

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง ผลของกระบวนการอบแห้งต่อคุณภาพของขนมขบเคี้ยวจากผลไม้
EFFECT OF DRYING METHODS ON FRUIT SNACK QUALITY
สัญญาเลขที่ GRB_APS_๑๗_๕๖_๒๓_๐๕

ผู้วิจัย

ผศ.ดร.ชาลิตา บรมพิชัยชาติกุล
ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท ปทุมวัน
กรุงเทพฯ 10330
โทรศัพท์ 0 2218 5518 โทรสาร 0 2254 4314

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินอุดหนุนทั่วจากรัฐบาล ประจำปีงบประมาณ 2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลการ pretreatment ร่วมกับกระบวนการอบแห้งต่างๆ ต่อคุณภาพด้านเคมี กายภาพ และประสาทสัมผัสของขนมขบเคี้ยวจากผลไม้ โดยในงานวิจัยนี้เลือกศึกษา ขนุน และ มะม่วง โดยศึกษาผลการ pretreatment และวิธีการอบแห้งอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับขนุนและมะม่วงในกรณีของขนุนได้ศึกษาผลของการอบแห้งขนุนแช่อิ่มด้วยลมร้อนแบบขั้นตอนเดียวหลายขั้นตอนและการอบแห้งด้วยเครื่องไมโครเวฟสุญญากาศ ต่อสมบัติทางเคมีและกายภาพของขนุนอบแห้ง เตรียมขนุนแช่อิ่มด้วยการนำขนุนสดแช่ในสารละลายน้ำตาล 50 องศาบริกซ์ นาน 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำขนุนที่ได้ไปอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 70 และ 90 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งขนุนแช่อิ่ม พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สามารถใช้ทำนายลักษณะการอบแห้งขนุนแช่อิ่มด้วยลมร้อนที่ทั้ง 3 อุณหภูมิได้ดีที่สุด ในการศึกษาผลของผลิตภัณฑ์ขนุนอบแห้งที่สภาวะต่างกัน 3 สภาวะ โดยนำขนุนแช่อิ่มไปอบแห้งแบบลมร้อนขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 420 นาที อบแห้งแบบหลายขั้นตอนด้วยลมร้อนที่ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที และ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 210 นาที รวมทั้งหมดใช้เวลา 420 นาทีและอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศกำลัง 960 วัตต์ เป็นเวลา 20 นาที พัก 1 นาที และอบต่ออีก 3 นาที รวมเวลาในการอบแห้ง 23 นาที เมื่อทำการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนุนอบแห้งได้แก่ ค่าปริมาณความชื้น ค่ากิจกรรมของน้ำ สี กลิ่น เนื้อสัมผัส และการยอมรับของผู้บริโภค พบว่าผลิตภัณฑ์ขนุนแช่อิ่มที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศมีค่าปริมาณความชื้น และค่ากิจกรรมของน้ำต่ำที่สุด มีสี กลิ่นที่ใกล้เคียงกับขนุนสดมากที่สุด และเมื่อทำการตรวจสอบภาพตัดขวางของชิ้นขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยเครื่อง Image analyzer พบว่าขนุนแช่อิ่มอบแห้งแบบลมร้อนทั้ง 2 สภาวะ เกิดโครงสร้างที่อัดตัวกันแน่น มีการยุบตัวและมีจำนวนรูพรุนน้อย ในขณะที่ขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศพบว่า โครงสร้างภายในของขนุนแช่อิ่มอบแห้งมีการพองตัวและเกิดโครงสร้างที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งลักษณะโครงสร้างดังกล่าวอาจส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศ เมื่อทำการประเมินการยอมรับทางประสาทสัมผัส พบว่าขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศมีคะแนนการยอมรับโดยรวมสูงกว่าขนุนแช่อิ่มอบแห้งแบบลมร้อนทั้ง 2 วิธี สำหรับมะม่วง ได้เลือกมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์และน้ำดอกไม้มาศึกษาพบว่าการทำแห้งด้วยวิธีออสโมซิสมีส่วนช่วยในการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์มะม่วงก่อนทำแห้ง ทำให้อัตราการทำแห้งเพิ่มขึ้น เวลาในการทำแห้งลดลง โดยสารละลายออสโมติกที่ใช้มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสีและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งได้ แต่ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของผลิตภัณฑ์ลดลง การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งสามารถรักษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระไว้ได้ แต่การอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศจะส่งผลให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งใกล้เคียงกับขนมขบเคี้ยวที่มาจากกระบวนการทอด

ABSTRACT

The main purpose of this research was to study the effects of pretreatment and drying methods on physical, chemical properties and sensory evaluation of fruit snack by using jackfruit and mango as the model. Three different methods were carried out using a hot air dryer at 60 °C, hot-air dryer at multistage temperatures (90 °C, 70 °C and 60 °C) and microwave vacuum dryer (at 960 watt). For preparing osmotically dehydrated jackfruit, jackfruit was soaked in a sugar solution at 50 °Brix for 24 hours. Then, the osmotically pretreated jackfruit were dried in a hot air dryer with 3 conditions; 60 70 and 90 °C for collecting data for drying kinetic. Thin-layer drying kinetics of osmotically jackfruits was best predicted by Page's model that it was fitted to the observed data which showed excellent fit for 3 drying conditions among the tested models. Effects of 3 drying methods; at 60 °C for 420 min and at multistage temperatures (90 °C for 60 min, 70 °C for 150 min and 60 °C for 210 min) and using the microwave vacuum dryer (at 960 watt for 23 min) were studied by assessing the quality of osmotically dried jackfruit. The results showed that the microwave vacuum osmotically dehydrated jackfruit had the lowest final moisture content and water activity. In terms of the total color difference (ΔE^*) and the evaluation of fruit odour with E-nose, the result showed that the quality of osmotically dehydrated microwave vacuum dried jackfruit was similar to fresh jackfruit when compared with other drying methods. Image analysis showed that texture structure of both osmotically dehydrated hot air dried jackfruit was packed and dense with less porosity. On the other hand, the texture structure of osmotically dehydrated microwave vacuum dried jackfruit was puffed with more porosity. According to the results of the sensory evaluation, the highest overall acceptability was osmotically dehydrated microwave vacuum dried jackfruit. For mango, the osmotic pretreatment was proven to preserve colour and texture of dried fruit after drying process. It also increased drying rate and reduced time of drying. However, total phenolic compound and antioxidant activity were decreased. Similarly to dried jackfruit, drying mango underwent microwave vacuum drying had texture characteristic comparable to fried product.

สารบัญเรื่อง (Table of Contents)

บทที่	เรื่อง	หน้า
	กิตติกรรมประกาศ	ก
	บทคัดย่อภาษาไทย	ข
	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
	สารบัญเรื่อง	ง
	สารบัญตาราง	จ
	สารบัญภาพ	ฉ
1	บทนำ	1
2	การสำรวจเอกสารและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	2
3	วิธีดำเนินการวิจัย	11
4	ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	17
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	37
6	บรรณานุกรม	38
	ภาคผนวก	44
	ประวัติผู้วิจัย	56

สารบัญตาราง (List of Tables)

ตารางที่		หน้า
1	คุณค่าทางอาหารของขนุนสด (ปริมาณสารอาหารต่อขนุน 100 กรัม)	2
2	สมการแบบจำลองของ Lewis Henderson & Pabis และ Page ในการทำนายการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ขนุนแช่อบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	19
3	สมการแบบจำลองของ Lewis Henderson & Pabis และ Page ในการทำนายการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ขนุนแช่อบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	19
4	สมการแบบจำลองของ Lewis Henderson & Pabis และ Page ในการทำนายการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ขนุนแช่อบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส	20
5	ค่า water activity และค่าปริมาณความชื้นสุดท้ายของขนุนแช่อบแห้งสภาวะต่างๆ	21
6	ค่าสีของขนุนสดและขนุนแช่อบแห้งด้วยวิธีการต่างๆ	22
7	ค่าแรงตึงขาดและความกรอบของผลิตภัณฑ์ขนุนแช่อบแห้ง	22
8	ค่าการเปลี่ยนแปลงกลิ่นของขนุนแช่อบแห้งด้วยวิธีต่างๆ	23
9	ผลการประเมินการยอมรับทางประสาทสัมผัสของขนุนแช่อบแห้งด้วยวิธีการต่างๆ	26
10	เวลาที่ใช้ทำแห้งมะม่วงแช่อบ (นาทีก่อน) จนกระทั่งผลิตภัณฑ์มีความชื้นไม่เกิน 18% (wet basis)	28
11	ผลของการแช่อบในสารละลายต่างๆต่อความแตกต่างของกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์เทียบกับผลสด	29
12	ผลของการแช่อบในสารละลายต่างๆต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์	29
13	ผลของการแช่อบในสารละลายต่างๆต่อค่าลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์	30

สารบัญภาพ (List of Illustration)

ภาพที่		หน้า
1	กราฟอัตราการอบแห้งภายใต้ภาวะการอบแห้งคงที่	4
2	การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำและปริมาณน้ำตาลในชั้นผลไม้ระหว่างการออสโมซิส	5
3	เครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศ	7
4	โครงสร้าง Egg-box model	8
5	การเปลี่ยนแปลง Moisture ratio ระหว่างการอบแห้งขนุนแช่อบด้วยลมร้อน โดยใช้อุณหภูมิคงที่ที่ 60 70 และ 90 องศาเซลเซียส	17
6	ภาพถ่ายโครงสร้างภายในจากเครื่อง Image analyzer ของผลิตภัณฑ์ขนุนสด และขนุนแช่อบแห้งด้วยวิธีต่างๆกำลังขยาย 5 เท่า	25
7	กราฟการทำแห้งมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายต่างๆ ที่อุณหภูมิ 80 °C	27
8	ค่าสีของผลิตภัณฑ์ที่จากทรีตเมนต์ต่างๆ กัน (Ctr: ไม่แช่สารละลาย, OD: osmotic dehydration, HAD : Hot air drying, FD: Freeze drying, MWVD: Microwave vacuum drying)	32
9	ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่จากทรีตเมนต์ต่างๆ (Ctr: ไม่แช่สารละลาย, OD: osmotic dehydration, HAD : Hot air drying, FD: Freeze drying, MWVD: Microwave vacuum drying)	33
10	สมบัติการต้านอนุมูลอิสระของผลิตภัณฑ์ที่จากทรีตเมนต์ต่างๆ กัน (Ctr: ไม่แช่สารละลาย, OD: osmotic dehydration, HAD : Hot air drying, FD: Freeze drying, MWVD: Microwave vacuum drying)	34
11	ภาพถ่ายโครงสร้างตัดขวางของสมบัติการต้านอนุมูลอิสระของผลิตภัณฑ์ที่จากทรีตเมนต์ต่างๆ กัน (Ctr: ไม่แช่สารละลาย, OD: osmotic dehydration, HAD : Hot air drying, FD: Freeze drying, MWVD: Microwave vacuum drying)	35

1. บทนำ

ในปัจจุบันความปลอดภัยและคุณภาพของอาหารเป็นสิ่งที่ผู้บริโภคคำนึงมากที่สุดในการเลือกซื้อ โดยเฉพาะกลุ่มผู้บริโภคที่มีความตระหนักในเรื่องของสุขภาพ และโรคร้ายที่เกี่ยวข้องกับการบริโภค เช่น โรคเบาหวาน โรคอ้วน โรคหลอดเลือดหัวใจตีบตัน หรือ ความดันโลหิตสูง ซึ่งจะต้องมีการควบคุมการบริโภคอาหารที่มีองค์ประกอบต่างๆ ที่เหมาะสม เพื่อรักษาหรือชะลออาการของโรคเหล่านั้น ในขณะที่เดียวกันสังคมปัจจุบันมีการแข่งขันในเรื่องการทำงาน ส่งผลให้การดำรงชีวิตดำเนินไปอย่างรีบเร่ง ไม่มีเวลาในการปรุงอาหาร ทำให้มีความต้องการของกลุ่มอาหารสำเร็จรูปหรือขนมขบเคี้ยวมากขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของกลุ่มผู้บริโภคที่มีการดำรงชีวิตที่เร่งรีบ แต่ขนมขบเคี้ยวส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยแป้ง น้ำตาล และผงปรุงรส ที่มีคุณค่าทางอาหารต่ำ และส่งเสริมให้เกิดปัญหาสุขภาพตามมา ในขณะที่แนวโน้มการบริโภคผลไม้สดลดลง เนื่องจากผู้บริโภคมีความคิดว่าการปอก หั่น หรือตัดแต่งผลไม้ ทำให้เสียเวลา ในบริเวณพื้นที่ จ.สระบุรี มีผลิตผลที่เป็นผลไม้ตามฤดูกาลที่มีคุณค่าทางอาหารและฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระสูง เช่น กล้วย องุ่น ขนุน มะม่วง เป็นต้น ซึ่งในบางครั้งหากมีผลิตผลมากเกินไปเกินความต้องการบริโภคสด หรือ เกิดเหตุการณ์ภัยธรรมชาติ เช่น น้ำท่วมหรือพายุฝนที่ส่งผลให้ผลิตผลเสียหายและขายไม่ได้ราคา การนำมาแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าจึงเป็นทางเลือกที่จะสามารถช่วยเลือกเกษตรกรหรือชุมชนให้มีทางออกในการสร้างรายได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาวิจัยในกระบวนการแปรรูปโดยใช้เทคนิคการเชื่อมอบแห้งหรือการอบแห้งที่เหมาะสมที่ไม่ทำลายคุณสมบัติทางโภชนาการของผลไม้และแปรรูปให้เป็นขนมขบเคี้ยวที่มีคุณภาพสูงที่เหมาะสมสำหรับกลุ่มผู้บริโภคที่ต้องการอาหารเพื่อสุขภาพและมีการดำเนินชีวิตที่รีบเร่ง และสามารถถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับชุมชนเพื่อนำไปปฏิบัติได้

2. การสำรวจเอกสารและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ขนุน

ขนุน (Jackfruit) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Artocarpus heterophyllus* อยู่ในวงศ์ Moraceae ขนุนเป็นผลไม้เศรษฐกิจของไทย นิยมปลูกมาตั้งแต่สมัยสุโขทัย เนื่องจากความเชื่อที่ว่าเป็นไม้มงคลและมีสรรพคุณทางยาหลากหลาย อีกทั้งมีกลิ่นหอมและรสชาติหวาน

ขนุนพันธุ์มาเลเซียเป็นขนุนสายพันธุ์ที่นิยมปลูกเพื่อการค้า เพราะเนื้อขนุนนอกจากจะนำมาบริโภคสดได้แล้ว ยังเหมาะแก่การนำไปแปรรูปเป็นขนุนอบกรอบ ขนุนพันธุ์นี้เนื้อหนาและมีขนาดผลใหญ่ ผลอ่อนจะมีสีเหลืองอ่อน เมื่อแก่จะมีสีเหลืองสดซึ่งสีของขนุนมาจาก β -cryptoxanthin เป็นรงควัตถุที่ให้สีเหลือง การเจริญเติบโตของขนุนพันธุ์มาเลเซียเป็นแบบ double sigmoid curve คือมีการเจริญเติบโตเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกเป็นการเจริญและพัฒนารวมเมล็ด และช่วงที่สองเป็นการเจริญเติบโตและพัฒนารวมเนื้อวง ความหนาของเนื้อวงจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนผลเจริญเติบโตเต็มที่ (ผลมีอายุ 0-17 สัปดาห์) สีม่วงจึงเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเขียวอมเหลืองหลังจากกาบหุ้มช่อดอกเพศเมียเปิดออกเนื้อผลเริ่มเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีเหลืองเมื่อผลมีอายุ 11 สัปดาห์และมีสีเข้มขึ้นเมื่อผลมีอายุมากขึ้นอายุที่เหมาะสมในการเก็บเกี่ยวคือเมื่อผลมีอายุ 15-16 สัปดาห์หลังจากหลังจากกาบหุ้มช่อดอกเพศเมียเปิดออก (กาญจนา เหลืองสุวาลัย, 2551)

เนื้อขนุนเป็นผลไม้ที่ให้พลังงานสูงเพราะมีคาร์โบไฮเดรตและมีวิตามินแร่ธาตุต่างๆหลายชนิดเช่น วิตามินซี, วิตามินเอ, วิตามินบี1, วิตามินบี6, โพแทสเซียม, แมกนีเซียม, แคลเซียม เป็นต้น แต่เนื่องจากวิตามินซีสูญเสียง่ายเมื่อโดนแสงและได้รับความร้อน ดังนั้นการรับประทานขนุนสดจึงเป็นวิธีบริโภคที่จะได้รับคุณค่าทางอาหารสูงสุด ทั้งยังมี β -cryptoxanthin สารสีเหลืองที่มีอยู่มากในขนุน เป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอ ส่วนองค์ประกอบอื่นๆในขนุนมีแสดงในตารางที่ 1 (ดวงจันทร์ เกรียงสุวรรณ, 2544)

ตารางที่ 1 คุณค่าทางอาหารของขนุนสด (ปริมาณสารอาหารต่อขนุน 100 กรัม)

สารอาหาร	ปริมาณ
พลังงาน	95 Kcal
คาร์โบไฮเดรต	23.5 g
โปรตีน	1.72 g
ไขมัน	0.64 g
คลอเรสเตอรอล	0 mg
ใยอาหารที่ย่อยได้ (dietary fiber)	1.5 g
วิตามินซี	13.7 mg
วิตามินเอ	110 IU
วิตามินบี 1	0.105 mg
วิตามินบี6	0.329 mg

โซเดียม	3 mg
โพแทสเซียม	303 mg
แคลเซียม	34 mg
แมกนีเซียม	37 mg
ฟอสฟอรัส	21 mg

ที่มา: USDA National Nutrient database (2012)

มะม่วง

มะม่วงเป็นผลไม้เขตร้อนและกึ่งร้อนที่มีความสำคัญ มีคุณค่าทางโภชนาการสูง คือเป็นแหล่งที่ดีของวิตามินเอ วิตามินบี วิตามินซี dietary fiber และยังมีสารประกอบฟีนอลิกและแคโรทีนอยด์ ซึ่งมีสมบัติในการต้านออกซิเดชัน (Talcott *et al.*, 2005; Telis และ Telis-Romero, 2007) นอกจากนี้ยังปลูกได้ทั่วไปในประเทศไทยและมีความสำคัญทางเศรษฐกิจ โดยประเทศไทยเป็นผู้นำในการผลิตและส่งออกมะม่วงประเทศหนึ่ง (USDA, 2012) มะม่วงโชคอนันต์เป็นพันธุ์ที่ได้รับความนิยมเนื่องจากออกดอกและติดผลได้ตลอดทั้งปี โดยไม่ต้องใช้สารเคมีเหนียวน้ำ (Titiprasert *et al.*, 2001) เมื่อดิบผิวมีสีเขียวอ่อน เมื่อสุกผิวมีสีเหลือง เนื้อมีสีเหลือง แน่น ละเอียดย มีกลิ่นคล้ายมะม่วงสามปี เปลือกหนา (วิจิตร วังโน, 2533) แต่เนื่องจากผลไม้ดังกล่าวมีอายุการเก็บสั้นประมาณ 4-8 วัน ที่อุณหภูมิห้อง และ 2-3 สัปดาห์ที่อุณหภูมิแช่เย็น (13 °C) และความชื้นสัมพัทธ์ 85-90% (Carrillo-Lopez, 2000) จึงอาจแปรรูปเพื่อช่วยยืดอายุการเก็บ ซึ่งโดยทั่วไปทวีปเอเชียมักแปรรูปมะม่วงเป็นผลิตภัณฑ์แห้ง แต่การทำแห้งด้วยลมร้อนทั่วไปมักทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อสัมผัสเหนียว มีสีและกลิ่นรสไม่เป็นที่ยอมรับ อีกทั้งสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ (Durance, Wang and Meyer, 1999)

การอบแห้ง

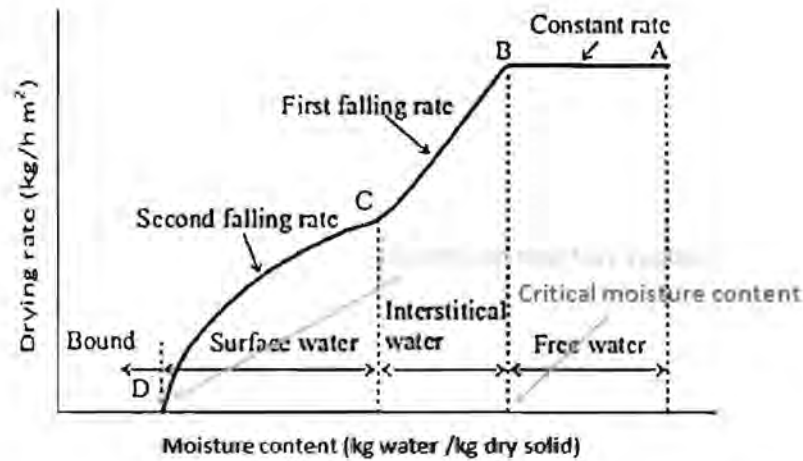
การทำแห้งด้วยลมร้อนช่วยลดปริมาณน้ำอิสระ ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์และลดปฏิกิริยาเคมีที่ไม่พึงประสงค์ จึงช่วยยืดอายุการเก็บ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสี กลิ่นรสและเนื้อสัมผัสตามต้องการ และยังช่วยลดปริมาณและน้ำหนัก จึงลดต้นทุนในการเก็บรักษาและขนส่ง (Mujumdar, 1997) แต่เวลาทำแห้งที่นานอาจส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เสื่อมเสียคุณภาพดังกล่าวข้างต้น รวมทั้งสารสำคัญต่างๆ เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต (Zhang, Li and Ding, 2003; 2005)

การอบแห้งเป็นการทำให้ความชื้นหรือมีค่ากิจกรรมของน้ำลดลง เพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์และลดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสีย โดยมีค่ากิจกรรมของน้ำ (a_w) ต่ำกว่า 0.65 (Mossel, 1975) การอบแห้งอาหารจึงเป็นการถนอมอาหารหรือแปรรูปอาหารอย่างหนึ่งเพื่อให้อาหารมีอายุการเก็บที่ยืนยาวขึ้น สะดวกต่อการขนส่งและเพิ่มความหลากหลายของผลิตภัณฑ์อาหารให้กับผู้บริโภค การอบแห้งแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ

1. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period) ในช่วงแรกของการอบแห้ง ความชื้นที่ผิวหน้าอาหารจะระเหยออกไปและน้ำที่อยู่ภายในชั้นอาหารจะเคลื่อนที่ขึ้นมาทดแทนที่ผิวหน้า ซึ่งการระเหยในช่วงนี้จะเกิดอย่างรวดเร็วด้วยอัตราคงที่ จากนั้นการอบแห้งจะดำเนินต่อไปจนถึงจุดปริมาณความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) ซึ่งเป็นจุดที่เปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งจากคงที่เป็นลดลง

2. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) เป็นช่วงการอบแห้งหลังจากผ่านจุดปริมาณความชื้นวิกฤต ในช่วงนี้อัตราการอบแห้งจะลดลงเนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำในชั้นอาหารขึ้นมาทดแทนที่

ผิวหน้าเกิดได้ช้าลง เป็นเพราะน้ำอิสระ (free water) ได้ระเหยออกไปเกือบหมด เหลือน้ำส่วนที่จับกับองค์ประกอบอื่นๆภายในอาหารอยู่ (bound water) ทำให้การระเหยออกของน้ำเป็นไปได้ยากขึ้น อัตราการอบแห้งจึงลดลง จนถึงจุดปริมาณความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) (Mujumdar, 2007)



ภาพที่ 1 กราฟอัตราการอบแห้งภายใต้ภาวะการอบแห้งคงที่
ที่มา : ดัดแปลงจาก Bennamoun (2011)

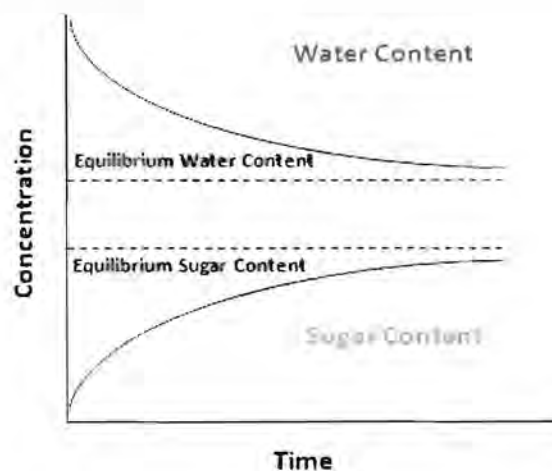
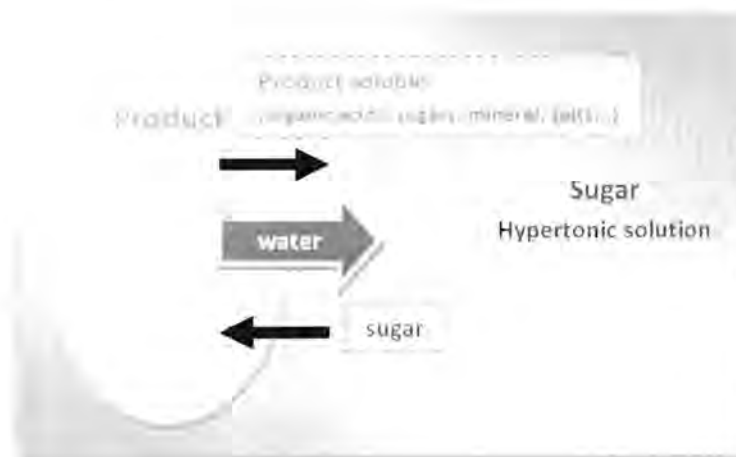
ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งผลิตภัณฑ์ผลไม้ที่ผ่านการออสโมซิสได้แก่ ขนาดและรูปร่างของผลไม้ ชั้นที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากกว่าชั้นที่มีขนาดใหญ่ ทำให้อบแห้งได้เร็วกว่า อีกทั้งลักษณะโครงสร้างตามธรรมชาติของเนื้อผลไม้ ผลไม้ที่มีรูพรุนมากจะสามารถระเหยน้ำได้เร็วกว่าผลไม้ที่มีรูพรุนน้อยหรือมีความแข็ง (วีรยา พรหมประเทศ, 2551) อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ใช้ออบแห้งอาหารมีผลต่อการระเหยของน้ำ ถ้าอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้น้ำแพร่ออกจากผลไม้ได้ดีขึ้น อัตราการอบแห้งจะสูงขึ้น แต่การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้ผิวหน้าของชิ้นผลไม้มีลักษณะแห้งแข็งและขัดขวางการระเหยของน้ำที่อยู่ภายในได้ และเมื่อปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศต่ำจะทำให้ประสิทธิภาพการอบแห้งดีขึ้น เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลระหว่างการอบสูงขึ้น (Anese et al., 1999)

การทำแห้งผลไม้ด้วยการออสโมซิส

การแช่อิ่มเป็นการทำแห้งด้วยวิธีออสโมซิส (osmotic dehydration) ซึ่งสามารถกำจัดน้ำบางส่วนออกจากผลิตภัณฑ์ โดยแช่ตัวอย่างในสารละลายของน้ำตาลหรือเกลือ ซึ่งเป็นตัวถูกละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่าในตัวอย่ง น้ำในตัวอย่งจะเคลื่อนที่ออก ส่วนตัวถูกละลายในสารละลายจะเคลื่อนที่เข้าไปในตัวอย่ง เนื่องจากความแตกต่างของแรงดันออสโมติก (Raoult-Wack, 1994) การทำแห้งด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่ช่วยกำจัดน้ำบางส่วนที่อุณหภูมิต่ำกว่าก่อนทำแห้ง จึงช่วยลดเวลาทำแห้งและทำให้ผลิตภัณฑ์สูญเสียและกลิ่นรสเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการทำแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว นอกจากนั้นยังช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัส ป้องกันการเปลี่ยนสีจากการเกิดสีน้ำตาลที่เกิดจากเอนไซม์และปฏิกิริยาออกซิเดชัน และยังช่วยลดพลังงานความร้อนที่ใช้ทำแห้งเพื่อให้ความชื้นหรือปริมาณน้ำสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ได้ตามเป้าหมาย (Yadav and Singh, 2012) แต่เนื่องจากการแช่อิ่มเพียงอย่างเดียวทำให้ผลิตภัณฑ์ได้ยังมีปริมาณความชื้นและค่า water activity (a_w) สูงอยู่ จึงจำเป็นต้องทำแห้งด้วยวิธีอื่นร่วมด้วย

การทำแห้งผลไม้โดยการออสโมซิสหรือการแช่แข็ง เป็นวิธีหนึ่งในการกำจัดน้ำบางส่วนออกจากผลไม้ โดยอาศัยกระบวนการออสโมซิส ทำโดยแช่ผลไม้ในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่า (Hypertonic solution) และมีค่ากิจกรรมของน้ำ (a_w) ต่ำกว่าสารละลายในผลไม้ จะส่งผลให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติก (osmotic pressure) ระหว่างสารละลายภายในเซลล์ของผลไม้กับสารละลายภายนอก เกิดเป็นแรงขับ (driving force) ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารระหว่างภายในเซลล์ของผลไม้และสารละลายภายนอก จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ โดยมีเซลล์เมมเบรนของผลไม้ทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน (Ponting *et al.*, 1966)

การถ่ายโอนมวลสารของน้ำและสารละลายจะเกิดในทิศสวนทางกัน (Counter-counter flow) คือน้ำภายในเซลล์จะแพร่ออกสู่สารละลายภายนอก ในขณะที่ตัวถูกละลายในสารละลายจะแพร่เข้าสู่เซลล์ของผลไม้ และดำเนินต่อไปจนถึงสภาวะสมดุล (อัตราการถ่ายโอนมวลของน้ำและตัวถูกละลายมีค่าคงที่) จึงทำให้ปริมาณน้ำและตัวถูกละลายในชิ้นผลไม้และในสารละลายภายนอกมีค่าคงที่ (Raoult-Wack, 1994)



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำและปริมาณน้ำตาลในชิ้นผลไม้ระหว่างการออสโมซิส
ที่มา : ดัดแปลงจาก Lenart (1996)

นอกจากนี้ถ้าเซลล์ของผลไม้ถูกทำลาย เช่น ผ่านการลวก ความร้อนจะทำให้เซลล์ผลไม้นิ่มลง การแพร่ของน้ำและตัวถูกลายจะถึงจุดสมดุลเร็วขึ้น (ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาลิก, 2532)

Kowalska, Lenart และ Leszczk (2008) ศึกษาผลของการเตรียมฟักทองก่อนการออสโมซิสต่อการถ่ายเทมวลสารในระหว่างการออสโมซิส โดยหั่นเป็นชิ้นลูกบาศก์ยาวด้านละ 10 มิลลิเมตร แปรวิธีการเตรียมฟักทองเป็น 2 วิธี วิธีแรกคือลวกชิ้นฟักทองด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 1 นาที แล้วแช่ในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วินาที วิธีที่สองคือแช่ชิ้นฟักทองที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 16 ชั่วโมง โดยเปรียบเทียบกับชิ้นฟักทองสดที่ไม่ผ่านการเตรียมตัวอย่าง จากนั้นนำชิ้นฟักทองมาแช่ในสารละลายซูโครสความเข้มข้น 61.5% (w/v) เป็นเวลา 180 นาที พบว่าชิ้นฟักทองที่ผ่านการลวกจะมีอัตราการสูญเสียน้ำในระหว่างการออสโมซิสสูงกว่าชิ้นฟักทองที่ผ่านการแช่แข็งและชิ้นฟักทองสด เนื่องจากการลวกจะทำให้โครงสร้างหรือเนื้อเยื่อของฟักทองอ่อนนุ่มลง จึงเกิดการถ่ายเทมวลสารได้ดี

การอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศ

การทำแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสุญญากาศ (microwave-vacuum drying) เป็นวิธีทำแห้งที่รวดเร็วประหยัดเวลา เนื่องจากโมเลกุลน้ำในอาหารจะดูดซับพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าโดยตรง จากนั้นอิเล็กตรอนในโมเลกุลน้ำจะเคลื่อนที่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่กลายเป็นพลังงานจลน์ และยังคงเคลื่อนที่ชนกันเองจนพลังงานของมันเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนเนื่องจากการเสียดสีกัน ทำให้น้ำระเหยออกสู่ภายนอกอย่างรวดเร็ว จึงช่วยป้องกันการหดตัวของโครงสร้างเนื้อเยื่ออาหาร ซึ่งเป็นปัญหาที่พบในการทำแห้งด้วยลมร้อนทั่วไป (Bilbao-Sainz *et al.*, 2006) นอกจากนี้ การทำแห้งในภาวะสุญญากาศ ทำให้น้ำระเหยที่อุณหภูมิต่ำกว่าในภาวะบรรยากาศปกติ ผลไม้จะถูกทำแห้งโดยไม่สัมผัสกับอุณหภูมิสูง และภาวะที่ไม่มีอากาศยังช่วยลดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงปรับปรุงสี รสชาติและกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ที่ทำแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Erle and Schubert, 2001)

ระบบไมโครเวฟสุญญากาศเป็นระบบที่ประยุกต์ระหว่างการทำแห้งด้วยความร้อนโดยใช้ระบบไมโครเวฟและระบบสุญญากาศ มีลักษณะเด่นคืออุณหภูมิที่ใช้ออบแห้งต่ำทำให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง จากหลักการของจุดเดือดจะลดต่ำลงเมื่ออยู่ในระบบสุญญากาศความดันที่ต่ำลงและคุณสมบัติการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟของน้ำส่งผลให้น้ำที่อยู่ภายในผลิตภัณฑ์ระเหยออกไปอย่างรวดเร็วการใช้คลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดการกระจายความร้อนจากภายในผลิตภัณฑ์ไปสู่ภายนอกผลิตภัณฑ์ ด้วยหลักการนี้จึงช่วยรักษาสภาพดั้งเดิมของวัตถุดิบและไม่มีออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับวัตถุดิบ อีกทั้งสามารถคงคุณค่าทางโภชนาการ กลิ่นและรสไว้ได้ดี นอกจากนี้ยังร่นระยะเวลาในกระบวนการอบแห้งให้เหลือเพียง 1 ใน 6 เท่าและเพิ่มอัตราการอบแห้งได้ 4-8 เท่า เมื่อเทียบกับกระบวนการอบแห้งด้วยวิธีทั่วไป (สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2554 : Gunasekaran, 1999 : Gökmen and Acar, 2000)



ภาพที่ 3 เครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศ

Lin และคณะ (1998) วิจารณ์การเปรียบเทียบผลของการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟสุญญากาศและการอบแห้งแบบ Freeze drying ของแครอทสไลด์ พบว่าการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟสุญญากาศมีค่า alpha-carotene และปริมาณวิตามินซีมากกว่า แต่มีความหนาแน่นและความชื้นน้อยกว่าการอบแห้งแบบ freeze drying

Bondaruk และคณะ (2006) ศึกษาการอบแห้งมันฝรั่งทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์โดยใช้ไมโครเวฟสุญญากาศ พบว่าการใช้ไมโครเวฟสุญญากาศช่วยรักษาสีของมันฝรั่งและลดการสูญเสียแป้งและน้ำตาลเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง อบแห้งแบบลมร้อนและการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิสูงจะทำลายโครงสร้างภายในของมันฝรั่งทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

จาดุพงศ์ วาฤทธิ และ นราธิป สุจินดา (2551) ศึกษาการพัฒนากระบวนการอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศกับผลผลิตเกษตร 3 ชนิดได้แก่ ลำไยกรอบลำไยผงแบบโพนัมเมทและโปกะเพราแห้ง พบว่าผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ประเภทมีลักษณะที่เฉพาะแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยลมร้อนปกติลำไยกรอบที่อบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศ มีลักษณะเป็นผลกลม ฟรุกรอบเหมาะสำหรับทำเป็นขนมขบเคี้ยว

Therdthai (2009) ศึกษาการอบแห้งพริกแดง พันธุ์จินดาโดยใช้การอบแห้งแบบไมโครเวฟสุญญากาศ พบว่าพริกแห้งมีสีแดงเข้มมีลักษณะพองและคงรูปไม่มีสีคล้ำและไม่เหี่ยวเหมือนกับพริกแห้งทั่วไปที่ได้จากการอบแห้งแบบลมร้อน ลักษณะโครงสร้างของพริกอบแห้งที่ได้มีรูพรุน และการเปรียบเทียบการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟสุญญากาศและการอบแห้งแบบลมร้อน (Hot air drying) ของโอบสะระแห่นพบว่า การอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟสุญญากาศจะลดเวลาการทำแห้งได้ 85-90% และรักษาสีของโอบสะระแห่นได้ดีกว่าการอบแห้งแบบลมร้อน

Figiel (2010) ศึกษาจลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของการทำแห้งบิทูรุษ ซึ่งทำแห้ง 2 วิธี คือการอบแห้งแบบพาความร้อน (ใช้เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน) และการอบแห้งแบบผสมคืออบแห้งแบบพาความร้อนก่อนแล้วใช้ไมโครเวฟสุญญากาศทำแห้งต่อ พบว่าเมื่อใช้ไมโครเวฟสุญญากาศร่วมด้วยส่งผลให้การหดตัวลดน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบพาความร้อนเพียงอย่างเดียว และเมื่อใช้กำลังไมโครเวฟสูง ขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการดูดน้ำกลับของบิทูรุษมีค่ามากขึ้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟและลดเวลาที่ใช้ในการอบแห้งแบบพาความร้อนลงจะช่วยให้อบแห้งบิทูรุษอบแห้งมีคุณภาพดีขึ้น

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze-drying) ช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทั้งด้านรูปทรง กลิ่น รส สี และวิตามิน แต่มีข้อเสียคือมีต้นทุนในการผลิตสูงกว่าการทำแห้งแบบลมร้อนหลายเท่าตัว (Clarke,

2004) นอกจากนั้นกระบวนการดังกล่าวมีแนวโน้มที่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรง ส่งผลให้สามารถดูดน้ำกลับ (rehydrate) ได้อย่างรวดเร็วหากอยู่ในภาวะที่มีความชื้น (Ochoa-Martinez *et al.*, 2012)

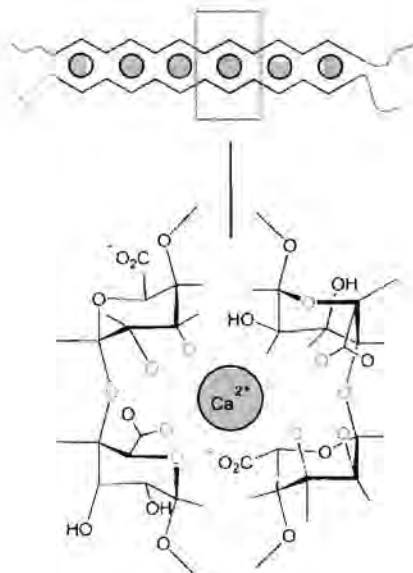
การพรีทรีตเมนต์ (Pretreatment)

การ Pretreatment เป็นการเตรียมวัตถุดิบก่อนเข้าสู่กระบวนการออสโมซิสและกระบวนการทำแห้ง มีทั้งการใช้สารเคมีและใช้ความร้อน เพื่อช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ และช่วยรักษาคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส สีและลักษณะปรากฏของผลไม้ได้

การให้ความร้อน จะช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase; PPO) ที่มีอยู่ในผลไม้ โดยความร้อนจะทำให้เอนไซม์เสียสภาพไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้ (McBean *et al.*, 1971) และการใช้สารเคมีอาจใช้เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กรดแอสคอร์บิก กรดซิตริก หรือใช้เพื่อปรับปรุงเนื้อสัมผัส เช่น แคลเซียมคลอไรด์ แต่สารเคมีบางชนิด เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ มีผลเสียต่อร่างกาย จึงจำเป็นต้องใช้ในปริมาณไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่กฎหมายกำหนด

แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride)

ผลไม้แช่อิ่มอบแห้งที่ผ่านกระบวนการออสโมซิสมาเป็นเวลานาน เนื้อสัมผัสจะนิ่ม ดังนั้นการใช้สารประกอบแคลเซียมจะช่วยรักษาความคงรูปของเนื้อผลไม้ไว้ได้ เนื่องจากแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบเพคตินบริเวณ middle lamella และผนังเซลล์ของผลไม้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมข้าม (crosslink) ระหว่างหมู่คาร์บอกซิลบนสายของเพคตินและประจุของแคลเซียมไอออน เกิดเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า Egg-box model (รูปที่ 4) เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมเพคเตตซึ่งไม่ละลายน้ำ ทำให้เนื้อผลไม้มีความแข็งแรงและคงตัวอยู่ได้



ภาพที่ 4 โครงสร้าง Egg-box model
ที่มา : Leick *et al.* (2010)

Luna-Guzman, Cantwell และ Barrett (1999) ศึกษาผลของการแช่แคนตาลูปชนิดพร้อมบริโภค ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของแคนตาลูป พบว่าการใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1-5% ช่วยปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น และเมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น ปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในแคนตาลูปก็มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ด้วย

Rastogi, Nguyen และ Balasubramaniam (2008) ศึกษาผลของการพรีทรีตเมนต์ที่มีต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของแครอทหลังจากผ่านความร้อนและผ่านความร้อนที่มีการใช้ความดันร่วมด้วย พบว่าเมื่อพรีทรีตเมนต์แครอทโดยใช้แคลเซียมคลอไรด์ 1% แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้ความดัน (200 MPa) ร่วมด้วย เนื้อแครอทมีความแข็งเพิ่มขึ้น และโครงสร้างของเซลล์ถูกทำลายน้อยลง

Irfan, Vanjakshi, Prakash, Ravi, Kudachikar, (2013) ศึกษาผลของแคลเซียมคลอไรด์ที่มีต่อการรักษาคุณภาพของผลมะเดื่อระหว่างการเก็บและอายุการเก็บของผลมะเดื่อ พบว่าการใช้แคลเซียมคลอไรด์ 4% ช่วยรักษาคุณภาพด้านสี, เนื้อสัมผัส, ปริมาณวิตามินซี และช่วยชะลอการสุก ส่งผลให้ผลมะเดื่อมีอายุการเก็บที่ยาวนานขึ้น

กรดซิตริก (Citric acid)

กรดซิตริกจัดเป็นวัตถุเจือปนในอาหาร (Food additive) มีคุณสมบัติเป็นสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ กรดซิตริกทำหน้าที่เพิ่มความเป็นกรด จึงรักษาระดับ pH ให้ต่ำกว่าระดับที่เอนไซม์ทำงานได้ดี และเป็น chelating agent จับไอออนของทองแดงที่อยู่บน active side ของเอนไซม์ ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถทำงานได้

Jiang, Pen และ Li (2004) ศึกษาการใช้กรดซิตริกเพื่อยืดอายุการเก็บและการรักษาคุณภาพของเกาลัดชนิดพร้อมบริโภค พบว่าการใช้กรดซิตริกที่ความเข้มข้นระดับต่ำจะกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ PPO แต่ถ้าใช้กรดซิตริกที่ระดับความเข้มข้น 0.1 M ขึ้นไป จะยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ PPO จึงช่วยยืดอายุการเก็บ ยับยั้งการเปลี่ยน แปลงสีที่ผิวของเกาลัด และลดการสูญเสียวิตามินซีในเกาลัดได้อีกด้วย

โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (Sodium metabisulfite)

สารประกอบซัลไฟต์จัดเป็นวัตถุเจือปนในอาหาร (Food additive) นิยมใช้ในรูปของ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์, โซเดียมซัลไฟต์, โพแทสเซียมซัลไฟต์, โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ และโพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ เป็นต้น สารประกอบซัลไฟต์มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลทั้งที่เกิดจากเอนไซม์หรือที่ไม่ได้มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้อง สารประกอบซัลไฟต์จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบคาร์บอนิลที่เกิดขึ้น ทำให้สามารถยับยั้งรงควัตถุสีน้ำตาลที่จะเกิดขึ้นได้จากปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่ได้มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้อง (Branen, 1989) นอกจากนี้ยังมีการใช้เป็นวัตถุกันเสีย สารฟอกสีหรือสารป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกด้วย

โดยทั่วไปซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะระเหยไปกับไอน้ำถึง 90% สำหรับปริมาณที่อนุญาตให้มีได้ในผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือน้อยกว่า 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พืชของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ปริมาณ 8 ppm จะทำให้เกิดอาการระคายเคืองของระบบหายใจ ปริมาณ 20 ppm จะทำให้เกิดอาการระคายเคืองตา ถ้ารับประทานไม่มาก ร่างกายสามารถขับออกทางระบบปัสสาวะได้ แต่ถ้ารับประทานมากเกินไปจะมีผลไปลดประสิทธิภาพการใช้โปรตีนและไขมันในร่างกายและทำลายวิตามินบี1 ถ้ามีซัลเฟอร์ไดออกไซด์สะสมใน

ร่างกายมากๆ อาจทำให้หายใจติดขัด ปวดท้อง ท้องร่วง เวียนศีรษะ อาเจียน ทมดสติ และอาจถึงแก่ชีวิตในผู้ที่แพ้มากหรือเป็นหอบหืด จึงมีการกำหนดค่าการบริโภคในแต่ละวันที่ได้รับ (Acceptable Daily Intake : ADI) ของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งองค์การอนามัยโลกกำหนดไม่เกิน 0.7 มิลลิกรัม/คน/วัน (กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์)

งานวิจัยนี้ จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลการ pretreatment ร่วมกับกระบวนการอบแห้งต่างๆ เช่น การใช้ตู้อบลมร้อน ไมโครเวฟสุญญากาศ และการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพด้าน เคมี กายภาพ และประสาทสัมผัสของขนมขบเคี้ยวจากขนุนและมะม่วง

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบ

ขนุนพันธุ์มาเลย์ (*Artocarpus heterophyllus* Lamk.) ที่มีค่าองศาบริกซ์อยู่ในช่วง 13-15 จากตลาดสี่มุมเมือง อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี

มะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ ซึ่งจากตลาดมหานาค กรุงเทพฯ ในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงกันยายน พ.ศ. 2556 ระยะบ่ม 2 วัน น้ำหนักผลประมาณ 280-340 กรัม ปริมาณของแข็งทั้งหมดเป็น $13.9 \pm 0.5^\circ\text{Brix}$ ล้างด้วยน้ำเปล่า ปอกเปลือก เอาเมล็ดออก ก่อนดำเนินการทดลองขั้นต่อไป

มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ ซึ่งจากตลาด จ.นนทบุรี ในช่วงเดือนมกราคมถึงเมษายน พ.ศ. 2557 ระยะบ่ม 2 วัน น้ำหนักผลประมาณ 350-400 กรัม ปริมาณของแข็งทั้งหมดเป็น $15.5 \pm 0.5^\circ\text{Brix}$ ปอกเปลือก เอาเมล็ดออก แล้วหั่นเนื้อมะม่วงเป็นชิ้นขนาด $3 \times 3 \times 0.5$ เซนติเมตร แช่ตัวอย่างในสารละลายที่ประกอบด้วยกรดซิตริก 0.5 % (w/v) และซูโครส 45.0 % (w/v) สกัดส่วนตัวอย่างต่อสารละลายเป็น 1:4 ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30°C) นาน 2 ชั่วโมง และตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่ (control) เปรียบเทียบผลของวิธีทำแห้ง 3 วิธี ได้แก่ ทำแห้งด้วยลมร้อน แบบแช่เยือกแข็ง และไมโครเวฟแบบสุญญากาศ

3.2 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

สารเคมีที่ใช้ในการทำกระบวนการผลิต

เกลือ	บริษัท ประจักษ์ จำกัด
น้ำตาลทรายขาว	บริษัท มิตรผล จำกัด
Citric Acid	Food Grade
Calcium chloride	Food Grade
Sodium metabisulfite	Food Grade

อุปกรณ์

- ตู้อบลมร้อน (Possess Model UM-Oven 250l-10, Thailand)
- ตู้อบความชื้น (Memmert, model 600, Germany)
- เครื่องไมโครเวฟสุญญากาศ (March Cool, Thailand)
- เครื่องวัดสี (Chroma Meter CR-300, Minolta Co., Japan)
- เครื่องวัด water activity (AquaLab Series 3 TE, Pullman, USA)
- Texture Analyzer (Stable Micro System Model TA.XT2i, UK)
- เครื่องชั่งชนิดละเอียด (Sartorius model BP310s, Germany)
- Hand refractometer (Atago model 2210-w06, Japan)
- เครื่อง Image Analyzer (Nikon Corporation model ACT-1 version 2.63, Japan)

3.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

3.3.1 ขบวนการแห้ง

3.3.1.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของขนุนสด

คัดเลือกขนุนที่มีลักษณะที่ต้องการ นำมาตรวจวัดองค์ประกอบทางเคมีและกายภาพ ดังต่อไปนี้

คุณสมบัติทางเคมี

- ปริมาณความชื้น (A.O.A.C., 1995) รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.1
- ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solids) โดยใช้ Hand refractometer (Atago model 2210-w06, Tokyo, Japan) รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.2

คุณสมบัติทางกายภาพ

- ค่า water activity โดยใช้เครื่อง Water activity (AquaLab Series 3 TE, Pullman, WA, USA) รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.3
- ค่าสี ด้วยเครื่องวัดสี (Chroma Meter CR-300, Minolta Co., Osaka, Japan) ในระบบ CIE L*, a*, b* รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.4
- ค่าความแข็ง (hardness) ด้วย Texture Analyzer (Stable Micro System Model TA.XT2i, Godalming, UK) รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.5
- วัดกลิ่นด้วย E - nose รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.6
- ถ่ายภาพโครงสร้างภายในด้วย Image analyzer (Nikon Corporation model ACT-1 version 2.63, Japan)

3.3.1.2 ศึกษาจลศาสตร์ของการอบแห้งขนุนแช่ส้ม

คัดเลือกขนุนที่มีสมบัติทางเคมีและกายภาพใกล้เคียงกันมาเป็นวัตถุดิบโดยเลือกขนุนที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 13-14 องศาบริกซ์ นำมาหั่นให้ได้ชิ้นขนาด 3x4 ตารางเซนติเมตร ชั่งขนุนปริมาณ 200 กรัม แล้วนำขนุนแช่ในสารละลายผสมที่ประกอบด้วยกรดซิตริก 1% (w/v) โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ 0.5% (w/v) และแคลเซียมคลอไรด์ 2.5% (w/v) โดยมีอัตราส่วนของเนื้อขนุนต่อสารละลายเป็น 1:3 นานเป็นเวลา 10 นาที นำไปต้มไอน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นทำการออสโมซิสโดยนำขนุนไปแช่ในสารละลายผสมของน้ำตาล 50 องศาบริกซ์และเกลือ 1%(w/v) นานเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึบน้ำส่วนเกินที่ผิวของขนุนที่ผ่านการออสโมซิส วางเรียงบนตะแกรงที่อยู่บนถาดอะลูมิเนียม จากนั้นนำเข้าสู่ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 70 องศาเซลเซียส และ 90 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ปริมาณความชื้นโดยบันทึกน้ำหนักของขนุนตลอดการทดลอง จนกระทั่งผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีความชื้นไม่เกิน 18% (w.b.) นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและปริมาณความชื้น (Drying curve) และนำข้อมูลค่าความสัมพันธ์ที่สัมพันธ์กับความชื้นสัมพันธ์ที่อุณหภูมิต่างๆ มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งการคำนวณหาค่าจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงความชื้นของขนุน สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$MR \text{ (Moisture ratio)} = \frac{(M_t - M_{eq})}{(M_i - M_{eq})}$$

โดยที่	MR	=	อัตราส่วนความชื้น
	M_t	=	ปริมาณความชื้นที่เวลาใดๆ (โดยน้ำหนักแห้ง)
	M_i	=	ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (โดยน้ำหนักแห้ง)
	M_{eq}	=	ปริมาณความชื้นที่สมดุลใดๆ (โดยน้ำหนักแห้ง)

3.3.1.3 ศึกษาผลของการอบแห้งลมร้อนแบบชั้นตอนเดียวและหลายชั้นตอน และการอบแห้งด้วยเครื่องไมโครเวฟสุญญากาศ

-การอบแห้งขนุนแช่อิ่มแบบลมร้อนชั้นตอนเดียว

นำขนุนที่ผ่านการออสโมซิสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง วางลงบนตะแกรงบนถาดอะลูมิเนียม แล้วเอาเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ทำการอบแห้งต่อเนื่องนานเป็นเวลา 420 นาที

-การอบแห้งขนุนแช่อิ่มแบบลมร้อนหลายชั้นตอน

การอบแห้งช่วงแรกที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที ช่วงที่สองใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 150 นาที และช่วงสุดท้ายใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียสอบแห้งนานเป็นเวลา 210 นาที

-การอบแห้งขนุนแช่อิ่มด้วยเครื่องไมโครเวฟสุญญากาศ

ขนุนที่ผ่านการออสโมซิสถูกนำเข้าเครื่องไมโครเวฟสุญญากาศโดยตั้งค่ากำลังวัตต์ ที่ 960 วัตต์ อบนานเป็นเวลา 20 นาที พัก 1 นาที แล้วอบต่ออีก 3 นาที รวมเวลาในการอบ 23 นาที

3.3.1.4 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และการประเมินทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนุนแช่อิ่มอบแห้งทั้ง 3 วิธี

คุณสมบัติทางเคมี

- ปริมาณความชื้น (A.O.A.C., 1995) รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.1

คุณสมบัติทางกายภาพ

- ค่า water activity โดยใช้เครื่อง water activity (Aqua Lab Series 3 TE, Pullman, WA, USA) รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.3
- ค่าความแข็ง (hardness) ด้วย Texture Analyzer (Stable Micro System Model TA.XT2i, Godalming, UK) รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.5
- ค่าสีด้วยเครื่องวัดสี (Chroma Meter CR-300, Minolta Co., Osaka, Japan) ในระบบ CIE L^* , a^* , b^* รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.4 และคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE^*_{ab}) ดังสูตร ต่อไปนี้

$$\Delta E_{i,b}^* = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2}$$

- ค่ากลิ่นด้วยเครื่อง E-nose รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.6
- ถ่ายภาพโครงสร้างภายในด้วย Image analyzer (Nikon Corporation model ACT-1 version 2.63, Japan)

การประเมินทางประสาทสัมผัส

ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสแบบ Acceptance test โดยประเมินการยอมรับคุณภาพในด้านสีของผลิตภัณฑ์ กลิ่นรส รสชาติโดยรวม เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดยใช้ผู้ทดสอบประเภทไม่ฝึกฝน จำนวน 30 คน แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสดังแสดงในภาคผนวก ก.10

วางแผนการทดลองแบบ Completely randomized design (CRD) สำหรับการตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพและทางเคมี เนื่องจากงานวิจัยนี้มีตัวแปรที่ต้องศึกษา 3 ตัวแปร คือ ขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยลมร้อนแบบหลายขั้นตอน และขนุนอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศ และวางแผนแบบ Randomized complete block design (RCBD) สำหรับการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติและเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's new multiple range test

3.3.2 มะม่วงอบแห้ง

3.3.2.1 ศึกษาผลของการแช่อิ่มในสารละลายต่างๆ ต่อการทำแห้งมะม่วงแช่อิ่ม

มะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ซื้อจากตลาดมหานาค กรุงเทพฯ ในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงกันยายน พ.ศ. 2556 ระยะบ่ม 2 วัน น้ำหนักผลประมาณ 280-340 กรัม ปริมาณของแข็งทั้งหมดเป็น 13.9 ± 0.5 องศาบริกซ์ ล้างด้วยน้ำเปล่า ปอกเปลือก เอาเมล็ดออก แล้วหั่นเนื้อมะม่วงเป็นชิ้นขนาด $1.5 \times 1.0 \times 0.5$ เซนติเมตร แช่ตัวอย่างในสารละลายที่ประกอบด้วยโซเดียมคลอไรด์ 0.5 หรือ 1.0 % (w/v) และซูโครส 35.0 หรือ 45.0% (w/v) สัดส่วนตัวอย่างต่อสารละลายเป็น 1:4 ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30 °C) นาน 2 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่ (control) (รวมเป็น 5 การทดลอง) จากนั้นทำแห้งตัวอย่างด้วย tray dryer (Yeo heng รุ่น HAL100S, Bangkok, Thailand) ที่อุณหภูมิ 80°C (Pott *et al.*, 2005) ความเร็วลม 0.5 m/s บันทึกรน้ำหนักของตัวอย่างตลอดการทำแห้ง และสร้างกราฟการทำแห้งระหว่างอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) กับเวลาการทำแห้ง เพื่อหาเวลาที่ตัวอย่างมีความชื้นไม่เกิน 18% (wet basis, w.b.) (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532) โดยคำนวณค่า MR ได้จากสมการที่ 1 ทำการทดลอง 2 ซ้ำ

$$MR = \frac{M_t}{M_i} \dots\dots\dots(1)$$

- เมื่อ MR = อัตราส่วนความชื้น
- M_t = ปริมาณความชื้นที่เวลาใดๆ (โดยน้ำหนักแห้ง)
- M_i = ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (โดยน้ำหนักแห้ง)

3.3.2.2 ศึกษาผลของการแช่อบในสารละลายต่างๆ ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์

เตรียมตัวอย่างทั้ง 5 ชุดการทดลองเช่นเดียวกับในขั้นตอนที่ 3.3.2.1 หลังจากนั้นทำแห้งตัวอย่างที่ผ่านการแช่อบทุกชุดการทดลองด้วย tray dryer ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที จนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นไม่เกิน 18% ทำการทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์ โดยวิเคราะห์กลิ่นรสเปรียบเทียบกับมะม่วงสดด้วย E-nose ค่า a_w ด้วยเครื่องวัด a_w (AquaLab รุ่น Series 3 TE, Pullman, Washington, U.S.A) ปริมาณความชื้น (AOAC, 2006) ค่าสี (L^* , a^* , b^* , hue angle และ chroma) ด้วย colorimeter (Chroma Meter CR-300, Minolta Co., Osaka, Japan) และค่าลักษณะเนื้อสัมผัส (hardness, cutting work และ adhesiveness) ด้วย texture analyzer (Stable Micro System Model TA.XT2i, Godalming, UK) และ HDP/BSK blade cutter ใช้เวลาในการทำแห้ง ค่ากลิ่นรส สีและเนื้อสัมผัสเป็นเกณฑ์ในการเลือกสารละลายที่ใช้แช่อบ

การทำแห้งด้วยลมร้อน

ทำแห้งตัวอย่างที่ผ่านและไม่ผ่านการแช่อบด้วย tray dryer (Yeo heng รุ่น HAL100S, Bangkok, Thailand) ที่อุณหภูมิ 80°C (Pott et al., 2005) ความเร็วลม 0.5 m/s นาน 2 ชั่วโมง 45 นาที และ 3 ชั่วโมง 30 นาที ตามลำดับ

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

แช่แข็งตัวอย่างที่ผ่านและไม่ผ่านการแช่อบที่อุณหภูมิ -25°C แล้วทำแห้งด้วย freeze-dryer ที่อุณหภูมิ -46°C ความดัน 0.05 mbar (5 Pa) นาน 10 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ

การทำแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสุญญากาศ

ทำแห้งตัวอย่างที่ผ่านและไม่ผ่านการแช่อบด้วย microwave-vacuum dryer (March Cool, Bangkok, Thailand) ที่ 960 W นาน 20 นาที ตามด้วย 720 W นาน 6 นาที และ 960 W นาน 20 นาที ตามด้วย 720 W นาน 7 นาที ตามลำดับ โดยอุณหภูมิในกาบแห้งด้วย microwave-vacuum dryer อยู่ระหว่าง 35 - 40°C ที่ความดันสัมบูรณ์ 8 kPa

วิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์ โดยวิเคราะห์ค่าสี (L^* , a^* , b^*) ด้วย colorimeter (Chroma Meter CR-300, Minolta Co., Osaka, Japan) ค่าลักษณะเนื้อสัมผัส (hardness, cutting work, adhesiveness, จำนวน peak ก่อนตัวอย่างแตก และจำนวน peak ทั้งหมด) ด้วย texture analyzer (Stable Micro System Model TA.XT2i, Godalming, UK) และ HDP/BSK blade cutter (ภาคผนวก ก. 5) การทดลองละ 8 ซ้ำ ซ้ำละ 1 ครั้ง และลักษณะโครงสร้างด้วย image analyser (Nikon Digital Camera DXM1200F for Microscope, Tokyo, Japan) กำลังขยาย 0.8 เท่า

การวิเคราะห์สมบัติการต้านออกซิเดชัน ทำโดยสกัดตัวอย่างที่บดแล้ว 1.0 กรัม ด้วยเมทานอลความเข้มข้น 80% (w/w) ปริมาตร 20 มิลลิลิตร เขย่าใน water-bath shaker ที่อุณหภูมิ 32°C ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที นาน 1 ชั่วโมง ปั่นเหวี่ยงที่ 10,000 x g นาน 1 นาที แยกเก็บเฉพาะส่วนใส สกัดซ้ำอีกสองครั้งด้วยสารละลายชนิดเดิม ปริมาตร 10 มิลลิลิตร รวมส่วนใสทั้งสามส่วนเข้าด้วยกัน (Sogi et al., 2013)

วิเคราะห์ปริมาณ total phenolics ด้วย Folin-Ciocalteu assay (Waterhouse, 2005; ภาคผนวก ก.7) และสมบัติการต้านออกซิเดชัน ได้แก่ total antioxidant capacity ด้วย ferric reducing antioxidant

power (FRAP) assay โดยดัดแปลงจาก Benzie และ Strain (1996) (ภาคผนวก ก.8) และ 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) assay โดยดัดแปลงจาก Brand-Williams และคณะ (1995) (ภาคผนวก ก.9)
วางแผนการทดลองแบบ CRD ทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์ผลทางสถิติ และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

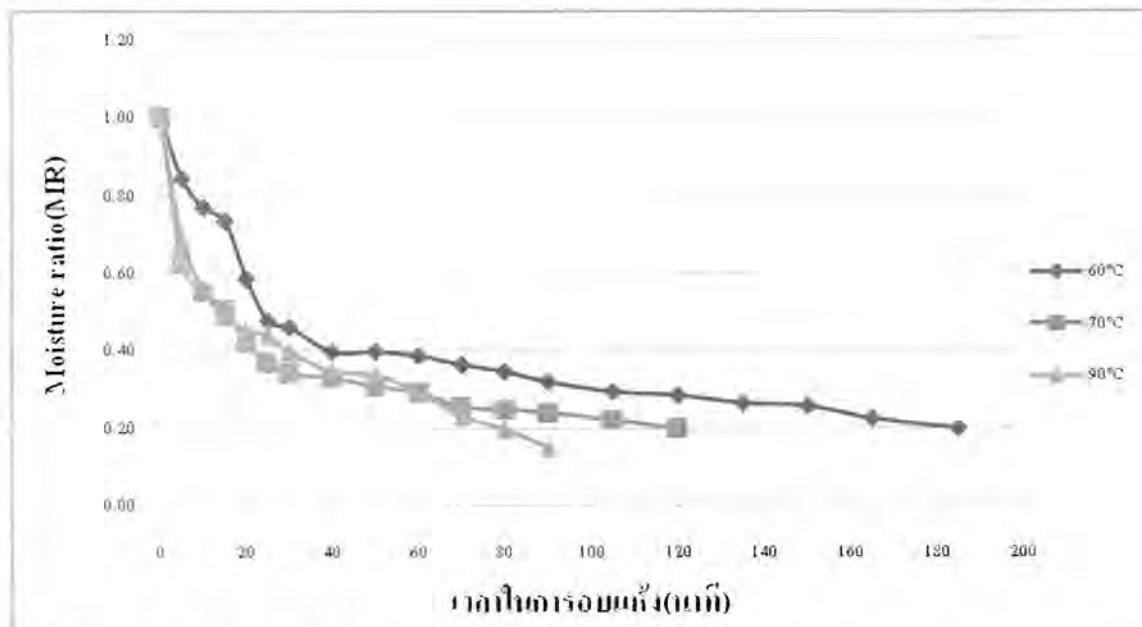
4.1 การอบแห้งขนุนแช่อิ่ม

4.1.1 ผลการหาจลนพลศาสตร์การอบแห้งขนุนแช่อิ่ม

อบแห้งขนุนที่ผ่านการแช่อิ่มด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 70 และ 90 องศาเซลเซียส บันทึกน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ตั้งแต่เริ่มต้นอบแห้งจนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีความชื้น (โดยน้ำหนักแห้ง) 18% นำค่าปริมาณความชื้นสมดุลของแต่ละชุดการทดลองไปคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) ตามสมการที่ 2 จากนั้นสร้างกราฟการอบแห้ง (Drying Curve) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 5

$$\text{MR (Moisture ratio)} = \frac{(M_t - M_{eq})}{(M_i - M_{eq})} \quad \text{-----สมการที่ 2}$$

โดยที่	MR	=	อัตราส่วนความชื้น
	M_t	=	ปริมาณความชื้นที่เวลาใดๆ (โดยน้ำหนักแห้ง)
	M_i	=	ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (โดยน้ำหนักแห้ง)
	M_{eq}	=	ปริมาณความชื้นที่สมดุลใดๆ (โดยน้ำหนักแห้ง)



ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลง Moisture ratio ระหว่างการอบแห้งขนุนแช่อิ่มด้วยลมร้อนโดยใช้อุณหภูมิคงที่ที่ 60 70 และ 90 องศาเซลเซียส

เพื่อทำนายสมการการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ผลไม้อบแห้งต่างๆ มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลายแบบจำลองที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ เช่น แบบจำลองของ Newton แบบจำลองของ Page แบบจำลองของ Henderson & Pabis แบบจำลองของ Verma เป็นต้น ในงานวิจัยนี้เลือกสมมติให้การอบแห้งมีลักษณะตามแบบจำลอง 3 แบบจำลอง คือ แบบจำลองของ Lewis แบบจำลองของ Henderson & Pabis และแบบจำลองของ Page ดังแสดงในสมการที่ 3 สมการที่ 4 และสมการที่ 5 ตามลำดับ คัดเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมกับการทดลอง เพื่อสามารถนำไปใช้เป็นแบบจำลองในการทำนายลักษณะในการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ขนุนแช่อิ่มต่อไป โดยเกณฑ์ที่ใช้ในการคัดเลือกแบบจำลองพิจารณาจากค่า Correlation coefficient (r^2) และค่า Root Mean Square Error (RMSE) ซึ่งค่า RMSE สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6

สมการแบบจำลองของ Lewis

$$MR = \exp(-kt) \quad \text{-----สมการที่ 3}$$

เมื่อ

MR	=	อัตราส่วนความชื้น
t	=	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง(นาที)
k	=	ค่าคงที่ของการอบแห้ง

สมการแบบจำลองของ Henderson & Pabis

$$MR = a \cdot \exp(-kt) \quad \text{-----สมการที่ 4}$$

เมื่อ

MR	=	อัตราส่วนความชื้น
t	=	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง(นาที)
k	=	ค่าคงที่ของการอบแห้ง
a	=	ค่าคงที่

สมการแบบจำลองของ Page

$$MR = \exp(-kt^n) \quad \text{-----สมการที่ 5}$$

เมื่อ

MR	=	อัตราส่วนความชื้น
t	=	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง(นาที)
k	=	ค่าคงที่ของการอบแห้ง
n	=	ค่าคงที่

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

เมื่อ RMSE = Root Mean Square Error

$$\begin{aligned}
 MR_{\text{exp},i} &= \text{MR ที่ได้จากการทดลองของข้อมูลชุดที่ } i \\
 MR_{\text{pre},i} &= \text{MR ที่ได้จากแบบจำลองของข้อมูลชุดที่ } i \\
 N &= \text{จำนวนข้อมูลการทดลอง}
 \end{aligned}$$

โดยนำค่า MR ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับ MR ที่ได้จากการคำนวณได้จากแบบจำลองของ Lewis Henderson & Pabis และ Page พบว่า MR ที่ได้จากแบบจำลองทั้งสามมีค่าใกล้เคียงกับ MR จากการทดลอง และเมื่อพิจารณาค่า r^2 และค่า RMSE ของแบบจำลองการอบแห้งแบบต่างๆดังแสดงในตารางที่ 2 ตารางที่ 3 และตารางที่ 4 พบว่าแบบจำลองของ Page มีความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ทั้งสามชุดการทดลองมากที่สุด เนื่องจากให้ค่า r^2 สูงกว่า และค่า RMSE ที่ต่ำกว่าแบบจำลองของ Lewis และ Henderson & Pabis ในทุกชุดการทดลอง ซึ่งสามารถนำสมการแบบ Page ไปใช้ในการทำนายลักษณะการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ขนุนแช่อบแห้งได้ต่อไป

ตารางที่ 2 สมการแบบจำลองของ Lewis Henderson & Pabis และ Page ในการทำนายการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ขนุนแช่อบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

แบบจำลอง	ค่าสัมประสิทธิ์	สมการ	RMSE	r^2
Lewis	$k = 0.015343$	$MR = \exp(-0.015343*t)$	0.1155	0.9476
Henderson & Pabis	$a = 0.812139$ $k = 0.010715$	$MR = 0.812139*\exp(-0.010715*t)$	0.0875	0.9239
Page	$k = 0.103217$ $n = 0.535675$	$MR = \exp(-0.103217*t^{0.535675})$	0.0451	0.9794

ตารางที่ 3 สมการแบบจำลองของ Lewis Henderson & Pabis และ Page ในการทำนายการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ขนุนแช่อบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

แบบจำลอง	ค่าสัมประสิทธิ์	สมการ	RMSE	r^2
Lewis	$k = 0.02993$	$MR = \exp(-0.02993*t)$	0.1406	0.9290
Henderson & Pabis	$a = 0.723199$ $k = 0.010715$	$MR = 0.723199*\exp(-0.0167*t)$	0.0993	0.8788
Page	$k = 0.26078$ $n = 0.386694$	$MR = \exp(-0.26078*t^{0.386694})$	0.0187	0.9957

ตารางที่ 4 สมการแบบจำลองของ Lewis Henderson & Pabis และ Page ในการทำนายการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ขนุนแช่อบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

แบบจำลอง	ค่าสัมประสิทธิ์	สมการ	RMSE	r^2
Lewis	$k = 0.029769$	$MR = \exp(-0.029769*t)$	0.1102	0.9523
Henderson & Pabis	$a = 0.800255$ $k = 0.020921$	$MR = 0.800255*\exp(-0.02092*t)$	0.0778	0.9363
Page	$k = 0.039136$ $n = 0.918698$	$MR = \exp(-0.039136*t^{0.918698})$	0.0148	0.9601

4.1.2 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเชิงคุณภาพขนุนแช่อบแห้ง

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเชิงคุณภาพในด้านต่างๆของขนุนแช่อบแห้ง ได้แก่ ค่าปริมาณความชื้นและ a_w ค่าสี ค่าความแข็งและค่าความกรอบ ค่ากลิ่น และลักษณะโครงสร้างภายในของขนุนแช่อบแห้ง โดยเปรียบเทียบการอบแห้ง 3 แบบคือ การอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส การอบแห้งแบบลมร้อนที่หลายขั้นตอน (อุณหภูมิลมร้อน 90, 70 และ 60 องศาเซลเซียส) และการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟสุญญากาศ

4.1.2.1 ผลค่าความชื้น และค่า a_w

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของขนุนแช่อบแห้งในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิคงที่ที่ 60, 70 และ 90 องศาเซลเซียส จนกระทั่งขนุนแช่อบแห้งมีค่า a_w และค่าปริมาณความชื้นสุดท้ายดังตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาพบว่าค่า a_w ที่ได้ไม่เกิน 0.75 และมีปริมาณความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 18% โดยน้ำหนัก (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, สำนักงาน. 2550) เนื่องจากค่า a_w เป็นปัจจัยสำคัญในการคาด คะเนอายุ การเก็บอาหาร และเป็นตัวบ่งชี้ถึงความปลอดภัยของอาหารโดยทำหน้าที่ควบคุมการอยู่รอด การเจริญ และการสร้างพิษของจุลินทรีย์โดยเฉพาะรา ในการศึกษาการอบแห้งด้วยลมร้อนด้วยลมร้อนแบบหลายขั้นตอน โดยอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที อบแห้งต่อที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที และลดอุณหภูมิลงเหลือ 60 องศาเซลเซียส นานเป็นเวลา 210 นาที รวมใช้เวลาในการอบแห้งทั้งหมด 420 นาที

เมื่อนำผลิตภัณฑ์มาเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ขนุนอบแห้งด้วยลมร้อนแบบขั้นตอนเดียวใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อบนานเป็นเวลา 420 นาที พบว่าค่าปริมาณความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ และค่า a_w ของผลิตภัณฑ์ขนุนอบแห้งด้วยลมร้อนแบบหลายขั้นตอนมีค่าปริมาณความชื้นต่ำกว่า และมีค่า a_w ต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ขนุนอบแห้งด้วยลมร้อนแบบขั้นตอนเดียว แต่เมื่อเปรียบเทียบในเรื่องของกระบวนการที่ใช้ในการอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศ พบว่าผลิตภัณฑ์ขนุนอบแห้งที่ใช้ไมโครเวฟสุญญากาศนั้น มีค่าปริมาณความชื้นสุดท้าย และค่า a_w ต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ขนุนอบแห้งที่ใช้ลมร้อน ดังแสดงในตารางที่ 5 เนื่องจากการใช้เครื่องไมโครเวฟที่มีระบบสุญญากาศร่วมด้วย ระบบสุญญากาศทำให้น้ำสามารถ

ระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำ น้ำในผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนจากการสั่นของโมเลกุลเมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟจึงระเหยได้เร็ว

ตารางที่ 5 ค่า water activity และค่าปริมาณความชื้นสุดท้ายของขนุนแช่อิ่มอบแห้งสภาวะต่างๆ

treatment	a_w	%MC
ขนุนสด	$0.992^a \pm 0.007$	$77.32^a \pm 3.09$
ขนุนแช่อิ่ม อบแห้งที่ 60°C	$0.650^b \pm 0.005$	$11.46^b \pm 0.13$
ขนุนแช่อิ่มอบแห้ง multistage	$0.533^d \pm 0.026$	$9.74^b \pm 1.56$
ขนุนแช่อิ่มอบแห้งไมโครเวฟ สุญญากาศ	$0.376^c \pm 0.015$	$2.01^c \pm 0.13$

4.1.2.2 ผลค่าสี

เมื่อพิจารณาค่าสีของผลิตภัณฑ์ขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยวิธีการต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 6 พบว่าค่าความสว่าง (L^*) ของขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศมีค่าสูงกว่าขนุนแช่อิ่มอบแห้งแบบลมร้อนทั้ง 2 วิธี และมีค่าเข้าใกล้ค่าความสว่างของขนุนสด ส่วนค่าความเหลือง (b^*) มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน เมื่อนำค่าจากการวัดสีในระบบ CIE $L^* a^* b^*$ มาคำนวณค่า ΔE ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความแตกต่างของค่าสีของขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยวิธีการต่างๆ โดยเปรียบเทียบกับขนุนสด พบว่าค่า ΔE ของขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าค่า ΔE ของขนุนแช่อิ่มอบแห้งแบบลมร้อนทั้ง 2 วิธี ที่เป็นเช่นนี้อาจเพราะการอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศ มีการใช้ระบบสุญญากาศร่วมด้วยในการอบแห้ง น้ำจึงสามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ทำให้มีอุณหภูมิในการอบต่ำกว่าการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และการอบแห้งแบบลมร้อนที่หลายขั้นตอน (อุณหภูมิลมร้อน 90, 70 และ 60 องศาเซลเซียส) การเปลี่ยนแปลงค่าสีจึงเกิดขึ้นน้อยกว่า

ตารางที่ 6 ค่าสีของขนุนสดและขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยวิธีการต่างๆ

Treatment	Color			
	L^*	a^*	b^*	ΔE
ขนุนสด	82.36 ^a ± 2.70	-5.47 ^c ± 1.99	56.12 ^a ± 4.16	0
ขนุนแช่อิ่มอบแห้งที่ 60°C	46.78 ^c ± 3.67	4.47 ^a ± 1.95	28.31 ^c ± 5.72	28.24
ขนุนแช่อิ่มอบแห้ง multistage	44.76 ^d ± 2.98	3.58 ^a ± 0.97	25.42 ^d ± 3.83	31.51
ขนุนแช่อิ่มอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศ	70.84 ^b ± 4.08	-0.24 ^b ± 1.95	48.05 ^b ± 3.91	3.26

*หมายเหตุ a, b เป็นตัวอักษรกำกับับแตกต่างกันตามแนวตั้ง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

4.1.2.3 ผลค่าแรงที่ใช้ในการตัดขาดขนุนและค่าความกรอบ

นำขนุนแช่อิ่มที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งต่างๆมาวิเคราะห์ค่าแรงในการตัดขาดและค่าความกรอบ โดยผลค่าแรงตัดขาดและค่าความกรอบแสดงในตารางที่ 7 ตารางที่ 7 ค่าแรงตัดขาดและความกรอบของผลิตภัณฑ์ขนุนแช่อิ่มอบแห้ง

Treatment	ความแข็ง (kgf)	ความกรอบ (kgf)
ขนุนสด	7.70 ^a ± 1.37	0.06 ^a ± 0.02
ขนุนแช่อิ่มอบแห้งที่ 60°C	29.84 ^b ± 7.63	1.36 ^b ± 0.24
ขนุนแช่อิ่มอบแห้ง multistage	33.96 ^b ± 2.41	1.26 ^b ± 0.17
ขนุนแช่อิ่มอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศ	6.28 ^a ± 1.40	5.02 ^c ± 1.11

*หมายเหตุ a, b เป็นตัวอักษรกำกับแตกต่างกันตามแนวตั้ง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 7 แสดงค่าแรงที่ใช้ในการตัดขาดขนุนและค่าความกรอบของขนุนแช่อิ่มอบแห้งทั้ง 3 แบบ พบว่าขนุนแช่อิ่มอบแห้งแบบลมร้อนทั้งสองวิธีคือ อบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และอบแห้งแบบหลายขั้นตอน มีค่าแรงตัดขาดไม่แตกต่างกันและมีค่าสูงกว่าค่าแรงตัดขาดของขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เนื่องจากการอบแห้งแบบลมร้อนทั้งสองวิธีใช้เวลาในการอบแห้งนาน จึงทำให้ผิวหน้าของขนุนแข็งตัว ในขณะที่การอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟสุญญากาศ คลื่นไมโครเวฟทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์ถูกกระตุ้นเป็นไอได้เร็วขึ้น จึงใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งแบบลมร้อนทั้งสองวิธี ดังนั้นขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศจึงมีค่าแรงตัดขาดน้อยกว่าขนุนแช่อิ่มอบแห้งแบบลมร้อนทั้งสองวิธีอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

เมื่อเปรียบเทียบค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์ขนุนแช่อิ่มอบแห้งทั้ง 3 วิธี พบว่าขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศมีค่าความกรอบสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ส่วนผลิตภัณฑ์ขนุนแช่อิ่มอบแห้งแบบลมร้อนทั้ง 2 วิธี มีค่าความกรอบน้อยกว่า เนื่องจากความกรอบสัมพันธ์กับค่าความชื้น เมื่อผลิตภัณฑ์อาหารมีค่าความชื้นสูงจะมีค่าความกรอบต่ำ การอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ในช่วงแรกน้ำส่วนที่เป็น free water ระเหยออกไปก่อน เมื่อเวลาในการอบแห้งผ่านไป free water ไม่สามารถระเหยได้แล้ว น้ำส่วนที่เป็น bound water จึงไประเหยออกมาแทน แต่การเคลื่อนที่ของ bound water มาที่ผิวได้ไม่ทันกับการระเหยที่ผิวหน้า ทำให้ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์แข็งตัว น้ำส่วน bound water จึงระเหยออกไปได้ยากขึ้น จึงมีความชื้นหลงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์มากกว่า การอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟสุญญากาศ ทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์ระเหยเป็นไอได้อย่างรวดเร็ว จึงใช้เวลาในการอบแห้งน้อยและเกิดการแข็งตัวที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์น้อยกว่า น้ำจึงระเหยออกไปได้ดีกว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีความชื้นน้อย ดังนั้นขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศจึงมีค่าความกรอบมากกว่าขนุนแช่อิ่มอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และอบแห้งแบบหลายขั้นตอน

4.1.2.4 ผลค่ากลิ่น

นำขนุนแช่อิ่มที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งทั้งสามวิธี มาวิเคราะห์ค่ากลิ่นด้วยเครื่อง E-nose โดยเปรียบเทียบกลิ่นของขนุนแช่อิ่มอบแห้งทั้งสามวิธีกับขนุนสด เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงกลิ่นของขนุนหลังกระบวนการอบแห้ง โดยผลค่ากลิ่นแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ค่าการเปลี่ยนแปลงกลิ่นของขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยวิธีต่างๆ

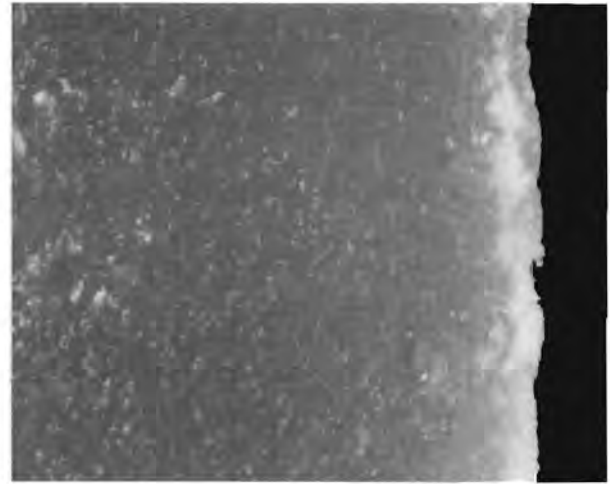
Treatment	ค่าเบี่ยงเบนของกลิ่น เมื่อเปรียบเทียบกับผลสด
ขนุนแช่อิ่มอบแห้งที่ 60°C	25.249 ^a ± 0.001
ขนุนแช่อิ่มอบแห้ง multistage	24.140 ^b ± 0.001
ขนุนแช่อิ่มอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศ	21.911 ^c ± 0.001

*หมายเหตุ a, b, c เป็นตัวอักษรกำกับแตกต่างกันตามแนวตั้ง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 8 แสดงค่ากลิ่นของขนุนแช่อิ่มอบแห้งที่สภาวะต่างๆโดยเปรียบเทียบกับขนุนสด พบว่าขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศมีค่าเบี่ยงเบนของกลิ่นน้อยกว่าค่าของขนุนแช่อิ่มอบแห้งแบบลมร้อนทั้งสองวิธี แสดงว่าค่ากลิ่นของขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศมีค่าใกล้เคียงกับขนุนสดมากกว่าขนุนแช่อิ่มอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสและอบแห้งลมร้อนแบบหลายขั้นตอน (อุณหภูมิลมร้อน 90, 70 และ 60 องศาเซลเซียส) เพราะว่าการอบแห้งแบบลมร้อนมีอุณหภูมิในการอบแห้งสูงกว่า จึงสูญเสียค่ากลิ่นของขนุนไปมากกว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศซึ่งมีอุณหภูมิในการอบแห้งต่ำกว่า

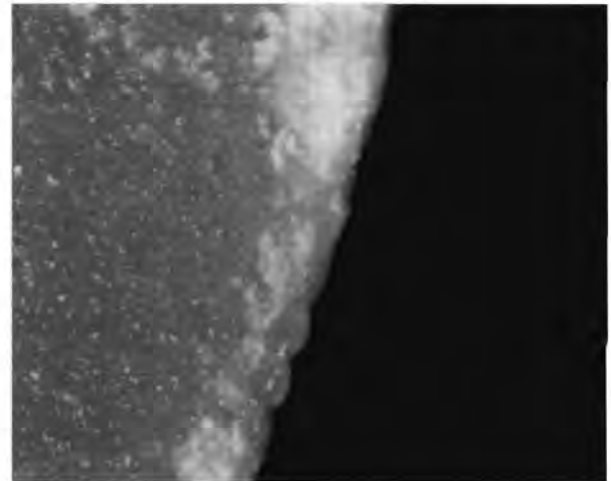
4.1.2.5 ผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโครงสร้างภายในของขนุนแช่อิ่มอบแห้ง

เนื่องจากกระบวนการอบแห้งที่ต่างกัน ส่งผลให้ขนุนมีโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาดังแสดงในภาพที่ 6 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นหลังอบแห้งจากภาพถ่ายตัดขวางโครงสร้างภายในของขนุนที่สภาวะต่างๆด้วยเครื่อง Image analyzer ขนุนแช่อิ่มอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสและขนุนแช่อิ่มอบแห้งลมร้อนแบบหลายขั้นตอน พบว่าโครงสร้างภายในมีลักษณะอัดตัวกันแน่น ไม่พองตัว ไม่มีรูพรุนและเห็นผลึกน้ำตาลที่บริเวณขอบของผิวขนุนได้อย่างชัดเจน ในขณะที่ขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศมีโครงสร้างพองตัว มีรูพรุนเป็นจำนวนมากและมีขนาดใหญ่ เนื่องมาจากคลื่นไมโครเวฟทำให้โมเลกุลของน้ำในผลิตภัณฑ์สั่นสะเทือน เปลี่ยนจากพลังงานจลน์เป็นพลังงานความร้อน ไอน้ำที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ทำให้ความดันภายในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำภายในกับภายนอกผลิตภัณฑ์ส่งผลให้น้ำในผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่ออกไปภายนอก ผลิตภัณฑ์จึงเกิดการพองตัว เพราะมีการใช้ระบบสุญญากาศร่วมด้วย จุดเดือดของน้ำจึงลดต่ำลง น้ำสามารถกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส เกิดการทำลายโครงสร้างของผนังเซลล์น้อย ทำให้เซลล์คงรูปร่างไว้ได้ ส่วนรูพรุนเกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดไอน้ำที่มีขนาดใหญ่และเกิดการระเหยออกไปอย่างรวดเร็ว



ขุ่นสด

ขุ่นแช่อิ่มอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C



ขุ่นแช่อิ่มอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศ ขุ่นแช่อิ่มอบแห้งลมร้อนแบบหลายขั้นตอน

ภาพที่ 6 ภาพถ่ายโครงสร้างภายในจากเครื่อง Image analyzer ของผลิตภัณฑ์ขุ่นสดและขุ่นแช่อิ่มอบแห้ง ด้วยวิธีต่างๆกำลังขยาย 5 เท่า

4.1.3 ผลการประเมินการยอมรับทางประสาทสัมผัส

ขุ่นแช่อิ่มอบแห้งเมื่อผ่านการให้ความร้อนทำให้มีลักษณะในด้านต่างๆเช่น เนื้อสัมผัส สี กลิ่น และรสชาติ เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงต้องมีการทำการประเมินการยอมรับทางประสาทสัมผัส โดยใช้สเกลวัดระดับความชอบ 7 ระดับ เพื่อวิเคราะห์การยอมรับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้ง โดยผลการประเมินการยอมรับทางประสาทสัมผัสของขุ่นแช่อิ่มอบแห้งด้วยวิธีการต่างๆแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการประเมินการยอมรับทางประสาทสัมผัสของขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยวิธีการต่างๆ

Treatment	คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัส				
	สี	กลิ่นรส	รสชาติโดยรวม	เนื้อสัมผัส	ความชอบโดยรวม
ขนุนแช่อิ่ม อบแห้งที่ 60°C	4.27 ^a ± 1.78	4.57 ± 1.33	4.63 ± 1.16	4.43 ^a ± 1.65	4.73 ^a ± 1.20
ขนุนแช่อิ่ม อบแห้ง multistage	4.20 ^a ± 1.50	4.60 ± 1.28	4.50 ± 1.46	4.37 ^a ± 1.90	4.67 ^a ± 1.49
ขนุนแช่อิ่ม อบแห้ง ไมโครเวฟ สุญญากาศ	5.60 ^b ± 1.16	5.23 ± 1.04	4.87 ± 1.59	6.03 ^b ± 0.77	5.50 ^b ± 0.94

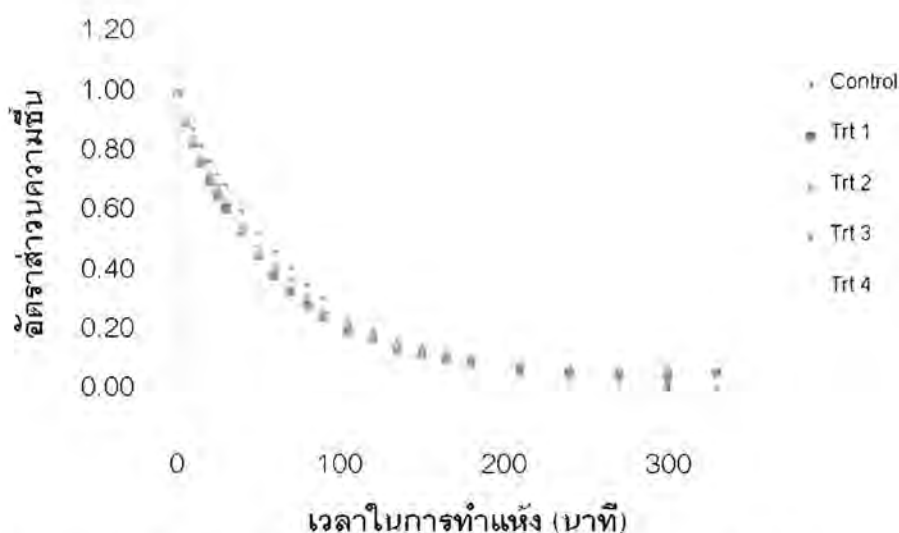
*หมายเหตุ a, b เป็นตัวอักษรกำกับแตกต่างกันตามแนวตั้ง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 9 เมื่อพิจารณาในด้านสีและเนื้อสัมผัสพบว่า ผู้ทดสอบให้การยอมรับต่อสีและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนุนแช่อิ่มอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และที่หลายขั้นตอนไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ผู้ทดสอบเห็นความแตกต่างในด้านสีและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ในด้านกลิ่นรสและรสชาติโดยรวมพบว่า ขนุนแช่อิ่มอบแห้งทั้ง 3 วิธีการ มีคะแนนการยอมรับในด้านกลิ่นรสและรสชาติโดยรวมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ส่วนคะแนนการยอมรับโดยรวมของผลิตภัณฑ์ พบว่าขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศมีคะแนนการยอมรับโดยรวมมากที่สุด เนื่องจากเป็นสภาวะการอบแห้งที่มีลักษณะปรากฏในด้านสีและเนื้อสัมผัสที่ดี อีกทั้งมีกลิ่นรสและรสชาติโดยรวมเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

4.2 การทำแห้งมะม่วงแช่อิ่ม

4.2.1 ผลของการแช่อิ่มในสารละลายต่างๆ ต่อการทำแห้งมะม่วงแช่อิ่ม

ความเข้มข้นที่ใช้ในการออสโมซิสมีผลต่อการถ่ายโอนมวลระหว่างการออสโมซิส เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย ความแตกต่างของแรงดันออสโมติกระหว่างภายในเนื้อเยื่อผลไม้และสารละลายออสโมติกจะเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารได้ดีกว่าการใช้สารละลายออสโมติกที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า (Raoult-Wack, 1994)



ภาพที่ 7 กราฟการทำแห้งมะม่วงแช่อิ่มแสดงดังภาพที่ 7 พบว่า การแปรรูปอาหารด้วยวิธีออสโมซิสก่อนทำแห้งช่วยให้อัตราการทำแห้งสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการออสโมซิส สังเกตได้จากกราฟการทำแห้งที่มีความชื้นเพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกที่สูงขึ้นส่งผลให้เวลาในการทำแห้งลดลง (ตารางที่ 10) โดยตัวอย่าง Trt 4 ใช้เวลาทำแห้งสั้นที่สุด อาจอธิบายได้ว่าตัวอย่างที่ผ่านการแช่อิ่มในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่า จะมีปริมาณความชื้นลดลงมากกว่า อันเป็นผลมาจากการถ่ายโอนมวลของน้ำออกจากตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงความสามารถของการแช่อิ่มที่ช่วยลดปริมาณน้ำบางส่วนก่อนทำแห้งและเวลาที่ใช้ทำแห้งได้ Falade, Igbeka และ Ayanwuyi (2007) ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกต่อการถ่ายเทมวลสารของแตงโม พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายทำให้ตัวอย่างมีการถ่ายโอนมวลน้ำและของแข็งสูงขึ้น ($p < 0.05$) เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกทำให้ความแตกต่างของแรงดันออสโมติกระหว่างชิ้นผลไม้งอกกับสารละลายเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Allali, Marchal และ Vorobiev (2010) พบว่า การใช้กรดซิตริกที่ความเข้มข้น 0.5-2.0% มีผลช่วยเร่งการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิสแอมบิล เนื่องจากกรดซิตริกทำให้เพกตินที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยโครงสร้างของเพกตินอาจมีช่องว่างมากขึ้น ส่งผลให้การแพร่ผ่านของสารระหว่างการออสโมซิสเกิดได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 10 เวลาที่ใช้ทำแห้งมะม่วงแช่อิ่ม (นาทีก) จนกระทั่งผลิตภัณฑ์มีความชื้นไม่เกิน 18% (wet basis)

Control	Trt 1	Trt 2	Trt 3	Trt 4
210	220	220	165	160

(Control: ไม่แช่สารละลาย, Trt 1: 35.0% ซูโครสและ 0.5% กรดซิตริก, Trt 2: 35.0% ซูโครสและ 1.0% กรดซิตริก, Trt 3: 40.0% ซูโครสและ 0.5% กรดซิตริก, Trt 4: 35.0% ซูโครสและ 1.0% กรดซิตริก)

4.2.2 ผลของการแช่อิ่มในสารละลายต่างๆ ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์

การแปรรูปอาหารด้วยวิธีออสโมติกก่อนทำแห้งส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณความชื้นลดลง และทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีลักษณะเฉพาะ โดยตัวถูกละลายในสารละลายออสโมติกซึ่งในที่นี้ได้แก่ น้ำตาลและกรดซิตริก จะเคลื่อนที่เข้าไปในผลิตภัณฑ์ระหว่างการออสโมซิส และมีส่วนช่วยในการป้องกันการสูญเสียของรงควัตถุและสารระเหยได้ในอาหาร รวมถึงทำให้โครงสร้างของเนื้อเยื่อมีความคงรูปมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลไม้ที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว (Raoult-Wack, 1994) ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพของมะม่วงแช่อิ่มจากสารละลายน้ำตาลและกรดซิตริกในระดับความเข้มข้นต่างๆ แสดงในตารางที่ 11-13

ตารางที่ 11 ผลของการแช่อบในสารละลายต่างๆต่อความแตกต่างของกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์เทียบกับผลสด

Treatment	Control	น้ำตาลทราย 35%		น้ำตาลทราย 45%	
		กรดซิตริก 0.5%	กรดซิตริก 1.0%	กรดซิตริก 0.5%	กรดซิตริก 1.0%
Flavor	39.87 ± 14.93	14.04 ± 5.82	13.27 ± 6.36	15.39 ± 3.04	48.51 ± 5.61

ตารางที่ 12 ผลของการแช่อบในสารละลายต่างๆต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์

Treatment	Control	น้ำตาลทราย 35%		น้ำตาลทราย 45%	
		กรดซิตริก 0.5%	กรดซิตริก 1.0%	กรดซิตริก 0.5%	กรดซิตริก 1.0%
L^*	71.88 ± 1.27	69.90 ± 0.44	71.97 ± 3.69	75.32 ± 1.46	70.71 ± 1.74
a^*	-1.33 ± 0.21	-1.14 ± 0.17	-1.23 ± 0.87	-1.93 ± 0.19	-1.82 ± 0.21
b^*	55.88 ± 0.70	56.59 ± 0.81	55.18 ± 0.84	56.40 ± 1.64	55.56 ± 0.61
Hue angle (°)	-88.63 ± 0.25	-88.31 ± 0.91	-87.91 ± 0.37	-87.63 ± 0.41	-87.62 ± 0.47
Chroma	55.89 ± 0.69	56.60 ± 0.80	55.19 ± 0.86	56.45 ± 1.63	55.59 ± 0.61

ตารางที่ 13 ผลของวิธีทำแห้งต่อค่าลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์

Treatment	Control	น้ำตาลทราย 35%		น้ำตาลทราย 45%	
		กรดซิตริก 0.5%	กรดซิตริก 1.0%	กรดซิตริก 0.5%	กรดซิตริก 1.0%
Hardness (N)	253.13 ± 38.69	184.92 ± 27.48	157.45 ± 24.50	136.03 ± 26.20	137.58 ± 27.31
Cutting work (N.sec)	257.21 ± 56.05	246.30 ± 42.38	213.92 ± 28.49	179.97 ± 24.69	162.14 ± 22.69
Adhesiveness (N.sec)	-0.06 ± 0.03	-6.12 ± 2.00	-4.02 ± 0.58	-4.52 ± 1.08	-2.68 ± 0.50

ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในแถวเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

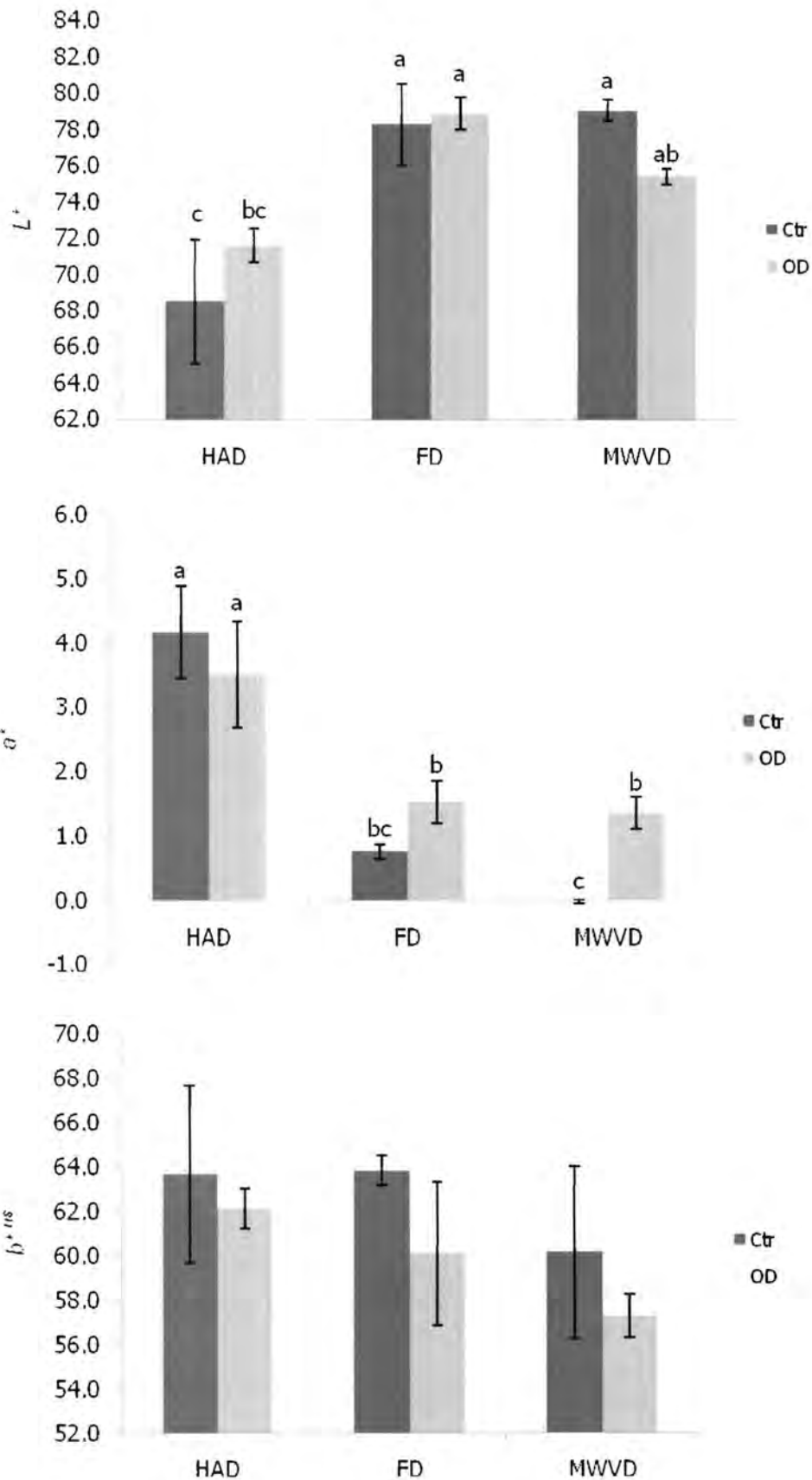
^{ns} ข้อมูลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

จากตารางที่ 11 พบว่า ตัวอย่างมะม่วงแช่อิ่มมีค่าความแตกต่างด้านกลิ่นรสกับตัวอย่างสดน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านกระบวนการดังกล่าว แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลและกรดซิตริก จะมีความแตกต่างของค่านั้นมากขึ้น ผลที่ได้สอดคล้องกับ Torres และคณะ (2007) ซึ่งพบว่าการแช่อิ่มส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารระเหยได้ในมะม่วง และสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ส่งผลให้ตัวอย่างมะม่วงสูญเสียสารระเหยได้ไปมากขึ้น โดยให้เหตุผลว่าอาจเป็นเพราะเมื่อแช่ตัวอย่างในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่า สารระเหยได้ในตัวอย่างจะแพร่สู่สารละลายไปมากกว่า และยังอาจเกิดปฏิกิริยาการสร้างและสลายตัวของสารในเนื้อเยื่อของผลไม้

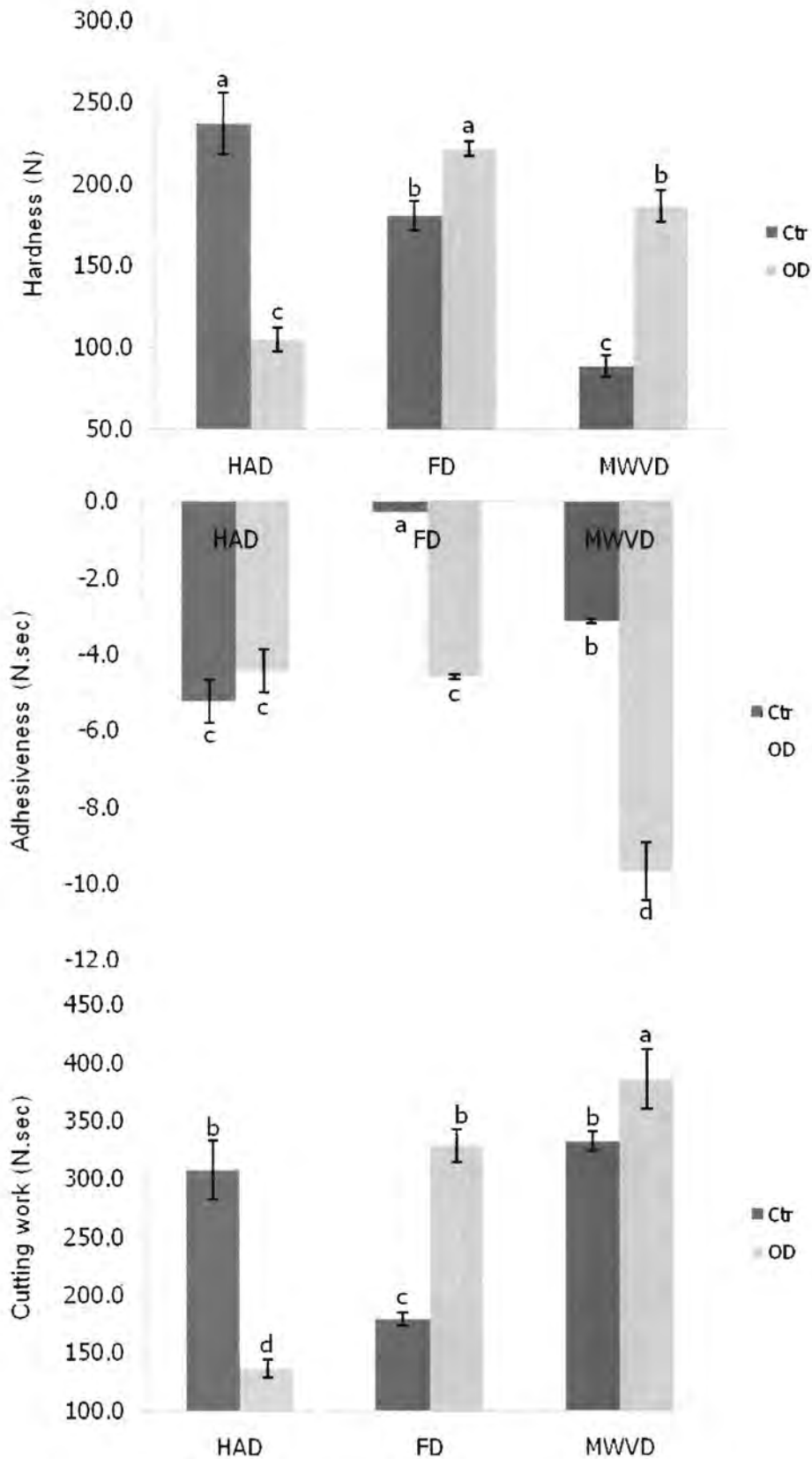
ผลของการแช่อิ่มในสารละลายต่างๆต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์แสดงดังตารางที่ 12 พบว่า ทุกตัวอย่างมีค่า a^* , b^* , chroma และ hue angle ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามการแช่อิ่มทำให้ตัวอย่างมีค่าความสว่าง (ค่า L^*) สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแช่อิ่ม และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้น อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกที่สูงขึ้นส่งผลให้เวลาในการทำแห้งลดลง Park และ Lee (1975) สรุปว่าเวลาทำแห้งที่นานส่งผลให้ตัวอย่างพริกหยวกมีความสว่างลดลง Arslan และ Özcan (2011) พบว่าค่า L^* ของตัวอย่างพริกหยวกที่ลดลงเป็นผลมาจากการสร้างสารประกอบสีน้ำตาลระหว่างกระบวนการทำแห้ง นอกจากนี้การใช้กรดซิตริกมีผลยับยั้งการทำงานของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดสีน้ำตาล เนื่องจากกรดซิตริกช่วยลดค่า pH ของตัวอย่างทำให้เกิดภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ และมีสมบัติเป็นตัวจับโลหะ (chelating agent) ช่วยจับกับคอปเปอร์ไอออนซึ่งจำเป็นต่อการทำงานของเอนไซม์ที่บริเวณเร่งของเอนไซม์ (Eskin, Henderson and Townsend, 1971)

ผลของการแช่อิ่มในสารละลายต่างๆต่อค่าลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ แสดงดังตารางที่ 13 พบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการแช่อิ่มมีค่า hardness, cutting work และ adhesiveness ต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านกระบวนการดังกล่าว และมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นน้ำตาลหรือกรดซิตริก อาจเนื่องมาจากโครงสร้างเซลล์และองค์ประกอบของเพกตินเปลี่ยนแปลงไป (Ilker and Szczesniak, 1990) Torreggiani และ Bertolo (2001) อธิบายว่าการแช่อิ่มส่งผลให้สตรอเบอร์รี่มีค่าความแน่นเนื้อ (firmness) ลดลงเนื่องจากมี oxalate soluble และ residual pectin (protopectin) fractions ลดลง

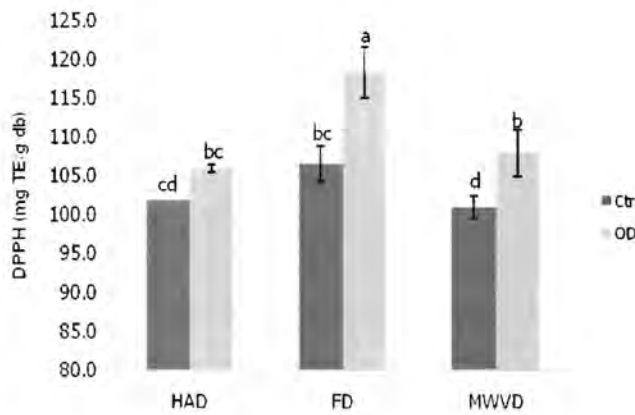
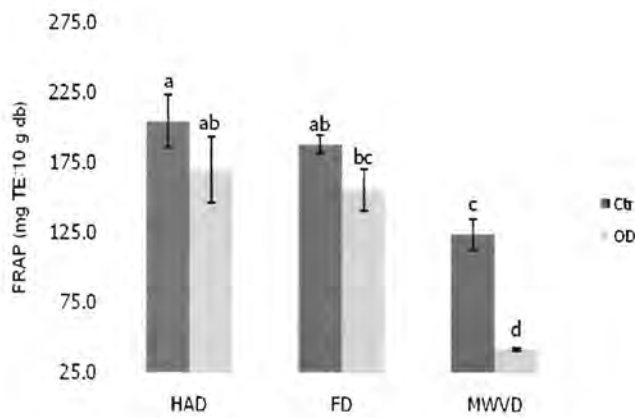
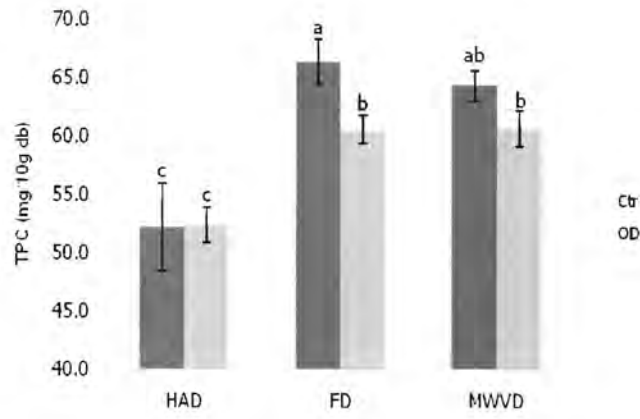
จากผลดังกล่าวจึงเลือกสภาวะการแช่อิ่มที่แช่ในสารละลายน้ำตาล 35% และกรดซิตริก 1% มาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยแปรวิธีการอบแห้ง โดยใช้ตู้อบลมร้อน การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง และการใช้ไมโครเวฟสุญญากาศ เพื่อศึกษาผลของการอบแห้งต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของมะม่วงอบแห้ง โดยผลการทดลองแสดงในภาพที่ 8-11



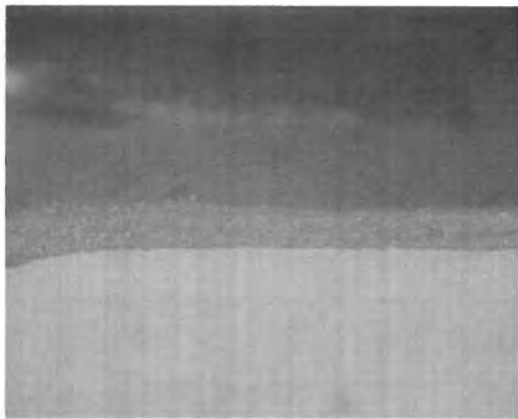
ภาพที่ 8 ค่าสีของผลิตภัณฑ์ที่จากวิธีหมักต่าง ๆ กัน (Ctr: ไม่แช่สารละลาย, OD: osmotic dehydration, HAD : Hot air drying, FD: Freeze drying, MWVD: Microwave vacuum drying)



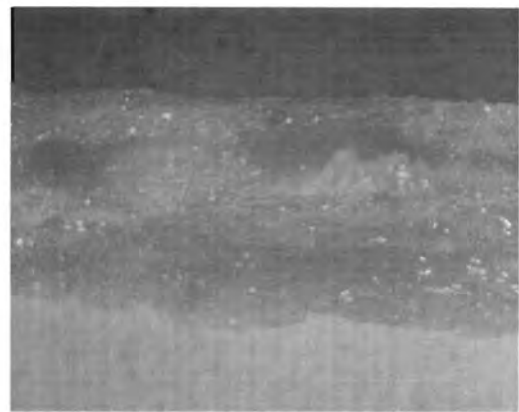
ภาพที่ 9 ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่จากวิธีหมักต่างๆ (Ctr: ไม่แช่สารละลาย, OD: osmotic dehydration, HAD : Hot air drying, FD: Freeze drying, MWVD: Microwave vacuum drying)



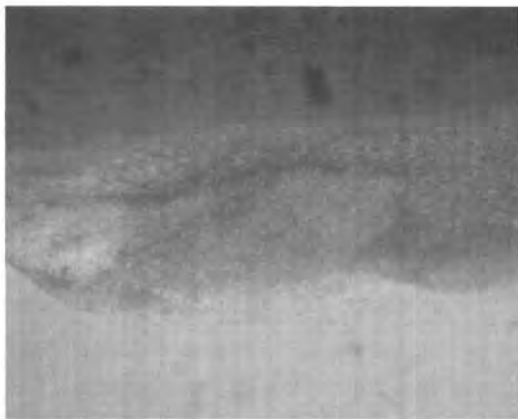
ภาพที่ 10 สมบัติการต้านอนุมูลอิสระของผลิตภัณฑ์จากทรีตเมนต์ต่างๆ กัน (Ctr: ไม่แช่สารละลาย, OD: osmotic dehydration, HAD : Hot air drying, FD: Freeze drying, MWVD: Microwave vacuum drying)



HAD - Ctr



HAD - OD



FD - Ctr



FD - OD



MWVD Ctr



MWVD OD

ภาพที่ 11 ภาพถ่ายโครงสร้างตัดขวางของสมบัติการต้านอนุมูลอิสระของผลิตภัณฑ์ที่จากทรีตเมนต์ต่างๆ กัน (Ctr: ไม่แช่สารละลาย, OD: osmotic dehydration, HAD : Hot air drying, FD: Freeze drying, MWVD: Microwave vacuum drying)

ผลของวิธีทำแห้งต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์แสดงให้เห็นว่า วิธีทำแห้งมีผลต่อค่า L^* และ a^* ของตัวอย่าง อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่ไม่มีผลต่อค่า b^* โดยตัวอย่างที่ทำแห้งแบบ FD มีค่าความสว่าง (L^*) สูงที่สุด รองลงมาคือตัวอย่างที่ทำแห้งด้วย MWVD และ HAD ตามลำดับ และโดยทั่วไปมะม่วงที่ทำแห้งแบบ HAD จะมีค่า a^* และ b^* สูงกว่าที่ทำแห้งด้วยวิธีอื่น อย่างไรก็ตามพบว่าการแช่อบไม่มีผลต่อค่าสี ยกเว้นตัวอย่างที่แช่อบแล้วทำแห้งแบบ MWVD ที่มีค่า a^* สูงกว่า control ($p \leq 0.05$)

การแช่อบและวิธีทำแห้งมีอิทธิพลต่อค่าลักษณะเนื้อสัมผัส โดยพบว่าการแช่อบแล้วทำแห้งแบบ FD และ MWVD ส่งผลให้ตัวอย่างมีค่า hardness และ cutting work สูงกว่า แต่มีค่า adhesiveness ต่ำกว่า control อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ HAD มีผลในทางกลับกันคือผลิตภัณฑ์จะนิ่มและเหนียว นอกจากนั้น MWVD ส่งผลให้ตัวอย่างมีเนื้อสัมผัสกรอบ ซึ่งแสดงเป็นค่าจำนวน peak ก่อนตัวอย่างแตก และจำนวน peak ทั้งหมดจากกราฟที่ได้จาก texture analyser โดยตัวอย่างแช่อบจะมีค่าดังกล่าวสูงกว่า control จากภาพถ่ายโครงสร้างตัดขวาง (ภาพที่ 12) จะเห็นได้ชัดเจนว่าตัวอย่างจากการอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศจะมีความเป็นรูพรุนสูง ส่งผลต่อความกรอบที่มาก ในขณะที่ตัวอย่างจากการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนนั้นจะแน่นและไม่มีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ที่ส่งผลต่อการพองตัวของผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์สมบัติการต้านออกซิเดชันจากค่า TPC, FRAP และ DPPH พบว่ากระบวนการแช่อบ และวิธีทำแห้งที่ต่างกัน ส่งผลให้ตัวอย่างมีค่าเหล่านั้นแตกต่างกัน ($p \leq 0.05$) ตัวอย่างที่ทำแห้งแบบ FD จะมีค่า TPC และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระที่สูงกว่าตัวอย่างที่ทำแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศตู้อบลมร้อน ($p \leq 0.05$) กระบวนการแช่อบส่งผลให้เกิดการสูญเสีย TPC และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมีค่าลดลง

กระบวนการทำแห้งมะม่วงด้วยไมโครเวฟสุญญากาศ อาจส่งผลเสียในกรณีที่ทำให้เกิดช่องว่างที่เป็นรูพรุนมากในตัวผลิตภัณฑ์ ซึ่งทำให้ออกซิเจนซึมผ่านเข้าไปในผลิตภัณฑ์ได้ง่ายจึงส่งผลต่อความเสถียรของสารต้านอนุมูลอิสระเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่วนการทำแห้งโดยตู้อบลมร้อนนั้นใช้อุณหภูมิถึง 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงจึงทำให้ปริมาณ TPC และฤทธิ์การต้านลดลง

กระบวนการอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศสามารถทำให้ผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งมีลักษณะพอง และมีความกรอบเหมือนกับผลิตภัณฑ์ทอด หรือ อบกรอบที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่ไมโครเวฟสุญญากาศใช้เวลาในการปฏิบัติสั้นน้อยกว่า 30 นาที ใช้อุณหภูมิไม่เกิน 45 องศาเซลเซียส สามารถทำให้ผลิตภัณฑ์ผลไม้อบแห้งมีลักษณะเหมือนขนมขบเคี้ยวที่ผ่านกระบวนการทอด และกระบวนการอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศยังคงรักษาคุณค่าทางด้านปริมาณสารประกอบฟีนอลิกใกล้เคียงกับการใช้การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง แม้ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระจะแตกต่าง ซึ่งฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบฟีนอลิก จึงต้องมีการศึกษาต่อไป

5. สรุปผลการทดลอง

5.1 ขนุนอบแห้ง

จากการศึกษาและเปรียบเทียบผลของการอบแห้งขนุนโดยใช้รูปแบบการอบแห้งแบบต่างๆ ได้แก่ การอบแห้งด้วยลมร้อนแบบขั้นตอนเดียว (อุณหภูมิลมร้อน 60 องศาเซลเซียส) การอบแห้งลมร้อนหลายขั้นตอน (อุณหภูมิลมร้อน 90, 70 และ 60 องศาเซลเซียส) และการอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศต่อสมบัติทางเคมีและกายภาพของขนุนแช่อิ่มอบแห้ง พบว่าแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของ Page สามารถทำนายลักษณะในการอบแห้งขนุนแช่อิ่มด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิต่างๆได้เหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากมีค่า r^2 สูงสุด และมีค่า RMSE ต่ำที่สุด

เมื่อทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของขนุนแช่อิ่มอบแห้งทั้ง 3 วิธีพบว่า ขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศที่กำลัง 960 วัตต์ เป็นเวลา 23 นาที มีค่าความชื้นและค่ากิจกรรมของน้ำต่ำสุด และให้ลักษณะเนื้อสัมผัส สี กลิ่น อีกทั้งสามารถคงรูปร่างได้ใกล้เคียงกับขนุนสดมากที่สุด เมื่อทำการประเมินการยอมรับทางประสาทสัมผัส ขนุนแช่อิ่มอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศมีคะแนนการยอมรับโดยรวมสูงกว่าขนุนแช่อิ่มอบแห้งแบบลมร้อนทั้ง 2 วิธี เนื่องมาจากการอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศ คลื่นไมโครเวฟทำให้น้ำระเหยเป็นไอได้อย่างรวดเร็ว ลดเวลาการอบแห้งและมีอุณหภูมิต่ำกว่าการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และการอบแห้งลมร้อนหลายขั้นตอน จึงส่งผลให้ลักษณะทางกายภาพมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลง

5.2 มะม่วงอบแห้ง

การทำแห้งด้วยวิธีออสโมซิสมีส่วนช่วยในการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ก่อนทำแห้ง ทำให้อัตราการทำแห้งเพิ่มขึ้น เวลาในการทำแห้งลดลง โดยสารละลายออสโมติกที่ใช้มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสีและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ และเมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการออสโมซิสไปอบแห้งพบว่าผลิตภัณฑ์มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีกว่าตัวอย่างควบคุม แต่ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระจะลดลง

การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งสามารถรักษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระไว้ได้ แต่การอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศจะส่งผลให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งใกล้เคียงกับขนมขบเคี้ยวที่มาจากกระบวนการทอด

5.3. ข้อเสนอแนะและประโยชน์ในการทางประยุกต์ของผลงานวิจัยที่ได้

กระบวนการอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศสามารถนำไปใช้แปรรูปผลไม้ที่มีสุกให้มีลักษณะทางกายภาพเหมือนกับขนมทอดกรอบเพื่อที่จะนำมาเป็นขนมขบเคี้ยวที่มีประโยชน์และคุณค่าทางอาหารสูง ทั้งยังให้กลิ่นรสที่ใกล้เคียงกับผลสดก่อนแปรรูป

6. บรรณานุกรม

1. กาญจนา เหลืองสุวาลัย, ประพนธ์ ปัญญาสร้างสรรค์ และ สุธิภรณ์ ศิริกำเลิศ. 2551. การเจริญเติบโตและพัฒนาของผลขนุนพันธุ์มาเลเซีย. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 39: 142-145.
2. จาตุพงศ์ วาฤทธิ และนราธิป สุจินดา. 2551. เครื่องอบแห้งไมโครเวฟ-สุญญากาศแบบถาดหมุน. งานวิจัยเด่น มหาวิทยาลัยแม่โจ้. [Online]. Available from: http://www.rdi.ku.ac.th/kasetresearch52/03-foods/Nantawan/food_00.html [2012, March 16].
3. จิราพร กอศิลาบุตร. 2549. ผลของน้ำตาลอินเวิร์ตต่อการทำแห้งและคุณภาพของแคนตาลูป *Cucumis melo* L. แห้งอบแห้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4. ขาสีดา บรมพิชัยชาติกุล. 2555. เทคโนโลยีการทำแห้งแบบผสมผสาน :การนำมาใช้เพื่อถนอมผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อน. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 35 2: 269-283.
5. ดวงจันทร์ เกรียงสุวรรณ. มารู้จักขนุนกันดีกว่า. [Online]. Available from: http://natres.psu.ac.th/radio/radio_article/radio43-44/43-440025.htm [2013, April 22].
6. ธัญวรรณ อยู่แก้ว. 2551. ผลของมอลโทเดกซ์ทรีนต่อการทำแห้งและคุณภาพของแคนตาลูปแช่อบแห้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
7. ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาสิก. 2532. กรรมวิธีการแปรรูปอาหาร. หน้า 278-279. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ โอเดียนสตาาร์.
8. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, สำนักงาน. 2532. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้แห้ง. มอก. 919-2532. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม.
9. วิจิตร วังไฉ. 2533. พันธุ์มะม่วง. ใน การทำสวนมะม่วง. หน้า 1-6. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ สำนักส่งเสริมและฝึกอบรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
10. วีรยา พรหมประเทศ. 2551. ผลของน้ำตาลอินเวิร์ตและการอบแห้งแบบสองขั้นตอนต่อคุณภาพของมะละกอ *Carica papaya* L. แห้งอบแห้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
11. สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) 2554. ระบบอบแห้งพลังงานสะอาดสำหรับผลิตภัณฑ์แปรรูป. [Online]. Available from :http://pr.trf.or.th/index.php?option=com_content&view=article&id=356%3A2011-02-08-03-14-15&catid=40%3A2010-06-10-02-37-47&Itemid=58 [2012, March 15].
12. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2550. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผลไม้แห้ง. มผช. 136/2550.

13. สำนักคุณภาพและความปลอดภัยอาหาร. ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในผักแห้งนำเข้า. กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. [Online]. Available from: <http://www.dmsc.moph.go.th/webroot/secretary/ Homepage/news49/august/7.html> [2013, April 22].
14. A.O.A.C. 1995. Official Methods of Analysis. 16th ed. Washington: The Association of Official Analytical Chemists.
15. Allali, H., Marchal, L. and Vorobiev, E. 2010. Effects of vacuum impregnation and ohmic heating with citric acid on the behaviour of osmotic dehydration and structural changes of apple fruit. Biosystems Engineering 106: 6-13.
16. Anese, M., Nicoli, C., Massini, R., and Lerici, R.C., 1999. Effects of drying processing on the associated phytochemical changes in Mangoes (*Mangifera indica*) following thermal quarantine and low-temperature storage. Journal of Food Science. 70: 337–341.
17. AOAC. 2006. Official Methods of Analysis. 18th ed. AOAC International, Maryland.
18. Arslan, D. and Özcan, M.M. 2011. Dehydration of red bell-pepper (*Capsicum annuum* L.): Change in drying behavior, colour and antioxidant content. Food and Bioproducts Processing. 89: 504-513.
19. Bennamoun L., 2011. Solar drying of waste water sludge. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 16: 1061-1073.
20. Benzie, I.F.F., and Strain, J.J. 1996. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": the FRAP assay. Analytical Biochemistry. 239:70-76.
21. Bilbao-Sainz, C., Andres, A., Chiralt, A., and Fito, P. 2006. Microwave phenomena during drying of apple cylinders. Journal of Food Engineering. 74: 160-167.
22. Bondaruk, J., Markowski, M., Blaszczyk, W., 2007. Effect of drying conditions on the quality of vacuum-microwave dried potato cubes. Journal of Food Engineering. 81: 164-175.
23. Brand-Williams, W., Cuvelier, M.E., and Berset, C. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie. 28: 25–30.
24. Branen, A.L., Davidson, P.M., Salminen, S., 1989. Food Additives. p.938. New York. Marcel Dekker.
25. Carrillo-Lopez, A., Ramirez-Bustamante, F., Valdez-Torres, J.B., Rojas-Villegas, R. and Yahia, E.M. 2000. Ripening and quality changes in mango fruit as affected by coating with an edible film. Journal of Food Quality. 23(5): 479-486.
26. Clarke, P.T. 2004. Refractance Window™-“Down Under”. In Proceedings of the 14th International Drying Symposium, Vol. B. pp. 813-820. São Paulo City, Brazil.

27. Decareau, R.V., 1985. Microwave in the Food Processing Industry. p.234. New York. Academic Press Inc.
28. Drouzas, A.E., Schubert, H., 1996. Microwave application in vacuum drying of fruits. Journal Food Engineering. 28:203-209.
29. Durance, T.D., Wang, J.H. and Meyer, R.S. 1999. Processing for drying mango and pineapples. US Patent No. 5 962 057.
30. Erle, U. and Schubert, H. 2001. Combined osmotic and microwave-vacuum dehydration of apples and strawberries. Journal of Food Engineering. 49: 193-199.
31. Eskin, N.A.M., Henderson, H.M. and Townsend, R.I. 1971. Biochemistry of food. New York: Academic Press.
32. Falade, K.O., Igbeka, J.C. and Ayanwuyi, F.A. 2007. Kinetic of mass transfer, and colour changes during osmotic dehydration of watermelon. Journal of Food Engineering 80: 979-985.
33. Figiel, A., 2010. Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods. Journal of Food Engineering. 98(4): 461-470.
34. Gökmen, V., Kahraman, N., Demir, N., Acar, J., 2000. Enzymatically validated liquid chromatographic method for the determination of ascorbic and dehydroascorbic acids in fruit and vegetables. Journal of Chromatography A. 881: 309-316.
35. Gunasekaran, S., 1999. Pulsed microwave-vacuum drying of food materials. Drying Technology. 17(3): 395-412.
36. Ilker, R. and Szczesniak, A.S. 1990. Structural and chemical bases for texture of plant foodstuffs. Journal of Texture Studies. 21: 1-36.
37. Irfan, P.K., Vanjakshi, V., Prakash, K.M.N., Ravi, R., Kudachikar, V.B., 2013. Calcium chloride extends the keeping quality of fig fruit (*Ficus carica* L.) during storage and shelf-life. Postharvest Biology and Technology. 82: 70-75.
38. Jiang, Y., Pen, L., Li, J., 2004. Use of citric acid for shelf life and quality maintenance of fresh-cut Chinese water chestnut. Food Engineering. 63: 325-328.
39. Kowalska, H., Lenart, A., Leszczyk, D., 2008. The effect of blanching and freezing on osmotic dehydration of pumpkin. Journal of Food Engineering. 86: 30-38.
40. Leick, S., Henning, S., Degen, P., Suter, D., Rehage, H., 2010. Deformation of liquid-filled calcium alginate capsules in a spinning drop apparatus. Physical Chemistry Chemical Physics. 12: 2950-2958.

41. Lenart, A., 1996. Osmo-Convective drying of Fruits and Vegetables: Technology and application. Drying Technology. 14 (2): 391-413.
42. Lewis, W.K., 1921. The rate of drying solid materials. Journal of Industrial Engineering. 13: 427-443.
43. Lin *et al.*, 1998. Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices. Food research international. 31: 111-117.
44. Luna-Guzman, I., Cantwell, M., Barrett, M.D., 1999. Fresh-cut cantaloupes: Effect of CaCl₂ dips and heat treatments on firmness and metabolic activity. Postharvest Biology and Technology. 17: 201-213.
45. Mossel, D.A.A., 1975. Water relation of foods. London. Academic Press Inc.
46. Mujumdar, A.S. 1997. Drying fundamentals. In C.G.J. Baker, (Ed.), Industrial Drying of Foods. pp.7-30. London: Chapman & Hall.
47. Mujumdar, A.S., 2007. Handbook of Industrial Drying. 3rd ed. CRC Press Taylor & Francis Group.
48. Ochoa-Martinez, 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: 69-75.
49. Ozdemir, M., Devres, O.Y., 1999. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. Journal of Food Engineering. 42: 225-233.
50. Ozkan, A., Akbudak B., Akbudak N., 2007. Microwave drying characteristics of spinach. Journal of Food Engineering, 78: 577-583.
51. Park, C.R. and Lee, K.J. 1975. A study on influence of drying methods upon the chemical changes in red pepper. Part 2. Changes of free amino acid, free sugar. Korean Journal of Nutrition. 8: 33-37.
52. Ponting, J. D., Watters, G. G., Forrey, R. R., Jackson, R., and Stanley, W.L., 1966. Osmotic dehydration of fruits. Food Technology. 20:125-128.
53. Pott, I., Neidhart, S., Mühlbauer, W. and Carle, R. 2005. Quality improvement of non sulphited mango slices by drying at high temperatures. Innovative Food Science & Emerging Technology. 6: 412-419.
54. Pott, I., Neidhart, S., Mühlbauer, W., and Carle, R. 2005. Quality improvement of non-sulphited mango slices by drying at high temperatures. Innovative Food Science & Emerging Technology. 6: 412-419.

55. Raghavan, G.S.V., Rennie, T.J., Sunjka, P.S., Orsat, V., Phaphuangwittayakul, W., Terdtoon, P., 2005. Overview of new techniques for drying biological materials with emphasis on energy aspects. Brazilian Journal of Chemical Engineering. 22: 195-201.
56. Raoult-Wack, A.L. 1994. Recent advances in the osmotic dehydration of food. Trends in Food Science and Technology. 5: 255-260.
57. Rastogi, N.K., Nguyen, T.L., Balasubramaniam, V.M., 2008. Effect of pretreatments on carrot texture after thermal and pressure-assisted thermal processing. Food Engineering. 88: 541-547.
58. Sogi, D.S., Siddiq, M., Greiby, I., and Dolan, K.D. 2013. Total phenolics, antioxidant activity, and functional properties of 'Tommy Atkins' mango peel and kernel as affected by drying methods. Food Chemistry. 141: 2649-2655.
59. Talcott, S.T., Moore, J.P., Lounds-Singleton, A.J. and Percival, S.S. 2005. Ripening Maillard reaction in pasta. Food Research International. 32: 193-199.
60. Telis, V.R.N. and Telis-Romero, J. 2007. Freezing point and thermal conductivity of tropical fruit pulps: mango and papaya. International Journal of Food Properties. 10: 73-84.
61. Therdthai, N. and Zhou, W., 2009. Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves. Journal of Food Engineering. 91(3): 482-489.
62. Titiprasert, V., Chintanawong, S., Chaichakan, M. and Lee-Angoonsathian, N. 2001. Plant Germplasm Database for Mango. Plant Variety Protection Office Department of Agriculture, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok. 142 p. (in Thai language).
63. Torreggiani, D. and Bertolo, G. 2001. Osmotic pre-treatments in fruit processing: chemical, physical and structural effects. Journal of Food Engineering. 49: 247-253.
64. Torres, J.D., Talens, P., Carot, J.M., Chiralt, A. and Escriche, I. 2007. Volatile profile of mango (*Mangifera indica* L.), as affected by osmotic dehydration. Food Chemistry. 101: 219-228.
65. US Department of Agriculture (USDA). (2012). Mangoes: U.S. import-eligible countries; world production and exports [WWW page]. URL <http://www.ers.usda.gov/data-products.aspx> Accessed on 9th January 2014.
66. Variith, J., Dijkanarukkul, P., Achariyaviriya, A., Achariyaviriya, S., 2007. Combined microwave hot air drying of peeled longan. Journal of Food Engineering. 81: 459-466.
67. Waterhouse, A. L. 2005. Determination of total phenolics. In R. E. Wrolstad, T. E. Acree, E. A. Decker, M. H. Penner, D. S. Reid, S. J. Schwartz, C. F. Shoemaker, D. Smith, and P. Sporns (Eds.), Handbook of food analytical chemistry: Pigments, colorants,

- flavors, texture, and bioactive food components (pp. 463–470). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
68. Yadav, A.K. and S.V. Singh. 2012. Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review. Journal of Food Science and Technology. DOI: 10.1007/s13197-012-0659-2.
 69. Yongsawatdigul, J., Gunasekaran, S., 1996. Microwave-vacuum-drying of cranberries: Part I: Energy use and efficiency. Part II: Quality evaluation. Journal of Food Processing & Preservation. 20: 121-156.
 70. Zhang, M., Li, C. L. and Ding, X. L. 2005. Effects of heating conditions on the thermal denaturation of white mushroom suitable for dehydration. Drying Technology. 23: 1119-1125.
 71. Zhang, M., Li, C.L. and Ding, X.L. 2003. Optimization for preservation of selenium in sweet pepper under low-vacuum dehydration. Drying Technology. 21: 569-579.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมี-กายภาพ

ภาคผนวก ข

ผลงานที่เผยแพร่

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการทางเคมี-กายภาพ

ก.1 การวัดความชื้นของขนุน (AOAC, 1995)

วิธีการวิเคราะห์

1. เตรียมตัวอย่าง โดยตัดตัวอย่างขนุนสด ขนุนที่ผ่านการออสโมซิส และผลิตภัณฑ์ขนุนแช่แข็งที่ผ่านกระบวนการอบแห้งต่างสภาวะ ให้เป็นชิ้นละเอียด
2. ชั่งตัวอย่างให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 2-5 กรัม (เทคนิค 3 ตำแหน่ง) ใส่ในภาชนะอะลูมิเนียม ซึ่งอบและทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว โดยทำตัวอย่างละ 3 ซ้ำ
3. นำตัวอย่างเข้าอบในตู้อบโดยควบคุมอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
4. นำภาชนะอะลูมิเนียมออกจากตู้อบใส่ใน โถดูดความชื้น 30 นาที เพื่อบริเวณให้เย็น
5. ชั่งน้ำหนัก และทำซ้ำจนกระทั่งน้ำหนักคงที่

การคำนวณ

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}}$$

ก.2 การตรวจหาปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solids)

วิธีการวิเคราะห์

นำตัวอย่างขนุนสดไปปั่นละเอียด กรองด้วยผ้าขาวบาง นำน้ำขนุนที่ได้ไปวัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ด้วย Hand refractometer (Atago model 2210-w06, Tokyo, Japan)

ก.3 การวัดค่ากิจกรรมของน้ำ (Water activity)

วิธีการวิเคราะห์

1. เปิดเครื่องวัดค่า Water activity ทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที ก่อนการใช้งาน
2. ใส่ตลับที่มีน้ำกลั่นเข้าไป เพื่อทำการ calibrate
3. ใส่ตัวอย่างที่ตัดเป็นชิ้นลงในตลับสำหรับวัดค่ากิจกรรมของน้ำให้เต็มผิวหน้า ระดับความสูงประมาณ 1/3 ของตลับ

ก.4 การวัดสีในระบบ CIE L^* a^* b^*

วิธีการวิเคราะห์

นำตัวอย่างมาวัดค่า L^* , a^* และ b^* ด้วยเครื่อง colorimeter (Chroma Meter CR-300, Minolta Co., Osaka, Japan) แหล่งกำเนิดแสง D65 มุมการมอง 10 องศา

การใช้เครื่อง

1. เลื่อนสวิทช์ POWER ON พร้อมกับกดปุ่ม ALL DATA CLEAR
2. กดปุ่ม index set
3. กดปุ่ม (C) ทุกครั้ง
4. เลือกแหล่งแสงCหรือD65 โดยกดปุ่ม → หรือ ← แล้วกดปุ่ม ENTER
5. กดปุ่มcalibrate เพื่อป้อนค่าสีตามแหล่งแสงที่เลือกไว้ในข้อ 4 ตามแผ่นcalibrate
6. เติมน้ำกลั่นลงใน sample cell จนถึงเส้นขาว
7. กดปุ่ม measure แล้วรอจนเกิดการ reflect ครบ3ซ้ำ
8. กดปุ่ม color space select เพื่อเลือกระบบสีที่ต้องการคือ L^* , a^* และ b^*
9. นำตัวอย่างที่ต้องการมาวัด กดปุ่ม measure
10. ถ้าต้องการวิเคราะห์ทางสถิติให้กดปุ่มSTAT เครื่องจะแสดงค่า max, min, mean และ SD

การคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ตามวิธีของ Hunt (1998))

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2}$$

โดยที่

ΔE_{ab}^* คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงสี

L_1^* คือ ค่าความสว่างของขนุนสด

L_2^* คือ ค่าความสว่างของขนุนอบแห้งที่สภาวะต่างๆ

a_1^* คือ ค่าความเขียว-แดงของขนุนสด

a_2^* คือ ค่าความเขียว-แดงของขนุนอบแห้งที่สภาวะต่างๆ

b_1^* คือ ค่าความน้ำเงิน-เหลืองของขนุนสด

b_2^* คือ ค่าความน้ำเงิน-เหลืองของขนุนอบแห้งที่สภาวะต่างๆ

ก.5 การวัดค่าความแข็ง (Hardness)

วิธีการใช้เครื่อง Texture Analyzer (Stable Micro System Model TA.XT2i, Godalming, UK)

1. เตรียมตัวอย่างขนุนที่จะนำมาวิเคราะห์ โดยคัดเลือกตัวอย่างชิ้นขนุนขนาด 3x4 ตารางเซนติเมตร
2. เข้าสู่โปรแกรม Exponential lite express
3. เลือก TA -> Calibrate -> Calibrate force -> next -> วางตุ้มน้ำหนักขนาด 1000 กรัม ลงไป กด complete แล้วเครื่องจะทำการ calibrate เมื่อเสร็จเรียบร้อยกด next
4. ทำการ calibrate probe โดยจัดวางเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ อันดับแรกติดตั้งฐาน แล้วใส่ใบมีด (ในการวิเคราะห์ค่าแรงที่ใช้ในการตัด จะใช้ใบมีดหัวตัด) ให้กดลงมาพอดีกับร่องของฐาน แล้วจึง ล็อกฐานให้แน่น
5. เลือกเมนู TA -> Calibrate -> Calibrate high ตั้งค่าที่ต้องการใช้

1. ช่องแรก 20 mm
2. ช่องสอง 10 mm
3. ช่องสาม 10 mm

นำเหล็กแผ่นเรียบมารองใต้ฐานที่ติดตั้งไว้ เพื่อกำหนดระดับในการกดของใบมีด แล้วกด Calibrate

6. เลือกเมนู TA -> TA setting -> เลือกโหมด Library -> เลือก return to start เพื่อให้ใบมีดกลับมาที่เดิมหลังกดตัวอย่างเสร็จ หลังจากนั้นเลือกโหมด Comp
 - Test mode : compression
 - Pretest speed : 1 mm/s
 - Test speed : 2 mm/s
 - Target mode : distance
 - Distance : 30 mm
 - Trigger type : Auto (Force)
 - Trigger force : 5 g
 - Advance option : Off

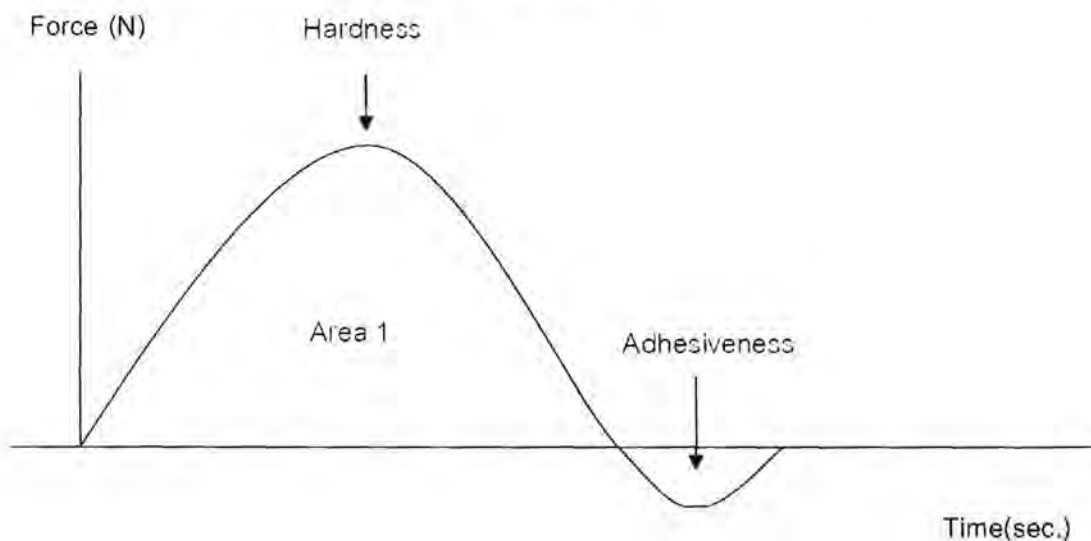
7. เลือกเมนู TA -> Run a test -> Probe -> เลือก probe ที่ใช้ในการตัด (ในการวิเคราะห์เลือกใช้ HDP/BSK : Blade set with knife) -> เลือก auto save เพื่อให้ save กราฟ ที่ได้ -> Apply เครื่องจะทำการตัดตัวอย่าง และแสดงค่าออกมาเป็นกราฟ
8. เลือก peak ที่สูงสุดในกราฟนั้น เพื่อเป็นค่าแรงที่ใช้ในการตัด

การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของมะม่วง

วัดลักษณะเนื้อสัมผัสของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ด้วย texture analyzer และ HDP/BSK blade cutter โดยกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้

Pre-test speed:	2.0 มิลลิเมตร/วินาที.
Test-speed:	2.0 มิลลิเมตร/วินาที
Post-test speed:	10 มิลลิเมตร/วินาที
Distance:	15 มิลลิเมตร

หาค่า hardness จาก peak force ของกราฟ คำนวณค่า cutting work จากพื้นที่ใต้กราฟ Area 1 และค่า adhesiveness จากพื้นที่ใต้กราฟส่วนที่เป็นลบ (ภาพที่ ก.1)



ภาพที่ ก.1 ตัวอย่างลักษณะกราฟจากเครื่อง texture analyser ซึ่งวัดด้วยหัววัด HDP/BSK blade cutter

ก.6 การวัดค่ากลิ่น E-nose

วิธีวิเคราะห์

1. เตรียมตัวอย่างโดยการตัดขนุนให้ละเอียด ใส่ลงในขวดแก้วที่ใช้วัดกลิ่น ทำซ้ำตัวอย่างละ 10 ซ้ำ แต่ละซ้ำมีน้ำหนักประมาณ 7.000 ± 0.005 กรัม
2. ใช้โปรแกรม ENose.exe ในการวิเคราะห์ค่า
3. นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่ากลิ่นของขนุนสด

ก.7 การวิเคราะห์ปริมาณ total phenolics ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu แบบ microscale (Waterhouse, 2005)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

spectrophotometer (Thermo Spectronic, รุ่น GENESYS 10 UV)

สารเคมี

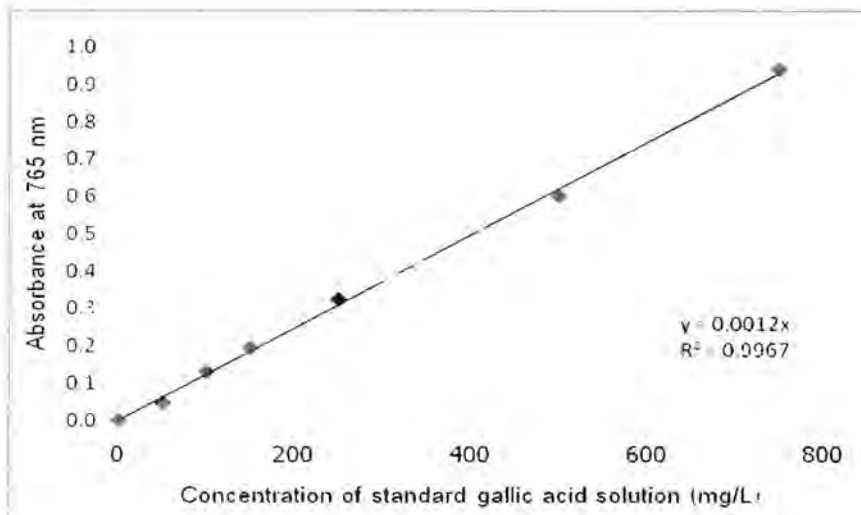
- gallic acid (Fluka, Spain)
- sodium carbonate (A.R. grade, Ajax Finechem, Australia)
- Folin-Ciocalteu reagent (Carlo Erba, France)
- ethanol 95% (A.R. grade, QRēC, New Zealand)

วิธีเตรียมสารละลาย sodium carbonate อิมตัว

ละลาย sodium carbonate 200 กรัม ในน้ำ 800 ml นำไปต้มจนเดือด แล้วทิ้งให้เย็น จากนั้นเติมผลึกของ sodium carbonate ลงไปเล็กน้อย ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 1 °C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองสารละลายที่ได้ผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 นำสารละลายที่ได้มาปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตรด้วยน้ำกลั่น

วิธีเตรียมสารละลายมาตรฐาน gallic acid และการสร้างกราฟมาตรฐาน

1. ละลาย gallic acid 0.500 g ใน ethanol 10 ml แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 100 ml ด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายของ gallic acid ที่มีความเข้มข้น 5 g/l
2. ปิเปตสารละลายของ gallic acid ที่เตรียมไว้ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 ml ในปริมาณต่างๆ ดังนี้ 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 และ 5.0 ml จากนั้นปรับปริมาตรให้ถึงขีดบอกปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลาย gallic acid ที่มีความเข้มข้น 0, 50, 100, 150, 250, 500 และ 750 mg/l ตามลำดับ
3. ปิเปตสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 100 μ l ใส่ในขวดปรับปริมาตร 10 ml เติมน้ำกลั่น 7 ml และ Folic-Ciocalteu reagent 500 μ l ทิ้งไว้ 1-8 นาที
4. เติมสารละลาย sodium carbonate 1.5 ml และปรับปริมาตรให้ถึงขีดด้วยน้ำกลั่น
5. เขย่าผสมสารละลายทั้งหมด บ่มทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง
6. วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 nm
7. สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน gallic acid (แกน x) กับค่าการดูดกลืนแสง (แกน y)



ภาพที่ ก.2 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในรูปของกรดแกลลิก

วิธีวิเคราะห์

1. ปิเปตสารสกัดปริมาตร 100 μ l ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 ml
2. เติมน้ำกลั่น 7 ml และ Folin-Ciocalteu reagent 500 μ l ทิ้งไว้ 1-8 นาที
3. ปิเปตสารละลาย sodium carbonate ปริมาตร 1.5 ml
4. เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร เขย่าแล้วบ่มทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง
5. วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 nm เทียบกับค่าดังกล่าวของกราฟมาตรฐานของสาร gallic acid แล้วคำนวณปริมาณ total phenolics รายงานเป็น g gallic acid/100g db

ก.8 การวิเคราะห์สมบัติการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี ferric reducing antioxidant power (FRAP) (ดัดแปลงจาก Benzie และ Strain, 1996)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

spectrophotometer (Thermo Spectronic, รุ่น GENESYS 10 UV)

สารเคมี

- Trolox (Fluka, Denmark)
- sodium acetate trihydrate (A.R. grade, QR \acute{e} c, New Zealand)
- tripyridyltriazine (TPTZ) (Fluka, Switzerland)
- ferric chloride (QR \acute{e} c, New Zealand)
- glacial acetic acid (A.R. grade, QR \acute{e} c, New Zealand)
- HCl 0.1 M (A.R. grade, J.T. Baker, Neutrasorb, USA)
- methanol 99.9% (A.R. grade, Fisher Scientific, UK)

วิธีเตรียมสารละลาย FRAP

1. เตรียมสารละลาย acetate buffer pH 3.6 โดยผสม sodium acetate trihydrate 0.3 g และ glacial acetic acid ปริมาตร 1.6 ml แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 ml ด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 ml
2. เตรียมสารละลาย ferric chloride โดยละลาย ferric chloride 270 mg ในน้ำกลั่นปริมาตร 50 ml ในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 ml
3. เตรียมสารละลาย TPTZ โดยชั่งน้ำหนัก 31.2 mg ละลายใน HCl 0.04 M เติงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 ml และเติม HCl 0.04 M จนถึงขีดบอกปริมาตร
4. เตรียมสารละลาย FRAP โดยผสม acetate buffer 25 ml, ferric chloride 2.5 ml และ TPTZ 2.5 ml ตามลำดับ

วิธีเตรียมสารละลายมาตรฐาน Trolox

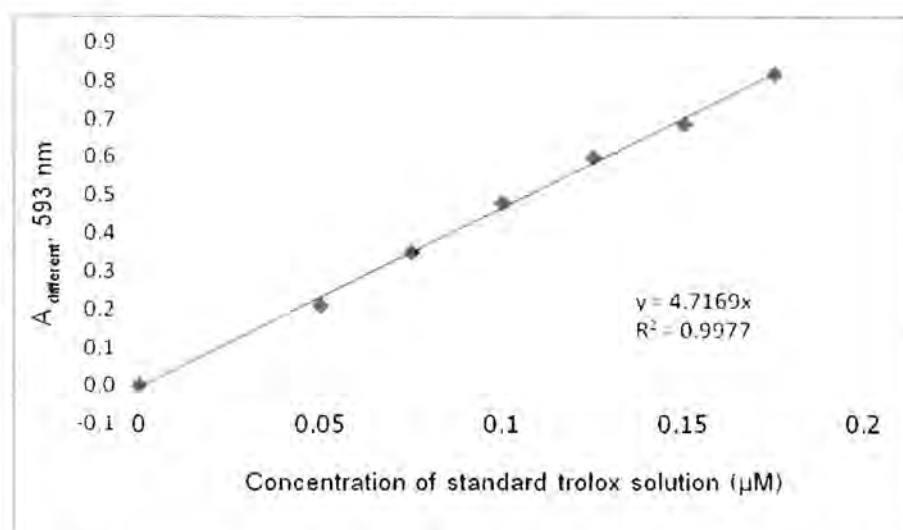
เตรียมสารละลายมาตรฐาน Trolox ที่ความเข้มข้น 0, 0.050, 0.075, 0.100, 0.125, 0.150 และ 0.175 μM

วิธีวิเคราะห์

1. นำสารละลาย FRAP มาให้ความร้อนที่ 37°C ใน water bath นาน 30 นาที ซึ่งจะได้สารละลายสีน้ำตาลอมส้ม
2. ปิเปตสารละลายมาตรฐานหรือตัวอย่างสารสกัด 400 μl ผสมกับสารละลาย FRAP 4 ml ในหลอดทดลอง ให้ความร้อนที่ 37°C ใน water bath นาน 30 นาที
3. วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 nm โดยใช้ น้ำกลั่น ในการปรับค่าการดูดกลืนแสงเป็น 0 (set blank) ซึ่งสีของตัวอย่างจะเปลี่ยนจากสีน้ำตาลอมส้มไปเป็นสีม่วง
4. นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากตัวอย่าง (A_{final}) มาหักลบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย FRAP (A_{initial}) จะได้เป็นผลต่างของค่าการดูดกลืนแสง (A_{diff})

$$A_{\text{diff}} = A_{\text{final}} - A_{\text{initial}}$$

5. นำ A_{diff} ที่ได้จากตัวอย่างไปคำนวณหาสมบัติการต้านออกซิเดชันโดยเทียบกับ A_{diff} ของกราฟมาตรฐานของ Trolox (ภาพที่ ก.3) รายงานค่าเป็น $\mu\text{g Trolox}/100 \text{ g db}$



ภาพที่ ก.3 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์สมบัติการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี FRAP

ก.9 การวิเคราะห์สมบัติการต้านออกซิเดชันด้วย 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) assay ดัดแปลงจาก Brand-Williams และคณะ (1995)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

spectrophotometer (Thermo Spectronic, รุ่น GENESYS 10 UV)

สารเคมี

- 6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid (Trolox) (Fluka, Denmark)
- 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) (Fluka, USA)
- methanol 99.9% (A.R. grade, Fisher Scientific, UK)

วิธีเตรียมสารละลาย DPPH

1. เตรียม stock solution โดยชั่ง DPPH มา 0.24 g ละลายใน methanol เติงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 ml และปรับปริมาตรด้วย methanol
2. ผสม stock solution 1 ส่วน กับ เมทานอลความเข้มข้น 80% 33 ส่วน ทดลองวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 nm (A_{initial}) จนมีค่า 1.1 ± 0.02 หากค่าการดูดกลืนแสงมากหรือน้อยกว่า ให้ปรับค่าด้วย methanol 80% หรือ stock solution

วิธีการเตรียมสารละลายมาตรฐาน Trolox

เตรียมสารละลายมาตรฐาน Trolox ให้มีความเข้มข้น ดังนี้

ความเข้มข้นของสารละลาย Trolox (ไมโครโมลาร์)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร
control	0.563
82	0.051
123	0.068

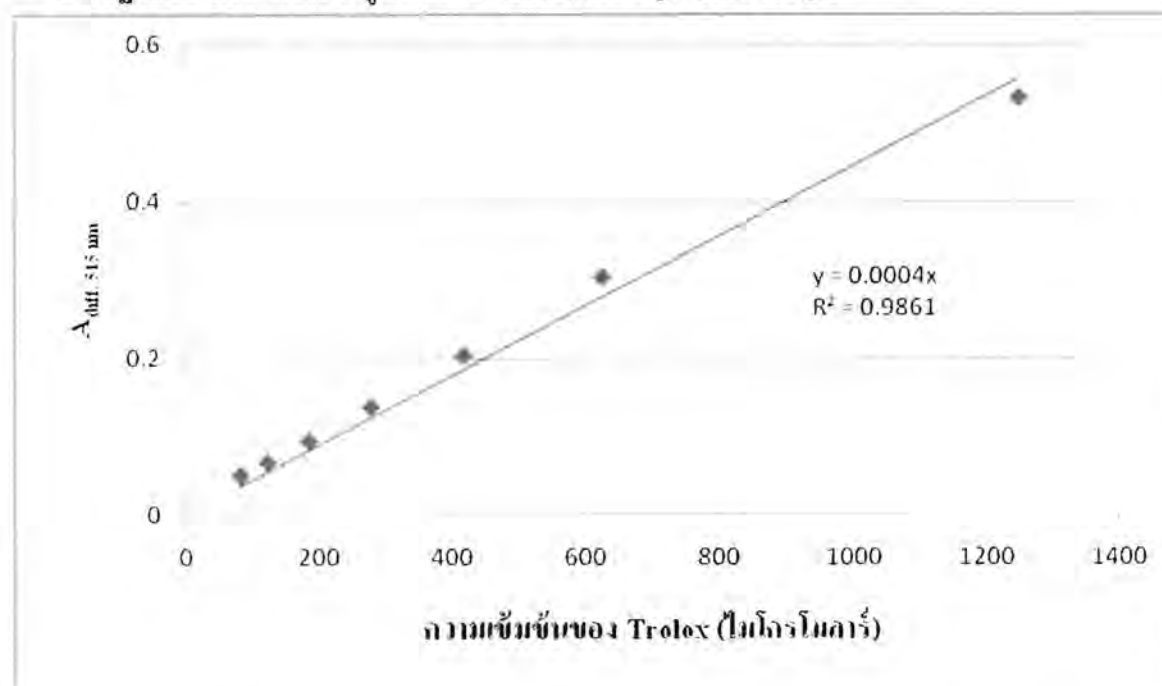
ความเข้มข้นของสารละลาย Trolox (ไมโครโมลาร์)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร
185	0.095
278	0.139
417	0.204
625	0.304
1250	0.531

วิธีวิเคราะห์และสร้างกราฟมาตรฐานของ Trolox

1. ปิเปตสารละลาย Trolox หรือตัวอย่างสารสกัด 0.6 ml ผสมกับสารละลาย DPPH 3.0 ml ในหลอดทดลอง เขย่าและทิ้งไว้ในที่มืด ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที
2. วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 nm โดยใช้ methanol 80% ในการปรับค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0 (set blank) ซึ่งสีของตัวอย่างจะเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีเหลือง
3. นำค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย DPPH ($A_{initial}$) มาหักลบออกด้วยค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากตัวอย่างได้เป็นผลต่างของค่าการดูดกลืนแสง (A_{diff})

$$A_{diff} = A_{initial} - A_{final}$$

4. นำ A_{diff} ที่ได้จากตัวอย่างไปคำนวณหาค่าสมบัติการต้านออกซิเดชันโดยเทียบกับ A_{diff} ของกราฟมาตรฐานของสาร Trolox (รูปที่ ก.4) รายงานค่าเป็น g Trolox/100 g db



ภาพที่ ก.4 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์สมบัติการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH

ก.10 ผลการประเมินการยอมรับทางประสาทสัมผัสวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม SPSS

รหัสการทดสอบ _____

วันที่ _____

ชนิดตัวอย่าง _____

ชื่อ _____

กรุณابอกความพอใจต่อลักษณะต่างๆของผลิตภัณฑ์ขนุนแช่อิ่มอบแห้ง

1. สีที่ผิว

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ชอบมาก	ชอบปานกลาง		ชอบเล็กน้อย	เฉยๆ	ไม่ชอบเล็กน้อย		ไม่ชอบ
ปานกลาง	ไม่ชอบมาก						

2. กลิ่นรส

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ชอบมาก	ชอบปานกลาง		ชอบเล็กน้อย	เฉยๆ	ไม่ชอบเล็กน้อย		ไม่ชอบ
ปานกลาง	ไม่ชอบมาก						

3. รสชาติโดยรวม

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ชอบมาก	ชอบปานกลาง		ชอบเล็กน้อย	เฉยๆ	ไม่ชอบเล็กน้อย		ไม่ชอบ
ปานกลาง	ไม่ชอบมาก						

4. เนื้อสัมผัส

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ชอบมาก	ชอบปานกลาง		ชอบเล็กน้อย	เฉยๆ	ไม่ชอบเล็กน้อย		ไม่ชอบ
ปานกลาง	ไม่ชอบมาก						

5. ความชอบโดยรวม

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ชอบมาก	ชอบปานกลาง		ชอบเล็กน้อย	เฉยๆ	ไม่ชอบเล็กน้อย		ไม่ชอบ
ปานกลาง	ไม่ชอบมาก						

ข้อเสนอแนะ

.....

.....

ภาคผนวก ข

ผลงานที่เผยแพร่

1. J. Srinang, N. Chatasuwankul and C. Borompichaichartkul (2013) Effects of drying methods on chemical and physical properties of osmotically dehydrated jackfruit. Proceedings of The 2nd Southeast Asia Symposium on Quality Management in Postharvest Systems (SEAsia 2013), 4-6 December 2013, Vientiane, Lao PDR.

ประวัตินักวิจัย

1. ชื่อ ดร.ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล
Dr Chaleeda Borompichaichartkul
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3-5299-00216-41-5
3. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ A-4
4. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก
ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
โทรศัพท์ 02-218-5518
โทรศัพท์มือถือ 089-855-6515
โทรสาร 02-254-4314
E-mail : chaleeda.b@chula.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

มหาวิทยาลัย	ปริญญา	สาขา	ปีที่ได้รับ
University of New South Wales	ตรี	Food Science and Technology	2543
University of New South Wales	เอก	Food Science and Technology	2547

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

- สมบัติในเชิงความร้อนของอาหาร
- เทคโนโลยีการทำแห้ง
- Moisture sorption isotherms ของอาหาร
- การขึ้นรูปฟิล์มและการทำไมโครแคปซูล

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

7.1 หัวหน้าโครงการวิจัย :

- งานวิจัยเรื่อง “ผลของวิธีการอบแห้งต่อสารให้กลิ่นรสในข้าวหอมดอกมะลิ” ทุนวิจัย รัชดาภิเษกสมโภช พัฒนาอาจารย์ใหม่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ระยะเวลาดำเนินการ ตุลาคม พ.ศ. 2548 – กันยายน พ.ศ. 2550
- งานวิจัยเรื่อง “การปรับปรุงกระบวนการอบแห้งแมคคาเดเมียโดยใช้กระบวนการอบแห้งแบบหลายขั้นตอน” ทุนวิจัยพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว) ระยะเวลาดำเนินการ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2550 – 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2552

- งานวิจัยเรื่อง “การพัฒนากระบวนการแปรรูปแมคคาเดเมียหลังการเก็บเกี่ยวและผลิตภัณฑ์อันเกี่ยวเนื่อง” ทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ระยะเวลาดำเนินการตั้งแต่วันที่ 8 สิงหาคม พ.ศ. 2550 – 7 สิงหาคม พ.ศ. 2551
- งานวิจัยเรื่อง “ผลของวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิในการอบแห้ง และปริมาณแอมิโลสต่อคุณภาพการสีของข้าวไทย” ทุนวิจัยจากศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ระยะเวลาดำเนินการ 1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2551 – 31 ตุลาคม พ.ศ. 2552
- งานวิจัยเรื่อง “การผลิตผงบุกคุณภาพสูงและการนำไปใช้” ทุนวิจัยโครงการวิจัยพื้นฐานเชิงยุทธศาสตร์สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว) ระยะเวลาดำเนินการตั้งแต่วันที่ 1 พฤษภาคม 2553 – 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2555
- งานวิจัยเรื่อง “ฟิล์มย่อยสลายได้ที่มีหน้าที่เฉพาะจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ” ทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช) ระยะเวลาดำเนินการตั้งแต่วันที่ 14 สิงหาคม 2555 – 15 พฤษภาคม พ.ศ. 2557
- งานวิจัยเรื่อง “ผลของกระบวนการอบแห้งต่อคุณภาพของขนมขบเคี้ยวจากผลไม้” ทุนวิจัยทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาล ประจำปีงบประมาณ 2556 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช) ระยะเวลาดำเนินการตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2555 – 31 มีนาคม พ.ศ. 2557

7.2 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว :

- งานวิจัยเรื่อง “ผลของวิธีการอบแห้งต่อสารให้กลิ่นรสในข้าวหอมดอกมะลิ” ทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช พัฒนาอาจารย์ใหม่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ระยะเวลาดำเนินการ ตุลาคม พ.ศ. 2548 – กันยายน พ.ศ. 2550
- งานวิจัยเรื่อง “การปรับปรุงกระบวนการอบแห้งแมคคาเดเมียโดยใช้กระบวนการอบแห้งแบบหลายขั้นตอน” ทุนวิจัยพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว) ระยะเวลาดำเนินการ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2550 – 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2552
- งานวิจัยเรื่อง “การพัฒนากระบวนการแปรรูปแมคคาเดเมียหลังการเก็บเกี่ยวและผลิตภัณฑ์อันเกี่ยวเนื่อง” ทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ระยะเวลาดำเนินการตั้งแต่วันที่ 8 สิงหาคม พ.ศ. 2550 – 7 สิงหาคม พ.ศ. 2551
- งานวิจัยเรื่อง “ผลของวิธีการอบแห้ง อุณหภูมิในการอบแห้ง และปริมาณแอมิโลสต่อคุณภาพการสีของข้าวไทย” ทุนวิจัยจากศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ระยะเวลาดำเนินการ 1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2551 – 31 ตุลาคม พ.ศ. 2552
- งานวิจัยเรื่อง “การผลิตผงบุกคุณภาพสูงและการนำไปใช้” ทุนวิจัยโครงการวิจัยพื้นฐานเชิงยุทธศาสตร์สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว) ระยะเวลาดำเนินการตั้งแต่วันที่ 1 พฤษภาคม 2553 – 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2555

- C. Borompichaichartkul, L. Wiset, V. Tulayatur, S. Tuntratean, T. Thetsupamorn, R. Impaprasert and I. Waedalor (2007) Comparative study of effects of drying methods and storage conditions on aroma and quality attributes of Thai jasmine rice. *Drying Technology*: 25: 1185-1192
- Borompichaichartkul, C. and Hongkulasap, S. (2007) Spray Drying of Konjac (*Amorphophallus Oncophyllus*) Powder, The proceedings of the 5th Asia-Pacific drying conference Hong Kong 13-15 August 2007, World Scientific, 1444pp
- Borompichaichartkul, C., Luengsode, K., Chinprahast, N., and Devahastin, S. (2009) Improving quality of macadamia nut (*Macadamia integrifolia*) through the use of hybrid drying process. *Journal of Food Engineering*, 93: 348 – 353.
- Z. Jianrong, Z. Donghua, G. Srzednicki, S. Kanlayanarat and C. Borompichaichartkul (2009) A simplified method of purification of konjac glucomannan. *ACTA Horticulturae*, 837. (Available online)
- Z. Jianrong, Z. Donghua, G. Srzednicki, S. Kanlayanarat and C. Borompichaichartkul (2009) Asexual reproduction of *Amorphophallus bulbifer* by low-cost artificial-induction technique. *ACTA Horticulturae*, 837. (Available online)
- Borompichaichartkul, C., Maneechot, P., Homkajon, P. and Tongplod, P. (2009) Storage Stability of Dried Macadamia Nuts in Different Packaging Materials. *ISHS Acta Horticulturae*, Vol 837. (Available online)
- Zhao, J., Zhang, D., Srzednicki, G., Kanlayanarat, S., Jianping, Z., Borompichaichartkul, C. (2010) Morphological and growth characteristics of *Amorphophallus muelleri* blume – A commercially important konjac species. *ISHS Acta Horticulturae*, Vol 875. (Available online)
- Wongnimitkul, N., Auiha, B., Rurkruthairat, P., Borompichaichartkul, C. (2010) Production of konjac glucomannan antimicrobial film for extending shelf life of fresh cut tomato. *ISHS Acta Horticulturae*, Vol 875. (Available online)
- Zhao, J., Zhang, D., Srzednicki, G., Kanlayanarat, S., Borompichaichartkul, C. (2010) Development of a low-cost two-stage technique for production of low-sulphur puried konjac flour. *International Food Research Journal*, 17(4), 1113-1124.
- Korsrilabut, J., Borompichaichartkul, C., Duangmal, K. (2010) Effect of invert sugar on the drying kinetics and water mobility of osmosed-air dried cantaloupe. *International Journal of Food Science and Technology*, 45(7), 1524-1531.
- Wiset, L., Laoprasert, P., Borompichaichartkul, C., Poomsa-ad, N., Tulyathan, V. (2011) Effects of in-bin aeration storage on physicochemical properties and

quality of glutinous rice cultivar RD 6. *Australian Journal of Crop Science*, 5(6), 635-640.

- Phatanayindee, S.; Borompichaichartkul, C.; Srzednicki, G.; Craske, J.; Wootton, M. Changes Of Chemical And Physical Quality Attributes Of Macadamia Nuts During Hybrid Drying And Processing. *Drying Technology*, 2012, 30, 1870-1880.
- Adamiec, J.; Borompichaichartkul, C.; Srzednicki, G.; Panket, W.; Piriya-punsakul, S.; Zhao, J. Microencapsulation of Kaffir Lime Oil and Its Functional Properties. *Drying Technology*, 2012, 30, 914 - 920.
- Rumroythum, P., Borompichaichartkul, C and Kongpensook, V. (2014) Effect of drying involving fluidisation in superheated steam on physiochemical and antioxidant properties of Thai native rice cultivars. *Journal of Food Engineering*, Vol 123; 143-147.
- ชาลีตา บรมพิชัยชาติกุล บัญชา พิชัยบัณฑิตกุล และวิหวัธ ไชยวงศ์ (2550) ปัจจัยที่มีผลต่อการกะเทาะเปลือกถั่วแมคคาเดเมียโดยใช้แรงอัด *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร* 38:5 349-352
- ชูสิทธิ์ หงษ์กุลทรัพย์ อภิรดี อุทัยรัตนกิจ และชาลีตา บรมพิชัยชาติกุล (2550) फिल्मบริโกล์ได้จากผงบุกและการนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารเคลือบผิวชมพู้ทับทิมจันท์ *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร* 38:6 208-211
- อินดา แวดาลอ ละมุล วิเศษ และชาลีตา บรมพิชัยชาติกุล (2550) ผลของการอบแห้งแบบสองขั้นตอนและอุณหภูมิในการอบแห้งต่อคุณภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105 *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร* 38:6 326-330
- ธานินทร์ รัชโพธิ์ ละมุล วิเศษ ณัฐพล ภูมิสะอาด และ ชาลีตา บรมพิชัยชาติกุล (2552) สมการอบแห้งชั้นบางของถั่วแมคคาเดเมียภายใต้การอบแห้งแบบป้อนความร้อน *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร* 40:1 465-468
- ณัฐโสภิน ทองประไพ ชาลีตา บรมพิชัยชาติกุล และ ละมุล วิเศษ (2552) สมบัติทางเคมีกายภาพของต้นข้าวและข้าวหักที่ผ่านการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูง *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร* 40:1 481-484

7.3 งานวิจัยที่กำลังทำ

- งานวิจัยเรื่อง “ฟิล์มย่อยสลายได้ที่มีหน้าที่เฉพาะจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ” ทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช) ระยะเวลาดำเนินการตั้งแต่วันที่ 14 สิงหาคม 2555 – 15 พฤษภาคม พ.ศ. 2557
- งานวิจัยเรื่อง “ผลของกระบวนการอบแห้งต่อคุณภาพของขนมขบเคี้ยวจากผลไม้” ทุนวิจัยทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาล ประจำปีงบประมาณ 2556 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช) ระยะเวลาดำเนินการตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2555 – 31 มีนาคม พ.ศ. 2557