

การศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น
Study on psychrometric properties in a hot air drying chamber
with a desiccant wheel dehumidification system

เกียรติศิริรินทร์ กลิ่นจันทร์
ดวงหทัย คำอ่อน
ปลิดา สุวรรณวิศาล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น
Study on psychrometric properties in a hot air drying chamber
with a desiccant wheel dehumidification system



T143891

เกียรติศิริรินทร์ กลิ่นจันทร์

ดวงหทัย คำอ่อน

ปลิดา สุวรรณวิศาล

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **143891**
วันเดือนปี **04 ต.ค. 2559**

b. **1280941x**
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น
Study on psychrometric properties in a hot air drying chamber
with a desiccant wheel dehumidification system

เกียรติศิริรินทร์ กลิ่นจันทร์
ดวงหทัย คำอ่อน
ปลิดา สุวรรณวิศาล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

STUDY ON PSYCHROMETRIC PROPERTIES IN A HOT AIR DRYING CHAMBER
WITH A DESICCANT WHEEL DEHUMIDIFICATION SYSTEM

Keatsirin Klinchan
Duanghathai Khamon
Palida Suvanvisan

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN AGRICULTURAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2015


คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

.....

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น
Study on psychrometric properties in a hot air drying chamber with a desiccant wheel dehumidification system

นักศึกษาผู้จัดทำ นางสาวเกียรตติรินทร์ กลิ่นจันทร์ รหัสนักศึกษา 55010106
นางสาวดวงหทัย คำอ่อน รหัสนักศึกษา 55010426
นางสาวปลิดา สุวรรณวิศาล รหัสนักศึกษา 55010731

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)
หลักสูตร วิศวกรรมเกษตร
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2558

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร. จิราพร ศรีภิญโญวณิชย์ จงยิ่งเจริญ	

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น		
นักศึกษาผู้จัดทำ	นางสาวเกียรติศรินทร์	กลิ่นจันทร์	รหัสนักศึกษา 55010106
	นางสาวดวงหทัย	คำอ่อน	รหัสนักศึกษา 55010426
	นางสาวปลิดา	สุวรรณวิศาล	รหัสนักศึกษา 55010731
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. จิราพร ศรีภิญโญวิชย์ จงยิ่งเจริญ		
ปีการศึกษา	2558		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการพัฒนาระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นโดยการศึกษาสมบัติการดูดและการคายความชื้นของสารดูดความชื้น ได้แก่ ซิลิกาเจล เนื่องจากอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศ (0.04 , 0.06 และ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$) อุณหภูมิของอากาศ (50 , 60 , และ 90°C) และความหนาของชั้นสารดูดความชื้นได้แก่ (1 , 3 , และ 5 cm) เพื่อให้ได้อากาศที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในระบอบอบแห้งต่อไป โดยเมื่อใช้ซิลิกาเจลในวงล้อดูดความชื้นพบว่ามีความสามารถในการดูดได้ดีเมื่อเพิ่มอัตราการไหลและลดความหนาของชั้นสารดูดความชื้นและมีความสามารถในการคายได้ดีเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและอัตราการไหล วงล้อดูดความชื้นช่วยลดความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบแห้งจาก 52.4% ถึง 40.6% ระหว่างการดูดซับความชื้น อากาศที่แลกเปลี่ยนความร้อนมาแล้วเมื่อผ่านเข้าวงล้อดูดความชื้นความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะเพิ่มขึ้นจาก 22% ถึง 32.1% และ 17% ถึง 27.2% ที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C ตามลำดับ เมื่อใช้ซิลิกาเจลในการทดลองร่วมกับระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นพบว่าสามารถลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศได้ตลอดช่วงเวลาที่ทดสอบซึ่งแสดงให้เห็นว่าซิลิกาเจลในวงล้อดูดความชื้นสามารถคายความชื้นออกได้ในเวลาเดียวกันและสามารถดูดความชื้นจากอากาศได้อย่างต่อเนื่อง

คำสำคัญ: วงล้อดูดความชื้น; การอบแห้งแบบลมร้อน; สารดูดความชื้น; ซิลิกาเจล

Thesis Title	Study on psychrometric properties in a hot air drying chamber with a desiccant wheel dehumidification system		
Authors	Keatsirin	Klinchan	55010106
	Duanghathai	Khamon	55010426
	Palida	Suvanvisan	55010731
Thesis Advisor	Dr. Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen		
Year	2015		

Abstract

A hot air drying with a desiccant wheel dehumidification system (HA-DW system) was developed in this study. Effects of air flow rate (Q , 0.04, 0.06, and 0.08 m³/s), hot air temperature (T , 50, 60, and 90°C), and desiccant thickness (t , 1, 3, and 5 cm) on water capacity (WC) during moisture adsorption and desorption of silica gel were investigated. Silica gel presented better moisture adsorption with increasing Q and decreasing t . Higher T and Q also led to greater moisture desorption. The desiccant wheel (DW) could reduce relative humidity (RH) in a drying chamber from 52.4% to 40.6% during moisture adsorption. RH of regeneration air after passing through the desiccant were increased from 22% to 32.1% and from 17% to 27.2% with the regeneration temperatures of 50°C and 60°C. Lower RH was observed in the HA-DW system for the whole experimental period which presented that silica gel in the DW could be well regenerated and used for moisture adsorption in the system.

Keywords: Desiccant wheel; Hot air drying; Desiccant; Silica gel

กิตติกรรมประกาศ

รายงานโครงการฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์จากโครงการวิจัยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนงบประมาณในการจัดซื้อวัสดุและอุปกรณ์ในการทำวิจัย และหลักสูตรวิศวกรรมเกษตร สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

ดร. จิราพร ศรีภิญโญวิชย์ จงยิ่งเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาด้านวิชาการและการจัดทำโครงการ หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ข้อคิดเห็นในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอน และให้กำลังใจในการทำโครงการมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ดร.เอกพงษ์ ซีวิตโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษาด้านวิชาการและการออกแบบเครื่องจักรกล หลักสูตรวิศวกรรมอาหาร สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำปรึกษา และช่วยเหลือด้านการออกแบบเครื่องจักรกล

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณทุกท่านที่ให้การสนับสนุนการทำงานและกำลังใจแก่ผู้จัดทำมาโดยตลอด กระทั่งการศึกษาค้นคว้าโครงการในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำมีความซาบซึ้งใจในความกรุณาอันดีเยี่ยมจากทุกท่านที่ได้กล่าวนามมา และขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

นางสาวเกียรติศรินทร์ กลิ่นจันทร์

นางสาวดวงหทัย คำอ่อน

นางสาวปลิดา สุวรรณวิศาล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	XL
สารบัญรูป	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีการอบแห้ง	4
2.1.1 คำนียามและการคำนวณกระบวนการอบแห้ง	4
2.1.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง	8
2.2 ประเภทของสารดูดความชื้น	8
2.2.1 ซิลิกาเจล	8
2.2.2 ไดอะตอมมาเซียสเอิร์ธ	11
2.2.3 มอนต์โมริลโลไนต์เคลย์	11
2.2.4 โมเลกุลลาร์ซีฟ	11
2.2.5 แคลเซียมออกไซด์	12
2.3 การใช้สารดูดความชื้นในระบบอบแห้ง	13
2.4 ระบบการดูดความชื้น	13
2.4.1 การดูดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นแบบแข็ง	13
2.4.2 การดูดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นแบบเหลว	17
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
2.5.1 การทำแห้งชาสมุนไพรด้วยเครื่องอบลมร้อนร่วมกับการใช้สารดูดความชื้น	18
2.5.2 อิทธิพลของวิธีการอบแห้งต่อคุณภาพของผักชีฝรั่ง	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	19
3.1 การออกแบบวงล้อดูดความชื้นและเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น	19
3.1.1 การคำนวณปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบแห้งในสถานการณ์จำลองที่สภาพอากาศนี้	19
3.1.2 การคำนวณปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบแห้งในสถานการณ์จำลองที่สภาพอากาศไหล	20
3.1.3 การคำนวณอัตราการไหลของอากาศ เพื่อคายความชื้นจากซิลิกาเจล	21
3.1.4 การคำนวณขนาดของวงล้อดูดความชื้น	22
3.1.5 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น	22
3.2 การเปรียบเทียบสมบัติการดูดและการคายความชื้นของสารดูดความชื้นระหว่างซิลิกาเจลและโมลิกุลลาร์ซีฟ	24
3.2.1 การเปรียบเทียบสมบัติการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นระหว่างซิลิกาเจลและโมลิกุลลาร์ซีฟ	24
3.2.2 การเปรียบเทียบสมบัติการคายความชื้นของสารดูดความชื้นระหว่างซิลิกาเจลและโมลิกุลลาร์ซีฟ	25
3.3 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและความหนาของชั้นสารดูดความชื้นต่อการดูดความชื้นของซิลิกาเจล	25
3.4 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่อการคายความชื้นของซิลิกาเจล	25
3.5 การศึกษาสมรรถนะของวงล้อดูดความชื้น	26
3.5.1 การวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังจากผ่านการดูดความชื้นด้วยวงล้อดูดความชื้น	26
3.5.2 การวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังจากผ่านการคายความชื้นจากวงล้อดูดความชื้น	27
3.6 การศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	30
4.1 การออกแบบวงล้อดูดความชื้นและเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น	30
4.1.1 ผลปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบแห้งในสถานการณ์จำลองที่สภาพอากาศนิ่ง	30
4.1.2 ผลการปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบแห้งในสถานการณ์จำลองที่สภาพอากาศไหล	31
4.1.3 ผลการคำนวณอัตราการไหลของอากาศเพื่อคายความชื้นจากซิลิกาเจล	33
4.1.4 ผลการคำนวณขนาดของวงล้อดูดความชื้น	36
4.2 การเปรียบเทียบสมบัติการดูดและการคายความชื้นของสารดูดความชื้นระหว่างซิลิกาเจลและโมเลกุลสารซีฟ	37
4.2.1 การดูดความชื้น	37
4.2.2 การคายความชื้น	37
4.3 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและความหนาของชั้นสารดูดความชื้นต่อการดูดความชื้นของซิลิกาเจล	38
4.4 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิลมร้อน และความหนาของชั้นสารดูดความชื้นต่อการคายความชื้นของซิลิกาเจล	40
4.5 การศึกษาสมรรถนะของวงล้อดูดความชื้น	41
4.5.1 การดูดความชื้น	41
4.5.2 การคายความชื้น	42
4.6 การศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	48
5.1.1 การเปรียบเทียบสมบัติการดูดและการคายความชื้นระหว่าง ซิลิกาเจลและโมเลกุลลาร์ซีฟลาร์ซีฟ	48
5.1.2 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและความหนาของ ชั้นสารดูดความชื้นต่อการดูดความชื้นของซิลิกาเจล	48
5.1.3 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิลมร้อน และ ความหนาของชั้นสารดูดความชื้นต่อการคายความชื้นของ ซิลิกาเจล	48
5.1.4 การศึกษาสมรรถนะของวงล้อดูดความชื้น	48
5.1.5 การศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ ระบบวงล้อดูดความชื้น	48
5.2 ข้อเสนอแนะ	49
เอกสารอ้างอิง	50
ภาคผนวก ก.	54

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของซิลิกาเจล	9
ตารางที่ 2.2 ข้อมูลทางกายภาพของซิลิกาเจล	10
ตารางที่ 2.3 ความสามารถในการดูดความชื้นของซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 30°C ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ	10
ตารางที่ 2.4 ความหมายของสีที่แสดงบนเม็ดสีซิลิกาเจล	10
ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณค่าต่างๆในการคำนวณหาปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบแห้ง	30
ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณค่าต่างๆในการคำนวณหาปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบแห้ง	32
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซับความชื้นของซิลิกาเจล (kg water) ต่อหนึ่งหน่วยเวลา(h)	33
ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณค่าต่างๆในการคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศเพื่อคายความชื้นของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบแห้ง	35
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคายซับความชื้นของซิลิกาเจล (kg water) ต่อหนึ่งหน่วยเวลา(h)	35

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กราฟแสดงความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในการอบแห้ง	6
รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้งกับเวลาในการอบแห้ง	7
รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความจุความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของซิลิกาเจลและโมเลกุลสารซีพี	12
รูปที่ 2.4 ระบบลดความชื้นด้วยสารดูดความชื้นแข็ง	14
รูปที่ 2.5 เครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นแบบหมุนใช้ฮีตเตอร์	14
รูปที่ 2.6 เครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นแบบหมุนที่มีระบบนำความร้อนกลับมาใช้	15
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของระบบลดความชื้นด้วยสารดูดความชื้นเหลว	17
รูปที่ 3.1 กราฟอัตราการดูดซับความชื้นของสารดูดความชื้นชนิดต่างๆ	20
รูปที่ 3.2 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น	23
รูปที่ 3.3 ชุดทดสอบสมบัติการดูดและการคายความชื้นของสารดูดความชื้น	24
รูปที่ 3.4 แผนภาพการทำงานของส่วนประกอบในระบบดูดความชื้นของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นส่วนดูดความชื้น	26
รูปที่ 3.5 แผนภาพการทำงานของส่วนประกอบในระบบคายความชื้นของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นส่วนคายความชื้น	27
รูปที่ 3.6 แผนภาพการทำงานของส่วนประกอบในระบบคายความชื้นของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น	29
รูปที่ 4.1 แผนภูมิไฮโครเมตริกแสดงสมบัติของอากาศนิ่งจากการจำลองการดูดความชื้นของวงล้อดูดความชื้น	31
รูปที่ 4.2 แผนภูมิไฮโครเมตริกแสดงสมบัติของอากาศไหลจากการจำลองการดูดความชื้นของวงล้อดูดความชื้น	34
รูปที่ 4.3 วงล้อดูดความชื้น	36
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุความชื้นและเวลาในการดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ เปรียบเทียบระหว่างซิลิกาเจลและโมเลกุลสารซีพี	37
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุความชื้นและเวลาในการคายความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ เปรียบเทียบระหว่างซิลิกาเจลและโมเลกุลสารซีพี	38
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุความชื้นและเวลาในการดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ ของซิลิกาเจล	39

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารดูดความชื้นและเวลาในการดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ ของซิลิกาเจล	39
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุความชื้นและเวลาในการดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆของซิลิกาเจล	40
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารดูดความชื้นและเวลาในการคายความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆของซิลิกาเจล	41
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในการดูดความชื้นของวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหล $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$	42
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในการคายความชื้นของวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหล $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิ 50°C	43
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในการคายความชื้นของวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหล $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิ 60°C	44
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในระบบวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหล $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิ 90°C	45
รูปที่ 4.14 แผนภาพแสดงการศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น	46
รูปที่ 4.15 แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงการศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น เป็นระบบการอบแห้งวัสดุในสถานะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งต่ำกว่าสภาวะปกติ ในสภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C เมื่อใช้สารดูดความชื้นร่วมในระบบความชื้นสัมพัทธ์อาจลดลงเหลือ 28-30% ในขณะที่ระบบการอบแห้งแบบลมร้อนปกติจะมีความชื้นสัมพัทธ์สูงถึง 58-63% [1] การลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องอบแห้งสามารถส่งผลให้การระเหยน้ำออกจากวัสดุมาซึ่งอากาศมีประสิทธิภาพมากขึ้น ข้อดีของสารดูดความชื้นต่อกระบวนการอบแห้งยังมีอีกหลายประการ ได้แก่ การเพิ่มอัตราการอบแห้ง การเพิ่มความสม่ำเสมอของความชื้นของวัสดุในระหว่างอบแห้ง และการเพิ่มคุณภาพของวัสดุอบแห้ง โดยเฉพาะวัสดุที่เสื่อมคุณภาพได้ด้วยความร้อน [2] จากงานวิจัยของ Naidu [1] ซึ่งทำการอบแห้งผักซีฟรังก์ด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 50°C พบว่าวิธีการอบแห้งนี้ทำให้ผักซีฟรังก์มีสารต้านอนุมูลอิสระในปริมาณที่สูงกว่าวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนปกติ รวมถึงมีลักษณะปรากฏเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคมากกว่าด้วย

ในปัจจุบันสารดูดความชื้นมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด โดยแต่ละชนิดจะมีลักษณะ สมบัติ และความเหมาะสมในการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป บางชนิดสัมผัสอาหารได้ บางชนิดไม่อนุญาตให้ใช้กับอาหาร ขึ้นอยู่กับมาตรฐานการนำไปใช้งานของแต่ละประเทศ สารดูดความชื้นที่มีการนำมาใช้กับอาหาร ได้แก่ ซิลิกาเจล (silica gel) [3] ซึ่งสามารถดูดความชื้นได้มากถึง 40% ของน้ำหนักตัว ไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยาและไม่เป็นพิษ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ มีความปลอดภัยที่จะใช้กับอาหารและยา สำหรับโมเลกุลลาร์ซีฟ (Molecular Sieve) จากงานวิจัยของ Dina [4] มีการนำโมเลกุลลาร์ซีฟ มาใช้ร่วมในการอบแห้งเมล็ดโกโก้ โดยสามารถดูดความชื้นได้สูงสุด 20% ของน้ำหนักตัว แต่ปัจจุบันยังไม่ได้รับการรับรองจากหน่วยงานอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา (US-FDA) ให้ใช้ได้สำหรับอาหารและยา [5] จึงนิยมใช้กับภาคอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่

ระบบวงล้อดูดความชื้นมีส่วนประกอบหลัก คือ ชุดวงล้อหมุน ซึ่งบรรจุสารดูดความชื้นเช่นซิลิกาเจลอยู่ในชุดวงล้อดังกล่าวจะถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ซึ่งทำหน้าที่หมุนวงล้อดูดความชื้นให้อากาศที่เข้ามาในเครื่องสัมผัสกับชุดวงล้อมากที่สุดเพื่อไล่ความชื้นออกจากอากาศที่ไหลผ่านซึ่งจะถูกดูดซับไว้โดยซิลิกาเจล ซิลิกาเจลจะเปลี่ยนสีจากสีชมพูเป็นสีน้ำเงินเมื่อรับไอน้ำเข้ามาในตัวเอง ทำให้อากาศที่ได้มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำแล้วนำไปใช้ในระบบอบแห้ง จากนั้นอากาศที่แลกเปลี่ยนความร้อนวนกลับเข้าสู่วงล้อดูดความชื้นอีกครั้งเพื่อไล่ความชื้นออกจากซิลิกาเจล ซิลิกาเจลจะเปลี่ยนสีจากสีชมพูเป็นสีน้ำเงินทำให้สามารถวนกลับมาใช้ในระบบได้ต่อไป [6]

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อลดความชื้นของอากาศในห้องอบแห้ง สารดูดความชื้นที่ศึกษาในการทดลองนี้ คือ ซิลิกาเจลและ โมเลกุลสารซีฟ มีการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหล อุณหภูมิ และความหนาของสารดูดความชื้น ต่อความจุความชื้นของสารดูดความชื้น และศึกษาการทำงานของวงล้อดูดความชื้นที่มีต่อการดูดและการคายความชื้นของอากาศเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิและอัตราการไหล รวมทั้งศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติการดูดและการคายความชื้นของสารดูดความชื้นเนื่องจากอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิของอากาศ และความหนาของชั้นสารดูดความชื้นสำหรับการออกแบบวงล้อดูดความชื้น

1.2.2 เพื่อศึกษาสมรรถนะของวงล้อดูดความชื้นในการลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น

1.3 ขอบเขตการศึกษา

วิธีการอบแห้งที่ใช้เป็นวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นชนิดวงล้อที่มีการนำความร้อนทิ้งจากกระบวนการอบแห้งกลับมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศโดยรอบเพื่อนำอากาศโดยรอบที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นไปกำจัดความชื้นออกจากสารดูดความชื้นในวงล้อดูดความชื้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีการอบแห้ง

2.1.1 คำนิยามและการคำนวณกระบวนการอบแห้ง

การอบแห้ง (Drying) คือ กระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทไปโดยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย โดยอาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย ปริมาณความชื้นสามารถรายงานผลได้ 2 รูปแบบตามการคำนวณในสมการต่อไปนี้ [7]

ความชื้นฐานเปียก (moisture content on wet basis, %MC_{wb})

$$\%MC_{wb} = \frac{M_w}{M_w + M_s} \times 100 \quad (2.1)$$

ความชื้นมาตรฐานแห้ง (moisture content on dry basis, %MC_{db})

$$\%MC_{db} = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (2.2)$$

เมื่อ %MC_{wb} คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก (%)

%MC_{db} คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้ง (%)

M_w คือ มวลน้ำในวัสดุ (kg)

M_s คือ มวลแห้งของวัสดุ (kg)

อัตราการอบแห้ง (drying rate)

อัตราการอบแห้ง (drying rate) คือ มวลของเหลวที่ระเหยต่อพื้นที่ที่เกิดการระเหยต่อเวลา สมการของอัตราการอบแห้ง สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.3)

$$R = -\frac{1}{A} \frac{dm}{dt} \quad (2.3)$$

เมื่อ R คือ อัตราการแห้งหรืออัตราการระเหย ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)

A คือ พื้นที่ที่เกิดการระเหย (m^2)

$\frac{dm}{dt}$ คือ มวลของน้ำที่ระเหยต่อหนึ่งหน่วยเวลา (kg/h)

ความสัมพันธ์ของมวลของน้ำในอาหารและความชื้นในอาหาร สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.4)

$$M = Wm \quad M = lA\rho_s$$

$$dm = MdW = lA\rho_s dW \quad (2.4)$$

เมื่อ m คือ มวลของน้ำในสารขึ้น (kg)

M คือ มวลของสารแห้งสนิท (kg)

W คือ ความชื้นในอาหารฐานแห้ง ($\text{kg water}/\text{kg dry solid}$)

l คือ ความหนาของสารแห้งสนิท (m)

ρ_s คือ ความหนาแน่นของสารแห้งสนิท (kg/m)

แทนค่า dm ในสมการที่ (2.3) จะได้

$$R = -\frac{1}{A} \frac{dm}{dt} = -l\rho_s \frac{dW}{dt} \quad (2.5)$$

$$dT = -\frac{M}{A} \frac{dW}{R} = -l\rho_s \frac{dW}{dt}$$

เวลาที่ใช้ในการทำแห้ง (drying time) หาได้จากการอินทิเกรตสมการที่ (2.5) จากความชื้นเริ่มต้น (W_0) ถึงความชื้นที่เวลาใดๆ (W_t) จะได้

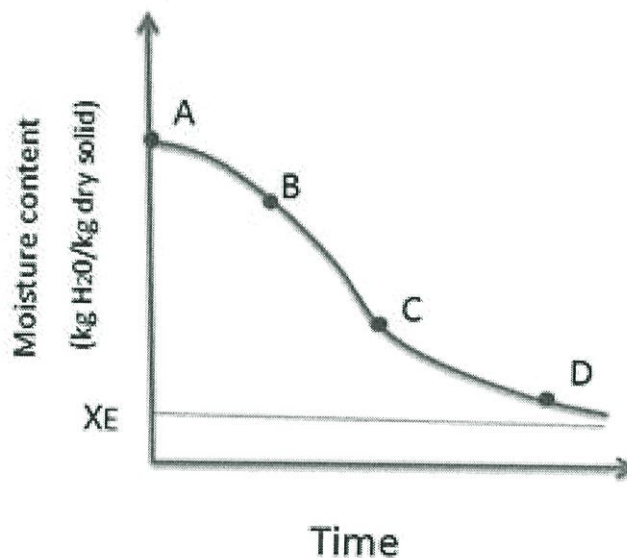
$$t = -\frac{M}{A} \int_{W_0}^W \frac{dR}{R} = -l\rho_s \int_{W_0}^{W_t} \frac{dW}{R} \quad (2.6)$$

เนื่องจาก $W_0 > W_t$ เสมอ ดังนั้น สามารถเขียนสมการที่ (2.7) ใหม่ ดังต่อไปนี้

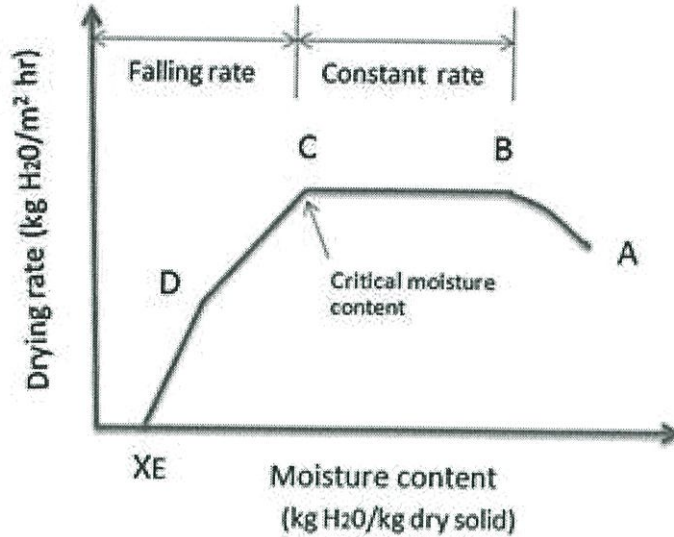
$$t = -\frac{M}{A} \int_{W_t}^{W_0} \frac{dR}{R} = -l\rho_s \int_{W_t}^{W_0} \frac{dW}{R} \quad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.7) หาเวลาที่ใช้ในการอบแห้งได้โดยการเขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{R}$ และ ที่เวลาใดๆ จากนั้นหาพื้นที่ใต้กราฟจาก W_t ถึง W_0 แล้วนำมาคูณด้วยค่า $\frac{M_s}{A}$ หรือ $l\rho_s$ ก็จะได้เวลาที่ใช้การทำแห้งที่ต้องการ

กราฟระหว่างอัตราการอบแห้ง (drying rate) และความชื้นในสารนั้น (moisture content) แบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 คือ



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในการอบแห้ง [8]



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้งกับเวลาในการอบแห้ง [8]

1. ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial adjustment period - AB) เป็นช่วงเริ่มต้นที่อาหารที่ใช้ในการอบแห้งมีความชื้นเริ่มต้น (A) ของอาหารยังสูงอยู่ ผิวของอาหารจะมีลักษณะเปียกชื้นมาก เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางลมร้อนกับอาหาร ทำให้อุณหภูมิพื้นผิวอาหาร มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet bulb temperature) ของกระแสลมร้อนที่ใช้เป็นตัวกลาง อัตราการทำแห้งค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนถึงช่วงอัตราทำแห้งคงที่ (constant rate)

2. ช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ (Constant rate period-BC) เป็นช่วงที่น้ำภายในวัสดุเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้า พลังงานความร้อนที่วัสดุได้รับจะใช้ในการระเหยน้ำออกจากของวัสดุอย่างต่อเนื่อง ความชื้นเฉลี่ยของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในการอบแห้ง จุดสุดท้ายของช่วงการอบแห้งความเร็วคงที่ อัตราเร็วในการอบแห้งจะเริ่มลดลง ความชื้นของวัสดุ ณ เวลานี้ เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (critical moisture content)

การคำนวณอัตราการอบแห้งในช่วงนี้ สามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$R_c = \frac{h}{\lambda} (T_v - T_i) \quad (2.8)$$

เมื่อ R_c คือ อัตราการอบแห้งในช่วงความเร็วคงที่ (w/m)

h_v คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (heat transfer coefficient, $w/m^2 \text{ } ^\circ C$)

T_v คือ อุณหภูมิของลมร้อน ($^\circ C$)

T_i คือ อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ เท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก ($^\circ C$)

3. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period CD และ DE) เป็นช่วงที่ความชื้นในอาหารเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารอย่างต่อเนื่อง ผิวหน้าของอาหารเริ่มแห้ง ทำให้อุณหภูมิจุดผิวของอาหารสูงขึ้นเรื่อยๆ อัตราการอบแห้งจะลดลงความชื้นจะลดลงเรื่อยๆ จนถึงค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content, XE) ซึ่งเป็นความชื้นที่ต่ำสุด ภายใต้สภาวะที่ให้อยู่ในขณะนั้น ที่ความชื้นนี้ อัตราการทำแห้งเป็นศูนย์ น้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก

2.1.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง อัตราเร็วของการทำแห้งอาหารขึ้นอยู่กับ

1. *ลักษณะธรรมชาติของอาหาร* อาหารที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีความพรุน (porosity) มาก จะมีอัตราการอบแห้งเร็วเนื่องจากน้ำในอาหารสามารถเคลื่อนจากภายในออกมาภายนอกได้ง่าย นอกจากนี้ อาหารที่มีพื้นที่ผิวมากอัตราการอบแห้งสามารถเกิดได้เร็วเช่นกัน ทั้งนี้ก็เนื่องจากพื้นที่การระเหยของน้ำในวัสดุเพิ่มขึ้นมากนั่นเอง

2. *ขนาด รูปร่าง ปริมาตร และพื้นที่ผิวของอาหาร* เป็นสมบัติทางกายภาพของอาหาร ที่มีผลต่อการทำแห้ง อาหารที่มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก จะมีพื้นที่ระเหยน้ำมาก จะมีอัตราการทำแห้งเร็วขึ้น ดังนั้นหากอาหารที่มีความหนามากอัตราการอบแห้งจะช้ากว่าอาหารที่มีความหนาน้อยกว่าเนื่องจากอัตราการทำแห้งจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของอาหาร

3. *ปริมาณของอาหารที่นำมาอบแห้ง* อาหารที่นำมาอบแห้งในปริมาณมากๆ จะมีอัตราการอบแห้งที่ช้าเนื่องจากอากาศร้อนไม่สามารถสัมผัสกับอาหารที่นำมาอบแห้งได้อย่างทั่วถึง จึงไม่สามารถถ่ายเทความร้อนให้กับอาหารได้ จึงทำให้อัตราการอบแห้งช้าลง

4. *ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความชื้นจำเพาะ (specific humidity) ของอากาศ* เป็นสิ่งสำคัญมาก การระเหยน้ำออกจะทำได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับความชื้นของอากาศและความเร็วลม ความดันเกี่ยวข้องเนื่องกับการระเหยของน้ำ เนื่องจากในที่ความดันต่ำๆ ลงมา น้ำจะเดือดได้ที่อุณหภูมิต่ำลง ดังนั้นการทำแห้งภายใต้ความดันจะทำให้อัตราการทำแห้งเร็วขึ้น [8]

2.2 ประเภทของสารดูดความชื้น

สารดูดความชื้นมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด โดยแต่ละชนิดจะมีคุณลักษณะและความเหมาะสมในการใช้งานที่แตกต่างกันออกไปดังนี้ [9]

2.2.1 ซิลิกาเจล

ซิลิกาเจลเป็นสารสังเคราะห์ในรูปของซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide, SiO₂) ส่วนประกอบของซิลิกาเจลแสดงอยู่ในตารางที่ 2.1 ที่มีพื้นที่ผิวมากประมาณ 800 m² ต่อ 1 g การดูดความชื้นของซิลิกาเจลเป็นลักษณะทางกายภาพ (Physical Adsorption) โดยซิลิกาเจลกักเก็บความชื้นไว้ที่โพรง

โครงสร้างด้านใน สมบัติของซิลิกาเจลแสดงอยู่ในตารางที่ 2.2 ซิลิกาเจลถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในบรรจุภัณฑ์อาหารและยา โดยปกติ ซิลิกาเจลสามารถดูดความชื้นได้ระหว่าง 24-40% ของน้ำหนักตัวเอง และมีประสิทธิภาพสูงสุดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25°C ตารางที่ 2.3 แสดงความสามารถในการดูดความชื้นของซิลิกาเจล หากอุณหภูมิสูงกว่านี้ ประสิทธิภาพ ในการดูดความชื้นจะลดลงไปเรื่อยๆ และมีโอกาสที่จะคายความชื้น (Desorption) ออกจากตัวเองเช่นกัน โดยเหตุนี้ การใช้ซิลิกาเจลกับประเทศร้อนชื้น ดังเช่นประเทศไทย จึงต้องระมัดระวังเป็นอย่างยิ่งต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิรอบข้าง

ซิลิกาเจล ที่ใช้งานอยู่ทั่ว ๆ ไปมี 2 ชนิด คือ เม็ดสีใสๆขนาด 2-5 มิลลิเมตร และเม็ดสีน้ำเงิน (Indicating Silica gel) ขนาดเท่า ๆ กัน คุณสมบัติของซิลิกาเจลทั้ง 2 ชนิดนี้ แตกต่างกันตรงที่มีการเติมโคบอลต์คลอไรด์ลงไปทำให้มีสีน้ำเงินบนซิลิกาเจล สีน้ำเงินนี้จะค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีชมพู เมื่อความชื้นสัมพัทธ์รอบข้างสูงขึ้นมากกว่า 40% ซิลิกาเจลชนิดนี้ ตารางที่ 2.4 แสดงการเปลี่ยนสีของซิลิกาเจลตามปริมาณความชื้นที่ซิลิกาเจลดูดไว้ มีประโยชน์ในการสังเกตได้โดยง่ายว่าสินค้ามีโอกาสเสี่ยงต่อความชื้นมากน้อยเพียงไร หากซิลิกาเจลที่ใช้อยู่ยังมีสีน้ำเงินหรือไม่เปลี่ยนสีมากนัก แสดงว่าความชื้นรอบข้างถูกซิลิกาเจลดูดไว้และมีระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำ ในทางตรงกันข้าม หากสีของซิลิกาเจลเปลี่ยนเป็นสีชมพู แสดงว่าความชื้นรอบข้างนั้น มีปริมาณที่สูงเกินกว่าที่ซิลิกาเจลจะดูด และควบคุมให้อยู่ในระดับที่ต่ำได้ อย่างไรก็ตาม การใช้ซิลิกาเจลชนิดสีน้ำเงินนี้ ควรระมัดระวังการใช้งานเป็นอย่างยิ่ง เพราะหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับสุขอนามัยระดับโลกบางแห่ง เช่น European Commission และ International Agent for Research on Cancer ได้จัดโคบอลต์คลอไรด์ไว้อยู่ในประเภทของสารที่อาจก่อให้เกิดมะเร็ง (carcinogen) หากสูดดมเข้าไป และอาจมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาวได้

ประโยชน์ของซิลิกาเจล ได้แก่ ซิลิกาเจลมีความสามารถในการดูดความชื้นได้สูง ไม่มีวันหมดอายุ ไม่ใช่วัตถุไวไฟ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยวิธีการอบที่อุณหภูมิ 60°C

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของซิลิกาเจล [10]

แร่ธาตุ	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	ZrO ₂	Na ₂ O	lg.loss
ปริมาณ (%)	99.71	0.01	0.19	0.09	0.01	0.02	0.02	0.02

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลทางกายภาพของซิลิกาเจล [10]

จุดเดือดเท่ากับ 2900 °F หรือ 1900 °C	ความหนาแน่นเท่ากับ 43 lb/ft ³ หรือ 0.70 ถึง 0.78 g/ M ³
พื้นที่ผิวเท่ากับ 650 m ² / g	อัตราการระเหยของน้ำ น้อยกว่า 10% ที่ 175 °F
ลักษณะทางกายภาพเป็นเม็ดสีน้ำเงินหรือ เม็ดใส	ความต้านทานเท่ากับ 4,000 ถึง 7,000 Wcm
ลักษณะทางกายภาพไม่ละลายน้ำ	ความชื้นในสารน้อยกว่า 3.0%

ตารางที่ 2.3 ความสามารถในการดูดความชื้นของซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 30°C ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ [10]

ความชื้นสัมพัทธ์	ความสามารถในการดูดความชื้น
20%	> 10%
50%	> 20%
90%	> 30%

ตารางที่ 2.4 ความหมายของสีที่แสดงบนเม็ดสีซิลิกาเจล [10]

ปริมาณความชื้นในซิลิกาเจล	สี
20%	สีฟ้า
35%	สีม่วง
50%	สีชมพู

2.2.2 ไดอะตอมมาเชียสเอิร์ธ หรือดินไไดอะตอม

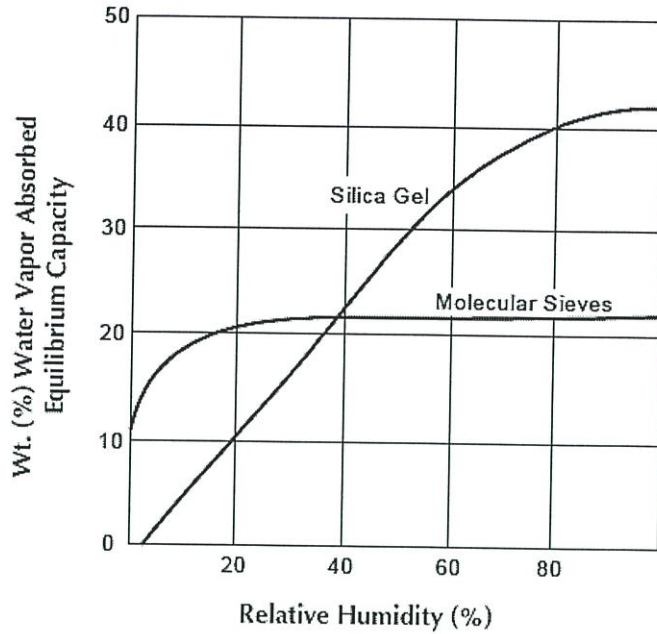
ไไดอะตอมมาเชียสเอิร์ธเป็นดินที่เกิดจากซากพืชเซลล์เดี่ยว ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก เมื่อได้รับการเผาที่อุณหภูมิสูง และเติมสารเร่งปฏิกิริยาบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium Chloride) จะมีคุณสมบัติในการดูดความชื้นได้ดีมากถึง 70-80% ของน้ำหนักตัว เมื่อเทียบกับซิลิกาเจล แล้ว อัตราเร็วในการดูดความชื้นของไไดอะตอมมาเชียสเอิร์ธ จะต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 25°C และ ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 75% ซิลิกาเจลจะดูดความชื้นจนอิ่มตัวภายในเวลาไม่กี่ชั่วโมง ในขณะที่เดียวกัน ต้องใช้เวลาหลาย ๆ วันหรือเป็นเดือนสำหรับไไดอะตอมมาเชียสเอิร์ธ ที่จะดูดความชื้นจนอิ่มตัว อย่างไรก็ตาม การดูดความชื้นของไไดอะตอมมาเชียสเอิร์ธนี้ มีแรงดึงดูดของโมเลกุลค่อนข้างมาก การคายความชื้น เมื่ออุณหภูมิรอบข้างสูงขึ้นจึงมีน้อยมากหรือไม่เกิดขึ้นเลย ความสามารถในการดูดความชื้นที่มาก อัตราเร็วของการทำงานที่ไม่เร็วจนเกินไป และโอกาสในการคายความชื้นที่ต่ำมาก เป็นเหตุให้ไไดอะตอมมาเชียสเอิร์ธ เป็นทางเลือกที่ดีของสารดูดความชื้น และได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศ

2.2.3 มอนต์โมริลโลไนต์เคลย์

มอนต์โมริลโลไนต์เคลย์เป็นดินธรรมชาติที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมาก ดินประเภทนี้เมื่อได้รับการเผาที่อุณหภูมิสูง จะทำให้ความสามารถในการดูดความชื้น และการคงสภาพหลังการใช้ดีขึ้นโดยปรกติ มอนต์โมริลโลไนต์เคลย์ มีความสามารถในการดูดความชื้นประมาณ 25% ของน้ำหนักตัว ประสิทธิภาพดังกล่าว จะลดลงค่อนข้างมาก เมื่ออุณหภูมิรอบข้างสูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยเหตุนี้ การใช้มอนต์โมริลโลไนต์เคลย์ สำหรับบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง จะต้องพิจารณาถึงข้อจำกัดข้อนี้ เช่นเดียวกับการใช้ซิลิกาเจล

2.2.4 โมเลกุลาร์ซีฟ

โมเลกุลาร์ซีฟ หรือที่เรียกว่า ซีโอไลต์สังเคราะห์ เป็นสารสังเคราะห์ ที่มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นที่ดีมาก ๆ ภายใต้อุณหภูมิสัมพัทธ์รอบข้างในระดับต่ำ (10%-30%) โดยมีประสิทธิภาพในการดูดความชื้นประมาณ 22% ของน้ำหนักตัว โครงสร้างพิเศษทำให้โมเลกุลาร์ซีฟ มีพื้นที่ผิวสัมผัสประมาณ 7-800 m² ต่อ 1 g และมีแรงดึงดูดความชื้นที่สูงมาก ข้อดีดังกล่าว ทำให้ปัญหาการคายความชื้นน้อยกว่าซิลิกาเจลและมอนต์โมริลโลไนต์เคลย์ เมื่ออุณหภูมิรอบข้างสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม โมเลกุลาร์ซีฟยังไม่ได้รับการรับรองจากหน่วยงานของรัฐในการใช้งานในอาหารและยา จึงทำให้สารชนิดนี้ยังไม่แพร่หลายมากนัก



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความจุความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของซิลิกาเจลและโมเลกุลลาร์ซีฟ [11]

จากรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของเส้นโค้งของการดูดซับความชื้นจนถึงจุดสมดุลของซิลิกาเจลและโมเลกุลลาร์ซีฟ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่แตกต่างกัน ซิลิกาเจลมีความสามารถในการรับน้ำไว้จนถึงจุดสมดุลได้ดีในทุกช่วงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ในขณะที่โมเลกุลลาร์ซีฟมีความสามารถจะรับน้ำไว้จนถึงจุดสมดุลได้ดี หากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าอยู่ในช่วง 0-40% เท่านั้น แต่ในช่วงนี้ หากเปรียบเทียบระหว่างซิลิกาเจลและโมเลกุลลาร์ซีฟ พบว่าโมเลกุลลาร์ซีฟมีความสามารถในการดูดน้ำดีกว่า

2.2.5 แคลเซียมออกไซด์

แคลเซียมออกไซด์เป็นสารที่มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นได้มากกว่า 28.5% ของน้ำหนักตัว สารชนิดนี้มีคุณสมบัติเด่นในการดูดความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำและมีอัตราการคายความชื้นที่ต่ำ เช่นเดียวกับโมเลกุลลาร์ซีฟ อย่างไรก็ตาม ความเร็วในการดูดความชื้นค่อนข้างช้า เมื่อเทียบกับสารชนิดอื่น ๆ และจะกลายเป็นสารกึ่งเหลว (swell) เมื่อดูดความชื้นจนกระทั่งอิ่มตัว สารดูดความชื้นประเภทนี้มีคุณสมบัติในการกัดกร่อนสูง (corrosive) ดังนั้น บรรจุภัณฑ์ของสารดูดความชื้นประเภทนี้ ต้องป้องกันไม่ให้สารดูดความชื้นหลุดรอดออกมาได้

2.3 การใช้สารดูดความชื้นในระบบอบแห้ง

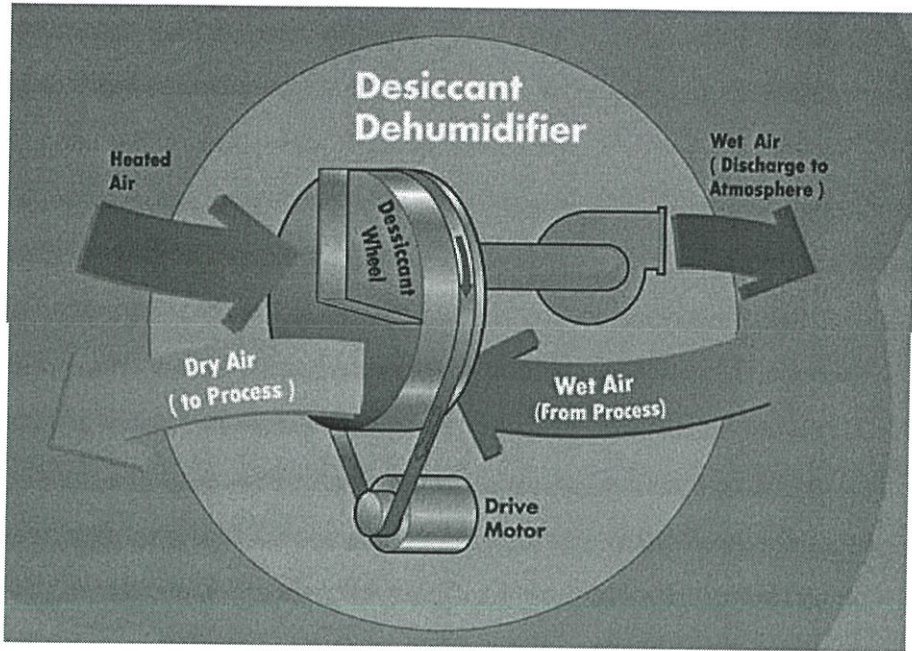
ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นเป็นระบบการอบแห้งวัสดุในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งต่ำกว่าสภาวะปกติ ซึ่งเป็นผลดีต่อกระบวนการอบแห้ง การใช้สารดูดความชื้นในการอบแห้งมีประโยชน์ในการเพิ่มอัตราการอบแห้ง (Drying rate) อันเกิดขึ้นมาจากอากาศร้อนและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ การอบแห้งจะเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และเป็นการเพิ่มคุณภาพในผลผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผลผลิตที่ไวต่อความร้อน แต่ในระบบสารดูดความชื้นก็พบปัญหาอื่น เช่น ความดันตกคร่อม (Pressure drop) ในสารดูดความชื้นชนิดแข็ง ในขณะที่สารดูดความชื้นแบบเหลวจะไม่พบปัญหาดังกล่าว ดังนั้นการทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุด ควรเลือกชนิดของสารดูดความชื้นให้เหมาะสมกับการออกแบบระบบสารดูดความชื้น งานวิจัยต่าง ๆ ได้มีการศึกษาความคุ้มค่าและอุณหภูมิสำหรับไล่ความชื้นออกจากสารดูดความชื้น เพื่อนำสารดูดความชื้นนั้นกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่การที่จะนำสารดูดความชื้นมาใช้ต่อไปนั้นจะต้องใช้พลังงานสูงมาก การใช้ความร้อนเพื่อจะนำสารดูดความชื้นให้กลับมาใช้ใหม่ในระบบการอบแห้งอีกครั้งนั้นยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการกักเก็บพลังงาน อย่างไรก็ตาม การใช้พลังงานน้อยลงหรือพลังงานที่มีอยู่ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์หรือการนำความร้อนจากกระบวนการทางอุตสาหกรรมนำกลับมาใช้ใหม่ หากนำมาใช้ในการไล่ความชื้นออกจากสารดูดความชื้นได้ จะส่งผลให้ประหยัดพลังงานและลดค่าใช้จ่ายเป็นอย่างมาก [12]

2.4 ระบบการดูดความชื้น

ระบบการดูดความชื้นแบ่งออกตามสถานะของสารดูดความชื้นได้เป็น 2 รูปแบบ คือระบบการดูดความชื้นที่ใช้สารดูดความชื้นแบบแข็ง และระบบการดูดความชื้นที่ใช้สารดูดความชื้นแบบเหลว รายละเอียดของระบบการดูดความชื้น 2 ระบบ มีดังนี้ [13]

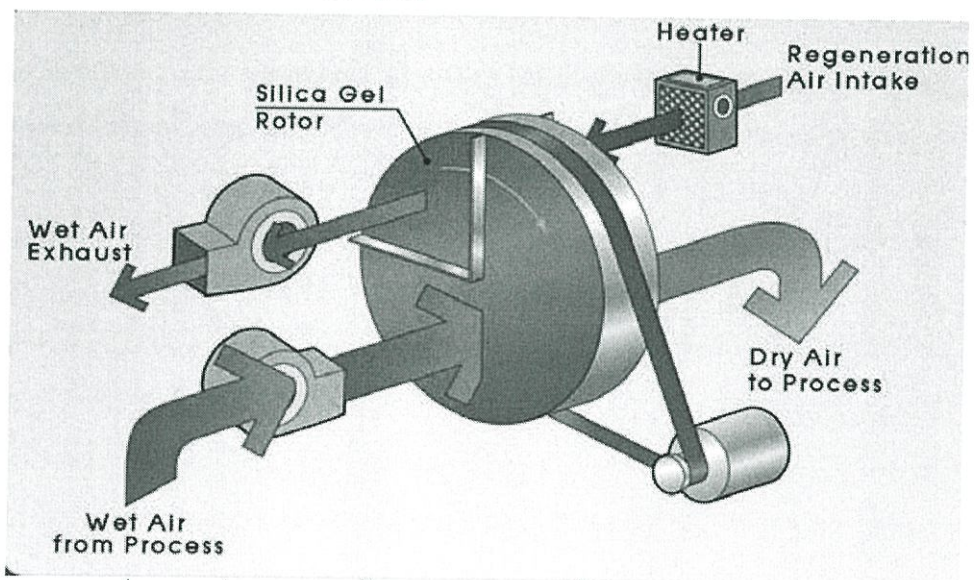
2.4.1 การดูดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นแบบแข็ง

ลักษณะการทำงานโดยปล่อยอากาศชื้นจากกระบวนการผลิต (Process Air) ให้ไหลผ่านวงล้อที่เคลือบสารดูดความชื้นซึ่งจะทำหน้าที่ดูดเก็บความชื้นของอากาศไว้ หลังจากนั้นวงล้อจะถูกหมุนไปถ่ายความชื้นที่เก็บไว้ให้กับอากาศที่ร้อนและความชื้นต่ำ (Heated air) เพื่อระบายความชื้นออกจากเครื่องดูดความชื้นต่อไป การผลิตอากาศร้อนที่ใช้ในการดึงความชื้นออกจากเครื่องดูดความชื้นนั้นสามารถใช้ความร้อนทั้งที่เหลือจากกระบวนการผลิตหรือแสงอาทิตย์ สารดูดความชื้นที่นิยมใช้กันทั่วไปในปัจจุบันได้แก่ ซิลิกาเจล อะลูมินาแกมมันต์ ซีโอไลต์สังเคราะห์ ลิเทียมคลอไรด์ ไททานเนียมซิลิเกต และพอลิเมอร์สังเคราะห์

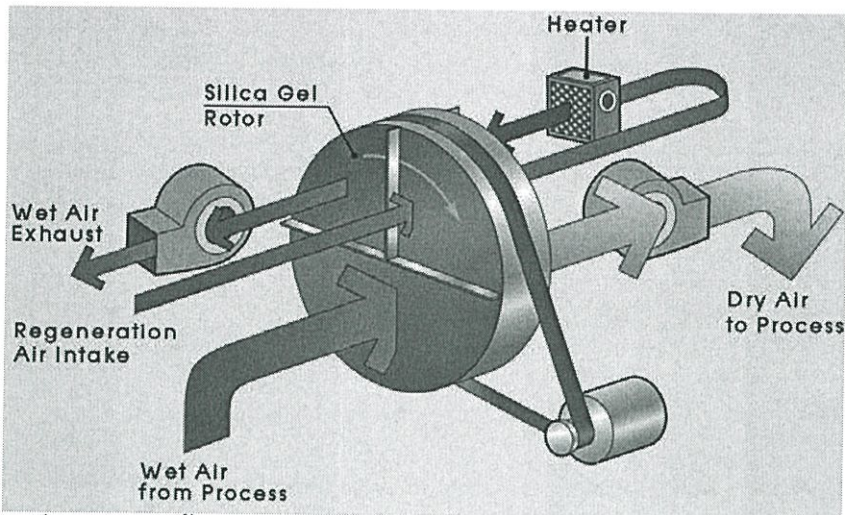


รูปที่ 2.4 ระบบลดความชื้นด้วยสารดูดความชื้นแข็ง [13]

เครื่องลดความชื้นที่ใช้สารดูดความชื้นมีส่วนประกอบหลักคือ ชุดวงล้อหมุน (รูปที่ 2.4) ซึ่งมีส่วนประกอบของสารดูดความชื้น เช่นซิลิกาเจล ชุดวงล้อดังกล่าวจะถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ เพื่อไล่ความชื้นออกจากอากาศที่ไหลผ่านมาจากกระบวนการผลิต ตัวอย่างของเครื่องลดความชื้นที่ใช้สารดูดความชื้นที่ใช้ในอุตสาหกรรม 2 แบบได้แก่ เครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นแบบหมุนใช้ฮีตเตอร์ในการให้ความร้อนแก่อากาศ (รูปที่ 2.5) ที่จะใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้น เหมาะกับการใช้งานกับพื้นที่เก็บสินค้าและห้องสะอาดขนาดเล็ก [13]



รูปที่ 2.5 เครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นแบบหมุนใช้ฮีตเตอร์ [13]



รูปที่ 2.6 เครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นแบบหมุนที่มีระบบนำความร้อนกลับมาใช้ [13]

การลดความชื้นเมล็ดพันธุ์โดยใช้ซิลิกาเจล เป็นสารดูดความชื้นที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเช่น ใสโหลดูดความชื้นสำหรับห้องปฏิบัติการทางเคมี ใสท่อของเพื่อดูดความชื้นระหว่างการขนส่ง และใช้ในการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ ซิลิกาเจลที่ใช้ทั่วไปมีลักษณะเม็ดกลมๆเหมือนลูกปัด บางครั้งมีการใส่ลิเทียมคลอไรด์ทำให้เปลี่ยนสีได้คือเป็นสีน้ำเงินเมื่อแห้งและเป็นสีชมพูเมื่อดูดความชื้นเข้าไปมากพอ ซิลิกาเจลไม่มีพิษ สามารถดูดความชื้นได้ถึง 40% ของน้ำหนักตัว และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60°C

รูปแบบของส่วนควบคุมความชื้นที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการอบแห้ง ที่มีลักษณะแบบราบและให้อากาศไหลผ่านผิวของซิลิกาเจลทั้งด้านบนและด้านล่าง ทำให้มีพื้นที่ผิวของซิลิกาเจลสัมผัสกับอากาศมากที่สุดสามารถดูดซับความชื้นได้ดี และประหยัดพลังงานได้ดีที่สุด เพราะว่ามีความดันลดของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งน้อยที่สุด ความเร็วของอากาศที่ผ่านส่วนควบคุมความชื้นที่เหมาะสมเท่ากับ 1.10 เมตรต่อวินาที และจากการศึกษาการคืนตัวของซิลิกาเจลโดยพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการคืนตัวของซิลิกาเจล แต่ต้องใช้กล่องอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับช่วงระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะทำการคืนตัวของซิลิกาเจลโดยพลังงานแสงอาทิตย์ คือ ช่วงเวลา 11.00 น. ถึง 15.00 น. เพราะว่ามีค่าพลังงานแสงอาทิตย์มากทำให้ประสิทธิภาพในการคืนตัวสูงกว่าช่วงเวลาอื่น ๆ ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์ผลจากการทดลองทั้งหมด พบว่าการควบคุมความชื้นของอากาศโดยซิลิกาเจลสำหรับระบบการอบแห้งมีความเป็นไปได้ทางเทคนิค เพราะว่ามีเมื่อกำหนดซิลิกาเจลมาควบคุมความชื้นในการอบแห้งจะทำให้สมรรถนะในการอบแห้งสูงขึ้น และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่ำลง รวมทั้งในการสร้างส่วนควบคุมความชื้นของอากาศไม่ยุ่งยากและใช้ต้นทุนไม่สูงมาก [14] งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของบีมความร้อนที่ทำงานร่วมกับสารดูดความชื้นที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งโดยสารดูดความชื้นที่ใช้ คือ ซิลิกาเจลเรียงตัวเป็นแผ่นสลับวางขวางทางไหลของอากาศที่เข้าสู่กระบวนการอบแห้งเพื่อลดความชื้นของอากาศในการศึกษาได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการดูดซับความชื้นกระบวนการไล่ความชื้นของสารดูดซับความชื้น และ

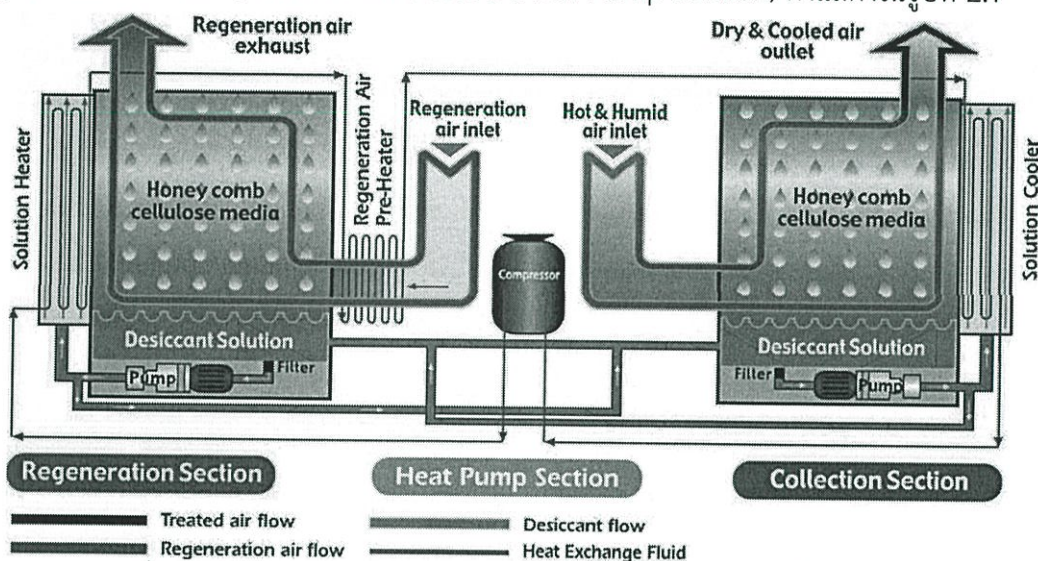
ระบบปั๊มความร้อน ปั๊มความร้อนที่ใช้เป็นระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ ใช้สารทำงานคือ R-134 a ทำการควบคุมความเร็วรอบการหมุนของคอมเพรสเซอร์อยู่ในช่วง 100-200 rpm อากาศที่เข้าสู่กระบวนการถูกควบคุมให้อยู่ในช่วง 20-40°C ความชื้นสัมพัทธ์ 50-80% ความเร็วลม 1-2 m/s ทำการศึกษาในระบบที่มีโครงสร้าง 2 ลักษณะคือแบบ A และแบบ B ในระบบแบบ A นั้น ใอน้ำจะถูกแยกออกจากอากาศโดยการกลั่นตัวที่อีวาपोเรเตอร์ จากนั้นจะได้อากาศเย็นไปรับอากาศร้อนที่คอนเดนเซอร์ จะได้อากาศที่เข้าห้องอบแห้งที่มีความชื้นต่ำ ในระบบแบบ B อากาศจากภายนอกจะได้รับความร้อนจากคอนเดนเซอร์และฮีตเตอร์เท่านั้นก่อนที่จะเข้าสู่ห้องอบแห้ง และอีวาपोเรเตอร์จะดึงความร้อนและลดความชื้นสัมพัทธ์จากอากาศร้อนที่ออกจากห้องอบแห้ง จากการวิจัยพบว่าการใส่สารดูดความชื้นทำงานร่วมกับปั๊มความร้อนใน โครงสร้างแบบ B ส่งผลให้สามารถใช้พลังงานโดยรวมได้ต่ำลง โดยการสับเปลี่ยนสารดูดความชื้นทุกๆ 30 นาทีจากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เมื่อใช้งานระบบที่เวลา 6,000 ชั่วโมง/ปีที่อัตราอบแห้ง 1.5 kg/h พบว่าสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้สูงสุด 18,000-25,000 บาท/ปีค่าอัตรการคืนทุน (IRR) 78-114% ระยะเวลาคืนทุน 0.9-1.3 ปีจากการทบทวนผลการวิจัยนี้ พบว่าได้ทำการศึกษาสมรรถนะของปั๊มความร้อนที่ทำงานร่วมกับสารดูดความชื้น ความเร็วรอบของคอมเพรสเซอร์อยู่ที่ 100-200 rpm อากาศเข้าสู่กระบวนการที่ 20-40°C และสรุปได้ว่าโครงสร้างแบบ B ส่งผลให้สามารถใช้พลังงานโดยรวมได้ต่ำลง เมื่อใช้เวลา 6,000 ชั่วโมง/ปีที่อัตราอบแห้ง 1.5 kg/h ประหยัดค่าใช้จ่ายได้ 18,000-25,000 บาท/ปี [15]

การทดลองเพื่อทดสอบระบบอบแห้ง ที่ประกอบด้วยระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น (Combined system) พบว่าวงล้อดูดความชื้นสามารถทำงานเป็นส่วนเสริมกับระบบลมร้อนแบบธรรมดาได้ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 50-60°C มีประสิทธิภาพที่จะสามารถลดเวลาในการอบแห้งถึง 20% การใช้พลังงานสำหรับการไล่ความชื้นออกจากสารดูดความชื้น มีปัญหาในด้านการใช้พลังงานสูง ในระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบแห้งที่ได้จากการทดลองระหว่างระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น (Combined system) และระบบการอบแห้งแบบลมร้อน (Pure hot air) พบว่าระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าประมาณ 25% และมีอัตรการอบแห้งที่ได้เปรียบมากกว่าระบบการอบแห้งแบบลมร้อน ซึ่งอัตรการอบแห้งเฉลี่ยของระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นมีค่า 30-35% ซึ่งสูงกว่าระบบการอบแห้งแบบลมร้อน อย่างไรก็ตามระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น ใช้พลังงาน 40-80% ซึ่งมีค่ามากกว่าระบบการอบแห้งแบบลมร้อน (Combined system 30-35 MJ/kg water; Pure hot air, 17-24 MJ/kg water) แต่จากข้อมูลนี้ได้พบว่าพลังงานที่ใช้ไปมากที่สุดเป็นพลังงานที่ใช้ในการวนกลับมาใหม่ (13-16 MJ/kg water) ซึ่งคิดเป็น 40% ของพลังงานทั้งหมด เมื่อเทียบกับระบบการอบแห้งแบบลมร้อนแล้ว พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งของระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นนั้น มีค่าไม่สูงมากนัก [16]

ดังนั้นการที่จะลดการใช้พลังงานสำหรับการวนกลับมาใหม่ ซึ่งมีค่าประมาณ 40% ของพลังงานทั้งหมด สามารถทำได้โดยการนำความร้อนที่กลับมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศเพื่อนำอากาศร้อนไปกำจัดความชื้นออกจากเม็ดสารดูดความชื้น จะช่วยให้การใช้พลังงานที่มีค่าสูงนั้นลดลงได้

2.4.2 การดูดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นแบบเหลว

เทคโนโลยีการลดความชื้นด้วยสารดูดความชื้นเหลวอาศัยการทำงานของสารละลายของสารดูดความชื้นในการดึงความชื้นออกจากอากาศ โดยสามารถควบคุมความชื้นของอากาศได้ในระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 40% ในช่วงอุณหภูมิประมาณ $22 \pm 1^{\circ}\text{C}$ โดยระบบลดความชื้นด้วยสารดูดความชื้นเหลวจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนดูดความชื้น (Collection Section), ส่วนคายความชื้น (Regeneration Section) และส่วนปั๊มความร้อน (Heat Pump Section) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของระบบลดความชื้นด้วยสารดูดความชื้นเหลว [17]

ส่วนดูดความชื้น (Collection Section) จะดูดอากาศที่ต้องการลดความชื้นผ่านส่วนดูดความชื้นที่มีสารละลายลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) ซึ่งไหลผ่าน Heat Exchanger ฝั่งเย็นและได้รับการถ่ายเทความร้อนจาก Heat Exchanger จนมีอุณหภูมิต่ำ พ่นกระจายเป็นละอองฝอยอยู่ในส่วนดูดความชื้น เมื่ออากาศที่ต้องการลดความชื้นสัมผัสกับสารละลายลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) ตัวสารละลายลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) ก็จะดูดความชื้นในอากาศไว้พร้อมกับถ่ายเทความร้อนจากสารละลายให้แก่อากาศ จึงทำให้อากาศที่ผ่านส่วนดูดความชื้นมีคุณสมบัติแห้งและเย็น สารละลายลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) ที่ดูดความชื้นไว้ก็จะไหลลงมายังถาดรองรับ และไหลวนจากด้านดูดความชื้นไปยังส่วนคายความชื้น (Regeneration Section)

ส่วนคายความชื้น (Regeneration Section) จะมีปั๊มซึ่งทำหน้าที่ดูดสารละลายลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) ไหลผ่าน Heat Exchanger ฝั่งร้อน และได้รับการถ่ายเทความร้อนให้สารละลายลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) จนมีอุณหภูมิสูงขึ้น หลังจากนั้นจะพ่นเป็นละอองฝอยลงในด้านคายความชื้น และเครื่องจะดูดอากาศจากภายนอกมาผ่าน Pre-Heat Coil ของส่วนปั๊มความร้อน เพื่อทำให้อุณหภูมิของอากาศสูงขึ้น

เมื่ออากาศจากภายนอกสัมผัสกับสารละลายลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) ด้านคายความชื้น อากาศจากภายนอกก็จะพาความชื้นที่เกาะอยู่ที่สารละลายลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) ออกไปด้วย สารละลายลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) ที่คายความชื้นออกก็จะไหลวนกลับไปยังด้านดูดความชื้นเพื่อทำการดูดความชื้นต่อไป

ส่วนปั๊มความร้อน (Heat Pump Section) จะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของน้ำยา R-22 เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและความเย็นให้แก่ Heat Exchanger ทั้งฝั่งร้อนและฝั่งเย็นซึ่งจะนำไปใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิและลดอุณหภูมิของสารละลายลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) จึงเห็นได้ว่ากระบวนการต่างๆของระบบลดความชื้นด้วยสารดูดความชื้นเหลวจะมีการใช้พลังงานหลักที่ส่วนปั๊มความร้อนเท่านั้น และได้นำคุณสมบัติด้านความเย็นและความร้อนไปใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างเต็มที่ จึงทำให้มีการใช้พลังงานที่น้อยกว่าระบบอื่น ๆ [17]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 การทำแห้งชาสมุนไพรด้วยเครื่องอบลมร้อนร่วมกับการใช้สารดูดความชื้น

การอบแห้งตะไคร้ และ ใบเตย ในเครื่องอบลมร้อนแบบถาดร่วมกับการใช้สารดูดความชื้น เป็นวิธีการทำแห้งแบบ 2 ขั้นตอนคือ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 240 นาทีสำหรับตะไคร้ และ 90 นาทีสำหรับใบเตย แล้วนำสมุนไพรอบแห้งมาใส่ในตู้ดูดความชื้น จนสมุนไพรมีค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w) ที่ 0.7 ซึ่งใช้เวลา 480 และ 90 นาทีสำหรับตะไคร้และใบเตย ตามลำดับ รวมทั้งสิ้นตะไคร้ใช้เวลาในการทำแห้ง 720 นาที ได้ความชื้น 9.3817 g water/g dry matter (8.5770%wb) ใบเตย 180 นาที ได้ความชื้น 5.4599 g water/g dry matter (5.1772%wb) จะเห็นว่าการทำงานแห้งด้วยลมร้อนแบบถาดร่วมกับการใช้สารดูดความชื้นนี้ใช้เวลานานกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว แต่จะมีประสิทธิภาพในการดูดความชื้นได้ดีมากกว่าการอบลมร้อน หรืออาจกล่าวได้ว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการใช้สารดูดความชื้นสามารถดูดน้ำกลับได้ดีกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว [18]

2.5.2 อิทธิพลของวิธีการอบแห้งต่อคุณภาพของผักชีฝรั่ง

การอบแห้งผักชีฝรั่งที่อุณหภูมิ 50°C โดยให้อากาศร้อนเข้าสู่ระบบผ่านการไหลที่ความเร็วลม 1.3 m/s โดยมีการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ที่ $50 \pm 2^\circ\text{C}$ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ปกติ 58-63% RH และความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ 28-30% RH โดยจากการทดลองพบว่าวิธีการอบแห้งผักชีฝรั่งด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำทำให้สารต้านอนุมูลอิสระในผักชีฝรั่งมีค่าสูงกว่าวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนปกติ ทั้งยังช่วยรักษาคุณสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมี ผักชีฝรั่งอบแห้งมีส่วนประกอบของโพลีฟีนอล วิตามินซี และแร่ธาตุ ซึ่งเป็นสารอาหารที่มีประโยชน์และเป็นที่ยอมรับในหมู่ผู้บริโภค ดังนั้นการอบแห้งผักชีฝรั่งด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นสามารถยืดอายุการเก็บรักษาและสามารถนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งอาหารที่มีคุณค่าเพื่อเสริมสร้างโภชนาการของมนุษย์ [1]

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 การออกแบบวงล้อดูดความชื้นและเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

3.1.1 การคำนวณปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบบอบแห้งในสถานการณ์จำลองที่สภาพอากาศหนึ่ง

ในการจำลองการคำนวณน้ำหนักของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบบ จากอัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่ห้องอบแห้ง โดยกำหนดให้ความเร็วลมเป็น 1 m/s พื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้งรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส คือ $0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$ ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราการไหลได้จากสมการที่ (3.1)

$$Q = vA \quad (3.1)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหล (m^3/s)

v คือ ความเร็วลม (m/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัด (m^2)

จากนั้นทำการคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศจากสมการที่ (3.2)

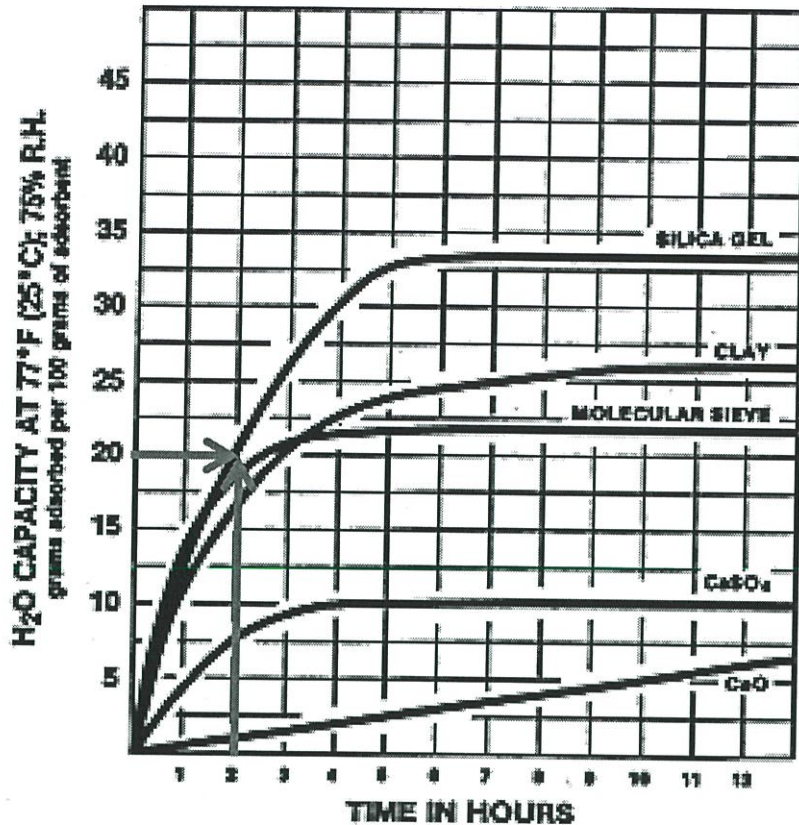
$$\dot{m} = \frac{Q}{v} \quad (3.2)$$

เมื่อ \dot{m} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/h)

Q คือ อัตราการไหล (m^3/s)

v คือ ปริมาตรจำเพาะ (m^3/kg)

ในการจำลองสถานะการดูดความชื้นของอากาศกำหนดให้อากาศภายนอกเข้าสู่วงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 32°C ความชื้นสัมพัทธ์ 75% และถูกลดความชื้นแบบอะเดียแบติกตามเส้นกระบวนการลดความชื้นสารดูดความชื้นจนมีอุณหภูมิ 40°C ความชื้นสัมพัทธ์ 40% จะได้ปริมาณความชื้นอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔW) โดยปริมาณความชื้นในอากาศที่มีค่าลดลงมีค่าเท่ากับปริมาณที่ซิลิกาเจลดูดซับไว้ จากนั้นสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำในอากาศที่ซิลิกาเจลในสถานะอากาศหนึ่ง ดังรูปที่ 3.1 เพื่อคำนวณหาปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบบ ข้อมูลปริมาณของซิลิกาเจลที่คำนวณได้ถือเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการประมาณปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 3.1 กราฟอัตราการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นชนิดต่าง ๆ [19]

3.1.2 การคำนวณปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบแห้งในสถานการณ์จำลองที่สภาพอากาศไหล

ในการจำลองการคำนวณน้ำหนักของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบบจากอัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่ห้องอบแห้ง โดยทำการปรับความเร็วลมเป็น 1.85 m/s พื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้งสี่เหลี่ยมจัตุรัสคือ $0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$ ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราการไหลได้จากสมการที่ (3.1) และคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศจากดั่งสมการที่ (3.2)

โดยการจำลองสภาวะการดูดความชื้นของอากาศกำหนดให้อากาศภายนอกเข้าสู่วงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 30.7°C ความชื้นสัมพัทธ์ 65.6% และถูกลดความชื้นแบบอะเดียแบติกตามเส้นกระบวนการลดความชื้นสารดูดความชื้นจนมีอุณหภูมิ 40°C ความชื้นสัมพัทธ์ 30% จะได้ปริมาณความชื้นอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔW) โดยปริมาณความชื้นในอากาศที่มีค่าลดลงมีค่าเท่ากับปริมาณความชื้นที่ซิลิกาเจลดูดไว้ จากนั้นสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำในอากาศที่ซิลิกาเจลในสภาวะอากาศไหลซึ่งสามารถหาได้จากแผนภูมิไซโคเมตริก เพื่อคำนวณหาปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบข้อมูลปริมาณของซิลิกาเจลที่คำนวณได้ถือเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการประมาณปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบแห้งที่พัฒนาขึ้น

3.1.3 การคำนวณอัตราการไหลของอากาศ เพื่อคายความชื้นจากซิลิกาเจล

จากข้อมูลในหัวข้อ 3.1.2 ซึ่งจะทราบการเปลี่ยนแปลงความชื้นของอากาศเนื่องจากการจากการดูดความชื้นของซิลิกาเจล ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำที่ซิลิกาเจลดูดซับไว้ต่อเวลา 1 ชั่วโมง ($\Delta w/h$) ได้ดังสมการที่ (3.3)

$$\Delta w/h = \frac{W \text{ silica gel}}{\text{Moisture desorption rate}} \quad (3.3)$$

เมื่อ $\frac{\Delta W}{h}$ คือ อัตราส่วนความชื้นในอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปต่อเวลา 1 ชั่วโมง (kg water/h)

Δw คือ อัตราส่วนความชื้นในอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป (kg water/kg dry air)

จากสมการที่ (3.4) แสดงให้เห็นถึงปริมาณความชื้นในอากาศที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะมีค่าเท่ากับปริมาณน้ำที่อากาศดูดไว้ได้ ซึ่งเราสามารถคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศได้ดังสมการ

$$\dot{m} = \Delta w \times \frac{\Delta W}{h} \quad (3.4)$$

เมื่อ \dot{m} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg dry air/h)

$\frac{\Delta W}{h}$ คือ อัตราส่วนความชื้นในอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปต่อเวลา 1 ชั่วโมง (kg water/h)

Δw คือ อัตราส่วนความชื้นในอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป (kg_{H₂O}/kg dry air)

การจำลองการคายความชื้นของซิลิกาเจลโดยกำหนดให้ซิลิกาเจลดูดซับความชื้นเท่ากับ 30% ของน้ำหนักตัวเอง จะได้อัตราการไหลของอากาศมีค่าเท่ากับ 0.0008 m³/s

3.1.4 การคำนวณขนาดของวงล้อดูดความชื้น

จากการจำลองการดูดความชื้นของซิลิกาเจลเพื่อคำนวณน้ำหนักของซิลิกาเจลที่ใช้ในระบบที่ใช้ในอากาศไหลในหัวข้อ 4.1.2 ที่อัตราการไหลของอากาศ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ ซึ่งเป็นอัตราการไหลของอากาศที่มีอัตราการดูดความชื้นต่ำที่สุดและสอดคล้องกับความเร็วลม 1 m/s ที่ใช้ในระบบบอบแห้งในระบบซึ่งได้เลือกชั้นความหนาของซิลิกาเจล 1 cm ซึ่งเป็นชั้นความหนาที่มีอัตราการดูดความชื้นสูงที่สุดมาใช้ในการคำนวณหาปริมาตรรูปทรงกระบอกของวงล้อ โดยคิดที่เฉพาะบริเวณดูดความชื้นจากสมการที่ (3.5) และสามารถคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจากสมการที่ (3.6)

$$v = \frac{\pi}{8} d^2 l \quad (3.5)$$

$$d = \frac{\sqrt{8v}}{\pi l} \quad (3.9)$$

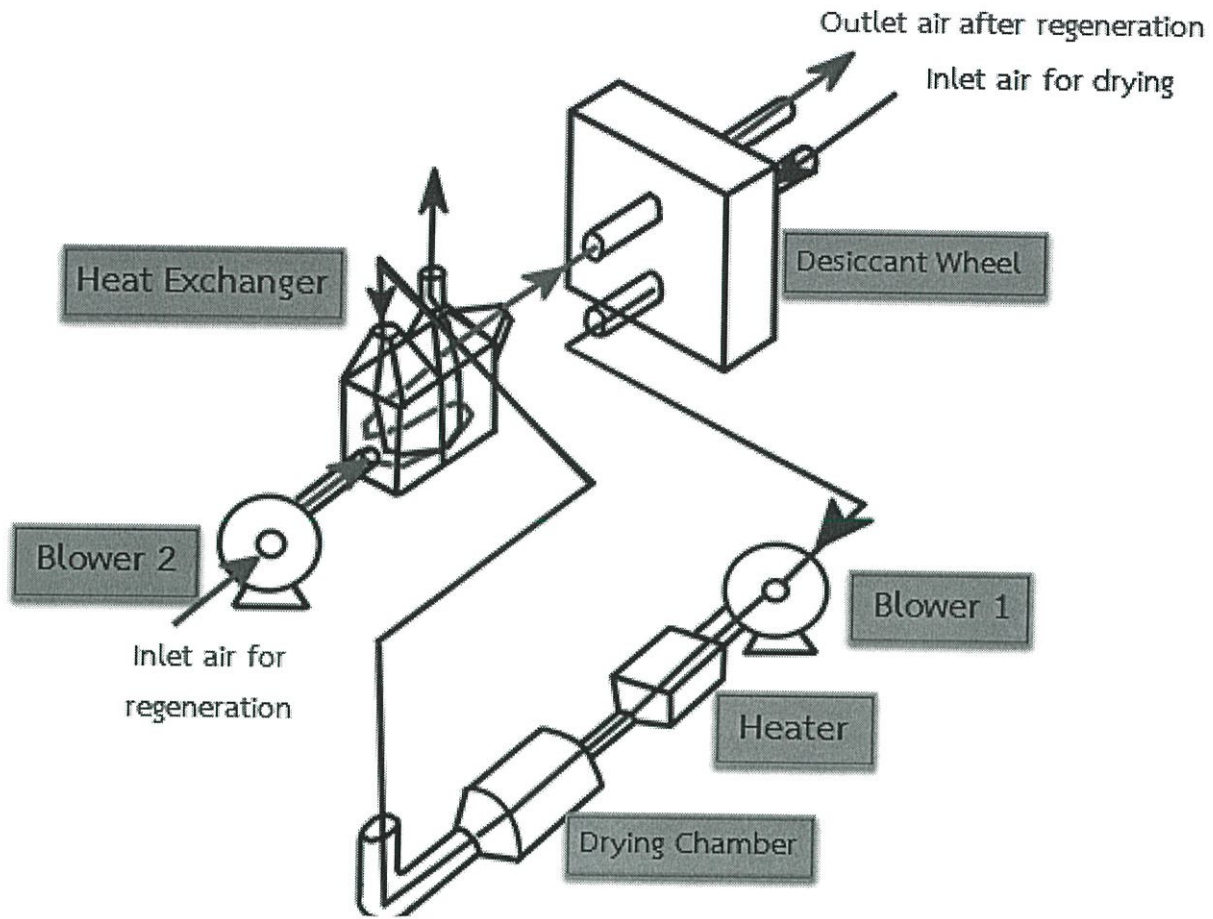
v คือ ปริมาตรของซิลิกาเจล (cm^3)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของวงล้อดูดความชื้น (cm)

l คือ ชั้นความหนาของชั้นซิลิกาเจล (cm)

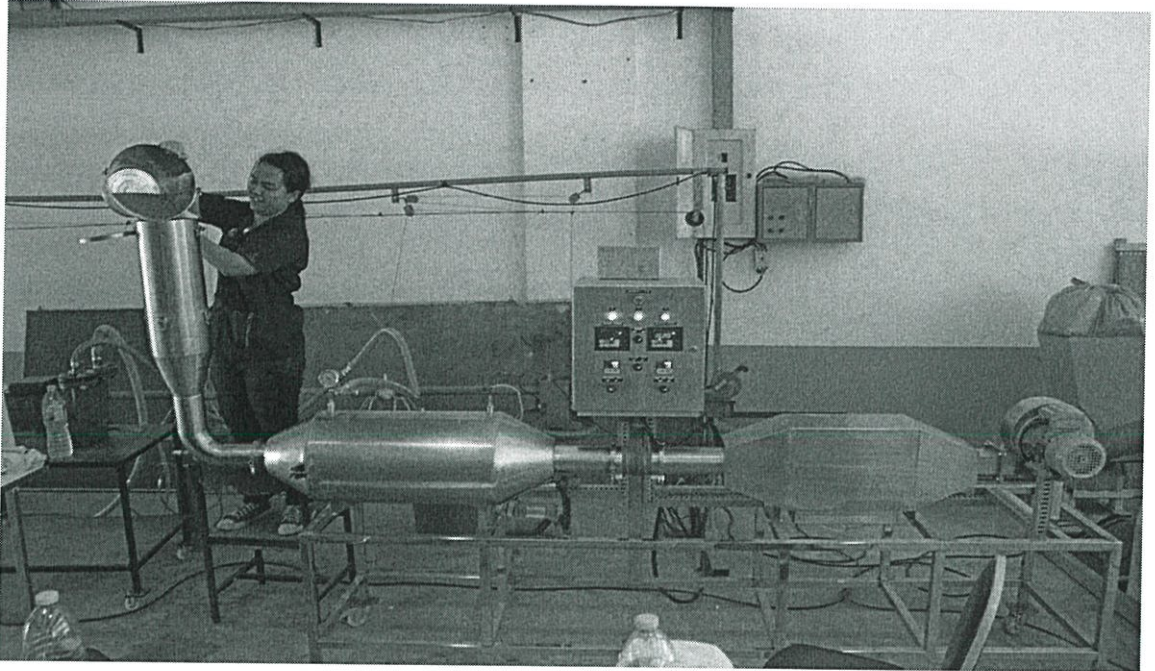
3.1.5 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

จากแผนภาพแสดงเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นในรูปที่ 3.2 เครื่องอบแห้งมีขนาดท่อที่ใช้ในระบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกเท่ากับ 102.4 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในเท่ากับ 100.0 mm ใช้อะลูมิเนียมชนิด ss304 วงล้อดูดความชื้นที่ใช้ในระบบมีขนาดเท่ากับ (diameter x thickness) เท่ากับ $700 \times 50 \text{ mm}$ สายพายขนาดร่อง A วัสดุที่ใช้ทำวงล้อคือ อะลูมิเนียม ss304 รูของตะแกรงที่ใส่ซิลิกาเจลในวงล้อดูดความชื้นใช้ลวดเบอร์ 16 ขนาด $26 \text{ m}^2/\text{in}$ มอเตอร์ที่ใช้กำลังขับวงล้อ (RS Motor Industry TAIWAN) ความเร็วเท่ากับ 28 rpm กำลังขับ 45 watt เครื่องอุ่นอากาศมีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกเท่ากับ 19.0 mm เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในเท่ากับ 18.2 mm เครื่องเป่าลมร้อน (MA40B, Euro vent) กำลังการทำงานของเครื่องเท่ากับ 0.75 kw แรง (RPM) เท่ากับ 2800 rpm อัตราการไหลสูงสุดที่เครื่องสามารถทำงานได้เท่ากับ $24 \text{ m}^3/\text{min}$ เครื่องทำความร้อนแบบชนิดแห้งไม่มีฟีน ทำความร้อนได้สูงสุด 800°C ยี่ห้อ เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์ ฉนวนที่ใช้ชนิด โยหินหนา ห้องอบแห้ง ใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในเท่ากับ 200 mm ความยาวของท่อเท่ากับ 300.0 mm ซึ่งเราเปิดเครื่องทำความร้อนเพื่อทำอากาศร้อนให้ห้องอบแห้งและวงล้อดูดความชื้น เพื่อลดความชื้นสัมพัทธ์ให้ห้องอบแห้ง และมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำอากาศร้อนขาออกจากห้องอบแห้งมาแลกเปลี่ยนกับอากาศปกติ โดยนำอากาศผสมไปใช้ในการกำจัดความชื้นออกจากสารดูดความชื้นในวงล้อดูดความชื้นในระบบได้ใหม่



รูปที่ 3.2 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

3.2 การเปรียบเทียบสมบัติการดูดและการคายความชื้นของสารดูดความชื้นระหว่างซิลิกาเจลและโมเลกุลลาร์ซีฟ



รูปที่ 3.3 ชุดทดสอบสมบัติการดูดและการคายความชื้นของสารดูดความชื้น

3.2.1 การเปรียบเทียบสมบัติการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นระหว่างซิลิกาเจลและโมเลกุลลาร์ซีฟ

การทดลองนี้ใช้ชุดทดสอบดังรูปที่ 3.3 ซึ่งนำหนักสารดูดความชื้นที่ไม่มีสารดูดความชื้นสะสมอยู่ 1500 g ใส่ในท่อบรรจุสารดูดความชื้นของชุดทดสอบสมบัติการดูดการคายความชื้นของสารดูดความชื้น ทำการเปรียบเทียบสมบัติการดูดความชื้นของซิลิกาเจล และโมเลกุลลาร์ซีฟโดยใช้อัตราการไหลของอากาศ 0.04, 0.06 และ 0.08 m^3/s และสภาวะอากาศโดยรอบได้แก่อุณหภูมิ 30.7°C และความชื้นสัมพัทธ์ 65.6% ให้อากาศไหลผ่านสารดูดความชื้นเพื่อให้สารดูดความชื้นดูดความชื้นจากอากาศ จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักสารดูดความชื้นทุกๆ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วคำนวณหาความจุความชื้นของสารดูดความชื้นในการดูดความชื้น เป็นหน่วย g adsorbed per 100 g of desiccant

3.2.2 การเปรียบเทียบสมบัติการคายความชื้นของสารดูดความชื้นระหว่างซิลิกาเจลและโมเลกุลลาร์ซีฟ

การทดลองนี้ใช้ชุดทดสอบดังรูปที่ 3.3 ชั่งน้ำหนักสารดูดความชื้นที่ปล่อยให้ดูดความชื้นจนอิ่มตัวแล้ว 1500 g ใส่ในห่อบรรจุสารดูดความชื้น ในการเปรียบเทียบสมบัติการคายความชื้นของซิลิกาเจลและโมเลกุลลาร์ซีฟให้อัตราการไหลของอากาศ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิของอากาศ 90°C ไหลผ่านสารดูดความชื้นเพื่อคายความชื้นออกจากสารดูดความชื้น จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักสารดูดความชื้นทุกๆ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วคำนวณหาความจุความชื้นของสารดูดความชื้นในการคายความชื้น เป็นหน่วย g adsorbed per 100 g of desiccant

3.3 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและความหนาของชั้นสารดูดความชื้นต่อการดูดความชื้นของซิลิกาเจล

จากหัวข้อ 3.2.2 ได้คัดเลือกซิลิกาเจลมาเพื่อศึกษาต่อ โดยมีการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและความหนาของชั้นสารดูดความชื้นต่อการดูดความชื้นของซิลิกาเจล ซิลิกาเจลที่ใช้ในการทดลอง คือ ซิลิกาเจลที่ไม่มีความชื้นสะสมอยู่ สำหรับการศึกษอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศ 3 ระดับ ได้แก่ 0.04 , 0.06 และ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ ตัวแปรควบคุม ได้แก่ อุณหภูมิของอากาศโดยรอบ (อุณหภูมิ 30.7°C และ 65.6%) และความหนาของชั้นสารดูดความชื้น (5 cm) สำหรับการศึกษอิทธิพลของความหนาของชั้นสารดูดความชื้น ใช้สารดูดความชื้น 3 ระดับ ความชื้น 1, 3, และ 5 cm โดยมีตัวแปรควบคุม คือ อัตราการไหลของอากาศ ($0.04 \text{ m}^3/\text{s}$) และอุณหภูมิของอากาศโดยรอบ (30.7°C) ในการทดลองทำการชั่งน้ำหนัก 300, 900 และ $1500 \text{ g adsorbed per } 100 \text{ g of desiccant}$ โดยการทดลองนี้ใช้ชุดทดสอบดังรูปที่ 3.3

3.4 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่อการคายความชื้นของซิลิกาเจล

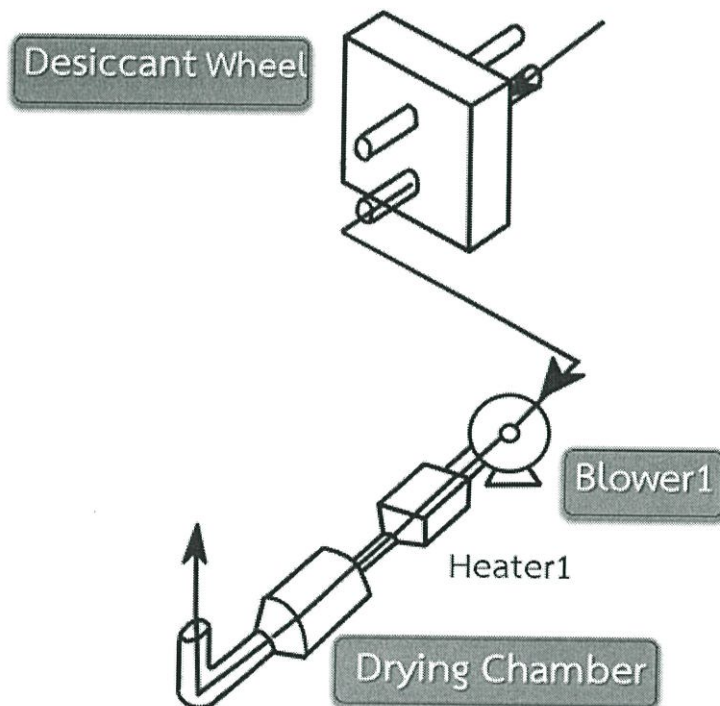
ในการศึกษาหัวข้อนี้ใช้ซิลิกาเจลที่ดูดความชื้นไว้จนอิ่มตัวแล้ว โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 มีการจัดการทดลองแบบ แฟคทอเรียล 2 ตัวแปร ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศ (0.04 , 0.06 และ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$) และอุณหภูมิลมร้อน (50 , 70 และ 90°C) โดยมีตัวแปรควบคุม คือ ความหนาของชั้นสารดูดความชื้น (5 cm) ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาอิทธิพลของความหนาของชั้นสารดูดความชื้นต่อการคายความชื้นของซิลิกาเจล ใช้ความหนาของชั้นสารดูดความชื้น 3 ระดับ ได้แก่ 1, 3, และ 5 cm โดยมีตัวแปรควบคุม คือ อัตราการไหลของอากาศ ($0.04 \text{ m}^3/\text{s}$) และอุณหภูมิลมร้อน (50°C) ในการทดลองทำการชั่งน้ำหนัก 300, 900 และ $1500 \text{ g adsorbed per } 100 \text{ g of desiccant}$ โดยการทดลองนี้ใช้ชุดทดสอบดังรูปที่

3.5 การศึกษาสมรรถนะของวงล้อดูดความชื้น

3.5.1 การวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังจากผ่านการดูดความชื้นด้วยวงล้อดูดความชื้น

บรรจุซิลิกาเจลที่ไม่มีความชื้นสะสมอยู่ 3 kg เข้าไปในวงล้อดูดความชื้น ให้อากาศไหลผ่านวงล้อดูดความชื้นโดยเปิดเพียงเครื่องเป่าลม 1 ในรูปที่ 3.4 ให้มีอัตราการไหลของอากาศโดยรอบ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ ทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศทางเข้าวงล้อดูดความชื้นตามเส้นกระบวนการสีน้ำเงิน: อากาศสำหรับกระบวนการ (process air) ซึ่งเป็นอากาศโดยรอบ และเมื่อวงล้อทำงานโดยตั้งให้มีความเร็วรอบ 0.25 rpm ทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ออกจากวงล้อดูดความชื้นโดยวัดในห้องอากาศแห้ง ทุก ๆ 1 นาทีจนถึงนาทีที่ 10 และทุก ๆ 5 นาที จนถึงนาทีที่ 30 และนำค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้มาคำนวณเพื่อหาสมรรถนะของวงล้อดูดความชื้นจากสมการที่ (3.10)

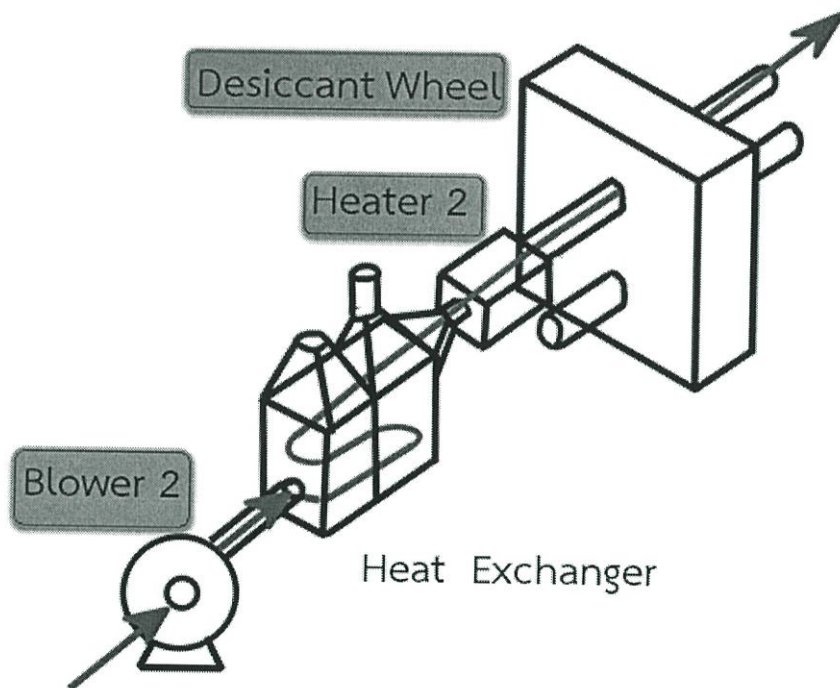
$$\text{สมรรถนะวงล้อดูดความชื้น(\%)} = \frac{\text{ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนเข้าวงล้อ} - \text{ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังออกจากวงล้อ}}{\text{ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนเข้าวงล้อ}} \quad (3.10)$$



รูปที่ 3.4 แผนภาพการทำงานของส่วนประกอบในระบบดูดความชื้นของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน ร่วมกับวงล้อดูดความชื้นส่วนดูดความชื้น

3.5.2 การวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังจากผ่านการคายความชื้นจากวงล้อดูดความชื้น

บรรจุซิลิกาเจลที่ไม่มีความชื้นสะสมอยู่ 3 kg เข้าไปในวงล้อดูดความชื้น ให้อากาศร้อนไหลผ่านวงล้อดูดความชื้นโดยเปิดเครื่องเป่าลม 2 และใส่เครื่องทำความร้อน 2 เพิ่มในระบบดังรูปที่ 3.5 เพื่อทำอากาศร้อนเข้าวงร้อนดูดความชื้น สภาวะการคายความชื้นจากวงร้อนดูดความชื้น อัตราการไหลของอากาศโดยรอบ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ อุณหภูมิลมร้อน 50 และ 60°C ทำการวัดอุณหภูมิของอากาศขาเข้าวงล้อดูดความชื้นตามเส้นกระบวนการสีแดง: อากาศสำหรับการคืนสภาพสารดูดความชื้น (regeneration) และเมื่อวงล้อทำงานโดยตั้งให้มีความเร็วรอบ 0.25 rpm ทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ออกจากวงล้อดูดความชื้น โดยวัดในห้องอากาศแห้ง ทุกๆ 1 นาทีจนถึงนาทีที่ 10 และทุกๆ 5 นาที จนถึงนาทีที่ 30 และนำค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้มาคำนวณเพื่อหาสมรรถนะของวงล้อดูดความชื้นจากสมการที่(3.10)



รูปที่ 3.5 แผนภาพการทำงานของส่วนประกอบในระบบคายความชื้นของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน ร่วมกับวงล้อดูดความชื้นส่วนคายความชื้น

3.6 การศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น

บรรจุซิลิกาเจลที่ไม่มีความชื้นสะสมอยู่ 3 kg เข้าไปในวงล้อดูดความชื้นเปิดทำงานอุปกรณ์ทุก ส่วนของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น ในส่วนของอากาศสำหรับกระบวนการ (Dehumidification air) ตามเส้นกระบวนการ A เปิดเครื่องเป่าลม 1 ให้อากาศที่มีอัตราการไหล $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ ผ่านวงล้อดูดความชื้น จากนั้นอากาศจะผ่านเครื่องทำความร้อน 1 โดยตั้งให้ทำอุณหภูมิความร้อน 90°C สำหรับเข้าในห้องอบแห้ง เมื่ออากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำออกจากห้องอบแห้งอากาศเคลื่อนที่ต่อไปยังเครื่องอุ่นอากาศเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศจากเส้นกระบวนการ B (Regeneration air) สำหรับอากาศขาเข้าจากเส้นกระบวนการ B เป็นอากาศโดยรอบที่ผ่านเครื่องเป่าลมร้อน 2 มายังเครื่องอุ่นอากาศ ทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น อากาศร้อนที่ไหลผ่านไปยังวงล้อดูดความชื้น เพื่อคายความชื้นออกจากวงล้อดูดความชื้น ในระหว่างการทดลองทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในจุดต่างๆของระบบ ดังรูปที่ 3.6 ทำการบันทึกข้อมูลทุก ๆ 1 นาทีจนถึงนาทีที่ 10 และทุก ๆ 5 นาที จนถึงนาทีที่ 30 และแสดงผลเป็นเส้นกระบวนการในแผนภูมิไซโครเมตริกแสดงสมบัติของอากาศ (Psychrometric Chart)

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การออกแบบวงล้อดูดความชื้นและเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

4.1.1 ผลปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบบอบแห้งในสถานการณ์จำลองที่สภาพอากาศนี้ จากการกำหนดให้ความเร็วที่ไหลผ่านห้องอบแห้งเป็น 1 m/s และพื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้งเป็น $0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$ จะได้อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ เมื่อกำหนดให้อากาศโดยรอบเข้าสู่สารดูดความชื้นมีอุณหภูมิ 32°C และความชื้นสัมพัทธ์ 75% และอากาศที่ออกจากสารดูดความชื้นมีอุณหภูมิ 40°C และความชื้นสัมพัทธ์ 40% สามารถคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเป็น $158.24 \text{ kg dry air/h}$ และอัตราส่วนความชื้นในอากาศลดลงไป $0.004 \text{ kg water/kg dry air}$ ดังรูปที่ 4.1 จากสองค่านี้สามารถคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นในอากาศที่ลดลงต่อหน่วยเวลาเป็น 0.63 kg water/h จากข้อมูลอัตราการดูดซับความชื้นของซิลิกาเจลที่สภาพอากาศนี้ในรูปที่ 4.1 สามารถคำนวณหาปริมาณของซิลิกาเจลที่เพียงพอต่อการลดความชื้นออกจากอากาศตามที่คำนวณไว้ข้างต้นได้ โดยได้ผลเป็นปริมาณซิลิกาเจลที่ต้องการ 6.3 kg

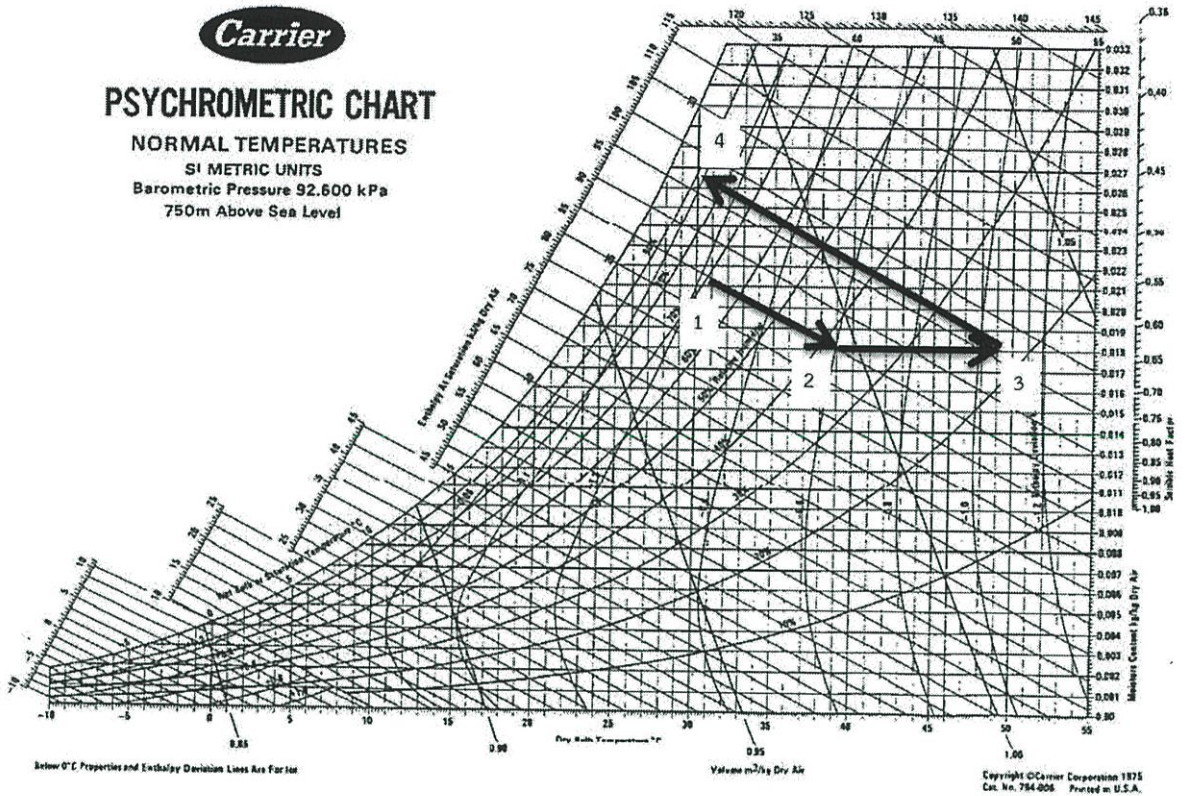
ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณค่าต่างๆในการคำนวณหาปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบบอบแห้ง

ค่าที่ใช้ในการคำนวณ	ผลการคำนวณ
1. ความเร็วลม ^a	1 m/s
2. พื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้ง ^a	$0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$
3. อัตราการไหลของอากาศ ^b	$0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ ซึ่งเท่ากับ $144 \text{ m}^3/\text{h}$
4. อุณหภูมิของอากาศขาเข้า ^a	32°C
5. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้า ^a	75%
6. อุณหภูมิของอากาศขาออก ^a	40°C
7. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออก ^a	40%
8. ปริมาตรจำเพาะของอากาศ ^c	$0.019 \text{ kg water/kg dry air}$
9. น้ำหนักของซิลิกาเจล ^b	6.3 kg

a คือ ค่าที่กำหนดขึ้น

b คือ ค่าที่คำนวณได้

c คือ ค่าจากแผนภูมิไซโครเมตริก



รูปที่ 4.1 แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงสมบัติของอากาศนิ่งจากการจำลองการดูดความชื้นของวงล้อดูดความชื้น

1-2 คือ กระบวนการลดความชื้น

2-3 คือ กระบวนการทำความร้อน

3-4 คือ กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

4.1.2 ผลการปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบบอบแห้งในสถานการณ์จำลองที่สภาพอากาศไหล

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการคำนวณปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบบอบแห้งเมื่ออากาศไหลอยู่รอบซิลิกาเจล โดยกำหนดให้ความเร็วที่ไหลผ่านห้องอบแห้งเป็น 1.85 m/s และพื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้งเป็น 0.2x0.2 m² จะได้อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.04 m³/s เมื่อกำหนดให้อากาศโดยรอบเข้าสู่สารดูดความชื้นมีอุณหภูมิ 30.7°C และความชื้นสัมพัทธ์ 65.6% และอากาศที่ออกจากสารดูดความชื้นมีอุณหภูมิ 40°C และความชื้นสัมพัทธ์ 30% สามารถคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเป็น 158.24 kg dry air/h และอัตราส่วนความชื้นในอากาศลดลงไป 0.0043 kg water/kg

dry air ดังรูปที่ 4.2 จากสองค่านี้สามารถคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นในอากาศที่ลดลงต่อหน่วยเวลาที่เป็น 0.682 kg water/h จากข้อมูลตาราง 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซับความชื้นของซิลิกาเจล (kg water) ต่อหนึ่งหน่วยเวลา (h) เราสามารถคำนวณหาปริมาณของซิลิกาเจลที่ใช้สำหรับวงล้อดูดความชื้นโดยการนำค่าปริมาณน้ำในอากาศที่ถูกดูดซับโดยซิลิกาเจลต่อเวลา 1 ชั่วโมง ($\Delta W/h$) มาเทียบบัญญัติไตรยางกับอัตราการดูดซับความชื้นของซิลิกาเจลที่สภาพอากาศไหลเมื่อเทียบกับซิลิกาเจล 1 kg สามารถคำนวณหาปริมาณของซิลิกาเจลที่เพียงพอต่อการลดความชื้นออกจากอากาศตาคี่คำนวณไว้ข้างต้นได้ โดยได้ผลเป็นปริมาณซิลิกาเจลที่ต้องการ 8.97 kg

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณค่าต่างๆในการคำนวณหาปริมาณของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบอบแห้ง

ค่าที่ใช้ในการคำนวณ	ผลการคำนวณ
1. ความเร็วลม ^a	1.85 m/s
2. พื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้ง ^a	0.2×0.2 m ²
3. อัตราการไหลของอากาศ ^b	0.04 m ³ /s ซึ่งเท่ากับ 144 m ³ /h
4. อุณหภูมิของอากาศขาเข้า ^a	30.7 °C
5. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้า ^a	65.6%
6. อุณหภูมิของอากาศขาออก ^a	40 °C
7. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออก ^a	30%
8. ปริมาตรจำเพาะของอากาศ ^c	0.0140 kg water/kg dry air
9. อัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป ^b	0.0043 kg water/kg dry air
10. น้ำหนักของซิลิกาเจล ^b	8.97 Kg

a คือ ค่าที่กำหนดขึ้น

b คือ ค่าที่คำนวณได้

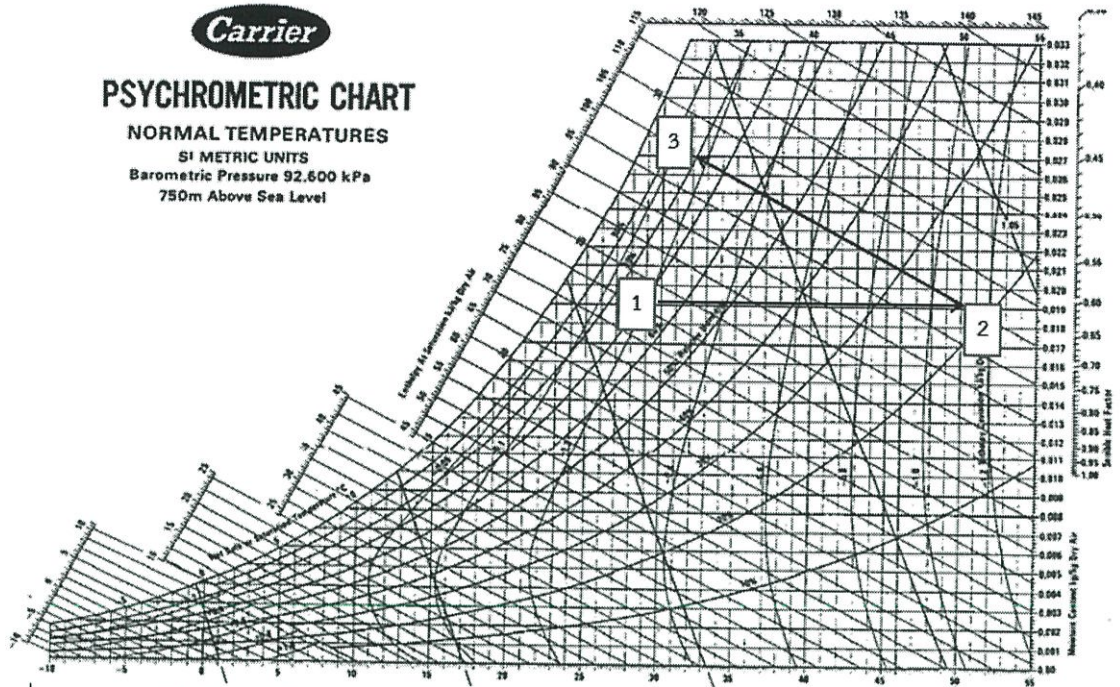
c คือ ค่าจากแผนภูมิไซโครเมตริก

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจล(kg water)ต่อหนึ่งหน่วยเวลา(h)

Q (m ³ /s)	ค่าเฉลี่ยอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจลที่อากาศไหล(kg water/kg silica gel·h)
0.04	0.076
0.06	0.105
0.08	0.175

4.1.3 ผลการคำนวณอัตราการไหลของอากาศเพื่อคายความชื้นจากซิลิกาเจล

จากการกำหนดให้ความเร็วที่ไหลผ่านห้องอบแห้งเป็น 1.85 m/s และพื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้งเป็น 0.2×0.2 m² โดยกำหนดอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.04 m³/s เมื่อกำหนดให้อากาศโดยรอบเข้าสู่สารดูดความชื้นมีอุณหภูมิ 30.7°C และความชื้นสัมพัทธ์ 65.6% อากาศที่ออกจากสารดูดความชื้นมีอุณหภูมิ 35°C และความชื้นสัมพัทธ์ 80% สามารถคำนวณอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจลที่อากาศไหลในเวลา 1 ชั่วโมงมีค่าเท่ากับ 0.07 kg water/h และอัตราส่วนความชื้นในอากาศลดลงไป 0.02205 kg water/ kg dry air จากแผนภูมิไซโครเมตริกดังรูปที่ 4.2 ดังนั้นจากการจำลองการคายความชื้นของซิลิกาเจลกำหนดให้ซิลิกาเจลดูดซับความชื้นเท่ากับ 30% ของน้ำหนักตัวเองจะได้อัตราการไหลของอากาศมีค่าเท่ากับ 0.0008 m³/s ซึ่งค่าอัตราการไหลที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่าค่าอัตราการไหลจากกราฟที่กำหนดไว้ในข้างต้นคือ 0.006 kg water/kg silica gel·h ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และ อัตราการไหล 0.04 m³/s (kg water/kg silica gel·h) ดังข้อมูลตารางที่ 4.5 จึงสามารถกล่าวได้ว่าที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.0008 m³/s สามารถดูดความชื้นออกจากซิลิกาเจลได้หมดในการจำลองการคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น



รูปที่ 4.2 แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงสมบัติของอากาศไหลจากการจำลองการคายความชื้นของวงล้อดูดความชื้น

1-2 คือ กระบวนการทำความร้อน

3-4 คือ กระบวนการคายความชื้นจากซิลิกาเจล

ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณค่าต่างๆในการคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศเพื่อคายความชื้นของซิลิกาเจลที่ต้องใช้ในระบอบแห้ง

ค่าที่ใช้ในการคำนวณ	ผลการคำนวณ
1. ความเร็วลม ^a	1.85 m/s
2. พื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้ง ^a	0.2×0.2 m ²
3. อัตราการไหลของอากาศ ^b	0.04 m ³ /s ซึ่งเท่ากับ 144 m ³ /h
4. อุณหภูมิของอากาศขาเข้า ^a	30.7 °C
5. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้า ^a	65.6%
6. อุณหภูมิของอากาศขาออก ^a	35 °C
7. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออก ^a	80%
8. ปริมาตรจำเพาะของอากาศ ^c	0.00687kg water/kg dry air
9. อัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลง ^b	0.02205 kg water/kg dry air
10. อัตราการไหลของอากาศ ^b	0.0008 m ³ /s

a คือ ค่าที่กำหนดขึ้น

b คือ ค่าที่คำนวณได้

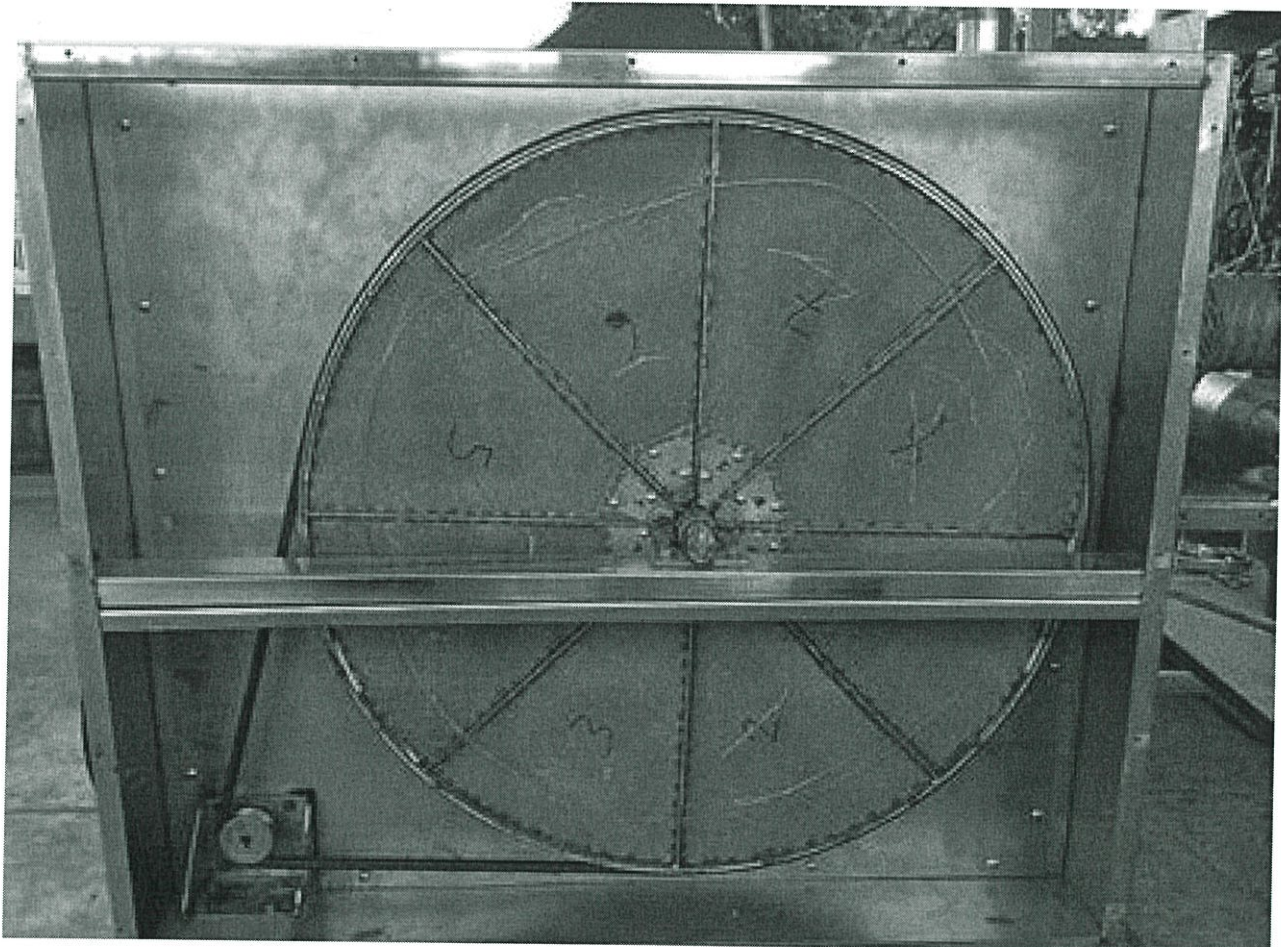
c คือ ค่าจากแผนภูมิไซโครเมตริก

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจล(kg water)ต่อหนึ่งหน่วยเวลา(h)

อุณหภูมิ (°C)	Q (m ³ /s)	ค่าเฉลี่ยอัตราการคายความชื้นของซิลิกาเจลที่อากาศไหล (kg water/kg silica gel·h)
40	0.04	0.006
	0.06	0.023
	0.08	0.029
70	0.04	0.007
	0.06	0.053
	0.08	0.080
90	0.04	0.012
	0.06	0.077
	0.08	0.133

4.1.4 ผลการคำนวณขนาดของวงล้อดูดความชื้น

จากการจำลองการดูดความชื้นของซิลิกาเจลเพื่อคำนวณน้ำหนักของซิลิกาเจลที่ใช้ในระบบที่ใช้ในอากาศไหล $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ ซึ่งเป็นอัตราการไหลของอากาศที่มีอัตราการดูดความชื้นต่ำที่สุดและสอดคล้องกับความเร็วลม 1 m/s ที่ใช้ในการอบแห้งวัสดุด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนตามปกติโดยเลือกใช้ชั้นความหนาของซิลิกาเจล 1 cm ซึ่งเป็นชั้นความหนาที่อัตราการดูดความชื้นสูงสุดเมื่อเทียบกับชั้นความหนาระดับอื่นๆ พบว่าน้ำหนักของซิลิกาเจลที่ต้องการคือ 2.01 kg ทั้งนี้ในการกำหนดน้ำหนักของซิลิกาเจลที่ต้องใช้จริงในระบบตั้งเกณฑ์ให้ใช้ซิลิกาเจล 1.5 เท่าของน้ำหนักที่คำนวณได้ จึงใช้ซิลิกาเจล 3 kg สำหรับใส่ในวงล้อดูดความชื้น จากการคำนวณความหนาแน่นและปริมาตรของซิลิกาเจลได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงล้อดูดความชื้นเป็น 70 cm ดังรูปที่ 4.3

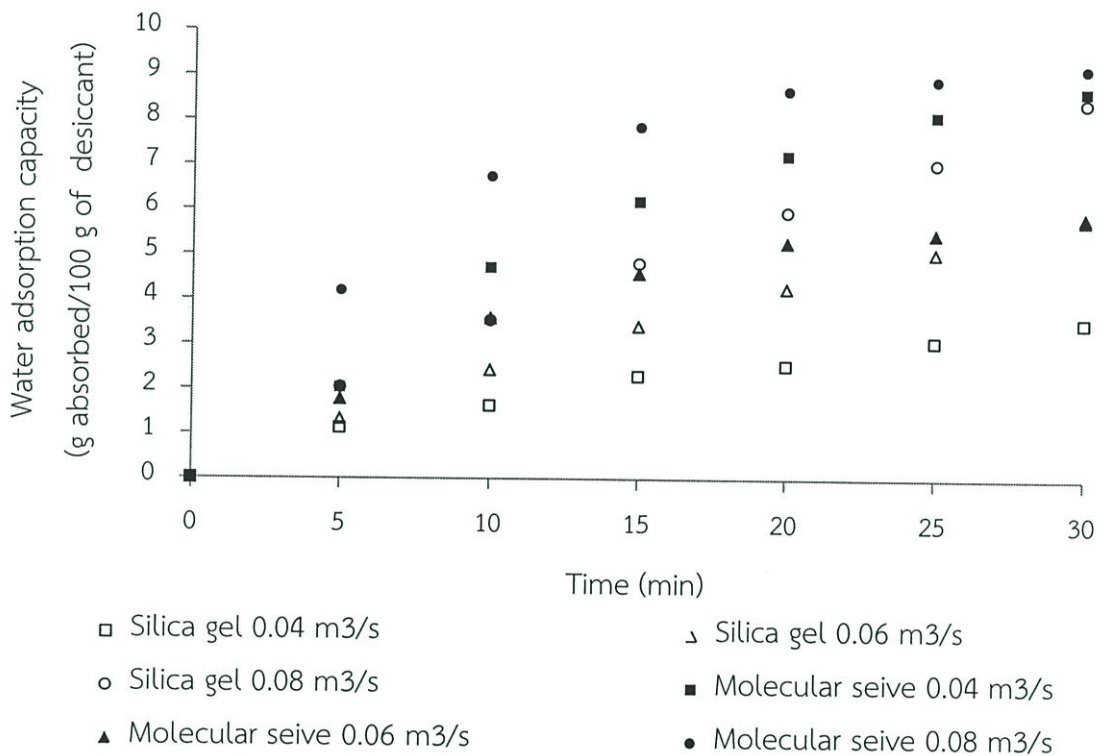


รูปที่ 4.3 วงล้อดูดความชื้น

4.2 การเปรียบเทียบสมบัติการดูดและการคายความชื้นของสารดูดความชื้นระหว่างซิลิกาเจลและโมเลกุลลาร์ซีฟ

4.2.1 การดูดความชื้น

จากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติระหว่างซิลิกาเจลและโมเลกุลลาร์ซีฟดังรูปที่ 4.2 ได้ผลว่าซิลิกาเจลสามารถดูดความชื้นได้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ในขณะที่โมเลกุลลาร์ซีฟจะดูดความชื้นได้ค่อนข้างคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที อย่างไรก็ตามโมเลกุลลาร์ซีฟมีความสามารถในการดูดความชื้นสูงกว่าซิลิกาเจล เมื่อทำการเปรียบเทียบที่อัตราการไหลของอากาศ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ และ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ โมเลกุลลาร์ซีฟจะสามารถดูดความชื้นได้ดีกว่าซิลิกาเจลในทุกสภาวะ

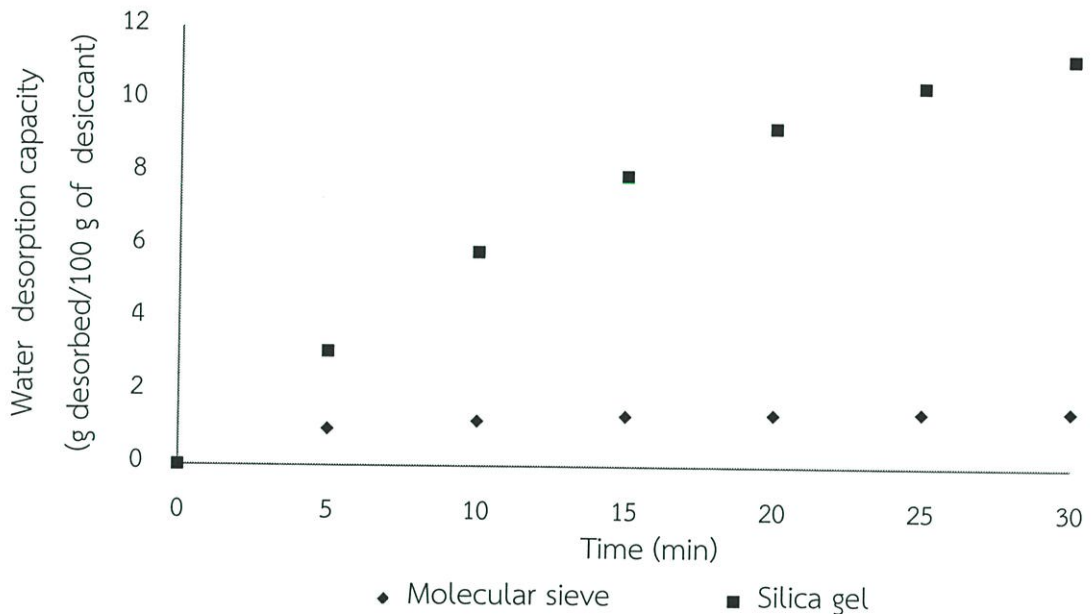


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุความชื้นและเวลาในการดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ เปรียบเทียบระหว่างซิลิกาเจลและโมเลกุลลาร์ซีฟ

4.2.2 การคายความชื้น

จากการทดลองการคายความชื้นของซิลิกาเจลและโมเลกุลลาร์ซีฟ พบว่าซิลิกาเจลมีความสามารถคายความชื้นได้ดีกว่าโมเลกุลลาร์ซีฟถึงเกือบ 12 เท่า เมื่อเวลาในการคายความชื้นผ่านไป 30 นาที จากรูปที่ 4.3 ซึ่งใช้อุณหภูมิ 90°C ในการคายความชื้นพบว่า ซิลิกาเจลยังมีแนวโน้มคาย

ความชื้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่โมเลกุลาร์ซีฟสามารถคายความชื้นได้เพียง 1 g/100 g of desiccant ในช่วง 5 นาทีแรก และค่อนข้างมีความจุความชื้นคงที่ในช่วงเวลาต่อไปจนถึง 30 นาทีของการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในการจำลองอุณหภูมิที่อาจเกิดขึ้นจริงในการนำอากาศทิ้งจากห้องอบแห้งมา แลกเปลี่ยนความร้อนให้กับอากาศโดยรอบ เพื่อใช้ในการคายความชื้นออกจากสารดูดความชื้นนั้น ซิลิกาเจลถือเป็นสารดูดความชื้นที่เหมาะสมกับระบบนี้มากกว่า เนื่องจากสามารถคายความชื้นที่สภาวะอากาศนี้ได้ดีกว่า

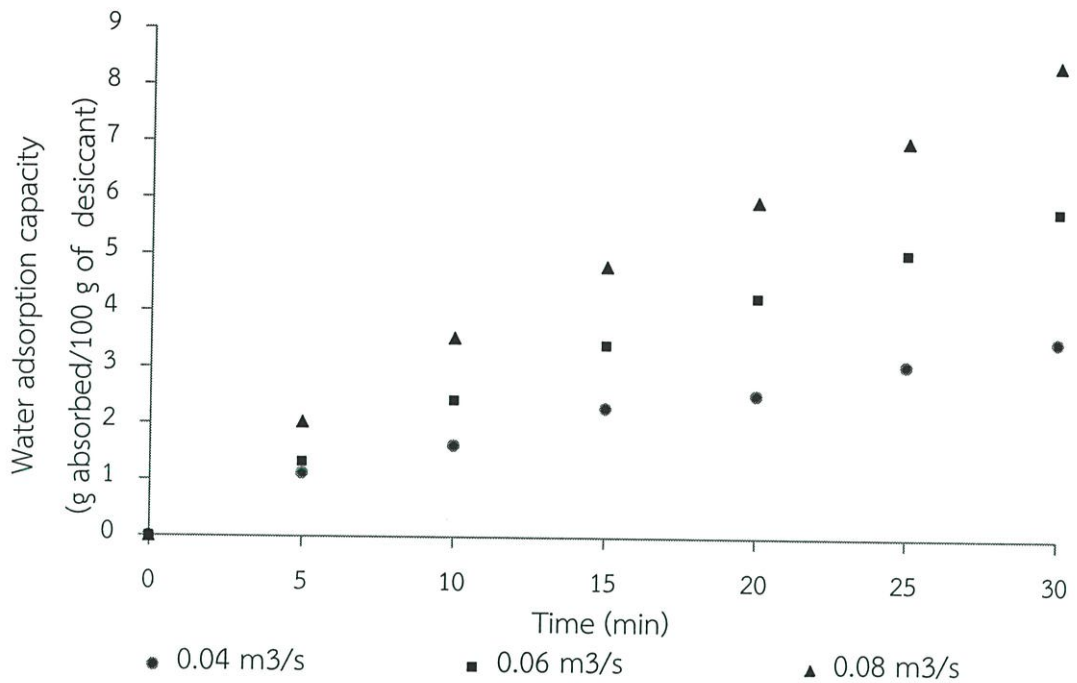


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุความชื้นและเวลาในการคายความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ เปรียบเทียบระหว่างซิลิกาเจลและโมเลกุลาร์ซีฟ

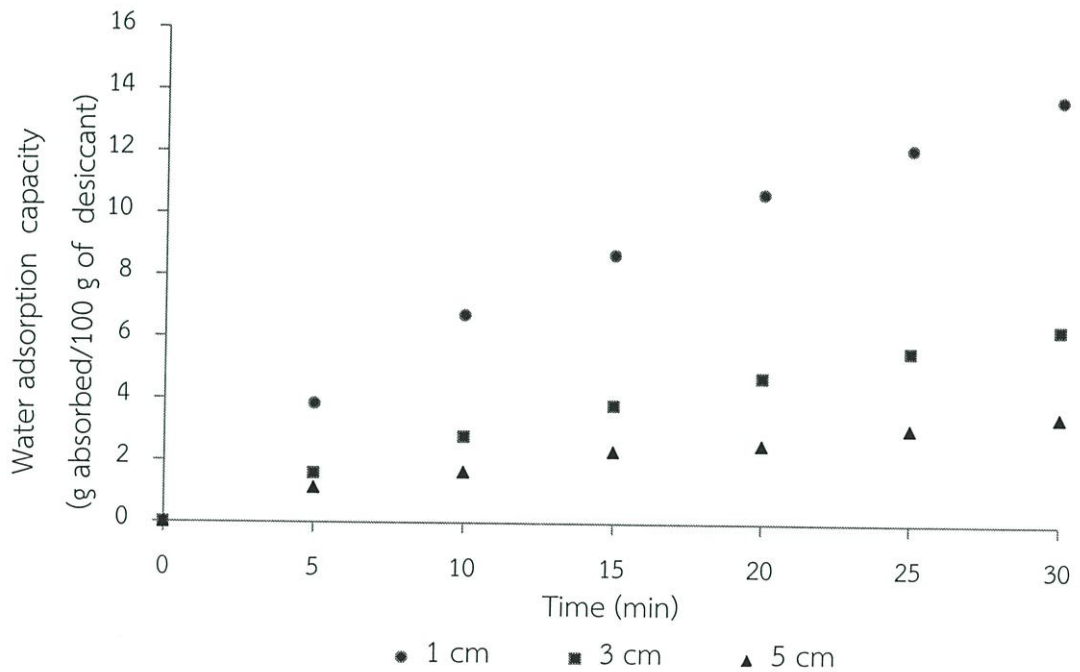
4.3 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและความหนาของชั้นสารดูดความชื้นต่อการดูดความชื้นของซิลิกาเจล

ซิลิกาเจลสามารถดูดความชื้นได้เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศดังรูปที่ 4.4 โดยทำการเปรียบเทียบที่อัตราการไหลของอากาศ 0.04, 0.06 และ 0.08 m^3/s จะเห็นได้ว่าซิลิกาเจลสามารถดูดความชื้นได้ดีที่สุดที่อัตราการไหลของอากาศที่ 0.08 m^3/s ขณะที่ความหนาของชั้นสารดูดความชื้นก็มีอิทธิพลต่อการดูดความชื้นของซิลิกาเจลเช่นกันดังรูป 4.5 โดยเมื่อความหนาของชั้นดูดความชื้นที่ต่ำลง ซิลิกาเจลจะมีความสามารถในการดูดความชื้นได้ดีขึ้น จากความหนาของชั้นดูดความชื้น 3 ระดับ ได้แก่ 1, 3 และ 5 cm จึงพบว่าความหนาของชั้นดูดความชื้นที่ทำให้ความสามารถในการดูดความชื้นของซิลิกาเจลสูงสุด คือ 1 cm จากรูปที่ 4.5 เห็นได้ชัดว่าเมื่อเวลาผ่านไป การใช้ความหนาของชั้นดูดความชื้น

1 cm สามารถดูดความชื้นออกจากอากาศได้ประมาณ 2.2 และ 4.3 เท่าเมื่อเทียบกับความหนาของชั้นดูดความชื้น 3 cm และ 5 cm ตามลำดับ



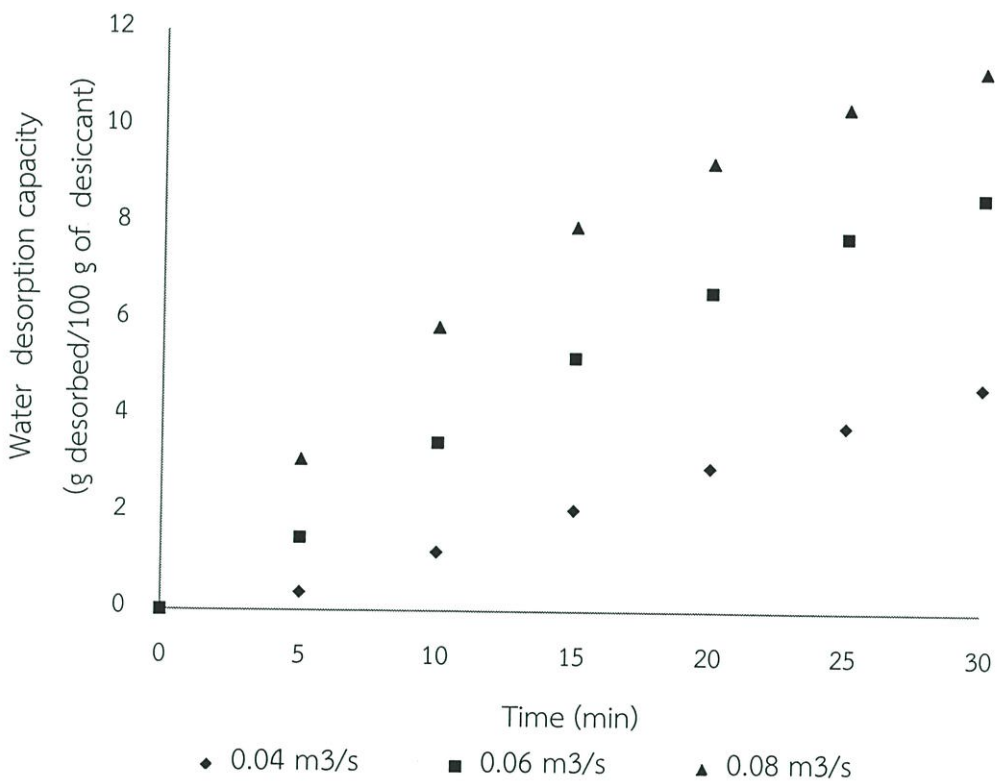
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุความชื้นและเวลาในการดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ ของซิลิกาเจล



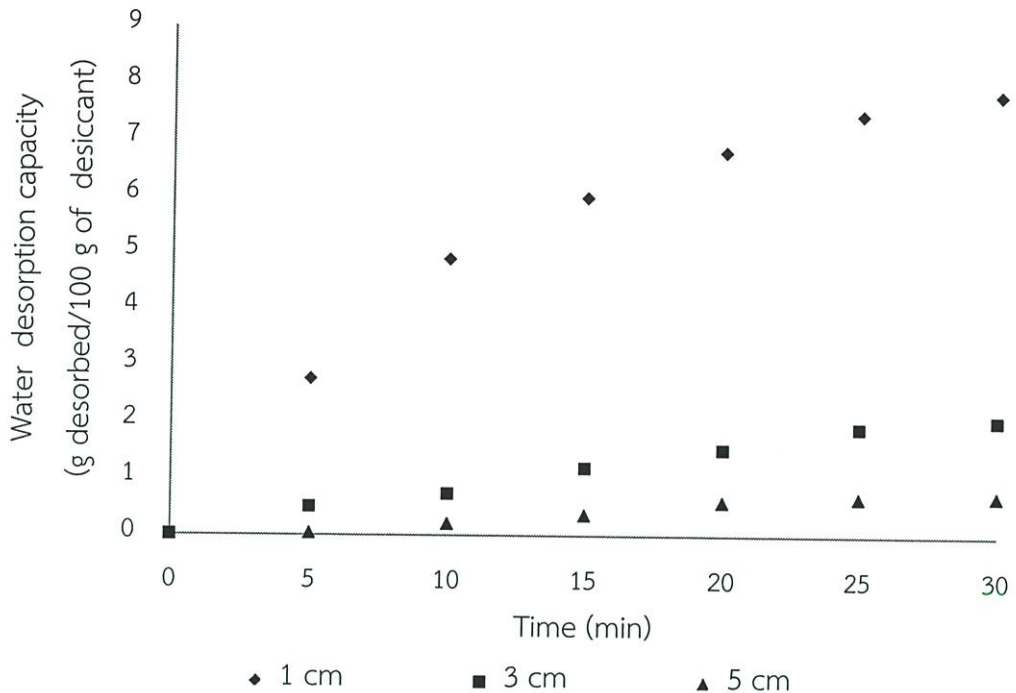
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารดูดความชื้นและเวลาในการดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ ของซิลิกาเจล

4.4 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิลมร้อน และความหนาของชั้นสารดูดความชื้นต่อการคายความชื้นของซิลิกาเจล

ซิลิกาเจลสามารถคายความชื้นได้เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศดังรูปที่ 4.6 โดยทำการเปรียบเทียบที่อัตราการไหลของอากาศ 0.04, 0.06 และ 0.08 m^3/s จะเห็นได้ว่าซิลิกาเจลสามารถคายความชื้นได้ดีที่สุดที่อัตราการไหลของอากาศที่ 0.08 m^3/s ขณะที่ความหนาของชั้นสารดูดความชื้นก็มีอิทธิพลต่อการคายความชื้นของซิลิกาเจลเช่นกันดังรูป 4.7 โดยเมื่อความหนาของชั้นดูดความชื้นที่ต่ำลง ซิลิกาเจลจะมีความสามารถในการคายความชื้นได้ดีขึ้น จากความหนาของชั้นดูดความชื้น 3 ระดับ ได้แก่ 1, 3 และ 5 cm จึงพบว่าความหนาของชั้นดูดความชื้นที่ทำให้ความสามารถในการคายความชื้นของซิลิกาเจลสูงสุด คือ 1 cm จากรูปที่ 4.7 เห็นได้ชัดว่าเมื่อเวลาผ่านไปการใช้ความหนาของชั้นดูดความชื้น 1 cm สามารถดูดความชื้นออกจากอากาศได้ประมาณ 4 และ 8 เท่าเมื่อเทียบกับความหนาของชั้นดูดความชื้น 3 cm และ 5 cm ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุความชื้นและเวลาในการดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ ของซิลิกาเจล

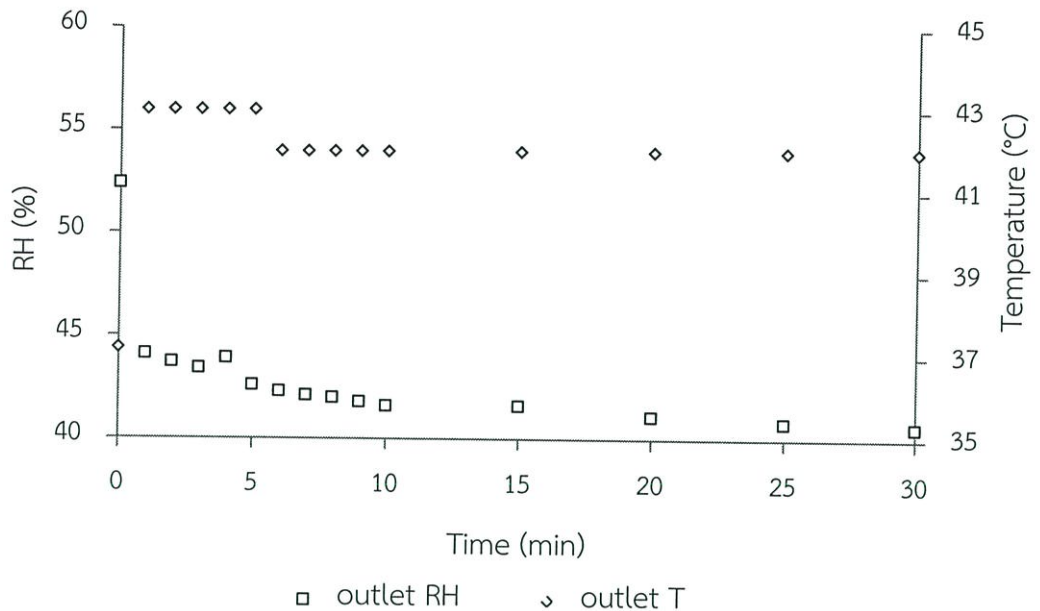


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสารดูดความชื้นและเวลาในการคายความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ ของซิลิกาเจล

4.5 การศึกษาสมรรถนะของวงล้อดูดความชื้น

4.5.1 การดูดความชื้น

จากรูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาที่อัตราการไหลของอากาศ คือ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการดูดความชื้นผ่านไป จากความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นที่ 52.4% เมื่ออากาศถูกไหลผ่านวงล้อดูดความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสามารถลดลงประมาณ 8% ในช่วงเวลา 1 นาทีของการทำงานของวงล้อ จากนั้นความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศยังคงลดลงอย่างต่อเนื่องจนได้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เวลา 30 นาทีของการทำงานของวงล้อเป็น 40.6% ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าระบบวงล้อดูดความชื้นที่พัฒนาขึ้นสามารถทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศลดลงถึงประมาณ 12% สำหรับผลการวัดอุณหภูมิขาออกจากวงล้อดูดความชื้นของอากาศ พบว่าอุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นจาก 37.2°C ไปเป็น 43°C ในนาทีที่ 1 ของการทำงานของวงล้อในทันทีตามหลักการการทำงานของวงล้อดูดความชื้น จากนั้นอุณหภูมิของอากาศขาออกที่สังเกตพบว่าจะอยู่ในช่วง $42\text{--}43^\circ\text{C}$ ตลอดการทำงานของวงล้อ ซึ่งเราสามารถคำนวณหาสมรรถนะของระบบวงล้อได้จากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังจากผ่านวงล้อดูดความชื้นแล้ว โดยความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังจากผ่านวงล้อดูดความชื้นจะลดลง 22.52% ซึ่งสามารถคำนวณสมรรถนะในการดูดความชื้นของวงล้อดูดความชื้น คือ 22.52%



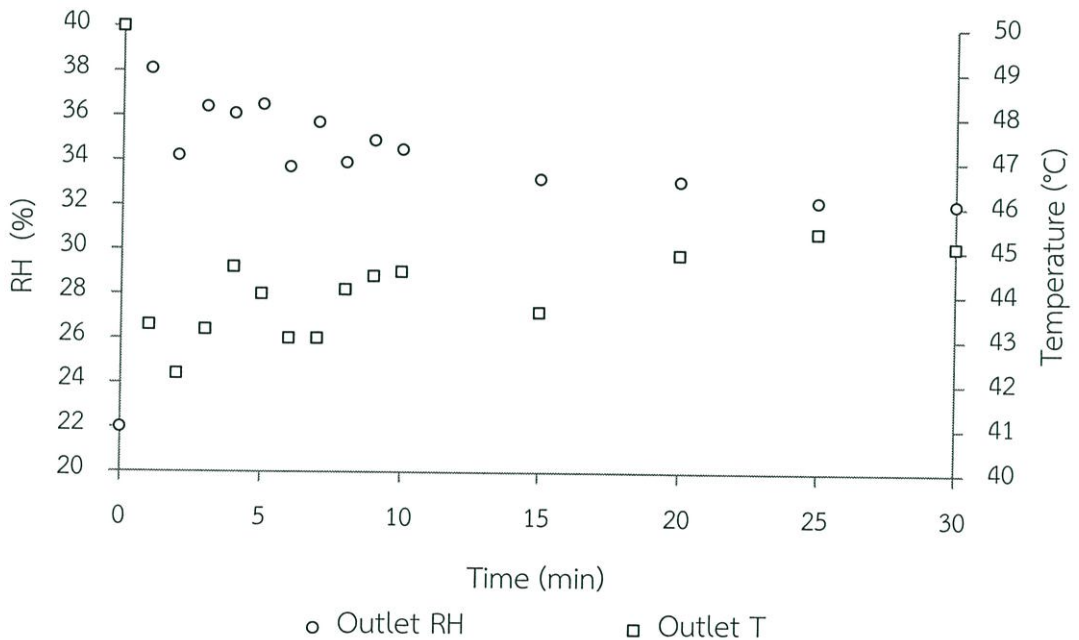
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในการดูดความชื้นของวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหล $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$

4.5.2 การคายความชื้น

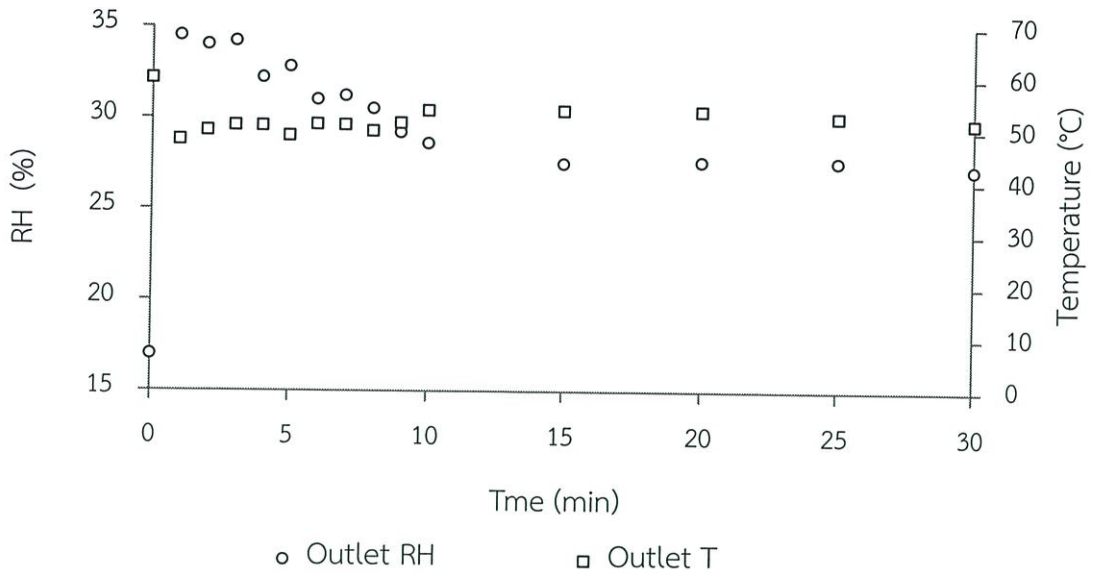
มีการศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนการคายความชื้นจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหล $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิ 50°C และ 60°C จากรูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาที่อัตราการไหลและอุณหภูมิเดียวกัน คือ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และ 50°C พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ผ่านวงล้อเพื่อคายความชื้นออกจากซิลิกาเจลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการคายความชื้นผ่านไป จากความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นที่ 22% เมื่ออากาศถูกไหลผ่านวงล้อดูดความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 16% ในช่วงเวลา 1 นาทีของการทำงานของวงล้อ จากนั้นความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะเพิ่มอย่างสม่ำเสมอจนได้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เวลา 30 นาทีของการทำงานของวงล้อเป็น 32.1% ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าวงล้อได้รับการคายความชื้นโดยความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 10.1% สำหรับผลการวัดอุณหภูมิขาออกจากวงล้อดูดความชื้นของอากาศ พบว่าอุณหภูมิของอากาศลดลงจาก 50°C ไปเป็น 43.5°C ในนาทีที่ 1 ของการทำงานของวงล้อในทันทีตามหลักการการทำงานของวงล้อดูดความชื้น จากนั้นอุณหภูมิของอากาศขาออกที่สังเกตพบว่าจะอยู่ในช่วง $42\text{--}46^\circ\text{C}$ ตลอดการทำงานของวงล้อ ซึ่งเราสามารถคำนวณหาสมรรถนะของระบบวงล้อได้จากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังจากออกจากวงล้อดูดความชื้นแล้ว

โดยความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังจากออกจากวงล้อดูดความชื้นจะเพิ่มขึ้น 45.91% ที่อุณหภูมิ 50°C ซึ่งสามารถคำนวณสมรรถนะในการคายความชื้นของวงล้อดูดความชื้น คือ 60%

จากรูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาที่อัตราการไหลและอุณหภูมิเดียวกัน คือ 0.04 m³/s และ 60°C พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ผ่านวงล้อเพื่อดูดความชื้นออกจากซิลิกาเจลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการคายความชื้นผ่านไป จากความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นที่ 17% เมื่ออากาศถูกไหลผ่านวงล้อดูดความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสามารถเพิ่มขึ้นสูงขึ้นประมาณ 18% ในช่วงเวลา 1 นาทีของการทำงานของวงล้อ เมื่อถึงนาทีที่ 30 ของการทำงานของวงล้อ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าเป็น 27.2% ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าวงล้อได้รับการดูดความชื้นโดยความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 10.2% สำหรับผลการวัดอุณหภูมิขาออกจากวงล้อดูดความชื้นของอากาศ พบว่าอุณหภูมิของอากาศลดลงจาก 60°C ไปเป็น 47°C ในนาทีที่ 1 ของการทำงานของวงล้อในทันทีตามหลักการการทำงานของวงล้อดูดความชื้น โดยจากกราฟพบว่าอุณหภูมิของอากาศขาออกที่สังเกตพบว่าจะอยู่ในช่วง 45-52°C ของระบบ ซึ่งสามารถคำนวณสมรรถนะในการคายความชื้นของวงล้อดูดความชื้น คือ 45.91%



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในการคายความชื้นของวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหล 0.04 m³/s และอุณหภูมิ 50°C

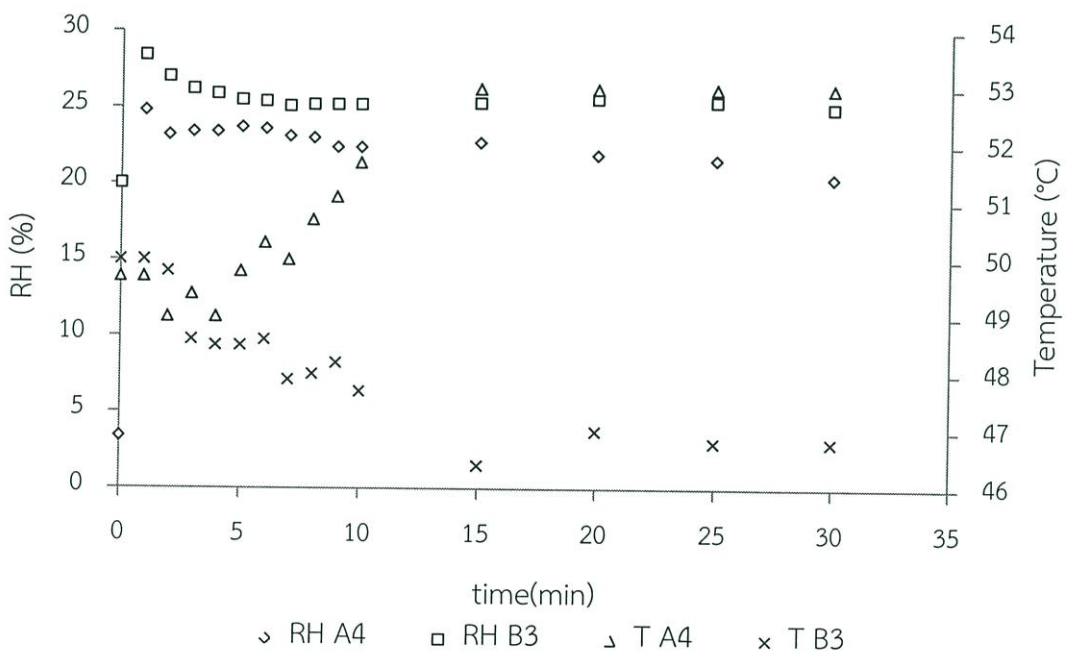


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในการคายความชื้นของวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหล 0.04 m³/s และอุณหภูมิ 60°C

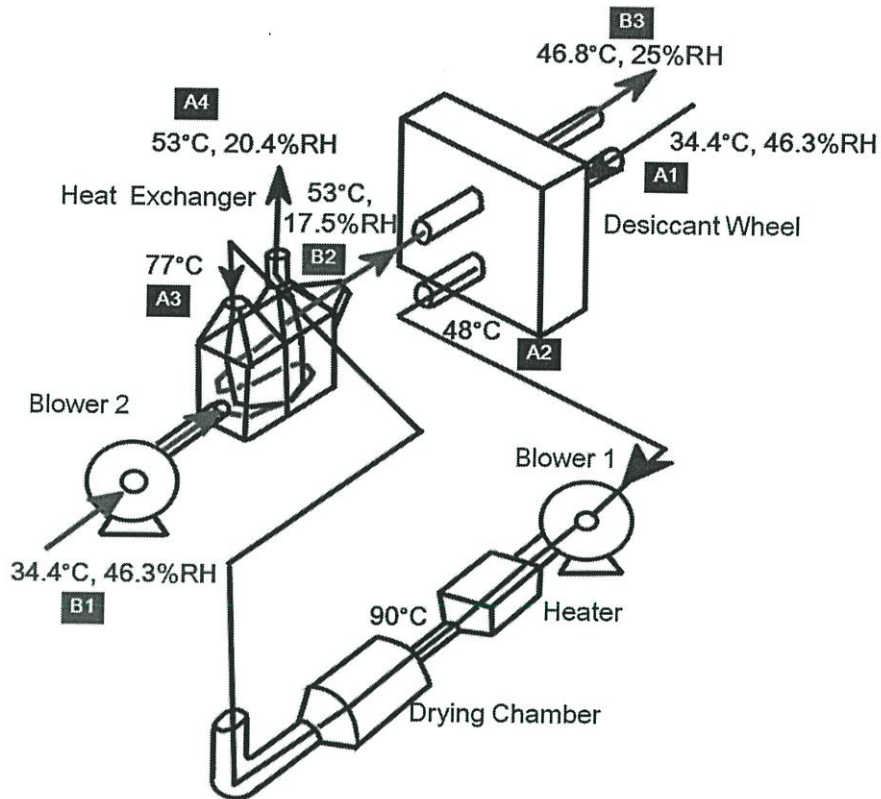
4.6 การศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น

จากการศึกษาสมบัติของอากาศในการทำงานของเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นทั้งระบบ โดยให้มีอัตราการไหลของอากาศเป็น 0.04 m³/s และอุณหภูมิของลมร้อนในเครื่องอบแห้งเป็น 90°C ซึ่งกำหนดให้จุดที่ทำการวัดผลความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิของอากาศในกระบวนการลดความชื้น (Dehumidification Process) เป็นอากาศขาออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่จุด A4 ดังรูปที่ 4.15 ส่วนในกระบวนการคายความชื้นจากวงล้อดูดความชื้น (Regeneration Process) กำหนดให้จุดที่ทำการวัดความสามารถของระบบในการคายความชื้นจากวงล้อดูดความชื้นเป็นอากาศออกจากวงล้อดูดความชื้นที่จุด B3 จากการทดลองพบว่าบรรยากาศมีความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิเป็น 46.3% และ 34.4°C โดยในส่วนการดูดความชื้นที่อัตราการไหล 0.04 m³/s และอุณหภูมิที่เครื่องทำความร้อน 90°C เมื่อพิจารณาจากค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่จุด A4 คือ อากาศที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หลังจากกระบวนการนำอากาศร้อนขาออกจากห้องอบแห้งมาแลกเปลี่ยนกับอากาศปกติ ความชื้นสัมพัทธ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการดูดความชื้นผ่านไป จากความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นที่ 46.3% เมื่ออากาศร้อนขาออกจากห้องอบแห้งมาแลกเปลี่ยนกับอากาศปกติ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสามารถลดลงประมาณ 43.3% ในช่วงเวลา 1 นาทีของการทำงานของวงล้อ จากนั้นความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะค่อนข้างมีความจุความชื้นคงที่ในช่วงเวลาต่อไปจนถึง 30 นาทีของการทดลอง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่สังเกตพบว่าจะอยู่ในช่วง 20-24% ตลอดการทำงานของวงล้อ ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าระบบวงล้อดูดความชื้นที่พัฒนาขึ้นสามารถทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศลดลงถึงประมาณ 26% และสำหรับผลการวัดอุณหภูมิอากาศที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หลังจาก

กระบวนการนำอากาศร้อนจากห้องอบแห้งมาแลกเปลี่ยนกับอากาศปกติ พบว่าอุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นจาก 34.4°C ไปเป็น 49.4°C ในนาทีที่ 1 ของการทำงานของวงล้อในทันทีตามหลักการการทำงานของวงล้อดูดความชื้น จากนั้นอุณหภูมิของอากาศขาออกที่สังเกตพบว่าจะอยู่ในช่วง 52-53°C ตลอดการทำงานของวงล้อ ในขณะที่ส่วนคายความชื้นที่อัตราการไหลเดียวกันคือ 0.04 m³/s เมื่อพิจารณาจากค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่จุด B3 คือ อากาศที่ออกจากวงล้อดูดความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการคายความชื้นผ่านไป จากความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นที่ 20% เมื่ออากาศถูกไหลผ่านวงล้อดูดความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสามารถเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 9% ในช่วงเวลา 1 นาทีของการทำงานของวงล้อ จากนั้นความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะลดลงอย่างสม่ำเสมอจนได้ค่าความชื้นสัมพัทธ์คงที่ที่เวลา 30 นาทีของการทำงานของวงล้อเป็น 27.5% ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าระบบวงล้อดูดความชื้นที่พัฒนาขึ้นสามารถทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 7.5% สำหรับผลการวัดอุณหภูมิขาออกจากวงล้อความชื้นของอากาศ พบว่าอุณหภูมิของอากาศลดลงจาก 50°C ไปเป็น 49.5°C ในนาทีที่ 1 ของการทำงานของวงล้อในทันทีตามหลักการการทำงานของวงล้อดูดความชื้น ซึ่งจะพบว่าอุณหภูมิของอากาศขาออกที่สังเกตพบจะอยู่ในช่วง 46-48°C ตลอดการทำงานของระบบ



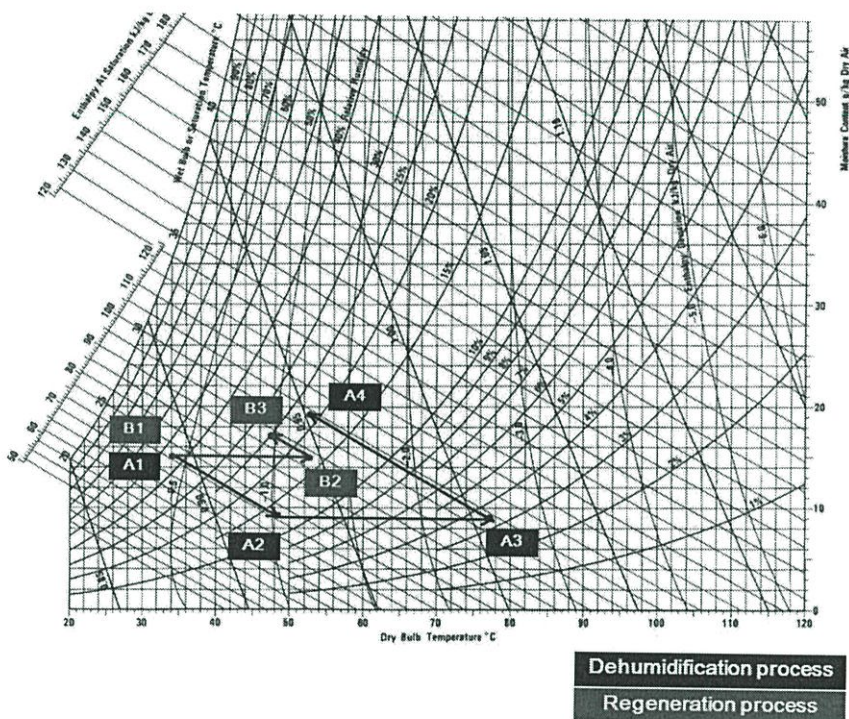
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในระบบวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหล 0.04 m³/s และอุณหภูมิ 90°C



รูปที่ 4.14 แผนภาพแสดงการศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น

โดยหลักการทำงานของระบบห้องอบแห้งแบบลมร้อนการใช้ความร้อนร่วมจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น สามารถแบ่งกระบวนการหลักได้ 2 กระบวนการ คือ กระบวนการการดูดความชื้นจากระบบวงล้อดูดความชื้น และกระบวนการคายความชื้นจากระบบวงล้อดูดความชื้น จากรูปที่ 4.16 แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงการศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น กระบวนการดูดความชื้นจากระบบวงล้อดูดความชื้นเส้นสีน้ำเงิน เริ่มจากจุด A1 ที่นำอากาศจากภายนอกที่มีอุณหภูมิ 34.4°C ความชื้นสัมพัทธ์ 46.3% เข้าสู่ระบบ ซึ่งอากาศจากภายนอกจะผ่านกระบวนการลดความชื้นซึ่งเป็นกระบวนการแบบอะเดียแบติก คือ กระบวนการที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนเข้าและออกจากระบบ โดยจากรูปจะเห็นได้จากแผนภูมิไซโครเมตริกที่แสดงจุด A1 ไปยังจุด A2 มีอุณหภูมิกระเปาะเปียกและเอลทัลปีคงที่ ทำให้อากาศที่ได้ที่จุด A2 มีอุณหภูมิ 48°C หลังจากนั้นอากาศ A2 ที่ได้จะถูกนำไปเพิ่มอุณหภูมิด้วยกระบวนการทำความร้อน โดยตั้งให้ทำความร้อนเป็นอุณหภูมิ 90°C เมื่อวัดที่จุด A3 ได้อุณหภูมิก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็น 77°C โดยอากาศที่จุด A3 นี้จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศปกติที่จุด B1 ทำให้อากาศที่ได้หลังจากผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วจะมีอุณหภูมิ 53°C ความชื้นสัมพัทธ์ 20.4% ที่จุด A4 ทั้งนี้อาจมีอากาศภายนอกผสมในระบบในระหว่างกระบวนการ จึงทำให้เส้นกระบวนการจาก A3 ไป A4

ไม่ตรงตามกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน ในขณะที่ส่วนกระบวนการคายความชื้นจากระบบวงล้อดูดความชื้นเส้นสีแดง เริ่มจากจุด B1 คืออากาศจากภายนอกซึ่งมีอุณหภูมิ 34.4°C ความชื้นสัมพัทธ์ 46.3% เข้าสู่ระบบ จากนั้นอากาศจะถูกนำไปสู่กระบวนการทำความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้อากาศที่ได้หลังจากผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็นอุณหภูมิ 53 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 17.5 %RH ที่จุด B2 โดยอากาศที่ได้จากจุด B2 นี้ คือ อากาศสำหรับการคืนสภาพสารดูดความชื้น จะถูกนำมาใช้สำหรับการดูดซับความชื้นออกจากซิลิกาเจลที่วงล้อดูดความชื้น ซึ่งทำให้อากาศที่ได้หลังจากผ่านวงล้อดูดความชื้นแล้วที่จุด B3 มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 46.8°C ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 25%



รูปที่ 4.15 แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงการศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น

กระบวนการลดความชื้นในอากาศ คือ เส้นกระบวนการ A (Dehumidification Process)

A1 - A2 กระบวนการลดความชื้น

A2 - A3 กระบวนการทำความร้อน

A3 - A4 กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

กระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้น คือ เส้นกระบวนการ B (Regeneration Process)

B1 - B2 กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

B2 - B3 กระบวนการคายความชื้น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การเปรียบเทียบสมบัติการดูดและการคายความชื้นระหว่างซิลิกาเจล และโมเลกุลลาร์ซีฟ ซิลิกาเจลมีสมบัติในการดูดความชื้นต่ำกว่าโมเลกุลลาร์ซีฟ แต่มีสมบัติในการคายความชื้นดีกว่าโมเลกุลลาร์ซีฟมาก จากสภาวะที่ใช้ในการทดลองจึงคัดเลือกซิลิกาเจลสำหรับเป็นสารดูดความชื้นบรรจุในวงล้อดูดความชื้น

5.1.2 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและความหนาของชั้นสารดูดความชื้นต่อการดูดความชื้นของซิลิกาเจล

ซิลิกาเจลสามารถดูดความชื้นได้เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ และลดความหนาของชั้นสารดูดความชื้น

5.1.3 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิลมร้อน และความหนาของชั้นสารดูดความชื้นต่อการคายความชื้นของซิลิกาเจล

ซิลิกาเจลสามารถคายความชื้นได้เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิลมร้อน และลดความหนาของชั้นสารดูดความชื้น

5.1.4 การศึกษาสมรรถนะของวงล้อดูดความชื้น

สมรรถนะในการดูดความชื้นของวงล้อดูดความชื้น คือ 22.52% ในขณะที่สมรรถนะในการคายความชื้นของวงล้อดูดความชื้น คือ 45.91% และ 60% ที่อุณหภูมิ 50°C และ 60°C ตามลำดับ

5.1.5 การศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนจากการใช้ระบบวงล้อดูดความชื้น

ในส่วนการดูดความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์จะลดลงจาก 46.3% เป็น 20.4% โดยอากาศร้อนที่เหลือทิ้งจากกระบวนการอบแห้งจะถูกนำมาแลกเปลี่ยนความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศปกติ ซึ่งส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังจากผ่านวงล้อดูดความชื้นในส่วนการคายความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น 7.5%

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากการทดลองระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น ในการดูดความชื้น ระบบอาจมีอากาศภายนอกผสมในระหว่างกระบวนการ ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนภายในระบบ จึงทำให้เส้นกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน (A3 ไป A4) ไม่ตรงตามแผนภูมิไซโครเมตริก จึงควรหุ้มฉนวนเครื่องทั้งระบบเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน

5.2.2 เครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์วัดได้ในช่วงอุณหภูมิต่ำ ควรใช้เครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ที่สามารถวัดได้ในช่วงอุณหภูมิสูง จึงจะเหมาะสมกับสภาวะในการอบแห้งมากกว่า และน่าจะเพิ่มความสามารถในการคายความชื้นสารดูดความชื้นที่อยู่ในวงล้อดูดความชื้นได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. MadhavaNaidu , M. Vedashree , PankajSatapathy , HafeezaKhanum, Ravi Ramsamy and H. UmeshHebbar.(2015). Effect of drying methods on the quality characteristics of dill (*Anethumgraveolens*) greens, *Food Chemistry*, 192,pp. 849–856
- [2] S. Misha, S.Mat, M.H.Ruslan, K.Sopian.(2012). Review of solid/liquid desiccant in the drying applications and its regeneration methods, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, September2012, pp. 4686–4707.
- [3] บริษัทธนพลวานิช. สารดูดความชื้นมีอะไรบ้าง, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: http://www.tanapolvanich.com/dry-bag/html/Type_of_Desiccant_Packaging_th.htm. accessed date: 18 กุมภาพันธ์ 2559
- [4] Sari Farah Dina and et.al. 2015. Study on effectiveness of continuous solar dryer integrated with desiccant thermal storage for drying cocoa beans. *Case Studies in Thermal Engineering*. 5. 32–40
- [5] วรณีย์ อุโพบูรณ. การรักษาคุณภาพสินค้าด้วยสารดูดความชื้น, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: http://siweb.dss.go.th /dss_doc/fulltext/radio/T53.pdf.(วันที่สืบค้นข้อมูล 17 กุมภาพันธ์ 2559.)
- [6] กระทรวงพลังงาน. การอบแห้งและลดความชื้นในอุตสาหกรรม, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: www2.dede.go.th/bhrd/.../Bay18%20Desiccant%20Dehumidification.pdf (วันที่สืบค้นข้อมูล 17 สิงหาคม 2558.)
- [7] วิบูลย์ เทเพนทร์. การวัดความชื้นเมล็ดพืช, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.doa.go.th/aeri/files/KM/moisture%202.pdf>(วันที่สืบค้นข้อมูล 17 สิงหาคม 2558.)
- [8] ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์,ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.นิธิยา รัตนานนท์. Drying rate / อัตราการทำแห้งDrying rate / อัตราการทำแห้ง, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.fao.org/docrep/X5036E/x5036E0x.htm>(วันที่สืบค้นข้อมูล 17 สิงหาคม 2558.)
- [9] บริษัทธนพลวานิช. สารดูดความชื้นมีอะไรบ้าง , [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: http://www.tanapolvanich.com/dry-bag/html/Type_of_Desiccant_Packaging_th.htm(วันที่สืบค้นข้อมูล 7 สิงหาคม 2558.)

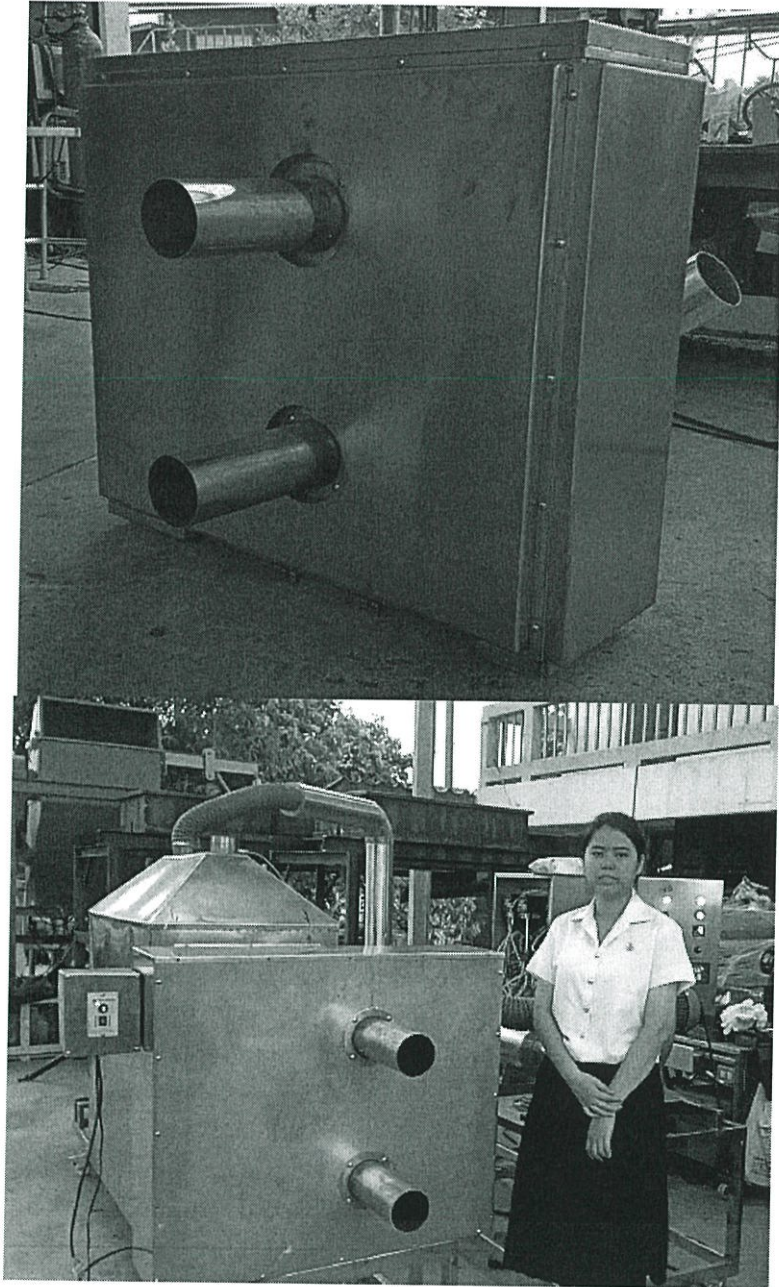
- [10] POWER DRY.ข้อมูลผลิตภัณฑ์ : ซิลิกาเจล (Silica gel) , [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: http://www.powerdry.co.th/giggs_products_silica_gel_th.php/(วันที่สืบค้นข้อมูล 17 มีนาคม 2559.)
- [11] AIR XCHANGE.Silica gel Desiccant, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.airxchange.com/resource-center-application-design.htm/>(วันที่สืบค้นข้อมูล 17 มีนาคม 2559.)
- [12] ThanidMadhiyanon, SermpongAdirekrut, PrasanSathitruangsak, Somchart Soponronnari t.(2007). Integration of a rotary desiccant wheel into a hot-air drying system: Drying performance and product quality studies, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Vol. 46, April2007, pp. 282–290.
- [13] กระทรวงพลังงาน.การอบแห้งและลดความชื้นในอุตสาหกรรม , [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: www2.dede.go.th/bhrd/.../Bay18%20Desiccant%20Dehumidification.pdf/(วันที่สืบค้นข้อมูล 17 สิงหาคม 2558.)
- [14] ประทีป ไคว้นภูมิตร.การศึกษาสมรรถนะการควบคุมความชื้นโดยซิลิกาเจลสำหรับระบบการอบแห้ง, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.thaithesis.org/detail.php?id=920/>(วันที่สืบค้นข้อมูล 17 สิงหาคม 2558.)
- [15] จุฑามาส ภควัตบริรักษ์.การวิเคราะห์สมรรถนะปั๊มความร้อนทำงานร่วมกับสารดูดความชื้นชนิดแข็งในกระบวนการอบแห้ง, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มาhttp://www.phtnet.org/research/view-abstract.asp?research_id=ag090/(วันที่สืบค้นข้อมูล 17 สิงหาคม 2558.)
- [16] ThanidMadhiyanon,SermpongAdirekrut,PrasanSathitruangsak,Somchart Soponronnarit. (2007). Integration of a rotary desiccant wheel into a hot-air drying system: Drying performance and product quality studies, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Vol. 46, April2007, pp. 282–290.
- [17] กระทรวงพลังงาน.การลดความชื้นด้วยสารดูดความชื้นเหลว, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: http://www2.dede.go.th/km_berc/downloads/menu4/เทคโนโลยี/โรงงาน/05%20การลดความชื้นด้วยสารดูดความชื้นเหลว.pdf/(วันที่สืบค้นข้อมูล 17 มีนาคม 2559.)
- [18] Food Network Solution.การทำแห้งชาสมุนไพรด้วยเครื่องอบลมร้อนร่วมกับการใช้สารดูดความชื้น ,[ระบบออนไลน์],แหล่งที่มา :http://www.foodnetworksolution.com/news_and_articles/article/0246/การทำแห้งชาสมุนไพรด้วยลมร้อนร่วมกับการใช้สารดูดซับความชื้น/(วันที่สืบค้นข้อมูล 17 มีนาคม 2559.)

- [19] H2OUT FOREVER, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://h2outforever.wordpress.com/7-faq/>(วันที่สืบค้นข้อมูล 17 มีนาคม 2559.)

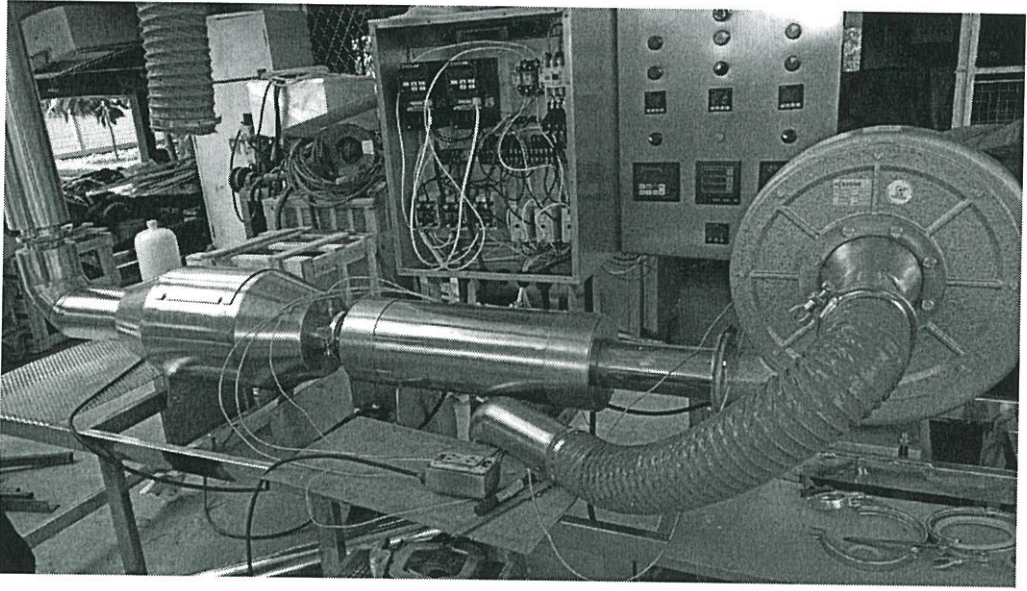
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

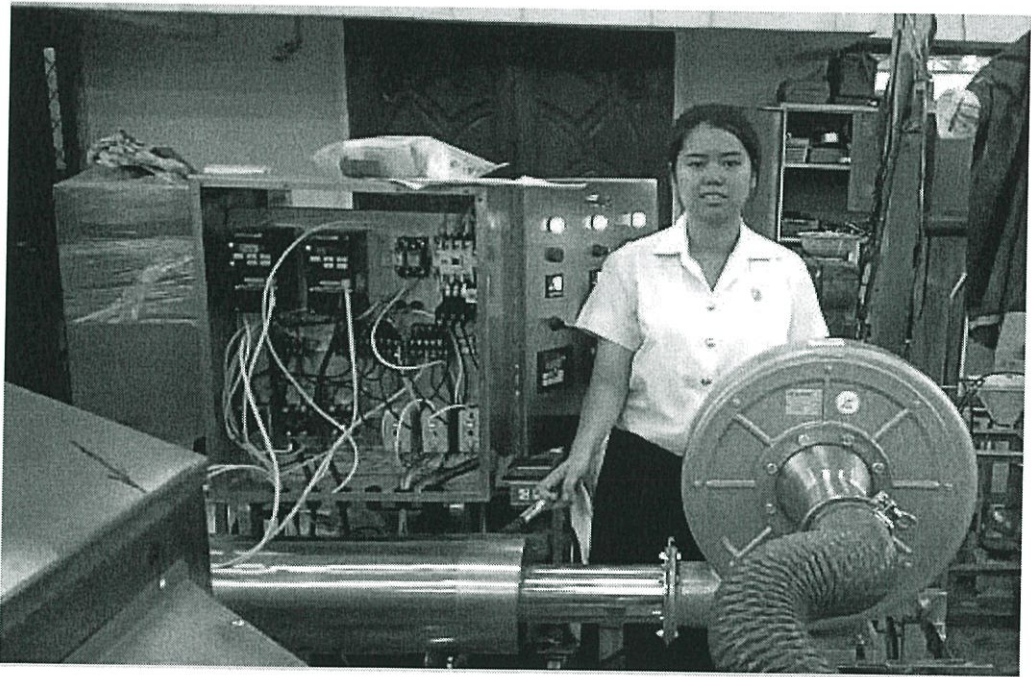
ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น



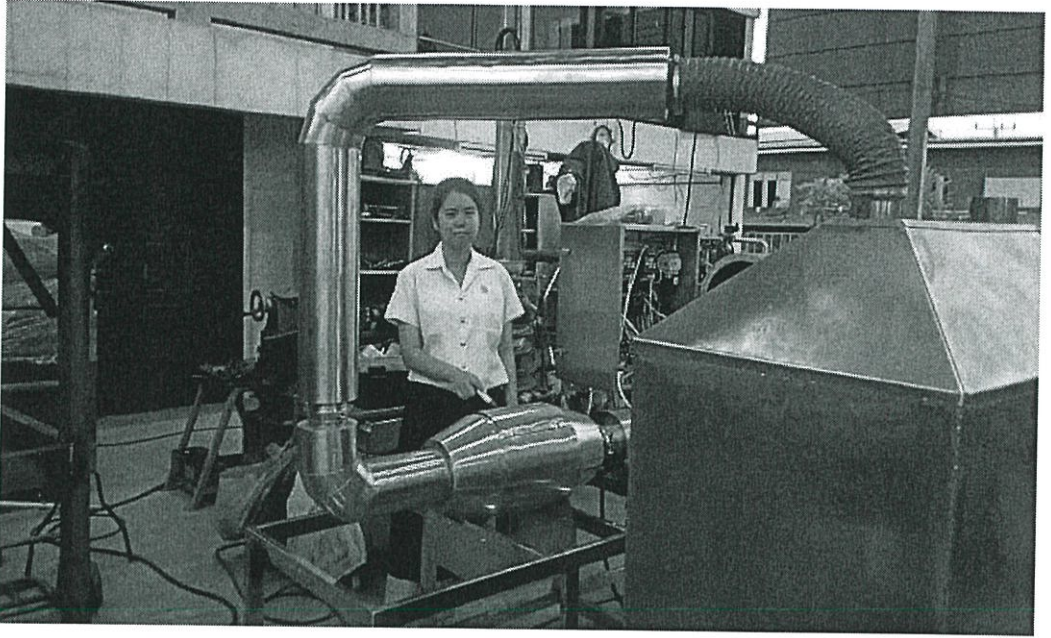
รูปที่ ก.1 วงล้อดูดความชื้น



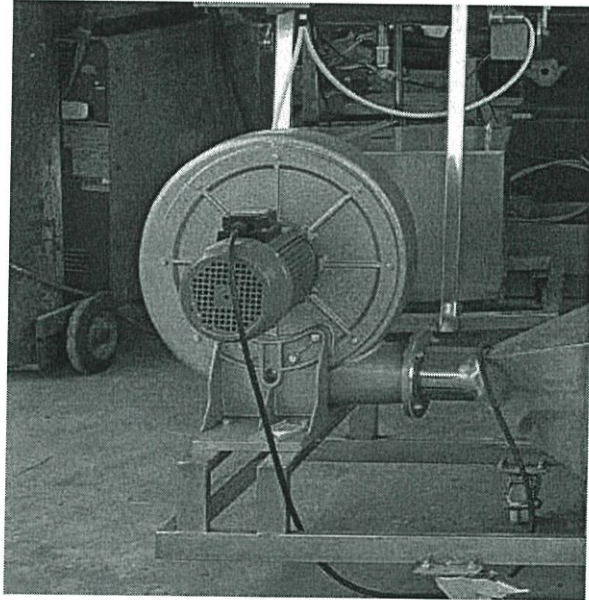
รูปที่ ก.2 เครื่องเป่าลมร้อนตัวที่ 1



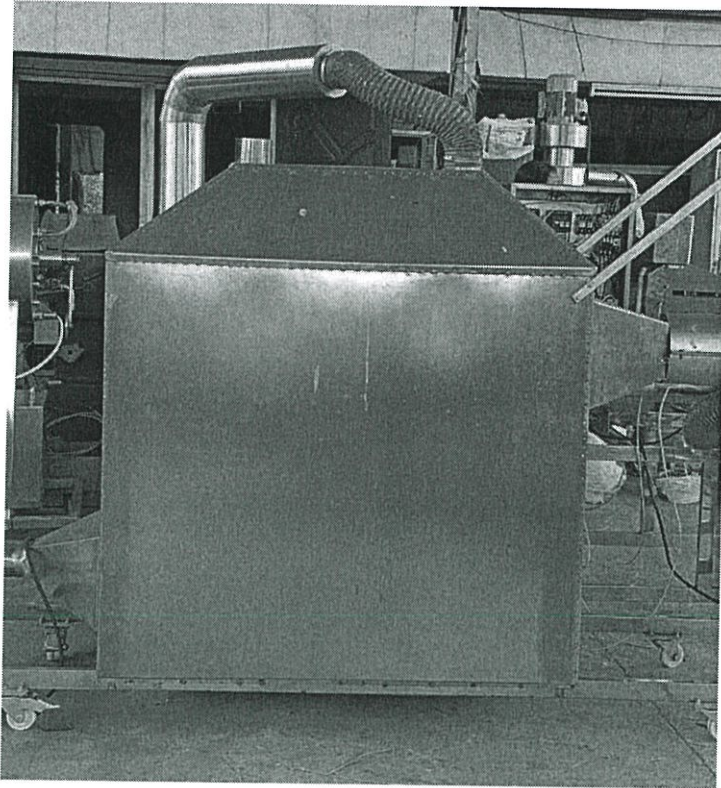
รูปที่ ก.3 เครื่องทำความร้อน 1



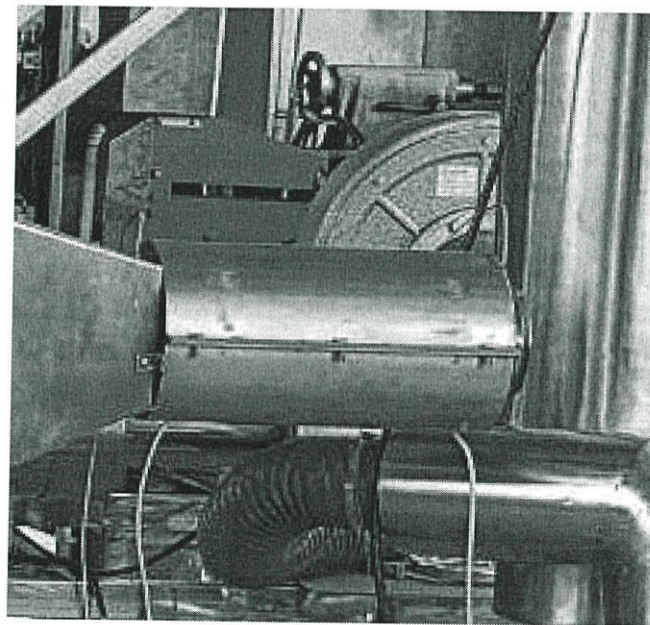
รูปที่ ก.4 ห้องอบแห้ง



รูปที่ ก.5 เครื่องเป่าลมร้อนตัวที่ 2



รูปที่ ก.6 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ ก.7 เครื่องทำความร้อน 2