

ผลของน้ำผึ้งและน้ำสับปะรดต่อการอบแห้งและคุณภาพปืต路店แช่ลุ่มอบแห้ง

นายพงษ์พิสุทธิ์ คุณะวันทนิต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF HONEY AND PINEAPPLE JUICE ON DRYING AND QUALITY OF
OSMOTICALLY DEHYDRATED-AIR DRIED BEETROOT

Mr. Pongpisut Kunawantanit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Food Technology

Department of Food Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของน้ำผึ้งและน้ำสับปะรดต่อการอบแห้งและคุณภาพ
ปัสตรูตแช่อบแห้ง

โดย

นายพงษ์พิสุทธิ์ คุณะวันทนิต

สาขาวิชา

เทคโนโลยีทางอาหาร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติศักดิ์ ดวงมาลย์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

อาจารย์ ดร. ธนจันทร์ มหาวนิช

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุวรรณ สุภิมารส)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติศักดิ์ ดวงมาลย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร. ธนจันทร์ มหาวนิช)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ซาลีดา บรมพิชัยชาติกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิษุจิตา จันทราพรชัย)

พงษ์พิสุทธิ คุณะวันทนิต : ผลของน้ำผึ้งและน้ำส้มประรดต่อการอบแห้งและคุณภาพปืตรูตแช่อิม
 อบแห้ง. (EFFECTS OF HONEY AND PINEAPPLE JUICE ON DRYING AND QUALITY OF
 OSMOTICALLY DEHYDRATED-AIR DRIED BEETROOT) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก :
 ผศ.ดร.เกียรติศักดิ์ ดวงมาลย์, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: อ.ดร.ธนจันทร์ มหาวนิช, 86 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของน้ำผึ้งและน้ำส้มประรดต่อการถ่ายเทมวลสาร
 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ปืตรูตแช่อิมอบแห้ง ชั้นแรกศึกษาภาวะที่เหมาะสมใน
 การแช่ปืตรูตในสารละลายผสมกรดซิตริกเข้มข้น 1% w/v และแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 4 ระดับ (0, 0.5,
 1.0 และ 1.5% w/v) พบว่าการใช้แคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1.0% w/v ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมในชั้นปืตรูต
 สูงที่สุดแต่ไม่แตกต่างจากการใช้แคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1.5% w/v ($p>0.05$) และให้ค่าความแข็งของชั้น
 ปืตรูตสูงสุดแต่ไม่แตกต่างจากการใช้แคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.5 และ 1.5% w/v ($p>0.05$) ขั้นตอนที่สอง
 ศึกษาผลการใช้น้ำผึ้งและน้ำส้มประรดร่วมกับซูโครสต่อการถ่ายเทมวลสารในระหว่างการออสโมซิส โดยแช่ชั้น
 ปืตรูตในสารละลายซูโครสเข้มข้น 35 และ 45 องศาบริกซ์ ตามลำดับ ความเข้มข้นละ 6 ชั่วโมง โดยที่ระดับ 45
 องศาบริกซ์ ทดแทนสารละลายซูโครสด้วยน้ำผึ้งและน้ำส้มประรดปริมาณ 10 และ 15% v/v (H-10, H-15, P-10
 และ P-15) เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการทดแทน และชุดเปรียบเทียบซึ่งทดแทนสารละลายซูโครสด้วย
 น้ำตาลอินเวิร์ตปริมาณ 10% v/v เมื่อพิจารณาค่าการสูญเสีย น้ำ (WL) และค่าการเพิ่มขึ้นของของแข็ง (SG) ที่
 ชั่วโมงที่ 12 ของการออสโมซิส พบว่าปืตรูตชุด H-10 และ H-15 ให้ค่า WL และ SG สูงที่สุดเมื่อเทียบกับชุด
 อื่น ๆ เมื่ออบแห้งปืตรูตที่ผ่านการออสโมซิสที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีความชื้น
 ประมาณ 14% (โดยน้ำหนักเปียก) พบว่าชุด H-15 มีอัตราการอบแห้งสูงสุด รองลงมาคือชุด H-10, P-15,
 P-10 ชุดเปรียบเทียบ และชุดควบคุม ตามลำดับ เมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายพฤติกรรมการ
 อบแห้ง พบว่าแบบจำลอง modified Henderson and Pabis สามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งของ
 ผลิตภัณฑ์ได้ดีที่สุด การศึกษาคูณภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งพบว่าชุด H-10 และ H-15 มีปริมาณน้ำตาล
 กลูโคสและฟรุกโทสสูงกว่าชุดอื่น ๆ ($p\leq 0.05$) ส่วนชุดควบคุมมีปริมาณน้ำตาลซูโครสสูงสุด เมื่อพิจารณา
 ผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งที่ระดับความชื้นประมาณ 14% (โดยน้ำหนักเปียก) พบว่าชุด H-10 และ H-15 มีค่า
 วอเตอร์แอกติวิตีและความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำต่ำกว่าชุดอื่น ๆ เนื่องจากชุดดังกล่าวมีน้ำตาลกลูโคส
 และฟรุกโทสในปริมาณมากทำให้สามารถจับกับโมเลกุลน้ำได้ดี เมื่อพิจารณาลักษณะเนื้อสัมผัสพบว่าชุด
 H-15 มีค่าความแข็งและค่างานในการตัดต่ำที่สุดแต่ไม่แตกต่างจากชุด H-10 ($p>0.05$) ขณะที่ชุดการทดลอง
 P-15 มีค่าความแข็งและค่างานในการตัดสูงกว่าชุดอื่น ๆ และพบว่าชุด H-10 และ H-15 ไม่เกิดผลึกน้ำตาลที่
 ผิวหน้า ขณะที่ชุดควบคุมเกิดผลึกน้ำตาลที่ผิวหน้ามากที่สุด ผลิตภัณฑ์ทั้งหกชุดมีเจดสีแดง โดยที่ชุดควบคุมมี
 ค่า L^* และ a^* สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) ขณะที่ชุด H-15 มีค่า L^* , a^* , b^* และความเข้มสีต่ำที่สุด เมื่อ
 เก็บผลิตภัณฑ์ไว้ 30 วัน พบว่าทุกชุดมีค่า L^* , a^* , b^* และความเข้มสีลดลง ยกเว้นชุด H-10 ที่มีค่า a^* และ
 ความเข้มสีใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสพบว่าชุด H-15 มี
 คะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุด ส่วนปริมาณแบคทีเรีย ยีสต์และรา ของทุกชุดมีปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์ที่
 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนดไว้สำหรับผลิตภัณฑ์ผลไม้แห้ง (มอก. 919-2532) การเปลี่ยนแปลง
 ทางสัณฐานของเซลล์ พบว่าปืตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายทั้งหกชุดมีการหดตัวของเซลล์ชัดเจน
 และหดตัวมากขึ้นเมื่อผ่านการอบแห้ง โดยชุด H-10 และ H-15 มีการหดตัวของเซลล์ต่ำสุด

ภาควิชา.....เทคโนโลยีทางอาหาร..... ลายมือชื่ออนิสิต.....
 สาขาวิชา.....เทคโนโลยีทางอาหาร..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2553..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5072651823 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEYWORDS : BEETROOT/ HONEY/ PINEAPPLE JUICE/ DRYING KINETICS/ OSMOSED-AIR DRIED

PONGPISUT KUNAWANTANIT : EFFECTS OF HONEY AND PINEAPPLE JUICE ON DRYING AND QUALITY OF OSMOTICALLY DEHYDRATED-AIR DRIED BEETROOT. ADVISOR :

ASST. PROF. KIATTISAK DUANGMAL, Ph.D., CO-ADVISOR : THANACHAN

MAHAWANICH, Ph.D., 86 pp.

The objective of this study was to investigate the effect of honey and pineapple juice on mass transfer, drying kinetics and quality of osmotically dehydrated-air dried beetroot. Initially, beetroot pieces were pre-treated by soaking in a solution containing 1% (w/v) citric acid and calcium chloride at four different levels (0, 0.5, 1.0% and 1.5% w/v). Beetroot pieces treated with the mix solution containing 1% (w/v) calcium chloride had a highest calcium content but not significantly different from those treated with solution containing 1.5% (w/v) calcium chloride ($p>0.05$). The 1% (w/v) calcium chloride treatment resulted in beetroot pieces with highest hardness. However, this was not significantly different from 0.5 and 1.5% (w/v) calcium chloride treatments ($p>0.05$). Beetroot pieces were then immersed sequentially in 35 and 45 °Brix sucrose solution for 6 hours each. At 45° Brix level, an osmotic agent, either 10% and 15% (v/v) honey or pineapple juice was used to partially replace sucrose (H-10, H-15, P-10 and P-15). The treatment without honey and pineapple juice and the treatment with 10% (v/v) invert sugar replacement were set as a control and a reference, respectively. The H-10 and H-15 yielded the highest water loss (WL) and highest solid gain (SG) than other treatments. The osmosed beetroot were then dried in a hot air drier at 60 °C until a moisture content of about 14% (wb) was obtained. It was found that H-15 exhibited the fastest drying rate followed by H-10, P-15, P-10, reference and control, respectively. Modified Henderson and Pabis model was found to be the best model for describing the drying behavior of all treatments. For dried products, the H-10 and H-15 possessed significantly higher glucose and fructose contents than other treatments ($p\leq 0.05$) while the control possessed the highest sucrose content. The H-10 and H-15 treatments resulted in lower water activity and water mobility than other treatments. This reflected that the monosaccharides present in these samples bind more water in the final product. For texture, the H-15 had the lowest hardness and cutting work but this was not significantly different from those of H-10 ($p>0.05$). The highest hardness and cutting work was found in P-15. The color of products obtained from all treatments were in the shade of red while the control gave the highest L^* and a^* values ($p\leq 0.05$). From sensory evaluation, it was shown that the H-15 was the most acceptable. The bacteria, yeast and mold counts of all treatment stayed within the levels set for dried fruit products by the Thai Industrial Standards Institute (TIS 919-1989). The microstructure analysis of osmosed and dried products showed that the cell structure of H-10 and H-15 was less shrinkage than other treatments.

Department :Food Technology.....Student's Signature :

Field of Study :Food Technology.....Advisor's Signature :

Academic Year :2010.....Co-advisor's Signature :

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. เกียรติศักดิ์ ดวงมาลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร. ธนจันทร์ มหาวนิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความรู้ แนวความคิดหลักในการทำงาน และเสียสละเวลาอันมีค่าในการให้คำแนะนำ คำปรึกษา และความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สุวรรณา สุภิมารส ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. ชาติดา บรมพิชัยชาติกุล และ ผศ.ดร. วิษฐิตา จันทราพรชัย ที่ร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และได้สละเวลาให้คำแนะนำ และตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการวิทยาเพื่อพื้นที่นเพื่อแผนพัฒนาวิชาการจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โครงการย่อยงานวิจัยด้านอาหารจากทรัพยากรท้องถิ่นเพื่อพัฒนาอาชีพชุมชน

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ระดับปริญญาโท ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับกำลังใจ ความช่วยเหลือ และน้ำใจที่มีให้ และขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการทุกท่าน สำหรับการอำนวยความสะดวกในการวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ รวมถึงขอบคุณพี่และน้อง สำหรับความรัก ความห่วงใย และกำลังใจด้วยดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. วารสารปริทัศน์.....	2
2.1 ปีตรูต.....	2
2.2 การทำแห้งโดยการออสโมซิส (osmotic dehydration)	4
2.3 การใช้น้ำผึ้งและน้ำสับปะรดในการปรับปรุงคุณภาพผักผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง.....	12
2.4 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผักผลไม้แช่อิ่มอบแห้งในระหว่างการ เก็บรักษา.....	16
3. อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย.....	20
3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของปีตรูต.....	22
3.2 ศึกษาผลของแคลเซียมคลอไรด์ต่อปริมาณแคลเซียมและลักษณะเนื้อสัมผัสของ ชิ้นปีตรูต.....	22
3.3 ศึกษาผลของน้ำผึ้งและน้ำสับปะรดต่อการถ่วงมวลสารในระหว่างการออสโม ซิส.....	23
3.4 ศึกษาผลของการใช้น้ำผึ้งและน้ำสับปะรดร่วมกับน้ำตาลซูโครสต่อ จลนพลศาสตร์การอบแห้ง.....	24
3.5 ศึกษาผลของการใช้น้ำผึ้งและน้ำสับปะรดร่วมกับน้ำตาลซูโครสต่อจลนพลศาสตร์ การอบแห้ง.....	25
3.6 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานของเซลล์.....	26

บทที่	หน้า
4. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	27
4.1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของปีตรูต.....	27
4.2 ผลของแคลเซียมคลอไรด์ต่อปริมาณแคลเซียมและลักษณะเนื้อสัมผัสของชิ้นปีตรูต.....	28
4.3 ผลของน้ำผึ้งและน้ำสับปะรดต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างการอบสโมคซีส.....	30
4.4 ผลของการใช้น้ำผึ้งและน้ำสับปะรดร่วมกับน้ำตาลซูโครสต่อজনপলাস্ট্রিকারอบแห้ง.....	34
4.5 ผลของการใช้น้ำผึ้งและน้ำสับปะรดร่วมกับซูโครสต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน.....	43
4.6 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานของเซลล์.....	56
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	60
รายการอ้างอิง.....	62
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก.....	68
ภาคผนวก ข.....	77
ภาคผนวก ค.....	78
ภาคผนวก ง.....	82
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	86

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบทางเคมีและสารอาหารต่อเนื้อปีตรูตที่รับประทานได้ 100 กรัม.....	3
4.1 องค์ประกอบทางเคมี และสมบัติทางกายภาพของปีตรูตสด.....	27
4.2 ผลของความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ต่อปริมาณแคลเซียมไอออนและปริมาณ ความชื้นของชิ้นปีตรูต.....	28
4.3 ผลของความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ต่อค่าความแข็งของชิ้นปีตรูต.....	29
4.4 การสูญเสียน้ำและการเพิ่มขึ้นของของแข็งของปีตรูตภายหลังการออสโมซิส.....	32
4.5 ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ วอเตอร์แอกติวิตี และความเป็นกรดต่างของ สารละลายออสโมติก.....	33
4.6 ค่าคงที่ k ที่ได้จากการอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส ของผลิตภัณฑ์ปีตรูตที่ผ่านการ ออสโมซิสในสารละลายน้ำตาลชนิดต่าง ๆ.....	38
4.7 สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งปีตรูตแช่ อิม.....	39
4.8 ค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองของ Page, Henderson and Pabis และ modified Henderson and Pabis ของผลิตภัณฑ์ทั้งหกชุดการทดลอง.....	41
4.9 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโทส ซูโครส กลูโคส+ฟรุคโทส และน้ำตาลทั้งหมดของ ผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อิมอบแห้งเปรียบเทียบกับปีตรูตสดและปีตรูตที่ผ่านการปรับปรุง คุณภาพ.....	44
4.10 ปริมาณความชื้นและค่า a_w ของผลิตภัณฑ์ปีตรูตหลังอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน..	46
4.11 ค่า spin lattice relaxation time (T_1) ของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อิมอบแห้งและเมื่อ เก็บไว้ 30 วัน.....	48
4.12 ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อิมอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน.....	49
4.13 ค่าสี $L^*a^*b^*$ ของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อิมอบแห้งหลังอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน.....	52
4.14 ค่าเฉดสี (Hue angle) ค่าความเข้มสี (Chroma) และค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) ของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อิมอบแห้งหลังอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน.....	52
4.15 คะแนนการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยวิธีการทดสอบความชอบของ ผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อิมอบแห้งที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายชนิดต่าง ๆ.....	55

ตารางที่	หน้า
ค.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ในชั้นปีตรูตเมื่อแปรระดับความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์.....	78
ค.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งของชั้นปีตรูตชั้นเมื่อแปรระดับความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์.....	78
ค.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าร้อยละการสูญเสีย น้ำของชั้นปีตรูตที่ชั่วโมงที่ 12 ของการออสโมซิสในสารละลายชุดการทดลองต่าง ๆ.....	78
ค.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าร้อยละการเพิ่มขึ้นของของแข็งของชั้นปีตรูตที่ชั่วโมงที่ 12 ของการออสโมซิสในสารละลายชุดการทดลองต่าง ๆ.....	78
ค.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโทส ซูโครส กลูโคส+ฟรุคโทส และน้ำตาลทั้งหมด ของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อิ่มอบแห้งภายหลังการออสโมซิสในสารละลายชุดการทดลองต่าง ๆ.....	79
ค.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อิ่มอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน ภายหลังการออสโมซิสในสารละลายชุดการทดลองต่าง ๆ.....	79
ค.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าวอเตอร์แอกติวิตีของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อิ่มอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน ภายหลังการออสโมซิสในสารละลายชุดการทดลองต่าง ๆ.....	79
ค.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า spin lattice relaxation time (T_1) ของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อิ่มอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน ภายหลังการออสโมซิสในสารละลายชุดการทดลองต่าง ๆ.....	79
ค.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งและค่างานในการตัดของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อิ่มอบแห้งภายหลังการออสโมซิสในสารละลายชุดการทดลองต่าง ๆ.....	80
ค.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งและค่างานในการตัดของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อิ่มอบแห้งเมื่อเก็บไว้ 30 วัน ภายหลังการออสโมซิสในสารละลายชุดการทดลองต่าง ๆ.....	80
ค.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความเหนียวของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อิ่มอบแห้งภายหลังการออสโมซิสในสารละลายชุดการทดลองต่าง ๆ.....	80
ค.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความเหนียวของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อิ่มอบแห้งเมื่อเก็บไว้ 30 วัน ภายหลังการออสโมซิสในสารละลายชุดการทดลองต่าง ๆ.....	80

ตารางที่	หน้า
ค.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสี่ $L^*a^*b^*$ ของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่ใ้หมอบแห้ง และเมื่อเก็บไว้ 30 วัน ภายหลังกการออสโมซิสในสารละลายชุดการทดลองต่าง ๆ...	81
ค.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคะแนนการประเมินผลทางประสาทสัมผัสของผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่ใ้หมอบแห้งภายหลังกการออสโมซิสในสารละลายชุดการทดลองต่าง ๆ.....	81
ง.1 ร้อยละการสูญเสียน้ำและร้อยละการเพิ่มขึ้นของของแข็ง ของปีตรูตระหว่างการออสโมซิสในสารละลายชูโครสที่ความเข้มข้น 35 องศาบริกซ์ ณ เวลาต่าง ๆ.....	82
ง.2 ร้อยละการสูญเสียน้ำและร้อยละการเพิ่มขึ้นของของแข็ง ของปีตรูตระหว่างการออสโมซิสในสารละลายชูโครสที่ความเข้มข้น 45 องศาบริกซ์ ณ เวลาต่าง ๆ.....	82
ง.3 ร้อยละการสูญเสียน้ำและร้อยละการเพิ่มขึ้นของของแข็ง ของปีตรูตระหว่างการออสโมซิสในสารละลายชูโครสที่ความเข้มข้น 45 องศาบริกซ์ ของปีตรูตชุดการทดลอง P-10 ณ เวลาต่าง ๆ.....	82
ง.4 ร้อยละการสูญเสียน้ำและร้อยละการเพิ่มขึ้นของของแข็งของปีตรูตระหว่างการออสโมซิสในสารละลายชูโครสที่ความเข้มข้น 45 องศาบริกซ์ ของปีตรูตชุดการทดลอง P-15 ณ เวลาต่าง ๆ.....	83
ง.5 ร้อยละการสูญเสียน้ำและร้อยละการเพิ่มขึ้นของของแข็ง ของปีตรูตระหว่างการออสโมซิสในสารละลายชูโครสที่ความเข้มข้น 45 องศาบริกซ์ ของปีตรูตชุดการทดลอง H-10 ณ เวลาต่าง ๆ.....	83
ง.6 ร้อยละการสูญเสียน้ำและร้อยละการเพิ่มขึ้นของของแข็ง ของปีตรูตระหว่างการออสโมซิสในสารละลายชูโครสที่ความเข้มข้น 45 องศาบริกซ์ ของปีตรูตชุดการทดลอง H-15 ณ เวลาต่าง ๆ.....	83
ง.7 ร้อยละการสูญเสียน้ำและร้อยละการเพิ่มขึ้นของของแข็ง ของปีตรูตระหว่างการออสโมซิสในสารละลายชูโครสที่ความเข้มข้น 45 องศาบริกซ์ ของปีตรูตชุดเปรียบเทียบ ณ เวลาต่าง ๆ.....	84
ง.8 ปริมาณความชื้น (กรัมน้ำต่อกรัมของแข็ง) ของปีตรูตทั้ง 6 ชุดการทดลอง ณ เวลาต่าง ๆ ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส.....	84

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การถ่ายภาพมวลสารระหว่างการออกซิซิส.....	4
2.2 กลไกการถ่ายภาพมวลสารในเนื้อเยื่อพืช.....	5
2.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำและน้ำตาลในชิ้นผลไม้ขณะออกซิซิส.....	5
2.4 กราฟอัตราการอบแห้ง.....	10
4.1 การสูญเสียน้ำหนักของปีตรูตตลอดระยะเวลาการออกซิซิส 12 ชั่วโมง.....	31
4.2 การเพิ่มขึ้นของของแข็งของปีตรูตตลอดระยะเวลาการออกซิซิส 12 ชั่วโมง.....	31
4.3 กราฟการอบแห้ง (ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส) ของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อิ่มอบแห้งที่ผ่านการออกซิซิสในสารละลายชนิดต่าง ๆ.....	35
4.4 กราฟอัตราส่วนความชื้น (ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส) ของผลิตภัณฑ์ปีตรูตที่ผ่านการออกซิซิสในสารละลายน้ำตาลชนิดต่าง ๆ.....	36
4.5 กราฟอัตราการอบแห้ง (อุณหภูมิในการอบ 60 องศาเซลเซียส) ของผลิตภัณฑ์ปีตรูตที่ผ่านการออกซิซิสในสารละลายน้ำตาลชนิดต่าง ๆ แสดงในรูปอัตราการอบแห้งกับค่าอัตราส่วนความชื้น	38
4.6 ผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งทั้งหมดชุดการทดลองของปีตรูตที่ผ่านการออกซิซิสในสารละลายและอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ....	50
4.7 ผลิตภัณฑ์เมื่อเก็บไว้ 30 วัน ทั้งหมดชุดการทดลองของปีตรูตที่ผ่านการออกซิซิสในสารละลายและอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ.....	51
4.8 การเปรียบเทียบสีและความเข้มสีของปีตรูตหลังอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน.....	54
4.9 ปีตรูตสดและปีตรูตที่ผ่านการออกซิซิสในสารละลายออกซิติกชนิดต่าง ๆ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ที่กำลังขยาย 150 เท่า	57
4.10 ปีตรูตที่ผ่านการออกซิซิสในสารละลายออกซิติกชนิดต่าง ๆ และอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ที่กำลังขยาย 150 เท่า.....	58
ก.1 ตัวอย่างลักษณะกราฟจากเครื่อง Texture Analyser	72
ก.2 กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียม.....	74

บทที่ 1

บทนำ

ปีตรูตเป็นพืชเมืองหนาว ปลูกบริเวณภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย การบริโภคปีตรูตในปัจจุบันยังไม่แพร่หลาย ผู้บริโภคมักใช้เป็นผักสลัด นอกจากนี้ยังมีการนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น น้ำปีตรูตพร้อมบริโภค ปีตรูตดอง ไอศกรีม และเยลลี่ ขณะที่ระดับอุตสาหกรรมใช้หัวปีตรูตในการสกัดสีแดงเพื่อทำสีผสมอาหาร การแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นยังอยู่ในวงจำกัด ดังนั้นการแช่อิ่มอบแห้งจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ผักผลไม้แช่อิ่มอบแห้งเป็นที่นิยมของผู้บริโภค มีรูปแบบการบริโภคที่หลากหลาย มีอายุการเก็บรักษาที่นาน และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

ผักผลไม้แช่อิ่มอบแห้งเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญของประเทศไทย ในปี พ.ศ.2551 2552 และ 2553 ประเทศไทยส่งออกสินค้าประเภทผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง (รหัส HS:20060000) ไปยังประเทศต่างๆ ทั่วโลกมีมูลค่าสูงประมาณ 4,395 4,080 และ 5,065 ล้านบาท ตามลำดับ (กรมศุลกากร, 2554) และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในอนาคต อย่างไรก็ตามปัญหาด้านคุณภาพที่มักพบโดยทั่วไปของผักผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง ได้แก่ รสชาติที่หวานจัด และเมื่อเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ระยะหนึ่งจะเกิดลักษณะที่ไม่เป็นที่ต้องการต่าง ๆ เช่น เนื้อสัมผัสที่แห้งแข็ง การหดตัว และการเกิดผลึกน้ำตาลที่ผิวหน้า การนำปีตรูตมาแช่อิ่มอบแห้งอาจพบปัญหาดังกล่าวข้างต้น จากปัญหาดังกล่าวจึงมีแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้น้ำผึ้งและน้ำสับปะรดเข้ามาช่วยในกระบวนการผลิต เนื่องจากน้ำผึ้งมีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเป็นองค์ประกอบหลัก และมีความเข้มข้นสูงส่งผลให้มีแรงดันออสโมติกสูง ทำให้มีการแพร่ของของแข็งและการสูญเสียน้ำขณะออสโมซิสมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีสมบัติรักษาความชื้น ควบคุมการตกผลึกน้ำตาลบริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ ขณะที่น้ำสับปะรดมีปริมาณน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวน้อยกว่าน้ำผึ้งแต่มีความเป็นกรดค่อนข้างสูง จึงช่วยไฮโดรไลซ์ซูโครสเป็นกลูโคสและฟรุกโทสมากขึ้นเมื่อได้รับความร้อน นอกจากนี้ปีตรูตยังมีกลิ่นคล้ายดินซึ่งเกิดจากสาร geosmin กลิ่นดังกล่าวจะลดลงเมื่อปรุงด้วยความร้อน (Tyler, Acree and Smith, 1979)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้น้ำผึ้งและน้ำสับปะรด ร่วมกับสารละลายซูโครส ต่อการถ่ายเทมวลสารในระหว่างการออสโมซิส จลนพลศาสตร์การอบแห้งของผลิตภัณฑ์ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายหลังการอบแห้ง รวมถึงการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการเก็บรักษา 30 วัน ข้อมูลที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อิ่มอบแห้ง และเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้แช่อิ่มอบแห้งผักผลไม้ชนิดอื่น ๆ ต่อไป

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 บีตรูต

บีตรูตจัดเป็นพืชล้มลุก อยู่ในวงศ์ Chenopodiaceae สายพันธุ์ที่นิยมปลูกสำหรับใช้ส่วนราก เพื่อบริโภคคือ การ์เดนบีต (garden beet) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Beta vulgaris* subsp. *vulgaris* พืชสายพันธุ์นี้มีรากแก้วที่บวมพองสำหรับเก็บสะสมอาหาร รูปร่างค่อนข้างกลม ภายในมีลักษณะเป็นวงแหวนของกลุ่มท่อลำเลียงเป็นชั้นสลับกัน ก้านใบยาวสีแดงเรียงสลับกันบนลำต้นที่สั้น แผ่นใบรูปร่างคล้ายหัวใจมีสีเขียวหรือแดง ยาวประมาณ 20-40 ซม. มีรอยย่นระหว่างเส้นใบ ขอบใบเป็นคลื่น ดอกมีลักษณะเป็นดอกสมบูรณ์เพศ ไม่มีก้านดอกย่อย มีกลีบดอก 5 กลีบ ผลเป็นแบบนัท (nut) เปลือกแข็งเมื่อแก่ผลแห้งไม่แตก (dry indehiscent fruit) เส้นผ่านศูนย์กลาง 3-7 มม. เมล็ดมีรูปร่างคล้ายไต สีน้ำตาล เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5-3 มม. พืชชนิดนี้ขยายพันธุ์โดยการเพาะเมล็ด หลังจากเพาะเมล็ดแล้ว เมล็ดจะเริ่มงอกในช่วง 10-24 วัน และเจริญเติบโตเต็มที่จนสามารถเก็บเกี่ยวได้ใช้เวลาประมาณ 60-90 วัน การเก็บเกี่ยวจะเริ่มในช่วงต้นฤดูร้อนถึงปลายฤดูใบไม้ร่วง หลังเก็บเกี่ยวเก็บรักษาผลผลิตที่อุณหภูมิ 0-5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 90-95% (Nottingham, 2004)

หัวบีตรูตมีสีแดงเข้ม เป็นสารสีในกลุ่มเบตาเลน (betalain) ซึ่งเป็นกลุ่มสีที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ สารสีดังกล่าวอยู่ในแควคิวโอลของเซลล์พืช ละลายน้ำได้ เบตาเลนประกอบด้วยเบตาไซยานิน (betacyanins) มีสีม่วงถึงแดง และเบตาแซนทิน (betaxanthins) มีสีเหลืองถึงส้ม สีแดงของบีตรูตจัดอยู่ในกลุ่มเบตาไซยานินเรียกว่า เบตานิน (betanins) (Stintzing and Carle, 2008)

บีตรูตเป็นผักที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรต วิตามินและแร่ธาตุ โดยเฉพาะวิตามินซี โฟเลต และโพแทสเซียม องค์ประกอบทางเคมีและสารอาหารที่มีอยู่ในเนื้อบีตรูตแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีและสารอาหารต่อเนื้อปืตรุตที่รับประทานได้ 100 กรัม

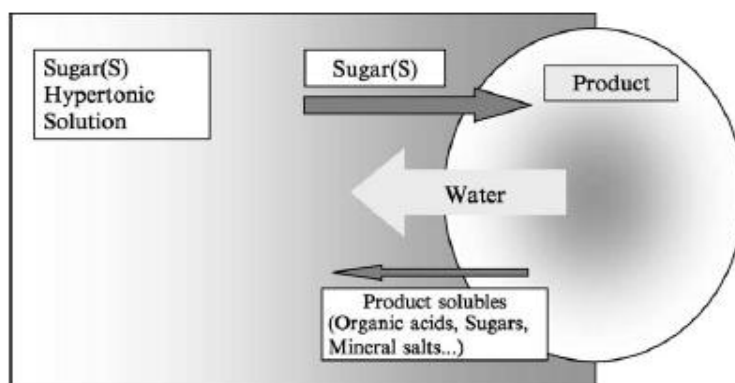
องค์ประกอบ	ค่าเฉลี่ย (ต่อ 100 กรัม)
น้ำ (กรัม)	87.58
คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	9.56
โปรตีน (กรัม)	1.61
ไขมัน (กรัม)	0.17
เส้นใย (กรัม)	2.80
เถ้า (กรัม)	1.08
น้ำตาลทั้งหมด (กรัม)	6.76
แร่ธาตุ	
- โพแทสเซียม (มิลลิกรัม)	325.00
- โซเดียม (มิลลิกรัม)	78.00
- ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม)	40.00
- แมกนีเซียม (มิลลิกรัม)	23.00
- แคลเซียม (มิลลิกรัม)	16.00
- เหล็ก (มิลลิกรัม)	0.80
- สังกะสี (มิลลิกรัม)	0.35
- แมงกานีส (มิลลิกรัม)	0.33
วิตามิน	
- วิตามินซี (มิลลิกรัม)	4.90
- ไนอะซิน (มิลลิกรัม)	0.33
- กรดแพนโททินิก (มิลลิกรัม)	0.16
- วิตามินบีหนึ่ง (มิลลิกรัม)	0.03
- วิตามินบีสอง (มิลลิกรัม)	0.04
- วิตามินบีหก (มิลลิกรัม)	0.07
- โฟเลต (ไมโครกรัม)	109.00
พลังงาน (กิโลแคลอรี)	43

ที่มา: USDA (2010)

หัวบีตรูตสามารถใช้บริโภคสดได้ และสามารถคั้นน้ำเป็นผลิตภัณฑ์น้ำบีตรูตพร้อมบริโภค นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นส่วนผสมหรือแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดอื่น เช่น บีตรูตคอง ไอศกรีม เยลลี่ ในขณะที่ระดับอุตสาหกรรมใช้หัวบีตรูตเป็นวัตถุดิบหลักในการสกัดสีแดง เพื่อทำสีผสมอาหารทั้งชนิดน้ำและผง โดยสีที่ได้ดังกล่าวจะนำมาใช้เพื่อปรับปรุงสีของซอสมะเขือเทศ แยม และขนมหวานต่าง ๆ (Nottingham, 2004)

2.2 การทำแห้งโดยการออสโมซิส (osmotic dehydration)

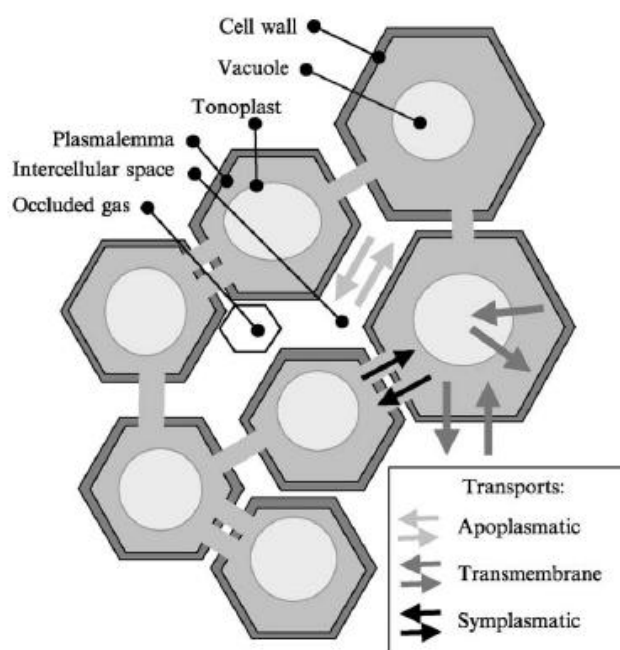
การทำแห้งโดยการออสโมซิส เป็นกระบวนการกำจัดน้ำบางส่วนออกจากผักผลไม้ โดยการแช่ชิ้นผักหรือผลไม้ในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงและมีค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (water activity; a_w) ต่ำเมื่อเทียบกับสารละลายในเนื้อผักผลไม้ ทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติก (osmotic pressure) ระหว่างน้ำในเซลล์กับสารละลายภายนอกเกิดเป็นแรงขับ และเกิดการถ่ายเทมวลสารระหว่างภายในเซลล์กับสารละลายภายนอกจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำผ่านเยื่อเลือกผ่านในทิศสวนทางกัน โดยน้ำภายในเซลล์จะแพร่ออกสู่สารละลาย ขณะที่ตัวถูกละลายจะแพร่เข้าเซลล์ผักผลไม้ นอกจากนี้ยังมีสารบางอย่าง เช่น กรดอินทรีย์ วิตามิน และเกลือแร่ ในเนื้อเยื่อแพร่ออกมาแต่ปริมาณน้อยเท่านั้น (Raoult-Wack, 1994) การถ่ายเทมวลสารแสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 การถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิส

ที่มา: Torreggiani และ Bertolo (2004)

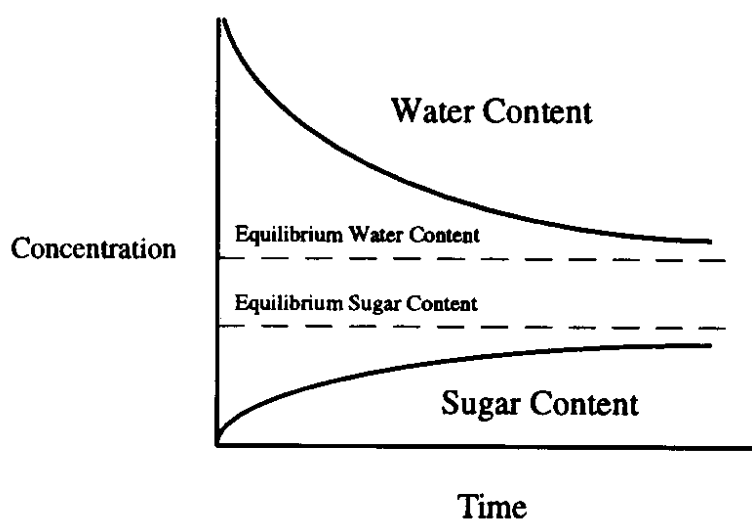
Le Maguer และ Yao (1995) อ้างถึงใน Torreggiani และ Bertolo (2004) ศึกษาการถ่ายเทมวลสารในเนื้อเยื่อพืชขณะแช่ผักผลไม้ในระบบของสารละลาย ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (light microscope) พบว่าการถ่ายเทมวลสารของตัวถูกละลายและน้ำแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ การถ่ายเทมวลสารภายนอกเซลล์บริเวณช่องว่างระหว่างเซลล์นอกเซลล์เมมเบรน (apoplasmatic) การถ่ายเทมวลสารภายในเซลล์กับสารละลายภายนอก (transmembrane) และการถ่ายเทมวลสารระหว่างเซลล์สองเซลล์ที่อยู่ติดกัน (symplasmatic) กลไกการถ่ายเทมวลสารแสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 กลไกการถ่ายเทมวลสารในเนื้อเยื่อพืช

ที่มา: Torreggiani และ Bertolo (2004)

Barbosa-Canovas และ Vega-Mercado (1996) ศึกษาการถ่ายเทมวลสารของน้ำและน้ำตาลในชั้นผลไม้ขณะออสโมซิส พบว่าการถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้นทั้งของน้ำและน้ำตาลในกระบวนการออสโมซิสจะดำเนินการต่อจนถึงภาวะสมดุล มีผลให้ปริมาณน้ำและตัวถูกละลายในชั้นผลไม้และในสารละลายภายนอกมีค่าคงที่ แสดงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำและน้ำตาลในชั้นผลไม้ขณะออสโมซิส

ที่มา: Barbosa-Canovas และ Vega-Mercado (1996)

การออกซิโมซิสเป็นการกำจัดความชื้นบางส่วนออกจากผักผลไม้ก่อนเข้าสู่กระบวนการอบแห้ง ทำให้ลดเวลาที่ผลิตภัณฑ์จะสัมผัสกับความชื้นระหว่างกระบวนการอบแห้ง จึงช่วยรักษาสีและเนื้อเยื่อของผักผลไม้ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะปรากฏและคุณค่าทางโภชนาการที่ดี เมื่อเทียบกับการอบแห้งโดยทั่วไป

กระบวนการผลิตผักผลไม้แช่อบแห้งแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักดังนี้

2.2.1 การคัดเลือกและเตรียมวัตถุดิบ

คุณภาพของวัตถุดิบเริ่มต้นมีผลโดยตรงต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออกซิโมซิส และคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย จึงต้องมีการกำหนดปัจจัยคุณภาพของวัตถุดิบ และมีการควบคุมให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ปัจจัยที่นำมาพิจารณา เช่น ชนิดหรือสายพันธุ์ ระดับความสุก นอกจากนี้แล้วขนาดและรูปร่างของผักผลไม้ก็มีผลเช่นกัน โดยจะพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของสารละลาย ถ้าอัตราส่วนดังกล่าวนี้สูงจะทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสารสูง

Sablani และ Rahman (2003) ศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำตาล อุณหภูมิ และรูปทรงต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในระหว่างการทำแห้งโดยการออกซิโมซิสมะม่วง โดยปกเปิดอกมะม่วงสุกและตัดให้มีรูปทรง 3 แบบ คือ ทรงลูกบาศก์ ยาวด้านละ 2 ซม. ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 1.8 ซม.×3.5 ซม.×1 ซม. และรูปกลมขนาด 2.0 ซม.×2.5 ซม.×1.5 ซม. จากนั้นแช่ในสารละลายซูโครสที่แปรระดับความเข้มข้นเป็น 30 40 50 60 และ 70% (w/v) และแปรอุณหภูมิของสารละลายขณะแช่เป็น 22 40 60 และ 90 องศาเซลเซียส คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและของแข็งที่จุดสมดุลเมื่อแช่ครบ 24 ชั่วโมง พบว่าชิ้นมะม่วงทรงลูกบาศก์มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและของแข็งสูงที่สุด เพราะทรงลูกบาศก์มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงกว่ารูปทรงอื่น จึงเกิดการถ่ายเทมวลสารได้ดี ขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิและพื้นที่ผิวมากขึ้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของของแข็งเพิ่มขึ้นแต่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำลดลง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายให้สูงขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำสูงขึ้นแต่สัมประสิทธิ์การแพร่ของของแข็งลดลง

นอกจากการคัดเลือกวัตถุดิบแล้ว การเตรียมวัตถุดิบก่อนเข้าสู่กระบวนการออกซิโมซิส หรือที่เรียกว่า พรีทรีทเมนต์ (pretreatment) ก็เป็นสิ่งสำคัญ สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ความร้อนเพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส การใช้สารเคมี เช่น กรดซิตริกยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและการเจริญของจุลินทรีย์ การใช้เกลือแคลเซียม เช่น แคลเซียมคลอไรด์ แคลเซียมแลคเตท แคลเซียมซิเตรท เพื่อปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัส เนื่องจากในผักผลไม้ดิบส่วนใหญ่มีโพทเพกทินซึ่งเป็นสารเพกทินที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อผักผลไม้เริ่มสุกโพทเพกทินจะเปลี่ยนเป็น กรดเพกทินิกและ

กรดเพกติกตามลำดับ โดยเอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรสในผักผลไม้ทำหน้าที่เร่งการตัดหมู่เมทิลออกจากโครงสร้างจึงเหลือหมู่คาร์บอกซิลอิสระ เมื่อนำผักผลไม้ที่เริ่มสุกมาปรับปรุงคุณภาพโดยแช่ในสารละลายเกลือแคลเซียม แคลเซียมไอออนจะเกิดอันตรกิริยากับสารประกอบเพกทินในชั้นผนังเซลล์และชั้นมิดเดิลลามেলা (middle lamella) เกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างหมู่คาร์บอกซิลของเพกทิน โดยแคลเซียมไอออนเป็นตัวเชื่อมระหว่างหมู่คาร์บอกซิลของเพกทินสองสายเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมเพกเตตที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้ผนังเซลล์ของผักผลไม้มีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้เนื้อสัมผัสมีความกรอบและคงตัวอยู่ได้ (Martin-Diana et al., 2007) โดยทั่วไปโรงงานอุตสาหกรรมจะใช้แคลเซียมร่วมกับกรดซิตริกในการปรับปรุงคุณภาพผักผลไม้แปรรูป

Manganaris และคณะ (2007) ศึกษาผลของเกลือแคลเซียมต่อการซึมเข้าและค่าความแข็งของผลพีช โดยแช่ผลพีชในสารละลายเกลือแคลเซียม 3 ชนิด คือ แคลเซียมคลอไรด์ แคลเซียมพอร์ฟิไอเนต และแคลเซียมกลูโคเนต แต่ละชนิดแบ่งแช่ที่ความเข้มข้น 62.5 และ 187.5 มิลลิโมลาร์ นาน 5 นาที แล้วเก็บรักษาไว้ 5 วัน ที่ 20 องศาเซลเซียส จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียม พบว่าปริมาณแคลเซียมที่เปลือกเพิ่มขึ้น 2.3-2.7 เท่า และในเนื้อเพิ่มขึ้น 50-74% เมื่อเทียบกับชุดควบคุม และการเพิ่มความเข้มข้นของเกลือแคลเซียม มีผลให้ปริมาณแคลเซียมในผลพีชเพิ่มขึ้น ขณะที่การแช่เกลือแคลเซียมและเก็บรักษาไว้นาน 5 วัน มีผลให้ปริมาณแคลเซียมในเปลือกของผลพีชลดลง เนื่องจากผลพีชเริ่มสุกมากขึ้นทำให้แคลเซียมจากเปลือกซึมผ่านเข้ามาในเนื้อได้มาก ทำให้ปริมาณแคลเซียมในเนื้อสูงขึ้น นอกจากนี้การใช้แคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 62.5 มิลลิโมลาร์ ให้ค่าความแข็งไม่ต่างจากการใช้ที่ความเข้มข้น 187.5 มิลลิโมลาร์ แต่การใช้แคลเซียมแลคเตตและแคลเซียมพอร์ฟิไอเนตที่ความเข้มข้น 187.5 มิลลิโมลาร์ ทำให้ค่าความแข็งของผลพีชลดลง เนื่องจากความเข้มข้นที่สูงเกินไปทำให้เนื้อเยื่อที่ผิวถูกทำลาย

Nayak และคณะ (2007) ศึกษาผลของรังสีแกมมาและแคลเซียมคลอไรด์ต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของแครอท มันฝรั่ง และบัตร์นัต โดยตัดแครอท มันฝรั่ง และบัตร์นัต เป็นชิ้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 ซม. หนา 0.5 ซม. แล้วแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1.0% (w/v) ที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นสะเด็ดน้ำแล้วแยกบรรจุลงในถุงพอลิเอทิลีน ฉายด้วยรังสีแกมมาที่ 3 6 9 และ 12 กิโลเกรย์ วัดค่าความแข็งของเนื้อเยื่อด้วย Texture Analyser (LR-5K, Fareham, UK) ใช้หัวกดแผ่นกลมบางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. พบว่าการฉายรังสีแกมมาในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งต่ำลง โดยการฉายที่ 12 กิโลเกรย์ ทำให้ค่าความแข็งของเนื้อเยื่อพีชทั้งสามชนิดต่ำที่สุด เนื่องจากรังสีแกมมามีผลทำลายเซลล์ทำให้สูญเสียแรงดันเต่งและเกิดการสลายตัวของเพกทิน และพบว่าการแช่พีชทั้งสามชนิดลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ก่อนการฉายรังสีมีผลให้ค่าความแข็งสูง

กว่าตัวอย่างที่ไม่แช่ อาจเนื่องจากแคลเซียมจับกับเพกทินที่อยู่บริเวณผนังเซลล์และมิดเดิลลามেলা เกิดเป็นแคลเซียมเพกเตท ทำให้เนื้อเยื่อมีความแข็งแรงมากขึ้น

2.2.2 การออสโมซิส

เป็นการนำผักผลไม้ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้ว แช่ในสารละลายออสโมติกซึ่ง ชนิด ความเข้มข้น และอุณหภูมิของสารละลายออสโมติกมีผลต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิสและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ในการคัดเลือกสารละลายออสโมติกที่มีความเหมาะสมนั้นต้องพิจารณาถึงลักษณะทางประสาทสัมผัสที่ดีของผลิตภัณฑ์สุดท้าย ราคา และน้ำหนักโมเลกุลของสารที่จะนำมาใช้ โดยสารละลายออสโมติกที่นิยมใช้มากที่สุด คือ ซูโครส (Barbosa-Canovas and Vega-Mercado, 1996) นอกจากนี้ยังมีการใช้น้ำตาลอินเวิร์ตเพื่อปรับสัดส่วนของน้ำตาลโมโนแซคคาไรด์และไดแซคคาไรด์ของผลิตภัณฑ์ เพื่อช่วยควบคุมการเกิดผลึกน้ำตาลบนผิวหน้าของผลิตภัณฑ์สุดท้ายหลังการอบแห้ง ส่วนความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกพบว่าการใช้ที่ระดับความเข้มข้นสูง มีผลให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติกภายในชิ้นผลไม้กับสารละลายภายนอกสูง จึงเกิดการถ่ายเทมวลสารได้ดีกว่าการใช้ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ขณะที่อุณหภูมิของสารละลายออสโมติกก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลสาร โดยอุณหภูมิของสารละลายที่สูงขึ้นจะทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสารมากขึ้น เนื่องจากความร้อนทำให้เนื้อเยื่อและโครงสร้างผนังเซลล์บางส่วนของผลไม้อ่อนตัวลง (Ponting et al., 1966)

El-Aouar และคณะ (2006) ศึกษาผลของการใช้น้ำตาลซูโครสและคอร์นซีรัปในการแช่หิมอบแห้งมะละกอบ ต่อการลดลงของน้ำหนัก (weight reduction; WR) การสูญเสียน้ำ (water loss; WL) การเพิ่มขึ้นของของแข็ง (solid gain; SG) และค่าวอเตอร์แอกติวิตี โดยหั่นมะละกอบให้มีขนาด 30 มม.×50 มม.×5 มม. แช่ในสารละลายซูโครสและคอร์นซีรัปที่ความเข้มข้น 44 ถึง 56% (w/v) แปรอุณหภูมิและเวลาที่ใช้แช่เป็น 34-46 องศาเซลเซียส และ 120-210 นาที ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า การแช่มะละกอบในสารละลายซูโครสทำให้ค่า WR, WL และ SG สูงกว่าการใช้สารละลายคอร์นซีรัป แต่ให้ค่า a_w ต่ำกว่า เนื่องจากที่ระดับความเข้มข้นเท่ากันสารละลายซูโครสมีค่า a_w ต่ำกว่า สารละลายคอร์นซีรัป ทำให้ค่าแรงดันออสโมติกสูงกว่า ดังนั้นการใช้สารละลายซูโครสจึงมีการถ่ายเทมวลสารได้ดีกว่าการใช้สารละลายคอร์นซีรัป

Matussek, Czukor และ Meresz (2008) เปรียบเทียบผลของการใช้ซูโครสและฟรุคโท-โอลิโกแซคคาไรด์เป็นสารละลายออสโมติก ในการทำแห้งโดยการออสโมซิสแอมป์เปิดต่อค่าการลดลงของน้ำหนัก (WR) ปริมาณความชื้น (moisture content; MC) ค่าการสูญเสียน้ำ (WL) และค่าการเพิ่มขึ้นของของแข็ง (SG) โดยปอกเปลือกแอมป์เปิดและหั่นเป็นทรงลูกบาศก์ยาวด้านละ 10 มม. แล้วแช่ใน

สารละลาย กรดซิตริก 1.0% (w/v) เพื่อยับยั้งปฏิกิริยาสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ จากนั้นลวกในน้ำที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที ซึบให้แห้งด้วยกระดาษ แ่งแช่ในสารละลายซูโครสและฟรุทโท-โอลิโกแซคคาไรด์ที่ความเข้มข้น 40 50 และ 60% (w/v) อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 20, 30 และ 40 นาที อัตราส่วนเนื้อแอปเปิลต่อสารละลายเป็น 1:10 (w/v) พบว่าการใช้ซูโครสที่อุณหภูมิและความเข้มข้นเดียวกัน ทำให้ค่า MC ของแอปเปิลต่ำกว่าการใช้ฟรุทโท-โอลิโกแซคคาไรด์ แต่ให้ค่า WL และ SG สูงกว่า ขณะเดียวกันพบว่าการใช้ฟรุทโท-โอลิโกแซคคาไรด์ให้ค่า WR สูงกว่าการใช้ซูโครส เนื่องจากความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างของสารละลายออสโมติก โดยฟรุทโท-โอลิโกแซคคาไรด์มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าซูโครส จึงขัดขวางการแพร่ของออสโมซิส ทำให้การถ่ายเทมวลสารต่ำกว่าซูโครส

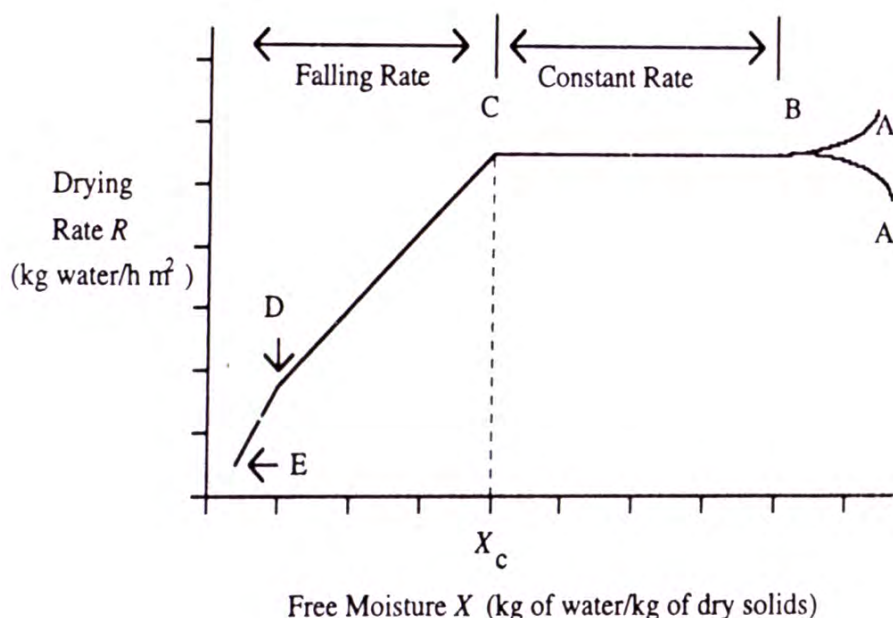
Manivannan และ Rajasimman (2009) ศึกษาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำแห้งโดยการออสโมซิสปีตรูตในสารละลายน้ำตาล จากค่าการสูญเสีย น้ำ (WL) การเพิ่มขึ้นของของแข็ง (SG) และค่าการลดลงของน้ำหนัก (WR) ซึ่งพิจารณาจากกราฟสามมิติที่แสดงความสัมพันธ์ร่วมของปัจจัยสองปัจจัย (ระยะเวลาที่ใช้แช่กับอุณหภูมิของสารละลาย ความเข้มข้นกับอุณหภูมิของสารละลาย อัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารละลายกับอุณหภูมิของสารละลาย ความเข้มข้นของสารละลายกับระยะเวลาที่ใช้แช่ อัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารละลายกับระยะเวลาที่ใช้แช่ และอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารละลายกับความเข้มข้นของสารละลาย) โดยตัดปีตรูตเป็นชิ้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มม. หนา 3 มม. แช่ในสารละลายซูโครสที่แปรระดับความเข้มข้น อุณหภูมิ ระยะเวลา และอัตราส่วนของเนื้อปีตรูตต่อสารละลายเป็น 20-60% (w/v) 25-45 องศาเซลเซียส 30-150 นาที และ 1:5-1:25 (w/v) ตามลำดับ พบว่าระยะเวลาที่ใช้แช่และความเข้มข้นของสารละลายเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า WL มากกว่าอุณหภูมิ ขณะที่ระยะเวลาที่ใช้แช่และอุณหภูมิของสารละลายเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า SG มากกว่าความเข้มข้น และพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งโดยการออสโมซิสนั้นใช้สารละลายซูโครสที่มีความเข้มข้น 27.71.0% (w/v) อุณหภูมิ 33.64 องศาเซลเซียส ใช้เวลาแช่ 115.37 นาที และอัตราส่วนของเนื้อปีตรูตต่อสารละลายเป็น 1:17.5 (w/v) ซึ่งภาวะดังกล่าวมีผลให้ค่า WL, SG และ WR สูงสุดเท่ากับ 53.74, 8.34 และ 45.41 กรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักเริ่มต้น

2.2.3 การอบแห้ง

การอบแห้ง คือ การลดปริมาณความชื้นของอาหารโดยการใช้ความร้อน จนถึงระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ โดยมีค่า a_w ต่ำกว่า 0.65 ทำให้เก็บอาหารไว้บริโภคได้นานขึ้น (Mossel, 1975) อาหารแห้งแต่ละชนิดมีปริมาณความชื้นในระดับที่ปลอดภัยไม่เท่ากัน โดยผลิตภัณฑ์ผลไม้อบแห้งต้องมีปริมาณความชื้นต่ำกว่า 18% โดยน้ำหนักเปียก และมีค่า a_w ต่ำกว่า 0.65

(สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532) การอบแห้งนอกจากจะเป็นการถนอมอาหารแล้วยังช่วยลดปริมาณและน้ำหนักของอาหาร สามารถลดต้นทุนในการเก็บรักษาและขนส่ง กระบวนการอบแห้งโดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period) ในช่วงแรกของการอบแห้งอุณหภูมิที่ผิวหน้าของอาหารมีการปรับตัวเข้าสู่สมดุลกับอุณหภูมิภายในตู้อบ (ช่วง A'B หรือ AB ในภาพที่ 2.4) โดยทั่วไปจะใช้เวลานานมาก จากนั้นจะเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (ช่วง BC ในภาพที่ 2.4) ซึ่งเป็นช่วงที่ความชื้นบริเวณผิวหน้าของอาหารระเหยออกไป และความชื้นที่อยู่ภายในชั้นอาหารก็เคลื่อนที่มาทดแทนด้วยอัตราเร็วคงที่ โดยผิวหน้าของอาหารยังคงเปียกอยู่ จากนั้นอัตราการอบแห้งจะดำเนินการต่อไปจนถึงจุดปริมาณความชื้นวิกฤต (จุด X_c ในภาพที่ 2.4) เป็นจุดที่อัตราการอบแห้งเปลี่ยนจากอัตราการอบแห้งคงที่เป็นอัตราการอบแห้งลดลง



ภาพที่ 2.4 กราฟอัตราการอบแห้ง

ที่มา: Barbosa-Cánovas และ Vega-Mercado (1996)

ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) เป็นช่วงที่ปริมาณความชื้นของอาหารลดต่ำกว่าจุดปริมาณความชื้นวิกฤต อัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในอาหารมายังผิวหน้าของการระเหยต่ำกว่าอัตราการระเหยของความชื้นที่ผิวหน้าไปยังอากาศโดยรอบ เนื่องจากความชื้นในชั้นอาหารเหลือน้อย และปริมาณน้ำอิสระ (free water) ระเหยออกไปเกือบหมดแล้วเหลือแต่น้ำที่จับอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ (bound water) ภายในอาหาร ทำให้การระเหยความชื้นเป็นไปได้ยากขึ้น อัตราการอบแห้งจึงลดลง และเมื่อผิวหน้าของการระเหยแห้งสนิท (จุด D ในภาพที่ 2.4) ระยะเวลาของการระเหย

(plane of evaporation) จะเปลี่ยนไปอยู่ทางด้านในของอาหาร ความชื้นจะต้องแพร่ผ่านชั้นของแข็งที่ผิวหน้าของอาหาร ดังนั้นอัตราการอบแห้งจึงลดลงต่ำกว่าในช่วงแรก แต่บางครั้งอาจไม่พบความแตกต่างของอัตราการอบแห้งที่ลดลงของทั้งสองช่วง

อัตราการอบแห้งของอาหารขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการอบแห้ง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายตามต้องการ ปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ผักผลไม้ เช่น ธรรมชาติของอาหาร ตำแหน่งของอาหารในตู้อบ อุณหภูมิ และความเร็วลม นอกจากนี้แล้วชนิดและความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกก็เป็นปัจจัยสำคัญต่ออัตราการอบแห้ง การใช้สารละลายออสโมติกที่มีความเข้มข้นสูงและสารละลายออสโมติกที่มีขนาดโมเลกุลเล็ก มีผลให้อัตราการอบแห้งของผักผลไม้สูงขึ้น และใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการใช้สารละลายออสโมติกที่มีความเข้มข้นต่ำและสารละลายออสโมติกที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ (Fernandes et al., 2006)

Riva และคณะ (2005) ศึกษาหาอัตราการอบแห้งของขึ้นแอบริคอตที่หั่นเป็นทรงลูกบาศก์ยาวด้านละ 14 มม. หลังผ่านการออสโมซิสในสารละลายสามชนิด คือ ซูโครส 60% (w/v) ซอร์บิทอล 60% (w/v) และสารละลายไอโซโทนิค (ซูโครส 13% (w/v)) นาน 60 นาที เมื่อเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งหลังผ่านการออสโมซิสในซูโครสกับซอร์บิทอล พบว่าช่วงที่ขึ้นแอบริคอตมีความชื้นมากกว่า 1.5 กิโลกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง อัตราการอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน แต่หลังจากช่วงนี้อัตราการอบแห้งของแอบริคอตที่ผ่านการแช่ในสารละลายซูโครสจะลดลงต่ำกว่าการแช่ในสารละลายซอร์บิทอล เนื่องจากซูโครสเกิดการตกผลึกและขัดขวางการระเหยของน้ำในระหว่างการอบแห้ง

ในกระบวนการอบแห้งจะมีการบันทึกน้ำหนักตามช่วงเวลาของการอบแห้งตั้งแต่เริ่มอบแห้งจนผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีน้ำหนักคงที่ เพื่อหาเวลาในการอบแห้งที่เหมาะสม ข้อมูลที่ได้สามารถใช้ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งแบบจำลองที่นิยมใช้ เช่น แบบจำลองของ Page (Mandala, Anagnostaras and Oikonomou, 2005) Henderson and Pabis (Ghodake, Goawami and Chakraverty, 2006) และ modified Henderson and Pabis (Menges and Ertekin, 2006) เป็นต้น

Erbay และ Icier (2008) ศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งใบมะกอกเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมของการอบแห้ง โดยเก็บใบมะกอกมาล้างและซับด้วยกระดาษให้แห้ง นำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาด ขนาด 0.3 ม.× 0.3 ม.× 0.4 ม. ที่อุณหภูมิ 50, 60 หรือ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมร้อน 0.5 1.0 หรือ 1.5 เมตรต่อวินาที พบว่าแบบจำลอง

modified Henderson and Pabis เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งของใบมะกอก เมื่อเทียบกับแบบจำลองของ Lewis (Newton), Page, modified Page, Henderson and Pabis, Logarithmic, Two term, Twoterm exponential, Diffusion approach, Verma และ Midilli เนื่องจากให้ค่า correlation coefficient (r) สูงที่สุดเท่ากับ 0.9955 และให้ค่า chi square (χ^2) และ root mean square error (RMSE) ต่ำที่สุดเท่ากับ 2.78×10^{-5} และ 0.0048 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิและความเร็วลมร้อนที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งใบมะกอก คือ 60 องศาเซลเซียส และ 1 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และพบว่าแม้จะใช้อุณหภูมิและความเร็วลมร้อนที่ 70 องศาเซลเซียส และ 1.5 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ก็ไม่มีผลให้อัตราการอบแห้งสูงตามไปด้วย

Lemus-Mondaca และคณะ (2009) ศึกษาผลของสารละลายออสโมติกต่ออุณหภูมิการอบแห้งและคุณภาพของมะละกอก โดยล้างมะละกอกและนำเมล็ดออกแล้วหั่นตามแนวยาวเป็นแผ่นหนา 10 ± 2 มม. แบ่งมะละกอกเป็นหกชุดการทดลอง ชุดที่ 1 2 และ 3 อบด้วยตู้อบลมร้อนที่ 40 60 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนชุดที่ 4 5 และ 6 นำไปแช่ในสารละลายซูโครสเข้มข้น 40 50 และ 60% (w/v) ตามลำดับ ที่ 40 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที แล้วอบด้วยตู้อบลมร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส พบว่าชุดการทดลองที่ผ่านการแช่ในสารละลายซูโครสแล้วนำไปอบแห้งมีอัตราการอบแห้งต่ำกว่าชุดการทดลองที่ไม่ผ่านการแช่ และการใช้ซูโครสที่มีความเข้มข้นสูงกว่าจะมีอัตราการอบแห้งต่ำกว่าการใช้ที่มีความเข้มข้นต่ำ เนื่องจากการรวมตัวกันของผลึกน้ำตาล ทำให้ผิวหน้าแห้งแข็ง น้ำจึงระเหยออกจากผิวหน้าได้น้อยลง เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการอบให้สูงขึ้น จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำมากขึ้นตามไปด้วย แต่การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายซูโครสให้สูงขึ้นมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำต่ำลง เพราะเกิดการสะสมของน้ำตาลซูโครสที่ผิวด้านนอกของชิ้นมะละกอก และน้ำตาลซูโครสที่แพร่เข้าไปในชิ้นมะละกอกทำให้ความเป็นรูพรุนลดลง เมื่อนำไปอบแห้งจึงทำให้เกิดผลึกน้ำตาลแห้งแข็งที่ผิว ส่งผลให้น้ำแพร่ออกมาได้น้อยลง

2.3 การใช้น้ำผึ้งและน้ำสับปะรดในการปรับปรุงคุณภาพผักผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง

ในกระบวนการผลิตผักผลไม้แช่อิ่มอบแห้งโดยทั่วไปมักแช่ผักผลไม้ลงในสารละลายออสโมติกชนิดต่าง ๆ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของของแข็งและการสูญเสียน้ำของผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีลักษณะแตกต่างกันตามสมบัติของสารละลายออสโมติก โดยมากสารละลายออสโมติกมักใช้น้ำตาลซูโครสเป็นหลัก แต่การใช้น้ำตาลซูโครสเพียงชนิดเดียวจะทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีลักษณะแห้งแข็ง เนื่องจากเกิดผลึกน้ำตาลบริเวณผิวหน้า และทำให้ค่า a_w และความชื้นอยู่ในปริมาณสูง ดังนั้นการควบคุมการเกิดผลึกน้ำตาลสามารถทำได้โดยการควบคุมไม่ให้เกิดนิวเคลียสของผลึก โดยการปรับอัตราส่วนของน้ำตาลโมโนแซคคาไรด์และน้ำตาลไดแซคคาไรด์ (Brown, 1969) จาก

เหตุผลดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้น้ำผึ้งและน้ำสับประรดร่วมกับน้ำตาลซูโครสเป็นสารละลายออสโมติก

2.3.1 น้ำผึ้ง

น้ำผึ้งได้จากน้ำหวาน (nectar) ของดอกไม้ และจากแหล่งน้ำหวานอื่น ๆ ที่ผึ้งนำมาเก็บสะสมไว้ และผ่านขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพบางประการแล้วสะสมไว้ในรังผึ้ง ทำให้มีกลิ่นหอมและมีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน น้ำผึ้งตามธรรมชาติจะมีรสหวานจัด กลิ่นหอม มีสีเหลืองอ่อน ๆ จนถึงสีน้ำตาลเข้มแล้วแต่แหล่งหรือชนิดพืชอาหาร (สิริวัฒน์ วงษ์ศิริ, 2532) มีฟรุกโทสประมาณ 38% กลูโคสประมาณ 31.0% มอลโทสประมาณ 7% ซูโครสประมาณ 1.5% และความชื้นประมาณ 17% โดยน้ำหนักเปียก (The National Honey Board, 2009) จากการที่น้ำผึ้งมีกลูโคสและฟรุกโทสเป็นองค์ประกอบหลัก จึงมีสมบัติรักษาความชื้นและควบคุมการเกิดผลึกน้ำตาลบริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ (Kitts, 2010) เพราะการเกิดผลึกน้ำตาลส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แห้งแข็งและมีกลิ่นน้ำตาลสีขาวบริเวณผิวหน้า ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค นอกจากนี้น้ำผึ้งที่มีความเข้มข้นสูงส่งผลให้มีแรงดันออสโมติกสูง และขนาดโมเลกุลของกลูโคสและฟรุกโทสที่เล็กกว่าซูโครส ทำให้การแพร่ของของแข็งและการสูญเสียน้ำขณะออสโมซิสมากขึ้น

น้ำผึ้งมีองค์ประกอบของกรดฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ กรดแอสคอร์บิก กรดอินทรีย์ กรดอะมิโน และเอนไซม์ ได้แก่ กลูโคสออกซิเดส แคทาเลส และเพอร์ออกซิเดส ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้มีสมบัติเป็นสารแอนติออกซิแดนท์ สามารถป้องกันการเสื่อมคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ในผักและผลไม้ โดยปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในน้ำผึ้งจะแตกต่างกันขึ้นกับแหล่งที่มาของน้ำผึ้ง (Gheldof, Wang and Engeseth, 2002)

น้ำผึ้งสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ เนื่องจากเป็นสารที่มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) และค่า a_w ประมาณ 3.91 และ 0.5 ตามลำดับ และมีค่าแรงดันออสโมติกสูงไม่เหมาะต่อการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ อีกทั้งยังมีองค์ประกอบของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดจากการย่อยสลายของกลูโคสด้วยกลูโคสออกซิเดส ซึ่งเป็นสารที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ด้วย (Cardetti, 2004)

2.3.2 น้ำสับประรด

น้ำสับประรดเป็นน้ำผลไม้ที่ได้จากผลสับประรด โดยอาจผ่านกระบวนการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น น้ำสับประรด 100% น้ำสับประรดเข้มข้น ในน้ำสับประรดประกอบด้วยน้ำตาลซูโครสประมาณ 6 % น้ำตาลกลูโคสประมาณ 2 % และน้ำตาลฟรุกโทสประมาณ 1.98% (Elkins et al., 1997) แม้ว่าจะมี

น้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสในปริมาณน้อยกว่าน้ำผึ้ง แต่มีความเป็นกรดสูง (pH ประมาณ 3.2-3.6) ซึ่งจะช่วยไฮโดรไลซ์น้ำตาลซูโครสเป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสมากขึ้นเมื่อมีการให้ความร้อน (Ramallo and Mascheroni, 2005) นอกจากนี้ น้ำสับประรดยังช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ เพราะน้ำสับประรดมีสารประกอบซัลไฟดริลเป็นองค์ประกอบ (Lozano-de-Gonzalez et al., 1993)

ดังนั้นการใช้ น้ำผึ้งและน้ำสับประรดทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนในกระบวนการอบสโมทิสจึงสามารถช่วยควบคุมการตกผลึกของน้ำตาลบริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ และช่วยปรับปรุงกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้นได้

McLellan และคณะ (1995) ศึกษาผลของน้ำผึ้งต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ลูกเกดเปรียบเทียบกับลูกเกดทางการค้า โดยแช่ของุ่นที่เอาเมล็ดออกแล้วในสารละลายน้ำผึ้ง 10% (v/v) ที่ความดันบรรยากาศ 25 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นาน 15 นาที และแช่ต่อที่ความดันบรรยากาศปกติ 18 ชั่วโมง ที่ 0 องศาเซลเซียส แล้วอบด้วยตู้อบลมร้อนที่ 63 องศาเซลเซียส นาน 10 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีความชื้น 14% จากนั้นทดสอบทางประสาทสัมผัสด้วยการทดสอบความชอบ (Preference test) ใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 18 คน พบว่าผู้ทดสอบ 94% ยอมรับลูกเกดที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำผึ้งมากกว่าลูกเกดทางการค้า และผู้ทดสอบยอมรับว่าน้ำผึ้งช่วยส่งเสริมให้ลูกเกดมีกลิ่นรสผลไม้มากขึ้น มีเนื้อสัมผัสนุ่มและเคี้ยวง่าย

Chen และคณะ (2000) ศึกษาผลของน้ำผึ้งจากแหล่งต่างกันต่อการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ในมันฝรั่ง แอปเปิล และสาลี โดยผักผลไม้ที่ผ่านการทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (homogenize) แล้วเติมน้ำผึ้งที่แปรระดับความเข้มข้นเป็น 0.5-4% (v/v) เปรียบเทียบกับชุดที่ไม่เติมน้ำผึ้ง ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง โดยสำหรับชุดควบคุมผู้วิจัยนำผักผลไม้ที่เป็นเนื้อเดียวกันแล้ว ไปต้มในน้ำเดือด 10 นาที ก่อนเพื่อยับยั้งการทำงานของพอลิฟีนอลออกซิเดส จากนั้นวัดค่าการเกิดสีน้ำตาลตามวิธีของ Omidiji และ Okpuzor (1996) โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 420 นาโนเมตร พบว่ามันฝรั่ง แอปเปิล และสาลี ที่มีการเติมน้ำผึ้งลงไปเกิดสีน้ำตาลน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่เติม ซึ่งประสิทธิภาพในการป้องกันการเกิดสีน้ำตาลของน้ำผึ้งขึ้นกับแหล่งของน้ำผึ้งและปริมาณของสารแอนติออกซิแดนทีในน้ำผึ้ง

Ramallo และ Mascheroni (2005) ศึกษาอัตราการสูญเสียน้ำและการเพิ่มขึ้นของของแข็งรวมทั้งการเปลี่ยนแปลงปริมาณกลูโคสและฟรุกโทสในระหว่างการทำแห้งโดยการอบสโมทิสสับประรด ปอกเปลือกสับประรดเอาแกนกลางออก หั่นตามขวางเป็นวงแหวนหนา 0.6 ซม. แช่ในสารละลายซูโครสเข้มข้น 60% (w/v) อัตราส่วนเนื้อสับประรดต่อสารละลายเป็น 1:20 แช่นาน 10 ชั่วโมง แปรอุณหภูมิของสารละลายซูโครสเป็น 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายซูโครสให้

สูงขึ้นจาก 30 เป็น 50 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและของน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้น 3.8 และ 2.8 เท่า ตามลำดับ และการออกซิเดชันโดยใช้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ทำให้อัตราส่วนของปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นต่อปริมาณน้ำที่สูญเสียไปมีค่าสูงที่สุด ส่วนปริมาณน้ำตาลในชั้นสับปะรดเมื่อวิเคราะห์ด้วย High Performance Liquid Chromatography (HPLC) พบว่าการออกซิเดชันโดยใช้อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีผลให้ปริมาณฟรุกโทสและกลูโคสเพิ่มขึ้นมากที่สุด เนื่องจากกรดที่อยู่ในสับปะรดสามารถไฮโดรไลซ์ซูโครสเป็นกลูโคสและฟรุกโทส

Konopacka และคณะ (2008) ศึกษาการใช้ผลไม้เข้มข้นเป็นสารออกซิเดติกสำหรับการทำแห้งเซอริโดยการออกซิเดชัน โดยล้างเซอริและนำเมล็ดออก แบ่งแช่ในสารละลายออกซิเดติก 4 ชนิด คือ น้ำแอปเปิลเข้มข้น (AJ) น้ำแอปเปิลและเซอริเปรี้ยวเข้มข้น (AJ+SCJ) น้ำแอปเปิลเข้มข้นที่ผ่านการกำจัดกรด (DeAAJ) และสารละลายซูโครส (S) เป็นชุดควบคุม ความเข้มข้นของสารละลายออกซิเดติกทุกชุดการทดลองเป็น 65 องศาบริกซ์ อัตราส่วนของเนื้อเซอริต่อสารละลายเป็น 1:4 แช่ที่ 40 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นสะเด็ดน้ำแล้วอบด้วยตู้อบลมร้อน ความเร็วลม 2.5 เมตรต่อวินาทีที่ 65 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝน 11 คน พบว่าชุดการทดลอง DeAAJ มีคะแนนด้านกลิ่นรสและคุณภาพโดยรวมสูงที่สุดเท่ากับ 6.7 จาก 10 คะแนน และจากการวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานิน พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนทำให้ปริมาณแอนโทไซยานินของเซอริลดลงทุกชุดการทดลอง โดยชุดการทดลอง AJ+SCJ มีปริมาณแอนโทไซยานินเหลือมากที่สุด (2,160 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากชุดการทดลองดังกล่าวมีปริมาณน้ำตาลฟรุกโทสในผลิตภัณฑ์สุดท้ายอยู่น้อยกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ ซึ่งน้ำตาลฟรุกโทสมีผลให้ความคงตัวของแอนโทไซยานินลดลง

Perera และคณะ (2010) ศึกษาผลของน้ำสับปะรดต่อการเปลี่ยนแปลงของสีและเนื้อสัมผัสของแอปเปิลพันธุ์ Granny Smith และพันธุ์ Pink Lady ภายใต้ความดันสูง โดยล้างแอปเปิลด้วยสารละลายคลอรีน 200 ส่วนในล้านส่วน ปอกเปลือกเอาแกนกลางออก หั่นเป็นทรงลูกบาศก์ยาวด้านละ 1 ซม. จากนั้นแช่ในสารละลายกรดแอสคอร์บิกเข้มข้น 0.1.0% (w/v) เพื่อป้องกันการเกิดสีน้ำตาลของสารละลายออกจนสะเด็ดน้ำ บรรจุแอปเปิล 200 กรัม ลงในถุงพลาสติกที่ด้านการซีมผ่านของออกซิเจนขนาด 14 ซม.×18.5 ซม. แล้วเติมน้ำสับปะรดที่แปรระดับความเข้มข้นเป็น 0, 25 และ 50% (v/v) ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ปิดผนึกถุงพลาสติกแบบสุญญากาศที่ 0.8 บาร์ นำตัวอย่างไปผ่านการให้ความดัน 600 เมกะพาสคาล ด้วยเครื่อง Flow pressure system Quintus[®] ที่ 22 องศาเซลเซียส นาน 1 3 และ 5 นาที และเก็บรักษาไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส นาน 4 สัปดาห์ เปิดบรรจุภัณฑ์ให้ขึ้นแอปเปิลสัมผัสกับอากาศนาน 5 ชั่วโมง แล้ววัดค่าสีด้วยระบบ CIE $L^*a^*b^*$ พบว่าการใช้น้ำสับปะรดเข้มข้น 50% (v/v)

ร่วมกับการให้ความดันสูง 5 นาที ทำให้แอปเปิลทั้งสองพันธุ์มีการเปลี่ยนแปลงสีและคะแนนการเกิดสีน้ำตาลต่ำที่สุด และแอปเปิลพันธุ์ Granny Smith มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีต่ำกว่าพันธุ์ Pink Lady เนื่องจากในน้ำสับประรดมีสารประกอบซัลไฟดริล โบรมีเลน และกรดอินทรีย์ต่าง ๆ รวมทั้งการใช้ความดันสูงมีผลยับยั้งการทำงานของพอลิฟีนอลออกซิเดส นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มระยะเวลาในการให้ความดันสูงกับแอปเปิล ทำให้เนื้อสัมผัสมีความคงตัวมากขึ้น เพราะความดันสูงช่วยยับยั้งการทำงานของเพกทินเมทิลเอสเทอร์

2.4 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผักผลไม้แช่อิ่มอบแห้งในระหว่างการเก็บรักษา

คุณภาพของอาหารจะลดลงเมื่อเวลาของการเก็บรักษานานขึ้น จากการเสื่อมเสียที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ ซึ่งมีผลทำให้คุณภาพของอาหารลดลงจนไม่ปลอดภัยต่อการบริโภคหรือไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค และไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของกฎหมาย ดังนั้นอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารก็คือช่วงเวลาตั้งแต่ผลิตภัณฑ์ถูกผลิตขึ้นมา ระหว่างช่วงเวลาดังกล่าว ผลิตภัณฑ์ยังมีคุณภาพทางด้านคุณค่าทางอาหาร รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส และลักษณะปรากฏเป็นที่พอใจของผู้บริโภค จนถึงเวลาที่ผลิตภัณฑ์ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคหรือไม่ปลอดภัยต่อการบริโภค (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, 2550)

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผักผลไม้แช่อิ่มอบแห้งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ลักษณะทางธรรมชาติของผักผลไม้ ภาวะการวางจำหน่าย การกระจายสินค้าหรือการเก็บรักษา และกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ สภาวะแวดล้อมในการเก็บรักษา และภาชนะบรรจุ

2.4.1 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผักผลไม้แช่อิ่มอบแห้งเนื่องจากองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ชนิดของสารละลายออสโมติก ความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี

ผลิตภัณฑ์ผักผลไม้แช่อิ่มอบแห้งมักจะเกิดผลึกน้ำตาลบริเวณผิวหน้าในระหว่างเก็บรักษา โดยปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดผลึกน้ำตาล คือ ชนิดของสารละลายออสโมติกที่แตกต่างกันในขั้นตอนของการออสโมซิส การใช้สารละลายออสโมติกที่มีน้ำตาลอินเวิร์ตอยู่ปริมาณมากกว่า จะช่วยควบคุมการตกผลึกน้ำตาลที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่า อีกทั้งยังช่วยชะลอการสูญเสียความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ และมีผลลดค่า a_w ของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากน้ำตาลอินเวิร์ตจับกับน้ำได้ดีทำให้มีสมบัติรักษาความชื้น (Fennema, 1996)

ความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตีของผลิตภัณฑ์สุดท้าย มีผลต่อการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสีย จึงต้องควบคุมให้อยู่ในระดับที่เชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้ ตามข้อกำหนดของ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้อบแห้ง มอก. 919-2532 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532) กำหนดให้ผลไม้อบแห้งต้องมีปริมาณความชื้นต่ำกว่า 18% โดยน้ำหนักเปียก และค่า a_w ต่ำกว่า 0.65 เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ผลไม้อบแห้งสามารถเก็บรักษาได้นาน

2.4.2 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผักผลไม้แช่อิ่มอบแห้งเนื่องจากสภาวะแวดล้อมในการเก็บรักษา ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น และแสง

ในระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ผักผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง ผลิตภัณฑ์มักจะสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และแสง ซึ่งสามารถกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่ทำให้เสื่อมเสียคุณภาพด้านสี กลิ่นรส ลักษณะปรากฏ และคุณค่าทางโภชนาการ

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ มีผลต่อการเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสลายของอาหาร เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ และยังเร่งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสียอีกด้วย โดยการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำกว่าอัตราของปฏิกิริยาที่ทำให้อาหารเสื่อมเสียจะดำเนินไปได้ช้ากว่า

ความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดต่อความคงตัวของผักผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง เพราะผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งแล้วจะมีความชื้นอยู่ในระดับต่ำ หากเก็บรักษาไม่เหมาะสม เช่น ให้สัมผัสกับอากาศชื้นจะทำให้ผลิตภัณฑ์ดูดความชื้นกลับเข้ามา ซึ่งถ้าผลิตภัณฑ์มีความชื้นสูงก็จะเสี่ยงต่อการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสีย

แสงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อความคงตัวของผลิตภัณฑ์ เพราะทำให้สารสี เช่น คลอโรฟิลล์ แคโรทีน เบตาเลน รวมทั้งวิตามินบางชนิด เช่น วิตามินซี วิตามินบีหนึ่ง วิตามินเอ ถูกทำลายทำให้คุณค่าทางโภชนาการลดลง ดังนั้นภาชนะบรรจุที่ใช้ควรป้องกันไม่ให้ผลิตภัณฑ์ถูกแสง

2.4.3 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผักผลไม้แช่อิ่มอบแห้งเนื่องจากภาชนะบรรจุ

ภาชนะบรรจุอาหารมีบทบาทสำคัญในการช่วยรักษาคุณภาพอาหาร เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาอาหารให้นานขึ้น และรักษาคุณภาพของอาหารรวมถึงคุณค่าทางอาหาร พร้อมทั้งเป็นที่ดึงดูดสำหรับผู้บริโภค ซึ่งอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ โดยการเลือกใช้ภาชนะบรรจุที่เหมาะสมกับประเภทอาหาร ต้องคำนึงถึงความสามารถในการรักษาคุณภาพของอาหารได้ตามอายุที่ต้องการ รูปแบบของภาชนะบรรจุที่ใช้ และต้นทุนที่เหมาะสม ปัจจุบันผลิตภัณฑ์ผักผลไม้แช่อิ่มอบแห้งมักจะบรรจุในภาชนะพลาสติก ซึ่งจะขอก้าวถึงพลาสติกที่นิยมใช้ในการบรรจุอาหาร 2 ชนิด คือ พอลิเอทิลีน และพอลิโพรพิลีน

พอลิเอทิลีน (polyethylene; PE) เป็นพลาสติกที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมบรรจุ เนื่องจากราคาต่ำและมีสมบัติที่ดีหลายประการ โดยมีความเฉื่อยต่อสารเคมีค่อนข้างสูงและมีขั้วต่ำ ทำให้ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดีแต่ยอมให้ออกซิเจนซึมผ่านได้ง่าย ป้องกันการซึมผ่านของไขมันได้ดี และปิดผนึกด้วยความร้อนได้ดี โดยทั่วไป PE จะแบ่งเป็น 3 ประเภท ตามความหนาแน่นดังนี้ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene; LDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (medium density polyethylene; MDPE) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene; HDPE) ค่าความหนาแน่นนี้มีผลโดยตรงต่อสมบัติของ PE คือ เมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจะทำให้ความใสลดลง ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ความทนทานต่อความร้อนสูงขึ้น และป้องกันการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้น โดย HDPE ใช้ทำถุงร้อน ขณะที่ LDPE ใช้ทำถุงเย็น (งามทิพย์ ภู่วโรดม, 2550) ซึ่งพลาสติกชนิด LDPE และ HDPE ที่มีความหนา 0.0254 มม. มีค่าการซึมผ่านของน้ำและไอน้ำเท่ากับ 1.30 และ 0.30 กรัม/24 ชั่วโมง/100 ตารางนิ้ว ที่ 95 องศาฟาเรนไฮต์ และความชื้นสัมพัทธ์ 90% ตามลำดับ (Hanlon, 1992)

พอลิโพรพิลีน (polypropylene; PP) เป็นพลาสติกที่มีความใสมันเงา ทนอุณหภูมิได้สูงถึง 120 องศาเซลเซียส ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำและไขมันได้ดี สมบัติของ PP จะใกล้เคียงกับ HDPE อย่างไรก็ตามสมบัติสำคัญที่ PP แตกต่างจาก HDPE ได้แก่ ความหนาแน่นต่ำกว่า จุดหลอมเหลวสูงกว่า ความแข็งตึงสูงกว่า และต้านการซึมผ่านของไขมันได้ดีกว่า (งามทิพย์ ภู่วโรดม, 2550) ซึ่งพลาสติกชนิด PP ที่มีความหนา 0.0254 มม. มีค่าการซึมผ่านของน้ำและไอน้ำเท่ากับ 0.70 กรัม/24 ชั่วโมง/100 ตารางนิ้ว ที่ 95 องศาฟาเรนไฮต์ และความชื้นสัมพัทธ์ 90% (Hanlon, 1992)

Silveira, Rahman และ Buckle (1996) ศึกษาการทำแห้งโดยการออสโมซิสสับประรดต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยล้างสับประรดและปอกเปลือกเอาแกนกลางออก หั่นเป็นวงแหวนหนา 12 มม. แล้วตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมให้ได้ 8-12 ชิ้น แซ่สับประรด 500 กรัม ลงในสารละลายซูโครสที่แปรระดับความเข้มข้นและอุณหภูมิเป็น 50 60 70 75% (w/w) และ 30 45 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อัตราส่วนเนื้อสับประรดต่อสารละลายเป็น 1:4 (w/w) แช่นาน 4.50 ชั่วโมง แล้วนำไปลวกด้วยไอน้ำ 3 นาที และแช่ในสารละลายโพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ 0.25% (w/v) 6 นาที ตามด้วยการแช่ในสารละลายกรดซิตริก 2% (w/v) 2 นาที แบ่งเป็นสองชุดการทดลอง ชุดแรกอบด้วยตู้อบลมร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง ส่วนชุดที่สองอบด้วยตู้อบภายใต้ภาวะสุญญากาศที่ 50 องศาเซลเซียส ความดัน 1.33 กิโลพาสคาล 5 ชั่วโมง เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อบแล้วในถุงพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนนาน 4 เดือน พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารละลายซูโครสให้สูงขึ้น มีผลทำให้ค่าการสูญเสียและค่าการเพิ่มขึ้นของของแข็งสูงขึ้น และจากการวัดค่าสีด้วยระบบ Hunter Lab และวิเคราะห์การเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัย

เอนไซม์ โดยวิธีสกัดด้วยแอลกอฮอล์แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 420 นาโนเมตร หลังจากเก็บรักษาครบ 4 เดือน พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งภายใต้ภาวะสุญญากาศมีการเกิดสีน้ำตาลน้อยกว่าการอบด้วยลมร้อน ขณะที่ค่าความสว่าง (L) และค่าสีเหลือง (b) สูงกว่า ส่วนค่าสีแดง (a) ต่ำกว่าการอบด้วยลมร้อน และเมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่เก็บรักษาไว้เป็นเวลา 0 และ 3 เดือน มาทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบฮีดอนิก 9 ระดับ โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน 59 คน สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบด้วยลมร้อน และ 73 คน สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งภายใต้ภาวะสุญญากาศ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบภายใต้ภาวะสุญญากาศ มีคะแนนความชอบด้านกลิ่นรสและเนื้อสัมผัสสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบด้วยลมร้อน แต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบด้วยลมร้อนและผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งภายใต้ภาวะสุญญากาศ แล้วเก็บรักษาครบ 30 วัน มีคะแนนการเกิดสีน้ำตาลสูงกว่า และคะแนนด้านกลิ่นรสและเนื้อสัมผัสต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ที่เก็บรักษา 0 เดือน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย

วัตถุดิบ

หัวบีตรูตที่นำมาใช้ในการวิจัยเป็นสายพันธุ์ที่ได้รับการส่งเสริมให้ปลูกทางตอนเหนือของประเทศไทย มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Beta vulgaris* subsp. *vulgaris* อยู่ในระยะพัฒนาเต็มที่ อายุ 14-16 สัปดาห์หลังจากการเพาะด้วยเมล็ดจนงอกแล้วย้ายลงแปลงปลูก ขนาดของหัวใกล้เคียงกัน เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-7 ซม. ขนาด 7-8 หัวต่อกิโลกรัม ซึ่งจากเกษตรกรจังหวัดน่านในช่วงปี พ.ศ. 2552-2553

สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีและทางกายภาพ

Acetonitrile	Carlo Erba, Italy	HPLC grade
Dipotassium hydrogen phosphate	Merck, Germany	AR grade
Ethyl alcohol absolute (99.8%)	Carlo Erba, Italy	AR grade
Fructose (99.9%)	BDH, England	AR grade
Glucose monohydrate (99.5%)	Fluka, Switzerland	AR grade
Glutaraldehyde (25%)	Unilab, Australia	AR grade
Hydrochloric acid (37%)	Carlo Erba, Italy	AR grade
Lanthanum oxide	Unilab, Australia	AR grade
Methanol	Carlo Erba, Italy	HPLC grade
Nitric acid	Merck, Germany	AR grade
Petroleum ether (bp 35-60°C)	MP, United States	ACS grade
Potassium dihydrogen phosphate	Merck, Germany	AR grade
Potassium hexacyanoferrate trihydrate (99%)	Sigma, Germany	AR grade
Sucrose (99.5%)	Fluka, Switzerland	AR grade
Zinc sulfate heptahydrate (99.5%)	Sigma, Germany	AR grade

สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยา

Peptone	Himedia, India	AR grade
Plate count agar	Merck, Germany	AR grade

Potato dextrose agar	Himedia, India	AR grade
Tartaric acid	Univar, Australia	AR grade

สารเคมีและวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต

น้ำตาลทรายบริสุทธิ์	บริษัท น้ำตาลมิตรผล จำกัด, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย	
น้ำผึ้งสวนจิตรลดา	โครงการสวนพระองค์สวนจิตรลดา, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย	
น้ำส้มปะรด 100%	บริษัททีปโก้ฟู๊ดส์ จำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ, ประเทศไทย	
Calcium chloride	Tokuyama, Tokyo, Japan	Food grade
Citric acid	Foodchem International Corporation, Shanghai, China	Food grade
Peroxyacetic acid (5%)	Thai Peroxide, Samutprakarn, Thailand	Food grade

อุปกรณ์

- Analytical Balances (Sartorius Model ED 224s, Bradford, Germany)
- Analytical Balances (Sartorius Model CP 224s, Bradford, Germany)
- Approximate Weighing Balances (Sartorius Model BP 310s, Bradford, Germany)
- Atomic Absorption Spectrophotometer (Varian Model Spectr AA-330, CA, USA)
- Autoclave (Tomy Autoclave Model ss-320, Tokyo, Japan)
- Color meter system (Hunter Associates Laboratory Model ColorFlex[®] 45/0-s, Va., USA)
- Critical Point Dryer (Balzers Model CPD 020, Furstentum, Liechtenstein)
- Hand refractometer (Atago Model 2210-w06, Tokyo, Japan)
- High Performance Liquid Chromatography (Agilent Technologies Model HP 1100, CA, USA)
- Hot Air Oven (Mettler Model 600, Schwabach, Germany)
- Hot Air Oven (WTB Binder Model 78532, Tuttlingen, Germany)
- Incubator (Mettler Model 500, Schwabach, Germany)
- Ion sputter (Balzers Model SCD 040, Vaduz, Liechtenstein)
- Muffle furnace (Isotemp Model FT01/138, KY, USA)
- Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer (Oxford Instruments Model Varian[®] Inova, CA, USA)
- pH meter (Eutech Model Cyber Scan pH 1000 Bench, Queenstown, Singapore)
- Scanning Electron Microscope (JEOL Model JSM-5410LV, Tokyo, Japan)

Stereo Microscope (Olympus Model SZ-ST, Tokyo, Japan)

Stomacher Circulator (Seward Stomacher Model Stomacher[®] 400, London, England)

Texture Analyser (Stable Micro System Model TA-XT2i, Godalming, United Kingdom)

Tray Dryer (Yeo heng, Bangkok, Thailand)

Ultrasonic Bath (P-SELECTR Model Ultrason[®], Barcelona, Spain)

Vortex Mixers (Scientific Industries Model Vortex-Genie[®] 2 G560E, NY, USA)

Water activity meter (Decagon Devices Model AquaLab[®] series 3TE, WA, USA)

ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของบัตูรุตสด

3.1.1 ปริมาณความชื้น (AOAC, 2006) รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.1

3.1.2 วอเตอร์แอคทิวิตี (a_w) โดยเครื่อง AquaLab รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.2

3.1.3 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (total soluble solids) โดยใช้ hand refractometer

3.1.4 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโทส และซูโครส ด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (AOAC, 2006) รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.3

3.1.5 ลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแข็งโดยใช้เครื่อง Texture Analyser ใช้หัววัดแบบ cylinder probe ขนาด 2 มม. วัดเนื้อสัมผัสโดยใช้แรงเจาะทะลุ โดยตัวอย่างชิ้นบัตูรุตมีขนาดกว้าง 2 ซม. ยาว 3 ซม. และหนา 1 ซม. วัดที่กึ่งกลางของชิ้นบัตูรุตขึ้นละ 1 ครั้ง จำนวนทั้งหมด 15 ชิ้น ตัวอย่าง คำนวณค่าแรงสูงสุด (peak force, N) จากกราฟ ซึ่งแรงที่ได้บ่งบอกถึงความแข็งของเนื้อบัตูรุต รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.4

3.1.6 ค่าสีในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ ด้วยเครื่อง ColorFlex[®] แหล่งกำเนิดแสง D65 มุมการมอง 10° วัดขึ้นละ 10 ครั้ง โดยวัดทั้งหมด 3 ชิ้นตัวอย่าง รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.5

3.2 ศึกษาผลของแคลเซียมคลอไรด์ต่อปริมาณแคลเซียมและลักษณะเนื้อสัมผัสของชิ้นบัตูรุต

ล้างหัวบัตูรุตด้วยน้ำประปาให้สะอาด แขนในสารละลายกรดเปอร์ออกซีอะซิติกความเข้มข้น 200 ส่วนในล้านส่วน นาน 30 นาที หั่นหัวบัตูรุตเป็นชิ้นตามขวางของผล กว้าง 2 ซม. ยาว 3.5 ซม. หนา 1 ซม. แขนในสารละลายผสมที่ประกอบด้วยกรดซิตริก 1.0% (w/v) และแคลเซียมคลอไรด์ซึ่งแปรระดับความเข้มข้นเป็น 4 ระดับ คือ 0 0.5 1.0 และ 1.5% (w/v) อัตราส่วนของเนื้อบัตูรุตต่อสารละลายผสม 1:3 (w/v) นาน 6 ชั่วโมง วิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมในเนื้อบัตูรุตโดยใช้วิธี Atomic Absorption Spectrophotometry (AOAC, 2006) รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.6 และวัดค่าความแข็งที่

กึ่งกลางของขึ้นปีตรูตโดยใช้ Texture Analyser (TA-XT2i) หัววัดแบบ cylinder probe ขนาด 2 มม. รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.4

วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (completely randomized design, CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้ analysis of variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เลือกระดับความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากปริมาณแคลเซียมในเนื้อเยื่อที่มากที่สุด และค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสที่แข็งที่สุด

3.3 ศึกษาผลของน้ำผึ้งและน้ำสับปะรดต่อการถ่ายเทมวลสารในระหว่างการอบสโมคซิส

นำปีตรูตที่ผ่านการแช่ในสารละลายผสมที่คัดเลือกได้จากข้อ 3.2 ซึ่งมีปริมาณแคลเซียมและค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสสูงที่สุด ต้มในน้ำเดือด 10 นาที อัตราส่วนเนื้อปีตรูตต่อน้ำเป็น 1:3 (w/v) จากนั้นแช่ในสารละลายอบสโมคติก (สารละลายซูโครส) เข้มข้น 35 และ 45 องศาบริกซ์ ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้อง ใช้เวลาในการแช่ความเข้มข้นละ 6 ชั่วโมง อัตราส่วนเนื้อปีตรูตต่อน้ำเป็น 1:3 (w/v) โดยที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายอบสโมคติก 45 องศาบริกซ์ ทดแทนสารละลายน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยน้ำผึ้ง 10% (v/v) (H-10) น้ำผึ้ง 15% (v/v) (H-15) น้ำสับปะรด 10% (v/v) (P-10) และน้ำสับปะรด 15% (v/v) (P-15) โดยเปรียบเทียบกับกรแช่ในสารละลายซูโครสที่ไม่มีการทดแทนด้วยน้ำผึ้งหรือน้ำสับปะรด (ชุดควบคุม) และการแช่ในสารละลายซูโครสที่มีการทดแทนด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต 10% (v/v) (ชุดเปรียบเทียบ)

น้ำตาลอินเวิร์ตที่ใช้ในการทดลองเตรียมโดยเติมกรดซิตริก 5% (w/v) ในสารละลายซูโครส เข้มข้น 45 องศาบริกซ์ และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที วางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 3 วัน (จิราพร กอศรีลบุตร, 2549)

ติดตามการถ่ายเทมวลสารช่วงของการอบสโมคซิสในรูปของเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำ (water loss; WL) และเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของของแข็ง (solid gain; SG) ในเนื้อปีตรูตตลอดระยะเวลา 12 ชั่วโมง ค่า WL และ SG คำนวณดังสมการ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ วางแผนการทดลองแบบ CRD ทำการทดลองสามซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้ ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

$$\text{water loss (\%)} = \frac{(M_o X_{wo}) - (M_t X_{wt})}{M_o} \dots\dots\dots(3.1)$$

$$\text{solid gain (\%)} = \frac{(M_t X_{st}) - (M_o X_{so})}{M_o} \dots\dots\dots(3.2)$$

- เมื่อ M_o = น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)
 M_t = น้ำหนักตัวอย่างที่ผ่านการออสโมซิสแล้ว (กรัม)
 X_{so} = องศาบริกซ์เริ่มต้นของตัวอย่าง
 X_{st} = องศาบริกซ์สุดท้ายหลังการออสโมซิส
 X_{wo} = ปริมาณน้ำเริ่มต้นของตัวอย่าง (%)
 X_{wt} = ปริมาณน้ำที่อยู่ในตัวอย่างหลังการออสโมซิส (%)

3.4 ศึกษาผลของการใช้น้ำผึ้งและน้ำสับปะรดร่วมกับน้ำตาลซูโครสต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

นำปีตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายออสโมติกทั้ง 6 ชุดการทดลอง (ชุดควบคุม, H-10, H-15, P-10, P-15 และชุดเปรียบเทียบ) มาอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.3 เมตรต่อวินาที บนที่ก้นน้ำหนักของปีตรูตตามช่วงเวลาของการอบแห้งตั้งแต่เริ่มอบแห้ง จนผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีน้ำหนักคงที่ ทดลองสามซ้ำ ใช้ข้อมูลที่ได้สร้างกราฟการอบแห้งในรูปความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้น (MR) กับเวลา และหาค่าคงที่การอบแห้งจากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln MR$ กับเวลา จากนั้นศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง โดยเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายพฤติกรรมกรอบแห้ง ใช้แบบจำลองของ Page [$MR = \exp(-kt^n)$] (Mandala et al., 2005), Henderson and Pabis [$MR = a \exp(-kt)$] (Ghodake et al., 2006) และ modified Henderson and Pabis [$MR = a.\exp(-kt) + b.\exp(-gt) + c.\exp(-ht)$] (Menges and Ertekin, 2006)

เลือกแบบจำลองเพื่อทำนายพฤติกรรมกรอบแห้งที่เหมาะสมจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, r), ค่า Mean Residue Least Square (MRS) และค่า Root Mean Square Error ($RMSE$) โดยแบบจำลองที่เหมาะสมจะต้องให้ค่า r สูง ค่า MRS และ $RMSE$ ต่ำ ซึ่งค่า MRS และ $RMSE$ คำนวณดังสมการ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

$$MRS = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N-1} \dots\dots\dots(3.3)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(3.4)$$

เมื่อ MRS = Mean Residue Least Square

$RMSE$ = Root Mean Square Error

$MR_{exp,i}$ = MR ที่ได้จากการทดลองของข้อมูลชุดที่ i

$MR_{pre,i}$ = MR ที่ได้จากแบบจำลองของข้อมูลชุดที่ i

N = จำนวนข้อมูลการทดลอง

3.5 ศึกษาผลของการใช้น้ำผึ้งและน้ำสับปะรดร่วมกับซูโครสต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน

วิเคราะห์คุณภาพปื้ตรูตที่ผ่านการแช่อบแห้งทั้งห้กชุดการทดลองและศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่เก็บไว้ 30 วัน โดยบรรจุผลิตภัณฑ์ไว้ในถุงพอลิโพรพิลีน (PP) ขนาด 7×11 นิ้ว บรรจุถุงละ 50 ชิ้น แล้วปิดให้สนิทด้วยเครื่องปิดผนึก และเก็บรักษาในสภาพบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิห้อง (30±2 องศาเซลเซียส) จากนั้นตรวจสอบคุณภาพด้านต่าง ๆ ดังนี้

3.5.1 ปริมาณความชื้น (AOAC, 2006) รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.1

3.5.2 วอเตอร์แอกติวิตี (a_w) โดยเครื่อง AquaLab รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.2

3.5.3 ความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในผลิตภัณฑ์ปื้ตรูตแช่อบแห้งด้วยเครื่อง Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer (NMR) รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.7

3.5.4 ลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแข็ง (hardness) ค่างานในการตัด (cutting work) และค่าความเหนียว (adhesiveness) ด้วยเครื่อง Texture Analyser ใช้หัววัดแบบ BSK with knife วัดที่กึ่งกลางของชิ้นปื้ตรูต วัดขึ้นละ 1 ครั้ง จำนวนทั้งหมด 15 ชิ้นต่อตัวอย่าง รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.4

3.5.5 ปริมาณกลูโคส ฟรุคโทส และซูโครส ด้วยเครื่อง HPLC (AOAC, 2006) รายละเอียดแสดงใน ภาคผนวก ก.3 (ข้อนี้ตรวจสอบคุณภาพเฉพาะผลิตภัณฑ์สุดท้ายหลังการอบแห้ง)

3.5.6 การเกิดผลึกน้ำตาลที่ผิวหน้าของชิ้นปื้ตรูต ด้วยเครื่อง Stereo Microscope รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.8

3.5.7 ค่าสีในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ ด้วยเครื่อง ColorFlex[®] แหล่งกำเนิดแสง D65 มุมการมอง 10° วัดขึ้นละ 3 ครั้ง โดยวัดทั้งหมด 3 ชิ้นต่อตัวอย่าง รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.5 นำค่า L^* a^* และ b^* มาคำนวณค่าเฉดสี (Hue angle) ค่าความเข้มสี (Chroma) และค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE)

$$\text{Hue angle} = \tan^{-1} \left[\frac{b^*}{a^*} \right]$$

$$\text{Chroma} = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$$

$$\Delta E = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$$

$$\text{โดย } \Delta L^* = L^* \text{ ของตัวอย่าง} - L^* \text{ ของตัวอย่างมาตรฐาน}$$

$$\Delta a^* = a^* \text{ ของตัวอย่าง} - a^* \text{ ของตัวอย่างมาตรฐาน}$$

$$\Delta b^* = b^* \text{ ของตัวอย่าง} - b^* \text{ ของตัวอย่างมาตรฐาน}$$

3.5.8 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์สุดท้ายหลังการอบแห้งโดยใช้การทดสอบความชอบ (preference test) ใช้สเกลฮีโดนิค 5 ระดับ ประเมินลักษณะของผลิตภัณฑ์ในด้านความคงรูป (การหดตัว) สี กลิ่น ความชุ่มน้ำเมื่อหักหรือกัด รสหวาน และความชอบโดยรวม (แบบทดสอบการวิเคราะห์แสดงดังภาคผนวก ข.1) ให้ผู้ทดสอบจำนวนทั้งหมด 60 คน เป็นนิสิตและบุคลากรในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบุคคลทั่วไป

3.5.9 ปริมาณแบคทีเรีย ยีสต์ และรา (Harrigan and McCance, 1976) รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ก.9 และ ก.10

วางแผนการทดลองแบบ CRD ในข้อ 3.5.1-3.5.5 และ 3.5.7 ทำการทดลองสามซ้ำ และวางแผนการทดลองแบบ randomized complete block design (RCBD) ในข้อ 3.5.8 วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้ ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3.6 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานของเซลล์

เตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานของเซลล์ปีตรูตสด ปีตรูตที่ผ่านการแช่ในสารละลายผสมแคลเซียมคลอไรด์กับกรดซิตริกโดยเลือกภาวะที่เหมาะสมจากข้อ 3.2 ปีตรูตที่ผ่านการอบสโมคิซทั้งหกชุดการทดลองจากข้อ 3.3 และผลิตภัณฑ์สุดท้ายภายหลังจากการอบแห้งทั้งหกชุดการทดลองจากข้อ 3.4 ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ใช้กำลังขยาย 150 เท่า ค่าศักย์ไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอน 15 กิโลโวลต์ ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.11

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของปีตรูต

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของปีตรูตที่ใช้ในงานวิจัย แสดงดังตารางที่

4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมี และสมบัติทางกายภาพของปีตรูตสด

องค์ประกอบ	ค่าเฉลี่ย ¹ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ปริมาณความชื้น (% โดยน้ำหนักเปียก)	90.81 ± 1.76
ค่าวอเตอร์แอคติวิตี (a_w)	0.96 ± 0.01
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (% w/w)	9.13 ± 0.15
ปริมาณน้ำตาล (กรัม/100 กรัม โดยน้ำหนักแห้ง)	
น้ำตาลกลูโคส	12.76 ± 0.34
น้ำตาลฟรุกโทส	11.95 ± 0.11
น้ำตาลซูโครส	27.64 ± 0.92
น้ำตาลกลูโคส+ฟรุกโทส	24.72 ± 0.23
น้ำตาลทั้งหมด	52.36 ± 0.69
ค่าความแข็ง (hardness, N)	11.15 ± 0.65
ค่าสีของเนื้อปีตรูต	
L^*	21.94 ± 0.95
a^*	28.69 ± 2.20
b^*	11.04 ± 1.80

¹ ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของปีตรูตสด เมื่อนำปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (ประกอบด้วยน้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุกโทส ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก) ที่ได้จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับข้อมูลจาก Nutrient Database for Standard Reference (USDA, 2010) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยปริมาณความชื้นที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าประมาณ 90% (โดยน้ำหนักเปียก) ส่วนปริมาณความชื้นที่รายงานโดย USDA มีค่าประมาณ 87% (โดยน้ำหนักเปียก) ขณะที่ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าประมาณ 52 กรัม/100 กรัม (โดยน้ำหนักแห้ง)

ส่วนปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่รายงานโดย USDA มีค่าประมาณ 54 กรัม/100 กรัม (โดยน้ำหนักแห้ง) งานวิจัยนี้เลือกเกณฑ์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดประมาณ 9-10% (w/w) และค่าความแข็งในช่วง 10-11 N เป็นเกณฑ์ในการคัดเลือกวัตถุดิบเริ่มต้นตลอดการทดลอง

4.2 ผลของแคลเซียมคลอไรด์ต่อปริมาณแคลเซียมและลักษณะเนื้อสัมผัสของชีนปีตรูต

ผลของความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ต่อปริมาณแคลเซียมในชีนปีตรูตแสดงดังตารางที่ 4.2 ระดับความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์มีผลต่อปริมาณแคลเซียมอิสระในชีนปีตรูตอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตาราง ค.1) โดยเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ให้สูงขึ้น ปริมาณแคลเซียมอิสระในชีนปีตรูตจะมีค่าเพิ่มขึ้นและจะค่อนข้างคงที่ที่ระดับความเข้มข้นมากกว่า 1.0% (w/v) ซึ่งพบว่าชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมแคลเซียมคลอไรด์ (แคลเซียมคลอไรด์ 0% (w/v) + กรดซิตริก 1.0% (w/v)) มีปริมาณแคลเซียมอิสระในชีนปีตรูตต่ำที่สุดซึ่งไม่แตกต่างจากปีตรูตสด ($p > 0.05$) (ตาราง ค.1) ขณะที่ชุดการทดลองที่มีการใช้แคลเซียมคลอไรด์ 1.0% (w/v) มีปริมาณแคลเซียมอิสระในชีนปีตรูตสูงที่สุดและไม่แตกต่างจากชุดการทดลองที่ใช้แคลเซียมคลอไรด์ 1.5% (w/v) ($p > 0.05$) (ตาราง ค.1)

ตารางที่ 4.2 ผลของความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ต่อปริมาณแคลเซียมอิสระและปริมาณความชื้นของชีนปีตรูต

ชุดการทดลอง	ปริมาณแคลเซียมอิสระ (ppm)	ปริมาณความชื้น (%) โดยน้ำหนักเปียก)
ปีตรูตที่แช่ CaCl_2 0% (w/v)	$0.93^a \pm 0.439$	93.09 ± 1.02
ปีตรูตที่แช่ CaCl_2 0.5% (w/v)	$15.36^b \pm 2.986$	91.31 ± 1.12
ปีตรูตที่แช่ CaCl_2 1.0% (w/v)	$22.64^c \pm 2.841$	91.22 ± 1.19
ปีตรูตที่แช่ CaCl_2 1.5% (w/v)	$22.19^c \pm 3.129$	91.76 ± 1.09
ปีตรูตสด	$1.54^a \pm 0.583$	89.50 ± 1.13

a, b, c ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันตามแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

การที่ชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมแคลเซียมคลอไรด์ มีปริมาณแคลเซียมอิสระในชีนปีตรูตต่ำกว่าปีตรูตสด เนื่องจากชีนปีตรูตของชุดการทดลองดังกล่าว มีปริมาณความชื้นหลังจากแช่ในสารละลายสูงกว่าปีตรูตสด (ตารางที่ 4.2) ซึ่งถ้าคำนวณปริมาณแคลเซียมที่วิเคราะห์ได้โดยน้ำหนักแห้ง พบว่าปริมาณแคลเซียมอิสระของทั้งสองชุดการทดลองมีปริมาณใกล้เคียงกัน โดยชุดการทดลองที่ไม่เติมแคลเซียมคลอไรด์มีปริมาณแคลเซียม 13.40 ppm (โดยน้ำหนักแห้ง) ขณะที่ปีตรูตสดมีปริมาณแคลเซียมอิสระ 14.60 ppm (โดยน้ำหนักแห้ง) และพบว่าชุดการทดลองที่ใช้แคลเซียมคลอไรด์ 0.5 และ 1.5% (w/v) มีปริมาณความชื้นหลังจากแช่ในสารละลาย (โดยน้ำหนักเปียก) ใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 4.2)

ผลของความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ต่อค่าความแข็งของขึ้นปีตรูตแสดงดังตารางที่ 4.3 โดยระดับความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ที่สูงขึ้นมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งของขึ้นปีตรูต ($p \leq 0.05$) (ตาราง ค.2) จากผลการทดลองพบว่าการใช้แคลเซียมคลอไรด์ 1.0% (w/v) ให้ค่าความแข็งของขึ้นปีตรูตสูงที่สุดไม่แตกต่างจากการใช้ที่ระดับความเข้มข้น 0.5 และ 1.5% (w/v) ($p > 0.05$) (ตาราง ค.2) การที่ระดับความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งของขึ้นปีตรูตเพิ่มขึ้นนั้น เนื่องจากแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) เกิดอันตรกิริยากับสารประกอบเพกทินในชั้นผนังเซลล์และบริเวณมิดเดิลลามาเลลา เกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างหมู่คาร์บอกซิลบนสายเพกทินโดยแคลเซียมไอออน เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมเพกเตตซึ่งไม่ละลายน้ำ และแคลเซียมไอออนยังช่วยรักษาความเสถียรของเซลล์เมมเบรน โดยช่วยชะลอการสลายตัวของ galactolipid จึงทำให้ขึ้นปีตรูตมีค่าความแข็งมากขึ้น (Martin-Diana et al., 2007) พบว่าชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมแคลเซียมคลอไรด์ (แคลเซียมคลอไรด์ 0% (w/v) + กรดซิตริก 1.0% (w/v)) มีค่าความแข็งสูงกว่าปีตรูตสด ($p \leq 0.05$) เนื่องจากการแช่ปีตรูตในชุดการทดลองดังกล่าว ทำให้สูญเสียแคลเซียมไอออนออกจากเซลล์ ขณะเดียวกันก็ทำให้น้ำสามารถแพร่เข้าไปในเซลล์ได้มากกว่า เซลล์จึงเต่งขึ้น อาจทำให้เซลล์มีความแข็งแรงมากขึ้น

ตารางที่ 4.3 ผลของความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ต่อค่าความแข็งของขึ้นปีตรูต

ชุดการทดลอง	ค่าความแข็ง (N)
ปีตรูตสด	8.87 ^a ± 0.22
ปีตรูตที่แช่ CaCl ₂ 0% (w/v)	9.62 ^b ± 0.39
ปีตรูตที่แช่ CaCl ₂ 0.5% (w/v)	10.15 ^{bc} ± 0.37
ปีตรูตที่แช่ CaCl ₂ 1.0% (w/v)	10.50 ^c ± 0.15
ปีตรูตที่แช่ CaCl ₂ 1.5% (w/v)	10.17 ^{bc} ± 0.40

a, b, c ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

การคัดเลือกภาวะการแช่ที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อิมมอบแห้งในช่วง pretreatment ไม่ได้ขึ้นกับการใช้ความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์สูงสุดเพียงอย่างเดียว แต่จะต้องพิจารณาค่าความแข็งควบคู่ไปด้วย โดยเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองที่ได้ พบว่าการใช้แคลเซียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้น 1.0% (w/v) ทำให้ปริมาณแคลเซียมไอออนและค่าความแข็งของขึ้นปีตรูตสูงที่สุด งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แคลเซียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้น 1.0% (w/v) ในการปรับปรุงคุณภาพปีตรูต

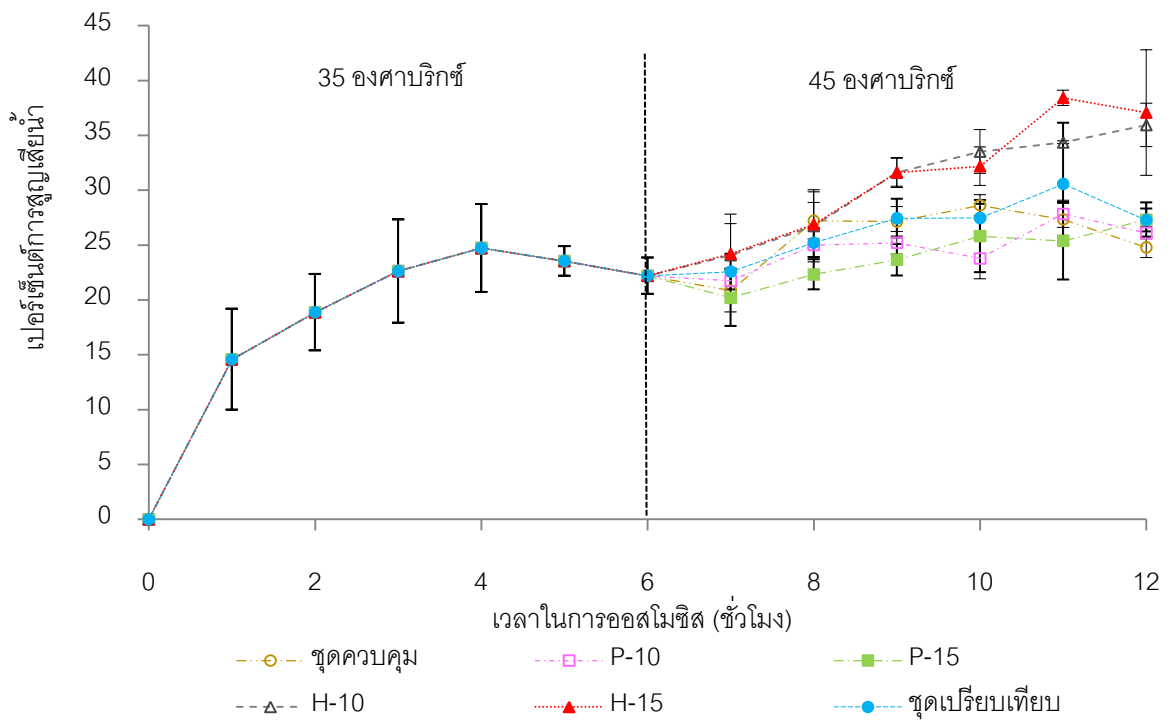
การใช้แคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1.0% (w/v) ในการปรับปรุงคุณภาพปีตรูตส่งผลให้มีปริมาณแคลเซียมไอออนและค่าความแข็งของขึ้นปีตรูตสูงที่สุด สอดคล้องกับรายงานของ จิราพร กอศรีลบุตร

(2549) ที่ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพแคนตาลูปด้วยสารละลายผสมที่ประกอบด้วยกรดซิตริก 1.0% (w/v) โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ 0.5% (w/v) และแคลเซียมคลอไรด์ที่แปรระดับความเข้มข้นเป็น 0 0.5 1.0 1.5 และ 2.0% (w/v) และรายงานว่ระดับความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์มีผลต่อปริมาณแคลเซียมในชิ้นแคนตาลูป โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมจะเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่งแล้วจึงคงที่ แต่ระยะเวลาการแช่ไม่มีผลต่อค่าความแข็งของชิ้นแคนตาลูปอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) และพบว่าการใช้แคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1.0% (w/v) เป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการปรับปรุงคุณภาพของชิ้นแคนตาลูป

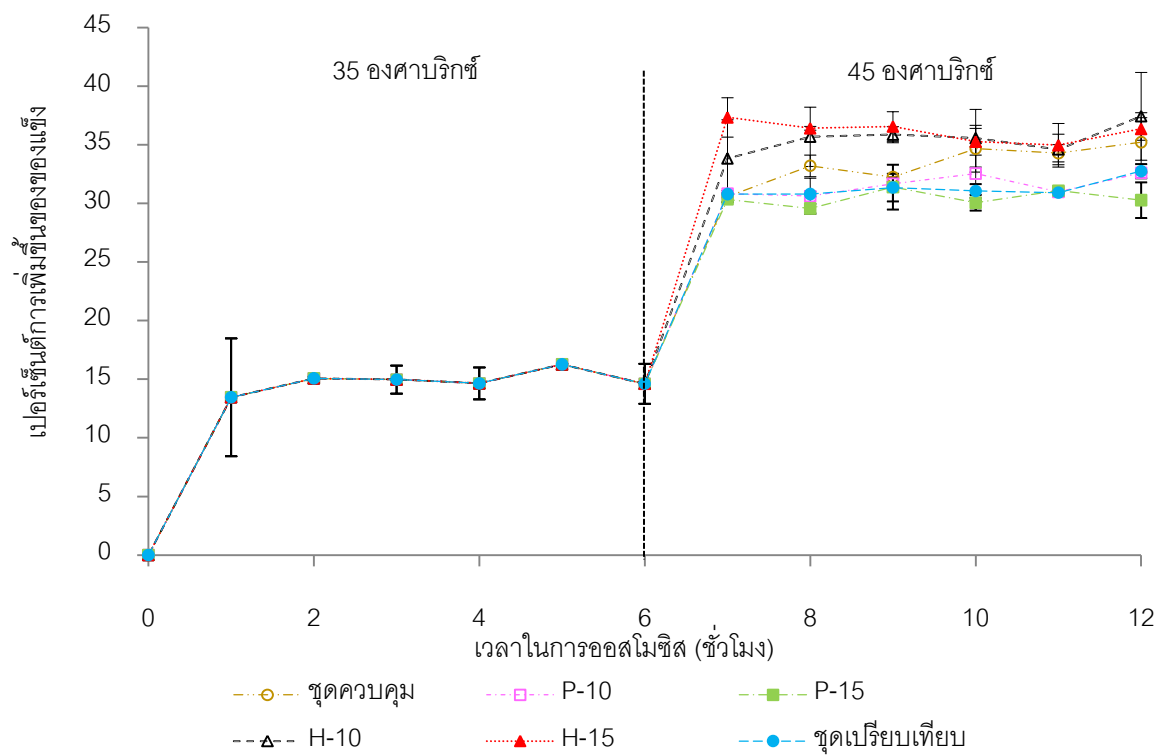
ขณะที่ อพร ละออ กอ (2547) พบว่ระดับความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ (0 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 % (w/v)) และระยะเวลาในการแช่ (1 2 3 4 5 6 และ 7 วัน) มีผลต่อค่าความแข็งและปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ในเนื้อมะละกอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) โดยการใช้แคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1.5% (w/v) ในการแช่มะละกอนาน 5 วัน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความแข็งสูงที่สุดและมีคุณภาพทางประสาทสัมผัสเป็นที่ยอมรับมากที่สุด อย่างไรก็ตามการใช้แคลเซียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นสูงในการปรับปรุงคุณภาพ ทำให้เกิดรสขมได้ดังในรายงานของ Luna-Guzman และ Barrett (2000) ที่ศึกษาผลของแคลเซียมคลอไรด์และแคลเซียมแลคเตท ที่ระดับความเข้มข้น 2.5% (w/v) ต่อคุณภาพของแคนตาลูปสดตัดแต่ง จากผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่า การใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 2.5% (w/v) ในการปรับปรุงคุณภาพแคนตาลูป ให้รสขมมากกว่าการใช้สารละลายแคลเซียมแลคเตทที่ระดับความเข้มข้นเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.1$)

4.3 ผลของน้ำผึ้งและน้ำสับปะรดต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิส

ติดตามการถ่ายเทมวลสารของปีตรูตทั้ง 6 ชุดการทดลอง (ชุดควบคุม P-10 P-15 H-10 H-15 และชุดเปรียบเทียบ) ตลอดระยะเวลาการออสโมซิส 12 ชั่วโมง ดังรายละเอียดในข้อ 3.3 โดยแสดงผลการถ่ายเทมวลสารในรูปของเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำ (water loss; WL) และเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของของแข็ง (solid gain; SG) พบว่ค่า WL (ภาพที่ 4.1) ของปีตรูตที่แช่ในสารละลายซูโครสเข้มข้น 35 องศาบริกซ์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นมีค่าลดลงเล็กน้อยจนถึงชั่วโมงที่ 6 ของการออสโมซิส และเมื่อเปลี่ยนระดับความเข้มข้นของสารละลายเป็น 45 องศาบริกซ์ ค่า WL ของทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากชั่วโมงที่ 7 ถึงชั่วโมงที่ 9 และค่อนข้างคงที่จนถึงชั่วโมงที่ 12 ของการออสโมซิส (โดยมีค่า WL อยู่ในช่วง 24-37%) (ภาคผนวก ง.1-ง.7) เมื่อพิจารณาค่า SG (ภาพที่ 4.2) พบว่ปีตรูตที่แช่ในสารละลายซูโครสเข้มข้น 35 องศาบริกซ์มีค่า SG เพิ่มขึ้นในชั่วโมงแรก จากนั้นค่าค่อนข้างคงที่จนถึงชั่วโมงที่ 6 ของการออสโมซิส และเมื่อเปลี่ยนระดับความเข้มข้นของสารละลายเป็น 45 องศาบริกซ์ พบว่ทุกชุดการทดลองมีค่า SG เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในชั่วโมงที่ 7 และจากนั้นค่าจะคงที่จนถึงชั่วโมงที่ 12 ของการออสโมซิส (โดยมีค่า SG อยู่ในช่วง 30-37%) (ภาคผนวก ง.1-ง.7)



ภาพที่ 4.1 การดูดน้ำของบิตูตตลอดระยะเวลาการทดสอบ 12 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.2 การเพิ่มขึ้นของแข็งของบิตูตตลอดระยะเวลาการทดสอบ 12 ชั่วโมง

จากตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาค่า WL และ SG ที่ชั่วโมงที่ 12 ของการอบสโมคซิส พบว่าปีตรูตแซ่ในชุดการทดลอง H-15 มีค่า WL สูงสุดแต่ไม่แตกต่างจากชุดการทดลอง H-10 ($p>0.05$) (ตาราง ค.3) ขณะที่ชุดควบคุมมีค่า WL ต่ำสุดแต่ไม่แตกต่างจากชุดการทดลอง P-10 P-15 และชุดเปรียบเทียบ ($p>0.05$) (ตาราง ค.3) ส่วนค่า SG พบว่าชุดการทดลอง H-10 มีค่า SG สูงสุดแต่ไม่แตกต่างจากชุดการทดลอง H-15 ชุดควบคุม ชุดเปรียบเทียบ และชุดการทดลอง P-10 ($p>0.05$) (ตาราง ค.4) ขณะที่ชุดการทดลอง P-15 มีค่า SG ต่ำที่สุดแต่ไม่แตกต่างจากชุดการทดลอง P-10 ชุดเปรียบเทียบ และชุดควบคุม ($p>0.05$) (ตาราง ค.4)

ตารางที่ 4.4 การสูญเสียน้ำและการเพิ่มขึ้นของของแข็งของปีตรูตภายหลังการอบสโมคซิส

ช่วงการอบสโมคซิส	ชุดการทดลอง	การสูญเสียน้ำ (%)	การเพิ่มขึ้นของของแข็ง (%)
ชั่วโมงที่ 6 ของการอบสโมคซิส			
ในสารละลายอบสโมคติกเข้มข้น	ทุกชุดการทดลอง	22.20 ^a ± 1.66	14.62 ^a ± 1.71
35 องศาบริกซ์			
	ชุดควบคุม	24.79 ^a ± 0.93	35.22 ^{bc} ± 2.52
ชั่วโมงที่ 12 ของการอบสโมคซิส	P-10	26.10 ^a ± 0.55	32.60 ^{bc} ± 0.02
ในสารละลายอบสโมคติก	P-15	27.32 ^a ± 1.56	30.28 ^b ± 1.52
เข้มข้น 45 องศาบริกซ์	H-10	35.94 ^b ± 1.98	37.44 ^c ± 3.74
	H-15	37.07 ^b ± 5.72	36.36 ^c ± 0.96
	ชุดเปรียบเทียบ	27.28 ^a ± 1.05	32.75 ^{bc} ± 0.60

a, b, c ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันตามแนวดิ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$)

การแช่ปีตรูตในสารละลายซูโครสที่มีการทดแทนด้วยน้ำผึ้ง 10 และ 15% (v/v) มีผลให้ทั้งค่า WL และ SG สูงที่สุด เมื่อเทียบกับชุดการทดลองอื่น ๆ เนื่องจากการใช้น้ำผึ้ง 10 และ 15% (v/v) ทดแทนสารละลายซูโครสบางส่วนทำให้สารละลายมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้เพิ่มขึ้นจาก 45 องศาบริกซ์ เป็น 49 และ 51 องศาบริกซ์ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.5) การที่สารละลายมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้มากขึ้น ส่งผลให้สารละลายมีแรงดันออสโมติกสูงขึ้น (El-Aouar et al., 2006) ขณะเดียวกัน สารละลายดังกล่าวมีค่า a_w ต่ำกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ ทำให้น้ำแพร่ออกมาจากชั้นปีตรูตมากขึ้น ค่า WL จึงสูงกว่าชุดการทดลองอื่น นอกจากนี้การที่น้ำผึ้งประกอบด้วยฟรุกโทสและกลูโคสเป็น ซึ่งมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าน้ำตาลซูโครสเป็นองค์ประกอบหลัก ทำให้น้ำตาลสามารถแพร่เข้าไปในชั้นปีตรูตได้มากกว่า ส่งผลให้มีค่า SG สูงที่สุด ขณะที่ชุดการทดลองที่มีการใช้น้ำสับปะรดให้ค่า WL และ SG ต่ำกว่า เนื่องจากการใช้น้ำสับปะรดทั้ง 10 และ 15% (v/v) ทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วน ทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในสารละลายต่ำกว่าการใช้น้ำผึ้ง โดยสารละลายมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้เป็น

43 และ 41 องศาบริกซ์ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.5) ส่งผลให้สารละลายมีแรงดันออสโมติกต่ำกว่า ขณะเดียวกันก็ทำให้ค่า a_w มีค่าสูงกว่า ถึงแม้ว่าน้ำสับปะรดจะมีความเป็นกรดที่สามารถไฮโดรไลซ์ น้ำตาลซูโครสให้เป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสได้เมื่อให้ความร้อน (Ramallo and Mascheroni, 2005) แต่ในงานวิจัยนี้ใช้สารละลายขณะอุ่น (ประมาณ 45-50 องศาเซลเซียส) ในการออสโมซิส ทำให้น้ำตาลซูโครสอาจถูกไฮโดรไลซ์เป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสได้บางส่วน ดังนั้นการใช้น้ำสับปะรดจึงให้ค่า WL และ SG ต่ำกว่าการใช้น้ำผึ้ง

ตารางที่ 4.5 ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ วอเตอร์แอกติวิตี และความเป็นกรดต่างของสารละลายออสโมติก

ชนิดของสารละลายออสโมติก	ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (°Brix)	วอเตอร์แอกติวิตี (a_w)	ความเป็นกรดต่าง (pH)
ชุดควบคุม	45.0 ± 0.0	0.990 ± 0.001	6.84 ± 0.17
P-10	43.0 ± 0.0	0.991 ± 0.001	3.75 ± 0.00
P-15	41.0 ± 0.0	0.994 ± 0.001	3.64 ± 0.05
H-10	49.3 ± 0.4	0.988 ± 0.001	5.00 ± 0.04
H-15	51.0 ± 0.0	0.985 ± 0.001	3.64 ± 0.05
ชุดเปรียบเทียบ			
น้ำผึ้ง	41.8 ± 0.4	0.994 ± 0.001	2.25 ± 0.02
น้ำผึ้ง	68.0 ± 0.0	0.599 ± 0.001	4.27 ± 0.00
น้ำสับปะรด	12.0 ± 0.0	0.996 ± 0.001	3.53 ± 0.00

จากผลการทดลองพบว่าการทดแทนสารละลายซูโครสบางส่วนด้วยน้ำผึ้ง ซึ่งมีน้ำตาลฟรุกโทสและกลูโคสเป็นองค์ประกอบหลัก และมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าซูโครส ทำให้ค่า WL และ SG ในขณะออสโมซิสสูงขึ้น สอดคล้องกับรายงานของ Rodrigues และ Fernandes (2007) ที่ศึกษาผลของการใช้น้ำตาลกลูโคสและแมนนิทอลทดแทนสารละลายซูโครสบางส่วนในกระบวนการออสโมซิสเมลอนโดยหั่นเมลอนเป็นทรงลูกบาศก์ มีความยาวด้านละ 2 ซม. และแช่ในสารละลายออสโมติกที่ประกอบด้วยซูโครสเข้มข้น 70% (w/w) และไซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 5% (w/w) ที่อุณหภูมิ 42.5 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง และทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยน้ำตาลกลูโคสหรือแมนนิทอล 20% (w/w) พบว่าการใช้สารละลายซูโครส 70% (w/w) ที่มีการทดแทนด้วยน้ำตาลกลูโคส 20% (w/w) ในการออสโมซิสเมลอนให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารและค่าการสูญเสียน้ำสูงที่สุด รองลงมาคือการใช้สารละลายซูโครส 70% (w/w) ที่มีการทดแทนด้วยน้ำตาลแมนนิทอล 20% (w/w) ขณะที่การใช้สารละลายซูโครสเพียงชนิดเดียวทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารและค่าการสูญเสียน้ำต่ำที่สุด ทั้งนี้เนื่องจาก

โมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของน้ำตาลแมนนิทอลและน้ำตาลซูโครส ตามลำดับ จึงเกิดการถ่ายเทมวลสารได้ดีกว่า

เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่ใช้ น้ำฝิ่งและน้ำสับปะรด พบว่าการเพิ่มปริมาณน้ำฝิ่งหรือน้ำสับปะรดในการทดแทนสารละลายซูโครสบางส่วนจาก 10% เป็น 15% (v/v) ทำให้ค่า WL สูงขึ้น ขณะที่ค่า SG ลดลง แต่ทั้งค่า WL และ SG ของชุดการทดลองที่มีการแทนที่ด้วยน้ำฝิ่งและน้ำสับปะรดทั้งสอง ความเข้มข้น ก็มีค่าไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$)

4.4 ผลของการใช้น้ำฝิ่งและน้ำสับปะรดร่วมกับน้ำตาลซูโครสต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

หลังจากอบแห้งปีตรูตที่ผ่านการอบสโมคซิงทั้งหกชุดการทดลอง (ชุดควบคุม H-10 H-15 P-10 P-15 และชุดเปรียบเทียบ) ด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.3 เมตรต่อวินาที และบันทึกน้ำหนักตั้งแต่เริ่มต้นจนผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีน้ำหนักคงที่ นำข้อมูลน้ำหนักที่บันทึกได้ในระหว่างการอบแห้งมาคำนวณเป็นปริมาณความชื้น และสร้างกราฟการอบแห้งในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลาการอบแห้ง (ภาพที่ 4.3) พบว่าเมื่อเวลาการอบแห้งนานขึ้น ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 3 ชั่วโมงแรก แล้วค่อย ๆ ลดลงจนคงที่ในช่วงท้ายของการอบแห้ง แต่เนื่องจากปริมาณความชื้นเริ่มต้นของแต่ละชุดการทดลองมีค่าไม่เท่ากัน โดยชุดควบคุม H-10 H-15 P-10 P-15 และชุดเปรียบเทียบ มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 203.77 151.71 180.12 208.62 203.81 และ 227.65 กรัมต่อ 100 กรัมของแห้ง ตามลำดับ ทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการสูญเสียไอน้ำในระหว่างการอบสโมคซิงที่แตกต่างกัน จึงนำข้อมูลปริมาณความชื้นที่ได้มาคำนวณเป็นค่าอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) โดยใช้สมการที่ 4.1 เพื่อให้แต่ละชุดการทดลองมีค่าความชื้นเริ่มต้นเท่ากัน และแสดงข้อมูลที่ได้ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้ง (ภาพที่ 4.4) จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจนผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีความชื้นประมาณ 14% (โดยน้ำหนักเปียก) ได้ สูตรการคำนวณอัตราส่วนความชื้นอ้างอิงจากงานวิจัยของ Mandala และคณะ (2005)

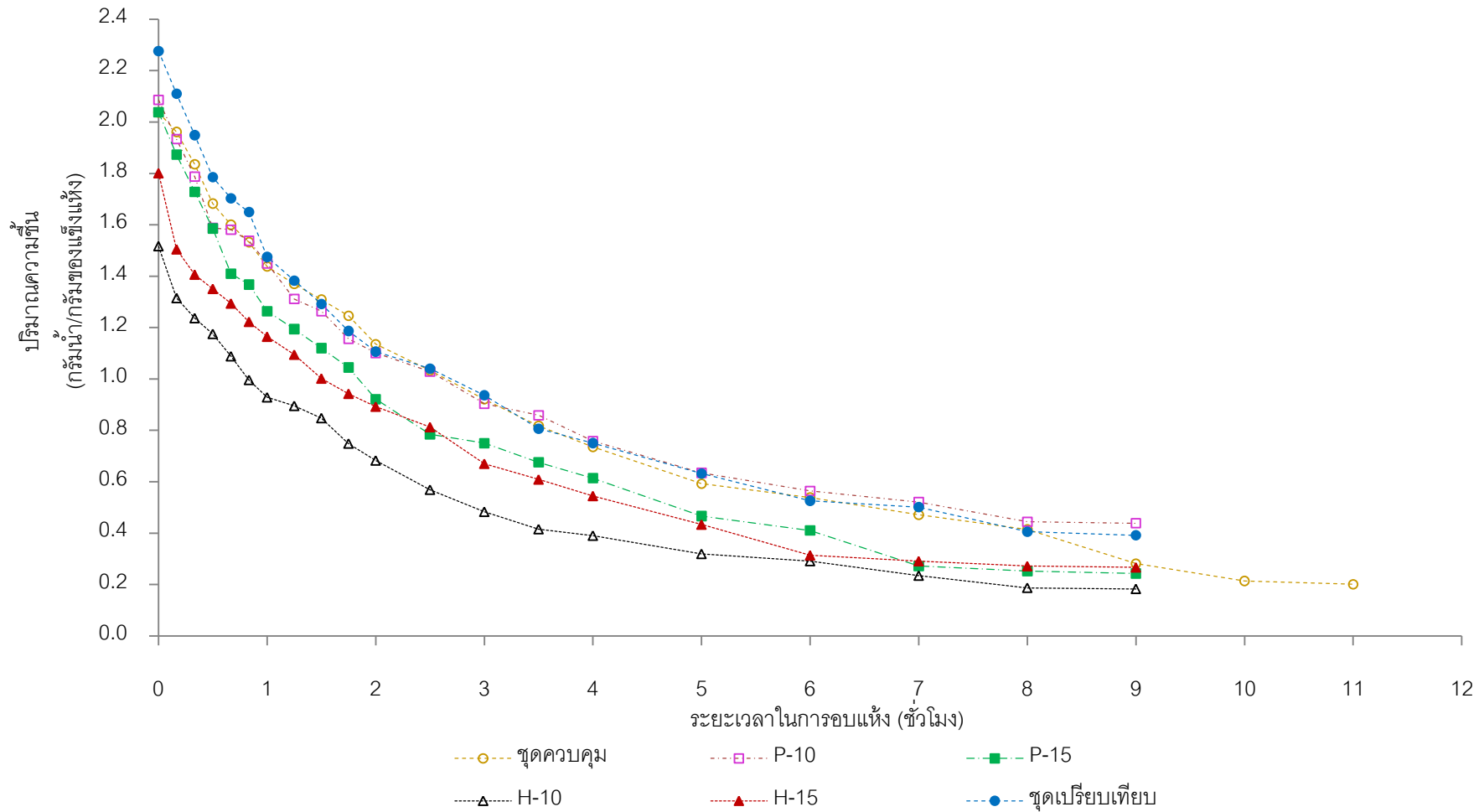
$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_o - M_e)} \dots\dots\dots(4.1)$$

เมื่อ MR = อัตราส่วนความชื้น

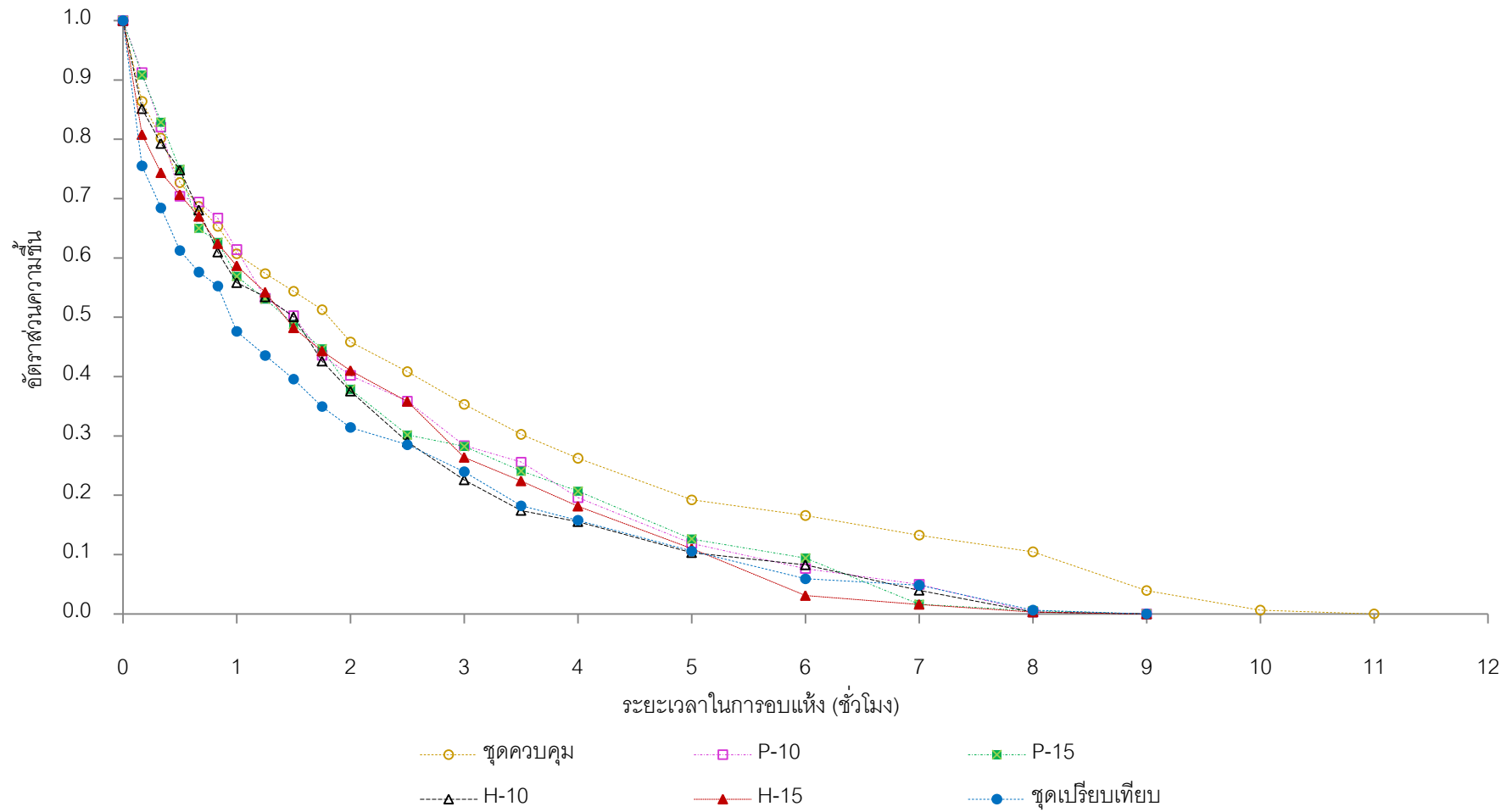
M_t = ปริมาณความชื้นที่เวลาใดๆ (โดยน้ำหนักแห้ง)

M_o = ปริมาณความชื้นที่เริ่มต้น (โดยน้ำหนักแห้ง)

M_e = ปริมาณความชื้นที่สมดุล (โดยน้ำหนักแห้ง)



ภาพที่ 4.3 กราฟการอบแห้ง (ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส) ของผลิตภัณฑ์ปัดรูดเชื่อมอบแห้งที่ผ่านการออกซิไดส์ในสารละลายชนิดต่าง ๆ



ภาพที่ 4.4 กราฟอัตราส่วนความเข้มข้น (ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส) ของผลิตภัณฑ์ที่ปฏิกิริยาที่ผ่านการออกซิเดชันในสารละลายน้ำตาลชนิดต่าง ๆ

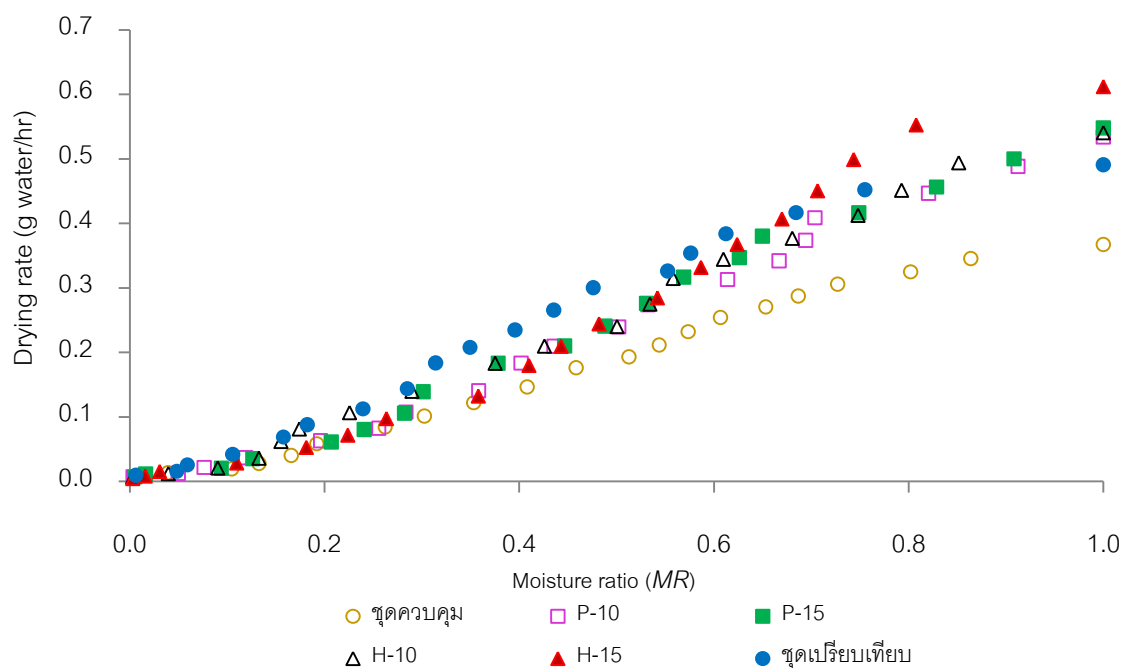
จากนั้นคำนวณหาอัตราเร็วในการอบแห้ง เนื่องจากกราฟอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองมีลักษณะเป็นแบบเอกซ์โปเนนเชียล จึงสมมติให้ใช้สมการเอกซ์โปเนนเชียลอย่างง่าย เพื่อใช้หาแนวโน้มของอัตราการอบแห้งในแต่ละชุดการทดลอง และคำนวณหาอัตราการอบแห้งในรูปอนุพันธ์ของค่าอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งโดยใช้สมการที่ 4.2 ซึ่งสูตรการคำนวณอ้างอิงมาจากงานวิจัยของ Doymaz และ Pala (2002)

$$\begin{aligned} \text{Drying rate} &= -d(MR)/dt \cdot \text{dry solid} \\ &= -d[\exp(-kt)]/dt \cdot \text{dry solid} \\ &= k \cdot \exp(-kt) \cdot \text{dry solid} \quad \dots\dots\dots(4.2) \end{aligned}$$

เมื่อ MR = อัตราส่วนความชื้น
 t = เวลาในการอบแห้ง (ชั่วโมง)
 k = ค่าคงที่ของการอบแห้ง (1/ชั่วโมง)

นำข้อมูลอัตราการอบแห้งที่คำนวณจากสมการที่ 4.2 มาแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้น (ภาพที่ 4.5)

จากภาพที่ 4.5 เมื่อพิจารณาค่า MR ในช่วง 0.6-1.0 พบว่าชุดการทดลอง H-15 มีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด ขณะที่ชุดการทดลอง P-10 P-15 H-10 และชุดเปรียบเทียบ มีอัตราการอบแห้งค่อนข้างใกล้เคียงกัน และชุดควบคุมมีอัตราการอบแห้งต่ำที่สุด ส่วนค่า MR ในช่วง 0.3-0.6 พบว่าชุดเปรียบเทียบมีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด ส่วนชุดการทดลอง P-10 P-15 H-10 และ H-15 มีอัตราการอบแห้งใกล้เคียงกัน และชุดควบคุมมีอัตราการอบแห้งต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาที่ MR เดียวกัน จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกของการอบแห้ง ค่าอัตราการอบแห้งของแต่ละชุดการทดลองค่อนข้างแตกต่างกัน เนื่องจากชนิดและปริมาณของน้ำตาลที่แตกต่างกันในผลิตภัณฑ์ โดยผลิตภัณฑ์ที่มีซูโครสอยู่ปริมาณมากกว่าจะทำให้อัตราการอบแห้งต่ำ เพราะว่าซูโครสมีขนาดโมเลกุลใหญ่ ตกผลึกที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ได้ง่าย ขัดขวางการระเหยน้ำของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้ง (Riva et al., 2005) และเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้นอัตราการอบแห้งของแต่ละชุดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 4.5 กราฟอัตราการอบแห้ง (อุณหภูมิในการอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส) ของผลิตภัณฑ์ปืตรูตที่ผ่านการอบสโมซีสในสารละลายน้ำตาลชนิดต่าง ๆ แสดงในรูปอัตราการอบแห้งกับค่าอัตราส่วนความชื้น

ค่าคงที่การอบแห้ง (ค่าคงที่ k) ของการทดลองสามารถหาจากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln MR$ กับเวลาในการอบแห้ง จากตารางที่ 4.6 พบว่าปืตรูตที่แช่ในชุดการทดลอง H-15 มีค่าคงที่ k สูงที่สุด ซึ่งให้ให้เห็นว่ามีอัตราการอบแห้งเร็วที่สุด รองลงมาคือ ชุดการทดลอง H-10 P-15 P-10 ขุดเปรียบเทียบ และชุดควบคุม ตามลำดับ โดยที่ชุดการทดลอง P-10 กับ P-15 มีค่าคงที่ k ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้งกับ MR พบว่าค่า k สอดคล้องกับค่าอัตราการอบแห้งในช่วงที่มีค่า MR เท่ากับ 0.6-1.0 โดยชุดการทดลอง H-15 มีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด ส่วนชุดควบคุมมีอัตราการอบแห้งต่ำที่สุด

ตารางที่ 4.6 ค่าคงที่ k ที่ได้จากการอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส ของผลิตภัณฑ์ปืตรูตที่ผ่านการอบสโมซีสในสารละลายน้ำตาลชนิดต่าง ๆ

ชุดการทดลอง	ค่าคงที่ k (h^{-1})	R^2
ชุดควบคุม	0.3674	0.8938
P-10	0.5339	0.8885
P-15	0.5407	0.8937
H-10	0.5481	0.9199
H-15	0.6123	0.9369
ชุดเปรียบเทียบ	0.4909	0.9358

โดยทั่วไปการอบแห้งผักผลไม้ที่ผ่านการอบสโมซิมในสารละลายน้ำตาลที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น น้ำตาลซูโครส เพียงชนิดเดียว จะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบสโมซิมในสารละลายน้ำตาลที่มีขนาดโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาลกลูโคสหรือฟรุคโทส ดังรายงานของ Rodrigues และ Fernandes (2007) ที่ศึกษาผลของการใช้น้ำตาลกลูโคสและแมนนิทอล ทดแทนสารละลายซูโครสบางส่วนในการอบสโมซิม ต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเมลอน พบว่าเมลอนที่แช่สารละลายซูโครส 70% (w/w) ที่ทดแทนด้วยน้ำตาลกลูโคส 20% (w/w) มีอัตราการอบแห้งต่ำที่สุด รองลงมาคือเมลอนที่แช่สารละลายซูโครส 70% (w/w) ที่ทดแทนด้วยแมนนิทอล 20% (w/w) และเมลอนที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายซูโครส 70% (w/w) เพียงชนิดเดียวมีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด โดยแต่ละชุดการทดลองใช้เวลาในการอบ 8.1 2.9 และ 1.4 ชั่วโมงตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากซูโครสมีน้ำหนักโมเลกุลสูง จึงเกิดการถ่ายเทมวลสารในอัตราที่ต่ำกว่ากลูโคสและแมนนิทอล ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า

ขณะที่ผลจากการทดลองนี้ พบว่าชุดการทดลองที่ใช้น้ำผึ้งมีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด (พิจารณาจากค่าคงที่ k) ชุดควบคุมมีอัตราการอบแห้งต่ำที่สุด (พิจารณาจากค่าคงที่ k) จากผลการทดลองดังกล่าวนี้ สามารถอธิบายได้โดยงานวิจัยของ Riva และคณะ (2005) ที่ศึกษาการทำแห้งโดยการอบสโมซิมแอปริคอต โดยแช่ในสารละลายอบสโมติก 3 ชนิด คือ สารละลายซูโครสเข้มข้น 60% (w/w) สารละลายซอร์บิทอลเข้มข้น 60% (w/w) และสารละลายไอโซโทนิค (สารละลายซูโครสเข้มข้น 13% (w/w)) นาน 60 นาที จากนั้นอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที พบว่าในขณะอบแห้งช่วงที่ขึ้นแอปริคอตมีความชื้นต่ำกว่า 1.5 กิโลกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง ขึ้นแอปริคอตที่ผ่านการแช่ในสารละลายซูโครส 60% (w/w) มีอัตราการอบแห้งต่ำกว่าการแช่ในสารละลายซอร์บิทอล 60% (w/w) เนื่องจากน้ำตาลซูโครสมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าซอร์บิทอลเกิดการตกผลึกที่ผิวหน้าในขณะอบแห้งได้ง่าย ทำให้ผลึกน้ำตาลดังกล่าวขัดขวางการระเหยของน้ำในขณะอบแห้ง

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page, Henderson and Pabis และ modified Henderson and Pabis (ตารางที่ 4.7) เพื่ออธิบายพฤติกรรมการอบแห้งของปีตรูตแช่ส้ม

ตารางที่ 4.7 สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งปีตรูตแช่ส้ม

แบบจำลอง	สมการจำลอง	เอกสารอ้างอิง
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Mandala et al. (2005)
Henderson and Pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt)$	Ghodake et al. (2006)
Modified Henderson and Pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt) + b \cdot \exp(-gt) + c \cdot \exp(-ht)$	Menges and Ertekin. (2006)

นำค่า MR ที่ได้จากการทดลองมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาประยุกต์ใช้ในการ
 ออบแห้งผักผลไม้ โดยใช้ฟังก์ชัน solver ในโปรแกรม Microsoft[®] Office Excel 2007 เพื่อคำนวณค่า k
 และ n ในสมการจำลองของ Page คำนวณค่า a และ k ในสมการจำลองของ Henderson and Pabis
 และคำนวณค่า a, k, b, g, c และ h ในสมการจำลองของ modified Henderson and Pabis พร้อมทั้ง
 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, r), ค่า Mean Residue Least Square
 (MRS) และค่า Root Mean Square Error ($RMSE$) คัดเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนาย
 พฤติกรรมการอบแห้งของป๊อปปี้แช่อบจากแบบจำลองที่ให้ค่า r สูง และค่า MRS และ $RMSE$ ต่ำ โดยค่า
 MRS และ $RMSE$ คำนวณได้จากสมการที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า $MRS, RMSE$ และ
 ค่า r (ตารางที่ 4.8) พบว่าแบบจำลองของ modified Henderson and Pabis มีความเหมาะสมในการ
 ทำนายพฤติกรรมการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าแบบจำลองของ Page และ Henderson and
 Pabis ตามลำดับ

$$MRS = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N-1} \dots\dots\dots(4.3)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(4.4)$$

เมื่อ MRS = Mean Residue Least Square

$RMSE$ = Root Mean Square Error

$MR_{exp,i}$ = MR ที่ได้จากการทดลองของข้อมูลชุดที่ i

$MR_{pre,i}$ = MR ที่ได้จากแบบจำลองของข้อมูลชุดที่ i

N = จำนวนข้อมูลการทดลอง

Korsrilabut, Borompichaichartkul และ Duangmal (2010) รายงานพฤติกรรมการอบแห้ง
 แคนตาลูปแช่อบ ซึ่งอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส พบว่าแบบจำลองแบบ modified
 Henderson and Pabis สามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ทุกชุดการทดลองได้ดีที่สุด

ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองของ Page, Henderson and Pabis และ modified Henderson and Pabis ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดทุกชุดการทดลอง

ชุดการทดลอง	ค่าสัมประสิทธิ์	Page	Henderson And Pabis	Modified Henderson and Pabis
ชุดควบคุม	k	0.4756	0.3212	0.2821
	n	0.7542	-	-
	a	-	0.8956	0.8186
	b	-	-	0.0903
	g	-	-	4.2512
	c	-	-	0.0903
	h	-	-	4.2512
	MRS	4.87×10^{-4}	1.16×10^{-3}	2.09×10^{-4}
	RMSE	2.15×10^{-2}	3.32×10^{-2}	1.41×10^{-2}
	r	0.9971	0.9930	0.9987
P-10	k	0.5021	0.4220	0.3823
	n	0.8634	-	-
	a	-	0.9485	0.8783
	b	-	-	0.0639
	g	-	-	3.2911
	c	-	-	0.0639
	h	-	-	3.2911
	MRS	4.77×10^{-4}	7.28×10^{-4}	3.54×10^{-4}
	RMSE	2.13×10^{-2}	2.63×10^{-2}	1.83×10^{-2}
	r	0.9974	0.9959	0.9981
P-15	k	0.5277	0.4421	0.3771
	n	0.8495	-	-
	a	-	0.9484	0.8286
	b	-	-	0.0903
	g	-	-	2.4160
	c	-	-	0.0903
	h	-	-	2.4160
	MRS	5.01×10^{-4}	9.42×10^{-4}	3.95×10^{-4}
	RMSE	2.18×10^{-2}	2.99×10^{-2}	1.93×10^{-2}
	r	0.9973	0.9948	0.9979

ตารางที่ 4.8 (ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองแบบ Page, Henderson and Pabis และ modified Henderson and Pabis ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่หักชุดการทดลอง

ชุดการทดลอง	ค่าสัมประสิทธิ์	Page	Henderson And Pabis	Modified Henderson and Pabis
H-10	k	0.5508	0.4643	0.3846
	n	0.8594	-	-
	a	-	0.9426	0.7256
	b	-	-	0.1187
	g	-	-	0.9979
	c	-	-	0.1187
	h	-	-	0.9979
	MRS	4.33×10^{-4}	5.89×10^{-4}	4.20×10^{-4}
	RMSE	2.02×10^{-2}	2.36×10^{-2}	2.00×10^{-2}
	r	0.9976	0.9968	0.9978
H-15	k	0.5517	0.4643	0.3770
	n	0.8138	-	-
	a	-	0.9071	0.7994
	b	-	-	0.0660
	g	-	-	1.4320
	c	-	-	0.0660
	h	-	-	1.4320
	MRS	1.07×10^{-3}	1.09×10^{-3}	1.04×10^{-3}
	RMSE	3.18×10^{-2}	3.21×10^{-2}	3.14×10^{-2}
	r	0.9940	0.9937	0.9942
ชุดเปรียบเทียบ	k	0.7352	0.4928	0.4060
	n	0.6640	-	-
	a	-	0.8511	0.7441
	b	-	-	0.1273
	g	-	-	7.8336
	c	-	-	0.1273
	h	-	-	7.8336
	MRS	4.87×10^{-4}	2.18×10^{-3}	1.89×10^{-4}
	RMSE	2.15×10^{-2}	4.55×10^{-2}	1.34×10^{-2}
	r	0.9968	0.9854	0.9987

การที่แบบจำลองแบบ modified Henderson and Pabis สามารถทำนายค่า MR ของผลิตภัณฑ์ทั้ง 6 ชุดการทดลองได้ดีกว่าแบบจำลองอื่น ๆ อาจเนื่องมาจากแบบจำลองแบบ modified Henderson and Pabis มีการแบ่งสมการในการทำนายออกเป็นสามพจน์แทนลักษณะที่แตกต่างกันในชั้นต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากชั้นผลิตภัณฑ์มีลักษณะแตกต่างกัน โดยบริเวณผิวนอกของผลิตภัณฑ์มีลักษณะแห้ง ขณะที่บริเวณเนื้อส่วนด้านในมีลักษณะชุ่มน้ำ ทำให้การแพร่ของน้ำภายในผลิตภัณฑ์ของแต่ละชั้นมีค่าแตกต่างกัน ทำให้สามารถทำนายค่าการเปลี่ยนแปลงของ MR ได้ใกล้เคียงมากขึ้น (จิราพร กอศรีลบุตร, 2549) และสามารถนำแบบจำลองดังกล่าวมาใช้ทำนายเวลาในการอบแห้ง (t) หรือค่าอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ (MR) โดยนำค่าคงที่ a, k, b, g, c และ h จากชุดการทดลองใดชุดการทดลองหนึ่งในตารางที่ 4.8 มาแทนในสมการ $MR = a \cdot \exp(-kt) + b \cdot \exp(-gt) + c \cdot \exp(-ht)$ และใส่ค่า MR หรือ t ตามต้องการ แต่แบบจำลองนี้สามารถใช้ในการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งของบัตูตที่ผ่านการอบสโมคซิสในชุดการทดลองทั้ง 6 ชุด เมื่ออบแห้งด้วยลมร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส เท่านั้น

จากผลการทดลองนี้ยังพบว่าแบบจำลองแบบ Page สามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งของผลิตภัณฑ์บัตูตที่ผ่านการอบสโมคซิสได้ดีกว่าแบบจำลองแบบ Henderson and Pabis เช่นเดียวกับรายงานของ Menges และ Ertekin (2006) ที่ศึกษาการอบแห้งแบบเปิดโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพฤติกรรมการอบแห้ง ที่อบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1 2 และ 3 เมตรต่อวินาที พบว่าที่อุณหภูมิและความเร็วลมเดียวกัน แบบจำลองแบบ Page สามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งของแบบเปิดได้ดีกว่าแบบจำลองแบบ Henderson and Pabis เนื่องจากแบบจำลองแบบ Page มีค่า $RMSE$ และค่า χ^2 ที่ต่ำกว่า ขณะที่ค่า r สูงกว่าแบบจำลองแบบ Henderson and Pabis

4.5 ผลของการใช้น้ำผึ้งและน้ำสับปะรดร่วมกับซูโครสต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน

บัตูตที่ผ่านการอบสโมคซิสทั้ง 6 ชุดการทดลอง (ชุดควบคุม H-10 H-15 P-10 P-15 และชุดเปรียบเทียบ) และอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีความชื้นประมาณ 14% (โดยน้ำหนักเปียก) บรรจุผลิตภัณฑ์ไว้ในถุงพอลิโพรพิลีน (PP) ขนาด 7×11 นิ้ว บรรจุลงละ 50 ชิ้น ภายใต้บรรยากาศปกติแล้วปิดให้สนิท เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (30±2 องศาเซลเซียส) จากนั้นตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน ผลการตรวจสอบคุณภาพด้านต่าง ๆ ดังนี้

4.5.1 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโทส และซูโครส ของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง

ปริมาณน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อบแห้งทั้งหกชุดการทดลอง ในรูปของน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโทส และซูโครส แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโทส ซูโครส กลูโคส+ฟรุคโทส และน้ำตาลทั้งหมดของ ผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อบแห้งเปรียบเทียบกับปีตรูตสดและปีตรูตที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ

ชุดการทดลอง	ปริมาณน้ำตาล (กรัม/100 กรัม น้ำหนักแห้ง)				
	กลูโคส	ฟรุคโทส	ซูโครส	กลูโคส+ฟรุคโทส	น้ำตาลทั้งหมด*
วัตถุดิบ (ปีตรูตสด)	12.76 ± 0.34	11.95 ± 0.11	27.64 ± 0.92	24.72 ± 0.23	52.36 ± 0.69
Pretreated sample	2.39 ± 0.08	2.61 ± 0.08	24.10 ± 1.13	5.00 ± 0.15	29.10 ± 1.28
ชุดควบคุม	0.40 ^a ±0.02	0.31 ^a ±0.01	68.25 ^c ±0.20	0.71 ^a ±0.02	68.96 ^{bc} ± 0.18
P-10	0.85 ^b ±0.03	0.91 ^b ±0.01	63.90 ^b ±0.50	1.76 ^b ±0.04	65.65 ^{ab} ± 0.46
P-15	0.93 ^b ±0.01	0.95 ^b ±0.02	65.94 ^{bc} ±1.72	1.89 ^c ±0.01	67.82 ^{abc} ± 1.73
H-10	6.44 ^d ±0.04	9.92 ^d ±0.03	48.18 ^a ±1.06	16.36 ^e ±0.01	64.54 ^a ± 1.07
H-15	8.19 ^e ±0.08	11.72 ^e ±0.09	45.16 ^a ±1.95	19.91 ^f ±0.01	65.07 ^{ab} ± 1.96
ชุดเปรียบเทียบ	1.22 ^c ±0.01	1.22 ^c ±0.04	67.33 ^{bc} ±2.51	2.44 ^d ±0.03	69.77 ^c ± 2.47

a, b, c,... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันตามแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

* ได้มาจากการคำนวณ

จากตารางที่ 4.9 เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำตาลของวัตถุดิบและปีตรูตที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพก่อนการอบแห้ง (pretreatment) พบว่าปริมาณน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโทส ซูโครส และน้ำตาลทั้งหมด (กลูโคส+ฟรุคโทส+ซูโครส) ลดลงเมื่อผ่าน pretreatment ทั้งนี้เนื่องจากขณะแช่ pretreatment น้ำตาลแพร่ออกมาจากชั้นปีตรูต โดยกลูโคสและฟรุคโทสแพร่ออกมาได้มากกว่าซูโครสเพราะโมเลกุลมีขนาดเล็กกว่า เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำตาลของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง พบว่าชุดการทดลอง H-10 และ H-15 มีปริมาณน้ำตาลกลูโคสและฟรุคโทสสูงกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตาราง ค.5) รองลงมาคือ ชุดเปรียบเทียบ P-15 P-10 และชุดควบคุมตามลำดับ ส่วนปริมาณน้ำตาลซูโครสพบว่าชุดการทดลอง H-10 และ H-15 มีปริมาณน้อยกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ ($p \leq 0.05$) (ตาราง ค.5) ขณะที่ชุดควบคุมมีปริมาณน้ำตาลซูโครสสูงที่สุดแต่ไม่แตกต่างจากชุดเปรียบเทียบและชุดการทดลอง P-15 ($p > 0.05$) (ตาราง ค.5) การที่ชุดการทดลองที่ใช้น้ำผึ้งทั้งสองความเข้มข้นมีปริมาณน้ำตาลกลูโคสและฟรุคโทสในผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งสูง เนื่องจากน้ำผึ้งมีกลูโคสและฟรุคโทสเป็นองค์ประกอบหลัก จึงแพร่เข้าไปในชั้นปีตรูตได้มากกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ ส่วนชุดควบคุมมีปริมาณน้ำตาลซูโครสในผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งสูงที่สุด เพราะชุดดังกล่าวใช้สารละลายซูโครสเพียงชนิดเดียวในการอบแห้ง

ขณะที่ชุดเปรียบเทียบมีปริมาณน้ำตาลซูโครสลดลงเมื่อเทียบกับชุดควบคุมเพราะน้ำตาลซูโครสบางส่วนถูกทดแทนด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต ทำให้ชุดเปรียบเทียบมีปริมาณน้ำตาลกลูโคสกับฟรุกโทสสูงกว่าชุดควบคุม และชุดการทดลองที่ใช้น้ำสับปะรดทั้งสองความเข้มข้นมีปริมาณน้ำตาลกลูโคสกับฟรุกโทสในผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งน้อยกว่าชุดเปรียบเทียบ และเมื่อพิจารณาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด พบว่าปีตรูตสดที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจะมีน้ำตาลทั้งหมดลดลง และเมื่อผ่านการอบสโมคซิงและอบแห้ง ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเพิ่มขึ้น โดยชุดเปรียบเทียบมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดสูงที่สุดที่ไม่แตกต่างจากชุดควบคุม และชุดการทดลอง P-15 ($p>0.05$) (ตาราง ค.5) ขณะที่ชุดการทดลอง H-10 มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดต่ำที่สุดแต่ไม่แตกต่างจากชุดการทดลอง H-15 P-10 และ P-15 ($p>0.05$) (ตาราง ค.5)

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งพบว่ามีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ k (ตารางที่ 4.6) โดยชุดการทดลอง H-15 มีปริมาณน้ำตาลซูโครสในผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งต่ำที่สุด รองลงมาเป็นชุดการทดลอง H-10 P-10 P-15 ชุดเปรียบเทียบ และชุดควบคุมตามลำดับ และพบว่าชุดการทดลอง P-10 กับ P-15 มีปริมาณน้ำตาลซูโครสในผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งใกล้เคียงกัน โดย Riva และคณะ (2005) รายงานว่าการมีน้ำตาลซูโครสในผลิตภัณฑ์ปริมาณมาก จะทำให้เกิดการตกผลึกบริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ในระหว่างอบแห้งมาก ผลึกน้ำตาลดังกล่าวจะขัดขวางการระเหยน้ำของผลิตภัณฑ์ ทำให้อัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ลดลง ดังนั้นชุดควบคุมจึงมีอัตราการอบแห้งต่ำที่สุด รองลงมาคือชุดเปรียบเทียบ และชุดการทดลองที่ใช้น้ำสับปะรด ตามลำดับ เพราะชุดการทดลองเหล่านี้มีปริมาณน้ำตาลซูโครสสูงกว่าชุดการทดลองที่ใช้น้ำผึ้ง และปริมาณน้ำตาลซูโครสจะแปรผกผันกับอัตราการอบแห้ง

4.5.2 ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน

เมื่อพิจารณาปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง (ตารางที่ 4.10) หลังจากอบแห้งให้มีปริมาณความชื้นประมาณ 14% (โดยน้ำหนักเปียก) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้อบแห้ง มอก. 919-2532 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532) โดยชุดการทดลอง H-15 มีปริมาณความชื้นสูงที่สุดแต่ไม่แตกต่างจากชุดการทดลอง H-10 ($p>0.05$) (ตาราง ค.6) รองลงมาเป็นชุดเปรียบเทียบ P-15 P-10 และชุดควบคุม ตามลำดับ จากผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสในผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง (ตารางที่ 4.9) ที่พบว่าชุดการทดลอง H-10 และ H-15 มีปริมาณน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสในผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งสูงกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ ซึ่งน้ำตาลดังกล่าวสามารถจับกับโมเลกุลน้ำได้ดี มีผลต่อสมบัติในการรักษาความชื้นของผลิตภัณฑ์ และพบว่า การเพิ่มปริมาณน้ำผึ้งหรือน้ำสับปะรดในการทดแทนน้ำตาลซูโครสให้สูงขึ้นจาก 10% เป็น 15% (v/v) มีผลให้ปริมาณความชื้นสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาปริมาณความชื้นของทุกชุดการทดลองของผลิตภัณฑ์ที่เก็บไว้ 30 วัน พบว่าปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ประมาณ 1-4%) เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง

ตารางที่ 4.10 ปริมาณความชื้นและค่า a_w ของผลิตภัณฑ์ปืตรูตหลังอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน

ชุดการทดลอง	ปริมาณความชื้น (% โดยน้ำหนักเปียก)		a_w	
	ผลิตภัณฑ์หลัง อบแห้ง	เมื่อเก็บไว้ 30 วัน	ผลิตภัณฑ์หลัง อบแห้ง	เมื่อเก็บไว้ 30 วัน
ชุดควบคุม	13.40 ^a ± 0.16	13.72 ^a ± 0.31	0.769 ^d ± 0.002	0.770 ^d ± 0.002
P-10	13.73 ^b ± 0.02	14.23 ^{ab} ± 0.73	0.737 ^c ± 0.004	0.747 ^c ± 0.002
P-15	13.84 ^b ± 0.08	14.40 ^{ab} ± 0.23	0.734 ^c ± 0.003	0.741 ^b ± 0.002
H-10	14.42 ^{cd} ± 0.04	14.70 ^b ± 0.09	0.639 ^b ± 0.004	0.640 ^a ± 0.001
H-15	14.54 ^d ± 0.07	14.74 ^b ± 0.12	0.629 ^a ± 0.002	0.639 ^a ± 0.003
ชุดเปรียบเทียบ	14.27 ^c ± 0.01	14.47 ^{ab} ± 0.30	0.734 ^c ± 0.004	0.741 ^b ± 0.001

a, b, c,... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันตามแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

4.5.3 ค่าวอเตอร์แอกทิวิตีของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน

จากตารางที่ 4.10 พบว่าค่า a_w ของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งทุกชุดการทดลองมีค่าลดลงหลังการอบแห้ง เช่นเดียวกับปริมาณความชื้น โดยชุดการทดลอง H-15 มีค่า a_w ต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) รองลงมาเป็นชุดการทดลอง H-10 ชุดเปรียบเทียบ P-15 และ P-10 ตามลำดับ โดยที่ชุดเปรียบเทียบมีค่า a_w ไม่แตกต่างจากชุดการทดลอง P-10 และ P-15 อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) (ตาราง ค.7) ขณะที่ชุดควบคุมมีค่า a_w สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตาราง ค.7) และเมื่อพิจารณาว่า a_w ของผลิตภัณฑ์ที่เก็บไว้ 30 วัน พบว่าทุกชุดการทดลองมีค่า a_w เพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ประมาณ 0.1-1.5%) โดยชุดการทดลอง H-15 มีค่า a_w ต่ำที่สุด แต่ไม่แตกต่างจากชุดการทดลอง H-10 ($p > 0.05$) (ตาราง ค.7) รองลงมาเป็นชุดเปรียบเทียบ P-15 P-10 และชุดควบคุมตามลำดับ จากผลการทดลองดังกล่าวเป็นผลเนื่องจากชุดการทดลองที่ใช้น้ำผึ้ง น้ำสับปะรด และชุดเปรียบเทียบ มีปริมาณน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสในผลิตภัณฑ์สูงกว่าชุดควบคุม (ตารางที่ 4.9) ซึ่งน้ำตาลกลูโคสและ ฟรุกโทสมีอัตราส่วนของจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลต่อจำนวนคาร์บอน (OH:C) สูงกว่าน้ำตาลซูโครส โดยกลูโคสและฟรุกโทสมีอัตราส่วน OH:C เป็น 0.83:1 ขณะที่ซูโครสมีอัตราส่วน OH:C เป็น 0.67:1 ทำให้มีส่วนที่เป็น hydrophilic มากกว่า และสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลกับโมเลกุลของน้ำได้มากกว่า จึงสามารถลดปริมาณน้ำอิสระลงได้ต่ำกว่า (Sagiv and Marcus, 2003) และจะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณของน้ำผึ้งและน้ำสับปะรดในการทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนให้สูงขึ้นจาก 10% เป็น 15% (v/v) ส่งผลให้ a_w มีค่าต่ำลง เนื่องจากปริมาณของน้ำผึ้งหรือน้ำสับปะรดที่สูงขึ้นทำให้โมเลกุลของน้ำถูกจับไว้มากขึ้น

4.5.4 ความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำ (water mobility) ของผลิตภัณฑ์สุดท้ายหลังอบแห้ง และเมื่อเก็บไว้ 30 วัน

การเคลื่อนที่ของน้ำในผลิตภัณฑ์ปิโตรตแช่อบแห้ง จากการติดตามด้วยเทคนิค NMR โดยวัดค่า spin lattice relaxation time (T_1) ของโปรตอนน้ำ ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำ ถ้าค่า T_1 สูง โมเลกุลของน้ำจะมีความสามารถในการเคลื่อนที่สูงหรือน้ำมีความเป็นอิสระมาก แต่ถ้าค่า T_1 ต่ำ โมเลกุลของน้ำจะมีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ต่ำ แสดงว่าโมเลกุลของน้ำมีความเป็นอิสระน้อย เนื่องจากโมเลกุลน้ำมีการสร้างพันธะหรือเกิดอันตรกิริยาต่าง ๆ กับโมเลกุลอื่นในระบบ (Kuo et al., 2001)

จากตารางที่ 4.11 พบว่าชุดการทดลอง H-15 ของผลิตภัณฑ์สุดท้ายหลังอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน มีค่า T_1 ต่ำที่สุด ($p \leq 0.05$) (ตาราง ค.8) รองลงมาคือชุดการทดลอง H-10 ชุดเปรียบเทียบ P-15 และ P-10 ตามลำดับ ขณะที่ชุดควบคุมมีค่า T_1 สูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากชุดการทดลองที่ใช้ น้ำฝั่มมีปริมาณน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสสูงกว่าชุดเปรียบเทียบและชุดการทดลองที่ใช้ น้ำสับปะรดตามลำดับ ซึ่งน้ำตาลดังกล่าวสามารถจับกับโมเลกุลน้ำได้ดีกว่าน้ำตาลซูโครส ดังนั้นชุดการทดลองที่ใช้ น้ำฝั่มจึงมีค่า T_1 ต่ำกว่าชุดการทดลองอื่น และพบว่าการใช้ น้ำฝั่มหรือน้ำสับปะรดทดแทนสารละลายน้ำตาลซูโครสบางส่วนสูงขึ้นจาก 10% เป็น 15% (v/v) มีผลให้ค่า T_1 ของผลิตภัณฑ์ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของน้ำถูกจับไว้มากขึ้น ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่า a_w (ตารางที่ 4.10) ที่พบว่าเมื่อปริมาณของน้ำฝั่มหรือน้ำสับปะรดที่ใช้ทดแทนสารละลายน้ำตาลซูโครสบางส่วนเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า a_w ของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง และพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เก็บไว้ 30 วัน ของทุกชุดการทดลอง มีค่า T_1 สูงขึ้น เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง

ผลิตภัณฑ์ที่เก็บไว้ 30 วัน พบว่ามีปริมาณความชื้น a_w และ T_1 เพิ่มขึ้น เนื่องผลิตภัณฑ์บรรจุไว้ในถุงพอลิโพรพิลีน ซึ่งมีค่าการซึมผ่านของน้ำและไอน้ำเท่ากับ 0.70 กรัม/24 ชั่วโมง/100 ตารางนิ้ว ที่ 95 องศาฟาเรนไฮต์ และความชื้นสัมพัทธ์ 90% (Hanlon, 1992)

ตารางที่ 4.11 ค่า spin lattice relaxation time (T_1) ของผลิตภัณฑ์บีตรูตแช่อิ่มอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน

ชุดการทดลอง	Spin lattice relaxation time (T_1) (ms)	
	ผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง	เมื่อเก็บไว้ 30 วัน
ชุดควบคุม	503.90 ^b ± 4.52	516.15 ^c ± 1.48
P-10	465.00 ^b ± 46.67	496.80 ^{bc} ± 2.26
P-15	451.10 ^b ± 29.56	491.70 ^{bc} ± 2.55
H-10	436.10 ^b ± 13.44	483.85 ^b ± 10.11
H-15	349.85 ^a ± 38.40	454.15 ^a ± 24.82
ชุดเปรียบเทียบ	440.30 ^b ± 15.13	488.20 ^{bc} ± 8.20

a, b, c ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันตามแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

4.5.5 ผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน

จากการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์บีตรูตแช่อิ่มอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน ของทั้งหกชุดการทดลอง โดยวัดค่าความแข็ง (hardness) ค่างานในการตัด (cutting work) และค่าความเหนียว (adhesiveness) ซึ่งค่าความแข็งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงแรงที่ใช้ในการกัดผลิตภัณฑ์ให้ขาดออกจากกัน ส่วนค่างานในการตัดเป็นค่าที่บ่งบอกถึงงานในการกัดผลิตภัณฑ์ และค่าความเหนียวเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเหนียวติดฟันเมื่อกัด ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์บีตรูตแช่อิ่มอบแห้งแสดงดังตารางที่ 4.12

จากตารางที่ 4.12 เมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง พบว่าชุดการทดลอง H-15 มีค่าความแข็งและค่างานในการตัดต่ำที่สุดแต่ไม่แตกต่างจากชุดการทดลอง H-10 ($p > 0.05$) (ตาราง ค.9) ขณะที่ชุดการทดลอง P-15 มีค่าความแข็งและค่างานในการตัดสูงกว่าชุดอื่น ๆ ทั้งนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ใช้น้ำผึ้งทดแทนสารละลายชูโครสบางส่วน มีน้ำตาลกลูโคสและฟรุคโทสอยู่ปริมาณมากกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ (ตารางที่ 4.9) ซึ่งน้ำตาลดังกล่าวสามารถจับกับโมเลกุลน้ำได้ดี ผลิตภัณฑ์มีลักษณะชุ่มน้ำ จึงทำให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่มกว่า ส่วนค่าความเหนียวติดฟันเมื่อกัด พบว่าชุดการทดลอง H-15 มีค่าสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตาราง ค.11-12) ขณะที่ชุดการทดลอง P-15 มีค่าความเหนียวติดฟันต่ำที่สุดแต่ไม่แตกต่างจากชุดการทดลอง H-10 ($p > 0.05$) (ตาราง ค.11-12) และพบว่าชุดควบคุม ชุดเปรียบเทียบ และชุดการทดลอง P-10 มีค่าความเหนียวติดฟันต่ำมากจนไม่สามารถวัดได้ นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มปริมาณการใช้น้ำผึ้งในการทดแทนสารละลายชูโครสบางส่วนจาก 10% เป็น 15% (v/v) มีผลให้ค่าความแข็งและค่างานในการตัดมีค่าลดลง ($p > 0.05$) ขณะที่ค่าความเหนียวติดฟันเพิ่มขึ้น

และเมื่อเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ 30 วัน พบว่าค่าความแข็ง ค่างานในการตัด และค่าความเหนียวติดฟัน มีค่าใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง โดยชุดการทดลอง H-10 และ H-15 มีค่าความแข็งและค่างานในการตัดต่ำที่สุด ($p>0.05$) ขณะที่ชุดการทดลอง H-15 มีค่าความเหนียวติดฟันสูงที่สุด ($p\leq 0.05$) เช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง

ตารางที่ 4.12 ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ตรึงแช่อบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน

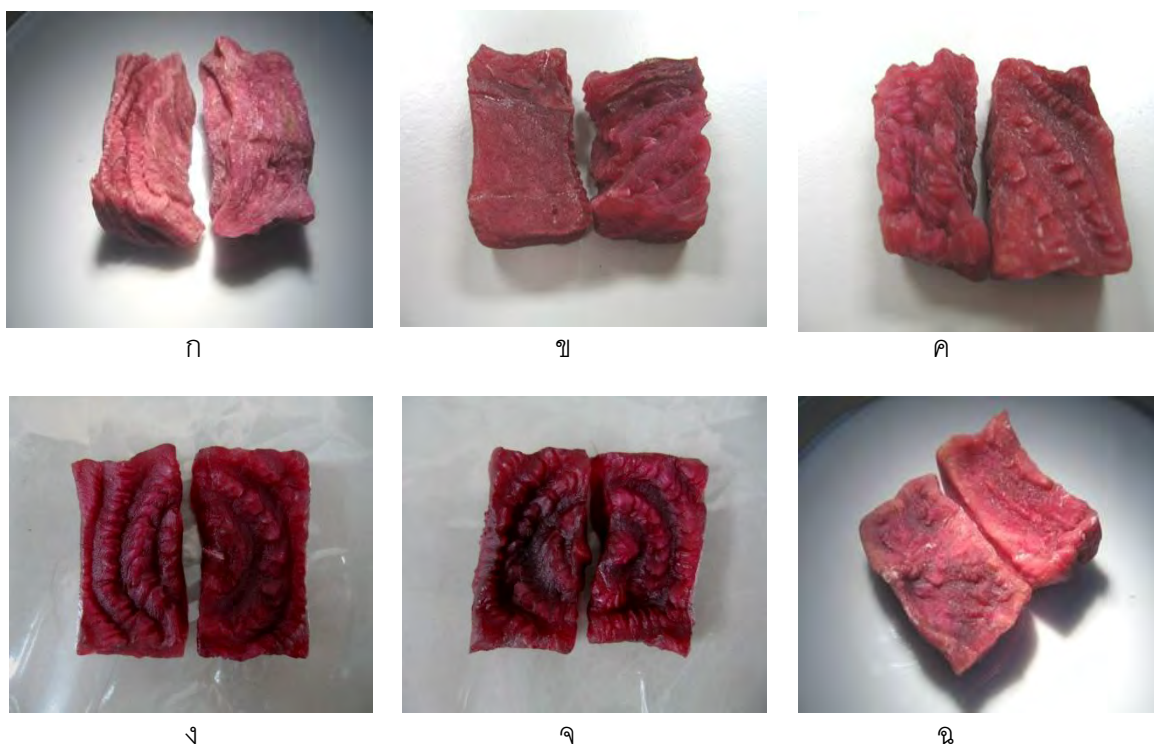
ชุดการทดลอง	ผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง			เมื่อเก็บไว้ 30 วัน		
	ค่าความแข็ง (N)	ค่างานในการตัด (N.mm)	ค่าความเหนียว (N.mm)	ค่าความแข็ง (N)	ค่างานในการตัด (N.mm)	ค่าความเหนียว (N.mm)
ชุดควบคุม	73.96 ^{bc} ± 20.16	210.24 ^{bc} ± 38.20	-	77.80 ^b ± 20.74	209.19 ^{ab} ± 60.23	-
P-10	87.48 ^{cd} ± 17.87	245.01 ^c ± 52.30	-	90.62 ^{bc} ± 8.38	232.75 ^{bc} ± 36.96	-
P-15	96.63 ^d ± 17.17	286.80 ^d ± 59.69	2.02 ^a ± 0.57	97.10 ^c ± 21.63	265.99 ^c ± 23.78	2.23 ^a ± 0.84
H-10	60.72 ^{ab} ± 10.98	191.97 ^{ab} ± 59.69	2.34 ^a ± 0.62	48.23 ^a ± 15.02	169.76 ^a ± 17.67	2.37 ^a ± 0.61
H-15	49.70 ^a ± 9.45	163.15 ^a ± 21.93	3.54 ^b ± 1.34	46.64 ^a ± 14.48	167.76 ^a ± 37.94	3.54 ^b ± 0.38
ชุดเปรียบเทียบ	75.98 ^{bc} ± 18.62	231.67 ^{bc} ± 56.66	-	77.06 ^b ± 24.03	223.45 ^b ± 47.20	-

a, b, c, ... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันตามแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$)

- หมายถึงไม่สามารถวัดค่าได้

4.5.6 การเกิดผลึกน้ำตาลที่ผิวหน้าของชิ้นที่ตรึงของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน

จากการศึกษาการเกิดผลึกน้ำตาลที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (stereo microscope) เมื่อพิจารณาการเกิดผลึกน้ำตาลที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ที่ตรึงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ พบว่าชุดการทดลอง H-10 และ H-15 (ง และ จ) ดังภาพที่ 4.6 และ 4.7 ของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน ไม่เกิดผลึกน้ำตาลที่ผิวหน้า ขณะที่ชุดควบคุม (ก) ของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งเกิดผลึกน้ำตาลที่ผิวหน้ามาก และเมื่อเก็บไว้ 30 วัน พบว่าเกิดผลึกน้ำตาลที่ผิวหน้าเพิ่มมากขึ้น ส่วนชุดการทดลอง P-10 P-15 และชุดเปรียบเทียบ (ข ค และ ฉ) ของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งพบว่าเกิดผลึกน้ำตาลที่ผิวหน้าเล็กน้อย และเมื่อเก็บไว้ 30 วัน พบว่าชุดการทดลอง P-10 และ P-15 เกิดผลึกน้ำตาลที่ผิวหน้ามากกว่าชุดเปรียบเทียบ การที่ชุดควบคุมเกิดผลึกน้ำตาลที่ผิวหน้ามากที่สุด เพราะมีน้ำตาลซูโครสในผลิตภัณฑ์มากที่สุด (ตารางที่ 4.9) ขณะที่ชุดการทดลอง H-10 และ H-15 มีน้ำตาลซูโครสในผลิตภัณฑ์น้อยกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ ซึ่งน้ำตาลซูโครสเป็นน้ำตาลที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทส เกิดผลึกได้ง่ายกว่า ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำตาลซูโครสในผลิตภัณฑ์มากกว่า จึงเกิดผลึกของน้ำตาลที่ผิวหน้าได้มากกว่า



ภาพที่ 4.6 ผลผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งทั้งหกชุดการทดลองของป๊อตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายและอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ

ก. ป๊อตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสโดยไม่มีการมีทดแทนด้วยน้ำผึ้งและน้ำส้มปะรด และอบแห้ง (ชุดควบคุม)

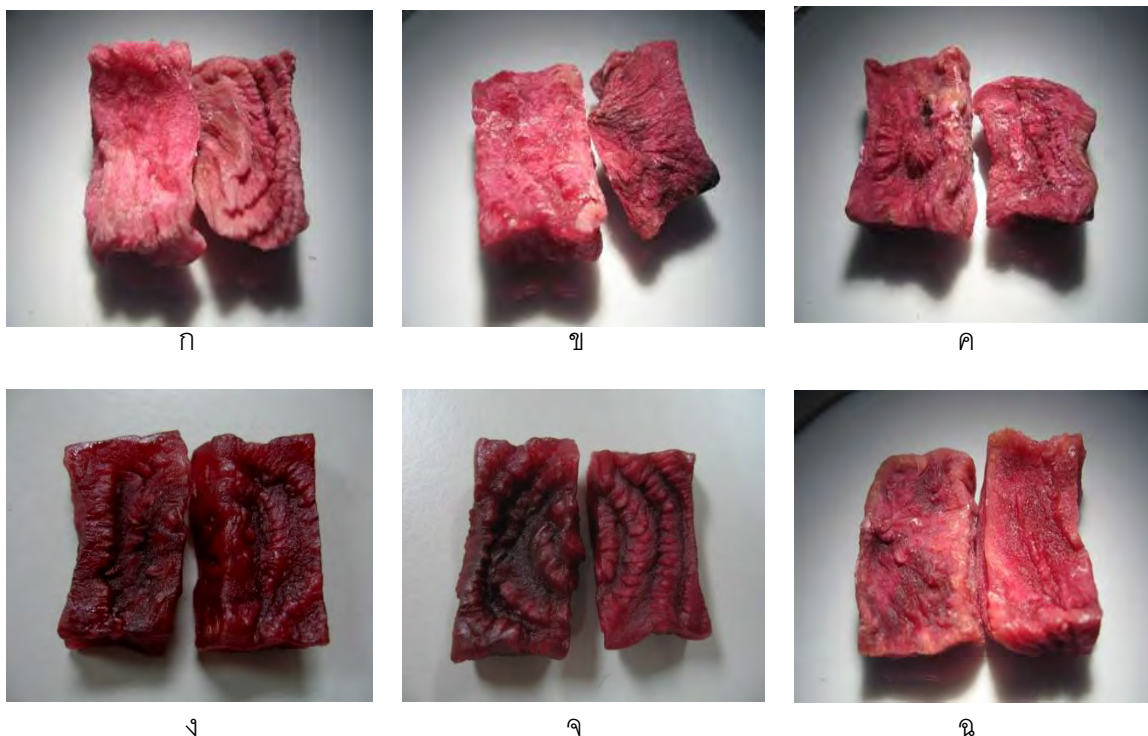
ข. ป๊อตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำส้มปะรด 10% และอบแห้ง (P-10)

ค. ป๊อตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำส้มปะรด 15% และอบแห้ง (P-15)

ง. ป๊อตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำผึ้ง 10% และอบแห้ง (H-10)

จ. ป๊อตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำผึ้ง 15% และอบแห้ง (H-15)

ฉ. ป๊อตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต 10% และอบแห้ง (ชุดเปรียบเทียบ)



ภาพที่ 4.7 ผลิตรสสัมผัสเมื่อเก็บไว้ 30 วัน ทั้งหกชุดการทดลองของบีตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายและอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ

ก. บีตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสโดยไม่การมีทดแทนด้วยน้ำผึ้งและน้ำส้มประรด และอบแห้ง (ชุดควบคุม)

ข. บีตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำส้มประรด 10% และอบแห้ง (P-10)

ค. บีตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำส้มประรด 15% และอบแห้ง (P-15)

ง. บีตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำผึ้ง 10% และอบแห้ง (H-10)

จ. บีตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำผึ้ง 15% และอบแห้ง (H-15)

ฉ. บีตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต 10% และอบแห้ง (ชุดเปรียบเทียบ)

4.5.7 ค่าสีของผลิตรสสัมผัสหลังอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน

ผลการวิเคราะห์ค่าสีในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ ของผลิตรสสัมผัสหลังอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน แสดงดังตารางที่ 4.13 เมื่อพิจารณาผลิตรสสัมผัสหลังอบแห้งพบว่าชุดการทดลอง H-15 มีค่า L^* ต่ำที่สุดแต่ไม่แตกต่างจากชุดการทดลอง H-10 ($p>0.05$) (ตาราง ค.13) ขณะที่ชุดควบคุมมีค่า L^* สูงที่สุด ($p\leq 0.05$) (ตาราง ค.13) เมื่อพิจารณาค่า a^* พบว่าชุดการทดลอง H-15 มีค่า a^* ต่ำที่สุด ($p\leq 0.05$) (ตาราง ค.13) ขณะที่ชุดควบคุมมีค่า a^* สูงที่สุด ($p\leq 0.05$) (ตาราง ค.13) และเมื่อพิจารณาค่า b^* พบว่าชุดการทดลอง H-15 มีค่า b^* ต่ำที่สุด ($p\leq 0.05$) (ตาราง ค.13) ขณะที่ชุดการทดลอง P-15 มีค่า b^* สูงที่สุด ($p\leq 0.05$) (ตาราง ค.13) เมื่อเก็บผลิตรสสัมผัสไว้ 30 วัน พบว่าค่า L^* , a^* และ b^* ลดลงทุกชุดการ

ทดลอง โดยชุดการทดลอง H-10 มีค่า L^* ต่ำที่สุดแต่ไม่แตกต่างจากชุดการทดลอง H-15 ($p>0.05$) (ตาราง ค.13) ขณะที่ชุดเปรียบเทียบมีค่า L^* สูงที่สุดแต่ไม่แตกต่างจากชุดการทดลอง P-15 ($p>0.05$) (ตาราง ค.13) ส่วนชุดการทดลอง H-15 มีค่า a^* ต่ำที่สุด($p\leq 0.05$) (ตาราง ค.13) ขณะที่ชุดการทดลอง P-10 มีค่า a^* สูงที่สุดแต่ไม่แตกต่างจากชุดการทดลอง P-15 และ H-10 ($p>0.05$) (ตาราง ค.13) และชุดเปรียบเทียบมีค่า b^* ต่ำที่สุดแต่ไม่แตกต่างจากชุดการทดลอง H-15 ขณะที่ชุดการทดลอง P-10 มีค่า b^* สูงที่สุดแต่ไม่แตกต่างจากชุดการทดลอง H-10 และ P-15 ($p>0.05$) (ตาราง ค.13)

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าเฉดสี (Hue angle) ค่าความเข้มสี (Chroma) ของผลิตภัณฑ์ และการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) ของผลิตภัณฑ์หลังอบและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

ตารางที่ 4.13 ค่าสี $L^*a^*b^*$ ของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน

ชุดการทดลอง	ผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง			เมื่อเก็บไว้ 30 วัน		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
ชุดควบคุม	24.09 ^d ±2.50	21.70 ^c ±1.78	4.55 ^c ±1.08	17.72 ^b ±0.70	9.95 ^b ±2.58	2.11 ^b ±0.61
P-10	20.98 ^b ±1.23	16.14 ^c ±1.53	4.30 ^{bc} ±1.05	17.78 ^b ±2.19	13.01 ^d ±4.54	3.13 ^c ±1.10
P-15	23.06 ^c ±2.07	19.85 ^d ±1.04	5.37 ^d ±0.74	19.16 ^c ±1.74	12.86 ^d ±4.63	2.58 ^{bc} ±1.44
H-10	18.06 ^a ±1.76	9.43 ^b ±1.76	3.99 ^b ±1.07	14.00 ^a ±1.60	12.16 ^{cd} ±1.91	3.06 ^c ±1.37
H-15	17.24 ^a ±1.31	7.92 ^a ±2.33	2.74 ^a ±0.85	14.72 ^a ±2.51	6.49 ^a ±1.10	1.46 ^a ±0.73
ชุดเปรียบเทียบ	22.84 ^c ±2.71	16.01 ^c ±1.66	4.72 ^c ±0.61	20.02 ^c ±0.66	11.09 ^{bc} ±0.79	1.03 ^a ±0.59

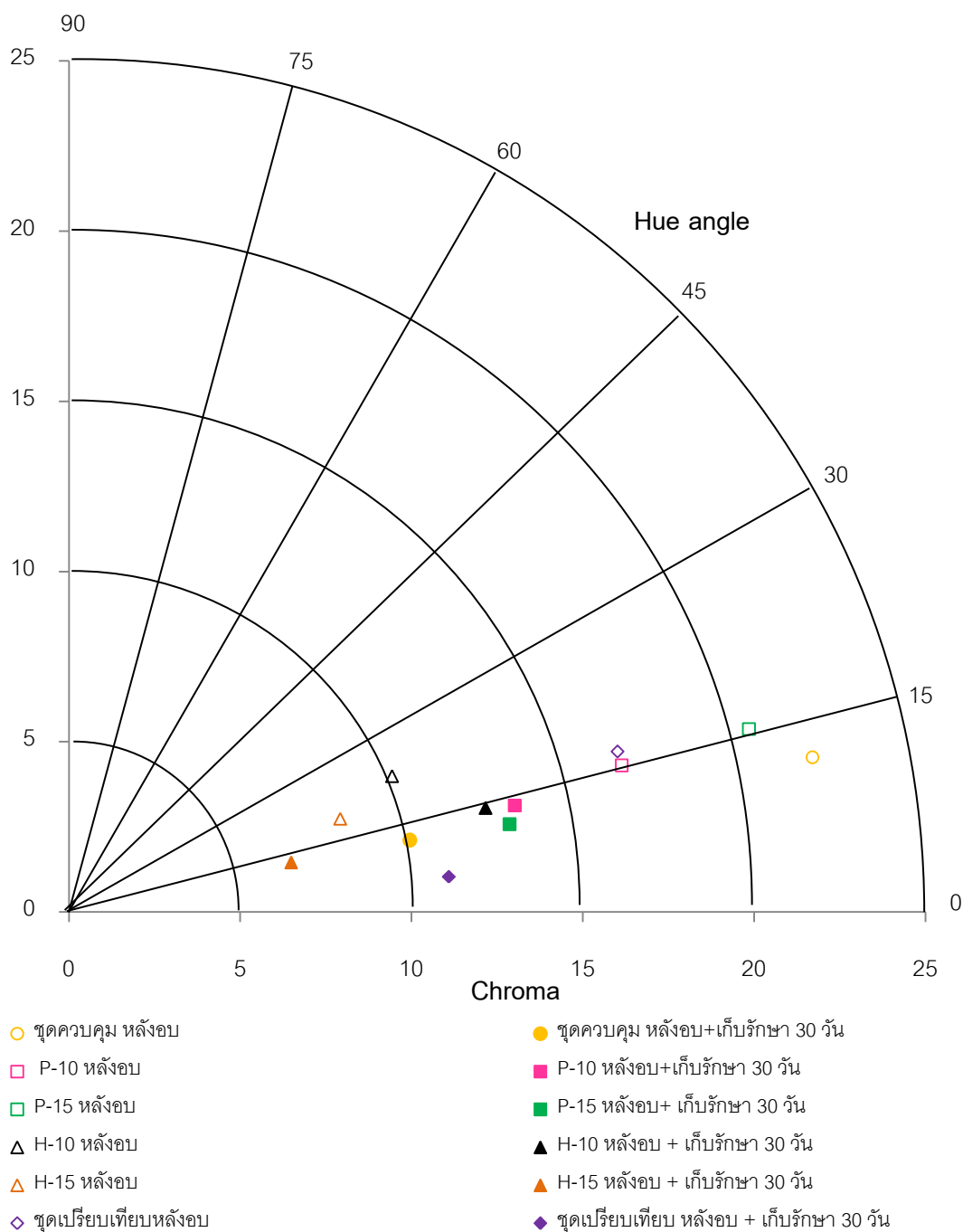
a, b, c,... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันตามแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$)

ตารางที่ 4.14 ค่าเฉดสี (Hue angle) ค่าความเข้มสี (Chroma) และค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) ของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน

ชุดการทดลอง	ผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง			เมื่อเก็บไว้ 30 วัน		
	Hue angle	Chroma	ΔE	Hue angle	Chroma	ΔE
ชุดควบคุม	11.83	22.18	-	11.97	10.17	-
P-10	14.94	16.70	6.38	13.51	13.39	3.23
P-15	15.15	20.56	2.28	11.34	13.12	3.28
H-10	22.95	10.24	13.68	14.12	12.54	4.43
H-15	19.06	8.38	15.50	12.65	6.65	4.63
ชุดเปรียบเทียบ	16.41	16.69	5.83	5.33	11.13	2.78

- หมายถึง ไม่มีค่าการเปลี่ยนแปลงสี เนื่องจากใช้ค่า L^* a^* และ b^* ของชุดควบคุมเป็นตัวอย่างมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่น ๆ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยและค่าความเข้มสี (ภาพที่ 4.8) เมื่อพิจารณาที่เฉลี่ย โดยที่ 0° เป็นสีแดง และที่ 90° เป็นสีเหลือง พบว่าผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน ของทั้ง หกชุดการทดลอง มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วง 10-20 องศา ซึ่งเป็นสีแดง และเมื่อพิจารณา ความเข้มสีของผลิตภัณฑ์ (ที่ค่าความเข้มสีสูงกว่าจะบอกถึงความสดใสของสีที่มากกว่า) พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่เก็บไว้นาน 30 วัน มีค่าความเข้มสีลดลงเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง ยกเว้นชุดการ ทดลอง H-10 ที่ค่าความเข้มสีใกล้เคียงกัน ขณะที่ชุดควบคุมของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งมีค่าความเข้มสี สูงที่สุด รองลงมาเป็นชุดการทดลอง P-15 P-10 ชุดเปรียบเทียบ H-10 และ H-15 ตามลำดับ ขณะที่ ผลิตภัณฑ์ที่เก็บไว้ 30 วัน ชุดการทดลอง P-10 มีค่าความเข้มสีสูงสุด รองลงมาคือชุดการทดลอง P- 15 H-10 ชุดเปรียบเทียบ ชุดควบคุม และ H-15 ตามลำดับ ซึ่งชุดการทดลอง H-15 ของทั้งผลิตภัณฑ์ หลังอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน มีค่าความเข้มสีต่ำที่สุด เนื่องจากเนื้อของบีตรูตมีสีแดงเข้ม เมื่อแช่ลงใน สารละลายซูโครสที่มีการทดแทนด้วยน้ำผึ้ง ทำให้สีของบีตรูตเปลี่ยนไปโดยมีความสดของสีแดงลดลง (สีแดงคล้ำ) ทำให้ชุดการทดลอง H-15 มีค่า L^* และ a^* ต่ำ และเมื่อพิจารณาความแตกต่างของความ เข้มสีของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งกับผลิตภัณฑ์ที่เก็บไว้ 30 วัน ของทั้งหกชุดการทดลอง (ภาพที่ 4.8) พบว่าผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งมีความแตกต่างของความเข้มสี (ความเข้มสีอยู่ในช่วง 8-22) มากกว่า ผลิตภัณฑ์ที่เก็บไว้ 30 วัน (ความเข้มสีอยู่ในช่วง 6-13) ซึ่งจากผลที่ได้สอดคล้องกับค่าการเปลี่ยนแปลง สี (ΔE) ดังแสดงในตารางที่ 4.14 เมื่อเก็บผลิตภัณฑ์ไว้นานขึ้น พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงสีของ ผลิตภัณฑ์จะลดต่ำลงเมื่อเทียบกับชุดควบคุม



ภาพที่ 4.8 การเปรียบเทียบสีและความเข้มสีของปืตรูตหลังอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน

4.5.8 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง

ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ทั้งหกชุดการทดลอง ด้วยวิธีการทดสอบความชอบ (preference test) ในด้านความคงรูป สี กลิ่น ความชุ่มน้ำเมื่อหักหรือกัด รสหวาน และความชอบโดยรวม ดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 คะแนนการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยวิธีการทดสอบความชอบของผลิตภัณฑ์บีตรูตแช่ใหม่อบแห้งที่ผ่านการอบสโมคซิสในสารละลายชนิดต่าง ๆ

ชุดการทดลอง	ความคงรูป (มีการหดตัวน้อย)			ความชุ่มน้ำเมื่อ หักหรือกัด ^{ns}		ความชอบ โดยรวม
	สี	กลิ่น	รสหวาน	รสหวาน		
ชุดควบคุม	2.6 ^a ± 0.8	2.4 ^a ± 0.9	2.2 ^a ± 0.9	2.8 ± 0.8	2.7 ^a ± 0.8	2.5 ^a ± 0.6
P-10	2.7 ^a ± 0.9	2.4 ^a ± 0.9	2.4 ^a ± 0.9	3.0 ± 0.8	2.9 ^{ab} ± 0.7	2.6 ^{abc} ± 0.7
P-15	2.7 ^a ± 0.8	2.4 ^a ± 0.9	2.9 ^b ± 0.6	3.0 ± 0.8	2.9 ^{ab} ± 0.8	2.8 ^{bc} ± 0.8
H-10	2.8 ^a ± 0.7	2.9 ^b ± 0.8	2.8 ^b ± 0.8	3.0 ± 0.9	2.7 ^a ± 0.8	2.8 ^{abc} ± 0.9
H-15	3.2 ^b ± 0.7	3.0 ^b ± 0.8	3.0 ^b ± 0.8	3.1 ± 0.8	3.1 ^b ± 0.9	2.9 ^c ± 0.7
ชุดเปรียบเทียบ	2.7 ^a ± 0.6	2.9 ^b ± 0.8	2.3 ^a ± 0.8	3.0 ± 0.8	2.7 ^a ± 0.9	2.6 ^{ab} ± 0.9

a, b, c ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันตามแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns ค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

จากตารางพบว่าชุดการทดลอง H-15 มีคะแนนความชอบด้านความคงรูปสูงที่สุด ($p \leq 0.05$) (ตาราง ค.14) ขณะที่ชุดควบคุมมีคะแนนความชอบด้านความคงรูปต่ำที่สุดไม่แตกต่างจากชุดเปรียบเทียบ ชุดการทดลอง H-10, P-10 และ P-15 ($p > 0.05$) (ตาราง ค.14) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของปริมาณน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโทส ซึ่งมีสมบัติในการรักษาความชื้นได้ดี ทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งไม่สูญเสียน้ำมากเกินไป จึงมีลักษณะการหดตัวน้อยและมีความคงรูปสูง

จากการทดสอบความชอบด้านสี พบว่าชุดการทดลอง H-15 มีคะแนนความชอบด้านสีสูงที่สุดแต่ไม่ต่างจากชุดการทดลอง H-10 และชุดเปรียบเทียบ ($p > 0.05$) (ตาราง ค.14) ส่วนชุดการทดลอง P-10 P-15 และชุดควบคุม มีคะแนนความชอบด้านสีต่ำกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ แต่ไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) (ตาราง ค.14) และจากการสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าชุดการทดลองที่ใช้น้ำฝั่มมีสีแดงค่อนข้างคล้ำ ขณะที่ชุดการทดลองอื่น ๆ มีสีแดงสด

ขณะที่ความชอบด้านกลิ่นเมื่อเปรียบเทียบกับบีตรูตสด พบว่าชุดการทดลอง H-15 มีคะแนนความชอบด้านกลิ่นสูงที่สุดไม่ต่างจากชุดการทดลอง H-10 และ P-15 ($p > 0.05$) (ตาราง ค.14) ขณะที่ชุดควบคุมมีคะแนนความชอบด้านกลิ่นต่ำที่สุดไม่ต่างจากชุดเปรียบเทียบ และชุดการทดลอง P-10 ($p > 0.05$) (ตาราง ค.14) จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าการใช้น้ำฝั่มและน้ำสับปะรดทดแทนสารละลายซูโครสบางส่วนขณะอบสโมคซิสช่วยปรับปรุงกลิ่นของบีตรูตให้ดีขึ้นกว่าชุดควบคุมและชุดเปรียบเทียบ

ส่วนความชอบด้านความชุ่มน้ำ พบว่าชุดการทดลอง H-15 มีคะแนนความชอบด้านความชุ่มน้ำสูงที่สุดไม่แตกต่างจากชุดการทดลองอื่น ($p > 0.05$) (ตาราง ค.14) ขณะที่ชุดควบคุมมีคะแนน

ความชอบต่ำที่สุด จะเห็นได้ว่าชุดการทดลองที่ใช้น้ำผึ้ง ชุดเปรียบเทียบ และชุดการทดลองที่ใช้น้ำสับปะรด มีคะแนนความชอบด้านความชุ่มน้ำสูงกว่าชุดควบคุม เพราะชุดการทดลองดังกล่าวมีน้ำตาล กลูโคสและฟรุกโทสเป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์อยู่มากกว่า ซึ่งน้ำตาลดังกล่าวสามารถจับกับโมเลกุลน้ำได้ดี มีผลต่อสมบัติในการรักษาความชื้นของผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งของชุดการทดลองดังกล่าวมีความชุ่มน้ำสูงกว่าชุดควบคุม

เมื่อพิจารณาความชอบด้านรสหวาน พบว่าชุดการทดลอง H-15 มีคะแนนความชอบด้านรสหวานสูงที่สุดไม่แตกต่างจากชุดการทดลอง P-10 และ P-15 ($p>0.05$) (ตาราง ค.14) ส่วนชุดควบคุม H-10 และชุดเปรียบเทียบ มีคะแนนความชอบด้านรสหวานต่ำที่สุดไม่แตกต่างจากชุดการทดลอง P-10 และ P-15 ($p>0.05$) (ตาราง ค.14) เพราะในผลิตภัณฑ์สุดท้ายพบว่าชุดการทดลอง H-15 มีปริมาณน้ำตาลฟรุกโทสมากที่สุด ซึ่งน้ำตาลฟรุกโทสเป็นน้ำตาลที่มีความหวานที่สุด

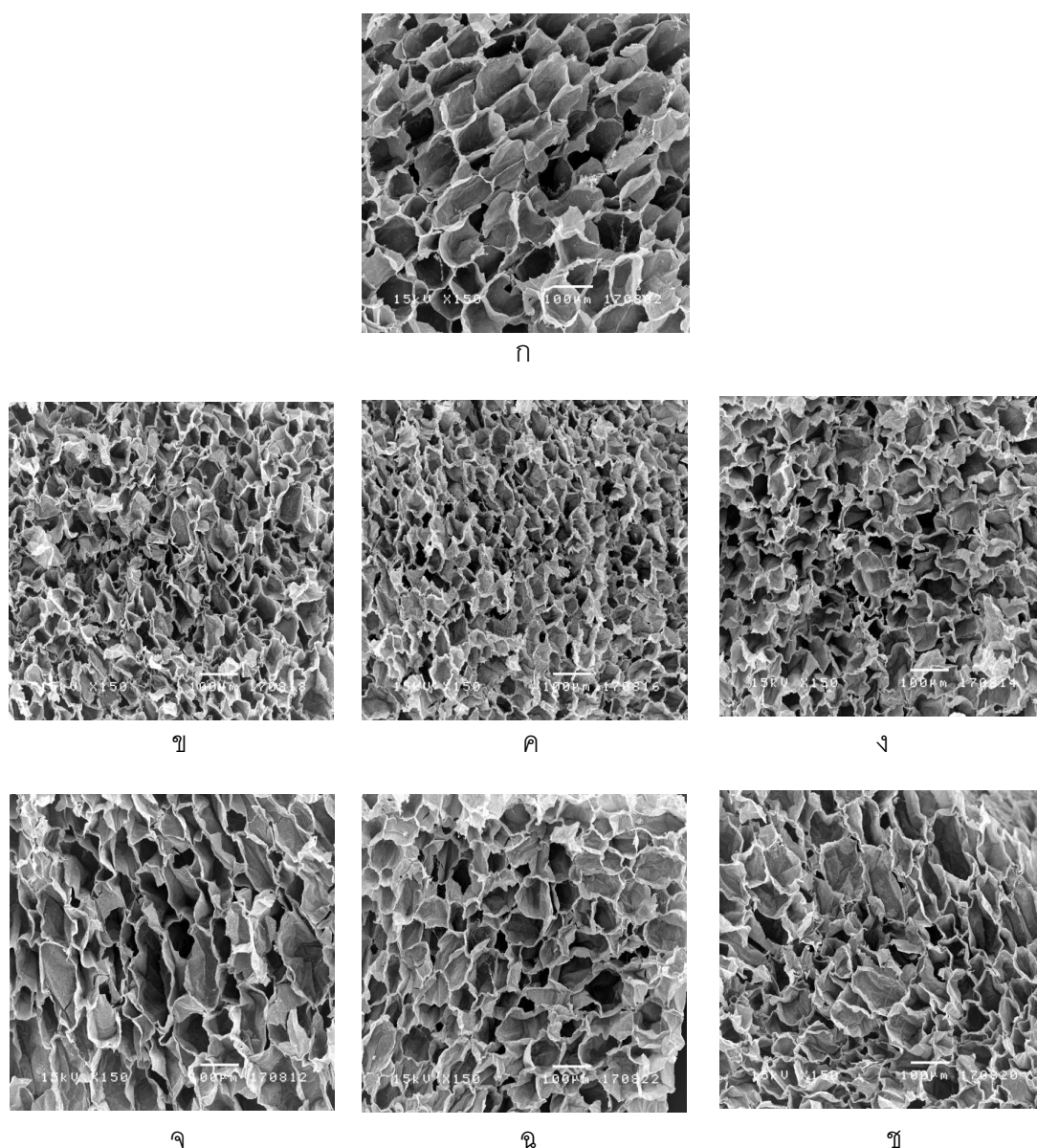
ส่วนความชอบโดยรวม พบว่าชุดการทดลอง H-15 มีคะแนนความชอบโดยรวมสูงกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ แต่ไม่แตกต่างจากชุดการทดลอง H-10 P-10 และ P-15 ($p>0.05$) (ตาราง ค.14) ขณะที่ชุดควบคุมมีคะแนนความชอบโดยรวมต่ำที่สุดไม่แตกต่างจากชุดเปรียบเทียบ H-10 และ P-10 ($p>0.05$) (ตาราง ค.14) ซึ่งจากคะแนนความชอบโดยรวมพบว่าชุดการทดลองที่ใช้น้ำผึ้งและน้ำสับปะรด มีคะแนนความชอบโดยรวมสูงกว่าชุดควบคุม

4.5.9 ปริมาณแบคทีเรีย ยีสต์ และรา ของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน

จากการตรวจหาปริมาณแบคทีเรีย ยีสต์ และรา ของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน ของทั้งหกชุดการทดลอง พบว่าปริมาณแบคทีเรียและราที่พบทั้งหมดน้อยกว่า 300 CFU/g และตรวจไม่พบยีสต์ ซึ่งมีปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้แห้ง มอก. 919-2532 โดยที่ปริมาณแบคทีเรียต้องไม่เกิน 1×10^4 CFU/g ขณะที่ปริมาณยีสต์และราต้องไม่เกิน 1×10^2 CFU/g (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532)

4.6 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานของเซลล์

ลักษณะทางสัณฐานของเซลล์ปีตรูตที่ผ่านการแช่ในสารละลายออสโมติกทั้งหกชุดการทดลอง และปีตรูตที่ผ่านการออสโมซิสแล้วอบแห้งทั้งหกชุดการทดลองด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เปรียบเทียบกับเซลล์ของปีตรูตสดแสดงดังภาพที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.9 ปัตรูตสดและปัตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายออสโมติกชนิดต่าง ๆ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ที่กำลังขยาย 150 เท่า

ก. ปัตรูตสด (วัตถุดิบ)

ข. ปัตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสโดยไม่มีกรทดแทนด้วยน้ำผึ้งและน้ำสับปะรด (ชุดควบคุม)

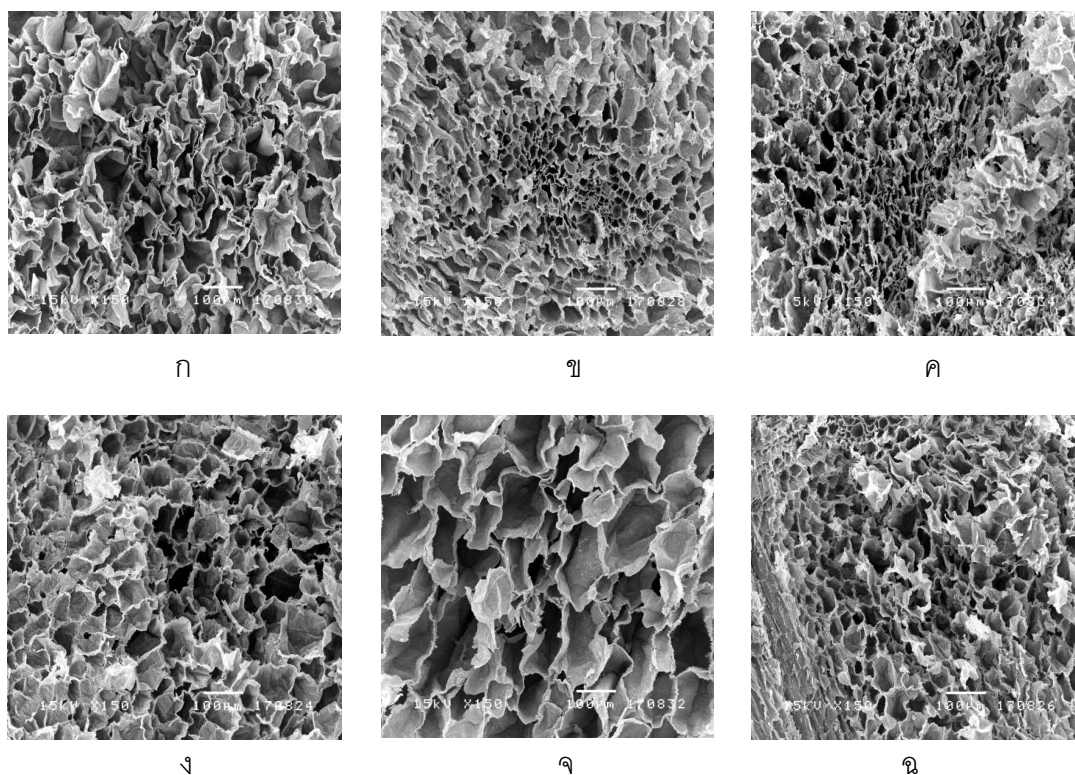
ค. ปัตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำสับปะรด 10% (P-10)

ง. ปัตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำสับปะรด 15% (P-15)

จ. ปัตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำผึ้ง 10% (H-10)

ฉ. ปัตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำผึ้ง 15% (H-15)

ช. ปัตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต 10% (ชุดเปรียบเทียบ)



ภาพที่ 4.10 ปีตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายออสโมติกชนิดต่าง ๆ และอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ที่กำลังขยาย 150 เท่า

ก. ปีตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสโดยไม่การมีทดแทนด้วยน้ำผึ้งและน้ำส้มประด และอบแห้ง (ชุดควบคุม)

ข. ปีตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำส้มประด 10% และอบแห้ง (P-10)

ค. ปีตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำส้มประด 15% และอบแห้ง (P-15)

ง. ปีตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำผึ้ง 10% และอบแห้ง (H-10)

จ. ปีตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำผึ้ง 15% และอบแห้ง (H-15)

ฉ. ปีตรูตที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต 10% และอบแห้ง (ชุดเปรียบเทียบ)

เมื่อพิจารณาเซลล์ของปíตรูตสดจากภาพที่ 4.9 (ก) ซึ่งเป็นเซลล์พาแรงไคมาทำหน้าที่สะสมอาหาร (storage parenchyma) พบว่าเซลล์มีรูปร่างกลมรี ไม่หดตัว แต่ละเซลล์อยู่ชิดกัน มีช่องว่างระหว่างเซลล์เล็กน้อย สามารถมองเห็นขอบเขตของเซลล์ได้ชัดเจน ขณะที่ปíตรูตที่ผ่านการแช่สารละลายออสโมติกทั้งหกชุดการทดลอง (ข-ฉ) มีการหดตัวของเซลล์ชัดเจนทุกชุดการทดลองเมื่อเทียบกับเซลล์ของปíตรูตสด เนื่องจากการที่เซลล์แช่ในสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูง (แรงดันออสโมติกสูง) ทำให้น้ำภายในเซลล์เคลื่อนที่ออกจากเซลล์ เซลล์เกิดการสูญเสียน้ำ โปรโทพลาสต์ (protoplast) หดตัวจากผนังเซลล์ทำให้เซลล์ดูเหี่ยวลง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าพลาสโมไลซิส (plasmolysis) ซึ่งสามารถ

อธิบายได้จากรายงานของ Pereira, Camello-Guerreiro และ Hubinger (2009) ที่ศึกษาผลของการทำแห้งโดยการออสโมซิสต่อการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ฝรั่ง โดยแช่ลงในสารละลายซูโครสและมอลโทสที่แปรระดับความเข้มข้นเป็น 40 และ 60 องศาบริกซ์ ส่องดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (light microscope) พบว่าเซลล์พาเรงไคมา (parenchyma) ของฝรั่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลที่ความเข้มข้นสูงกว่า (60 องศาบริกซ์) มีการหดตัว เนื่องจากเกิดพลาสโมไลซิส ทำให้รูปร่างของเซลล์เปลี่ยนไป และพบว่าเซลล์บางเซลล์ถูกทำลาย เมื่อพิจารณาเซลล์ของปีตรูตที่ผ่านการออสโมซิสพบว่าเซลล์ของชุดการทดลองที่ใช้น้ำผึ้งทั้งสองความเข้มข้น (จ และ ฉ) จะเหี่ยวน้อยกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ รองลงมาเป็นชุดเปรียบเทียบ (ช) และชุดที่ใช้น้ำสับปะรดทั้งสองความเข้มข้น (ค และ ง) ส่วนชุดควบคุม (ข) พบว่าเซลล์ค่อนข้างเหี่ยวมากกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ

เมื่อพิจารณาเซลล์ของปีตรูตที่ผ่านการออสโมซิสแล้วอบแห้งทั้งหกชุดการทดลองดังภาพที่ 4.10 (ก-ฉ) พบว่าเซลล์หดตัวในทุกชุดการทดลองมากกว่าการแช่ในสารละลายออสโมติกที่ไม่ผ่านการอบแห้ง โดยชุดการทดลองที่ใช้น้ำผึ้งทั้งสองความเข้มข้น (ง และ จ) เซลล์ปีตรูตหดตัวค่อนข้างน้อยกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ รองลงมาเป็นชุดเปรียบเทียบ (ฉ) และชุดที่ใช้น้ำสับปะรด (ง และ จ) ส่วนชุดควบคุมเซลล์เหี่ยวค่อนข้างมากกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ เนื่องจากในผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งของชุดการทดลองที่ใช้น้ำผึ้ง มีน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสมากกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ (ตารางที่ 4.9) ซึ่งน้ำตาลดังกล่าวมีขนาดโมเลกุลเล็ก สามารถแพร่ผ่านเข้าไปในเซลล์พาเรงไคมาได้ดีกว่าน้ำตาลซูโครสซึ่งมีขนาดโมเลกุลใหญ่ จึงช่วยรักษาความคงรูปของเซลล์ได้ดี ทำให้เซลล์มีการหดตัวน้อยกว่าชุดควบคุมซึ่งมีน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสในผลิตภัณฑ์ต่ำ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

หวัปีตรูตที่ใช้ในการทดลองซึ่งจากเกษตรกรในจังหวัดน่าน อายุ 14-16 สัปดาห์ มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 9-10% (w/w) โดยหั่นหวัปีตรูตเป็นชิ้นแล้วนำมาปรับปรุงคุณภาพโดยแช่ในสารละลายผสมของกรดซิตริกเข้มข้น 1.0% (w/v) และแคลเซียมคลอไรด์ที่แปรระดับความเข้มข้นเป็น 0 0.5 1.0 และ 1.5% (w/v) พบว่าการใช้แคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1.0% (w/v) ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมในชิ้นปีตรูตสูงที่สุดแต่ไม่แตกต่างจากการใช้ที่ความเข้มข้น 1.5% (w/v) อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) และให้ค่าความแข็งของชิ้นปีตรูตสูงที่สุดแต่ไม่แตกต่างจากการใช้ที่ความเข้มข้น 0.5% และ 1.5% (w/v) ($p > 0.05$) จึงเลือกใช้แคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1.0% (w/v) ในการปรับปรุงคุณภาพ จากนั้นแช่ชิ้นปีตรูตในสารละลายซูโครสเข้มข้น 35 และ 45 องศาบริกซ์ ตามลำดับ แช่ความเข้มข้นละ 6 ชั่วโมง อัตราส่วนของเนื้อปีตรูตต่อสารละลายเป็น 1:3 (w/v) โดยที่ระดับความเข้มข้น 45 องศาบริกซ์ ทดแทนสารละลายซูโครสบางส่วนด้วยน้ำผึ้งและน้ำส้มประรดปริมาณ 10% และ 15% (v/v) (H-10 H-15 P-10 และ P-15) เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการทดแทน และชุดเปรียบเทียบซึ่งทดแทนสารละลายซูโครสด้วยน้ำตาลอินเวิร์ตปริมาณ 10% (v/v) พบว่าปีตรูตที่แช่ในชุด H-10 และ H-15 มีผลให้ทั้งค่าการสูญเสียน้ำ (WL) และค่าการเพิ่มขึ้นของของแข็ง (SG) ที่ชั่วโมงที่ 12 ของการออสโมซิสสูงที่สุดเมื่อเทียบกับชุดอื่น ๆ

เมื่ออบแห้งปีตรูตที่ผ่านการออสโมซิสด้วยตู้อบลมร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.3 เมตรต่อวินาที พบว่าปีตรูตที่ผ่านการแช่ในชุด H-15 มีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด รองลงมาคือชุด H-10 P-15 P-10 ชุดเปรียบเทียบ และชุดควบคุมตามลำดับ และพบว่าค่าคงที่การอบแห้งสอดคล้องกับกราฟความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้งกับ MR ในช่วงที่มีค่า MR เท่ากับ 0.6-1.0 เมื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายพฤติกรรมการอบแห้ง พบว่าแบบจำลองแบบ modified Henderson and Pabis สามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ได้ดีที่สุด เมื่อพิจารณาจากค่า MRS และ $RMSE$ ที่ต่ำ และค่า r ที่สูง

การศึกษาคูณภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง พบว่าชุด H-10 และ H-15 มีปริมาณน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสสูงกว่าชุดอื่น ๆ ($p \leq 0.05$) ขณะที่ชุดควบคุมมีปริมาณน้ำตาลซูโครสสูงที่สุดแต่ไม่แตกต่างจากชุดเปรียบเทียบและชุดการทดลอง P-15 ($p > 0.05$) ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ระดับความชื้นประมาณ 14% (โดยน้ำหนักเปียก) พบว่าชุด H-10 และ H-15 มีค่า a_w และความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำต่ำกว่าชุดอื่น ๆ ขณะที่ชุดควบคุมมีค่าดังกล่าวสูงกว่าชุดอื่น ๆ เนื่องจากชุด H-10 และ H-15 มีน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสในผลิตภัณฑ์ปริมาณมาก ทำให้สามารถจับกับโมเลกุลน้ำได้ดี เมื่อพิจารณาลักษณะเนื้อสัมผัส พบว่าชุด H-15 มีค่าความแข็งและค่างานในการตัดต่ำที่สุดแต่ไม่แตกต่าง

จากชุด H-10 ($p > 0.05$) ขณะที่ชุด P-15 มีค่าความแข็งและค่างานในการตัดสูงกว่าชุดอื่น ๆ ส่วนค่าความเหนียวติดฟันของชุด H-15 มีค่าสูงที่สุด ($p \leq 0.05$) และพบว่าชุด H-10 และ H-15 ไม่เกิดผลึกน้ำตาลที่ผิวหน้า ขณะที่ชุดควบคุมเกิดผลึกน้ำตาลที่ผิวหน้ามากที่สุด ผลต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์ พบว่าผลิตภัณฑ์ทั้งหกชุดมีเฉดสีแดง โดยชุดควบคุมมีค่า L^* และ a^* สูงที่สุด ($p \leq 0.05$) และชุดดังกล่าวมีความเข้มสีสูงที่สุด ส่วนค่า b^* พบว่าชุด P-15 มีค่าสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ขณะที่ชุด H-15 มีค่า L^* , a^* , b^* และความเข้มสีต่ำที่สุด การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่าชุด H-15 มีคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุด ส่วนผลิตภัณฑ์เมื่อเก็บไว้ 30 วัน พบว่าปริมาณความชื้นของทุกชุดลดลงเล็กน้อย ขณะที่ค่า a_w และความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ลักษณะเนื้อสัมผัสพบว่าความแข็ง ค่างานในการตัด และค่าความเหนียวติดฟัน มีค่าใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง ขณะเดียวกันพบว่าชุด H-10 และ H-15 ไม่เกิดผลึกน้ำตาลที่ผิวหน้า แต่ชุดควบคุมเกิดผลึกน้ำตาลที่ผิวหน้ามากที่สุดเช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง ส่วนผลต่อค่าสีพบว่าทุกชุดมีค่า L^* , a^* , b^* และความเข้มสีลดลง ยกเว้นชุด H-10 ที่มีค่า a^* และความเข้มสีใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง ส่วนปริมาณแบคทีเรีย ยีสต์และรา ของผลิตภัณฑ์หลังอบและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน ของทุกชุดมีปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์ที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้แห้งกำหนดไว้ และการเปลี่ยนแปลงทางสีฐานของเซลล์ พบว่าปีตรูตที่ผ่านการอบสโมคซิในสารละลายทั้งหกชุดมีการหดตัวของเซลล์ชัดเจนทุกชุด และหดตัวมากขึ้นเมื่อผ่านการอบแห้ง โดยชุด H-10 และ H-15 มีการหดตัวของเซลล์ต่ำสุด

ชุดการทดลองที่ใช้น้ำผึ้งทั้งสองความเข้มข้น (H-10 และ H-15) ช่วยปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพดีขึ้นทุกด้าน ยกเว้นด้านสีที่ยังมีสีคล้ำอยู่ ส่วนชุดการทดลองที่ใช้น้ำสับปะรด (P-10 และ P-15) ช่วยกลบกลิ่นของวัตถุดิบได้ดี

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาผลของการใช้น้ำผึ้งร่วมกับน้ำสับปะรดหรือสารออสโมติกเอเจนต์ชนิดอื่น ต่อการถ่ายเทมวลสารในระหว่างการอบสโมคซิส จลนพลศาสตร์การอบแห้ง และคุณภาพผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่ อิมอบแห้ง เพื่อช่วยในการปรับปรุงคุณภาพด้านสี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- งามทิพย์ ภู่วโรดม. 2550. การบรรจุอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: เอสพีเอ็มการพิมพ์.
- จิราพร กอศรีลบุตร. 2549. ผลของน้ำตาลอินเวิร์ตต่อการทำแห้งและคุณภาพของแคนตาลูป *Cucumis melon* L. แซ่ส้มอบแห้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, สำนักงาน. 2532. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้แห้ง. มอก.919-2532. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม.
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, บรรณาธิการ. 2550. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมเกษตร. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศุลกากร, กรม. ข้อมูลการส่งออกผลไม้แช่ส้มอบแห้ง [Online]. Available from: <http://www.customs.go.th/Statistic/StatisticIndex2550.jsp> [2554, มกราคม 20]
- สิริวัฒน์ วงษ์ศิริ. 2532. ชีววิทยาของผึ้ง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ต้นอ่อน.
- อาพร ละออง. 2547. ผลของแคลเซียมคลอไรด์และน้ำตาลอินเวิร์ตต่อคุณภาพของมะละกอ *Carica papaya* L. ที่ทำแห้งโดยการอบแห้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- AOAC 2006. Official Methods of Analysis, 18th ed. Washington, DC: The Association of Official Analytical Chemists.
- Barbosa-Cánovas, G. V. and Vega-Mercado, H. V. 1996. Dehydration of Foods. New York: Chapman & Hall.
- Brown, B. I. 1969. Processing and preserving ginger by syruping under atmospheric condition. Food Technology. 23: 109-112.
- Cardetti, M. M. Scientific health research as a platform for a marketing strategy. [Online]. Available from: <http://www.nhb.org/foodtech.html> [2004, December 10]
- Chen, L., Mehta, A., Berenbaum, M., Zangen, A. R. and Engesth, N. J. 2000. Honeys from difference sources as inhibitors of enzymatic browning in fruit and vegetable homogenates. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 48: 4997- 5000.

- Doymaz, I. and Pala, M. 2002. The effect of dipping pretreatments on air-drying rates of the seedless grapes. Journal of Food Engineering 52: 413-417.
- El-Aouar, A. A., Azoubel, P. M., Barbosa, J. L. and Murr, F. E. X. 2006. Influence of the osmotic agent on the osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya* L.). Journal of Food Engineering. 75: 267-274.
- Elkins, E.R., Lyon, R., Huang, C. J. and Matthys, A. 1997. Characterization of commercially produced pineapple juice concentrate. Journal of Food Composition and Analysis. 10: 285-298.
- Erbay, Z. and Icier, F. 2008. Thin-layer drying behaviors of olive leaves (*Olea europaea* L.). Journal of Food Process Engineering. 33: 287-308.
- Fennema, O.R. 1996. Principles of Food Science. New York: Marcel Decker.
- Fernandes, F. A. N., Rodrigues, S., Gaspareto, O. C. P. and Oliveira, E. L. 2006. Optimization of osmotic dehydration of papaya followed by air-drying. Food Research International. 39: 492-498.
- Gheldof, N., Wang, X. and Engeseth, N. J. 2002. Identification and quantification of antioxidant components of honey from various floral source. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 50: 5870-5877.
- Ghodake, H. M., Goawami, T. K. and Chakraverty, A. 2006. Mathematical modeling of withering characteristics of tea leaves. Drying Technology. 24: 159-164.
- Hanlon, J.F. 1992. Handbook of Package Engineering, 2nd ed. Lancaster: Technomic.
- Harrigan, W. F. and McCance, M. E. 1976. Laboratory Methods in Foods and Dairy Microbiology. London: Academic Press.
- Kitts, D.D. The functional role of sugars in food. [Online]. Available from: <http://www.sugar.ca/english/healthprofessionals/carbolssue4.cfm> [2010, April 10]
- Konopacka, D., Jesionkowska, K., Mieszczakowska, M. and Plochanski, W. 2008. The usefulness of natural concentrated fruit juices as osmotic agents for osmo-dehydrated dried fruit production. Journal of Fruit and Ornamental Plant Research. 16: 275-284.
- Korsrilabut, J., Borompichaichartkul, C. and Duangmal, K. 2010. Effect of invert sugar on the drying kinetics and water mobility of osmosed-air dried cantaloupe. 45: 1524-1531.

- Kuo, M. I., Gunasekaran, S., Johnson, M. and Chen, C. 2001. Nuclear magnetic resonance study of water mobility in pasta filata and non-pasta filata mozzarella. Journal of Dairy Science. 84: 1950-1958.
- Le Maguer, M. and Yao, Z. 1995. Mass transfer during osmotic dehydration at cellular level. p. 186. Cited in Torreggiani, D. and Bertolo, G. Present and future in process control and optimization of osmotic dehydration. 2004. Advances in Food and Nutrition Research. p. 186.
- Lemus-Mondaca, R., Miranda, M., Grau, A. A., Briones, V., Villalobos, R. and Vega-Galvez, A. 2009. Effect of osmotic pretreatment on hot air drying kinetics and quality of Chilean papaya (*Carica pubescens*). Drying Technology. 27: 1105-1115.
- Lozano-de-Gonzalez, P. G., Barrett, D. M., Wrolstad, R. E. and Durst, R. W. 1993. Enzymatic browning inhibited in fresh and dried apple rings by pineapple juice. Journal of Food Science. 58: 399-404.
- Luna-Guzman, I. and Barrett, D. M. 2000. Comparison of calcium chloride and calcium lactate effectiveness in maintaining shelf stability and quality of fresh-cut cantaloupes. Postharvest Biology and Technology. 19: 61-72.
- Mandala, I. G., Anagnostaras, E. F. and Oikonomou, C. K. 2005. Influence of osmotic dehydration conditions on apple air-drying kinetics and their quality characteristics. Journal of Food Engineering 69: 307-316.
- Manganaris, G. A., Vasilakakis, M., Diamantidis, G. and Mignani, I. 2007. The effect of postharvest calcium application on tissue calcium concentration, quality attributes, incidence of flesh browning and cell wall physicochemical aspects of peach fruits. Food Chemistry. 100: 1385-1392.
- Manivannan, P. and Rajasimman, M. 2009. Optimization of process parameters for the osmotic dehydration of beetroot in sugar solution. Journal of Food Process Engineering. 8: 801-822.
- Martin-Diana, A. B., Rico, D., Frias, J. M., Barat, J. M., Henehan, G. T. M. and Barry-Ryan, C. 2007. Calcium for extending the shelf life of fresh whole and minimally processed fruits and vegetables: a review. Trends in Food Science & Technology. 18: 210-218.

- Matusek, A., Czukur, B. and Meresz, P. 2008. Comparison of sucrose and fructo-oligosaccharides as osmotic agents in apple. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 9: 365-373.
- McLellan, M. R., Kime, R. W., Lee C. Y. and Long, T. M. 1995. Effect of honey as an antibrowning agent in light raisin processing. Journal of Food Processing and Preservation. 19: 1-8.
- Menges, H. O. and Ertekin, C. 2006. Mathematical modeling of thin layer drying of golden apples. Journal of Food Engineering. 77: 119-125.
- Mossel, D. A. A. 1975. Water Relations of Foods. London: Academic Press.
- Nayak, C. A., Suguna, K., Narasimhamurthy, K. and Rastogi, N. K. 2007. Effect of gamma irradiation on histological and textural properties of carrot, potato and beetroot. Journal of Food Engineering. 79: 765-770.
- Nottingham, S. 2004. Beetroot. [Online]. Available from: <http://stephennottingham.co.uk/beetroot.htm> [2009, July 8]
- Omidiji, O. and Okpuzor, J. 1996. Time course of PPO-related browning of yams. Journal of the Science of Food and Agriculture. 70: 190-197.
- Pereira, L. M., Carmello-Guerreiro, S. M. and Hubinger, M. D. 2009. Microscopic features, mechanical and thermal properties of osmotically dehydrated guavas. Lebensmittel Wissenschaft und-Technologie. 42: 378-384.
- Perera, N., Gamage, T. V., Wakeling, L., Gamlath, G. G. S. and Versteeg, C. 2010. Colour and texture of apples high pressure processed in pineapple juice. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 11: 39-46.
- 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.
- Ramallo, L. A. and Mascheroni, R. H. 2005. Rate of water loss and sugar uptake during osmotic dehydration of pineapple. Brazilian Archives of Biology and Technology. 48, 761-770.
- Raoult-Wack, A. L. 1994. Recent advances in the osmotic dehydration of food. Trends in Food Science & Technology. 5: 255-260.

- Riva, M., Campolongo, S., Leva, A. A., Maestrelli, A. and Torreggiani, D. 2005. Structure-property relationships in osmo-air-dehydrated apricot cubes. Food Research International. 38: 533-542.
- Rodrigues, S. and Fernandes, F. A. N. 2007. Dehydration of melons in a ternary system followed by air-drying. Journal of Food Engineering. 80: 678-687.
- Sablani, S. S. and Rahman, M. S. 2003. Effect of syrup concentration, temperature and sample geometry on equilibrium distribution coefficients during osmotic dehydration of mango. Food Research International. 36: 65-71.
- Sagiv, A. E. and Marcus, Y. 2003. The connection between *in vitro* water uptake and *in vivo* skin moisturization. Skin Research and Technology. 9: 306-311.
- Silveira, E. T. F., Rahman, M. S. and Buckle, K. A. 1996. Osmotic dehydration of pineapple: kinetics and product quality. Food Research International. 29: 227-233.
- Stintzing, F. C. and Carle, R. 2008. Food Colorants. Romania: CRC press.
- The National Honey Board. Definition of honey and honey products. [Online]. Available from: <http://www.nhb.org/foodtech.html> [2009, April 18]
- Torreggiani, D. and Bertolo, G. 2004. Present and future in process control and optimization of osmotic dehydration. Advances in Food and Nutrition Research. 48: 173-238.
- Tyler, L. D., Acree, T. E. and Smith, N. L. 1979. Sensory evaluation of geosmin in juice made from cooked beets. Journal of Food Science. 44: 79-81.
- USDA. 2010. National Nutrient Database for Standard Reference. [Online]. Available from: <http://www.nal.usda.gov> [2010, November 6]

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์ทางเคมีและกายภาพ

ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ตามวิธี AOAC (2006)

วิธีการทดลอง

1. เตรียมตัวอย่างปัดรูด หั่นเป็นชิ้นเล็กละเอียดแล้วผสมให้เข้ากัน (ทำให้เสร็จสิ้นอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น)
2. ชั่งตัวอย่างปัดรูดน้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 5 กรัม (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ใส่ในภาชนะอลูมิเนียม ซึ่งอบแห้งและชั่งน้ำหนักแน่นอนแล้ว อบในตู้อบลมร้อน 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ วางไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก คำนวณปริมาณความชื้น โดยใช้สูตร

$$\text{ปริมาณความชื้น (\% โดยน้ำหนักเปียก)} = \frac{(\text{น้ำหนักปัดรูดก่อนอบ} - \text{น้ำหนักปัดรูดหลังอบ}) \times 100}{\text{น้ำหนักปัดรูดก่อนอบ}}$$

ก.2 การวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) โดยใช้เครื่อง AquaLab (Decagon Devices Model AquaLab® series 3TE, WA, USA)

วิธีการทดลอง

1. เปิดเครื่อง AquaLab ทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที ก่อนการใช้งาน
2. Calibrate เครื่องโดยการวัดน้ำกลั่น โดยนำถ้วยตัวอย่างที่ใส่น้ำกลั่นใส่ในช่องวัดตัวอย่าง รอให้เครื่องอ่านค่าเสร็จ ไฟสีเขียวจะกระพริบ ค่า a_w ของน้ำกลั่นที่ได้ต้องมีค่าประมาณ 1.0
3. นำตัวอย่างปัดรูดที่หั่นเป็นชิ้นละเอียดเตรียมใส่ถ้วยตัวอย่าง ให้มีความสูงเท่ากับขีดด้านข้างของถ้วยตัวอย่าง ปิดฝาทิ้งไว้ให้เข้าสู่สภาวะสมดุลประมาณ 5 นาที
4. เปิดฝากล้วยตัวอย่าง และใส่ในช่องวัดตัวอย่าง รอให้เครื่องอ่านค่าเสร็จ ไฟสีเขียวจะกระพริบ

ก.3 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโทส และซูโครส โดยใช้เครื่อง HPLC (Agilent Technologies Model HP 1100, CA, USA)

วิธีเตรียม Stock Solution

ละลายสารมาตรฐานน้ำตาลด้วยน้ำปราศจากอิออน (deionized water) ให้ได้ความเข้มข้นประมาณ 2% (w/v) เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และเตรียม working solution ที่ระดับความเข้มข้น 0.0063-0.30% (v/v) โดยเจือจางด้วยน้ำปราศจากอิออน

วิธีเตรียมสารเคมี

1.เตรียมสารละลาย potassium hexacyanoferrate $K_4[Fe(CN)_6]$ 15% (w/v) โดยชั่ง $K_4[Fe(CN)_6].3H_2O$ 15 กรัม ใส่ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนครบ 100 มิลลิลิตร

2.เตรียมสารละลาย zinc sulfate ($ZnSO_4$) 30% (w/v) โดยชั่ง $ZnSO_4.7H_2O$ 30 กรัม ใส่ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนครบ 100 มิลลิลิตร

วิธีการทดลอง

- 1.ชั่งตัวอย่าง 5-10 กรัม ด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง ใส่ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
- 2.เติมน้ำร้อน 50 มิลลิลิตร เขย่าแล้วนำไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก 20 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
- 3.เติมสารละลาย $K_4[Fe(CN)_6]$ 15% (w/v) 1 มิลลิลิตร แล้วเขย่าและเติมสารละลาย $ZnSO_4$ 30% (w/v) 1 มิลลิลิตร แล้วเขย่าเพื่อตกตะกอนโปรตีน
- 4.ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 100 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 15 นาที
- 5.กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 นำส่วนที่กรองได้กรองผ่าน nylon syringe filter ขนาด 0.45 ไมโครเมตร แล้วนำสารละลายที่กรองได้มาวิเคราะห์น้ำตาลด้วย HPLC เทียบกับสารละลายมาตรฐานน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโทส และซูโครส

สภาวะการทำงานของเครื่อง HPLC

Detector ELSD : รุ่น HP 1100 โดยตั้ง drift tube : $50^\circ C$, nitrogen flow : 1.5 และ impactor : on

Column : Prevail Amino 5u (250 มิลลิเมตร, ID. 4.6)

Mobile phase : Acetonitrile : methanol : water (D.I.) ตั้งโปรแกรมวิเคราะห์แบบ gradient elution analysis โดย flow rate : 1 มิลลิลิตร/นาที stop time : 19 นาที และ post time : 5 นาที

การคำนวณ

กรณีเครื่องตรวจวัดแบบ ELSD

กำหนดให้ $y = ax^m$

เมื่อ $y = \text{peak area}$

$m = \text{slope}$

$a = \text{response factor}$

สมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน : $\log y = m \log x + a$

เมื่อ $\log y =$ แกน y (พื้นที่ใต้พีค)

$\log x =$ แกน x (ความเข้มข้น)

$$\text{น้ำตาลแต่ละชนิดที่วิเคราะห์ได้ (กรัม/100 กรัม)} = \frac{C \times V}{W}$$

เมื่อ $C =$ ปริมาณน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและน้ำตาลโมเลกุลคู่ที่อ่านได้ (กรัม/100 กรัม)


เทียบจากกราฟมาตรฐาน

$V =$ ปริมาตรที่ปรับครั้งสุดท้าย (มิลลิลิตร)

$W =$ น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

ก.4 การวัดเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่อง Texture Analyser (Stable Micro System Model TA-XT2i, Godalming, United Kingdom)

วิธีการทดลอง

1. เข้าสู่โปรแกรม Texture expert โดยดับเบิ้ลคลิกที่ไอคอนของ Texture expert
2. เลือก user name ที่ต้องการแล้วคลิกที่ปุ่ม OK จากนั้นคลิกปุ่ม restart
3. คลิกที่ T.A. บนเมนูหลัก แล้วคลิก calibrate force
4. ตรวจสอบให้แน่ใจว่าไม่มีหัววัดและตัวอย่างอยู่ที่ฐานของเครื่อง จากนั้นคลิกปุ่ม OK
5. รอให้เครื่องแสดงข้อความว่า ให้วางตุ้มน้ำหนัก 5 กิโลกรัม ที่หน้าจอ (เนื่องจากใช้ load cell ขนาด 25 กิโลกรัม) จากนั้นวางตุ้มน้ำหนัก 5 กิโลกรัม บนฐานของเครื่อง (Calibration platform) แล้วคลิกปุ่ม OK และนำตุ้มน้ำหนักออก
6. ใส่หัววัดที่ใช้วัด ถ้าเป็นหัวเจาะทะลุ (P/2) คลิกที่ T.A. บนเมนูหลัก แล้วคลิก Calibrate probe และตรวจสอบให้แน่ใจว่าไม่มีตัวอย่างหรือสิ่งของวางไว้ที่ฐานของเครื่อง แต่ถ้าเป็นหัววัดที่ใช้ตัด (BSK with knife) ต้องติดตั้งแท่นที่ใช้สำหรับวางตัวอย่างที่จะตัดก่อน จากนั้นคลิกที่ T.A. บนเมนูหลัก แล้วคลิก Calibrate probe และตรวจสอบให้แน่ใจว่าไม่มีตัวอย่างหรือสิ่งของวางไว้ที่แท่นวางตัวอย่าง
7. กดปุ่ม Fast +  เพื่อเลื่อนตำแหน่งของหัววัดให้มาอยู่ใกล้กับฐานของเครื่องในกรณีที่เป็นหัวเจาะทะลุ (P/2) แต่ถ้าเป็นหัววัดที่ใช้ตัด (BSK with knife) ต้องเลื่อนใบมีดลงมาให้เลยช่องของแท่นวางตัวอย่างเล็กน้อย
8. กำหนดระยะทางในการเคลื่อนที่กลับไปของหัววัด เมื่อหัววัดสัมผัสกับฐานของเครื่องสำหรับหัววัดแบบเจาะทะลุ และเมื่อหัววัดเลยช่องของแท่นวางตัวอย่างลงมาเล็กน้อยสำหรับหัววัดที่ใช้ตัด โดยใช้ความสูงของตัวอย่างที่ต้องการวัดเป็นเกณฑ์ (ระยะทางที่กำหนดต้องมากกว่าความสูงของตัวอย่างที่ต้องการวัดเล็กน้อย) ในที่นี้ให้ระยะทางในการเคลื่อนที่กลับไปของหัววัดเป็น 30 มิลลิเมตร
9. ถ้าใช้หัววัดแบบเจาะทะลุ วางตัวอย่างบนฐานของเครื่อง แต่ถ้าเป็นหัววัดแบบตัดให้วางตัวอย่างที่แท่นวาง

10. กำหนดตัวแปรเพื่อสั่งงานเครื่อง โดยคลิกที่ T.A. บนเมนูหลัก เลือก T.A. Settings

11. ตั้งค่าต่าง ๆ ของการวัด ดังนี้

หัววัดแบบเจาะทะลุ (P/2)

Mode :	Measure force in compression
Option :	Return to start
Pre-test speed :	1.5 mm/s
Test speed :	1.5 mm/s
Post-test speed :	10.0 mm/s
Distance :	10.0 mm.

หัววัดแบบใช้ตัด (BSK with knife)

Mode :	Measure force in compression
Option :	Return to start
Pre-test speed :	2.0 mm/s
Test speed :	2.0 mm/s
Post-test speed :	10.0 mm/s
Distance :	12.0 mm.

12. วางตัวอย่างบนฐานของเครื่องวัด คลิกที่ T.A. บนเมนูหลัก เลือก Running a test

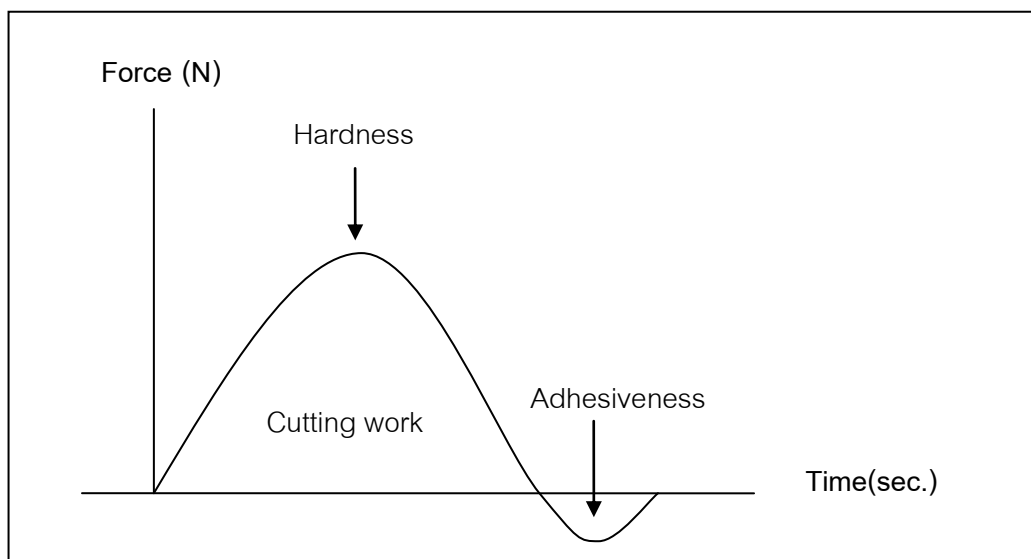
13. คลิกที่ปุ่ม Auto save เพื่อให้เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ พร้อมกับตรวจสอบว่าทำการบันทึกไว้ที่ directory ไດ

14. เลือกหัววัดแบบ P/2 สำหรับหัววัดแบบเจาะทะลุ และ BSK with knife สำหรับหัววัดแบบหัวตัด

15. เมื่อกำหนดตัวแปรเพื่อสั่งงานเครื่องเสร็จแล้ว คลิกที่ update เพื่อตั้งค่าสั่งเครื่องทั้งหมดไปยังเครื่องวัดเนื้อสัมผัส

16. วิเคราะห์ชุดการทดลองละ 15 ชิ้น แต่ละชิ้นวัดหนึ่งครั้ง

17. สำหรับหัววัดแบบเจาะทะลุได้ค่าความแข็ง (hardness) จาก peak force จากกราฟ ขณะที่หัววัดแบบหัวตัดได้ค่าแรงการตัดขาด (peak force) ค่างานที่ใช้ในการตัด (พื้นที่ใต้กราฟ cutting work) และค่าความเหนียว (พื้นที่ใต้กราฟส่วนที่เป็นลบ) แสดงดังภาพที่ ก.1



ภาพที่ ก.1 ตัวอย่างลักษณะกราฟจากเครื่อง Texture Analyser

ก.5 การวัดสี โดยใช้เครื่อง ColorFlex[®] (HunterLab Reston รุ่น 45/0-s, Reston, Va., USA)

วิธีการทดลอง

1. เข้าสู่โปรแกรม Spectrophotometer Universe โดยดับเบิลคลิกที่ไอคอนของ Spectrophotometer Universe
2. คลิกที่ Standardize บนเมนูหลัก
3. เลือก Port size ขนาด 0.50 นิ้ว จากนั้นคลิกปุ่ม OK
4. วางแผ่น calibrate สีดำ ให้ปุ่มสีขาวด้านบนแผ่น calibrate หันออกด้านนอก จากนั้นคลิกปุ่ม OK
5. วางแผ่น calibrate สีขาว ให้ปุ่มสีขาวด้านบนแผ่น calibrate หันออกด้านนอก จากนั้นคลิกปุ่ม OK รอจนเครื่องขึ้นคำว่า Sensor successfully standardized จากนั้นกดปุ่ม OK
6. ทดลองอ่านค่าแผ่น calibrate สีขาว โดยคลิกที่ Read sample บนเมนูหลัก โดยค่าที่ได้ต้องอยู่ในช่วงดังนี้ $X=78.89\pm 0.3$ $Y=83.78\pm 0.3$ $Z=87.74\pm 0.3$ (ถ้าไม่อยู่ในช่วงที่กำหนดต้องทำ Standardize ใหม่)
7. นำตัวอย่างปัดรูตวางบนฐานของเครื่องให้ปิดช่อง port size ให้สนิท แล้วปิดฝาครอบ จากนั้นคลิกที่ Read sample บนเมนูหลัก
8. วิเคราะห์ตัวอย่างละ 10 ซ้ำ โดยค่าที่ได้จะรายงานเป็น CIE $L^*a^*b^*$ แหล่งแสง D65 มุมการมอง 10°

ก.6 การวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียม ตามวิธี AOAC (2006)

วิธีการทดลอง

1. เตรียมสารเคมี

- กรดไนตริก ความเข้มข้น 1 M 500 มิลลิลิตร โดยชั่งกรดไนตริกด้วยเครื่องชั่งละเอียด 31.5 กรัม ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 500 มิลลิลิตร

- สารละลาย lanthanum chloride เข้มข้น 1.0% (w/v) โดยชั่ง Lanthanum oxide ด้วยเครื่องชั่งละเอียด 11.7 กรัม ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร จากนั้นเติม Hydrochloric acid (37%) 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 1000 มิลลิลิตร

2. ชั่งปฏิกูต 5 กรัมใส่ crucible ที่แห้ง จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นในตู้อบลมร้อน 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3. นำ crucible ที่เผาไล่ควันแล้วไปเข้า muffle furnace ที่อุณหภูมิ 525 องศาเซลเซียส จนเข้ามีสีขาว (ประมาณ 5 ชั่วโมง) ถ้าเข้ายังขาวไม่หมดให้เติมกรดไนตริกเข้มข้น 1 M เล็กน้อย แล้วอุ่นบน hot plate แล้วนำไปเผาใน muffle furnace ต่อ (ประมาณ 1 ชั่วโมง)

4. จากนั้นนำมาเติมกรดไนตริกเข้มข้น 1 M 5 มิลลิลิตร ให้ความร้อนด้วย hot plate 2-3 นาที เพื่อให้ละลาย แล้วใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยกรดไนตริกจนครบ 50 มิลลิลิตร

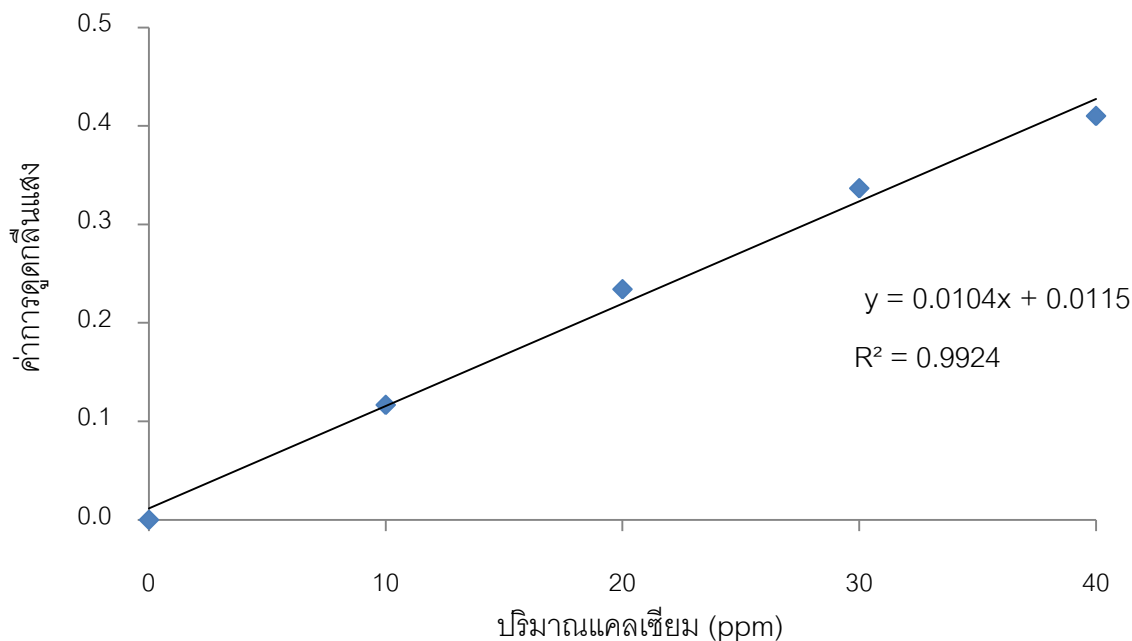
5. ปิเปตสารละลายจากข้อ 4 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร แล้วเติม Lanthanum Chloride 1 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยกรดน้ำกลั่นจนครบ 10 มิลลิลิตร

6. นำสารละลายที่ได้เข้าเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (with air-acetylene flame) ที่ความยาวคลื่น 422.7 นาโนเมตร อ่านค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ คำนวณปริมาณแคลเซียมที่ได้ โดยเทียบจากกราฟมาตรฐานซึ่งรายงานในหน่วยส่วนในล้านส่วน (ภาพที่ ก.2)

วิธีทำกราฟมาตรฐาน

1. ปิเปต calcium stock solution ความเข้มข้น 1000 ppm มา 0, 1, 2, 3 และ 4 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมสารละลาย Lanthanum Chloride 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 100 มิลลิลิตร สารละลายที่ได้จะมีความเข้มข้นของแคลเซียมเป็น 0, 10, 20, 30 และ 40 ppm ตามลำดับ

2. นำสารละลายที่ได้จากข้อ 1 เข้าเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (with air-acetylene flame) ที่ความยาวคลื่น 422.7 นาโนเมตร อ่านค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ คำนวณปริมาณแคลเซียมได้กราฟมาตรฐานดังภาพที่ ก.2



ภาพที่ ก.2 กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียม

ก.7 การติดตามการเคลื่อนที่ของน้ำ (water mobility) ในผลิตภัณฑ์โดยเครื่อง Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer (Oxford Instruments Model Varian[®] Inova, CA, USA)

วิธีการทดลอง

1. หั่นปีตรูตแช่เชื่อมอบแห้งเป็นชิ้นขนาด 0.5×4.0 เซนติเมตร
2. บรรจุลงในหลอด NMR ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร สูง 18 เซนติเมตร
3. นำหลอด NMR ที่บรรจุตัวอย่าง ใส่ในเครื่อง NMR ขนาด 500 MHz
4. วัดโปรตอนสเปกตรัมของน้ำ
5. แปรค่า delay time ทั้งหมด 8 ค่า โดยให้ค่า spin lattice relaxation time (T_1) ในช่วง 300-1000 มิลลิวินาที
6. วิเคราะห์ค่า T_1 ตัวอย่างละ 2 ซ้ำ

ก.8 การติดตามการเกิดผลึกน้ำตาลที่ผิวหน้าของชิ้นปีตรูต ด้วยเครื่อง Stereo Microscope (Olympus Model SZ-ST, Tokyo, Japan)

วิธีการทดลอง

1. เสียบปลั๊กไฟของกล้องจุลทรรศน์ แล้วกดสวิตช์เปิดไฟที่ตัวกล้อง จากนั้นวางชิ้นปีตรูตบน petri dish ที่แทนวางของกล้อง
2. เลือกตำแหน่งของชิ้นปีตรูตที่ต้องการโดยหมุน petri dish แล้วส่องดูภาพโดยหมุนปุ่มปรับไฟก็สจนเห็นภาพชัด

ก.9 การวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรีย ตามวิธี Harrigan และ McCance (1976)

วิธีการทดลอง

1. เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ plate count agar โดยชั่ง plate count agar 23.5 กรัม ละลายในน้ำกลั่นร้อน 1000 มิลลิลิตร บรรจุลงในขวดรูปชมพูปิดปากด้วยจุกสำลี ซ้ำเชื้อใน autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที

2. ชั่งปฏิตูตแช่อิ่มอบแห้ง 10 กรัม ใส่ถุง เต็ม peptone 0.1.0% 90 มิลลิลิตร ตีด้วยเครื่อง stomacher 10 นาที เจือจางความเข้มข้นเป็น 10^{-1} 10^{-2} และ 10^{-3} กรัมต่อมิลลิลิตร ด้วย peptone 0.1.0%

3. ปิเปตสารละลายที่ dilution ต่างๆ มา 1 มิลลิลิตร ใส่ในจานเลี้ยงเชื้อ dilution ละ 2 จาน เท plate count agar (ที่ 40-45 องศาเซลเซียส) ลงในจานเลี้ยงเชื้อประมาณจานละ 15-20 มิลลิลิตร หมุนจานไปมาเพื่อให้สารละลายและ plate count agar ผสมกัน ทิ้งให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง

4. บ่มที่อุณหภูมิ 37 ± 0.5 องศาเซลเซียส นาน 2-3 วัน ตรวจนับเชื้อแบคทีเรียแล้วรายงานผลเป็นจำนวนโคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

ก.10 การวิเคราะห์ปริมาณยีสต์และรา ตามวิธี Harrigan และ McCance (1976)

วิธีการทดลอง

1. เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ potato dextrose agar โดยชั่ง potato dextrose agar 39.0 กรัม ละลายในน้ำกลั่นร้อน 1 ลิตร บรรจุลงใน ขวดรูปชมพูปิดปากด้วยจุกสำลี นำมาฆ่าเชื้อใน autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นปรับ pH ด้วย tataric acid (ที่ปลอดเชื้อ) ความเข้มข้น 10% (w/v) ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตรต่อ potato dextrose agar 100 มิลลิลิตร (จะได้ pH ประมาณ 3.74-4.0) เท potato dextrose agar ลงในจานเลี้ยงเชื้อจานละ 15-20 มิลลิลิตร แล้วทิ้งให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง

2. เตรียมตัวอย่างที่ dilution 10^{-1} และ 10^{-2} กรัมต่อมิลลิลิตร

3. ปิเปตสารละลายที่ dilution ต่างๆ มา 1 มิลลิลิตร ใส่ในจานเลี้ยงเชื้อ dilution ละ 2 จาน แล้วใช้แท่งแก้วรูปตัวแอล จุ่มแอลกอฮอล์ ลนไฟ เกลี่ยสารละลายให้กระจายทั่วผิวหน้าของอาหารเลี้ยงเชื้อ

4. นำจานเลี้ยงเชื้อไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 ± 0.5 องศาเซลเซียส นาน 2-3 วัน ตรวจนับเชื้อยีสต์ และรา แล้วรายงานผลเป็นจำนวนโคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

ก.11 การตรวจดูโครงสร้างภายในผลิตภัณฑ์ปฏิตูตแช่อิ่มอบแห้งโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (JEOL Model JSM-5410LV, Tokyo, Japan)

วิธีการทดลอง

1. หั่นตัวอย่างปฏิตูตแช่อิ่มอบแห้งเป็นชิ้นขนาด กว้าง 3 มิลลิเมตร ยาว 5 มิลลิเมตรหนา 3 มิลลิเมตร

2. แช่ตัวอย่างในน้ำยา 2.5% glutaraldehyde ใน 0.2 M phosphate buffer (pH 7.2) นาน 2 ชั่วโมง

3. ล้างน้ำยาออกด้วย phosphate buffer 2 ครั้ง แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น 1 ครั้ง ครั้งละ 10 นาที

4. ขจัดน้ำออกจากตัวอย่างโดยการแช่ด้วย ethanol ความเข้มข้น 30 50 70 และ 90% ตามลำดับ แช่ความเข้มข้นละ 30 นาที จากนั้นแช่ใน absolute ethanol 3 ครั้ง ครั้งละ 10 นาที

5. นำตัวอย่างไปทำให้แห้งภายใต้สุญญากาศและความดันวิกฤต (สุญญากาศ 31 องศาเซลเซียส ความดันวิกฤต 73.8 บาร์) ด้วยเครื่อง Critical Point Dryer (Balzers Model CPD 020, Furstentum, Liechtenstein)

6. ติดตัวอย่างบนแท่นวางตัวอย่าง (stub) ด้วยเทปกาวสองหน้า

7. นำตัวอย่างที่ติดบน stub ไปฉาบทองด้วยเครื่อง Ion sputter (Balzers Model SCD 040, Vaduz, Liechtenstein)

8. นำไปส่องดูด้วย SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า ค่าศักดาไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอน 15 kV

ภาคผนวก ข
แบบประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ข.1 แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์สุดท้ายหลังการอบแห้งด้วยวิธีการทดสอบ
ความชอบ (Preference test)

ผลิตภัณฑ์ปีตรุดแช่อิ่มอบแห้ง

เพศ ชาย..... หญิง อายุ..... วันที่

ข้อแนะนำ : กรุณาทดสอบชิมตัวอย่างที่เสนอให้ โดยใส่เครื่องหมาย ✓ หน้าข้อความที่ตรงกับระดับ
ความชอบของท่านต่อผลิตภัณฑ์

ความคงรูป (มีการหดตัวน้อย)	สี	กลิ่น
รหัสตัวอย่าง -----	รหัสตัวอย่าง -----	รหัสตัวอย่าง -----
..... ชอบมากที่สุด	..... ชอบมากที่สุด	..... ชอบมากที่สุด
..... ชอบปานกลาง	..... ชอบปานกลาง	..... ชอบปานกลาง
..... เฉยๆ	..... เฉยๆ	..... เฉยๆ
..... ไม่ชอบปานกลาง	..... ไม่ชอบปานกลาง	..... ไม่ชอบปานกลาง
..... ไม่ชอบมากที่สุด	..... ไม่ชอบมากที่สุด	..... ไม่ชอบมากที่สุด
ความชุ่มน้ำเมื่อหัก/กัด	รสหวาน	ความชอบโดยรวม
รหัสตัวอย่าง -----	รหัสตัวอย่าง -----	รหัสตัวอย่าง -----
..... ชอบมากที่สุด	..... ชอบมากที่สุด	..... ชอบมากที่สุด
..... ชอบปานกลาง	..... ชอบปานกลาง	..... ชอบปานกลาง
..... เฉยๆ	..... เฉยๆ	..... เฉยๆ
..... ไม่ชอบปานกลาง	..... ไม่ชอบปานกลาง	..... ไม่ชอบปานกลาง
..... ไม่ชอบมากที่สุด	..... ไม่ชอบมากที่สุด	..... ไม่ชอบมากที่สุด

ข้อเสนอแนะ.....

.....

ภาคผนวก ค
ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตารางที่ ค.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ในชั้นปีตรูตเมื่อแปรระดับความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์

SOV	df	MS
ระดับความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์	4	688.699*
Error	25	5.463

*แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งของชั้นปีตรูตชั้นเมื่อแปรระดับความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์

SOV	df	MS
ระดับความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์	4	12779.645*
Error	10	1092.892

*แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำของชั้นปีตรูตที่ชั่วโมงที่ 12 ของการอบสโมคซิสในสารละลายชุดการทดลองต่าง ๆ

SOV	df	MS
ชุดการทดลอง	6	63.629*
Error	7	6.311

*แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของของแข็งของชั้นปีตรูตที่ชั่วโมงที่ 12 ของการอบสโมคซิสในสารละลายของชุดการทดลองต่าง ๆ

SOV	df	MS
ชุดการทดลอง	6	120.593*
Error	7	3.832

*แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณน้ำตาลกลูโคส ฟรุกโทส ซูโครส กลูโคส+ฟรุกโทส และน้ำตาลทั้งหมด ของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อิ่มอบแห้งภายหลังการออสโมซิสในสารละลายชุดการทดลองต่าง ๆ

SOV	df	MS				
		กลูโคส	ฟรุกโทส	ซูโครส	กลูโคส+ฟรุกโทส	น้ำตาลทั้งหมด
ชุดการทดลอง	5	23.050*	53.872*	212.806*	147.281*	9.511*
Error	6	0.002	0.002	2.415	0.001	2.392

*แตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อิ่มอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน ภายหลังการออสโมซิสในสารละลายชุดการทดลองต่าง ๆ

SOV	df	MS	
		ผลิตภัณฑ์สุดท้าย	เมื่อเก็บรักษาไว้ 30 วัน
ชุดการทดลอง	5	0.399*	0.728
Error	6	0.007	0.132

*แตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าวอเตอร์แอกติวิตีของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อิ่มอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน ภายหลังการออสโมซิสในสารละลายชุดการทดลองต่าง ๆ

SOV	df	MS	
		ผลิตภัณฑ์สุดท้าย	เมื่อเก็บรักษาไว้ 30 วัน
ชุดการทดลอง	5	0.007*	0.007
Error	6	0.00001	0.000004

*แตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า spin lattice relaxation time (T_1) ของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่อิ่มอบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน ภายหลังการออสโมซิสในสารละลายชุดการทดลองต่าง ๆ

SOV	df	MS	
		ผลิตภัณฑ์สุดท้าย	เมื่อเก็บรักษาไว้ 30 วัน
ชุดการทดลอง	5	5186.893*	818.114*
Error	6	825.971	133.222

*แตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งและค่างานในการตัดของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่िमอบแห้งภายหลังการอบสไมซิสในสารละลายชุดการทดลองต่าง ๆ

SOV	df	MS	
		ค่าความแข็ง	ค่างานในการตัด
ชุดการทดลอง	5	2929.254*	18649.266*
Error	54	262.871	1999.401*

*แตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งและค่างานในการตัดของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่िमอบแห้งเมื่อเก็บไว้ 30 วัน ภายหลังการอบสไมซิสในสารละลายชุดการทดลองต่าง ๆ

SOV	df	MS	
		ค่าความแข็ง	ค่างานในการตัด
ชุดการทดลอง	5	3582.154*	11557.624*
Error	42	330.158	1589.736

*แตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความเหนียวของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่िमอบแห้งภายหลังการอบสไมซิสในสารละลายชุดการทดลองต่าง ๆ

SOV	df	MS
ชุดการทดลอง	2	5.271*
Error	22	0.948

*แตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความเหนียวของผลิตภัณฑ์ปีตรูตแช่िमอบแห้งเมื่อเก็บไว้ 30 วัน ภายหลังการอบสไมซิสในสารละลายชุดการทดลองต่าง ๆ

SOV	df	MS
ชุดการทดลอง	2	4.047*
Error	20	0.389

*แตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสี $L^*a^*b^*$ ของผลิตภัณฑ์ปืตรูตแช่อบแห้งและเมื่อเก็บไว้ 30 วัน ภายหลังจากการอบสโมคซิสในสารละลายชุดการทดลองต่าง ๆ

SOV	df	MS					
		ผลิตภัณฑ์สุดท้าย			เมื่อเก็บรักษาไว้ 30 วัน		
		L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
ชุดการทดลอง	5	239.988*	909.944*	23.502*	172.738*	181.811*	21.933*
Error	174	4.029	2.980	0.841	2.933	9.031	1.067

*แตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ ค.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคะแนนการประเมินผลทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ปืตรูตแช่อบแห้งภายหลังจากการอบสโมคซิสในสารละลายชุดการทดลองต่าง ๆ

SOV	df	MS					
		ความคงตัว	สี	กลิ่น	ความชุ่มน้ำ	รสหวาน	ความชอบ
					เมื่อหักหรือกัด		โดยรวม
ชุดการทดลอง	5	2.998*	6.023*	7.723*	0.553	1.267	1.369*
ผู้ทดสอบ	59	0.513	0.657	0.877*	0.660	0.874	1.037*
Error	295	0.579	0.710	0.610	0.644	0.651	0.508

*แตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ภาคผนวก ง
ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ง.1 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำและเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของของแข็ง ของปีตรูระหว่างการออกซิไดส์ในสารละลายซูโครสที่ความเข้มข้น 35 องศาบริกซ์ ณ เวลาต่าง ๆ

เวลา (ชั่วโมง)	การสูญเสียน้ำ (%)	การเพิ่มขึ้นของของแข็ง (%)
1	14.58±4.60	13.46±5.03
2	18.87±3.48	15.07±0.17
3	22.62±4.71	14.97±1.20
4	24.72±4.01	14.65±1.36
5	23.54±1.35	16.26±0.04
6	22.20±1.66	14.61±1.71

ตารางที่ ง.2 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำและเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของของแข็ง ของปีตรูระหว่างการออกซิไดส์ในสารละลายซูโครสที่ความเข้มข้น 45 องศาบริกซ์ ณ เวลาต่าง ๆ

เวลา (ชั่วโมง)	การสูญเสียน้ำ (%)	การเพิ่มขึ้นของของแข็ง (%)
1	20.85±1.96	30.58±0.51
2	27.21±1.67	33.21±0.92
3	27.15±1.34	32.25±0.00
4	28.62±0.97	34.68±1.99
5	27.33±1.46	34.28±0.74
6	24.79±0.93	35.22±2.52

ตารางที่ ง.3 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำและเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของของแข็ง ของปีตรูระหว่างการออกซิไดส์ในสารละลายซูโครสที่ความเข้มข้น 45 องศาบริกซ์ ของปีตรูชุดการทดลอง P-10 ณ เวลาต่าง ๆ

เวลา (ชั่วโมง)	การสูญเสียน้ำ (%)	การเพิ่มขึ้นของของแข็ง (%)
1	21.74±1.15	30.83±0.10
2	25.00±0.06	30.63±1.53
3	25.20±1.03	31.68±0.20
4	23.78±1.87	32.54±2.30
5	27.84±1.24	30.98±0.34
6	26.10±0.55	32.60±0.02

ตารางที่ ง.4 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำและเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของของแข็ง ของปีตรูระหว่างการออกซิโมซิสในสารละลายยูโครสที่ความเข้มข้น 45 องศาบริกซ์ ของปีตรูชุดการทดลอง P-15 ณ เวลาต่าง ๆ

เวลา (ชั่วโมง)	การสูญเสียน้ำ (%)	การเพิ่มขึ้นของของแข็ง (%)
1	20.19±2.57	30.34±0.20
2	22.32±1.37	29.57±0.39
3	23.65±1.44	31.39±1.91
4	25.81±3.29	30.06±0.67
5	25.38±3.53	31.08±0.19
6	27.31±1.56	30.28±1.52

ตารางที่ ง.5 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำและเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของของแข็ง ของปีตรูระหว่างการออกซิโมซิสในสารละลายยูโครสที่ความเข้มข้น 45 องศาบริกซ์ ของปีตรูชุดการทดลอง H-10 ณ เวลาต่าง ๆ

เวลา (ชั่วโมง)	การสูญเสียน้ำ (%)	การเพิ่มขึ้นของของแข็ง (%)
1	24.08±2.86	33.83±3.30
2	26.74±3.28	35.69±2.53
3	31.63±1.27	35.87±0.69
4	33.52±2.00	35.57±2.46
5	34.36±0.12	34.61±1.31
6	35.95±1.98	37.44±3.74

ตารางที่ ง.6 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำและเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของของแข็ง ของปีตรูระหว่างการออกซิโมซิสในสารละลายยูโครสที่ความเข้มข้น 45 องศาบริกซ์ ของปีตรูชุดการทดลอง H-15 ณ เวลาต่าง ๆ

เวลา (ชั่วโมง)	การสูญเสียน้ำ (%)	การเพิ่มขึ้นของของแข็ง (%)
1	24.20±3.62	37.34±1.68
2	26.89±2.95	36.41±0.16
3	31.61±1.37	36.57±1.26
4	32.18±1.75	35.27±1.14
5	38.41±0.70	34.97±1.86
6	37.07±5.72	36.36±0.96

ตารางที่ ง.7 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำและเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของของแข็ง ของปี้ตรูตระหว่างการออกซิโมซิสในสารละลายซูโครสที่ความเข้มข้น 45 องศาบริกซ์ ของปี้ตรูตชุดเปรียบเทียบ ณ เวลาต่าง ๆ

เวลา (ชั่วโมง)	การสูญเสียน้ำ (%)	การเพิ่มขึ้นของของแข็ง (%)
1	22.57±1.63	30.80±0.04
2	25.21±1.33	30.79±0.22
3	27.44±1.77	31.35±1.18
4	27.47±1.28	31.06±0.59
5	30.57±5.57	30.92±0.28
6	27.28±1.05	32.75±0.61

ตารางที่ ง.8 ปริมาณความชื้น (กรัมน้ำต่อกรัมของแข็ง) ของปี้ตรูตทั้ง 6 ชุดการทดลอง ณ เวลาต่าง ๆ ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ชุดการทดลอง					ชุดเปรียบเทียบ
	ชุดควบคุม	P-10	P-15	H-10	H-15	
0	2.04±0.00	2.09±0.00	2.04±0.05	1.52±0.00	1.80±0.00	2.28±0.01
10	1.96±0.05	1.93±0.20	1.87±0.11	1.37±0.07	1.50±0.07	2.11±0.08
20	1.84±0.07	1.79±0.09	1.73±0.22	1.24±0.11	1.41±0.12	1.95±0.10
30	1.68±0.03	1.59±0.32	1.59±0.11	1.18±0.15	1.35±0.06	1.79±0.06
40	1.60±0.07	1.58±0.08	1.41±0.18	1.09±0.10	1.29±0.07	1.70±0.10
50	1.53±0.04	1.54±0.08	1.37±0.15	1.00±0.07	1.22±0.12	1.65±0.12
60	1.44±0.06	1.45±0.06	1.26±0.15	0.93±0.03	1.16±0.15	1.47±0.01
75	1.37±0.04	1.31±0.16	1.19±0.20	0.90±0.06	1.10±0.19	1.38±0.03
90	1.31±0.05	1.26±0.17	1.12±0.18	0.85±0.11	1.00±0.25	1.29±0.03
105	1.25±0.04	1.16±0.08	1.04±0.14	0.75±0.11	0.94±0.22	1.19±0.02
120	1.14±0.06	1.10±0.07	0.92±0.18	0.68±0.09	0.89±0.19	1.11±0.04
150	1.03±0.07	1.03±0.07	0.78±0.09	0.57±0.09	0.69±0.11	1.04±0.05
180	0.92±0.06	0.90±0.15	0.75±0.09	0.48±0.10	0.67±0.09	0.94±0.02
210	0.82±0.09	0.86±0.12	0.68±0.14	0.42±0.08	0.61±0.11	0.81±0.07
240	0.74±0.02	0.76±0.15	0.61±0.18	0.39±0.09	0.55±0.07	0.75±0.06
300	0.59±0.05	0.63±0.10	0.47±0.24	0.32±0.12	0.43±0.14	0.63±0.12

ตารางที่ ง.8 (ต่อ) ปริมาณความชื้น (กรัมน้ำต่อกรัมของแข็ง) ของปืตฐูตทั้ง 6 ชุดการทดลอง ณ เวลาต่าง ๆ ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ชุดการทดลอง					
	ชุดควบคุม	P-10	P-15	H-10	H-15	ชุดเปรียบเทียบ
360	0.54±0.07	0.56±0.13	0.41±0.20	0.29±0.13	0.31±0.06	0.53±0.08
420	0.47±0.02	0.52±0.11	0.27±0.12	0.23±0.12	0.29±0.07	0.50±0.08
480	0.41±0.02	0.44±0.11	0.25±0.12	0.19±0.09	0.27±0.05	0.41±0.10
540	0.28±0.03	0.44±0.11	0.24±0.12	0.18±0.09	0.27±0.05	0.39±0.09
600	0.21±0.04	-	-	-	-	-
660	0.20±0.04	-	-	-	-	-

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพงษ์พิสุทธิ์ คุณะวันทนิต เกิดเมื่อวันที่ 14 กรกฎาคม 2528 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จ การศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาชีววิทยา(พฤกษศาสตร์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน เมื่อปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชา เทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาคปลายปีการศึกษา 2550

ในระหว่างการศึกษาได้เข้าร่วมเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการ นเรศวรวิจัย ครั้งที่ 6 “ วิถีชีวิตยั่งยืนบนพื้นฐานเศรษฐกิจพอเพียง” ระหว่างวันที่ 29-31 กรกฎาคม 2553 ณ มหาวิทยาลัย นเรศวร ในหัวข้อเรื่อง ผลของน้ำผึ้งและน้ำส้มปรดต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างการอบสโมคซิสและ จลนพลศาสตร์การอบแห้งของปัสตูลแช่อิ่ม และเข้าร่วมโครงการอบรมด้านอาหารจากทรัพยากรท้องถิ่น ให้แก่ชุมชน จ.น่าน ครั้งที่ 4 เรื่อง “การแปรรูปและการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร” ระหว่างวันที่ 3-4 มีนาคม 2554