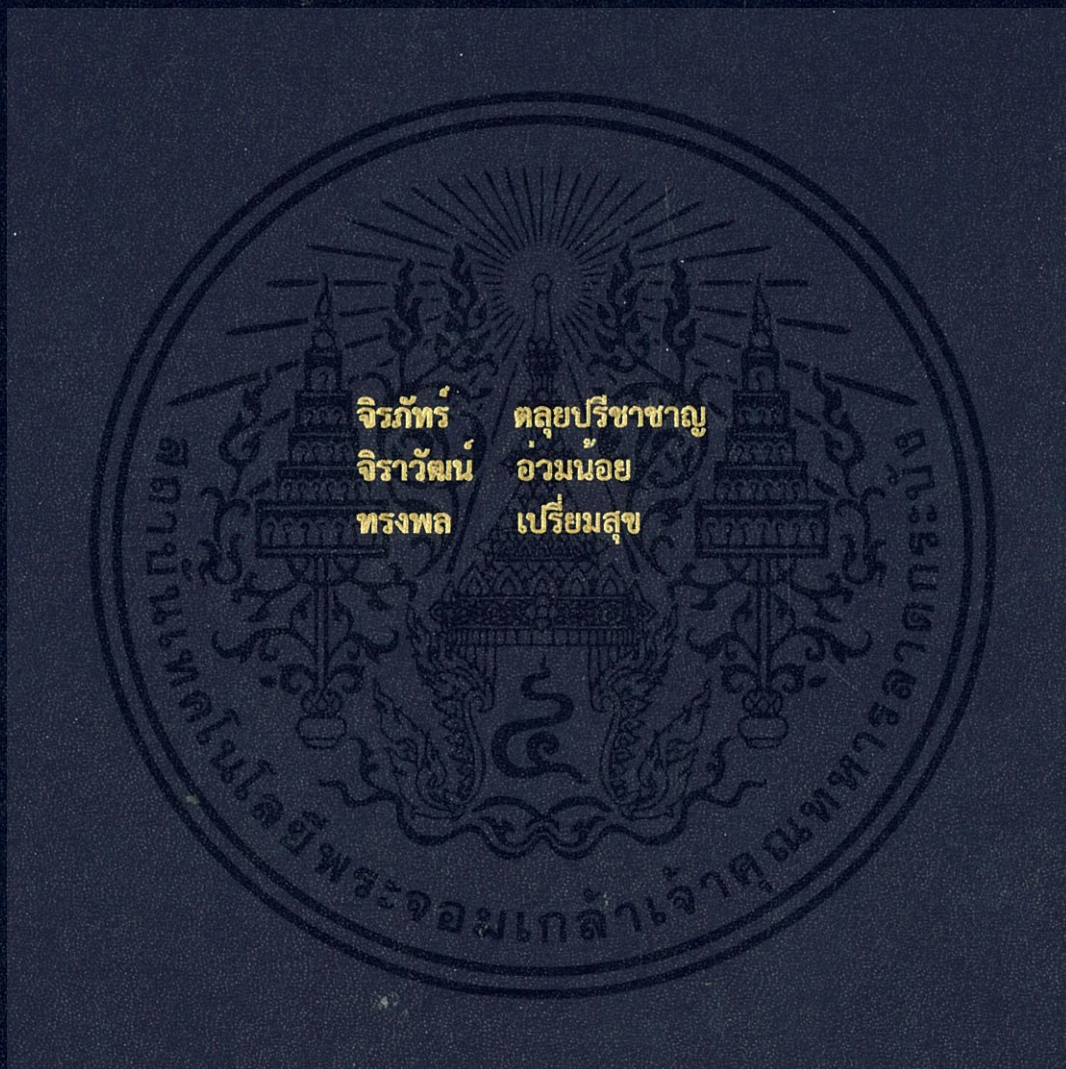


การประยุกต์ใช้ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นสำหรับการอบแห้งแครอท
Application of a Hot Air Drying System with a Desiccant Wheel Dehumidification
for Carrot Drying



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การประยุกต์ใช้ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นสำหรับการอบแห้งแครอท
Application of a Hot Air Drying System with a Desiccant Wheel Dehumidification
for Carrot Drying



ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Application of a Hot Air Drying System with a Desiccant Wheel Dehumidification
for Carrot Drying



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
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 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การประยุกต์ใช้ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นสำหรับการ
การอบแห้งแครอท
Application of a Hot Air Drying System with a Desiccant Wheel
Dehumidification for Carrot Drying

นักศึกษาผู้จัดทำ นางสาวจิรภัทร์ ตลุ่ยปรีชาชาญ รหัสนักศึกษา 56010189
นายจิราวัฒน์ อ่วมน้อย รหัสนักศึกษา 56010209
นายทรงพล เปี่ยมสุข รหัสนักศึกษา 56010470

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)
หลักสูตร วิศวกรรมเกษตร
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2559

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร. จิราพร ศรีภิญโญวณิชย์ จงยิ่งเจริญ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การประยุกต์ใช้ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นสำหรับการอบแห้งแครอท		
นักศึกษาผู้จัดทำ	นางสาวจิรภัทร์	ตลุมพรีชาชาญ	รหัสนักศึกษา 56010189
	นายจิราวัฒน์	อ่วมน้อย	รหัสนักศึกษา 56010209
	นายทรงพล	เปี่ยมสุข	รหัสนักศึกษา 56010470
อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา	ดร. จิราพร ศรีภิญโญวณิชย์ จงยิ่งเจริญ 2559		

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ เพื่อประยุกต์ใช้ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น (HA-DW) สำหรับการอบแห้งแครอท มีการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้ง (80, 100 และ 120°C) และอัตราการไหลของอากาศ (0.04, 0.06 และ 0.08 m³/s) ต่อลักษณะการอบแห้งของแครอททรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวเท่ากันที่ 1 cm เวลาในการอบแห้งที่สั้นที่สุด 150 min และการใช้พลังงานจำเพาะที่ต่ำที่สุด 0.0062 kWh/kg water ได้มาจากอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศ 120°C และ 0.08 m³/s ตามลำดับ ที่สภาวะการอบแห้งนี้ อัตราการอบแห้งเฉลี่ยคือ 0.0676 g water/g dry matter•min แบบจำลองการอบแห้ง Page มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการอธิบายลักษณะการอบแห้งของแครอท โดยมี R² และ RMSE อยู่ในช่วง 0.9978-0.9993 และ 0.0093-0.0161 ตามลำดับ สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของการอบแห้งแครอทแบบ HA-DW มีค่าอยู่ในช่วง 5.65-6.13×10⁻⁹ m²/s นอกจากนี้ ยังดำเนินการอบแห้งแบบลมร้อนปกติที่อุณหภูมิ 80, 100 และ 120°C และอัตราการไหลของอากาศ 0.08 m³/s เพื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบ HA-DW ที่สภาวะการทดลองเดียวกันด้วย ในแต่ละสภาวะการอบแห้ง อัตราการอบแห้งเฉลี่ยของการอบแห้งแบบ HA-DW ของแครอทมีค่าสูงกว่าที่ได้รับจากการอบแห้งแบบลมร้อนปกติ

คำสำคัญ—การอบแห้ง; แครอท; วงล้อดูดความชื้น; การลดความชื้นในอากาศ

Thesis Title	Application of a Hot Air Drying System with a Desiccant Wheel Dehumidification for Carrot Drying		
Authors	Jiraphat	Taluypreechachan	56010189
	Jirawat	Oumnoy	56010209
	Songpol	Priamsook	56010470
Thesis Advisor	Dr. Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen		
Year	2016		

Abstract

The main objective of this research was to apply a hot air drying system with a desiccant wheel dehumidification (HA-DW) for carrot drying. The effects of drying temperature (80, 100, and 120°C) and air flow rate (0.04, 0.06, and 0.08 m³/s) on drying characteristics of cylindrical carrot with an equal diameter and length of 1 cm were investigated. The shortest drying time of 150 min and the lowest specific energy consumption of 0.0062 kWh/kg water were obtained by drying the carrot at the temperature and air flow rate of 120°C and 0.08 m³/s, respectively. At this drying condition, the average drying rate was 0.0676 g water/g dry matter•min. Page drying model was the most suitable for describing the drying characteristics of carrot with the R2 and RMSE in the ranges of 0.9978-0.9993 and 0.0093-0.0161, respectively. Effective diffusivity of HA-DW drying of carrot was in the range of 5.65-6.13×10⁻⁹ m²/s. Conventional hot air drying at the temperature of 80, 100, and 120°C and air flow rate of 0.08 m³/s was also conducted to compare with HA-DW drying at the same experimental conditions. In each drying condition, the average drying rate of HA-DW drying of carrot was higher than that obtained by the conventional hot air drying.

Keywords—drying; carrot; desiccant wheel; dehumidification

กิตติกรรมประกาศ

รายงานโครงการฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากท่าน ดร. จิราพร ศรีภิญโญ วนิชย์ จงยิ่งเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาด้านวิชาการและการจัดทำโครงการ หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้คอยให้คำแนะนำและให้คำปรึกษา หรือข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ อีกทั้งยังเอาใจใส่ทุกกระบวนการดำเนินงานและคอยให้กำลังใจคณะผู้จัดทำเสมอมา ทางคณะผู้จัดทำรายงานวิจัยขอกราบขอบคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ ดร.เอกพงษ์ ชีวดีโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษาด้านวิชาการและการออกแบบเครื่องจักรกล หลักสูตรวิศวกรรมอาหาร สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้มอบความช่วยเหลือต่างๆและคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์เมื่อเกิดปัญหาขึ้นขณะทำการทดลองจึงทำให้ทางคณะผู้จัดทำสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยให้สำเร็จไปด้วยดี

ขอบคุณสมาชิกในคณะผู้จัดทำที่ให้ความร่วมมือซึ่งกันและกันเสมอมาตลอดจนรายงานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นางสาวจิรภัทร์ ตลวยปรีชาชาญ

นายจิราวัฒน์ อ่วมน้อย

นายทรงพล เปี่ยมสุข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ความชื้นในอากาศและวิธีการวัดความชื้นในอากาศ	4
2.1.1 คำจำกัดความของความชื้นในอากาศ	4
2.1.2 วิธีการวัดความชื้นในอากาศ	4
2.2 ระบบลดความชื้นในอากาศแบบวงล้อดูดความชื้น	5
2.3 ซิลิกาเจลและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดและคายความชื้นของซิลิกาเจล	7
2.3.1 ลักษณะและสมบัติของซิลิกาเจล	7
2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดความชื้นของซิลิกาเจล	7
2.4 แผนภูมิไฮโครเมตริก	8
2.4.1 ลักษณะทั่วไปของแผนภูมิไฮโครเมตริก	8
2.4.2 ค่าสมบัติของอากาศในแผนภูมิไฮโครเมตริก	9
2.5 การใช้ระบบดูดความชื้นร่วมในกระบวนการอบแห้ง	15
2.6 ทฤษฎีการทำแห้ง	16
2.6.1 ปริมาณความชื้น	16
2.6.2 อัตราส่วนความชื้น	16
2.6.3 อัตราการทำแห้ง	17
2.6.4 สมประสิทธิการแพร่ความชื้นประสิทธิผล	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.5 พลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่	18
2.6.6 แบบจำลองการอบแห้ง	19
2.6.7 ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้ง	19
2.7 การอบแห้งแบบถาด (Tray drying)	20
2.7.1 ลักษณะทั่วไปของเครื่องอบแห้งแบบถาด	20
2.7.2 ข้อดีและข้อเสียของเครื่องอบแห้งแบบถาด	20
2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุในการทำแห้ง	20
2.8.1 ความชื้นสัมพัทธ์	20
2.8.2 ปริมาณการไหลของอากาศ (Air volume flow rate, m ³ /s)	21
2.8.3 อุณหภูมิของอากาศร้อน	21
2.8.4 ปริมาณและการจัดเรียงวัสดุ	21
2.9 การเปลี่ยนแปลงของวัสดุหลังผ่านกระบวนการทำแห้ง	21
2.9.1 คุณภาพสีที่เปลี่ยนไปหลังผ่านกระบวนการทำแห้ง	21
2.9.2 อัตราส่วนการคืนตัว (Rehydration Ratio, RR)	21
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
2.10.1 การอบแห้งแครอทด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน	22
2.10.2 การทำแห้งชาสมุนไพรด้วยเครื่องอบลมร้อนร่วมกับการใช้สารดูดความชื้น	22
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	23
3.1 ตัวอย่างวัสดุทดลอง	23
3.2 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น	24
3.3 การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับสถานะการทำงานที่เหมาะสมในส่วนคืนสภาพ	26
วงล้อดูดความชื้น	
3.4 การศึกษาลักษณะการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อน	27
ร่วมกับวงล้อดูดความชื้น	
3.5 การสร้างแบบจำลองการอบแห้งและการวิเคราะห์จลนศาสตร์ในการอบแห้งแครอท	28
ด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น	
3.6 การเปรียบเทียบลักษณะการอบแห้งของแครอทระหว่างระบบอบแห้งแบบ	29
ลมร้อนที่ร่วมกับและไม่ร่วมกับวงล้อดูดความชื้น	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7 การวิเคราะห์พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อน ร่วมกับวงล้อดูดความชื้น	30
บทที่ 4 ผลการทดลอง	31
4.1 สภาพะการทำงานที่เหมาะสมในส่วนคั้นสภาพวงล้อดูดความชื้น	31
4.2 ลักษณะการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น ..	32
4.2.1 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและเวลาในการอบแห้ง	32
4.2.2 เส้นโค้งการอบแห้ง	33
4.2.3 เส้นโค้งอัตราการอบแห้ง	35
4.2.4 สมบัติของอากาศ	37
4.3 แบบจำลองการอบแห้งและจลนศาสตร์ในการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้ง แบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น	41
4.3.1 แบบจำลองการอบแห้ง	41
4.3.2 จลนศาสตร์การอบแห้ง	45
4.4 การเปรียบเทียบลักษณะการอบแห้งของแครอทระหว่างระบบอบแห้งแบบ ลมร้อนที่ร่วมกับและไม่ร่วมกับวงล้อดูดความชื้น	46
4.5 พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อน ร่วมกับวงล้อดูดความชื้น	50
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	52
5.1 สรุปผลการทดลอง	52
5.2 ข้อเสนอแนะ	53
เอกสารอ้างอิง	54
ภาคผนวก ก	56

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาดำเนินงาน	3
ตารางที่ 4.1 ปริมาณน้ำที่อากาศสามารถพาออกจากซิลิกาเจลในวงล้อดูดความชื้น (ΔW) ได้	31
ตารางที่ 4.2 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและเวลาในการอบแห้งแครอทที่อัตราการไหล	33
ของอากาศส่วนดูดความชื้นและอุณหภูมิในห้องอบแห้งต่างๆ	
ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ สัมประสิทธิ์และพารามิเตอร์ทางสถิติของแบบจำลองการอบแห้งต่างๆ	41
ที่อัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้น $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$	
ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ สัมประสิทธิ์และพารามิเตอร์ทางสถิติของแบบจำลองการอบแห้งต่างๆ	42
ที่อัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้น $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$	
ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่ สัมประสิทธิ์และพารามิเตอร์ทางสถิติของแบบจำลองการอบแห้งต่างๆ	42
ที่อัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$	
ตารางที่ 4.6 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและพลังงานกระตุ้นในการอบแห้ง	46
แครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น	
ตารางที่ 4.7 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและความชื้นของแครอทที่เวลา 120 นาที	47
เมื่ออบแห้งในระบบอบแห้งที่ร่วมกับและไม่ร่วมกับวงล้อดูดความชื้น	
ตารางที่ 4.8 พลังงานจำเพาะที่ใช้สำหรับการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้ง	51
แบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่สภาวะการทดลองต่างๆ	

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้น.....	6
รูปที่ 2.2 เครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นแบบหมุน.....	6
รูปที่ 2.3 เครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นแบบหมุนที่มีระบบนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่.....	7
รูปที่ 2.4 แผนภูมิไซโครเมตริก (Psychrometric Chart).....	8
รูปที่ 2.5 แสดงเส้นอัตราส่วนความชื้น (Humidity Ratio Line).....	10
รูปที่ 2.6 แสดงเส้นความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity Line).....	11
รูปที่ 2.7 แสดงเส้นปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume).....	12
รูปที่ 2.8 เส้นอุณหภูมิกระเปาะแห้งบนแผนภูมิไซโครเมตริก.....	13
รูปที่ 2.9 เส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียกบนแผนภูมิไซโครเมตริก.....	13
รูปที่ 2.10 แสดงการหาจุดน้ำค้างที่สภาวะที่กำหนด.....	14
รูปที่ 2.11 เส้นแสดงค่าเอนทัลปี.....	15
รูปที่ 2.12 กราฟอัตราการแห้ง (Drying rate) และความชื้นในวัสดุ (Moisture content).....	17
รูปที่ 3.1 เครื่องที่ใช้ในการทดลองอบแห้ง.....	23
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมเครื่องเป็นทรงกระบอก.....	23
รูปที่ 3.3 ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น.....	24
รูปที่ 3.4 วงล้อดูดความชื้น.....	24
รูปที่ 3.5 เครื่องเป่าลมร้อน.....	25
รูปที่ 3.6 ห้องอบแห้งและถาดใส่ตัวอย่าง.....	25
รูปที่ 3.7 แผนภาพการทำงานของส่วนประกอบในระบบอบแห้งแบบลมร้อน ร่วมกับวงล้อดูดความชื้น.....	26
รูปที่ 3.8 แผนภาพการทำงานของส่วนประกอบในระบบคืนสภาพวงล้อดูดความชื้น ของระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น.....	26
รูปที่ 3.9 แผนภาพการทำงานของส่วนประกอบในระบบอบแห้งแบบลมร้อน ร่วมกับวงล้อดูดความชื้น.....	28
รูปที่ 3.10 แผนภาพการทำงานของส่วนประกอบในระบบอบแห้งแบบลมร้อน ไม่ร่วมกับวงล้อดูดความชื้น.....	30
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศที่ผ่านกระบวนการ คืนสภาพสารดูดความชื้นเมื่อมีอัตราการไหลของอากาศ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และความเร็วรอบของวงล้อ 0.5 RPM	32

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.2 เส้นกระบวนการคั่นสภาพซีลิกาเจลทางทฤษฎี	32
รูปที่ 4.3 เส้นโค้งการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับ วงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้น เป็น 0.04 m ³ /s	34
รูปที่ 4.4 เส้นโค้งการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับ วงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้น เป็น 0.06 m ³ /s	34
รูปที่ 4.5 เส้นโค้งการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับ วงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้น เป็น 0.08 m ³ /s	35
รูปที่ 4.6 เส้นโค้งอัตราการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับ วงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆเมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้น เป็น 0.04 m ³ /s	36
รูปที่ 4.7 เส้นโค้งอัตราการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับ วงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆเมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้น เป็น 0.06 m ³ /s	36
รูปที่ 4.8 เส้นโค้งอัตราการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับ วงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆเมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้น เป็น 0.08 m ³ /s	37
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศในส่วนคั่นสภาพวงล้อดูดความชื้น ในกระบวนการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นกับ เวลาที่อัตราการไหลของอากาศเป็น 0.04 m ³ /s ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ	38
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศในส่วนคั่นสภาพวงล้อดูดความชื้น ในกระบวนการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นกับ เวลาที่อัตราการไหลของอากาศเป็น 0.06 m ³ /s ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ	38
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศในส่วนคั่นสภาพวงล้อดูดความชื้น ในกระบวนการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นกับ เวลาที่อัตราการไหลของอากาศเป็น 0.08 m ³ /s ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ	39

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของผลต่างมวลของน้ำที่อยู่ในอากาศแห้ง 1 กิโลกรัมกับเวลา ที่อัตราการไหลของอากาศเป็น 0.04 m ³ /s ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ	39
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของผลต่างมวลของน้ำที่อยู่ในอากาศแห้ง 1 กิโลกรัมกับเวลา ที่อัตราการไหลของอากาศเป็น 0.06 m ³ /s ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ	40
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของผลต่างมวลของน้ำที่อยู่ในอากาศแห้ง 1 กิโลกรัมกับเวลา ที่อัตราการไหลของอากาศเป็น 0.08 m ³ /s ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ	40
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของการทดลองและที่ทำนายได้จากแบบ จำลอง Page ของเครื่องที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศ เป็น 0.04 m ³ /s	43
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของการทดลองและที่ทำนายได้จากแบบ จำลอง Page ของเครื่องที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศ เป็น 0.06 m ³ /s	43
รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของการทดลองและที่ทำนายได้จากแบบ จำลอง Page ของเครื่องที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศ เป็น 0.08 m ³ /s	44
รูปที่ 4.18 เส้นโค้งการอบแห้งของเครื่องด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อ..... ดูความชื้นระหว่างข้อมูลจากการทดลองและข้อมูลจากการทำนายจากแบบจำลอง Page ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศเป็น 0.04 m ³ /s	44
รูปที่ 4.19 เส้นโค้งการอบแห้งของเครื่องด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อ..... ดูความชื้นระหว่างข้อมูลจากการทดลองและข้อมูลจากการทำนายจากแบบจำลอง Page ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศเป็น 0.06 m ³ /s	45
รูปที่ 4.20 เส้นโค้งการอบแห้งของเครื่องด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อ..... ดูความชื้นระหว่างข้อมูลจากการทดลองและข้อมูลจากการทำนายจากแบบจำลอง Page ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศเป็น 0.08 m ³ /s	45
รูปที่ 4.21 เส้นโค้งการอบแห้งของเครื่องด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับและไม่ร่วมกับ วงล้อดูความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศ 0.08 m ³ /s เมื่อมีอุณหภูมิอบแห้งเป็น 80 °C	47
รูปที่ 4.22 เส้นโค้งการอบแห้งของเครื่องด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับและไม่ร่วมกับ วงล้อดูความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศ 0.08 m ³ /s เมื่อมีอุณหภูมิอบแห้งเป็น 100 °C	48

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

- รูปที่ 4.23 เส้นโค้งการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับและไม่ร่วมกับ48
วงล้อมดูความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ เมื่อมีอุณหภูมิอบแห้งเป็น $120 \text{ }^\circ\text{C}$
- รูปที่ 4.24 เส้นโค้งอัตราการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อม49
ดูความชื้นและไม่ร่วมกับวงล้อมดูความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศเป็น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$
เมื่อมีอุณหภูมิอบแห้งเป็น $80 \text{ }^\circ\text{C}$
- รูปที่ 4.25 เส้นโค้งอัตราการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อม49
ดูความชื้นและไม่ร่วมกับวงล้อมดูความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศเป็น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$
เมื่อมีอุณหภูมิอบแห้งเป็น $100 \text{ }^\circ\text{C}$
- รูปที่ 4.26 เส้นโค้งอัตราการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อม50
ดูความชื้นและไม่ร่วมกับวงล้อมดูความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศเป็น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$
เมื่อมีอุณหภูมิอบแห้งเป็น $120 \text{ }^\circ\text{C}$
- รูปที่ 4.27 พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อน51
ร่วมกับวงล้อมดูความชื้นที่อุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศต่างกัน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

หลักการพื้นฐานการอบแห้งคือกระบวนการที่ดึงน้ำออกจากวัสดุ(ลดความชื้น)ที่ต้องการ โดยปกติแล้วการที่น้ำจะระเหยออกจากวัสดุจำเป็นต้องใช้อากาศที่มีอุณหภูมิสูงเพื่อทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะ(ของเหลว - ไอ)แต่อากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ(อากาศแห้ง) ก็สามารถระเหยน้ำออกจากวัสดุได้จากการพัดผ่านเช่นกัน จะเห็นได้ว่าอากาศเป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้งของการอบแห้งแบบลมร้อน ดังนั้นการปรับปรุงสมบัติของอากาศ เช่น การเพิ่มความเร็วลม การเพิ่มอุณหภูมิ และการลดความชื้นของอากาศก่อนที่จะเข้าห้องอบจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการระเหยน้ำออกจากวัสดุภายในห้องอบแห้งให้ดีขึ้นได้

ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับการลดความชื้นในอากาศที่สนใจในการศึกษานี้ เป็นระบบที่เพิ่มวงล้อดูดความชื้น โดยใช้ซิลิกาเจลดูดความชื้นของอากาศก่อนที่จะนำไปใช้การระเหยน้ำออกจากวัสดุ จากงานวิจัยของ ปลิดา สุวรรณวิศาล (2559) อากาศที่ออกจากวงล้อดูดความชื้นจะมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าสภาวะอากาศปกติ โดยสามารถลดความชื้นสัมพัทธ์ได้ถึง 28-30% ซึ่งน้อยกว่าอากาศที่ไม่ผ่านวงล้อดูดความชื้นถึง 2 เท่า(อากาศปกติมีความชื้นสัมพัทธ์ 58-63%) ซึ่งการที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศน้อยลงทำให้เอื้อต่อการระเหยน้ำออกจากวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นและรักษาความสม่ำเสมอของความชื้นในวัสดุและลดอุณหภูมิที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการรักษาและเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเหมาะสำหรับวัสดุที่ไวต่อความร้อน ดังที่ชาลีตา บรมพิชัยชาติกุล (2555) ได้กล่าวว่า คุณภาพอาหารหลังการอบเป็นปัจจัยสำคัญที่เราต้องพิจารณา โดยเฉพาะวัสดุที่เกิดการเสื่อมเสียคุณภาพได้ง่ายด้วยความร้อน เช่น ผัก ผลไม้

ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นนั้นมีสิ่งที่จะต้องพิจารณาก็คือ 1. ความเร็วลม 2. อุณหภูมิของอากาศ และ 3. ความชื้นของอากาศ การใช้วงล้อดูดความชื้นโดยใช้ซิลิกาเจลเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพอัตราการอบแห้งโดยการใช้พลังงานต่อมวลน้ำที่ระเหยน้อยลงเมื่อเทียบกับการให้ความร้อนกับอากาศเพียงอย่างเดียวโดยสักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา (2555) กล่าวว่า ต้องใช้พลังงานถึงประมาณ 4000-6000 กิโลจูลเพื่อทำให้น้ำ 1 กิโลกรัมระเหยออก การลดความชื้นของอากาศยังส่งผลกระทบเชิงลบต่อวัสดุที่น้อยที่สุด ทำให้สามารถคงคุณภาพของวัสดุได้มากที่สุดด้วย

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการประยุกต์ใช้ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น สำหรับการอบแห้งวัสดุทางการเกษตร ได้แก่ แครอท ก่อนการทดลองการอบแห้งมีการศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบของวงล้อและอัตราการไหลของอากาศต่อการคืนสภาพวงล้อเพื่อให้ได้สภาวะการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานที่เหมาะสมของวงล้อย ในการอบแห้งแครอทได้ทำการศึกษาลักษณะการอบแห้งและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง อันเนื่องมาจากอิทธิพลของอุณหภูมิในห้องอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศ รวมทั้งทำการสร้างแบบจำลองการอบแห้งและวิเคราะห์จลนศาสตร์การอบแห้งแครอทด้วย นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบลักษณะการอบแห้งแครอทระหว่างระบบอบแห้งที่มีวงล้อยูดความชื้น และไม่มีวงล้อยูดความชื้น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของวงล้อยูดความชื้นในส่วนคั้นสภาพวงล้อยูดความชื้น ได้แก่ ความเร็วรอบของวงล้อย และอัตราการไหลของอากาศ

1.2.2 เพื่อศึกษาลักษณะการอบแห้งและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อยูดความชื้นเนื่องจากอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิในห้องอบแห้ง

1.2.3 เพื่อสร้างแบบจำลองการอบแห้งและวิเคราะห์จลนศาสตร์ในการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อยูดความชื้น

1.2.4 เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการอบแห้งแครอทของระบบอบแห้งที่มีการลดความชื้นในอากาศกับระบบอบแห้งที่ไม่มีการลดความชื้นในอากาศ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อยูดความชื้นที่พัฒนาขึ้นในภาควิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นเครื่องอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้งเท่ากับ $0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$

1.3.2 วัสดุที่ใช้ในการทำแห้งคือ แครอท ที่หั่นในลักษณะรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm และมีความสูง 1 cm

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ระบบอบแห้งรูปแบบใหม่ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาเพื่อใช้ในระบบอุตสาหกรรม

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาการดำเนินงาน

ขั้นตอนดำเนินงาน	ปี/เดือน						
	พ.ศ. 2559					พ.ศ. 2560	
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1. ศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>					
2. ศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับสภาวะการทำงาน (อัตราการไหลของอากาศและความเร็วรอบของวงล้อ) ในส่วนกาย ความชื้นของวงล้อดูดความชื้น		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
3. ศึกษาลักษณะการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>			
4. สร้างแบบจำลองการอบแห้งในการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น				<input type="radio"/>			
5. เปรียบเทียบลักษณะการอบแห้งของแครอทระหว่างระบบอบแห้งแบบลมร้อนที่ร่วมกับและไม่ร่วมกับวงล้อดูดความชื้น					<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
6. การวิเคราะห์พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น						<input type="radio"/>	
7. การวิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนรายงาน						<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความชื้นในอากาศและวิธีการวัดความชื้นในอากาศ

2.1.1 คำจำกัดความของความชื้นในอากาศ

ความชื้นในอากาศ คือ ปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศบริเวณใดบริเวณหนึ่ง ซึ่งมีสัดส่วนที่แตกต่างกันไปในแต่ละท้องถิ่น ถ้าอากาศมีความชื้นสูง น้ำจะระเหยได้น้อย แต่ถ้าอากาศมีความชื้นต่ำ น้ำจะเกิดการระเหยได้มาก ขณะที่น้ำเกิดการระเหยจะทำให้อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมลดต่ำลง เนื่องจากที่ระเหยจะดูดความร้อนจากสิ่งต่าง ๆ ไปใช้ในการระเหย

อากาศอิ่มตัว คือ อากาศที่มีไอน้ำอยู่เต็มที่และไม่สามารถรับเพิ่มได้อีกแล้ว ณ อุณหภูมิหนึ่ง ปัจจัยที่มีผลต่อการระเหย

1. อุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การระเหยจะเกิดเร็วขึ้น
2. พื้นที่ผิว ถ้าพื้นที่ผิวน้ำมากขึ้นการระเหยจะเกิดได้ดี
3. ความชื้นในอากาศ ถ้าในอากาศมีความชื้นสูง การระเหยจะเกิดได้ยาก
4. ชนิดของสาร ของเหลวที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูงจะมีค่าความร้อนแฝงสูง การกลายเป็นไอของน้ำทำได้ยาก ความดันไอต่ำ และจุดเดือดสูง

ปริมาณไอน้ำที่อากาศรับไว้จะน้อยหรือมากขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศ ถ้าอุณหภูมิต่ำอากาศจะรับไอน้ำได้น้อย ถ้าอุณหภูมิสูงอากาศจะรับไอน้ำได้มาก ถ้าอากาศอยู่ในสภาพที่ไม่สามารถรับไอน้ำได้อีก แสดงว่าอากาศขณะนั้นอิ่มตัวด้วยไอน้ำ เรียกสภาวะนี้ว่า อากาศอิ่มตัวไอน้ำหรืออากาศอิ่มตัว ซึ่งเป็นสภาวะที่อากาศมีความชื้นมากที่สุด (<https://www.gotoknow.org>, 2 กันยายน 2559)

2.1.2 วิธีการวัดความชื้นในอากาศ

เราสามารถบอกค่าความชื้นของอากาศได้ 3 รูปแบบ คือ

2.1.2.1 ความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity) ความชื้นสัมบูรณ์จะเปลี่ยนแปลงตามความดันอากาศที่เปลี่ยนแปลง สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างมวลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศต่อ 1 หน่วยปริมาตรของอากาศ มีหน่วยเป็น กรัม/ลูกบาศก์เมตร

2.1.2.2 ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity, RH) นิยมบอกค่าเป็นร้อยละ โดยที่ 100%RH หมายถึง อากาศอิ่มตัวด้วยไอน้ำ อากาศไม่สามารถรับไอน้ำได้อีก หากมีไอน้ำเพิ่มขึ้นอีกจะเกิดเป็นหมอก หรือไอน้ำขนาดเล็กที่อยู่ในสถานะของเหลวจะกระจายในอากาศ สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศขณะนั้นต่อปริมาณไอน้ำสูงสุดที่อากาศจะรับได้หรือปริมาณไอน้ำอิ่มตัว ณ อุณหภูมิเดียวกัน หรือหาค่าได้จากอัตราส่วนระหว่างความดันไอน้ำที่ในอากาศต่อความดันไอน้ำอิ่มตัว

2.1.2.3 ความชื้นจำเพาะ (specific humidity) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลของไอน้ำที่มีอากาศต่อมวลของอากาศแห้งหรือมวลอากาศเพียงอย่างเดียว มีหน่วยคือ กรัมไอน้ำ/กรัมอากาศแห้ง

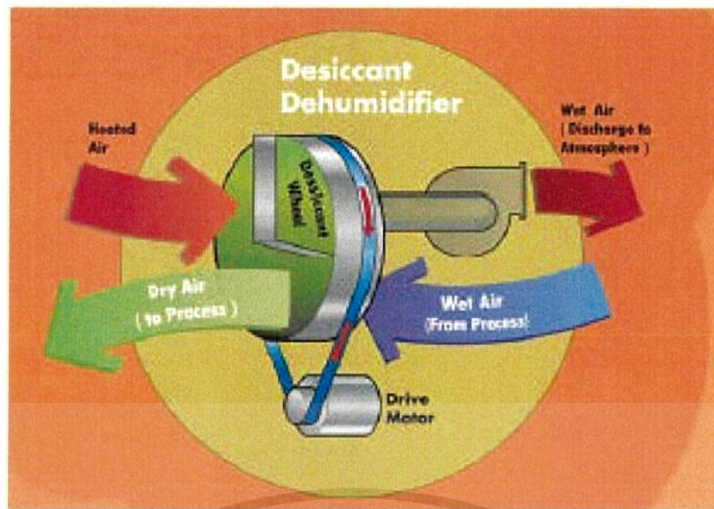
ความชื้นในอากาศเป็นบทบาทสำคัญในกระบวนการระเหยของน้ำ หากความชื้นในอากาศสูง ความชื้นจากวัสดุในบริเวณนั้นน้ำจะระเหยได้ช้าเมื่อเปรียบเทียบกับการวางไว้ในที่มีความชื้นอากาศต่ำกว่า กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับความชื้นในอากาศสามารถใช้แผนภูมิไซโครเมตริกประกอบการพิจารณาได้ (www.foodnetworksolution.com, 3 กันยายน 2559)

2.2 ระบบลดความชื้นในอากาศแบบวงล้อดูดความชื้น

ระบบดูดความชื้นที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีอยู่ 2 ระบบ คือ ระบบดูดความชื้นโดยสารดูดความชื้น (Desiccant Dehumidification) และระบบทำความเย็นแบบกล (Mechanical Refrigeration) ซึ่งระบบดูดความชื้นโดยสารดูดความชื้นจะให้ประสิทธิภาพและประหยัดกว่าการลดความชื้นด้วยระบบการทำความเย็นแบบกล

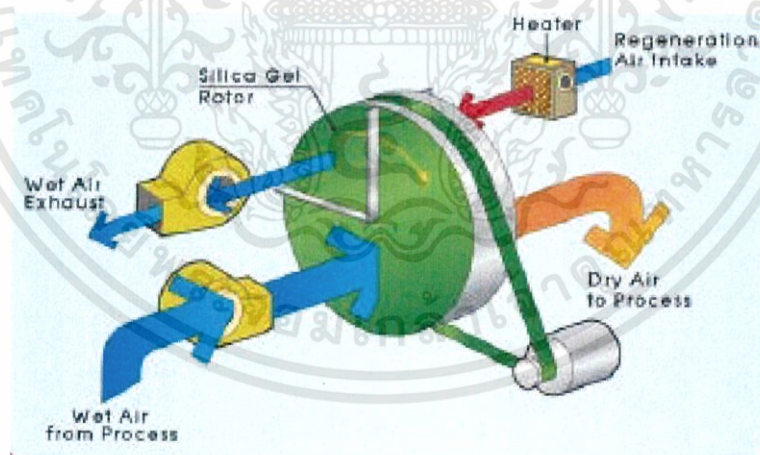
การดูดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้น จะมีลักษณะการทำงานโดยการปล่อยความชื้นจากกระบวนการผลิต (Process Air) ให้ไหลผ่านวงล้อที่เคลือบสารดูดความชื้น หลังจากนั้นวงล้อจะถูกหมุนไปถ่ายเทความชื้นที่เก็บไว้ให้กับอากาศที่ร้อนและความชื้นต่ำ (Heated Air) เพื่อระบายความชื้นออกจากเครื่องดูดความชื้น สารดูดความชื้นที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ ซิลิกาเจล (Silica Gel) Activated Alumina, Natural and Synthetic Zeolite, Lithium Chloride, Titanium Silicate และ Synthetic Polymers

ส่วนประกอบของเครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้น มีส่วนประกอบหลักคือ ชุดวงล้อหมุน ซึ่งมีส่วนประกอบของสารดูดความชื้น เช่น ซิลิกาเจล มอเตอร์จะเป็นตัวขับเคลื่อนชุดวงล้อเพื่อไล่ความชื้นออกจากอากาศที่ไหลผ่านกระบวนการผลิต



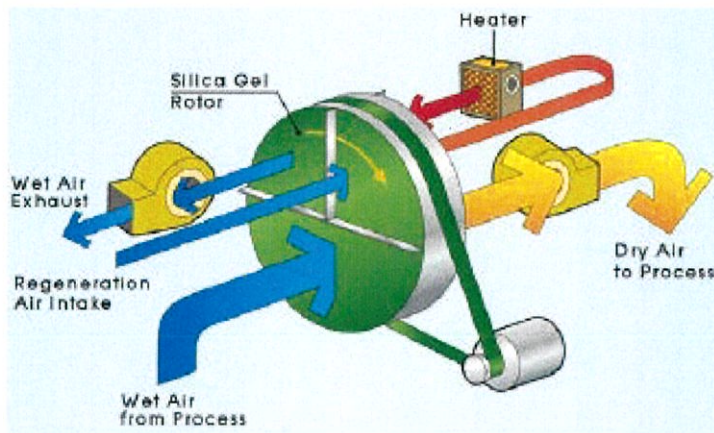
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้น
(กระทรวงพลังงาน, 22 สิงหาคม 2559)

ในอุตสาหกรรมเครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นจะมี 2 แบบ ได้แก่ เครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นแบบหมุนใช้ฮีตเตอร์ในการให้ความร้อนแก่อากาศที่จะใช้ในการฟื้นฟูสภาพการดูดความชื้น เหมาะกับการใช้งานกับพื้นที่เก็บสินค้าและห้องสะอาดขนาดเล็กและเครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นแบบหมุนที่มีระบบนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ (กระทรวงพลังงาน, 22 สิงหาคม 2559)



รูปที่ 2.2 เครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นแบบหมุน
(กระทรวงพลังงาน, 29 สิงหาคม 2559)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 เครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นแบบหมุนที่มีระบบนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่
(กระทรวงพลังงาน, 29 สิงหาคม 2559)

2.3 ซิลิกาเจลและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดและคายความชื้นของซิลิกาเจล

2.3.1 ลักษณะและสมบัติของซิลิกาเจล

ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) หรือ ซิลิกาเจล (Silica gel) มีลักษณะเป็นผงสีขาวหรือเป็นเม็ด เป็นวัสดุที่มีความพรุนสูงสังเคราะห์มาจากโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซิลิกาเจลมีลักษณะเป็นของแข็ง ไม่ใช่เจลแบบเจลาตินหรือวุ้นตามชื่อเรียก ซิลิกาเจลที่นำมาเป็นสารดูดความชื้นมีขนาดของรูพรุน 2.4 นาโนเมตร และมีความสามารถในการดูดความชื้นสูง ในบางครั้งจะมีการเติมสารเคมีที่มีสีลงไป เช่น โคบอลต์คลอไรด์ (CoCl_2) เพื่อใช้บ่งบอกว่าซิลิกาเจลดูดความชื้นจนอิ่มตัวแล้วหรือไม่ โดยสามารถสังเกตจากการเปลี่ยนสีของซิลิกาเจลได้ เมื่อซิลิกาเจลดูดความชื้นจนอิ่มตัวแล้วจะเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินไปเป็นสีชมพู เราสามารถไล่ความชื้นของซิลิกาเจลออกได้โดยการใช้ความร้อน ใช้ตู้อบหรือนำไปผึ่งแดด ซิลิกาเจลก็จะเปลี่ยนจากสีชมพูไปเป็นสีน้ำเงิน หลังจากนั้นก็สามารถนำกลับมาดูดความชื้นใหม่ได้อีก (<http://glasswarechemical.com>, 14 กุมภาพันธ์ 2557)

2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดความชื้นของซิลิกาเจล

2.3.2.1 ลักษณะของตัวดูดซับ คุณสมบัติของตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับที่เพิ่มขึ้น ถ้าขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับก็จะต่ำลง

2.3.2.2 ความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับมีค่าลดลงเนื่องจากในการถูกดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลายและไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

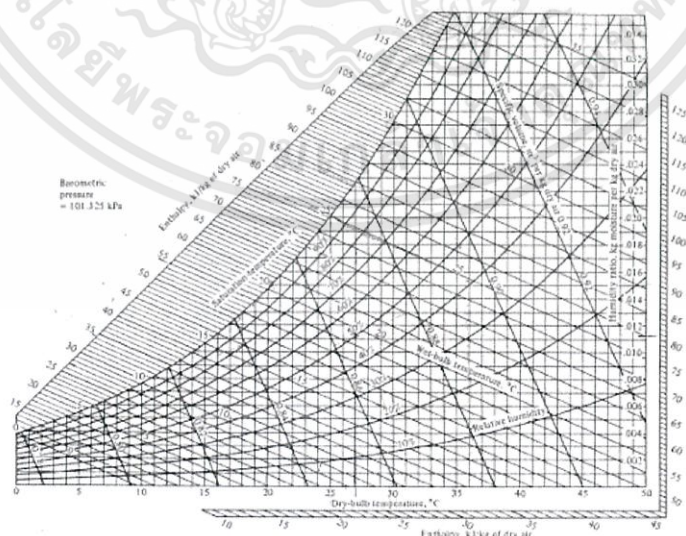
2.3.2.3 อุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากการดูดซับส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

2.4 แผนภูมิไซโครเมตริก

2.4.1 ลักษณะทั่วไปของแผนภูมิไซโครเมตริก

แผนภูมิไซโครเมตริก เป็นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์สมบัติของผสมระหว่างอากาศและไอน้ำ เนื่องจากอากาศในบรรยากาศจะมีไอน้ำปนอยู่ ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากต่อสภาวะการแปรรูปอาหาร และการเก็บรักษาอาหาร เช่น การทำแห้ง การควบแน่น อุปกรณ์เพิ่มความชื้น เป็นต้น นิยมใช้ในการคำนวณด้านการปรับอากาศเพราะสะดวกเนื่องจากมีสมบัติทางอากาศที่สำคัญต่าง ๆ รวมอยู่ในแผนภูมิ

โดยทั่วไปแผนภูมิไซโครเมตริกใช้ได้สำหรับความดันคงที่ค่าหนึ่งเท่านั้น ความดันของแผนภูมิไซโครเมตริกที่นิยมใช้กันคือความดันที่ระดับน้ำทะเล ที่ความดันนี้จะมีแผนภูมิอยู่ด้วยกัน 3 ระดับ อุณหภูมิ คือ แผนภูมิสำหรับอุณหภูมิต่ำ -40 - 50 องศาฟาเรนไฮต์ แผนภูมิสำหรับอุณหภูมิช่วง 32 - 120 องศาฟาเรนไฮต์ และแผนภูมิสำหรับช่วง 60 - 250 องศาฟาเรนไฮต์ นอกจากนี้ยังมีแผนภูมิที่ความสูงจากระดับน้ำทะเล 5,000 ฟุตอีกด้วย แต่มีเฉพาะช่วงอุณหภูมิปกติเท่านั้นในกรณีที่ต้องการทราบสมบัติของอากาศที่ความดันอื่น ๆ ซึ่งไม่มีในแผนภูมิไซโครเมตริก อาจคำนวณจากสมการสมบัติของอากาศโดยตรง หรืออ่านค่าจากแผนภูมิไซโครเมตริกที่มี แล้วปรับแก้ค่าที่อ่านได้ด้วยตัวปรับค่าที่เหมาะสม ซึ่งปกติถ้าความดันแตกต่างกันไม่เกิน 1 นิ้วปรอท(in Hg.) ความผิดพลาดจะมีค่าน้อยมาก (www.foodnetworksolution.com, 3 กันยายน 2559)



รูปที่ 2.4 แผนภูมิไซโครเมตริก (Psychrometric Chart)

(www.thailandindustry.com, 22 สิงหาคม 2559)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ค่าสมบัติของอากาศในแผนภูมิไซโครเมตริก

ไซโครเมตริกเป็นการศึกษาคุณสมบัติของผสมระหว่างอากาศและไอน้ำ เนื่องจากในบรรยากาศอากาศจะไม่แห้งสนิทแต่จะมีไอน้ำปนอยู่ ดังนั้นไซโครเมตริกจึงมีความสำคัญอย่างมาก ส่วนประกอบของอากาศในไซโครเมตริกประกอบไปด้วย

2.4.2.1 ความชื้น (Humidity) เป็นชื่อเรียกของปริมาณไอน้ำในอากาศ อากาศชื้นหรืออากาศเปียกเราจะใช้เรียกกับอากาศที่มีไอน้ำปนอยู่มาก ส่วนอากาศแห้งคืออากาศที่เราเอาความชื้นออกหมดจนไม่มีไอน้ำเจือปนอยู่เลย

2.4.2.1.1 อัตราส่วนความชื้น (Humidity Ratio, " ω ") หรือความชื้นจำเพาะ (Specific Humidity) คืออัตราส่วนระหว่างมวลของไอน้ำในอากาศ (m_v) กับมวลของอากาศแห้ง (m_a) ที่ปริมาตรอากาศที่พิจารณา

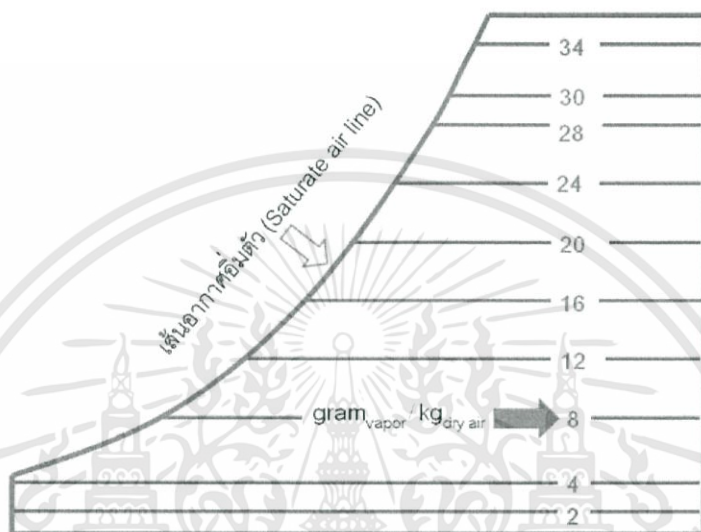
$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{\frac{P_v V}{R_v T}}{\frac{P_a V}{R_a T}} = \frac{P_v}{P_a} = \frac{0.622 P_v}{P_a} \quad (2.1)$$

$$\omega = \frac{(0.622)(P_w)}{P_{atm} - P_v} \quad (2.2)$$

เมื่อ	ω	คือ	อัตราส่วนความชื้น ($\frac{\text{kg}_{\text{vapor}}}{\text{kg}_{\text{dry air}}}$)
	m_v	คือ	จำนวนมวลของไอน้ำในอากาศ ($\frac{\text{kg}_{\text{vapor}}}{\text{kg}_{\text{dry air}}}$)
	m_a	คือ	จำนวนของอากาศแห้ง ($\text{kg}_{\text{dry air}}$)
	T	คือ	อุณหภูมิในสภาวะที่พิจารณา (K)
	P_v	คือ	แรงดันย่อยของไอน้ำ ($\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$)
	P_a	คือ	แรงดันย่อยของอากาศแห้ง ($\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$)
	R_v	คือ	ค่าคงที่ของไอน้ำ ($0.4615 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$)
	R_a	คือ	ค่าคงที่ของอากาศแห้ง ($0.2870 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$)
	V	คือ	ปริมาตรอากาศ (m^3)
	P_{atm}	คือ	ความดันบรรยากาศ ($\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$) หรือ ($P_a + P_v$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นอัตราส่วนความชื้น (Humidity Ratio Line) ที่แสดงในแผนภูมิไซโครเมตริกเป็นเส้นที่ลากจากเส้นไอน้ำอิ่มตัว (Saturated Vapor) จากด้านซ้ายมือไปยังด้านขวามือ ค่าอัตราส่วนความชื้นด้านล่างน้อยเนื่องจากมีอุณหภูมิต่ำ ส่วนค่าอัตราส่วนความชื้นสูงจะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งอัตราส่วนความชื้นที่แสดงในแผนภูมิไซโครเมตริกอัตราส่วนมวลของไอน้ำในอากาศมีหน่วยเป็นกรัม และมวลอากาศแห้งมีหน่วยเป็นกิโลกรัม



รูปที่ 2.5 แสดงเส้นอัตราส่วนความชื้น (Humidity Ratio Line)

(www.thailandindustry.com, 22 สิงหาคม 2559)

2.4.1.1.2 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity or RH, ϕ) เป็นหน่วยวัดที่ใช้วัดระดับความชื้นในอากาศ ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของปริมาณไอน้ำที่มีในอากาศ ณ ตอนนั้น ต่อปริมาณไอน้ำที่อากาศจะรับได้ อุณหภูมิในอากาศยิ่งสูงมากเท่าไรจำนวนไอน้ำที่สามารถรองรับได้ก็ยิ่งมากเท่านั้น นอกจากนี้ยังสามารถหาความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศจากสมการ

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} \times 100 = \frac{\frac{P_v V}{R_v T}}{\frac{P_g V}{R_g T}} \times 100 = \frac{P_v}{P_g} \times 100 \quad (2.3)$$

เมื่อ ϕ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (%)

m_v คือ มวลของไอน้ำในอากาศ ณ จุดที่ทำการวัด ($\frac{\text{kg}_{\text{vapor}}}{\text{kg}_{\text{dry air}}}$)

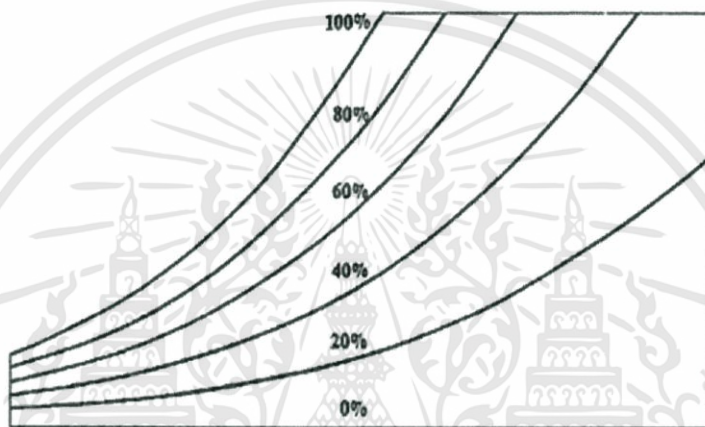
m_g คือ มวลของไอน้ำที่อากาศสามารถรับได้สูงสุดของอุณหภูมิที่ต้องการวัด ($\frac{\text{kg}_{\text{vapor}}}{\text{kg}_{\text{dry air}}}$)

P_v คือ แรงดันย่อยของไอน้ำในอากาศ ($\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_v	คือ	ค่าคงที่ของไอน้ำในอากาศ ($0.615 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$)
P_g	คือ	แรงดันย่อยของอากาศ ($\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$)
T	คือ	อุณหภูมิในสภาวะที่พิจารณา (K)

เส้นความชื้นสัมพัทธ์ 100% ในแผนภูมิไซโครเมตริกคือเส้นที่อยู่ด้านนอกสุดซึ่งเป็นเส้นเดียวกับเส้นอากาศอิ่มตัว (Saturated Air Line) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ก็จะลดต่ำลงมาเรื่อย ๆ อากาศที่มีปริมาณความชื้นอยู่เท่า ๆ กัน ค่าความชื้นสัมพัทธ์จะสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง



รูปที่ 2.6 แสดงเส้นความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity Line)

(www.thailandindustry.com, 22 สิงหาคม 2559)

2.4.2.2 ปริมาตรจำเพาะของอากาศ (Specific Volume, V)

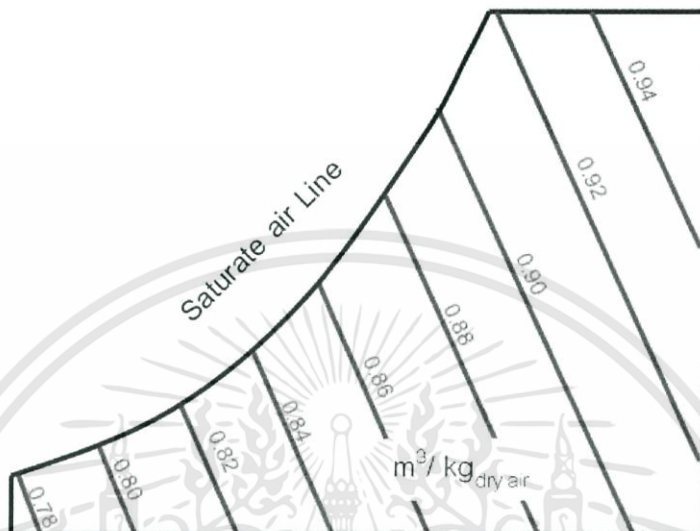
ปริมาตรจำเพาะ คืออัตราส่วนระหว่างปริมาตร (Volume) ต่อมวล (Mass) ของอากาศ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม (m^3/kg) ในระบบ SI ในสภาวะความดันคงที่ ปริมาตรจำเพาะของอากาศจะน้อยถ้าอุณหภูมิต่ำ และในขณะเดียวกันถ้าอุณหภูมิสูง ปริมาตรจำเพาะของอากาศก็จะมากขึ้นด้วย ในแผนภูมิไซโครเมตริกเส้นที่แสดงปริมาตรจำเพาะของอากาศจะเป็นเส้นที่ทะแยงจากซ้ายไปขวา โดยเส้นที่อยู่ข้างบนสุดจะเป็นเส้นที่มีค่าปริมาตรจำเพาะมากและลดลงเรื่อย ๆ ไปสู่ด้านล่าง ปริมาตรจำเพาะของอากาศสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$V = \frac{R_a T}{P_a} = \frac{R_a T}{(P_{\text{atm}} - P_v)} \quad (2.4)$$

โดยที่	R_a	คือ	ค่าคงที่ของอากาศแห้ง ($0.2870 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$)
	T	คือ	อุณหภูมิในสภาวะที่พิจารณา (K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P_{atm}	คือ	ความดันบรรยากาศ ($\frac{kN}{m^2}$) หรือ (P_a+P_v)
P_v	คือ	แรงดันย่อยของไอน้ำ ($\frac{kN}{m^2}$)
P_a	คือ	แรงดันย่อยของอากาศแห้ง ($\frac{kN}{m^2}$)

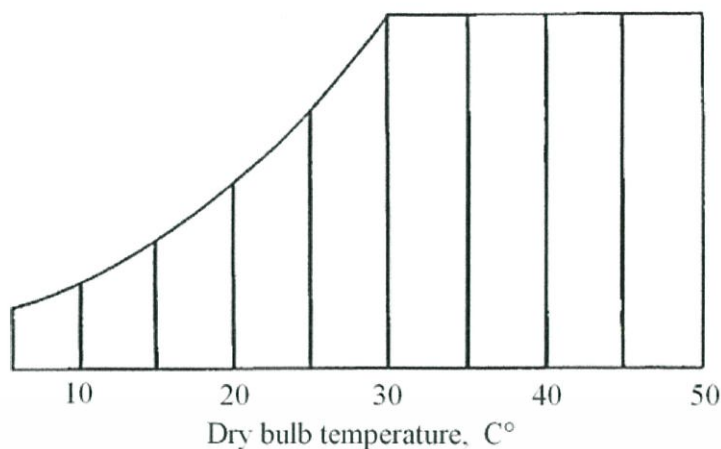


รูปที่ 2.7 แสดงเส้นปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume)

(www.thailandindustry.com, 22 สิงหาคม 2559)

2.4.2.3 อุณหภูมิ (Temperature) คือ ความร้อนของสิ่งต่างๆรอบตัวเราที่เราสัมผัสได้ เครื่องมือที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิเรียกว่า เทอร์โมมิเตอร์ เราสามารถแบ่งอุณหภูมิของอากาศออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

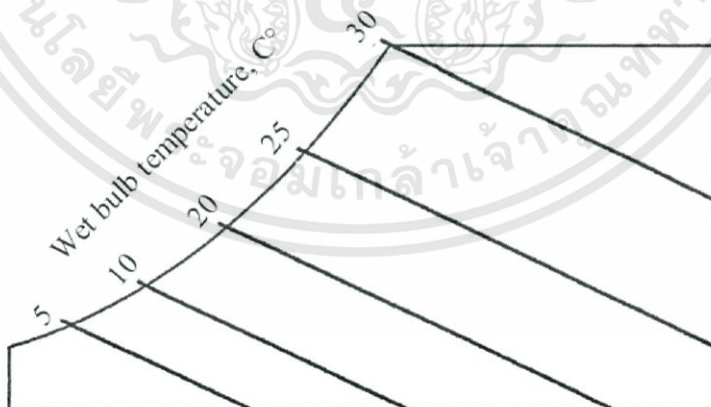
2.4.2.3.1 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry Bulb Temperature, Tdb) คือ อุณหภูมิที่อ่านจากเทอร์โมมิเตอร์กระเปาะแห้ง โดยในการวัดจะต้องอยู่ในที่ที่ถ่ายเทสะดวก ในแผนภูมิไซโครเมตริกเส้นอุณหภูมิกระเปาะแห้งจะเป็นเส้นตามแนวตั้งโดยจะเรียงตั้งแต่น้อยไปหามากจากซ้ายมือไปขวามือ



รูปที่ 2.8 เส้นอุณหภูมิกระเปาะแห้งบนแผนภูมิไซโครเมตริก
(www.thailandindustry.com, 22 สิงหาคม 2559)

2.4.2.3.2 อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet Bulb Temperature, T_{wb})

คือ อุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมมิเตอร์เช่นเดียวกับอุณหภูมิกระเปาะแห้ง แต่อุณหภูมิกระเปาะเปียกนั้นปลายเทอร์โมมิเตอร์จะต้องเอาผ้าหรือสำลีชุบน้ำพอมุ่ม ๆ มาพันปลายกระเปาะไว้ และการวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียกจะได้ค่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิของกระเปาะแห้ง อุณหภูมิกระเปาะเปียกจะเป็นตัววัดความชื้นที่มีอยู่ในอากาศในจุดที่เราวัด ความแตกต่างของอุณหภูมิกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งจะต่างกันมากเมื่อความชื้นในอากาศน้อย ในแผนภูมิไซโคร-เมตริก เส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียกจะเอียงทแยงจากซ้ายไปขวาและค่าจะเพิ่มขึ้นจากน้อยไปมากจากซ้ายไปขวาด้านขวา



รูปที่ 2.9 เส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียกบนแผนภูมิไซโครเมตริก
(www.thailandindustry.com, 22 สิงหาคม 2559)

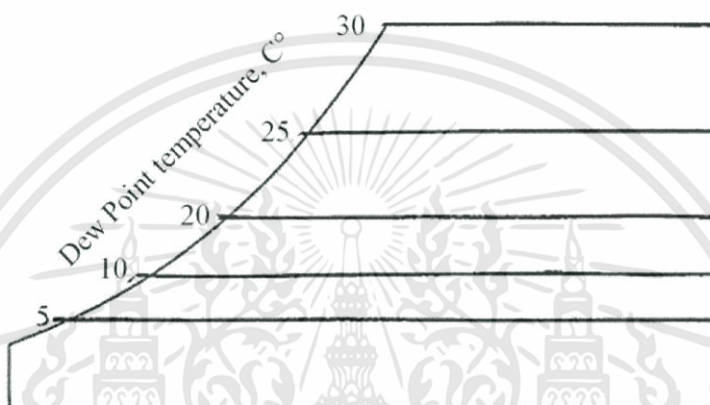
2.4.2.3.3 อุณหภูมิหยดน้ำค้าง (Dew Point Temperature) คืออุณหภูมิ
อิมตัวของไอน้ำเมื่อเทียบกับความดันของไอน้ำ สามารถหาได้จากตารางหรือสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{dp} = T_{sat}@P_v \quad (2.5)$$

โดยที่ P_v คือ แรงดันย่อยของไอน้ำที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง ณ อุณหภูมิที่จุดอ้างอิง ($\frac{kN}{m^2}$)

ในแผนภูมิไซโครเมตริกเส้นที่แสดงถึงอุณหภูมิจุดน้ำค้าง คือเส้นที่ลากขนานไปกับเส้นปริมาตรจำเพาะไปทางขวามือจนไปชนกับเส้นอากาศอิ่มตัว



รูปที่ 2.10 แสดงการหาจุดน้ำค้างที่สถานะที่กำหนด

(www.thailandindustry.com, 22 สิงหาคม 2559)

2.4.2.4 เส้นอากาศอิ่มตัว (Saturation Line, Air saturation line) เป็นเส้นที่อยู่ในแนวเดียวกับเส้นความชื้นสัมพัทธ์ ในแผนภูมิไซโครเมตริกเส้นอากาศอิ่มตัวคือเส้นเดียวกับความชื้นสัมพัทธ์ 100%

2.4.2.5 เอนทาลปี (Enthalpy) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงพลังงานของของไหลซึ่งรวมถึงอากาศด้วย โดยเอนทาลปีจำเพาะจะใช้เรียกเอนทาลปีต่อหน่วยมวล มีหน่วยเป็นพลังงานต่อมวล โดยที่เอนทาลปีมีค่าแปรผันกับอุณหภูมิ เราสามารถหาค่าของเอนทาลปีอากาศแห้งและอากาศชื้นจากสมการ

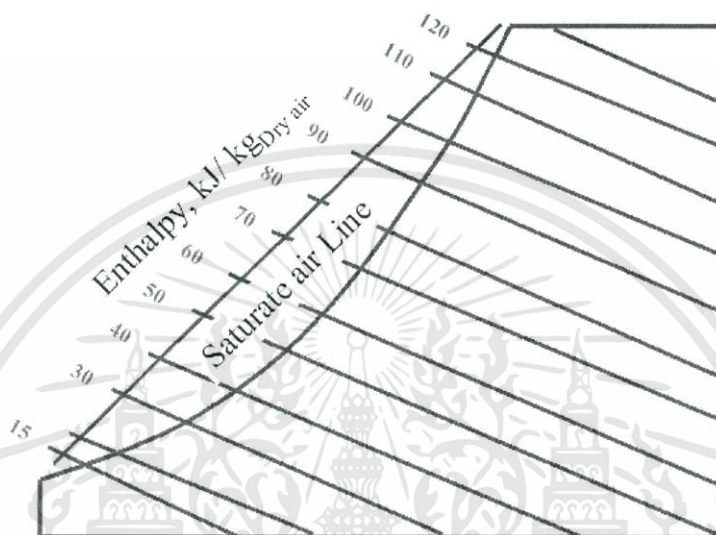
$$h = C_p T + \omega h_g \quad (2.6)$$

โดยที่ h คือ ค่าเอนทาลปี ($\frac{kJ}{kg}$)
 C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง ($1 \frac{kJ}{kg \cdot K}$)
 T คือ อุณหภูมิในสถานะที่พิจารณา (K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ω คือ อัตราส่วนความชื้น (ไม่มีหน่วย)
- h_g คือค่า เอนทาลปีของไอน้ำอิ่มตัว ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$)

ในแผนภูมิไซโครเมตริกเส้นเอนทาลปีจะอยู่ด้านหน้าสุดของแผนภูมิ โดยที่ค่าเอนทาลปีจะเพิ่มจากน้อยไปมากจากล่างขึ้นบน (อาจหาญ ณ นรงค์, 2013)



รูปที่ 2.11 เส้นแสดงค่าเอนทาลปี

(www.thailandindustry.com, 22 สิงหาคม 2559)

2.5 การใช้ระบบดูดความชื้นร่วมในกระบวนการอบแห้ง

ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นเป็นระบบการอบแห้งวัสดุในสถานะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งต่ำกว่าสภาวะปกติ ซึ่งเป็นผลดีต่อกระบวนการอบแห้ง การใช้สารดูดความชื้นในการอบแห้งมีประโยชน์ในการเพิ่มอัตราการอบแห้ง (Drying rate) อันเกิดขึ้นมาจากอากาศร้อนและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ การอบแห้งจะเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอและเป็นการเพิ่มคุณภาพในผลผลิตโดยเฉพาะอย่างยิ่งในผลผลิตที่ไวต่อความร้อน การทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดควรเลือกชนิดของสารดูดความชื้นให้เหมาะสมกับการออกแบบระบบสารดูดความชื้น ในงานวิจัยต่าง ๆ ได้มีการพูดถึงความคุ้มค่าและอุณหภูมิสำหรับไล่ความชื้นออกจากสารดูดความชื้น แต่การที่จะนำสารดูดความชื้นกลับมาใช้ใหม่นั้นจะต้องใช้พลังงานเป็นอย่างมาก การใช้ความร้อนเพื่อจะนำสารดูดความชื้นกลับมาใช้ใหม่นั้นยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการกักเก็บพลังงาน อย่างไรก็ตาม การใช้พลังงานน้อยหรือใช้พลังงานที่มีอยู่ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์หรือการนำความร้อนจากกระบวนการทางอุตสาหกรรมนำมาใช้ใหม่ หากนำมาใช้กับการไล่ความชื้นออกจากสารดูดความชื้นได้ จะส่งผลให้ประหยัดพลังงานและลดค่าใช้จ่ายเป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 ทฤษฎีการทำแห้ง

2.6.1 ปริมาณความชื้น

ความชื้นฐานแห้ง

$$\%MC_{db} = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (2.7)$$

ความชื้นฐานเปียก

$$\%MC_{wb} = \frac{M_w}{M_w + M_s} \times 100 \quad (2.8)$$

โดยที่ M_w คือ มวลของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ (g)

M_s คือ มวลของวัสดุแห้ง (g)

2.6.2 อัตราส่วนความชื้น

อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) เมื่อเราเริ่มกระบวนการอบแห้ง วัสดุจะเกิดการถ่ายเทมวลของน้ำในวัสดุไปยังอากาศด้วยวิธีการระเหยภายใต้ความร้อนและความดัน จนเมื่อเข้าสู่สภาวะความชื้นสมดุลน้ำจะไม่สามารถระเหยออกไปยังอากาศได้อีก โดยค่าอัตราส่วนความชื้นจะบอกถึงผลต่างของปริมาณความชื้นในวัสดุและปริมาณความชื้นสมดุลต่อผลต่างของปริมาณความชื้นเริ่มต้นและปริมาณความชื้นสมดุล ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งดังกล่าวสามารถนำมาสร้างแบบจำลองการอบแห้งเพื่อพิจารณาหาสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการและวัสดุอบแห้งมากที่สุด (สุนต สืบคำ และฤทธิชัย อัครราชันย์, 2011)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (2.9)$$

โดยที่ M_t คือ ความชื้นของวัสดุที่เวลา t ($g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$)

M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ ($g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$)

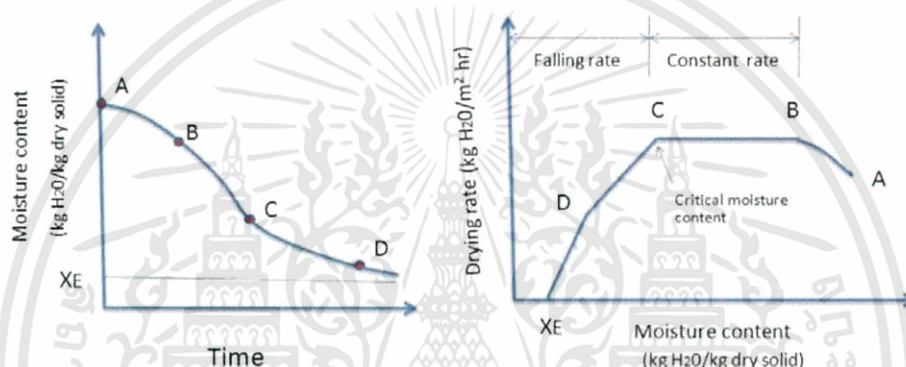
M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ ($g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$)

2.6.3 อัตราการทำให้แห้ง

อัตราการทำให้แห้ง (Drying rate, DR) คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นต่อหน่วยเวลา

$$DR = \frac{W_0 - W_t}{t} \quad (2.10)$$

โดยที่ W_0 คือ น้ำหนักวัสดุเริ่มต้น (g)
 W_t คือ น้ำหนักวัสดุที่เวลา t
 t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (min)



รูปที่ 2.12 กราฟอัตราการทำให้แห้ง (Drying rate) และความชื้นในวัสดุ (Moisture content)
 (<http://www.foodnetworksolution.com>, 7 กันยายน 2559)

โดยในระหว่างกระบวนการอบแห้งตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการจนถึงสิ้นสุดกระบวนการสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง

1. ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial adjustment period – AB) ในสภาวะการอบแห้งช่วงเริ่มต้นความชื้นจะมีมากบริเวณผิวของวัสดุ มีการถ่ายเทความร้อนกับอากาศที่บริเวณนี้ทำให้ผิวของวัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิสมดุลที่ตรงกับเงื่อนไขในการอบแห้งเพื่อให้เกิดการถ่ายเทมวลของน้ำไปยังอากาศ

2. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period – BC) ช่วงนี้อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุจะเข้าสู่สภาวะสมดุล ความชื้นภายในวัสดุจะแพร่มายังผิวและถูกระเหยไปด้วยพลังงานความร้อนอย่างต่อเนื่อง ทำให้วัสดุมีการระเหยน้ำออกไปในอัตราที่คงที่จนถึงจุดที่เป็นความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) อัตราเร็วในการอบแห้งจะเริ่มลดลง

3. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period – CD และ DE) เป็นช่วงที่ความชื้นภายในวัสดุเหลือไม่มาก มีการแพร่ของความชื้นมายังผิวน้อยลงทำให้ผิวน้ำเริ่มแห้ง ส่งผลให้ชั้นของการระเหยค่อยๆ เลื่อนลึกลงไปภายในเนื้อวัสดุ ความร้อนส่วนใหญ่จึงถูกนำไปใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้กับวัสดุแทน ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นจะถูกระเหยจนถึงสภาวะความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, XE) ซึ่งความชื้นจะไม่สามารถระเหยออกไปได้อีก (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, 25 สิงหาคม 2559)

2.6.4 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective diffusion coefficient, Deff)

กระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนเพื่อลดความชื้นให้กับวัสดุต้องมีการถ่ายเทมวลและความร้อนเกิดขึ้นระหว่างอากาศกับผิววัสดุพร้อมกัน ความชื้นที่อยู่บริเวณผิววัสดุจะเกิดการระเหยไปยังอากาศ ส่วนความชื้นที่อยู่บริเวณภายในวัสดุจะเกิดการแพร่ของน้ำไปยังผิววัสดุเพื่อระเหยความชื้นต่อไป ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจึงมีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้งของวัสดุตั้งที่กล่าวไปข้างต้น ความชื้นภายในวัสดุสามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยการแพร่ ซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่สองของ Fick (Fick's Second Law) เป็นสมการทางทฤษฎี โดยลักษณะการแพร่จะต่างกันไปตามรูปร่างของวัสดุขณะอบแห้ง เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับสมการอาร์เรเนียส สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล(Deff) จะเป็นค่าคงที่ตลอดคาบเวลาการอบแห้งซึ่งส่งผลต่อความชื้นของวัสดุในระหว่างการอบแห้ง อัตราการหดตัวของวัสดุระหว่างการอบแห้งมีค่าคงที่ และอุณหภูมิในการอบแห้งมีค่าคงที่ตลอดคาบเวลาการอบแห้ง เป็นต้น (สุนต สืบคำ และฤทธิชัย อัครราชันย์, 2011)

สมการสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ("D_{eff}") สำหรับวัสดุที่มีรูปร่างกระบอก

$$\frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{4}{r^2(\alpha)^2} \exp\left(-(\alpha)^2 \frac{D_{eff}t}{r^2}\right) \quad (2.11)$$

โดยที่	M _t	คือ	ความชื้นของวัสดุที่เวลา t (dry basis)
	M _{eq}	คือ	ความชื้นสมดุลของวัสดุ (dry basis)
	M ₀	คือ	ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (dry basis)
	D _{eff}	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (mm ² /min)
	t	คือ	เวลาในการอบแห้ง (min)
	r	คือ	รัศมีของวัสดุ (mm)
	α	คือ	ค่าฟังก์ชันเบสเซล

2.6.5 พลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ (Activation energy for diffusion, Ea)

คือ พลังงานต่ำสุดที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดการแพร่ของความชื้นภายในวัสดุ โดยทั่วไปการแพร่จะเกิดได้รวดเร็วหากใช้พลังงานกระตุ้นต่ำ ซึ่งกระบวนการอบแห้งเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อน

เพื่อใช้ในการลดพลังงานกระตุ้น พลังงานกระตุ้นสามารถหาได้จากสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพโดยการประยุกต์ใช้กับสมการอาร์เรเนียส (สุนต สืบคำ และฤทธิชัย อัครราชันย์, 2011)

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2.12)$$

โดย	D_{eff}	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิภาพ (mm ² /min)
	D_0	คือ	ค่าคงที่เทียบเท่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิภาพที่อุณหภูมิ
			อากาศสูงไม่มีขอบเขต (mm ² /min)
	E_a	คือ	พลังงานกระตุ้น (kJ/kg)
	R	คือ	ค่าคงที่ของก๊าซ = 8.314 kJ/kmol.K
	T	คือ	อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง (K)

2.6.6 แบบจำลองการอบแห้ง

พฤติกรรมของการอบแห้งของวัสดุมีลักษณะคล้ายคลึงกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) เมื่อนำมาเทียบเคียงกับสมการการแพร่ความชื้นของ Fick จะได้ผลเฉลยอย่างง่ายตามรูปแบบสมการ ดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_{\text{eq}}}{M_0 - M_{\text{eq}}} = \exp(-kt) \quad (2.13)$$

ใส่ลอการิทึมธรรมชาติ(ln) ในสมการทั้งสองข้าง

$$\ln MR = -kt \quad (2.14)$$

สามารถหาค่าคงที่การอบแห้ง(k) ได้จากกราฟเส้นตรงระหว่าง ln MR กับ เวลาในการอบแห้ง โดยกราฟจะเป็นกราฟเส้นตรงที่มีความลาดชันเป็นลบ ค่าคงที่ k จะมีหน่วย t⁻¹ โดยค่าคงที่การอบแห้งจะบอกถึงระยะเวลาในการอบแห้ง ถ้าค่าคงที่การอบแห้งมีค่ามาก เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะสั้น (สุนต สืบคำ และ ฤทธิชัย อัครราชันย์, 2011)

2.6.7 ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้ง (Energy Effectiveness)

2.6.7.1 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC)

คือ พลังงานที่เครื่องอบแห้งใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุ

$$SEC = \frac{\text{พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง}}{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยจากวัสดุอบแห้ง}}, \text{ MJ/kg}_{\text{water evap.}} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.7.2 อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific moisture extraction rate, SMER)

คือ ความสามารถในการดึงน้ำออกจากวัสดุต่อพลังที่เครื่องอบแห้งใช้

$$\text{SMER} = \frac{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยจากวัสดุอบแห้ง}}{\text{พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง}}, \text{ kg}_{\text{Water evap.}}/\text{kWh} \quad (2.16)$$

(นพรัตน์ อมัตริรัตน์, 2554)

2.7 การอบแห้งแบบถาด (Tray drying)

2.7.1 ลักษณะทั่วไปของเครื่องอบแห้งแบบถาด

เป็นการอบแห้งที่อาศัยลมร้อนจากแหล่งความร้อน อาจเป็นคอลย์ไอน้ำหรือก๊าซหุงต้ม ลมร้อนจะไหลผ่านของแข็งที่วางเป็นชั้นบางๆ ในชั้นอาจมีรูพรุนหรือไม่มีรูพรุนก็ได้ มีระบบบังคับทิศทางลมของลมร้อนภายในเครื่องโดยใช้แผ่นเหล็กบางๆ กัน เพื่อให้ลมร้อนไหลอย่างสม่ำเสมอและทั่วถึงทุกส่วน นิยมใช้กับโรงงานที่มีกำลังผลิตไม่สูงมากนัก

2.7.2 ข้อดีและข้อเสียของเครื่องอบแบบถาด

ข้อดีของเครื่องอบแบบถาด

- สะดวกรวดเร็วเนื่องจากการอบด้วยเครื่องอบลมร้อนจะไวกว่าการอบด้วยการตากแดด
- ทำได้ทุกที่ ทุกเวลา เช่น เปิดเครื่องอบลมร้อน ทำงานเวลากลางคืน
- สินค้าที่ได้หลังการอบ มีน้ำหนักเบาขึ้น
- ใช้พลังงานน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแปรรูปวิธีอื่น
- สามารถปรับอุณหภูมิตามที่ต้องการได้
- อุณหภูมิในการอบจะคงที่ ทำให้สีของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเสมอกัน

ข้อเสียของเครื่องอบแบบถาด

- ผลิตภัณฑ์อาหารบางประเภท เมื่ออบไปนานๆ จะมีลักษณะแห้ง กระด้าง
- ผลิตภัณฑ์จะแห้ง ไม่คงรูปเดิม คือจะแบนไม่เหมือนสภาพก่อนเข้าเตาอบ คั้นรูปเดิมยาก

(<http://www.kluoyamthai.com>, 4 กันยายน 2559)

2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุในการทำแห้ง

2.8.1 ความชื้นสัมพัทธ์ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่ามากจะทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำและการระเหยของไอน้ำออกจากตัววัสดุเป็นไปได้ยากเพราะเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากจะทำให้ถึงจุดอิ่มตัวเร็วขึ้นหลังจากรับไอน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุทำให้ไม่สามารถรองรับไอน้ำเพิ่มได้อีก

2.8.2 ปริมาณการไหลของอากาศ (Air volume flow rate, m^3/s) ถ้าปริมาณการไหลอากาศมากก็จะทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ที่สะสมจากน้ำที่ระเหยจากวัสดุภายในห้องอบน้อยลงส่งผลให้สามารถรองรับการระเหยของน้ำจากวัสดุได้อย่างต่อเนื่อง

2.8.3 อุณหภูมิของอากาศร้อน วัสดุที่ได้รับความร้อนสูงเป็นเวลานานจะส่งผลให้โครงสร้างและคุณภาพของวัสดุลดลงโดยเฉพาะวัสดุที่ไวต่อความร้อน เช่น วัสดุทางการเกษตร

2.8.4 ปริมาณและการจัดเรียงวัสดุ การจัดเรียงวัสดุที่ปริมาณมากเกินไปหรือมีการเรียงซ้อนกันจะทำให้วัสดุได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงส่งผลให้วัสดุในบริเวณนั้นมีอัตราการแห้งที่ไม่สม่ำเสมอ

2.9 การเปลี่ยนแปลงของวัสดุหลังผ่านกระบวนการทำแห้ง

2.9.1 คุณภาพสีที่เปลี่ยนไปหลังผ่านกระบวนการทำแห้ง

วัดคุณภาพด้านการเปลี่ยนแปลงสีโดยใช้เครื่อง Spectrophotometer โดยทำการวัดในเทอม L^* (degree of lightness), a^* (degree of redness), b^* (degree of yellowness) และนำไปทำคำนวณในสมการ

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad (2.17)$$

เมื่อ ΔE คือค่าความแตกต่างสุทธิที่เปลี่ยนสีจากการทำแห้ง และ “0” คือค่าสีของแครอทสดก่อนทำแห้ง (เทวรัตน์ ทิพยวิมล และวีรชัย อัจหาญ, 2554)

2.9.2 อัตราส่วนการคืนตัว (Rehydration Ratio, RR)

เราสามารถทดสอบอัตราส่วนการคืนตัวได้โดยการนำผลิตภัณฑ์หลังการทำแห้งไปแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 3 ค่า คือ อุณหภูมิห้อง, 60 องศา (น้ำอุ่น), 100 องศา (น้ำเดือด) แช่นาน 10 นาที แล้วจึงนำขึ้นมาชั่งน้ำหนักจากนั้นจึงคำนวณอัตราส่วนการคืนตัวก่อนแช่และหลังแช่น้ำดังสมการ

$$RR = \frac{m_f}{m_i} \quad (2.18)$$

โดยที่	RR	คือ	อัตราส่วนการคืนตัวของผลิตภัณฑ์
	m_f	คือ	น้ำหนักแครอทหลังการคืนตัว (g)
	m_i	คือ	น้ำหนักแครอทแห้งก่อนการคืนตัว (g)

(เทวรัตน์ ทิพยวิมล และวีรชัย อัจหาญ, 2554)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 การอบแห้งแครอทด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

การอบแห้งแครอทด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนเป็นการทดสอบการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้แก่ 45, 50 และ 55 °C ความเร็วลมเฉลี่ย 1.3 m/s โดยการนำแครอทปอกเปลือกหั่นเต๋าเข้าเครื่องอบครั้งละ 10 กิโลกรัม ทำการศึกษาสมรรถนะการอบแห้ง อัตราการคืนตัวและการเปลี่ยนแปลงสีของแครอทแห้งเทียบกับแครอทสด จากการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งแครอทมีค่า 1.09, 1.48 และ 1.76 กิโลกรัม น้ำระเหยต่อชั่วโมง และสามารถทำการอบแห้งแครอทจากความชื้นเริ่มต้น 88.70%wb ลงเหลือ 10.98%wb โดยใช้เวลาในการอบ 7, 5 และ 4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45, 50 และ 55 °C ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเครื่องอบแห้งระบบปั๊มมีประสิทธิภาพในการทำงานได้ดีกว่าเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนเทียบกับที่อุณหภูมิเดียวกัน เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนใช้เวลานานกว่าและเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีแครอทเมื่อเทียบกับแครอทสด (เทวรัตน์ ทิพยวิมล และวีรชัย อัจหาญ, 2554)

2.10.2 การทำแห้งชาสมุนไพรด้วยเครื่องอบลมร้อนร่วมกับการใช้สารดูดความชื้น

การทำแห้งตะไคร้และใบเตยด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาดร่วมกับการใช้สารดูดความชื้น เป็นการทำให้แห้งแบบ 2 ชั้น โดยการนำสมุนไพรเข้าไปอบเป็นเวลา 240 นาทีสำหรับตะไคร้และ 90 นาทีสำหรับใบเตย หลังจากที่ยอบจนครบเวลาแล้ว ให้นำสมุนไพรเข้าสู่ตู้ดูดความชื้นโดยนำออกมาชั่งน้ำหนักทุกๆ 60 นาทีและ 30 นาที สำหรับตะไคร้และใบเตย ตามลำดับ จนน้ำหนักมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี (aw) ที่ 0.7 เราก็จะได้เวลาในการทำแห้งของสมุนไพรทั้ง 2 ชนิด จากการทดลองเวลาที่ใช้ในการทำให้แห้งทั้ง 2 ชั้นคือตะไคร้ใช้เวลา 720 นาที ได้ความชื้น 9.3817 $\frac{g_{water}}{g_{dry\ matter}}$ (8.5770 %wb) และใบเตยใช้เวลา 180 นาทีได้ความชื้น 5.4599 $\frac{g_{water}}{g_{dry\ matter}}$ (5.1772 %wb) จะเห็นได้ว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการใช้สารดูดความชื้นจะใช้เวลามากกว่าการทำแห้งแบบลมร้อน แต่ประสิทธิภาพในการดูดความชื้นสามารถทำได้ดีกว่าการทำแห้งแบบลมร้อนอย่างเดียว (<http://www.foodnetworksolution.com>, 8 เมษายน 2555)

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

3.1 ตัวอย่างวัสดุทดลอง

การทดลองนี้ใช้แครอทที่ซื้อจากซูเปอร์มาร์เกต โดยเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิประมาณ 4 °C และเมื่อนำมาทดลองเตรียมโดยการหั่นเป็นทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm และความสูง 1 cm ดังรูปที่ 3.1 รูปที่ 3.2 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแครอทเป็นทรงกระบอก ในการทดลองอบแห้งแครอทจะใช้แครอททรงกระบอก 130 g ต่อการทดลองหนึ่งครั้งโดยจะเป็นการอบแห้งวัสดุแบบชั้นเดียว



รูปที่ 3.1 แครอทที่ใช้ในการทดลองอบแห้ง

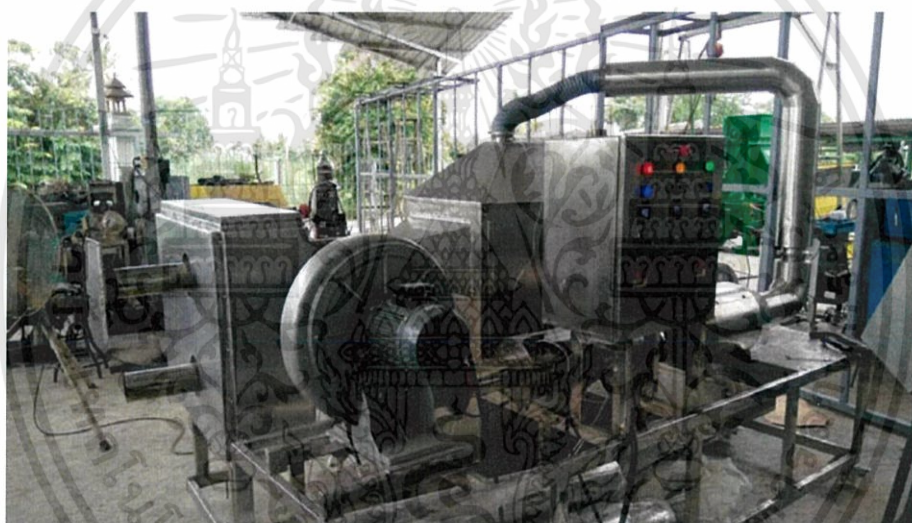


รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมแครอทเป็นทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นแสดงอยู่ในรูปที่ 3.3 ส่วนประกอบของระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักดังนี้ วงล้อดูดความชื้นทำหน้าที่ในการลดความชื้นอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง วงล้อดูดความชื้นที่ใช้ในระบบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง \times ความหนา เท่ากับ 0.7×0.05 m มอเตอร์ที่ใช้กำลังขับวงล้อ (RS Motor Industy TAIWAN) ความเร็วเท่ากับ 28 RPM กำลังขับ 45 watt เครื่องเป่าลมร้อน (MA40B, Euro vent) กำลังการทำงานของเครื่องเท่ากับ 0.75 kw แรง (RPM) เท่ากับ 2800 RPM อัตราการไหลสูงสุดที่เครื่องสามารถทำงานได้เท่ากับ $24 \text{ m}^3/\text{min}$ เครื่องทำความร้อนแบบชนิดแห้งไม่มีฟิน ทำความร้อนได้สูงสุด $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ยี่ห้อ เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์ ฉนวนที่ใช้ใยหินหนา ห้องอบแห้งใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในเท่ากับ 0.2 m ความยาวของท่อเท่ากับ 0.3 m



รูปที่ 3.3 ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น



รูปที่ 3.4 วงล้อดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

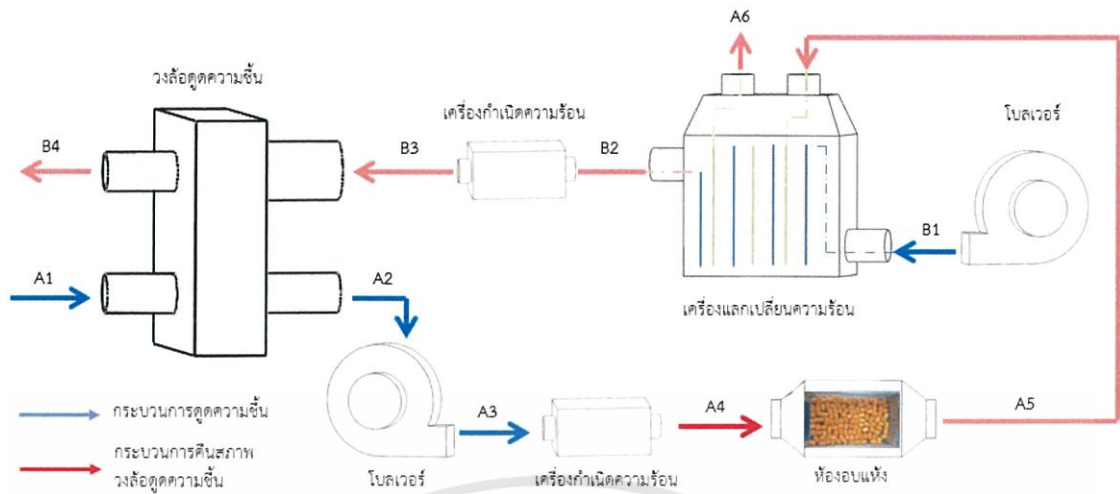


รูปที่ 3.5 เครื่องเป่าลมร้อน



รูปที่ 3.6 ห้องอบแห้งและถาดใส่ตัวอย่าง

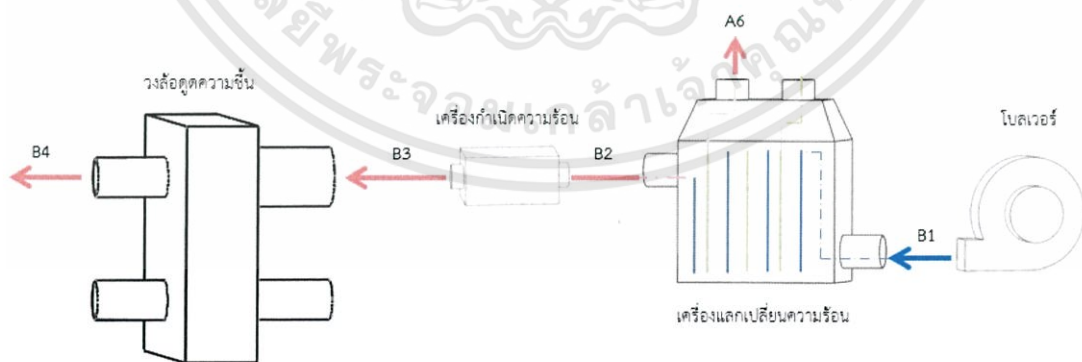
ทำการดูดอากาศจากภายนอกด้วยโบลเวอร์ส่งผ่านไปยังวงล้อดูดความชื้น จากจุด A1 ไปจุด A2 อากาศจะไหลผ่านเครื่องกำเนิดความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิ จากจุด A3 ไปจุด A4 ก่อนที่จะเข้าห้องอบแห้ง โดยในห้องอบแห้งจะมีการติดตั้งตาชั่งเพื่อใช้ในการอ่านน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการอบแห้ง อากาศที่จุด A4 ไปจุด A5 จะมีอุณหภูมิลดลงเล็กน้อย อากาศที่จุด A5 จะถูกส่งไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งอากาศจุด B1 จะถูกดูดด้วยโบลเวอร์ เพื่อนำมาผสมกับอากาศร้อนที่ได้มาจากห้องอบแห้ง อากาศบางส่วนที่ผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วนั้นจะถูกปล่อยออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่จุด A6 อากาศผสมที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกส่งไปยังเครื่องกำเนิดความร้อนเพื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิก่อนที่จะส่งไปยังวงล้อดูดความชื้นจากจุด B2 ไป B3 และอากาศที่จุด B3 ไหลผ่านวงล้อดูดความชื้นไปยังจุด B4 เพื่อทำหน้าที่ในการกำจัดความชื้นออกจากสารดูดความชื้นในวงล้อดูดความชื้นในระบบใหม่ได้ดังที่แสดงในรูป 3.7



รูปที่ 3.7 แผนภาพการทำงานของส่วนประกอบในระบบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

3.3 การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับสภาวะการทำงานที่เหมาะสมในส่วนคั้นสภาพวงล้อดูดความชื้น

ในการศึกษานี้ทำการเปิดระบบของอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นเพียงส่วนคั้นสภาพสารดูดความชื้นเท่านั้น ทำการทดลองโดยกำหนดความเร็วรอบของวงล้อดูดความชื้นที่ 0.5, 1 และ 1.5 RPM อัตราการไหลของอากาศของส่วนคั้นสภาพวงล้อดูดความชื้นที่ 0.04, 0.06 และ 0.08 m^3/s และอุณหภูมิของส่วนคั้นสภาพวงล้อดูดความชื้นที่ 90°C ทำการบันทึกค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%) และอุณหภูมิ ($^\circ\text{C}$) ของอากาศที่จุด B4 ซึ่งเป็นอากาศที่ผ่านกระบวนการคั้นสภาพสารดูดความชื้นดังรูปที่ 3.8 กับเวลา (นาที) และนำค่าสมบัติของอากาศที่บันทึกได้มาคำนวณหาผลต่างมวลของน้ำที่อยู่ในอากาศแห้ง 1 กิโลกรัม ($\text{g น้ำ} / \text{kg อากาศแห้ง}$)



รูปที่ 3.8 แผนภาพการทำงานของส่วนประกอบในระบบคั้นสภาพวงล้อดูดความชื้นของระบบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การศึกษาลักษณะการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

ในการศึกษานี้ ทำการเปิดระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นทั้งกระบวนการดูดความชื้นและกระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้น ดังรูปที่ 3.9 ทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้นที่ 0.04, 0.06 และ 0.08 m³/s และอุณหภูมิในห้องอบแห้ง 80, 100 และ 120 °C โดยกำหนดการทำงานของระบบส่วนอื่นให้คงที่ได้แก่ ความเร็วรอบของวงล้อ 1.5 RPM และอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิของส่วนคืนสภาพวงล้อดูดความชื้น 0.04 m³/s และ 90 °C ตามลำดับ

เริ่มทำการทดลองโดยทำแครอททรงกระบอกใส่ถาดในห้องอบแห้ง ในระหว่างการทดลองทำการบันทึกความชื้นสัมพัทธ์ (%) และอุณหภูมิของอากาศ (°C) ที่จุด B ตามเวลา (นาที) ด้วยเครื่องวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิ ความชื้น (KPA 320, KIMO, France) และนำค่าสมบัติของอากาศที่บันทึกได้มาคำนวณหาผลต่างมวลของน้ำที่อยู่ในอากาศแห้ง 1 kg ($g_{\text{water}}/kg_{\text{dry air}}$) ในการศึกษาลักษณะการอบแห้งทำการบันทึกน้ำหนักแครอทที่ลดลงตามเวลา จากนั้นหาน้ำหนักแห้งของแครอทโดยนำแครอทไปอบในตู้อบลมร้อน (memmert, UF260, Germany) ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และคำนวณความชื้นของแครอทตามเวลาอบแห้งดังสมการที่ 3.1

$$\%MC_{db} = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (3.1)$$

อัตราส่วนความชื้น (MR) และ อัตราการทำแห้ง (DR) คำนวณได้ดังสมการที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (3.2)$$

$$DR = \frac{W_0 - W_t}{t} \quad (3.3)$$

ทำการสร้างกราฟเส้นโค้งการอบแห้งซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง MR และเวลา และกราฟเส้นโค้งอัตราการอบแห้งซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง MR และ DR และวิเคราะห์เวลาในการอบแห้งที่ให้ความชื้นสุดท้ายของแครอทเป็น 15.4675 $g_{\text{water}}/g_{\text{dry water}}$ (13 %ฐานเปียก)

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (MR_{\text{exp},i} - \overline{MR_{\text{exp}}}) (MR_{\text{pred},i} - \overline{MR_{\text{pred}}})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (MR_{\text{exp},i} - \overline{MR_{\text{exp}}})^2) (\sum_{i=1}^n (MR_{\text{pred},i} - \overline{MR_{\text{pred}}})^2)}} \right)^2 \quad (3.7)$$

$$\text{RMSE} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{\text{pred},i} - MR_{\text{exp},i})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$

เมื่อได้แบบจำลองการอบแห้งที่ดีที่สุดจากสมการที่ (3.4) และ (3.5) แล้ว จะทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective diffusivity, D_{eff}) สำหรับ finite cylinder โดยมีสมการดังนี้

$$MR = \left(\frac{8}{\pi^2} \right) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4}{\lambda_m^2} \exp\left(\frac{\lambda_m^2 D_{\text{eff}} t}{r_0^2} \right) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(\frac{-\pi^2 (2n+1)^2 D_{\text{eff}} t}{4l} \right) \quad (3.9)$$

จากสมการที่ (3.9) เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสามารถนำมาหาค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy, E_a) จากความสัมพันธ์ระหว่าง D_{eff} และ T ได้โดยมีสมการดังนี้

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT} \right) \quad (3.10)$$

3.6 การเปรียบเทียบลักษณะการอบแห้งของแครอทระหว่างระบบอบแห้งแบบลมร้อนที่ร่วมกับและไม่ร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

ในการเปรียบเทียบลักษณะการอบแห้งของแครอทระหว่างระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นและไม่ร่วมกับวงล้อดูดความชื้น มีการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในห้องอบแห้งที่ 80, 100 และ 120 °C โดยทำการเปรียบเทียบที่เวลาในการอบแห้ง 120 นาที ส่วนสภาวะอื่นๆ ในระบบคงที่ ได้แก่ ความเร็วรอบของวงล้อดูดความชื้น 1.5 RPM อัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้น 0.8 m³/s และอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิของส่วนคืนสภาพวงล้อดูดความชื้น 0.04 m³/s และ 90 °C ตามลำดับ ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร้อนแบบไม่ร่วมกับวงล้อดูดความชื้นแสดงอยู่ในรูปที่ 3.10 ทำการบันทึกผลและเก็บข้อมูลลักษณะการอบแห้งเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.4



รูปที่ 3.10 แผนภาพการทำงานของส่วนประกอบในระบบอบแห้งแบบลมร้อนไม่ร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

3.7 การวิเคราะห์พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งแคโรทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

จากสภาวะการทดลองในหัวข้อ 3.4 เมื่อได้เวลาที่เหมาะสมในการผลิตแคโรทอบแห้งให้มีความชื้น 13% ฐานเปียก ทำการวิเคราะห์พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งแคโรทที่สภาวะต่างๆ โดยมีสมการดังนี้

$$\text{พลังงานจำเพาะ} = \frac{\text{พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง}}{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยจากวัสดุอบแห้ง}} \quad (3.11)$$

บทที่ 4

ผลการทดลอง

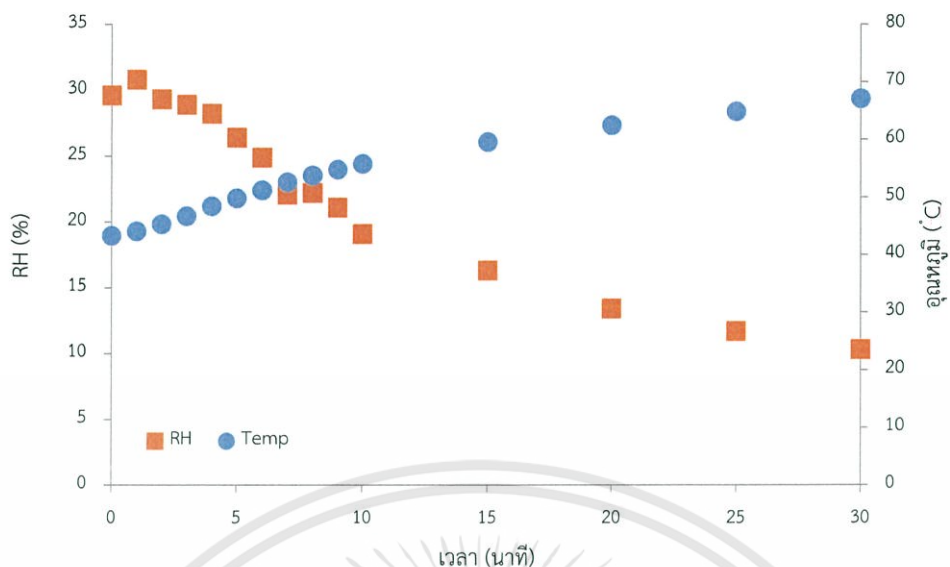
4.1 สภาวะการทำงานที่เหมาะสมในส่วนคินสภาพวงล้อดูดความชื้น

จากตารางที่ 4.1 แสดงผลปริมาณน้ำที่อากาศสามารถพาออกจากซิลิกาเจลในวงล้อดูดความชื้นได้โดยกำหนดความเร็วรอบของวงล้อดูดความชื้นที่ 0.5, 1 และ 1.5 RPM อัตราการไหลของอากาศของส่วนคายที่ 0.04, 0.06 และ 0.08 m³/s และอุณหภูมิของส่วนคายที่ 90 °C พบว่าอัตราการไหลของอากาศของส่วนคินสภาพที่ 0.04 m³/s ให้ปริมาณน้ำที่อากาศสามารถพาออกจากวัสดุได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราการไหลของอากาศของส่วนคินสภาพค่าอื่นๆ และความเร็วรอบของวงล้อดูดความชื้นที่ 1.5 RPM ให้ปริมาณน้ำที่อากาศสามารถพาออกจากวัสดุได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับความเร็วรอบของวงล้อดูดความชื้นค่าอื่นๆ

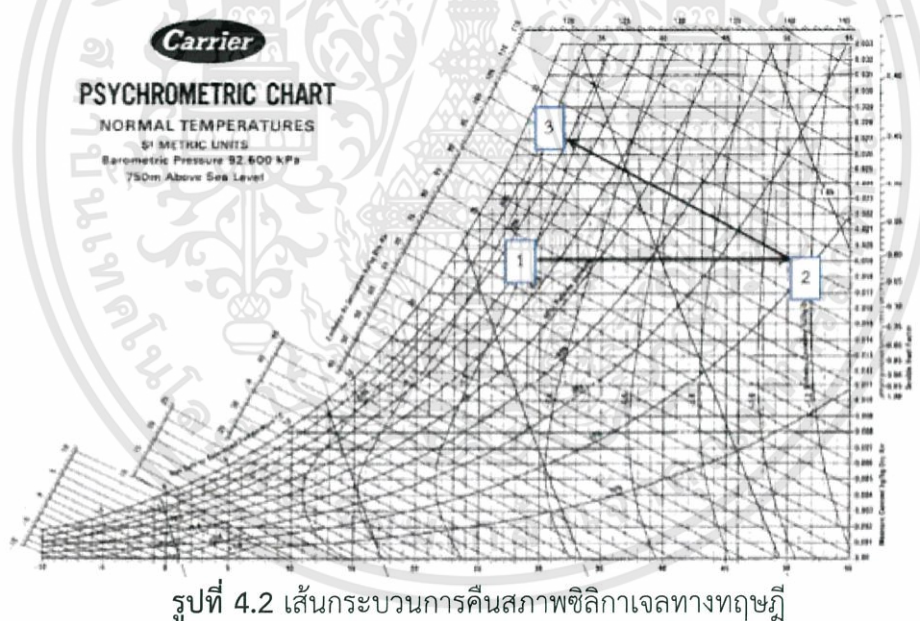
รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศที่ผ่านส่วนคินสภาพในวงล้อดูดความชื้น (ดูภาคผนวก ก สำหรับสภาวะการทดลองอื่นๆ) โดยเมื่อเวลาผ่านไปพบว่าความชื้นสัมพัทธ์มีแนวโน้มลดลง ขณะที่อุณหภูมิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับเส้นกระบวนการคินสภาพซิลิกาเจลทางทฤษฎีดังรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ปริมาณน้ำที่อากาศสามารถพาออกจากซิลิกาเจลในวงล้อดูดความชื้น (ΔW) ได้

treatment	condition		ΔW
	Q (m ³ /s)	Speed (RPM)	(g _{water} /kg _{dry air})
1	0.04	0.5	4.35
2		1	3.63
3		1.5	5.26
4	0.06	0.5	1.71
5		1	2.22
6		1.5	2.35
7	0.08	0.5	2.80
8		1	2.12
9		1.5	2.23



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศที่ผ่านกระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้นเมื่อมีอัตราการไหลของอากาศ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และความเร็วรอบของวงล้อ 0.5 RPM



รูปที่ 4.2 เส้นกระบวนการคืนสภาพซิลิกาเจลทางทฤษฎี

4.2 ลักษณะการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

4.2.1 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและเวลาในการอบแห้ง

ตารางที่ 4.2 แสดงอัตราการอบแห้งเฉลี่ยและเวลาในการอบแห้งแครอทโดยใช้ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น โดยการกำหนดความเร็วรอบของวงล้อดูดความชื้นที่ 1.5 RPM อัตราการไหลของอากาศของส่วนคืนสภาพที่ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิของส่วนคืนสภาพที่ $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

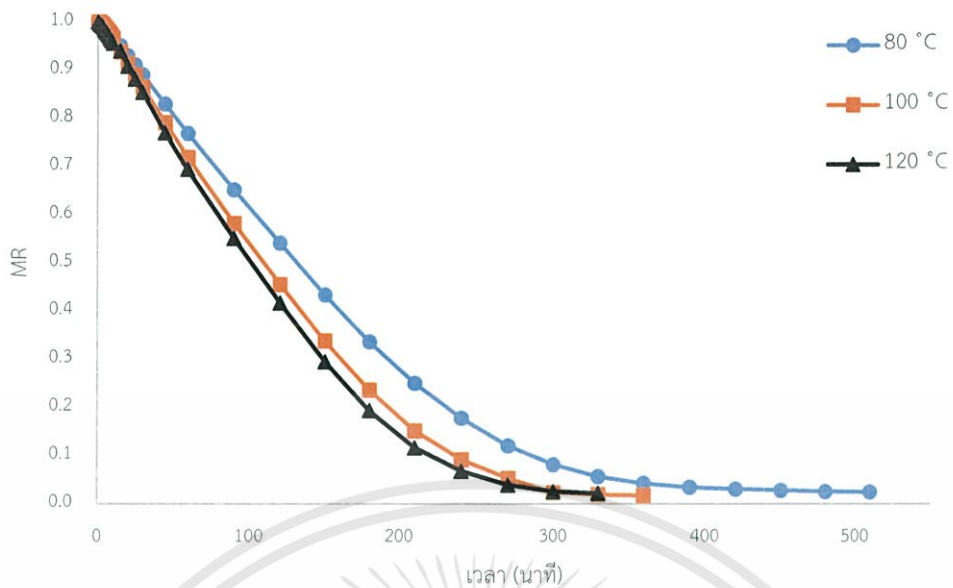
ทดลองอัตราการไหลของอากาศของส่วนดูดที่ 0.04, 0.06 และ 0.08 m³/s และอุณหภูมิในห้องอบแห้ง 80, 100 และ 120 °C พบว่าถ้าพิจารณาที่อัตราการไหลของอากาศ เมื่ออัตราการไหลของอากาศมากจะทำให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยมากและเวลาในการอบแห้งน้อยลง และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ ที่อุณหภูมิสูงจะใช้เวลาในการทำแห้งน้อยกว่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่า

ตารางที่ 4.2 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและเวลาในการอบแห้งแครอทที่อัตราการไหลของอากาศส่วนดูด ความชื้นและอุณหภูมิในห้องอบแห้งต่างๆ

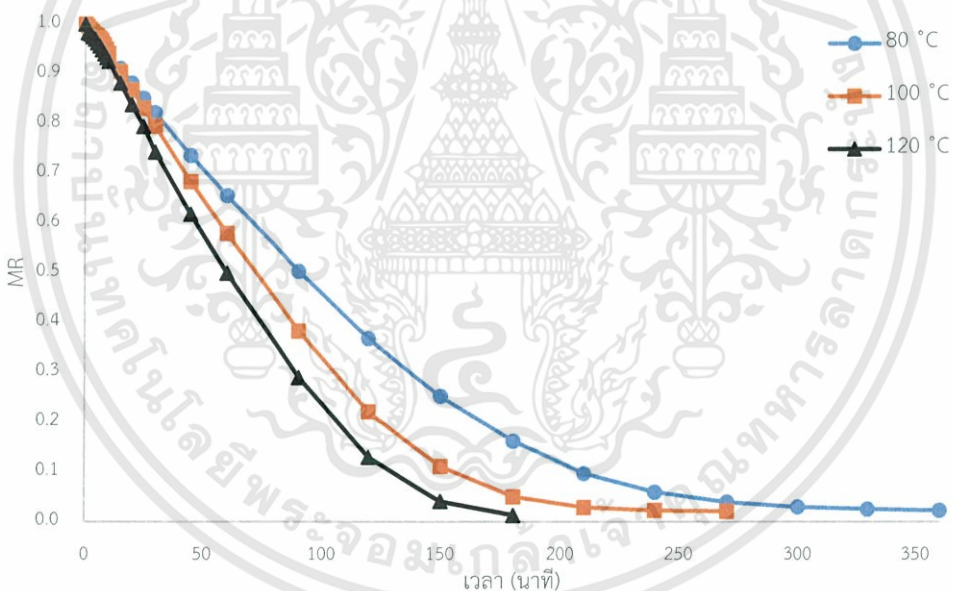
Treatment	Condition		Average DR	Drying time
	Q (m ³ /s)	T (°C)		
1	0.04	80	0.0165	510
2		100	0.0238	360
3		120	0.0281	330
4	0.06	80	0.0290	360
5		100	0.0357	270
6		120	0.0522	180
7	0.08	80	0.0392	240
8		100	0.0715	195
9		120	0.0676	150

4.2.2 เส้นโค้งการอบแห้ง

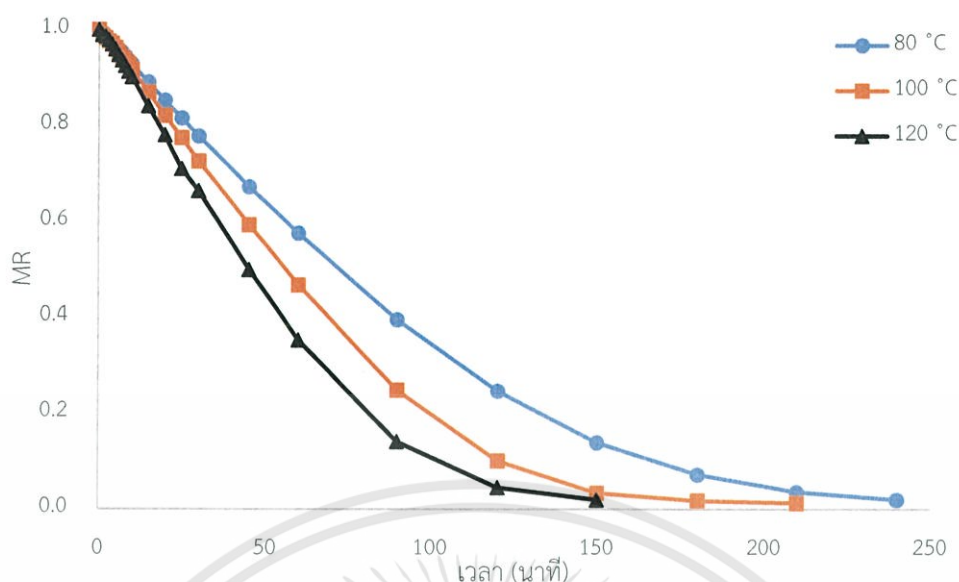
รูปที่ 4.3 – 4.5 แสดงเส้นโค้งการอบแห้งที่อุณหภูมิในห้องอบแห้งต่างๆ สำหรับอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้น 0.04, 0.06 และ 0.08 m³/s ตามลำดับ จากกราฟทุกเส้นพบว่า อัตราส่วนความชื้นมีแนวโน้มลดลงเร็วในช่วงแรกของการอบแห้งและค่อยๆมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นน้อยลงในช่วงท้าย โดยอุณหภูมิในห้องอบแห้งที่ต่ำกว่าและอัตราการไหลของอากาศที่ต่ำกว่าจะใช้เวลาานกว่าในการลดความชื้นจนเหลือความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ



รูปที่ 4.3 เส้นโค้งการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้นเป็น $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$



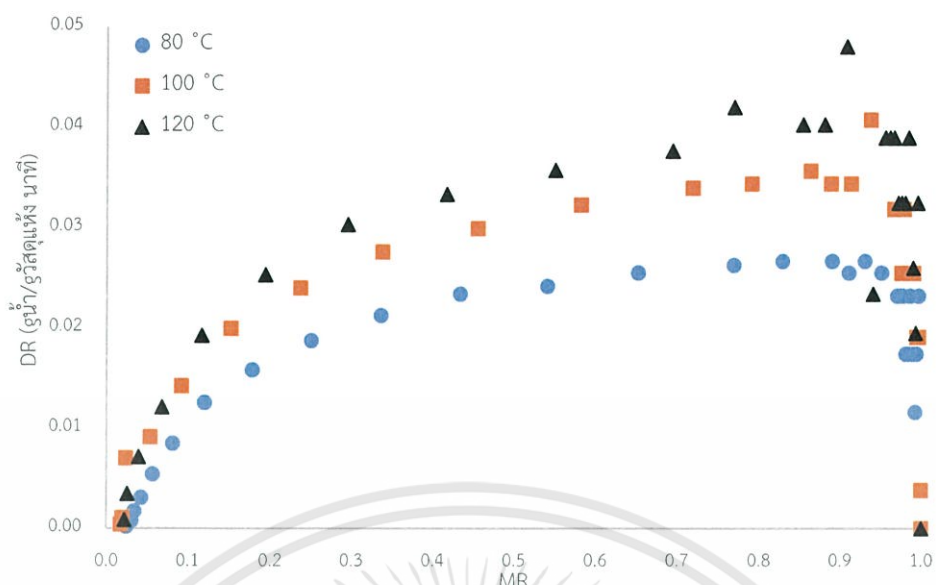
รูปที่ 4.4 เส้นโค้งการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้นเป็น $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$



รูปที่ 4.5 เส้นโค้งการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้นเป็น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$

4.2.3 เส้นโค้งอัตราการอบแห้ง

รูปที่ 4.6 – 4.8 แสดงเส้นโค้งอัตราการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศต่างๆ ในทุกสภาวะการอบแห้งพบอัตราการอบแห้งทั้ง 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงปรับสภาพ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยทั่วไปการอบแห้งแบบลมร้อนมักมีช่วงอัตราการอบแห้งคงที่เป็นแค่ช่วงสั้นๆ หรืออาจไม่พบเลย แต่การอบแห้งแครอทแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นสามารถรักษาช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ได้ระยะเวลาหนึ่ง เท่ากับว่าระบบนี้สามารถรักษาอัตราการอบแห้งที่สูงที่สุดได้เป็นระยะเวลานานเมื่อเทียบกับระบบอบแห้งแบบลมร้อน

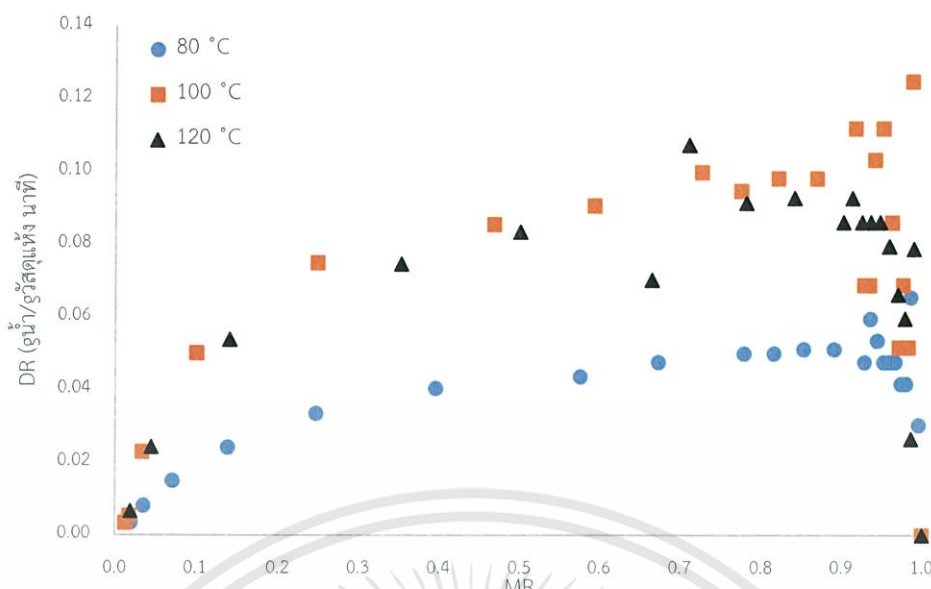


รูปที่ 4.6 เส้นโค้งอัตราการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น ที่อุณหภูมิมอบแห้งต่างๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้นเป็น $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$



รูปที่ 4.7 เส้นโค้งอัตราการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น ที่อุณหภูมิมอบแห้งต่างๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้นเป็น $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$

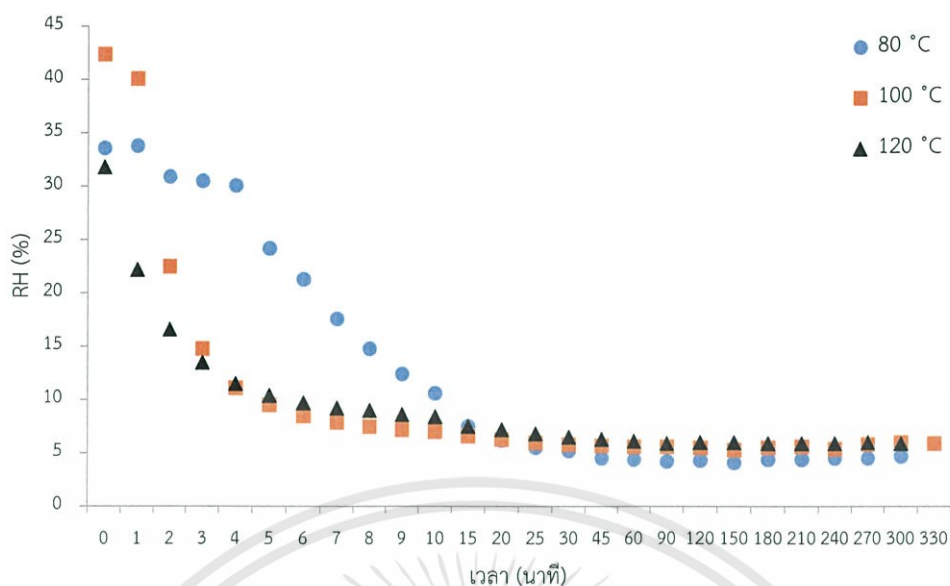
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



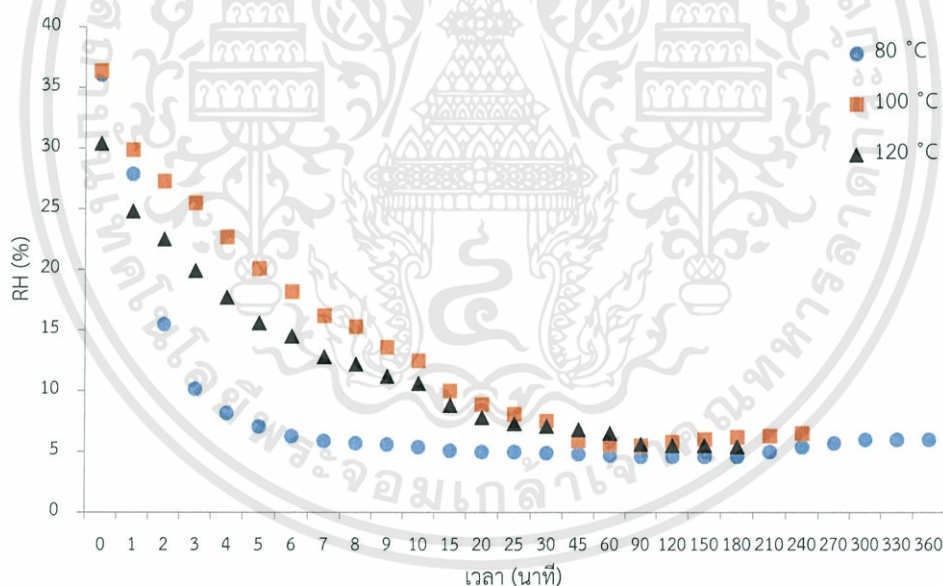
รูปที่ 4.8 เส้นโค้งอัตราการอบแห้งของเครื่องด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้นเป็น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$

4.2.4 สมบัติของอากาศ

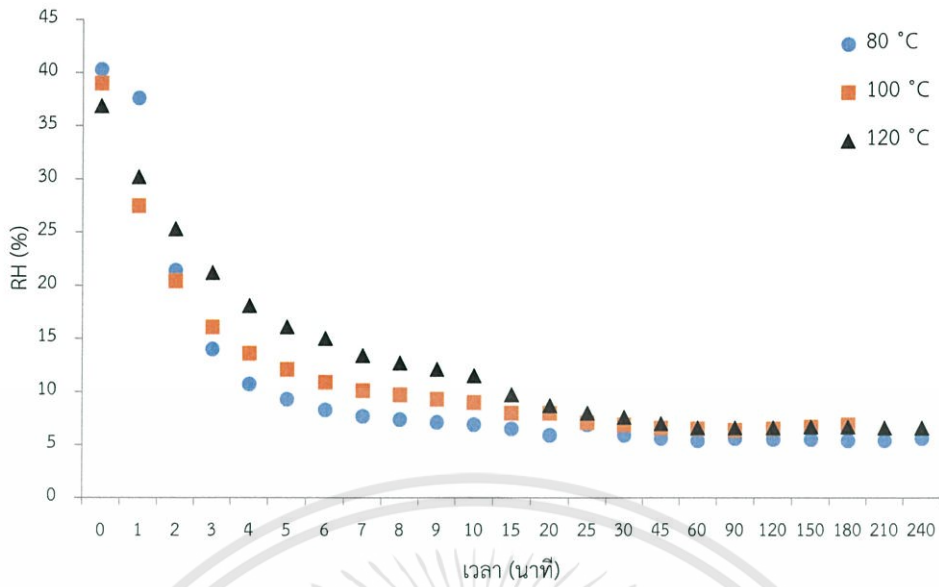
รูปที่ 4.9 – 4.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในส่วนคืนสภาพวงล้อดูดความชื้นตามเวลาในการใช้ระบบอบแห้งทั้งนี้พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงรวดเร็วในช่วงแรกจากนั้นการเปลี่ยนแปลงค่อยๆ ลดลงจนเกือบคงที่ในช่วงท้ายของกระบวนการการเปลี่ยนแปลงผลต่างมวลของน้ำตามเวลาในการใช้ระบบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.12 – 4.14 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวงล้อดูดความชื้นมีการคายความชื้นออกจากซิลิกาเจลอย่างสม่ำเสมอในระหว่างกระบวนการอบแห้ง



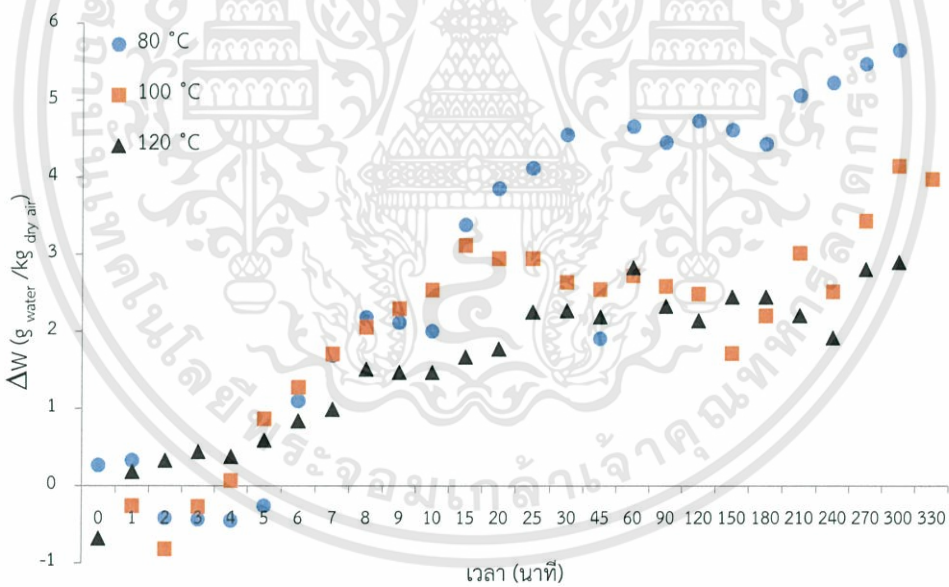
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศในส่วนคั้นสภาพวงล้อดูดความชื้นในกระบวนการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นกับเวลาที่อัตราการไหลของอากาศเป็น $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ



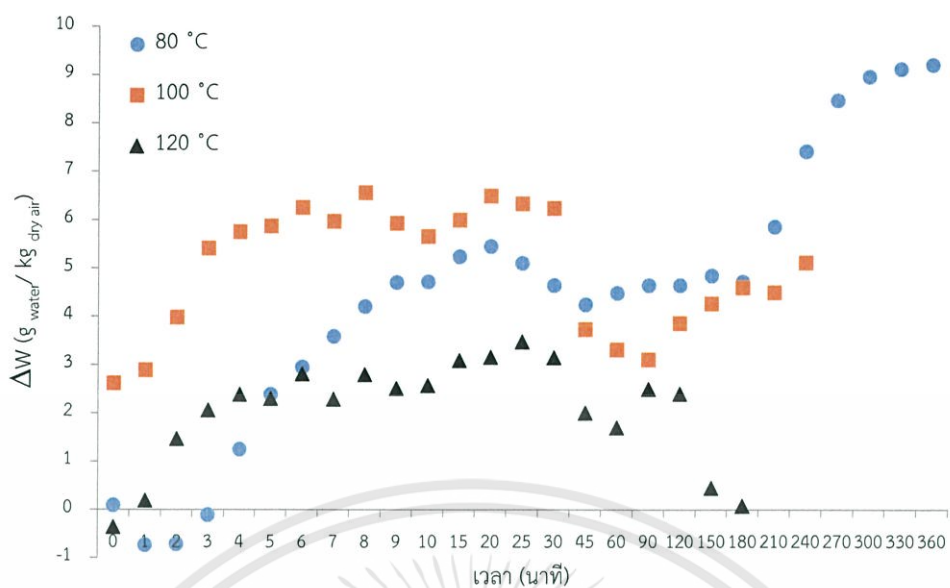
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศในส่วนคั้นสภาพวงล้อดูดความชื้นในกระบวนการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นกับเวลาที่อัตราการไหลของอากาศเป็น $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ



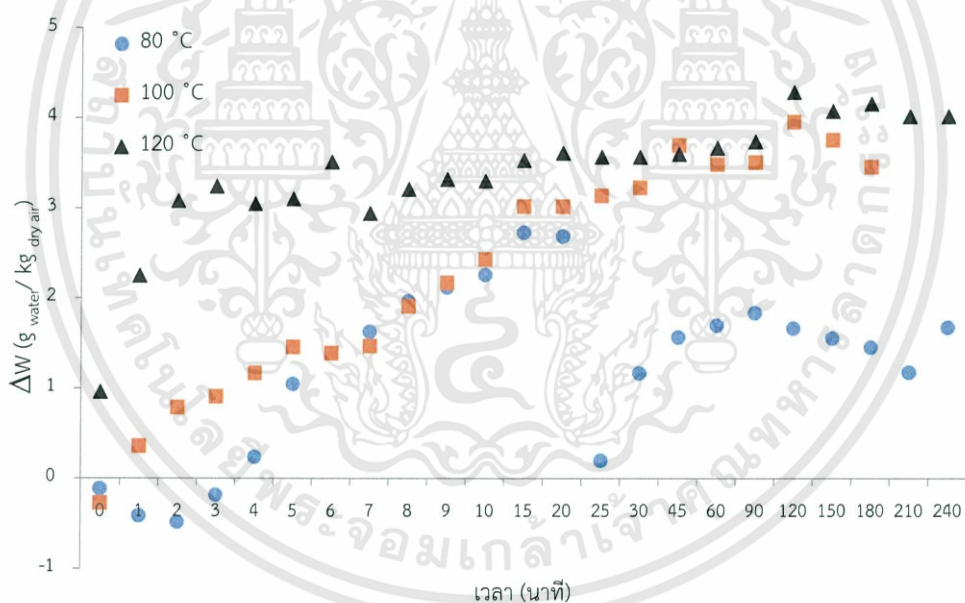
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศในส่วนคืนสภาพวงล้อดูดความชื้นในกระบวนการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นกับเวลาที่อัตราการไหลของอากาศเป็น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของผลต่างมวลของน้ำที่อยู่ในอากาศแห้ง 1 กิโลกรัมกับเวลาที่อัตราการไหลของอากาศเป็น $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของผลต่างมวลของน้ำที่อยู่ในอากาศแห้ง 1 กิโลกรัมกับเวลาที่อัตราการไหลของอากาศเป็น $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของผลต่างมวลของน้ำที่อยู่ในอากาศแห้ง 1 กิโลกรัมกับเวลาที่อัตราการไหลของอากาศเป็น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 แบบจำลองการอบแห้งและจลนศาสตร์การอบแห้งในการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

4.3.1 แบบจำลองการอบแห้ง

จากตารางที่ 4.3-4.5 เป็นการแสดงถึงแบบจำลองการอบแห้ง 3 แบบ คือ 1. Lewis 2. Page และ 3. Henderson and Pabis นำมาเปรียบเทียบ โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การอธิบาย และค่า RMSE พบว่าแบบจำลองของ Page ให้ค่า R^2 มากที่สุด และ RMSE น้อยที่สุดในทุกสภาวะการทดลองเมื่อคำนวณอัตราส่วนความชื้นจากแบบจำลอง Page และทำการเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองดังรูปที่ 4.15 – 4.17 พบว่าจุดข้อมูลเกือบทั้งหมดอยู่บนเส้นอ้างอิง (1:1 line) ซึ่งแสดงว่าอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองและการทำนายจากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกันดี ซึ่งยังแสดงในรูปที่ 4.18 – 4.20 เส้นโค้งการอบแห้งเพื่อเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลจากการทดลองและข้อมูลจากการทำนายด้วย

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ สัมประสิทธิ์และพารามิเตอร์ทางสถิติของแบบจำลองการอบแห้งต่างๆที่อัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้น $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$

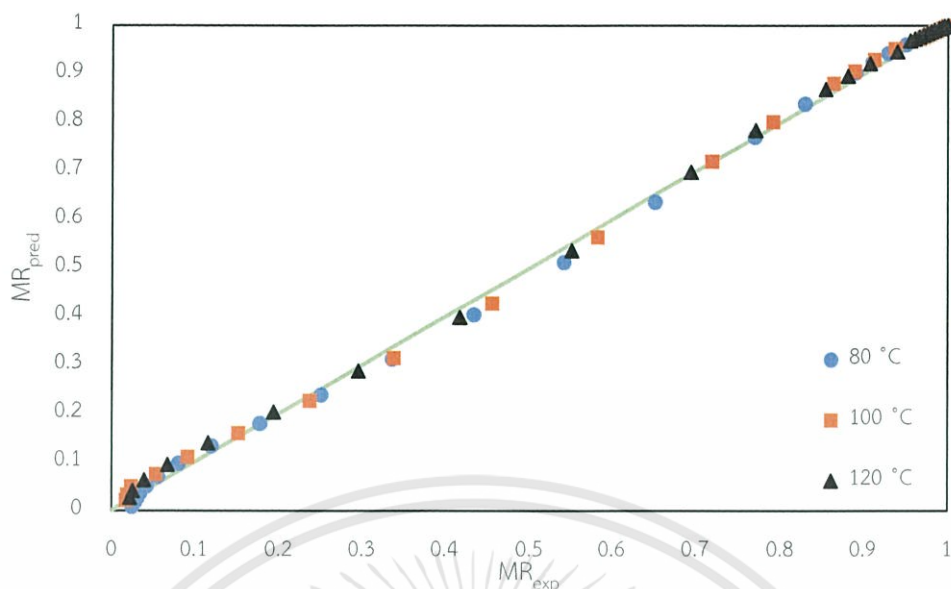
Model	T (°C)	Constant and coefficient		R^2	RMSE
Lewis	80	k=0.0062		0.9872	0.0466
	100	k=0.0074		0.9829	0.0508
	120	k=0.0079		0.9832	0.0493
Page	80	k=0.0010	n=1.3590	0.9992	0.0121
	100	k=0.0012	n=1.3710	0.9988	0.0137
	120	k=0.0014	n=1.3550	0.9989	0.0131
Henderson	80	k=0.0065	a=1.0380	0.9906	0.0406
And pabis	100	k=0.0078	a=1.0420	0.9881	0.0431
	120	k=0.0084	a=1.0390	0.9880	0.0428

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ สัมประสิทธิ์และพารามิเตอร์ทางสถิติของแบบจำลองการอบแห้งต่างๆที่อัตราการไหลของอากาศส่วนตูดความชื้น $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$

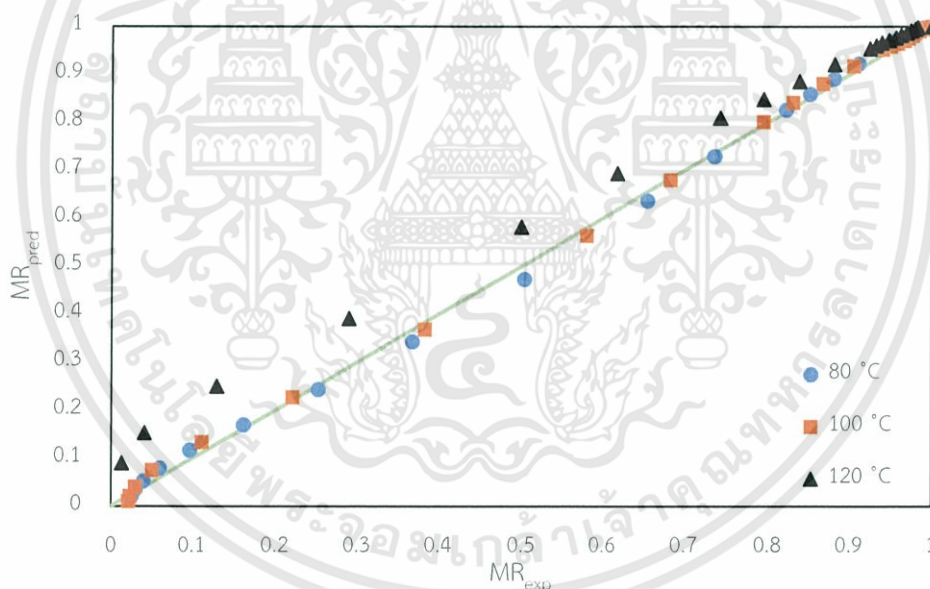
Model	T (°C)	Constant and coefficient		R ²	RMSE
Lewis	80	k=0.0087		0.9910	0.0371
	100	k=0.0108		0.9817	0.0519
	120	k=0.0126		0.9756	0.0523
Page	80	k=0.0028	n=1.2420	0.9987	0.0141
	100	k=0.0021	n=1.3700	0.9992	0.0111
	120	k=0.0021	n=1.3560	0.9978	0.0161
Henderson	80	k=0.0090	a=1.0260	0.9929	0.0338
And pabis	100	k=0.0116	a=1.0470	0.9882	0.0427
	120	k=0.0136	a=1.0410	0.9823	0.0457

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่ สัมประสิทธิ์และพารามิเตอร์ทางสถิติของแบบจำลองการอบแห้งต่างๆที่อัตราการไหลของอากาศส่วนตูดความชื้น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$

Model	T (°C)	Constant and coefficient		R ²	RMSE
Lewis	80	k=0.0106		0.9867	0.0411
	100	k=0.0136		0.9805	0.0511
	120	k=0.0163		0.9769	0.0506
Page	80	k=0.0033	n=1.2660	0.9988	0.0129
	100	k=0.0033	n=1.3450	0.9986	0.0140
	120	k=0.0043	n=1.3480	0.9993	0.0093
Henderson	80	k=0.0113	a=1.0330	0.9906	0.0354
And pabis	100	k=0.0147	a=1.0440	0.9866	0.0434
	120	k=0.0177	a=1.0500	0.9864	0.0399

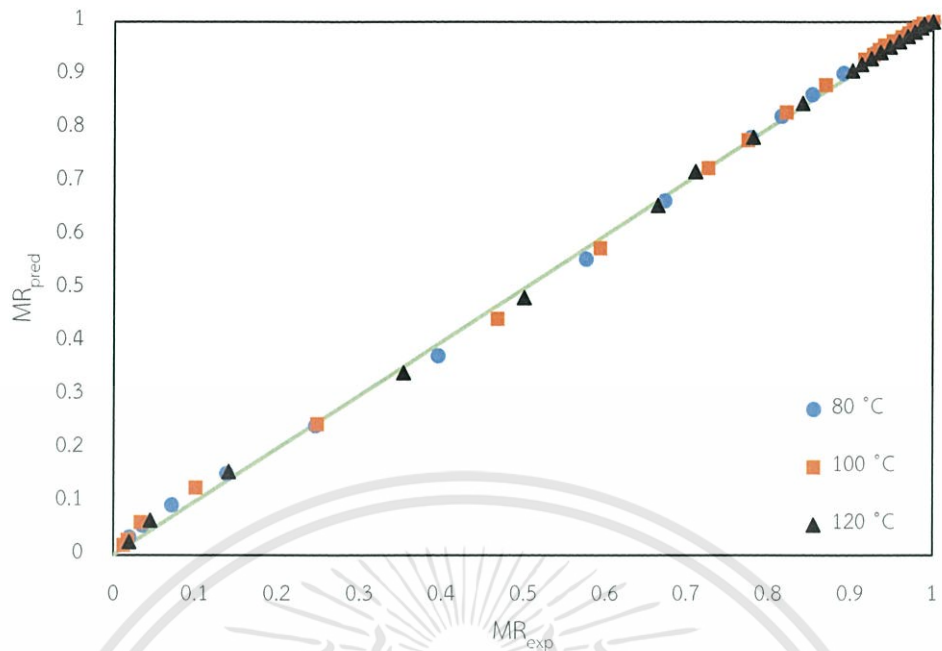


รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของการทดลองและที่ทำนายได้จากแบบจำลอง Page ของเครื่องที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศเป็น $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$

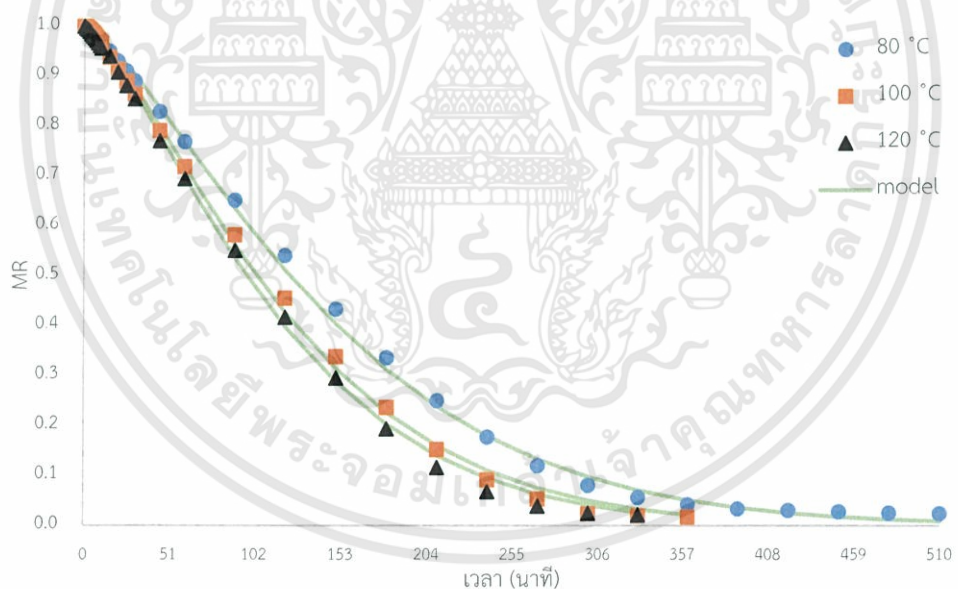


รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของการทดลองและที่ทำนายได้จากแบบจำลอง Page ของเครื่องที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศเป็น $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

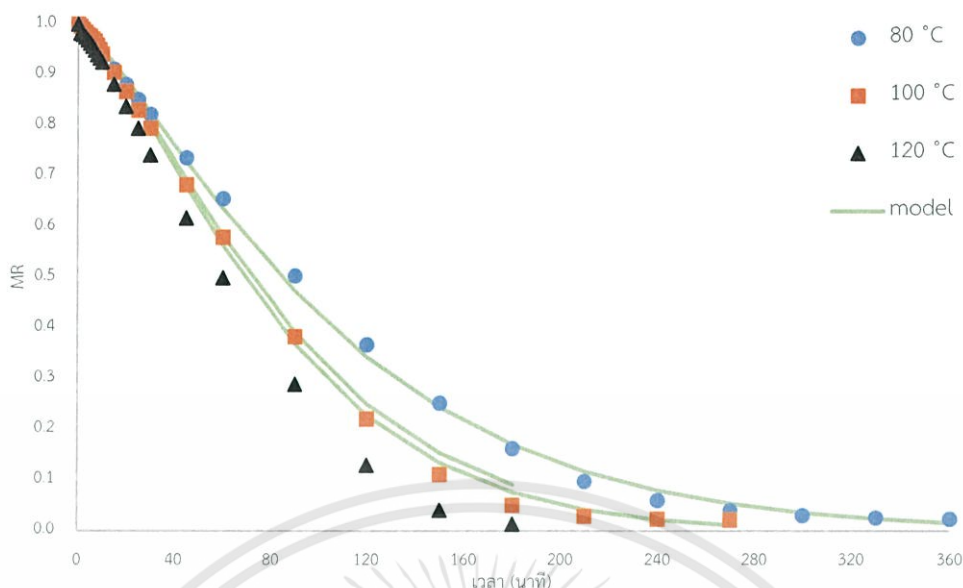


รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของการทดลองและที่ทำนายได้จากแบบจำลอง Page ของเครื่องที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศเป็น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$

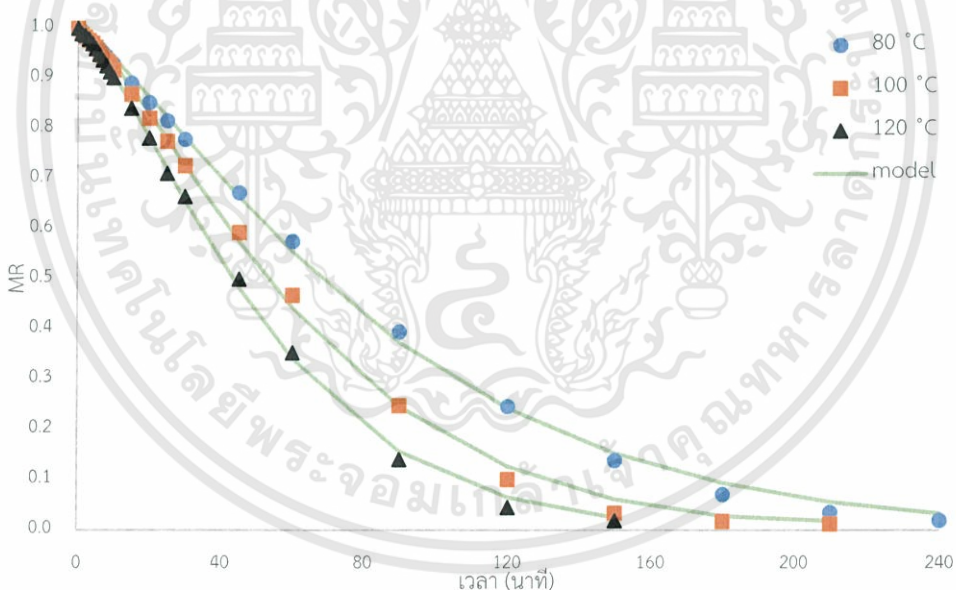


รูปที่ 4.18 เส้นโค้งการอบแห้งของเครื่องด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น ระหว่างข้อมูลจากการทดลองและข้อมูลจากการทำนายจากแบบจำลอง Page ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศเป็น $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 เส้นโค้งการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น ระหว่างข้อมูลจากการทดลองและข้อมูลจากการทำนายจากแบบจำลอง Page ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศเป็น 0.06 m³/s



รูปที่ 4.20 เส้นโค้งการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น ระหว่างข้อมูลจากการทดลองและข้อมูลจากการทำนายจากแบบจำลอง Page ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศเป็น 0.08 m³/s

4.3.2 จลนศาสตร์การอบแห้ง

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล และค่าพลังงานในการกระตุ้นในการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น ค่าสัมประสิทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่ความชื้นประสิทธิผล และ ค่าพลังงานในการกระตุ้น ใช้วัดประสิทธิภาพของการแพร่ความชื้น จากภายในวัสดุมายังผิววัสดุ และค่าพลังงานต่ำสุดที่ทำให้เกิดกระบวนการการแพร่ความชื้นขึ้น เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ พบว่าอุณหภูมิที่สูงจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมากกว่า อุณหภูมิที่ต่ำกว่า

ตารางที่ 4.6 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและพลังงานกระตุ้นในการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

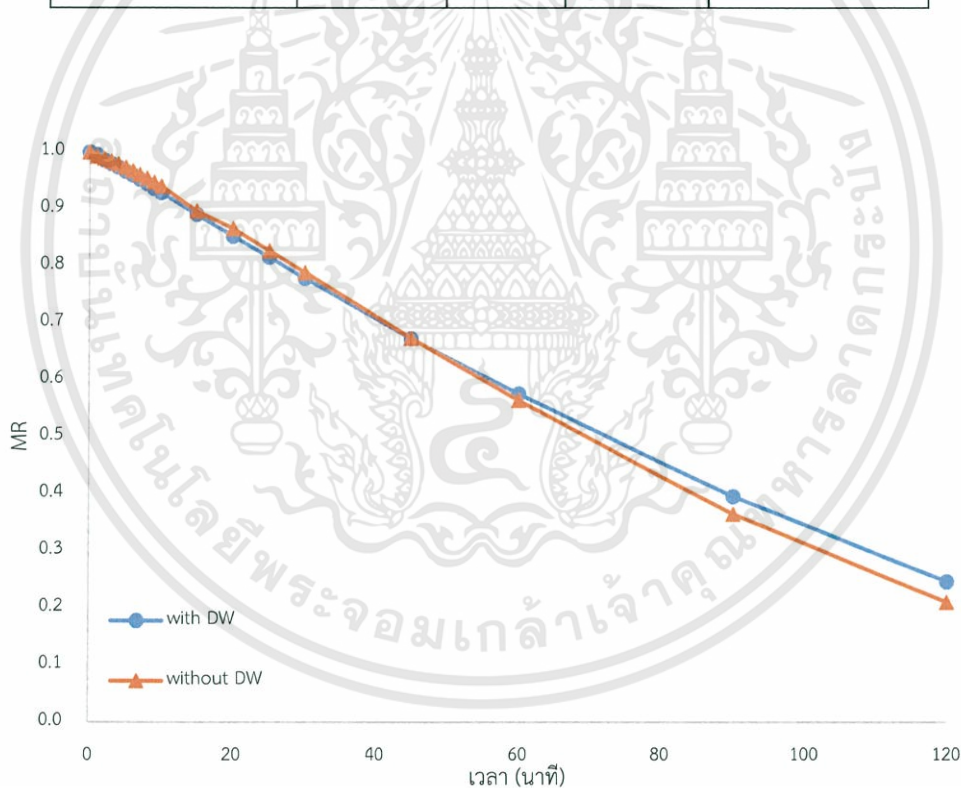
treatment		D_{eff}	E_a
Q (m ³ /s)	Temperature (°C)	(m ³ /s)	kJ/mole
0.08	80	5.8500E-09	1.3423
	100	6.0517E-09	
	120	6.1267E-09	
0.06	80	5.7417E-09	1.3223
	100	5.8667E-09	
	120	6.0117E-09	
0.04	80	5.6467E-09	0.4880
	100	5.7350E-09	
	120	5.7417E-09	

4.4 การเปรียบเทียบลักษณะการอบแห้งของแครอทระหว่างระบบอบแห้งแบบลมร้อนที่ร่วมกับและไม่ร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

ตารางที่ 4.7 แสดงอัตราการอบแห้งเฉลี่ยและความชื้นสุดท้ายของแครอทอบแห้งที่เวลาอบแห้ง 120 นาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นที่ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นทำให้ได้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยสูงกว่าระบบที่ไม่ใช้วงล้อดูดความชื้น เส้นโค้งการอบแห้งและเส้นโค้งอัตราการอบแห้งที่แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสองระบบนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.21 – 4.26

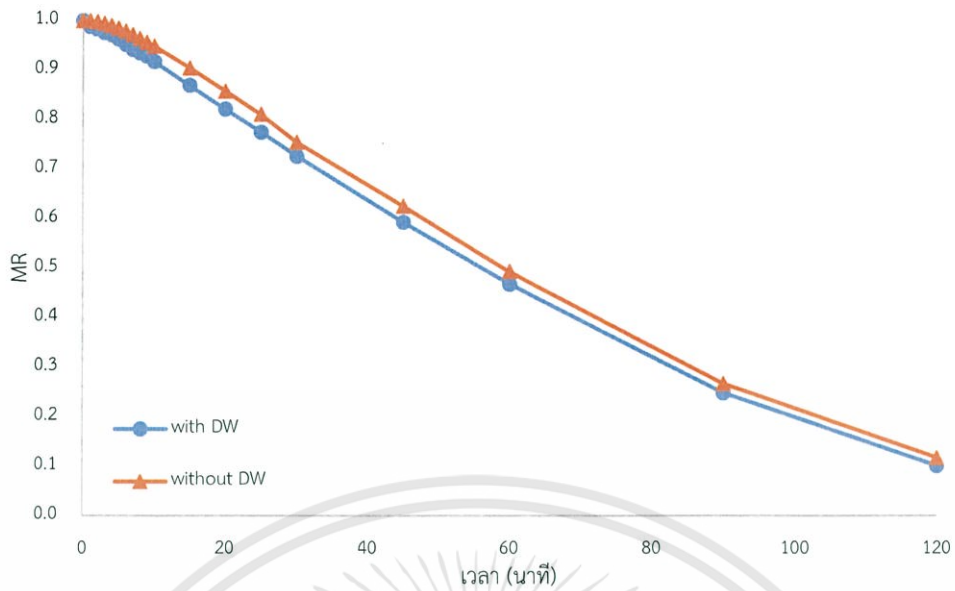
ตารางที่ 4.7 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและความชื้นของแครอทที่เวลา 120 นาทีเมื่ออบแห้งในระบบอบแห้งที่ร่วมกับและไม่ร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

Treatment	Condition		ave DR	MC ที่ เวลา 120 นาที
	Q (m ³ /s)	T (°C)		
ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น	0.08	80	0.0488	1.6623
		100	0.0811	1.0327
		120	0.0709	0.3453
ระบบอบแห้งแบบลมร้อนไม่ร่วมกับวงล้อดูดความชื้น	0.08	80	0.0458	1.5633
		100	0.0491	0.9125
		120	0.0570	0.4838

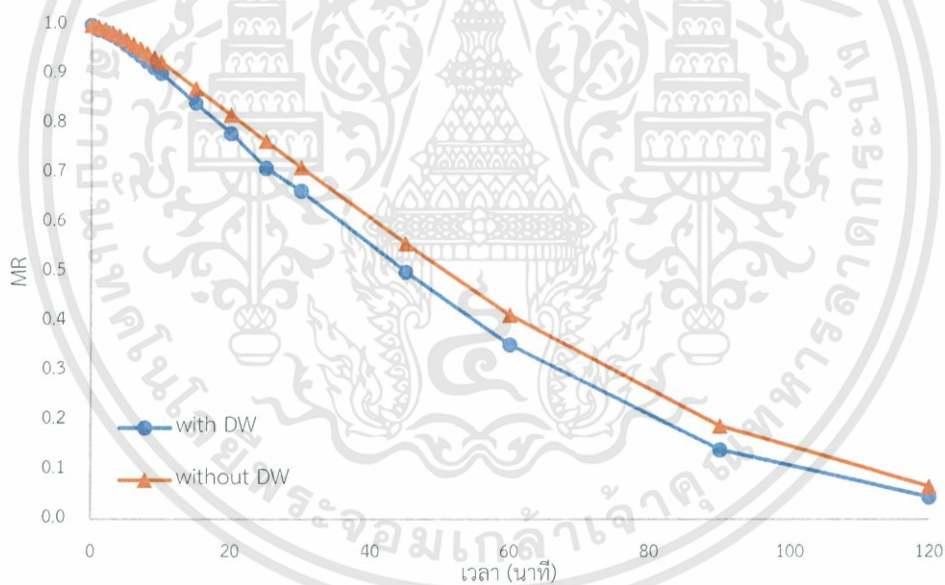


รูปที่ 4.21 เส้นโค้งการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับและไม่ร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศ 0.08 m³/s เมื่อมีอุณหภูมิอบแห้งเป็น 80 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

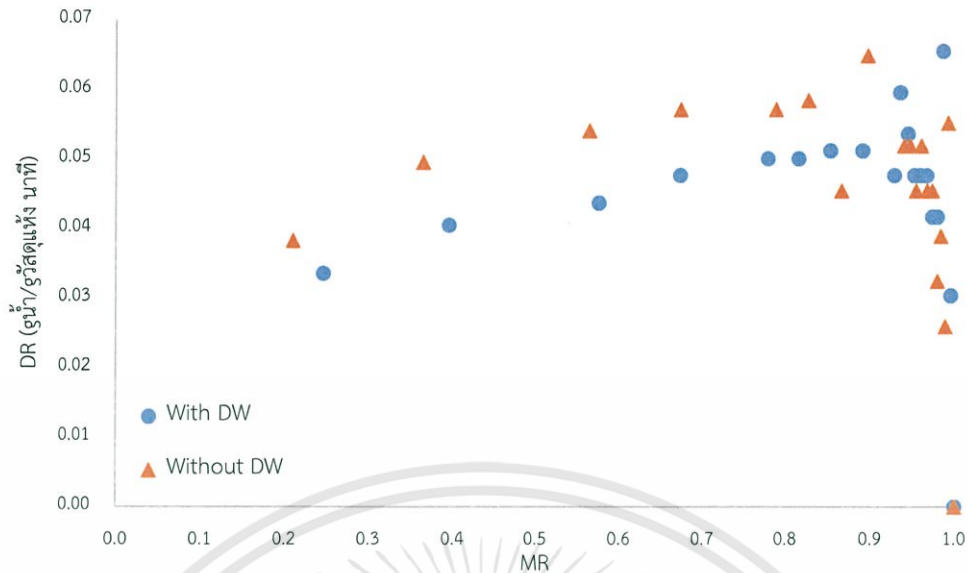


รูปที่ 4.22 เส้นโค้งการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับและไม่ร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ เมื่อมีอุณหภูมิอบแห้งเป็น $100 \text{ }^\circ\text{C}$

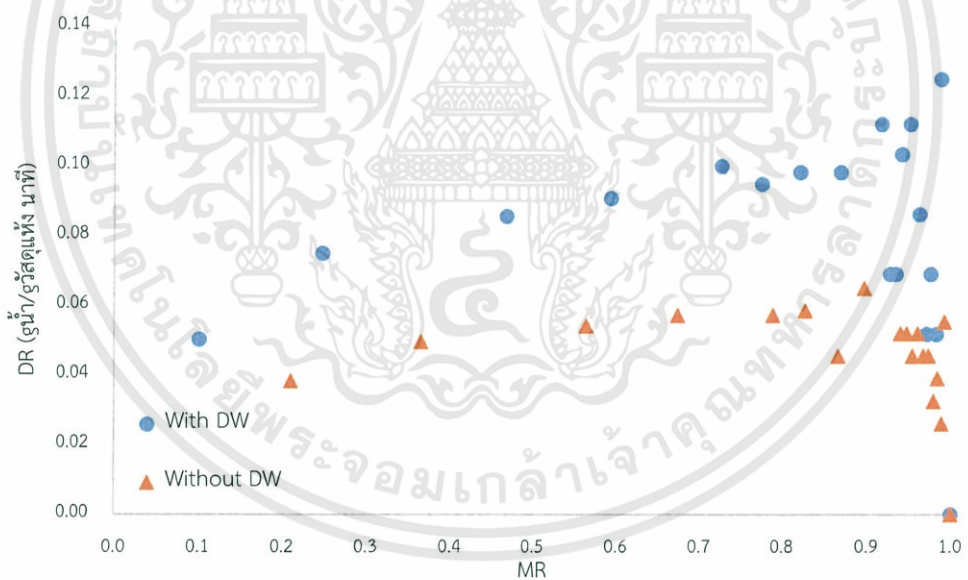


รูปที่ 4.23 เส้นโค้งการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับและไม่ร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ เมื่อมีอุณหภูมิอบแห้งเป็น $120 \text{ }^\circ\text{C}$

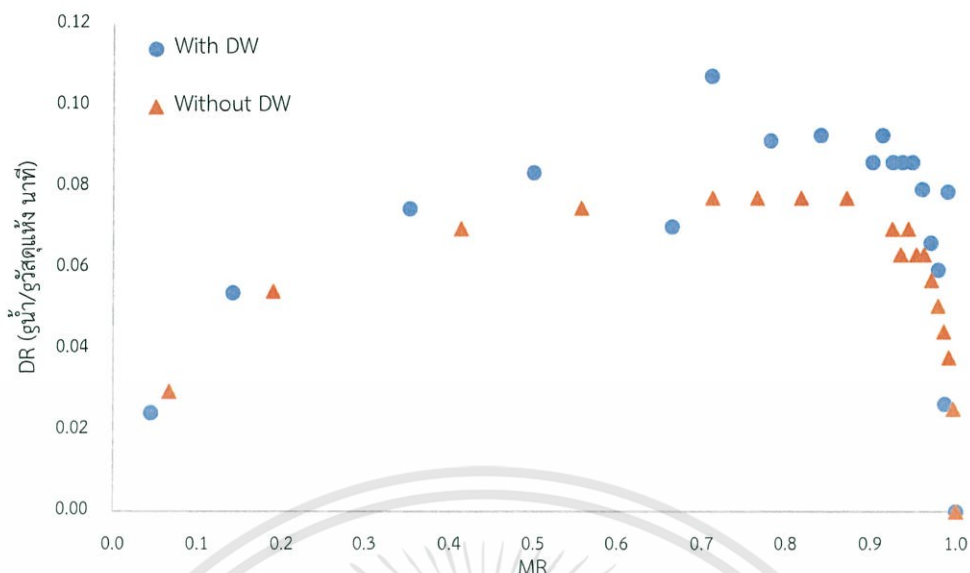
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 เส้นโค้งอัตราการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นและไม่ร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศเป็น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ เมื่อมีอุณหภูมิอบแห้งเป็น $80 \text{ }^\circ\text{C}$



รูปที่ 4.25 เส้นโค้งอัตราการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นและไม่ร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศเป็น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ เมื่อมีอุณหภูมิอบแห้งเป็น $100 \text{ }^\circ\text{C}$



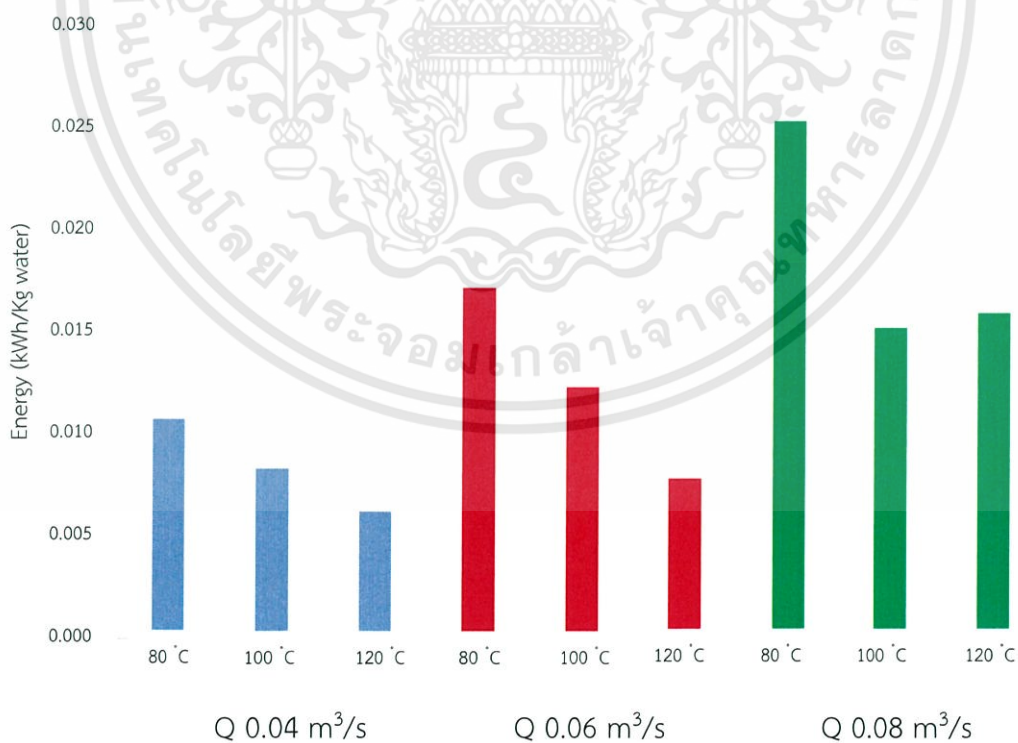
รูปที่ 4.26 เส้นโค้งอัตราการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นและไม่ร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศเป็น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ เมื่อมีอุณหภูมิอบแห้งเป็น $120 \text{ }^\circ\text{C}$

4.5 พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

ตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นพลังงานที่ใช้ในระบบนี้อยู่ในช่วง $0.0062\text{-}0.0254 \text{ kWh/kg water}$ ที่อัตราการไหลอากาศ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ ทั้ง 3 อุณหภูมิ ใช้พลังงานในการดึงน้ำ 1 kg ออกจากวัสดุแห้งที่สุด เมื่อเทียบกับอัตราการไหล 0.06 และ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 พลังงานจำเพาะที่ใช้สำหรับการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่สภาวะการทดลองต่างๆ

treatment		Energy
Q (m ³ /s)	Temperature (°C)	K Wh/Kg water
0.04	80	0.0254
	100	0.0152
	120	0.0160
0.06	80	0.0172
	100	0.0123
	120	0.0078
0.08	80	0.0108
	100	0.0083
	120	0.0062



รูปที่ 4.27 พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 สภาวะการทำงานที่เหมาะสมในส่วนคืบสภาพวงล้อดูดความชื้น

ที่อุณหภูมิอากาศ 90 °C อัตราการไหลของอากาศ 0.04 m³/s และความเร็วรอบของวงล้อดูดความชื้น 1.5 rpm เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการระเหยความชื้นออกจากซิลิกาเจลมากที่สุด ผลต่างของความชื้นมีค่าอยู่ในช่วง 1.71 – 5.26 g_{water}/kg_{dry air}

5.1.2 ลักษณะการอบแห้งของแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นเวลาที่ใช้ในการอบแห้งน้อยลง เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิให้ห้องอบแห้ง ส่งผลให้อัตราการอบแห้งมีค่ามากขึ้น อัตราการอบแห้งเฉลี่ยมีค่าอยู่ในช่วง 0.0165 – 0.0715 g_{น้ำ}/g_{วัสดุแห้ง} หน้าที่ เวลาที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 150 – 510 นาที

5.1.3 แบบจำลองการอบแห้งและจลนศาสตร์การอบแห้งในการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

แบบจำลองของ Page สามารถทำนายลักษณะการอบแห้งได้เหมาะสมที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าอยู่ในช่วง 5.6467E-09 – 6.1267E-09 m²/s ค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าอยู่ในช่วง 0.4880 – 1.3423 kJ/mole

5.1.4 การเปรียบเทียบลักษณะการอบแห้งของแครอทระหว่างระบบอบแห้งแบบลมร้อนที่ร่วมกับและไม่ร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

ระบบอบแห้งที่มีการลดความชื้นในอากาศมีค่าเฉลี่ยของอัตราการอบแห้งสูงกว่าระบบอบแห้งที่ไม่มีการลดความชื้นในอากาศ โดยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นมีการลดความชื้นอยู่ในช่วง 0.3453 – 1.6623 g_{น้ำ}/g_{วัสดุแห้ง} มีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.0488 – 0.0811 g_{น้ำ}/g_{วัสดุแห้ง} หน้าที่ และระบบอบแห้งแบบลมร้อนไม่ร่วมกับวงล้อดูดความชื้นมีการลดความชื้นอยู่ในช่วง 0.4838 – 1.5633 g_{น้ำ}/g_{วัสดุแห้ง} มีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.0458 – 0.0570 g_{น้ำ}/g_{วัสดุแห้ง} หน้าที่

5.1.5 พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งแครอทด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

เมื่อใช้อุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศสูงในการอบแห้งแครอทจะทำให้พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งแครอทน้อยกว่าอุณหภูมิต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น ตำแหน่งที่ทำการต่ออุปกรณ์เสริมเข้าไป เช่น ตาซึ่งที่ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ เป็นต้น เกิดการสูญเสียความร้อนเนื่องจากเกิดรอยรั่วของอากาศตรงตำแหน่งที่ต่ออุปกรณ์เสริมทำให้มีผลต่อการทดลอง จึงควรหาฉนวนมาหุ้มในที่ที่มีรอยต่อต่างๆ เพื่อป้องกันการรั่วของอากาศ

5.2.2 การทดลองการอบแห้งนั้นควรมีการทำการเปรียบเทียบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ระหว่างระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นและระบบอบแห้งแบบลมร้อน



เอกสารอ้างอิง

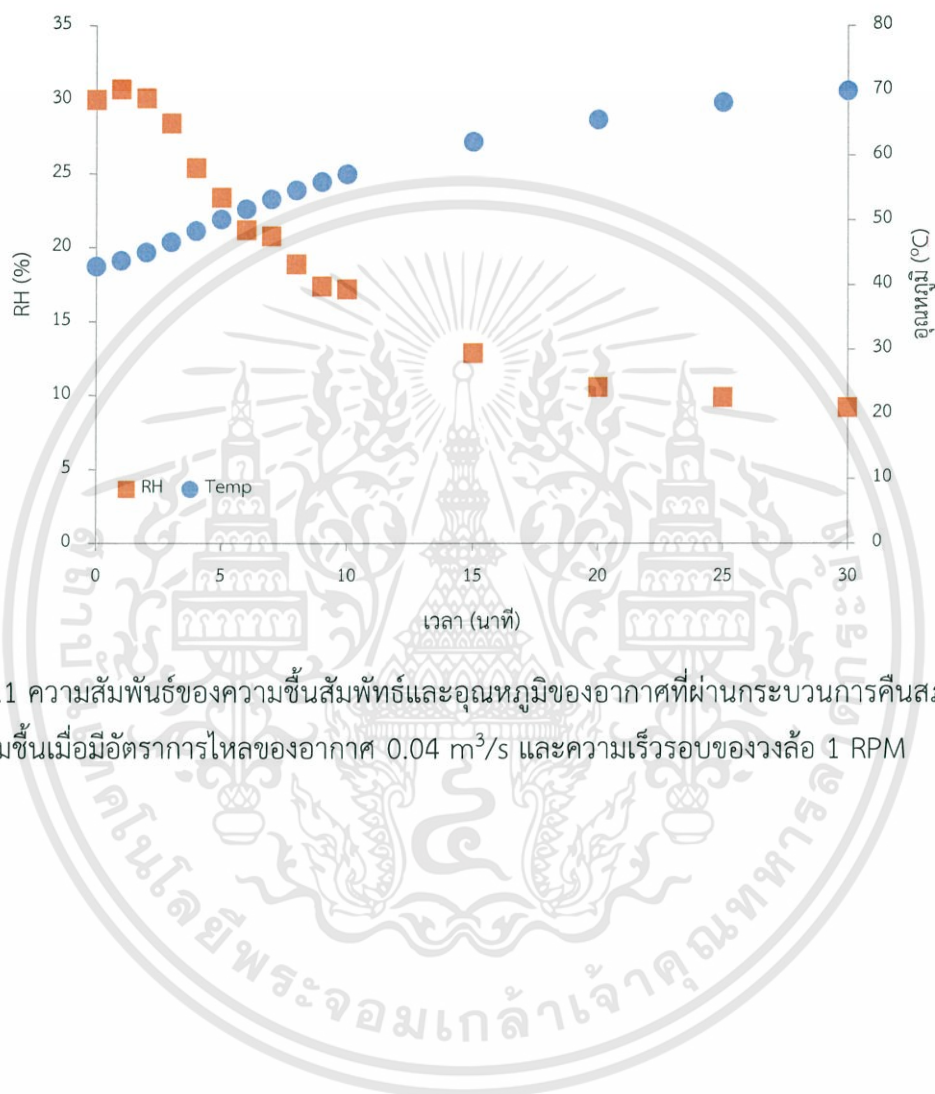
- Glassware Chemical. (2557). ซิลิกาเจล. 2 กันยายน 2559.
<http://glasswarechemical.com/materials/>
- กระทรวงพลังงาน. การอบแห้งและลดความชื้นในอุตสาหกรรม. 29 สิงหาคม 2559.
www2.dede.go.th/Bay18%20Desiccant%20Dehumidification.pdf
- จรัสกรีย์ เทียงธรรม. (2542). การทำแห้งอาหารโดยระบบการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งบางส่วน.
 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล. (2555). เทคโนโลยีการทำแห้งแบบผสมผสาน : การนำมาใช้เพื่อถนอม
 ผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อน. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่35(2), 272-273.
- เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และ วีรชัย อัจหาญ.(2554).การอบแห้งแครอทด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความ
 ร้อน.การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, 31 มีนาคม – 1 เมษายน
 2554 ณ ชลจันทร์ พัทยา รีสอร์ท จังหวัดชลบุรี.
- เทวรัตน์ ทิพย์วิมล. (2555). การควบคุมสภาพผักอบแห้งกึ่งสำเร็จรูปด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบปั๊ม
 ความ ร้อน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- นพรัตน์ อมัตริรัตน์ และสถาพร ทองวิค. (2554). การศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องอบ
 แห้งแบบปั๊มความร้อนระหว่างสารทำความเย็น R-22 กับ COLD-22. วิศวกรรมศาสตร์
 มหาลัยเทคโนโลยีราชมงคล นครราชสีมา. กรุงเทพฯ.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และสมักร รักแม่. ความชื้นในอากาศ. 3 กันยายน 2559.
<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/6122/air-humidity-ความชื้น>
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. อัตราการทำแห้ง, 7 กันยายน 2559.
<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0663/drying-rate->
- ไพรวลัย วงศ์ดี. (2555). ความชื้นของอากาศ. 2 กันยายน 2559.
[https://www.gotoknow.org/posts/438663.](https://www.gotoknow.org/posts/438663)
- สั๊กมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา. (2555). การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. มหาวิทยาลัย
 เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- สุนทร สืบคำ และฤทธิชัย อัศวราชันย์. (2554). แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งสำหรับวัสดุ,
 17(1), 2-4.
- อัจหาญ ณ นรงค์. (2556). ทำความเข้าใจแผนภูมิไซโครเมตริก (Psychometric Chart). 22
 สิงหาคม 2559.
http://www.thailandindustry.com/indust_newweb/articles_preview.php?cid



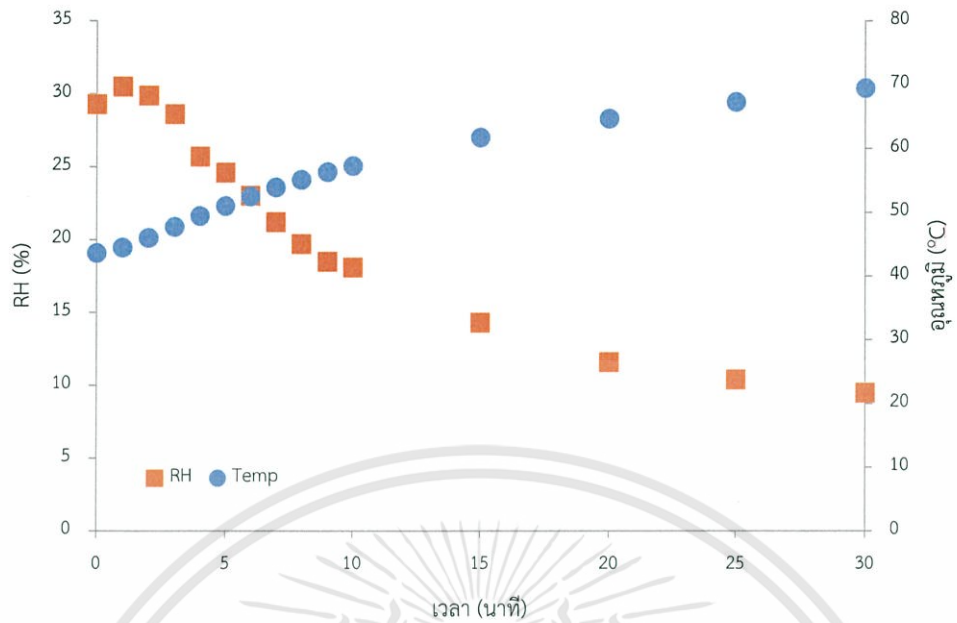
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

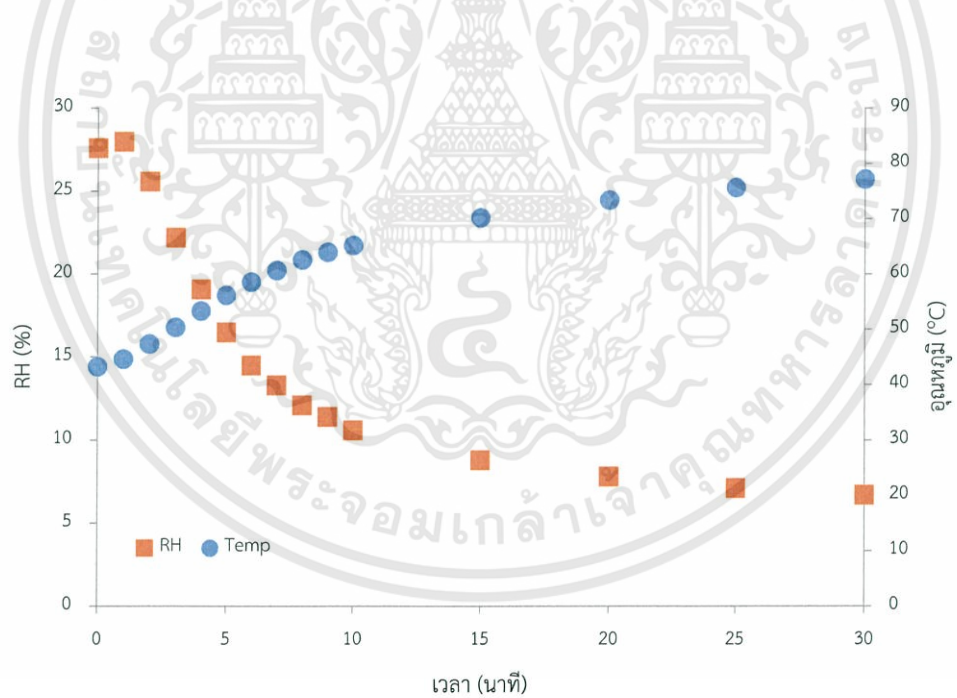
ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศที่ผ่านกระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้นเมื่อมีอัตราการไหลของอากาศและความเร็วรอบของวงล้อที่ค่าต่างๆ



รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศที่ผ่านกระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้นเมื่อมีอัตราการไหลของอากาศ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และความเร็วยรอบของวงล้อ 1 RPM

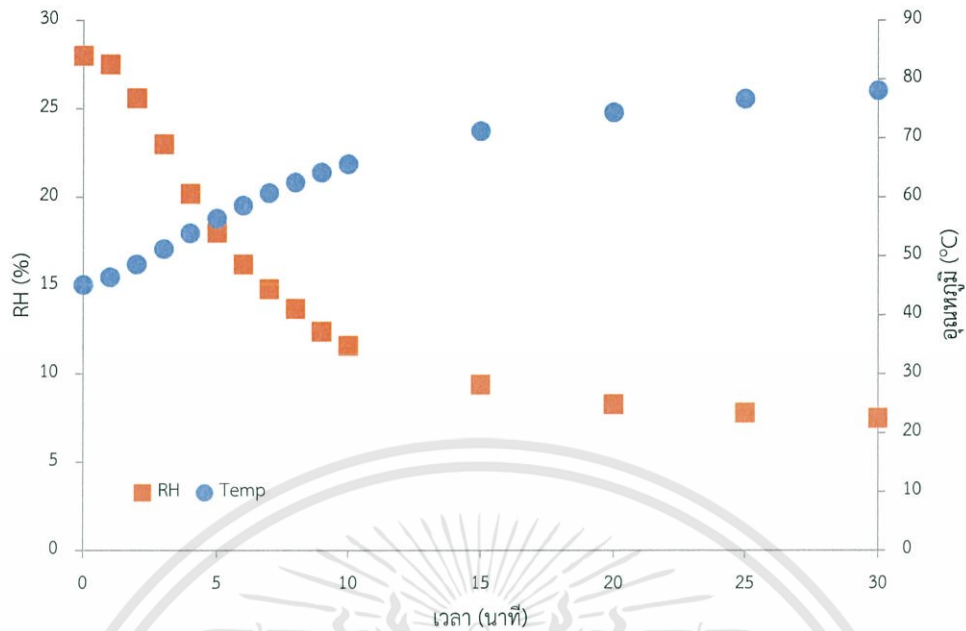


รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศที่ผ่านกระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้นเมื่อมีอัตราการไหลของอากาศ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และความเร็วรอบของวงล้อ 1.5 RPM

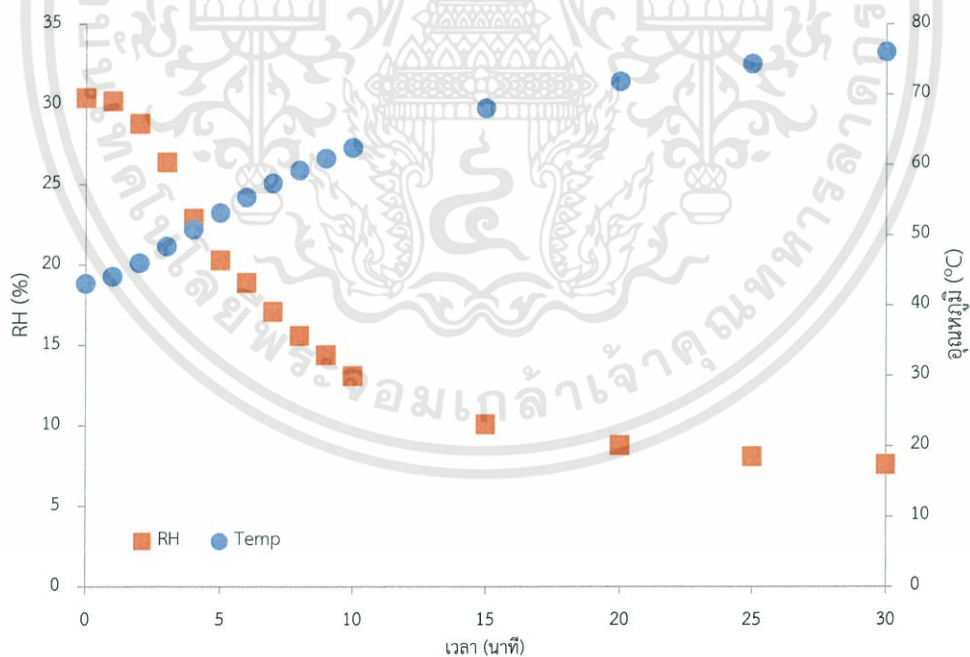


รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศที่ผ่านกระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้นเมื่อมีอัตราการไหลของอากาศ $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ และความเร็วรอบของวงล้อ 0.5 RPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

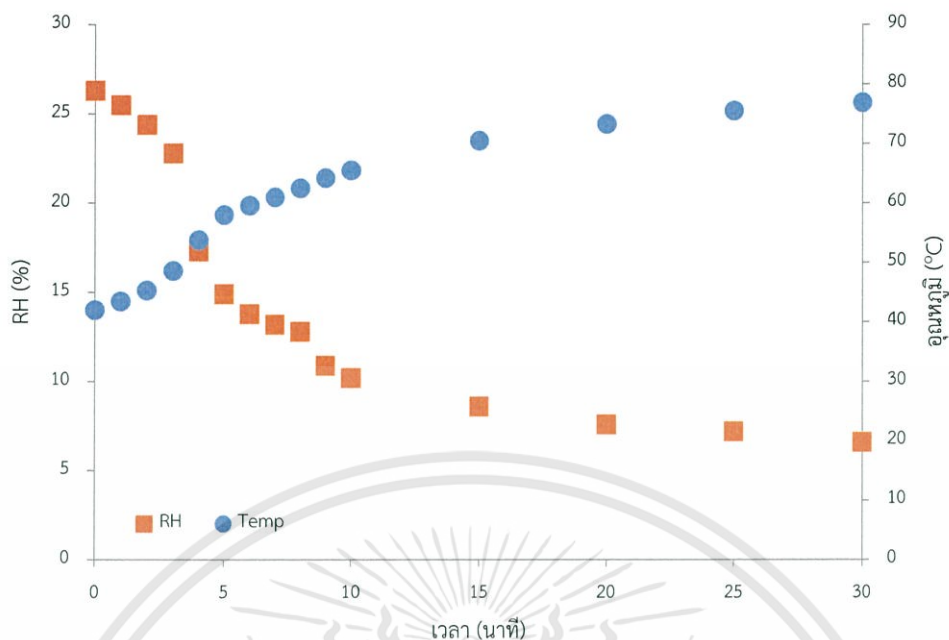


รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศที่ผ่านกระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้นเมื่อมีอัตราการไหลของอากาศ $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ และความเร็วรอบของวงล้อ 1 RPM

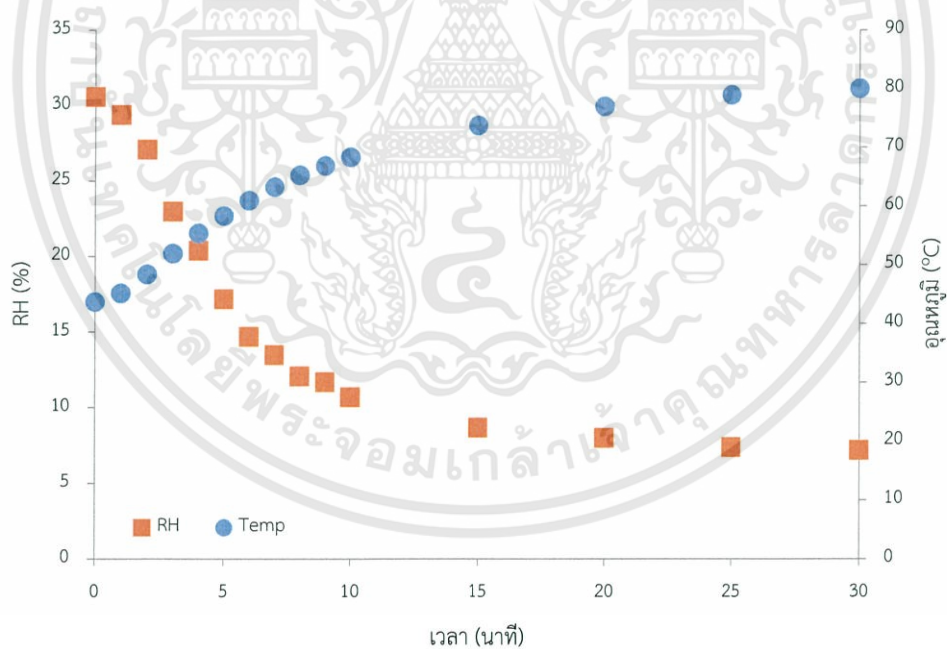


รูปที่ ก.5 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศที่ผ่านกระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้นเมื่อมีอัตราการไหลของอากาศ $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ และความเร็วรอบของวงล้อ 1.5 RPM

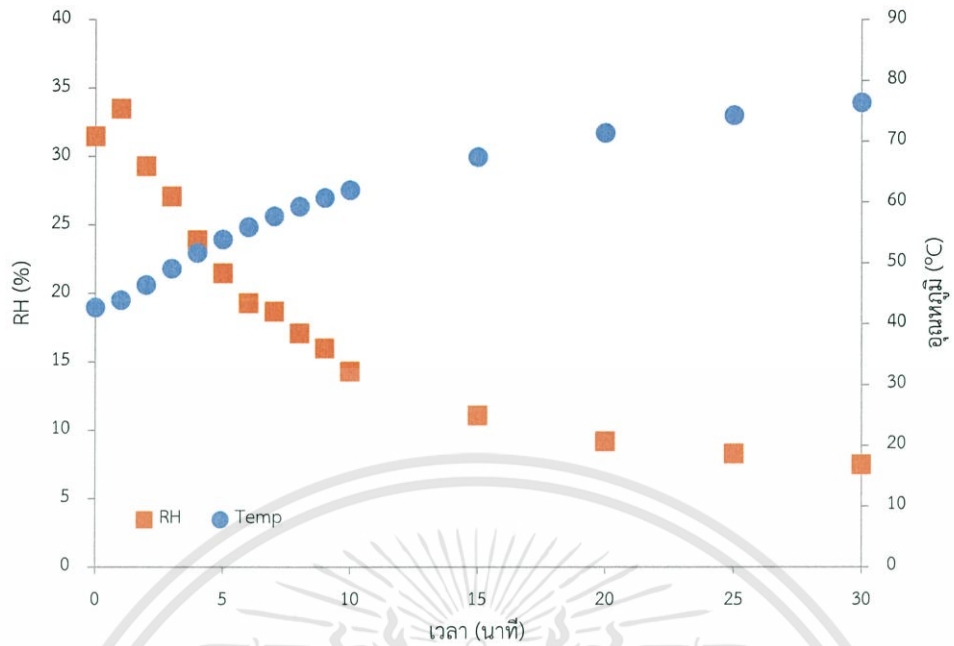
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.6 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศที่ผ่านกระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้นเมื่อมีอัตราการไหลของอากาศ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และความเร็วรอบของวงล้อ 0.5 RPM



รูปที่ ก.7 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศที่ผ่านกระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้นเมื่อมีอัตราการไหลของอากาศ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และความเร็วรอบของวงล้อ 1 RPM



รูปที่ ก.8 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศที่ผ่านกระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้นเมื่อมีอัตราการไหลของอากาศ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และความเร็วรอบของวงล้อ 1.5 RPM