

การออกแบบและศึกษาสมรรถนะของหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี
DESIGN AND PERFORMANCE OF A RADIAL-FLOW DESICCANT COLUMN



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การออกแบบและศึกษาสมรรถนะของหอดูดาวความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี

DESIGN AND PERFORMANCE OF A RADIAL-FLOW DESICCANT COLUMN



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND PERFORMANCE OF A RADIAL-FLOW DESICCANT COLUMN

CHAIYAPAN LAOPAISAN

NAPIDA ARTKAMON

NISANART THANGMANKHUNNATHAM

BUSARAT NUNTACHAT



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและศึกษาสมรรถนะของหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี

Design and performance of a radial-flow desiccant column

นักศึกษาผู้จัดทำโครงการ

- | | | |
|-------------------|-----------------|-----------------------|
| 1. นายชัยพันธ์ | เล่าไพศาล | รหัสนักศึกษา 57010304 |
| 2. นางสาวนพิตา | อาจกมล | รหัสนักศึกษา 57010653 |
| 3. นางสาวนิตานาถ | ตั้งมั่นคุณธรรม | รหัสนักศึกษา 57010689 |
| 4. นางสาวบุษรัตน์ | นันทะชาติ | รหัสนักศึกษา 57010709 |

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.เอกสิทธิ์ ศรีธรรม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการ	การออกแบบและศึกษาสมรรถนะของหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี	
นักศึกษา	นายชัยพันธ์	เล่าไพศาล
	นางสาวนพิตา	อาจมล
	นางสาวนิศานาถ	ตั้งมั่นคุณธรรม
	นางสาวบุษรัตน์	นันทะชาติ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.เอกสิทธิ์	ศรีธรรม
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
ภาควิชา	วิศวกรรมอาหาร	
ปีการศึกษา	2560	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและศึกษาสมรรถนะของหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมีสำหรับระบบอบแห้งแบบลมร้อนโดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดูดความชื้น เบื้องต้นทำการศึกษาลักษณะการไหลของอากาศโดยใช้โปรแกรม SOLIDWORKS เพื่อออกแบบแผ่นกั้นอากาศภายในหอดูดความชื้นสามรูปแบบได้แก่ แบบไม่มีแผ่นกั้น แบบแผ่นกั้นวงแหวน และแบบแผ่นกั้นแบ่งส่วน จากการทดลองพบว่าหอดูดความชื้นแบบแผ่นกั้นวงแหวนมีการกระจายตัวของอากาศที่ไหลผ่านสม่ำเสมอที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองการดูดความชื้นของซิลิกาเจลในชั้นต่างๆ หอดูดความชื้นแบบนี้ยังให้อัตราการดูดความชื้นสูงที่สุด และถูกเลือกใช้ในการทดลองการคายความชื้นที่อุณหภูมิ 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส ข้อมูลการทดลองการคายความชื้นอธิบายได้ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแบบจำลองของ Page เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุด ($R^2 = 0.95 \pm 0.01$) แต่ให้ค่าไคกำลังสอง และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุด ($\chi^2 = 0.003 \pm 0.0007$, $RMSE = 1.27 \pm 0.18$) ค่าคงที่ของแบบจำลอง $k(T)$ อยู่ในช่วง 0.09-0.17 และค่าพลังงานกระตุ้นซึ่งคำนวณจากความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการอาร์เรเนียส (E_a) ของ $k(T)$ มีค่าเท่ากับ 21.61 กิโลจูลต่อโมล

Project Title	Design and performance of a radial-flow desiccant column	
Students	Mr. Chaiyapan	Laopaisan
	Miss Napida	Artkamon
	Miss Nisanart	Thangmankhunnatham
	Miss Busarat	Nuntachat
Project advisor	Dr.Eakasit	Sritham
Degree	Bachelor of Engineering	
Program	Food Engineering	
Academic year	2017	

ABSTRACT

This project was aimed at designing and studying on the performance of a radial-flow desiccant column using silica gel as a desiccant. A radial-flow desiccant column was designed using SOLIDWORKS computer package. From three different designs—without baffles, with ring baffles, and with divided baffles, the simulation suggested that the design with ring baffles provides the most even airflow distribution throughout the column and this was in good agreement with the experimental data. The highest water adsorption rate at 60°C was also obtained with the design with ring baffles and this design was chosen for desorption study. The desorption experiments were carried out at 60, 70, 80 and 90°C. The data was well fitted with the Page model ($R^2 = 0.95 \pm 0.01$, $\chi^2 = 0.003 \pm 0.0007$, RMSE = 1.27 ± 0.18). The drying constant of the model $[k(T)]$ was in a range of 0.09-0.17. The activation energy (E_a) for $[k(T)]$ was 21.61 kJ/mole.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.เอกสิทธิ์ ศรีธรรม ที่ได้กรุณาให้แนวคิดต่างๆที่เป็นประโยชน์ คำแนะนำเกี่ยวกับการทดลอง ติดตามความก้าวหน้าในการดำเนินการวิจัย การเรียบเรียงเนื้อหา และตรวจแก้ไขรายงาน ตลอดจนสนับสนุนผู้วิจัยตลอดมาจนรายงานฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร.เอกพงศ์ ซีวิทโสภณ ที่ได้กรุณาเอื้อเฟื้อเพื่อชุดทดลองในการทำวิจัย และขอขอบคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้จนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมอาหาร นางบุญนำ ผลโพธิ์ นางสาววราภรณ์ มาไพศาลทรัพย์ นางสาวสุธัญญา ถาดนาค และนายอำนาจ คุณตะคุ ที่คอยช่วยเหลือ คอยดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดี ให้คำแนะนำและคอยจัดเตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยตลอดมา

ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของอาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านเป็นอย่างยิ่งและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา	3
บทที่ 2 สํารวจเอกสาร	4
2.1 การอบแห้ง	4
2.1.1 หลักการพื้นฐานของการทำแห้ง	5
2.1.2 ความชื้นในวัสดุ (Moisture Content)	5
2.1.3 ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content)	6
2.1.4 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate)	6
2.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการทำแห้ง	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2 แผนภูมิไซโครเมตริก (Psychrometric chart)	10
2.2.1 ลักษณะทั่วไปของแผนภูมิไซโครเมตริก	10
2.2.2 ส่วนประกอบของแผนภูมิไซโครเมตริก	11
2.2.3 เส้นกระบวนการการทำแห้งบนแผนภูมิไซโครเมตริก	17
2.3 สารดูดความชื้น (Desiccant)	18
2.3.1 ประเภทสารดูดความชื้น	18
2.3.2 วัฏจักรสารดูดความชื้นในกระบวนการถ่ายเทความชื้น	24
2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการถ่ายเทความชื้นของสารดูดความชื้น	27
2.3.4 การประยุกต์ใช้สารดูดความชื้นร่วมกับกระบวนการอบแห้ง	31
2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การทำแห้ง	35
2.5 สมการของอาร์เรเนียส	37
2.6 รูปแบบการบรรจุสารดูดความชื้นประเภทของแข็งแบบ Radial bed	39
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	42
3.1 การออกแบบและสร้างหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี	42
3.2 การทดลองเบื้องต้น	43
3.2.1 อุปกรณ์	43
3.2.2 วิธีการทดลอง	43
3.3 การออกแบบและสร้างแผ่นกั้นการไหลของของไหลภายในหอดูดความชื้น	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1 อุปกรณ์	44
3.3.2 วิธีการทดลอง	45
3.4 การทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่ออัตราการการถ่ายเทความร้อน	46
3.4.1 อุปกรณ์	46
3.4.2 การทดลองดูความร้อน	48
3.4.3 การทดลองคายความร้อน	49
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	50
4.1 การจำลองการไหลของอากาศในหอดูดาวด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS	50
4.2 การทดลองเบื้องต้น	53
4.2.1 ผลการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการดูดซับน้ำของซิลิกาเจล	53
4.2.2 อัตราการไหลอากาศในแต่ละชั้น	54
4.3 การถ่ายเทความร้อน	57
4.3.1 การดูความร้อน	57
4.3.2 การคายความร้อน	62
4.3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	66
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	69
5.1 สรุปผลการทดลอง	69
บรรณานุกรม	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก. ข้อมูลจากการทดลอง	73
ภาคผนวก ข. ภาพการทดลอง	79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง	36
4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ a k n R^2 χ^2 และ RMSE ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	66
ก.1 ข้อมูลการทดลองการดูดความชื้นภายในหอดูดความชื้นแบบไม่มีแผ่นกั้น	73
ก.2 ข้อมูลการทดลองการดูดความชื้นภายในหอดูดความชื้นแบบแผ่นกั้นวงแหวน	74
ก.3 ข้อมูลการทดลองการดูดความชื้นภายในหอดูดความชื้นแบบแผ่นกั้นแบ่งส่วน	75
ก.4 ข้อมูลการทดลองคายความชื้นภายในหอดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 60 °C	76
ก.5 ข้อมูลการทดลองคายความชื้นภายในหอดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 70 °C	77
ก.6 ข้อมูลการทดลองคายความชื้นภายในหอดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 80 °C	78
ก.7 ข้อมูลการทดลองคายความชื้นภายในหอดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 90 °C	79



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เส้นโค้งอัตราการอบแห้งเชิงทฤษฎี	7
2.2 เส้นอุณหภูมิกระเปาะแห้งบนแผนภูมิไซโครเมตริก	11
2.3 เส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียกบนแผนภูมิไซโครเมตริก	12
2.4 เส้นความชื้นสัมพัทธ์บนแผนภูมิไซโครเมตริก	13
2.5 เส้นแสดงความชื้นจำเพาะ	14
2.6 เส้นแสดงปริมาตรจำเพาะของอากาศ	15
2.7 เส้นแสดงเอลทาลปี	16
2.8 กระบวนการทำแห้งจาก A ไป B	18
2.9 Equilibrium Capacity ของสารดูดความชื้นชนิดต่างๆ	22
2.10 อัตราการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นชนิดต่างๆ	23
2.11 ความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้น	26
2.12 วัฏจักรการทำงานของสารดูดความชื้น	26
2.13 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศต่อมวลของไอน้ำที่ถูกดูดโดยซิลิกาเจล	27
2.14 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศต่อมวลของไอน้ำที่ถูกขับออกจากซิลิกาเจล	28
2.15 อุณหภูมิอากาศขาเข้าต่อมวลของไอน้ำที่ถูกดูดโดยซิลิกาเจล	29
2.16 อุณหภูมิอากาศขาเข้าต่อมวลของไอน้ำที่ถูกขับออกจากซิลิกาเจล	29
2.17 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้าต่อมวลของไอน้ำที่ถูกดูดโดยซิลิกาเจล	30
2.18 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้าต่อมวลของไอน้ำที่ถูกขับออกจากซิลิกาเจล	31
2.19 แบบจำลองเครื่องอบแห้งลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และXของอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 เครื่องอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับวงล้อสารดูดความชื้น	33
2.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$	38
2.22 ลักษณะการบรรจุสารดูดความชื้นแบบ Radial bed	40
2.23 ชุดทดลองหอดูดความชื้น Radial bed	40
2.24 ผลของความดันตกคร่อมกับรูปแบบการบรรจุสารดูดความชื้น	41
3.1 การบรรจุซิลิกาเจลในหอดูดความชื้น	42
3.2 อุปกรณ์ในการทดลอง	47
3.3 ภาพชุดทดลอง	47
4.1 หอดูดความชื้นแบบไม่มีแผ่นกั้น	50
4.2 หอดูดความชื้นมีแผ่นกั้นแบบวงแหวน	51
4.3 รูปแบบแผ่นกั้นแบบวงแหวน	51
4.4 หอดูดความชื้นมีแผ่นกั้นแบบแบ่งส่วน	52
4.5 รูปแบบแผ่นกั้นแบบแบ่งส่วน	52
4.6 อัตราการดูดซับความชื้นของซิลิกาเจล	53
4.7 อัตราการไหลอากาศของชุดทดลองหอดูดความชื้นแบบไม่มีแผ่นกั้น	54
4.8 อัตราการไหลอากาศของชุดทดลองหอดูดความชื้นแบบแผ่นกั้นวงแหวน	55
4.9 อัตราการไหลอากาศของชุดทดลองหอดูดความชื้นแบบแผ่นกั้นแบ่งส่วน	56
4.10 ปริมาณความชื้นสะสมในหอดูดความชื้นแบบไม่มีแผ่นกั้น	58
4.11 ปริมาณความชื้นสะสมในหอดูดความชื้นแบบแผ่นกั้นวงแหวน	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และXของอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ปริมาณความชื้นสะสมในหอดูดความชื้นแบบแผ่นกั้นแบ่งส่วน	60
4.13 อัตราการดูดความชื้นของหอดูดความชื้น	61
4.14 อัตราการคายความชื้นของหอดูดความชื้น ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	62
4.15 อัตราการคายความชื้นของหอดูดความชื้น ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	63
4.16 อัตราการคายความชื้นของหอดูดความชื้น ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	64
4.17 อัตราการคายความชื้นของหอดูดความชื้น ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส	65
4.18 ค่าลอการิทึมธรรมชาติของสัมประสิทธิ์กับอุณหภูมิ	67
ข.1 ซิลิกาเจลสีน้ำเงิน	80
ข.2 ซิลิกาเจลสีชมพู	80
ข.3 ชุดทดลองหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี	81
ข.4 การบรรจุซิลิกาเจลสีชมพูในชุดทดลอง	81
ข.5 แผ่นกั้นวงแหวน	82
ข.6 แผ่นกั้นวงแหวนระหว่างชั้นที่1และชั้นที่2	82
ข.7 แผ่นกั้นวงแหวนระหว่างชั้นที่2และชั้นที่3	83
ข.8 แผ่นกั้นวงแหวนระหว่างชั้นที่3และชั้นที่4	83
ข.9 การคลุมเพื่อวัดลมในแต่ละชั้น	84
ข.10 การคลุมเพื่อวัดลมในแต่ละชั้น	84

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

การอบแห้ง เป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญในการลดความชื้นของวัตถุดิบอย่างกว้างขวาง เช่น ในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่มชนิดผง ยา เป็นต้น โดยสามารถนำการอบแห้งมาใช้ในการถนอม และเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการอบแห้งจะมีความชื้นลดลง ทำให้จุลินทรีย์ที่อยู่ในผลิตภัณฑ์มีอัตราการเจริญเติบโตช้าลง เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา และสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ให้เกิดความหลากหลาย แต่ผลิตภัณฑ์บางประเภทที่เสียด่างง่ายเมื่อได้รับความร้อนได้แก่ สี กลิ่น รส เนื้อ สัมผัส รวมถึงสารอาหาร จึงไม่สามารถอบแห้งที่อุณหภูมิสูงได้เพราะจะส่งผลต่อคุณภาพภาพของผลิตภัณฑ์ (Sato et al., 1996) ดังนั้นอุณหภูมิจึงไม่ควรสูงจนเกินไปแต่ต้องใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้น ปัจจุบันได้มีการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีการใช้สารดูดความชื้นเพื่อลดความชื้นของอากาศสำหรับกระบวนการต่าง ๆ เพื่อลดปัญหาการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจนเกินไป และปัญหาระยะเวลาในการอบแห้ง เช่น การอบแห้งใบชาเพื่อคงไว้ซึ่งกลิ่นและสีที่ดีของใบชาโดยได้ลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศพบว่าคุณภาพของใบชาดีขึ้น และขณะเดียวกันสามารถประหยัดพลังงานได้ 15% (Ming et al., 1994)

ซิลิกาเจลเป็นสารดูดความชื้นประเภทของแข็งที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากซิลิกาเจลมีลักษณะเป็นรูพรุน ทำให้มีความสามารถในการดูดความชื้นได้เป็นอย่างดี เมื่อนำมาใช้ในหอดูดความชื้นในการใช้สารดูดความชื้นประเภทของแข็งระบบจะซับซ้อนน้อยกว่าประเภทของเหลวแต่จะมีปัญหาเรื่องความดันตกคร่อมมาก เพราะการใช้สารดูดความชื้นประเภทของแข็งจะเกิดการต้านทานการไหลของอากาศมากเนื่องจากการจัดวางสารดูดความชื้นในระบบจะจัดวางซ้อนทับกัน ดังนั้นถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบใช้สารดูดความชื้นประเภทของแข็งจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการที่ต้องบีบอากาศเพิ่ม เพื่อลดผลกระทบด้านความดันตกคร่อม (Gandhidasan, 2002) จึงมีการออกแบบหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมีเพื่อเป็นการลดระยะทางที่อากาศสัมผัสกับสารดูดความชื้นส่งผลให้ความดันตกคร่อมลดลง (Awad et al., 2006) และหากมีการจัดเรียงซิลิกาเจลภายในหอดูดความชื้นแบบแบ่งชั้นจะทำให้อัตราการดูดความชื้นมากกว่าแบบบรรจุเต็ม (จิวนันท์ และคณะ, 2559) อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของหอดูดความชื้นอาจเพิ่มขึ้นได้อีก หากสามารถออกแบบหอดูดความชื้นโดยให้อากาศไหลผ่านทุก ๆ ชั้นของสารดูดความชื้นได้เท่า ๆ กัน ดังนั้นภายในหอดูดความชื้นจึงควรมีแผ่นกั้นอากาศเพื่อบังคับทิศทางการไหลของอากาศในหอดูดความชื้นเพื่อให้สามารถเพิ่มโอกาสในการถ่ายเทความชื้นระหว่างอากาศกับซิลิกาเจลได้มากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อออกแบบแผ่นกั้นสำหรับกระจายการไหลของอากาศภายในหอดูดความชื้น
- 2) เพื่อศึกษาการกระจายตัวของการไหลของอากาศ อัตราการดูด และอัตราการคายความชื้นของหอดูดความชื้น
- 3) เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่ออัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจลในหอดูดความชื้น

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) รูปแบบของแผ่นกั้นเพื่อกระจายการไหลของอากาศอย่างสม่ำเสมอ
- 2) สมรรถนะของชุดทดลองหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมีที่พัฒนาขึ้น
- 3) จลศาสตร์ (Kinetics) การคายความชื้นของหอดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตการศึกษา

- 1) ใช้โปรแกรม SOLIDWORKS เพื่อช่วยจำลองการไหลของอากาศภายในหอดูดาว
- 2) ใช้ซิลิกาเจลสีน้ำเงินเป็นสารดูดความชื้น
- 3) ออกแบบหอดูดาวความชื้นให้อากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี โดยมีแผ่นกั้นกระจายอากาศแตกต่างกัน 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบวงแหวน และแบบแบ่งส่วน
- 4) ศึกษาอัตราการดูดความชื้นที่อุณหภูมิห้อง และอัตราการคายความชื้นที่อุณหภูมิ 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

สำรวจเอกสาร

การอบแห้งเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการถนอมและเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โดยผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการอบแห้งจะมีความชื้นลดลง ทำให้จุลินทรีย์ที่อยู่ในผลิตภัณฑ์มีอัตราการเจริญเติบโตช้าลง ผลิตภัณฑ์ไม่เน่าเสียง่าย แต่ผลิตภัณฑ์บางประเภทที่เสียสภาพได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนไม่สามารถอบแห้งที่อุณหภูมิสูงได้เพราะจะส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ สี กลิ่น รส เนื้อ สัมผัส รวมถึงสารอาหาร (Sato et al, 1996) ปัจจุบันได้มีการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีการใช้สารดูดความชื้นเพื่อลดความชื้นของอากาศสำหรับกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากสารดูดความชื้นสามารถผลิตอากาศร้อนและแห้งได้ ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับกระบวนการอบแห้งที่ใช้ลมร้อน โดยให้อากาศผ่านสารดูดความชื้นก่อนส่งเข้าห้องอบแห้งเพื่อลดความชื้นของอากาศ ทำให้ได้อากาศที่ร้อนและแห้ง จึงไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นการช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่เสียหายได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง และลดพลังงานที่ต้องใช้ให้ความร้อนกัน นอกจากนี้ได้มีการนำสารดูดความชื้นไปใช้ร่วมกับระบบอบแห้งแบบใช้แสงอาทิตย์เพื่อให้สามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้อย่างต่อเนื่องแม้ไม่มีแสงอาทิตย์ (Ming et al, 1994)

2.1 การอบแห้ง

การอบแห้ง (Drying) คือ เป็นกระบวนการลดความชื้นภายในวัสดุ โดยการถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุเพื่อเป็นความร้อนแฝงของการระเหยไล่ความชื้นออกจากวัสดุ ทำให้ปริมาณน้ำในวัสดุนั้นลดลง (สมชาติ, 2540)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุประสงค์หลักของกระบวนการอบแห้งคือยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์โดยเฉพาะผลผลิตทางการเกษตรและอาหารซึ่งเน่าเสียได้ง่าย โดยการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ทุกชนิดที่เป็นสาเหตุให้อาหารเสื่อม ทั้งยังให้อาหารมีน้ำหนักเบา ปริมาตรลดลง ทำให้สะดวกต่อการขนส่ง หรือการนำไปเป็นวัตถุดิบในการแปรรูปด้วยวิธีอื่น ๆ (สมชาติ, 2540)

2.1.1 หลักการพื้นฐานของการทำแห้ง

การทำแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้นซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุขึ้นเพื่อไล่ความชื้นออก โดยการระเหยความชื้นในวัสดุและความร้อนที่ถ่ายเทไปยังวัสดุขึ้นเป็นความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ เมื่ออากาศร้อนพัดผ่านผิวหน้าอาหารที่เปียก ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิวของอาหารและน้ำในอาหารจะระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ไอน้ำจะแพร่ผ่านอากาศและถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่ (สมชาติ, 2540)

2.1.2 ความชื้นในวัสดุ (Moisture Content, M)

ความชื้นเป็นตัวบอกรูปปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ ความชื้นฐานเปียกและความชื้นฐานแห้ง (Wilhelm et al, 2004)

ความชื้นฐานเปียก คือ อัตราส่วนของน้ำที่อยู่ในวัสดุกับน้ำหนักทั้งหมดของวัสดุ นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์

$$M_W = \frac{(w-d)}{w} \times 100\% \quad (2.1)$$

ความชื้นฐานแห้ง คือ อัตราส่วนของน้ำหนักน้ำที่อยู่ในวัสดุกับน้ำหนักแห้งของวัสดุ ค่าน้ำหนักแห้งของวัสดุเป็นค่าคงที่หรือเกือบคงที่ในระหว่างการทำแห้ง นิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_d = \frac{(w-d)}{d} \times 100\% \quad (2.2)$$

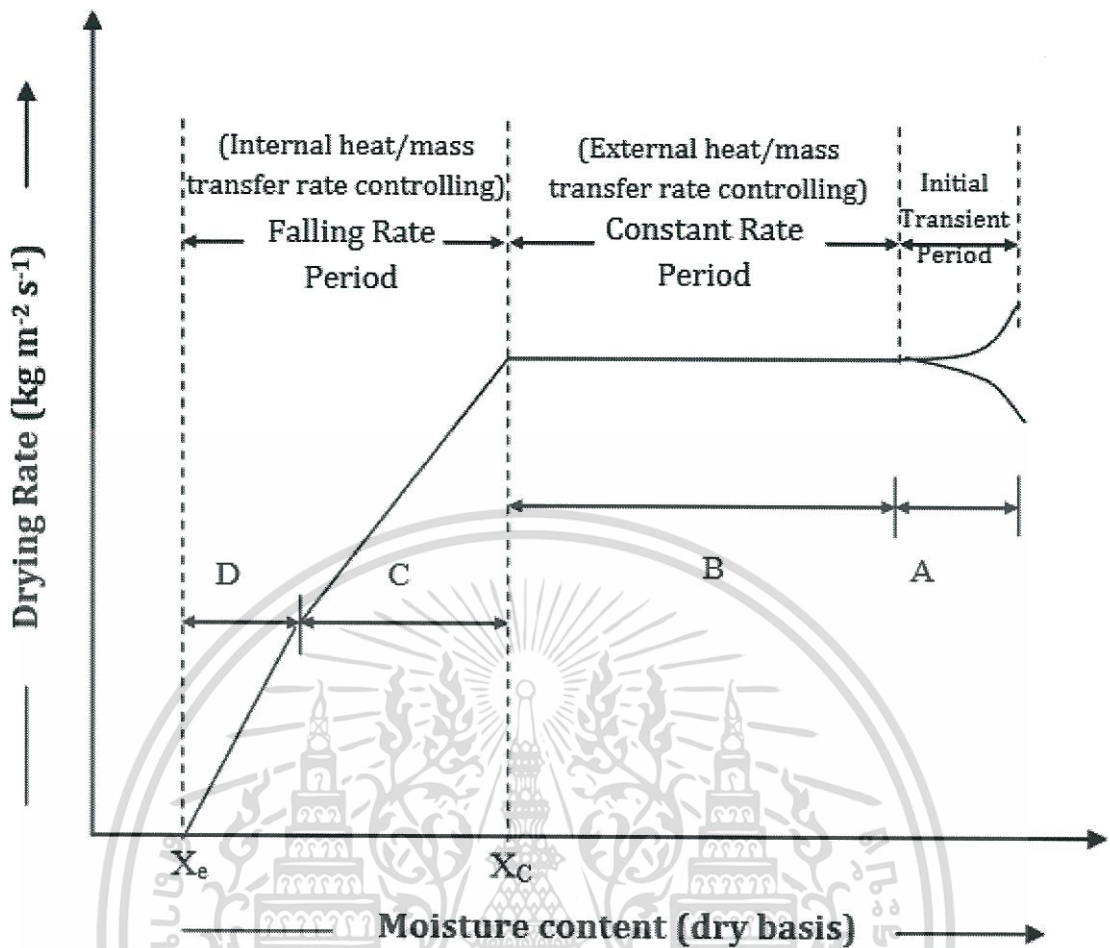
เมื่อ	d	คือ	มวลของวัสดุแห้งที่ไม่มี ความชื้น, kg
	M_d	คือ	ความชื้นฐานแห้ง, %
	M_w	คือ	ความชื้นฐานเปียก, %
	w	คือ	มวลของวัสดุเปียก, kg

2.1.3 ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, M_{eq})

ความชื้นสมดุล คือ ความชื้นของวัสดุในขณะที่ความดันไอน้ำภายในวัสดุสมดุลกับความดันไอน้ำของอากาศแวดล้อมวัสดุนั้น โดยความชื้นสมดุลจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม (Wilhelm et al, 2004)

2.1.4 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR)

อัตราการทำให้แห้ง คือ อัตราการระเหยน้ำออกจากวัสดุต่อพื้นที่ที่เกิดการระเหยต่อหน่วยเวลา ระหว่างการทำให้แห้งแบ่งเป็น 3 ช่วง คือช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (พิมพ์เพ็ญ และคณะ, 2560)



รูปที่ 2.1 อัตราการอบแห้งเชิงทฤษฎี (Jangam, 2010)

1) ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial adjustment period -AB)

เป็นช่วงเริ่มต้นที่วัสดุใช้ในการอบแห้งมีความชื้นเริ่มต้น (A) ของวัสดุสูง เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางกับวัสดุ ทำให้อุณหภูมิพื้นผิววัสดุ มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature) ของตัวกลาง และอัตราการแห้งค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงอัตราทำแห้งคงที่ (Constant rate)

2) ช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ (Constant rate period-BC)

เป็นช่วงที่ผิวของวัสดุมีน้ำหล่อเลี้ยงอยู่ตลอดเวลา จึงทำให้อัตราการระเหยของน้ำจากผิววัสดุ ขึ้นอยู่กับความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายนอกวัสดุ (External Heat and

Mass Transfer Resistance) เท่านั้น กล่าวคือ หากความต้านทานการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายนอกวัสดุมีค่าน้อย น้ำจะระเหยจากผิววัสดุได้อย่างรวดเร็ว อัตราการทำแห้งจะมีค่าสูง ความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายนอกวัสดุระบุโดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร (Mass Transfer Coefficient) ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองค่านี้ขึ้นอยู่กับความเร็วและทิศทางไหลของตัวกลางการทำแห้งผ่านวัสดุเป็นหลัก ในช่วงอัตราการทำแห้งคงที่อุณหภูมิผิวของวัสดุจะมีค่าคงที่อยู่ที่อุณหภูมิระเปาะเปียกของตัวกลางการทำแห้งเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากผิวของวัสดุมีชั้นฟิล์มของน้ำหล่อเลี้ยงอยู่ตลอดเวลาตัวเอง เมื่อความชื้นของวัสดุลดลงจนถึงค่าค่าหนึ่งที่เรียกว่า ค่าความชื้นวิกฤต (Critical moisture content, จุด C) ผิวของวัสดุจะเริ่มไม่มีชั้นฟิล์มของน้ำหล่อเลี้ยงอยู่มากพอที่จะทำให้เกิดการระเหยของน้ำด้วยอัตราที่เท่ากับอัตราการระเหยของน้ำในช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ ประกอบกับระยะทางที่น้ำต้องเคลื่อนที่จากภายในมายังผิววัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น (เนื่องจากน้ำที่อยู่บริเวณใกล้ผิววัสดุเคลื่อนที่ออกไปทดแทนน้ำที่ระเหยจากผิววัสดุในช่วงแรก ๆ ของการทำแห้งจะหมดแล้ว) ทำให้น้ำเคลื่อนที่มาที่ผิววัสดุไม่ทันต่อการระเหย อัตราการทำแห้งในช่วงนี้จึงมีค่าลดลง

3) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period CD และ DE)

เป็นช่วงที่ความชื้นในวัสดุเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารอย่างไม่ต่อเนื่อง ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของอาหารสูงขึ้นเรื่อย ๆ อัตราการอบแห้งจะลดลงจนถึงค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, XE) ซึ่งเป็นความชื้นที่ต่ำสุด ที่ความชื้นนี้อัตราการทำแห้งเป็นศูนย์ น้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก (พิมพ์เพ็ญ และคณะ, 2560)

2.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการทำแห้ง

สภาวะการทำแห้งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากการดำเนินงานและการควบคุม สภาวะภายนอกที่สำคัญและมีผลต่ออัตราการอบแห้งวัสดุได้แก่ อุณหภูมิของลมร้อนความชื้น ความสัมพันธ์

ของลมร้อนและน้ำหนักของวัสดุอบแห้งต่อหน่วยพื้นที่ (Ndukwu, 2009; Fudholi et al, 2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) อุณหภูมิของลมร้อน

โดยปกติอุณหภูมิการทำแห้งของเครื่องอบแห้งจะควบคุมโดยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ การเพิ่มหรือลดอุณหภูมิในขณะที่ทำแห้งจะมีผลต่อการทำแห้งเป็นอย่างมาก ในกรณีการทำแห้งอาหารที่ความเร็วลมร้อนคงที่ อัตราการทำแห้งจะขึ้นอยู่กับผลต่างของอุณหภูมิกระเปาะเปียกกับกระเปาะแห้งของอากาศของอากาศร้อนเท่านั้น ดังนั้นอัตราการทำแห้งมีค่าสูง เมื่ออุณหภูมิกระเปาะแห้งมีค่าสูงและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าต่ำสุด ในช่วงของอัตราการทำแห้งคงที่ อัตราการทำแห้งจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศแห้งเท่านั้น ส่วนในช่วงอัตราการทำแห้งลดลงวัสดุมีแนวโน้มจะแห้งเร็วขึ้นถ้าอุณหภูมิในการทำแห้งเพิ่มขึ้น

2) ความเร็วของลมร้อน

ความเร็วของลมร้อนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอากาศ อุณหภูมิ และการนำอากาศที่ใช้แล้วมาผสมกับอากาศภายนอก โดยปกติในการทำแห้งจะควบคุมให้ความเร็วของลมร้อนคงที่ตลอดเวลาการทำแห้ง ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงแปลงความเร็วของลมร้อนจะส่งผลต่ออัตราการทำแห้งเนื่องจากความเร็วของลมร้อนจะมีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ดังนั้นถ้าปัจจัยอื่น ๆ คงที่การทำแห้งที่ความเร็วลมร้อนสูงจะทำให้อัตราการทำแห้งสูงขึ้น

3) ความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อน

ความชื้นสัมพัทธ์คืออัตราส่วนความดันไอน้ำในอากาศจริงต่อความดันไอน้ำในอากาศอิ่มตัวในสถานะที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในขณะที่ทำแห้งมีค่าสูงจะมีผลทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำและการระเหยของไอน้ำออกจากอาหารมาสู่อากาศโดยรอบนั้นเป็นไปได้ยากขึ้นเนื่องจากอากาศภายนอกนั้นมีปริมาณน้ำสูงอยู่แล้ว ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในขณะที่ทำแห้งมีค่าต่ำลง ทำให้การเคลื่อนตัวและการระเหยของน้ำออกจากอาหารได้ง่ายขึ้น อัตราการทำแห้งสูงขึ้น จึงเหมาะกับการทำแห้งอาหารที่เสื่อมคุณภาพได้ง่ายเนื่องจากความร้อน

4) ความดันบรรยากาศ

ถ้าลดความดันของบรรยากาศในขณะที่ทำแห้งจะทำให้จุดเดือดของน้ำในอากาศนั้นลดลง ทำให้การเคลื่อนตัวและการระเหยของน้ำออกจากอาหารได้ง่ายขึ้น โดยน้ำสามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิ ต่ำลง เหมาะที่จะใช้ทำแห้งอาหารที่เสื่อมคุณภาพได้ง่ายเนื่องจากความร้อน

2.2 แผนภูมิไซโครเมตริก (Psychrometric chart)

รายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับแผนภูมิไซโครเมตริกมีดังต่อไปนี้ (อาจหาญ, 2013)

2.2.1 ลักษณะทั่วไปของแผนภูมิไซโครเมตริก

เป็นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์สมบัติของอากาศ ซึ่งประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำ เนื่องจากอากาศในบรรยากาศมีไอน้ำปนอยู่ ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากต่อสภาวะการแปรรูปอาหาร และการเก็บรักษาอาหาร เช่น ปรับอากาศ เพื่อการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ (cold storage) โดยการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ การแช่เยือกแข็ง การทำแห้ง เป็นต้น

แผนภูมิไซโครเมตริกได้มีการสร้างขึ้นโดยหลายหน่วยงาน ซึ่งในแผนภูมิของแต่ละหน่วยงาน จะมีโครงสร้างที่สำคัญเหมือนกัน แต่อาจมีรายละเอียดปลีกย่อยแตกต่างกัน เช่น สเกล หน่วย เป็นต้น

แผนภูมิไซโครเมตริกเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการหาค่าสมบัติของอากาศได้อย่างรวดเร็ว นิยมใช้ในการคำนวณด้านการปรับอากาศ เพราะสะดวก ไม่ต้องใช้เวลาในการคำนวณ สามารถอ่านค่าได้เลย โดยทั่วไปแผนภูมิไซโครเมตริกใช้ได้สำหรับความดันคงที่ค่าหนึ่งเท่านั้น ความดันของแผนภูมิไซโครเมตริกที่นิยมใช้กันคือ ความดันที่ระดับน้ำทะเล ที่ความดันนี้จะมีแผนภูมิอยู่ด้วยกัน 3 ระดับอุณหภูมิ คือ แผนภูมิสำหรับอุณหภูมิต่ำ (ช่วง 40-50 องศาฟาเรนไฮต์) แผนภูมิสำหรับอุณหภูมิปานกลาง (ช่วง 32-120 องศาฟาเรนไฮต์) และแผนภูมิสำหรับอุณหภูมิสูง (ช่วง 60-250 องศาฟาเรนไฮต์) ในกรณีที่

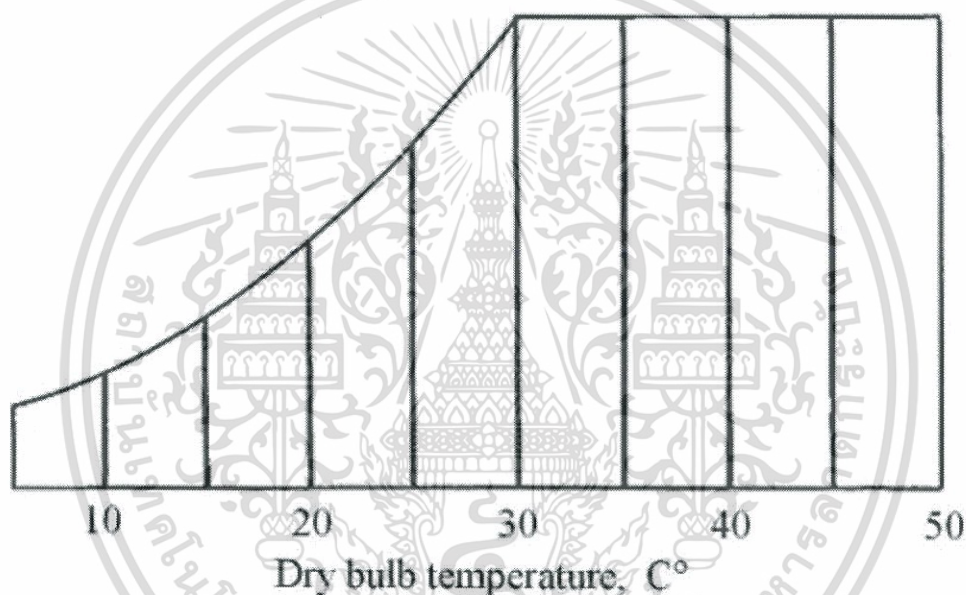
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการทราบสมบัติของอากาศที่ความดันอื่น ๆ ซึ่งไม่มีในแผนภูมิไซโครเมตริก อาจคำนวณจากสมการสมบัติของอากาศโดยตรง

2.2.2 ส่วนประกอบของแผนภูมิไซโครเมตริก

1) อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry Bulb Temperature)

การวัดอุณหภูมิกระเปาะแห้งสามารถวัดและอ่านค่าได้จากเทอร์โมมิเตอร์แบบธรรมดา เป็นอุณหภูมิที่เครื่องมือวัดอุณหภูมิสัมผัสกับอากาศโดยตรง



รูปที่ 2.2 เส้นอุณหภูมิกระเปาะแห้งบนแผนภูมิไซโครเมตริก (อาจหาญ, 2013)

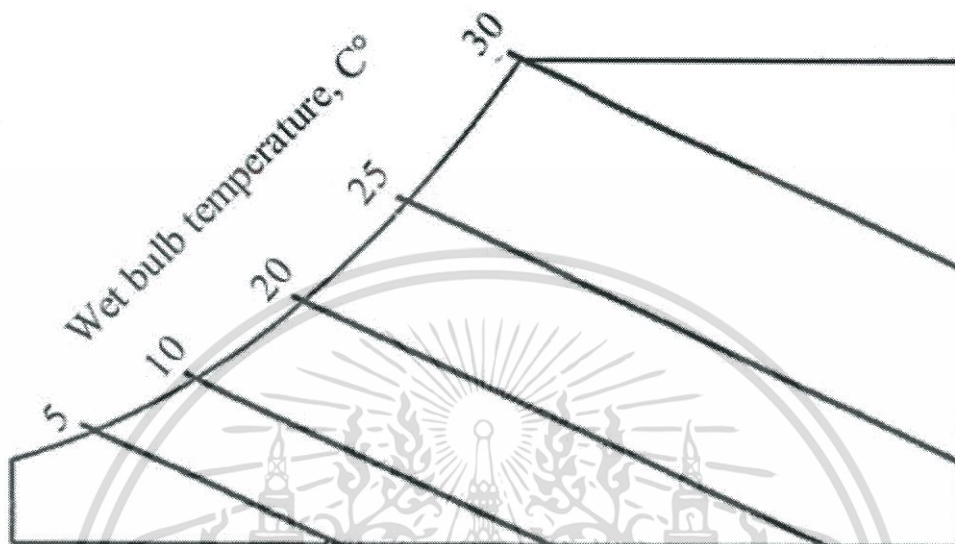
เส้นแสดงค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งในแผนภูมิไซโครเมตริกจะเป็นเส้นตามแนวตั้งของแผนภูมิ อาจเอียงเล็กน้อย โดยค่าจะเรียงตั้งแต่น้อยไปหามากจากซ้ายมือไปยังขวามือ

2) อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet Bulb Temperature)

การวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียกนั้นในการวัดก็ใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบเดียวกับที่วัดแบบกระเปาะแห้งแต่ที่กระเปาะปลายเทอร์โมมิเตอร์จะเอาผ้าชุบน้ำพอมุ่ม ๆ พันกระเปาะ อุณหภูมิกระเปาะเปียกจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอากาศในจุดที่ทำการวัด ถ้าความชื้นใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศน้อยความแตกต่างของอุณหภูมิระเปาะแห้งกับอุณหภูมิระเปาะเปียกจะมาก ถ้าความชื้นในอากาศมากความแตกต่างของอุณหภูมิที่วัดได้จะน้อย และอุณหภูมิระเปาะแห้งกับระเปาะเปียกจะเท่ากันที่เส้นอากาศอิ่มตัว (Saturated Temperature) หรือจุดที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100%

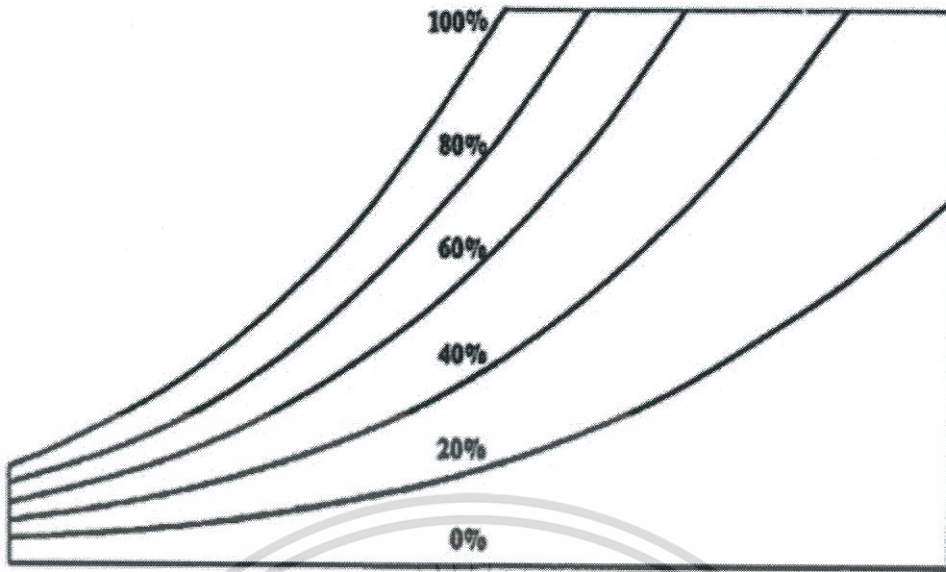


รูปที่ 2.3 เส้นอุณหภูมิระเปาะเปียกบนแผนภูมิไซโครเมตริก (อาจหาญ, 2013)

เส้นแสดงค่าอุณหภูมิระเปาะเปียกที่อยู่ในแผนภูมิไซโครเมตริกนั้นจะแสดงบนเส้นแนวทแยงของแผนภูมิ โดยค่าจะเพิ่มขึ้นจากน้อยไปมากจากด้านซ้ายไปยังด้านขวา

3) ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)

คืออัตราส่วนความดันไอน้ำในอากาศจริงต่อความดันไอน้ำในอากาศอิ่มตัวในสภาวะที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน



รูปที่ 2.4 เส้นความชื้นสัมพัทธ์บนแผนภูมิไซโครเมตริก (อาจหาญ, 2013)

เส้นแสดงค่าความชื้นสัมพัทธ์ในแผนภูมิไซโครเมตริก โดยเส้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% นั้นจะเป็นเส้นเดียวกับเส้นอากาศอิ่มตัว (Saturated Air Line) หรือจุดที่อากาศสามารถรองรับปริมาณไอน้ำได้สูงสุดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ถัดจากเส้นความชื้นสัมพัทธ์ 100% ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 0% ที่เส้นตามแนวนอน

สำหรับในกรณีที่ต้องใช้การคำนวณ สามารถหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$RH = \frac{P_v}{P_g} \times 100 \quad (2.3)$$

RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์, %

P_v คือ แรงดันย่อยของไอน้ำในอากาศ, kN/m^2

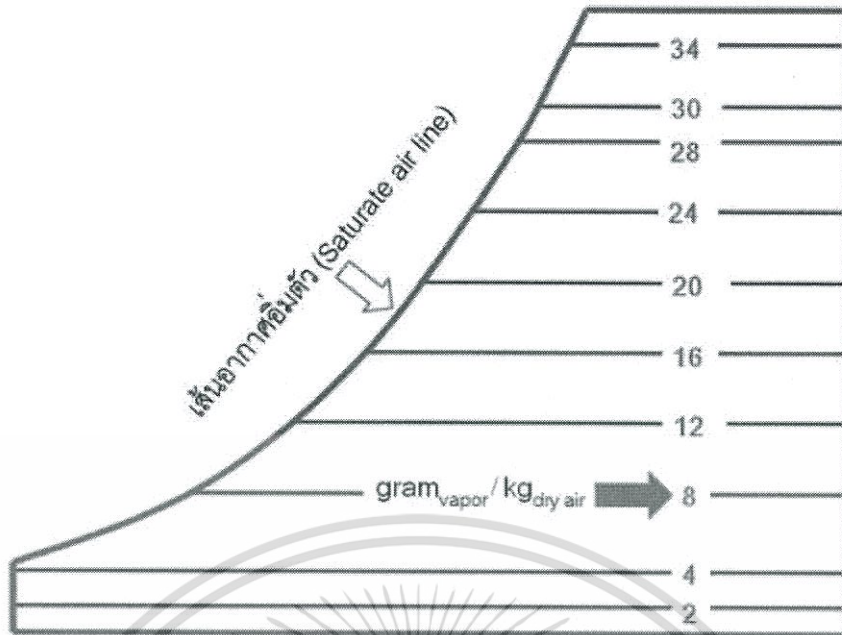
P_g คือ แรงดันย่อยของอากาศ, kN/m^2

4) ความชื้นจำเพาะ (Specific Humidity)

เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าค่า อัตราส่วนความชื้น (Humidity Ratio) คืออัตราส่วนระหว่างมวล

ของไอน้ำในอากาศ (mv) กับมวลของอากาศแห้ง (ma) ที่ปริมาตรอากาศที่พิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 เส้นแสดงความชื้นจำเพาะ (อาจหาญ, 2013)

เส้นแสดงค่าอัตราส่วนความชื้นในแผนภูมิไซโครเมตริกเป็นเส้นที่ลากจากเส้นไอน้ำอิ่มตัว (Saturated Vapor) จากด้านซ้ายมือไปยังด้านขวามือ ซึ่งอัตราส่วนความชื้นที่ปรากฏในแผนภูมิไซโครเมตริกจะเป็นอัตราส่วนมวลของไอน้ำในอากาศเป็นกรัมต่อมวลอากาศแห้งเป็นกิโลกรัม

สำหรับในกรณีที่ต้องใช้การคำนวณ สามารถหาค่าอัตราส่วนความชื้นได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Y = \frac{0.622P_v}{P_{atm} - P_v} \quad (2.4)$$

Y คือ อัตราส่วนความชื้น, g_{vapor} / kg_{air}

P_v คือ แรงดันย่อยของไอน้ำในอากาศ, kN/m^2

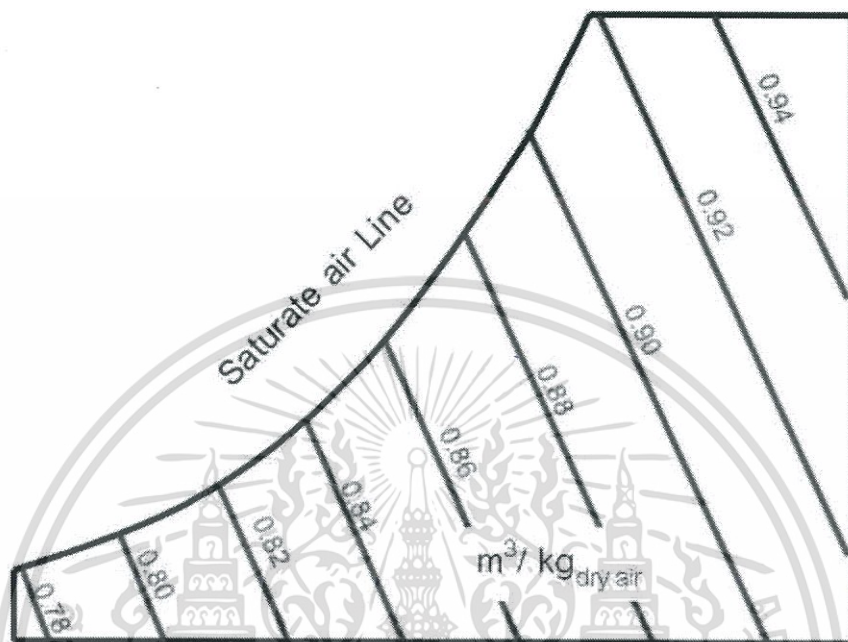
P_{atm} คือ ความดันบรรยากาศ, kN/m^2

5) ปริมาตรจำเพาะของอากาศ (Specific Volume)

คืออัตราส่วนระหว่างปริมาตร (Volume) ต่อมวล (Mass) ของอากาศ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์

เมตรต่อกิโลกรัม (m^3/kg) อากาศมีคุณสมบัติในการขยายตัวตามอุณหภูมิที่ความดันคงที่ (Constant) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pressure) ถ้าอุณหภูมิต่ำอากาศจะมีปริมาตรจำเพาะน้อยหมายถึงน้ำหนักอากาศต่อหน่วยปริมาตร จะมากในทางตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นอากาศจะขยายตัวออกทำให้ปริมาตรจำเพาะของ อากาศของอากาศมากขึ้น ซึ่งก็คือน้ำหนักของอากาศต่อหน่วยปริมาตรจะลดลง



รูปที่ 2.6 เส้นแสดงปริมาตรจำเพาะของอากาศ (อาจหาญ, 2013)

เส้นแสดงค่าปริมาตรจำเพาะที่อยู่ในไซโครเมตริกชาร์ตนั้นจะเป็นเส้นทแยงจากซ้ายไปขวา โดยเส้นที่อยู่ด้านล่างจะมีค่าปริมาตรจำเพาะน้อยและเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ไปสู่ด้านบน สำหรับในกรณีที่ต้องใช้การคำนวณ สามารถหาค่าปริมาตรจำเพาะได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$V = \frac{R_a T}{P_a} = \frac{R_a T}{(P_{atm} - P_v)} \quad (2.5)$$

- V คือ ปริมาตรจำเพาะ
- R_a คือ ค่าคงที่ของอากาศแห้ง
- T คือ อุณหภูมิในสภาวะที่พิจารณา
- P_{atm} คือ ความดันบรรยากาศ, kN/m^2

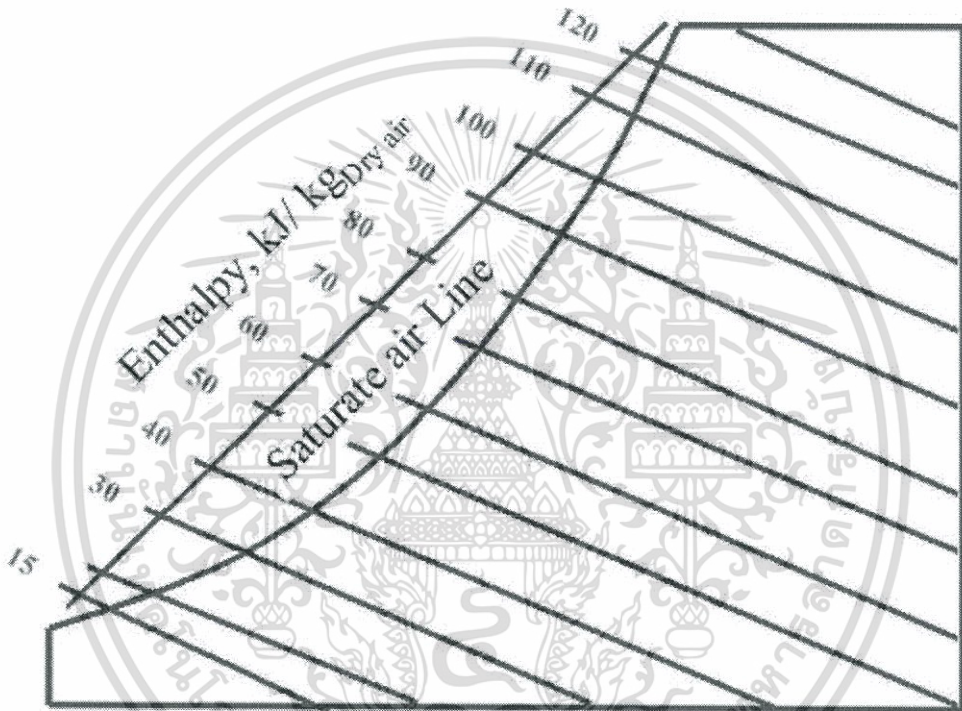
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P_v คือ แรงดันย่อยของไอน้ำในอากาศ, kN/m^2

P_a คือ แรงดันย่อยของอากาศแห้ง, kN/m^2

6) เอนทัลปี (Enthalpy)

ค่าที่เป็นตัวบ่งบอกถึงระดับพลังงานของของไหลที่รวมถึงอากาศด้วย ซึ่งเป็นค่าพลังงานภายในของของไหลบวกกับพลังงานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความดันและปริมาตร



รูปที่ 2.7 เส้นแสดงเอนทัลปี (อาจหาญ, 2013)

เส้นแสดงระดับค่าเอนทัลปีในแผนภูมิไซโครเมตริกนั้นจะอยู่ด้านซ้ายมือหรือด้านหน้าของเส้นอากาศอิ่มตัว โดยที่ค่าเอนทัลปีจะเพิ่มจากน้อยไปหามากตามระดับของอุณหภูมิของอากาศที่เพิ่มขึ้น

สำหรับในกรณีที่ต้องใช้การคำนวณ สามารถหาค่าเอนทัลปีได้จากสมการดังต่อไปนี้

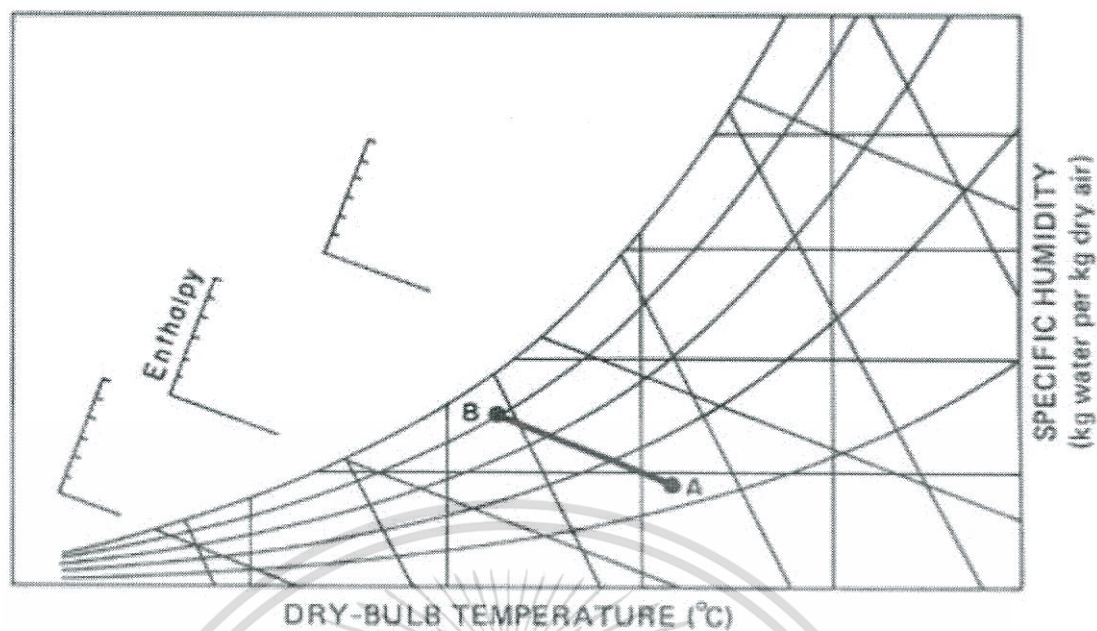
$$h = C_p T + Y h_g \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

h	=	ค่าเอนทัลปี, kJ/kg
C_p	=	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง, 1 kJ/kg.K
T	=	อุณหภูมิในสถานะที่พิจารณา, K
Y	=	อัตราส่วนความชื้น
h_g	=	ค่าเอนทัลปีของไอน้ำอิ่มตัว, kJ/kg

2.2.3 เส้นกระบวนการการทำแห้งบนแผนภูมิไซโครเมตริก

แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงกระบวนการทำแห้ง จะแสดงถึงกระบวนการระเหยเดี่ยวแบบอะเดียแบติก (Adiabatic Saturation) คือ ความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์จะได้จากอากาศร้อนนี้เท่านั้น ไม่มีการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนหรือการแผ่รังสีความร้อนจากสิ่งแวดล้อมเกิดขึ้น ขณะที่อากาศผ่านมวลดังกล่าว ความร้อนสัมผัสของอากาศส่วนใหญ่จะเปลี่ยนเป็นความร้อนแฝงเมื่อน้ำอยู่ใน สภาพเป็นไอในอากาศมากขึ้น จากรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าระหว่างกระบวนการระเหยเดี่ยวแบบอะเดียแบติก อุณหภูมิกระเปาะแห้งจะลดลง ขณะที่ค่าเอนทัลปียังคงที่ ซึ่งกล่าวได้ว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกคงที่นั่นเอง ขณะที่อากาศได้รับความชื้นจากผลิตภัณฑ์มากขึ้น อัตราส่วนความชื้นจะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.8 กระบวนการทำแห้งจาก A ไป B (อาจหาญ, 2013)

2.3 สารดูดความชื้น (Desiccant)

สารดูดความชื้น (Desiccant) คือ สารที่มีคุณสมบัติในการดูดความชื้น (Moisture) ซึ่งมีหลายประเภทขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน เช่น การถนอมอาหาร การขนส่งสินค้าใช้ในห้องทดลองใช้ในกระบวนการผลิต เป็นต้น ข้อมูลเกี่ยวกับสารดูดความชื้นมีดังต่อไปนี้ (ASHRAE, 2005)

2.3.1 ประเภทสารดูดความชื้น

1) สารดูดความชื้นประเภทของแข็ง

สารดูดความชื้นประเภทของแข็งเป็นสาเหตุทำให้เกิดความดันลดในกระบวนการผลิตอากาศมากกว่าแบบของเหลว แต่การประยุกต์ใช้สารดูดความชื้นประเภทของแข็งมีความยุ่งยากซับซ้อนน้อยกว่าแบบของแข็ง เนื่องจากการจัดการกับสารประเภทของแข็งทำได้ง่ายกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิกาเจล (Silica Gel)

สารสังเคราะห์ที่สกัดจากทรายของผสมกรดกำมะถันมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide) ซิลิกาเจลถูกใช้งานอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในบรรจุภัณฑ์ยา และอาหาร ลักษณะของซิลิกอนไดออกไซด์เป็นเม็ดกลม เป็นโพรง มีรูพรุน ทำให้มีพื้นที่ผิวที่ใช้ในการ ดูดความชื้นเป็นจำนวนมาก ประมาณ 800 ตารางเมตรต่อน้ำหนัก 1 กรัม หรือประมาณ 35-40 % ของน้ำหนักตัวประสิทธิภาพสูงสุดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส หากอุณหภูมิสูงกว่านี้ ประสิทธิภาพในการดูดความชื้นจะลดลงไปเรื่อย ๆ และมีโอกาสที่จะคายความชื้น (Desorption) ออกจากตัวเองเช่นกันซิลิกาเจลมี 4 ชนิด

ก) ชนิดเม็ดสีขาว (White silica gel) มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นประมาณ 35-40% ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแต่ละเม็ดประมาณ 2-5 มิลลิเมตร

ข) ชนิดเม็ดสีน้ำเงิน (Blue silica gel) มีการเติม Cobalt chloride ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีเป็นสีชมพูเมื่อความชื้นสัมพัทธ์รอบข้างมากกว่า 40% ชนิดนี้นิยมใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีประโยชน์ในการสังเกตได้โดยง่ายว่าสินค้ามีโอกาสเสี่ยงต่อความชื้นเล็กน้อยเพียงใด หากซิลิกาเจลที่ใช้อย่างยังมีสีน้ำเงินแสดงว่าความชื้นรอบข้างมีระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ในทางตรงกันข้ามหากสีของซิลิกาเจลเปลี่ยนเป็นสีชมพูแสดงว่าความชื้นรอบข้างนั้นมีปริมาณที่สูงเกินกว่าที่ซิลิกาเจลจะดูดและควบคุมให้อยู่ในระดับที่ต่ำได้

ค) ชนิดเม็ดสีส้ม (Orange silica gel) มีคุณสมบัติเหมือนกับชนิดสีน้ำเงินทุกประการ การทำงานจะเปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีเขียวอ่อน ซิลิกาเจลชนิดนี้ยังไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากมีราคาค่อนข้างสูง

ง) ชนิดเม็ดทราย (Silica sand) มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นเหมือนกับเม็ดขาวทุกประการ แตกต่างกันที่ขนาดเม็ดของสาร ซึ่งสารดูดความชื้นชนิดเม็ดทรายจะมีขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร

ดินไดอะตอม (Diatomaceous earth)

ดินที่เกิดจากซากพืชเซลล์เดียว มีลักษณะคล้ายกรวดขนาดเล็กสีเทาหรือสีน้ำตาลแต่มีการนำไปผ่านกระบวนการผลิตจึงทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดความชื้นได้สูง ดินไดอะตอมเป็นสารจากธรรมชาติจึงไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม มีโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก เมื่อได้รับการเผาที่อุณหภูมิสูงและเติมสารเร่งปฏิกิริยาบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride) มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นได้ดีมากถึง 70-80% ของน้ำหนักตัว เมื่อเทียบกับซิลิกาเจลแล้ว อัตราเร็วในการดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ที่ 75% ของดินไดอะตอมจะต่ำกว่า การดูดความชื้นของดินไดอะตอมนี้มีแรงดึงดูดของโมเลกุลค่อนข้างมาก ทำให้การคายความชื้นเมื่ออุณหภูมิรอบข้างสูงขึ้นเกิดขึ้นได้น้อยมากหรือไม่เกิดขึ้นเลย จากความสามารถในการดูดความชื้นที่ดี อัตราเร็วไม่เร็วจนเกินไปและโอกาสในการคายความชื้นที่ต่ำมากเป็นเหตุให้ดินไดอะตอมเป็นทางเลือกที่ดีของสารดูดความชื้นและได้รับการยอมรับอย่างมากในการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศ

ดินเหนียวดูดซับ (Montmorillonite clay)

ดินธรรมชาติที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมาก ดินประเภทนี้เมื่อได้รับการเผาที่อุณหภูมิสูง (Calcination) จะทำให้ความสามารถในการดูดความชื้นและการคงสภาพหลังการใช้ดีขึ้น โดยปกติดินเหนียวดูดซับมีความสามารถในการดูดความชื้นประมาณ 25% ของน้ำหนักตัว ประสิทธิภาพดังกล่าวจะลดลงค่อนข้างมากเมื่ออุณหภูมิรอบข้างสูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยเหตุนี้การใช้ดินเหนียวดูดซับสำหรับบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งจะต้องพิจารณาถึงข้อจำกัดนี้

เยื่อกระดาษ (Plant fiber)

สารดูดความชื้นชนิดนี้จัดเป็นนวัตกรรมของบริษัท Shanghai polly technology development (ประเทศจีน) ที่สามารถพัฒนาเยื่อกระดาษธรรมชาติให้มีคุณสมบัติในการดูด

ความชื้นได้มากถึง 100% ของน้ำหนักตัว ความสามารถในการดูดความชื้นได้มากกว่า Silica Gel ถึง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 เท่า ณ ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ นั้น ทำให้ Polly Fiber Desiccant สามารถนำมาใช้ทดแทน Silica Gel ในอุตสาหกรรมอาหารและยาได้เป็นอย่างดี

แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO) หรือหินปูน (Caustic lime / Quick lime)

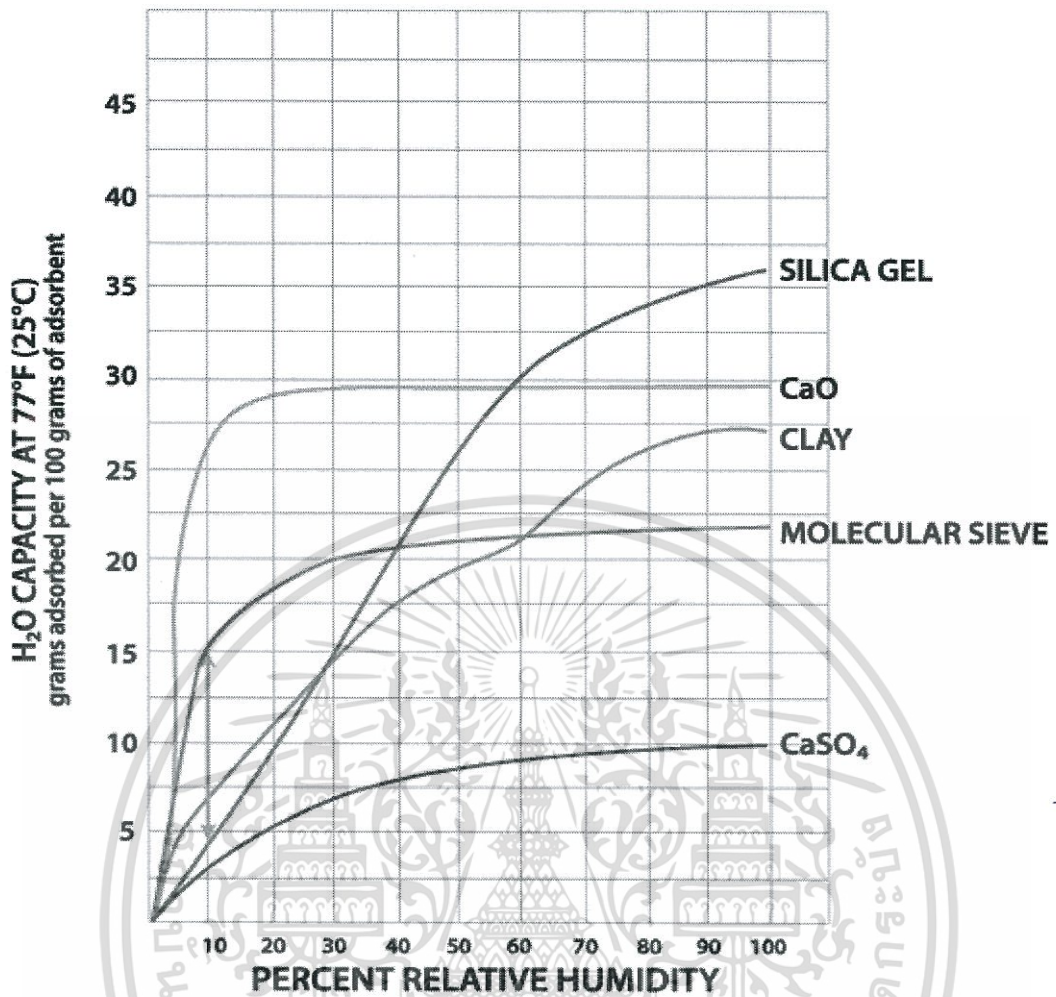
ลักษณะเป็นผงสีขาว เป็นสารที่มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นประมาณ 28% ของน้ำหนักตัว มีอัตราการคายความชื้นที่ต่ำ ความเร็วในการดูดความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำค่อนข้างช้า เมื่อมีการดูดความชื้นจนกระทั่งอิ่มตัวจะกลายเป็นสารกึ่งเหลว (Swell) คล้ายแป้งละลายน้ำขุ่น มีคุณสมบัติในการกักความร้อนสูง ดังนั้นบรรจุภัณฑ์ของสารดูดความชื้นประเภทนี้ต้องป้องกันไม่ให้สารดูดความชื้นปนไปกับผลิตภัณฑ์ได้โดยเด็ดขาด

แคลเซียมซัลเฟต (Calcium sulfate, CaSO₄)

สารที่ได้จากแรยิปซัม การดูดความชื้นค่อนข้างต่ำประมาณ 10% ของน้ำหนักตัว เป็นสารที่คงสถานะได้ดีไม่เป็นพิษและไม่กักความร้อน

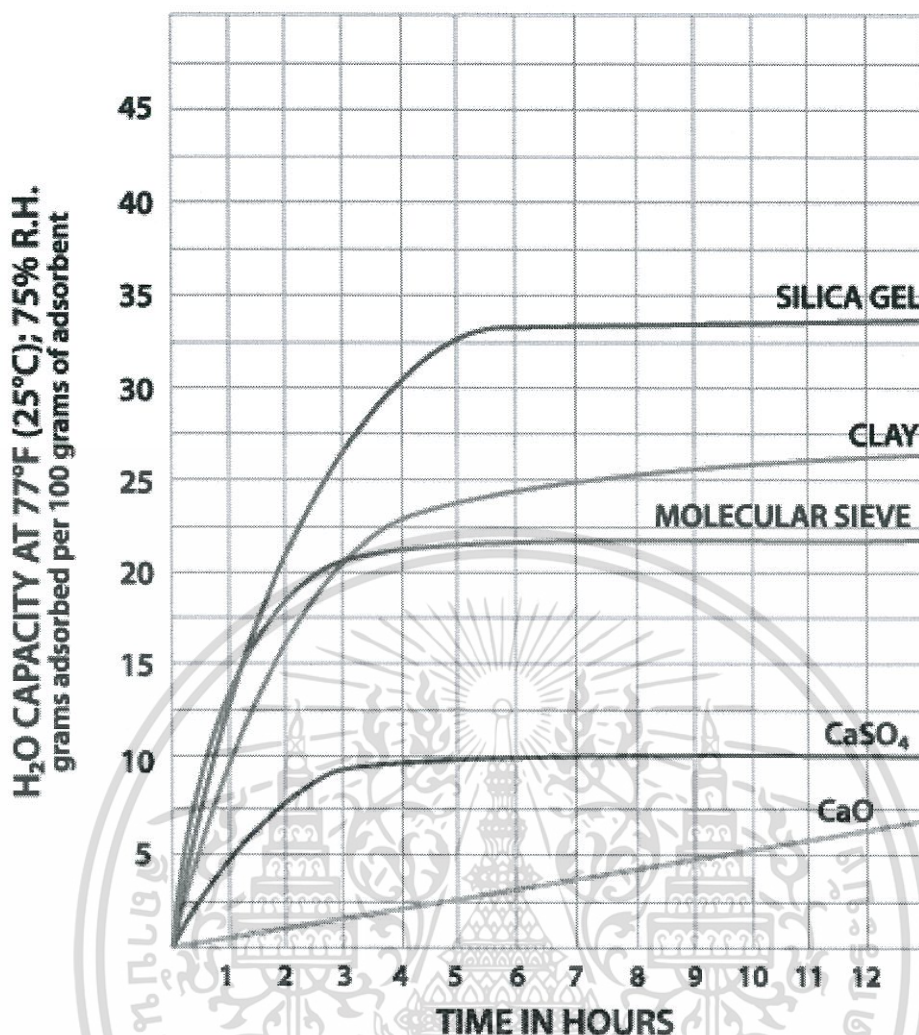
โมเลกุลาร์ซีฟ (Molecular sieve)

สารสังเคราะห์ที่มีโครงสร้างพิเศษทำให้มีพื้นผิวสัมผัสประมาณ 700-800 ตารางเมตรต่อ 1 กรัม และมีแรงดึงดูดความชื้นที่สูงมากดูดความชื้นได้ดีมากภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์รอบข้างในระดับต่ำ (10%-30%) โดยมีประสิทธิภาพในการดูดความชื้นประมาณ 22% ของน้ำหนักตัว ทำให้ปัญหาการคายความชื้นน้อยกว่าซิลิกาเจลและดินเหนียวดูดซับเมื่ออุณหภูมิรอบข้างสูงขึ้น โมเลกุลาร์ซีฟยังไม่ได้รับการรับรองจากหน่วยงานของรัฐในการใช้งานกับอาหารและยาจึงทำให้สารชนิดนี้ยังไม่แพร่หลายมากนัก



รูปที่ 2.9 Equilibrium Capacity ของสารดูดความชื้นชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 อัตราการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นชนิดต่าง ๆ

2) สารดูดความชื้นประเภทของเหลว (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน)

สารละลายที่ใช้เป็นสารดูดความชื้นเหลวต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ ความดันไอต่ำ เพื่อการถ่ายเทมวลที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างความดันไอของอากาศและความดันไอของสารดูดความชื้นเหลว นอกจากคุณสมบัติด้านความดันไอแล้วสารดูดความชื้นจะต้องมีความหนืดต่ำและคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนได้ดี รวมถึงคุณสมบัติที่ไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน ไม่มีกลิ่น ไม่ก่อให้เกิดสารพิษ มีความเสถียรและราคาไม่แพง

สารดูดความชื้นเหลวที่นิยมใช้ได้แก่สารละลายลิเทียมโบรไมด์ (LiBr) ลิเทียมคลอไรด์ (LiCl)

แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) และไตรเอทิลีนไกลคอล (TEG) ความดันไอของสารดูดความชื้นเหลวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสาร ระบบลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นเหล่านั้นมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าสารดูดความชื้นชนิดของแข็ง เนื่องจากสามารถดูดซึมสารปนเปื้อนอื่น ๆ ในอากาศได้ เช่น สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ รวมถึงเชื้อแบคทีเรีย แต่มีการออกแบบลักษณะการบรรจุที่ย่งยากซับซ้อน

2.3.2 วัฏจักรสารดูดความชื้นในกระบวนการถ่ายเทความชื้น

สารดูดความชื้นเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นรูพรุนสูง ซึ่งประกอบด้วยช่องว่างภายในขนาดเล็กจำนวนมาก พื้นที่ผิวทั้งหมดมีขนาดใหญ่ 0.1 ถึง 1.0 ตารางกิโลเมตรต่อกิโลกรัมหรือ 20 ถึง 200 สนามฟุตบอลต่อกิโลกรัม ช่องว่างมีขนาดเล็กเป็นนาโนเมตร โดยสารดูดความชื้นจะดูดซับความชื้นจากอากาศ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความดันไอที่แตกต่างระหว่างน้ำในอากาศและน้ำในสารดูดความชื้นนั้น ๆ โดยปกติแล้วไอน้ำจะถูกดูดซับอยู่บนผิวของสารดูดซับความชื้นนั้น ๆ โดยวัฏจักรการทำงานของสารดูดความชื้นทุกชนิดมีความคล้ายกันในเรื่องของการดูดซับความชื้น คือ เมื่อความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้นมีค่าต่ำกว่าความดันไอน้ำในอากาศสารดูดความชื้นจะเริ่มดูดไอน้ำ (ความชื้น) ในอากาศและเมื่อความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้นมีค่าสูงกว่าความดันไอน้ำของอากาศสารดูดความชื้นคายไอน้ำออกมา (Neti and Wolfe, 1999)

ความดันไอ (Vapor pressure)

คือ ความดันของไอที่อุณหภูมิกำหนดสำหรับสารเฉพาะมีความดันไอ ความดันไอนี้เกิดจากโมเลกุลหรืออะตอมหนีจากของเหลวหรือของแข็ง ถ้าอยู่ในจุดสมดุลกับสถานะที่เป็นของเหลวหรือของแข็งของมัน เรียกว่า ความดันไอสมดุล (Equilibrium vapor pressure) หรือ ความดันไอสัมบูรณ์ (Saturation vapor pressure) ของสารที่อุณหภูมินั้น

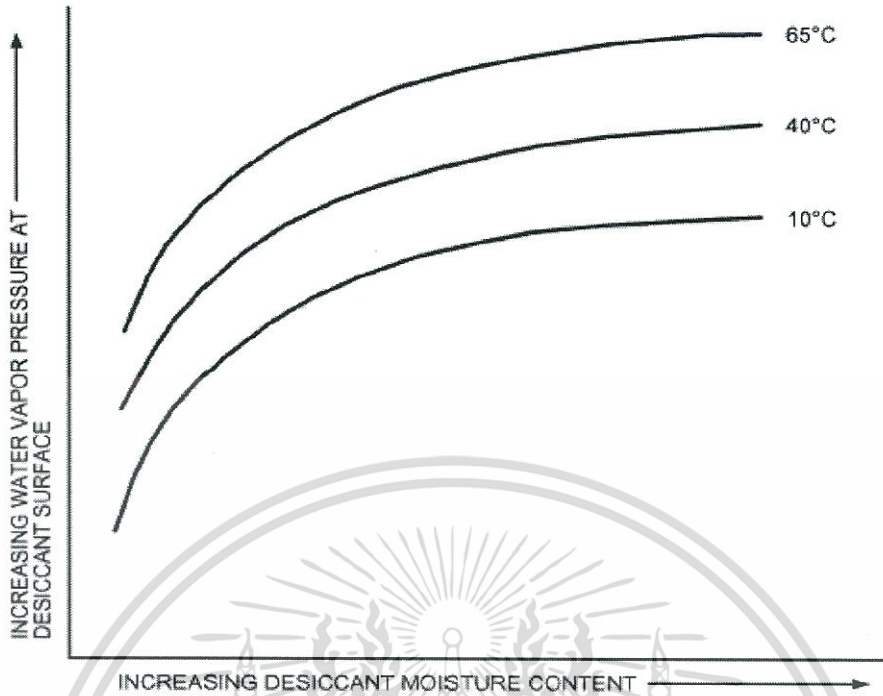
ความดันไอของสารที่เป็นของเหลวปกติจะมีความแตกต่างจากความดันไอของสารเดียวกันที่

อยู่ในสถานะของแข็ง ถ้าอุณหภูมิของความดันไอของของเหลวสูงกว่าของของแข็ง ของเหลวจะระเหย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

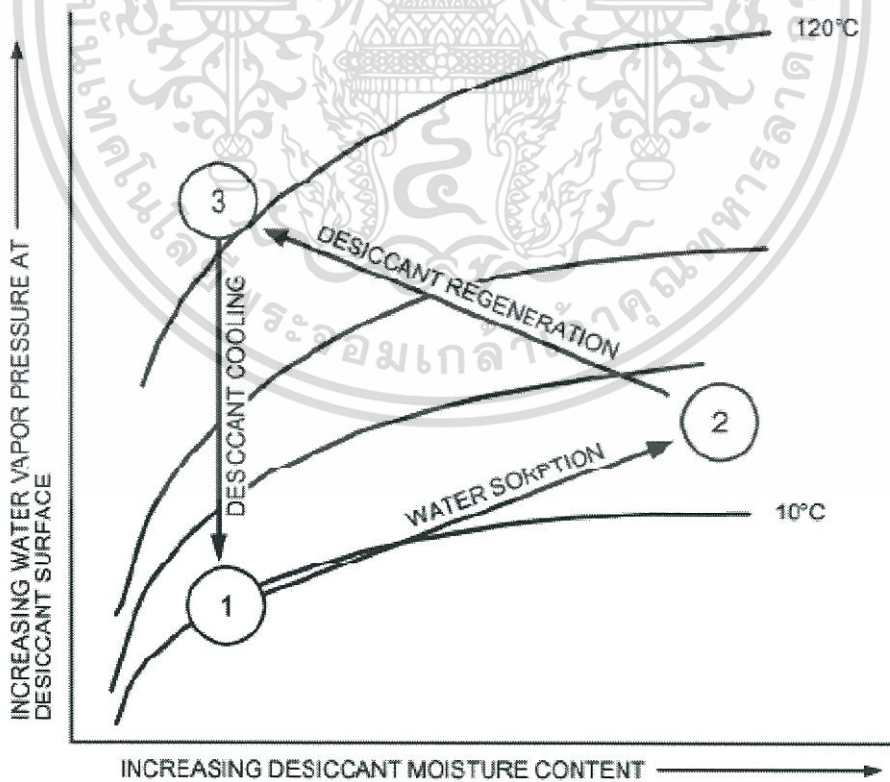
กลายเป็นไอแต่ไอจะควบแน่นเป็นของแข็ง นั่นคือของเหลวถูกทำให้เยือกแข็ง (Freezing) ถ้าอุณหภูมิของความดันไอของของเหลวต่ำกว่าของของแข็ง ของแข็งจะระเหยกลายเป็นไอแต่ไอจะควบแน่นเป็นของเหลว นั่นคือของแข็งถูกทำให้หลอมเหลว ที่อุณหภูมิต่ำกว่าของของแข็ง ของสองความดันไอที่ซึ่งมีความสมดุลระหว่าง สถานะ ของเหลวและของแข็ง ที่อุณหภูมินี้จะเป็นจุดหลอมเหลว (Melting point)

ความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้นมีค่าสูงขึ้นตามอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของสารดูดความชื้นที่สูงขึ้น และเมื่อความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้นมีค่าสูงกว่าความดันไอน้ำในอากาศความชื้นจะถ่ายเทออกจากสารดูดความชื้น ซึ่งเรียกว่า รีเจนเนอเรชันหรือกระบวนการคายความชื้น (Regeneration process) ดังรูปที่ 2.5 และในรูปที่ 2.6 แสดงถึงพลังงานที่ใช้ในวัฏจักรการทำงานของสารดูดความชื้นโดย (จากจุด 2-3) พลังงานที่ใช้ในการลดอุณหภูมิของสารดูดความชื้น (จากจุด 3-1) โดยพลังงานรีเจนเนอเรชันจะมีค่าเท่ากับการรวมกันของพลังงาน 3 ส่วน คือ

- 1) พลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของสารดูดความชื้น จนกระทั่งความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้นมีค่าสูงกว่าความดันไอน้ำในอากาศ
- 2) พลังงานความร้อนที่ทำให้ความชื้นกลายเป็นไอ (2465 kJ/kg)
- 3) พลังงานความร้อนในการดึงน้ำออกจากสารดูดความชื้น สำหรับพลังงานที่ใช้ในการลดอุณหภูมิของสารดูดความชื้นขึ้นอยู่กับปริมาณของสารดูดความชื้น และความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิหลังจากการรีเจนเนอเรชันและอุณหภูมิต่ำสุดที่สารดูดความชื้นจะสามารถเอาไอน้ำออกจากอากาศได้



รูปที่ 2.11 ความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้น (Neti and Wolfe, 1999)



รูปที่ 2.12 วัฏจักรการทำงานของสารดูดความชื้น (Neti and Wolfe, 1999)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

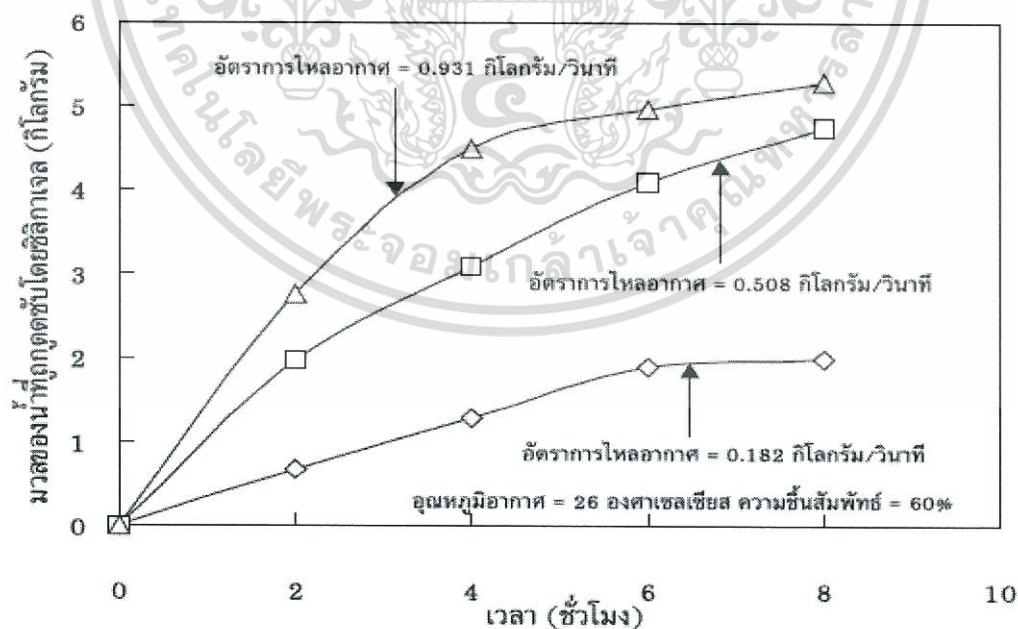
2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการถ่ายเทความชื้นของสารดูดความชื้น

1) ชนิดของสารดูดความชื้น

ความสามารถของการดูดความชื้นในสารดูดความชื้นขึ้นอยู่กับความเป็นรูพรุนที่ผิวของสารดูดความชื้นชนิดนั้น ๆ ซึ่งโครงสร้างตามขนาดและความลึกของรูพรุนก็จะแตกต่างกันไปตามประเภทของสารดูดความชื้น นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของสารดูดความชื้น

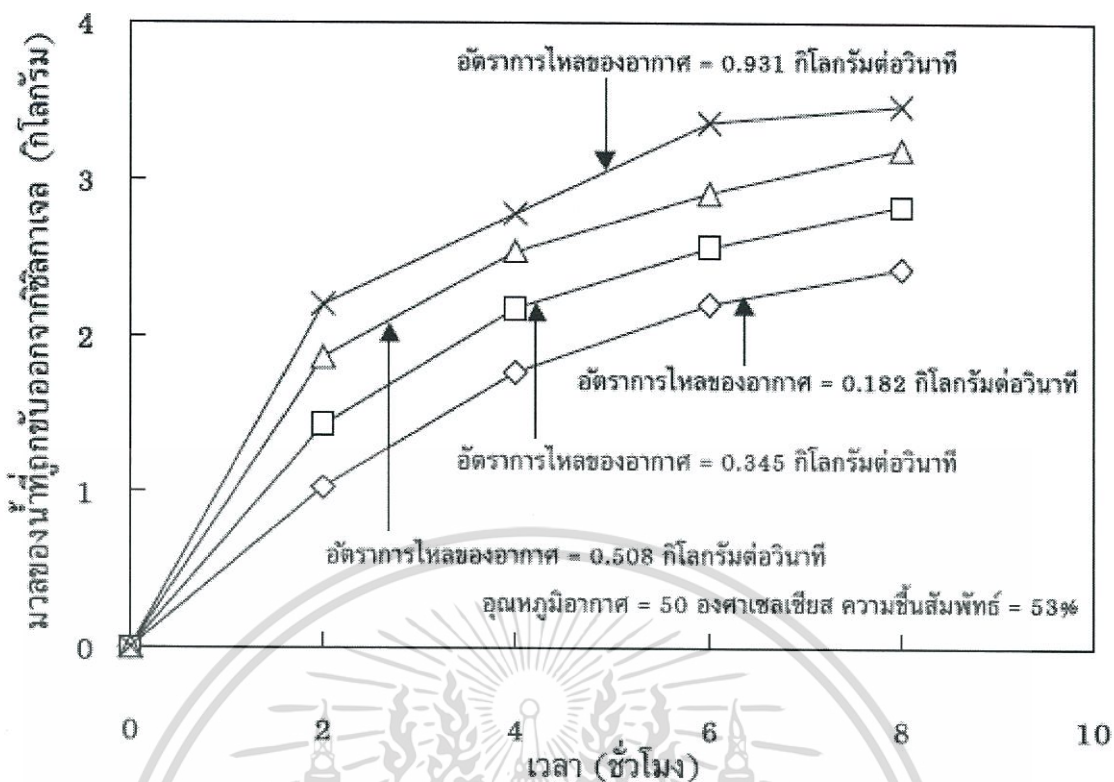
2) อัตราการไหลเชิงมวล

อดิพงษ์ และคณะ (2548) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของชุดสารดูดความชื้นแบบถาดสำหรับกระบวนการอบแห้งลำไย พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมีผลต่อสมรรถภาพการดูดความชื้นและคายความชื้นของชุดสารดูดความชื้นที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเท่ากับ 0.182 กิโลกรัมต่อวินาที ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับจะมีค่าต่ำกว่าที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเท่ากับ 0.931 กิโลกรัมต่อวินาทีของการดูดความชื้น และที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเท่ากับ 0.931 กิโลกรัมต่อวินาทีชุดสารดูดความชื้นจะคายความชื้นได้มากที่สุด



รูปที่ 2.13 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศต่อมวลของไอน้ำที่ถูกดูดโดยซิลิกาเจล (อดิพงษ์ และคณะ, 2548)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

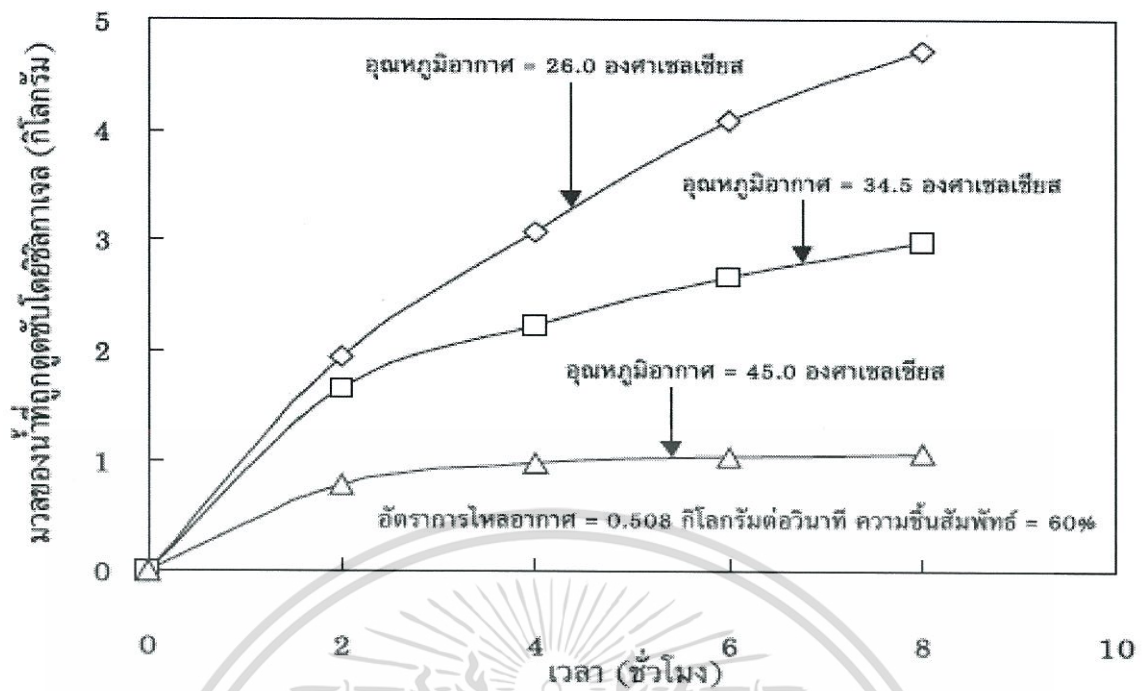


รูปที่ 2.14 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศต่อมวลของไอน้ำที่ถูกขับออกจากซิลิกาเจล (อติพงศ์ และคณะ, 2548)

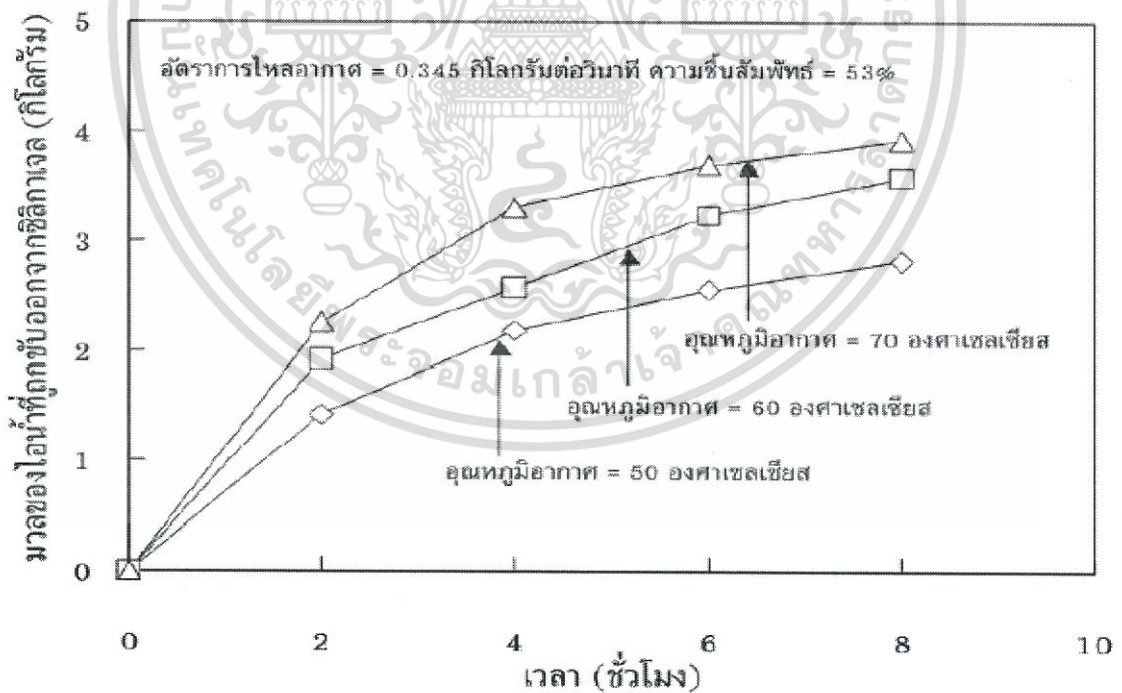
3) อุณหภูมิของอากาศ

อติพงศ์ และคณะ (2548) ทำการทดลองพบว่าอุณหภูมิมีต่อคุณสมบัติการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นการที่อุณหภูมิของอากาศเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นลดลงโดยที่ความเร็วอากาศด้านเข้าชุดสารดูดความชื้นเท่ากับ 0.508 กิโลกรัมต่อวินาที และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศประมาณ 60 % ความชื้นของซิลิกาเจล กรณีที่อุณหภูมิของอากาศเท่ากับ 26 องศาเซลเซียส ซิลิกาเจลสามารถดูดความชื้นได้มากที่สุดในขณะที่อุณหภูมิของอากาศเท่ากับ 45 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับโดยซิลิกาเจลจะน้อยลงและมีผลต่อการคายความชื้นเช่นกัน จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิอากาศ 70 องศาเซลเซียสจะสามารถทำให้มวลของไอน้ำในซิลิกาเจลลดลงมากกว่าที่อุณหภูมิอากาศที่ 60 องศาเซลเซียสและ 50 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 อุณหภูมิอากาศขาเข้าต่อมวลของไอน้ำที่ถูกดูดโดยซิลิกาเจล (อติพงศ์ และคณะ, 2548)

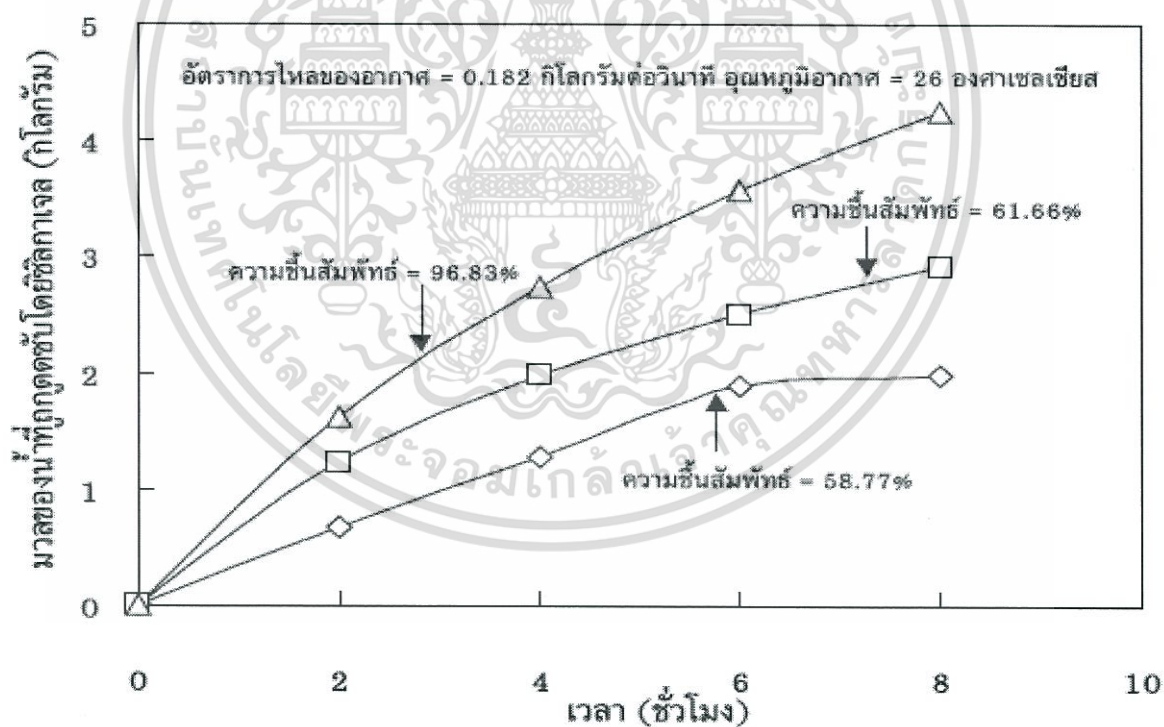


รูปที่ 2.16 อุณหภูมิอากาศขาเข้าต่อมวลของไอน้ำที่ถูกขับออกจากซิลิกาเจล (อติพงศ์ และคณะ, 2548)

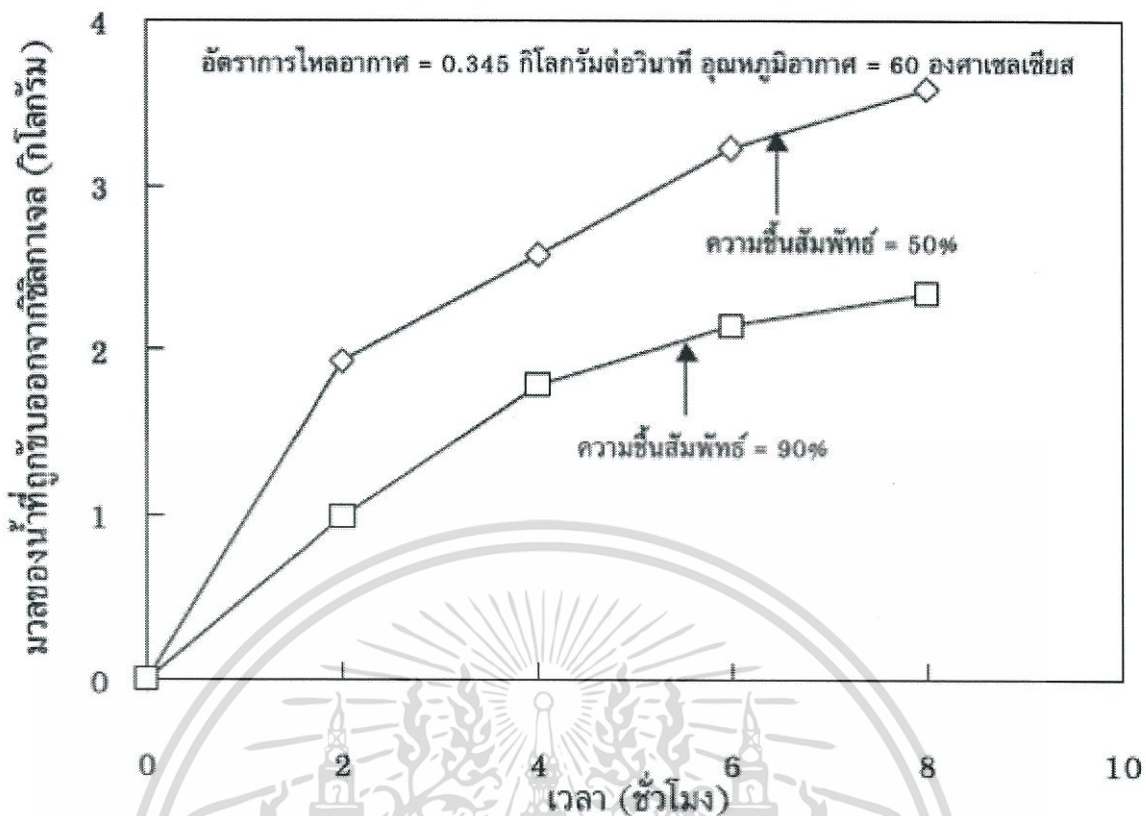
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ

อดิพงษ์ และคณะ (2548) ได้ทำการศึกษาพบว่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศมีผลต่อการดูดความชื้นและการคายความชื้นโดยที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศด้านเข้าชุดสารดูดความชื้นเท่ากับ 0.182 กิโลกรัมต่อวินาทีและอุณหภูมิอากาศด้านเข้าชุดสารดูดความชื้นประมาณ 26 องศาเซลเซียสซึ่งพบว่าความชื้นสัมพัทธ์สูงชันจะส่งผลให้ปริมาณไอน้ำที่ถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้น และพบว่าผลของความชื้นสัมพัทธ์อากาศขาเข้าชุดสารดูดความชื้นต่อมวลน้ำที่ถูกขับออกจากซิลิกาเจล ณ เวลาต่าง ๆ โดยพบว่ากรณีการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะส่งผลให้ปริมาณความชื้นที่ขับออกจากสารดูดความชื้นลดลงทั้งนี้เนื่องจากในกรณีดังกล่าวผลต่างของความหนาแน่นของไอน้ำในบรรยากาศและความหนาแน่นของน้ำในสารดูดความชื้นน้อยจึงทำให้แรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวลความชื้นลดน้อยลงด้วยดังนั้นปริมาณความชื้นที่ถูกขับออกจากสารดูดความชื้นจึงลดลง



รูปที่ 2.17 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้าต่อมวลของไอน้ำที่ถูกดูดโดยซิลิกาเจล (อดิพงษ์ และคณะ, 2548)



รูปที่ 2.18 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเข้าต่อมวลของไอน้ำที่ถูกขับออกจากซิลิกาเจล (อติพงศ์ และคณะ, 2548)

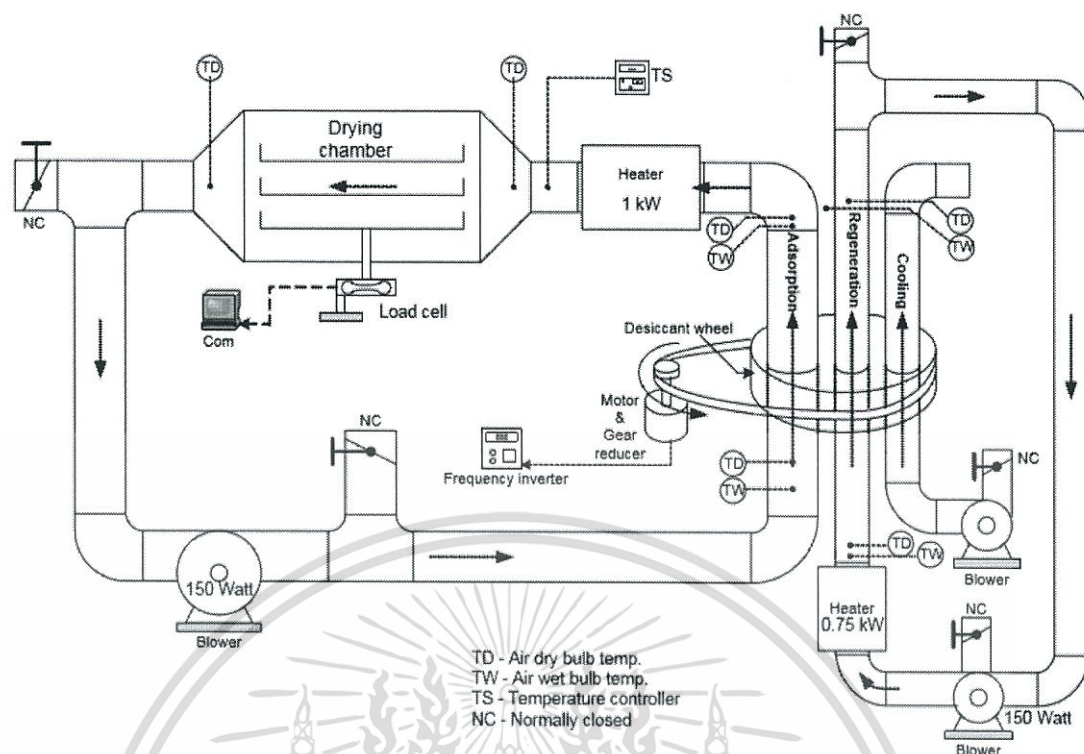
2.3.4 การประยุกต์ใช้สารดูดความชื้นร่วมกับกระบวนการอบแห้ง

อติพงศ์ และคณะ (2548) ได้ศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของเตาอบลำไย กล่าวคือ การลดความชื้นของอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้ ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงในการอบแห้งและลดระยะเวลาของการอบแห้งลงได้ โดยออกแบบและสร้างชุดสารดูดความชื้น สำหรับใช้ในกระบวนการลดความชื้นของอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้ ชุดสารดูดความชื้นมีลักษณะเป็นชั้นบรรจุซิลิกาเจลชั้นละ 3 กิโลกรัม ขนาด $49.5 \times 49.5 \times 2.5$ เซนติเมตร จำนวน 10 ชั้นวางซ้อนกันในแนวตั้ง โดยมีระยะห่างระหว่างชั้น 2.5 เซนติเมตร ทดสอบสมรรถนะของชุดสารดูดความชื้นทั้งในกรณี ของกระบวนการดูดความชื้นและกระบวนการอบไล่ความชื้น โดยนำชุดสารดูดความชื้นไปทดสอบสมรรถนะในอุโมงค์ลม และได้ศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

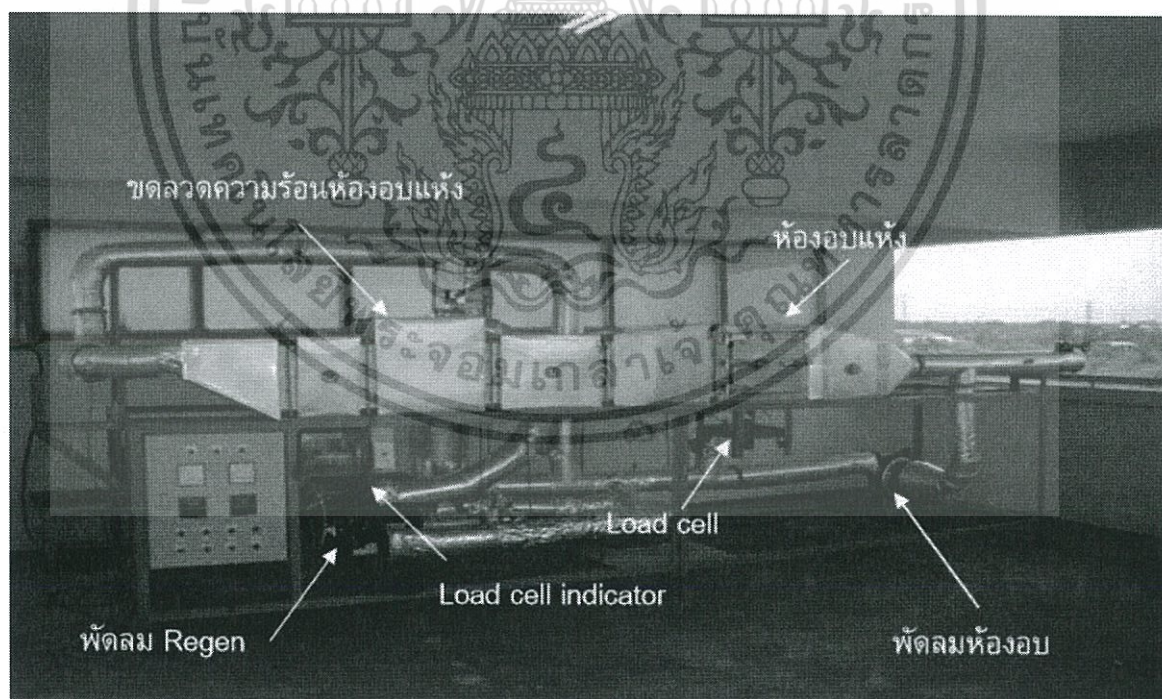
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อุณหภูมิของอากาศด้านเข้าชุดสารดูดความชื้น และเวลาที่ใช้ทดสอบ โดยพบว่าอัตราการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นจะเพิ่มสูงขึ้น ในกรณีที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม อัตราการดูดความชื้นดังกล่าวจะลดลง ในกรณีที่อุณหภูมิด้านเข้าชุดสารดูดความชื้นของอากาศเพิ่มขึ้น ในกรณีของการอบไล่ความชื้นออกจากชุดสารดูดความชื้นพบว่าปริมาณความชื้นที่ถูกขับออกมาจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศและอุณหภูมิด้านเข้าของอากาศเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันปริมาณความชื้นที่ถูกขับออกมาจะลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองอบแห้งกับผ้ามวนชุบน้ำ พบวาระบบสามารถทำงานได้ดีโดยมีค่าอัตราการอบแห้ง อัตราการดูดความชื้น และอัตราการคายความชื้นสอดคล้องกัน การนำอากาศที่ผ่านการลดความชื้น ซึ่งมีค่าอัตราส่วนความชื้นคอนข้างคงที่แล้ว เวียนกลับมาใช้ใหม่ช่วยลดการใช้พลังงานลงได้มาก อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่ออกจาก regeneration section มีค่าคอนข้างคงที่เนื่องจากการรั่วไหลของไอน้ำที่บริเวณวงล้อสารดูดความชื้น กระบวนการดูดซับความชื้นโดยซิลิกาเจลใน adsorption section จะคายพลังงานความร้อนกลับคืนให้อากาศอบแห้ง แต่ที่ยังคงมีการใช้พลังงานของขดลวดไฟฟ้าสำหรับห้องอบแห้งอยู่ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบอบแห้งที่ไซปมความร้อนพบวามสมรรถนะของระบบอบแห้งที่ไซลมร้อนรวมกับวงล้อสารดูดความชื้นในด้านของอัตราการอบแห้งจำเพาะและ การใช้พลังงานปฏุมภูมิจำเพาะมีแนวโน้มที่ดีกว่าอย่างชัดเจน



รูปที่ 2.19 แบบจำลองเครื่องอบแห้งผสมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น รั้วชชัย และคณะ (ม.ป.ป.)



รูปที่ 2.20 เครื่องอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับวงล้อสารดูดความชื้น รั้วชชัย และคณะ (ม.ป.ป.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Liquid Desiccant Dehumidification หลักการทำงาน อาศัยการทำงานของสารละลายของสารดูดความชื้น LiCl ในการลดความชื้นอากาศ และใช้ปั๊มความร้อนเป็นตัวดึงความร้อนออกจากอากาศไปใช้ไถการไล่ความชื้นจากสารดูดความชื้น ใช้ควบคุมความชื้นของอากาศในระดับต่ำกว่า 40 %RH ทดแทนการใช้วงล้อดูดความชื้น (Desiccant Wheel) และใช้ Electric Heater หรือ Steam ในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศเพื่อไล่ความชื้นออกจากสารดูดความชื้น ซึ่งต้องใช้พลังงานสูงมากและทำให้อากาศแห้งที่ส่งกลับสู่ห้องมีอุณหภูมิสูงชันมาก จากข้อมูลกรณีศึกษาในประเทศไทย เทคโนโลยีการลดความชื้นด้วยสารดูดความชื้นเหลวสามารถลดการชะล้างงานในกระบวนการลดความชื้นได้ประมาณ 50% เมื่อเทียบกับระบบความชื้นเดิมที่ใช้วงล้อดูดความชื้นและ Electric Heater หรือ Steam Heater ในการไล่ความชื้นจากวงล้อดูดความชื้น (Regeneration)

Ismail (1991) มีการทดลองนำซิลิกาเจลมาใช้ลดความชื้นของอากาศและนำไปลดอุณหภูมิของข้าวโพดที่ถูกจัดเก็บอยู่ในไซโล โดยให้อากาศไหลผ่านซิลิกาเจลเพื่อลดความชื้นในอากาศก่อนผ่านไปยังไซโลที่เก็บข้าวโพด และได้ติดตั้งแผงรวมแสงอาทิตย์ขนาด 5.85 ตารางเมตร เพื่อทำการคืนรูปซิลิกาเจลในเวลากลางวัน จากการทดลองพบว่าสามารถลดอุณหภูมิของข้าวโพดได้ดีกว่าการผึ่งด้วยลมธรรมชาติ อีกทั้งค่าความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ก็สูงกว่าเพียงเล็กน้อย

Ming and Colleagues (1994) ศึกษาการใช้สารดูดความชื้นเพื่อลดความชื้นของอากาศในกระบวนการอบแห้งใบชาเพื่อคงไว้ซึ่งกลิ่นและสีที่ดีของใบชา โดยลดความชื้นในอากาศเหลือ 1-30% และใช้อุณหภูมิในการอบแห้งระหว่าง 30-80 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าคุณภาพของใบชาดีขึ้นและในขณะเดียวกันสามารถประหยัดพลังงานได้ 15% เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอบแห้งใบชาแบบปกติ ทั้งนี้เนื่องจากการลดความชื้นของอากาศลง ส่งผลให้ลดอุณหภูมิของการอบแห้งได้จาก 110 องศาเซลเซียสเป็น 80 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thoruwa et al. (1996) สร้างเครื่องอบแห้งเมล็ดธัญพืชร่วมกับสารดูดความชื้น เพื่ออบแห้งเมล็ดข้าวโพดสด โดยใช้สารดูดความชื้นเป็นดินเบนโทไนต์และแคลเซียมคลอไรด์ สารดูดความชื้นชนิดนี้จะสามารถนำกลับมาใช้ได้ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และดูดความชื้นได้สูงสุด 45% (dwb) หลักการทำงานคือจะใช้เครื่องทำความร้อนแบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบเป็นตัวเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศแห้ง ซึ่งถูกเชื่อมต่อไปยังห้องอบแห้ง สารดูดความชื้นจะถูกวางไว้บนเบดบรรจุข้าวโพดในห้องอบแห้ง กระบวนการอบแห้งใช้ช่วงเวลากลางวันผลิตอากาศร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ และเวลากลางคืนสำหรับการอบแห้ง การอบแห้งจะเกิดขึ้นโดยการใช้อากาศหมุนเวียนภายในเบดบรรจุสารดูดความชื้น ซึ่งสารดูดความชื้นที่อิ่มตัวจะเข้าสู่กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ระหว่างกลางวัน เครื่องอบแห้งนี้สามารถอบแห้งข้าวโพดสดที่มีความชื้นเริ่มต้น 38% (dwb) ลดลงเหลือ 15% (dwb) จำนวน 90 กิโลกรัมในเวลา 24 ชั่วโมง

2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การทำแห้ง

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง โดยสมการของอัตราส่วนความชื้นแสดงในสมการที่ (2.7) (Doymas, 2008)

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (2.7)$$

เมื่อ	MR	คือ อัตราส่วนความชื้น
	M_t	คือ ปริมาณความชื้นที่เวลาใด ๆ (% dry basis)
	M_e	คือ ปริมาณความชื้นสมดุล (% dry basis)
	M_i	คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (% dry basis)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งด้วยลมร้อนที่นิยมใช้ในการศึกษาสำหรับการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรจำพวกผักและผลไม้ มักจะเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมไพริคอล (Empirical Model) อาทิเช่นแบบจำลองของ Newton, Page และ Midilli et al. ซึ่งรูปแบบความสัมพันธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง (Doymas, 2008)

Model	Model equation
Newton	$MR = \exp(-k.t)$
Page	$MR = \exp(-k.t^n)$
Henderson and Pabis	$MR = a. \exp(-k.t)$
Logarithmic	$MR = a. \exp(-k.t) + c$
Two term	$MR = a. \exp(-k_0.t) + b. \exp(-k_1.t)$
Wang and Singh	$MR = 1 + a.t + b.t^2$
Midilli et al	$MR = a \exp(-k.t^n) + (b.t)$
Modified Page	$MR = \exp(-(k.t)^n)$
Two term exponential	$MR = a \exp(-k.t) + (1-a) \exp(-k.a.t)$
Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-k.t) + (1-a) \exp(-k.b.t)$
Logistic	$MR = a / [1 + \exp(k.t)]$
Verma et al.	$MR = a. \exp(-k.t) + (1-a) \exp(-k_0.t)$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่า Chi-Square (χ^2) และค่า RMSE (Root Mean Square Error) เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติซึ่งช่วยในการวิเคราะห์การเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความแม่นยำในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน (Kingly and Singh, 2007;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Kaleta and Górnicki, 2010) ค่า R^2 มีค่าสูงแสดงว่าตัวแปร x มีอิทธิพลต่อตัวแปร y อย่างมาก หรือแสดงถึงคุณภาพของรูปแบบสมการที่มีความเหมาะสมในการทำนาย ในขณะที่ค่า χ^2 และค่า RMSE เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่มีความแม่นยำในการทำนายที่เหมาะสมควรมีค่า R^2 สูงแต่มีค่า χ^2 และค่า RMSE ต่ำ โดยสมการหาพารามิเตอร์ทั้งสามค่า แสดงในสมการที่ (2.8) – (2.10)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pr,i} - MR_{ex,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pr} - MR_{ex,i})^2} \quad (2.8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pr,i} - MR_{ex,i})^2} \quad (2.9)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{ex,i} - MR_{pr,i})^2}{N-n} \quad (2.10)$$

เมื่อ	MR_{exp}	คือ	ค่าอัตราส่วนความชื้นของการทดลอง
	MR_{pr}	คือ	ค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
	N	คือ	จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์
	n	คือ	จำนวนตัวแปรในแบบจำลองคณิตศาสตร์

2.5 สมการของอาร์เรเนียส

จากกฎอัตรา $rate = k [A]_m [B]_n$ บอกได้แต่เพียงว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดปฏิกิริยา แต่ค่าคงที่อัตราอาจเปลี่ยนแปลงไปได้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าคงที่อัตราจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิและพลังงานก่อกัมมันต์ (ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา) เปลี่ยนไป แต่มีสมการที่สามารถบอกความสัมพันธ์ของสามตัวแปรนี้ได้ นั่นคือสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation)

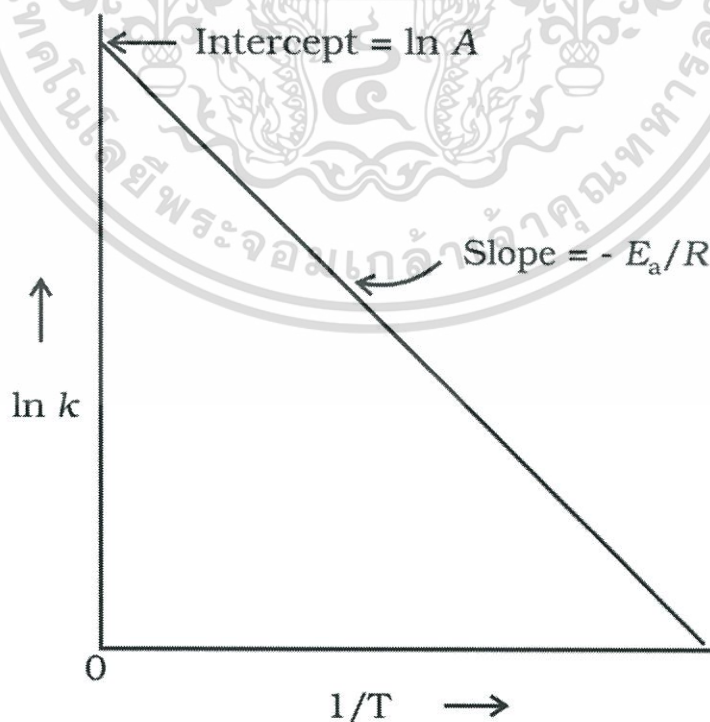
จากการสังเกตจะเห็นได้ว่าค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็นไปตามสมการของอาร์เรเนียส

$$k = A e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2.11)$$

ถ้าเราเขียนสมการให้อยู่ในรูปลอการิทึมธรรมชาติ จะได้ว่า

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (2.12)$$

ถ้าเราเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ จะได้กราฟเป็นเส้นตรง และมีค่าความชันเท่ากับ $-\frac{E_a}{R}$ และมีจุดตัดแกน $\ln k$ ที่จุด $\ln k = \ln A$



รูปที่ 2.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	A	=	แฟกเตอร์ความถี่ (frequency factor) ซึ่งมีค่าคงที่ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างพอสมควรสำหรับแต่ละปฏิกิริยา
	E_a	=	พลังงานก่อกัมมันต์ (activation energy) ของปฏิกิริยา (kJ/mol)
	R	=	ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/Kmol)
	T	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (หน่วย K)

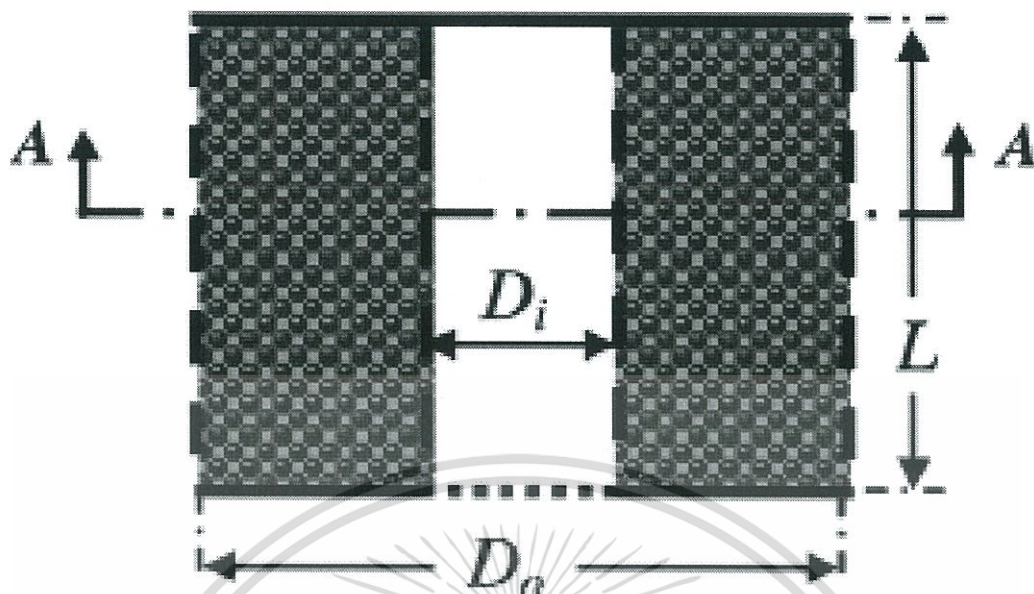
เราเรียกแฟกเตอร์ความถี่และพลังงานก่อกัมมันต์ว่าเป็นพารามิเตอร์ของอาร์เรเนียส

(Arrhenius parameter) โดยเราก็สามารถคำนวณหาพลังงานก่อกัมมันต์และแฟกเตอร์ความถี่ได้ ซึ่งจะนำไปคำนวณหาค่าคงที่อัตราที่ระดับอุณหภูมิอื่นต่อไป (Haritma Chopra, 2007)

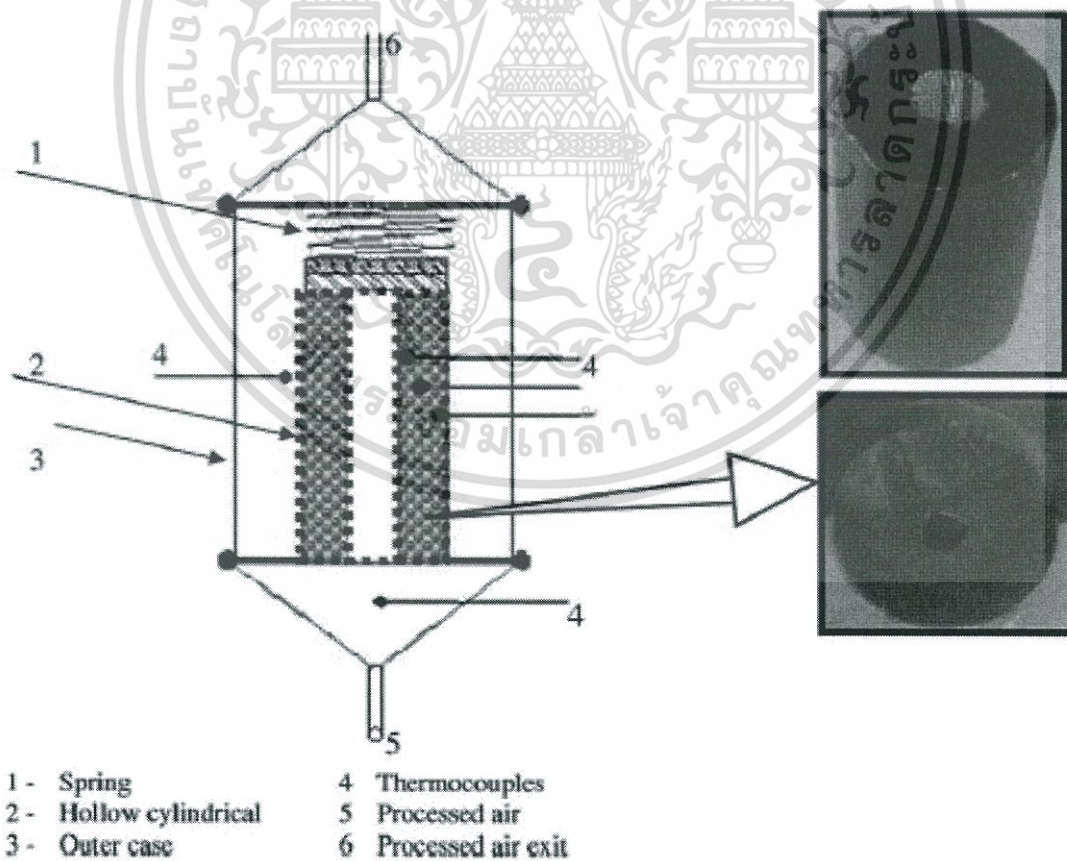
2.6 รูปแบบการบรรจุสารดูดความชื้นประเภทของแข็งแบบ Radial bed

การบรรจุสารดูดความชื้นประเภทของแข็งแบบ Radial bed เป็นรูปแบบที่พัฒนามาเพื่อลดปัญหาเรื่องความดันตกคร่อมของอากาศจากการบรรจุแบบ Vertical bed เนื่องจากการบรรจุแบบ Radial bed จะบรรจุสารดูดความชื้นตามความหนาของทรงกระบอกกลางและให้อากาศไหลผ่านตามแนวรัศมีของทรงกระบอกกลางสัมผัสกับสารดูดความชื้น ซึ่งช่วยลดระยะทางที่อากาศไหลผ่านสารดูดความชื้นทำให้เกิดความดันตกคร่อมของอากาศน้อยลง แต่การดำเนินการจะยุ่งยากกว่าแบบ Vertical bed เพราะต้องทำที่บรรจุสารดูดความชื้นเป็นลักษณะทรงกระบอกกลาง (Awad et al., 2006)

ศึกษาและทดลองคุณลักษณะการดูดความชื้นในหอดูดความชื้นแบบ Radial bed รวมทั้งศึกษาผลของสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง (D_o/D_i) ของทรงกระบอกกลางที่บรรจุสารดูดความชื้นต่อความสามารถในการดูดความชื้นและเปรียบเทียบความดันตกคร่อมของอากาศระหว่างการบรรจุสารดูดความชื้นแบบ Radial bed และแบบ Vertical bed (Awad et al., 2006)



รูปที่ 2.22 ลักษณะการบรรจุสารดูดความชื้นแบบ Radial bed (Awad, et al., 2006)

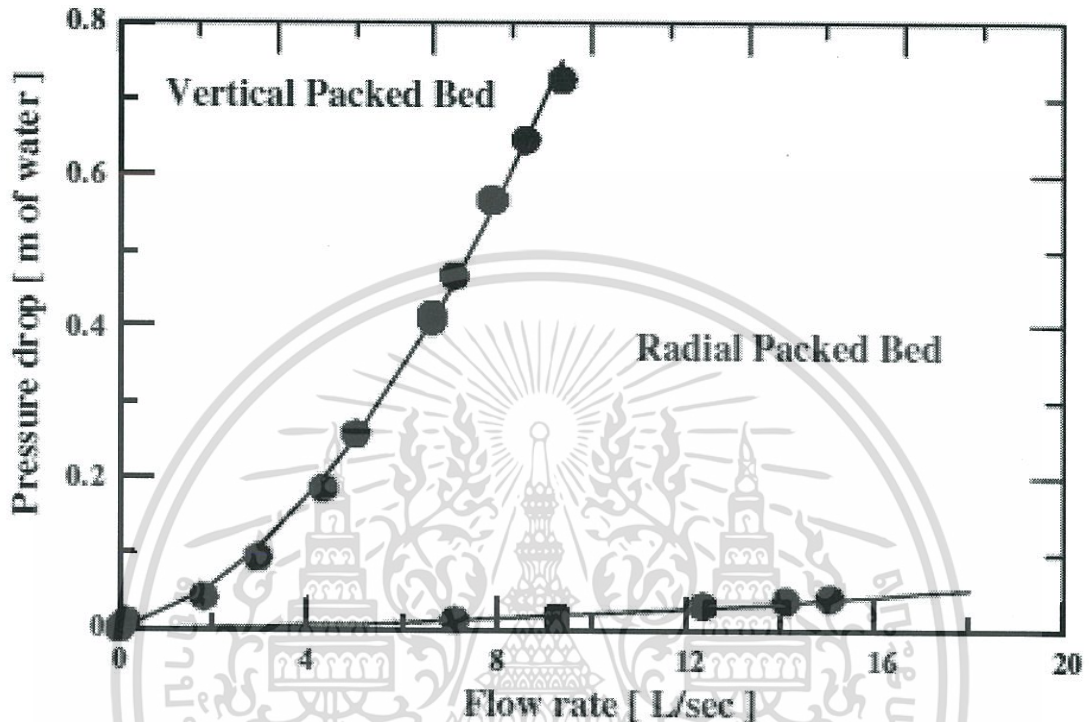


รูปที่ 2.23 ชุดทดลองหอดูดความชื้น Radial bed (Awad, et al., 2006)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองพบว่าความดันตกคร่อมของอากาศเมื่อบรรจุสารดูดความชื้นประเภทของแข็งแบบ Radial bed มีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบความดันตกคร่อมกับแบบ Vertical bed ดังรูปที่

2.24



รูปที่ 2.24 ผลของความดันตกคร่อมกับรูปแบบการบรรจุสารดูดความชื้น (Awad et al., 2006)

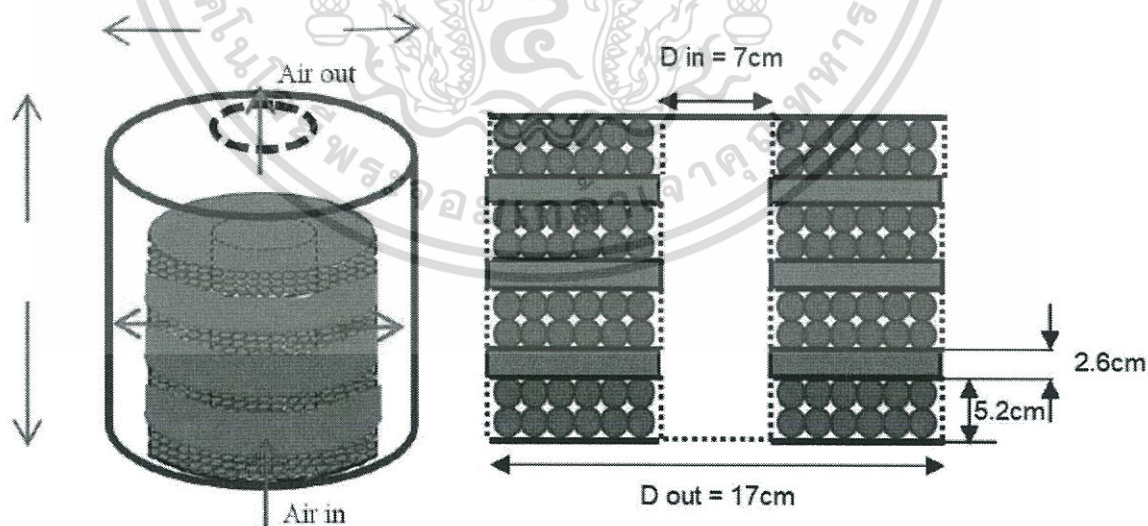
บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

โครงการวิจัยเรื่องการออกแบบและศึกษาสมรรถนะของหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมีนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนสำคัญคือ 1) การทดลองเบื้องต้น 2) การออกแบบและสร้างชุดทดลองหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี และ 3) การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความชื้นภายในหอดูดความชื้น ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การออกแบบและสร้างหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี

หอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี มีทั้งหมด 4 ชั้น แต่ละชั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 17 เซนติเมตร และสูง 5.2 เซนติเมตร มีแผ่นกั้นแต่ละชั้นเพื่อไม่ให้ทุกชั้นติดชิดกัน แผ่นกั้นทำจากแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีหนา 0.8 มิลลิเมตร สูง 2.6 เซนติเมตร ผนังกั้นซิลิกาเจลแต่ละชั้น ทำจากตะแกรงอะลูมิเนียมหนา 0.56 มิลลิเมตร ขนาดช่อง 1.56×1.56 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.1 การบรรจุซิลิกาเจลในหอดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดลองเบื้องต้น

การทดลองเบื้องต้นมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาคุณลักษณะ อัตราการไหลที่ส่งผลต่ออัตราการดูดความชื้น เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบแผ่นกั้นและการวางแผนการทดลอง โดยกำหนดอัตราการไหลที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 10.21 15.31 และ 20.41 ลูกบาศก์เมตรอากาศต่อวินาทีต่อลูกบาศก์เมตรซิลิกาเจล

3.2.1 อุปกรณ์

- 1) Blower
- 2) Heater
- 3) Inverter (JADENDLM1)
- 4) แผงควบคุม
- 5) เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล (UWE GW พิกัดน้ำหนัก 15 กิโลกรัม)
- 6) เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น (Fluke 971 ความคลาดเคลื่อน ± 1)
- 7) เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (DIGICON DA-43A ความคลาดเคลื่อน ± 0.2)
- 8) หอดูดความชื้น
- 9) ซิลิกาเจลสีน้ำเงิน

3.2.2 วิธีการทดลอง

ทำการทดลอง 3 ชั่วโมงแต่ละปัจจัย โดยทำการทดลองในช่วงเวลา 09:30-16:00 น.
ความชื้นสัมพัทธ์ 50-65%

- 1) อบซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 2) วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการทดลองด้วยเครื่องวัด

อุณหภูมิและความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ปรับ Inverter ให้อากาศมีอัตราการไหล 10.21 ลูกบาศก์เมตรอากาศต่อวินาทีต่อลูกบาศก์เมตรซิลิกาเจล (ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อส่งอากาศเท่ากับ 7 เซนติเมตร)

4) บันทึกน้ำหนักของชุดบรรจุซิลิกาเจล ก่อนบรรจุซิลิกาเจล

5) บรรจุซิลิกาเจล ในชุดบรรจุซิลิกาเจลที่ไม่ติดตั้งแผ่นกั้น และนำเข้าหอดูดความชื้น

6) ช่วง 6 นาทีแรก บันทึกน้ำหนักของซิลิกาเจลที่เพิ่มขึ้นทุก 1 นาที และบันทึกค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังออกจากหอดูดความชื้น

7) หลังจากผ่าน 6 นาที บันทึกน้ำหนักของซิลิกาเจลที่เพิ่มขึ้นทุก 3 นาที จนถึงเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงบันทึกน้ำหนักของซิลิกาเจลที่เพิ่มขึ้นทุก 5 นาที จนครบเวลา 2 ชั่วโมง

8) ทำการทดลองใหม่โดยใช้อัตราการไหล 15.31 และ 20.41 ลูกบาศก์เมตรอากาศต่อวินาทีต่อลูกบาศก์เมตรซิลิกาเจล เพื่อศึกษาอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจล

3.3 การออกแบบและสร้างแผ่นกั้นการไหลของของไหลภายในหอดูดความชื้น

1) ศึกษาคุณลักษณะการกระจายตัวของของไหลที่ไหลผ่านแผ่นกั้นแต่ละแบบ ด้วยโปรแกรม SolidWorks 2017

2) สร้างแผ่นกั้นของไหล เพื่อเพิ่มสมรรถนะของหอดูดความชื้น

3.3.1 อุปกรณ์

1) คอมพิวเตอร์ ที่ติดตั้งโปรแกรม SolidWorks 2017

2) แผ่นยางหนา 5 มิลลิเมตร

3) กรรไกร คัตเตอร์

4) เวอร์เนียคาลิปเปอร์

5) วงเวียน

6) Blower

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) Inverter (JADENDLM1)

8) เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (DIGICON DA-43A ความคลาดเคลื่อน ± 0.2)

3.3.2 วิธีการทดลอง

การทดลองที่ 1 ศึกษาคุณลักษณะการกระจายตัวของของไหลที่ไหลผ่านแผ่นกั้นแต่ละแบบ

- 1) ใช้โปรแกรม SolidWorks2017 วาดต้นแบบหลอดความชื้นโดยใช้ขนาดจริง
- 2) วาดแผ่นกั้นแล้วไปติดตั้ง ที่หลอดความชื้นต้นแบบ
- 3) ทำการ simulation ของของไหล
- 4) ดูลักษณะการไหลของของไหล เมื่อไหลผ่านแผ่นกั้นในแต่ละชั้น
- 5) วัดปริมาณลมที่ไหลเข้าในแต่ละชั้น
- 6) หากปริมาณลมในแต่ละชั้นไม่ใกล้เคียงกัน ให้ปรับขนาดแผ่นกั้นจนได้ขนาดที่

เหมาะสม

การทดลองที่ 2 สร้างแผ่นกั้นของไหล เพื่อเพิ่มสมรรถนะของหลอดความชื้น

- 1) นำขนาดของแผ่นกั้นที่ได้จากการ simulation มาวาดลงบนแผ่นยางหนา 5
- 2) ตัดแผ่นยางหนา 5 มิลลิเมตร ให้ได้ขนาดเท่าแผ่นกั้นที่ simulation

มิลลิเมตร

การทดลองที่ 3 วัดปริมาณลมในแต่ละชั้น หลังจากติดตั้งแผ่นกั้นของไหลในชุดทดลอง

- 1) ติดตั้งแผ่นกั้นของไหลที่ได้จากการทดลองที่ 2 ในชุดทดลองจริง
- 2) ปรับอัตราการไหลเข้า 20.41 ลูกบาศก์เมตรอากาศต่อวินาทีต่อลูกบาศก์เมตร

ซีลิกาเจล

- 3) วัดความเร็วของอากาศในแต่ละชั้น แล้วบันทึกผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) ทำซ้ำ 3 ครั้ง หากปริมาณอากาศยังไม่ใกล้เคียงกันทุกชั้น ให้ปรับแก้ที่แผ่นกันโดยการลดหรือเพิ่มขนาดเล็กน้อย จนปริมาณอากาศในแต่ละชั้นใกล้เคียงกัน
- 5) ได้แผ่นกันที่สามารถทำให้ปริมาณอากาศในแต่ละชั้นเท่ากัน

3.4 การทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่ออัตราการการถ่ายเทความร้อน

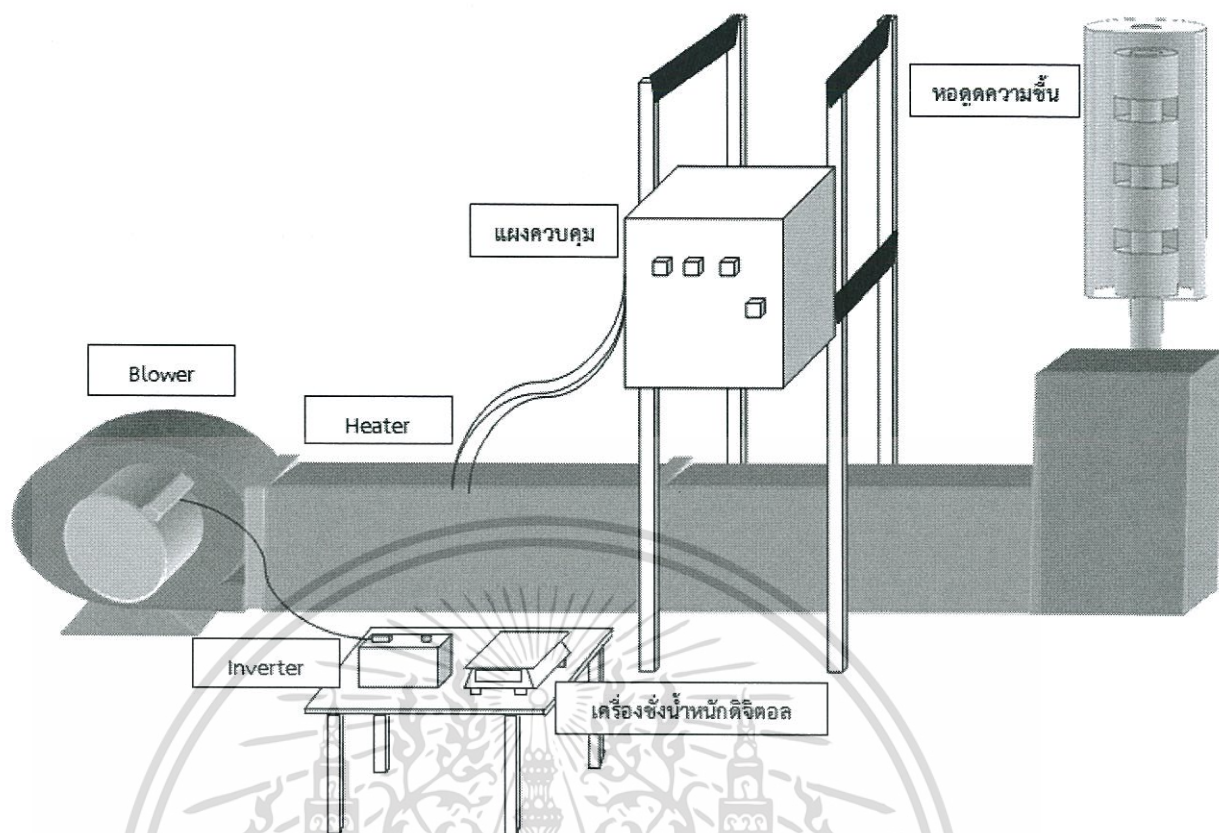
การทดลองเพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่ออัตราถ่ายเทความร้อนภายในหอดูดความร้อนแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมีประกอบด้วย 2 ปัจจัย ได้แก่

- 1) รูปแบบการติดตั้งแผ่นกันของการทดลองการดูดความร้อนที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ แบบแผ่นกันวงแหวน แบบแผ่นกันครึ่งวงกลม และแบบไม่มีแผ่นกัน
- 2) อุณหภูมิในการทดลองการคายความร้อนแบบติดตั้งแผ่นกันและไม่ติดตั้งแผ่นกัน ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส

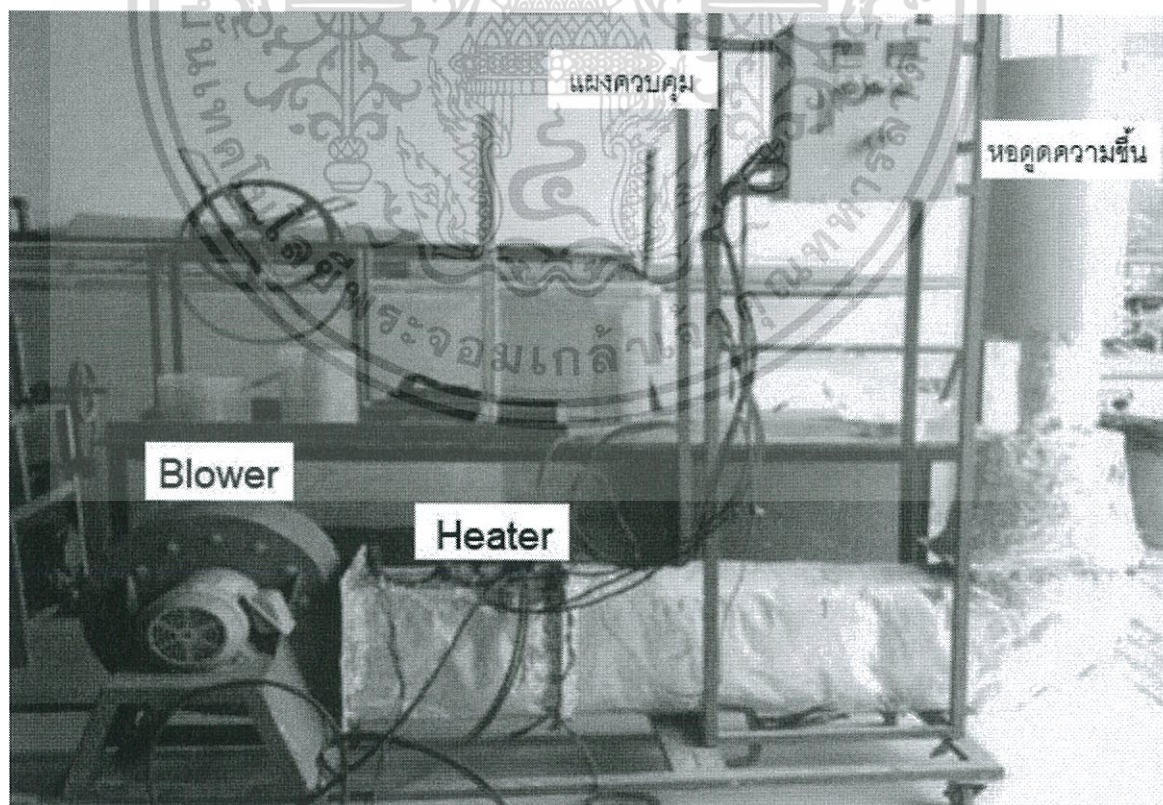
3.4.1 อุปกรณ์

- 1) Blower
- 2) Heater
- 3) Inverter (JADENDLM1)
- 4) แผงควบคุม
- 5) เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล (UWE GW พิกัดน้ำหนัก 15 กิโลกรัม)
- 6) เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น (Fluke 971 ความคลาดเคลื่อน ± 1)
- 7) เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (DIGICON DA-43A ความคลาดเคลื่อน ± 0.2)
- 8) หอดูดความร้อน
- 9) ซิลิกาเจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ในการทดลอง



รูปที่ 3.3 ภาพชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การทดลองดูความชื้น

ทำการทดลอง 3 ชั่วโมงในแต่ละปัจจัย โดยทำการทดลองในช่วงเวลา 09:30-16:00 น.
ความชื้นสัมพัทธ์ 50-65%

- 1) อบซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 2) วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนการทดลองด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น
- 3) ปรับ Inverter ให้อากาศมีอัตราการไหล 20.41 ลูกบาศก์เมตรอากาศต่อวินาทีต่อลูกบาศก์เมตรซิลิกาเจล (ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อส่งอากาศเท่ากับ 7 เซนติเมตร)
- 4) บันทึกน้ำหนักของชุดบรรจุซิลิกาเจล ก่อนบรรจุซิลิกาเจล
- 5) บรรจุซิลิกาเจล ในชุดบรรจุซิลิกาเจลที่ไม่ติดตั้งแผ่นกั้น และนำเข้าหอดูดความชื้น
- 6) ช่วง 6 นาทีแรก บันทึกน้ำหนักของซิลิกาเจลที่เพิ่มขึ้นทุก 1 นาที และบันทึกค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังจากออกจากหอดูดความชื้น
- 7) หลังจากผ่าน 6 นาที บันทึกน้ำหนักของซิลิกาเจลที่เพิ่มขึ้นทุก 3 นาที จนถึงเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงบันทึกน้ำหนักของซิลิกาเจลที่เพิ่มขึ้นทุก 5 นาที จนครบเวลา 2 ชั่วโมง
- 8) ทำการทดลองใหม่โดยใช้ชุดบรรจุซิลิกาเจล แบบติดตั้งแผ่นกั้นวงแหวน เพื่อศึกษาอัตราการดูความชื้นของซิลิกาเจล
- 9) ทำการทดลองใหม่โดยใช้ชุดบรรจุซิลิกาเจล แบบติดตั้งแผ่นกั้นครึ่งวงกลม เพื่อศึกษาอัตราการดูความชื้นของซิลิกาเจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การทดลองคายความชื้น

ทำการทดลอง 3 ครั้งในแต่ละปัจจัย

- 1) ให้ซิลิกาเจลดูดความชื้นจากอากาศที่มีความเร็ว 25 เมตรต่อวินาที ความชื้นสัมพัทธ์ 50-60% เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 2) ปรับปรับ Inverter ให้อากาศมีอัตราการไหล 20.41 ลูกบาศก์เมตรอากาศต่อวินาทีต่อลูกบาศก์เมตรซิลิกาเจล (ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อส่งอากาศเท่ากับ 7 เซนติเมตร)
- 3) เปิด Heater ให้อากาศมีอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
- 4) บรรจุซิลิกาเจล ในชุดบรรจุซิลิกาเจลที่ไม่ติดตั้งแผ่นกั้นและนำเข้าหอดูดความชื้น
- 5) ช่วง 10 นาทีแรก บันทึกน้ำหนักของซิลิกาเจลที่ลดลงทุก 1 นาที และบันทึกค่าอุณหภูมิของอากาศหลังจากออกจากหอดูดความชื้น
- 6) หลังจากผ่านไป 10 นาที บันทึกน้ำหนักของซิลิกาเจลที่ลดลงทุก 2 นาที และบันทึกค่าอุณหภูมิของอากาศหลังจากออกจากหอดูดความชื้น
- 7) หลังจากผ่านไป 30 นาที บันทึกน้ำหนักของซิลิกาเจลที่ลดลงทุก 5 นาที และบันทึกค่าอุณหภูมิของอากาศหลังจากออกจากหอดูดความชื้นจนน้ำหนักซิลิกาเจลคงที่
- 8) ทำการทดลองใหม่ โดยปรับอุณหภูมิเป็น 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาอัตราการคายความชื้น
- 9) ทำการทดลองใหม่โดยใช้ชุดบรรจุซิลิกาเจลแบบมีแผ่นกั้นวงแหวน เพื่อศึกษาอัตราการคายความชื้น

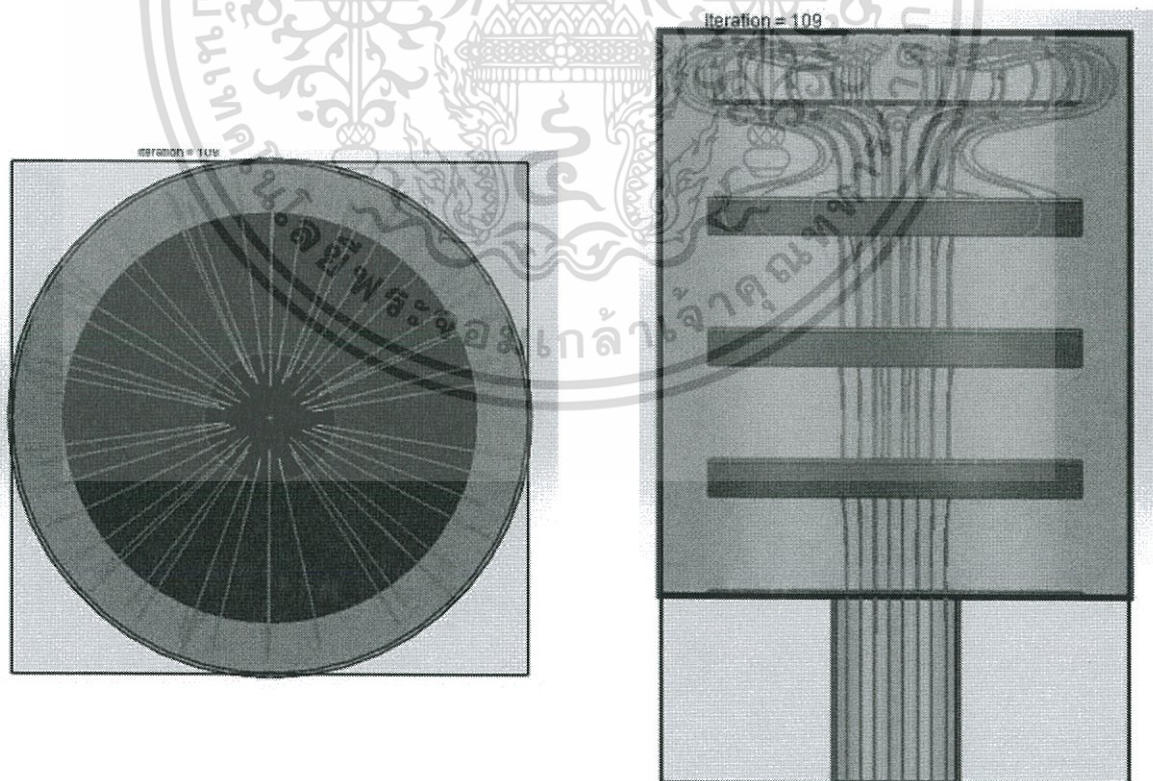
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

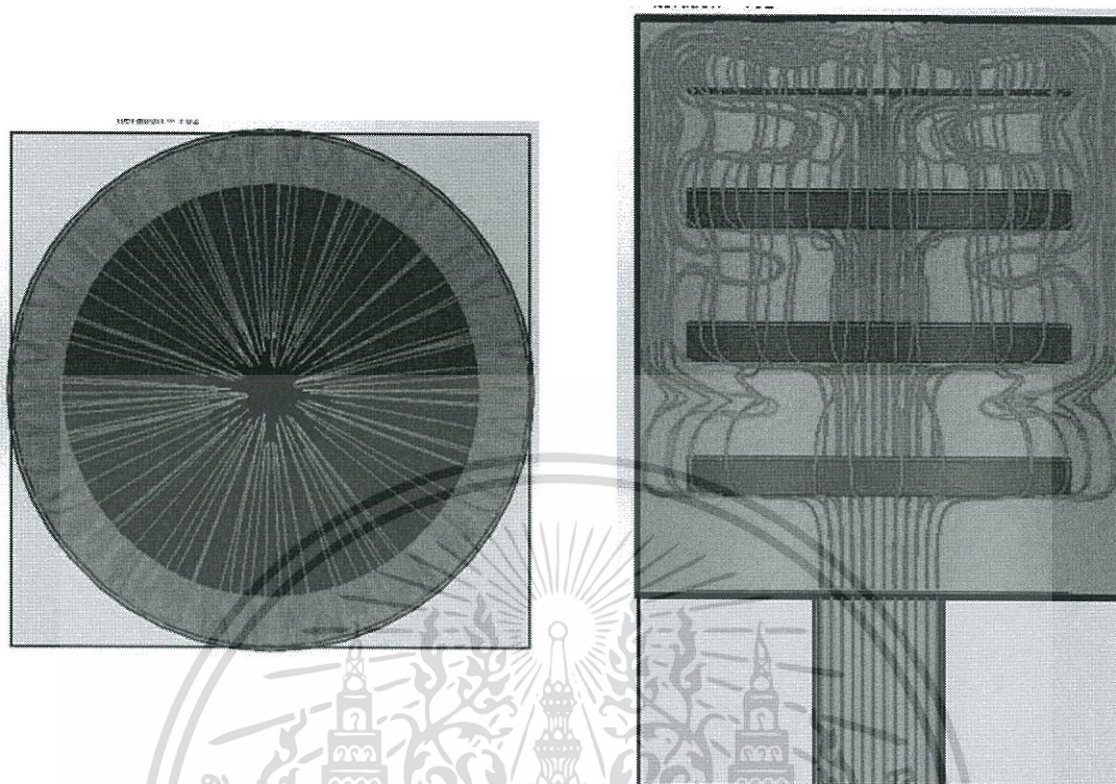
4.1 การจำลองการไหลของอากาศในหอดูดาวด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS

จากการจำลองการไหลของอากาศภายในหอดูดาวความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมีที่ อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ 20.4 ลูกบาศก์เมตรอากาศต่อเวลาต่อบาศก์เมตรซิลิกาเจล พบว่า เมื่อไม่มีแผ่นกั้นอากาศไหลไปด้านบนมากที่สุด (รูปที่ 4.1) หลังจากมีการติดตั้งแผ่นกั้นทั้ง 2 รูปแบบ แล้วพบว่าการกระจายการไหลของอากาศอย่างสม่ำเสมอ โดยเมื่อมีการติดตั้งแผ่นกั้นแบบวงแหวน อากาศจะมีการกระจายตัวออกไปอย่างสม่ำเสมอในทุกๆทิศทาง แต่แผ่นกั้นแบบแบ่งส่วนอากาศจะมีการกระจายตัวในบริเวณที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นอากาศมากกว่า (รูปที่ 4.2-4.5)

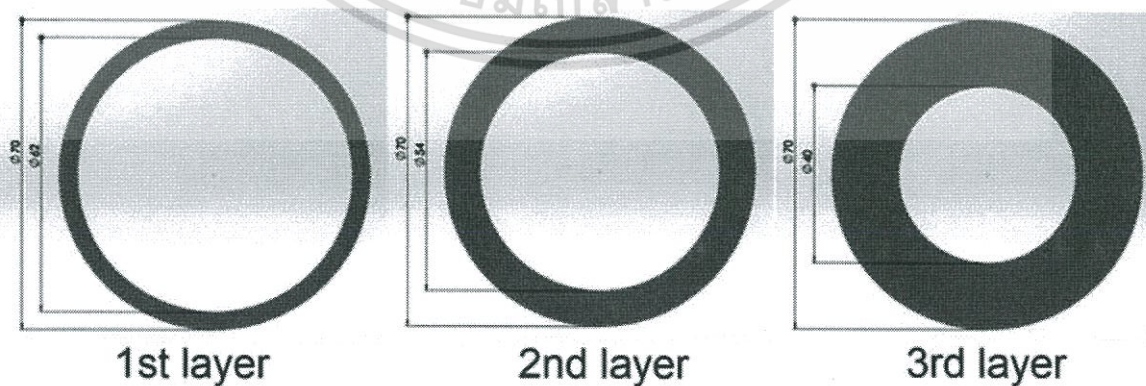


รูปที่ 4.1 หอดูดาวความชื้นแบบไม่มีแผ่นกั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

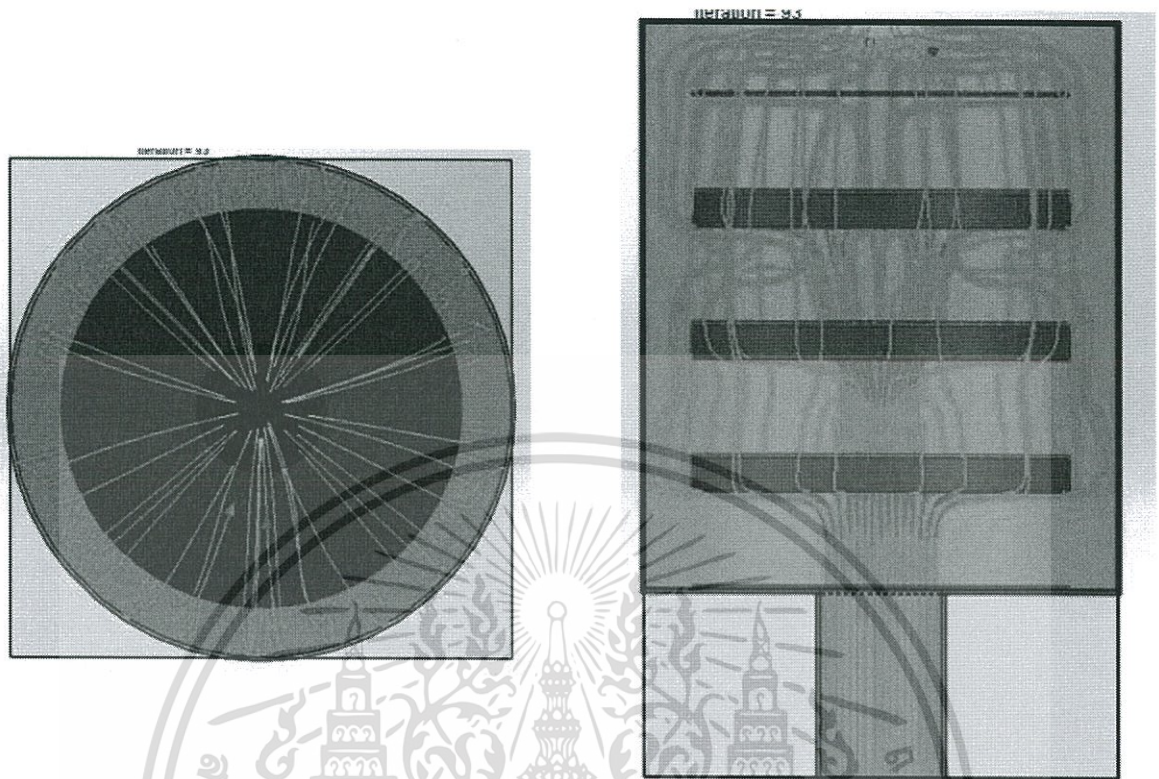


รูปที่ 4.2 ทอดดูความชื้นมีแผ่นกันแบบวงแหวน

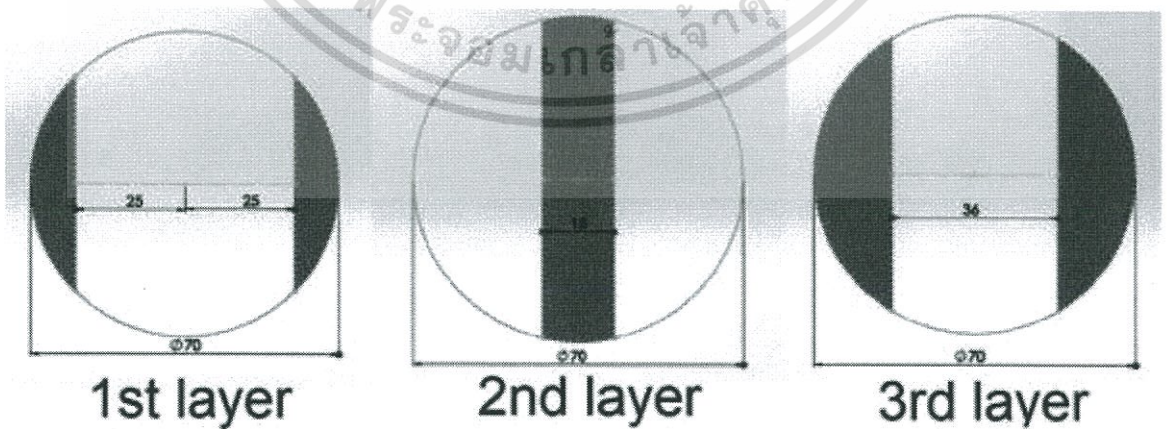


รูปที่ 4.3 รูปแบบแผ่นกันแบบวงแหวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ทอดดูความขึ้นมีแผ่นกันแบบแบ่งส่วน



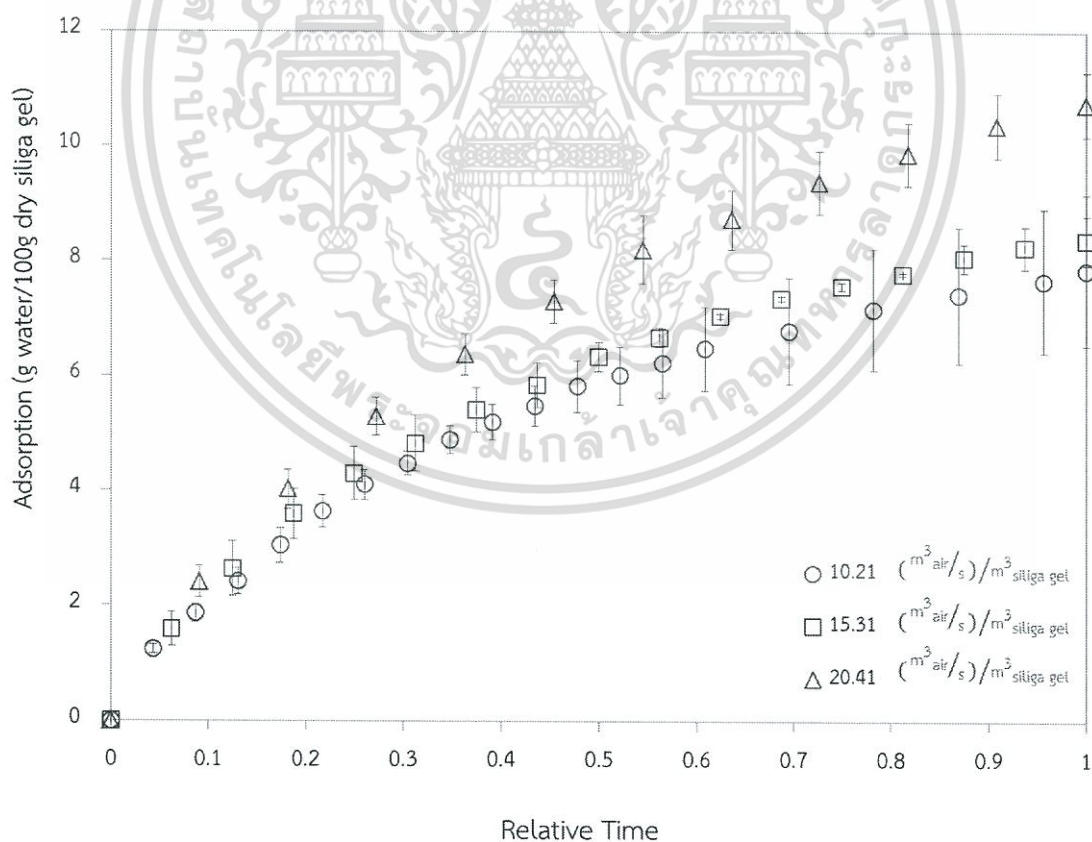
รูปที่ 4.5 รูปแบบแผ่นกันแบบแบ่งส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดลองเบื้องต้น

4.2.1 ผลการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการดูดซับน้ำของซิลิกาเจล

จากการศึกษาเบื้องต้นที่อัตราการไหลของอากาศเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 10.21 15.31 และ 20.41 ลูกบาศก์เมตรอากาศต่อเวลาต่อลูกบาศก์เมตรซิลิกาเจล พบว่าปริมาณน้ำที่ซิลิกาเจลดูดซับที่เพิ่มขึ้นตามเวลาและอัตราการไหลของอากาศ ดังรูปที่ 4.6 ที่อัตราการไหลของอากาศ 10.21 15.31 และ 20.41 ลูกบาศก์เมตรอากาศต่อเวลาต่อลูกบาศก์เมตรซิลิกาเจล มีปริมาณน้ำที่ซิลิกาเจลดูดซับได้เท่ากับ 8.80, 9.16 และ 10.17 กรัมต่อร้อยกรัมซิลิกาเจล ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำที่ซิลิกาเจลดูดซับเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา และเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ซิลิกาเจลดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย

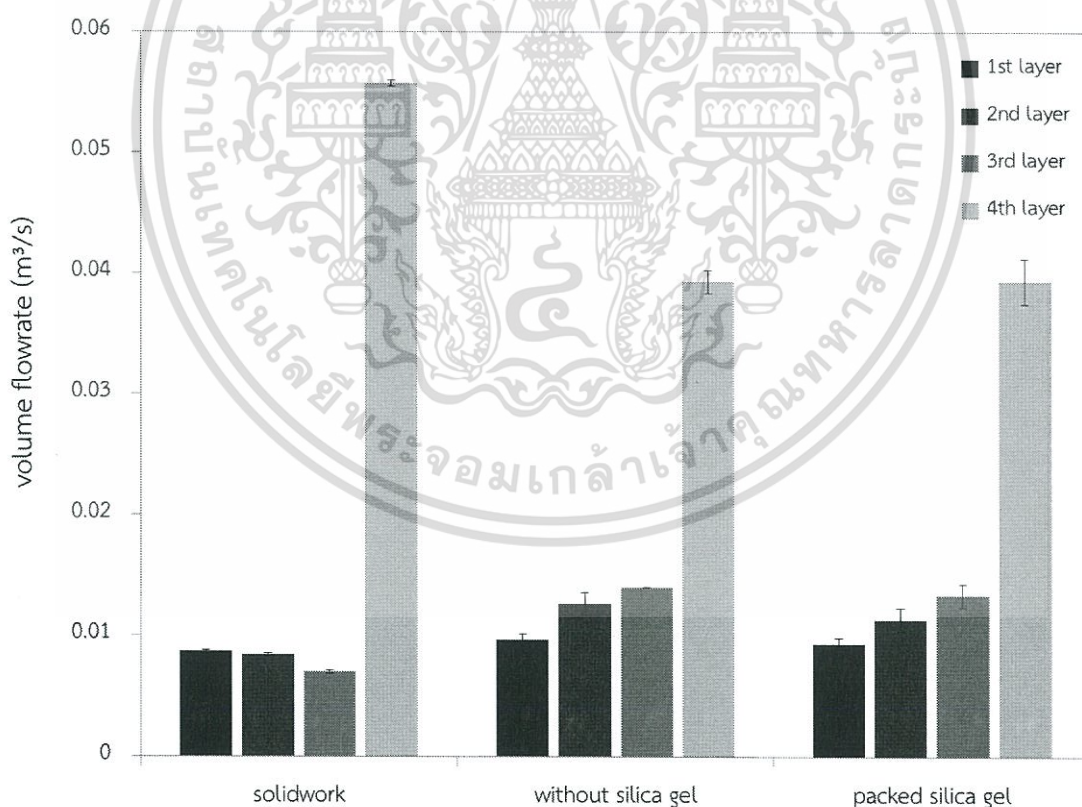


รูปที่ 4.6 อัตราการดูดซับความชื้นของซิลิกาเจล (ความคาดเคลื่อนที่แสดงในกราฟคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

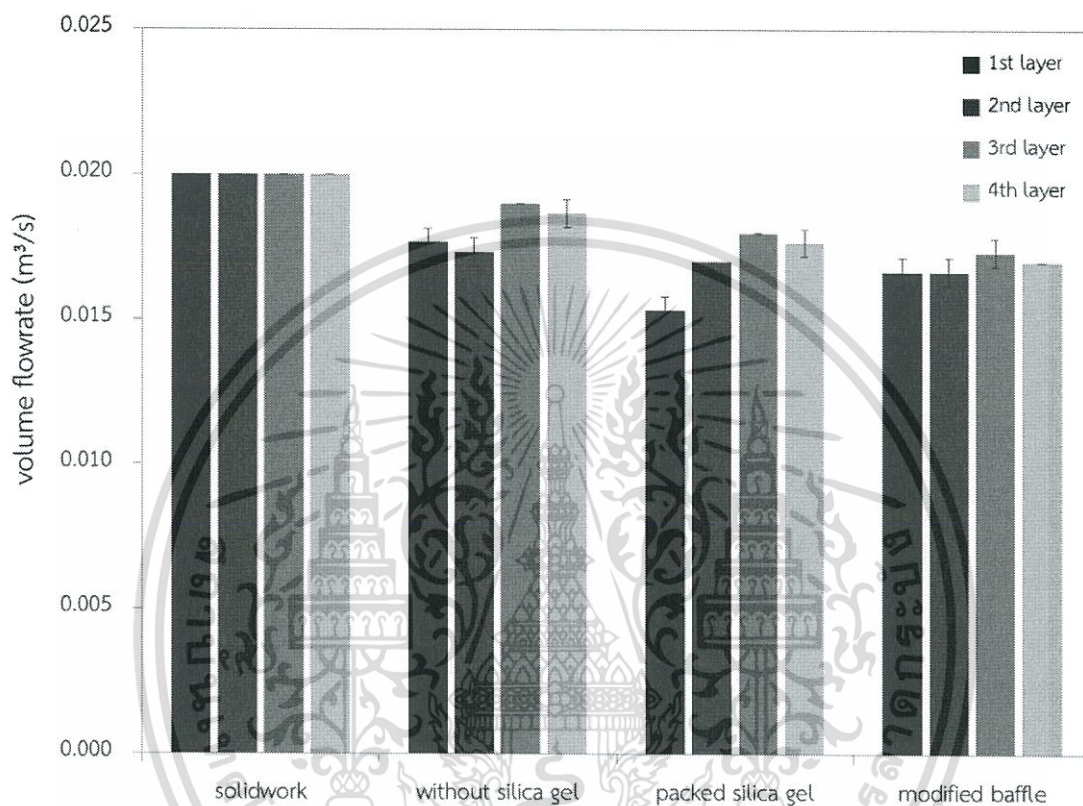
4.2.2 อัตราการไหลอากาศในแต่ละชั้น

การทดลองทำการวัดค่าความเร็วลมเพื่อดูอัตราการไหลของอากาศในแต่ละชั้นของชุดทดลองหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี พบว่าในชั้นที่ 4 (ชั้นบนสุด) 3 2 และ 1 มีอัตราการไหลของอากาศผ่านหอดูดความชื้นมากที่สุดและลดลงตามลำดับ (รูปที่ 4.7) เมื่อติดแผ่นกันตามขนาดที่ออกแบบมาจากโปรแกรม SOLIDWORKS พบว่าสามารถแบ่งปริมาณลมให้อัตราการของอากาศในแต่ละชั้นมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อมีการบรรจุซิลิกาเจลแล้วพบว่าปริมาณของลมในแต่ละชั้นมีค่าแตกต่างกันเนื่องจากซิลิกาเจลไปขวางการไหลของอากาศในแนวรัศมี จึงทำให้อากาศเคลื่อนที่ขึ้นข้างบนมากกว่า ดังนั้นจึงได้มีการปรับขนาดแผ่นกันแล้วทำให้ปริมาณลมในแต่ละชั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น (รูปที่ 4.8-4.9)



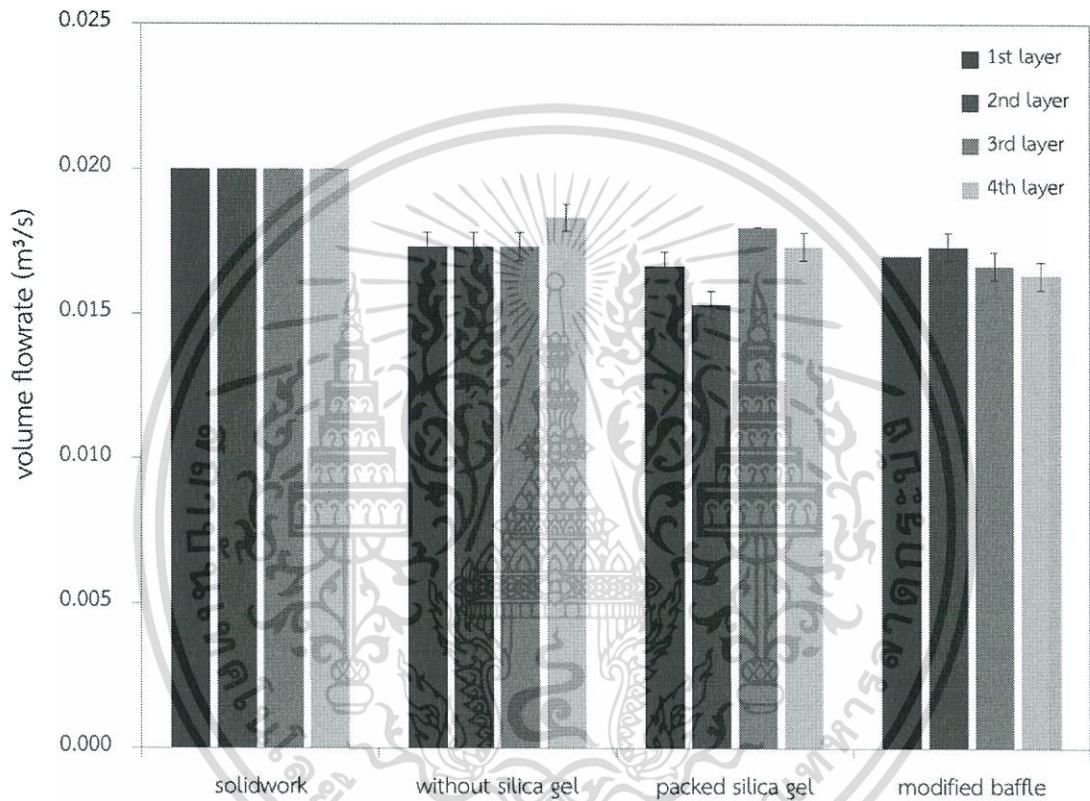
รูปที่ 4.7 อัตราการไหลอากาศของชุดทดลองหอดูดความชื้นแบบไม่มีแผ่นกัน (ความคาดเคลื่อนที่แสดงในกราฟคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 อัตราการไหลอากาศของชุดทดลองหอดูดความชื้นแบบแผ่นกั้นวงแหวน (ความคาดเคลื่อนที่แสดงในกราฟคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ครั้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



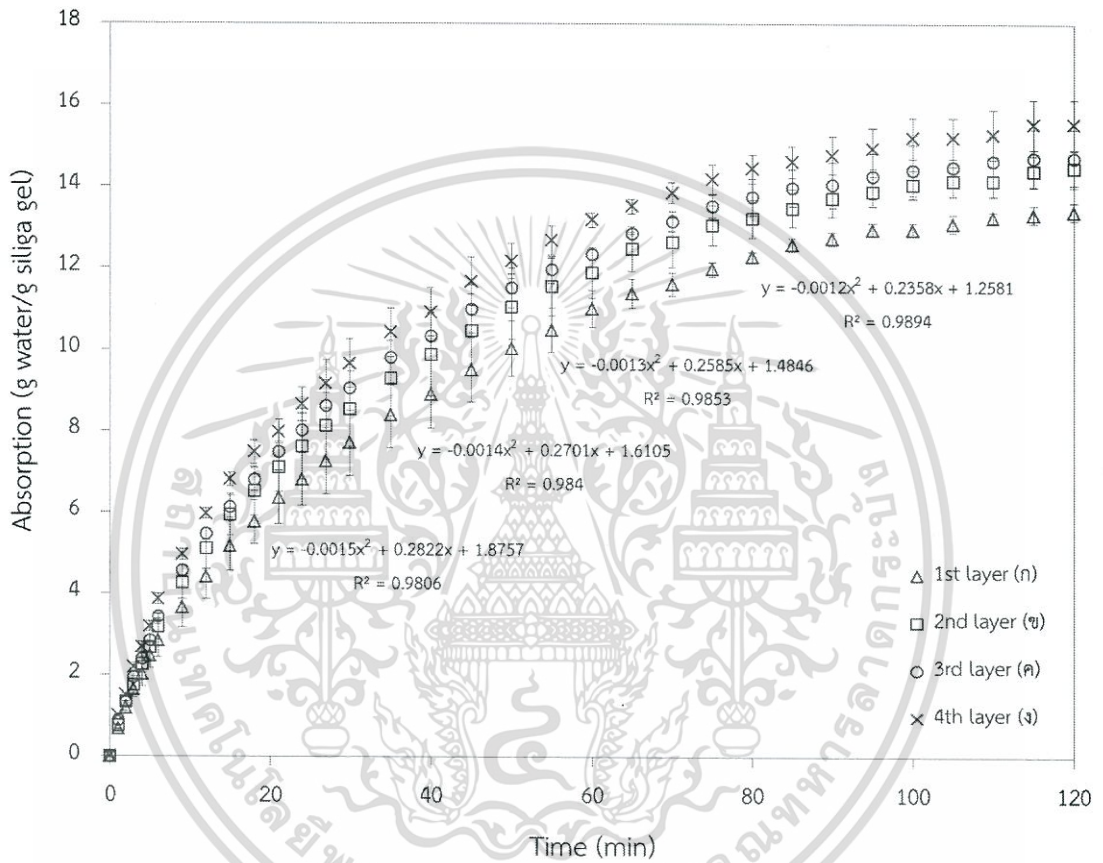
รูปที่ 4.9 อัตราการไหลอากาศของชุดทดลองหอดูดาวความชื้นแบบแผ่นกั้นแบ่งส่วน(ความคาดเคลื่อนที่แสดงในกราฟคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การถ่ายเทความร้อน

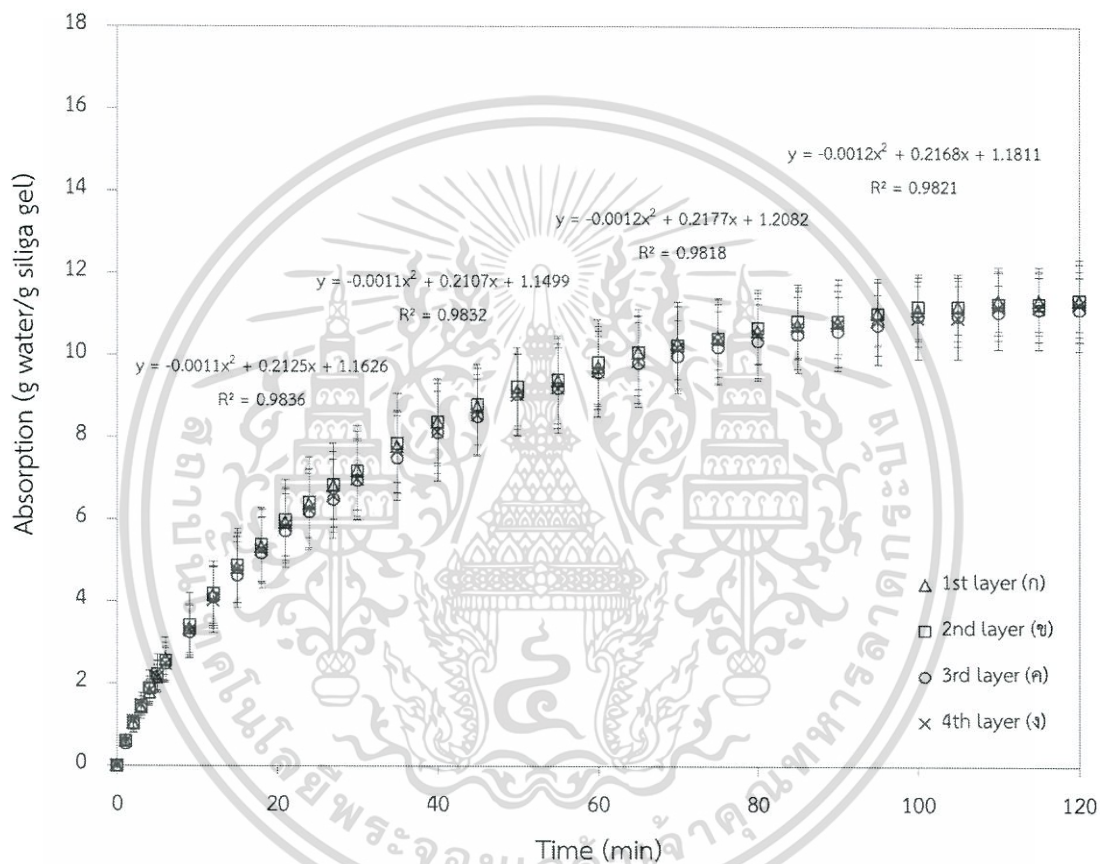
4.3.1 การดูดความร้อน

จากการทดลองการดูดความร้อนของซิลิกาเจลภายในหอดูดแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมีแบบไม่มีแผ่นกั้นและแบบแผ่นกั้นวงแหวน พบว่าปริมาณ ความร้อนที่สะสมในซิลิกาเจลแต่ละชั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาแบบพหุนาม โดยที่หอดูดแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมีแบบไม่มีแผ่นกั้นในชั้นที่ 4 (ชั้นบนสุด) 3 2 และ 1 มีปริมาณความร้อนที่ถูกดูดซับโดยซิลิกาเจลมากที่สุดและลดลงมาตามลำดับ ซึ่งได้จากวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนาม (รูปที่ 4.10) ในขณะที่หอดูดความร้อนแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมีแบบแผ่นกั้นวงแหวน และแบบแผ่นกั้นแบ่งส่วน มีปริมาณความร้อนที่ถูกดูดซับโดยซิลิกาเจลใกล้เคียงกัน เนื่องจากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามมีค่าใกล้เคียงกัน เพราะการติดแผ่นกั้นทำให้อัตราการไหลของอากาศที่ผ่านซิลิกาเจลแต่ละชั้นใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4.11-4.12)



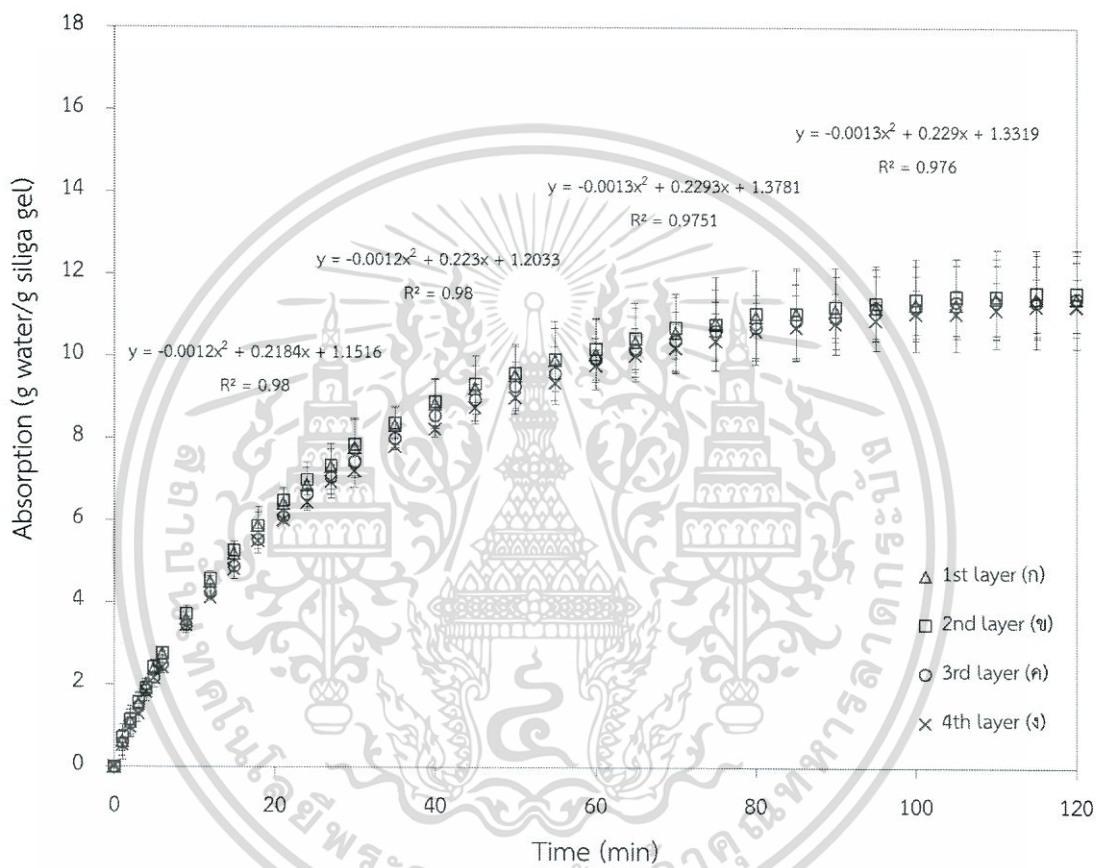
รูปที่ 4.10 ปริมาณความชื้นสะสมในหลอดดูดความชื้นแบบไม่มีแผ่นกั้น ก) ชั้นที่ 1 ข) ชั้นที่ 2 ค) ชั้นที่ 3 ง) ชั้นที่ 4 (ความคาดเคลื่อนที่แสดงในกราฟคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ปริมาณความชื้นสะสมในหอดูดความชื้นแบบแผ่นกั้นวงแหวน ก) ชั้นที่ 1 ข) ชั้นที่ 2 ค) ชั้นที่ 3 ง) ชั้นที่ 4 (ความคาดเคลื่อนที่แสดงในกราฟคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ)

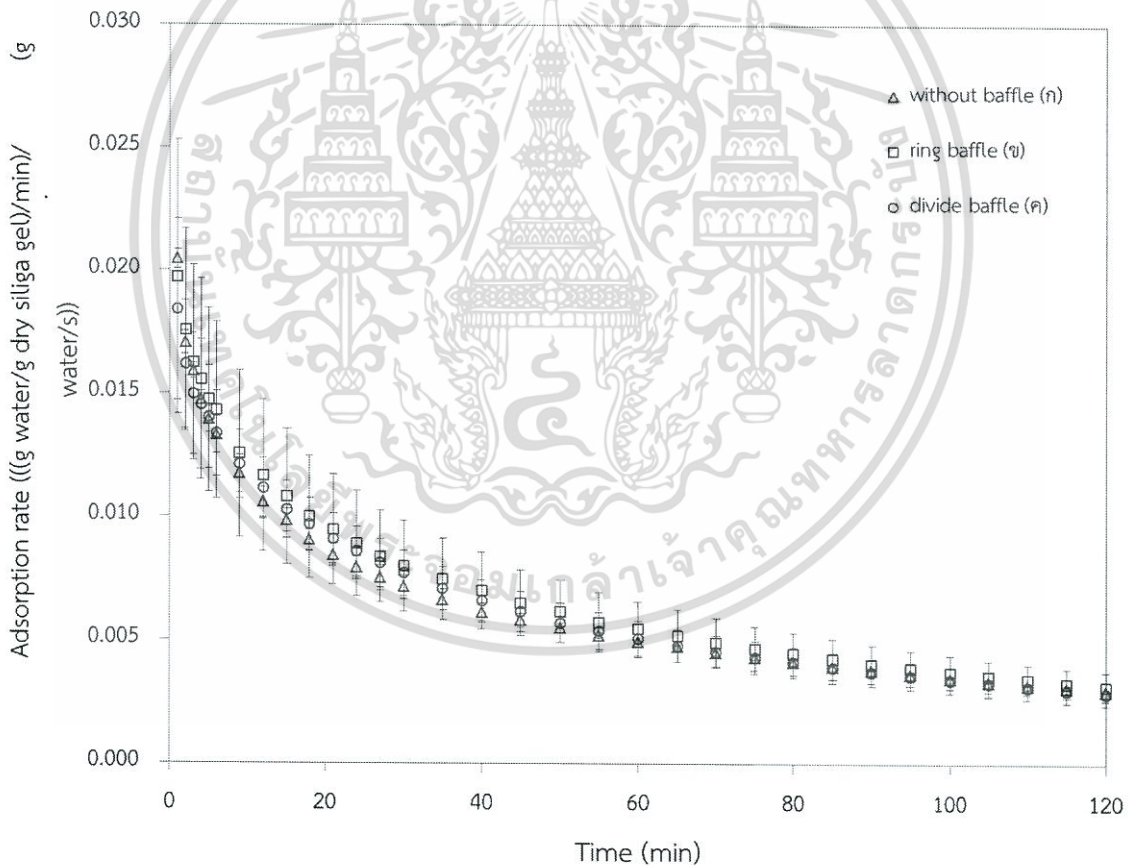
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ปริมาณความชื้นสะสมในหอดูดความชื้นแบบแผ่นกั้นแบ่งส่วน ก) ชั้นที่ 1 ข) ชั้นที่ 2 ค) ชั้นที่ 3 ง) ชั้นที่ 4 (ความคาดเคลื่อนที่แสดงในกราฟคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองการดูดความชื้นของซิลิกาเจลภายในหอดูดแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี เมื่อเปรียบเทียบอัตราการการดูดความชื้น ของแบบไม่มีแผ่นกั้น แบบแผ่นกั้นวงแหวน และแบบแผ่นกั้นแบ่งส่วน พบว่า เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นทั้ง 2 แบบ ทำให้อัตราการไหลของอากาศลดลง ส่งผลให้ปริมาณความชื้นในอากาศที่ไหลผ่านหอดูดความชื้นลดลง เนื่องจากสภาวะแวดล้อมของแต่ละช่วงการทดลอง ทั้งความชื้นและอุณหภูมิอาจแตกต่างกันไป ดังนั้นเพื่อการเปรียบเทียบผลเราจึงพิจารณาอัตราการดูดความชื้นต่อหน่วยที่ไหลเข้าสู่หอดูดความชื้น ดังแสดงในรูป 4.13 พบว่าอัตราการดูดความชื้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา โดยที่หอดูดแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมีแบบแผ่นกั้นวงแหวนมีอัตราการดูดความชื้นสูงสุด



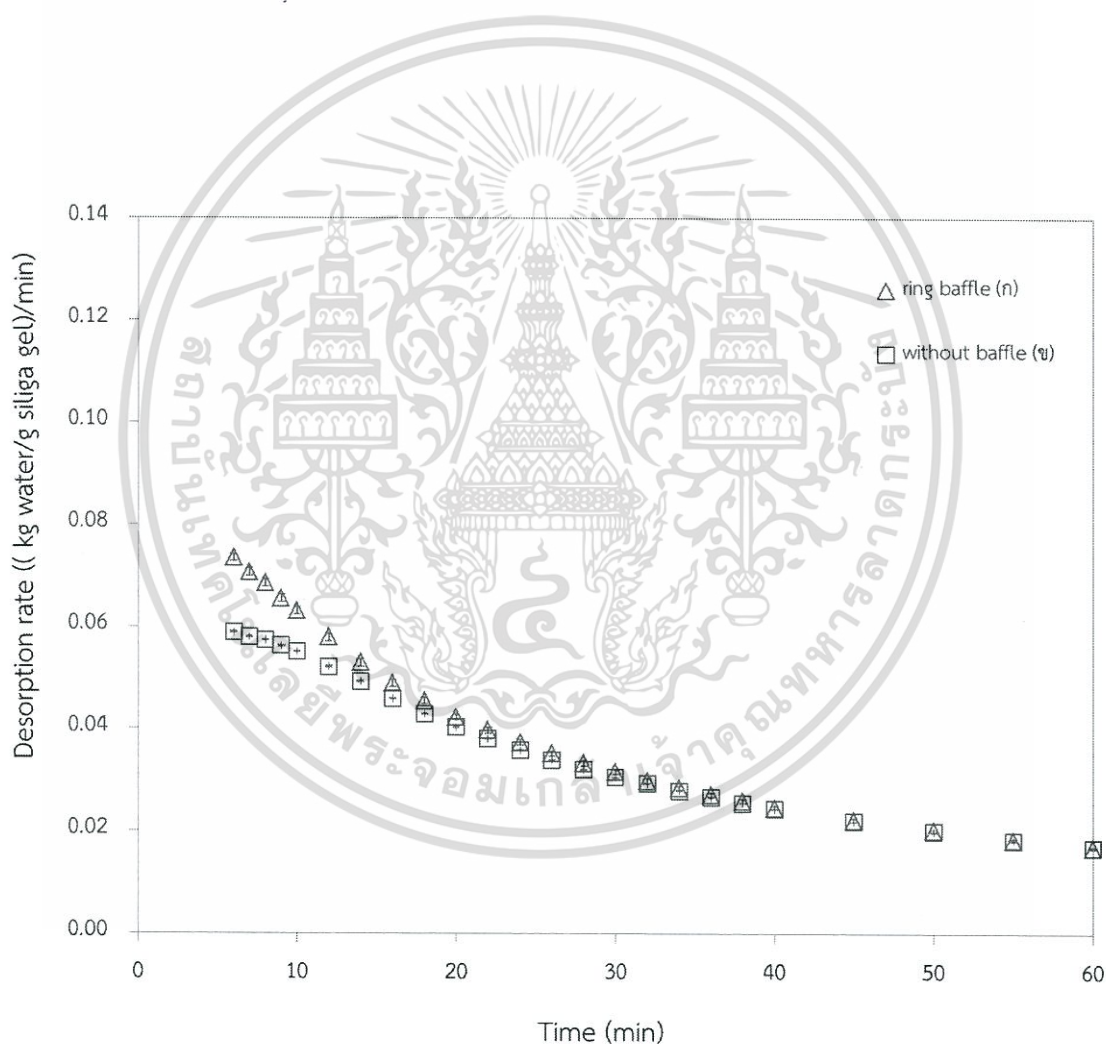
4.13 อัตราการดูดความชื้นของหอดูดความชื้นแบบ ก) ไม่มีแผ่นกั้น ข) แผ่นกั้นวงแหวน ค) แผ่นกั้น

แบ่งส่วน (ความคาดเคลื่อนที่แสดงในกราฟคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

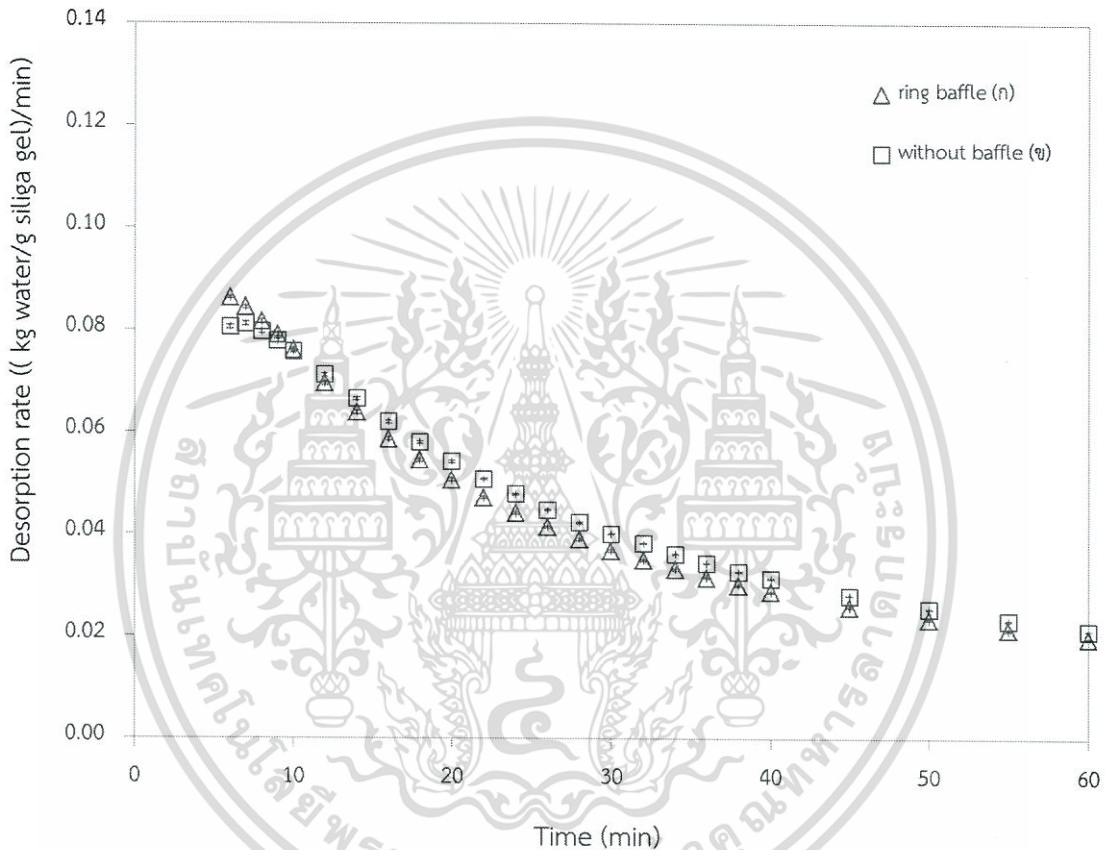
4.3.2 การคายความชื้น

จากการทดลองการคายความชื้นภายในหอดูดแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี ของแบบไม่มีแผ่นกั้น และแบบแผ่นกั้นวงแหวน ที่สภาวะต่างกันของอุณหภูมิของอากาศ ที่ 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส เพื่อเปรียบเทียบอัตราการการคายความชื้น เมื่อพิจารณาตลอดทั้งกระบวนการพบว่า อัตราการคายความชื้นแบบแผ่นกั้นวงแหวนมีค่าสูงกว่าแบบไม่มีแผ่นกั้นในทุกสภาวะ (รูปที่ 4.14-4.17)



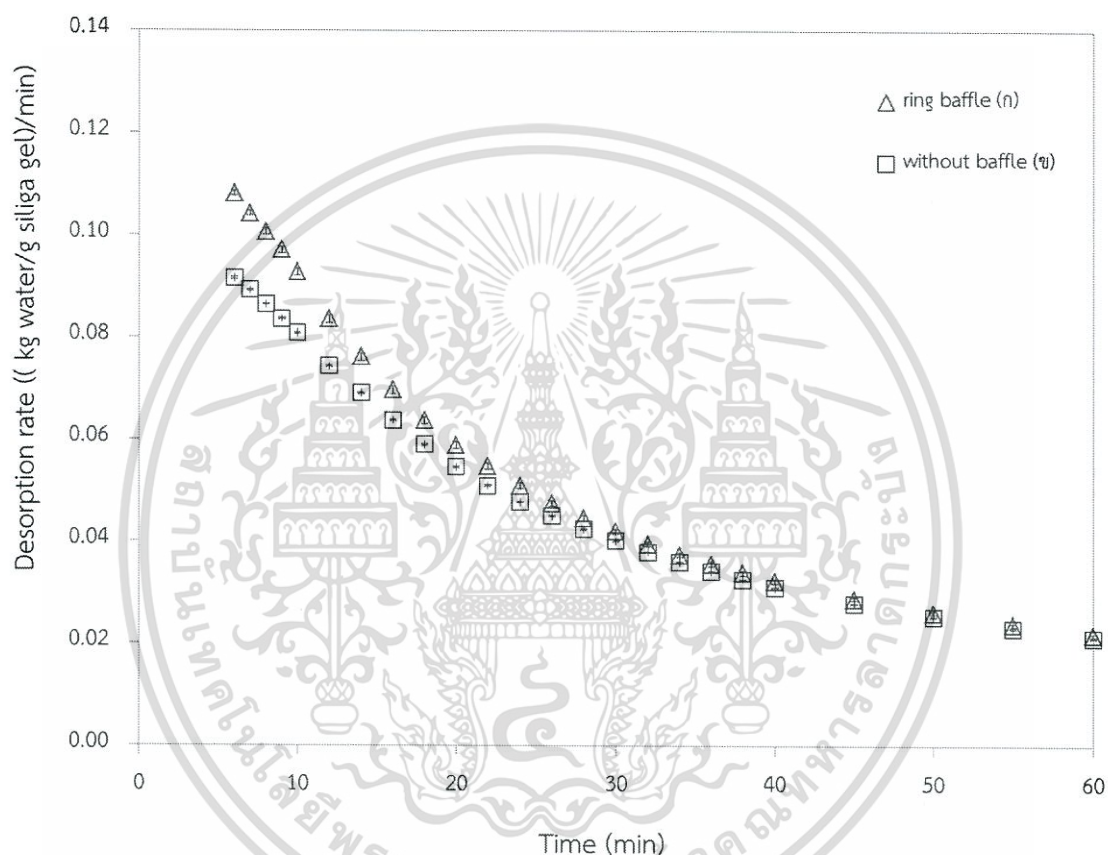
รูปที่ 4.14 อัตราการคายความชื้นของหอดูดความชื้น ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ก) แบบแผ่นกั้นวงแหวน ข) แบบแผ่นกั้นแบ่งส่วน(ความคาดเคลื่อนที่แสดงในกราฟคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 อัตราการคายความชื้นของหอดูดความชื้น ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ก) แบบแผ่นกั้นวงแหวน ข) แบบแผ่นกั้นแบ่งส่วน(ความคาดเคลื่อนที่แสดงในกราฟคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 อัตราการคายความชื้นของหอดูดความชื้น ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ก) แบบแผ่นกั้นวงแหวน ข) แบบแผ่นกั้นแบ่งส่วน(ความคาดเคลื่อนที่แสดงในกราฟคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 อัตราการคายความชื้นของหอดูดความชื้น ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ก) แบบแผ่นกั้นวงแหวน ข) แบบแผ่นกั้นแบ่งส่วน(ความคาดเคลื่อนที่แสดงในกราฟคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ครั้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการทดลองการคายความชื้นที่อุณหภูมิ 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส เมื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะได้ผลดังตารางที่ 4.2

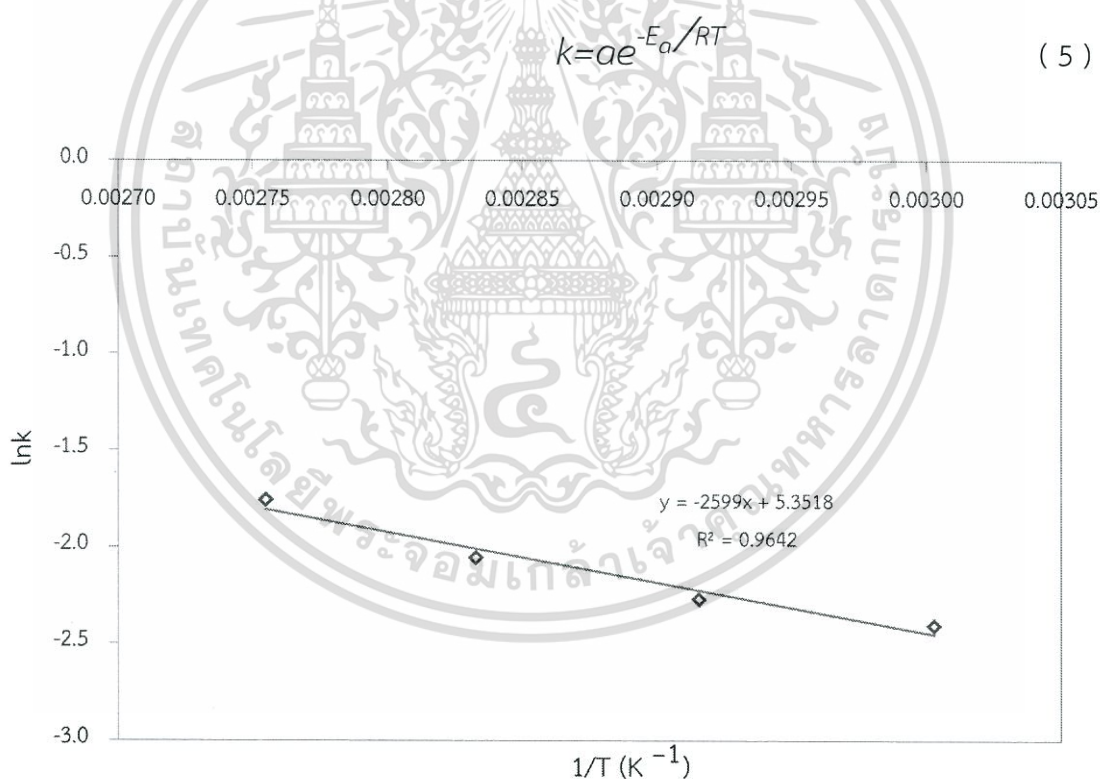
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ a k n R^2 χ^2 และ RMSE ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆกับ 5 แบบจำลอง ได้แก่ Newton Page Henderson and Pabis Two term exponential และ Logistic

model	°C	Coefficients			R^2	χ^2	RMSE
		a	k	n			
Newton ($MR = e^{-kt}$)	60		0.031		0.866	0.006	0.079
	70		0.048		0.920	0.005	0.073
	80		0.042		0.830	0.009	0.045
	90		0.051		0.760	0.013	0.112
Page ($MR = e^{-kt^n}$)	60	0.090	0.666		0.963	0.002	0.041
	70	0.103	0.741		0.964	0.003	0.049
	80	0.128	0.630		0.954	0.003	0.049
	90	0.172	0.578		0.938	0.003	0.057
Henderson and Pabis ($MR = ae^{-kt}$)	60	0.906	0.026		0.905	0.004	0.063
	70	0.934	0.044		0.930	0.005	0.067
	80	0.877	0.034		0.878	0.006	0.076
	90	0.840	0.038		0.831	0.008	0.088
Two term exponential ($MR = ae^{-kt} + (1-a)e^{-kat}$)	60	0.185	0.127		0.937	0.003	0.054
	70	0.251	0.142		0.959	0.003	0.016
	80	0.208	0.153		0.910	0.005	0.069
	90	0.218	0.176		0.859	0.008	0.086
Logistic ($MR = \frac{a}{1 + e^{kt}}$)	60	1.733	0.037		0.847	0.042	0.199
	70	1.768	0.061		0.887	0.060	0.237
	80	1.659	0.047		0.822	0.047	0.020
	90	1.576	0.052		0.766	0.044	0.203

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า แบบจำลองของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงการคายความชื้นของซิลิกาเจลได้ดีที่สุดโดยมีค่า $R^2 = 0.95 \pm 0.01$ ซึ่งมีค่ามากกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ก่ารอบแห้งแบบอื่นๆ ค่า $\chi^2 = 0.003 \pm 0.0007$ และ $RMSE = 1.27 \pm 0.18$ มีค่าต่ำกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบอื่นๆ

นำค่าคงที่ที่ได้จากแบบจำลองของ Page ไปสร้างความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ออบแห้ง (T) ในรูปแบบสมการ Arrhenius (รูปที่ 4.18) เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น ในการคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) สำหรับจลนพลศาสตร์สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการ Arrhenius ดังแสดงในสมการที่(5)



รูปที่ 4.18 ค่าลอการิทึมธรรมชาติของสัมประสิทธิ์กับอุณหภูมิ

เมื่อ k คือ ค่าคงที่การอบแห้ง, E_a คือ ค่าพลังงานกระตุ้น (KJ/mol), T คือ อุณหภูมิของลมร้อน (K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่า ค่าพลังงานกระตุ้นซึ่งคำนวณจากรูปแบบความสัมพันธ์ในรูปแบบ
ของสมการ Arrhenius มีค่าเท่ากับ 21.61 กิโลจูลต่อโมล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1) แผ่นกระจายการของไหลที่สามารถควบคุมปริมาณลมในแต่ละชั้นมีความสม่ำเสมอ คือ แผ่นกั้นแบบวงแหวน และมีขนาดดังนี้ ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 70 มิลลิเมตร แผ่นกั้นของไหลระหว่างชั้นที่ 1 และ 2 มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 62 มิลลิเมตร แผ่นกั้นของไหลระหว่างชั้นที่ 2 และ 3 มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 54 มิลลิเมตร และแผ่นกั้นของไหลระหว่างชั้นที่ 3 และ 4 มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 40 มิลลิเมตร

2) การออกแบบหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี โดยมีแผ่นกั้นแบบวงแหวนช่วยกระจายการไหล สามารถทำให้อัตราการถ่ายเทความชื้นเกิดขึ้นได้มากที่สุด

3) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งของ Page สามารถอธิบายพฤติกรรมการคายความชื้นของหอดูดทดลองได้ดีที่สุด ($R^2 = 0.95 \pm 0.01$, $\chi^2 = 0.003 \pm 0.0007$ และ $RMSE = 1.27 \pm 0.18$) โดยค่าคงที่ $k(T)$ ของแบบจำลองอยู่ในช่วง 0.09-0.17

4) ในช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษาคือ 60-90 องศาเซลเซียส ค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของค่าคงที่ $k(T)$ ในสมการของ page เท่ากับ 21.61 กิโลจูลต่อโมล

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ในการทดลองควรมีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนเข้าหอดูดความชื้น เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่น่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

2) ในการชั่งน้ำหนักควรหลีกเลี่ยงการนำซิลิกาเจลออกมาจากหอดูดความชื้น หรือลด

ระยะเวลาในการเอาออกมาให้น้อยที่สุด เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- จิวันท์ สัมมาตรม, เจตนิพัทธ์ อัครเดชเมธากุล และสุติภาญจน์ ศรีมุข. 2559. การออกแบบและพัฒนา หอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี. ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ธวัชชัย จอมใจ อภิชัย จิตอารีย์รัตน์ เอกพงศ์ เดชกล้าหาญ และฐานิตย์ เมธียานนท์. ม.ป.ป. การศึกษา ความเป็นไปได้ในการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับวงล้อสารดูดความชื้น. ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนานพนธ์. 2560. Drying rate / อัตราการทำแห้ง. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0663/drying-rate> [เข้าถึงวันที่ 28 เมษายน 2560].
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อดิพงษ์ นันทพันธุ์, ทะนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ และณัฐวุฒิ ดุษฎี. 2548. การทดสอบสมรรถนะของชุด สารดูดความชื้นแบบถาดสำหรับกระบวนการอบแห้งลำไย. *วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร*, 13: 25-36.
- อาจหาญ ณ นรงค์. 2556. ทำความเข้าใจแผนภูมิไซโครเมตริก (Psychometric Chart). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.thailandindustry.com/indust_newweb/articles_preview.php?cid=19123 [เข้าถึงวันที่ 14 สิงหาคม 2560].
- ASHRAE. 2005. Sorbents and desiccants. Atlanta, Georgia, USA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Inc.
- Awad, M.M., Ramzy A., Hamed, A.M. and Bekheit, M.M. 2006. Theoretical and experimental investigation on the radial flow desiccant dehumidification bed. *Applied Thermal Engineering*, 28: 75–85.
- Chopra, H. 2007. Chemical Kinetics and Catalysis. *Physical Chemistry*.
- Doymas, I. 2005. Sun drying of figs: an experimental study. *Journal of Food Engineering*, 71: 403-407.
- Faustino, J.M.F., Barroca, M.J. and Guine, R.P.F. 2007. Study of the drying kinetics of green bell pepper and chemical characterization. *Food and Bioproducts Processing*, 85(3): 163–170.
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Fudholi, A., Othman, M.Y., Ruslan, M.H., Yahya, M., Zaharim, A. and Sopian, K.. 2011. The Effects of Drying Air Temperature and Humidity on the Drying Kinetics of Seaweed. in *4th WSEAS international conference on Energy and development-environment-biomedicine*. Corfu Island, Greece. 14 – 16 July 2011, 129-133.
- Gandhidasan, P. 2002. A simplified model for air dehumidification with liquid desiccant. *Solar Energy*, 76: 409–416.
- Grimm, N.R. and Rosaler, R.C. 1998. Desiccant dehumidification. *HVAC system and component handbook (2nd edition)*. New York: McGraw-Hill.
- Hamed, A.M. 2002. Theoretical and experimental study on the transient adsorption characteristics of a vertical packed porous bed. *Renewable Energy*, 27: 525–541.
- Ismail, M. Z., Angus, D. E. and Thorpe, G. R. 1991. The performance of a solar-regenerated open-cycle desiccant bed gain cooling system. *Solar Energy*, 46: 63-70.
- Jeong, J., Yamaguchi, S., Saito, K. and Kawai, S. 2011. Performance analysis of desiccant dehumidification systems driven by low-grade heat source. *International Journal of Refrigeration*, 34: 928–945.
- Kaleta, A. and Górnicki, K. 2010. Evaluation of drying models of apple (var. McIntosh) dried in convective dryer. *International Food Science and Technology*, 45(5): 891-989.
- Kingly, A.R.P. and Singh, D.B. 2007. Drying kinetics of pomegranate arils. *Journal of Food Engineering*, 79(2): 741-744.
- Madhiyanon, T., Adirekrut, S., Sathiruangsak, P. and Saponronnarit, S. 2007. Integration of a rotary desiccant wheel into a hot-air drying system: drying performance and product quality studies. *Chemical Engineering and Processing*, 46: 282–290.
- Miller, W.M. 1983. Energy storage via desiccant for food agricultural applications. *Energy in Agriculture*, 2: 341-354.
- Ming, F. Y., Zhang, H. J. and Chang, T. P. 1994. Agricultural applications of desiccant drying technology. *Paper presented at the 5th ASEAN Conference on Energy Technology, Bangkok, Thailand*.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Nagaya, K., Li, Y., Jin, Z., Fukumuro, M., Ando, Y. and Akaishi, A. 2006. Low-temperature desiccant-based food drying system with airflow and temperature control. *Journal of Food Engineering*, 75: 71–77.
- Ndukwu M.C. 2009. Effect of Drying Temperature and Drying Air Velocity on the Drying Rate and Drying Constant of Cocoa Bean. *Agricultural Engineering International: The CIGR e-journal*, 11: 1-7.
- Neti, S. and Wolfe, E.I. 1999. Measurements of effectiveness in a silica gel rotary exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 20: 309-322.
- Ramadan, W. 2005. Theoretical and experimental study on the performance of a fluidized air dryer. *M.Sc. thesis, Mechanical Engineering Department, Mansoura University*.
- Sato, K., Katahira, M. and Toji, E. 1996. Drying characteristics of raw bulb and dehumidified air and moisture content distribution of different bulb parts. *Journal of Japanese Society of Agricultural Machinery, Tohoku Branch*, 44: 43–46.
- Shah, R. K. and Sekulib, D.R. 2003. Fundamentals of Heat Exchanger Design. *John Wiley & Sons*: 7-9.
- Shanmugam, V. and Natarajan E. 2005. Experimental investigation of forced convection and desiccant integrated solar dryer. *Renewable Energy*, 31: 1239–1251.
- Shanmugam, V. and Natarajan, E. 2007. Experimental study of regenerative desiccant integrated solar dryer with and without reflective mirror. *Applied Thermal Engineering*, 27: 1543–1551.
- Thoruwa, T.F.N., Smith, J.E., Grant, A.D. and Johnstone C.M. 1996. Development in solar drying using forced ventilation and solar regenerated desiccant materials. *In World renewable energy congress*.
- Wihelm, L.R., Dwayne, A.S. and Gerald, H.B. 2004. Food & Process Engineering Technology. Michigan: ASAE, 259-284



ภาคผนวก ก

ข้อมูลจากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.1 ข้อมูลการทดลองการดูดความชื้นภายในหอดูดความชื้นแบบไม่มีแผ่นกั้น

เวลา (นาท)	ครั้งที่1	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อกรัมซิลิกาเจล (กรัมน้ำต่อกรัมซิลิกาเจล)				ครั้งที่2	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อกรัมซิลิกาเจล (กรัมน้ำต่อกรัมซิลิกาเจล)				ครั้งที่3	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อกรัมซิลิกาเจล (กรัมน้ำต่อกรัมซิลิกาเจล)			
		ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4		ชั้น1	ชั้น2	ชั้น3	ชั้น4		ชั้น1	ชั้น2	ชั้น3	ชั้น4
0		0	0	0	0		0	0	0	0		0	0	0	0
1		0.67	0.76	0.90	1.02		0.67	0.75	0.90	1.00		0.68	0.75	0.88	1.01
2		1.35	1.26	1.58	1.53		1.11	1.50	1.35	1.49		1.14	1.26	1.33	1.77
3		1.80	1.77	2.04	2.30		1.78	2.00	2.03	2.24		1.59	1.76	1.77	2.27
4		2.25	2.27	2.49	2.81		2.22	2.50	2.48	2.74		1.82	2.26	2.21	2.78
5		2.70	2.78	2.94	3.32		2.67	3.00	2.93	3.23		2.05	2.51	2.65	3.28
6		3.15	3.28	3.39	3.83		3.11	3.50	3.39	3.73		2.27	2.76	2.88	3.79
9		4.04	4.29	4.52	5.10		4.00	4.75	4.74	4.98		2.95	3.77	3.76	4.80
12		4.72	5.05	5.43	6.12		4.89	5.75	5.64	5.97		3.64	4.52	4.65	5.81
15		5.62	6.06	6.33	6.89		5.56	6.50	6.32	6.97		4.32	5.28	5.75	6.57
18		6.07	6.57	7.01	7.65		6.22	7.25	7.00	7.71		5.00	5.78	6.42	7.07
21		6.74	7.32	7.92	8.16		6.89	7.75	7.67	8.21		5.45	6.28	6.86	7.58
24		7.19	7.83	8.60	8.93		7.33	8.50	8.13	8.96		5.91	6.53	7.30	8.08
27		7.64	8.33	9.28	9.69		8.00	9.00	8.80	9.45		6.14	7.04	7.74	8.33
30		8.09	8.84	9.73	9.95		8.44	9.50	9.26	10.20		6.59	7.29	8.19	8.84
35		8.76	9.60	10.41	10.71		9.11	10.25	10.16	10.95		7.27	8.04	8.85	9.60
40		9.44	10.10	10.86	11.22		9.56	11.00	10.61	11.44		7.73	8.54	9.51	10.10
45		9.89	10.61	11.54	11.99		10.22	11.50	11.29	12.19		8.41	9.30	10.18	10.86
50		10.34	11.11	11.99	12.24		10.67	12.00	11.74	12.69		9.09	10.05	10.84	11.62
55		10.56	11.36	12.22	12.50		11.11	12.50	12.19	13.18		9.77	10.80	11.50	12.37
60		11.01	11.62	12.44	13.01		11.56	12.75	12.42	13.43		10.45	11.31	12.17	13.13
65		11.46	12.12	12.90	13.27		11.78	13.25	12.87	13.68		10.91	12.06	12.83	13.64
70		11.46	12.12	12.90	13.52		12.00	13.50	13.09	13.93		11.36	12.31	13.50	14.14
75		11.91	12.63	13.35	13.78		12.22	13.75	13.32	14.18		11.82	12.81	13.94	14.65
80		12.13	12.63	13.57	14.03		12.44	13.75	13.32	14.43		12.27	13.32	14.38	14.90
85		12.36	12.88	13.80	14.29		12.67	14.00	13.54	14.43		12.73	13.57	14.60	15.15
90		12.58	13.13	13.80	14.29		12.67	14.25	13.54	14.68		12.95	13.82	14.82	15.40
95		12.81	13.38	14.03	14.54		12.89	14.25	13.77	14.68		13.18	14.07	15.04	15.66
100		12.81	13.64	14.25	14.80		12.89	14.50	13.77	14.93		13.18	14.07	15.27	15.91
105		13.03	13.64	14.25	14.80		12.89	14.50	13.77	14.93		13.41	14.32	15.49	15.91
110		13.26	13.64	14.48	14.80		13.11	14.50	14.00	14.93		13.41	14.32	15.49	16.16
115		13.26	13.89	14.48	15.05		13.11	14.75	14.00	15.17		13.64	14.57	15.71	16.41
120		13.48	13.89	14.48	15.05		13.11	14.75	14.00	15.17		13.64	14.82	15.71	16.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.2 ข้อมูลการทดลองการดูดความชื้นภายในหอดูดความชื้นแบบแผ่นกั้นวงแหวน

เวลา (นาท)	ครั้งที่1	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อกรัมซิลิกาเจล (กรัมน้ำต่อกรัมซิลิกาเจล)				ครั้งที่2	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อกรัมซิลิกาเจล (กรัมน้ำต่อกรัมซิลิกาเจล)				ครั้งที่3	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อกรัมซิลิกาเจล (กรัมน้ำต่อกรัมซิลิกาเจล)			
		ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4		ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4		ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4
0		0	0	0	0		0	0	0	0		0	0	0	0
1		0.66	0.77	0.69	0.74		0.66	0.51	0.46	0.49		0.45	0.51	0.47	0.50
2		1.10	1.29	1.15	1.23		1.11	1.02	1.15	0.98		0.90	0.77	0.70	0.99
3		1.54	1.80	1.62	1.72		1.55	1.53	1.38	1.47		1.13	1.03	1.17	1.24
4		1.98	2.31	2.08	2.22		1.99	2.04	2.07	1.71		1.36	1.29	1.41	1.49
5		2.42	2.57	2.54	2.46		2.43	2.54	2.30	2.20		1.58	1.54	1.64	1.74
6		2.86	3.08	2.77	2.96		2.88	2.80	2.76	2.44		2.04	1.80	1.88	1.99
9		3.74	4.11	3.70	3.94		3.76	3.82	3.69	3.42		2.49	2.31	2.35	2.48
12		4.63	4.88	4.85	4.93		4.65	4.58	4.38	4.16		3.17	3.08	3.05	2.98
15		5.51	5.66	5.31	5.67		5.31	5.34	5.07	4.89		3.62	3.60	3.52	3.72
18		6.17	6.17	6.00	6.16		5.75	5.85	5.53	5.38		4.07	4.11	3.99	4.22
21		6.61	6.94	6.47	6.90		6.42	6.36	6.22	5.87		4.75	4.63	4.46	4.71
24		7.05	7.46	7.16	7.39		6.86	6.87	6.45	6.36		5.20	4.88	4.93	4.96
27		7.49	7.71	7.39	7.64		7.30	7.38	6.91	6.60		5.66	5.40	5.16	5.46
30		8.15	8.23	7.85	8.13		7.52	7.63	7.37	7.09		5.88	5.66	5.63	5.71
35		8.59	9.00	8.55	8.87		8.19	8.40	7.83	7.58		6.56	6.17	6.10	6.45
40		9.47	9.51	9.24	9.61		8.63	8.65	8.29	8.07		7.01	6.94	6.81	6.70
45		9.69	9.77	9.47	9.85		9.07	9.16	8.76	8.31		7.47	7.46	7.28	7.44
50		10.13	10.28	10.16	10.34		9.29	9.41	9.22	8.80		7.92	7.97	7.75	7.94
55		10.57	10.54	10.39	10.59		9.51	9.67	9.22	9.05		8.03	7.97	7.98	7.94
60		10.79	11.05	10.62	11.08		9.73	9.92	9.68	9.29		8.60	8.48	8.45	8.44
65		11.23	11.31	11.09	11.33		9.96	10.18	9.68	9.54		9.05	8.74	8.69	8.68
70		11.45	11.57	11.09	11.58		10.18	10.18	9.91	9.78		9.28	9.00	8.92	9.18
75		11.45	11.57	11.32	11.82		10.40	10.43	10.14	9.78		9.50	9.25	9.15	9.43
80		11.67	11.83	11.55	12.07		10.40	10.43	10.14	9.78		9.73	9.77	9.39	9.68
85		11.89	12.08	11.78	12.07		10.40	10.43	10.14	10.02		9.95	10.03	9.62	9.93
90		11.89	12.08	11.78	12.32		10.40	10.43	10.14	10.02		10.18	10.03	9.86	9.93
95		12.11	12.08	11.78	12.32		10.62	10.69	10.37	10.02		10.41	10.28	10.09	10.17
100		12.11	12.34	12.01	12.32		10.62	10.69	10.60	10.02		10.63	10.54	10.33	10.42
105		12.11	12.34	12.01	12.32		10.62	10.69	10.60	10.02		10.86	10.54	10.33	10.42
110		12.33	12.34	12.01	12.56		10.62	10.69	10.60	10.27		11.09	10.80	10.56	10.67
115		12.33	12.34	12.24	12.56		10.62	10.69	10.60	10.27		11.09	10.80	10.56	10.67
120		12.33	12.60	12.24	12.81		10.62	10.69	10.60	10.27		11.09	10.80	10.56	10.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.3 ข้อมูลการทดลองการดูดความชื้นภายในหอดูดความชื้นแบบแผ่นกั้นแบ่งส่วน

เวลา (นาท)	ครั้งที่1	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อกรัมซิลิกาเจล (กรัมน้ำต่อกรัมซิลิกาเจล)				ครั้งที่2	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อกรัมซิลิกาเจล (กรัมน้ำต่อกรัมซิลิกาเจล)				ครั้งที่3	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อกรัมซิลิกาเจล (กรัมน้ำต่อกรัมซิลิกาเจล)			
		ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4		ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4		ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 4
0		0	0	0	0		0	0	0	0		0	0	0	0
1		0.45	0.76	0.47	0.51		0.91	0.77	0.71	0.52		0.47	0.53	0.50	0.51
2		0.90	1.02	0.95	1.02		1.37	1.29	1.18	1.04		0.94	1.07	0.99	0.77
3		1.35	1.52	1.42	1.28		1.82	1.80	1.65	1.55		1.41	1.33	1.24	1.03
4		1.79	1.78	1.66	2.04		2.51	2.32	2.12	2.07		1.64	1.60	1.74	1.29
5		2.47	2.28	1.90	2.30		2.73	2.84	2.59	2.33		1.88	2.13	1.99	1.80
6		2.69	2.79	2.37	2.55		3.19	3.09	2.83	2.59		2.35	2.40	2.23	2.06
9		3.59	3.81	3.55	3.83		4.10	4.12	3.77	3.63		3.05	3.20	2.98	2.83
12		4.93	5.08	4.50	4.59		4.78	4.90	4.72	4.40		3.76	3.73	3.47	3.34
15		5.83	5.84	5.21	5.61		5.47	5.67	5.42	4.92		4.23	4.27	3.97	3.86
18		6.73	6.60	5.92	6.38		6.15	6.19	6.13	5.70		4.69	4.80	4.47	4.37
21		7.40	7.36	6.64	6.89		6.61	6.96	6.60	6.22		5.16	5.07	4.96	4.88
24		8.07	7.87	7.35	7.40		7.06	7.47	7.31	6.74		5.40	5.60	5.21	5.14
27		8.52	8.38	7.82	8.16		7.52	7.73	7.78	7.25		5.87	5.87	5.46	5.40
30		9.19	9.14	8.29	8.42		7.97	8.25	8.02	7.51		6.10	6.13	5.96	5.66
35		9.87	9.90	9.00	9.18		8.43	8.76	8.73	8.03		6.57	6.40	6.20	6.17
40		10.54	10.66	9.72	9.69		9.11	9.28	9.20	8.55		6.81	6.67	6.70	6.43
45		11.21	10.91	10.19	10.46		9.34	9.79	9.67	9.07		7.04	7.20	6.95	6.68
50		11.43	11.42	10.66	10.71		9.79	10.05	10.14	9.33		7.28	7.20	6.95	6.94
55		12.11	11.93	11.14	11.22		10.02	10.31	10.38	9.59		7.51	7.47	7.20	7.20
60		12.33	12.44	11.61	11.48		10.25	10.57	10.61	10.10		7.51	7.47	7.44	7.46
65		12.78	12.69	11.85	11.99		10.48	10.82	10.85	10.10		7.75	7.73	7.69	7.71
70		13.00	12.94	12.32	12.24		10.71	11.08	11.08	10.36		7.98	8.00	7.69	7.71
75		13.45	13.20	12.56	12.50		10.93	11.08	11.32	10.62		7.98	8.00	7.94	7.71
80		13.68	13.71	12.80	12.76		10.93	11.34	11.32	10.88		8.22	8.00	7.94	7.97
85		13.68	13.71	13.03	13.01		11.16	11.34	11.56	10.88		8.22	8.00	7.94	7.97
90		13.90	13.71	13.03	13.27		11.16	11.60	11.56	11.14		8.22	8.27	8.19	7.97
95		13.90	13.96	13.51	13.27		11.39	11.60	11.79	11.14		8.22	8.27	8.19	8.23
100		14.13	13.96	13.51	13.52		11.39	11.86	11.79	11.40		8.22	8.27	8.19	8.23
105		14.13	14.21	13.74	13.52		11.39	11.86	12.03	11.40		8.22	8.27	8.19	8.23
110		14.35	14.21	13.74	13.78		11.62	11.86	12.03	11.40		8.22	8.27	8.19	8.23
115		14.35	14.21	13.74	13.78		11.62	12.11	12.03	11.66		8.22	8.27	8.19	8.23
120		14.35	14.21	13.74	13.78		11.62	12.11	12.26	11.66		8.22	8.27	8.19	8.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.4 ข้อมูลการทดลองคายความร้อนภายในหอดูดาวความชื้นที่อุณหภูมิ 60 °C

เวลา (นาท)	ครั้งที่1	น้ำหนักที่ลดลงต่อน้ำหนักซิลิกาเจล ต่อเวลา		ครั้งที่2	น้ำหนักที่ลดลงต่อน้ำหนักซิลิกาเจล ต่อเวลา		ครั้งที่3	น้ำหนักที่ลดลงต่อน้ำหนักซิลิกาเจล ต่อเวลา	
		แผ่นกึ่งวง แหวน	ไม่มีแผ่นกั้น		แผ่นกึ่งวงแหวน	ไม่มีแผ่นกั้น		แผ่นกึ่งวงแหวน	ไม่มีแผ่นกั้น
0		0	0		0	0		0	0
1		0.0037	0.0017		0.0040	0.0022		0.0033	0.0017
2		0.0056	0.0033		0.0054	0.0036		0.0047	0.0031
3		0.0061	0.0037		0.0056	0.0041		0.0048	0.0036
4		0.0063	0.0039		0.0061	0.0041		0.0047	0.0037
5		0.0063	0.0039		0.0059	0.0041		0.0048	0.0037
6		0.0062	0.0040		0.0057	0.0041		0.0046	0.0038
7		0.0061	0.0040		0.0055	0.0040		0.0043	0.0037
8		0.0060	0.0039		0.0053	0.0039		0.0041	0.0037
9		0.0058	0.0038		0.0050	0.0039		0.0039	0.0036
10		0.0057	0.0038		0.0048	0.0037		0.0037	0.0036
12		0.0053	0.0037		0.0044	0.0035		0.0034	0.0033
14		0.0048	0.0034		0.0040	0.0033		0.0031	0.0032
16		0.0045	0.0032		0.0037	0.0030		0.0029	0.0030
18		0.0042	0.0030		0.0034	0.0029		0.0026	0.0028
20		0.0039	0.0028		0.0032	0.0027		0.0025	0.0026
22		0.0037	0.0026		0.0029	0.0026		0.0023	0.0024
24		0.0035	0.0025		0.0028	0.0024		0.0022	0.0023
26		0.0032	0.0023		0.0026	0.0023		0.0021	0.0022
28		0.0031	0.0022		0.0025	0.0022		0.0020	0.0021
30		0.0029	0.0021		0.0023	0.0021		0.0019	0.0020
32		0.0028	0.0020		0.0022	0.0020		0.0018	0.0019
34		0.0026	0.0019		0.0021	0.0019		0.0017	0.0018
36		0.0025	0.0018		0.0020	0.0018		0.0016	0.0018
38		0.0024	0.0017		0.0019	0.0017		0.0015	0.0017
40		0.0023	0.0016		0.0018	0.0017		0.0015	0.0016
45		0.0020	0.0015		0.0016	0.0015		0.0013	0.0014
50		0.0018	0.0013		0.0015	0.0014		0.0012	0.0013
55		0.0017	0.0012		0.0014	0.0013		0.0011	0.0012
60		0.0015	0.0011		0.0013	0.0012		0.0010	0.0011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.5 ข้อมูลการทดลองคายความร้อนภายในหลอดความชื้นที่อุณหภูมิ 70 °C

เวลา (นาท)	ครั้งที่1	น้ำหนักที่ลดลงต่อน้ำหนักซิลิกาเจล ต่อเวลา		ครั้งที่2	น้ำหนักที่ลดลงต่อน้ำหนักซิลิกาเจล ต่อเวลา		ครั้งที่3	น้ำหนักที่ลดลงต่อน้ำหนักซิลิกาเจล ต่อเวลา	
		แผ่นกั้นวงแหวน	ไม่มีแผ่นกั้น		แผ่นกั้นวงแหวน	ไม่มีแผ่นกั้น		แผ่นกั้นวงแหวน	ไม่มีแผ่นกั้น
0		0	0		0	0		0	0
1		0.0049	0.0017		0.0045	0.0028		0.0017	0.0016
2		0.0066	0.0033		0.0062	0.0044		0.0050	0.0038
3		0.0067	0.0037		0.0066	0.0050		0.0059	0.0046
4		0.0068	0.0039		0.0066	0.0052		0.0064	0.0049
5		0.0068	0.0039		0.0064	0.0053		0.0065	0.0049
6		0.0067	0.0040		0.0062	0.0052		0.0065	0.0050
7		0.0066	0.0040		0.0059	0.0053		0.0064	0.0051
8		0.0064	0.0039		0.0056	0.0051		0.0063	0.0050
9		0.0062	0.0038		0.0054	0.0050		0.0062	0.0049
10		0.0059	0.0038		0.0052	0.0048		0.0060	0.0048
12		0.0054	0.0037		0.0047	0.0046		0.0055	0.0045
14		0.0049	0.0034		0.0043	0.0043		0.0051	0.0042
16		0.0045	0.0032		0.0040	0.0040		0.0047	0.0039
18		0.0042	0.0030		0.0037	0.0037		0.0044	0.0037
20		0.0039	0.0028		0.0034	0.0035		0.0041	0.0035
22		0.0036	0.0026		0.0031	0.0033		0.0038	0.0032
24		0.0034	0.0025		0.0030	0.0031		0.0036	0.0031
26		0.0032	0.0023		0.0028	0.0029		0.0034	0.0029
28		0.0030	0.0022		0.0026	0.0028		0.0032	0.0027
30		0.0028	0.0021		0.0025	0.0026		0.0030	0.0026
32		0.0027	0.0020		0.0023	0.0025		0.0028	0.0025
34		0.0026	0.0019		0.0022	0.0024		0.0027	0.0024
36		0.0024	0.0018		0.0021	0.0022		0.0026	0.0022
38		0.0023	0.0017		0.0020	0.0021		0.0024	0.0021
40		0.0022	0.0016		0.0019	0.0021		0.0023	0.0020
45		0.0020	0.0015		0.0017	0.0018		0.0021	0.0018
50		0.0018	0.0013		0.0016	0.0017		0.0019	0.0017
55		0.0017	0.0012		0.0014	0.0015		0.0017	0.0015
60		0.0015	0.0011		0.0013	0.0014		0.0016	0.0014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.6 ข้อมูลการทดลองคายความร้อนภายในหลอดความชื้นที่อุณหภูมิ 80 °C

เวลา (นาที)	ครั้งที่1	น้ำหนักที่ลดลงต่อน้ำหนักซิลิกาเจล ต่อเวลา		ครั้งที่2	น้ำหนักที่ลดลงต่อน้ำหนักซิลิกาเจล ต่อเวลา		ครั้งที่3	น้ำหนักที่ลดลงต่อน้ำหนักซิลิกาเจล ต่อเวลา	
		แผ่นกั้นวงแหวน	ไม่มีแผ่นกั้น		แผ่นกั้นวงแหวน	ไม่มีแผ่นกั้น		แผ่นกั้นวงแหวน	ไม่มีแผ่นกั้น
0		0	0		0	0		0	0
1		0.0069	0.0039		0.0074	0.0011		0.0050	0.0040
2		0.0085	0.0061		0.0085	0.0047		0.0069	0.0057
3		0.0089	0.0065		0.0089	0.0054		0.0074	0.0061
4		0.0089	0.0065		0.0084	0.0058		0.0075	0.0064
5		0.0089	0.0066		0.0082	0.0059		0.0076	0.0063
6		0.0087	0.0064		0.0079	0.0058		0.0077	0.0062
7		0.0085	0.0062		0.0073	0.0058		0.0077	0.0059
8		0.0083	0.0060		0.0069	0.0056		0.0074	0.0058
9		0.0081	0.0058		0.0065	0.0055		0.0073	0.0055
10		0.0078	0.0056		0.0061	0.0053		0.0070	0.0053
12		0.0072	0.0052		0.0054	0.0049		0.0063	0.0048
14		0.0066	0.0049		0.0048	0.0046		0.0057	0.0044
16		0.0061	0.0045		0.0044	0.0043		0.0052	0.0041
18		0.0056	0.0041		0.0040	0.0040		0.0047	0.0038
20		0.0052	0.0038		0.0037	0.0037		0.0044	0.0035
22		0.0048	0.0036		0.0034	0.0034		0.0041	0.0032
24		0.0045	0.0033		0.0032	0.0032		0.0038	0.0030
26		0.0042	0.0031		0.0029	0.0031		0.0035	0.0028
28		0.0040	0.0030		0.0028	0.0029		0.0033	0.0027
30		0.0037	0.0028		0.0026	0.0027		0.0031	0.0025
32		0.0035	0.0026		0.0024	0.0026		0.0029	0.0024
34		0.0033	0.0025		0.0023	0.0025		0.0028	0.0023
36		0.0032	0.0024		0.0022	0.0023		0.0026	0.0021
38		0.0031	0.0023		0.0021	0.0022		0.0025	0.0020
40		0.0029	0.0022		0.0020	0.0021		0.0024	0.0019
45		0.0026	0.0019		0.0018	0.0019		0.0021	0.0017
50		0.0024	0.0018		0.0016	0.0017		0.0019	0.0016
55		0.0021	0.0016		0.0015	0.0016		0.0017	0.0014
60		0.0020	0.0015		0.0013	0.0015		0.0016	0.0013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.7 ข้อมูลการทดลองคายความชื้นภายในหอดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 90 c°

เวลา (นาท)	ครั้งที่1	น้ำหนักที่ลดลงต่อน้ำหนักซิลิกาเจล ต่อเวลา		ครั้งที่2	น้ำหนักที่ลดลงต่อน้ำหนักซิลิกาเจล ต่อเวลา		ครั้งที่3	น้ำหนักที่ลดลงต่อน้ำหนักซิลิกาเจล ต่อเวลา	
		แผ่นกั้นวงแหวน	ไม่มีแผ่นกั้น		แผ่นกั้นวงแหวน	ไม่มีแผ่นกั้น		แผ่นกั้นวงแหวน	ไม่มีแผ่นกั้น
0		0	0		0	0		0	0
1		0.0071	0.0045		0.0053	0.0034		0.0066	0.0072
2		0.0090	0.0065		0.0072	0.0065		0.0086	0.0094
3		0.0095	0.0072		0.0083	0.0073		0.0092	0.0096
4		0.0096	0.0072		0.0085	0.0075		0.0091	0.0094
5		0.0096	0.0073		0.0087	0.0074		0.0091	0.0091
6		0.0093	0.0081		0.0087	0.0073		0.0088	0.0087
7		0.0091	0.0076		0.0086	0.0072		0.0088	0.0082
8		0.0088	0.0071		0.0084	0.0069		0.0085	0.0079
9		0.0084	0.0067		0.0082	0.0066		0.0082	0.0075
10		0.0081	0.0064		0.0080	0.0064		0.0081	0.0071
12		0.0073	0.0057		0.0074	0.0059		0.0073	0.0064
14		0.0066	0.0051		0.0067	0.0053		0.0067	0.0058
16		0.0061	0.0047		0.0062	0.0049		0.0061	0.0053
18		0.0057	0.0043		0.0058	0.0045		0.0056	0.0048
20		0.0052	0.0039		0.0053	0.0042		0.0052	0.0044
22		0.0048	0.0036		0.0050	0.0039		0.0048	0.0041
24		0.0045	0.0033		0.0047	0.0036		0.0045	0.0038
26		0.0042	0.0031		0.0044	0.0034		0.0042	0.0036
28		0.0039	0.0029		0.0041	0.0032		0.0040	0.0034
30		0.0037	0.0028		0.0039	0.0030		0.0037	0.0031
32		0.0035	0.0026		0.0037	0.0028		0.0035	0.0030
34		0.0033	0.0025		0.0035	0.0027		0.0033	0.0028
36		0.0031	0.0023		0.0033	0.0025		0.0031	0.0027
38		0.0030	0.0022		0.0032	0.0024		0.0030	0.0025
40		0.0028	0.0021		0.0030	0.0023		0.0029	0.0024
45		0.0025	0.0019		0.0027	0.0020		0.0026	0.0021
50		0.0023	0.0017		0.0024	0.0019		0.0023	0.0019
55		0.0021	0.0015		0.0022	0.0017		0.0021	0.0018
60		0.0019	0.0014		0.0020	0.0015		0.0019	0.0016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 ซิลิกาเจลสีน้ำเงิน

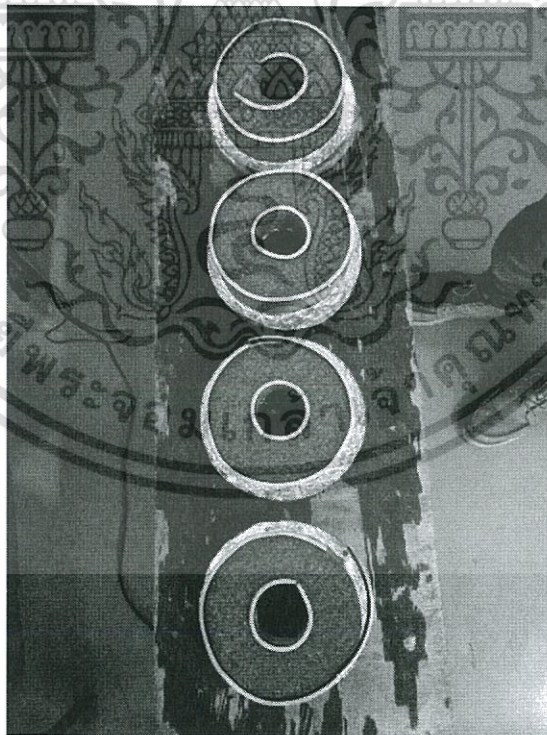


รูปที่ ข.2 ซิลิกาเจลสีชมพู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

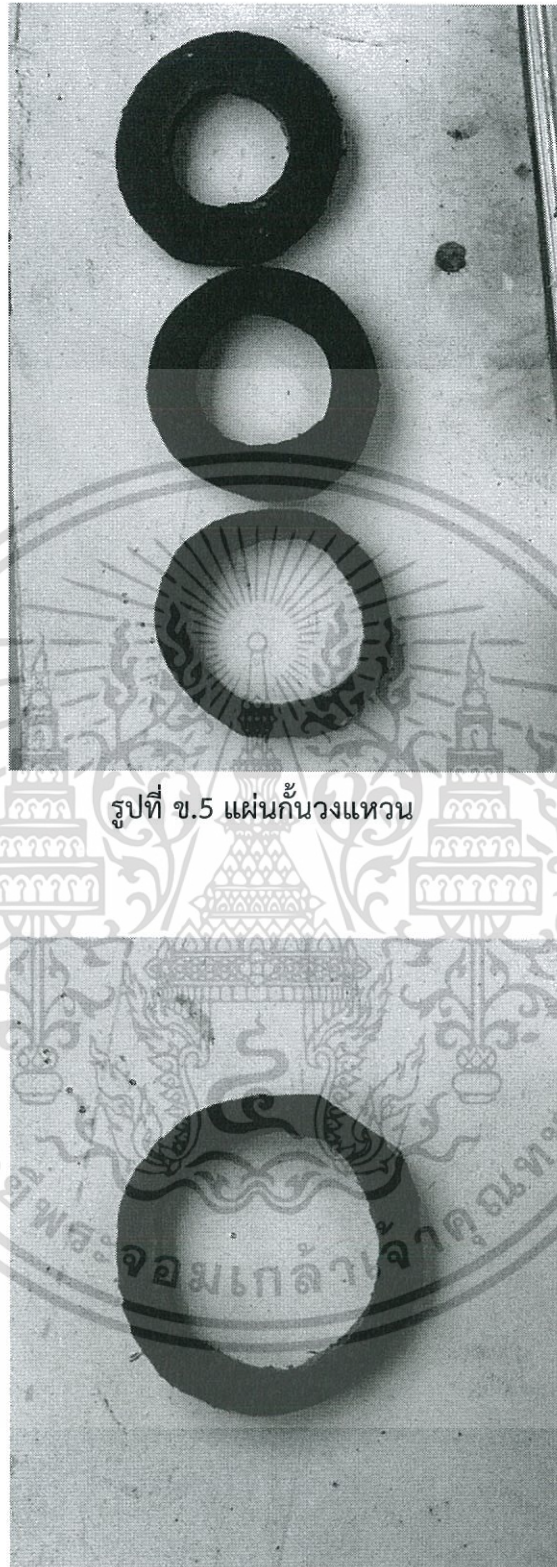


รูปที่ ข.3 ชุดทดลองหอดูดความชื้นแบบอากาศไหลผ่านตามแนวรัศมี



รูปที่ ข.4 การบรรจุซิลิกาเจลสีชมพูในชุดทดลอง

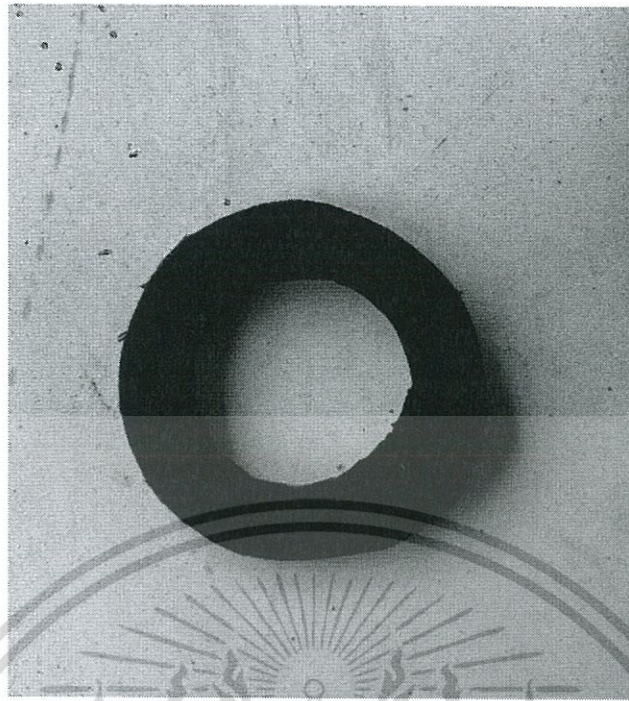
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.5 แผ่นกั้นวงแหวน

รูปที่ ข.6 แผ่นกั้นวงแหวนระหว่างชั้นที่1และชั้นที่2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

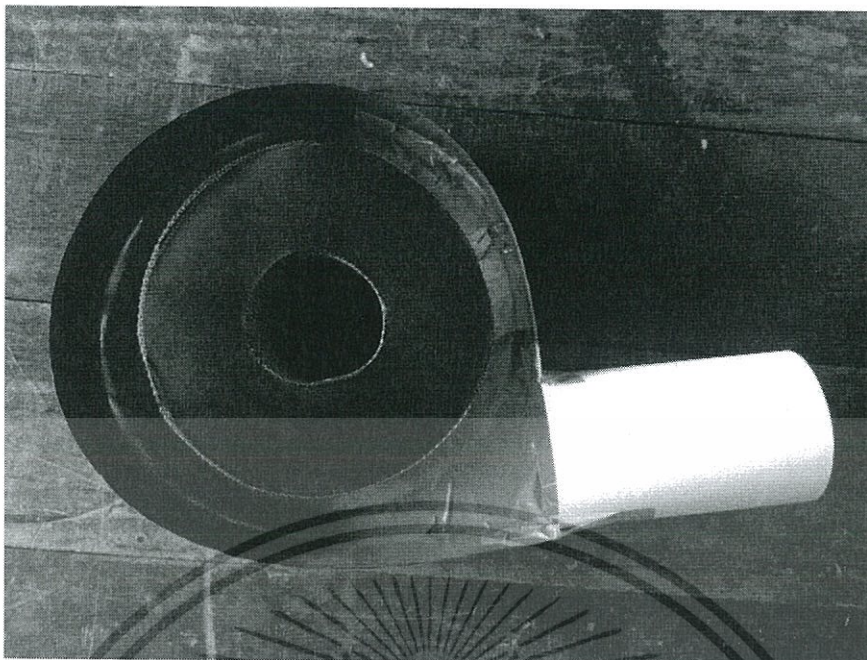


รูปที่ ข.7 แผ่นกั้นวงแหวนระหว่างชั้นที่2และชั้นที่3

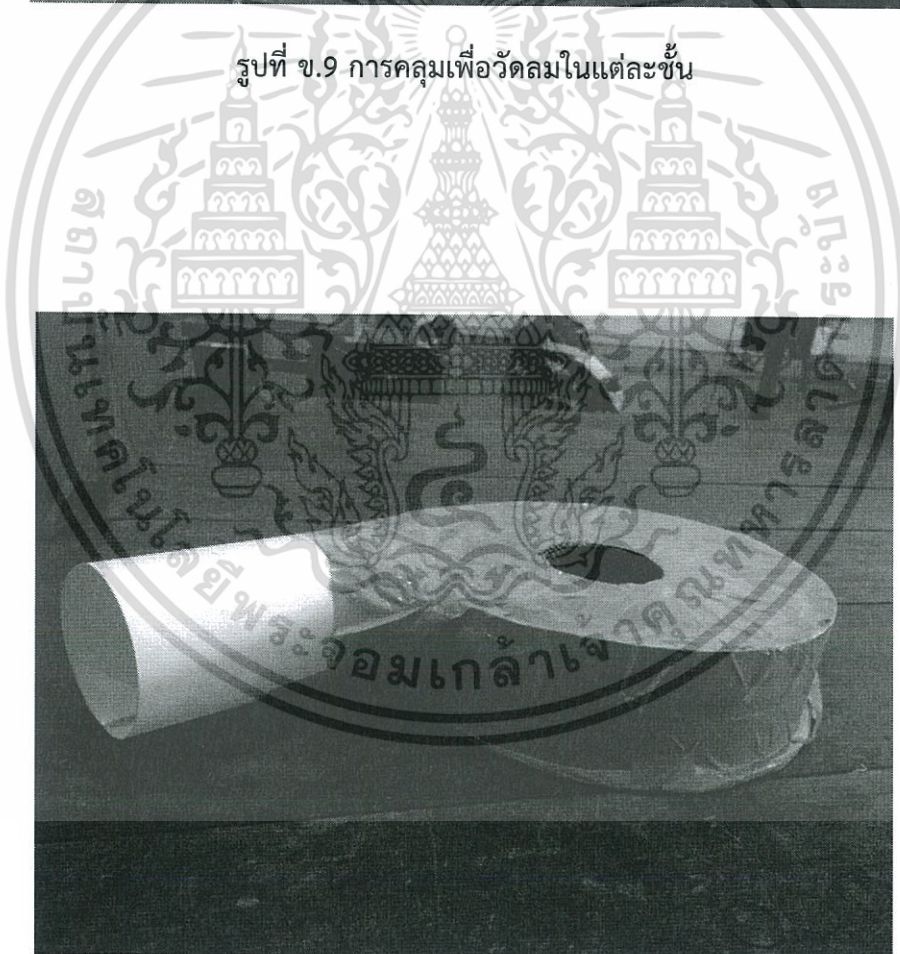


รูปที่ ข.8 แผ่นกั้นวงแหวนระหว่างชั้นที่3และชั้นที่4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.9 การคลุมเพื่อวัดลมในแต่ละชั้น



รูปที่ ข.10 การคลุมเพื่อวัดลมในแต่ละชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้