื้นเฉลี่ย โดยเมื่อเพิ่มขึ้นแรกส่งผลให้ค่าเพิ่มขึ้น 70% และเมื่อเพิ่มอีกสองชั้นจากชั้นเดียวกลายเป็นสามชั้นส่งผลให้ค่าเพิ่มขึ้น 144% ภายใต้อัตราการไหลอากาศคงที่สำหรับชั้นสารดูดความชื้นจำนวน 2 ชั้น มีประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศ 1.85 kg/h ที่สภาวะอากาศ 28°C 65%RH และ 4.75 kg/h ที่สภาวะอากาศ 36°C 65%RH อัตราการดูดความชื้นเฉลี่ยเพิ่มประมาณ 157% เมื่ออุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้นจาก 28 เป็น 36°C อัตราการคายความชื้นเพิ่มเกือบสองเท่าเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเข้าเพิ่มขึ้นจาก 50 เป็น 80% อัตราการคายความชื้นเฉลี่ยสูงเมื่ออุณหภูมิ Regeneration สูงขึ้น โดยเฉพาะในช่วงระยะแรก (จนถึง 15 นาที) เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดูดความชื้นพบว่า ซิลิกาเจลสามารถดูดความชื้นได้ประมาณ 24% ซึ่งสูงกว่า Activated alumina ในขณะที่การทำ Regeneration ที่อุณหภูมิ 45 °C Activated alumina มีแนวโน้มในการตอบสนองดีกว่าซิลิกาเจล

Yang et al. (2017) ใช้ซิลิกาเจลในการลดความชื้นอากาศสำหรับอาคารและ regeneration ตัวพลังงานแสงอาทิตย์ ซิลิกาเจลจำนวน 3 kg ถูกบรรจุในชั้นที่วางซ้อนกันจำนวน 3 ชั้น และติดตั้งที่ หน้าต่าง ผลต่างของปริมาณความชื้นอากาศเข้าและอากาศแห้งมีค่าสูงสุดในตอนเริ่มกระบวนการลด ความชื้นซึ่งเท่ากับ 7.1 g water/kg dry air ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศคำนวณจากอัตราส่วน ของผลต่างปริมาณความชื้นอากาศเข้าและอากาศแห้งต่อปริมาณความชื้นอากาศเข้า ซึ่งมีค่าสูงสุด เท่ากับ 58.60% เมื่ออากาศมีอุณหภูมิ 19.2°C และมีความชื้นสัมพัทธ์ 86.1% มีประสิทธิภาพการ ลดความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 33.96% อัตราการ regeneration สูงสุด 153 g/h ภายใต้การแผ่รังสีของ แสงอาทิตย์จำลองที่ 900 W/m<sup>2</sup>

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบชุดลดความชื้นอากาศแบบเบดบรรจุถัง

นักวิจัย	ชนิดสาร ดูด ความชื้น	โครงสร้างชั้นบรรจุสารดูด ความชื้น	ทิศทางการไหลของ อากาศ
Singh & Singh (1997)	ซิลิกาเจล	ชั้นบรรจุไม้ทรงสี่เหลี่ยมมี ตะแกรงด้านล่าง จำนวน 2-4 ชั้น	ไหลจากล่างขึ้นบน
อติพงศ์ และคณะ (2548)	ซิลิกาเจล	ตะแกรงเรียงซ้อนกันจำนวน 10 ชั้น มีช่องว่างระหว่างชั้น	ไหลตามแนวระนาบ
Awad et al. (2008)	ซิลิกาเจล	ตะแกรงรูปทรงกระบอกกลาง	ไหลตามแนวรัศมี
Chang et al. (2005)	ซิลิกาเจล	เคลือบที่ผิวท่อ	ไหลตามแนวท่อ
Kabeel (2009)	ซิลิกาเจล	ทรงกระบอกบรรจุเต็ม	ไหลจากล่างขึ้นบน
Taweekun and Akvanich (2013)	ซิลิกาเจล	ตะแกรงรูปทรงกระบอกกลาง	ไหลตามแนวรัศมี
Ramzy et al. (2013)	ซิลิกาเจล	ทรงกระบอกบรรจุเต็ม	ไหลจากล่างขึ้นบน
Abou-Ziyan et al. (2017)	Activated Alumina	ตะแกรงทรงสี่เหลี่ยม ซ้อนกัน 1-3 ชั้น	ไหลจากล่างขึ้นบน

## 2.9 งานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้ชุดลดความชื้นอากาศกับกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอาหาร

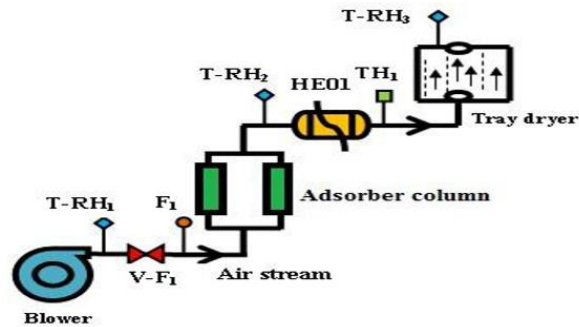
Goula and Adamopoulos (2005) ทำแห้งเนื้อมะเขือเทศด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย ร่วมกับชุดลดความชื้นอากาศที่อุณหภูมิ 110 – 140°C อัตราการไหลลมที่ใช้ทำแห้ง 17.75 -22.75 m<sup>3</sup>/h และศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติทางความชื้น ความหนาแน่นและความสามารถในการละลาย ของผงมะเขือเทศที่ผ่านการทำแห้งของการทำแห้งแบบพ่นฝอยแบบเดิมกับการใช้ร่วมกับชุดลด ความชื้นอากาศ การทำแห้งแบบพ่นฝอยร่วมกับชุดลดความชื้นอากาศส่งผลให้การสร้างผิวของ อนุภาคเกิดเร็วขึ้น ผงที่ได้มีความชื้นต่ำลง ความหนาแน่นและความสามารถในการละลายเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ว่าระบบทำแห้งแบบพ่นฝอยที่ดัดแปลงนี้มีข้อดีกว่าระบบเดิม การทำแห้งอากาศ ก่อนนั้นนอกจากจะช่วยปรับปรุงการกักเก็บผลิตภัณฑ์ยังช่วยให้ปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์อีกด้วย

Nagaya et al. (2006) ใช้ชุดลดความชื้นแบบวงล้อหมุนในระบบทำแห้งอาหารที่อุณหภูมิต่ำ และการใช้สารดูดความชื้นร่วมโดยมีการควบคุมอุณหภูมิและความเร็วลม ใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ 49°C โดยอากาศที่ผ่านชุดลดความชื้นมาถูกให้ความร้อนเพื่อให้ได้ตามอุณหภูมิที่กำหนดด้วยฮีตเตอร์ขนาด 2 kW ทดลองอบแครอทที่อุณหภูมิ 49°C ความชื้นสัมพัทธ์ 15% พบว่าใช้เวลา 14 ชั่วโมงเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ระดับเดียวกันกับการทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ซึ่งต้องใช้เวลารวมถึง 8 วัน เมื่อวิเคราะห์ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำแห้งด้วยระบบทำแห้งอาหารที่อุณหภูมิต่ำและการใช้สารดูดความชื้นร่วมโดยมีการควบคุมอุณหภูมิและความเร็วลมพบว่าสามารถรักษาสีของผักไว้ได้ใกล้เคียงกับผักสด ปริมาณวิตามินซีในผักโขมที่ทำแห้งด้วยระบบนี้สูงกว่าผักโขมต้มถึง 3 เท่า สำหรับการทำแห้งเห็ดนั้น ต่างจากการทำแห้งผักอื่น ๆ เนื่องจากอุณหภูมิมีส่วนสำคัญกับกลิ่นของเห็ด จึงแบ่งการทำแห้งเป็น 5 ช่วง ช่วงละเท่า ๆ กันและเริ่มจากอุณหภูมิ 49°C จนกระทั่งถึงอุณหภูมิสุดท้ายที่ 60°C ส่วนเงื่อนไขการทำงานอื่น ๆ กำหนดเช่นเดียวกับวิธีการมาตรฐานในการทำแห้งเห็ด เห็ดแห้งที่ได้จากระบบที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถรักษาสีให้สดและกลิ่นยังเหมือนกับเห็ดที่ผ่านการทำแห้งตามวิธีที่ใช้โดยทั่วไป

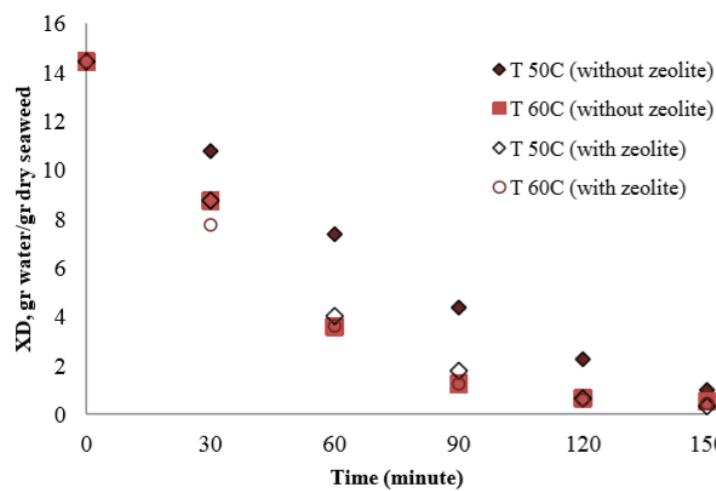
Ondier et al. (2010) อบแห้งข้าวเปลือกด้วยอุณหภูมิต่ำและความชื้นต่ำ ใช้อุณหภูมิในช่วง 26–34°C และความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 19–68% ทำแห้งข้าวเปลือกที่ถูกเรียงเป็นชั้นเดียวเพื่อให้ความชื้นลดลงเหลือ 12.5% ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการลดความชื้นของอากาศที่ใช้ทำแห้งนั้นส่งผลให้เพิ่มอัตราการแห้งที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน การทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำไม่มีผลกระทบต่อค่าเปอเซ็นต์ข้าวตันหรือค่าสีเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม ค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดสุดท้ายของตัวอย่างข้าวที่ทำแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำและความชื้นต่ำมีค่าเหมือนกับตัวอย่างควบคุม

Attkan et al. (2014) ประเมินประสิทธิภาพของระบบทำแห้งอาหารร่วมกับชุดลดความชื้นอากาศที่อุณหภูมิต่ำ งานวิจัยนี้ใช้เครื่องลดความชื้นอากาศแบบเบดหมุน อากาศที่ผ่านการลดความชื้นถูกต่อเข้ากับเครื่องอบแห้งแบบถาดซึ่งมีถาดซ้อนกันภายในจำนวน 5 ชั้น ทำการเปรียบเทียบเวลาทำแห้งและคุณภาพของพีนุกริกที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบถาดกับการใช้เครื่องอบแห้งแบบถาดร่วมกับชุดลดความชื้นอากาศที่อุณหภูมิ 45°C จากผลการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำแห้งโดยใช้ชุดลดความชื้นอากาศร่วมในระบบส่งผลให้มีปริมาณวิตามินซีและแคโรทีนอยด์สูงกว่า การทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดร่วมกับชุดลดความชื้นอากาศสามารถทำแห้งได้ไวกว่าการใช้เครื่องอบแห้งแบบถาด

Djaeni and Sari (2015) ทำแห้งสาหร่ายที่อุณหภูมิต่ำด้วยอากาศที่ลดความชื้น โดยใช้คอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นซีโอไลท์ 3A ดังแสดงในรูปที่ 2.13 อากาศสิ่งแวดล้อมมีความชื้นสัมพัทธ์ 70-80 % อุณหภูมิ 29-33°C เมื่อผ่านคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นทำให้ปริมาณความชื้นในอากาศลดลงประมาณ 80-90% อบแห้งสาหร่ายที่อุณหภูมิ 70, 60, 50, และ 40°C ด้วยความเร็วลม 5 m<sup>3</sup>/s และ 7 m<sup>3</sup>/s จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 70°C หรือต่ำกว่ามีระยะเวลาการทำแห้งที่สามารถยอมรับได้และยังรักษาคุณภาพของสาหร่ายได้ การเพิ่มอุณหภูมิทำแห้งหรือลดความชื้นอากาศส่งผลให้ระยะเวลาการทำแห้งลดลง เมื่อเปรียบเทียบการทำแห้งแบบที่ใช้และไม่ใช้อากาศที่ลดความชื้นด้วยซีโอไลท์ที่ความเร็วลม 5 m<sup>3</sup>/s อุณหภูมิ 50 และ 60°C ในรูปที่ 2.14 แสดงปริมาณน้ำในสาหร่ายที่ทำแห้งด้วยอากาศที่ผ่านและไม่ผ่านสารดูดความชื้นซีโอไลท์พบว่าการใช้อากาศที่ลดความชื้นส่งผลทางบวกต่อปริมาณการระเหยออกของน้ำในสาหร่าย แต่ที่อุณหภูมิ 60°C ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากปริมาณที่ระเหยออกมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 2.13 โครงร่างระบบทำแห้งสำหรับที่อุณหภูมิต่ำด้วยอากาศที่ลดความชื้น  
ที่มา: Djaeni and Sari, 2015



รูปที่ 2.14 ปริมาณน้ำในสาหร่ายที่ทำแห้งด้วยอากาศที่ผ่านและไม่ผ่านสารดูดความชื้นซีโอไลท์  
ที่มา: Djaeni and Sari, 2015

ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของชุดลดความชื้นอากาศสามารถสรุปได้เป็น 2 ส่วนหลัก ส่วนแรกคือสภาพอากาศซึ่งเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ ความชื้นและอุณหภูมิของอากาศส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับความชื้นของสารดูดความชื้น ส่วนที่สองคือการออกแบบชุดลดความชื้นอากาศ ลักษณะการออกแบบชั้นบรรจุสารดูดความชื้น ชนิดสารดูดความชื้นที่เลือกใช้ การกำหนดอัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสารดูดความชื้น ปัจจัยทั้งหลายนี้ล้วนส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของชุดลดความชื้นอากาศ มีการออกแบบเบดบรรจุสารดูดความชื้นในหลากหลายรูปแบบซึ่งแต่ละแบบนั้นมีเงื่อนไขการทำงานเพื่อให้ได้ค่าประสิทธิภาพที่ดีแตกต่างกัน ในกรณีชุดลดความชื้นอากาศแบบคอลัมน์ที่เบดบรรจุสารดูดความชื้นมีความยาวสามารถทำให้อากาศคงความชื้นต่ำได้เป็นระยะเวลานานแต่ต้องใช้เวลาในการฟื้นฟูสารดูดความชื้นนาน เบดบรรจุสั้นกว่าจะใช้เวลาฟื้นฟูที่น้อยกว่าแต่ให้อากาศที่คงความชื้นต่ำได้ระยะเวลาน้อยลงเช่นกัน (Ramzy et al., 2013) หากสามารถทำให้อากาศไหลผ่านชั้นสารดูดความชื้นที่ระยะทางมากขึ้นหรือเพิ่มการสัมผัสกับพื้นผิวสารดูดความชื้นจะช่วยให้ความสามารถการลดความชื้นอากาศเพิ่มสูงขึ้น และการแบ่งเบดบรรจุสารดูดความชื้นเป็นชั้นย่อย ๆ ช่วยให้ระยะการฟื้นฟูสารดูดความชื้นสั้นลง (Singh & Singh, 1998)

ดังนั้นการปรับโครงสร้างเบตบรรจุให้สามารถทำงานได้ด้วยลักษณะการออกแบบทั้งสองที่กล่าวมานั้น มีแนวโน้มทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของชุดลดความชื้นอากาศแบบคอลัมน์ดีขึ้น

## บทที่ 3

### วิธีการทดลอง

ชุดลดความชื้นอากาศแบบคอลัมน์จะถูกนำมาปรับปรุงโครงสร้างเบดบรรจุสารดูดความชื้นภายใน โดยเบดบรรจุเดิมซิลิกาเจลถูกบรรจุในเบดเดี่ยวรวมกันหรือเบดบรรจุเต็ม เบดบรรจุใหม่ถูกออกแบบให้มีจำนวนชั้นเพิ่มมากขึ้นและกระจายซิลิกาเจลไปในชั้นเบดต่าง ๆ มีการควบคุมสภาวะอากาศที่ใช้ขณะทดสอบด้วยชุดปรับสภาพอากาศซึ่งจะช่วยให้ในระหว่างการทดลองมีปริมาณความชื้นอากาศตามที่กำหนด โครงสร้างเบดบรรจุจำนวน 7 แบบ ได้รับการทดสอบความสามารถในการลดความชื้นอากาศ โครงสร้างเบดบรรจุที่มีประสิทธิภาพสูงสุดถูกเลือกเพื่อนำไปใช้งานและศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการลดความชื้นอากาศ ผลจากการศึกษาถูกนำมาหาสมการความสัมพันธ์เพื่อนำมาใช้ประเมินเวลาการสลับการทำงานของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้น ในขั้นตอนสุดท้ายชุดลดความชื้นอากาศแบบคอลัมน์คู่ซึ่งภายในเป็นเบดบรรจุแบบชั้นบางหลายชั้นถูกนำมาใช้งานร่วมกับระบบทำแห้งแบบลมร้อนเพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงาน

#### 3.1 การเตรียมซิลิกาเจล

ลดความชื้นของซิลิกาเจล (Commercial grade) ด้วยการอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 120°C นาน 12 ชั่วโมง (Rady, 2009; Yang et al., 2018) ปล่อยให้เย็นในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทก่อนนำไปใช้ วัดความชื้นของซิลิกาเจลเริ่มต้นด้วยเครื่องวัดความชื้นแบบอินฟราเรด (MA45; Sartorius, Germany)

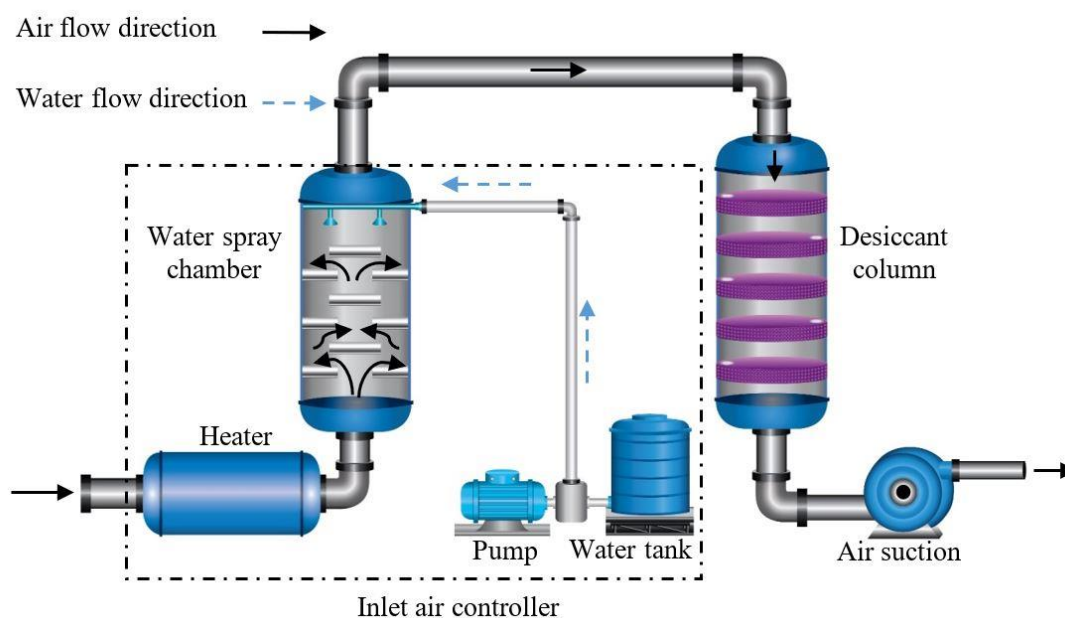
ซิลิกาเจลถูกบรรจุลงในชั้นบรรจุแบบต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศและค่าความดันตกคร่อม การลดความชื้นอากาศต้องการให้ชั้นซิลิกาเจลมีพื้นที่สัมผัสอากาศสูงสุด ดังนั้นซิลิกาเจลจึงถูกแบ่งลงในชั้นบรรจุในลักษณะชั้นบางให้ซิลิกาเจลเรียงตัวกันเพียงชั้นเดียวในการทดสอบชั้นต้นชั้นบรรจุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm ต้องใช้ซิลิกาเจล 130 g เพื่อให้เกิดลักษณะชั้นบางของสารดูดความชื้น ในการทดลองมีจำนวนชั้นที่ใช้บรรจุสารดูดความชื้น 15 ชั้น ใช้ซิลิกาเจลทั้งหมด 1,950 g ต่อการบรรจุในหนึ่งคอลัมน์



รูปที่ 3.1 ซิลิกาเจล

### 3.2 ชุดปรับสภาพอากาศ (Inlet air controller)

ชุดปรับสภาพอากาศใช้เพื่อปรับสภาพอากาศให้มีปริมาณความชื้นตามที่ต้องการและสามารถควบคุมให้สภาพอากาศค่อนข้างคงที่ระหว่างการทดลอง ชุดปรับสภาพอากาศ (รูปที่ 3.2) ประกอบด้วยปั้มน้ำ ถังเก็บน้ำ ฮีตเตอร์และห้องปรับความชื้นอากาศ ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้ อากาศผ่านฮีตเตอร์เพื่อปรับอุณหภูมิก่อนที่จะเข้าสู่ห้องปรับความชื้นอากาศซึ่งภายในมีการติดตั้งหัวฉีดละอองน้ำเพื่อเพิ่มความชื้นให้กับอากาศ ท่ออากาศเข้าของชุดลดความชื้นอากาศต่อกับท่ออากาศออกของชุดปรับสภาพอากาศ พัดลมดูดอากาศ (MA40B; EuroVent Co.,Ltd., Thailand) ของชุดลดความชื้นอากาศจะดูดอากาศไหลผ่านชุดปรับสภาพอากาศซึ่งแสดงในรูปที่ 3.2 หัววัดความชื้นอากาศและอุณหภูมิถูกติดตั้งบริเวณท่ออากาศก่อนเข้าคอลัมน์ดูดความชื้น ทำการปรับอุณหภูมิของอากาศและค่า RH ให้ได้ปริมาณความชื้นตามที่กำหนดก่อนจะปล่อยอากาศเข้าสู่คอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้น



รูปที่ 3.2 โครงสร้างชุดปรับสภาพอากาศและทิศทางการไหลของอากาศ

### 3.3 การออกแบบเบตบรรจุซิลิกาเจล

โครงสร้างเบตบรรจุซิลิกาเจล 3 แบบถูกออกแบบเพื่อใช้ลดความชื้นอากาศ คอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 cm และผนังคอลัมน์ถูกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน โครงสร้างแบบ A เบตบรรจุซิลิกาเจลถูกแบ่งชั้นย่อยโดยในชั้นย่อยแต่ละชั้นมีช่องให้อากาศไหลผ่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm และวางซ้อนกันโดยวางสลับช่องอากาศให้อยู่ด้านตรงข้ามกันในแต่ละชั้นมีระยะห่างระหว่างชั้น 2.5 cm แบบ B เบตบรรจุถูกแบ่งเป็นชั้นย่อยแต่ละชั้นวางซ้อนกันมีระยะห่างระหว่างชั้น 2.5 cm และแบบ C เป็นเบตบรรจุซิลิกาเจลแบบเต็มซึ่งโครงสร้างชั้นบรรจุทั้ง 3

แบบแสดงในรูปที่ 3.3 โดยจำนวนชั้นที่ใช้ทดสอบของเบตบรรจุแบบ A และ B มี 3 ระดับ คือ 5, 10 และ 15 ชั้น เนื่องจากปริมาณการลดความชื้นอากาศขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารดูดความชื้นกับอากาศ จึงบรรจุซิลิกาเจลด้วยน้ำหนักเท่ากันทุกโครงสร้างเบต กรณีแบบ A และแบบ B ซิลิกาเจลจะถูกกระจายในแต่ละชั้นด้วยปริมาณที่เท่ากันกับทุกชั้น ศึกษาผลของโครงสร้างเบตบรรจุและจำนวนชั้นเบตที่มีผลต่อการลดความชื้นอากาศ กำหนดอัตราการไหลของอากาศเข้า  $1.2 \text{ m}^3/\text{min}$  ตัวแปรที่ศึกษา คือ ค่าความดันตกคร่อมของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์อากาศออกและอุณหภูมิอากาศออก กำหนดตัวอักษรย่อเพื่อแสดงถึงโครงสร้างเบตบรรจุแบบต่าง ๆ ดังนี้

5A คือ โครงสร้างเบตบรรจุแบบ A จำนวน 5 ชั้น

10A คือ โครงสร้างเบตบรรจุแบบ A จำนวน 10 ชั้น

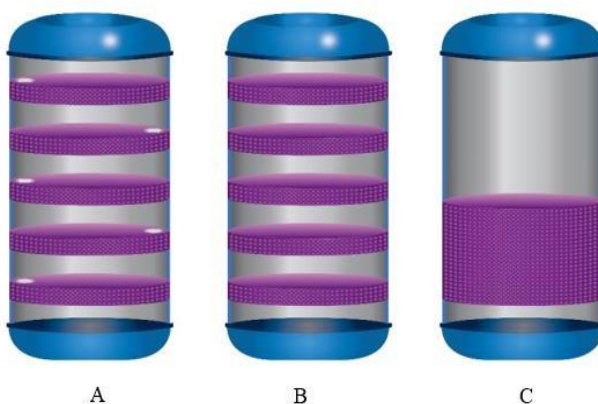
15A คือ โครงสร้างเบตบรรจุแบบ A จำนวน 15 ชั้น

5B คือ โครงสร้างเบตบรรจุแบบ B จำนวน 5 ชั้น

10B คือ โครงสร้างเบตบรรจุแบบ B จำนวน 10 ชั้น

15B คือ โครงสร้างเบตบรรจุแบบ B จำนวน 15 ชั้น

C คือ โครงสร้างเบตบรรจุแบบเต็ม



รูปที่ 3.3 โครงสร้างเบตบรรจุ (A) แบบบรรจุเป็นชั้นและมีช่องอากาศ, (B) แบบบรรจุเป็นชั้น และ (C) แบบบรรจุเต็ม

### 3.3.1 ความดันตกคร่อมของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้น

คอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นที่ภายในมีโครงสร้างเบตบรรจุสารดูดความชื้นแบบต่าง ๆ ถูกวัดค่าความดันตกคร่อมระหว่างทางเข้าและทางออกของอากาศที่อัตราการไหล 4 ระดับ 1.2, 2.4, 3.6 และ  $4.8 \text{ m}^3/\text{min}$  เพื่อเปรียบเทียบความดันตกคร่อมของโครงสร้างเบตบรรจุสารดูดความชื้นแบบต่าง ๆ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติ

### 3.3.2 ศึกษาผลของโครงสร้างเบตบรรจุต่อการลดความชื้นอากาศ

โครงสร้างเบตบรรจุทั้ง 3 แบบแสดงในรูปที่ 3.3 ถูกนำมาทดสอบประสิทธิภาพลดความชื้นอากาศโดยมีการควบคุมสภาวะอากาศก่อนเข้าคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นด้วยชุดปรับสภาวะอากาศ ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. ปรับความชื้นอากาศที่ใช้ในการทดลองด้วยชุดปรับสภาพอากาศโดยควบคุมให้อากาศเข้ามีอัตราส่วนความชื้นอากาศประมาณ 22 g/kg dry air (ประมาณ 31°C ความชื้นสัมพัทธ์ 77%)
2. เมื่อสภาพอากาศได้ตามที่กำหนดจึงบรรจุซิลิกาเจลปริมาณ 1950 g ลงในชั้นบรรจุสารดูดความชื้นเพื่อเริ่มทำการทำการทดลอง ปรับอัตราการไหลของอากาศเข้าตามที่กำหนด วัดอุณหภูมิและ %RH ของอากาศทั้งก่อนและหลังผ่านคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นและบันทึกค่าทุก ๆ 30 sec ระยะเวลาทดสอบนาน 60 min วัดค่าความดันตกคร่อมของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นของแต่ละโครงสร้างเบตบรรจุ เมื่อสิ้นสุดการทดลองซึ่งนำน้ำหนักซิลิกาเจลอีกครั้ง ทำการทดลอง 2 ซ้ำ
3. คำนวณอัตราการลดความชื้นอากาศและประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศจากสมการที่ 3.1 และ 3.2 โดยปริมาณน้ำในอากาศที่ใช้ในการคำนวณมาจากโปรแกรม KILOG 2015 ของเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศ (KT320; KIMO, France)

$$\text{Dehumidification rate} = \dot{m}_d(w_{i,d} - w_{o,d}) \quad (3.1)$$

$$\text{Dehumidification efficiency (\%)} = \frac{w_{i,d} - w_{o,d}}{w_{i,d}} \times 100 \quad (3.2)$$

โดย Dehumidification rate คือ อัตราการลดความชื้นอากาศ (g water/min)

Dehumidification efficiency คือ ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศ (%)

$\dot{m}_d$  คือ อัตราการไหลของอากาศเข้า (kg dry air/min)

$w_{i,d}$  คือ อัตราส่วนความชื้นอากาศเข้า (g water/kg dry air)

$w_{o,d}$  คือ อัตราส่วนความชื้นอากาศออก (g water/kg dry air)

4. คำนวณประสิทธิผลการลดความชื้นอุณหภูมิจากสมการ 3.3 โดยพิจารณาจากค่าผลต่าง Enthalpy ที่สภาวะ Adiabatic ( $h_{ideal}$ ) กับค่า Enthalpy ของอากาศออกที่ได้การทดลอง ( $h_{out}$ ) (Jongyingcharoen, 2018; Mandegari & Pahlavanzadeh, 2009)

$$\text{dehumidification adiabatic effectiveness} = 1 - \frac{|h_{out} - h_{ideal}|}{h_{ideal}} \quad (3.3)$$

โดย dehumidification adiabatic effectiveness คือ ประสิทธิภาพการลดความชื้นอุณหภูมิจาก

$h$  คือ Enthalpy (kJ/kg dry air)

5. วิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติ
6. เลือกโครงสร้างเบตบรรจุที่มีความเหมาะสมโดยพิจารณาจากอัตราการลดความชื้นอากาศ และประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศ ซึ่งโครงสร้างที่เลือกจะถูกใช้ในการทดลองขั้นต่อไป



รูปที่ 3.4 แผนการทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างเบตบรรจุสารดูดความชื้น

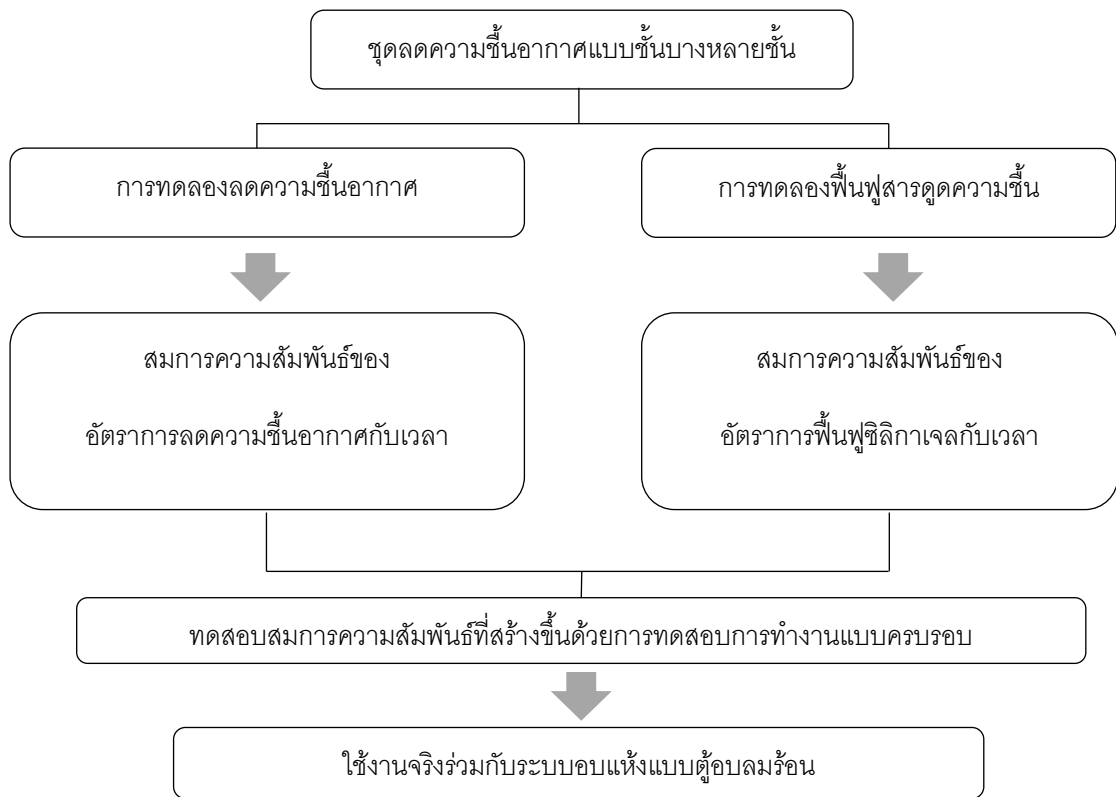
### 3.3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม SPSS ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย (Duncan's Multiple Range Test) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

## 3.4 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของชุดลดความชื้นอากาศ

เมื่อได้โครงสร้างชั้นบรรจุสารดูดความชื้นที่เหมาะสมแล้ว โครงสร้างนั้นถูกนำมาศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของชุดลดความชื้นอากาศ นำข้อมูลที่ได้มาสร้างสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการประมาณเวลาการทำงานของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้น

แผนการทดลองเพื่อการศึกษาการทำงานของชุดลดความชื้นอากาศแบบชั้นบางหลายชั้นแสดงดังในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การทดลองเพื่อการศึกษาการทำงานของชุดลดความชื้นอากาศแบบชั้นบางหลายชั้น

### 3.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการลดความชื้นอากาศ (Dehumidification)

โครงสร้างเบดบรรจุสารดูดความชื้นที่เลือกจากการทดลองข้อ 3.3 ถูกนำมาศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดความชื้นอากาศ อากาศเข้าที่ใช้ทดสอบการทำงานจะถูกปรับสภาพโดยมีอุณหภูมิประมาณ 35°C และความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) อยู่ในช่วง 60 - 80% เพื่อให้ได้อัตราส่วนความชื้นอากาศเข้า 3 ระดับ คือ 19, 22 และ 25 g/kg dry air ใช้อัตราการไหล 3 ระดับ 1.2, 2.4 และ 3.6 m<sup>3</sup>/min วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศทั้งก่อนและหลังผ่านคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้น ทำการทดลองนาน 60 min วางแผนการทดลองแบบ Full factorial โดยมีตัวแปรต้น คือ อัตราส่วนความชื้นและอัตราการไหลของอากาศเข้า วัดค่าปริมาณความชื้นอากาศออก อุณหภูมิอากาศออกและอัตราการลดความชื้นของอากาศ ทำการทดลอง 2 ชั่วโมง พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอากาศหลังผ่านหอดูดความชื้น ซึ่งมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

1. ปรับความชื้นอากาศที่ใช้ในการทดลองด้วยชุดปรับสภาพอากาศโดยควบคุมให้อากาศเข้ามีปริมาณความชื้นตามที่กำหนด
2. เมื่อสภาพอากาศได้ตามที่กำหนดจึงบรรจุซิลิกาเจลปริมาณ 1,950 g ลงในชั้นสารบรรจุความชื้นเพื่อเริ่มทำการทดลอง ปรับอัตราการไหลของอากาศเข้าตามที่กำหนด

3. ปรับความชื้นอากาศที่ใช้ในการทดลองด้วยชุดปรับสภาพอากาศโดยควบคุมให้อากาศเข้ามีปริมาณความชื้นตามที่กำหนด
4. วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศทั้งก่อนและหลังผ่านคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นและบันทึกค่าทุก ๆ 30 sec ทดสอบลดความชื้นอากาศนาน 60 min
5. คำนวณอัตราการลดความชื้นอากาศและประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศจากสมการที่ 3.1 และ 3.2 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการทดลอง เพื่อหาระยะเวลาการทำงานที่เหมาะสมในกระบวนการลดความชื้นอากาศ
6. ศึกษาผลของอัตราส่วนความชื้นอากาศเข้าและอัตราการไหลอากาศเข้าที่มีผลต่อปริมาณความชื้นอากาศออกและอัตราการลดความชื้นอากาศ

### 3.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการฟื้นฟูสารดูดความชื้น (Regeneration)

เตรียมซิลิกาเจลเพื่อทดลองการฟื้นฟูสารดูดความชื้น โดยปล่อยให้ดูดความชื้นที่อุณหภูมิห้องนาน 12 ชั่วโมงแล้วจัดเก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทและวัดค่าความชื้น ชั่งน้ำหนักซิลิกาเจล 2, 250 g เพื่อใช้ทดสอบกระบวนการฟื้นฟูสารดูดความชื้น ใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิต่างกัน 3 ระดับ คือ 70, 80 และ 90°C ที่อัตราการไหลต่างกัน 3 ระดับ คือ 2.4, 3.6 และ 4.8 m<sup>3</sup>/min อากาศไหลผ่านชุดปรับสภาพอากาศเพื่อให้มีอัตราส่วนความชื้นประมาณ 20 g/kg dry air (ประมาณ 30°C ความชื้นสัมพัทธ์ 74%) ก่อนไหลผ่านฮีตเตอร์ 2 เพื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนดังแสดงในรูปที่ 3.7 วางแผนการทดลองแบบ Full factorial ตัวแปร คือ อุณหภูมิลมร้อนและอัตราการไหลลมร้อน วัดค่าปริมาณความชื้นอากาศออกและอุณหภูมิ ทำการทดลอง 2 ซ้ำ

1. ปรับอุณหภูมิลมร้อนและอัตราการไหลให้ได้ตามที่กำหนด
2. เตรียมซิลิกาที่ผ่านการดูดความชื้นแล้วบรรจุในคอลัมน์ จึงค่อยเปิดวาล์วให้อากาศไหลผ่านคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้น
3. ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศเข้าและอากาศออกถูกบันทึกทุก ๆ 30 sec ใช้เวลาฟื้นฟูซิลิกาเจลนาน 60 min ชั่งน้ำหนักซิลิกาเจลเมื่อการฟื้นฟูสิ้นสุด คำนวณอัตราการฟื้นฟูสารดูดความชื้นและประสิทธิภาพการฟื้นฟูสารดูดความชื้นจากสมการที่ 3.4 และ 3.5 ศึกษาผลของอุณหภูมิลมร้อนและอัตราการไหลลมร้อนที่มีผลต่อการฟื้นฟูความชื้น

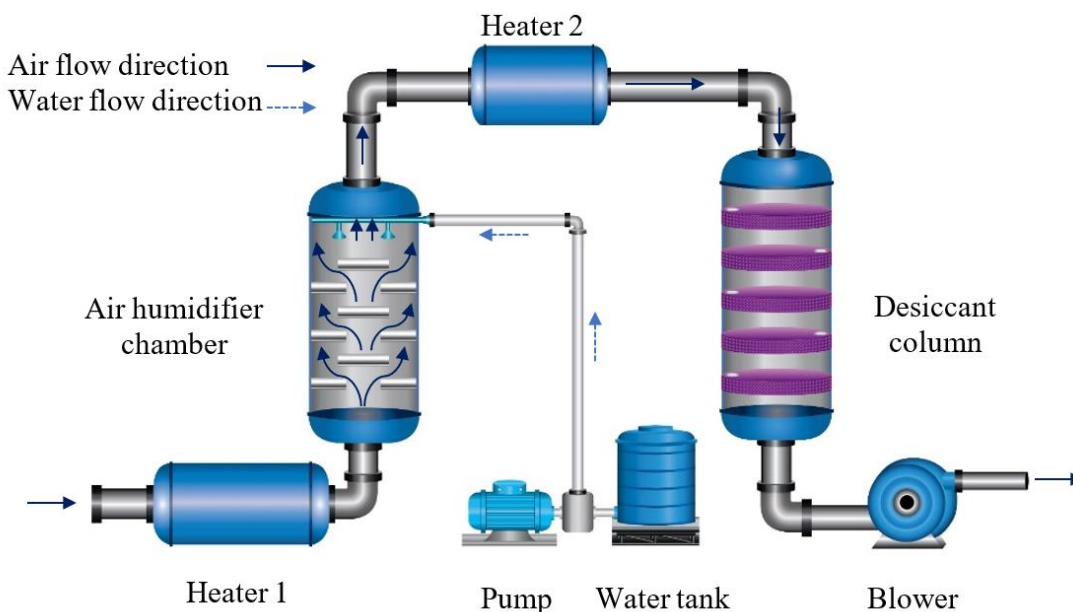
$$\text{Regeneration rate} = \dot{m}_r(w_{o,r} - w_{i,r}) \quad (3.4)$$

$$\text{Regeneration efficiency (\%)} = \frac{w_{o,r} - w_{i,r}}{w_{i,r}} \times 100 \quad (3.5)$$

โดย Regeneration rate คือ อัตราการฟื้นฟูสารดูดความชื้น (g water/min)  
 Regeneration efficiency คือ ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสารดูดความชื้น (%)  
 $\dot{m}_r$  คือ อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ฟื้นฟูสารดูดความชื้น (kg dry air/s)  
 $w_{i,r}$  คือ อัตราส่วนความชื้นอากาศเข้า (g water/kg dry air)  
 $w_{o,r}$  คือ อัตราส่วนความชื้นอากาศออก (g water/kg dry air)



รูปที่ 3.6 แผนการทดลองเพื่อการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการลดความชื้นอากาศ (A) และการฟื้นฟูสารดูดความชื้น (B)



รูปที่ 3.7 แผนผังระบบการไหลอากาศของการทดสอบกระบวนการฟื้นฟูสารดูดความชื้น

### 3.4.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นอากาศกับเวลาในขณะลดความชื้นอากาศและฟื้นฟูซิลิกาเจลของหอดูดความชื้น

สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปริมาณความชื้นอากาศออก ( $W_{out}$ ) และค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการลดความชื้นอากาศ (Dehumidification cumulative average, DCA) กับอัตราการไหล ( $Q$ ) และเวลา ( $t$ ) และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการฟื้นฟูสารดูดความชื้น (Regeneration cumulative average, RCA) กับอัตราการไหล ( $Q$ ) และเวลา ( $t$ ) วิเคราะห์ข้อมูลแบบ Multiple regression analysis และใช้วิธีการเลือกตัวแปรเข้าสมการแบบ Stepwise และข้อมูลนำจากการทดลองในหัวข้อ 3.4.1 และ 3.4.2 คำนวณค่า RMSE ของสมการที่ได้เพื่อประเมินความแม่นยำของสมการ

## 3.5 การทดลองการทำงานแบบครบรอบ (Cyclic operation)

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาระยะเวลาสลับการทำงานของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้น เนื่องจากในการทำงานจริงคอลัมน์ดูดความชื้นต้องทำงานเป็นคู่และสลับการทำงานเพื่อให้ระบบลดความชื้นอากาศทำงานได้อย่างต่อเนื่อง จากผลการทดลองก่อนหน้านี้พบว่าอัตราการลดความชื้นอากาศมีค่าสูงสุดในนาทีแรกของกระบวนการจากนั้นค่าจะลดลงอย่างชัดเจนในช่วง 10 นาที และเริ่มคงที่ เพื่อศึกษาหาเวลาการสลับการทำงานที่เหมาะสมในการใช้งานคอลัมน์บรรจุความชื้นแบบคู่ รูปที่ 3.8 แสดงระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการลดความชื้นอากาศ ในการทดลองนี้วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากคอลัมน์เพียงคอลัมน์เดียว (Column A)

ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการลดความชื้นอากาศด้วยการเปิดวาล์ว 1 และ 6 เพื่อให้อากาศไหลผ่านคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้น อากาศถูกดูดเข้าห้องอบด้วย Blower 1 หลังจากทำงานครบ

ตามเวลา วาล์ว 1 และ 6 จะถูกปิดเพื่อไม่ให้อากาศไหลเข้าคอลัมน์ และวาล์ว 2 จะเปิดเพื่อให้ลมร้อนไหลเข้าสู่คอลัมน์เพื่อทำการฟื้นฟูซิลิกาเจล ลมร้อนที่ใช้ฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นจะถูกปล่อยออกที่วาล์ว 5 เมื่อฟื้นฟูซิลิกาเจลครบเวลาที่กำหนด วาล์ว 2 และ 5 ถูกปิด เปลี่ยนเป็นกระบวนการลดความชื้นอากาศอีกครั้งด้วยการทำซ้ำตามขั้นตอนเดิม วัดความชื้นของอากาศแวดล้อมที่ตำแหน่ง a วัดความชื้นของอากาศแห่งที่ตำแหน่ง b และวัดความชื้นของอากาศที่ผ่านฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นที่ตำแหน่ง c

### 3.5.1 ระยะเวลาสลับการทำงานของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้น

การลดความชื้นอากาศสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องเมื่อมีปริมาณการไล่ความชื้นออกจากสารดูดความชื้น (RCA) มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับไว้ (DCA) กำหนดเวลาเพื่อทดสอบเวลาสลับการทำงานระหว่างการลดความชื้นอากาศและการฟื้นฟูสารดูดความชื้นที่ 5 และ 10 min อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ฟื้นฟูสารดูดความชื้น  $90^{\circ}\text{C}$  ในการทดลองนี้ประมาณปริมาณความชื้นอากาศที่ใช้ในการคำนวณไว้ที่  $19 \text{ g/kg dry air}$  คำนวณหาค่า DCA และ RCA จากสมการความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นในหัวข้อ 3.4.3 เพื่อทดสอบความใช้ได้ของสมการที่สร้างขึ้น ซึ่งมีวิธีการทดลองดังนี้

1. นำซิลิกาเจลที่ผ่านการลดความชื้นแล้วบรรจุลงในคอลัมน์
2. กำหนดเวลาการสลับการทำงานกระบวนการลดความชื้น คำนวณค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการลดความชื้นอากาศ (DCA) และค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการฟื้นฟูสารดูดความชื้น (RCA) พิจารณาค่าที่คำนวณได้เพื่อประเมินว่าระบบสามารถทำงานได้หรือไม่
3. ทดสอบการทำงานแบบครบรอบของระบบลดความชื้นอากาศต่อเนื่อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (1 รอบการทำงานหมายถึงการลดความชื้นอากาศและการฟื้นฟูสารดูดความชื้น) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นอากาศระหว่างการทำงานแบบครบรอบของชุดลดความชื้นอากาศมีการบันทึกค่าความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิของอากาศตลอดเวลาการทดลองทุก ๆ 30 sec
4. พิจารณาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของอากาศออกทั้งกระบวนการลดความชื้นอากาศและกระบวนการฟื้นฟูสารดูดความชื้น คำนวณประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศ ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสารดูดความชื้น และประสิทธิภาพการทำงานของระบบทั้งหมด (Total Coefficient of Performance) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงค่าเอนทัลปีของกระบวนการลดความชื้นอากาศกับพลังงานที่ใช้ในกระบวนการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น ดังสมการที่ 3.6 (Ramzy et al., 2013)

$$\eta = \frac{\int LH \times \dot{m}_d (w_{i,d} - w_{o,d}) dt}{\int c_a \times \dot{m}_r (T_{air} - T_{amb}) dt} \times 100 \quad (3.6)$$

โดย	$\eta$	คือ ประสิทธิภาพการทำงานของระบบทั้งหมด
	LH	คือ ความร้อนแฝงของกลายเป็นไอ (kJ/kg)
	$c_a$	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$ )
	$T_{air}$	คือ อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ในกระบวนการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{amb}$  คือ อุณหภูมิของอากาศ ( $^{\circ}\text{C}$ )

5. เลือกระยะเวลาสลับการทำงานโดยพิจารณาจากประสิทธิภาพการทำงานของระบบทั้งหมด

### 3.5.2 ผลของอัตราการไหลลมร้อนและอุณหภูมิการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นต่อ

#### ประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

โครงสร้างชั้นบรรจุสารดูดความชื้นที่เลือกนำมาบรรจุในคอลัมน์ทั้ง 2 คอลัมน์ของระบบลดความชื้นที่แสดงอยู่ในรูปที่ 3.8 - 3.11 ติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิและความชื้น (KT320; KIMO, France) ที่ จุด b และจุด c เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศหลังจากผ่านชุดลดความชื้น เครื่องเป่าลมขนาด 1 HP (MA40B; EuroVent Co.,Ltd., Thailand) ติดตั้งที่ตำแหน่ง Blower 2 เพื่อดูดอากาศให้ผ่านชุดให้ความร้อนขนาด 3.74 kW (Heater 2) และไหลเข้าสู่คอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นเพื่อใช้ในกระบวนการฟื้นฟูสารดูดความชื้น ท่ออากาศขนาด 110 มิลลิเมตรต่อเข้ากับคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นโดยมีวาล์วควบคุมทิศทางการไหลจำนวน 8 ตัว ห้องทำแห้งมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกมีฉนวนหุ้มด้านนอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในห้อง 20 cm ความยาว 30 cm Blower 1 เป็นเครื่องเป่าลมขนาด 1 HP ติดตั้งอยู่ก่อนห้องทำแห้งเพื่อดูดอากาศเข้าคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นและส่งอากาศแห้งเข้าสู่ห้องอบแห้ง ชุดให้ความร้อน (Heater 1) ทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิลมร้อนก่อนเข้าห้องทำแห้ง ภายในห้องทำแห้งมีตะแกรงสำหรับวางตัวอย่างที่ต้องการอบและต่ออยู่กับเครื่องชั่งน้ำหนัก

ลักษณะการทำงานของคอลัมน์ทั้งสองคือเมื่อคอลัมน์ A ทำหน้าที่ลดความชื้นอากาศวาล์ว 1 และ 6 เปิดเพื่อให้อากาศไหลผ่านสารดูดความชื้นในคอลัมน์ ส่วนวาล์ว 2 และ 5 จะถูกปิด ในขณะที่เดียวกันคอลัมน์ B ถูกฟื้นฟูสารดูดความชื้นวาล์ว 3 และ 8 เปิดเพื่อให้ลมร้อนไหลผ่านสารดูดความชื้นในคอลัมน์ ส่วนวาล์ว 4 และ 7 จะถูกปิด เมื่อครบกำหนดเวลาการสลับการทำงานวาล์วทุกตัวจะปรับไปในทางกลับกันเพื่อเปลี่ยนทิศทางการไหลของอากาศ ทำให้คอลัมน์ A ได้รับการฟื้นฟูสารดูดความชื้นและคอลัมน์ B ทำงานลดความชื้นอากาศ อากาศที่ออกจากห้องทำแห้งสามารถนำไปใช้อุ่นอากาศที่ใช้ในกระบวนการฟื้นฟูสารดูดความชื้นที่ Air preheater

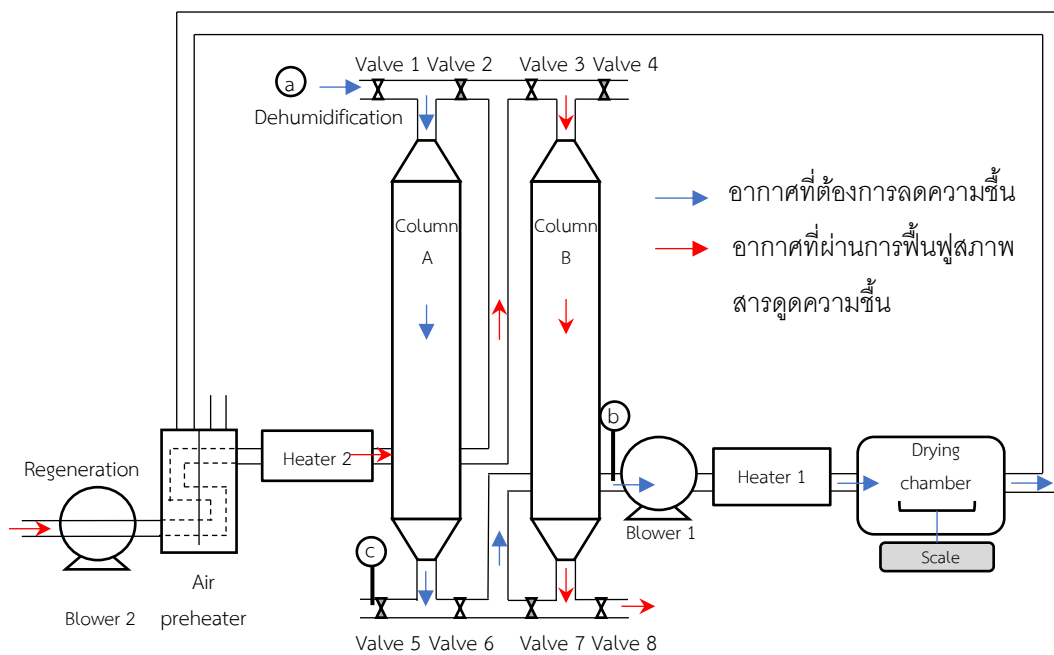
คอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นถูกนำมาใช้ลดความชื้นอากาศที่อัตราการไหลอากาศเข้า 1.2 และ 2.4  $\text{m}^3/\text{min}$  จากนั้นสารดูดความชื้นถูกฟื้นฟูที่เงื่อนไขการทำงานต่างกัน ที่อุณหภูมิลมร้อน 70 และ 90 $^{\circ}\text{C}$  และอัตราการไหล 2.4 และ 3.6  $\text{m}^3/\text{min}$  วางแผนการทดลองแบบ Full factorial กำหนดเวลาสลับการทำงาน 10 นาที ทดสอบการทำงานแบบครบรอบ ขั้นตอนการทดสอบทำเช่นเดียวกันกับหัวข้อ 3.5.1 พิจารณาค่าประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศ ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสารดูดความชื้นและประสิทธิภาพการทำงานของระบบทั้งหมด

วัดปริมาณการใช้ไฟฟ้าเมื่อใช้งานชุดลดความชื้นอากาศแบบขั้นบันไดเป็นระยะเวลา 60 min โดยมีอุณหภูมิอากาศระหว่างการทดลองอยู่ในช่วง 32 – 33 $^{\circ}\text{C}$  คำนวณค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ตามสมการที่ 3.12

$$SEC = \frac{P}{W} \quad (3.12)$$

โดย P คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)

W คือ ปริมาณความชื้นของอากาศที่ถูกดูดซับโดยสารดูดความชื้น โดยคำนวณจากผลต่างของปริมาณความชื้นอากาศเข้ากับอากาศออก (kg)



รูปที่ 3.8 ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการลดความชื้นอากาศ



รูปที่ 3.9 คอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้น



รูปที่ 3.10 ชุดอุ่นอากาศ (Air preheater)



รูปที่ 3.11 ห้องทำแห้ง (Drying chamber)

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

กระบวนการทดสอบคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นมีการควบคุมสภาวะอากาศด้วยชุดปรับสภาวะอากาศเพื่อให้อากาศแต่ละการทดลองมีค่าอัตราส่วนความชื้นตามที่กำหนด เมื่อได้แบบคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นที่เหมาะสมจึงดำเนินการทดสอบกับสภาวะอากาศต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลของปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของชุดลดความชื้นอากาศ รวมถึงการทดสอบใช้งานร่วมกับระบบอบแห้งลมร้อนเพื่อใช้ทำแห้งอาหาร

#### 4.1 การออกแบบเบตบรรจุซิลิกาเจล

##### 4.1.1 ความดันตกคร่อมของคอลัมน์ลดความชื้น

วัดความดันตกคร่อมของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นที่มีโครงสร้างเบตภายในแตกต่างกันโดย การวัดคร่อมระหว่างส่วนหัวและส่วนท้ายคอลัมน์ซึ่งเป็นทางเข้าและทางออกของอากาศ คอลัมน์ลดความชื้นแบบหลายชั้น (A และ B) มีความดันตกคร่อมต่างจากคอลัมน์แบบเบตบรรจุเต็ม (C) อย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) เมื่ออัตราการไหลมากกว่า  $1.2 \text{ m}^3/\text{min}$  ความดันตกคร่อมของคอลัมน์ลดความชื้นแบบ A, B และ C ที่อัตราการไหล 1.2 และ  $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$  มีค่าค่อนข้างใกล้เคียง แต่เมื่ออัตราการไหลอากาศเพิ่มเป็น 3.6 และ  $4.8 \text{ m}^3/\text{min}$  คอลัมน์แบบ B มีแนวโน้มที่ค่าความดันตกคร่อมสูงกว่าแบบ A และ C เล็กน้อย การแบ่งชั้นบรรจุสารดูดความชื้นของคอลัมน์แบบ A และ B พบว่าการเพิ่มจำนวนชั้นไม่มีผลต่อความดันตกคร่อมอย่างชัดเจน

##### 4.1.2 การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักซิลิกาเจลหลังผ่านกระบวนการลดความชื้นอากาศ

เบตบรรจุซิลิกาเจลทั้ง 3 แบบ คือ เบตบรรจุสารดูดความชื้นแบบหลายชั้นที่มีช่องอากาศ (A) เบตบรรจุสารดูดความชื้นแบบหลายชั้น (B) และเบตบรรจุซิลิกาเจลแบบเต็ม (C) ถูกทดสอบหาประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศ โดยการบรรจุซิลิกาเจลปริมาณ 1950 g ลงในเบต จากนั้นเบตจะถูกนำไปใส่ในคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้น อากาศที่อุณหภูมิห้องถูกปรับสภาวะให้มีอัตราส่วนความชื้น  $22 \text{ g/kg dry air}$  ก่อนถูกดูดเข้าสู่คอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้น อากาศไหลผ่านชั้นซิลิกาเจลเพื่อลดความชื้นเป็นเวลานาน 60 min ด้วยอัตราการไหล  $1.2 \text{ m}^3/\text{min}$  น้ำหนักของซิลิกาเจลหลังจากใช้งานมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเฉลี่ย  $229.64 \pm 10.78 \text{ g}$  ดังแสดงในตารางที่ 4.2 การที่น้ำหนักของซิลิกาเจลในทุกชนิดเบตมีค่าใกล้เคียงเนื่องจากการใช้เวลาลดความชื้นอากาศที่นานจนกระทั่งซิลิกาเจลนั้นดูดซับความชื้นจนเกือบสมดุลกับสภาวะอากาศที่ใช้ เบตบรรจุแบบเต็มมีน้ำหนักซิลิกาเจลหลังผ่านกระบวนการลดความชื้นอากาศน้อยที่สุดและแตกต่างจากเบตบรรจุแบบหลายชั้นอย่างมีนัยสำคัญ เบตบรรจุแบบ 15A มีน้ำหนักซิลิกาเจลหลังผ่านกระบวนการลดความชื้นอากาศสูงสุด การเปลี่ยนโครงสร้างเบตบรรจุเป็นชั้นบางซ้อนกันส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้อัตราการดูดความชื้นดีขึ้น

**ตารางที่ 4.1** ความดันตกคร่อมของคอลัมน์ลดความชื้นที่มีโครงสร้างเบตภายในต่างกัน

โครงสร้างเบต	ความดันตกคร่อม (mmH <sub>2</sub> O)			
	1.2 m <sup>3</sup> /min	2.4 m <sup>3</sup> /min	3.6 m <sup>3</sup> /min	4.8 m <sup>3</sup> /min
5A	2.45 ± 0.71 <sup>a</sup>	5.05 ± 0.07 <sup>bc</sup>	9.95 ± 0.07 <sup>b</sup>	16.55 ± 0.07 <sup>c</sup>
10A	2.50 <sup>a</sup>	5.05 ± 0.07 <sup>bc</sup>	10.00 <sup>b</sup>	16.65 ± 0.07 <sup>bc</sup>
15A	2.50 <sup>a</sup>	5.00 <sup>c</sup>	10.05 ± 0.07 <sup>b</sup>	16.45 ± 0.07 <sup>d</sup>
5B	2.50 <sup>a</sup>	5.10 <sup>b</sup>	10.05 ± 0.07 <sup>b</sup>	16.95 ± 0.07 <sup>a</sup>
10B	2.50 <sup>a</sup>	5.20 <sup>a</sup>	10.30 <sup>a</sup>	17.05 ± 0.07 <sup>a</sup>
15B	2.50 <sup>a</sup>	5.00 <sup>c</sup>	10.05 ± 0.07 <sup>b</sup>	16.75 ± 0.07 <sup>b</sup>
C	2.45 ± 0.71 <sup>a</sup>	4.80 <sup>d</sup>	9.25 ± 0.07 <sup>c</sup>	15.25 ± 0.07 <sup>e</sup>

ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

**ตารางที่ 4.2** น้ำหนักซิลิกาเจลหลังการใช้ลดความชื้นอากาศนาน 60 min

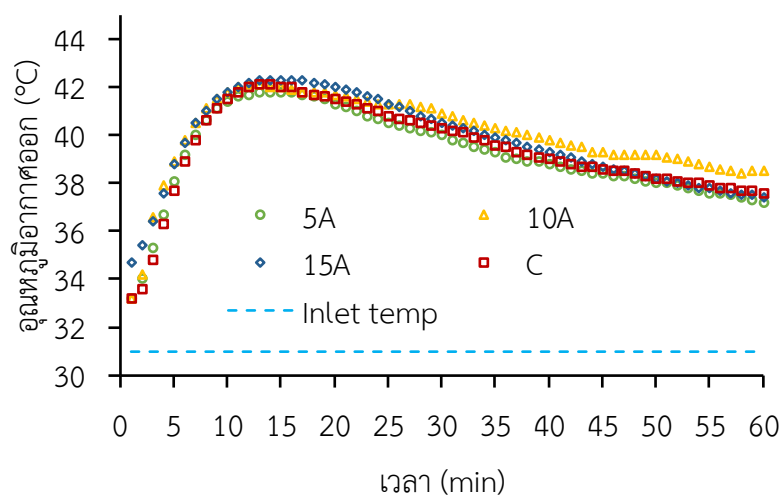
ชนิดเบต	จำนวนชั้น	โครงสร้างเบต	ค่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น	อัตราการดูดซับความชื้น (g/min)
			หลังผ่านกระบวนการลดความชื้นอากาศ (g)	
A	5	5A	222.00 ± 8.45 <sup>b</sup>	3.70
	10	10A	227.50 ± 10.61 <sup>b</sup>	3.79
	15	15A	243.00 ± 9.90 <sup>a</sup>	4.05
B	5	5B	232.50 ± 4.95 <sup>b</sup>	3.86
	10	10B	224.00 ± 14.14 <sup>b</sup>	3.73
	15	15B	239.50 ± 3.54 <sup>b</sup>	3.99
C	1	C	219.00 ± 2.83 <sup>c</sup>	3.65

ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

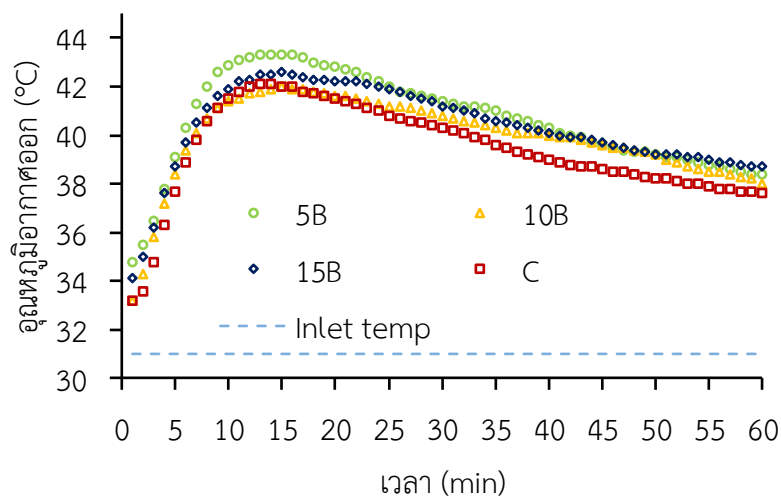
#### 4.1.3 การเปลี่ยนแปลงของสภาวะอากาศออก

สภาวะอากาศหลังผ่านคอลัมน์ลดความชื้นที่ภายในมีเบตบรรจุชนิดต่างกัน แสดงดังในภาพที่ 4.1 และ 4.2 โครงสร้างเบตแบบ A และ B ส่งผลให้อากาศที่ผ่านชั้นสารดูดความชื้นมีความแตกต่างจากเบต

แบบ C อย่างชัดเจน แต่การเพิ่มจำนวนชั้นบรรจุสารดูดความชื้นในโครงสร้างเบดแบบ A และ B กลับส่งผลไม่ชัดเจนมากนัก อากาศเข้ามีอุณหภูมิประมาณ  $31\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในช่วงแรกเมื่อเริ่มกระบวนการลดความชื้น อากาศ อุณหภูมิของอากาศออกค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากซิลิกาเจลดูดซับความชื้นจากอากาศทำให้เกิดความร้อนเนื่องจากการดูดซับหรือ Heat of adsorption อุณหภูมิจะมีค่าสูงสุดประมาณ  $41.8 - 43.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่เวลาประมาณ 15 min จากนั้นอุณหภูมิของอากาศออกจะค่อย ๆ ลดลง (Awad et al., 2008; Yeboah & Darkwa, 2021) ความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศเข้าและอากาศออกมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  หากปล่อยให้กระบวนการลดความชื้นอากาศดำเนินต่อไปมากกว่า 60 min จนกระทั่งซิลิกาเจลไม่สามารถดูดซับความชื้นได้ อุณหภูมิอากาศออกจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศเข้า

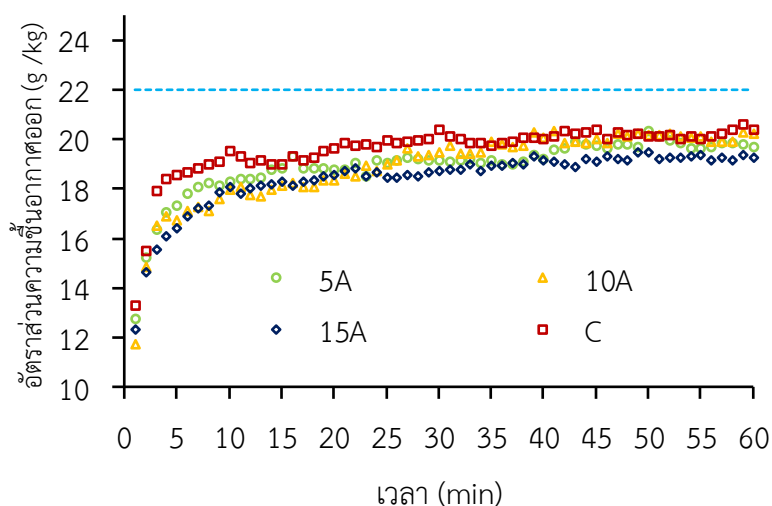


รูปที่ 4.1 อุณหภูมิอากาศออกของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นแบบหลายชั้นที่มีช่องอากาศ

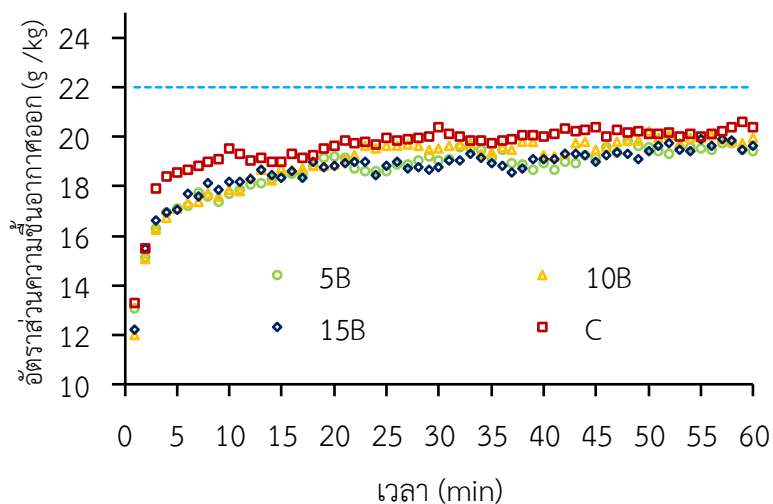


รูปที่ 4.2 อุณหภูมิอากาศออกของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นแบบหลายชั้น

ปริมาณความชื้นของอากาศที่ผ่านการลดความชื้นแล้วหรืออากาศออกแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 อากาศออกมีอัตราส่วนความชื้นต่ำที่สุดในช่วงแรก เนื่องจากการดูดซับความชื้นของอากาศในคอลัมน์ ระหว่างการติดตั้งระบบและซิลิกาเจลมีความชื้นต่ำเมื่อเริ่ม ที่ 1 min จึงดูดซับความชื้นได้มาก (Balthazar, Ismail, khai, et al., 2020) อัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกถึง 15 min หลังจากนั้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นแต่อัตราส่วนความชื้นของอากาศออกยังคงต่ำกว่าอากาศเข้า เบดบรรจุแบบ 15A สามารถลดความชื้นอากาศได้สูงสุดประมาณ 44% ในช่วงแรก และเมื่อผ่านไป 15 min สามารถลดความชื้นอากาศได้ประมาณ 15% เมื่อเวลาผ่านไปความสามารถในการดูดซับความชื้นของซิลิกาเจลจะลดลงจึงทำให้อัตราส่วนความชื้นของอากาศออกเพิ่มสูงขึ้น และยังพบการเปลี่ยนแปลงในลักษณะแบบเดียวกันในชุดลดความชื้นอากาศแบบอื่น ๆ (Abou-Ziyan et al., 2017; Balthazar, Ismail, Nasir, et al., 2020; Zallama et al., 2020) ปริมาณความชื้นอากาศออกของเบดแบบ C มีค่าสูงกว่าแบบ A และ B ดังนั้นเบดแบบบรรจุเต็มมีความสามารถในการลดความชื้นอากาศได้น้อยกว่าเบดแบบชั้นบาง เมื่อเวลาผ่านไปความสามารถในการดูดซับความชื้นของซิลิกาเจลจะค่อย ๆ ลดลง นอกจากนี้หากพิจารณาอุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นของอากาศออกร่วมกันพบว่าอุณหภูมิอากาศออกค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นในช่วงเวลา 1-15 min แรก พร้อมกับอัตราส่วนความชื้นอากาศออกที่ค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน ในทางทฤษฎีเมื่ออุณหภูมิของสารดูดความชื้นเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นลดลง ขณะที่กระบวนการลดความชื้นอากาศดำเนินไปจะมีความร้อนของการดูดซับเกิดขึ้น ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิภายในเบดสูงขึ้นจึงอาจเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อัตราส่วนความชื้นอากาศออกสูงขึ้น



รูปที่ 4.3 ความชื้นอากาศออกของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นแบบหลายชั้นที่มีช่องอากาศ



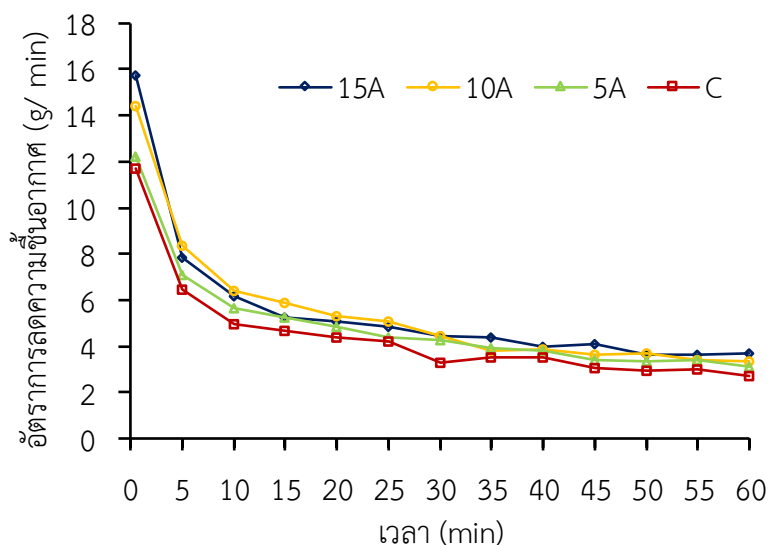
รูปที่ 4.4 ความขึ้นอากาศออกของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นแบบหลายชั้น

#### 4.1.4 สมรรถนะการลดความชื้นอากาศ

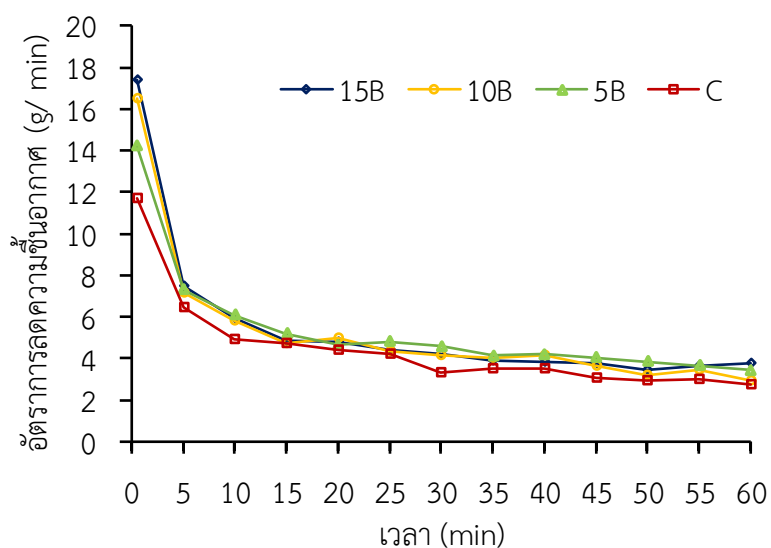
สมรรถนะการลดความชื้นอากาศของเบตบรรจุสารดูดความชื้นพิจารณาจากอัตราการลดความชื้นอากาศและประสิทธิภาพการลดความชื้น อัตราการลดความชื้นอากาศของเบตทุกแบบมีค่าสูงสุดช่วงเวลาที่แรก จากนั้นอัตราการลดความชื้นจะลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากซิลิกาเจลมีความชื้นสะสมที่ดูดซับไว้ทำให้สามารถดูดซับความชื้นจากอากาศได้น้อยลง ผลต่างของอัตราการลดความชื้นอากาศในนาที่แรกกับนาที่ที่ 30 มีค่าประมาณ 10 g/min หลังจาก 30 min อัตราการลดความชื้นอากาศค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 เบตบรรจุสารดูดความชื้นแบบหลายชั้น (A, B) มีอัตราการลดความชื้นอากาศสูงกว่าเบตแบบบรรจุเต็ม (C) ประมาณ 3 g/kg อัตราการลดความชื้นอากาศของเบต 15A และ 15B มีความแตกต่างจากเบต C อย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) อัตราลดความชื้นอากาศเฉลี่ยของเบต 15A มีค่าสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ  $5.22 \pm 2.18$  g/min สำหรับเบต 15B ที่มีจำนวนชั้นบรรจุสารดูดความชื้น 15 ชั้นแต่ไม่มีช่องอากาศมีอัตราลดความชื้นอากาศเฉลี่ย  $4.89 \pm 2.04$  g/min และเบต C แบบบรรจุเต็มมีอัตราลดความชื้นอากาศเฉลี่ยต่ำที่สุด  $4.29 \pm 0.66$  g/min

ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศของแต่ละโครงสร้างเบตบรรจุแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศของทุกโครงสร้างเบตบรรจุมีค่าลดลงอย่างชัดเจนในช่วง 5 min แรก หลังจากนั้นประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศจะค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งผลการทดลองที่พบนี้สอดคล้องกับการใช้ซิลิกาเจลเพื่อลดความชื้นอากาศของ Yang et al. (2017) ในการทดลองนี้โครงสร้างเบตบรรจุ 15A มีค่าประสิทธิภาพการลดความชื้นสูงสุด ณ เวลาเริ่มต้นของกระบวนการลดความชื้นอากาศเท่ากับ 51.59 % โครงสร้างเบต 15A กับ C มีความแตกต่างของประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศสูงสุดเท่ากับ 7.44 % แต่เมื่อกระบวนการลดความชื้นดำเนินไปจนครบ 60 min ค่าประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศของทุกแบบโครงสร้างเบตมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงสถานะ

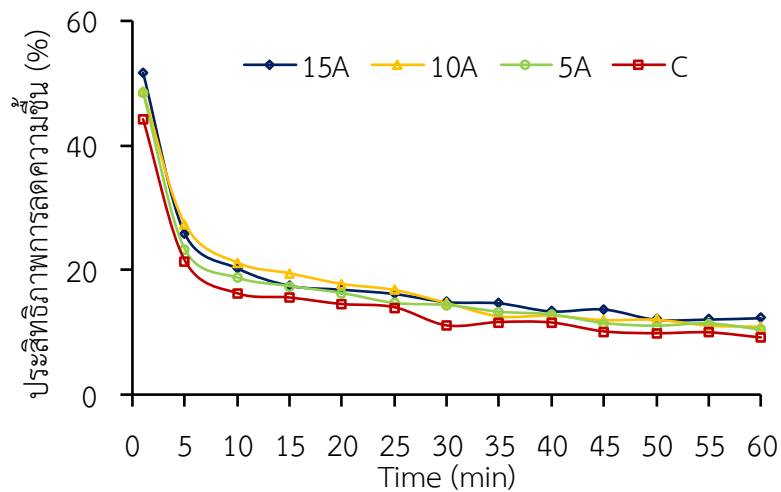
ของอากาศออกซึ่งค่อนข้างใกล้เคียงกันเมื่อเวลาผ่านไป 60 min ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศเฉลี่ยของโครงสร้างเบต 15A มีค่าสูงกว่า 15B ประมาณ 1% โดยโครงสร้างเบต 15A มีค่าประสิทธิภาพลดความชื้นเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 16.99% ดังแสดงในตารางที่ 4.3 เบตบรรจุแบบ C ค่าประสิทธิภาพต่ำที่สุด ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศเฉลี่ยของโครงสร้างเบตแบบหลายชั้น (A และ B) มีความแตกต่างจากเบตบรรจุเต็ม (C) อย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มจำนวนชั้นเบตบรรจุส่งผลต่ออัตราการลดความชื้นอากาศซึ่งผลนี้สอดคล้องกับการทดลองของ Abou-Ziyan et al. (2017) ซึ่งใช้ thin-multilayer activated alumina ในการลดความชื้นอากาศ



รูปที่ 4.5 อัตราการลดความชื้นอากาศออกของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นแบบหลายชั้นมีช่องอากาศ

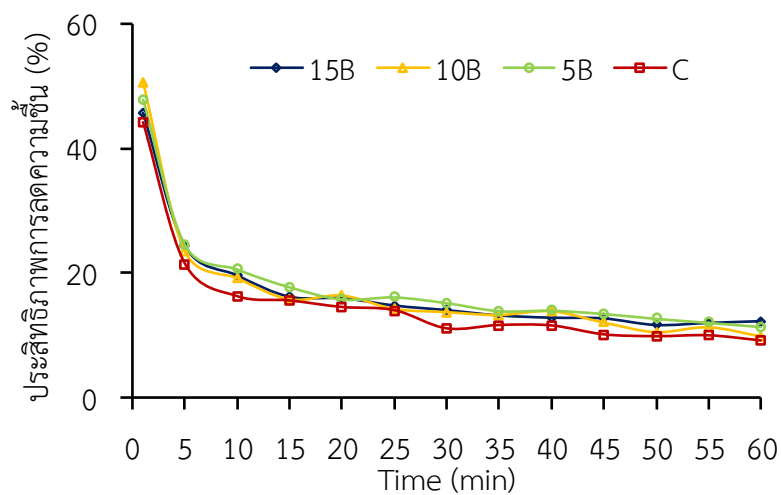


รูปที่ 4.6 อัตราการลดความชื้นอากาศออกของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นแบบหลายชั้น



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศออกของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้น

แบบหลายชั้นมีช่องอากาศ



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศออกของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นแบบหลายชั้น

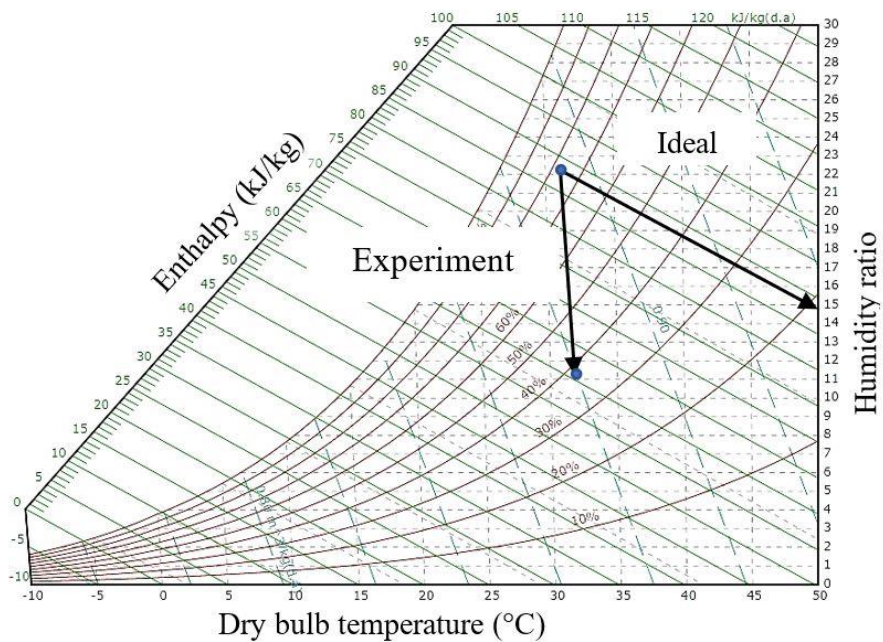
**ตารางที่ 4.3** อัตราลดความชื้นอากาศเฉลี่ยและประสิทธิภาพการลดความชื้นเฉลี่ยของคอลัมน์ลดความชื้นอากาศที่โครงสร้างเบตบรจภายในต่างกัน

โครงสร้างเบตบรจ สารดูดความชื้น	อัตราการลดความชื้นอากาศ (g/min)	ประสิทธิภาพการลดความชื้น อากาศ (%)
5A	4.66 ± 1.87 <sup>b</sup>	15.51 ± 6.05 <sup>b</sup>
10A	5.07 ± 2.07 <sup>a</sup>	16.78 ± 6.73 <sup>a</sup>
15A	5.13 ± 1.96 <sup>ab</sup>	16.99 ± 6.11 <sup>ab</sup>
5B	4.95 ± 1.88 <sup>ab</sup>	16.60 ± 6.10 <sup>ab</sup>
10B	4.70 ± 1.92 <sup>b</sup>	15.57 ± 6.22 <sup>b</sup>
15B	4.79 ± 1.69 <sup>ab</sup>	15.88 ± 5.28 <sup>ab</sup>
C	4.24 ± 1.86 <sup>c</sup>	14.01 ± 6.05 <sup>c</sup>

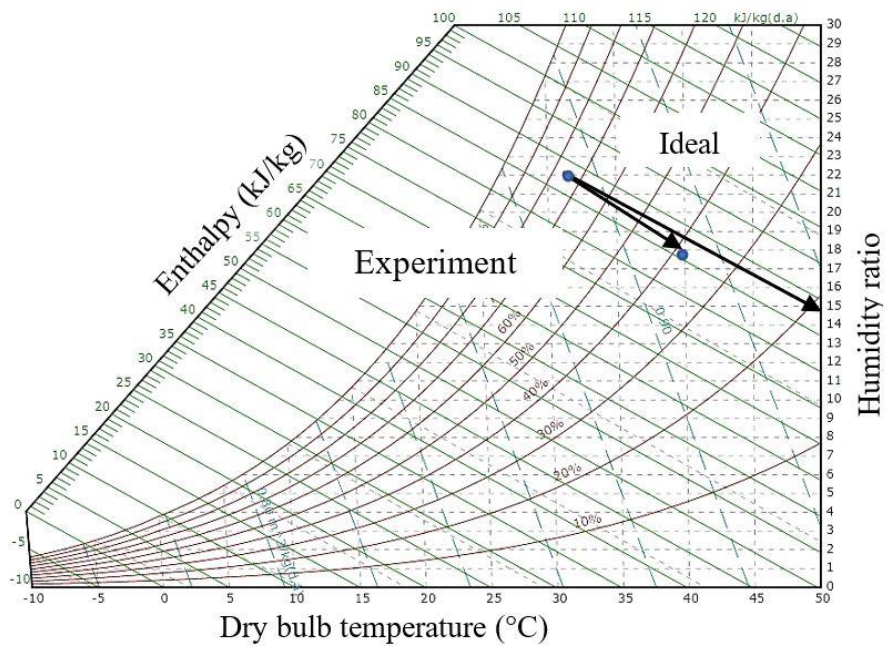
ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

#### 4.1.5 ประสิทธิภาพการลดความชื้นอุดมคติ

ค่า Enthalpy ของอากาศหลังการลดความชื้น ( $enthalpy_{out}$ ) ถูกนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพการลดความชื้นอุดมคติ ทางทฤษฎีการลดความชื้นอากาศด้วยสารดูดความชื้นเป็นกระบวนการ Adiabatic เนื่องจากไม่มีการส่งผ่านความร้อนเข้าหรือออกจากระบบทำให้ค่า enthalpy ของอากาศนั้นคงที่ ( $enthalpy_{ideal}$ ) ในการทดลองพบว่าในช่วงแรกของกระบวนการลดความชื้นอากาศความแตกต่างของค่า  $enthalpy_{out}$  กับ  $enthalpy_{ideal}$  นั้นมีค่าค่อนข้างมากดังแสดงในรูปที่ 4.9 เมื่อเวลาผ่านไป 10 min ในทุกโครงสร้างเบตมีค่า  $enthalpy_{out}$  มีค่าใกล้เคียงกับค่า  $enthalpy_{ideal}$  มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.10 เมื่อพิจารณาร่วมกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอากาศหลังการลดความชื้นที่ได้แสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 อุณหภูมิอากาศออกในช่วงแรกมีค่าต่ำสุด พลังงานความร้อนได้สูญหายไปในช่วงเวลานี้ประมาณ 33 kJ/kg dry air ทำให้ค่า enthalpy ต่ำลง ความร้อนที่สูญหายไปนี้เกิดจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารดูดความชื้นด้วยตัวเองและการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารดูดความชื้นกับผนังคอลัมน์ (Long & Guan, 2012) นอกจากนี้ยังมีการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากอากาศกับผนังคอลัมน์ซึ่งเป็นผลจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่มีค่ามากในช่วงแรก (Laguerre et al., 2006) เมื่อกระบวนการดำเนินไป 10 min อุณหภูมิของอากาศออกมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากความร้อนของการดูดซับที่เกิดจากสารดูดความชื้นและความร้อนไม่ได้ถูกถ่ายเทไปยังพื้นผิวคอลัมน์มากเหมือนในตอนเริ่มต้นกระบวนการ ในช่วงนี้ค่า  $enthalpy_{out}$  จึงมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี จากการทดลองพบว่าทุกโครงสร้างชั้นบรรจุสารดูดความชื้นเริ่มมีค่า enthalpy ใกล้เคียงกับค่า  $enthalpy_{ideal}$  ที่เวลาประมาณ 10 min ดังแสดงในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงค่า enthalpy ของอากาศออกที่ 1 min



รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงค่า enthalpy ของอากาศออกที่ 10 min

**ตารางที่ 4.4** ประสิทธิภาพการลดความชื้นอุณหภูมิต่อของโครงสร้างเบตบรรจุแบบต่างๆ

เวลา (min)	โครงสร้างเบต						
	15A	15B	10A	10B	5A	5B	C
1	0.68	0.73	0.71	0.70	0.72	0.71	0.75
5	0.91	0.92	0.90	0.93	0.94	0.92	0.95
10	0.97	0.98	0.97	0.99	1.00	0.98	0.98
15	0.99	0.98	0.98	0.97	0.98	0.98	0.97
20	0.99	0.98	0.99	0.98	0.98	0.97	0.97
25	0.97	0.98	0.99	0.98	0.97	0.98	0.97
30	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.96
35	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97
40	0.99	0.98	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98
45	1.00	0.99	0.99	0.98	0.98	0.99	0.97
50	0.99	0.98	0.99	0.98	0.99	0.99	0.98
55	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98
60	1.00	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	0.98

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเบตบรรจุสารดูดความชื้นจากเดิมที่เป็นแบบบรรจุเต็ม (C) เป็นการกระจายสารดูดความชื้นในเบตที่มีชั้นย่อยหลายชั้นทำให้อัตราการลดความชื้นอากาศและประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศนั้นดีขึ้น จากการทดลองข้างต้นพบว่าโครงสร้างเบตบรรจุแบบ 15A มีอัตราการลดความชื้นเฉลี่ยและประสิทธิภาพการลดความชื้นเฉลี่ยมีค่าสูงสุด สามารถลดความชื้นอากาศลงได้สูงสุดประมาณ 50% ณ เวลาเริ่มต้นของกระบวนการ ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศเฉลี่ยของ 15A สูงกว่า C ประมาณ 3% จึงเลือกโครงสร้าง 15A เป็นต้นแบบคอลัมน์ลดความชื้นอากาศเพื่อทำการทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อการลดความชื้นอากาศและการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นในขั้นต่อไป

## 4.2 กระบวนการลดความชื้นอากาศ

คอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นแบบชั้นบางหลายชั้น 15A ถูกเลือกนำมาลดความชื้นอากาศที่มีการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการลดอากาศ ได้แก่ ปริมาณความชื้นของอากาศ 3 ระดับ คือ 19, 22 และ 25 g/kg dry air และอัตราการไหลของอากาศเข้า 1.2, 2.4 และ 3.6 m<sup>3</sup>/min ระหว่างการทดสอบทำการบันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศตลอดระยะเวลา 60 min อุณหภูมิของอากาศหลังจากผ่านการลดความชื้นมีอุณหภูมิสูงขึ้น การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศส่งผลให้อุณหภูมิอากาศออกมีค่าสูงขึ้น (Kabeel, 2009) ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนในช่วง 5 – 10 min ดังแสดงในรูปที่ 4.11

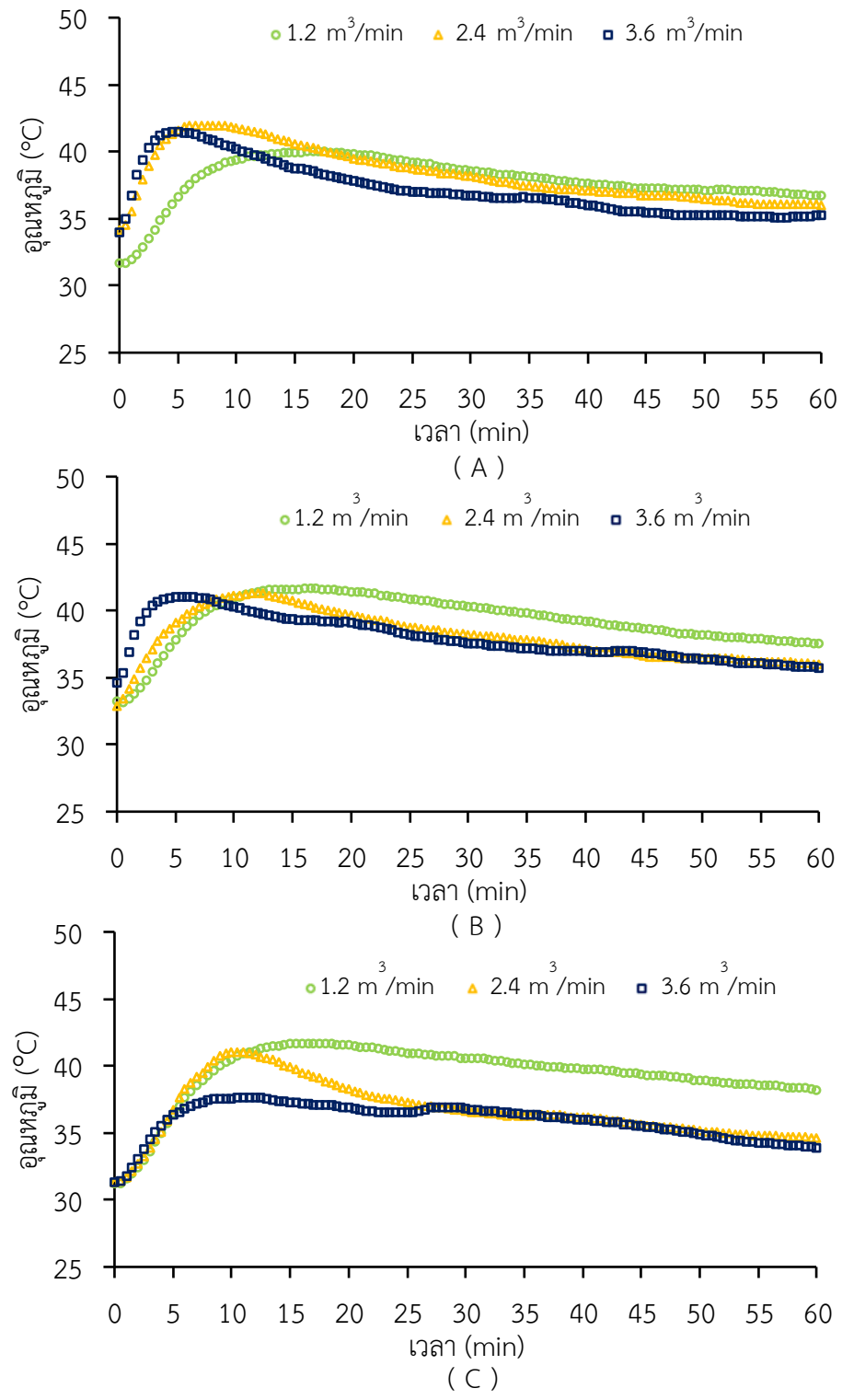
พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นอากาศออกในรูปที่ 4.12 ช่วงแรกของกระบวนการลดความชื้นอากาศการใช้อัตราการไหลอากาศสูงทำให้อากาศออกมีความชื้นสูงกว่าอัตราการ

ไหลอากาศตัวอย่างชัดเจน การเพิ่มอัตราการไหลอากาศของอากาศเข้าทำให้อากาศมีระยะเวลาสัมผัสกับสารดูดความชื้นน้อยการดูดซับความชื้นออกจากอากาศจึงลดลง

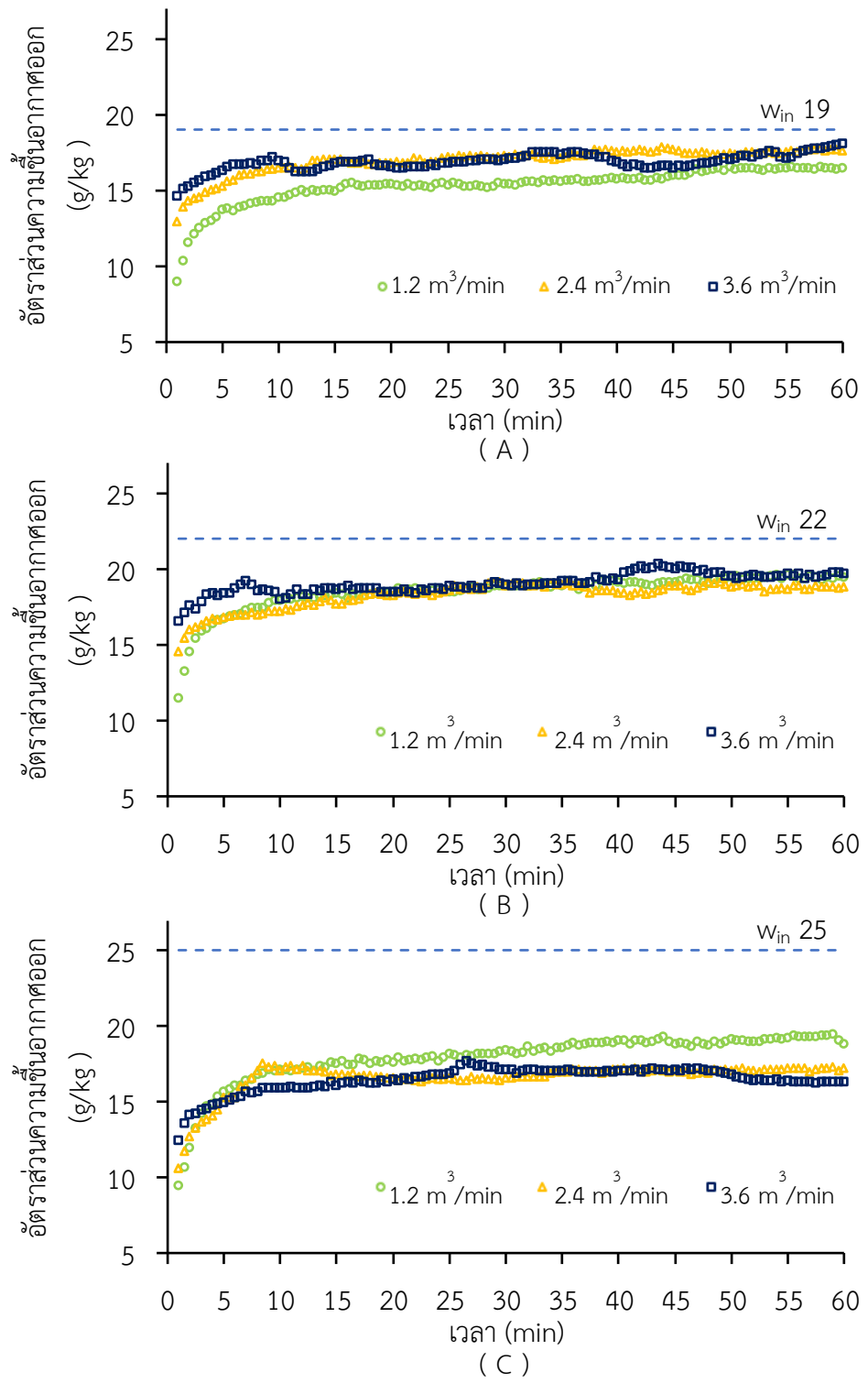
อัตราการลดความชื้นอากาศมีค่าสูงสุดในช่วงแรกของกระบวนการ มีการลดลงอย่างชัดเจนในช่วงแรกดังแสดงในรูปที่ 4.13 หลังจากนั้นอัตราการลดความชื้นอากาศค่อยๆ ลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มอัตราการไหลอากาศเข้าส่งผลให้อัตราการลดความชื้นอากาศมีค่าสูงขึ้น กรณีที่อากาศเข้ามีปริมาณความชื้นต่ำการเพิ่มอัตราการไหลอากาศนั้นส่งผลต่ออัตราการลดความชื้นไม่มากนักเมื่อเทียบกับอากาศเข้าที่มีปริมาณความชื้นสูง ค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการลดความชื้นอากาศมีค่าสูงเมื่อใช้ระยะเวลาในการลดความชื้นในช่วงสั้นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.5

**ตารางที่ 4.5** ค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการลดความชื้นอากาศ

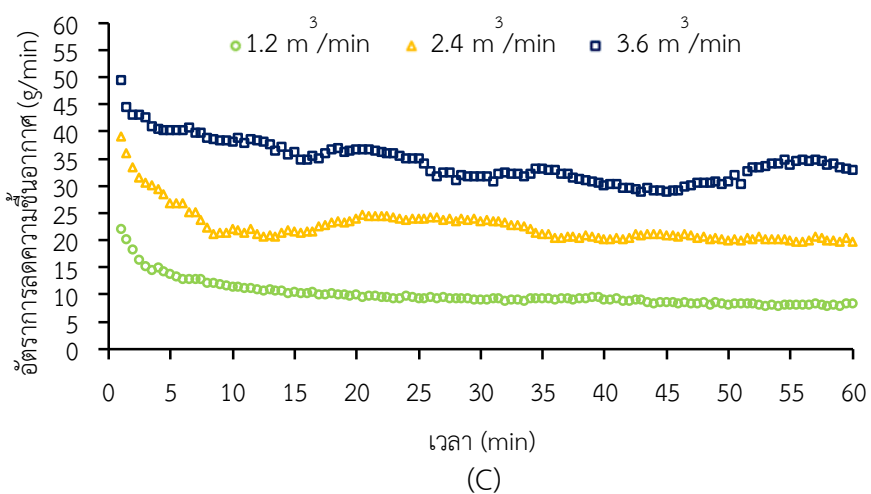
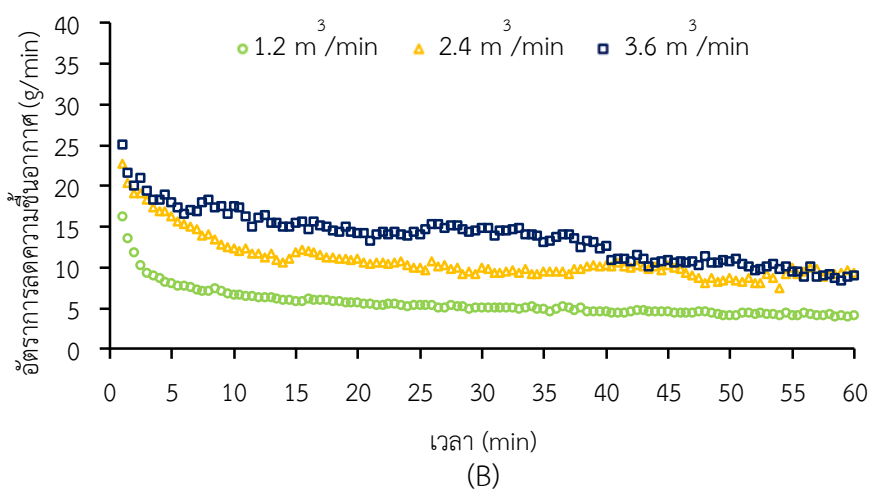
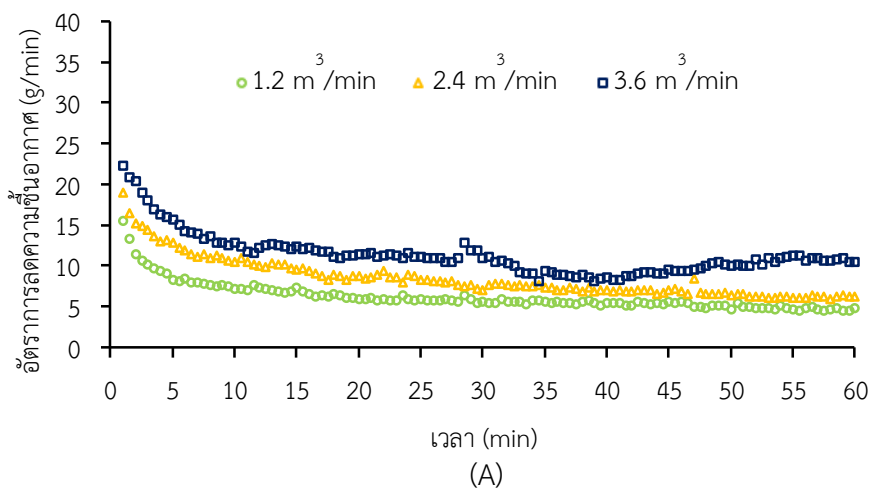
ความชื้นอากาศ (g/kg)	อัตราการไหล อากาศร้อน (m <sup>3</sup> /min)	ค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการลดความชื้นอากาศ		
		DCA (g/min)		
		0-5 min	0-10 min	0-15 min
19	1.2	10.89 ± 0.06	9.28 ± 0.24	8.55 ± 0.41
	2.4	14.81 ± 0.25	12.97 ± 0.43	12.00 ± 0.40
	3.6	18.46 ± 2.53	15.91 ± 1.51	14.67 ± 1.10
22	1.2	10.62 ± 0.01	8.87 ± 0.11	7.99 ± 0.12
	2.4	18.56 ± 0.05	16.16 ± 0.45	14.56 ± 0.08
	3.6	20.10 ± 1.68	18.66 ± 2.73	17.67 ± 3.08
25	1.2	16.72 ± 2.49	14.50 ± 1.92	13.29 ± 1.58
	2.4	31.78 ± 3.87	27.50 ± 3.55	25.42 ± 2.91
	3.6	42.87 ± 2.55	41.01 ± 1.62	39.82 ± 1.72



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศออกในกระบวนการลดความชื้นอากาศที่อัตราส่วนความชื้นอากาศ A: 19 g/kg dry air, B: 22 g/kg dry air และ C: 25 g/kg dry air

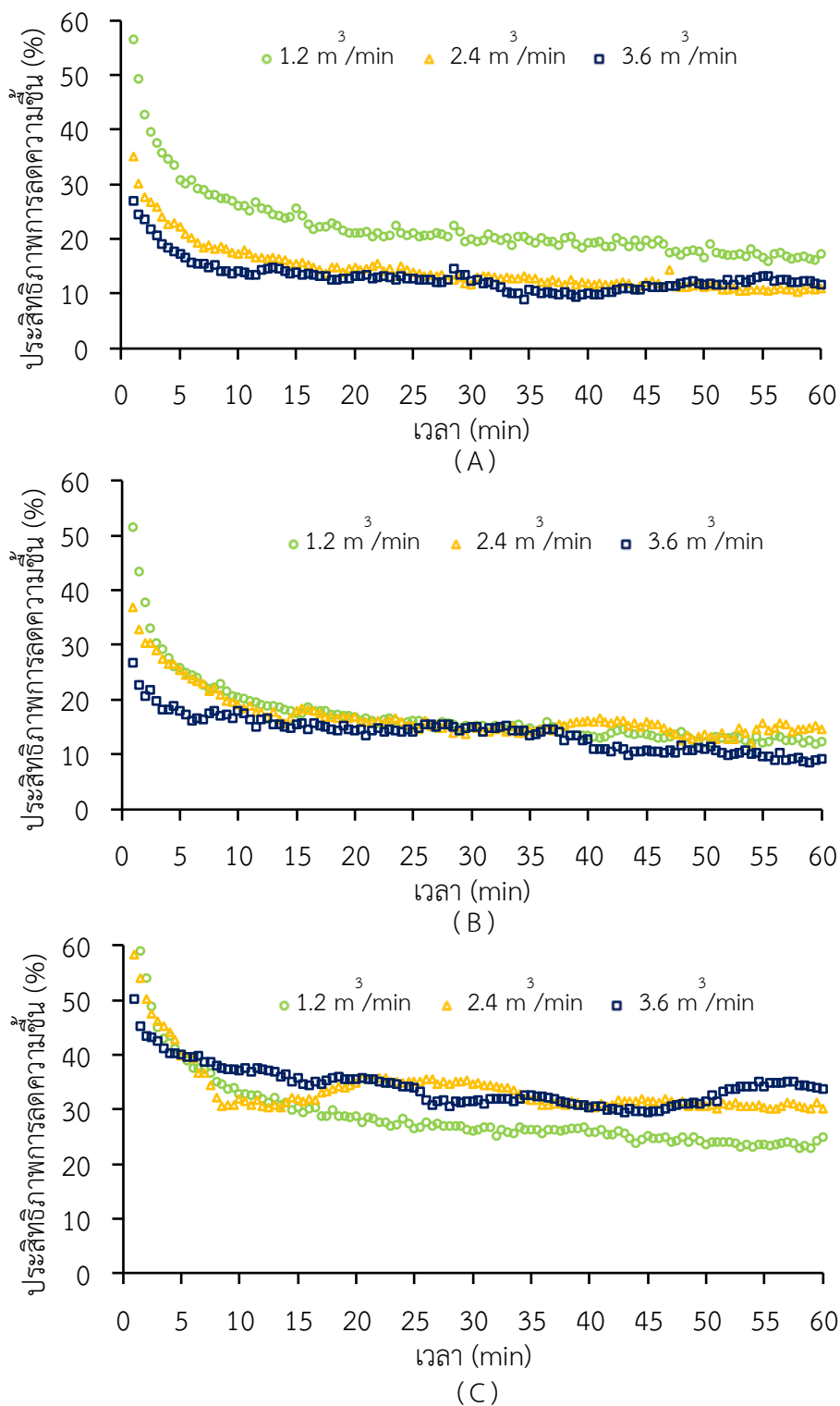


รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของอากาศออกในกระบวนการลดความชื้นอากาศที่ อัตราส่วนความชื้นอากาศ A: 19 g/kg dry air, B: 22 g/kg dry air และ C: 25 g/kg dry air



รูปที่ 4.13 อัตราการลดความชื้นอากาศที่ระดับอัตราการไหลอากาศต่างกันที่อัตราส่วน  
ความชื้นอากาศ A: 19 g/kg dry air, B: 22 g/kg dry air และ C: 25 g/kg dry air

ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศมีค่าสูงสุดในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการเช่นเดียวกับอัตราการลดความชื้นอากาศ ในช่วงแรกประสิทธิภาพการลดความชื้นมีการลดลงอย่างชัดเจนหลังจากนั้นค่าประสิทธิภาพจะค่อยๆ ลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้นดังแสดงใน รูปที่ 4.14 ที่ระดับปริมาณความชื้นอากาศเข้า 19 g/kg dry air เมื่อเพิ่มอัตราการไหลอากาศเข้าส่งผลให้ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศลดลงสอดคล้องกับผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นอากาศออกซึ่งมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลอากาศ เมื่อปริมาณความชื้นอากาศเข้าสูงขึ้นเป็น 25 g/kg dry air อัตราการไหลอากาศที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศต่างกันออกไป เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นความชื้นของซิลิกาเจลยังคงต่ำ มีความสามารถในการดูดซับความชื้นสูง การใช้อัตราการไหลอากาศเข้าที่ต่ำทำให้ดูดซับความชื้นได้มากจึงมีประสิทธิภาพสูงในช่วงแรก เมื่อกระบวนการดำเนินต่อไปความสามารถในการดูดซับความชื้นของซิลิกาที่อัตราการไหลอากาศเข้าต่ำลดลงมากกว่าอัตราการไหลอากาศเข้าสูง เป็นผลให้การใช้อัตราการไหลอากาศเข้า 1.2 m<sup>3</sup>/min มีประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศน้อยกว่าอัตราการไหลอากาศเข้า 3.6 m<sup>3</sup>/min หลังจาก 5 minแรก



รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศที่ระดับอัตราการไหลอากาศต่างกันที่อัตราส่วนความชื้นอากาศ A: 19 g/kg dry air, B: 22 g/kg dry air และ C: 25 g/kg dry air

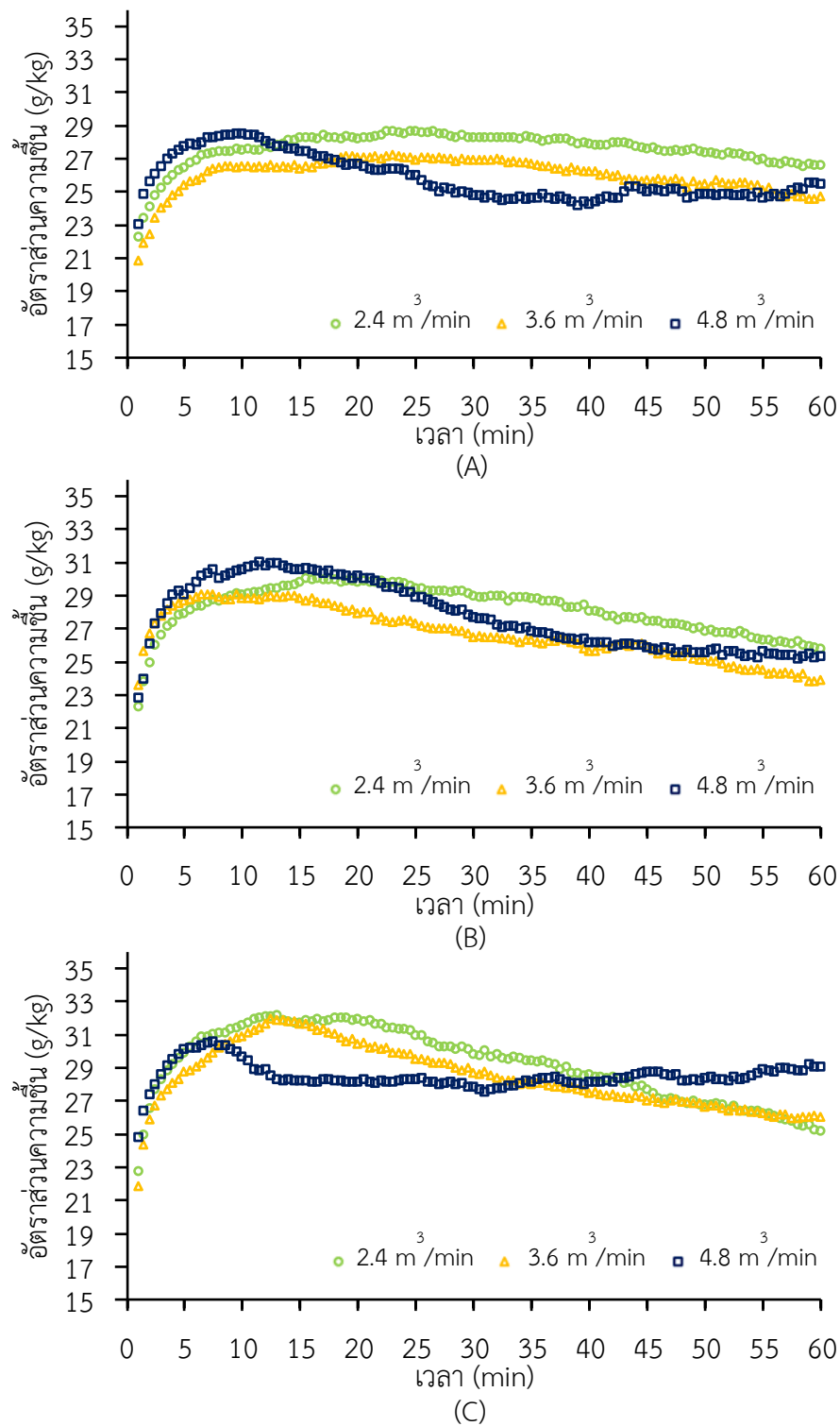
### 4.3 กระบวนการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น

เตรียมซิลิกาเจลที่ผ่านการดูดซับความชื้นจากอากาศเป็นเวลา 12 h ซึ่งมีความชื้นอยู่ที่ประมาณ 10.8 -13.1 %db ถูกนำมาไล่ความชื้นออกด้วยลมร้อนเพื่อให้สามารถกลับมาดูดความชื้นได้อีกครั้ง กระบวนการฟื้นฟูสภาพถูกทดสอบที่อัตราการไหล 3 ระดับ คือ 2.4, 3.6 และ 4.8 m<sup>3</sup>/min และอุณหภูมิ ลมร้อน 70, 80 และ 90°C ในช่วงแรกความชื้นที่ซิลิกาเจลดูดซับไว้ถูกขับออกมาที่อากาศที่ออกจาก คอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้น เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นในซิลิกาเจลลดต่ำลงทำให้ปริมาณความชื้น อากาศออกลดลง และอุณหภูมิอากาศออกมีค่าสูงขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 การเพิ่มอัตราการไหลอากาศและการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนส่งผลให้อัตราการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นมี ค่าสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.17 ในกรณีที่ใช้อัตราการไหลลมร้อนที่สูง (4.8 m<sup>3</sup>/min) มีอัตราการฟื้นฟู สภาพสารดูดความชื้นมีค่าสูงกว่าอัตราการไหลลมร้อนที่ต่ำกว่าอย่างชัดเจน ดังนั้นการเพิ่มอัตราการไหล ลมร้อนสามารถใช้เพิ่มอัตราการฟื้นฟูสภาพได้ดีในกรณีที่มีข้อจำกัดในการปรับอุณหภูมิลมร้อน พิจารณา ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นในรูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพมีค่าสูงขึ้นในช่วงแรกจนกระทั่งมี ค่าสูงสุดจากนั้นจะลดลง เมื่อเพิ่มอัตราไหลลมร้อนส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพสารดูด ความชื้นเพิ่มขึ้นสู่ค่าสูงสุดด้วยระยะเวลาที่สั้นขึ้น ที่อัตราการไหลลมร้อน 2.4 m<sup>3</sup>/min ใช้เวลาประมาณ 10 -15 min ค่าประสิทธิภาพจึงจะถึงค่าสูงสุด สำหรับอัตราการไหลลมร้อน 4.8 m<sup>3</sup>/min ค่า ประสิทธิภาพของกระบวนการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นมีค่าสูงสุดเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 5 -10 min

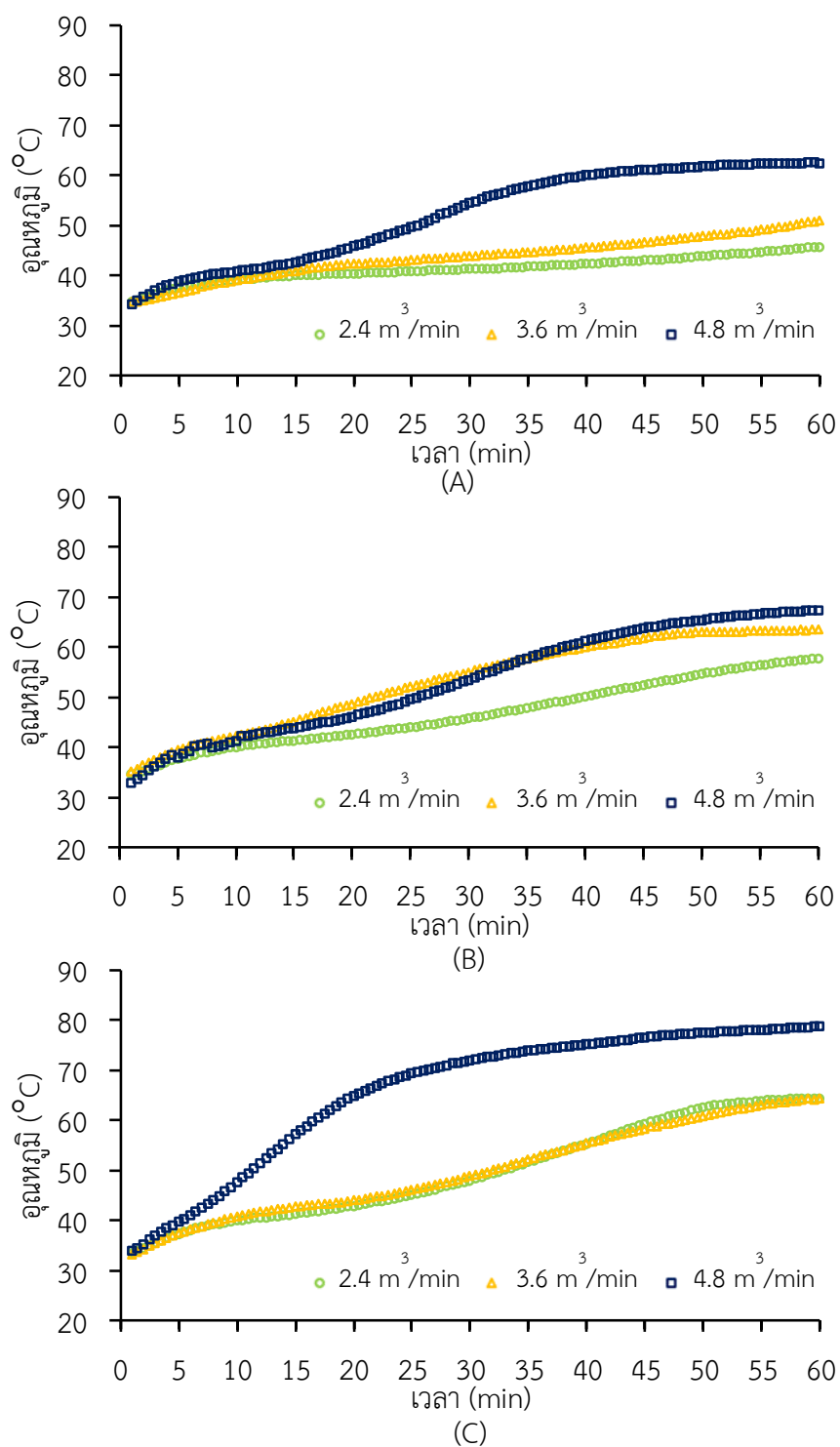
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นที่ระยะเวลาต่าง ๆ อัตราการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยในช่วงแรกซิลิกาเจลต้องได้รับความ ร้อนให้สูงเพียงพอจนกระทั่งแรงดันไอภายในซิลิกาเจลสูงกว่าอากาศแวดล้อมจึงจะคายความชื้นที่ดูด ซักไว้ ภายในคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นซิลิกาเจลที่อยู่ชั้นบนได้รับความร้อนก่อนจะคายความชื้น ออกมาก่อนในช่วงแรกส่วนชั้นถัดมาที่ยังไม่ได้รับความร้อนจะยังคงไม่คายความชื้นออกมา เมื่อเวลาผ่านไปซิลิกาเจลทั้งหมดได้รับความร้อนจึงส่งผลให้มีการคายความชื้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการฟื้นฟูสภาพ สารดูดความชื้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น

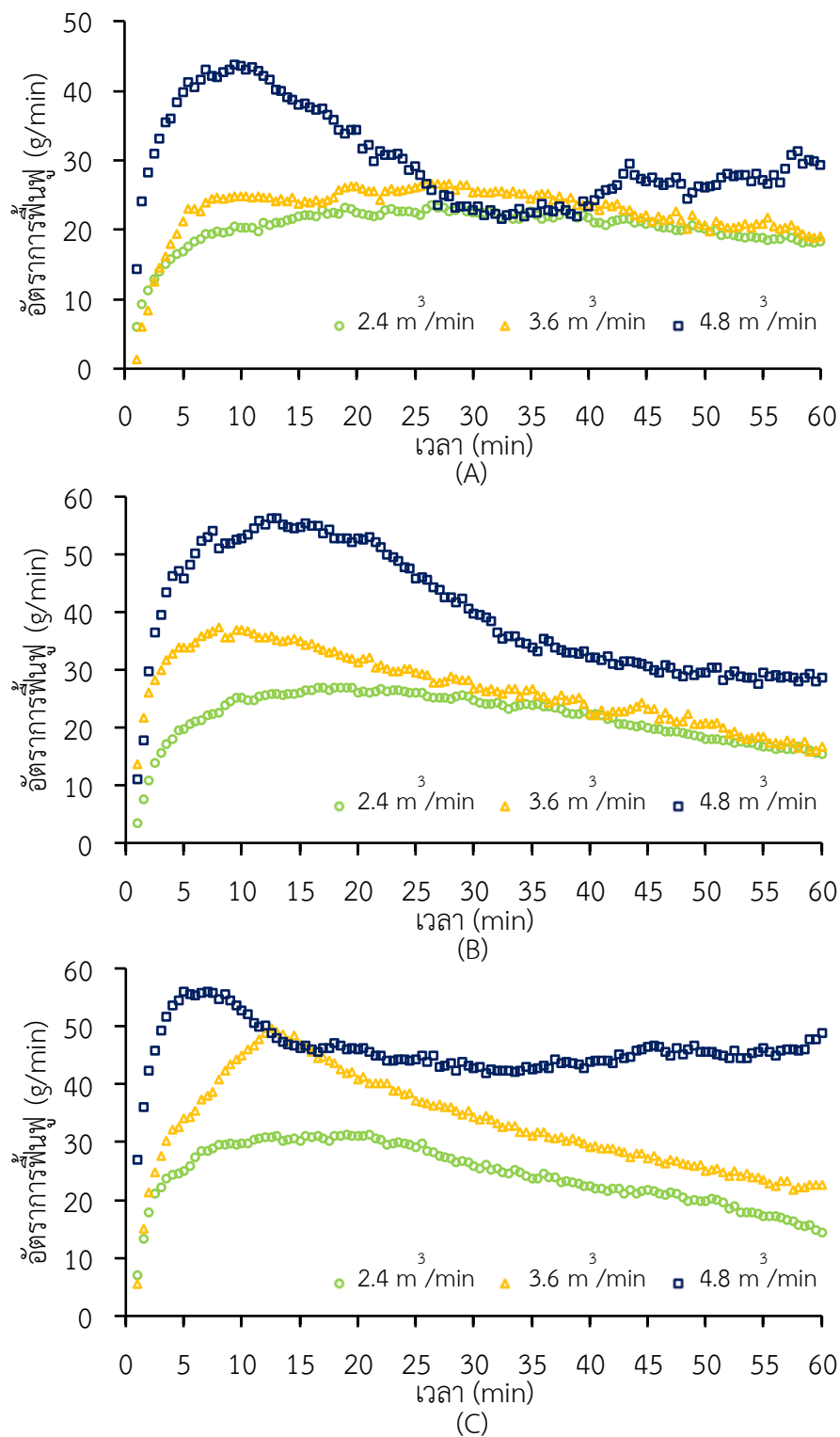
อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหลอากาศร้อน (m <sup>3</sup> /min)	ค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น RCA (g/min)		
		0-5 min	0-10 min	0-15 min
70	2.4	11.97 ± 4.00	15.73 ± 4.11	17.45 ± 4.01
	3.6	13.94 ± 4.99	19.24 ± 6.18	21.04 ± 6.66
	4.8	27.24 ± 5.45	34.98 ± 6.72	37.20 ± 7.15
80	2.4	12.93 ± 2.52	18.08 ± 3.69	20.68 ± 3.78
	3.6	24.55 ± 1.34	30.45 ± 2.47	32.31 ± 3.62
	4.8	32.98 ± 3.61	42.69 ± 2.72	46.96 ± 1.80
90	2.4	18.54 ± 4.48	23.82 ± 5.59	26.18 ± 6.07
	3.6	24.91 ± 6.82	32.89 ± 5.57	38.14 ± 2.96
	4.8	40.94 ± 0.18	48.55 ± 1.60	48.86 ± 2.50



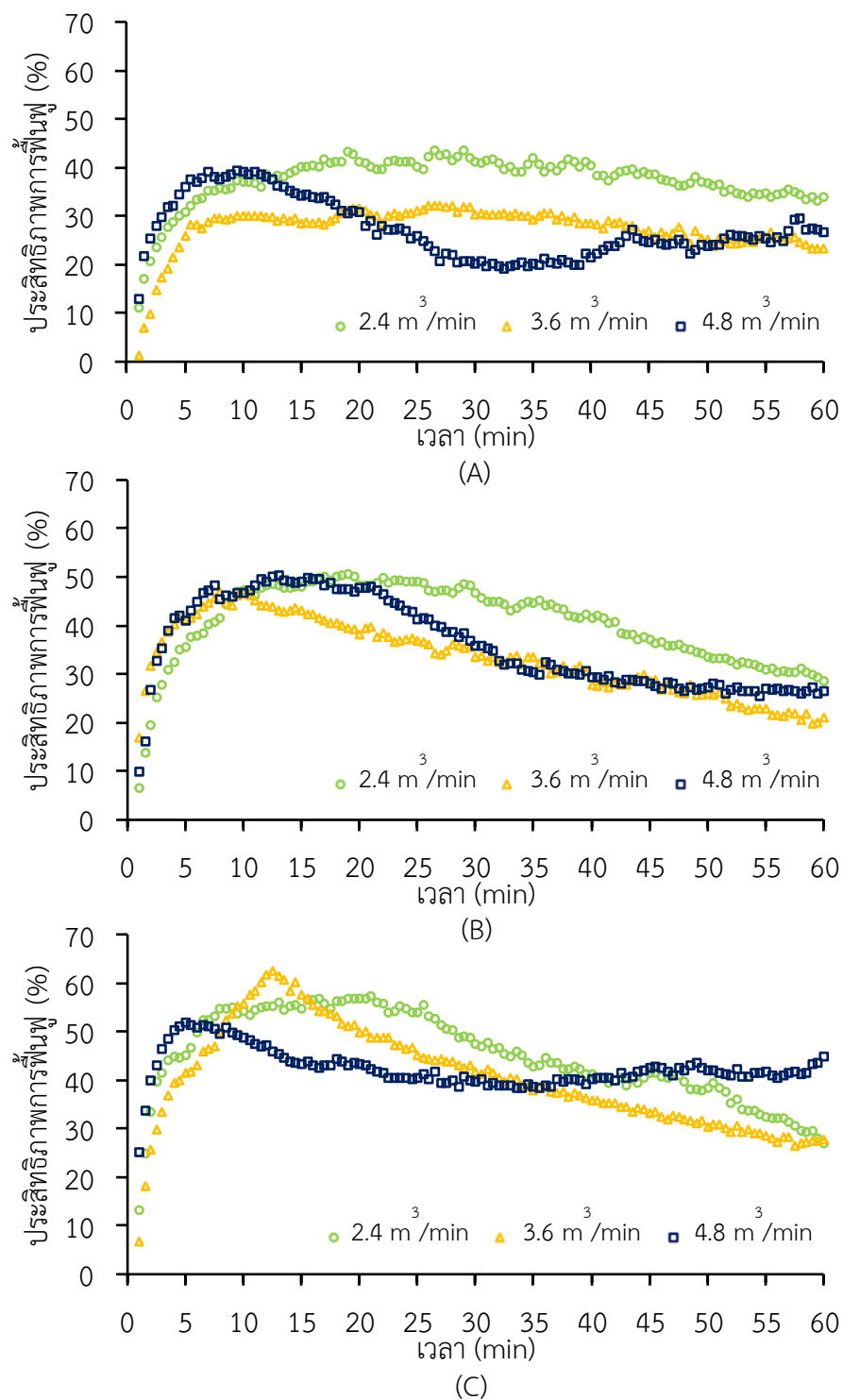
รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของอากาศออกของการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น  
A: 70°C, B: 80°C และ C: 90°C



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศออกระหว่างกระบวนการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น  
A: 70°C, B: 80°C และ C: 90°C



รูปที่ 4.17 อัตราการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นที่อุณหภูมิร้อน A: 70°C, B: 80°C และ C: 90°C



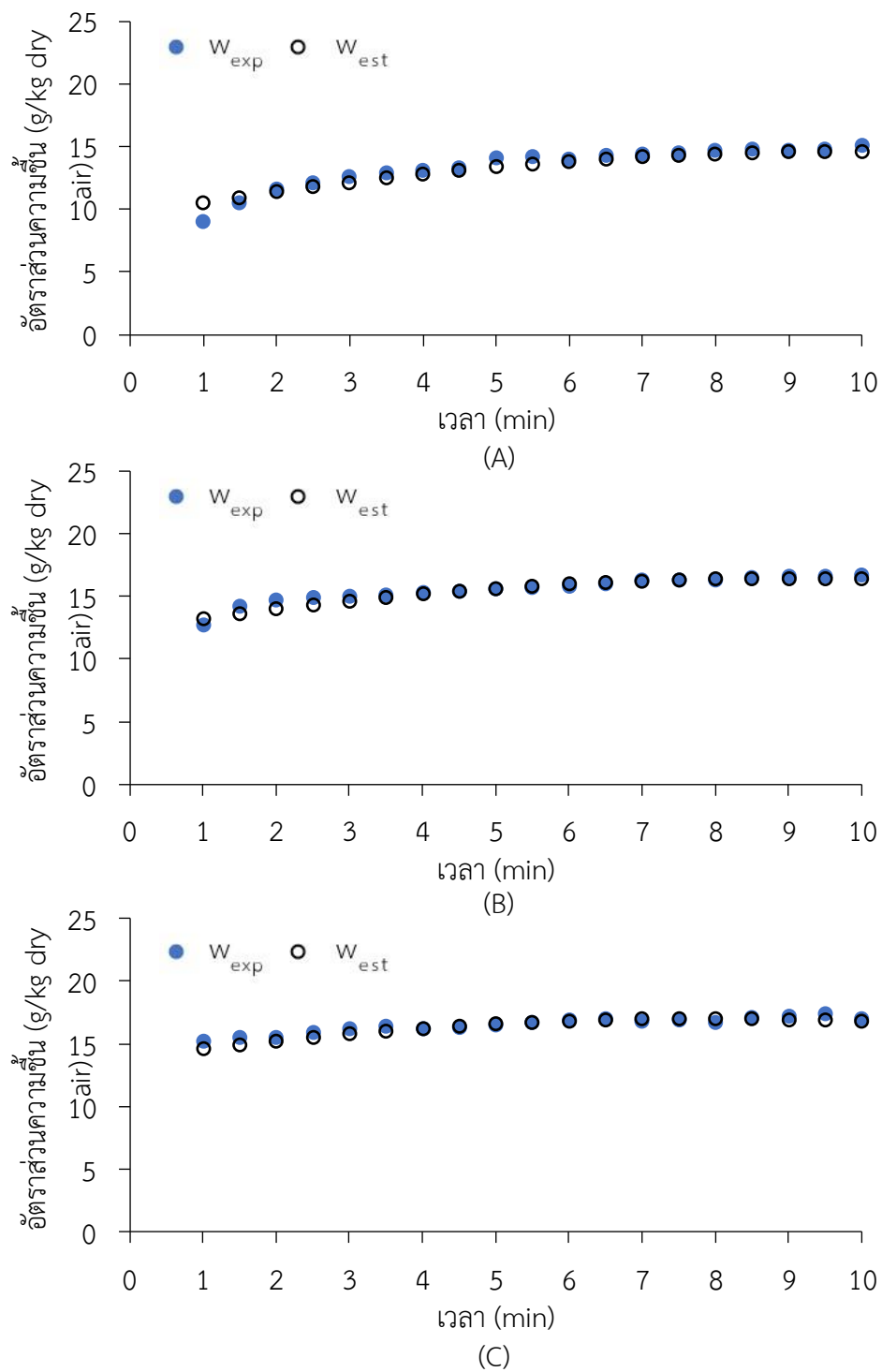
รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพการพ่นฟูสภาพสารดูดความชื้นที่อุณหภูมิร้อน A: 70°C, B: 80°C และ C: 90°C

#### 4.4 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อการลดความชื้นอากาศและการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น

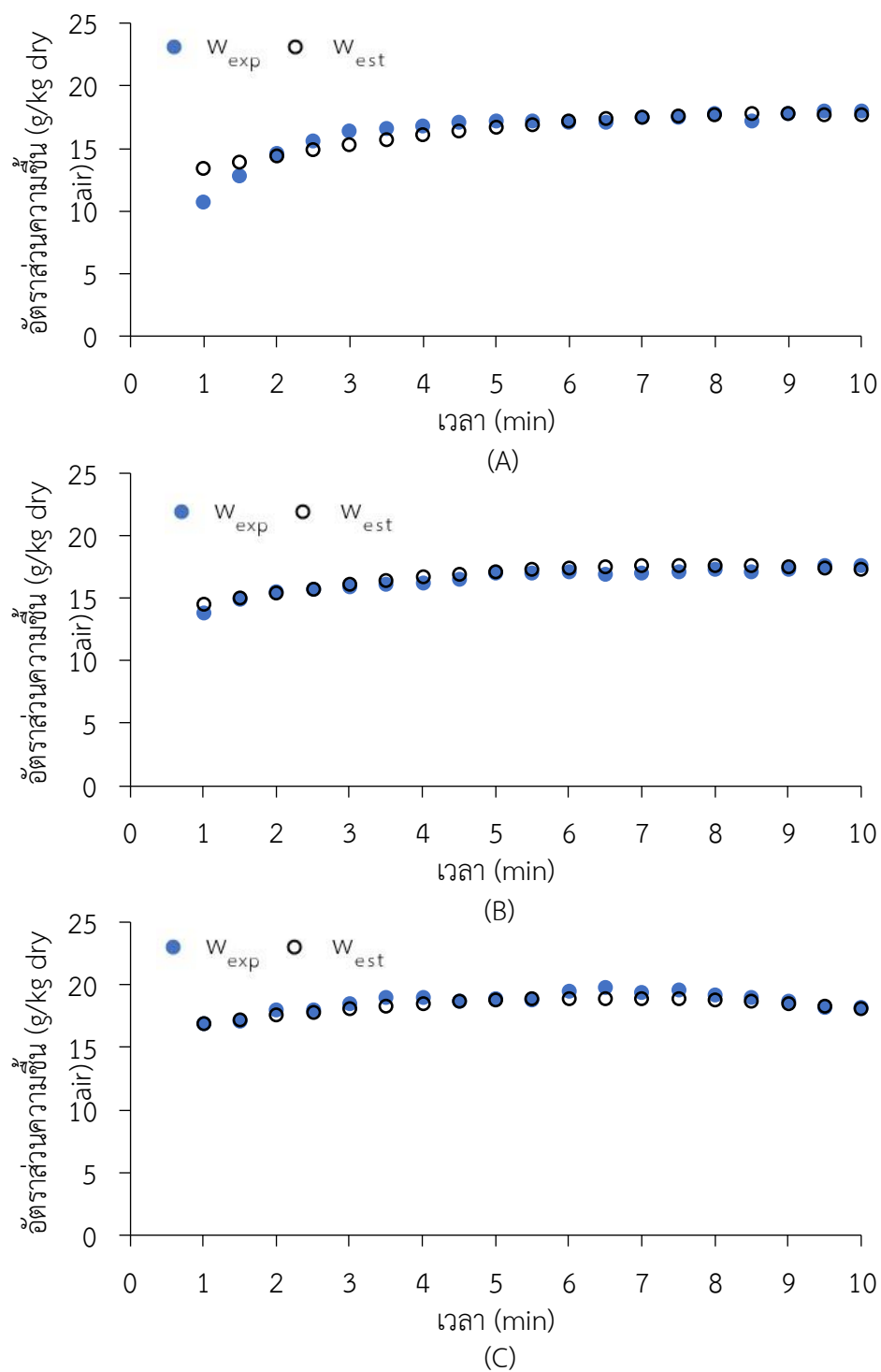
สมการถดถอยถูกนำมาใช้หาสมการความสัมพันธ์เพื่อทำนายปริมาณความชื้นของอากาศที่ผ่านการลดความชื้นด้วยคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นแบบชั้นบางหลายชั้น โดยใช้รูปแบบสมการ  $y = C + x_1 + x_2 + x_1^2 + x_2^2 + x_1 x_2$  จากกราฟอัตราการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นสังเกตเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 min อัตราการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นมีค่าสูงสุดจากนั้นค่าจะเริ่มลดลง และเมื่อพิจารณาอัตราการลดความชื้นอากาศสังเกตได้ว่าอัตราการลดความชื้นอากาศมีค่าลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้นและเริ่มมีค่าค่อย ๆ ลดลงตั้งแต่เวลาประมาณ 10 min ดังนั้นจึงนำข้อมูลในช่วง 10 min แรกมาวิเคราะห์เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ทำนายปริมาณความชื้นอากาศออกหลังจากผ่านชุดลดความชื้น ( $w_{out}$ ) และค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการลดความชื้นอากาศ (Dehumidification cumulative average, DCA (g/min)) ได้ความสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่า  $w_{out}$  และ DCA ที่ได้จากการคำนวณกับค่าจากการทดลองพบว่ามีค่า RMSE อยู่ในช่วง 0.37 – 2.06 ดังแสดงในรูปที่ 4.19 – 4.24

ตารางที่ 4.7 สมการทำนายค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการลดความชื้นอากาศ

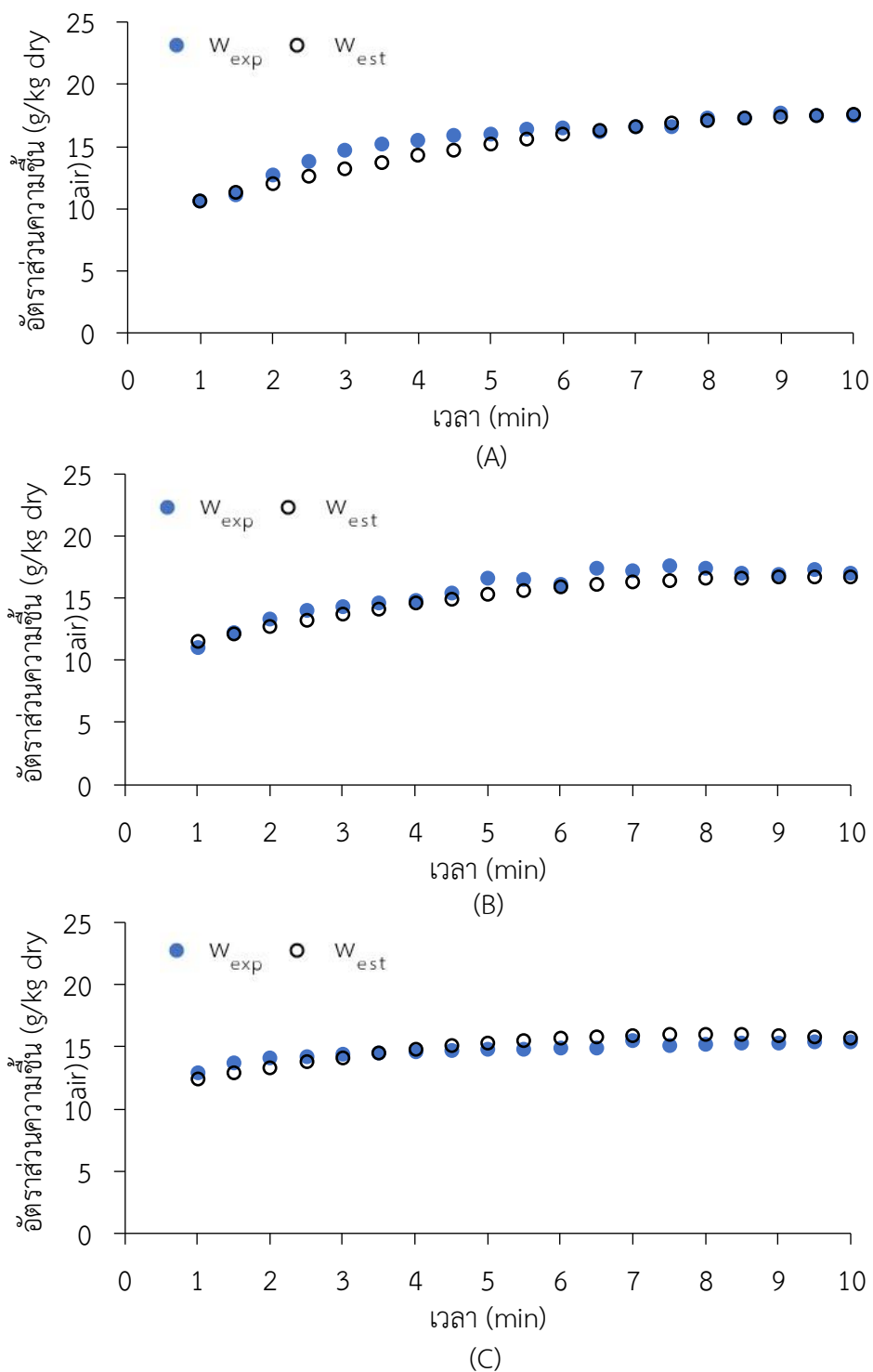
สมการทำนาย	$r^2$	RMSE	
19 g/kg dry air			
$w_{out} = 5.402 + 1.1311t + 3.952Q - 0.05148t^2 - 0.4500Q^2 - 0.0891tQ$	0.95	0.37	(4.1)
$DCA = 12.601 - 1.379t + 3.037Q + 0.0682t^2$	0.91	1.10	(4.2)
22 g/kg dry air			
$w_{out} = 12.362 + 1.396t - 0.636Q - 0.06838t^2 + 0.4601Q^2 - 0.1413tQ$	0.86	0.50	(4.3)
$DCA = 3.221 - 1.557t + 13.425Q + 0.0837t^2 - 1.989Q^2$	0.96	0.86	(4.4)
25 g/kg dry air			
$w_{out} = 8.040 + 1.798t + 0.859Q - 0.0739t^2 + 0.010Q^2 - 0.1720tQ$	0.84	0.73	(4.5)
$DCA = 6.05 - 2.002t + 16.55Q + 0.1013t^2 - 1.163Q^2$	0.96	2.06	(4.6)



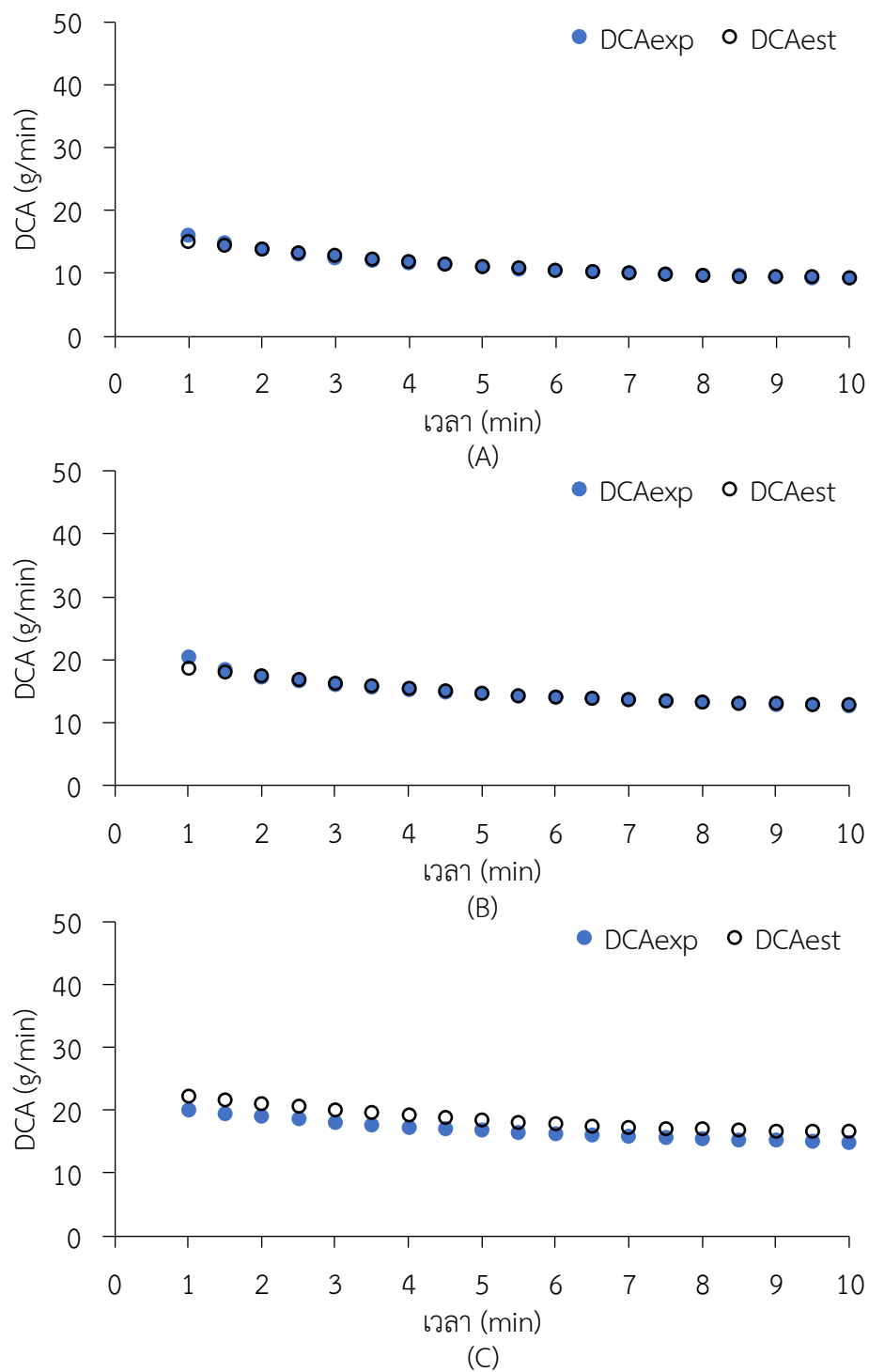
รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของอากาศจากการทดลอง ( $w_{exp}$ ) และค่าทำนาย ( $w_{est}$ ) ที่สภาวะอากาศเข้า  $19 \text{ g/kg dry air}$  โดย A:  $1.2 \text{ m}^3/\text{min}$ , B:  $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$  และ C:  $3.6 \text{ m}^3/\text{min}$



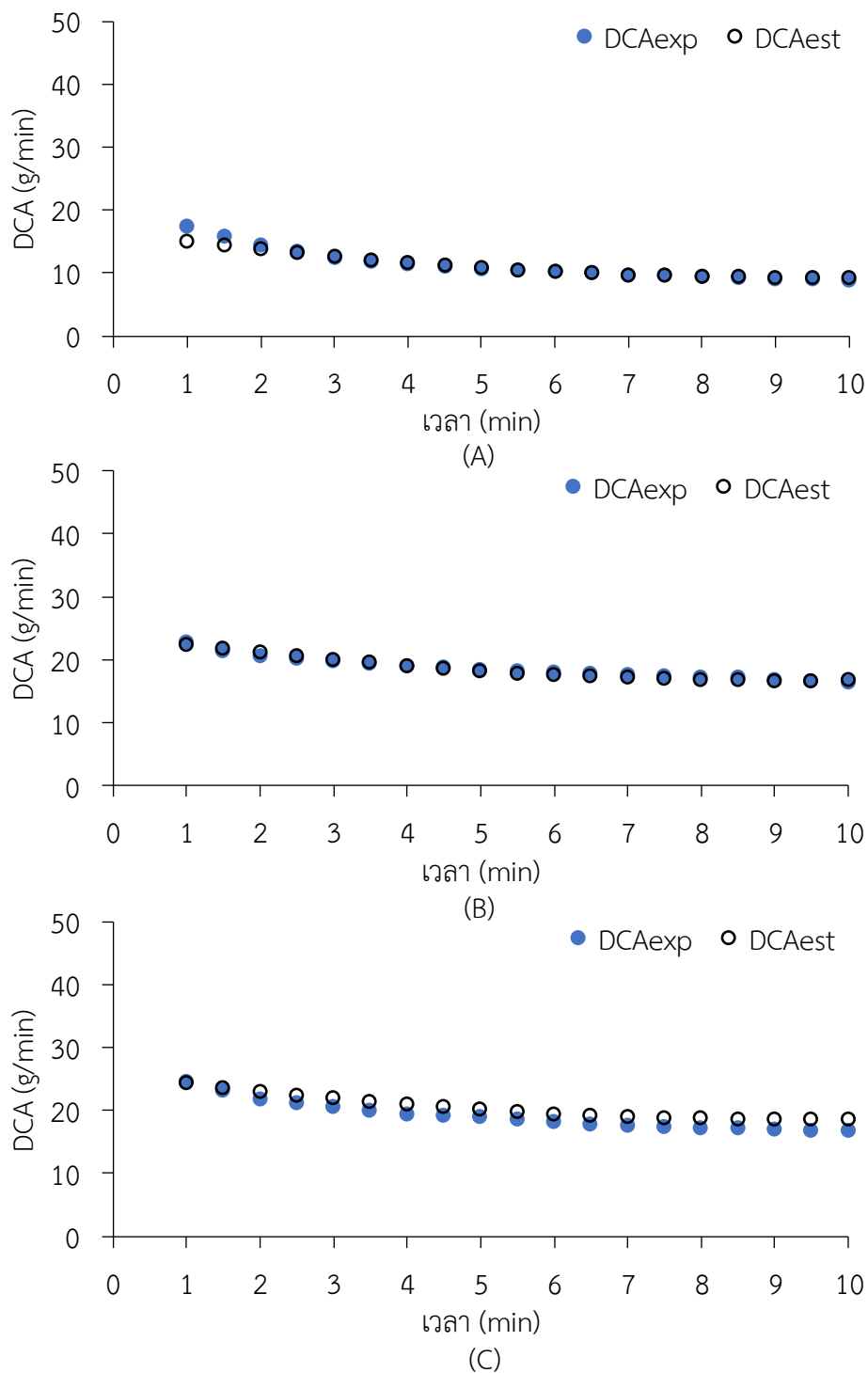
รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบปริมาณความชื้นของอากาศออกจากการทดลอง ( $w_{exp}$ ) และค่าทำนาย ( $w_{est}$ ) ที่สภาวะอากาศเข้า 22 g/kg dry air โดย A : 1.2 m<sup>3</sup>/min, B : 2.4 m<sup>3</sup>/min และ C : 3.6 m<sup>3</sup>/min



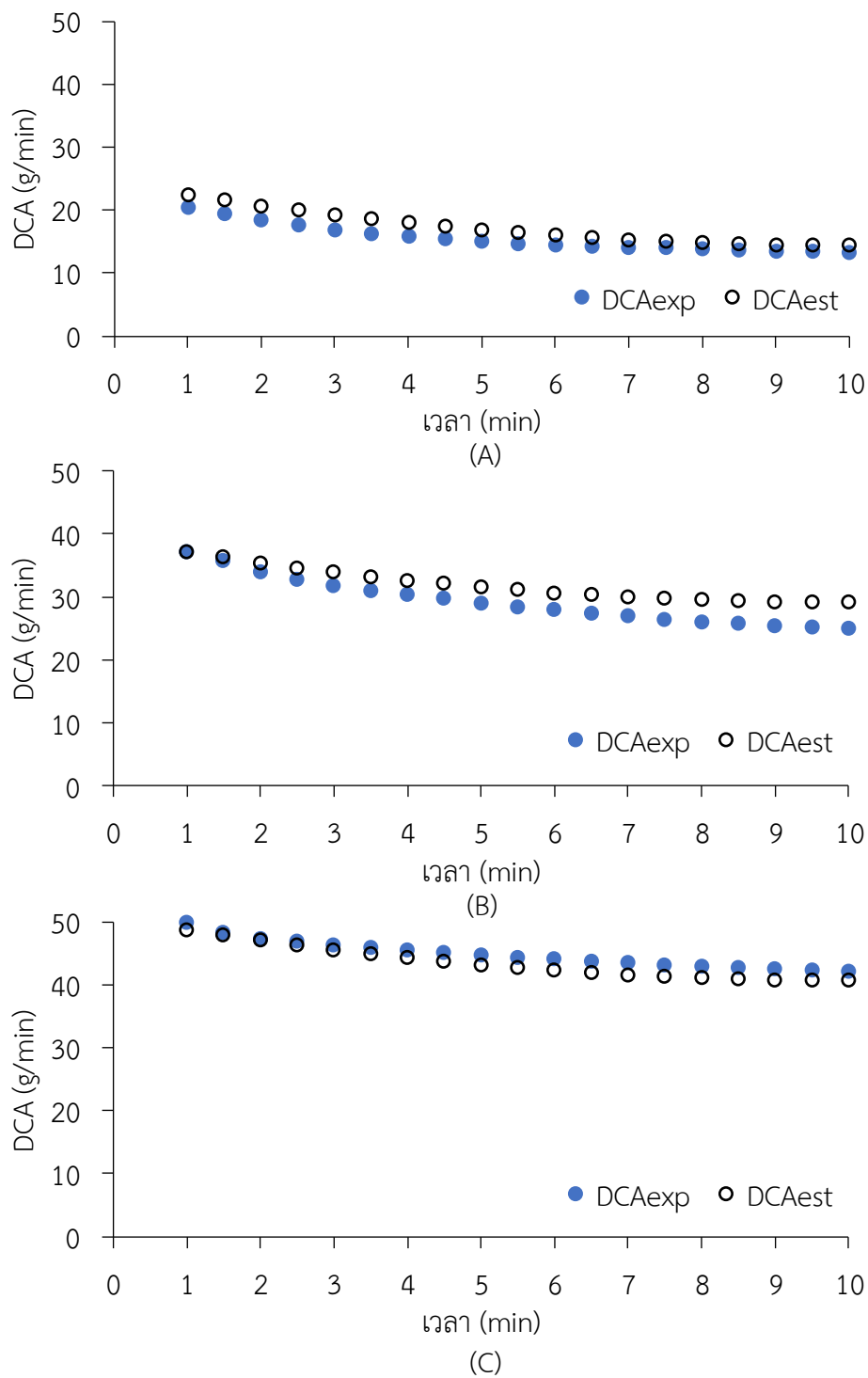
รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบปริมาณความชื้นของอากาศจากการทดลอง ( $w_{exp}$ ) และค่าทำนาย ( $w_{est}$ ) ที่สภาวะอากาศเข้า 25 g/kg dry air โดย A : 1.2 m<sup>3</sup>/min, B : 2.4 m<sup>3</sup>/min และ C : 3.6 m<sup>3</sup>/min



รูปที่ 4.22 DCA จากการทดลอง ( $DCA_{exp}$ ) และค่าทำนาย ( $DCA_{est}$ ) ที่สภาวะอากาศเข้า  $19 \text{ g/kg dry air}$  โดย A :  $1.2 \text{ m}^3/\text{min}$ , B :  $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$  และ C :  $3.6 \text{ m}^3/\text{min}$



รูปที่ 4.23 DCA จากการทดลอง ( $DCA_{exp}$ ) และค่าทำนาย ( $DCA_{est}$ ) ที่สภาวะอากาศเข้า 22 g/kg dry air โดย A : 1.2 m<sup>3</sup>/min, B : 2.4 m<sup>3</sup>/min และ C : 3.6 m<sup>3</sup>/min

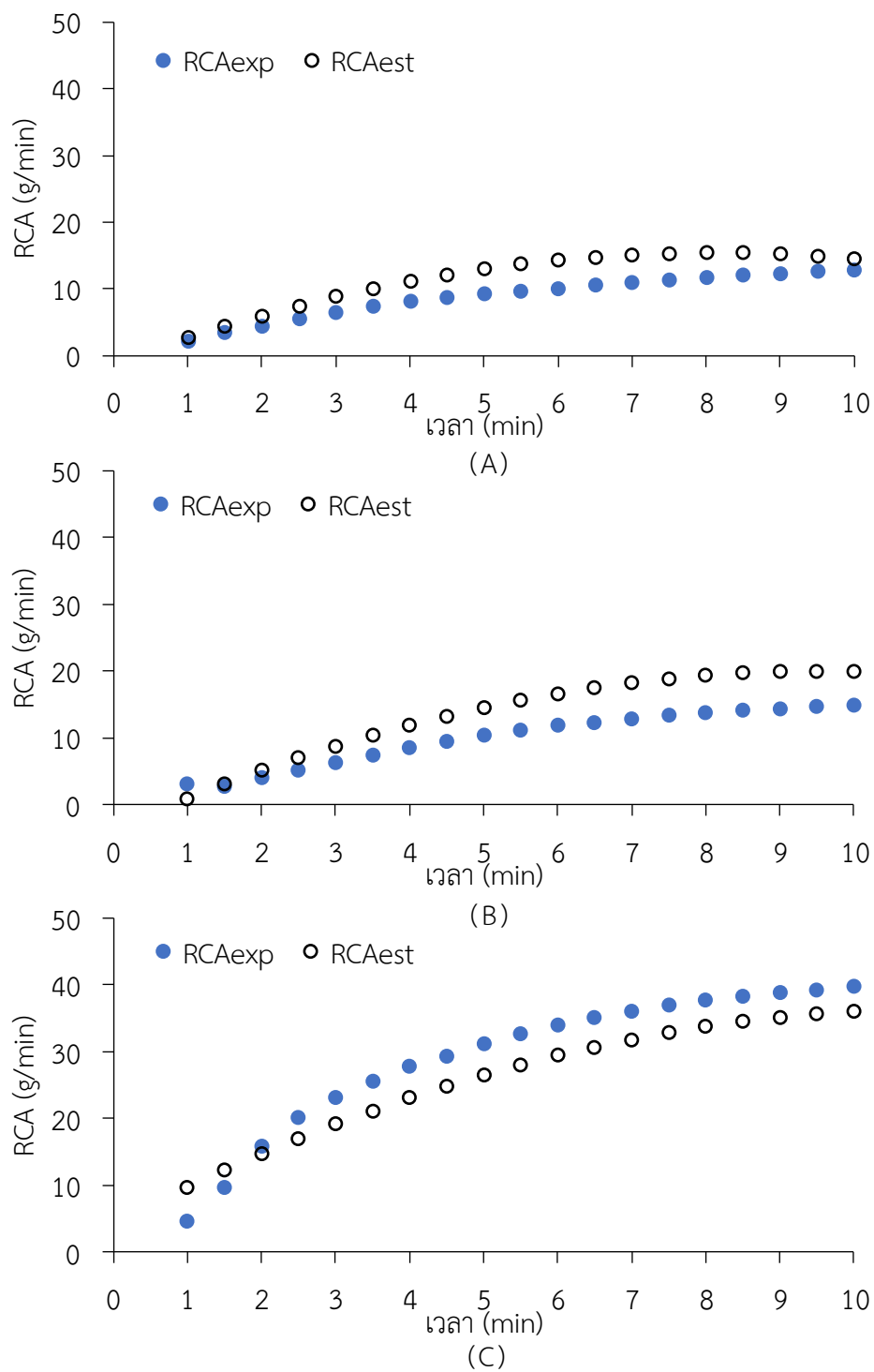


รูปที่ 4.24 DCA จากการทดลอง ( $DCA_{exp}$ ) และค่าทำนาย ( $DCA_{est}$ ) ที่สภาวะอากาศเข้า 25 g/kg dry air โดย A : 1.2 m<sup>3</sup>/min, B : 2.4 m<sup>3</sup>/min และ C : 3.6 m<sup>3</sup>/min

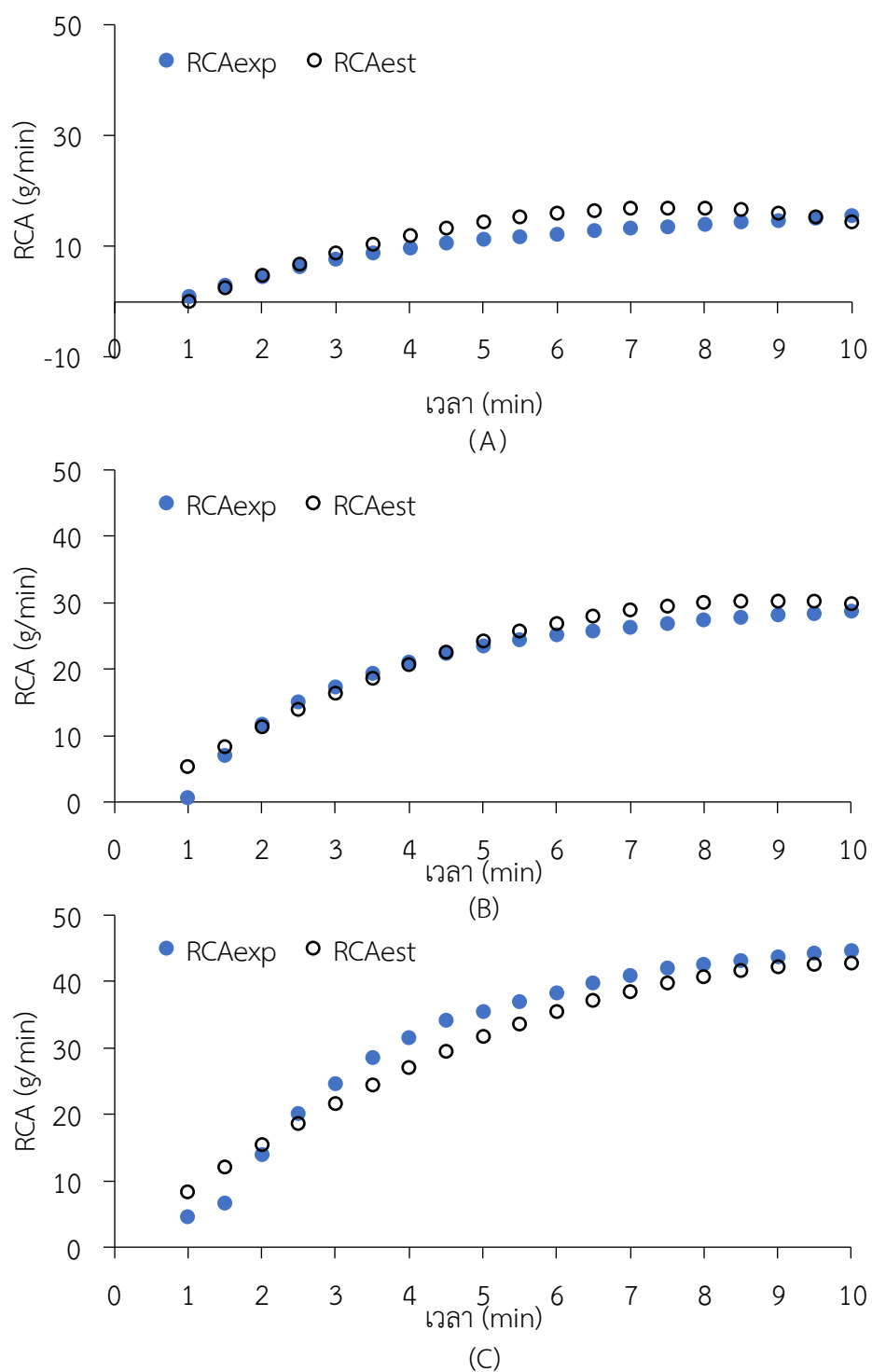
อุณหภูมิอากาศร้อนและอัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นอย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 4.17 สมการความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นกับค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น (Regeneration cumulative average, RCA) ที่สภาวะอากาศเข้า 20 g /kg dry air แสดงในตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบค่า RCA จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.25 - 4.27 พบว่ามีค่า RMSE อยู่ในช่วง 2.36 – 3.58

**ตารางที่ 4.8** สมการทำนายค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น

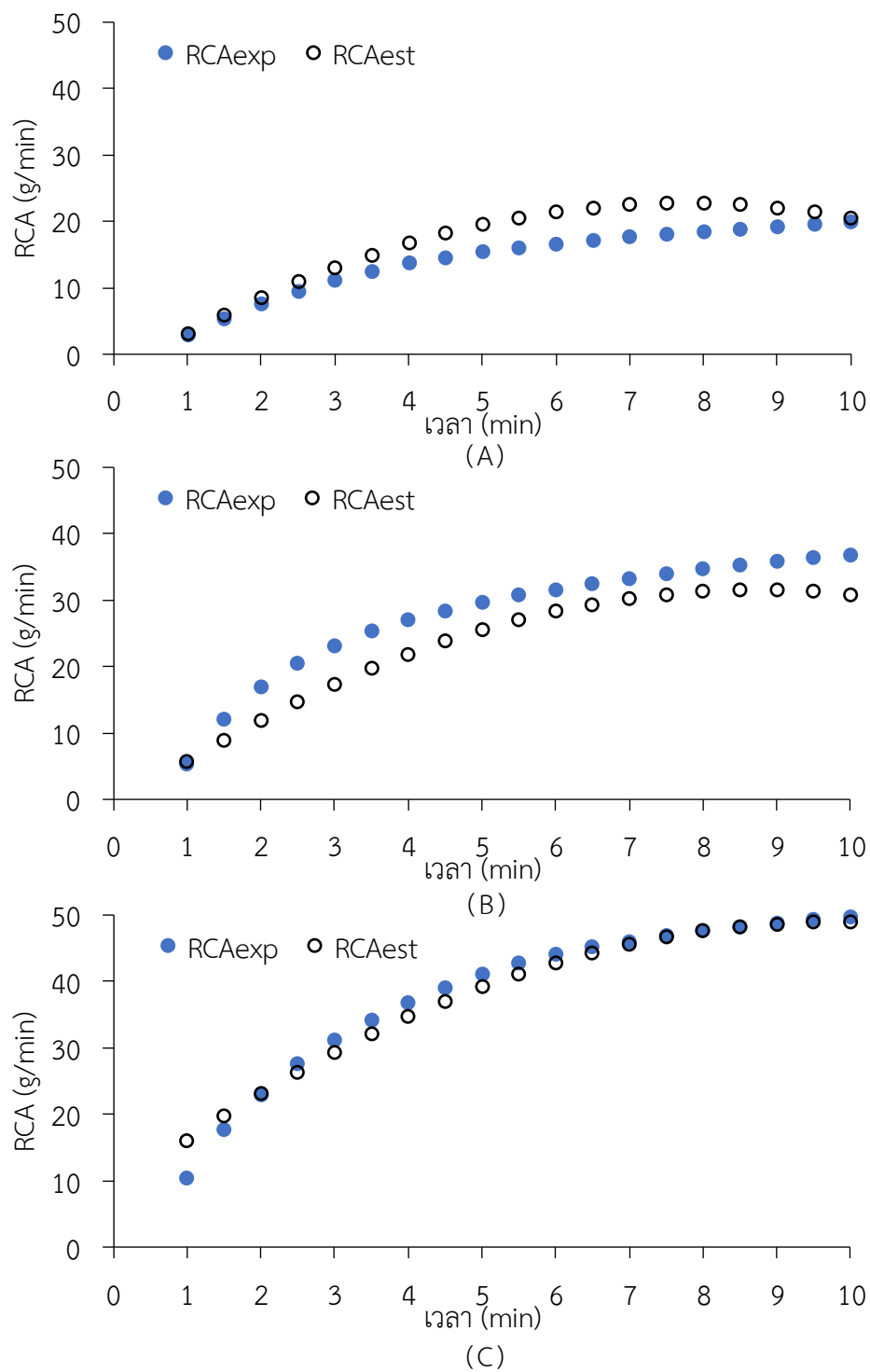
สมการทำนาย	$r^2$	RMSE
อุณหภูมิ 70°C		
$RCA = 34.98 + 2.507t - 23.80Q - 0.2546t^2 + 3.624Q^2 + 0.670tQ$	0.86	3.58 (4.7)
อุณหภูมิ 80°C		
$RCA = -21.57 + 3.795t + 8.63Q - 0.3987t^2 - 0.836Q^2 + 0.9199tQ$	0.96	2.36 (4.8)
อุณหภูมิ 90°C		
$RCA = 16.49 + 4.947t - 14.56Q - 0.4288t^2 + 2.670Q^2 + 0.712tQ$	0.92	3.57 (4.9)



รูปที่ 4.25 RCA จากการทดลอง (exp) และค่าทำนาย (est) เมื่อพื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 70°C โดย A : 2.4 m<sup>3</sup>/min, B : 3.6 m<sup>3</sup>/min และ C : 4.8 m<sup>3</sup>/min



รูปที่ 4.26 RCA จากการทดลอง (exp) และค่าทำนาย (est) เมื่อพื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 80°C โดย A : 2.4 m<sup>3</sup>/min, B : 3.6 m<sup>3</sup>/min และ C : 4.8 m<sup>3</sup>/min



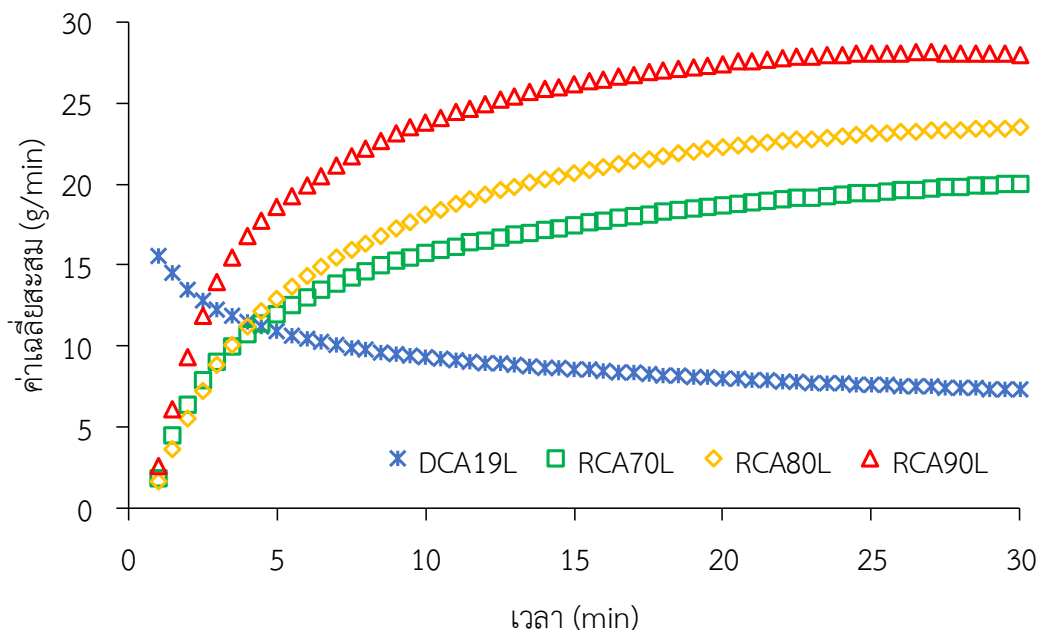
รูปที่ 4.27 RCA จากการทดลอง (exp) และค่าทำนาย (est) เมื่อพื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 90°C โดย A : 2.4 m<sup>3</sup>/min, B : 3.6 m<sup>3</sup>/min และ C : 4.8 m<sup>3</sup>/min

## 4.5 การทำงานแบบครบรอบของชุดลดความชื้นอากาศ

### 4.5.1 ระยะเวลาสลับการทำงานของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้น

จากการทดลองก่อนหน้าเป็นการทดสอบการทำงานของคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นอย่างต่อเนื่องของกระบวนการลดความชื้นอากาศหรือกระบวนการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นเพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่งเท่านั้น ในการใช้งานจริงการลดความชื้นอากาศจำเป็นต้องทำงานอย่างต่อเนื่องจึงต้องมีคอลัมน์อย่างน้อย 2 คอลัมน์เพื่อให้สลับกันทำงาน ขณะที่คอลัมน์หนึ่งกำลังลดความชื้นอากาศอีกคอลัมน์หนึ่งก็จะถูกฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น ดังนั้นต้องทราบเวลาที่เหมาะสมในการสลับกระบวนการลดความชื้นอากาศและฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น ในการทดสอบนี้ใช้คอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้น 1 คอลัมน์ และสังเกตความเปลี่ยนแปลงค่าค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการลดความชื้น (DCA) และค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการฟื้นฟูสภาพ (RCA) เมื่อทำการลดความชื้นอากาศที่มีปริมาณความชื้น 19 g/kg dry air ด้วยอัตราการไหลอากาศ 1.2 m<sup>3</sup>/min ที่ทุกอุณหภูมิ และฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นด้วยอัตราการไหลลมร้อน 2.4 m<sup>3</sup>/min ดังแสดงในรูปที่ 4.28

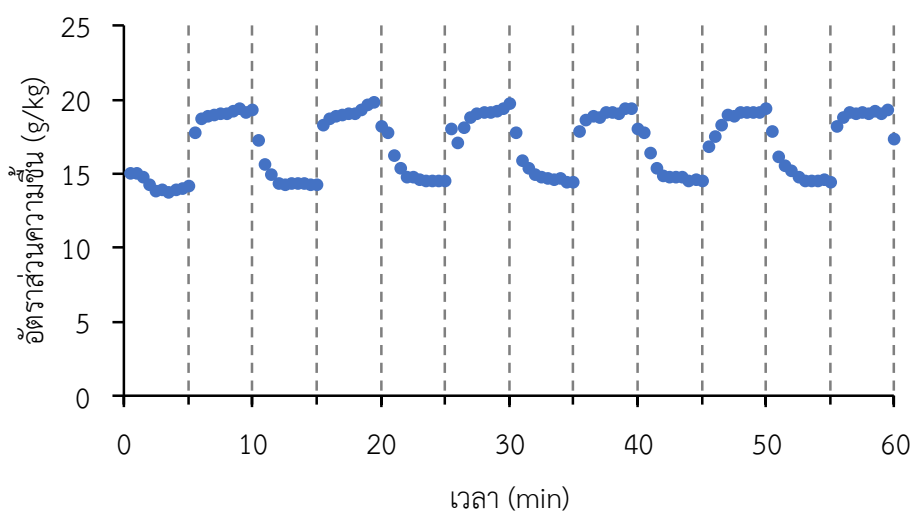
ค่า DCA มีค่าลดลงอย่างชัดเจนในช่วง 5 min แรก หลังจากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง ค่า RCA ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามเวลา และค่า RCA เริ่มมีค่าสูงกว่า DCA ที่เวลา 5 min ค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นที่เพิ่มจนสูงสุดหมายถึงซิลิกาเจลส่วนใหญ่ในคอลัมน์ได้รับความร้อนอย่างเพียงพอและมีการคายความชื้นออกมา หลังจากนั้นซิลิกาเจลคายความชื้นออกมาอย่างต่อเนื่องแต่ในปริมาณที่ลดลงเนื่องจากมีบางส่วนที่ได้คายความชื้นออกไปก่อนแล้ว ในกรณีที่ใช้อัตราการไหลลมร้อนที่ต่ำกว่าทำให้ RCA มีค่าสูงสุดจะใช้เวลาเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามในการทำงานจริงของคอลัมน์ลดความชื้นอากาศซิลิกาเจลไม่ได้ดูดซับความชื้นไว้อย่างเต็มที่เหมือนซิลิกาเจลที่ใช้ในการทดสอบการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น ดังนั้นในการทำงานจริงต้องปรับอัตราการไหลอากาศและอุณหภูมิการฟื้นฟูสภาพให้ค่า RCA มีค่าเท่ากับหรือสูงกว่า DCA เพื่อให้ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับและถูกขับออกจากซิลิกาเจลสัมพันธ์กัน จากผลการทดลองให้หัวข้อ 4.2 อัตราการลดความชื้นอากาศมีค่าสูงสุดในช่วงแรกของกระบวนการและลดลงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งเวลาผ่านไป 10 min อัตราการลดความชื้นเริ่มคงที่ดังนั้นจึงกำหนดเวลาสลับการทำงานไว้ไม่เกิน 10 min



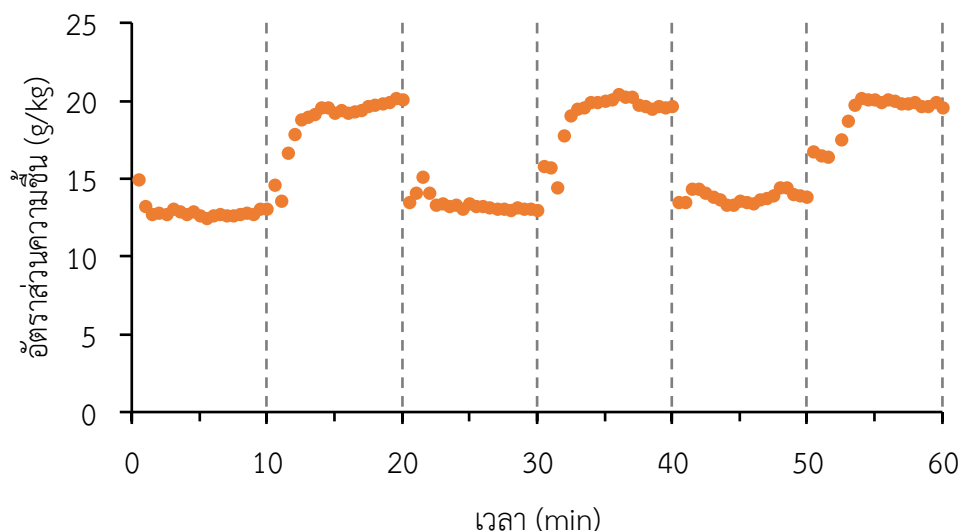
รูปที่ 4.28 ค่าเฉลี่ยสะสมอัตราการลดความชื้น (DCA) และค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการฟื้นฟูสภาพ (RCA)

สมการทำนาย DCA และ RCA ที่ได้ในหัวข้อ 4.4 ถูกสร้างขึ้นเพื่อประมาณเวลาในการทำงานของชุดลดความชื้นอากาศ ทดสอบความใช้ได้ของสมการด้วยการลดความชื้นอากาศด้วยอัตราการไหลอากาศที่  $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$  ทั้งกระบวนการลดความชื้นอากาศและฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น กำหนดเวลาสลับการทำงาน 5 min และปริมาณความชื้นอากาศเข้าเพื่อใช้ในการคำนวณเท่ากับ  $19 \text{ g/kg dry air}$  ใช้ลมร้อนอุณหภูมิ  $90^\circ\text{C}$  เพื่อฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น เมื่อกำหนดด้วยสมการที่ 4.2 และ 4.9 ได้ DCA และ RCA เท่ากับ 13.39 และ 19.48 g/min เมื่อกำหนดเวลาสลับการทำงาน 10 min จำนวน DCA และ RCA ได้เท่ากับ 6.49 และ 20.60 g/min ตามลำดับ ในขณะที่ทดสอบปริมาณความชื้นอากาศต่ำกว่าค่าที่ใช้ในการคำนวณ ( $15 - 16 \text{ g/kg dry air}$ ) ค่า DCA และ RCA ที่ได้จากการทดลองใช้งานจริงของเวลาสลับการทำงาน 5 min เท่ากับ 4.82 และ 5.55 เมื่อเปลี่ยนเวลาสลับการทำงานเป็น 10 min มีค่าเท่ากับ 4.60 และ 10.13 ทั้งสองการทดลองค่า RCA ยังคงมีค่าสูงกว่า DCA ระบบจึงทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ค่า DCA ของการทดลองมีค่าต่ำกว่าค่าคำนวณเนื่องจากซิลิกาเจลได้รับความร้อนในระหว่างกระบวนการฟื้นฟูสภาพทำให้ความสามารถในการลดความชื้นอากาศต่ำลง ซึ่งต่างจากการทดสอบกระบวนการลดความชื้นอากาศให้หัวข้อ 4.2 ที่ซิลิกาเจลนั้นไม่ได้รับความร้อนก่อนดูดซับความชื้น ค่า RCA ของการทดลองมีค่าต่ำกว่าค่าจากการคำนวณเช่นกัน เนื่องจากซิลิกาเจลนั้นไม่ได้ดูดซับความชื้นจากอากาศเต็มที่เหมือนกับในการทดลองหัวข้อ 4.3

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นอากาศหลังผ่านชุดลดความชื้นอากาศแบบชั้นบางหลายชั้นแสดงในภาพที่ 4.29 และ 4.30 พบว่าทั้งสองระยะเวลาสามารถทำการลดความชื้นอากาศได้ การลดความชื้นอากาศช่วง 1-2 min แรกจะยังไม่สามารถลดความชื้นอากาศได้ทันที เนื่องจากซิลิกาเจลมีความร้อนสะสมจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพ ทำให้ระยะเวลาที่ระบบสามารถลดความชื้นอากาศนั้นสั้นลงกว่าระยะเวลาสลับการทำงานที่กำหนด เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศพบว่าเวลาสลับการทำงานที่ 10 min มีค่าเท่ากับ 11.18 ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าเวลาสลับการทำงาน 5 min ที่มีค่าประสิทธิภาพ 7.25 สำหรับกระบวนการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นพบว่าระยะเวลาสลับการทำงาน 5 และ 10 min มีประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพเท่า 15.61 และ 25.66 ตามลำดับ การกำหนดเวลาสลับการทำงานที่ 10 min สามารถฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นได้ดีกว่าจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศมีค่าสูงด้วย



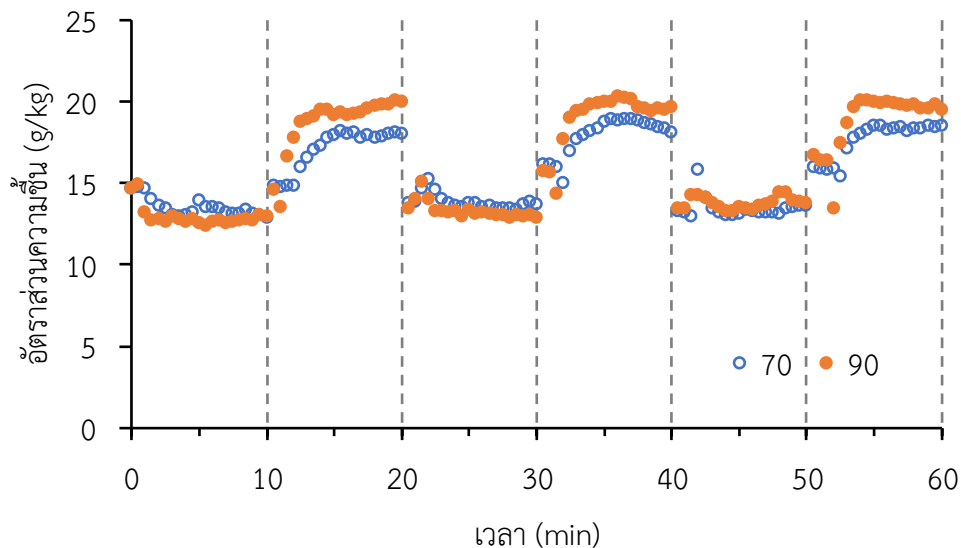
รูปที่ 4.29 ปริมาณความชื้นของอากาศออกหลังผ่านชุดลดความชื้นที่เวลาสลับการทำงาน 5 min อัตราการไหลอากาศ 2.4 m<sup>3</sup>/min อุณหภูมิ 90°C



**รูปที่ 4.30** ปริมาณความชื้นของอากาศออกหลังผ่านชุดลดความชื้นที่เวลาสลับการทำงาน 10 min อัตราการไหลอากาศ 2.4 m<sup>3</sup>/min อุณหภูมิ 90°C

ทดสอบลดความชื้นอากาศด้วยการใช้ลดอุณหภูมิลมร้อนเหลือ 70°C ในกระบวนการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นใช้อัตราการไหล 2.4 m<sup>3</sup>/min เวลาสลับการทำงาน 10 min จากการคำนวณมีค่า DCA เท่ากับ 6.49 และ RCA เท่ากับ 13.46 ซึ่งยังคงมีค่าสูงกว่าค่า DCA จากการคำนวณคาดว่าระบบสามารถทำงานได้ที่เงื่อนไขการทำงานนี้ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.31 ซึ่งชุดลดความชื้นอากาศทำงานได้ตามที่ประเมินไว้ จากการทดลองได้ค่า DCA เท่ากับ 4.92 และ RCA เท่ากับ 5.84 สามารถลดปริมาณความชื้นอากาศลงได้ประมาณ 1.78 g/kg dry air ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นที่ 90°C ที่ลดปริมาณความชื้นอากาศได้ประมาณ 1.71 g/kg dry air โดยที่สภาวะอากาศเข้าขณะทดสอบมีค่าประมาณ 15 g/kg dry air อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิลมร้อนสูงในการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นส่งผลให้อัตราการฟื้นฟูสภาพมีค่ามาก (Baghapour et al., 2015) ซึ่งส่งผลดีต่อระบบโดยรวมในกรณีที่ปริมาณความชื้นในอากาศมีการแปรปรวน ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศเมื่อใช้อุณหภูมิในการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นที่ 70°C และ 90°C มีค่าเท่ากับ 11.44 และ 11.18 มีประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น 14.16 และ 25.66 ตามลำดับ ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ประสิทธิภาพการทำงานของระบบทั้งหมด ( $\eta$ ) พบว่าการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 70°C มีค่า  $\eta$  เท่ากับ 10.94 ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 90°C มีค่า  $\eta$  เท่ากับ 6.67 ดังนั้นการทำงานที่เงื่อนไขเดียวกันแต่เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบทั้งหมดมีค่าต่ำลง เนื่องจากมีการใช้พลังงานเพื่อ

การให้ความร้อนกับอากาศที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นมากขึ้น การเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมจะช่วยให้ประสิทธิภาพการทำงานทั้งระบบดีขึ้น



รูปที่ 4.31 ปริมาณความชื้นของอากาศออกหลังผ่านชุดลดความชื้นเมื่อฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นด้วยลมร้อนที่อัตราการไหล 2.4 m<sup>3</sup>/min อุณหภูมิ 70 และ 90°C

#### 4.5.2 ผลของอัตราการไหลอากาศและอุณหภูมิการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นต่อประสิทธิภาพการทำงานทั้งหมดของระบบ

ในกระบวนการลดความชื้นอากาศการกำหนดอัตราการไหลของอากาศมีผลต่อปริมาณการลดความชื้นอากาศ ส่วนกระบวนการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นการเพิ่มอัตราการไหลและอุณหภูมิลมร้อนมีผลต่อการไล่ความชื้นออกจากสารดูดความชื้น ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานแบบครบรอบ (η) ในหัวข้อนี้จึงทดสอบการทำงานของชุดลดความชื้นอากาศที่อัตราการไหลอากาศและอุณหภูมิฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นที่ระดับแตกต่างกัน

ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศ (D eff) ในทุกเงื่อนไขการทำงานในตารางที่ 4.9 มีค่าต่างกันไม่มากนัก การกำหนดอัตราการไหลอากาศของกระบวนการลดความชื้นและกระบวนการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นที่ 2.4 m<sup>3</sup>/min อุณหภูมิลมร้อน 70°C มีค่าประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศสูงสุดเท่ากับ 14.15 การเพิ่มอัตราการไหลอากาศเข้าในกระบวนการลดความชื้นอากาศโดยที่มีการกำหนดค่าการทำงานอื่น ๆ ไม่ต่างกัน พบว่าที่อุณหภูมิ 70°C (ตัวอย่าง เช่น การทดลองที่ 1 กับ 5) การเพิ่มอัตราการไหลอากาศเข้าส่งผลให้ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศสูงขึ้นเล็กน้อย จาก 12.59 เป็น 14.51 แต่ที่อุณหภูมิ 90°C ส่งผลไม่ชัดเจนนัก (ตัวอย่าง เช่น การทดลองที่ 3 กับ 7) เมื่อใช้อัตราการไหลอากาศเข้า

ไม่ต่างกันและอัตราการไหลลมร้อนไม่ต่างกัน (ตัวอย่าง เช่น การทดลองที่ 2 กับ 4) จะเห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศลดต่ำลง

พิจารณาประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น ( $R_{eff}$ ) ในตารางที่ 4.9 ที่อัตราการไหลอากาศของกระบวนการลดความชื้นและกระบวนการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นเท่ากับ  $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$  อุณหภูมิลมร้อน  $90^\circ\text{C}$  มีค่าประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นสูงสุดเท่ากับ 12.48 เมื่อใช้อัตราการไหลลมร้อนและอุณหภูมิลมร้อนเดียวกันแต่เพิ่มอัตราการไหลอากาศเข้าในกระบวนการลดความชื้นอากาศ (ตัวอย่าง เช่น การทดลองที่ 4 กับ 8) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากมีปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับในซิลิกาเจลเพิ่มขึ้นจึงทำให้ปริมาณความชื้นที่ถูกขับออกมาจากซิลิกาเจลมีปริมาณมากขึ้นตามไปด้วย การเพิ่มอัตราการไหลลมร้อนและอุณหภูมิลมร้อนในกระบวนการฟื้นฟูสภาพส่งผลให้ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสูงขึ้น จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าทั้งอัตราการไหลอากาศเข้าอัตราการไหลลมร้อน และอุณหภูมิลมร้อนมีผลให้ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้น

ประสิทธิภาพการทำงานทั้งหมดของระบบ ( $\eta$ ) เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าเอนทัลปีที่ใช้เพื่อการลดความชื้นอากาศกับค่าพลังงานที่ใช้ในกระบวนการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น อัตราการไหลอากาศของกระบวนการลดความชื้นและกระบวนการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นที่  $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$  อุณหภูมิลมร้อน  $70^\circ\text{C}$  (การทดลองที่ 5) มีค่า  $\eta$  สูงสุดเท่ากับ 15.91 ในกรณีที่ใช้เงื่อนไขการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นเหมือนกันแต่มีอัตราการไหลอากาศเข้าที่สูงขึ้น (ตัวอย่างเช่น การทดลองที่ 1 กับ 5) ส่งผลให้ค่า  $\eta$  มีค่าสูงขึ้น ในกรณีที่อัตราการไหลอากาศเข้ามีค่าเท่ากันและอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นเท่ากัน (ตัวอย่างเช่น การทดลองที่ 1 กับ 2) การเพิ่มอัตราการไหลลมร้อนที่ใช้ในกระบวนการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นส่งผลให้ค่า  $\eta$  มีค่าลดลง ในกรณีอัตราการไหลอากาศเข้าเท่ากันและอัตราการไหลลมร้อนเท่ากัน (ตัวอย่างเช่น การทดลองที่ 1 กับ 3) การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนส่งผลให้  $\eta$  มีค่าลดลง สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มอัตราการไหลและอุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้ในกระบวนการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานทั้งหมดของระบบลดลง

ตารางที่ 4.10 แสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าของชุดลดความชื้นอากาศแบบชื้นบางเมื่อทำงานเป็นระยะเวลา 60 min ปัจจัยหลักที่ทำให้ปริมาณการใช้ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นคืออัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิลมร้อนที่สูงขึ้น เมื่อคำนวณค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) ของการลดความชื้นอากาศ ที่อัตราการไหลอากาศเข้า  $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$  และการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นที่อัตราการไหล  $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$  อุณหภูมิลมร้อน  $70^\circ\text{C}$  มีค่า SEC ต่ำที่สุด คือ  $2.33 \text{ kWh/kg}$

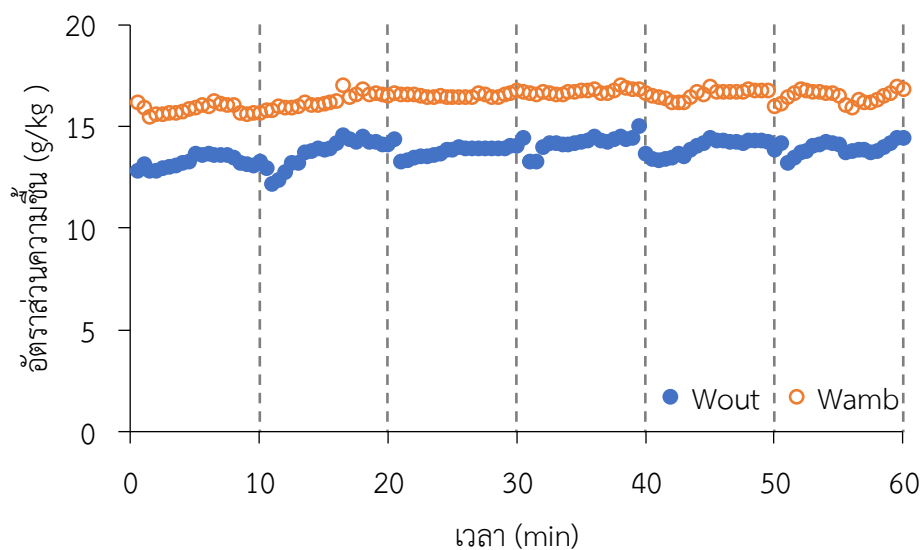
ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพการทำงานของชุดลดความชื้นอากาศเมื่อทำงานแบบครบรอบ

การทดลองที่	การลดความชื้น	การฟื้นฟูสภาพ		ความชื้นอากาศเข้า (g/kg dry air)	D eff (%)	R eff (%)	$\eta$ (%)
	อัตราการไหลอากาศเข้า (m <sup>3</sup> /min)	อัตราการไหลลมร้อน (m <sup>3</sup> /min)	อุณหภูมิ (°C)				
1	1.2	2.4	70	18.43 ± 0.27	12.59	3.06	7.03
2	1.2	3.6	70	18.30 ± 0.25	13.82	3.37	5.07
3	1.2	2.4	90	19.06 ± 0.21	12.36	3.51	6.80
4	1.2	3.6	90	19.73 ± 0.16	12.28	7.74	5.05
5	2.4	2.4	70	18.59 ± 0.43	14.15	3.43	15.91
6	2.4	3.6	70	18.00 ± 0.32	14.07	5.85	10.17
7	2.4	2.4	90	19.64 ± 0.16	12.26	12.48	14.41
8	2.4	3.6	90	19.61 ± 0.19	11.93	11.87	9.74

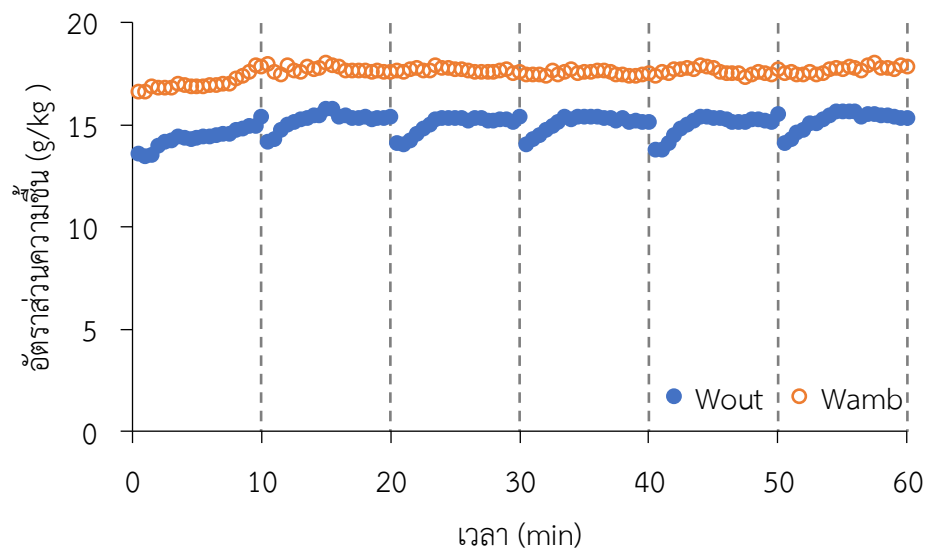
ตารางที่ 4.10 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของชุดลดความชื้นอากาศเมื่อทำงานแบบครบรอบ 60 min

การทดลองที่	การลดความชื้น	การฟื้นฟูสภาพ		ปริมาณความชื้นอากาศที่ลดลง (g/kg dry air)	การใช้ไฟฟ้า kWh	SEC kWh/kg
	อัตราการไหลอากาศเข้า (m <sup>3</sup> /min)	อัตราการไหล (m <sup>3</sup> /min)	อุณหภูมิ (°C)			
1	1.2	2.4	70	2.36 ± 0.77	0.95	4.93
2	1.2	3.6	70	2.55 ± 0.54	1.60	7.69
3	1.2	2.4	90	2.29 ± 0.82	1.45	7.76
4	1.2	3.6	90	2.45 ± 0.92	2.20	10.99
5	2.4	2.4	70	2.65 ± 0.60	1.00	2.33
6	2.4	3.6	70	2.54 ± 0.51	1.60	3.88
7	2.4	2.4	90	2.41 ± 0.95	1.45	3.72
8	2.4	3.6	90	2.38 ± 0.88	2.40	6.22

การทำงานของเครื่องทดสอบที่ 5 และ 7 ในตารางที่ 4.9 ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการทำงานทั้งหมดของระบบสูงจึงถูกเลือกมาทดสอบการทำงานแบบคอลัมน์คู่ ซิลิกาเจลถูกบรรจุลงในคอลัมน์ 2 คอลัมน์และสลับกันทำงาน เมื่อคอลัมน์หนึ่งทำการลดความชื้นอากาศ อีกคอลัมน์หนึ่งจะถูกฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น วัดความชื้นอากาศที่ผ่านชุดลดความชื้นอากาศแบบขั้นบันไดตลอดระยะเวลา 60 min รูปที่ 4.32 แสดงปริมาณความชื้นอากาศหลังผ่านการลดความชื้น โดยกำหนดอัตราการไหลของอากาศเข้าและลมร้อนเท่ากับ  $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$  ใช้อุณหภูมิลมร้อน  $70^\circ\text{C}$  โดยขณะทดสอบมีความชื้นอากาศแวดล้อม  $16.41 \pm 0.37 \text{ g/kg dry air}$  รูปที่ 4.33 แสดงปริมาณความชื้นอากาศหลังผ่านการลดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศเข้าและลมร้อนเท่ากับ  $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$  อุณหภูมิลมร้อน  $90^\circ\text{C}$  โดยขณะทดสอบมีความชื้นอากาศแวดล้อม  $17.55 \pm 0.31 \text{ g/kg dry air}$  จะเห็นว่าทั้งสองเงื่อนไขการทำงานระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลา 60 min และลดความชื้นอากาศลงได้ 14.25% อัตราส่วนความชื้นอากาศลดลงเฉลี่ยประมาณ  $2.5 \text{ g/kg dry air}$  เมื่อพิจารณาปริมาณการใช้ไฟฟ้าและค่า SEC ร่วมด้วย การใช้การลดความชื้นที่อัตราการไหลอากาศเข้า  $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$  อัตราการไหลลมร้อน  $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$  อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$  เป็นเงื่อนไขการทำงานที่ดีที่สุดของชุดลดความชื้นแบบขั้นบันได เนื่องจากมีค่าประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดและการใช้พลังงานจำเพาะต่ำที่สุด



รูปที่ 4.32 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นของอากาศออกหลังผ่านชุดลดความชื้นที่อัตราการไหลอากาศเข้า  $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$  และฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นที่อัตราการไหลลมร้อน  $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$   $70^\circ\text{C}$



รูปที่ 4.33 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นของอากาศออกหลังผ่านชุดลดความชื้นที่อัตราการไหลอากาศเข้า  $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$  และพื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นที่อัตราการไหลลมร้อน  $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$   $90^\circ\text{C}$

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

กระบวนการลดความชื้นอากาศถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการแปรรูปอาหาร ช่วยให้ลดระยะเวลาในการทำแห้งและยังสามารถรักษาคุณภาพของอาหารไว้ได้ ชุดลดความชื้นอากาศแบบคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นที่ใช้โดยทั่วไปมีโครงสร้างแบบเบตบรรจุเต็ม (Packed bed) การปรับเปลี่ยนโครงสร้างเบตนั้นส่งผลต่อความสามารถในการลดความชื้น ในงานวิจัยนี้เริ่มจากออกแบบโครงสร้างเบตบรรจุ โดยเบตบรรจุถูกแบ่งชั้นบรรจุออกเป็นชั้นย่อย ๆ เพื่อให้สารดูดความชื้นเรียงตัวกันเป็นชั้นบาง มีลักษณะต่างกัน 2 แบบ คือ ชั้นบางแบบมีช่องให้อากาศไหลผ่าน (A) และไม่มีช่องอากาศ (B) และมีการจัดเรียงซ้อนกันด้วยจำนวนชั้นที่ต่างกัน คือ 5, 10 และ 15 ชั้น ทดสอบลดความชื้นอากาศเพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลอากาศเข้าที่มีต่อความดันตกคร่อม ศึกษาผลของโครงสร้างเบตที่มีต่ออัตราส่วนความชื้นอากาศออก อัตราการลดความชื้น และประสิทธิภาพการลดความชื้น เมื่อเปรียบเทียบกับเบตบรรจุเต็มพบว่าที่อัตราการไหลอากาศต่ำความดันตกคร่อมของชั้นเบตไม่มีความแตกต่างกัน แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลความดันตกคร่อมเบตแบบหลายชั้นมีค่าสูงกว่าแบบเบตบรรจุเต็ม เบตบรรจุแบบหลายชั้นเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นไม่ได้ส่งผลต่อความดันตกคร่อมชัดเจน การแบ่งชั้นเบตเป็นชั้นย่อยหลายชั้นทำให้อัตราการลดความชื้นอากาศและประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศมีค่าสูงกว่าแบบเบตบรรจุเต็ม โดยเบตบรรจุแบบชั้นบางที่มีช่องอากาศไหลผ่านซ้อนกันจำนวน 15 ชั้น (15A) ให้อัตราการลดความชื้นอากาศสูงสุดเท่ากับ 5.13 g/min และประสิทธิภาพการลดความชื้น 16.99% จึงได้ชุดลดความชื้นอากาศแบบหลายชั้นโดยโครงสร้างภายในคอลัมน์เป็นเบตแบบชั้นบางที่มีช่องให้อากาศไหลผ่านซ้อนกันจำนวน 15 ชั้น และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของชุดลดความชื้นอากาศ ทำการลดความชื้นอากาศที่สภาวะอากาศต่างกัน 3 ระดับ และอัตราการไหลอากาศเข้า 3 ระดับ เพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ อัตราส่วนความชื้นอากาศออก อุณหภูมิอากาศออก อัตราการลดความชื้นอากาศ ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศ และหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะอากาศและอัตราการไหลอากาศเข้ากับอัตราการลดความชื้นเฉลี่ยสะสม สำหรับกระบวนการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นทดสอบที่อัตราส่วนความชื้นอากาศเข้า 20 g/kg dry air อัตราการไหลลมร้อน 3 ระดับ เพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ อัตราส่วนความชื้นอากาศออก อุณหภูมิอากาศออก อัตราการฟื้นฟูสารดูดความชื้น ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสารดูดความชื้น และหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและอุณหภูมิลมร้อนกับอัตราการฟื้นฟูสารดูดความชื้นเฉลี่ยสะสม ในขั้นสุดท้ายทำการทดสอบหาเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมด้วยการหาระยะเวลาสลับการทำงานของกระบวนการลดความชื้นอากาศและฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น

การทดสอบชุดลดความชื้นอากาศแบบหลายชั้นที่ปริมาณความชื้นอากาศและอัตราการไหลต่างกัน เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของชุดลดความชื้นอากาศซึ่งสรุปผลได้ดังนี้

1. การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเข้าส่งผลให้ผลต่างของความชื้นอากาศเข้าและความชื้นอากาศออกลดลงแต่ส่งผลให้อัตราการลดความชื้นอากาศสูงขึ้น
2. ปริมาณความชื้นอากาศเข้าและอัตราการไหลอากาศเข้าส่งผลให้อัตราการลดความชื้นอากาศเพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการลดความชื้นอากาศมีค่าสูงขึ้นประมาณ 5 – 25 g/min เมื่อ

ความชื้นอากาศเข้าเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 19 -25 g/kg dry air และค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการลดความชื้นอากาศมีค่าสูงขึ้นประมาณ 6 – 27 g/kg dry air เมื่ออัตราการไหลอากาศเข้าเพิ่มขึ้นในช่วง 1.2 – 3.6 m<sup>3</sup>/min

3. ค่า enthalpy ของการลดความชื้นอากาศจะมีค่าใกล้เคียงค่า enthalpy ของกระบวนการ adiabatic เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 นาที

4. การเพิ่มอุณหภูมิและอัตราการไหลลมร้อนส่งผลให้ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสารดูดความชื้นสูงขึ้น ค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการฟื้นฟูสารดูดความชื้นมีค่าสูงขึ้นประมาณ 6 – 14 g/min เมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนในช่วง 70 - 90°C และค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการฟื้นฟูสารดูดความชื้นมีค่าสูงขึ้นประมาณ 15 – 26 g/min เมื่ออัตราการไหลลมร้อนเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 2.4 - 4.8 m<sup>3</sup>/min

5. การเพิ่มอัตราไหลลมร้อนส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นมีค่าสูงขึ้น ที่อัตราการไหลลมร้อน 2.4 m<sup>3</sup>/min ใช้เวลาประมาณ 10 -15 min เมื่ออัตราการไหลลมร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 4.8 m<sup>3</sup>/min ใช้เวลาประมาณ 5 -10 min

6. สมการทำนายค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการลดความชื้นอากาศ (DCA) และค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการฟื้นฟูสารดูดความชื้น (RCA) มีค่า  $r^2$  อยู่ประมาณ 0.84 – 0.96

7. สมการทำนายค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการลดความชื้นอากาศ (DCA) และค่าเฉลี่ยสะสมของอัตราการฟื้นฟูสารดูดความชื้น (RCA) สามารถใช้วิเคราะห์เวลาการสลับการทำงานของคอลัมน์ แต่ค่าที่ได้จากสมการทำนายมีค่าสูงกว่าการค่าที่ได้จากการทดลอง

คอลัมน์ลดความชื้นอากาศแบบชั้นบางถูกทดสอบตามสภาพการใช้งานจริง อากาศเข้ามีปริมาณความชื้นในช่วง 15 – 16 g/kg dry air คอลัมน์ต้องถูกสลับการทำงานทั้งกระบวนการลดความชื้นอากาศและฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น จากการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การทำงานแบบครบรอบของชุดลดความชื้นอากาศ กระบวนการลดความชื้นอากาศจะเริ่มหลังจากเวลาผ่านไป 1-2 นาที เนื่องจากอุณหภูมิของซิลิกาเจลยังคงสูงหลังจากผ่านกระบวนการฟื้นฟู

2. อัตราการลดความชื้นอากาศเฉลี่ยสะสม (DCA) และอัตราการฟื้นฟูสารดูดความชื้นเฉลี่ยสะสม (RCA) สามารถใช้เป็นค่าพิจารณาในการกำหนดเวลาสลับรอบการทำงานของคอลัมน์ โดยค่าทั้งสองอย่างน้อยต้องมีค่าเท่ากัน หรือค่า RCA ต้องมากกว่า DCA จึงทำให้ระบบสามารถทำงานแบบครบรอบได้อย่างต่อเนื่อง

3. ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น โดยลดลงประมาณ 0.2 – 2%

4. การเพิ่มอัตราการไหลลมร้อนส่งผลให้ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย

5. การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนส่งผลให้ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นเพิ่มสูงขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจาก 70°C เป็น 90°C ที่อัตราการไหลอากาศเข้าและอัตราการไหลลมร้อน 2.4 m<sup>3</sup>/min ทำให้ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 9%

6. ประสิทธิภาพการทำงานของระบบทั้งหมด ( $\eta$ ) มีค่าลดลงเมื่อใช้อัตราการไหลลมร้อนสูงกว่าอัตราการไหลอากาศเข้า (อากาศที่ต้องการลดความชื้น) ค่า  $\eta$  สูงสุดเท่ากับ 15.91 เมื่อใช้อัตราการไหลอากาศเข้าและอัตราการไหลลมร้อนที่ 2.4 m<sup>3</sup>/min อุณหภูมิลมร้อน 70°C

7. การตั้งค่าการทำงานของกระบวนการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อทั้งประสิทธิภาพการลดความชื้น ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น และประสิทธิภาพการทำงานแบบครบรอบของระบบ

8. ปริมาณการใช้ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลและอุณหภูมิความร้อนที่ใช้ในกระบวนการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น

9. การกำหนดค่าการทำงานแบบครบรอบของคอลัมน์ลดความชื้นอากาศแบบหลายชั้นสามารถทำงานได้หลายเงื่อนไขการทำงาน การเลือกเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมต้องพิจารณาจากทั้ง ประสิทธิภาพการลดความชื้น ประสิทธิภาพการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น ประสิทธิภาพการทำงานแบบครบรอบ และปริมาณการใช้ไฟฟ้า

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการสังเกตผลการทดลอง ข้อเสนอแนะเหล่านี้อาจใช้เป็นแนวทางในการวิจัยต่อไป

1. การทดลองนี้ใช้สารดูดความชื้นเป็นซิลิกาเจล 1950 g ซึ่งมีความสามารถในการลดความชื้นอากาศลงได้ประมาณ 2.5 g/kg dry air หากเพิ่มปริมาณสารดูดความชื้นจะส่งผลให้การลดลงของความชื้นอากาศเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามต้องพิจารณาถึงความดันตกคร่อมที่อาจเปลี่ยนแปลงและระยะเวลาในการสลับการทำงานระหว่างคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นทั้งสองที่จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป

2. สามารถหาแหล่งความร้อนอื่นที่ไม่สิ้นเปลืองพลังงาน เช่น ความร้อนทิ้งจากกระบวนการทำแห้งนำมาใช้ในกระบวนการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นจะช่วยให้ประหยัดพลังงานมากขึ้น หรือมีการใช้สารดูดความชื้นที่สามารถฟื้นฟูได้ที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยให้ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้เช่นกัน

3. การเพิ่มจำนวนคอลัมน์บรรจุสารดูดความชื้นให้มีจำนวนมากกว่า 2 คอลัมน์จะช่วยให้ประสิทธิภาพการลดความชื้นอากาศเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากสารดูดความชื้นหลังผ่านการฟื้นฟูสภาพจะมีเวลาในการลดอุณหภูมิมากขึ้น เมื่อเริ่มกลับเข้าสู่กระบวนการลดความชื้นอากาศ อุณหภูมิสารดูดความชื้นจะไม่สูงมากส่งผลให้การดูดซับความชื้นดีขึ้น

## บรรณานุกรม

- ศิริพันธ์ มุรธาธัญลักษณ์, ณัชพล ไม้ซุ่น, ธนทัต ศิริสุวรรณโชติ. 2559. การศึกษาผลของการลดความชื้นในฟลูอิดซ์เบดและเบดบรรจุเพื่อการออกแบบเครื่องผลิตอากาศแห้งแบบต่อเนื่อง. วิศวกรรมลาดกระบัง. 33(4) : 1-7
- หนังสืออุตุนิยมวิทยา. 2561. ความชื้นสัมพัทธ์. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <https://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=56>.
- อดิพงษ์ นันทพันธ์ุ, ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, ณัฐวดี ดุษฎี. 2548). การทดสอบสมรรถนะของชุดสารดูดความชื้นแบบถาดสำหรับกระบวนการอบแห้งลำไย. **Naresuan University Journal**. 13(1) : 25-36.
- Abou-Ziyan, H., Abd El-Raheim, D., Mahmoud, O., & Fatouh, M. 2017. Performance characteristics of thin-multilayer activated alumina bed. **Applied Energy**. 190 : 29-42.
- Attkan, A. K., Kumar, N., & Yadav, Y. K. 2014. Performance evaluation of a dehumidifier assisted low temperature based food drying system. **IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology**. 8(1) : 43-49.
- Awad, M. M., Ramzy K, A., Hamed, A. M., & Bekheit, M. M. 2008. Theoretical and experimental investigation on the radial flow desiccant dehumidification bed. **Applied thermal engineering**. 28(1) : 75-85.
- Baghapour, B., Rouhani, M., & Bahrami, M. 2015. Experimental design and performance analysis of a desiccant dehumidification column under cyclic operating conditions. **Proceedings of the IX Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerator, Power Sources”**. Minsk, Belarus.
- Balthazar, P., Ismail, M., khai, L., Ramdan, m. i., Mazlan, N., & Mamat, H. 2020. Adsorption Characteristic of a Two Layer Hollow Cylindrical Silica Bed. **Proceedings of International Conference of Aerospace and Mechanical Engineering 2019**. 493-500.
- Balthazar, P., Ismail, M. A., Nasir, M. N. M., Mamat, H., & Ramdan, M. I. 2020. Experimental Investigation on a Desiccant Silica Bed for Dehumidification. **Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences**. 73(2) : 1-11.
- Chang, K.-S., Wang, H.-C., & Chung, T.-W. 2004. Effect of regeneration conditions on the adsorption dehumidification process in packed silica gel beds. **Applied thermal engineering**. 24(5-6) : 735-742.

- Chang, K.-S., Chen, M.-T., & Chung, T.-W. 2005. Effects of the thickness and particle size of silica gel on the heat and mass transfer performance of a silica gel-coated bed for air-conditioning adsorption systems. **Applied thermal engineering**. 25(14-15) : 2330-2340.
- Cheevitsopon, E., & Jongyingcharoen, J. S. 2019. Drying in a desiccant wheel dehumidification system-assisted hot air dryer: desiccant wheel effectiveness and carrot drying. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. 301(1) : 012046
- Chen, C.-H., Schmid, G., Chan, C.-T., Chiang, Y.-C., & Chen, S.-L. 2015. Application of silica gel fluidised bed for air-conditioning systems. **Applied thermal engineering**. 89 : 229-238.
- Djaeni, M., & Sari, D. A. 2015. Low temperature seaweed drying using dehumidified air. **Procedia Environmental Sciences**. 23 : 2-10.
- El-Samadony, Y., Hamed, A., & Kabeel, A. 2013. Dynamic performance evaluation of single bed desiccant dehumidification system. **International Journal of Renewable and Sustainable Energy**. 2(1) : 18-25.
- El-Samadony, Y. 2014. Effect of adsorption to desorption air mass ratio on the performance of double bed desiccant dehumidification system. **ERJ. Engineering Research Journal**. 37 : 331-336.
- Finocchiaro, P., Beccali, M., & Gentile, V. 2016. Experimental results on adsorption beds for air dehumidification. **International journal of refrigeration**. 63 : 100-112.
- Goula, A. M., & Adamopoulos, K. G. 2005. Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: II. The effect on powder properties. **Journal of Food Engineering**. 66(1) : 35-42.
- Hamed AM, Walaa R, El-Emam SH. 2005. Study of the transient adsorption/desorption characteristics of solid desiccant particles in fluidized bed. **In: The third Minia international conference for advanced trends in engineering**. Minia University, Egypt.
- Jongyingcharoen, J. 2018. Study on psychrometric properties of air in a hot air drying system with a desiccant wheel. **Thai Society of Agricultural Engineering Journal**. 24(1) : 6-12.
- Ju, H., Zhao, S.-H., Mujumdar, A., Fang, X.-M., Gao, Z.-J., & Zheng, Z.-A. 2018. Energy efficient improvements in hot air drying by controlling relative humidity based on Weibull and Bi-Di models. **Food and Bioproducts Processing**. 111.

- Kabeel, A. 2009. Adsorption–desorption operations of multilayer desiccant packed bed for dehumidification applications. **Renewable Energy**. 34(1) : 255-265.
- Laguerre, O., Amara, S. B., & Flick, D. 2006. Heat transfer between wall and packed bed crossed by low velocity airflow. **Applied thermal engineering**. 26(16) : 1951-1960.
- Long, C., & Guan, J. 2012. Measurement of diffusivity and thermal parameters of gas adsorption with a volumetric method. **Industrial & engineering chemistry research**. 51(18) : 6502-6512.
- Mandegari, M. A., & Pahlavanzadeh, H. 2009. Introduction of a new definition for effectiveness of desiccant wheels. **Energy**. 34(6) : 797-803.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. 1993. **Unit operations of chemical engineering**. New York: McGraw-Hill.
- Misha, S., Mat, S., Ruslan, M., & Sopian, K. 2012. Review of solid/liquid desiccant in the drying applications and its regeneration methods. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 16(7) : 4686-4707.
- Nagaya, K., Li, Y., Jin, Z., Fukumuro, M., Ando, Y., & Akaishi, A. 2006. Low-temperature desiccant-based food drying system with airflow and temperature control. **Journal of Food Engineering**. 75(1) : 71-77.
- Ng, K. C., Chua, H. T., Chung, C. Y., Loke, C. H., Kashiwagi, T., Akisawa, A., & Saha, B. B. 2001. Experimental investigation of the silica gel–water adsorption isotherm characteristics. **Applied thermal engineering**. 21(16) : 1631-1642.
- Ondier, G., Siebenmorgen, T., & Mauromoustakos, A. 2010. Low-temperature, low-relative humidity drying of rough rice. **Journal of Food Engineering**. 100 : 545-550.
- Pesic, R., Kaludjerovic-Radoicic, T., Boskovic-Vragolovic, N., Arsenijević, Z., & Grbavčić, Ž. B. 2014. Pressure drop in packed beds of spherical particles at ambient and elevated air temperatures. **Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly**. 21 : 419-427.
- Punlek, C., Pairintra, R., Chindaraksa, S., & Maneewan, S. 2009. Simulation design and evaluation of hybrid PV/T assisted desiccant integrated HA-IR drying system (HPIRD). **Food and Bioproducts Processing**. 87(2) : 77-86.
- Rady, M. 2009. Experimental and numerical investigations on the performance of dehumidifying desiccant beds composed of silica-gel and thermal energy storage particles. **Heat and mass transfer**. 45(5) : 545-561.

- Ramzy K, A., Kadoli, R., & Ashok Babu, T. P. 2012. Performance studies on the desiccant packed bed with varying particle size distribution along the bed. **International journal of refrigeration**. 35(3) : 663-675.
- Ramzy K, A., Kadoli, R., & Ashok Babu, T. P. 2013. Experimental and theoretical investigations on the cyclic operation of TSA cycle for air dehumidification using packed beds of silica gel particles. **Energy**. 56 : 8-24.
- Singh, S., & Singh, P. P. 1998. Regeneration of silica gel in multi-shelf regenerator. **Renewable Energy**. 13(1) : 105-119.
- Taweekun, J., & Akvanich, V. 2013. The Experiment and Simulation of Solid Desiccant Dehumidification for Air-Conditioning System in a Tropical Humid Climate. **Engineering**. 146-153.
- Yang, W., Deng, H., Wang, Z., Zhao, X., & He, S. 2017. Performance investigation of the novel solar-powered dehumidification window for residential buildings. **Energies**. 10(9) : 1369.
- Yang, W., Ren, J., Lin, Z., Wang, Z., & Zhao, X. 2018. Study on dehumidification performance of a multi-stage internal cooling solid desiccant adsorption packed bed. **Energies**. 11(11) : 3038.
- Yeboah, S., & Darkwa, J. 2016. A critical review of thermal enhancement of packed beds for water vapour adsorption. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 58 : 1500-1520.
- Yeboah, S., & Darkwa, J. 2021. Experimental investigation into the integration of solid desiccant packed beds with oscillating heat pipes for energy efficient isothermal adsorption processes. **Thermal Science and Engineering Progress**. 21 : 100791.
- Zallama, B., Ghedira, L. Z., & Nasrallah, S. B. 2020. Performance of a new desiccant bed using phase change material. **MATEC Web of Conferences**. 330 : 01015.

## ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก**  
**ประวัติผู้เขียน**

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวพุกษา สวาทสุข
วัน เดือน ปีเกิด	19 พฤศจิกายน 2523 ที่กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	91/115 ตำบลบึงยี่โถ อำเภอลำลูกกา ปทุมธานี 12130 โทร.0898964009
ประวัติการศึกษา	2545 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2550 Master of Science Food Engineering and Bioprocess Technology Asian Institute of Technology
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) การแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหาร 2.) กระบวนการเอ็กทรัชัน
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ.2545-2546	Production supervisor บริษัท เพอร์ซิเดนท์ เบเกอรี่ จำกัด (มหาชน)
พ.ศ.2547-2548	ผู้ช่วยผู้จัดการ ห้างหุ้นส่วนจำกัด พี.เอส.เอ. 21
พ.ศ.2551-ปัจจุบัน	อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**ภาคผนวก ข**  
**ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์**

- Experimental investigation of air characteristics during dehumidification in the multilayer desiccant bed column system  
The 4th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST 2018)
- Evaluation of cyclic efficiency of multilayer desiccant bed column  
The 13th Thai Society of Agricultural Engineering International Conference (TSAE 2020)
- Effect of different desiccant bed designs in a desiccant column on dehumidification performance  
Agricultural Engineering International: CIGR Journal Vol. 24, No.1

## Experimental investigation of air characteristics during dehumidification in the multilayer desiccant bed column system

Pruksa Sawardsuk<sup>1</sup>, Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen<sup>2</sup> and Ekkapong Cheevitsopon<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

<sup>2</sup>Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

**Abstract.** The goal of this research is to investigate air characteristics during dehumidification process using the multilayer desiccant bed. Silica gel packing in the multilayer column was used as a desiccant material. Airflow direction in the column was designed in a zigzag path passing each desiccant layer. The changes in temperature and relative humidity of exit air were recorded after dehumidification at different airflow rates of 18, 36, and 72 m<sup>3</sup>/h. In the desiccant regeneration process, moisture in silica gel was removed by 85°C of hot air at varied airflow rates. The characteristics of exit air after regeneration were also monitored. The result revealed that air humidity ratio was significantly decreased using multilayer desiccant bed column. The highest rates of air dehumidification and desiccant regeneration were observed in the first 5 min operation. The highest air dehumidification rate was 12.82 g/min at the airflow rate of 72 m<sup>3</sup>/h and the highest regeneration rate of desiccant was 6.70 g/min at the airflow rate of 72 m<sup>3</sup>/h. In addition, the dual column of multilayer desiccant bed can be successfully applied to cyclic operation of dehumidification and regeneration when the cycle time were 5 min and airflow rate 36 and 72 m<sup>3</sup>/h.

### 1 Introduction

The desiccant dehumidification of air is widely used in industrials and air conditioning. Either solid or liquid desiccant can be used. However, solid desiccant in forms of packed bed or rotary bed is preferable because of easy handling [1]. The packed bed system has less mechanical problems because its design is not complicate and higher amount of humidity is reduced as compared to the rotary bed system [2,3]. The commonly used solid desiccant is silica gel as it has high moisture adsorption capacity and great pore surface area to trap the water vapor. Adsorption and desorption of the packed bed of silica gel have been reported in several studies. Chang et al. [3] investigated the effect of regeneration conditions on the dehumidification process of modified silica gel and commercial silica gel packed bed. The adsorption of the silica gel was increased as the degree of regeneration increased. Awad et al. [4] fabricated a radial flow dehumidifier using silica gel as a desiccant. Hollow cylindrical bed patterns were designed and test at different diameter ratios. Low bed diameter ratio was appropriate for minimum pressure drop. On the other hand, higher bed diameter ratio caused greater air humidity drop. Dehumidifiers were applied in drying due to many benefits such as reducing drying time and retaining product qualities [5,6].

To date, limited reports are available in the literature on the performance of desiccant bed column. Therefore,

the objective of this study was to design the zigzag airflow direction in desiccant bed column, and study the humidity ratio and temperature characteristics of the exit air after dehumidification and regeneration of the air in the multilayer desiccant bed column system. The system was composed of two columns performing the switch task of dehumidification and regeneration, i.e. cyclic operation. The cyclic operation of the system was also carried out at different air flow rates to determine the system performance.

### 2 Experiment study

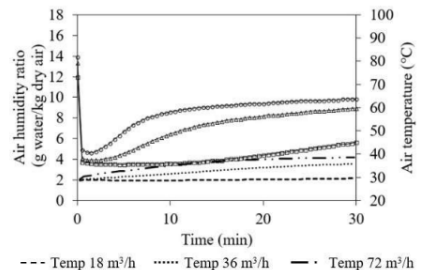
#### 2.1 Experimental setup

A schematic diagram of the multilayer desiccant bed column system is illustrated in Fig. 1. The system consisted of a dual column; column A and column B. Each column was 20 cm inner diameter and 100 cm height. Fifteen layers with sieve containers were inside the column. Each layer contained 150 g of silica gel. The sieve container had an air duct with a diameter of 2.54 cm to allow the air to pass through. The air duct was changed from left side of one layer to right side of the next layer in order that a zigzag pathway of the air was generated. Outside of the column was covered by rock wool insulation.

\* Corresponding author: [ekkapong.ch@kmitl.ac.th](mailto:ekkapong.ch@kmitl.ac.th)



that humidity ratio of the exit air sharply decreased at the initial period of dehumidification when compared to humidity ratio of the inlet air (12.09-13.94 g water/g dry air). Thereafter humidity ratio of the exit air increased with increasing time. This was because of lower adsorption capacity of silica gel with longer process time. Similar trend have been observed in a thin multilayer of activated alumina and packed bed of silica gel [7,8,9]. At first 5 min of the process, the highest dehumidification rates were 2.93, 6.52 and 12.82 g water/min (corresponding to the specific dehumidification rates of 1.30, 2.90 and 5.70 g water/(min·kg silica gel)) at the airflow rates of 18, 36 and 72 m<sup>3</sup>/h, respectively. Regarding to temperature of the exit air, temperature slightly increased with increasing time because heat was released from the desiccant (heat of adsorption). It could be observed that in long term adsorption, humidity ratio and temperature of the exit air were the same as those of the inlet air. Fig. 3 shows a psychrometric process of air dehumidification at the represent airflow rate of 72 m<sup>3</sup>/h. Humidity ratios of the inlet air reduced by about 64%, 50% and 29% when the process times were 1, 5 and 30 min, respectively. It is interesting that psychrometric path of the dehumidification process at 30 min conformed to the adiabatic path.



□ Humidity 18 m<sup>3</sup>/h   Δ Humidity 36 m<sup>3</sup>/h   ○ Humidity 72 m<sup>3</sup>/h  
Fig. 2. Humidity ratio and temperature of exit air after the dehumidification process at various airflow rates.

### 3.2 Regeneration process: Effect of airflow rate on characteristics of the exit air

Saturated silica gel was regenerated using the air temperature of 85°C at the airflow rates 18-72 m<sup>3</sup>/h. The changes in humidity ratio and temperature of the exit air after the regeneration process (Point II) for 30 min are illustrated in Fig. 4. Humidity ratio of the exit air increased continuously with increasing time. It indicated that moisture in the silica gel was evaporated by the regeneration process. Moreover, the change in humidity ratio of the exit air was dependent on the airflow rate. Humidity ratio of the exit air gradually increased with time at low airflow rate. And the exit air humidity ratio sharply increased with time at high airflow rate. Therefore, the highest regeneration rate was 6.70 g water/min (corresponding to the specific dehumidification rates of 2.98 g water/(min·kg silica gel))

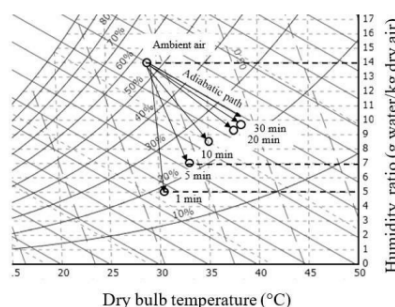
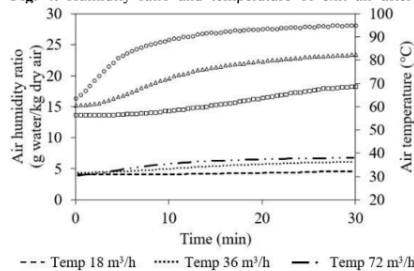


Fig. 3. Psychrometric paths of the dehumidification process with the airflow rate of 72 m<sup>3</sup>/h at various time.

Fig. 4. Humidity ratio and temperature of exit air after the



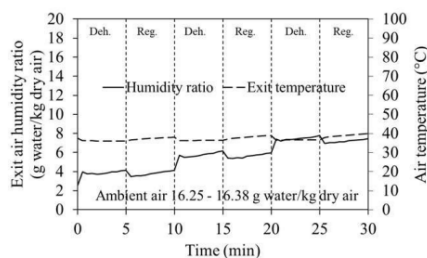
□ Humidity 18 m<sup>3</sup>/h   Δ Humidity 36 m<sup>3</sup>/h   ○ Humidity 72 m<sup>3</sup>/h  
regeneration process at various air flow rates.

at the first 5 min when the airflow rate was 72 m<sup>3</sup>/h. As can be seen in Fig. 4, temperature of the exit air increased with time. Abou-Ziyan et al. [7] also reported increasing temperature of the exit air for long process period until the temperature was equal to the inlet air temperature.

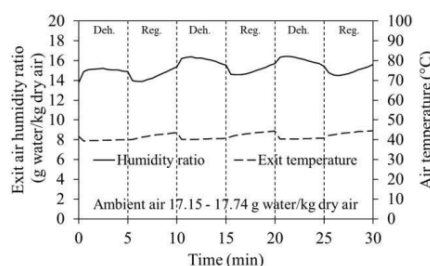
### 3.3 Cyclic operation of the system

Behaviors of air during the cyclic operation between the dehumidification and regeneration process at the airflow rate 18, 36 and 72 m<sup>3</sup>/h are shown in Fig. 5, 6 and 7, respectively. Different characteristics of dehumidification process were found at airflow rate of 18 m<sup>3</sup>/h. Humidity ratio of the dehumidification process increased in every cycle. It indicated that moisture was accumulated in the silica gel after the regeneration process. The lowest flow rate of hot air for the regeneration process cannot be applied in this system. For the cyclic operation at the airflow rate of 36 and 72 m<sup>3</sup>/h, the humidity ratio of the exit air decreased during dehumidification and increased during regeneration. Similar characteristics were presented in previous research on cyclic operation [8,10]. At the airflow rate of 72 m<sup>3</sup>/h, humidity ratio of the exit air was the lowest during dehumidification and the highest during regeneration. It should be concluded that the regeneration airflow rate was an important control parameter for a successful cyclic operation. In addition, performance of the cyclic operation was dependent on the cycle duration and air temperature used in the

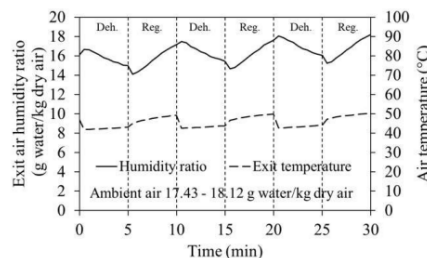
regeneration process [7]. When the airflow rate was  $72 \text{ m}^3/\text{h}$ , the multilayer desiccant bed column system could reduce air humidity ratio from the ambient condition (approximately  $17 \text{ g water/kg dry air}$ ) to about  $15 \text{ g water/kg dry air}$ , yielding 12% reduction. Therefore, the results indicated that the dual column of the multilayer desiccant bed system could be successfully applied to provide continuous supplied air with low humidity ratio for various industrial processes such as drying.



**Fig. 5.** Humidity ratio and temperature of the exit air during the cyclic operation at  $18 \text{ m}^3/\text{h}$ .



**Fig. 6.** Humidity ratio and temperature of the exit air during the cyclic operation at  $36 \text{ m}^3/\text{h}$ .



**Fig. 7.** Humidity ratio and temperature of the exit air during the cyclic operation at  $72 \text{ m}^3/\text{h}$ .

#### 4 Conclusion

Air dehumidification and desiccant regeneration of the multilayer desiccant bed column system were studied by observing humidity ratio and temperature of the exit air. Cyclic operation between dehumidification and regeneration was run to test ability of the system. From the study, the following observations can be drawn.

1. The highest dehumidification rate was observed at the beginning of the dehumidification process, and then the dehumidification rate decreased due to lower adsorption capacity of desiccant.

2. The regeneration rate significantly increased with the airflow rate of hot air.

3. The cyclic operation at the airflow rates of  $36$  and  $72 \text{ m}^3/\text{h}$  presented continuous ability to conduct the dehumidification and regeneration process in the multilayer desiccant bed column system. Humidity ratio of the exit air reduced by about 12% (compared to humidity ratio of the inlet air) when the airflow rate was  $72 \text{ m}^3/\text{h}$ .

#### References

1. S. Misha, S. Mat, M.H. Rustan, K. Sopian, Review of solid/liquid desiccant in the drying applications and its regeneration methods, *RENEW SUST ENERG REV* **16**, 4686 (2001).
2. S.K. Yeboah, J. Darkwa, A critical review of thermal enhancement of packed beds for water vapour adsorption *RENEW SUST ENERG REV* **58**, 1500 (2016).
3. K.S. Chang, H.C. Wang, T.W. Chung, Effect of regeneration condition on the adsorption dehumidification process in packed silica gel beds, *Appl. Therm. Eng* **24**, 735 (2014).
4. M.M. Awad, A. Ramzy K, A.M. Hamed, H.M. Bekheit, Theoretical and experimental investigation on the radial flow desiccant dehumidification bed, *Appl. Therm. Eng* **28**, 75 (2018).
5. K. Nagaya, Y. Li, Z. Jin, M. Fukumuro, Y. Ando, A. Akaishi, Low-temperature desiccant-based food drying system with airflow and temperature control, *J Food Eng* **75**, 71 (2006).
6. G. O. Ondier, T. J. Siebenmorgen, A. Mauromoustakos, Low-temperature, low-relative humidity drying rough rice, *J Food Eng* **100**, 545 (2010).
7. H. Abou-Ziyan, D. Abd El-Raheim, O. Mahmoud, M. Fatouh, Performance characteristics of thin-multilayer activated alumina bed, *APPL ENERG* **190**, 29 (2017).
8. A.K. Ramzy, R. Kadoli, A. Babu T.P., Experimental and theoretical investigation on the cyclic operation of TSA cycle for air dehumidification using packed beds of silica gel, *Energy* **56**, 8 (2013).
9. A.E. Kabeel, Adsorption operations of multilayer desiccant packed bed for dehumidification applications, *RENEW ENERG* **34**, 255 (2009).
10. A.K. Ramzy, A.M. Hamed, M.M. Awad, M.M. Bekheit, Theoretical investigation on the cyclic operation of radial flow desiccant bed dehumidifier, *JETR* **2**, 6 (2010).

## Evaluation of cyclic efficiency of multilayer desiccant bed column

Prueksa Sawardsuk<sup>1</sup>, Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen<sup>2</sup>, and Ekkapong Cheevitsopon<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, Bangkok, Thailand

<sup>2</sup>King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Bangkok, Thailand

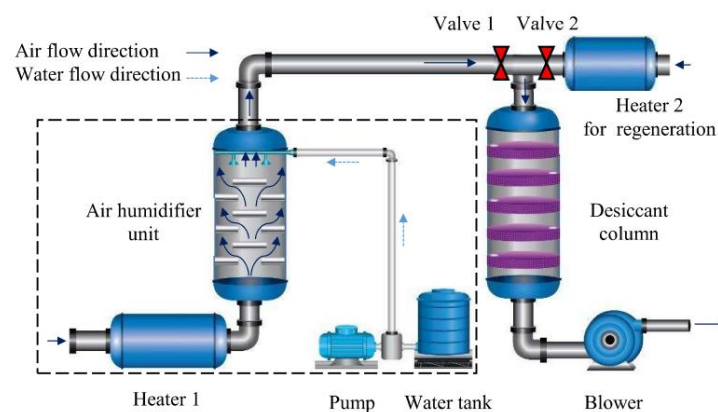
**Abstract.** The main objective was to evaluate cyclic efficiency of a multilayer desiccant bed column. The experimental setup consisted of an air humidifier unit, a heating unit for regeneration, and the desiccant bed column with 15 layers. An airflow rate of 2.4 m<sup>3</sup>/min with the humidity ratio of 20 g water/kg dry air was used in this study. The results showed that the highest dehumidification rate of 21 g water/min was found at the beginning of the dehumidification process. During the regeneration process, the highest regeneration rate was 39 g water/min when regenerating the desiccant at a temperature of 90°C. For cyclic operation process, the cyclic efficiencies were 11% and 7% at the regeneration temperatures of 70°C and 90°C, respectively. The cyclic efficiency was dependent on the regeneration temperature.

### 1 Introduction

Methods to dehumidify air are mainly into 2 ways: the moisture are condensed on the surface of cooling coil which is the refrigeration method, and the moisture are absorbed by desiccant material which is sorption method. Dehumidification using desiccant materials is widely used in industrial process. Dehumidifier in the form of desiccant beds is used in many applications, such as chemical materials separation, and food industries [1]. In the past few years, a number of dehumidifier applications with food and agriculture products have been conducted such as drying of fenugreek green, spray drying of tomato pulp [2, 3, 4]. Silica gel, activated alumina, zeolites, and molecular sieve are the most common solid desiccant [5]. Many investigators have studied in air characteristics during adsorption and desorption process of dehumidifiers. Adsorption capacity depend on the temperature and time of regeneration. An increase in adsorption capacity is found with increase in regeneration temperature and/or regeneration time [6, 7]. Desorption rate increases with increase in inlet air temperature [8]. Air dehumidifier using desiccant bed cannot run without regenerating process of desiccant material. Dehumidification (adsorption) and regeneration (desorption) is required in order to make the process work continuously. From the study reveal, the cyclic operation of

Corresponding author: [ekkapong.ch@kmitl.ac.th](mailto:ekkapong.ch@kmitl.ac.th)

dehumidifier studies have little work. Ramzy et al. [9] studied parameters that affect the cyclic operation of radial flow desiccant bed dehumidifier. It found that humidity of dehumidified air decrease with increase in regeneration temperature. Adsorption time increase as the regeneration temperature increase. Reducing inlet air temperature result in the ability of the bed to adsorb from air increase. Two packed beds of silica gel were utilized to dehumidify air and investigate on the cyclic operation [5]. The mathematical model has been validated using the experimental data. The maximum cycle efficiency was found at regeneration temperature 90-95°C when bed length were between 50 to 300 mm. Increasing temperature of regeneration air exceeds the optimum value does not result in the better dehumidification rate and the cycle efficiency decreases. Banghapour et al. [6] studied the performance of a desiccant dehumidification column under cyclic operating conditions. Cold air and hot air were used for adsorption and regeneration. The water uptake of the desiccant column was calculated. Increasing cycle time leads to increase water uptake. The system works better and greater adsorption when increasing regeneration temperature. The effectiveness of the desiccant column was improved by increasing the hot air velocity. Rogala et al. [10] studied adsorption and desorption characteristics of the fluidised desiccant cooler. They reported that the switching time between adsorption and desorption had a greater impact on the water uptake of bed. The optimum switching time was 350 s. If using switching time lower than optimum value, the hot air for desorption was not properly utilized. If switching time higher than optimum value, it did not significantly improve the desorption but the adsorption was improved. In this work, the cycle time of multilayer desiccant bed column was estimated by the experimental data from single blow of dehumidification and regeneration. Average water removal (dehumidification) rate and regeneration rate were parameters that used in the cycle time selection. The cyclic operation was tested and monitor air humidity ratio of outlet air.



**Fig. 1.** A schematic diagram of the multilayer desiccant bed column test unit.

## 2 Experimental setup

Figure 1 shows the system of the multilayer desiccant bed column test unit. The test unit was composed of a desiccant column and an air humidifier unit. The inner diameter of the

desiccant column was 20 cm and 15 layers of desiccant bed containers were stacked inside. At the bottom of the container was a sieve. An air duct with a diameter of 2.54 cm to allow the air to pass through and between the layers of desiccant container was set at one side of its. The duct in the container was placed alternately on the left and switch to the right side of the succeeding desiccant bed layers. Hence the air flow direction in the desiccant column was a zigzag flow pattern. Humidifier unit was used to adjusted humidity of ambient air by spraying water. Dehumidification test were done by the ambient air pass through the air humidifier unit to adjust humidity ratio before the air was flown in to the desiccant column. Regeneration processes were done by the ambient air pass through the air humidifier unit to adjust humidity and heated to the desired temperature before the air flow in to the desiccant column.

### 3 Analysis of cyclic efficiency

Commercial silica gel size 2-4 mm. were used in this experiment (Power dry, Thailand). Silica gel was dried at 120°C for 12 hours [11] and kept in a close chamber until use. The moisture content of the silica gel was determined with an infrared moisture analyser (MA45 Sartorius, Germany). Silica gel was packed in the desiccant column at 1950 g. Silica gel was portioned out equally to each layer in the column. Dehumidification process, inlet air with humidity ratio 20 g water/kg dry air was dehumidified at an air flow rate of 2.4 m<sup>3</sup>/min. Regeneration process, silica gel with moisture content about 15% db were regenerated by hot air at an air flow rate of 2.4 m<sup>3</sup>/min. Temperature of hot air was 70°C and 90°C. The hot air stream temperature was maintained at the desired temperature before starting the experiment. The relative humidity and temperature of the inlet and outlet air were monitored throughout the experiment with a temperature hygrometer (KT320 KIMO, France).

Dehumidification rate and regeneration rate were the factor to decide the time of cyclic operation. Cyclic operation on a single multilayer desiccant bed column was tested by switching between dehumidification and regeneration with helping of valve 1 and 2. Ambient air was used to test the cyclic process at an air flow rate 2.4 m<sup>3</sup>/min. An amount of adsorbed water and desorbed water were calculated to determine the cyclic operation time.

The difference of outlet humidity ratio between dehumidification and regeneration  $\Delta w$  was calculated, as in Equation (1).

$$\Delta w = w_o - w_i \quad (1)$$

Dehumidification rate and regeneration rate were determined as the product of the mass flow rate and humidity ratio difference between the inlet and outlet air of the multilayer desiccant bed column, as in Equation (2) and (3) [12].

$$\text{Dehumidification rate} = (\dot{m})(w_{i,d} - w_{o,d}) \quad (2)$$

$$\text{Regeneration rate} = (\dot{m})(w_{o,r} - w_{i,r}) \quad (3)$$

Where,  $\dot{m}$  is the mass flow rate of air (kg dry air/min);  $w_i$  is the humidity ratio of inlet air and  $w_o$  is the humidity of the outlet air (g water/kg dry air); subscript d is the dehumidification; and subscript r is the regeneration.

The cyclic efficiency is defined as follows [5],

$$\eta = \frac{\int LH \times \dot{m}_d (w_{i,d} - w_{o,d}) dt}{\int c_a \times \dot{m}_r (T_{ai,r} - T_{amb}) dt} \times 100$$

Where, LH is latent heat of the vapor;  $c_a$  is specific heat of air;  $T_{ai,r}$  is temperature of regenerating air and  $T_{amb}$  is temperature of ambient air.

## 4 Results and discussion

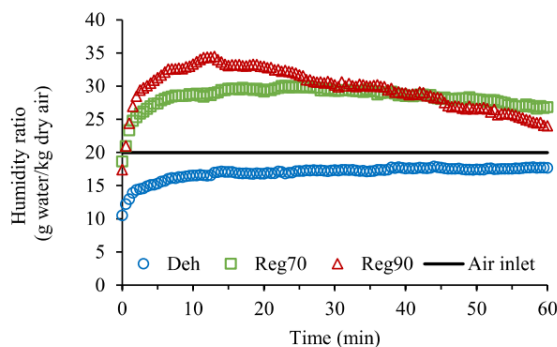
### 4.1 Dehumidification process

The inlet air at ambient condition was passed the humidifier unit to adjust air temperatures of 30-32°C and relative humidity of 67-73%. After humidifying, the humidity ratio of air was controlled to be approximately  $20 \pm 0.36$  g water/ kg dry air before a study of dehumidification and regeneration process in the multilayer desiccant bed column.

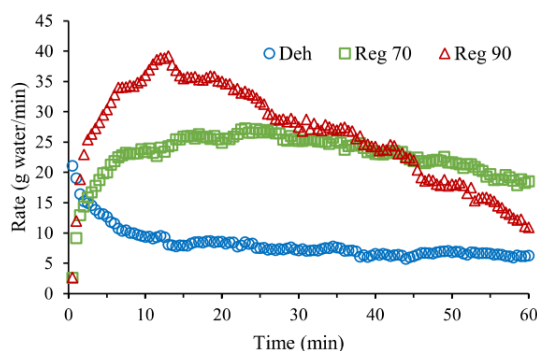
Humidity ratio changes of outlet air during dehumidification process are presented in Figure 2. It can be seen that the humidity ratio of outlet air sharply decreased at the beginning of dehumidification period. Then, it significantly increased within the 30 min of process, and slowly converges to a humidity ratio of inlet air after prolonged dehumidification. The rapid absorption of desiccant at an initial period was because vapor pressure on the desiccant surface is less than the vapor pressure of experimental air. [13] The vapor pressure difference between desiccant surface and air steadily reduced with time. The maximum dehumidification rate was found to be 21.06 g water/min during the first period and decreased continually with time as shown in Figure 3. It indicated that changes in the dehumidification rate exhibited two distinct periods, namely, significant decreasing, and slight decreasing period.

### 4.2 Regeneration process

The humidified air was heated to 70, and 90°C by a heater 2 to regenerate the moist desiccant in the multilayer desiccant bed column. Figure 2 shows the changes in humidity ratio of outlet air during generation process. The humidity ratio of outlet air dramatically increased until reaching the highest value because of increasing temperature in desiccant. And then, the humidity ratio decreased gently in later stages because the moisture content in desiccant decreases. Figure 3 illustrates the changes in regeneration rate undergoing different regeneration temperatures. It was found that regeneration behaviour exhibited two distinct periods, namely, increasing rate, and decreasing rate period. The highest regeneration rates were 27.24 and 39.17 g water/min for the regeneration temperatures of 70, and 90°C, respectively.



**Fig. 2.** Humidity ratio of outlet air during dehumidification (Deh) and regeneration rate at 70°C (Reg70) and 90°C (Reg90).



**Fig. 3.** The dehumidification rate (Deh) and regeneration rate at 70°C (Reg70) and 90°C (Reg90).

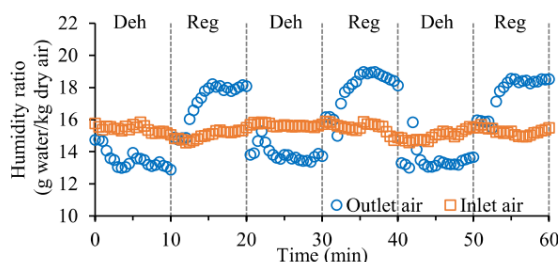
### 4.3 Cyclic efficiency

Cyclic operation of the multilayer desiccant bed column is the continuous dehumidification and regeneration cycles of silica gel. Thus, the cyclic time consists of one cycle of the dehumidification time and regeneration time. The regeneration time for a complete cycle is the time required to remove an amount of absorbed water in desiccant during the dehumidification process. In this study, the regeneration time for a complete cycle was considered to be 10 min and the cyclic time was 20 min.

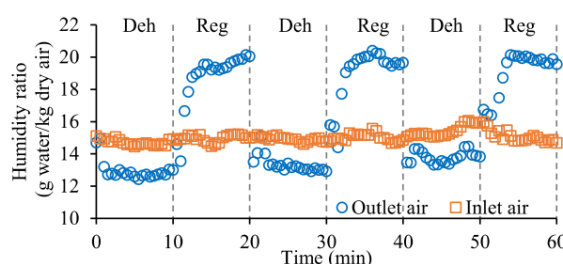
An inlet air humidity of about 15 – 16 g water/kg dry air was feed into the multilayer desiccant bed column. The cycle started with dehumidification mode for 10 min with subsequent 10 min for regeneration, so one cycle takes 20 min. The cyclic processes were run continuously for 60 min. Changes in outlet air humidity ratio during the cyclic operation undergoing different regeneration temperatures were shown in Figure 5 and Figure 6. It was observed that the humidity ratios of outlet air during dehumidification process were not significantly different when desiccant was regenerated at the air temperatures of 70°C and 90°C. However, trends of outlet air humidity ratio during the regeneration process increased with an increase in regeneration temperature.

For the second and the third cycles, the dehumidification process began after starting the cycles for a moment. Humidity ratio dropped instantly at the first minute of the cycle because the direction of air inlet valves were changed. Similar characteristics were also observed in packed bed and radial flow bed [5,9]. Moisture ratio of ambient air was reduced by about 2.5 g water/kg dry air which was lower than the previous dehumidification test because air inlet humidity ratio observed in the cyclic operation was lower. Both regeneration temperatures can regenerate silica gel and make the system work continuously.

For the efficiency analysis during the cyclic operation, the regeneration process using hot air at 70°C and 90°C had the efficiency values of 11% and 7%, respectively. Regeneration rate at 90°C was higher than that at 70°C while the cyclic efficiency of the former was lower. More energy was required to raise higher regeneration temperature while the outlet air humidity ratios of both temperatures were nearly equal. This result agreed with Ramzy et al. [5], efficiency of the dehumidification systems reached the maximum value at the optimum regeneration temperature. If regenerating air temperature was higher than the optimum value, it did not increase the dehumidification rate and caused lower cyclic operation efficiency.



**Fig. 5.** Variation of humidity ratio of cyclic operations with regeneration temperature of 70°C (Deh: Dehumidification, Reg: Regeneration).



**Fig. 6.** Variation of humidity ratio of cyclic operations with regeneration temperature of 90°C (Deh: Dehumidification, Reg: Regeneration).

## 5 Conclusions

Changes in humidity ratio of outlet air during the dehumidification and regeneration process were studied. When the multilayer desiccant bed column was operated in a cyclic process of alternate dehumidification and regeneration, the cyclic efficiency was analyzed. The following conclusion can be summarized:

1. The maximum dehumidification rate was 21.06 g water/min at the beginning of dehumidification process. Dehumidification rate decreased with time.
2. During the regeneration process, the maximum regeneration rates were 27.24 g water/min at the regeneration temperature of 70°C and 39.17 g water/min at the regeneration temperature of 90°C.
3. In the cyclic operation, the highest cyclic efficiency was obtained at the regeneration temperature of 70°C. It indicated that the regeneration temperature had an effect on the cyclic efficiency.

This research project was supported by the National Research Council of Thailand, fiscal year of 2016.

## References

1. M.M. Awad, A. K. Ramzy, A.M. Hamed, H.M. Bekheit, *Appl. Therm. Eng* **28**, 75 (2008)
2. A. M. Goula, K. G. Adamopoulos, *J Food Eng* **66**, 25 (2005).
3. A. K. Attkan, N. Kumar, Y. K. Yadav, *IOSR-JESTFT* **8**, 43 (2014)
4. M. Djaeni, D. A. Sari, *Procedia Environment Science* **23**, 2 (2015)

5. A. K. Ramzy, R. Kadoli, A. Babu T. P., *Energy* **56**, 8 (2013)
6. B. Baghapour, M. Rouhani, M. Bahrami, *Experimental design and performance analysis of a desiccant dehumidification column under cyclic operating conditions*, in Proceedings of the IX Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerator, Power Sources”, 7 -10 Sep 2015, Minsk, Belarus (2015)
7. K. S. Chang, H. C. Wang, T. W. Chung, *Appl. Therm. Eng* **24**, 735 (2004)
8. A. E. Kabeel, *RENEW ENERG* **34**, 255 (2009)
9. A. K. Ramzy, A. M. Hamed, M. M. Awad, M. M. Bekheit, *JETR* **2**, 96 (2010)
10. Z. Rogala, P. Kolasinski, P. Blasiak, *Energies* **11**, 1597 (2018)
11. M. A. Rady, *Heat Mass Transfer* **45**, 545 (2009)
12. W. Yang, H. Deng, Z. Wang, X. Zhao, S. He, *Energies* **10**, 1369 (2017)
13. A.M. Hamed, W.R. Abd-Elrahman, S.H. El-Emam, M.M. Awad, *Energy Convass Manag* **65**, 262 (2013)
14. S.K. Yeboah, J. Darkwa, *Renew. Sustain. Energy Rev.* **58**, 1500 (2016)

## Effect of different desiccant bed designs in a desiccant column on dehumidification performance

Prueksa Sawardsuk<sup>1</sup>, Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen<sup>2</sup>,  
Ekkapong Cheevitsopon<sup>1\*</sup>

(1. Department of Food Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand;  
2. Department of Agricultural Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand)

**Abstract:** The main objective of this study was to develop a desiccant column with enhanced air dehumidification. Multilayer desiccant beds with and without air ducts were designed in the column. The desiccant material was silica gel. Air dehumidification characteristics and psychrometric properties of air of various desiccant bed designs were investigated. Dehumidification rate, percentage adsorbed water, desiccant column effectiveness of each design were evaluated at an air flow rate of 1.2 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>, where the control was a single layer packed bed design. Both kinds of multilayer bed designs (with and without air ducts) exhibited a significantly better dehumidification rate, percentage adsorbed water, and desiccant column effectiveness than the control. The experimental dehumidification psychrometric process was consistent with the theoretical adiabatic dehumidification process. The percentage dehumidification rate as time passed for every multilayer bed design was better than that of the control. The 15-layer bed design with air ducts exhibited the highest values of about 15.73 g water min<sup>-1</sup> dehumidification rate, 51.59% dehumidification efficiency, and 0.998 desiccant column effectiveness. This design shows good dehumidification performance and can be simply applied to many processes requiring air dehumidification.

**Keywords:** air dehumidifier, desiccant column, multilayer desiccant bed, silica gel

**Citation:** S. Prueksa., J. S. Jongyingcharoen and E. Cheevitsopon. 2022. Effect of different desiccant bed designs in a desiccant column on dehumidification performance. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 24 (1):207-216.

### 1 Introduction

The general dehumidifier designs that have been long used in industrial and residential applications are desiccant column and desiccant wheel (Chang et al., 2004; Rady, 2009). Column design provides a greater dehumidification

capacity than wheel design (Zouaoui et al., 2016a; Abou-Ziyan et al., 2017). It has been applied to several processes requiring dehumidified air such as food drying (Attkan et al., 2014; Jedlińska et al., 2019; Rashidi et al., 2021; and Shewale et al., 2021), fuel combustion (Kucuk et al., 2003), air conditioning (Yang et al., 2017), corrosion prevention in electronics industry, seed storage and pharmaceutical cleanrooms etc. (Munters Corporation, 2019). In selecting a proper desiccant, adsorbent-adsorbate pairs are considered. Silica gel and zeolite pairs have been long used as desiccant material in industrial and residential applications because of their good water adsorption

Received date: 2020-10-26 Accepted date: 2021-05-21

\* **Corresponding author:** Ekkapong Cheevitsopon, Ph.D., Assistant Professor of Department of Food Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand. Email: [ekkapong.ch@kmitl.ac.th](mailto:ekkapong.ch@kmitl.ac.th). Tel: +66 23298356, Fax: +66 23298356 ext. 13.

capacity. When the desiccant absorbs moisture for a period of time, its adsorption ability is reduced, and regeneration is needed to remove the absorbed moisture. Silica gel needs a lower regeneration temperature than zeolite does. Silica gel regeneration temperature is less than 100°C (Chang et al., 2005; Ramzy et al., 2010). Many researchers have developed different designs of desiccant bed to mainly improve its dehumidifier efficiency as well as to improve some of its characteristics such as high adsorption capacity, low pressure drop and shorter regeneration time.

The design of desiccant bed to reduce air humidity found in previous studies take many forms such as packed bed (Ramzy et al., 2011), hollow bed (Awad et al., 2008; Balthazar et al., 2019), multilayer bed (Abou-Ziyan et al., 2017) and multi-stage packed bed (Yang et al., 2017, 2018), etc. Desiccant-coated bed has been used to reduce air humidity in air conditioning systems (Chang et al., 2005; Shamim et al., 2018). By the hollow bed model, it was found that increasing the ratio of outer and inner diameters increased the dehumidification capacity (Awad et al., 2008). Reducing the bed thickness causes the pressure drop to be lower (Awad et al., 2008; Abou-Ziyan et al., 2017; Shamim et al., 2018) and has a positive effect on heat exchange during the regeneration process as well. Reduced bed thickness also reduces regeneration time (Chang et al., 2005). Additionally, Yang et al. (2018), Yeboah and Darkwa (2021) added a cooling unit to reduce the temperature of the desiccant bed from heat of adsorption during the adsorption process, which led to an increase in the adsorption rate of the desiccant. However, in the study of dehumidifier efficiency, the condition of the inlet air should be kept constant throughout the experimental process (Chang et al., 2005; Awad et al., 2008; Kabeel, 2009; Abou-Ziyan et al., 2017; and Yang et al., 2017).

Factors of inlet air that affect the performance of dehumidifier are the amount of water in the air, temperature, and velocity. The amount of water or the temperature of the inlet air increase result in reduced dehumidification capacity (Abou-Ziyan et al., 2017). As

the inlet air velocity increases, the desiccant exposure time is less, and the dehumidification capacity is also reduced (Zouaoui et al., 2016b). These literatures were utilized for the design of dehumidifier in this research to increase the efficiency of air dehumidification.

However, a design with multilayers of solid desiccant and air ducts in the desiccant container has never been developed before. The objectives of this study were to develop and evaluate such designs. A design of multilayers of desiccant with no air duct and a packed bed design were compared to the developed design. Several properties of the outlet air of each design were monitored and determined.

## 2 Materials and methods

### 2.1 Experiment setup

Figure 1(a) shows the experimental set-up of the desiccant column test unit. The unit consists of two main components: the inlet air controller and the desiccant column. The inlet air controller is composed of a heater and a water spray chamber. It was used to control the properties of the inlet air prior to its flowing into the desiccant bed (Kabeel, 2009; Ramzy et al., 2013; Abou-Ziyan et al., 2017). For the desiccant column, it can be changed in any designs. In this study, the designs of the desiccant bed are shown in Figure 1(b). The diameter of every desiccant bed was 20 cm, with a sieve at the bottom of the container. The container of a desiccant bed was of 2 types: with air duct (A) and without air duct (B). The bed container with an air duct had a duct with a diameter of 2.54 cm to allow air to pass through and between the layers of desiccant bed. The ducts in the A container were on alternating left and right sides of the succeeding desiccant bed layers. Hence the air flow direction in the A container was a zigzag flow pattern. The multilayer desiccant bed column either had 5, 10 or 15 layers. Thus, silica gel was packed in the desiccant column in 6 different treatments including 5 layers with air duct (5A); 10 layers with air duct (10A); 15 layers with air duct (15A); 5 layers without air duct (5B); 10 layers without air duct (10B); and

15 layers without air duct (15B). Packed bed (C) was used as the control column. Commercial silica gel (2–4 mm diameter, Power dry, Thailand) was used as a desiccant. Prior to use, silica gel was dried at 120°C for 12 hours (Rady, 2009; Yang et al., 2018) and kept in a close chamber until use. The moisture content of the silica gel was determined with an infrared moisture analyser (MA45; Sartorius, Germany). All bed designs were filled with the same total quantity of silica gel at 1950 g. Silica gel was portioned out equally to each layer in a multilayer bed.

### 2.2 Experimental process

All desiccant bed designs dehumidified the inlet air under the same conditions. The humidity ratio of ambient air was adjusted to 22 g water kg<sup>-1</sup> dry air by the inlet air controller. The temperature of the inlet air was controlled by a heater to be about 31°C. The inlet air was sucked into the desiccant column by a blower at an air flow rate of 1.2 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>. The air mass flow rate was calculated from the average air velocity in the inlet air duct (V) using Equation 1 (Abou-Ziyan et al., 2017).

$$\dot{m} = \rho AV \quad (1)$$

where  $\dot{m}$  is the mass flow rate of air (kg dry air min<sup>-1</sup>),  $\rho$  is the air density (kg dry air m<sup>-3</sup>), A is the cross-sectional area of the inlet air duct (m<sup>2</sup>), and V is the air velocity (m min<sup>-1</sup>).

The relative humidity and temperature of the inlet and outlet air were monitored throughout the experiment with a temperature hygrometer (KT320; KIMO, France). The air dehumidification process or the desiccant adsorption process was totally run for 60 min. The experiments were conducted in Pathum Thani province, Thailand (latitude 14.0895252, longitude 100.5919529) from February to April 2019.

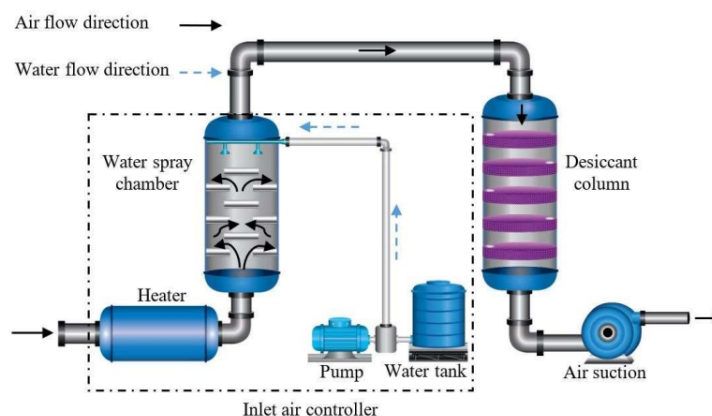
### 2.3 Evaluation of dehumidification performance

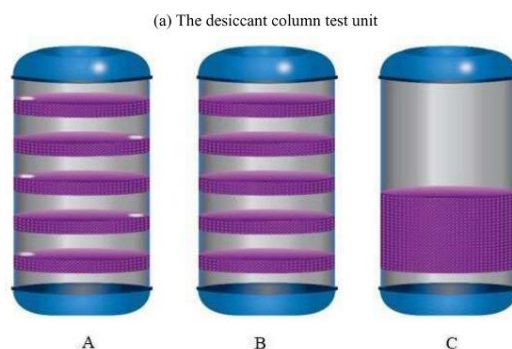
Dehumidification performance of the desiccant column was defined in terms of the rate and efficiency of air dehumidification. Dehumidification rate and dehumidification efficiency were calculated using Equations 2 and 3, respectively (Abou-Ziyan et al., 2017; Yang et al., 2017).

$$\text{Dehumidification rate (g water min}^{-1}\text{)} = \dot{m}(w_i - w_o) \quad (2)$$

$$\text{Dehumidification efficiency (\%)} = \frac{w_i - w_o}{w_i} \times 100 \quad (3)$$

where  $\dot{m}$  is the mass flow rate of air (kg dry air min<sup>-1</sup>), and  $w_i$  and  $w_o$  are the humidity ratio of inlet air and outlet air (g water kg<sup>-1</sup> dry air).





(b) The different desiccant bed designs of this study: multilayer bed with air duct (A); multilayer bed without air duct (B); and packed bed (C)

Figure 1 Schematic diagram of the desiccant column test unit

## 2.4 Analysis of psychrometric dehumidification process and effectiveness of the desiccant column

Dehumidification of air is an adiabatic process that is no change in heat content of air. However, deviation in the enthalpy could be observed. As described by Mandegari and Pahlavanzadeh (2009), this enthalpy deviation can be caused by isosteric heat, heat accumulation in a desiccant material and bed, and heat transfer from the regeneration process. In this way, the psychrometric process of air during the dehumidification was calculated. The effectiveness of the desiccant column was analyzed with respect to the enthalpy deviation from the adiabatic condition as in Equation 4 (Mandegari and Pahlavanzadeh, 2009; Suvanvisan et al., 2018). If the desiccant column was adiabatically operated, the effectiveness value would reach to 1.

$$\text{Desiccant column effectiveness} = 1 - \left| \frac{h_{\text{out}} - h_{\text{ideal}}}{h_{\text{ideal}}} \right| \quad (4)$$

where  $h_{\text{out}}$  is the enthalpy of outlet air ( $\text{kJ kg}^{-1}$  dry air), and  $h_{\text{ideal}}$  is the enthalpy of the adiabatic condition ( $\text{kJ kg}^{-1}$  dry air).

## 2.5 Statistical data analysis

The experiments were conducted in two replicates. The data were statistically analyzed by one-way analysis of variance (ANOVA) and Duncan's multiple range test at a significance level of 0.05.

## 3 Results and discussion

### 3.1 Dehumidified air characteristics

The incoming air prior pass through the desiccant column was adjusted to humidity ratio at  $22 \text{ g water kg}^{-1}$  dry air by air humidifier chamber. Figure 2 shows the variations in humidity ratio as time passed. At the beginning of the dehumidification process, the humidity ratio of the outlet air was the lowest because water vapor got adsorbed in the desiccant bed column during the system setup and the moisture content of the silica gel was at the lowest (Balthazar et al., 2019). The humidity ratio of the outlet air clearly and rapidly increased for the first 15 min. After that, the increase was gradual, but the humidity ratio of the outlet air was still lower than that of the inlet air as shown in Figure 2(a) and 2(b). Multilayer bed 15A was able to reduce the humidity ratio of inlet air by about 44% in the first minute and 15% in 30 min. Silica gel had a low moisture content at the beginning of the process and was able to adsorb a lot of moisture from the air. As time passed, its adsorption ability decreased and the humidity ratio of the exit air increased. The increasing humidity ratio of exit air with time follows the same trend as those observed in a packed bed, a thin-multilayer activated alumina bed, or a multilayer desiccant bed (Abou-Ziyan et al., 2017; Sawardsuk et al., 2018; Balthazar et al., 2020; Zallama et al., 2020).

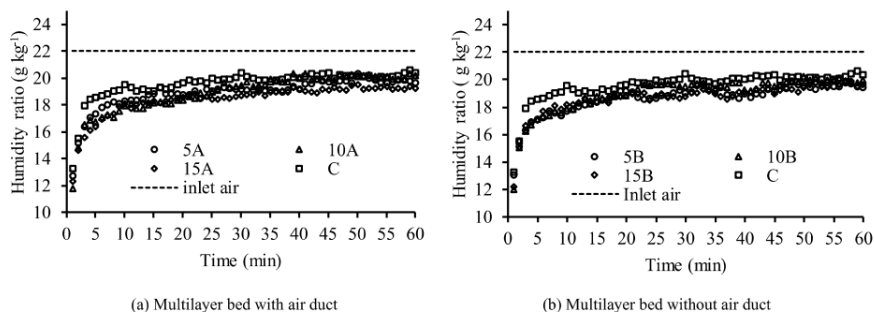


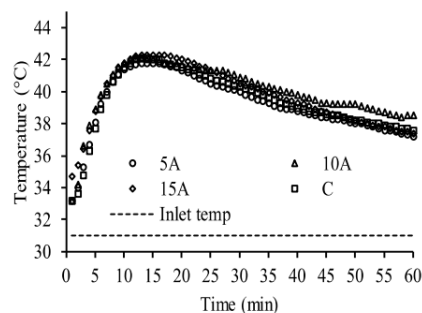
Figure 2 Humidity ratio of outlet air versus dehumidification time of the desiccant column with different bed designs

Shown in Figure 3(a) and 3(b), the temperature difference between the inlet and outlet air at the start of the dehumidification process was small, then the outlet air temperature rose with time and reached the highest value at about 15 min after the start and then declined with time. The variation of the outlet air temperature followed the same trend as those observed in a packed bed or a radial flow bed (Awad et al., 2008; Ramzy et al., 2013; Zallama et al., 2020). The outlet air temperature during the first 15 min was higher than those of the rest of the dehumidification period. This was due to a higher amount of water vapor getting adsorbed in the initial period, which generated more heat of adsorption (Awad et al., 2008; Yeboah and Darkwa, 2021). This result agrees well with the low relative humidity of the exit air in the first 15 min. The maximum temperature difference between the outlet and inlet air was about 10°C.

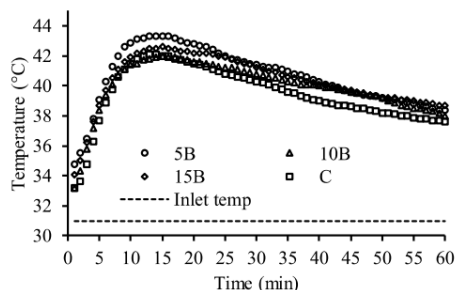
### 3.2 Dehumidification rate

For every design of multilayer desiccant bed column, the dehumidification rate was the highest in the first minute, then it gradually decreased and plateaued out, as shown in Figure 4. The initial decreasing dehumidification rate with time was due to the increased moisture accumulation in silica gel (Zouaoui et al., 2016b). The difference in the dehumidification rates between that in the first minute and that at 30 min was about 10 g water min<sup>-1</sup>. After 30 min, the dehumidification rate of every bed type stayed nearly constant. In Figure 4, it can be observed that

the dehumidification rates of all multilayer bed columns were higher than that of the packed bed, at about 3 g water min<sup>-1</sup>. The dehumidification rates of multilayer bed 15A and 15B were significantly higher than that of packed bed as shown in Figure 4(c) ( $p \leq 0.05$ ). By the way, multilayer bed 15A gave the highest average dehumidification rate (Average dehumidification rate 15A  $5.22 \pm 2.18$  g water min<sup>-1</sup>, 15B  $4.89 \pm 2.04$  g water min<sup>-1</sup>). In dehumidification process by a desiccant column, the desiccant must be regenerated after it is used for a while. For 5-min dehumidification, the dehumidification rate of 15 layers columns was higher than that of a column with a fewer number of layers. Increasing the number of bed layers tended to increase the dehumidification rate. These results were like that of a thin-multilayer activated alumina bed type (Abou-Ziyan et al., 2017).



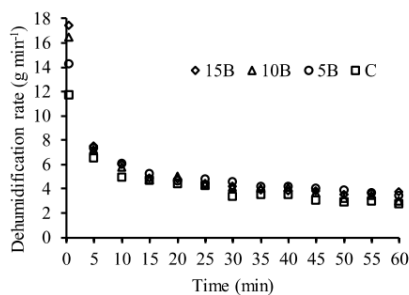
(a) Multilayer bed with air duct



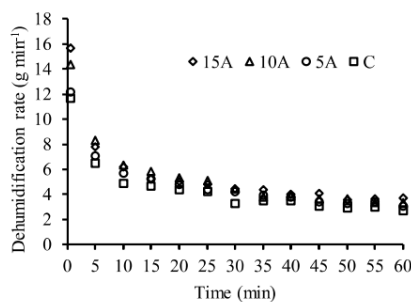
(b) Multilayer bed without air duct

Figure 3 Temperature of outlet air versus dehumidification time of the desiccant column with different bed designs

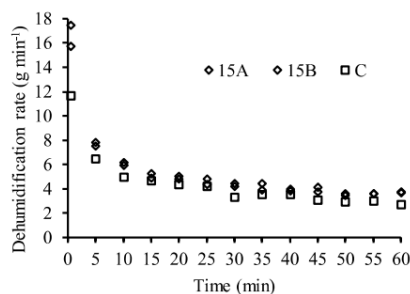
The multilayer bed type exhibited a lower value of the dehumidification rate reduction than the packed bed type did. It can be observed that, in the first 30 min, the dehumidification rate reduction differed clearly between the multilayer bed and packed bed types. At 60 min, the dehumidification rate reduction values of all type A beds were nearly the same. The number of layers had a slight influence on the dehumidification rate reduction. A low dehumidification rate reduction value resulted in a longer dehumidification process.



(a) Multilayer bed with air duct



(b) Multilayer bed without air duct



(c) 15 layers bed designs compare with control bed

Figure 4 Dehumidification rates of the desiccant column with different bed designs

### 3.3 Dehumidification efficiency

The amount of adsorbed water vapor was calculated from the difference between the humidity ratios of inlet and outlet air. Such percentage amount was defined as dehumidification efficiency. Figure 5 shows the effect of desiccant bed design on dehumidification efficiency for a period of 60 min. The dehumidification efficiency of every bed design followed the same trend. The dehumidification efficiency decreased with time during the first 30 min. After 30 min, the dehumidification efficiency remained almost constant. This result agrees with a finding from a study by Yang et al. (2017) that used silica gel to

dehumidify air. In this study, multilayer bed 15A exhibited the highest dehumidification efficiency of 51.59% at the beginning of the dehumidification process. In addition, the average dehumidification efficiency was about 17%. The dehumidification efficiencies of all multilayer bed designs were higher than that of the packed bed design. The highest difference in dehumidification efficiency between bed 15A and bed C was 7.44%. At 60 min, the dehumidification rates for all bed types were nearly the same. The multilayer desiccant bed type 15A with air duct achieved a higher average efficiency than type 15B without air duct.

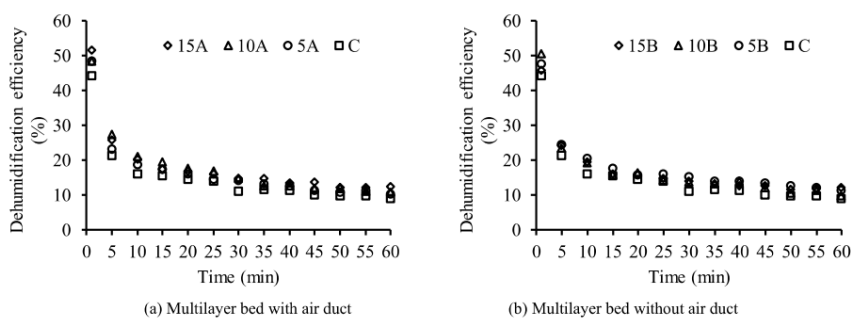


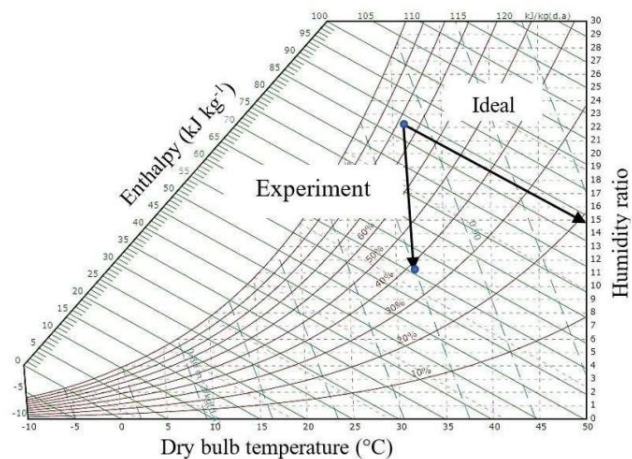
Figure 5 Dehumidification efficiency of the desiccant column with different bed designs

### 3.4 Psychrometric dehumidification process and desiccant column effectiveness

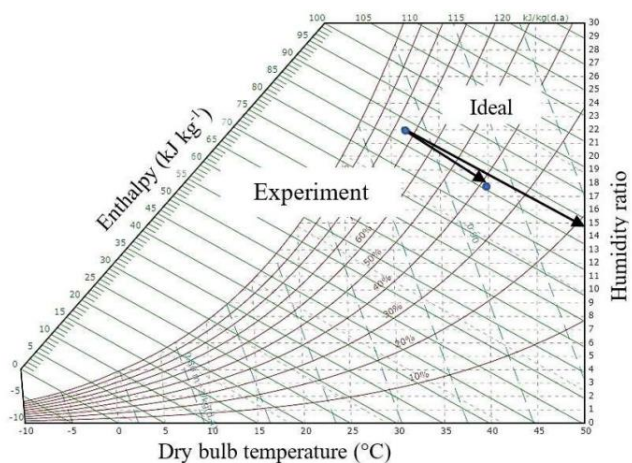
Psychrometric dehumidification processes of the desiccant column with multilayer bed 15A at the dehumidification time of 1 min and 10 min are shown as representatives in Figure 6. The other bed designs exhibited the same trend of the dehumidification process on psychrometric chart. At the first minute of dehumidification, large variation was observed between the experimental and adiabatic process lines. As shown in the dehumidified air characteristics, the humidity ratio and temperature of the outlet air were both the lowest at the beginning. Heat of air was lost at this time with about  $33 \text{ kJ kg}^{-1}$  dry air reduction of enthalpy value. This could be the result of conduction heat transfer occurring between the desiccants themselves and between the desiccants and the walls of the column beds (Long and Guan, 2012) as the desiccants and the column was at ambient temperature during the first period of the process. Additionally, convective heat transfer between the desiccant column and process air considerably occurs during this period because of high temperature gradient (Laguerre et al., 2006). In contrast, after a 10-min operation, the outlet air was approximately at the highest temperature (see Figure 3) presenting that the heat of adsorption, which was generated by the desiccants, was not much transferred to the test unit. During this period, the experimental and adiabatic process lines were almost aligned.

Based on the variation of the experimental dehumidification process and the theoretical adiabatic dehumidification process, the desiccant column effectiveness was calculated for each desiccant bed design (Figure 7). The effectiveness values

were the lowest at the first minute and then raised to almost 1 and kept constant at the highest effectiveness for the rest of the process. The desiccant column effectiveness observed in this study was consistent with the desiccant effectiveness of desiccant wheel reported by Mandegari and Pahlavanzadeh (2009) and Suvanvisan et al. (2018).



(a) 1 min



(b) 10 min

Figure 6 Representative psychrometric dehumidification process of the desiccant column with multilayer bed 15A. (Psychrometric Chart adapted from FlyCarpet Inc (2020))

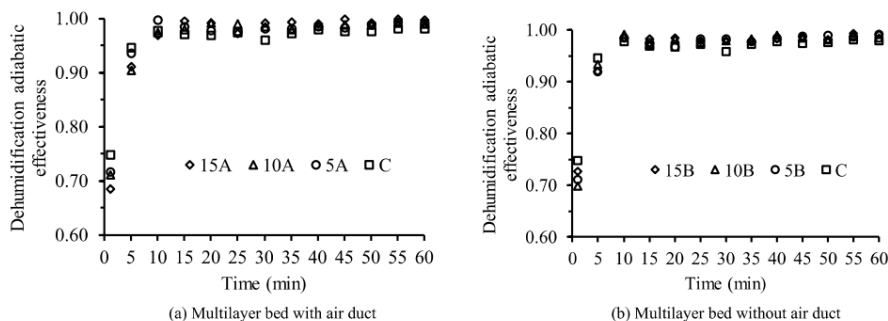


Figure 7 Desiccant column effectiveness of the desiccant column with different bed designs

#### 4 Conclusions

Various multilayer desiccant bed designs were evaluated. The dehumidified air reached the lowest humidity in the first minute; the outlet humidity ratio then increased slightly with time. The temperature difference between the inlet and outlet air could be as high as 10°C, a distinct benefit that reduces energy expenditure in drying food. The results show that different designs exerted different effects on dehumidification rate and dehumidification efficiency. A 15-layer desiccant column in a container with air duct design exhibited the highest average dehumidification rate, dehumidification efficiency, and desiccant column effectiveness of 15.73 g water min<sup>-1</sup>, 51.59%, and 0.998, respectively. The main dehumidification period was 30-min long. Multilayer bed designs provided better results than the packed bed design. The dehumidification efficiency of the multilayer bed design was 7.44% higher than that of the packed bed design. Increasing the number of bed layers tended to increase dehumidification rate and dehumidification efficiency in a multilayer bed design. The experimental dehumidification process was aligned well adiabatic dehumidification process. The 15-layer desiccant bed with air duct design was better than other bed designs in terms of dehumidification rate and efficiency.

#### Acknowledgement

This research project was supported by the National Research Council of Thailand, fiscal year of 2016.

#### References

- Abou-Ziyan, H., D. Abd El-Raheim, O. Mahmoud, and M. Fatouh. 2017. Performance characteristics of thin-multilayer activated alumina bed. *Applied Energy*, 190(c): 29-42.
- Attkan, A. K., N. Kumar, and Y. K. Yadav. 2014. Performance evaluation of a dehumidifier assisted low temperature based food drying system. *IOSR Journal of Environment Science, Toxicology and Food Technology*, 8(1): 43-49.
- Awad, M. M., A. K. Ramzy, A. M. Hamed, and H. M. Bekheit. 2008. Theoretical and experimental investigation on the radial flow desiccant dehumidification bed. *Applied Thermal Engineering*, 28(1): 75-85.
- Balthazar, P., M. A. Ismail, L. C. Khai, M. I. Ramdan, N. M. Mazlan, and H. B. Mamat. 2019. Adsorption characteristic of a two layer hollow cylindrical silica bed. In *Proceedings of International Conference of Aerospace and Mechanical Engineering 2019*, 493-500. Penang, Malaysia, 20-21 November.
- Balthazar, P., M. A. Ismail, M. N. M. Nasir, H. Mamat, and M. I. Ramdan. 2020. Experimental investigation on a desiccant silica bed for dehumidification. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 73(2): 1-11.
- Chang, S., H. Wang, and T. Chung. 2004. Effect of regeneration conditions on the adsorption dehumidification process in packed silica gel beds. *Applied Thermal Engineering*, 24(5-6): 735-742.
- Chang, S., M. Chen, and T. Chung. 2005. Effect of the thickness and particle size of silica gel on the heat and mass transfer performance of silica gel-coated bed for air-conditioning adsorption systems. *Applied Thermal Engineering*, 25(14-15): 14-21.

- 2230-2340.
- FlyCarpet Inc. 2020. Free Online Interactive Psychrometric Chart. Available at: <http://www.flycarpet.net/en/psyonline>. Accessed 20 October 2020.
- Jedlińska, A., K. Samborska, A. Wiczorek, A. Wiktor, E. Ostrowska-Ligeza, W. Jamróż, K. Skwarczyńska-Maj, D. Kielczewski, L. Błażowski, M. Tułodziecki, and D. Witrowa-Rajchert. 2019. The application of dehumidified air in rapeseed and honeydew honey spray drying - Process performance and powders properties considerations. *Journal of Food Engineering*, 245: 80-87.
- Kabeel, A. E. 2009. Adsorption - desorption operation of multilayer desiccant packed bed for dehumidification applications. *Renewable Energy*, 34(1): 255-265.
- Kucuk, A., Y. Kadioglu, and M. S. Gulabglu. 2003. A study of spontaneous combustion characteristics of a Turkish lignite: particle size, moisture of coal, humidity of air. *Combustion and Flame*, 133(3): 255-261.
- Laguette, O., S. B. Amara, and D. Flick. 2006. Heat transfer between wall and packed bed crossed by low velocity airflow. *Applied Thermal Engineering*, 26(16): 1951-1960.
- Long, X., and Y. Guan. 2012. Measurement of diffusivity and thermal parameters of gas adsorption with a volumetric method. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(18): 6502-12.
- Mandegari, M. A., and H. Pahlavanzadeh. 2009. Introduction of a new definition for effectiveness of desiccant wheels. *Journal of Chemical Engineering*, 34(6): 797-803.
- Munters Corporation. 2019. The Dehumidification Handbook. Available at: <https://www.munters.com/globalassets/documents/airt/solutions/the-dehumidification-handbook---third-edition.pdf>. Accessed 19th May 2021.
- Rady, M. A. 2009. Experimental and numerical investigations on the performance of dehumidifying desiccant beds composed of silica-gel and thermal energy storage particles. *Heat Mass Transfer*, 45(5): 545-561.
- Ramzy, A. K., A. M. Hamed, M. M. Awad, and M. M. Bekheit. 2010. Theoretical investigation on the cyclic operation of radial flow desiccant bed dehumidifier. *Journal of Engineering and Technology Research*, 2(6): 96-110.
- Ramzy, A. K., R. Kadoli, and T. P. A. Babu. 2011. Improved utilization of desiccant material in packed bed dehumidifier using composite particles. *Renewable Energy*, 36(2): 732-742.
- Ramzy, A. K., R. Kadoli, T. P. Ashok Babu. 2013. Experimental and theoretical investigation on the cyclic operation of TSA cycle for air dehumidification using packed bed of silica gel particles. *Energy*, 56: 8-24.
- Rashidi, M., A. Arabhosseini, H. Samimi-Akhijahani, and A. M. Kermani. 2021. Acceleration the drying process of oleaster (*Elaeagnus angustifolia* L.) using reflectors and desiccant system in a solar drying system. *Renewable Energy*, 171(2): 526-541.
- Shewale, S. R., D. Rajoriya, M. L. Bhavya, and H. U. Hebbar. 2021. Application of radiofrequency heating and low humidity air for sequential drying of apple slices: Process intensification and quality improvement. *LWT-Food Science and Technology*, 135(2): 109904.
- Sawardsuk, P., J. S. Jongyingcharoen, and E. Cheevitsopon. 2018. Experimental investigation of air characteristics during dehumidification in the multilayer desiccant bed column system. In *MATEC Web of Conferences*, 192: 03012. Phuket, Thailand, 4-7 July.
- Shamim, J., W. Hsu, K. Kitaoka, S. Paul, and H. Daiguji. 2018. Design and performance evaluation of a multilayer fixed-bed binder-free desiccant dehumidifier for hybrid air-conditioning systems: Part i-experimental. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 116(4A): 1361-1369.
- Suvanvisan, P., E. Cheevitsopon, and J. S. Jongyingcharoen. 2018. Study on psychrometric properties of air in a hot air drying system combined with a desiccant wheel. *TSAE Journal*, 24(1): 6-12.
- Yang, W., H. Deng, Z. Wang, X. Zhao, and S. He. 2017. Performance investigation of the novel solar-powered dehumidification window for residential buildings. *Energies*, 10(9): 1369.
- Yang, W., J. Ren, Z. Lin, Z. Wang and X. Zhao. 2018. Study on dehumidification performance of a multi-stage internal cooling solid desiccant adsorption packed bed. *Energies*, 11(11): 3038.
- Yeboah, S. K., and J. Darkwa. 2021. Experimental investigation into the integration of solid desiccant packed beds with oscillating heat pipes for energy efficient isothermal adsorption processes. *Thermal Science and Engineering Progress*, 21(14-15): 100791.
- Zallama, B., L. Zili-Ghedira, and S. B. Nasrallah. 2020. Performance of a new desiccant bed using phase change material. In *MATEC Web Conference*, 330: 01015. Hammamet, Tunisia, 23-26 April.
- Zouaoui, A., L. Zili-Ghedira, and S. B. Nasrallah. 2016a. Open solid desiccant cooling air systems: a review and comparative study. *Renew Sustain Energy*, 54: 889-917.
- Zouaoui, A., L. Zili-Ghedira, and S. B. Nasrallah. 2016b. Experimental investigation of air dehumidification and regeneration operations using packed bed of silica gel particles. *International Journal of Heat and Technology*, 34(1): 103-109.