ผลของการทำแห้งด้วยสภาวะไม่คงที่ต่อจลนพลศาสตร์ สมบัติทางเคมีกายภาพ และสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของมะม่วงสุก

โดย
นายภาคย์ มาลัยกฤษณะชลี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แบบ 1.1 ระดับปริญญาดุษฎีบัณฑิต
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผลของการทำแห้งด้วยสภาวะไม่คงที่ต่อจลนพลศาสตร์ สมบัติทางเคมีกายภาพ และสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของมะม่วงสุก

โดย
นายภาคย์ มาลัยกฤษณะชลี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แบบ 1.1 ระดับปริญญาดุษฎีบัณฑิต
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

EFFECT OF NON-STATIONARY DRYING ON KINETICS, PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES AND THERMODYNAMIC PROPERTIES OF RIPE MANGO

By

MR. Pak MALAIKRITSANACHALEE

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for Doctor of Philosophy (FOOD TECHNOLOGY)

Department of FOOD TECHNOLOGY

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2019

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	ผลของการทำแห้งด้วยสภาวะไม่คงที่ต่อจลนพลศาสตร์ สมบัติทางเคมีกายภาพ และสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของมะม่วงสุก
โดย	ภาคย์ มาลัยกฤษณะชลี
สาขาวิชา	เทคโนโลยีอาหาร แบบ 1.1 ระดับปริญญาดุษฎีบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธัชพงศ์ ชูศรี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

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

พิจารณาเห็นชอบโดย

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ สมุหเสนีโต)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัชพงศ์ ชูศรี)

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิธู ชูศรี)

57403803 : เทคโนโลยีอาหาร แบบ 1.1 ระดับปริญญาดุษฎีบัณฑิต
คำสำคัญ : การทำแห้ง, มะม่วงสุก, การทำแห้งด้วยสภาวะไม่คงที่, สมบัติทางเคมีกายภาพ, สมบัติทางอุณหพลศาสตร์

นาย ภาคย์ มาลัยกฤษณะชลี: ผลของการทำแห้งด้วยสภาวะไม่คงที่ต่อจลนพลศาสตร์ สมบัติทางเคมีกายภาพ และสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของมะม่วงสุก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธัชพงศ์ ชูศรี

การทำแห้งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีการถนอมอาหารที่สำคัญสำหรับการแปรรูปผลิตผลทางการเกษตร งานวิจัยนี้ศึกษาสภาวะที่ใช้ในการทำแห้งมะม่วงสุกแบบไม่คงที่กับแบบคงที่ด้วยตัวกลาง 2 ชนิด คือ ลมร้อน และไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำ โดยศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการในด้านผลิตภาพ และคุณภาพ จากตัวแปรทางด้านจลนพลศาสตร์ของกระบวนการทำแห้ง สมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์ และสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของตัวอย่าง เพื่อที่จะพัฒนากระบวนการทำแห้งให้ดีขึ้น

จากผลการวิจัยพบว่าในการทำแห้งด้วยตัวกลางที่เป็นลมร้อน การลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ การเพิ่มอุณหภูมิ และความเร็วลม และลักษณะการไหลของลมแบบหมุน ทำให้ระยะเวลาในการทำแห้งสั้นลง และยังลดการเปลี่ยนแปลงสี และการหดตัวของตัวอย่างลงได้มากขึ้น และยังพบว่าการทำแห้งโดยใช้สภาวะอุณหภูมิของลมร้อนแบบไม่คงที่ช่วยเพิ่มอัตราการทำแห้ง และลดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของตัวอย่างลงได้เช่นเดียวกัน โดยการทำแห้งที่อุณหภูมิ และความเร็วลมต่ำกลับส่งผลให้ตัวอย่างใช้ระยะเวลาในการคืนน้ำน้อยกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิ และความเร็วลมสูง และการลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะสามารถลดระยะเวลาในการคืนน้ำของตัวอย่างลงได้

สำหรับกระบวนการทำแห้งโดยใช้ตัวกลางเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำทั้งในสภาวะคงที่และไม่คงที่จะมีอัตราการทำแห้งสูงกว่าตัวกลางที่เป็นลมร้อน รวมถึงมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของตัวอย่าง คือ การหดตัว และการเปลี่ยนแปลงสีน้อยกว่ากระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน จากการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค พฤติกรรมการคืนน้ำ และการหดตัวของตัวอย่างร่วมกันพบว่าการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำทั้งในสภาวะคงที่และไม่คงที่จะส่งผลให้ตัวอย่างมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุนสูง เกิดการยุบตัวต่ำกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อน เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการคืนน้ำ และโครงสร้างระดับจุลภาค พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยสภาวะไม่คงที่จะมีรูพรุนจำนวนมากกว่า และมีอัตราการคืนน้ำที่สูงกว่าแสดงให้เห็นว่าการใช้

สภาวะไม่คงที่มีผลให้โครงสร้างของตัวอย่างมีความพรุนมากกว่าการใช้สภาวะคงที่ อย่างไรก็ตาม พบว่าการใช้สภาวะคงที่และไม่คงที่ในการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำมีอัตราการทำแห้ง การหดตัว และการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างไม่แตกต่างกัน

การศึกษาสมบัติการดูดความชื้น (hygroscopic property) ของตัวอย่างสด และตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งโดยใช้วิธีการทางอุณหพลศาสตร์ด้วยพารามิเตอร์สำคัญ คือ net isosteric heat of sorption (q_{st}) และ differential entropy (ΔS) พบว่า q_{st} และ ΔS มีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นในทุกๆ ตัวอย่าง โดยที่ปริมาณความชื้นเท่ากันตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำในสภาวะไม่คงที่ จะมีค่า q_{st} และ ΔS มากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแสดงให้เห็นว่าการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำในสภาวะไม่คงที่ส่งผลให้โครงสร้างของตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด

มหาวิทยาลัยศิลปากร

57403803 : Major (FOOD TECHNOLOGY)
Keyword : Drying, Ripe mango, Non-stationary drying, Physicochemical properties, Thermodynamic properties

MR. PAK MALAIKRITSANACHALEE : EFFECT OF NON-STATIONARY DRYING ON KINETICS, PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES AND THERMODYNAMIC PROPERTIES OF RIPE MANGO THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR TOUCHPONG CHOOSRI, Ph.D.

Drying is one of the important preservation technologies for agricultural products. In order to improve the drying process, this research studied the effect on drying conditions with intermittent and continuous mode in two drying mediums; hot-air and low-pressure superheated steam. The productivity and quality of the process are studied from the drying kinetic parameters of the process, physicochemical properties and thermodynamic properties of the samples.

The results of the hot-air drying found that the decreasing relative humidity, increasing air temperature and velocity including the swirling flow application were able to reduce the drying time, shrinkage and color changes of dried ripe mangoes. Additionally, the intermittent hot-air drying was also able to increase the drying rate and reduce the changes in physicochemical properties of dried ripe mangoes. On the other hand, the rehydration time reduced when the relative humidity, air temperature and velocity were decreased.

For intermittent and continuous low-pressure superheated steam drying (LPSSD), they provided the higher drying rate as well as the lower shrinkage and color changes of dried ripe mangoes than the hot-air drying. Moreover, the Intermittent and continuous LPSSD provided the dried ripe mangoes with a more porous and less collapsed structure than the hot-air drying. When comparing between the intermittent and continuous LPSSD, the resulted showed that the intermittent LPSSD provided a more porous structure and higher rehydration rate of dried ripe mangoes than the continuous LPPSD. However, the drying rate, shrinkage and color changes of dried ripe mangoes in both of intermittent and continuous LPSSD were not significantly different.

Finally, hygroscopic properties of fresh samples and the dried samples were studied by thermodynamic method with net isosteric heat of sorption (q_{st}) and differential entropy (ΔS). The results found that q_{st} and ΔS of all samples were exponential decay with the increasing moisture content. At the same humidity, the samples from Intermittent LPSSD have higher q_{st} and ΔS than the samples from hot air. The results indicated that the intermittent LPSSD was capable of producing the drying products with less structural changes.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. ธัชพงศ์ ชูศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาแนะนำให้คำปรึกษาในการทำงานวิจัย การวางเค้าโครงเรื่องวิทยานิพนธ์ และช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้ถูกต้อง และสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. สุเชษฐ์ สมุหเสนีโต และ ผศ. ดร. วิธู ชูศรี สำหรับคำแนะนำ และข้อคิดที่เป็นประโยชน์แก่งานวิจัย พร้อมทั้งกรุณาตรวจสอบ และแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้อง และสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีอาหารทุกท่านที่ให้ความรู้ และให้คำแนะนำตลอดการศึกษาที่ผ่านมาที่ทำให้ข้าพเจ้าจัดทำวิทยานิพนธ์ได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ในภาควิชาเทคโนโลยีอาหารทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกให้ข้าพเจ้ามีข้อมูลในการศึกษาค้นคว้าในการจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้องในภาควิชาเทคโนโลยีอาหารทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีในทุกเรื่อง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้กำลังใจ และสนับสนุนในการทำงานของข้าพเจ้าตลอดมา

ภาคย์ มาลัยกฤษณะชลี

มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ฉ

กิตติกรรมประกาศ ..... ช

สารบัญ ..... ฌ

สารบัญตาราง ..... ฒ

สารบัญภาพ ..... ด

บทที่ 1 บทนำ 1

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

วัตถุประสงค์ของการวิจัย 1

สมมติฐานของการวิจัย 2

ขอบเขตของการวิจัย 2

ประโยชน์ที่ได้รับ 2

บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง 3

มะม่วง 3

การทำแห้งอาหาร 6

หลักการและกลไกการทำแห้งอาหาร 6

ประเภทของกระบวนการทำแห้งอาหาร 7

ผลของการทำแห้งต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ 12

กลยุทธ์ในการพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ 16

สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของผลิตภัณฑ์ 24

sorption isotherm 24

net isosteric heat of sorption 27
differential entropy 27
enthalpy-entropy compensation theory 28
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 33
การเตรียมตัวอย่าง 33
อุปกรณ์การทำแห้ง 33
อุปกรณ์การทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่ 33
อุปกรณ์การทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนร่วมกับ computer vision system 34
อุปกรณ์การทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนร่วมกับ dehumidifier 35
อุปกรณ์การทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำ 37
ขั้นตอนการทำแห้ง 39
การวิเคราะห์ข้อมูลการทำแห้ง 39
อัตราส่วนความชื้น 39
กราฟการทำแห้ง 40
อัตราการทำแห้ง 41
สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล 41
การวิเคราะห์การหดตัว 43
การวิเคราะห์ค่าสี 43
Computer vision system 44
การวิเคราะห์การหดตัวเชิงพื้นที่ 44
การวิเคราะห์ค่าสี 45
การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 47

การวิเคราะห์การคืนน้ำ....47
การวิเคราะห์สมบัติทางอุณหพลศาสตร์....48
sorption isotherm....48
net isosteric heat of sorption....50
differential entropy....51
enthalpy-entropy compensation theory....51
การวิเคราะห์ทางสถิติ....52
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล....53
การศึกษาเบื้องต้น: การทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะไม่คงที่....53
สภาวะการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่....53
จลนพลศาสตร์การทำแห้งด้วยลมร้อน....53
พฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุก....55
อัตราการทำแห้งมะม่วงสุก....57
สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลและดัชนีการเพิ่มประสิทธิภาพ....58
ค่าการเปลี่ยนสีทั้งหมดของมะม่วงสุก....59
ร้อยละการหดตัวของมะม่วงสุก....60
การศึกษาเบื้องต้น: การทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุน....62
ผลของการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนต่อการหดตัวและการเปลี่ยนแปลงสีในระหว่างกระบวนการทำแห้ง....63
สภาวะการทำแห้งด้วยลมร้อน....63
จลนพลศาสตร์การทำแห้งด้วยลมร้อน....64
ผลของอุณหภูมิ ความเร็ว และรูปแบบการไหลของลมต่อพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุก....67
อัตราการทำแห้งมะม่วงสุก....68

ผลของอุณหภูมิ ความเร็ว และรูปแบบการไหลของลมต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล...69
ผลของอุณหภูมิ ความเร็ว และรูปแบบการไหลของลมต่อร้อยละการหดตัวเชิงพื้นที่ของมะม่วงสุก.....71
กลไกการหดตัวของมะม่วงสุกในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุน.....73
ผลของอุณหภูมิและความเร็วลมต่อร้อยละการหดตัวเชิงพื้นที่ของมะม่วงสุก.....73
การเปลี่ยนแปลงสีของมะม่วงสุกในระหว่างกระบวนการทำแห้ง.....74
กลไกการเปลี่ยนแปลงค่า L^* และ a^* ของมะม่วงสุกในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุน.....76
กลไกการเปลี่ยนแปลงค่า b^* ของมะม่วงสุกในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุน.....79
กลไกการเปลี่ยนแปลงค่า ΔE^* ของมะม่วงสุกในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุน.....81
ผลของอุณหภูมิ ความเร็ว และรูปแบบการไหลของลมต่อค่าการเปลี่ยนสีทั้งหมดของมะม่วงสุก.....83
ผลของอุณหภูมิและความเร็วลมต่อค่าการเปลี่ยนสีทั้งหมดของมะม่วงสุก.....85
ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุน.....86
สภาวะการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุน.....86
ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างและอุณหภูมิลมร้อนต่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ.....86
ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่อพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุก.....87
ผลของอุณหภูมิลมร้อนต่อพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุก.....88
ผลของความเร็วลมต่อพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุก.....90
จลนพลศาสตร์การทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุน.....91
ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่ออัตราการทำแห้งมะม่วงสุก.....94
ผลของอุณหภูมิลมร้อนต่ออัตราการทำแห้งมะม่วงสุก.....96

ผลของความเร็วลมต่ออัตราการทำแห้งมะม่วงสุก.....97
ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างและอุณหภูมิลมร้อนต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล 98
ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างและความเร็วลมต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล 99
ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างและอุณหภูมิลมร้อนต่อร้อยละการหดตัวของมะม่วงสุก.....100
ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างและความเร็วลมต่อร้อยละการหดตัวของมะม่วงสุก.....101
ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างและอุณหภูมิลมร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีของมะม่วงสุก 102
ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างและอุณหภูมิลมร้อนต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมดของมะม่วงสุก 104
ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างและความเร็วลมต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีของมะม่วงสุก 106
ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างและความเร็วลมต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมดของมะม่วงสุก...107
จลนพลศาสตร์การคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุน 108
ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่อพฤติกรรมการคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุน 111
ผลของอุณหภูมิลมร้อนต่อพฤติกรรมการคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุน 113
ผลของความเร็วลมต่อพฤติกรรมการคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุน.....113
การทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำในสภาวะไม่คงที่.....116
สภาวะการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำในสภาวะคงที่และไม่คงที่.....116
พฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุก.....116
จลนพลศาสตร์การทำแห้ง 117
อัตราการทำแห้งมะม่วงสุก 118
สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล.....120
การหดตัวของมะม่วงสุก 121

การเปลี่ยนแปลงสีของมะม่วงสุก 123
ค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมดของมะม่วงสุก 125
โครงสร้างจุลภาค.....125
จลนพลศาสตร์การคืนน้ำของมะม่วงสุก 126
พฤติกรรมการคืนน้ำของมะม่วงสุก 127
สมบัติทางอุณหพลศาสตร์.....130
ตัวอย่าง.....130
แบบจำลอง sorption isotherm.....130
sorption isotherm 133
ผลของอุณหภูมิต่อ sorption isotherm.....136
ผลของตัวอย่างต่อ sorption isotherm.....138
net isosteric heat of sorption.....139
differential entropy 141
enthalpy-entropy compensation theory 142
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 146
ภาคผนวก Study on kinetics of flow characteristics in hot air drying of pineapple 148
รายการอ้างอิง 158
ประวัติผู้เขียน 180

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 แบบจำลองสำหรับการทำแห้งผลไม้ 40

ตารางที่ 2 แบบจำลองสำหรับการคืนน้ำ 48

ตารางที่ 3 water activity ของสารละลายเกลืออิ่มตัวชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50°C 49

ตารางที่ 4 แบบจำลองสำหรับ sorption isotherm 50

ตารางที่ 5 สภาวะการทำแห้งต่างๆ ที่ความเร็วลม 1.5 m/s 53

ตารางที่ 6 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่ที่สภาวะต่างๆ 54

ตารางที่ 7 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) และดัชนีการเพิ่มประสิทธิภาพ (EI) ของกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะต่างๆ 59

ตารางที่ 8 สภาวะการทำแห้งด้วยลมร้อน 63

ตารางที่ 9 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่สภาวะต่างๆ 64

ตารางที่ 10 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่สภาวะต่างๆ 70

ตารางที่ 11 ร้อยละการหดตัวเชิงพื้นที่ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่สภาวะต่างๆ 72

ตารางที่ 12 ค่าการเปลี่ยนสีทั้งหมดของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่สภาวะต่างๆ 84

ตารางที่ 13 สภาวะการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนในการศึกษาผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างและอุณหภูมิลมร้อน 86

ตารางที่ 14 สภาวะการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนในการศึกษาผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างและความเร็วลม 87

ตารางที่ 15 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อุณหภูมิลมร้อนและอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่างๆ.....87

ตารางที่ 16 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่สภาวะต่างๆ 92

ตารางที่ 17 ค่าสี (ΔL* Δa* และ Δb*) ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่ความเร็วลม 2.0 m/s กับอุณหภูมิลมร้อน และอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่างๆ.....104

ตารางที่ 18 ค่าสี (ΔL* Δa* และ Δb*) ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C กับความเร็วลม และอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่างๆ 107

ตารางที่ 19 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่สภาวะต่างๆ.....109

ตารางที่ 20 สภาวะการทำแห้งในสภาวะคงที่และไม่คงที่ ที่อุณหภูมิ 70°C 116

ตารางที่ 21 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ.....119

ตารางที่ 22 ค่าสี (ΔL* Δa* และ Δb*) ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ.....124

ตารางที่ 23 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ 128

ตารางที่ 24 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลอง sorption isotherm ของมะม่วงสุก 131

ตารางที่ 25 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลอง sorption isotherm ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD.....132

ตารางที่ 26 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลอง sorption isotherm ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD 133

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 รูปแบบอุณหภูมิในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่ (DC- drying curve และ AT คือ อุณหภูมิลมร้อน).....8

ภาพที่ 2 รูปแบบการไหลของลมร้อนผ่านชิ้นอาหาร (ก) overflow และ (ข) through flow.....9

ภาพที่ 3 รูปแบบอุณหภูมิในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะไม่คงที่ (DC- drying curve และ AT คือ อุณหภูมิลมร้อน).....10

ภาพที่ 4 รูปแบบอุณหภูมิและความชื้นของอากาศในกระบวนการ Intermittent drying.....11

ภาพที่ 5 รูปแบบอุณหภูมิและความดันในกระบวนการ CMFD.....12

ภาพที่ 6 sorption isotherm ของอาหาร 25

ภาพที่ 7 อุปกรณ์การทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่ ประกอบด้วย (1) พัดลม (2) ขดลวดความร้อน (3) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (4) pulsed controller (5) PT100 (6) temperature and humidity sensor (7) load cell (8) data logger และ (9) ถาดใส่ตัวอย่าง 34

ภาพที่ 8 อุปกรณ์การทำแห้งด้วยลมร้อน (ก) แบบหมุน และ (ข) แบบไม่หมุนร่วมกับ computer vision system ประกอบด้วย (1) พัดลม (2) ขดลวดความร้อน (3) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (4) PT100 (5) temperature and humidity sensor (6) load cell (7) data logger (8) ถาดใส่ตัวอย่าง (9) กล้องดิจิทัล (10) แหล่งกำเนิดแสงสว่าง และ (11) คอมพิวเตอร์ 35

ภาพที่ 9 อุปกรณ์การทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนร่วมกับ dehumidifier ประกอบด้วย (1) พัดลมอัดอากาศ (2) ท่อสองชั้น (3) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (4) water trap (5) PT100 (6) ขดลวดความร้อน (7) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (8) temperature and humidity sensor (9) load cell (10) data logger และ (11) ถาดใส่ตัวอย่าง 37

ภาพที่ 10 อุปกรณ์การทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำในสภาวะคงที่และไม่คงที่ ประกอบด้วย (1) เครื่องกำเนิดไอน้ำ (2) วาล์วควบคุมไอน้ำ (3) solenoid valve (4) เกจวัดความดัน (5) steam regulator (6) steam trap (7) ขดลวดความร้อน (8) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (9) load cell (10) thermocouple (11) data logger (12) ถาดใส่ตัวอย่าง และ (13) ปั๊มสุญญากาศ.....38

ภาพที่ 11 อุปกรณ์การศึกษา sorption isotherm ประกอบด้วย (1) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (2) ถ้วยแก้วสำหรับใส่สารละลายเกลืออิ่มตัว (3) พัดลม (4) ถาดใส่ตัวอย่าง และ (5) ฝาปิดห้องใส่ตัวอย่าง..49

ภาพที่ 12 กราฟการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อน (ก) ในสภาวะคงที่ และ (ข) ในสภาวะไม่คงที่.....56

ภาพที่ 13 กราฟการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่ ที่สภาวะต่างๆ.....56

ภาพที่ 14 กราฟอัตราการทำแห้งของมะม่วงสุกในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่ ที่สภาวะต่างๆ.....57

ภาพที่ 15 ค่าการเปลี่ยนสีทั้งหมดของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่ ที่สภาวะต่างๆ 60

ภาพที่ 16 ร้อยละการหดตัวของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่ ที่สภาวะต่างๆ 61

ภาพที่ 17 กราฟการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่ความเร็วลมต่างๆ กับอุณหภูมิลมร้อนที่ (ก) 50 (ข) 60 และ (ค) 70°C.....68

ภาพที่ 18 กราฟอัตราการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่ความเร็วลมต่างๆ กับอุณหภูมิลมร้อนที่ (ก) 50 (ข) 60 และ (ค) 70°C 69

ภาพที่ 19 ผลของอุณหภูมิและความเร็วลมต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน (ก) แบบหมุน และ (ข) แบบไม่หมุน 71

ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเชิงพื้นที่กับปริมาณความชื้นของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่ความเร็วลมต่างๆ กับอุณหภูมิลมร้อนที่ (ก) 50 (ข) 60 และ (ค) 70°C.....74

ภาพที่ 21 ผลของอุณหภูมิและความเร็วลมต่อร้อยละการหดตัวเชิงพื้นที่ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อน (ก) แบบหมุน และ (ข) แบบไม่หมุน 75

ภาพที่ 22 การเปลี่ยนแปลงค่าสี (ก) L* (ข) a* และ (ค) b* ของมะม่วงสุกในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน.....75

ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า L^*/L^*_0 กับปริมาณความชื้นของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่ความเร็วลมต่างๆ กับอุณหภูมิลมร้อนที่ (ก) 50 (ข) 60 และ (ค) 70°C 77

ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า a^*/a^*_0 กับปริมาณความชื้นของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่ความเร็วลมต่างๆ กับอุณหภูมิลมร้อนที่ (ก) 50 (ข) 60 และ (ค) 70°C 79

ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า b^*/b^*_0 กับปริมาณความชื้นของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่ความเร็วลมต่างๆ กับอุณหภูมิลมร้อนที่ (ก) 50 (ข) 60 และ (ค) 70°C 81

ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนสีทั้งหมดกับปริมาณความชื้นของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่ความเร็วลมต่างๆ กับอุณหภูมิลมร้อนที่ (ก) 50 (ข) 60 และ (ค) 70°C 83

ภาพที่ 27 ผลของอุณหภูมิและความเร็วลมต่อค่าการเปลี่ยนสีทั้งหมดของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อน (ก) แบบหมุน และ (ข) แบบไม่หมุน 85

ภาพที่ 28 กราฟการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน (T_a) ความเร็วลม (V_a) และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_d) ต่างๆ.....89

ภาพที่ 29 กราฟการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่ความเร็วลม (V_a) 2.0 m/s กับอุณหภูมิลมร้อน (T_a) ต่างๆ และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_d) ที่ (ก) 5 (ข) 10 และ (ค) 15°C 90

ภาพที่ 30 กราฟการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน (T_a) 70°C กับความเร็วลม (V_a) ต่างๆ และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_d) ที่ (ก) 5 (ข) 10 และ (ค) 15°C..91

ภาพที่ 31 กราฟอัตราการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน (T_a) ความเร็วลม (V_a) และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_d) ต่างๆ 95

ภาพที่ 32 กราฟอัตราการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่ความเร็วลม (V_a) 2.0 m/s กับอุณหภูมิลมร้อน (T_a) ต่างๆ และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_d) ที่ (ก) 5 (ข) 10 และ (ค) 15°C 96

ภาพที่ 33 กราฟอัตราการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน (T_a) 70°C กับความเร็วลม (V_a) ต่างๆ และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_d) ที่ (ก) 5 (ข) 10 และ (ค) 15°C 97

ภาพที่ 34 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่ความเร็วลม 2.0 m/s กับอุณหภูมิลมร้อน และอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่างๆ 98

ภาพที่ 35 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C กับความเร็วลม และอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่างๆ 99

ภาพที่ 36 ร้อยละการหดตัวของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่ความเร็วลม 2.0 m/s กับอุณหภูมิลมร้อน และอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่างๆ.....101

ภาพที่ 37 ร้อยละการหดตัวของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C กับความเร็วลม และอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่างๆ 102

ภาพที่ 38 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมดของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่ความเร็วลม 2.0 m/s กับอุณหภูมิลมร้อน และอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่างๆ 105

ภาพที่ 39 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมดของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C กับความเร็วลม และอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่างๆ 108

ภาพที่ 40 กราฟการคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน (T_a) ความเร็วลม (V_a) และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_d) ต่างๆ.....112

ภาพที่ 41 กราฟการคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่ความเร็วลม (V_a) 2.0 m/s กับอุณหภูมิลมร้อน (T_a) ต่างๆ และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_d) ที่ (ก) 5 (ข) 10 และ (ค) 15°C 114

ภาพที่ 42 กราฟการคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน (T_a) 70°C กับความเร็วลม (V_a) ต่างๆ และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_d) ที่ (ก) 5 (ข) 10 และ (ค) 15°C115

ภาพที่ 43 กราฟการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ.....117

ภาพที่ 44 กราฟอัตราการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ 120

ภาพที่ 45 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ.....121

ภาพที่ 46 ร้อยละการหดตัวของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ 122

ภาพที่ 47 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมดของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ.....125

ภาพที่ 48 SEM micrographs ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วย (ก) HAD (ข) LPSSD (ค) Intermittent LPSSD ที่ heating period 10 นาที (ง) Intermittent LPSSD ที่ heating period 20 นาที และ (จ) Intermittent LPSSD ที่ heating period 30 นาที.....126

ภาพที่ 49 กราฟการคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ.....129

ภาพที่ 50 sorption isotherm ของมะม่วงสุกที่อุณหภูมิ (ก) 30 (ข) 40 และ (ค) 50°C 134

ภาพที่ 51 sorption isotherm ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD ที่อุณหภูมิ (ก) 30 (ข) 40 และ (ค) 50°C.....135

ภาพที่ 52 sorption isotherm ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD ที่อุณหภูมิ (ก) 30 (ข) 40 และ (ค) 50°C 136

ภาพที่ 53 ผลของอุณหภูมิต่อ sorption isotherm ของ (ก) มะม่วงสุก (ข) มะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD และ (ค) LPSSD.....137

ภาพที่ 54 ผลของตัวอย่างต่อ sorption isotherm ที่อุณหภูมิ (ก) 30 (ข) 40 และ (ค) 50°C 139

ภาพที่ 55 net isosteric heat of sorption ของมะม่วงสุก (Ripe mangoes) และมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD (HAD) และ LPSSD (LPSSD).....141

ภาพที่ 56 differential entropy ของมะม่วงสุก (Ripe mangoes) และมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD (HAD) และ LPSSD (LPSSD).....142

ภาพที่ 57 ความสัมพันธ์ระหว่าง net isosteric heat of sorption และ differential entropy ของมะม่วงสุก 143

ภาพที่ 58 ความสัมพันธ์ระหว่าง net isosteric heat of sorption และ differential entropy ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD.....144

ภาพที่ 59 ความสัมพันธ์ระหว่าง net isosteric heat of sorption และ differential entropy ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD 145

บทที่ 1
บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มะม่วงเป็นผลไม้ตามฤดูกาลที่มีการบริโภคมากที่สุดชนิดหนึ่ง (Pott และคณะ, 2005) โดยมะม่วงมีการเพาะปลูกกันอย่างแพร่หลายในประเทศเขตร้อนรวมถึงประเทศไทย อย่างไรก็ตามมะม่วงสามารถเสื่อมเสียได้ง่ายและมีอายุการเก็บรักษาค่อนข้างสั้น ดังนั้นในช่วงที่มีผลผลิตของมะม่วงจำนวนมากจึงจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการแปรรูปต่างๆ มาชะลอการเสื่อมเสียของมะม่วง โดยการทำแห้ง (drying) เป็นหนึ่งในวิธีการแปรรูปอาหารที่นิยมนำมาใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลทางการเกษตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน (hot-air drying) อย่างไรก็ตามสภาวะของกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนที่มีการใช้อุณหภูมิสูง และคงที่ตลอดเวลา หรือที่เรียกว่ากระบวนการทำแห้งในสภาวะคงที่ (stationary drying) ซึ่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนเป็นระยะเวลานาน ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านต่างๆได้ เช่น การเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (การหดตัว) การสูญเสียความสามารถในการคืนน้ำ (rehydration) การสูญเสียสารอาหาร และการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางประสาทสัมผัส (สี กลิ่น กลิ่นรส และรสชาติ) เป็นต้น (Fellows, 2000; Lewicki, 2006; Louka และคณะ, 2004) ดังนั้นเพื่อที่จะลดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์แห้งจึงจำเป็นต้องลดปริมาณความร้อน และระยะเวลาในการสัมผัสความร้อนของผลิตภัณฑ์ลง ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการทำแห้งในสภาวะไม่คงที่ (non-stationary drying) ซึ่งเป็นกระบวนการทำแห้งที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะบางอย่างในระหว่างกระบวนการ เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศ หรือการเปลี่ยนแปลงความดันในระหว่างกระบวนการทำแห้ง เป็นต้น โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถเพิ่มอัตราการทำแห้งให้สูงขึ้น และเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์แห้งมีคุณภาพดีขึ้น นอกจากนี้ยังอาจช่วยลดการใช้พลังงานของกระบวนการทำแห้งได้อีกด้วย (Kowalski และ Pawłowski, 2011)

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาพฤติกรรม และอัตราการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านกระบวนการทำแห้งในสภาวะไม่คงที่ เปรียบเทียบกับกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน

2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพ จากสี และลักษณะโครงสร้างของมะม่วงสุกที่ผ่านกระบวนการทำแห้งในสภาวะไม่คงที่ เปรียบเทียบกับกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน
3. ศึกษาสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของมะม่วงสุกที่ผ่านกระบวนการทำแห้งในสภาวะไม่คงที่ เปรียบเทียบกับกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน

สมมติฐานของการวิจัย

1. การทำแห้งในสภาวะไม่คงที่จะช่วยเพิ่มอัตราการทำแห้ง ส่งผลให้ระยะเวลาในการทำแห้งสั้นลง
2. การทำแห้งในสภาวะไม่คงที่จะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพ
3. การทำแห้งในสภาวะไม่คงที่มีผลต่อปรากฏการณ์ enthalpy-entropy compensation แตกต่างจากการทำแห้งในสภาวะคงที่

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาสภาวะของกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนที่เหมาะสมต่อการทำแห้งมะม่วงสุก
2. ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการทำแห้งในสภาวะไม่คงที่ เปรียบเทียบกับกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน
3. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ โดยคุณภาพที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ สี และลักษณะโครงสร้างของมะม่วงสุกที่ผ่านกระบวนการทำแห้งในสภาวะไม่คงที่ เปรียบเทียบกับกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน
4. ศึกษาสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของมะม่วงสุกที่ผ่านกระบวนการทำแห้งในสภาวะไม่คงที่ เปรียบเทียบกับกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน

ประโยชน์ที่ได้รับ

1. นำความรู้ไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางเพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์แห้งให้ดีขึ้น
2. นำความรู้ไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำแห้งให้ดีขึ้น
3. เป็นองค์ความรู้สำหรับนำไปใช้ในการวิจัยต่อไป

บทที่ 2
วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

มะม่วง

มะม่วงเป็นผลไม้เมืองร้อนที่มีการบริโภคมากที่สุดเป็นอันดับสามของโลก (Maneepun และ Yunchalad, 2004) เนื่องจากมะม่วงมีรสชาติและกลิ่นรสเป็นที่ดึงดูดต่อผู้บริโภค รวมถึงยังมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เช่น แคโรทีนอยด์ วิตามินเอ วิตามินบี วิตามินซี เส้นใย และแร่ธาตุ เป็นต้น (Bernardi และคณะ, 2009; Eipenson และ Bhowmik, 1992; Torezan และคณะ, 2007) นอกจากนี้มะม่วงยังจัดเป็นผลไม้ที่มีสารต้านอนุมูลอิสระอยู่จำนวนมาก ซึ่งมีประโยชน์ต่อสุขภาพ เช่น ช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดโรคหัวใจ ป้องกันการเกิดมะเร็ง และมีความสามารถในการต้านทานต่อไวรัส (anti-viral activities) (Sivakumar และคณะ, 2011)

มะม่วงมีการเพาะปลูกกันอย่างแพร่หลายในประเทศเขตร้อน รวมถึงประเทศไทย โดยในปี 2013 ประเทศไทยได้มีการผลิตมะม่วง มังคุด และฝรั่งรวมกันมากที่สุดเป็นอันดับ 3 ของโลก ซึ่งมีปริมาณถึง 3,141,950 ตัน (FAOSTAT, 2013) อย่างไรก็ตามมะม่วงจะมีอายุการเก็บรักษาค่อนข้างสั้น และสามารถเกิดการเสื่อมเสียได้ง่าย โดย González-Aguilar และคณะ (2007) ได้รายงานว่าการเก็บรักษามะม่วงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการแปรรูปไว้ที่อุณหภูมิ 25°C เป็นระยะเวลา 18 วัน จะส่งผลให้มะม่วงทั้งหมดเกิดการเน่าเสีย และมีเชื้อราเกิดขึ้น นอกจากนี้ถ้ามีการจัดการที่ไม่ถูกต้องในขั้นตอนของการเก็บเกี่ยว และภายหลังการเก็บเกี่ยวก็จะส่งผลให้มะม่วงเกิดการเสื่อมเสียได้เช่นเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่น การเก็บรักษามะม่วงที่อุณหภูมิต่ำจะส่งผลให้เกิดอาการสะท้านหนาว (chilling injury) (Sogi และคณะ, 2015) ซึ่งอาการดังกล่าวเป็นผลให้เกิดความเสียหายทางกายภาพขนาดใหญ่ และเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของมะม่วงได้ (Serrano, 2005) ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องอาศัยกระบวนการแปรรูปต่างๆ มาประยุกต์ใช้สำหรับชะลอการเสื่อมเสีย และลดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่พึงประสงค์ของมะม่วงภายหลังการเก็บเกี่ยว เช่น การแช่แข็ง (freezing) การแปรรูปเป็นน้ำผลไม้ และการทำแห้ง (drying) เป็นต้น (Fitzpatrick และ Ahrné, 2005) ซึ่งกระบวนการทำแห้งเป็นหนึ่งในกระบวนการแปรรูปผักและผลไม้ที่มีการนำมาใช้กันอย่างยาวนาน เนื่องจากสามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ โดยการป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ และชะลอการเสื่อมเสียที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่อาศัยความชื้นเป็นตัวกลาง (Zhao และคณะ, 2015) นอกจากนี้การทำแห้งยังสามารถเพิ่มมูลค่า

ของผลิตภัณฑ์ และลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย (Saxena และ Arora, 1997; Srinivasan และคณะ, 2000)

กระบวนการทำแห้งมะม่วงโดยทั่วไปที่ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูป คือ กระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน อย่างไรก็ตามกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะปรากฏ และลักษณะโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ โดย Dissa และคณะ (2008) ได้ศึกษาผลของกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70°C ต่อการหดตัวของมะม่วง Amelie ที่มีความสุกปานกลาง และมีค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (total soluble solid, TSS) ประมาณ 14.0 ± 1.7°Brix และค่าความเป็นกรด (acidity) ประมาณ 8.9 ± 3.1 mmol/100 g sample พบว่าอุณหภูมิของกระบวนการทำแห้งจะไม่ส่งผลต่อการหดตัวของมะม่วง โดยมะม่วงจะเกิดการหดตัวในระหว่างกระบวนการทำแห้งสูงถึง 70% เมื่ออัตราส่วนความชื้น (X/X_0) ของตัวอย่างมีค่าประมาณ 30% ดังนั้นผลิตภัณฑ์มะม่วงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนจะมีขนาดเล็ก และมีความพรุน (porosity) ต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากการหดตัวของตัวอย่าง

Zou และคณะ (2013) ได้ศึกษาผลของการแช่อิ่มต่อคุณภาพของมะม่วงแผ่นอบแห้งด้วยวิธี explosion puffing drying พบว่ามะม่วงที่ไม่ผ่านการแช่อิ่มนั้นจะมีการลดลงของค่าความสว่าง และค่าสีเหลืองมากที่สุด โดยมีความแตกต่างจากค่าความสว่าง และค่าสีเหลืองของมะม่วงสด และมะม่วงที่ผ่านการแช่อิ่มอย่างมีนัยสำคัญ และในส่วนของค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมด (ΔE^*) พบว่ามะม่วงที่ไม่ผ่านการแช่อิ่มนั้นจะมีค่า ΔE^* มากกว่ามะม่วงที่ผ่านการแช่อิ่มอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการแช่อิ่มสามารถลดการเปลี่ยนแปลงสีของมะม่วงอบแห้งได้ ในส่วนคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสทางด้านสี กลิ่น เนื้อสัมผัส กลิ่นรส และคุณภาพโดยรวม พบว่าผู้บริโภคมีความชอบทางด้านสี กลิ่น และคุณภาพของมะม่วงที่ผ่านการแช่อิ่มมากกว่ามะม่วงที่ไม่ผ่านการแช่อิ่มอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามกลับไม่พบความแตกต่างในคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัส และกลิ่นรส นอกจากนี้ Rajkumar และคณะ (2007) ได้ศึกษากระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนของเนื้อมะม่วงสุกบด (mango pulp) และโฟมของเนื้อมะม่วงสุกบดกับไข่ขาวและ methyl cellulose (foamed mango pulp) ต่อคุณลักษณะของตัวอย่าง โดยพบว่า mango pulp จะมีการลดลงขององค์ประกอบทางเคมีชีวภาพ (biochemical component) เช่น TSS ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และกรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid) มากกว่า foamed mango pulp ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการทำแห้งของ foamed mango pulp จะมีค่าสูงกว่า mango pulp จึงส่งผลให้ foamed mango pulp จะใช้ระยะเวลาในการทำแห้งน้อยกว่า mango pulp นอกจากนี้เมื่อนำตัวอย่างทั้งสองที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแล้วมา

ใช้เป็นส่วนผสมในการทำเค้กมะม่วง และทำการทดสอบความชอบโดยรวมของผู้บริโภคด้วยวิธี Hedonic scale พบว่าเค้กที่ใช้ foamed mango pulp จะได้รับคะแนนความชอบโดยรวม (8.1 ± 0.1) มากกว่าเค้กที่ใช้ mango pulp (6.7 ± 0.2) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า foamed mango pulp จะให้คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสที่ดีกว่า mango pulp จากงานวิจัยดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการแช่อิ่มหรือการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์จะสามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการทำแห้งได้ อย่างไรก็ตามกระบวนการแช่อิ่มจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเปลี่ยนแปลงรสชาติของผลิตภัณฑ์ (Sutar และ Sutar, 2013) ดังนั้นเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุง หรือเปลี่ยนแปลงกระบวนการทำแห้งเพื่อลดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์

Ochoa-Martínez และคณะ (2012) ได้ศึกษาผลของกระบวนการทำแห้งแบบ Refractance Window (RW) และกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนของมะม่วงที่มีค่า TSS ประมาณ 13.9°Brix พบว่ากระบวนการ RW จะใช้ระยะเวลาในการทำแห้งน้อยกว่ากระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน นอกจากนี้ยังพบว่าม่วงที่ผ่านกระบวนการ RW จะเกิดการหดตัวประมาณ 60% และในส่วนกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนมะม่วงจะเกิดการหดตัวประมาณ 80% โดยมะม่วงที่ผ่านกระบวนการ RW จะมีความพรุนมากกว่ามะม่วงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงสีของมะม่วงที่ผ่านกระบวนการทั้งสองกลับไม่มีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ Chen และคณะ (2007) ได้รายงานการเปลี่ยนแปลงปริมาณแคโรทีนอยด์ในมะม่วงสุกที่ผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน และกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่ากระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียปริมาณแคโรทีนอยด์มากกว่ากระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง และมะม่วงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนจะมีค่า a^* และ b^* มากกว่ามะม่วงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามะม่วงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนจะมีสีส้มคล้ำเกิดขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sogi และคณะ (2015) ที่ได้ศึกษาผลของกระบวนการทำแห้งแบบต่างๆ ต่อปริมาณฟีนอล วิตามินซี และแคโรทีนในมะม่วง พบว่ากระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะมีปริมาณฟีนอล วิตามินซี และแคโรทีนสูงที่สุด โดยที่กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะมีปริมาณวิตามินซีมากกว่ากระบวนทำแห้งด้วยลมร้อน กระบวนการทำแห้งแบบสุญญากาศ และกระบวนการทำแห้งด้วยอินฟราเรดอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากวิตามินซีนั้นสามารถสุญเสียได้ด้วยความร้อน อย่างไรก็ตามกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะมีปริมาณฟีนอลไม่แตกต่างกับกระบวนการทำแห้งด้วยอินฟราเรดอย่างมีนัยสำคัญ และในส่วนของปริมาณแคโรทีน

พบว่ากระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง และกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนจะมีปริมาณแคโรทีนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจากงานวิจัยต่างๆ พบว่ากระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนจะส่งผลให้คุณภาพของมะม่วงลดต่ำลง ในขณะที่กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้นจะสามารถคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการทำแห้งแบบต่างๆ อย่างไรก็ตาม กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งยังมีข้อเสียที่สำคัญ คือ ใช้ต้นทุนการแปรรูปสูง และใช้ระยะเวลาในการทำแห้งนานกว่ากระบวนการทำแห้งอื่นๆ (Cui และคณะ, 2008; Hofsetz และคณะ, 2007; R. Wang และคณะ, 2010) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนากระบวนการทำแห้งในรูปแบบอื่นที่สามารถทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งมีคุณภาพดีเช่นเดียวกับกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง แต่มีต้นทุนในการแปรรูปที่ต่ำกว่า

การทำแห้งอาหาร

การทำแห้งอาหาร คือ การกำจัดน้ำที่มีอยู่ในอาหารด้วยวิธีการระเหย หรือวิธีการระเหิด (Brennan, 2006) โดยวัตถุประสงค์หลักของการทำแห้ง คือ การยืดอายุการเก็บรักษาของอาหารให้สามารถจัดเก็บ และขนส่งได้โดยไม่ต้องแช่เย็น เนื่องจากการทำแห้งจะไปลดค่า water activity (A_w) ของอาหารให้อยู่ในระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ก่อโรค (pathogenic microorganism) จุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสีย (spoilage microorganism) รวมถึงลดค่ากิจกรรมของเอนไซม์ (enzyme activity) และลดอัตราการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ไม่พึงประสงค์ในอาหาร (Rahman และ Perera, 2007)

หลักการและกลไกการทำแห้งอาหาร

หลักการทำแห้ง (dehydration principle) เมื่อนำวัสดุที่มีค่าความดันไอ (vapor pressure) สูงมาวางไว้ในตัวกลางที่มีค่าความดันไอต่ำกว่าชิ้นวัสดุ โดยอุณหภูมิของวัสดุและตัวกลางมีค่าเท่ากัน วัสดุจะเกิดการถ่ายโอนความชื้นไปยังตัวกลางจนกระทั่งความดันไอของทั้งตัวกลางและวัสดุมีค่าเท่ากัน โดยตัวกลางที่ใช้ในการทำแห้งมีหลากหลายชนิดไม่ว่าจะเป็น อากาศ ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (superheated steam) ตัวทำละลาย และสารละลายก็สามารถนำมาใช้ในการทำแห้งได้ (Karel และ Lund, 2003a)

กลไกการทำแห้งอาหารเป็นกลไกที่มีความซับซ้อน ซึ่งในระหว่างการทำแห้งอาหารจะเกิดทั้งการถ่ายโอนมวล (mass transfer) และการถ่ายโอนความร้อน (heat transfer) ขึ้นพร้อมๆกันใน

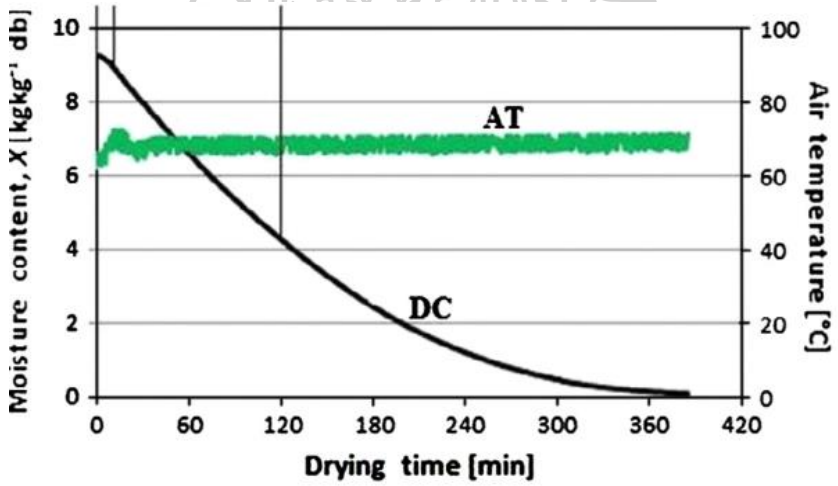
ระบบ (Mujumdar, 1997; Mujumdar และ Menon, 1995; Ratti, 2001) โดยการถ่ายโอนความร้อนจากตัวกลางในการทำแห้งไปยังวัสดุจะสามารถเกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ในหลายรูปแบบ เช่น การพาความร้อน (convection) การนำความร้อน (conduction) หรือการแผ่รังสีความร้อน (radiation) เป็นต้น นอกจากนี้อาจเกิดจากกลไกการถ่ายโอนความร้อนหลายๆ อย่างมารวมกัน การถ่ายโอนความร้อนในระหว่างกระบวนการทำแห้งโดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นจากการถ่ายโอนความร้อนที่ผิวหน้าวัสดุกับตัวกลางการทำแห้ง ในขณะที่การถ่ายโอนความร้อนภายในวัสดุจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับการถ่ายโอนความร้อนที่ผิวหน้าวัสดุกับตัวกลางการทำแห้ง ในส่วนของการถ่ายโอนมวลจะขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัสดุ หรือการเคลื่อนที่ของไอน้ำที่บริเวณผิวหน้าของวัสดุไปยังตัวกลาง อย่างไรก็ตามลักษณะโครงสร้างของวัสดุจะเป็นตัวกำหนดกลไกการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัสดุที่สำคัญ โดยวัสดุที่เป็นน้ำและเจลจะเกิดการถ่ายโอนมวลโดยวิธีการแพร่ (diffusion) จากภายในวัสดุสู่ผิวหน้าวัสดุ (Rizvi, 2005) ซึ่งจะอาศัยความแตกต่างของความเข้มข้น (concentration gradient) เป็นแรงขับสำหรับการแพร่ โดยการแพร่ของน้ำสามารถเกิดขึ้นทั้งในสถานะของเหลว และในสถานะของก๊าซ โดยการแพร่ของของเหลวจะเกิดขึ้นจากความแตกต่างของความเข้มข้นของน้ำบนผิวหน้าวัสดุกับความเข้มข้นของน้ำภายในวัสดุ และการแพร่ของก๊าซหรือไอน้ำจะเกิดขึ้นจากความแตกต่างของความดันไอของน้ำในวัสดุกับตัวกลางการทำแห้ง แต่ในส่วนของวัสดุที่มีรูพรุน (capillary-porous material) จะมีกลไกการเคลื่อนที่ของความชื้นโดยแรงคะปิลลารี (capillary force) โดยโครงสร้างที่เป็นรูพรุนภายในชิ้นอาหารจะประกอบไปด้วยโครงข่ายที่ซับซ้อนที่มีการเชื่อมต่อกันของช่องว่าง และช่องว่างนั้นจะขยายไปสู่พื้นผิวภายนอกของชิ้นอาหาร ซึ่ง capillary force จะเกิดขึ้นจาก interfacial tension ระหว่างน้ำและส่วนของแข็ง โดยความแรงของ capillary force ขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่าง ถ้าช่องว่างมีขนาดเล็กจะส่งผลให้เกิดแรง capillary force ได้มากกว่าช่องว่างขนาดใหญ่ โดยที่แรงโน้มถ่วงของโลกจะมีผลโดยตรงต่อ capillary force (McCabe และ Smith, 1976) นอกจากนี้ยังมีกลไกอื่นๆ ของการเคลื่อนที่ของความชื้นในวัสดุที่มีรูพรุน เช่น การแพร่ของของเหลว การแพร่ของไอน้ำ และการเคลื่อนที่ของไอน้ำภายใต้สภาวะความดันที่แตกต่างกัน เป็นต้น (Araya-Farias และ Ratti, 2009)

ประเภทของกระบวนการทำแห้งอาหาร

กระบวนการทำแห้งอาหารสามารถแบ่งออกได้หลากหลายประเภทขึ้นอยู่กับเกณฑ์การแบ่งประเภทของกระบวนการ เช่น รูปแบบการทำงานของอุปกรณ์การทำแห้ง (แบบกะ หรือแบบต่อเนื่อง)

ระดับความดันที่ใช้ในกระบวนการทำแห้ง (สุญญากาศ ความดันบรรยากาศ หรือความดันสูง) และรูปแบบของการถ่ายโอนความร้อน (การพาความร้อน การนำความร้อน หรือการแผ่รังสีความร้อน) เป็นต้น (Kudra และ Mujumdar, 2002; Mujumdar และ Menon, 1995; Vega-Mercado และคณะ, 2001) อย่างไรก็ตามยังสามารถแบ่งประเภทของกระบวนการทำแห้งตามสภาวะของกระบวนการทำแห้งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. กระบวนการทำแห้งในสภาวะคงที่ คือ การทำแห้งโดยกำหนดให้สภาวะของกระบวนการ เช่น อุณหภูมิ ความดัน และความเร็วลม ในระหว่างกระบวนการให้มีค่าคงที่ ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยข้อดีของกระบวนการทำแห้งด้วยสภาวะคงที่ คือ การตั้งค่า และการควบคุมสภาวะของการทำแห้งสามารถทำได้ง่าย รวมถึงอุปกรณ์มีราคาถูก (Kowalski และคณะ, 2013)

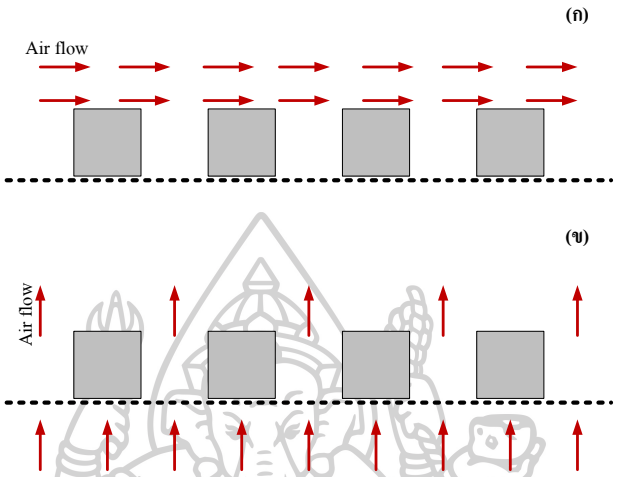


ภาพที่ 1 รูปแบบอุณหภูมิในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่ (DC- drying curve และ AT คือ อุณหภูมิลมร้อน)

ที่มา: Kowalski และคณะ (2013)

สำหรับกระบวนการทำแห้งโดยทั่วไปจะเป็นกระบวนการทำแห้งในสภาวะคงที่ เช่น กระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งจัดเป็นกระบวนการทำแห้งที่ไม่ซับซ้อน โดยจะอาศัยอากาศร้อนหรือลมร้อนเป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อน และการถ่ายโอนมวลให้แก่อาหาร ซึ่งลมร้อนจะถูกควบคุมอุณหภูมิและความชื้น และบังคับให้ไหลผ่านชิ้นอาหารในทิศทางขนาน (overflow) หรือตั้งฉาก (through flow) ดังแสดงในภาพที่ 2 (ก) และ 2 (ข) ตามลำดับ กับชิ้นอาหารภายในอุปกรณ์การ

ทำแห้ง โดยปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการทำแห้งในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน คือ อุณหภูมิของลม ความชื้นของลม ความเร็วลม รูปแบบการไหลของลม รูปร่างและลักษณะของชิ้นอาหาร เป็นต้น (Rahman และ Perera, 2007)



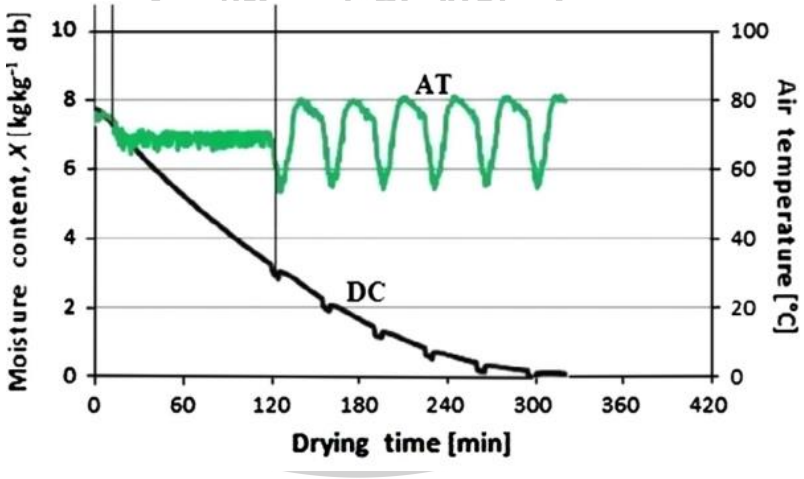
ภาพที่ 2 รูปแบบการไหลของลมร้อนผ่านชิ้นอาหาร (ก) overflow และ (ข) through flow
ที่มา: ดัดแปลงมาจาก Udomkun และคณะ (2015)

กระบวนการทำแห้งแบบสุญญากาศ (vacuum drying) เป็นกระบวนการทำแห้งอาหารที่ความดันต่ำ โดยจะต้องอาศัยปั๊มสุญญากาศในการลดความดันในอุปกรณ์การทำแห้งลง ซึ่งในสภาวะของการทำแห้งที่ความดันต่ำจะส่งผลให้น้ำภายในชิ้นอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะกลายเป็นไอ (vaporize) ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าที่ระดับความดันบรรยากาศ ดังนั้นจึงสามารถทำแห้งได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า อย่างไรก็ตามกระบวนการทำแห้งแบบสุญญากาศอาจต้องมีการให้ความร้อนแก่ชิ้นอาหารเพื่อเร่งอัตราการทำแห้งให้สูงขึ้น โดยจะต้องอาศัยแหล่งกำเนิดความร้อนมาใช้ในอุปกรณ์การทำแห้ง เช่น อินฟราเรด (infrared) และไมโครเวฟ (microwave) เป็นต้น (Rahman และ Perera, 2007)

กระบวนการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (superheated steam drying) เป็นกระบวนการทำแห้งที่อาศัยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อน และการถ่ายโอนมวลให้แก่อาหาร อย่างไรก็ตามอาหารโดยส่วนใหญ่จัดเป็นวัสดุที่ไม่ทนต่อความร้อน (heat-sensitive material) ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้สภาวะความดันต่ำร่วมกับการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพื่อให้สามารถสร้างไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่ำลง และสามารถนำมาทำแห้งวัสดุที่ไม่ทนต่อความร้อน (Nimmol และคณะ, 2007) โดยเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวด

ยิ่งที่ระดับความดันต่ำ (low-pressure superheated steam drying, LPSSD) สำหรับข้อดีของ LPSSD คือ ในระบบการทำแห้งจะไม่มีออกซิเจน ดังนั้นจึงสามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) ต่างๆ ที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสี และเกิดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการของอาหารลงได้ นอกจากนี้การทำแห้งในสภาวะสุญญากาศยังส่งผลให้อาหารเกิดการหดตัวลดลง มีความพรุน และมีความสามารถในการคืนน้ำสูง (Barbieri และคณะ, 2004)

2. กระบวนการทำแห้งในสภาวะไม่คงที่ คือ การทำแห้งโดยกำหนดให้สภาวะของกระบวนการ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือความเร็วลมให้มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการ (Bon และ Kudra, 2007; Herrithsch และคณะ, 2008; Jumah และคณะ, 2007; Kowalski และ Pawłowski, 2010; Salin, 2003; Smith และ Langrish, 2008; Thomkapanich และคณะ, 2007; Zhang และ Mujumdar, 1992) ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยข้อดีของกระบวนการทำแห้งในสภาวะไม่คงที่จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการทำแห้งให้สูงขึ้นได้

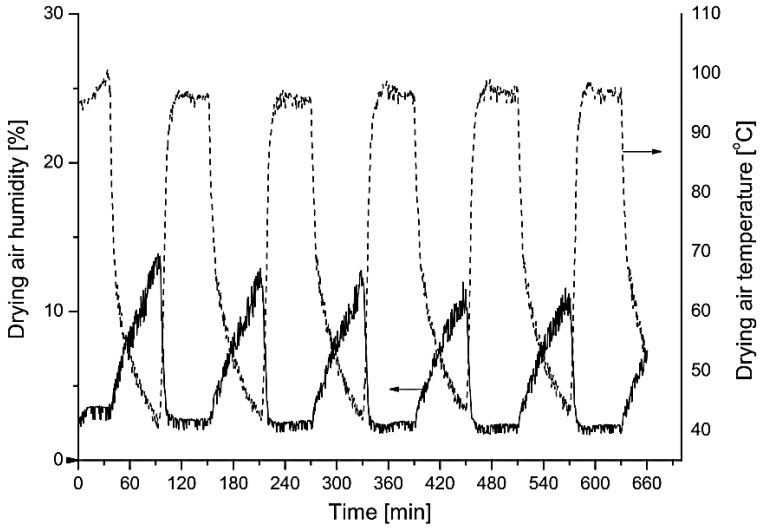


ภาพที่ 3 รูปแบบอุณหภูมิในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะไม่คงที่ (DC- drying curve และ AT คือ อุณหภูมิลมร้อน)
ที่มา: Kowalski และคณะ (2013)

ตัวอย่างของกระบวนการทำแห้งด้วยสภาวะไม่คงที่ เช่น กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) เป็นกระบวนการทำแห้งที่อาศัยวิธีการระเหิด (sublimation) น้ำแข็งในชิ้นอาหารให้กลายเป็นไอเพื่อลดปริมาณน้ำในชิ้นอาหารลง โดยขั้นตอนแรกของกระบวนการจะต้องทำการแช่แข็งชิ้นอาหารเพื่อให้น้ำในชิ้นอาหารกลายเป็นน้ำแข็ง หลังจากนั้นจะทำการลดความดันลงให้

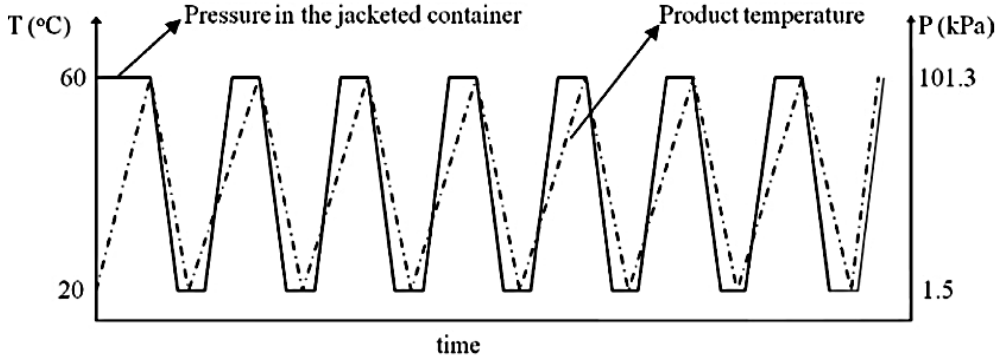
ต่ำกว่า triple point (0°C ที่ความดัน 610 Pa) และทำการเพิ่มอุณหภูมิของชิ้นอาหารให้สูงขึ้นเพื่อทำให้เกิดการระเหิดของน้ำแข็งภายในชิ้นอาหาร โดยข้อดีของกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดี เนื่องจากเป็นกระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ จึงส่งผลให้กลิ่น รสชาติ กลิ่นรส และสารอาหารที่ไม่ทนต่อความร้อนไม่ถูกทำลาย รวมถึงจะไม่เกิดการหดตัว (shrinkage) ของชิ้นอาหารในระหว่างกระบวนการทำแห้ง อย่างไรก็ตามกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นกระบวนการที่มีต้นทุนสูง และใช้ระยะเวลาในกระบวนการนาน ดังนั้นกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจึงเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่มีราคาสูง

Intermittent drying เป็นกระบวนการทำแห้งที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะบางอย่างของกระบวนการแบบเป็นจังหวะ เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนดังภาพที่ 4 พบว่าในกระบวนการ Intermittent drying จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งอุณหภูมิ และความชื้นของอากาศขึ้นพร้อมๆกันเป็นระยะๆ โดยระยะเวลาในการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินั้นสามารถกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงในระยะเวลาที่เท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ นอกจากนี้ในกระบวนการ Intermittent drying ยังอาจมีการนำอุปกรณ์การให้ความเย็นมาใช้เพื่อลดอุณหภูมิของชิ้นอาหารลง โดยปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการทำแห้งในกระบวนการ Intermittent drying นอกจากอุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วและรูปแบบการไหลของลม รูปร่าง และลักษณะของชิ้นอาหาร ยังรวมถึงความถี่ (frequency) และการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของสภาวะต่างๆ ในกระบวนการ (amplitude) (Kowalski และ Pawłowski, 2011; Kowalski และคณะ, 2013)



ภาพที่ 4 รูปแบบอุณหภูมิและความชื้นของอากาศในกระบวนการ Intermittent drying
ที่มา: Kowalski และ Pawłowski (2011)

Convective multi-flash drying (CMFD) เป็นกระบวนการทำแห้งที่มีการให้ความร้อนสลับกับสุญญากาศแก่ตัวชิ้นอาหารอย่างเป็นจังหวะดังภาพที่ 5 โดยพบว่าชิ้นอาหารจะถูกให้ความร้อนด้วยลมร้อนที่สภาวะความดันบรรยากาศ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเป็นการลดปริมาณความชื้นในชิ้นอาหารลงบางส่วน หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิของชิ้นอาหารสูงขึ้นถึงอุณหภูมิที่กำหนดจะทำการลดความดันรอบๆชิ้นอาหารลงทันที ซึ่งจะส่งผลให้น้ำเกิดการระเหย (evaporation) ออกมาจากชิ้นอาหาร (flash drying) และอุณหภูมิของชิ้นอาหารจะลดต่ำลง (Laurindo และคณะ, 2011)



ภาพที่ 5 รูปแบบอุณหภูมิและความดันในกระบวนการ CMFD
ที่มา: Zotarelli และคณะ (2012)

ผลของการทำแห้งต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์แห้งที่มีคุณภาพดีควรจะมีลักษณะใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ผ่านการทำแห้งทั้งทางด้านลักษณะปรากฏ (สี ขนาด และรูปร่าง) กลิ่นรส (flavor) และคุณค่าทางโภชนาการ (Harnkarnsujarit และ Charoenrein, 2011) อย่างไรก็ตามสภาวะของกระบวนการทำแห้งสามารถส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในด้านต่างๆได้ เช่น การเกิดสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์มีความแข็งหรือความเหนียวเพิ่มขึ้น ความสามารถในการคืนน้ำของผลิตภัณฑ์ลดต่ำลง กลิ่นรสของผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลง และเกิดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ เป็นต้น (Barbosa-Cánovas และ Vega-Mercado, 1996; Karel และ Lund, 2003b) โดยลักษณะคุณภาพของผลิตภัณฑ์แห้งสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. คุณภาพทางด้านความปลอดภัย

คุณภาพและความคงตัวของผลิตภัณฑ์แห้งไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ แต่ขึ้นอยู่กับค่า A_w โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณภาพทางด้านความปลอดภัย ซึ่งค่า A_w จะแสดงถึงปริมาณน้ำ

อิสระในผลิตภัณฑ์ที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้ รวมถึงปริมาณน้ำที่ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมี และเกิดกิจกรรมของเอนไซม์ เป็นต้น ทั้งนี้การที่ผลิตภัณฑ์แห้งสามารถเก็บรักษาได้นานที่อุณหภูมิห้อง เนื่องมาจากค่า A_w ของผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำในระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ได้ โดยถ้าผลิตภัณฑ์แห้งมีความปลอดภัยทั้งจากจุลินทรีย์ก่อโรค สารพิษ และสารประกอบทางเคมีที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค คุณภาพของผลิตภัณฑ์แห้งจะขึ้นอยู่กับลักษณะคุณภาพทางด้านอื่นๆ เช่น สี กลิ่นรส ลักษณะปรากฏ รสชาติ และคุณค่าทางโภชนาการ เป็นต้น อย่างไรก็ตามปริมาณของจุลินทรีย์เริ่มต้นในผลิตภัณฑ์ยังมีความสำคัญอย่างมากต่อความปลอดภัยทางด้านจุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์แห้ง เนื่องจากการลดค่า A_w ของผลิตภัณฑ์นั้นจะสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์เท่านั้น แต่ไม่สามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์เหล่านั้นได้ทั้งหมด (Rahman และ Perera, 2007) โดยค่า A_w น้อยกว่า 0.7 จะสามารถยับยั้งการเจริญของราได้ ในส่วนของยีสต์ และแบคทีเรียโดยส่วนใหญ่นั้นจะไม่สามารถเจริญได้ที่ค่า A_w น้อยกว่า 0.8 และ 0.9 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามแบคทีเรียบางชนิดที่ชอบเกลือ (halophilic bacteria) จะสามารถเจริญได้ที่ค่า A_w ต่ำกว่า 0.9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ที่ค่า A_w ต่างๆ เช่น ชนิดของจุลินทรีย์ อุณหภูมิ pH ปริมาณออกซิเจน และสารอาหาร เป็นต้น (Brennan, 1990, 1994; Fellows, 2000; Labuza, 1977; Singh และ Heldman, 1993) โดย Beuchat (1983) ได้รายงานว่าการลดค่า A_w ลงให้น้อยกว่า 0.7 จะสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสียได้ นอกจากนี้ในขั้นตอนการแปรรูป (ล้าง และตัดแต่ง) และขั้นตอนการเก็บรักษาก็มีความสำคัญต่อความปลอดภัยทางด้านจุลชีววิทยา เนื่องจากในขั้นตอนดังกล่าวถ้ามีการจัดการที่ไม่ถูกสุขลักษณะจะส่งผลให้ปริมาณจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์มีจำนวนเพิ่มขึ้นได้ และส่งผลให้อายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ลดต่ำลง

2. คุณภาพทางด้านสีและกลิ่นรส

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านสีและกลิ่นรส โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์แห้งเป็นปัจจัยหลักอย่างหนึ่งที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์แห้งโดยตรง ซึ่งในระหว่างกระบวนการทำแห้ง และการเก็บรักษาจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีในผลิตภัณฑ์ เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี หรือปฏิกิริยาทางเคมีชีวภาพ เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ (enzymatic browning reaction) และปฏิกิริยาการเกิดคาราเมล (caramelization) และปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) (Perera, 2005) ซึ่งจัดเป็นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (non-enzymatic browning reaction) โดยปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning reaction) นอกจากจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีในผลิตภัณฑ์ ยังส่งผลให้เกิดกลิ่นรสผิดปกติ

(off-flavor) เกิดการสูญเสียสารอาหาร รวมถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะของเนื้อสัมผัสในผลิตภัณฑ์อีกด้วย โดย browning reaction จะเกิดได้อย่างจำกัด เมื่อผลิตภัณฑ์มีปริมาณความชื้นสูง หรือต่ำมากๆ ดังนั้นในระหว่างกระบวนการทำแห้ง เมื่อผลิตภัณฑ์จะมีปริมาณความชื้นลดลงจะส่งผลให้เกิด browning reaction ขึ้นได้ โดย Potter (1986) ได้รายงานว่าปฏิกิริยาเมลลาร์ดจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในระหว่างกระบวนการทำแห้ง เมื่อผลิตภัณฑ์มีปริมาณความชื้นลดลงประมาณ 15 ถึง 20% และการเกิดสีน้ำตาลจะเริ่มช้าลงเมื่อปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ลดต่ำลง และเมื่อผลิตภัณฑ์มีความชื้นต่ำกว่า 2% จะไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงสีในผลิตภัณฑ์ได้ นอกจากนี้การเกิดสีน้ำตาลจะเพิ่มมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้น โดย Ratti (2001) ได้เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีของสตอเบอรี่ที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่าสตอเบอรี่ที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีมากกว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสี และการเกิดสีน้ำตาลของผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการทำแห้งนอกจากจะเกิดขึ้นจาก browning reaction แล้วยังอาจมีสาเหตุมาจากการสูญเสียรงควัตถุในผลิตภัณฑ์ (García-Viguera และคณะ, 1998) ดังนั้นเพื่อที่จะลดการเกิดสีน้ำตาล และการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์จึงจำเป็นต้องลดการสัมผัสกับความร้อนที่มากเกินไปของผลิตภัณฑ์ในช่วงที่ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์เหมาะสมกับการเกิดสีน้ำตาลขึ้น (Okos และคณะ, 1989)

การสูญเสียกลิ่นรสในผลิตภัณฑ์แห้งนอกจากจะมีสาเหตุมาจากการเกิด browning reaction แล้ว ความร้อนในระหว่างกระบวนการทำแห้งก็ยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการสูญเสียกลิ่นรสในผลิตภัณฑ์ โดยสารหอมระเหย (volatile compound) นั้นจะเกิดการสูญเสียได้ง่ายในช่วงแรกของกระบวนการทำแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูง ดังนั้นผลิตภัณฑ์ประเภทสมุนไพร และเครื่องเทศอบแห้งนั้นจำเป็นต้องใช้กระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำเพื่อที่จะรักษากลิ่นรสของผลิตภัณฑ์เหล่านั้นไว้ (Mazza และ LeMaguer, 1980) สำหรับปัจจัยที่ส่งผลต่อการสูญเสียสารหอมระเหยในระหว่างกระบวนการทำแห้ง คือ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ ความดันไอของสารหอมระเหย และความสามารถในการละลายในไอน้ำของสารหอมระเหย

3. คุณภาพทางด้านลักษณะโครงสร้าง

คุณภาพทางด้านลักษณะโครงสร้างเป็นปัจจัยหลักอย่างหนึ่งที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์แห้งโดยตรง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างที่สำคัญอย่างหนึ่งของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการทำแห้ง คือ การหดตัว (shrinkage) โดยการหดตัวมีสาเหตุมาจากการยุบตัว (collapse)

ของโครงสร้างผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นผลมาจากสูญเสียน้ำในผลิตภัณฑ์ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นภายในเซลล์ และเซลล์จะเกิดการยุบตัวขึ้น โดยการหดตัวจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดและรูปร่าง รวมถึงส่งผลให้ความสามารถในการคืนน้ำของผลิตภัณฑ์ลดลง นอกจากนี้ยังส่งผลให้เกิดเปลือกแข็ง (case hardening) ที่บริเวณผิวหน้าผลิตภัณฑ์ (Mayor และ Sereno, 2004; Prothon และคณะ, 2003; Ratti, 1994) ซึ่งจากการศึกษาของ Moreira และคณะ (1998) ได้ศึกษาการหดตัวของแอปเปิลที่ผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน และกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่ากระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเซลล์น้อยกว่ากระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวในระหว่างกระบวนการทำแห้งสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition theory) (Ratti, 2001) ซึ่งผลิตภัณฑ์จะเกิดการยุบตัวน้อย (มีรูพรุนสูง) เมื่ออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) โดยผลิตภัณฑ์นั้นจะอยู่ในสถานะคล้ายแก้ว (glassy state) ในสถานะนี้ผลิตภัณฑ์จะมีความคงตัวสูง และเกิดการเปลี่ยนแปลงได้น้อยมาก ในทางตรงกันข้ามเมื่ออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์มีค่าสูงกว่า T_g ผลิตภัณฑ์จะอยู่ในสถานะคล้ายยาง (rubbery state) ซึ่งในสถานะนี้ผลิตภัณฑ์จะมีความคงตัวต่ำ และเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์สามารถเกิดการยุบตัวได้มาก โดยทฤษฎีดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการอธิบายความแตกต่างในการยุบตัวของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง และกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนได้ดังนี้ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะมีค่าต่ำกว่า T_g จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์อยู่ในสถานะคล้ายแก้ว ดังนั้นตัวอย่างจึงเกิดการหดตัวหรือยุบตัวได้อย่างจำกัด ในขณะที่อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนจะมีค่าสูงกว่า T_g จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์อยู่ในสถานะคล้ายยาง ผลิตภัณฑ์จะเกิดการหดตัวและยุบตัวได้มาก (Rahman, 2001)

คุณภาพทางด้านลักษณะโครงสร้างที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการทำแห้ง คือ ความสามารถในการคืนน้ำ ซึ่งเป็นกระบวนการในการดูดกลับความชื้นของผลิตภัณฑ์แห้ง ดังนั้นความสามารถในการคืนน้ำจึงสามารถนำมาใช้เป็นดัชนีสำหรับการบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการทำแห้งได้ (M. K. Krokida และ Philippopoulos, 2005) โดยอัตราและระดับของความสามารถในการคืนน้ำของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับสภาวะของกระบวนการทำแห้ง รวมถึงรูปแบบของกระบวนการในการทำแห้งด้วย ซึ่งผลิตภัณฑ์แห้งที่มีรูพรุนสูง

จะมีความสามารถในการคืนตัวได้ดี ดังนั้นลักษณะของโครงสร้าง และรูพรุนของผลิตภัณฑ์จึงเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของผลิตภัณฑ์แห้ง

4. คุณภาพทางด้านโภชนาการ

ผักและผลไม้เป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เช่น วิตามิน เกลือแร่ เส้นใย และสารต้านอนุมูลอิสระ (สารประกอบฟีนอล) เป็นต้น ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยในการเจริญเติบโตของร่างกาย รวมทั้งยังสามารถป้องกันโรคในมนุษย์ เช่น โรคหัวใจ และโรคมะเร็ง เป็นต้น อย่างไรก็ตามคุณค่าทางโภชนาการเหล่านี้สามารถถูกทำลายได้ในขั้นตอนของการตัดแต่ง แปรรูป และการเก็บรักษา ซึ่งในระหว่างกระบวนการทำแห้งก็สามารถส่งผลให้เกิดการสูญเสียค่าทางโภชนาการได้เช่นเดียวกัน โดยเป็นผลมาจากการสัมผัสกับความร้อน การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทำแห้ง ดังนั้นการที่จะลดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์แห้งนั้นสามารถทำได้โดยการเลือกวิธีการทำแห้ง และสภาวะในการทำแห้งที่เหมาะสม (Araya-Farias และ Ratti, 2009)

กลยุทธ์ในการพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์

คุณภาพของผลิตภัณฑ์แห้งประกอบด้วยคุณภาพทางด้านต่างๆ อย่างที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น คือ คุณภาพทางด้านจุลชีววิทยา สี กลิ่นรส ลักษณะโครงสร้าง และโภชนาการ ซึ่งคุณภาพของผลิตภัณฑ์แห้งที่ดีควรจะมีลักษณะใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทำแห้ง โดยในปัจจุบันกระบวนการทำแห้งที่นิยมนำมาใช้ในการทำแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร คือ กระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน (Lewicki, 2006) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการนำไปใช้งาน รวมถึงเครื่องมือและอุปกรณ์มีราคาถูก อย่างไรก็ตามกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนกลับส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในแบบที่ไม่พึงประสงค์อย่างรุนแรง เช่น เกิดการหดตัว และเกิดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการเนื่องจากความร้อน เป็นต้น (Zotarelli และคณะ, 2012) โดยการหดตัวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัส และความสามารถในการคืนน้ำของผลิตภัณฑ์โดยตรง นอกจากนี้เมื่อผลิตภัณฑ์เกิดการหดตัวมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ของผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้น กล่าวคือผลิตภัณฑ์จะได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ และคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสบางประการ เช่น การสูญเสียกลิ่นรสดั้งเดิมในผลิตภัณฑ์ เป็นต้น (Fellows, 2000; Lewicki, 2006; Louka และคณะ, 2004) ดังนั้นเพื่อที่จะเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์แห้งให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้นจึง

จำเป็นต้องมีการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการทำแห้ง สำหรับกลยุทธ์ในการพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์แห้งจะแบ่งออกเป็น 2 กลยุทธ์ ดังนี้

1. การทำแห้งโดยให้ผลิตภัณฑ์อยู่ในสถานะใกล้กับสถานะคล้ายแก้ว ซึ่งจากการประยุกต์ใช้ความรู้ทางด้านการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วในผลิตภัณฑ์อาหาร จึงสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัส ซึ่งผลิตภัณฑ์อาหารจะมีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous material) ที่อยู่ในสถานะคล้ายยาง เมื่อนำมาผ่านกระบวนการทำแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการทำแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูง ผลิตภัณฑ์จะอยู่ในสถานะคล้ายยางที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพได้ง่าย เนื่องจากเป็นสถานะที่ไม่คงตัว และง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ (Roos, 2010) และเมื่อผลิตภัณฑ์มีปริมาณความชื้นลดต่ำลงจะมีทิศทางการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะคล้ายยางไปเป็นสถานะคล้ายแก้วมากขึ้น ซึ่งสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะที่มีความคงตัวสูง เนื่องจากวัสดุจะมีค่าความหนืดสูง (ประมาณ 10^{12} Pa s) จึงยากต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางเคมีและทางกายภาพ (Nicoleti และคณะ, 2007) โดยปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการทำแห้ง คือ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ และอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว โดยผลิตภัณฑ์ที่มีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ และอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมาก การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์จะเกิดได้มาก ซึ่งจากการรายงานของ Ratti และ Mujumdar (2005) ที่ได้ศึกษาการหดตัวของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน และกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิสูงจะเกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ และอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูงจึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการหดตัวสูงถึง 80 ถึง 90% ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะมีการหดตัวน้อยกว่า 10% เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ และอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีค่าต่ำ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Corrêa และคณะ (2011) ที่ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของ *Annona crassiflora* ที่ผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน และกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะมีปริมาตรจำเพาะ (specific volume) มากกว่าผลิตภัณฑ์สด และผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้นจะไม่ส่งผลให้เกิดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ หรือส่งผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่ากระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีสีเข้มขึ้น (สีส้ม) เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์สด (สีเหลือง) แต่ในส่วนกระบวนการ

แช่เยือกแข็งกลับพบว่าผลิตภัณฑ์นั้นจะมีสีอ่อนกว่าผลิตภัณฑ์สด (สีเหลืองอ่อน) เช่นเดียวกับผลจากการศึกษาของ Schulze และคณะ (2014) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของชิ้นแอปเปิลที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบลมร้อน กระบวนการทำแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ (microwave vacuum drying) และกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่ากระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะส่งผลให้ชิ้นแอปเปิลเกิดการหดตัวน้อยที่สุดประมาณ 8% ในส่วนของกระบวนการทำแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ และกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนจะส่งผลให้ชิ้นแอปเปิลเกิดการหดตัวสูงถึง 46.1 และ 48.9% ตามลำดับ นอกจากนี้ความหนาแน่นรวม (bulk density) ของชิ้นแอปเปิลที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะมีค่าน้อยที่สุด แต่ในส่วนกระบวนการทำแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ และกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนจะมีความหนานแน่นรวมสูงกว่า และโครสร้างของชิ้นแอปเปิลจะมีการจับตัวกันแน่นกว่า ซึ่งสาเหตุของการหดตัว และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแอปเปิลนั้นเกิดจากอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการทำแห้งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของชิ้นแอปเปิลเป็นอย่างมาก ในส่วนคุณภาพทางด้านสีของแอปเปิล พบว่ากระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง และกระบวนการทำแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟจะส่งผลให้สีของชิ้นแอปเปิลมีสีแดงลดลง แต่ความสว่าง และสีเหลืองของชิ้นแอปเปิลจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ในส่วนของกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน พบว่าสีของชิ้นแอปเปิลจะมีสีแดงเข้ม และมีความสว่างลดลง หรืออาจกล่าวได้ว่าชิ้นแอปเปิลมีสีคล้ำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วยังสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านโภชนาการของผลิตภัณฑ์ได้ เนื่องจากเมื่อผลิตภัณฑ์อยู่ในสถานะคล้ายยาง โมเลกุลต่างๆ ภายในผลิตภัณฑ์จะสามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย ดังนั้นจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาต่างๆที่อาจส่งผลต่อการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ได้ โดย de Torres และคณะ (2010) ได้รายงานผลของกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน และกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งต่อการสูญเสียสารหอมระเหย และสารประกอบฟีนอลในเปลือกองุ่นแห้ง พบว่ากระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C จะส่งผลให้เกิดการลดลงอย่างมีนัยสำคัญของปริมาณสารหอมระเหย เช่น terpenes sesquiterpenes norisoprenoids และ 1-hexanol เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง นอกจากนี้ยังพบว่ากระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนจะส่งผลให้สารประกอบฟีนอลในเปลือกองุ่นลดลงถึง 35 ถึง 39% แต่ในส่วนของกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งกลับพบว่าสารประกอบฟีนอลมีปริมาณลดลงเพียง 15 ถึง 22% ดังนั้นถ้าต้องการลดการเปลี่ยนแปลง

คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทำแห้ง สามารถทำได้โดยการลดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ และอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลงให้ได้มากที่สุด

2. การเพิ่มอัตราเร็วในกระบวนการทำแห้งเพื่อลดระยะเวลาของผลิตภัณฑ์ที่อยู่สถานะคล้ายยางให้สั้นลงในระหว่างกระบวนการทำแห้ง โดยการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการทำแห้งนั้นสามารถทำได้หลายวิธี หนึ่งในวิธีการนั้น คือ การประยุกต์ใช้กระบวนการทำแห้งร่วมกับเทคนิคต่างๆ เช่น กระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ หรืออินฟราเรด เป็นต้น (Glouannec และคณะ, 2002; Kowalski และ Rajewska, 2009) นอกจากนี้การทำแห้งด้วยสภาวะไม่คงที่ก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถเพิ่มอัตราเร็วในกระบวนการทำแห้งได้ โดย Pan และคณะ (1997) ได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วย vibrofluidized bed dryer ต่อประสิทธิภาพของกระบวนการทำแห้งแครอท โดยพบว่าการใช้กระบวนการทำแห้งด้วยสภาวะไม่คงที่จะสามารถลดระยะเวลาในการทำแห้งแครอทลงจาก 76 นาที เหลือเพียง 45 นาที นอกจากนี้ในกระบวนการทำแห้งด้วยสภาวะไม่คงที่ยังช่วยประหยัดพลังงานที่ใช้ถึง 30 ถึง 40% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yang และคณะ (2013) ที่ได้ศึกษากระบวนการ Intermittent drying ต่อประสิทธิภาพและการใช้พลังงานในการทำแห้งเมล็ดพันธุ์กะหล่ำปี โดยกระบวนการ Intermittent drying จะเป็นการให้ลมร้อนที่อุณหภูมิที่ 40°C สลับกับการหยุดให้ความร้อนเป็นระยะๆ พบว่ากระบวนการ Intermittent drying จะใช้ระยะเวลาเพียง 51.9% ของระยะเวลาการทำแห้งด้วยกระบวนการทำแห้งในสภาวะคงที่ จึงสามารถลดการใช้พลังงานในกระบวนการทำแห้งลงได้มากถึง 48.1% แสดงให้เห็นว่ากระบวนการ Intermittent drying สามารถเพิ่มอัตราการทำแห้งให้สูงขึ้น และลดการใช้พลังงานในกระบวนการทำแห้งลงได้

กระบวนการทำแห้งด้วยสภาวะไม่คงที่นอกจากจะสามารถเพิ่มอัตราเร็วในกระบวนการทำแห้งได้แล้ว ยังสามารถลดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์แห้งได้อีกด้วย โดย Chua และคณะ (2001) ได้ศึกษาผลของกระบวนการทำแห้งชิ้นกล้วยในสภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 25°C และในสภาวะไม่คงที่ ต่อระยะเวลาในการทำแห้ง และการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นตัวอย่าง โดยกระบวนการทำแห้งในสภาวะไม่คงที่จะแบ่งออกเป็น 2 สภาวะ คือ 1.) เพิ่มอุณหภูมิ 5°C ทุกๆ 1 ชั่วโมง จาก 20 ถึง 35°C และ 2.) ลดอุณหภูมิ 5°C ทุกๆ 1 ชั่วโมง จาก 35 ถึง 20°C พบว่าในสภาวะไม่คงที่แบบเพิ่มอุณหภูมิและลดอุณหภูมิจะใช้ระยะเวลาในการทำแห้งสั้นกว่าในสภาวะคงที่ถึง 25 และ 300% ตามลำดับ ทั้งนี้สาเหตุที่สภาวะไม่คงที่แบบลดอุณหภูมิสามารถลดระยะเวลาในการทำแห้งได้มากที่สุด เนื่องจากเกิดความแตกต่างระหว่างค่าความดันไอในอากาศกับผิวหน้าของชิ้นตัวอย่างในช่วงแรกของ

กระบวนการทำแห้ง ส่งผลให้อัตราในการทำแห้งในช่วงแรกของกระบวนการมีค่าสูง และเกิดการสูญเสียความชื้นในชิ้นตัวอย่างขึ้นอย่างรวดเร็ว ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นตัวอย่าง พบว่าในสภาวะไม่คงที่แบบเพิ่มอุณหภูมิและลดอุณหภูมิจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นตัวอย่างน้อยกว่าในสภาวะคงที่ถึง 40 และ 23% ตามลำดับ นอกจากนี้กระบวนการทำแห้งในสภาวะไม่คงที่ยังสามารถช่วยลดการสูญเสียวิตามินซี และเบต้า-แคโรทีน (β-carotene) ในผลไม้แห้งอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการทำแห้งในสภาวะคงที่ (Chua และคณะ, 2003) และจากรายงานของ Zotarelli และคณะ (2012) ได้เปรียบเทียบผลของกระบวนการ CMFD กับกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน กระบวนการทำแห้งแบบสุญญากาศ และกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ต่อระยะเวลาการทำแห้ง และคุณภาพของมะม่วงและกล้วยที่ผ่านกระบวนการต่างๆ พบว่ากระบวนการ CMFD ที่ใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C สลับกับสุญญากาศที่ 15 mbar จะใช้ระยะเวลาในการทำแห้งประมาณ 50% ของระยะเวลาในการทำแห้งแบบสุญญากาศ และจะใช้ระยะเวลาน้อยกว่า 50% ของระยะเวลาในการทำแห้งด้วยลมร้อน ทั้งนี้เนื่องจากการสลับใช้สุญญากาศในระหว่างกระบวนการจะช่วยให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำภายในชิ้นอาหารมายังผิวหน้าของชิ้นอาหาร นอกจากนี้ในช่วงของสุญญากาศอุณหภูมิของชิ้นอาหารจะลดต่ำลง จึงส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของลมร้อนและอุณหภูมิของชิ้นอาหารมากขึ้นเป็นผลให้เกิดการเพิ่มอัตราการถ่ายโอนความร้อนระหว่างลมร้อนและชิ้นอาหาร ในขณะที่ลักษณะคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ผ่านกระบวนการ CMFD นั้นจะมีลักษณะใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง นอกจากนี้ Kowalski และคณะ (2013) ได้ศึกษาผลของสภาวะของกระบวนการ Intermittent drying ต่อคุณภาพของแครอท โดยกระบวนการ Intermittent drying จะเป็นการใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิที่ 70°C สลับกับการใช้ลมเย็นเป็นระยะๆ พบว่ากระบวนการ Intermittent drying ที่มีการใช้ลมเย็นเป็นระยะเวลานานจะส่งผลให้อัตราการทำแห้งมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และระยะเวลาในการทำแห้งจะเพิ่มสูงขึ้น และในส่วนการเปลี่ยนแปลงสีของแครอทจะพบว่ากระบวนการ Intermittent drying ส่งผลให้แครอทเกิดการเปลี่ยนแปลงสีน้อยกว่ากระบวนการทำแห้งในสภาวะคงที่ เนื่องจากระยะเวลาในการทำแห้งด้วยกระบวนการ Intermittent drying สั้น แครอทจึงจะได้รับปริมาณความร้อนลดลง จึงเป็นผลให้เกิดการสูญเสียแคโรทีนนอยด์ซึ่งเป็นรงควัตถุที่ให้สีในแครอทน้อยลง นอกจากนี้การใช้ลมเย็นยังช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของแครอทอีกด้วย ในส่วนของคุณภาพทางด้านโภชนาการของแครอทสามารถอธิบายได้ด้วยปริมาณเบต้า-แคโรทีน ซึ่งพบว่ากระบวนการทำแห้งในสภาวะคงที่จะเกิดการสูญเสียเบต้า-แคโรทีนประมาณ 32 ถึง 39% ในขณะที่กระบวนการ

Intermittent drying จะเกิดการสูญเสียเบต้า-แคโรทีนเพียงแค่ 8 ถึง 27% โดยการสูญเสียเบต้า-แคโรทีนนั้นจะสัมพันธ์กับระยะเวลาของกระบวนการทำแห้ง กล่าวคือเมื่อระยะเวลาของกระบวนการทำแห้งมากขึ้น การสูญเสียเบต้า-แคโรทีนในแครอทก็จะมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ Kowalski และ Szadziǹska (2014) ได้ศึกษาผลของกระบวนการ Intermittent drying ต่อการทำแห้งเชอรรี่ พบว่ากระบวนการทำแห้งในสภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 60°C จะใช้ระยะเวลาในการทำแห้งประมาณ 454 นาที ในขณะที่กระบวนการ Intermittent drying จะใช้ระยะเวลาทำแห้งเพียง 395 นาที และการเปลี่ยนแปลงสีของเชอรี่ในกระบวนการ Intermittent drying ก็ยังน้อยกว่ากระบวนการทำแห้งในสภาวะคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการทำแห้งในสภาวะคงที่ เชอรี่จะสัมผัสกับลมร้อนเป็นระยะเวลานาน ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้เชอรี่เกิดการเปลี่ยนแปลงสี สอดคล้องกับการศึกษาของ da Silva และคณะ (2015) ที่ศึกษาผลของกระบวนการ Intermittent drying ต่อประสิทธิภาพในการทำแห้งกล้วย โดยกระบวนการ Intermittent drying จะเป็นการใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิที่ 70°C สลับกับการหยุดให้ความร้อนเป็นระยะๆ พบว่ากระบวนการ Intermittent drying สามารถลดระยะเวลาในกระบวนการทำแห้งลงได้ครึ่งหนึ่งจากกระบวนการทำแห้งในสภาวะคงที่ นอกจากนี้กระบวนการ Intermittent drying ยังสามารถลดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของตัวอย่าง เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการทำแห้งในสภาวะคงที่ โดยเป็นผลมาจากการเพิ่มอัตราการทำแห้งของกระบวนการ ซึ่งจากผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการทำแห้งในสภาวะไม่คงที่สามารถเพิ่มอัตราเร็วในการทำแห้งได้ เมื่อผลิตภัณฑ์มีระยะเวลาอยู่ในสถานะคล้ายยางสั้นลง การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์จึงเกิดขึ้นได้น้อยลง นอกจากนี้จากงานวิจัยอื่นๆ ยังมีการประยุกต์ใช้กระบวนการ Controlled sudden decompression หรือ Détente instantanée Contrôlée (DIC) ซึ่งเป็นกระบวนการปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำแห้งมาแล้วบางส่วนให้เกิดการขยายตัวของโครงสร้าง และมีความพรุนเพิ่มมากขึ้น เพื่อลดระยะเวลา และพลังงานที่ใช้ในการบวนการทำแห้ง (R. Wang และคณะ, 2010) ร่วมกับกระบวนการทำแห้งแบบต่างๆ โดยหลักการของกระบวนการ DIC คือ การลดความดันของกระบวนการลงทันทีจากสภาวะที่มีความดันสูงไปยังสภาวะที่ระดับความดันบรรยากาศหรือสุญญากาศ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการขยายตัว และการระเหยของความชื้น หรือแก๊สขึ้นภายในชิ้นอาหาร จึงทำให้โครงสร้างของชิ้นอาหารเกิดการขยายตัว หรืออาจเกิดการทำลายโครงสร้างบางส่วน และเกิดเป็นรูพรุนขึ้นภายในชิ้นอาหาร (Antonio และคณะ, 2008; Hofsetz และคณะ, 2007) โดย Louka และ Allaf (2004) ได้ศึกษาการขยายตัวของมันฝรั่ง แครอท และหัวหอมจากอัตราส่วนระหว่างความหนานแน่นของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่าง

เดียว กับความหนาแน่นของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการ DIC ที่ระดับความดัน 7 bar สำหรับมันฝรั่ง และ 6 bar สำหรับแครอทและหัวหอม และลดระดับความดันลงที่ระดับ 0.1 bar ร่วมกับกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน พบว่าตัวอย่างทั้งสามชนิดที่ผ่านกระบวนการ DIC ร่วมกับกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนจะมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นกว่า 20% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Zou และคณะ (2013) ที่ได้ศึกษาผลของกระบวนการ explosion puffing drying (EPD) หรือกระบวนการ DIC ที่ระดับความดัน 2 bar และลดระดับความดันลงที่ระดับ 0.001 bar ร่วมกับกระบวนการทำแห้งแบบสุญญากาศ ต่อการขยายตัวของมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง พบว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่อิ่มนั้นจะมีการจะมีการขยายตัวสูงถึง 88% เมื่อเทียบกับปริมาตรของตัวอย่างก่อนผ่านกระบวนการทำแห้ง อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่ผ่านการแช่อิ่มกลับมีการขยายตัวเพียง 7 ถึง 27% เมื่อเทียบกับปริมาตรของตัวอย่างก่อนผ่านกระบวนการทำแห้ง ซึ่งมีค่าการขยายตัวน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่อิ่มอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากในตัวอย่างแช่อิ่มจะเกิดการจับเกาะกันของสารละลายในการแช่อิ่มกับส่วนเนื้อเยื่อของตัวอย่าง จึงส่งผลให้โครงสร้างของตัวอย่างมีความแข็งแรง และเกิดการขยายตัวของโครงสร้างในตัวอย่างได้จำกัด (Tabtiang และคณะ, 2012)

แม้ว่ากระบวนการทำแห้งในสภาวะไม่คงที่จะสามารถเพิ่มอัตราเร็วในกระบวนการทำแห้งได้ แต่ยังคงมีงานวิจัยบางส่วนที่แสดงให้เห็นว่ากระบวนการทำแห้งในสภาวะไม่คงที่ไม่สามารถเพิ่มอัตราเร็วในการทำแห้ง หรือช่วยลดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ โดย Soysal และคณะ (2009) ได้ศึกษากระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟด้วยสภาวะคงที่ (HMD) และสภาวะไม่คงที่ (IHMD) และกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน ต่อคุณภาพของพริกแดง โดยกระบวนการ IHMD จะเป็นการให้คลื่นไมโครเวฟที่ 597 และ 697 W สลับกับการหยุดให้คลื่นไมโครเวฟเป็นระยะๆ โดยพบว่ากระบวนการ HMD จะใช้ระยะเวลาในการทำแห้ง (20 ถึง 28 นาที) สั้นกว่ากระบวนการ IHMD (38 ถึง 114 นาที) และกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนจะใช้ระยะเวลานานที่สุด อย่างไรก็ตามคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการ HMD กลับพบว่ามีสีคล้ำเกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์มากกว่ากระบวนการอื่นๆ โดยในส่วนของกระบวนการ IHMD พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส เช่น ลักษณะปรากฏ สี เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ที่ดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน และ HMD ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกระบวนการ IHMD เป็นกระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ และมีการให้คลื่นไมโครเวฟต่ำกว่ากระบวนการทำแห้งในสภาวะคงที่ ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่รุนแรงต่อผลิตภัณฑ์ จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลง

คุณภาพน้อยลง นอกจากนี้ Thomkapanich และคณะ (2007) ได้ศึกษาผลของกระบวนการ Intermittent low-pressure superheated steam (intermittent LPSSD) ต่อคุณภาพของกล้วย โดยสภาวะของ intermittent LPSSD จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความดันในระหว่างกระบวนการ พบว่าระยะเวลาของกระบวนการ intermittent LPSSD ที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะใช้ระยะเวลาสั้นกว่ากระบวนการ LPSSD ในสภาวะคงที่อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้กระบวนการ intermittent LPSSD ยังช่วยประหยัดพลังงานได้มากถึง 65% และในส่วนกระบวนการ intermittent LPSSD ที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันจะมีอัตราการทำแห้งที่มากกว่ากระบวนการ LPSSD ในสภาวะคงที่ ซึ่งส่งผลให้กระบวนการ intermittent LPSSD ยังช่วยประหยัดพลังงานจากปั๊มสุญญากาศและไอน้ำได้มากถึง 51 ถึง 53% และ 58% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ กลับพบว่ากระบวนการ intermittent LPSSD ที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีการสูญเสียวิตามินซีน้อยกว่ากระบวนการ LPSSD ที่สภาวะคงที่อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามจะไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทั้งทางด้าน สี ความแข็ง (hardness) ความกรอบ (crispness) และการหดตัวของผลิตภัณฑ์ และในส่วนกระบวนการintermittent LPSSD ที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันกลับส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ ทั้งการสูญเสียวิตามินซี การเปลี่ยนแปลงสี และการหดตัวเกิดขึ้นมากกว่ากระบวนการ LPSSD ในสภาวะคงที่อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการ intermittent LPSSD ที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันจะส่งผลให้มีออกซิเจนเข้ามาในระหว่างกระบวนการทำแห้ง เป็นผลให้วิตามินซีเกิดการสลายตัว และช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลขึ้นด้วย ส่วนสาเหตุของการหดตัว เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความดันในระหว่างกระบวนการทำแห้ง ซึ่งในระหว่างกระบวนการทำแห้งจะมีการเพิ่มความดันจนถึงระดับความดันบรรยากาศ จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ถูกแรงดันจากภายนอกกด และเกิดการยุบตัวขึ้น เช่นเดียวกับการศึกษาของ Laura A. Ramallo และคณะ (2010) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิในกระบวนการ Intermittent drying ต่อคุณภาพของ *Ilex paraguariensis* โดยกระบวนการ Intermittent drying จะเป็นการให้ลมร้อนที่อุณหภูมิที่ 60 80 และ 100°C สลับกับการหยุดให้ความร้อนเป็นเวลา 15 และ 30 นาที ซึ่งพบว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 และ 80°C ด้วยกระบวนการ Intermittent drying จะมีอัตราการทำแห้งที่สูงกว่ากระบวนการทำแห้งในสภาวะคงที่ แต่การเพิ่มระยะเวลาในการหยุดให้ความร้อนจาก 15 เป็น 30 นาที นั้นจะไม่ส่งผลต่ออัตราการทำแห้งทั้งการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 และ 80°C อย่างไรก็ตามในส่วนกระบวนการทำแห้งที่ 100°C ทั้งกระบวนการ Intermittent drying และกระบวนการทำแห้งในสภาวะคงที่กลับไม่พบความแตกต่างของอัตราการทำแห้ง ในส่วนของคุณภาพทางด้านสีของ

ผลิตภัณฑ์ พบว่าค่า *L* และ *b* ของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในกระบวนการทำแห้ง แต่การหยุดให้ความร้อนในกระบวนการทำแห้งจะไม่ส่งผลต่อค่าดังกล่าว และในส่วนของค่า *a* ทั้งอุณหภูมิและการหยุดให้ความร้อนในกระบวนการทำแห้งจะไม่ส่งผลต่อค่าดังกล่าวในผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้กระบวนการ Intermittent drying ยังส่งผลต่อปริมาณคาเฟอีนที่สกัดได้จากผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการทำแห้งในสภาวะคงที่ โดยปริมาณคาเฟอีนจะลดลงประมาณ 10% จากกระบวนการ Intermittent drying อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในช่วงของการหยุดให้ความร้อนยังคงมีอุณหภูมิสูง จึงส่งผลให้ปริมาณคาเฟอีนถูกทำลายในระหว่างการหยุดและการให้ความร้อน

สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของผลิตภัณฑ์

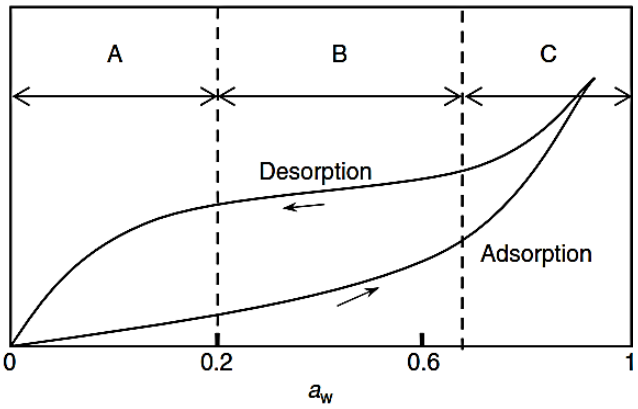
sorption isotherm

sorption isotherm คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในสภาวะสมดุล (equilibrium moisture content, X_{eq}) กับค่า A_w ของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่ง sorption isotherm เป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญในกระบวนการทำแห้ง โดย sorption isotherm สามารถบ่งบอกถึงกลไกการดูดซับ (sorption mechanism) และอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างน้ำและผลิตภัณฑ์ (Chirife และ MarIA Del Buera, 1994; Tsami และคณะ, 1990) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการจำลอง ออกแบบ และหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการทำแห้ง รวมถึงยังสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้น และทำนายความคงตัวของผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการเก็บรักษา นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคัดเลือกวัสดุสำหรับนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม (Gal, 1987)

การวิเคราะห์ sorption isotherm สามารถทำได้โดยเก็บผลิตภัณฑ์อาหารไว้ในสภาวะบรรยากาศที่มีค่าความชื้นสัมพันธ์ในสภาวะสมดุล (equilibrium relative humidity, RH_{eq}) หรือมีค่า A_w คงที่ โดยต้องมีการควบคุมอุณหภูมิในสภาวะการเก็บให้มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง และเมื่อผลิตภัณฑ์อยู่ในสภาวะสมดุลทางความชื้นกับบรรยากาศจึงจะทำการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ สำหรับการควบคุมค่า A_w สามารถทำได้โดยอาศัยสารละลายเกลืออิ่มตัว

โดยทั่วไป sorption isotherm ของผลิตภัณฑ์อาหารจะมีลักษณะกราฟที่เป็นรูปตัวเอส (sigmodal shape) ดังแสดงในภาพที่ 6 ซึ่ง adsorption isotherm จะแสดงถึงการเพิ่มค่า A_w ของผลิตภัณฑ์แห้ง ในทางตรงกันข้าม desorption isotherm จะแสดงถึงการลดค่า A_w ของผลิตภัณฑ์ที่

มีความชื้นสูง โดยลักษณะของ sorption isotherm จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนดังภาพ คือ ส่วน A B และ C ในส่วน A นั้นจะแสดงถึงส่วนที่น้ำมีการดูดซับอย่างแน่นหนากับพื้นผิวดูดซับ (sorption site) และไม่มีคุณสมบัติในการเป็นตัวทำละลาย (solvent) โดยค่า enthalpy of vaporization ของน้ำในส่วนนี้จะมีค่ามากกว่าของน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งจะเรียกน้ำในส่วนนี้ว่า น้ำในส่วน monolayer ต่อมาในส่วน B น้ำในส่วนนี้จะมีการดูดซับกับพื้นผิวดูดซับอย่างหลวมๆ โดยจะมีการยึดเกาะกันของน้ำหลายชั้น จึงเรียกน้ำในส่วนนี้ว่า น้ำในส่วน double layer หรือ multiple layer ถึงแม้ว่าน้ำในส่วน B จะมีการดูดซับอย่างหลวมๆ แต่การเคลื่อนที่ของน้ำในส่วนนี้ยังคงจำกัด เนื่องจากยังมีแรงดูดซับจากพื้นผิวดูดซับ และในส่วนสุดท้าย ส่วน C น้ำในส่วนนี้จะเป็นน้ำที่มีการดูดซับกับพื้นผิวดูดซับน้อยที่สุด และยังคงมีพฤติกรรมแบบน้ำ คือ มีคุณสมบัติในการเป็นตัวทำละลาย และสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ (Mujumdar, 1997; Mujumdar และ Menon, 1995; Toledo, 1991)



ภาพที่ 6 sorption isotherm ของอาหาร
ที่มา: Araya-Farias และ Ratti (2009)

จากภาพที่ 6 จะเห็นได้ว่า adsorption และ desorption isotherm นั้นจะมีเส้นกราฟที่ไม่ซ้อนทับกัน ซึ่งจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า hysteresis (Kapsalis, 1987) โดย desorption isotherm จะมีค่าความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์มากกว่า adsorption isotherm ที่ค่า A_w เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในขั้นตอนการทำแห้งหรือ desorption ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่เกิดการ adsorption จึงไม่สามารถดูดซับน้ำได้เหมือนผลิตภัณฑ์เริ่มต้น ซึ่งในผลิตภัณฑ์อาหารหลายๆ ชนิดนั้นจะเกิดปรากฏการณ์ hysteresis ขึ้น

Mir และ Nath (1995) ได้ศึกษา sorption isotherm ของมะม่วงสุกอบแห้งอัดแท่ง (mango bar) ทั้งสูตรปกติ สูตรเติมผงมะพร้าวแห้ง และสูตรเติมโปรตีนถั่วเหลือง พบว่าตัวอย่างทั้งสามแบบนั้นมีรูปแบบของ sorption isotherm แบบ sigmoid type II เมื่อพิจารณาที่ค่า A_w ต่ำที่สุด พบว่าตัวอย่างสูตรปกติจะมีปริมาณความชื้นสูงที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างสูตรปกตินั้นมีพื้นผิวสำหรับการดูดซับของโมเลกุลน้ำมากที่สุด เนื่องจากในตัวอย่างสูตรปกติจะมีปริมาณน้ำตาลเป็นส่วนประกอบอยู่มากกว่าตัวอย่างที่เหลืออีกสองสูตร

Cano-Higuita และคณะ (2015) ได้ศึกษา sorption isotherm ของมะม่วงผงที่มีทั้งการเติม maltodextrin และหางนม (skimmed milk) โดยมีอัตราส่วนดังนี้ สูตรที่ 1 มะม่วง : maltodextrin (1 : 8) สูตรที่ 2 มะม่วง : maltodextrin (3 : 6) และสูตรที่ 3 มะม่วง : maltodextrin : หางนม (1 : 4 : 4) พบว่าปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของ maltodextrin มีค่าลดลง นอกจากนี้ที่ค่า A_w คงที่ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้น ปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างจะมีค่าลดต่ำลง อย่างไรก็ตามในสูตรที่ 2 และ 3 กลับพบว่าที่อุณหภูมิสูงสุด (50°C) และที่ A_w สูงสุด (0.884) กลับมีปริมาณความชื้นสมดุลสูงกว่าที่อุณหภูมิ 40°C และที่ A_w 0.893 ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้น้ำตาลมีความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ผลิตภัณฑ์มีพื้นผิวดูดซับกับโมเลกุลน้ำเพิ่มขึ้น ปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างจึงเพิ่มสูงขึ้น (Ayranci และคณะ, 1990) และในส่วนสูตรที่ 1 จะไม่เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้น เนื่องจากมีปริมาณ maltodextrin ผสมอยู่มาก ซึ่ง maltodextrin นั้นจะส่งผลให้ความสามารถในการละลายของของแข็งที่ละลายได้มีค่าลดต่ำลง (Fabra และคณะ, 2011) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kaymak-Ertekin และ Gedik (2004) ได้ศึกษา sorption isotherm ขององุ่น แอปริคอต แอปเปิ้ล และมันฝรั่ง พบว่าองุ่นและแอปริคอตจะมีปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างเพิ่มสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่ค่า A_w มากกว่า 0.8 โดยในส่วนของแอปเปิ้ลที่มีปริมาณน้ำตาลและเพกตินสูง และมันฝรั่งมีปริมาณสตาร์ชสูงจะไม่พบปรากฏการณ์ดังกล่าว เช่นเดียวกันกับการศึกษาของ Djendoubi Mrad และคณะ (2012) ได้ศึกษา sorption isotherm ของแอปริคอตสด และแอปริคอตที่ผ่านการแช่อิ่มอบแห้ง พบว่าที่ A_w มากกว่า 0.6 ที่อุณหภูมิ 45 และ 60°C จะส่งผลให้ปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าที่อุณหภูมิ 30°C โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้กับอาหารที่มีปริมาณน้ำตาลสูง ที่ค่า A_w สูง

นอกจากนี้ sorption isotherm ยังสามารถนำมาใช้ในการประเมินสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ได้ ซึ่งสมบัติดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ในการอธิบายพฤติกรรม และโครงสร้างของการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับของผลิตภัณฑ์อาหาร (Hill และ Rizvi, 1982) รวมถึงสามารถ

คำนวณพลังงานที่ใช้ในการถ่ายโอนมวล และการถ่ายโอนความร้อนในผลิตภัณฑ์อาหารได้อีกด้วย (Fasina และคณะ, 1999) โดย sorption isotherm ที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาคำนวณตามหลักทฤษฎีทางอุณหพลศาสตร์ ซึ่งจะสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบของ net isosteric heat of sorption และ differential entropy

net isosteric heat of sorption

net isosteric heat of sorption หรือ differential enthalpy (q_{st}) เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงระดับพลังงานส่วนเกินจากค่าความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำบริสุทธิ์ (latent heat of vaporization of pure water, λ_{vap}) ที่ใช้ในการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับ (N. Wang และ Brennan, 1991) ซึ่งในกระบวนการ adsorption ของโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับจะเป็นกระบวนการคายพลังงาน (exothermic) จะสามารถการอธิบายถึงระดับพลังงานที่ปลดปล่อยจากโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับ ในทางกลับกันกระบวนการ desorption ของโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับจะเป็นกระบวนการดูดพลังงาน (endothermic) จะสามารถการอธิบายถึงระดับพลังงานที่ใช้ในการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับ (intermolecular force) (Rizvi, 1995; Tsami และคณะ, 1990) โดย q_{st} ยังสามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณพลังงาน และนำมาใช้ในการออกแบบอุปกรณ์สำหรับกระบวนการทำแห้งได้อีกด้วย (McMinn และ Magee, 2003) ในส่วนของระดับพลังงานทั้งหมดที่ใช้สำหรับกระบวนการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับสามารถแสดงได้ด้วยพารามิเตอร์ isosteric heat of sorption (Q_{st}) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ net isosteric heat of sorption (q_{st}) รวมกับค่า λ_{vap} ซึ่งสามารถใช้บ่งบอกถึงสถานะของน้ำที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวอีกด้วย เมื่อ Q_{st} มีค่ามากกว่า λ_{vap} จะแสดงถึงพลังงานที่ใช้ดูดซับโมเลกุลน้ำกับพื้นผิว จะมีค่ามากกว่าพลังงานที่ใช้ในการจับเกาะกันของโมเลกุลน้ำที่อยู่ในสถานะของเหลว (Al-Muhtaseb และคณะ, 2004)

differential entropy

differential entropy (ΔS) เป็นพารามิเตอร์ที่สามารถแสดงถึง จำนวนพื้นผิวที่พร้อมจะเกิดการดูดซับโมเลกุลน้ำที่ระดับพลังงานเฉพาะ (Madamba และคณะ, 1996) และยังสามารถบ่งบอกถึงระดับความเป็นระเบียบหรือความสุ่มที่เกิดขึ้นในระบบของโมเลกุลน้ำและพื้นผิว นอกจากนี้ยัง

สามารถนำมาใช้ในการอธิบายกระบวนการ เช่น การละลาย การตกผลึก และการพองตัว เป็นต้น (Apostolopoulos และ Gilbert, 1990)

enthalpy-entropy compensation theory

enthalpy-entropy compensation theory เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง q_{st} และ ΔS ซึ่งทฤษฎีนี้จะกล่าวถึงกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้น และมีการเปลี่ยนแปลง enthalpy ของระบบบางส่วน หรือเกือบทั้งหมด ซึ่ง enthalpy ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจะถูกชดเชยด้วยการเปลี่ยนแปลง entropy ของระบบที่สัมพันธ์กัน ส่งผลให้ตรวจพบการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ (free energy) สุทธิเล็กน้อย ซึ่งการเปลี่ยนแปลง enthalpy และ entropy ของกระบวนการนั้นเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะบางอย่างในกระบวนการ เช่น pH องค์ประกอบของตัวทำละลาย โมเลกุลของตัวทำปฏิกิริยา และ A_w เป็นต้น โดยปกติพันธะ หรืออันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรง (enthalpy มีค่าเพิ่มขึ้น) จะส่งผลให้ระบบมีความเป็นไม่เป็นระเบียบเพิ่มขึ้น (entropy มีค่าเพิ่มขึ้น) และนำไปสู่การลดลงอย่างมากของความอิสระของโครสร้าง (configuration) (Liu และ Guo, 2001)

enthalpy-entropy compensation theory สามารถนำมาใช้ในการอธิบายกลไกเกี่ยวกับการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับที่แตกต่างกันของผลิตภัณฑ์อาหารภายใต้สภาวะต่างๆ (Beristain และคณะ, 1996) โดยในทางอุณหพลศาสตร์ตามหลักของ enthalpy-entropy compensation theory จะสามารถแบ่งกลไกการ sorption ของโมเลกุลน้ำได้เป็น 2 แบบ ดังนี้

1. กลไกการดูดซับที่ถูกควบคุมโดย enthalpy (เมื่อ $T_\beta > T_{hm}$) ซึ่งสามารถแสดงถึงโครงสร้างของอาหารที่มีความคงตัวสูง และไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกลไกการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อกลไกการดูดซับ คือ ระดับพลังงานในการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับ
2. กลไกการดูดซับที่ถูกควบคุมโดย entropy (เมื่อ $T_\beta < T_{hm}$) ซึ่งสามารถแสดงถึงกลไกการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับนั้นเกิดขึ้นจากปัจจัยทางโครงสร้างของอาหารเป็นหลัก โดยจะไม่เกี่ยวข้องกับระดับพลังงานในการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับ

Madamba และคณะ (1996) ได้ศึกษาสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของกระเทียม คือ q_{st} และ ΔS ซึ่งพบว่าทั้ง q_{st} และ ΔS จะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้การลดลงของ q_{st} เกิดขึ้นเนื่องจาก เมื่อผลิตภัณฑ์มีปริมาณความชื้นต่ำบริเวณพื้นผิวดูดซับที่มีความเป็นขั้วจะสามารถเกิดการดูดซับกับโมเลกุลน้ำได้โดยตรง และจะส่งผลให้มีพลังงานในการดูดซับสูง

แต่เมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มสูงขึ้น พื้นผิวที่มีความเป็นขั้วจะมีจำนวนลดน้อยลงจากการที่โมเลกุลน้ำมีจำนวนเพิ่มสูงขึ้นจนส่งผลให้ไม่สามารถเกิดการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำที่มีจำนวนมากกับพื้นผิวดูดซับได้โดยตรง พลังงานในการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับจึงมีค่าลดต่ำลง (H.A. Iglesias และ J. Chirife, 1976) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่า q_{st} ของกระเทียมสอดคล้องกับผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า q_{st} ในผลิตภัณฑ์อาหารประเภทต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสับปะรด (Hossain และคณะ, 2001) มะเขือเทศ (Akanbi และคณะ, 2006) ใบของ bitter orange (Mohamed และคณะ, 2005) ข้าวโพด (Samapundo และคณะ, 2007) ใบและลำต้นของ lemon blam (Argyropoulos และคณะ, 2012) lupine (Vázquez และคณะ, 2003) ฟิล์มที่บริโภคได้ (edible film) ที่มีส่วนผสมของ pullan-sodium alginate (Xiao และ Tong, 2013) รวมถึงผลิตภัณฑ์เนื้อแห้งของตุรกี (Aktaş และ Gürses, 2005)

Kaymak-Ertekin และ Gedik (2004) ได้ศึกษา q_{st} ขององุ่น แอปริคอต แอปเปิ้ล และมันฝรั่ง พบว่าค่า q_{st} จะมีค่าสูง เมื่อปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างมีค่าต่ำ โดยในตัวอย่างมันฝรั่ง q_{st} จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ตัวอย่างอื่นๆ q_{st} จะมีค่าลดลงอย่างช้าๆ โดยค่า q_{st} ของแอปเปิ้ลจะมีค่าลดลงจนกระทั่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งจะแสดงถึงพลังงานในการดูดซับของพื้นผิวดูดซับที่ส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อการดูดซับโมเลกุลน้ำ (H.A. Iglesias และ J. Chirife, 1976) แต่ในส่วนขององุ่น และแอปริคอตกลับพบว่า ค่า q_{st}จะมีค่าลดลงจนกระทั่งมีค่าติดลบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างทั้งสองมีปริมาณน้ำตาลสูง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้น้ำตาลมีความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น เป็นผลให้มีพื้นผิวสำหรับการดูดซับของโมเลกุลน้ำเพิ่มขึ้น ปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างจึงเพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกับการศึกษาของ Djendoubi Mrad และคณะ (2012) พบว่าค่า q_{st} ของแอปริคอตนั้นจะมีค่าลดลงจนกระทั่งมีค่าติดลบ เมื่อปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยค่าติดลบจะแสดงถึงกระบวนการดูดพลังงานที่เกิดขึ้นจากการละลายของน้ำตาลกับโมเลกุลน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่าง

Al-Muhtaseb และคณะ (2004) ได้ศึกษาสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ คือ Q_{st} และ ΔS ของสตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชแบบ highly amylopectin และสตาร์ชแบบ highly amylose พบว่า Q_{st} ของตัวอย่างทั้งสามชนิดจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างมีค่าลดต่ำลง เนื่องจากที่ปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างต่ำ โมเลกุลน้ำจะเกิดการดูดซับขึ้นได้โดยตรงกับพื้นผิวดูดซับ ซึ่งจะเกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลน้ำในส่วน monolayer จึงส่งผลให้เกิดการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวอย่างแน่นหนา โดยที่สตาร์ชมันฝรั่งจะมีค่า Q_{st} สูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากสตาร์ชมัน

ฝรั่งจะมีพื้นผิวดูดซับที่มีความเป็นขั้วมากกว่าสตาร์ชที่เหลือทั้งสองชนิด ส่งผลให้มีพลังงานที่ใช้ดูดซับโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับของตัวอย่างมีค่าสูง โดยที่ค่า Q_{st} ของตัวอย่างทั้งสามชนิดจะมีค่าสูงกว่าค่า λ_{vap} ซึ่งแสดงถึงพลังงานที่ใช้ดูดซับโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับ จะมีค่ามากกว่าพลังงานที่ใช้ในการจับเกาะกันของโมเลกุลน้ำที่อยู่ในสถานะของเหลว และในส่วนของการเปลี่ยนแปลง ΔS ที่ปริมาณความชื้นต่างๆ พบว่าจะมีค่า ΔS เพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างมีค่าลดต่ำลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณความชื้นสมดุลต่ำ ปริมาณโมเลกุลน้ำจะมีจำนวนน้อย และเกิดการดูดซับกับพื้นผิวได้แค่บางส่วน ดังนั้นปริมาณพื้นผิวที่สามารถดูดซับกับโมเลกุลน้ำจึงยังมีจำนวนมาก

Arslan และ Toğrul (2005b) ได้รายงานค่า Q_{st} และ ΔS ของพริกบดไว้ดังนี้ ค่า Q_{st} ของตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างมีค่าลดต่ำลง แสดงให้เห็นว่าโมเลกุลน้ำเกิดการดูดซับกับพื้นผิวดูดซับด้วยแรงที่เพิ่มขึ้น เมื่อตัวอย่างมีปริมาณความชื้นสมดุลลดต่ำลง เช่นเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงของค่า Q_{st} โดย ΔS จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างมีค่าลดต่ำลง ทั้งนี้การลดลงของ ΔS ที่ปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อมีปริมาณความชื้นเพิ่มสูงขึ้น โมเลกุลน้ำจะเกิดการดูดซับกับพื้นผิวดูดซับที่ว่างอยู่ ซึ่งส่งผลให้ปริมาณพื้นผิวดูดซับที่สามารถดูดซับกับโมเลกุลน้ำมีจำนวนลดลง (Kapsalis, 1987) สอดคล้องงานวิจัยของ Arslan และ Toğrul (2006) กับการเปลี่ยนแปลงของค่า Q_{st} และ ΔS ในใบชา พบว่า Q_{st} ของตัวอย่างจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง 11% (ฐานแห้ง) หลังจากนั้น Q_{st} จะมีค่าลดลงอย่างช้าๆ ทั้งนี้การลดลงของค่า Q_{st} เมื่อปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากเมื่อโมเลกุลน้ำเพิ่มมากขึ้น บริเวณพื้นผิวที่ดูดซับโมเลกุลน้ำจึงมีจำนวนลดลง ส่งผลให้แรงดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับมีค่าลดต่ำลง (N. Wang และ Brennan, 1991) ในส่วนของ ΔS จะมีลักษณะการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) เมื่อปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า Q_{st} และ ΔS ดังกล่าวมีลักษณะเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันกับค่า q_{st} และ ΔS ในมักกะโรนี (Arslan และ Toğrul, 2005a) บิสกิตข้าวโอ๊ตและแผ่นข้าวโอ๊ต (oat flakes) (McMinn และคณะ, 2007) และเมล็ดวอลนัท (Toğrul และ Arslan, 2007) อย่างไรก็ตาม ΔS ของเมล็ดวอลนัทจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนถึง 6.5% (ฐานแห้ง) และหลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการหลุดออกของโมเลกุลน้ำกับพื้นผิว ที่เป็นผลมาจากการเปิดออก และการพองตัวขององค์ประกอบในอาหาร (Bettelheim และคณะ, 1970)

Beristain และคณะ (1996) ได้ศึกษา enthalpy-entropy compensation ของอาหารที่มีปริมาณน้ำตาลสูง (พรุน แอปริคอต มะเดื่อ และลูกเกด) ซึ่งพบว่ากลไกการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับของตัวอย่างทั้งหมดถูกควบคุมโดย enthalpy ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างระดับจุลภาคของอาหารมีความคงตัวสูง และไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกลไกการดูดซับ ระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับของตัวอย่างที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 15 ถึง 60°C ซึ่งกระบวนการหรือกลไกการดูดซับของโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับที่ถูกควบคุมโดย enthalpy สามารถพบได้ในผลิตภัณฑ์อาหารประเภทต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นกระเทียม (Madamba และคณะ, 1996) ใบชา (Arslan และ Toğrul, 2006) บิสกิตข้าวโอ๊ตและแผ่นข้าวโอ๊ต (McMinn และคณะ, 2007) และฟิล์มที่บริโภคได้ (edible film) ที่มีส่วนผสมของ pullan-sodium alginate (Xiao และ Tong, 2013) อย่างไรก็ตาม จากการศึกษา enthalpy-entropy compensation ในแผ่นมันฝรั่งทอด ของ Zúñiga และคณะ (2008) กลับพบว่ากระบวนการหรือไกกลการสูญเสียน้ำในตัวอย่างจะถูกควบคุมโดย entropy นอกจากนี้กระบวนการหรือกลไกการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับนั้นสามารถถูกควบคุมได้ทั้ง enthalpy และ entropy ที่ระดับความชื้นสมดุลของตัวอย่างที่แตกต่างกัน โดย Beristain และคณะ (1996) ได้ศึกษา enthalpy-entropy compensation ของมันฝรั่งและแมคคาเดเมียซึ่งจัดเป็นอาหารที่มีปริมาณสตาร์ชสูง โดยพบว่า Q_{st} และ ΔS ของตัวอย่างสามารถสร้างความสัมพันธ์เชิงเส้นได้เป็นสองส่วน คือ ในส่วนที่ปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างมีค่าสูง (> 3.5% ฐานแห้ง ในมันฝรั่ง และ > 2.6% ฐานแห้ง ในแมคคาเดเมีย) กระบวนการหรือกลไกการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับจะถูกควบคุมโดย enthalpy และในส่วนที่ปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างมีค่าต่ำ (1.8 ถึง 3.5% ฐานแห้ง ในมันฝรั่ง และ 1.8 ถึง 2.6% ฐานแห้ง ในแมคคาเดเมีย) กระบวนการหรือกลไกการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับจะถูกควบคุมโดย entropy ซึ่งสามารถอธิบายกระบวนการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับนั้นเกิดขึ้นจากปัจจัยทางโครงสร้างของอาหาร โดยจะไม่เกี่ยวข้องกับระดับพลังงานในการดูดซับ หรือความจำเพาะของไอออนิก หรือความมีขั้วของโมเลกุลน้ำ และพื้นผิวของอาหาร ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวจะพบเฉพาะอาหารที่มีปริมาณสตาร์ชสูงร่วมกับสภาวะการดูดซับที่อุณหภูมิสูง ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาค (microstructure) ที่เป็นผลมาจากอุณหภูมิ นอกจากนี้ Viganó และคณะ (2012) ยังได้ศึกษา enthalpy-entropy compensation ของสับปะรดผงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบต่างๆ ซึ่งพบว่า Q_{st} และ ΔS ของตัวอย่างสามารถสร้างความสัมพันธ์เชิงเส้นได้เป็นสองส่วน และให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Beristain และคณะ (1996) คือ ในส่วนที่ปริมาณความชื้นสมดุลของ

ตัวอย่างมีค่าสูง กระบวนการหรือกลไกการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับนั้นถูกควบคุมโดย enthalpy และที่ปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างมีค่าต่ำ กระบวนการหรือกลไกการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับนั้นถูกควบคุมโดย entropy ทั้งนี้เนื่องมาจากกระบวนการทำแห้งที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้โครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่างที่มีลักษณะแตกต่างกัน โดยการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่างมีผลต่อการดูดซับของโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวมากกว่าพลังงานที่ใช้ดูดซับโมเลกุลน้ำกับพื้นผิว

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมตัวอย่าง

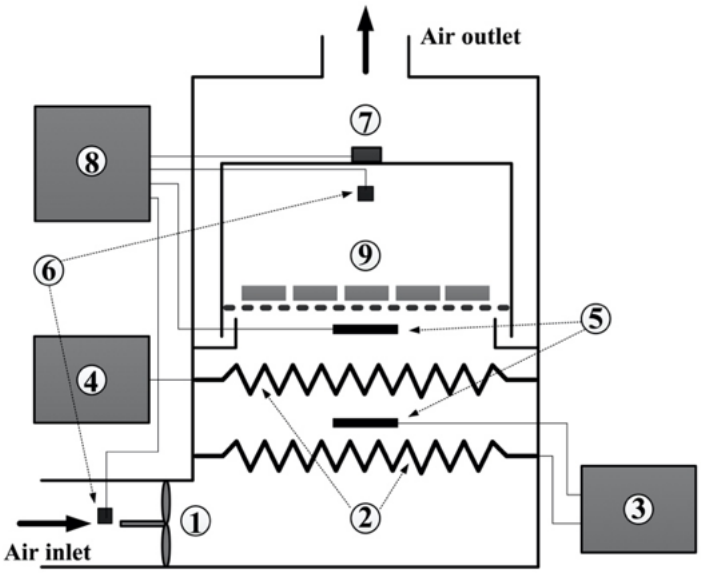
ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำมะม่วงสุกสายพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองมาใช้เป็นตัวอย่างในการทดลอง โดยเกณฑ์ในการคัดเลือกตัวอย่างให้มีความสม่ำเสมอจะอาศัยค่า total soluble solid (TSS) จากการวัดด้วย refractometer (Optika HR-130, Italy) ค่าความแน่นเนื้อ (firmness) จากการวัดด้วย penetrometer (FT 327, Italy) โดยใช้หัววัดขนาด 8 mm และ titratable acidity (TA) จากการวัดด้วยวิธีการไทเตรทตามวิธีของ Sogi และคณะ (2015) สำหรับ TSS firmness และ TA ของตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานี้จะมีค่าเท่ากับ 18.96 ± 1.44°Brix 13.21 ± 1.87 N และ 0.30 ± 0.08 g citric acid/100 g sample ตามลำดับ ในขณะที่ความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างมีค่า 4.48 ± 0.47 kg water / kg dry matter (dry basis) ซึ่งจะอาศัยวิธีมาตรฐาน AOAC (AOAC, 2005) ในการหาปริมาณความชื้นของตัวอย่าง และสำหรับตัวอย่างที่ผ่านการคัดเลือกจะถูกหั่นเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมขนาด 1.5 × 1.5 × 1 cm^3 (กว้าง × ยาว × หนา) เพื่อนำไปทำการทดลองต่อไป

อุปกรณ์การทำแห้ง

อุปกรณ์การทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่

ภาพที่ 7 แสดงภาพอุปกรณ์การทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่ สำหรับการทำแห้งในสภาวะไม่คงที่จะเป็นการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนแบบเป็นจังหวะ ดังนั้นอุปกรณ์การทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะไม่คงที่จึงจำเป็นต้องใช้ขดลวดความร้อน (heater) ขนาด 1500 W จำนวน 2 ตัว โดยขดลวดความร้อนตัวแรกจะติดตั้งไว้ที่ช่องลมขาเข้า และทำการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งขดลวดความร้อนตัวที่หนึ่งจะทำหน้าที่ให้การให้ความร้อนแก่ลมร้อนในสภาวะคงที่ และสำหรับขดลวดความร้อนตัวที่สองจะติดตั้งไว้เหนือขดลวดความร้อนตัวที่หนึ่งมีหน้าที่ในการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนขึ้นแบบเป็นจังหวะ โดยการทำงานของขดลวดความร้อนตัวที่สองจะถูกควบคุมด้วย microcontroller (Atmega328) นอกจากนี้ในระหว่างกระบวนการทำแห้งน้ำหนักของตัวอย่าง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของลมขาเข้าและขาออก และอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งจะถูกบันทึกทุกๆ 2 นาที ผ่านทาง data logger (Opus 200, Lufft, Germany) สำหรับการติดตามน้ำหนักของตัวอย่างจะอาศัย load cell ในส่วนอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของลมขาเข้าและขาออกจะอาศัย temperature and humidity sensor และอุณหภูมิลมในห้องอบแห้งจะอาศัย PT100

(Polyscience, USA) ในขณะที่ความเร็วลมจะถูกวัดด้วย vane type anemometer (Lutron AM-4201, Taiwan) โดยอุปกรณ์การทำแห้งนี้ได้ถูกนำมาใช้ศึกษาในหัวข้อ “การศึกษาเบื้องต้น: การทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะไม่คงที่”

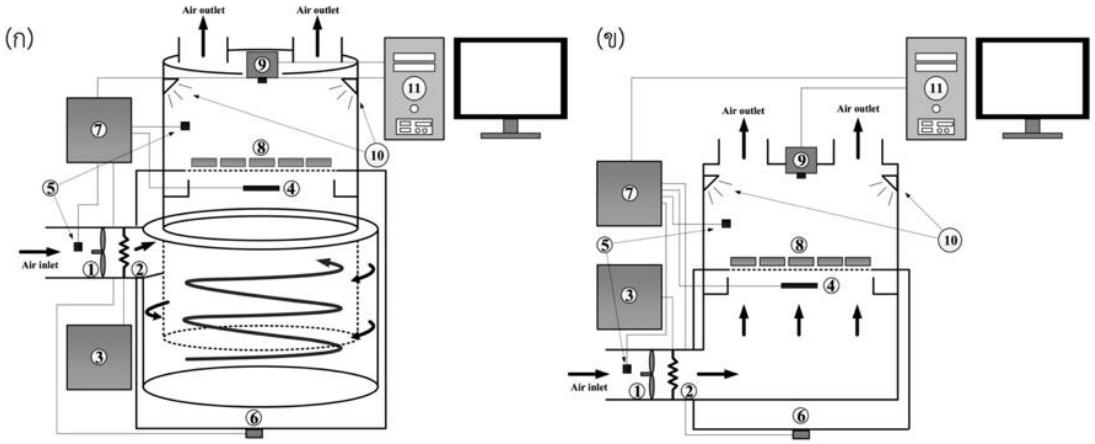


ภาพที่ 7 อุปกรณ์การทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่ ประกอบด้วย (1) พัดลม (2) ขดลวดความร้อน (3) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (4) pulsed controller (5) PT100 (6) temperature and humidity sensor (7) load cell (8) data logger และ (9) ถาดใส่ตัวอย่าง

อุปกรณ์การทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนร่วมกับ computer vision system

ภาพที่ 8 แสดงภาพอุปกรณ์การทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนร่วมกับ computer vision system (CVS) ซึ่งอุปกรณ์การทำแห้งนี้ได้ดัดแปลงมาจากอุปกรณ์การทำแห้งในภาคผนวก Study on kinetics of flow characteristics in hot air drying of pineapple เพื่อให้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงขนาดและสีของตัวอย่างในระหว่างกระบวนการทำแห้ง โดยส่วนประกอบหลักของ CVS จะประกอบไปด้วยกล้องดิจิทัล computer software และ computer hardware โดยกล้องดิจิทัลจะถูกติดตั้งอยู่จุดกึ่งกลางเหนือจากถาดใส่ตัวอย่าง 30 cm สำหรับภาพถ่ายที่ได้จากกล้องดิจิทัล (CMOS digital image sensor IMX179, SONY, Japan) จะมี resolution 3264 × 2448 pixels นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งแหล่งกำเนิดแสงสว่าง (LED, Daylight 6500 K, 120° viewing angle, SMDS 5050, Epistar, Taiwan) ไว้ที่ผนังของห้องอบแห้ง ซึ่งจะอยู่

สูงจากตัวอย่างประมาณ 10 cm และทำมุม 45° กับตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 8 สำหรับ software ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างกล้องดิจิทัลกับคอมพิวเตอร์ได้ถูกพัฒนามาจากภาษา Visual Basic (VB) โดยภาพของตัวอย่างในระหว่างกระบวนการทำแห้งจะถูกถ่าย และบันทึกลงในคอมพิวเตอร์ทุกๆ 1 นาที ผ่านทาง software ที่พัฒนาขึ้น นอกจากนี้น้ำหนักของตัวอย่าง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของลมขาเข้าและขาออก และอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งจะถูกบันทึกทุกๆ 1 นาที ผ่านทาง data logger (Lufft Opus 200) โดยอุปกรณ์การทำแห้งนี้ได้ถูกนำมาใช้ศึกษาในหัวข้อ “ผลของการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนต่อการหดตัวและการเปลี่ยนแปลงสีในระหว่างกระบวนการทำแห้ง”



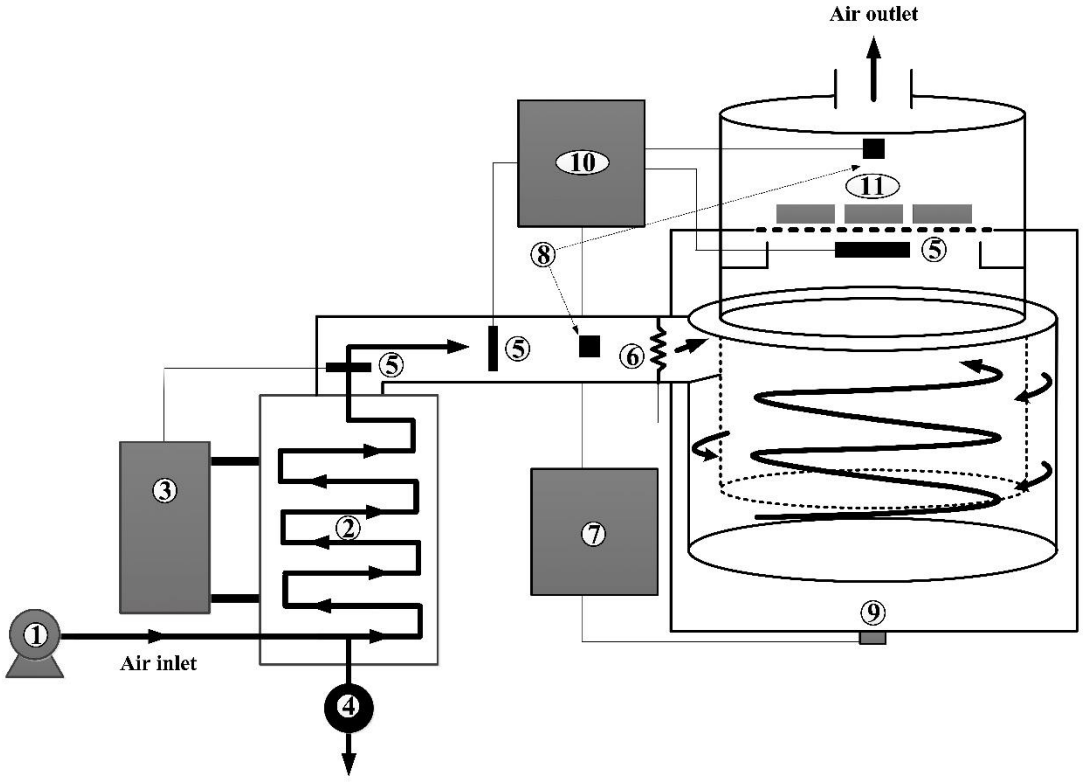
ภาพที่ 8 อุปกรณ์การทำแห้งด้วยลมร้อน (ก) แบบหมุน และ (ข) แบบไม่หมุนร่วมกับ computer vision system ประกอบด้วย (1) พัดลม (2) ขดลวดความร้อน (3) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (4) PT100 (5) temperature and humidity sensor (6) load cell (7) data logger (8) ถาดใส่ตัวอย่าง (9) กล้องดิจิทัล (10) แหล่งกำเนิดแสงสว่าง และ (11) คอมพิวเตอร์

อุปกรณ์การทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนร่วมกับ dehumidifier

ภาพที่ 9 แสดงภาพอุปกรณ์การทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนร่วมกับ dehumidifier ซึ่งอุปกรณ์การทำแห้งนี้ประกอบไปด้วย พัดลมอัดอากาศ (air compressor) dehumidifier ขดลวดความร้อน ขนาด 1000 W ที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ และห้องอบแห้ง โดยห้องอบแห้งจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกผลิตมาจากวัสดุ poly (methyl methacrylate) จำนวน 2 ชิ้น มาวางซ้อนกัน โดยทรงกระบอกวงนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm สูง 12 cm ในขณะที่ทรงกระบอกวงในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm สูง 20 cm ซึ่งช่องวางระหว่างทรงกระบอกทั้ง

สองถูกเชื่อมต่อกันด้วย poly (methyl methacrylate) cm ในขณะที่ถาดทำจากวัสดุ poly (tetrafluroethylene) ที่เป็นตาข่ายทรงสี่เหลี่ยมจตุรัสขนาด 8 × 8 cm^2 สำหรับ dehumidifier จะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ กล่าวคือเป็นการควบคุมอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศ โดย dehumidifier จะประกอบไปด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Polyscience, USA) ที่สามารถปรับอุณภูมิได้ในช่วง 1 ถึง 99°C water trap และท่อสองชั้นยาว 10 m สำหรับหลักการทำงานของ dehumidifier คือ อากาศจากพัดลมอัดอากาศที่ความดันประมาณ 1.5 kPa จะไหลมาตามท่อชั้นใน และน้ำจากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิจะไหลอยู่ในท่อชั้นนอกในทิศทางตรงกันข้าม เพื่อทำให้อากาศมีอุณหภูมิถึงอุณหภูมิจุดน้ำค้างที่กำหนด โดยอุณหภูมิอากาศก่อนออกจาก dehumidifier จะถูกควบคุม และวัดด้วย PT100 sensor (Polyscience, USA) ที่เชื่อมต่อกับอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ สำหรับน้ำที่เกิดการควบแน่นในกระบวนการจะถูกกำจัดออกจากระบบด้วย water trap

ในระหว่างกระบวนการทำแห้งน้ำหนักของตัวอย่าง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของลมขาเข้าและขาออก และอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งจะถูกบันทึกทุกๆ 1 นาที ผ่านทาง data logger (Opus 200, Lufft, Germany) สำหรับการติดตามน้ำหนักของตัวอย่างจะอาศัย load cell ในส่วนอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของลมขาเข้าและขาออกจะอาศัย temperature and humidity sensor และอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้งจะอาศัย PT100 (Polyscience, USA) ในขณะที่ความเร็วลมจะถูกวัดด้วย vane type anemometer (Lutron AM-4201, Taiwan) โดยอุปกรณ์การทำแห้งนี้ได้ถูกนำมาใช้ศึกษาในหัวข้อ “ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุน”



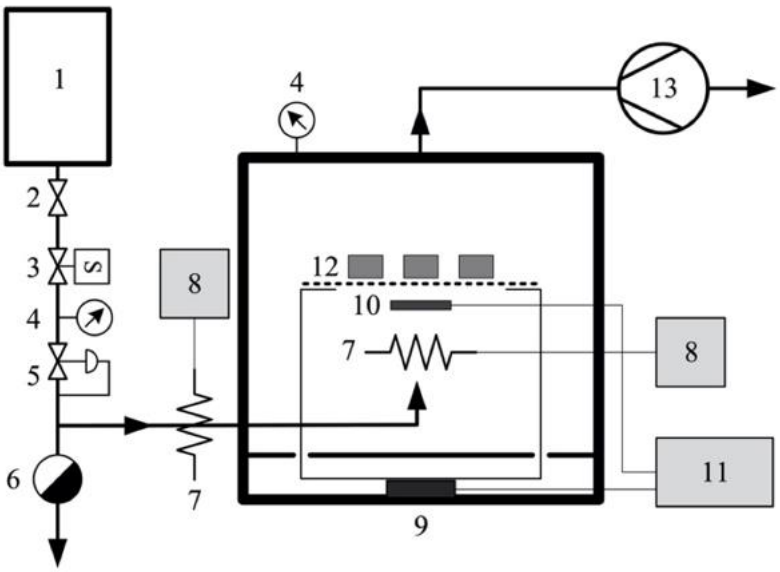
ภาพที่ 9 อุปกรณ์การทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนร่วมกับ dehumidifier ประกอบด้วย (1) พัดลมอัดอากาศ (2) ท่อสองชั้น (3) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (4) water trap (5) PT100 (6) ขดลวดความร้อน (7) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (8) temperature and humidity sensor (9) load cell (10) data logger และ (11) ถาดใส่ตัวอย่าง

อุปกรณ์การทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำ

ภาพที่ 10 แสดงภาพอุปกรณ์การทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำในสภาวะคงที่และไม่คงที่ ซึ่งอุปกรณ์การทำแห้งนี้ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไอน้ำ (boiler) ขดลวดความร้อนขนาด 1000 W จำนวน 2 ตัว ที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ห้องอบแห้ง และปั๊มสุญญากาศแบบ liquid ring (L-BV7, Elmo Rietschle, Germany) โดยห้องอบแห้งมีรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาดด้านใน 15 × 15 × 25 cm^3 (กว้าง × ยาว × สูง) ผลิตจากวัสดุ poly (methyl methacrylate) ความหนา 2.5 cm ในขณะที่ถาดทำจากวัสดุ poly (tetrafluroethylene) ที่เป็นตาข่ายทรงสี่เหลี่ยมจตุรัสขนาด 8 × 8 cm^2

ไอน้ำที่ใช้ในการทำแห้งจะมีแหล่งกำเนิดมาจากเครื่องกำเนิดไอน้ำ หลังจากนั้นไอน้ำจะผ่าน solenoid valve ซึ่งเป็นตัวควบคุมการปล่อยไอน้ำเข้าสู่ห้องอบแห้ง โดยความดันของไอน้ำจะถูก

ควบคุมด้วย steam regulator ให้มีค่าประมาณ 320 kPa (absolute pressure) หลังจากผ่าน steam regulator สภาวะของระบบทั้งหมดจะเป็นสภาวะที่ระดับความดันต่ำที่ถูกควบคุมด้วยปั๊มสุญญากาศ โดยก่อนที่ไอน้ำจะเข้าไปยังห้องอบแห้ง ไอน้ำบางส่วนที่เกิดการควบแน่นจะถูกกำจัดออกจากระบบด้วย steam trap หลังจากนั้นไอน้ำส่วนที่เหลือจะถูกให้ความร้อนรอบแรกด้วยขดลวดความร้อนตัวที่หนึ่ง และจะถูกให้ความร้อนอีกครั้งด้วยขดลวดความร้อนตัวที่สอง เพื่อให้ไอน้ำมีอุณหภูมิตามที่กำหนด นอกจากนี้ยังได้ติดตั้งเกจวัดความดัน (pressure gauge) ไว้บนห้องอบแห้ง เพื่อติดตามระดับความดันภายในห้องอบแห้ง สำหรับน้ำหนักของตัวอย่าง และอุณหภูมิไอน้ำในห้องอบแห้งจะถูกบันทึกทุกๆ 5 นาที ผ่านทาง data logger (Opus 200, Lufft, Germany) ซึ่งน้ำหนักของตัวอย่างจะถูกติดตามด้วย load cell และอุณหภูมิไอน้ำจะถูกติดตามด้วย thermocouple โดยอุปกรณ์การทำแห้งนี้ได้ถูกนำมาใช้ศึกษาในหัวข้อ “การทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำในสภาวะไม่คงที่”



ภาพที่ 10 อุปกรณ์การทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำในสภาวะคงที่และไม่คงที่ ประกอบด้วย (1) เครื่องกำเนิดไอน้ำ (2) วาล์วควบคุมไอน้ำ (3) solenoid valve (4) เกจวัดความดัน (5) steam regulator (6) steam trap (7) ขดลวดความร้อน (8) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (9) load cell (10) thermocouple (11) data logger (12) ถาดใส่ตัวอย่าง และ (13) ปั๊มสุญญากาศ

ขั้นตอนการทำแห้ง

ตัวอย่างที่ผ่านการคัดเลือกและตัดแต่งจะถูกนำมาวางไว้บนถาด หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิภายในห้องอบแห้งถึงค่าที่กำหนด และอยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) จึงจะนำถาดที่ใส่ตัวอย่างเข้าสู่ห้องอบแห้ง โดยตัวอย่างจะถูกทำให้แห้งจนกระทั่งมีปริมาณความชื้นประมาณ 0.15 kg water / kg dry matter (dry basis) จึงจะนำตัวอย่างออกมาวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆ ต่อไป

การวิเคราะห์ข้อมูลการทำแห้ง

อัตราส่วนความชื้น

ความชื้นของตัวอย่างในกระบวนการทำแห้งจะแสดงในรูปของอัตราส่วนความชื้น (moisture ratio, *MR*) ดังสมการ (1)

$$MR = \frac{X_t - X_{eq}}{X_i - X_{eq}} \quad (1)$$

เมื่อ *MR* คือ อัตราส่วนความชื้น (-) X_i คือ ความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่าง (kg water / kg dry matter) X_t คือ ความชื้นของตัวอย่างที่เวลาใดๆ ในระหว่างกระบวนการทำแห้ง (kg water / kg dry matter) X_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของตัวอย่างในระหว่างกระบวนการทำแห้ง (kg water / kg dry matter)

โดยค่าความชื้นเริ่มต้น ความชื้นที่เวลาใดๆ และค่าความชื้นสมดุลของตัวอย่างจะสามารถคำนวณได้จากน้ำหนักของตัวอย่างดังแสดงในสมการ (2) ถึง (4) ตามลำดับ

$$X_i = \frac{w_i - w_d}{w_d} \quad (2)$$

$$X_t = \frac{w_t - w_d}{w_d} \quad (3)$$

$$X_{eq} = \frac{w_{eq} - w_d}{w_d} \quad (4)$$

เมื่อ w_i คือ น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง (kg) w_d คือ น้ำหนักของแข็งของตัวอย่าง (kg) w_t คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่เวลาใดๆ ในระหว่างกระบวนการทำแห้ง (kg) และ w_{eq} คือ น้ำหนักสมดุลของตัวอย่างในระหว่างกระบวนการทำแห้ง (kg)

กราฟการทำแห้ง

กราฟการทำแห้ง (drying curve) เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง *MR* และเวลาในการทำแห้ง โดยพฤติกรรมการทำแห้งสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการทำแห้งต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แบบจำลองสำหรับการทำแห้งผลไม้

No.	แบบจำลอง	สมการ	อ้างอิง
[1]	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Lewis (1921)
[2]	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Page (1949)
[3]	Henderson and Pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt)$	Henderson และ Pabis (1961)
[4]	Logarithmic	$MR = a \cdot \exp(-kt) + c$	Yagciolu และคณะ (1999)
[5]	Two term exponential	$MR = a \cdot \exp(-kt) + a \cdot \exp(-kt)$	Sharaf-Eldeen และคณะ (1980)

เมื่อ *t* คือ เวลาในการทำแห้ง (s) และ *a c k* และ *n* คือ ค่าคงที่ของแบบจำลอง

สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมของค่าคงที่ในแบบจำลองการทำแห้งจำเป็นต้องสร้างความสอดคล้องระหว่างผลของแบบจำลองกับผลการทดลองด้วยวิธีการลดค่า sum of square error (*SSE*) ในสมการ (5) ลงให้มีค่าต่ำที่สุด และสำหรับการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเส้นตรง (non-linear regression) จะทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม R (R-3.6.2 for Windows)

$$SSE = \sum_{i=1}^{n} \left[Y_{\exp,i} - Y_{pre,i} \right]^2 \quad (5)$$

เมื่อ *SSE* คือ sum of square error (-) *n* คือ จำนวนของค่าตอบสนอง Y_{exp} คือ ค่าตอบสนองจากการทดลอง และ Y_{pre} คือ ค่าตอบสนองจากแบบจำลอง

สำหรับการบ่งชี้ความสอดคล้องระหว่างผลของแบบจำลองกับผลการทดลองจะอาศัยพารามิเตอร์ทางสถิติ คือ coefficient of determination (R^2) root mean square error (*RMSE*) และ reduced chi-square (χ^2) ดังแสดงในสมการ (6) ถึง (8) ตามลำดับ

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

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

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_{exp,i} - Y_{pre,i}\right)^2}{n - z} \quad (8)$$

เมื่อ R^2 คือ coefficient of determination (-) $RMSE$ คือ root mean square error (-) χ^2 คือ reduced chi-square (-) และ z คือ จำนวนค่าคงที่ของแบบจำลอง (-)

อัตราการทำแห้ง

อัตราการทำแห้ง (drying rate) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของตัวอย่างต่อหนึ่งหน่วยเวลา (Pillai, 2013) ซึ่งจะสามารถคำนวณได้จากสมการ (9)

$$DR = -\frac{X_{t+\Delta t} - X_t}{\Delta t} \quad (9)$$

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

สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

ประสิทธิภาพในการทำแห้งตัวอย่างสามารถบ่งชี้ได้จากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (effective moisture diffusivity, D_{eff}) โดยแบบจำลองการแพร่ (diffusion model) ที่มีพื้นฐานมาจาก Fick's second law of diffusion ในสมการ (10) ได้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาค่า D_{eff} (Crank, 1975; Pasban และคณะ, 2017) และในการทดลองนี้จะทำการพิจารณาการถ่ายโอนมวล (ความชื้น) ของตัวอย่างที่สามารถเกิดขึ้นในสามมิติ (ด้านกว้าง ด้านยาว และด้านหนา) ในขณะที่แบบจำลองนี้ได้กำหนดข้อสมมติ (assumption) ดังนี้ ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของทุกตัวอย่างมีค่าเท่ากัน ไม่เกิดการหดตัวของชิ้นตัวอย่าง และ D_{eff} มีค่าคงที่ตลอดทั้งชิ้นของตัวอย่าง

$$MR = \frac{8^3}{\pi^6}\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{\infty}\sum_{k=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2(2m+1)^2(2k+1)^2} \quad (10)$$

$$\times \exp\left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff}}{4X^2} t\right]$$

$$\times \exp\left[-(2m+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff}}{4Y^2} t\right]$$

$$\times \exp\left[-(2k+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff}}{4Z^2} t\right]$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (m^2/s) X Y และ Z คือ ความหนาครึ่งหนึ่งของตัวอย่าง (m) ในส่วนของความกว้าง ความยาว และความหนา ตามลำดับ และ n m และ k คือ indexes of summations (-)

จากสมการ (10) เมื่อตัวอย่างถูกทำแห้งเป็นเวลานาน จะสามารถลดรูปสมการให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่ายได้ดังนี้

$$MR = \frac{8^3}{\pi^6} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t\right) \tag{11}$$

เมื่อ $L^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$

ดังนั้นจากความสัมพันธ์ของ ln(MR) และระยะเวลาในการทำแห้งที่ได้จากแบบจำลองการทำแห้งที่ดีที่สุด ซึ่งมีรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นจะสามารถหาค่า D_{eff} ได้จากความชัน (slope) ของความสัมพันธ์ดังกล่าว โดยมีรูปแบบดังสมการ (12)

$$\text{Slope} = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \tag{12}$$

สำหรับการศึกษาในหัวข้อ “ผลของการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนต่อการหดตัวและการเปลี่ยนแปลงสีในระหว่างกระบวนการทำแห้ง” ได้มีการติดตามการเปลี่ยนแปลงขนาดของตัวอย่างในระหว่างกระบวนการทำแห้ง ดังนั้นแบบจำลองการแพร่จึงสามารถพิจารณาการหดตัวของชิ้นตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในระหว่างกระบวนการทำแห้ง โดยข้อสมมติของการหดตัวของตัวอย่าง คือ ตัวอย่างเกิดการหดตัวแบบสมมาตร (symmetric shrinkage) ดังนั้นจากสมการ (10)

เมื่อตัวอย่างถูกทำแห้งเป็นเวลานาน จะสามารถลดรูปสมการให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่ายได้ดังนี้ (Crank, 1975; Dissa และคณะ, 2008)

$$MR = \frac{8^3}{\pi^6} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L_t^2} t\right) \quad (13)$$

เมื่อ $L_t^2 = X_t^2 + Y_t^2 + Z_t^2$ และ X_t Y_t และ Z_t คือ ความหนาครึ่งหนึ่งของตัวอย่าง (m) ที่เวลาใดๆ ในระหว่างกระบวนการทำแห้งในส่วนของความกว้าง ความยาว และความหนา ตามลำดับ

ดังนั้นจากความสัมพันธ์ของ ln(MR) และ t/L_t^2 ที่ได้จากแบบจำลองการทำแห้งที่ดีที่สุด จะสามารถหาค่า D_{eff} ได้จากความชันของความสัมพันธ์ดังกล่าว ซึ่งมีรูปแบบดังสมการ (14)

$$\text{Slope} = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4} \quad (14)$$

การวิเคราะห์การหดตัว

การหดตัว (shrinkage) ของตัวอย่างจะแสดงอยู่ในรูปของร้อยละการหดตัว หรือการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างภายหลังการทำแห้งเปรียบเทียบกับปริมาตรของตัวอย่างก่อนการทำแห้งดังสมการ (15) โดยขนาดของตัวอย่าง (ความกว้าง ความยาว และความหนา) ก่อนและหลังการทำแห้งจะถูกวัดด้วยเวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Mitutoyo, series No. 522, Japan) อย่างน้อย 3 ซ้ำในแต่ละด้านของตัวอย่าง

$$S = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100\% \quad (15)$$

เมื่อ S คือ ร้อยละการหดตัวของตัวอย่าง (%) V_0 คือ ปริมาตรของตัวอย่างก่อนการทำแห้ง (m^3) และ V คือ ปริมาตรของตัวอย่างหลังการทำแห้ง (m^3)

การวิเคราะห์ค่าสี

การเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างก่อนและหลังการทำแห้งจะทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Hunter Lab (Miniscan XE plus) ก่อนทำการวัดสีตัวอย่าง เครื่อง Hunter Lab จะต้องผ่านการปรับเทียบ (calibration) ด้วยแผ่นสีมาตรฐานทั้งสีดำและสีขาว โดยการวัดสีของตัวอย่างจะทำการวัดอย่างน้อย 3 ซ้ำ ในแต่ละชิ้นของตัวอย่าง และค่าสีที่ได้จะแสดงเป็นค่าเฉลี่ยของ ΔL^* Δa^* และ Δb^*

นอกจากนี้ยังได้พิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมดของตัวอย่าง (ΔE^*) ซึ่งมีรูปแบบความสัมพันธ์ดังสมการ (16)

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (16)$$

เมื่อ ΔE^* คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมดของตัวอย่าง (-) $\Delta L^* = L^* - L_0^*$ $\Delta a^* = a^* - a_0^*$ $\Delta b^* = b^* - b_0^*$ โดย L_0^* a_0^* และ b_0^* คือ ค่าสีของตัวอย่างก่อนการทำแห้ง และ L^* a^* และ b^* คือ ค่าสีของตัวอย่างหลังการทำแห้ง (-)

Computer vision system

การประยุกต์ใช้ CVS ในระหว่างกระบวนการทำแห้งจะสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงขนาดและสีของตัวอย่างในระหว่างกระบวนการทำแห้ง ซึ่งจะใช้ศึกษาในหัวข้อ “ผลของการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนต่อการหดตัวและการเปลี่ยนแปลงสีในระหว่างกระบวนการทำแห้ง”

การวิเคราะห์การหดตัวเชิงพื้นที่

การวิเคราะห์การหดตัวเชิงพื้นที่ของตัวอย่างในระหว่างกระบวนการทำแห้งสามารถทำได้โดยการประยุกต์ใช้ CVS โดยอาศัยวิธีการนับจำนวนพิกเซล (pixel) จากภาพตัวอย่าง ซึ่งภาพของตัวอย่างที่ได้มาในระหว่างกระบวนการทำแห้งจะถูกบันทึกเป็นไฟล์ JPEG หลังจากนั้นจะทำการแยกภาพของตัวอย่างและพื้นหลังออกจากกันด้วยวิธี thresholding-based method (Otsu, 1979) หลังจากนั้นจึงทำการนับจำนวน pixel ทั้งหมดของชิ้นตัวอย่าง โดยกระบวนการทั้งหมดนี้จะดำเนินการผ่านทาง software ที่พัฒนาขึ้น

สำหรับจำนวน pixel จากภาพของตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้จะถูกนำมาเปลี่ยนให้เป็นพื้นที่ในหน่วยตารางเมตร (m^2) ด้วยวิธีการปรับเทียบกับภาพมาตรฐาน ซึ่งวิธีการนี้จะใช้ภาพสี่เหลี่ยมจตุรัสสีขาวที่มีขนาดแตกต่างกัน 5 ขนาด คือ 0.5 × 0.5 1.0 × 1.0 1.5 × 1.5 2.0 × 2.0 และ 2.5 × 2.5 cm^2 (กว้าง × ยาว) ที่อยู่บนพื้นหลังสีดำมาเป็นภาพมาตรฐาน โดยภาพมาตรฐานเหล่านี้จะถูกวาดขึ้นด้วยโปรแกรม computer aided design (CAD) และจัดพิมพ์ออกมา (Fuji Xerox DocuPrint C2200, Japan) ภาพมาตรฐานจะถูกนำไปวางบนถาดในอุปกรณ์การทำแห้ง หลังจากนั้นจะทำการถ่ายภาพ และวิเคราะห์จำนวน pixel ของภาพด้วย CVS จำนวน 3 ซ้ำในแต่ละขนาดของภาพมาตรฐาน ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน pixel และขนาดของภาพมาตรฐานจะสามารถแสดงแบบจำลองการถดถอย (regression model) ดังสมการ (17) สำหรับวิธีการปรับเทียบนี้ดัดแปลงมาจากวิธีของ Sampson และคณะ (2014)

$$A = \left(6.8150 \times 10^{-6}\right) \times N \quad (17)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ของตัวอย่าง (m^2) และ N คือ จำนวน pixel ของภาพตัวอย่าง (-)

จากแบบจำลองการถดถอยในสมการ (17) จะสามารถเปลี่ยนจำนวน pixel จากภาพถ่ายของตัวอย่างในระหว่างกระบวนการทำแห้งให้เป็นพื้นที่ได้ ดังนั้นร้อยละการหดตัวเชิงพื้นที่ของตัวอย่างจะสามารถคำนวณได้จากสมการ (18)

$$S_A = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100\% \quad (18)$$

เมื่อ S_A คือ ร้อยละการหดตัวเชิงพื้นที่ของตัวอย่าง (%) A_0 คือ พื้นที่ของตัวอย่างก่อนการทำแห้ง (m^2) และ A_t คือ พื้นที่ของตัวอย่างที่เวลาใดๆ ในระหว่างกระบวนการทำแห้ง (m^2)

การวิเคราะห์ค่าสี

การวิเคราะห์ค่าสีของตัวอย่างในระหว่างกระบวนการทำแห้งสามารถทำได้โดยการประยุกต์ใช้ CVS โดยอาศัยการอ่านค่าสีจาก pixel ทั้งหมดจากภาพตัวอย่าง ซึ่งภาพของตัวอย่างที่ได้มาในระหว่างกระบวนการทำแห้งจะถูกบันทึกเป็นไฟล์ JPEG จากนั้นจะทำการแยกภาพของตัวอย่างและพื้นหลังออกจากกันด้วยวิธี thresholding-based method (Otsu, 1979) หลังจากนั้นจึงทำการอ่านค่าสีจาก pixel ทั้งหมดของชิ้นตัวอย่าง อย่างไรก็ตามค่าสีที่อ่านได้จาก pixel จะแสดงอยู่ในรูปของ RGB space ซึ่งในการศึกษาครั้งจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างในรูปของ L*a*b* space ดังนั้นค่าสีในรูปของ RGB space จึงถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ L*a*b* space ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

1. เปลี่ยนจาก RGB space เป็น XYZ space โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้ (Hunt, 1991)

$$X = k_1R + k_2G + k_3B \quad (19)$$

$$Y = k_4R + k_5G + k_6B \quad (20)$$

$$Z = k_7R + k_8G + k_9B \quad (21)$$

เมื่อ R G และ B คือ ค่าเฉลี่ยของ R G และ B ที่ได้จากภาพตัวอย่าง ตามลำดับ X Y และ Z คือ the tri-stimulus values in CIE 1931 XYZ color space และ k_1 ถึง k_9 คือ the standard coefficients ("International Telecommunication Union," 2002)

2. เปลี่ยนจาก XYZ space เป็น L*a*b* space โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$L^* = 116\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - 16 \qquad \text{เมื่อ } \left(\frac{Y}{Y_n}\right) > 0.00856$$

$$L^* = 116\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} \qquad \text{เมื่อ } \left(\frac{Y}{Y_n}\right) < 0.00856 \tag{22}$$

$$a^* = 500\left[\left(\frac{X}{X_n}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}}\right] \tag{23}$$

$$b^* = 200\left[\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{\frac{1}{3}}\right] \tag{24}$$

เมื่อ X_n Y_n และ Z_n คือ ค่า X Y และ Z ของ the European Broadcasting Union with reference white at D65 illumination โดยมีค่าเท่ากับ 0.95 1.0 และ 1.08 ตามลำดับ (Nobbs และ Connolly, 2000)

โดยกระบวนการเปลี่ยนค่าสีในรูปของ RGB space ให้อยู่ในรูปของ L*a*b* space ทั้งหมดนี้จะดำเนินการผ่านทาง software ที่พัฒนาขึ้น

นอกจากนี้ค่าสีของตัวอย่างที่ได้จาก CVS จะต้องนำมาปรับเทียบกับค่าสีมาตรฐานที่ได้จากเครื่อง Hunter Lab (Miniscan XE plus) โดยวิธีการนี้จะใช้กระดาษสีจำนวน 10 สีนำมาวัดค่าสีด้วยเครื่อง Hunter Lab และ CVS จากนั้นสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีที่ได้ ซึ่งจะสามารถแสดงแบบจำลองการถดถอยดังสมการต่อไปนี้ โดยทำการวัดค่า 3 ซ้ำในแต่ละสีมาตรฐาน สำหรับวิธีการปรับเทียบนี้ดัดแปลงมาจากวิธีของ León และคณะ (2006)

$$L^* = \left(1.3914 \times L_c^*\right) - 44.1107 \tag{25}$$

$$a^* = \left(-1.0968 \times a_c^*\right) - 10.3689 \tag{26}$$

$$b^* = \left(1.2637 \times b_c^*\right) + 16.9422 \tag{27}$$

เมื่อ L_c^* a_c^* และ b_c^* คือ ค่า L^* a^* และ b^* ที่ได้จาก CVS

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาค (microstructure) ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งจะถูกวิเคราะห์ด้วย field emission scanning electron microscope (FE-SEM, Tescan Mira 3, Czech) โดยตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งจะถูกหั่นเป็นแผ่นให้มีความหนาประมาณ 3.0 mm หลังจากนั้นจะวางลงบน SEM holder และทำการเคลือบทองตัวอย่าง ภาพถ่ายของตัวอย่างจะถูกถ่ายที่กำลังขยาย 500 เท่า (500 × magnification) ที่แรงดันไฟฟ้า 5 kV

การวิเคราะห์การคืนน้ำ

การวิเคราะห์การคืนน้ำ (rehydration) ของตัวอย่างสามารถทำได้โดยการจุ่มตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งลงในบิกเกอร์ขนาด 500 ml ที่มีน้ำกลั่นปริมาตร 250 ml บรรจุอยู่ โดยบิกเกอร์จะวางลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C และตัวอย่างจะถูกนำออกมาจากบิกเกอร์เพื่อชั่งน้ำหนักทุกๆ 10 นาที ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Sartorius, Entris) ก่อนการชั่งน้ำหนักตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกซับน้ำส่วนเกินที่ผิวของตัวอย่างออกด้วยกระดาษชำระ หลังจากชั่งน้ำหนักเสร็จตัวอย่างจะถูกนำกลับลงในบิกเกอร์เดิม และทำซ้ำจนกว่าน้ำหนักของตัวอย่างจะคงที่ ทำการวิเคราะห์การคืนน้ำจำนวน 3 ซ้ำ ในแต่ละสภาวะการทดลอง สำหรับค่าการคืนน้ำจะแสดงได้ด้วยอัตราส่วนการคืนน้ำ (rehydration ratio, *RR*) ดังสมการ (28) (Marabi และ Saguy, 2004)

$$RR = \frac{X_{r,t} - X_{r,i}}{X_{r,eq} - X_{r,i}} \tag{28}$$

เมื่อ *RR* คือ อัตราส่วนการคืนน้ำ (-) $X_{r,t}$ คือ ความชื้นของตัวอย่างที่ผ่านการคืนน้ำที่เวลาใดๆ (kg water / kg dry matter) $X_{r,i}$ คือ ความชื้นของตัวอย่างก่อนการคืนน้ำ (kg water / kg dry matter) และ $X_{r,eq}$ คือ ความชื้นสมดุลของตัวอย่างในระหว่างกระบวนการคืนน้ำ (kg water / kg dry matter)

สำหรับพฤติกรรมการคืนน้ำซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง *RR* และเวลาในการคืนน้ำสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการคืนน้ำต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2 และเพื่อที่จะหาค่าที่เหมาะสมของค่าคงที่ในแบบจำลองการคืนน้ำจึงจำเป็นต้องสร้างความสอดคล้องระหว่างผลของแบบจำลองกับผลการทดลองด้วยวิธีการลดค่า *SSE* ในสมการ (5) ลงให้มีค่าต่ำที่สุด สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเส้นตรงนั้นจะอาศัยโปรแกรม R (R-3.6.2 for Windows) และการบ่งชี้ความสอดคล้องของแบบจำลองกับผลการทดลองจะอาศัยพารามิเตอร์ทางสถิติ คือ R^2 *RMSE* และ χ^2 ดังแสดงในสมการ (6) ถึง (8) ตามลำดับ

ตารางที่ 2 แบบจำลองสำหรับการคืนน้ำ

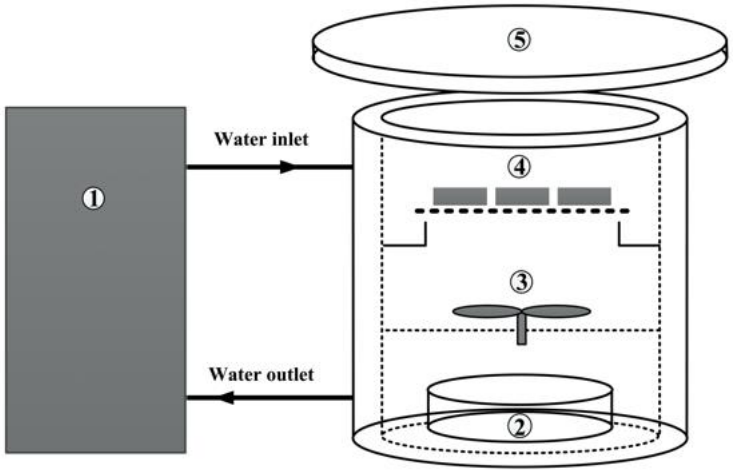
No.	แบบจำลอง	สมการ	อ้างอิง
[6]	first order	$RR = 1 - \exp(-Kt_r)$	M. K. Krokida และ Marinos-Kouris (2003)
[7]	Weibull	$RR = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t_r}{\beta}\right)^{\alpha}\right)$	García-Pascual และคณะ (2006)
[8]	Peleg	$RR = \frac{1}{X_{r,eq} - X_d} \times \frac{1}{(K_1 + K_2 t_r)}$	Peleg (1988)

เมื่อ t_r คือ เวลาในการคืนน้ำ (s) และ α β K K_1 และ K_2 คือ ค่าคงที่ของแบบจำลอง

การวิเคราะห์สมบัติทางอุณหพลศาสตร์

sorption isotherm

sorption isotherm ของตัวอย่างสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธี static-gravimetric (Rahman 1995; Rockland และ Beuchat, 1987) ซึ่งเป็นการหาสภาวะที่ตัวอย่างมีความชื้นสมดุลกับสภาวะของระบบที่สร้างขึ้นจากสารละลายเกลืออิ่มตัว 10 ชนิด ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 °C สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา sorption isotherm ของตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 11 ซึ่งจะประกอบไปด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Polyscience, USA) ถ้วยแก้วสำหรับใส่สารละลายเกลืออิ่มตัว พัดลม ถาดใส่ตัวอย่าง และห้องใส่ตัวอย่าง โดยถาดใส่ตัวอย่างทำมาจากวัสดุ poly (tetrafluroethylene) ที่เป็นตาข่ายรูปร่างเป็นวงกลามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 cm สำหรับห้องใส่ตัวอย่างจะใช้วัสดุสแตนเลสสตีลทรงกระบอกจำนวน 2 ชิ้น ซึ่งทรงกระบอกวงนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 15 cm ในขณะที่ทรงกระบอกวงในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 cm สูง 15 cm มาวางซ้อนกันโดยอาศัยจุดศูนย์กลางเดียวกัน สำหรับช่องว่างระหว่างทรงกระบอกทั้งสองมีไว้สำหรับควบคุมอุณหภูมิห้องใส่ตัวอย่างโดยอาศัยน้ำจากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งช่องวางระหว่างทรงกระบอกทั้งสองถูกเชื่อมต่อกันด้วยแผ่น stainless steel



ภาพที่ 11 อุปกรณ์การศึกษา sorption isotherm ประกอบด้วย (1) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (2) ถ้วยแก้วสำหรับใส่สารละลายเกลืออิ่มตัว (3) พัดลม (4) ถาดใส่ตัวอย่าง และ (5) ฝาปิดห้องใส่ตัวอย่าง

สำหรับสารละลายเกลืออิ่มตัวที่ต่างชนิดกันจะมีค่า A_w ที่แตกต่างกันในแต่ละอุณหภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 water activity ของสารละลายเกลืออิ่มตัวชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50°C

เกลือ	อุณหภูมิ (°C)		
	30	40	50
NaOH	0.069	0.066	0.059
LiCl	0.112	0.111	0.110
CH_3COOK	0.223	0.206	0.189
$MgCl_2$	0.324	0.319	0.314
K_2CO_3	0.439	0.432	0.432
$Mg(NO_3)_2$	0.526	0.506	0.489
$NaNO_2$	0.635	0.615	0.599
NaCl	0.756	0.753	0.746
KCl	0.835	0.820	0.809
$BaCl_2$	0.900	0.893	0.884

ที่มา: Labuza และคณะ (1985); Young (1967)

สำหรับการศึกษา sorption isotherm สามารถทำได้โดยสุ่มตัวอย่างจำนวน 3 ชิ้น ใส่ลงในอุปกรณ์สำหรับหา sorption isotherm ที่บรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัวและมีการควบคุมอุณหภูมิ โดยรอจนกระทั่งตัวอย่างเกิดสมดุลทางความชื้นกับสารละลายเกลืออิ่มตัว จากนั้นทำการหาปริมาณความชื้นของตัวอย่างโดยอาศัยวิธีมาตรฐาน AOAC (AOAC, 2005) ซึ่งลักษณะของ sorption isotherm ของตัวอย่างสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4 และเพื่อที่จะหาค่าที่เหมาะสมของค่าคงที่ในแบบจำลอง sorption isotherm จึงจำเป็นต้องสร้างความสอดคล้องระหว่างผลของแบบจำลองกับผลการทดลองด้วยวิธีการลดค่า *SSE* ในสมการ (5) ลงให้มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งในการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเส้นตรงนั้นจะอาศัยโปรแกรม R (R-3.6.2 for Windows) และสำหรับการบ่งชี้ความสอดคล้องของแบบจำลองกับผลการทดลองจะอาศัยพารามิเตอร์ทางสถิติ คือ R^2 *RMSE* และ χ^2 ดังแสดงในสมการ (6) ถึง (8) ตามลำดับ

ตารางที่ 4 แบบจำลองสำหรับ sorption isotherm

No.	แบบจำลอง	สมการ	อ้างอิง
[9]	BET	$X = \frac{X_m C A_w}{\left[\left(1 - A_w\right)\left(1 - A_w + CA_w\right)\right]}$	Brunauer และคณะ (1938)
[10]	GAB	$X = \frac{X_m C K A_w}{\left[\left(1 - KA_w\right)\left(1 - KA_w + CKA_w\right)\right]}$	Van der berg และ Bruin (1981)
[11]	Oswin	$X = A\left[\frac{A_w}{\left(1 - A_w\right)}\right]^B$	Oswin (1946)
[12]	Halsey	$X = \left[\frac{-A}{\ln\left(A_w\right)}\right]^{\frac{1}{B}}$	Halsey (1948)

เมื่อ X_m คือ ปริมาณความชื้นที่ monolayer (kg water / kg dry matter) A_w คือ water activity และ *A B C* และ *K* คือ ค่าคงที่ของแบบจำลอง

net isosteric heat of sorption

net isosteric heat of sorption (q_{st}) สามารถคำนวณหาได้จากข้อมูลของ moisture sorption ซึ่งมีรูปแบบความสัมพันธ์มาจากสมการ Clausius-Clapeyron ดังแสดงในสมการ (29)

$$q_{st} = -R\left[\frac{d\left(\ln\left(A_w\right)\right)}{d\left(1/T\right)}\right]_X \quad (29)$$

เมื่อ q_{st} คือ net isosteric heat of sorption (kJ/mol) R คือ ค่าคงที่สากลของแก๊ส (8.314 J/mol·K) และ T คือ อุณหภูมิ (K)

จากสมการ (29) สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(A_w)$ และ $1/T$ ที่ปริมาณความชื้นสมดุลคงที่ค่าหนึ่ง โดยจากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาค่า q_{st} ได้จากค่าความชันของกราฟ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $-q_{st}/R$ (Kiranoudis และคณะ, 1993; Tsami, 1991) โดยวิธีการนี้ได้มีการตั้งข้อสมมติให้ค่า q_{st} มีค่าคงที่ในทุกๆ อุณหภูมิ และจำเป็นต้องทำการศึกษา sorption isotherm ที่สองอุณหภูมิขึ้นไป (H.A. Iglesias และ J. Chirife, 1976)

differential entropy

differential entropy (ΔS) สามารถคำนวณหาได้จากจุดตัดแกนตั้ง (intercept) ของกราฟ (Aguerre และคณะ, 1986) ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(A_w)$ และ $1/T$ ดังแสดงในสมการ (30)

$$\ln\left(A_w\right) = \frac{q_{st}}{RT} - \frac{\Delta S}{R} \quad (30)$$

เมื่อ ΔS คือ differential entropy (J/mol·K)

enthalpy-entropy compensation theory

enthalpy-entropy compensation เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง q_{st} และ ΔS ที่ค่าความชื้นสมดุลของตัวอย่างเท่ากัน (McLaughlin และ Magee, 1998) ดังแสดงในสมการ (31) โดย T_β และ α สามารถหาค่าได้จากค่าความชันของเส้นตรง และค่าจุดตัดแกนตั้งของกราฟ ตามลำดับ

$$q_{st} = T\beta\Delta S + \alpha \quad (31)$$

เมื่อ T_β คือ isokinetic temperature (K) และ α คือ พลังงานอิสระ

Krug และคณะ (1976) ได้ทำการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการยืนยัน compensation theory ด้วย harmonic mean temperature (T_{hm}) ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$T_{hm} = \frac{n}{\sum_1^n \frac{1}{T}} \quad (32)$$

เมื่อ T_{hm} คือ harmonic mean temperature (K) และ n คือ จำนวน sorption isotherm ที่นำมาใช้ในการคำนวณ

Compensation theory จะนำมาใช้ก็ต่อเมื่อ $T_\beta \neq T_{hm}$ โดยเมื่อ $T_\beta > T_{hm}$ จะแสดงถึงกระบวนการจะถูกควบคุมด้วย enthalpy ในทางตรงกันข้าม ถ้า $T_\beta < T_{hm}$ จะแสดงถึงกระบวนการจะถูกควบคุมด้วย entropy (Leffer และ Grunwald, 1963)

การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ทางสถิติจะทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (one-way ANOVA) สำหรับวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามต่างๆ นอกจากนี้ยังทำการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยในแต่ละคู่ของแต่ละตัวแปรตามด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยอาศัย SPSS software v.18 ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำในทุกๆ การทดลอง

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษาเบื้องต้น: การทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะไม่คงที่

สภาวะการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่

สำหรับในการทดลองนี้ได้ศึกษาผลของการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่ โดยสภาวะการทำแห้งทั้งหมดจะใช้ความเร็วลมที่ 1.5 m/s สำหรับการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่จะทำการศึกษาผลของอุณหภูมิลมร้อนที่แตกต่างกัน คือ 50 60 และ 70°C และสำหรับการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะไม่คงที่ จะทำการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50°C และทำการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนขึ้น (pulse amplitude, A_p) ตามที่กำหนด คือ 60 และ 70°C หลังจากอุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้นตามที่กำหนดจะทำการลดอุณหภูมิลมร้อนลงมาที่ 50°C โดยความถี่ระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิ (pulse frequency, F_p) จะถูกกำหนดไว้ที่ 0.100 (10 นาที) และ 0.067 (15 นาที) นาที$^{-1}$ ซึ่งสภาวะการทำแห้งทั้งหมดสำหรับการทดลองนี้แสดงอยู่ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สภาวะการทำแห้งต่างๆ ที่ความเร็วลม 1.5 m/s

สภาวะการทำแห้ง	อุณหภูมิลม (°C)	A_p (°C)	F_p (นาที$^{-1}$)
T50	50	-	-
T60	60	-	-
T70	70	-	-
T50/60f10	50	60	0.100
T50/60f15	50	60	0.067
T50/70f10	50	70	0.100
T50/70f15	50	70	0.067

จลนพลศาสตร์การทำแห้งด้วยลมร้อน

แบบจำลอง Lewis แบบจำลอง Page แบบจำลอง Henderson and Pabis และแบบจำลอง Logarithmic เป็นแบบจำลองที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวเลือกในการอธิบายพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่ ซึ่งการเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับนำมาใช้ในการศึกษานี้ทำได้โดยอาศัยตัวบ่งชี้ทางสถิติ คือ R^2 *RMSE* และ χ^2 โดยแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด

จะต้องมีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า *RMSE* และ χ^2 ต่ำที่สุด ซึ่งค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 6 พบว่าแบบจำลองการทำแห้งทั้งหมดให้มีค่า R^2 สูง โดยอยู่ในช่วง 0.9656 ถึง 0.9744 สำหรับแบบจำลอง Page มีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า *RMSE* และ χ^2 ต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองการทำแห้งอื่นๆ ในเกือบทุกสภาวะการทดลอง ดังนั้นแบบจำลอง Page จึงได้ถูกเลือก และนำมาใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่สำหรับในการศึกษานี้

ตารางที่ 6 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่ที่สภาวะต่างๆ

สภาวะการทำแห้ง	No.	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R^2	*RMSE*	χ^2
T50	[1]	$k = 9.4171\times10^{-5}$	0.9674	4.6095×10^{-2}	2.1295×10^{-3}
	[2]	$k = 9.0425\times10^{-5}$, $n = 1.0437$	0.9674	**4.6070×10^{-2}**	**2.1273×10^{-3}**
	[3]	$a = 1.0061$, $k = 9.4748\times10^{-5}$	0.9674	4.6091×10^{-2}	2.1279×10^{-3}
	[4]	$a = 1.0062$, $k = 9.4585\times10^{-5}$, $c = -4.7429\times10^{-4}$	0.9674	4.6074×10^{-2}	2.1301×10^{-3}
T60	[1]	$k = 1.2008\times10^{-4}$	0.9726	3.1280×10^{-2}	9.8087×10^{-4}
	[2]	$k = 1.0924\times10^{-4}$, n = 1.0102	0.9726	**3.1273×10^{-2}**	**9.7984×10^{-4}**
	[3]	$a = 0.9991$, $k = 1.1997\times10^{-4}$	0.9726	3.1280×10^{-2}	9.8125×10^{-4}
	[4]	$a = 0.9992$, $k = 1.1959\times10^{-4}$, $c = -8.4642\times10^{-4}$	0.9726	3.1278×10^{-2}	9.8270×10^{-4}
T70	[1]	$k = 1.3754\times10^{-4}$	0.9736	2.4343×10^{-2}	5.9310×10^{-4}
	[2]	$k = 1.2719\times10^{-4}$, $n = 1.0086$	**0.9744**	**2.3984×10^{-2}**	**5.7679×10^{-4}**
	[3]	$a = 1.0037$, $k = 1.3804\times10^{-4}$	0.9687	2.7325×10^{-2}	6.4449×10^{-4}
	[4]	$a = 1.0037$, $k = 1.3795\times10^{-4}$, $c = 1.7737\times10^{-4}$	0.9740	2.4159×10^{-2}	5.8472×10^{-4}
T50/60f10	[1]	$k = 1.1211\times10^{-4}$	0.9663	4.4783×10^{-2}	2.0079×10^{-3}
	[2]	$k = 1.3148\times10^{-4}$, $n = 0.9829$	0.9663	**4.4724×10^{-2}**	**2.0050×10^{-3}**
	[3]	$a = 0.9995$, $k = 1.1206\times10^{-4}$	0.9663	4.4782×10^{-2}	2.0103×10^{-3}
	[4]	$a = 0.9995$, $k = 1.1250\times10^{-4}$, $c = 1.0169\times10^{-3}$	0.9663	4.4747×10^{-2}	2.0095×10^{-3}
T50/60f15	[1]	$k = 1.0133\times10^{-4}$	0.9687	4.4114×10^{-2}	1.9495×10^{-3}
	[2]	$k = 1.0929\times10^{-4}$, $n = 0.9920$	0.9687	**4.4100×10^{-2}**	**1.9484×10^{-3}**
	[3]	$a = 0.9992$, $k = 1.0125\times10^{-4}$	0.9687	4.4114×10^{-2}	1.9507×10^{-3}
	[4]	$a = 0.9992$, $k = 1.0137\times10^{-4}$, $c = 3.1187\times10^{-4}$	0.9687	4.4108×10^{-2}	1.9526×10^{-3}

ตัวอักษรหนาแสดงถึงค่า R^2 ที่สูงที่สุด และค่า *RMSE* และ χ^2 ที่ต่ำที่สุดในแต่ละสภาวะการทำแห้ง

ตารางที่ 6 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่ ที่สภาวะต่างๆ (ต่อ)

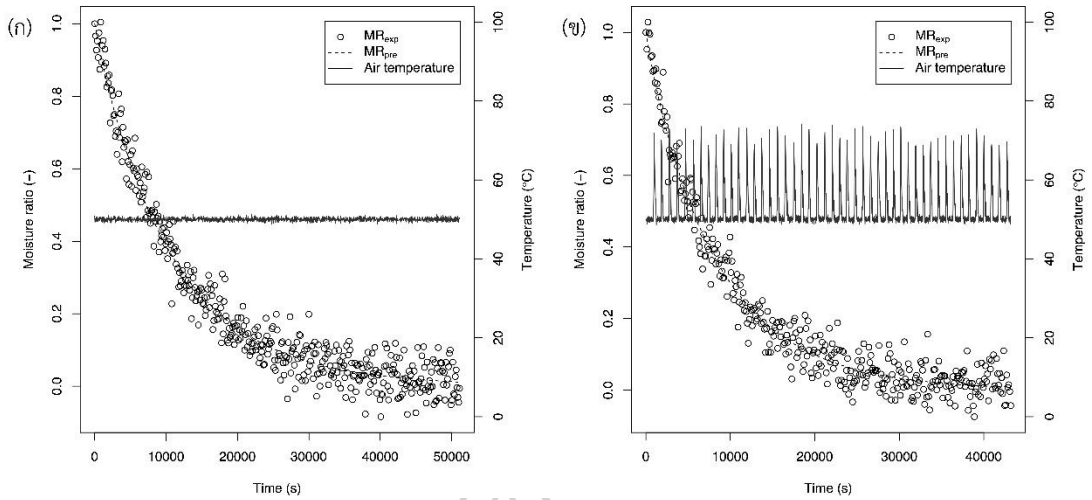
สภาวะการทำแห้ง	No.	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R^2	*RMSE*	χ^2
T50/70f10	[1]	$k = 1.1873\times10^{-4}$	0.9660	4.4471×10^{-2}	1.9824×10^{-3}
	[2]	$k = 1.2142\times10^{-4}$, $n = 0.9976$	0.9660	**4.4461×10^{-2}**	**1.9801×10^{-3}**
	[3]	$a = 1.0011$, $k = 1.1886\times10^{-4}$	0.9660	4.4470×10^{-2}	1.9824×10^{-3}
	[4]	$a = 1.0011$, $k = 1.1921\times10^{-4}$, $c = 7.4672\times10^{-4}$	0.9660	4.4461×10^{-2}	1.9839×10^{-3}
T50/70f15	[1]	$k = 1.1500\times10^{-4}$	0.9656	4.4814×10^{-2}	2.0107×10^{-3}
	[2]	$k = 1.2638\times10^{-4}$, $n = 0.9899$	0.9656	**4.4745×10^{-2}**	**2.0070×10^{-3}**
	[3]	$a = 0.9883$, $k = 1.1365\times10^{-4}$	0.9656	4.4795×10^{-2}	2.0114×10^{-3}
	[4]	$a = 0.9882$, $k = 1.1388\times10^{-4}$, $c = 5.3798\times10^{-4}$	0.9656	4.4746×10^{-2}	2.0094×10^{-3}

ตัวอักษรหนาแสดงถึงค่า R^2 ที่สูงที่สุด และค่า *RMSE* และ χ^2 ที่ต่ำที่สุดในแต่ละสภาวะการทำแห้ง

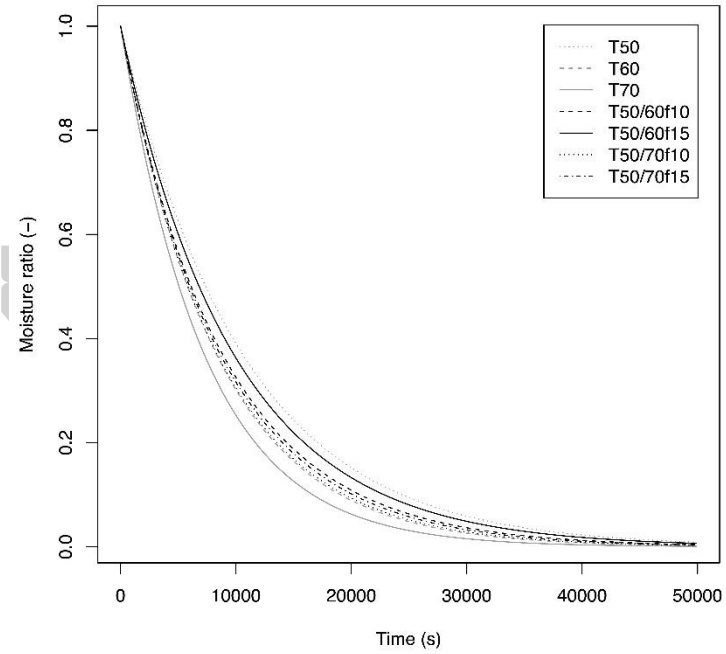
พฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุก

ภาพที่ 12 แสดงตัวอย่างกราฟการทำแห้ง และรูปแบบของอุณหภูมิลมร้อนในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 50°C (ภาพที่ 12 (ก)) และในสภาวะไม่คงที่ที่ A_p เท่ากับ 70°C และ F_p เท่ากับ 0.100 นาที$^{-1}$ (ภาพที่ 12 (ข)) โดยจะเห็นได้ว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะไม่คงที่จะมีการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนขึ้นไปที่ 70°C หลังจากนั้นจะทำการลดอุณหภูมิลมร้อนลงมาที่ 50°C ตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ ในขณะที่การทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่อุณหภูมิของลมร้อนจะถูกกำหนดให้คงที่ตามสภาวะที่กำหนด

โดยกราฟการทำแห้งของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่ ที่สภาวะต่างๆ แสดงในภาพที่ 13 พบว่าอัตราส่วนความชื้นของตัวอย่างจะมีค่าลดลงแบบเอกซ์โพนเนนเชียล (exponential decay) กับเวลาการทำแห้ง นอกจากนี้เวลาในการทำแห้งของการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่จะมีค่าลดลง 26 และ 39% เมื่ออุณหภูมิลมร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 50 เป็น 60°C และจาก 50 เป็น 70°C ตามลำดับ นอกจากนี้การทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะไม่คงที่ ที่ A_p เท่ากับ 70°C และ F_p เท่ากับ 0.100 นาที$^{-1}$ จะสามารถลดระยะเวลาในการทำแห้งได้ถึง 21% เมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 50°C จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการระเหยน้ำของชิ้นตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิของชิ้นตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (Zhu และ Shen, 2014)



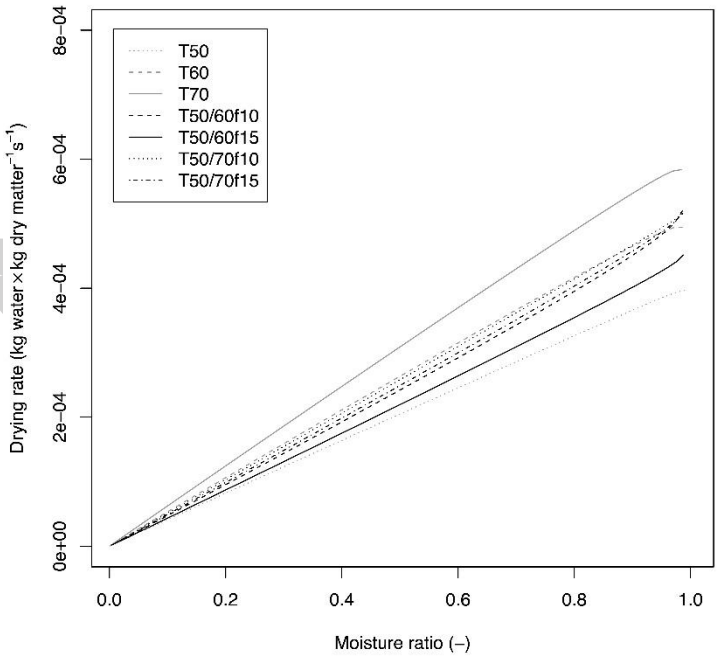
ภาพที่ 12 กราฟการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อน (ก) ในสภาวะคงที่ และ (ข) ในสภาวะไม่คงที่



ภาพที่ 13 กราฟการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่ ที่สภาวะต่างๆ

อัตราการทำแห้งมะม่วงสุก

ภาพที่ 14 แสดงอัตราการทำแห้งของตัวอย่างในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่ ที่สภาวะต่างๆ พบว่าอัตราการทำแห้งจะมีค่าลดลงแบบเชิงเส้นเมื่อปริมาณความชื้นของตัวอย่างมีค่าลดลงในทุกๆ สภาวะการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำมะม่วงสุกด้วยลมร้อนทั้งในสภาวะคงที่และไม่คงที่จะพบเฉพาะช่วงอัตราการทำแห้งลดลง (falling rate period) ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยในการทำแห้งผักและผลไม้ก่อนหน้านี้ (Lee และ Kim, 2009; Sobukola และคณะ, 2008; Yaldýz และ Ertekýn, 2001) โดยการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 70°C จะมีอัตราการทำแห้งสูงที่สุด ในขณะที่การทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 50°C จะมีอัตราการทำแห้งต่ำที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจะช่วยเพิ่มอัตราการทำแห้งให้สูงขึ้น นอกจากนี้การทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะไม่คงที่ ที่ A_p เท่ากับ 70°C และ F_p เท่ากับ 0.100 นาที$^{-1}$ จะมีอัตราการทำแห้งสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งในสภาวะไม่คงที่ ที่สภาวะต่างๆ ซึ่งการเพิ่ม A_p และ F_p จะส่งผลให้อัตราการทำแห้งของตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 14 กราฟอัตราการทำแห้งของมะม่วงสุกในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่ ที่สภาวะต่างๆ

สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลและดัชนีการเพิ่มประสิทธิภาพ

ตารางที่ 7 แสดงค่า D_{eff} สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่ ที่สภาวะต่างๆ โดย D_{eff} เป็นพารามิเตอร์สำหรับแสดงประสิทธิภาพในการทำแห้ง พบว่าค่า D_{eff} ของการทำแห้งในสภาวะคงที่มีค่าอยู่ในช่วง (4.13 ถึง 6.68) × 10^{-9} m^2/s โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เมื่ออุณหภูมิลมร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยค่า D_{eff} ของการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่มีค่า สำหรับการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C จะมีค่า D_{eff} สูงที่สุด ในขณะที่การทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 50°C จะมีค่า D_{eff} ต่ำที่สุด นอกจากนี้การทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะไม่คงที่จะมีค่า D_{eff} อยู่ในช่วง (4.53 ถึง 5.64) × 10^{-9} m^2/s ซึ่งจะมีค่ามากกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 50°C อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ยกเว้นที่ A_p เท่ากับ 60°C และ F_p เท่ากับ 0.067 นาที$^{-1}$ สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Baini และ Langrish (2007) พบว่าการทำแห้งในสภาวะไม่คงที่ จะมีค่า D_{eff} สูงกว่าการทำแห้งในสภาวะคงที่ รวมถึงการเพิ่ม A_p และ F_p จะส่งผลให้ D_{eff} มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนในระหว่างกระบวนการทำแห้งจะส่งผลให้อุณหภูมิของชิ้นตัวอย่างเพิ่มขึ้น ดังนั้นอัตราการระเหยน้ำ และค่าความดันไอของชิ้นตัวอย่างจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (Hofsetz และคณะ, 2007)

นอกจากนี้ค่าดัชนีการเพิ่มประสิทธิภาพ (Enhancemnet index, *EI*) ของการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่แสดงอยู่ในตารางที่ 7 โดยค่า *EI* เป็นอัตราส่วนระหว่างค่า D_{eff} ของการทำแห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะต่างๆ ต่อค่า D_{eff} ของการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 50°C ดังนั้นค่า *EI* จึงสามารถแสดงถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 50°C จากผลการทดลองพบว่าค่า *EI* ของการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะไม่คงที่ ที่ A_p เท่ากับ 60°C และ F_p เท่ากับ 0.067 และ 0.100 นาที$^{-1}$ มีค่าเท่ากับ 1.10 และ 1.21 ตามลำดับ และสำหรับการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะไม่คงที่ ที่ A_p เท่ากับ 70°C และ F_p เท่ากับ 0.067 และ 0.100 นาที$^{-1}$ *EI* จะมีค่าเท่ากับ 1.23 และ 1.36 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะไม่คงที่ ที่ A_p เท่ากับ 70°C และ F_p เท่ากับ 0.100 นาที$^{-1}$ มีค่าใกล้เคียงกับการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิลมร้อน 60°C แต่ยังต่ำกว่าที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C

ตารางที่ 7 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) และดัชนีการเพิ่มประสิทธิภาพ (EI) ของกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนที่สภาวะต่างๆ

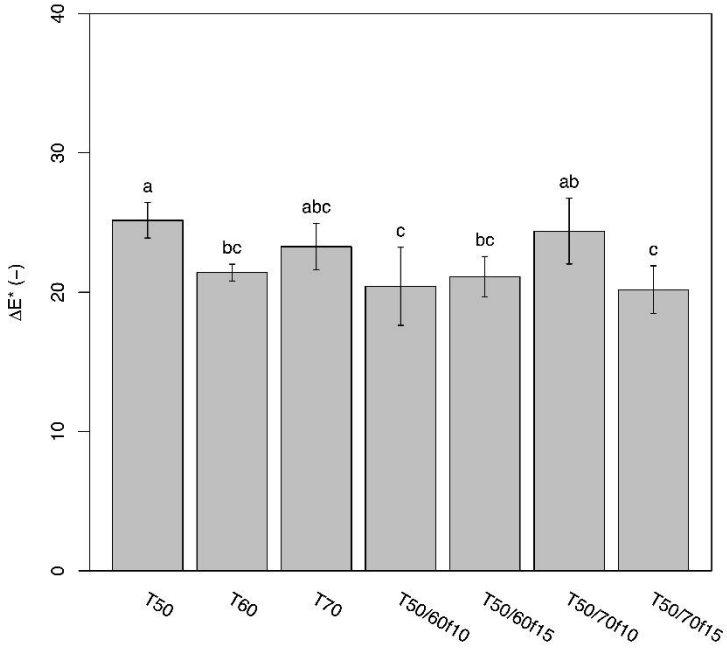
สภาวะการทำแห้ง	D_{eff} (m^2/s) × 10^9	*EI* (-)
T50	4.13 ± 0.12^{e}	-
T60	5.68 ± 0.24^{b}	1.37 ± 0.06
T70	6.68 ± 0.38^{a}	1.62 ± 0.09
T50/60f10	5.01 ± 0.17^{cd}	1.21 ± 0.04
T50/60f15	4.53 ± 0.20^{de}	1.10 ± 0.05
T50/70f10	5.64 ± 0.11^{b}	1.36 ± 0.03
T50/70f15	5.07 ± 0.11^{c}	1.23 ± 0.03

[a-e] ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

ค่าการเปลี่ยนสีทั้งหมดของมะม่วงสุก

ค่าการเปลี่ยนสีทั้งหมด (ΔE^*) ของตัวอย่างมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่ ที่สภาวะต่างๆ แสดงอยู่ในภาพที่ 15 สำหรับการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้นของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนโดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ และปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวของกับเอนไซม์ สำหรับปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์จะอาศัยเอนไซม์ polyphenol oxidase (PPO) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล โดยปฏิกิริยานี้จะสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิไม่เกิน 60°C ที่ค่า A_w สูง และจะส่งผลให้ตัวอย่างเกิดสีน้ำตาล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Park และคณะ, 1980) และสำหรับปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวของกับเอนไซม์สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่อุณหภูมิสูง และจะส่งผลให้ตัวอย่างเกิดสีน้ำตาลขึ้นในตัวอย่างเช่นเดียวกันกับปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (Garza และคณะ, 1999) จากผลการทดลองพบว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 50°C ส่งผลให้ตัวอย่างมีค่า ΔE^* มากที่สุด ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 70 และ 60°C จะมีค่า ΔE^* น้อยกว่าที่อุณหภูมิ 50°C ตามลำดับ อย่างไรก็ตามค่า ΔE^* ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 50 และ 70°C กลับไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้การทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะไม่คงที่จะส่งผลให้ ΔE^* ของตัวอย่างมีค่าน้อยกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 50°C อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ยกเว้นที่ A_p เท่ากับ 70°C และ F_p เท่ากับ 0.100

นาที$^{-1}$ เนื่องจากที่สภาวะดังกล่าวตัวอย่างจะได้รับความร้อนจากการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนที่สูงกว่าและมากกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะไม่คงที่ ที่สภาวะอื่นๆ อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะไม่คงที่ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีน้อยกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มและลดอุณหภูมิลมร้อนในระหว่างกระบวนการทำแห้ง

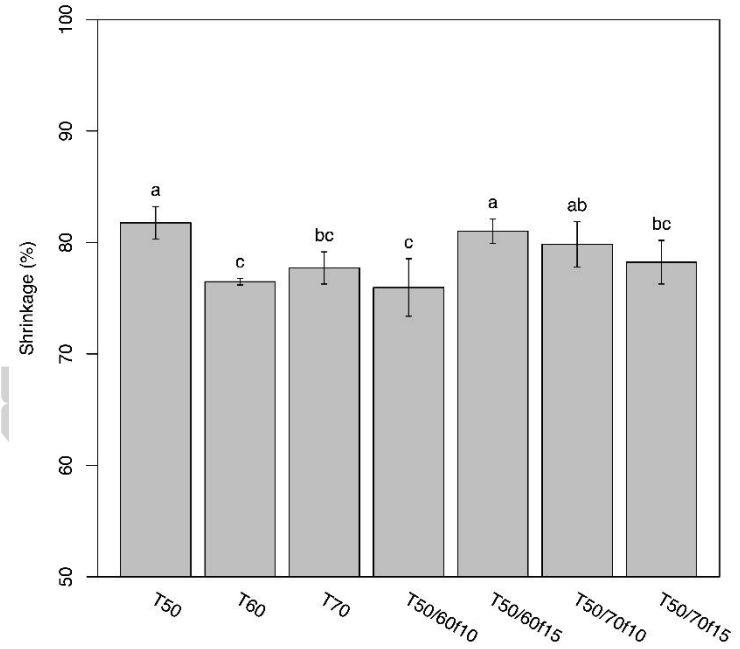


ภาพที่ 15 ค่าการเปลี่ยนสีทั้งหมดของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่ ที่สภาวะต่างๆ

ร้อยละการหดตัวของมะม่วงสุก

ภาพที่ 16 แสดงร้อยละการหดตัวของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่ ที่สภาวะต่างๆ พบว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 50°C ส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการหดตัวมากกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) อย่างไรก็ตามการหดตัวของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C กลับไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำจะส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการหดตัวมากกว่าที่อุณหภูมิสูง หรืออาจกล่าวได้ว่าการหดตัวของตัวอย่างจะลดลงเมื่ออัตราการทำแห้งของตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากระยะเวลาในการทำแห้งตัวอย่างที่แตกต่างกัน สำหรับการหดตัวของผลไม้ในระหว่างกระบวนการทำแห้งโดยส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับค่า T_g ของตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่มีค่า T_g ต่ำ หรือตัวอย่างที่อยู่ใน

สถานะคล้ายยางจะสามารถเกิดการหดตัวได้มากกว่าตัวอย่างที่มีค่า T_g สูง หรือตัวอย่างที่อยู่ในสถานะคล้ายแก้ว (Rahman, 2001) เนื่องจากในสถานะคล้ายยางโมเลกุลของตัวอย่างจะสามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย ตัวอย่างจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางด้านกายภาพ และทางด้านเคมีได้ง่าย (Roos, 2010) ดังนั้นกระบวนการทำแห้งที่มีอัตราการทำแห้งสูงจะส่งผลให้ตัวอย่างอยู่ในสถานะคล้ายยางในระยะเวลาที่สั้นกว่า การหดตัวของตัวอย่างจึงเกิดขึ้นได้น้อยกว่า นอกจากนี้ถ้าอัตราการทำแห้งมีค่าสูงมากจนส่งผลให้น้ำบริเวณที่ผิวหน้าของชิ้นตัวอย่างเกิดการระเหยอย่างรวดเร็ว ค่า T_g ที่ผิวของตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนนำไปสู่การเกิด case hardening ที่บริเวณผิวของตัวอย่าง และจะส่งผลให้การหดตัวของตัวอย่างเกิดการชะลอตัวลง (Mayor และ Sereno, 2004) ดังนั้นตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะไม่คงที่ จึงมีแนวโน้มการหดตัวน้อยกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 50°C



ภาพที่ 16 ร้อยละการหดตัวของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนในสภาวะคงที่และไม่คงที่ ที่สภาวะต่างๆ

การศึกษาเบื้องต้น: การทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุน

สำหรับในการทดลองนี้ได้ศึกษาผลของรูปแบบการไหล อุณหภูมิ และความเร็วลม โดยทำการศึกษาผลของรูปแบบการไหลของลมที่แตกต่างกัน คือ การไหลของลมแบบหมุน (swirling flow) และการไหลของลมแบบไม่หมุน (non-swirling flow) ที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C และความเร็วลมที่ 1.5 และ 2.0 m/s ต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้ง และการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่าง โดยรายละเอียดในการศึกษานี้แสดงในภาคผนวก Study on kinetics of flow characteristics in hot air drying of pineapple

ผลของการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนต่อการหดตัวและการเปลี่ยนแปลงสีในระหว่างกระบวนการทำแห้ง

สภาวะการทำแห้งด้วยลมร้อน

สำหรับในการทดลองนี้ได้ศึกษาผลของรูปแบบการไหล อุณหภูมิ และความเร็วลม โดยทำการศึกษารูปแบบการไหลของลมที่แตกต่างกัน คือ การไหลของลมแบบหมุนและแบบไม่หมุน ที่อุณหภูมิลมร้อนแตกต่างกัน คือ 50 60 และ 70°C และความเร็วลมที่แตกต่างกัน คือ 1.0 1.5 และ 2.0 m/s โดยสภาวะการทำแห้งทั้งหมดสำหรับการทดลองนี้แสดงอยู่ในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 สภาวะการทำแห้งด้วยลมร้อน

รูปแบบการไหลของลม	อุณหภูมิลมร้อน (°C)	ความเร็วลม (m/s)
แบบหมุน	50	1.0
แบบหมุน	50	1.5
แบบหมุน	50	2.0
แบบหมุน	60	1.0
แบบหมุน	60	1.5
แบบหมุน	60	2.0
แบบหมุน	70	1.0
แบบหมุน	70	1.5
แบบหมุน	70	2.0
แบบไม่หมุน	50	1.0
แบบไม่หมุน	50	1.5
แบบไม่หมุน	50	2.0
แบบไม่หมุน	60	1.0
แบบไม่หมุน	60	1.5
แบบไม่หมุน	60	2.0
แบบไม่หมุน	70	1.0
แบบไม่หมุน	70	1.5
แบบไม่หมุน	70	2.0

จลนพลศาสตร์การทำแห้งด้วยลมร้อน

แบบจำลอง Lewis แบบจำลอง Page แบบจำลอง Henderson and Pabis และแบบจำลอง Logarithmic เป็นแบบจำลองที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวเลือกในการอธิบายพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุน ซึ่งการเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับนำมาใช้ในการศึกษานี้ทำได้โดยอาศัยตัวบ่งชี้ทางสถิติ คือ R^2 *RMSE* และ χ^2 โดยแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดจะต้องมีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า *RMSE* และ χ^2 ต่ำที่สุด ซึ่งค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 9 พบว่าแบบจำลอง Page มีค่า R^2 สูงที่สุด ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.9826 ถึง 0.9990 และมีค่า *RMSE* และ χ^2 ต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 6.0732×10^{-3} ถึง 3.4341×10^{-2} และ 3.6962×10^{-5} ถึง 1.1850×10^{-3} ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองการทำแห้งอื่นๆ ดังนั้นแบบจำลอง Page จึงได้ถูกเลือกและนำมาใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนในการศึกษานี้ ซึ่งจากผลการทดลองสอดคล้องกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่าแบบจำลอง Page เหมาะสมในการนำมาใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน (Dissa และคณะ, 2008; Goyal และคณะ, 2006; Sehrawat และคณะ, 2018) และกระบวนการทำแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (W. Wang และคณะ, 2018)

ตารางที่ 9 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่สภาวะต่างๆ

สภาวะการทำแห้ง	No.	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R^2	*RMSE*	χ^2
การไหลแบบหมุน					
50°C and 1.0 m/s	[1]	$k = 1.3368\times10^{-4}$	0.9957	1.4972×10^{-2}	2.2453×10^{-4}
	[2]	$k = 1.3372\times10^{-4}$, $n = 0.9999$	**0.9959**	$\mathbf{1.4673\times10^{-2}}$	$\mathbf{2.1603\times10^{-4}}$
	[3]	$a = 1.0005$, $k = 1.3388\times10^{-4}$	0.9957	1.4972×10^{-2}	2.2491×10^{-4}
	[4]	$a = 0.9999$, $k = 1.3369\times10^{-4}$, $c = 2.8819\times10^{-5}$	0.9957	1.4972×10^{-2}	2.2530×10^{-4}
50°C and 1.5 m/s	[1]	$k = 1.3782\times10^{-4}$	0.9990	6.0734×10^{-3}	3.7035×10^{-5}
	[2]	$k = 1.3832\times10^{-4}$, $n = 0.9996$	0.9990	$\mathbf{6.0732\times10^{-3}}$	$\mathbf{3.6962\times10^{-5}}$
	[3]	$a = 1.0553$, $k = 1.5985\times10^{-4}$	0.9858	2.2878×10^{-2}	5.2552×10^{-4}
	[4]	$a = 1.0000$, $k = 1.3783\times10^{-4}$, $c = 3.9737\times10^{-5}$	0.9990	6.0734×10^{-3}	3.7113×10^{-5}
50°C and 2.0 m/s	[1]	$k = 1.5404\times10^{-4}$	0.9955	1.6544×10^{-2}	2.7423×10^{-4}
	[2]	$k = 1.7561\times10^{-4}$, $n = 0.9855$	**0.9956**	$\mathbf{1.6414\times10^{-2}}$	$\mathbf{2.7043\times10^{-4}}$
	[3]	$a = 1.0000$, $k = 1.5404\times10^{-4}$	0.9955	1.6544×10^{-2}	2.7473×10^{-4}
	[4]	$a = 1.0000$, $k = 1.5423\times10^{-4}$, $c = 3.2848\times10^{-4}$	0.9955	1.6545×10^{-2}	2.7527×10^{-4}

ตัวอักษรหนาแสดงถึงค่า R^2 ที่สูงที่สุด และค่า *RMSE* และ χ^2 ที่ต่ำที่สุดในแต่ละสภาวะการทำแห้ง

ตารางที่ 9 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่สภาวะต่างๆ (ต่อ)

สภาวะการทำแห้ง	No.	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R^2	*RMSE*	χ^2
60°C and 1.0 m/s	[1]	$k = 1.5290\times10^{-4}$	0.9958	1.6205×10^{-2}	2.6313×10^{-4}
	[2]	$k = 2.0961\times10^{-4}$, $n = 0.9650$	**0.9963**	**1.5318×10^{-2}**	**2.3557×10^{-4}**
	[3]	$a = 1.0000$, $k = 1.5290\times10^{-4}$	0.9958	1.6205×10^{-2}	2.6365×10^{-4}
	[4]	$a = 1.0000$, $k = 1.5293\times10^{-4}$, $c = 5.5084\times10^{-5}$	0.9958	1.6205×10^{-2}	2.6417×10^{-4}
60°C and 1.5 m/s	[1]	$k = 1.7994\times10^{-4}$	0.9989	8.5520×10^{-3}	7.3331×10^{-5}
	[2]	$k = 2.0605\times10^{-4}$, $n = 0.9847$	**0.9990**	**8.2149×10^{-3}**	**6.7845×10^{-5}**
	[3]	$a = 1.0000$, $k = 1.7994\times10^{-4}$	0.9989	8.5520×10^{-3}	7.3527×10^{-5}
	[4]	$a = 1.0000$, $k = 1.7986\times10^{-4}$, $c = -1.2954\times10^{-4}$	0.9989	8.5521×10^{-3}	7.3727×10^{-5}
60°C and 2.0 m/s	[1]	$k = 2.1872\times10^{-4}$	0.9941	1.8906×10^{-2}	3.5835×10^{-4}
	[2]	$k = 3.3323\times10^{-4}$, $n = 0.9515$	**0.9949**	**1.7538×10^{-2}**	3.0913×10^{-4}
	[3]	$a = 1.0000$, $k = 2.1872\times10^{-4}$	0.9941	1.8906×10^{-2}	3.5925×10^{-4}
	[4]	$a = 0.9999$, $k = 2.1879\times10^{-4}$, $c = 8.6432\times10^{-5}$	0.9941	1.8906×10^{-2}	3.6016×10^{-4}
70°C and 1.0 m/s	[1]	$k = 2.2778\times10^{-4}$	0.9963	1.2472×10^{-2}	1.5596×10^{-4}
	[2]	$k = 2.8606\times10^{-4}$, $n = 0.9734$	**0.9966**	**1.1979×10^{-2}**	**1.4424×10^{-4}**
	[3]	$a = 1.0069$, $k = 2.3159\times10^{-4}$	0.9961	1.2718×10^{-2}	1.6258×10^{-4}
	[4]	$a = 0.9999$, $k = 2.2974\times10^{-4}$, $c = 2.1656\times10^{-4}$	0.9963	1.2473×10^{-2}	1.5677×10^{-4}
70°C and 1.5 m/s	[1]	$k = 2.4257\times10^{-4}$	0.9944	1.7757×10^{-2}	3.1608×10^{-4}
	[2]	$k = 3.4236\times10^{-4}$, $n = 0.9598$	**0.9949**	**1.6902×10^{-2}**	**2.8704×10^{-4}**
	[3]	$a = 1.0000$, $k = 2.4257\times10^{-4}$	0.9944	1.7757×10^{-2}	3.1683×10^{-4}
	[4]	$a = 0.9999$, $k = 2.4246\times10^{-4}$, $c = -1.1873\times10^{-4}$	0.9944	1.7758×10^{-2}	3.1759×10^{-4}
70°C and 2.0 m/s	[1]	$k = 2.7174\times10^{-4}$	0.9972	1.2366×10^{-2}	1.5344×10^{-4}
	[2]	$k = 2.9647\times10^{-4}$, $n = 0.9894$	0.9972	**1.2301×10^{-2}**	**1.5238×10^{-4}**
	[3]	$a = 1.0409$, $k = 3.0335\times10^{-4}$	0.9925	2.0141×10^{-2}	4.0851×10^{-4}
	[4]	$a = 1.0000$, $k = 2.7176\times10^{-4}$, $c = 2.0175\times10^{-5}$	0.9972	1.2366×10^{-2}	1.5452×10^{-4}
การไหลแบบไม่หมุน					
50°C and 1.0 m/s	[1]	$k = 1.1460\times10^{-4}$	0.9965	1.3997×10^{-2}	1.9628×10^{-4}
	[2]	$k = 1.5733\times10^{-4}$, $n = 0.9652$	**0.9969**	**1.3179×10^{-2}**	**1.7431×10^{-4}**
	[3]	$a = 1.0557$, $k = 1.3332\times10^{-4}$	0.9871	2.6855×10^{-2}	7.2379×10^{-4}
	[4]	$a = 1.0001$, $k = 1.1449\times10^{-4}$, $c = -3.2944\times10^{-4}$	0.9965	1.3998×10^{-2}	1.9700×10^{-4}

ตัวอักษรหนาแสดงถึงค่า R^2 ที่สูงที่สุด และค่า *RMSE* และ χ^2 ที่ต่ำที่สุดในแต่ละสภาวะการทำแห้ง

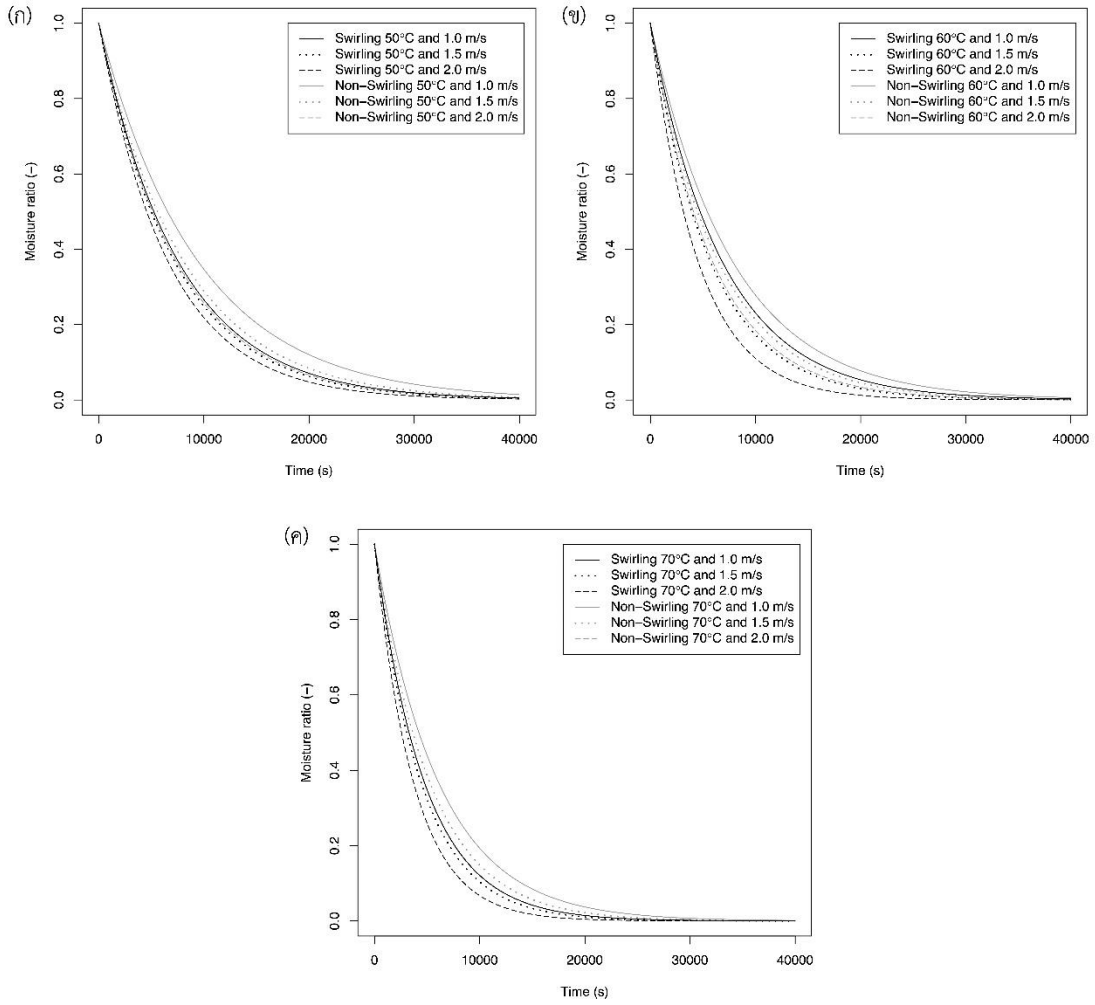
ตารางที่ 9 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่สภาวะต่างๆ (ต่อ)

สภาวะการทำแห้ง	No.	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R^2	*RMSE*	χ^2
50°C and 1.5 m/s	[1]	$k = 1.2376\times10^{-4}$	0.9986	7.4297×10^{-3}	5.5301×10^{-5}
	[2]	$k = 1.3900\times10^{-4}$, $n = 0.9872$	0.9986	**7.2440×10^{-3}**	**5.2667×10^{-5}**
	[3]	$a = 1.0259$, $k = 1.3212\times10^{-4}$	0.9956	1.2915×10^{-2}	1.6740×10^{-4}
	[4]	$a = 1.0002$, $k = 1.2363\times10^{-4}$, $c = -4.1244\times10^{-4}$	0.9986	7.4299×10^{-3}	5.5506×10^{-5}
50°C and 2.0 m/s	[1]	$k = 1.3077\times10^{-4}$	0.9941	1.9007×10^{-2}	3.6250×10^{-4}
	[2]	$k = 1.2915\times10^{-4}$, $n = 1.0014$	0.9941	**1.9006×10^{-2}**	**3.6190×10^{-4}**
	[3]	$a = 1.0033$, $k = 1.3189\times10^{-4}$	0.9940	1.9061×10^{-2}	3.6461×10^{-4}
	[4]	$a = 0.9999$, $k = 1.3092\times10^{-4}$, $c = 3.3948\times10^{-4}$	0.9941	1.9008×10^{-2}	3.6320×10^{-4}
60°C and 1.0 m/s	[1]	$k = 1.3619\times10^{-4}$	0.9820	3.4955×10^{-2}	1.2248×10^{-3}
	[2]	$k = 1.3917\times10^{-4}$, $n = 0.9975$	**0.9826**	**3.4341×10^{-2}**	**1.1850×10^{-3}**
	[3]	$a = 0.9999$, $k = 1.8045\times10^{-4}$	0.9820	3.4955×10^{-2}	1.2277×10^{-3}
	[4]	$a = 1.0004$, $k = 1.3598\times10^{-4}$, $c = -6.8402\times10^{-4}$	0.9820	3.4955×10^{-2}	1.2306×10^{-3}
60°C and 1.5 m/s	[1]	$k = 1.6215\times10^{-4}$	0.9949	1.7285×10^{-2}	2.9953×10^{-4}
	[2]	$k = 2.1753\times10^{-4}$, $n = 0.9671$	**0.9953**	**1.6507×10^{-2}**	**2.7385×10^{-4}**
	[3]	$a = 1.0041$, $k = 1.6375\times10^{-4}$	0.9948	1.7370×10^{-2}	3.0323×10^{-4}
	[4]	$a = 1.0000$, $k = 1.6208\times10^{-4}$, $c = -1.3405\times10^{-4}$	0.9949	1.7286×10^{-2}	3.0104×10^{-4}
60°C and 2.0 m/s	[1]	$k = 1.8577\times10^{-4}$	0.9976	1.0516×10^{-2}	1.1080×10^{-4}
	[2]	$k = 2.2935\times10^{-4}$, $n = 0.9758$	**0.9978**	**1.0138×10^{-2}**	**1.0317×10^{-4}**
	[3]	$a = 1.0153$, $k = 1.9292\times10^{-4}$	0.9970	1.1711×10^{-2}	1.3768×10^{-4}
	[4]	$a = 1.0001$, $k = 1.8557\times10^{-4}$, $c = -3.5578\times10^{-4}$	0.9976	1.0517×10^{-2}	1.1124×10^{-4}
70°C and 1.0 m/s	[1]	$k = 1.6322\times10^{-4}$	0.9892	2.4408×10^{-2}	5.9819×10^{-4}
	[2]	$k = 1.7008\times10^{-4}$, $n = 0.9954$	0.9892	**2.4400×10^{-2}**	**5.9719×10^{-4}**
	[3]	$a = 1.0178$, $k = 1.7243\times10^{-4}$	0.9876	2.6188×10^{-2}	6.8908×10^{-4}
	[4]	$a = 1.0000$, $k = 1.6320\times10^{-4}$, $c = -4.7065\times10^{-5}$	0.9892	2.4408×10^{-2}	6.0004×10^{-4}
70°C and 1.5 m/s	[1]	$k = 1.8835\times10^{-4}$	0.9976	1.2116×10^{-2}	1.4713×10^{-4}
	[2]	$k = 2.4783\times10^{-4}$, $n = 0.9689$	**0.9979**	**1.1236×10^{-2}**	**1.2681×10^{-4}**
	[3]	$a = 1.0000$, $k = 1.8835\times10^{-4}$	0.9976	1.2116×10^{-2}	1.4746×10^{-4}
	[4]	$a = 0.9999$, $k = 1.8872\times10^{-4}$, $c = 5.1905\times10^{-3}$	0.9976	1.2119×10^{-2}	1.4786×10^{-4}
70°C and 2.0 m/s	[1]	$k = 2.0773\times10^{-4}$	0.9891	2.4450×10^{-2}	5.9904×10^{-4}
	[2]	$k = 1.6645\times10^{-4}$, $n = 1.0147$	0.9891	**2.4394×10^{-2}**	**5.9753×10^{-4}**
	[3]	$a = 1.0642$, $k = 2.2904\times10^{-4}$	0.9778	3.4901×10^{-2}	1.2231×10^{-3}
	[4]	$a = 1.0001$, $k = 1.8881\times10^{-4}$, $c = -3.2705\times10^{-4}$	0.9891	2.4450×10^{-2}	6.0157×10^{-4}

ตัวอักษรหนาแสดงถึงค่า R^2 ที่สูงที่สุด และค่า *RMSE* และ χ^2 ที่ต่ำที่สุดในแต่ละสภาวะการทำแห้ง

ผลของอุณหภูมิ ความเร็ว และรูปแบบการไหลของลมต่อพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุก

ผลของอุณหภูมิ ความเร็ว และรูปแบบการไหลของลมต่อพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุก แสดงอยู่ในภาพที่ 17 พบว่าอัตราส่วนความชื้นของตัวอย่างจะมีค่าลดลงแบบเอกซ์โพนเนนเชียลกับเวลาการทำแห้งในทุกๆ สภาวะการทดลอง นอกจากนี้เวลาในการทำแห้งจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิและความเร็วลมมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งจากการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุน โดยเวลาในการทำแห้งของกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนจะมีค่าลดลงถึง 52 และ 45% จากการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจาก 50 เป็น 70°C ที่ความเร็วลม 2.0 m/s ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันการเพิ่มความเร็วลมจาก 1.0 เป็น 2.0 m/s เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิลมร้อน 60°C จะสามารถลดเวลาในการทำแห้งลงถึง 34% สำหรับการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุน และ 24% สำหรับการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบไม่หมุน ทั้งนี้การเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วลมจะส่งผลให้เกิดการเพิ่มความแตกต่างของค่าความความดันไอระหว่างลมร้อนและตัวอย่าง ดังนั้นอัตราการระเหยน้ำออกจากตัวอย่างจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (Goyal และคณะ, 2006; Kha และคณะ, 2014; Zhu และ Shen, 2014) นอกจากนี้การทำแห้งตัวอย่างด้วยลมร้อนแบบหมุนสามารถลดเวลาในการทำแห้งได้ประมาณ 11 ถึง 23% เมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบไม่หมุนที่อุณหภูมิและความเร็วลมเดียวกัน โดยการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C กับความเร็วลมที่ 2.0 m/s จะใช้ระยะเวลาในการทำแห้งสั้นที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้การไหลของลมแบบหมุนสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการทำแห้งได้ เนื่องจากลมที่มีการไหลแบบหมุนเมื่อไหลผ่านไปยังถาดที่วางตัวอย่าง ลมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นลมหมุนขนาดเล็กที่ไหลผ่านไปยังพื้นผิวของตัวอย่าง แรงเฉือนของลมหมุนขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจะไปรบกวนชั้นของไอน้ำ (vapor density) ที่อยู่บริเวณรอบผิวของตัวอย่างให้มีขนาดเล็กลงจนส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างเพิ่มสูงขึ้น (Sedahmed และคณะ, 2017) อัตราการระเหยน้ำของตัวอย่างจึงมีค่าเพิ่มขึ้น (Aral และ Beşe, 2016; Tang และคณะ, 2018) ดังนั้นการถ่ายโอนมวลระหว่างลมร้อนและตัวอย่างจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (Javed และคณะ, 2006; Sedahmed และคณะ, 2017)

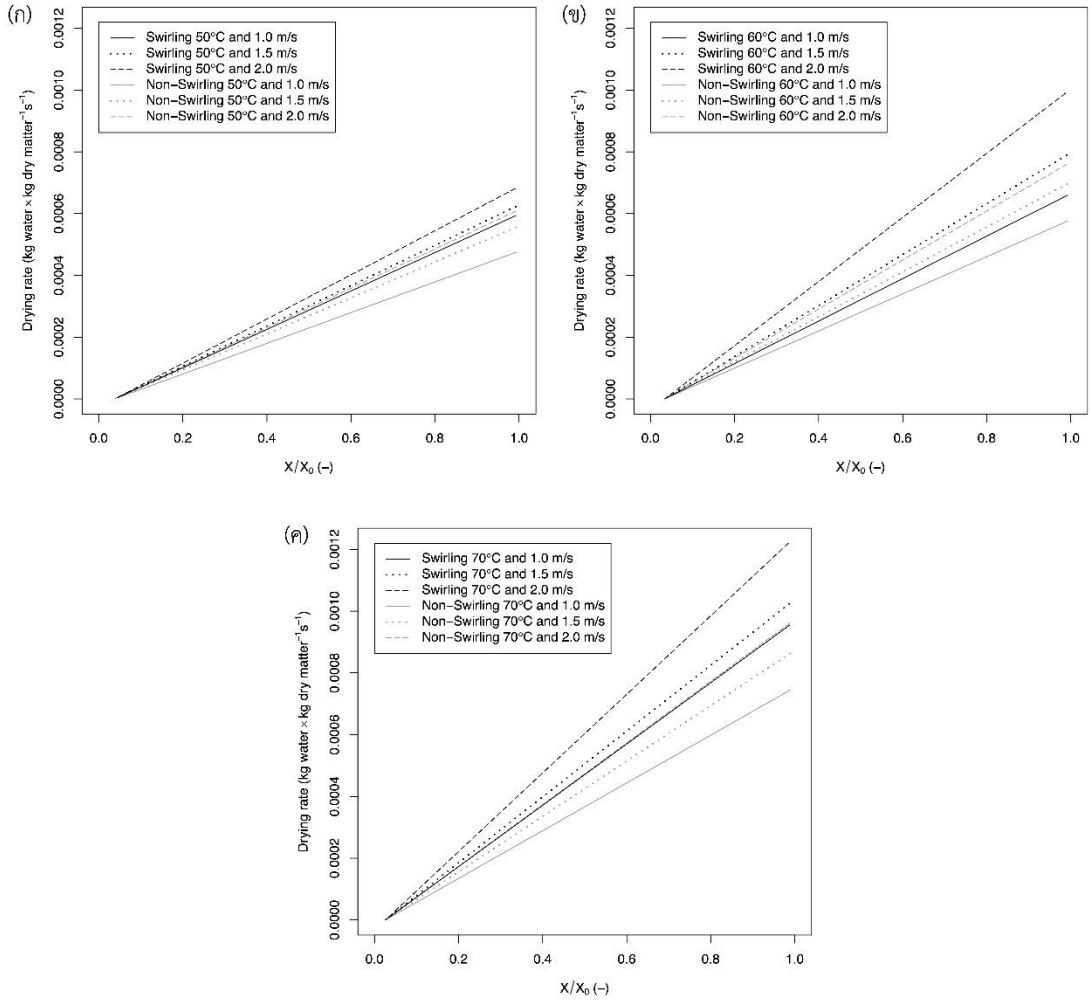


ภาพที่ 17 กราฟการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่ความเร็วลมต่างๆ กับอุณหภูมิลมร้อนที่ (ก) 50 (ข) 60 และ (ค) 70°C

อัตราการทำแห้งมะม่วงสุก

ภาพที่ 18 แสดงอัตราการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่สภาวะต่างๆ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วลม รวมถึงรูปแบบการไหลของลมแบบหมุนจะส่งผลให้อัตราการทำแห้งมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้อัตราการทำแห้งจะมีค่าลดลงแบบเชิงเส้นกับปริมาณความชื้น (X/X_0) ของตัวอย่างที่ลดลงในทุกๆ สภาวะการทดลอง หรือกล่าวได้ว่าจะพบเฉพาะช่วง falling rate period ตลอดทั้งกระบวนการทำแห้งตัวอย่าง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการลดลงของปริมาณความชื้นในระหว่างกระบวนการทำแห้งจะส่งผลให้โมเลกุลของน้ำในชิ้นตัวอย่างเกิดการยึดเกาะกับองค์ประกอบต่างๆ ในตัวอย่างด้วยพันธะที่มีความแข็งแรงมากขึ้น (Telis-Romero และคณะ, 2005) จึงเป็นผลให้อัตราการทำแห้งมีค่าลดลงตลอดกระบวนการ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่าการทำ

แห้งมะม่วงจะพบเฉพาะช่วง falling rate period (Dissa และคณะ, 2008; W. Wang และคณะ, 2018)



ภาพที่ 18 กราฟอัตราการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่ความเร็วลมต่างๆ กับอุณหภูมิลมร้อนที่ (ก) 50 (ข) 60 และ (ค) 70°C

ผลของอุณหภูมิ ความเร็ว และรูปแบบการไหลของลมต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

ตารางที่ 10 แสดงค่า D_{eff} ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่สภาวะต่างๆ พบว่า D_{eff} ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนมีค่าอยู่ในช่วง (4.48 ถึง 9.71) × 10^{-9} m^2/s ในขณะที่ค่า D_{eff} ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบไม่หมุนมีค่าอยู่ในช่วง (3.41 ถึง 7.24) × 10^{-9} m^2/s ซึ่งการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนจะมีค่า D_{eff} มากกว่า

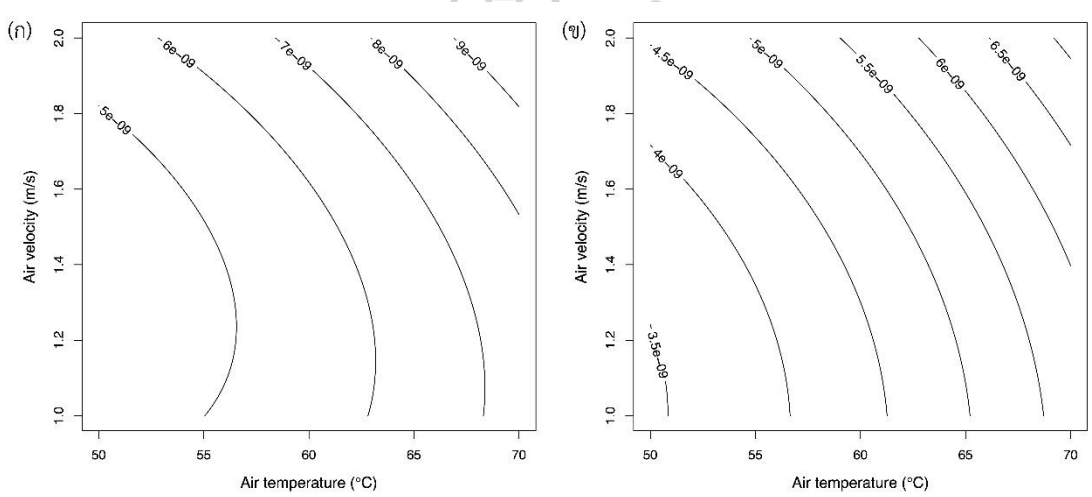
การทำแห้งด้วยลมร้อนแบบไม่หมุนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) เมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งที่อุณหภูมิและความเร็วลมเดียวกัน

ตารางที่ 10 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่สภาวะต่างๆ

สภาวะการทำแห้ง	D_{eff} (m^2/s) × 10^9
การไหลแบบหมุน	
50°C และ 1.0 m/s	4.70 ± 0.10^{fg}
50°C และ 1.5 m/s	4.48 ± 0.15^{g}
50°C และ 2.0 m/s	5.22 ± 0.25^{de}
60°C และ 1.0 m/s	5.00 ± 0.07^{ef}
60°C และ 1.5 m/s	5.71 ± 0.22^{c}
60°C และ 2.0 m/s	7.63 ± 0.55^{b}
70°C และ 1.0 m/s	7.64 ± 0.42^{b}
70°C และ 1.5 m/s	7.55 ± 0.06^{b}
70°C และ 2.0 m/s	9.71 ± 0.14^{a}
การไหลแบบไม่หมุน	
50°C และ 1.0 m/s	3.41 ± 0.10^{h}
50°C และ 1.5 m/s	3.80 ± 0.07^{h}
50°C และ 2.0 m/s	4.48 ± 0.08^{g}
60°C และ 1.0 m/s	4.27 ± 0.44^{g}
60°C และ 1.5 m/s	4.74 ± 0.10^{efg}
60°C และ 2.0 m/s	5.56 ± 0.17^{cd}
70°C และ 1.0 m/s	5.83 ± 0.17^{c}
70°C และ 1.5 m/s	5.91 ± 0.44^{c}
70°C และ 2.0 m/s	7.24 ± 0.41^{b}

$^{a-h}$ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

สำหรับผลของอุณหภูมิและความเร็วลมต่อค่า D_{eff} ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนแสดงอยู่ในภาพที่ 19 (ก) และ 19 (ข) ตามลำดับ พบว่า D_{eff} จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิและความเร็วลมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นทั้งในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุน นอกจากนี้เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและความเร็วลม การไหลของลมแบบหมุนจะส่งผลให้ D_{eff} มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบไม่หมุน จากผลการทดลองจึงสามารถสรุปได้ว่าการไหลของลมแบบหมุนจะช่วยเสริมผลของการเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วลมในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากการไหลของลมแบบหมุนจะไปรบกวนชั้นของไอน้ำที่อยู่รอบผิวของตัวอย่าง (Malaikritsanachalee และคณะ, 2018)



ภาพที่ 19 ผลของอุณหภูมิและความเร็วลมต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน (ก) แบบหมุน และ (ข) แบบไม่หมุน

ผลของอุณหภูมิ ความเร็ว และรูปแบบการไหลของลมต่อร้อยละการหดตัวเชิงพื้นที่ของมะม่วงสุก

ร้อยละการหดตัวเชิงพื้นที่ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่สภาวะต่างๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 11 พบว่าการหดตัวเชิงพื้นที่ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนมีค่าอยู่ในช่วง 32.64 ถึง 40.98% ในขณะที่การทำแห้งด้วยลมร้อนแบบไม่หมุนส่งผลให้ตัวอย่างมีการหดตัวเชิงพื้นที่อยู่ในช่วง 36.45 ถึง 43.44% จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนจะสามารถลดการหดตัวเชิงพื้นที่ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งลงได้ นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนจะส่งผลให้การหดตัวเชิงพื้นที่ของตัวอย่างมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วลมเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อมีการเพิ่มอัตราเร็วในการทำแห้งจะส่งผลให้เกิด case hardening ขึ้นที่บริเวณผิวของ

ตัวอย่าง โดย case hardening ที่เกิดขึ้นจะช่วยชะลอการหดตัวของตัวอย่างลง (Aral และ Beşe, 2016; Mayor และ Sereno, 2004; Ratti, 1994; J. Wang และคณะ, 2018)

ตารางที่ 11 ร้อยละการหดตัวเชิงพื้นที่ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่สภาวะต่างๆ

สภาวะการทำแห้ง	การหดตัวเชิงพื้นที่ (%)
การไหลแบบหมุน	
50°C และ 1.0 m/s	34.92 ± 3.38^{efg}
50°C และ 1.5 m/s	40.98 ± 2.90^{abc}
50°C และ 2.0 m/s	37.38 ± 2.61^{cde}
60°C และ 1.0 m/s	38.01 ± 3.85^{cde}
60°C และ 1.5 m/s	40.35 ± 2.60^{abc}
60°C และ 2.0 m/s	36.58 ± 2.53^{def}
70°C และ 1.0 m/s	32.64 ± 3.30^{g}
70°C และ 1.5 m/s	37.73 ± 3.63^{cde}
70°C และ 2.0 m/s	33.56 ± 4.97^{fg}
การไหลแบบไม่หมุน	
50°C และ 1.0 m/s	40.63 ± 2.16^{abc}
50°C และ 1.5 m/s	43.44 ± 2.96^{a}
50°C และ 2.0 m/s	39.41 ± 2.95^{bcd}
60°C และ 1.0 m/s	38.04 ± 2.97^{cde}
60°C และ 1.5 m/s	42.96 ± 3.01^{a}
60°C และ 2.0 m/s	39.46 ± 3.30^{bcd}
70°C และ 1.0 m/s	36.45 ± 4.93^{def}
70°C และ 1.5 m/s	42.76 ± 3.09^{ab}
70°C และ 2.0 m/s	37.97 ± 3.28^{cde}

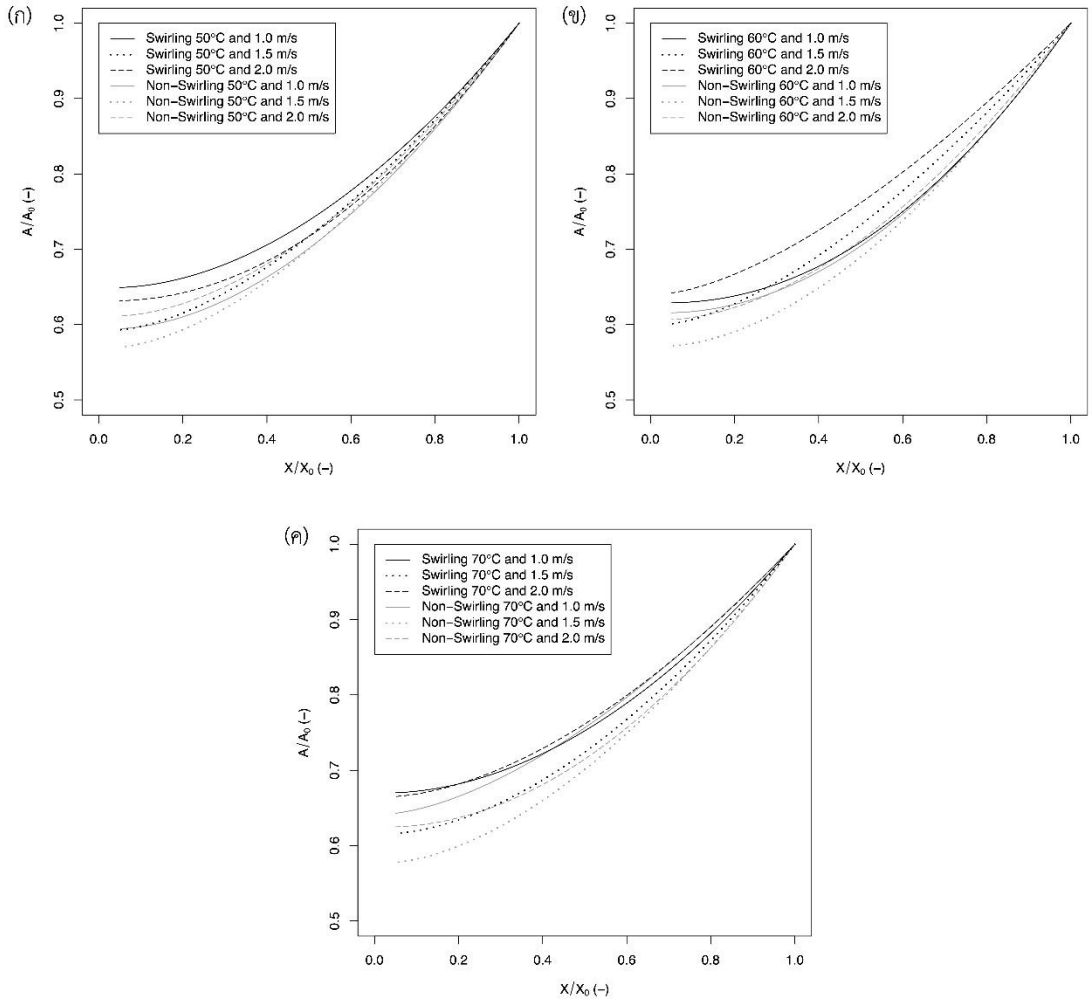
[a-f] ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

กลไกการหดตัวของมะม่วงสุกในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุน

ภาพที่ 20 แสดงกลไกการหดตัวเชิงพื้นที่ของมะม่วงสุกในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่สภาวะต่างๆ โดยในทุกสภาวะการทดลองพบว่าในช่วงแรกของการทำแห้ง ขนาด (พื้นที่) ของตัวอย่างจะมีค่าลดลงแบบเชิงเส้นกับปริมาณความชื้น (X/X_0) ของตัวอย่างที่ลดลง โดยในช่วงแรกนี้ถือว่าเป็นช่วงที่ตัวอย่างยังคงมีปริมาณความชื้นสูง และอยู่ในสถานะคล้ายยาง ซึ่งจากการรายงานของ Karathanos และคณะ (1996) พบว่าการหดตัวของตัวอย่างที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณความชื้นที่สูญเสียไปในระหว่างกระบวนการทำแห้ง เมื่อตัวอย่างที่อยู่ในสถานะคล้ายยาง หลังจากนั้นการหดตัวเชิงพื้นที่ของตัวอย่างจะเกิดขึ้นช้าลง ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณความชื้นที่ลดลงจนส่งผลให้โครงสร้างของตัวอย่างมีความแข็งแรงมากขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าค่า T_g ของตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (Mayor และ Sereno, 2004; Sappati และคณะ, 2017)

ผลของอุณหภูมิและความเร็วลมต่ออัตราการหดตัวเชิงพื้นที่ของมะม่วงสุก

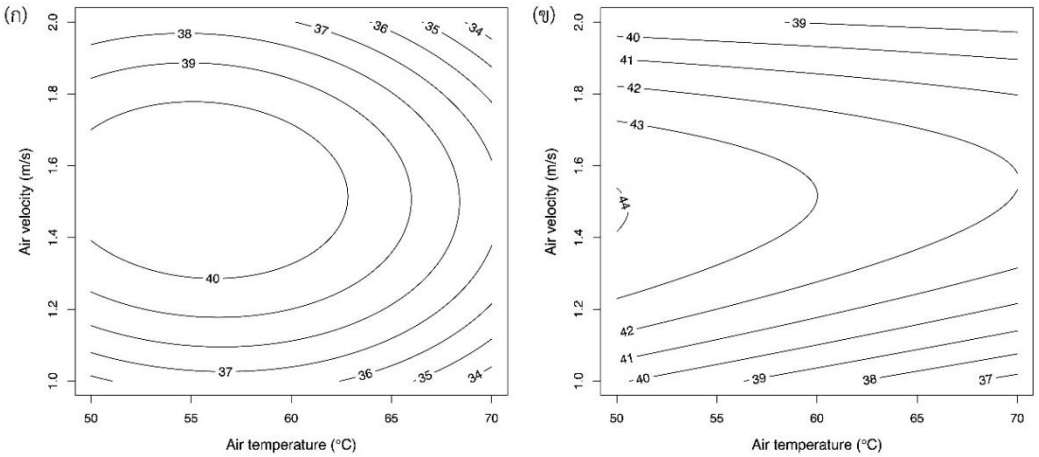
ผลของอุณหภูมิและความเร็วลมต่ออัตราการหดตัวเชิงพื้นที่ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่สภาวะต่างๆ แสดงอยู่ในภาพที่ 21 (ก) และ 21 (ข) ตามลำดับ พบว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนทั้งแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่ความเร็ว 1.5 m/s จะส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการหดตัวเชิงพื้นที่มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิลมร้อนเดียวกัน โดยจากภาพที่ 20 (ก) ถึง 20 (ค) ได้แสดงกลไกการหดตัวเชิงพื้นที่ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าในช่วงความชื้นต่ำ การหดตัวเชิงพื้นที่ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่ความเร็วลม 1.5 m/s จะเกิดขึ้นมากกว่าที่ความเร็วลมอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากความเครียดภายในชิ้นตัวอย่าง (internal stress) และการเกิด case hardening สำหรับการทำแห้งที่ความเร็วลมต่ำ (1.0 m/s) ความแตกต่างของปริมาณความชื้นระหว่างภายในและพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างจะมีค่าต่ำ ส่งผลให้ความเครียดภายในชิ้นตัวอย่างมีค่าน้อย การหดตัวของตัวอย่างจึงเกิดขึ้นอย่างช้าๆ สำหรับการทำแห้งที่ความเร็วลมที่สูงขึ้น (1.5 m/s) จะส่งผลให้ความแตกต่างของปริมาณความชื้นระหว่างภายในและพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้น ความเครียดภายในชิ้นตัวอย่างจะมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นการหดตัวของตัวอย่างจึงเกิดได้มากกว่าที่ความเร็วลมต่ำ และสำหรับความเร็วลมสูงสุด (2.0 m/s) จะส่งผลให้ความแตกต่างของปริมาณความชื้นระหว่างภายในและพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างมีค่ามากที่สุด ซึ่งเป็นผลให้เกิด case hardening ขึ้นที่ผิวหน้าของชิ้นตัวอย่าง (Aral และ Beşe, 2016; Ratti, 1994) ดังนั้นการหดตัวของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่ความเร็วลม 2.0 m/s จึงเกิดขึ้นน้อยกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่ความเร็วลม 1.5 m/s



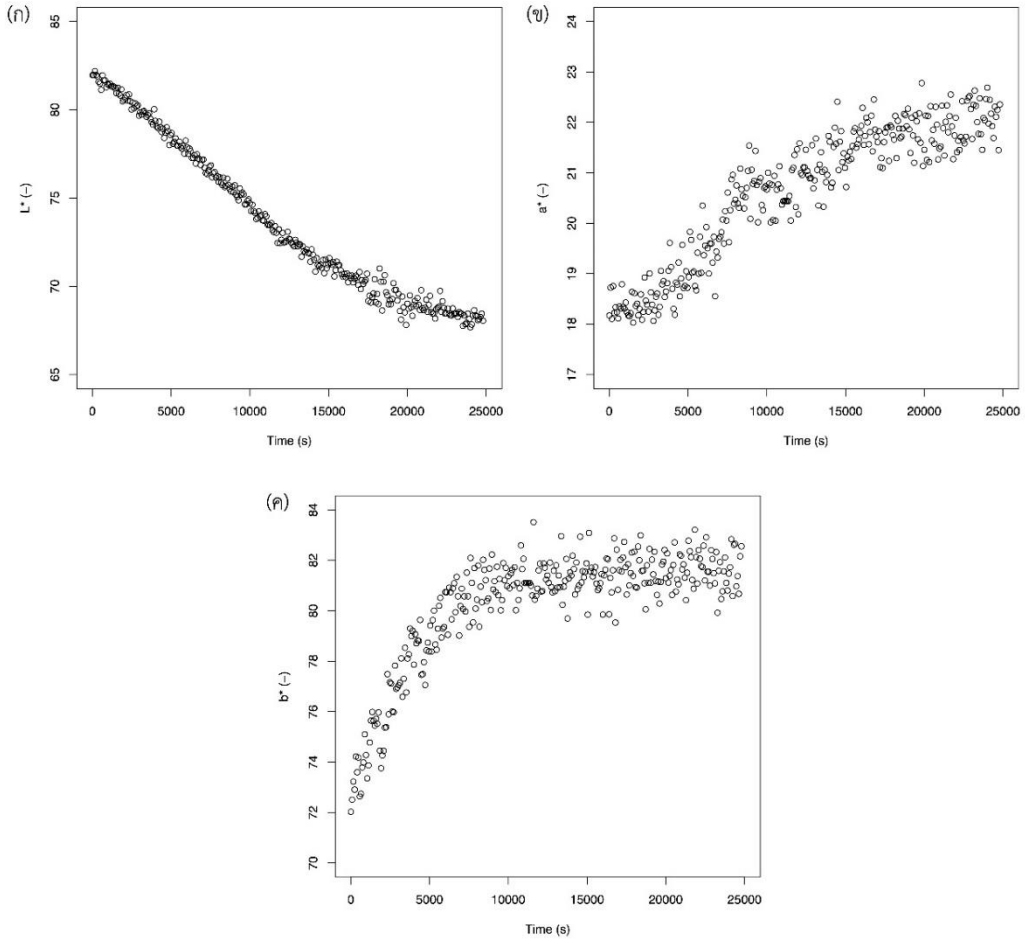
ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเชิงพื้นที่กับปริมาณความชื้นของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่ความเร็วลมต่างๆ กับอุณหภูมิลมร้อนที่ (ก) 50 (ข) 60 และ (ค) 70°C

การเปลี่ยนแปลงสีของมะม่วงสุกในระหว่างกระบวนการทำแห้ง

ภาพที่ 22 แสดงตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงค่าสีของมะม่วงสุกในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน พบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างในทุกๆ สภาวะการทดลองจะมีลักษณะเหมือนกัน โดยค่า L^* ของตัวอย่างจะมีค่าลดลงแบบเชิงเส้นกับเวลาในการทำแห้ง หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ (ภาพที่ 22 (ก)) สำหรับค่า a^* ของตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นกับเวลาในการทำแห้งจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ (ภาพที่ 22 (ข)) และสำหรับค่า b^* ของตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงแรกของการทำแห้ง หลังจากนั้นจะมีค่าค่อนข้างคงที่จนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ (ภาพที่ 22 (ค))



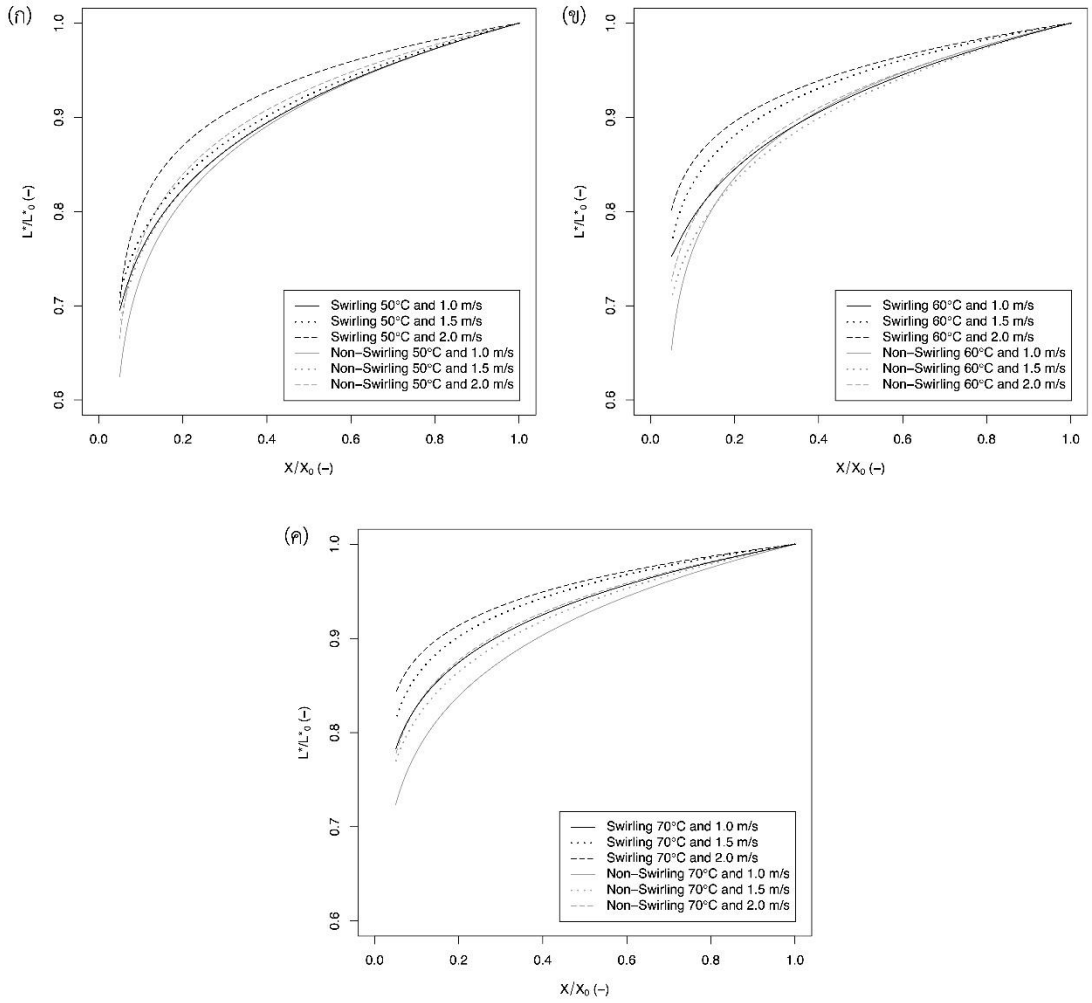
ภาพที่ 21 ผลของอุณหภูมิและความเร็วลมต่อร้อยละการหดตัวเชิงพื้นที่ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อน (ก) แบบหมุน และ (ข) แบบไม่หมุน



ภาพที่ 22 การเปลี่ยนแปลงค่าสี (ก) L (ข) a* และ (ค) b* ของมะม่วงสุกในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน*

กลไกการเปลี่ยนแปลงค่า L^* และ a^* ของมะม่วงสุกในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุน

กลไกการเปลี่ยนแปลงค่า L^* และ a^* ของมะม่วงสุกในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่สภาวะต่างๆ แสดงดังภาพที่ 23 และ 24 ตามลำดับ โดยค่า L^* และ a^* จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบบรรทัดฐาน (normalization) คือ L^*/L^*_0 และ a^*/a^*_0 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าในช่วงแรกของการทำแห้งที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่าง (X/X_0 = 1.0) ถึงที่ปริมาณความชื้นประมาณ 0.2 ถึง 0.3 ค่า L^* (ภาพที่ 23 (ก) ถึง 23 (ค)) และ a^* (ภาพที่ 24 (ก) ถึง 24 (ค)) ของตัวอย่างจะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างเป็นเส้นตรงกับปริมาณความชื้นที่ลดลงในทุกๆ สภาวะการทดลอง โดยปกติแล้วการลดลงของค่า L^* และการเพิ่มขึ้นของค่า a^* จะแสดงถึงการเกิดสีน้ำตาลในตัวอย่าง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่า L^* และ a^* ของตัวอย่างในช่วงแรกนี้เป็นผลมาจากการสูญเสียปริมาณความชื้นของตัวอย่าง เนื่องจากในช่วงแรกของการทำแห้ง ตัวอย่างจะยังคงมีปริมาณความชื้นสูงจึงส่งผลให้พื้นผิวของตัวอย่างมีความมันวาว (glossiness) ดังนั้นตัวอย่างจึงมีค่าความสว่างสูง (Sturm และคณะ, 2012) และเมื่อปริมาณความชื้นของตัวอย่างลดต่ำลง ค่าความสว่างของตัวอย่างจึงมีค่าลดลง นอกจากนี้การสูญเสียความชื้นยังส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการหดตัว ซึ่งการหดตัวเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าสีของตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการหดตัวของตัวอย่างจะส่งผลให้ตัวอย่างมีค่าความทึบแสง (opacity) ที่เพิ่มขึ้น (Contreras และคณะ, 2008; Sturm และคณะ, 2012) จึงเป็นผลให้ความสว่างของตัวอย่างมีค่าลดลง นอกจากนี้ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ และปฏิกิริยาเมลลาร์ดก็ยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลให้สีของตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการทำแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า a^* (L A Ramallo และ Mascheroni, 2012; Sturm และคณะ, 2012) ซึ่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์จะพบได้มากในช่วงแรกของการทำแห้ง เนื่องจากตัวอย่างมีค่า A_w สูง (Korbel, Attal, และคณะ, 2013) อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์จะสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิไม่เกิน 60°C เนื่องจากอุณหภูมิที่มากกว่า 60°C จะสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ polyphenol oxidase ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Park และคณะ, 1980; Sturm และคณะ, 2012)

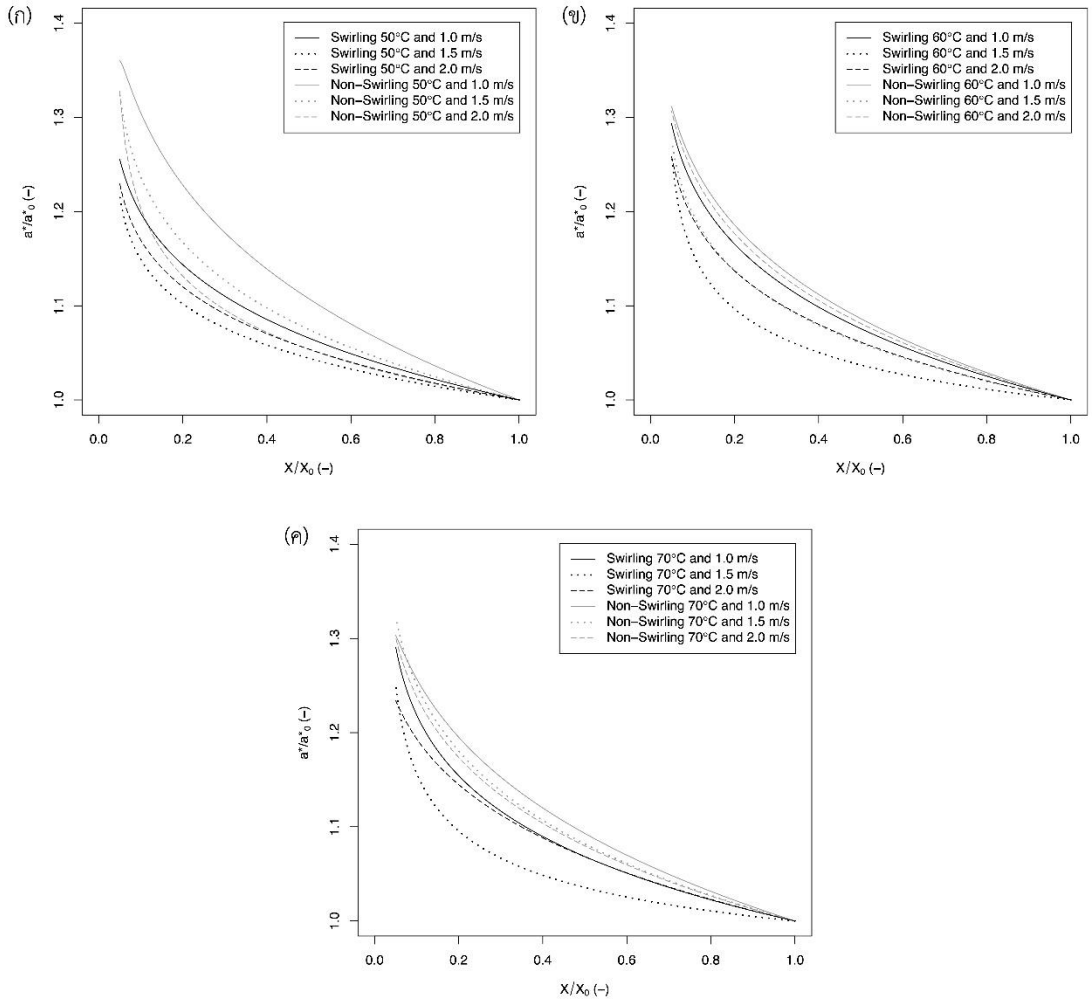


ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า L^*/L^*_0 กับปริมาณความชื้นของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่ความเร็วลมต่างๆ กับอุณหภูมิลมร้อนที่ (ก) 50 (ข) 60 และ (ค) 70°C

ในช่วงท้ายของการทำแห้ง ($X/X_0 < 0.2$) ค่า L^* จะมีการลดลงอย่างรวดเร็ว (ภาพที่ 23 (ก) ถึง 23 (ค)) ในขณะที่ค่า a^* จะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (ภาพที่ 24 (ก) ถึง 24 (ค)) กับปริมาณความชื้นที่ลดลงในทุกๆ สภาวะการทดลอง โดยค่า A_w ของตัวอย่างในช่วงนี้จะมีค่าลดลง และจะถูกทำให้ลดลงต่ำกว่า 0.6 เมื่อสิ้นสุดกระบวนการทำแห้ง ซึ่งในช่วงนี้ตัวอย่างจะสามารถเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดได้มากขึ้น โดย Korbel, Attal, และคณะ (2013) ได้รายงานว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดในตัวอย่างมะม่วง (จำลอง) จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อ A_w ของตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 0.7 สอดคล้องกับการรายงานของ Pott และคณะ (2005) พบว่าเวลาในการทำแห้งที่มากเกินไปในช่วงท้ายของกระบวนการจะส่งผลให้ตัวอย่างเกิดสีน้ำตาลเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นการลดลงของค่า L^* และการ

เพิ่มขึ้นของค่า a^* ในช่วงท้ายกระบวนการทำแห้งจึงเป็นผลมาจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์จะมีค่าลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิ 60°C เนื่องจากค่า A_w ของตัวอย่างที่ลดต่ำลง (Korbel, Servent, และคณะ, 2013) จากผลการทดลองจึงสามารถสรุปได้ว่าตัวอย่างมะม่วงสุกจะมีค่าความสว่างลดลง และมีค่าสีแดงเพิ่มขึ้นตลอดกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน อย่างไรก็ตาม Corzo และ Álvarez (2014) กลับพบว่าค่าสว่างและค่าสีแดงของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนจะมีค่าลดลง ในขณะที่ Link และคณะ (2017) ได้รายงานว่ามะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งจะมีค่า L^* น้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการทำแห้ง ในขณะที่ค่า a^* ของตัวอย่างที่ผ่านและไม่ได้ผ่านการทำแห้งกลับไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ Pu และ Sun (2017) ได้รายงานว่าค่า L^* ของตัวอย่างมะม่วงจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 4 ชั่วโมงแรกของการทำแห้งด้วยลมร้อน หลังจากนั้น L^* จะมีค่าลดลงอย่างช้าจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ

สำหรับการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า L^* และ a^* ของตัวอย่างน้อยกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบไม่หมุนตลอดกระบวนการทำแห้ง เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิและความเร็วลมเดียวกัน (ภาพที่ 23 และ 24) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนจะส่งผลให้ตัวอย่างเกิดสีน้ำตาลน้อยกว่ากระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบไม่หมุน ทั้งนี้เนื่องมาจากระยะเวลาในการทำแห้งที่สั้นกว่าของกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนจึงส่งผลให้ตัวอย่างมีเวลาอย่างจำกัดในการสร้างรงควัตถุสีน้ำตาลขึ้น (Nadian และคณะ, 2015) สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Malaikritsanachalee และคณะ (2018) พบว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนจะส่งผลให้ระยะเวลาในการทำแห้งสั้นกว่า และเกิดสีน้ำตาลบนตัวอย่างน้อยกว่ากระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบไม่หมุน เมื่อเปรียบเทียบที่สภาวะการทำแห้งเดียวกัน นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงค่า L^* และ a^* ของตัวอย่างจะมีแนวโน้มที่ลดลง เมื่ออุณหภูมิและความเร็วลมมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งจากการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุน อย่างไรก็ตามการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิต่างๆ กับความเร็วลมที่ 1.5 m/s กลับส่งผลให้ค่า a^* มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด

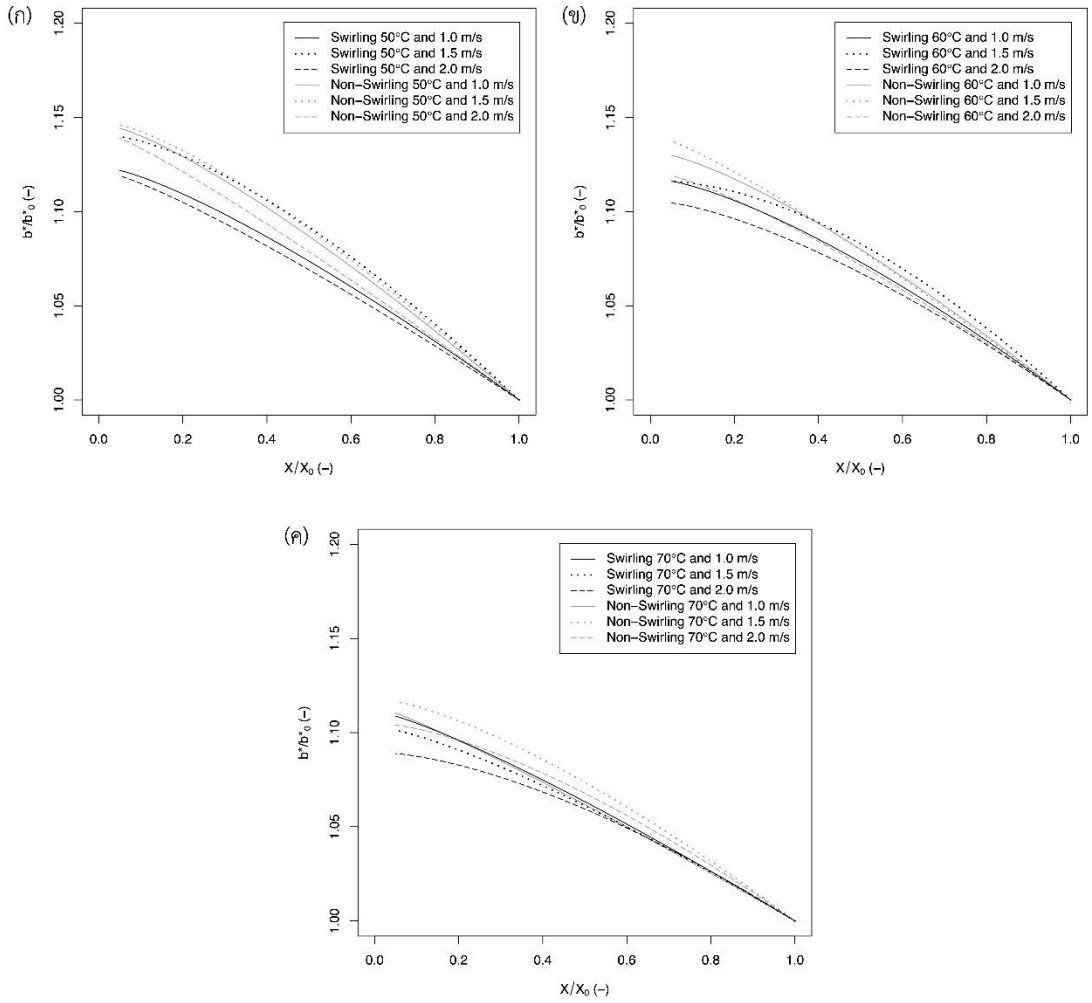


ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า a^*/a^*_0 กับปริมาณความชื้นของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่ความเร็วลมต่างๆ กับอุณหภูมิลมร้อนที่ (ก) 50 (ข) 60 และ (ค) 70°C

กลไกการเปลี่ยนแปลงค่า b^* ของมะม่วงสุกในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุน

ภาพที่ 25 แสดงกลไกการเปลี่ยนแปลงค่า b^* ของมะม่วงสุกในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่สภาวะต่างๆ โดยค่า b^* จะต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบบรรทัดฐาน คือ b^*/b^*_0 ซึ่งพบว่าตัวอย่างจะมีค่า b^* เพิ่มขึ้น (สีเหลืองเพิ่มขึ้น) ค่อนข้างเป็นเส้นตรงกับปริมาณความชื้น (X/X_0) ที่ลดลงจนถึงที่ปริมาณความชื้นประมาณ 0.2 ถึง 0.3 ในทุกๆ สภาวะการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของค่า b^* ในช่วงนี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณความชื้นที่

สูญเสียไป ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นการสูญเสียปริมาณความชื้นในระหว่างกระบวนการทำแห้งจะส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการหดตัวและเกิดโครงสร้างที่อัดแน่น (dense structure) ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ที่มีอยู่ในชิ้นตัวอย่าง (Nadian และคณะ, 2015) โดยปกติแล้วแคโรทีนอยด์โดยเฉพาะอย่างยิ่งบีตา-แคโรทีน (β-carotene) จะพบได้มากในมะม่วงสุก ซึ่งบีตา-แคโรทีนจะทำหน้าที่ให้สีเหลืองแก่มะม่วงสุก (Harnkarnsujarit และ Charoenrein, 2011) นอกจากนี้โครงสร้างที่อัดแน่นยังช่วยชลอการสูญเสียปริมาณแคโรทีนอยด์ในตัวอย่าง เนื่องจากลักษณะโครงสร้างที่อัดแน่นจะช่วยป้องกันการแพร่ของออกซิเจน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลก็ยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า b^* ของตัวอย่าง โดย Murata และคณะ (1995) ได้รายงานว่าการเพิ่มขึ้นของค่า a^* และ b^* ในแอปเปิ้ลเป็นผลมาจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ เช่นเดียวกับผลงานวิจัยของ Swasdisevi และคณะ (2007) พบว่าการเพิ่มขึ้นของสีเหลืองในกล้วยเป็นผลมาจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในระหว่างกระบวนการทำแห้ง สำหรับในช่วงท้ายของการทำแห้ง ($X/X_0 < 0.2$) อัตราการเพิ่มขึ้นของ b^* จะมีค่าลดลง (ภาพที่ 25 (ก) ถึง 25 (ค)) ในทุกๆ สภาวะการทดลอง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการหดตัวของตัวอย่างที่เกิดขึ้นน้อยลงในช่วงท้ายของการทำแห้ง จากผลการทดลองจึงสามารถสรุปได้ว่าตัวอย่างมะม่วงสุกจะมีค่าสีเหลืองเพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Corzo และ Álvarez (2014) อย่างไรก็ตาม Pu และ Sun (2017) ได้รายงานว่าค่า b^* ของมะม่วงจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 4 ชั่วโมงแรกของการทำแห้งด้วยลมร้อน หลังจากนั้น b^* จะมีค่าลดลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ นอกจากนี้การทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า b^* ของตัวอย่างน้อยกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบไม่หมุนตลอดกระบวนการทำแห้ง เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิและความเร็วลมเดียวกัน (ภาพที่ 25) ทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาในการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่สั้นกว่าจึงส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการหดตัวและเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่น้อยกว่า สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Nadian และคณะ (2015) พบว่าการทำแห้งที่ใช้ระยะเวลาสั้นกว่าจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดน้อยกว่า จึงเป็นผลให้แอปเปิ้ลที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนเกิดการเปลี่ยนแปลงค่า b^* น้อยกว่า นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงค่า b^* ของตัวอย่างมีแนวโน้มที่ลดลง เมื่ออุณหภูมิลมร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุน อย่างไรก็ตามการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและไม่หมุนที่อุณหภูมิต่างๆ กับความเร็วลมที่ 1.5 m/s กลับส่งผลให้ค่า b^* มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการหดตัวของตัวอย่างที่เกิดมากที่สุดที่ความเร็วลม 1.5 m/s



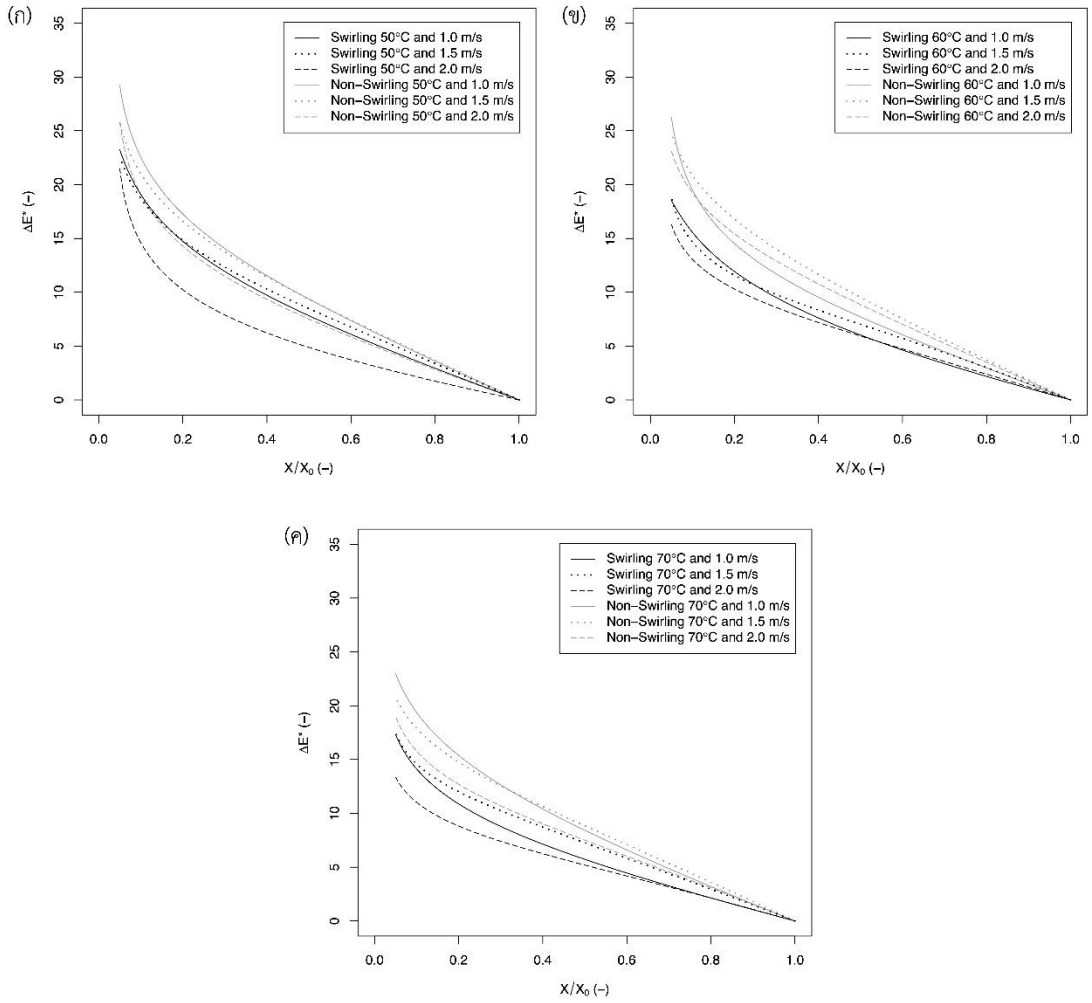
ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า b^*/b^*_0 กับปริมาณความชื้นของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่ความเร็วลมต่างๆ กับอุณหภูมิลมร้อนที่ (ก) 50 (ข) 60 และ (ค) 70°C

กลไกการเปลี่ยนแปลงค่า ΔE^* ของมะม่วงสุกในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุน

ภาพที่ 26 แสดงกลไกการเปลี่ยนแปลงค่า ΔE^* ของมะม่วงสุกในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่สภาวะต่างๆ พบว่า ΔE^* จะมีค่าเพิ่มขึ้นค่อนข้างเป็นเส้นตรงกับปริมาณความชื้น (X/X_0) ที่ลดลง จนถึงที่ปริมาณความชื้นประมาณ 0.2 ถึง 0.3 ในทุกๆ สภาวะการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของค่า ΔE^* จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณความชื้นที่เสียไป โดยจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับค่า L^* a^* และ b^* สำหรับในช่วงท้ายของการทำแห้ง ($X/X_0 < 0.2$) ค่า ΔE^* จะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (ภาพที่ 26 (ก) ถึง 26 (ค)) กับปริมาณ

ความชื้นที่ลดลงในทุกๆ สภาวะการทดลอง ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลง ΔE^* ในช่วงท้ายของการทำแห้งมีสาเหตุหลักมาจากการเกิดสีน้ำตาลของตัวอย่าง (การเปลี่ยนแปลงค่า L^* และ a^*) เนื่องจากตัวอย่างที่ทำแห้งในช่วงนี้จะมีค่า A_w ที่เหมาะสมสำหรับเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงค่า b^* ในช่วงท้ายของการทำแห้งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงค่า L^* และ a^* จากผลการทดลองจึงสามารถสรุปได้ว่าตัวอย่างมะม่วงสุกจะมีค่า ΔE^* เพิ่มขึ้นตลอดกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน สอดคล้องกับการรายงานของ Sturm และคณะ (2014) พบว่าค่า ΔE^* ของแอปเปิ้ลจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงแรกของการทำแห้งด้วยลมร้อน หลังจากนั้น ΔE^* จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งอัตราส่วนความชื้นของตัวอย่างมีค่าลดลงถึง 0.4 และหลังจากนั้น ΔE^* จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากอีกครั้งจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ อย่างไรก็ตาม Nadian และคณะ (2015) กลับพบว่าในช่วงแรกของการทำแห้งค่า ΔE^* ของแอปเปิ้ลจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นลดต่ำลง หลังจากนั้น ΔE^* จะมีค่าค่อนข้างคงที่จนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ และสำหรับ Pu และ Sun (2017) ได้รายงานว่าค่า ΔE^* ของมะม่วงจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วง 4 ชั่วโมงแรกของการทำแห้งด้วยลมร้อน หลังจากนั้น ΔE^* จะมีค่าลดลงอย่างช้าๆจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ

นอกจากนี้การทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนยังส่งผลให้ ΔE^* ของตัวอย่างมีค่าน้อยกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบไม่หมุนตลอดกระบวนการทำแห้ง เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิและความเร็วลมเดียวกัน (ภาพที่ 26) เนื่องจากการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนจะใช้ระยะเวลาในการทำแห้งสั้นกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบไม่หมุน โดย Corzo และ Álvarez (2014) ได้รายงานว่าการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อน และระยะเวลาในการทำแห้งจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของมะม่วงสูงขึ้น สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Malaikritsanachalee และคณะ (2018) พบว่าค่า ΔE^* ของสับปะรดที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนจะมีค่าน้อยกว่าสับปะรดที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบไม่หมุน เมื่อเปรียบเทียบที่สภาวะการทำแห้งเดียวกัน



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนสีทั้งหมดกับปริมาณความชื้นของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่ความเร็วลมต่างๆ กับอุณหภูมิลมร้อนที่ (ก) 50 (ข) 60 และ (ค) 70°C

ผลของอุณหภูมิ ความเร็ว และรูปแบบการไหลของลมต่อค่าการเปลี่ยนสีทั้งหมดของมะม่วงสุก

ค่าการเปลี่ยนสีทั้งหมดของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่สภาวะต่างๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 12 พบว่า ΔE^* ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนมีค่าอยู่ในช่วง 13.40 ถึง 24.44 ในขณะที่การทำแห้งด้วยลมร้อนแบบไม่หมุนส่งผลให้ ΔE^* ของตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วง 18.96 ถึง 29.24 โดยตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนจะมีค่า ΔE^* น้อยกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบไม่หมุนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เมื่อ

เปรียบเทียบที่อุณหภูมิและความเร็วลมเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ลมร้อนแบบหมุนจะสามารถลดการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนลงได้

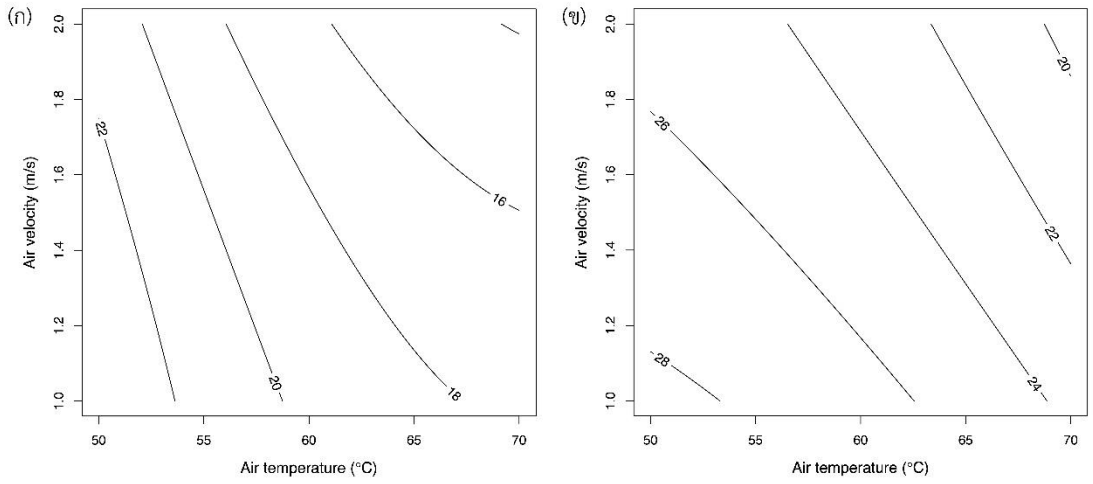
ตารางที่ 12 ค่าการเปลี่ยนสีทั้งหมดของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่สภาวะต่างๆ

สภาวะการทำแห้ง	ΔE^* (-)
การไหลแบบหมุน	
50°C และ 1.0 m/s	24.44 ± 0.86^{b}
50°C และ 1.5 m/s	21.59 ± 2.54^{cd}
50°C และ 2.0 m/s	21.64 ± 1.69^{cd}
60°C และ 1.0 m/s	19.22 ± 2.20^{de}
60°C และ 1.5 m/s	18.29 ± 0.73^{ef}
60°C และ 2.0 m/s	16.40 ± 2.29^{f}
70°C และ 1.0 m/s	17.44 ± 1.65^{ef}
70°C และ 1.5 m/s	16.78 ± 1.05^{ef}
70°C และ 2.0 m/s	13.40 ± 0.70^{g}
การไหลแบบไม่หมุน	
50°C และ 1.0 m/s	29.24 ± 1.94^{a}
50°C และ 1.5 m/s	26.12 ± 1.05^{b}
50°C และ 2.0 m/s	25.28 ± 3.22^{b}
60°C และ 1.0 m/s	25.58 ± 1.05^{b}
60°C และ 1.5 m/s	24.87 ± 2.30^{b}
60°C และ 2.0 m/s	23.70 ± 1.52^{bc}
70°C และ 1.0 m/s	23.93 ± 0.95^{bc}
70°C และ 1.5 m/s	21.68 ± 3.10^{cd}
70°C และ 2.0 m/s	18.96 ± 1.28^{ef}

$^{a-g}$ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

ผลของอุณหภูมิและความเร็วลมต่อค่าการเปลี่ยนสีทั้งหมดของมะม่วงสุก

ผลของอุณหภูมิและความเร็วลมต่อค่าการเปลี่ยนสีทั้งหมดของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนที่สภาวะต่างๆ แสดงอยู่ในภาพที่ 27 (ก) และ 27 (ข) ตามลำดับ พบว่า ΔE^* ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนทั้งแบบหมุนและแบบไม่หมุนจะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิลมร้อน 50°C กับความเร็วลมที่ 1.0 m/s โดย ΔE^* ของตัวอย่างจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิ และความเร็วลมทั้งในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนและแบบไม่หมุนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า ΔE^* ของตัวอย่างเป็นอย่างมาก ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมกลับส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงค่า ΔE^* อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองจึงสามารถสรุปได้ว่าการลดระยะเวลาในการทำแห้งจะส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงสีที่น้อยลง



ภาพที่ 27 ผลของอุณหภูมิและความเร็วลมต่อค่าการเปลี่ยนสีทั้งหมดของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อน (ก) แบบหมุน และ (ข) แบบไม่หมุน

ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุน

สภาวะการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุน

สำหรับในการทดลองนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_d) อุณหภูมิลมร้อน (T_a) และความเร็วลม (V_a) โดยสามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. ศึกษาผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างที่แตกต่างกัน คือ 5 10 และ 15°C และผลของอุณหภูมิลมร้อนที่แตกต่างกัน คือ 50 60 และ 70°C กับความเร็วลมที่ 2.0 m/s โดยสภาวะการทำแห้งทั้งหมดสำหรับการทดลองนี้แสดงอยู่ในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 สภาวะการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนในการศึกษาผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างและอุณหภูมิลมร้อน

อุณหภูมิลมร้อน (°C)	ความเร็วลม (m/s)	อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (°C)
50	2.0	5
50	2.0	10
50	2.0	15
60	2.0	5
60	2.0	10
60	2.0	15
70	2.0	5
70	2.0	10
70	2.0	15

2. ศึกษาผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างที่แตกต่างกัน คือ 5 10 และ 15°C และผลของความเร็วลมที่แตกต่างกัน คือ 1.0 1.5 และ 2.0 m/s กับอุณหภูมิลมร้อนที่ 70°C โดยสภาวะการทำแห้งทั้งหมดสำหรับการทดลองนี้แสดงอยู่ในตารางที่ 14

ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างและอุณหภูมิลมร้อนต่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

สำหรับในการทดลองนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างที่แตกต่างกัน คือ 5 10 และ 15°C และอุณหภูมิลมร้อนที่แตกต่างกัน คือ 50 60 และ 70°C ต่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ พบว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิจุดน้ำค้างมีค่าลดลง ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจะส่งผลให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน (ตารางที่ 15)

ตารางที่ 14 สภาวะการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนในการศึกษาผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างและความเร็วลม

อุณหภูมิลมร้อน (ºC)	ความเร็วลม (m/s)	อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (ºC)
70	1.0	5
70	1.0	10
70	1.0	15
70	1.5	5
70	1.5	10
70	1.5	15
70	2.0	5
70	2.0	10
70	2.0	15

ตารางที่ 15 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อุณหภูมิลมร้อนและอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่างๆ

อุณหภูมิลมร้อน (ºC)	อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (ºC)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
50	5	4.74
50	10	6.67
50	15	9.26
60	5	2.93
60	10	4.13
60	15	5.73
70	5	1.88
70	10	2.64
70	15	3.67

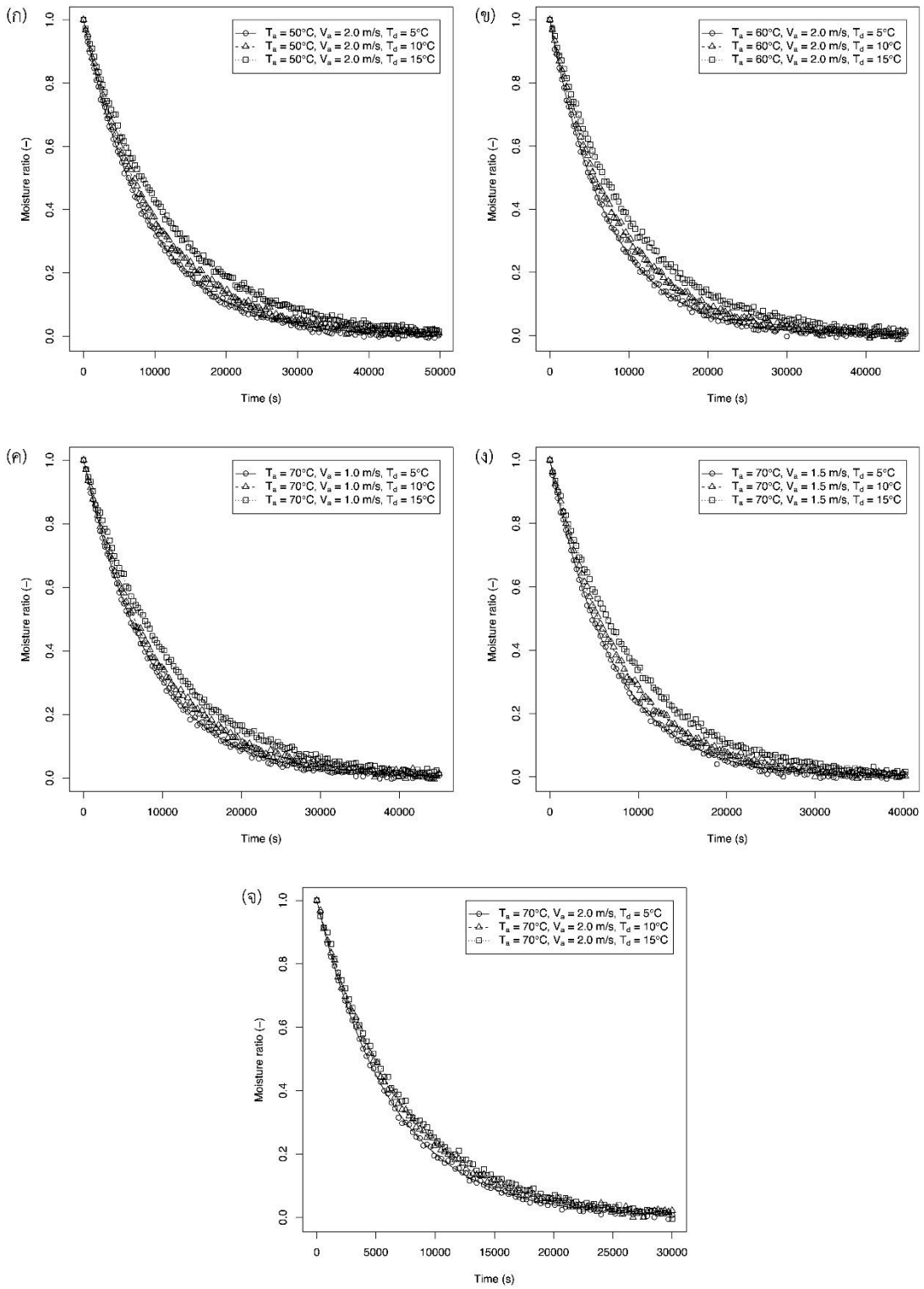
ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่อพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุก

ภาพที่ 28 แสดงกราฟการทำแห้งของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่สภาวะต่างๆ พบว่าอัตราส่วนความชื้นของตัวอย่างจะมีค่าลดลงแบบเอกซ์โพนเนนเชียลกับเวลาการทำแห้ง และเวลาในการทำแห้งจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิจุดน้ำค้างมีค่าลดลงในทุกๆ สภาวะการทดลอง โดยเวลาในการทำแห้งจะมีค่าลดลง 25 26 และ 15% เมื่ออุณหภูมิจุดน้ำค้างมีค่าลดลงจาก

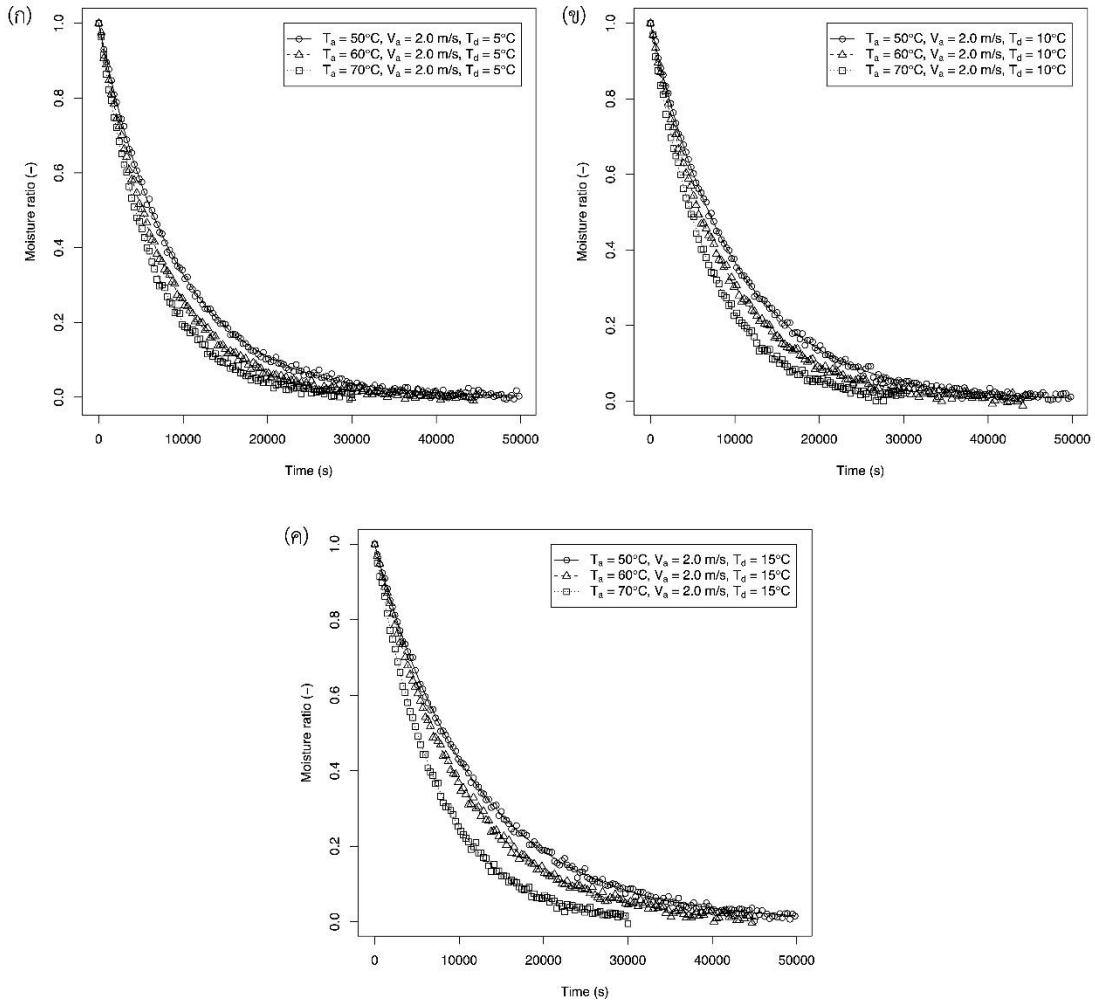
15 เป็น 5ºC ที่ความเร็วลม 2.0 m/s กับอุณหภูมิลมร้อนที่ 50 (ภาพที่ 28 (ก)) 60 (ภาพที่ 28 (ข)) และ 70ºC (ภาพที่ 28 (จ)) ตามลำดับ นอกจากนี้เวลาในการทำแห้งจะมีค่าลดลง 22 26 และ 15% เมื่ออุณหภูมิจุดน้ำค้างมีค่าลดลงจาก 15 เป็น 5ºC ที่อุณหภูมิลมร้อน 70ºC กับความเร็วลม 1.0 (ภาพที่ 28 (ค)) 1.5 (ภาพที่ 28 (ง)) และ 2.0 m/s (ภาพที่ 28 (จ)) ตามลำดับ เนื่องจากการลดอุณหภูมิจุดน้ำค้างจะส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าลดต่ำลง จึงเป็นผลให้เกิดการเพิ่มความแตกต่างของค่าความความดันไอระหว่างอากาศและตัวอย่าง ดังนั้นอัตราการระเหยน้ำออกจากตัวอย่างจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

ผลของอุณหภูมิลมร้อนต่อพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุก

กราฟการทำแห้งของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่ความเร็วลม 2.0 m/s กับอุณหภูมิจุดน้ำค้าง และอุณหภูมิลมร้อนที่แตกต่างกันแสดงอยู่ในภาพที่ 29 พบว่าเวลาในการทำแห้งจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิลมร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกๆ สภาวะการทดลอง โดยการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจาก 50 เป็น 70ºC ที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง 5 (ภาพที่ 29 (ก)) 10 (ภาพที่ 29 (ข)) และ 15ºC (ภาพที่ 29 (ค)) จะส่งผลให้เวลาในการทำแห้งมีค่าลดลง 64 65 และ 69% ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจะส่งผลให้อุณหภูมิของตัวอย่างเพิ่มสูงขึ้น จึงเป็นผลให้อัตราการระเหยน้ำของชิ้นตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (Joykumar Singh และ Pandey, 2012; Zhu และ Shen, 2014) ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Dissa และคณะ (2008) พบว่าเวลาในการทำแห้งมะม่วงจะมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิของลมร้อนให้สูงขึ้น



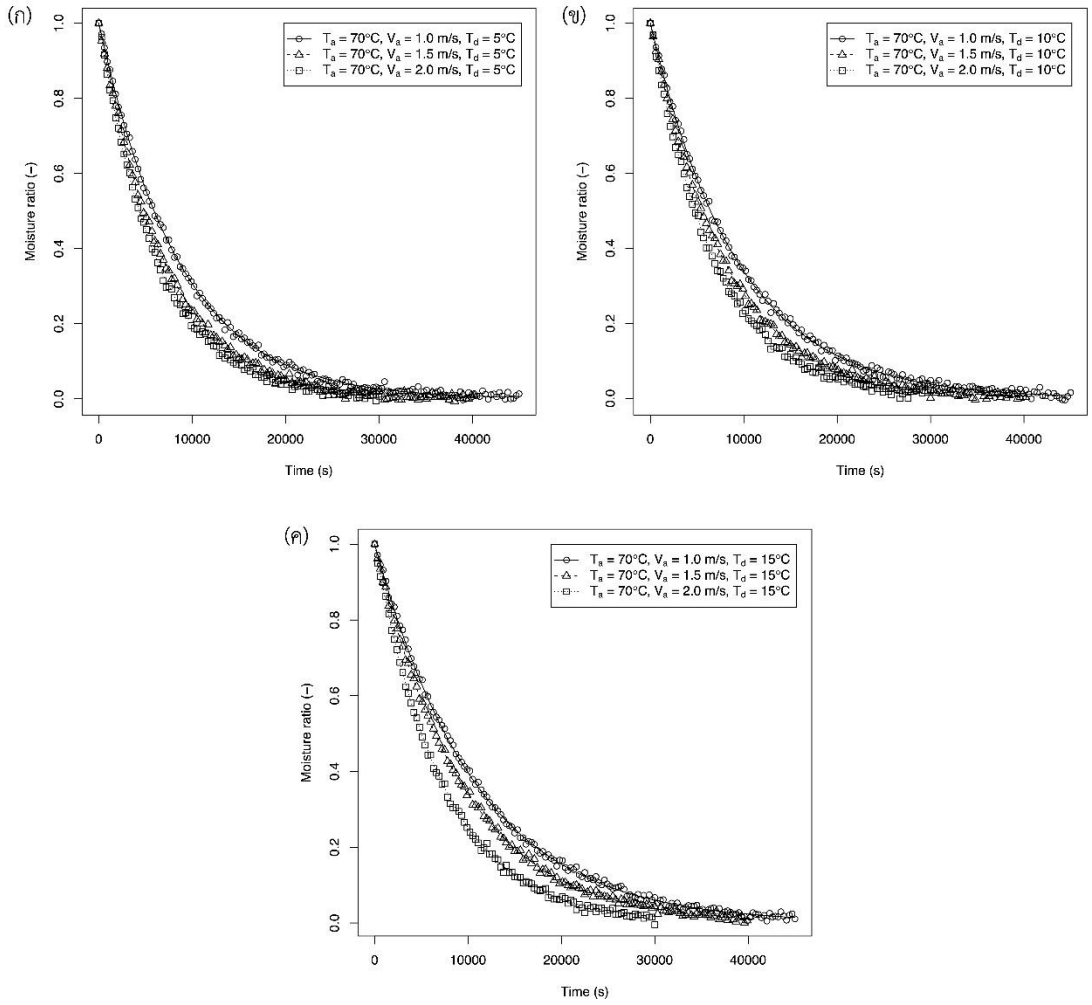
ภาพที่ 28 กราฟการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน (T_a) ความเร็วลม (V_a) และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_d) ต่างๆ



ภาพที่ 29 กราฟการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่ความเร็วลม (V_a) 2.0 m/s กับอุณหภูมิลมร้อน (T_a) ต่างๆ และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_d) ที่ (ก) 5 (ข) 10 และ (ค) 15°C

ผลของความเร็วลมต่อพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุก

ภาพที่ 30 แสดงกราฟการทำแห้งของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C กับความเร็วลม และอุณหภูมิจุดน้ำค้างที่แตกต่างกัน พบว่าเวลาในการทำแห้งจะมีค่าลดลงเมื่อความเร็วลมมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกๆ สภาวะการทดลอง โดยการเพิ่มความเร็วลมจาก 1.0 เป็น 2.0 m/s ที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง 5 (ภาพที่ 30 (ก)) 10 (ภาพที่ 30 (ข)) และ 15°C (ภาพที่ 30 (ค)) จะส่งผลให้เวลาในการทำแห้งมีค่าลดลง 25 26 และ 31% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความเร็วลมจะสามารถลดชั้นของไอน้ำบริเวณรอบผิวของตัวอย่าง จึงส่งผลให้การถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลระหว่างอากาศและตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (Aral และ Beşe, 2016)



ภาพที่ 30 กราฟการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน (T_a) 70ºC กับความเร็วลม (V_a) ต่างๆ และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_d) ที่ (ก) 5 (ข) 10 และ (ค) 15ºC

จลนพลศาสตร์การทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุน

แบบจำลอง Lewis แบบจำลอง Page แบบจำลอง Henderson and Pabis และแบบจำลอง Logarithmic เป็นแบบจำลองที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวเลือกในการอธิบายพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนแบบหมุน ซึ่งการเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับนำมาใช้ในการศึกษานี้ทำได้โดยอาศัยตัวบ่งชี้ทางสถิติ คือ R^2 *RMSE* และ χ^2 โดยแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดจะต้องมีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า *RMSE* และ χ^2 ต่ำที่สุด สำหรับค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 16 พบว่าแบบจำลอง Page มีค่า R^2 สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองการทำแห้งอื่นๆ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.9960 ถึง 0.9998 และมีค่า *RMSE* และ χ^2 ต่ำที่สุด

ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 3.3018×10^{-3} ถึง 1.6138×10^{-2} และ 1.0952×10^{-5} ถึง 2.6178×10^{-4} ตามลำดับ ดังนั้นแบบจำลอง Page จึงได้ถูกเลือกและนำมาใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนแบบหมุนในการศึกษานี้ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Goyal และคณะ (2006) และ Dissa และคณะ (2008) พบว่าแบบจำลอง Page เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงด้วยลมร้อน

ตารางที่ 16 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่สภาวะต่างๆ

สภาวะการทำแห้ง	No.	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R^2	*RMSE*	χ^2
50°C และ 2.0 m/s					
T_d = 5°C	[1]	$k = 1.0958\times10^{-4}$	0.9990	8.2074×10^{-3}	6.7514×10^{-5}
	[2]	$k = 9.6029\times10^{-5}$, $n = 1.0142$	**0.9991**	**7.8811×10^{-3}**	**6.2395×10^{-5}**
	[3]	$a = 1.0000$, $k = 1.0958\times10^{-4}$	0.9990	8.2074×10^{-3}	6.7668×10^{-5}
	[4]	$a = 0.9998$, $k = 1.0968\times10^{-4}$, $c = 3.0788\times10^{-4}$	0.9990	8.2077×10^{-3}	6.7828×10^{-5}
T_d = 10°C	[1]	$k = 1.0054\times10^{-4}$	0.9998	3.3182×10^{-3}	1.1036×10^{-5}
	[2]	$k = 9.8679\times10^{-5}$, $n = 1.0020$	0.9998	**3.3018×10^{-3}**	**1.0952×10^{-5}**
	[3]	$a = 1.0000$, $k = 1.0054\times10^{-4}$	0.9998	3.3182×10^{-3}	1.1062×10^{-5}
	[4]	$a = 1.0000$, $k = 1.0053\times10^{-4}$, $c = -5.9637\times10^{-5}$	0.9998	3.3182×10^{-3}	1.1088×10^{-5}
T_d = 15°C	[1]	$k = 8.3561\times10^{-5}$	0.9986	9.2017×10^{-3}	8.4862×10^{-5}
	[2]	$k = 9.5487\times10^{-5}$, $n = 0.9859$	**0.9987**	**8.8978×10^{-3}**	**7.9527×10^{-5}**
	[3]	$a = 1.0000$, $k = 8.3561\times10^{-5}$	0.9986	9.0217×10^{-3}	8.5053×10^{-5}
	[4]	$a = 0.9998$, $k = 8.3615\times10^{-5}$, $c = 2.6323\times10^{-4}$	0.9986	9.2018×10^{-3}	8.5247×10^{-5}
60°C และ 2.0 m/s					
T_d = 5°C	[1]	$k = 1.3621\times10^{-4}$	0.9986	9.5829×10^{-3}	9.2057×10^{-5}
	[2]	$k = 1.3219\times10^{-4}$, $n = 1.0033$	0.9986	**9.5685×10^{-3}**	**9.2007×10^{-5}**
	[3]	$a = 1.0000$, $k = 1.3621\times10^{-4}$	0.9986	9.5829×10^{-3}	9.2284×10^{-5}
	[4]	$a = 1.0002$, $k = 1.3598\times10^{-4}$, $c = -5.2972\times10^{-4}$	0.9986	9.5843×10^{-3}	9.2540×10^{-5}
T_d = 10°C	[1]	$k = 1.1478\times10^{-4}$	0.9981	9.7499×10^{-3}	9.5315×10^{-5}
	[2]	$k = 1.2818\times10^{-4}$, $n = 0.9879$	**0.9982**	**9.5771×10^{-3}**	**9.2213×10^{-5}**
	[3]	$a = 1.0236$, $k = 1.2227\times10^{-4}$	0.9951	1.5741×10^{-2}	2.4911×10^{-4}
	[4]	$a = 1.0001$, $k = 1.1476\times10^{-4}$, $c = -8.7209\times10^{-5}$	0.9981	9.7499×10^{-3}	9.5828×10^{-5}

ตัวอักษรหนาแสดงถึงค่า R^2 ที่สูงที่สุด และค่า *RMSE* และ χ^2 ที่ต่ำที่สุดในแต่ละสภาวะการทำแห้ง

ตารางที่ 16 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่สภาวะต่างๆ (ต่อ)

สภาวะการทำแห้ง	No.	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R^2	*RMSE*	χ^2
T_d = 15℃	[1]	$k = 1.0826\times10^{-4}$	0.9993	6.8977×10^{-3}	4.7703×10^{-5}
	[2]	$k = 1.1917\times10^{-4}$, $n = 0.9896$	0.9993	**6.6767×10^{-3}**	**4.4812×10^{-5}**
	[3]	$a = 1.0000$, $k = 1.0826\times10^{-4}$	0.9993	6.8977×10^{-3}	4.7828×10^{-5}
	[4]	$a = 1.0000$, $k = 1.0829\times10^{-4}$, $c = 8.1555\times10^{-5}$	0.9993	6.8978×10^{-3}	4.7954×10^{-5}
70℃ และ 1.0 m/s					
T_d = 5℃	[1]	$k = 1.1656\times10^{-4}$	0.9957	1.6735×10^{-2}	2.8080×10^{-4}
	[2]	$k = 9.0228\times10^{-5}$, $n = 1.0279$	**0.9960**	**1.6138×10^{-2}**	**2.6178×10^{-4}**
	[3]	$a = 1.0000$, $k = 1.1656\times10^{-4}$	0.9957	1.6735×10^{-2}	2.8153×10^{-4}
	[4]	$a = 1.0000$, $k = 1.1659\times10^{-4}$, $c = 7.7350\times10^{-5}$	0.9957	1.6735×10^{-2}	2.8227×10^{-4}
T_d = 10℃	[1]	$k = 1.0426\times10^{-4}$	0.9971	1.3754×10^{-2}	1.8963×10^{-4}
	[2]	$k = 8.6612\times10^{-5}$, $n = 1.0200$	**0.9972**	**1.3374×10^{-2}**	**1.7974×10^{-4}**
	[3]	$a = 1.0000$, $k = 1.0426\times10^{-4}$	0.9971	1.3754×10^{-2}	1.9009×10^{-4}
	[4]	$a = 0.9998$, $k = 1.0436\times10^{-4}$, $c = 3.4368\times10^{-4}$	0.9971	1.3754×10^{-2}	1.9056×10^{-4}
T_d = 15℃	[1]	$k = 9.2406\times10^{-5}$	0.9977	1.0408×10^{-2}	1.0860×10^{-4}
	[2]	$k = 8.2258\times10^{-5}$, $n = 1.0126$	0.9977	**1.0255×10^{-2}**	**1.0569×10^{-4}**
	[3]	$a = 1.0360$, $k = 1.0227\times10^{-4}$	0.9890	2.2583×10^{-2}	5.1253×10^{-4}
	[4]	$a = 0.9996$, $k = 9.2515\times10^{-5}$, $c = 5.4707\times10^{-4}$	0.9977	1.0409×10^{-2}	1.0915×10^{-4}
70℃ และ 1.5 m/s					
T_d = 5℃	[1]	$k = 1.4393\times10^{-4}$	0.9986	9.5455×10^{-3}	9.1346×10^{-5}
	[2]	$k = 1.2022\times10^{-4}$, $n = 1.0199$	**0.9988**	**9.0328×10^{-3}**	**8.2005×10^{-5}**
	[3]	$a = 1.0000$, $k = 1.4393\times10^{-4}$	0.9986	9.5455×10^{-3}	9.1577×10^{-5}
	[4]	$a = 1.0000$, $k = 1.4396\times10^{-4}$, $c = 7.9021\times10^{-5}$	0.9986	9.5455×10^{-3}	9.1810×10^{-5}
T_d = 10℃	[1]	$k = 1.2775\times10^{-4}$	0.9991	7.7527×10^{-3}	6.0212×10^{-5}
	[2]	$k = 1.0636\times10^{-4}$, $n = 1.0200$	**0.9992**	**7.1949×10^{-3}**	**5.1953×10^{-5}**
	[3]	$a = 1.0000$, $k = 1.2775\times10^{-4}$	0.9991	7.7527×10^{-3}	6.0321×10^{-5}
	[4]	$a = 0.9999$, $k = 1.2789\times10^{-4}$, $c = 3.2806\times10^{-4}$	0.9991	7.7540×10^{-3}	6.0451×10^{-5}
T_d = 15℃	[1]	$k = 1.0802\times10^{-4}$	0.9989	8.4902×10^{-3}	7.2233×10^{-5}
	[2]	$k = 9.5393\times10^{-5}$, $n = 1.0134$	**0.9990**	**8.2186×10^{-3}**	**6.7827×10^{-5}**
	[3]	$a = 1.0000$, $k = 1.0802\times10^{-4}$	0.9989	8.4902×10^{-3}	7.2383×10^{-5}
	[4]	$a = 1.0001$, $k = 1.0797\times10^{-4}$, $c = -1.5583\times10^{-4}$	0.9989	8.4903×10^{-3}	7.2536×10^{-5}

ตัวอักษรหนาแสดงถึงค่า R^2 ที่สูงที่สุด และค่า *RMSE* และ χ^2 ที่ต่ำที่สุดในแต่ละสภาวะการทำแห้ง

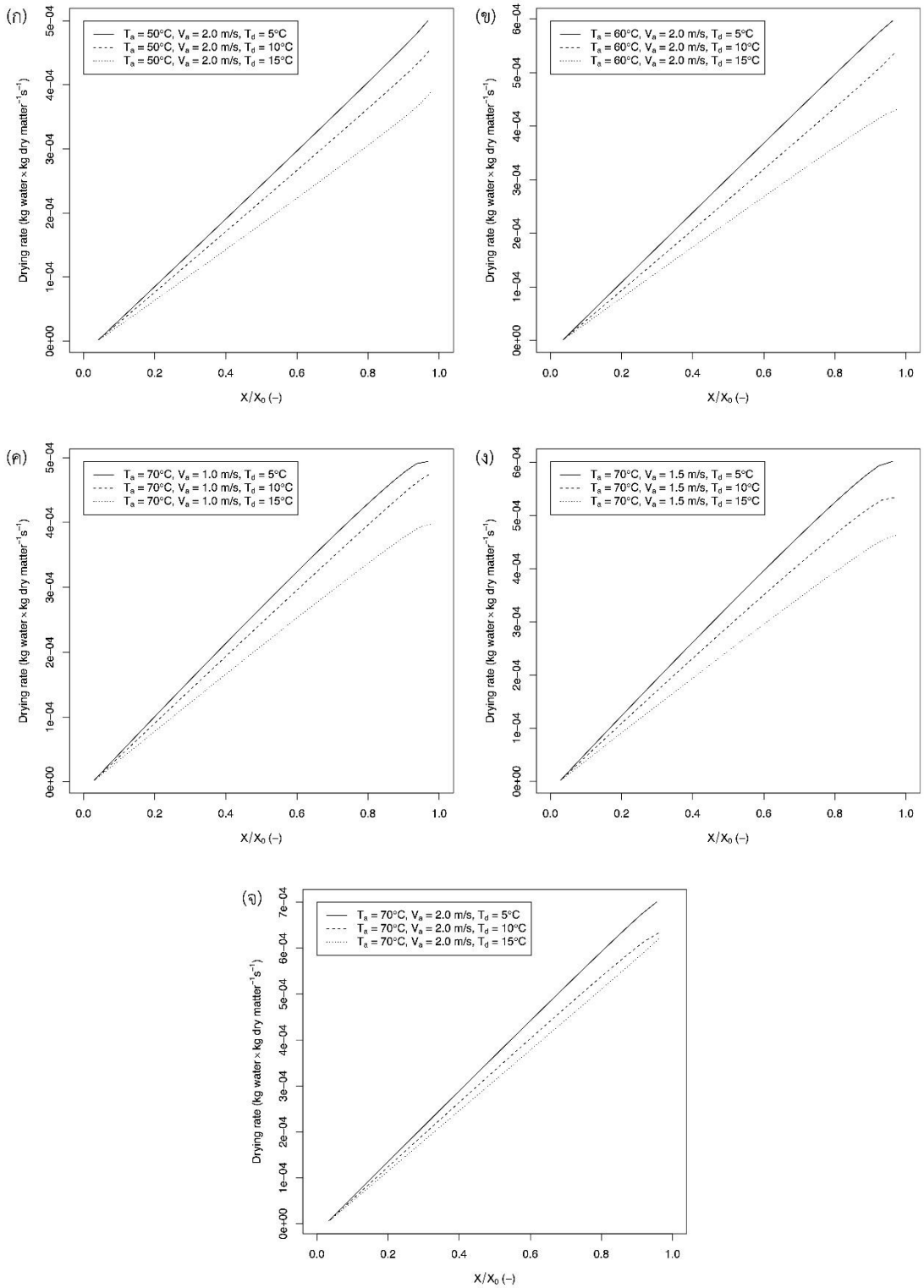
ตารางที่ 16 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่สภาวะต่างๆ (ต่อ)

สภาวะการทำแห้ง	No.	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R^2	*RMSE*	χ^2
70°C และ 2.0 m/s					
T_d = 5°C	[1]	$k = 1.6681\times10^{-4}$	0.9996	5.3604×10^{-3}	2.8837×10^{-5}
	[2]	$k = 1.7909\times10^{-4}$, $n = 0.9920$	0.9996	**5.1921×10^{-3}**	**2.7151×10^{-5}**
	[3]	$a = 1.0000$, $k = 1.6681\times10^{-4}$	0.9996	5.3604×10^{-3}	2.8940×10^{-5}
	[4]	$a = 0.9999$, $k = 1.6690\times10^{-4}$, $c = 1.9008\times10^{-4}$	0.9996	5.3606×10^{-3}	2.9046×10^{-5}
T_d = 10°C	[1]	$k = 1.4402\times10^{-4}$	0.9992	7.2176×10^{-3}	5.2314×10^{-5}
	[2]	$k = 1.4222\times10^{-4}$, $n = 1.0014$	0.9992	**7.2142×10^{-3}**	**5.2228×10^{-5}**
	[3]	$a = 1.0000$, $k = 1.4402\times10^{-4}$	0.9992	7.2176×10^{-3}	5.2363×10^{-5}
	[4]	$a = 1.0000$, $k = 1.4399\times10^{-4}$, $c = -7.4344\times10^{-5}$	0.9992	7.2176×10^{-3}	5.2499×10^{-5}
T_d = 15°C	[1]	$k = 1.3028\times10^{-4}$	0.9989	8.4752×10^{-3}	7.1971×10^{-5}
	[2]	$k = 1.4926\times10^{-4}$, $n = 0.9852$	**0.9990**	**8.1507×10^{-3}**	**6.6698×10^{-5}**
	[3]	$a = 1.0000$, $k = 1.3028\times10^{-4}$	0.9989	8.4752×10^{-3}	7.2115×10^{-5}
	[4]	$a = 1.0000$, $k = 1.3028\times10^{-4}$, $c = -7.9679\times10^{-6}$	0.9989	8.4752×10^{-3}	7.2259×10^{-5}

ตัวอักษรหนาแสดงถึงค่า R^2 ที่สูงที่สุด และค่า *RMSE* และ χ^2 ที่ต่ำที่สุดในแต่ละสภาวะการทำแห้ง

ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่ออัตราการทำแห้งมะม่วงสุก

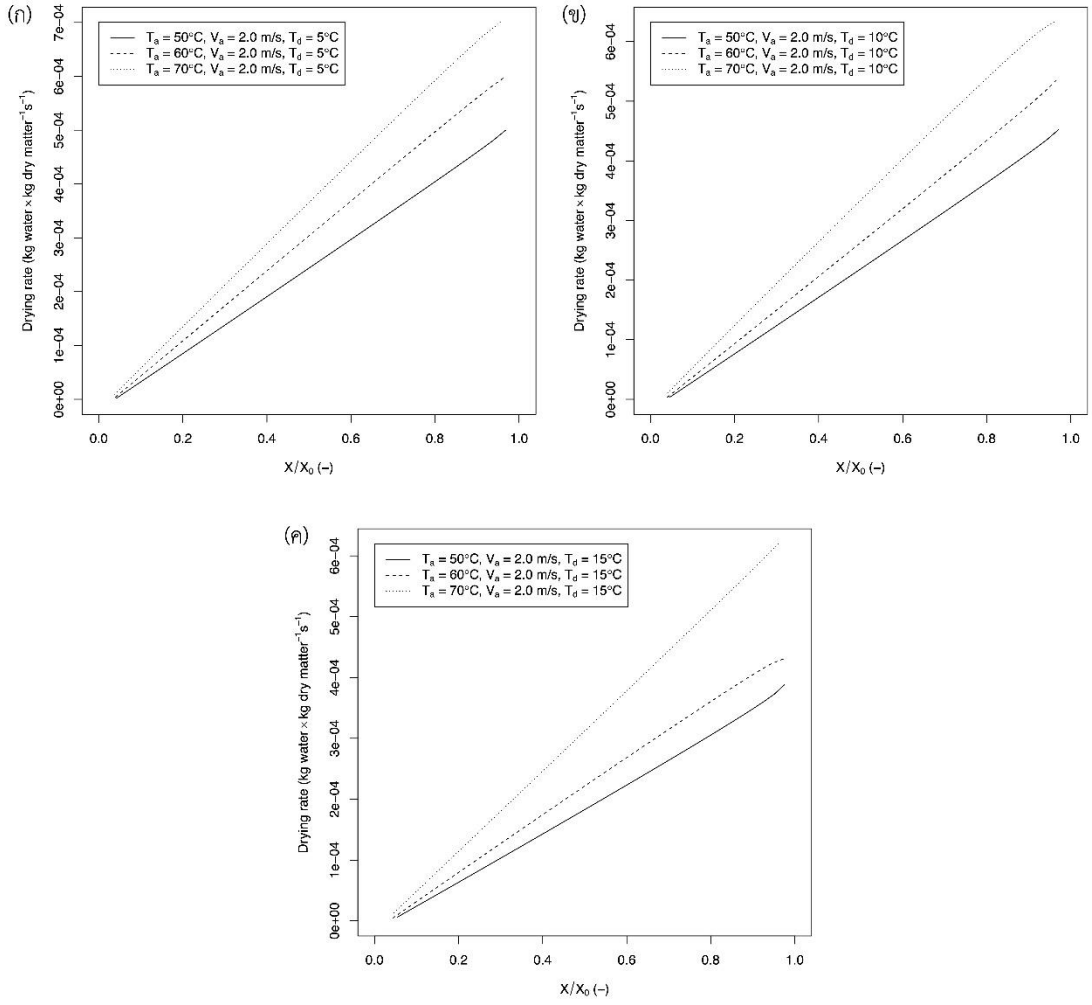
อัตราการทำแห้งของตัวอย่างจะแสดงอยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของชิ้นตัวอย่างต่อหนึ่งหน่วยเวลา โดยอัตราการทำแห้งของตัวอย่างที่สภาวะต่างๆ แสดงในภาพที่ 31 พบว่าการลดอุณหภูมิจุดน้ำค้างส่งผลให้อัตราการทำแห้งมีค่าสูงขึ้นในทุกๆ สภาวะการทดลอง นอกจากนี้อัตราการทำแห้งจะมีค่าลดลงแบบเชิงเส้นกับการลดลงของปริมาณความชื้นของตัวอย่างในทุกๆ สภาวะการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำแห้งมะม่วงสุกด้วยลมร้อนแบบหมุนจะพบเฉพาะช่วง falling rate period ทั้งนี้เนื่องจากการลดลงของปริมาณความชื้นในระหว่างกระบวนการทำแห้งจะส่งผลให้โมเลกุลของน้ำในชิ้นตัวอย่างเกิดการยึดเกาะกับองค์ประกอบต่างๆ ในตัวอย่างด้วยพันธะที่มีความแข็งแรงมากขึ้น (Telis-Romero และคณะ, 2005) จึงส่งผลให้อัตราการทำแห้งมีค่าลดลงตลอดกระบวนการ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ในการทำแห้งมะม่วงด้วยลมร้อน(Dissa และคณะ , 2008) และการทำแห้งมะม่วงด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (W. Wang และคณะ, 2018)



ภาพที่ 31 กราฟอัตราการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน (T_a) ความเร็วลม (V_a) และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_d) ต่างๆ

ผลของอุณหภูมิลมร้อนต่ออัตราการทำแห้งมะม่วงสุก

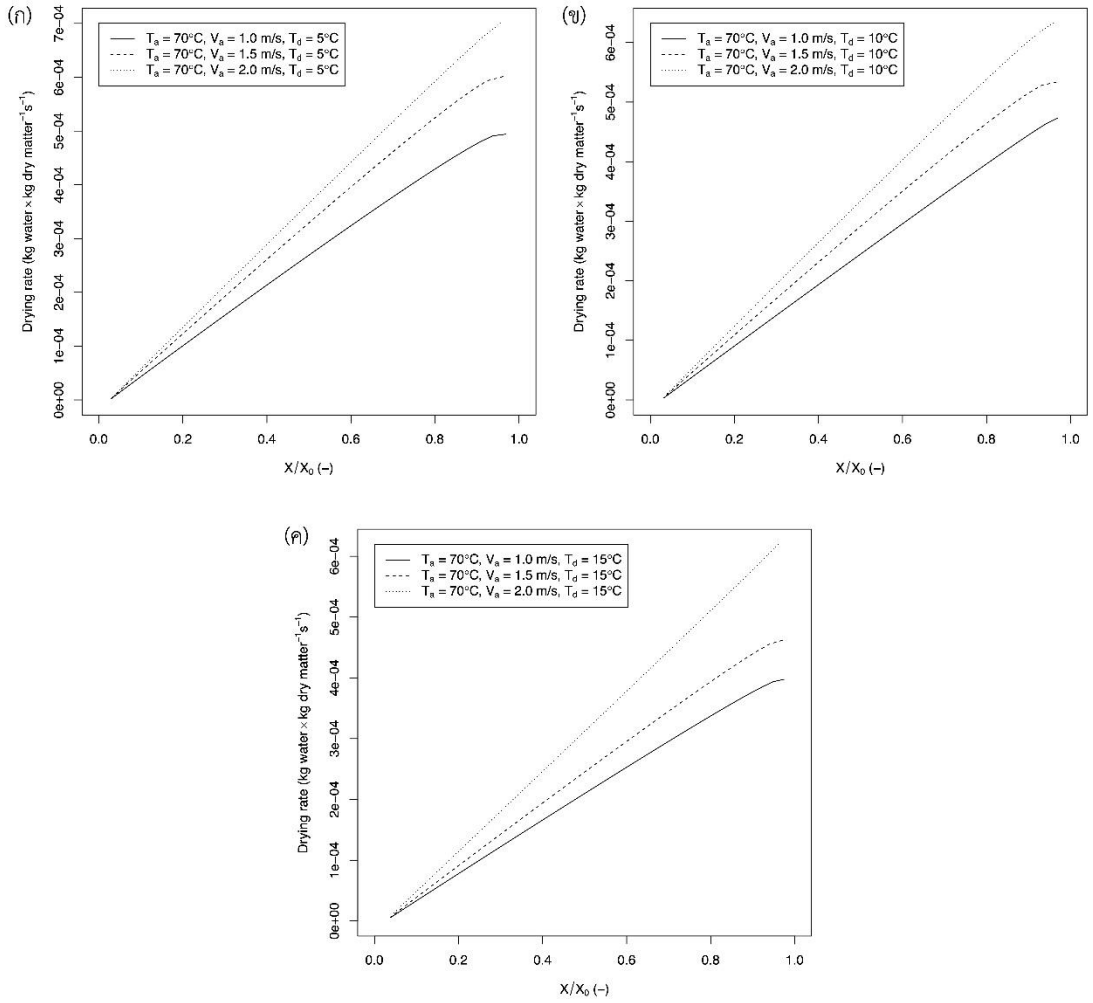
ภาพที่ 32 แสดงอัตราการทำแห้งของตัวอย่างที่ความเร็วลม 2.0 m/s กับอุณหภูมิจุดน้ำค้างและอุณหภูมิลมร้อนที่แตกต่างกัน พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนส่งผลให้อัตราการทำแห้งมีค่าสูงขึ้นในทุกๆ สภาวะการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนส่งผลให้อุณหภูมิของตัวตัวอย่างเพิ่มสูงขึ้น จึงเป็นผลให้อัตราการระเหยน้ำของตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 32 กราฟอัตราการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่ความเร็วลม (V_a) 2.0 m/s กับอุณหภูมิลมร้อน (T_a) ต่างๆ และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_d) ที่ (ก) 5 (ข) 10 และ (ค) 15°C

ผลของความเร็วลมต่ออัตราการทำแห้งมะม่วงสุก

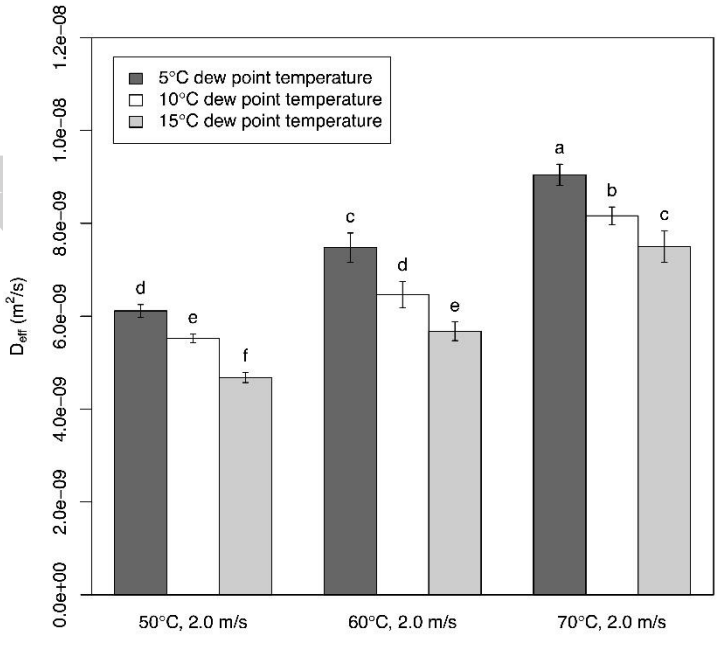
ภาพที่ 33 แสดงอัตราการทำแห้งของตัวอย่างที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C กับความเร็วลม และอุณหภูมิจุดน้ำค้างที่แตกต่างกัน พบว่าการเพิ่มความเร็วลมส่งผลให้อัตราการทำแห้งมีค่าสูงขึ้นในทุกๆ สภาวะการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเร็วลมจะสามารถลดชั้นของไอน้ำบริเวณรอบผิวของตัวอย่าง จึงส่งผลให้การถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลระหว่างอากาศและตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 33 กราฟอัตราการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน (T_a) 70°C กับความเร็วลม (V_a) ต่างๆ และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_d) ที่ (ก) 5 (ข) 10 และ (ค) 15°C

ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างและอุณหภูมิลมร้อนต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

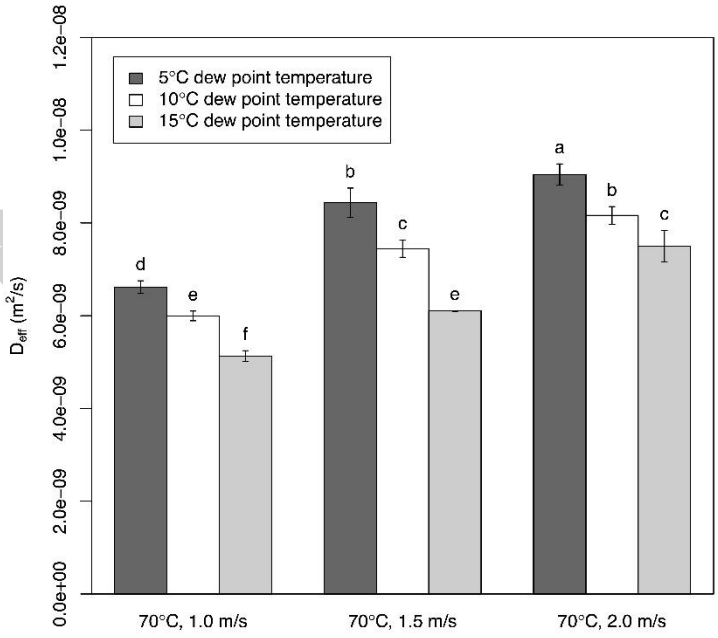
ค่า D_{eff} ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่ความเร็วลม 2.0 m/s กับอุณหภูมิจุดน้ำค้าง และอุณหภูมิลมร้อนที่แตกต่างกันแสดงอยู่ในภาพที่ 34 พบว่า D_{eff} ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนมีค่าอยู่ในช่วง (4.68 ถึง 9.04) × 10^{-9} m^2/s โดย D_{eff} จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เมื่ออุณหภูมิจุดน้ำค้างมีค่าลดลงในทุกๆ สภาวะการทดลอง นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนยังส่งผลให้ D_{eff} มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ในทุกๆ สภาวะการทดลองเช่นเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจุดน้ำค้างในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน 50 60 และ 70°C กับความเร็วลมที่ 2.0 m/s จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำแห้งมะม่วงสุกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในทำนองเดียวกันการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง 5 10 และ 15°C กับความเร็วลมที่ 2.0 m/s ก็ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำแห้งมะม่วงสุกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นเดียวกัน สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Corzo และคณะ (2008) พบว่า D_{eff} จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิลมร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 34 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่ความเร็วลม 2.0 m/s กับอุณหภูมิลมร้อน และอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่างๆ

ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างและความเร็วลมต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

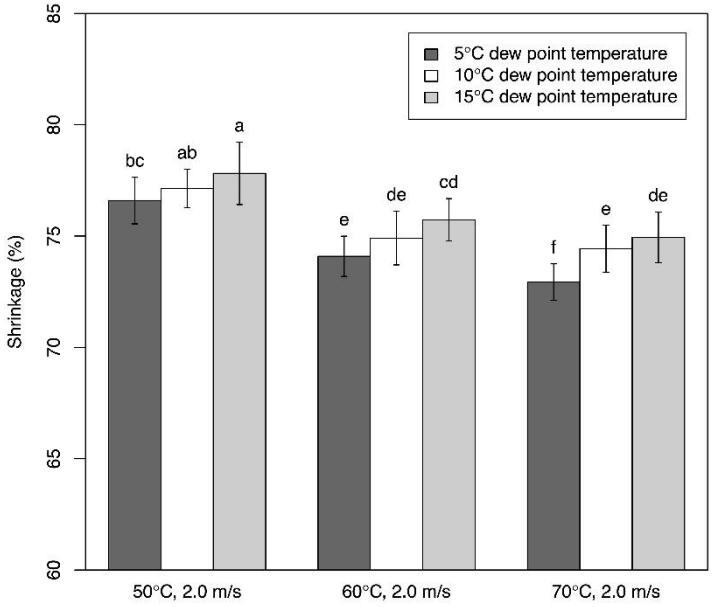
ภาพที่ 35 แสดงค่า D_{eff} ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C กับความเร็วลม และอุณหภูมิจุดน้ำค้างที่แตกต่างกัน พบว่า D_{eff} ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนมีค่าอยู่ในช่วง (5.13 ถึง 9.04) × 10^{-9} m^2/s โดย D_{eff} จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เมื่ออุณหภูมิจุดน้ำค้างมีค่าลดลงในทุกๆ สภาวะการทดลอง นอกจากนี้การเพิ่มความเร็วลมยังส่งผลให้ D_{eff} มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ในทุกๆ สภาวะการทดลองเช่นเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจุดน้ำค้างในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่ความเร็วลม 1.0 1.5 และ 2.0 m/s กับอุณหภูมิลมร้อนที่ 70°C จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำแห้งมะม่วงสุกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในทำนองเดียวกันการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง 5 10 และ 15°C กับอุณหภูมิลมร้อนที่ 70°C ก็ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำแห้งมะม่วงสุกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นเดียวกัน สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Corzo และคณะ (2008) พบว่า D_{eff} จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วลมมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 35 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C กับความเร็วลม และอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่างๆ

ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างและอุณหภูมิลมร้อนต่อร้อยละการหดตัวของมะม่วงสุก

ภาพที่ 36 แสดงร้อยละการหดตัวของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่ความเร็วลม 2.0 m/s กับอุณหภูมิจุดน้ำค้าง และอุณหภูมิลมร้อนที่แตกต่างกัน พบว่าร้อยละการหดตัวของตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วง 73 ถึง 78% โดยการลดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง และการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจะส่งผลให้ร้อยละการหดตัวของตัวอย่างมีแนวโน้มที่ลดลง สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Aral และ Beşe (2016) พบว่าการหดตัวของผลฮอร์ธอร์นจะลดลง เมื่ออุณหภูมิลมร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจุดน้ำค้างจาก 5 เป็น 15°C ในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน 50 60 และ 70°C กับความเร็วลมที่ 2.0 m/s ส่งผลต่อการหดตัวของมะม่วงสุกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนจาก 50 เป็น 70°C ในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง 5 10 และ 15°C กับความเร็วลมที่ 2.0 m/s จะส่งผลต่อต่อการหดตัวของมะม่วงสุกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการลดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง และการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจะส่งผลให้ระยะเวลาในการทำแห้งลดต่ำลง ดังนั้นระยะเวลาของตัวอย่างที่อยู่ในสถานะคล้ายยางจึงสั้นลง การหดตัวของตัวอย่างจึงเกิดขึ้นได้น้อยกว่า (Aral และ Beşe, 2016; Mayor และ Sereno, 2004) โดย Karathanos และคณะ (1996) ได้รายงานว่าตัวอย่างที่อยู่ในสถานะคล้ายยางจะเกิดการหดตัวเป็นสัดส่วนกับปริมาณความชื้นที่สูญเสียไปในระหว่างกระบวนการทำแห้ง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย จึงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางด้านกายภาพ และทางด้านเคมีในผลิตภัณฑ์อาหารได้ง่ายขึ้น (Roos, 2010) อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนอุณหภูมิจุดน้ำค้างจาก 5 เป็น 10°C หรือจาก 10 เป็น 15°C และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนจาก 60 เป็น 70°C กลับไม่ส่งผลให้ร้อยละการหดตัวของตัวอย่างมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในบางอุณหภูมิของลมร้อน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของระยะเวลาในการทำแห้งที่ไม่มากพอ ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจุดน้ำค้างหรืออุณหภูมิลมร้อนเพียงเล็กน้อย โดย Dissa และคณะ (2008) ได้รายงานว่าอุณหภูมิของลมร้อนมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการหดตัวของมะม่วงสุกในระหว่างกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน

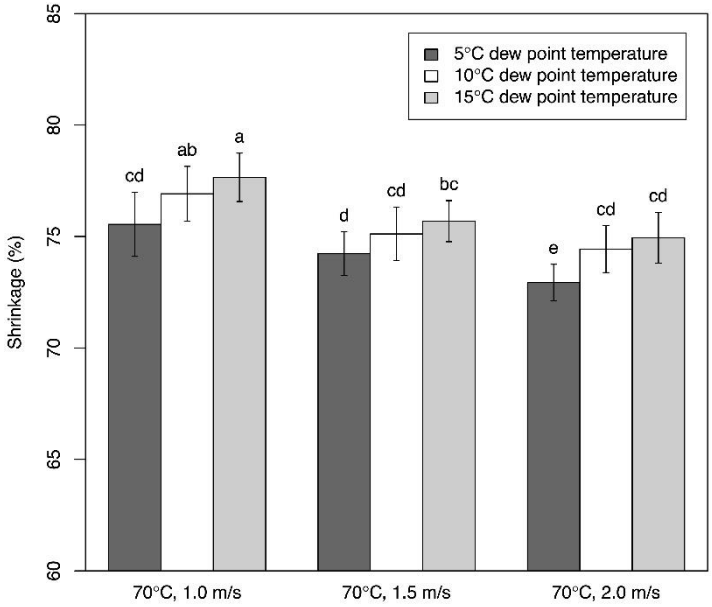


ภาพที่ 36 ร้อยละการหดตัวของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่ความเร็วลม 2.0 m/s กับอุณหภูมิลมร้อน และอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่างๆ

ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างและความเร็วลมต่อร้อยละการหดตัวของมะม่วงสุก

ภาพที่ 37 แสดงร้อยละการหดตัวของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน 70ºC กับความเร็วลม และอุณหภูมิจุดน้ำค้างที่แตกต่างกัน พบว่าร้อยละการหดตัวของตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วง 73 ถึง 78% โดยการลดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง และการเพิ่มความเร็วลมจะส่งผลให้ร้อยละการหดตัวของตัวอย่างมีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Aral และ Beşe (2016) พบว่าเมื่อความเร็วลมมีค่าเพิ่มสูงขึ้น การหดตัวของผลฮอร์ธอร์นจะมีค่าลดลง นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจุดน้ำค้างจาก 5 เป็น 15ºC ในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่ความเร็วลม 1.0 1.5 และ 2.0 m/s กับอุณหภูมิลมร้อนที่ 70ºC จะส่งผลต่อการหดตัวของมะม่วงสุกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมจาก 1.0 เป็น 2.0 m/s ในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง 5 10 และ 15ºC กับอุณหภูมิลมร้อนที่ 70ºC จะส่งผลต่อต่อการหดตัวของมะม่วงสุกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการลดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง และการเพิ่มความเร็วลมจะส่งผลให้ระยะเวลาในการทำแห้งลดต่ำลง ดังนั้นระยะเวลาของตัวอย่างที่อยู่ในสถานะคล้ายยางจึงสั้นลง การหดตัวของตัวอย่างจึงเกิดขึ้นได้น้อยกว่าดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนอุณหภูมิจุดน้ำค้างจาก 5 เป็น

10°C หรือจาก 10 เป็น 15°C และการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมจาก 1.0 เป็น 1.5 m/s หรือ 1.5 เป็น 2.0 m/s กลับไม่ส่งผลให้ร้อยละการหดตัวของตัวอย่างมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของระยะเวลาในการทำแห้งที่ไม่มากพอ ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจุดน้ำค้างหรือความเร็วลมเพียงเล็กน้อย



ภาพที่ 37 ร้อยละการหดตัวของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C กับความเร็วลม และอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่างๆ

ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างและอุณหภูมิลมร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีของมะม่วงสุก

ตารางที่ 17 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่ความเร็วลม 2.0 m/s กับอุณหภูมิจุดน้ำค้าง และอุณหภูมิลมร้อนที่แตกต่างกัน โดยค่าการเปลี่ยนแปลงสีจะแสดงอยู่ในรูปของ ΔL^* Δa^* และ Δb^* พบว่าค่า ΔL^* ในทุกๆ สภาวะการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง -24.34 ถึง -15.47 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความสว่างของตัวอย่างมีค่าลดลงภายหลังจากการทำแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ในการทำแห้งมะม่วงด้วยลมร้อน (Corzo และ Álvarez, 2014; Link และคณะ, 2017; Sehrawat และคณะ, 2018) นอกจากนี้ยังพบว่าการลดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง และการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจะส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของค่า L^* มีแนวโน้มที่ลดลง โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจุดน้ำค้างจาก 5 เป็น 15°C ในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน 60°C กับความเร็วลมที่ 2.0 m/s ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า L^*

อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนอุณหภูมิจุดน้ำค้างในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน 50 และ 70°C กับความเร็วลมที่ 2.0 m/s กลับไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า L^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนจาก 50 เป็น 70°C ในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง 5 10 และ 15°C กับความเร็วลมที่ 2.0 m/s จะส่งผลต่อต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า L^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) สำหรับค่า Δa^* พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 4.51 ถึง 7.91 ในทุกๆ สภาวะการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างมีค่าสีแดงเพิ่มขึ้นภายหลังจากการทำแห้ง สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Pu และ Sun (2017) พบว่าค่า a^* ของตัวอย่างมะม่วงจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อระยะเวลาในการทำแห้งด้วยลมร้อนเพิ่มขึ้น โดยการทำแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C กับอุณหภูมิจุดน้ำค้าง 5°C และความเร็วลมที่ 2.0 m/s จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่า a^* น้อยกว่าสภาวะอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ในขณะที่สภาวะอื่นๆ กลับไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการลดลงของค่า L^* และการเพิ่มขึ้นของค่า a^* บ่งชี้ให้เห็นว่าตัวอย่างมีสีที่คล้ำขึ้น (สีน้ำตาลเพิ่มขึ้น) ทั้งนี้การเกิดสีน้ำตาลของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ โดยปฏิกิริยานี้จะสามารถเกิดขึ้นได้ในกระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนไม่เกิน 60°C (Park และคณะ, 1980) ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิลมร้อน 60°C หรือมากกว่าจะสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ polyphenol oxidase ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Sturm และคณะ, 2012) ดังนั้นจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C จะมีการเปลี่ยนแปลงค่า L^* น้อยกว่าที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิจุดน้ำค้างเดียวกัน นอกจากนี้ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ประเภทปฏิกิริยาเมลลาร์ดก็เป็นอีกหนึ่งสาเหตุของการเกิดสีน้ำตาลในผลไม้ที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนด้วยเช่นเดียวกัน (Malaikritsanachalee และคณะ, 2018; Nadian และคณะ, 2015; L A Ramallo และ Mascheroni, 2012) ซึ่งปฏิกิริยาเมลลาร์ดเป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) และกรดอมิโน (amino acid) ที่สามารถพบได้ในตัวอย่างมะม่วงสุก และจะส่งผลให้เกิดการสร้างรงควัตถุ (pigment) ที่มีสีน้ำตาลขึ้นในตัวอย่าง และสำหรับการหดตัวของตัวอย่างก็เป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ส่งผลให้ตัวอย่างมีสีคล้ำขึ้น โดยการหดตัวของตัวอย่างจะส่งผลให้ความทึบแสงของตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (Nadian และคณะ, 2015; Sturm และคณะ, 2012) ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าการลดอุณหภูมิลมร้อน และการเพิ่มอุณหภูมิจุดน้ำค้างจะส่งผลให้แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่า L^* มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสภาวะดังกล่าวใช้ระยะเวลาในการทำแห้งนานขึ้น จึงส่งผลให้ตัวอย่างมีระยะเวลาในการสร้างรงควัตถุที่มีสีน้ำตาลจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดได้มากกว่า (Nadian และคณะ, 2015) และยังรวมถึงการหดตัวของตัวอย่างที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้น (ภาพที่ 36)

สำหรับ Δb^* ของตัวอย่าง พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 10.08 ถึง 12.18 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าสีเหลืองของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นภายหลังจากการทำแห้ง สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Corzo และ Álvarez (2014) และ Pu และ Sun (2017) พบว่าสีเหลืองของมะม่วงสุกจะเพิ่มขึ้นภายหลังจากการทำแห้งด้วยลมร้อน โดยการเพิ่มขึ้นของสีเหลืองในตัวอย่างเป็นผลมาจากการเพิ่มความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ในชิ้นตัวอย่างจากการที่ตัวอย่างเกิดการหดตัวที่มากขึ้น (Nadian และคณะ, 2015) นอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์และปฏิกิริยาเมลลาร์ดก็ส่งผลให้ค่า b^* ของตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (Nadian และคณะ, 2015; Sturm และคณะ, 2012) อย่างไรก็ตามกลับพบว่าการเปลี่ยนอุณหภูมิลมร้อน และอุณหภูมิจุดน้ำค้างกลับไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า b^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 17 ค่าสี (ΔL^* Δa^* และ Δb^*) ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่ความเร็วลม 2.0 m/s กับอุณหภูมิลมร้อน และอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่างๆ

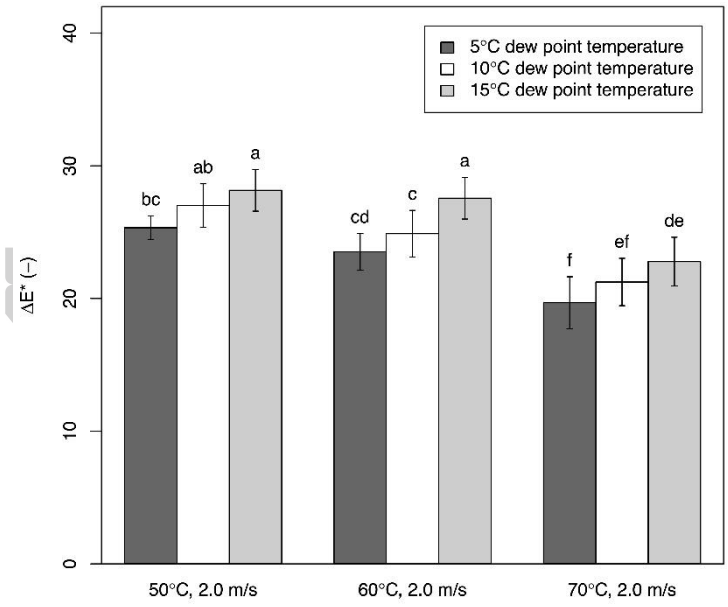
สภาวะการทำแห้ง	ΔL^*	Δa^*	Δb^*
T_a = 50°C, T_d = 5°C	-21.98 ± 1.14^{de}	6.98 ± 1.50^{a}	10.35 ± 1.04^{ab}
T_a = 50°C, T_d = 10°C	-23.87 ± 2.45^{e}	7.08 ± 0.96^{a}	10.11 ± 1.34^{b}
T_a = 50°C, T_d = 15°C	-24.29 ± 1.79^{e}	7.14 ± 1.28^{a}	11.37 ± 1.04^{ab}
T_a = 60°C, T_d = 5°C	-19.07 ± 1.61^{bc}	7.10 ± 1.02^{a}	11.69 ± 1.63^{ab}
T_a = 60°C, T_d = 10°C	-21.03 ± 1.99^{cd}	7.17 ± 1.56^{a}	10.08 ± 0.95^{b}
T_a = 60°C, T_d = 15°C	-24.34 ± 2.05^{e}	7.91 ± 1.43^{a}	10.51 ± 1.22^{ab}
T_a = 70°C, T_d = 5°C	-15.47 ± 2.92^{a}	4.51 ± 0.78^{b}	12.18 ± 1.22^{a}
T_a = 70°C, T_d = 10°C	-17.08 ± 1.98^{ab}	6.89 ± 1.12^{a}	10.89 ± 0.58^{ab}
T_a = 70°C, T_d = 15°C	-18.28 ± 1.73^{abc}	7.25 ± 0.95^{a}	11.94 ± 1.83^{ab}

$^{a-e}$ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างและอุณหภูมิลมร้อนต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมดของมะม่วงสุก

ค่า ΔE^* ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่ความเร็วลม 2.0 m/s กับอุณหภูมิจุดน้ำค้าง และอุณหภูมิลมร้อนที่แตกต่างกันแสดงอยู่ในภาพที่ 38 พบว่าค่า ΔE^* ของตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วง 19.68 ถึง 28.15 นอกจากนี้ยังพบว่าการลดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง และการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจะส่งผลให้ค่า ΔE^* มีแนวโน้มที่ลดลง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจุดน้ำค้างจาก 5 เป็น

15°C ในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน 50 60 และ 70°C กับความเร็วลมที่ 2.0 m/s ส่งผลให้ ΔE^* มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนจาก 50 เป็น 70°C ในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง 5 10 และ 15°C กับความเร็วลมที่ 2.0 m/s ส่งผลต่อการลดลงของค่า ΔE^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการลดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง และการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจะส่งผลให้ระยะเวลาในการทำแห้งลดต่ำลง ดังนั้นระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์และปฏิกิริยาเมลลาร์ด รวมถึงการหดตัวของตัวอย่างจึงเกิดขึ้นได้น้อยกว่า จึงส่งผลให้สีของตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่า อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนอุณหภูมิจุดน้ำค้างจาก 5 เป็น 10°C หรือจาก 10 เป็น 15°C กลับไม่ส่งผลให้ค่า ΔE^* ของตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของระยะเวลาในการทำแห้งที่ไม่มากพอ ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจุดน้ำค้างเพียงเล็กน้อย



ภาพที่ 38 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมดของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่ความเร็วลม 2.0 m/s กับอุณหภูมิลมร้อน และอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่างๆ

ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างและความเร็วลมต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีของมะม่วงสุก

ตารางที่ 18 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C กับความเร็วลม และอุณหภูมิจุดน้ำค้างที่แตกต่างกัน โดยค่าการเปลี่ยนแปลงสีจะแสดงอยู่ในรูปของ ΔL^* Δa^* และ Δb^* พบว่าค่า ΔL^* ในทุกๆ สภาวะการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง -15.47 ถึง -23.40 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความสว่างของตัวอย่างมีค่าลดลงภายหลังจากการทำแห้งเช่นเดียวกับผลของการทำแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 50 และ 60°C กับอุณหภูมิจุดน้ำค้างที่ 5 10 และ 15°C กับความเร็วลมที่ 2.0 m/s (ตารางที่ 17) นอกจากนี้ยังพบว่าการลดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง และการเพิ่มความเร็วลมจะส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของค่า L^* มีแนวโน้มที่ลดลง โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจุดน้ำค้างจาก 5 เป็น 15°C ในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C กับความเร็วลมที่ 1.0 และ 1.5 m/s ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า L^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนอุณหภูมิจุดน้ำค้างจาก 5 เป็น 10°C หรือจาก 10 เป็น 15°C และการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมจาก 1.0 เป็น 1.5 m/s หรือ 1.5 เป็น 2.0 m/s กลับไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า L^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมจาก 1.0 เป็น 2.0 m/s ในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง 5 10 และ 15°C กับอุณหภูมิลมร้อนที่ 70°C จะส่งผลต่อต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า L^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) สำหรับค่า Δa^* พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 4.51 ถึง 7.41 ในทุกๆ สภาวะการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างมีค่าสีแดงเพิ่มขึ้นภายหลังจากการทำแห้งเช่นเดียวกับผลของการทำแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 50 และ 60°C กับอุณหภูมิจุดน้ำค้างที่ 5 10 และ 15°C กับความเร็วลมที่ 2.0 m/s (ตารางที่ 17) โดยการทำแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C กับอุณหภูมิจุดน้ำค้าง 5°C และความเร็วลมที่ 2.0 m/s มีการเปลี่ยนแปลงของค่า a^* น้อยกว่าสภาวะอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ในขณะที่สภาวะอื่นๆ กลับไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการลดลงของค่า L^* และการเพิ่มขึ้นของค่า a^* บ่งชี้ให้เห็นว่าตัวอย่างมีสีน้ำตาลเพิ่มขึ้นดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น อย่างไรก็ตามจะไม่พบปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ เนื่องจากตัวอย่างถูกทำแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C ที่อุณหภูมิดังกล่าวจะสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ polyphenol oxidase ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Sturm และคณะ, 2012) ดังนั้นการเกิดสีน้ำตาลของตัวอย่างเป็นผลมาจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด และการหดตัวของตัวอย่าง ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อลดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง และเพิ่มความเร็วลมจะส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของค่า L^* มีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากการลดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง และเพิ่มความเร็วลมจะส่งผลให้ระยะเวลาในการทำแห้งสั้นลง การสร้างรงควัตถุที่มีสีน้ำตาลจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์และปฏิกิริยาเมลลาร์ดในระหว่างกระบวนการทำแห้งจึงเกิดได้น้อยลง (Nadian และคณะ, 2015) และยังรวมถึงการหดตัวของตัวอย่างที่มีค่าลดต่ำลง (ภาพที่ 37)

สำหรับ Δb^* ของตัวอย่าง พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 10.88 ถึง 12.26 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าสีเหลืองของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นภายหลังจากการทำแห้ง เช่นเดียวกับผลของการทำแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 50 และ 60ºC กับอุณหภูมิจุดน้ำค้างที่ 5 10 และ 15ºC กับความเร็วลมที่ 2.0 m/s (ตารางที่ 17) อย่างไรก็ตามกลับพบว่าการเปลี่ยนความเร็วลม และอุณหภูมิจุดน้ำค้างกลับไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า b^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 18 ค่าสี (ΔL^* Δa^* และ Δb^*) ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน 70ºC กับความเร็วลม และอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่างๆ

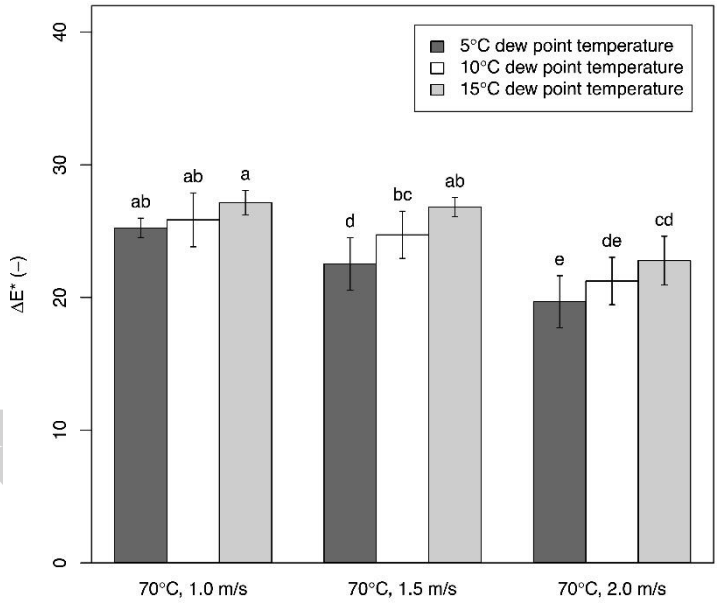
สภาวะการทำแห้ง	ΔL^*	Δa^*	Δb^*
V_a = 1.0 m/s, T_d = 5ºC	-20.10 ± 1.85^{bc}	6.85 ± 0.82^{a}	12.26 ± 1.29
V_a = 1.0 m/s, T_d = 10ºC	-22.14 ± 1.74^{cd}	6.57 ± 1.20^{a}	11.56 ± 1.22
V_a = 1.0 m/s, T_d = 15ºC	-23.40 ± 1.38^{d}	7.41 ± 0.98^{a}	12.02 ± 1.01
V_a = 1.5 m/s, T_d = 5ºC	-17.71 ± 2.10^{ab}	6.75 ± 0.70^{a}	10.99 ± 1.72
V_a = 1.5 m/s, T_d = 10ºC	-20.20 ± 2.35^{bc}	7.27 ± 1.24^{a}	11.89 ± 1.55
V_a = 1.5 m/s, T_d = 15ºC	-23.36 ± 1.46^{d}	7.15 ± 0.87^{a}	10.88 ± 1.56
V_a = 2.0 m/s, T_d = 5ºC	-15.47 ± 2.92^{a}	4.51 ± 0.78^{b}	12.18 ± 1.22
V_a = 2.0 m/s, T_d = 10ºC	-17.08 ± 1.98^{a}	6.89 ± 1.12^{a}	10.89 ± 0.58
V_a = 2.0 m/s, T_d = 15ºC	-18.28 ± 1.73^{ab}	7.25 ± 0.95^{a}	11.94 ± 1.83

$^{a-d}$ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างและความเร็วลมต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมดของมะม่วงสุก

ภาพที่ 39 แสดงค่า ΔE^* ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน 70ºC กับความเร็วลม และอุณหภูมิจุดน้ำค้างที่แตกต่างกัน พบว่าค่า ΔE^* ของตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วง 19.68 ถึง 27.14 นอกจากนี้ยังพบว่าการลดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง และการเพิ่มความเร็วลมจะส่งผลให้ค่า ΔE^* มีแนวโน้มที่ลดลง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจุดน้ำค้างจาก 5 เป็น 15ºC ในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่ความเร็วลม 1.5 และ 2.0 m/s กับอุณหภูมิลมร้อนที่ 70ºC ส่งผลให้ ΔE^* มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมจาก 1.0 เป็น 2.0 m/s ในกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง 5 10 และ 15ºC กับอุณหภูมิลมร้อนที่ 70ºC ส่งผลต่อการลดลงของค่า ΔE^* ของมะม่วงสุกอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) ทั้งนี้เนื่องจากการลดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง และการเพิ่มความเร็วลมจะช่วยลดระยะเวลาในการทำแห้งลง ดังนั้นระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์และปฏิกิริยาเมลลาร์ด รวมถึงการหดตัวของตัวอย่างจึงเกิดขึ้นได้น้อยลง จึงส่งผลให้สีของตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่า อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนอุณหภูมิจุดน้ำค้างจาก 5 เป็น 10°C หรือจาก 10 เป็น 15°C กลับไม่ส่งผลให้ค่า ΔE^* ของตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมจาก 1.0 เป็น 1.5 m/s ที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง 10 และ 15°C กลับไม่ส่งผลให้ค่า ΔE^* ของตัวอย่างมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วยเช่นกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของระยะเวลาในการทำแห้งที่ไม่มากพอ ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจุดน้ำค้าง และความเร็วลมเพียงเล็กน้อย



ภาพที่ 39 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมดของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C กับความเร็วลม และอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่างๆ

จลนพลศาสตร์การคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุน

แบบจำลอง First order แบบจำลอง Weibull และแบบจำลอง Peleg เป็นแบบจำลองที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวเลือกในการอธิบายพฤติกรรมการคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุน ซึ่งการเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับนำมาใช้ในการศึกษานี้ทำได้โดยอาศัยตัวบ่งชี้ทางสถิติ คือ R^2 *RMSE* และ χ^2 โดยแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดจะต้องมีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า *RMSE*

และ χ^2 ต่ำที่สุด สำหรับค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการคืนน้ำของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 19 พบว่าแบบจำลอง Weibull มีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า *RMSE* และ χ^2 ต่ำที่สุด อย่างไรก็ตามในบางสภาวะการทำแห้งที่อุณหภูมิจุดน้ำค้างที่ 10 และ 15°C พบว่าแบบจำลอง Peleg จะมีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า *RMSE* และ χ^2 ต่ำที่สุด ดังนั้นแบบจำลอง Weibull และ Peleg จึงได้ถูกเลือก และนำมาใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนในการศึกษานี้ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Benseddik และคณะ (2019) พบว่าแบบจำลอง Weibull เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมการคืนน้ำของฟักทองที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อน

ตารางที่ 19 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่สภาวะต่างๆ

สภาวะการทำแห้ง	No.	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R^2	*RMSE*	χ^2
50°C และ 2.0 m/s					
T_d = 5°C	[6]	$K = 4.6256\times10^{-4}$	0.9983	1.2027×10^{-2}	1.5430×10^{-4}
	[7]	$\alpha = 1.0232$, $\beta = 2.1735\times10^{3}$	**0.9984**	**1.1555×10^{-2}**	**1.5258×10^{-4}**
	[8]	$K_1 = 4.4536\times10^{2}$, $K_2 = 0.2004$	0.9947	2.1041×10^{-2}	5.0595×10^{-4}
T_d = 10°C	[6]	$K = 4.5129\times10^{-4}$	0.9974	1.4539×10^{-2}	2.2549×10^{-4}
	[7]	$\alpha = 0.9830$, $\beta = 2.2063\times10^{3}$	**0.9987**	**1.0232×10^{-2}**	**1.1965×10^{-4}**
	[8]	$K_1 = 4.0911\times10^{2}$, $K_2 = 0.1784$	0.9975	1.4312×10^{-2}	2.3409×10^{-4}
T_d = 15°C	[6]	$K = 3.5966\times10^{-4}$	0.9788	4.5225×10^{-2}	2.1817×10^{-2}
	[7]	$\alpha = 1.3380$, $\beta = 2.9019\times10^{3}$	**0.9994**	**7.7007×10^{-3}**	**6.7773×10^{-5}**
	[8]	$K_1 = 7.9756\times10^{2}$, $K_2 = 0.1637$	0.9883	3.3592×10^{-2}	1.2896×10^{-3}
60°C และ 2.0 m/s					
T_d = 5°C	[6]	$K = 6.3078\times10^{-4}$	0.9960	1.6813×10^{-2}	3.0033×10^{-4}
	[7]	$\alpha = 0.8734$, $\beta = 1.5293\times10^{3}$	**0.9997**	**4.6855×10^{-3}**	**2.4881×10^{-5}**
	[8]	$K_1 = 3.4992\times10^{2}$, $K_2 = 0.2952$	0.9958	1.7285×10^{-2}	3.3860×10^{-4}
T_d = 10°C	[6]	$K = 5.2509\times10^{-4}$	0.9862	3.1056×10^{-2}	1.0248×10^{-3}
	[7]	$\alpha = 0.7949$, $\beta = 1.7868\times10^{3}$	**0.9993**	**6.8697×10^{-3}**	**5.3486×10^{-5}**
	[8]	$K_1 = 3.4891\times10^{2}$, $K_2 = 0.2603$	0.9977	1.2538×10^{-2}	1.7817×10^{-4}

ตัวอักษรหนาแสดงถึงค่า R^2 ที่สูงที่สุด และค่า *RMSE* และ χ^2 ที่ต่ำที่สุดในแต่ละสภาวะการทำแห้ง

ตารางที่ 19 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่สภาวะต่างๆ (ต่อ)

สภาวะการทำแห้ง	No.	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R^2	*RMSE*	χ^2
T_d = 15°C	[6]	$K = 2.9825\times10^{-4}$	0.9831	3.8079×10^{-2}	1.5406×10^{-3}
	[7]	$\alpha = 0.8073, \beta = 3.1775\times10^{3}$	0.9994	6.9401×10^{-3}	5.4587×10^{-5}
	[8]	$K_1 = 7.1842\times10^{2}, K_2 = 0.2779$	**0.9999**	**3.5725×10^{-3}**	**1.4465×10^{-5}**
70°C และ 1.0 m/s					
T_d = 5°C	[6]	$K = 5.9632\times10^{-4}$	0.9951	2.0003×10^{-2}	**4.2871×10^{-4}**
	[7]	$\alpha = 1.0265, \beta = 1.6846\times10^{3}$	**0.9953**	**1.9737×10^{-2}**	4.4949×10^{-4}
	[8]	$K_1 = 3.5244\times10^{2}, K_2 = 0.2404$	0.9849	3.5280×10^{-2}	1.4362×10^{-3}
T_d = 10°C	[6]	$K = 4.6980\times10^{-4}$	0.9953	1.9739×10^{-2}	4.1744×10^{-4}
	[7]	$\alpha = 0.8858, \beta = 2.0625\times10^{3}$	**0.9992**	**8.0167×10^{-3}**	**7.4154×10^{-5}**
	[8]	$K_1 = 6.4355\times10^{2}, K_2 = 0.3585$	0.9977	1.3827×10^{-2}	2.2061×10^{-4}
T_d = 15°C	[6]	$K = 3.5295\times10^{-4}$	0.9877	3.2869×10^{-2}	1.1575×10^{-3}
	[7]	$\alpha = 0.8437, \beta = 2.7063\times10^{3}$	0.9972	1.5565×10^{-2}	2.7956×10^{-4}
	[8]	$K_1 = 5.9531\times10^{2}, K_2 = 0.2425$	**0.9985**	**1.1550×10^{-2}**	**1.5392×10^{-4}**
70°C และ 1.5 m/s					
T_d = 5°C	[6]	$K = 3.3191\times10^{-4}$	0.9924	2.2182×10^{-2}	5.1173×10^{-4}
	[7]	$\alpha = 0.8581, \beta = 2.8935\times10^{3}$	**0.9994**	**6.1616×10^{-3}**	**4.1130×10^{-5}**
	[8]	$K_1 = 6.5942\times10^{2}, K_2 = 0.2736$	0.9991	7.5790×10^{-3}	6.2227×10^{-5}
T_d = 10°C	[6]	$K = 1.8594\times10^{-4}$	0.9767	4.1969×10^{-2}	1.8319×10^{-3}
	[7]	$\alpha = 0.8288, \beta = 5.1178\times10^{3}$	0.9909	2.6184×10^{-2}	7.4276×10^{-4}
	[8]	$K_1 = 8.9334\times10^{2}, K_2 = 0.1846$	**0.9932**	**2.2661×10^{-2}**	**5.5630×10^{-4}**
T_d = 15°C	[6]	$K = 9.8997\times10^{-5}$	0.9825	4.6388×10^{-2}	2.2379×10^{-3}
	[7]	$\alpha = 0.9433, \beta = 9.9902\times10^{3}$	0.9838	4.4535×10^{-2}	2.1487×10^{-3}
	[8]	$K_1 = 2.5212\times10^{3}, K_2 = 0.1995$	**0.9919**	**3.1495×10^{-2}**	**1.0746×10^{-3}**
70°C และ 2.0 m/s					
T_d = 5°C	[6]	$K = 3.0580\times10^{-4}$	0.9933	2.3979×10^{-2}	6.0376×10^{-4}
	[7]	$\alpha = 1.1065, \beta = 3.3443\times10^{3}$	**0.9962**	**1.8025×10^{-2}**	**3.5911×10^{-4}**
	[8]	$K_1 = 8.6856\times10^{2}, K_2 = 0.2089$	0.9960	1.8639×10^{-2}	3.8398×10^{-4}

ตัวอักษรหนาแสดงถึงค่า R^2 ที่สูงที่สุด และค่า *RMSE* และ χ^2 ที่ต่ำที่สุดในแต่ละสภาวะการทำแห้ง

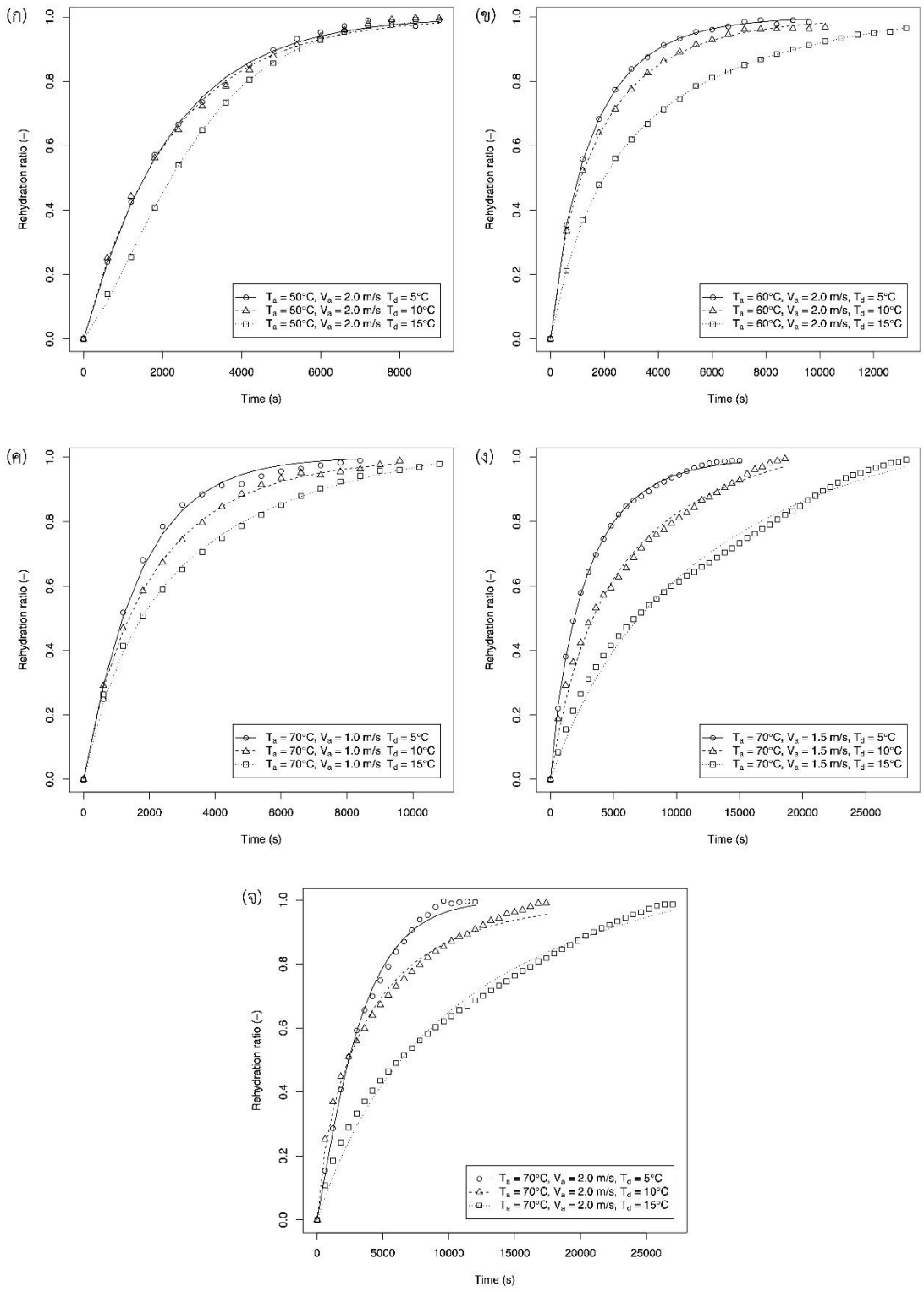
ตารางที่ 19 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่สภาวะต่างๆ (ต่อ)

สภาวะการทำแห้ง	No.	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R^2	*RMSE*	χ^2
T_d = 10°C	[6]	$K = 2.3595\times10^{-4}$	0.9603	5.6645×10^{-2}	3.3690×10^{-3}
	[7]	$\alpha = 0.7514$, $\beta = 3.8721\times10^{3}$	**0.9929**	**2.3977×10^{-2}**	**6.3540×10^{-4}**
	[8]	$K_1 = 9.2692\times10^{2}$, $K_2 = 0.2946$	0.9915	2.6138×10^{-2}	7.5510×10^{-4}
T_d = 15°C	[6]	$K = 1.0625\times10^{-4}$	0.9821	5.0096×10^{-2}	2.6351×10^{-3}
	[7]	$\alpha = 0.9138$, $\beta = 9.2420\times10^{3}$	0.9855	4.5202×10^{-2}	2.2583×10^{-3}
	[8]	$K_1 = 2.6820\times10^{3}$, $K_2 = 0.2457$	**0.9918**	**3.3915×10^{-2}**	**1.2713×10^{-3}**

ตัวอักษรหนาแสดงถึงค่า R^2 ที่สูงที่สุด และค่า *RMSE* และ χ^2 ที่ต่ำที่สุดในแต่ละสภาวะการทำแห้ง

ผลของอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่อพฤติกรรมการคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุน

ภาพที่ 40 แสดงกราฟการคืนน้ำ (rehydration curve) ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน ความเร็วลม และอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่างๆ พบว่าอัตราส่วนการคืนน้ำของตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพนเนนเชียลกับเวลาการคืนน้ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Maldonado และคณะ (2010) ในการศึกษาการคืนน้ำของมะม่วงอบแห้ง โดยการคืนน้ำเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สามารถบ่งชี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์แห้ง ความสามารถในการคืนน้ำของผลิตภัณฑ์แห้งจะแสดงได้ถึงระดับความเสียหายทางโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับในระหว่างกระบวนการทำแห้ง โดยทั่วไปการทำแห้งจะส่งผลให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบถาวร ซึ่งรวมถึงการยุบตัวและการหดตัวที่จะส่งผลให้คุณสมบัติด้านความชอบน้ำ (hydrophilic properties) ของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง ดังนั้นความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการคืนน้ำจึงมีค่าลดลง (Jayaraman และคณะ, 1990; Srikanth และคณะ, 2019) ซึ่งจากผลการทดลองจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิจุดน้ำค้างมีค่าลดลง เวลาในการคืนน้ำจะมีค่าลดลงในทุกๆ สภาวะการทดลอง เนื่องจากการลดอุณหภูมิจุดน้ำค้างจะส่งผลให้เวลาในการทำแห้งลดลง เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิและความเร็วลมเดียวกัน ดังนั้นตัวอย่างจึงได้รับความร้อนในกระบวนการสั้นกว่าจึงส่งผลให้เกิดความเสียหายทางโครงสร้างเนื่องจากความร้อนน้อยกว่า ตัวอย่างจึงมีความสามารถในการคืนน้ำที่ดีกว่า (Benseddik และคณะ, 2019) สอดคล้องกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่แสดงให้เห็นว่าการทำแห้งที่ใช้ระยะเวลาสั้น และตัวอย่างเกิดการหดตัวน้อยจะส่งผลให้ระยะเวลาในการคืนน้ำของตัวอย่างสั้นลง (Cano-Chauca และคณะ, 2005; Haas และคณะ, 1974)



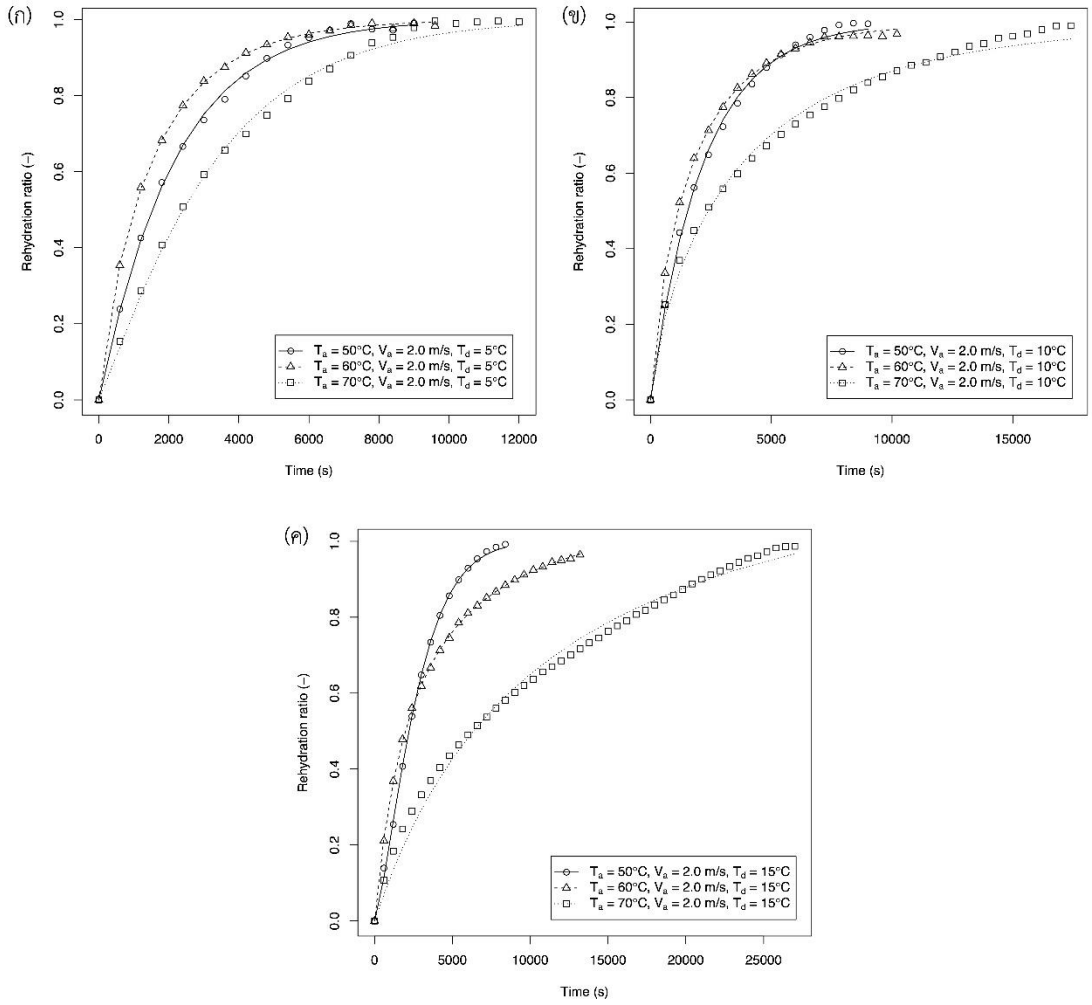
ภาพที่ 40 กราฟการคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน (T_a) ความเร็วลม (V_a) และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_d) ต่างๆ

ผลของอุณหภูมิลมร้อนต่อพฤติกรรมการคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุน

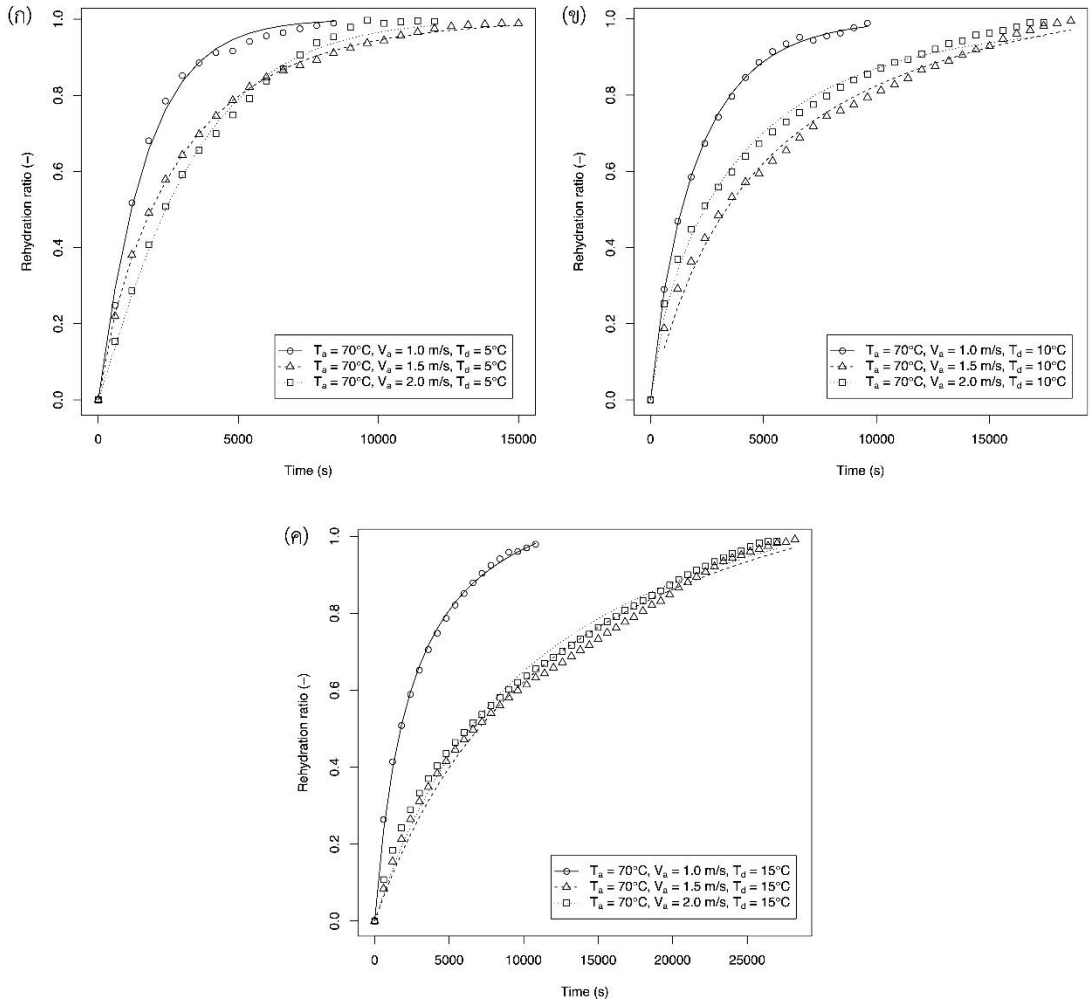
กราฟการคืนน้ำของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่ความเร็วลม 2 m/s กับอุณหภูมิจุดน้ำค้าง และอุณหภูมิลมร้อนที่แตกต่างกันแสดงอยู่ในภาพที่ 41 พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C กับอุณหภูมิจุดน้ำค้างที่ 5 (ภาพที่ 41 (ก)) 10 (ภาพที่ 41 (ข)) และ 15°C (ภาพที่ 41 (ค)) จะใช้ระยะเวลาในการคืนน้ำมากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนที่ 50 และ 60°C ในขณะที่ระยะเวลาในการคืนน้ำของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 50 และ 60°C มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนสูงจะส่งผลให้โครงสร้างของตัวอย่างเกิดความเสียหายมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตาม J. Wang และคณะ (2018) กลับรายงานว่าการเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการ pulsed vacuum drying จะส่งผลให้เลมอนอบแห้งสามารถดูดซับน้ำในกระบวนการคืนน้ำได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้โครงสร้างของตัวอย่างได้รับความเสียหาย และเกิดการสร้างช่องว่างขนาดใหญ่ขึ้น จึงส่งผลให้ความสามารถในการคืนน้ำของชิ้นเลมอนเพิ่มสูงขึ้น

ผลของความเร็วลมต่อพฤติกรรมการคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุน

ภาพที่ 42 แสดงกราฟการคืนน้ำของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C กับความเร็วลม และอุณหภูมิจุดน้ำค้างที่แตกต่างกัน พบว่าการทำแห้งที่ความเร็วลม 1.0 m/s กับอุณหภูมิจุดน้ำค้างที่ 5 (ภาพที่ 42 (ก)) 10 (ภาพที่ 42 (ข)) และ 15°C (ภาพที่ 42 (ค)) จะใช้ระยะเวลาในการคืนน้ำน้อยกว่าที่ความเร็วลม 1.5 และ 2.0 m/s ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำแห้งที่ความเร็วลมสูงจะส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนระหว่างอากาศและตัวอย่างสูงขึ้น (Aral และ Beşe, 2016) จนส่งผลให้โครงสร้างของตัวอย่างเกิดความเสียหายจากความร้อนที่ได้รับมากกว่าการทำแห้งที่ความเร็วลมต่ำ เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิลมร้อนและอุณหภูมิจุดน้ำค้างเดียวกัน อย่างไรก็ตามระยะเวลาในการคืนน้ำของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่ความเร็วลม 1.5 และ 2.0 m/s กลับมีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 41 กราฟการคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่ความเร็วลม (V_a) 2.0 m/s กับอุณหภูมิลมร้อน (T_a) ต่างๆ และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_d) ที่ (ก) 5 (ข) 10 และ (ค) 15ºC



ภาพที่ 42 กราฟการคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิลมร้อน (T_a) 70ºC กับความเร็วลม (V_a) ต่างๆ และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_d) ที่ (ก) 5 (ข) 10 และ (ค) 15ºC

การทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำในสภาวะไม่คงที่

สภาวะการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำในสภาวะคงที่และไม่คงที่

สำหรับในการทดลองนี้ได้ศึกษาผลของการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำในสภาวะคงที่ (LPSSD) และในสภาวะไม่คงที่ (Intermittent LPSSD) โดยสภาวะของการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งทั้งหมดจะใช้อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 70°C ที่ระดับความดัน 6.0 kPa (ความดันสัมบูรณ์) สำหรับ Intermittent LPSSD จะมีการสลับระหว่างการปล่อยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเข้าไปในห้องทำแห้ง (heating period) และการหยุดปล่อยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเข้าไปในห้องทำแห้ง (tempering period) แต่ยังคงรักษาระดับความดันในห้องทำแห้งไว้ที่ 6.0 kPa (ความดันสัมบูรณ์) ทั้งในช่วง heating period และ tempering period โดยช่วงเวลาของ heating period จะถูกกำหนดไว้ที่ 10 20 และ 30 นาที และสำหรับช่วงเวลาของ tempering period จะถูกกำหนดไว้ที่ 1 นาที นอกจากนี้ยังได้นำผลการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมาเปรียบเทียบกับผลการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนในสภาวะคงที่ (HAD) ที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C และความเร็วลมที่ 2.0 m/s กับที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง 5°C โดยสภาวะการทำแห้งทั้งหมดสำหรับการทดลองนี้แสดงอยู่ในตารางที่ 20

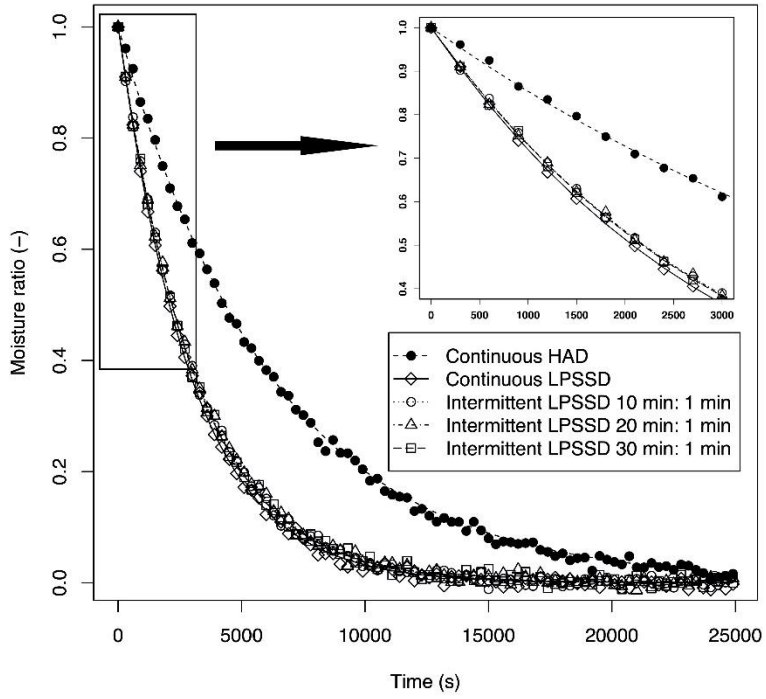
ตารางที่ 20 สภาวะการทำแห้งในสภาวะคงที่และไม่คงที่ ที่อุณหภูมิ 70°C

สภาวะการทำแห้ง	heating period (นาที)	tempering period (นาที)
HAD	-	-
LPSSD	-	-
Intermittent LPSSD		
10 min: 1 min	10	1
20 min: 1 min	20	1
30 min: 1 min	30	1

พฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุก

ภาพที่ 43 แสดงกราฟการทำแห้งของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ พบว่าอัตราส่วนความชื้นของตัวอย่างจะมีค่าลดลงแบบเอกซ์โพนเนนเชียลกับเวลาการทำแห้งในทุกๆ สภาวะการทดลอง นอกจากนี้ LPSSD จะใช้ระยะเวลาในการทำแห้งสั้นที่สุด ในขณะที่ HAD กลับใช้ระยะเวลาในการทำแห้งนานที่สุด ซึ่งเวลาในการทำแห้งของ LPSSD จะสั้นกว่าเวลาในการทำแห้งของ HAD ถึง 58% สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Sehrawat และคณะ (2018) พบว่าการทำแห้งด้วยไอ

น้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำจะใช้เวลาในการทำแห้งสั้นกว่ากระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิการทำแห้งเท่ากัน (60 ถึง 80°C) สำหรับระยะเวลาในการทำแห้งของ Intermittent LPSSD พบว่าจะใช้เวลาในการทำแห้งนานกว่า LPSSD ประมาณ 5 ถึง 7% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการทำแห้งระหว่าง Intermittent LPSSD และ LPSSD นั้นแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Thomkapanich และคณะ (2007) พบว่า Intermittent LPSSD และ LPSSD จะใช้ระยะเวลาในการทำแห้งกล้วยหอมใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 43 กราฟการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ

จลนพลศาสตร์การทำแห้ง

แบบจำลอง Lewis แบบจำลอง Page แบบจำลอง Henderson and Pabis แบบจำลอง Logarithmic และแบบจำลอง two term exponential เป็นแบบจำลองที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวเลือกในการอธิบายพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุกด้วย HAD LPSSD และ Intermittent LPSSD ซึ่งการเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับนำมาใช้ในการศึกษานี้ทำได้โดยอาศัยตัวบ่งชี้ทางสถิติ คือ R^2 *RMSE* และ χ^2 โดยแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดจะต้องมีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า *RMSE* และ χ^2 ต่ำที่สุด สำหรับค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 21 พบว่าแบบจำลอง Page มีค่า R^2 สูงที่สุด ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.9956 ถึง 0.9991 และมีค่า *RMSE* และ

χ^2 ต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 5.2524×10^{-3} ถึง 1.6088×10^{-2} และ 2.7766×10^{-5} ถึง 2.6065×10^{-4} ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองการทำแห้งอื่นๆ ดังนั้นแบบจำลอง Page จึงได้ถูกเลือกและนำมาใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงสุกในทุกๆ สภาวะการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Sehrawat และคณะ (2018) พบว่าแบบจำลอง Page เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมการทำแห้งมะม่วงด้วยลมร้อน ด้วยสุญญากาศ และด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำ

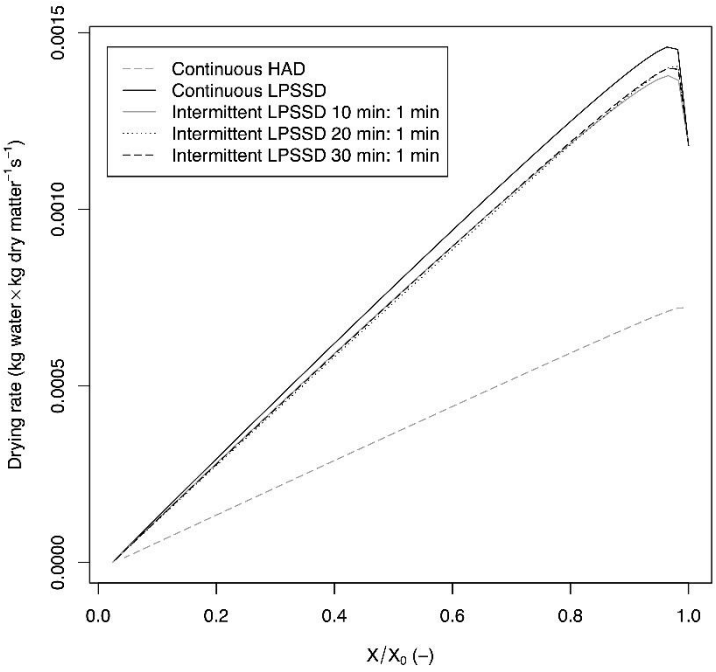
อัตราการทำแห้งมะม่วงสุก

อัตราการทำแห้งของตัวอย่างจะแสดงอยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของชิ้นตัวอย่างต่อหนึ่งหน่วยเวลา โดยกราฟอัตราการทำแห้งของตัวอย่างที่สภาวะต่างๆ แสดงในภาพที่ 44 พบว่าอัตราการทำแห้งของ LPSSD และ Intermittent LPSSD สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง สำหรับในช่วงแรกอัตราการทำแห้งของตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อปริมาณความชื้น (X/X_0) ของตัวอย่างมีค่าลดลง เนื่องจากในช่วงแรกของการทำแห้ง อุณหภูมิของตัวอย่างจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จึงส่งผลให้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งบางส่วนเกิดการกลั่นตัว (condensation) ลงบนผิวของตัวอย่าง อัตราการทำแห้งของตัวอย่างในช่วงแรกจึงมีค่าต่ำ หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิตัวอย่างเพิ่มสูงขึ้นจนไอน้ำร้อนยวดยิ่งไม่เกิดการกลั่นตัว อัตราการทำแห้งของตัวอย่างจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (Zielinska และ Cenkowski, 2012) ซึ่งจะเรียกช่วงนี้ว่า warming-up period และสำหรับช่วงที่สอง คือ ช่วง falling rate period ในช่วงนี้อัตราการทำแห้งจะมีค่าลดลงแบบเชิงเส้นกับการลดลงของปริมาณความชื้นของตัวอย่าง และจะไม่พบช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ (constant rate period) ตลอดกระบวนการ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Zielinska และ Cenkowski (2012) ในการศึกษาการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อย่างไรก็ตาม Nimmol และคณะ (2007) กลับพบว่าในการทำแห้งกล้วยด้วย LPSSD จะมีอัตราการทำแห้งในช่วง constant rate period ปรากฏอยู่ และสำหรับอัตราการทำแห้งของ HAD จะพบเฉพาะช่วง falling rate period ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ในการทำแห้งมะม่วง (Dissa และคณะ, 2008) และการทำแห้งสับปะรด (Malaikritsanachalee และคณะ, 2018) โดยอัตราการทำแห้งของ LPSSD และ Intermittent LPSSD จะมีค่าสูงกว่าอัตราการทำแห้งของ HAD ตลอดกระบวนการ นอกจากนี้อัตราการทำแห้งของ LPSSD จะมีค่ามากกว่าอัตราการทำแห้งของ Intermittent LPSSD เพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 21 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ

สภาวะการทำแห้ง	No.	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R^2	*RMSE*	χ^2
Continuous HAD	[1]	$k = 1.6053\times10^{-4}$	0.9956	1.6523×10^{-2}	2.7396×10^{-4}
	[2]	$k = 1.5221\times10^{-4}$, $n = 1.0060$	**0.9958**	**1.6088×10^{-2}**	**2.6065×10^{-4}**
	[3]	$a = 1.0000$, $k = 1.6053\times10^{-4}$	0.9945	1.8435×10^{-2}	3.4226×10^{-4}
	[4]	$a = 0.9999$, $c = 3.4519\times10^{-4}$, $k = 1.6070\times10^{-4}$	0.9956	1.6523×10^{-2}	2.7590×10^{-4}
	[5]	$a = 1.2218$, $k = 1.6740\times10^{-4}$	0.9956	1.6393×10^{-2}	2.7062×10^{-4}
Continuous LPSSD	[1]	$k = 3.3674\times10^{-4}$	0.9981	7.0119×10^{-3}	4.9340×10^{-5}
	[2]	$k = 2.9286\times10^{-4}$, $n = 1.0172$	0.9983	**6.7789×10^{-3}**	**4.6280×10^{-5}**
	[3]	$a = 1.0262$, $k = 3.5895\times10^{-4}$	0.9954	1.0944×10^{-2}	1.2174×10^{-4}
	[4]	$a = 1.0009$, $c = 2.1377\times10^{-4}$, $k = 3.3732\times10^{-4}$	0.9981	7.0101×10^{-3}	4.9668×10^{-5}
	[5]	$a = 1.3258$, $k = 3.6675\times10^{-4}$	0.9983	6.7919×10^{-3}	4.6458×10^{-5}
Intermittent LPSSD					
10 min: 1 min	[1]	$k = 3.0706\times10^{-4}$	0.9973	8.6502×10^{-3}	7.5115×10^{-5}
	[2]	$k = 2.6147\times10^{-4}$, $n = 1.0204$	**0.9976**	**8.2205×10^{-3}**	**6.8100×10^{-5}**
	[3]	$a = 1.0998$, $k = 4.1225\times10^{-4}$	0.9887	1.7645×10^{-2}	3.1377×10^{-4}
	[4]	$a = 1.0007$, $c = 3.7047\times10^{-4}$, $k = 3.0773\times10^{-4}$	0.9973	8.6227×10^{-3}	7.5218×10^{-5}
	[5]	$a = 1.3568$, $k = 3.4199\times10^{-4}$	0.9974	8.4237×10^{-3}	7.1509×10^{-5}
20 min: 1 min	[1]	$k = 3.2079\times10^{-4}$	0.9990	5.4945×10^{-3}	3.0286×10^{-5}
	[2]	$k = 2.8421\times10^{-4}$, $n = 1.0148$	**0.9991**	**5.2524×10^{-3}**	**2.7766×10^{-5}**
	[3]	$a = 1.0198$, $k = 3.3655\times10^{-4}$	0.9976	8.4584×10^{-3}	7.2006×10^{-5}
	[4]	$a = 1.0010$, $c = 2.6073\times10^{-4}$, $k = 3.2139\times10^{-4}$	0.9990	5.4928×10^{-3}	3.0464×10^{-5}
	[5]	$a = 1.2851$, $k = 3.4304\times10^{-4}$	0.9990	5.3469×10^{-3}	2.8774×10^{-5}
30 min: 1 min	[1]	$k = 3.1759\times10^{-4}$	0.9954	1.2408×10^{-2}	1.5449×10^{-4}
	[2]	$k = 2.9033\times10^{-4}$, $n = 1.0111$	0.9956	**1.2118×10^{-2}**	**1.4787×10^{-4}**
	[3]	$a = 1.0393$, $k = 3.5206\times10^{-4}$	0.9912	1.7185×10^{-2}	2.9736×10^{-4}
	[4]	$a = 1.0010$, $c = -5.4520\times10^{-5}$, $k = 3.1792\times10^{-4}$	0.9954	1.2408×10^{-2}	1.5556×10^{-4}
	[5]	$a = 1.2478$, $k = 3.3487\times10^{-4}$	0.9956	1.2148×10^{-2}	1.4860×10^{-4}

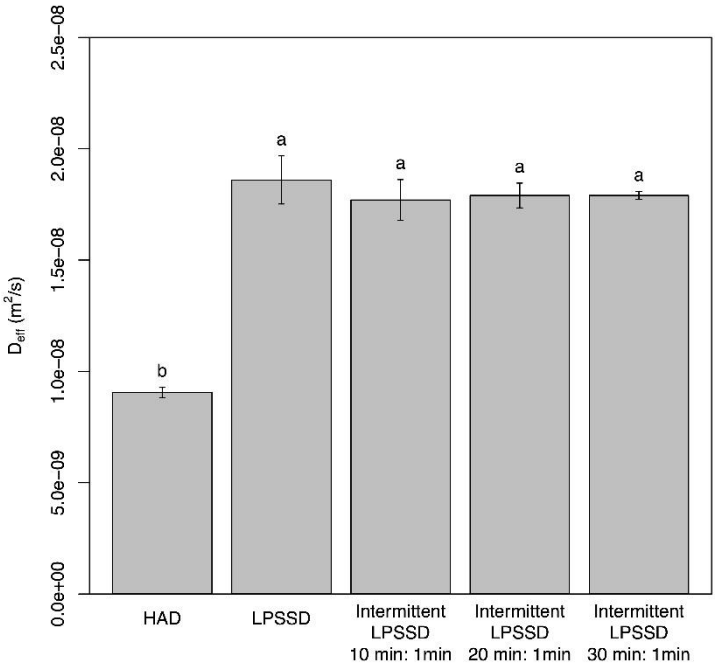
ตัวอักษรหนาแสดงถึงค่า R^2 ที่สูงที่สุด และค่า *RMSE* และ χ^2 ที่ต่ำที่สุดในแต่ละสภาวะการทำแห้ง



ภาพที่ 44 กราฟอัตราการทำแห้งของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ

สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

ค่า D_{eff} ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ แสดงอยู่ในภาพที่ 45 พบว่า D_{eff} ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD และ Intermittent LPSSD มีค่าอยู่ในช่วง (1.77 ถึง 1.86) × 10^{-8} m^2/s ในขณะที่ D_{eff} ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD มีค่าเท่ากับ 9.04 × 10^{-9} m^2/s โดย D_{eff} ของ LPSSD และ Intermittent LPSSD จะมีค่ามากกว่าของ HAD อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ทั้งนี้เนื่องจาก LPSSD และ Intermittent LPSSD เป็นกระบวนการทำแห้งที่ระดับความดันต่ำ ส่งผลให้น้ำในชิ้นตัวอย่างสามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าการทำแห้งที่ระดับความดันบรรยากาศ (Nimmol และคณะ, 2007) นอกจากนี้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งยังมีความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนได้ดีกว่าอากาศเมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน ดังนั้นอัตราการระเหยน้ำออกจากตัวอย่างจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (Alfy และคณะ, 2016)

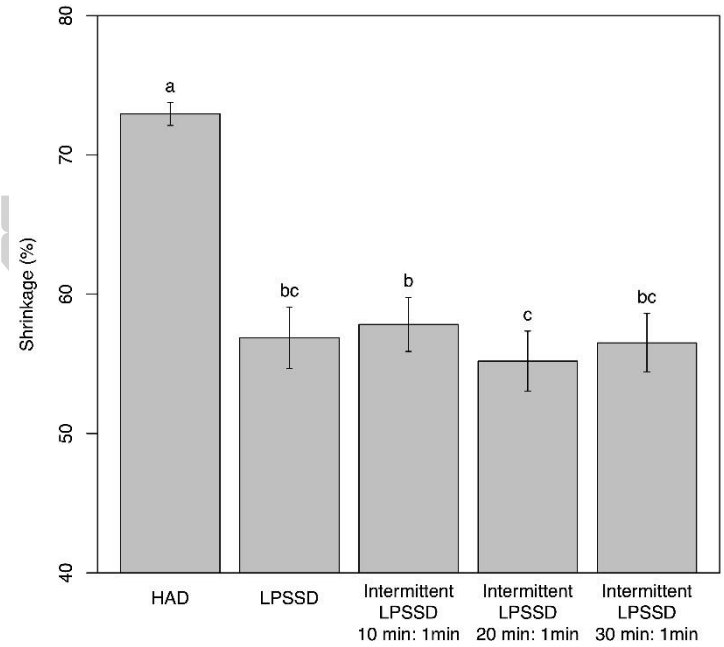


ภาพที่ 45 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ

การหดตัวของมะม่วงสุก

ภาพที่ 46 แสดงร้อยละการหดตัวของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยที่สภาวะต่างๆ พบว่าร้อยละการหดตัวของตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วง 55.20 ถึง 72.93% โดยตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD จะมีค่าการหดตัวมากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD และ Intermittent LPSSD อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยในระหว่างกระบวนการทำแห้งเมื่อตัวอย่างเกิดการสูญเสียความชื้นจะส่งผลให้แรงดันภายในชิ้นตัวอย่างลดลง ในขณะที่แรงดันจากภายนอกยังคงที่จึงเป็นผลให้เกิดความแตกต่างของแรงดันระหว่างภายในและภายนอกของชิ้นตัวอย่าง การหดตัวของตัวอย่างจึงเกิดขึ้น (Mayor และ Sereno, 2004) ดังนั้นการทำแห้งที่ระดับความดันต่ำของทั้ง LPSSD และ Intermittent LPSSD จึงเป็นผลให้เกิดความแตกต่างของแรงดันระหว่างภายในและภายนอกของชิ้นตัวอย่างน้อยกว่าการทำแห้งที่ระดับความดันบรรยากาศของ HAD การหดตัวของตัวอย่างจึงเกิดขึ้นได้น้อยกว่า นอกจากนี้การทำแห้งด้วย HAD ที่มีอัตราการทำแห้งต่ำที่สุดยังส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการหดตัวและยุบตัว (collapse) อย่างต่อเนื่อง (Aral และ Beşe, 2016; Mayor และ Sereno, 2004) เนื่องจากตัวอย่างอยู่ในสถานะคล้ายยางเป็นระยะเวลานาน โดยทั่วไปแล้วตัวอย่างที่อยู่ในสถานะคล้ายยางจะเกิดการหดตัวเป็นสัดส่วนกับปริมาณความชื้นที่สูญเสียไปในระหว่างกระบวนการทำแห้ง

(Karathanos และคณะ, 1996) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย จึงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางด้านกายภาพ และทางด้านเคมีในผลิตภัณฑ์อาหารได้ง่ายขึ้น (Roos, 2010) นอกจากนี้การทำแห้งด้วย LPSSD และ Intermittent LPSSD ที่มีอัตราการทำแห้งสูงจะสามารถทำให้ตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะคล้ายยางเป็นสถานะคล้ายแก้วที่บริเวณผิวของตัวอย่าง หรือที่เรียกว่าการเกิด case hardening ขึ้นได้ ซึ่งจะส่งผลให้การหดตัวของตัวอย่างเกิดการชะลอตัวลงในระหว่างกระบวนการทำแห้ง (Aral และ Beşe, 2016; Mayor และ Sereno, 2004; Sappati และคณะ, 2017) สำหรับ Intermittent LPSSD ที่ heating period 20 นาที ตัวอย่างจะมีค่าการหดตัวที่น้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งด้วย Intermittent LPSSD ที่สภาวะอื่นๆ อย่างไรก็ตามการทำแห้งด้วย Intermittent LPSSD ที่สภาวะต่างๆ กลับไม่ส่งผลให้ค่าการหดตัวของตัวอย่างมีค่าแตกต่างกับการทำแห้งด้วย LPSSD อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Thomkapanich และคณะ (2007) พบว่าการหดตัวของกล้วยที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD และ Intermittent LPSSD ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



ภาพที่ 46 ร้อยละการหดตัวของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ

การเปลี่ยนแปลงสีของมะม่วงสุก

ตารางที่ 22 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ โดยค่าการเปลี่ยนแปลงสีจะแสดงอยู่ในรูปของ ΔL^* Δa^* และ Δb^* พบว่าค่า ΔL^* ในทุกๆ สภาวะการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง -15.47 ถึง -10.92 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความสว่างของตัวอย่างมีค่าลดลงภายหลังจากการทำแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Sehrawat และคณะ (2018) พบว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน และการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำจะส่งผลให้ค่า L^* ของตัวอย่างมะม่วงมีค่าลดลง โดยสาเหตุหลักของการลดลงของค่า L^* เป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด ของตัวอย่างในระหว่างกระบวนการทำแห้ง อย่างไรก็ตามจะไม่พบปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ เนื่องจากตัวอย่างถูกทำแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 70°C ซึ่งที่อุณหภูมิดังกล่าวจะสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ polyphenol oxidase ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Sturm และคณะ, 2012) นอกจากนี้ในกระบวนการทำแห้งด้วย LPSSD และ Intermittent LPSSD ยังเป็นกระบวนการที่ปราศจากออกซิเจน ดังนั้นปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างกระบวนการทำแห้ง (Devahastin และคณะ, 2004) อย่างไรก็ตามการหดตัวของตัวอย่างก็เป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ส่งผลให้ตัวอย่างมีสีคล้ำขึ้น โดยการหดตัวของตัวอย่างจะส่งผลให้ความทึบแสงของตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (Nadian และคณะ, 2015; Sturm และคณะ, 2012) ดังนั้นกระบวนการทำแห้งด้วย HAD ที่ใช้ระยะเวลาในการทำแห้งนานที่สุดจะส่งผลให้ตัวอย่างมีระยะเวลาในการสร้างรงควัตถุสีน้ำตาลและเกิดการหดตัวได้มากที่สุด (Nadian และคณะ, 2015) จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า L^* มากที่สุด และมากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย Intermittent LPSSD ที่ heating period 10 และ 20 นาที อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

สำหรับค่า Δa^* ในทุกๆ สภาวะการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง -2.71 ถึง 4.51 โดยตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD จะมีค่า Δa^* เป็นบวก (มีสีแดงเพิ่มขึ้น) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ให้เห็นว่าตัวอย่างมีสีน้ำตาลเพิ่มขึ้น (M. Krokida และ Maroulis, 2000; Maskan, 2001) ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD และ Intermittent LPSSD จะมีค่า Δa^* เป็นลบ (มีสีแดงลดลง) อย่างไรก็ตามค่า Δa^* ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD และ Intermittent LPSSD จะไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Thomkapanich และคณะ (2007)

นอกจากนี้ยังพบว่าค่า Δb^* ของตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วง 1.56 ถึง 12.18 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าสีเหลืองของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นภายหลังจากการทำแห้ง โดยตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD จะมีค่า Δb^* มากที่สุด ซึ่งมากกว่าที่สภาวะอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยการเปลี่ยนแปลงค่า b^* ของตัวอย่างเป็นผลมาจากการหดตัว และการสูญเสียน้ำในระหว่างกระบวนการ

ทำแห้ง ซึ่งจะส่งผลให้ความเข้มข้นของบีตา-แคโรทีนที่ให้สีเหลืองแก่ตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (Devahastin และคณะ, 2004; Nadian และคณะ, 2015) นอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดก็ส่งผลให้ค่า *b** ของตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (Nadian และคณะ, 2015; Sturm และคณะ, 2012) ซึ่งจะเห็นได้ว่าการหดตัว และการเปลี่ยนแปลงค่า *L** และ *a** ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD จะมีค่าสูงที่สุดซึ่งจะส่งผลให้ตัวอย่างมีค่า Δb^* มากที่สุด ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD จะมีค่า Δb^* น้อยที่สุด และน้อยกว่าสภาวะอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยเมื่อพิจารณาค่าการหดตัวของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD และ Intermittent LPSSD ที่มีค่าไม่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของค่า Δb^* ทั้งจาก LPSSD และ Intermittent LPSSD สามารถเกิดขึ้นมาจากการเสื่อมสลายของบีตา-แคโรทีนเนื่องจากความร้อน (thermal degradation) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย Intermittent LPSSD จะเกิดการเสื่อมสลายของบีตา-แคโรทีนเนื่องจากความร้อนน้อยกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD เนื่องจากในกระบวนการ Intermittent LPSSD จะมีช่วง tempering period ซึ่งเป็นช่วงที่หยุดปล่อยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเข้าไปในห้องทำแห้ง จึงส่งผลให้ตัวอย่างได้รับความร้อนที่น้อยกว่าการทำแห้งด้วย LPSSD สอดคล้องกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Thomkapanich และคณะ (2007) พบว่าตัวอย่างกล้วยที่ผ่านการทำแห้งด้วย Intermittent LPSSD จะมีปริมาณ ascorbic acid ที่เหลือในตัวอย่างมากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD

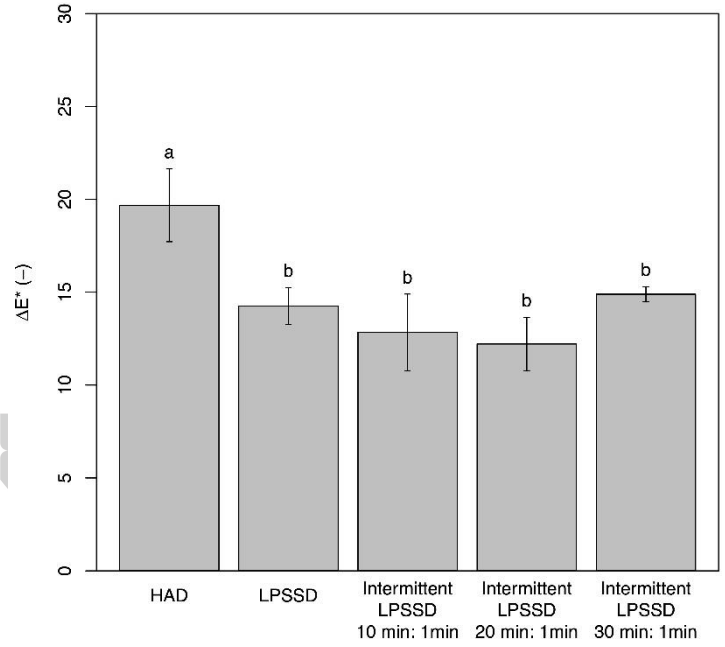
ตารางที่ 22 ค่าสี (ΔL^* Δa^* และ Δb^*) ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ

สภาวะการทำแห้ง	ΔL^*	Δa^*	Δb^*
Continuous HAD	-15.47 ± 2.92^{c}	4.51 ± 0.78^{a}	12.18 ± 1.22^{a}
Continuous LPSSD	-13.70 ± 0.74^{bc}	-2.71 ± 0.74^{b}	1.56 ± 0.71^{d}
Intermittent LPSSD			
10 min: 1min	-12.59 ± 2.16^{ab}	-2.29 ± 0.62^{b}	4.32 ± 0.91^{bc}
20 min: 1min	-10.92 ± 2.23^{a}	-2.33 ± 0.78^{b}	5.02 ± 0.48^{b}
30 min: 1min	-14.04 ± 0.10^{bc}	-1.83 ± 0.97^{b}	4.00 ± 0.70^{c}

$^{a-d}$ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

ค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมดของมะม่วงสุก

ค่า ΔE^* ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ แสดงอยู่ในภาพที่ 47 พบว่าค่า ΔE^* ของตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วง 12.21 ถึง 19.68 โดยการเพิ่มขึ้นของค่า ΔE^* ของตัวอย่างเป็นผลมาจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด และการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของรงควัตถุ โดยตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD จะมีค่า ΔE^* สูงที่สุด ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD และ Intermittent LPSSD อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ในทางกลับกันตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย Intermittent LPSSD ที่ heating period 20 นาที จะมีค่าน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามค่า ΔE^* ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD และ Intermittent LPSSD จะไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

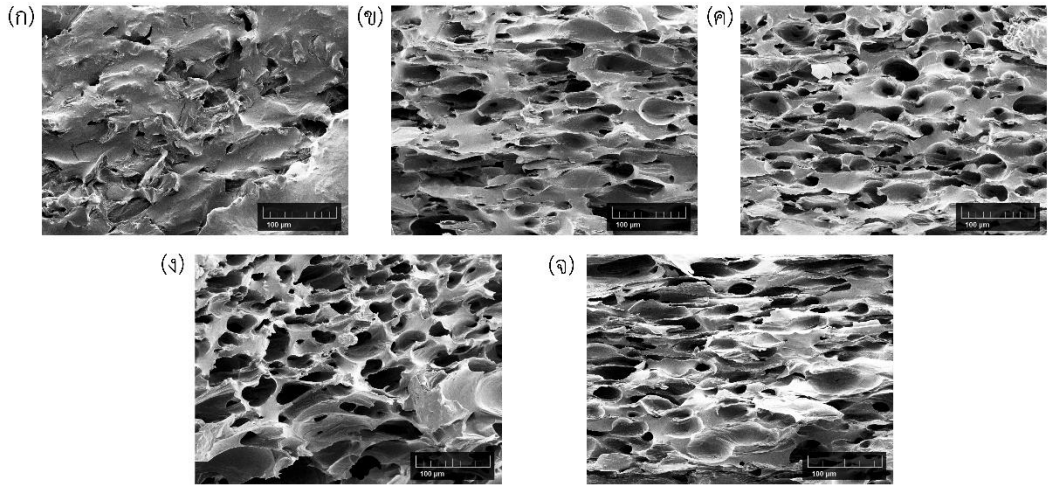


ภาพที่ 47 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมดของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ

โครงสร้างจุลภาค

ภาพที่ 48 แสดงโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ โดยภาพ SEM micrographs แสดงให้เห็นความแตกต่างของโครงสร้างตัวอย่างอย่างชัดเจนระหว่างตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD และตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD และ Intermittent LPSSD โดยตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD จะมีลักษณะโครงสร้างที่อัดแน่ รูพรุนน้อย และเกิดการยุบตัวสูง (ภาพที่ 48 (ก)) เนื่องจากการทำแห้งเป็นระยะเวลานาน และระดับความดันที่ใช้ทำแห้งสูงกว่า

กระบวนการ LPSSD และ Intermittent LPSSD ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD และ Intermittent LPSSD จะมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุน และไม่เกิดการยุบตัว (ภาพที่ 48 (ข) ถึง 48 (จ)) ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างกระบวนการ LPSSD และ Intermittent LPSSD น้ำภายในชิ้นอาหารจะระเหยกลายเป็นไอน้ำซึ่งเป็นผลมาจากการทำแห้งที่ระดับความดันต่ำ จึงส่งผลให้เกิดการสร้างแรงดันภายในชิ้นอาหารจนนำไปสู่การสร้างช่องว่างและรูพรุนขึ้น (Devahastin และคณะ, 2004)



ภาพที่ 48 SEM micrographs ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วย (ก) HAD (ข) LPSSD (ค) Intermittent LPSSD ที่ heating period 10 นาที (ง) Intermittent LPSSD ที่ heating period 20 นาที และ (จ) Intermittent LPSSD ที่ heating period 30 นาที

จลนพลศาสตร์การคืนน้ำของมะม่วงสุก

แบบจำลอง First order แบบจำลอง Weibull และแบบจำลอง Peleg เป็นแบบจำลองที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวเลือกในการอธิบายพฤติกรรมการคืนน้ำของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ ซึ่งการเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับนำมาใช้ในการศึกษานี้ทำได้โดยอาศัยตัวบ่งชี้ทางสถิติ คือ R^2 *RMSE* และ χ^2 ซึ่งแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดจะต้องมีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า *RMSE* และ χ^2 ต่ำที่สุด โดยค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการคืนน้ำของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 23 พบว่าแบบจำลอง Peleg มีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า *RMSE* และ χ^2 ต่ำที่สุด สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD ในขณะที่แบบจำลอง Weibull มีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า *RMSE* และ χ^2 ต่ำที่สุด สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD และ Intermittent LPSSD ในทุกๆ สภาวะการทดลอง ดังนั้นแบบจำลอง Peleg จึงได้ถูกเลือกและนำมาใช้ในการอธิบาย

พฤติกรรมการคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD ในขณะที่แบบจำลอง Weibull ถูกเลือกสำหรับตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD และ Intermittent LPSSD และสำหรับค่า β ในแบบจำลอง Weibull สามารถบ่งชี้ถึงร้อยละ 63 ของเวลาที่ใช้ในกระบวนการคืนน้ำทั้งหมด (Cunningham และคณะ, 2007; Machado และคณะ, 1998) พบว่า β จะมีค่าอยู่ในช่วง 10 ถึง 56 นาที (646 ถึง 3,344 วินาที) ซึ่งตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD จะมีค่า β สูงที่สุด (ตารางที่ 23) นอกจากนี้ค่า K_1 ในแบบจำลอง Peleg จะแปรผกผันกับอัตราการถ่ายโอนมวลของการคืนน้ำ โดยค่ามากจะแสดงถึงอัตราการถ่ายโอนมวลต่ำ ในขณะที่ค่าน้อยแสดงถึงอัตราการถ่ายโอนมวลสูง โดยตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD จะมีค่า K_1 มากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย Intermittent LPSSD ที่ heating period 10 นาที ประมาณ 9 เท่า จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระบวนการ LPSSD และ Intermittent LPSSD จะส่งผลให้ตัวอย่างมีอัตราการคืนน้ำสูงกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD ซึ่งความสามารถในการคืนน้ำของผลิตภัณฑ์แห้งจะแสดงได้ถึงระดับความเสียหายทางโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับในระหว่างกระบวนการทำแห้ง โดยทั่วไปการทำแห้งจะส่งผลให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบถาวร ซึ่งรวมถึงการยุบตัวและการหดตัวที่จะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง (M. K. Krokida และ Marinos-Kouris, 2003) โดยตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD และ Intermittent LPSSD จะมีค่าการหดตัวน้อย (ภาพที่ 46) และมีรูพรุนสูง (ภาพที่ 48 (ข) ถึง 48 (จ)) จึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำของตัวอย่างมีค่าสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Marabi และ Saguy (2004) ได้สรุปไว้ว่าอัตราการคืนน้ำของตัวอย่างแครอทแห้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อตัวอย่างมีรูพรุนสูงขึ้น

พฤติกรรมการคืนน้ำของมะม่วงสุก

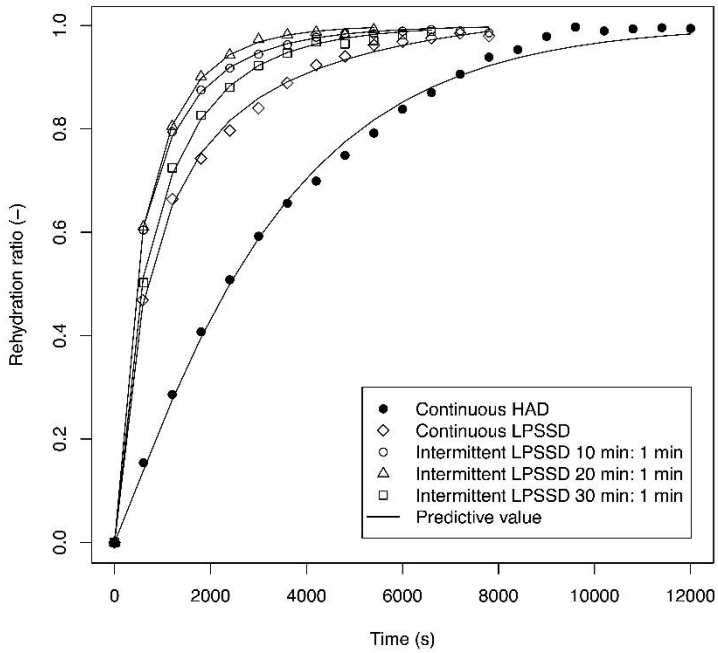
ภาพที่ 49 แสดงกราฟการคืนน้ำของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ พบว่าอัตราส่วนการคืนน้ำของตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการคืนน้ำ หลังจากนั้นอัตราส่วนการคืนน้ำจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ในการศึกษาการคืนน้ำของมะม่วง (Maldonado และคณะ, 2010) สาหร่าย (Cox และคณะ, 2012) ฝักทอง (Benseddik และคณะ, 2019) และมันเทศ (Srikanth และคณะ, 2019) นอกจากนี้ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย Intermittent LPSSD จะใช้เวลาในการคืนน้ำสั้นกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD และ LPSSD อย่างไรก็ตามเวลาเวลาในการคืนน้ำของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย Intermittent LPSSD ที่สภาวะต่างๆ กลับมีค่าไม่แตกต่างกัน จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการ HAD จะส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการหดตัวสูง และเกิดความเสียหายทางโครงสร้างมาก เนื่องจากจากที่ตัวอย่างได้รับความร้อนสูงเป็นระยะเวลานาน (Benseddik และคณะ,

2019) สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Deng และคณะ (2014) พบว่ากระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนจะส่งผลให้ตัวอย่างเนื้อปลาหมึกมีความสามารถในการดูดซับน้ำต่ำกว่าตัวอย่างผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง และการทำแห้งระบบปั๊มความร้อน (heat-pump drying) ในทางตรงข้ามตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD และ Intermittent LPSSD จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำสูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเสียหายทางโครงสร้างของตัวอย่างเกิดขึ้นน้อย ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากระยะเวลาการทำแห้งที่สั้น การทำแห้งที่ระดับความดันต่ำ รวมถึง tempering period หรือช่วงที่หยุดปล่อยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเข้าไปในห้องทำแห้ง

ตารางที่ 23 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลองการคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ

สภาวะการทำแห้ง	No.	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R^2	*RMSE*	χ^2
Continuous HAD	[6]	$K = 3.0580\times10^{-4}$	0.9933	2.3979×10^{-2}	6.0376×10^{-4}
	[7]	$\alpha = 1.1065$, $\beta = 3.3443\times10^{3}$	**0.9962**	**1.8025×10^{-2}**	**3.5911×10^{-4}**
	[8]	$K_1 = 8.6856\times10^{2}$, $K_2 = 0.2089$	0.9960	1.8639×10^{-2}	3.8398×10^{-4}
Continuous LPSSD	[6]	$K = 7.7542\times10^{-4}$	0.9715	4.4384×10^{-2}	2.1215×10^{-3}
	[7]	$A = 0.6977$, $\beta = 1.1347\times10^{3}$	0.9983	1.0860×10^{-2}	1.3760×10^{-4}
	[8]	$K_1 = 2.3189\times10^{2}$, $K_2 = 0.2866$	**0.9984**	**1.0638×10^{-2}**	**1.3202×10^{-4}**
Intermittent LPSSD					
10 min: 1 min	[6]	$K = 1.3359\times10^{-3}$	0.9901	2.5765×10^{-2}	7.1489×10^{-4}
	[7]	$\alpha = 0.7077$, $\beta = 6.5250\times10^{2}$	**0.9996**	**4.9406×10^{-3}**	**2.8478×10^{-5}**
	[8]	$K_1 = 9.1124\times10^{1}$, $K_2 = 0.2190$	0.9978	1.2166×10^{-2}	1.7268×10^{-4}
20 min: 1 min	[6]	$K = 1.4251\times10^{-3}$	0.9962	1.5335×10^{-2}	2.5326×10^{-4}
	[7]	$\alpha = 0.8051$, $\beta = 6.4617\times10^{2}$	**0.9998**	**3.5647×10^{-3}**	**1.4825×10^{-5}**
	[8]	$K_1 = 1.3807\times10^{2}$, $K_2 = 0.3144$	0.9972	1.3255×10^{-2}	2.0496×10^{-4}
30 min: 1 min	[6]	$K = 1.0210\times10^{-3}$	0.9919	2.3149×10^{-2}	5.7711×10^{-4}
	[7]	$\alpha = 0.7872$, $\beta = 9.0935\times10^{2}$	**0.9993**	**6.9342×10^{-3}**	**5.6098×10^{-5}**
	[8]	$K_1 = 1.3358\times10^{2}$, $K_2 = 0.2075$	0.9974	1.3199×10^{-2}	2.0325×10^{-4}

ตัวอักษรหนาแสดงถึงค่า R^2 ที่สูงที่สุด และค่า *RMSE* และ χ^2 ที่ต่ำที่สุดในแต่ละสภาวะการทำแห้ง



ภาพที่ 49 กราฟการคืนน้ำของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งที่สภาวะต่างๆ

มหาวิทยาลัยศิลปากร

สมบัติทางอุณหพลศาสตร์

ตัวอย่าง

สำหรับในการทดลองนี้ได้ศึกษาสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของตัวอย่างมะม่วงสุกที่ไม่ผ่านการทำแห้ง (ตัวอย่างสด, ripe mangoes) ตัวอย่างมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนที่อุณหภูมิ 70ºC กับความเร็วลมที่ 2.0 m/s และอุณหภูมิจุดน้ำค้างที่ 5ºC (HAD) และตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำในสภาวะไม่คงที่ ที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 70ºC กับระดับความดันที่ 6.0 kPa และ heating period ที่ 20 นาที (LPSSD)

แบบจำลอง sorption isotherm

แบบจำลอง BET แบบจำลอง GAB แบบจำลอง Oswin และแบบจำลอง Halsey เป็นแบบจำลองที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวเลือกในการอธิบายลักษณะ sorption isotherm ของตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50ºC โดยการเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับนำมาใช้ในการศึกษานี้ทำได้โดยอาศัยตัวบ่งชี้ทางสถิติ คือ R^2 *RMSE* และ χ^2 ซึ่งแบบจำลอง sorption isotherm ที่เหมาะสมที่สุดจะต้องมีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า *RMSE* และ χ^2 ต่ำที่สุด โดยตารางที่ 24 25 และ 26 แสดงค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลอง sorption isotherm ที่อุณหภูมิต่างๆ ของตัวอย่างสด ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD และตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD ตามลำดับ พบว่าแบบจำลอง GAB มีค่า R^2 สูงที่สุด และมีค่า *RMSE* และ χ^2 ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ ดังนั้นแบบจำลอง GAB จึงได้ถูกเลือกและนำมาใช้ในการอธิบายลักษณะ sorption isotherm ของตัวอย่างสด และตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD และ LPSSD ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ในการอธิบายลักษณะ sorption isotherm ด้วยแบบจำลอง GAB ในตัวอย่างมะม่วงอบแห้ง (Akoy และคณะ, 2013; Falade และ Aworh, 2004) มะม่วงอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Range-Marrón และคณะ, 2011) มะเฟืองอบแห้ง (Falade และ Aworh, 2004) มันฝรั่ง (Kaymak-Ertekin และ Gedik, 2004) และองุ่น (Kaymak-Ertekin และ Gedik, 2004) ในขณะที่แบบจำลอง BET จะมีความเหมาะสมน้อยที่สุดในการอธิบายลักษณะ sorption isotherm ของตัวอย่าง เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ เนื่องจากแบบจำลอง BET เหมาะสำหรับการอธิบายลักษณะ sorption isotherm ของตัวอย่างในช่วง A_w น้อยกว่า 0.5 (Iguedjtal และคณะ, 2008)

ตารางที่ 24 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลอง sorption isotherm ของมะม่วงสุก

อุณหภูมิ (°C)	No.	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R^2	*RMSE*	χ^2
30	[9]	$C = 8.0256\times10^{3}$, $X_m = 0.0450$	0.9992	4.0471×10^{-3}	2.0018×10^{-5}
	[10]	$C = 1.2300\times10^{4}$, $X_m = 0.0456$, $K = 0.9960$	**0.9995**	$\mathbf{2.7565\times10^{-3}}$	$\mathbf{1.0448\times10^{-5}}$
	[11]	$A = 0.0941$, $B = 0.6858$	0.9845	1.6891×10^{-2}	3.4871×10^{-4}
	[12]	$A = 0.0375$, $B = 1.2334$	0.9955	8.6254×10^{-3}	9.0929×10^{-5}
40	[9]	$C = 1.0389\times10^{6}$, $X_m = 0.0398$	0.9979	5.0133×10^{-3}	3.0718×10^{-5}
	[10]	$C = 6.8300\times10^{3}$, $X_m = 0.0417$, $K = 0.9940$	**0.9982**	$\mathbf{4.6449\times10^{-3}}$	$\mathbf{2.9666\times10^{-5}}$
	[11]	$A = 0.0841$, $B = 0.6847$	0.9804	1.5918×10^{-2}	3.0969×10^{-4}
	[12]	$A = 0.0330$, $B = 1.2271$	0.9928	9.1244×10^{-3}	1.0176×10^{-4}
50	[9]	$C = 2.0214\times10^{4}$, $X_m = 0.0338$	0.9798	1.2937×10^{-2}	2.0456×10^{-4}
	[10]	$C = 3.7600\times10^{3}$, $X_m = 0.0388$, $K = 0.9620$	**0.9926**	$\mathbf{6.5239\times10^{-3}}$	5.8522×10^{-5}
	[11]	$A = 0.0827$, $B = 0.5495$	0.9804	1.0656×10^{-2}	1.3878×10^{-4}
	[12]	$A = 0.0172$, $B = 1.4621$	0.9914	6.7409×10^{-3}	$\mathbf{5.5537\times10^{-5}}$

ตัวอักษรหนาแสดงถึงค่า R^2 ที่สูงที่สุด และค่า *RMSE* และ χ^2 ที่ต่ำที่สุดในแต่ละสภาวะการทำแห้ง

นอกจากนี้ค่า X_m ในแบบจำลอง GAB สามารถบ่งชี้ถึงปริมาณความชื้นที่ monolayer ของตัวอย่าง โดยปริมาณความชื้นที่ monolayer จะแสดงถึงปริมาณความชื้นของตัวอย่างที่ส่งผลให้ตัวอย่างมีความคงตัวสูง เนื่องจากโมเลกุลของน้ำในตัวอย่างจะเกิดการดูดซับ (adsorb) ด้วยพันธะที่แข็งแรงกับพื้นผิวดูดซับ จึงเป็นผลให้ตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งจากปฏิกิริยาเคมี และปฏิกิริยาทางชีวภาพได้น้อยกว่า (Iguedjtal และคณะ, 2008; Monte และคณะ, 2018) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าปริมาณความชื้นที่ monolayer ของตัวอย่างสดที่อุณหภูมิ 30 ถึง 50°C มีค่าอยู่ในช่วง 0.0388 ถึง 0.0456 kg water / kg dry matter (ตารางที่ 24) และสำหรับตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD จะมีปริมาณความชื้นที่ monolayer ที่อุณหภูมิ 30 ถึง 50°C อยู่ในช่วง 0.0287 ถึง 0.0328 kg water / kg dry matter (ตารางที่ 25) นอกจากนี้ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD จะมีปริมาณความชื้นที่ monolayer ที่อุณหภูมิ 30 ถึง 50°C อยู่ในช่วง 0.0316 ถึง 0.0381 kg water / kg dry matter (ตารางที่ 26) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นที่ monolayer ของตัวอย่างจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพ และทางด้านเคมีจึงเป็นผลให้พื้นผิวดูดซับของตัวอย่างมีจำนวนลดลง (H. A. Iglesias และ J. Chirife, 1976; Mazza และ LeMaguer, 1978) สอดคล้องกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Akoy และคณะ (2013) ที่ศึกษา sorption isotherm ของมะม่วงที่ผ่านการทำแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ นอกจากนี้ปริมาณความชื้นที่ monolayer ของตัวอย่างสดจะมีค่าสูงกว่า

ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD และ LPSSD เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งโดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำแห้งที่อุณหภูมิสูง (70°C) จะส่งผลให้พื้นผิวดูดซับของตัวอย่างมีจำนวนลดลง ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD จะมีปริมาณความชื้นที่ monolayer ต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน เนื่องจากการทำแห้งด้วย HAD จะใช้เวลาในการทำแห้งนานกว่า และตัวอย่างเกิดการหดตัวที่มากกว่าการทำแห้งด้วย LPSSD สอดคล้องกับผลการทดลองของ Iguedjtal และคณะ (2008) พบว่าตัวอย่างมันฝรั่งที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนจะมีปริมาณความชื้นที่ monolayer ต่ำกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งและปรับปรุงโครงสร้างด้วยวิธี controlled sudden decompression เนื่องจากตัวอย่างที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างจะมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนมากกว่า

ตารางที่ 25 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลอง sorption isotherm ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD

อุณหภูมิ (°C)	No.	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R^2	*RMSE*	χ^2
30	[9]	$C = 6.9893\times10^{2}$, $X_m = 0.0320$	0.9972	4.6790×10^{-3}	**2.5005×10^{-5}**
	[10]	$C = 1.5900\times10^{4}$, $X_m = 0.0328$, $K = 0.9970$	**0.9975**	**4.5231×10^{-3}**	3.0103×10^{-5}
	[11]	$A = 0.0648$, $B = 0.7076$	0.9734	1.5920×10^{-2}	3.0976×10^{-4}
	[12]	$A = 0.0259$, $B = 1.2053$	0.9880	1.0178×10^{-2}	1.2660×10^{-4}
40	[9]	$C = 5.5478\times10^{4}$, $X_m = 0.0278$	0.9956	5.0381×10^{-3}	3.1024×10^{-5}
	[10]	$C = 1.1300\times10^{4}$, $X_m = 0.0295$, $K = 0.9880$	**0.9962**	**4.2692×10^{-3}**	**2.5061×10^{-5}**
	[11]	$A = 0.0600$, $B = 0.6591$	0.9726	1.2540×10^{-2}	1.9220×10^{-4}
	[12]	$A = 0.0192$, $B = 1.2710$	0.9879	7.8891×10^{-3}	7.6069×10^{-5}
50	[9]	$C = 2.0231\times10^{4}$, $X_m = 0.0255$	0.9823	9.6324×10^{-3}	1.1340×10^{-4}
	[10]	$C = 2.2700\times10^{3}$, $X_m = 0.0287$, $K = 0.9620$	**0.9899**	**5.7870×10^{-3}**	**4.6048×10^{-5}**
	[11]	$A = 0.0574$, $B = 0.5861$	0.9676	1.0289×10^{-2}	1.2938×10^{-4}
	[12]	$A = 0.0126$, $B = 1.3894$	0.9829	7.1488×10^{-3}	6.2461×10^{-5}

ตัวอักษรหนาแสดงถึงค่า R^2 ที่สูงที่สุด และค่า *RMSE* และ χ^2 ที่ต่ำที่สุดในแต่ละสภาวะการทำแห้ง

ตารางที่ 26 ค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับแบบจำลอง sorption isotherm ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD

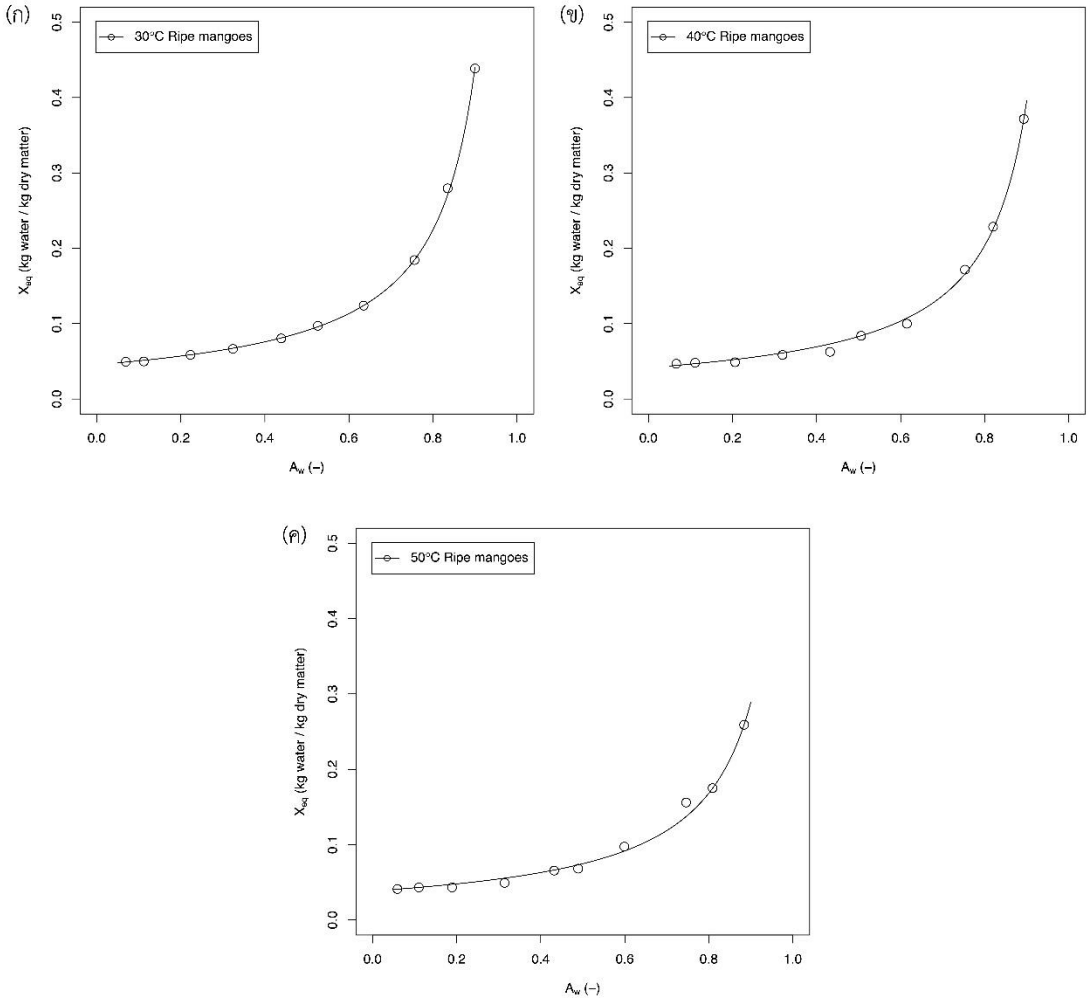
อุณหภูมิ (°C)	No.	ค่าคงที่ของแบบจำลอง	R^2	*RMSE*	χ^2
30	[9]	$C = 1.7616\times10^{2}$, $X_m = 0.0368$	0.9987	3.8168×10^{-3}	**1.7805×10^{-5}**
	[10]	$C = 1.9900\times10^{4}$, $X_m = 0.0381$, $K = 0.9960$	**0.9989**	**3.7092×10^{-3}**	1.8917×10^{-5}
	[11]	$A = 0.0750$, $B = 0.7079$	0.9816	1.5437×10^{-2}	2.9125×10^{-4}
	[12]	$A = 0.0310$, $B = 1.2024$	0.9932	8.8725×10^{-3}	9.6215×10^{-5}
40	[9]	$C = 5.5405\times10^{4}$, $X_m = 0.0316$	0.9834	1.1004×10^{-2}	1.4800×10^{-4}
	[10]	$C = 1.3500\times10^{4}$, $X_m = 0.0340$, $K = 0.9910$	**0.9846**	**1.0321×10^{-2}**	**1.4646×10^{-4}**
	[11]	$A = 0.0692$, $B = 0.6706$	0.9690	1.5423×10^{-2}	2.9071×10^{-4}
	[12]	$A = 0.0243$, $B = 1.2515$	0.9802	1.1740×10^{-2}	1.6844×10^{-4}
50	[9]	$C = 1.3292\times10^{5}$, $X_m = 0.0284$	0.9902	1.0576×10^{-2}	1.3671×10^{-4}
	[10]	$C = 1.0005\times10^{4}$, $X_m = 0.0316$, $K = 0.9640$	**0.9929**	**4.9126×10^{-3}**	**3.3184×10^{-5}**
	[11]	$A = 0.0657$, $B = 0.5587$	0.9613	1.2153×10^{-2}	1.8053×10^{-4}
	[12]	$A = 0.0131$, $B = 1.4393$	0.9832	7.7294×10^{-3}	7.3021×10^{-5}

ตัวอักษรหนาแสดงถึงค่า R^2 ที่สูงที่สุด และค่า *RMSE* และ χ^2 ที่ต่ำที่สุดในแต่ละสภาวะการทำแห้ง

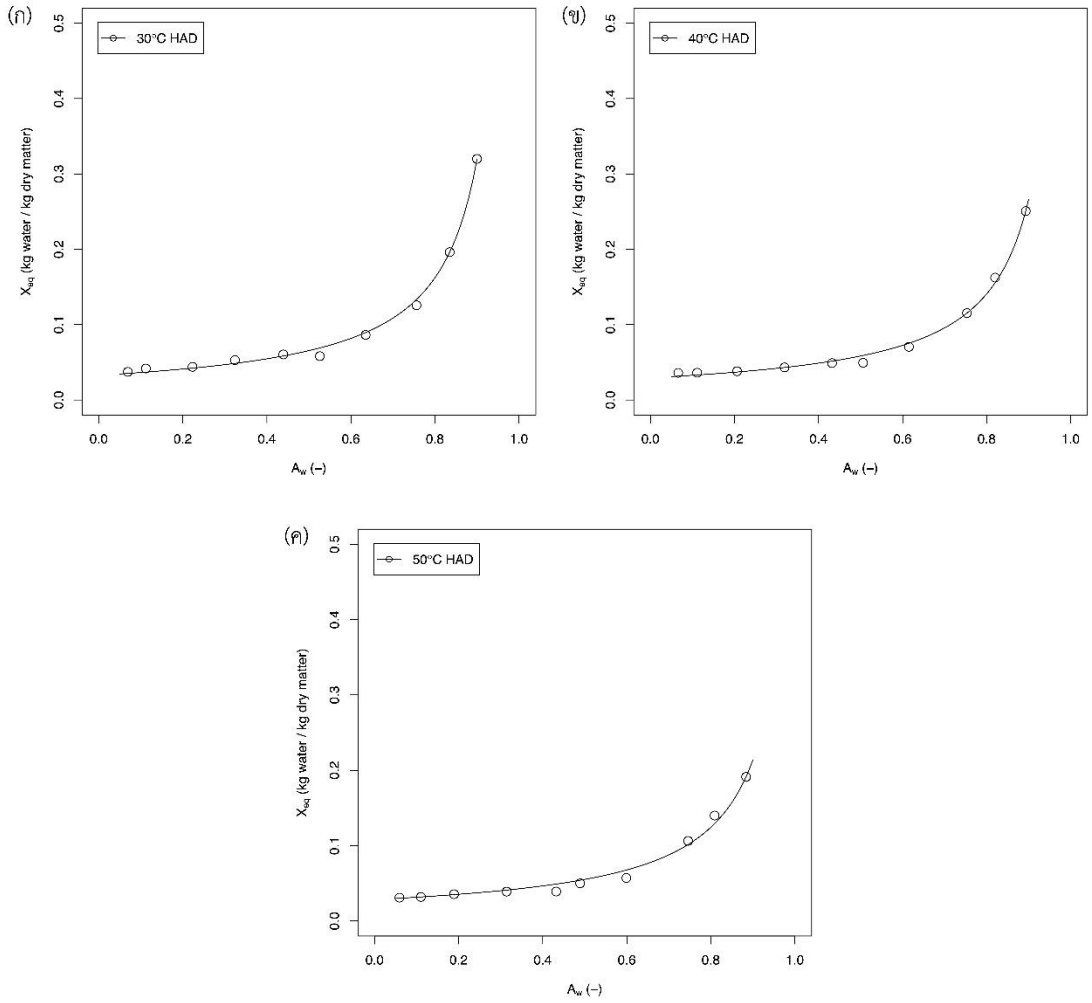
sorption isotherm

sorption isotherm ของตัวอย่างสด และตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD และ LPSSD ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50°C โดยมีค่า A_w อยู่ในช่วง 0.059 ถึง 0.900 แสดงอยู่ในภาพที่ 50 51 และ 52 ตามลำดับ พบว่าการปริมาณความชื้นสมดุล (X_{eq}) จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ A_w ของตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยลักษณะ sorption isotherm ของตัวอย่างทั้งหมดในทุกๆ อุณหภูมิจะมีลักษณะแบบ sigmoidal type III isotherm ซึ่งเป็นลักษณะของ sorption isotherm ที่พบได้ในตัวอย่างที่มีปริมาณน้ำตาลสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ในตัวอย่างมะม่วง (Telis-Romero และคณะ, 2005) ตัวอย่างมะม่วงอบแห้งด้วยลมร้อน (Falade และ Aworh, 2004) และตัวอย่างมะม่วงอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Range-Marrón และคณะ, 2011) นอกจากนี้จากผลการทดลองยังพบว่าเมื่อ A_w ของตัวอย่างมีค่าน้อยกว่า 0.06 ค่า A_w ของตัวอย่างจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ปริมาณความชื้นของตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเลกุลของน้ำในตัวอย่างจะเกิดการดูดซับด้วยพันธะที่แข็งแรงกับพื้นผิวดูดซับ (Hubinger และคณะ, 1992; Mazza, 1982;

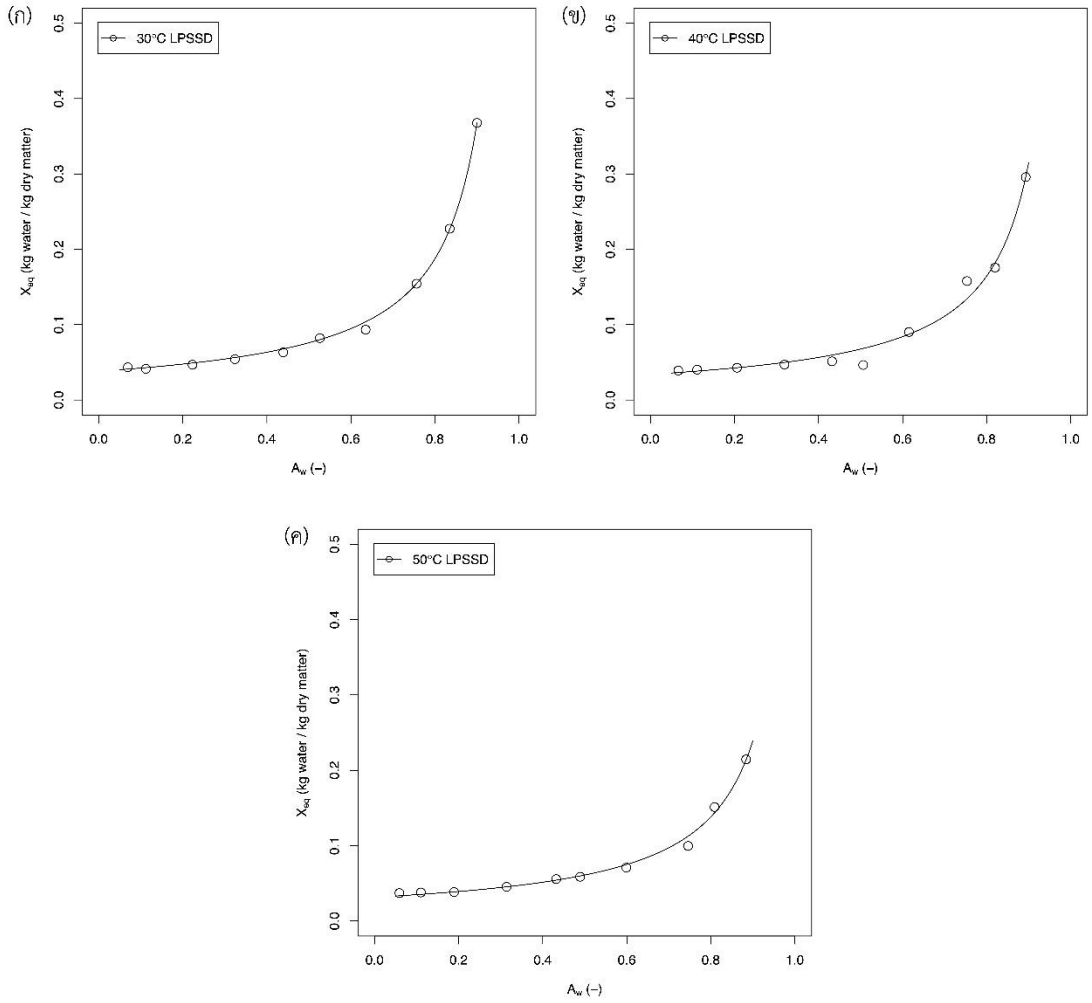
Tsami และคณะ, 1990) ซึ่งเป็นการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำกับผลึกของน้ำตาล (Ayranci และคณะ, 1990) และในช่วง A_w มากกว่า 0.06 ถึง ประมาณ 0.6 พื้นผิวดูดซับที่สามารถดูดซับกับโมเลกุลของน้ำได้โดยตรงจะมีจำนวนลดลง จึงส่งผลให้ค่า A_w เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นกับปริมาณความชื้นของตัวอย่าง อย่างไรก็ตามผลึกน้ำตาลบางส่วนจะเกิดการละลายได้เพิ่มขึ้นจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น (Bolin, 1980; Tsami และคณะ, 1990) และในช่วงสุดท้ายจะพบว่าค่า A_w จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยอีกครั้งกับปริมาณความชื้นของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากในช่วงนี้ผลึกน้ำตาลของตัวอย่างจะเกิดการละลายมากขึ้น จึงส่งผลให้พื้นผิวดูดซับมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นตามผลึกน้ำตาลที่เกิดการละลาย (Ayranci และคณะ, 1990; Hubinger และคณะ, 1992)



ภาพที่ 50 sorption isotherm ของมะม่วงสุกที่อุณหภูมิ (ก) 30 (ข) 40 และ (ค) 50°C



ภาพที่ 51 sorption isotherm ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD ที่อุณหภูมิ (ก) 30 (ข) 40 และ (ค) 50°C

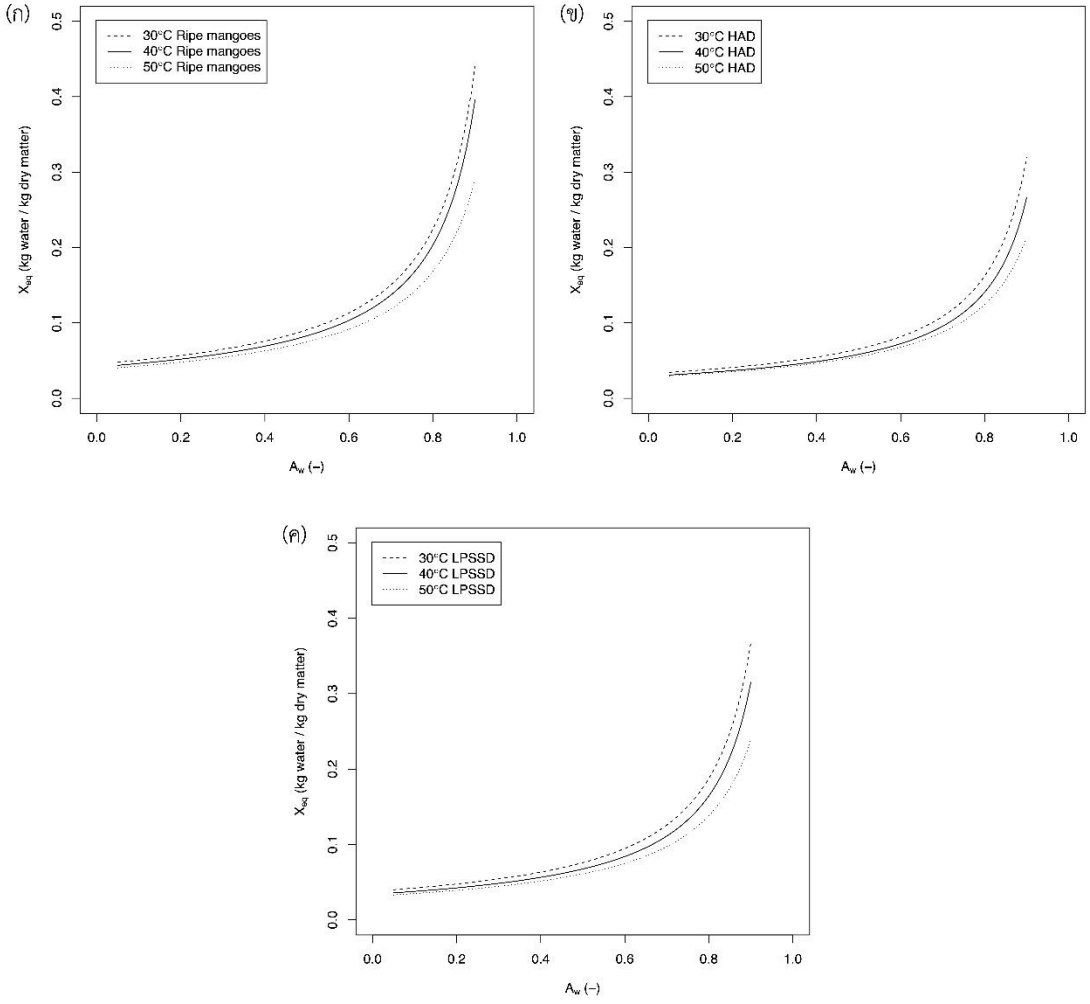


ภาพที่ 52 sorption isotherm ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD ที่อุณหภูมิ (ก) 30 (ข) 40 และ (ค) 50°C

ผลของอุณหภูมิต่อ sorption isotherm

ภาพที่ 53 แสดง sorption isotherm ของตัวอย่างสด (ภาพที่ 53 (ก)) และตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD (ภาพที่ 53 (ข)) และ LPSSD (ภาพที่ 53 (ค)) ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50°C โดยมีค่า A_w อยู่ในช่วง 0.059 ถึง 0.900 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ค่า A_w ของตัวอย่างทั้งหมดจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบที่ X_{eq} เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพ และทางด้านเคมีจึงเป็นผลให้พื้นผิวดูดซับของตัวอย่างมีจำนวนลดลง (H. A. Iglesias และ J. Chirife, 1976; Mazza และ LeMaguer, 1978) นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิยังส่งผลให้โมเลกุลของน้ำมีพลังงานสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้โมเลกุลของน้ำเกิดความไม่เสถียร

และสามารถหลุดออกจากพื้นผิวดูดซับหรือโมเลกุลน้ำด้วยกันเองได้ ค่า A_w ของตัวอย่างจึงมีค่าเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น (Palipane และ Driscoll, 1993) ดังนั้นการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารไว้ที่อุณหภูมิสูงจึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์อาหารเกิดการเสื่อมเสียได้ง่ายกว่าการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่า A_w ของผลิตภัณฑ์อาหารจะช่วยเร่งให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางด้านเคมี และชีวภาพ (Van den Berg และ Bruin, 1981)

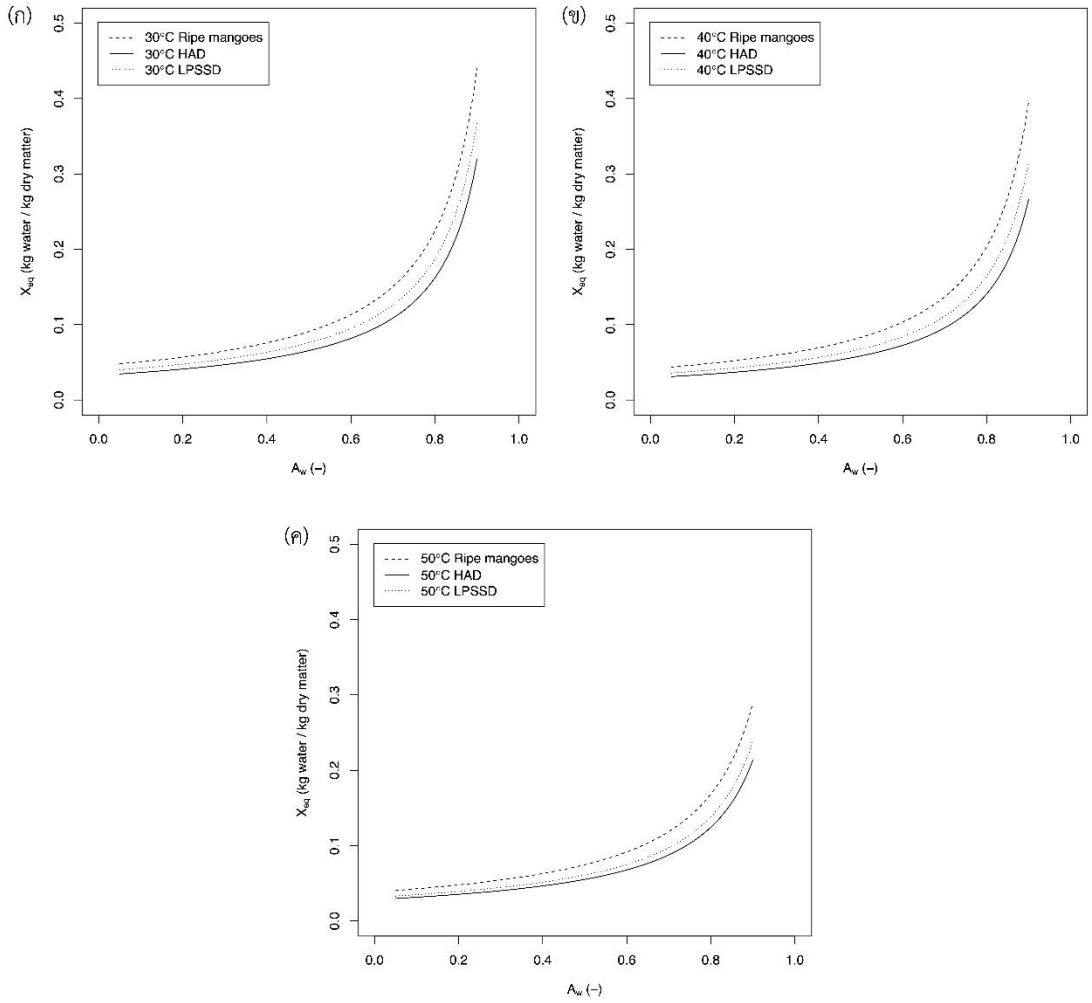


ภาพที่ 53 ผลของอุณหภูมิต่อ sorption isotherm ของ (ก) มะม่วงสุก (ข) มะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD และ (ค) LPSSD

ผลของตัวอย่างต่อ sorption isotherm

ภาพที่ 54 แสดง sorption isotherm ของตัวอย่างสด และตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD และ LPSSD ที่อุณหภูมิ 30 (ภาพที่ 54 (ก)) 40 (ภาพที่ 54 (ข)) และ 50°C (ภาพที่ 54 (ค)) โดยมีค่า A_w อยู่ในช่วง 0.059 ถึง 0.900 พบว่า X_{eq} ของตัวอย่างสดจะมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD และ LPSSD เมื่อเปรียบเทียบที่ A_w เท่ากันในทุกๆ อุณหภูมิ ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD จะมีค่า X_{eq} ต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างสด และตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD ที่ค่า A_w เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของการหดตัวของตัวอย่างที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทำแห้ง ซึ่งส่งผลให้พื้นผิวดูดซับของตัวอย่างชิดติดกันจนเป็นผลให้ความสามารถในการดูดซับกับโมเลกุลน้ำลดต่ำลง (Tscheuschner, 1987) นอกจากนี้การได้รับความร้อนจากกระบวนการทำแห้งยังส่งผลให้พื้นผิวดูดซับของตัวอย่างมีจำนวนลดลง ดังนั้นจากผลการทดลองจึงแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการทำแห้งจะมีค่า X_{eq} มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่ค่า A_w เท่ากัน ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD จะมีค่า X_{eq} น้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบที่ค่า A_w เท่ากัน เนื่องจากกระบวนการ HAD จะใช้ระยะเวลาในการทำแห้งนานกว่า และส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการหดตัวมากกว่า และมีรูพรุนน้อยกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD

มหาวิทยาลัยศิลปากร

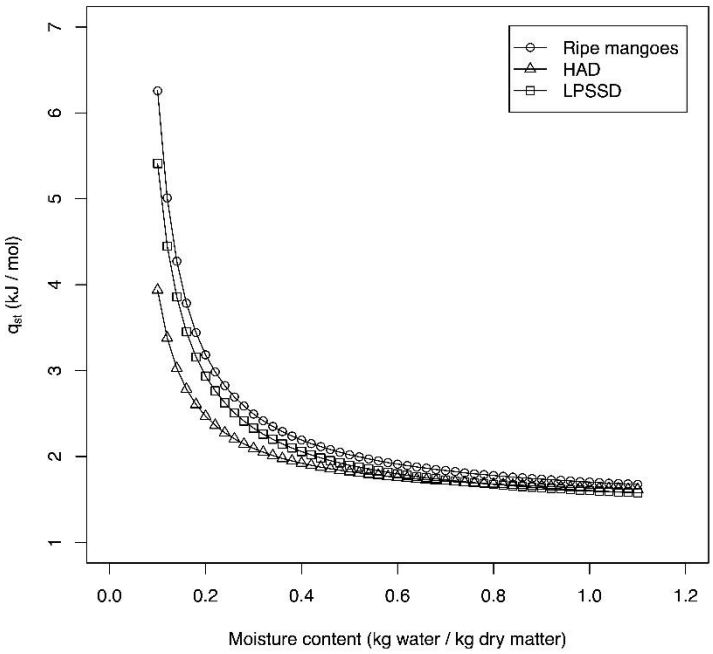


ภาพที่ 54 ผลของตัวอย่างต่อ sorption isotherm ที่อุณหภูมิ (ก) 30 (ข) 40 และ (ค) 50°C

net isosteric heat of sorption

net isosteric heat of sorption (q_{st}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (29) โดยอาศัยข้อมูลจาก sorption isotherm ของตัวอย่าง โดย q_{st} สามารถบอกถึงระดับพลังงานในการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับ โดยไม่รวมค่าความร้อนแฝงในการระเหยของน้ำบริสุทธิ์ (N. Wang และ Brennan, 1991) ซึ่งจากภาพที่ 55 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า q_{st} ที่ระดับความชื้นต่างๆ ของตัวอย่างสด และตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD และ LPSSD ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 30 ถึง 50°C พบว่าในทุกๆ ตัวอย่างจะมีค่า q_{st} เพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณความชื้นของตัวอย่างลดต่ำลง เนื่องจากที่ปริมาณความชื้นต่ำตัวอย่างจะมีพื้นผิวดูดซับที่ยังไม่ได้เกิดการจับเกาะกับโมเลกุลน้ำจำนวนมาก จึงเป็นผลให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับสูง หรือเกิดเป็นความชื้น

ที่ monolayer ขึ้น (Al-Muhtaseb และคณะ, 2004; Hossain และคณะ, 2001; N. Wang และ Brennan, 1991) ในทางตรงข้ามเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มสูงขึ้น พื้นผิวดูดซับจะเกิดการจับเกาะกับโมเลกุลน้ำมากขึ้นจนส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับลดต่ำลงเรื่อยๆ (Range-Marrón และคณะ, 2011; N. Wang และ Brennan, 1991) และจากผลการทดลองยังพบว่าในทุกๆ ตัวอย่าง q_{st} จะมีค่าลดลงจนเกือบคงที่ ที่ระดับความชื้นมากกว่า 0.6 แสดงให้เห็นว่าผลึกน้ำตาลในตัวอย่างเกิดการละลายมากขึ้น จึงเป็นผลให้มีจำนวนพื้นผิวดูดซับเพิ่มมากขึ้น จน q_{st} ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงแม้ว่าปริมาณความชื้นจะเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่า q_{st} จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณความชื้นมีค่าลดต่ำลงทั้งในตัวอย่างมะม่วง (Telis-Romero และคณะ, 2005) และมะม่วงอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Range-Marrón และคณะ, 2011) รวมถึงในผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น สับปะรดอบแห้ง (Viganó และคณะ, 2012) แป้งมันฝรั่ง (Al-Muhtaseb และคณะ, 2004) และใบชา (Arslan และ Toğrul, 2006) นอกจากนี้จากผลการทดลองยังพบว่าตัวอย่างสดจะมีค่า q_{st} สูงกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งทั้งจาก HAD และ LPSSD เมื่อเปรียบเทียบที่ระดับความชื้นน้อยกว่า 0.6 ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD จะมีค่า q_{st} ต่ำที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างสดจะมีพื้นผิวดูดซับมากที่สุด ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD จะมีพื้นผิวดูดซับน้อยที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากการหดตัวของตัวอย่าง รวมถึงการได้รับความร้อนจากกระบวนการทำแห้ง สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Viganó และคณะ (2012) พบว่ากระบวนการทำแห้งที่แตกต่างกันส่งผลให้ q_{st} ของตัวอย่างสับปะรดผงมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะโครงสร้างของตัวอย่างที่แตกต่างกัน และจากผลการทดลองยังพบว่าที่ระดับความชื้นมากกว่า 0.6 ค่า q_{st} ของทุกๆ ตัวอย่างจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าจำนวนพื้นผิวดูดซับของตัวอย่างจะไม่ส่งผลต่อพลังงานในการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำและพื้นผิวดูดซับที่ปริมาณความชื้นมากกว่า 0.6 (H.A. Iglesias และ J. Chirife, 1976) ดังนั้นจึงจะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD ที่เกิดการหดตัวน้อย และมีรูพรุนสูงจะมีลักษณะและสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ใกล้เคียงกับตัวอย่างสดมากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อน

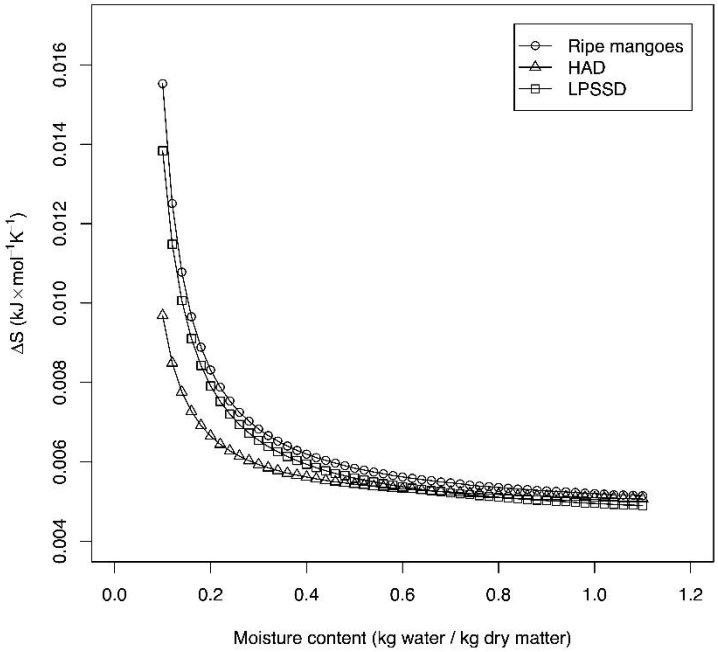


ภาพที่ 55 net isosteric heat of sorption ของมะม่วงสุก (Ripe mangoes) และมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD (HAD) และ LPSSD (LPSSD)

differential entropy

differential entropy (ΔS) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (30) โดยอาศัยข้อมูลจาก sorption isotherm ของตัวอย่าง โดย ΔS สามารถบอกถึงจำนวนพื้นผิวดูดซับที่พร้อมจะเกิดการดูดซับกับโมเลกุลน้ำที่ระดับพลังงานเฉพาะ โดยภาพที่ 56 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า ΔS ที่ระดับความชื้นต่างๆ ของตัวอย่างสด และตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD และ LPSSD ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 30 ถึง 50ºC พบว่า ΔS จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณความชื้นในทุกๆ ตัวอย่างลดต่ำลง โดยจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับ q_{st} ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า ΔS ของพริก (Arslan และ Toğrul, 2005b) ใบชา (Arslan และ Toğrul, 2006) และสตาร์ชผง (Al-Muhtaseb และคณะ, 2004) นอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่างสดจะมีค่า ΔS สูงกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งทั้งจาก HAD และ LPSSD เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณความชื้นเท่ากัน ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD จะมีค่า ΔS ต่ำที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างสดจะมีจำนวนพื้นผิวดูดซับมากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้ง ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD และ HAD จะมีจำนวนพื้นผิวดูดซับน้อยลงตามลำดับ เนื่องจากตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งจะ

เกิดการหดตัว และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่เป็นผลมาจากการได้รับความร้อนในระหว่างกระบวนการทำแห้ง

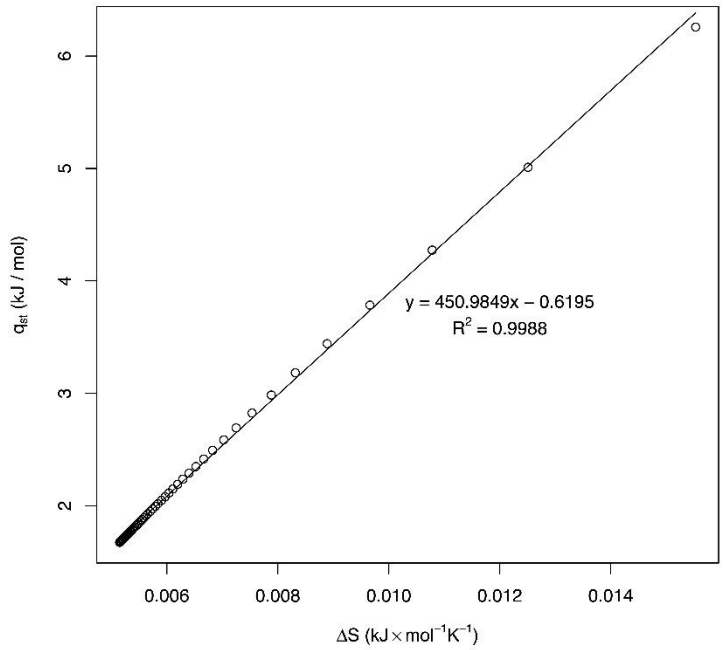


ภาพที่ 56 differential entropy ของมะม่วงสุก (Ripe mangoes) และมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD (HAD) และ LPSSD (LPSSD)

enthalpy-entropy compensation theory

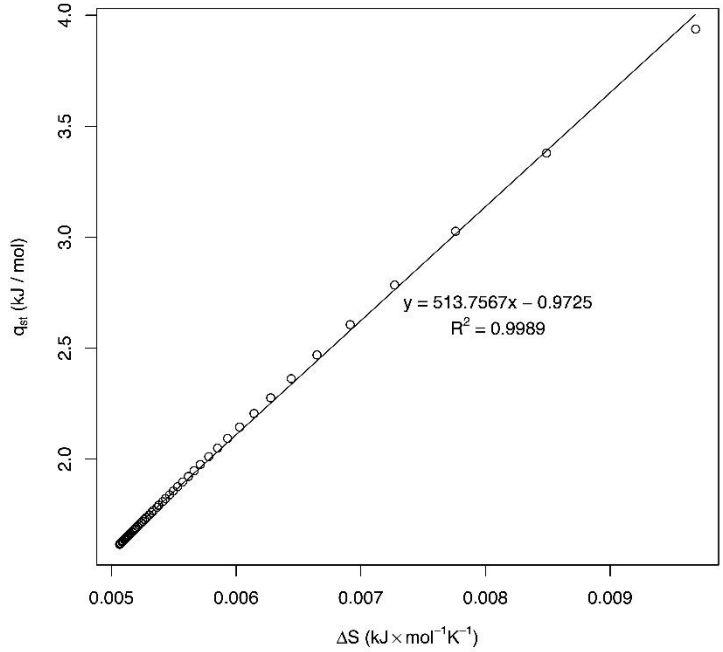
การพิสูจน์ enthalpy-entropy compensation theory สามารถทำได้โดยการสร้างความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง q_{st} และ ΔS (สมการที่ (31)) และ enthalpy-entropy compensation theory จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ต่อเมื่อค่า harmonic mean temperature (T_{hm}) ในสมการที่ (32) จะต้องไม่เท่ากับ isokinetic temperature (T_{β}) โดยค่า T_{hm} ในการศึกษานี้มีค่าเท่ากับ 313.94 K

สำหรับตัวอย่างสดสามารถแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง q_{st} และ ΔS ได้ดังภาพที่ 57 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9988 และมีค่า T_{β} เท่ากับ 450.98 K โดยเมื่อ T_{β} มีค่ามากกว่า T_{hm} จะแสดงให้เห็นว่ากลไกการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับของตัวอย่างสดถูกควบคุมโดย enthalpy หรืออาจกล่าวได้ว่าการดูดซับความชื้นของตัวอย่างจะขึ้นอยู่กับระดับพลังงานในการดูดซับ



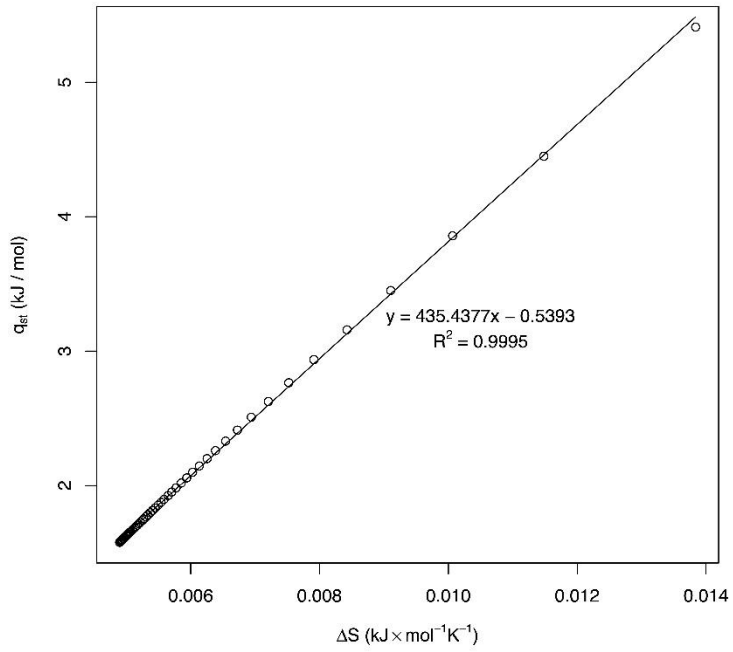
ภาพที่ 57 ความสัมพันธ์ระหว่าง net isosteric heat of sorption และ differential entropy ของมะม่วงสุก

สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD สามารถแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง q_{st} และ ΔS ได้ดังภาพที่ 58 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9989 และมีค่า T_β เท่ากับ 513.76 K โดยเมื่อ T_β มีค่ามากกว่า T_{hm} จะแสดงให้เห็นว่ากลไกการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD ถูกควบคุมโดย enthalpy



ภาพที่ 58 ความสัมพันธ์ระหว่าง net isosteric heat of sorption และ differential entropy ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วย HAD

สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD สามารถแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง q_{st} และ ΔS ได้ดังภาพที่ 59 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9995 และมีค่า T_β เท่ากับ 435.44 K โดยเมื่อ T_β มีค่ามากกว่า T_{hm} แสดงให้เห็นว่ากลไกการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD ถูกควบคุมโดย enthalpy



ภาพที่ 59 ความสัมพันธ์ระหว่าง net isosteric heat of sorption และ differential entropy ของมะม่วงสุกที่ผ่านการทำแห้งด้วย LPSSD

บทที่ 5
สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสภาวะที่ใช้ในกระบวนการทำแห้งมะม่วงสุกแบบไม่คงที่เปรียบเทียบกับแบบคงที่ด้วยตัวกลาง 2 ชนิด คือ ลมร้อน และไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำต่อจลนพลศาสตร์ของกระบวนการทำแห้ง สมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์ และสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของตัวอย่าง จากผลการวิจัยพบว่าในการทำแห้งด้วยตัวกลางที่เป็นลมร้อน การลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ การเพิ่มอุณหภูมิ และความเร็วลม และลักษณะการไหลของลมแบบหมุน ทำให้ระยะเวลาในการทำแห้งสั้นลง และยังลดการเปลี่ยนแปลงสี และการหดตัวของตัวอย่างลงได้มากขึ้น และยังพบว่าการทำแห้งโดยใช้สภาวะอุณหภูมิของลมร้อนแบบไม่คงที่ช่วยเพิ่มอัตราการทำแห้ง และลดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของตัวอย่างลงได้เช่นเดียวกัน ในขณะที่การทำแห้งที่อุณหภูมิและความเร็วลมต่ำกลับส่งผลให้ตัวอย่างใช้ระยะเวลาในการคืนน้ำน้อยกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิ และความเร็วลมสูง และการลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะสามารถลดระยะเวลาในการคืนน้ำของตัวอย่างลงได้

สำหรับกระบวนการทำแห้งโดยใช้ตัวกลางเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำทั้งในสภาวะคงที่และไม่คงที่จะมีอัตราการทำแห้งสูงกว่าตัวกลางที่เป็นลมร้อน รวมถึงมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของตัวอย่าง คือ การหดตัว และการเปลี่ยนแปลงสีน้อยกว่ากระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน จากการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค พฤติกรรมการคืนน้ำ และการหดตัวของตัวอย่างร่วมกัน พบว่าการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำทั้งในสภาวะคงที่และไม่คงที่จะส่งผลให้ตัวอย่างมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุนสูง เกิดการยุบตัวต่ำกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อน โดยพบว่าการใช้สภาวะคงที่และไม่คงที่ในการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำมีอัตราการทำแห้ง การหดตัว และการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาพฤติกรรมการคืนน้ำ และโครงสร้างระดับจุลภาค พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยสภาวะไม่คงที่มีรูพรุนจำนวนมากกว่า และมีอัตราการคืนน้ำที่สูงกว่าแสดงให้เห็นว่าการใช้สภาวะไม่คงที่มีผลให้โครงสร้างของตัวอย่างมีความพรุนมากกว่าการใช้สภาวะคงที่

จากการศึกษาสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของตัวอย่างสด และตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำในสภาวะไม่คงที่ และลมร้อน พบว่าการเปลี่ยนแปลงของ q_{st} และ ΔS จะมีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นในทุกๆ ตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำในสภาวะไม่คงที่ จะมีค่า q_{st} และ ΔS มากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุน เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณความชื้นเท่ากัน ซึ่งแสดงให้

เห็นว่ากระบวนการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ระดับความดันต่ำในสภาวะไม่คงที่ส่งผลให้ลักษณะโครงสร้างของตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่ากลไกการดูดซับระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวดูดซับสำหรับตัวอย่างสด และตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำในสภาวะไม่คงที่ และลมร้อนแบบหมุนถูกควบคุมโดย enthalpy

ภาคผนวก

Study on kinetics of flow characteristics in hot air drying of pineapple

Author's personal copy

Food Sci Biotechnol
https://doi.org/10.1007/s10068-018-0357-6

Study on kinetics of flow characteristics in hot air drying of pineapple

Pak Malaikritsanachalee[1] · Withu Choosri[2] · Touchpong Choosri[1]

Received: 19 June 2017 / Revised: 25 December 2017 / Accepted: 14 March 2018
© The Korean Society of Food Science and Technology and Springer Science+Business Media B.V., part of Springer Nature 2018

Abstract The aim was to evaluate the kinetic parameters, total color differences (ΔE*) and browning index differences (ΔBI) of air flow pineapple drying. The experiments were performed on air temperatures at 60 and 70 °C, and air velocities at 1.5 and 2.0 m/s. The kinetic parameter (k) increased when air temperature was increased for all air velocity. The effective diffusivity coefficient (D_{eff}) increased as high as the temperature of the heating medium. The variation of D_{eff} of swirling flow was ranging from 6.72×10^{-9} to 10.23×10^{-9} m^2/s, while the variation of D_{eff} of non-swirling flow was ranging from 6.40×10^{-9} to 9.42×10^{-9} m^2/s. The drying time of swirling flow was shorter than non-swirling flow in each drying condition. Moreover, the ΔE* and ΔBI of pineapple in swirling flow were lower than that obtained from non-swirling flow. Therefore, the convective drying using swirling flow can be minimized for drying time and color deterioration.

Keywords Pineapple · Drying kinetic · Effective diffusivity coefficient · Browning index differences · Total color differences

✉ Withu Choosri
c_withu@hotmail.com

[1] Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom, Thailand

[2] Department of Food Technology, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University, Bangkok, Thailand

Introduction

Pineapple (*Ananas comosus*) is a tropical fruit and is produced in several countries such as Thailand, Brazil, India, Philippines and China. Pineapple contains important nutrients such as carbohydrates, sugars, Vitamin A and C and beta carotene, protein, fat, ash, fiber and antioxidants introducing to flavonoids, citric and ascorbic acid. Moreover, pineapple has attractive sensorial such as texture, flavor, taste and color [28]. In 2012, Thailand produced 2,650,000 metric tons of pineapples and is the first largest producer of pineapple in the world [13]. However, pineapple is perishable fruit. So, an alternative method to preserve the quality and extend shelf life of pineapple is drying.

Convective drying, especially tray drying, has been widely used as a method for preserving the agricultural product because it is simple to operate and inexpensive. In many researches, the pineapples were dried by convective drying at various conditions. The air temperature was used in a wide range of 40–80 °C while the air velocity was performed at 0.5 to 3.8 m/s [1, 10, 28]. Nevertheless, the convective drying has the negative impact on the product qualities such as color, taste, flavor, texture and nutrient content because of high air temperature exposure and long drying time [20].

In order to improve quality dried product, the combination of a new technologies with convective drying is possible to preserve product quality e.g. hot air drying with microwave, radio-frequency, infrared radiation and power ultrasound enhancement [19]. One important characteristic of the convective drying that can affect the product quality is the flow type which is normally two kinds: swirling flow and non-swirling flow. The non-swirling flow was normally used in the convective drying. The swirling flow was

Published online: 28 March 2018

Author's personal copy

ordinary found in spray and fluidized bed dryer which sample was impelled together with the air flow. So, heat and mass transfer of the swirling flow type dryer were high.

In tray dryer, swirling flow type is less well-known when compared to the non-swirling flow type, although some researchers have studied the effect of swirling flow on drying of potato, pumpkin, and apple [2, 3]. Compared to non-swirling air flow, the swirling air flow can be used for heat and mass transfer enhancement in drying process [16]. Çakmak and Yildiz [6] studied on grape seed drying in a new designed solar dryer with swirling flow. The drying processes were performed at three different air velocities (0.5, 1 and 1.5 m/s) with swirling flow and non-swirling flow. The results showed that the drying time decreased by increasing the air velocity. Moreover, the swirling flow provided the shorter drying time than the other that without swirling flow at the same air velocity. Özbey and Söylemez [23] investigated the effect of swirling flow on fluidized bed drying of wheat grains. They reported that the swirling flow enhanced the drying capability of granular wheat material in fluidized bed dryer up to 38% increase when compared to non-swirling flow. The aim of this experiment was to evaluate the effects of air flow on pineapple drying behavior which was compared between swirling flow type and non-swirling flow type in terms of kinetics including total color differences (ΔE*) and browning index differences (ΔBI).

Materials and methods

Sample preparation

Pineapples were purchased in a local market (Nakhon Pathom, Thailand). For the sample selection, the pineapples were measured the total soluble solid (TSS) content and firmness. The initial TSS and firmness (expressed as N) were determined by refractometer (Optika HR-130, Italy) and penetrometer (FT 327, Italy) with a 8 mm tip, respectively. The initial TSS and firmness of each sample could be $13.46 \pm 0.84°$ Brix and 26.87 ± 5.15 N, respectively. The pineapples were washed, peeled and cut into a slab shape with sized in $1 \times 2 \times 1$ cm (width × lengths × thickness). The initial moisture content was $711.63 \pm 5.60\%$ (dry basis) according to AOAC method [4].

Experimental setup

The experimental setup of swirling flow and non-swirling flow type dryer, as presented in Fig. 1, consisted of a fan, heater, temperature controller and drying chamber. However, the shape of the drying chamber for the hot air dryer was entirely different. The drying chamber of swirling flow type dryer was a cyclonic shape and the other one was a rectangular shape as shown in Fig. 1(A) and (B), respectively. The cyclonic drying chamber was constructed by stainless steel in size 0.5 cm thickness. The stainless steel was a concentric cylinder formed with two layers. The outer layer is sized in a 50 cm diameter and 30 cm height and the inner layer is sized in 40 cm diameter and 50 cm height cylinder. The space of these two layers was sealed by stainless steel sheet. The drying chamber of non-swirling flow type dryer was rectangular shape and manufactured by stainless steel with sized in $30 \times 30 \times 50$ cm (width × length × height). This sieve of tray was manufactured with stainless steel in square shape that is sized in 25×25 cm.

The drying air was forced through the drying chamber and sample tray. The air velocity was adjusted manually. The air velocity could be adjusted between 0 and 3 m/s. The heating system consisted of a 1000 W of electric wire heater placed at a channel of air inlet and connected with temperature controller as illustrated in Fig. 1. The air temperature was adjusted in the range of 40–90 °C.

Drying procedures

The air temperature and air velocity were set to a desired value at 60 and 70 °C, and 1.5 and 2.0 m/s, respectively. These drying conditions were mostly selected and suitable for air-dried pineapple production [1, 10, 28]. Samples were placed on the tray and then put into the drying chamber after the temperature of drying chamber reached steady state. The samples were dried until moisture content was approximately 15.00% (dry basis). The sample weight, ambient temperature, inlet and outlet relative humidity, inlet and outlet air temperatures were recorded every 1 min by the data logger (Lufft Opus 200). The sample weight was measured by load cell. The inlet and outlet air temperature and relative humidity were measured by temperature and humidity sensor. The ambient temperature was measured by PT100 sensor (Polyscience, USA) while the air velocity passing through the tray was measured by a vane type anemometer (Lutron AM-4201).

Data analysis of drying parameters

The initial moisture content, moisture content at any time and equilibrium moisture content of the sample were estimated from the weight as shown in following equation.

$$X_i = \frac{w_i - w_d}{w_d} \quad (1)$$

Author's personal copy

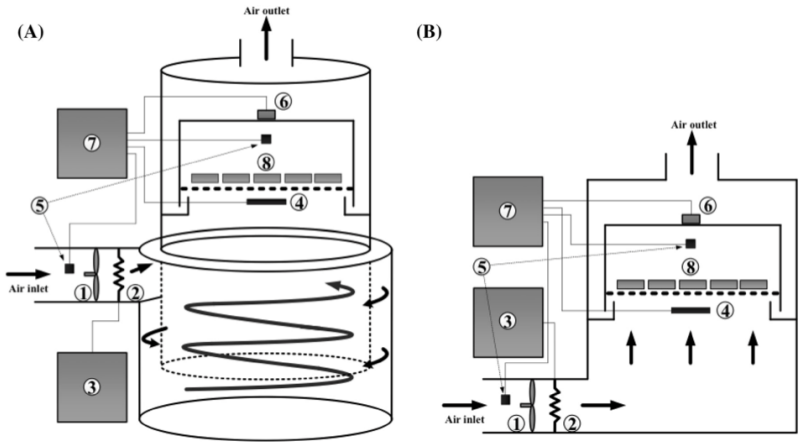


Fig. 1 The experimental setup of (**A**) swirling flow type dryer; and (**B**) non-swirling flow type dryer was comprised (1) fan; (2) heater; (3) temperature controller; (4) PT100; (5) temperature and humidity sensors; (6) load cell; (7) data loggers; and (8) samples

$$X_t = \frac{w_t - w_d}{w_d} \tag{2}$$

$$X_{eq} = \frac{w_{eq} - w_d}{w_d} \tag{3}$$

where X_i is the initial moisture content (kg water · kg dry matter^{-1}), w_i is the initial weight of the samples (kg), w_d is the dry weight of the samples (kg), X_t is the moisture content at any time (kg water · kg dry matter^{-1}), w_t is the weight of the samples at any time (kg), X_{eq} is the equilibrium moisture content (kg water · kg dry matter^{-1}) and w_{eq} is the weight of the samples at equilibrium (kg) in each condition. For equilibrium moisture content assessment, the samples in all conditions were dried for 24 h to achieve the constant weight.

In this work, the moisture content of the samples was converted to moisture ratio (MR) by using Eq. (4).

$$MR = \frac{X_t - X_{eq}}{X_i - X_{eq}} \tag{4}$$

The drying curves were plotted between MR (from the experiment) and drying time. The drying models in Table 1 were considered to clarify the drying curves in our experiment. The non-linear regression analysis was carried out in Microsoft Excel 2010 to evaluate the model constants.

The statistical parameters were used to fit the quality of the model. They were the coefficient of determination (R^2), the reduced Chi-square (χ^2) and the root mean square error (RMSE) which can be calculated as the Eqs. (5), (6) and (7), respectively:

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

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left[MR_{exp,i} - MR_{pre,i}\right]^2}{n - z} \tag{6}$$

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

where MR_{exp} is the experimental moisture ratio (−), MR_{pre} is the predicted moisture ratio (−), n is the number of

Table 1 Drying models used to describe pineapple drying

Model no.	Model	Equation	References
1	Lewis	MR = exp(− kt)	[21]
2	Page	MR = exp(− kt^n)	[24]
3	Henderson and Pabis	MR = a exp(− kt)	[14]
4	Logarithmic	MR = a exp(− kt) + c	[34]

where a, c, k and n are the model constants and t is the drying time (s)

Author's personal copy

observations and z is the number of constants in the drying model.

The drying rate (DR) of pineapple is defined by the changes in moisture content per each unit of time, which can be calculated by using Eq. (8).

$$DR = -\frac{X_{t+\Delta t} - X_t}{\Delta t} \tag{8}$$

where DR is the drying rate (kg water · kg dry matter^{-1} s^{-1}), $X_{t+\Delta t}$ is the moisture content at $t + \Delta t$ (kg water · kg dry matter^{-1}), $X_t$is the moisture content at t (kg water · kg dry matter^{-1}) and Δt is the time increment (s).

The effective moisture diffusivity (D_{eff}) was predicted by a diffusion model in Eq. (9) [11, 25]. The diffusion model based on the Fick's second law of diffusion and used to describe the moisture transport from the sample and drying capability of the dryers. Assumptions of diffusion model are uniform initial moisture content, non-shrinking slab and constant D_{eff} throughout the sample.

$$MR = \frac{8^3}{\pi^6}\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{\infty}\sum_{k=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2(2m+1)^2(2k+1)^2} \times \exp\left[-(2n+1)^2\frac{\pi^2 D_{eff}}{4X^2}t\right] \times \exp\left[-(2m+1)^2\frac{\pi^2 D_{eff}}{4Y^2}t\right] \times \exp\left[-(2k+1)^2\frac{\pi^2 D_{eff}}{4Z^2}t\right] \tag{9}$$

where X, Y and Z are the half thickness of the samples (m) in the width, length and thickness, respectively, D_{eff} is the effective moisture diffusivity (m^2/s) and n, m and k are the indexes of summations.

The drying time is anticipated to be large enough so that all other terms of the series may be regarded as in significant compared to the first. Therefore, Eq. (9) turned into:

$$MR = \frac{8^3}{\pi^6}\exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}t\right) \tag{10}$$

where $L^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$.

In the falling rate period, the slope of drying model relates to constant D_{eff} [12]. The D_{eff} in this study, thus, was calculated from the slope (m) of ln(MR) versus drying time [30] as the following equation:

$$m = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \tag{11}$$

Enhancement index

The D_{eff} was assumed constant value for throughout the process. Thus, the enhancement index (EI) was defined as dimensionless enhancement ratio from D_{eff} of the swirling flow type dryer and normalized by that of the non-swirling flow type dryer as showed in Eq. (12).

$$EI = \frac{D_{eff,Swirling}}{D_{eff,Non-Swirling}} \tag{12}$$

where EI is the enhancement index, $D_{eff,Swirling}$ is the effective moisture diffusivity of the swirling flow type dryer (m^2/s) and $D_{eff,Non\text{-}swirling}$ is the effective moisture diffusivity of the non-swirling flow type dryer (m^2/s).

The error of EI was calculated by uncertainties of the effective diffusion coefficient of swirling and non-swirling flow. It can be written as:

$$\Delta EI = \sqrt{\left(\frac{\Delta D_{eff,Swirling}}{D_{eff,Swirling}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D_{eff,Non-swirling}}{D_{eff,Non-swirling}}\right)^2} \tag{13}$$

Color assessment

The initial and final color of the samples in drying process were measured by Hunter Lab (Miniscan XE plus). Twenty samples were measured and resulted as the mean of its. Color of the samples were reported in L* (lightness), a* (red/green) and b* (yellow/blue). In addition, total color differences (ΔE*) and browning index differences (ΔBI) were calculated by using Eqs. (14) and (15), respectively [26].

$$\Delta E^* = \sqrt{\left(L^* - L_0^*\right)^2 + \left(a^* - a_0^*\right)^2 + \left(b^* - b_0^*\right)^2} \tag{14}$$

$$\Delta BI = BI - BI_0 \tag{15}$$

$$BI = \frac{100}{0.17}\left(\frac{a^* + 1.75L^*}{5.645L^* + a^* - 3.012b^*} - 0.31\right) \tag{16}$$

where L_0^* is the initial L* value of the samples, a_0^* is the initial a* value of the samples, b_0 is the initial b* value of the samples and BI_0 is the initial BI value of the samples.

Author's personal copy

Table 2 Fitting statistics of various drying models from swirling flow and non-swirling flow type dryer at various conditions

Drying conditions	Model no.	Model constants	R^2	RMSE	χ^2
Swirling flow					
60 °C and 1.5 m/s	1	$k = 1.1436 \times 10^{-4}$	0.9852	3.0777×10^{-2}	9.4740×10^{-4}
	2	$k = 1.5076 \times 10^{-4}$, n = 0.9703	**0.9856**	$\mathbf{3.0405 \times 10^{-2}}$	$\mathbf{9.2485 \times 10^{-4}}$
	3	a = 0.9980, $k = 1.1607 \times 10^{-4}$	0.9850	3.1083×10^{-2}	9.6660×10^{-4}
	4	a = 1.0000, $k = 1.1437 \times 10^{-4}$, $c = 2.4980 \times 10^{-5}$	0.9852	3.0777×10^{-2}	9.4781×10^{-4}
60 °C and 2.0 m/s	1	$k = 1.2872 \times 10^{-4}$	0.9529	4.6178×10^{-2}	2.1326×10^{-3}
	2	$k = 1.5454 \times 10^{-4}$, n = 0.9800	**0.9594**	$\mathbf{4.6093 \times 10^{-2}}$	$\mathbf{2.1250 \times 10^{-3}}$
	3	a = 0.9977, $k = 1.2844 \times 10^{-4}$	0.9592	4.6175×10^{-2}	2.1326×10^{-3}
	4	a = 0.9971, $k = 1.2917 \times 10^{-4}$, $c = 1.7680 \times 10^{-3}$	0.9592	4.6166×10^{-2}	2.1319×10^{-3}
70 °C and 1.5 m/s	1	$k = 1.4499 \times 10^{-4}$	0.9758	3.6672×10^{-2}	1.3451×10^{-3}
	2	$k = 1.4698 \times 10^{-4}$, n = 0.9985	0.9758	$\mathbf{3.6671 \times 10^{-2}}$	1.3454×10^{-3}
	3	a = 1.0202, $k = 1.6845 \times 10^{-4}$	0.9626	4.5632×10^{-2}	2.0832×10^{-3}
	4	a = 1.0000, $k = 1.4499 \times 10^{-4}$, $c = 2.1480 \times 10^{-6}$	0.9758	3.6672×10^{-2}	1.3457×10^{-3}
70 °C and 2.0 m/s	1	$k = 1.7221 \times 10^{-4}$	0.9713	3.7903×10^{-2}	1.4370×10^{-3}
	2	$k = 1.9318 \times 10^{-4}$, n = 0.9870	0.9713	$\mathbf{3.7871 \times 10^{-2}}$	$\mathbf{1.4349 \times 10^{-3}}$
	3	a = 1.0360, $k = 2.2005 \times 10^{-4}$	0.9422	5.3774×10^{-2}	2.8929×10^{-3}
	4	a = 0.9999, $k = 1.7239 \times 10^{-4}$, $c = 2.8630 \times 10^{-4}$	0.9713	3.7903×10^{-2}	1.4377×10^{-3}
Non-swirling flow					
60 °C and 1.5 m/s	1	$k = 1.1053 \times 10^{-4}$	0.9522	5.6395×10^{-2}	3.1810×10^{-3}
	2	$k = 1.3423 \times 10^{-4}$, n = 0.9791	**0.9523**	$\mathbf{5.6297 \times 10^{-2}}$	$\mathbf{3.1707 \times 10^{-3}}$
	3	a = 1.0009, $k = 1.1531 \times 10^{-4}$	0.9505	5.7377×10^{-2}	3.2936×10^{-3}
	4	a = 1.0001, $k = 1.1046 \times 10^{-4}$, $c = -1.8970 \times 10^{-4}$	0.9522	5.6395×10^{-2}	3.1824×10^{-3}
60 °C and 2.0 m/s	1	$k = 1.2186 \times 10^{-4}$	0.9338	3.2431×10^{-2}	1.0519×10^{-3}
	2	$k = 1.0999 \times 10^{-4}$, n = 1.0111	**0.9397**	$\mathbf{3.0957 \times 10^{-2}}$	$\mathbf{9.5851 \times 10^{-4}}$
	3	a = 1.0061, $k = 1.2262 \times 10^{-4}$	0.9379	3.1416×10^{-2}	9.8719×10^{-4}
	4	a = 1.0061, $k = 1.2255 \times 10^{-4}$, $c = -1.6190 \times 10^{-4}$	0.9381	3.1358×10^{-2}	9.8365×10^{-4}
70 °C and 1.5 m/s	1	$k = 1.3721 \times 10^{-4}$	0.9553	3.3084×10^{-2}	1.0947×10^{-3}
	2	$k = 1.4295 \times 10^{-4}$, n = 0.9955	**0.9570**	$\mathbf{3.2484 \times 10^{-2}}$	$\mathbf{1.0554 \times 10^{-3}}$
	3	a = 0.9895, $k = 1.3577 \times 10^{-4}$	0.9565	3.2652×10^{-2}	1.0663×10^{-3}
	4	a = 0.9896, $k = 1.3549 \times 10^{-4}$, $c = -5.7130 \times 10^{-4}$	0.9566	3.2609×10^{-2}	1.0636×10^{-3}
70 °C and 2.0 m/s	1	$k = 1.5854 \times 10^{-4}$	0.9454	5.6577×10^{-2}	3.2016×10^{-3}
	2	$k = 1.8097 \times 10^{-4}$, n = 0.9853	0.9454	$\mathbf{5.6543 \times 10^{-2}}$	$\mathbf{3.1984 \times 10^{-2}}$
	3	a = 0.9952, $k = 1.6368 \times 10^{-4}$	0.9444	5.7089×10^{-2}	3.2604×10^{-3}
	4	a = 1.0000, $k = 1.5845 \times 10^{-4}$, $c = -1.5620 \times 10^{-4}$	0.9454	5.6577×10^{-2}	3.2029×10^{-3}

R^2 is the coefficient of determination

χ^2 is the reduced Chi-square

RMSE is the root mean square error

Statistical analysis

All experiments were performed in duplicate. The experimental data was statistically analyzed by SPSS v.18. The mean differences of D_{eff}, ΔE^* and ΔBI were analyzed by one-way analysis of variance (one-way ANOVA). The Duncan's multiple range test was used to multiple comparisons of significant treatment effect. A significance level of 0.05 ($p < 0.05$) was used to determination of significance.

Results and discussion

The drying curves were fitted by different drying models. The best model was selected from the highest R^2 values, the lowest RMSE and χ^2 values. The fitting statistics of various drying models were shown in Table 2. These models provided the high R^2 values in the range of 0.9338–0.9856. The Page model obtained the highest R^2 values including the lowest RMSE and χ^2 values in almost all drying conditions. Hence, the Page model was used to

Author's personal copy

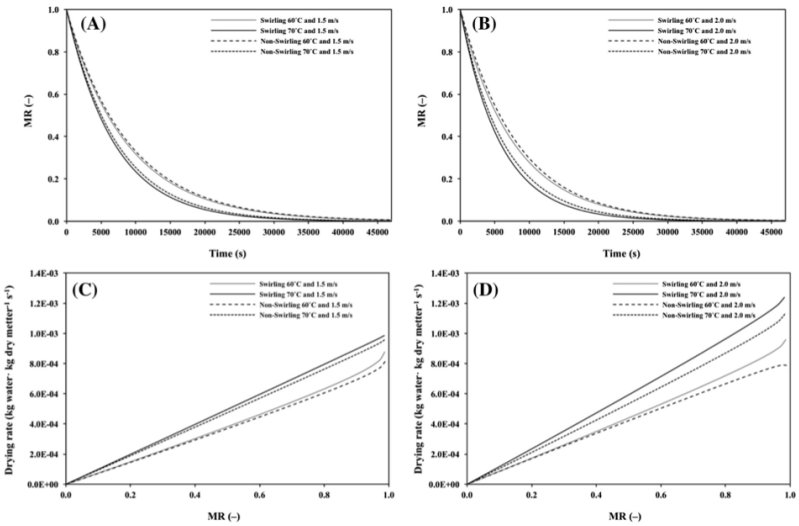


Fig. 2 Drying curves and drying rate of pineapples from swirling flow and non-swirling flow type dryer with air temperature at 60 and 70 °C. (**A**) drying curves at 1.5 m/s air velocity; (**B**) drying curves at 2.0 m/s air velocity; (**C**) drying rate at 1.5 m/s air velocity; (**D**) drying rate at 2.0 m/s air velocity

describe the drying curves of pineapples drying in all drying conditions.

Drying curves of pineapples with different air velocity conditions are presented in Fig. 2(A) and (B). The results indicated that the drying time decreased when air temperature and air velocity were increased. Consequently, the driving force for heat transfer and mass transfer between the air and the pineapple was enhanced by the higher air temperature and air velocity [18, 35]. Similarly, previous literatures have been reported in various food products [5, 27]. Moreover, the drying time from swirling flow type dryer was much shorter than the drying time from non-swirling flow type dryer which was about 4–8% when compared with the same condition because the swirling air flow was forced through the sample tray which induced the small eddies on the samples surface. The shear stress of the small eddies disturbed the vapor density. The vapor density was reduced and, as a result, the mass transfer was enhanced [17, 31]. In addition, the air around the pineapples surface was always replaced by heated fresh air resulting from the swirling of the air [31]. Therefore, the surface temperature of the samples was increased and causing the increase of water evaporation in the samples [33]. The non-swirling flow type dryer at 60 °C and 1.5 m/s provided the highest drying time of 532 min while the shortest drying time of 338 min was obtained from the swirling flow type dryer at 70 °C and 2.0 m/s. These results complied with Çakmak and Yildiz [6] who reported the swirling flow in solar dryer led to the increase of the drying rate and the decrease of the drying time.

In the study, the drying rate was evaluated by using Eq. (8) and was shown in Fig. 2(C) and (D) at different air velocity conditions. The results indicated that the drying rate linearly decreased with decrease of MR. In all drying experiments, constant rate period was not found. Only falling rate period was observed for drying of pineapple which complied to previously reported [2, 28]. Furthermore, the drying rate increased along with air temperature and air velocity. The highest drying rate was obtained from the swirling flow type dryer at 70 °C and 2.0 m/s. On the other hand, the non-swirling flow type dryer at 60 °C and 1.5 m/s provided the lowest drying rate. In addition, the results of m and D_{eff}, were fitted by using Eq. (11) as illustrated in Table 3. As the results of drying rate, m and D_{eff} increased when air temperature was increased in any air velocity values. The variation of D_{eff} from swirling flow type dryer was in the range of (6.72–10.23) × 10^{-9} m^2/s, while the variation of D_{eff} from non-swirling flow type dryer was in the range of (6.40–9.42) × 10^{-9} m^2/s.

Author's personal copy

Table 3 Slope (m) of the ln(MR) versus drying time, effective diffusivity coefficient (D_{eff}) and EI from swirling flow and non-swirling flow type dryer at various conditions

Drying conditions	m (s^{-1}) × 10^4	D_{eff} (m^2/s) × 10^9	EI (−)
Swirling flow			
60 °C and 1.5 m/s	1.11 ± 0.02^{c}	6.72 ± 0.09^{c}	1.05 ± 0.04
60 °C and 2.0 m/s	1.27 ± 0.03^{bc}	7.69 ± 0.16^{bc}	1.03 ± 0.02
70 °C and 1.5 m/s	1.43 ± 0.03^{abc}	8.67 ± 0.16^{abc}	1.05 ± 0.02
70 °C and 2.0 m/s	1.68 ± 0.01^{a}	10.23 ± 0.04^{a}	1.09 ± 0.01
Non-swirling flow			
60 °C and 1.5 m/s	1.05 ± 0.03^{c}	6.40 ± 0.16^{c}	–
60 °C and 2.0 m/s	1.22 ± 0.02^{bc}	7.43 ± 0.14^{bc}	–
70 °C and 1.5 m/s	1.36 ± 0.01^{abc}	8.24 ± 0.05^{abc}	–
70 °C and 2.0 m/s	1.55 ± 0.01^{ab}	9.42 ± 0.04^{ab}	–

[abc]Different letters in the same column indicate significant differences ($p < 0.05$)

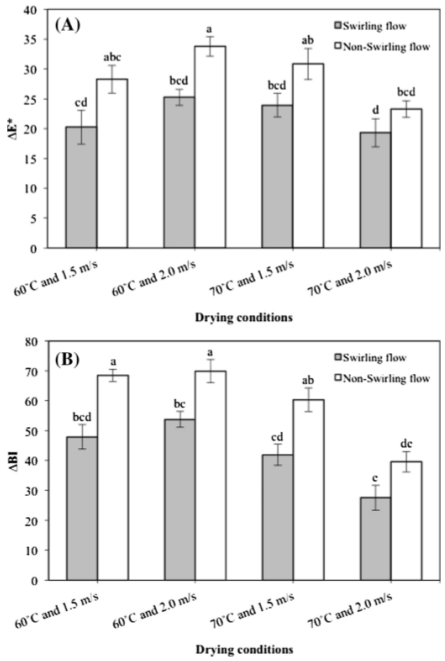


Fig. 3 Effect of different drying conditions on (**A**) total color differences (ΔE*); and (**B**) browning index differences (ΔBI) of pineapple. Data are shown as the mean ± SD. Means with different lower case letters are significantly different ($p < 0.05$)

The EI from swirling flow type dryer at various conditions was illustrated in Table 3. The results presented that the efficiency of hot air drying was improved by using the swirling flow type dryer due to the boundary air layer of the samples surface was disturbed by circulation of the air around the sample surface. Because of this reason, the convective heat transfer coefficient and evaporation rate were enhanced which resulted on the efficiency of hot air drying process [7]. Similarly, the efficiencies of swirling flow and non-swirling flow type dryer were enhanced by increase of air temperature and air velocity. The EI from swirling flow type dryer at 60 °C and 1.5 m/s and 60 °C and 2.0 m/s were 1.05 and 1.03, respectively, whereas the EI at 70 °C and 1.5 m/s and 70 °C and 2.0 m/s were 1.05 and 1.09, respectively.

In this work, the color changes of pineapple at various conditions were estimated by ΔE* and ΔBI which were represented in Fig. 3. The color changes in the samples were resulted by Maillard reaction (non-enzymatic browning reaction) and pigment destruction. However, the enzymatic browning reaction was inattentive in the study because it was normally susceptible to high temperature at more than 50 °C [22]. When considering the ΔE* in Fig. 3(A), the highest ΔE* value was obtained by the non-swirling flow type dryer at 60 °C and 2.0 m/s while the lowest ΔE* value was achieved from the swirling flow type dryer at 70 °C and 2.0 m/s. The ΔE* values from swirling flow and non-swirling flow type dryer were only significantly different in the drying condition at 60 °C and 2.0 m/s, whereas the ΔE* values from swirling flow type dryer in the other conditions were not significantly different. Nevertheless, the color changes of the samples in the swirling flow type dryer was low, forasmuch its drying time was shorter than in non-swirling flow type dryer. Correspondingly, Rattanathanalerk et al. [29] reported that the ΔE* values of pineapple juice was significantly increased by enhancement the heating temperatures and processing times of thermal process. Moreover, the increased temperature enhanced the color changes because of carotenoid isomerization [8, 32] and non-enzymatic browning reaction [9].

Author's personal copy

For the ΔBI of pineapple at various conditions, they were expressed in Fig. 3(B). The ΔBI of pineapple drying from swirling flow type dryer were lower than in non-swirling flow type dryer when compared at the same condition. However, the ΔBI from swirling flow and non-swirling flow type dryer were not significantly difference in the drying condition at 70 °C and 2.0 m/s. The highest ΔBI was obtained from the non-swirling flow type dryer at 60 °C and 2.0 m/s, while the lowest ΔBI was obtained from the swirling flow type dryer at 70 °C and 2.0 m/s. The increased ΔBI caused the brown color in the samples that was produced by Maillard reaction, pigment destruction and sample shrinkage during the drying process [15]. From the Fig. 3(B), it illustrated that the ΔBI of swirling flow in mostly conditions was lower than in non-swirling flow. It displayed that the brown color occurred in swirling flow was less than in non-swirling flow. Thus, the color of the drying products produced by swirling flow system was capable to be conserved.

Acknowledgements This project was supported by a new researcher grants from Ministry of Science and Technology of the National Science and Technology Development Agency-NSTDA (SCH-NR2014-161).

References

1. Agarry SE, Ajani AO, Aremu MO. Thin layer drying kinetics of pineapple: Effect of blanching temperature–time combination. Nig. J. Basic Appl. Sci. 21(1): 1–10 (2013).
2. Akpinar EK, Midilli A, Bicer Y. Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. Energ. Convers. Manage. 44: 1689–1705 (2003).
3. Akpinar EK. Evaluation of convective heat transfer coefficient of various crops in cyclone type dryer. Energ. Convers. Manage. 46: 2439–2454 (2005).
4. AOAC. Official methods of analysis. AOAC Official Method 935.29. Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, MD (2000).
5. Babalis SJ, Papanicolaou E, Kyriakis N, Belessiotis VG. Evaluation of thin-layer drying model for describing drying kinetics of figs (*Ficuscarica*). J. Food Eng. 75: 205–214 (2006).
6. Çakmak G, Yildiz C. Design of a new solar dryer system with swirling flow for drying seeded grape. Int. Commun. Heat Mass. 36: 984–990 (2009).
7. Chang F, Dhir VK. Mechanisms of heat transfer enhancement and slow decay of swirl in tubes using tangential injection. Int. J. Heat Fluid Fl. 16(2): 78–87 (1995).
8. Chen HE, Peng HY, Chen BH. Changes of carotenoids, color and vitamin A contents during processing of carrot juice. J. Agr. Food Chem. 43(7): 1912–1918 (1995).
9. Chutintrasri B, Noomhorm A. Color degradation kinetics of pineapple puree during thermal processing. LWT Food Sci. Technol. 40(2): 300–306 (2007).
10. Cortellino G, Pani P, Torreggiani D. Crispy air-dried pineapple rings: optimization of processing parameters. Procedia Food Sci. 1: 1324–1330 (2011).
11. Crank J. The mathematics of diffusion. Clarendon Press, Oxford (1975).
12. Dutta PP, Baruah DC. Drying modelling and experimentation of Assam black tea (*Camellia sinensis*) with producer gas as a fuel. Appl. Therm. Eng. 63: 495–502 (2014).
13. FAO. FoSTAT Database Collections, Agricultural Data, Food and Agriculture Organization of the United Nations 2012. www.faostat.fao.org. Accessed June 23, 2015.
14. Henderson SM, Pabis S. Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient. J. Agric. Eng. Res. 6: 169–174 (1961).
15. Hosseinpour S, Rafiee S, Mohtasebi SS, Aghbashlo M. Application of computer vision technique for on-line monitoring of shrimp color changes during drying. J. Food Eng. 115: 99–114 (2013).
16. Huntington DH. The influence of the spray drying process on product properties. Dry. Technol. 22(6): 1261–1287 (2004).
17. Javed KH, Mahmud T, Purba E. Enhancement of mass transfer in a spray tower using swirling gas flow. Chem. Eng. Res. Des. 84(6): 465–477 (2006).
18. Kha TC, Nguyen MH, Roach PD, Stathopoulos CE. Microencapsulation of gac oil: Optimization of spray drying conditions using response surface methodology. Powder technol. 264: 298–309 (2014).
19. Kowalski SJ, Rajewska K. Convective drying enhanced with microwave and infrared radiation. Dry. Technol. 27(7): 878–887 (2009).
20. Kowalski SJ, Szadzińska J, Łechtańska J. Non-stationary drying of carrot: Effect on product quality. J. Food Eng. 118: 393–399 (2013).
21. Lewis WK. The rate of drying solid materials. J. Ind. Eng. Chem. 13(5): 427–432 (1921).
22. Martinez MV, Whitaker JR. The biochemistry and control of enzymatic browning. Trends Food Sci. Tech. 6(6): 195–200 (1995).
23. Özbey M, Söylemez MS. Effect of swirling flow on fluidized bed drying of wheat grains. Energ. Convers. Manage. 46: 1495–1512 (2005).
24. Page GE. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. M.S. thesis. Department of Mechanical Engineering, Purdue University, Lafayette, USA. (1949).
25. Pasban A, Sadrnia H, Mohebbi M, Shahidi SA. Spectral method for simulating 3D heat and mass transfer during drying of apple slices. J. Food Eng. 212: 201–212 (2017).
26. Pothula AK, Igathinathane C, Shen J, Nichols K, Archer D. Milled industrial beet color kinetics and total soluble solid contents by image analysis. Ind. Crop. Prod. 65: 159–169 (2015).
27. Rafiee S, Sharifi M, KeyhaniA, Omid M, Jafari A, Mohtasebi SS, Mobli H. Modeling effective moisture diffusivity of orange slices (*Thompson* Cv.). Int. J. Food Prop. 13: 32–40 (2010).
28. Ramallo LA, Mascheroni RH. Quality evaluation of pineapple fruit during drying process. Food Bioprod. Process. 90: 275–283 (2012).
29. Rattanathanalerk M, Chiewchan N, Srichumpoung W. Effect of thermal processing on the quality loss of pineapple juice. J. Food Eng. 66: 259–265 (2005).
30. Rayaguru K, Routray W. Mathematical modelling of thin layer drying kinetics of stone apple slices. Int. Food Res. J. 19(4): 1503–1510 (2012).
31. Sedahmed GH, Abdel-Aziz MH, Abdo MSE, Hassan MS, Konsowa AH. Mass and heat transfer the surface of a gas sparged pool of liquid to an immiscible liquid under swirling flow and potential applications. Chem. Eng. Res. Des. 125: 88–95 (2017).
32. Singleton VL, Gortner WA, Young HY. Carotenoid pigments of pineapple fruit. I. Acid-catalyzed isomerization of the Pigments. J. Food Sci. 26(1): 49–52 (1961).
33. Tang Y, Min J, Wu X. Selection of convective moisture transfer driving potential and its impacts upon porous plate air-drying characteristics. Int. J. Heat Mass Transf. 116: 371–376 (2018).

Author's personal copy

34. Yagcioglu A, Degirmencioglu A, Cagatay F. Drying characteristics of laurel leaves under different conditions. In Başçetinçelik A. (Ed.), Proceedings of the 7th International Congress on Agricultural Mechanization and Energy, 26–27 May, Adana, Turkey. Faculty of Agriculture, Çukurova University. pp. 565–569 (1999).
35. Zhu A, Shen X. The model and mass transfer characteristics of convection drying of peach slices. Int. J. Heat Mass Tran. 72: 345–351 (2014).

รายการอ้างอิง

Aguerre, R. J., SuÁRez, C., & Viollaz, P. E. (1986). Enthalpy-Entropy Compensation in Sorption Phenomena: Application to the Prediction of the Effect of Temperature on Food Isotherms. *Journal of Food Science, 51*(6), 1547-1549. doi:10.1111/j.1365-2621.1986.tb13856.x

Akanbi, C. T., Adeyemi, R. S., & Ojo, A. (2006). Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices. *Journal of Food Engineering, 73*(2), 157-163. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.01.015

Akoy, E., Höresten, D., & Ismail, M. (2013). Moisture adsorption characteristics of solar-dried mango slices. *International Food Research Journal, 20*, 883-890.

AktaŞ, N., & Gürses, A. (2005). Moisture adsorption properties and adsorption isosteric heat of dehydrated slices of Pastirma (Turkish dry meat product). *Meat Science, 71*(3), 571-576. doi:https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.04.042

Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2004). Water sorption isotherms of starch powders. Part 2: Thermodynamic characteristics. *Journal of Food Engineering, 62*(2), 135-142. doi:https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00202-4

Alfy, A., Kiran, B. V., Jeevitha, G. C., & Hebbar, H. U. (2016). Recent Developments in Superheated Steam Processing of Foods—A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 56*(13), 2191-2208. doi:10.1080/10408398.2012.740641

Antonio, G. C., Alves, D. G., Azoubel, P. M., Murr, F. E. X., & Park, K. J. (2008). Influence of osmotic dehydration and high temperature short time processes on dried sweet potato (Ipomoea batatas Lam.). *Journal of Food Engineering, 84*(3), 375-382. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.05.033

AOAC. (2005). Official Method 935.29: Moisture in malt. *Gaithersburg, MD, USA: AOAC International*.

Apostolopoulos, D., & Gilbert, S. G. (1990). Water Sorption of Coffee Solubles by Frontal Inverse Gas Chromatography: Thermodynamic Considerations. *Journal of Food Science, 55*(2), 475-487. doi:10.1111/j.1365-2621.1990.tb06790.x

Aral, S., & BeŞe, 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:https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.04.128

Araya-Farias, M., & Ratti, C. (2009). Dehydration of foods: General concepts. In C. Ratti (Ed.), *ADVANCES in FOOD DEHYDRATION*. Boca Raton, Florida: CRC Press.

Argyropoulos, D., Alex, R., Kohler, R., & Müller, J. (2012). Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of leaves and stems of lemon balm (Melissa officinalis L.) established by dynamic vapor sorption. *LWT, 47*(2), 324-331. doi:https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.01.026

Arslan, N., & Toğrul, H. (2005a). Modelling of water sorption isotherms of macaroni stored in a chamber under controlled humidity and thermodynamic approach. *Journal of Food Engineering, 69*(2), 133-145. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.08.004

Arslan, N., & Toğrul, H. (2005b). Moisture Sorption Isotherms for Crushed Chillies. *Biosystems Engineering, 90*(1), 47-61. doi:https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.10.008

Arslan, N., & Toğrul, H. (2006). The fitting of various models to water sorption isotherms of tea stored in a chamber under controlled temperature and humidity. *Journal of Stored Products Research, 42*(2), 112-135. doi:https://doi.org/10.1016/j.jspr.2005.01.001

Ayranci, E., Ayranci, G., & Dogantan, Z. (1990). Moisture Sorption Isotherms of Dried Apricot, Fig and Raisin at 20 °C and 36°C. *Journal of Food Science, 55*(6), 1591-1593. doi:10.1111/j.1365-2621.1990.tb03577.x

Baini, R., & Langrish, T. A. G. (2007). Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas. *Journal of Food Engineering, 79*(1), 330-343. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.068

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

Barbosa-Cánovas, G. V., & Vega-Mercado, H. (1996). Fundamentals of Air-Water Mixtures and Ideal Dryers. In *Dehydration of foods* (pp. 9-27). New York: Chapman & Hall.

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

Beristain, C. I., Garcia, H. S., & Azuara, E. (1996). Enthalpy-Entropy compensation in food vapor adsorption. *Journal of Food Engineering, 30*(3), 405-415. doi:https://doi.org/10.1016/S0260-8774(96)00011-8

Bernardi, S., Bodini, R. B., Marcatti, B., Petrus, R. R., & Favaro-Trindade, C. S. (2009). Quality and sensorial characteristics of osmotically dehydrated mango with syrups of inverted sugar and sucrose. *Scientia Agricola, 66*, 40-43. Retrieved from http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162009000100005&nrm=iso

Bettelheim, F. A., Block, A., & Kaufman, L. J. (1970). Heats of water vapor sorption in swelling biopolymers. *Biopolymers, 9*(12), 1531-1538. doi:10.1002/bip.1970.360091212

Beuchat, L. R. (1983). Influence of Water Activity on Growth, Metabolic Activities and Survival of Yeasts and Molds. *Journal of Food Protection, 46*(2), 135-141. doi:10.4315/0362-028X-46.2.135

Bolin, H. R. (1980). RELATION OF MOISTURE TO WATER ACITIVITY IN PRUNES AND RAISINS. *Journal of Food Science, 45*(5), 1190-1192. doi:10.1111/j.1365-2621.1980.tb06518.x

Bon, J., & Kudra, T. (2007). Enthalpy-Driven Optimization of Intermittent Drying. *Drying Technology, 25*(4), 523-532. doi:10.1080/07373930701226880

Brennan, J. G. (1990). *Food Engineering Operations* (third ed.). London: Elsevier Applied Science.

Brennan, J. G. (1994). *Food Dehydration: A Dictionary and Guide*: Taylor & Francis.

Brennan, J. G. (2006). *Food processing handbook*. Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society, 60*(2), 309-319. doi:10.1021/ja01269a023

Cano-Chauca, M., Stringheta, P. C., Ramos, A. M., & Cal-Vidal, J. (2005). Effect of the carriers on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 6*(4), 420-428. doi:https://doi.org/10.1016/j.ifset.2005.05.003

Cano-Higuita, D. M., Villa-Vélez, H. A., Telis-Romero, J., Váquiro, H. A., & Telis, V. R. N. (2015). Influence of alternative drying aids on water sorption of spray dried mango mix

powders: A thermodynamic approach. *Food and Bioproducts Processing, 93*, 19-28. doi:https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.10.005

Chen, J. P., Tai, C. Y., & Chen, B. H. (2007). Effects of different drying treatments on the stability of carotenoids in Taiwanese mango (Mangifera indica L.). *Food Chemistry, 100*(3), 1005-1010. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.10.056

Chirife, J., & MarÍA Del Buera, P. (1994). Water Activity, Glass Transition and Microbial Stability in Concentrated/Semimoist Food Systems. *Journal of Food Science, 59*(5), 921-927. doi:10.1111/j.1365-2621.1994.tb08159.x

Chua, K. J., Mujumdar, A. S., & Chou, S. K. (2003). Intermittent drying of bioproducts—an overview. *Bioresource Technology, 90*(3), 285-295. doi:https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00133-0

Chua, K. J., Mujumdar, A. S., Hawlader, M. N. A., Chou, S. K., & Ho, J. C. (2001). CONVECTIVE DRYING OF AGRICULTURAL PRODUCTS. EFFECT OF CONTINUOUS AND STEPWISE CHANGE IN DRYING AIR TEMPERATURE. *Drying Technology, 19*(8), 1949-1960. doi:10.1081/DRT-100107282

Contreras, C., Martín-Esparza, M. E., Chiralt, A., & Martínez-Navarrete, N. (2008). Influence of microwave application on convective drying: Effects on drying kinetics, and optical and mechanical properties of apple and strawberry. *Journal of Food Engineering, 88*(1), 55-64. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.01.014

Corrêa, S. C., Clerici, M. T. P. S., Garcia, J. S., Ferreira, E. B., Eberlin, M. N., & Azevedo, L. (2011). Evaluation of dehydrated marolo (Annona crassiflora) flour and carpels by freeze-drying and convective hot-air drying. *Food Research International, 44*(7), 2385-2390. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.02.052

Corzo, O., & Álvarez, C. (2014). Color Change Kinetics of Mango at Different Maturity Stages during Air Drying. *Journal of Food Processing and Preservation, 38*(1), 508-517. doi:10.1111/j.1745-4549.2012.00801.x

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

Cox, S., Gupta, S., & Abu-Ghannam, N. (2012). Effect of different rehydration temperatures on the

moisture, content of phenolic compounds, antioxidant capacity and textural properties of edible Irish brown seaweed. *LWT, 47*(2), 300-307. doi:https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.01.023

Crank, J. (1975). *The Mathematics of diffusion*. Oxford, UK: Clarendon Press.

Cui, Z.-W., Li, C.-Y., Song, C.-F., & Song, Y. (2008). Combined Microwave-Vacuum and Freeze Drying of Carrot and Apple Chips. *Drying Technology, 26*(12), 1517-1523. doi:10.1080/07373930802463960

Cunningham, S. E., McMinn, W. A. M., Magee, T. R. A., & Richardson, P. S. (2007). Modelling water absorption of pasta during soaking. *Journal of Food Engineering, 82*(4), 600-607. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.03.018

da Silva, W. P., Rodrigues, A. F., e Silva, C. M. D. P. S., de Castro, D. S., & Gomes, J. P. (2015). Comparison between continuous and intermittent drying of whole bananas using empirical and diffusion models to describe the processes. *Journal of Food Engineering, 166*, 230-236. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.06.018

de Torres, C., Díaz-Maroto, M. C., Hermosín-Gutiérrez, I., & Pérez-Coello, M. S. (2010). Effect of freeze-drying and oven-drying on volatiles and phenolics composition of grape skin. *Analytica Chimica Acta, 660*(1), 177-182. doi:https://doi.org/10.1016/j.aca.2009.10.005

Deng, Y., Luo, Y., Wang, Y., Yue, J., Liu, Z., Zhong, Y., . . . Yang, H. (2014). Drying-induced protein and microstructure damages of squid fillets affected moisture distribution and rehydration ability during rehydration. *Journal of Food Engineering, 123*, 23-31. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.09.006

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:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.03.008

Djendoubi Mrad, N., Bonazzi, C., Boudhrioua, N., Kechaou, N., & Courtois, F. (2012). Influence of sugar composition on water sorption isotherms and on glass transition in apricots. *Journal*

of Food Engineering, 111(2), 403-411. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.02.001

Eipenson, W. E., & Bhowmik, S. R. (1992). Indian fruit and vegetable processing industry- potential and challenges. *Indian Food Packer, 46*(5), 7-12.

Fabra, M. J., Márquez, E., Castro, D., & Chiralt, A. (2011). Effect of maltodextrins in the water-content–water activity–glass transition relationships of noni (Morinda citrifolia L.) pulp powder. *Journal of Food Engineering, 103*(1), 47-51. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.09.018

Falade, K. O., & Aworh, O. C. (2004). Adsorption isotherms of osmo-oven dried african star apple (Chrysophyllum albidum) and african mango (Irvingia gabonensis) slices. *European Food Research and Technology, 218*(3), 278-283. doi:10.1007/s00217-003-0843-8

FAOSTAT. (2013). Food and Agriculture Organization of the United Nations Staistics Division. Retrieved from faostat3.fao.org

Fasina, O. O., Ajibola, O. O., & Tyler, R. T. (1999). THERMODYNAMICS OF MOISTURE SORPTION IN WINGED BEAN SEED AND GARI. *Journal of Food Process Engineering, 22*(6), 405-418. doi:10.1111/j.1745-4530.1999.tb00496.x

Fellows, P. J. (2000). *Food Processing Technology – Principles and Practice* (second ed.). Boca Raton, Florida: CRC Press.

Fitzpatrick, J. J., & Ahrné, L. (2005). Food powder handling and processing: Industry problems, knowledge barriers and research opportunities. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 44*(2), 209-214. doi:https://doi.org/10.1016/j.cep.2004.03.014

Gal, S. (1987). The need for, and practical applications of sorption data. In R. Jowitt, F. Escher, B. Hallstrom, H. Mefert, W. Spiess, & G. Vos (Eds.), *Physical properties of foods-2* (pp. 13-25). London: Elsevier Applied Science.

García-Pascual, P., Sanjuán, N., Melis, R., & Mulet, A. (2006). Morchella esculenta (morel) rehydration process modelling. *Journal of Food Engineering, 72*(4), 346-353. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.12.014

García-Viguera, C., Zafrilla, P., Artés, F., Romero, F., Abellán, P., & Tomás-Barberán, F. A. (1998). Colour and anthocyanin stability of red raspberry jam. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 78*(4), 565-573. doi:10.1002/(SICI)1097-0010(199812)78:4<565::AID-JSFA154>3.0.CO;2-P

Garza, S., Ibarz, A., Pagán, J., & Giner, J. (1999). Non-enzymatic browning in peach puree during heating. *Food Research International, 32*(5), 335-343. doi:https://doi.org/10.1016/S0963-9969(99)00094-0

Glouannec, P., Lecharpentier, D., & Noel, H. (2002). Experimental survey on the combination of radiating infrared and microwave sources for the drying of porous material. *Applied Thermal Engineering, 22*(15), 1689-1703. doi:https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00071-6

González-Aguilar, G. A., Zavaleta-Gatica, R., & Tiznado-Hernández, M. E. (2007). Improving postharvest quality of mango 'Haden' by UV-C treatment. *Postharvest Biology and Technology, 45*(1), 108-116. doi:https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.01.012

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

Haas, G. J., Prescott Jr, H. E., & Cante, C. J. (1974). ON REHYDRATION AND RESPIRATION OF DRY AND PARTIALLY DRIED VEGETABLES. *Journal of Food Science, 39*(4), 681-684. doi:10.1111/j.1365-2621.1974.tb17956.x

Halsey, G. (1948). Physical Adsorption on Non‐Uniform Surfaces. *The Journal of Chemical Physics, 16*(10), 931-937. doi:10.1063/1.1746689

Harnkarnsujarit, N., & Charoenrein, S. (2011). Influence of collapsed structure on stability of β-carotene in freeze-dried mangoes. *Food Research International, 44*(10), 3188-3194. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.08.008

Henderson, S. M., & Pabis, S. (1961). Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research, 6*, 169–174.

Herrithsch, A., Dronfield, J., & Nijdam, J. (2008, 9–12 November 2008). *Intermittent and continuous drying of red- beech timber from the green conditions.* Paper presented at the 16th International Drying Symposium (IDS2008), Hyderabad, India.

Hill, P. E., & Rizvi, S. S. H. (1982). Thermodynamic parameters and storage stability of drum dried peanut flakes. *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie, 15*(4), 185–190.

Hofsetz, K., Lopes, C. C., Hubinger, M. D., Mayor, L., & Sereno, A. M. (2007). Changes in the physical properties of bananas on applying HTST pulse during air-drying. *Journal of Food*

Engineering, 83(4), 531-540. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.04.003

Hossain, M. D., Bala, B. K., Hossain, M. A., & Mondol, M. R. A. (2001). Sorption isotherms and heat of sorption of pineapple. *Journal of Food Engineering, 48*(2), 103-107. doi:https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00132-1

Hubinger, M., Menegalli, F. C., Aguerre, R. J., & Suarez, C. (1992). Water Vapor Adsorption Isotherms of Guava, Mango and Pineapple. *Journal of Food Science, 57*(6), 1405-1407. doi:10.1111/j.1365-2621.1992.tb06869.x

Hunt, R. W. G. (1991). *Measuring Color* (second ed.). New York: Ellis Horwood.

Iglesias, H. A., & Chirife, J. (1976). BET monolayer values in dehydrated foods components. *Food Science and Technology, 9*(2), 15-113.

Iglesias, H. A., & Chirife, J. (1976). Isosteric heats of water vapour sorption on dehydrated foods. Part 1 - Analysis of differential heat curves. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie, 9*, 116–122.

Iguedjtal, T., Louka, N., & Allaf, K. (2008). Sorption isotherms of potato slices dried and texturized by controlled sudden decompression. *Journal of Food Engineering, 85*(2), 180-190. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.06.028

International Telecommunication Union. (2002). *Recommendation ITU-R BT.709 Parameter Values for the HDTV Standards for Production and International Programme Exchange (04/02)*.

Javed, K. H., Mahmud, T., & Purba, E. (2006). Enhancement of Mass Transfer in a Spray Tower Using Swirling Gas Flow. *Chemical Engineering Research and Design, 84*(6), 465-477. doi:https://doi.org/10.1205/cherd.05119

Jayaraman, K. S., Gupta, D. K. D., & Rao, N. B. (1990). Effect of pretreatment with salt and sucrose on the quality and stability of dehydrated cauliflower. *International Journal of Food Science & Technology, 25*(1), 47-60. doi:10.1111/j.1365-2621.1990.tb01058.x

Joykumar Singh, N., & Pandey, R. K. (2012). Convective air drying characteristics of sweet potato cube (Ipomoea batatas L.). *Food and Bioproducts Processing, 90*(2), 317-322. doi:https://doi.org/10.1016/j.fbp.2011.06.006

Jumah, R., Al-Kteimat, E., Al-Hamad, A., & Telfah, E. (2007). Constant and Intermittent Drying Characteristics of Olive Cake. *Drying Technology, 25*(9), 1421-1426. doi:10.1080/07373930701536668

Kapsalis, J. G. (1987). Influence of hysteresis and temperature on moisture sorption isotherms. In L. B. Rockland & L. R. Beuchat (Eds.), *Water activity theory and applications to food* (pp. 173–207). New York: Marcel Dekker, Inc.

Karathanos, V. T., Kanellopoulos, N. K., & Belessiotis, V. G. (1996). Development of porous structure during air drying of agricultural plant products. *Journal of Food Engineering, 29*(2), 167-183. doi:https://doi.org/10.1016/0260-8774(95)00058-5

Karel, M., & Lund, D. B. (2003a). Dehydration. In *Physical principles of food preservation* (second ed.). New York: Marcel Dekker, Inc.

Karel, M., & Lund, D. B. (2003b). Water activity. In *Physical principles of food preservation* (second ed.). New York: Marcel Dekker, Inc.

Kaymak-Ertekin, F., & Gedik, A. (2004). Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes. *LWT - Food Science and Technology, 37*(4), 429-438. doi:https://doi.org/10.1016/j.lwt.2003.10.012

Kha, T. C., Nguyen, M. H., Roach, P. D., & Stathopoulos, C. E. (2014). Microencapsulation of Gac oil: Optimisation of spray drying conditions using response surface methodology. *Powder Technology, 264*, 298-309. doi:https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.053

Kiranoudis, C. T., Maroulis, Z. B., Tsami, E., & Marinos-Kouris, D. (1993). Equilibrium moisture content and heat of desorption of some vegetables. *Journal of Food Engineering, 20*(1), 55-74. doi:https://doi.org/10.1016/0260-8774(93)90019-G

Korbel, E., Attal, E.-H., Grabulos, J., Lluberas, E., Durand, N., Morel, G., . . . Brat, P. (2013). Impact of temperature and water activity on enzymatic and non-enzymatic reactions in reconstituted dried mango model system. *European Food Research and Technology, 237*(1), 39-46. doi:10.1007/s00217-013-2026-6

Korbel, E., Servent, A., Billaud, C., & Brat, P. (2013). Heat Inactivation of Polyphenol Oxidase and Peroxidase as a Function of Water Activity: A Case Study of Mango Drying. *Drying Technology, 31*(13-14), 1675-1680. doi:10.1080/07373937.2013.808659

Kowalski, S. J., & Pawłowski, A. (2010). Drying of Wet Materials in Intermittent Conditions. *Drying Technology, 28*(5), 636-643. doi:10.1080/07373931003788718

Kowalski, S. J., & Pawłowski, A. (2011). Intermittent drying of initially saturated porous materials. *Chemical Engineering Science, 66*(9), 1893-1905.

doi:https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.01.044

Kowalski, S. J., & Rajewska, K. (2009). Convective Drying Enhanced with Microwave and Infrared Radiation. *Drying Technology, 27*(7-8), 878-887. doi:10.1080/07373930903014837

Kowalski, S. J., & Szadzińska, J. (2014). Convective-intermittent drying of cherries preceded by ultrasonic assisted osmotic dehydration. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 82*, 65-70. doi:https://doi.org/10.1016/j.cep.2014.05.006

Kowalski, S. J., Szadzińska, J., & Łechtańska, J. (2013). Non-stationary drying of carrot: Effect on product quality. *Journal of Food Engineering, 118*(4), 393-399. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.04.028

Krokida, M., & Maroulis, Z. (2000). Quality changes during drying of food materials. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Drying technology in agriculture and food sciences* (pp. 61-98). Enfield: Science Publishers.

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

Krokida, M. K., & Philippopoulos, C. (2005). Rehydration of Dehydrated Foods. *Drying Technology, 23*(4), 799-830. doi:10.1081/DRT-200054201

Krug, R. R., Hunter, W. G., & Grieger, R. A. (1976). Enthalpy-entropy compensation. 1. Some fundamental statistical problems associated with the analysis of van't Hoff and Arrhenius data. *The Journal of Physical Chemistry, 80*(21), 2335-2341. doi:10.1021/j100562a006

Kudra, T., & Mujumdar, A. S. (2002). *Advanced drying technologies*. New York: Marcel Dekker, Inc.

Labuza, T. P. (1977). THE PROPERTIES OF WATER IN RELATIONSHIP TO WATER BINDING IN FOODS: A REVIEW1,2. *Journal of Food Processing and Preservation, 1*(2), 167-190. doi:10.1111/j.1745-4549.1977.tb00321.x

Labuza , T. P., Kaanane, A., & Chen, J. Y. (1985). Effect of Temperature on the Moisture Sorption Isotherms and Water Activity Shift of Two Dehydrated Foods. *Journal of Food Science, 50*(2), 385-392. doi:10.1111/j.1365-2621.1985.tb13409.x

Laurindo, J. B., Porciuncula, B. D. A., & Zotarelli, M. F. (2011). Brazilian Patent PI 017110000045.

Lee, J. H., & Kim, H. J. (2009). Vacuum drying kinetics of Asian white radish (Raphanus sativus L.) slices. *LWT - Food Science and Technology, 42*(1), 180-186.

doi:https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.05.017

Leffer, J. E., & Grunwald, E. (1963). *Rates and equilibria of organic reactions*. New York: Wiley.

León, K., Mery, D., Pedreschi, F., & León, J. (2006). Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images. *Food Research International, 39*(10), 1084-1091. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodres.2006.03.006

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

Lewis, W. K. (1921). The Rate of Drying of Solid Materials. *Journal of Industrial & Engineering Chemistry, 13*(5), 427-432. doi:10.1021/ie50137a021

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

Liu, L., & Guo, Q. X. (2001). Isokinetic relationship, isoequilibrium relationship, and enthalpy-entropy compensation. *Chemical Reviews, 101*(3), 673–695.

Louka, N., & Allaf, K. (2004). Expansion ratio and color improvement of dried vegetables texturized by a new process "Controlled Sudden Decompression to the vacuum": Application to potatoes, carrots and onions. *Journal of Food Engineering, 65*(2), 233-243. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.01.020

Louka, N., Juhel, F., & Allaf, K. (2004). Quality studies on various types of partially dried vegetables texturized by Controlled Sudden Decompression: General patterns for the variation of the expansion ratio. *Journal of Food Engineering, 65*(2), 245-253. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.01.021

Machado, M. d. F. t., Oliveira, F. A. R., Gekas, V., & Singh, R. P. (1998). Kinetics of moisture uptake and soluble-solids loss by puffed breakfast cereals immersed in water. *International Journal of Food Science & Technology, 33*(3), 225-237. doi:10.1046/j.1365-2621.1998.00197.x

Madamba, P. S., Driscoll, R. H., & Buckle, K. A. (1996). Enthalpy-entropy compensation models for sorption and browning of garlic. *Journal of Food Engineering, 28*(2), 109-119. doi:https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)00072-7

Malaikritsanachalee, P., Choosri, W., & Choosri, T. (2018). Study on kinetics of flow characteristics

in hot air drying of pineapple. *Food Science and Biotechnology, 27*(4), 1047-1055. doi:10.1007/s10068-018-0357-6

Maldonado, S., Arnau, E., & Bertuzzi, M. A. (2010). Effect of temperature and pretreatment on water diffusion during rehydration of dehydrated mangoes. *Journal of Food Engineering, 96*(3), 333-341. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.08.017

Maneepun, S., & Yunchalad, M. (2004). *Developing processed mango products for international markets.* Paper presented at the Proceedings of the VII International Mango Symposium, ISHS Acta Horticulturae, ISHS, Recife, Brazil.

Marabi, A., & Saguy, I. S. (2004). Effect of porosity on rehydration of dry food particulates. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 84*(10), 1105-1110. doi:10.1002/jsfa.1793

Maskan, M. (2001). Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering, 48*(2), 169-175. doi:https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00154-0

Mayor, L., & Sereno, A. M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering, 61*(3), 373-386. doi:https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00144-4

Mazza, G. (1982). Moisture sorption isotherms of potato slices. *International Journal of Food Science & Technology, 17*(1), 47-54. doi:10.1111/j.1365-2621.1982.tb00158.x

Mazza, G., & LeMaguer, M. (1978). Water Sorption Properties of Yellow Globe Onion (Allium cepa L.). *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal, 11*(4), 189-193. doi:https://doi.org/10.1016/S0315-5463(78)73269-4

Mazza, G., & LeMaguer, M. (1980). Flavour retention during dehydration of onion. In P. Linko, Y. Malkki, J. Olkku, & J. Larinkari (Eds.), *Food process engineering, Vol. 1, Food processing systems.* (pp. 399–406). London: Applied Science.

McCabe, W. L., & Smith, J. C. (1976). *Unit operations of chemical engineering* (third ed.). New York: McGraw-Hill Book Company.

McLaughlin, C. P., & Magee, T. R. A. (1998). The determination of sorption isotherm and the isosteric heats of sorption for potatoes. *Journal of Food Engineering, 35*(3), 267-280. doi:https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00025-9

McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2003). Thermodynamic properties of moisture sorption of

potato. *Journal of Food Engineering, 60*(2), 157-165. doi:https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00036-0

McMinn, W. A. M., McKee, D. J., & Magee, T. R. A. (2007). Moisture adsorption behaviour of oatmeal biscuit and oat flakes. *Journal of Food Engineering, 79*(2), 481-493. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.02.009

Mir, M. A., & Nath, N. (1995). Sorption isotherms of fortified mango bars. *Journal of Food Engineering, 25*(1), 141-150. doi:https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)00005-T

Mohamed, A., Kouhila, M., Jamali, A., Lahsasni, S., & Mahrouz, M. (2005). Moisture sorption isotherms and heat of sorption of bitter orange leaves (Citrus aurantium). *Journal of Food Engineering, 67*(4), 491-498. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.016

Monte, M. L., Moreno, M. L., Senna, J., Arrieche, L. S., & Pinto, L. A. A. (2018). Moisture sorption isotherms of chitosan-glycerol films: Thermodynamic properties and microstructure. *Food Bioscience, 22*, 170-177. doi:https://doi.org/10.1016/j.fbio.2018.02.004

Moreira, R., Villate, J. E., Figueiredo, A., & Sereno, A. (1998). *Shrinkage of apple slices during drying by warm air convection and freeze-drying.* Paper presented at the Drying ’98s Proceedings of the 11th International Proceedings of the 11th International Drying Symposium, Halkidiki, Greece.

Mujumdar, A. S. (1997). Drying fundamentals. In C. G. J. Baker (Ed.), *Industrial drying of foods* (pp. 7–30). London: Blackie Academic and Professional.

Mujumdar, A. S., & Menon, A. S. (1995). Drying of solids: Principles, classifi cation, and selection of dryers. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of industrial drying* (Vol. 1, pp. 1–39). New York: Marcel Dekker, Inc.

Murata, M., Tsurutani, M., Tomita, M., Homma, S., & Kaneko, K. (1995). Relationship between Apple Ripening and Browning: Changes in Polyphenol Content and Polyphenol Oxidase. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 43*(5), 1115-1121. doi:10.1021/jf00053a001

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

Nicoleti, J. F., Silveira, V., Telis-Romero, J., & Telis, V. R. N. (2007). Influence of Drying

Conditions on Ascorbic Acid during Convective Drying of Whole Persimmons. *Drying Technology, 25*(5), 891-899. doi:10.1080/07373930701370365

Nimmol, C., Devahastin, S., Swasdisevi, T., & Soponronnarit, S. (2007). Drying and heat transfer behavior of banana undergoing combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation drying. *Applied Thermal Engineering, 27*(14), 2483-2494. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.02.003

Nobbs, J. H., & Connolly, C. (2000). Camera‐based colour inspection. *Sensor Review, 20*(1), 14-20. doi:10.1108/02602280010311347

Ochoa-Martínez, C. I., Quintero, P. T., Ayala, A. A., & Ortiz, M. J. (2012). Drying characteristics of mango slices using the Refractance Window™ technique. *Journal of Food Engineering, 109*(1), 69-75. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.09.032

Okos, M. R., Bell, L., Castaldi, A., Jones, C., Liang, H., Murakami, E., . . . Xiong, X. (1989). Design and control of energy efficient food drying processes with specific reference to quality. *Report Purdue University, Indiana*.

Oswin, C. R. (1946). The kinetics of package life. III. The isotherm. *Journal of the Society of Chemical Industry, 65*(12), 419-421. doi:10.1002/jctb.5000651216

Otsu, N. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 9*(1), 62-66. doi:10.1109/TSMC.1979.4310076

Page, G. (1949). *Factors influencing the maximum rates of air-drying shelled corn in thin layers.* (M.S. Thesis). Purdue University, Lafayatte.

Palipane, K. B., & Driscoll, R. H. (1993). Moisture sorption characteristics of in-shell macadamia nuts. *Journal of Food Engineering, 18*(1), 63-76. doi:https://doi.org/10.1016/0260-8774(93)90075-U

Pan, Y. K., Wu, H., Li, Z. Y., Mujumdar, A. S., & Kudra, T. (1997). EFFECT OF A TEMPERING PERIOD ON DRYING OF CARROT IN A VffiRO-FLUlDIZED BED. *Drying Technology, 15*(6-8), 2037-2043. doi:10.1080/07373939708917348

Park, Y. K., Sato, H. H., Almeida, T. D., & Moretti, R. H. (1980). POLYPHENOL OXIDASE OF MANGO (Mangifera indica var. Haden). *Journal of Food Science, 45*(6), 1619-1621. doi:10.1111/j.1365-2621.1980.tb07575.x

Pasban, A., Sadrnia, H., Mohebbi, M., & Shahidi, S. A. (2017). Spectral method for simulating 3D

heat and mass transfer during drying of apple slices. *Journal of Food Engineering, 212*, 201-212. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.05.013

Peleg, M. (1988). An Empirical Model for the Description of Moisture Sorption Curves. *Journal of Food Science, 53*(4), 1216-1217. doi:10.1111/j.1365-2621.1988.tb13565.x

Perera, C. O. (2005). Selected Quality Attributes of Dried Foods. *Drying Technology, 23*(4), 717-730. doi:10.1081/DRT-200054180

Pillai, M. G. (2013). Thin layer drying kinetics, characteristics and modeling of plaster of paris. *Chemical Engineering Research and Design, 91*(6), 1018-1027. doi:https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.01.005

Pott, I., Neidhart, S., Mühlbauer, W., & Carle, R. (2005). Quality improvement of non-sulphited mango slices by drying at high temperatures. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 6*(4), 412-419. doi:https://doi.org/10.1016/j.ifset.2005.05.004

Potter, N. N. (1986). *Food science*. Connecticut: AVI Publication.

Prothon, F., Ahrné, L., & Sjöholm, I. (2003). Mechanisms and Prevention of Plant Tissue Collapse during Dehydration: A Critical Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 43*(4), 447-479. doi:10.1080/10408690390826581

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:https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.01.006

Rahman, M. S. (2001). TOWARD PREDICTION OF POROSITY IN FOODS DURING DRYING: A BRIEF REVIEW. *Drying Technology, 19*(1), 1-13. doi:10.1081/DRT-100001349

Rahman, M. S., & Perera, C. O. (2007). Drying and food preservation. In M. S. Rahman (Ed.), *Handbook of food preservation* (second ed.). Boca Raton, Florida: CRC Press.

Rahman , S. (1995). *Food properties handbook*. New York: CRC Press.

Rajkumar, P., Kailappan, R., Viswanathan, R., & Raghavan, G. S. V. (2007). Drying characteristics of foamed alphonso mango pulp in a continuous type foam mat dryer. *Journal of Food Engineering, 79*(4), 1452-1459. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.04.027

Ramallo, L. A., Lovera, N. N., & Schmalko, M. E. (2010). Effect of the application of intermittent drying on Ilex paraguariensis quality and drying kinetics. *Journal of Food Engineering,*

97(2), 188-193. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.10.008

Ramallo, L. A., & Mascheroni, R. H. (2012). Quality evaluation of pineapple fruit during drying process. *Food and bioproducts processing., 90*(2), 275-283. doi:10.1016/j.fbp.2011.06.001

Range-Marrón, M., Welti-Chanes, J., Córdova-Quiroz, A. V., Griselda, C.-B., Cerón-Bretón, R. M., & Anguebes, F. (2011). Estimation of Moisture Sorption Isotherms of Mango Pulp Freeze-dried. *INTERNATIONAL JOURNAL OF BIOLOGY AND BIOMEDICAL ENGINEERING, 5*, 18.

Ratti, C. (1994). Shrinkage during drying of foodstuffs. *Journal of Food Engineering, 23*(1), 91-105. doi:https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)90125-2

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

Ratti, C., & Mujumdar, A. S. (2005). Drying of fruits. In D. M. Barret, L. Somogyi, & H. Ramaswamy (Eds.), *Processing Fruits* (second ed., pp. 127–159). Boca Raton, Florida: CRC Press.

Rizvi, S. S. H. (1995). Thermodynamic properties of food in dehydration. In M. A. Rao & S. S. H. Rizvi (Eds.), *Engineering properties of foods* (pp. 223–309). New York: Marcel Dekker, Inc.

Rizvi, S. S. H. (2005). Thermodynamic properties of food in dehydration. In M. A. Rao, S. S. H. Rizvi, & A. K. Datta (Eds.), *Engineering properties of foods* (third ed., pp. 239–325). Boca Raton, Florida: CRC Press.

Rockland, L. B., & Beuchat, L. R. (1987). *Water activity: Theory and applications to food*. New York: Marcel Deckker, Inc.

Roos, Y. H. (2010). Glass Transition Temperature and Its Relevance in Food Processing. *Annual Review of Food Science and Technology, 1*(1), 469-496. doi:10.1146/annurev.food.102308.124139

Salin, J. G. (2003). A theoretical analysis of timber drying in oscillating climates. *Holtzforschung, 57*, 427–432.

Samapundo, S., Devlieghere, F., Meulenaer, B. D., Atukwase, A., Lamboni, Y., & Debevere, J. M. (2007). Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn. *Journal of Food Engineering, 79*(1), 168-175.

doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.040

Sampson, D. J., Chang, Y. K., Rupasinghe, H. P. V., & Zaman, Q. U. Z. (2014). A dual-view computer-vision system for volume and image texture analysis in multiple apple slices drying. *Journal of Food Engineering, 127*, 49-57. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.11.016

Sappati, P. K., Nayak, B., & van Walsum, G. P. (2017). Effect of glass transition on the shrinkage of sugar kelp (Saccharina latissima) during hot air convective drying. *Journal of Food Engineering, 210*, 50-61. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.018

Saxena, R., & Arora, V. P. S. (1997). Consumers of processed fruit and vegetables products. An analysis of buying behaviour. *Indian Food Industry, 16*(3), 25–36.

Schulze, B., Hubbermann, E. M., & Schwarz, K. (2014). Stability of quercetin derivatives in vacuum impregnated apple slices after drying (microwave vacuum drying, air drying, freeze drying) and storage. *LWT - Food Science and Technology, 57*(1), 426-433. doi:https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.11.021

Sedahmed, G. H., Abdel-Aziz, M. H., Abdo, M. S. E., Hassan, M. S., & Konsowa, A. H. (2017). Mass and heat transfer from the surface of a gas sparged pool of liquid to an immiscible liquid under swirl flow and potential applications. *Chemical Engineering Research and Design, 125*, 88-95. doi:https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.06.037

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

Serrano, E. P. (2005). Postharvest management of fruit and vegetables in the Asia Pacific region: Philippines country report. *Asian Productivity Organization (APO); Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*, 216–226.

Sharaf-Eldeen, Y. I., Blaisdell, J. L., & Hamdy, M. Y. (1980). A model for ear-corn drying. *Transactions of the ASAE, 23*(5), 1261-1265, 1271. doi:10.13031/2013.34757

Singh, R. P., & Heldman, D. R. (1993). *Introduction to food engineering* (second ed.). London: Academic Press.

Sivakumar, D., Jiang, Y., & Yahia, E. M. (2011). Maintaining mango (Mangifera indica L.) fruit quality during the export chain. *Food Research International, 44*(5), 1254-1263.

doi:https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.11.022

Smith, S. A., & Langrish, T. A. G. (2008). Multicomponent Solid Modeling of Continuous and Intermittent Drying of Pinus radiata Sapwood Below the Fiber Saturation Point. *Drying Technology, 26*(7), 844-854. doi:10.1080/07373930802136012

Sobukola, O. P., Dairo, O. U., & Odunewu, A. V. (2008). Convective hot air drying of blanched yam slices. *International Journal of Food Science & Technology, 43*(7), 1233-1238. doi:10.1111/j.1365-2621.2007.01597.x

Sogi, D. S., Siddiq, M., & Dolan, K. D. (2015). Total phenolics, carotenoids and antioxidant properties of Tommy Atkin mango cubes as affected by drying techniques. *LWT - Food Science and Technology, 62*(1, Part 2), 564-568. doi:https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.04.015

Soysal, Y., Ayhan, Z., EŞtürk, O., & Arıkan, 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

Srikanth, K. S., Sharanagat, V. S., Kumar, Y., Bhadra, R., Singh, L., Nema, P. K., & Kumar, V. (2019). Convective drying and quality attributes of elephant foot yam (Amorphophallus paeoniifolius). *LWT, 99*, 8-16. doi:https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.049

Srinivasan, N., Elangovan, S., & Chinnaiyan, P. (2000). Consumer perception towards processed fruit and vegetables products. *Indian Economic Panorama, 10*(3), 11–12.

Sturm, B., Hofacker, W. C., & Hensel, O. (2012). Optimizing the Drying Parameters for Hot-Air–Dried Apples. *Drying Technology, 30*(14), 1570-1582. doi:10.1080/07373937.2012.698439

Sturm, B., Nunez Vega, A.-M., & Hofacker, W. C. (2014). Influence of process control strategies on drying kinetics, colour and shrinkage of air dried apples. *Applied Thermal Engineering, 62*(2), 455-460. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.09.056

Sutar, N., & Sutar, P. P. (2013). Developments in osmotic dehydration of fruits and vegetable: A review. *Trends in Post Harvest Technology, 1*, 20–36.

Swasdisevi, T., Devahastin, S., Ngamchum, R., & Soponronnarit, S. (2007). Optimization of a drying process using infrared- vacuum drying of Cavendish banana slices. *Songklanakarin Journal of Science and Technology, 29*(3), 809-816.

Tabtiang, S., Prachayawarakon, S., & Soponronnarit, S. (2012). Effects of Osmotic Treatment and Superheated Steam Puffing Temperature on Drying Characteristics and Texture Properties of Banana Slices. *Drying Technology, 30*(1), 20-28. doi:10.1080/07373937.2011.613554

Tang, Y., Min, J., & Wu, X. (2018). Selection of convective moisture transfer driving potential and its impacts upon porous plate air-drying characteristics. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 116*, 371-376. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.040

Telis-Romero, J., Kohayakawa, M. N., Silveira Jr, V., Pedro, M. A. M., & Gabas, A. L. (2005). Enthalpy-entropy compensation based on isotherms of mango. *Food Science and Technology, 25*, 297-303. doi:https://doi.org/10.1590/S0101-20612005000200020

Thomkapanich, O., Suvarnakuta, P., & Devahastin, S. (2007). Study of Intermittent Low-Pressure Superheated Steam and Vacuum Drying of a Heat-Sensitive Material. *Drying Technology, 25*(1), 205-223. doi:10.1080/07373930601161146

Toğrul, H., & Arslan, N. (2007). Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of walnut kernels. *Journal of Stored Products Research, 43*(3), 252-264. doi:https://doi.org/10.1016/j.jspr.2006.06.006

Toledo, R. M. (1991). Dehydration. In *Fundamentals of food process engineering* (second ed., pp. 456–505). New York: an Nostrand Reinhold.

Torezan, G. A. P., Menezes, H. C., Katekawa, M. E., & Silva, M. A. (2007). Microstructure and Adsorption Characteristics of Mango Chips Obtained by Osmotic Dehydration and Deep Fat Frying. *Drying Technology, 25*(1), 153-159. doi:10.1080/07373930601161005

Tsami, E. (1991). Net isosteric heat of sorption in dried fruits. *Journal of Food Engineering, 14*(4), 327-335. doi:https://doi.org/10.1016/0260-8774(91)90022-K

Tsami, E., Marinos-Kouris, D., & Maroulis, Z. B. (1990). Water Sorption Isotherms of Raisins, Currants, Figs, Prunes and Apricots. *Journal of Food Science, 55*(6), 1594-1597. doi:10.1111/j.1365-2621.1990.tb03578.x

Tscheuschner, H. D. (1987). N. N. Mohsenin: Physical Properties of Plant and Animal Materials. Structure, Physical Characteristics and Mechanical Properties. 2. Aufl. 891 Seiten, zahlr. Abb. und Tab. Gordon and Breach Science Publishers, New York u. a. 1986. Preis: 140.— £. *Food / Nahrung, 31*(7), 702-702. doi:10.1002/food.19870310724

Udomkun, P., Argyropoulos, D., Nagle, M., Mahayothee, B., Janjai, S., & Müller, J. (2015). Single

layer drying kinetics of papaya amidst vertical and horizontal airflow. *LWT - Food Science and Technology, 64*(1), 67-73. doi:https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.05.022

Van den Berg, C., & Bruin, S. (1981). Water activity and its estimation in food systems. In L. B. Rockland & F. Stewart (Eds.), *Water activity: Influence on food quality* (pp. 147–177). New York: Academic Press.

Van der berg, C., & Bruin, S. (1981). Water activity and its estimation in food system: theoretical aspects. In L. B. Rockland & G. F. Stewart (Eds.), *Water activity: Influences on food quality* (pp. 1–61). New York: Academic Press.

Vázquez, G., Chenlo, F., & Moreira, R. (2003). Sorption isotherms of lupine at different temperatures. *Journal of Food Engineering, 60*(4), 449-452. doi:https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00068-2

Vega-Mercado, H., Marcela Góngora-Nieto, M., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2001). Advances in dehydration of foods. *Journal of Food Engineering, 49*(4), 271-289. doi:https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00224-7

Viganó, J., Azuara, E., Telis, V. R. N., Beristain, C. I., Jiménez, M., & Telis-Romero, J. (2012). Role of enthalpy and entropy in moisture sorption behavior of pineapple pulp powder produced by different drying methods. *Thermochimica Acta, 528*, 63-71. doi:https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.11.011

Wang, J., Law, C.-L., Nema, P. K., Zhao, J.-H., Liu, Z.-L., Deng, L.-Z., . . . Xiao, H.-W. (2018). Pulsed vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon slices. *Journal of Food Engineering, 224*, 129-138. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.01.002

Wang, N., & Brennan, J. G. (1991). Moisture sorption isotherm characteristics of potatoes at four temperatures. *Journal of Food Engineering, 14*(4), 269-287. doi:https://doi.org/10.1016/0260-8774(91)90018-N

Wang, R., Zhang, M., & Mujumdar, A. S. (2010). Effect of Osmotic Dehydration on Microwave Freeze-Drying Characteristics and Quality of Potato Chips. *Drying Technology, 28*(6), 798-806. doi:10.1080/07373937.2010.482700

Wang, W., Li, M., Hassanien, R. H. E., Wang, Y., & Yang, L. (2018). Thermal performance of indirect forced convection solar dryer and kinetics analysis of mango. *Applied Thermal Engineering, 134*, 310-321. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.115

Xiao, Q., & Tong, Q. (2013). Thermodynamic properties of moisture sorption in pullulan–sodium alginate based edible films. *Food Research International, 54*(2), 1605-1612. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.09.019

Yagciolu, A., Degirmencioglu, A., & Cagatay, F. (1999, 26–27 May). *Drying characteristics of laurel leaves under different conditions.* Paper presented at the 7th international congress on agricultural mechanization and energy, Adana, Turkey.

Yaldýz, O., & Ertekýn, C. (2001). THIN LAYER SOLAR DRYING OF SOME VEGETABLES. *Drying Technology, 19*(3-4), 583-597. doi:10.1081/DRT-100103936

Yang, Z., Zhu, E., Zhu, Z., Wang, J., & Li, S. (2013). A comparative study on intermittent heat pump drying process of Chinese cabbage (Brassica campestris L.ssp) seeds. *Food and Bioproducts Processing, 91*(4), 381-388. doi:https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.02.006

Young, J. F. (1967). Humidity control in the laboratory using salt solutions—a review. *Journal of Applied Chemistry, 17*(9), 241-245. doi:10.1002/jctb.5010170901

Zhang, W., & Mujumdar, A. S. (1992). DEFORMATION AND SlRESS ANALYSIS OF POROUS CAPILLARY BODIES DURING INTERMITTENT VOLUMERIC THERMAL DRYING. *Drying Technology, 10*(2), 421-443. doi:10.1080/07373939208916444

Zhao, J.-H., Liu, F., Wen, X., Xiao, H.-W., & Ni, Y.-Y. (2015). State diagram for freeze-dried mango: Freezing curve, glass transition line and maximal-freeze-concentration condition. *Journal of Food Engineering, 157*, 49-56. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.02.016

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:https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.001

Zielinska, M., & Cenkowski, S. (2012). Superheated steam drying characteristic and moisture diffusivity of distillers' wet grains and condensed distillers' solubles. *Journal of Food Engineering, 109*(3), 627-634. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.06.017

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

Zou, K., Teng, J., Huang, L., Dai, X., & Wei, B. (2013). Effect of osmotic pretreatment on quality of

mango chips by explosion puffing drying. *LWT - Food Science and Technology, 51*(1), 253-259. doi:https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.11.005

Zúñiga, R. N., Moyano, P. C., & Pedreschi, F. (2008). Enthalpy–entropy compensation for water loss of potato slices during deep-fat frying. *Journal of Food Engineering, 88*(1), 1-8. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.05.004

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ภาคย์ มาลัยกฤษณะชลี
วัน เดือน ปี เกิด	6 ธันวาคม 2532
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2554 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2556 สำเร็จการศึกษาปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2557 ศึกษาต่อในระดับปริญญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	1639/5 ม.6 ต.อู่ทอง อ.อู่ทอง จ.สุพรรณบุรี
ผลงานตีพิมพ์	ภาคย์ มาลัยกฤษณะชลี, วิธู ชูศรี และ ธัชพงศ์ ชูศรี. 2556. การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางประสาทสัมผัสเนื่องจากอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการพาสเจอไรซ์. การประชุมวิชาการอุตสาหกรรมเกษตร สจล. ครั้งที่ 2. วันที่ 30 สิงหาคม 2556, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย ภาคย์ มาลัยกฤษณะชลี, วิธู ชูศรี และ ธัชพงศ์ ชูศรี. 2557. การประเมินอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการพาสเจอไรซ์นมแบบไหลต่อเนื่องโดยใช้วิตามินบี 1 เป็นตัวบ่งชี้. โครงการประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 4. วันที่ 22 – 23 พฤษภาคม 2557, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย Malaikritsanachalee, P., Choosri, W., Pookthamai, P. and Choosri, T. 2015. Optimization of convective hot air drying for ripe banana. Food Innovative Asia Conference 2015 “Innovative ASEAN Food Research towards the World”. 516-521. Malaikritsanachalee, P., Choosri, W. and Choosri, T. 2015. Thermal resistance evaluation of microorganism by continuous pasteurization process. The 5th National and International Graduate Study Conference 2015 “Creative Education

Intellectual Capital toward ASEAN”. 506-514.
Malaikritsanachalee, P., Choosri, W. and Choosri, T. 2016. Effects of Thermal Pulse Drying on the kinetic parameters and qualities of dried mango. Food Innovation Asia Conference 2016 “Food Research and Innovation for Sustainable Global Prosperity”. 34-42.
Malaikritsanachalee, P., W. Choosri and T. Choosri. 2018. Study on kinetics of flow characteristics in hot air drying of pineapple. Food Sci. Biotechnol. 27(4): 1047-1055. https://doi.org/10.1007/s10068-018-0357-6
Malaikritsanachalee P, Choosri W, Choosri T. 2020. Study on intermittent low-pressure superheated steam drying: Effect on drying kinetics and quality changes in ripe mangoes. J Food Process Preserv. 2020;00:e14669. https://doi.org/10.1111/jfpp.14669

รางวัลที่ได้รับ

รางวัลรองชนะเลิศอันดับ 3 การแข่งขันตอบปัญหาวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทางอาหาร FoSTAT - Nestle Quiz Bowl 2012

ผลงานวิจัย / ผลงานสร้างสรรค์ดีเด่น ในหัวข้อ "การประเมินอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการพาสเจอไรซ์นมแบบไหลต่อเนื่องโดยใช้วิตามินบี 1 เป็นตัวบ่งชี้". โครงการประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาระดับชาติ และนานาชาติ ครั้งที่ 4. วันที่ 23 พฤษภาคม 2557

ผ่านการแข่งขันโครงการ Startup Thailand League 2017 ระดับประเทศ

Second runner-up, the oral presentation award in Food Innovation Asia Conference 2016.