ผลของการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งการเปลี่ยนแปลงสี การหดตัว และการคืนตัวของมะม่วงสุกอบแห้ง

โดย

นางสาวสิริกัญญา กระต่ายทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผลของการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้ง การเปลี่ยนแปลงสี การหดตัว และการคืนตัวของมะม่วงสุกอบแห้ง

โดย
นางสาวสิริกัญญา กระต่ายทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

EFFECTS OF LOW PRESSURE HOT AIR DRYING ON DRYING KINETICS, COLOR CHANGES, SHRINKAGE AND REHYDRATION OF DRIED RIPE MANGOES

By

MISS Sirikanya KRATAITONG

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for Master of Science (FOOD TECHNOLOGY)

Department of FOOD TECHNOLOGY

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2020

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	ผลของการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งการเปลี่ยนแปลงสี การหดตัว และการคืนตัวของมะม่วงสุกอบแห้ง
โดย	สิริกัญญา กระต่ายทอง
สาขาวิชา	เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธัชพงศ์ ชูศรี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

.... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ สมุหเสนีโต)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัชพงศ์ ชูศรี)

.... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

(ดร.ภาริกา รุ่งพิชยพิเชฐ)

มหาวิทยาลัยศิลปากร

61403204 : เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
คำสำคัญ : การทำแห้งด้วยลมร้อน, สภาวะความดันต่ำ, จลนพลศาสตร์การทำแห้ง, การเปลี่ยนแปลงสี, การหดตัว, การคืนตัวมะม่วงสุกอบแห้ง

นางสาว สิริกัญญา กระต่ายทอง: ผลของการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งการเปลี่ยนแปลงสี การหดตัว และการคืนตัวของมะม่วงสุกอบแห้ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธัชพงศ์ ชูศรี

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการทำแห้งแบบใหม่ภายใต้แนวคิดการผสมผสานข้อดีของการใช้ตัวกลางในการทำแห้ง 2 ชนิดคือลมร้อน (Hot Air Drying, HAD) และสุญญากาศ เรียกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ (low pressure hot air drying, LPHAD) โดยเปรียบเทียบวิธีการทำแห้งแบบ LPHAD ทั้งด้านผลิตภาพ และคุณภาพจากตัวแปรทางด้านจลนพลศาสตร์ของกระบวนการทำแห้ง สมบัติทางด้านสี การหดตัว และการคืนน้ำกลับกับ HAD ซึ่งเป็นวิธีการทำแห้งที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปในอุตสาหกรรม พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วลมในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (D_{eff}) ของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น รวมถึงยังช่วยลดการเปลี่ยนแปลงสีและการหดตัวของตัวอย่าง โดยการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°C ความเร็วลม 2 m/s เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดเพื่อที่จะนำไปใช้ศึกษาเปรียบเทียบกับกระบวนการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ

สำหรับการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 °C และความดัน 6, 8 และ 10 kPa พบว่าการใช้อุณหภูมิสูงร่วมกับความดันสูงส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูง โดยระดับความดันเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลมากกว่าปัจจัยเรื่องอุณหภูมิ และชิ้นมะม่วงที่ทำแห้งด้วยวิธี LPHAD ที่สภาวะต่าง ๆ มีการเปลี่ยนแปลงสี และการหดตัวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่มีการหดตัวต่ำกว่าชิ้นมะม่วงที่ทำแห้งด้วยวิธี HAD อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) การหดตัวของชิ้นมะม่วงเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของผลไม้อบแห้งที่สำคัญ ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีการหดตัวต่ำจะมีลักษณะปรากฏและลักษณะทางประสาทสัมผัสที่ดี และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ซึ่งคุณสมบัติด้านการหดตัวมีความสอดคล้องกับคุณสมบัติด้านการคืนตัวของชิ้นมะม่วงอบแห้ง โดยชิ้นมะม่วงที่มีการหดตัวต่ำ ส่งผลให้มีอัตราการคืนตัวสูง

61403204 : Major (FOOD TECHNOLOGY)

Keyword : LOW PRESSURE HOT AIR DRYING, DRYING KINETICS, REHYDRATION RATIO, SHRINKAGE, COLOR CHANGES, DRIED MANGO

MISS SIRIKANYA KRATAITONG : EFFECTS OF LOW PRESSURE HOT AIR DRYING ON DRYING KINETICS, COLOR CHANGES, SHRINKAGE AND REHYDRATION OF DRIED RIPE MANGOES THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR TOUCHPONG CHOOSRI, Ph.D.

Objective of this research is to develop a new drying method under the concept of combining the advantages of using two drying media, hot air and vacuum, called low pressure hot air drying (LPHAD). The LPHAD was compared both in terms of productivity (drying kinetics) and quality (color changes, shrinkage and rehydration properties) of dried ripe mangoes with HAD, the most common drying method in the industry. It was found that high temperature and velocity in HAD increased the effective moisture diffusivity (D_{eff}) and reduce of color changes and shrinkage of dried ripe mango. The HAD drying conditions at 70°C air temperature and 2 m/s air velocity were optimum for comparison with LPHAD.

For the LPHAD of ripe mangoes at temperatures of 50, 60 and 70°C and pressure of 6, 8 and 10 kPa, the results found that the LPHAD with high temperature and high pressure showed a higher effective moisture diffusivity (D_{eff}). The level of pressure has more influence on D_{eff} than temperature. The color changes and %shrinkage of samples dried by LPHAD at different conditions have no significantly difference ($p \leq 0.05$) but there were significantly difference ($p \leq 0.05$) with samples dried by HAD. %Shrinkage is an important factor that influence the quality of dried fruits and consumer satisfaction. Shrinkage related to rehydration of dried mangoes. The high %shrinkage resulted in high rehydration ratio.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ธัชพงศ์ ชูศรี เป็นอย่างยิ่งที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา และแนวคิดในการวางแผน และการดำเนินงานวิจัย จนกระทั่งโครงงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณพี่ปริญญาเอก ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษาในการทำงานวิจัย จนกระทั่งโครงงานวิจัยฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร สถานที่ให้องค์ความรู้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณบุคคลในครอบครัวที่ให้กำลังใจ เป็นแรงผลักดัน ให้ความช่วยเหลือ และสนับสนุนในการทำงานวิจัยของข้าพเจ้าเสมอมา

สิริกัญญา กระต่ายทอง

มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ

กิตติกรรมประกาศ .... ฉ

สารบัญ .... ช

สารบัญตาราง .... ญ

สารบัญภาพ .... ฎ

บทที่ 1 13

บทนำ 13

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 13

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 14

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา 14

1.4 ขอบเขตการศึกษา 15

บทที่ 2 16

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 16

2.1 มะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง 16

2.2 การทำแห้ง 16

2.2.1 น้ำภายในชิ้นอาหาร 16

2.2.2 กลไกการเคลื่อนของน้ำในชิ้นอาหารระหว่างการทำแห้ง 17

2.2.3. ปริมาณความชื้น 18

2.3 จลนพลศาสตร์ของการทำแห้ง (Drying Kinetics) 18

2.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น 20

มหาวิทยาลัยศิลปากร

2.4 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของชิ้นอาหารที่ผ่านการทำแห้ง....21
2.4.1 การเปลี่ยนแปลงสี (Color changes)....21
2.4.2 การหดตัว (Shrinkage)....22
2.4.3 การคืนตัว (Rehydration)....22
2.5 การทำแห้งด้วยลมร้อน (Hot air drying หรือ Convective drying)....23
2.6 การทำแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum drying)....25
2.7 การทำแห้งแบบ multi – flash....26
บทที่ 3....28
วิธีดำเนินงานวิจัย....28
3.1 ตัวอย่าง และการเตรียมตัวอย่าง....28
3.2 อุปกรณ์สำหรับศึกษาการทำแห้ง....28
3.3 ขั้นตอนการทำแห้ง....30
3.4 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การทำแห้ง....31
3.4.1 ความชื้น....31
3.4.2 กราฟการทำแห้ง....32
3.4.3 อัตราการทำแห้ง....32
3.4.4 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล....33
3.5 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพ....34
3.5.1 สมบัติด้านสี....34
3.5.2 การหดตัว....34
3.5.3 สมบัติการคืนกลับน้ำ....34
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ....35
บทที่ 4....36
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล....36

มหาวิทยาลัยศิลปากร

4.1 จลนพลศาสตร์การทำแห้งของมะม่วงสุก 36

4.1.1 พฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุก 36

4.1.2 อัตราการทำแห้งมะม่วงสุก 41

4.1.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุก 43

4.3 การหดตัวของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้ง 51

4.4 ความสัมพันธ์ของสภาวะการทำแห้งกับ D_{eff}, ΔE^* และ S 54

4.5 การคืนกลับน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้ง 60

บทที่ 5 62

สรุปผลการทดลอง 62

รายการอ้างอิง 63

ประวัติผู้เขียน 70

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการทำแห้ง.............................19

ตารางที่ 2 สภาวะที่ใช้ในการศึกษาการทำแห้งด้วยลมร้อน 30

ตารางที่ 3 สภาวะที่ใช้ในการศึกษาการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ 31

ตารางที่ 4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายพฤติกรรมการทำแห้ง 32

ตารางที่ 5 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการทำแห้งด้วยลมร้อน และ ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ 37

ตารางที่ 6 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล การเปลี่ยนแปลงสี และร้อยละการหดตัวของการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ 44

มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 เครื่องทำแห้งด้วยลมร้อน 29

ภาพที่ 2 เครื่องทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ 30

ภาพที่ 3 เครื่องวิเคราะห์การคืนตัว 35

ภาพที่ 4 เส้นโค้งการทำแห้งของมะม่วงสุก ด้วยวิธีการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ 40

ภาพที่ 5 อัตราการทำแห้งของมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยวิธีการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ 42

ภาพที่ 6 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ 46

ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการทำแห้งมะม่วงสุกกับสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลในกระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ 47

ภาพที่ 8 การเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นมะม่วงในกระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ 49

ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการทำแห้งมะม่วงสุกกับการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นมะม่วงในกระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ 50

ภาพที่ 10 ร้อยละการหดตัวของชิ้นมะม่วงในกระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ 52

ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการทำแห้งมะม่วงสุกกับร้อยละการหดตัวของชิ้นมะม่วงในกระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ 53

ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการทำแห้งมะม่วงสุกกับ D_{eff}, ΔE^* และ S ของชิ้นมะม่วงในกระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ 55

ภาพที่ 13 เส้นโค้งการทำแห้งของมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วลม 2.0 m/s) และลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ 56

ภาพที่ 14 อัตราการทำแห้งของมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วลม 2.0 m/s) และลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ 57

ภาพที่ 15 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วลม 2.0 m/s) และลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ 58

ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลงสีของการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วลม 2.0 m/s) และลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ 59

ภาพที่ 17 การหดตัวของการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วลม 2.0 m/s) และลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ 60

ภาพที่ 18 การคืนกลับน้ำของการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วลม 2.0 m/s) และลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ 61

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มะม่วงเป็นผลไม้เขตร้อนที่นิยมรับประทานกันอย่างแพร่หลาย ประกอบด้วยสารอาหารต่าง ๆ มากมาย อาทิ วิตามิน เส้นใย สารต้านอนุมูลอิสระ ฯลฯ (Pu & Sun, 2016) มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองจัดเป็นหนึ่งในผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศและสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรชาวไทยเป็นจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นการส่งออกสินค้าภายใน หรือภายนอกประเทศ มะม่วงเป็นผลไม้ในกลุ่มไคลแมคเทอริก (climacteric fruit) เมื่อผลไม้เริ่มสุกจะมีการเปลี่ยนแปลงสภาพภายในทำให้เกิดการเน่าเสียได้ง่าย และมีอายุการเก็บรักษาที่สั้น หากไม่ได้รับการเก็บรักษาที่ถูกต้องจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและสูญเสียคุณภาพได้มากถึง 87% (Caparino et al., 2012) การแปรรูปมะม่วงสุกจึงเป็นวิธีการสำคัญที่ช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการทำแห้งเป็นวิธีการสำคัญที่นิยมใช้ในการถนอม และยืดอายุการเก็บรักษาโดยจะลดปริมาณน้ำ หรือลดความชื้นของผลิตภัณฑ์อาหาร ทั้งยังทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารมีน้ำหนักเบา ช่วยลดปริมาตร ทำให้สะดวกในการขนส่งและการจัดเก็บที่ถูกกว่า นอกจากนี้ ยังเป็นการสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ที่เป็นทางเลือกให้กับผู้บริโภค หรือสามารถนำผลิตภัณฑ์อาหารแห้งที่ได้เป็นวัตถุดิบในการแปรรูปต่อเนื่องด้วยวิธีอื่น ๆ ยืดอายุการเก็บรักษา ทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตทางการเกษตรอีกด้วย

การทำแห้งด้วยลมร้อนเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมใช้ในการแปรรูปผลิตผลทางการเกษตร เนื่องจากสามารถทำได้ง่าย และมีต้นทุนในการแปรรูปไม่สูง (Karam, Petit, Zimmer, Baudelaire Djantou, & Scher, 2016) โดยหลักการทำแห้งอาหารด้วยลมร้อนเป็นวิธีการที่ใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการให้ความร้อนกับน้ำในชิ้นอาหาร และพาน้ำออกจากชิ้นอาหาร จนกระทั่งอาหารแห้ง ซึ่งการถ่ายโอนความร้อนและความชื้น โดยการพาความร้อน และมวลสาร (convective heat and mass transfer) เป็นกลไกการถ่ายโอนความร้อน และมวลสารที่มีประสิทธิภาพสูง อย่างไรก็ตาม กระบวนการทำแห้งอาหารโดยใช้ลมร้อนยังเป็นกระบวนการที่ใช้เวลานาน ทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารสัมผัสกับความร้อนเป็นระยะเวลานาน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพในทางที่ไม่ต้องการได้ เช่น ผิวหน้าที่แข็ง มีการหดตัวสูง ลักษณะเนื้อสัมผัสแข็งเหนียว สีคล้ำ และการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารอาจเกิดขึ้นมากหรือน้อยแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของวัตถุดิบและสภาวะที่ใช้ในการทำแห้ง (Orikasa, Wu, Shiina, & Tagawa, 2008)

การประยุกต์ใช้สภาวะสุญญากาศเป็นวิธีหนึ่งซึ่งได้รับความสนใจในการทำแห้งอาหาร เนื่องจากมีข้อดีคือ สภาวะสุญญากาศช่วยให้กำจัดน้ำออกจากชิ้นอาหารได้ที่อุณหภูมิต่ำลงจึงช่วยลดความร้อนที่ผลิตภัณฑ์อาหารได้รับลงได้ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดีขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำแห้งวิธีนี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงสีและการหดตัวต่ำ (Orikasa et al., 2014) แต่ข้อเสียของวิธีการประยุกต์ใช้สภาวะสุญญากาศในการทำแห้ง คือ เป็นวิธีที่ใช้เวลาในการแปรรูปนาน เนื่องจากกลไกในการถ่ายโอนมวล และความร้อนมีประสิทธิภาพต่ำ กล่าวคือ ให้ความร้อนกับชิ้นตัวอย่าง โดยวิธีแผ่รังสีความร้อน หรือนำความร้อน เช่น การใช้หลอดอินฟราเรด (Infrared) ในการให้ความร้อนและการถ่ายโอนความชื้นออกจากชิ้นตัวอย่างโดยใช้กลไกการแพร่ ซึ่งมีอัตราช้ากว่ากลไกการพา (convective) มาก (J. V. Link, G. Tribuzi, & J. B. Laurindo, 2017) พัฒนาวิธีการทำแห้ง เรียกว่า การทำแห้งแบบ Convective multi - flash โดยใช้ข้อดีของลมร้อน และสุญญากาศ โดยทำแห้งชิ้นอาหารด้วยการใช้ลมร้อนสลับกับการกระตุ้นสุญญากาศเป็นช่วง ๆ เพื่อช่วยให้น้ำในชิ้นอาหารระเหยออกมาได้ง่ายและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น ทำให้ใช้ระยะเวลาในการทำแห้งลดลง ผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้จึงมีการหดตัวต่ำและมีรูพรุนสูง ส่งผลให้มีอัตราการคืนตัวที่ดีขึ้น และช่วยลดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ ทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งที่ได้มีคุณภาพคล้ายกับผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง แต่มีค่าใช้จ่ายน้อยกว่า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนากระบวนการทำแห้งแบบใหม่ภายใต้แนวคิดการผสมผสานข้อดีของการใช้ตัวกลางในการทำแห้ง 2 ชนิด คือ ลมร้อน และสุญญากาศ โดยใช้สภาวะของลมร้อนที่ความดันต่ำในการทำแห้งมะม่วงสุก เพื่อลดความร้อนที่ผลิตภัณฑ์จะได้รับลง เพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น และเพิ่มอัตราเร็วในการทำแห้งให้สูงขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งของมะม่วงสุก

1.2.2 ศึกษาผลของการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำต่อการเปลี่ยนแปลงสีการหดตัว และการคืนตัวของมะม่วงสุกอบแห้ง เปรียบเทียบกับการทำแห้งด้วยลมร้อน

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.3.1 การทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำช่วยเพิ่มอัตราการทำแห้ง ทำให้ระยะเวลาในการทำแห้งลดลง

1.3.2 มะม่วงสุกอบแห้งที่ได้จากการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำมีคุณภาพด้านเคมีกายภาพดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำแห้งด้วยลมร้อน

1.4 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้ง และคุณภาพด้านเคมีกายภาพ (การเปลี่ยนแปลงสี การหดตัว และการคืนตัว) ของมะม่วงสุกอบแห้ง เปรียบเทียบกับมะม่วงสุกที่ผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

มะม่วงเป็นไม้ผลเมืองร้อนในวงศ์ Anacardiaceae ซึ่งมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองจัดเป็นหนึ่งในผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศและสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรชาวไทยเป็นจำนวนมาก มะม่วงเป็นผลไม้ที่เป็นที่นิยมรับประทานกันอย่างแพร่หลาย ประกอบด้วยสารอาหารต่าง ๆ มากมาย อาทิ สารต้านอนุมูลอิสระ เส้นใย วิตามินฯลฯ (Pu & Sun, 2016) และเป็นผลไม้ในกลุ่มไคลแมคเทอริก (climacteric fruit) เมื่อผลไม้เริ่มสุกจะมีการเปลี่ยนแปลงสภาพภายใน ทำให้เกิดการเน่าเสียได้ง่าย และมีอายุการเก็บรักษาที่สั้น หากไม่ได้รับการเก็บรักษาที่ถูกต้องจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและสูญเสียคุณภาพได้มากถึง 5% - 87% (Caparino et al., 2012)

2.2 การทำแห้ง

การทำแห้งเป็นกระบวนการกำจัดน้ำหรือความชื้นออกจากชิ้นอาหาร เพื่อลดค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ (water activity) จนถึงระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้ (<0.6) ทำให้ยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร ให้สามารถเก็บไว้ได้นานขึ้น การทำแห้งเป็นการลดน้ำหนัก และปริมาตรของผลิตภัณฑ์อาหาร ช่วยเพิ่มความสะดวกและลดค่าใช้จ่ายในการบรรจุ เก็บรักษาและการขนส่ง นอกจากนี้ ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าและเพิ่มทางเลือกใหม่ในการบริโภคผลิตภัณฑ์อาหารให้กับผู้บริโภค (Rasane, 2017)

2.2.1 น้ำภายในชิ้นอาหาร

เนื่องจากน้ำเป็นองค์ประกอบหลักของอาหารทุกชนิด และยังมีองค์ประกอบมากมายที่สามารถละลายน้ำ หรือเกิดคอลลอยด์กับน้ำได้ ในการทำแห้งอาหารนั้นประเภทของน้ำที่มีอยู่ในชิ้นอาหารจึงเป็นสิ่งที่มีบทบาทและมีความสำคัญมาก โดยทั่วไป น้ำในชิ้นอาหารจะแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. โมเลกุลน้ำที่อยู่ในรูปอิสระ (free water) เป็นน้ำที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์ อาจมีการเกาะตัวกับองค์ประกอบอื่น แต่ก็เป็นการสร้างพันธะที่ไม่ค่อยแข็งแรงมากนัก น้ำอิสระที่มีอยู่ในชิ้นอาหารจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำให้อาหารเกิดการเสื่อมเสียคุณภาพได้

2. โมเลกุลน้ำที่ยึดเกาะกับองค์ประกอบอื่นด้วยพันธะโควาเลนท์ เป็นน้ำที่ยึดเกาะกับองค์ประกอบ ภายในอาหารด้วยพันธะที่แข็งแรงมาก ทำให้ไม่มีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลาย และไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี

3. โมเลกุลน้ำที่ยึดเกาะกับองค์ประกอบอื่นด้วยพันธะไอออนิก เป็นน้ำที่ยึดเกาะกับองค์ประกอบภายในอาหารด้วยพันธะที่แข็งแรงมากกว่าพันธะโควาเลนท์ ทำให้ไม่มีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลาย และไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเช่นเดียวกัน

สมบัติทางเคมี กายภาพ และเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำแต่ละประเภทที่ยึดเกาะอยู่ในชิ้นอาหารที่แตกต่างกันส่งผลถึงระดับความยากง่ายในการทำแห้งที่เกิดขึ้น โดยโมเลกุลน้ำที่อยู่ในรูปอิสระสามารถระเหยออกไปได้ง่ายที่สุด ตามด้วยโมเลกุลน้ำที่ยึดเกาะกับองค์ประกอบอื่นด้วยพันธะโควาเลนท์ และด้วยพันธะไอออนิก ตามลำดับ ซึ่งหากอาหารมีปริมาณน้ำอิสระมาก (มีค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้สูง) ก็จะทำให้เกิดการเน่าเสีย หรือเสื่อมเสียคุณภาพ เนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้ง่ายกว่าอาหารที่มีปริมาณน้ำอิสระน้อย (มีค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ต่ำ) ดังนั้น น้ำจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดในการควบคุมอัตราการเสื่อมเสียของอาหาร

2.2.2 กลไกการเคลื่อนของน้ำในชิ้นอาหารระหว่างการทำแห้ง

ในการทำแห้ง การถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน ภายในโครงสร้างของชิ้นอาหาร โดยการถ่ายโอนความร้อนอาจมีได้หลายวิธี ได้แก่ การพาความร้อน การนำความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน เป็นต้น เมื่อความร้อนถูกถ่ายโอนไปยังผิวหน้าของอาหาร น้ำในอาหารจะระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดไอ จากนั้นไอน้ำจะแพร่ผ่านฟิล์มอากาศ และถูกพัดพาไปด้วยลมร้อนที่เคลื่อนที่ ความเร็วลมใช้ในการทำแห้งจะเป็นตัวกำหนดความหนาของฟิล์ม ซึ่งฟิล์มอากาศที่อยู่บริเวณรอบ ๆ ของชิ้นอาหารจะกีดขวางการถ่ายโอนความร้อน และไอน้ำระหว่างการทำแห้ง ในสภาวะดังกล่าวบริเวณผิวหน้าของอาหารจะมีความดันไอต่ำกว่าความดันไอภายในชิ้นอาหาร ความแตกต่างของความดันไอที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดแรงดันในการกำจัดน้ำออกมาจากอาหาร

กลไกการเคลื่อนที่ของน้ำในสถานะของเหลว และไอน้ำจากภายในไปยังผิวหน้าของอาหารสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. การเคลื่อนที่ของน้ำผ่านช่องแคบด้วยแรงคะปิลลารี (capillary flow)

ภายในชิ้นอาหารจะมีลักษณะเป็นรูพรุน มีช่องว่างระหว่างเซลล์ต่อเนื่องกันเป็นช่องแคบ ๆ เมื่ออาหารได้รับความร้อนจากการทำแห้ง อากาศจะเกิดการขยายตัว ทำให้เกิดแรงดันของน้ำขึ้นมาตามท่อ ซึ่งจะเกิดต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ

2. การเคลื่อนที่ของน้ำด้วยการแพร่ผ่านเซลล์ (diffusion)

น้ำในชิ้นอาหารจะซึมผ่านเยื่อผนังเซลล์ โดยที่ไอน้ำภายในชิ้นอาหารจะมีความดันไอสูงกว่าไอน้ำภายนอกชิ้นอาหาร ความแตกต่างระหว่างความดันไอภายในอาหารกับสิ่งแวดล้อมภายนอกชิ้นอาหารส่งผลให้เกิดการแพร่ผ่านเซลล์

การแพร่นี้จะเกิดขึ้นค่อนข้างช้า และมักเกิดขึ้นกับอาหารที่มีเนื้อแน่น หรือเกิดในอาหารที่ผ่านกระบวนการทำแห้งมาระยะหนึ่ง ซึ่งน้ำที่อยู่ตามรูพรุนของอาหารได้ถูกระเหยออกไปหมดแล้ว

2.2.3. ปริมาณความชื้น

ปริมาณความชื้น (Moisture content, MC) เป็นดัชนีสำคัญที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ภายในชิ้นอาหารเทียบกับมวลของชิ้นอาหารนั้น การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นภายในชิ้นอาหารส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง โดยเฉพาะอาหารที่มีปริมาณความชื้นต่ำ (Park, 2008)

ความชื้นในชิ้นอาหารสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis, Mw) คำนวณได้จากสมการที่ 1

$$M_w(\%) = \frac{(w-d)}{w} \times 100 \quad (1)$$

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis, Md) คำนวณได้จากสมการที่ 2

$$M_d(\%) = \frac{(w-d)}{d} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ w คือ มวลของชิ้นอาหารเริ่มต้น (กิโลกรัม)

และ d คือ มวลของชิ้นอาหารแห้ง (กิโลกรัม)

2.3 จลนพลศาสตร์ของการทำแห้ง (Drying Kinetics)

พฤติกรรมการทำแห้งอธิบายได้ด้วยการศึกษาจลนพลศาสตร์การทำแห้งที่เกิดขึ้น จลนพลศาสตร์เป็นการศึกษาอัตราเร็ว (rate) ของการเกิดปฏิกิริยา หรือการเปลี่ยนแปลงของสารที่สนใจ ในระยะเวลา t โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายและคำนวณ เพื่อช่วยให้เข้าใจกระบวนการ รวมถึงทำนายและควบคุมคุณลักษณะทางคุณภาพของอาหาร ทำให้สามารถจัดการกับสถานการณ์จริงที่มีความซับซ้อนได้ง่ายยิ่งขึ้น (Boekel, 2019)

การศึกษาจลนพลศาสตร์การทำแห้ง สามารถอธิบายลักษณะการทำแห้งที่เกิดขึ้นได้ โดยการวิเคราะห์อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในชิ้นอาหารเทียบกับความชื้นเริ่มต้นที่เวลาใด ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 (Yang et al., 2018)

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3)$$

เมื่อ M_t คือ ความชื้นของชิ้นอาหารที่เวลาใด ๆ (% d.b.)

M_0 คือ ความชื้นของชิ้นอาหารเริ่มต้น (% d.b.)

และ M_e คือ ความชื้นสมดุลของชิ้นอาหาร (% d.b.)

ในการคำนวณสามารถละค่าความชื้นสมดุลในสมการข้างต้นได้ โดยจะถือว่าค่าความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น (M_e << M_0) และความชื้นที่เวลาใด ๆ (M_e << M_t) ดังแสดงในสมการที่ 4

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (4)$$

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการทำแห้ง

ชื่อ	แบบจำลอง	อ้างอิง
Lewis	MR = exp(-kt)	Lewis (1921)
Page	MR = exp(-kt^n)	PAGE (1949)
Modified Page	MR = exp(-(kt)^n)	Yaldiza, Ertekina, and Uzunb (2001)
Henderson and Pabis	MR = a exp(-kt)	HENDERSON and PABIS (1961)
Modified Henderson and Pabis	MR = a exp(-kt) + b exp(-gt) + c exp(-ht)	HENDERSON and PABIS (1961)
Logarithmic	MR = a exp(-kt) + b	TOGRUL and PEHLIVAN (2002)
Wang and Singh	MR = 1 + at + bt^2	WANG and SINGH (1978)
Midilli	MR = exp(-kt^n) + bt	MIDILLI, KUCUK, and YAPAR (2002)

เมื่อ a, b, c, g, h, k และ n คือค่าคงที่ในแบบจำลอง และ t คือเวลาในการทำแห้ง (วินาที)

นอกจากสมการที่กล่าวไว้ข้างต้น ยังมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่น ๆ ที่สามารถใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการทำแห้งที่เกิดขึ้นได้ เช่น Lewis, Page, Modified Page, Henderson and Pabis, Modified Henderson and Pabis, Logarithmic, Wang and Singh และ Midilli เป็นต้น แสดงในตารางที่ 1

การเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับผลการทดลองการทำแห้งที่เกิดขึ้น สามารถวิเคราะห์ได้จากค่าไคสแควร์ (chi-square, χ^2), ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (correlation coefficient, R^2) และ รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean

squared error, RMSE) ซึ่งถือเป็นดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ โดยแบบจำลองที่ดีควรมีค่า χ^2 และค่า RMSE ต่ำ และมีค่า R^2 เข้าใกล้ 1

ค่าไคสแควร์ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5, 6 และ 7 ตามลำดับ (Yang et al., 2018)

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(MR_{exp,i}-MR_{pre,i})^2}{n-z} \quad (5)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Residual sum square}}{\text{Total sum square}} \quad (6)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

เมื่อ MR_{exp} คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง

MR_{pre} คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง

และ n คือ จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์

Malaikritsanachalee, Choosri, and Choosri (2018) ศึกษาจลนพลศาสตร์การทำแห้งสับปะรด โดยใช้แบบจำลอง 4 แบบ คือ Lewis, Page, Henderson and Pabis และ Logarithmic พบว่า การใช้แบบ จำลอง Page ในการทำนายมีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า RMSE และ χ^2 ต่ำที่สุด จึงมีความเหมาะสมกับชุดข้อมูลมากกว่าแบบจำลองชนิดอื่น ๆ สอดคล้องกับงานวิจัยการทำแห้งกีวี ของ Simal, Femenia, Garau, and Rosselló (2004)

2.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (Effective moisture diffusion coefficient, D_{eff}) เป็นสมบัติเฉพาะทางกายภาพที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุ และถือเป็นพารามิเตอร์การทำแห้งที่สำคัญ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นขึ้นอยู่กับความชื้นเริ่มต้น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของกระแสอากาศ พิจารณาได้จากสมการการแพร่ตามกฎข้อที่ 2 ของฟิคก์ (Liu et al., 2017) ดังแสดงในสมการที่ 8

$$MR = \frac{8^3}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{\infty}\sum_{k=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2(2m+1)^2(2k+1)^2} \times \exp\left[-(2n+1)^2\frac{\pi^2 D_{eff}}{4X^2}\, t\right] \times \exp\left[-(2m+1)^2\frac{\pi^2 D_{eff}}{4X^2}\, t\right] \times \exp\left[-(2k+1)^2\frac{\pi^2 D_{eff}}{4X^2}\, t\right] \quad (8)$$

เมื่อ X, Y และ Z คือ ความหนาครึ่งหนึ่งของชิ้นตัวอย่าง ด้านกว้าง ยาวและสูงตามลำดับ (m)

N, m และ k คือ ค่าคงที่ของสมการ

จากสมการที่ (8) สามารถลดให้อยู่ในรูปของสมการลำดับที่หนึ่งได้ ดังสมการที่ (9)

$$MR = \frac{8^3}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t\right) \qquad (9)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสามารถหาได้จากความชันของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ln(MR) กับเวลาในการทำแห้ง ดังแสดงในสมการที่ (10) โดยค่า L มาจาก $X^2+Y^2+Z^2$

$$m = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \qquad (10)$$

การทำแห้งที่อุณหภูมิสูง และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำ จะส่งผลให้การทำแห้งนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูง (Dissa, Desmorieux, Bathiebo, & Koulidiati, 2008)

Liu et al. (2017) ศึกษาการทำแห้งหัวไชเท้าขาว ด้วยการทำแห้งแบบสุญญากาศ และการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวด ที่อุณหภูมิ 75, 80, 85 และ 90°C พบว่า การทำแห้งที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูงกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ

2.4 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของชิ้นอาหารที่ผ่านการทำแห้ง

แม้ว่าการทำแห้งจะมีข้อดีมากมาย แต่ในทางตรงกันข้ามก็ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพที่ซับซ้อนภายในชิ้นอาหาร ผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านกระบวนการทำแห้งจะมีการเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพในด้านต่าง ๆ การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้บ่งบอกถึงความสามารถ หรือประสิทธิภาพในการทำแห้ง ซึ่งจะเกิดขึ้นมาก หรือน้อย ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น วิธีการทำแห้ง อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง เป็นต้น ดังนั้น การเลือกวิธี และสภาวะที่ใช้ในการทำแห้งให้เหมาะสมจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ (Krokida & Marinos-Kouris, 2003) ปัจจุบันมีการศึกษาและพัฒนาวิธีการทำแห้ง และหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งผลิตภัณฑ์อาหารแต่ละชนิด เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพด้านเคมีกายภาพ และรักษาคุณค่าทางโภชนาการให้ได้มากที่สุด

2.4.1 การเปลี่ยนแปลงสี (Color changes)

สีเป็นปัจจัยคุณภาพที่สำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตและแปรรูปอาหาร ซึ่งส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค และมีความสอดคล้องกับคุณสมบัติทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ จึงถือได้ว่าเป็นคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแห้งที่สามารถกำหนดราคาขายในตลาดได้ (Yang et al., 2018)

อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นอาหารแห้งที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่ชิ้นอาหารสัมผัสกับความร้อนเป็นเวลานาน จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง (Argyropoulos & Müllera, 2011)

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ทางเคมี และการวิเคราะห์ทางการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหาร จากงานวิจัยของ J. Link, G. Tribuzi, and J. Laurindo (2017); Liu et al. (2017); Salehi and Kashaninejad (2018) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง และทำการวิเคราะห์ค่าสีโดยใช้เครื่องวัดสี (Colorimeter) ในระบบ CIE Lab ซึ่งมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 ตัว คือ L*, a* และ b* โดยที่ L* คือค่าความสว่างของชิ้นตัวอย่าง มีค่าตั้งแต่ 0 – 100 ค่า a* คือค่าความเป็นสีแดง (+) และสีเขียว (-) และค่า b* คือค่าความเป็นสีเหลือง (+) และสีน้ำเงิน (-)

2.4.2 การหดตัว (Shrinkage)

การหดตัวเป็นหนึ่งในการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่ความสำคัญในการทำแห้งผลิตภัณฑ์อาหาร การให้ความร้อนแก่ชิ้นอาหารในระหว่างกระบวนการทำแห้ง น้ำอิสระที่อยู่ภายในชิ้นอาหารจะระเหยออก ทำให้ชิ้นอาหารมีปริมาณน้ำหรือความชื้นต่ำลง การลดลงของแรงตึงผิวระหว่างน้ำและผนังเซลล์ภายในชิ้นอาหารส่งผลให้เกิดการหดตัวของชิ้นอาหารแห้ง (Arévalo-Pinedo & Murr, 2006)

เมื่ออาหารเกิดการหดตัวจะทำให้มีรูปร่างและขนาดเล็กลง การหดตัวในอุดมคติอาจบอกได้ว่าเป็นปริมาตรที่ลดลงของอาหารในระหว่างการทำแห้งตามปริมาณน้ำที่ถูกกำจัดในระหว่างกระบวนการทั้งหมด อัตราการหดตัวขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการทำแห้ง ลักษณะโครงสร้าง และรูพรุนภายในชิ้นอาหาร ซึ่งอาจจะเกิดจากผลกระทบของปัจจัยหลาย ๆ ชนิดรวมกัน (Nguyen, Mondor, & Ratti, 2018)

การหดตัวของอาหารส่งผลต่อลักษณะปรากฏ และลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหารแห้งที่ได้ ในการศึกษาอัตราการหดตัวสามารถวิเคราะห์ได้หลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นวิธีการวัดขนาดโดยตรง หรือการวิเคราะห์ปริมาตรของชิ้นอาหารแห้ง (Ortiz-García-Carrasco et al., 2015)

2.4.3 การคืนตัว (Rehydration)

อัตราการคืนตัว หรืออัตราการดูดน้ำกลับ (Rehydration ratio, RR) เป็นหนึ่งในพารามิเตอร์คุณภาพที่มีการกล่าวถึงมากที่สุดในการทำแห้งผักและผลไม้ ซึ่งจะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการทำแห้งนั้น ๆ อัตราการคืนตัวของชิ้นอาหารแห้ง ขึ้นอยู่กับโครงสร้างภายใน ปริมาณรูพรุน และลักษณะการหดตัวของชิ้นอาหาร โดยการทำแห้งที่ดี ผลิตภัณฑ์อาหารแห้งที่ได้ควรมีอัตราการคืนตัวสูง และสามารถดูดซับน้ำกลับเข้าไปภายในชิ้นได้จนกระทั่งมีปริมาณความชื้นเทียบเท่ากับชิ้นอาหารสด (J. V. Link et al., 2017)

อุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์ เป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อการคืนตัวของผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง โดยการวิเคราะห์การคืนตัวด้วยอุณหภูมิต่ำจะส่งผลให้ชิ้นตัวอย่างมีความชื้นสุดท้าย

หลังการคืนตัวมากกว่าการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากการแช่ชิ้นตัวอย่างลงไปในอุณหภูมิสูง ทำให้โครงสร้างของชิ้นตัวอย่างเกิดความเสียหาย ส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับน้ำต่ำลง (Hernando, Sanjuán, Pérez-Munuera, & Mulet, 2008) ทั้งนี้อุณหภูมิที่ใช้นั้นก็ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารที่นำมาวิเคราะห์ด้วย

จากงานวิจัยของ Barrera, Betoret, Betoret, and Fito (2016) ศึกษาอัตราการคืนตัวของแอปเปิ้ลที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อน โดยการแช่ชิ้นแอปเปิ้ลอบแห้งลงในน้ำกลั่นอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างทุก ๆ 10 นาทีใน 1 ชั่วโมงแรก ก่อนจะชั่งทุก ๆ ชั่วโมงเป็นเวลา 9 ชั่วโมง และ Liu et al. (2017) ศึกษาอัตราการคืนตัวของหัวไชเท้าขาวอบแห้ง โดยการแช่ลงในน้ำกลั่นอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ก่อนจะนำชิ้นตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนักทุก ๆ 15 นาทีจนกว่าน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างจะคงที่

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การคืนตัว สามารถวิเคราะห์ได้โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยในการทำนาย การเลือกใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารที่นำมาทำแห้ง รวมไปถึงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยจะวิเคราะห์ความเหมาะสมในการเลือกสมการจากดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนาย ได้แก่ ค่าไคสแควร์ (chi-square, χ^2), ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (correlation coefficient, R^2) และ รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean squared error, RMSE) เช่นเดียวกับการศึกษาจลนพลศาสตร์การทำแห้งที่กล่าวไว้ข้างต้น

Benseddik, Azzi, Zidoune, Khanniche, and Besombes (2019) ศึกษาจลนพลศาสตร์การคืนตัวของฟักทองที่ผ่านการทำแห้ง 4 รูปแบบ คือ การทำแห้งด้วยลมร้อน การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง การทำแห้งแบบ Vacuum Multi Flash (VMFD) และการทำแห้งแบบ Swell (SD) โดยเปรียบเทียบแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมด 4 รูปแบบ คือ Peleg, Weibull, Exponential และ First order พบว่า แบบจำลอง Weibull มีประสิทธิภาพในการทำนาย และมีความเหมาะสมกับข้อมูลการทดลองชุดนี้มากที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า χ^2 และค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนกำลังสองต่ำที่สุด และชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและการทำแห้งแบบ Swell มีอัตราการคืนตัวสูงสุด โดยชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนมีอัตราการคืนตัวต่ำที่สุด

2.5 การทำแห้งด้วยลมร้อน (Hot air drying หรือ Convective drying)

การทำแห้งด้วยลมร้อนเป็นเทคนิคการทำแห้งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร โดยมีข้อดี คือ สามารถดำเนินการได้ง่าย สะดวก และมีค่าใช้จ่ายไม่สูงมากนัก การทำแห้งด้วยลมร้อนเป็นกระบวนการที่ใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการทำแห้ง มีการถ่ายโอนความร้อน และความชื้นโดยวิธีการพาความร้อน และมวลสาร (convective heat and mass transfer) ซึ่งเป็นกลไก

การถ่ายโอนความร้อน และมวลสารที่มีประสิทธิภาพสูง เมื่ออากาศร้อนสัมผัสกับผิวหน้าของชิ้นอาหารจะทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนจากอากาศไปยังผิวหน้าของชิ้นอาหาร และถ่ายโอนมวลน้ำจากภายในชิ้นอาหารไปยังผิวหน้า และจากผิวหน้าของชิ้นอาหารไปยังอากาศ เมื่อไอน้ำระเหยออกมาก็จะถูกพัดพาไปด้วยลมร้อนที่กำลังเคลื่อนที่ ทำให้ปริมาณน้ำภายในชิ้นอาหารลดลง ความชื้นในชิ้นอาหารต่ำลง (Sabarez, 2016)

อุณหภูมิของลมร้อนและความเร็วลมที่ใช้ในการทำแห้งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแห้งที่ได้ การเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วลมจะช่วยเพิ่มอัตราการระเหยของน้ำภายในชิ้นอาหาร ทำให้ลดระยะเวลาในการทำแห้งลง (Charmongkolpradit & Luampon, 2017; Putra & Ajiwiguna, 2017)

López et al. (2010) ศึกษาการทำแห้งบลูเบอร์รี่ โดยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเร็วลม เท่ากับ 2.00 เมตรต่อวินาที พบว่า การทำแห้งที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ใช้เวลาการทำแห้งสั้นกว่า และมีอัตราการทำแห้งสูงกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ

Vega-Gálvez et al. (2012) ศึกษาการทำแห้งแอปเปิ้ล โดยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน ภายใต้อุณหภูมิและความเร็วลมที่แตกต่างกัน คือ ใช้อุณหภูมิลมร้อน เท่ากับ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วลม เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 เมตรต่อวินาที พบว่า การทำแห้งโดยการใช้อุณหภูมิและความเร็วลมที่สูงขึ้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำแห้ง ทำให้สามารถทำแห้งได้อย่างรวดเร็วมากยิ่งขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้แอปเปิ้ลมีการเปลี่ยนแปลงสีลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tzempelikos, Vouros, Bardakas, Filios, and Margaris (2014) ที่ได้ศึกษาการทำแห้งมะตูม โดยการทำแห้งด้วยลมร้อน ที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วลมเท่ากับ 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วลมส่งผลให้ใช้เวลาในการทำแห้งน้อยลง

แม้การทำแห้งด้วยลมร้อนจะมีข้อดีมากมาย แต่ก็ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในการทำแห้งวัตถุดิบที่ไวต่อความร้อน เนื่องจากมีข้อเสีย คือ ชิ้นอาหารจะได้รับความร้อนในปริมาณมาก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านต่าง ๆ ได้ อาทิ การหดตัว การคืนตัว การเปลี่ยนแปลงสี รวมทั้งการสลายตัวของสารอาหารต่าง ๆ เป็นต้น (Corzo, Bracho, & Alvarez, 2008; Dissa et al., 2008)

Abano, Ma, and Qu (2011) ศึกษาการทำแห้งมะเขือเทศด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่า การทำแห้งโดยการใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมากขึ้น เพิ่มอัตราการทำแห้ง และลดระยะเวลาในการทำแห้งลง แต่ในทางตรงกันข้าม การใช้อุณหภูมิสูงกลับทำให้เกิดสีน้ำตาลในมะเขือเทศอบแห้งได้มากกว่าการ

ใช้อุณหภูมิต่ำ ค่าความเป็นสีแดงของชิ้นตัวอย่างจะลดลง ส่วนค่าความเป็นสีเหลืองจะเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับมะเขือเทศสด เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Yang et al. (2018) ซึ่งศึกษาการทำแห้งพริกสีแดง โดยใช้วิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน ที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง จะทำให้ใช้เวลาในการทำแห้งลดลง แต่ส่งผลให้พริกมีการเปลี่ยนแปลงสีมากกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ

นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนเปรียบเทียบกับวิธีการทำแห้งแบบอื่น ๆ จากงานวิจัยของ Nemzer, Vargas, Xia, Sintara, and Feng (2018) ศึกษาการทำแห้งผลไม้ ได้แก่ บลูเบอร์รี่ สตรอเบอร์รี่ เชอร์รี่ และแครนเบอร์รี่ โดยใช้วิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนเปรียบเทียบกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำแห้งด้วยลมร้อนมีการเปลี่ยนแปลงสี และมีการสลายตัวของสารพฤกษเคมี เช่น วิตามินซี วิตามินบี แอนโทไซยานิน สารแอนตี้ออกซิแดนท์ และกรดอินทรีย์มากกว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง สอดคล้องกับงานวิจัยการทำแห้งแครอทของ Siebert, Gall, Karbstein, and Gaukel (2018) และการทำแห้งเห็ดของ Hernando et al. (2008) ซึ่งพบว่า การทำแห้งด้วยลมร้อนใช้เวลาในการทำแห้งนาน และ ได้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีคุณภาพต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

2.6 การทำแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum drying)

การทำแห้งแบบสุญญากาศเป็นการทำแห้งชิ้นอาหารภายใต้สภาวะที่เป็นสุญญากาศ หรือความดันต่ำกว่าบรรยากาศ โดยอาศัยหลักการลดจุดเดือดของน้ำ ทำให้น้ำระเหยออกมาได้ในอุณหภูมิที่ต่ำลง ช่วยลดความร้อนที่จะสัมผัสกับชิ้นอาหาร ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีคุณภาพดีมากขึ้น จึงเป็นวิธีที่เหมาะกับการทำแห้งวัตถุดิบที่ไวต่อความร้อน (Lewicki, 2006)

เมื่อห้องทำแห้งอยู่ในสภาวะสุญญากาศ ความดันไอของน้ำและความเข้มข้นของความชื้นในอากาศจะต่ำ ทำให้เกิดความแตกต่าง (partial vapor pressure) และความเข้มข้นของความชื้น (vapor diffusion) ระหว่างชิ้นอาหารกับอากาศ ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนมวลไอน้ำที่ผิวหน้าของชิ้นอาหารโดยการแพร่สู่อากาศ โดยปกติแล้วการทำแห้งด้วยวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนแก่ชิ้นอาหารที่ต้องการนำมาทำแห้ง เนื่องจากที่สภาวะความดันต่ำ น้ำภายในชิ้นอาหารสามารถกลายเป็นไอและระเหยออกมาได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่การทำแห้งที่สภาวะความดันต่ำมาก ๆ นั้นเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน จึงมีการให้ความร้อนแก่ชิ้นอาหารควบคู่กับการลดความดันภายในห้องทำแห้ง เพื่อช่วยลดพลังงานที่ใช้ในการทำแห้ง และเพิ่มประสิทธิภาพในการทำแห้ง

การทำแห้งแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิสูง และใช้ความดันในการทำแห้งต่ำจะส่งผลให้มีอัตราการทำแห้งสูง และใช้เวลาในการทำแห้งน้อยลง โดยความดันที่ใช้มีอิทธิพลต่ออัตราการทำแห้งมากกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง (Luampon, Supakarn, Theerakulpisut, & Artnaseaw, 2016)

Wongsa and Jengsuksawat (2012) ศึกษาการทำแห้งขนุนพันธุ์ทองสุดใจด้วยการทำแห้งแบบสุญญากาศ เปรียบเทียบกับที่สภาวะความดันบรรยากาศ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง คือ 45, 60 และ 80 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ 700, 620 และ 420 mmHg ตามลำดับ พบว่า ที่อุณหภูมิเดียวกัน การทำแห้งด้วยสภาวะสุญญากาศมีช่วยให้น้ำระเหยออกมาได้มากกว่าการทำแห้งที่สภาวะความดันบรรยากาศ และการทำแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูงจะช่วยเพิ่มอัตราการทำแห้ง เนื่องจากทำให้อัตราความชื้นลดลงได้เร็วกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ

Phungamngoen, Chiewchan, and Devahastin (2013) ศึกษาการทำแห้งกะหล่ำปลี โดยวิธีการทำแห้งแบบสุญญากาศ เปรียบเทียบกับการทำแห้งด้วยลมร้อน พบว่า การทำแห้งแบบสุญญากาศช่วยลดระยะเวลาในการทำแห้งลง ทั้งยังได้ผลิตภัณฑ์ที่มีการหดตัวต่ำ และมีการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมน้อยกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน สอดคล้องกับงานวิจัยของ de Mendonça et al. (2017) ซึ่งศึกษาการทำแห้ง pequi ด้วยวิธีการทำแห้งแบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับการทำแห้งด้วยลมร้อน พบว่า การทำแห้งแบบสุญญากาศช่วยลดการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผลิตภัณฑ์อบแห้งได้

Orikasa et al. (2014) ศึกษาการทำกีวีอบแห้ง โดยใช้วิธีการทำแห้งแบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความดัน 3.00 kPa เปรียบเทียบกับการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง ส่งผลให้มีอัตราการทำแห้งเพิ่มขึ้น และกีวีที่ผ่านการทำแห้งแบบสุญญากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงสีน้อยและมีการหดตัวต่ำกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิเดียวกัน นอกจากนี้ งานวิจัยการทำแห้งมะม่วงของ Sehrawat, Nema, and Kaur (2018) ยังพบว่า มะม่วงอบแห้งที่ได้จากการทำแห้งแบบสุญญากาศมีการสลายตัวของวิตามินซีและบีตาแคโรทีนต่ำกว่า และมีอัตราการคืนตัวที่ดีกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน

แม้การประยุกต์ใช้สภาวะสุญญากาศในการทำแห้งจะช่วยแก้ปัญหาด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งให้ดีขึ้น แต่ก็มีข้อเสียเกี่ยวกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง เนื่องจากการทำแห้งด้วยวิธีนี้เป็นการให้ความร้อนกับชิ้นตัวอย่างโดยวิธีการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) หรือนำความร้อน (Conduction) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนมวล และความร้อนต่ำ ทำให้มีอัตราการแพร่ของไอน้ำช้ากว่าวิธีการพาความร้อน (Convection) มาก

2.7 การทำแห้งแบบ multi – flash

การทำแห้งแบบ multi – flash เป็นหนึ่งในนวัตกรรมการทำแห้งที่พัฒนาขึ้น โดยการนำข้อดีของการทำแห้งด้วยลมร้อน และการทำแห้งแบบสุญญากาศมาผสมผสานกัน เพื่อเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง และลดระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง

มีหลักการคือ การให้ความร้อนสลับกับการกระตุ้นสุญญากาศเข้าไปในระบบเป็นช่วง ๆ เพื่อกระตุ้นให้น้ำภายในชิ้นอาหารสามารถระเหยออกมาได้ง่ายและรวดเร็วมากขึ้น โดยชิ้นอาหารจะถูกให้ความร้อนด้วยลมร้อนที่ความดันบรรยากาศ เมื่อได้อุณหภูมิของชิ้นอาหารตามที่ต้องการก็จะลดความดันภายในห้องทำแห้งลงอย่างรวดเร็ว (กระตุ้นสุญญากาศ) ในสภาวะเช่นนี้จะทำให้น้ำภายในชิ้นอาหารระเหยออกมา และทำให้ชิ้นอาหารเย็นลง (flash evaporation) ก่อนจะเพิ่มความดันภายในห้องทำแห้งให้กลับสู่สภาวะความดันบรรยากาศอีกครั้ง นับเป็น 1 รอบของ heating - vacuum pulse cycles ซึ่งการเพิ่มจำนวนรอบของ heating - vacuum pulse cycles ช่วยในการระเหยน้ำ ส่งผลให้ชิ้นอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้อยลง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีคุณภาพดีมากขึ้น (J. Link et al., 2017)

Monteiro, Link, Tribuzi, Carciofi, and Laurindo (2018) ศึกษาการทำแห้งฟักทอง โดยใช้การทำแห้งแบบ Conductive multi-flash เปรียบเทียบกับการทำแห้งด้วยลมร้อน และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่า การทำแห้งแบบ Conductive multi-flash ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำแห้ง ส่งผลให้ใช้เวลาในการทำแห้งน้อยลง และทำให้ได้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ดี คือ มีการเปลี่ยนแปลงสีน้อย มีการหดตัวต่ำ และมีอัตราการคืนตัวที่ดีกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

Zotarelli, Porciuncula, and Laurindo (2012) ศึกษาการทำแห้งกล้วย และมะม่วงสุก โดยวิธีการทำแห้งแบบ Convective multi – flash เปรียบเทียบกับการทำแห้งด้วยลมร้อน การทำแห้งแบบสุญญากาศ และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่า การทำแห้งแบบ Convective multi – flash สามารถลดระยะเวลาในการทำแห้งลง และส่งผลให้ได้กล้วยและมะม่วงสุกอบแห้งที่มีคุณภาพดีและมีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับกล้วย และมะม่วงสุกที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

J. V. Link et al. (2017) ศึกษาการทำแห้งมะม่วงสุก โดยใช้การทำแห้งแบบ Conductive multi-flash เปรียบเทียบกับการทำแห้งด้วยลมร้อน การทำแห้งแบบสุญญากาศ และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่า มะม่วงสุกอบแห้งที่ได้จากการทำแห้งแบบ Conductive multi – flash ใช้เวลาในการทำแห้งน้อยที่สุด และมีการเปลี่ยนแปลงสีต่ำกว่าวิธีการทำแห้งแบบอื่น ๆ นอกจากนี้ มะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งแบบ Conductive multi – flash ยังมีการหดตัวน้อย และมีปริมาณรูพรุนมากกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน และการทำแห้งแบบสุญญากาศ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Porciuncula, Segura, and Laurindo (2015) ที่ทำการศึกษาการทำแห้งกล้วยด้วยวิธีการทำแห้งแบบ Conductive multi-flash เปรียบเทียบกับการทำแห้งด้วยลมร้อน และการทำแห้งแบบสุญญากาศ พบว่า กล้วยที่ผ่านการทำแห้งแบบ Conductive multi - flash มีการหดตัวต่ำ และมีรูพรุนสูงกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน และการทำแห้งแบบสุญญากาศ

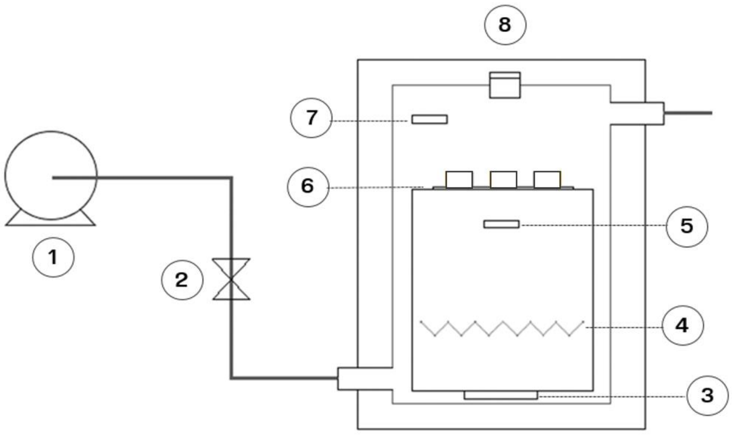
บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ตัวอย่าง และการเตรียมตัวอย่าง

มะม่วงน้ำดอกไม้สายพันธุ์สีทองจัดหาจากตลาดปฐมมงคล อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม มีเกณฑ์ในการคัดเลือกตัวอย่างให้มีความสม่ำเสมอ โดยพิจารณาจากผิวไม่มีรอยแมลงเจาะ ขนาดและสีมีความสม่ำเสมอ มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Total soluble solids) จากการวัดด้วย refractometer (Optika HR-130, italy) เป็น 18.32 ± 1.03 °Brix มีค่าความแน่นเนื้อ 12.77 ± 2.52 N วัดด้วย penetrometer (FT 327, Italy) หัววัดขนาด 8 mm. มีปริมาณกรด (Titratable acidity) เป็น 0.28 ± 0.06 g citric/100 g sample และมีค่าความชื้นเริ่มต้น (moisture content) จากการวัดตามวิธีมาตรฐาน (AOAC, 2005) เป็น 4.93 ± 0.23 g water/ g dry basis ตัวอย่างที่นำมาศึกษาการทำแห้งจะถูกนำมาล้างทำความสะอาด ปอกเปลือก และตัดเป็นชิ้นให้มีขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 1.5 x 1.5 x 1.5 cm^3

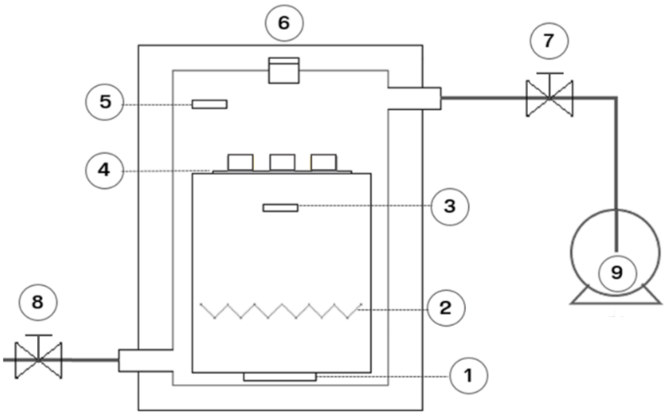
3.2 อุปกรณ์สำหรับศึกษาการทำแห้ง

อุปกรณ์สำหรับศึกษาการทำแห้งด้วยลมร้อนแสดงดังภาพที่ 1 ห้องทำแห้งผลิตจาก poly (methy methacrylate) หนา 2.5 cm มีขนาด (กว้าง x ยาว x สูง) ด้านใน 15 x 15 x 25 cm^3 ถาดวางตัวอย่างทำจากตะแกรง poly (tetrafluroethylene) ขนาด 8 x 8 cm ในการทำแห้งอากาศไหลเข้าด้านล่างของห้องทำแห้งด้วยปั๊มลม (air compressor) ความเร็วลมที่ไหลผ่านตัวอย่างควบคุมด้วยวาล์ว และวัดด้วย vane type anemometer (Lutron AM-4201) ลมจากด้านล่างของห้องทำแห้งจะไหลผ่าน heater (PCT heater) ขนาด 1500 W ซึ่งเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิทำหน้าที่ในการให้ความร้อนกับอากาศให้มีอุณหภูมิคงที่ตามกำหนดแล้วจึงผ่านออกจากห้องทำแห้งทางด้านบน เมื่อเริ่มต้นกระบวนการทำแห้งน้ำหนักตัวอย่างถูกวัดด้วย load cell และอุณหภูมิของอากาศในห้องทำแห้งวัดด้วย thermocouple โดยข้อมูลน้ำหนัก และอุณหภูมิในกระบวนการทำแห้งจะถูกบันทึกทุก 1 นาที ด้วย data logger (Luft Opus 200)



ภาพที่ 1 เครื่องทำแห้งด้วยลมร้อน
ประกอบไปด้วย (1) เครื่องกำเนิดลม (2) วาล์วควบคุมความเร็วลม (3) โหลดเซลล์ (4) เครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้า (5) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิอากาศขาเข้า (6) ตะแกรงวางตัวอย่าง (7) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิอากาศขาออก (8) กล้องถ่ายภาพ

อุปกรณ์สำหรับศึกษาการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ แสดงดังภาพที่ 2 ห้องทำแห้งผลิตจาก poly (methy methacrylate) หนา 2.5 cm มีขนาด (กว้าง x ยาว x สูง) ด้านใน 15 x 15 x 25 cm^3 ถาดวางตัวอย่างทำจากตะแกรง poly (tetrafluroethylene) ขนาด 8 x 8 cm ปั๊มสุญญากาศแบบ liquid ring (L-BV7, Elmo Rietschle, Germany) ต่อกับห้องทำแห้งทางด้านบนเพื่อดูดอากาศออกทำให้ห้องทำแห้งมีสภาวะสุญญากาศ ในการทำแห้งอากาศไหลผ่านวาล์วเข้าทางด้านล่างของห้องทำแห้งเพื่อควบคุมความดันของอากาศที่ไหลผ่านห้องทำแห้งให้อยู่ภายใต้สภาวะความดันต่ำ อากาศที่ความดันต่ำจากด้านล่างของห้องทำแห้งจะไหลผ่าน heater (PCT heater) ขนาด 1500 W ซึ่งเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิทำหน้าที่ในการให้ความร้อนกับอากาศให้มีอุณหภูมิคงที่ตามกำหนด เมื่อเริ่มต้นกระบวนการทำแห้งน้ำหนักตัวอย่างถูกวัดด้วย load cell และอุณหภูมิของอากาศในห้องทำแห้งวัดด้วย thermocouple โดยข้อมูลน้ำหนัก และอุณหภูมิในกระบวนการทำแห้งจะถูกบันทึกทุก 1 นาที ด้วย data logger (Luft Opus 200)



ภาพที่ 2 เครื่องทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ
ประกอบไปด้วย (1) โหลดเซลล์ (2) เครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้า (3) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิอากาศและความดันขาเข้า (4) ตะแกรงวางตัวอย่าง (5) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิอากาศและความดันขาออก (6) กล้องถ่ายภาพ (7) วาล์วควบคุมความดัน (8) วาล์วควบคุมอากาศเข้า (9) ปั๊มสุญญากาศ

3.3 ขั้นตอนการทำแห้ง

ปรับสภาวะในห้องทำแห้งให้ได้ตามกำหนดในการศึกษานี้สำหรับการทำแห้งด้วยลมร้อนและการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำดังตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ เมื่อห้องทำแห้งมีสภาวะคงที่ตามกำหนดนำตัวอย่างที่เตรียมไว้วางบนตะแกรงแล้วใส่ในห้องทำแห้ง และเริ่มบันทึกข้อมูลจนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.35 kg water / kg dry matter (dry basis) จึงสิ้นสุดกระบวนการทำแห้ง ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งจะถูกนำไปศึกษาสมบัติเชิงเคมีกายภาพต่อไป

ตารางที่ 2 สภาวะที่ใช้ในการศึกษาการทำแห้งด้วยลมร้อน

สภาวะ	**อุณหภูมิ (°C)**	**ความเร็วลม (m/s)**
T50V1.0	50	0.5
T50V1.5	50	1.0
T50V2.0	50	1.5
T60V1.0	60	0.5
T60V1.5	60	1.0
T60V2.0	60	1.5
T70V1.0	70	0.5
T70V1.5	70	1.0
T70V2.0	70	1.5

ตารางที่ 3 สภาวะที่ใช้ในการศึกษาการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ

สภาวะ	อุณหภูมิ (˚C)	ความดัน (kPA)
T50P6	50	6
T50P8	50	8
T50P10	50	10
T60P6	60	6
T60P8	60	8
T60P10	60	10
T70P6	70	6
T70P8	70	8
T70P10	70	10

3.4 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การทำแห้ง

3.4.1 ความชื้น

การศึกษาการทำแห้งนี้แสดงความชื้นของตัวอย่างในรูปของอัตราส่วนความชื้น (moisture ratio, MR) ดังสมการที่ 11 ซึ่งแสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในชิ้นอาหารที่เวลาใด ๆ เทียบกับความชื้นเริ่มต้น โดย ความชื้นเริ่มต้น ความชื้นที่เวลาใด ๆ และความชื้นที่สมดุลของตัวอย่าง คำนวณได้จากน้ำหนักตัวอย่างดังสมการที่ 12 ถึง 14 ตามลำดับ

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} \tag{11}$$

$$M_i = \frac{W_i - W_d}{W_d} \tag{12}$$

$$M_t = \frac{W_t - W_d}{W_d} \tag{13}$$

$$M_{eq} = \frac{W_{eq} - W_d}{W_d} \tag{14}$$

เมื่อ M_i คือ ความชื้นของชิ้นตัวอย่างเริ่มต้น (kg water / kg dry matter) M_t คือ ความชื้นของชิ้นตัวอย่างที่เวลาใด ๆ (kg water / kg dry matter) M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของชิ้นตัวอย่าง (kg water / kg dry matter) W_i W_t และ W_{eq} คือ น้ำหนักเริ่มต้น น้ำหนักที่เวลาใด ๆ และ น้ำหนักสมดุลของชิ้นตัวอย่าง (kg) ตามลำดับ

3.4.2 กราฟการทำแห้ง

กราฟการทำแห้ง (drying curve) แสดงถึงพฤติกรรมการทำแห้งของกระบวนการทำแห้งที่ศึกษาจากความสัมพันธ์ระหว่าง MR กับเวลาซึ่งในการศึกษานี้จะอธิบายความสัมพันธ์นี้ได้ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 3 แบบ ได้แก่ แบบจำลองของ Lewis, Page และ Henderson and Pabis ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายพฤติกรรมการทำแห้ง

แบบจำลอง	**รูปแบบสมการ**	**อ้างอิง**
Lewis	MR = exp(-kt)	Lewis (1921)
Page	MR = exp(-kt^n)	PAGE (1949)
Henderson and Pabis	MR = a exp(-kt)	HENDERSON and PABIS (1961)

เมื่อ a, k และ n คือค่าคงที่ในแบบจำลอง และ t คือเวลาในการทำแห้ง (s)

ในการบ่งชี้ความสอดคล้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองในการศึกษานี้จะพิจารณาจากพารามิเตอร์ทางสถิติ 3 แบบ คือ ไคสแควร์ (chi-square, χ^2), สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (correlation coefficient, R^2) และ รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean squared error, RMSE) ดังแสดงในสมการที่ 15 - 17 ตามลำดับ

เมื่อ MR_{exp} คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง MR_{pre} คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง และ n คือ จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(MR_{exp,i}-MR_{pre,i})^2}{n-z} \quad (15)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Residual sum square}}{\text{Total sum square}} \quad (16)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

3.4.3 อัตราการทำแห้ง

ความเร็วในการเปลี่ยนแปลงความชื้นต่อหนึ่งหน่วยเวลาของกระบวนการทำแห้งแสดงได้ด้วยอัตราการทำแห้ง (drying rate) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 18

$$DR = -\frac{X_{t+\Delta t}-X_t}{\Delta t} \quad (18)$$

เมื่อ DR คือ อัตราการทำแห้ง (kg water x kg dry matter^{-1} s^{-1}) $X_{t+\Delta t}$ คือ ความชื้นของตัวอย่างที่ t+Δt (kg water / kg dry matter) และ Δt คือ เวลาที่เปลี่ยนแปลงไป (s)

3.4.4 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity coefficient, D_{eff}) เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของกระบวนการทำแห้ง สมการที่ 19 ใช้ในการคำนวณค่า D_{eff} จากกราฟการทำแห้งที่ได้จากการทดลองซึ่งนำเสนอโดย Crank (Crank, 1975) มีพื้นฐานมาจากการถ่ายโอนมวลตามกฎข้อที่ 2 ของฟิคก์ (Fick's second law) สมการที่ 19 พิจารณาการถ่ายโอนความชื้นในตัวอย่างแบบ 3 มิติสำหรับตัวอย่างที่มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ และใช้ข้อสมมุติว่าไม่เกิดการหดตัวของชิ้นตัวอย่าง และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในชิ้นตัวอย่างมีค่าคงที่ตลอดทั้งชิ้นตัวอย่าง

$$MR = \frac{8^3}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{\infty}\sum_{k=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2(2m+1)^2(2k+1)^2} \times \exp[-(2n+1)^2\frac{\pi^2 D_{eff}}{4X^2}t] \times \exp[-(2m+1)^2\frac{\pi^2 D_{eff}}{4X^2}t] \times \exp[-(2k+1)^2\frac{\pi^2 D_{eff}}{4X^2}t] \quad (19)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (m^2/s) X, Y และ Z คือ ความหนาครึ่งหนึ่งของชิ้นตัวอย่าง ตามด้านกว้าง ยาว และสูงตามลำดับ (m) N, m และ k คือ indexes of summations (-)

สามารถลดรูปสมการที่ 19 สามารถลดให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังสมการที่ 20

$$MR = \frac{8^3}{\pi^2}\exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}t\right) \quad (20)$$

เมื่อ $L^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$

จากความสัมพันธ์เชิงเส้นในรูปแบบลอการิทึมธรรมชาติ (natural logarithm) ของสมการที่ 20 สามารถนำมาใช้หาค่า D_{eff} ของกระบวนการทำแห้งได้จากความชัน (m) ของความสัมพันธ์จากความสัมพันธ์เชิงเส้นดังกล่าวของข้อมูลการทดลองระหว่างเวลาในการทำแห้งกับ ln(MR) ดังสมการที่ 21

$$m = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (21)$$

3.5 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพ

3.5.1 สมบัติด้านสี

สมบัติด้านสีของตัวอย่างในการศึกษาวัดในหน่วยระบบสี CIE (L^*, a^* และ b^*) โดยค่าสีของผลิตภัณฑ์ แสดงในเทอมของตัวแปร L^* a^* และ b^* โดยที่ L^* เป็นค่าความสว่าง (Lightness) a^*เป็นค่าความเป็นสีแดง (Redness) และ b^* เป็นค่าความเป็นสีเหลือง (Yellowness) แล้วนำไปคำนวนค่าค่าความแตกต่างของสีทั้งหมด (ΔE^*) ดังแสดงในสมการที่ 22

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \qquad (22)$$

เมื่อ L^*, a^* และ b^* คือ ค่าความสว่าง ค่าความแดงและค่าความเหลืองของตัวอย่างที่เวลาใด ๆ L_0^*, a_0^* และ b_0^* คือค่าสีของตัวอย่างก่อนทำแห้ง

3.5.2 การหดตัว

การหดตัวของตัวอย่างในการศึกษานี้ประเมินจากภาพถ่ายของตัวอย่างก่อน และหลังกระบวนการทำแห้ง วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพ (Image Processing) ซึ่งใช้หลักการในการเปลี่ยนสีรูปภาพเฉพาะส่วนของตัวอย่างเป็นสีเทา และตัดพื้นหลังออกให้ได้เฉพาะพื้นที่ของตัวอย่าง ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยจำนวนพิกเซลแล้วจึงเปลี่ยนเป็น ค่าพื้นที่ได้โดยใช้กราฟเทียบมาตรฐาน จากนั้นจึงนำค่าพื้นที่ได้ไปหาค่าร้อยละอัตราส่วนการหดตัว (S) ดังสมการที่ 23

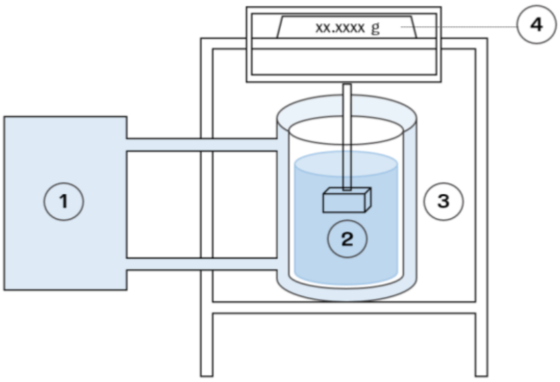
$$S = \left(1 - \frac{\text{พื้นที่ผิวของตัวอย่างในระหว่างการทำแห้ง}}{\text{พื้นที่ผิวของตัวอย่างก่อนการทำแห้ง}}\right) \times 100 \qquad (23)$$

3.5.3 สมบัติการคืนกลับน้ำ

สมบัติการคืนกลับน้ำของตัวอย่างทำได้โดยการติดตามน้ำหนักตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เกิดการดูดคืนน้ำกลับเข้าไปในชิ้นตัวอย่างเมื่อจุ่มตัวอย่างแห้งลงในน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ภาพที่ 3 แสดงชุดอุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์การคืนกลับน้ำ ตลอดการทดลองน้ำหนักตัวอย่างจะถูกบันทึกทุก 1 นาที จนตัวอย่างมีน้ำหนักคงที่ อัตราส่วนการคืนกลับน้ำคำนวณได้จากสมการที่ 24

$$\text{อัตราการคืนตัว } (RR) = \frac{M_t - M_i}{M_{eq} - M_i} \qquad (24)$$

เมื่อ M_t คือ น้ำหนักของชิ้นมะม่วงอบแห้งที่เวลาใด ๆ M_{eq} คือ น้ำหนักที่สมดุลของชิ้นมะม่วงอบแห้งและ M_i คือ น้ำหนักเริ่มต้นของชิ้นมะม่วงอบแห้ง



ภาพที่ 3 เครื่องวิเคราะห์การคืนตัว
ประกอบไปด้วย (1) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (2) ตะแกรงใส่ตัวอย่าง (3) กระบอกอลูมิเนียม (4) เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด 4 ตำแหน่ง

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติในการศึกษานี้ทำด้วยโปรแกรม SPSS software v.18 ข้อมูลจากการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์ความแตกต่างค่าเฉลี่ยของตัวแปรทางสถิติด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (one-way ANOVA) และทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของตัวแปรด้วยวิธี Duncan’s Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยการศึกษานี้จะทำ 3 ซ้ำในทุกการทดลอง

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 จลนพลศาสตร์การทำแห้งของมะม่วงสุก

4.1.1 พฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุก

พฤติกรรมการทำแห้งตัวอย่างในการศึกษานี้พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของตัวอย่างกับเวลาในการทำแห้งที่พบจากการทดลอง ซึ่งความสัมพันธ์นี้อธิบายได้ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้อธิบายพฤติกรรมการทำแห้ง ได้แก่ Lewis, Page และ Henderson and Pabis การคัดเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับอธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวจากความสอดคล้องของแบบจำลองกับผลการทดลองด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติ คือ R^2, RMSE และ χ^2 ตารางที่ 5 แสดงค่าคงที่ของแบบจำลอง และค่าพารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับแสดงความสอดคล้องของแบบจำลองกับผลการทดลอง พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Lewis มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์การทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อน เนื่องจากมีค่า R^2 สูงที่สุด อยู่ในช่วง 0.98499 – 0.99119 และมีค่า RMSE และ χ^2 ต่ำที่สุด อยู่ในช่วง 0.022200 – 0.024463 และ 0.000493 – 0.000617 ตามลำดับ สอดคล้องกับการเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายจลนพลศาสตร์การทำแห้งของสับปะรดด้วยลมร้อน (Malaikritsanachalee et al., 2018)

สำหรับพฤติกรรมการทำแห้งตัวอย่างด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page มีความเหมาะสมในการอธิบายพฤติกรรมการทำแห้งตัวอย่างด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำเนื่องจากมีค่า R^2 สูงที่สุด ในช่วง 0.98152 – 0.99082 รวมทั้งมีค่า RMSE และ χ^2 ต่ำที่สุด อยู่ในช่วง 0.022171 – 0.026151 และ 0.000493– 0.000686 ตามลำดับ ซึ่งมีความสอดคล้องกับการเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายจลนพลศาสตร์การทำแห้งของมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่สภาวะความดันต่ำ (Malaikritsanachalee, Choosri, & Choosri, 2020) และการทำแห้งกีวีด้วยวิธีการทำแห้งแบบสุญญากาศ (Orikasa et al., 2014)

ตารางที่ 5 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการทำแห้งด้วยลมร้อน และ ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ

แบบจำลอง	สภาวะการทำแห้ง	ค่าคงที่ในแบบจำลอง		R^2	RMSE($\times10^2$)	χ^2($\times10^5$)
การทำแห้งด้วยลมร้อน						
	T50V1.0	k=0.000071		0.99119	0.023434	0.000551
	T50V1.5	k=0.000089		0.98984	0.02414	0.000617
	T50V2.0	k=0.000080		0.99016	0.023184	0.000538
	T60V1.0	k=0.000085		0.98975	0.024463	0.000601
Lewis	T60V1.5	k=0.000105		0.98902	0.024176	0.000585
	T60V2.0	k=0.000123		0.98872	0.022200	0.000493
	T70V1.0	k=0.000105		0.98917	0.022664	0.000514
	T70V1.5	k=0.000149		0.98646	0.022371	0.000502
	T70V2.0	k=0.000174		0.98499	0.024067	0.000580
	T50V1.0	k=0.000070	n=1.00123	0.99119	0.023435	0.000551
	T50V1.5	k=0.000106	n=0.98184	0.98984	0.024814	0.000618
	T50V2.0	k=0.000080	n=1.01251	0.99016	0.023184	0.000539
	T60V1.0	k=0.000076	n=1.01264	0.98975	0.024463	0.000602
Page	T60V1.5	k=0.000105	n=1.00014	0.98902	0.024176	0.000586
	T60V2.0	k=0.000133	n=0.99200	0.98872	0.022200	0.000494
	T70V1.0	k=0.000108	n=0.99746	0.98917	0.022664	0.000515
	T70V1.5	k=0.000126	n=1.01815	0.98649	0.022351	0.000501
	T70V2.0	k=0.000168	n=1.00390	0.98499	0.024067	0.000581
	T50V1.0	k=0.000066	a=0.986709	0.98989	0.025113	0.000632
	T50V1.5	k=0.000079	a=1.007416	0.98620	0.028927	0.000838
	T50V2.0	k=0.000079	a=0.959552	0.98465	0.023184	0.000538
	T60V1.0	k=0.000080	a=0.980618	0.98874	0.025641	0.000659
Henderson and Pabis	T60V1.5	k=0.000093	a=0.98151	0.98299	0.030083	0.000907
	T60V2.0	k=0.000096	a=0.92219	0.96365	0.039852	0.001591
	T70V1.0	k=0.000082	a=0.92177	0.97084	0.037195	0.001386
	T70V1.5	k=0.000100	a=0.88398	0.91631	0.055625	0.003100
	T70V2.0	k=0.000151	a=0.98273	0.96796	0.035163	0.001239

ตารางที่ 5 (ต่อ)

แบบจำลอง	สภาวะการทำแห้ง	ค่าคงที่ในแบบจำลอง		R^2	RMSE($\times10^2$)	χ^2($\times10^5$)
การทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ						
Lewis	T50P6	k=0.000106		0.9897	0.024078	0.000581
	T50P8	k=0.000114		0.9886	0.025353	0.000645
	T50P10	k=0.000123		0.98899	0.023641	0.000561
	T60P6	k=0.000085		0.99017	0.024375	0.000596
	T60P8	k=0.000094		0.98989	0.025455	0.00065
	T60P10	k=0.000232		0.98172	0.022490	0.000507
	T70P6	k=0.000077		0.99056	0.026408	0.000699
	T70P8	k=0.000156		0.98672	0.022266	0.000497
	T70P10	k=0.000229		0.98137	0.023809	0.000569
Page	T50P6	k=0.000030	n=1.133833	0.99082	0.022732	0.000518
	T50P8	k=0.000039	n=1.113687	0.98943	0.024412	0.000598
	T50P10	k= 0.000058	n=1.078645	0.98942	0.023182	0.000539
	T60P6	k= 0.000034	n=1.093333	0.99068	0.023727	0.000565
	T60P8	k=0.000033	n=1.110689	0.99062	0.024516	0.000603
	T60P10	k=0.000119	n=1.074075	0.9821	0.022252	0.000497
	T70P6	k=0.000044	n=1.056687	0.99075	0.026151	0.000686
	T70P8	k=0.000108	n=1.03937	0.98683	0.022171	0.000493
	T70P10	k=0.000152	n=1.045595	0.98152	0.023712	0.000564
Henderson and Pabis	T50P6	k=0.000087	a= 1.011545	0.97353	0.038596	0.001493
	T50P8	k=0.000123	a=1.031414	0.98514	0.028939	0.000839
	T50P10	k=0.000109	a= 1.002997	0.98120	0.030895	0.000956
	T60P6	k=0.000077	a=0.998450	0.98721	0.027803	0.000775
	T60P8	k=0.000093	a=1.049427	0.98984	0.025513	0.000652
	T60P10	k=0.000178	a=0.922078	0.90760	0.050562	0.002562
	T70P6	k=0.000085	a=1.073980	0.98755	0.030341	0.000922
	T70P8	k=0.000121	a=0.921357	0.94614	0.044841	0.002015
	T70P10	k=0.000214	a=0.973869	0.97467	0.027761	0.000772

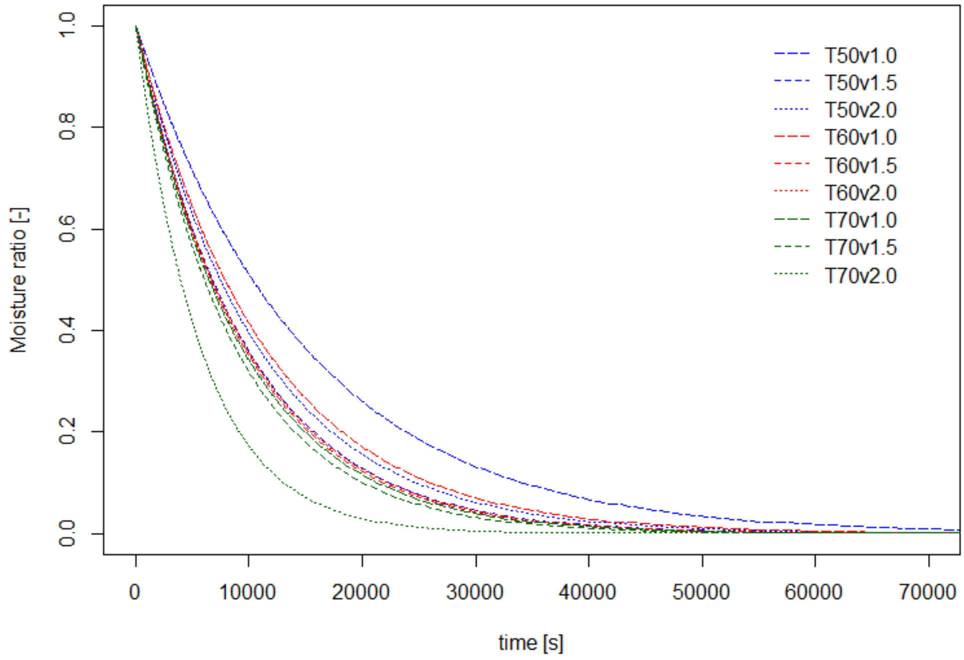
ภาพที่ 4 แสดงพฤติกรรมการทำแห้งตัวอย่างด้วยลมร้อน (ก) และลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ (ข) ด้วยเส้นโค้งการทำแห้งที่สภาวะการทำแห้งต่าง ๆ พบว่า ในช่วงแรกของกระบวนการทำแห้งความชื้นของตัวอย่างลดลงอย่างรวดเร็วและจะมีการลดของความชื้นช้าลงตามลำดับจนถึงช่วงท้ายของกระบวนการทำแห้งซึ่งความชื้นของตัวอย่างสมดุลกับสภาวะในกระบวนการทำแห้งเรียกว่า ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ซึ่งความชื้นของตัวอย่างจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงอีกต่อไปหรือมีอัตราการทำแห้งเท่ากับ 0 เนื่องจาก สาเหตุที่พฤติกรรมการทำแห้งในทุกสภาวะมีลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากในช่วงเริ่มต้นกระบวนการทำแห้งชิ้นตัวอย่างมีความชื้นสูงทำให้ความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำภายในชิ้นตัวอย่างกับความดันไอน้ำในอากาศมีค่าสูง จึงส่งผลให้มีแรงขับของการถ่ายโอนมวลสูง เมื่อกระบวนการทำแห้งดำเนินไปจนความดันไอน้ำภายในชิ้นตัวอย่างลดลงเนื่องจากความชื้นในตัวอย่างลดลงส่งผลให้แรงขับของการถ่ายโอนมวลลดต่ำลงตามไปด้วย (Crank, 1975; Whitman, 1962) พฤติกรรมการทำแห้งแบบนี้พบได้ในทุกสภาวะการทำแห้ง

จากกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนพิจารณาเส้นโค้งการทำแห้งในภาพที่ 4ก. พบว่าอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในกระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงมีผลให้ความชื้นของตัวอย่างลดลงได้เร็วกว่าการใช้อุณหภูมิลมร้อนที่ต่ำกว่า และพบว่ากระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนที่ใช้ความเร็วลมร้อนที่ระดับความเร็วสูงสามารถลดความชื้นของตัวอย่างลงได้เร็วกว่าการใช้ระดับความเร็วลมที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบในสภาวะการทำแห้งที่อุณหภูมิเดียวกัน ดังนั้นการทำแห้งตัวอย่างด้วยอุณหภูมิ และความเร็วลมร้อนที่ระดับสูงส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการทำแห้งต่ำลง สอดคล้องกับงานวิจัยการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งบลูเบอร์รี่ของ López et al. (2010) และ งานวิจัยการทำแห้งมะม่วงด้วยลมร้อนของ Dissa et al. (2008)

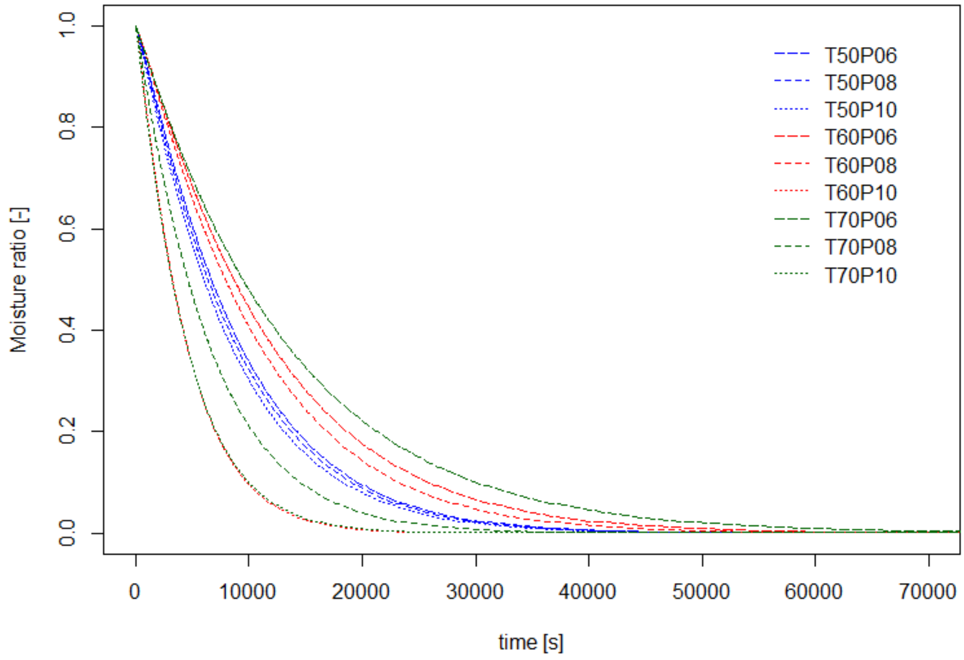
จากเส้นโค้งการทำแห้งภาพที่ 4ข. ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมของกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำพบว่าการทำแห้งโดยใช้ความดันของตัวกลาง (ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ) ที่ระดับสูงสามารถลดความชื้นในตัวอย่างลงได้เร็วกว่าการทำแห้งโดยใช้ความดันของตัวกลางในการทำแห้งที่ระดับต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการทำแห้งที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน ส่วนอุณหภูมิของตัวกลางแสดงอันตรกิริยากับความดันต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความชื้นของตัวอย่างในกระบวนการทำแห้ง พบว่าการใช้อุณหภูมิสูงร่วมกับความดันสูงในการทำแห้งส่งผลให้อัตราส่วนความชื้นของชิ้นมะม่วงลดลงได้อย่างรวดเร็วมากยิ่งขึ้น การลดอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการทำแห้งลง ส่งผลให้การลดลงของความชื้นภายในชิ้นมะม่วงลดช้าลงตลอดกระบวนการ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิและความดันช่วยเพิ่มอัตราการระเหยของน้ำภายในชิ้น

มะม่วง ชิ้นมะม่วงจึงมีการลดลงของอัตราส่วนความชื้นสูง ส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการทำแห้งลดต่ำลง

(ก)



(ข)



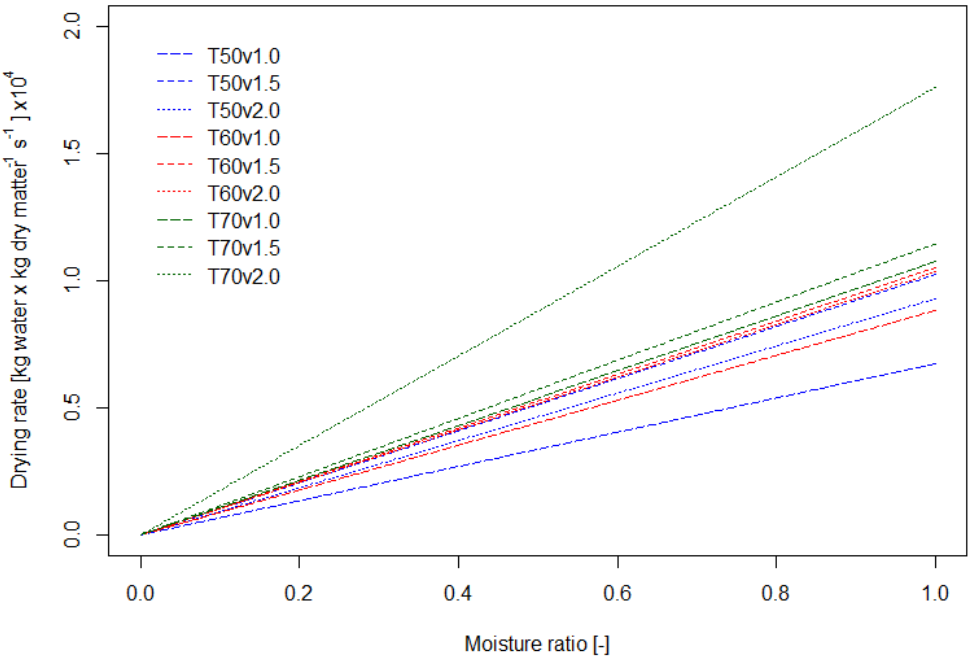
ภาพที่ 4 เส้นโค้งการทำแห้งของมะม่วงสุก ด้วยวิธีการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ

4.1.2 อัตราการทำแห้งมะม่วงสุก

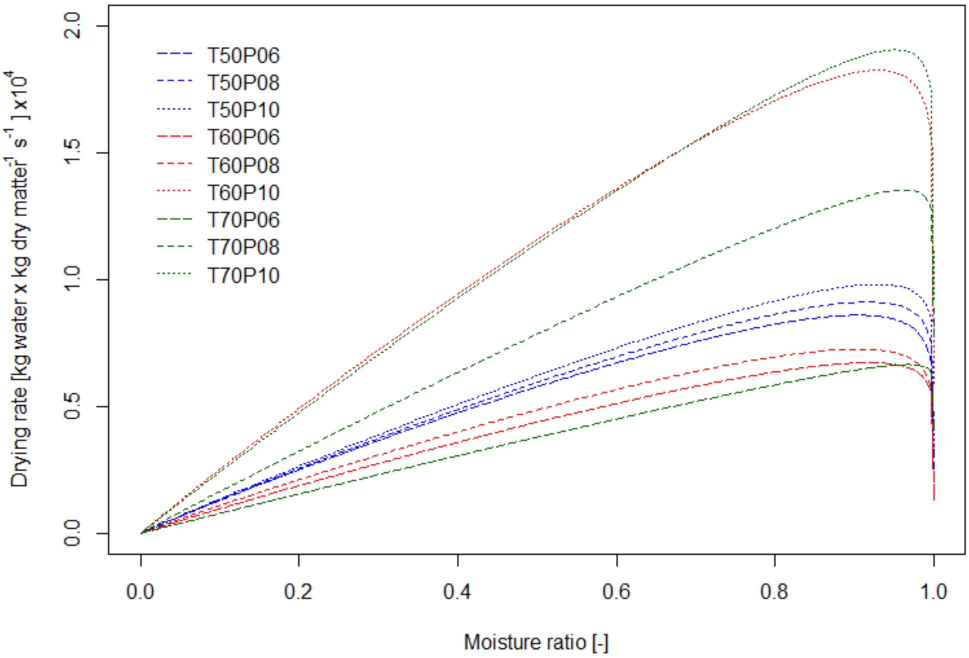
อัตราการทำแห้งมะม่วงสุกในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 5ก. พบว่ากระบวนการทำแห้งตัวอย่างด้วยลมร้อนในทุกสภาวะจะปรากฏเฉพาะช่วงอัตราการทำแห้งลดลงเท่านั้น โดยอัตราการทำแห้งมีค่าสูงที่สุดในช่วงเริ่มต้นกระบวนการ ซึ่งชิ้นตัวอย่างมีปริมาณความชื้นสูงที่สุด ทำให้มีแรงขับของการถ่ายโอนมวลสูง ส่งผลให้มีอัตราการทำแห้งสูงที่สุดในช่วงเริ่มต้นและอัตราการทำแห้งจะค่อย ๆ ลดลงเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความชื้นของตัวอย่างกระบวนการทำแห้งสิ้นสุดลง เมื่อความชื้นของชิ้นตัวอย่างอยู่ภายใต้สมดุลกับลมร้อนในกระบวนการอัตราการทำแห้งของกระบวนการจึงมีค่าเท่ากับ 0 เป็นการสิ้นสุดกระบวนการทำแห้ง ผลที่พบนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาการทำแห้งแอปเปิ้ลของ Sturm, Nuñez Vega, and Hofacker (2014)

ภาพที่ 5ข. แสดงอัตราการทำแห้งมะม่วงสุกในทุกสภาวะการทำแห้งพบว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้ความดันต่ำประกอบด้วย 2 กลไกหลัก คือ ช่วงให้ความร้อนกับชิ้นตัวอย่างเกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นกระบวนการในช่วงนี้ตัวกลางจะถ่ายโอนความร้อนให้กับตัวอย่างเพื่อให้อุณหภูมิของตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการทำแห้งเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด และช่วงอัตราการทำแห้งลดลงซึ่งเป็นช่วงที่เกิดขึ้นหลังจากอุณหภูมิชิ้นตัวอย่างสมดุลกับอุณหภูมิตัวกลางที่ใช้ทำแห้งจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลของกระบวนการทำแห้งเช่นเดียวกับที่พบในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน กลไกการทำแห้งนี้เกิดขึ้นกับการทำแห้งภายใต้สภาวะความดันต่ำที่พบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่สภาวะความดันต่ำของมะม่วงสุก (Malaikritsanachalee et al., 2020) การเพิ่มความดันและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งให้สูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการทำแห้งเพิ่มสูงขึ้นด้วย การทำแห้งที่สภาวะความดันสูงร่วมกับการใช้อุณหภูมิสูง ส่งผลให้มีอัตราการทำแห้งสูงกว่าเมื่อเทียบกับการทำแห้งที่สภาวะความดันต่ำร่วมกับการใช้อุณหภูมิต่ำ

(ก)



(ข)



ภาพที่ 5 อัตราการทำแห้งของมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยวิธีการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ

4.1.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุก

สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลถือเป็นค่าพารามิเตอร์ที่แสดงถึงประสิทธิภาพของกระบวนการทำแห้ง ตารางที่ 6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยวิธีกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน และลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำที่สภาวะต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าการทำแห้งชิ้นมะม่วงที่อุณหภูมิสูงมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลเพิ่มขึ้น เมื่อศึกษาที่ความเร็วลมเดียวกัน และการทำแห้งชิ้นมะม่วงที่ความเร็วลมสูงส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลเพิ่มขึ้น เมื่อศึกษาที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลอยู่ในช่วง 1.60×10^{-8} m^2/s - 3.48×10^{-8} m^2/s ในทุก ๆ สภาวะ จากภาพที่ 6ก. เห็นได้ชัดว่า การทำแห้งที่สภาวะความเร็วลม 2 m/s และอุณหภูมิ 70 °C มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการทำแห้งมะม่วงสุกกับสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลในกระบวนการทำแห้งด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน ดังแสดงในภาพที่ 7ก. พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วลมที่ใช้ในการทำแห้งให้สูงขึ้นสามารถช่วยให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลสูงขึ้นได้ เนื่องจาก การทำแห้งที่อุณหภูมิสูง ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ในอากาศมีอุณหภูมิสูงจะมีค่าต่ำกว่าอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ เมื่อความแตกต่างของความดันไอระหว่างลมร้อนกับชิ้นมะม่วงมีมากจึงทำให้มีอัตราการถ่ายโอนความชื้นสูงขึ้น น้ำภายในชิ้นมะม่วงจึงระเหยออกมาได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ส่งผลให้มีการลดลงของอัตราส่วนความชื้นภายในชิ้นมะม่วงสูง การทำแห้งจึงมีอัตราการทำแห้งสูงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยการทำแห้งมะเขือเทศด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนของ Abano et al. (2011) เช่นเดียวกับการทำแห้งด้วยความเร็วลมสูง เนื่องจาก การเพิ่มความเร็วลมส่งผลให้ชั้นความชื้นรอบชิ้นมะม่วงลดลง อากาศจะดูดซับความชื้นจากชิ้นมะม่วงทำให้มีความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น ก่อนจะถูกแทนที่ด้วยอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ส่งผลให้การถ่ายโอนความร้อนระหว่างชิ้นมะม่วงและลมร้อน ซึ่งเป็นตัวกลางในการทำแห้งสามารถเกิดได้ดีขึ้น ทำให้การทำแห้งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลสูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Vega-Gálvez et al. (2012) ซึ่งศึกษาการทำแห้งแอปเปิ้ล โดยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้อุณหภูมิและความเร็วลมที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 6 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล การเปลี่ยนแปลงสี และร้อยละการหดตัวของการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ

สภาวะในการทำแห้ง	**D_{eff} (m^2/s) ×10^8**	**ΔE^***	**S (%)**
กระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน			
T50V1.0	1.60 ± 0.10^{e}	29.56 ± 1.59^{a}	42.06 ± 2.54^{ab}
T50V1.5	2.03 ± 0.19^{cd}	26.24 ± 2.88^{ab}	42.98 ± 1.61^{a}
T50V2.0	1.91 ± 0.03^{d}	24.10 ± 2.05^{bc}	40.68 ± 2.44^{abc}
T60V1.0	1.82 ± 0.03^{de}	27.55 ± 0.43^{ab}	38.16 ± 0.70^{c}
T60V1.5	2.25 ± 0.05^{c}	25.04 ± 0.98^{bc}	43.72 ± 2.74^{a}
T60V2.0	2.73 ± 0.30^{b}	24.20 ± 0.37^{bc}	38.80 ± 2.05^{bc}
T70V1.0	2.24 ± 0.12^{c}	23.93 ± 3.43^{bc}	37.91 ± 0.37^{c}
T70V1.5	2.84 ± 0.14^{b}	21.64 ± 0.72^{c}	41.34 ± 1.38^{abc}
T70V2.0	3.48 ± 0.06^{a}	17.99 ± 2.37^{d}	40.68 ± 1.50^{abc}
กระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะความดันต่ำ			
T50P6	2.24 ± 0.19^{d}	17.00 ± 1.05^{bc}	21.63 ± 0.98^{b}
T50P8	2.50 ± 0.08^{c}	18.79 ± 3.40^{ab}	24.22 ± 2.43^{ab}
T50P10	2.45 ± 0.09^{cd}	21.27 ± 0.53^{a}	23.56 ± 1.92^{ab}
T60P6	1.71 ± 0.02^{ef}	11.92 ± 1.18^{ef}	23.25 ± 1.39^{ab}
T60P8	1.90 ± 0.03^{e}	15.40 ± 0.34^{cd}	22.97 ± 3.03^{ab}
T60P10	4.89 ± 0.32^{a}	19.46 ± 1.35^{ab}	24.36 ± 2.69^{ab}
T70P6	1.59 ± 0.09^{f}	10.88 ± 1.53^{f}	25.76 ± 2.16^{a}
T70P8	3.20 ± 0.08^{b}	13.61 ± 1.32^{def}	24.31 ± 1.02^{ab}
T70P10	4.91 ± 0.03^{a}	14.58 ± 1.40^{cde}	23.40 ± 1.47^{ab}

หมายเหตุ ตัวอักษร $^{a\,b\,c\,d\,e\,f}$ แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกันของแต่ละกระบวนการ

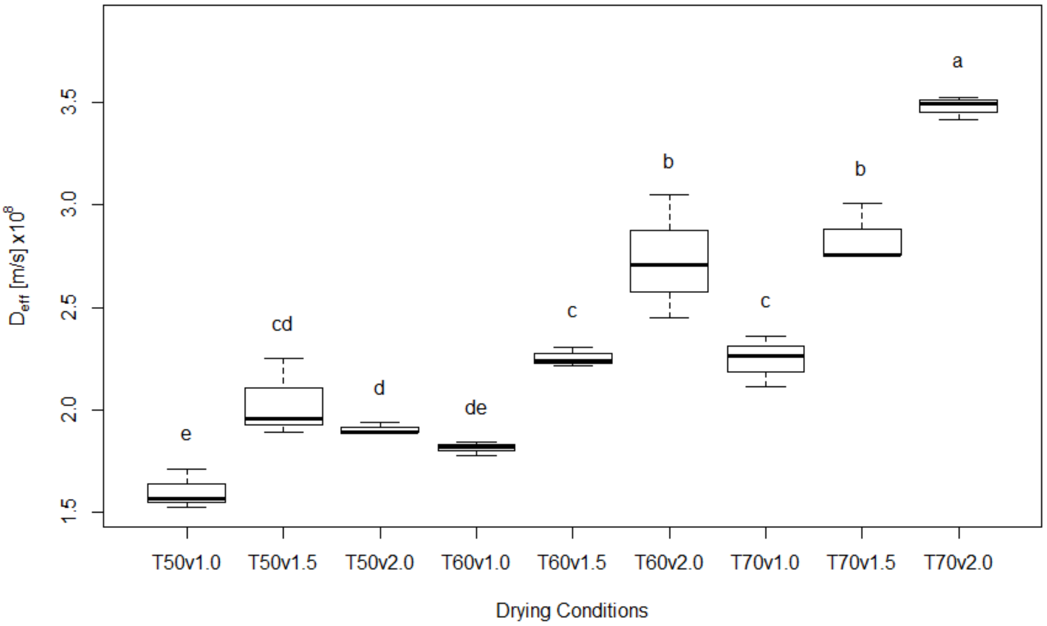
มหาวิทยาลัยศิลปากร

ในการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ พบว่าการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลอยู่ในช่วง 1.59×10^{-8} - 4.91×10^{-8} m^2/s โดยภาพที่ 6ข. ชี้ให้เห็นว่าระดับความดันที่ใช้ในการทำแห้งเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งของมะม่วงสุกมากกว่าปัจจัยจากอุณหภูมิผลที่พบสอดคล้องกับงานวิจัยการทำแห้งแครอทของ Luampon et al. (2016) การทำแห้งที่ความดันสูงแม้จะใช้อุณหภูมิที่ต่ำลงยังคงส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลสูงขึ้นได้

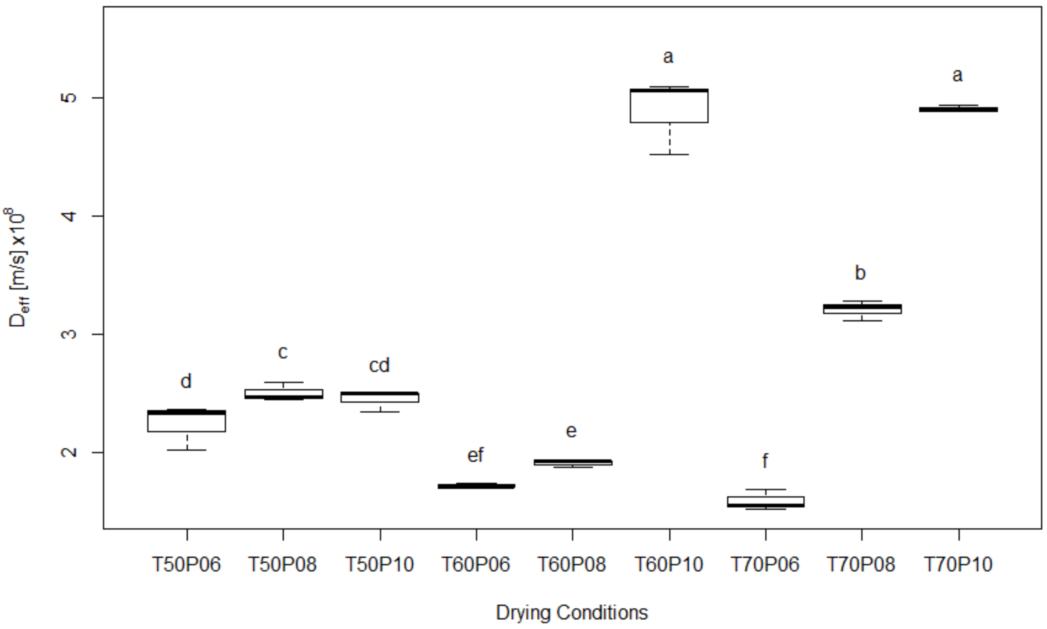
จากความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการทำแห้งมะม่วงสุกกับสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 7ข. พบว่าการเพิ่มความดันและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลสูงขึ้น เนื่องจาก ที่สภาวะความดันต่ำมีปริมาณอากาศน้อย การทำแห้งที่ความดันต่ำมากจึงทำให้มีปริมาณลมร้อนที่ใช้ในการทำแห้งต่ำลง ทำให้ชิ้นมะม่วงสัมผัสกับอากาศร้อนได้น้อยลงเมื่อการถ่ายโอนความร้อนและความชื้นโดยการพาความร้อนและมวลสาร (convective heat and mass transfer) ซึ่งถือเป็นกลไกการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารที่มีประสิทธิภาพสูงนั้นมีประสิทธิภาพต่ำลง จึงส่งผลให้การลดลงของอัตราส่วนความชื้นของชิ้นมะม่วงเกิดขึ้นได้ช้าลง เมื่อทำแห้งที่สภาวะความดันสูงร่วมกับการใช้อุณหภูมิสูง จึงส่งผลให้มีอัตราการทำแห้งสูงกระบวนการทำแห้งจึงมีประสิทธิภาพสูง เช่นเดียวกับการทำแห้งกีวี โดยใช้วิธีการทำแห้งแบบสุญญากาศของ Orikasa et al. (2014) ซึ่งพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งสามารถช่วยเพิ่มอัตราการทำแห้งให้สูงขึ้นได้

มหาวิทยาลัยศิลปากร

(ก)

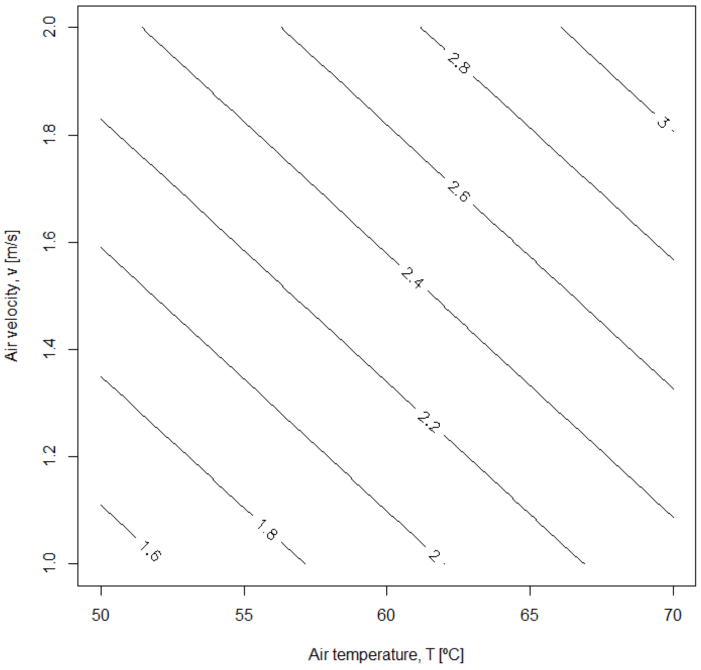


(ข)

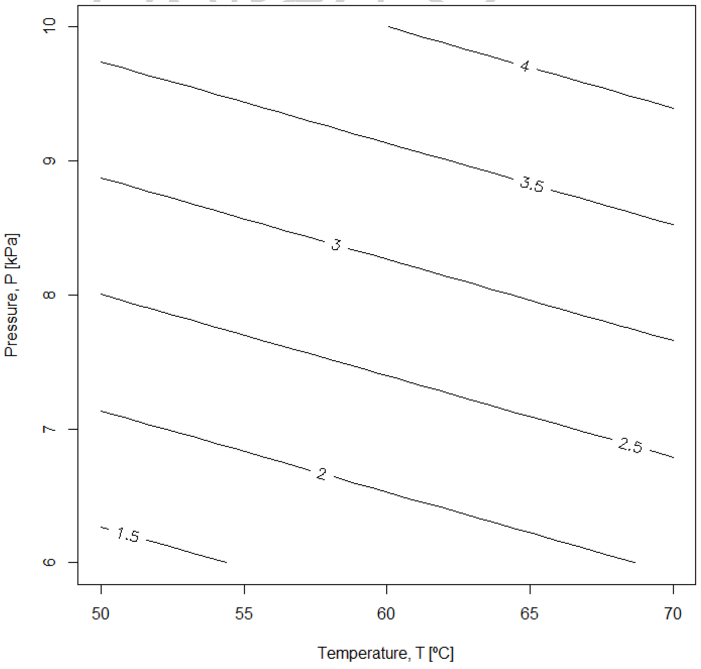


ภาพที่ 6 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ

(ก)



(ข)

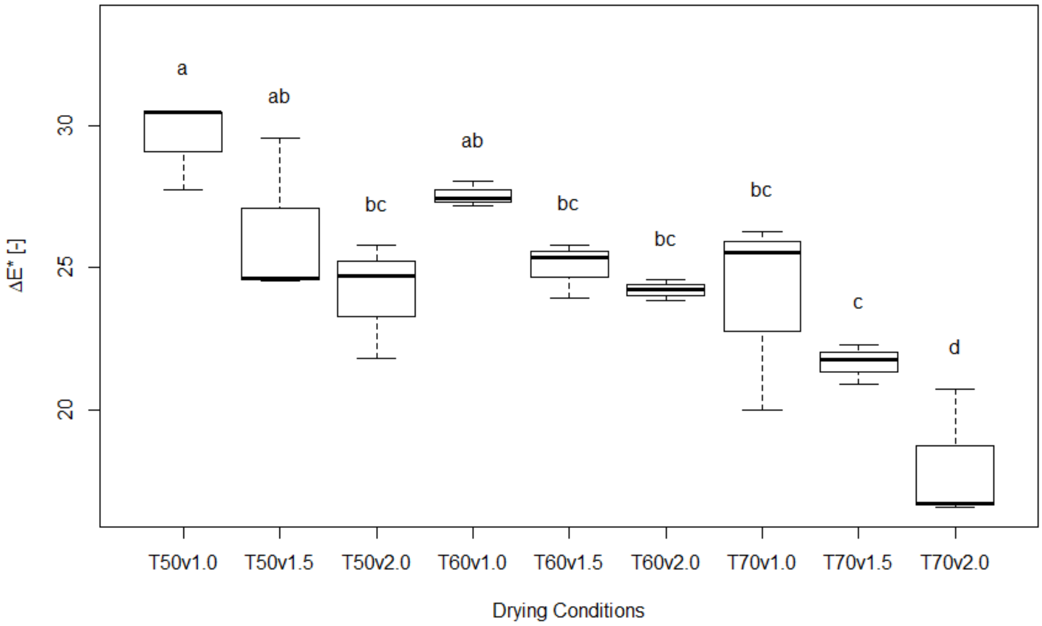


ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการทำแห้งมะม่วงสุกกับสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลในกระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ

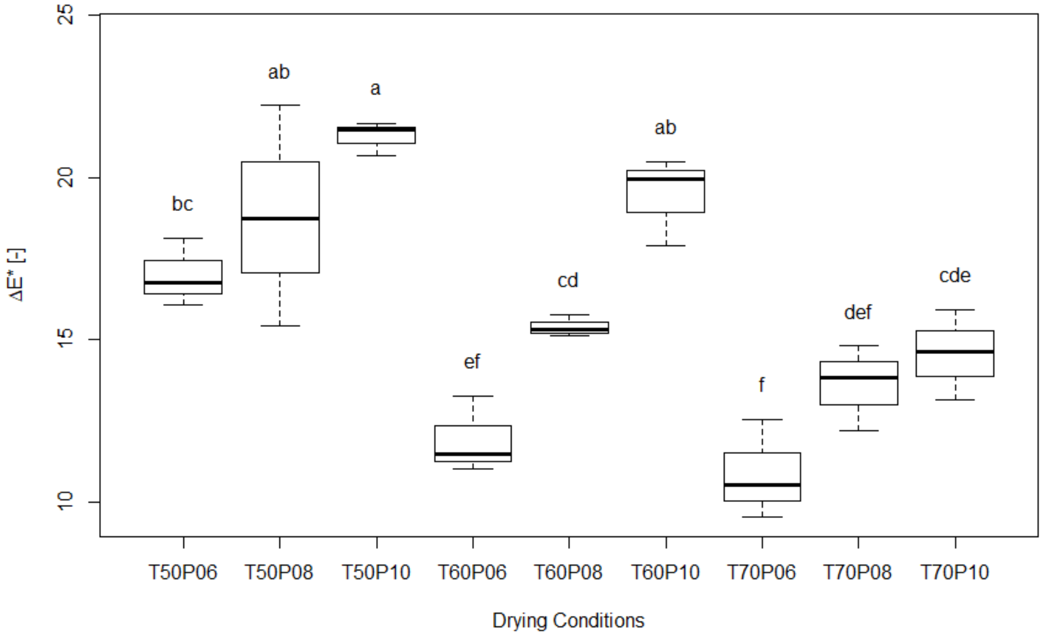
ค่าความแตกต่างของสีทั้งหมด (ΔE*) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงสีของมะม่วงสุกในระหว่างกระบวนการทำแห้ง จากภาพที่ 8ก. เห็นได้ชัดว่าชิ้นมะม่วงที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อน ที่สภาวะอุณหภูมิ 70°C และความเร็วลม 2.0 m/s มีการเปลี่ยนแปลงสีต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการทำแห้งมะม่วงสุกกับการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นมะม่วงในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน ดังแสดงในภาพที่ 9ก. พบว่า อุณหภูมิและความเร็วลมมีอิทธิพลต่อค่า ΔE* เป็นอย่างมาก โดยการเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วลมส่งผลให้มีค่า ΔE* ต่ำลง เนื่องจาก การทำแห้งที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้มีอัตราการทำแห้งสูง เมื่อการทำแห้งมีประสิทธิภาพที่ดี ทำให้มีระยะเวลาในการทำแห้งต่ำ ชิ้นมะม่วงจึงสัมผัสกับความร้อนเป็นเวลาที่สั้นลง ส่งผลให้ชิ้นมะม่วงอบแห้งมีการเปลี่ยนแปลงสีต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยการทำแห้งแอปเปิ้ล โดยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนของ Vega-Gálvez et al. (2012) โดยจะเห็นได้ว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีมากกว่าความเร็วลม เนื่องจาก การทำแห้งที่ความเร็วลมต่ำ หากใช้อุณหภูมิในการทำแห้งสูงสามารถส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงสีต่ำลงได้

การเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นมะม่วงที่ผ่านวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำที่สภาวะต่าง ๆ แสดงในภาพที่ 8ข. จะเห็นได้ว่า ชิ้นมะม่วงที่ผ่านวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ มีการเปลี่ยนแปลงสีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการทำแห้งมะม่วงสุกกับการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นมะม่วงในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 9ข. พบว่า เมื่อพิจารณาที่ระดับความดันในการทำแห้งเดียวกัน การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ชิ้นมะม่วงมีค่า ΔE* ต่ำลง เนื่องจาก การทำแห้งโดยการใช้อุณหภูมิสูง ส่งผลให้กระบวนการทำแห้งนั้นมีประสิทธิภาพดี และใช้เวลาในการทำแห้งน้อยกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งทำให้สามารถลดการเกิดสีคล้ำของชิ้นมะม่วงที่เกิดจากการที่บริเวณผิวหน้าของชิ้นมะม่วงสัมผัสกับความร้อนเป็นระยะเวลานานได้ (Argyropoulos & Müllera, 2011) และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิในการทำแห้งเดียวกัน การเพิ่มความดันที่ใช้ในการทำแห้ง กลับส่งผลให้ชิ้นมะม่วงมีค่า ΔE* สูงขึ้น เนื่องจาก ในสภาวะการทำแห้งที่ความดันสูง มีปริมาณอากาศร้อนมากกว่าสภาวะการทำแห้งที่ความดันต่ำ จึงทำให้ชิ้นมะม่วงสัมผัสกับอากาศร้อนในปริมาณที่สูงกว่า ส่งผลให้เกิดสีคล้ำบริเวณผิวหน้าของชิ้นมะม่วง (Corzo et al., 2008; Dissa et al., 2008)

(ก)

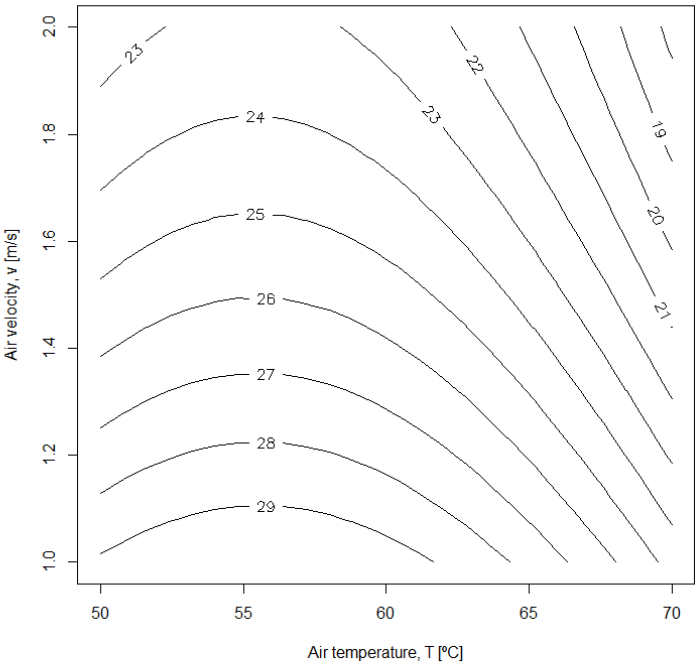


(ข)

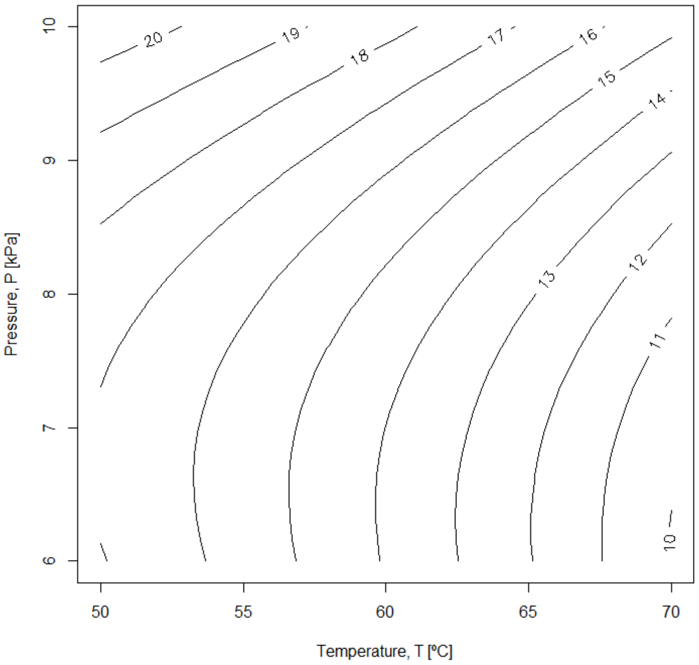


ภาพที่ 8 การเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นมะม่วงในกระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ

(ก)



(ข)



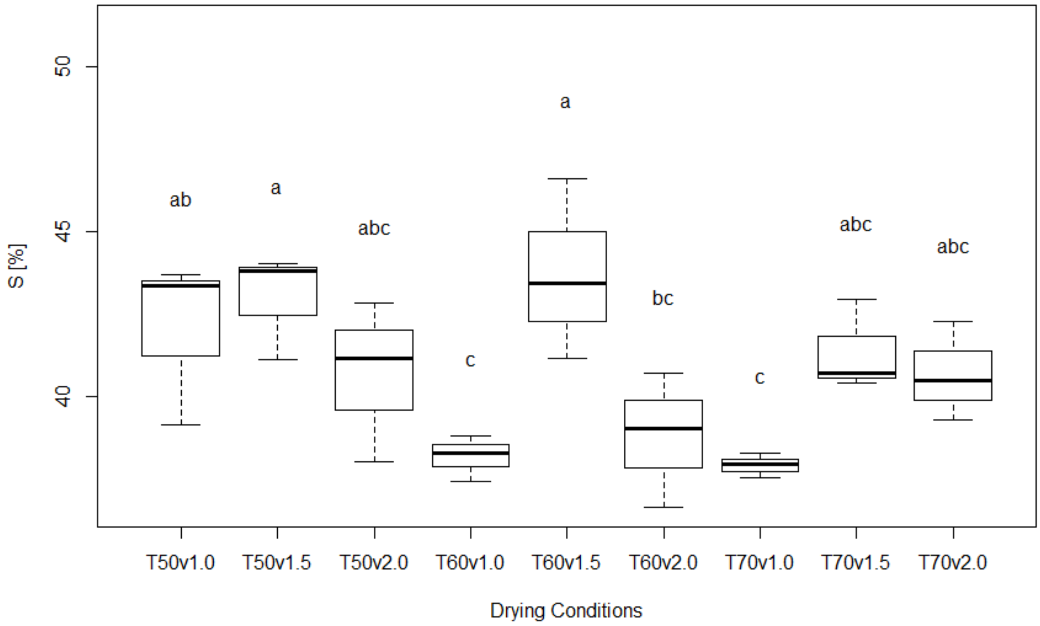
ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการทำแห้งมะม่วงสุกกับการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นมะม่วงในกระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ

4.3 การหดตัวของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้ง

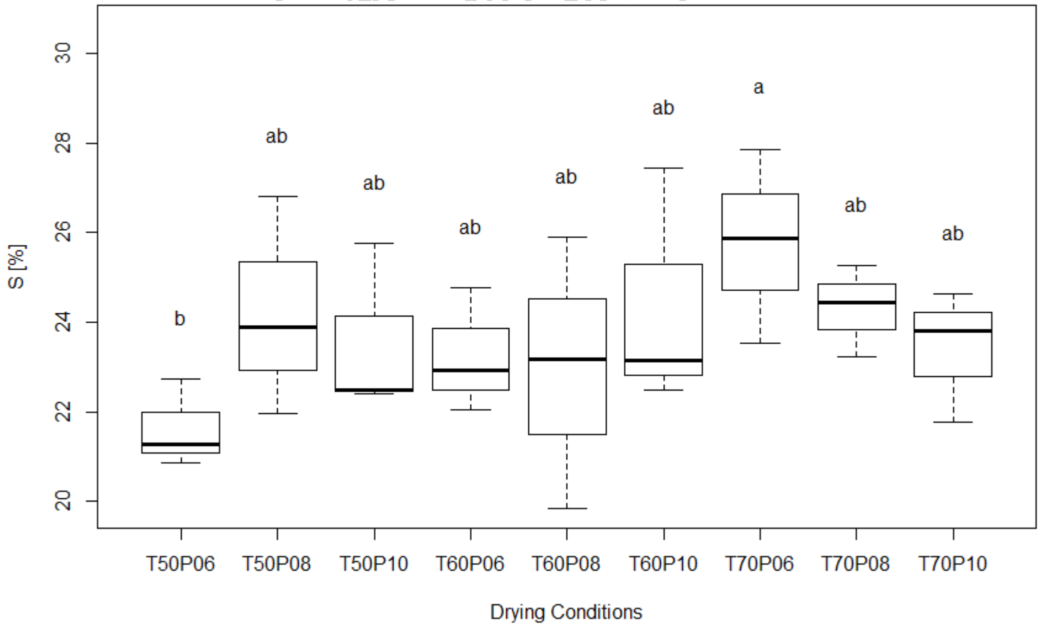
เมื่อชิ้นมะม่วงสัมผัสกับลมร้อนในระหว่างกระบวนการทำแห้ง น้ำอิสระที่อยู่ภายในชิ้นมะม่วงจะระเหยออก ทำให้ชิ้นมะม่วงมีปริมาณน้ำหรือความชื้นต่ำลง เมื่อแรงตึงผิวระหว่างน้ำและผนังเซลล์ภายในชิ้นมะม่วงลดลงจึงส่งผลให้เกิดการหดตัว (Arévalo-Pinedo & Murr, 2006) จากร้อยละการหดตัวของชิ้นมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน (ภาพที่ 10ก.) พบว่าชิ้นมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อน ที่สภาวะต่าง ๆ มีร้อยละการหดตัวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการทำแห้งมะม่วงสุกกับร้อยละการหดตัวของชิ้นมะม่วงสุกในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน ดังแสดงในภาพที่ 11ก. พบว่า การทำแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ร้อยละการหดตัวของชิ้นมะม่วงสุกมีค่าต่ำลง ในทางกลับกันการทำแห้งโดยใช้ความเร็วลมที่สูงขึ้นส่งผลให้ร้อยละการหดตัวของชิ้นมะม่วงสุกมีค่าสูงขึ้นด้วย แต่เมื่อทำแห้งที่ความเร็วลมสูงกว่า 1.8 m/s ขึ้นไป ร่วมกับใช้อุณหภูมิในการทำแห้งสูงกว่า 60 °C ขึ้นไป จะส่งผลให้ชิ้นมะม่วงอบแห้งมีค่าร้อยละการหดตัวต่ำลงได้ เนื่องจาก การทำแห้งที่ความเร็วลมกว่า 1.8 m/s ร่วมกับใช้อุณหภูมิในการทำแห้งสูงกว่า 60 °C ส่งผลให้มีอัตราการทำแห้งสูงขึ้น การทำแห้งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ชิ้นมะม่วงเกิดเปลือกแข็ง (case-hardening) ซึ่งเป็นลักษณะที่พบได้ในการทำแห้งที่อุณหภูมิและความเร็วลมที่สูง (Gulati & Datta, 2015) การเกิดเปลือกแข็งบริเวณผิวหน้าของชิ้นมะม่วง ส่งผลให้มีการหดตัวต่ำลง

ในการศึกษาร้อยละการหดตัวของชิ้นมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 10ข. เห็นได้ชัดว่า ชิ้นมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ มีร้อยละการหดตัวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งจากความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการทำแห้งมะม่วงสุกกับร้อยละการหดตัวของชิ้นมะม่วงในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 11ข. พบว่า การทำแห้งที่อุณหภูมิสูงร่วมกับความดันสูง มีแนวโน้มที่จะส่งผลให้ชิ้นมะม่วงเกิดการหดตัวต่ำลงได้ โดยการเพิ่มอุณหภูมิการทำแห้งให้สูงขึ้นส่งผลให้ชิ้นมะม่วงมีร้อยละการหดตัวต่ำลง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 60 °C ขึ้นไป การเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้ชิ้นมะม่วงมีร้อยละการหดตัวสูงขึ้นกว่าเดิม นอกจากนี้ การเพิ่มความดันที่ใช้ในการทำแห้งยังส่งผลให้ชิ้นมะม่วงมีร้อยละการหดตัวสูงขึ้นอีกด้วย แต่เมื่อทำแห้งที่ความดันสูงกว่า 8.5 kPa จะทำให้ชิ้นมะม่วงมีร้อยละการหดตัวต่ำลง

(ก)

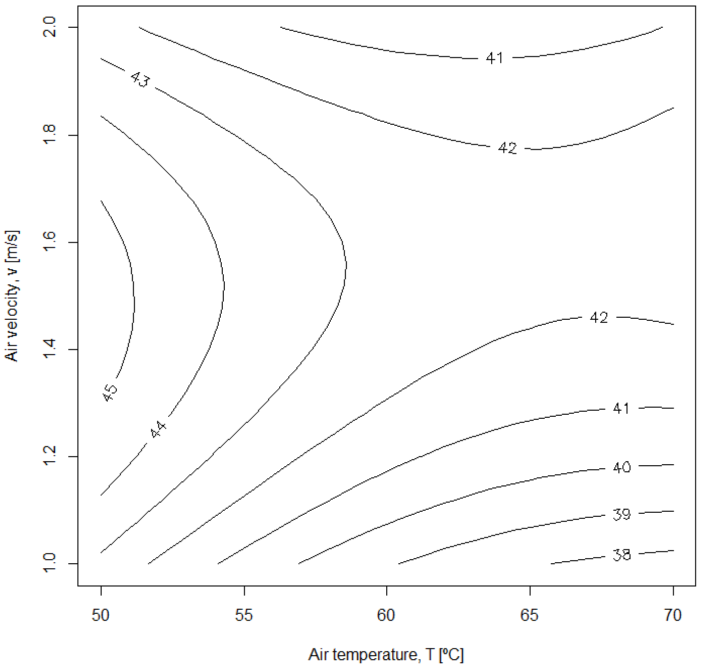


(ข)

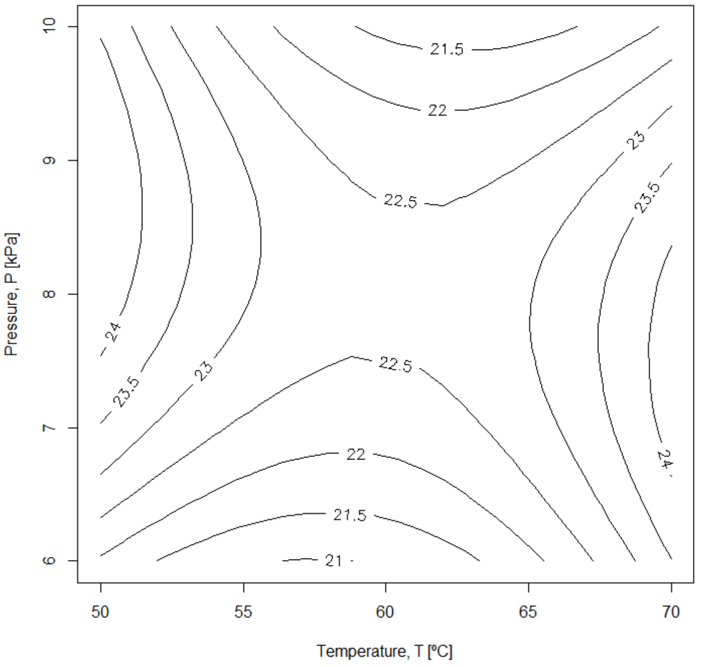


ภาพที่ 10 ร้อยละการหดตัวของชิ้นมะม่วงในกระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ

(ก)



(ข)



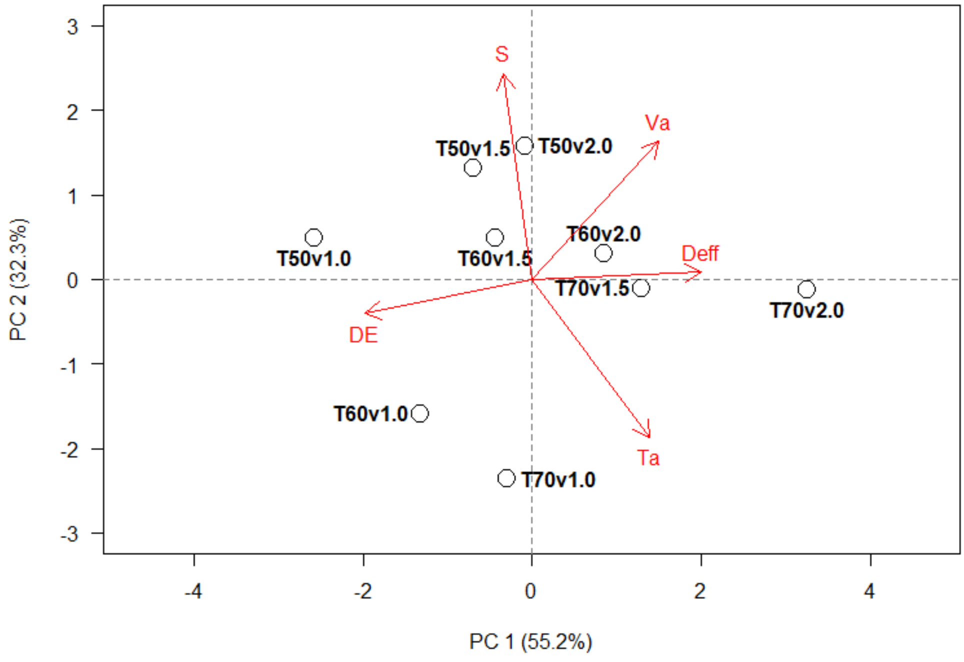
ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการทำแห้งมะม่วงสุกกับร้อยละการหดตัวของชิ้นมะม่วงในกระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ

4.4 ความสัมพันธ์ของสภาวะการทำแห้งกับ D_{eff}, ΔE^* และ S

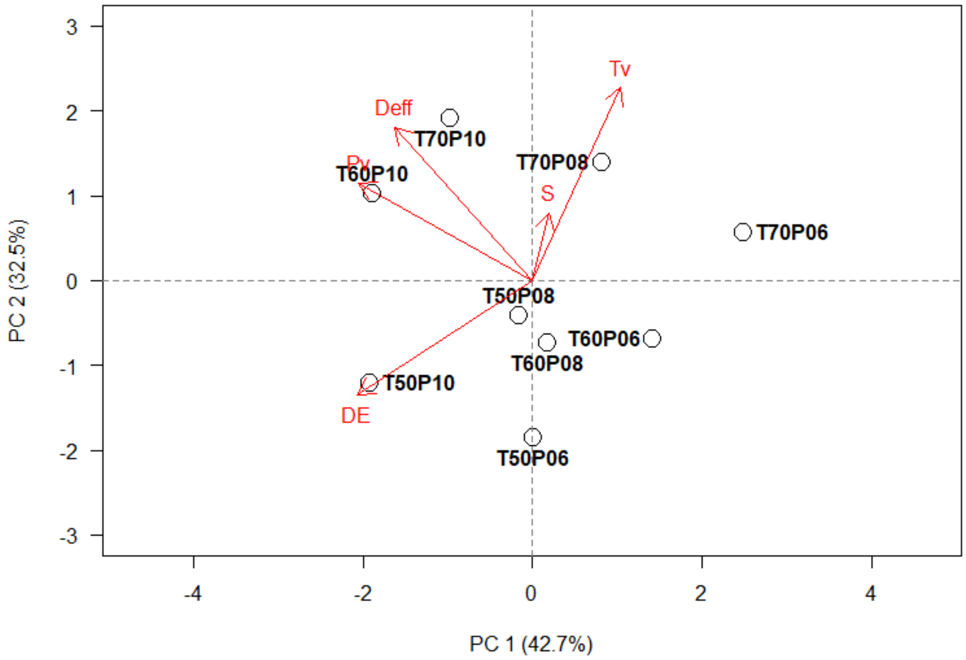
ความสัมพันธ์ของตัวแปรในสภาวะของกระบวนการทำแห้งกับ D_{eff}, ΔE^* และ S จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Principle Component Analysis (PCA) สำหรับกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแสดงดังภาพที่ 12ก. พบว่าความแปรปรวนของข้อมูลที่ศึกษาได้มีค่าร้อยละ 87.5 และจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (Multivariate correlation) ด้วยวิธี PCA ของการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ พบว่าความแปรปรวนของข้อมูลที่ศึกษาได้มีค่าร้อยละ 75.2 ดังแสดงภาพที่ 12ข.

งานวิจัยนี้ต้องการพัฒนาเพื่อให้ได้กระบวนการทำแห้งที่มีประสิทธิภาพ และได้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีคุณภาพดี กล่าวคือมีการเปลี่ยนแปลงด้านสีและการหดตัวต่ำ ซึ่งสังเกตได้จากการที่มีค่า D_{eff} สูง เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล หรือ ค่า D_{eff} บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการทำแห้งนั้น ๆ รวมทั้งมี ΔE^* และ S ต่ำ เนื่องจากเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงสีสุทธิและร้อยละการหดตัวของชิ้นมะม่วง ในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนของมะม่วงสุก ที่สภาวะต่าง ๆ เห็นได้ชัดว่า สภาวะของกระบวนการที่อยู่บนองค์ประกอบหลักที่ 1 ที่มีคะแนนเป็นบวก มี D_{eff} สูง และมีค่า ΔE^* และ S ต่ำ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงนำสภาวะการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C และความเร็วลม 2.0 m/s มาใช้ในการเปรียบเทียบกับการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนสภาวะความดันต่ำต่อไป เนื่องจากสภาวะนี้เป็นสภาวะที่ดีที่สุดของกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยด้วยลมร้อนที่ทำการศึกษา

(ก)



(ข)



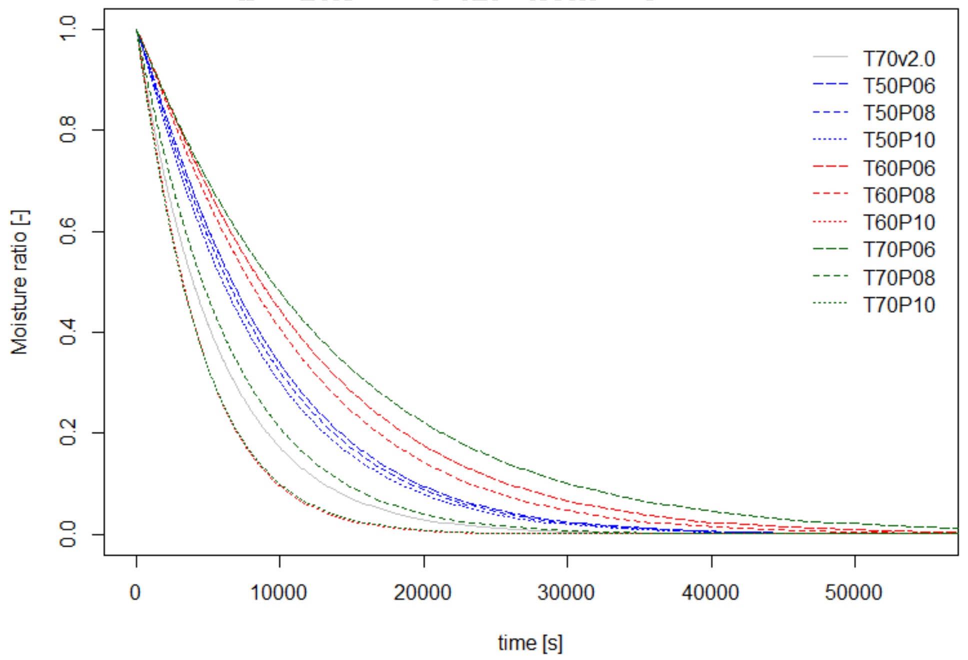
ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการทำแห้งมะม่วงสุกกับ D_{eff}, ΔE^* และ S ของชิ้นมะม่วงในกระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการทำแห้งมะม่วงสุกกับ D_{eff}, ΔE^* และ S ของชิ้นมะม่วงในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ พบว่าสภาวะของกระบวนการที่อยู่บนองค์ประกอบหลักที่ 1 ที่มีคะแนนเป็นลบ มีค่า D_{eff} สูง และมีค่า ΔE^* ต่ำ เมื่อพิจารณาถึงค่า S จะเห็นได้ว่า ค่า S หรือการหดตัวมีอิทธิพลต่อความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นต่ำมาก เนื่องจาก ในแต่ละสภาวะการทำแห้ง ชิ้นมะม่วงสุกมีค่าร้อยละการหดตัวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังนั้น การทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำที่อุณหภูมิ 70 °C และความดัน 10 kPa จึงเป็นสภาวะการทำแห้งที่ดีที่สุดของวิธีการทำแห้งนี้ กล่าวคือ เป็นสภาวะการทำแห้งที่มีค่า D_{eff} สูง และมีค่า ΔE^* ต่ำลง

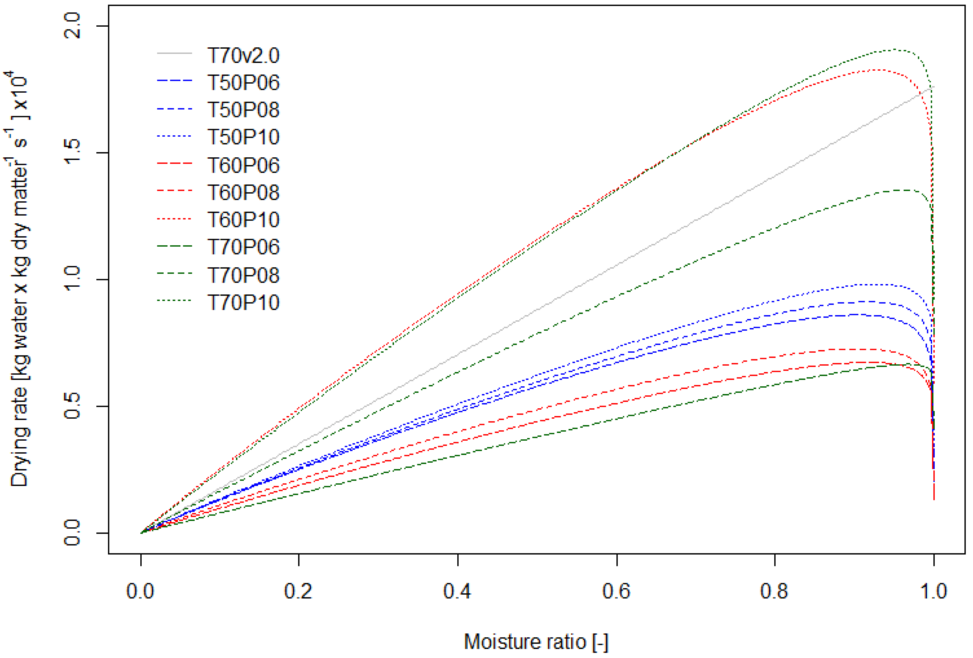
เมื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างเส้นโค้งการทำแห้งของมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะที่ดีที่สุด (อุณหภูมิ 70 °C และความเร็วลม 2.0 m/s) กับเส้นโค้งการทำแห้งของมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 13 ชี้ให้เห็นว่า การทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำที่สภาวะอุณหภูมิสูงร่วมกับการใช้ความดันสูง (T70P08, T70P10) ส่งผลให้อัตราการลดลงของความชื้นภายในชิ้นมะม่วงเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วมากกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้ความดันบรรยากาศ เนื่องจาก

ในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ภายในห้องทำแห้งจะถูกปรับให้มีความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำภายในชิ้นมะม่วงกับความดันภายในห้องทำแห้งมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้ความดันบรรยากาศ แรงขับในการเกิดการถ่ายโอนมวลจึงมีมากกว่า ส่งผลให้น้ำอิสระในชิ้นมะม่วงระเหยออกมาได้ง่ายและรวดเร็วมากขึ้น

เช่นเดียวกับการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างอัตราการทำแห้งของมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C และความเร็วลม 2.0 m/s และวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ จะเห็นได้ว่า การทำแห้งมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ โดยการใช้อุณหภูมิสูงร่วมกับการใช้ความดันสูง (T70P08, T70P10) มีอัตราการทำแห้งสูงกว่าวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้ความดันบรรยากาศ ดังแสดงในภาพที่ 14 เนื่องจากอัตราการลดลงของความชื้นภายในชิ้นมะม่วงที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำที่อุณหภูมิสูงร่วมกับความดันสูงมีมากกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้ความดันบรรยากาศ

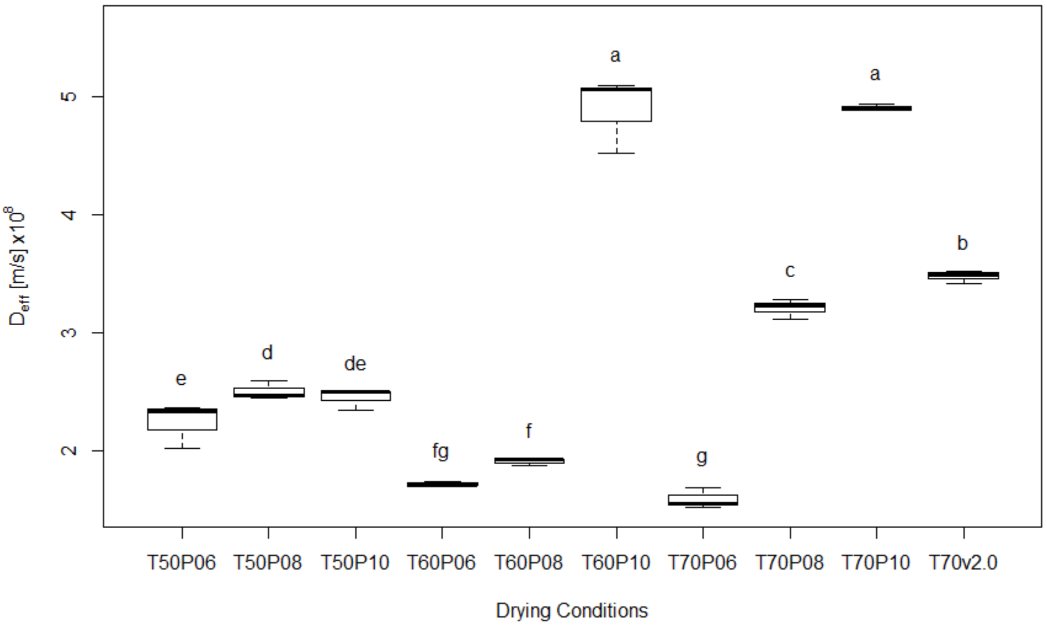


ภาพที่ 13 เส้นโค้งการทำแห้งของมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วลม 2.0 m/s) และลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ



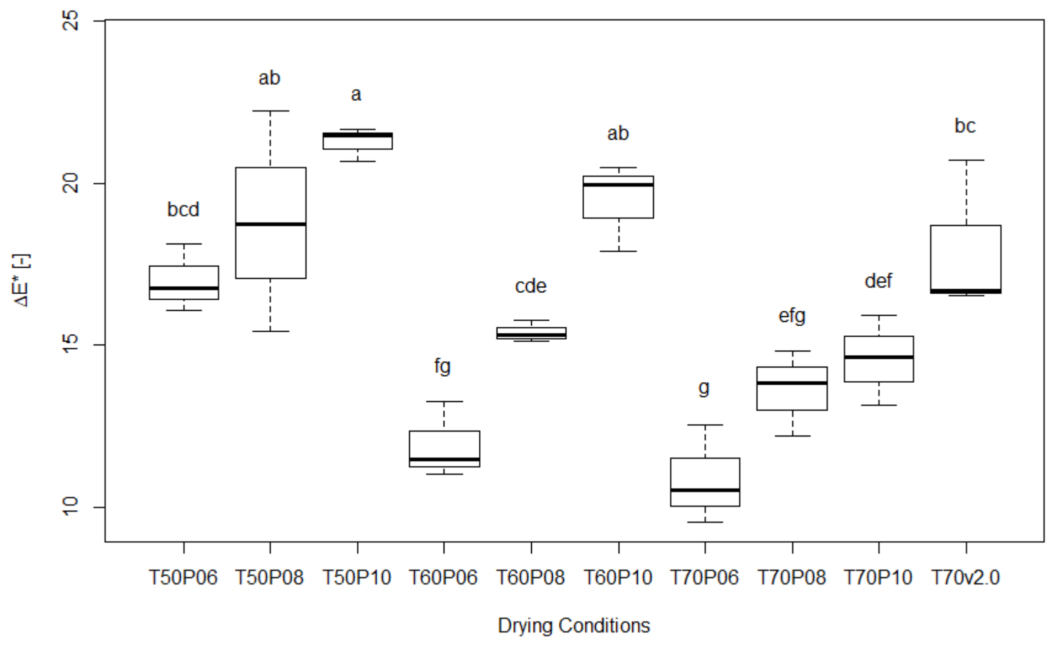
ภาพที่ 14 อัตราการทำแห้งของมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วลม 2.0 m/s) และลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ

เป็นไปในทางเดียวกันกับการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน ที่อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วลม 2.0 m/s และการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ ซึ่งจากการศึกษา พบว่า การทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำที่สภาวะความดันสูงร่วมกับการใช้อุณหภูมิสูง (T70P08, T70P10) ส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลต่ำกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้ความดันบรรยากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังแสดงในภาพที่ 15 เนื่องจาก การทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ โดยใช้อุณหภูมิและความดันสูง ส่งผลให้มีอัตราการทำแห้งสูงกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้ความดันบรรยากาศ



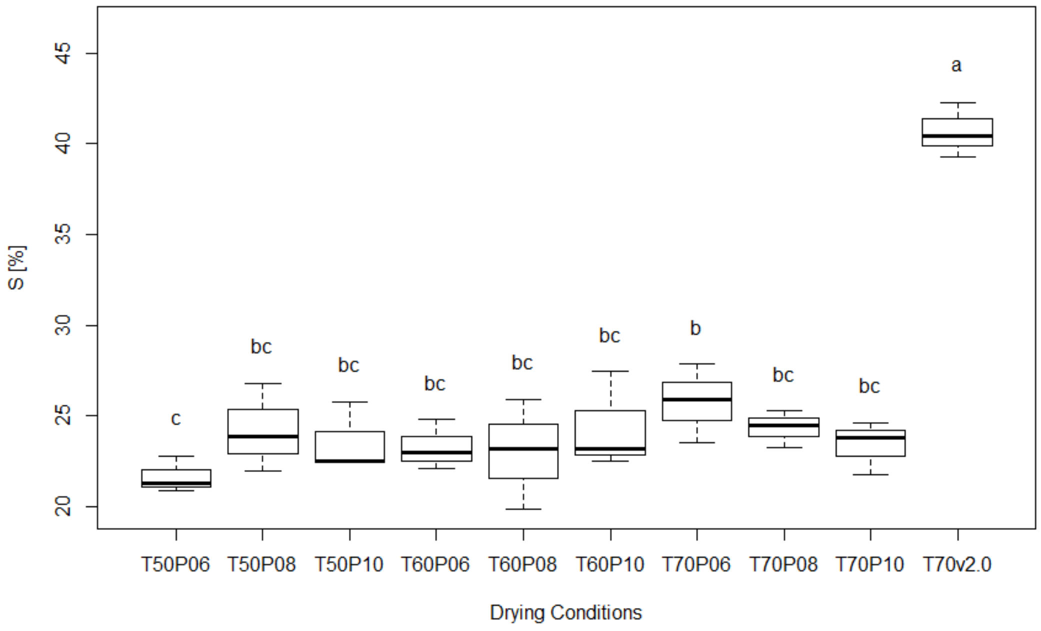
ภาพที่ 15 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วลม 2.0 m/s) และลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ

ในการศึกษาและเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นมะม่วงสุกระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน ที่อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วลม 2.0 m/s และลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำที่สภาวะต่าง ๆ จะเห็นได้ว่า การทำแห้งมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนและลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังแสดงในภาพที่ 16 เนื่องจาก กระบวนการทำแห้งทั้งสองวิธียังคงเป็นวิธีที่มีออกซิเจนอยู่ในระบบเช่นเดียวกัน จึงส่งผลให้มีการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบอาศัยเอนไซม์ภายในชิ้น ซึ่งจัดเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในการเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นผลไม้อบแห้ง (Mahayothee, Komonsing, Khuwijitjaru, Nagle, & Müller, 2018)



ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลงสีของการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วลม 2.0 m/s) และลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ

เมื่อศึกษาการหดตัวของการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน ที่อุณหภูมิ 70°C และความเร็วลม 2.0 m/s กับลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ พบว่า ชิ้นมะม่วงที่ผ่านวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนมีร้อยละการหดตัวสูงกว่าวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังแสดงในภาพที่ 17 เนื่องจาก กระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน การทำแห้งที่อุณหภูมิสูงกว่าค่า Tg (glass transition temperature) ของชิ้นมะม่วง ชิ้นมะม่วงจะอยู่ในสถานะคล้ายยาง (rubbery state) เมื่อชิ้นมะม่วงอยู่ในสถานะนี้ การหดตัวจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นที่ระเหยออกหรือเรียกว่าเป็นการหดตัวในอุดมคติ (ideal shrinkage) (Gulati & Datta, 2015) ซึ่งส่งผลให้เมื่อน้ำระเหยออกจะเกิดการยุบตัว โครงสร้างเนื้อเยื่อภายในชิ้นมะม่วงถูกทำลาย เป็นสาเหตุของการหดตัว นอกจากนี้ ในวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ภายในห้องทำแห้งจะมีปริมาณอากาศร้อนต่ำกว่า มีความแตกต่างระหว่างความดันภายในชิ้นมะม่วงกับความดันภายในห้องทำแห้งสูง แรงขับในการถ่ายโอนมวลและความชื้นมีค่าสูง อัตราการถ่ายโอนความร้อนและความชื้นจึงมีค่าสูงตามไปด้วย ส่งผลให้น้ำภายในชิ้นมะม่วงสามารถระเหยออกมาได้โดยมีการทำลายโครงสร้างเนื้อเยื่อของชิ้นมะม่วงต่ำลง โดยการถูกทำลายของโครงสร้างเนื้อเยื่อภายในชิ้นมะม่วงส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างภายในชิ้นอาหาร ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวของผลิตภัณฑ์อบแห้ง (Nguyen et al., 2018)

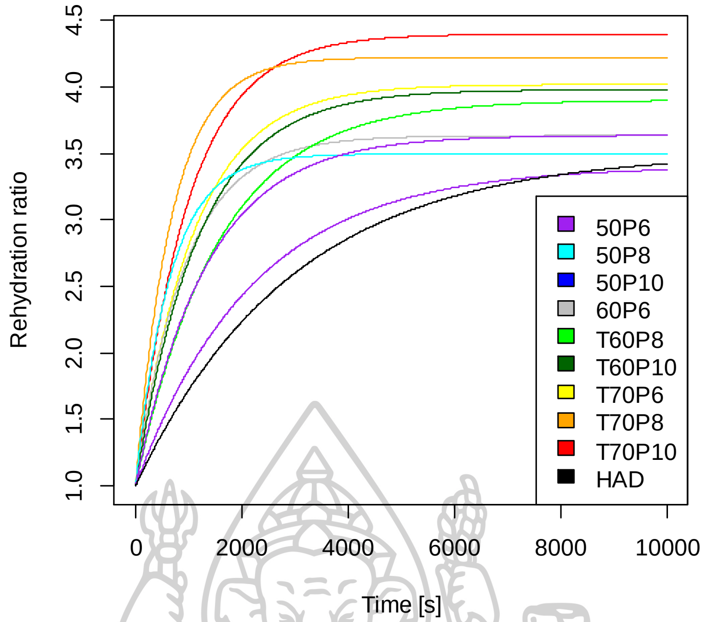


ภาพที่ 17 การหดตัวของการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วลม 2.0 m/s) และลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ

4.5 การคืนกลับน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้ง

การวิเคราะห์การคืนกลับน้ำของชิ้นมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งแล้วจะแสดงในรูปของอัตราส่วนการคืนกลับน้ำจากภาพที่ 18 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการคืนกลับน้ำกับเวลาที่ใช้ในการคืนกลับน้ำ จะเห็นได้ว่า ในช่วงแรกของการคืนกลับน้ำ อัตราการคืนกลับน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในระดับที่ช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป จนกระทั่งมีอัตราการคืนกลับน้ำคงที่หรือเข้าสู่สมดุลในที่สุด

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการคืนกลับน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน ที่อุณหภูมิ 70 °C และความเร็วลม 2.0 m/s และลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำที่สภาวะต่าง ๆ พบว่า ชิ้นมะม่วงที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำมีอัตราการคืนกลับน้ำสูงกว่าชิ้นมะม่วงที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งสมบัติการคืนกลับน้ำมีความสอดคล้องกับสมบัติการหดตัวของชิ้นมะม่วง เนื่องจากอัตราการคืนกลับน้ำขึ้นอยู่กับลักษณะการหดตัวของชิ้นมะม่วงอบแห้ง (J. V. Link et al., 2017) การหดตัวต่ำ ส่งผลให้ชิ้นมะม่วงมีปริมาณรูพรุนสูง โครงสร้างของชิ้นมะม่วงถูกทำลายน้อย น้ำจึงสามารถแพร่ผ่านเข้าไปภายในชิ้นมะม่วงได้มากขึ้น จึงส่งผลให้มีอัตราการคืนกลับน้ำสูง (Liu et al., 2017)



ภาพที่ 18 การคืนกลับน้ำของการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ 70°C ความเร็วลม 2.0 m/s) และลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ ที่สภาวะต่าง ๆ

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาตัวกลางที่ใช้ในการทำแห้งมะม่วงสุก คือลมร้อน และลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับใช้ในการพัฒนากระบวนการทำแห้ง จากข้อมูลด้านจลนพลศาสตร์การทำแห้ง และสมบัติทางเคมีกายภาพทางด้านสี การหดตัว และการคืนกลับน้ำของผลิตภัณฑ์ ผลการวิจัยพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Lewis และ Page สามารถอธิบายพฤติกรรมการทำแห้งด้วยลมร้อน และลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำได้ดีที่สุดตามลำดับ โดยพบว่าการทำแห้งด้วยตัวกลางเป็นลมร้อนนั้น การเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วลมในการทำแห้งส่งผลให้ระยะเวลาในการทำแห้งสั้นลง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลสูงขึ้น ลดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพด้านสี การหดตัว และเวลาในการคืนกลับน้ำ ดังนั้น การทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C และความเร็วลม 2 m/s เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวกลางที่เป็นลมร้อน

สำหรับการทำแห้งด้วยตัวกลางเป็นลมร้อนที่สภาวะความดันต่ำ พบว่า อัตราการทำแห้ง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล และการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์มีค่าใกล้เคียงการทำแห้งด้วยลมร้อน โดยที่ระดับความดันสูง การเพิ่มอุณหภูมิมีผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลเพิ่มขึ้น ในขณะที่การทำแห้งด้วยการใช้ความดันต่ำ การเพิ่มอุณหภูมิจะไม่มีผลต่อการเพิ่มสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล อย่างไรก็ตาม การหดตัวและเวลาในการคืนกลับน้ำของชิ้นมะม่วงจากการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำมีค่าต่ำกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน โดยการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำที่อุณหภูมิสูงร่วมกับความดันสูงส่งผลให้ชิ้นมะม่วงอบแห้งมีอัตราการคืนกลับน้ำสูงที่สุด แสดงให้เห็นว่า การใช้ลมร้อนที่สภาวะความดันต่ำเป็นตัวกลางในการทำแห้งสามารถคงคุณสมบัติด้านโครงสร้างของตัวอย่างได้ดีกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน

รายการอ้างอิง

Abano, E., Ma, H., & Qu, W. (2011). Influence of Air Temperature on the Drying Kinetics and Quality of Tomato Slices. *Journal of Food Processing & Technology,* 02. doi:10.4172/2157-7110.1000123

Arévalo-Pinedo, A., & Murr, F. E. X. (2006). Kinetics of vacuum drying of pumpkin (Cucurbita maxima): Modeling with shrinkage. *Journal of Food Engineering,* 76(4), 562-567. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.003

Argyropoulos, D., & Müllera, J. (2011). Effect of Convective Drying on Quality of Lemon Balm (Melissa Officinalis L.). *Procedia Food Science,* 1, 1932-1939. doi:https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.284

Barrera, C., Betoret, N., Betoret, E., & Fito, P. (2016). Calcium and temperature effect on structural damage of hot air dried apple slices: Nonlinear irreversible thermodynamic approach and rehydration analysis. *Journal of Food Engineering,* 189, 106-114. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.05.024

Benseddik, A., Azzi, A., Zidoune, M. N., Khanniche, R., & Besombes, C. (2019). Empirical and diffusion models of rehydration process of differently dried pumpkin slices. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences,* 18(4), 401-410. doi:https://doi.org/10.1016/j.jssas.2018.01.003

Boekel, M. (2019). Kinetic Modeling of Food Quality: A Critical Review. *Comprehensive reviews in food science and food safety* 7 (2008) 1.

Caparino, O. A., Tang, J., Nindo, C. I., Sablani, S. S., Powers, J. R., & Fellman, J. K. (2012). Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder. *Journal of Food Engineering,* 111(1), 135-148. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.01.010

Charmongkolpradit, S., & Luampon, R. (2017). Study of Thin Layer Drying Model for Cassava Pulp. *Energy Procedia,* 138, 354-359. doi:https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.138

Corzo, O., Bracho, N., & Alvarez, C. (2008). Water effective diffusion coefficient of mango slices at different maturity stages during air drying. *Journal of Food Engineering,* 87(4), 479-484. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.12.025

Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion / by J. Crank*. Oxford [England]: Clarendon Press.

de Mendonça, K. S., Corrêa, J. L. G., Junqueira, J. R. d. J., Cirillo, M. A., Figueira, F. V., & Carvalho, E. E. N. (2017). Influences of convective and vacuum drying on the quality attributes of osmo-dried pequi (Caryocar brasiliense Camb.) slices. *Food Chemistry,* 224, 212-218. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.12.051

Dissa, A. O., Desmorieux, H., Bathiebo, J., & Koulidiati, J. (2008). Convective drying characteristics of Amelie mango (Mangifera Indica L. cv. 'Amelie') with correction for shrinkage. *Journal of Food Engineering,* 88(4), 429-437. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.03.008

Gulati, T., & Datta, A. (2015). Mechanistic Understanding of Case-hardening and Texture Development During Drying of Food Materials. *Journal of Food Engineering,* 166. doi:10.1016/j.jfoodeng.2015.05.031

HENDERSON, S. M., & PABIS, S. (1961). Grain drying theory. II. Temperature effects on drying coefficients. *Journal of Agricultural Engineering Research,* 6, 169-174.

Hernando, I., Sanjuán, N., Pérez-Munuera, I., & Mulet, A. (2008). Rehydration of Freeze-Dried and Convective Dried Boletus edulis Mushrooms: Effect on Some Quality Parameters. *Journal of food science,* 73, E356-362. doi:10.1111/j.1750-3841.2008.00913.x

Karam, M. C., Petit, J., Zimmer, D., Baudelaire Djantou, E., & Scher, J. (2016). Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review. *Journal of Food Engineering,* 188, 32-49. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.05.001

Krokida, M. K., & Marinos-Kouris, D. (2003). Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering,* 57(1), 1-7. doi:https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00214-5

Lewicki, P. P. (2006). Design of hot air drying for better foods. *Trends in Food Science & Technology,* 17(4), 153-163. doi:https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.10.012

Lewis, W. K. (1921). The rate of drying of solid materials. *Industrial Engineering Chemistry,* 13(5), 427–432.

Link, J., Tribuzi, G., & Laurindo, J. (2017). Conductive multi-flash drying of mango slices: Vacuum pulse conditions on drying rate and product properties: LINK et al. *Journal of Food*

Processing and Preservation, 42, e13440. doi:10.1111/jfpp.13440

Link, J. V., Tribuzi, G., & Laurindo, J. B. (2017). Improving quality of dried fruits: A comparison between conductive multi-flash and traditional drying methods. *LWT,* 84, 717-725. doi:https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.06.045

Liu, J., Xue, J., Xu, Q., Shi, Y., Wu, L., & Li, Z. (2017). Drying Kinetics and Quality Attributes of White Radish in Low Pressure Superheated Steam. *International Journal of Food Engineering,* 13. doi:10.1515/ijfe-2016-0365

López, J., Uribe, E., Vega-Galvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Gonzalez, E., & Di Scala, K. (2010). Effect of Air Temperature on Drying Kinetics, Vitamin C, Antioxidant Activity, Total Phenolic Content, Non-enzymatic Browning and Firmness of Blueberries Variety O´Neil. *Food and Bioprocess Technology,* 3, 772-777. doi:10.1007/s11947-009-0306-8

Luampon, R., Supakarn, S., Theerakulpisut, D. S., & Artnaseaw, D. A. (2016). Heat and Moisture Transfer Equations for a Vacuum Drying. *KKU RESEARCH JOURNAL (GRADUATE STUDIES),* 16, 1-14.

Mahayothee, B., Komonsing, N., Khuwijitjaru, P., Nagle, M., & Müller, J. (2018). Influence of drying conditions on colour, betacyanin content and antioxidant capacities in dried red-fleshed dragon fruit (Hylocereus polyrhizus). *International Journal of Food Science & Technology,* 54. doi:10.1111/ijfs.13958

Malaikritsanachalee, P., Choosri, W., & Choosri, T. (2018). Study on kinetics of flow characteristics in hot air drying of pineapple. *Food Science and Biotechnology,* 27(4), 1047-1055. doi:10.1007/s10068-018-0357-6

Malaikritsanachalee, P., Choosri, W., & Choosri, T. (2020). Study on intermittent low-pressure superheated steam drying: Effect on drying kinetics and quality changes in ripe mangoes. *Journal of Food Processing and Preservation,* 44. doi:10.1111/jfpp.14669

MIDILLI, A., KUCUK, H., & YAPAR, Z. (2002). A new model for single layer drying. *Drying Technology,* 20, 1503–1513.

Monteiro, R. L., Link, J. V., Tribuzi, G., Carciofi, B. A. M., & Laurindo, J. B. (2018). Effect of multi-flash drying and microwave vacuum drying on the microstructure and texture of pumpkin slices. *LWT,* 96, 612-619. doi:https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.06.023

Nemzer, B., Vargas, L., Xia, X., Sintara, M., & Feng, H. (2018). Phytochemical and physical

properties of blueberries, tart cherries, strawberries, and cranberries as affected by different drying methods. *Food Chemistry,* 262, 242-250. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.04.047

Nguyen, T. K., Mondor, M., & Ratti, C. (2018). Shrinkage of cellular food during air drying. *Journal of Food Engineering,* 230, 8-17. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.02.017

Orikasa, T., Koide, S., Okamoto, S., Imaizumi, T., Muramatsu, Y., Takeda, J.-i., . . . Tagawa, A. (2014). Impacts of hot air and vacuum drying on the quality attributes of kiwifruit slices. *Journal of Food Engineering,* 125, 51-58. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.10.027

Orikasa, T., Wu, L., Shiina, T., & Tagawa, A. (2008). Drying characteristics of kiwifruit during hot air drying. *Journal of Food Engineering - J FOOD ENG,* 85, 303-308. doi:10.1016/j.jfoodeng.2007.07.005

Ortiz-García-Carrasco, B., Yañez-Mota, E., Pacheco-Aguirre, F. M., Ruiz-Espinosa, H., García-Alvarado, M. A., Cortés-Zavaleta, O., & Ruiz-López, I. I. (2015). Drying of shrinkable food products: Appraisal of deformation behavior and moisture diffusivity estimation under isotropic shrinkage. *Journal of Food Engineering,* 144, 138-147. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.07.022

PAGE, G. E. (1949). *Factors influencing the maximum rate so of air drying shelled corn in thin layers.* Purdue University, USA.

Park, Y. (2008). Moisture and Water Activity. In (pp. 35-67).

Phungamngoen, C., Chiewchan, N., & Devahastin, S. (2013). Effects of various pretreatments and drying methods on Salmonella resistance and physical properties of cabbage. *Journal of Food Engineering,* 115(2), 237-244. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.10.020

Porciuncula, B., Segura, L., & Laurindo, J. (2015). Processes for Controlling the Structure and Texture of Dehydrated Banana. *Drying Technology,* 34, 150715124904009. doi:10.1080/07373937.2015.1014911

Pu, Y.-Y., & Sun, D.-W. (2016). Prediction of moisture content uniformity of microwave-vacuum dried mangoes as affected by different shapes using NIR hyperspectral imaging. *Innovative Food Science & Emerging Technologies,* 33, 348-356. doi:https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.11.003

Putra, R. N., & Ajiwiguna, T. A. (2017). Influence of Air Temperature and Velocity for Drying

Process. *Procedia Engineering,* 170, 516-519. doi:https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.082

Rasane, P. (2017). Recent advances in conventional drying of foods: a review. *Journal of Food Technology and Preservation,* 1, 24-34.

Sabarez, H. T. (2016). 14 - Airborne Ultrasound for Convective Drying Intensification. In K. Knoerzer, P. Juliano, & G. Smithers (Eds.), *Innovative Food Processing Technologies* (pp. 361-386): Woodhead Publishing.

Salehi, F., & Kashaninejad, M. (2018). Modeling of moisture loss kinetics and color changes in the surface of lemon slice during the combined infrared-vacuum drying. *Information Processing in Agriculture,* 5(4), 516-523. doi:https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.05.006

Sehrawat, R., Nema, P. K., & Kaur, B. P. (2018). Quality evaluation and drying characteristics of mango cubes dried using low-pressure superheated steam, vacuum and hot air drying methods. *LWT,* 92, 548-555. doi:https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.03.012

Siebert, T., Gall, V., Karbstein, H., & Gaukel, V. (2018). Serial combination drying processes: A measure to improve quality of dried carrot disks and to reduce drying time. *Drying Technology,* 36, 1-14. doi:10.1080/07373937.2017.1418374

Simal, S., Femenia, A., Garau, M. C., & Rosselló, C. (2004). Use of Exponential Page's and Diffusional Models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *Journal of Food Engineering,* 66, 323-328. doi:10.1016/j.jfoodeng.2004.03.025

Sturm, B., Nuñez Vega, A.-M., & Hofacker, W. (2014). Influence of process control strategies on drying kinetics, colour and shrinkage of air dried apples. *Applied Thermal Engineering,* 62, 455–460. doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.09.056

TOGRUL, I. T., & PEHLIVAN, D. (2002). Mathematical modeling of solar Drying of apricots in thin layers. . *Journal of Food Engineering,* 55, 209-216.

Tzempelikos, D. A., Vouros, A. P., Bardakas, A. V., Filios, A. E., & Margaris, D. P. (2014). Case studies on the effect of the air drying conditions on the convective drying of quinces. *Case Studies in Thermal Engineering,* 3, 79-85. doi:https://doi.org/10.1016/j.csite.2014.05.001

Vega-Gálvez, A., Ah-Hen, K., Chacana, M., Vergara, J., Martínez-Monzó, J., García-Segovia, P., . . . Di Scala, K. (2012). Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices. *Food Chemistry,* 132(1), 51-59.

doi:https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.10.029

WANG, C. Y., & SINGH, R. P. (1978). Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. . *Transactions of American Society of Agricultural Engineers,* 11, 668-672.

Whitman, W. G. (1962). The two film theory of gas absorption. *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 5(5), 429-433. doi:https://doi.org/10.1016/0017-9310(62)90032-7

Wongsa, J., & Jengsuksawat, S. (2012). *A study of Vacuum Drying Characteristics of Jackfruit*.

Yaldiza, O., Ertekina, C., & Uzunb, H. I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy,* 26(5), 457-465.

Yang, X.-H., Deng, L.-Z., Mujumdar, A. S., Xiao, H.-W., Zhang, Q., & Kan, Z. (2018). Evolution and modeling of colour changes of red pepper (Capsicum annuum L.) during hot air drying. *Journal of Food Engineering,* 231, 101-108. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.03.013

Zotarelli, M. F., Porciuncula, B. D. A., & Laurindo, J. B. (2012). A convective multi-flash drying process for producing dehydrated crispy fruits. *Journal of Food Engineering,* 108(4), 523-531. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.09.014

มหาวิทยาลัยศิลปากร

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สิริกัญญา กระต่ายทอง
วัน เดือน ปี เกิด	13 กรกฎาคม 2539
สถานที่เกิด	นครปฐม
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2556 สำเร็จการศึกษามัธยมปลายจากโรงเรียนราชินีบูรณะ จังหวัดนครปฐม พ.ศ. 2560 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2561 ศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	30/6 ตรอกวัดพระงาม ตำบลพระปฐมเจดีย์ อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000
ผลงานตีพิมพ์	พ.ศ. 2563 แสดงผลงานแบบวาจา ในการประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 10 ในหัวข้อ ผลของการทำแห้งด้วยลมร้อนภายใต้สภาวะความดันต่ำต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้ง และคุณภาพทางเคมีกายภาพของมะม่วงสุกอบแห้ง

มหาวิทยาลัยศิลปากร