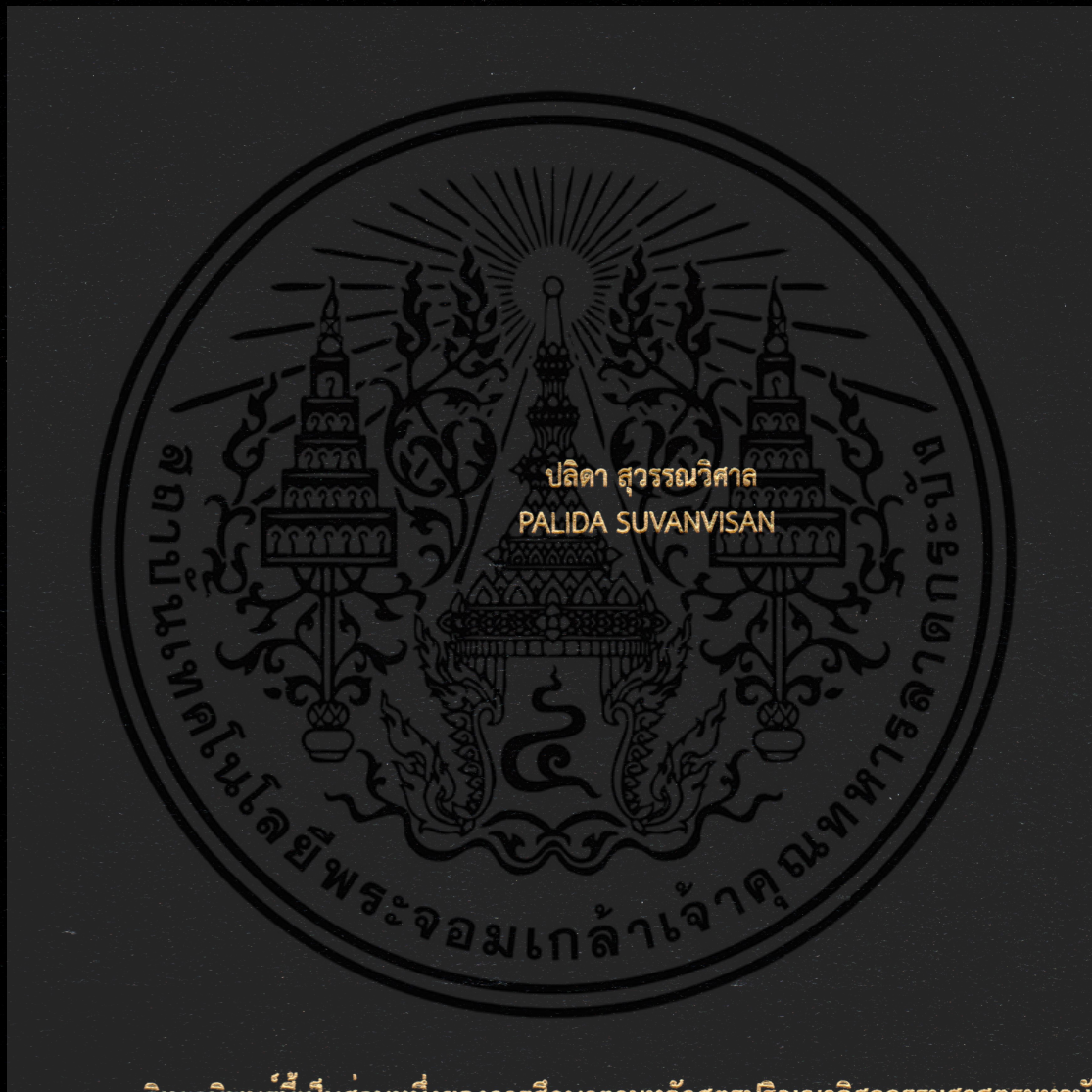


การอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับระบบลดความชื้นในอากาศ
สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอก

HOT AIR DRYING WITH AN AIR DEHUMIDIFICATION SYSTEM
FOR GERMINATED BROWN RICE DRYING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-100-202

การอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับระบบลดความชื้นในอากาศ
สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอก

HOT AIR DRYING WITH AN AIR DEHUMIDIFICATION SYSTEM
FOR GERMINATED BROWN RICE DRYING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูงานนี้ เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HOT AIR DRYING WITH AN AIR DEHUMIDIFICATION SYSTEM
FOR GERMINATED BROWN RICE DRYING



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN AGRICULTURAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
KMITL-2017-EN-M-100-202



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อผู้เผยแพร่เห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับระบบลดความชื้นในอากาศสำหรับการอบแห้ง
ข้าวกล้องงอก

Thesis Title Hot Air Drying with an Air Dehumidification System for Germinated Brown
Rice Drying

นักศึกษา นางสาวปติดา สุวรรณวิศาล

รหัสประจำตัว 59601289

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.จिरาพร ศรีภิญโญวณิชย์ จงยิ่งเจริญ

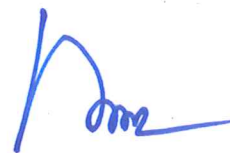
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-100-202

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ศิวลักษณ์	ปฐวีรัตน์	
ผศ.ดร.ธีรพงศ์	ผลโพธิ์	
ดร.เอกพงษ์	ชีวีตโสภณ	
ดร.นารัถระพี	นาคะวัญชะ	
ดร.จिरาพร	ศรีภิญโญวณิชย์ จงยิ่งเจริญ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 12 ธันวาคม พ.ศ. 2560 เวลา 11.00-13.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
คณะบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 12 ธันวาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับระบบลดความชื้นในอากาศสำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอก
นักศึกษา	นางสาวปลิดา สุวรรณวิศาล
รหัสประจำตัว	59601289
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเกษตร
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร. จิราพร ศรีภิญโญวณิชย์ จงยิ่งเจริญ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อประยุกต์ใช้ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบการลดความชื้นในอากาศสำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอก โดยมีการศึกษาทั้งในส่วนของการทำงานและประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้นที่ใช้เพื่อลดความชื้นในอากาศและลักษณะการอบแห้ง พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง และคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่ผ่านกระบวนการอบแห้งในระบบดังกล่าว และมีการเปรียบเทียบระบบอบแห้งนี้กับวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนแบบปกติด้วย เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ วงล้อดูดความชื้น ส่วนอบแห้ง และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในการศึกษาการทำงานของวงล้อในส่วนดูดความชื้นในอากาศและส่วนคั้นสภาพสารดูดความชื้น พบว่าระบบวงล้อดูดความชื้นสามารถทำให้ความชื้นในอากาศลดลงและอุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้นตามกระบวนการอะเดียแบติก และวงล้อยังได้รับการคั้นสภาพสารดูดความชื้นตามกระบวนการอะเดียแบติกเช่นกัน สำหรับการศึกษาสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิอบแห้ง 90°C พบว่าวงล้อดูดความชื้นสามารถทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศลดลงจาก 42.6% (17.5 g water/kg dry air) เป็น 9% (10 g water/kg dry air) ซึ่งอากาศร้อนที่เหลือทิ้งจากกระบวนการอบแห้ง เมื่อนำมาแลกเปลี่ยนความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศโดยรอบ และนำอากาศนี้ (ความชื้นสัมพัทธ์ 9%, 17.5 g water/kg dry air) มาใช้เพื่อคั้นสภาพสารดูดความชื้น พบว่าอากาศที่นำความชื้นออกจากซิลิกาเจลมีความชื้นสัมพัทธ์เป็น 22.9% (25 g water/kg dry air) แสดงให้เห็นว่าซิลิกาเจลภายในวงล้อดูดความชื้นสามารถดูดและคายความชื้นออกได้ดี โดยมีค่าประสิทธิภาพแบบอะเดียแบติกสูงถึง 98.49% ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นโดยการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศ ($0.04\text{-}0.08 \text{ m}^3/\text{s}$) และอุณหภูมิอบแห้ง ($80\text{-}120^\circ\text{C}$) พบว่ามีอิทธิพลของตัวแปรเหล่านี้ต่อลักษณะการอบแห้ง พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง และคุณภาพของข้าวกล้องงอก อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิอบแห้งสูงส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งลดลง ปริมาณสารกาบามีค่าสูงขึ้นเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูงในช่วง $100\text{-}120^\circ\text{C}$ แต่ใช้อัตราการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ! อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลของอากาศต่ำที่ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และที่อัตราการไหลของอากาศนี้ยังให้ข้าวกล้องหุงสุกที่มีความแข็งน้อยกว่าด้วย ในการสร้างแบบจำลองการอบแห้งสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาในการอบแห้ง แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด คือ แบบจำลอง Midilli et al. ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจและค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยเป็น 0.9991 และ 0.0045 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนแบบปกติที่อัตราการไหลของอากาศเดียวกัน คือ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ โดยมีอุณหภูมิอบแห้งในช่วง $80\text{-}120^\circ\text{C}$ และมีข้าวกล้องเป็นตัวอย่างควบคุม การอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นให้อัตราการอบแห้งสูงสุด เวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งน้อยกว่า และมีปริมาณสารกาบาโดยเฉลี่ยมากกว่าการอบแห้งแบบลมร้อนปกติ ผลลัพธ์ข้าวกล้องงอกที่ได้มีปริมาณสารกาบามากกว่าข้าวกล้องปกติประมาณ 9 เท่า มีเนื้อสัมผัสดีกว่า และมีความขาวมากกว่าข้าวกล้องควบคุม สภาวะที่แนะนำสำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกในงานวิจัยนี้ คือ การอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นให้อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิอบแห้งเป็น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และ 120°C ตามลำดับ สภาวะนี้ให้อัตราการอบแห้งสูงสุดมากที่สุด $0.0125 \text{ g water/g dry matter}\cdot\text{min}$ เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด 45 นาที พลังงานที่ใช้การอบแห้งต่ำที่สุด $0.173 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ปริมาณสารกาบาสูง $13.01 \text{ mg}/100 \text{ g}$ ความแข็ง ความเหนียว และความขาวปานกลาง 105.77 kgf , 13.20 kgf และ 59.98% ตามลำดับ

Thesis	Hot air drying with an air dehumidification system for germinated brown rice drying
Student	Miss Palida Suvanvisan
Student ID.	59601289
Degree	Master of Engineering
Program	Agricultural Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Dr.Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen

Abstract

This research aimed to apply a hot air drying system combined with an air dehumidification system for germinated brown rice drying. The study was conducted to determine desiccant wheel's operation and effectiveness for air dehumidification and to investigate drying characteristics, energy consumption and quality of dried germinated brown rice. Comparison of this drying system to a conventional hot air drying was also conducted. The hot air drying system with a desiccant wheel (HA-DW) comprised of 3 main parts including desiccant wheel, drying unit, and heat exchanger. For the determination of operation of the desiccant wheel in the sections of dehumidification and regeneration, the desiccant wheel could reduce moisture content and increase temperature of air following the ideal adiabatic process. The desiccant in the wheel was also regenerated conforming to the theoretical principle of desiccant wheel's operation. For the determination of psychrometric properties of air and effectiveness in the drying system at the air flow rate of 0.04 m³/s and temperature of 90°C, the desiccant wheel could reduce the relative humidity from 42.6% (17.5 g water/kg dry air) to 9% (10 g water/kg dry air). The hot air exhausted from the drying chamber was heat exchanged with the ambient air. Then, the heated air (9%RH, 17.5 g water/kg dry air) was passed through the regeneration section of the desiccant wheel. The outlet air of this section had the relative humidity of 22.9% (25 g water/kg dry air). This shows that the desiccant, silica gel, could well absorb and desorb moisture content of air for the system of study with the adiabatic efficiency of 98.49%. For germinated brown rice drying in the HA-DW system, effects of air flow rate (0.04-0.08 m³/s) and drying temperature (80-120°C) was investigated. The effects of

these variables were found on drying characteristics, energy consumption during drying and quality of dried germinated brown rice. Higher air flow rate and drying temperature resulted in higher drying rate, shorter drying time, and lower energy consumption. Greater GABA content was obtained when drying at high temperatures of 100-120°C and low air flow rate of 0.04 m³/s. This level of air flow rate also contributed to lower hardness of cooked germinated brown rice. In drying modelling, the most suitable drying model was the Midilli et al. model. The average values of coefficient of determination and root mean square error were the greatest of 0.9991 and the lowest of 0.0045, respectively. When compared to the conventional hot air drying at the same air flow rate of 0.08 m³/s with the drying temperature of 80-120°C along with brown rice as a control, the HA-DW drying provided higher maximum drying rate, lower drying time and energy consumption, and greater average GABA content than hot air drying. The germinated brown rice product had GABA content 9 times higher, had better texture attributes and was whiter than the control brown rice. The recommended drying condition for germinated brown rice of this study was the HA-DW drying at the air flow rate of 0.08 m³/s and drying temperature of 120°C. This drying condition provided the highest maximum drying rate of 0.0125 g water/g dry matter-min, the shortest drying time of 45 min, the lowest energy consumption of 0.173 kW-h, high GABA content of 13.01 mg/100 g, and medium hardness, stickiness, and whiteness of 105.77 kgf, 13.20 kgf, and 59.98%, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (ชื่อโครงการวิจัย การออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะของระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน: กรณีศึกษาการอบแห้งข้าวกล้องงอก ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559) ที่สนับสนุนงบประมาณในการจัดซื้อวัสดุและอุปกรณ์ในการทำวิจัย และ หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

ผศ.ดร.ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์ ผศ.ธีรพงศ์ ผลโพธิ์ และ ดร.นารัษฎะพี นาคะวังนะ กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ดร.จิราพร ศรีภิญโญวิชย์ จงยิ่งเจริญ หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ ดร.เอกพงษ์ ชีวีตโสภณ หลักสูตรวิศวกรรมอาหาร สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาด้านวิชาการและการจัดทำโครงการ ที่คอยให้คำแนะนำปรึกษา ข้อคิดเห็นในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอน และให้กำลังใจในการทำโครงการมาโดยตลอด

ผู้จัดทำขอขอบคุณทุกท่านที่ให้การสนับสนุนการทำงานและเป็นกำลังใจแก่ผู้จัดทำมาโดยตลอด กระทั่งการศึกษาค้นคว้าโครงการในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำมีความซาบซึ้งใจในความกรุณาอันดีจากทุกท่านที่ได้กล่าวนามมา และ ขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ปอลิดา สุวรรณวิศาล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 แผนการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ระบบการลดความชื้นอากาศโดยใช้สารดูดความชื้น.....	4
2.2 สารดูดความชื้น.....	6
2.3 สมบัติทางไซโครเมตริก.....	9
2.3.1 แผนภูมิไซโครเมตริก.....	9
2.3.2 กระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะของอากาศโดยใช้แผนภูมิไซโครเมตริก..	14
2.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบการลดความชื้นในอากาศโดยใช้สารดูดความชื้น.....	18
2.4.1 วัฏจักรการทำงานของสารดูดความชื้น.....	18
2.4.2 ประสิทธิภาพในการลดความชื้นของวงล้อดูดความชื้น.....	20
2.5 ทฤษฎีการอบแห้ง.....	23
2.5.1 ทฤษฎีและการคำนวณในกระบวนการอบแห้ง.....	23
2.5.2 ความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุขึ้นกับกลไกการเคลื่อนที่.....	25
2.5.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้ง.....	26
2.5.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้ง.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 การลดความชื้นในเมล็ดข้าว.....	28
2.7 ข้าวกล้องงอก.....	30
2.8 สารกาบา.....	32
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
2.6.1 งานวิจัยเกี่ยวกับระบบลดความชื้นในอากาศ.....	33
2.6.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการอบแห้งข้าวกล้องงอก.....	34
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	35
3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง.....	35
3.2 กระบวนการเพาะงอกข้าวกล้อง.....	35
3.3 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น.....	36
3.4 แผนการทดลอง.....	39
3.4.1 การศึกษาการทำงานของวงล้อและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้นทั้งระบบในสภาวะห้องอบแห้งเปล่า.....	39
3.4.1.1 การทดลองดูดความชื้นในอากาศของวงล้อดูดความชื้น.....	39
3.4.1.2 การทดลองการคืนสภาพสารดูดความชื้นในวงล้อดูดความชื้น..	39
3.4.1.3 การศึกษาสมบัติของอากาศในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นในสภาวะห้องอบแห้งเปล่า.....	40
3.4.1.4 การคำนวณประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้น.....	41
3.4.2 การศึกษาการอบแห้งข้าวกล้องงอกในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น.....	43
3.4.2.1 อิทธิพลของอัตราการไหลและอุณหภูมิต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น.....	44
3.4.2.2 การเปรียบเทียบระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ.....	45
3.5 การวิเคราะห์ลักษณะการอบแห้ง.....	46
3.5.1 ปริมาณความชื้น.....	46
3.5.2 อัตราส่วนความชื้น (The moisture ratio, MR)	46
3.5.3 อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR)	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 การวิเคราะห์พลังงานจำเพาะของการอบแห้ง.....	47
3.7 การสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบชั้นบาง.....	47
3.8 การวิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องงอก.....	48
3.8.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพ.....	48
3.8.2 สารกาบา.....	49
3.8.3 ความแข็งและความเหนียว.....	50
3.8.4 ค่าสีและค่าความขาว.....	51
3.9 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	53
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	54
4.1 การทำงานของวงล้อและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้นทั้งระบบใน สถานะห้องอบแห้งเปล่า.....	54
4.1.1 การดูดความชื้นในอากาศของวงล้อดูดความชื้น.....	54
4.1.2 การคืนสภาพสารดูดความชื้นในวงล้อดูดความชื้น.....	56
4.1.3 สมบัติของอากาศในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นใน สถานะห้องอบแห้งเปล่า.....	57
4.1.4 ประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้นทั้งระบบในสถานะห้องอบแห้งเปล่า.....	59
4.2 อิทธิพลของอัตราการไหลอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่อลักษณะการอบแห้งและ พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวง ล้อดูดความชื้น.....	60
4.3 อิทธิพลของอัตราการไหลอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่อสมบัติของอากาศในการ อบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น.....	65
4.4 การสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวกล้องงอกแบบชั้นบางด้วย ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น.....	67
4.5 อิทธิพลของอัตราการไหลอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่อคุณภาพของข้าวกล้อง งอกที่อบแห้งในอบแห้งในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น.....	72
4.5.1 สารกาบา.....	72
4.5.2 ความแข็งและความเหนียว.....	73
4.5.3 ค่าสีและความขาว.....	74

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 การเปรียบเทียบระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ.....	76
4.6.1 การเปรียบเทียบลักษณะการอบแห้งและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง.....	76
4.6.2 การเปรียบเทียบคุณภาพของข้าวกล้องงอก.....	81
4.6.2.1 สารกาบา.....	81
4.6.2.2 ความแข็งและความเหนียว.....	82
4.6.2.3 ค่าสีและค่าความขาว.....	82
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	84
5.1 ผลการศึกษาการทำงานของวงล้อ และวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้น ทั้งระบบในสถานะห้องอบแห้งเปล่า.....	84
5.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่อลักษณะการ อบแห้งและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลม ร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น.....	84
5.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่อสมบัติของ อากาศในการอบแห้งข้าว กล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูด ความชื้น.....	85
5.4 ผลการศึกษาการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวกล้องงอกแบบ ชั้นบางด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น.....	85
5.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่อคุณภาพของ ข้าวกล้องงอกที่อบแห้ง ในอบแห้งในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูด ความชื้น.....	85
5.6 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลม ร้อนปกติ.....	86
5.7 สภาพที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อน ร่วมกับระบบลดความชื้นในอากาศ.....	86
5.8 ข้อเสนอแนะ.....	86
เอกสารอ้างอิง.....	87
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่.....	93
ประวัติผู้เขียน.....	108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
IX
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของซิลิกาเจล	7
2.2 สีบ่งชี้และปริมาณความชื้นที่ซิลิกาเจลดูดไว้ได้.....	7
2.3 สารดูดความชื้นที่องค์การอาหารและยาประเทศไทยรับรอง.....	8
2.4 สภาพการอุ้มความชื้นภายในวัตถุดิบเปียก.....	26
2.5 รูปแบบการจำลองสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้ง.....	28
3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง.....	47
4.1 ประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้น.....	59
4.2 เวลาที่ใช้ในการอบแห้งและอัตราการอบแห้งสูงสุดสำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกแบบ ลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้นและอุณหภูมิ ในห้องอบแห้งต่าง ๆ.....	61
4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบการอบแห้งแบบลม ร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นแบบชั้นบางที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิอบแห้ง ต่าง ๆ.....	68
4.4 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศต่อปริมาณสารกาบาของข้าว กล้องงอก.....	73
4.5 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศต่อความแข็งและความเหนียว ของข้าวกล้องงอกหุงสุก.....	74
4.6 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศต่อค่าสีและความขาวของข้าว กล้องงอก.....	75
4.7 การเปรียบเทียบระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติที่อัตราการ อบแห้งสูงสุดและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ มีอัตรา การไหลของอากาศส่วนดูดความชื้นเป็น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$	77
4.8 ปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกที่วิธีการอบแห้งต่าง ๆ.....	81
4.9 ความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุกที่วิธีการอบแห้งต่าง ๆ.....	82
4.10 ค่าสีและความสว่างของข้าวกล้องงอกที่วิธีการอบแห้งต่าง ๆ.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	เครื่องลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้น.....	5
2.2	เครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นแบบหมุนใช้ฮีตเตอร์ในการให้ความร้อนแก่อากาศที่จะใช้ในการคืนสภาพสารดูดความชื้น.....	5
2.3	เครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นแบบหมุนที่มีระบบนำความร้อนกลับมาใช้.....	6
2.4	แผนภาพไซโครเมตริก.....	9
2.5	เส้นอุณหภูมิกระเปาะแห้งบนแผนภูมิไซโครเมตริก.....	10
2.6	เส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียกบนแผนภูมิไซโครเมตริก.....	11
2.7	เส้นอัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio line).....	11
2.8	เส้นความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity line).....	12
2.9	เส้นปริมาตรจำเพาะ (Specific volume).....	13
2.10	เส้นจุดน้ำค้างที่สถานะที่กำหนด.....	13
2.11	เส้นแสดงค่าเอลทาลปี.....	14
2.12	กระบวนการให้ความร้อนกับอากาศ.....	15
2.13	กระบวนการให้ความเย็นกับอากาศ.....	15
2.14	กระบวนการทำความชื้น.....	16
2.15	กระบวนการลดความชื้น.....	17
2.16	กระบวนการทำความเย็นโดยเพิ่มความชื้น และกระบวนการให้ความร้อนและการลดความชื้น.....	18
2.17	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอน้ำกับปริมาณความชื้นในสารดูดความชื้น.....	19
2.18	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอน้ำกับปริมาณความชื้นในสารดูดความชื้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารดูดความชื้น.....	19
2.19	วัฏจักรการทำงานของสารดูดความชื้น.....	20
2.20	แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะกระบวนการอะเดียแบติกสำหรับแก๊สอุดมคติ.....	21
2.21	แผนภูมิไซโครเมตริกในกระบวนการลดความชื้นด้วยวงล้อดูดความชื้นซึ่งเป็นไปตามกระบวนการอะเดียแบติก.....	22
2.22	กราฟแสดงความชื้นกับเวลา.....	24
2.23	กราฟแสดงอัตราการอบแห้งกับเวลา.....	24
2.24	ภาพเปรียบเทียบระหว่างเมล็ดข้าวกล้องธรรมชาติ (แถบบน) กับเมล็ดข้าวกล้องงอก (แถบล่าง).....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26 ปริมาณสารกาบา(GABA) ของข้าวกล้องงอกจากขั้นตอนการผลิตช่วงต่าง ๆ.....	31
3.1 ขั้นตอนการเตรียมข้าวกล้องงอก.....	35
3.2 ข้าวกล้องงอกหลังการเพาะป่ม 24 ชั่วโมง.....	36
3.3 แผนผังเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบวงล้อดูดความชื้น.....	37
3.4 ระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น.....	38
3.5 วงล้อดูดความชื้น.....	38
3.6 ระบบอบแห้งแบบลมร้อน.....	38
3.7 แผนผังเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบวงล้อดูดความชื้นในส่วนดูดความชื้น.....	39
3.8 แผนผังเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบวงล้อดูดความชื้นในส่วนการคืนสภาพสารดูดความชื้น.....	40
3.9 แผนผังแสดงจุดในการวัดสมบัติอากาศของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบวงล้อดูดความชื้น.....	41
3.10 แผนภูมิไซโครเมตริกในกระบวนการลดความชื้นด้วยวงล้อดูดความชื้นซึ่งเป็นไปตามกระบวนการระเหยแบบตึก.....	42
3.11 แผนผังการทดลองอิทธิพลของอัตราการไหลและอุณหภูมิต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น	43
3.12 แผนผังการทดลองการเปรียบเทียบระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ.....	44
3.13 ข้าวกล้องงอกชั้นความหนา 1 เซนติเมตรเกลี่ยให้เรียบเสมอกัน.....	45
3.14 ข้าวกล้องงอกหลังผ่านการหุงด้วยวิธีการหุงสุกด้วยบีกเกอร์.....	49
3.15 ข้าวกล้องงอกบดละเอียด.....	50
3.16 เครื่องวัด Texture analyzer.....	51
3.17 เครื่องวัดสี Hunter lab.....	52
3.18 การวัดสีของเครื่องวัดสี Hunter lab.....	52
4.1 แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงสภาวะอากาศในระหว่างกระบวนการดูดความชื้น.....	55
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในการดูดความชื้นของวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหล 0.04 m ³ /s.....	55
4.3 แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงสภาวะอากาศในระหว่างกระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้น.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในการคืนสภาพสารดูดความชื้นของวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหล 0.04 m ³ /s และอุณหภูมิ 60°C.....	57
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในระบบวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหล 0.04 m ³ /s และอุณหภูมิ 90°C.....	58
4.6 แผนผังแสดงสมบัติอากาศในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบวงล้อดูดความชื้น.....	59
4.7 ค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้นเป็น 0.04 m ³ /s 0.06 m ³ /s และ 0.08 m ³ /s ตามลำดับ.....	62
4.8 ค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้นเป็น 0.04 m ³ /s 0.06 m ³ /s และ 0.08 m ³ /s ตามลำดับ.....	62
4.9 เส้นโค้งการอบแห้งของข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้นเป็น (ก) 0.04 m ³ /s (ข) 0.06 m ³ /s และ (ค) 0.08 m ³ /s ตามลำดับ.....	63
4.10 เส้นโค้งอัตราการอบแห้งของข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้นเป็น (ก) 0.04 m ³ /s (ข) 0.06 m ³ /s และ (ค) 0.08 m ³ /s ตามลำดับ.....	64
4.11 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศในส่วนดูดความชื้นของวงล้อดูดความชื้นในกระบวนการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นกับเวลาที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่ออัตราการไหลของอากาศเป็น (ก) 0.04 m ³ /s (ข) 0.06 m ³ /s และ (ค) 0.08 m ³ /s ตามลำดับ.....	66
4.12 การเปรียบเทียบเส้นโค้งอบแห้งระหว่างข้อมูลการอบแห้งจริงและข้อมูลจากการอบแห้งที่ได้จากการคาดการณ์ด้วยแบบจำลอง Midilli et al. ที่อัตราการไหลของอากาศ (ก) 0.04 m ³ /s (ข) 0.06 m ³ /s และ (ค) 0.08 m ³ /s ตามลำดับ ในแต่ละอุณหภูมิ.....	70
4.13 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นระหว่างข้อมูลการอบแห้งจริงและข้อมูลจากการอบแห้งที่ได้จากการคาดการณ์ด้วยแบบจำลอง Midilli et al. ที่อัตราการไหลของอากาศ (ก) 0.04 m ³ /s (ข) 0.06 m ³ /s และ (ค) 0.08 m ³ /s ตามลำดับ ในแต่ละอุณหภูมิ.....	71
4.14 การเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกระหว่างระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้นเป็น 0.08 m ³ /s.....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และของอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.15	การเปรียบเทียบค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกระหว่างระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ ที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนตูดความชื้นเป็น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$	78
4.16	เส้นโค้งการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบการอบแห้งแบบต่างๆที่อัตราการไหลของอากาศ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิลมร้อนอากาศ (ก) 80°C (ข) 100°C และ(ค) 120°C ตามลำดับ.....	79
4.17	เส้นโค้งอัตราการอบแห้งของการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบการอบแห้งแบบต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของอากาศ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิลมร้อน (ก) 80°C (ข) 100°C และ (ค) 120°C ตามลำดับ.....	80



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

อากาศในห้องอบแห้งถือเป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้งในกระบวนการอบแห้ง อัตราการอบแห้งสูงสามารถเกิดขึ้นได้ในสภาวะที่มีความเร็วลมสูง อุณหภูมิสูง และความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ [1] การอบแห้งเป็นการเอาน้ำออกจากวัสดุที่ต้องการ [2] ทำให้ปริมาณน้ำในวัสดุนั้นลดลง (ความชื้นลดลง) โดยส่วนใหญ่วัสดุนั้นจะอยู่ในสถานะของแข็ง น้ำที่ระเหยออกจากวัสดุนั้นอาจจะไม่ต้องระเหยที่จุดเดือดแต่ใช้อากาศพัดผ่านวัสดุนั้นเพื่อดึงน้ำออกมา อากาศจะรับความชื้นจากวัสดุอบแห้ง วัสดุจะแห้งได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสมบัติของอากาศที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งเพื่อทำให้ของเหลวในวัสดุระเหยเป็นไอ ซึ่งหลังกระบวนการอบแห้งจะได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่มีสัดส่วนของของเหลวต่ำลง การลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องอบแห้งสามารถส่งผลให้การระเหยน้ำออกจากวัสดุมาซึ่งอากาศมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีความสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้ง เพิ่มความสม่ำเสมอของความชื้นของวัสดุในระหว่างอบแห้ง เพิ่มคุณภาพของวัสดุอบแห้ง และลดเวลาในการอบแห้ง [3,4] โดยเฉพาะวัสดุที่เสื่อมคุณภาพได้ด้วยความร้อน [2]

ในปัจจุบันสารดูดความชื้นมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด โดยแต่ละชนิดจะมีคุณลักษณะ และความเหมาะสมในการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป บางชนิดสัมผัสอาหารได้ บางชนิดไม่อนุญาตให้ใช้กับอาหาร ขึ้นอยู่กับมาตรฐานการนำไปใช้งานของแต่ละประเทศ สารดูดความชื้นที่มีการนำมาใช้กับอาหาร ได้แก่ ซิลิกาเจล (Silica gel) [5] ซึ่งสามารถดูดความชื้นได้มากถึง 40% ของน้ำหนักตัว ไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยาและไม่เป็นพิษ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ มีความปลอดภัยที่จะใช้กับอาหารและยา ซึ่งในระบบการลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศโดยใช้สารดูดความชื้น [6] มีส่วนประกอบหลักได้แก่ ชุดวงล้อหมุนที่มีสารดูดความชื้น โดยชุดวงล้อนี้จะหมุนด้วยมอเตอร์เพื่อดึงความชื้นออกจากอากาศในกระบวนการผลิต หลังจากนั้นส่วนของวงล้อ สารดูดความชื้นก็จะหมุนผ่านอากาศร้อน เพื่อเป่าไล่ความชื้นออกจากวงล้อให้สารดูดความชื้นกลับมาอยู่สภาวะพร้อมใช้งานในรอบถัดไปของระบบ ดังนั้นการลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศโดยใช้สารดูดความชื้น [6] จึงเหมาะสำหรับการอบแห้งหรือลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ซึ่งต้องการควบคุมสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำกว่า 50% โดยสารดูดความชื้นสามารถลดความชื้นที่ต้องการควบคุมได้ถึงช่วง 30-40% ดังนั้นสำหรับการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบการลดความชื้นในอากาศจึงถือเป็นวิธีการอบแห้งวัสดุในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งต่ำกว่าสภาวะปกติ จากงานวิจัย [4] ที่อุณหภูมิเดียวกันคือ 50°C เมื่อใช้สารดูดความชื้นร่วมในระบบ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอาจลดลงเหลือ 28-30% ในขณะที่ระบบ

การอบแห้งแบบลมร้อนปกติจะมีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูงถึง 58-63% ซึ่งเมื่อทำการอบแห้งเอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนเวสาหรับการเขางานเพื่อกการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผักซีฝรั่งด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น พบว่าวิธีการอบแห้งนี้ทำให้สารต้านอนุมูลอิสระในผักซีฝรั่งมีค่าสูงกว่าวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนปกติรวมถึงมีลักษณะปรากฏเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคมากกว่าด้วย และจากงานวิจัยของ Madhiyanon [7] ยังพบว่าการนำสารดูดความชื้นซิลิกาเจลมาใช้ในระบบการอบแห้ง ทำให้ความชื้นของอากาศที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งลดลง และลดเวลาในการอบแห้งได้ถึง 20% นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สารดูดความชื้นร่วมกับระบบปรับอากาศสามารถช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศลงได้ คิดเป็น 5-10% [8] เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการใช้สารดูดความชื้นร่วมกับระบบปรับอากาศ โดยในปัจจุบันสำหรับการอบแห้ง การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก็ถือเป็นส่วนสำคัญในการทำนายลักษณะการอบแห้ง เช่น อัตราส่วนความชื้น เวลาที่ใช้อบแห้ง และ อัตราการอบแห้ง เป็นต้น ดังนั้นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งจึงถือเป็นปัจจัยที่สำคัญที่นำไปสู่การทำนายลักษณะการอบแห้งที่เหมาะสมและพัฒนาผลิตภัณฑ์อบแห้งให้มีคุณภาพ [9]

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบการลดความชื้นในอากาศมาใช้ในการอบแห้งข้าวกล้องงอก โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนากระบวนการอบแห้งข้าวกล้องงอกซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพที่ได้รับความนิยมสูง สารสำคัญที่พบในข้าวกล้องงอกคือ กรดแกมมาอะมิโนบิวไทริก (Gamma aminobutyric acid, GABA) [10] มีสรรพคุณหลักช่วยป้องกันโรคอัลไซเมอร์ ลดความวิตกกังวล และลดความดันโลหิต ทั้งนี้เพื่อให้บรรลุเป้าหมาย งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการทำงานและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้นที่ใช้เพื่อลดความชื้นในอากาศ และทำการศึกษาการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งข้างต้นทั้งในเชิงพฤติกรรมการอบแห้ง และคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่ได้มา พร้อมกับการเปรียบเทียบระบบอบแห้งนี้กับวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนปกติด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาการทำงานของวงล้อและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้นทั้งระบบในสภาวะห้องอบแห้งเปล่า

1.2.2 เพื่อศึกษาลักษณะการอบแห้ง พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง และคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการศึกษา คือ ข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เพาะงอกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

1.3.2 ระบบอบแห้งที่ใช้ในการศึกษา คือ ระบบอบแห้งแบบลมร้อน และระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

1.4 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงาน	ปี/เดือน											
	พ.ศ. 2560											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1. การศึกษาการทำงานของวงล้อดูดความชื้น	○	○										
2. การศึกษาสมบัติของอากาศและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้นทั้งระบบ			○	○	○							
3. การศึกษาลักษณะการอบแห้ง พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง และคุณภาพของข้าวกล้องงอกในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น					○	○	○	○				
4. เปรียบเทียบระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ								○	○			
5. วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการทดลอง									○	○		
6. เขียนรายงานผล										○	○	○

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

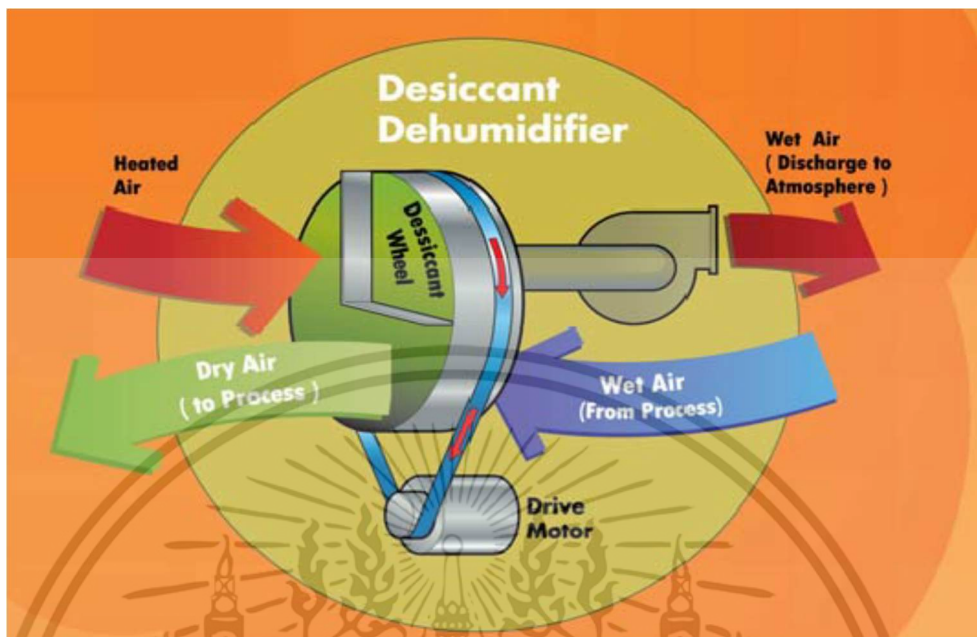
2.1 ระบบการลดความชื้นอากาศโดยใช้สารดูดความชื้น

หลักการของเทคโนโลยีการลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้น [11] (Desiccant dehumidification) ในปัจจุบันสามารถแบ่งได้ 2 ระบบหลักคือ ระบบการทำความเย็นแบบกล (Mechanical refrigeration) และระบบดูดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้น (Desiccant dehumidification) ซึ่งทั้ง 2 ระบบมีข้อดีและข้อเสียในการใช้งานแตกต่างกันดังนี้

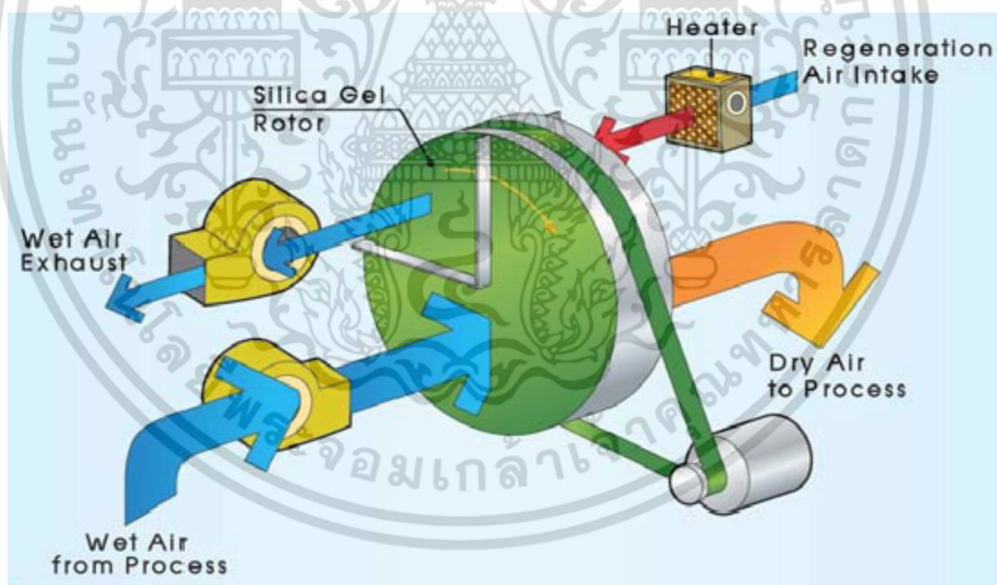
การลดความชื้นด้วยระบบการทำความเย็นแบบกล (Mechanical refrigeration) ระบบมีความซับซ้อนและราคาแพงในการติดตั้งและใช้งาน เหมาะสำหรับการใช้งานในกรณีที่ต้องการลดความชื้นในอากาศที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์สูง (ความชื้นสัมพัทธ์มักสูงกว่า 45% ขึ้นไป)

การลดความชื้นด้วยระบบดูดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้น (Desiccant dehumidification) จะให้ประสิทธิภาพและประหยัดกว่าการลดความชื้นด้วยระบบการทำความเย็นแบบกล (Mechanical refrigeration) ในกรณีที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศไม่สูงมาก (ความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 1-45%) มีหลักการทำงานคือปล่อยอากาศชื้นจากกระบวนการผลิต (Process air) ให้ไหลผ่านวงล้อที่เคลือบสารดูดความชื้นซึ่งจะทำหน้าที่ดูดเก็บความชื้นของอากาศไว้ หลังจากนั้นวงล้อจะถูกหมุนไปถ่ายความชื้นที่เก็บไว้ให้กับอากาศที่ร้อนและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ (Heated Air) เพื่อระบายความชื้นออกจากเครื่องดูดความชื้นต่อไป โดยการผลิตอากาศร้อนที่ใช้ในการดึงความชื้นออกจากเครื่องดูดความชื้นนั้นสามารถใช้ความร้อนทิ้งที่เหลือจากกระบวนการผลิตหรือแสงอาทิตย์ได้ โดยสารดูดความชื้นที่นิยมใช้กันทั่วไปในปัจจุบันได้แก่ ซิลิกาเจล (Silica gel), Activated Alumina, Natural and Synthetic Zeolite, Lithium Chloride, Titanium Silicate และ Synthetic

เครื่องลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นที่นิยมใช้มีส่วนประกอบหลักคือ ชุดวงล้อหมุนดังรูปที่ 2.1 ซึ่งภายในวงล้อจะถูกบรรจุด้วยสารดูดความชื้น เช่นซิลิกาเจล ชุดวงล้อดังกล่าวจะถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เพื่อไล่ความชื้นออกจากอากาศที่ไหลผ่านมาจากกระบวนการผลิต ในปัจจุบันเครื่องลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นแบบแข็งที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ เครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นแบบหมุนใช้ฮีตเตอร์ในการให้ความร้อนแก่อากาศที่จะใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นดังรูปที่ 2.2 เหมาะกับการใช้งานกับพื้นที่เก็บสินค้าและห้องสะอาดขนาดเล็ก และ เครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นแบบหมุนที่มีระบบนำความร้อนกลับมาใช้ดังรูปที่ 2.3

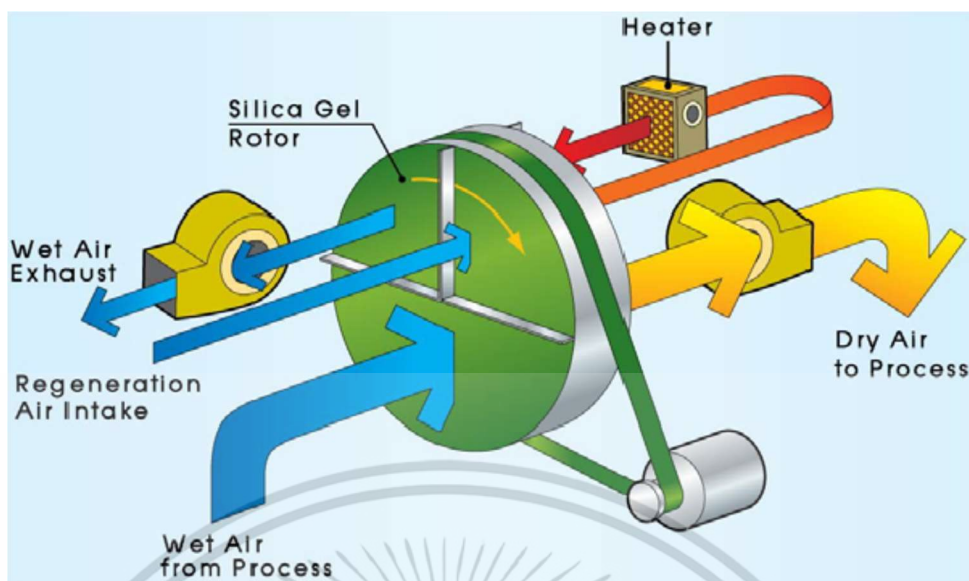


รูปที่ 2.1 เครื่องลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้น [11]



รูปที่ 2.2 เครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นแบบหมุนใช้ฮีตเตอร์ในการให้ความร้อนแก่อากาศที่จะใช้ในการคืนสภาพสารดูดความชื้น [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 เครื่องลดความชื้นโดยสารดูดความชื้นแบบหมุนที่มีระบบนำความร้อนกลับมาใช้ [11]

2.2 สารดูดความชื้น

สารดูดความชื้น [5] นับว่าเป็นสิ่งจำเป็นในการป้องกันสินค้าจากความชื้นที่มาจากแหล่งความชื้นทั้ง 3 ลักษณะ คือ ตัวสินค้า อากาศภายในบรรจุภัณฑ์ และอากาศแวดล้อม ในปัจจุบันสารดูดความชื้นมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด โดยแต่ละชนิดจะมีคุณลักษณะและความเหมาะสมในการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป ดังนี้

ซิลิกาเจล (Silica gel) [12] เป็นสารสังเคราะห์ในรูปของซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide, SiO_2) ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในบรรจุภัณฑ์อาหารและยา มีส่วนประกอบของแร่ธาตุโดยละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยทั่วไปซิลิกาเจลมีพื้นที่ผิวประมาณ 800 ตารางเมตร ต่อ 1 กรัม การดูดความชื้นของซิลิกาเจลเป็นลักษณะทางกายภาพ (Physical adsorption) โดยกักเก็บความชื้นไว้ที่โพรงโครงสร้างด้านในซิลิกาเจล ซิลิกาเจลสามารถดูดความชื้นได้ระหว่าง 20-50% ของน้ำหนักซิลิกาเจลเริ่มต้น และมีประสิทธิภาพสูงสุดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25°C หากอุณหภูมิสูงกว่านี้ประสิทธิภาพในการดูดความชื้นจะลดลงไปเรื่อย ๆ และมีโอกาสที่จะคืนสภาพสารดูดความชื้น (Desorption) ออกจากตัวเองเช่นกัน โดยเหตุนี้การใช้ซิลิกาเจลกับประเทศร้อนขึ้นดังเช่นประเทศไทยจึงต้องระมัดระวังเป็นอย่างยิ่งต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิรอบข้างของบรรจุภัณฑ์สินค้า ในปัจจุบันซิลิกาเจลที่ใช้งานอยู่ทั่วไปมี 2 ชนิดคือ เม็ดสีใส ๆ ขนาด 2-5 มิลลิเมตรและเม็ดสีน้ำเงิน (Indicating silica gel) ขนาดเท่าๆกัน คุณสมบัติของซิลิกาเจลทั้ง 2 ชนิดนี้แตกต่างกันตรงที่มีการเติม Cobalt chloride ลงไปทำให้มีสีน้ำเงินบนเม็ดซิลิกาเจล สีน้ำเงินนี้จะค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีชมพูเมื่อความชื้นสัมพัทธ์รอบข้างสูงขึ้นมากว่า 40% การเปลี่ยนแปลงสีตามปริมาณความชื้นแสดงอยู่ในตารางที่ 2.2 ซิลิกาเจลชนิดนี้มีประโยชน์ในการสังเกตได้โดยง่ายว่าสินค้ามีโอกาสเสี่ยงต่อความชื้นมากน้อยเพียงไร หากซิลิกาเจลที่ใช้ยังคงมีสีน้ำเงินหรือไม่เปลี่ยนสีมากสามารถกล่าวได้ว่าความชื้นรอบข้างที่ถูกซิลิกาเจลดูดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำ ในทางตรงกันข้ามหากสีของซิลิกาเจลเปลี่ยนเป็นสีชมพูแสดงว่าความชื้นรอบข้างนั้นมีปริมาณที่สูงเกินกว่าที่ซิลิกาเจลจะดูด และควบคุมให้อยู่ในระดับที่ต่ำได้ยาก อย่างไรก็ตามการใช้ซิลิกาเจลชนิดสีน้ำเงิน [13] นี้ควรระมัดระวังการใช้งานเป็นอย่างยิ่ง เพราะหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับสุขอนามัยระดับโลกบางแห่ง เช่น European Commission และ International Agent for Research on Cancer ได้จัด Cobalt chloride ไว้อยู่ในประเภทของสารที่อาจก่อให้เกิดมะเร็ง (Carcinogen) หากสูดดมเข้าไป และอาจมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาวได้

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของซิลิกาเจล [14]

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 สีบ่งชี้และปริมาณความชื้นที่ซิลิกาเจลดูดไว้ได้ [14]

สี	ปริมาณความชื้น (% ต่อน้ำหนักซิลิกาเจลเริ่มต้น)
สีฟ้า	20%
สีม่วง	35%
สีชมพู	50%

ไดอะตอมมาเซียส เอิร์ธ (Diatomaceous earth) หรือที่เรียกว่าดินไดอะตอม เป็นดินที่เกิดจากซากพืชเซลล์เดียวที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก เมื่อได้รับการเผาที่อุณหภูมิสูงและเติมสารเร่งปฏิกิริยาบางชนิดเช่น แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride) จะมีคุณสมบัติในการดูดความชื้นได้ดีมากถึง 70-80% ของน้ำหนักตัวเอง เมื่อเทียบกับซิลิกาเจลแล้ว อัตราเร็วในการดูดความชื้นของไดอะตอมมาเซียสเอิร์ธจะต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 25°C และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 75% ซิลิกาเจลจะดูดความชื้นจนอิ่มตัวภายในเวลาไม่กี่ชั่วโมง ในขณะที่เดียวกันต้องใช้เวลาหลายวันหรือเป็นเดือนสำหรับไดอะตอมมาเซียส เอิร์ธที่จะดูดความชื้นจนอิ่มตัว อย่างไรก็ตามการดูดความชื้นของไดอะตอมมาเซียส เอิร์ธนี้มีแรงดึงดูดของโมเลกุลค่อนข้างมาก การคืนสภาพสารดูดความชื้น เมื่ออุณหภูมิรอบข้างสูงขึ้นจึงมีน้อยมากหรือไม่เกิดขึ้นเลย ดังนั้นไดอะตอมมาเซียส เอิร์ธจึงจัดเป็นสารดูดความชื้นที่มีความสามารถในการดูดความชื้นมาก อัตราเร็วของการดูดความชื้นปานกลาง และโอกาสในการคืนสภาพสารดูดความชื้นที่ต่ำ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ไดอะตอมมาเซียส เอิร์ธเป็นทางเลือกที่ดีของสารดูดความชื้น และได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศ

มอนต์โมริลโลไนต์ เคลย์ (Montmorillonite clay) เป็นดินธรรมชาติที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมาก ดินประเภทนี้เมื่อได้รับการเผาที่อุณหภูมิสูง (Calcination) จะทำให้ความสามารถในการดูดความชื้น และการคงสภาพหลังการใช้ดีขึ้น โดยปกติมอนต์โมริลโลไนต์ เคลย์มีความสามารถในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูดความชื้นประมาณ 25% ของน้ำหนักตัวเอง ประสิทธิภาพดังกล่าวจะลดลงค่อนข้างมากเมื่ออุณหภูมิรอบข้างสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยเหตุนี้การใช้มอดโมริลโลไนต์ เคลย์สำหรับบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งจะต้องพิจารณาถึงข้อจำกัดข้อนี้เช่นเดียวกับการใช้ซิลิกาเจล

โมเลกุลลาร์ ซีฟ (Molecular sieve) หรือที่เรียกว่า Synthetic zeolite เป็นสารสังเคราะห์ที่มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นที่ดีมากที่สภาวะภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์รอบข้างในระดับต่ำ (10% - 30%) โดยมีประสิทธิภาพในการดูดความชื้นประมาณ 22% ของน้ำหนักตัวเอง โครงสร้างพิเศษทำให้โมเลกุลลาร์ ซีฟมีพื้นผิวสัมผัสประมาณ 800 ตารางเมตรต่อ 1 กรัม และมีแรงดึงดูดความชื้นที่สูงมาก ข้อดีดังกล่าวทำให้ปัญหาการคืนสภาพสารดูดความชื้นน้อยกว่าซิลิกาเจลและมอดโมริลโลไนต์ เคลย์เมื่ออุณหภูมิรอบข้างสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามโมเลกุลลาร์ ซีฟยังไม่ได้รับการรับรองจากหน่วยงานของรัฐในการใช้งานกับอาหารและยา จึงทำให้สารชนิดนี้ยังไม่แพร่หลายมากนัก

แคลเซียม ออกไซด์ (Calcium oxide, CaO) หรือที่เรียกว่า Caustic lime / Quick lime เป็นสารที่มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นได้มากกว่า 28.5% ของน้ำหนักตัวเอง สารชนิดนี้มีคุณสมบัติเด่นในการดูดความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำและมีอัตราการคืนสภาพสารดูดความชื้นที่ต่ำเช่นเดียวกับโมเลกุลลาร์ ซีฟ อย่างไรก็ตามความเร็วในการดูดความชื้นค่อนข้างช้าเมื่อเทียบกับสารชนิดอื่น ๆ และจะกลายเป็นสารกึ่งเหลว (Swell) เมื่อดูดความชื้นจนกระทั่งอิ่มตัว สารดูดความชื้นประเภทนี้มีคุณสมบัติในการกัดกร่อนสูง (Corrosive) ดังนั้นบรรจุภัณฑ์ของสารดูดความชื้นประเภทนี้ต้องป้องกันไม่ให้สารดูดความชื้นหลุดรอดออกมาได้โดยเด็ดขาด

แคลเซียม ซัลเฟต (CaSO₄) เป็นสารที่ได้จากแรยิปซัม โดยมีคุณสมบัติในการดูดความชื้นค่อนข้างต่ำประมาณ 10% ของน้ำหนักตัวเอง เป็นสารที่คงสถานะได้ดี ไม่เป็นพิษ และไม่กัดกร่อน

ในปัจจุบันสารดูดความชื้นที่องค์การอาหารและยาแห่งประเทศไทยรับรอง (Thailand FDA) [15] สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สารดูดความชื้นที่องค์การอาหารและยาประเทศไทยรับรอง

ชนิดของสารดูดความชื้น	ทะเบียนเลขที่ อย.
ซิลิกาเจลชนิดกระสอบ	10-3-10948-1-0001
ซิลิกาเจลชนิดซอง	10-3-10948-1-0004
ดินดูดความชื้นชนิดกระสอบและซอง	10-3-10948-1-0003
ดินดูดความชื้นชนิดกระสอบและซอง	10-3-10948-1-0002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

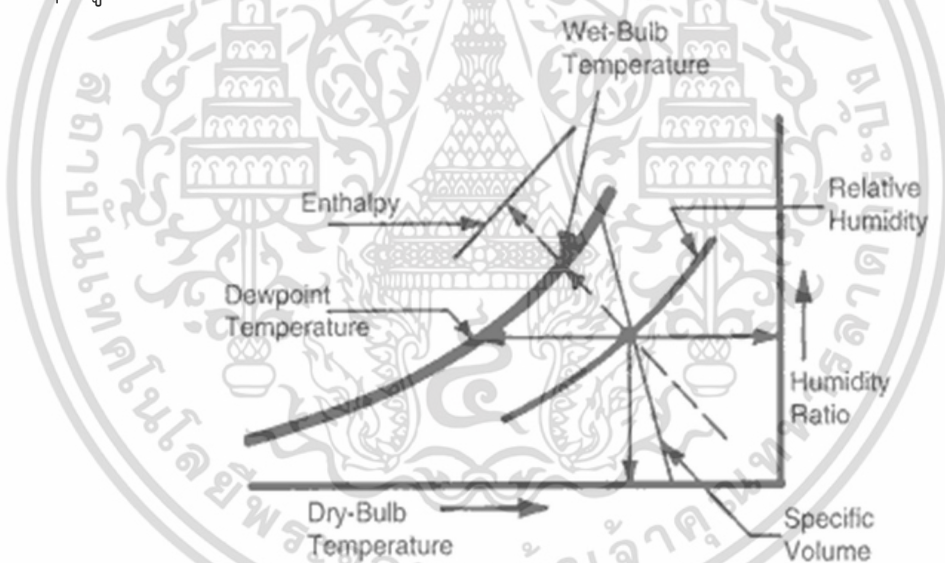
2.3 สมบัติทางไซโครเมตริก

2.3.1 แผนภูมิไซโครเมตริก

Psychrometric เป็นแผนภูมิแสดงถึงความสัมพันธ์ของคุณสมบัติของผสมระหว่างอากาศและไอน้ำ ซึ่งจะมีความสำคัญอย่างมากต่อการปรับอากาศ เนื่องจากอากาศในบรรยากาศไม่ได้แห้งสนิท แต่จะมีไอน้ำปนอยู่ [16] โดยสำหรับการลดความชื้นในห้องอบแห้งจะมีกระบวนการที่เป็นการขจัดน้ำออกจากส่วนผสมของอากาศ เพื่อให้ระบบการอบแห้งมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

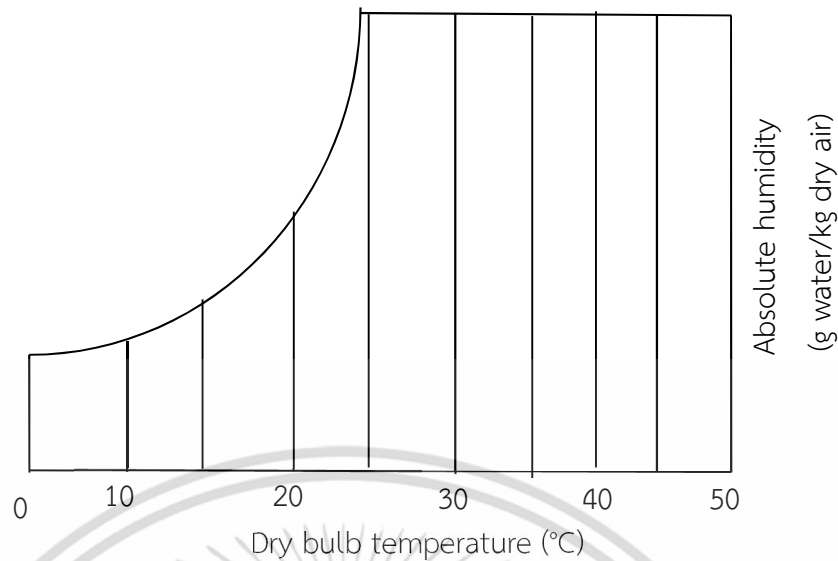
ในปัจจุบันแผนภูมิไซโครเมตริกได้มีการสร้างขึ้นที่นิยมใช้มี 2 แบบหลัก คือ แผนภูมิของ The American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineering หรือ ASHRAE และแผนภูมิของแคร์เรีย (Carrier) ซึ่งในแผนภูมิอาจจะมีรายละเอียดปลีกย่อยแตกต่างกัน แต่จะมีโครงสร้างที่สำคัญเหมือนกัน โดยทั่วไปแผนภูมิไซโครเมตริกใช้ได้สำหรับความดันคงที่ค่าหนึ่งเท่านั้น ซึ่งความดันของแผนภูมิไซโครเมตริกที่นิยมใช้กันคือ ความดันที่ระดับน้ำทะเล [17]

ค่าที่แสดงสมบัติของอากาศกับไอน้ำในอากาศที่มีในแผนภูมิไซโครเมตริก [18] ประกอบด้วยค่าต่างๆดังรูปที่ 2.4



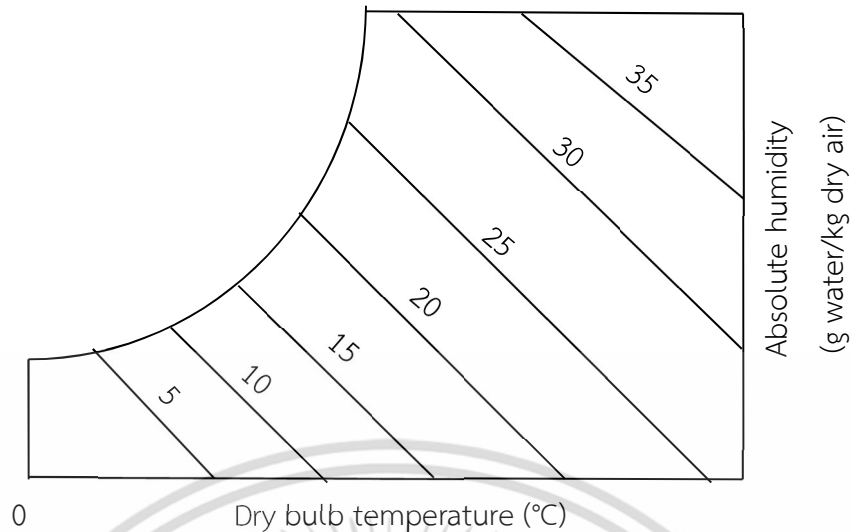
รูปที่ 2.4 แผนภาพไซโครเมตริก [19]

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry bulb temperature, db) คืออุณหภูมิที่อ่านค่าจากเทอร์โมมิเตอร์ที่กระเปาะแห้ง [20] โดยในแผนภูมิไซโครเมตริกจะเป็นเส้นตามแนวตั้งซึ่งค่าจะเรียงตั้งแต่น้อยไปหามากคือจากซ้ายมือไปยังขวามือดังรูปที่ 2.5



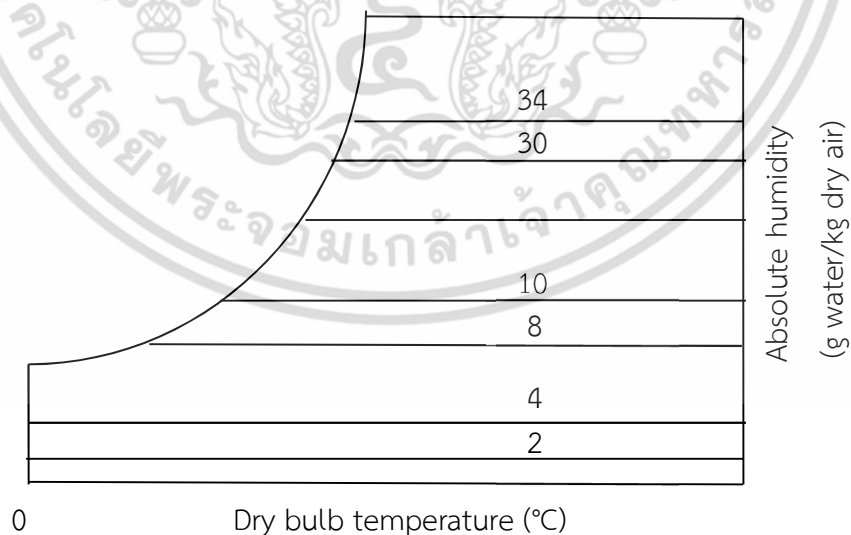
รูปที่ 2.5 เส้นอุณหภูมิกะเปาะแห้งบนแผนภูมิไซโครเมตริก (ดัดแปลงจาก [19])

อุณหภูมิกะเปาะเปียก (Wet bulb temperature, wb) คืออุณหภูมิที่อ่านจากเทอร์โมมิเตอร์ที่กระเปาะหุ้มด้วยผ้าสำลีที่ขึ้นโดยต้องมีกระแสลมพัดผ่านกระเปาะเปียกที่ความเร็วไม่น้อยกว่า 5 m/s โดยในกระบวนการการระเหยของความชื้นของผ้าชุบน้ำที่ติดอยู่ที่ปลายเทอร์โมมิเตอร์แบบกระเปาะเปียกนั้นจะดูดความร้อนรอบ ๆ ตัวกระเปาะมาทำให้ความชื้นเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิที่วัดได้หรืออุณหภูมิกะเปาะเปียกจะต่ำกว่าอุณหภูมิกะเปาะแห้ง ในกรณีที่ในอากาศมีความชื้นอยู่มาก ความชื้นที่ผ้าที่หุ้มกระเปาะไว้จะระเหยได้ยาก ดังนั้นความร้อนที่ใช้ในการระเหยตัวก็จะน้อยส่งผลให้ค่าที่วัดได้จะใกล้เคียงกับอุณหภูมิกะเปาะแห้ง ซึ่งกรณีเดียวที่จะทำให้อุณหภูมิกะเปาะแห้งกับกระเปาะเปียกมีค่าเท่ากันคือที่เส้นอากาศอิ่มตัว (Saturated temperature) หรือจุดที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100% โดยในแผนภูมิไซโครเมตริกเส้นอุณหภูมิกะเปาะเปียกจะเอียงทแยงจากซ้ายไปขวาและค่าจะเพิ่มขึ้นจากน้อยไปมากจากด้านซ้ายไปยังด้านขวา [19] ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เส้นอุณหภูมิกะเปาะเปียกบนแผนภูมิไซโครเมตริก (ดัดแปลงจาก [19])

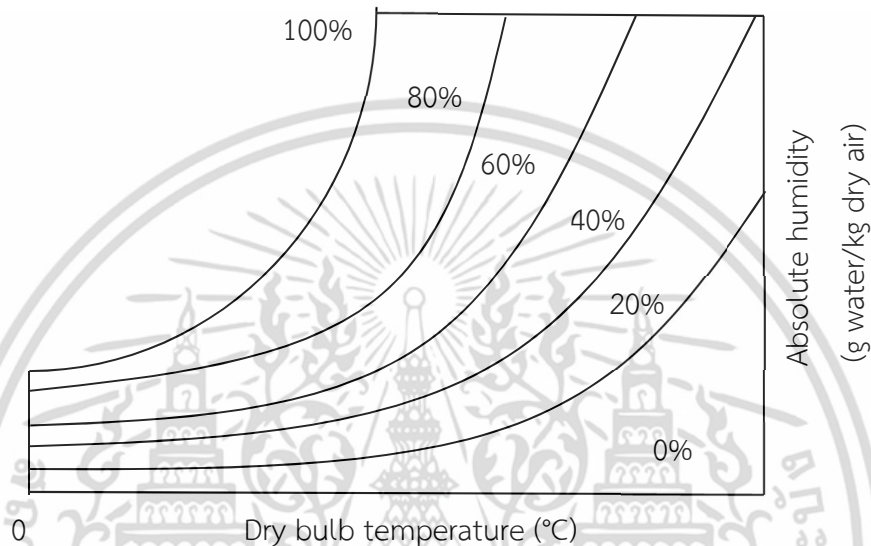
อัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio) คืออัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างไอน้ำในอากาศต่ออากาศแห้ง 1 kg โดยในแผนภูมิไซโครเมตริกเส้นอัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio line) เป็นเส้นที่ลากจากเส้นไอน้ำอิ่มตัว (Saturated vapor) จากด้านซ้ายมือไปยังด้านขวามือ ซึ่งค่าอัตราส่วนความชื้นจะแปรผันตรงกับค่าอุณหภูมิ โดยด้านล่างจะมีค่าอัตราส่วนความชื้นต่ำเพราะอุณหภูมิต่ำ ในขณะที่ด้านบนเป็นส่วนที่อุณหภูมิสูง อัตราส่วนความชื้นก็จะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เส้นอัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio line) (ดัดแปลงจาก[19])

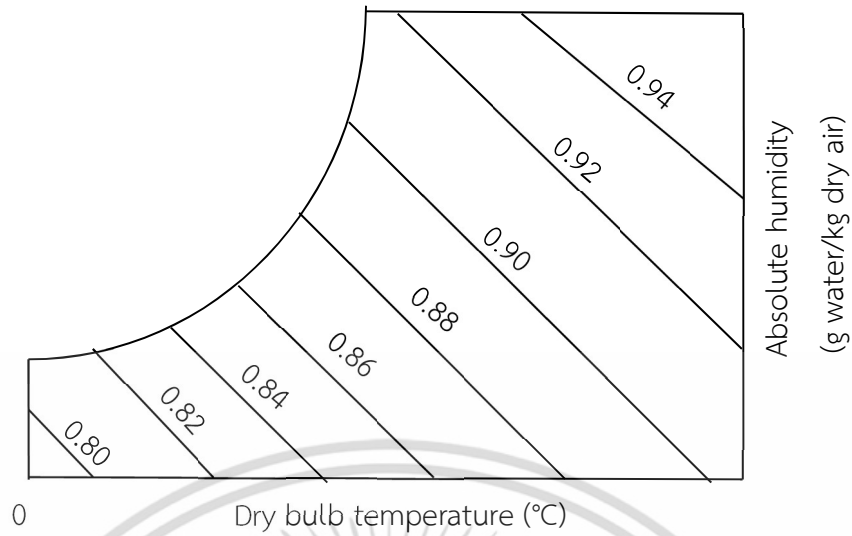
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นในอากาศ (Relative humidity, RH) คืออัตราส่วนความดันระหว่างความดันของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศชื้น และความดันอิ่มตัวของไอน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยในแผนภูมิไซโครเมตริกเส้นแรกทางซ้ายมือสุดหรือเส้นที่อยู่ด้านนอกคือเส้นความชื้นสัมพัทธ์ 100% หรือเส้นอากาศอิ่มตัว (Saturated air line) ซึ่งถัดมาจากเส้นความชื้นสัมพัทธ์ 100% ค่าความชื้นสัมพัทธ์ก็จะลดต่ำลงมาเรื่อย ๆ ดังรูปที่ 2.8



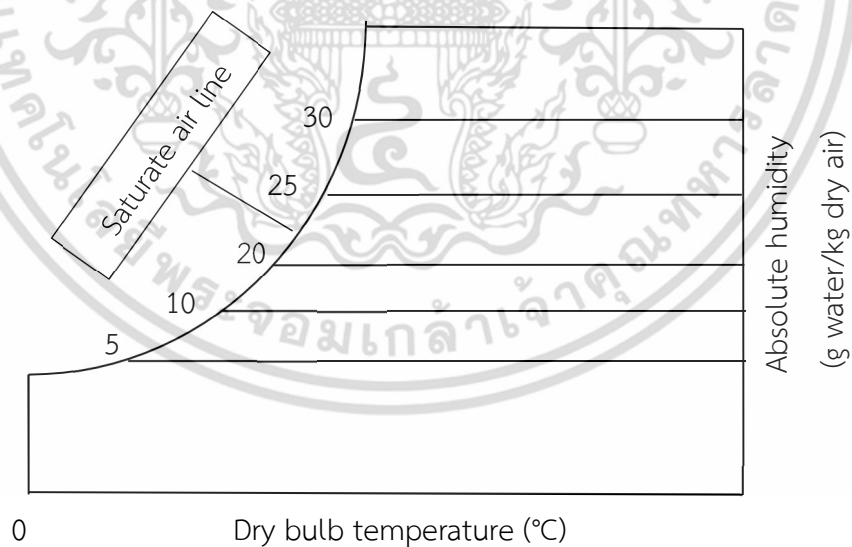
รูปที่ 2.8 เส้นความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity line) (ดัดแปลงจาก [19])

ปริมาตรจำเพาะของอากาศชื้น (Specific volume) คือปริมาตรของอากาศชื้นขณะนั้นต่ออากาศแห้ง โดยในแผนภูมิไซโครเมตริกเส้นปริมาตรจำเพาะของอากาศชื้นจะเอียงทแยงจากซ้ายไปขวาและค่าจะเพิ่มขึ้นจากน้อยไปมาก ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เส้นปริมาตรจำเพาะ (Specific volume) (ดัดแปลงจาก [19])

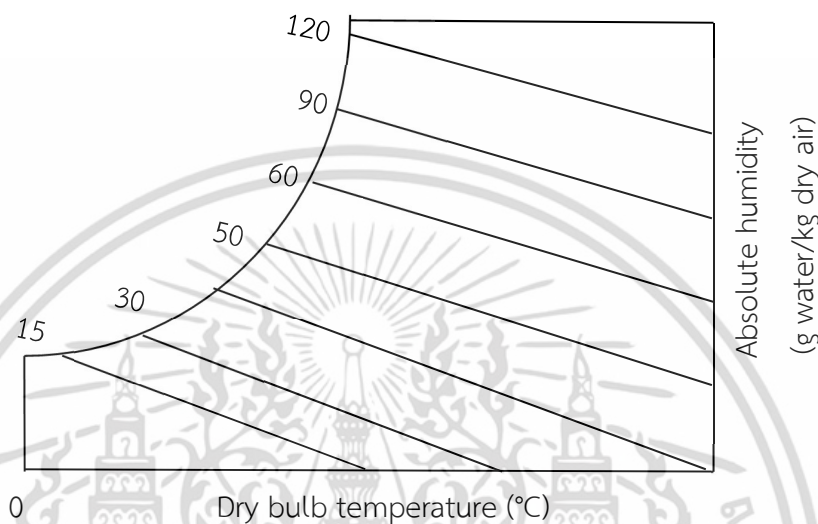
อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point, DP) คืออุณหภูมิที่ไอน้ำในอากาศเริ่มควบแน่นเป็นหยดน้ำ เมื่ออากาศชื้นถูกทำให้เย็นลง เป็นจุดที่อากาศ ณ อุณหภูมินั้น ๆ สามารถรองรับปริมาณไอน้ำไว้ได้มากที่สุดดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เส้นจุดน้ำค้างที่สภาวะที่กำหนด (ดัดแปลงจาก [19])

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนจำเพาะของอากาศ (Specific enthalpy, h) คือปริมาณความร้อนที่ทำให้อากาศแห้ง 1 กิโลกรัม เส้นแสดงระดับค่าเอนทัลปีในแผนภูมิไซโครเมตริกนั้นจะอยู่ด้านซ้ายมือหรือด้านหน้าของเส้นอากาศอิ่มตัว โดยที่ค่าเอนทัลปีจะเพิ่มจากน้อยไปหามากตามระดับของอุณหภูมิของอากาศที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11

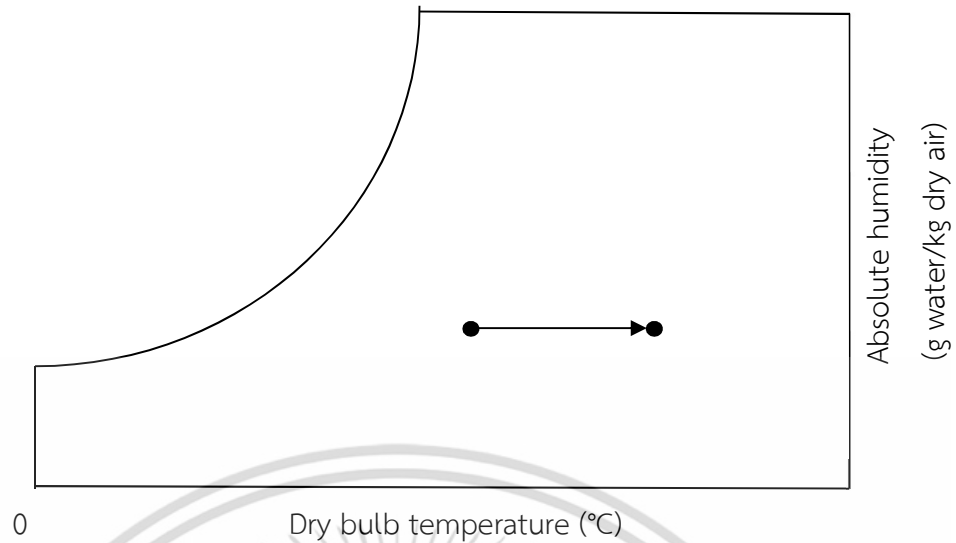


รูปที่ 2.11 เส้นแสดงค่าเอนทัลปี (ดัดแปลงจาก [19])

2.3.2 กระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะของอากาศโดยใช้แผนภูมิไซโครเมตริก

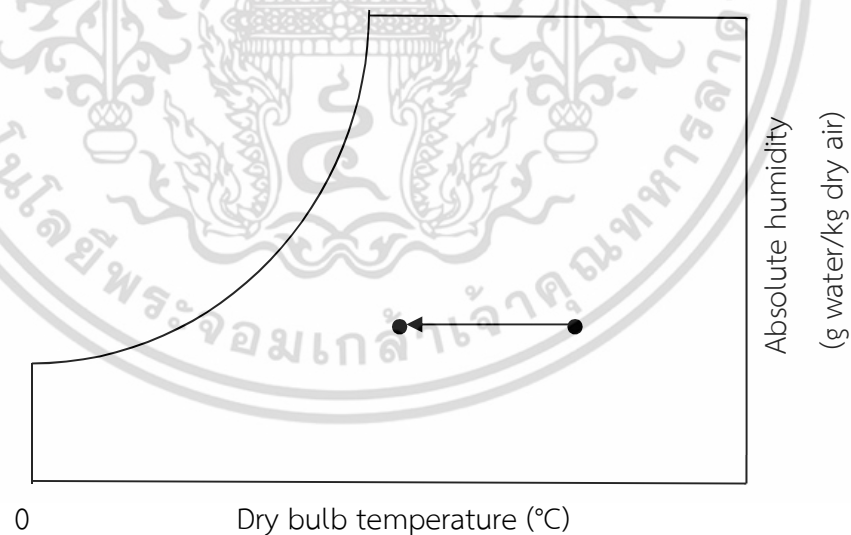
กระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะของอากาศโดยใช้แผนภูมิไซโครเมตริกสามารถแบ่งได้ กระบวนการหลักได้ 8 กระบวนการ [21] ดังนี้

กระบวนการให้ความร้อนกับอากาศ (Heating process) คือกระบวนการที่ความร้อนของอากาศจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นที่สถานะความดันคงที่ โดยเมื่ออากาศได้รับความร้อนที่ความดันคงที่ อุณหภูมิของอากาศจะเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ปริมาตรจำเพาะของอากาศเพิ่มขึ้นหรืออากาศมีน้ำหนักเบาขึ้นเพราะอากาศเกิดการขยายตัว ในขณะที่ไอน้ำในอากาศมีเท่าเดิม และค่าความชื้นสัมพัทธ์จะลดลงเพราะอากาศสามารถรองรับไอน้ำที่ปะปนอยู่ได้เพิ่มขึ้น สำหรับกระบวนการนี้ส่วนใหญ่มักจะพบในกระบวนการอบเพื่อลดความชื้นกับวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรต่าง ๆ โดยความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้จะมีความร้อนสัมผัส (Sensible heat) หรือความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งกระบวนการให้ความร้อนในไซโครเมตริกชาร์ตนั้นจะเป็นเส้นในแนวขนานกับแกนอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (T_{db}) ในทิศทางห่างออกไปจากเส้นอากาศอิ่มตัวดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กระบวนการให้ความร้อนกับอากาศ (ดัดแปลงจาก [22])

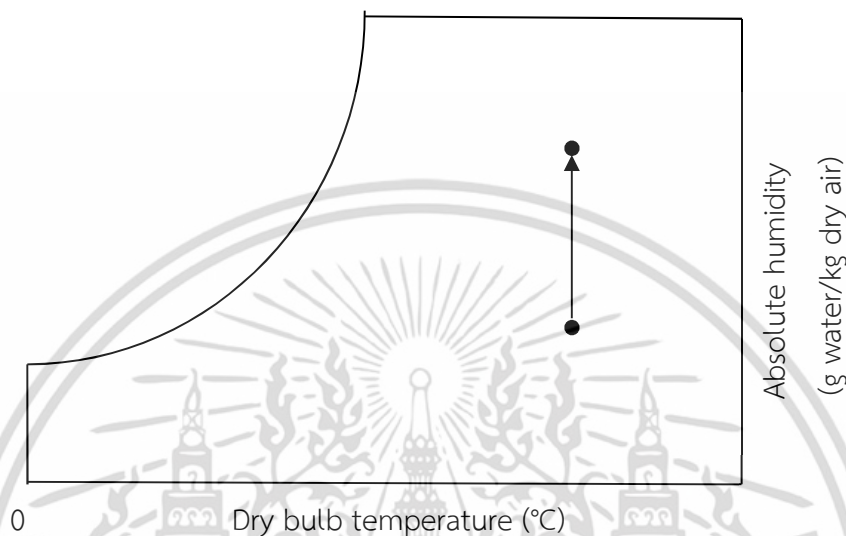
กระบวนการให้ความเย็นกับอากาศ (Cooling process) คือกระบวนการที่อุณหภูมิของอากาศจะถูกลดลงด้วยความดันคงที่ ซึ่งสามารถแสดงเส้นกระบวนการได้ดังรูปที่ 2.13 เช่น ในระบบการปรับอากาศ โดยผลพวงจากการลดความร้อนจะทำให้ปริมาตรจำเพาะของอากาศลดลง หรืออากาศมีความหนาแน่นขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเพิ่มมากขึ้น [23]



รูปที่ 2.13 กระบวนการให้ความเย็นกับอากาศ (ดัดแปลงจาก [22])

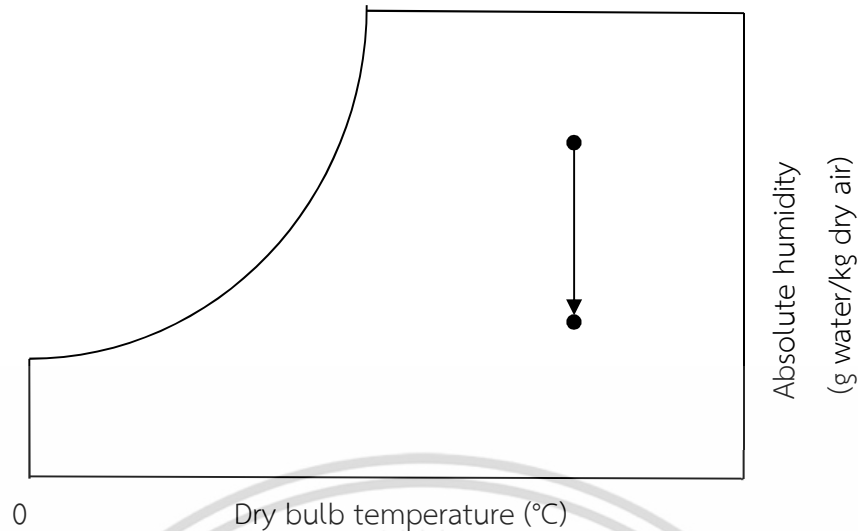
กระบวนการทำความชื้น (Humidification) กระบวนการนี้เกิดขึ้นเมื่อไอน้ำถูกฉีดเข้าสู่อากาศ (Humidification) โดยที่ไม่มีการให้ความร้อน (Heating) หรือการทำความเย็น (Cooling) เมื่อเราเติมไอน้ำเข้าไปปะปนในอากาศ ไอน้ำก็จะเจือปนอยู่กับอากาศในระบบทำให้ภายในระบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังกล่าวมีความชื้นมากขึ้นตามที่ต้องการ สำหรับในแผนภูมิไซโครเมตริกชาร์ตนั้นจะแสดงดังรูปที่ 2.14 โดยที่กระบวนการจะเริ่มที่อุณหภูมิเริ่มต้นและเมื่อไอน้ำค่อย ๆ เข้าไปในระบบแล้วความชื้นในระบบจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นโดยที่อุณหภูมิกระเปาะแห้งยังคงที่ ส่วนตัวแปรที่เปลี่ยนไปคือค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิกระเปาะเปียก



รูปที่ 2.14 กระบวนการทำความชื้น (ดัดแปลงจาก [22])

กระบวนการลดความชื้น (Dehumidification) กระบวนการนี้เกิดขึ้นโดยให้อากาศพัดผ่านสารดูดความชื้น (Sorbent dehumidifier) มีการควบคุมสถานะอากาศให้มีค่าความชื้นสัมพัทธ์น้อยลง การลดความชื้นแบบนี้เป็นการใช้วัสดุดูดซึมความชื้น (Absorption material) เช่น ซิลิกาเจลเป็นตัวลดความชื้นออกจากอากาศ เมื่อเรานำวัสดุดูดความชื้นมาวาง วัสดุดูดความชื้นก็จะดูดไอน้ำหรือความชื้นในอากาศออกจากอากาศในระบบนั้น เป็นผลให้ความชื้นในอากาศลดลงโดยที่อุณหภูมิของอากาศคงที่ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 กระบวนการลดความชื้น (ดัดแปลงจาก [22])

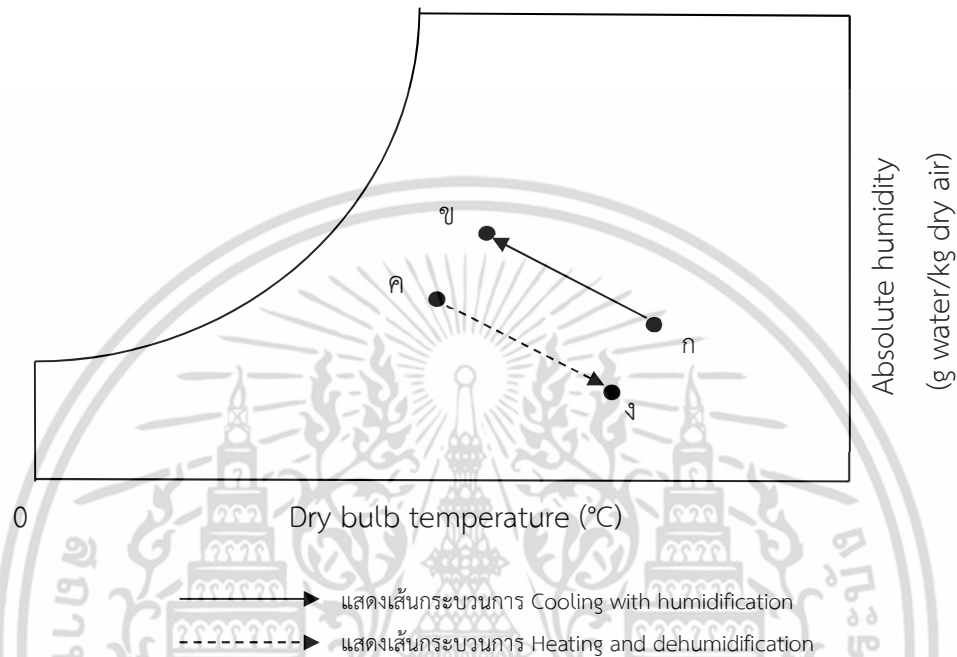
กระบวนการให้ความร้อนและการเพิ่มความชื้น (Heating and humidification) กระบวนการนี้เกิดขึ้นเมื่อไอน้ำถูกฉีดเข้าสู่อากาศ (Humidification) และมีการทำความร้อน (Heating) การปรับอากาศลักษณะนี้จะเป็นการปรับอากาศภายในห้องปิด อากาศภายนอกเย็นและมีความชื้นต่ำ (Winter air conditioning) ซึ่งจะเป็นลักษณะการปรับอากาศภายในบ้านหรือห้องที่ต้องการอุณหภูมิและความชื้นที่ต้องการ มักนิยมใช้ระบบนี้ในประเทศแถบยุโรป อเมริกาตอนบน และเอเชียตอนบนในฤดูหนาว

กระบวนการทำความเย็นโดยลดความชื้น (Cooling and dehumidification) กระบวนการนี้เกิดขึ้น เมื่ออากาศพัดผ่านคอยล์เย็น โดยทั่วไปแล้วอากาศที่เข้าจะมีความชื้นสูง เมื่อออกไปแล้วจะมีความชื้นและความเย็นต่ำลง การปรับอากาศลักษณะนี้เหมาะสำหรับการปรับสภาวะอากาศของห้องปิด โดยอากาศภายนอกร้อนและมีความชื้น ซึ่งจะเป็นลักษณะการปรับอากาศภายในบ้านเรือนในประเทศไทย

กระบวนการทำความเย็นโดยเพิ่มความชื้น (Cooling with humidification) กระบวนการนี้เกิดขึ้นเมื่อไอน้ำถูกฉีดเข้าสู่อากาศ (Humidification) และมีการทำความเย็น (Cooling) คือการเพิ่มความชื้นในขณะที่ทำการลดอุณหภูมิไปในเวลาเดียวกัน ตัวอย่างของกระบวนการนี้ได้แก่พัดลมแบบที่มีช่องใส่น้ำแข็งอยู่ที่ด้านหน้าของใบพัด โดยเมื่อเอาพัดลมตัวนี้ไปวางไว้ในห้อง เมื่อพัดลมเริ่มทำงานพัดลมก็จะเป่าทำให้น้ำแข็งระเหยกลายเป็นไอเย็นออกมา ทำให้อุณหภูมิมิรอบๆพัดลมนั้นค่อย ๆ เย็นลง แต่ขณะเดียวกันนั้นปริมาณไอน้ำที่เกิดจากการระเหยก็จะค่อย ๆ มากขึ้นทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศค่อย ๆ มากขึ้นไปด้วย สำหรับกระบวนการในแผนภูมิไซโครเมตริกจะเป็นไปและมีทิศทางดังเส้นกระบวนการจากจุด ก ไป ข ดังรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการให้ความร้อนและการลดความชื้น (Heating and dehumidification) กระบวนการนี้เกิดขึ้นโดยการให้ความร้อน (Heating) และการลดความชื้น (Dehumidification) ให้กับอากาศที่พัดผ่าน การปรับอากาศลักษณะนี้จะเป็นการปรับสภาวะอากาศของห้องปิด ซึ่งสามารถแสดงได้ตั้งเส้นกระบวนการจากจุด ค ไป ง ดังรูปที่ 2.16



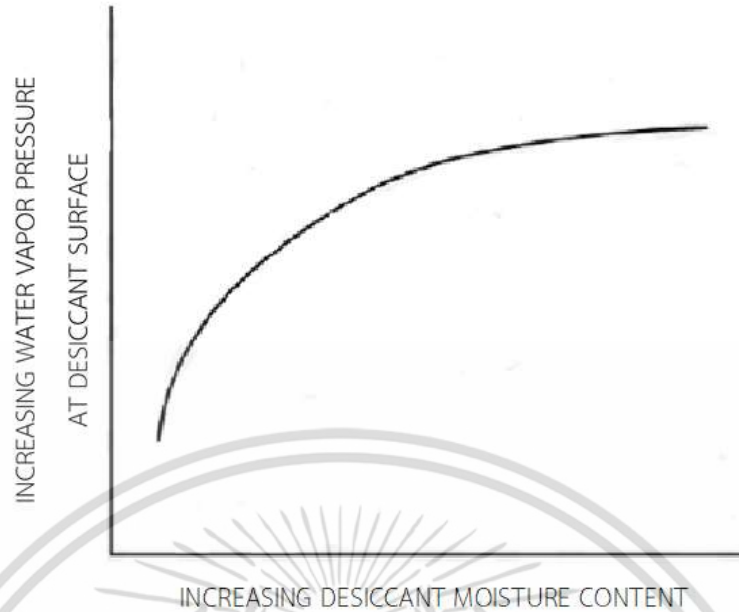
รูปที่ 2.16 กระบวนการทำความเย็นโดยเพิ่มความชื้น และกระบวนการให้ความร้อนและการลดความชื้น (ดัดแปลงจาก [22])

2.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบการลดความชื้นในอากาศโดยใช้สารดูดความชื้น

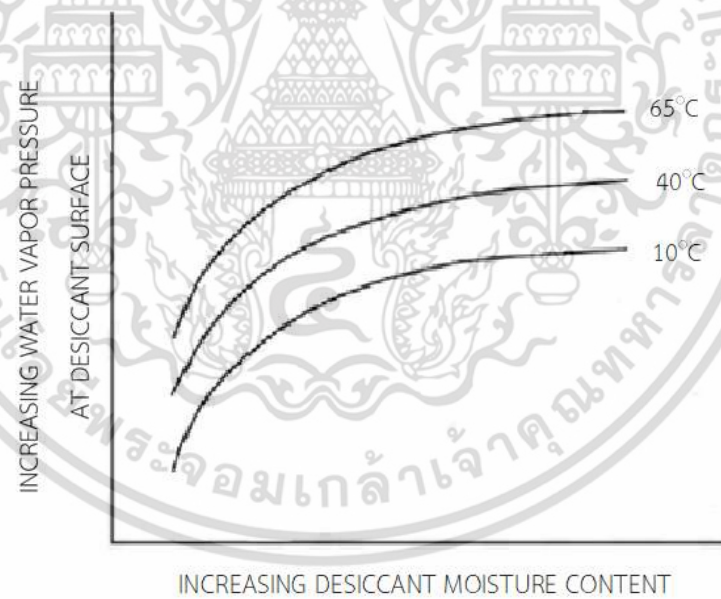
2.4.1 วัฏจักรการทำงานของสารดูดความชื้น [8]

หลักการทำงานของระบบ คือ เมื่อความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้นมีค่าต่ำกว่าความดันไอน้ำในอากาศ สารดูดความชื้นจะเริ่มกระบวนการดูดความชื้นในอากาศ ในขณะที่เมื่อใดก็ตามที่ความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้นมีค่าสูงกว่าความดันไอน้ำในอากาศ สารดูดความชื้นจะเริ่มกระบวนการ คือคายไอน้ำออกมาในอากาศ การนำสารดูดความชื้นมาคืนสภาพสารดูดความชื้นนั้น ถือเป็นกระบวนการอบสารดูดความชื้นให้แห้งโดยใช้ความร้อนและลดอุณหภูมิของสารดูดความชื้นให้ลดลงจนเท่ากับอุณหภูมิของอากาศปกติ ซึ่งความดันไอน้ำที่ผิวสารดูดความชื้นจะแปรผันตรงกับปริมาณความชื้นที่ผิวของสารดูดความชื้นดังรูปที่ 2.17 และจากรูปที่ 2.18 เมื่อพิจารณาที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารดูดความชื้น จะพบว่าความดันไอน้ำที่ผิวสารดูดความชื้นจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิของสารดูดความชื้นเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



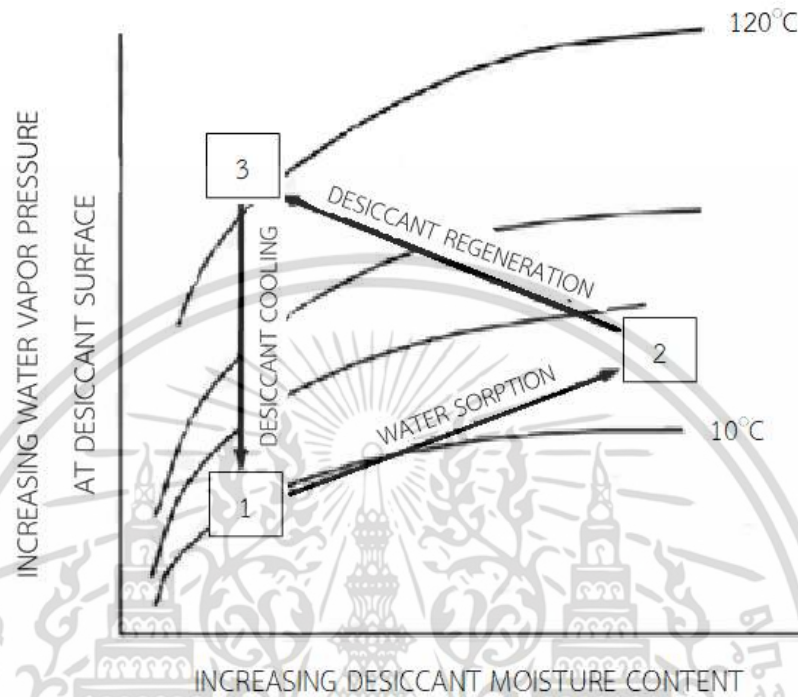
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอน้ำกับปริมาณความชื้นในสารดูดความชื้น (ดัดแปลงจาก [8])



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอน้ำกับปริมาณความชื้นในสารดูดความชื้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารดูดความชื้น (ดัดแปลงจาก [8])

จากรูปที่ 2.19 แสดงถึงพลังงานที่ใช้ในวัฏจักรสารดูดความชื้น จะประกอบด้วย 3 พลังงานหลักสำหรับกระบวนการอบสารดูดความชื้นให้แห้ง คือ พลังงานความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิของสารดูดความชื้นจนทำให้ความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้นมีค่าสูงกว่าความดันไอน้ำในอากาศ (จากจุดที่ 1 ถึง 2) พลังงานที่ใช้ในการคืนสภาพสารดูดความชื้น คือ พลังงานความร้อนที่ทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ความชื้นกลายเป็นไอ และพลังงานความร้อนในการกำจัดน้ำออกจากสารดูดความชื้น (จากจุดที่ 2 ถึง 3) และพลังงานที่ใช้ในการลดอุณหภูมิของสารดูดความชื้น (จากจุดที่ 3 ถึง 1)



รูปที่ 2.19 วัฏจักรการทำงานของสารดูดความชื้น (ดัดแปลงจาก [8])

2.4.2 ประสิทธิภาพในการลดความชื้นของวงล้อดูดความชื้น

ความสามารถในการลดความชื้นในวงล้อดูดความชื้นสามารถพิจารณาได้จากสองกระบวนการหลักที่เกิดขึ้น คือกระบวนการถ่ายโอนเชิงมวลและการถ่ายเทความร้อน [24]

การลดความชื้นด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น ถือเป็นระบบการลดความชื้นแบบอะเดียแบติก [25] โดยระบบจะไม่มีถ่ายเทความร้อนและมวลสารให้กับสิ่งแวดล้อม

ซึ่งจากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ (กฎอนุรักษ์พลังงาน) คือกระบวนการใด ๆ พลังงานอาจเปลี่ยนแปลงรูปได้ แต่ไม่สามารถสูญหายหรือเกิดขึ้นใหม่ได้ โดยความร้อนที่ระบบจะได้รับเท่ากับพลังงานภายในของระบบที่เพิ่มขึ้นบวกกับงานที่ระบบได้รับจากสิ่งแวดล้อม [26] ซึ่งสำหรับกฎอนุรักษ์พลังงานสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบสมการ (2.1)

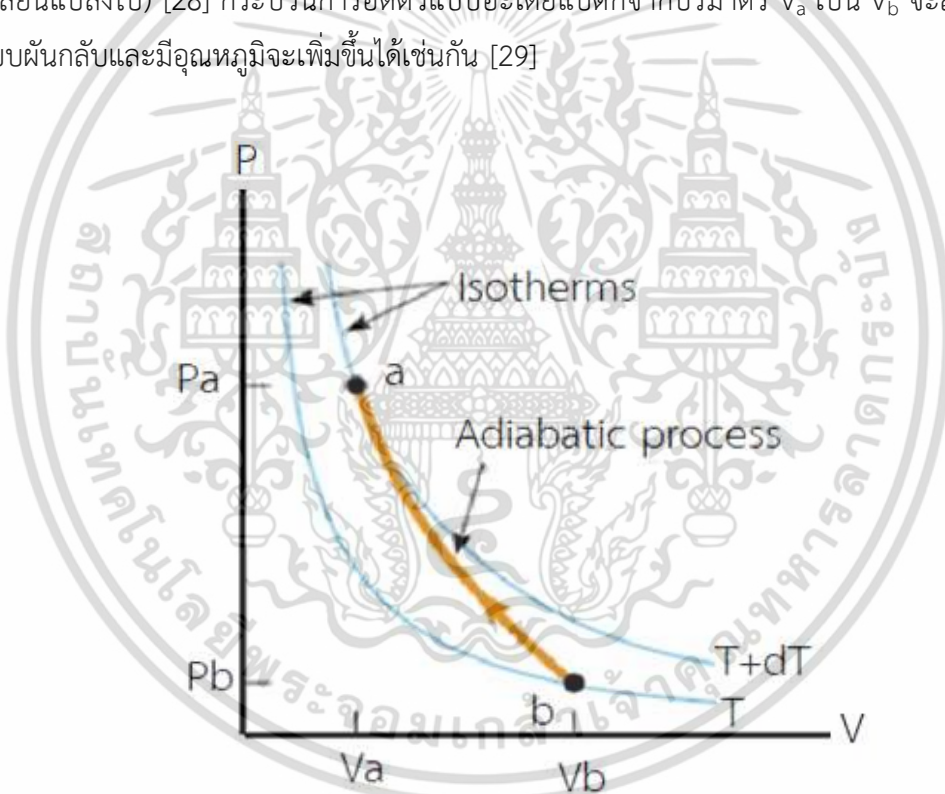
กฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ (กฎอนุรักษ์พลังงาน) [24]

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	U	คือ พลังงานภายใน (+ พลังงานที่เพิ่มขึ้น, - พลังงานที่ลดลง)
	W	คือ งานที่ทำโดยระบบ (+ งานที่ทำโดยระบบ, - งานที่ให้กับระบบ)
	Q	คือ ความร้อนที่เข้าสู่ระบบ (+ ความร้อนที่เข้าสู่ระบบ, - ความร้อนที่ออกสู่ระบบ)

กระบวนการลดความชื้นแบบอะเดียแบติกสำหรับแก๊สอุดมคติจะเป็นไปตามแผนภูมิดังรูปที่ 2.20 เมื่อแก๊สขยายตัวจากปริมาตร V_a เป็น V_b แก๊สจะทำงานส่งผลให้พลังงานภายในและอุณหภูมิของแก๊สลดลงด้วย และถ้าจุด a แทนสถานะเริ่มต้นที่อยู่บนเส้น isotherm ($T+dT$) แล้วจุด b ซึ่งเป็นสถานะสุดท้ายจะอยู่บนเส้น isotherm ที่อุณหภูมิต่ำกว่า (T) สำหรับแก๊สอุดมคติ จากรูปจะเห็นได้ว่าเส้นโค้งอะเดียแบติก ณ จุดใด ๆ จะมีความชันมากกว่าเส้นโค้งแบบ isotherm ที่ผ่านจุดเดียวกันเมื่อมีอุณหภูมิกงที่ (ปฏิกิริยาเกิดในภาชนะที่สามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ โดยปริมาตรและความดันจะเปลี่ยนแปลงไป) [28] กระบวนการอัดตัวแบบอะเดียแบติกจากปริมาตร V_a เป็น V_b จะสามารถเป็นแบบผันกลับและมีอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นได้เช่นกัน [29]



รูปที่ 2.20 แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะกระบวนการอะเดียแบติกสำหรับแก๊สอุดมคติ (ดัดแปลงจาก [29])

ในกระบวนการลดความชื้นแบบอะเดียแบติก ระบบจะไม่มีความร้อนไหลเข้าหรือออกจากระบบ ($\Delta Q=0$) ซึ่งเกิดได้ในกรณีที่ให้งานแก่ระบบอย่างรวดเร็ว หรือ ระบบถูกห่อด้วยฉนวน ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.2) [30]

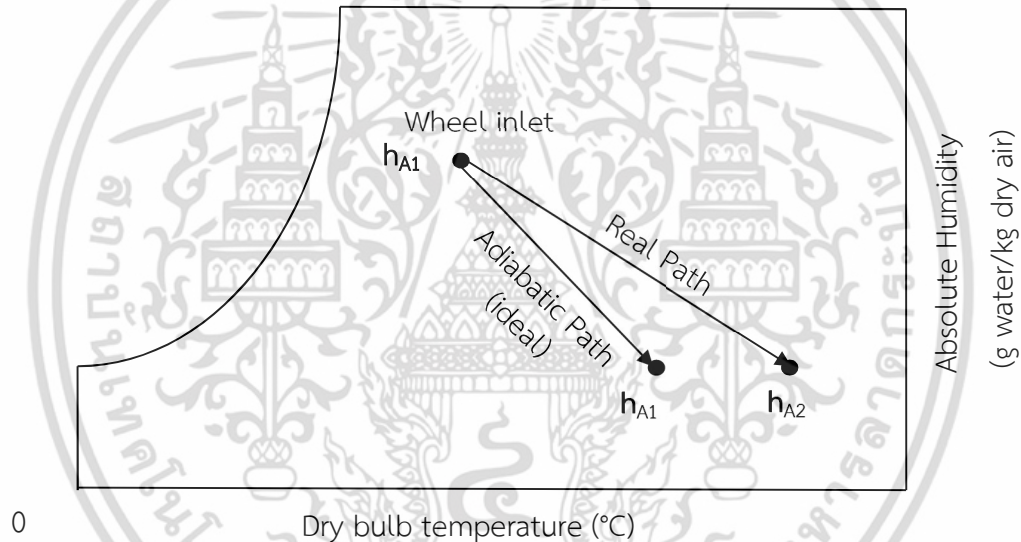
$$\Delta U = \Delta W \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta U = -P\Delta V \quad (2.3)$$

เมื่อ P คือ ความดัน
V คือ ปริมาตร

โดยสำหรับกระบวนการอะเดียแบติกดังรูปที่ 2.21 แสดงความแตกต่างระหว่างค่าเอนทัลปีของอากาศทางเข้าและออกจากวงล้อดูดความชื้นจะเท่ากับศูนย์ คือระบบจะไม่มีความร้อนไหลเข้าหรือออกจากระบบ ทำให้การเบี่ยงเบนของค่าเอนทัลปีจึงมีผลต่อค่าประสิทธิผลของกระบวนการอะเดียแบติก ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.4 ระหว่างเส้นกระบวนการอะเดียแบติกที่เป็นไปตามทฤษฎีและเส้นกระบวนการอะเดียแบติกที่ได้จากการทดลอง ซึ่งระบบจะสามารถทำการลดความชื้นได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อค่าประสิทธิผลมีค่าเป็น 100% [25]



รูปที่ 2.21 แผนภูมิไซโครเมตริกในกระบวนการลดความชื้นด้วยวงล้อดูดความชื้นซึ่งเป็นไปตามกระบวนการอะเดียแบติก (ดัดแปลงจาก [25])

ประสิทธิภาพกระบวนการอะเดียแบติก (Adiabatic DW 's effectiveness)

$$\epsilon = 1 - \frac{(h_{A2} - h_{A1})}{h_{A1}} = \frac{2h_{A1} - h_{A2}}{h_{A1}} \quad (2.4)$$

เมื่อ h_{A1} และ h_{A2} คือ ค่าเอนทัลปีของอากาศทางเข้าและออกจากวงล้อดูดความชื้นที่เป็นไปตามการลดความชื้นแบบกระบวนการอะเดียแบติก และค่าเอนทัลปีของอากาศหลังจากออกจากวงล้อดูดความชื้นที่ได้จากการทดลองจริง ตามลำดับ

2.5 ทฤษฎีการอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอบแห้ง (Drying) [31] คือ กระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทไปยังวัสดุที่มีความชื้นโดยวิธีใดวิธีหนึ่งเพื่อใช้ในการคายความชื้นออกจากวัสดุโดยวิธีการระเหย ซึ่งความร้อนที่ได้รับถือเป็นความร้อนแฝงของการระเหย

2.5.1 ทฤษฎีและการคำนวณในกระบวนการอบแห้ง

ปริมาณความชื้นสามารถรายงานผลได้ 2 รูปแบบตามสมการดังนี้

ปริมาณความชื้นฐานเปียก (Moisture content on wet basis, % MC_{wb})

$$\% MC_{wb} = \frac{M_w}{M_w + M_s} \times 100 \quad (2.5)$$

เมื่อ % MC_{wb} คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก

M_w คือ มวลน้ำในวัสดุ

M_s คือ มวลแห้งของวัสดุ

ปริมาณความชื้นฐานแห้ง (Moisture content on dry basis, % MC_{db})

$$\% MC_{db} = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (2.6)$$

เมื่อ % MC_{db} คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้ง

M_w คือ มวลน้ำในวัสดุ

M_s คือ มวลแห้งของวัสดุ

อัตราการทำแห้ง (Drying rate) คือ มวลของเหลวที่ระเหยต่อพื้นที่ที่เกิดการระเหยต่อเวลา สมการของอัตราการแห้ง สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.7)

$$R = - \frac{1}{A} \frac{dm}{dt} \quad (2.7)$$

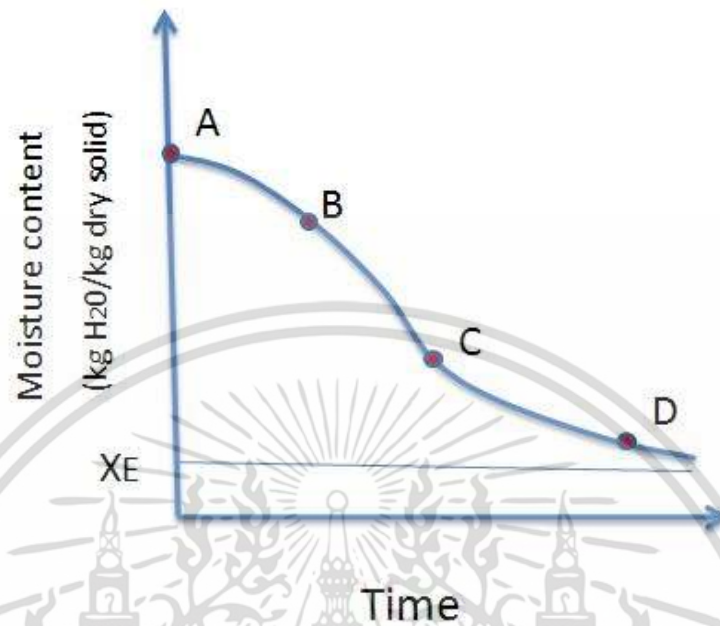
เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้งหรืออัตราการระเหย , $kg/m^2.hr$

A คือ พื้นที่ที่เกิดการระเหย , m^2

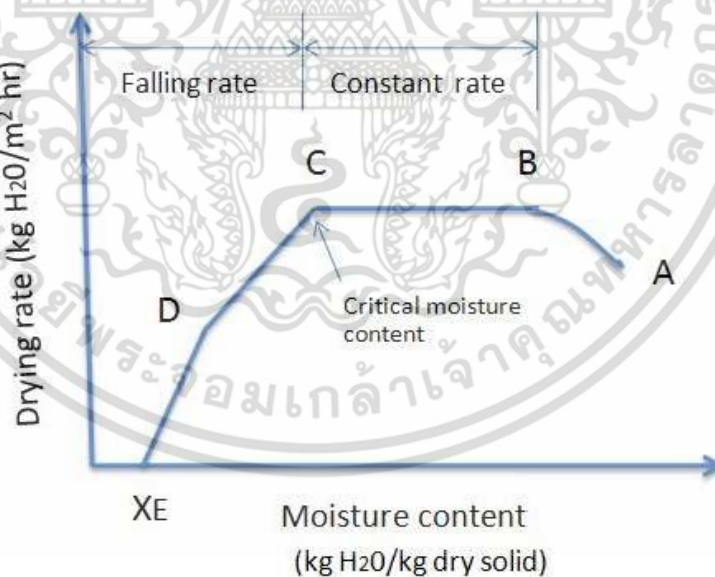
$\frac{dm}{dt}$ คือ มวลของน้ำที่ระเหยต่อหนึ่งหน่วยเวลา , kg/hr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟระหว่างอัตราการอบแห้ง (Drying rate) และความชื้นในสารนั้น (Moisture content) แบ่งออกเป็น 3 ช่วงดังรูปที่ 2.22 และ 2.23 คือ



รูปที่ 2.22 กราฟแสดงความชื้นกับเวลา [31]



รูปที่ 2.23 กราฟแสดงอัตราการอบแห้งกับเวลา [31]

ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial adjustment period-AB) เป็นช่วงเริ่มต้นที่อาหารที่ใช้ในการอบแห้งมีความชื้นเริ่มต้น (A) ของอาหารยังสูงอยู่ ผิวของอาหารจะมีลักษณะเปียกชื้นมาก เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางลมร้อนกับอาหาร ทำให้อุณหภูมิพื้นผิวอาหารมีค่าใกล้เคียงกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature) ของกระแสลมร้อนที่ใช้เป็นตัวกลาง อัตราการทำแห้งจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จนถึงช่วงอัตราทำแห้งคงที่ (constant rate)

ช่วงอัตราทำแห้งคงที่ (Constant rate period-BC) เป็นช่วงที่น้ำภายในวัสดุเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้า พลังงานความร้อนที่วัสดุได้รับจะใช้ในการระเหยน้ำออกจากของวัสดุอย่างต่อเนื่อง ความชื้นเฉลี่ยของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในการอบแห้ง จุดสุดท้ายของช่วงการอบแห้งความเร็วคงที่ อัตราเร็วในการอบแห้งจะเริ่มลดลง ความชื้นของวัสดุ ณ เวลานี้ เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical moisture content)

การคำนวณอัตราการอบแห้งในช่วงนี้ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

เมื่อ R_c คือ อัตราการอบแห้งในช่วงความเร็วคงที่
 h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (heat transfer coefficient, $w/m^2 \text{ } ^\circ C$)
 T_v คือ อุณหภูมิของลมร้อน, $^\circ C$
 T_i คือ อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ เท่ากับ T_w , $^\circ C$

ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period-CD) เป็นช่วงที่ความชื้นในอาหารเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารอย่างไม่ต่อเนื่อง ผิวหน้าของอาหารเริ่มแห้ง ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของอาหารสูงขึ้นเรื่อยๆ อัตราการอบแห้งจะลดลงความชื้นจะลดลงเรื่อยๆ จนถึงค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, XE) ซึ่งเป็นความชื้นที่ต่ำสุด ภายใต้สภาวะที่ใช้อุณหภูมิในขณะนั้นที่ความชื้นนี้ อัตราการทำแห้งเป็นศูนย์ น้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก

2.5.2 ความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุขึ้นกับกลไกการเคลื่อนที่ [2]

สภาพของความชื้นที่มีอยู่ภายในวัสดุถือเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีอิทธิพลต่อกลไกการเคลื่อนที่ของความชื้น ในวัสดุเปียกนอกจากจะมีความชื้นในรูปน้ำอิสระแล้ว ยังมีความชื้นที่อยู่ในรูปของน้ำ Adsorption water ที่เกาะติดกับพื้นผิวของแข็ง ความชื้น Bonding water และไอน้ำในช่องว่าง โดยจากตารางที่ 2.4 สามารถอธิบายกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุ ซึ่งสามารถจำแนกวัสดุออกได้ 3 ประเภทหลักคือ

วัสดุ Non-hydrophilic หมายถึงกรณีที่พื้นผิวที่เป็นองค์ประกอบของของแข็งไม่สามารถดูดความชื้น หรือดูดความชื้นได้น้อยมาก จนปริมาณความชื้นสูงสุด (ปริมาณน้ำ) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับมวลสัมบูรณ์ของของแข็ง

วัสดุ Hydrophilic หมายถึงวัสดุที่พื้นผิวของแข็งที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุมีสมบัติดูดความชื้น หรือวัสดุที่ตัวของแข็งเองมีสมบัติ Adsorption กับน้ำ

วัสดุเนื้อเดียว (Homogeneous) โมเลกุลน้ำในวัสดุเนื้อเดียว เช่น สารละลายไฮโพลีเมอร์ สบู่ ฯลฯ โดยทั่วไปจะละลาย หรือเกิด Affinity กับองค์ประกอบของแข็ง ขณะที่น้ำมีความเข้มข้นสูง จะมีความดันไอเกือบเท่ากับน้ำอิสระ แต่เมื่อน้ำมีความเข้มข้นลดลง ความดันไอจะลดลงอย่างรวดเร็ว และปริมาตรของวัสดุจะหดตัวจนมีค่าเท่ากับปริมาตรเมื่อไม่มีน้ำ

ตารางที่ 2.4 สภาพการอุ้มความชื้นภายในวัสดุเปียก (ดัดแปลงจาก [2])

วัสดุเปียก	เนื้อผสม	ประเภทของน้ำที่มีอยู่		การอุ้มน้ำ	กลไกการเคลื่อนที่ของความชื้น	ตัวอย่างวัสดุ
		Non-hydrophilic	น้ำเกาะติดผิวหน้า		แรงดึงผิว	การแพร่ของไอน้ำ
Capillary water	Funicular water		Capillary suction force	การเคลื่อนที่ในสถานะของเหลว	ชั้นอนุภาคอิสระของแข็งมีรูพรุน	
	Suspended water		แรงดึงผิว	การแพร่ของไอน้ำ		
Osmotic water (ในสภาพแขวนลอย)			Osmotic suction force	การเคลื่อนที่ในสถานะของเหลว	ชั้นอนุภาคละเอียด slag ดินเหนียวที่ชื้นมากๆ	
Adsorption water			Adsorption power	การแพร่ของไอน้ำ	Activated alumina	
Bonding water			Affinity ระหว่างพื้นผิวของอนุภาคกับน้ำ	การเคลื่อนที่ในสถานะของเหลว การแพร่ของไอน้ำ	ดินเหนียว (ใกล้จะแห้ง)	
เนื้อเดียว		Bonding water (ที่ผ่านสภาพเป็นเจลแล้ว)	Affinity ระหว่างโมเลกุลกับน้ำ	การแพร่ของความชื้น	สารละลายไฮโพลีเมอร์	
		การละลาย		การแพร่ของความชื้น	สารละลายในน้ำของสารอินทรีย์ สารละลายในน้ำของเกลือต่างๆ	
วัสดุเปียกแห้ง		น้ำแข็ง		การแพร่ของไอน้ำ (การไหลของไอน้ำ)		

2.5.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง

ลักษณะธรรมชาติของวัสดุอบแห้ง วัสดุที่มีลักษณะเป็นรูพรุน (Porosity) ซึ่งวัสดุที่มีความพรุนมาก [32] จะส่งผลต่ออัตราการอบแห้งที่เร็วขึ้น เนื่องจากน้ำในวัสดุสามารถเคลื่อนจากภายในออกมาภายนอกได้ง่าย นอกจากนี้สำหรับวัสดุที่มีพื้นที่ผิวมากก็จะส่งผลให้อัตราการอบแห้งสามารถเกิดได้เร็วขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้ก็เนื่องจากพื้นที่การระเหยของน้ำในวัสดุเพิ่มขึ้นนั่นเอง ซึ่งปัจจัยหลักที่ส่งผลให้อัตราการอบแห้งสามารถแบ่งได้ 4 สาเหตุหลักดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาด รูปร่าง ปริมาตร และพื้นที่ผิวของวัสดุ เป็นสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่มีผลต่อการทำแห้ง วัสดุที่มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก จะมีพื้นที่ระเหยน้ำมาก ส่งผลให้เกิดอัตราการแห้งเร็วขึ้น ดังนั้นหากวัสดุที่มีความหนามาก จะส่งผลให้อัตราการอบแห้งช้ากว่าวัสดุที่มีความหนาน้อยกว่าเนื่องจากอัตราการแห้งจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของอาหาร

ปริมาณของวัสดุนำมาอบแห้ง วัสดุที่นำมาอบแห้งในปริมาณมาก ๆ จะมีอัตราการอบแห้งที่ช้าเนื่องจากอากาศร้อนไม่สามารถสัมผัสกับวัสดุที่นำมาอบแห้งได้อย่างทั่วถึง จึงไม่สามารถถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุได้ จึงเป็นสาเหตุทำให้อัตราการอบแห้งช้าลง

ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความชื้นจำเพาะ (Specific humidity) ของอากาศเป็นสิ่งสำคัญมาก การระเหยน้ำออกจากวัสดุจะทำได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับความชื้นของอากาศและความเร็วลม

ความดัน เกี่ยวเนื่องกับการระเหยของน้ำ เนื่องจากในที่มีความดันต่ำ ๆ ลงมา น้ำจะเดือดได้ที่อุณหภูมิต่ำลง ดังนั้นการทำแห้งภายใต้ความดันจะทำให้อัตราการแห้งเร็วขึ้นเช่นกัน

2.5.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้ง

การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การหารูปแบบการจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการอบแห้งเพื่อใช้ทำนายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและระยะเวลาการอบแห้ง ซึ่งการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบต่าง ๆ สามารถแสดงดังตารางที่ 2.5 โดยสำหรับการทดลองทั่วไป การหาสมการการอบแห้งแบบชั้นบางจะทำการอบแห้งจนกว่าน้ำหนักของวัสดุคงที่ จึงกำหนดให้ค่าความชื้นสมดุลมีค่าเท่ากับศูนย์ [33]

การทดลองการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรสามารถนำข้อมูลผลการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อหาสมการอบแห้งด้วยวิธีการแบบไม่เชิง (Non-linear regression) โดยแบบจำลองการอบแห้งที่นิยมใช้ในการศึกษาอาหารหรือวัสดุชีวภาพจำพวกผักและผลไม้ ได้แก่ แบบจำลองในรูปแบบของสมการเอมพิริคัล (Empirical equation) [34] เช่นแบบจำลองของ Lewis, Page, Henderson and Pabis, Logarithmic และ Wang and Singh เป็นต้น โดยการเลือกสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมที่สุดสามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) ที่สูงสุด และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) ที่ต่ำที่สุด [35]

ตารางที่ 2.5 รูปแบบการจำลองสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้ง (ดัดแปลงจาก [36])

ลำดับที่	ชื่อแบบจำลอง	แบบจำลองการอบแห้ง
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
5	Two term	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
6	Approximation of diffusion	$MR = (a \exp(-kt)) + (1-a) \exp(-kbt)$
7	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
8	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$

2.6 การลดความชื้นในเมล็ดข้าว

การลดความชื้นเมล็ด [32] ความชื้นในเมล็ดข้าวมีความสำคัญต่ออายุการเก็บรักษา ซึ่งหลังจากเก็บเกี่ยวที่นวดข้าวแล้วควรลดความชื้นเมล็ดให้เร็วที่สุด ข้าวเปลือกที่ดีควรมีความชื้นอยู่ในช่วง 13-14% ซึ่งการรักษาความชื้นในระดับนี้จะส่งให้สามารถเก็บข้าวเปลือกไว้ได้นานขึ้น 2-3 เดือน แต่ถ้าหากต้องการเก็บรักษาไว้ได้นานมากกว่า 3 เดือนควรลดความชื้นของเมล็ดให้ต่ำกว่า 12% โดยการลดความชื้นในเมล็ดข้าวสามารถแบ่งได้ 2 วิธีหลัก คือ วิธีธรรมชาติและ การใช้เครื่องอบ

วิธีธรรมชาติ (Natural drying or Sun drying) ใช้แสงแดดเป็นแหล่งความร้อนและอากาศทำให้ความชื้นลดลง เกษตรกรลดความชื้นของข้าวโดยวิธีธรรมชาติ 2 วิธี คือ การตากข้าวทิ้งไว้ในนาหลังการเก็บเกี่ยว การนำข้าวไปนวดทันทีโดยไม่ตากข้าวไว้ในนาจะได้ข้าวมีคุณภาพการสีที่ดีที่สุด การตากข้าวทิ้งไว้ในนามีผลทำให้คุณภาพการสีของข้าวลดลง การตากไว้ในนานานขึ้นจะยิ่งทำให้คุณภาพการสีของข้าวลดลง และการตากในลานหลังนวดข้าวแล้ว การลดความชื้นด้วยแสงแดด ช่วยลดความเสียหายของเมล็ดข้าวได้ดีกว่าการตากข้าวไว้ในนา การตากข้าวในลานให้ได้ผลดีมีข้อปฏิบัติดังนี้คือ ควรมีวัสดุที่สะอาดและแห้งรองรับ เช่น ผ้าใบหรือเสื่อที่สานด้วยไม้ไผ่ ไม่ควรตากกับพื้นซีเมนต์หรือถนนโดยตรง เพราะเมล็ดอาจได้รับความร้อนจากพื้นสูงเกินไปทำให้เกิดการแตกข้าวภายในเมล็ดได้ในลานนวดควรมีวัสดุรองรับ เพื่อป้องกันสิ่งเจือปน และความชื้นจากพื้นดินจะมารวมอยู่ที่ผิวดิน ทำให้เมล็ดที่ติดกับผิวดินมีความชื้นสูง ความหนาของข้าวที่ตากควรไม่เกิน 5-10 ซม. หากการตากเมล็ดหนาเกินไปทำให้การระบายอากาศไม่ดี ข้าวแห้งช้า การตากเมล็ดบางเกินไปจะทำให้อุณหภูมิของข้าวสูงถึง 55-70°C ซึ่งมีผลต่อคุณภาพการสี เพราะเกิดการแตกข้าวขึ้นภายในเมล็ดและเกิดเมล็ดเหลืองได้ ระหว่างการตากควรหมั่นกลับกองข้าวทุก ๆ 2 ชั่วโมง หรือวันละ 4 ครั้ง เพื่อช่วยให้ลดความชื้นได้อย่างรวดเร็ว ความชื้นสัมพัทธ์ขณะลดความชื้นควรต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์ที่จะสมดุลย์ของเมล็ด การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดความชื้นจึงจะได้ผล ทั้งนี้ความชื้นสัมพัทธ์ไม่ควรจะเกิน 60% เวลาตากข้าวไม่ควรตากนานเกินไป เมื่อมีความชื้นประมาณ 12-14% ให้หยุดตากข้าวที่เก็บไว้เป็นเมล็ดพันธุ์ จะเก็บรักษาได้นาน มีความงอกสูงหากความชื้นของเมล็ดต่ำ และขณะเก็บต้องพยายามรักษาให้ระดับความชื้นของเมล็ดต่ำอยู่เสมอ เมล็ดพันธุ์ข้าวที่เก็บไว้ทำพันธุ์ควรผึ่งแดดเพื่อลดความชื้นให้เหลือ 9-10%

การใช้เครื่องอบ (Artificial drying) การใช้เครื่องอบมีข้อดี คือ สามารถทำได้ทุกสภาวะอากาศแม้ขณะฝนตกหรือมีแสงแดดน้อย ไม่เปลืองลานตาก สามารถควบคุมการลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้ ใช้เวลาการลดความชื้นไม่นานและยังสามารถป้องกันการสูญเสียคุณภาพการสีได้ดีกว่าวิธีธรรมชาติแต่มีข้อเสีย คือ เสียค่าใช้จ่ายสูง การเปรียบเทียบคุณภาพการสีข้าวที่ตากลดความชื้นและใช้เครื่องอบแห้งพบว่า วิธีการผึ่งแดดจะได้ข้าวเต็มเมล็ดและต้นข้าวระหว่าง 40-50% และน้อยกว่า 40% การใช้เครื่องอบแห้งได้ข้าวเต็มเมล็ดระหว่าง 50-60% การลดความชื้นของข้าวเปลือกอุณหภูมิที่ใช้ไม่ควรจะสูงเกิน 50°C และถ้าเป็นเมล็ดพันธุ์ไม่ควรสูงเกิน 43°C ข้อเสียของการลดความชื้นในเมล็ดข้าวถ้าจะทำให้เมล็ดมีความเสียหายจากเชื้อรา เกิดข้าวเมล็ดเหลือง และเมล็ดพันธุ์เสื่อมความงอกเร็วขึ้น

สำหรับการเก็บรักษาเมล็ดข้าว สามารถแบ่งวิธีการเก็บรักษาข้าวออกได้เป็น 4 ประเภท คือ การเก็บในสภาพปกติไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (Uncondition storage) ภายในโรงเก็บ เป็นวิธีที่นิยมใช้ในประเทศไทยเพราะลงทุนน้อย และเสียค่าใช้จ่ายต่ำ

การเก็บในที่ที่มีการควบคุมอุณหภูมิ ไม่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ เช่น การเก็บไว้ในตู้เย็นหรือไนโตรเจนเก็บข้าวที่มีการเป่าลมเย็น เป็นต้น

การเก็บในที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ ไม่ควบคุมอุณหภูมิ ได้แก่ การเก็บข้าวไว้ในภาชนะเก็บที่มิดชิดสามารถป้องกันการเคลื่อนผ่านเข้าออกของอากาศได้ (Hermetic condition) เช่น การเก็บเมล็ดพันธุ์ไว้ในปี๊บสังกะสี หรือ ถังพลาสติก การเก็บรักษาด้วยวิธีนี้ ความชื้นของเมล็ดข้าวก่อนเก็บต้องไม่เกิน 10% โดยการลดความชื้นของเมล็ดพันธุ์ข้าวให้เหลือ 6% แล้วเก็บในปี๊บสังกะสีปิดผนึกฝาให้แน่น เก็บรักษาในโรงเก็บธรรมดาจะสามารถเก็บเมล็ดพันธุ์ข้าวไว้ได้นานถึง 8 ปี ความงอกของเมล็ดลดลงเหลือ 80% ส่วนเมล็ดพันธุ์ข้าวญี่ปุ่นที่นำมาปลูกในประเทศไทย เมื่อเก็บรักษาในปี๊บสังกะสี โดยลดความชื้นให้เหลือ 9% จะยืดอายุการเสื่อมความงอกนาน 40 เดือน และสำหรับเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ข้าวที่ความชื้น 10% ในถังพลาสติกหรือน้ำมันขนาด 200 ลิตรจะเก็บรักษาได้นาน 2 ปี

การเก็บในที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ สามารถป้องกันและลดความเสียหายของเมล็ดข้าวและคงคุณภาพดีได้นานหลายสิบปี แต่เสียค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาสูงมาก จึงนิยมใช้สำหรับงานการอนุรักษ์เชื้อพันธุ์ (Germplasm bank) เท่านั้น

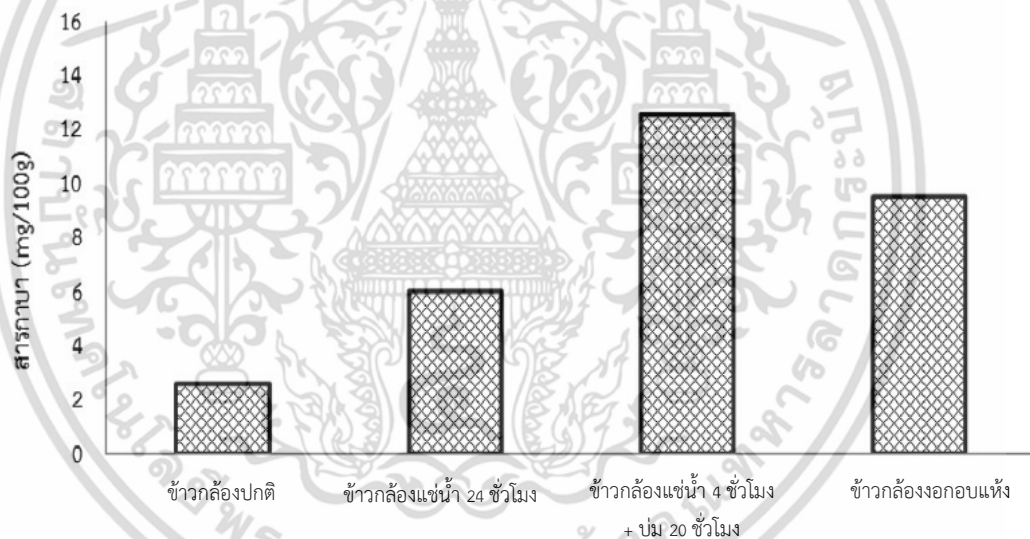
2.7 ข้าวกล้องงอก

ข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice หรือ GABA-rice) เป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน จากการศึกษาทางกายภาพและทางชีวเคมีพบว่า ข้าวกล้องงอกประกอบด้วยสารอาหารจำนวนมาก เช่น โยอาหาร กรดไฟติก (Phytic acid) วิตามินซี วิตามินอี และ GABA (Gamma aminobutyric acid) [37] โดยจากงานวิจัยพบว่าข้าวกล้องที่ผ่านการเพาะงอกจะมีสารกาบามากกว่าข้าวกล้องปกติถึง 15 เท่า [38] การบริโภคข้าวกล้องงอกเป็นประจำจะสามารถช่วยป้องกันโรคต่าง ๆ ได้ เนื่องจากสารกาบในข้าวกล้องงอกเป็นกรดอะมิโนที่ผลิตจากกระบวนการ decarboxylation ของกรดอะมิโน (Glutamic acid) [39] ซึ่งกรดนี้จะมียับยั้งสำคัญในการทำหน้าที่เป็นสารสื่อประสาท (Neurotransmitter) ในระบบประสาทส่วนกลาง รักษาสมดุลของสารสื่อประสาทในสมอง [40] นอกจากนี้ยังเป็นสารสื่อประสาทประเภทสารยับยั้ง (Inhibitor) รักษาสมดุลในสมองที่ได้รับการกระตุ้นซึ่งช่วยทำให้สมองเกิดการผ่อนคลายและนอนหลับสบาย ป้องกันการเกิดโรคสมองเสื่อมหรือโรคอัลไซเมอร์ อีกทั้งยังทำหน้าที่ช่วยกระตุ้นต่อมไร้ท่อ (Anterior pituitary) ซึ่งทำหน้าที่ผลิตฮอร์โมนที่ช่วยในการเจริญเติบโต (HGH) ทำให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อ ทำให้กล้ามเนื้อเกิดความกระชับและเกิดสาร lipotropic ซึ่งเป็นสารป้องกันการสะสมไขมัน [41] ควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด [42] และ การเร่งการเผาผลาญแอลกอฮอล์ (Preventing chronic alcohol-related diseases) [43] ทั้งนี้คาดว่าจะยังมีฤทธิ์ระงับมะเร็งลำไส้ใหญ่ ป้องกันมะเร็งลำไส้และลดอาการท้องผูก [44] เป็นต้น ดังนั้นจึงได้มีการนำสารกาบมาใช้ในวงการแพทย์ [45] เพื่อการรักษาโรคเกี่ยวกับระบบประสาทต่าง ๆ หลายโรค เช่น โรควิตกกังวล โรคนอนไม่หลับ โรคลมชัก เป็นต้น

โดยข้าวขาวดอกมะลิ 105 ถือเป็นพันธุ์ข้าวที่เหมาะสมที่สุดในการเพาะงอก ให้ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระสูงสุดเมื่อเทียบกับการเพาะงอกข้าวเหนียวดำและข้าวหอมนิล [46] สภาวะที่เหมาะสมที่จะทำให้ข้าวกล้องงอกได้ดีคือการนำข้าวกล้องที่ผ่านการกะเทาะเปลือกมาไม่นานเกิน 2 สัปดาห์แช่น้ำราว 48 - 72 ชั่วโมงในหม้อแช่ โดยมีการควบคุมอุณหภูมิ การไหลเวียนน้ำ ความดันและความชื้นของน้ำอย่างสม่ำเสมอ [47] ซึ่งเมล็ดข้าวกล้องที่ผ่านการเพาะงอกแล้วจะสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของเมล็ดข้าวได้ดังรูป 2.24 นอกจากนี้จากการศึกษาของสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี [48] ดังรูป 2.25 พบว่าการเพาะงอกข้าวกล้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง คือ 4 ชั่วโมงสำหรับการแช่ข้าวกล้องในน้ำสะอาดและ 20 ชั่วโมงสำหรับการบ่มในภาชนะ (กล่องพลาสติก) จะได้ข้าวกล้องงอกที่มีปริมาณสารกาบสูงสุด โดยหลังจากการอบแห้ง คือการนำข้าวกล้องงอกที่ผ่านการเพาะงอกไปอบแห้งเพื่อลดความชื้นและยืดอายุการเก็บรักษาจะส่งผลต่อคุณค่าทางอาหารที่ลดลงของข้าวกล้องงอกเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 2.24 ภาพเปรียบเทียบระหว่างเมล็ดข้าวกล้องธรรมชาติ (แถบบน) กับเมล็ดข้าวกล้องงอก (แถบล่าง) [38]



รูปที่ 2.25 ปริมาณสารกาบา (GABA) ของข้าวกล้องงอกจากขั้นตอนการผลิตช่วงต่าง ๆ [48]

ในปัจจุบันประเทศไทยถือได้ว่าเป็นผู้ส่งออก "ข้าว" เป็นอันดับหนึ่งของโลก [49] โดยในปี พ.ศ. 2548 มูลค่าการส่งออกสินค้าข้าวและผลิตภัณฑ์แปรรูปมีมูลค่าสูงถึง 98,777 ล้านบาท ซึ่งในจำนวนนี้เป็นการส่งออกผลิตภัณฑ์ในรูปแบบของ "ข้าวสาร" ที่ไม่ได้มีการแปรรูปถึงร้อยละ 95 ของผลิตภัณฑ์ข้าวทั้งหมด จากที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าสัดส่วนการส่งออกในรูปแบบของผลิตภัณฑ์แปรรูปจากข้าวที่มาจากอุตสาหกรรมข้าวไทยเพียงร้อยละ 5 หรือคิดเป็นมูลค่า 5,858 ล้านบาท ดังนั้น หากเราสามารถพัฒนาข้าวสารให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์นวัตกรรมที่สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับประเทศได้มากกว่าเดิม 1-5 เท่า ซึ่งส่งผลให้ประเทศมีศักยภาพทางการแข่งขันกับอุตสาหกรรมข้าวในตลาดโลกได้มากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 สารกาบา

สาร “GABA” [50] ย่อมาจากคำว่า “Gamma – Amino Butyric Acid” (แกมมา-อะมิโนบิวไทริกแอซิด) สารตัวนี้ทำหน้าที่เป็น Neurotransmitter หรือสารสื่อประสาทในสมองประเภทสารยับยั้ง (Inhibitor) ทำหน้าที่รักษาสมดุลและควบคุมการทำงานของสมอง สารกาบา [51] พบมากในใบชาแห้ง แตงเมลอน มะเขือเทศ กิมจิ (Kimchi) ช็อกโกแลต (Chocolate) และข้าวกล้อง ซึ่งในข้าวกล้องกาบาจะเพิ่มขึ้นสูงมากระหว่างกระบวนการงอก

โดยปกติสารกาบาชนิดนี้มีอยู่ในระบบประสาทส่วนกลางของมนุษย์ทุกคนอยู่แล้ว ซึ่งสารกาบาสามารถเกิดขึ้นได้จากกระบวนการทางธรรมชาติที่เปลี่ยนสารกลูตาเมต (Glutamate) ในสมองให้กลายเป็นสารกาบานั่นเอง แต่การได้รับสารกลูตาเมตจากธรรมชาติเพียงอย่างเดียว อาจจะมีควมแปรปรวนในด้านปริมาณ และในบางครั้งอาจไม่เพียงพอต่อความต้องการของร่างกายมนุษย์ ด้วยเหตุนี้เองจึงมักมีการเติมกาบาเสริมลงในผลิตภัณฑ์อาหารชนิดต่าง ๆ เพื่อให้ผู้บริโภคได้รับสารกาบาในปริมาณที่เพียงพออย่างแท้จริง

สารกาบาที่ใช้เติมในผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อลดความเครียด หรือความอ่อนคลายอารมณ์ มักจะพบผสมอยู่ในเครื่องดื่ม น้ำผลไม้ โยเกิร์ต ลูกอม หมากฝรั่ง ไล้กรอก ขนมปัง ซีส นมถั่วเหลืองพร้อมดื่ม หรือกาแฟพร้อมดื่ม นอกจากนี้ อาจอยู่ในรูปแบบของผลิตภัณฑ์อาหารเสริมชนิดเม็ด เพื่อความสะดวกในการรับประทานจากตัวอย่างงานวิจัยของ Nakamura [52] พบว่าเมื่อนำช็อกโกแลตที่มีส่วนผสมของสารกาบาที่ผลิตจากกรดกลูตามิกปริมาณ 0.28 มิลลิกรัม ให้ผู้ที่ผ่านการเพิ่มความเครียดโดยการทำแบบทดสอบประเภท Arithmetic รับประทาน และตรวจวัดค่าความเครียดผ่านค่า HRV และ CGA ภายในเวลาที่กำหนด ผลการทดสอบพบว่า ปริมาณตัวชี้วัดทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงในทางที่ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การทดลองนี้จึงสนับสนุนข้อเท็จจริงที่ว่า ช็อกโกแลตผสมกาบาสามารถช่วยลดความเครียดได้จริง

การผลิตกาบาในระดับอุตสาหกรรมถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อตอบสนองความต้องการในการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร เพื่อตอบสนองความต้องการของกลุ่มผู้บริโภคที่ประสบภาวะเครียดสะสม ซึ่งการผลิตสามารถทำได้ทั้งการผลิตจากวัตถุดิบและกรรมวิธีทางธรรมชาติ ไปจนถึงการสังเคราะห์จากวัตถุดิบประเภทปิโตรเคมี โดยหากเป็นสารกาบาที่ผลิตจากกรดกลูตามิก (Glutamic acid) โดยใช้วิธีการหมักทางธรรมชาติ จะเป็นการผลิตด้วยเชื้อ *Lactobacillus hilgardii* K-3 แล้วจึงนำมาทำแห้งเพื่อเก็บในรูปแบบผงละเอียด

อย่างไรก็ตาม จากหลักฐานทางงานวิจัยพบว่า [53] ปริมาณกาบาแค่เพียงประมาณ 20-30 มิลลิกรัมต่อวัน ก็เพียงพอต่อการผ่อนคลายความเครียด ซึ่งหากไม่ต้องการรับประทานกาบาในรูปแบบที่สังเคราะห์ขึ้นมา ก็สามารถหารับประทานได้จากแหล่งอาหารตามธรรมชาติ [54] เช่น ใบชาแห้ง (100-200 mg GABA /100g), เมลอน (74.5 mg GABA /100g), มะเขือเทศ (62.6 mg GABA /100g), กิมจิ (59.4 mg GABA /100g), ช็อกโกแลต (14.5 mg GABA /100g), ข้าวกล้องงอก (10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

mg GABA /100g), ฟักทอง (9.7 mg GABA /100g) หรือเต้าหู้ (6.4 mg GABA /100g) เป็นต้น ก็ สามารถช่วยในการผ่อนคลายความเครียดของสมองได้ดี

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับระบบลดความชื้นในอากาศ

การศึกษาอิทธิพลของวิธีการอบแห้งที่ส่งผลต่อคุณภาพของผักชีฝรั่ง [4] การทดลองมีการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ที่ $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ปกติ 58-63% และความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ (28-30%) พบว่า วิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ทำให้สารต้านอนุมูลอิสระในผักชีฝรั่งมีค่าสูงกว่าวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนปกติ ทั้งยังช่วยรักษาคุณสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของผักชีฝรั่งอบแห้ง

การศึกษาอิทธิพลของวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่ส่งผลต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของวัสดุ [7] ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นสามารถลดเวลาในการอบแห้งเครื่องอบแห้งลงถึง 25% เมื่อเทียบกับระบบอบแห้งลมร้อนแบบปกติ ซึ่งสามารถช่วยสามารถลดต้นทุนการอบแห้งได้ โดยเมื่อเทียบพลังงานในเฉพาะส่วนอบแห้ง ไม่คิดรวมพลังงานในส่วนของการคืนสภาพสารดูดความชื้น จะพบว่าระบบแบบผสมจะใช้พลังงานน้อยกว่าการอบแห้งแบบทั่วไป เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งที่น้อยกว่า ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่แปรผันตรงกับพลังงานที่ใช้ แต่หากคิดจากพลังงานที่ใช้ในระบบทั้งหมดจะพบว่าระบบแบบผสมใช้พลังงานมากกว่าการอบแห้งแบบทั่วไประหว่าง 40-80% ซึ่งส่วนพลังงานที่เพิ่มขึ้นนี้ มาจากส่วนคืนสภาพสารดูดความชื้นถึง 40% ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด

การลดภาระการทำความเย็นของระบบปรับอากาศโดยใช้สารดูดความชื้นเพื่อการประหยัดพลังงาน [8] โดยสารดูดความชื้นที่นำมาใช้ในการทดลอง ได้แก่ ทรายแอก (Dry act) และอีโคทราย (Co dry) ซึ่งเป็นสารดูดความชื้นจากธรรมชาติและ ซิลิกาเจล (Silica gel) ซึ่งเป็นสารดูดความชื้นสังเคราะห์ จากการทดลองพบว่าสารดูดความชื้นจากธรรมชาติโดยเฉพาะสารอีโคทรายมีความสามารถในการดูดซับความชื้นดีกว่าสารดูดความชื้นซิลิกาเจล ส่วนความสามารถในการคายความชื้นมีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นสามารถนำสารดูดความชื้นจากธรรมชาติมาใช้ทดแทนสารดูดความชื้นจากการสังเคราะห์ในกรณีที่น่าไปประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบปรับอากาศได้ ซึ่งการใช้สารดูดความชื้นร่วมกับระบบปรับอากาศสามารถช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศลงได้คิดเป็น 5-10% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการใช้สารดูดความชื้นร่วมกับระบบปรับอากาศ

2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการอบแห้งข้าวกล้องงอก

ผลของการอบแห้งแบบถาดของข้าวกล้องงอกขาวดอกมะลิ 105 งอกต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ [55] การทดลองทำการศึกษาการอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 40, 50 และ 60°C ในเวลาการอบแห้ง 10, 12 และ 14 ชั่วโมง พบว่าอิทธิพลร่วมของอุณหภูมิและเวลาไม่มีผลอย่างชัดเจนต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ แต่อิทธิพลของอุณหภูมิจึงมีผลต่อปริมาณสารกาบาและ γ -tocopherol อย่างมีนัยสำคัญ โดยที่อุณหภูมิ 40°C เวลา 14 ชั่วโมงจะทำให้ข้าวกล้องงอกขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณ GABA สูงสุดที่ 15.83 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และเมื่อเทียบที่เวลาอบแห้งเดียวกันจะพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งจะส่งผลให้สารกาบามีปริมาณลดน้อยลง

วิธีการเตรียมและการอบแห้งต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของข้าวฮางงอก จากข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 [56] จากการทดลองทำการศึกษาอิทธิพลของสองปัจจัยหลัก คือ อิทธิพลของการเตรียมข้าวฮางงอกก่อนการอบแห้ง (การแช่เย็นที่อุณหภูมิ 5°C และการแช่เยือกแข็ง -20°C) และอิทธิพลของวิธีการอบแห้ง (แบบถาด และแบบอินฟราเรด) ต่อการอบแห้งข้าวฮางงอก จากผลการวิจัยพบว่า การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดจะส่งผลให้ข้าวฮางงอกมีสารกาบาสูงสุดคือ 23.37 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม ในขณะที่เครื่องอบแห้งแบบถาดจะให้ปริมาณสารกาบาเพียง 19.40 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม

ผลของวิธีการหุงต่อปริมาณกรดแกมมาอะมิโนบิวทริก (กาบา) และสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องงอก [57] พบว่าวิธีการหุงมีผลต่อปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องงอกหุงสุก การหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าแบบไม่มีการชวดด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1:2 (w/w) โดยก่อนทำการหุงข้าวกล้องงอก ทำการแช่ข้าวที่น้ำอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการหุงข้าวกล้องงอกจนกระทั่งหม้อหุงข้าวไฟฟ้าตัดไฟอัตโนมัติ และให้ความร้อนข้าวในหม้อเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเกลี่ยข้าว และให้ความร้อนข้าวต่อเป็นเวลา 5 นาที จะให้ปริมาณกาบาสูงกว่าการหุงด้วยวิธีอื่นๆ

อิทธิพลของการทำแห้งต่อสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และคุณภาพของข้าวหอมนิลฮางงอก [58] จากทดลองอบแห้งข้าวหอมนิลฮางงอก พบว่าอิทธิพลของอุณหภูมิ และความเร็วลมที่ใช้ในการทำแห้งมีไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาณกาบา และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในข้าวฮางงอก โดยพบว่าหลังการทำแห้งปริมาณกาบาจะลดลงเล็กน้อย เนื่องจากกาบาเป็นสารที่สามารถทนอุณหภูมิได้สูง ในขณะที่เมื่อทำการเปรียบเทียบด้วยวิธีการทำแห้งแบบต่างๆ คือ การตากแดด ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกพบว่าวิธีการอบแห้งไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อปริมาณกาบาในข้าวฮางงอก หลังการทำการทำแห้งเช่นกัน

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 โดยเริ่มต้นจากการนำข้าวเปลือกมาผ่านกระบวนการสีจนได้เป็นข้าวกล้องเต็มเมล็ด ตัวอย่างข้าวกล้องถูกบรรจุในถุงสุญญากาศที่อุณหภูมิ 4°C ก่อนนำมาใช้ในกระบวนการต่อไป ต้องนำตัวอย่างมาวางไว้ให้มีสถานะอุณหภูมิห้อง 25°C

3.2 กระบวนการเพาะงอกข้าวกล้อง

นำข้าวกล้องเต็มเมล็ดมาล้างน้ำแล้วห่อด้วยผ้าขาวบาง ทำการแช่และบ่มในอ่างน้ำปรับอุณหภูมิ (W350, Memmert, Germany) ในน้ำประมาณ 5 ลิตร ที่อุณหภูมิ 35°C

การเพาะข้าวกล้องงอกสามารถแบ่งได้ 2 ขั้นตอนหลัก คือ การแช่ในน้ำเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และการบ่มเป็นเวลา 20 ชั่วโมง โดยในระหว่างกระบวนการเพาะข้าวกล้องงอกต้องทำการล้างข้าวทุกๆ 4 ชั่วโมงเพื่อลดการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [59] พบว่าการแช่และบ่มข้าวกล้องงอกที่อุณหภูมิและเวลาดังกล่าวจะส่งผลให้ข้าวกล้องงอกมีปริมาณสารกาบาสูงสุด เมื่อเทียบกับตัวอย่างข้าวกล้องงอกที่แช่และบ่มที่เวลาอื่นๆ ขั้นตอนการเพาะข้าวกล้องงอกและข้าวกล้องงอกหลังการเพาะบ่ม 24 ชั่วโมงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมข้าวกล้องงอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ข้าวกล้องงอกหลังการเพาะบ่ม 24 ชั่วโมง

3.3 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

จากรูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ วงล้อดูดความชื้นซึ่งทำหน้าที่ในการลดความชื้นในห้องอบแห้ง เครื่องทำความร้อนเพื่อทำอากาศร้อนให้ห้องอบแห้ง และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำอากาศร้อนออกจากห้องอบแห้งมาแลกเปลี่ยนกับอากาศปกติ และนำอากาศร้อนที่ได้ไปใช้ในการกำจัดความชื้นออกจากสารดูดความชื้นในวงล้อดูดความชื้นต่อไป

ในส่วนของวงล้อดูดความชื้น วงล้อทำมาจากสแตนเลสสตีลมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.7 m หนา 1 cm วงล้อจะถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ซึ่งทำการหมุนอย่างต่อเนื่อง วงล้อประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนดูดความชื้น และส่วนคืนสภาพสารดูดความชื้น ในส่วนดูดความชื้น อากาศปกติจะถูกนำมาลดความชื้นขณะเข้าสู่วงล้อดูดความชื้นเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการอบแห้ง ขณะที่ส่วนคืนสภาพสารดูดความชื้น อากาศปกติจะถูกนำมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อนำอากาศร้อนไปคายความชื้นออกจากซิลิกาเจลต่อไป

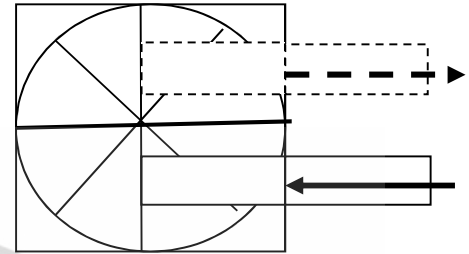
สำหรับการทดลองนี้ ห้องอบแห้งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2 m ยาว 0.3 m มีฝาสำหรับนำวัสดุเข้า-ออกจากห้องอบแห้ง โครงสร้างของเครื่องอบแห้งทั้งหมดทำมาจากสแตนเลสสตีล ส่วนประกอบอื่นๆได้แก่ พัดลมขนาด 0.5 แรงม้า (รุ่น MA40B, EuroVent, Thailand) ทำหน้าที่เป่าผ่านขดลวดเพื่อทำให้เกิดการไหลของอากาศร้อนผ่านท่อไปยังห้องอบแห้ง ในส่วนของชุดควบคุมอุณหภูมิจะใช้อุปกรณ์ทำอากาศร้อนขนาด 1 กิโลวัตต์ (Technology Instruments, Thailand) ขณะที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำมาจากอลูมิเนียมมีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนรวมทั้งหมด 50 ตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

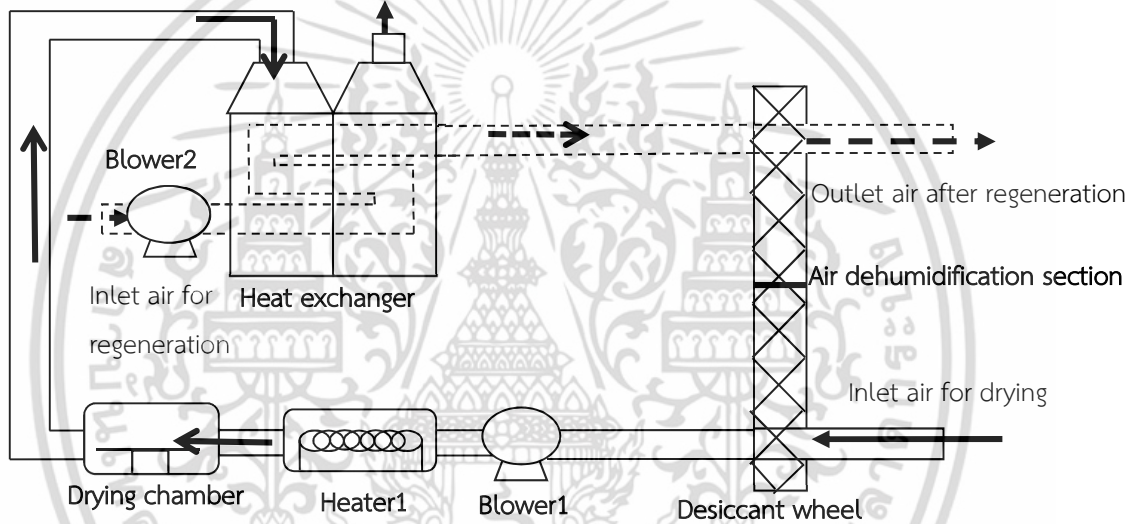
ในด้านการวัดพลังงานการอบแห้ง ใช้อุปกรณ์ที่วัดค่าพลังงานไฟฟ้าสำหรับระบบไฟ 3 เฟส (รุ่น KM-06-N, Pm PRIMUS, Thailand) เพื่อวัดค่าพลังงานไฟฟ้าในหน่วย kWh



DW regeneration section



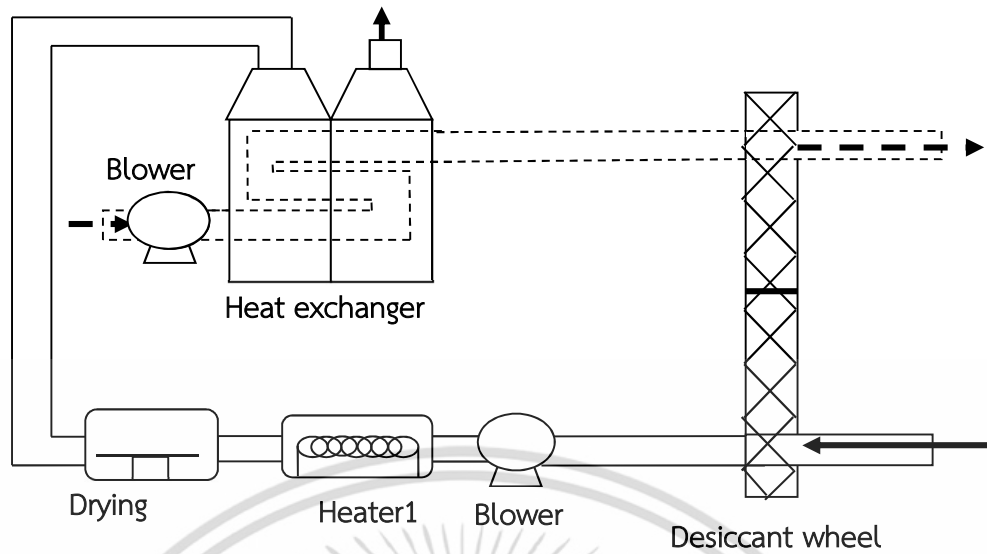
Outlet air after heat exchanging



รูปที่ 3.3 แผนผังเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบวงล้อดูดความชื้น

จากรูปที่ 3.4 -3.5 แสดงระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบการลดความชื้นในห้องอบแห้ง วงล้อดูดความชื้นจะถูกบรรจุด้วยซิลิกาเจลที่ไม่มีการดูดความชื้นผสมอยู่ปริมาณ 3 กิโลกรัม โดยในส่วนของลดความชื้น เริ่มจากอากาศปกติที่ถูกนำมาใช้ในการอบแห้งจะมีความชื้นสัมพัทธ์สูง อุปกรณ์ลดความชื้นจึงมีหน้าที่สำคัญในการลดความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศก่อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง เพื่อเพิ่มอัตราการอบแห้งและลดเวลาในการอบแห้งให้แก่ระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

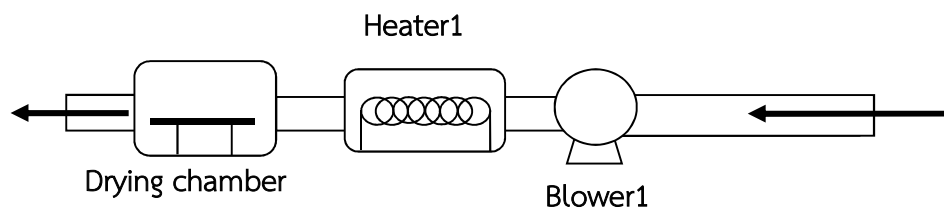


รูปที่ 3.4 ระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น



รูปที่ 3.5 วงล้อดูดความชื้น

ในการใช้เครื่องอบแห้งโดยไม่มีการลดความชื้นในอากาศ ส่วนประกอบที่ทำงานแสดงดังรูปที่ 3.6 ระบบอบแห้งแบบลมร้อนประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก ได้แก่ พัดลม อุปกรณ์ทำอากาศร้อน และ ห้องอบแห้ง ระบบจะทำการอบแห้งโดยนำอากาศปกติจากภายนอกเข้าสู่ห้องอบแห้งเพื่อใช้ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกต่อไป



รูปที่ 3.6 ระบบอบแห้งแบบลมร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

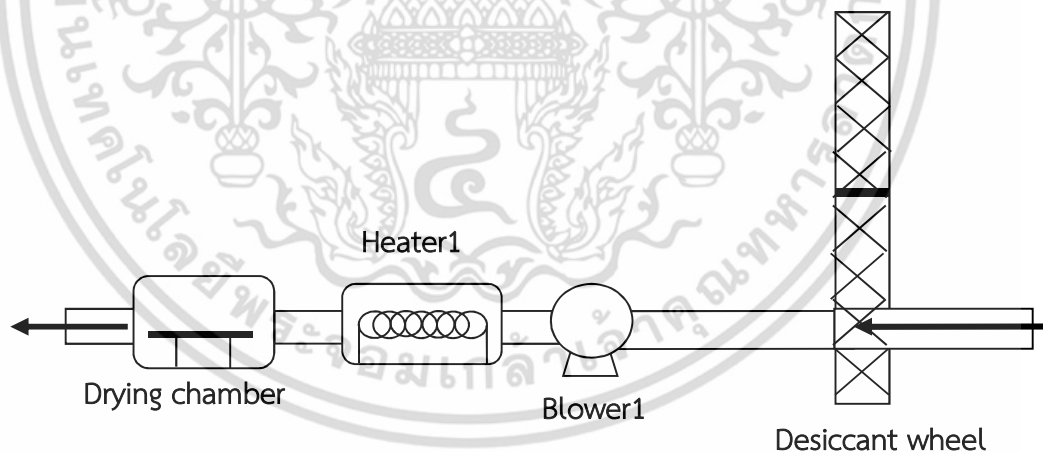
3.4 แผนการทดลอง

งานวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1. การศึกษาการทำงานของวงล้อและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้นทั้งระบบในสภาวะห้องอบแห้งเปล่า และ 2. การศึกษาการอบแห้งข้าวกล้องงอกในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น โดยรายละเอียดทางการทดลองมีดังนี้

3.4.1 การศึกษาการทำงานของวงล้อและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้นทั้งระบบในสภาวะห้องอบแห้งเปล่า

3.4.1.1 การทดลองดูดความชื้นในอากาศของวงล้อดูดความชื้น

จากรูปที่ 3.7 แผนภาพไดอะแกรมในส่วนดูดความชื้นของระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น โดยวงล้อดูดความชื้นถูกบรรจุด้วยซิลิกาเจลสีน้ำเงินสดที่ไม่มีความชื้นสะสมอยู่ปริมาณ 3 กิโลกรัม ในการทดลองใช้อัตราการไหลของอากาศและความเร็วรอบของวงล้อเป็น $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และ 0.5 rpm ตามลำดับ มีอากาศโดยรอบเป็น 35.9°C , $50.2\% \text{ RH}$ และ $0.019 \text{ kg water/kg dry air}$ โดยในระหว่างกระบวนการทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศโดยเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (KT320, Kimo, France) ทุก ๆ 1 นาทีจนครบ 10 นาที และหลังจากนั้นทำการวัด ทุก ๆ 5 นาทีจนครบ 30 นาที

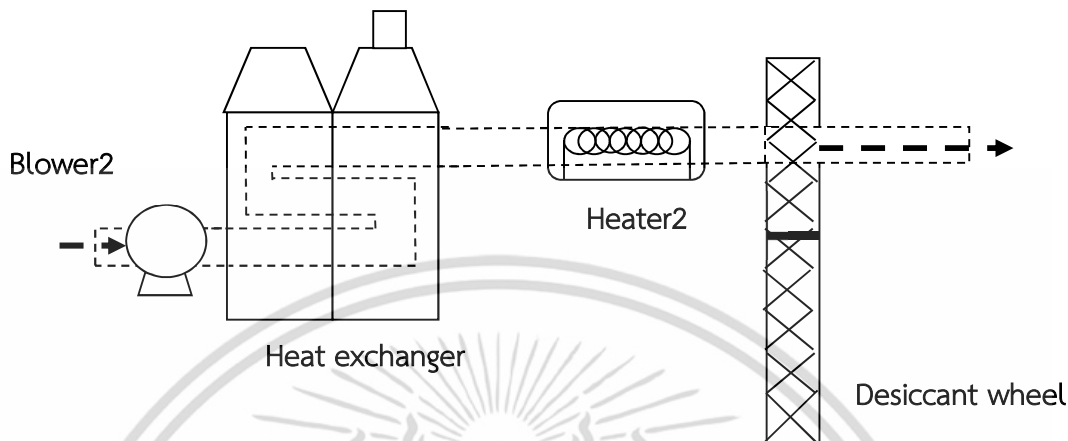


รูปที่ 3.7 แผนผังเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับระบบวงล้อดูดความชื้นในส่วนดูดความชื้น

3.4.1.2 การทดลองการคืนสภาพสารดูดความชื้นในวงล้อดูดความชื้น

จากรูปที่ 3.8 แผนภาพไดอะแกรมในส่วนคืนสภาพสารดูดความชื้นของระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น โดยวงล้อดูดความชื้นถูกบรรจุด้วยซิลิกาเจลปริมาณ 3 กิโลกรัม ก่อนการทดลองกำหนดให้ซิลิกาเจลดูดความชื้นจนเต็มในที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 ชั่วโมงจนมีสีชมพู ทำการทดลองโดยให้อัตราการไหลของอากาศและความเร็วรอบของวงล้อคือ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 0.5 rpm ตามลำดับ และทำการกำหนดอุณหภูมิลมร้อนในการคืนสภาพสารดูดความชื้นคือ 60°C ซึ่งในระหว่างกระบวนการทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเป็นเวลา 30 นาที เช่นเดียวกับในส่วนกระบวนการดูดความชื้น



รูปที่ 3.8 แผนผังเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบวงล้อดูดความชื้นในส่วนการคืนสภาพสารดูดความชื้น

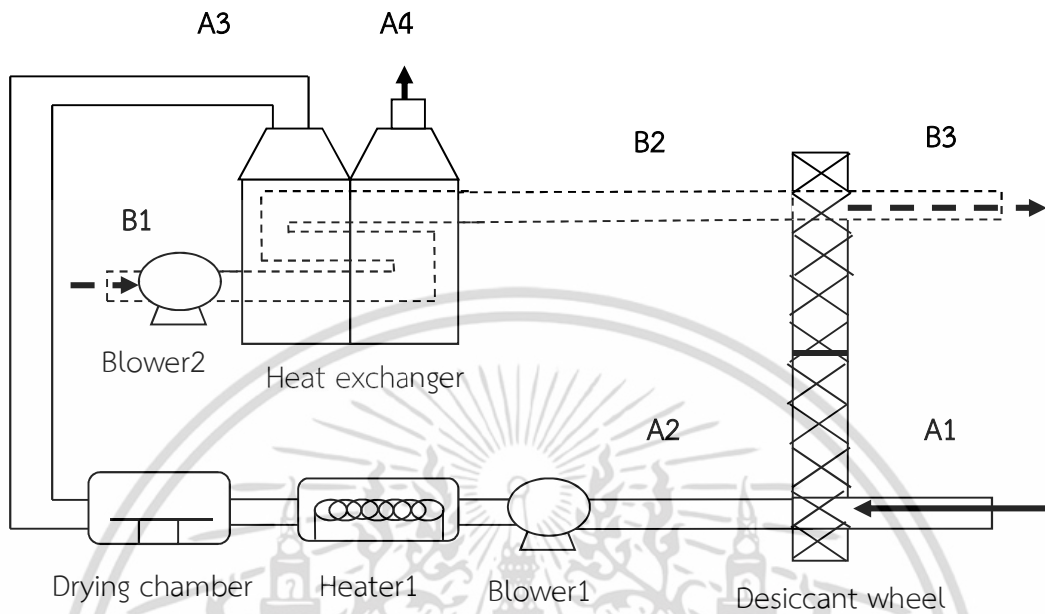
3.4.1.3 การศึกษาสมบัติของอากาศในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นในสถานะห้องอบแห้งเปล่า

จากรูปที่ 3.10 แผนภาพไดอะแกรมแสดงระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นทั้งระบบ ในการทดลองทำการบรรจุซิลิกาเจลที่ไม่มี ความชื้นสะสมปริมาณ 3 กิโลกรัม เป็ดทำงานในอุปกรณ์ทุกส่วนของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น โดยให้อัตราการไหลของอากาศคือ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ ความเร็วรอบของวงล้อเป็น 0.5 rpm และอุณหภูมิลมร้อนเป็น 90°C ซึ่งในระหว่างกระบวนการทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศทุก ๆ 5 นาทีจนครบ 30 นาที

ระบบลดความชื้นในห้องอบแห้งประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนการดูดความชื้น (เส้นกระบวนการ A) และส่วนการคืนสภาพสารดูดความชื้น (เส้นกระบวนการ B) ในส่วนการดูดความชื้นเริ่มจากอากาศปกติที่จุด A1 จะถูกนำมาลดความชื้นโดยผ่านวงล้อดูดความชื้น ซึ่งทำให้อากาศที่ออกจากวงล้อดูดความชื้นที่จุด A2 มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ โดยอากาศที่ได้นี้จะถูกไปเพิ่มอุณหภูมิที่เครื่องทำความร้อนจนมีอุณหภูมิเป็น 90°C เพื่อใช้สำหรับกระบวนการอบแห้งต่อไป ซึ่งอากาศที่เหลือทิ้งจากกระบวนการอบแห้งคือจุด A3 จะถูกนำมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศปกติ คือจุด B1 ในส่วนของกระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้นที่บริเวณเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้อากาศที่เหลือทิ้งหลังจากการแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วที่จุด A4 มีอุณหภูมิต่ำและความชื้นสัมพัทธ์สูง ขณะที่ส่วนคืนสภาพสารดูดความชื้น อากาศปกติที่จุด B1 จะถูกนำมาเพิ่มอุณหภูมิที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยอากาศร้อนที่ได้คือจุด B2 จะถูกนำไปใช้ในการคืนสภาพสารดูดความชื้นออกจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิกาเจล ซึ่งส่งผลให้อากาศที่ออกจากวงล้อดูดความชื้นในส่วนการคืนสภาพสารดูดความชื้นที่จุด B3 มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ



รูปที่ 3.9 แผนผังแสดงจุดในการวัดสมบัติอากาศของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบวงล้อดูดความชื้น

3.4.1.4 การคำนวณประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้นทั้งระบบในสภาวะห้องอบแห้งเปล่า

ประสิทธิภาพของระบบวงล้อดูดความชื้นสามารถคำนวณในแง่ของการถ่ายเทความร้อนและการโอนเชิงมวลจากสมการดังต่อไปนี้ [25]

ประสิทธิภาพทางการถ่ายเทความร้อน (Thermal effectiveness) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.1)

$$\epsilon = \frac{T_{A2} - T_{A1}}{T_{B2} - T_{A1}} \quad (3.1)$$

เมื่อ T_{A1} , T_{A2} และ T_{B2} คือ อุณหภูมิทางเข้าและทางออกของอากาศในส่วนการดูดความชื้นและอุณหภูมิทางเข้าของอากาศในส่วนการคืนสภาพสารดูดความชื้น ($^{\circ}\text{C}$) ตามลำดับ

ประสิทธิภาพทางการคืนสภาพสารดูดความชื้น (Regeneration effectiveness) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.2)

$$\epsilon = \frac{(W_{A1} - W_{A2}) h_{fg}}{h_{B2} - h_{B1}} \quad (3.2)$$

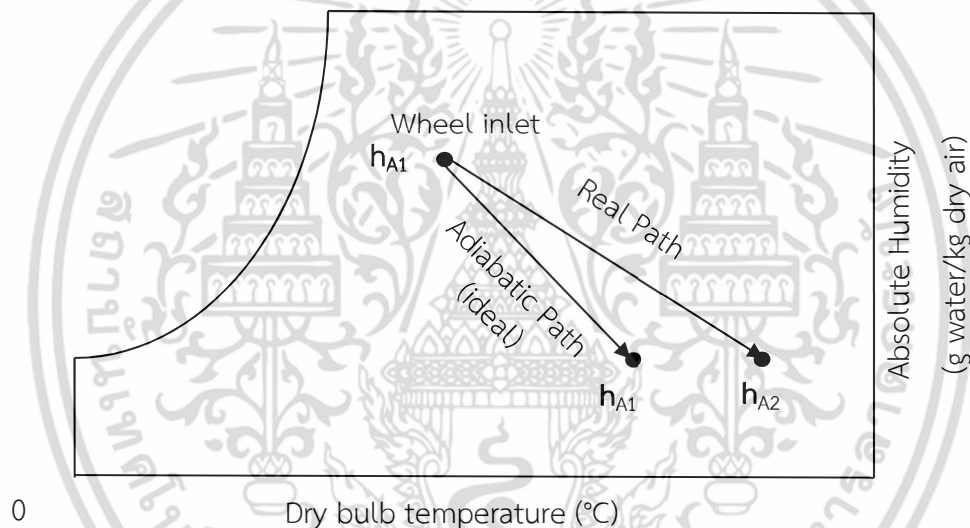
เมื่อ w และ h คือ ความชื้นจำเพาะและ ความร้อนแฝงในการระเหยของน้ำ ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพทางการลดความชื้น (Dehumidification effectiveness สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.3)

$$\epsilon = \frac{W_{A1} - W_{A2}}{W_{A1} - W_{A2,ideal}} \quad (3.3)$$

เมื่อ W_{A1} และ W_{A2} คือ ความชื้นจำเพาะทางเข้าและทางออกของอากาศในส่วนการดูดความชื้น ขณะที่ $W_{A2,ideal}$ คือ ความชื้นจำเพาะทางอุดมคติของทางออกของอากาศในส่วนการดูดความชื้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0 หรือ ระบบสามารถทำการลดความชื้นได้อย่างสมบูรณ์

โดยความแตกต่างระหว่างค่าเอนทัลปีของอากาศทางเข้าและออกจากวงล้อดูดความชื้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 โดยการเบี่ยงเบนของค่าเอนทัลปีมีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการอะเดียแบติกสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.4)



รูปที่ 3.10 แผนภูมิไซโครเมตริกในกระบวนการลดความชื้นด้วยวงล้อดูดความชื้นซึ่งเป็นไปตามกระบวนการอะเดียแบติก (ดัดแปลงจาก[25])

ประสิทธิภาพกระบวนการอะเดียแบติก (Adiabatic DW 's effectiveness)

$$\epsilon = 1 - \frac{(h_{A2} - h_{A1})}{h_{A1}} = \frac{2h_{A1} - h_{A2}}{h_{A1}} \quad (3.4)$$

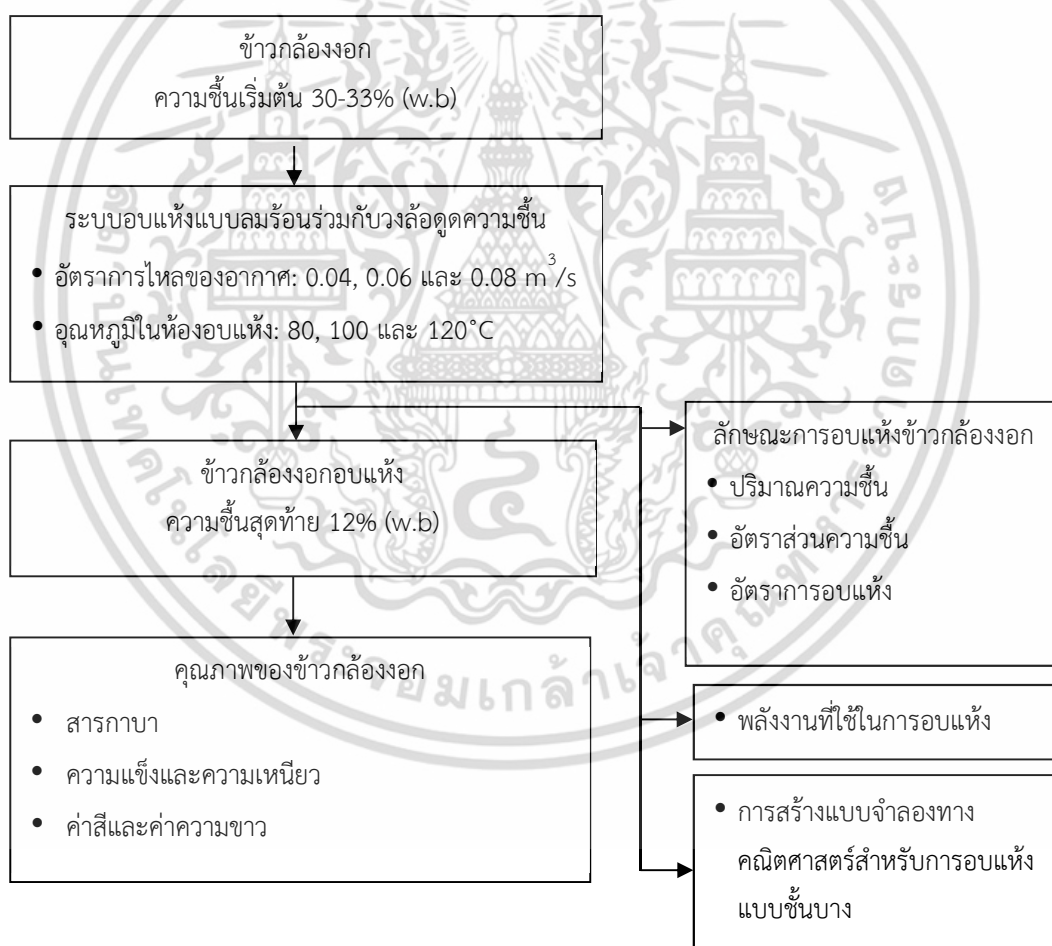
เมื่อ h_{A1} และ h_{A2} คือ ค่าเอนทัลปีของอากาศทางเข้าและออกจากวงล้อดูดความชื้นที่เป็นไปตามการลดความชื้นแบบกระบวนการอะเดียแบติก และค่าเอนทัลปีของอากาศหลังออกจากวงล้อดูดความชื้นที่ได้จากการทดลองจริง ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยอ้างอิงจากแผนภูมิไซโครเมตริกในรูปที่ 3.9 กระบวนการลดความชื้นด้วยวงล้อดูดความชื้นต้องเป็นไปตามเส้นกระบวนการอะเดียแบติก คือระบบสามารถทำการลดความชื้นได้อย่างสมบูรณ์ มีค่าประสิทธิภาพ 100%

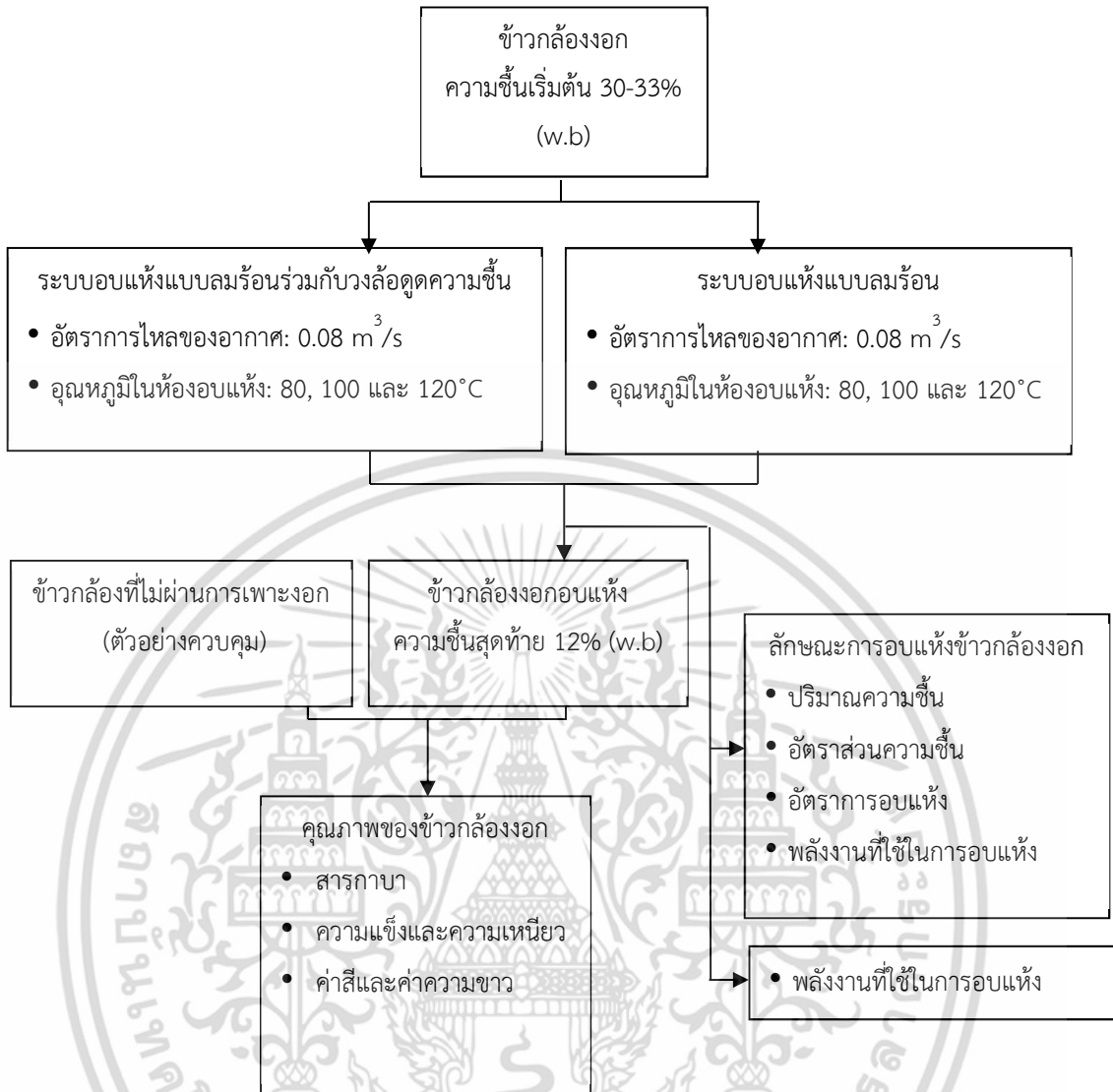
3.4.2 การศึกษาการอบแห้งข้าวกล้องงอกในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 การทดลองหลัก ได้แก่ 1. อิทธิพลของอัตราการไหลและอุณหภูมิต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นซึ่งสามารถแสดงดังรูปที่ 3.11 และ 2. การเปรียบเทียบระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ โดยรายละเอียดการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 แผนผังการทดลองอิทธิพลของอัตราการไหลและอุณหภูมิต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แผนผังการทดลองการเปรียบเทียบระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ

3.4.2.1 อิทธิพลของอัตราการไหลและอุณหภูมิ ต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

ระบบที่ใช้ในการศึกษาคือระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิห้องอบแห้งที่ส่งผลต่อลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของข้าวกล้องงอก โดยด้านคุณภาพของข้าวกล้องงอกจะทำการวิเคราะห์ปริมาณสารกาบา ความแข็ง ความเหนียว ค่าสี และค่าความขาวของข้าวกล้องงอกที่ได้หลังจากกระบวนการอบแห้งที่พัฒนาขึ้นซึ่งมีวิธีการวิเคราะห์ที่ได้ตั้งหัวข้อที่ 3.5, 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการศึกษาคือ ตัวอย่างข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งดังรูปที่ 3.12 ที่อัตราการไหลของอากาศ

ของส่วนดูดความชื้นคือ 0.04, 0.06 และ 0.08 m³/s และอุณหภูมิในห้องอบแห้ง 80, 100 และ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

120°C นอกจากนี้ยังทำการสร้างและเลือกแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบชั้นบางที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทำนายลักษณะการอบแห้งของข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

การทดลองทำการกำหนดความเร็วรอบของวงล้อดูดความชื้นที่ 1.5 rpm อัตราการไหลของอากาศของส่วนคืนสภาพสารดูดความชื้นที่ 0.04 m³/s และอุณหภูมิของส่วนคืนสภาพที่ 90°C ก่อนการทดลองกำหนดอากาศก่อนก่อนเข้าสู่วงล้อดูดความชื้นมีค่าควบคุมอยู่ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 45-55% ข้าวกล้องงอกที่ใช้ในการศึกษาคือข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เพาะงอกเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจนมีความชื้นอยู่ในช่วง 30-33% (w.b) การทดลองทำการอบแห้งแบบชั้นบาง (Thin-layer drying) ที่ชั้นความหนา 1 เซนติเมตรเกลี่ยให้เรียบเสมอกัน ให้ข้าวกล้องงอกมีความชื้นสุดท้ายเป็น 12% (w.b) ซึ่งเป็นระดับความชื้นที่ปลอดภัย คือ 10-13% (w.b) [60] ในการเก็บรักษาข้าวกล้องงอก



รูปที่ 3.13 ข้าวกล้องงอกชั้นความหนา 1 เซนติเมตรเกลี่ยให้เรียบเสมอกัน

3.4.2.2 การเปรียบเทียบระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ

ในการทดลองจะทำการศึกษาและเปรียบเทียบตัวอย่างข้าวกล้องจำนวน 3 ตัวอย่างหลัก คือ ตัวอย่างควบคุม (ข้าวกล้องที่ไม่ผ่านการเพาะงอก) ตัวอย่างข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น และตัวอย่างข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อน ซึ่งตัวอย่างทั้งหมดจะถูกนำมาเปรียบเทียบในด้านลักษณะการอบแห้ง และด้านคุณภาพซึ่งได้แก่ ปริมาณสารกาบา ความแข็ง ความเหนียว ค่าสี และค่าความขาวที่ได้หลังจากกระบวนการอบแห้งเมื่อใช้วิธีการอบแห้งที่แตกต่างกัน โดยตัวอย่างที่นำมาใช้ในการศึกษาคือ ตัวอย่างข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งด้วยอัตราการไหลของอากาศเดียวกันในส่วนดูดความชื้น คือที่อัตราการไหลของอากาศเป็น 0.08 m³/s และอุณหภูมิในห้องอบแห้งเป็น 80, 100 และ 120°C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การวิเคราะห์ลักษณะการอบแห้ง

3.5.1 ปริมาณความชื้น

วิธีการวัดปริมาณความชื้นถูกกำหนดโดย AOAC [61] โดยทำการชั่งข้าวกล้องงอกใส่ลงในถ้วยวัดความชื้น หลังจากนั้นนำเข้าเครื่องอบแห้ง (UF260, Memmert, Germany) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำข้าวกล้องที่ผ่านการอบออกมาชั่งน้ำหนัก และนำไปคำนวณหาความชื้นของแต่ละตัวอย่างได้ดังสมการ (3.5) และ (3.6)

การวิเคราะห์หาความชื้นฐานเปียกสามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.5)

$$MR = \frac{M_w}{M_w - M_s} \times 100 \quad (3.5)$$

การวิเคราะห์หาความชื้นฐานแห้งสามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.6)

$$MR = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ M_w และ M_s คือ ปริมาณน้ำ (g_{water}) และน้ำหนักตัวอย่างแห้ง ($g_{\text{dry matter}}$) ตามลำดับ

3.5.2 อัตราส่วนความชื้น (The moisture ratio, MR)

หลังจากที่ได้ความชื้นตามเงื่อนไขที่ต้องการ สามารถนำมาคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นได้ดังสมการ (3.7)

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (3.7)$$

เมื่อ M_t , M_0 และ M_e คือ ปริมาณความชื้นข้าวที่เวลาใดๆ ($g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$), ปริมาณความชื้นข้าวที่เวลาเริ่มต้น ($g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$) และ ปริมาณความชื้นข้าวที่สมดุล ($g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$) ตามลำดับ ซึ่งสำหรับการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิสูงจะพบว่าค่า M_e จะมีค่าเท่ากับ 0 [62]

3.5.3 อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) เมื่อคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นแล้วจึงสามารถนำมาคำนวณหาอัตราการอบแห้งได้ดังสมการ (3.8)

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (3.8)$$

เมื่อ M_{t+dt} , M_t และ dt คือ ปริมาณความชื้นข้าวที่เวลาเริ่มต้น ($g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$), ปริมาณความชื้นข้าวที่เวลาใดๆ ($g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$) และ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (min) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสิทธิ์สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การวิเคราะห์พลังงานจำเพาะของการอบแห้ง

ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption: SEC) เป็นค่าที่สะท้อนถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และยังสามารถแสดงถึงต้นทุนทางด้านพลังงานของโรงงานอุตสาหกรรมได้ โดยทั่วไปค่า SEC สามารถคำนวณได้จากปริมาณพลังงานที่โรงงานใช้ในเวลานั้น ต่อปริมาณผลผลิตทั้งหมดในช่วงเวลาเดียวกัน [63] สามารถแสดงได้ดังสมการ (3.9)

$$SEC = \frac{\text{Energy}}{\text{Product}} \quad (3.9)$$

เมื่อ Energy คือ พลังงานที่ใช้หรือเกี่ยวข้องกับการผลิตสินค้าในช่วง 1 รอบการทำงานหรือช่วงเวลา (kWh) ในขณะที่ Product คือ ปริมาณผลผลิตที่ผลิตได้ในช่วง 1 รอบการทำงาน หรือช่วงเวลา โดยต้องเป็นช่วงเวลาเดียวกันกับการบันทึกพลังงาน

3.7 การสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบชั้นบาง

จากการทดลองเลือกใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวกล้องงอกแบบชั้นบางจำนวน 8 โมเดลได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

Model No.	Model name	Model
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
5	Two term	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$
6	Approximation of diffusion	$MR = (a \exp(-kt)) + (1-a) \exp(-kbt)$
7	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
8	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$

ซึ่งจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวกล้องงอกแบบชั้นบางสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) [36] ได้ดังสมการที่ (3.10) และ (3.11) ตามลำดับ โดยตัวแปรทั้งสองตัวสามารถนำไปสู่การเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุดเพื่อใช้ในการอบแห้ง คือ แบบจำลองที่มีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจสูง และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) สามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.10)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{bar, exp})^2} \quad (3.10)$$

การคำนวณหาค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean square error, RMSE) สามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.11)

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (3.11)$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$, $MR_{bar, exp}$, $MR_{pre,i}$ และ N คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง, อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง, อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการคาดการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และ จำนวนสิ่งทดลอง ตามลำดับ

3.8 การวิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องงอก

คุณภาพข้าวกล้องงอกที่ทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ สารกาบา ความแข็ง ความเหนียว ค่าสีและความขาว โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

3.8.1 การเตรียมข้าวกล้องงอกหุงสุกสำหรับการวิเคราะห์ความแข็งและความเหนียว

วิธีการหุงข้าวกล้องงอกที่เหมาะสมที่สุด คือ วิธีการหุงสุกด้วยปิกเกอร์ในหม้อหุงข้าวซึ่งเป็นวิธีการหุงข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแล้วยังคงมีปริมาณสารกาบาสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหุงข้าวด้วยวิธีอื่นๆ [59] โดยปริมาณน้ำที่ใช้ต่อข้าวกล้องงอกคือ 0.8:1 และเวลาที่เหมาะสมในการหุงคือ 12 นาทีหลังจากน้ำเดือด

ชั่งข้าวสารปริมาณ 25 กรัมและชั่งน้ำปริมาณ 20 กรัม (อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:0.8) ใส่ลงในปิกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ทำซ้ำ 4 ปิกเกอร์โดยเกลี่ยข้าวให้เรียบเสมอกัน จากนั้นชั่งน้ำปริมาณ 400 กรัมใส่ลงไป ในหม้อหุงข้าว (RC-100, Toshiba, Thailand) ปิดฝาแล้วกดหุง (Cook) สังเกตจากไอน้ำเดือดแล้วทำการจับเวลาต่อไปอีก 12 นาที แล้วกดยกเลิก (Cancel) ทำการปล่อยทิ้งไว้ในหม้อหุงข้าวต่ออีก 10 นาที เมื่อครบเวลานำข้าวที่หุงเสร็จแล้วพร้อมปิกเกอร์คว่ำลงบนตะแกรงโดยทิ้งไว้เป็นเวลา 40 นาที ข้าวกล้องงอกหุงสุกดังรูปที่ 3.14 เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้วนำข้าวที่อยู่ตรงกลางใส่กล่องพลาสติกปริมาณกล่องละ 3 กรัม



รูปที่ 3.14 ข้าวกล้องงอกหลังผ่านการหุงด้วยวิธีการหุงสุกด้วยบีกเกอร์

3.8.2 สารกาบา

นำตัวอย่างข้าวกล้องงอกหลังผ่านกระบวนการอบแห้ง มาบดละเอียดให้มีลักษณะเป็นผงแบ่งดังรูปที่ 3.14 จากนั้นนำตัวอย่างผงใส่ถุงพลาสติกใสซีลปิดสนิทถุงละ 25 กรัม ตัวอย่างละ 2 ถุง ส่งตรวจสารกาบาที่สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ด้วยวิธี In-house method based on Journal of Chromatography B712 (1998): 43-49

การวิเคราะห์ปริมาณสารกาบา ตัวอย่างข้าวกล้องงอกที่ถูดบดละเอียด 2.5 กรัมถูกเติมลงไป ในน้ำ 1.8 ml และกรด sulfosalicylic 200 μ L ส่วนผสมต่างๆจะถูกคนให้เข้ากันด้วยกระบวนการ โชนิคะชั้นเป็นเวลา 20 นาที แล้วทำการปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4200 rpm เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นของผสมจะถูกกรองผ่านตัวกรองขนาด 0.45 μ m ส่วนใสเหนือตะกอน 50 μ L จะถูกนำมาผสมกับ 100 mmol sodium bicarbonate 50 μ L และ 4 mM Dabsyl-Cl 200 μ L เขย่าของผสม และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเติม ethanal 250 μ L และ potassium hydrogen phosphate ที่ค่าความเป็นกรดต่าง 6.8 ปริมาณ 250 μ L กรองสารผสมที่ได้ นำส่วนใสเหนือตะกอนฉีดเข้าระบบ HPLC ที่อุณหภูมิ 28 \pm 1°C และมีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 630 nm

ใช้คอลัมน์ Supelcosil LC-DABS ขนาดอนุภาค 3 μ m ที่ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในเป็น 150x4.6 mm² เป็นเฟสคงที่ โดยมีเฟสเคลื่อนที่ (gradient mobile phase) เป็น sodium acetate ค่าความเป็นกรดต่าง 6.8 : acetonitrile ที่อัตราการไหล 1 mL/min โดยความเข้มข้นของ acetonitrile ที่ใช้ในระบบจะคือ 0-40 นาทีที่ linear gradient 35-40% : 40-80 นาที ที่ isocratic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

40% สูดทำยล้างคอลลัมน์ด้วย soduim acetate :acetonitrile ในอัตราส่วน 5:95 เป็นเวลา 20 นาที และทำการปรับระบบใหม่ด้วย soduim acetate :acetonitrile ในอัตราส่วน 75:35



รูปที่ 3.15 ข้าวกล็องงอกบดละเอียด

3.8.3 ความแข็งและความเหนียว

การวัดเนื้อสัมผัสของข้าวกล็องด้วยเครื่องวัด Texture analyzer (TA HDplus, Stable Micro System, UK) โดยใช้วิธีผลักดันย้อนกลับ (Back extrusion) ซึ่งประกอบด้วยแท่นวัดและหัวกดดังรูปที่ 3.16 กำหนดหัววัดสูงจากแท่น 100 มิลลิเมตร และตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองคือข้าวที่ซั่งไว้ตัวอย่างละ 3 กรัมใส่ลงในแท่นวัดโดยค่อย ๆ กดเมล็ดลงอย่างช้า ๆ แรงที่ใช้ในการกดข้าวกล็อง 1 นิวตัน ระยะที่ทำการกดคือ 99 มิลลิเมตร ด้วยความเร็ว 1 มิลลิเมตร/นาที [64] โดยทำการวัดค่าซั่งตัวอย่างละ 3 ซั่ง ทำการวิเคราะห์ผลค่าความแข็ง (Hardness) และความเหนียว (Stickiness)



รูปที่ 3.16 เครื่องวัด Texture analyzer

3.8.4 ค่าสีและค่าความขาว

การทดสอบทางด้านสีอาหารของข้าวกล้องด้วยเครื่องวัดสี Hunter lab ดังรูปที่ 3.17 และ 3.18 ทำการวัดสีของข้าวกล้องในเทอมของตัวแปร L^* , a^* และ b^* โดยแต่ละตัวอย่างทำการวัดค่าซ้ำ 3 ซ้ำ เมื่อติดตั้งเครื่องมือเสร็จแล้วก็นำข้าวมาใส่กระปุกข้าวสำหรับการวัดสี รอเครื่องอ่านค่าสีระยะเวลาหนึ่ง จะได้ค่าตัวแปร L^* , a^* และ b^* ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความขาว [59] ได้ดังสมการ (3.12)

$$\text{Whiteness} = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2} \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	L	คือ ค่าความสว่างมีค่าตั้งแต่ 0-100
	0	คือ สีมืดที่สุด
	100	คือ สีสว่างที่สุด
	a	คือ ค่าที่แสดงความเป็นสีแดงหรือเขียว
	+a	คือ แสดงความเป็นสีแดง
	-a	คือ แสดงความเป็นสีเขียว
	b	คือ ค่าที่แสดงความเป็นสีเหลืองหรือน้ำเงิน
	+b	คือ แสดงความเป็นสีเหลือง
	-b	คือ แสดงความเป็นสีน้ำเงิน



รูปที่ 3.17 เครื่องวัดสี Hunter lab



รูปที่ 3.18 การวัดสีของเครื่องวัดสี Hunter lab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ในการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่อปริมาณสารกาบา ค่าความแข็ง ค่าความเหนียว ค่าสีและค่าความขาวสำหรับการอบแห้งด้วยระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น ซึ่งมีตัวแปรต้น 2 ตัว ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิลมร้อน ดังนั้นจึงวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธีการวิเคราะห์แบบ Least Significant Difference test (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนการเปรียบเทียบระบบอบแห้งระหว่างระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นและระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ ต่อปริมาณสารกาบา ค่าความแข็ง ค่าความเหนียว ค่าสีและค่าความขาว ทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธีการวิเคราะห์แบบ Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

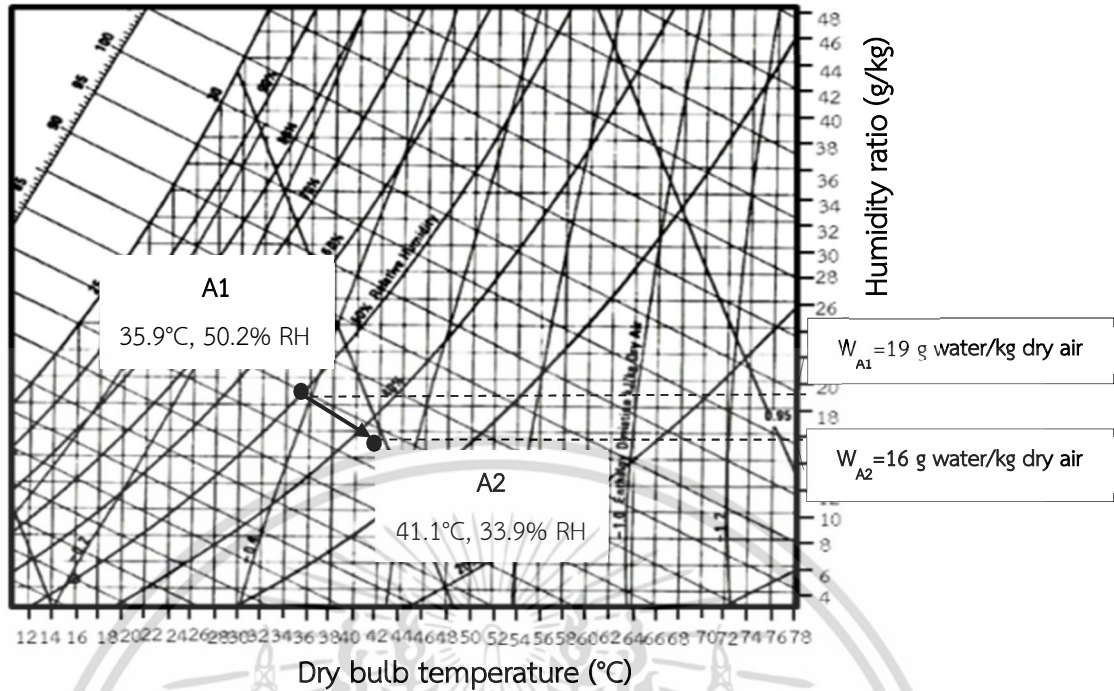
4.1 การทำงานของวงล้อและวิเคราะห์ประสิทธิภาพผลของวงล้อดูดความชื้นทั้งระบบในสถานะห้องอบแห้งเปล่า

4.1.1 การดูดความชื้นในอากาศของวงล้อดูดความชื้น

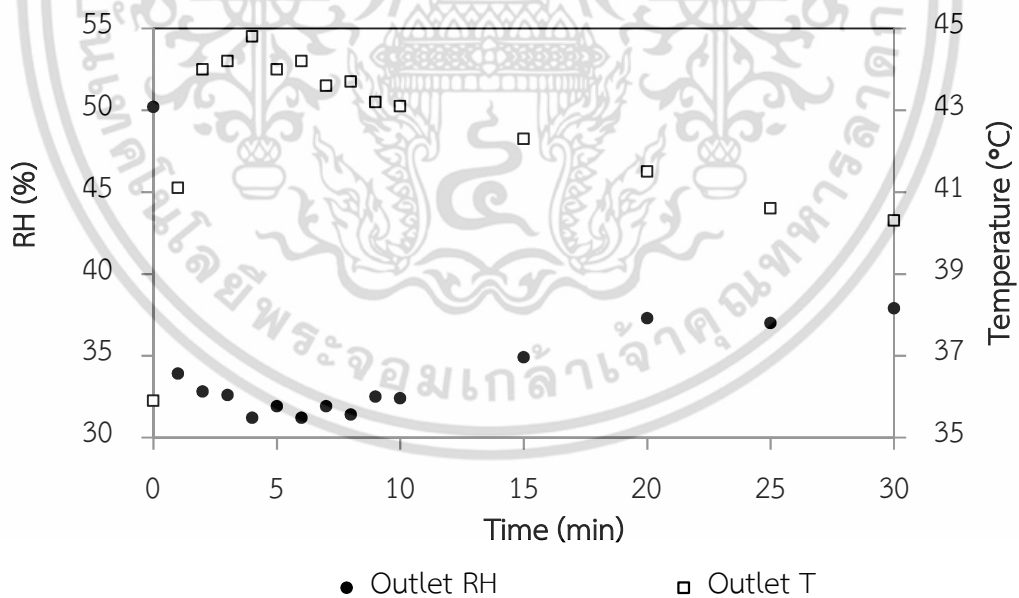
ในระหว่างกระบวนการดูดความชื้น วงล้อดูดความชื้นถูกบรรจุด้วยซิลิกาเจลสีน้ำเงินสดที่ไม่มี ความชื้นสะสม เมื่อเปิดทำงานเฉพาะส่วนดูดความชื้นซึ่งได้แก่ พัดลมดูดอากาศในส่วนดูดความชื้นที่ อัตราการไหลของอากาศ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังออกจากวงล้อดูด ความชื้นในกระบวนการดูดความชื้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการดูดความชื้นผ่านไป โดยเริ่มต้น จากอากาศปกติความชื้นสัมพัทธ์และอัตราส่วนความชื้นเริ่มต้นที่ 50.2% และ $19 \text{ g water/kg dry air}$ เมื่ออากาศถูกไหลผ่านวงล้อดูดความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์และอัตราส่วนความชื้นของอากาศสามารถ ลดลงไปได้จนถึง 33.9% และ $16 \text{ g water/kg dry air}$ ตามลำดับ ซึ่งจากรูปที่ 4.1 กล่าวได้ว่าความชื้น สัมพัทธ์และอัตราส่วนความชื้นของอากาศสามารถลดลงประมาณ 16% และ $3 \text{ g water/kg dry air}$ ตามลำดับในช่วงเวลา 1 นาทีแรกของการทำงานของวงล้อ จากนั้นความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศยังคง ลดลงอย่างต่อเนื่องจนเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ในนาทีที่ 25 ซึ่งพบการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสัมพัทธ์ ของอากาศน้อยกว่า 1.5% และได้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เวลา 30 นาทีของการทำงานของวงล้อเป็น 37.9% โดยแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งประโยชน์จากการจำลองการดูดความชื้นในอากาศของวงล้อดูด ความชื้น ทำให้สามารถคาดการณ์ความสามารถในการลดความชื้นของวงล้อจากการเปิดระบบอบแห้ง ระบบได้ เนื่องจากระบบวงล้อเมื่อทำการเปิดทำงานทั้งระบบ วงล้อจะถูกหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ ระหว่างส่วนดูดความชื้นและส่วนคืนสภาพสารดูดความชื้นสลับกันอย่างต่อเนื่องภายในเวลาไม่เกิน 1 นาที โดยจากการทดลองดูดความชื้น พบว่าวงล้อสามารถลดความชื้นได้จริงเป็นไปตามกระบวนการ ลดความชื้นแบบอะเดียแบติกในช่วง 1 นาทีของการทำงาน

สำหรับผลการวัดอุณหภูมิอากาศออกจากวงล้อดูดความชื้นของอากาศ (รูปที่ 4.2) พบว่าอุณหภูมิ ของอากาศสูงขึ้นประมาณ 5% จาก 35.9°C ไปเป็น 41.1°C ในช่วง 1 นาทีแรกทันทีตามการทำงานของ วงล้อ คือหลังจากอากาศผ่านจากวงล้อดูดความชื้นเพื่อลดความชื้นในกระบวนการดูดความชื้น หลังจากนั้นอุณหภูมิของอากาศขาออกที่สังเกตพบว่าจะอยู่ในช่วง $40-41^\circ\text{C}$ ตลอดการทำงานของวง ล้อ จึงสามารถกล่าวได้ว่าระบบวงล้อดูดความชื้นที่พัฒนาขึ้นสามารถทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของ อากาศลดลงและอุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้นตามกระบวนการอะเดียแบติก โดยจากผลการวิจัยที่ได้ ศึกษามาก่อนหน้านี้ [3] กล่าวว่า ระบบลดความชื้นในห้องอบแห้งสามารถช่วยลดเวลาในการอบแห้ง

ได้
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงสภาวะอากาศในระหว่างกระบวนการดูดความชื้น



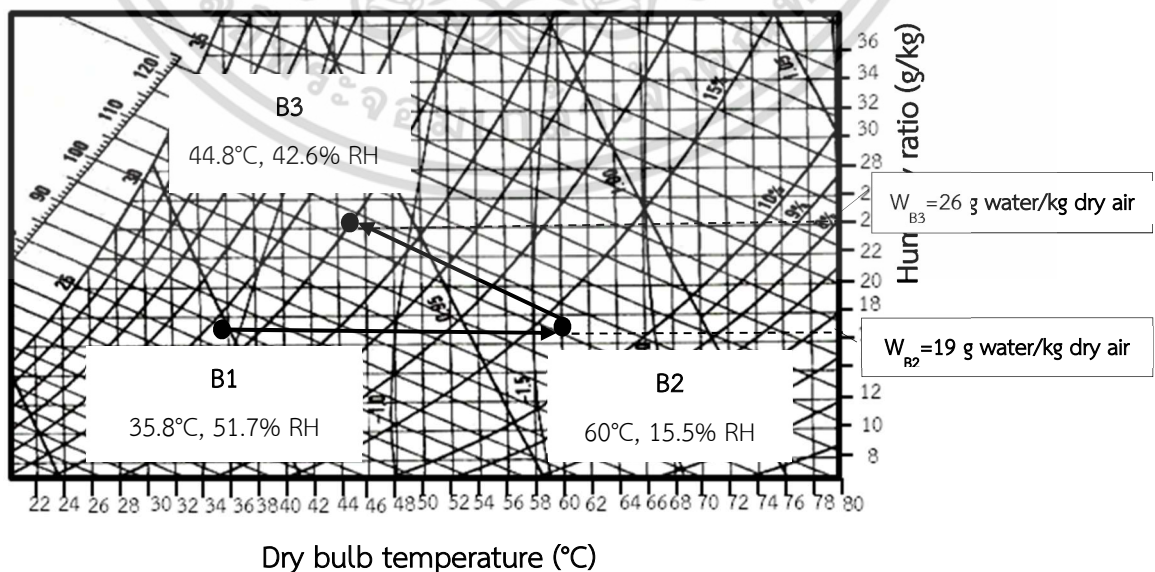
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในการดูดความชื้นของวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหล 0.04 m³/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การคืนสภาพสารดูดความชื้นในวงล้อดูดความชื้น

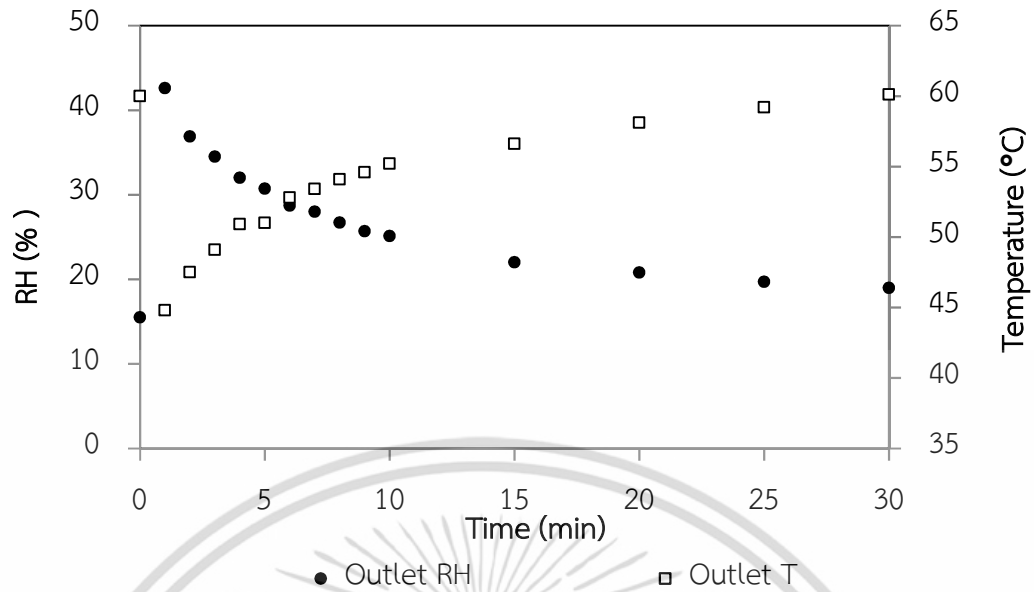
ในส่วนคืนสภาพสารดูดความชื้นของระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมร่วมนักว่งล้อดูดความชื้น ก่อนการทดลองกำหนดให้ซิลิกาเจลดูดความชื้นจนเต็มที่ ในระหว่างกระบวนการทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ จากรูปที่ 4.3 แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงสถานะอากาศในระหว่างกระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้นด้วยอากาศร้อนมีอัตราการไหลและอุณหภูมิเป็น $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และ 60°C พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ผ่านวงล้อเพื่อนำความชื้นออกจากซิลิกาเจลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการคืนสภาพสารดูดความชื้นผ่านไป จากความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นที่ 15.5% (60°C และ $19 \text{ g water/kg dry air}$) เมื่ออากาศไหลผ่านวงล้อดูดความชื้นในส่วนการคืนสภาพสารดูดความชื้น พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 27% จาก 15.5% เป็น 42.6% ($26 \text{ g water/kg dry air}$) ในช่วงเวลา 1 นาทีของการทำงานของวงล้อ จากนั้นความชื้นสัมพัทธ์จะเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ในนาที่ที่ 20 ซึ่งพบการเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 1.5% และเมื่อถึงนาที่ที่ 30 ของการทำงานของวงล้อดังรูปที่ 4.4 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าเป็น 19% โดยความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่กระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้นจากวงล้อจะเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 3.5% จากอากาศปกติ (51.7%) ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าวงล้อได้รับการคืนสภาพสารดูดความชื้น นอกจากนี้จากการทดลองยังสามารถคาดการณ์ความสามารถในการคืนสภาพสารดูดความชื้นเมื่อเปิดทำงานวงล้อทั้งระบบได้ วงล้อสามารถคืนสภาพสารดูดความชื้นได้จริงเป็นไปตามกระบวนการอะเดียแบติกตั้งแต่ช่วง 1 นาทีแรกของการทำงานเช่นเดียวกับกระบวนการดูดความชื้น

สำหรับผลการวัดอุณหภูมิขาออกจากวงล้อดูดความชื้นของอากาศ พบว่าอุณหภูมิของอากาศลดลงจาก 60°C ไปเป็น 44.8°C ในนาที่ที่ 1 ของการทำงานของวงล้อในทันทีตามหลักการทำงานของวงล้อดูดความชื้น โดยจากกราฟพบว่า เมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิของอากาศขาออกที่สังเกตพบอยู่ในช่วง $59\text{--}60^\circ\text{C}$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอากาศร้อนที่ใช้กำจัดความชื้น



รูปที่ 4.3 แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงสถานะอากาศในระหว่างกระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในการคืนสภาพสารดูดความชื้นของวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหล 0.04 m³/s และอุณหภูมิ 60°C

4.1.3 สมบัติของอากาศในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นในสภาวะห้องอบแห้งเปลา

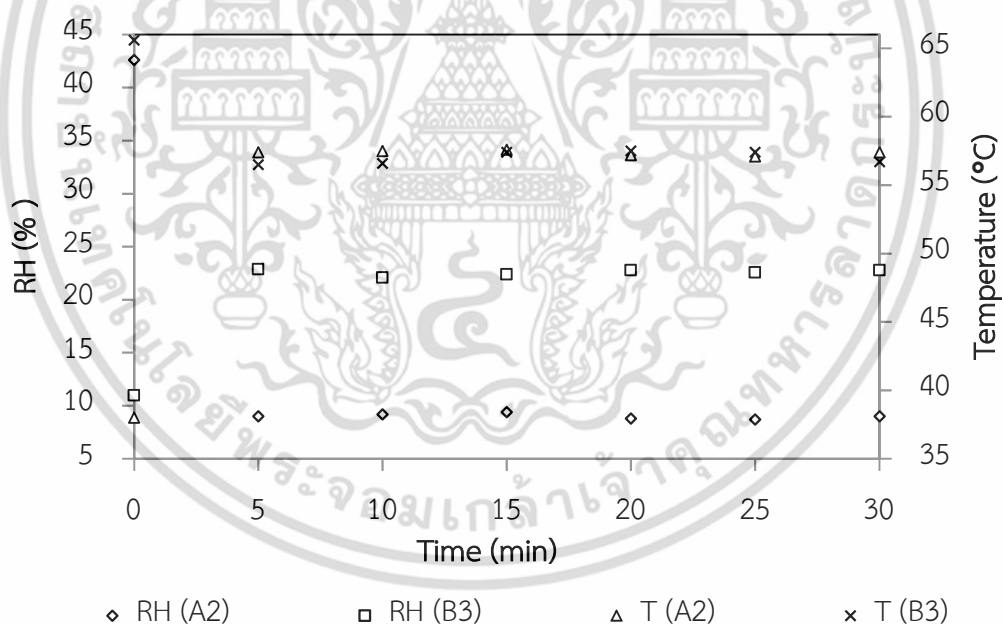
ในการทดลองทำการบรรจุซิลิกาเจลที่ไม่มีความชื้นสะสม เมื่อเปิดทำงานในอุปกรณ์ทุกส่วนของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น โดยกำหนดให้อัตราการไหลของอากาศในส่วนดูดความชื้นและคืนสภาพสารดูดความชื้นเป็น 0.04 m³/s และอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งเป็น 90°C ซึ่งในระหว่างกระบวนการทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศทุก ๆ 5 นาทีจนครบ 30 นาที จากรูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในระบบวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหล 0.04 m³/s และอุณหภูมิ 90°C พบว่าในกระบวนการดูดความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์มีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในเวลา 5 นาทีแรกของการทำงาน อัตราส่วนความชื้นมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไป อัตราส่วนความชื้นจะมีค่าอยู่ในช่วง 9-10 g water/kg dry air กล่าวได้ว่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศสามารถลดลงประมาณ 7.5 g water/kg dry air จากอากาศปกติ ขณะที่กระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลา 5 นาทีแรกของการทำงาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าซิลิกาเจลภายในวงล้อดูดความชื้นสามารถดูดและคืนสภาพสารดูดความชื้นออกได้ในเวลาเดียวกันซึ่งเป็นไปตามแผนภูมิไซโครเมตริกของทฤษฎีกระบวนการดูดและคืนสภาพสารดูดความชื้น

การศึกษาสมบัติของอากาศในการทำงานของเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นทั้งระบบ ซึ่งกำหนดให้จุดที่ทำการวัดผลความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศเป็นตามรูปที่ 4.6 แผนผังแสดงสมบัติอากาศในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบวงล้อดูดความชื้น

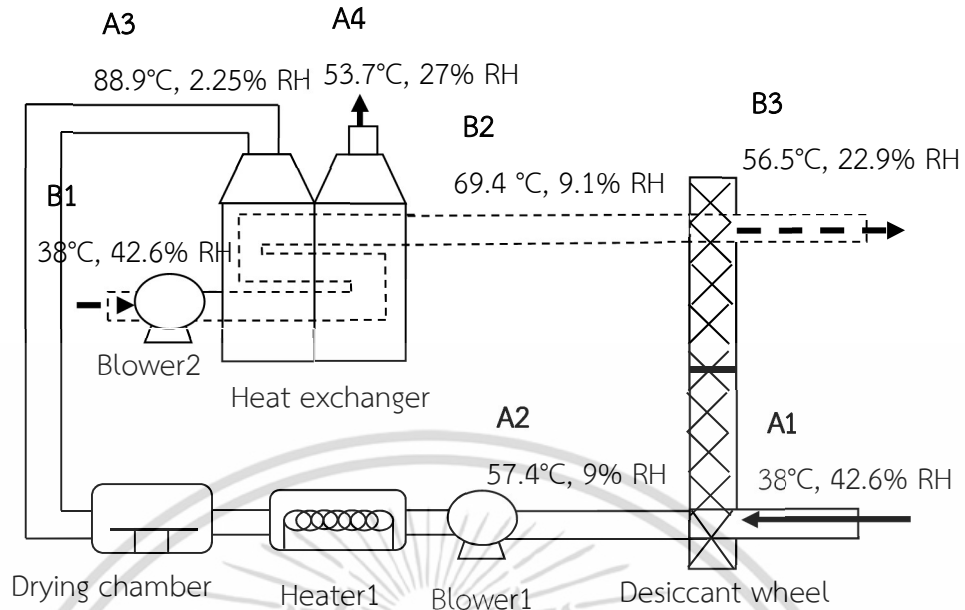
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Dehumidification Process) เริ่มจากอากาศปกติ A1 จะถูกลดความชื้นหลังจากผ่านวงล้อดูดความชื้น อากาศ A2 ที่ได้จะมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ซึ่งจะถูกนำไปเพิ่มอุณหภูมิเป็น 90°C เพื่อใช้สำหรับกระบวนการอบแห้ง โดยอากาศที่เหลือทิ้งจากห้องอบแห้งที่จุด A3 จะถูกนำไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศปกติที่จุด B1 ในส่วนการคืนสภาพสารดูดความชื้น (Regeneration Process) ทำให้อากาศขาออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่จุด A4 จะมีค่าเป็น 27%RH และ 53.7°C ตามลำดับ ในขณะที่ส่วนการคืนสภาพสารดูดความชื้น เมื่อพิจารณาจากค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่จุด B3 คือ อากาศที่ออกจากวงล้อดูดความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นในการระหว่างการคืนสภาพสารดูดความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่จุด B3 จะมีค่าเป็น 22.9% RH และ 56.5°C ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาในนาที่ที่ 30 ของกระบวนการดูดความชื้นและกระบวนการคืนสภาพสารดูดความชื้นของระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นดังรูปที่ 4.6 พบว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของอากาศในส่วนการดูดความชื้นและในส่วนคืนสภาพสารดูดความชื้นมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า วงล้อดูดความชื้นสามารถดูดและคืนสภาพสารดูดความชื้นออกได้ในเวลาเดียวกันอย่างทันท่วงที



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาในระบบวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหล $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิ 90°C



รูปที่ 4.6 แผนผังแสดงสมบัติอากาศในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมด้วยระบบวงล้อดูดความชื้น

4.1.4 ประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้นทั้งระบบในสถานะห้องอบแห้งเปล่า

ตารางที่ 4.1 แสดงประสิทธิภาพของระบบวงล้อดูดความชื้น โดยเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นทั้งระบบกำหนดให้มีอัตราการไหลของอากาศเป็น 0.04 m³/s และอุณหภูมิของลมร้อนในเครื่องอบแห้งเป็น 90°C จากผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพทางการถ่ายเทความร้อน ประสิทธิภาพทางการคืนสภาพสารดูดความชื้น ประสิทธิภาพทางการดูดความชื้น และประสิทธิภาพกระบวนการอะเดียแบติกมีค่าที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในกระบวนการลดความชื้นอย่างสมบูรณ์ภายในห้องอบแห้ง ค่าประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้นมีค่าอยู่ในช่วง 44.39-98.49% และเมื่ออิงตามทฤษฎีกระบวนการอะเดียแบติกได้ประสิทธิภาพถึง 98.49% โดยค่าประสิทธิภาพกระบวนการอะเดียแบติกนั้นจะมีค่าเหมาะสมหรือไม่ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพทางการคืนสภาพสารดูดความชื้น และประสิทธิภาพทางการดูดความชื้นเป็นสำคัญ [65] ค่าอัตราการดูดความชื้นของซิลิกาเจลในกระบวนการดูดความชื้นคือ 2.64 g water/kg dry air·kg silica gel·min

ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้น

Effectiveness	Percentage (%)
Thermal effectiveness	69.28
Regeneration effectiveness	61.42
Dehumidification effectiveness	44.39
Adiabatic DW's effectiveness	98.49

4.2 อิทธิพลของอัตราการไหลอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่อลักษณะการอบแห้งและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น ก่อนการทดลองทำการบรรจุซิลิกาเจลที่ไม่มีความชื้นสะสมภายในวงล้อดูดความชื้น เมื่อเปิดทำงานในอุปกรณ์ทุกส่วนของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น กำหนดความเร็วรอบของวงล้อดูดความชื้นที่ 1.5 rpm อัตราการไหลของอากาศของส่วนคืนสภาพที่ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิของส่วนคืนสภาพที่ 90°C ในระหว่างกระบวนการอบแห้งทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในส่วนการดูดความชื้นและส่วนการคืนสภาพสารดูดความชื้นจนถึงสิ้นสุดกระบวนการ จากตารางที่ 4.2 แสดงอัตราการอบแห้งเฉลี่ยและเวลาในการอบแห้งข้าวกล้องงอกโดยใช้ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น การทดลองกำหนดอัตราการไหลของอากาศของส่วนดูดความชื้นคือ 0.04 , 0.06 และ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิในห้องอบแห้ง 80 , 100 และ 120°C พบว่าถ้าพิจารณาที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ เมื่ออัตราการไหลของอากาศมีค่ามากขึ้นส่งผลให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง ในขณะที่เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิในห้องอบแห้งที่แตกต่างกันที่อัตราการไหลของอากาศเดียวกัน พบว่าที่อุณหภูมิในห้องอบแห้งสูงจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าอุณหภูมิในห้องอบแห้งที่ต่ำกว่า และจากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิในห้องอบแห้งเป็น 0.04 - $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และ 80 - 120°C ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าอัตราการอบแห้งสูงสุดและเวลาในการอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 0.0039 - $0.0125 \text{ g water/g dry matter}\cdot\text{min}$ และ 45 - 130 นาทีตามลำดับ โดยที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิลมร้อนเป็น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และ 120°C ส่งผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงสุดและใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด ในขณะที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่ำสุดคือ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ และ 80°C ส่งผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าต่ำสุดและใช้เวลาในการอบแห้งมากที่สุดเช่นกัน จึงกล่าวได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิในห้องอบแห้ง จะทำให้ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วและใช้เวลาในการอบแห้งลดลง

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงค่าพลังงานและค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิในห้องอบแห้งต่าง ๆ พบว่า เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลของอากาศเดียวกัน เมื่อลดอุณหภูมิในห้องอบแห้ง ค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสังเกตได้ว่าการใช้อุณหภูมิในห้องอบแห้งที่ต่ำลงส่งผลต่อระยะเวลาในการอบแห้งข้าวกล้องงอกที่นานขึ้น และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิในห้องอบแห้งเดียวกันที่อัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกัน จะพบว่า เมื่อลดอัตราการไหลของอากาศในส่วนดูดความชื้นส่งผลให้ค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเวลาในการอบแห้งมีผลโดยตรงต่อค่าพลังงานที่ใช้ในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อบแห้ง โดยที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิในห้องอบแห้งสูงสุด คือ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และ $120 \text{ }^\circ\text{C}$ ส่งผลให้ค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกมีค่าต่ำสุดคือ 0.173 kWh

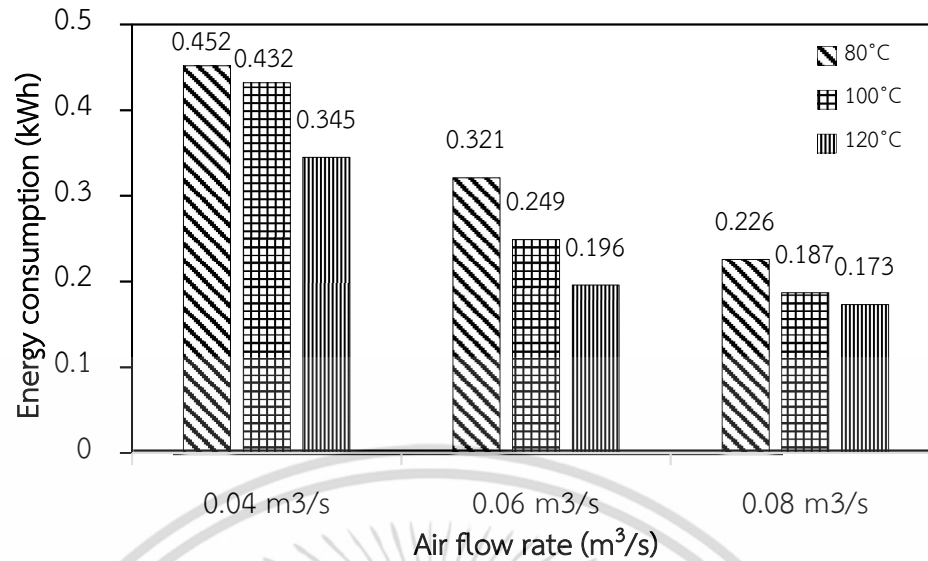
จากรูปที่ 4.9 แสดงเส้นโค้งการอบแห้งที่อุณหภูมิในห้องอบแห้งต่างๆ สำหรับอัตราการไหลของอากาศส่วนต่อความชื้น 0.04 , 0.06 และ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ ตามลำดับ จากกราฟทุกเส้นพบว่า ความชื้นลดลงตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป อัตราส่วนความชื้นมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้ง เนื่องจากข้าวกล้องงอกมีความชื้นอยู่มาก และความชื้นนั้นลดลงอย่างช้า ๆ เมื่อเวลาผ่านไป การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นมีค่าน้อยลงในช่วงท้ายของกระบวนการ โดยอุณหภูมิในห้องอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศที่ต่ำจะใช้เวลานานกว่าในการลดความชื้นจนเหลือความชื้นสุดท้ายของข้าวกล้องงอกที่ต้องการ

จากรูปที่ 4.10 แสดงเส้นโค้งอัตราการอบแห้งของข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นในทุกอัตราการไหลของอากาศและทุกอุณหภูมิลมร้อน จะพบเพียง 2 ช่วงการอบแห้งหลักคือ ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Heating up) และ ช่วง อัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate) เท่านั้น

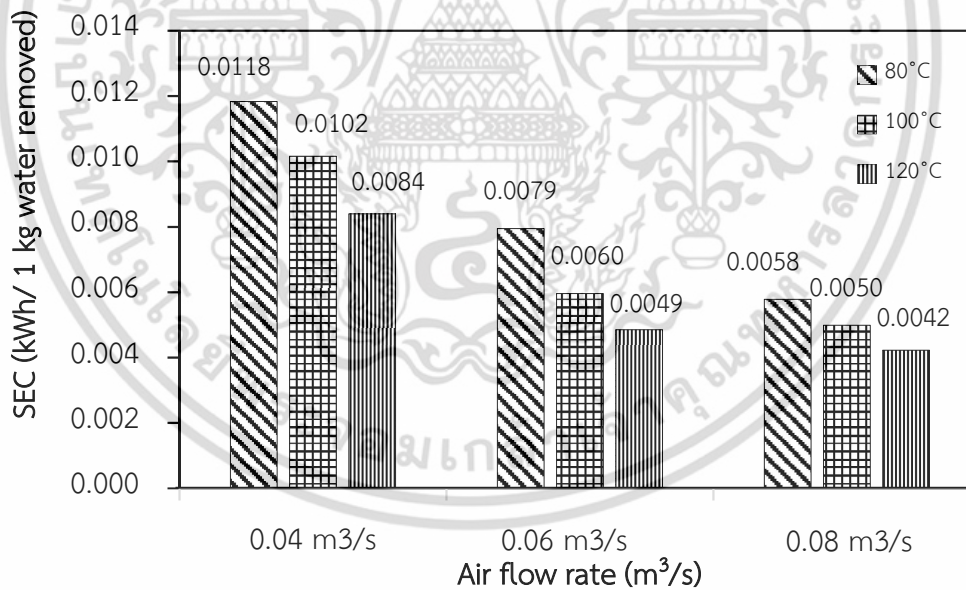
จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิลมร้อนเป็น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และ $120 \text{ }^\circ\text{C}$ ตามลำดับ จะส่งผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าสูงสุดและใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดคือ $0.0125 \text{ g water/g dry matter}\cdot\text{min}$ และ 45 นาทีตามลำดับ นอกจากนี้ในด้านพลังงานการอบแห้งพบว่าการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นด้วยเงื่อนไขดังกล่าวจะใช้พลังงานในการอบแห้งน้อยที่สุดเช่นกัน

ตารางที่ 4.2 เวลาที่ใช้ในการอบแห้งและอัตราการอบแห้งสูงสุดสำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศส่วนต่อความชื้นและอุณหภูมิในห้องอบแห้งต่าง ๆ

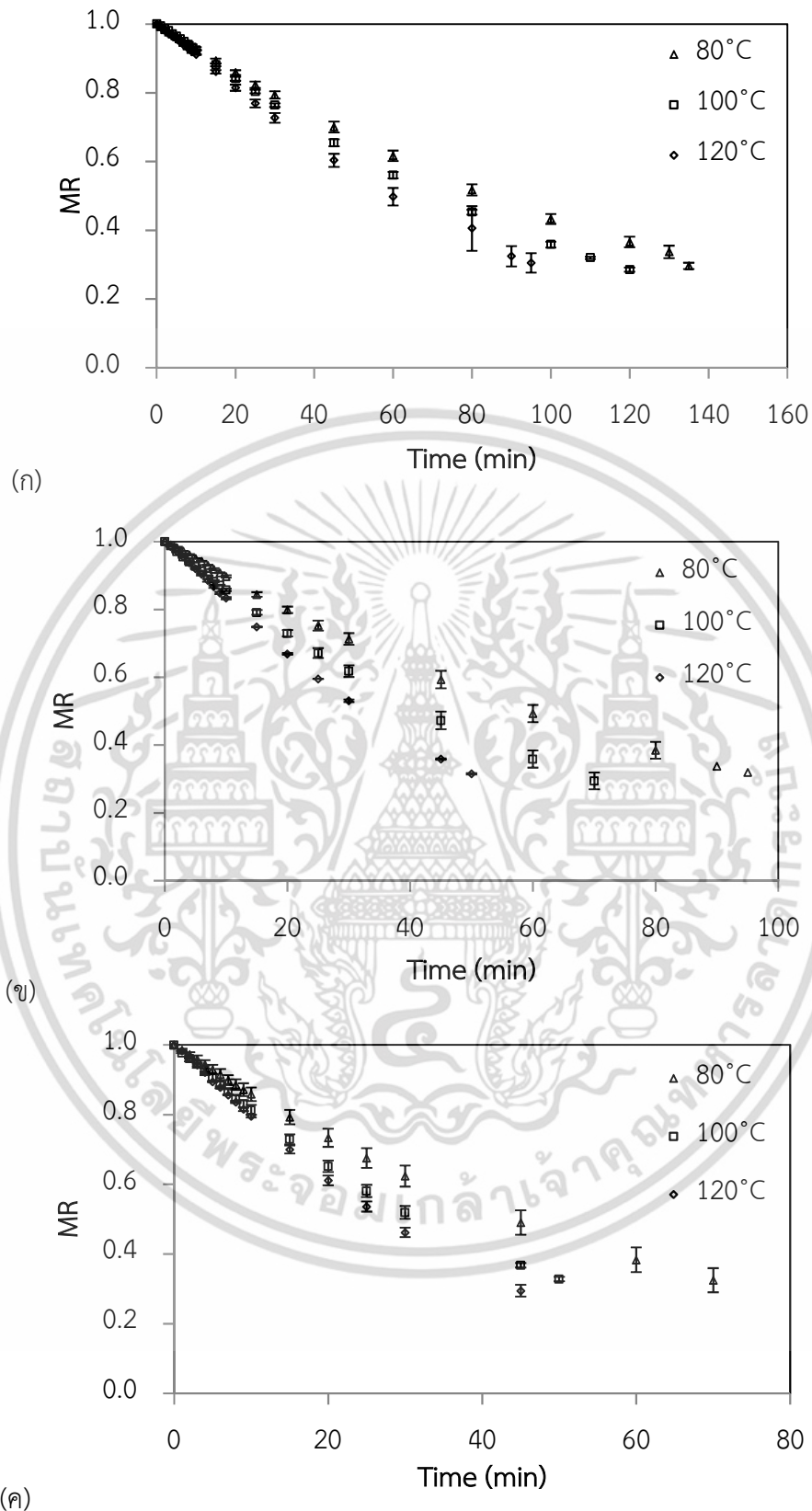
Drying condition		Drying time (min)	Maximum DR (g water/g dry matter \cdot min)	Energy consumption (kWh)	SEC (kWh/1 kg water removed)
Q (m^3/s)	T ($^\circ\text{C}$)				
0.04	80	130	0.0039	0.452	0.0118
	100	120	0.0043	0.432	0.0102
	120	95	0.0047	0.345	0.0084
0.06	80	95	0.0055	0.321	0.0079
	100	70	0.0083	0.249	0.0060
	120	50	0.0087	0.196	0.0049
0.08	80	70	0.0074	0.226	0.0058
	100	50	0.0100	0.187	0.0050
	120	45	0.0125	0.173	0.0042



รูปที่ 4.7 ค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้นเป็น 0.04 m³/s 0.06 m³/s และ 0.08 m³/s ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้นเป็น 0.04 m³/s 0.06 m³/s และ 0.08 m³/s ตามลำดับ

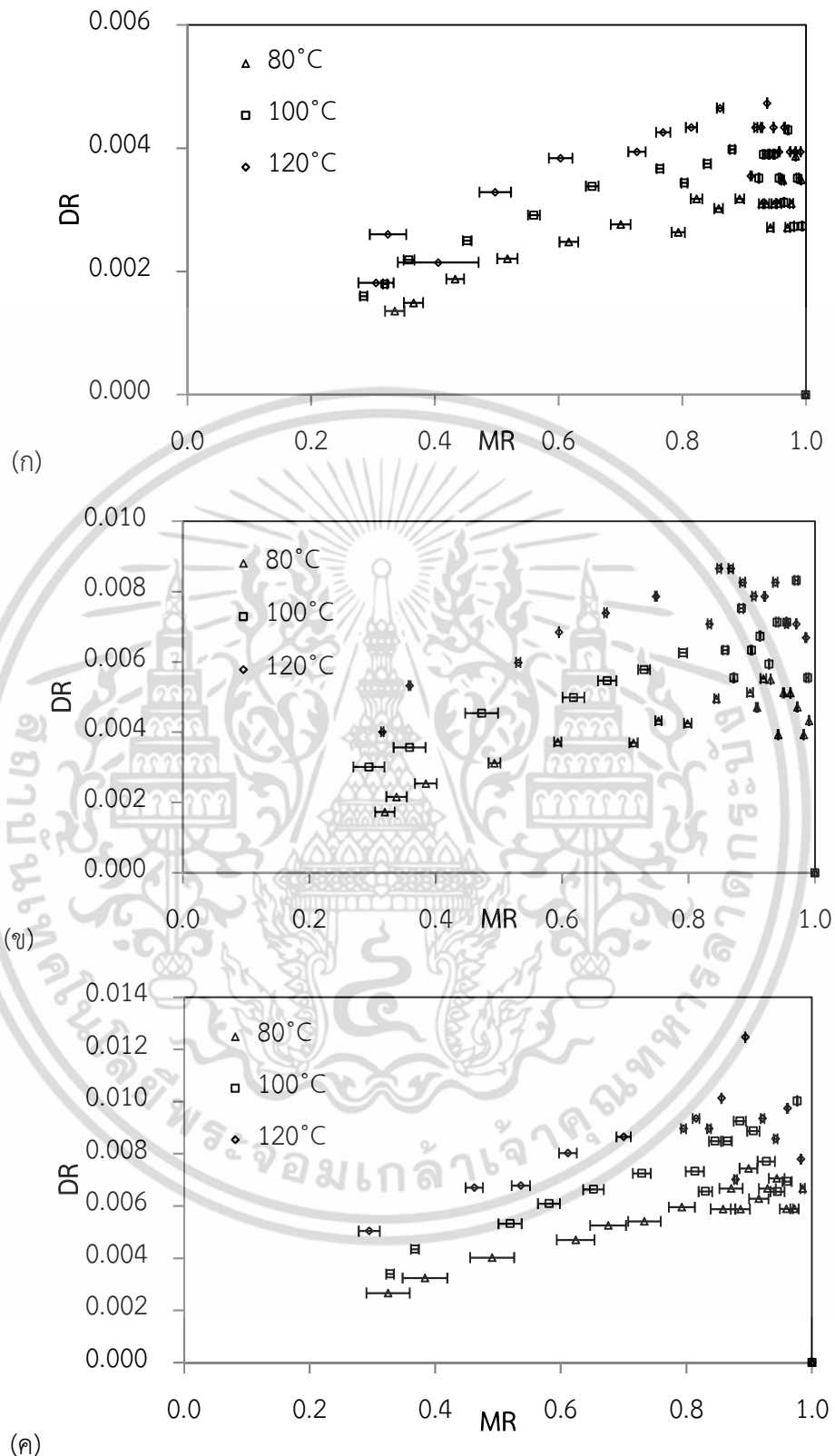


รูปที่ 4.9

เส้นโค้งการอบแห้งของข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้นเป็น

(ก) $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ (ข) $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ และ (ค) $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



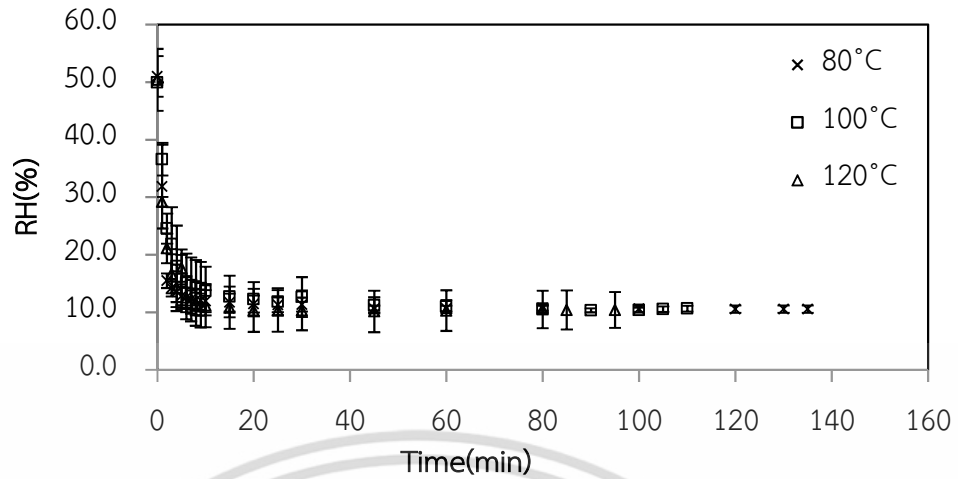
รูปที่ 4.10 เส้นโค้งอัตราการอบแห้งของข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้นเป็น (ก) $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ (ข) $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ และ (ค) $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

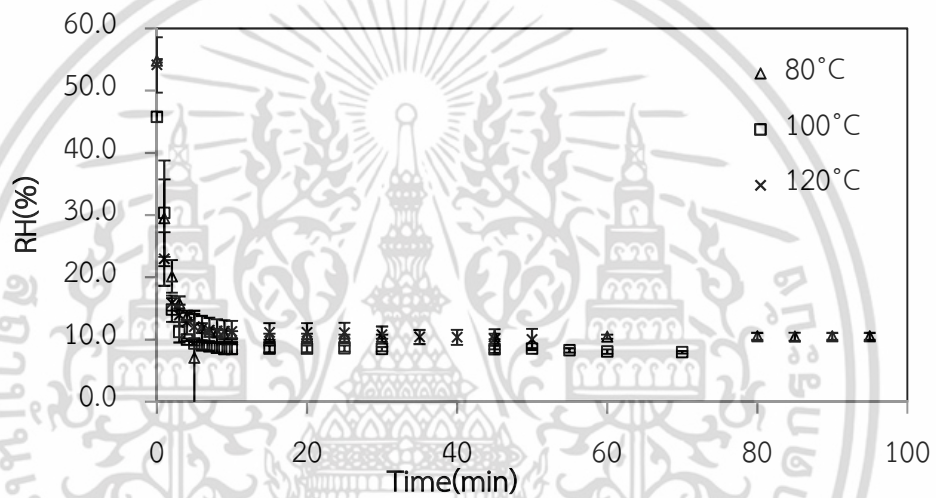
4.3 อิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่อสมบัติของอากาศในการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

เมื่อเปิดทำงานเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นทั้งระบบ จากรูปที่ 4.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในส่วนดูดความชื้นหลังออกจากวงล้อดูดความชื้นตลอดระยะเวลาของการอบแห้ง การทดลองกำหนดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกเริ่มต้นมีค่าอยู่ในช่วง 45-55% ทั้งนี้พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรกของการอบแห้งดูดความชื้นในทุกเงื่อนไขของการอบแห้งข้าวกล้องงอก คือที่อัตราการไหลของอากาศเป็น $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ และ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิในห้องอบแห้งเป็น 80, 100 และ 120°C ตามลำดับ จากนั้นจะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อเวลาผ่านไปความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีแนวโน้มค่อย ๆ ลดลงจนเกือบคงที่ในช่วงท้ายของกระบวนการ โดยในทุกเงื่อนไขการอบแห้ง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในส่วนดูดความชื้นในช่วงท้ายของกระบวนการอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 9-15%

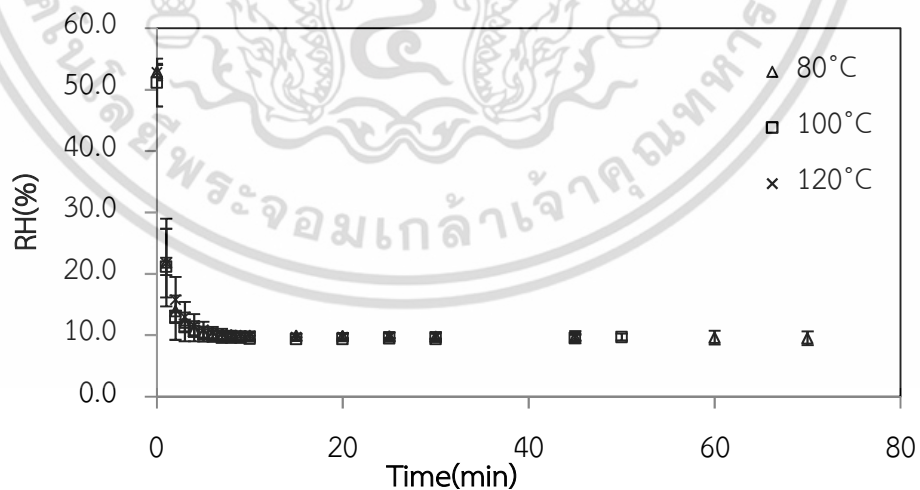
เมื่อพิจารณาที่อิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิในห้องอบแห้งจะเห็นได้ว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่วัดได้หลังจากออกจากวงล้อดูดความชื้นให้ผลไม่แตกต่างกันในทุกเงื่อนไขการอบแห้ง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะเริ่มค่อนข้างคงที่ในนาทีที่ 10 ของกระบวนการอบแห้ง และมีค่าอยู่ในช่วง 9-15% RH ตลอดจนถึงสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศในส่วนจุดความชื้นของวงล้อดูดความชื้นในกระบวนการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นกับเวลาที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ เมื่ออัตราการไหลของอากาศเป็น (ก) $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ (ข) $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ และ (ค) $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวกล้องงอกแบบชั้นบางด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นแบบชั้นบาง สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และ ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean square error, RMSE) ได้ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งจากตารางที่ทำการเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุดจำนวน 4 โมเดลที่มีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจมากกว่า 0.998 ได้แก่ แบบจำลองของ Page, Logarithmic, Midilli et al. และ Wang and Singh และเมื่อทำการเปรียบเทียบแบบจำลองต่าง ๆ เพื่อหาแบบจำลองที่ดีที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ถือเป็นค่าพารามิเตอร์ในทางสถิติที่บ่งบอกความแตกต่างระหว่างข้อมูลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่ดีที่สุดมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจสูง และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งรูปแบบนั้น มีประสิทธิภาพสูงในการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้น เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่มีความแม่นยำและมีค่าความผิดพลาดต่ำ

เมื่อทำการเปรียบเทียบทั้ง 4 แบบจำลองจากค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจและค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย พบว่าแบบจำลองของ Midilli et al. ($MR = a \exp(-kt^n) + bt$) มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นได้ดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจสูงสุดและค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด คือ 0.9991 และ 0.0045 ตามลำดับ โดยจากรูปที่ 4.12 เมื่อทำการเปรียบเทียบเส้นโค้งอบแห้งระหว่างข้อมูลการอบแห้งจริงและข้อมูลจากการอบแห้งที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลอง Midilli et al. พบว่าข้อมูลเส้นโค้งการอบแห้งมีค่าเข้าใกล้กันในทุกอัตราการไหลอากาศและทุกอุณหภูมิลมร้อนในทุกช่วงเวลาของการอบแห้ง รูปแบบของสมการ Midilli et al. มีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจอยู่ระหว่าง 0.99298 - 0.99998 เมื่อเทียบกับผลการทดลอง

จากรูปที่ 4.13 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นระหว่างข้อมูลการอบแห้งจริงและข้อมูลที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลอง Midilli et al. ทุกจุดข้อมูลมีค่าเข้าใกล้แนวแกนเส้นแบ่ง 1:1 ในทุกสภาวะการอบแห้ง นอกจากนี้เมื่อนำจุดข้อมูลมาสร้างสมการเส้นตรง พบว่า ค่าความชันของกราฟมีค่าเข้าใกล้ 1 และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยมีค่าสูง ซึ่งแสดงถึงการมีความสัมพันธ์กันสูงของข้อมูล เป็นไปตามลักษณะของแบบจำลองที่ดีในการทำนายข้อมูลการอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นแบบชั้นบางที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ

Model.	Condition		Constant and coefficient			R ²	RMSE	
	Q (m ³ /s)	T (°C)						
1	0.04	80	k=	0.0083		0.99840	0.00964	
		100	k=	0.0096		0.98489	0.03023	
		120	k=	0.0114		0.99498	0.01660	
	0.06	80	k=	0.0117		0.99901	0.00729	
		100	k=	0.0165		0.99822	0.00923	
		120	k=	0.0209		0.99164	0.01977	
	0.08	80	k=	0.0158		0.99961	0.00417	
		100	k=	0.0216		0.99891	0.00697	
		120	k=	0.0251		0.99440	0.01536	
2	0.04	80	k=	0.0063	n= 1.0620	0.99957	0.00500	
		100	k=	0.0047	n= 1.1700	0.99273	0.02097	
		120	k=	0.0072	n= 1.1150	0.99934	0.00601	
	0.06	80	k=	0.0096	n= 1.0500	0.99995	0.00164	
		100	k=	0.0132	n= 1.0620	0.99983	0.00281	
		120	k=	0.0131	n= 1.1450	0.99994	0.00164	
	0.08	80	k=	0.0143	n= 1.0280	0.99997	0.00113	
		100	k=	0.0186	n= 1.0460	0.99991	0.00204	
		120	k=	0.0179	n= 1.1070	0.99990	0.00208	
3	0.04	80	k=	0.0084	a= 1.0070	0.99883	0.00824	
		100	k=	0.0100	a= 1.0200	0.98814	0.02679	
		120	k=	0.0119	a= 1.0170	0.99729	0.01219	
	0.06	80	k=	0.0119	a= 1.0090	0.99967	0.00419	
		100	k=	0.0168	a= 1.0090	0.99896	0.00704	
		120	k=	0.0221	a= 1.0240	0.99638	0.01301	
	0.08	80	k=	0.0160	a= 1.0050	0.99988	0.00234	
		100	k=	0.0221	a= 1.0080	0.99948	0.00482	
		120	k=	0.0262	a= 1.0200	0.99754	0.01019	
4	0.04	80	k=	0.0065	a= 1.1900	c= -0.1895	0.99967	0.00435
		100	k=	0.0055	a= 1.5130	c= -0.5057	0.99186	0.02219
		120	k=	0.0078	a= 1.3390	c= -0.3324	0.99931	0.00615
	0.06	80	k=	0.0105	a= 1.0900	c= -0.0844	0.99991	0.00215
		100	k=	0.0132	a= 1.1750	c= -0.1734	0.99996	0.00131
		120	k=	0.0137	a= 1.4160	c= -0.4056	0.99952	0.00472
	0.08	80	k=	0.0150	a= 1.0460	c= -0.0431	0.99995	0.00147
		100	k=	0.0193	a= 1.0950	c= -0.0917	0.99980	0.00298
		120	k=	0.0186	a= 1.2640	c= -0.2560	0.99968	0.00364

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

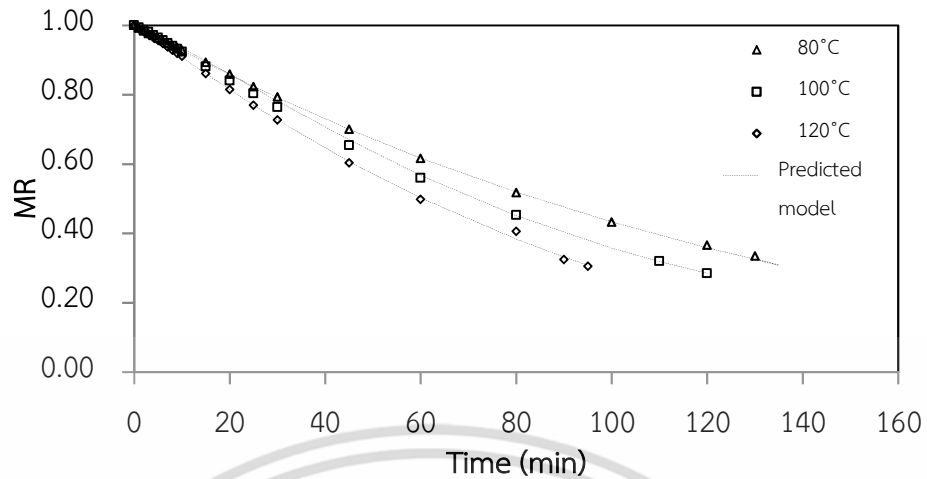
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นแบบชั้นบางที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ

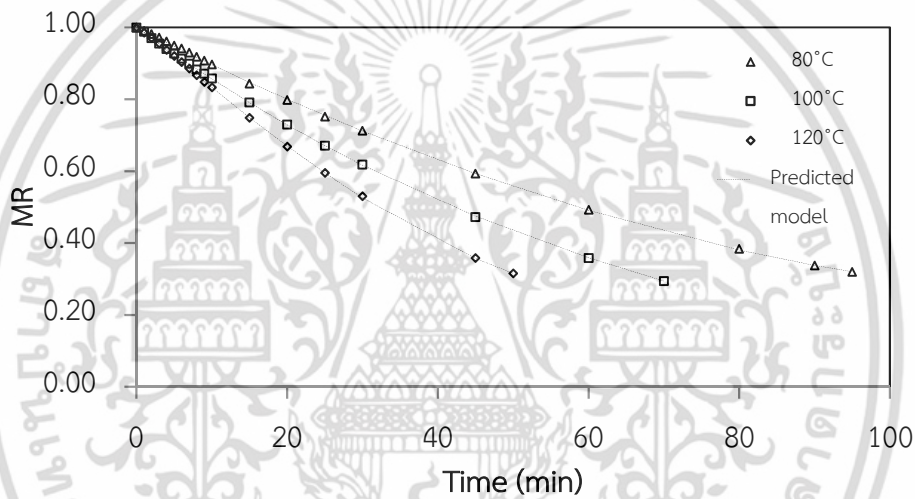
Model.	Condition		Constant and coefficient				R ²	RMSE
	Q (m ³ /s)	T (°C)						
5	0.04	80	k ₀ = 0.0111	k ₁ = 0.0137	a= 2.3630	b= -1.3620	0.99963	0.00461
		100	k ₀ = 0.0121	k ₁ = 0.0438	a= 1.2050	b= -0.2106	0.99310	0.02043
		120	k ₀ = 0.0166	k ₁ = 0.0226	a= 2.1880	b= -1.1850	0.99934	0.00603
	0.06	80	k ₀ = 0.0547	k ₁ = 0.0125	a= -0.0420	b= 1.0450	0.99995	0.00165
		100	k ₀ = 0.0221	k ₁ = 0.0267	a= 2.4840	b= -1.4800	0.99988	0.00242
		120	k ₀ = 0.0205	k ₁ = 0.0206	a= -6.0790	b= 7.0850	0.99375	0.01709
	0.08	80	k ₀ = 0.0102	k ₁ = 0.0103	a= -22.7800	b= 23.7300	0.97115	0.03569
		100	k ₀ = -0.0229	k ₁ = 0.1524	a= 1.0310	b= -0.0323	0.99991	0.00197
		120	k ₀ = 0.0327	k ₁ = 0.0627	a= 1.3950	b= -0.3922	0.99991	0.00193
6	0.04	80	k= 0.0084	a= 0.4612	b= 0.9670		0.99840	0.00965
		100	k= 0.0096	a= 1.0000	b= 0.5931		0.98489	0.03023
		120	k= 0.0370	a= -0.2358	b= 0.3852		0.99932	0.00609
	0.06	80	k= 0.0997	a= -0.0279	b= 0.1232		0.99993	0.00187
		100	k= 0.0298	a= -0.8494	b= 0.7307		0.99996	0.00145
		120	k= 0.0218	a= 0.2598	b= 0.9418		0.99162	0.01979
	0.08	80	k= 0.0146	a= 1.7790	b= 0.9076		0.99967	0.00384
		100	k= 0.0213	a= 1.3170	b= 0.9451		0.99892	0.00693
		120	k= 0.0199	a= 2.0280	b= 0.7764		0.99629	0.01250
7	0.04	80	k= 0.0066	n= 1.0320	a= 0.9989	b= -0.0003	0.99969	0.00423
		100	k= 0.0036	n= 1.2510	a= 0.9907	b= 0.0004	0.99298	0.02061
		120	k= 0.0077	n= 1.0760	a= 1.0010	b= -0.0005	0.99941	0.00567
	0.06	80	k= -0.0004	n= 1.5260	a= 1.0040	b= -0.0119	0.99990	0.00234
		100	k= 0.0138	n= 1.0250	a= 1.0000	b= -0.0007	0.99998	0.00108
		120	k= -0.0219	n= 0.9003	a= 1.0000	b= -0.0358	0.99992	0.00187
	0.08	80	k= 0.0144	n= 1.0270	a= 1.0010	b= 4.951x10 ⁻⁵	0.99998	0.00102
		100	k= 0.0181	n= 1.0600	a= 0.9985	b= 0.0002	0.99991	0.00197
		120	k= 0.0183	n= 1.0870	a= 1.001	b= -0.0005	0.99994	0.00161
8	0.04	80	a= -0.0074	b= 1.691x10 ⁻⁵			0.99964	0.00460
		100	a= -0.0079	b= 1.561x10 ⁻⁵			0.99182	0.02224
		120	a= -0.0098	b= 2.643x10 ⁻⁵			0.99916	0.00681
	0.06	80	a= -0.0107	b= 3.726x10 ⁻⁵			0.99988	0.00256
		100	a= -0.0148	b= 6.849x10 ⁻⁵			0.99995	0.00151
		120	a= -0.0179	b= 8.149x10 ⁻⁵			0.99914	0.00634
	0.08	80	a= -0.0147	b= 7.338x10 ⁻⁵			0.99988	0.00228
		100	a= -0.0200	b= 1.312x10 ⁻⁴			0.99989	0.00226
		120	a= -0.0219	b= 1.380x10 ⁻⁴			0.99961	0.00403

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

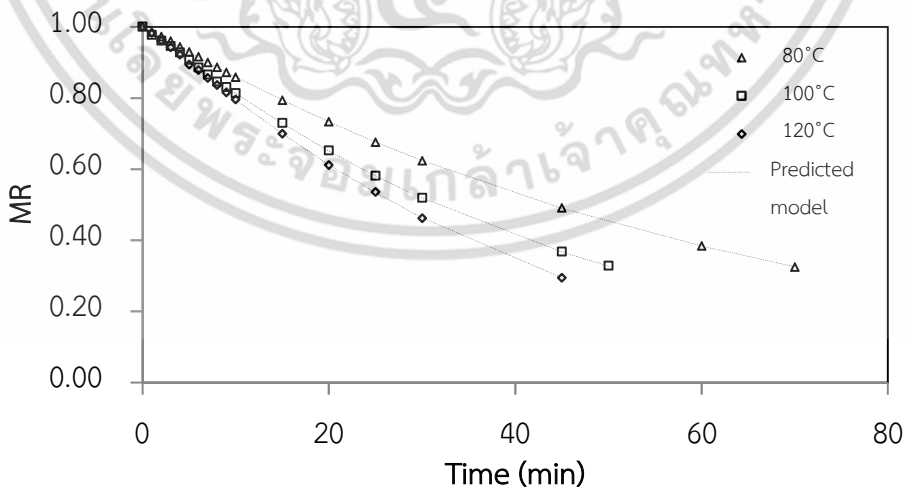
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

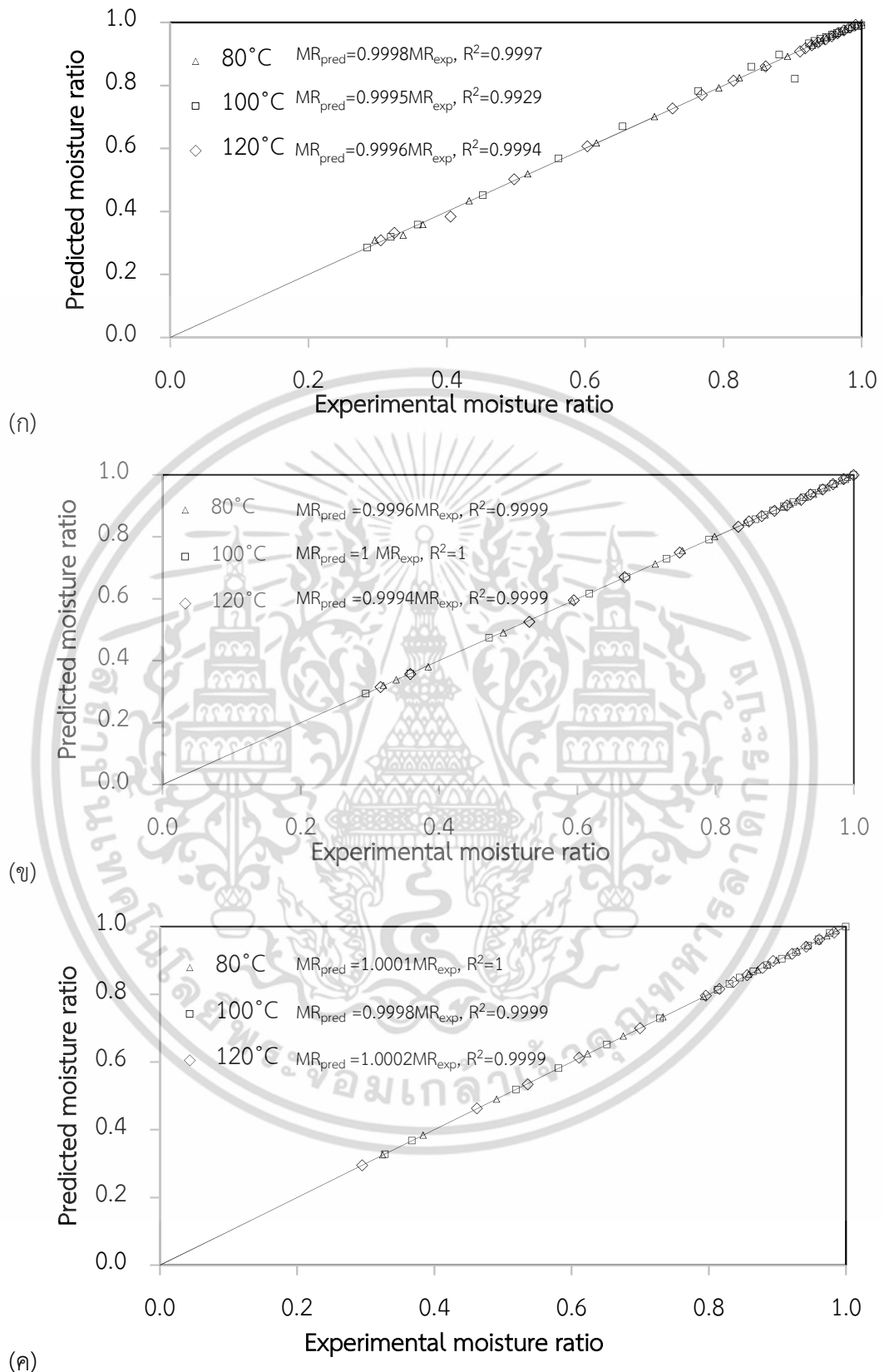


(ค)

รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบเส้นโค้งแห้งระหว่างข้อมูลการอบแห้งจริงและข้อมูลจากการอบแห้งที่ได้จากการคาดการณ์ด้วยแบบจำลอง Midilli et al. ที่อัตราการไหลของอากาศ (ก)

0.04 m³/s (ข) 0.06 m³/s และ (ค) 0.08 m³/s ตามลำดับ ในแต่ละอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นระหว่างข้อมูลการอบแห้งจริงและข้อมูลจากการอบแห้งที่ได้จากการคาดการณ์ด้วยแบบจำลอง Midilli et al. ที่อัตราการไหลของอากาศ

(ก) 0.04 m³/s (ข) 0.06 m³/s และ (ค) 0.08 m³/s ตามลำดับ ในแต่ละอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 อิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งในอบแห้งในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

4.5.1 สารกาบา

การทดลองอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิห้องอบแห้งที่ส่งผลต่อปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอก จากผลการวิเคราะห์ปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกหลังกระบวนการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น โดยวางแผนการทดลองแบบการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับสองปัจจัย (Two-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธีการวิเคราะห์แบบ LSD ($p < 0.05$) พบว่าอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศไม่มีปฏิสัมพันธ์กันต่อปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องงอก หรือกล่าวได้ว่าผลการวิเคราะห์ปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกหลังกระบวนการอบแห้งจากอุณหภูมิห้องอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศต่างๆ ให้ผลที่แตกต่างกันอย่างน้อย 2 ค่าต่อปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ทั้งนี้เมื่อมาพิจารณาที่ค่าปริมาณสารกาบาจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิในการอบแห้งด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยเดียว One-way ANOVA (Duncan's multiple range) ดังตารางที่ 4.4 พบว่าปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกในแต่ละสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิในห้องอบแห้ง 100 และ 120 °C เห็นแนวโน้มค่อนข้างชัดเจนที่จะพบปริมาณสารกาบาสูงสุด ในขณะที่เมื่อพิจารณาที่ค่าปริมาณสารกาบาจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศ พบว่าที่อัตราการไหลของอากาศเป็น 0.04 m³/s เห็นแนวโน้มค่อนข้างชัดเจนที่จะพบปริมาณสารกาบาสูงสุดเมื่อเทียบกับที่ในระดับอื่น

ตารางที่ 4.4 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศต่อปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอก

Drying condition		GABA (mg/100 g)
Q (m ³ /s)	T (°C)	
0.04	80	12.25±0.21 ^e
	100	14.98±0.18 ^a
	120	14.32±0.37 ^{ab}
0.06	80	12.56±0.50 ^{de}
	100	13.48±0.40 ^{bcd}
	120	13.74±0.44 ^{bc}
0.08	80	10.78±0.65 ^f
	100	13.88±0.74 ^{bc}
	120	13.01±0.16 ^{cde}

4.5.2 ความแข็งและความเหนียว

จากผลการวิเคราะห์ความแข็งและความเหนียวดังตารางที่ 4.5 ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับสองปัจจัย (Two-way ANOVA) พบว่าอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศมีปฏิสัมพันธ์ต่อกัน และเมื่อพิจารณาค่าความแข็งและความเหนียวด้วยวิธีทดสอบแบบ Simple main effect เพื่อหาปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศที่ส่งผลต่อค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุก ทั้งนี้แนวโน้มค่อนข้างชัดเจนว่าอัตราการไหลของอากาศที่ 0.04 m³/s ส่งผลให้ข้าวกล้องงอกหุงสุกมีความแข็งน้อยกว่าอัตราการไหลของอากาศที่ระดับอื่น ขณะที่เมื่อพิจารณาว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบแห้ง พบว่าผลการเปรียบเทียบทางสถิติส่วนใหญ่ ไม่พบความแตกต่างต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุก

ตารางที่ 4.5 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศต่อความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุก

Drying condition	Hardness (kgf)			Stickiness (kgf)		
	T (°C)					
Q (m ³ /s)	80	100	120	80	100	120
0.04	93.04±2.73 ^{A,b}	75.62±1.36 ^{B,b}	89.29±1.21 ^{A,c}	12.24±0.14 ^{NS,ns}	12.67±0.41 ^{NS,a}	12.50±0.22 ^{NS,ns}
0.06	103.67±2.87 ^{B,a}	111.57±3.00 ^{A,a}	114.58±1.53 ^{A,a}	12.77±0.23 ^{NS,ns}	13.27±0.54 ^{NS,a}	12.48±1.49 ^{NS,ns}
0.08	108.69±9.52 ^{AB,a}	113.23±3.75 ^{A,a}	105.77±3.49 ^{B,b}	12.96±0.07 ^{A,ns}	10.40±0.24 ^{B,b}	13.20±1.16 ^{A,ns}

ตัวพิมพ์ใหญ่แสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในแถวเดียวกัน (การเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้ง, p=0.05)

ตัวพิมพ์เล็กแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในคอลัมน์เดียวกัน (การเปรียบเทียบอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศ, p=0.05)

4.5.3 ค่าสีและความขาว

จากตารางที่ 4.6 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศต่อค่าความสว่าง (L*) ค่าสีแดงกับสีเขียว (a*) ค่าสีเหลืองกับสีน้ำเงิน (b*) และค่าความขาว (Whiteness) ของข้าวกล้องงอก และจากผลการวิเคราะห์ค่าสีและความขาวด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับสองปัจจัย (Two-way ANOVA) พบว่ามีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศต่อค่าสีและความขาวของข้าวกล้องงอก โดยเมื่อพิจารณาค่าสีและความขาวด้วยวิธีทดสอบแบบ Simple main effect เพื่อหาปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศที่ส่งผลต่อค่าสีและความขาวของข้าวกล้องงอก โดยผลการเปรียบเทียบทางสถิติส่วนใหญ่ ไม่พบความแตกต่างจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศต่อการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพสีและความขาวที่ชัดเจน

ตารางที่ 4.6 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศต่อค่าสีและความขาวของข้าวกล้องงอก

Drying condition	L*			a*		
	T (°C)					
Q (m ³ /s)	80	100	120	80	100	120
0.04	66.82±0.49 ^{B,b}	68.16±0.56 ^{A,b}	67.91±0.32 ^{A,b}	4.73±0.16 ^{B,ns}	4.54±0.17 ^{B,ns}	5.06±0.19 ^{A,a}
0.06	68.50±0.49 ^{B,a}	69.46±0.03 ^{A,a}	69.10±0.04 ^{AB,a}	4.72±0.06 ^{A,ns}	4.36±0.11 ^{B,ns}	4.38±0.09 ^{B,b}
0.08	67.58±0.16 ^{B,b}	68.03±0.26 ^{B,b}	69.33±1.02 ^{A,a}	4.99±0.14 ^{A,ns}	4.51±0.08 ^{B,ns}	5.05±0.37 ^{A,a}

Drying condition	b*			Whiteness (%)		
	T (°C)					
Q (m ³ /s)	80	100	120	80	100	120
0.04	23.54±0.15 ^{B,b}	24.41±0.48 ^{A,a}	24.35±0.20 ^{A,b}	59.04±0.47 ^{NS,b}	59.62±0.69 ^{NS,b}	59.40±0.39 ^{NS,b}
0.06	23.28±0.02 ^{B,b}	23.38±0.19 ^{B,b}	23.92±0.25 ^{A,b}	60.55±0.38 ^{NS,a}	61.29±0.15 ^{NS,a}	60.68±0.16 ^{NS,a}
0.08	24.41±0.46 ^{B,a}	23.79±0.04 ^{C,b}	25.20±0.07 ^{A,a}	59.11±0.39 ^{B,b}	59.90±0.19 ^{A,b}	59.98±0.79 ^{A,ab}

ตัวพิมพ์ใหญ่แสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในแถวเดียวกัน (การเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้ง, p=0.05)

ตัวพิมพ์เล็กแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในคอลัมน์เดียวกัน (การเปรียบเทียบอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศ, p=0.05)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การเปรียบเทียบระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ

4.6.1. การเปรียบเทียบลักษณะการอบแห้งและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบลักษณะการอบแห้งของข้าวกล้องงอกระหว่างระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นและระบบอบแห้งแบบลมร้อน จากทดลองทำการเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิในห้องอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 100 และ 120 °C ส่วนสภาวะอื่น ๆ ในระบบทำการกำหนดให้มีค่าคงที่ โดยทำการกำหนดให้ความเร็วรอบของวงล้อดูดความชื้นและอัตราการไหลของอากาศส่วนดูดความชื้นมีค่าเป็น 1.5 rpm 0.08 m³/s ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิในส่วนคั้นสภาพสารดูดความชื้นมีค่าเป็น 0.04 m³/s และ 90 °C ตามลำดับ

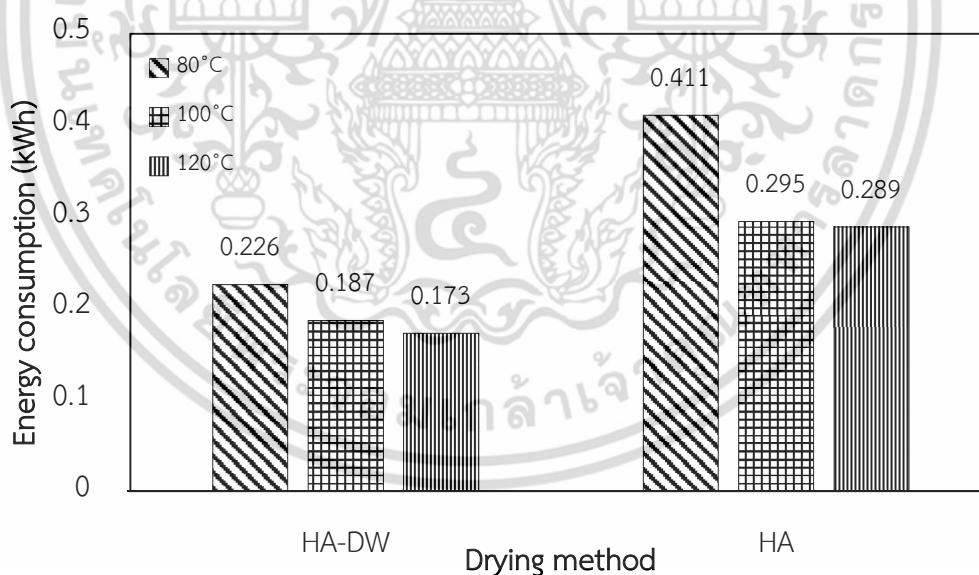
เมื่อพิจารณาที่อิทธิพลของอุณหภูมิตอบแห้งเดียวกัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นจะพบอัตราการอบแห้งสูงสุดมีค่าสูงกว่าระบบอบแห้งแบบลมร้อนในทุกช่วงอุณหภูมิ โดยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นพบค่าอัตราการอบแห้งสูงสุดอยู่ในช่วง 0.0063-0.0093 g water/g dry matter·min ในขณะที่ระบบอบแห้งแบบลมร้อนพบค่าอัตราการอบแห้งสูงสุดอยู่ในช่วง 0.0074-0.0125 g water/g dry matter·min หรืออาจกล่าวได้ว่าระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นทำให้อัตราการอบแห้งสูงสุดในการอบแห้งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 17-35% ของระบบอบแห้งแบบลมร้อน และเมื่อเปรียบเทียบในด้านของเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง พบว่า ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นใช้เวลาในการอบแห้งมีค่าน้อยกว่าระบบอบแห้งแบบลมร้อนเช่นกัน ระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นสามารถลดเวลาในการอบแห้งได้ลดลงถึง 10-23% ของระบบอบแห้งแบบลมร้อน โดยจากงานวิจัย [7] พบว่าการใช้ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นทำให้สามารถลดเวลาในการอบแห้งได้ลดลงถึง 25% ของระบบที่ไม่ใช้วงล้อดูดความชื้น และเมื่อพิจารณาที่อิทธิพลของอุณหภูมิตอบแห้งจากระบบอบแห้งชนิดเดียวกัน พบว่าที่อุณหภูมิในการอบแห้งสูงจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าอุณหภูมิในการอบแห้งที่ต่ำกว่า โดยที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิลมร้อนคือ 0.08 m³/s และ 120 °C จะพบอัตราการอบแห้งมีค่าสูงสุดและใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดในทั้งสองระบบการอบแห้ง

จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดงค่าพลังงานและพลังงานจำเพาะที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกระหว่างระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ เมื่อพิจารณาที่ระบบอบแห้งทั้ง 2 ระบบ ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น พบค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกมีค่าต่ำกว่าระบบอบแห้งแบบลมร้อนในทุกช่วงอุณหภูมิ โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งส่งผลให้ค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนให้กับห้องอบแห้งส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง จึงกล่าวได้ว่าอุณหภูมิในห้องอบแห้งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอก โดยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นพบค่าพลังงานที่ใช้

สำหรับการอบแห้งอยู่ในช่วง 0.173-0.226 g water/g dry matter·min ในขณะที่ระบบอบแห้งแบบลมร้อนพบค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งอยู่ในช่วง 0.289-0.411 g water/g dry matter·min

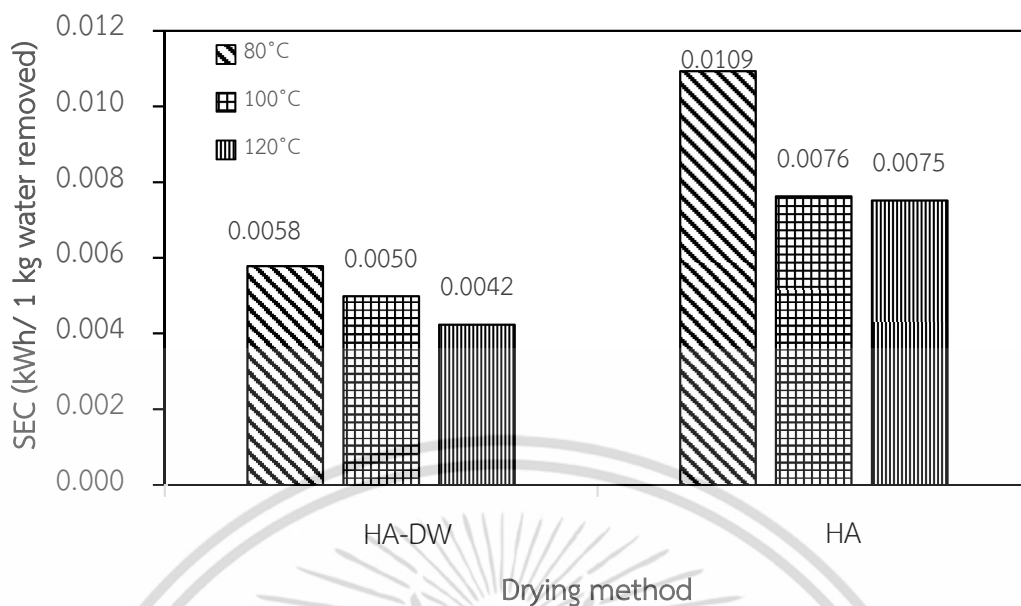
ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติที่อัตราการอบแห้งสูงสุดและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ มีอัตราการไหลของอากาศส่วนต่อความชื้นเป็น 0.08 m³/s

Treatment	Drying condition		Drying time (min)	Maximum DR (g water/g dry matter min)	Energy consumption (kWh)	SEC (kWh/1 kg water removed)
	Q (m ³ /s)	T (°C)				
HA-DW	0.08	80	70	0.0074	0.226	0.0058
		100	50	0.0100	0.187	0.0050
		120	45	0.0125	0.173	0.0042
HA	0.08	80	80	0.0063	0.411	0.0109
		100	65	0.0074	0.295	0.0076
		120	50	0.0093	0.289	0.0075



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกระหว่างระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ ที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนต่อความชื้นเป็น 0.08 m³/s

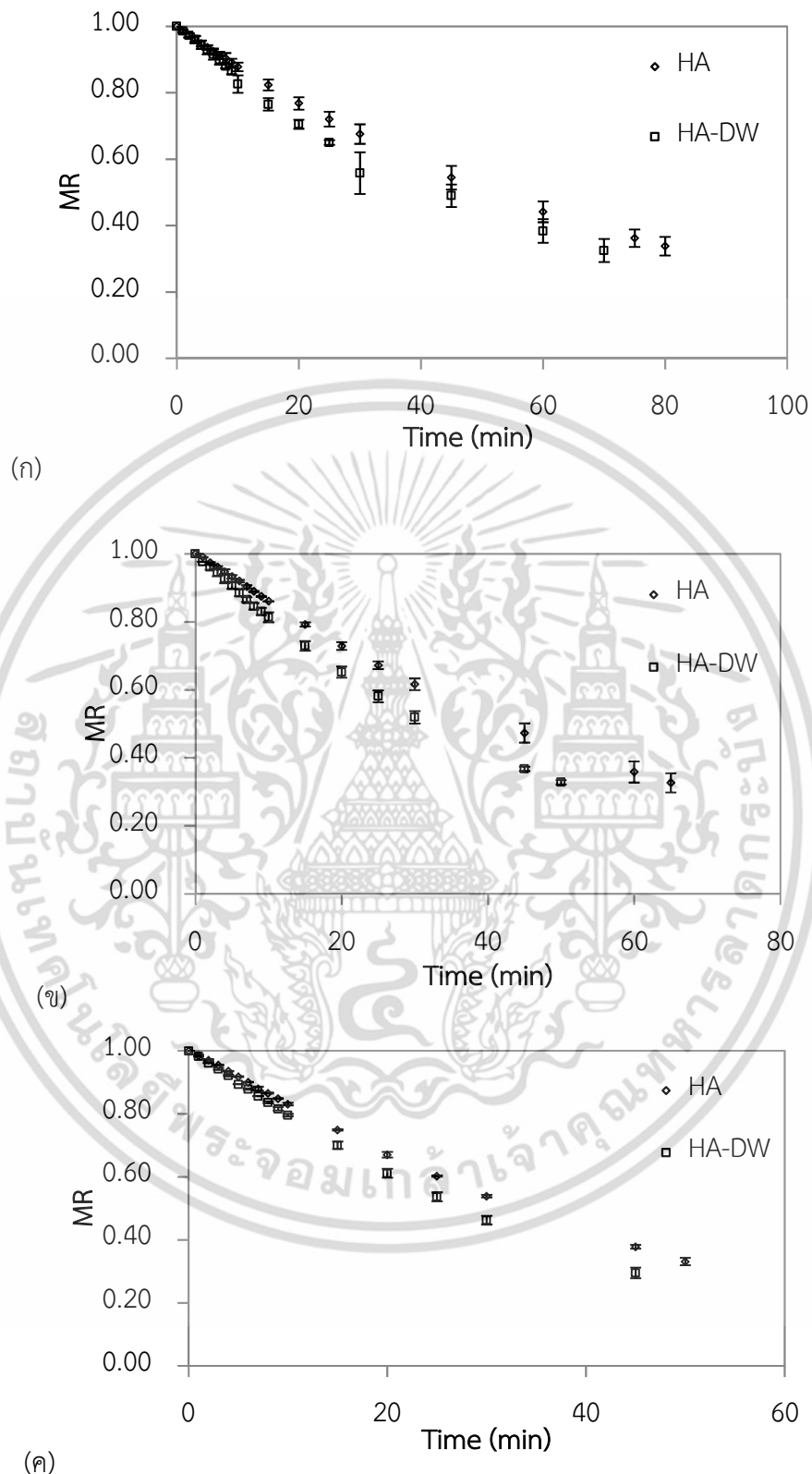
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกระหว่างระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ ที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ เมื่อมีอัตราการไหลของอากาศส่วนต่อความชื้นเป็น $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$

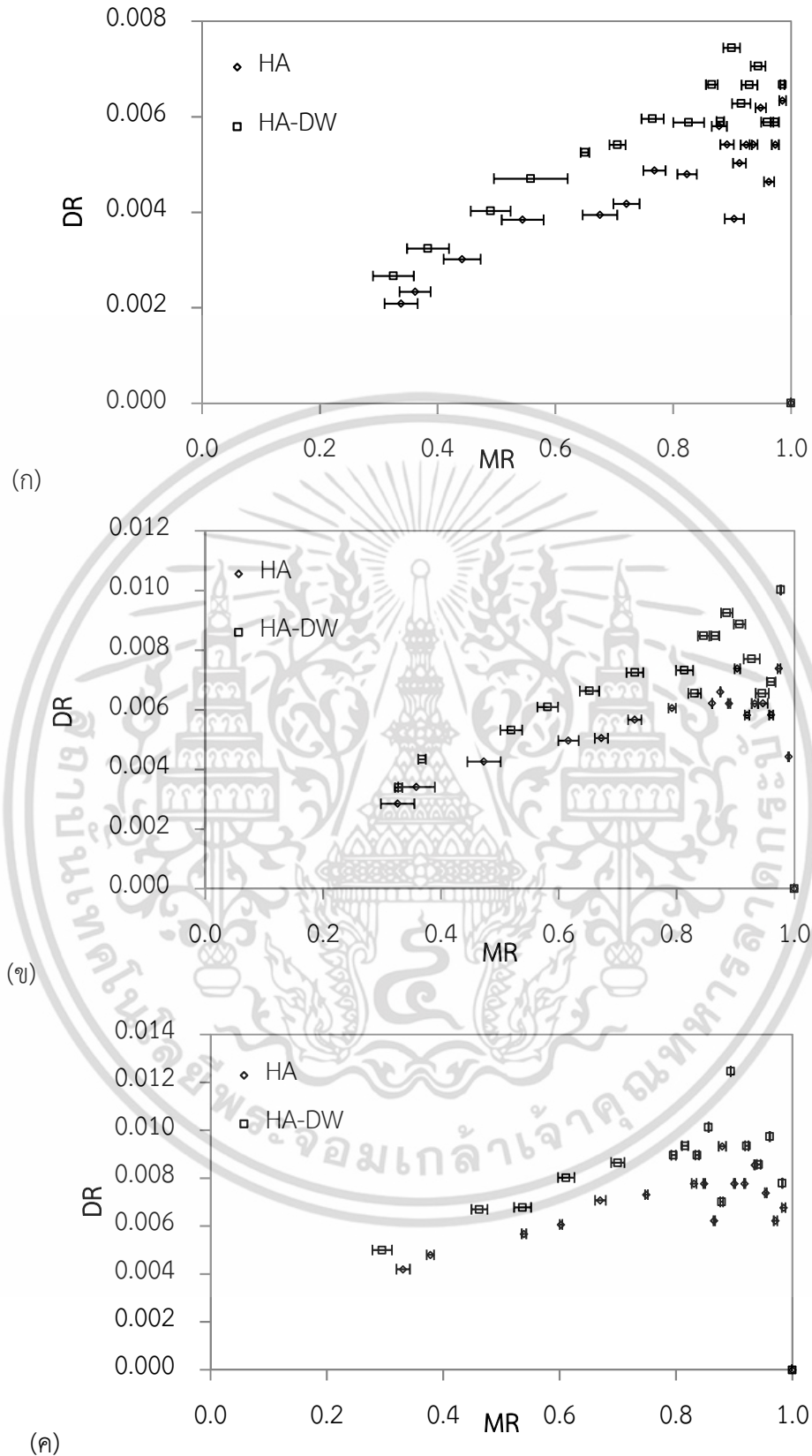
จากรูปที่ 4.16 เมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะการอบแห้งทั้ง 2 ระบบ คือ ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น และระบบอบแห้งแบบลมร้อนที่อัตราการไหลของอากาศคือ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิในห้องอบแห้งเป็น 80, 100 และ 120°C พบว่าระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นสามารถระเหยน้ำออกจากวัสดุได้ดีกว่าระบบอบแห้งแบบลมร้อนในทุกสภาวะการอบแห้ง

จากรูปที่ 4.17 แสดงเส้นโค้งอัตราการอบแห้งของข้าวกล้องงอกระหว่างระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น และระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ พบว่า ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกจากทั้งสองระบบอบแห้งจะพบเพียง 2 ช่วงการอบแห้งหลักคือ ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Heating up) และ ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate) เท่านั้น ซึ่งระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น จะส่งผลให้อัตราการอบแห้งของข้าวกล้องงอกมีค่าสูงกว่าระบบอบแห้งแบบลมร้อนในทุกสภาวะการอบแห้ง



รูปที่ 4.16 เส้นโค้งการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบการอบแห้งแบบต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของอากาศ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิลมร้อนอากาศ (ก) 80°C (ข) 100°C และ (ค) 120°C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 เส้นโค้งอัตราการอบแห้งของการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบการอบแห้งแบบต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของอากาศ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิลมร้อน (ก) 80°C (ข) 100°C และ

(ค) 120°C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 การเปรียบเทียบคุณภาพของข้าวกล้องงอก

4.6.2.1 สารกาบา

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกระหว่างระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นและระบบอบแห้งแบบลมร้อน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.8 และจากผลการวิเคราะห์ปริมาณสารกาบาด้วยวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยเดียว One-way ANOVA (Duncan's multiple range) ที่ $p < 0.05$ พบว่าค่าปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกในแต่ละสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีแนวโน้มค่อนข้างชัดเจนคือ ข้าวกล้องงอกทุกตัวอย่างที่ได้จากการอบแห้งแบบต่าง ๆ มีปริมาณสารกาบามากกว่าข้าวกล้องปกติที่ไม่ผ่านการเพาะงอก (ตัวอย่างควบคุม) ซึ่งบ่งชี้ได้ดีถึงคุณค่าทางโภชนาการที่ดีขึ้นของข้าวกล้องงอกเมื่อเทียบกับข้าวกล้องปกติ และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกจากวิธีการอบแห้งทั้งสองระบบ ผลการเปรียบเทียบทางสถิติส่วนใหญ่ ไม่พบความแตกต่างที่ชัดเจนของการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารกาบาจากอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบแห้ง ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกจากอิทธิพลของวิธีการอบแห้งที่แตกต่างกันสำหรับระบบอบแห้งทั้งสองระบบ พบแนวโน้มชัดเจนที่จะพบปริมาณสารกาบาสูงสุดที่การอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

ตารางที่ 4.8 ปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกที่วิธีการอบแห้งต่าง ๆ

Drying method	Drying condition		Drying time (min)	GABA (mg/100 g)
	Q (m ³ /s)	T (°C)		
HA-DW	0.08	80	70	10.78±0.65 ^d
		100	50	13.88±0.74 ^a
		120	45	13.01±0.16 ^{ab}
HA	0.08	80	80	12.46±0.30 ^{bc}
		100	65	12.72±0.48 ^b
		120	50	11.39±0.34 ^{cd}
Brown rice	-	-	-	1.34±0.04 ^e

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2.2 ความแข็งและความเหนียว

จากผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.9 ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยเดียว One-way ANOVA (Duncan's multiple range) พบว่าความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุกในแต่ละสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และจะเห็นได้ว่าข้าวกล้องงอกหุงสุกทุกตัวอย่างมีความแข็งน้อยกว่าและมีความเหนียวมากกว่าข้าวกล้องปกติหุงสุกที่ไม่ผ่านการเพาะงอก (ตัวอย่างควบคุม) ซึ่งบ่งชี้ได้ดีถึงคุณภาพในการรับประทานที่ดีขึ้นของข้าวกล้องงอกเมื่อเทียบกับข้าวกล้องปกติ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาที่ความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยวิธีการอบแห้งที่แตกต่างกัน ผลการเปรียบเทียบทางสถิติส่วนใหญ่ ไม่พบความแตกต่างต่อค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุกจากการเปลี่ยนแปลงวิธีการอบแห้งข้าวกล้องงอก

ตารางที่ 4.9 ความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุกที่วิธีการอบแห้งต่าง ๆ

Drying method	Drying condition		Hardness (kfg)	Stickiness (kfg)
	Q (m ³ /s)	T (°C)		
HA-DW	0.08	80	108.69±9.52 ^{bc}	12.96±0.07 ^a
		100	113.23±3.75 ^b	10.40±0.24 ^b
		120	105.77±3.49 ^{bc}	13.20±1.16 ^a
HA	0.08	80	110.46±2.94 ^{bc}	12.99±1.13 ^a
		100	104.80±2.91 ^{bc}	13.50±0.77 ^a
		120	103.73±2.91 ^c	12.98±0.74 ^a
Brown rice	-	-	164.70±2.04 ^a	8.66±0.07 ^c

4.6.2.3 ค่าสีและค่าความขาว

จากผลการวิเคราะห์ค่าสีและความขาวของข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยเดียว One-way ANOVA (Duncan's multiple range) สามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.10 โดยพบว่าในแต่ละสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สำหรับค่าสีและความขาวของข้าวกล้องงอก แสดงให้เห็นได้ว่าข้าวกล้องงอกทุกตัวอย่างมีความสว่างและความขาวมากกว่าข้าวกล้องปกติที่ไม่ผ่านการเพาะงอก (ตัวอย่างควบคุม) ซึ่งบ่งชี้ได้ดีถึงลักษณะปรากฏที่ดีขึ้นของข้าวกล้องงอกเมื่อเทียบกับข้าวกล้องปกติ และเมื่อทำการเปรียบเทียบอิทธิพลของวิธีการอบแห้งต่อค่าความสว่าง ค่าสีแดงกับสีเขียว ค่าสีเหลืองกับสีน้ำเงิน และค่าความขาวของข้าวกล้องงอก ผลการเปรียบเทียบส่วนใหญ่ ไม่พบความแตกต่างจากอิทธิพลของวิธีการอบแห้งข้าวกล้องงอกต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสีแดงกับสีเขียว ค่าสีเหลืองกับสีน้ำเงิน และค่าความขาวของข้าวกล้องงอกในทุกเงื่อนไขการอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ค่าสีและความสว่างของข้าวกล้องงอกที่วิธีการอบแห้งต่างๆ

Drying method	Drying condition		L*	a*	b*	Whiteness (%)
	Q (m ³ /s)	T (°C)				
HA-DW	0.08	80	67.58±0.16 ^{bc}	4.99±0.14 ^{ab}	24.41±0.46 ^b	59.11±0.39 ^b
		100	68.03±0.26 ^{bc}	4.51±0.08 ^c	23.79±0.04 ^c	59.90±0.19 ^{ab}
		120	69.33±1.02 ^a	5.05±0.37 ^a	25.20±0.07 ^a	59.98±0.79 ^{ab}
HA	0.08	80	67.22±0.14 ^c	4.90±0.10 ^{ab}	23.75±0.24 ^c	59.22±0.21 ^{ab}
		100	68.02±0.44 ^{bc}	4.91±0.07 ^{ab}	24.26±0.26 ^b	59.56±0.50 ^{ab}
		120	68.35±0.72 ^b	4.75±0.06 ^{abc}	23.78±0.07 ^c	60.13±0.55 ^a
Brown rice	-	-	62.83±0.54 ^d	4.72±0.05 ^{bc}	24.92±0.18 ^a	55.00±0.52 ^c



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

5.1 ผลการศึกษาการทำงานของวงล้อและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้นทั้งระบบในสถานะห้องอบแห้งเปล่า

วงล้อดูดความชื้นสามารถลดความชื้นสัมพัทธ์และอัตราส่วนความชื้นและเพิ่มอุณหภูมิของอากาศจาก 50.2%, 19 g water/kg dry air และ 35.9°C เป็น 33.9%, 16 g water/kg dry air และ 41.1°C ตามลำดับ ตั้งแต่เริ่มให้ระบบลดความชื้นในอากาศทำงานในนาที่แรก และวงล้อสามารถรักษาการทำงานดูดความชื้นในอากาศได้อย่างต่อเนื่องจนถึงนาที่ที่ 30 ซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์เป็น 37.9% กระบวนการลดความชื้นในอากาศนี้แสดงการลดความชื้นและเพิ่มอุณหภูมิของอากาศตรงตามกระบวนการอะเดียแบติก อากาศร้อนที่นำมาใช้คืนสภาพสารดูดความชื้นแสดงการรับความชื้นจากสารดูดความชื้นได้ โดยมีการเปลี่ยนแปลงอากาศจากความชื้นสัมพัทธ์ อัตราส่วนความชื้น และอุณหภูมิ 15.5%, 19 g water/kg dry air และ 60°C เป็น 42.6%, 26 g water/kg dry air และ 44.8°C ตามลำดับ

เมื่อนำระบบวงล้อดูดความชื้นมาใช้ร่วมกับระบบอบแห้ง โดยกำหนดอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านวงล้อดูดความชื้นเป็น 0.04 m³/s และอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งเป็น 90°C วงล้อดูดความชื้นสามารถลดอัตราส่วนความชื้นในอากาศลงประมาณ 7.5 g water/kg dry air ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนความชื้นที่เพิ่มขึ้น 7.5 g water/kg dry air ของอากาศที่ผ่านการคืนสภาพสารดูดความชื้น แสดงให้เห็นว่าซิลิกาเจลภายในวงล้อดูดความชื้นสามารถดูดและคายความชื้นออกได้ในเวลาเดียวกันในสัดส่วนที่เท่ากัน

ประสิทธิภาพของวงล้อดูดความชื้นอยู่ในช่วง 44.39-98.49% ขึ้นอยู่กับทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ เมื่ออิงตามทฤษฎีกระบวนการแบบอะเดียแบติก ได้ประสิทธิภาพถึง 98.49% แสดงว่าวงล้อดูดความชื้นนี้มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการลดความชื้นในอากาศ

5.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่อลักษณะการอบแห้งและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิอบแห้ง 0.04-0.08 m³/s และ 80-120°C ตามลำดับ ให้อัตราการอบแห้งสูงสุด เวลาในการอบแห้ง และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ในช่วง 0.0039-0.0125 g water/g dry matter-min, 45-130 นาที และ 0.173-0.452 kWh ตามลำดับ ยิ่งอัตรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหลของอากาศและอุณหภูมิอบแห้งสูง อัตราการอบแห้งยิ่งสูง เวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งยิ่งต่ำ ดังนั้น อัตราการไหลของอากาศ $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และอุณหภูมิอบแห้ง 120°C จึงเป็นสภาวะการอบแห้งที่ดีที่สุด

5.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่อสมบัติของอากาศในการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศโดยรอบที่ใช้ในการเริ่มต้นการทดลองอยู่ในช่วง 45-55% เมื่อทำการทดลองอบแห้ง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศลดลงอย่างรวดเร็วและค่อนข้างเข้าสู่ค่าคงที่ในนาที่ที่ 10 ของกระบวนการอบแห้ง โดยมีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 9-15% ตลอดจนสิ้นสุดกระบวนการ

5.4 ผลการศึกษาการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการอบแห้งข้าวกล้องงอกแบบชั้นบางด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

แบบจำลองคณิตศาสตร์ของ Midilli et al. ($MR = a \exp(-kt^n) + bt$) คือ แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถทำนายเส้นโค้งการอบแห้งสำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นที่อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิอบแห้ง $0.04\text{-}0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ และ $80\text{-}120^\circ\text{C}$ ตามลำดับ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจและค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ในช่วง $0.99298\text{-}0.99998$ และ $0.00102\text{-}0.02061$ ตามลำดับ

5.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลอากาศและอุณหภูมิลมร้อนต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งในอบแห้งในระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น

ปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอกอยู่ในช่วง $10.78\text{-}14.98 \text{ mg}/100 \text{ g}$ ความแข็งและความเหนียวอยู่ในช่วง $75.62\text{-}113.23 \text{ kgf}$ และ $10.40\text{-}13.27 \text{ kgf}$ ตามลำดับ ความขาวอยู่ในช่วง $59.04\text{-}61.29\%$ อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิลมร้อนมีอิทธิพลต่อปริมาณสารกาบา ความแข็งและความเหนียว และค่าสีและความขาวของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น อุณหภูมิอบแห้งสูง 100 และ 120°C และอัตราการไหลของอากาศต่ำ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ ให้สารกาบาสูงกว่าสภาวะการอบแห้งอื่น ๆ อัตราการไหลของอากาศ $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ ยังส่งผลให้ข้าวกล้องงอกหุงสุกมีความแข็งน้อยกว่าอัตราการไหลของอากาศที่ระดับอื่น ๆ ความขาวของข้าวกล้องงอกมีความแตกต่างกันทางสถิติแต่ไม่พบแนวโน้มที่ชัดเจนมากนัก

5.6 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นกับระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติ

ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นให้อัตราการอบแห้งสูงสุด เวลาในการอบแห้ง และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ในช่วง 0.0074-0.0125 g water/g dry matter·min, 45-70 นาที และ 0.173-0.226 kWh ตามลำดับ ซึ่งดีกว่าระบบอบแห้งแบบลมร้อนปกติที่มีค่าเหล่านี้อยู่ในช่วง 0.0063-0.0093g water/g dry matter·min, 50-80 นาที และ 0.289-0.411kWh ตามลำดับ ข้าวกล้องงอกที่อบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น แบบลมร้อนปกติ และข้าวกล้องมีปริมาณสารกาบาโดยเฉลี่ย คือ 12.56, 12.19 และ 1.34 mg/100 g ตามลำดับ ความแข็งโดยเฉลี่ย คือ 109.23, 106.33 และ 164.70 kgf ตามลำดับ ความเหนียวโดยเฉลี่ย คือ 12.19, 13.16 และ 8.66 kgf ตามลำดับ และความขาวโดยเฉลี่ย คือ 59.66, 59.64 และ 55.00% ตามลำดับ

5.7 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับระบบลดความชื้นในอากาศ

ระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้นให้อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิอบแห้งเป็น 0.08 m³/s และ 120°C ตามลำดับ เป็นสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งข้าวกล้องงอก โดยให้อัตราการอบแห้งสูงสุด 0.0125 g water/g dry matter·min เวลาในการอบแห้งสั้นสุด 45 นาที พลังงานที่ใช้การอบแห้งต่ำสุด 0.173 kWh ปริมาณสารกาบาสูง 13.01 mg/100 g ความแข็ง ความเหนียว และความขาวปานกลาง 105.77 kgf, 13.20 kgf และ 59.98% ตามลำดับ

5.8 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองระบบอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวงล้อดูดความชื้น พบว่าระบบอบแห้งที่ได้ทำการศึกษามีการลดความชื้นในอากาศได้เป็นที่น่าพึงพอใจ ในการศึกษาต่อไปในอนาคตควรมีการศึกษาระบบอบแห้งที่มีการลดความชื้นในอากาศแบบอื่นเพิ่มเติมด้วยเช่นกัน เช่น ระบบการลดความชื้นในห้องอบแห้งแบบคอลัมน์ เพื่อหาวิธีการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดและมีประสิทธิภาพสูงสุดต่อการอบแห้งข้าวกล้องงอก

สำหรับการศึกษาการทำงานของวงล้อดูดความชื้น อาจปรับสภาวะการทดลองในรูปแบบอื่น ๆ เช่น การเพิ่มชั้นความหนาของซิลิกาเจล เพื่อให้ได้ผลการทำงานของวงล้อดูดความชื้นที่ดีขึ้น ในการเพิ่มชั้นความหนาของซิลิกาเจล ควรมีการปรับขนาดพัดลมให้มีแรงม้ามากขึ้นด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Yadollahinia A.R., Omid, M. and Rafiee S. "Design and fabrication of experimental dryer for studying agricultural products" *International Journal of Agriculture and Biology*, vol.10, 2008. pp.61–65.
- [2] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, เกียรติคุณ รัตนาปนนท์ และนิธิยา รัตนาปนนท์. "Dehydration/การทำแห้ง." [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0277/dehydration-การทำแห้ง>. 2017
- [3] Dina S. F., Ambarita H., Napitupulu F.H. and Kawai H. "Study on effectiveness of continuous solar dryer integrated with desiccant thermal storage for drying cocoa beans" *Case Studies in Thermal Engineering*, vol.5, 2015. pp.32–40.
- [4] Naidu M. M., Vedashree M., Satapathy P., Khanum H., Ramsamy R., and Hebbar H. U. "Effect of drying methods on the quality characteristics of dill (*Anethum graveolens*) greens" *Journal of Food Chemistry*, vol.192, 2016. pp.849–856.
- [5] ชนพลวานิช. "สารดูดความชื้นมีอะไรบ้าง?." [Online]. Available : http://www.tanapolvanich.com/dry-bag/html/Type_of_Desiccant_Packaging_th.htm. 2017
- [6] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. "เครื่องลดความชื้นแบบใช้สารดูดความชื้น." [Online]. Available : http://www2.dede.go.th/bhrd/old/web_display/websemple/swf_ind33/33_thai.swf. 2017
- [7] Madhiyanon T., Adirekrut S., Sathitruangsak P. and Soponronnarit S. "Integration of a rotary desiccant wheel into a hot-air drying system: Drying performance and product quality studies" *Chemical Engineering and Processing*, vol.46, 2007. pp.282–290
- [8] ชาตรี เกียรติจรูญศิริ, สุดาภรณ์ ฉุ่งสู้, พรรณจิรา ทิศาวิภาต และบัณฑิต ลิ้มมีโชคชัย. "การลดภาระการทำความเย็นของระบบปรับอากาศโดยใช้สารดูดความชื้น เพื่อการประหยัดพลังงาน ." *วารสารวิจัยพลังงาน*, ปีที่ 7, ฉบับที่ 1, 2553. หน้า 25-43
- [9] Giri S. K. and Prasad S. "Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave vacuum and convective-hot air-dried mushrooms" *Journal of Food Engineering*, vol.78, 2007. pp.512–521.
- [10] ชนากานต์ คำมี, สุภาพร ปานแก้ว ,จุฬาลักษณ์ วิไลยา, พิมพ์พรรณ ปฎิมา, จิตรภัทรณ์ กันธพงษ์ และ นพพล เล็กสวัสดิ์. "กรดแอมิโนบิวทริกในข้าวกล้องงอกมปีบทบาทในการบำรุงระบบประสาทได้จริงหรือ." [Online]. Available: <http://www.agro.cmu.ac.th/absc/data/57/57-015.pdf>.

เอกสารนี้²⁰¹⁷เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. "การอบแห้งและลดความชื้นในอุตสาหกรรม." [Online]. Available: [http://www2.dede.go.th/bhrd/old/web_display/websemple/Industrial\(PDF\)/Bay18% 20Desiccant% 20 Dehumidification .pdf](http://www2.dede.go.th/bhrd/old/web_display/websemple/Industrial(PDF)/Bay18%20Desiccant%20Dehumidification.pdf). 2017
- [12] เวิลด์ เคมีคอล ฟาร์อีสท์. "ซิลิกาเจล." [Online]. Available : <http://www.worldchemical.co.th/th/product-detail-21-ซิลิกาเจล.html>. 2017
- [13] ชอบธรรม. "คู่มือการใช้ ซิลิกา เจล (วัตถุดูดความชื้น)." [Online]. Available : http://www.chobtham.com/attachments/view/?attach_id=24728. 2017
- [14] เพาเวอร์ ทราย. "ซิลิกา เจล (Silica Gel)." [Online]. Available: http://www.powerdry.co.th/giggs_products_silica_gel_th.php. 2017
- [15] เพาเวอร์ ทราย. "สารดูดความชื้นที่องค์การอาหารและยาประเทศไทยรับรอง (Thailand FDA)." [Online]. Available : http://www.powerdry.co.th/index_th.php.
- [16] คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. "คุณสมบัติไซโครเมตริกของอากาศ." [Online]. Available : http://mte.kmutt.ac.th/elearning/refrigeration_and_airconditioning/elearning/lesson1.html. 2017
- [17] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, นิธิยา รัตนานนท์ และสมักร รักแม่. "Psychrometric chart / แผนภูมิไซโครเมตริก." [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0573/psychrometric-chart-%>. 2017
- [18] Thailandindustry. "ทำความเข้าใจแผนภูมิไซโครเมตริก (Psychrometric Chart)." [Online]. Available : http://www.thailandindustry.com/indust_newweb/article_previews.php?cid=19123/. 2017
- [19] Stonecypher L. "Psychrometric Chart Use." [Online]. Available : <http://www.brightubengineering.com/hvac/41262-what-is-psychrometric-chart-components-of-psychrometric-chart/>. 2017
- [20] เชียงใหม่แอร์แคร์ เอ็นจิเนียริง. "แผนภาพไซโครเมตริกมีประโยชน์อย่างไร." [Online]. Available : <http://www.chiangmaiaircare.com/แผนภาพไซโครเมตริกมีประโยชน์อย่างไร/>. 2017
- [21] piya_engineer2786. "Refrigeration and Air Conditioning." [Online]. Available: https://docuri.com/download/10refrigeration-and-air-conditioning_59c1dd6ff581710b2868fbc8.pdf. 2017
- [22] ref-wiki. "แผนภูมิ Psychrometric" [Online]. Available : <http://www.ref-wiki.com/th/content/view/31964/28/>. 2017
- [23] เจริญ เจริญชัย. "ไซโครเมตริกส์." [Online]. Available : https://ajarncharoen.files.wordpress.com/2014/08/08_psychrometrics.pdf. 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน. "อุณหพลศาสตร์ Thermodynamics." [Online]. Available : <http://chem.flas.kps.ku.ac.th /SLIDE/SLIDE-01403111-CH09-THERMODYNAMICS.pdf>. 2017
- [25] Mandegari M. A. and Pahlavanzadeh H. "Introduction of a new definition for effectiveness of desiccant wheels." *Journal of Chemical Engineering*, vol.34, 2009. pp.797–803.
- [26] Jones A.Z. "Thermodynamics: Adiabatic Process." [Online]. Available: <https://www.thoughtco.com/adiabatic-process-2698961>. 2017
- [27] Poon Suk. "พลังงานภายในระบบ (Internal energy of system)." [Online]. Available : <http://pukpik690.blogspot.com/2013/01/blog-post.html>. 2017
- [28] Jones A.Z. " What is an Isothermal Process in Physics?." [Online] . Available : <https://www.thoughtco.com/isothermal-process-2698986>. 2017
- [29] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. "ระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodinamics systems)." [Online]. Available : http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/ap-physics2/lesson10_1.html. 2017
- [30] Mahidol Wittayanusorn School. "เทอร์โมไดนามิกส์." [Online]. Available : http://www.mwit.ac.th/~teppode/DOCUMENT_THERMODYNAMICS_4ed.pdf. 2017
- [31] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, เกียรติคุณ รัตนานนท์ และนิธิยา รัตนานนท์. "Drying rate / อัตราการทำแห้ง Drying rate / อัตราการทำแห้ง." [Online]. Available : <http://www.fao.org/docrep/X5036E/x5036E0x.htm>. 2017
- [32] หน่วยส่งเสริมและพัฒนาสหกรณ์ สำนักงานสหกรณ์จังหวัดปทุมธานี. "การลดความชื้นเปลือก." [Online]. Available : http://webhost.cpd.go.th/plancpd/download/KM_province/14/pratumtani.pdf. 2017
- [33] รตินันท์ เหลือมพล. "สมการอบแห้งแบบชั้นบางของแครอทโดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับปั๊มความร้อน." [Online]. Available : <http://ojs.kmutnb.ac.th/files/journals /7 / articles /1044/submission/editor/1044-2580-1-ED.pdf>. 2017
- [34] พิชิต สอนทวย, วิโรจน์ ไข่มุขเลิศฤทธิ์ และฤทธิชัย อัครวราชันย์. "จลนพลศาสตร์การอบแห้งไขมันชั้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ" การประชุมวิชาการอุตสาหกรรมเกษตร สจล., ปีที่ 2, ฉบับที่2, สิงหาคม 2556. หน้า 37-44
- [35] บัณฑิต กฤตาคม, ปฎิวัติ วรามิตร, นันทวัฒน์ วีระยุทธ, อำไพศักดิ์ ทีบุญมา และโสภณ สินสร้าง. "แบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อน" [Online]. Available : <http://web.eng.ubu.ac.th/~seminar/research/Journal/Publication%20vol%206.1.2556/1.Paper%20No.1.pdf>. 2017

- [36] Thanimkarn S. and Jongyingcharoen J.S. "Thin-layer drying characteristics of *Cissus Quadrangularis* Linn. and selection of suitable drying models". **The TSAE international conference** , vol.7, 2 – 4 April 2014.
- [37] Kaosa-ard, T. and Songsermpong, S. "Influence of germination time on the GABA content and physical properties of germinated brown rice." **Asian Journal of Food and Agro-Industry**, vol.5, 2012. pp.270-283.
- [38] บุชญา รัตนสุภา. "ข้าวกล้องงอก" [Online]. Available : <http://www.vcharkarn.com /varticle /39050>. 2017
- [39] สำนักพัฒนาการถ่ายทอดเทคโนโลยี กรมส่งเสริมการเกษตร. "GABA สารอาหารมหัศจรรย์ในเมล็ดข้าว" [Online]. Available : <http://actech.agritech.doae. go.th /techno /other/ GABA% 20.pdf>. 2017
- [40] Miura D, Ito Y., Mizukuchi A., Kise M., Aoto H. and Yagasaki K.. " Hypocholesterolemic action of pre-germinated brown rice in hepatoma-bearing rats." **Journal of Life Science**, vol.76, 2006. pp.259-264.
- [41] Liao W.C., Wang C.Y., Shyu Y.T. and Yu R.C. "Influence of pre-processing methods and fermentation of adzuki beans on gamma- aminobutyric acid (GABA) accumulation by latic acid bacteria." **Journal of Functional Foods**, vol.5, 2013. pp.1108-1115.
- [42] Seiki T., Nagase R., Torimitsu M., Yanagi M., Ito Y., Kise M., Mizukuchi A., Fujimura N , Hayamizu K. and Ariga T. " Insoluble fiber is a major constituent responsible for lowering the post-prandial blood glucose concentration in the pre- germinated brown rice." **Journal of Biological and Pharmaceutical Bulletin**, vol.28, 2005. pp.1539-1541.
- [43] Oh S.H, Soh J.R. and Cha Y.S. "Germinated brown rice extract shows a nutraceutical effect in the recovery of chronic alcohol-related symptoms." **Journal of Medicinal Food**, vol.6, 2003. pp.115-121
- [44] ศูนย์วิจัยข้าวอุบลราชธานี. "ข้าวกล้องงอก (Gaba Rice)" [Online]. Available : http://www.recovery. ac.th /article /gaba _rice.htm. 2017
- [45] วิรัชพัชร อินยาวีเลิศ. "ข้าวกล้องงอก" [Online]. Available : <https:// beerlly.wordpress.com /2012/05/26/%> . 2017
- [46] วรัมพร วงศ์สุติน, พัชราภรณ์ รัตนธรรม, ณัฐฐา เลหากุลจิตต์ และ อรพิน เกิดชูชื่น. "การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารสำคัญในข้าวกล้องงอก" [Online]. Available: <http://www.crdc.kmutt.ac.th /Data% 202012/CRDC6/data/553-556.pdf>. 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [47] ทีมงานครอบครัวครูบ้านนอกดอทคอม. “น้ำข้าวกล้องงอก ของดีทำง่าย” [Online]. Available :<http://www.kroobannok.com/article-4561-น้ำข้าวกล้องงอก-ของดีทำง่าย-.html>. 2017
- [48] สถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. “ข้าวกล้องงอกทำง่ายได้ประโยชน์สูง” [Online]. Available : http://www.ird.rmutt.ac.th/?wpfb_dl=520. 2017
- [49] ชาญวิทย์ รัตนราศรี. “ข้าวกล้องงอก กาบาริซ (GABA-rice) นวัตกรรมผลิตภัณฑ์ข้าวไทยในตลาดโลก” [Online]. Available : <http://www.nia.or.th/innolinks/200701/innovtrend.htm>. 2017
- [50] เทคโนโลยีชาวบ้าน. “กลิ่นหอมละมุน เปี่ยมคุณค่า ของข้าวพันธุ์พื้นเมืองจากภูมิปัญญาไทย” [Online]. Available: http://siweb.dss.go.th/QA/search/search_description.asp?QA_ID=980. 2017
- [51] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. “Gamma aminobutyric acid / GABA” [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1269/gamma-aminobutyric-acid-gaba>. 2017
- [52] Nakamura H., Takishima T., Kometani T. and Yokogoshi H. “Psychological stress-reducing effect of chocolate enriched with μ -aminobutyric acid (GABA) in humans: assessment of stress using heart rate variability and salivary chromogranin A”, *International Journal of food Sciences and Nutrition*. vol.60, 2009. pp.106-113
- [53] Tea institute Mae Fah Luang University. “GABA IN TEA” [Online]. Available : <http://www.teainstitutemfu.com/document/GABATea.pdf>. 2017
- [54] วรัชยา วงษ์หาญ, .คณิต วิชิตพันธุ์ และสุกานดา วิชิตพันธุ์. “การผลิตไส้กรอกออสเสริมแกมมาอะมิโนบิวทริกแอซิด (กาบา)โดยใช้เชื้อบริสุทธิ์” [Online]. Available : <http://gsbooks.gs.kku.ac.th/58/the34th/pdf/BMP22.pdf>. 2017
- [55] เทวิกา กิรติบุรณะ และวรนุช ศรีเจษฎารักษ์. “ผลของการอบแห้งแบบถาดของข้าวกล้องขาวดอกมะลิ 105 งอกต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ” *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัย ขอนแก่น*, ปีที่12, 2554. หน้า 729-734.
- [56] กรรณิการ์ ห้วยแสน, จิระพันธ์ ห้วยแสน, ชาญณรงค์ ชมนาวัง, หนูเดือน สาระบุตร และพัฒนา พึ่งพันธุ์. “วิธีการเตรียมและการอบแห้งต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของข้าวฮางอกจากข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105” *วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ฉบับพิเศษ การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5*, ปีที่5, 2556. หน้า 376-383.
- [57] อินทาวุธ สรรพพรสถิตย์, กรุณาพร ปานวรรณ, ชูติกา เกียรติเรืองไกร และสายวรุฬ ชัยวานิชศิริ “ผลของวิธีการหุงต่อปริมาณกรดแกมมาอะมิโนบิวทริก (กาบา) และสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องงอก” *วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม*, ปีที่ 10, ฉบับที่ 1, ตุลาคม 2557 - กันยายน 2558. หน้า 31-41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [58] สุกัญญา แซ่เตียว. “อิทธิพลของการทำแห้งต่อสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและคุณภาพของข้าวหอมนิลฮางงอก.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2559.
- [59] จิรวัดน์ ลักษณะม้าย, ไตรรงค์ มูลขารี และศิริมาศ โหรรรัตน์. “การผลิตข้าวกล้องงอกหุงสุกปลอดเชื้อด้วยรังสีอัลตราโอเลต.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556
- [60] Jongyingcharoen J. S. and Cheevitsopon E. “Development of UV-treated cooked germinated brown rice and effect of UV-C treatment on its storability, GABA content, and quality.” *LWT - Food Science and Technology*, vol.71, 2016. pp.243-248.
- [61] AOAC. **Official Methods of Analysis**. Ed 18th. Washington DC : Association of Official Analytical Chemists Methods of Analysis, Inc 2005.
- [62] Sripinyowanich J. and Noomhorm A. “A new model and quality of unfrozen and frozen cooked rice dried in a microwave vibro-fluidized bed dryer.” *Drying Technology*, vol.29, 2011. pp.735-748
- [63] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. “คู่มือฝึกอบรม การประเมินศักยภาพการอนุรักษ์พลังงาน” [Online]. Available : http://www2.dede.go.th/bhrd/old/Download/file_handbook/M_T_Building/assen_latency_Handbook.pdf. 2017
- [64] สมชาย กัดสุข. “การประเมินสมบัติเชิงความแข็งของข้าวในโรงงานปรับปรุงคุณภาพข้าว โดยใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556
- [65] Misha S., Mat S., Ruslan M.H. and Sopian K. “Review of solid/liquid desiccant in the drying application and its regeneration methods.” *Journal of renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.16, 2012. pp.4686-4707.

ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

1. Palida Suvanvisan, Ekkapong Cheevitsopon and Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen. 2017. “Thin-Layer Drying Models for Dehumidified Hot Air Drying of Germinated Brown Rice.” 36-41 in **The 18th TSAE National Conference and The 10th TSAE International Conference (TSAE2017)**. IMPACT Exhibition & Convention center, Bangkok, Thailand; 7-9 September 2017
2. Palida Suvanvisan, Ekkapong Cheevitsopon and Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen. 2018. “Study on psychrometric properties of air in a hot air drying system combined with a desiccant wheel.” **TSAE Journal**. 24(1) : 6-12.

TSAE 2017

การประชุมวิชาการ
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ระดับชาติ ครั้งที่ 18 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 10
ประจำปี 2560
The 18th TSAE National Conference and
The 10th TSAE International Conference
(TSAE 2017)

ณ อิมแพค เมืองทองธานี
กรุงเทพมหานคร
7-9 กันยายน 2560
จัดโดย สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ร่วมกับ กรมส่งเสริมการเกษตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Thin-Layer Drying Models for Dehumidified Hot Air Drying of Germinated Brown Rice

Palida Suvanvisan¹, Ekkapong Cheevitsopon², Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen^{1*}

¹Curriculum of Agricultural Engineering, Department of Mechanical Engineering.

²Department of Food Engineering Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrang, Bangkok, Thailand.

Corresponding author: Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen. E-mail jiraporn.jo@kmitl.ac.th

Abstract

This study aimed to evaluate suitable thin-layer drying models for germinated brown rice (GBR) undergoing dehumidified hot air drying. Dehumidified hot air drying of GBR to the final moisture content of 12% wet basis was conducted in a hot air drying system with a desiccant wheel (HA-DW). Drying curves as influenced by drying temperature (80, 100, and 120°C) and air flow rate (0.04, 0.06, and 0.08 m³/s) were plotted. The shortest drying time of 45 min was achieved by drying GBR at the highest drying temperature of 120°C and the greatest air flow rate of 0.08 m³/s. Comparison of R² and RMSE values of selected 8 drying models showed that the Midilli et al. model gave better fit. The average R² and RMSE of 0.9991 and 0.0045 were achieved respectively.

Keywords: Drying modeling, Desiccant wheel, Hot air drying, Germinated brown rice.

1. Introduction

Thin-layer drying is the process of removal of water from a material by passing drying air through a thin layer of the material until reaching the desirable moisture content. Moisture removal from agricultural products typically presents direct relationship among drying temperature, drying air velocity, relative air humidity, and variety and maturity (Yadollahinia et al., 2008). One of the most important studies on thin-layer drying of materials is the study on mathematical modeling of the drying process. Drying model is significantly useful in selection of the ideal drying conditions. It can be used to estimate a drying curve and predict drying behavior of materials such as moisture content, drying time, and heat and mass transfer. It also provides important parameters of drying optimization and product quality improvement (Giri and Prasad, 2007).

Although thin-layer drying modeling has been reported in numerous research, there is no study on modeling of drying process of hot air drying system with a desiccant wheel (HA-DW). The HA-DW system was developed to provide dehumidified air in the drying system. Low relative humidity in the drying chamber could contribute to higher drying rate, shorter drying time and moisture homogeneity inside the drying material (Dina et al., 2015; Naidu et al., 2016). Moreover, the dehumidification system may offer

several advantages such as low initial costs, environmental friendliness, and energy saving (Madhiyanon et al., 2007).

Regarding to the drying material of this study, i.e. germinated brown rice (GBR), it is promoted for high nutrients such as γ -aminobutyric acid (GABA), dietary fibre, oryzanol, vitamin E and vitamin B (Kaosa-ard and Songsermpong, 2012). GABA has several physiological advantages such as being an inhibitory neurotransmitter in the cerebrospinal fluid of mammals (Liao et al., 2003), reducing plasma cholesterol level (Miura et al., 2006), improving blood glucose level (Seiki et al., 2005), and preventing chronic alcohol-related diseases (Oh et al., 2003).

Therefore, the present study was focused on developing thin-layer drying models of drying of GBR using the HA-DW system. Drying characteristics of GBR drying using the HA-DW system were also discussed.

2. Materials and Methods

2.1 Experimental Material

Brown rice of khao Dawk Mali 105 variety was used as a sample of this study. The sample was vacuum-packed and stored at 4°C. Before using in each experiment, it was brought to room temperature.

To prepare GBR, the brown rice sample was soaked at 35°C for 4 h and germinated at the same temperature for



20 h. The GBR has a moisture content up to 30-33% (w.b). The final moisture content required for dried GBR is 10-13% w.b. for safe storage (Jongyingcharoen and Cheevitsopon, 2016).

2.2 Experimental Dryer

Figure 1 shows an experimental set-up of the HA-DW system. The system is composed of three main components including a rotary DW, a dryer, and an air-to-air heat exchanger.

The rotary DW with silica gel (a desiccant material) was combined to a hot air drying system. The stainless steel DW was 700 mm diameter x 50 mm thickness. It was divided into two equal sections, i.e. adsorption and regeneration sections. These sections were run simultaneously by means of continuous rotation between the ambient humid air through the adsorption section and the heated regenerative air through the regeneration section. It was driven by a motor (RS Motor Industry, Taiwan) at 0.5 rpm. Lower relative humidity of 8-13% was achieved in this system.

The cylindrical drying chamber was 200 mm inner diameter x 300 mm length. The blowers (1 HP, MA40B, EuroVent, Thailand) were used to supply air for drying and regeneration, respectively. The air was heated to required temperatures by 3.74-kW electrical heaters (Technology Instruments, Thailand).

The heat exchanger was made of aluminium with a heat exchanging area of 50 m². It was designed to receive the inlet heated air from the drying unit and exchange the heat to the inlet ambient air for regenerating the DW.

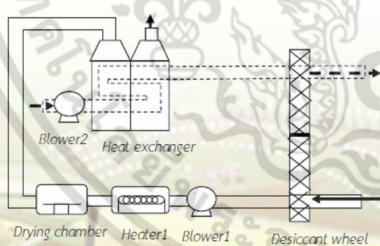


Figure 1 A schematic diagram of a HA-DW system

2.3 Experimental Procedure

The drying experiments were conducted at the drying temperatures of 80, 100 and 120°C and the flow rate of

0.04, 0.06 and 0.08 m³/s. The fixed temperature of 90°C and flow rate of 0.04 m³/s was used for the regeneration process. GBR of 1-cm grain bed depth (180 g) was fed into the drying chamber and dried until reaching the final moisture content of 12% w.b. During the process of drying, the sample was weighed at each predetermined interval for moisture content measurement. To determine its dry matter content, the sample was dried in a hot air oven at 105°C for 24 h (AOAC, 2005). The experiments were duplicated.

2.4 Theoretical Considerations

2.4.1 Calculation of Moisture Ratio and Drying Rate

The moisture ratio (MR) and drying rate (DR) were calculated as follows:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (1)$$

$$DR = \frac{M_i - M_t}{dt} \quad (2)$$

where M_i , M_t , M_e and $M_t + dt$ are moisture content (g water/g dry matter) at initial, specific time, equilibrium and $t + dt$, respectively and t is drying time (min). However, M_e was assumed to be zero for drying at high temperature (Sripinyowanich and Noomhorm, 2011).

2.4.2 Mathematical Modeling of Drying Curves

The drying characteristics of GBR drying using HA-DW were modeled based on 8 thin-layer drying models as shown in Table 1.

Table 1 Thin layer drying models applied for HA-DW drying of GBR

Model No.	Model name	Model
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Pabis	$MR = a \exp(-kt) + c$
5	Logarithmic Two term	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
6	Approximation of diffusion	$MR = (a \exp(-kt)) + (1-a) \exp(-kt)$
7	Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
8	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$

Coefficient of determination (R²) and root mean square error (RMSE) were used to evaluate goodness of fit of the models to the experimental data. The higher the R² and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



the lower the RMSE were indicated the best the model fit. These statistical criteria were calculated as follows:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n MR_{pre,i} \times MR_{exp,i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (MR_{pre,i})^2 \times \sum_{i=1}^n (MR_{exp,i})^2}} \quad (3)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

where MR_{exp,i} and MR_{pre,i} are the *i*th experimental and predicted moisture ratio, respectively. N is the number of observations.

3. Results and Discussion

3.1 Drying Characteristics

Drying curves of HA-DW drying of GBR at different drying temperatures are shown in Figures 2-4 for the air flow rates of 0.04-0.08 m³/s, respectively. The results show that increasing drying temperature and air flow rate increased the drying rate and consequently decreased the drying time. As shown in Table 2, the shortest drying time of 45 min was achieved by drying GBR at the highest drying temperature of 120°C and the greatest air flow rate of 0.08 m³/s. The greatest maximum drying rate of 0.0125 g water/g dry matter-min was achieved at this condition as well.

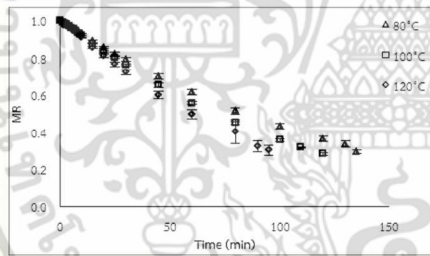


Figure 2 Drying curves of HA-DW drying of GBR at 0.04 m³/s and different drying temperatures.

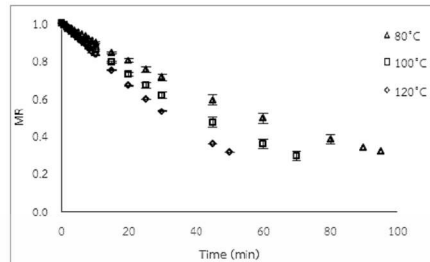


Figure 3 Drying curves of HA-DW drying of GBR at 0.06 m³/s and different drying temperatures.

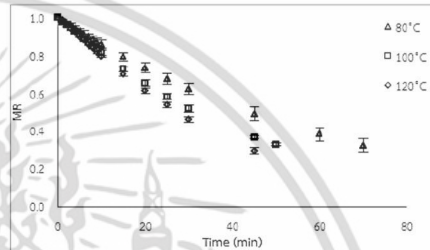
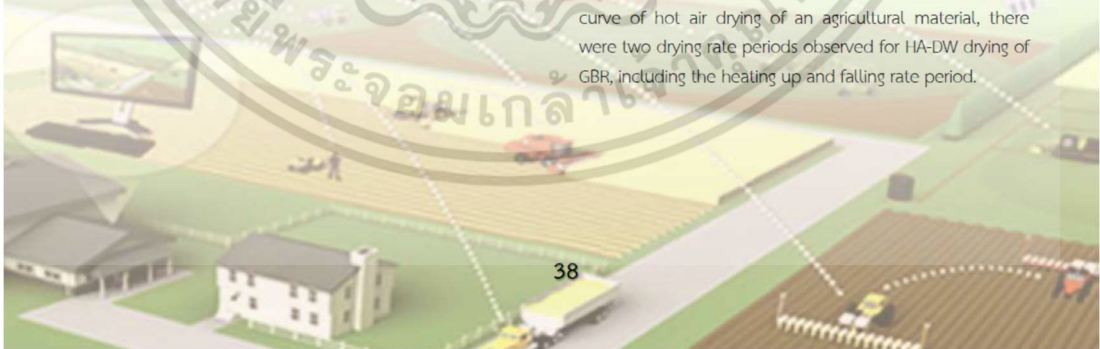


Figure 4 Drying curves of HA-DW drying of GBR at 0.08 m³/s and different drying temperatures.

Table 2 Drying time and maximum DR for HA-DW system of GBR.

Drying condition		Drying time	Maximum DR
Q (m ³ /s)	T (°C)	(min)	(g water/g dry matter min)
0.04	80	130	0.0039
	100	120	0.0043
	120	95	0.0047
0.06	80	95	0.0055
	100	70	0.0083
	120	50	0.0087
0.08	80	70	0.0074
	100	50	0.0100
	120	45	0.0125

From Figures 5-7, like general pattern of drying rate curve of hot air drying of an agricultural material, there were two drying rate periods observed for HA-DW drying of GBR, including the heating up and falling rate period.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

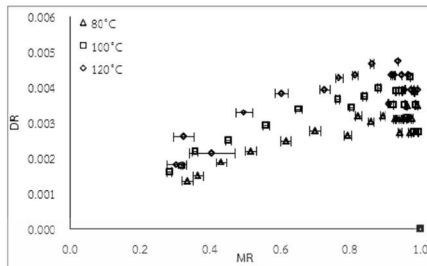


Figure 5 Drying rate curves of HA-DW drying of GBR at 0.04 m³/s and different drying temperatures.

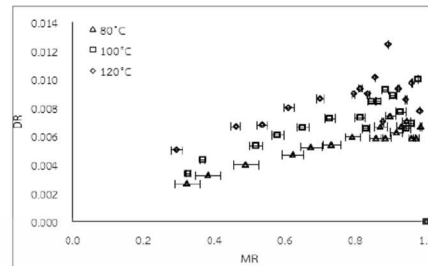


Figure 7 Drying rate curves of HA-DW drying of GBR at 0.08 m³/s and different drying temperatures.

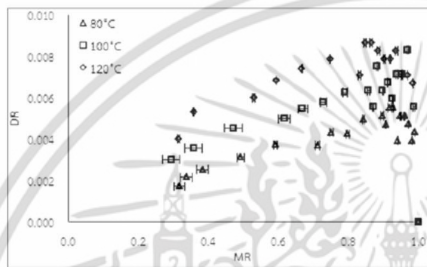


Figure 6 Drying rate curves of HA-DW drying of GBR at 0.06 m³/s and different drying temperatures

3.2 Mathematical drying method

The results of drying model constant and coefficients and statistical criteria (R^2 and RMSE) expressing goodness to fit of the models are shown in Table 3. This table shows only four models having the R^2 values greater than 0.998 (Page, Logarithmic, Midilli et al. and Wang and Singh models, respectively). Comparison of R^2 and RMSE values of the selected drying models showed that the Midilli et al. model gave better fit. The average values of two parameters (R^2 and RMSE) were 0.9991 and 0.0045, respectively. Figures 8-10 present the comparison between the experimental data of HA-DW drying of GBR to the predicted data given by the Midilli et al. model at each air flow rate and different drying temperatures. It can be seen that there was a very good agreement between the experimental and predicted moisture ratios at each drying time.

Table 3 Constants, coefficients and statistical criteria (R^2 and RMSE) for HA-DW drying of GBR.

Model No.	Condition Q (m ³ /s)	T (°C)	Constant and coefficient		R^2	RMSE
2	0.04	80	k=0.0063	n=1.0620	0.99957	0.00500
		100	k=0.0047	n=1.1700	0.99273	0.02097
		120	k=0.0072	n=1.1150	0.99934	0.00601
	0.06	80	k=0.0096	n=1.0500	0.99995	0.00164
		100	k=0.0132	n=1.0620	0.99983	0.00281
		120	k=0.0131	n=1.1450	0.99994	0.00164
	0.08	80	k=0.0143	n=1.0280	0.99997	0.00113
		100	k=0.0186	n=1.046	0.99991	0.00204
		120	k=0.0179	n=1.1070	0.99990	0.00208

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Model No.	Condition		Constant and coefficient				R ²	RMSE	
	Q (m ³ /s)	T (°C)							
4	0.04	80	k=0.0065	a=1.1900	c= -0.1895		0.99967	0.00435	
		100	k=0.0055	a=1.5130	c= -0.5057		0.99186	0.02219	
		120	k=0.0078	a=1.3390	c= -0.3324		0.99931	0.00615	
	0.06	80	k=0.0105	a=1.0900	c= -0.0844		0.99991	0.00215	
		100	k=0.0132	a=1.1750	c= -0.1734		0.99996	0.00131	
		120	k=0.0137	a=1.4160	c= -0.4056		0.99952	0.00472	
	0.08	80	k=0.0150	a=1.0460	c= -0.0431		0.99995	0.00147	
		100	k=0.0193	a=1.0950	c= -0.0916		0.99980	0.00298	
		120	k=0.0186	a=1.2640	c= -0.2560		0.99968	0.00364	
	7	0.04	80	k=0.0066	n=1.0320	a=0.9989	b= -0.0003	0.99969	0.00423
			100	k=0.0036	n=1.2510	a=0.9907	b=0.0004	0.99298	0.02061
			120	k=0.0077	n=1.0760	a=1.0010	b= -0.0005	0.99941	0.00567
0.06		80	k= -0.0004	n=1.5260	a=1.0040	b= -0.0119	0.99990	0.00234	
		100	k=0.0138	n=1.0250	a=1.0000	b= -0.0007	0.99998	0.00108	
		120	k= -0.0220	n=0.9003	a=1.0000	b= -0.0358	0.99992	0.00187	
0.08		80	k=0.0144	n=1.0270	a=1.0010	b=0.0000	0.99998	0.00102	
		100	k=0.0181	n=1.0600	a=0.9985	b=0.0002	0.99991	0.00197	
		120	k=0.0183	n=1.0870	a=1.0010	b= -0.0005	0.99994	0.00161	
8		0.04	80	a= -0.0074	b=0.000017			0.99964	0.00460
			100	a= -0.0079	b=0.000016			0.99182	0.02224
			120	a= -0.0098	b=0.000026			0.99916	0.00681
	0.06	80	a= -0.0107	b=0.000037			0.99988	0.00256	
		100	a= -0.0148	b=0.000068			0.99995	0.00151	
		120	a= -0.0179	b=0.000081			0.99914	0.00634	
	0.08	80	a= -0.0147	b=0.000073			0.99988	0.00228	
		100	a= -0.0200	b=0.000131			0.99989	0.00226	
		120	a= -0.0219	b=0.000138			0.99961	0.00403	

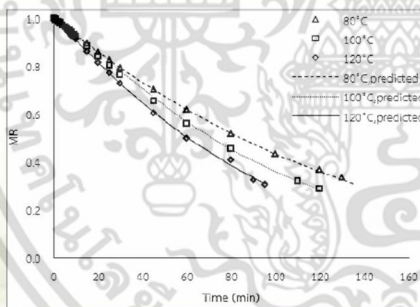


Figure 8 Experimental and predicted drying curves of HA-DW drying of GBR at 0.04 m³/s and different drying temperatures.

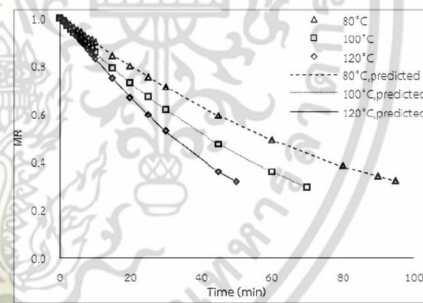


Figure 9 Experimental and predicted drying curves of HA-DW drying of GBR at 0.06 m³/s and different drying temperatures.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

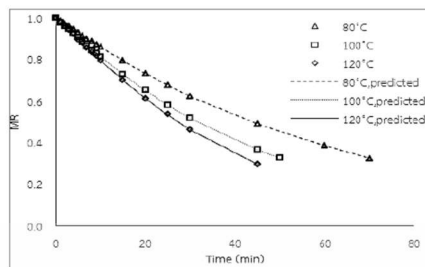


Figure 10 Experimental and predicted drying curves of HA-DW drying of GBR at $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ and different drying temperatures.

4. Conclusions

Drying characteristics of HA-DW drying of GBR were provided at the air flow rates of $0.04\text{-}0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ and the drying temperatures of $80\text{-}120^\circ\text{C}$. Air flow rate and drying temperature had a considerable effect on drying time and drying rate. Increased air flow rate and drying temperature led to increased drying rate and short drying time. The shortest drying time of 45 min was achieved by drying GBR at the greatest air flow rate of $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ and the highest drying temperature of 120°C . The best fitted drying model for HA-DW drying of GBR was the Midilli et al. model ($MR = a \exp(-kt^n) + b$). It resulted in the highest average R^2 of 0.9991 and the lowest RMSE of 0.0045.

5. Acknowledgements

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

6. References

- AOAC. 2005. Association of Official Analytical Chemists Methods of Analysis, 18th ed. AOAC: Washington, DC.
- Dina, S.F., Ambarita, H., Napitupulu, F.H., and Kawai, H. 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.
- Giri, S.K. and Prasad, S. 2007. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave vacuum and convective-hot air-dried mushrooms. *Journal of Food Engineering*, 78, 512–521.
- Jongyingcharoen, J.S. and Cheevitsopon, E. 2016. Development of UV-treated cooked germinated brown rice and effect of

UV-C treatment on its storability, GABA content, and quality. *LWT - Food Science and Technology*, 71, 243–248.

- Kaosa-ard, T. and Songsermpong, S. 2012. Influence of germination time on the GABA content and physical properties of germinated brown rice. *Asian Journal of Food and Agro-Industry*, 5, 270–283.
- Liao, W.C., Wang, C.Y., Shyu, Y.T., and Yu, R.C. 2013. Influence of pre-processing methods and fermentation of adzuki beans on gamma-aminobutyric acid (GABA) accumulation by lactic acid bacteria. *Journal of Functional Foods*, 5, 1108–1115.
- Madhiyanon, T., Adirekrut, S., Sathitruangsak, P., and Soponronnarit, S. 2007. Integration of a rotary desiccant wheel into a hot-air drying system: Drying performance and product quality studies. *Journal of Chemical Engineering and Processing*, 46, 282–290.
- Miura, D., Ito, Y., Mizukuchi, A., Kise, M., Aoto, H., and Yagasaki, K. 2006. Hypocholesterolemic action of pre-germinated brown rice in hepatoma-bearing rats. *Journal of Life Science*, 76, 259–264.
- Naidu, M.M., Vedashree, M., Satapathy, P., Khanum, H., Ramsamy, R., and Hebbar, H.U. 2016. Effect of drying methods on the quality characteristics of dill (*Anethum graveolens*) greens. *Journal of Food Chemistry*, 192, 849–856.
- Oh, S.H., Soh, J.R., and Cha, Y.S. 2003. Germinated brown rice extract shows a nutraceutical effect in the recovery of chronic alcohol-related symptoms. *Journal of Medicinal Food*, 6, 115–121.
- Seiki, T., Nagase, R., Torimitsu, M., Yanagi, M., Ito, Y., Kise, M., Mizukuchi, A., Fujimura, N., Hayamizu, K., and Ariga, T. 2005. Insoluble fiber is a major constituent responsible for lowering the post-prandial blood glucose concentration in the pre-germinated brown rice. *Biol Pharm Bull*, 28, 1539–1541.
- Sripinyowanich, J. and Noomhorm, A. 2011. A new model and quality of unfrozen and frozen cooked rice dried in a microwave vibro-fluidized bed dryer. *Drying Technology*, 29, 735–748.
- Yadollahinia, A.R., Omid, M., and Rafiee, S. 2008. Design and fabrication of experimental dryer for studying agricultural products. *International Journal of Agriculture and Biology*, 10, 61–65.



Study on psychrometric properties of air in a hot air drying system combined with a desiccant wheel

Palida Suvanvisan¹, Ekkapong Cheevitsopon², Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen^{1*}

¹Curriculum of Agricultural Engineering, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

²Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

*Corresponding author: Tel: +66-2329-8337, Fax: +66-2329-8336, E-mail: jiraporn.jo@kmitl.ac.th

Abstract

A hot air drying system combined with a desiccant wheel (HA-DW) was developed in this study to provide dehumidified air in the system. The rotary desiccant wheel (DW) with silica gel could reduce humidity of fresh air as shown by its lower relative humidity (RH) and humidity ratio of 33.9% and 16 g water/kg dry air, respectively. The RH and humidity ratio of regenerative air at the temperature of 60°C exiting the DW were increased from 15.5% to 42.6% and from 19 g water/kg dry air to 26 g water/kg dry air, respectively. In the HA-DW system with a given drying temperature of 90°C, the RH of 42.6% (17.5 g water/kg dry air) at the inlet decreased to 9% (7.5 g water/kg dry air) at the outlet of the DW during dehumidification. In the section of DW regeneration, the RH increased by 13.8% (7.5 g water/kg dry air added) after passing through the DW. The HA-DW system was proved to provide this drying system with lower humidity following the theoretical dehumidification and regeneration process in a psychrometric chart.

Keywords: Desiccant wheel, Hot air drying, Desiccant, Silica gel, Psychrometric properties

1 Introduction

Using a dehumidification process in hot air drying is advantageous for improvement of drying characteristics and dried product quality. Low RH which promotes the efficient water removal could be observed in this drying system. Naidu et al. (2016) has shown that lightness, greenness, and yellowness of dill greens dried by low humidity hot air were higher than those of the samples dried by hot air. The low humidity air drying of dill greens (50°C, 28-30%RH) also contributed to its higher anti-oxidant activity as compared to conventional hot air drying at the same temperature (50°C, 58-63%RH).

A rotary DW is one of the most promising dehumidification of air conditioning system. It could be incorporated into a hot air drying system as an alternative way of drying. Regarding to process development, desiccant dehumidification system may offer several advantages such as low initial costs, environmental friendliness, and energy saving (Madhiyanon et al, 2007).

Therefore, this study was focused on development of a HA-DW system and determination of psychrometric properties of air in the system.

2 Materials and Methods

2.1 A hot air drying system with a DW

Figure 1 shows the experimental set-up of the HA-DW system. This system is composed of three main components including a rotary DW, a dryer, and an air-to-air heat exchanger.

The rotary DW with silica gel (desiccant material) was equipped with a hot air drying system. The stainless steel DW was 700 mm diameter x 50 mm thickness. It was divided into two equal sections, i.e. adsorption and regeneration sections. These sections were run simultaneously by means of continuous rotation between the ambient humid air through the adsorption section and the heated regenerative air through the regeneration section. It was driven by a motor (RS Motor Industry, Taiwan) at 0.5 rpm.

Thai Society of Agricultural Engineering Journal Vol. 24 No. 1 (2018), 6-12

The cylindrical drying chamber was 200 mm inner diameter x 300 mm length. The blowers (1 HP, MA40B, EuroVent, Thailand) were used to supply air for drying and regeneration, respectively. The air was heated to required temperatures by 3.74-kW electrical heaters (Technology Instruments, Thailand).

The heat exchanger was made of aluminium with a heat exchanging area of 50 m². It was designed to transfer receive the inlet heated air from the drying unit and exchange the heat to the inlet ambient air for regenerating the DW.

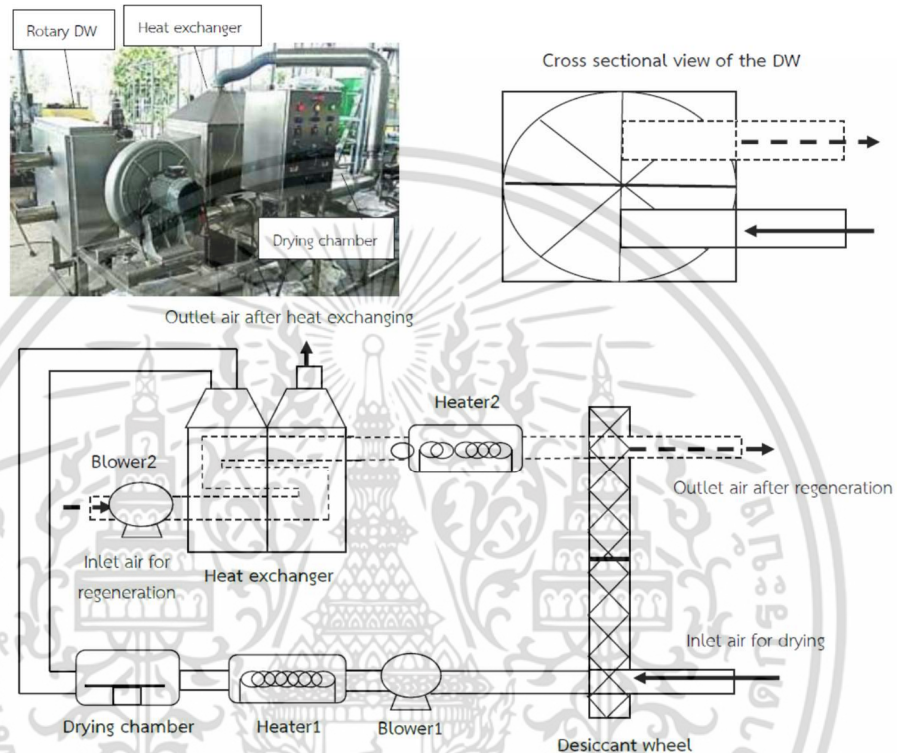


Figure 1 A schematic diagram of a HA-DW system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 Performance of a DW dehumidification system

2.2.1 Dehumidification process

Figure 2 shows the schematic diagram of the dehumidification process unit. The DW contained 3-kg fresh silica gel with the thickness of 1 cm. The ambient humid air (daytime, 35.9°C, 50.2%RH and 19 g water/kg dry air) passed through the DW at the flow rate of 0.04 m³/s (0.044 kg dry air/s). During the process, a temperature/ hygrometer (KT320, Kimo, France) was used to measure RH and temperature of the processed air. The experiment was conducted for 30 min with the measuring intervals of every 1 min for the first 10 min and every 5 min for the last 20 min.

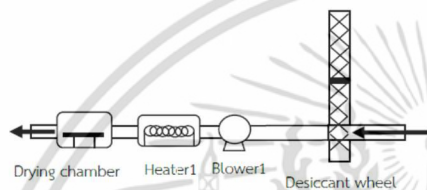


Figure 2 A schematic diagram of the dehumidification process unit.

2.2.2 Regeneration process

Figure 3 shows the schematic diagram of the regeneration process unit. The silica gel inside the DW was allowed to absorb moisture at the ambient condition for 5 hrs until it became pink prior to experiment. The heated air with the temperatures of 60°C and the flow rate of 0.04 m³/s (0.041 kg dry air/s) was used to regenerate the silica gel. The air supplied in this process was heated up by a supplement heater 2. The RH and temperature of this process were measured at the same intervals as stated in 2.2.1

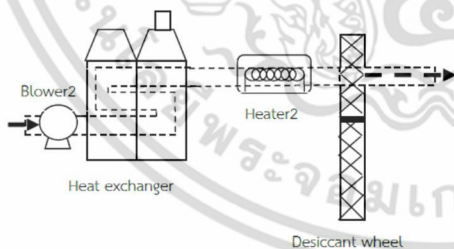


Figure 3 A schematic diagram of the regeneration process unit.

2.3 Psychrometric properties of air in a hot air drying system with a DW

Figure 4 shows the schematic diagram of a HA-DW system. There are two simultaneous processes including the dehumidification process (line A) and the regeneration process (line B). In the dehumidification process, the ambient air was introduced to the process at A1, reduced its moisture by the DW, heated by the heater, used for drying, and then passed through the heat exchanger for exchanging its heat with the ambient air from line B. In the regeneration process, the ambient air was inducted at B1, increased its temperature using the heat exchanger and passed through the DW for regenerating the silica gel. The heater 2 was closed during this experiment. The experiment was conducted at the temperature in a drying chamber of 90°C and the flow rate of 0.04 m³/s for both lines (0.044 kg dry air/s for line A and 0.040 kg dry air/s for line B). During the process, the RH and temperature of this process were measured at every 5 min for 30 min.

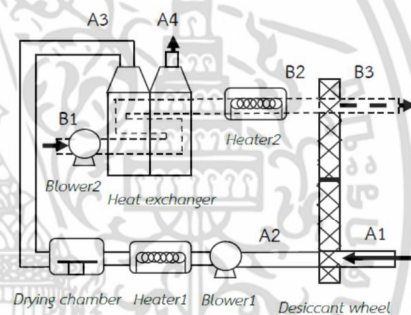


Figure 4 A schematic diagram of a HA-DW system with points of air condition assessment.

2.4 Desiccant wheel effectiveness

Effectiveness of the DW was determined using four equations, which were introduced by Mandegari and Pahlavanzadeh (2009). The DW effectiveness could be defined in terms of heat and mass transfer processes. The first equation is considered as thermal effectiveness as follows:

$$\epsilon = \frac{T_{d2} - T_{A1}}{T_{R2} - T_{A1}} \tag{1}$$

where T_{A1} , T_{A2} and T_{B2} are inlet and outlet dehumidification process air and inlet regenerative air temperature, respectively.

Assuming DW as a heat exchanger, the DW effectiveness could be derived from the heat exchanger effectiveness as given by Eq. (2):

$$\epsilon = \frac{(w_{A1}-w_{A2}) h_{fg}}{h_{B2}-h_{B1}} \quad (2)$$

where w and h are the specific humidity and the vaporization latent heat of water, respectively.

Based on the ideal dehumidification of DW in which the air is completely dehumidified and the humidity ratio of the outlet air of DW ($w_{A2,ideal}$) is zero, the expression of DW effectiveness could be:

$$\epsilon = \frac{w_{A1}-w_{A2}}{w_{A1}-w_{A2,ideal}} \quad (3)$$

where w_{A1} and w_{A2} was the specific humidity of the inlet and outlet air of DW.

As the theoretical operation of DW would be adiabatic, the following equation expresses the DW effectiveness with respect to the enthalpy deviation from the adiabatic condition, in which the effectiveness value reaches to 100% (Figure 5).

$$\epsilon = 1 - \frac{(h_{A2} - h_{A1})}{h_{A1}} \quad (4)$$

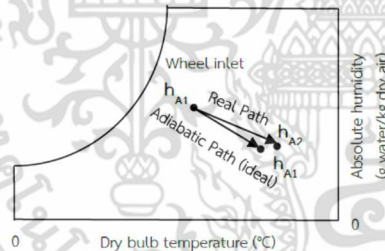


Figure 5 Adiabatic and real DW processes on psychrometric chart. (Modified from Mandogari and Pahlavanzadeh, 2009).

During the dehumidification process, DW could reduce RH and humidity ratio from 50.2% and 19 g water/kg dry air to 33.9% and 16 g water/kg dry air after running the process for 1 min, respectively. The temperature dramatically rised about 5% from 35.9°C to 41.1°C for the first 1-min process as well. As can be seen in Figure 6, the experimental dehumidification process aligned well with the theoretical adiabatic dehumidification process.

Figure 7 shows the relationship of RH and temperature of DW outlet air with dehumidification time. It was found that the RH tended to reduce throughout the process. The RH was decreased by 16% approximately after running the process for only first min, which was correspondent to the reduction of humidity ratio by 3 g water/kg dry air. The RH was slightly increased and its value was 37.9% at 30 min, which was reduced by about 12% from the ambient RH of 50.2%. It is obvious that the DW successfully dehumidified air condition in the system. These results were agreed with Dina et al. (2015). They reported that solar drying with desiccant thermal energy storage, which provided lower humidity inside the drying chamber and hence contributed to decrease in drying time. However, the temperature tended to be stable for the whole process operation. After 30 min, the temperature was 40.3°C, which was increased by about 4.4% from the ambient temperature.

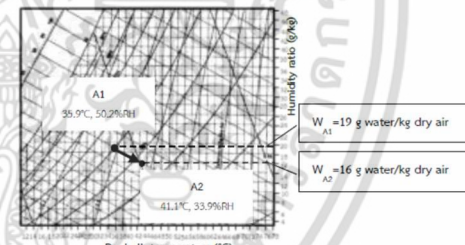


Figure 6 A psychrometric process of DW dehumidification.

3 Results and discussion

3.1 Performance of a DW dehumidification system

3.1.1 Dehumidification process

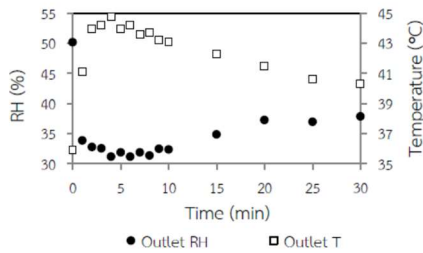


Figure 7 Relationship of RH and temperature at the outlet of the DW with adsorption time

3.1.2 Regeneration process

The psychrometric process of DW regeneration is shown in Figure 8. The changes of RH and temperature of DW outlet air during the regeneration process at 60°C are presented in Figure 9. An increase in RH of about 27% was observed when regenerating the silica gel for first 1 min from hot air of 60°C (15.5% and 19 g water/kg dry air). At this time, the corresponding humidity ratio was 7 g water/kg dry air for exiting DW of 42.6% (26 g water/kg dry air). After 30-min operation, the RH was 19%, which was increased by about 3.5% from the ambient RH (51.7%). It is obvious that the DW could be regenerated under this regeneration condition.

As expected, the temperature decreased by about 15% from 60°C to 44.8°C after regeneration the DW for first 1 min. After 30 min, the temperature of the outlet air was almost equal to that of the heated air supplied to the DW.

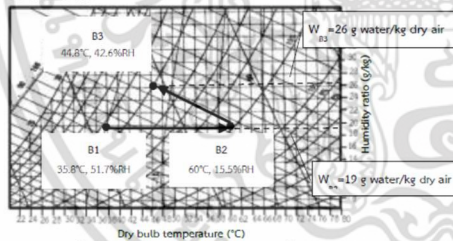


Figure 8 A psychrometric process of DW regeneration.

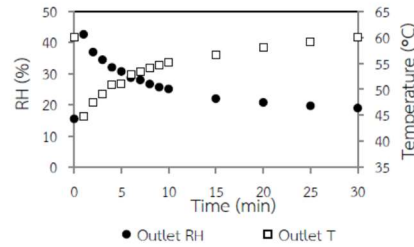


Figure 9 Relationship of RH and temperature at the outlet of the DW with desorption time at the regeneration temperature of 60°C.

3.2 Psychrometric properties of air in a hot air drying system with a DW

Figure 10 shows the relationship of RH and temperature of outlet air of the DW at the fixed drying temperature of 90°C. Similarly, dramatic decrease in RH was obtained at the five minute dehumidification. It is interesting that the desirable low RH was constantly observed for the whole period of dehumidification. The corresponding humidity ratios were in the range of 9 and 10 g water/kg dry air, which was reduced by about 7.5 g water/kg dry air from the ambient humid air. The RH changes during the regeneration process was obvious at the first five minutes as well. Dramatic increase and decrease in temperature of the outlet air were also observed at the first five minutes for the dehumidification and regeneration process.

The air condition at each point in the HA-DW system is shown in Figure 11. Humidity of air was reduced after passing through the DW from A1 to A2. The air was then heated to the temperature of 90°C and introduced to the heat exchanger at A3. After exchanging its heat, the air condition was determined at A4 to be 53.7°C and 27%RH. For the regeneration process, the inlet ambient air was supplied to B1, passed through the heat exchanger at B2 to increase its temperature, and then used to remove moisture from silica gel in the DW. It was observed that the outlet air condition of this process (B3) was 56.5°C and 22.9%RH.

The air properties observed in Figure 11 could be plotted in the psychrometric chart. The psychrometric process of air passing through the DW for both dehumidification and regeneration sides followed typical adiabatic process. The heater is used to

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

regenerate the DW and to control the process of air conditioning. The adiabatic efficiency will have an optimum value that depends on dehumidification and regeneration efficiency (Misha et al. 2012).

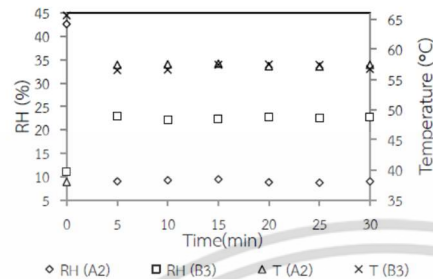


Figure 10 Relationship of RH and temperature at the outlet of DW during dehumidification (A2) and regeneration (B3) with processing time at the drying temperature of 90°C.

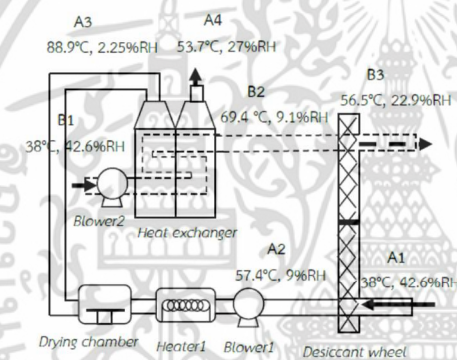


Figure 11 Schematic diagram of a HA-DW system with the air condition at each point after running the process for 30 min.

3.3 Desiccant wheel effectiveness

DW's effectiveness are shown in Table3. The properties of air in a hot air drying used in this study at 90°C. The effectiveness results showed that thermal, regeneration, dehumidification and adiabatic DW's would be gained by an optimum value operation which provided completely lower humidity inside the drying chamber. The specific absorption of silica gel for dehumidification process was 2.64 g water/kg dry air·kg silica gel·min

Table 1 Effectiveness of DW.

Effectiveness	Percentage (%)
Thermal effectiveness	69.28
Regeneration effectiveness	61.42
Dehumidification effectiveness	44.39
Adiabatic DW's effectiveness	98.49

4 Conclusions

The RH and humidity ratio decreased from 50.2 to 33.9% and from 19 to 16 g water/kg dry air during moisture adsorption by the DW, respectively. The temperature increased from 35.9 to 40.3°C

In the regeneration process at 60°C, the RH and humidity ratio increased from 15.5 to 42.6% and from 19 to 26 g water/kg dry air, respectively. The temperature decreased in the first period to 50°C and kept constant at 60°C in the last period.

In the HA-DW system, the RH and humidity ratio of the dehumidification process decreased from 42.6 to 9% and from 17.5 to 10 g water/kg dry air, respectively. The RH and humidity ratio of the regeneration process increased from 11 to 22.9% and from 17.5 to 25 g water/kg dry air, respectively.

The performance of the HA-DW system that thermal, regeneration, dehumidification and adiabatic desiccant wheel's effectiveness were 69.28, 61.42, 44.39 and 98.49%, respectively.

5 Acknowledgements

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

6 References

Dina, S.F., Ambarita, H., H. Napitupulu, F.H., Kawai, H. 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.

Madhiyanon, T., Adirekrut, S., Sathitruangsak, P., Soponronnarit, S. 2007. Integration of a rotary desiccant wheel into a hot-air drying system: Drying performance and product quality studies. Journal of Chemical Engineering and Processing 46, 282-290.

Mandegari, M.A., Pahlavanzadeh, H. 2009. Introduction of a new definition for effectiveness of desiccant

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ปีที่ 24 ฉบับที่ 1 (2561), 6-12

wheels. *Journal of Chemical Engineering* 34, 797–803.

Misha, S., Mat, S., Ruslan, M.H., Sopian, K. 2012. Review of solid/liquid desiccant in the drying application and its regeneration methods. *Journal of renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 4686–4707.

Naidu, M.M., Vedashree, M., Satapathy, P., Khanum, H., Ramsamy, R., Hebbar, H.U. 2016. Effect of drying methods on the quality characteristics of dill (*Anethumgraveolens*) greens. *Journal of Food Chemistry* 192, 849–856.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาว ปลิดา สุวรรณวิศาล
วัน เดือน ปีเกิด	4 พฤษภาคม 2537 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ที่อยู่ปัจจุบัน	754 แขวงหัวหมาก เขตบางกะปิ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10240
ที่อยู่ตามทะเบียนบ้าน	754 แขวงหัวหมาก เขตบางกะปิ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10240
ประวัติการศึกษา	2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร (เกียรตินิยม อันดับ2) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้