



ผลของการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ ต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้ง สี และการ  
หดตัวของมะม่วงสุก



โดย  
นางสาวกรชนก ชมพิกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผลของการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ ต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้ง  
สี และการหดตัวของมะม่วงสุก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต  
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร  
ปีการศึกษา 2563  
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

EFFECT OF LOW-PRESSURE SUPERHEATED STEAM DRYING ON DRYING  
KINETIC, COLOR AND SHRINKAGE OF RIPE MANGO



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 ผลของการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ ต่อ  
จลนพลศาสตร์การทำแห้ง สี และการหดตัวของมะม่วงสุก  
โดย กรชนก ชมพิกุล  
สาขาวิชา เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท  
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัชพงศ์ ชูศรี

---

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

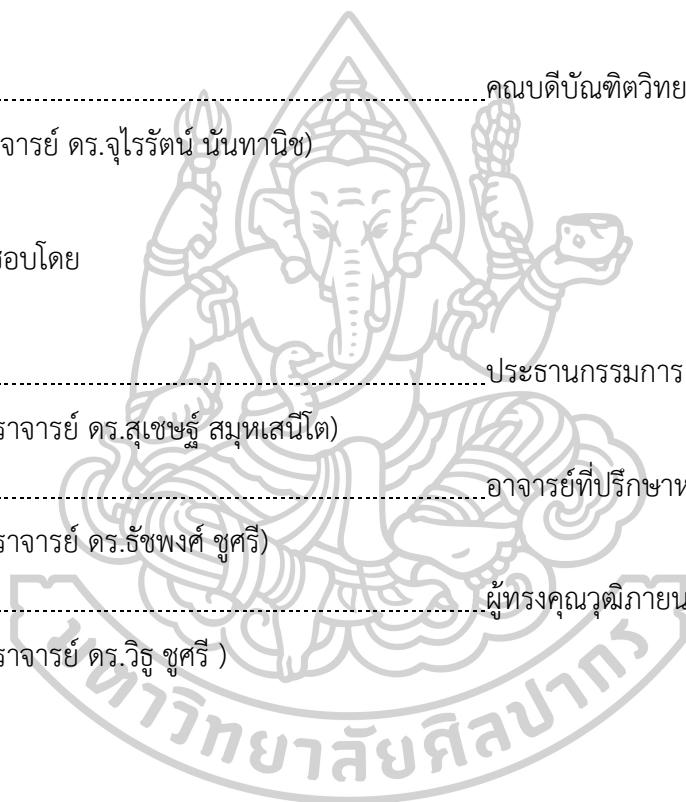
.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ สุ่มเสนาโต)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชพงศ์ ชูศรี)

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิฐู ชูศรี )



60403201 : เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : การทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ/การทำแห้งด้วยลมร้อน/

จลนพลศาสตร์ของการทำแห้ง/การหดตัว/มะม่วงสุก

นางสาว กรชนก ชมพิกุล: ผลของการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ ต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้ง สี และการหดตัวของมะม่วงสุก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธัชพงศ์ ชูศรี

การทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ (low-pressure superheated steam drying, LPSSD) ถือเป็นหนึ่งในกระบวนการทำแห้งผักและผลไม้ที่น่าสนใจ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อน (hot-air drying) ทั้งในด้านผลิตภาพ และคุณภาพ จากตัวแปรทางด้านจลนพลศาสตร์ของกระบวนการทำแห้ง และสมบัติทางเคมีกายภาพทางด้านสีและการหดตัว เพื่อที่จะนำมาเปรียบเทียบกับกระบวนการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ

สำหรับกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน การเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วลมในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ( $D_{eff}$ ) ของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น รวมถึงยังช่วยลดการเปลี่ยนแปลงสีและการหดตัวของตัวอย่าง โดยการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°C ความเร็วลม 2 m/s เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปใช้ศึกษาเปรียบเทียบกับกระบวนการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ

สำหรับกระบวนการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ การเพิ่มอุณหภูมิร่วมกับการปรับลดความดันจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น และในทุกๆ สภาวะของการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำจะมีอัตราการทำแห้งตัวอย่างสูงกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนเป็นอย่างมากในช่วงแรกของการทำแห้ง ดังนั้นการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำจึงสามารถลดเวลาในการทำแห้งตัวอย่างลงไปได้มากกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนถึง 50% นอกจากนี้การทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำยังส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพด้านสีและการหดตัวน้อยกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนเป็นอย่างมาก โดยรูปแบบการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพทั้งการเปลี่ยนแปลงสีและการหดตัวของตัวอย่างในระหว่างการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำจะเกิดขึ้นน้อยในช่วงแรกและในช่วงกลางของการทำแห้ง และการเปลี่ยนแปลงจะเพิ่มสูงขึ้นในช่วงท้ายของการทำแห้ง หรือในช่วงที่ตัวอย่างมีปริมาณความชื้นต่ำ สำหรับการทำแห้งด้วยลมร้อนการเปลี่ยนแปลงสีและการหดตัวของตัวอย่างจะ

เกิดขึ้นสูงกว่าการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำตั้งแต่ช่วงแรกของการทำแห้ง ดังนั้นจึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนมีคุณภาพต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลของการคืนน้ำกลับ (rehydration) และลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่าง พบว่าการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ ตัวอย่างมีรูพรุนขนาดใหญ่และกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นตัวอย่าง จึงทำให้การคืนน้ำกลับเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำที่อุณหภูมิ 110°C ความดัน 4 cmHg จะใช้ระยะเวลาในการทำแห้งสั้นที่สุด และยังสามารถคงคุณลักษณะทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์ได้เป็นอย่างดี



60403201 : Major (FOOD TECHNOLOGY)

Keyword : low-pressure superheated steam drying/ hot-air drying/ drying kinetics/shrinkage/ripe mango

MISS KORNCANOK CHOMPIKON : EFFECT OF LOW-PRESSURE SUPERHEATED STEAM DRYING ON DRYING KINETIC, COLOR AND SHRINKAGE OF RIPE MANGO THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR TOUCHPONG CHOOSRI, Ph.D.

Low-pressure superheated steam drying (LPSSD) is one of the most interesting drying methods for fruits and vegetables. In this study, the optimum conditions of hot-air drying (HAD) for productivity (drying kinetics) and qualities (color changes and shrinkage) of dried ripe mangoes were investigated and compared with the LPSSD.

For HAD, the higher air temperature and velocity resulted in the increase of 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 LPSSD.

For LPSSD, the  $D_{eff}$  increased with increasing the drying temperature and decreasing the drying pressure. The drying rate in all conditions of LPSSD was higher than that of HAD, especially in the first period of drying. Consequently, the drying time of LPSSD was shorter by 50% as compared with the HAD. In addition, the LPSSD-dried products were less color changes and shrinkage than that of the HAD- dried products. The color changes and shrinkage of LPSSD had low in the first and middle period of the drying. Then, they increased in the final stage of the drying (low moisture content of the samples). The color changes and shrinkage of HAD were higher than that of LPSSD throughout the process that lead to lower quality of dried ripe mangoes. This results corresponded to the rehydration property and microstructure of dried ripe mangoes in LPSSD. The LPSSD-dried products were more porous structure and higher rehydration rate. The LPSSD at a 110°C drying temperature and 4 cmHg drying pressure had the shortest drying time and the Physico-chemical properties of the dried products were maintained as well.





## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. ธัชพงศ์ ชูศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าให้ความรู้ ให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือ ตลอดจนข้อเสนอแนะต่างๆ ในการวางเค้าโครงเรื่องวิทยานิพนธ์ การทำวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จร่ว่งไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. สุขเชษฐ์ สมุหเสนีโต ประธานกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ และ ผศ. ดร. วิฐู ชูศรี กรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดที่เป็นประโยชน์แก่งานวิจัยพร้อมทั้งกรุณาตรวจสอบและแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีอาหารทุกท่านที่ได้ให้การอบรมสั่งสอนวิชา ให้ความรู้ตลอดการศึกษาที่ผ่านมา อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีอาหารทุกท่านที่ได้ช่วยเหลือ อำนวยความสะดวกในด้านต่างๆจนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณนายภาคย์ มาลัยกฤษณะชลิ ที่สละเวลาให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนผลักดันให้ข้าพเจ้ามีความมุ่งมั่นในการทำวิจัยตลอดมา

ขอขอบพระคุณรุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้องในภาควิชาเทคโนโลยีอาหารทุกคน ที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนงานวิจัยของข้าพเจ้าเสมอมา

กรชนก ชมพิกุล

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 มะม่วง.....	4
2.2 การทำแห้ง.....	5
2.3 ความชื้น.....	5
2.4 จลนพลศาสตร์การทำแห้ง.....	6
2.5 ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (superheated steam).....	8
2.6 คุณภาพทางเคมี-กายภาพ.....	13
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	16
3.1 วัตถุประสงค์.....	16
3.2 วิธีการทดลอง.....	16

3.2.1	แผนการทดลอง.....	16
3.2.2	ขั้นตอนการเตรียมชิ้นตัวอย่างมะม่วง.....	18
3.2.3	ขั้นตอนการหาความชื้นเริ่มต้นของชิ้นตัวอย่างมะม่วง.....	18
3.2.4	ศึกษาจลนพลศาสตร์ในการทำแห้งอาหารด้วยลมร้อน.....	18
3.2.5	ศึกษาจลนพลศาสตร์ในการทำแห้งอาหารด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ.....	20
3.2.6	ศึกษาสมบัติทางด้านสีของตัวอย่าง.....	21
3.2.7	ศึกษาสมบัติด้านการหดตัวของตัวอย่าง.....	22
3.2.8	ศึกษาสมบัติทางการคืนน้ำกลับของตัวอย่าง.....	22
3.2.9	การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค.....	22
3.2.10	จลนพลศาสตร์การทำแห้ง.....	23
3.2.10.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	23
3.2.10.2	การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (Effective moisture diffusivity coefficient, $D_{eff}$ ).....	24
3.2.11	การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	25
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	26
4.1	จลนพลศาสตร์การทำแห้งมะม่วงสุก.....	26
4.1.1	พฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุก.....	26
4.1.2	อัตราการทำแห้งมะม่วงสุก.....	31
4.1.3	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นในการทำแห้งมะม่วงสุก.....	34
4.2	เปลี่ยนแปลงสีของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้ง.....	38
4.3	การหดตัวของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้ง.....	40
4.4	ความสัมพันธ์ของสภาวะการทำแห้งกับ $D_{eff}$ , $\Delta E^*$ และ S.....	42
4.5	การคืนน้ำกลับของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้ง.....	47
4.6	โครงสร้างระดับจุลภาคของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้ง.....	49

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง..... 50

รายการอ้างอิง..... 51

ประวัติผู้เขียน..... 59



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แผนการทดลองการทำแห้งโดยใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิและความเร็วลมต่างๆ .....	17
ตารางที่ 2 แผนการทดลองการทำแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ .....	17
ตารางที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทำแห้ง .....	23
ตารางที่ 4 ค่าคงที่ และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ .....	27
ตารางที่ 5 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น การเปลี่ยนแปลง และร้อยละการหดตัวของการทำแห้งมะม่วงสุกที่สภาวะต่างๆ ในกระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ.....	35



## สารบัญภาพ

### หน้า

ภาพที่ 1 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปี (enthalpy) และอุณหภูมิที่ความดันต่างๆ .....	8
ภาพที่ 2 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่องมือที่ใช้ศึกษาการทำแห้งอาหารด้วยลมร้อน ประกอบด้วย (1) พัดลม (2) electrical heater (3) PT100 (4) Temperature controller (5) ตัวอย่าง (6) โพลดเซลล์ (7) digital camera (8) คอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูล.....	19
ภาพที่ 3 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่องมือที่ใช้ศึกษาการทำแห้งอาหารด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ที่สภาวะความดันต่ำ ประกอบด้วย (1) เครื่องกำเนิดไอน้ำ (2) วาล์วลดความดัน (3) electrical pre-heater (4) vacuum gauge (5) electrical heater (6) PT100 (7) ตัวอย่าง (8) วาล์วสุญญากาศ (9) ปุ่มสุญญากาศ (10) Temperature controller (11) โพลดเซลล์ (12) digital camera (13) คอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูล .....	21
ภาพที่ 4 กราฟการทำแห้งของมะม่วงสุกที่สภาวะต่างๆ ในกระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ .....	30
ภาพที่ 5 อัตราการทำแห้งของมะม่วงสุกที่สภาวะต่างๆ ในกระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ .....	32
ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการทำแห้งมะม่วงสุกกับสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นใน กระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ .....	37
ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการทำแห้งมะม่วงสุกกับการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างใน กระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ .....	39
ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการทำแห้งมะม่วงสุกกับร้อยละการหดตัวของตัวอย่างใน กระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ .....	41
ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการทำแห้งมะม่วงสุกกับ $D_{eff}$ , $\Delta E^*$ , และ $S$ ของตัวอย่างใน กระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ .....	42
ภาพที่ 10 การเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างมะม่วงสุกระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ 70°C ความเร็วลม 2.0 m/s) และไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำที่สภาวะต่างๆ ในด้าน (ก) การหดตัว และ (ข) การเปลี่ยนสีทั้งหมด.....	45

- ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสีและการหดตัวของชิ้นมะม่วงสุกในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ 70°C ความเร็วลม 2.0 m/s) และไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำที่สภาวะต่างๆ..... 47
- ภาพที่ 12 อัตราส่วนการคืนน้ำกลับของตัวอย่างมะม่วงสุกจากกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ 70°C ความเร็วลม 2.0 m/s) และไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำที่สภาวะต่างๆ.... 48
- ภาพที่ 13 ภาพถ่าย SEM ของมะม่วงสุกหลังการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ..... 49



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มะม่วงเป็นผลไม้สำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศ เนื่องจากมะม่วงมีกลิ่นรสที่ดีและมีสารอาหารมากมาย เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน วิตามินและแร่ธาตุที่สำคัญต่างๆ หลายชนิด จึงทำให้เป็นที่นิยมของผู้บริโภค แต่ในช่วงฤดูเก็บเกี่ยว มะม่วงจะมีปริมาณมากเกินกว่าที่ผู้บริโภคต้องการ ซึ่งก่อให้เกิดการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์หลังการเก็บเกี่ยว จึงต้องมีการแปรรูปมะม่วงเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา โดยการทำแห้งถือเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากเป็นวิธีถนอมอาหารที่สมบูรณ์คือมีทั้งการถ่ายเทมวลและความร้อน เพื่อลดความชื้นและค่าแอกติวิตีของน้ำ (water activity) ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ให้อยู่ในระดับที่ทำให้อาหารปลอดภัย เพื่อให้สามารถเก็บรักษาคุณภาพของอาหารไว้ได้นานขึ้น (Yao และคณะ, 2020; Zotarelli และคณะ, 2012) รวมถึงส่งผลให้มีน้ำหนักเบาสามารถส่งสินค้าไปจำหน่ายในที่ห่างไกลได้สะดวกมากขึ้นถือเป็นการเพิ่มมูลค่าสินค้าเกษตรของประเทศอีกทางหนึ่ง อย่างไรก็ตามอาหารที่ผ่านการทำแห้งมักมีคุณภาพต่ำลง เนื่องจากอาหารเป็นวัสดุชีวภาพประเภทไม่ทนความร้อน (heat-sensitive materials) ที่มีองค์ประกอบที่ซับซ้อนจึงมีการเปลี่ยนแปลงต่างๆทางเคมี-กายภาพของผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการทำแห้งทั้งที่เป็นที่ต้องการและไม่เป็นที่ต้องการ โดยการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดและมีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการทำแห้งผลิตผลทางการเกษตรโดยเฉพาะอย่างยิ่งผักและผลไม้ คือ การหดตัว (shrinkage) โดยมักมีการศึกษาควบคู่กับสมบัติการคืนน้ำกลับ (rehydration) (Khalloufi และคณะ, 2009) การเปลี่ยนแปลงสีและการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ โดยการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์นี้สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ (Madiouli และคณะ, 2012) ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลง ทั้งนี้ผู้บริโภคจึงต้องการผลิตภัณฑ์อาหารแห้งที่มีคุณภาพสูงทั้งทางด้านสารอาหาร คุณสมบัติทางประสาทสัมผัสและลักษณะปรากฏให้มีความใกล้เคียงกับอาหารสดมากที่สุด (Xanthopoulos และคณะ, 2019)



กระบวนการทำแห้งอาหารที่นิยมใช้กันทั่วไป คือ การทำแห้งโดยใช้ลมร้อน (hot air drying, HAD) เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้งานง่ายและมีต้นทุนในการดำเนินงานต่ำ แต่การทำแห้งด้วยวิธีนี้ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์หลังการทำแห้ง มีสีคล้ำ มีการหดตัวสูงและมีการสูญเสียสารอาหารมาก เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงร่วมกับชิ้นอาหารได้รับความร้อนเป็นเวลานาน (Pu และ Sun, 2017) ในปัจจุบันจึงมีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง โดยมีหลักการคือกำจัดน้ำออกจากอาหารที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของอาหาร ซึ่งทำให้อาหารอยู่ในสถานะใกล้เคียงกับสถานะคล้ายแก้ว (glass transition) อาหารจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี-กายภาพอย่างช้าๆ ถึงแม้จะใช้เวลาในการทำแห้งเป็นเวลานานก็ตาม อย่างไรก็ตามวิธีการทำแห้งแบบระเหิดเป็นวิธีที่มีต้นทุนในการแปรรูปสูง ทำให้ต้องจำหน่ายผลิตภัณฑ์ในราคาสูง จึงไม่เหมาะกับการแปรรูปผลิตผลทางการเกษตร ซึ่งส่วนใหญ่มีมูลค่าไม่สูงมาก ดังนั้นการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (superheated steam) เป็นตัวกลางในการทำแห้งจึงถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เนื่องจากการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จะไม่มีออกซิเจนอยู่ในระบบซึ่งถือเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีที่สำคัญ ที่เป็นสาเหตุทำให้คุณภาพของอาหารเสื่อมลง เช่น การเกิดสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์และการสลายตัวของสารอาหาร เป็นต้น แต่การทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งยังมีข้อจำกัด คือ อุณหภูมิที่สูงมากซึ่งไม่เหมาะกับการทำแห้งอาหารที่เป็นวัสดุประเภทไม่ทนความร้อน แต่ข้อจำกัดนี้สามารถแก้ไขได้โดยการผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ ซึ่งจะสามารถคงคุณสมบัติของไอน้ำร้อนยวดยิ่งแต่มีความเหมาะสมต่อการทำแห้งอาหารมากขึ้น เนื่องจากมีอุณหภูมิที่ต่ำลงและอยู่ในช่วงที่สามารถนำมาใช้ในการทำแห้งได้ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษา กระบวนการทำแห้งอาหารโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ (low-pressure superheated steam drying, LPSSD) ซึ่งคาดว่าจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงขึ้นจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การทำแห้ง และการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี-กายภาพเปรียบเทียบกับระหว่างการทำแห้งพื้นฐานคือใช้ลมร้อนเทียบกับการทำแห้งอาหารโดยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาข้อมูลทางจลนพลศาสตร์การทำแห้งอาหารด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำจากตัวแปรสำคัญคือ ระดับความดันและอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
2. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติทางเคมี-กายภาพของผลิตภัณฑ์อาหารที่ทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำกับผลิตภัณฑ์อาหารที่ทำแห้งด้วยลมร้อน

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. การทำแห้งอาหารภายใต้สภาวะของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำ ช่วยเพิ่มอัตราการทำแห้งอาหาร ทำให้ระยะเวลาในการทำแห้งสั้นลง
2. การทำแห้งอาหารโดยใช้ตัวกลางคือไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำ สามารถลดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี-กายภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น การเปลี่ยนแปลงสีและการหดตัว ทำให้สามารถคงคุณภาพของอาหารแห้งไว้ได้มากกว่าการทำแห้งโดยใช้ลมร้อนเป็นตัวกลาง

## 1.4 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการทำแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สายพันธุ์สีทอง โดยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำในสภาวะการทำแห้งที่แตกต่างกัน (ระดับความดันและอุณหภูมิ) ต่อจลนพลศาสตร์ในการทำแห้ง ซึ่งบ่งบอกถึงระยะเวลาในการทำแห้ง และคุณภาพของมะม่วงหลังการทำแห้งด้านเคมีและกายภาพที่สำคัญ คือ การเปลี่ยนแปลงสี การหดตัว และการคืนน้ำกลับเปรียบเทียบกับมะม่วงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 มะม่วง

มะม่วง (Mango) มีชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Mangifera Indica* เป็นผลไม้เขตร้อนอยู่ในวงศ์ Anacardiaceae โดยมะม่วงสุกถือเป็นผลไม้เขตร้อนที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ เนื่องจากมะม่วงมีสีส้มและกลิ่นรสที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว (Yao และคณะ, 2020) รวมถึงมีปริมาณแคโรทีนอยด์ วิตามิน สารประกอบฟีนอลิก และสารอาหารที่มีประโยชน์มากมาย จึงเป็นที่ต้องการของผู้บริโภคทั่วโลก (Link และคณะ, 2018) อย่างไรก็ตามมะม่วงเป็นผลไม้ที่ออกตามฤดูกาล จึงมีการจัดการให้มะม่วงนั้นสามารถให้ผลผลิตนอกฤดูกาล เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของผู้บริโภค แต่ในช่วงฤดูกาลกลับพบปัญหามะม่วงล้นตลาด และเนื่องจากมะม่วงจัดอยู่ในกลุ่ม Climacteric fruit ซึ่งมีอัตราการหายใจเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆหลังจากการเก็บเกี่ยว และเป็นผลไม้ที่มีน้ำมากส่งผลให้เกิดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวในช่วงของฤดูกาลเก็บเกี่ยวในปริมาณมาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพทางกายภาพของมะม่วงและการเน่าเสียจากจุลินทรีย์ และหากต้องการยืดอายุการเก็บรักษาของมะม่วงสุกโดยการแช่เย็น ก็จะส่งผลทำให้มะม่วงสุกเกิดอาการสะท้อนหนาว (chilling injury) ส่งผลให้มะม่วงเกิดเป็นรอยคล้ำ ฉ่ำน้ำ ซึ่งส่งผลให้เกิดความเสียหายภายหลังการเก็บเกี่ยวด้วยเช่นกัน ซึ่งความเสียหายที่เกิดขึ้นภายหลังจากการเก็บเกี่ยว ก่อให้เกิดปัญหาทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม ดังนั้นมะม่วงจึงถูกแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกต่างๆ เช่น มะม่วงแช่อิ่ม มะม่วงกวน แยมมะม่วง และมะม่วงอบแห้ง เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและและเพิ่มมูลค่าให้กับมะม่วง โดยมะม่วงอบแห้งได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก มีความใกล้เคียงกับมะม่วงที่ยังไม่ได้ผ่านการแปรรูปมากที่สุด และยังสามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน สะดวกต่อการขนส่งและประหยัดต้นทุนในการจัดจำหน่าย (Longyang และคณะ, 2020) แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการทำแห้งยังคงต้องได้รับการพัฒนาเพื่อลดต้นทุนและสามารถรักษาคุณภาพของมะม่วงหลังการทำแห้งให้มีคุณภาพดีและใกล้เคียงกับผลสดมากที่สุด

## 2.2 การทำแห้ง

การทำแห้ง (drying) เป็นวิธีการถนอมอาหารที่ได้รับความนิยมมากที่สุดมาเป็นเวลานาน โดยการทำแห้งอาหาร เป็นการดึงน้ำออกจากอาหารซึ่งมีความชื้นเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวล ซึ่งจะเกิดควบคู่กันตลอดกระบวนการ (Pu และ Sun, 2017) โดยการทำแห้งของอาหารเกิดขึ้นจากการที่ความชื้นภายในของอาหารเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้าของวัตถุ จากนั้นจะระเหยออกไปสู่บรรยากาศที่ล้อมรอบชิ้นอาหารในรูปของไอ จนความชื้นทั้งชิ้นอาหารมีค่าคงที่ โดยมีวัตถุประสงค์พื้นฐานคือเพื่อลดค่าแอกติวิตีของน้ำ (water activity,  $a_w$ ) และชะลอปฏิกิริยาต่างๆ ทั้งทางเคมีและชีวเคมี ที่เป็นสาเหตุให้อาหารเสื่อมเสีย Ratti (2001) และยังส่งผลทำให้อาหารมีน้ำหนักเบา สะดวกต่อการขนส่ง ทั้งยังเป็นการสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ที่เป็นทางเลือกของผู้บริโภคมากขึ้น

## 2.3 ความชื้น

ความชื้น คือ ปริมาณน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในชิ้นอาหาร ซึ่งน้ำในชิ้นอาหารนั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

- 1) น้ำเกาะติด (bound water) เป็นน้ำที่เกาะอยู่ในโครงสร้างของอาหารอย่างแข็งแรง จึงไม่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ และจุลินทรีย์ไม่สามารถนำไปใช้ได้
- 2) น้ำอิสระ (free water) เป็นน้ำที่อาหารยึดเกาะเอาไว้อย่างหลวมๆ จึงมีพฤติกรรมคล้ายน้ำบริสุทธิ์ ส่งผลให้สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีและจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้ โดยน้ำส่วนนี้ก็คือ water activity ( $a_w$ ) ซึ่งน้ำส่วนนี้ส่งผลต่อการเสื่อมเสียของอาหารโดยตรงจึงทำให้นิยมใช้เป็นตัวระบุขอบเขตของการเสื่อมเสียของอาหารมากกว่าความชื้น เพราะ  $a_w$  เป็นค่าที่สามารถชี้ระดับปริมาณน้ำต่ำสุดในอาหารที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโต และใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ

## 2.4 จลนพลศาสตร์การทำแห้ง

จลนพลศาสตร์การทำแห้ง (drying kinetic) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นและอุณหภูมิต่อเวลาในกระบวนการทำแห้ง ซึ่งค่าสามารถนำข้อมูลไปคำนวณหาปริมาณความชื้นที่ระเหยออกจากตัวอย่าง เวลาในการทำแห้ง พลังงานที่ใช้ในการทำแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของอาหารในระหว่างการทำแห้ง มีอิทธิพลมาจากการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลที่ผิวของชิ้นอาหาร สภาพแวดล้อมและภายในชิ้นอาหารเอง โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทำแห้ง มักแสดงด้วยกราฟการทำแห้ง (Drying Curve) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นต่อเวลา หรือกราฟอัตราการทำแห้ง (Drying rate Curve) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำแห้งต่อเวลา

จลนพลศาสตร์การทำแห้งสามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของความชื้นและอุณหภูมิต่อเวลาในกระบวนการทำแห้ง โดยใช้วิธีปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting) ให้ผลการจำลองข้อมูลสอดคล้องกับผลการทดลอง ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้สำหรับการทำแห้งผักและผลไม้ นิยมใช้แบบจำลองเอมพิริคอล (Empirical Model) เช่น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton, Page, Modified Henderson and Pabis และ Peleg เป็นต้น โดยการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมจะวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination,  $R^2$ ), รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean squared error, RMSE) และค่าไคสแควร์ ( $\chi^2$ ) เพื่อบอกความแม่นยำในการทำนายที่เหมาะสม

Dissa และคณะ (2008) ศึกษาจลนพลศาสตร์ในการทำแห้งมะม่วง ที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70°C โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page และ Henderson and Pabis โดยพบว่าแบบจำลองทั้งสองสามารถเป็นตัวแทนของข้อมูลได้เป็นอย่างดีและมีรูปร่างใกล้เคียงกัน แต่แบบจำลองของ Page ให้ค่า  $R^2$  สูง และมีค่า  $\chi^2$  ต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงคุณภาพของรูปแบบสมการที่มีความเหมาะสม

Aghbashlo และคณะ (2009) ศึกษาจลนพลศาสตร์การทำแห้งแผ่นมันฝรั่งที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร โดยเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องด้วยสายพาน พบว่าอัตราส่วนความชื้นของมันฝรั่งลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นของสายพาน โดยแบบจำลองของ Page สามารถอธิบายอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปได้อย่างต่อเนื่องและมีความเหมาะสมมากที่สุด

da Silva และคณะ (2014) ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 6 แบบ เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายอัตราการท่าแห่งของกล้วยทั้งผล โดยพบว่าแบบจำลองของ Wang กับ Singh, Henderson กับ Pabis และ Lewis ไม่สามารถเป็นตัวแทนของข้อมูลที่ดีได้ แต่แบบจำลองของ Page สามารถเป็นตัวแทนของข้อมูลได้เป็นอย่างดี จึงสามารถนำข้อมูลมาศึกษาอัตราการท่าแห่งและเวลาที่ใช้ในการรอบแห่ง

Zhu และ Shen (2014) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วลมในการทำแห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนของแผ่นลูกพีช พบว่าการใช้วิธีปรับเส้นโค้งของข้อมูลที่ได้จากการทดลองด้วยแบบจำลองของ Page มีความเหมาะสมที่สุดในการอธิบายอิทธิพลของอุณหภูมิ ส่วนแบบจำลองของ Wang กับ Singh มีความเหมาะสมที่สุดในการอธิบายอิทธิพลของความเร็วมในการทำแห้ง

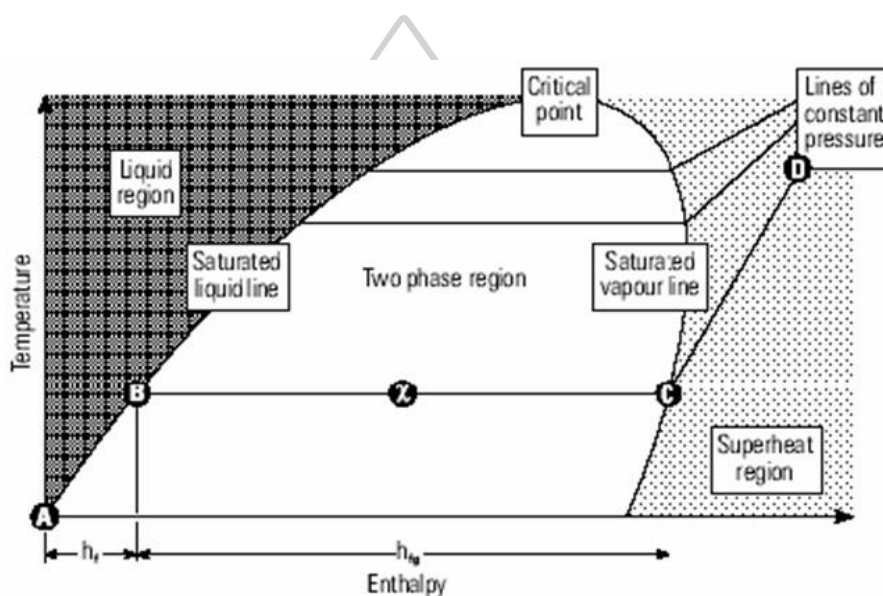
Younis และคณะ (2018) ศึกษาการทำแห้งแผ่นกระเทียมด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรด ที่ความเข้มและอัตราการไหลของลมแตกต่างกันพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ของ Modified Henderson and Pabis สามารถอธิบายประสิทธิภาพในการทำแห้งและทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในระหว่างการทำแห้งแผ่นกระเทียมได้เป็นอย่างดี

Sehrawat และ Nema (2018) ศึกษาจลนพลศาสตร์การทำแห้งของหัวหอมด้วยเครื่องทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ โดยศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton, Page, Modified Henderson กับ Pabis และ Peleg ซึ่งพบว่าทุกแบบจำลองยกเว้นแบบจำลองของ Peleg มีค่าคงที่ ( $k$ ) ที่สามารถแสดงให้เห็นว่าค่า  $k$  จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทำแห้งเพิ่มขึ้น และในการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำและการทำแห้งด้วยสุญญากาศมีค่า  $k$  สูงกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน แต่หากศึกษาจลนพลศาสตร์การทำแห้งจะพบว่าแบบจำลองของ Page สามารถอธิบายข้อมูลได้ดีและมีความเหมาะสมที่สุด

Nyangena และคณะ (2019) ศึกษาอิทธิพลของความเร็วมต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งแผ่นมะเขือเทศ ที่ทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ด้วยรังสีอาทิตย์ พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson and Pabis สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์การทำแห้งแผ่นมะเขือเทศได้เป็นอย่างดี ซึ่งทำให้พบว่าการทำแห้งแผ่นมะเขือเทศพบอัตราการท่าแห่งทั้งช่วงอัตราการท่าแห่งคงที่และอัตราการรอบแห่งลดลง แต่หากเครื่องมีการควบคุมทิศทางลมแบบจำลองของ Page จะสามารถอธิบายข้อมูลได้ดีและมีความเหมาะสมมากกว่า

## 2.5 ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (superheated steam)

สถานะ (Phase) ของสารบริสุทธิ์หมายถึงคุณลักษณะของสารซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะการเรียงตัวของโมเลกุลของสาร โดยสถานะของสารบริสุทธิ์มีอยู่ 3 ชนิดคือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยการเปลี่ยนสถานะของสารบริสุทธิ์ในระบบทางอุณหพลศาสตร์จะมีการเปลี่ยนสถานะจากสถานะหนึ่งไปอีกรัฐหนึ่ง ซึ่งจะมีสมดุลของสถานะอยู่ 2 สถานะภายในระบบ โดยการเปลี่ยนสถานะนั้นค่อนข้างซับซ้อน จึงนิยมอธิบายโดยใช้แผนภาพที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปี (enthalpy) และอุณหภูมิที่ความดันต่างๆ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปี (enthalpy) และอุณหภูมิที่ความดันต่างๆ  
ที่มา: Cengel และBoles (2006)

เมื่อให้ความร้อนแก่น้ำจาก  $0^{\circ}\text{C}$  (จุด A) จะดำเนินตามเส้นของเหลวอิ่มตัว (saturated liquid line) จนถึงอุณหภูมิของเหลวอิ่มตัว (saturation temperature) ณ จุด B และหากให้ความร้อนเพิ่มขึ้นของเหลวอิ่มตัวจะเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำอิ่มตัวโดยที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากพลังงานที่ได้รับถูกใช้ไปในการเปลี่ยนสัดส่วนความแห้ง (dryness fraction) โดยยังได้รับพลังงานมาก จะยิ่งเกิดการผสมระหว่างน้ำและไอน้ำเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจุดตรงกลางระหว่างเส้น (B-C) จึงมีสัดส่วนความแห้งเท่ากับ 0.5 และจะเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งกลายเป็นไอน้ำทั้งหมด 100% ที่จุดไอน้ำอิ่มตัว (saturated vapor line) และหากให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องจากจุดไอน้ำอิ่มตัว (จุด C) อุณหภูมิของ

ไอน้ำจะเพิ่มขึ้นและกลายเป็น ไอน้ำอิ่มตัวยวดยิ่ง (super saturated steam) ณ จุด D โดยระดับพลังงานของทั้งกระบวนการสามารถเปลี่ยนแปลงได้จากการปรับอุณหภูมิและความดันในระบบ

ไอน้ำอิ่มตัวยวดยิ่ง หรือไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (superheated steam) ที่ความดันบรรยากาศปกติ จะมีอุณหภูมิสูงกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  สามารถทำแห้งผลิตภัณฑ์โดยการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์ในการระเหยน้ำ โดยอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะลดลงแต่ไม่ถึงกับควบแน่น เนื่องจากหลังจากให้พลังงานแก่ผลิตภัณฑ์แล้วนั้นไอน้ำร้อนยวดยิ่งยังคงมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของไอน้ำอิ่มตัว ด้วยคุณสมบัตินี้ จึงมีผู้วิจัยสนใจศึกษาผลของการใช้ไอน้ำอิ่มตัวยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการทำแห้ง

การพัฒนากระบวนการทำแห้งเป็นสิ่งที่ผู้วิจัยสนใจอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการทำแห้งอาหารนั้นนอกจากวัตถุประสงค์หลักคือเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาแล้วนั้น ยังคงต้องคำนึงถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการทำแห้งและมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำเพื่อให้ผู้บริโภคสามารถยอมรับได้ โดยในปัจจุบันการทำแห้งที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือการทำแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้งานได้ง่ายและมีค่าใช้จ่ายต่ำแต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้มักมีคุณภาพที่ไม่ดีนัก เนื่องจากการใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งจะใช้เวลาในการทำแห้งนาน และมีประสิทธิภาพในการทำแห้งต่ำจึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี-กายภาพด้านต่างๆของอาหารทำให้มีคุณภาพต่ำลง เช่น อาหารมีสีคล้ำขึ้น เนื้อสัมผัสแข็งขึ้น การหดตัวมากขึ้น และมีการสูญเสียสารอาหารในระหว่างการทำแห้งสูง (Aghilinategh และคณะ, 2015; Alibas, 2007; Arikan และคณะ, 2011; Feng และคณะ, 2012; Zhao และคณะ, 2014) จึงมีผู้วิจัยสนใจการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการทำแห้ง แทนการใช้อากาศร้อนเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการทำแห้งอาหาร

การหดตัวเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่สำคัญในระหว่างกระบวนการทำแห้ง โดยรูปแบบการหดตัวนั้นจะแตกต่างกันออกไปตามวิธีการทำแห้ง, สภาวะในการทำแห้งและปริมาณความชื้นในระหว่างการทำแห้ง (Sehrawat และคณะ, 2016) ในการทำแห้งด้วยลมร้อนพบว่าขึ้นอาหารมีการหดตัวมากกว่าการทำแห้งภายใต้สภาวะไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เนื่องจากการทำแห้งโดยใช้อากาศร้อนการแพร่ของความชื้นเริ่มจากภายในออกสู่ผิววนอกของชิ้นอาหาร และเมื่อเวลาผ่านไปความชื้นจะออกได้ยากขึ้นจนไปถึงช่วงที่ถูกจำกัดการแพร่ แต่ในการทำแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง มีการขยายตัวของความชื้นภายในชิ้นอาหารเกิดขึ้นทั่วทั้งชิ้นอาหารอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากได้รับพลังงานจากตัวกลางที่เป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จากนั้นความชื้นของตัวอย่างจะออกไปกับตัวกลางซึ่งเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว รวมถึงการที่ชิ้นอาหารอยู่ในสภาวะที่เต็มไปด้วยไอน้ำชิ้นอาหารจึงไม่เกิดเปลือกแข็ง (case hardening) ทำให้เกิดรูพรุนจำนวนมากและการหดตัวอย่างสม่ำเสมอ



(uniform shrinkage) เนื่องจากการสูญเสียน้ำที่ช่วยพยุงโครงสร้างของตัวอย่าง ส่งผลให้เกิดการยุบตัว (collapse) ตามแรงโน้มถ่วงของโลก (gravitational force) (Devahastin และคณะ, 2004; Hamawand และคณะ, 2014; Jamradloedluk และคณะ, 2007) โดยสภาวะที่เติมไปด้วยไอน้ำในการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ส่งผลให้โครงสร้างเกิดการหดตัวน้อย และมีรูพรุนมากกว่าการทำแห้งด้วยสุญญากาศ (vacuum drying, VD) เนื่องจากการหดตัวของชิ้นอาหารในการทำแห้งด้วยสุญญากาศซึ่งไม่มีไอน้ำในระบบ ส่งผลให้ผิวหน้าของชิ้นอาหารแห้งและแข็งเป็นเวลานานก่อนที่ภายในของชิ้นอาหารจะแห้ง ซึ่งก่อให้เกิดการหดตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ (non-uniform shrinkage) (Jamradloedluk และคณะ, 2007; Leeratanarak และคณะ, 2006; Liu และคณะ, 2017) โดยการเกิดเปลือกแข็งที่ผิวหน้าของชิ้นอาหารส่งผลต่ออัตราการคืนน้ำกลับของชิ้นตัวอย่าง การทำแห้งโดยอากาศร้อนและสุญญากาศมีค่าการคืนน้ำกลับต่ำกว่าอาหารที่ผ่านการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เนื่องจากการเกิดเปลือกแข็งที่ผิวหน้าของชิ้นอาหารและรูพรุนที่เล็กกว่าจะต้านทานการคืนน้ำกลับของชิ้นอาหาร (Devahastin และคณะ, 2004; Liu และคณะ, 2017; Suvarnakuta และคณะ, 2011) นอกจากนี้เรื่องโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ การทำแห้งโดยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีข้อดีอย่างเห็นได้ชัดกว่าการใช้อากาศร้อนในการทำแห้งคือ ไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะดันเอาอากาศออกไปทั้งหมด ปฏิกริยาที่ต้องการออกซิเจนจึงไม่เกิดขึ้น นั่นคือไม่ก่อให้เกิดปฏิกริยาออกซิเดชันต่างๆ เช่น ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (Enzymatic browning) ปฏิกริยาออกซิเดชันของไขมัน (Lipid oxidation) หรือการเสื่อมสลายแบบต่างๆ เนื่องจากออกซิเจน (Aerobic degradation) ผลิตภัณฑ์หลังการทำแห้งโดยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจึงคงเหลือปริมาณสารระเหย กรดแอสคอร์บิกและเบต้าแคโรทีนมากกว่า (Barbieri และคณะ, 2004; Hiranvarachat และคณะ, 2008; Methakhup และคณะ, 2005; Suvarnakuta และคณะ, 2011) และถึงแม้การทำแห้งโดยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะไม่ก่อให้เกิดปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ แต่เนื่องจากไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันบรรยากาศ มีอุณหภูมิสูง (มากกว่า 100°C) การเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์จึงยังสามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากปฏิกริยาสีน้ำตาล (เมลลาร์ด, คาราเมลไลเซชัน) และการไหม้ของผลิตภัณฑ์อาหารซึ่งไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิสูง จึงทำให้ค่าสีแดงเข้มมากกว่าและความสว่างน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนและสุญญากาศ เนื่องมาจากการควบแน่นของไอน้ำที่ผิวของอาหารในช่วงเริ่มต้นและอุณหภูมิที่สูงตลอดการทำแห้งซึ่งเป็นสาเหตุหลักในการเร่งปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาล (Hamawand และคณะ, 2014; Iyota และคณะ, 2001) จากข้อเสียด้านสีจึงทำให้ทราบว่า การทำแห้งโดยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันบรรยากาศไม่เหมาะสมต่อการทำแห้งอาหาร

ซึ่งมีสาเหตุหลักจากอุณหภูมิที่สูงมาก (120-200°C) นักวิจัยจึงหันมาสนใจการทำแห้งโดยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ ซึ่งรวมข้อดีของการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งร่วมกับการลดความดันเพื่อให้สามารถผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C โดยคาดว่าจะสามารถทำแห้งอาหารซึ่งเป็นวัสดุประเภทไม่ทนความร้อนได้อย่างเหมาะสม

Devahastin และคณะ (2004) ศึกษาจลนพลศาสตร์และคุณภาพด้านต่างๆของแครอทขนาด 1 cm<sup>3</sup> ที่ทำแห้งด้วย LPSSD เทียบกับ VD ที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C ที่ความดัน 7, 10 และ 13 kPa พบว่า LPSSD ใช้เวลาในการทำแห้งนานกว่า VD ในทุกสภาวะ แต่คุณภาพด้านสี, การหดตัว และการคืนน้ำกลับในตัวอย่างที่ทำแห้งด้วย LPSSD มีค่าดีกว่าการทำแห้งด้วย VD

Barbieri และคณะ (2004) พบว่าการทำแห้งด้วย LPSSD สามารถรักษาสารระเหยในใบโหระพาได้มากกว่าการทำแห้งด้วย HAD ในทุกสภาวะ (50, 60 และ 70°C ความเร็วลม 1.2 m/s) โดยเฉพาะการทำแห้งด้วย LPSSD ที่อุณหภูมิ 50°C ที่ความดัน 5 kPa สามารถรักษาสารระเหยได้มากที่สุด

Methakhup และคณะ (2005) ศึกษาจลนพลศาสตร์และคุณภาพของผงมะขามป้อม ที่ทำแห้งด้วย LPSSD เทียบกับ VD ที่อุณหภูมิ 65 และ 75°C ที่ความดัน 7, 10 และ 13 kPa พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการอธิบายจลนพลศาสตร์คือ สมการกึ่งทฤษฎีของ Page ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทั้งการทำแห้งด้วย LPSSD และ VD อัตราการทำแห้ง (k) จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือเมื่อความดันลดลง และค่า k ในการทำแห้งด้วย VD มีค่าสูงกว่า LPSSD ในทุกสภาวะ แต่การทำแห้งด้วย LPSSD สามารถรักษาปริมาณกรดแอสคอร์บิกและค่าสีได้ดีกว่าตัวอย่างที่ทำแห้งด้วย VD

Hiranvarachat และคณะ (2008) ศึกษาปริมาณเบต้าแคโรทีนในแครอทที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD, VD (อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C ที่ความดัน 7 kPa) และ HAD (อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C ความเร็วลม 1.2 m/s) พบว่าการทำแห้งด้วย LPSSD มีสารออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant activity) มากที่สุด และการทำแห้งด้วยวิธี LPSSD และ VD พบการสลายตัวของเบต้าแคโรทีนน้อยกว่าการทำแห้งด้วย HAD แต่พบว่าที่อุณหภูมิสูง (80°C) การทำแห้งแครอทด้วยวิธี VD พบการสลายตัวของเบต้าแคโรทีนมากกว่าการทำแห้งด้วย LPSSD

Suvarnakuta และคณะ (2011) พบว่าการทำแห้งด้วย LPSSD ที่อุณหภูมิ 75°C ความดัน 7 kPa สามารถรักษาปริมาณแซนโทน (xanthones), โพรตีน, สีและการคืนน้ำกลับในเปลือกมังคุดได้ดีมากที่สุด เมื่อเทียบกับทำแห้งด้วย LPSSD และ VD ที่อุณหภูมิ 60, 75 และ 90°C ที่ความดัน 7 kPa

Liu และคณะ (2017) ศึกษาจลนพลศาสตร์และคุณภาพด้านต่างๆของหัวไชเท้า ในการทำแห้งด้วย LPSSD เทียบกับ VD ที่อุณหภูมิ 75, 80, 85 และ 90°C ที่ความดัน 95 mbar พบว่า การทำแห้งด้วย LPSSD มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นต่ำแต่มีค่าพลังงานกระตุ้นสูงกว่าการทำแห้งด้วย VD ในทุกสภาวะ ทางด้านคุณภาพนั้นการทำแห้งด้วย LPSSD มีค่าการคืนน้ำกลับสูงเนื่องจากมีรูพรุนที่ใหญ่ ค่าการเปลี่ยนแปลงสีต่ำและสามารถรักษาปริมาณวิตามินซีสูงมากกว่าการทำแห้งด้วย VD โดยเฉพาะการทำแห้งด้วย LPSSD ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำแห้งหัวไชเท้า

Rachna และคณะ (2018) ศึกษาจลนพลศาสตร์และคุณภาพด้านต่างๆของมะม่วง ขนาด 1 cm<sup>3</sup> ที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD, VD (อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C ที่ความดัน 10 kPa) และ HAD (อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C) พบว่าแบบจำลองที่เหมาะสมในการอธิบายจลนพลศาสตร์การทำแห้งคือ สมการกึ่งทฤษฎีของ Page ซึ่งแสดงให้เห็นว่า HAD ใช้เวลาในการทำแห้งนานที่สุดรองลงมาคือ LPSSD และ VD ตามลำดับ โดยที่ LPSSD ใช้เวลาในการทำแห้งนานกว่า VD อาจเนื่องมาจากการเกิดการควบแน่นของไอน้ำบริเวณผิวของตัวอย่างในช่วงแรกของการทำแห้ง แต่ข้อดีของการทำแห้งด้วย LPSSD คือส่งผลให้ตัวอย่างมีคุณภาพดีกว่าการทำแห้งด้วยวิธีอื่นๆ ทั้งทางด้านการคืนน้ำกลับมาก ค่าการเปลี่ยนแปลงสีต่ำและรักษาปริมาณกรดแอสคอร์บิก, เบต้าแคโรทีน, ปริมาณฟีนอลทั้งหมดและการทำงานของสารต้านอนุมูลอิสระได้มากที่สุด รองลงมาคือ VD และ HAD ตามลำดับ

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่ากระบวนการทำแห้งโดยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำมีศักยภาพในการทำแห้งอาหารซึ่งเป็นวัสดุประเภทไม่ทนความร้อน

## 2.6 คุณภาพทางเคมี-กายภาพ

คุณภาพทางเคมี-กายภาพ ของผลิตภัณฑ์หลังการทำแห้ง เช่น สี การหดตัว เนื้อสัมผัส ความเป็นรูพรุนและความสามารถในการคืนน้ำกลับ เป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทำแห้ง ซึ่งสีและการหดตัวถือเป็นลักษณะที่มีความสำคัญ เนื่องจากเป็นลักษณะที่ผู้บริโภคสามารถมองเห็นและมีอิทธิพลต่อการตัดสินใจในการเลือกซื้อผักและผลไม้อบแห้ง โดยผู้บริโภคคาดหวังให้ผักและผลไม้หลังการอบแห้งมีลักษณะปรากฏใกล้เคียงกับผักและผลไม้สดมากที่สุด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางเคมี-กายภาพ เกิดขึ้นจากปัจจัยหลายอย่างในระหว่างกระบวนการทำแห้ง เช่น ลักษณะของชิ้นอาหาร วิธีการทำแห้ง อุณหภูมิและความเร็วลมหรือสภาวะต่างๆในการทำแห้ง

Chong และคณะ (2008) ศึกษาคุณภาพทางด้านสีและเนื้อสัมผัสของจำปาตะที่ทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์ (sun drying) พบว่า สีของตัวอย่างหลังการทำแห้งมีค่าความสว่าง ( $L^*$ ) และ  $b^*$  ลดลง ในขณะที่  $a^*$  มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างแห้งมีสีคล้ำขึ้นจากตัวอย่างสด ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบออกซิเดชันและปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบออสโตรนิกซ์ และการทำแห้งที่ใช้เวลานานถึง 2 วัน คุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัสพบว่าจำปาตะมีค่าความแข็ง (hardness) และ ความเคี้ยวได้ (chewiness) สูงกว่าจำปาตะสด ส่วนค่าการเกาะติด (cohesiveness) และความยืดหยุ่น (springiness) ต่ำกว่าจำปาตะสด โดยค่าความแข็งถือเป็นค่าที่สำคัญในการแสดงถึงการเกิดเปลือกแข็ง (case-hardening) ในผักและผลไม้อบแห้ง ซึ่งค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นนี้เกิดจากดีโพลีเมอไรเซชัน (depolymerization) ขององค์ประกอบที่ผนังเซลล์ เช่น เพกตินเมื่อได้รับความร้อนในกระบวนการทำแห้ง

Figiel (2010) ศึกษาคุณภาพทางด้านสีและการคืนน้ำกลับของบัตร์ดที่ทำแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับ convective pre-drying (CPD) จนมีความชื้นในระดับหนึ่งและทำแห้งต่อด้วย vacuum-microwave finish drying (VMFD) จนสิ้นสุดกระบวนการ พบว่าปริมาณความชื้นที่ลดลงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของบัตร์ดในช่วงที่อุณหภูมิตกลง การเพิ่มกำลังของคลื่นไมโครเวฟและลดเวลาในการทำแห้งด้วย CPD ลง จะทำให้การหดตัวมีค่าต่ำซึ่งส่งผลทำให้ค่าการคืนน้ำกลับสูงด้วยเช่นกัน เนื่องจากการทำแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ จะส่งผลให้โครงสร้างพองตัว (puffed) และมีรูพรุนมาก

Soysal และคณะ (2009) ศึกษาคุณภาพของพริกหยวก (red pepper) ที่ทำแห้งด้วย continuous microwave-convective air drying (CMWC), intermittent microwave-convective air drying (IMWC) และ convective air drying (CD). พบว่าคุณภาพทางเคมีกายภาพทางด้านสีของพริกหยวก พบว่าตัวอย่างสดมีค่า  $L^*$  ต่ำและมีค่า  $a^*$  สูงกว่าพริกหยวกแห้ง และการทำแห้งด้วย CMWC ส่งผลทำให้พริกหยวกมีสีคล้ำมากที่สุด อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบไม่อาศัยเอนไซม์ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นหลัก และยังพบว่าการทำแห้งพริกหยวกในกระบวนการแบบต่อเนื่องมีค่าการเกิดสีน้ำตาลต่ำกว่ากระบวนการแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิเดียวกัน เนื้อสัมผัสก็ถือเป็นลักษณะที่สำคัญในการประเมินคุณภาพ โดยการทำแห้งด้วยลมร้อนส่งผลให้มีค่าความแข็งสูงกว่าการทำแห้งด้วยวิธีอื่นๆ

Zielinska และMarkowski (2016) ศึกษาผลของการทำแห้งบลูเบอร์รี่ด้วยลมร้อนในช่วงแรกตามด้วยไมโครเวฟ พบว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิ  $80^{\circ}\text{C}$  บลูเบอร์รี่มีการหดตัวประมาณ 82% เนื่องจากบลูเบอร์รี่มีน้ำเป็นองค์ประกอบสูงและพบว่าอุณหภูมิ  $80^{\circ}\text{C}$  ส่งผลให้ในระหว่างการทำแห้งมีความดันไอสูง ทำให้เนื้อของผลไม้หดตัวเข้าด้านในในขณะที่น้ำเคลื่อนที่ออกมาด้านนอก ส่งผลให้เกิดการสังสมของเนื้อภายในได้เปลือกของผลไม้แห้ง ซึ่งจะส่งผลต่อการคืนกลับน้ำของผลไม้หลังการอบแห้ง

Farahnaky และKamali (2015) ศึกษาการทำแห้งถั่วพิสตาชิโอด้วยการทำแห้งแบบบังคับลม (Air forced drying) พบว่าถั่วพิสตาชิโอมีความแข็งและต้องใช้พลังงานในการกดเพิ่มมากขึ้นเมื่อความชื้นลดลง โดยเมื่อสังเกตที่ความชื้นเดียวกัน แต่สภาวะในการทำแห้งต่างกันความแข็งก็แตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นที่เหลืออยู่ในตัวอย่างเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับรูปแบบของพลังงานความร้อนที่ตัวอย่างได้รับในระหว่างกระบวนการทำแห้ง ซึ่งในการทำแห้งถั่วพิสตาชิโอการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสจะเกิดขึ้นมากในช่วงแรกของการทำแห้งซึ่งเป็นช่วงที่มีความชื้นอยู่มาก

Ricce และคณะ (2016) ศึกษาการคืนน้ำกลับของแผ่นแครอทที่ทำการปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราซาวด์ก่อนการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ  $40^{\circ}\text{C}$  และ  $60^{\circ}\text{C}$  พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลง เช่น เซลล์แตก (cell disruption), การก่อตัวของช่องขนาดเล็ก (micro-channel formation) และการขยายตัวของเซลล์ (cell bloating) ซึ่งได้รับอิทธิพลมาจากช่วงการปรับสภาพ และยังพบว่าแผ่นแครอทที่ผ่านการทำแห้งด้วยช่วงอัลตราซาวด์น้อยร่วมกับอุณหภูมิต่ำ ตัวอย่างจะ

สามารถคืนน้ำกลับได้ดีกว่า เนื่องจากเซลล์เกิดการแตกและเนื้อเยื่อถูกทำลายน้อยกว่าการทำแห้งด้วยช่วงอัลตราซาวด์มากกว่าร่วมกับอุณหภูมิสูง ถึงแม้ว่ากรณีนี้จะให้ค่าอัตราการทำแห้งสูงกว่าก็ตาม

Salehi และKashaninejad (2018) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางด้านสีและการหดตัวของชิ้นเลมอนที่ทำแห้งด้วยคลื่นอินฟราเรดภายใต้สภาวะสุญญากาศ (IR-VD) พบว่าทั้งกำลังของหลอดอินฟราเรดและความดันในระบบสุญญากาศมีผลต่อเวลาในการทำแห้งและค่าสี  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  พบว่าค่า  $L^*$  ลดลง ค่า  $a^*$  และ  $b^*$  เพิ่มขึ้นหลังจากการทำแห้ง แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลและการเพิ่มขึ้นของเปลือกแข็ง (crust formation) เนื่องจากการได้รับอุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน และอีกค่าที่นิยมใช้ในการอธิบายค่าสีในกระบวนการทำแห้งคือค่า ความแตกต่างของสี ( $\Delta E$ ) โดยพบว่าค่า  $\Delta E$  เพิ่มขึ้นในระหว่างการทำแห้ง ซึ่ง  $\Delta E$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นมากเมื่อตัวอย่างได้รับอุณหภูมิสูงและมีความชื้นต่ำ เนื่องมาจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบไม่อาศัยเอนไซม์ เช่น ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) และ ปฏิกิริยาการเกิดคาราเมล (caramelization of sugar) ในส่วนของการหดตัวงานวิจัยนี้แสดงเป็นค่า ร้อยละของพื้นที่ผิวที่เปลี่ยนแปลงไป (%surface change) พบว่าการสูญเสียความชื้นส่งผลโดยตรงต่อการหดตัวของตัวอย่างและมีการหดตัวมากขึ้นอย่างต่อเนื่องตามเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง และการเพิ่มกำลังของหลอดอินฟราเรดก็ยังส่งผลให้เกิดการหดตัวมากขึ้น



### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 วัตถุประสงค์

มะม่วงสุก สายพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง เลือกซื้อจากตลาดปทุมมงคล จังหวัดนครปฐม ที่มีระดับความแก่-อ่อนเท่ากันโดยพิจารณาจาก

1. ขนาด และสีมีความสม่ำเสมอ
2. ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (Initial moisture content) ในช่วง  $4.93 \pm 0.23$  g water/ g dry basis
3. ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (Total soluble solid) ที่เป็นองค์ประกอบจากการวัดด้วย refractometer (Optika HR-130, italy) มีค่าอยู่ในช่วง  $18.32 \pm 1.03^\circ$ Brix
4. ความแน่นเนื่องจากการวัดด้วย penetrometer โดยใช้หัววัดขนาด 8 mm. มีค่าใกล้เคียงกัน คือ  $12.76 \pm 1.52$  N
5. ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ (titratable acidity; TA)  $0.28 \pm 0.06$  g citric/ 100 g sample

##### 3.2 วิธีการทดลอง

###### 3.2.1 แผนการทดลอง

ในการทดลองทำแห้งโดยใช้ลมร้อนทั้งหมด 9 สภาวะ ที่อุณหภูมิ 3 ระดับคือ  $50^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$  และ  $70^\circ\text{C}$  ที่ความเร็วลม 3 ระดับคือ 1.0 m/s, 1.5 m/s และ 2 m/s และในการทำแห้งโดยใช้ลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำทั้งหมด 9 สภาวะ ที่อุณหภูมิ 3 ระดับคือ  $90^\circ\text{C}$ ,  $100^\circ\text{C}$  และ  $110^\circ\text{C}$  ที่ความดัน 3 ระดับคือ 4 cmHg, 5 cmHg และ 6 cmHg ใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Experiment) ดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลร่วมหรืออิทธิพลของแต่ละปัจจัยการทำแห้ง ต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการทำแห้ง

ตารางที่ 1 แผนการทดลองการทำแห้งโดยใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิและความเร็วลมต่างๆ

สภาวะ	ความเร็วลม (m/s)	อุณหภูมิ (°C)
V1.0T50	1.0	50
V1.5T50	1.5	50
V2.0T50	2.0	50
V1.0T60	1.0	60
V1.5T60	1.5	60
V2.0T60	2.0	60
V1.0T70	1.0	70
V1.5T70	1.5	70
V2.0T70	2.0	70

ตารางที่ 2 แผนการทดลองการทำแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ

สภาวะ	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (cm Hg)
P4T90	90	4
P4T100	100	4
P4T110	110	4
P5T90	90	5
P5T100	100	5
P5T110	110	5
P6T90	90	6
P6T100	100	6
P6T110	110	6



### 3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นตัวอย่างมะม่วง

ในการศึกษานี้ทำการคัดเลือกคุณภาพด้านเคมี-กายภาพของมะม่วงให้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันทุกการทดลอง ตามวิธีในข้อ 3.1 และมีการเตรียมชิ้นตัวอย่างมะม่วงโดยเริ่มจากการล้างผลมะม่วงด้วยน้ำสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก จากนั้นจึงปอกเปลือก และหั่นชิ้นมะม่วงให้มีขนาดความกว้าง 1.5 เซนติเมตร ยาว 1.5 เซนติเมตร และหนา 1.0 เซนติเมตร

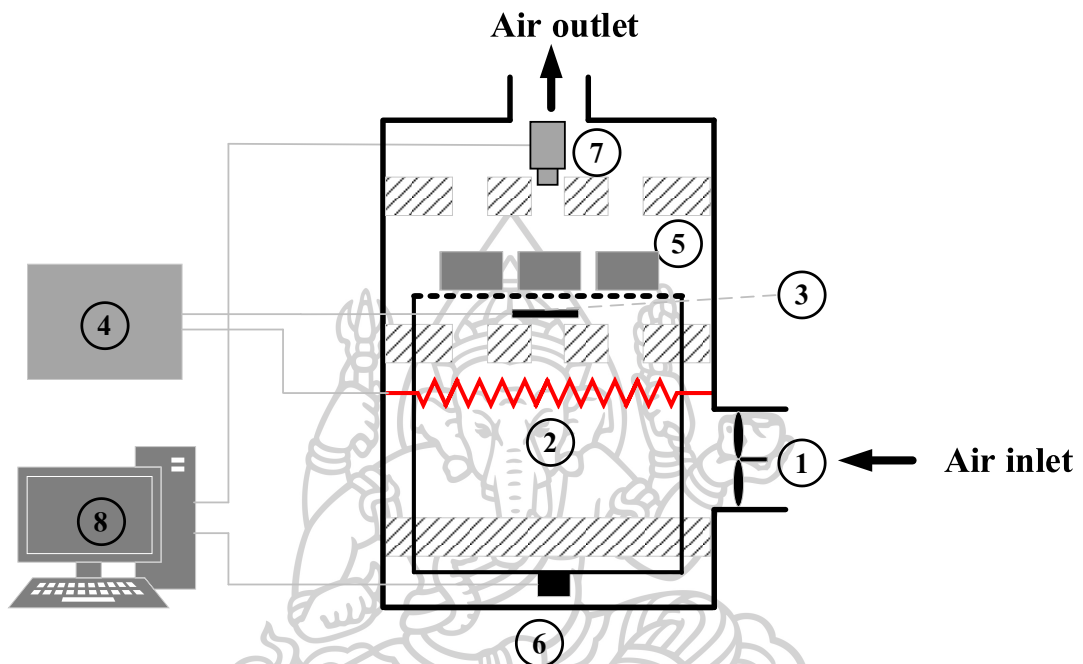
### 3.2.3 ขั้นตอนการหาความชื้นเริ่มต้นของชิ้นตัวอย่างมะม่วง

นำตัวอย่างไปหาความชื้นเริ่มต้น โดยการเตรียมตัวอย่างหนักที่แน่นอน  $3.0 \pm 0.1$  กรัม ใส่ลงไปในกระป๋องอลูมิเนียมสำหรับหาความชื้นและนำไปอบในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ  $105^{\circ}\text{C}$  จนกว่าน้ำหนักจะคงที่ โดยค่าความชื้นของตัวอย่างคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ

### 3.2.4 ศึกษาจลนพลศาสตร์ในการทำแห้งอาหารด้วยลมร้อน

1. ตั้งค่าเครื่องทำแห้งอาหารด้วยลมร้อน ให้ได้สภาวะที่คงที่ตามที่ต้องการ ตามตารางที่ 1 ตามแผนการทดลองในข้อ 3.2.1
2. คัดเลือก และเตรียมตัวอย่างมะม่วงตามวิธีในข้อ 3.2.2
3. นำตัวอย่างไปหาความชื้นเริ่มต้น ตามวิธีในข้อ 3.2.3
4. นำตะแกรงสำหรับวางชิ้นตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก บันทึกค่า
5. นำตัวอย่างวางบนตะแกรงแล้วชั่งน้ำหนัก บันทึกค่า
6. นำตะแกรงที่มีชิ้นตัวอย่างแล้ว วางลงในเครื่องทำแห้งอาหารด้วยลมร้อนที่มีสภาวะคงที่ตามที่ต้องการและเริ่มบันทึกค่าทันที โดยน้ำหนักของตัวอย่าง, ภาพถ่ายของชิ้นตัวอย่าง, ความเร็วลม, ความชื้นสัมพัทธ์, อุณหภูมิกระเปาะเปียกและแห้งของอากาศ จะถูกบันทึกอย่างต่อเนื่องทุกๆ 60 วินาที จนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างคงที่ โดยเครื่องทำแห้งอาหารด้วยลมร้อนแสดงในภาพที่ 2
7. นำตะแกรงที่มีชิ้นตัวอย่างออกจากเครื่องทำแห้งอาหารด้วยลมร้อนแล้วนำชั่งน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างหลังอบทันที
8. นำตัวอย่างไปศึกษาสมบัติทางด้านสี, การหั่วตัว และอัตราส่วนการคืนน้ำกลับ ตามวิธีในข้อ 3.2.6, 3.2.7 และ 3.2.8 ตามลำดับ
9. สร้างกราฟการทำแห้ง (Drying curve) และอัตราการทำแห้ง (Drying Rate) ของตัวอย่าง จากข้อมูลความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในตัวอย่างกับเวลาในระหว่างการทำแห้ง

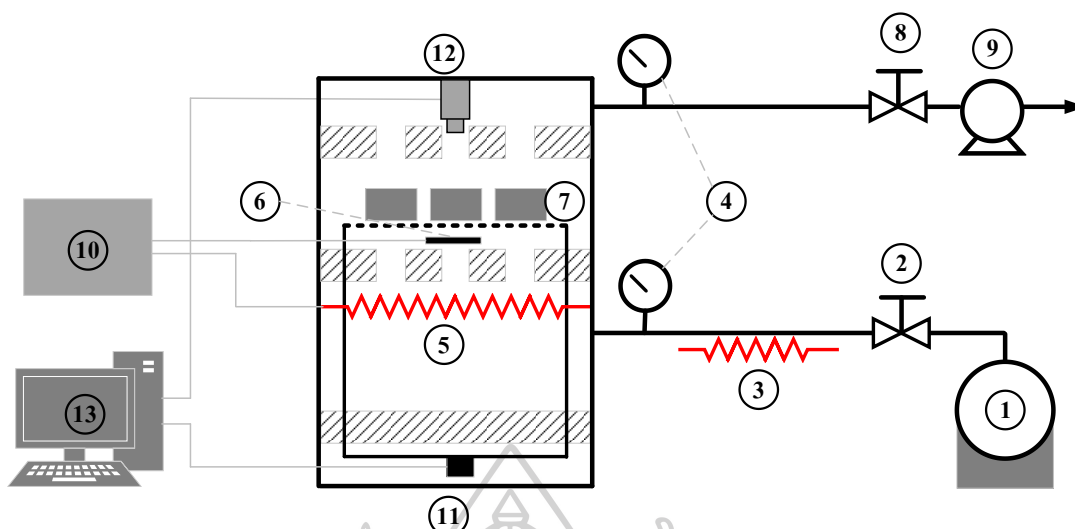
10. วิเคราะห์ค่าคงที่ที่แสดงประสิทธิภาพในกระบวนการทำแห้งจากข้อมูลเส้นโค้งการทำแห้ง ตามวิธีในข้อ 3.2.10



ภาพที่ 2 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่องมือที่ใช้ศึกษาการทำแห้งอาหารด้วยลมร้อน ประกอบด้วย (1) พัดลม (2) electrical heater (3) PT100 (4) Temperature controller (5) ตัวอย่าง (6) โหลดเซลล์ (7) digital camera (8) คอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูล

### 3.2.5 ศึกษาจลนพลศาสตร์ในการทำแห้งอาหารด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ

1. คัดเลือก และเตรียมตัวอย่างมะม่วงตามวิธีในข้อ 3.2.2
2. นำตัวอย่างไปหาความชื้นเริ่มต้น ตามวิธีในข้อ 3.2.3
3. นำตะแกรงสำหรับวางชิ้นตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก บันทึกค่า
4. นำตัวอย่างวางบนตะแกรงแล้วชั่งน้ำหนัก บันทึกค่า
5. ตั้งค่าเครื่องทำแห้งอาหารด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ ให้ได้สภาวะที่คงที่ตามที่ต้องการ ตามตารางที่ 2 ในแผนการทดลองข้อ 3.2.1
6. นำตะแกรงที่มีชิ้นตัวอย่างแล้ว วางลงในเครื่องทำแห้งอาหารด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ ที่มีสภาวะคงที่ตามที่ต้องการและเริ่มบันทึกค่าทันที โดยน้ำหนักของตัวอย่าง, ภาพถ่ายของชิ้นตัวอย่าง, ระดับความดัน, อุณหภูมิตัวอย่าง และอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จะถูกบันทึกอย่างต่อเนื่องทุกๆ 60 วินาที จนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างคงที่ โดยเครื่องทำแห้งอาหารด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำแสดงในภาพที่ 3
7. นำตะแกรงที่มีชิ้นตัวอย่างออกจากเครื่องทำแห้งอาหารด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ แล้วนำชั่งน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างหลังอบทันที
8. นำตัวอย่างไปศึกษาสมบัติทางด้านสี, การหั่วตัว และอัตราส่วนการคืนน้ำกลับ ตามวิธีในข้อ 3.2.6, 3.2.7 และ 3.2.8 ตามลำดับ
9. สร้างกราฟการทำแห้ง (Drying curve) และอัตราการทำแห้ง (Drying Rate) ของตัวอย่าง จากข้อมูลความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในตัวอย่างกับเวลาในระหว่างการทำแห้ง
10. วิเคราะห์ค่าคงที่ที่แสดงประสิทธิภาพในกระบวนการทำแห้งจากข้อมูลเส้นโค้งการทำแห้ง ตามวิธีในข้อ 3.2.10



ภาพที่ 3 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่องมือที่ใช้ศึกษาการทำแห้งอาหารด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ที่สภาวะความดันต่ำ ประกอบด้วย (1) เครื่องกำเนิดไอน้ำ (2) วาล์วลดความดัน (3) electrical pre-heater (4) vacuum gauge (5) electrical heater (6) PT100 (7) ตัวอย่าง (8) วาล์วสุญญากาศ (9) ปั๊มสุญญากาศ (10) Temperature controller (11) โหลดเซลล์ (12) digital camera (13) คอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูล

### 3.2.6 ศึกษาสมบัติทางด้านสีของตัวอย่าง

การประเมินคุณลักษณะด้านสีของตัวอย่างสดและตัวอย่างในระหว่างการทำแห้ง ถูกติดตามตลอดโดยใช้กล้องดิจิทัลถ่ายภาพ และเปลี่ยนภาพให้เป็นสีเทาเพื่อตัดพื้นหลังออก และวัดค่าสีในบริเวณที่ต้องการ โดยค่าสีที่วัดได้ใช้หน่วยระบบสี CIE ( $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$ ) โดยค่าสีของผลิตภัณฑ์ แสดงในเทอมของตัวแปร  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  โดยที่  $L^*$  เป็นค่าความสว่าง (Lightness)  $a^*$  เป็นค่าความเป็นสีแดง (Redness) และ  $b^*$  เป็นค่าความเป็นสีเหลือง (Yellowness) โดยข้อมูลที่ได้จะนำไปคำนวณค่าความแตกต่างสีสุทธิ ( $\Delta E^*$ ) ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (1)$$

เมื่อ  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  คือ ค่าความสว่าง ค่าความแดงและค่าความเหลือง ของตัวอย่างที่เวลาใดๆ

$L_0^*$ ,  $a_0^*$  และ  $b_0^*$  คือค่าสีของตัวอย่างก่อนอบ

### 3.2.7 ศึกษาสมบัติด้านการหดตัวของตัวอย่าง

การติดตามพฤติกรรมของการหดตัวอย่างต่อเนื่องในระหว่างการทำแห้ง จะใช้ระบบการติดตามด้วยภาพถ่ายตลอดการทดลอง และนำไปวิเคราะห์ค่าด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพ (Image Processing) โดยโปรแกรมประมวลผลภาพใช้หลักการในการเปลี่ยนสีรูปภาพจากภาพสีปกติเป็นสีเทา เพื่อให้รูปภาพมีความต่างกันอย่างชัดเจน ทำให้สามารถตัดพื้นหลังออกได้ จึงได้พื้นที่ที่เราสนใจ แล้วนำค่าจำนวนพิกเซลไปคำนวณเพื่อเปลี่ยนมาเป็นค่าพื้นที่ โดยมีกราฟเทียบมาตรฐานไว้สำหรับคำนวณค่า จากนั้นนำไปหาค่าร้อยละอัตราส่วนการหดตัว (S) ดังสมการที่ (2)

$$(S) = \left( 1 - \frac{\text{พื้นผิวตัวอย่างในระหว่างการทำแห้ง}}{\text{พื้นผิวตัวอย่างก่อนการทำแห้ง}} \right) \times 100 \quad (2)$$

### 3.2.8 ศึกษาสมบัติทางการคืนน้ำกลับของตัวอย่าง

วิเคราะห์การคืนน้ำกลับของมะม่วงสุกอบแห้งศึกษาจาก การจุ่มชิ้นตัวอย่างหลังการทำแห้งลงไปใต้น้ำกลั่นที่มีการควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และติดตามน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปทุกๆ 1 นาที จากนั้นนำมาหาอัตราส่วนการคืนน้ำกลับ ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$\text{อัตราส่วนการคืนน้ำกลับ (RR)} = \frac{M_t - M_i}{M_{eq} - M_i} \quad (3)$$

เมื่อ  $M_t$  คือ น้ำหนักของชิ้นมะม่วงอบแห้งที่เวลาใดๆ,  $M_{eq}$  คือ น้ำหนักที่สมดุลของชิ้นมะม่วงอบแห้ง,  $M_i$  คือ น้ำหนักเริ่มต้นของชิ้นมะม่วงอบแห้ง

### 3.2.9 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค

โครงสร้างระดับจุลภาค (microstructure) ของตัวอย่างหลังการทำแห้งจะนำมาวิเคราะห์ด้วย field emission scanning electron microscope (FE-SEM, Tescan Mira 3, Czech) โดยทำการหั่นชิ้นตัวอย่างให้เป็นแผ่นที่มีความหนาประมาณ 3.0 มิลลิเมตร เพื่อวางลงบนช่องวางตัวอย่าง และทำการเคลือบผงทองที่ชิ้นตัวอย่างก่อนถ่ายภาพของตัวอย่างที่กำลังขยาย 500 เท่า

### 3.2.10 จลนพลศาสตร์การทำแห้ง

#### 3.2.10.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ความชื้นในระหว่างการทำแห้ง แสดงในรูปของอัตราส่วนความชื้น (moisture ratio, MR) ซึ่งแสดงในสมการที่ (4)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} \quad (4)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น,  $M_t$  คือ ปริมาณความชื้นของชิ้นมะม่วงที่เวลาใดๆ,  $M_{eq}$  คือ ปริมาณความชื้นสมดุลของชิ้นมะม่วง,  $M_i$  คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของชิ้นมะม่วง โดยปริมาณความชื้นทั้งหมดจะเป็นปริมาณความชื้นฐานแห้ง (Dry basis)

โดยการทำการเปลี่ยนแปลงของความชื้นต่อเวลาในกระบวนการทำแห้งสามารถใช้ อัตราส่วนความชื้นที่เวลาใดๆที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จาก การตรวจเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการทำแห้งอาหาร ส่งผลให้งานวิจัยนี้ใช้ 3 แบบจำลองซึ่งแสดง รูปแบบความสัมพันธ์ของแบบจำลองดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทำแห้ง

ลำดับที่	ชื่อแบบจำลอง	รูปแบบสมการ
1.	Lewis	$MR = \exp(-kt)$
2.	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3.	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$

เมื่อ a, k และ n คือค่าคงที่ในแบบจำลองและ t คือเวลาในการทำแห้ง (วินาที)

โดยการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมจะวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination,  $R^2$ ), รากที่สองของความคลาดเคลื่อน กำลังสองเฉลี่ย (root mean squared error, RMSE) และค่าไคสแควร์ ( $\chi^2$ ) โดยแบบจำลองที่มีความเหมาะสมมากที่สุดควรมีค่า  $R^2$  สูงที่สุดแต่มีค่า RMSE และ  $\chi^2$  ต่ำที่สุด ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังที่แสดง ในสมการที่ (5), (6) และ (7) ตามลำดับ

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Residual sum square}}{\text{Total sum square}} \quad (5)$$

$$RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [MR_{exp,i} - MR_{pre,i}]^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [MR_{exp,i} - MR_{pre,i}]^2}{n - z} \quad (7)$$

โดย  $MR_{exp}$  คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง,  $MR_{pre}$  คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง,  $n$  คือ จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์

### 3.2.10.2 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (Effective moisture diffusivity coefficient, $D_{eff}$ )

กฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) ถูกนำมาใช้อธิบายกลไกการแพร่ของน้ำในชิ้นตัวอย่างในระหว่างการทำแห้ง โดยในการทดลองชิ้นตัวอย่างมีลักษณะใกล้เคียงกับทรงลูกบาศก์ ก่อให้เกิดการแพร่ของความชื้นได้ทั้ง 3 ทิศทาง จึงสามารถหาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ( $D_{eff}$ ) ของชิ้นอาหารดังสมการที่ (8)

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

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

$N$ ,  $m$  และ  $k$  คือ ค่าคงที่ของสมการ,  $MR$  คือ อัตราส่วนความชื้น

โดยในการทำแห้งที่ใช้ระยะเวลาสั้น สามารถลดให้อยู่ในรูปของสมการลำดับที่หนึ่ง และสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจากความชันของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(MR)$  กับเวลาในการทำแห้ง ดังแสดงในสมการที่ (9) และ (10) โดยค่า L มาจาก  $X^2+Y^2+Z^2$

$$MR = \frac{8^3}{\pi^6} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t\right) \quad (9)$$

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

### 3.2.11 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ในงานวิจัยจะทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำในทุกๆ การทดลอง โดยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ จะใช้ SPSS software V.18 เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (one-way ANOVA) และทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยในแต่ละคู่ของแต่ละตัวแปรด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%





## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

#### 4.1 จลนพลศาสตร์การทำแห้งมะม่วงสุก

##### 4.1.1 พฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุก

การศึกษาจลนพลศาสตร์การทำแห้งความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างกระบวนการทำแห้งมะม่วงด้วยลมร้อนมีลักษณะเป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมการทำแห้งโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 3 แบบจำลอง คือ Lewis, Page และ Henderson and Pabis ดังแสดงในตารางที่ 4 แสดงค่าคงที่และการวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองการทำแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของ Page ให้ค่า  $R^2$  สูงที่สุด อยู่ในช่วง 0.8739-0.9985 ในขณะที่ค่า RMSE และ  $X^2$  ต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 0.0121-0.0866 และ  $8.47 \times 10^{-6}$  -  $1.72 \times 10^{-5}$  ตามลำดับ ในทุกสภาวะ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สามารถใช้ทำนายจลนพลศาสตร์การทำแห้งมะม่วงด้วยลมร้อนได้เป็นอย่างดี ซึ่งสอดคล้องกับการทำแห้งมะม่วงของ (Dissa และคณะ, 2008; Goyal และคณะ, 2006)

เช่นเดียวกับในการศึกษาจลนพลศาสตร์การทำแห้งมะม่วงด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างกระบวนการทำแห้งมีลักษณะเป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมการทำแห้งโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 3 แบบจำลอง คือ Lewis, Page และ Henderson and Pabis ดังแสดงในตารางที่ 4 แสดงค่าคงที่และการวิเคราะห์ทางสถิติของแบบจำลองการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของ Page ให้ค่า  $R^2$  สูงที่สุด อยู่ในช่วง 0.9813-0.9979 ในขณะที่ค่า RMSE และ  $X^2$  ต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 0.0118-0.0799 และ  $9.00 \times 10^{-9}$  -  $1.47 \times 10^{-7}$  ตามลำดับ ในทุกสภาวะ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สามารถใช้ทำนายจลนพลศาสตร์การทำแห้งมะม่วงด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำได้เป็นอย่างดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Rachna และคณะ, 2018)

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ไอน้ำร้อน  
 ยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ

แบบจำลอง	สภาวะการทำแห้ง	ค่าคงที่ในแบบจำลอง	$R^2$	RMSE( $\times 10^2$ )	$\chi^2(\times 10^5)$
การทำแห้งด้วยลมร้อน					
Newton	V1.0T50	k=0.000041	0.89547	0.01221	0.0149
	V1.5T50	k=0.000074	0.96720	0.04617	0.0021
	V2.0T50	k=0.000074	0.98515	0.03110	0.0010
	V1.0T60	k=0.000060	0.87730	0.01273	0.0162
	V1.5T60	k=0.000130	0.94303	0.05306	0.0028
	V2.0T60	k=0.000113	0.91429	0.06793	0.0046
	V1.0T70	k=0.000096	0.87105	0.08761	0.0076
	V1.5T70	k=0.000156	0.97443	0.03335	0.0011
	V2.0T70	k=0.000194	0.97302	0.03164	0.0010
Page	V1.0T50	k=0.000089 n=0.9232	0.89783	0.01214	0.0147
	V1.5T50	k=0.000079 n=0.9933	0.96721	0.04615	0.0022
	V2.0T50	k=0.000670 n=1.0104	0.98519	0.03106	0.0009
	V1.0T60	k=0.000206 n=0.8759	0.88329	0.01254	0.0157
	V1.5T60	k=0.000176 n=0.9671	0.94331	0.05292	0.0028
	V2.0T60	k=0.000212 n=0.9326	0.91562	0.06740	0.0045
	V1.0T70	k=0.000237 n=0.9046	0.87396	0.08661	0.0075
	V1.5T70	k=0.000160 n=0.9966	0.97444	0.03334	0.0011
	V2.0T70	k=0.000200 n=0.9961	0.97302	0.03163	0.0010
Henderson and Pabis	V1.0T50	k=0.000039 a=0.9703	0.89661	0.01217	0.0148
	V1.5T50	k=0.000074 a=0.9967	0.96721	0.04616	0.0021
	V2.0T50	k=0.000075 a=1.0070	0.98519	0.03105	0.0009
	V1.0T60	k=0.000057 a=0.9438	0.88025	0.01263	0.0159
	V1.5T60	k=0.000128 a=0.9861	0.94316	0.05299	0.0028
	V2.0T60	k=0.000110 a=0.9703	0.91490	0.06769	0.0046
	V1.0T70	k=0.000092 a=0.9576	0.87235	0.08717	0.0076
	V1.5T70	k=0.000156 a=0.9999	0.97443	0.03334	0.0011
	V2.0T70	k=0.000156 a=0.9993	0.97302	0.03164	0.0010

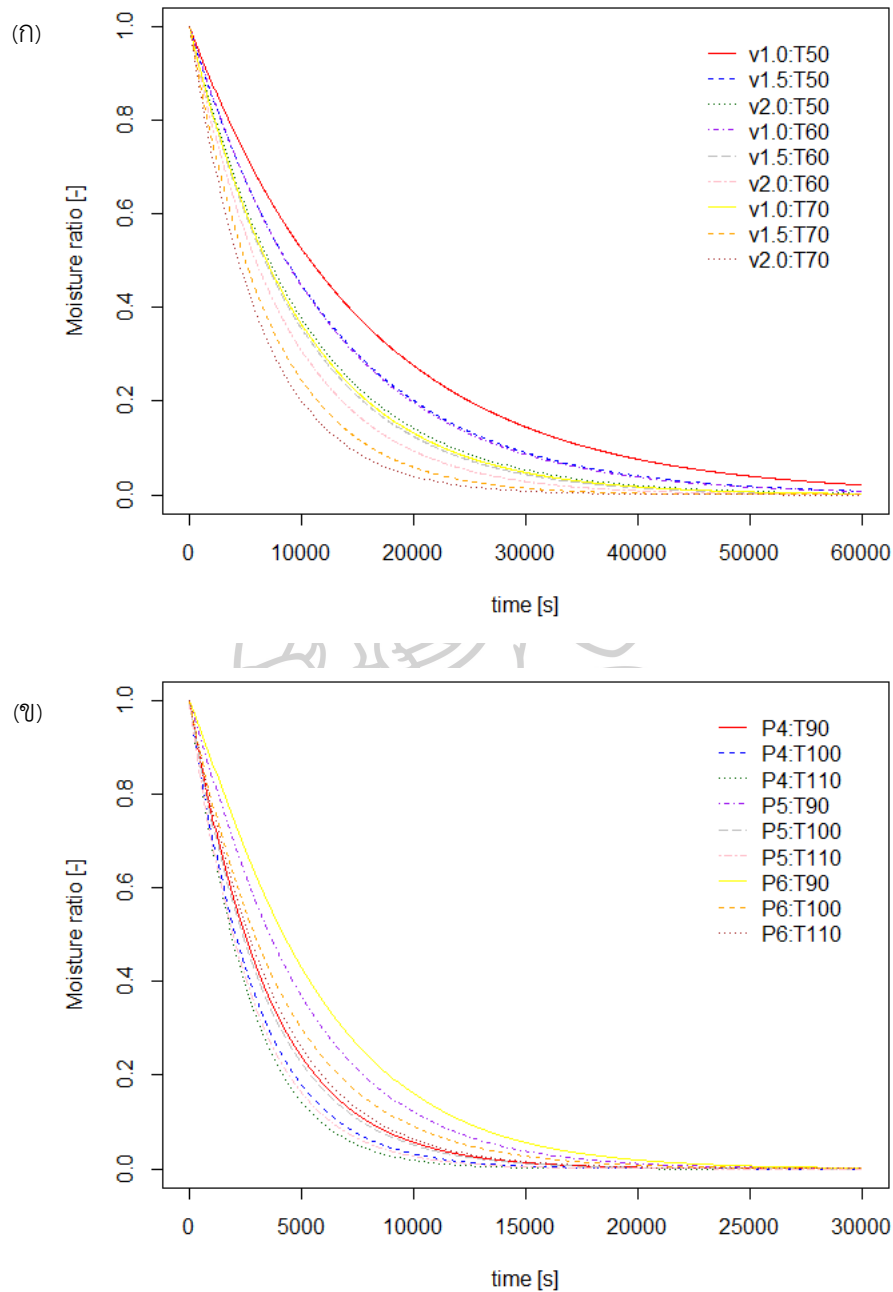
ตารางที่ 4 (ต่อ)

แบบจำลอง	สถานะการทำแห้ง	ค่าคงที่ในแบบจำลอง	R <sup>2</sup>	RMSE( $\times 10^2$ )	$\chi^2(\times 10^5)$
การทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ					
Newton	P4T90	k=0.00028	0.99493	1.1730	2.227
	P4T100	k=0.00035	0.99356	0.01989	3.790
	P4T110	k=0.00038	0.99320	0.02458	6.110
	P5T90	k=0.00020	0.99277	0.02413	5.028
	P5T100	k=0.00030	0.98126	0.03724	8.846
	P5T110	k=0.00037	0.99786	0.07986	17.476
	P6T90	k=0.00017	0.99675	0.02234	7.868
	P6T100	k=0.00024	0.98986	0.02731	6.057
	P6T110	k=0.00027	0.99573	0.01723	3.813
Page	P4T90	k=0.00026 n=1.011246	0.99490	0.01179	2.242
	P4T100	k=0.00036 n=0.994862	0.99344	0.02001	3.820
	P4T110	k=0.00029 n=1.035021	0.99387	0.02260	5.638
	P5T90	k=0.00010 n=1.081393	0.99447	0.02029	4.237
	P5T100	k=0.00029 n=1.003200	0.98130	0.03675	8.750
	P5T110	k=0.00035 n=1.004587	0.99788	0.07988	17.519
	P6T90	k=0.00062 n=1.117352	0.99657	0.01552	5.487
	P6T100	k=0.000241 n=1.000069	0.98986	0.02731	6.069
	P6T110	k=0.000213 n=1.028228	0.996334	0.01657	3.674
Henderson and Pabis	P4T90	k=0.000294 a= 1.01816	0.99493	0.01206	2.290
	P4T100	k=0.000345 a=0.993769	0.99346	0.01986	3.790
	P4T110	k=0.000396 a= 1.02678	0.99337	0.02252	5.618
	P5T90	k=0.000206 a=1.013869	0.99266	0.02354	4.915
	P5T100	k=0.000299 a=0.986850	0.98117	0.03673	8.746
	P5T110	k=0.000372 a=0.999236	0.99786	0.07981	17.503
	P6T90	k=0.000183 a=1.043425	0.99553	0.01824	6.446
	P6T100	k=0.000243 a=1.008326	0.98977	0.02717	6.0379
	P6T110	k=0.000271 a=1.000897	0.99572	0.01727	3.831

กราฟการทำแห้ง (drying curve) ของมะม่วงสุกด้วยลมร้อนทั้ง 9 สภาวะ แสดงดังภาพที่ 4ก ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการทำแห้งของมะม่วงสุกด้วยลมร้อนทั้ง 9 สภาวะ อัตราส่วนความชื้นของมะม่วงจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและช้าลงอย่างมากในช่วงท้าย เนื่องจากการทำแห้งด้วยลมร้อน อากาศร้อนจะสัมผัสกับผิวของอาหารที่มีความชื้นสูงและจะถ่ายโอนความร้อนเข้าไปในชิ้นอาหารโดยการนำความร้อน ความชื้นที่ได้รับความร้อนจะเกิดการถ่ายโอนมวลจากภายในออกไปยังผิวของชิ้นอาหารและถูกพัดพาออกไปโดยอากาศร้อน ส่งผลให้การทำแห้งด้วยลมร้อนมักจะมีรูปแบบของการลดลงของอัตราส่วนความชื้นอยู่ 2 ช่วงคือ ในช่วงแรกที่ผิวและภายในของชิ้นอาหารมีปริมาณความชื้นอยู่มาก น้ำอิสระจึงสามารถถ่ายโอนมวลไปที่ผิวและถูกกำจัดออกไปได้ง่ายโดยการระเหยได้อย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว เนื่องจากปริมาณความชื้นที่มาก ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำในชิ้นมะม่วงกับตัวกลาง (อากาศร้อน) มีความแตกต่างกันมาก จึงเป็นแรงขับให้เกิดการถ่ายเทมวลได้อย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อทำแห้งไปสักระยะหนึ่งการกำจัดความชื้นเป็นไปได้ยากขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำในชิ้นอาหารมีน้อยลงและมีพันธะยึดติดกับโครงสร้างที่แข็งแรง ส่งผลให้ความอิสระของน้ำในชิ้นอาหารลดน้อยลงหรือมีความหนืดเพิ่มขึ้น ทำให้การทำแห้งในช่วงท้ายมักจะใช้เวลาในการทำแห้งมากถึง 60% ของเวลาในการทำแห้งทั้งหมด เช่นเดียวกับกราฟการทำแห้งในภาพที่ 4ข แสดงอัตราส่วนความชื้นที่ลดลงเทียบกับเวลา ในการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ (LPSSD) ทั้ง 9 สภาวะ แสดงให้เห็นว่ารูปแบบการลดลงของความชื้นของทั้ง 2 กระบวนการมีลักษณะใกล้เคียงกันคือ อัตราส่วนความชื้นของมะม่วงในช่วงแรกจะลดลงอย่างรวดเร็ว และค่อยๆ ช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป แต่ในการทำแห้งด้วย LPSSD ในช่วงต้นของกระบวนการลดลงของความชื้นเกิดขึ้นรวดเร็วกว่าในการทำแห้งด้วยลมร้อนเป็นอย่างมาก

อิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วลมส่งผลต่อการลดลงของความชื้นในการทำแห้งด้วยลมร้อน โดยการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำร่วมกับความเร็วลมต่ำส่งผลให้การลดลงของความชื้นลดลงช้ามากตลอดกระบวนการ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วลมจะส่งผลให้การลดลงของความชื้นในช่วงแรก of กระบวนการลดลงได้อย่างรวดเร็ว เช่นเดียวกับอิทธิพลของอุณหภูมิและระดับความดันก็ส่งผลต่อการลดลงของความชื้นในการทำแห้งด้วย LPSSD โดยการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำร่วมกับระดับความดันที่ต่ำส่งผลให้การลดลงของความชื้นลดลงช้าตลอดกระบวนการ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและลดระดับความดันลงจะส่งผลให้การลดลงของความชื้นในช่วงแรกของกระบวนการลดลงได้อย่างรวดเร็ว และจะเห็นได้ว่าอิทธิพลของอุณหภูมิและระดับความดันในการทำแห้งด้วย LPSSD ส่งผลให้เกิดความแตกต่างใน

การลดลงของความชื้นของแต่ละสภาวะ น้อยกว่าในการทำแห้งด้วยลมร้อนรวมถึงเกิดการทำให้แห้งได้อย่างรวดเร็วในทุกสภาวะของ LPSSD

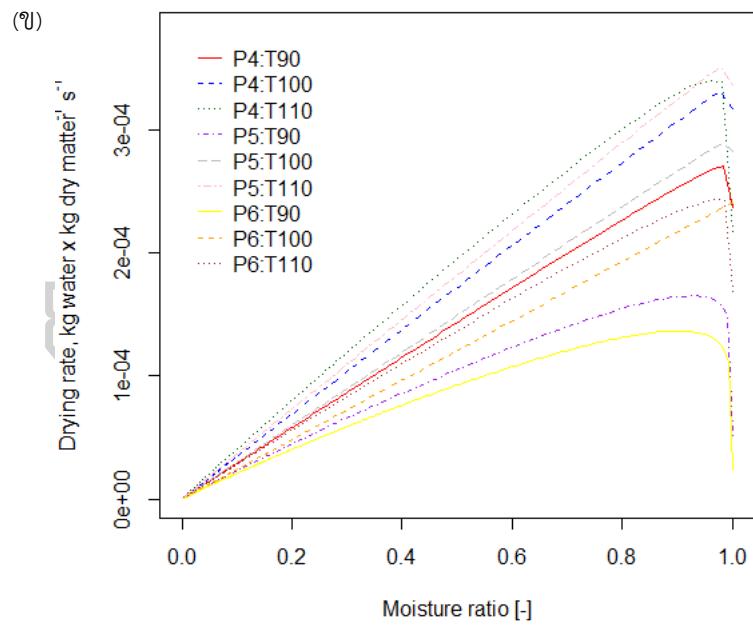
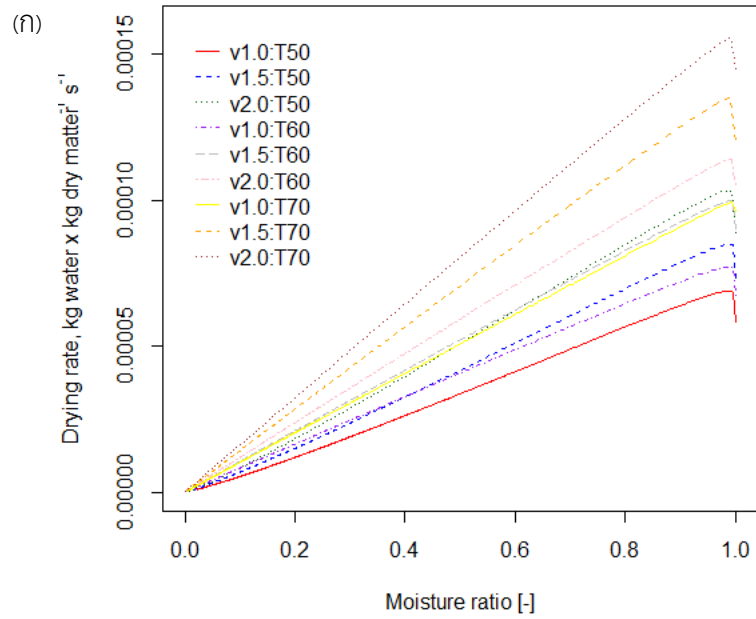


ภาพที่ 4 กราฟการทำแห้งของมะม่วงสุกที่สภาวะต่างๆ ในกระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ

#### 4.1.2 อัตราการทำแห้งมะม่วงสุก

อัตราการทำแห้ง (Drying rate) ของมะม่วงสุกที่ทำแห้งด้วยด้วยลมร้อนทั้ง 9 สภาวะ ดังแสดงในภาพที่ 5ก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณความชื้นที่ถูกกำจัดออกจากชิ้นตัวอย่างในหนึ่งหน่วยเวลาต่อปริมาณมวลแห้ง (กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมมวลแห้ง/นาท) โดยพบว่าอัตราการทำแห้งเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความเร็วลมในการทำแห้งเพิ่มขึ้นและอัตราการทำแห้งมะม่วงด้วยลมร้อนไม่พบช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ (constant period) พบเพียงแต่ช่วงอัตราการทำแห้งลดลงเท่านั้น (falling period) เนื่องจากการกำจัดความชื้นที่ผิวของชิ้นตัวอย่างเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วส่งผลให้ในช่วงแรกมีอัตราการทำแห้งสูงมากและค่อยๆลดลงเป็นเส้นตรง แต่ในช่วงท้ายที่ความชื้นลดลงใกล้เข้าสู่สมดุล รวมถึงการเกิดเปลือกแข็งในสภาวะที่ทำแห้งได้อย่างรวดเร็ว ยิ่งจะส่งผลให้การทำแห้งเป็นไปได้ยาก ทำให้อัตราการทำแห้งต่ำลงมากๆ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าในการทำแห้งกีวี (Orikasa และคณะ, 2008) และหัวไชเท้า (Liu และคณะ, 2017)

โดยในการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำจะใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการให้พลังงานในระหว่างการทำแห้ง ส่งผลให้รูปแบบของอัตราการทำแห้งแตกต่างจากการทำแห้งด้วยลมร้อน ดังแสดงในภาพที่ 5ข. โดยจะพบว่าในการทำแห้งด้วย LPSSD อัตราการทำแห้งในช่วงแรกจะพบช่วงอุ่นตัวอย่าง (Initial adjustment period) เนื่องจากในช่วงแรกตัวอย่างมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิของตัวกลางในการทำแห้ง (ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง) ตัวอย่างจึงใช้พลังงานความร้อนจากตัวกลางส่วนใหญ่เพื่อเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นตัวอย่าง ส่งผลให้ในช่วงแรกมีอัตราการทำแห้งที่ค่อนข้างต่ำ แต่เมื่อทำแห้งไปสักระยะจะสามารถเกิดการทำแห้งได้อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากอุณหภูมิของตัวอย่างจะเท่ากับอุณหภูมิของจุดเดือดภายใต้สภาวะความดันต่ำ (ที่ 6 cmHg น้ำจะเดือดที่ประมาณ 41 °C) ซึ่งทำให้ตัวกลางสามารถใช้พลังงานความร้อนสัมผัสที่มีไปกับการระเหยน้ำออกจากชิ้นตัวอย่าง หลังจากนั้นจะมีลักษณะคล้ายกับการทำแห้งด้วยลมร้อนคือ อัตราการทำแห้งในช่วงแรกจะสูงและค่อยๆลดลงเป็นเส้นตรง โดยยิ่งใช้อุณหภูมิสูงร่วมกับระดับความดันที่ต่ำอัตราการทำแห้งจะยิ่งสูงขึ้น



ภาพที่ 5 อัตราการทำแห้งของมะม่วงสุกที่สภาวะต่างๆ ในกระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ใช้น้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ

จากภาพที่ 5 ยังพบว่า LPSSD มีอัตราการทำแห้งสูงกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากความแตกต่างของคุณสมบัติของตัวกลางในการทำแห้งที่ต่างกัน โดยในการทำแห้งด้วยลมร้อนการแพร่ของความชื้นค่อยๆแพร่จากข้างในออกมาที่ผิวของชิ้นตัวอย่าง โดยอากาศร้อนจะถ่ายโอนความร้อนเข้าไปในชิ้นอาหารโดยการนำความร้อน ความชื้นที่ได้รับความร้อนจะเกิดการถ่ายโอนมวลจากภายในออกไปยังผิวของชิ้นอาหารและถูกพัดพาออกไปโดยอากาศร้อน แตกต่างจากการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ การแพร่กระจายของไอน้ำร้อนยวดยิ่งเกิดขึ้นภายในชิ้นตัวอย่างและการที่ไม่มีอากาศอยู่ในระบบจึงไม่มีแรงต้านการแพร่ของความชื้น ส่งผลให้มีอัตราการทำแห้งสูงกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน รวมทั้งอิทธิพลของอุณหภูมิและระดับความดัน ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของอัตราการทำแห้งในช่วงแรกของแต่ละสภาวะมากกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการให้พลังงานในระหว่างการทำแห้งด้วย LPSSD มีข้อจำกัดคือหากใช้สภาวะในการทำแห้งที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิของไอน้ำอิ่มตัวจะส่งผลให้ตัวกลางมีพลังงานในการทำแห้งต่ำหรืออาจทำให้เกิดการควบแน่นจนไม่สามารถทำแห้งจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ต้องการได้ (Devahastin และคณะ, 2004) พบได้จากสภาวะ P6:T90 และ P5:T90 ซึ่งเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มีระดับพลังงานต่ำเนื่องจากมีอุณหภูมิต่ำ และความดันสูงจึงมีช่วงอุ่นตัวอย่างในช่วงเริ่มต้นการทำแห้งเป็นระยะเวลาสั้นและมีอัตราการทำแห้งต่ำตลอดทั้งกระบวนการ





#### 4.1.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นในการทำแห้งมะม่วงสุก

การทำแห้งมะม่วงด้วยลมร้อนทั้ง 9 สภาวะ จนเหลือความชื้นสุดท้ายน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $0.26 \text{ g water/g dry basis}$  ส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ( $D_{\text{eff}}$ ) อยู่ในช่วง  $2.59 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s} - 7.24 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  ซึ่งแสดงดังตารางที่ 5 จากตารางจะพบว่าการทำแห้งมะม่วงด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิเดียวกัน การปรับเพิ่มความเร็วลมจะส่งผลให้ค่า  $D_{\text{eff}}$  มีค่าสูงขึ้น เช่นเดียวกับการทำแห้งมะม่วงด้วยลมร้อนที่ความเร็วลมเท่ากัน การทำแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่า  $D_{\text{eff}}$  มีค่าสูงขึ้น โดยเฉพาะในสภาวะที่ใช้อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$  รวมกับความเร็วลม  $2 \text{ m/s}$  ค่า  $D_{\text{eff}}$  จะสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) โดยความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วลมในการทำแห้งด้วยลมร้อนต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจะแสดงในภาพที่ 6k พบว่ายิ่งเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วลมก็จะยิ่งส่งผลให้ค่า  $D_{\text{eff}}$  มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการทำแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ในอากาศที่ใช้ในการทำแห้งจะมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้เกิดความแตกต่างของความดันไอระหว่างอากาศร้อนกับชื้นตัวอย่างมาก ส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนความชื้นสูงขึ้นจึงทำให้ค่า  $D_{\text{eff}}$  สูงขึ้น (Zhu และ Shen, 2014) และในการทำแห้งด้วยลมร้อนโดยใช้ความเร็วลมสูงขึ้น จะส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงขึ้น เนื่องจากความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นนั้นจะไปลดชั้นที่ต้านการแพร่ของความชื้นรอบๆ ชิ้นตัวอย่างให้ลดลง และแทนที่ด้วยอากาศร้อนที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ จึงเกิดการถ่ายโอนความร้อนที่ดีและทำให้ค่า  $D_{\text{eff}}$  สูงขึ้น (Abou และคณะ, 2019; Aral และ Bese, 2016)

ตารางที่ 5 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น การเปลี่ยนแปลง และร้อยละการหดตัวของการทำแห้ง มะม่วงสุกที่สภาวะต่างๆ ในกระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ

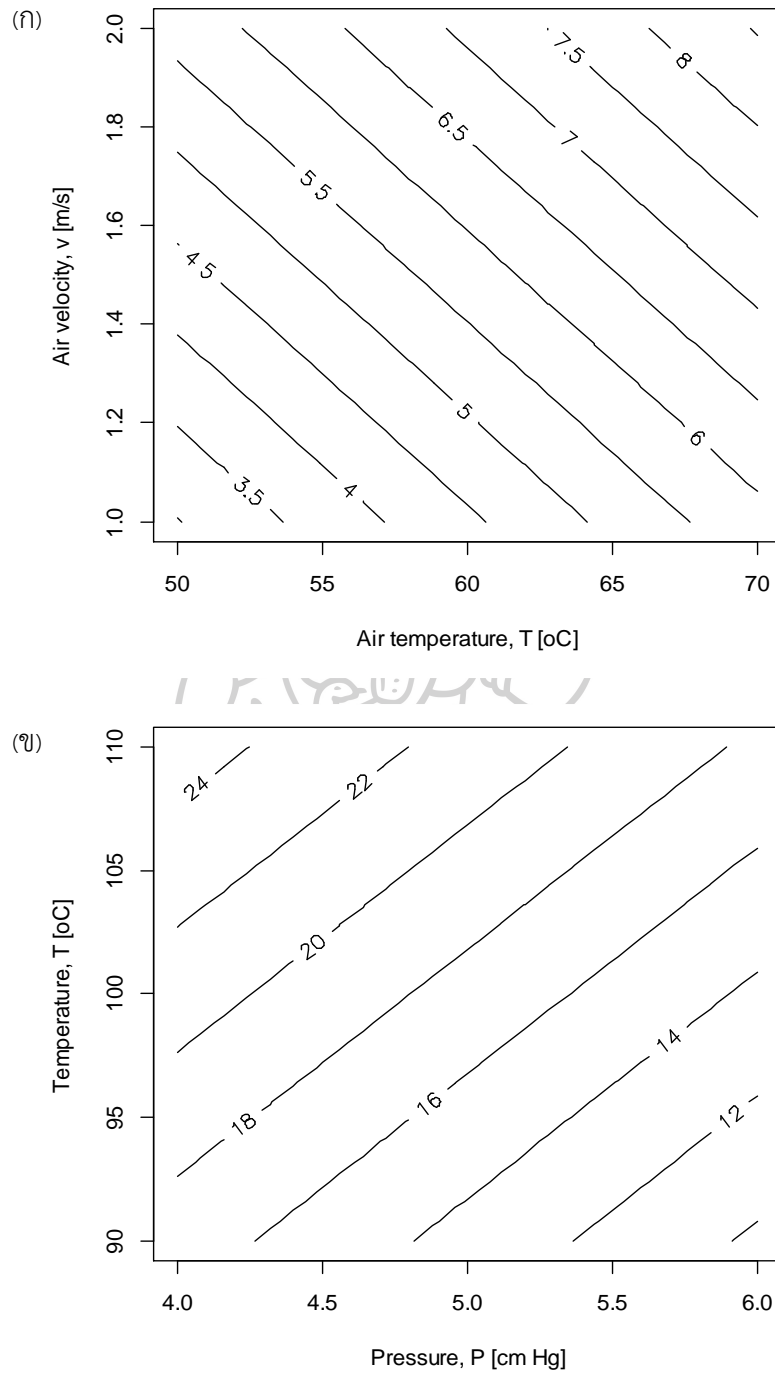
สภาวะในการทำแห้ง	$D_{\text{eff}}$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) $\times 10^8$	$\Delta E^*$	S (%)
กระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน			
V1.0T50	2.59±0.17 <sup>f</sup>	29.36±1.44 <sup>a</sup>	40.62±0.71 <sup>ab</sup>
V1.5T50	3.35±0.07 <sup>e</sup>	26.19±1.19 <sup>ab</sup>	37.96±2.49 <sup>bc</sup>
V2.0T50	4.13±0.07 <sup>d</sup>	25.33±0.95 <sup>ab</sup>	36.07±1.05 <sup>c</sup>
V1.0T60	3.25±0.44 <sup>e</sup>	24.70±2.60 <sup>bc</sup>	42.79±3.53 <sup>a</sup>
V1.5T60	4.74±0.10 <sup>d</sup>	24.26±2.82 <sup>bc</sup>	42.66±1.56 <sup>a</sup>
V2.0T60	5.56±0.17 <sup>b</sup>	20.97±3.20 <sup>cd</sup>	42.22±2.94 <sup>a</sup>
V1.0T70	5.83±0.17 <sup>e</sup>	26.55±2.93 <sup>ab</sup>	40.46±1.61 <sup>ab</sup>
V1.5T70	5.91±0.44 <sup>c</sup>	24.43±0.73 <sup>bc</sup>	37.94±1.45 <sup>bc</sup>
V2.0T70	7.24±0.41 <sup>a</sup>	18.75±2.59 <sup>d</sup>	36.93±2.04 <sup>bc</sup>
กระบวนการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ			
P4T90	17.01 ± 0.042 <sup>cd</sup>	9.00±0.33 <sup>c</sup>	23.53±0.34 <sup>d</sup>
P4T100	20.79 ± 0.041 <sup>b</sup>	7.32±0.37 <sup>d</sup>	23.62±0.35 <sup>d</sup>
P4T110	26.51 ± 0.008 <sup>a</sup>	7.67±0.32 <sup>d</sup>	22.59±0.13 <sup>e</sup>
P5T90	12.80 ± 0.022 <sup>ef</sup>	9.13±0.28 <sup>bc</sup>	24.71±0.37 <sup>c</sup>
P5T100	14.77 ± 0.062 <sup>de</sup>	9.52±0.25 <sup>bc</sup>	23.37±0.21 <sup>d</sup>
P5T110	21.30 ± 0.083 <sup>b</sup>	8.75±0.33 <sup>c</sup>	22.17±0.35 <sup>de</sup>
P6T90	11.47 ± 0.038 <sup>f</sup>	9.85±0.27 <sup>b</sup>	26.98±0.28 <sup>a</sup>
P6T100	13.74 ± 0.034 <sup>ef</sup>	7.13±0.37 <sup>d</sup>	25.62±0.30 <sup>b</sup>
P6T110	17.25 ± 0.115 <sup>c</sup>	12.37±0.50 <sup>a</sup>	24.36±0.26 <sup>c</sup>

หมายเหตุ ตัวอักษร <sup>abc def</sup> แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

เปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกันของแต่ละกระบวนการ

เช่นเดียวกับในการทำแห้งมะม่วงโดย LPSSD ทั้ง 9 สภาวะ จนเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 0.26 g water/g dry basis ส่งผลให้มีค่า  $D_{eff}$  อยู่ในช่วง  $11.47 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s –  $26.51 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s ซึ่งมีค่า  $D_{eff}$  สูงกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนในทุกสภาวะ ดังแสดงในตารางที่ 5 และยังพบว่าการทำแห้งมะม่วงโดย LPSSD ที่อุณหภูมิเดียวกัน การทำแห้งโดยใช้ความดันต่ำกว่าจะส่งผลให้ค่า  $D_{eff}$  มีค่าสูงขึ้น เช่นเดียวกับการทำแห้งมะม่วงโดย LPSSD ที่ระดับความดันเดียวกัน การทำแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูงกว่า จะส่งผลให้ค่า  $D_{eff}$  มีค่าสูงขึ้น โดยเฉพาะในสภาวะที่ใช้อุณหภูมิ 110°C ร่วมกับระดับความดัน 4 cmHg ค่า  $D_{eff}$  จะสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) โดยความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของอุณหภูมิและระดับความดันในการทำแห้งด้วย LPSSD ต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจะแสดงในภาพที่ 6ข พบว่ายิ่งเพิ่มอุณหภูมิและลดระดับความดันก็จะยิ่งส่งผลให้ ค่า  $D_{eff}$  มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากในการทำแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งภายใต้สภาวะความดันต่ำเป็นตัวกลางในการทำแห้ง ระดับพลังงานของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้จากการปรับอุณหภูมิและความดันในระบบ โดยยิ่งไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีอุณหภูมิสูงขึ้นหรือความดันต่ำลงเท่าไรก็จะยิ่งส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานของไอน้ำอิ่มตัว (saturated steam) กับไอน้ำอิ่มตัวยวดยิ่งหรือไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (superheated steam) ซึ่งพลังงานส่วนต่างนี้หรือพลังงานความร้อนสัมผัส (sensible heat) เป็นพลังงานที่นำมาใช้ในการทำแห้งของกระบวนการ LPSSD

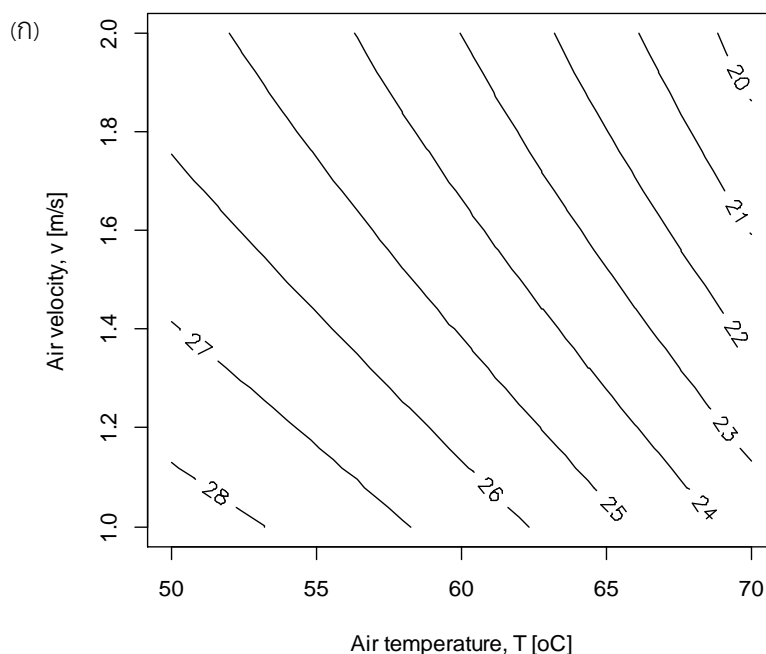


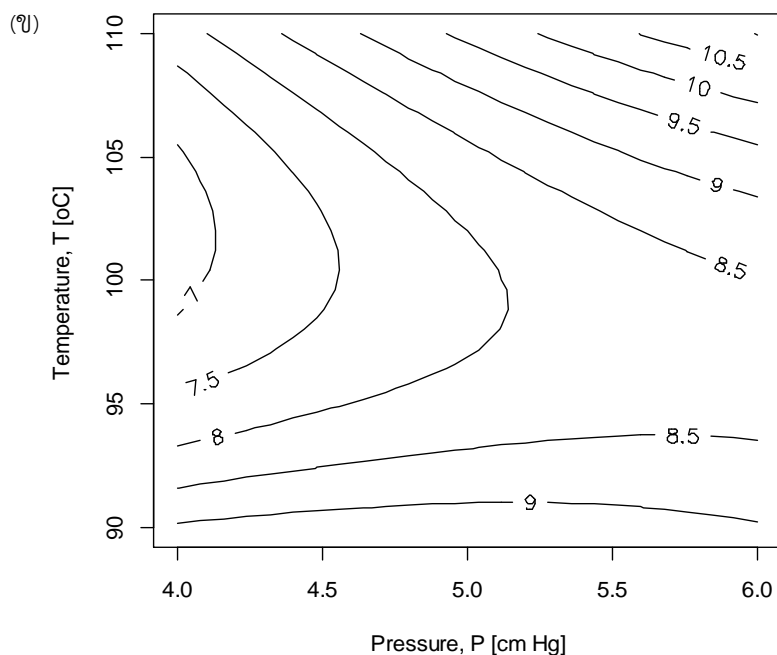


ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างสถานะในการทำแห้งมะม่วงสุกกับสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นในกระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ใช้น้ำร้อนยวดยิ่งที่สถานะความดันต่ำ

## 4.2 เปลี่ยนแปลงสีของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้ง

การเปลี่ยนแปลงสีของมะม่วงสุกในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อน ยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ สามารถอธิบายได้โดยใช้ค่าความแตกต่างสีสุทธิ ( $\Delta E^*$ ) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงสีของมะม่วงสุกในระหว่างการทำแห้งเปรียบเทียบกับมะม่วงสุกก่อนการทำแห้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยในแต่ละสภาวะ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความเร็วลมในการทำแห้งด้วยลมร้อนดังแสดงในภาพที่ 7ก. พบว่า  $\Delta E^*$  มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วลมในการทำแห้ง ส่งผลให้ในสภาวะที่ใช้อุณหภูมิ 70°C ความเร็วลม 2 m/s มีค่า  $\Delta E^*$  ต่ำที่สุด และยังพบว่าอิทธิพลของอุณหภูมิมิมากกว่าอิทธิพลของความเร็วม โดยในการทำแห้งด้วยลมร้อนโดยใช้ อุณหภูมิต่ำการปรับเพิ่มความเร็วมส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า  $\Delta E^*$  น้อยกว่าการทำแห้งโดยใช้ อุณหภูมิสูง ซึ่งสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการทำแห้งคืออิทธิพลของอุณหภูมิมิมากกว่าอิทธิพลของ ความเร็วลม และประสิทธิภาพในการทำแห้งจะยิ่งสูงขึ้นหากใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นร่วมกับการปรับเพิ่ม ความเร็วลม ส่งผลให้การทำแห้งมีประสิทธิภาพ ใช้เวลาในการทำแห้งน้อย ซึ่งจะส่งผลให้การ เปลี่ยนแปลงสีของชิ้นตัวอย่างเกิดขึ้นได้น้อยลง (Chunthaworn และคณะ, 2012; Nadian และคณะ, 2015)





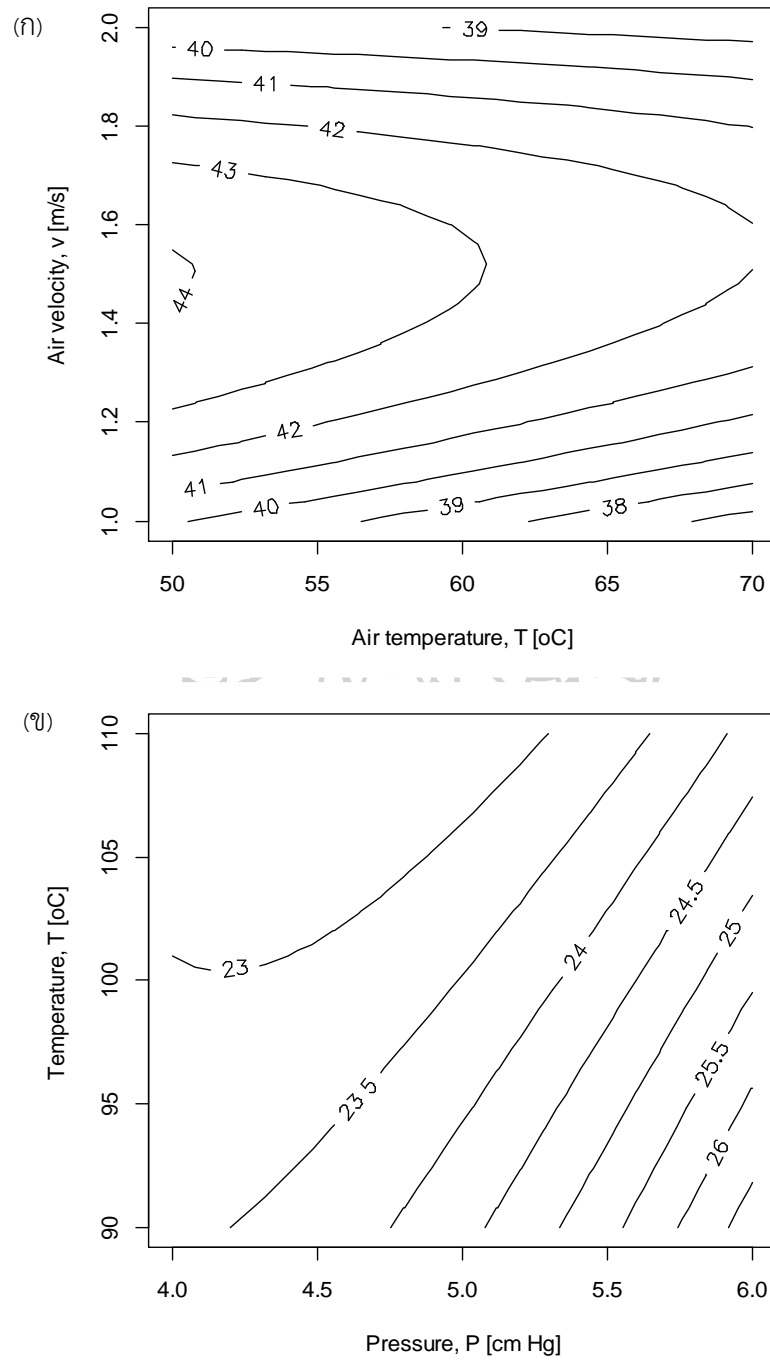
ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการทำแห้งมะม่วงสุกกับการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างในกระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ใช้น้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและระดับความดันต่อการเปลี่ยนแปลงค่า  $\Delta E^*$  ในการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ ซึ่งมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง (non-linear effect) ดังแสดงในภาพที่ 7ข. พบว่าการปรับความดันส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า  $\Delta E^*$  ในการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำและยังพบว่าการใช้ระดับความดันต่ำส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า  $\Delta E^*$  น้อยกว่าที่ระดับความดันสูงโดยเฉพาะในสภาวะที่ใช้อุณหภูมิ 100°C ร่วมกับระดับความดัน 4 cmHg ส่งผลให้มีค่า  $\Delta E^*$  ต่ำที่สุดเท่ากับ 7 และยังพบว่าค่า  $\Delta E^*$  ในทุกสภาวะของการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำมีค่าต่ำกว่าในการทำแห้งด้วยลมร้อนมากถึง 60% เนื่องจากการทำแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำเป็นการทำแห้งในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนในระบบจึงไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบออกซิเดชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นอาหารในระหว่างการทำแห้ง (Corzo และ Alvarez, 2012; Pott และคณะ, 2005)

### 4.3 การหดตัวของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้ง

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความเร็วลมต่อร้อยละการหดตัวของมะม่วงสุกในการทำแห้งด้วยลมร้อน ดังแสดงในภาพที่ 8ก. พบว่าร้อยละการหดตัวมีค่าต่ำลงเมื่ออุณหภูมิในการทำแห้งเพิ่มขึ้น และลักษณะของกราฟโครงร่างที่ไม่เป็นเส้นตรงแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเร็วมส่งผลให้ร้อยละการหดตัวมีค่าสูงขึ้นแต่เมื่อความเร็วลมสูงกว่า 1.5 m/s การเพิ่มความเร็วมจะส่งผลให้ร้อยละการหดตัวมีค่าต่ำลง เนื่องจากในสภาวะที่ใช้ความเร็วลมสูงกว่า 1.5 m/s ร่วมกับในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงจะส่งผลให้การทำแห้งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ชิ้นตัวอย่างเกิดเปลือกแข็งซึ่งไปยับยั้งการหดตัว (Gulati และ Datta, 2015) และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและระดับความดันต่อร้อยละการหดตัวของมะม่วงสุกในการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 8ข. พบว่าร้อยละการหดตัวมีค่าต่ำลงเมื่อลดระดับความดัน โดยที่ความดันต่ำ (4 cmHg) การเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงร้อยละการหดตัวน้อยมาก เนื่องจากในการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำภายใต้สภาวะที่ใช้ระดับความดันต่ำโดยเฉพาะในสภาวะที่ทำแห้งร่วมกับอุณหภูมิสูง (P4:T110) ก่อให้เกิดการทำแห้งที่มีประสิทธิภาพสูง การแพร่กระจายและการขยายตัวของไอน้ำร้อนยวดยิ่งส่งผลให้เกิดการหดตัวต่ำ และยังพบว่าร้อยละการหดตัวในทุกสภาวะของการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำมีค่าต่ำกว่าในการทำแห้งด้วยลมร้อนมากถึง 40%

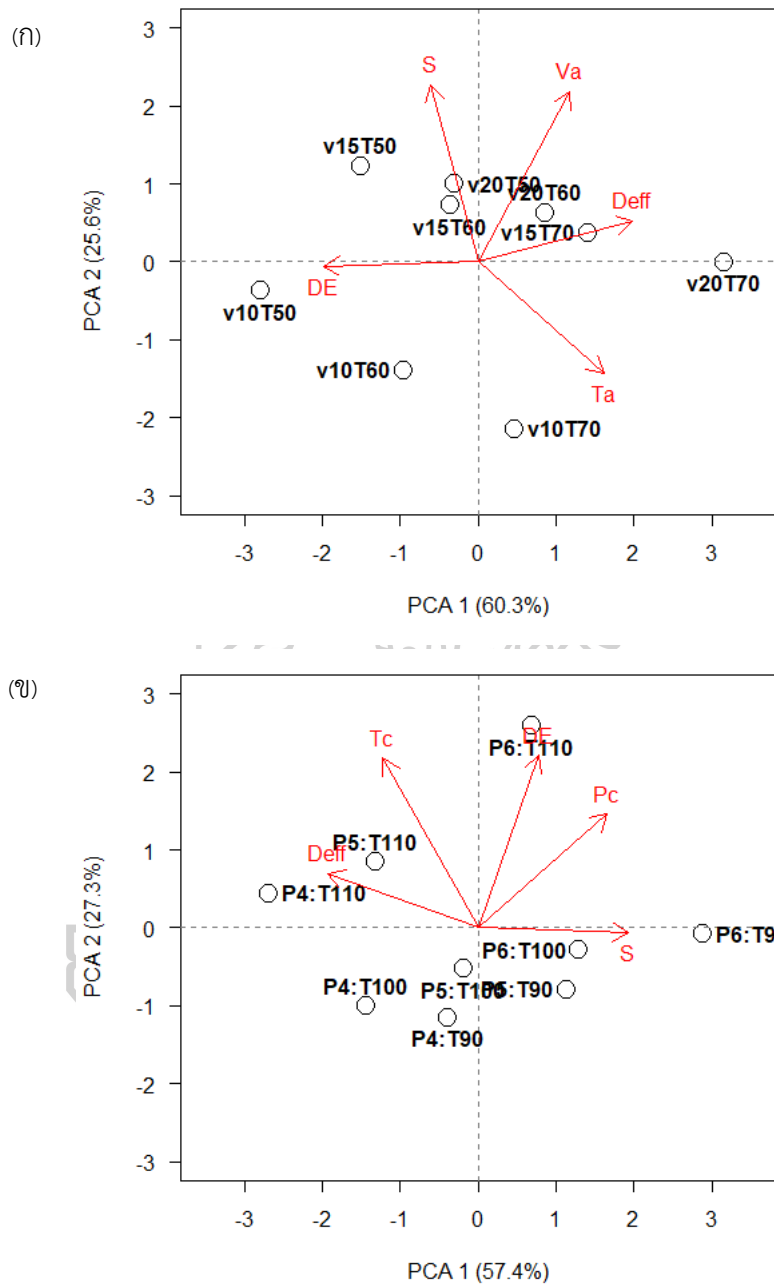




ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างสถานะในการทำแห้งมะม่วงสุกกับร้อยละการหดตัวของตัวอย่างในกระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สถานะความดันต่ำ



#### 4.4 ความสัมพันธ์ของสถานะการทำแห้งกับ $D_{eff}$ , $\Delta E^*$ และ $S$

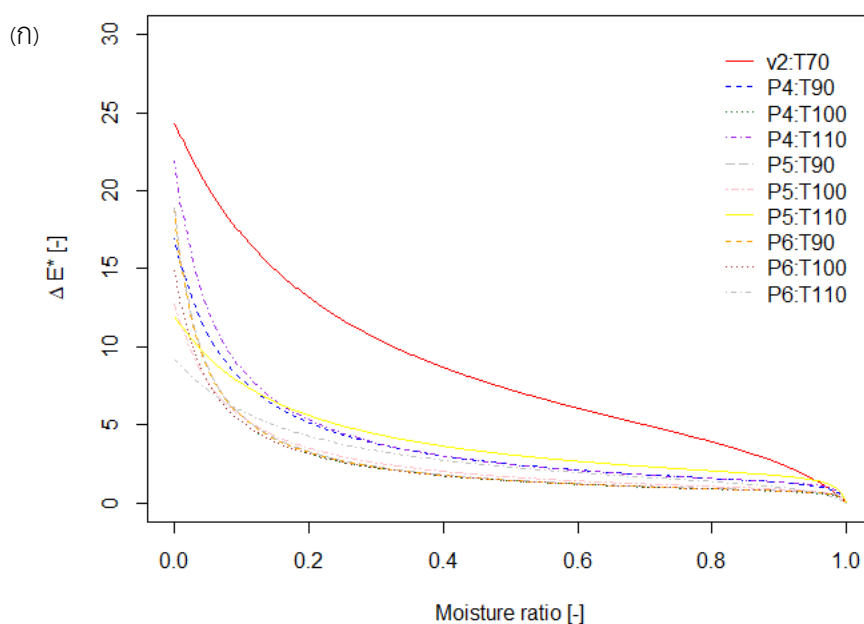


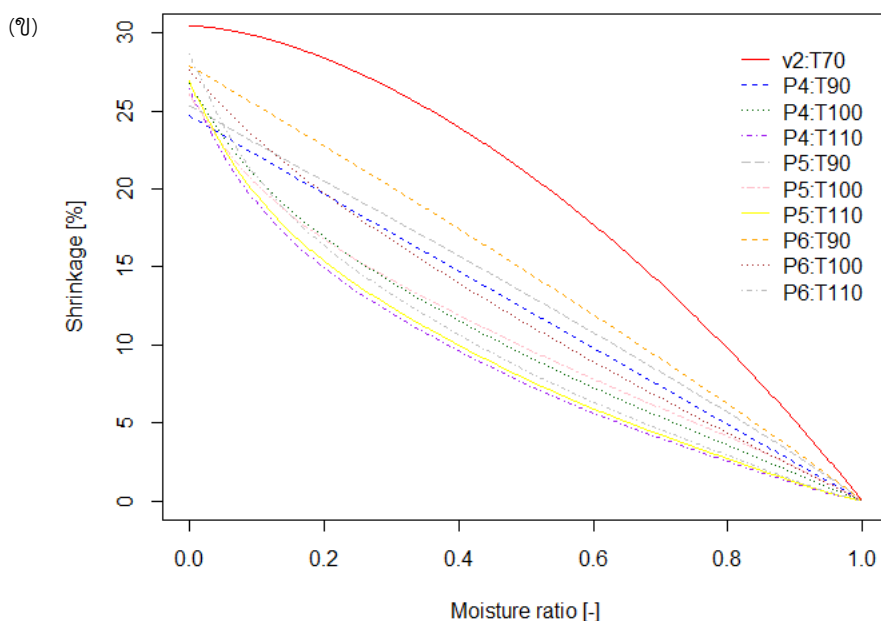
ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างสถานะในการทำแห้งมะม่วงสุกกับ  $D_{eff}$ ,  $\Delta E^*$ , และ  $S$  ของตัวอย่างในกระบวนการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ใช้น้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $D_{\text{eff}}$ ,  $\Delta E^*$ ,  $S$  และ สภาวะของกระบวนการทำแห้งสำหรับกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน และไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำแสดงดังภาพที่ 9 จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (Multivariate correlation) ด้วยวิธี Principle Component Analysis (PCA) พบว่าองค์ประกอบหลักที่ 1 และ 2 ในแผนภาพสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลที่ศึกษาได้ร้อยละ 60.3 และ 25.6 สำหรับกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนดังแสดงภาพที่ 9ก. และร้อยละ 57.4 และ 27.3 สำหรับกระบวนการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำดังแสดงภาพที่ 9ข. ในการศึกษาทำให้ความสนใจที่จะค้นหากระบวนการทำแห้งที่มีประสิทธิภาพ และคุณภาพ โดยพิจารณาจากตัวแปรที่ทำการศึกษานั้นคือ ต้องการกระบวนการที่มีค่า  $D_{\text{eff}}$  สูงซึ่งจะแสดงถึงผลิตภาพของกระบวนการ และครมมีค่า  $\Delta E^*$  และ  $S$  ต่ำซึ่งแสดงถึงคุณภาพที่ดีของผลผลิตที่ได้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพด้านการหดตัว และสีต่ำ

เมื่อพิจารณากระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะต่างๆที่ศึกษาพบว่ากระบวนการที่อยู่ด้านที่มีคะแนนขององค์ประกอบหลักที่ 1 เป็นบวกเป็นกระบวนการที่มีค่า  $D_{\text{eff}}$  สูงส่วนค่า  $\Delta E^*$  และ  $S$  ต่ำ คือกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนที่ใช้อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$  ความเร็วลม  $2.0 \text{ m/s}$  ซึ่งเป็นสภาวะที่ดีที่สุดที่นำไปใช้ศึกษาเปรียบเทียบกับกระบวนการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำต่อไป สำหรับกระบวนการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำพบว่ากระบวนการที่อยู่ด้านที่มีคะแนนขององค์ประกอบหลักที่ 1 เป็นลบเป็นกระบวนการที่มีค่า  $D_{\text{eff}}$  สูงส่วนค่า  $\Delta E^*$  และ  $S$  ต่ำสภาวะที่ดีที่สุดจากการศึกษานี้คือที่ความดัน  $4 \text{ cmHg}$  อุณหภูมิ  $110^{\circ}\text{C}$

จากการศึกษาข้างต้นจึงนำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างมะม่วงสุกทางด้านสีและการหดตัวในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°C ความเร็วลม 2.0 m/s ซึ่งเป็นสภาวะที่ดีที่สุดมาเปรียบเทียบกับกระบวนการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ การเปลี่ยนแปลงสีของมะม่วงสุกที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ 70°C ความเร็วลม 2.0 m/s) และการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำที่สภาวะต่างๆ แสดงอยู่ในรูปแบบของค่าความแตกต่างสีสุทธิ ( $\Delta E^*$ ) เทียบกับอัตราส่วนความชื้น ดังแสดงในภาพที่ 10ก. พบว่าทั้ง 2 กระบวนการมีรูปแบบที่แตกต่างกันแตกต่างกัน โดยในการทำแห้งด้วยลมร้อน  $\Delta E^*$  มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่เริ่มต้นของกระบวนการเนื่องจากผลของปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบออกไซด์เอนไซม์ และยังเพิ่มสูงขึ้นในช่วงท้ายของกระบวนการการทำให้แห้งเนื่องจากความชื้นในชิ้นอาหารมีความหนืดมากขึ้น จึงต้องใช้พลังงานมากขึ้นในกระตุ้นให้เกิดการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในโครงสร้างแพรร่อกสู่ภายนอก (Assavarachan และคณะ, 2016) แต่ในการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ  $\Delta E^*$  มีค่าต่ำต่ำตลอดทั้งกระบวนการในทุกสภาวะ เนื่องจากการทำให้แห้งในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนในระบบจึงไม่ทำให้ชิ้นตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบออกไซด์เอนไซม์ เว้นแต่ในช่วงท้ายของกระบวนการที่ปริมาณความชื้นในชิ้นมะม่วงมีค่าต่ำร่วมกับการทำให้แห้งภายใต้อุณหภูมิสูงส่งผลให้ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ซึ่งถือเป็นปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบไม่ออกไซด์เอนไซม์เกิดขึ้น (non enzymatic browning reaction) โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Salehi และ Kashaninejad, 2018)





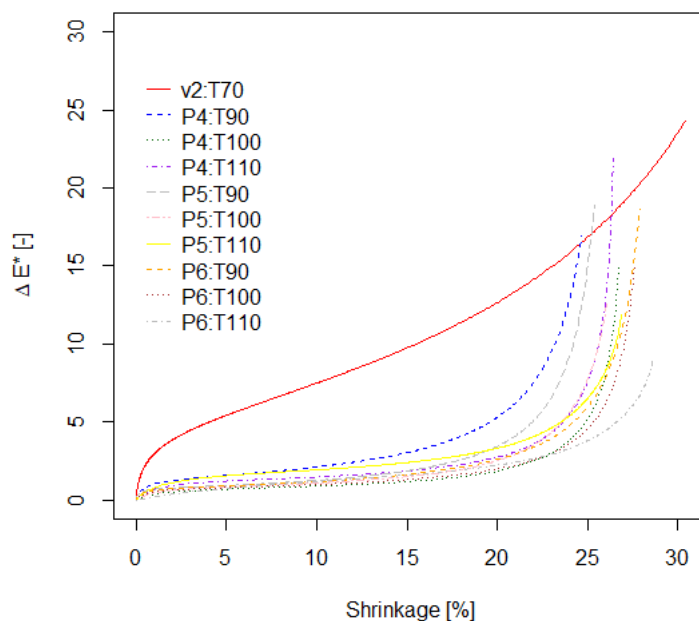
ภาพที่ 10 การเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างมะม่วงสุกระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$  ความเร็วลม  $2.0\text{ m/s}$ ) และไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำที่สภาวะต่างๆ ในด้าน (ก) การหดตัว และ (ข) การเปลี่ยนแปลงทั้งหมด

การหดตัวของชิ้นมะม่วงที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำแห้งด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$  ความเร็วลม  $2.0\text{ m/s}$ ) และการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำที่สภาวะต่างๆ แสดงอยู่ในรูปแบบของร้อยละอัตราส่วนการหดตัวเทียบกับอัตราส่วนความชื้น เนื่องจากการหดตัวของชิ้นอาหารส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการลดลงของความชื้น ดังแสดงในภาพที่ 10ข. พบว่ารูปแบบการหดตัวของทั้ง 2 กระบวนการมีรูปแบบการหดตัวแตกต่างกัน โดยในการทำแห้งด้วยลมร้อนในช่วงแรกร้อยละการหดตัวเพิ่มขึ้นตามการหดตัวในอุดมคติ (ideal shrinkage) คือการหดตัวในระหว่างทำแห้งเท่ากับปริมาณความชื้นที่ถูกกำจัดออกไป ส่งผลให้การหดตัวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็วเนื่องจากการที่ชิ้นตัวอย่างได้รับความร้อนจากลมร้อน ส่งผลให้น้ำที่อยู่ภายในชิ้นตัวอย่างมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น และเกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำภายในและภายนอก จึงมีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำจากภายในชิ้นตัวอย่างไปยังอากาศแวดล้อมในห้องทำแห้ง ทำให้เซลล์ภายในชิ้นตัวอย่างมีปริมาตรลดลงและเกิดการหดตัวขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ในช่วงท้ายของการทำแห้งด้วยลมร้อนตัวอย่างมีร้อยละการหดตัวต่ำลงเนื่องจากเมื่อชิ้นอาหารสัมผัสกับความร้อนเป็นเวลานาน ผิวภายนอกของชิ้นตัวอย่างจะเกิดเป็น

เปลือกแข็ง (case-hardening) ทำให้ยึดตัวและคงสภาพของโครงสร้างส่งผลให้ชิ้นตัวอย่างมีการหดตัวได้น้อยลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ในการทำแห้งมันฝรั่ง (Dehghannya และคณะ, 2018)

รูปแบบการหดตัวของชิ้นมะม่วงที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำในช่วงแรกมีลักษณะใกล้เคียงกัน คือตัวอย่างมีร้อยละการหดตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ในกรณีของการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำจะมีรูปแบบที่แตกต่างออกไปคือในสภาวะการทำแห้งที่มีอุณหภูมิต่ำ (90°C) ร้อยละการหดตัวเพิ่มขึ้นตามการหดตัวในอุดมคติ คือการหดตัวในระหว่างทำแห้งเท่ากับปริมาณความชื้นที่ถูกกำจัดออกไป อย่างมีแบบแผนจนสิ้นสุดกระบวนการ เนื่องจากการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ การแพร่กระจายของไอน้ำร้อนยวดยิ่งเกิดขึ้นทั่วทั้งชิ้นตัวอย่าง จึงไม่เกิดเปลือกแข็งที่จะมายับยั้งการหดตัว มีเพียงอิทธิพลของระดับความดันที่ส่งผลให้ความชื้นต่ำลงเมื่อลดระดับความดัน (Antal และคณะ, 2011) ส่งผลให้ร้อยละการหดตัวในการทำแห้งด้วยอุณหภูมิ 90°C ที่ระดับความดัน 4 cmHg มีค่าต่ำที่สุด แต่ในสภาวะการทำแห้งที่มีอุณหภูมิสูง (100°C และ 110°C) ร้อยละการหดตัวเพิ่มขึ้นตามการหดตัวในอุดมคติในช่วงแรกเท่านั้น เมื่อความชื้นลดต่ำลงร้อยละการหดตัวจะยิ่งเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับการทำแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากการที่ไม่มีเปลือกแข็งมาช่วยยับยั้งการหดตัวร่วมกับตัวอย่างมีความพรุนมากจึงเกิดการยุบตัว (collaps) ในสภาวะที่ตัวอย่างมีปริมาณความชื้นต่ำและอุณหภูมิสูงส่งผลให้ internal stress สูง ถึงแม้ว่าการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำโดยใช้อุณหภูมิสูง จะส่งผลให้ในช่วงท้ายร้อยละการหดตัวจะเพิ่มขึ้นมาก แต่หากทำแห้งในสภาวะการทำแห้งที่มีอุณหภูมิสูงร่วมกับระดับความดันที่ต่ำหรือในสภาวะที่มีประสิทธิภาพในการทำแห้งสูง จะส่งผลให้ค่าร้อยละการหดตัวในระหว่างกระบวนการมีค่าต่ำ โดยเฉพาะในการทำแห้งด้วยอุณหภูมิ 110°C ที่ระดับความดัน 4 cmHg มีค่าร้อยละการหดตัวที่ต่ำที่สุด เนื่องจากมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนและถ่ายโอนความชื้นสูง ส่งผลให้เกิดการทำแห้งได้อย่างรวดเร็วตัวอย่างจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างต่ำ

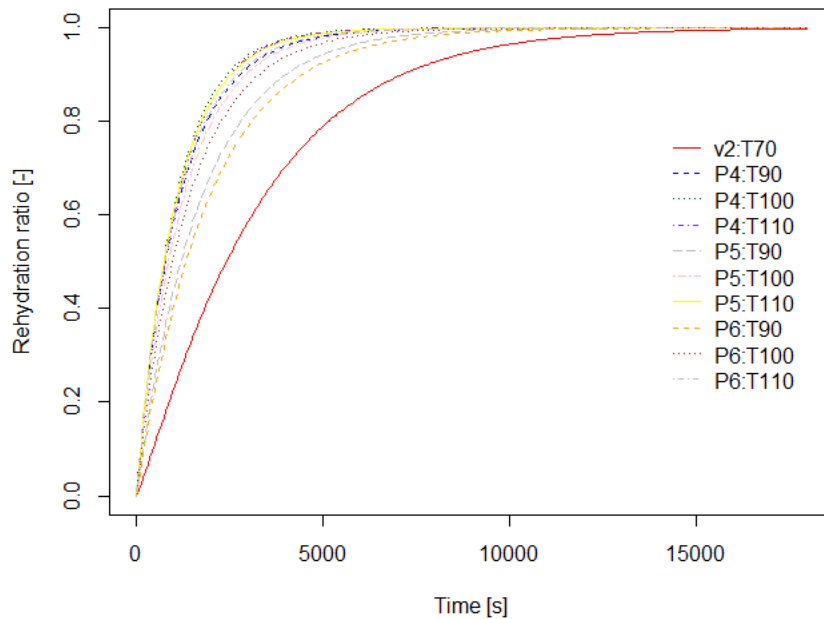
เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสีและการหดตัวของชิ้นมะม่วงสุกในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ 70°C ความเร็วลม 2.0 m/s) และการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำที่สภาวะต่างๆ ดังในภาพที่ 11 แสดงให้เห็นว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพสูงตั้งแต่เริ่มต้นของกระบวนการ และสูงยิ่งขึ้นจนสิ้นสุดกระบวนการ ซึ่งแตกต่างจากการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำที่การเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพจะเกิดขึ้นสูงในช่วงท้ายของกระบวนการ



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสีและการหดตัวของชั้นมะม่วงสุกในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ 70°C ความเร็วลม 2.0 m/s) และไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำที่สภาวะต่างๆ

#### 4.5 การคืนน้ำกลับของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้ง

อัตราส่วนการคืนน้ำกลับถือเป็นตัวชี้วัดถึงคุณภาพของอาหารแห้งที่ดี เนื่องจากเป็นค่าที่มีความเชื่อมโยงกับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพในระหว่างการทำแห้ง โดยการคืนน้ำกลับของชั้นมะม่วงสุกจากกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ 70°C ความเร็วลม 2.0 m/s) และไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำที่สภาวะต่างๆ แสดงอยู่ในรูปแบบของอัตราส่วนการคืนน้ำกลับเทียบกับเวลา แสดงดังภาพที่ 12 พบว่าการคืนน้ำกลับเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรก และค่อยๆ ช้าลงในช่วงท้าย เนื่องจากแรงขับในการแพร่ของน้ำลดลงเมื่อเข้าใกล้สมดุล (Demiray และTulek, 2016)



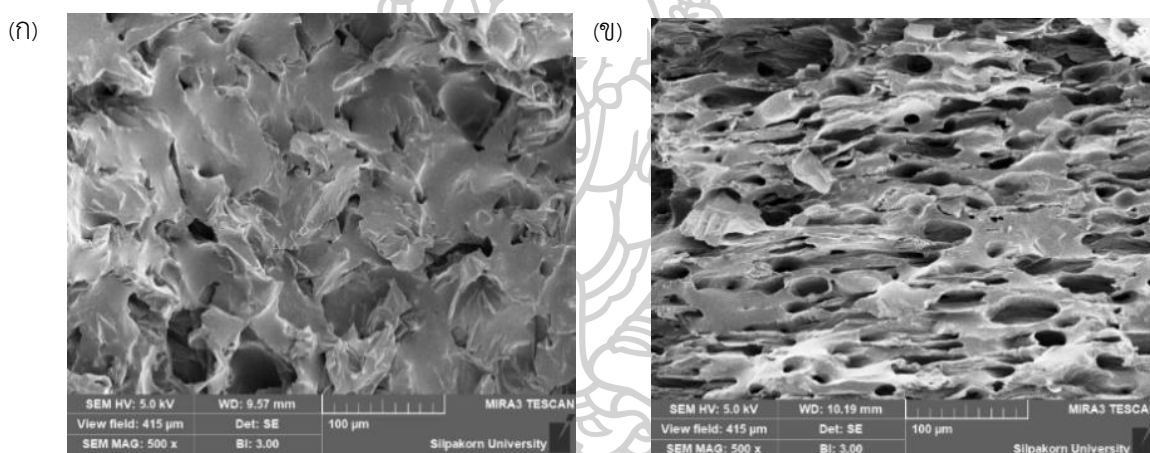
ภาพที่ 12 อัตราส่วนการคืนน้ำกลับของตัวอย่างมะม่วงสุกจากกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน (อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$  ความเร็วลม  $2.0\text{ m/s}$ ) และไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำที่สภาวะต่างๆ

มะม่วงสุกหลังการทำแห้งด้วยลมร้อนมีอัตราส่วนการคืนน้ำกลับของทั้งกระบวนการต่ำกว่ามะม่วงสุกหลังการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำในทุกอุณหภูมิ ซึ่งสัมพันธ์กับคุณภาพด้านการหัตถ์ที่ระบุว่า การทำแห้งด้วยลมร้อนมีการหัตถ์เกิดขึ้นมากกว่าในกระบวนการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ ส่งผลให้ชิ้นมะม่วงมีรูพรุนน้อยและรูพรุนมีขนาดเล็ก รวมถึงการเกิดเปลือกแข็งภายใต้การทำแห้งด้วยลมร้อนจะต้านการคืนน้ำกลับ แต่ในกรณีของการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ ตัวอย่างมีรูพรุนขนาดใหญ่และกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นตัวอย่าง จึงทำให้การคืนน้ำกลับเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำที่อุณหภูมิ  $110^{\circ}\text{C}$  ระดับความดัน  $4\text{ cmHg}$  มีการคืนน้ำกลับได้อย่างรวดเร็วและมีค่าอัตราส่วนการคืนน้ำกลับสูงสุดซึ่งสอดคล้องกับการที่ชิ้นตัวอย่างมีการการหัตถ์ต่ำที่สุด

#### 4.6 โครงสร้างระดับจุลภาคของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้ง

จากผลการศึกษาทางคุณภาพด้านการหดตัวและการคืนน้ำกลับ พบว่าการหดตัวของชิ้นมะม่วงในระหว่างการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำมีค่าต่ำกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนและส่งผลให้เกิดการคืนน้ำกลับได้ดีกว่าในการทำแห้งด้วยลมร้อน

เนื่องจากการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่มีความดันต่ำและเมื่อน้ำในชิ้นอาหารได้รับพลังงานจากไอน้ำร้อนยวดยิ่งภายใต้สภาวะความดันต่ำ ไอน้ำภายในตัวอย่างจึงเกิดการขยายตัวส่งผลให้เซลล์ขยายตัวใหญ่ขึ้น ตัวอย่างจึงไม่เสียรูปมากและมีความพรุนมากขึ้น แตกต่างจากการทำแห้งด้วยลมร้อนที่โครงสร้างหดตัวเป็นอย่างมากส่งผลให้รูพรุนต่ำและมีขนาดเล็ก ซึ่งแสดงด้วยภาพถ่าย SEM ในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ภาพถ่าย SEM ของมะม่วงสุกหลังการทำแห้งด้วย (ก) ลมร้อน และ (ข) ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อน เพื่อนำข้อมูลทางจลนพลศาสตร์การทำแห้งและสมบัติทางเคมีกายภาพทางด้านสีและการหดตัวของผลิตภัณฑ์มาเปรียบเทียบกับกระบวนการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ จากผลการวิจัยของทั้ง 2 กระบวนการคือลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สามารถอธิบายพฤติกรรมกรรมการทำแห้งได้ดีที่สุด ทำให้ทราบว่าในการทำแห้งด้วยลมร้อน การเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วลมในการทำแห้งส่งผลให้ระยะเวลาในการทำแห้งสั้นลง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูงขึ้นและยังลดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพด้านสีและการหดตัว ดังนั้นการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°C ความเร็วลม 2 m/s ถือเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำแห้งด้วยลมร้อนเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับกระบวนการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ โดยพบว่าเมื่อเปลี่ยนตัวกลางเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำจะพบว่าอัตราการทำแห้งและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูงกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนเป็นอย่างมากรวมถึงเกิดการทำให้แห้งได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในสภาวะที่ใช้อุณหภูมิสูงร่วมกับระดับความดันที่ต่ำลงจะยิ่งเพิ่มประสิทธิภาพในการทำแห้งได้เป็นอย่างดี ซึ่งการเปลี่ยนตัวกลางเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำยังส่งผลให้รูปแบบการเปลี่ยนแปลงค่าสีและการหดตัวในช่วงแรกของการตากแห้งดีขึ้นอย่างมาก แต่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงมากในช่วงท้าย แต่ด้วยการทำแห้งที่รวดเร็วจึงยังสามารถคงคุณสมบัติทางเคมีกายภาพไว้ได้เป็นอย่างดี ซึ่งสอดคล้องกับค่าการคืนน้ำกลับและโครงสร้างระดับจุลภาคของผลิตภัณฑ์ที่แสดงให้เห็นว่าขึ้นตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างต่ำกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน

## รายการอ้างอิง

- Abou, M. M. N., Madougou, S., & Boukar, M. (2019). Effect of Drying Air Velocity on Drying Kinetics of Tomato Slices in a Forced-Convective Solar Tunnel Dryer. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 9, 64-78. doi:10.4236/jsbs.2019.92005
- Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., & Arabhosseini, A. (2009). Modeling of thin-layer drying of potato slices in length of continuous band dryer. *Energy Conversion and Management*, 50(5), 1348-1355. doi:10.1016/j.enconman.2009.01.004
- Aghilinategh, N., Rafiee, S., Gholikhani, A., Hosseinpour, S., Omid, M., Mohtasebi, S. S., & Maleki, N. (2015). A comparative study of dried apple using hot air, intermittent and continuous microwave: evaluation of kinetic parameters and physicochemical quality attributes. *Food Science & Nutrition*, 3(6), 519-526. doi:10.1002/fsn3.241
- Alibas, I. (2007). Microwave, air and combined microwave-air-drying parameters of pumpkin slices. *LWT - Food Science and Technology*, 40(8), 1445-1451. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.09.002>
- Antal, T., Figiel, A., Kerekes, B., & Sikolya, L. (2011). Effect of Drying Methods on the Quality of the Essential Oil of Spearmint Leaves (*Mentha spicata* L.). *Drying Technology*, 29(15), 1836-1844. doi:10.1080/07373937.2011.606519
- Aral, S., & Bese, A. V. (2016). Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. *Food Chemistry*, 210, 577-584. doi:10.1016/j.foodchem.2016.04.128
- Arikan, M., Ayhan, Z., Soysal, Y., & Esturk, O. (2011). Drying Characteristics and Quality Parameters of Microwave-Dried Grated Carrots. *Food and Bioprocess Technology*, 5. doi:10.1007/s11947-011-0682-8
- Assavarachan, R., Upara, U., Tantikul, S., & Unhapipatpong, P. (2016). Drying Kinetics of Peeled Longan using Single-Stage and Multi-Stage Temperature. *Thai Society of Agricultural Engineering Journal*, 2, 30-40

- Barbieri, S., Elustondo, M., & Urbicain, M. (2004). Retention of aroma compounds in basil dried with low pressure superheated steam. *Journal of Food Engineering*, 65(1), 109-115. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.01.003>
- Cengel, Y. A., & Boles, m. A. (2006). thermodynamics an engineering approach 5th edition
- Chong, C. H., Law, C., Cloke, M., Luqman Chuah, A., & Wan Daud, W. (2008). Drying Kinetics, Texture, Color, and Determination of Effective Diffusivities During Sun Drying of Chempedak. *Drying Technology*, 26, 1286-1293.  
doi:10.1080/07373930802307308
- Chunthaworn, S., Achariyaviriya, S., Achariyaviriya, A., & Namsanguan, K. (2012). Color kinetics of longan flesh drying at high temperature. *Procedia Engineering*, 32, 104 – 111. doi:10.1016/j.proeng.2012.01.1243
- Corzo, O., & Alvarez, C. (2012). Color Change Kinetics of Mango at Different Maturity Stages during Air Drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38.  
doi:10.1111/j.1745-4549.2012.00801.x
- da Silva, W. P., e Silva, C. M. D. P. S., Gama, F. J. A., & Gomes, J. P. (2014). Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13(1), 67-74.  
doi:10.1016/j.jssas.2013.01.003
- Dehghannya, J., Bozorgi, S., & Heshmati, M. K. (2018). Low temperature hot air drying of potato cubes subjected to osmotic dehydration and intermittent microwave: drying kinetics, energy consumption and product quality indexes. *Heat and Mass Transfer*, 54(4), 929-954. doi:10.1007/s00231-017-2202-5
- Demiray, E., & Tulek, Y. (2016). Effect of temperature on water diffusion during rehydration of sun-dried red pepper (*Capsicum annum* L.). *Heat Mass Transfer*.  
doi:DOI 10.1007/s00231-016-1940-0
- Devahastin, S., Suvarnakuta, P., Soponronnarit, S., & Mujumdar, A. S. (2004). A Comparative Study of Low-Pressure Superheated Steam and Vacuum Drying of a Heat-Sensitive Material. *Drying Technology*, 22(8), 1845-1867. doi:10.1081/DRT-200032818
- 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:10.1016/j.jfoodeng.2008.03.008
- Farahnaky, A., & Kamali, E. (2015). Texture hysteresis of pistachio kernels on drying and rehydration. *Journal of Food Engineering*, 166, 335-341.  
doi:10.1016/j.jfoodeng.2015.06.036
- Feng, H., Yin, Y., & Tang, J. (2012). Microwave Drying of Food and Agricultural Materials: Basics and Heat and Mass Transfer Modeling. *Food Engineering Reviews*, 4(2), 89-106. doi:10.1007/s12393-012-9048-x
- Figiel, A. (2010). Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods. *Journal of Food Engineering*, 98(4), 461-470. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.01.029>
- Goyal, R. K., Kingsly, A. R. P., Manikantan, M. R., & Ilyas, S. M. (2006). Thin-layer Drying Kinetics of Raw Mango Slices. *Biosystems Engineering*, 95(1), 43-49.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.05.001>
- Gulati, T., & Datta, A. K. (2015). Mechanistic understanding of case-hardening and texture development during drying of food materials. *Journal of Food Engineering*, 166, 119-138. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.05.031>
- Hamawand, I., Yusaf, T., & Bennett, J. (2014). Study and modelling drying of banana slices under superheated steam. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 9(4), 591-603. doi:10.1002/apj.1788
- Hiranvarachat, B., Suvarnakuta, P., & Devahastin, S. (2008). Isomerisation kinetics and antioxidant activities of  $\beta$ -carotene in carrots undergoing different drying techniques and conditions. *Food Chemistry*, 107(4), 1538-1546.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.10.026>
- Iyota, H., Nishimura, N., Onuma, T., & Nomura, T. (2001). Drying of sliced raw potatoes in superheated steam and hot air. *Drying Technology*, 19(7), 1411-1424.  
doi:10.1081/DRT-100105297
- Jamradloedluk, J., Nathakaranakule, A., Soponronnarit, S., & Prachayawarakorn, S. (2007). Influences of drying medium and temperature on drying kinetics and quality

- attributes of durian chip. *Journal of Food Engineering - J FOOD ENG*, 78.  
doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.09.017
- Khalloufi, S., Almeida-Rivera, C., & Bongers, P. (2009). A theoretical model and its experimental validation to predict the porosity as a function of shrinkage and collapse phenomena during drying. *Food Research International*, 42(8), 1122-1130. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.05.013>
- Leeratanarak, N., Devahastin, S., & Chiewchan, N. (2006). Drying kinetics and quality of potato chips undergoing different drying techniques. *Journal of Food Engineering*, 77(3), 635-643. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.07.022>
- Link, J. V., Tribuzi, G., Oliveira de Moraes, J., & Laurindo, J. B. (2018). Assessment of texture and storage conditions of mangoes slices dried by a conductive multi-flash process. *Journal of Food Engineering*, 239, 8-14.  
doi:10.1016/j.jfoodeng.2018.06.024
- 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
- Longyang, Y., Liuping, F., & Zhenhua, D. (2020). Effects of different packaging systems and storage temperatures on the physical and chemical quality of dried mango slices. *LWT*, 121. doi:10.1016/j.lwt.2019.108981
- Madiouli, J., Sghaier, J., Lecomte, D., & Sammouda, H. (2012). Determination of porosity change from shrinkage curves during drying of food material. *Food and Bioproducts Processing*, 90(1), 43-51. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2010.12.002>
- Methakhup, S., Chiewchan, N., & Devahastin, S. (2005). Effects of drying methods and conditions on drying kinetics and quality of Indian gooseberry flake. *LWT - Food Science and Technology*, 38(6), 579-587. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2004.08.012>
- Nadian, M. H., Rafiee, S., Aghbashlo, M., Hosseinpour, S., & Mohtasebi, S. S. (2015). Continuous real-time monitoring and neural network modeling of apple slices color changes during hot air drying. *Food and Bioproducts Processing*, 94, 263-274. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2014.03.005>

- Nyangena, I. O., Owino, W. O., Imathiu, S., & Ambuko, J. (2019). Effect of pretreatments prior to drying on antioxidant properties of dried mango slices. *Scientific African*, 6. doi:10.1016/j.sciaf.2019.e00148
- Orikasa, T., Wu, L., Shiina, T., & Tagawa, A. (2008). Drying characteristics of kiwifruit during hot air drying. *Journal of Food Engineering*, 85(2), 303-308.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.07.005>
- Pott, I., Neidhart, S., Muhlbauer, W., & Carle, R. (2005). Quality improvement of non-sulphited mango slices by drying at high temperatures. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 6, 412 – 419. doi:10.1016/j.ifset.2005.05.004
- Pu, Y.-Y., & Sun, D.-W. (2017). Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualisation of moisture content distribution. *Biosystems Engineering*, 156, 108-119. doi:10.1016/j.biosystemseng.2017.01.006
- Rachna, S., K., N. P., & Pal, K. B. (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>
- Ratti, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 311-319. doi:[https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00228-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00228-4)
- Ricce, C., Rojas, M., Miano Pastor, A., Siche, R., & Augusto, P. (2016). Ultrasound pre-treatment enhances the carrot drying and rehydration. *Food Research International*, 89. doi:10.1016/j.foodres.2016.09.030
- 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. (2018). Low pressure superheated steam drying of onion slices: kinetics and quality comparison with vacuum and hot air drying in an advanced drying unit. *J Food Sci Technol*, 55(10), 4311-4320. doi:10.1007/s13197-018-3379-4

- Sehrawat, R., Nema, P. K., & Kaur, B. P. (2016). Effect of superheated steam drying on properties of foodstuffs and kinetic modeling. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 34, 285-301. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.02.003>
- Soysal, Y., Ayhan, Z., Eştürk, O., & Arkan, M. F. (2009). Intermittent microwave–convective drying of red pepper: Drying kinetics, physical (colour and texture) and sensory quality. *Biosystems Engineering*, 103(4), 455-463. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.05.010>
- Suvarnakuta, P., Chaweerungrat, C., & Devahastin, S. (2011). Effects of drying methods on assay and antioxidant activity of xanthenes in mangosteen rind. *Food Chemistry*, 125(1), 240-247. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.09.015>
- Xanthopoulos, G., Athanasiou, A., Sempou, A., Lentzou, D., Templalexis, C., & Boudouvis, A. G. (2019). Study of the Drying Rate and Colour Kinetics during Stepwise Air-Drying of Apricot Halves. *International Journal of Food Engineering*. doi:10.1515/ijfe-2018-0372
- Yao, L., Fan, L., & Duan, Z. (2020). Effect of different pretreatments followed by hot-air and far-infrared drying on the bioactive compounds, physicochemical property and microstructure of mango slices. *Food Chem*, 305, 125477. doi:10.1016/j.foodchem.2019.125477
- Younis, M., Abdelkarim, D., & Zein El-Abdein, A. (2018). Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices. *Saudi J Biol Sci*, 25(2), 332-338. doi:10.1016/j.sjbs.2017.06.011
- Zhao, D., An, K., Ding, S., Liu, L., Xu, Z., & Wang, Z. (2014). Two-Stage Intermittent Microwave Coupled with Hot-Air Drying of Carrot Slices: Drying Kinetics and Physical Quality. *Food and Bioprocess Technology*, 7(8), 2308-2318. doi:10.1007/s11947-014-1274-1
- Zhu, A., & Shen, X. (2014). The model and mass transfer characteristics of convection drying of peach slices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 72, 345-351. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.001
- Zielinska, M., & Markowski, M. (2016). The influence of microwave-assisted drying techniques on the rehydration behavior of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.). *Food Chem*, 196, 1188-1196. doi:10.1016/j.foodchem.2015.10.054

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>







## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กรชนก ชมพิกุล
วัน เดือน ปี เกิด	12 พฤศจิกายน 2537
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2559 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	605/241 ซอย เพชรเกษม 92/2 แขวง บางแคเหนือ เขตบางแค จังหวัด กรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10160
ผลงานตีพิมพ์	กรชนก ชมพิกุล, วิฐู ชูศรี และ อิชพงศ์ ชูศรี. 2561.ผลของการควบคุมอุณหภูมิในการทำแห้งด้วยลมร้อนต่อการหดตัว และการคืนกลับความชื้นของมะม่วงสุก. การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ครั้งที่ 2 “GRADUATE SCHOOL CONFERENCE 2018”. วันที่ 30 พฤศจิกายน 2561. กรุงเทพฯ, ประเทศไทย
รางวัลที่ได้รับ	รางวัลงานวิจัยประเภท ดีเด่น “ผลของการควบคุมอุณหภูมิในการทำแห้งด้วยลมร้อนต่อการหดตัว และการคืนกลับความชื้นของมะม่วงสุก” การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ครั้งที่ 2 “GRADUATE SCHOOL CONFERENCE 2018” ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา วันที่ 30 พฤศจิกายน 2561.