

ผลของการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่และแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน
ต่อคุณภาพของมะเขือม่วงผง

EFFECTS OF DRYING PROCESS WITH CONSTANT AIR TEMPERATURE AND
VARYING AIR TEMPERATURE ON QUALITIES OF EGGPLANT POWDER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2564
KMITL-2021-EN-M-270-017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECTS OF DRYING PROCESS WITH CONSTANT AIR TEMPERATURE AND
VARYING AIR TEMPERATURE ON QUALITIES OF EGGPLANT POWDER



PATCHAREEPORN POONSIRIWATTANA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2021
KMITL-2021-EN-M-270-017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2021

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองที่และแบบอุณหภูมิกาศแปรผันต่อคุณภาพของมะเขือม่วง
นักศึกษา	นางสาวพัชรีพร พูลศิริวัฒนา
รหัสประจำตัว	60601180
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร
พ.ศ.	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ. ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งมะเขือม่วง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์มะเขือม่วงคุณภาพสูง และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับมะเขือม่วงที่เป็นผลผลิตทางการเกษตร เนื่องจากมะเขือม่วงเป็นผักที่มีคุณค่าทางอาหารและมีสารต้านอนุมูลอิสระหลายชนิด อาทิเช่น ฟลาโวนอยด์ แอนโทไซยานิน รวมถึงสารประกอบฟีนอลิกที่พบมากในเปลือกและเนื้อผลมะเขือม่วง คือ กรดคลอโรจีนิคที่มีประสิทธิภาพในฤทธิ์ต้านโรคมะเร็ง ชะลอการเสื่อมของเซลล์ร่างกายและช่วยลดระดับน้ำตาลในเส้นเลือด เป็นต้น โดยศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองที่และการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าพฤติกรรมการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 3.29 กิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร รวมถึงใช้ระยะเวลาและค่าการใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้งต่ำที่สุด โดยสามารถลดระยะเวลาอบแห้งได้ถึง 0.3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองที่ ที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน นอกจากนี้อัตราการอบแห้งที่มีค่ารองลงมาคือ การอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 50 และ 40 องศาเซลเซียส และเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองที่ ที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน พบว่ามีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าถึง 1.7 และ 1.4 เท่า ตามลำดับ อีกทั้งยังสามารถลดระยะเวลาทำแห้งได้ 0.4 และ 0.2 เท่า ตามลำดับ ในส่วนของคุณภาพผลิตภัณฑ์การอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองที่ 40 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์มีค่าสีแท้และค่าความสดของสีสูงที่สุด โดยการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการดูดน้ำกลับสู่โครงสร้างของเซลล์สูงที่สุด โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.99 และมีค่า χ^2 และค่า RMSE ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.0014 และ 0.0364 ตามลำดับ นอกจากนี้การอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 50 องศาเซลเซียส มีปริมาณกรดคลอโรจีนิคสูงที่สุดเท่ากับ 3.36 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และต้นทุนในการผลิตมะเขือม่วงเบื่องต้นมีความแปรผันตามสภาวะในการอบแห้งและระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ดังนั้นสภาวะที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุดคือ การอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส มีราคาต้นทุนในการผลิตประมาณ 400 บาทต่อกิโลกรัมของแห้ง เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเพียง 410 นาที และเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองที่ ที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน พบว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส มีราคาต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าถึง 1.2 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Effects of Drying Process with Constant Air Temperature and Varying Air Temperature on Qualities of Eggplant Powder
Student	Ms.Patchareeporn Poonsiriwattana
Student ID.	60601180
Degree	Master of Engineering
Program	Food Engineering
Year	2021
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Pimpen Pornchaloempong

ABSTRACT

This research study proposes the drying behavior of eggplant as to produce high quality eggplant powder and to provide added value for agricultural product. Eggplant is nutritious vegetable which contains a number of antioxidants such as flavonoid, anthocyanin, and phenolic compounds. Chlorogenic acid is among phenolic compounds, mostly found in the skin and pulp of eggplant, which possesses significant biological activities including anti-cancer activity, cell aging retardation, and blood sugar level control. Drying behaviors of eggplant with constant air temperature and varying air temperature (Product Surface Temperature Limit) processes were investigated. Air temperature of 40, 50 and 60°C were set for the constant air temperature process. In varying air temperature process, the air temperature was varied to maintain product surface at 40, 50 and 60°C. It was found that the varying air temperature (Product Surface Temperature Limit) process with 60°C offered the highest drying rate of 3.29 kg water/hr.m², the shortest drying time, and the lowest specific energy consumption, the drying with varying air temperature (Product Surface Temperature Limit) had shorter drying time than drying with constant air temperature for 0.3 times. At the 50 and 40 °C, the drying with varying air temperature (Product Surface Temperature Limit) had higher drying rate than drying with constant air temperature for 1.7 and 1.4 times respectively. It also the drying with varying air temperature (Product Surface Temperature Limit) had shorter drying time than drying with constant air temperature for 0.4 and 0.2 times respectively. Constant air temperature at 40°C had the highest chroma (C*) and hue angle (h*). Varying air temperature (Product Surface Temperature Limit) at 40 °C had the highest water sorption isotherm and the experimental data with the highest R² and the lowest χ^2 and RMSE, which these were 0.99 0.0014 and 0.0364 respectively. In addition, Varying air temperature (Product Surface Temperature Limit) at 50 °C had the highest 3.36 mg/g dry weight in chlorogenic acid. However, varying air temperature (Product Surface Temperature Limit) at 60 °C had the lowest production cost approximately 400 Baht/kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อเผยแพร่ให้ผู้อื่นใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dry solids, shortest drying time 410 minutes, the drying with varying air temperature (Product Surface Temperature Limit) had the lower production cost than drying with constant air temperature for 1.2 times.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จด้วยความกรุณาจาก ผศ. ดร. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้ และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร. ปิติเขต สุรักษา และ ผศ. ดร. มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์ คณะกรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. ดวงพร อมรเลิศพิศาล ที่ให้ความช่วยเหลือและกรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะในการทดลองและการตรวจวิเคราะห์สารสำคัญ อีกทั้งพื้นที่วิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการสาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร ที่ให้ความกรุณาในการเปิดใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ อีกทั้งดูแลความเรียบร้อย

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ FACTory Classroom ที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์และสถานที่ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายต้องขอขอบพระคุณมารดา บิดา คนในครอบครัวที่คอยในการสนับสนุน รวมถึงทุกท่านใน FACTory Classroom ที่ คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับมารดาบิดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

พัชรินทร์ พูลศิริวัฒนา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ความสำคัญของมะเขือม่วง.....	3
2.1.1 องค์ประกอบของมะเขือม่วง	4
2.2 การเตรียมวัตถุดิบ	9
2.2.1 การทำความสะอาด	9
2.2.2 การคัดเลือกขนาดและรูปร่าง	9
2.2.3 การลดขนาด.....	9
2.2.4 การลวก.....	10
2.3 กระบวนการทำแห้ง	10
2.3.1 การทำแห้งแบบลมร้อน	10
2.3.2 หลักการทำแห้งแบบลมร้อน	10
2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการทำแห้ง.....	12
2.3.4 ป้อนความร้อน (Heat pump).....	15
2.4 ความชื้นสมดุลของวัสดุและวอเตอร์แอกติวิตี	16
2.5 ซอร์พชันไอโซเทอร์มของน้ำ	17
2.5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุล	19
2.5.2 ประโยชน์ของวอเตอร์ซอร์พชันไอโซเทอร์มแบบการดูดซับความชื้น	20
2.6 ผลของสภาวะการทำแห้งต่อคุณภาพทางกายภาพ และปริมาณสารสำคัญในผัก และผลไม้.....	21
2.6.1 สี	21
2.6.2 ปริมาณสารสำคัญ.....	22
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	25
3.1 วัตถุดิบ เครื่องมือ และอุปกรณ์	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ V อย่างไม่ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.1 วัตถุดิบ	25
3.1.2 สารเคมี.....	25
3.1.3 เครื่องมือ และอุปกรณ์.....	25
3.2 การเตรียมตัวอย่าง	26
3.2.1 การเตรียมตัวอย่างมะเขือม่วง.....	26
3.3 ศึกษาสภาวะการทำแห้งแบบลมร้อน.....	27
3.3.1 การเตรียมตัวอย่างก่อนการทำแห้ง.....	27
3.3.2 วิธีการอบแห้ง.....	28
3.3.3 การวางแผนการทดลอง.....	31
3.3.4 การวิเคราะห์คุณภาพของมะเขือม่วง.....	31
3.4 ปริมาณกรดคลอโรจีนิก (Chlorogenic acid)	33
3.5 การวิเคราะห์การใช้พลังงาน (Energy consumption)	33
3.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical analysis)	34
3.7 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการผลิตมะเขือม่วงผงจากการทำแห้งแบบลมร้อนใน ระดับอุตสาหกรรม.....	34
3.7.1 ต้นทุนคงที่ (Fixed cost)	34
3.7.2 ต้นทุนผันแปร (Running cost)	34
บทที่ 4 ผลการดำเนินการวิจัยและการอภิปราย	36
4.1 กระบวนการอบแห้งแบบลมร้อน.....	36
4.1.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและพฤติกรรมการอบแห้งแบบลมร้อนของ มะเขือม่วง	36
4.1.2 ระยะเวลาและปริมาณการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งมะเขือม่วง...	45
4.2 ผลของการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่และการอบแห้งแบบอุณหภูมิ อากาศแปรผันต่อคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี และปริมาณกรดคลอโรจีนิก ของมะเขือม่วง.....	47
4.2.1 ปริมาณความชื้น วอเตอร์แอกทีวิตี และความหนาแน่นรวม	47
4.2.2 สี.....	49
4.2.3 ปริมาณกรดคลอโรจีนิก	51
4.2.4 วอเตอร์ซอร์พชันไอโซเทอร์ม.....	52
4.3 การประเมินค่าใช้จ่ายในการผลิต.....	55
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินการวิจัยและข้อเสนอแนะ	56
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	56
5.2 ข้อเสนอแนะ	57
บรรณานุกรม.....	59
ภาคผนวก.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VI อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก รายละเอียดเครื่องทำแห้งแบบลมร้อนที่ใช้ในวิทยานิพนธ์	69
ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์	72
ภาคผนวก ค ผลการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ	81
ภาคผนวก ง งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	109
ประวัติผู้เขียน.....	121



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงองค์ประกอบทางโภชนาการของมะเขือ.....	4
2.2 ข้อดีและข้อเสียของการใช้พลังงานแต่ละชนิด	15
2.3 ชนิดสารละลายเกลืออิมิตัวและค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุล	19
3.1 แผนการทดลองการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศที่ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส (CAT (40 C) CAT (50 C) และ CAT (60 C)) และการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศ อากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิมิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส (VAT (PSTL 40 C) VAT (PSTL 50 C) และ VAT (PSTL 60 C)).....	31
4.1 ปริมาณความชื้น วอเตอร์แอกทิวิตี และความหนาแน่นรวมของมะเขือม่วง.....	47
4.2 ค่าสีแท้และค่าความสดของสีของมะเขือม่วง.....	49
4.3 แสดงลักษณะปรากฏของมะเขือม่วงหลังผ่านการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิมิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส	50
4.4 ค่าทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับผลิตภัณฑ์มะเขือม่วง.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 มะเขือม่วง	3
2.2 โครงสร้างพื้นฐานของฟลาโวนอยด์ (Flavonoids)	6
2.3 โครงสร้างแอนโทไซยานิน (Anthocyanin)	7
2.4 การเปลี่ยนแปลงสีของสารแอนโทไซยานินในสภาพกรด – ต่าง.....	7
2.5 โครงสร้างของกรดคลอโรจินิก (Chlorogenic acid)	8
2.6 การเมทาบอลิซึมของกรดคลอโรจินิกในร่างกายมนุษย์.....	9
2.7 การเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างการทำแห้ง	11
2.8 (a) การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นกับอุณหภูมิของวัตถุดิบและ (b) อัตราการทำแห้ง.....	11
2.9 หลักการทำงานของเครื่องทำแห้งแบบเป่าความร้อน	16
2.10 กราฟไอโซเทอร์มที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในอาหารกับความชื้นสัมพัทธ์ของ อากาศ หรือกับ a_w	18
3.1 มะเขือม่วงพันธุ์เชียงใหม่เบอร์ 1	26
3.2 การเตรียมตัวอย่าง(a)การเก็บรักษาตัวอย่างมะเขือม่วงที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส(b) .	27
3.3 การเรียงตัวอย่างมะเขือม่วงก่อนทำแห้ง.....	28
3.4 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการวัดอุณหภูมิผิวและชั่งน้ำหนักตัวอย่างมะเขือม่วง.....	29
3.5 แผนผังเครื่องทำแห้งแบบลมร้อน ระบบควบคุมการทำแห้งอัจฉริยะในผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง คุณภาพชั้นพรีเมียม (สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย).....	29
3.6 กระบวนการผลิตมะเขือม่วงผง	30
3.7 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตมะเขือม่วงผง	35
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศ (T_a) อุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ (T_s) และเปอร์เซ็นต์ ความชื้นสัมพัทธ์กับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อนแบบคงที่ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส.....	36
4.2 พฤติกรรมการอบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อนแบบคงที่ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส (a) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (b) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและปริมาณความชื้น.....	37
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศ (T_a) อุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ (T_s) และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์กับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 องศา เซลเซียส.....	39
4.4 พฤติกรรมการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศ แปรผัน(ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 องศาเซลเซียส (a) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (b) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและปริมาณความชื้น.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IX อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศ (Ta) อุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ (Ts) และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์กับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 50 องศาเซลเซียส	41
4.6 พฤติกรรมการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 50 องศาเซลเซียส(a) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง(b)กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและปริมาณความชื้น.....	42
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศ (Ta) อุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ (Ts) และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์กับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส.....	43
4.8 พฤติกรรมการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน(ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส (a) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (b) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและปริมาณความชื้น	44
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการอบแห้งและปริมาณการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งมะเชื่อม่วง (a) ระยะเวลา (b) ปริมาณการใช้พลังงาน และ (C) ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ โดยตัวอักษรที่แตกต่างกัน a - e หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยค่าที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ย.....	46
4.10 ปริมาณกรดคลอโรจีนิกของผลิตภัณฑ์มะเชื่อม่วงหลังผ่านการอบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อนแบบคงที่ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส (C40 C50 และ C60) และการอบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อนคงที่เป็นระยะ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส (MS40 MS50 และ MS60) (ตัวอักษรที่แตกต่างกัน a - d หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยค่าที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ย.....	51
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกทิวิตีของผลิตภัณฑ์มะเชื่อม่วงผงหลังผ่านการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Halsey.....	52
4.12 แผนภูมิแท่งแสดงต้นทุนเบื้องต้นในการผลิตมะเชื่อม่วงผงหลังผ่านการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส (CAT (40 C) CAT (50 C) และ CAT (60 C)) และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส (VAT (PSTL 40 C) VAT (PSTL 50 C) และ VAT (PSTL60 C)) โดยค่าที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ย.....	55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มะเขือม่วง (*Solanum melongena* Linn) เป็นพืชล้มลุกเจริญเติบโตง่าย เพาะปลูกได้ดีในเขตร้อนและกึ่งเขตร้อน (Luthria *et al.*, 2010) มีระยะเวลาเก็บเกี่ยว 3 – 4 เดือน (อุทัย กิติติชัย, 2556) ในประเทศไทยนิยมปลูกเพื่อนำส่วนผลมาบริโภคและส่งออกทั้งผลสดและเมล็ดพันธุ์ ในปี 2559 กรมส่งเสริมการเกษตรได้รายงานในพื้นที่เพาะปลูกมะเขือม่วงมีจำนวน 796 ไร่ ครอบคลุม 11 จังหวัดในประเทศไทย ได้ผลผลิตรวมทั้งหมด 1,305 ตัน ซึ่งจังหวัดที่มีการเพาะปลูกมะเขือม่วงมากที่สุด ได้แก่ เชียงใหม่ เพชรบูรณ์ และลำปาง (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2560) โดยการส่งออกมะเขือม่วงในแบบผลสดทั้งหมด 10,293 กิโลกรัม เป็นมูลค่า 985,391 บาท (กรมวิชาการเกษตร, 2559) มีราคาขาย 12.79 บาท/กิโลกรัม

ผลิตภัณฑ์มะเขือม่วงเป็นอีกหนึ่งผลิตภัณฑ์ที่ช่วยเพิ่มมูลค่า โดยมีข้อดี คือ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้ พกพาสะดวก น้ำหนักเบา ง่ายต่อการขนส่ง และมีศักยภาพสูงในการส่งออก นอกจากนี้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น สามารถนำไปเป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ได้อีกหลายผลิตภัณฑ์ เช่น ผลิตภัณฑ์เยลลี่ ผลิตภัณฑ์อาหารเสริม และผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เป็นต้น (Ibrahim, 2009; KADIVIC *et al.*, 2015) โดยเทคโนโลยีการแปรรูปที่เกี่ยวข้องกับการทำแห้งผงในระดับอุตสาหกรรมมีหลากหลายรูปแบบ เช่น การทำแห้งแบบพ่นฝอย การทำแห้งแบบลูกกลิ้ง การทำแห้งแบบสายพาน และการอบแห้งแบบลมร้อน เป็นต้น

การอบแห้งแบบลมร้อน (Hot air drying) เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่สามารถประยุกต์ใช้เพื่อแปรรูปมะเขือม่วง เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถทำได้ง่ายและใช้ต้นทุนการผลิตต่ำ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนทำให้อาหารสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการได้ง่าย อีกทั้งยังทำให้ กลิ่นรสและสีของอาหารเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงในการอบแห้ง (Hossain *et al.*, 2010; ซาลิตา บรมพิชัยชาติกุล, 2555) ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและทางเคมีสูญเสียคุณภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารสำคัญที่ไวต่อความร้อน (Inchuen *et al.*, 2010; Raja *et al.*, 2017) ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิต่ำ ซึ่งพบว่าสามารถรักษาคุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่ากระบวนการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูง (V. Sosle *et al.*, 2003; Phattanayindee *et al.*, 2009; Ivan *et al.*, 2013) ดังการศึกษาของ Vega-Galvez *et al.* (2008) ที่ศึกษาอุณหภูมิอากาศร้อนของการอบแห้งในช่วง 50 – 80 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สามารถรักษาปริมาณวิตามินซี ความแน่นรวม (bulk density) และมีสีใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์สดได้มากที่สุด แต่ต้องใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนาน และมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการแก้ปัญหาในกระบวนการอบแห้งแบบลมร้อนที่ใช้อุณหภูมิต่ำ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค โดยใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง และมีต้นทุนในการผลิตต่ำ โดยจากการศึกษาของ Cernisev (2010) พบว่า การอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิต่ำด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวของผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในระดับที่กำหนดสามารถลดการเกิดสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ได้ แต่อย่างไรก็ตามการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำทำให้อัตราการอบแห้งลดลงด้วยเช่นกัน ดังนั้นกระบวนการอบแห้งจำเป็นต้องมีการปรับใช้อุณหภูมิให้มีหลายระดับ เพื่อช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งให้สูงขึ้นและใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง รวมถึงการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศร้อนคงที่กับ

เอกสารนี้สงวนลิขสิทธิ์โดยกรมส่งเสริมการเกษตร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอบแห้งที่มีการปรับใช้อุณหภูมิหลายระดับ พบว่าในช่วงแรกของการอบแห้งสามารถใช้อุณหภูมิสูงได้ โดยที่อุณหภูมิที่ผิวผลิตภัณฑ์ยังไม่ถึงระดับที่กำหนด ซึ่งช่วยให้ผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนเพื่อใช้ในการระเหยน้ำออกผลิตภัณฑ์ได้มากกว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศร้อนแบบคงที่ตลอดการอบแห้ง และใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง (Phoungchandang and Saentaweek, 2011)

จากที่กล่าวมาในข้างต้นแสดงให้เห็นว่าสภาวะในการอบแห้งส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง ดังนั้นการศึกษาเปรียบเทียบสภาวะในการอบแห้ง และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การศึกษาพฤติกรรมและสภาวะการอบแห้งที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์มะเขือม่วงผง ได้แก่ ปริมาณความชื้น วอเตอร์แอกติวิตี สี ความหนาแน่นรวม วอเตอร์ซอร์พชันไอโซเทอร์ม และปริมาณกรดคลอโรจีนิก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งมะเขือม่วงแบบอุณหภูมิอากาศคงที่และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์)

1.2.2 เพื่อศึกษาสภาวะการอบแห้งที่มีต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์มะเขือม่วงผง ของการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาสภาวะการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียสตามลำดับ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยเครื่องทำแห้งแบบลมร้อน ระบบควบคุมการทำแห้งอัจฉริยะในผลิตภัณฑ์อาหารแห้งคุณภาพชั้นพรีเมียม (สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย)

1.3.2 ศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์มะเขือม่วงผง ได้แก่ ปริมาณความชื้น วอเตอร์แอกติวิตี สี ความหนาแน่นรวม วอเตอร์ซอร์พชันไอโซเทอร์ม และปริมาณกรดคลอโรจีนิก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบพฤติกรรมการอบแห้งมะเขือม่วง ของการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์)

1.4.2 ทราบสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์มะเขือม่วงผง และปริมาณกรดคลอโรจีนิกของสภาวะของการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์)

1.4.3 ทราบถึงต้นทุนเบื้องต้นในการผลิตมะเขือม่วงผงในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) จากกระบวนการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์)

1.4.4 สามารถนำผลิตภัณฑ์มะเขือม่วงผงไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารเสริมและเครื่องสำอางได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความสำคัญของมะเขือม่วง

มะเขือม่วง (Eggplant) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Solanum melongena* Linn. อยู่ในวงศ์ Solanaceae ใช้ส่วนผลในการบริโภคเป็นอาหารมีถิ่นกำเนิดมาจากแอฟริกาและแพร่กระจายไปยังเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Sayed and Jensen, 1994; Lester, 1998) โดยมีศูนย์กลางของความหลากหลายของสายพันธุ์อยู่ที่อินเดีย และในแถบประเทศญี่ปุ่น นอกจากนี้ยังพบในเขตเอเชียคือ จีน อินเดีย ไทย และฟิลิปปินส์ (Sekara *et al.*, 2007) ซึ่งประเทศไทยมีการเพาะปลูกมากที่สุดในจังหวัด เชียงใหม่ เพชรบูรณ์ และลำปาง (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2560) จากข้อมูลในช่วงต้นแสดงถึงความสามารถในการเพาะปลูกได้ทั่วไปทั้งในเขตร้อนและเขตอบอุ่น เนื่องจากเป็นพืชล้มลุกที่มีการเจริญเติบโตง่าย สามารถปลูกได้ตลอดทั้งปี และมีช่วงระยะเวลาในการเก็บเกี่ยว 3 – 4 เดือน (อุทัย กิตติชัย, 2556) เป็นไม้ทรงพุ่มสูงประมาณ 50 – 250 เซนติเมตร ระบายกรเป็นแบบรากแก้ว ลำต้นตั้งตรง มีกิ่งจำนวนมาก ใบเป็นแบบใบเดี่ยวขนาดใหญ่เจริญสลับกัน เป็นดอกสมบูรณ์เพศ ในส่วนของผลจะมีลักษณะแตกต่างกันตามสายพันธุ์ รวมถึงความหลากหลายของแหล่งพื้นที่ในการเพาะปลูก จึงเป็นผลให้เกิดความหลากหลายทางสัณฐานวิทยา (Kashyap *et al.*, 2003; Kantharajah and Golegaonkar, 2004; Knapp, 2004) อาทิเช่น รูปทรง ขนาด (ความยาวตั้งแต่ 4 - 30 เซนติเมตร) และมีสีที่หลากหลายตั้งแต่ สีม่วงอ่อน สีม่วงเข้ม ไปจนถึงสีเข้มเกือบดำ เป็นต้น โดยสายพันธุ์ของมะเขือม่วงได้แก่ สายพันธุ์ผลกลม (Toska, PS-8280, Black King) สายพันธุ์ผลกลมรี (Beauty Dusky Epic Black และ Enorma) สายพันธุ์ผลกลมยาว (Ichiban, Little fingers, Vernal) (Swarup, 1995; นิพนธ์ ไชยมงคล, 2546) โดยทางโครงการหลวงได้ส่งเสริมให้เกษตรกรในภาคเหนือปลูกมะเขือม่วงญี่ปุ่น ซึ่งมี 2 สายพันธุ์ ได้แก่ พันธุ์แรก คือแบบผลกลมอ้วนคล้ายหยดน้ำ ก้านตรงขั้วผลเป็นสีเขียวจึงเรียกว่า “มะเขือม่วงก้านเขียว” พันธุ์ที่สอง คือแบบผลพอมสั้น ก้านตรงขั้วผลเป็นสีม่วงเข้ม จึงเรียกว่า “มะเขือม่วงก้านดำ” (Sekara *et al.*, 2007; กรมส่งเสริมการเกษตร, 2554)



รูปที่ 2.1 มะเขือม่วง

มะเขือม่วงเหมาะสำหรับการแปรรูปเป็นผงและส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศ เพื่อช่วยสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับมะเขือม่วง ข้อดี คือ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้ พกพาสะดวก น้ำหนักเบา ขนส่งง่าย สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ได้แก่ นำไปเป็นส่วนผสมตั้งต้นของผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ได้อีกหลายผลิตภัณฑ์ เช่น ผลิตภัณฑ์เยลลี่ ผลิตภัณฑ์อาหารเสริม และผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เป็นต้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Ibrahim, 2009; KADIVEC *et al.*, 2015) รวมถึงยังเป็นสารประกอบเชิงฟังก์ชันจากธรรมชาติ (Functional Ingredients) และอุดมไปด้วยสารสำคัญชนิดต่าง ๆ

2.1.1 องค์ประกอบของมะเขือม่วง

สารต่าง ๆ ภายในเซลล์มีบทบาททำให้มะเขือม่วงมีลักษณะเฉพาะตัวทั้งในด้านสี คุณประโยชน์ และคุณค่าทางโภชนาการอีกด้วย

2.1.1.1 คุณค่าทางอาหารและสารสำคัญของมะเขือม่วง

มะเขือม่วงเป็นผักที่มีคุณค่าทางอาหารและสารสำคัญสำหรับร่างกายโดยเฉพาะ คาร์โบไฮเดรต เส้นใยอาหาร วิตามิน และแร่ธาตุต่าง ๆ เป็นต้น ซึ่งมะเขือม่วงปริมาณ 100 กรัมของสด มีปริมาณความชื้น 92.5 เปอร์เซ็นต์ และให้พลังงานเฉลี่ยประมาณ 24.0 กิโลแคลอรี ดังแสดงในตารางที่ 2.1 มะเขือม่วงเป็นผักชนิดหนึ่งที่พบสารต้านอนุมูลอิสระหรือการต้านออกซิเดชันในปริมาณสูง (Noda *et al.*, 2000; Hanson *et al.*, 2006) อาทิเช่น ฟลาโวนอยด์ แอนโทไซยานิน และสารประกอบฟีนอลิก สำหรับสารประกอบฟีนอลิกที่พบมากในเปลือกและเนื้อผลมะเขือม่วง ได้แก่ กรดคลอโรจีนิค (Chlorogenic acid) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1.4 – 28.0 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (Paganga *et al.*, 1999; Prashant *et al.*, 2015) โดยปริมาณที่พบสารสำคัญขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และแหล่งในการเพาะปลูก

ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบทางโภชนาการของมะเขือม่วง (นิพนธ์ ไชยมงคล, 2546; Ran Kim, 2016; Quamruzzaman, 2020)

องค์ประกอบ	ปริมาณต่อ 100 กรัมของสด
พลังงาน (กิโลแคลอรี)	24.0
ปริมาณความชื้น (เปอร์เซ็นต์)	92.5
โปรตีน (กรัม)	1.0
ไขมัน (กรัม)	0.2
คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	5.7
เส้นใย (กรัม)	0.8
เถ้า (กรัม)	0.6
แคลเซียม (มิลลิกรัม)	30.0
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม)	27.0
เหล็ก (มิลลิกรัม)	0.6
โซเดียม (มิลลิกรัม)	4.0
โพแทสเซียม (มิลลิกรัม)	223.0
แอนโทไซยานิน (มิลลิกรัม)	0.26
วิตามิน A (IU)	130.0
วิตามิน B1 (มิลลิกรัม)	10.0
วิตามิน B2 (มิลลิกรัม)	0.05
วิตามิน B3 (มิลลิกรัม)	0.60
วิตามิน C (มิลลิกรัม)	5.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.2 สารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant)

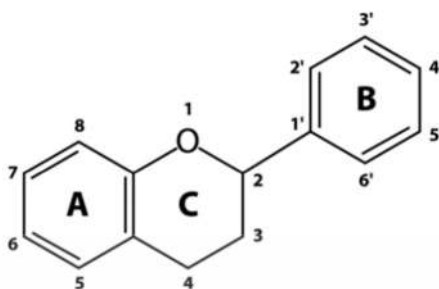
มีหน้าที่ ป้องกันและกำจัดอนุมูลอิสระ ซึ่งในร่างกายจะมีการสร้างสารต้านอนุมูลอิสระอย่างเพียงพอต่อการเกิดของอนุมูลอิสระขึ้นภายในร่างกาย แต่หากมีสภาวะผิดปกติในร่างกาย เช่น ความเครียด การนอนติดต่อกันเป็นระยะเวลาานาน ๆ การรับประทานยาที่มีผลลด เอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระหรือสภาวะโรคต่าง ๆ ก็อาจจะทำให้การสร้างอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นจนเสียสมดุลระหว่างสารต้านอนุมูลอิสระและอนุมูลอิสระเกิดเป็นภาวะเครียดที่เกิดจากออกซิเดชัน (oxidative stress) อนุมูลอิสระที่ไม่ได้ถูกกำจัดจะไปทำลายเซลล์และเนื้อเยื่อทำให้เป็นต้นเหตุของการเกิดโรคต่าง ๆ อาทิเช่น เป็นต้นเหตุของสภาวะหลอดเลือดอุดตัน มะเร็ง รวมถึงอาการอักเสบต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าสารต้านอนุมูลอิสระในร่างกายนั้นมีความสำคัญในการป้องกันการเกิดโรคและความเสื่อมของร่างกายเป็นอย่างมาก ซึ่งนอกจากนี้สารต้านอนุมูลอิสระยังสามารถพบได้ในผักและผลไม้ได้อีกด้วย เช่น สารประกอบฟีนอล (Phenolic compounds) และวิตามินซี (วาริน แสงกิตติโกมล, 2546; Halliwell and Gutteridge, 1989; Helmja *et al.*, 2007) เป็นต้น สารในกลุ่มโพลีฟีนอล ได้แก่ ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) ฟลาโวน (flavones) แอนโทไซยานิน (anthocyanin) กรดแกลลิก (gallic acid) กรดเอลลาจิก (ellagic acid) แคโรทีนอยด์ (carotenoids) และอนุพันธ์ของกรดซินนามิก (cinnamic acid) (Cowan, 1999; Helmja *et al.*, 2007) สารบางชนิดในกลุ่มนี้เป็นสารที่ให้สีส้มแก่ผักและผลไม้ เช่น สารแคโรทีนอยด์ที่ให้สีส้มเหลืองในแครอท ฟักทอง และมะละกอ เป็นต้น สารแอนโทไซยานินให้มีสีม่วง พบในมะเขือม่วง กะหล่ำปลีสีม่วง ลูกพรุน และผลองุ่น เป็นต้น โดยที่สารเหล่านี้จะพบได้มากหรือน้อยแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของพืช โดยสารประกอบฟีนอลิกจัดเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีสมบัติในการต้านมะเร็ง ช่วยขยายหลอดเลือด ลดการอักเสบ กระตุ้นระบบภูมิคุ้มกัน ต้านโรคมะเร็ง และทำลายเชื้อโรคที่เข้าสู่ร่างกาย (Shahidi *et al.*, 1992; Kinsella *et al.*, 1993; Chen *et al.*, 1996) อีกทั้งวิตามินซี (ascorbic acid) จัดเป็นเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สามารถช่วยสลายคอเลสเตอรอล ช่วยในการสังเคราะห์คอลลาเจน ต้านโรคมะเร็ง ลดการอักเสบ และลดการเกิดต่อกระดูก เป็นต้น (ฮาตา สึบหลินวงค์ และนวนลทิพย์ กมลวารินทร์, 2542; สมทรง เลขะกุล, 2543; Nicolle *et al.*, 2003; Genkinger *et al.*, 2004; Christen *et al.*, 2005; Wannamethee *et al.*, 2006) โดยวิตามินซีนั้นมีสมบัติในการละลายได้ดีในน้ำ แต่ร่างกายไม่สามารถสร้างวิตามินชนิดนี้ได้ จึงจำเป็นต้องรับประทานเข้าไป ดังนั้นการรับประทานรับประทานอาหารประเภทผักและผลไม้เป็นประจำ ทำให้ร่างกายมีสารต้านอนุมูลอิสระเพิ่มสูงขึ้นในกระแสเลือด (Cao *et al.*, 1989) ส่งผลให้ร่างกายสามารถป้องกันอันตรายจากโรคที่มีสาเหตุมาจากอนุมูลอิสระได้ (Steinberg, 1991; Ascherio *et al.*, 1992; Block *et al.*, 1992; Ames *et al.*, 1993; Gillman *et al.*, 1995)

2.1.1.3 ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids)

ปัจจุบันพบว่าฟลาโวนอยด์ จัดเป็นสารโภชนเภสัช (Nutraceutical) มีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ซึ่งมีประสิทธิภาพในฤทธิ์ต้านมะเร็ง ต้านโรคหัวใจและระบบไหลเวียนของโลหิต ป้องกันการเกิดโรคเบาหวานและโรคสมองเสื่อม รวมทั้งการสูญเสียความจำและการเคลื่อนไหว การรับประทานผักและผลไม้สามารถลดอัตราเสี่ยงจากการตายของผู้ป่วยเบาหวานและโรคหัวใจได้ มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนแอมโรมาติก (Aromatic ring) ที่มีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) รวมอยู่ในโมเลกุลตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป มีสมบัติในการละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่มักพบอยู่ร่วมกับน้ำตาลในรูปของสารประกอบไกลโคไซด์ (Glycoside)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบ ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) ได้แก่ ฟลาโวนอล (Flavonol) ฟลาโวนอน (Flavonone) ฟลาโวน (Flavone) ไอโซฟลาโวน (Isoflavone) ฟลาโวนอล (Flavanol) แคทีชิน (Catechin) และ แอนโทไซยานิน (Anthocyanin)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างพื้นฐานของฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) (วิภพ สุทชนะ, 2556)

2.1.1.4 แอนโทไซยานิน (Anthocyanin)

แอนโทไซยานิน เป็นรงควัตถุหรือสารสีที่พบทั้งในดอกและผลของพืช ให้สีแดง สีส้ม และสีม่วงธรรมชาติในอาหาร ซึ่งได้รับความนิยมมาก เป็นสารประกอบฟลาโวนอยด์ (flavonoid) จัดอยู่ในกลุ่มฟีนอลิก (phenolic) ซึ่งชนิดของแอนโทไซยานินที่แตกต่างกันทำให้เกิดสีในอาหารที่ต่างกันไป มีสมบัติการละลายในน้ำได้ดี แต่ไม่เสถียรจึงเกิดการสลายตัวได้ง่าย เช่น ความร้อน ออกซิเจน แสง อุณหภูมิในระหว่างเก็บรักษา และปัจจัยต่าง ๆ รวมถึงกระบวนการแปรรูป ได้แก่ อุณหภูมิ รวมถึงระยะเวลาในการให้ความร้อนล้วนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอนโทไซยานิน (Leong and Oey, 2012)

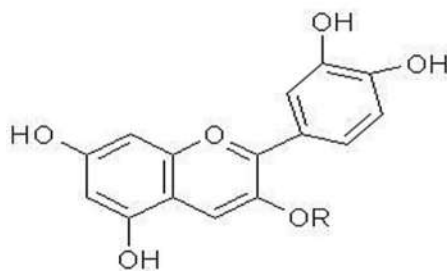
โครงสร้างของแอนโทไซยานินประกอบด้วยส่วนของ อะไกลโคน (Aglycone) น้ำตาล (Sugar) และหมู่เอซิล (Acylgroup) มีการค้นพบแอนโทไซยานินมากกว่า 300 ชนิด แต่ละชนิดจะมีสีและสมบัติแตกต่างกันไป แม้ว่าแอนโทไซยานินมีหลายชนิด แต่ทุกชนิดมีโครงสร้างหลักเป็นสารชนิดเดียวกันที่เรียกว่า แอนโทไซยานิดิน (anthocyanidins) ที่มีคาร์บอน 15 อะตอม อยู่ในโมเลกุล มีโครงสร้างแบบ C6-C3-C6 ซึ่งเป็นไกลโคไซด์ (Glycoside) ของ 2-phenyl benzopyrylium หรือ Flavylium Cation

แอนโทไซยานิดินสามารถเกิดได้ประมาณ 20 ชนิด แต่มีอยู่ 6 ชนิดเท่านั้นที่พบได้ในพืช คือ Pelargonidin Cyanidin Delphinidin Peonidin Petunidin และ Malvidin นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติความเป็นอินดิเคเตอร์ (Indicator) โดยที่ในสภาพที่สารเป็นกรดจะมีค่า pH ต่ำกว่า 3 (เป็นกรดแก่) ทำให้แอนโทไซยานินมีสีแดง ในสภาพที่เป็นกลางหรือมีค่า pH 7 - 8 มีสีม่วงและเมื่อสภาพเป็นเบสหรือมีค่า pH มากกว่าหรือเท่ากับ 11 (เป็นด่างแก่) แอนโทไซยานินจะเปลี่ยนเป็น สีส้ม (อรุษา เขาวนลิขิต, 2554)

แอนโทไซยานินแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ดังนี้

- 1) จำนวนของหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl Group) ในโมเลกุล
- 2) ระดับการเกิดเมทิลเลชัน (Degree of Methylation) ของหมู่ไฮดรอกซิล
- 3) จำนวนและตำแหน่งของในการเกิดไกลโคซิเลชัน (Glycosylation)
- 4) จำนวนของอโรเมติก (Aromatic) หรือกรดอะลิฟาติก (Aliphatic Acids)

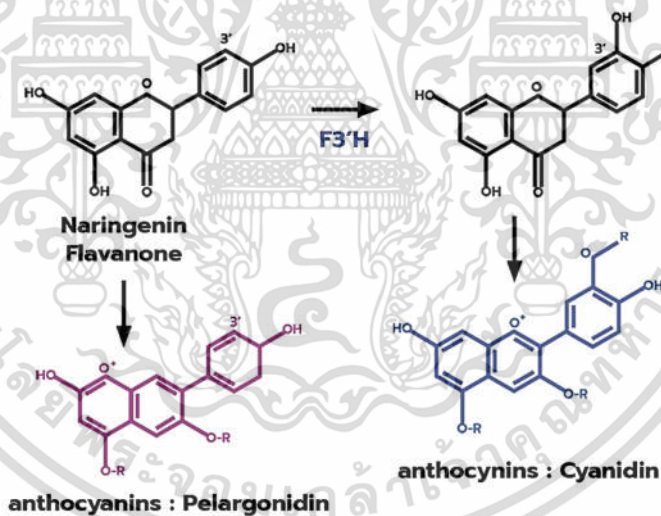
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 โครงสร้างแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) (เอมอร์ คชเสนี, 2548)

การแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซี (-OH) และหมู่เมทอกซี (-OCH₃) ของ Flavylium Ring จะทำให้เกิดสีของแอนโทไซยานิน กล่าวคือ การเพิ่มจำนวนของหมู่ไฮดรอกซีจะทำให้เกิดเฉดของสีฟ้า (Bluish Shade) การเพิ่มจำนวนของหมู่เมทอกซีจะทำให้เกิดสีแดง (Redness)

การเพิ่มจำนวนของหมู่ไฮดรอกซีจะเพิ่มความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant Activity) เพิ่มขึ้น และเนื่องจากการแทนที่ของกรดและด่างเกิดขึ้นได้ในหลาย ตำแหน่ง จึงทำให้จำนวนของแอนโทไซยานินมีมากกว่าแอนโทไซยานิน 15 - 20 เท่า โมเลกุลของน้ำตาลที่ต่อกับแอนโทไซยานิน ได้แก่ กลูโคส (Glucose) กาแลคโตส (Galactose) แรมโนส (Rhamnose) อะราบินโนส (Arabinose) ไตแซ็กคาไรด์และไตรแซ็กคาไรด์ โดยแอนโทไซยานินที่พบมากที่สุด คือ 3 - monoside 3-biosides 3,5-diglycosides และ 3,7- diglycosides (Sikorski ZE., 2007)



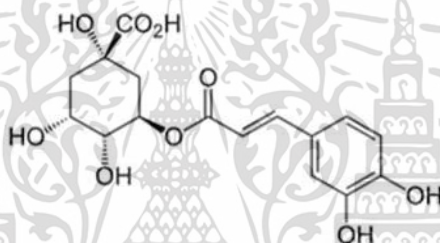
รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงสีของสารแอนโทไซยานินในสภาพกรด - ด่าง (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิมา รัตนาปนนท์, 2558)

แอนโทไซยานินมีสมบัติช่วยต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าวิตามินซีและวิตามินอีถึง 2 เท่า ลดอัตราเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งและต้านไวรัส ควบคุมระดับน้ำตาล ลดอาการอักเสบในทางเดินปัสสาวะ ลดความเสื่อมของตาที่มีผลต่อโรคเบาหวาน โรคต้อหิน และโรคต่อกระจุก ลดอัตราเสี่ยงของการเกิดโรคหัวใจและเส้นเลือดอุดตันในสมอง และป้องกันความผิดปกติของโรคที่เกิดจากความเสื่อมของระบบประสาท ลดอาการสูญเสียความทรงจำระยะสั้น เป็นต้น (สัมพันธ์, 2546; วีระศักดิ์, 2548; กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2553)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.5 กรดคลอโรจินิก (Chlorogenic acid)

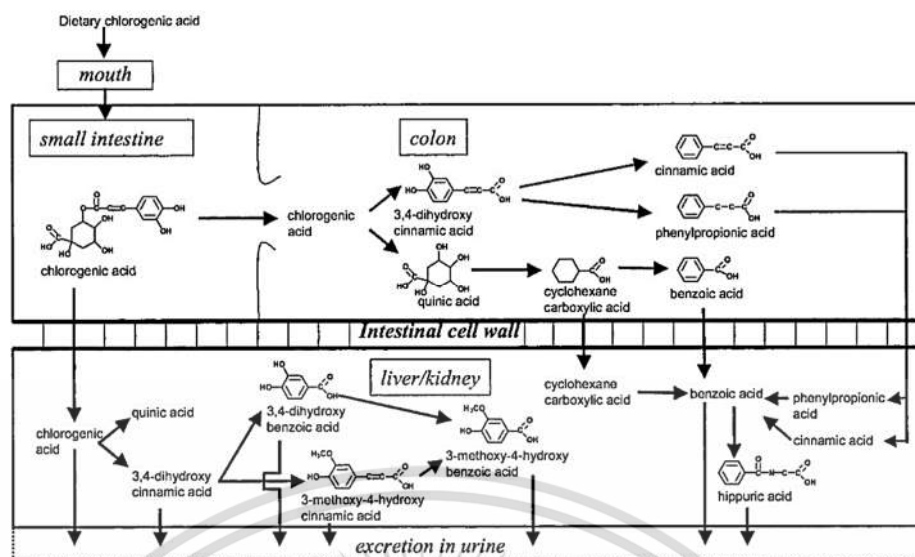
กรดคลอโรจินิก มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{16}H_{18}O_9$ เป็นสารโพลีฟีนอล (polyphenol) ในกลุ่มสารประกอบฟีนอล (phenolic compounds) ซึ่งเป็นเอสเตอร์ของกรดควินิก (Quinic acid) กับกรดคาเฟอิก (Caffeic acid) (กิตตพงษ์ ห่วงรักษ์, 2547) ที่มีสมบัติในการละลายน้ำ มีหน้าที่ป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชันและทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระโดยใช้ตัวเองเป็นตัวรับอนุมูลอิสระไว้เพื่อไม่ให้ไปจับกับโมเลกุลอื่น จึงส่งผลให้สามารถช่วยต้านโรคมะเร็ง (PubChem, 2004) ชะลอการเสื่อมของเซลล์ร่างกาย ช่วยลดระดับน้ำตาลในเส้นเลือดและยังช่วยยับยั้งเอนไซม์ในการย่อยแป้ง (Starch) ช่วยในการเผาผลาญไขมันในร่างกายและทำการเผาผลาญคาร์โบไฮเดรตให้ดีขึ้นได้ โดยกรดคลอโรจินิกส่วนมากพบในผักและผลไม้ อาทิเช่น มะเขือม่วง ลูกพีช และลูกพรุน อีกทั้งมีรายงานว่ากรดคลอโรจินิกสามารถพบมากทั้งในเปลือกและเนื้อของมะเขือม่วงและมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระสูง (Paganga *et al.*, 1999; Noda *et al.*, 2000; Hanson *et al.*, 2006) หากให้ผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวานรับประทานกรดคลอโรจินิกอาจส่งผลให้เกิดการชะลอการย่อยของคาร์โบไฮเดรตของข้าวได้ ซึ่งทำให้เกิดการควบคุมไม่ให้ระดับน้ำตาลในเส้นเลือดสูงขึ้น



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของกรดคลอโรจินิก (Chlorogenic acid) (Khang *et al.*, 2016)

ในปัจจุบันกรดคลอโรจินิกถูกนำไปใช้เป็นอาหารเพื่อสุขภาพ (functional food) เนื่องจากมีประโยชน์หลายประการ เช่น มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ (Olthof *et al.*, 2001; Olthof *et al.*, 2003; Sanchez *et al.*, 2005) มีส่วนช่วยป้องกันมะเร็ง (PubChem, 2004) ป้องกันโรคหัวใจ ป้องกันโรคหลอดเลือดสมอง (จารณัย พนิชชกุล และคณะ, 2007) ช่วยลดระดับน้ำตาล ต้านการอักเสบ ลดไขมัน (Thom, 2007; Meng *et al.*, 2013) และยังมีผลลดหรือชะลอการดูดซึมกลูโคส (glucose-6-phosphate translocase 1) ในลำไส้เล็กด้วย อีกทั้งกรดคลอโรจินิกมีผลต่อการหลั่งฮอร์โมนในการตอบสนองต่อทางเดินของสารอาหารเข้าสู่ทางเดินอาหารเรียกว่า อินครีติน (Incretin) ซึ่งในผู้ป่วยเบาหวานชนิดที่ 2 จะมีการหลั่งอินซูลินหลังการรับประทานอาหารลดลง และมีความบกพร่องในการหลั่งอินครีติน ซึ่งการที่กรดคลอโรจินิก และอนุพันธ์มีผลในการยับยั้งการทำงานของ glucose-6-phosphate translocase transporter ในตับ (Schwab *et al.*, 2001) จึงทำให้การใช้กรดคลอโรจินิกมีผลดีต่อผู้ที่เป็นเบาหวานชนิดที่ 2 เนื่องจากเบาหวานชนิดนี้มีการสร้างกลูโคสจากตับเพิ่ม ส่งผลให้ระดับน้ำตาลในเลือดสูงขึ้น ด้วยสาเหตุนี้กรดคลอโรจินิกจึงน่าจะเป็นสารสำคัญที่สามารถช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดเบาหวานชนิดที่ 2 (Higdon and Frei, 2006; Van and Feskens, 2002; Rosenggren *et al.*, 2004; Carlsson *et al.*, 2004; Tuomilehto, 2004; Salazar-Martinez, 2004; Oba, 2010) นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยอีกจำนวนมากที่รายงานฤทธิ์ของสารสกัดจากมะเขือม่วงที่สามารถช่วยลดน้ำตาลในเลือดในหนูที่เป็นเบาหวานได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การเมทาบอลิซึมของกรดคลอโรจีนิกในร่างกายมนุษย์ (Olthof *et al.*, 2006)

2.2 การเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบหลังการเก็บเกี่ยวส่วนใหญ่มักต้องมีการจัดการลักษณะทางกายภาพของอาหารเบื้องต้น เช่น รูปร่าง ขนาด หรือสีที่ไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค จึงจำเป็นต้องมีขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ เช่น การล้าง การแยกขนาดหรือการบดเปลือก ซึ่งทำให้อาหารคงคุณภาพที่ดีและมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันเหมาะสมกับกระบวนการแปรรูปขั้นต่อไป

2.2.1 การทำความสะอาด

การทำความสะอาดวัตถุดิบ คือ การแยกสิ่งสกปรกและสิ่งเจือปนหรือสิ่งปนเปื้อนที่ไม่ต้องการอื่น ๆ ออกจากวัตถุดิบและมักใช้เป็นกระบวนการเริ่มต้นของการเตรียมวัตถุดิบ ในบางกรณีการทำ ความสะอาดช่วยลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนลงได้ (กิตติพงษ์ ห่วงรักษ์, 2547) นอกจากการกำจัด เชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในวัตถุดิบยังเป็นการป้องกันการสูญเสียที่เกิดจากการเจริญอย่างรวดเร็ว ของเชื้อจุลินทรีย์ การทำความสะอาดจึงเป็นวิธีลดปริมาณของเสียอย่างมีประสิทธิภาพและเป็นการ ช่วยปรับปรุงด้านเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการแปรรูปรวมทั้งความปลอดภัยของผู้บริโภคด้วย (วิไล รังสาดทอง, 2547)

2.2.2 การคัดเลือกขนาดและรูปร่าง

การคัดเลือกวัตถุดิบเป็นการคัดแยกกลุ่มตามลักษณะทางกายภาพ โดยการคัดเลือกลักษณะ ในตอนต้นของกระบวนการแปรรูปเช่นเดียวกับการทำความสะอาด เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะ ใกล้เคียงกับก่อนการแปรรูปในขั้นตอนต่อไป ซึ่งรูปร่างของวัตถุดิบแต่ละชนิดมีความสำคัญมากในการ กำหนดวิธีการแปรรูปที่เหมาะสม อีกทั้งการคัดแยกขนาดของวัตถุดิบมีความสำคัญมากสำหรับการเข้า สู่กระบวนการอบแห้งต่อไป เนื่องจากอัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุดิบแต่ละชิ้น และถ้าวัตถุดิบมีขนาดชิ้นที่แตกต่างกันอาจทำให้เกิดการให้ความร้อนมากเกินไป (over-processing) หรือการให้ความร้อนไม่เพียงพอได้ (under-processing) (วิไล รังสาดทอง, 2547)

2.2.3 การลดขนาด

การลดขนาดเป็นปฏิบัติการนำวัตถุดิบที่เป็นของแข็งให้มีขนาดเล็กลง เป็นวิธีที่ช่วยเพิ่มความ เหมาะสมของวัตถุดิบสำหรับกระบวนการแปรรูปขั้นต่อไป ซึ่งประโยชน์ของการลดขนาด ได้แก่ เป็น การเพิ่มพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของอาหารที่ส่งผลในการเพิ่มอัตราการอบแห้งและการให้ความร้อน และ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลดขนาดอนุภาคของอาหารจะช่วยให้ความสามารถในการระเหยน้ำออกจากอาหารแต่ละชิ้นมีความใกล้เคียงกันมากขึ้น

2.2.4 การลวก

การลวกเป็นขั้นตอนการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ เนื่องจากผักและผลไม้บางชนิดมีเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส เอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส เป็นต้น เพื่อป้องกันการทำงานของเอนไซม์ในระหว่างการเก็บรักษา หรือระหว่างการเตรียมวัตถุดิบก่อนเข้าสู่กระบวนการต่อไป เช่น การอบแห้ง การลวกนี้ใช้ความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาที่ต่ำไว้ และทำให้เย็นโดยเร็ว ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาในการลวก ได้แก่ ชนิดของผักหรือผลไม้ ขนาดของชิ้นอาหาร อุณหภูมิของการลวก และวิธีการให้ความร้อน เป็นต้น (วิลโลว์ รังสาดทอง, 2547) ซึ่งการลวกด้วยน้ำร้อนจะใช้อุณหภูมิ 80 - 100 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาดั้งแต่ 1.5 จนถึง 12 นาที (กิตติพงษ์ ห่วงรักษ์, 2547) โดยแนะนำให้ใช้การลวกด้วยน้ำร้อนเป็นเวลา 3 - 4 นาที (Judy *et al.*, 1914; Hesham *et al.*, 2013; Nancy and Cindy, 2015; Joyce and Lisa, 2016; อัญญา จันทร์ปะทิว และคณะ, 2560)

2.3 กระบวนการอบแห้ง

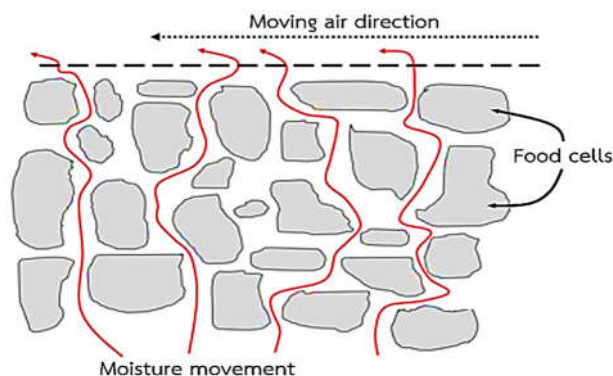
การอบแห้ง คือการให้ความร้อนภายใต้สภาวะการควบคุมเพื่อกำจัดน้ำที่มีอยู่ภายในอาหารด้วยการระเหยน้ำ ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของการกำจัดน้ำ คือ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร โดยการลดค่าวอเตอร์แอกติวิตี (water activity; aw) จนถึงระดับที่เชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคไม่สามารถเจริญได้ ซึ่งผลิตภัณฑ์ต้องมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี (water activity; a_w) ต่ำกว่า 0.60 การอบแห้งนอกจากช่วยยืดอายุการเก็บรักษาแล้ว ยังสามารถลดปริมาตรและน้ำหนัก ทำให้ง่ายต่อการเก็บรักษาและการขนส่งมีประสิทธิภาพสูง รวมถึงช่วยเพิ่มความหลากหลายและความสะดวกให้แก่ผู้บริโภคอีกด้วย (วิลโลว์ รังสาดทอง, 2546; Mujumdar and Devahastin, 2000; Chen and Mujumdar, 2008; สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)

2.3.1 การอบแห้งแบบลมร้อน

การอบแห้งแบบลมร้อนเป็นวิธีการอบแห้งที่ใช้อากาศเป็นตัวกลางในการให้ความร้อนภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ โดยวัสดุจะได้รับความร้อนโดยตรงจากอากาศร้อนที่เคลื่อนที่โดยการแพร่ผ่านวัสดุที่ต้องการอบแห้ง ซึ่งอากาศดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นอากาศที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 50 - 90 องศาเซลเซียส (Hall *et al.*, 1979; Maskan, 2001; Scala and Crapeste 2008; Vega-Galvez *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2015; Rahman *et al.*, 2015; Lu *et al.*, 2016; Elmizadeh *et al.*, 2017) การอบแห้งแบบลมร้อนเป็นวิธีการอบแห้งที่เป็นที่นิยมมากที่สุดในการอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากมีต้นทุนในการติดตั้งเครื่องและการดำเนินการกระบวนการอบแห้งที่ต่ำ (สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555) รวมถึงลักษณะของผลิตภัณฑ์อาหารที่เหมาะสมกับการอบแห้งด้วยวิธีนี้ได้แก่ อาหารที่มีลักษณะเป็นชิ้น เส้นใย และอาหารขึ้นรูป (ชาลิตา บรมพิชัยชาติกุล, 2555)

2.3.2 หลักการอบแห้งแบบลมร้อน

การอบแห้งแบบลมร้อนเป็นการอบแห้งที่อาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนประเภทการพาความร้อนเป็นหลัก ซึ่งลักษณะอากาศหรือลมร้อนจะพัดผ่านผิวหน้าของอาหาร จากนั้นความร้อนจะถูกถ่ายเทไปที่ผิวของอาหาร และน้ำในอาหารจะระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดไอ ไอน้ำจะแพร่ผ่านฟิล์มอากาศและถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่ (รูปที่ 2.7)

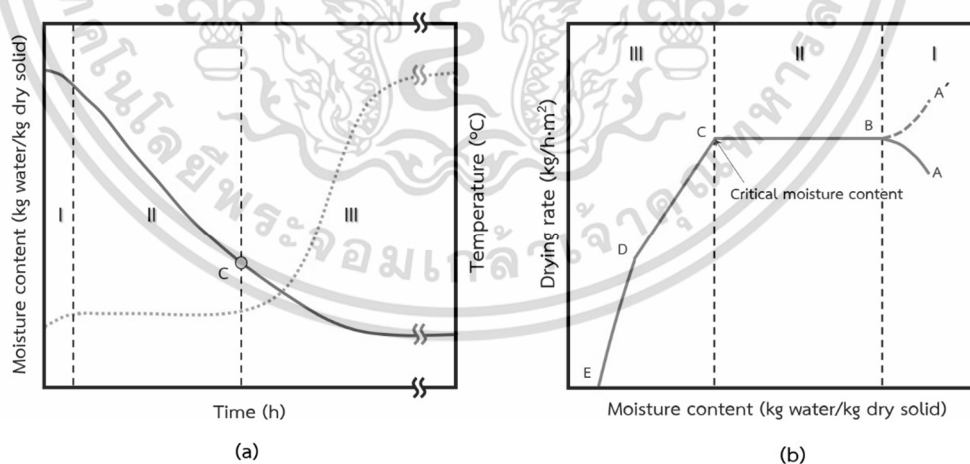


รูปที่ 2.7 การเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างการอบแห้ง (วีไล รังสาตทอง, 2546)

สภาวะการอบแห้งด้วยลมร้อนจะทำให้ความดันไอที่ผิวหน้าของอาหารต่ำกว่าความดันไอด้านในของอาหารเป็นผลให้เกิดความแตกต่างของความดันไอขึ้น อาหารชั้นด้านในจะมีความดันไอสุงและค่อย ๆ ลดต่ำลง เมื่อชั้นอาหารเข้าใกล้อากาศแห้ง ความแตกต่างนี้ทำให้เกิดแรงดันเพื่อไล่น้ำออกจากอาหารน้ำจะเคลื่อนที่ไปยังผิวหน้าด้วยกลไกดังต่อไปนี้

- 1) การเคลื่อนที่ของของเหลวโดยแรงแคปิลารี
- 2) การแพร่ของของเหลวซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวถูกละลายในอาหารส่วนต่าง ๆ
- 3) การแพร่ของของเหลวซึ่งถูกดูดซับโดยผิวหน้าของของแข็งในอาหาร
- 4) ความแตกต่างของความดันไอทำให้เกิดการแพร่ของไอน้ำในช่องอากาศของอาหาร

เมื่อมีการระเหยน้ำออกจากตัวอาหารที่เป็นอัตราส่วนต่อพื้นที่ที่เกิดการระเหยต่อหน่วยเวลา เรียกว่า อัตราการอบแห้ง ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงปรับสภาวะเบื้องต้น ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 (a) การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นกับอุณหภูมิของวัตถุดิบและ (b) อัตราการอบแห้ง (วีไล รังสาตทอง, 2546; iEnergyGuru, 2562)

(I) ช่วงปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial adjustment period) เป็นช่วงเวลาสั้น ๆ ในตอนเริ่มการทำแห้งจะเป็นเวลาที่ใช้ในการทำให้ผิวหน้าของอาหารมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากอุณหภูมิตั้งต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(อุณหภูมิห้อง) จนถึงอุณหภูมิสมดุลหรืออุณหภูมิกระเปาะแห้งของลมร้อนซึ่งเป็นช่วง AB ในกราฟการอบแห้ง (รูปที่ 2.8)

(II) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period) เป็นช่วงการทำให้แห้ง ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ได้รับจะถูกใช้ไปในการระเหยความชื้นอย่างต่อเนื่อง โดยน้ำจะเคลื่อนที่จากด้านในของอาหารออกมาด้วยอัตราเร็วเท่ากับน้ำที่ระเหยออกจากผิวหน้า ผิวหน้าจึงยังเปียกและดำเนินการต่อเนื่องไปจนถึงความชื้นวิกฤต (critical moisture content, ช่วง BC) หรือเป็นหลังจากช่วงที่มีความชื้นอิสระระเหยอยู่ที่ผิวหน้าของอาหาร แต่ในทางปฏิบัติผิวหน้าของอาหารจะค่อย ๆ แห้งด้วยอัตราเร็วที่ต่างกัน และอัตราการอบแห้งโดยรวมจะค่อย ๆ ลดลงในช่วงของอัตราเร็วคงที่ จุดความชื้นวิกฤตของอาหารแต่ละชนิดจึงไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของอาหารในเครื่องทำแห้ง และอัตราในการอบแห้ง ลักษณะที่สำคัญของอากาศแห้งที่ใช้ในการอบแห้งในช่วงอัตราเร็วคงที่ได้แก่ ต้องมีอุณหภูมิกระเปาะแห้งสูง มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ และอากาศเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง โดยฟิล์มอากาศที่อยู่รอบอาหารจะเกิดขบวนการถ่ายเทความร้อนและไอน้ำ ระหว่างการอบแห้ง ความเร็วของอากาศหรือลมจะเป็นตัวกำหนดความหนาของฟิล์ม ถ้าความเร็วลมต่ำเกินไป ไอน้ำจะเคลื่อนที่จากผิวหน้าของอาหารและยังคงอยู่รอบ ๆ อาหารทำให้มีความแตกต่างระหว่างความดันไอและอัตราการอบแห้งไม่สูงนัก ถ้าอุณหภูมิของอากาศแห้งต่ำหรือมีความชื้นสูงจะทำให้อัตราเร็วในการระเหยและการอบแห้งลดลง

(III) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period) เป็นช่วงที่ขั้นของการระเหยจะค่อย ๆ เลื่อนลงลึกเข้าไปในเนื้ออาหาร อุณหภูมิของอาหารจะเริ่มเข้าใกล้อุณหภูมิของลมร้อนจากบริเวณพื้นผิว โดยเมื่อความชื้นของอาหารลดต่ำกว่าความชื้นวิกฤต อัตราการอบแห้งก็จะลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ที่ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) ในช่วงนี้อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในอาหารมายังผิวหน้าจะต่ำกว่าอัตราการระเหยของน้ำไปยังอากาศโดยรอบ จึงทำให้ผิวหน้าของอาหารแห้ง นอกจากนี้ความร้อนส่วนหนึ่งยังต้องใช้ในการให้ความร้อนตัวอาหารเองอีกด้วย อัตราการอบแห้งจึงลดลงตามเวลาที่ผ่านไป ช่วงนี้จะเป็นช่วงที่นานที่สุดของกระบวนการอบแห้งในอาหารบางชนิด

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง (Cernișev, 2010; วสันต์ ด้วงคำจันทร์, 2540; อิศเรศ วรรณทร, 2554; ญัฐพล กระจ่าง, 2560)

การอบแห้งแบบลมร้อนเป็นการอบแห้งโดยใช้ลมหรืออากาศร้อนเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนเพื่อพาความชื้นหรือระเหยความชื้นออกจากวัสดุอบแห้ง ซึ่งสภาวะในการอบแห้งเป็นหนึ่ง ในปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง และนอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งดังต่อไปนี้

1) ธรรมชาติของอาหาร

เมื่อพิจารณาลักษณะธรรมชาติของอาหารในด้านของโครงสร้างที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง กล่าวคือ ถ้าอาหารมีโครงสร้างที่มีรูพรุนมาก ซึ่งสภาวะดังกล่าวจะทำให้โมเลกุลของน้ำในอาหารเคลื่อนที่ออกไปได้ง่าย ทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอาหารที่มีรูพรุนมากจนเกินไป อาจจะทำหน้าที่เหมือนฉนวนในการนำความร้อน ซึ่งอาจมีผลทำให้อัตราการอบแห้งลดลง เนื่องจากการส่งผ่านของความร้อนไปยังโมเลกุลของน้ำในอาหารเป็นไปได้ยาก ดังนั้นอาหารที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนมาก จะมีอัตราการอบแห้งสูงขึ้นได้ก็ต่อเมื่อการเคลื่อนที่โมเลกุลของน้ำเป็นไปได้ง่าย และเอกสารนี้ อังค์ประกอบทางเคมีในอาหารที่จะนำมาแปรรูปด้วยการอบแห้ง มีผลต่ออัตราการอบแห้งอีกด้วย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากอาหารแต่ละชนิดมีความเข้มข้นของสารอาหารหรือมีเป็นองค์ประกอบที่ต่างกัน จึงมีผลทำให้ การเคลื่อนที่ของน้ำ และการส่งผ่านความร้อนไปยังโมเลกุลของน้ำได้ต่างกัน รวมถึงส่งผลให้มี อัตราการอบแห้งที่ต่างกันที่สุดในที่สุด

2) ขนาดรูปร่าง การเตรียมและการจัดเรียงอาหาร

อาหารที่จะนำมาแปรรูปด้วยการอบแห้งที่มีขนาดและรูปร่างต่างกัน จะส่งผลต่ออัตราการอบแห้งได้ โดยอาหารที่มีขนาดและรูปร่างที่ทำให้อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของอาหารมาก จะช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งผ่านความร้อนไปทั่วทั้งชิ้นของอาหาร เพื่อใช้ในการระเหย น้ำออกจากอาหารได้ดีขึ้น ทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น โดยทั่วไปอาหารที่อยู่ในสภาพที่มีรูปร่าง หรือมีลักษณะเป็นของแข็ง (Solid food material) ก่อนที่จะนำมาทำแห้งมักมีการตัดแต่ง และลดขนาดก่อน และการเตรียมอาหารในลักษณะอื่น ๆ ก่อนการอบแห้งจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการอบแห้ง เช่น การลวกผักในน้ำร้อนก่อนที่จะนำมาทำแห้ง การนวดคลึงก่อนทำแห้งจะมีผลทำให้ การเคลื่อนที่ของน้ำง่ายขึ้น ทำให้มีอัตราการอบแห้งสูงขึ้น เป็นต้น รวมถึงการจัดเรียงอาหารต้อง คำนึงถึงพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศในการเคลื่อนย้ายน้ำออกจากวัสดุอบแห้งด้วย ต่อให้วัสดุอบแห้งจะมีขนาดชิ้นเล็กมากแต่มีการซ้อนทับกันหลายชั้น ก็อาจจะส่งผลให้การระเหยของไอน้ำเป็นไปได้ยาก เนื่องจากอาหารสามารถระเหยไอน้ำได้ดีเฉพาะบริเวณพื้นผิวที่สัมผัสกับอากาศเพียงเท่านั้น จึงต้องใช้ ระยะเวลาในการอบแห้งนานมากยิ่งขึ้น และการจัดปริมาณอาหารต่อถาดในการอบแห้งให้เหมาะสม เพื่อให้อาหารทุกชิ้นได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอและทั่วถึงทำให้เพิ่มอัตราการอบแห้งได้ และเกิด ความสม่ำเสมอในอาหารทุกชิ้นอีกด้วย

3) สภาวะในขณะที่ทำแห้งอาหาร

สภาวะในขณะที่ทำแห้งอาหารด้วยวิธีการหรือเครื่องทำแห้งแบบต่าง ๆ นั้น ก็เป็นปัจจัยสำคัญ ประการหนึ่งที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งของอาหาร เนื่องจากถ้าสภาวะในขณะที่ทำแห้งเอื้ออำนวยให้ ประสิทธิภาพการส่งผ่านความร้อนเข้าไปทำให้น้ำหรือไอน้ำเคลื่อนที่ออกจากอาหารได้เร็วขึ้น ก็จะมี ผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น โดยมีปัจจัยที่สำคัญเกี่ยวข้องกับสภาวะขณะทำแห้งดังนี้

3.1 อุณหภูมิของลมร้อน โดยปกติการอบแห้งด้วยลมร้อนของเครื่องทำแห้งแบบลม ร้อนทั่วไปจะมีการควบคุมอุณหภูมิลมร้อนซึ่งในกรณีที่กำหนดให้ความเร็วของลมร้อนคงที่ อุณหภูมิ ของลมร้อนจะมีผลต่ออัตราการอบแห้งอย่างมาก เมื่ออุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้น อัตราการอบแห้งจะ สูงขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของลมร้อนกับวัสดุอบแห้งมีมาก ทำให้ เกิดการถ่ายเทความร้อนสู่น้ำในอาหารได้ดี ส่งผลให้น้ำในอาหารสามารถเคลื่อนที่และระเหยได้เร็ว ยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะมีผลต่อการเสื่อมเสียคุณภาพและคุณค่า ทางอาหารเนื่องจากผลของความร้อน เช่น การสูญเสียวิตามินต่าง ๆ หรือสูญเสียสารสำคัญบางชนิด

3.2 อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ เป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ กล่าวคือ อุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับการกำหนดอุณหภูมิลมร้อน โดยในการอบแห้งแบบลมร้อนในช่วงแรกอุณหภูมิ ผลิตภัณฑ์จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิลมร้อน และจะเพิ่มขึ้นจนเกือบเท่ากับ อุณหภูมิลมร้อนหรือไม่เกินจากอุณหภูมิวิกฤต (critical temperature) ของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ทำให้ในช่วงแรกนั้นสามารถควบคุมอุณหภูมิลมร้อนได้สูงกว่าอุณหภูมิกำหนด ซึ่งการใช้อุณหภูมิลมร้อนสูงในช่วงแรกจะทำให้ผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะของน้ำให้กลายเป็นไอน้ำได้มากยิ่งขึ้น แล้วควบคุมลดอุณหภูมิลมร้อนตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์จนกว่าผลิตภัณฑ์จะมี

อุณหภูมิเท่ากับที่กำหนด ส่งผลให้สามารถกำจัดความชื้นออกจากวัสดุอบแห้งได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้น และช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งให้สั้นลง

3.3 ความเร็วของลมร้อน เนื่องจากลมร้อนทำหน้าที่เคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปจากบริเวณผิวหน้าของอาหาร โดยปกติในการอบแห้งทั่วไปจะควบคุมให้ความเร็วลมร้อนคงที่ตลอดช่วงการอบแห้ง ดังนั้นเมื่อความเร็วลมร้อนสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นตามเช่นเดียวกัน เนื่องจากความเร็วลมมีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ณ สภาวะปัจจัยอื่นค่าคงที่

3.4 ความชื้นของลมร้อน ความชื้นจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อม ในห้องทำแห้ง ซึ่งส่วนหนึ่งมีผลมาจากความเร็วของลมร้อน และรวมถึงเมื่อลมร้อนมีความชื้นสูง เนื่องจากได้รับมวลไอน้ำมาจากอาหาร จะส่งผลให้ลมร้อนนั้นมีความสามารถในการดึงน้ำออกจากอาหารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรได้ลดลง ทำให้อาหารมีมากกว่าอากาศแวดล้อมมาก ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศจึงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลง เนื่องจากการถ่ายเทมวลของไอน้ำออกไปสู่อากาศเป็นไปได้ยากขึ้น

จะเห็นได้ว่าปัจจัยต่าง ๆ ของสภาวะขณะทำแห้งนั้นจะมีผลต่ออัตราการอบแห้งของอาหาร ดังนั้นการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ อันได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม ในขณะที่ทำแห้งอาหารจะสามารถควบคุมอัตราการอบแห้งอาหารได้ดี แต่อย่างไรก็ตามในกรณีการอบแห้งโดยอาศัยธรรมชาติ เช่น การตากแดดนั้นจะไม่สามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ดังกล่าวได้เลย เนื่องจากสภาวะทำแห้งจะขึ้นกับสภาพดินฟ้าอากาศในขณะที่ทำแห้ง ดังนั้นการควบคุมอัตราการอบแห้งของอาหารที่ทำแห้งด้วยการตากแดดจึงเป็นไปได้ยากมาก จึงเป็นสาเหตุให้ในปัจจุบันเครื่องทำแห้งจึงเป็นที่นิยม ในการนำมาแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหารทำแห้งมากยิ่งขึ้น

เครื่องทำแห้งที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ส่วนใหญ่จะเป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนในการกำจัดความชื้นที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ โดยเครื่องทำแห้งแบบลมร้อนทั่วไป มีแหล่งพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ น้ำมัน หรือ ก๊าซ เพื่อให้ได้ลมร้อนที่จะใช้ในกระบวนการอบแห้ง แต่ลมร้อนที่ได้นั้นมีอุณหภูมิสูงมากจึงทำให้อาหารเกิดการเสียคุณภาพได้ง่าย อีกทั้งยังอาจเกิดอันตรายจากอัคคีภัยได้ง่ายเนื่องจากใช้การเผาไหม้ แต่อย่างไรก็ตามสิ่งที่จำเป็นสำหรับการอบแห้ง คือ ต้องสามารถทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงระดับอุณหภูมิที่ต้องการได้และรักษาความชื้นของอากาศโดยรอบ เพื่อให้สามารถลดความชื้นของอาหารได้ ดังนั้นจึงมีการนำฮีตปั๊มเข้ามาใช้ในการอบแห้ง เนื่องจากเป็นวิธีการที่ใช้การหมุนเวียนของอากาศแห่งที่ผ่านการลดความชื้นแล้ว โดยมีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำที่ได้จากการทำความเย็น (ลดความชื้น) ซึ่งการเพิ่มความร้อนด้วยฮีตปั๊มมีความแตกต่างจากเครื่องทำแห้งแบบลมร้อนทั่วไปที่ใช้การเพิ่มอุณหภูมิของผิวผลิตภัณฑ์ที่จะทำแห้ง แต่การอบแห้งแบบปั๊มความร้อนจะใช้วิธีการลดความชื้นของอากาศด้วยการทำความเย็นแทน และรักษาความแตกต่างของความดันไอน้ำไว้ ทำให้สามารถกำจัดน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ได้อย่างเป็นธรรมชาติมากกว่า อีกทั้งความร้อนจากการควบแน่นยังสามารถนำกลับมาใช้ได้อีกด้วย ดังนั้นการอบแห้งแบบปั๊มความร้อนจึงสามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดี เป็นกระบวนการทำแห้งที่ปลอดภัยและเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงานสูงอีกด้วย (อรณพ เรืองวิเศษ, 2551)

ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อเสียของการใช้พลังงานแต่ละชนิด

ชนิดของแหล่งพลังงาน	ข้อดี	ข้อเสีย
พลังงานแสงอาทิตย์	- การลงทุนไม่สูง - ไม่เกิดมลภาวะแก่บรรยากาศ - อุณหภูมิในการอบแห้งไม่สูงมาก	- เป็นพลังงานที่ต้องพึ่งพาธรรมชาติ จึงมักเกิดปัญหาตามฤดูกาล อาทิเช่น ฤดูฝน - ควบคุมอุณหภูมิในการอบแห้งให้คงที่ได้ยาก
พลังงานจากการเผาไหม้	- สามารถนำวัสดุเหลือใช้มาเป็นเชื้อเพลิง - การลงทุนไม่สูง	- ก่อให้เกิดมลภาวะ - ผลิตรถยนต์ที่เต็มไปด้วยควันไฟ
พลังงานจากไฟฟ้า	- สะดวกต่อการใช้งาน - ควบคุมอุณหภูมิในการอบแห้งได้	- เนื่องจากใช้ไฟฟ้า จึงทำให้สิ้นเปลืองค่าไฟฟ้า

จากข้อดีข้อเสียของแหล่งพลังงานความร้อนต่าง ๆ ที่กล่าวมาในข้างต้น ดังตารางที่ 2.2 จะพบว่าถ้าใช้พลังงานความร้อนจากอุปกรณ์ทำความร้อน (Heater) จะเกิดความสะอาดที่สุด ในกระบวนการผลิต แต่ต้องการลดจำนวนค่าไฟฟ้าอุปกรณ์ทำความร้อน (Heater) เครื่องทำแห้ง ต้องลดปริมาณการใช้ความร้อนจากอุปกรณ์ทำความร้อน ซึ่งการที่จะทำให้อากาศมีความชื้นลดต่ำลงได้นั้น จะต้องทำให้ความชื้นในอากาศเกิดการกลั่นตัวกลายเป็นหยดน้ำ ดังนั้นจึงได้มีแนวความคิดในการผลิตเครื่องทำแห้งแบบปั๊มความร้อน (Heat Pump Dryer)

2.3.4 ปั๊มความร้อน (Heat pump) (กระทรวงพลังงาน, 2552)

ปั๊มความร้อน คือระบบที่ทำงานในการปั๊มความร้อนจากตำแหน่งหนึ่งไปใช้งานอีกตำแหน่งหนึ่ง โดยใช้หลักการทำงานตามวัฏจักรการทำงานทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่เรียกว่า Carnot Cycle ทำให้สามารถดึงความร้อนจากแหล่งความร้อนแล้ว และนำไปถ่ายเทความร้อนให้ในบริเวณที่ต้องการได้รับความร้อน วัฏจักรการทำงานของปั๊มความร้อนมีลักษณะเช่นเดียวกับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ (Mechanical Vapor Compression System) ที่มีการประยุกต์ใช้งานโดยทั่วไปในเครื่องปรับอากาศ ต่างกันเพียงแต่ปั๊มความร้อนจะเลือกใช้ประโยชน์จากด้านความร้อนเป็นหลักและควบคุมอุณหภูมิด้านความร้อนแทนด้านความเย็น

2.3.4.1 เครื่องทำแห้งแบบปั๊มความร้อน (Heat pump dryer)

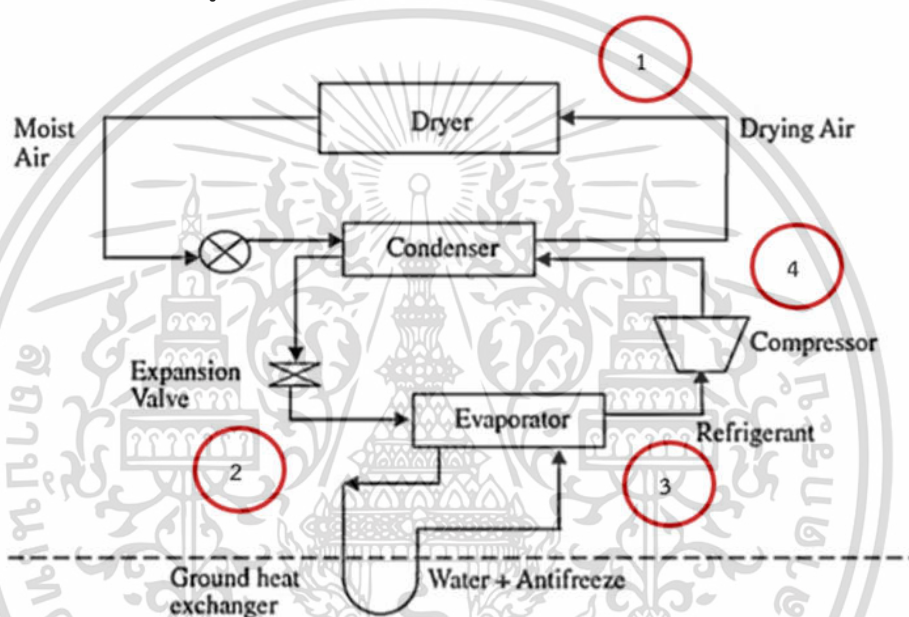
เครื่องทำแห้งแบบปั๊มความร้อนเป็นเครื่องทำแห้งที่นำระบบปั๊มความร้อนมาใช้ในกระบวนการอบแห้ง โดยระบบปั๊มความร้อนประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 4 ชนิด ได้แก่ เครื่องอัดไอ เครื่องควบแน่น วาล์วลดความดัน และเครื่องทำระเหย (นพรัตน์ อมัตริรัตน์, 2554) ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน เนื่องจากเป็นระบบสามารถนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่จากอากาศหลังการอบแห้งหรือนำพลังงานจากอากาศในบรรยากาศโดยรอบ (ambient air) ที่อุณหภูมิต่ำมาเป็นแหล่งความร้อน และยังสามารถควบคุมอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ ในอากาศสำหรับการอบแห้งได้ เครื่องทำแห้งแบบปั๊มความร้อนใช้ลักษณะของการพาความร้อนไปสู่อาหาร โดยทั่วไปมักใช้ระบบปั๊มความร้อนเป็นแหล่งความร้อนหลักของเครื่องและอาจมีหรือไม่มีแหล่งความร้อนในรูปแบบอื่นเพื่อช่วยในการถ่ายเทความร้อนให้กับระบบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4.2 หลักการของเครื่องทำแห้งแบบปั๊มความร้อน (เทวรัตน์ ทิพยวิมล, 2555)

หลักการงานทำงานของเครื่องทำแห้งระบบปั๊มความร้อนแสดงในรูปที่ 2.9 โดยอากาศอบแห้งจะไหลเข้าสู่ห้องทำแห้งที่ตำแหน่งหมายเลข โดยอากาศจะได้รับความชื้นจากอาหารจนกลายเป็นอากาศร้อนชื้น และออกจากห้องทำแห้งที่ตำแหน่งหมายเลข 2 จากนั้นเข้าสู่เครื่องระเหย (Evaporator) เพื่อทำการลดความชื้นอากาศด้วยวิธีการควบแน่นน้ำออกจากอากาศ กระบวนการจากตำแหน่งหมายเลข 2 – 3 ความร้อนแฝงของการระเหยจะถูกใช้ในการระเหยสารทำความเย็นภายในเครื่องระเหย จากนั้นสารทำความเย็นจะถูกอัดด้วยเครื่องอัดไอ (Compressor) เพื่อทำให้มีอุณหภูมิและความดันสูง แล้วส่งต่อไปยังเครื่องควบแน่น (Condenser) เมื่ออากาศไหลผ่านเครื่องควบแน่นจากตำแหน่งหมายเลข 4 – 1 ทำให้อากาศเย็นที่ผ่านการลดความชื้นได้รับความร้อนกลับคืนอีกครั้งและไหลเข้าสู่ห้องทำแห้ง



รูปที่ 2.9 หลักการทำงานของเครื่องทำแห้งแบบปั๊มความร้อน (Li et al., 2016)

2.3.4.3 ประโยชน์ของเครื่องทำแห้งแบบปั๊มความร้อน (ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล, 2555)

เครื่องทำแห้งแบบปั๊มความร้อน มีประสิทธิภาพในการจัดการพลังงานสูงมาก เนื่องจากสามารถนำความร้อนในระบบหมุนเวียนกลับมาใช้ได้ใหม่ สามารถทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำและมีช่วงความชื้นสัมพัทธ์ (15 – 80%) อีกทั้งสามารถลดความชื้นในบรรยากาศที่สภาวะอุณหภูมิต่ำได้ดีกว่าตู้อบลมร้อนทั่วไป ภายใต้อุณหภูมิในการอบแห้งเดียวกัน ซึ่งเหมาะสำหรับทำแห้งผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อความร้อนหรือต้องใช้อุณหภูมิต่ำในการอบแห้ง และเนื่องเครื่องทำแห้งชนิดนี้สามารถใช้อุณหภูมิต่ำในการอบแห้งได้ จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์หลังผ่านการอบแห้งมีคุณภาพที่ดี อาทิเช่น สี กลิ่น และเนื้อสัมผัส เป็นต้น รวมถึงสภาพอากาศภายนอกไม่มีผลต่อการอบแห้ง

2.4 ความชื้นสมดุลของวัสดุและวอเตอร์แอกติวิตี

วัสดุทางการเกษตรส่วนใหญ่มีโครงสร้างภายในที่มีรูพรุนขนาดเล็กมาก ๆ ที่เชื่อมกันเป็นเครือข่าย รูพรุนนี้อาจเรียกว่าหลอดรูเล็ก (capillary tube) ภายในรูพรุนเหล่านี้จะมีน้ำอยู่ ซึ่งทำให้วัสดุมีค่าความชื้นถ้าทิ้งไว้ในอากาศที่สภาวะคงตัวเป็นระยะเวลาสั้นเพียงพอ ความชื้นนี้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเปลี่ยนแปลงและมีค่าคงตัวค่าหนึ่งเช่นกัน เรียกความชื้นนี้ว่า ความชื้นสมดุล ซึ่งความชื้นสมดุลของวัสดุมีความสำคัญต่อการศึกษาระบบการอบแห้งมาก เพราะเมื่อทำแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สถานะคงตัว (เช่น อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์คงตัว) ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงค่า ๆ หนึ่งที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่ความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบ ๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ด้วยเช่นกัน ซึ่งเป็นสภาวะสมดุลระหว่างวัสดุกับอากาศ ค่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ซึ่งบางตำราถือว่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และวอเตอร์แอกติวิตี (water activity) ในวัสดุ กล่าวคือมีความหมายแบบเดียวกัน เนื่องจากวอเตอร์แอกติวิตีมีค่าเท่ากับ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ เมื่อวัสดุและอากาศอยู่ในสภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ และอยู่ภายใต้สมมติว่าไอน้ำเป็นแก๊สในอุดมคติ

วอเตอร์แอกติวิตีมีความสำคัญต่อการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร เนื่องจากมีผลต่อการเสื่อมคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์อาหาร โดยวอเตอร์แอกติวิตี คือ อัตราส่วนของความดันไอของน้ำที่อยู่ในวัสดุต่อความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ (อุณหภูมิและความดันเดียวกัน) ซึ่งในระบบของไอน้ำกับอากาศแห้ง ค่าอัตราส่วนนี้ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ ถ้าวอเตอร์แอกติวิตีมีค่าสูง จะส่งผลให้จุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์อาหารเจริญได้ดี ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเสื่อมคุณภาพและไม่ปลอดภัยต่อการบริโภค ซึ่งค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารแห่งควรมีค่าต่ำกว่า 0.6 อีกทั้งในกรณีของผลิตภัณฑ์อาหารต่างชนิดกัน แต่มีค่าความชื้นเท่ากัน ก็ไม่จำเป็นว่าค่าวอเตอร์แอกติวิตีของผลิตภัณฑ์ต้องเท่ากัน เนื่องจากมีส่วนประกอบที่แตกต่างกัน อาทิเช่น ผลิตภัณฑ์อาจมีน้ำตาลหรือเกลืออยู่มาก จึงทำให้น้ำที่อยู่อย่างอิสระของผลิตภัณฑ์มีน้อยลง เนื่องจากน้ำส่วนหนึ่งจับอยู่กับน้ำตาลหรือเกลือ จึงส่งผลให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตีไม่สูง ดังนั้นจึงสามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้โดยปลอดภัยที่ความชื้นค่อนข้างสูง แต่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่ำกว่า 0.6

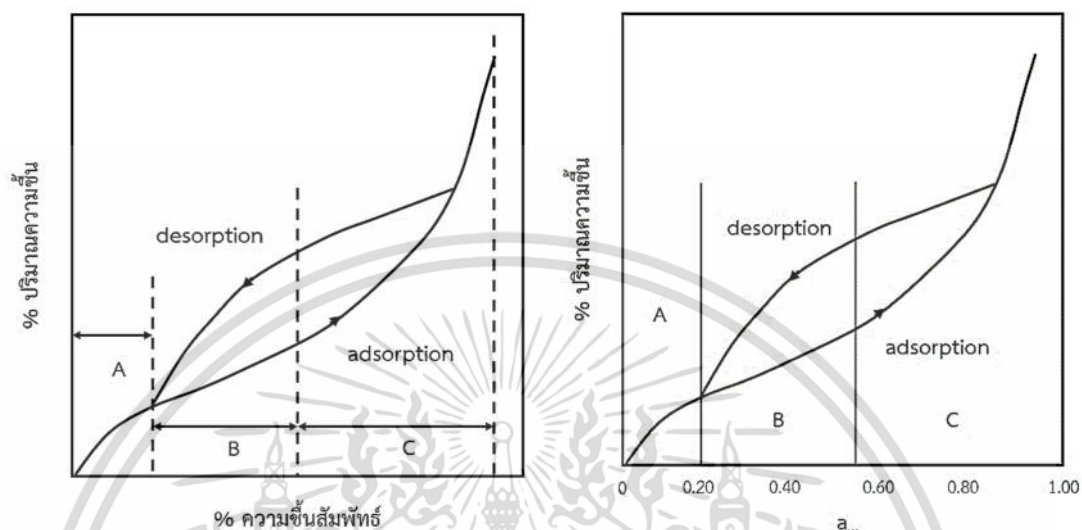
2.5 วอเตอร์ซอร์พชันไอโซเทอร์ม

วอเตอร์ซอร์พชันไอโซเทอร์ม (Water Sorption Isotherms) เป็นการเคลื่อนที่ของไอน้ำจากอาหารไปยังอากาศรอบ ๆ โดยขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นและองค์ประกอบของอาหาร รวมทั้งอุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่อุณหภูมิคงที่ ปริมาณความชื้นของอาหารจะเปลี่ยนไปจนกว่าความชื้นในอาหารจะสมดุลกับไอน้ำในอากาศรอบ ๆ นั่นคือ อาหารจะไม่มีน้ำหนักเพิ่มหรือลดลงภายใต้การเก็บรักษาในสภาวะดังกล่าว สามารถเรียกปริมาณความชื้นดังกล่าวว่า ปริมาณความชื้นสมดุลของอาหาร และเรียกความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศในการเก็บรักษาว่าความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดสมดุล จากนั้นนำค่าปริมาณความชื้นสมดุลมาพลอตกับความชื้นสัมพัทธ์จะได้กราฟที่เรียกว่า วอเตอร์ซอร์พชันไอโซเทอร์ม (Water Sorption Isotherms) ที่อุณหภูมิคงที่

วอเตอร์ซอร์พชันไอโซเทอร์มมี 2 ลักษณะ คือ กระบวนการคายความชื้น (Desorption) และกระบวนการดูดซับความชื้น (Adsorption) โดยทั้ง 2 กระบวนการ ไม่ได้เกิดขึ้นพร้อมกันหรือเป็นการเปลี่ยนกลับไปมา แต่มีความแตกต่างกันระหว่างไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้น (Adsorption Isotherms) และไอโซเทอร์มการคายความชื้น (Desorption Isotherms) ที่ความชื้นหนึ่ง ๆ ของอาหาร ค่า a_w ของกระบวนการคายความชื้นจะต่ำกว่ากระบวนการดูดความชื้น หรือ ณ ที่ค่า a_w หนึ่ง ๆ ปริมาณความชื้นของกระบวนการคายความชื้นจะมากกว่ากระบวนการดูดความชื้นเสมอ (รูปที่ 2.10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟไอโซเทอร์มการคายความชื้น (Desorption Isotherms) เป็นการวิเคราะห์ระดับความแห้งของอาหารที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นหรือความชื้นของอาหารที่ค่อย ๆ ลดต่ำลงจนถึงจุดสมดุลกับสภาวะแวดล้อมหรือความชื้นของอากาศขณะนั้น ดังนั้นจึงใช้ไอโซเทอร์มการคายความชื้น (Desorption Isotherms) สำหรับกระบวนการอบแห้ง



รูปที่ 2.10 กราฟไอโซเทอร์มที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในอาหารกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ หรือกับ a_w (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2551)

รูปกราฟของไอโซเทอร์มของวัสดุทางการเกษตรส่วนมากจะเป็นแบบรูปตัวเอส (sigmoid) โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ซึ่งจะแตกต่างกันตามปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอาหารหรือค่า a_w (รูปที่ 2.10)

ระยะที่ 1 (A) ของไอโซเทอร์ม เส้นกราฟค่อนข้างชัน จะสอดคล้องกับ monomolecular layer ของน้ำ ซึ่งเป็นน้ำที่เกาะอยู่กับสารประกอบในอาหารอย่างเหนียวแน่นและมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) อยู่ในช่วง 0 - 0.25 หรือ 0.3

ระยะที่ 2 (B) เส้นกราฟค่อนข้างราบ สอดคล้องกับ capillary water ที่มีอยู่ในอาหาร ซึ่งเป็นน้ำที่กำจัดออกได้แต่ค่อนข้างยาก ถ้าปริมาณน้ำส่วนนี้ลดลงจะทำให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ลดลงและยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาทางเคมีส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในอาหารได้ด้วย ปริมาณความชื้นจะลดลงเหลือประมาณ 3 - 7 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารและอุณหภูมิ มีค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) อยู่ 0.3 - 0.8

ระยะที่ 3 (C) เป็นน้ำอิสระที่มีอยู่ในเนื้อเยื่ออาหารทั้งจากพืชและสัตว์ สามารถกำจัดออกได้ง่าย น้ำเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวทำลายและถูกใช้สำหรับการเจริญของจุลินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี อาหารจะมีน้ำประมาณ 12 - 25 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าวอเตอร์แอกติวิตีมากกว่า 0.8 - 1.0 (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2551)

ตารางที่ 2.3 ชนิดสารละลายเกลืออิมตัวและค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (ชนันท์ ราชภูนิยิม และ สุเนตร สืบคำ, 2555; Moreira *et al.*, 2015)

สารละลายเกลืออิมตัว	ค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (%)
LiCl	11.15
CH ₃ COOK	22.60
MgCl ₂	32.73
K ₂ CO ₃	43.80
NaBr	57.70
NaCl	75.32
KCl	84.32

2.5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุล

มีผู้นำทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์ มาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสมดุล อุณหภูมิ และค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ หรือความดันไอของผลิตภัณฑ์หลายชนิดในรูปของสมการ หรือแบบจำลองทางทฤษฎีหรือกึ่งทฤษฎี และจากการทดลองพบว่าแบบจำลองทางทฤษฎีส่วนใหญ่ไม่สามารถอธิบายความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์ได้อย่างถูกต้อง จึงเป็นสาเหตุของการศึกษาแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากผลการทดลองมากกว่าแบบจำลองทางทฤษฎีและกึ่งทฤษฎี

2.5.1.1 แบบจำลองดัดแปลงของ Henderson

Henderson (1952) ได้สร้างสมการที่เรียกว่า Henderson สำหรับอธิบายความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ โดยสมการนี้ใช้ทำนายผลิตภัณฑ์อาหารได้ดีในช่วง $a_w < 0.8$ (Yu *et al.*, 1999) สามารถเขียนสมการได้ว่า

$$a_w = 1 - \exp[-A \times T \times M_e^B] \quad (2.1)$$

เมื่อ M_e คือ ความชื้นสมดุลมาตรฐานแห้ง (%)
 A และ B คือ ค่าคงที่ (dimensionless)
 T คือ อุณหภูมิของอากาศ (°C)

2.5.1.2 แบบจำลองดัดแปลงของ Modified Henderson

Thompson และคณะ (1968) ได้สร้างสมการที่เรียกว่า Modified Henderson สำหรับอธิบายความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ โดยสมการนี้ใช้ทำนายผลิตภัณฑ์อาหารได้ดีในช่วง $a_w \leq 0.8$ (Colley *et al.*, 2006; Dranca and Oroian, 2016; ชนันท์ ราชภูนิยิม และ สุเนตร สืบคำ, 2555) สามารถเขียนสมการได้ว่า

$$a_w = 1 - \exp[-A \times (T + C) \times M_e^B] \quad (2.2)$$

เมื่อ M_e คือ ความชื้นสมดุลมาตรฐานแห้ง (%)
 A B และ C คือ ค่าคงที่ (dimensionless)
 T คือ อุณหภูมิของอากาศ (°C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.3 แบบจำลองดัดแปลงของ Modified Chung - Pfof

Pfof และคณะ (1976) ได้สร้างสมการที่เรียกว่า Modified Chung - Pfof สำหรับอธิบายความขึ้นสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ โดยสมการนี้ใช้ทำนายผลิตภัณฑ์อาหารได้ดีในช่วง $0.2 \leq a_w \leq 0.85$ (Colley *et al.*, 2006) สามารถเขียนสมการได้ว่า

$$a_w = \exp\left[\left(\frac{-A}{T+C}\right) \exp(-B \times M_e)\right] \quad (2.3)$$

เมื่อ	M_e	คือ ความขึ้นสมดุลมาตรฐานแห้ง (%)
	A B และ C	คือ ค่าคงที่ (dimensionless)
	T	คือ อุณหภูมิของอากาศ ($^{\circ}\text{C}$)

2.5.1.4 แบบจำลองดัดแปลงของ Halsey

Halsey (1948) ได้สร้างสมการที่เรียกว่า Halsey สำหรับอธิบายความขึ้นสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ โดยสมการนี้ใช้ทำนายผลิตภัณฑ์อาหารได้ดีในช่วง $0.1 \leq a_w \leq 0.8$ สามารถเขียนสมการได้ว่า

$$a_w = \exp\left[\left(\frac{-A}{R \times T}\right) \times M_e^B\right] \quad (2.4)$$

เมื่อ	M_e	คือ ความขึ้นสมดุลมาตรฐานแห้ง (%)
	A และ B	คือ ค่าคงที่ (dimensionless)
	T	คือ อุณหภูมิของอากาศ ($^{\circ}\text{C}$)
	R	คือ ค่าคงที่ของก๊าซก๊าซ 8.314 kJ/kg mol K

2.5.1.5 แบบจำลองดัดแปลงของ Modified Halsey

Iglesias และ Chirife (1976) ได้สร้างสมการที่เรียกว่า Modified Halsey สำหรับอธิบายความขึ้นสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ สามารถเขียนสมการได้ว่า

$$a_w = \exp[-\exp(A + C \times T) \times M_e^B] \quad (2.5)$$

เมื่อ	M_e	คือ ความขึ้นสมดุลมาตรฐานแห้ง (%)
	A B และ C	คือ ค่าคงที่ (dimensionless)
	T	คือ อุณหภูมิของอากาศ ($^{\circ}\text{C}$)

สามารถเลือกรูปแบบสมการที่เหมาะสมจะประเมินจากค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination; R^2) มีค่ามากที่สุด แต่มีค่าการลดลงโคกำลังสอง (X^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error; RMSE) น้อยที่สุด

2.5.2 ประโยชน์ของวอเตอร์ซอร์พชันไอโซเทอร์มแบบการดูดซับความชื้น

ไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นสามารถนำมาอธิบายการดูดน้ำกลับของผลิตภัณฑ์อาหารแต่ละชนิด โดยเฉพาะอาหารประเภทไวต่อความชื้น เช่น อาหารแห้ง ชาสมุนไพร ขนมขบเคี้ยว เป็นต้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากจะเกิดการเสื่อมเสียคุณภาพทางเคมีและกายภาพได้เร็ว จนไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค อีกทั้งสามารถนำกราฟไอโซเทอมการดูดซับความชื้น มาวิเคราะห์ทำนายอายุการเก็บผลิตภัณฑ์อาหารในบรรจุภัณฑ์ที่ปิดสนิท (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และสาทิป รัตนภาสกร, 2555) การสร้างไอโซเทอมการดูดซับความชื้น ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ นอกจากจะมีประโยชน์ในการหาสภาวะที่เหมาะสมของการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารแล้ว ยังมีประโยชน์อีกหลายด้าน เช่น การเลือกบรรจุภัณฑ์เหมาะสมเพื่อลดการเคลื่อนย้ายความชื้นระหว่างอาหารกับสภาวะแวดล้อม การคัดเลือกส่วนผสมของอาหารเพื่อหลีกเลี่ยงการเคลื่อนย้ายความชื้นระหว่างส่วนผสม การทำนายการเปลี่ยนแปลงด้านเคมีและจุลินทรีย์ของอาหารอันเนื่องมาจากปริมาณความชื้นสำหรับอาหารแห้งและอาหารกึ่งแห้ง และยังช่วยในการเลือกปริมาณความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งที่เหมาะสม เพื่อยืดอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการสร้างไอโซเทอมการดูดซับความชื้น ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ เป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับนักวิทยาศาสตร์ทางอาหาร (สิทธิโชค เถลิงนวชาติ และ เกียรติศักดิ์ ดวงมาลัย, 2557)

2.6 ผลของสภาวะการอบแห้งต่อคุณภาพทางกายภาพ และปริมาณสารสำคัญในผักและผลไม้

2.6.1 สี

สีมีคุณสมบัติที่สำคัญและสามารถใช้เป็นเครื่องบ่งชี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ทั้งในเชิงกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสของอาหาร การเปลี่ยนแปลงของสีส่วนใหญ่เกิดในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัย เช่น เกิดจากความร้อนหรือจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยทั่วไปการอบแห้งที่ใช้ระยะเวลาอันยาวนานและการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูงจะเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งผลิตภัณฑ์อาหารเมื่อการอบแห้งก็มีสีเข้มขึ้นเนื่องจากความร้อนหรือปฏิกิริยาเคมีที่เกิดสีน้ำตาล อุณหภูมิ และช่วงเวลาอาหารมีความชื้น 10 - 20 เปอร์เซ็นต์ มีผลต่อความเข้มของ สีจึงควรหลีกเลี่ยงการใช้อุณหภูมิสูงในช่วงความชื้น อย่างไรก็ตามการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสามารถทำได้ดังนี้ ได้แก่ การลวก การใช้กรดแอสคอร์บิก หรือการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (วัตถุเจือปนอาหาร) แต่อย่างไรก็ตามการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะส่งผลให้เกิดการสูญเสียสารแอนโทไซยานินด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ในการเปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์ส่วนมากเกิดควบคู่กับการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ ซึ่งส่งผลทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อการยอมรับของผู้บริโภค ซึ่งในการที่จะวัดและรายงานค่าสีของอาหารออกมาเป็นตัวเลขที่น่าเชื่อถือได้นั้น จึงจำเป็นต้องควบคุมองค์ประกอบของการรับรู้สีที่สำคัญ 3 ประการ ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสง (Light Source) วัตถุ (Object) และผู้สังเกต (Observer) โดยในส่วนของแหล่งกำเนิดแสงนั้น ต้องมีการควบคุมชนิดของแหล่งกำเนิดแสงในส่วนของวัตถุ ต้องกำหนดว่าจะวัดจากแสงที่สะท้อนหรือส่องผ่านวัตถุ และในส่วนของผู้สังเกต อาจใช้มาตรฐานของ Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) ในการเปรียบเทียบค่าสีที่ได้จากการวัดกับค่าสีที่ได้จากการประเมินด้วยสายตา (Hunterlab, 2011) โดยค่าสีในระบบที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เช่น ระบบ Munsell CIELAB (หรือ CIE L*, a*, b* โดย L* คือค่าความสว่าง (Lightness), a* คือค่าความเป็นสีแดง-เขียว (Redness-Greenness) และ b* คือค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (Yellowness-Blueness) และระบบ CIELCH (หรือ CIE L*, C*, b* โดย L* คือ ค่าความสว่าง (Lightness) c* คือค่าความสดของสี (Chroma) และ b* คือค่าสีแท้ (Hue)) ได้ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากเครื่องวัดสีส่วนใหญ่ไม่สามารถวัดสีบนพื้นผิวที่มีขนาดเกินกว่า 2-5 ตารางเซนติเมตรได้ เครื่องมือประเภทนี้จึงไม่เหมาะสำหรับใช้ประเมินเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงสีของวัตถุที่ไม่ได้มีสีสม่ำเสมอเท่ากันทั้งชิ้น (เช่น ขึ้นผลไม้) แต่สามารถปรับใช้เป็นวิธีการวัดค่าสีที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนวัตถุ และนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนของค่าสีโดยรวมของวัตถุนั้นได้ (Fernandez *et al.*, 2005; Mendoza *et al.*, 2006; HunterLab, 2011) โดยระบบคอมพิวเตอร์วิทัศน์ประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐาน 4 อย่าง ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสง กล้องถ่ายภาพ (Camera) ส่วนอุปกรณ์ (Hardware) และส่วนชุดคำสั่ง (Software) ซึ่งใช้ในการรับและการวิเคราะห์ข้อมูล ตามลำดับ และแหล่งกำเนิดแสงที่นิยมใช้มากที่สุดได้แก่แหล่งกำเนิดแสงแบบ D₆₅ ซึ่งให้แสงช่วงเที่ยงวัน (สีกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)

2.6.2 ปริมาณสารสำคัญ

ดาลัด ศิริวัน (2558) กล่าวว่า อาหารฟังก์ชัน (Functional food) เป็นอาหารที่ให้ประโยชน์ต่อร่างกาย นอกเหนือไปจากคุณค่าทางโภชนาการแบบปกติ โดยอาจมีผลต่อการทำงานของร่างกายแบบจำเพาะเจาะจงที่อวัยวะนั้น ๆ เช่น เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสมอง หรือสามารถลดความเสี่ยงในการเกิดโรคได้ ซึ่งผู้ผลิตอาจทำการเติมสารอาหารหรือสารซึ่งไม่ใช่สารอาหาร หรือสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และนอกจากนี้ยังมีการนิยามอาหารฟังก์ชันมากมาย เช่น

1. ส่วนประกอบอาหารที่ให้ประโยชน์ทางร่างกายอันเห็นได้ชัดหรือช่วยลดความเสี่ยงสำหรับโรคเรื้อรัง และให้ประโยชน์มากกว่าหน้าที่พื้นฐานด้านโภชนาการ
2. อาหารที่ถูกผลิตขึ้นเพื่อลดความเสี่ยงหรือยืดระยะเวลาการเกิดของโรคบางชนิด
3. อาหารบางชนิดซึ่งมีบทบาทส่งเสริมสุขภาพ หรือส่วนประกอบอาหารที่มีผลทางสรีระ
4. อาหารหรือส่วนประกอบอาหารใด ๆ ที่อาจให้ประโยชน์ต่อสุขภาพเหนือกว่าคุณค่าอาหารตามปกติที่มีอยู่ (ปริยานุช ทิพย์ะวัฒน์, 2546; American Dietetics Association, 1999)

งานวิจัยของ Leong และ Oey (2012) ศึกษาสมบัติและปัจจัยที่มีต่อการสลายตัวของสารแอนโทไซยานิน ซึ่งสารแอนโทไซยานินเป็นสารสีแดง สีน้ำเงิน และสีม่วงธรรมชาติ ที่พบในพืชผักและผลไม้ เช่น มะเขือม่วง เป็นต้น ปัจจัยที่ส่งผลต่อการสลายตัวของสารได้แก่ ความร้อน ออกซิเจน แสง อุณหภูมิในระหว่างเก็บรักษา และปัจจัยต่าง ๆ รวมถึงกระบวนการแปรรูป ได้แก่ อุณหภูมิ รวมถึงระยะเวลาในการให้ความร้อนล้วนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอนโทไซยานิน

การให้ความร้อนถือว่าเป็นกระบวนการแปรรูปที่สำคัญอย่างยิ่งในแง่ความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ แต่การให้ความร้อนนั้นก็ส่งผลให้เกิดการสลายตัวของสารต่าง ๆ ได้เช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสลายตัวของรงควัตถุหรือสารสีอย่างส่งผลโดยตรงต่อสีของผลิตภัณฑ์ ในส่วนของแอนโทไซยานิน โดย Fischer *et al.* (2003) ได้ศึกษาความคงตัวเมื่อได้รับความของสารแอนโทไซยานิน ร่วมกับการติดตามค่าสี พบว่าสารแอนโทไซยานินมีการสลายตัวเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีใช้อุณหภูมิในการแปรรูปที่สูงขึ้น

ในงานวิจัยของ วิราญ หน่อแก้ว และคณะ (2557) ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความเร็วลมต่อการเปลี่ยนแปลงสารประกอบฟีนอลิกรวมของสาหร่ายเตา โดยอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 65 - 75 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น แต่การเพิ่มความเร็วลมส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น จึงสามารถช่วยรักษาปริมาณสารฟีนอลิกของสาหร่ายเตา เนื่องจากถ้ามีอัตราการอบแห้งต่ำและได้รับความร้อนเป็นระยะเวลานาน จะส่งผลให้สารประกอบฟีนอลิกเกิดการสลายตัว (Erick *et al.*, 2017) แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าอัตราการอบแห้งสูงเกินไป ก็จะทำให้เกิดการแพร่ของมวลความชื้นของโครงสร้างภายในเซลล์ออกมาอย่างรวดเร็ว

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จนทำให้ผนังเซลล์เกิดความเสียหายและสารประกอบฟีนอลิกเกิดการสลายตัวได้เช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Assawarachan *et al.* (2013)

ในงานวิจัยของ วัฒนา วิรุฒนิกร (2018) ศึกษาผลของอุณหภูมิการอบแห้งต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของกระเจี๊ยบเขียวในช่วงอุณหภูมิ 50 – 70 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกมีแนวโน้มลดลง เมื่อมีการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูงขึ้น โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีปริมาณฟีนอลิกสูงที่สุดเท่ากับ 96.39 มิลลิกรัมต่อกรัมกรดแกลลิก เนื่องจากมีอุณหภูมิในการอบแห้งต่ำที่สุด

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ertekin และคณะ (2003) ศึกษาการอบแห้งชิ้นบางของมะเขือยาว เครื่องทำแห้งในห้องปฏิบัติการโดยหาสภาวะในการอบแห้งของมะเขือยาว ซึ่งใช้อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 30 - 70 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 0.5 - 2.0 เมตร/วินาที และทำการศึกษาค่าผลของอุณหภูมิของชิ้นตัวอย่างที่มีต่อการอบแห้ง ระยะเวลาในการอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วลม ในการอบแห้งทำให้เวลาในการอบแห้งสั้นลง ในการอบแห้งมะเขือยาวต้องทำการเตรียมตัวอย่างไว้ล่วงหน้าเพื่อลดระยะเวลาในการอบแห้ง มะเขือยาวชิ้นที่บางทำให้เวลาในการอบแห้งสั้นลง อุณหภูมิอากาศที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสว่างของสีตัวอย่างลดลง ความหนาของชิ้นตัวอย่างไม่มีผลต่อค่าสี การเพิ่มความเร็วลมในการอบแห้งทำให้อัตราส่วนการอบแห้งเพิ่มขึ้นและที่อุณหภูมิอากาศแห้งที่ 50 องศาเซลเซียสได้ค่าสูงสุด

Doymaz (2008) ศึกษาและเปรียบเทียบการลวกกระเทียมและไม่ลวกกระเทียมหั่นชิ้น (leek slice) โดยตัวอย่างกระเทียมผ่านการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที ก่อนนำไปทำแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 ± 1 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2.5 เมตร/วินาที จากการทดลองพบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการลวกก่อนการอบแห้งใช้เวลาการอบแห้งที่น้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการลวก และการลวกก่อนทำแห้งช่วยเร่งอัตราการอบแห้งในคืนตัวได้อีกด้วย (rehydration capacity)

กัญจน์พัชร อุปศิลป์ (2553) ศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการลวกใบเตยสดที่เหมาะสมที่สุด โดยทำการลวกด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 90 และ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 3 และ 5 นาที ตามลำดับ จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำผลิตภัณฑ์ใบเตยอบแห้งมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางด้านเคมี ได้แก่ ค่าสี ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) และปริมาณความชื้น จากการศึกษาพบว่า การลวกใบเตยสดที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 นาที เหมาะสมที่สุด ผู้บริโภคให้การยอมรับมากที่สุดจากวิธีการทดสอบแบบ 9-Point Hedonic Scale และมีค่าสี L a b เท่ากับ 51.08 9.18 และ 13.74 ตามลำดับ ค่าวอเตอร์แอกติวิตีเท่ากับ 0.45 และมีปริมาณความชื้น 4.10 เปอร์เซ็นต์

Cernisev (2010) ศึกษาการอบแห้งมะเขือเทศ ด้วยลมร้อนแบบหลายขั้นตอน (multistage drying) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์มะเขือเทศอบแห้ง โดยการใช้วิธีการปรับระดับอุณหภูมิลมร้อนในกระบวนการอบแห้งถึง 7 ระดับ เพื่อรักษาอุณหภูมิผิวมะเขือเทศไม่ให้เกินอุณหภูมิที่กำหนด ทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (Sturm *et al.*, 2014) และผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพของสีอยู่ในเกณฑ์การยอมรับของผู้บริโภค อีกทั้งยังพบว่าในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการอบแห้งสามารถใช้อุณหภูมิสูงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Apichart และคณะ (2010) ศึกษาการออกแบบเครื่องทำแห้งแบบป้อนความร้อนที่ใช้สำหรับการอบแห้งพริก โดยปัจจัยที่ศึกษา คือ ความดันและอุณหภูมิภายในห้องทำแห้ง ที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และระยะเวลาในการอบแห้ง เช่น ค่าความแตกต่างของสี ร้อยละการหดตัว และอัตราการคืนตัว จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาใช้ในการสร้างสมการแบบจำลองในการทำนายการอบแห้งแบบชั้นบาง ที่สามารถทำนายได้แม่นยำที่สุด จากการทดลองพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดัน ส่งผลให้สีของผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เข้มข้น มีร้อยละการหดตัวและอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น แต่มีอัตราการคืนตัวและระยะเวลาที่ใช้ในการทำที่แห้งสั้นลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

Paola Russo *et al.* (2013) ในงานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการอบแห้งแบบการพาความร้อนที่อุณหภูมิต่างกัน 4 ระดับ คือ 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในมะเขือม่วง จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศในการอบแห้งช่วยให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการแห้งที่นานที่สุด รองลงมาคือ 50 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แต่การใช้อุณหภูมิที่สูงในการอบแห้งส่งผลอย่างมากต่อโครงสร้างภายในของตัวอย่าง ซึ่งสรุปได้ว่าการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิปานกลาง (60 องศาเซลเซียส) จะช่วยรักษาคุณภาพด้านโครงสร้างที่ดีที่สุด

ปิยะพร และ ศิริธร (2562) ศึกษาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของหน่อไม้ตงส้มแล้ง ทำแห้งแบบลมแห้งแบบร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น ทำให้ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด เบอโรซินต์การยับยั้ง DPPH radical และค่ากิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระมีค่าลดลง ตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิในการอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด เบอโรซินต์การยับยั้ง DPPH radical และค่ากิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระสูงสุด

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการปรับปรุงการอบแห้งแบบลมร้อน เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น ด้วยการใช้ระบบป้อนความร้อนมาช่วยในกระบวนการอบแห้ง เพื่อที่จะสามารถนำความร้อนภายในห้องทำแห้งกลับไปใช้ใหม่จากการศึกษาของ Fatouh *et al.* (2006) ในการอบแห้งสมุนไพรพบว่าการใช้ระบบป้อนความร้อนร่วมกับการอบแห้ง ทำให้สามารถช่วยลดการใช้พลังงานได้ถึง 1.5 เท่า เมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อนทั่วไป และยังมีการศึกษาของ Phoungchandang and Saentaweek (2011) ที่นอกจากการนำระบบป้อนความร้อนมาช่วยลดการใช้พลังงานแล้ว ยังมีการศึกษาการอบแห้งแบบหลายขั้นตอนทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพที่ดี ซึ่งเป็นกระบวนการที่เหมาะสมในการนำไปต่อยอดในอุตสาหกรรมเนื่องจากมีต้นทุนการผลิตต่ำ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบ เครื่องมือ และอุปกรณ์

3.1.1 วัตถุดิบ

- มะเขือม่วงมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้เฉลี่ยเท่ากับ 2.6 ± 0.2 เปอร์เซ็นต์บrikซ์
- มะเขือม่วงสดมีปริมาณความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 91.18 ± 0.74 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก

3.1.2 สารเคมี

- ลิเทียมคลอไรด์ (KEMAUS, Australia)
- โฟแทสเซียมแอสซีเทต (Ajax Finechem, Australia)
- แมกนีเซียมคลอไรด์ (Ajax Finechem, Australia)
- โฟแทสเซียมคาร์บอเนต (Ajax Finechem, Australia)
- โซเดียมโบรไมด์ (Ajax Finechem, Australia)
- โซเดียมคลอไรด์ (LobaChemie, India)
- โฟแทสเซียมคลอไรด์ (QREC, New Zealand)
- สารละลายเมทานอล
- สารละลายกรดฟอสฟอริก
- สารละลายอะซีโตนไตรล์

3.1.3 เครื่องมือ และอุปกรณ์

- เครื่องทำแห้งแบบลมร้อน ระบบควบคุมการทำแห้งอัจฉริยะในผลิตภัณฑ์อาหารแห่งคุณภาพชั้นพรีเมียม (สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย)
- เครื่องแช่เยือกแข็งแบบใช้ลมเย็นจัดเป่า (Compact freeze, PATKOL, Thailand)
- เครื่องไฮเปอร์ฟอร์แมนซ์ลิควิดโครมาโตกราฟี (FLEXAR™ LC Systems, Perkin Elmer, USA)
- เครื่อง Microwave-assisted extraction
- เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี (4TE, AquaLab, USA)
- เครื่องวัดสี (Color Flex, Hunter Lab, USA)
- เครื่อง Refractometer (HI96800, Hanna, Romania)
- ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) (UF55, Memmert, Germany)
- เครื่องสไลด์ (250ES-10, LINKRICH, China)
- เครื่องบดตัวอย่าง (Ultra centrifugal mill) (zm200, Retsch, Germany)
- เครื่องปั่น (HR2115, Philips Electronic, Nederland)
- เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง (BSA224S-CW, Sartorius, Germany)
- เครื่องชั่งน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง (UX-3200G, SHIMADZU, Japan)
- ตู้แช่แข็ง (SF-PC997, Panasonic, Japan)
- ตู้แช่เย็น (SBC-P2DB, Panasonic, Japan)

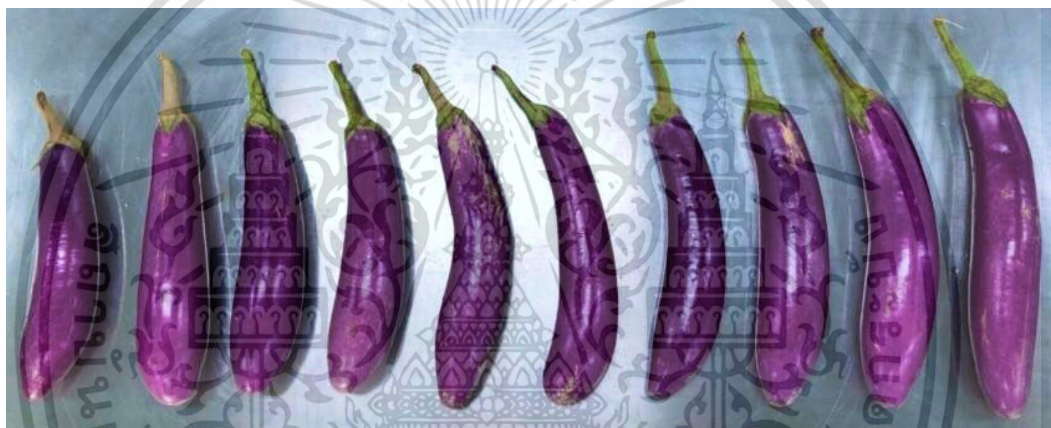
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คอลัมน์ C18 (PerkinElmer) ขนาด 250 x 4.6 มิลลิเมตร
- ถาดสำหรับบอบแห้ง
- ไซริงค์ฟิลเตอร์ไนลอน ขนาด 0.45 ไมโครเมตร
- ถุงลามีเนต
- ถุงอลูมิเนียมฟอยล์

3.2 การเตรียมตัวอย่าง

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างมะเขือม่วง

ตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดลองคือ มะเขือม่วงพันธุ์เชียงใหม่เบอร์ 1 (รูปที่ 3.1) จากอำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ โดยมีมะเขือม่วงสดมีความยาวเฉลี่ย 26.1 ± 1.8 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 5.5 ± 2.43 เซนติเมตร และมีปริมาณความชื้นประมาณ 91 เปอร์เซ็นต์-ฐานเปียก

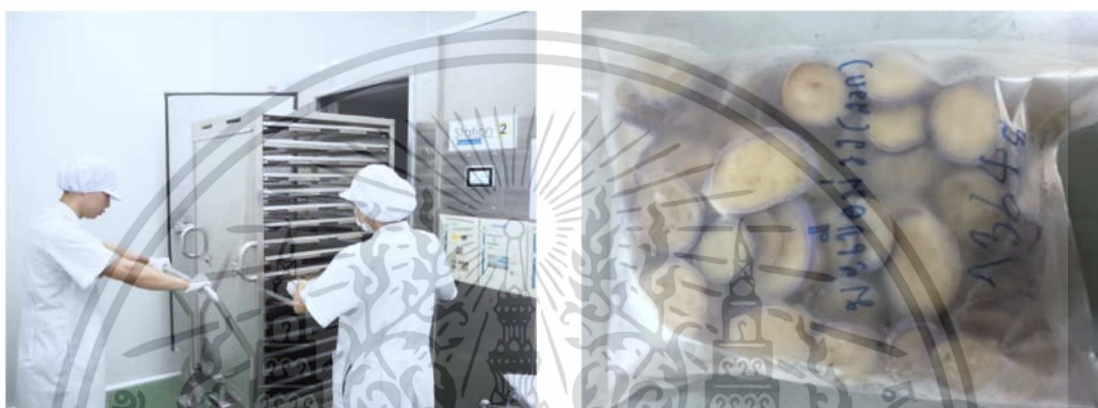


รูปที่ 3.1 มะเขือม่วงพันธุ์เชียงใหม่เบอร์ 1

ดำเนินการผลิตโดยนำมะเขือม่วงมาล้างทำความสะอาดและแช่สารละลายกรดเปอร์ออกซิอะซิติก (PAA) ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 5 นาที (จอมขวัญ สุวรรณรักษ์ และคณะ, 2557) ตัดแต่งและหั่นเป็นแผ่นให้มีความหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องสไลด์ (250ES-10, LINKRICH, China) แล้วนำไปลวกในน้ำเดือด (อุณหภูมิ 80 - 100 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นใส่ลงในน้ำเย็นจัด (0 - 4 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 4 นาที (Judy *et al.*, 1914; Hesham *et al.*, 2013; Nancy and Cindy, 2015; Joyce and Lisa, 2016; อัญจนา จันทร์ปะทิว และคณะ, 2560) นำตัวอย่างมะเขือม่วงขึ้นจากน้ำและวางบนตะแกรงเพื่อสะเด็ดน้ำ จากนั้นนำตัวอย่างมะเขือม่วงวางเรียงบนถาดสแตนเลสสำหรับแช่เยือกแข็ง โดยแช่เยือกแข็งแบบใช้ลมเย็นจัดเป่า (air blast freezing) (เครื่อง Compact freeze, PATKOL, Thailand) ที่อุณหภูมิ -38 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที แล้วนำออกมาบรรจุในถุงโพลีเอทิลีน (LLDPE) ประมาณ 1500 กรัม และเก็บรักษาในตู้แช่แข็ง (SF-PC997, Panasonic, Japan) ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส (รูปที่ 3.2)



(a)



(b)

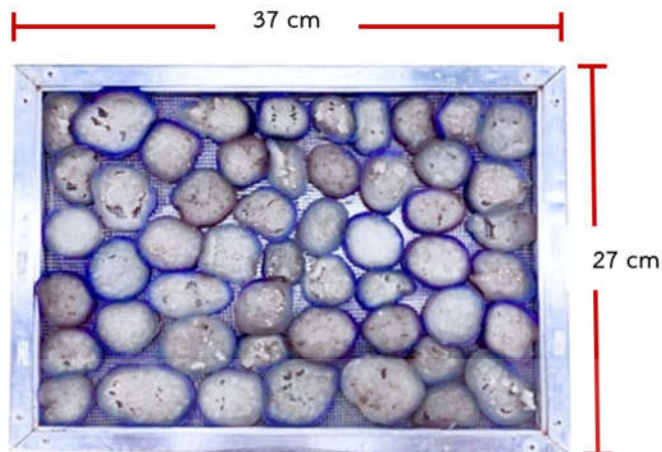
รูปที่ 3.2 การเตรียมตัวอย่าง (a) การเก็บรักษาตัวอย่างมะเขือม่วงที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส (b)

3.3 ศึกษาสถานะการอบแห้ง

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างก่อนการอบแห้ง

นำตัวอย่างมะเขือม่วงมาละลายในตู้เย็น (SBC-P2DB, Panasonic, Japan) ที่ช่วงอุณหภูมิ 4 - 6 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งตัวอย่างมีอุณหภูมิเท่ากับ 4 องศาเซลเซียส ความชื้นฐานเปียกประมาณ 94.03 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 400 กรัมต่อถาด ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่งและบันทึกน้ำหนัก แล้วนำมาเรียงกระจายชั้นเดียวให้เต็มบนถาด สำหรับอบแห้งที่มีขนาดกว้าง 27 เซนติเมตร และยาว 37 เซนติเมตร (รูปที่ 3.3) จำนวน 3 ถาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 การเรียงตัวอย่างมะเขือม่วงก่อนอบแห้ง

3.3.2 วิธีการอบแห้ง

นำตัวอย่างมะเขือม่วงที่ผ่านการจัดเตรียมไว้มาอบแห้ง ด้วยเครื่องทำแห้งแบบลมร้อน ระบบควบคุมการทำแห้งอัจฉริยะในผลิตภัณฑ์อาหารแห้งคุณภาพชั้นพรีเมียม (สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย) ดังแสดงในภาคผนวก ก ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที โดยแบ่ง การอบแห้งเป็น 2 วิธีการ ดังนี้

วิธีการที่ 1 การอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ คือ การอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิอากาศคงที่ แตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยจะคงที่อุณหภูมินั้น ๆ ตลอดกระบวนการอบแห้ง

วิธีการที่ 2 การอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) คือ การอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิอากาศแปรผัน โดยระบบจะเริ่มดำเนินการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศ 70 องศาเซลเซียส และจะปรับลดอุณหภูมิของลมร้อนลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ และใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส (infrared temperature sensor) ในการวัดอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์เพื่อไม่ให้เกินระดับที่กำหนด ซึ่งใช้อุณหภูมิในการอบแห้งแตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

อีกทั้งในระหว่างกระบวนการอบแห้งทั้งสองวิธีการนี้ จะมีการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ โดยกำหนดระยะห่างระหว่างเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัสกับผิวของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 2 เซนติเมตร (รูปที่ 3.4) ซึ่งบันทึกข้อมูลทั้งหมดทุก 1 นาที พร้อมทั้งบันทึกน้ำหนักตัวอย่างด้วยโหลดเซลล์ (Load cell) ทุก ๆ 10 นาที (รูปที่ 3.4) เพื่อวิเคราะห์อัตราการอบแห้ง (drying rate) การคำนวณหาปริมาณความชื้นของตัวอย่างในแต่ละช่วงเวลา ได้จากสมการที่ (3.1)

$$M_t = \frac{W_t - W_s}{W_s} \quad (3.1)$$

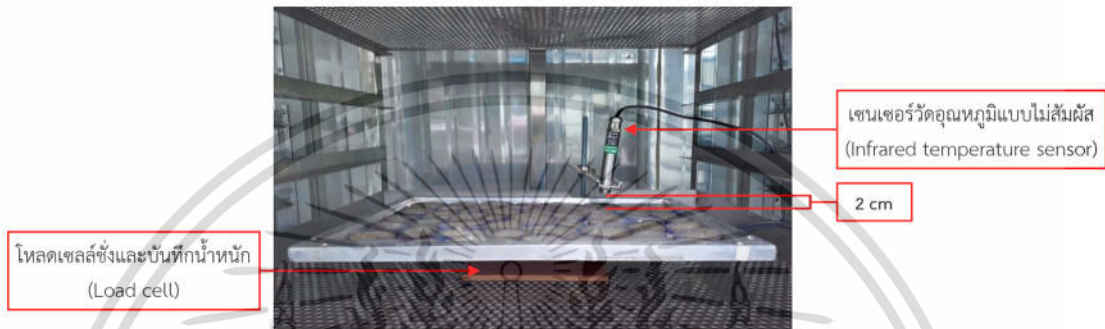
- เมื่อ M_t = ความชื้นของตัวอย่างในแต่ละช่วงเวลา (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมของแห้ง)
 W_t = น้ำหนักทั้งหมดของตัวอย่างในแต่ละช่วงเวลา (กิโลกรัม)
 W_s = น้ำหนักของแห้งของตัวอย่าง (กิโลกรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

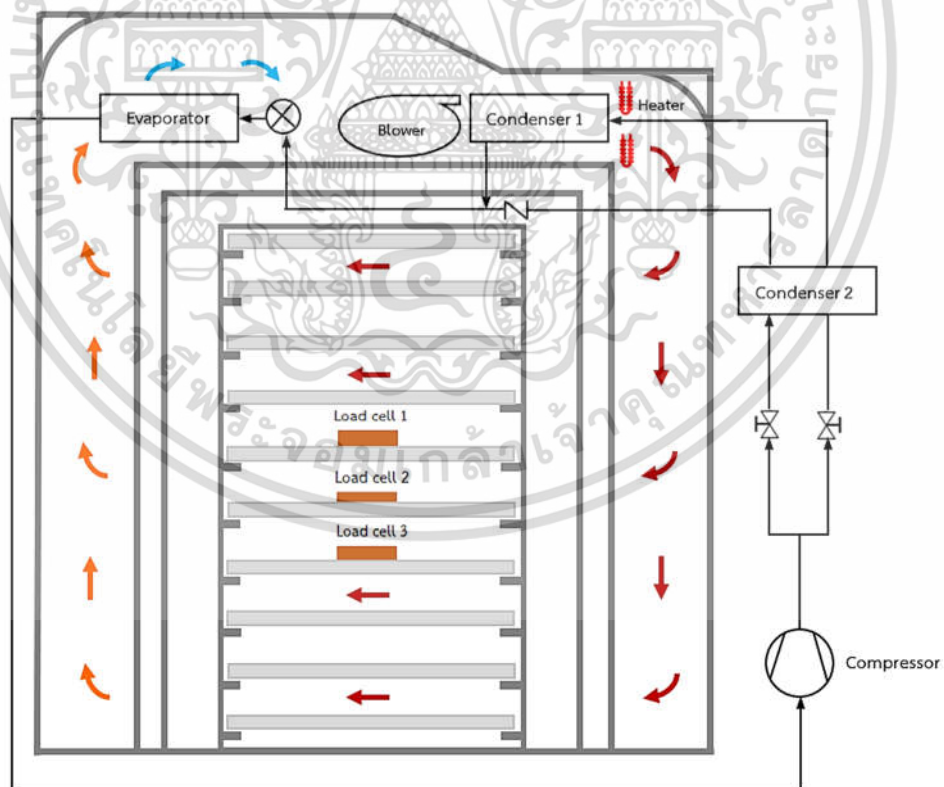
การคำนวณหาอัตราการระเหยนการอบแห้ง (Drying rate) สามารถคำนวณได้จากมวลของเหลวที่ระเหยต่อพื้นที่ที่เกิดการระเหยต่อเวลา ดังสมการที่ (3.2)

$$R = -\frac{W_s}{A} \times \frac{dm}{dt} \quad (3.2)$$

เมื่อ R = อัตราการอบแห้งหรืออัตราการระเหย (กิโลกรัม น้ำต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร)
 A = พื้นที่ผิวที่เกิดการระเหย (ตารางเมตร)
 $\frac{dM}{dt}$ = ปริมาณน้ำที่ระเหยต่อหนึ่งหน่วยเวลา (กิโลกรัม น้ำต่อชั่วโมง)



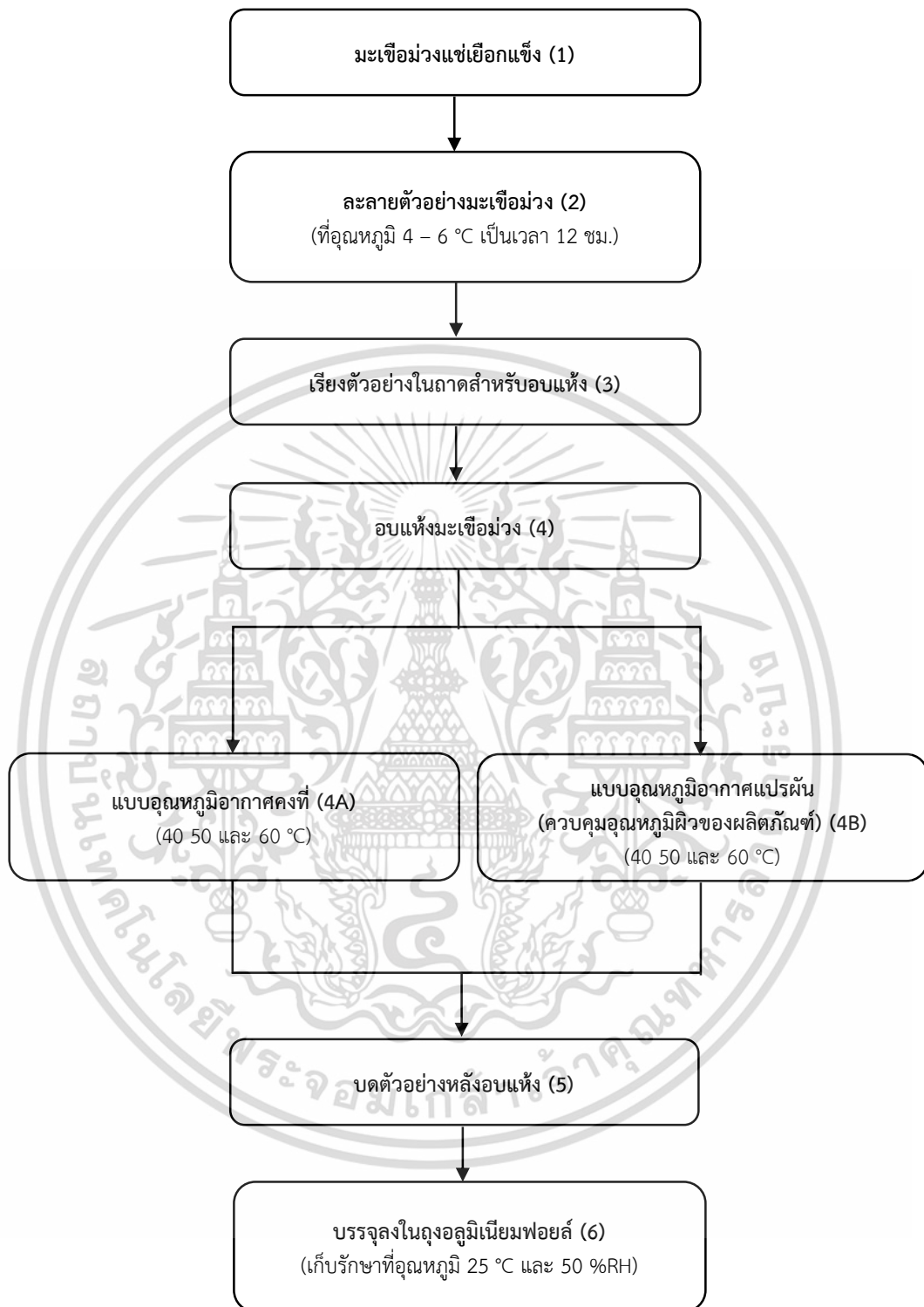
รูปที่ 3.4 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการวัดอุณหภูมิผิวและชั่งน้ำหนักตัวอย่างมะเขือม่วง



รูปที่ 3.5 แผนผังเครื่องทำแห้งแบบลมร้อน ระบบควบคุมการทำแห้งอัจฉริยะในผลิตภัณฑ์อาหารแห้งคุณภาพชั้นพรีเมียม (สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนผังกระบวนการผลิตมะเชื่อม่วงผง



รูปที่ 3.6 กระบวนการผลิตมะเชื่อม่วงผง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การวางแผนการทดลอง

นำตัวอย่างมะเขือม่วงมาอบแห้งด้วยลมร้อน 2 วิธีการ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design ; CRD) ซึ่งตัวแปรที่ต้องการศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ การอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) ทำการทดลองอย่างสุ่ม ทำซ้ำทั้งหมดจำนวน 3 ซ้ำ รวมการทดลองทั้งหมด 18 หน่วยการทดลอง โดยมีลำดับและแผนการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แผนการทดลองการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส (CAT (40 C) CAT (50 C) และ CAT (60 C)) และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส (VAT (PSTL 40 C) VAT (PSTL 50 C) และ VAT (PSTL 60 C))

หน่วยการทดลอง	ทรีตเมนต์					
	C40	C50	C60	S40	S50	S60
1	-	ซ้ำ 3	-	-	-	-
2	ซ้ำ 3	-	-	-	-	-
3	-	-	ซ้ำ 2	-	-	-
4	-	-	ซ้ำ 1	-	-	-
5	ซ้ำ 1	-	-	-	-	-
6	-	ซ้ำ 2	-	-	-	-
7	ซ้ำ 2	-	-	-	-	-
8	-	-	ซ้ำ 3	-	-	-
9	-	ซ้ำ 1	-	-	-	-
10	-	-	-	ซ้ำ 3	-	-
11	-	-	-	-	-	ซ้ำ 3
12	-	-	-	-	ซ้ำ 2	-
13	-	-	-	ซ้ำ 2	-	-
14	-	-	-	-	ซ้ำ 1	-
15	-	-	-	-	-	ซ้ำ 1
16	-	-	-	ซ้ำ 1	-	-
17	-	-	-	-	ซ้ำ 3	-
18	-	-	-	-	-	ซ้ำ 2

ในการอบแห้งของมะเขือม่วงทุกสภาวะจะดำเนินการจนกระทั่งตัวอย่างมีปริมาณความชื้นต่ำกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก (ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผักและผลไม้แห้ง (มผช.136/2558; Sabatel *et al.*, 2020))

3.3.4 การวิเคราะห์คุณภาพของมะเขือม่วงผง

นำมะเขือม่วงที่ผ่านการอบแห้งมาบดให้เป็นผงด้วยเครื่องบดตัวอย่าง (zm200, Retsch, เอกสารนี้ Germany) ใช้ตะแกรงรูสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoid holes) ขนาด 0.25 มิลลิเมตร จากนั้นบรรจุลง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในถุงออลูมิเนียมฟอยล์ และเก็บรักษาไว้ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์ เพื่อป้องกันการดูดความชื้นกลับของผลิตภัณฑ์ก่อนการตรวจวิเคราะห์คุณภาพ โดยวิเคราะห์คุณภาพต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณความชื้น (Moisture content) วอเตอร์แอกติวิตี (Water activity) สี (Colour) ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ซอร์พชันไอโซเทอร์มของน้ำ (Water sorption isotherm) และปริมาณกรดคลอโรจีนิก (Chlorogenic acid)

1) ปริมาณความชื้น (Moisture content)

วิเคราะห์ความชื้นตัวอย่างมะเขือม่วง ด้วยวิธีการอบแห้ง (oven drying method) (AOAC, 2000; Gozde *et al.*, 2015; Jose *et al.*, 2017) โดยนำภาชนะสำหรับอบตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์ความชื้นเข้าตู้อบลมร้อน (hot air oven) (UF55, Memmert, Germany) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาใส่ตู้ดูดความชื้นและปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่งและบันทึกน้ำหนัก สุ่มตัวอย่างมะเขือม่วงก่อนอบแห้งและหลังอบแห้ง ชั่งน้ำหนักประมาณ 3 กรัม วัดตัวอย่างจำนวน 3 ซ้ำ ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ใส่ในภาชนะสำหรับอบตัวอย่าง บันทึกน้ำหนักแล้วนำเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำภาชนะสำหรับอบตัวอย่างออกจากตู้อบลมร้อนแล้วใส่ในตู้ดูดความชื้นและปิดฝาภาชนะปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักเพื่อนำไปคำนวณเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก และฐานแห้ง ดังสมการที่ (3.3 และ 3.4) แสดงวิธีการดังภาคผนวก ข.1

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก} = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \times 100 \quad (3.3)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก} = \frac{(m_1 - m_2)}{m_2} \times 100 \quad (3.4)$$

โดย m_1 = น้ำหนักตัวอย่างผลิตภัณฑ์ก่อนอบแห้ง (กรัม)
 m_2 = น้ำหนักตัวอย่างผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง (กรัม)

2) วอเตอร์แอกติวิตี (Water activity) วิเคราะห์วอเตอร์แอกติวิตีของมะเขือม่วงผึ่ง โดยสุ่มตัวอย่างมะเขือม่วงผึ่งประมาณ 3 กรัม วัดค่าวอเตอร์แอกติวิตีด้วยเครื่องวอเตอร์แอกติวิตี (4TE, AquaLab, USA) วัดตัวอย่างจำนวน 3 ซ้ำ แสดงวิธีการดังภาคผนวก ข.2

3) สี (Colour)

ตรวจวัดตัวอย่างมะเขือม่วงก่อนอบแห้งและหลังอบแห้ง วัดโดยใช้ระบบสี CIE L*a*b* ที่สภาวะแสง D₆₅ Observer 10° จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณค่าสีแท้ (Hue angle) และค่าความสดของสี (Chroma) (Phoungchadang and Saentaweek, 2011; Gozde *et al.*, 2015) แสดงวิธีการดังภาคผนวก ข.3

4) ความหนาแน่นรวม (Bulk Density)

วิเคราะห์ความหนาแน่นรวมของมะเขือม่วงผึ่ง โดยดัดแปลงจาก Seerangurayar *et al.* (2017) โดยชั่งน้ำหนักภาชนะสำหรับใส่ตัวอย่างที่ทราบปริมาตรแน่นอน ด้วยเครื่องทศนิยม 2 ตำแหน่ง แล้วใส่ตัวอย่างมะเขือม่วงผึ่งที่ระดับความสูงจากปลายกรวยถึงขอบภาชนะเท่ากับ 15 เซนติเมตร ใส่ให้เต็มภาชนะจากนั้นปาดตัวอย่างมะเขือม่วงให้เสมอปากภาชนะ แล้วนำตัวอย่างใน

ภาชนะมาชั่งน้ำหนักและคำนวณค่าความหนาแน่นรวม ดังสมการที่ (3.5) วัดตัวอย่างจำนวน 3 ซ้ำ และแสดงวิธีการดังภาคผนวก ข.4

$$D = \frac{m}{V} \quad (3.5)$$

โดย D = ความหนาแน่นรวม (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
 m = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)
 V = ปริมาตรภาชนะ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

5) วอเตอร์ซอร์พชันไอโซเทอร์ม (Water sorption isotherm)

วิเคราะห์ซอร์พชันไอโซเทอร์มของมะเขือม่วงผง คำนวณหาความชื้นหลังสมดุลของตัวอย่างที่เก็บอยู่ในสารละลายเกลืออิ่มตัว ที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน 7 ชนิด โดยนำข้อมูลค่าความชื้นสมดุลที่สัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์ของตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 5 แบบ โดยการเลือกรูปแบบสมการที่เหมาะสมจะค่ากำลังสองของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient of Square, R^2), ค่าไคกำลังสอง (Chi-square; X^2), ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error; RMSE) (Thompson *et al.*, 1968; Pfoest *et al.*, 1976; Iglesias and Chirife, 1976; Phoungchandang and Saentaweek, 2011; ชนนท์ ราชภูนิยม และ สุเนตร สืบคำ, 2555; Moreira *et al.*, 2015) แสดงวิธีการดังภาคผนวก ข.6

3.4 ปริมาณกรดคลอโรจีนิก (Chlorogenic acid)

นำมะเขือม่วงผงปริมาณ 5 กรัม และบันทึกน้ำหนัก เติมน้ำตาลละลายเมทานอล 150 มิลลิลิตร แล้วนำไปสกัดด้วยวิธี Microwave-assisted extraction จากนั้นกรองสารสกัดที่ได้ผ่านไซริงค์ฟิลเตอร์ไนลอน ขนาด 0.45 ไมโครเมตร วิเคราะห์หาปริมาณกรดคลอโรจีนิก ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC) โดยใช้คอลัมน์ (Brownlee, PerkinElmer, USA) ความยาว 25 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.60 มิลลิเมตร ขนาดอนุภาค 5.0 ไมโครเมตร เฟสคงที่เป็น Analytical C18 ใช้ระบบเฟสเคลื่อนที่ สารละลายกรดฟอสฟอริกในน้ำ 0.1 เปอร์เซ็นต์ และอะซิโตนไนโตรเจน โดยปรับอัตราส่วนของสารละลายกรดฟอสฟอริก 0.1 เปอร์เซ็นต์ และอะซิโตนไนโตรเจนเริ่มต้นเท่ากับ 95 : 5 คงไว้ 5 นาที จากนั้นปรับอัตราส่วนเป็น 5 : 95 จนกระทั่งครบ 50 นาที ใช้อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที ตรวจวิเคราะห์ด้วย Photodiode array detector (PDA) ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร ปริมาณของสารตัวอย่างที่ฉีดเท่ากับ 10 ไมโครลิตร วัดตัวอย่างจำนวน 3 ซ้ำ แสดงวิธีการดังภาคผนวก ข.5

3.5 การวิเคราะห์การใช้พลังงาน (Energy consumption)

การวิเคราะห์ปริมาณการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ คือ การอบแห้งแบบอุณหภูมิกอากาศคงที่และการอบแห้งแบบอุณหภูมิกอากาศแปรผัน ดำเนินการโดยบันทึกกำลังไฟฟ้า และเวลาที่เครื่องอบแห้งทำงาน จากนั้นนำมาคำนวณหาปริมาณการใช้พลังงานดังสมการที่ (3.6) และสามารถคำนวณประสิทธิภาพพลังงาน (Energy efficiency) หรือค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption; SEC) (Kejing *et al.*, 2015) ดังสมการที่ (3.7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ E ในเพื่อการศึกษา P x t ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน (3.6)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ E = ปริมาณการใช้พลังงาน (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
 P = กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)
 t = เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)

$$\text{SEC} = \frac{E}{w} \quad (3.7)$$

เมื่อ SEC = ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม)
 W = น้ำหนักน้ำที่กำจัดได้ในระหว่างการอบแห้ง (กิโลกรัม)

3.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical analysis)

ออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design ; CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลด้วย (analysis of variance ; ANOVA) โดยใช้วิธีของ Tukey's Test เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($P < 0.05$)

3.7 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการผลิตมะเชื่อม่วงผงจากการอบแห้งแบบลมร้อนในระดับอุตสาหกรรม

พิจารณาระยะเวลาการอบแห้งของแต่ละสภาวะการทดลอง แล้วจึงนำมาวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการผลิตที่ส่งผลให้มะเชื่อม่วงที่ผ่านการอบแห้งแบบลมร้อนมีคุณภาพแตกต่างกัน เพื่อใช้ในการเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชิงอุตสาหกรรม โดยในการคำนวณค่าใช้จ่ายการผลิตสำหรับการอบแห้ง สามารถจำแนกวิเคราะห์เป็นส่วน ๆ ได้ดังนี้

3.7.1 ต้นทุนคงที่ (Fixed cost) คือ ส่วนของต้นทุนการผลิตที่คิดราคาเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต รวมถึงค่าเสื่อมราคาของเครื่องเหล่านั้นด้วย ซึ่งในระบบของโรงงานอุตสาหกรรมทั่ว ๆ ไป จะต้องนำมาใช้ในการคิดคำนวณเป็นราคาต้นทุนของผลิตภัณฑ์ต่อหนึ่งหน่วยการผลิต โดยต้องนำมาคิดรวมกับต้นทุนผันแปรสำหรับการผลิตในแต่ละครั้ง

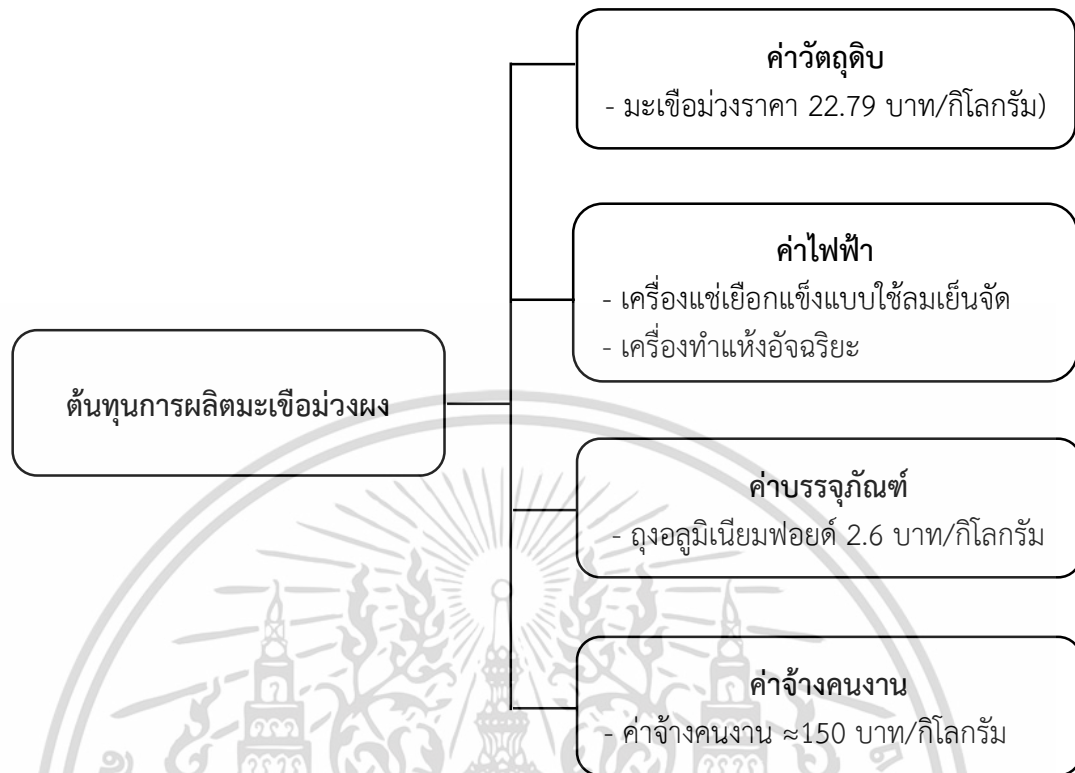
3.7.2 ต้นทุนผันแปร (Running cost) คือ ส่วนของต้นทุนที่รวมค่าต่าง ๆ ได้แก่ ค่าวัตถุดิบ ค่าไฟฟ้า ค่าบรรจุภัณฑ์ และค่าจ้างคนงาน ซึ่งจะมีความหลากหลายและมูลค่าที่แตกต่างกันในแต่ละโรงงานในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) เพื่อพัฒนาและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการผลิตในระดับอุตสาหกรรมต่อไป ดังนั้นค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจึงเป็นเพียงการประมาณ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตในแต่ละสภาวะ ดังนั้นในการประเมินต้นทุนในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะพิจารณาเฉพาะต้นทุนผันแปรส่วนที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปเพื่อให้ได้มาซึ่งต้นทุนเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์มะเชื่อม่วงผงที่ผ่านการอบแห้งเท่านั้น ดังแสดงในภาคผนวก ค ในตารางที่ ค.23

โดยการวิเคราะห์ค่าไฟฟ้า จะดำเนินการบันทึกหน่วยไฟฟ้าของเครื่องแช่เยือกแข็งแบบใช้ลมเย็นจัดเป่า (Compact freeze, PATKOL, Thailand) และเครื่องทำแห้งแบบลมร้อน ระบบควบคุมการอบแห้งอัจฉริยะในผลิตภัณฑ์อาหารแห้งคุณภาพชั้นพรีเมียม (สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย) จากนั้นนำหน่วยไฟฟ้ามาคำนวณกับอัตราค่าไฟของทางการไฟฟ้านครหลวง 4.4217 บาท (ค่าไฟฟ้ากิจการขนาดเล็ก) ดังสมการที่ (3.8)

$$\text{ค่าไฟฟ้า (บาท)} = \text{จำนวนหน่วยไฟฟ้า (หน่วย)} \times 4.4217 \text{ (บาท/หน่วย)} \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนผังการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตมะเขือม่วงผงต่อ 1 กิโลกรัม



รูปที่ 3.7 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตมะเขือม่วงผง

หมายเหตุ

- เครื่องแช่เยือกแข็งแบบใช้ลมเย็นจัดเก่า = (กำลังไฟฟ้าที่ใช้ ≈ 16 กิโลวัตต์ชั่วโมง) X (ระยะเวลาของการแช่เยือกแข็ง)
- เครื่องทำแห้งอัจฉริยะ = (กำลังไฟฟ้าที่ใช้ ≈ 6 กิโลวัตต์ชั่วโมง) X (ระยะเวลาของการอบแห้ง)

บทที่ 4

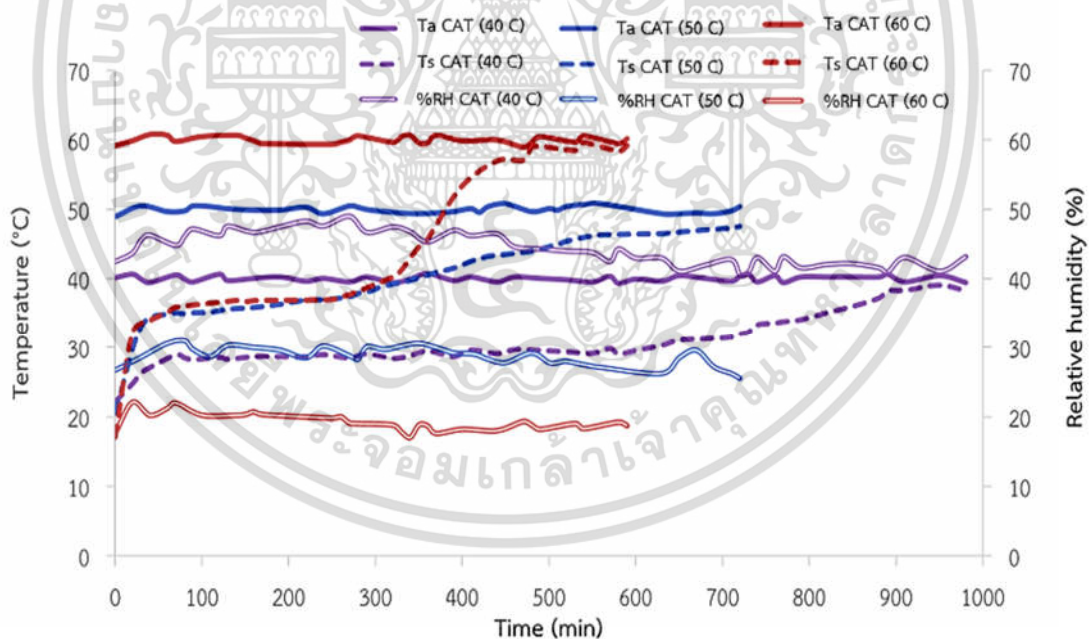
ผลการดำเนินการวิจัยและการอภิปราย

งานวิจัยฉบับนี้อบแห้งมะเขือม่วงที่มีค่าคุณภาพเริ่มต้น คือ ความชื้นฐานเปียกประมาณ 94.03 เปอร์เซ็นต์ และค่าสี L^* a^* และ b^* เท่ากับ 49.72 ± 0.03 -1.67 ± 0.04 และ 8.98 ± 0.05 ตามลำดับ รวมถึงมีความหนา 5 มิลลิเมตร โดยการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส (CAT (40 C) CAT (50 C) และ CAT (60 C)) และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส (VAT (PSTL 40 C) VAT (PSTL 50 C) และ VAT (PSTL 60 C)) ด้วยความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที และดำเนินการอบแห้งจนกระทั่งผลิตภัณฑ์มีค่าความชื้นฐานเปียกต่ำกว่า 12 เปอร์เซ็นต์

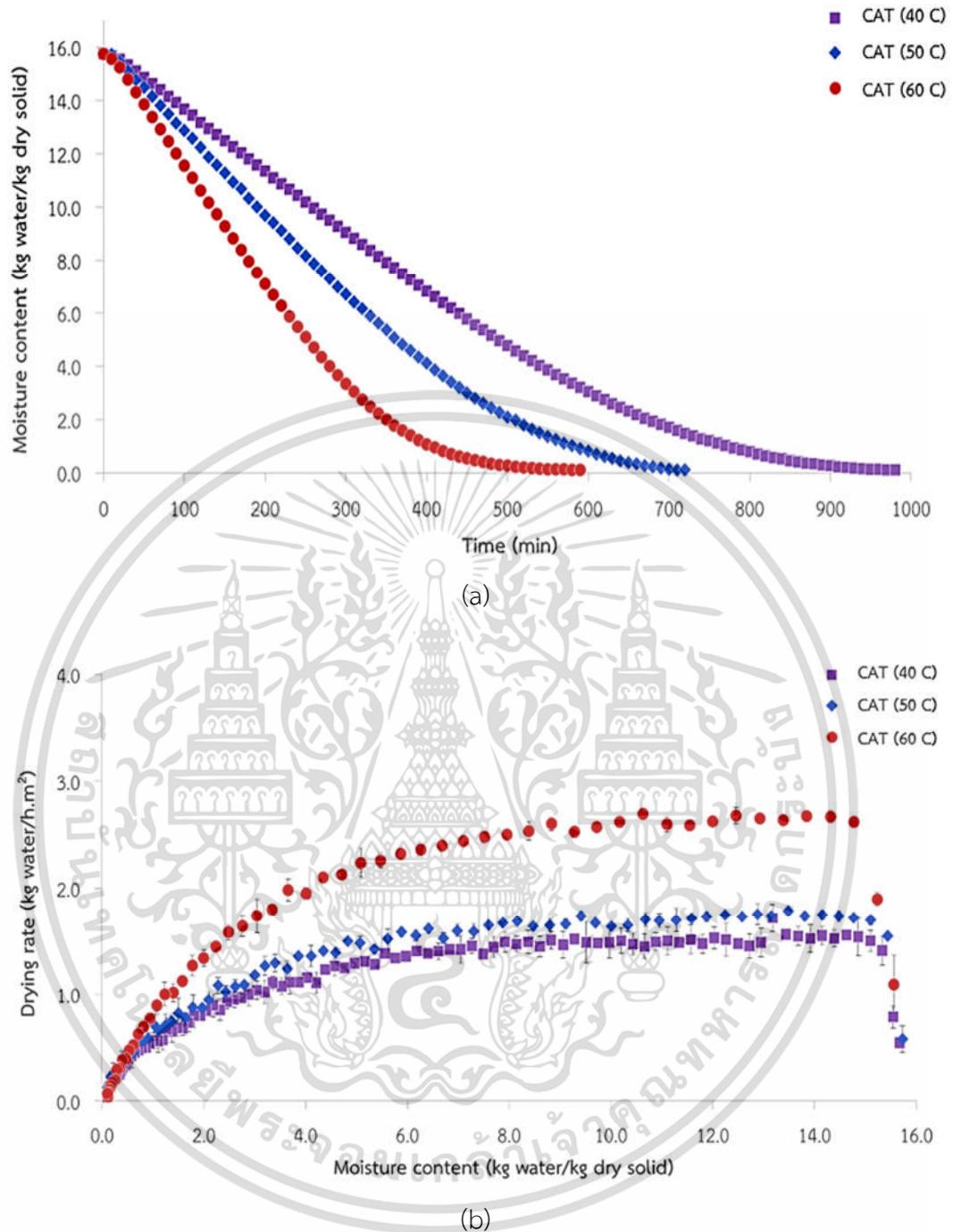
4.1 กระบวนการอบแห้งแบบลมร้อน

4.1.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและพฤติกรรมของการอบแห้งแบบลมร้อนของมะเขือม่วง

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบลมร้อน โดยแสดงข้อมูลอุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิอากาศ และเวลา แสดงดังรูปที่ 4.1 และแสดงพฤติกรรมการอบแห้งแสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิเริ่มต้นก่อนการอบแห้งประมาณ 20 – 22 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศ (Ta) อุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ (Ts) และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.2 พฤติกรรมการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส

(a) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

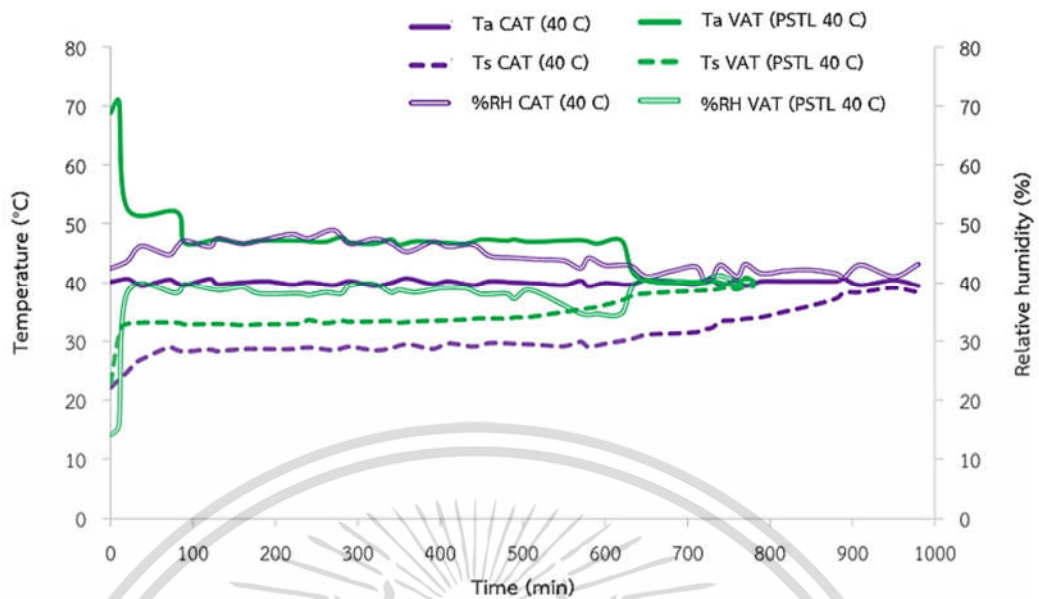
(b) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและปริมาณความชื้น

ผลจากการศึกษาการอบแห้งมะเขือม่วงแบบอุณหภูมิกาศคงที่ พบว่า การอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่ 60 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นที่สุดเท่ากับ 590 นาที (ดังรูปที่ 4.9a) ในระหว่างการอบแห้งมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำที่สุดที่อยู่ในช่วง 18 – 22 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.1) อีกทั้งเมื่อพิจารณาถึงพฤติกรรมการอบแห้งมะเขือม่วง (รูปที่ 4.2) พบว่า การอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่ 60 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารของงานวิจัยที่ทำการเผยแพร่ในสื่อออนไลน์เพื่อให้นักศึกษาได้เรียนรู้เกี่ยวกับเรื่องอบแห้งมะเขือม่วง

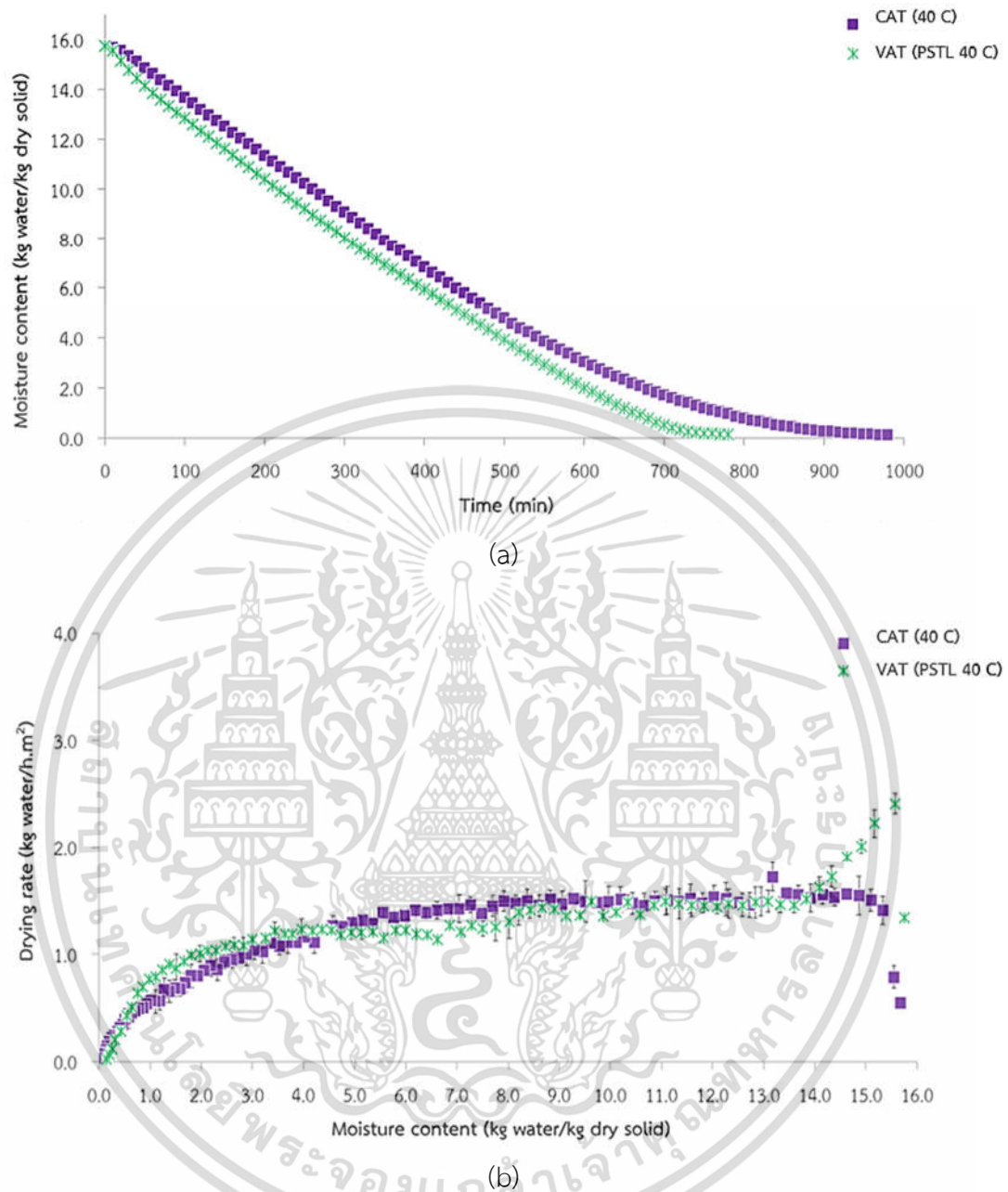
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการอบแห้งแบบเดียวกัน โดยมีค่าเท่ากับ 2.68 กิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร รองลงมาคือ การอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่ 50 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาถึง พฤติกรรมการอบแห้ง (รูปที่ 4.2) จะเห็นได้ว่ามีอัตราการอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 1.78 และ 1.72 กิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ตามลำดับ และใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเท่ากับ 720 และ 980 นาที ซึ่งมีอัตราการอบแห้งต่ำกว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่ 60 องศาเซลเซียส ถึง 1.5 และ 1.6 เท่า ตามลำดับ เนื่องจากกระบวนการอบแห้งมีการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศร้อนให้ สูงขึ้นจะทำให้อากาศร้อนสามารถถ่ายเทไปยังผิวของผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น จึงส่งผลให้น้ำในผลิตภัณฑ์ สามารถระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะของน้ำให้กลายเป็นไอได้มากกว่าการใช้ อุณหภูมิกาศร้อนต่ำ (วิลโลว์ รังสาตทอง, 2547; Nimmol *et al.*, 2007; Prachayawarakorn *et al.*, 2008) อีกทั้งการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นยังทำให้อุณหภูมิกะเปาะเปียกและกะเปาะแห้งของ อากาศมีค่าที่แตกต่างกันมากขึ้น จึงทำให้ภายในห้องอบแห้งสามารถควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ให้มี ค่าต่ำลง และประกอบกับเครื่องอบแห้งเป็นระบบปั๊มความร้อนจึงทำให้สามารถช่วยลดค่าความชื้น สัมพัทธ์ให้ต่ำลงอีก ซึ่งค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่ต่ำนั้นจะช่วยให้การถ่ายเทมวลความชื้นออกจาก ผลิตภัณฑ์สู่อากาศได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้น จากที่กล่าวในข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งนั้นจะใช้ความ ร้อนทั้งหมดที่ผลิตภัณฑ์ได้รับการควบคุมเพื่อนำไปกำจัดน้ำที่อยู่ภายในผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง และเมื่อน้ำของภายในผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่ออกมาด้วยอัตราเร็วเท่ากับน้ำที่ระเหยออกจากผิวหน้าของ ผลิตภัณฑ์ จะทำให้ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ยังคงรักษาความชื้นไว้ได้ (วิลโลว์ รังสาตทอง, 2547) ส่งผลให้ สามารถกำจัดน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ได้มากอย่างต่อเนื่อง จึงสามารถคงอัตราการอบแห้งอยู่ในช่วง อัตราการอบแห้งคงที่ได้ยาวนานยิ่งขึ้น และใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย ของ Doymaz (2007) Dissa *et al.* (2008) และ Gozde *et al.* (2015) ที่พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ใน การอบแห้งแบบลมร้อนเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีอัตราการอบแห้งที่สูงขึ้นและใช้ระยะเวลาใน การอบแห้งที่สั้นลงอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิสูงในการอบแห้ง (Hossain *et al.*, 2010; ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล, 2555) ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและ ทางเคมีสูญเสียคุณภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารสำคัญที่ไวต่อความร้อน (Inchuen *et al.*, 2010; Raja *et al.*, 2017)



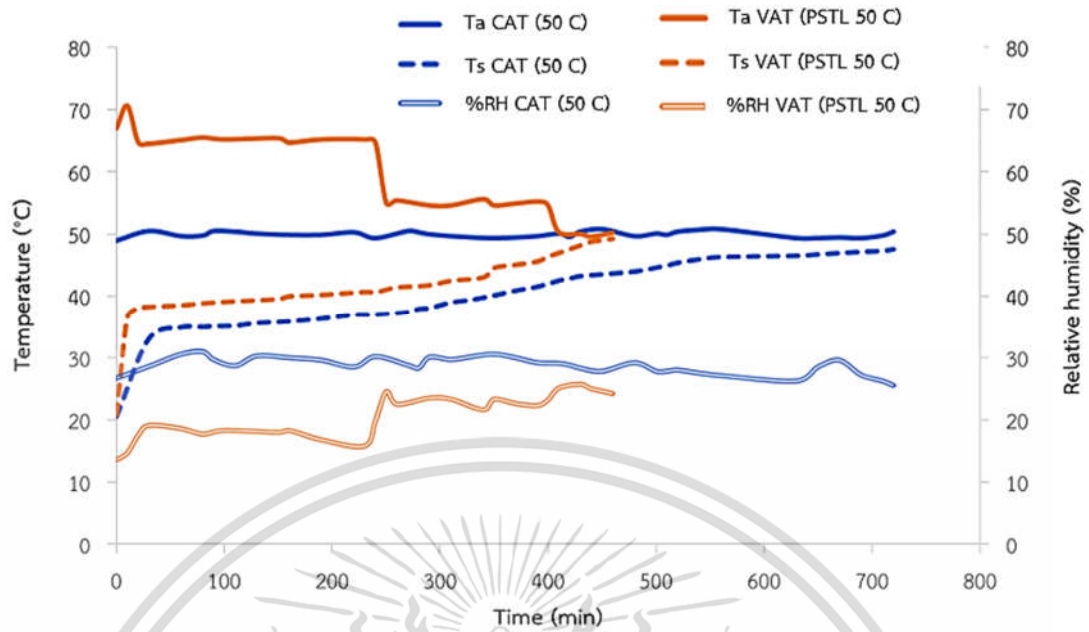
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศ (Ta) อุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ (Ts) และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 องศาเซลเซียส

จากผลของการศึกษาและเปรียบเทียบการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 องศาเซลเซียส พบว่าพฤติกรรมการอบแห้งในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการทั้งสองมีความแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.4 โดยการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 2.41 กิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร และมีค่าอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ 40 องศาเซลเซียส ถึง 1.4 เท่า เนื่องจากในช่วงแรกของการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน เครื่องทำแห้งจะดำเนินการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศ 70 องศาเซลเซียส และปรับลดอุณหภูมิลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ จึงทำให้มีช่วงของผลต่างระหว่างการปรับอุณหภูมิและอุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์มากกว่า การอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ 40 องศาเซลเซียส ที่จะคงอุณหภูมิอากาศที่อุณหภูมินั้น ๆ ตลอดกระบวนการอบแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nunez Vega *et al.* (2016) ที่พบว่าการอบแห้งที่มีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิผิวมาก จะมีผลให้มีการถ่ายเทความร้อนได้มาก เช่นเดียวกัน และเมื่ออุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้นได้มีการปรับลดอุณหภูมิอากาศลง จะส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและพฤติกรรมการอบแห้งลดลง อีกทั้งอากาศที่ใช้ในการอบแห้งของสถานะของการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผันมีความสามารถในการเก็บไอน้ำได้มากกว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ ที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน เนื่องจากมีค่าชื้นสัมพันธ์อยู่ในช่วง 14 – 40 เปอร์เซ็นต์ โดยในช่วงแรกมีค่าความชื้นสัมพันธ์ต่ำกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ จึงทำให้สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งลงถึง 0.2 เท่า ในขณะที่การอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ที่มีความชื้นสัมพันธ์อยู่ในช่วง 40 – 43 เปอร์เซ็นต์ ตลอดกระบวนการอบแห้ง แสดงดังรูปที่ 4.3



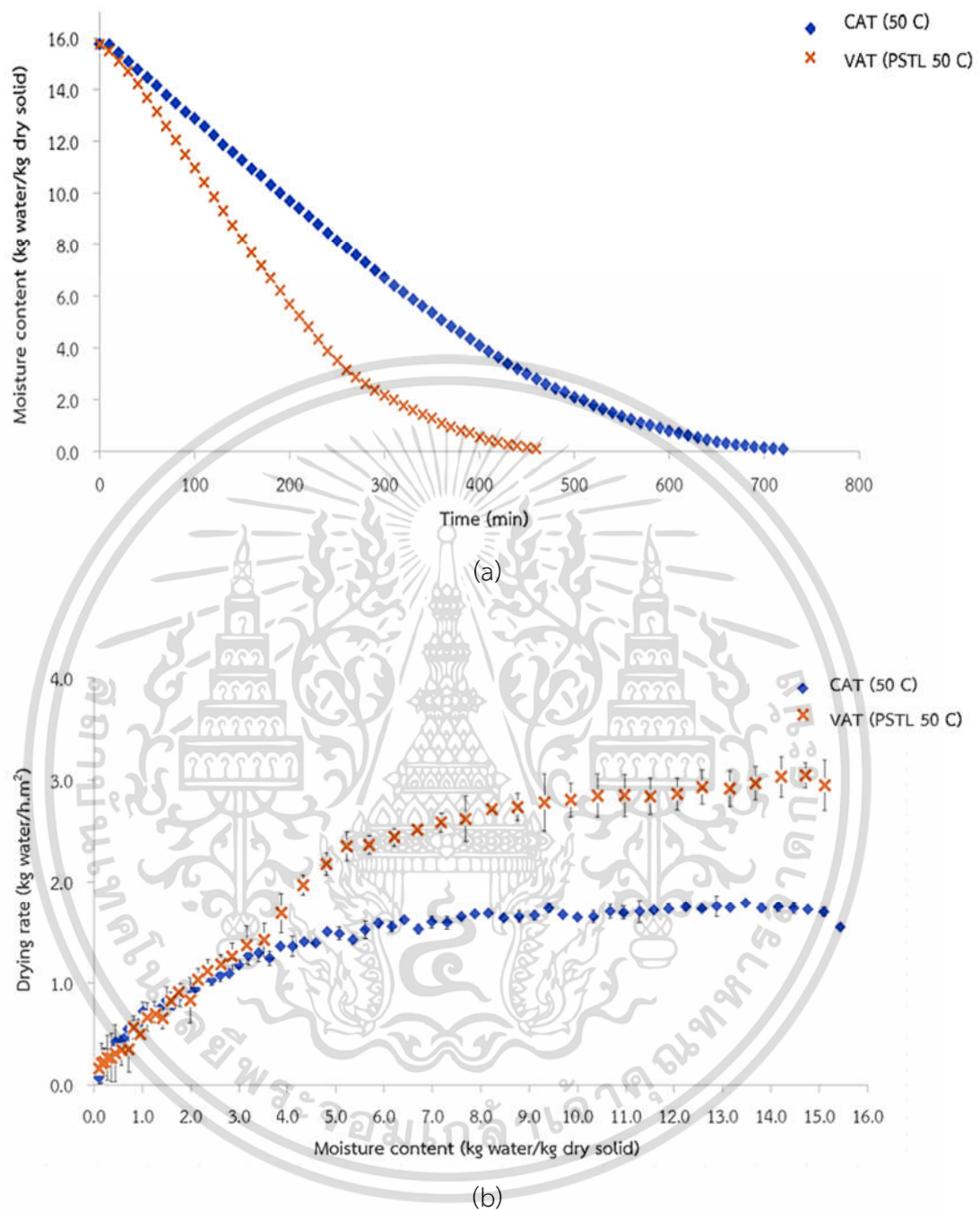
รูปที่ 4.4 พฤติกรรมการอบแห้งแบบอุณหภูมิกอากาศคงที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิกอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 องศาเซลเซียส
 (a) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง
 (b) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและปริมาณความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศ (Ta) อุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ (Ts) และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์กับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 50 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาและเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและพฤติกรรมการอบแห้งของการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 50 องศาเซลเซียส พบว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 50 องศาเซลเซียส มีค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 13 – 24 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำกว่าของการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ ที่มีค่าอยู่ในช่วง 25 – 31 เปอร์เซ็นต์ ตลอดกระบวนการอบแห้ง แสดงดังรูปที่ 4.5 จึงส่งผลให้อากาศที่ใช้ในการอบแห้งของสภาวะการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผันมีความสามารถในการเก็บไอน้ำได้มากกว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ ที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน ทำให้สามารถช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งลงถึง 0.4 เท่า นอกจากนี้พบว่าอัตราการอบแห้งในช่วงแรกของทั้งสองสภาวะมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด แสดงดังรูปที่ 4.6 โดยมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตามการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 50 องศาเซลเซียส มีค่าอัตราการอบแห้งที่สูงกว่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.04 กิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร รวมถึงมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ ที่ระดับอุณหภูมิเดียวกันถึง 1.7 เท่า

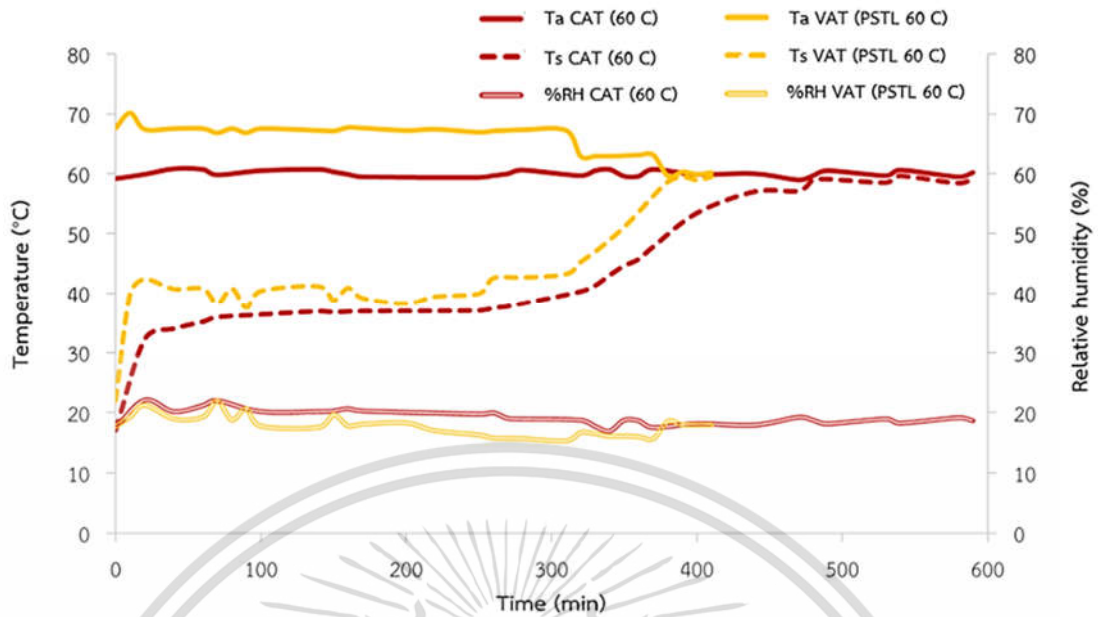


รูปที่ 4.6 พฤติกรรมการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 50 องศาเซลเซียส

(a) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

(b) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและปริมาณความชื้น

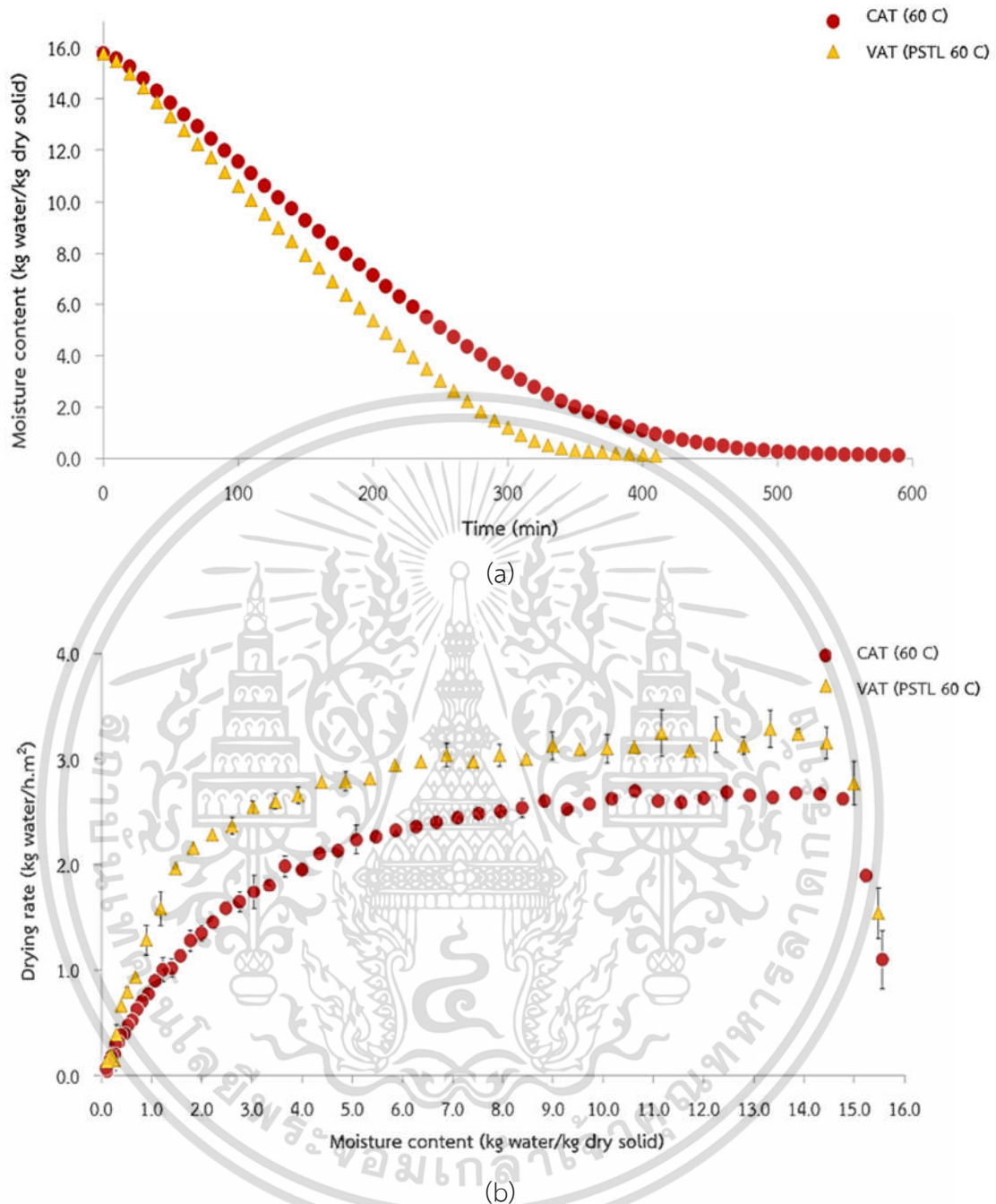
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศ (Ta) อุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ (Ts) และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์กับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งแบบอุณหภูมิกองที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิกองแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส

สำหรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและพฤติกรรมรอบแห้งของการอบแห้งแบบอุณหภูมิกองที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิกองแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส พบว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิกองที่ 60 องศาเซลเซียส มีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 17 - 22 เปอร์เซ็นต์ ตลอดกระบวนการอบแห้ง แสดงดังรูปที่ 4.7 ในขณะที่การอบแห้งแบบอุณหภูมิกองแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส มีค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 15 - 18 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาถึงพฤติกรรมรอบแห้ง พบว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิกองแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งสูงที่สุดเท่ากับ 3.29 กิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร แสดงดังรูปที่ 4.8 และสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งลง 0.3 เท่า นอกจากนี้ยังพบว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิกองแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มของอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิกองที่ 60 องศาเซลเซียส ตลอดทั้งกระบวนการอบแห้ง และเมื่อเปรียบเทียบกับรอบแห้งทุกสภาวะ พบว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิกองแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด

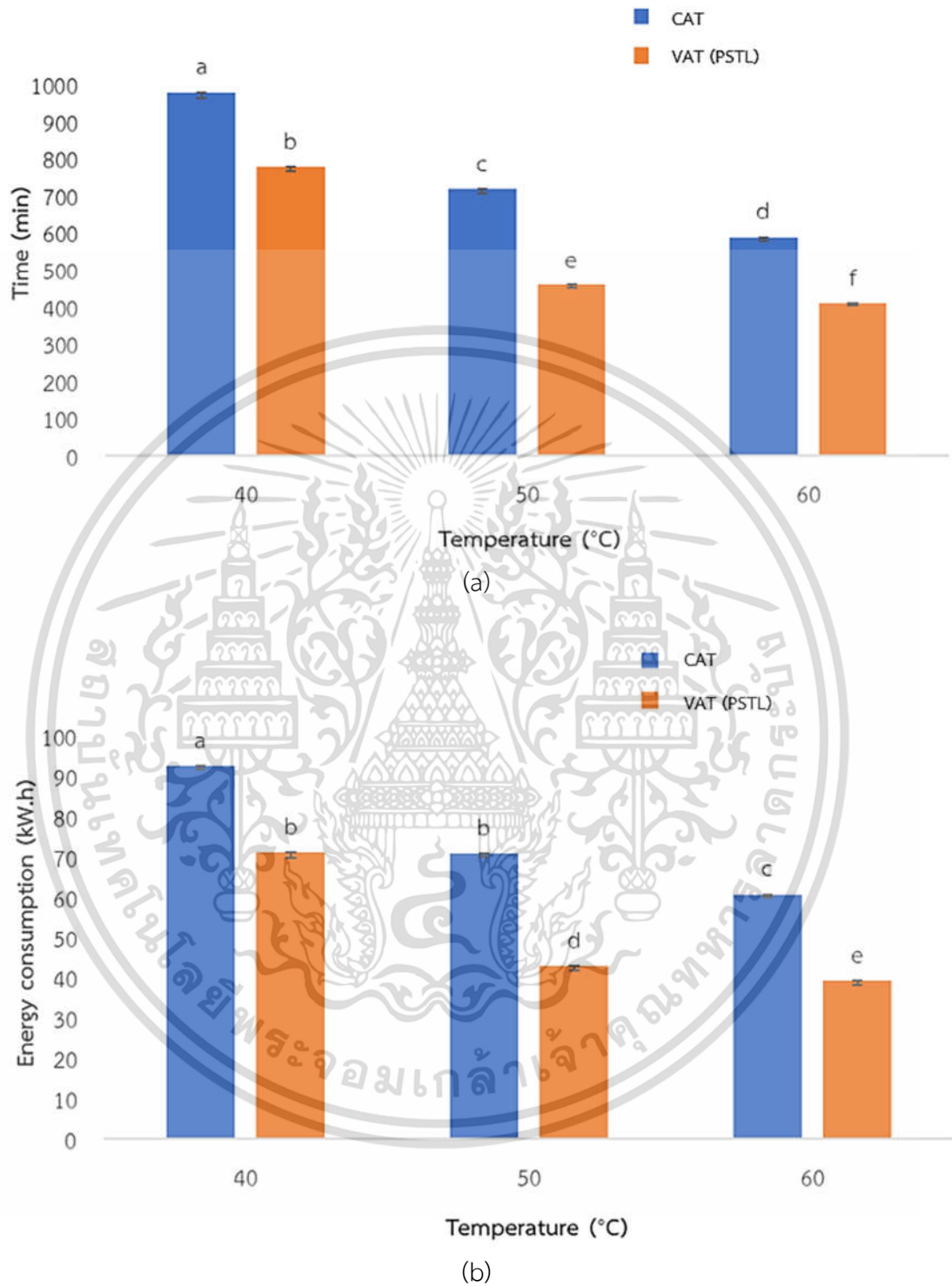
จากผลของการอบแห้งที่กล่าวมาในข้างต้น สามารถพบแนวโน้มการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศจะส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงใน (รูปที่ 4.9a) ทั้งในกระบวนการอบแห้งแบบอุณหภูมิกองที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิกองแปรผัน มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Doymaz (2007) Dissa *et al.* (2008) และ Gozde *et al.* (2015) โดยการอบแห้งแบบอุณหภูมิกองที่ 40 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการอบแห้งอื่น ๆ



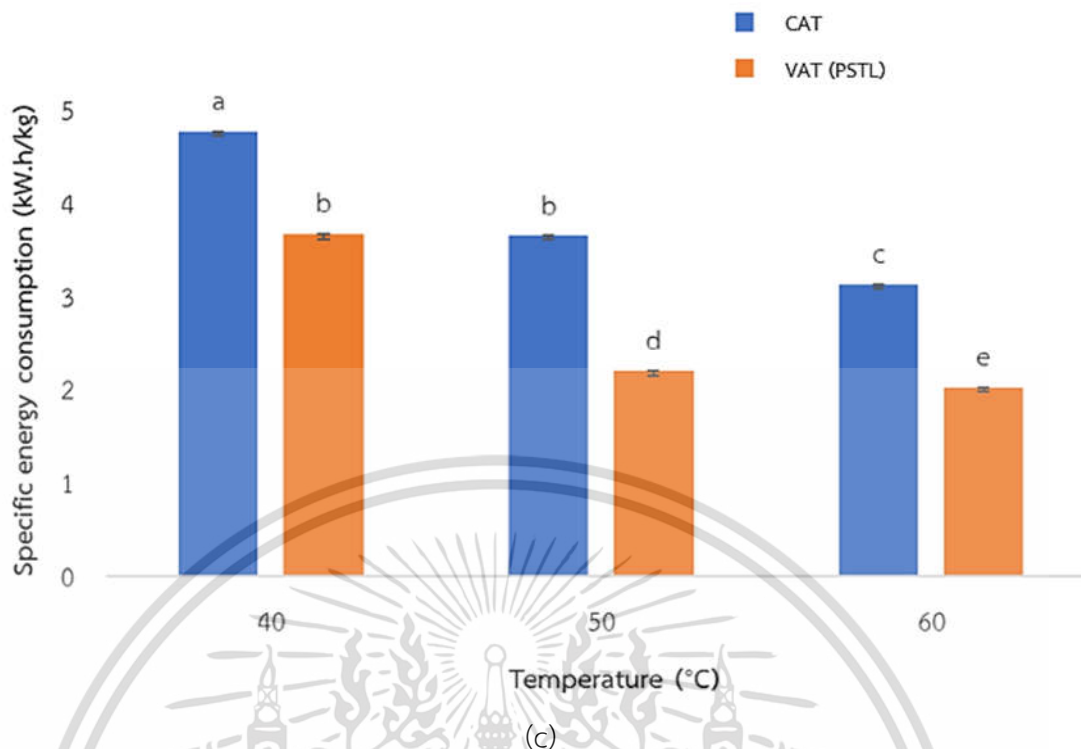
รูปที่ 4.8 พฤติกรรมการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส
 (a) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง
 (b) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและปริมาณความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ระยะเวลาและปริมาณการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งมะเขือม่วง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการอบแห้งและปริมาณการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งมะเขือม่วง (a) ระยะเวลา (b) ปริมาณการใช้พลังงาน และ (c) ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ โดยตัวอักษรที่แตกต่างกัน a - e หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยค่าที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ย

การใช้พลังงานจำเพาะของการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยพบว่า การอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่ 40 องศาเซลเซียส มีปริมาณการใช้พลังงานสูงที่สุดเท่ากับ 92.69 กิโลวัตต์ชั่วโมง (รูปที่ 4.9b) เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งทั้งหมด 6 สภาวะ และเมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่แบบเดียวกัน พบว่ามีปริมาณการใช้พลังงานสูงกว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ถึง 1.3 และ 1.5 เท่า ตามลำดับ และนอกจากนี้ยังมีปริมาณการใช้พลังงานสูงกว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 องศาเซลเซียส ถึง 1.3 เท่า เนื่องจากการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่ 40 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งมากที่สุดเท่ากับ 980 นาที (รูปที่ 4.9a) และเมื่อพิจารณาถึงค่าการใช้พลังงานจำเพาะของการอบแห้งทั้งหมด 6 สภาวะ พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส มีค่าการใช้พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ต่ำที่สุดเท่ากับ 2.02 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม น้ำ (รูปที่ 4.9c) เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งทั้งหมด 6 สภาวะ และเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน แบบเดียวกัน พบว่ามีค่าการใช้พลังงานจำเพาะต่ำกว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 และ 50 องศาเซลเซียส ถึง 1.8 และ 1.1 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับ อีกทั้งการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส สามารถลดค่าการใช้พลังงานจำเพาะลงถึง 0.4 เทา เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่ ที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน รวมถึงเมื่อนำการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส ที่มีค่าการใช้พลังงานจำเพาะต่ำที่สุดมาเปรียบเทียบกับ การอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่ 40 องศาเซลเซียส ที่มีค่าการใช้พลังงานจำเพาะสูงที่สุด จะพบว่า การอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส สามารถลดการใช้พลังงานจำเพาะลงถึง 0.6 เทา โดยปริมาณการใช้พลังงานและค่าการใช้พลังงานจำเพาะของการอบแห้งทั้ง 6 สภาวะ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง กล่าวคือ เมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการระเหยความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ลดลง (การอบแห้ง) จะส่งผลให้ปริมาณการใช้พลังงานมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน ภายใต้เงื่อนไขผลิตภัณฑ์ต้องมีความชื้นสุดท้ายอยู่ในระดับเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผันจะมีปริมาณการใช้พลังงานและค่าการใช้พลังงานจำเพาะที่ต่ำกว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่ ภายใต้อุณหภูมิในการอบแห้งระดับเดียวกัน รวมถึงในงานวิจัยนี้มีการใช้เครื่องทำแห้งที่มีระบบปั๊มความร้อนในการอบแห้งมะเชื่อม่วง เนื่องจากระบบปั๊มความร้อนเป็นระบบที่สามารถนำพลังงานความร้อนจากอากาศหลังการอบแห้งหมุนเวียนกลับมาใช้ได้ใหม่ หรือนำพลังงานจากอากาศในบรรยากาศโดยรอบที่อุณหภูมิต่ำมาเป็นแหล่งพลังงานความร้อน (Mujumdar, 2000) จึงสามารถช่วยลดการสร้างพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิกาศของกระบวนการอบแห้งลงอีกด้วย

4.2 ผลของการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผันต่อคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี และปริมาณกรดคลอโรจีนิกของมะเชื่อม่วง

4.2.1 ปริมาณความชื้น วอเตอร์แอกทิวิตี และความหนาแน่นรวม

ตารางที่ 4.1 ปริมาณความชื้น วอเตอร์แอกทิวิตี และความหนาแน่นรวมของมะเชื่อม่วง

สภาวะการอบแห้ง	ปริมาณความชื้น (%)		วอเตอร์แอกทิวิตี	ความหนาแน่นรวม (g/cm ³)
	ความชื้นฐานเปียก	ความชื้นฐานแห้ง		
CAT (40 C)	11.39±0.13 ^{ns}	12.85±0.16 ^{ns}	0.4497±0.0031 ^a	0.49±0.01 ^{ns}
CAT (50 C)	11.31±0.10 ^{ns}	12.76±0.13 ^{ns}	0.2988±0.0036 ^c	0.50±0.02 ^{ns}
CAT (60 C)	11.18±0.08 ^{ns}	12.59±0.10 ^{ns}	0.2342±0.0039 ^e	0.51±0.02 ^{ns}
VAT (PSTL 40 C)	11.34±0.12 ^{ns}	12.79±0.16 ^{ns}	0.4347±0.0065 ^b	0.50±0.02 ^{ns}
VAT (PSTL 50 C)	11.23±0.14 ^{ns}	12.65±0.18 ^{ns}	0.2512±0.0055 ^d	0.51±0.01 ^{ns}
VAT (PSTL 60 C)	11.15±0.11 ^{ns}	12.55±0.14 ^{ns}	0.2231±0.0034 ^e	0.53±0.02 ^{ns}

หมายเหตุ ตัวอักษรในแนวตั้ง ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง a - e หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยค่าที่แสดงในตารางคือค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น โดยกำหนดให้ทุกสภาวะในการอบแห้งดำเนินการจนกระทั่งผลิตภัณฑ์มีความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ผักและผลไม้แห้ง (มพช.136/2558) และ Sabatel *et al.* (2020) (ตารางที่ 4.1) ซึ่งผลิตภัณฑ์มะเขือม่วงแห้งผ่านการอบแห้งที่แตกต่างกันทั้ง 6 สภาวะ ได้แก่ การอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส มีค่าปริมาณความชื้นฐานเปียกประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าปริมาณความชื้นฐานแห้งประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่าวอเตอร์แอกทิวิตี แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าค่าวอเตอร์แอกทิวิตีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในช่วง 0.2231 – 0.4497 โดยพบแนวโน้มของค่าวอเตอร์แอกทิวิตีลดลง เมื่ออุณหภูมิกาศในการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น ทั้งในการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน กล่าวคือ การอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศที่ 40 องศาเซลเซียส ทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตีสูงที่สุดเท่ากับ 0.4497 ในขณะที่การอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตีต่ำที่สุดเท่ากับ 0.2231 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Harapriya Nayak *et al.* (2018) และ วศินี จิรวัดนโสมภณ และคณะ (2561) ที่พบว่า เมื่ออุณหภูมิมร้อนในการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้วอเตอร์แอกทิวิตีมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์มะเขือม่วงแห้งผ่านการอบแห้งที่แตกต่างกันทั้ง 6 สภาวะ มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตีต่ำกว่า 0.6 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผักและผลไม้แห้ง (มพช.136/2558) ซึ่งแสดงถึงการใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่นานเพียงพอสำหรับการกำจัดปริมาณน้ำในอาหารที่มีผลต่อการเสื่อมเสียของอาหาร เนื่องจากการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ (Hartel and Heldman, 1999; นิธิยา รัตนาปนนท์, 2553) รวมถึงเมื่อพิจารณาความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์หลังผ่านการอบแห้งที่แตกต่างกันทั้ง 6 สภาวะ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าอยู่ในช่วง 0.49 - 0.53 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยพบแนวโน้มของความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิกาศในกระบวนการอบแห้งให้สูงขึ้น เป็นเช่นนี้ทั้งการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Roongruangsri and Bronlund (2016) และ Setthawat *et al.* (2018) ที่พบว่า เมื่ออุณหภูมิกาศในการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ความหนาแน่นรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

4.2.2 สี

ตารางที่ 4.2 ค่าสีแท้และค่าความสดของสีของมะเขือม่วง

สภาวะการอบแห้ง	CIE			Hue angle (h*)	Chroma (C*)
	L*	a*	b*		
CAT (40 C)	69.33±0.06 ^a	2.43±0.02 ^b	17.82±0.02 ^a	82.24±0.06 ^a	17.98±0.02 ^a
CAT (50 C)	69.17±0.03 ^{bc}	2.51±0.03 ^b	15.13±0.02 ^b	80.58±0.12 ^c	15.34±0.01 ^b
CAT (60 C)	69.03±0.02 ^c	3.55±0.03 ^a	14.22±0.05 ^e	75.99±0.12 ^d	14.65±0.05 ^d
VAT (PSTL 40 C)	69.40±0.10 ^a	2.24±0.04 ^c	14.83±0.04 ^c	81.64±0.13 ^b	14.99±0.05 ^c
VAT (PSTL 50 C)	69.28±0.06 ^{ab}	2.25±0.05 ^c	14.75±0.05 ^c	81.39±0.24 ^b	14.92±0.04 ^c
VAT (PSTL 60 C)	69.16±0.04 ^{bc}	2.28±0.07 ^c	14.34±0.04 ^d	80.65±0.31 ^c	14.52±0.03 ^e



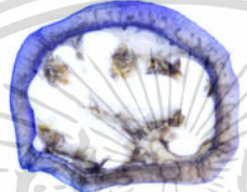

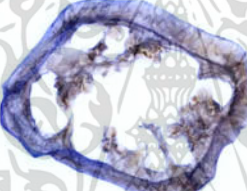

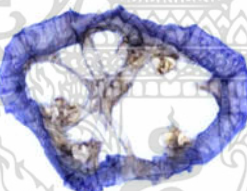

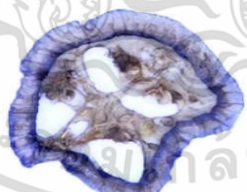
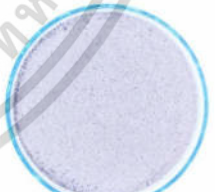


หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง a - e หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยค่าที่แสดงในตารางคือค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

วิเคราะห์ค่าสีของมะเขือม่วงหลังจากการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 จากผลการทดลองจะเห็นได้ชัดว่าอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบแห้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิอากาศในกระบวนการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น จะพบว่า ค่าความสว่าง (L*) ค่าสีเหลือง (b*) ของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลง และค่าสีแดง (a*) ของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้งในการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน แต่อย่างไรก็ตามการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผันมีแนวโน้มค่าความสว่าง (L*) ลดลงน้อยกว่าและค่าสีแดง (a*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นน้อยกว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ ที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน เนื่องจากมีระยะเวลาในการอบแห้งที่น้อยกว่า ดังแสดงใน (รูปที่ 4.9a) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang *et al.* (2012) Gozde *et al.* (2015) และ Elsis *et al.* (2019) ที่พบว่าการใช้อุณหภูมิอากาศสูงในกระบวนการอบแห้งส่งผลให้ L* และ b* มีแนวโน้มลดลง และ a* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากมะเขือม่วงมีสารแอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุในการให้สีม่วง (Pigment) ซึ่งมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี แต่สามารถเกิดการสลายตัวได้ง่ายจากปัจจัยของ ความร้อน ออกซิเจน แสง และอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษา ดังนั้นทั้งอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนจึงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอนโทไซยานิน (Leong and Oey, 2012) และเมื่อนำค่า a* และ b* ที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าสีแท้ (h*) และค่าความสดของสี (C*) พบว่าค่าสีแท้และค่าความสดของสีมีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิอากาศในการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และการอบแห้งทั้ง 6 สภาวะ มีค่าสีแท้อยู่ในช่วง 80.58 – 82.24 องศา และค่าความสดของสีอยู่ในช่วง 14.52 – 17.98 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

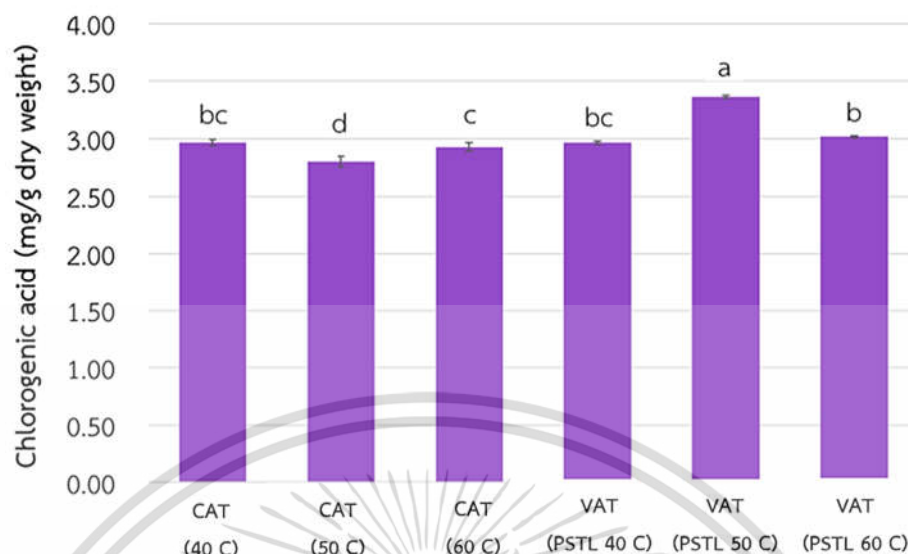
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงลักษณะปรากฏของมะเขือม่วงหลังผ่านการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส

สถานะการอบแห้ง	ลักษณะปรากฏ	
	ชิ้น	ผง
CAT (40 C)		
CAT (50 C)		
CAT (60 C)		
VAT (PSTL 40 C)		
VAT (PSTL 50 C)		
VAT (PSTL 60 C)		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ปริมาณกรดคลอโรจีนิก



รูปที่ 4.10 ปริมาณกรดคลอโรจีนิกของผลิตภัณฑ์มะเขือม่วงผงหลังผ่านการอบแห้งแบบอุณหภูมิตามอากาศคงที่ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส (CAT (40 C) CAT (50 C) และ CAT (60 C)) และการอบแห้งแบบอุณหภูมิตามอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส (VAT (PSTL 40 C) VAT (PSTL 50 C) และ VAT (PSTL 60 C)) (ตัวอักษรที่แตกต่างกัน a - d หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยค่าที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ย

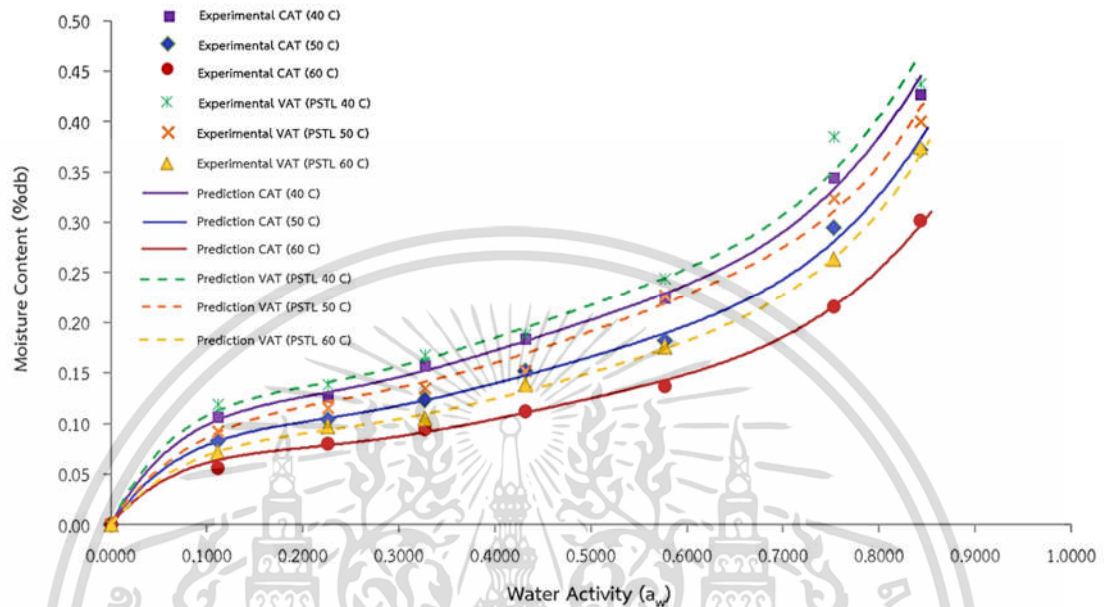
จากผลของการอบแห้งมะเขือม่วงแบบอุณหภูมิตามอากาศคงที่และการอบแห้งแบบอุณหภูมิตามอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการอบแห้ง ส่งผลให้ปริมาณกรดคลอโรจีนิกของผลิตภัณฑ์มะเขือม่วงผงมีแนวโน้มลดลงและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Miletic *et al.* (2019) และ ปิยะพรและศิริธร (2562) ที่พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอากาศของกระบวนการอบแห้งให้สูงขึ้นนั้น จะส่งผลให้ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและปริมาณกรดคลอโรจีนิกมีแนวโน้มลดลง และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.10 พบว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิตามอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 50 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะการอบแห้งที่มีปริมาณกรดคลอโรจีนิกสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอบแห้งทั้งหมด 6 สภาวะ ซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 3.36 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และเมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งแบบอุณหภูมิตามอากาศแปรผันแบบเดียวกัน พบว่ามีปริมาณกรดคลอโรจีนิกสูงกว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิตามอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 และ 60 องศาเซลเซียส ถึง 1.2 และ 1.1 เท่า ตามลำดับ อีกทั้งยังมีปริมาณกรดคลอโรจีนิกสูงกว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิตามอากาศคงที่ ที่ระดับอุณหภูมิเดียวกันถึง 1.2 เท่า เนื่องจากการอบแห้งแบบอุณหภูมิตามอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 50 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่าถึง 1.6 เท่า และจากการอบแห้งที่แตกต่างกันทั้ง 6 สภาวะ พบว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิตามอากาศคงที่ 50 องศาเซลเซียส มีปริมาณกรดคลอโรจีนิกต่ำที่สุดเท่ากับ 2.80 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการอบแห้งถึง 720 นาที ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Erick *et al.* (2017) และ Borui *et al.* (2019)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นใบเซอร์เวอริงนี้ให้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่พบว่าเมื่อกระบวนการอบแห้งใช้ระยะเวลามากยิ่งขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและปริมาณกรดคลอโรจีนิกมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

4.2.4 วอเตอร์ซอร์พชันไอโซเทอร์ม



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกทิวิตีของผลิตภัณฑ์มะเขือม่วงผง หลังผ่านการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Halsey

เมื่อพิจารณาและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 5 แบบ พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Halsey มีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า χ^2 และค่า RMSE ต่ำที่สุด ซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Halsey จึงถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายลักษณะการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์มะเขือม่วงผงหลังผ่านการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นเมื่อพิจารณาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกทิวิตี แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการดูดน้ำกลับสู่โครงสร้างของเซลล์สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอบแห้งทั้งหมด 6 สภาวะ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.99 และมีค่า χ^2 และค่า RMSE ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.0014 และ 0.0364 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงผลิตภัณฑ์เกิดความเสียหายของโครงสร้างภายในเซลล์ ในระหว่างการอบแห้งน้อยที่สุด เนื่องจากเป็นสภาวะการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิต่ำที่สุด แต่ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ ที่ระดับอุณหภูมิเดียวกันถึง 1.3 เท่า แต่ในทางตรงกันข้ามผลิตภัณฑ์อาจจะมีโอกาสเกิดการเสื่อมเสียคุณภาพได้มากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งในสภาวะอื่น ๆ เนื่องจากสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงของความชื้นได้เร็วกว่า ภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับเดียวกัน และเมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งแบบอุณหภูมิกอากาศแปรผันแบบเดียวกัน พบว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิกอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิกอากาศของผลิตภัณฑ์) 40 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการดูดน้ำกลับสู่โครงสร้างของเซลล์สูงสุด รองลงมาคือ การอบแห้งแบบอุณหภูมิกอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิกอากาศของผลิตภัณฑ์) 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยการอบแห้งแบบอุณหภูมิกอากาศคงที่มีแนวโน้มของลักษณะการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกัน และนอกจากนี้การอบแห้งที่มีความสามารถในการดูดน้ำกลับสู่โครงสร้างของเซลล์ต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งทั้งหมด 6 สภาวะ คือ การอบแห้งแบบอุณหภูมิกอากาศคงที่ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่า R^2 เท่ากับ 0.99 และมีค่า χ^2 และค่า RMSE ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.0003 และ 0.0176 ตามลำดับ เนื่องจากเป็นสภาวะที่ใช้อุณหภูมิกในการอบแห้งสูงสุด และใช้ระยะเวลาในการอบแห้งมากกว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิกอากาศแปรผัน ที่ระดับอุณหภูมิกเดียวกัน ถึง 1.4 เท่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ *Moreira et al.* (2010) และ *Raquel et al.* (2018) ที่พบว่า การใช้อุณหภูมิกสูงในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ จะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความสามารถในการดูดน้ำกลับสู่โครงสร้างของเซลล์ได้น้อยกว่าการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิกต่ำ ซึ่งเป็นผลจากความเสียหายของโครงสร้างภายในเซลล์ในระหว่างการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิกอากาศสูง (*Ayranci, 1995; Nurhan and Hasan, 2006; Molina et al., 2011*) โดยการอบแห้งทั้ง 6 สภาวะ มีแนวโน้มของลักษณะของไอโซเทอร์มไป ในทิศทางเดียวกันเป็นแบบตัวเอส (sigmoid) ซึ่งวัสดุทางการเกษตรส่วนใหญ่จะมีแนวโน้มในลักษณะนี้เช่นเดียวกัน (นิธิยา รัตนานนท์, 2551; ชนนี ราชัญนิยม และ สุเนตร สืบคำ, 2555)

ตารางที่ 4.4 ค่าทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับผลิตภัณฑ์มะเขือม่วง

สภาวะการอบแห้ง	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	R^2	χ^2	RMSE	ค่าคงที่		
					A	B	C
CAT (40 C)	Henderson model	0.9567	0.0037	0.0598	0.0276	1.6874	-
	Modified Henderson model	0.9742	0.0037	0.0598	0.0415	1.6873	-100.0208
	Modified Chung - Pfast model	0.9756	0.0035	0.0580	343.1673	8.0841	-219.0398
	Halsey model	0.9936	0.0009	0.0298	10.4816	1.9103	0.0083
	Modified Halsey model	0.9934	0.0009	0.0298	1.0207	1.9123	-0.0147
CAT (50 C)	Henderson model	0.9678	0.0028	0.0515	0.0382	1.7165	-
	Modified Henderson model	0.9808	0.0028	0.0515	0.0575	1.7165	-100.0201
	Modified Chung - Pfast model	0.9832	0.0024	0.0482	339.4764	9.7124	-222.6406
	Halsey model	0.9968	0.0005	0.0211	8.6432	1.8521	0.0083
	Modified Halsey model	0.9967	0.0005	0.0211	1.0065	1.8525	-0.0153

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

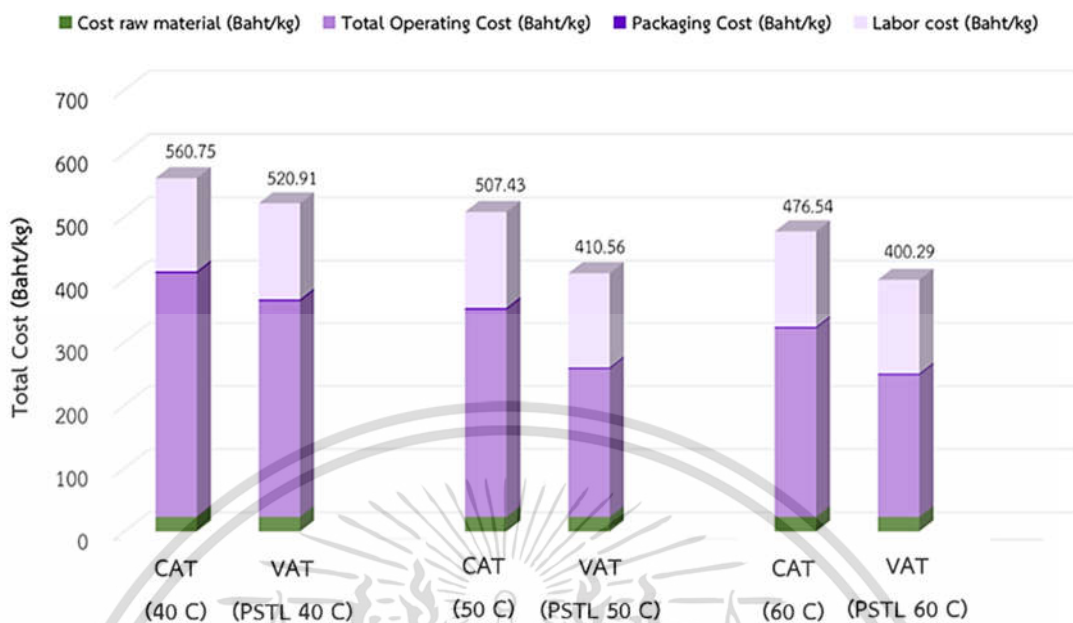
ตารางที่ 4.4 (ต่อ) ค่าทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับผลิตภัณฑ์มะเขือม่วงผง

สภาวะการอบแห้ง	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	R ²	X ²	RMSE	ค่าคงที่		
					A	B	C
CAT (60 C)	Henderson model	0.9644	0.0031	0.0542	0.0339	1.3955	-
	Modified Henderson model	0.9787	0.0031	0.0542	0.0511	1.3955	- 100.0208
	Modified Chung - Pfast model	0.9757	0.0035	0.0579	330.9529	10.584 4	- 195.9588
	Halsey model	0.9978	0.0003	0.0176	9.1689	1.5358	0.0083
	Modified Halsey model	0.9975	0.0003	0.0176	1.0085	1.5368	-0.0151
VAT (PSTL40 C)	Henderson model	0.9579	0.0036	0.0589	0.0237	1.6296	-
	Modified Henderson model	0.9749	0.0036	0.0589	0.0356	1.6295	- 100.0232
	Modified Chung - Pfast model	0.9756	0.0035	0.0580	349.1635	7.4960	- 212.9279
	Halsey model	0.9904	0.0014	0.0364	13.6840	1.7945	0.0083
	Modified Halsey model	0.9902	0.0014	0.0364	1.0063	1.7959	-0.0137
VAT (PSTL50 C)	Henderson model	0.9644	0.0031	0.0542	0.0284	1.6557	-
	Modified Henderson model	0.9787	0.0031	0.0542	0.0427	1.6557	- 100.0202
	Modified Chung - Pfast model	0.9799	0.0029	0.0537	339.4221	8.3461	- 218.0558
	Halsey model	0.9987	0.0045	0.0658	9.3614	1.8078	0.0083
	Modified Halsey model	0.9951	0.0007	0.0260	1.0078	1.8301	-0.0144
VAT (PSTL60 C)	Henderson model	0.9665	0.0029	0.0526	0.0335	1.5688	-
	Modified Henderson model	0.9800	0.0029	0.0526	0.0504	1.5687	- 100.0201
	Modified Chung - Pfast model	0.9801	0.0029	0.0524	334.2063	9.4182	- 210.2927
	Halsey model	0.9960	0.0006	0.0235	9.8565	1.6941	0.0083
	Modified Halsey model	0.9960	0.0006	0.0235	1.0073	1.6964	-0.0148

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่สู่สาธารณะเพื่อใช้ในการวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การประเมินค่าใช้จ่ายในการผลิต



รูปที่ 4.12 แผนภูมิแท่งแสดงต้นทุนเบื้องต้นในการผลิตมะเขือม่วงผงหลังผ่านการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองที่ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส (CAT (40 C) CAT (50 C) และ CAT (60 C)) และการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส (VAT (PSTL 40 C) VAT (PSTL 50 C) และ VAT (PSTL60 C)) โดยค่าที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ย

การประเมินต้นทุนเบื้องต้นในการผลิตมะเขือม่วงผงหลังผ่านการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองที่และการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้แบ่งการคำนวณออกเป็น 4 ส่วน คือ 1. ค่าวัตถุดิบ 2. ค่าบรรจุภัณฑ์ 3. ค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวกับเครื่องจักรต่าง ๆ ได้แก่ เครื่องแช่เยือกแข็งแบบใช้ลมเย็นจัดเป่า (Compact freeze, PATKOL, Thailand) และเครื่องทำแห้งแบบลมร้อน (ระบบควบคุมการทำแห้งอัจฉริยะในผลิตภัณฑ์อาหารแห่งคุณภาพชั้นพรีเมียมสำหรับ SME สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย) 4. ค่าจ้างแรงงาน แสดงวิธีการคำนวณในส่วนของภาคผนวก ค. ซึ่งจากรูปที่ 4.12 แสดงต้นทุนที่ใช้ในการผลิตเบื้องต้นสำหรับแต่ละสถานะการทดลองโดยแปรผันตามการควบคุมอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ดังนั้นสถานะที่มีต้นทุนในการผลิตสูงที่สุดในงานวิจัยนี้คือการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองที่ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งมีราคาต้นทุนการผลิตประมาณ 560 บาทต่อกิโลกรัมของแห้ง และเมื่อเปรียบเทียบกับกรอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน ที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน พบว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 องศาเซลเซียส มีราคาต้นทุนการผลิตต่ำกว่าถึง 1.1 เท่า และนอกจากนี้สถานะที่มีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด คือ การอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส โดยมีราคาต้นทุนการผลิตประมาณ 400 บาทต่อกิโลกรัมของแห้ง และเมื่อเปรียบเทียบกับกรอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองที่ ที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน พบว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส มีราคาต้นทุนการผลิตต่ำกว่าถึง 1.2 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งมะเขือม่วงแบบอุณหภูมิกาศคองที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองแปรผันต่อคุณภาพของมะเขือม่วงฝง รวมถึงนำการเปรียบเทียบต้นทุนเบื้องต้นมารวมประกอบในการพิจารณาเพื่อเลือกสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการ (lab scale) เพื่อรองรับการต่อยอดในระดับอุตสาหกรรมโดยสภาวะที่ใช้ในการอบแห้งคือ การอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองที่ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส และการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ในการอบแห้งทุกสภาวะจะลดความชื้นผลิตภัณฑ์ให้มีค่าต่ำกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก พบว่าพฤติกรรมการอบแห้งมะเขือม่วงแบบอุณหภูมิกาศคองแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งสูงที่สุดเท่ากับ 3.29 กิโลกรัมเนื้อต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร และใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด (410 นาที) เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งทุกสภาวะ รวมถึงสามารถลดระยะเวลาในอบแห้งลงจากการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองที่ ที่ระดับอุณหภูมิเดียวกันถึง 0.3 เท่า รองลงมาคือ การอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 50 และ 40 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งสูงที่สุดเท่ากับ 3.04 และ 2.41 กิโลกรัมเนื้อต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ตามลำดับ และมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองที่ ที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน 1.7 และ 1.4 เท่า ตามลำดับ นอกจากนี้การอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส มีค่าการใช้พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ต่ำที่สุดเท่ากับ 2.02 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัมเนื้อ เมื่อเปรียบเทียบกับทุกสภาวะ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส มีค่าการใช้พลังงานจำเพาะต่ำกว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 และ 50 องศาเซลเซียส ถึง 1.8 และ 1.1 เท่า ตามลำดับ อีกทั้งสามารถลดค่าการใช้พลังงานจำเพาะลงได้ 0.4 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองที่ ที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน นอกจากนี้การอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 และ 50 องศาเซลเซียส มีค่าการใช้พลังงานจำเพาะต่ำกว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองที่ ที่ระดับอุณหภูมิเดียวกันถึง 1.3 และ 1.7 เท่า ตามลำดับ

สำหรับคุณภาพของผลิตภัณฑ์มะเขือม่วงฝง พบว่าผลิตภัณฑ์มะเขือม่วงฝงหลังผ่านการอบแห้งทั้ง 6 สภาวะ มีค่าปริมาณความชื้นฐานเปียกประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์ และ มีค่าปริมาณความชื้นฐานแห้งประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ และมีวอเตอร์แอกติวิตีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในช่วง 0.2231 – 0.4497 โดยเมื่อการอบแห้งมีอุณหภูมิกาศคองเพิ่มสูงขึ้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตีจะมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองที่ 40 องศาเซลเซียส ทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าวอเตอร์แอกติวิตีสูงที่สุดเท่ากับ 0.4497 ในขณะที่การอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคองแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส มีค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่ำที่สุดเท่ากับ 0.2231 และความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์ทุกสภาวะไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.49 – 0.53

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อีกทั้งเมื่ออุณหภูมิอากาศในกระบวนการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น ความหนาแน่นรวมจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน นอกจากนี้อุณหภูมิและระยะเวลาในการอบแห้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากมะเขือม่วงมีสารแอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุในการให้สีม่วง แต่สามารถเกิดการสลายตัวได้ง่ายจากปัจจัยของ ความร้อน ออกซิเจน แสง และอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษา จึงทำให้ค่าสีแท้และค่าความสดของสีมีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าสีแท้ในช่วง 80.58 – 82.24 องศาเซลเซียส และค่าความสดของสีอยู่ในช่วง 14.52 – 17.98 และผลิตภัณฑ์มะเขือม่วงที่มีปริมาณกรดคลอโรจีนิกสูงสุด คือ การอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 50 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.36 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการอบแห้งส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มะเขือม่วงมีปริมาณกรดคลอโรจีนิกลดลง รวมถึงการอบแห้งที่ใช้ระยะเวลาานานจะส่งผลให้ปริมาณกรดคลอโรจีนิกมีแนวโน้มลดลงด้วยเช่นเดียวกัน นอกจากนี้วอเตอร์ซอร์พชันไอโซเทอร์มของผลิตภัณฑ์หลังผ่านการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการดูดน้ำกลับสู่โครงสร้างของเซลล์ได้สูงที่สุด โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.99 และ มีค่า χ^2 และค่า RMSE ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.0014 และ 0.0364 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงผลิตภัณฑ์เกิดความเสียหายของโครงสร้างภายในเซลล์ ในระหว่างการอบแห้งน้อยที่สุด เนื่องจากเป็นสภาวะการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิต่ำที่สุด และใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยกว่า การอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ ที่ระดับอุณหภูมิเดียวกันถึง 1.3 เท่า แต่ในทางตรงกันข้ามผลิตภัณฑ์อาจจะมีโอกาสเกิดการเสื่อมเสียคุณภาพได้มากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งในสภาวะอื่น ๆ เนื่องจากสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงของความชื้นได้เร็วกว่า ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ที่ระดับเดียวกัน และพบว่าการประเมินต้นทุนเบื้องต้นในการผลิตมีความแปรผันตามสภาวะการอบแห้งและระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ดังนั้นสภาวะที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุดคือ การอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเพียง 410 นาที จึงมีราคาต้นทุนในการผลิตประมาณ 400 บาทต่อกิโลกรัมของแห้ง และเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ ที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน พบว่าการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 60 องศาเซลเซียส มีราคาต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าถึง 1.2 เท่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้การศึกษารอบแห้งมะเขือม่วงแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ และการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

5.2.1 งานวิจัยฉบับนี้มีการศึกษาผลของการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ และแบบอุณหภูมิอากาศแปรผันต่อคุณภาพของมะเขือม่วง ดังนั้นวอเตอร์ซอร์พชันไอโซเทอร์มของผลิตภัณฑ์หลังผ่านการอบแห้งอาจจะมีการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์เพิ่มเติม เนื่องจากเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่เกี่ยวกับความสามารถในการดูดน้ำกลับเข้าสู่โครงสร้างของเซลล์

5.2.2 หากต้องการนำผลิตภัณฑ์ไปจำหน่ายจริงในตลาดทั้งภายในประเทศ หรือภายนอกประเทศ ควรศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากองค์ประกอบของอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหารแปรผันกับ 3 ปัจจัยหลัก คือ ตัวสินค้า บรรจุภัณฑ์ และสิ่งแวดล้อมหลังจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแปรรูปและผ่านกระบวนการผลิต จึงส่งผลถึงคุณภาพคงที่ คุณค่าทางโภชนาการ และความปลอดภัยของผู้บริโภค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- Adiletta, G., Iannone, G., Russo, P., Patimo, G., Pasqual D. S., and Matteo, D. M. 2014. "Moisture migration by magnetic resonance imaging during eggplant drying: a preliminary study." **International Journal of Food Science and Technology**. 49 : 2602-2609.
- Akpinar, K. E., and Bicer, Y. 2005. "Modelling of the drying of eggplants in thin-layers." **International Journal of Food Science and Technology**. 40 : 273-281.
- Analia, C., Maria, C. A., and Alicia R. C. 2007. "Effect of low temperature storage on physical and physiological characteristics of eggplant fruit (*Solanum melongena* L.)." **Food Science and Technology**. 40 : 389-396.
- Antonio, B., Giuseppina, A., Paola, R., Silvestro, C., Donatella, A., and Marisa, D. M. 2013. "Mathematical modeling of eggplant drying: Shrinkage effect." **Journal of Food Engineering**. 144 : 99-105.
- AOAC. 2000. "Feeds" **Official methods of analysis of AOAC International**. Gaithersburg, MD : AOAC International.
- Ayranci, E. 1995. "Equilibrium moisture characteristics of dried eggplant and okra," **Molecular Nutrition Food Research**. 39(3) : 228-233.
- Cao, W., & Moss, D. N. 1989. "Daylength Effect on Leaf Emergence and Phyllochron in Wheat and Barley." **Crop Science**. 29(4) : 1021-1025.
- Chen, Q., Bi, J., Wu, X., Yi, J., Zhou, L. and Zhou, Y. 2015. "Drying kinetics and quality attributes of jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) slices dried by hot-air and short- and medium-wave infrared radiation." **LWT - Food Science and Technology**. 64 : 759 – 766.
- Chen S, et al. 1996. "Transcriptional terminators of RNA polymerase II are associated with yeast replication origins." **Nucleic Acids Res**. 24(15) : 85-93.
- Chen, X. D. and Mujumdar, M. S. 2008. **Drying Technologies in Food Processing**. Singapore : Blackwell Publishing.
- Cernișev, S. 2010. "Effects of conventional and multistage drying processing on non-enzymatic browning in tomato." **Journal of Food Engineering**. 96 : 114–118.
- Christen, R., Rosenberg, R., and Jayadava, V. 2004. "Financial institutions with a double bottom line: Implications for the future of microfinance." **Occasional paper**. 8 : (1-18).
- Chumyama, A., Whangchaia, K., Jungklanga, J., Faiyuec, B., and Saengnila, K. 2013. "Effects of heat treatments on antioxidant capacity and total phenolic content of four cultivars of purple skin eggplants." **ScienceAsia**. 39 : 246-251.
- Cowan, M. M. 1999. "Plant Products as Antimicrobial Agents." **Clinical Microbiology Reviews**. 12(4) : 564-582.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Dereje, A., Karoline, J., Herbert, W., and Ralph, G. 2009. "Change in color and other fruit quality characteristics of tomato cultivars after hot-air drying at low final-moisture content." **International Journal of Food Sciences and Nutrition**. 60(S7) : 308-315.
- Diamante, L., Durand, M., Savage, G. and Vanhanen, L. 2010. "Effect of temperature on the drying characteristics, colour and ascorbic acid content of green and gold kiwifruits," **International Food Research Journal**.17 : 411-451.
- Dissa, A. O., Desmorieux, H., Bathiebo, J., and Koulidiati, J. 2008. "Convective drying characteristics of Amelie mango (*Mangifera indica* L. cv. 'Amelie') with correction for shrinkage." **Journal of Food Engineering**. 88: 429-437.
- Donald, G. M. 2014. "Drying of Specific Fruits and Vegetables." 1-129. Canada : Department of Food Science University of Guelph Ontario.
- Doymaz, I. 2007. "The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices." **Journal of Food Engineering**. 79: 243– 248.
- Ebru, K.A. and Yasar, B. 2005. "Modelling of the drying of eggplants in thin-layers," **International Journal of Food Science and Technology**. 40 : 273-281.
- Elmizadeh, A. , Shahedi, M. and Hamdami, N. 2017. "Comparison of electrohydrodynamic and hot-air drying of the quince slices." **Innovative Food Science and Emerging Technologies**. 43 : 130–135.
- Elsisi, S. F., Taha, A. T., and Eissa, A. H. A. 2019. "Quality properties changes of eggplant during microwave-oven drying," **Misr Journal of Agricultural Engineering**. 36(3) : 879-896.
- Ertekin, C., and Yaldiz, O. 2004. "Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model," **Journal of Food Engineering**. 63 : 349-359.
- Fatouh, M., Metwally, M. N. and Shedid, M.H. 2006. "Herbs drying using a heat pump dryer." **Energy Conversion and Management**. 47 : 2629–2643.
- Fellows, P. 1997. **Food Processing Technology : Principles and Practice**. Cambridge : Ellis Horwood Ltd.
- Folasayo, F., and Zhongjie, H. 2016. "Heat Pump Drying of Fruits and Vegetables: Principles and Potentials for Sub-Saharan Africa." **International Journal of Food Science**. 1-8.
- García-Pérez, V. J., Ozuna, C., Ortuño, C., Cárcel, A. J. and Mulet, A. 2011. "Modeling Ultrasonically Assisted Convective Drying of Eggplant." **Drying Technology: An International Journal**. 29 : 1499-1509.
- Genkinger, J. M., Platz, E. A., Hoffman, S. C., Comstock, W. G., and Helzlsouer K. J. 2004. "Fruit, Vegetable, and Antioxidant Intake and All-Cause, Cancer, and

- Cardiovascular Disease Mortality in a Community-dwelling Population in Washington County, Maryland.” **American Journal of Epidemiology**. 160(12) : 1223 – 1233.
- George, J., Flick, Jr., Robert, L. O., and Allen, J. S. A. 1997. “Comparison of Nutrient Composition and of Enzyme Activity in Purple, Green, and White Eggplants.” **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 25(1) : 117-120.
- Goh, J. L., Othman, Y. M., Mat, S., Ruslan, H., and Sopian, K. 2011. “Review of heat pump systems for drying application.” **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 15 : 4788-4796.
- Gözde, B. U. Ünal, R.Y. and Ergun, K. 2015. “Determination of Drying Characteristics and Quality Properties of Eggplant in Different Drying Conditions,” **Italian Journal of Food Science**. 27(4) : 459-467.
- Gulati, T., and Datta, A. K. 2015. “Mechanistic Understanding of Case-hardening and Texture Development During Drying of Food Materials,” **Journal of Food Engineering**. 166 : 119-138.
- Hall, C. W. 1979. **Dictionary of drying**. New York : Marcel Dekker.
- Halliwell, B. and Gutteridge, J.M.C. 1989. “Free Radicals in Biology and Medicine.” 2nd Edition, Clarendon Press, Oxford, 22-85.
- Helmja, K., Vaher, M., Gorbatsšova, J. and Kaljurand, M. 2007. “Characterization of bioactive compounds contained in vegetables of the Solanaceae family by capillary electrophoresis.” **Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Chemistry**. 56(4) : 172-186.
- iEnergyGuru. 2018. การอบแห้ง (DRYING). [Online]. Available : <https://ienergyguru.com/2015/09/drying/>.
- Igarashi, M., Saito, R., Mizukoshi, K., and Alford, B.R. 1993. “Otoconia in young and elderly persons: a temporal bone study.” **Acta Otolaryngol Suppl**. 504: 26–29.
- Iglesias, H., and Chirife, J. 1976. “Prediction of effect of temperature on water sorption isotherms of food materials.” **Journal Food Technology**. 11 : 109 - 116.
- Iguaz, A., and Vírveda, P. 2007. “Moisture desorption isotherms of rough rice at high temperatures.” **Journal of Food Engineering**. 79 : 794-802.
- José, D.T. et. al. 2017. “Optimization of vacuum frying conditions of eggplant (*Solanum melongena* L.) slices by response surface methodology.” **Interciencia Journal**. 42(10) : 683-691.
- Kejing, A., Zhao, D., Wang, Z., Wu, J., Xu, Y., & Xiao, G. (2015). “Comparison of different drying methods on Chinese ginger (*Zingiber officinale* Roscoe): Changes in

- volatiles, chemical profile, antioxidant properties, and microstructure.” **Food Chemistry**. 197 (15) : 1292–1300.
- Kendall, P., DiPersio, P., and Sofos, J. 2012. “Drying Vegetables.” 1-4. Food and Nutrition Series. US : Colorado State University.
- Khan, M. J., Yeasmin, F., Islam, M. N., Ahmmed. R., Das, C. P., and Ali, H. M. 2019. “Effect of pretreatments on drying behavior of eggplant.” **Journal of Bangladesh Agricultural University**. 17(1) : 105-109.
- Knapp, S., Bohs, L., Nee, M., and Spooner, D. M. 2004. “Solanaceae- a model for linking genomics with biodiversity.” **Comparative and Functional Genomics**. 5 : 285-291.
- Kinsella, J. E., Frankel, E., German, B. and Kanner, J. 1993. “Possible mechanism for the protective role of the antioxidant in wine and plant foods.” **Food Tech**. 47: 85–89.
- Leong, S. Y., and I. Oey. 2012. “Effect of processing on anthocyanins, carotenoids and vitamin C in summer fruits and vegetables.” **Food Chem**. 133 : 1577-1587.
- Lester, R.N. 1998. “Genetic resources of capsicum and eggplants.” 25-30, 7th EUCARPIA Meeting on Genetic and Breeding of Capsicum and Eggplant. Netherlands : Noordwijkerhout.
- Li, X. , Wang, L. , Wang, Y. and Xiong, Z. 2016. “ Effect of drying method on physicochemical properties and antioxidant activities of *Hohenbuehelia serotina* polysaccharides.” **Process Biochemistry**. 51(8) : 1100–1108.
- Long, W., Yukiharu, O., and Akio, T. 2008. “Electrical impedance spectroscopy analysis of eggplant pulp and effects of drying and freezing–thawing treatments on its impedance characteristics.” **Journal of Food Engineering**. 87 : 274-280.
- Luthria, L., Singh, A., Wilson, T., Vorsa, N., Banuelos, G., and Vinyard, B. 2010. “Influence of conventional and organic agricultural practices on the phenolic content in eggplant pulp: plant-to-plant variation.” **Food Chemistry**. 121 : 406-411.
- Lu, Z., Maa, C., Zhao, Z., Jia, W. and Wang, M. 2016. “Effects of hot air drying time on properties of biomass brick.” **Applied Thermal Engineering**. 109 : 487–496.
- Mariola, P., Isabel, A., Santiago, V., Maria, H., Pietro, G., Francisco, J. H., and Jaime P. 2013. “Breeding for Chlorogenic Acid Content in Eggplant: Interest and Prospects.” **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**. 41(1) : 26-35.
- Marta, G., and Dorota, W. 2017. “Chlorogenic acids – their properties, occurrence and analysis.” **Marta Gil and Dorota Wianowska**. 61-104 P.
- Mie, N., Miho, S., Ryuto, T., Shohei Y., Kazufumi, T., Tomoyuki, F., Jun N., and Kozo N. 2019. “Daily Ingestion of Eggplant Powder Improves Blood Pressure and

- Psychological State in Stressed Individuals: A Randomized Placebo-Controlled Study.” **Nutrients**. 11(11) : 1-15.
- Min, Z. and Dewei, C. 2006. “Effects of low temperature soaking on color and texture of green eggplants,” **Journal of Food Engineering**. 74 : 54-59.
- Monica, B., and Alina, B. 2014. “Chemical Composition of Vegetables and their Products.” **Handbook of Food Chemistry**. 1-49 P.
- Moreira, R., Chenlo, F. Torres, M. D. and Vallejo, N. 2015. “Analysis of Moisture Desorption Isotherms of Eggplant (*Solanum melongena*),” **Food Science and Technology International**. 16(5) : 417-425.
- Mujumdar, A. and Devahastin, S. 2000. **Mujumdar’s Practical Guide to Industrial Drying**. Bangkok : Thananuch Business.
- Mujumdar, A. S. 2000. **Drying technology in agriculture and food sciences**. Enfield, NH : Science.
- Mujumdar, A. S. and Suvachittanont, S. 2000. **Developments in drying**. Bangkok : Kasetsart University Press.
- Mujumdar, A.S. and Devahastin, S. 2000. **Fundamental Principles of Drying** in S. Devahastin (Ed.) *Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying: Principles, Equipment and New Developments*. Quebec : Exergex.
- Muzaffar. K. and Kumar, P. 2016. “Moisture sorption isotherms and storage study of spray dried tamarind pulp powder.” **Powder Technology**. 291 : 322 – 327.
- Nayak, H., Kushwaha, A., Shahi, N., Chand, K., Kushwaha, K., Kulshrestha, K., and Chopra, C. 2018. “Effect of drying parameters on water activity of pink oyster mushroom (*Pleurotus djamor*) powder,” **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**. 7(2) : 2288-2292.
- Nergiz, G., Selman, U., Anne, F., Amy F. and Sami, D. 2018. “Health benefits and bioactive compounds of eggplant.” **Food Chemistry**. 1-51.
- Nicolle, C. A. and Maguire, M. 2003. “Empathic modelling in teaching design for all.” In Universal access in HCI, **HCI International**. 4 : 143- 147.
- Nimmol, C., Devahastin, S., Swasdisevi, T., and Soponronnarit, S. 2007. “Drying and heat transfer behavior of banana undergoing combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation drying.” **Applied Thermal Engineering**. 27 : 2483–2494.
- Osidacz, C. R., and Ambrosio-Ugri, B. C. M. 2013. “Physicochemical quality of eggplant dehydrated with varied pretreatments.” **Acta Scientiarum**. 35(1) : 175-179.
- Pfost, H., Maurer, S., Chung, D., and Milliken, G. 1976. “Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains.” **Transactions ASAE**. 76 : 3520.

- Phoungchandang, S., and Saentaweasuk, S. 2011. "Effect of two stage, tray and heat pump assisted-dehumidified drying on drying characteristics and qualities of dried ginger." **Food and Bioproducts Processing**. 89 : 429–437.
- Prachayawarakorn, S., Tia, W., Plyto, N., and Soponronnarit, S. 2008. "Drying kinetics and quality attributes of low-fat banana slices dried at high temperature." **Journal of Food Engineering**. 85 : 509–517.
- Quamruzzaman, A.K.M., Anjumanara, K. and Ferdouse, I. 2020. "Nutritional Content and Health Benefits of Bangladeshi Eggplant Cultivars," **European Journal of Agriculture and Food Sciences**. 2(4) : 1-7.
- Ran, K. 2016. "A Study of Physiological Activities of the Thermal Treated Eggplant on the Skin," **Korean Society for Biotechnology and Bioengineering Journal**. 31(3) : 151-157.
- Rahman, S.N.F.S.A., Wahida, R. and Rahman, N.R. 2015. "Drying Kinetics of Nephelium Lappaceum (Rambutan) in a Drying Oven." **Procedia - Social and Behavioral Sciences**. 195 : 2734 – 2741.
- Raquel, P. G. F. 2018. "The Drying of Foods and Its Effect on the Physical-Chemical, Sensorial and Nutritional Properties," **International Journal of Food Engineering**. 4(2) : 93-100.
- Sabatel et al. Method of Drying Vegetables. U.S patent no. 0236957, 30 July 2020.
- Sabolu, S., Kathiria, B. K., Mistry, R. C., and Kumar, S. 2014. "Generation mean analysis of fruit quality traits in eggplant (*Solanum melongena* L.)." **Australina Journal of Crop Science**. 8(2) : 243-250.
- Santacatalina, V. J., Ozuna, C., Cárcel, A. J., García-Pérez, V. J. and Mulet, A. 2011. "Quality assessment of dried eggplant using different drying methods: hot air drying, vacuum freeze drying and atmospheric freeze drying." 1-6. Conference: 11th **International Congress on Engineering and Food**.
- Sayed, M. Z. H., Jansen., P. C. M. and Solanum L. 1994. "PROSEA: Vegetables Plant." **Resources of Southeast Asia**. 8 : 249-252.
- Scala, K. D. and Crapiste, G. 2008. "Drying kinetics and quality changes during drying of red pepper." **LWT**. 41 : 789–795.
- Seerangurayar, T., Manickavasagan, A., Abdulrahim, M. A. and Yaseen, A.A. 2017. "Effect of carrier agents on flow ability and microstructural properties of foam-mat freeze dried date powder." **Journal of Food Engineering**.
- Sekara, A., Cebula, S. and Kunicki, E. 2007. "Cultivated eggplants – origin, breeding objectives and genetic resources, a review." **Folia Horticulturae Ann**. 19(1) : 97-114.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Shahidi, F., Janitha, P. K. and Wanasundara, P. D. 1992. "Phenolic antioxidants." **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. 32(1) : 67-103.
- Sims, R., Flammini, A., Puri, M., and Bracco S. 2015. "Opportunities For Agri-Food Chains To Become Energy-Smart." 1-212. **POWERING AGRICULTURE: An Energy Grand Challenge for Development**. U.S. Agency for International Development.
- Singhanat, P. and Supawinee, S. 2011. "Effect of two stage, tray and heat pump assisted-dehumidified drying on drying characteristics and qualities of dried ginger," **Food and Bioproducts Processing**. 89 : 429-437.
- Swarup, V. 1995. "Genetic resources and breeding of aubergine (*Solanum melongena* L.)." **Acta Hort**. 412 : 71-79.
- Taher, D., Solberg, Ø. S., Prohens, J., Chou, Y., Rakha, M. and Wu, T. 2017. "World Vegetable Center Eggplant Collection: Origin, Composition, Seed Dissemination and Utilization in Breeding." **Frontiers in Plant Science**. 8 : 1-12.
- The Schumacher Centre for Technology and Development. 2008. **Drying of food**. United Kingdom.
- Thompson, T., Peart, R., and Foster, G. 1968. "Mathematical simulation of corn drying-a new model." **Transactions ASAE**. 24 : 582-586.
- Trivedi, M. K., Branton, A., Trivedi, D., Nayak, G., Gangwar, M., and Jana, S. 2016. "Molecular Analysis of Biofield Treated Eggplant and Watermelon Crops." **Advances in Crop Science and Technology**. 4(1) : 1-5.
- Vega-Galvez, A., Lemus-Mondaca, R., Bilbao-Sa'inz, C., Fito, P. and Andres, A. 2008. "Effect of air drying temperature on the quality of rehydrated dried red bell pepper (var. Lamuyo)". **Journal of Food Engineering**. 85 : 42-50.
- Wannamethee, G. S., Lowe, D. G., Rumley, A., Bruckdorfer, R. K. and Whincup H. P., 2006. "Associations of vitamin C status, fruit and vegetable intakes, and markers of inflammation and hemostasis." **American Society for Nutrition**. 83 : 567 – 574.
- Zaro, M. J., Vicente, A. R., Ortiz, C. M., Chaves, A. R., and Concellón, A. 2015. "Eggplant." 479-493. **Handbook of Vegetable Preservation and Processing**.
- Zhang, L., Wang, X., Yu, L., and Zhang, H. 2012. "Drying characteristics and color changes of infrared drying eggplant," **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**. 28(2) : 291-296.

กรมส่งเสริมการเกษตร. 2559. ข้อมูลการส่งผักสดไปต่างประเทศ. กรมส่งเสริมการเกษตร. [Online]. Available : <http://www.doa.go.th/ard/FileUpload/export/5.4.2/Vegetable59.pdf>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรมส่งเสริมการเกษตร.2560. มะเขือม่วง. กรมส่งเสริมการเกษตร. [Online].

Available : <http://www.agriinfo.doae.go.th/year60/plant/rortor/veget/67.pdf>

กรมส่งเสริมการเกษตร. 2562. มะเขือม่วง. [Online]. Available : [กลุ่มสื่อส่งเสริมการเกษตร กรมส่งเสริมการเกษตร. 2554. การปลูกมะเขือม่วงและมะเขือม่วงญี่ปุ่น. คณาจารย์ภาควิชา. 2543. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.](http://production.doae.go.th/กระทรวงอุตสาหกรรม มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน. 2558. ผักและผลไม้แห้ง. กรุงเทพฯ : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.</p>
</div>
<div data-bbox=)

จอมขวัญ สุวรรณรักษ์ และคณะ. 2557. “ประสิทธิภาพของสารฆ่าเชื้อกรดเพอร์ออกไซด์ออกซีแอกซีติกและสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ในการลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ผิวผักและผลไม้สดแกะสลัก.” วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร. 8(2) : 92-106.

ชนันท์ ราชภูนิยม และ สุเนตร สืบคำ. 2555. “การหาไอโซเทอมความชื้นของวัสดุที่แลกเปลี่ยนความชื้นได้ดี.” วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 18(1) : 43-51.

ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล. 2555. “เทคโนโลยีการทำแห้งแบบผสมผสาน: การนำมาใช้เพื่อถนอมผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อน.” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 35(2) : 269-283.

ธาดา สืบหลินวงศ์ และนวลทิพย์ กมลวารินทร์. 2542. ชีวเคมีทางการแพทย์. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นิพนธ์ ไชยมงคล. 2546. มะเขือม่วง. [Online]. Available : <https://vegetweb.com/wp-content/download/eggplant.pdf>.

นิพนธ์ ไชยมงคล. 2546. เอกสารความรู้ทั่วไปมะเขือม่วง. เชียงใหม่: สาขาพืชผัก ภาควิชาพืชสวน คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

นิรนาม. 2556. “มะเขือม่วงญี่ปุ่น.” เพื่อนแท้เกษตรกรไทย. 10(4) : 9-11.

ยะทะเบะ, ทะกะชิ. 2551. HEAT PUMP เทคโนโลยีเพื่อการประหยัดพลังงานและลดภาวะโลกร้อน. แปลโดย อรรณพ เรืองวิเศษ. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริม(ไทย-ญี่ปุ่น).

วศินี จิรวัดมนโสภณ, อุทัยวรรณ ท้ายเมือง, วรินธร พูลศรี, และกรรณพด แก้วสอน. 2561. “การศึกษาการอบแห้ง และกรรมวิธีการทำจากใบบัวหลวง.” วิทยาศาสตร์เกษตร. 49(2) :425-428.

วสันต์ ด้วงคำจันทร์. 2540. “การสร้างเครื่องอบแห้งผักและผลไม้ในระบบ Heat Pump Dryer.” ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วาริน แสงกิตติโกมล. 2546. “การเปรียบเทียบปริมาณสารโพลีฟีนอลิกส์และปริมาณการต้านสารอนุมูลอิสระในผักและสมุนไพร.” วารสารสหเวชศาสตร์. 3(1) : 91-99.

วินัย สมประสงค์. 2550. ความหลากหลายของพืชพื้นเมืองในประเทศไทยชุดที่ 1 พืชสกุล. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.

วิภพ สุทชนะ. 2556. “ฤทธิ์ต้านมะเร็งของพลาไวโนอยด์: กลไกการออกฤทธิ์.” ศรีนครินทร์เวชสาร. 28(4) : 567-582.

วีไล รังสาดทอง. 2547. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สีกกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา. 2555. **การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ**. กรุงเทพฯ : ท้อป. สมทรง เลขะกุล. 2543. **ชีวเคมีของวิตามิน**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : ศุภนิชการพิมพ์.
- อนุสรฯ พลบุญ. 2560. “การผลิตผงใยอาหารที่มีสารต้านอนุมูลอิสระจากเปลือกเสาวรสสีม่วงและการประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมของอาหารจำลองสำหรับผู้สูงอายุ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- อวยพร อภิรักษ์อร่ามวง. 2548. “การบริโภคกาแฟกับความเสี่ยงต่อเบาหวานชนิดที่ 2.” **วารสารไทยโภชนาการ**. 2 : 81-92.
- อัญญา จันทรปะทิว, युพา มิตรมังกร และ นาทยา มนต์รี. 2560. “ผลของความร้อนและการเก็บรักษาต่อปริมาณแอนโทไซยานินในผักสีม่วงบางชนิด.” **แก่นเกษตร**. 45(1) :1278-1282.
- อิศเรศ วรรณทร. 2554. “การศึกษาการกระจายอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุพูนในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนโดยใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- อุทัย กิติตุ้ย. 2556. “ประสิทธิภาพของการใช้ปุ๋ยที่มีผลต่อการผลิตมะเขือม่วงอำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปฐพีศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- เอกชัย จารุเนตรวิลาส. 2558. “อาหารฟังก์ชัน.” วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สำนักวิชาศึกษาทั่วไป, มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก รายละเอียดเครื่องทำแห้งแบบลมร้อนที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์

ภาคผนวก ค ผลการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

ภาคผนวก ง งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดเครื่องทำแห้งแบบลมร้อนที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ก.1 เครื่องทำแห้งแบบลมร้อน

เครื่องทำแห้งอัจฉริยะเป็นเครื่องทำแห้งที่พัฒนาขึ้นมาเพื่ออำนวยความสะดวกในการวิจัยกระบวนการอบแห้งแบบลมร้อน ซึ่งได้รับทุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย โครงการ “ระบบควบคุมการอบแห้งอัจฉริยะในผลิตภัณฑ์อาหารแห้งคุณภาพชั้นพรีเมียมสำหรับ SME” โดยเครื่องทำแห้งอัจฉริยะได้เพิ่มฟังก์ชันการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวของผลิตภัณฑ์และการวัดค่าความชื้นที่เปลี่ยนไปในขณะอบแห้ง และอีกหนึ่งรูปแบบการทำงานของเครื่องทำแห้งอัจฉริยะที่สามารถทำแห้งแบบเป็นขั้นตอนโดยการกำหนดอุณหภูมิอากาศและระยะเวลาในการอบแห้งได้ 3 ระดับ นอกจากนี้โปรแกรมการทำงานของเครื่องทำแห้งอัจฉริยะสามารถเก็บข้อมูลการอบแห้งในส่วนของคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ น้ำหนักและความชื้นของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังคำนวณหาอัตราการอบแห้งให้อัตโนมัติ โดยมีรายละเอียดของเครื่องดังนี้

รายละเอียดและขอบเขตการทำงานของเครื่อง

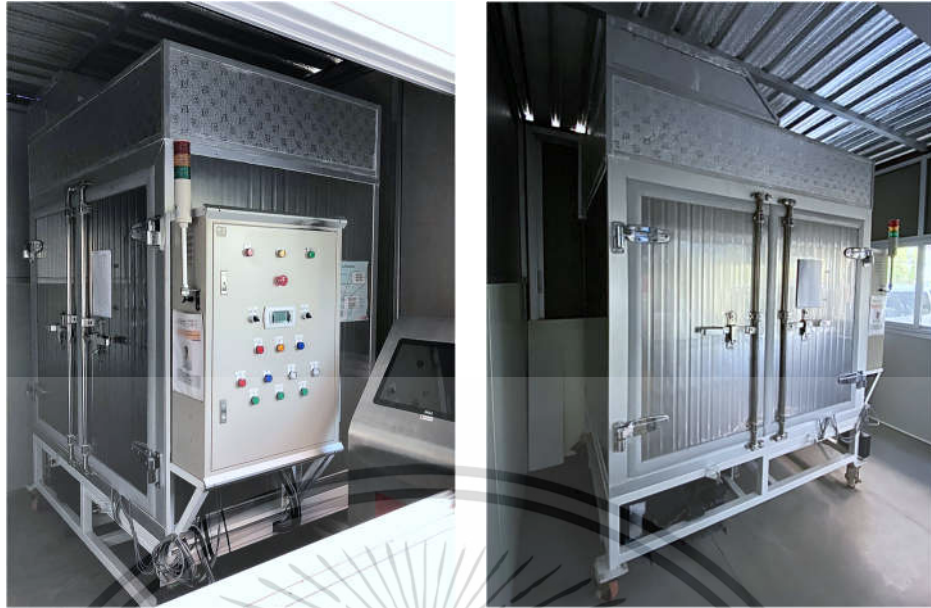
- ปริมาณสินค้าเข้าเครื่อง (Input capacity) : 10 กิโลกรัมต่อรอบ
- จำนวนถาด : 10 ถาด
- ถาดอบแห้งมีขนาด : 0.6 X 0.6 ตารางเมตร
- ขนาดภายนอกเครื่องทำแห้ง : 2.15 X 1.35 X 2.68 ลูกบาศก์เมตร
- ขนาดห้องทำแห้ง : 1.02 X 1.02 X 1.3 ลูกบาศก์เมตร
- วัสดุที่ใช้ทำส่วนที่สัมผัสผลิตภัณฑ์ : สแตนเลส 304
- ความต้องการกำลังไฟ : 6.5 กิโลวัตต์
- อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ในช่วง : 40 - 70 องศาเซลเซียส
- ค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ : ± 2 องศาเซลเซียส
- ความเร็วลม : 0.5 - 1.3 เมตรต่อวินาที
- วัดอุณหภูมิที่ผิวผลิตภัณฑ์ : 3 ตำแหน่ง
- วัดอุณหภูมิของอากาศในห้องทำแห้ง : 1 ตำแหน่ง
- วัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องทำแห้ง : 1 ตำแหน่ง
- ชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ขณะทำแห้ง : 3 ตำแหน่ง
- ความเร็วในการหมุนชั้นทำแห้ง : 0.147 เมตรต่อวินาที

การทำงานของเครื่องทำแห้งอัจฉริยะ

เครื่องทำแห้งอัจฉริยะมีส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานและการประมวลผลหลักใช้ชุดควบคุมหลัก (Main control) โดยมีการสั่งการทำงานใน 2 ลักษณะ ได้แก่

1. การควบคุมอุณหภูมิอากาศคงที่ เป็นวิธีที่สามารถตั้งค่าอุณหภูมิอากาศและเวลาได้ถึง 3 ระดับ โดยควบคุมให้อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้ามีค่าคงที่
2. การควบคุมอุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์ เป็นวิธีที่สามารถใช้อุณหภูมิอากาศร้อนได้สูงสุดถึง 70 องศาเซลเซียส โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิอากาศร้อนจากการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิผิวผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1 เครื่องทำแห้งแบบลมร้อน ระบบควบคุมการทำแห้งอัจฉริยะในผลิตภัณฑ์อาหารแห้งคุณภาพชั้นพรีเมียม (สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
วิธีการวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการวิเคราะห์คุณภาพของมะเชื่อม่วงผง

ข.1 ปริมาณความชื้น (Moisture content)

นำภาชนะสำหรับอบตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์ความชื้นเข้าตู้อบลมร้อน (hot air oven) (UF55, Memmert, Germany) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาใส่ตู้ดูดความชื้นและทิ้งให้เย็น ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่งและบันทึกน้ำหนัก สุ่มตัวอย่างมะเชื่อม่วงก่อนอบแห้งและหลังอบแห้ง ชั่งน้ำหนักประมาณ 3 กรัม วัดตัวอย่างจำนวน 3 ซ้ำ ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ใส่ในภาชนะสำหรับอบตัวอย่าง บันทึกน้ำหนักแล้วนำเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำภาชนะสำหรับอบตัวอย่างออกจากตู้อบลมร้อนแล้วใส่ในตู้ดูดความชื้นและปิดฝาภาชนะปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักเพื่อนำไปคำนวณเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก และฐานแห้ง ดังสมการที่ (ข.1) และ (ข.2) ตามลำดับ (AOAC, 2000; Gozde *et al.*, 2015; Jose *et al.*, 2017)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก} = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \times 100 \quad (\text{ข.1})$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก} = \frac{(m_1 - m_2)}{m_2} \times 100 \quad (\text{ข.2})$$

โดย m_1 = น้ำหนักตัวอย่างผลิตภัณฑ์ก่อนอบแห้ง (กรัม)
 m_2 = น้ำหนักตัวอย่างผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง (กรัม)



รูปที่ ข.1 การชั่งน้ำหนักและวางตัวอย่างในตู้อบลมร้อนเพื่อหาความชื้น

ข.2 วอเตอร์แอกติวิตี (Water activity)

สุ่มตัวอย่างมะเขือม่วงประมาณ 3 กรัม วัดค่าวอเตอร์แอกติวิตีด้วยเครื่องวอเตอร์แอกติวิตี (4TE, AquaLab, USA) (รูปที่ ข.2) วัดตัวอย่างจำนวน 3 ซ้ำ



รูปที่ ข.2 การวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตีของมะเขือม่วง

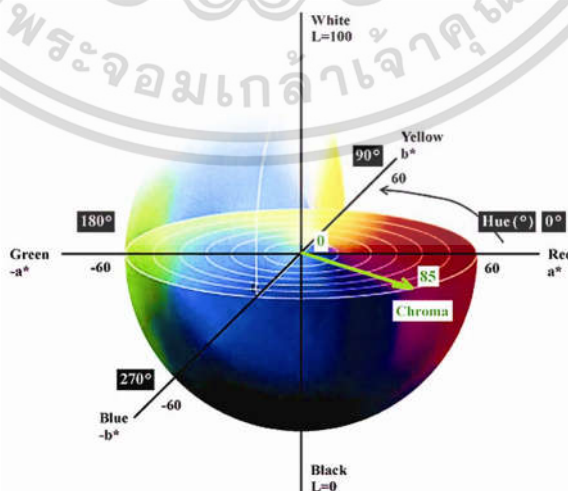
ข.3 สี (Colour)

สุ่มตัวอย่างมะเขือม่วงก่อนอบแห้งและหลังอบแห้งวัดสีด้วยเครื่องวัดสี (ColorFlex, Hunter Lab, USA) (รูปที่ ข.4) โดยใช้ระบบสี CIE $L^*a^*b^*$ ที่สภาวะแสง D_{65} Observer 10° ใช้แทนสำหรับวางแก้วควอตซ์ขนาด 1.25 นิ้ว โดยปรับเทียบค่าสีก่อนการตรวจวัดด้วย Black glass standard และ White tile standard ตามลำดับ จากนั้นบรรจุตัวอย่างลงในแก้วควอตซ์ ให้มีปริมาณตัวอย่างสูงจากก้นแก้วควอตซ์ 25 มิลลิเมตร ปิดทับด้วยดิสก์สีขาวและครอบด้วย opaque cover เพื่อวัดสีตัวอย่างจำนวน 3 ซ้ำ จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณค่าสีแท้ (Hue angle) ดังสมการที่ (ข.3) และค่าความสดของสี (Chroma) ดังสมการที่ (ข.4) (Phoungchadang and Saentaweasuk, 2011; Gozde *et al.*, 2015; อนุสรฯ, 2560)

โดย ค่า L^* = ค่าความสว่าง (L^* เท่ากับ 100 คือสีขาว และ L^* เท่ากับ 0 คือสีดำ)

ค่า a^* = ค่าสีแดง (เมื่อมีค่าเป็นบวก) และค่าสีเขียว (เมื่อมีค่าเป็นลบ)

ค่า b^* = ค่าสีเหลือง (เมื่อมีค่าเป็นบวก) และค่าสีน้ำเงิน (เมื่อมีค่าเป็นลบ)



รูปที่ ข.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สี $L^* a^* b^*$

ที่มา : <http://thecolormeasurement.com>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่าสีแท้ (Hue angle, h^*) หมายถึง ค่าที่แสดงถึงสีที่แท้จริงที่ปรากฏให้เห็นมีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 360 องศา ดังสมการที่ (ข.3)

$$\text{Hue angle} = \tan^{-1}(b^*/a^*) \quad (\text{ข.3})$$

โดย 0-45 องศา แสดงสีม่วงแดงถึงสีส้มแดง, 45-90 องศา แสดงสีส้มแดงถึงสีเหลือง, 90-135 องศา แสดงสีเหลืองถึงสีเหลืองเขียว, 135-180 องศา แสดงสีเหลืองเขียวถึงเขียว, 180-225 องศา แสดงสีเขียวกถึงสีน้ำเงิน, 225-270 องศา แสดงสีน้ำเงินเขียวถึงน้ำเงิน, 270-315 องศา แสดงสีน้ำเงินถึงม่วง และ 315-360 องศา แสดงสีม่วงถึงม่วงแดง

- ค่าความสดของสี (Chroma, C^*) บอกความบริสุทธิ์ หรือความเข้มของสีเป็นระดับสีอ่อนไปจนถึงสีเข้ม โดยใช้เปรียบเทียบความเข้มของสีในเฉดเดียวกัน ดังสมการที่ (ข.4)

$$\text{Chroma} = (a^2 + b^2)^{1/2} \quad (\text{ข.4})$$



รูปที่ ข.4 เครื่องวัดสี (ColorFlex, Hunter Lab, USA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.4 ความหนาแน่นรวม

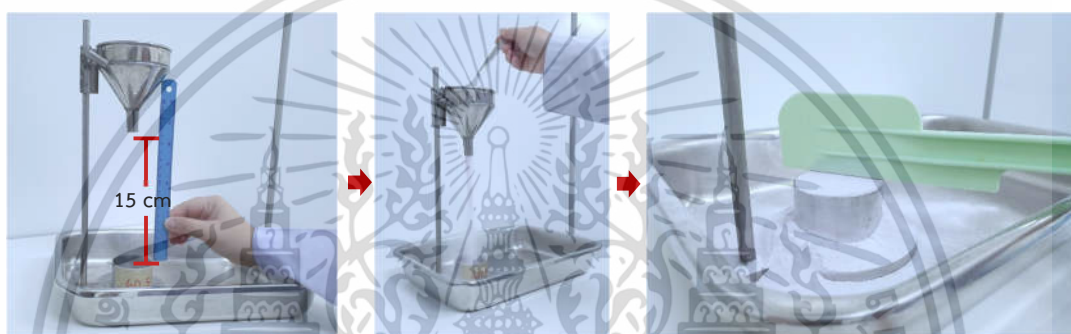
ชั่งน้ำหนักภาชนะสำหรับใส่ตัวอย่างที่ทราบปริมาตรแน่นอน ด้วยเครื่องตวง 2 ตำแหน่ง ใส่ตัวอย่างมะเขือม่วงฝงที่ระดับความสูงจากปลายกรวยถึงขอบภาชนะเท่ากับ 15 เซนติเมตร (รูปที่ ข.5) ใส่ให้เต็มภาชนะจากนั้นปาดตัวอย่างมะเขือม่วงให้เสมอกับปากภาชนะ แล้วนำตัวอย่างในภาชนะมาชั่งน้ำหนักและคำนวณค่าความหนาแน่นรวม ดังสมการที่ (ข.5) วัดตัวอย่างจำนวน 3 ซ้ำ

$$D = \frac{m}{V} \quad (\text{ข.5})$$

โดย D = ความหนาแน่นรวม (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

m = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

V = ปริมาตรภาชนะ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)



รูปที่ ข.5 ขั้นตอนการหาความหนาแน่นรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

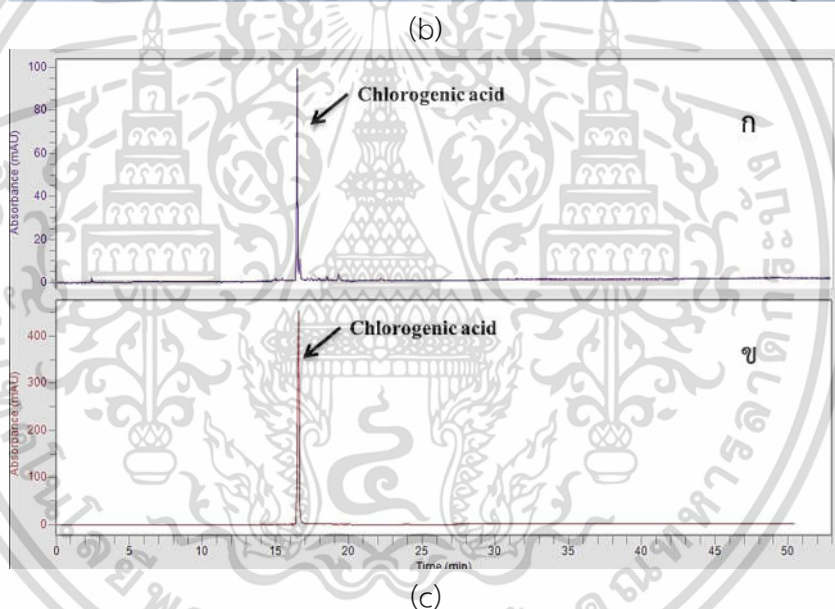
ข.5 ปริมาณกรดคลอโรจีนิก (Chlorogenic acid)

นำมะเขือม่วงผงปริมาณ 5 กรัม และบันทึกน้ำหนัก เติมน้ำละลายเมทานอล 150 มิลลิลิตร แล้วนำไปสกัดด้วยวิธี Microwave-assisted extraction โดยใช้กำลังไฟฟ้าในการสกัด 350 วัตต์ เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นกรองสารสกัดที่ได้ผ่านไซริงค์ฟิลเตอร์ในลอน ขนาด 0.45 ไมโครเมตร วิเคราะห์หาปริมาณกรดคลอโรจีนิกด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC) (รูปที่ ข. 5a) โดยใช้คอลัมน์ (Brownlee, PerkinElmer, USA) ความยาว 25 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.60 มิลลิเมตร ขนาดอนุภาค 5.0 ไมโครเมตร เฟสคงที่เป็น Analytical C18 ใช้ระบบเฟสเคลื่อนที่ สารละลายกรดฟอสฟอริกในน้ำ 0.1 เปอร์เซ็นต์ และอะซิโตนไนโตรล์ โดยปรับอัตราส่วนของ สารละลายกรดฟอสฟอริก 0.1 เปอร์เซ็นต์ และอะซิโตนไนโตรล์เริ่มต้นเท่ากับ 95 : 5 คงไว้ 5 นาที จากนั้นปรับอัตราส่วนเป็น 5 : 95 จนกระทั่งครบ 50 นาที ใช้อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที ตรวจวิเคราะห์ด้วย Photodiode array detector (PDA) ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร ปริมาณของสาร ตัวอย่างที่ฉีดเท่ากับ 10 ไมโครลิตร วัดตัวอย่างจำนวน 3 ซ้ำ



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.6 ขั้นตอนการหาปริมาณกรดคลอโรจีนิก

- (a) แผนผังแสดงการสกัดกรดคลอโรจีนิกของตัวอย่างมะเขือม่วง
 (b) เครื่องไฮเปอร์ฟอร์แมนซ์ลิควิดโครมาโตกราฟี (FLEXAR™ LC Systems, Perkin Elmer, USA)
 (c) RP-HPLC โครมาโทแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ (ก) สารสกัดมะเขือม่วงและ (ข) สารมาตรฐานกรดคลอโรจีนิก

ข.6 วอเตอร์ซอร์พชันไอโซเทอร์ม (Water sorption isotherm)

ชั่งน้ำหนักมะเขือม่วงฝง 1.5 - 2 กรัม ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (BSA224S-CW, Sartorius, Germany) ใส่ในถ้วยอลูมิเนียม แล้ววางถ้วยตัวอย่างบนตะแกรงพลาสติกที่เหนือสารละลายเกลืออิ่มตัว 7 ชนิด ได้แก่ LiCl CH₃COOH MgCl₂ K₂CO₃ NaBr NaCl และ KCl (รูปที่ ข.7) (ชนันท์ ราชัญนิยม และ สุเนตร สืบคำ, 2555; Moreira *et al.*, 2015) แสดงในตารางที่ 3.1 (ดัดแปลงจาก Muzaffar and Kumar, 2016) ในกล่องพลาสติกที่ปิดสนิท เพื่อให้ได้สภาวะที่ค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นสัมพัทธ์สมดุลที่แตกต่างกัน 7 ระดับ ระหว่างร้อยละ 11 – 84 เป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ จากนั้นนำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักจนกระทั่งตัวอย่างมีน้ำหนักคงที่ (± 0.001) คำนวณหาความชื้นหลังสมดุลของตัวอย่างที่เก็บอยู่ในสารละลายเกลืออิ่มตัว ที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน โดยใช้ความชื้นเริ่มต้นในการคำนวณ

ตารางที่ 3.1 ชนิดสารละลายเกลืออิ่มตัวและค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุล

สารละลายเกลืออิ่มตัว	ค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุล
LiCl	11.15%
CH ₃ COOK	22.60%
MgCl ₂	32.73%
K ₂ CO ₃	43.80%
NaBr	57.70%
NaCl	75.32%
KCl	84.32%

นำข้อมูลค่าความชื้นสมดุลที่สัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 5 แบบ แสดงในตารางที่ 3.2 (Thompson *et al.*, 1968; Pfof *et al.*, 1976; Iglesias and Chirife, 1976; Phoungchandang and Saentaweek, 2011) โดยการเลือกรูปแบบสมการที่เหมาะสมจะประเมินจากค่ากำลังสองของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient of Square, R²) มีค่ามากที่สุด แต่มีค่าการลดลงไคกำลังสอง (X²) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error; RMSE) น้อยที่สุด ที่คำนวณจากสมการที่ (3.7) และ (3.8) ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Sorption isotherm

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	สมการ
Henderson	$a_w = 1 - \exp[-A \times T \times M_e^B]$
Modified Henderson	$a_w = 1 - \exp[-A \times (T + C) \times M_e^B]$
Modified Chung - Pfof	$a_w = \exp\left[\left(\frac{-A}{T+C}\right) \exp(-B \times M_e)\right]$
Halsey	$a_w = \exp\left[\left(\frac{-A}{(R \times T)}\right) \times M_e^B\right]$
Modified Halsey	$a_w = \exp[-\exp(A + C \times T) \times M_e^B]$

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (ข.6)$$

$$SSE = \sum (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (ข.7)$$

$$SST = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (ข.8)$$

$$X^2 = \sum ((y_i - \bar{y}_i)^2) / (N-1) \quad (ข.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum ((y_i - \bar{y}_i)^2)/(N)} \quad (\text{ข.10})$$

โดย

y_i	=	ค่าที่ได้จากการทดลอง
\bar{y}_i	=	ค่าเฉลี่ยของผลการทดลอง
\hat{y}_i	=	ค่าที่ได้จากการคำนวณ
N	=	จำนวนข้อมูล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

ค.1 การอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่

ข้อมูลของการอบแห้ง

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลของการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ 40 องศาเซลเซียส (n=3)

เวลา (นาท)	ปริมาณความชื้นฐาน (kg water/kg dry solid)		อัตราการอบแห้ง (kg/h.m ²)	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	15.7504	0.0000	0.0000	0.0000
10	15.6662	0.0883	0.5484	0.0154
20	15.5452	0.0861	0.7877	0.1042
30	15.3289	0.1206	1.4084	0.1307
40	15.0983	0.1678	1.5013	0.0994
50	14.8615	0.1315	1.5417	0.1791
60	14.6222	0.1361	1.5583	0.0552
70	14.3877	0.1446	1.5270	0.0782
80	14.1493	0.1546	1.5522	0.0882
90	13.9150	0.1966	1.5250	0.1298
100	13.6771	0.2116	1.5489	0.0899
110	13.4373	0.1866	1.5619	0.0411
120	13.1732	0.2013	1.7190	0.1320
130	12.9446	0.2202	1.4885	0.1358
140	12.7209	0.2762	1.4569	0.1135
150	12.4940	0.2432	1.4768	0.0489
160	12.2616	0.2580	1.5135	0.1551
170	12.0266	0.2714	1.5298	0.1046
180	11.8002	0.3064	1.4739	0.0895
190	11.5674	0.3302	1.5160	0.1394
200	11.3387	0.3091	1.4890	0.0469
210	11.1082	0.3216	1.5007	0.1306
220	10.8788	0.3534	1.4938	0.0826
230	10.6561	0.3795	1.4502	0.1169
240	10.4302	0.3630	1.4704	0.1006
250	10.1992	0.3750	1.5042	0.1196
260	9.9711	0.4245	1.4850	0.1468
270	9.7436	0.3999	1.4816	0.0269

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ข้อมูลของการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่ 40 องศาเซลเซียส (n=3)

เวลา (นาที)	ปริมาณความชื้นฐาน (kg water/kg dry solid)		อัตราการอบแห้ง (kg/h.m ²)	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
280	9.5149	0.4211	1.4886	0.1904
290	9.2820	0.4284	1.5165	0.0474
300	9.0571	0.4507	1.4644	0.1242
310	8.8254	0.4557	1.5082	0.0836
320	8.6027	0.4688	1.4506	0.0982
330	8.3736	0.5057	1.4912	0.1076
340	8.1476	0.4928	1.4719	0.0740
350	7.9185	0.5050	1.4914	0.0951
360	7.6965	0.5170	1.4451	0.0968
370	7.4846	0.5244	1.3798	0.0493
380	7.2612	0.5329	1.4543	0.0715
390	7.0430	0.5496	1.4213	0.1304
400	6.8245	0.5494	1.4225	0.0041
410	6.6089	0.5574	1.4035	0.0796
420	6.3964	0.5831	1.3836	0.0195
430	6.1805	0.5613	1.4056	0.0218
440	5.9722	0.5658	1.3566	0.0517
450	5.7663	0.6055	1.3403	0.0383
460	5.5534	0.5648	1.3864	0.0118
470	5.3564	0.5643	1.2824	0.0076
480	5.1553	0.5572	1.3097	0.0370
490	4.9565	0.5500	1.2941	0.0302
500	4.7643	0.5681	1.2515	0.0521
510	4.5699	0.5288	1.2655	0.0931
520	4.3803	0.5257	1.2349	0.0468
530	4.2099	0.5144	1.1090	0.0967
540	0.5001	4.0320	1.1586	0.0501
550	0.4870	3.8613	1.1114	0.0124
560	0.4660	3.6904	1.1124	0.1055
570	0.4802	3.5252	1.0755	0.0768
580	0.4363	3.3554	1.1057	0.0621

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ข้อมูลของการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่ 40 องศาเซลเซียส (n=3)

เวลา (นาท)	ปริมาณความชื้นฐาน (kg water/kg dry solid)		อัตราการอบแห้ง (kg/h.m ²)	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
590	0.4544	3.1986	1.0211	0.1085
600	0.4047	3.0393	1.0373	0.0865
610	0.3920	2.8858	0.9994	0.1064
620	0.3672	2.7375	0.9653	0.0429
630	0.3448	2.5917	0.9494	0.0751
640	0.3255	2.4486	0.9316	0.0651
650	0.3090	2.3171	0.8559	0.1011
660	0.2889	2.1794	0.8965	0.1063
670	0.2694	2.0488	0.8506	0.0387
680	0.2543	1.9258	0.8009	0.0385
690	0.2345	1.8033	0.7978	0.1093
700	0.2261	1.6905	0.7338	0.0861
710	0.2065	1.5861	0.6801	0.0653
720	0.1873	1.4806	0.6870	0.0780
730	0.1732	1.3801	0.6541	0.1002
740	0.1592	1.2772	0.6699	0.1117
750	0.1405	1.1896	0.5707	0.0895
760	0.1271	1.1035	0.5603	0.1066
770	0.1107	1.0160	0.5694	0.0425
780	0.0947	0.9327	0.5425	0.0774
790	0.0762	0.8558	0.5011	0.0431
800	0.0621	0.7796	0.4959	0.0601
810	0.0732	0.7065	0.4761	0.0625
820	0.0920	0.6369	0.4529	0.0601
830	0.0841	0.5725	0.4194	0.1070
840	0.0959	0.5117	0.3959	0.1021
850	0.0977	0.4591	0.3428	0.0531
860	0.0800	0.4109	0.3136	0.0240
870	0.0474	0.3677	0.2813	0.0025
880	0.0685	0.3293	0.2500	0.0205
890	0.0897	0.2919	0.2434	0.0145
900	0.1091	0.2579	0.2213	0.0215

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ข้อมูลของการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ 40 องศาเซลเซียส (n=3)

เวลา (นาท)	ปริมาณความชื้นฐาน (kg water/kg dry solid)		อัตราการอบแห้ง (kg/h.m ²)	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
910	0.1262	0.2281	0.1940	0.0023
920	0.1426	0.1997	0.1852	0.0057
930	0.1563	0.1759	0.1545	0.0057
940	0.1687	0.1544	0.1402	0.0067
950	0.1788	0.1368	0.1144	0.0145
960	0.1866	0.1232	0.0888	0.0295
970	0.1928	0.1125	0.0699	0.0349
980	0.0510	0.1068	0.0372	0.0174

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลของการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่ 50 องศาเซลเซียส (n=3)

เวลา (นาท)	ปริมาณความชื้นฐาน (kg water/kg dry solid)		อัตราการอบแห้ง (kg/h.m ²)	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	15.7504	0.0000	0.0000	0.0000
10	15.7230	0.1433	0.5797	0.1231
20	15.4355	0.1500	1.5483	0.0283
30	15.1006	0.1652	1.6996	0.0460
40	14.7700	0.1873	1.7243	0.0018
50	14.4783	0.1473	1.7354	0.0531
60	14.1552	0.1337	1.7472	0.0437
70	13.8045	0.1689	1.7366	0.0392
80	13.4817	0.1707	1.7815	0.0035
90	13.1531	0.1891	1.7404	0.0267
100	12.8795	0.1189	1.7537	0.1000
110	12.5738	0.1112	1.7322	0.0211
120	12.2392	0.1389	1.7462	0.0211
130	11.8806	0.1829	1.7317	0.0454
140	11.5830	0.1682	1.7159	0.0036
150	11.2821	0.1349	1.7013	0.1098
160	10.9497	0.1669	1.6936	0.0668
170	10.6798	0.1076	1.7033	0.0668

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 (ต่อ) ข้อมูลของการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่ 50 องศาเซลเซียส (n=3)

เวลา (นาท)	ปริมาณความชื้นฐาน (kg water/kg dry solid)		อัตราการอบแห้ง (kg/h.m ²)	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		ค่าเฉลี่ย
180	10.3311	0.1776	1.7102	0.0635
190	10.0023	0.1885	1.8529	0.0024
200	9.6958	0.1982	1.7254	0.0001
210	9.4076	0.1538	1.5106	0.0423
220	9.1091	0.1291	1.6146	0.0460
230	8.7944	0.1555	1.8234	0.0588
240	8.4675	0.2002	1.9134	0.0056
250	8.1611	0.2074	1.7268	0.0290
260	7.8747	0.1872	1.5568	0.0028
270	7.5915	0.1714	1.5486	0.0229
280	7.3008	0.1832	1.6559	0.0653
290	6.9835	0.2288	1.8726	0.0588
300	6.7120	0.2284	1.5213	0.0480
310	6.4149	0.2369	1.6720	0.0003
320	6.1601	0.2088	1.3710	0.0519
330	5.8820	0.1971	1.5162	0.0411
340	5.6122	0.2005	1.5229	0.0875
350	5.3530	0.2035	1.4507	0.0055
360	5.0724	0.2263	1.6245	0.0636
370	4.8233	0.2043	1.3379	0.0200
380	4.5880	0.1901	1.2721	0.0092
390	4.3489	0.1773	1.2900	0.0128
400	4.1035	0.1898	1.4066	0.0996
410	3.8602	0.1906	1.3575	0.0120
420	3.6340	0.1852	1.2448	0.0702
430	3.4009	0.1954	1.3307	0.0825
440	3.1969	0.1701	1.0404	0.0888
450	2.9968	0.1609	1.0686	0.0380
460	2.7956	0.1613	1.1317	0.0111
470	2.6114	0.1509	0.9798	0.0611
480	2.4309	0.1433	0.9765	0.0540
490	2.2773	0.1443	0.7150	0.0753

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 (ต่อ) ข้อมูลของการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่ 50 องศาเซลเซียส (n=3)

เวลา (นาท)	ปริมาณความชื้นฐาน (kg water/kg dry solid)		อัตราการอบแห้ง (kg/h.m ²)	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
500	2.0950	0.1284	1.0244	0.0732
510	1.9653	0.1439	0.6317	0.0416
520	1.7842	0.1121	1.0335	0.1130
530	1.6339	0.1076	0.8663	0.0052
540	1.4959	0.0975	0.6925	0.1342
550	1.3594	0.0955	0.7645	0.0041
560	1.2483	0.1007	0.5341	0.1053
570	1.1151	0.0859	0.7839	0.0031
580	1.0110	0.1080	0.4782	0.0864
590	0.9076	0.1065	0.5516	0.0556
600	0.8018	0.0962	0.5773	0.0661
610	0.7021	0.0958	0.5690	0.0275
620	0.6164	0.0883	0.4794	0.0253
630	0.5354	0.0810	0.4692	0.0062
640	0.4419	0.0805	0.5084	0.0266
650	0.3817	0.0810	0.3337	0.0005
660	0.3276	0.0723	0.3121	0.0132
670	0.2674	0.0517	0.3786	0.0079
680	0.2183	0.0387	0.2455	0.0996
690	0.1717	0.0279	0.2643	0.0409
700	0.1392	0.0215	0.1806	0.0326
710	0.1119	0.0062	0.1226	0.1161
720	0.1020	0.0042	0.0246	0.0633

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลของการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่ 60 องศาเซลเซียส (n=3)

เวลา (นาท)	ปริมาณความชื้นฐาน (kg water/kg dry solid)		อัตราการอบแห้ง (kg/h.m ²)	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	15.7504	0.0000	0.0000	0.0000
10	15.5602	0.0962	1.0931	0.2727
20	15.2301	0.1225	1.8971	0.0668
30	14.7737	0.1284	2.6231	0.0377

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 (ต่อ) ข้อมูลของการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่ 60 องศาเซลเซียส (n=3)

เวลา (นาท)	ปริมาณความชื้นฐาน (kg water/kg dry solid)		อัตราการอบแห้ง (kg/h.m ²)	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
40	14.3087	0.1358	2.6724	0.0597
50	13.8433	0.1375	2.6748	0.0125
60	13.3841	0.1441	2.6391	0.0391
70	12.9224	0.1461	2.6537	0.0366
80	12.4559	0.1514	2.6809	0.0746
90	11.9983	0.1539	2.6295	0.0165
100	11.5476	0.1569	2.5903	0.0508
110	11.0953	0.1682	2.5996	0.0677
120	10.6258	0.1680	2.6784	0.0220
130	10.1698	0.1757	2.6205	0.0439
140	9.7224	0.1841	2.5715	0.0482
150	9.2826	0.1894	2.5279	0.0575
160	8.8295	0.1955	2.6037	0.0627
170	8.3880	0.2085	2.5376	0.0858
180	7.9522	0.2083	2.5044	0.0141
190	7.5204	0.2136	2.4816	0.0354
200	7.0952	0.2220	2.4437	0.0485
210	6.6774	0.2260	2.4014	0.0249
220	6.2667	0.2352	2.3601	0.0539
230	5.8626	0.2368	2.3222	0.0113
240	5.4690	0.2334	2.2622	0.0691
250	5.0796	0.2379	2.2381	0.1347
260	4.7086	0.2371	2.1321	0.0193
270	4.3431	0.2315	2.1008	0.0338
280	4.0035	0.2291	1.9515	0.0607
290	3.6585	0.2236	1.9831	0.1021
300	3.3449	0.2196	1.8022	0.0424
310	3.0425	0.2047	1.7381	0.1602
320	2.7568	0.1987	1.6418	0.0974
330	2.4816	0.1874	1.5817	0.0657
340	2.2294	0.1798	1.4491	0.0440
350	1.9959	0.1694	1.3419	0.0752

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 (ต่อ) ข้อมูลของการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่ 60 องศาเซลเซียส (n=3)

เวลา (นาท)	ปริมาณความชื้นฐาน (kg water/kg dry solid)		อัตราการอบแห้ง (kg/h.m ²)	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
360	1.7747	0.1567	1.2714	0.0970
370	1.5787	0.1484	1.1263	0.0479
380	1.4023	0.1483	1.0140	0.0850
390	1.2281	0.1292	1.0011	0.1112
400	1.0719	0.1206	0.8979	0.0506
410	0.9377	0.1110	0.7709	0.0559
420	0.8160	0.1044	0.6998	0.0463
430	0.7070	0.0946	0.6263	0.0731
440	0.6160	0.0963	0.5228	0.0295
450	0.5333	0.0907	0.4756	0.0452
460	0.4645	0.0938	0.3953	0.0525
470	0.3975	0.0797	0.3849	0.0826
480	0.3435	0.0703	0.3107	0.0646
490	0.2917	0.0666	0.2974	0.0215
500	0.2569	0.0644	0.2002	0.0395
510	0.2239	0.0597	0.1893	0.0834
520	0.1936	0.0483	0.1746	0.0986
530	0.1691	0.0350	0.1404	0.0924
540	0.1505	0.0279	0.1071	0.0412
550	0.1370	0.0243	0.0775	0.0428
560	0.1273	0.0246	0.0556	0.0039
570	0.1183	0.0117	0.0522	0.0755
580	0.1107	0.0061	0.0433	0.0379
590	0.0988	0.0052	0.0685	0.0590

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.2 การอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์)

ข้อมูลของการอบแห้ง

ตารางที่ ค.4 การอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์)

40 องศาเซลเซียส (n=3)

เวลา (นาที)	ปริมาณความชื้นฐาน (kg water/kg dry solid)		อัตราการอบแห้ง (kg/h.m ²)	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	15.7504	0.0000	0.0000	0.0000
10	15.5690	0.0756	1.3415	0.0048
20	15.1650	0.0725	2.4081	0.0931
30	14.7920	0.0704	2.2230	0.1292
40	14.4549	0.0720	2.0091	0.0630
50	14.1344	0.0801	1.9106	0.0488
60	13.8457	0.0836	1.7205	0.1003
70	13.5746	0.0754	1.6160	0.0982
80	13.3206	0.0766	1.5139	0.0199
90	13.0767	0.0746	1.4539	0.0709
100	12.8321	0.0737	1.4576	0.0727
110	12.5819	0.0778	1.4911	0.1008
120	12.3337	0.0818	1.4793	0.1445
130	12.0894	0.0905	1.4565	0.1086
140	11.8435	0.1060	1.4652	0.1339
150	11.6020	0.1164	1.4397	0.0628
160	11.3595	0.1217	1.4452	0.0551
170	11.1154	0.1351	1.4550	0.1078
180	10.8689	0.1557	1.4691	0.1407
190	10.6193	0.1717	1.4879	0.1240
200	10.3753	0.1735	1.4545	0.0117
210	10.1460	0.1813	1.3667	0.0465
220	9.8977	0.1910	1.4799	0.0683
230	9.6649	0.1872	1.3873	0.0226
240	9.4375	0.1944	1.3552	0.0590
250	9.1881	0.1961	1.4867	0.0133
260	8.9605	0.2005	1.3566	0.0269
270	8.7342	0.2059	1.3491	0.0410
280	8.4959	0.1982	1.4199	0.0479
290	8.2551	0.2036	1.4355	0.0387

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 (ต่อ) การอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์)
40 องศาเซลเซียส (n=3)

เวลา (นาท)	ปริมาณความชื้นฐาน (kg water/kg dry solid)		อัตราการอบแห้ง (kg/h.m ²)	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
300	8.0190	0.2012	1.4072	0.0762
310	7.7859	0.2114	1.3894	0.1214
320	7.5674	0.2021	1.3024	0.1525
330	7.3575	0.2114	1.2510	0.1252
340	7.1501	0.2036	1.2361	0.0676
350	6.9375	0.2036	1.2673	0.0257
360	6.7344	0.2101	1.2106	0.0390
370	6.5222	0.2131	1.2647	0.0405
380	6.3310	0.2192	1.1394	0.0367
390	6.1336	0.2210	1.1768	0.0298
400	5.9348	0.2300	1.1846	0.0535
410	5.7300	0.2303	1.2209	0.0336
420	5.5250	0.2345	1.2218	0.0304
430	5.3317	0.2344	1.1519	0.0353
440	5.1286	0.2428	1.2106	0.0531
450	4.9277	0.2511	1.1977	0.0609
460	4.7258	0.2619	1.2033	0.0673
470	4.5281	0.2622	1.1781	0.0249
480	4.3226	0.2648	1.2248	0.0354
490	4.1161	0.2692	1.2310	0.0393
500	3.9120	0.2709	1.2165	0.0366
510	3.7058	0.2694	1.2287	0.0997
520	3.5062	0.2671	1.1899	0.0388
530	3.3066	0.2649	1.1899	0.0388
540	3.1022	0.2602	1.2183	0.0784
550	2.9087	0.2594	1.1533	0.0366
560	2.7178	0.2598	1.1376	0.0329
570	2.5364	0.2633	1.0811	0.0698
580	2.3543	0.2548	1.0857	0.0653
590	2.1752	0.2540	1.0676	0.0118
600	2.0019	0.2468	1.0326	0.0545
610	1.8279	0.2495	1.0371	0.0462

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 (ต่อ) การอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์)
40 องศาเซลเซียส (n=3)

เวลา (นาท)	ปริมาณความชื้นฐาน (kg water/kg dry solid)		อัตราการอบแห้ง (kg/h.m ²)	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
620	1.6593	0.2470	1.0048	0.0746
630	1.4927	0.2438	0.9933	0.0381
640	1.3357	0.2424	0.9358	0.0519
650	1.1899	0.2286	0.8686	0.1331
660	1.0381	0.2219	0.9052	0.0422
670	0.8951	0.2176	0.8522	0.0379
680	0.7627	0.2125	0.7892	0.0315
690	0.6336	0.2099	0.7692	0.0191
700	0.5170	0.2112	0.6955	0.0163
710	0.4097	0.2122	0.6392	0.0221
720	0.3239	0.2162	0.5114	0.0301
730	0.2525	0.2172	0.4257	0.0125
740	0.2050	0.2155	0.2830	0.0108
750	0.1712	0.2143	0.2014	0.0115
760	0.1520	0.2141	0.1146	0.0229
770	0.1400	0.2131	0.0711	0.0205
780	0.1354	0.2135	0.0278	0.0039

ตารางที่ ค.5 การอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์)
50 องศาเซลเซียส (n=3)

เวลา (นาท)	ปริมาณความชื้นฐาน (kg water/kg dry solid)		อัตราการอบแห้ง (kg/h.m ²)	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	15.7504	0.0000	0.0000	0.0000
10	15.4932	0.0656	1.8135	0.3331
20	15.1126	0.0508	2.9478	0.2445
30	14.7129	0.0436	3.0442	0.1222
40	14.2161	0.0599	3.0301	0.1978
50	13.6816	0.0857	2.9669	0.1611
60	13.1574	0.1166	2.9152	0.1738
70	12.5804	0.1475	2.9292	0.1663
80	12.0661	0.1769	2.8649	0.1551
90	11.5066	0.2120	2.8404	0.1792

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ให้บริการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 (ต่อ) การอบแห้งแบบอุณหภูมิกอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์)
50 องศาเซลเซียส (n=3)

เวลา (นาท)	ปริมาณความชื้นฐาน (kg water/kg dry solid)		อัตราการอบแห้ง (kg/h.m ²)	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100	10.9730	0.2384	2.8488	0.2050
110	10.4124	0.2787	2.8460	0.2114
120	9.8602	0.3111	2.8030	0.1644
130	9.3129	0.3649	2.7788	0.2772
140	8.7590	0.3895	2.7359	0.1321
150	8.2242	0.3984	2.7153	0.0465
160	7.6904	0.4412	2.6196	0.2246
170	7.1818	0.4596	2.5824	0.0931
180	6.6874	0.4526	2.5100	0.0508
190	6.2070	0.4411	2.4385	0.0882
200	5.6911	0.4361	2.3653	0.0913
210	5.2286	0.4642	2.3478	0.1425
220	4.7999	0.4764	2.1766	0.1110
230	4.3235	0.4602	1.9645	0.0974
240	3.8725	0.3889	1.6901	0.1947
250	3.5240	0.4048	1.4219	0.1614
260	3.1540	0.3803	1.3711	0.1863
270	2.8559	0.3616	1.2592	0.1294
280	2.6234	0.3615	1.1804	0.0909
290	2.3533	0.3432	1.1177	0.1079
300	2.1503	0.3304	1.0305	0.1085
310	1.9866	0.3437	0.8308	0.2198
320	1.7576	0.3485	0.9089	0.0342
330	1.5952	0.3537	0.8242	0.0867
340	1.4159	0.2952	0.6568	0.1037
350	1.2790	0.2884	0.6951	0.0487
360	1.0981	0.2236	0.6643	0.1423
370	0.9505	0.2351	0.4955	0.0587
380	0.8196	0.1913	0.5631	0.1115
390	0.7204	0.2258	0.3512	0.2210
400	0.5675	0.2060	0.3420	0.1456
410	0.4354	0.1568	0.3125	0.2794

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 (ต่อ) การอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์)
50 องศาเซลเซียส (n=3)

เวลา (นาท)	ปริมาณความชื้นฐาน (kg water/kg dry solid)		อัตราการอบแห้ง (kg/h.m ²)	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
420	0.3628	0.1056	0.2673	0.2396
430	0.2802	0.0649	0.2672	0.2157
440	0.2157	0.0399	0.2255	0.1341
450	0.1538	0.0062	0.2131	0.1975
460	0.1125	0.0087	0.1589	0.0629

ตารางที่ ค.6 การอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์)
60 องศาเซลเซียส (n=3)

เวลา (นาท)	ปริมาณความชื้นฐาน (kg water/kg dry solid)		อัตราการอบแห้ง (kg/h.m ²)	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	15.7504	0.0000	0.0000	0.0000
10	15.4819	0.0422	1.5356	0.2413
20	14.9977	0.0569	2.7695	0.2040
30	14.4466	0.0627	3.1522	0.1466
40	13.8807	0.0803	3.2368	0.0462
50	13.3267	0.1094	3.2864	0.1738
60	12.7952	0.1346	3.1263	0.0804
70	12.2511	0.1710	3.2302	0.1654
80	11.7304	0.2010	3.0774	0.0112
90	11.1631	0.2397	3.2449	0.2208
100	10.6192	0.2681	3.1108	0.0035
110	10.0775	0.3094	3.0984	0.1346
120	9.5365	0.3363	3.0947	0.0183
130	8.9897	0.3759	3.1273	0.1311
140	8.4643	0.4045	3.0049	0.0256
150	7.9333	0.4406	3.0375	0.1045
160	7.4132	0.4622	2.9744	0.0161
170	6.8825	0.4939	3.0359	0.1128
180	6.3627	0.5146	2.9728	0.0099
190	5.8485	0.5443	2.9410	0.0229
200	5.3568	0.5551	2.8127	0.0102
210	4.8699	0.5596	2.7848	0.0900

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 (ต่อ) การอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์)
60 องศาเซลเซียส (n=3)

เวลา (นาท)	ปริมาณความชื้นฐาน (kg water/kg dry solid)		อัตราการอบแห้ง (kg/h.m ²)	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
220	4.3837	0.5677	2.7807	0.0041
230	3.9192	0.5538	2.6571	0.0735
240	3.4650	0.5437	2.5979	0.0747
250	3.0197	0.5298	2.5467	0.0530
260	2.6057	0.5036	2.3684	0.0801
270	2.2063	0.4717	2.2842	0.0020
280	1.8285	0.4381	2.1609	0.0080
290	1.4849	0.3935	1.9652	0.0270
300	1.1810	0.3417	1.5756	0.1641
310	0.8976	0.2877	1.2797	0.1400
320	0.6855	0.2012	0.9273	0.0234
330	0.5150	0.1457	0.7922	0.0383
340	0.3996	0.0905	0.6605	0.0036
350	0.3013	0.0424	0.3916	0.0870
360	0.2672	0.0231	0.1415	0.1002
370	0.2397	0.0071	0.1578	0.0058
380	0.2032	0.0061	0.1913	0.0263
390	0.1712	0.0056	0.1812	0.0147
400	0.1412	0.0057	0.1571	0.0178
410	0.1162	0.0035	0.1364	0.0068

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.3 ระยะเวลาของการอบแห้งมะเขือม่วง

ตารางที่ ค.7 ข้อมูลการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่และแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส (n=3)

Condition	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
CAT (40 C)	3	980.33	16.623	9.597	939.04	1021.63	965	998
CAT (50 C)	3	720.33	12.055	6.960	690.39	750.28	709	733
CAT (60 C)	3	590.33	9.292	5.364	567.25	613.41	584	601
VAT (PSTL 40 C)	3	780.00	11.136	6.429	752.34	807.66	768	790
VAT (PSTL 50 C)	3	460.00	6.557	3.786	443.71	476.29	454	467
VAT (PSTL 60 C)	3	410.33	5.686	3.283	396.21	424.46	404	415
Total	18	656.89	200.699	47.305	557.08	756.69	404	998

ตารางที่ ค.8 การวิเคราะห์ทางสถิติของระยะเวลาในการอบแห้งแบบอุณหภูมิอากาศคงที่และแบบอุณหภูมิอากาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส (n=3)

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	683347.111	5	136669.422	1159.307	.000
Within Groups	1414.667	12	117.889		
Total	684761.778	17			

Post Hoc Tests (Tukey HSD)

Tukey HSD^a

Condition	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
VAT (PSTL 60 C)	3	410.33					
VAT (PSTL 50 C)	3		460.00				
CAT (60 C)	3			590.33			
CAT (50 C)	3				720.33		
VAT (PSTL 40 C)	3					780.00	
CAT (40 C)	3						980.33
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tukey HSD

(I) Condition	(J) Condition	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
CAT (40 C)	CAT (50 C)	260.000*	8.865	.000	230.22	289.78
	CAT (60 C)	390.000*	8.865	.000	360.22	419.78
	VAT (PSTL 40 C)	200.333*	8.865	.000	170.56	230.11
	VAT (PSTL 50 C)	520.333*	8.865	.000	490.56	550.11
	VAT (PSTL 60 C)	570.000*	8.865	.000	540.22	599.78
CAT (50 C)	CAT (40 C)	-260.000*	8.865	.000	-289.78	-230.22
	CAT (60 C)	130.000*	8.865	.000	100.22	159.78
	VAT (PSTL 40 C)	-59.667*	8.865	.000	-89.44	-29.89
	VAT (PSTL 50 C)	260.333*	8.865	.000	230.56	290.11
	VAT (PSTL 60 C)	310.000*	8.865	.000	280.22	339.78
CAT (60 C)	CAT (40 C)	-390.000*	8.865	.000	-419.78	-360.22
	CAT (50 C)	-130.000*	8.865	.000	-159.78	-100.22
	VAT (PSTL 40 C)	-189.667*	8.865	.000	-219.44	-159.89
	VAT (PSTL 50 C)	130.333*	8.865	.000	100.56	160.11
	VAT (PSTL 60 C)	180.000*	8.865	.000	150.22	209.78
VAT (PSTL 40 C)	CAT (40 C)	-200.333*	8.865	.000	-230.11	-170.56
	CAT (50 C)	59.667*	8.865	.000	29.89	89.44
	CAT (60 C)	189.667*	8.865	.000	159.89	219.44
	VAT (PSTL 50 C)	320.000*	8.865	.000	290.22	349.78
	VAT (PSTL 60 C)	369.667*	8.865	.000	339.89	399.44
VAT (PSTL 50 C)	CAT (40 C)	-520.333*	8.865	.000	-550.11	-490.56
	CAT (50 C)	-260.333*	8.865	.000	-290.11	-230.56
	CAT (60 C)	-130.333*	8.865	.000	-160.11	-100.56
	VAT (PSTL 40 C)	-320.000*	8.865	.000	-349.78	-290.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	VAT (PSTL 60 C)	49.667*	8.865	.001	19.89	79.44
VAT (PSTL 60 C)	CAT (40 C)	-570.000*	8.865	.000	-599.78	-540.22
	CAT (50 C)	-310.000*	8.865	.000	-339.78	-280.22
	CAT (60 C)	-180.000*	8.865	.000	-209.78	-150.22
	VAT (PSTL 40 C)	-369.667*	8.865	.000	-399.44	-339.89
	VAT (PSTL 50 C)	-49.667*	8.865	.001	-79.44	-19.89

*. The mean difference is significant at the 0.05 level

ค. 4 ปริมาณการใช้พลังงานและค่าการใช้พลังงานจำเพาะ

ตารางที่ ค.9 ข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานในการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศที่และแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส (n=3)

Condition	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
CAT (40 C)	3	92.6867	.97685	.56398	90.2600	95.1133	91.65	93.59
CAT (50 C)	3	70.9267	.85290	.49242	68.8080	73.0454	70.21	71.87
CAT (60 C)	3	60.8233	.79008	.45616	58.8607	62.7860	60.09	61.66
VAT (PSTL 40 C)	3	71.2133	1.25385	.72391	68.0986	74.3281	70.02	72.52
VAT (PSTL 50 C)	3	42.8067	1.11733	.64509	40.0311	45.5823	41.99	44.08
VAT (PSTL 60 C)	3	39.2567	1.03587	.59806	36.6834	41.8299	38.07	39.98
Total	18	62.9522	18.74894	4.41917	53.6286	72.2759	38.07	93.59

ตารางที่ ค.10 การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณการใช้พลังงานในการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศที่และแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส (n=3)

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	5963.490	5	1192.698	1154.317	.000
Within Groups	12.399	12	1.033		
Total	5975.889	17			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Post Hoc Tests (Tukey HSD)

Tukey HSD^a

Condition	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
VAT (PSTL 60 C)	3	39.2567				
VAT (PSTL 50 C)	3		42.8067			
CAT (60 C)	3			60.8233		
CAT (50 C)	3				70.9267	
VAT (PSTL 40 C)	3				71.2133	
CAT (40 C)	3					92.6867
Sig.		1.000	1.000	1.000	.999	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

Tukey HSD

(I) Condition	(J) Condition	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
CAT (40 C)	CAT (50 C)	21.76000*	.82996	.000	18.9722	24.5478
	CAT (60 C)	31.86333*	.82996	.000	29.0756	34.6511
	VAT (PSTL 40 C)	21.47333*	.82996	.000	18.6856	24.2611
	VAT (PSTL 50 C)	49.88000*	.82996	.000	47.0922	52.6678
	VAT (PSTL 60 C)	53.43000*	.82996	.000	50.6422	56.2178
CAT (50 C)	CAT (40 C)	-21.76000*	.82996	.000	-24.5478	-18.9722
	CAT (60 C)	10.10333*	.82996	.000	7.3156	12.8911
	VAT (PSTL 40 C)	-.28667	.82996	.999	-3.0744	2.5011
	VAT (PSTL 50 C)	28.12000*	.82996	.000	25.3322	30.9078
	VAT (PSTL 60 C)	31.67000*	.82996	.000	28.8822	34.4578
CAT (60 C)	CAT (40 C)	-31.86333*	.82996	.000	-34.6511	-29.0756
	CAT (50 C)	-10.10333*	.82996	.000	-12.8911	-7.3156
	VAT (PSTL 40 C)	-10.39000*	.82996	.000	-13.1778	-7.6022
	VAT (PSTL 50 C)	18.01667*	.82996	.000	15.2289	20.8044
	VAT (PSTL 60 C)	21.56667*	.82996	.000	18.7789	24.3544
VAT (PSTL 40 C)	CAT (40 C)	-21.47333*	.82996	.000	-24.2611	-18.6856
	CAT (50 C)	.28667	.82996	.999	-2.5011	3.0744
	CAT (60 C)	10.39000*	.82996	.000	7.6022	13.1778
	VAT (PSTL 50 C)	28.40667*	.82996	.000	25.6189	31.1944
	VAT (PSTL 60 C)	31.95667*	.82996	.000	29.1689	34.7444

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VAT (PSTL 50 C)	CAT (40 C)	-49.88000*	.82996	.000	-52.6678	-47.0922
	CAT (50 C)	-28.12000*	.82996	.000	-30.9078	-25.3322
	CAT (60 C)	-18.01667*	.82996	.000	-20.8044	-15.2289
	VAT (PSTL 40 C)	-28.40667*	.82996	.000	-31.1944	-25.6189
	VAT (PSTL 60 C)	3.55000*	.82996	.011	.7622	6.3378
VAT (PSTL 60 C)	CAT (40 C)	-53.43000*	.82996	.000	-56.2178	-50.6422
	CAT (50 C)	-31.67000*	.82996	.000	-34.4578	-28.8822
	CAT (60 C)	-21.56667*	.82996	.000	-24.3544	-18.7789
	VAT (PSTL 40 C)	-31.95667*	.82996	.000	-34.7444	-29.1689
	VAT (PSTL 50 C)	-3.55000*	.82996	.011	-6.3378	-.7622

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ ค.11 ข้อมูลค่าการใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่และแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส (n=3)

Condition	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
CAT (40 C)	3	4.7667	.04933	.02848	4.6441	4.8892	4.71	4.80
CAT (50 C)	3	3.6533	.04041	.02333	3.5529	3.7537	3.61	3.69
CAT (60 C)	3	3.1300	.03606	.02082	3.0404	3.2196	3.10	3.17
VAT (PSTL 40 C)	3	3.6733	.05686	.03283	3.5321	3.8146	3.61	3.72
VAT (PSTL 50 C)	3	2.1967	.06028	.03480	2.0469	2.3464	2.14	2.26
VAT (PSTL 60 C)	3	2.0233	.05132	.02963	1.8959	2.1508	1.98	2.08
Total	18	3.2406	.96529	.22752	2.7605	3.7206	1.98	4.80

ตารางที่ ค.12 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าการใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้งแบบอุณหภูมิกาศคงที่และแบบอุณหภูมิกาศแปรผัน (ควบคุมอุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์) 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส (n=3)

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	15.811	5	3.162	1276.205	.000
Within Groups	.030	12	.002		
Total	15.840	17			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Post Hoc Tests Tukey HSD)

Tukey HSD^a

Condition	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
VAT (PSTL 60 C)	3	2.0233				
VAT (PSTL 50 C)	3		2.1967			
CAT (60 C)	3			3.1300		
CAT (50 C)	3				3.6533	
VAT (PSTL 40 C)	3				3.6733	
CAT (40 C)	3					4.7667
Sig.		1.000	1.000	1.000	.996	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

Tukey HSD

(I) Condition	(J) Condition	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
CAT (60 C)	CAT (50 C)	1.11333*	.04064	.000	.9768	1.2498
	CAT 60 C)	1.63667*	.04064	.000	1.5002	1.7732
	VAT (PSTL 40 C)	1.09333*	.04064	.000	.9568	1.2298
	VAT (PSTL 50 C)	2.57000*	.04064	.000	2.4335	2.7065
	VAT (PSTL 60 C)	2.74333*	.04064	.000	2.6068	2.8798
CAT (50 C)	CAT (40 C)	-1.11333*	.04064	.000	-1.2498	-.9768
	CAT (60 C)	.52333*	.04064	.000	.3868	.6598
	VAT (PSTL 40 C)	-.02000	.04064	.996	-.1565	.1165
	VAT (PSTL 50 C)	1.45667*	.04064	.000	1.3202	1.5932
	VAT (PSTL 60 C)	1.63000*	.04064	.000	1.4935	1.7665
CAT (60 C)	C40	-1.63667*	.04064	.000	-1.7732	-1.5002
	C50	-.52333*	.04064	.000	-.6598	-.3868
	VAT (PSTL 40 C)	-.54333*	.04064	.000	-.6798	-.4068
	VAT (PSTL 50 C)	.93333*	.04064	.000	.7968	1.0698
	VAT (PSTL 60 C)	1.10667*	.04064	.000	.9702	1.2432
VAT (PSTL 40 C)	CAT (40 C)	-1.09333*	.04064	.000	-1.2298	-.9568
	CAT (50 C)	.02000	.04064	.996	-.1165	.1565
	CAT (60 C)	.54333*	.04064	.000	.4068	.6798
	VAT (PSTL 50 C)	1.47667*	.04064	.000	1.3402	1.6132
	VAT (PSTL 60 C)	1.65000*	.04064	.000	1.5135	1.7865

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VAT (PSTL 50 C)	CAT (40 C)	-2.57000*	.04064	.000	-2.7065	-2.4335
	CAT (50 C)	-1.45667*	.04064	.000	-1.5932	-1.3202
	CAT (60 C)	-.93333*	.04064	.000	-1.0698	-.7968
	VAT (PSTL 40 C)	-1.47667*	.04064	.000	-1.6132	-1.3402
	VAT (PSTL 60 C)	.17333*	.04064	.011	.0368	.3098
VAT (PSTL 60 C)	CAT (40 C)	-2.74333*	.04064	.000	-2.8798	-2.6068
	CAT (50 C)	-1.63000*	.04064	.000	-1.7665	-1.4935
	CAT (60 C)	-1.10667*	.04064	.000	-1.2432	-.9702
	VAT (PSTL 40 C)	-1.65000*	.04064	.000	-1.7865	-1.5135
	VAT (PSTL 50 C)	-.17333*	.04064	.011	-.3098	-.0368

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ค. 5 ปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี และความหนาแน่นรวม

ตารางที่ ค.13 การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณความชื้นฐานเปียกมะเขือม่วงผง (n=3)

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.135	5	.027	2.050	.143
Within Groups	.159	12	.013		
Total	.294	17			

Post Hoc Tests (Tukey HSD)

Tukey HSD^a

Condition	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	
VAT (PSTL 60 C)	3	11.1500	
CAT (60 C)	3	11.1833	
VAT (PSTL 50 C)	3	11.2300	
CAT (50 C)	3	11.3133	
VAT (PSTL 40 C)	3	11.3433	
CAT (40 C)	3	11.3900	
Sig.		.182	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ค.14 การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณความชื้นฐานแห้งมะเขือม่วงผง (n=3)

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.219	5	.044	2.081	.139
Within Groups	.253	12	.021		
Total	.473	17			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Post Hoc Tests (Tukey HSD)

Tukey HSD^a

Condition	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	
VAT (PSTL 60 C)	3	12.5500	
CAT (60 C)	3	12.5900	
VAT (PSTL 50 C)	3	12.6500	
CAT (50 C)	3	12.7567	
VAT (PSTL 40 C)	3	12.7967	
CAT (40 C)	3	12.8533	
Sig.		.182	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ค.15 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าวอเตอร์แอกติวิตีมะเขือม่วงผง (n=3)

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.155	5	.031	1526.379	.000
Within Groups	.000	12	.000		
Total	.156	17			

Post Hoc Tests (Tukey HSD)

Tukey HSD^a

Condition	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
VAT (PSTL 60 C)	3	.223067				
CAT (60 C)	3	.234167				
VAT (PSTL 50 C)	3		.251200			
CAT (50 C)	3			.298800		
VAT (PSTL 40 C)	3				.434667	
CAT (40 C)	3					.449700
Sig.		.089	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.16 การวิเคราะห์ทางสถิติของความหนาแน่นรวมมะเขือม่วงผง (n=3)

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.002	5	.000	1.796	.188
Within Groups	.003	12	.000		
Total	.006	17			

Post Hoc Tests (Tukey HSD)

Tukey HSD^a

Condition	N	Subset for alpha = 0.05		
		1		
CAT (40 C)	3			.4867
CAT (50 C)	3			.5033
VAT (PSTL 40 C)	3			.5033
CAT (60 C)	3			.5067
VAT (PSTL 50 C)	3			.5100
VAT (PSTL 60 C)	3			.5267
Sig.				.100

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ค. 6 ลี

ตารางที่ ค.17 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความสว่างมะเขือม่วงผง (L*) (n=3)

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.265	5	.053	16.557	.000
Within Groups	.038	12	.003		
Total	.303	17			

Post Hoc Tests (Tukey HSD)

Tukey HSD^a

Condition	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
CAT (60 C)	3	69.0333		
VAT (PSTL 60 C)	3	69.1600	69.1600	
CAT (50 C)	3	69.1667	69.1667	
VAT (PSTL 50 C)	3		69.2800	69.2800
CAT (40 C)	3			69.3267
VAT (PSTL 40 C)	3			69.4000
Sig.		.109	.171	.171

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.18 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าสี่แฉงมะเชื่อม่วงผง (a*) (n=3)

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.265	5	.053	16.557	.000
Within Groups	.038	12	.003		
Total	.303	17			

Post Hoc Tests (Tukey HSD)

Tukey HSD^a

Condition	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
CAT (60 C)	3	2.2367		
VAT (PSTL 60 C)	3	2.2500		
CAT (50 C)	3	2.2767		
VAT (PSTL 50 C)	3		2.4267	
CAT (40 C)	3		2.5100	
VAT (PSTL 40 C)	3			3.5467
Sig.		.859	.244	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ค.19 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าสี่เหลี่ยมมะเชื่อม่วงผง (b*) (n=3)

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	26.702	5	5.340	4090.585	.000
Within Groups	.016	12	.001		
Total	26.718	17			

Post Hoc Tests (Tukey HSD)

Tukey HSD^a

Condition	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
VAT (PSTL 60 C)	3	14.2167				
CAT (60 C)	3		14.3367			
VAT (PSTL 50 C)	3			14.7500		
CAT (50 C)	3			14.8300		
VAT (PSTL 40 C)	3				15.1333	
CAT (40 C)	3					17.8167
Sig.		1.000	1.000	.144	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.20 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าสี่แท้ (h^*) ($n=3$)

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	76.263	5	15.253	455.680	.000
Within Groups	.402	12	.033		
Total	76.665	17			

Post Hoc Tests (Duncan)

Tukey HSD^a

Condition	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
VAT (PSTL 60 C)	3	75.9933			
VAT (PSTL 50 C)	3		80.5800		
MS60	3		80.6533		
MS50	3			81.3900	
VAT (PSTL 40 C)	3			81.6367	
CAT (40 C)	3				82.2433
Sig.		1.000	.996	.584	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ค.21 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความสดของสี (C^*) ($n=3$)

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	25.214	5	5.043	4561.238	.000
Within Groups	.013	12	.001		
Total	25.227	17			

Post Hoc Tests (Tukey HSD)

Tukey HSD^a

Condition	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
VAT (PSTL 60 C)	3	14.5233				
CAT (60 C)	3		14.6533			
VAT (PSTL 50 C)	3			14.9200		
CAT (50 C)	3			14.9867		
VAT (PSTL 40 C)	3				15.3400	
CAT (40 C)	3					17.9833
Sig.		1.000	1.000	.212	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed. a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. 7 ปริมาณกรดคลอโรจีนิก

ตารางที่ ค.22 การวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณกรดคลอโรจีนิก (n=3)

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.537	5	.107	145.433	.000
Within Groups	.009	12	.001		
Total	.546	17			

Post Hoc Tests (Duncan)

Tukey HSD^a

Condition	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
CAT (60 C)	3	2.8000			
CAT (50 C)	3		2.9300		
VAT (PSTL 60 C)	3		2.9667	2.9667	
VAT (PSTL 50 C)	3		2.9667	2.9667	
VAT (PSTL 40 C)	3			3.0167	
CAT (40 C)	3				3.3633
Sig.		1.000	.584	.283	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. 8 การประเมินค่าใช้จ่ายในการผลิต

ตารางที่ ค.23 ข้อมูลการคำนวณต้นทุนในการผลิตมะเชื่อม่วงผง

Cond.	Machine	Time (h)	P (kWh)	Yield (%)	Operating cost (Bath/kg)	Raw. cost (Bath/kg)	Packaging cost (Bath/kg)	Labor (Bath/kg)	Total cost (Bath/kg)
CAT (40 C)	Compact freeze	2	15.8	6.78	387.87	22.79	2.60	147.49	560.76
	Intelligent Dryer	16.8	5.4						
CAT (50 C)	Compact freeze	2	15.8	6.58	330.06	22.79	2.60	151.98	507.42
	Intelligent Dryer	12.5	5.6						
CAT (60 C)	Compact freeze	2	15.8	6.56	298.71	22.79	2.60	152.44	476.54
	Intelligent Dryer	10.4	5.7						
VAT (PSTL 40 C)	Compact freeze	2	15.8	6.58	343.54	22.79	2.60	151.98	520.91
	Intelligent Dryer	12.8	5.8						
VAT (PSTL 50 C)	Compact freeze	2	15.8	6.64	234.57	22.79	2.60	150.60	410.56
	Intelligent Dryer	7.3	5.6						
VAT (PSTL 60 C)	Compact freeze	2	15.8	6.66	224.75	22.79	2.60	150.15	400.29
	Intelligent Dryer	6.6	5.8						

หมายเหตุ : คิดค่าไฟ Unit ละ 4.3 บาท และแรงงาน 2 คน คนละ 50 บาท/ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง
งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BANGKOK
THAILAND

February 2025
February 2027

ACENS
The Annual Conference on
Engineering and Natural Sciences

ISSSM
International Symposium on
Social Sciences and Management

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Content

INTERNATIONAL COMMITTEES	1
SPECIAL THANKS TO SESSION CHAIRS	6
LOCAL HOST MESSAGE	7
WEDNESDAY AT A GLANCE	8
THURSDAY AT A GLANCE.....	9
FRIDAY AT A GLANCE	10
GENERAL INFORMATION	11
PRESENTATION GUIDE	12
ROOM SCHEDULE.....	14
FLOOR GUIDE	15
DIRECTIONS & ACCESS	16
KEYNOTE SESSION: DR. MAYURA SOONWERA	18
Thursday, February 06, 2019	
Parallel Session I	
Engineering, Nature Sciences	
10015.....	22
10017.....	25
10031.....	32
10032.....	34
10036.....	36
10024.....	37
Poster Session I	
Engineering, Natural Sciences	
10005.....	48
10013.....	50
10006.....	52
10007.....	54
10012.....	56
10014.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10024

Effect of Drying on Physical Properties and Chlorogenic Acid of Eggplant

Pachareeporn Trusphimai*

Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang, 1 Chalongkrung, Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

E-mail address: pachareeporn19@gmail.com

Thadchapong Pongsuttiyakorn

Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang, 1 Chalongkrung, Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

E-mail address: tpsky.7@gmail.com

Doungporn Amornlerdpison

Department of Fisheries Technology and Aquatic Resources, Faculty of Fisheries
Technology and Aquatic Resources, Maejo University, Chiang Mai, 50290, Thailand

E-mail address: doungpornfishtech@gmail.com

Pimpen Pornchalermping

Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang, 1 Chalongkrung, Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

E-mail address: pomchaloem.food@gmail.com

*The corresponding author: Pachareeporn Trusphimai

Abstract

This research studied the process of drying the eggplant using tray dryer with temperatures at 40, 50, 60 and 70°C, until the moisture content was less than 12% wet basis. The results shown that drying at 40 °C had highest chlorogenic acid content and bulk density were 2.97 mg/g dry weight and 0.5716, respectively. The air temperature at 70°C had significantly lowest water activity was 0.2964 ($p < 0.05$).

Keywords: Drying, Eggplant, Chlorogenic Acid

1. Background/ Objectives and Goals

Eggplants (*Solanum melongena* Linn.) is another management of vegetables that have a high crop volume, the most popular species in Thailand is the cultivation of crops in the northern region of 796 rai with a value of 16,690,950 baht (Department of Agriculture Extension, 2016).

The proximate composition of fresh eggplant of Moisture (91.5%), Carbohydrate (8.5%), Protein (1.12%), Fat (0.25%), Ash (0.54%), Acidity (0.138%) (Junaeid *et al.*, 2019) and chlorogenic acid (1700 mg 100g⁻¹) (Guillermo *et al.*, 2014).

Chlorogenic acid is a phenolic acid in the hydroxyl cinnamic acid group, which is a powerful antioxidant that can prevent various diseases (Vachiraphan *et al.*, 2017). In addition, chlorogenic acid also helps reduce blood sugar levels. Reduces the risk of diabetes and also inhibits starch digestion, helps to burn body fat and burn better carbohydrates (Meng *et al.*, 2017). Eggplant is popularly processed to be a food supplement and used as a cosmetic component. Using processing by drying (Ibrahim *et al.*, 2009; Kadivec *et al.*, 2015).

The important factor affecting the drying quality is the temperature, relative humidity. And suitable air flow. In which temperature is the most important factor affecting the quality of dry food products (Phatanayindee *et al.*, 2009). The low temperature drying process can maintain the physical characteristics of the product better than the high temperature drying process, whether it is color, odor, taste or important substances (Phatanayindee *et al.*, 2009; Hawlader *et al.*, 2006; Borompichaichartkul *et al.*, 2009; Apichart *et al.*, 2006).

To study the hot air drying of eggplant by blanching of sample preparation Which can help make drying easier. And drying at high temperatures will result in reduced drying time. And reduce the brightness of the sample color (The thickness of the specimen does not affect the color value.) There is a small change in the structure. In addition, increasing the wind speed can help increase the drying rate. Which, drying at medium temperature (50-60 degrees Celsius) results in the highest quality values (Ertekin *et al.*, 2004; Gözde *et al.*, 2015).

The objectives of this study were to investigate the effect of drying temperature at 40 50 60 and 70 °C on physical properties and chlorogenic acid of eggplant.

2. Methods

2.1 Sample preparation

Eggplants (*Solanum melongena* Linn.) with an average diameter of 5.5±2.43 cm and an average length of 26.1±1.8 cm were purchased from local market in Chiang Mai. The eggplant were initial moisture content of 94.03% (wet basis). And then washed with chlorine solution (50 ppm) and cut into 5 mm thick slices by sliced machine (Mildrich, Meat Slicer, 250ES-10). The samples was packed in laminated bag, and then frozen by air blast freezer at -38°C for 90 min and stored at -18°C until used.



Fig. 1: Sliced eggplant

2.2 Drying experiment

Frozen sliced eggplant was thawed at 4°C in refrigerator for 12 hours until the final temperature was 4 ° C. And then drying were performed in a laboratory scale hot air dryer (Thadchamong *et al.*, 2018). The experiments were conducted at drying temperatures of 40, 50, 60, and 70 °C at constant air velocity of 1.08 m/s and recorded temperature and relative humidity every 1 minute and sampling of measurement every 1 hour.

2.2.1 Drying rate

Eggplants were sliced place to three trays size 0.37x0.27 m, each sieve 450 g, The sample placed no to the weighing device data is collected every 10 minutes. All samples were dried until final moisture content was below 12% (wet basis) (Thai community product standard 136/2558).



Fig. 2: Placing samples on the weighing device in the dryer

Rate of drying curves. Data acquired usually obtained from the total weight is W_t and the weight of the dry solid is W_s in kg then :

$$M_t = \frac{W_t - W_s}{W_s} \quad (1)$$

For the given constant drying conditions, the equilibrium moisture content is M_e ($\text{kg}_{\text{equilibrium moisture}}/\text{kg}_{\text{dry solid}}$), and the free moisture content is M ($\text{kg}_{\text{free water}}/\text{kg}_{\text{dry solid}}$), the water can be removed by mechanical methods and can be calculated for moisture content at different times over the drying period ($\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry solid}}$) is M_t

$$M = M_t - M_e \quad (2)$$

The drying rate (R) is calculated for each drying time increment using the equation :

$$R = -\frac{W_t}{A} \times \frac{dm}{dt} \quad (3)$$

where A is the exposed surface area for drying (m^2), dm/dt is free moisture content of bulb at different times.

2.3 Moisture content

Moisture content was determined by hot air oven method (AOAC, 2000). Fresh and eggplant powder in the oven at 105°C until a constant weight was achieved. Then, the following relation was used:

$$\text{Moisture content} = \frac{(W_1 - W_2)}{W_1} \times 100 \quad (4)$$

Where W_1 is weight of eggplant powder before drying (g) and W_2 is weight of eggplant powder after drying (g). Moisture content was expressed as percentage (wet basis). The analysis was triplicated.

2.4 Water activity

Eggplant powder samples were taken about 3 g to determine water activity using electronic water activity meter (4TE, AquaLab, USA). Three replications of water activity were performed for each sample.

2.5 Bulk Density

Bulk density of eggplant powder were determined according to Seerangurayar *et al.* (Seerangurayar *et al.*, 2017). eggplant powder receiving cup was set up distance between bottom of loading funnel and top of sample receiving cup as 15 cm, The eggplant powder was loaded to flow through the funnel into the cup until it overflows and carefully scraped excess powder from the top of the cup by smoothly moving spatula. The cup occupied by powder was then weighed. Bulk density was expressed using the equation:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

Where ρ (g/cm^3) is bulk density, m (g) is the mass of eggplant powder and V (cm^3) is the volume of receiving cup. The bulk density measurements were performed in five repetitions.

2.6 Chlorogenic acid

Eggplant powder was weighed about 5 g and recorded. The powder was added 150 ml of methanol and then extracted by microwave-assisted extraction, using 350 W of electric power for 20 min. The extract was filtered with $0.45 \mu\text{m}$ nylon syringe filter. High Performance Liquid Chromatography (HPLC) was used to analyzed chlorogenic acid with

C18 column, 25 cm-4.60 mm inside diameter, 5.0 μm (Brownlee, PerkinElmer, USA). A mixture of 0.1% phosphoric acid and acetonitrile was used as mobile phase at the beginning 95 : 5 (v/v). The binary gradient was initiated with beginning ratio for 5 min, then adjusted the proportion to 5 : 95 (v/v) for 50 min at flow rate of 1 ml/min. Photodiode array detector (PDA) was performed to analyze at wavelength 350 nm. The 10 μl of extract was injected in triplication.

2.7 Statistical analysis

Data were processed using SPSS 22 while analyses of variance were conducted by the SPSS Paired Sample T-test procedure. Mean values were considered significantly different when $p < 0.05$.

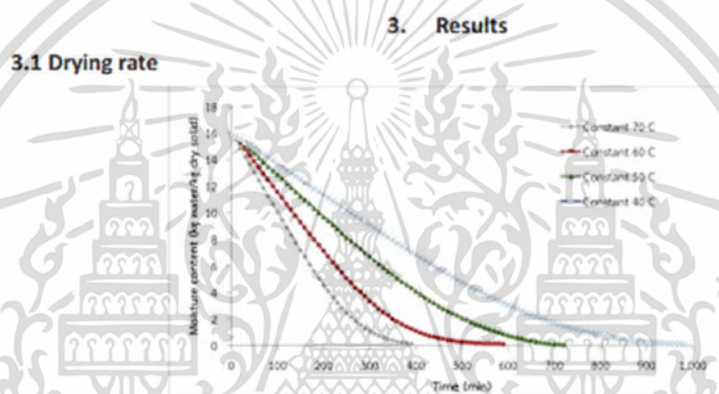


Fig. 3: Correlation between moisture content (dry basis) and drying time at 40 50 60 and 70 °C of eggplant

The result of eggplant drying at 40, 50, 60 and 70°C. Data was analyzed to determine the drying rate and the quality of the change over time during drying. Drying until the sample has a moisture content (wet basis) below 12% (Thai community product standard 136/2558). By drying at the temperature of 40, 50, 60 and 70 degrees Celsius, the drying time is 980, 720, 590, 590 and 390 minutes respectively.

The correlation between moisture content (dry basis) and drying time in Figure 3 shown that the drying temperature affects the drying rate and final moisture content. Clearly after drying Higher drying temperatures result in reduced drying times. By drying at 70 degrees Celsius, 2.5 times shorter than drying at 40 degrees Celsius, 1.6 times shorter at 60 degrees Celsius and 1.3 times shorter at 50 degrees Celsius. Drying at high temperatures can result in quick drying because there is a high rate of heat transfer from the hot air, the product gets a lot because of the high temperature difference between

the air and the product. Resulting in the water in the product to evaporate quickly

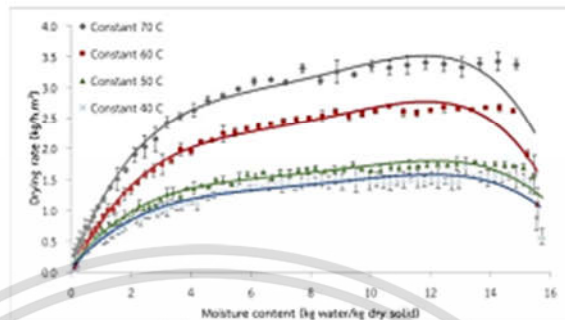


Fig. 4: Correlation between drying rate and moisture content (dry basis) at 40 50 60 and 70 °C of eggplant

The correlation between drying rate and moisture content in Figure 4 shows Look in the same direction. The drying rate at 70 °C has the highest drying rate at 3.42 kg/h.m² and the drying rate at 40 °C has the lowest drying rate of 1.72 kg/h.m². Resulting in a 50.29% increase in drying rate, which in the first period has a rapid increase in drying rate and a higher drying rate of 47-53%. After that it is a period of drying rate stable The higher the drying temperature, the range of the constant drying rate is 18-60% less and when entering the drying rate range gradually decreases. Decreases continuously until the end of the process (Due to the frozen eggplant causing the ice crystal to break, (Laura *et al.*, 1998) of the eggplant, the water can easily come off)

3.2 Physical properties

Table 1: Physical properties of eggplant powder

Temperature (°C)	Moisture content (% w.b.)	Water activity	Bulk density (g/cm ³)
40	11.51±0.06 ^a	0.5232±0.0008 ^a	0.5716±0.0022 ^a
50	11.31±0.10 ^a	0.3804±0.0081 ^b	0.5661±0.0034 ^b
60	11.27±0.02 ^a	0.3118±0.0033 ^c	0.5462±0.0018 ^c
70	11.23±0.11 ^a	0.2964±0.0007 ^d	0.5414±0.0011 ^d

Means (± standard deviation) with different superscripts in each column significantly different ($p < 0.05$)

Powder eggplant had no significant difference in moisture content ($p < 0.05$), which was

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11.51, 11.31, 11.27 and 11.23% (wet basis), respectively. In addition, hot air drying at higher temperatures causes the water activity tends to decrease significantly differently ($p < 0.05$). However, the eggplant powder has the water activity below 0.6, which is an important feature for dry food in order to prevent and control microbes that cause food spoilage (Sakamon Devahastin, 2012; Labuza *et al.*, 1980) and when increasing the temperature of hot air drying, the total density will be reduced significantly ($p < 0.05$), i.e. drying at a temperature of 40 °C, eggplant powder with the highest total density of 0.5716 g/cm³. Followed by the temperature at 50 60 and 70 °C which is equal to 0.5661 0.5462 and 0.5414 g/cm³, respectively.

3.3 Chlorogenic acid



Fig 4. Chlorogenic acid of eggplant after drying at 40 50 60 and 70 °C

a-b Different letters in the picture within the same section indicate a significant difference ($p < 0.05$).

According to the chlorogenic acid data in Figure 4, it was found that drying at high temperatures resulting in the reduction of chlorogenic content, which is consistent with the research report of Niramon and Sutthiwan (2011). In addition, longer drying times can increase chlorogenic acid content. Which the temperature controlled drying at 40 °C had the highest amount of chlorogenic acid equal to 2.97 mg/g dry weight.

4. Conclusions

The objectives of this study were to investigate the effect of drying temperature on physical properties and chlorogenic acid of eggplant. It was found that drying at 70 °C takes 2.5 times less than drying at 40 °C and drying rates at 70 °C have drying rates greater than 50.29% of drying at temperatures. 40 °C and drying. Drying at 70 °C has the lowest water activity and the lowest total density. the chlorogenic acid content of the drying at the highest 40 °C but not significantly different with the drying at 70 °C.

5. Acknowledgments and Legal Responsibility

This study was supported in Department of Food Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang and department of Fisheries Technology and Aquatic Resources, Maejo University.

6. References

- Department of Agriculture Extension.(2016). *Eggplant*.Department of Agriculture Extension.Bangkok. page 67. <http://www.agriinfo.doae.go.th/year60/plant/rortor/veget/67.pdf>
- Junaid, K., Farjana, Y., Nazrul, I., Raju, A., Pabitra, C. D., & Hatem, A.(2019). Effect of pretreatments on drying behavior of eggplant. *Journal of Bangladesh Agricultural University*, 17(1), 105–109. <https://doi.org/10.3329/jbau.v17i1.40671>
- Guillermo, N. M., Dolores, M. R., Alfonso, G. B., Gustavo, G. A., Basilio, H, Manuel, B. S., Jorge, S. C., & Rosabel, V. D. L. R.(2014). Nutritional and Nutraceutical Components of Commercial Eggplant Types Grown in Sinaloa, Mexico. *Not Bot Horti Agrobo*, 42(2), 538-544. <https://doi.org/10.15835/nbha4229573>
- Vachiraphan, B., & Pornphimon, M.(2017). Evaluation on Chlorogenic Acid Caffeic Acid Ferulic Acid and p-Coumaric Acid in Herbal Drinks. *Srinakharinwirot University Journal of Science and Technology*, 9(17), 104-113. <http://ejournals.swu.ac.th/index.php/SWUJournal/article/view/9007/7752>
- Meng, S., Cao, J., Feng, Q., Peng, J., Hu, Y.(2013). Roles of Chlorogenic Acid on Regulating Glucose and Lipids Metabolism: A Review. *Complementary and Alternative Medicine*, Article ID 801457, 1-11. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/801457>
- Ibrahim, D.(2009). Drying of eggplant slices in thin layers at different Air temperatures. *Journal of Food Processing and Preservation*, 35, 280-289. <http://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2009.00454.x>
- Kadivec, M., Kopjar, M., ŽNIDARČIČ, D., & POŽRL, T.(2015). Potential of Eggplant Peel as By-Product. *Acta Alimentaria*, 44(1), 126–131. <https://doi.org/10.1556/AAlim.44.2015.1.13>
- Phatanayindee, S., Borompichaichartkul, C., Srzednicki, G., Craske, J., & Wootton, M.(2009). Improving Volatile and Lipid Quality of Macadamia Nut through the Use of Hybrid Drying. *Proceedings of The international Symposium Agricultural Engineering towards Sustainable Agriculture in Asia (AESA 2009)*,420-426. https://repository.ipb.ac.id/jspui/bitstream/123456789/64587/1/AESA%202009_Rokhani1.pdf
- Hawladar, M.N.A, Perera, C.O., & Min, T.(2006). Comparison of Retention of 6-Gingerol in Drying of Ginger under Modified Atmosphere Heat Pump Drying and Other Methods. *Drying Technology*, 24, 51-56. <https://doi.org/10.1080/07373930500538675>

- Borompichaichartkul, C., Luengsode, K., Chinprahast, N., & Devahastin, S.(2009). Improving quality of macadamia nut (*Macadamia integrifolia*) through the use of hybrid drying process. *Journal of Food Engineering*, 93, 348–353. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.01.035>
- Apichart, A., Somnuk, T., & Chatchai, B.(2010). Development of a vacuum heat pump dryer for drying chilli. *Biosystemsengineering*, 105, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.10.003>
- Ertekin, C., & Yaldiz, O.(2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63, 349-359. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.08.007>
- Gözde, B. U., Ünal, R. Y., & Ergun, K.(2015). Determination of Drying Characteristics and Quality Properties of Eggplant in Different Drying Conditions. *Italian Journal of Food Science*, 27, 459-467. <https://doi.org/10.14674/1120-1770/ijfs.v378>
- Thadchamong, P., Pachareeporn, T., Pitikhate, S., & Pimpen, P.(2018). Effects of low temperature drying processing on longan fruit. *The 4th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology, MATEC Web of Conferences* 192, 1-4. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819203024>
- Thai community product standard 136/2558. http://tcps.tisi.go.th/pub/tcps0136_58.pdf
- AOAC.(2000). *Official methods of analysis of AOAC International*. Rockville, USA: Gaithersburg, MD : AOAC International.
- Seerangurayar, T., Manickavasagan, A., Abdulrahim, M. A., & Yaseen, A. A.(2017). Effect of carrier agents on flow ability and microstructural properties of foam-mat freeze dried date powder. *Journal of Food Engineering*, 215, 33-43. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.07.016>
- Laura, O., Marôã, T. S., Pedro, D. S., Carlos, E., Juan, A. C.(1998). Contrasting effects of high-pressure-assisted freezing and conventional freezing on eggplant tissue microstructure. *Z Lebensm Unters Forsch A*, 206, 338-342. <https://doi.org/10.1007/s002170050269>
- Sakamon, D.(2012). *Drying of foods and biomaterials*. Bangkok, Thailand: Top Publishing.
- Labuza, T. P.(1980). The Effect of Water Activity on Reaction Kinetics of Food Deterioration. *Food Technology*, 34, 36 - 41. https://www.researchgate.net/profile/Theodore_Labuza/publication/239667138_Effect_of_water_activity_on_reaction_kinetics_of_food_deterioration/links/5583009c08ae8bf4ba6f8689.pdf
- Niramon, P., & Sutthiwan, S.(2011). *Effect of drying on composition and antioxidation activity of coffee pulp*. Mae Fah Luang University.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้