รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการผลของพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ต่อการทำแห้งและคุณภาพของมะละกอแช่อิ่มอบแห้ง

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกียรติศักดิ์ ดวงมาลย์

และคณะ

กุมภาพันธ์ 2556

สัญญาเลขที่ DBG5380018

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการผลของพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ต่อการทำแห้งและคุณภาพของมะละกอแช่อิ่มอบแห้ง

ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกียรติศักดิ์ ดวงมาลย์

ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

“ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป”

สารบัญ

หน้า

สารบัญ..... ก

สารบัญภาพ..... ข

สารบัญตาราง..... ง

บทคัดย่อภาษาไทย..... ฉ

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ช

Executive Summary..... ซ

เนื้อหางานวิจัย

1. บทนำ..... 1
2. ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย..... 12
3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 19
4. สรุปผลการทดลอง..... 56
5. เอกสารอ้างอิง..... 58

Output จากโครงการวิจัย..... 63

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	การถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิส.....	2
1.2	การแพร่ของน้ำและน้ำตาลในชิ้นผลไม้ในระหว่างการออสโมซิส……	2
3.1	ค่าการสูญเสียน้ำของมะละกอในระหว่างการออสโมซิสด้วยวิธีการออสโมซิสแบบ single step และ multiple step.....	19
3.2	ค่าการเพิ่มขึ้นของของแข็งของมะละกอในระหว่างการออสโมซิสด้วยวิธีการออสโมซิสแบบ single step และ multiple step.....	20
3.3	ค่าการลดลงของน้ำหนักของมะละกอในระหว่างการออสโมซิสด้วยวิธีการออสโมซิสแบบ single step และ multiple step.....	20
3.4	ค่าการสูญเสียน้ำของมะละกอ.....	23
3.5	ค่าการเพิ่มขึ้นของของแข็งของมะละกอ.....	26
3.6	ค่าการลดลงของน้ำหนักของมะละกอ.....	27
3.7	กราฟการอบแห้งของมะละกอแช่อิ่มที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายออสโมติกชนิดต่าง ๆ.....	29
3.8	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นของมะละกอแช่อิ่มที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายออสโมติกชนิดต่าง ๆ.....	30
3.9	การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของมะละกอแช่อิ่มระหว่างการอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส.....	33
3.10	การเปลี่ยนแปลงวอเตอร์แอคทิวิตีของมะละกอแช่อิ่มระหว่างระหว่างการอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส.....	34
3.11	การเปลี่ยนแปลงค่าสีมะละกอระหว่างการอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส.....	36
3.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า a* และ b* ของมะละกอแช่อิ่มระหว่างการอบแห้งที่ 60 องศา-	

เซลเซียส..... 37

รูปที่ หน้า

3.13 ลักษณะเซลล์มะละกอสด มะละกอที่ผ่านการปรับสภาพก่อนการออสโมซิส และมะละกอที่ผ่านการออสโมซิสในแต่ละชุดการทดลองจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 150 เท่า..... 43

3.14 ลักษณะเซลล์ของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 150 เท่า..... 44

3.15 มอยส์เจอร์ซอร์พชันไอโซเทิร์มของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งที่อุณหภูมิ 30 ± 2 องศาเซลเซียส..... 45

3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า a* และ b* ของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษา..... 51

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การเตรียมสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	16
3.1	ค่าการสูญเสียน้ำ ค่าการเพิ่มขึ้นของของแข็ง และค่าการลดลงของน้ำหนักระหว่างการออสโมซิสแบบ single step และ multiple step.....	21
3.2	ค่าการสูญเสียน้ำ ค่าการเพิ่มขึ้นของของแข็ง ค่าการลดลงของน้ำหนักของมะละกอระหว่างการออสโมซิส.....	24
3.3	ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี ความเป็นกรดด่าง และความหนืดของสารละลายออสโมติกแต่ละชนิดก่อนและหลังการออสโมซิส.....	25
3.4	ค่าคงที่การอบแห้งที่ได้จากการอบแห้ง (60 องศาเซลเซียส) ของมะละกอที่ผ่านการออสโมซิส.....	30
3.5	ค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของมะละกอแช่อิ่มแต่ละชุดการทดลอง.....	31
3.5 (ต่อ)	ค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของมะละกอแช่อิ่มแต่ละชุดการทดลอง.....	32
3.6	ปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอคทิวิตีของมะละกอแช่อิ่มหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16.5 ชั่วโมง.....	34
3.7	การหดตัวของผลิตภัณฑ์จากการอบแห้งเป็นเวลา 16.5 ชั่วโมง.....	35
3.8	ปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอคทิวิตีของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้ง.....	37
3.9	ค่า spin-lattice relaxation time ของตัวอย่างมะละกอหลังการออสโมซิส และผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้ง.....	39
3.10	ปริมาณน้ำตาลในผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้ง.....	39
3.11	ค่า L*, a* และ b* ของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้ง.....	40
3.12	คะแนนความเข้มจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนาของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้ง.....	40
3.13	อัตราส่วนระหว่างคะแนนความเข้มและคะแนนที่ผู้ทดสอบคาดหวังของมะละกอแช่อิ่มอบแห้ง.....	42

ตารางที่		หน้า
3.14	ค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณจากแบบจำลอง BET และแบบจำลอง GAB ของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งชุดการทดลองต่าง ๆ.....	46
3.15	ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา.....	47
3.16	ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา.....	48
3.17	ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา.....	48
3.18	ค่างานในการตัดของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา.....	49
3.19	ค่าความเหนียวของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา.....	49
3.20	ค่าความแข็ง ค่างานในการตัด และค่าความเหนียวของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มทางการค้า.....	50
3.21	ค่า L* ของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา.....	50
3.22	ค่า a* ของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา.....	51
3.23	ค่า b* ของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา.....	51
3.24	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ของสารสกัดจากผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา.....	52
3.25	ปริมาณเบตาแคโรทีนของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา.....	53
3.26	ปริมาณไลโคปีนของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา.....	53

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอลและกลีเซอรอลต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิส จลนพลศาสตร์การอบแห้ง มอยส์เจอร์ซอร์พชันไอโซเทิร์ม และคุณภาพของมะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา ผลการทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิส โดยทดแทนซูโครสบางส่วนที่ระดับความเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ด้วยซอร์บิทอล 10%, w/v (Su-Sor) กลีเซอรอล 10%, v/v (Su-Gly) เทียบกับชุดเปรียบเทียบที่มีการทดแทนด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต 10%, v/v (Su-Inv) และชุดควบคุมที่ไม่มีการทดแทนซูโครส พบว่า Su-Sor, Su-Gly และ Su-Inv มีค่าการสูญเสียน้ำ ค่าการเพิ่มขึ้นของของแข็ง และค่าการลดลงของน้ำหนักสูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$) จากนั้นอบแห้งตัวอย่างทุกชุดการทดลองหลังการออสโมซิสด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างคงที่ พบว่าชุดควบคุมมีค่าคงที่การอบแห้งสูงสุด รองลงมาเป็น Su-Sor, Su-Gly และ Su-Inv ตามลำดับ และพบว่าแบบจำลอง modified Henderson and Pabis มีความเหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งของตัวอย่างทุกชุดการทดลองมากกว่าแบบจำลอง Page และแบบจำลอง Henderson and Pabis การเปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้งชี้ให้เห็นว่าชุดควบคุมมีแนวโน้มการลดลงของค่าวอเตอร์แอคทิวิตีต่ำที่สุด และมีการหดตัวสูงกว่าชุดการทดลองอื่น โดยผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งแต่ละชุดการทดลองมีเฉดสีใกล้เคียงกันแต่มีความเข้มสีต่างกัน ค่า monolayer moisture content (M_o) จากมอยส์เจอร์ซอร์พชันไอโซเทิร์มที่อุณหภูมิ 30±2 องศาเซลเซียสของผลิตภัณฑ์ โดยอาศัยแบบจำลอง GAB ในการคำนวณชี้ให้เห็นว่า Su-Sor และ Su-Gly มีค่า M_o สูงกว่าชุดควบคุม และ Su-Inv เมื่อพิจารณาลักษณะทางสัณฐานของเซลล์มะละกอในผลิตภัณฑ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่า Su-Sor และ Su-Inv หลังการอบแห้งมีลักษณะเซลล์ใกล้เคียงกัน และมีความคงรูปมากกว่าชุดควบคุม ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา พบว่า Su-Sor มีลักษณะทางประสาทสัมผัสใกล้เคียงกับ Su-Inv ขั้นตอนสุดท้ายศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บ 8 สัปดาห์ พบว่า Su-Sor มีค่าความแข็งและค่างานในการตัดต่ำกว่าชุดควบคุมตลอดระยะการเก็บ และมีปริมาณไลโคปีนหลังผ่านการเก็บสูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$)

คำสำคัญ: มะละกอ พอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ ซอร์บิทอล กลีเซอรอล แช่อิ่ม อบแห้ง

Abstract

The objectives of this research were to investigate the effect of partially substituted sucrose with glycerol and sorbitol on mass transfer during osmosis, drying kinetics, moisture sorption isotherm and quality of osmosed air dried papaya during storage. Papaya slices were soaked in 40, 50 and 60 °Brix sucrose solution, respectively, for 5 hours each. In 60 °Brix solution, partial replacement of sucrose with 10% (w/v) sorbitol (Su-Sor) and 10% (w/v) glycerol (Su-Gly) were used as osmotic solution compared with the control containing only sucrose and reference with partial replacement with 10% (v/v) invert sugar (Su-Inv). Su-Gly, Su-Inv and Su-Sor presented higher water loss, solid gain and weight reduction compared to the control ($p \leq 0.05$). After osmosis, papaya slices were dried in a hot-air dryer at 60 °C until the weight of sample was constant. The drying constant showed that the values were in order as follows: control > Su-Sor > Su-Gly > Su-Inv. Among three mathematical models (Page, Henderson and Pabis and modified Henderson and Pabis), Modified Henderson and Pabis was found to be the most appropriate model to predict the drying behavior, at 60 °C, of all treatments. During drying process, the control presented the lowest a_w reduction while the shrinkage of the control was higher than other treatments. The hue angle of four samples was similar while the chroma was varied. Monolayer moisture content (M_o) of dried products was calculated by applying GAB equation to moisture sorption isotherm at 30±2 °C. Su-Sor and Su-Gly had higher M_o than the control and Su-Inv. The microstructure analysis, using scanning electron microscope, of dried products showed that the cell structure of Su-Sor and Su-Inv was similar, but less shrinkage compared to that of the control. The results from the quantitative descriptive analysis showed that sensory characteristics of Su-Sor were as good as Su-Inv. Finally, quality of dried products, during 8 weeks of storage, was determined. Su-Sor exhibited lower hardness and cutting work compared to the control. The remaining lycopene content in Su-Sor was also significant higher than that of the control ($p \leq 0.05$).

KEYWORDS: Papaya, Polyhydric alcohol, Glycerol, Sorbitol, Osmotic dehydration, Air drying

Executive summary

การแปรรูปมะละกอในรูปแบบมะละกอแช่อิ่มอบแห้งเป็นวิธีการที่น่าสนใจในการเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบ เนื่องจากกรรมวิธีการผลิตไม่ซับซ้อน แต่มีการใช้เทคนิคในการผลิตที่แตกต่างกันไปขึ้นกับวิธีการ ปัญหาที่พบในผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้ง เช่น การหดตัวของผลิตภัณฑ์ การมีผลึกน้ำตาลเกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บ การเปลี่ยนแปลงสี เช่นการเกิดสีน้ำตาล การซึดลงของสีมะละกอ รวมทั้งรสหวานและไม่มีกลิ่นรสที่เป็นเอกลักษณ์ของมะละกอ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์โดยศึกษาผลการทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิส จลนพลศาสตร์การอบแห้ง มอยส์เจอร์ซอร์พชันไอโซเทิร์ม และคุณภาพของมะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา โดยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้ (1) ศึกษาผลของสารพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ร่วมกับซูโครสต่อการเพิ่มขึ้นของของแข็งและการลดลงของน้ำในชิ้นมะละกอระหว่างการออสโมซิส (2) ศึกษาผลของสารพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ร่วมกับซูโครสต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งของมะละกอแช่อิ่ม (3) ศึกษาผลของพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ร่วมกับซูโครสต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และกายภาพของมะละกอแช่อิ่มในระหว่างการอบแห้ง และมอยส์เจอร์ซอร์พชันไอโซเทิร์ม (MSI) ของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้ง (4) ศึกษาผลของสารพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ร่วมกับซูโครสต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของมะละกอแช่อิ่มอบแห้งในระหว่างการเก็บรักษา ผลการวิจัยที่ได้มีดังนี้

ผลการทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิส โดยทดแทนซูโครสบางส่วนที่ระดับความเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ ด้วยซอร์บิทอล 10%, w/v (Su-Sor) กลีเซอรอล 10%, v/v (Su-Gly) เทียบกับชุดเปรียบเทียบที่มีการทดแทนด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต 10%, v/v (Su-Inv) และชุดควบคุมที่ไม่มีการทดแทนซูโครส พบว่า Su-Sor และ Su-Gly มีค่าการสูญเสียน้ำ (WL) และค่าการเพิ่มขึ้นของของแข็ง (SG) ระหว่างการออสโมซิสสูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$) และเมื่อเปรียบเทียบกับ Su-Inv พบว่า Su-Gly มีค่า WL และ SG สูงกว่า Su-Inv อย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$) ขณะที่ Su-Sor มีค่า WL ต่ำกว่า Su-Inv อย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$) แต่มีค่า SG ไม่แตกต่างจาก Su-Inv อย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ทั้งนี้

เนื่องจากมวลโมเลกุลของสารออสโมติกเป็นตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการแพร่ผ่านเนื้อเยื่อในระหว่างการออสโมซิส

การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของมะละกอแช่อิ่ม พบว่าเมื่ออบแห้งตัวอย่างทุกชุดการทดลองหลังการออสโมซิสด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างคงที่ พบว่า ชุดควบคุมมีค่าคงที่การอบแห้งสูงสุด รองลงมาเป็น Su-Sor, Su-Gly และ Su-Inv ตามลำดับ โดยที่ Su-Sor และ Su-Gly มีค่าคงที่การอบแห้งสูงกว่า Su-Inv เล็กน้อย นอกจากนี้พบว่า แบบจำลอง modified Henderson and Pabis มีความเหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งของตัวอย่างทุกชุดการทดลองมากกว่าแบบจำลอง Page และแบบจำลอง Henderson and Pabis

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และกายภาพของมะละกอแช่อิ่มในระหว่างการอบแห้ง ผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในชิ้นมะละกอแช่อิ่มภายหลังการอบแห้ง และมอยส์เจอร์ซอร์พชันไอโซเทิร์มของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้ง พบว่าการทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอลหรือกลีเซอรอลทำให้ตัวอย่างมีแนวโน้มการลดลงของค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (a_w) ระหว่างการอบแห้งสูงกว่าชุดควบคุม แต่มีการหดตัวน้อยกว่าชุดควบคุม นอกจากนี้พบว่า Su-Gly หลังการอบแห้งมีค่า a_w ต่ำกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$) เมื่อเทียบกับชุดเปรียบเทียบพบว่า Su-Sor และ Su-Gly มีแนวโน้มการลดลงของค่า a_w และการหดตัวระหว่างการอบแห้งใกล้เคียงกับ Su-Inv ซึ่งชี้ให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์มีการคงรูปใกล้เคียงกัน ในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง พบว่าผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งแต่ละชุดการทดลองมีเฉดสีใกล้เคียงกัน แต่มีความเข้มสีต่างกัน เมื่อพิจารณาค่า spin-lattice relaxation time (^{1}H NMR T_1) พบว่า Su-Sor และ Su-Gly ให้ค่าต่ำกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$) การที่ค่า ^{1}H NMR T_1 ต่ำกว่า Su-Inv และชุดควบคุมแสดงให้เห็นว่าความมีอิสระของน้ำต่ำกว่า จากการพิจารณาลักษณะสัณฐานของเซลล์มะละกอด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่า Su-Sor และ Su-Inv หลังการอบแห้งมีลักษณะเซลล์ใกล้เคียงกัน จากการศึกษามอยส์เจอร์ซอร์พชันไอโซเทิร์มของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งที่อุณหภูมิ 30±2 องศาเซลเซียส พบว่า Su-Sor และ Su-Gly มีความชันของ MSI ในช่วงค่า a_w 0.6-0.9 และมีค่า monolayer moisture content (M_o) ที่ทำนายจากแบบจำลอง GAB สูงกว่าชุดควบคุม และชุดเปรียบเทียบแสดงถึงความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำของพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ที่ดีกว่าซูโครส (ชุดควบคุม) และน้ำตาลอินเวิร์ตในชุดเปรียบเทียบ

ขั้นตอนสุดท้ายศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบ เมื่อพิจารณาคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีทดสอบเชิงพรรณนา พบว่า Su-Sor สามารถลดการเกิดผลึก รักษาความคงรูป รวมถึงปรับปรุง

ลักษณะความชุ่มน้ำของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าชุดควบคุม และมีลักษณะด้านความแข็งกับความเหนียวใกล้เคียงกับลักษณะที่ผู้บริโภคคาดหวังมากกว่าชุดการทดลองอื่น เมื่อเทียบกับชุดเปรียบเทียบ พบว่าการเกิดผลึก ความคงรูปและความชุ่มน้ำใกล้เคียงกับ Su-Inv ในระหว่างการเก็บ 8 สัปดาห์ พบว่า Su-Sor มีค่าความแข็งและค่างานในการตัดต่ำกว่าชุดควบคุมตลอดระยะการเก็บ และมีปริมาณไลโคปีนหลังผ่านการเก็บสูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และมีค่าใกล้เคียงกับ Su-Inv ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการทดแทนซูโครสด้วยพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์โดยพบว่าการใช้ซอร์บิทอลมีแนวโน้มในการปรับปรุงกระบวนการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าการใช้ซูโครสเพียงอย่างเดียวในการออสโมซิส

ในภาพรวมจากผลการทดลองทั้งในด้านกระบวนการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ พบว่า การทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอลอาจเป็นทางเลือกในการปรับปรุงกระบวนการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์แทนการทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต ซึ่งมีใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง

ผลงานจากงานวิจัยนี้ได้นำไปเขียนบทความเชิงวิชาการในระดับชาติ 1 เรื่อง (ขณะนี้อยู่ระหว่างการพิจารณา โดยส่งบทความไปยังวารสารวิทยาศาสตร์ มข.) และกำลังเขียนบทความเพื่อขอรับการตีพิมพ์ในระดับนานาชาติอีก 1 เรื่อง (โดยส่งไปยังวารสาร Journal of Food Engineering) และผลิตบัณฑิตในระดับปริญญาโท 1 คน (นายสิทธิโชค เถลิงนวชาติ)

บทที่ 1

บทนำ

ผลของพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ต่อการทำแห้งและคุณภาพของมะละกอแช่อิ่มอบแห้ง

1. กระบวนการผลิตผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง

การผลิตผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง โดยทั่วไปประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักดังนี้

1.1 ขั้นตอนการคัดเลือกและการเตรียมวัตถุดิบ

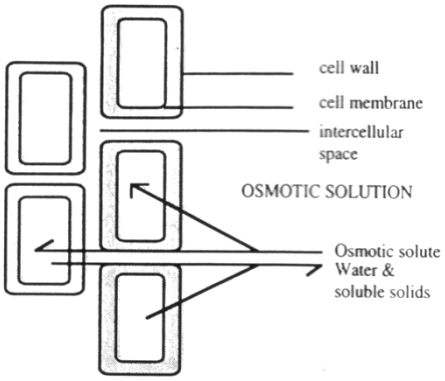
เนื่องจากคุณภาพของวัตถุดิบเริ่มต้นมีผลโดยตรงต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิส และคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย จึงต้องมีการกำหนดปัจจัยด้านคุณภาพของวัตถุดิบ และมีการควบคุมให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ปัจจัยที่ควรนำมาพิจารณา เช่น ชนิดหรือสายพันธุ์ ระดับความสุก ขนาดและรูปร่างของวัตถุดิบ

การเตรียมวัตถุดิบก่อนเข้าสู่กระบวนการออสโมซิส สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ความร้อนเพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส และการใช้สารเคมี เช่น กรดซิตริก และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล และยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังมีการใช้แคลเซียมคลอไรด์เพื่อช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสของวัตถุดิบ โดยแคลเซียมอิออนจะทำปฏิกิริยากับเพกติน เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมเพกเตตซึ่งไม่ละลายน้ำ ช่วยให้ผนังเซลล์ของผลไม้มีความแข็งแรงมากขึ้น (Feeters and Tang 1983, Torreggiani 1993, Torreggiani and Bertolo, 2001)

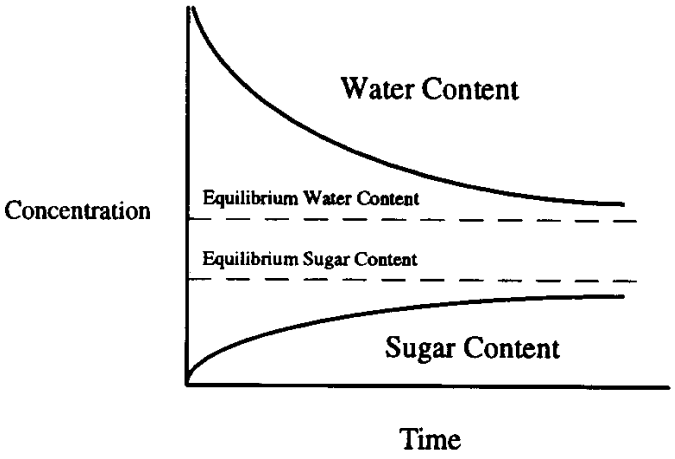
1.2 ขั้นตอนการออสโมซิส

การทำแห้งโดยการออสโมซิส (osmotic dehydration)

การทำแห้งแบบออสโมซิส เป็นการกำจัดน้ำบางส่วนออกจากเนื้อเยื่อ โดยแช่ตัวอย่างในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นของสารละลายภายในเนื้อเยื่อ ความแตกต่างของแรงดันออสโมติก (osmotic pressure) ทำให้เกิดแรงขับ (driving force) และเกิดการถ่ายเทมวลสารจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า โดยน้ำภายในองค์ประกอบของเนื้อเยื่อจะเคลื่อนที่ออกมาภายนอก ในขณะที่ตัวถูกละลายในสารละลายจะเคลื่อนที่เข้าไปในเนื้อเยื่อ นอกจากนี้ตัวถูกละลายบางส่วนในเนื้อเยื่อ เช่น น้ำตาล กรดอินทรีย์ เกลือแร่ และวิตามิน จะแพร่ออกมาปริมาณเล็กน้อย (Raoult-Wack, 1994) ดังนั้นในระหว่างการออสโมซิสการถ่ายเทจะเกิดขึ้นในลักษณะทิศทางสวนกัน ลักษณะของการถ่ายเทมวลสารแสดงดังรูปที่ 1.1 FFโดยการถ่ายเทมวลสารนั้นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการออสโมซิส เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายและความเข้มข้นภายในเซลล์สูง จากนั้นอัตราการแพร่จะช้าลง และเข้าสู่ภาวะสมดุลในที่สุด (รูปที่ 1.2)



รูปที่ 1.1 การถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิส (Lazarides, 2001)



รูปที่ 1.2 การแพร่ของน้ำและน้ำตาลในชิ้นผลไม้ในระหว่างการออสโมซิส (Baker, 1997)

การถ่ายเทมวลสารในระหว่างการออสโมซิส ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย เนื่องจากการแพร่ผ่านเข้าในเซลล์ของตัวทำละลายจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีน้ำตาลสูงขึ้น รวมทั้งยังสามารถปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ โดยการเติมน้ำตาลชนิดอื่น หรือเติมสารชนิดอื่นลงไปด้วย นอกจากนี้การใช้สารออสโมติกชนิดต่าง ๆ ในการออสโมซิสยังนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ได้ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลสารในระหว่างการออสโมซิส ได้แก่

1.2.1 ชนิดของสารละลายออสโมติก

สารละลายออสโมติกแต่ละชนิดมีผลต่อการถ่ายเทมวลสารในระหว่างการออสโมซิสแตกต่างกัน ในการคัดเลือกสารละลายออสโมติกที่มีความเหมาะสมนั้นต้องพิจารณาถึง ราคา ลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์สุดท้าย และน้ำหนักโมเลกุลของสารที่จะนำมาใช้ โดยสารออสโมติกที่นิยมใช้ ได้แก่ ซูโครส กลูโคส โซเดียมคลอไรด์ ซอร์บิทอล และกลีเซอรอล (Torreggiani, 1993, Cánovas and Mercado, 1996) ซูโครสได้รับความนิยมในการใช้ เนื่องจากมีผลให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้มีลักษณะทางประสาทสัมผัสที่ดี นอกจากนี้น้ำตาลซูโครสยังหาได้ง่าย และมีราคาถูก

1.2.2 ความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารละลายออสโมติก

ระดับความเข้มข้นและอุณหภูมิที่ใช้ในการออสโมซิสมีผลต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิส การใช้สารละลายออสโมติกที่ระดับความเข้มข้นสูง มีผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างแรงดันออสโมติกภายในชิ้นผลไม้กับสารละลายภายนอกสูง จึงเกิดการถ่ายเทมวลสารได้ดีกว่าการใช้สารละลายออสโมติกที่ระดับความเข้มข้นต่ำกว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกเป็นลำดับขั้นส่งผลให้การเคลื่อนที่ของของแข็ง หรือน้ำตาลเข้าสู่ชิ้นผลไม้ได้ดีขึ้น

การเพิ่มอุณหภูมิในการออสโมซิสช่วยเร่งให้การถ่ายเทมวลสารระหว่างภายใน และภายนอกชิ้นผลไม้เข้าสู่สมดุลได้เร็วขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อการเคลื่อนที่ของสาร อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อเยื่อและมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย โดยทั่วไปจะไม่ให้อุณหภูมิเกิน 45-55 องศาเซลเซียส (Azoubel and Murr, 2004)

1.3 ขั้นตอนการอบแห้ง

การกำจัดความชื้นบางส่วนด้วยวิธีการออสโมซิสก่อนนำผลไม้เข้าสู่กระบวนการอบแห้งนั้นช่วยลดการถูกทำลายของเนื้อเยื่อ และรงควัตถุในผักผลไม้อันเนื่องมาจากความร้อน ลดการเปลี่ยนแปลงของสีจากปฏิกิริยาสีน้ำตาล นอกจากนี้ยังช่วยลดการสูญเสียกลิ่น และวิตามินของผลไม้ได้ (Torreggiani and Bertolo, 2001)

ขั้นตอนการอบแห้ง เป็นขั้นตอนการลดปริมาณความชื้นของอาหารโดยการใช้ความร้อน จนถึงระดับที่สามารถระงับการเจริญของจุลินทรีย์ได้ คือมีค่า a_w ต่ำกว่า 0.65 ทำให้เก็บอาหารไว้ได้นานขึ้น โดยส่วนใหญ่นิยมใช้ตู้อบลมร้อน อาหารแห้งแต่ละชนิดมีปริมาณความชื้นในระดับที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาไม่เท่ากัน โดยผลิตภัณฑ์ผลไม้อบแห้งต้องมีปริมาณความชื้นต่ำกว่า 18% โดยน้ำหนักเปียก (สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม, 2532) นอกจากเป็นการถนอมอาหารแล้ว การอบแห้งยังช่วยลดปริมาตรและน้ำหนักของอาหารซึ่งช่วยลดต้นทุนในการเก็บรักษาและการขนส่งได้

อย่างไรก็ตามในระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ผลไม้แช่อิ่มอบแห้งอาจเกิดการเคลื่อนย้ายความชื้น (moisture migration) ระหว่างบริเวณที่มี a_w สูง ไปยังบริเวณที่มี a_w ต่ำ ส่งผลให้สมบัติของอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลง (Al-Muhtaseb *et al*., 2002) การสร้างมอยส์เจอร์ซอร์พชันไอโซเทิร์ม (MSI) ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า a_w กับปริมาณความชื้นของอาหารที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ สามารถใช้เป็นแนวทางในการหาภาวะที่เหมาะสมในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร และการเลือกบรรจุภัณฑ์ รวมถึงการปรับปรุงส่วนผสมของอาหาร (Fennema, 1996) นอกจากนี้สำหรับอาหารแห้งและอาหารกึ่งแห้งการสร้าง MSI ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ยังช่วยในการเลือกปริมาณความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งที่เหมาะสม เพื่อให้เก็บผลิตภัณฑ์ได้นานและสามารถคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้นาน (Mathlouthi, 2001)

2. การใช้สารพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ในการปรับปรุงคุณภาพผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง

โดยทั่วไปในการผลิตผลไม้แช่อิ่มอบแห้งนิยมใช้น้ำตาลทรายหรือเกลือเป็นส่วนประกอบในสารละลายออสโมติก เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณความชื้น หรือค่า a_w ที่เหมาะสม และมีคุณภาพเป็นที่ยอมรับ แต่เนื่องจากน้ำตาลทรายและเกลือมีขีดจำกัดในการใช้ เพราะหากใช้มากเกินไปจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีรสหวานหรือเค็มมากเกินไป การใช้สารละลายออสโมติกที่มีความเข้มข้นสูง ๆ และแช่เป็นเวลานานอาจทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเหี่ยวย่น เนื่องจากการสูญเสียน้ำมากเกินไป รวมถึงเกิดผลึกน้ำตาลบริเวณผิวหน้าในระหว่างการเก็บรักษา การใช้สารในกลุ่มพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ร่วมกับน้ำตาลทรายเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ ทั้งนี้เนื่องจากสารในกลุ่มนี้มีสมบัติในการดูดความชื้น และลดค่า a_w ซึ่งจะมีผลในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ อีกทั้งยังมีความหวานน้อยกว่าซูโครส พอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้ในอาหาร ได้แก่ propylene glycol, glycerol, polyethylene glycol และ sorbitol เป็นต้น (Gustavo *et al*., 2003)

2.1 พอลิไฮดริกแอลกอฮอล์

พอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ หมายถึงสารประกอบแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ตัวอย่างเช่น กลีเซอรอล และน้ำตาลแอลกอฮอล์ น้ำตาลแอลกอฮอล์หมายถึง อนุพันธ์ของน้ำตาลที่หมู่คีโตน หรือหมู่แอลดีไฮด์ถูกรีดิวซ์เป็นหมู่ไฮดรอกซิล สามารถแบ่งเป็นสามกลุ่มตามโครงสร้างทางเคมี คือ โมโนแซ็กคาไรด์แอลกอฮอล์ ได้แก่ ซอร์บิทอล แมนนิทอล และไซลิทอล ซึ่งได้มาจาก กลูโคส แมนโนส และไซโลส ตามลำดับ ไดแซ็กคาไรด์แอลกอฮอล์ ได้แก่ มอลติทอล แลคทิทอล ซึ่งได้มาจากมอลโทสและแลคโทส ตามลำดับ ไอโซมอลท์ได้มาจาก α -D-กลูโคไพราโนซิล-[1-6]-D-ซอร์บิทอล (alpha-D-glucopyranosyl-[1-6]-D-sorbitol) และ α -D-กลูโคไพราโนซิล-[1,6]-D-แมนนิทอล ผสมกันในอัตราส่วน 1:1 และพอลิแซ็กคาไรด์แอลกอฮอล์ได้มาจากไฮโดรจิเนเตทสตาร์ชไฮโดรไลเซท (hydrogenated starch hydrolysates) (Wolever *et al*., 2002)

พอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้กันในอุตสาหกรรมอาหาร ได้แก่

ซอร์บิทอล (หรือ D-กลูซิทอล) มีสูตรเคมี $C_6H_{14}O_6$ หรือ $H(HCHO)_6H$ จัดเป็นพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวน 6 หมู่ ในทางอุตสาหกรรมสามารถผลิตซอร์บิทอลได้จากปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันของกลูโคส ซอร์บิทอลมีลักษณะเป็นผงสีขาว มีความสามารถในการละลายน้ำ และความสามารถในการดูดความชื้นได้ดี ทนความร้อนได้สูง มีระดับความหวานประมาณ 0.5-0.6 เท่าของซูโครส จัดเป็นสารที่อยู่ในบัญชีรายชื่อสารประเภท generally recognized as safe (GRAS) นอกจากนี้ซอร์บิทอลยังให้พลังงานต่ำ โดยให้ค่าพลังงานเพียง 2 ใน 3 ของซูโครส คิดเป็น 2.6 กิโลแคลอรี่ต่อกรัม) ซึ่งเป็นประโยชน์ในการนำมาใช้กับผู้ป่วยโรคเบาหวาน หรือผู้ที่ต้องการควบคุมน้ำหนัก (Wolever *et al*., 2002)

กลีเซอรอล มีสูตรเคมี $C_3H_8O_3$ หรือ $H(HCHO)_3H$ จัดเป็นไตรไฮดริกแอลกอฮอล์ กลีเซอรอลมีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ละลายน้ำได้ดี มีจุดหลอมเหลว 17.8 องศาเซลเซียส จุดเดือด 290 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะ 1.261 มีความสามารถในการดูดความชื้นและลดค่า a_w ได้ดี มีความหนืดสูง

และเป็น plasticizer ช่วยให้ผลิตภัณฑ์คงความนุ่มนวล และมีความยืดหยุ่นที่ดี นิยมใช้ทั้งในผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม เช่น ช่วยให้เค้กคงความชุ่มชื้นทำให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัสนุ่ม ช่วยลดการเกิดปัญหา staling ในขนมปัง ควบคุมการระเหยของน้ำและการตกผลึกของน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ผลไม้อบแห้ง (O'Neil *et al*., 2001)

2.2 ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาผลของพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ต่อผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง

ในที่นี้จะอธิบายงานวิจัยที่ศึกษาผลของการใช้พอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ในการออสโมซิสต่อผลไม้แช่อิ่มอบแห้งในด้านต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

2.2.1 ผลของการใช้พอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิสของผลไม้

Ozen และคณะ (2002) ศึกษาผลของเกลือ (2, 6 และ 10% (w/v)) และซอร์บิทอล (0, 5 และ 10% (w/v)) ต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิสของพริกหยวก พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นซอร์บิทอลในการออสโมซิสส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำ (WL) และค่าการเพิ่มขึ้นของของแข็ง (SG) ของพริกหยวกเพิ่มขึ้น แต่ทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของเกลือในเนื้อเยื่อลดลง ซึ่งจะเห็นผลชัดเจนมากขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นของเกลือต่ำ โดย Collignan and Raoult-Wack (1994) อธิบายว่าซอร์บิทอลขัดขวางการแพร่ของเกลือผ่านเข้าสู่เนื้อเยื่อ

Behsnilian และ Spiess (2006) ศึกษาผลของชนิดสารละลายออสโมติกต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิสของแครอท โดยแปรสารละลายออสโมติก (a_w = 0.91) 4 ชนิด ได้แก่ ซูโครส กลูโคส ซอร์บิทอล และกลีเซอรอล แช่ตัวอย่างในสารละลายออสโมติกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า แครอทที่แช่ในสารละลายกลูโคสมีค่า WL สูงที่สุด รองลงมาเป็นซอร์บิทอล ซูโครส และกลีเซอรอลตามลำดับ (0.57, 0.51, 0.51, 0.37 kg H_2O/kg ตามลำดับ) ขณะที่การใช้กลีเซอรอลในการออสโมซิสทำให้แครอทมีค่า SG สูงที่สุด รองลงมาเป็นกลูโคส ซอร์บิทอล และซูโครส ตามลำดับ (0.12, 0.11, 0.10 และ 0.06 kg H_2O/kg ตามลำดับ) โดยค่า SG มีความสัมพันธ์กับมวลโมเลกุลของสารออสโมติก โดยจากสารออสโมติกที่มีมวลโมเลกุลต่ำมีความสามารถในการแพร่ผ่านเข้าสู่เนื้อเยื่อดีกว่าสารออสโมติกที่มีมวลโมเลกุลสูง (Torreggiani, 1993)

ศรีวิกรณ์ ดิษฐอุดมโพธิ์ และชลธิชา ปิตตาระเต (2550) ศึกษาผลของชนิดสารละลายออสโมติกต่อการถ่ายเทมวลสารของมะเขือเทศ โดยแปรชนิดของสารออสโมติก 3 ชนิด ได้แก่ ซูโครส มอลทิทอล และซอร์บิทอล แช่ตัวอย่างในสารละลายออสโมติกความเข้มข้น 65 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ควบคุมอุณหภูมิของสารละลายออสโมติกให้อยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส ตลอดการออสโมซิส พบว่า มะเขือเทศที่แช่ในสารละลายมอลทิทอลมีค่า WL สูงที่สุด (0.551 kg H_2O/kg) ขณะที่มะเขือเทศที่แช่ในสารละลายซอร์บิทอลมีค่า SG สูงที่สุด (0.152 kg/kg) โดยให้เหตุผลว่าซอร์บิทอลมีมวลโมเลกุลน้อยที่สุดจึงแพร่เข้าไปในเนื้อเยื่อมะเขือเทศได้มากกว่าซูโครส และมอลทิทอล ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า มวลโมเลกุลของสารละลายออสโมติกมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของ WL/SG โดยสารออสโมติกที่มีมวลโมเลกุลต่ำ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีอัตราส่วนของ WL/SG น้อยลง แต่ค่า WL ไม่มีความสัมพันธ์กับมวลโมเลกุลของสารออสโมติก จากนั้นอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิส (Azuara *et al*., 1992)

โดยมีรูปแบบของสมการดังนี้ $WL_t = \frac{S_1 \times t \times WL_\infty}{1+(S_1 \times t)}$ และ $SG_t = \frac{S_2 \times t \times SG_\infty}{1+(S_2 \times t)}$ เมื่อ t คือ เวลา S_1 และ S_2 คือ ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับการสูญเสียน้ำและการเพิ่มขึ้นของของแข็ง WL_∞ คือ ปริมาณน้ำที่แพร่ออกจากมะเขือเทศเมื่อเข้าสู่สมดุล SG_∞ คือ ปริมาณของแข็งในมะเขือเทศที่เพิ่มขึ้นเมื่อเข้าสู่สมดุล WL_t คือ ปริมาณน้ำที่แพร่ออกจากมะเขือเทศที่เวลา t SG_t คือ ปริมาณของแข็งในมะเขือเทศที่เพิ่มขึ้นที่เวลา t พบว่า สมการนี้มีค่าความเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ในการทำนายการถ่ายเทมวลสารร้อยละ 4.33-6.98

Moreira และคณะ (2007) ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายกลีเซอรอลต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิสของเกาลัด โดยแปรความเข้มข้นของกลีเซอรอล 4 ระดับ (25, 35, 45 และ 60% (w/w)) พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอลในการออสโมซิสส่งผลให้ค่า WL, SG และอัตราส่วนของ WL/SG ของตัวอย่างสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นกลีเซอรอล ส่งผลให้แรงดันออสโมติกสูงขึ้น จึงเกิดการถ่ายเทมวลสารได้ดีขึ้น

Pattanapa และคณะ (2010) ศึกษาผลการทดแทนสารละลายซูโครสด้วยกลีเซอรอลต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิสของส้ม (พันธุ์สายน้ำผึ้ง) โดยแปรอัตราส่วนของสารลายซูโครส 60% (w/w) และสารละลายกลีเซอรอล 60% (w/w) 5 ระดับ ได้แก่ 9:1, 8:2, 7:3, 6:4 และ 5:5 แช่ตัวอย่างในสารละลายออสโมติกเป็นเวลา 7 ชั่วโมง ควบคุมอุณหภูมิของสารละลายออสโมติกให้อยู่ที่ 55 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างตัวอย่างกับสารละลายออสโมติก 1:5พบว่า เมื่ออัตราส่วนของกลีเซอรอลในการออสโมซิสสูงขึ้น ส่งผลให้ค่า WL และ SG ของตัวอย่างเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยอธิบายว่ากลีเซอรอลมีมวลโมเลกุลต่ำกว่าซูโครส เมื่อใช้กลีเซอรอลและซูโครสในปริมาณเท่ากัน โมลของกลีเซอรอลจะมากกว่าโมลของซูโครส ทำให้แรงดันออสโมติกของกลีเซอรอลสูงกว่าซูโครส ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนกลีเซอรอล จึงส่งผลให้ค่า WL สูงขึ้น และการที่ค่า SG เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มอัตราส่วนของกลีเซอรอล อาจมีผลมาจากขนาดโมเลกุลของกลีเซอรอลที่เล็กกว่าซูโครส จึงแพร่ผ่านเข้าไปในเนื้อเยื่อได้ดีกว่า

Sritongtae และคณะ (2011) ศึกษาผลของพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิสของแคนตาลูป โดยแช่ตัวอย่างในสารละลายซูโครสความเข้มข้น 40 และ 50 องศาบริกซ์ ตามลำดับ ความเข้มข้นละ 24 ชั่วโมง แปรชนิดของสารละลายออสโมติกเพื่อทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนที่ความเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ ด้วยพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ 2 ชนิด ได้แก่ ซอร์บิทอลและกลีเซอรอล ที่ความเข้มข้น 10% และ 15% (w/v) เปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต 10% (v/v) และชุดควบคุมซึ่งไม่มีการทดแทนน้ำตาลซูโครส พบว่า ตัวอย่างที่ทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอลและตัวอย่างที่ทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยน้ำตาลอินเวิร์ตมีค่า SG สูงกว่าชุดควบคุม แต่มีค่า WL ต่ำกว่าชุดควบคุม ($p \leq 0.05$) ค่า SG ที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์กับมวลโมเลกุลของสารออสโมติก ดังนั้นซอร์บิทอลและน้ำตาลอินเวิร์ตที่มีมวลโมเลกุลน้อยกว่าซูโครสจึงแพร่เข้าสู่เนื้อเยื่อของแคนตาลูปได้ดีกว่า ขณะที่ตัวอย่างที่ทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยกลีเซอรอลมีค่า SG ต่ำกว่าชุดควบคุม แต่มีค่า WL สูงกว่า ($p \leq 0.05$) การลดลงของค่า SG เมื่อทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยกลีเซอรอลอาจมีผลมาจากความหนืด

ของกลีเซอรอลที่มีค่าสูงกว่าความหนืดของซูโครส ส่งผลให้การแพร่ผ่านของตัวถูกละลายลดลง ขณะที่ค่า WL ที่เพิ่มขึ้นอาจเกิดจากการที่กลีเซอรอลมีค่า a_w ต่ำ ทำให้แรงดันออสโมติกสูง จึงเกิดการแพร่ของน้ำได้ดีกว่าชุดควบคุม และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ชนิดเดียวกัน พบว่า ค่า WL และ SG ของตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงดันออสโมติกของสารละลายมีค่าสูงขึ้น

2.2.2 ผลของการใช้พอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งของผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง

Zenoozian และคณะ (2008) ศึกษาผลของชนิดสารละลายออสโมติกต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งของฟักทองแช่อิ่ม โดยแปรชนิดของสารละลายออสโมติก (สารละลายซูโครสและซอร์บิทอล 50% (w/w)) และแช่ฟักทองที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นอบแห้งฟักทองแช่อิ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ซูโครสในการออสโมซิสมีปริมาณความชื้นสุดท้ายสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ใช้ซอร์บิทอล (1.5 และ 1.3% โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ) และใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่า (700 และ 660 นาที ตามลำดับ) นอกจากนี้พบว่า แบบจำลอง Two term และแบบจำลอง Henderson and Pabis สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการออสโมซิสด้วยซูโครส และผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการออสโมซิสด้วยซอร์บิทอลได้ดีที่สุดตามลำดับ เมื่อเทียบกับแบบจำลอง Newton, Page, Modified Page, Modified Henderson and Pabis, Logarithmic, Two term, Wang and Singh, Simplified diffusion และ Verma

Pattanapa และคณะ (2010) ศึกษาผลการทดแทนสารละลายซูโครสด้วยกลีเซอรอลต่อการอบแห้งของส้ม (พันธุ์สายน้ำผึ้ง) แช่อิ่ม โดยแปรอัตราส่วนของสารลายซูโครส 60% (w/w) และสารละลายกลีเซอรอล 60% (w/w) 5 ระดับ ได้แก่ 9:1, 8:2, 7:3, 6:4 และ 5:5 แช่ตัวอย่างในสารละลายออสโมติกเป็นเวลา 7 ชั่วโมง ควบคุมอุณหภูมิของสารละลายออสโมติกให้อยู่ที่ 55 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างตัวอย่างกับสารละลายออสโมติก 1:5 จากนั้นอบแห้งตัวอย่างที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 360 นาที (ปริมาณความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 2.23-8.63 kg H_2O/kg solid) พบว่า แบบจำลอง Page สามารถทำนายลักษณะการอบแห้งได้ดีกว่าแบบจำลอง Lewis และการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนกลีเซอรอลทำให้ค่าคงที่ในการอบแห้งสูงขึ้น อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วนผสมของสารละลายซูโครสต่อสารละลายกลีเซอรอลที่ 5:5 (w/w) จะมีผลให้ค่าคงที่อัตราการอบแห้งของตัวอย่างมีค่าลดลง

Sritongtae และคณะ (2011) ศึกษาผลของพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งของแคนตาลูปแช่อิ่ม โดยแช่ตัวอย่างในสารละลายซูโครสความเข้มข้น 40 และ 50 องศาบริกซ์ ตามลำดับ ความเข้มข้นละ 24 ชั่วโมง แปรชนิดของสารละลายออสโมติกเพื่อทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนที่ความเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ ด้วยพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ 2 ชนิด ได้แก่ ซอร์บิทอลและกลีเซอรอล ที่ความเข้มข้น 10% และ 15% (w/v) เปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต 10% (v/v) และชุดควบคุมซึ่งไม่มีการทดแทนน้ำตาลซูโครส จากนั้นอบแห้งแคนตาลูปทุกชุดการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ พบว่า ชุดควบคุมมีค่าคงที่การอบแห้งสูงสุด รองลงมาเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอล ผลิตภัณฑ์ที่ทดแทนน้ำตาลซูโครส

บางส่วนด้วยกลีเซอรอล และผลิตภัณฑ์ที่ทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต ตามลำดับ เนื่องจากพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์และน้ำตาลอินเวิร์ตสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ดี ปริมาณน้ำที่ระเหยในช่วงการอบแห้งจึงน้อยกว่าภาวะอื่น ๆ นอกจากนี้พบว่า แบบจำลอง Page สามารถทำนายลักษณะการอบแห้งของทุกชุดการทดลองได้ดีกว่าแบบจำลอง Henderson และ Pabis

Therdthai, Zhou และ Pattanapa (2011) ศึกษาการทำแห้งส้มแมนดารินด้วยวิธีการแช่อิ่มอบแห้ง โดยแช่ตัวอย่างในสารละลายออสโมติกที่แปรอัตราส่วนผสมของสารละลายซูโครสเข้มข้น 60% (w/w) และสารละลายกลีเซอรอลเข้มข้น 60% (w/w) เป็น 9:1, 7:3 และ 5:5 (w/w) ตามลำดับ โดยใช้อัตราส่วนตัวอย่างต่อสารละลายเป็น 1:5 (w/v) จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มาทำแห้งด้วยวิธี microwave vacumm drying แปรระดับของค่าพลังงานไมโครเวฟเป็น 960 W และ 1280 W ตามลำดับ เมื่อพิจารณาในช่วงการออสโมซิส พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของสารละลายกลีเซอรอล จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอย่าง โดยค่า loss factor และ loss tangent ของตัวอย่างเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ค่า dielectric constant และ penetration depth ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างก่อนการออสโมซิส ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลให้ตัวอย่างมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟได้ดีขึ้น เมื่อพิจารณาในช่วงการทำแห้งด้วยไมโครเวฟ พบว่าการใช้กลีเซอรอลมีผลให้อัตราการทำแห้งด้วยวิธี microwave vacumm มีค่าเพิ่มขึ้น โดยอัตราการทำแห้งจะสูงขึ้นเมื่อระดับพลังงานไมโครเวฟมากขึ้น เมื่อพิจารณาการใช้แบบจำลองต่าง ๆ ในการทำนายลักษณะการทำแห้งของตัวอย่าง โดยเปรียบเทียบการใช้แบบจำลองของ Lewis, Page, Henderson&Pabis, Logarithmic, Two-term model และ Wang&Singh ตามลำดับ พบว่าแบบจำลองของ Page สามารถทำนายลักษณะการทำแห้งของตัวอย่างได้ดีที่สุด

Therdthai และ Visalrakkij (2012) ศึกษาการทำแห้งมังคุดด้วยวิธีการแช่อิ่มอบแห้งร่วมกับการใช้ microwave vacumm drying โดยแช่มังคุดในสารละลายซูโครสที่ระดับความเข้มข้น 65 องศาบริกซ์ อัตราส่วนมังคุดต่อสารละลายเป็น 1:5 (w/v) ที่อุณหภูมิ 40±2°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำมาทำแห้งด้วยวิธี microwave vacumm drying แปรระดับของค่าพลังงานไมโครเวฟเป็นสามระดับ คือ 1200 W, 1440 W และ 1680 W ตามลำดับ ใช้มังคุดที่ไม่ผ่านการแช่อิ่มเป็นตัวอย่างควบคุม พบว่าการออสโมซิสจะช่วยลดปริมาณความชื้นเริ่มต้นก่อนการทำแห้ง มีผลให้มังคุดที่ผ่านการออสโมซิสใช้ระยะเวลาการทำแห้งต่ำกว่ามังคุดที่ไม่ผ่านการออสโมซิส เมื่อระดับค่าพลังงานไมโครเวฟเพิ่มขึ้น อัตราการอบแห้งของมังคุดจะมีแนวโน้มสูงขึ้น และพบว่าแบบจำลองของ Page สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในระหว่างการทำแห้งได้ดี โดยมีค่า correlation coefficient อยู่ในช่วง 0.9555-0.9996 เมื่อศึกษาผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้พบว่าการออสโมซิสจะช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความแข็ง ค่าความสว่าง และช่วยลดการถูกทำลายของเนื้อเยื่อมังคุดได้ นอกจากนี้ตัวอย่างที่ผ่านการออสโมซิสจะมีความสามารถในการดูดน้ำกลับได้ดีกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการออสโมซิสอีกด้วย

2.2.3 ผลของการใช้พอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ต่อมอยส์เจอร์ซอร์พชันไอโซเทิร์มของผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง

Farahnaky และคณะ (2009) ศึกษาผลของกลีเซอรอลต่อ MSI ของผลมะเดื่อแช่อิ่มอบแห้ง โดยแปรระดับความเข้มข้นของกลีเซอรอล 2 ระดับ ได้แก่ 20% และ 40% (w/w) เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่เติมกลีเซอรอล จากนั้นอบแห้งตัวอย่างด้วยตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และแปรระดับอุณหภูมิในการเก็บรักษา 3 ระดับ ได้แก่ 5, 25 และ 40 องศาเซลเซียส ต่อมาจึงสร้าง MSI โดยใช้แบบจำลอง GAB และแบบจำลอง BET ในการทำนาย MSI และหาค่า monolayer moisture content (M_o) พบว่าการใช้แบบจำลอง GAB เพื่อทำนายลักษณะของ MSI มีความเหมาะสมกว่าการใช้แบบจำลอง BET เนื่องจากแบบจำลอง GAB เหมาะสมกับการทำนาย MSI ของผลิตภัณฑ์ในช่วงของค่า a_w ที่กว้างกว่าแบบจำลอง BET นอกจากนี้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอลในการออสโมซิส ค่า M_o ที่ทำนายจากแบบจำลอง GAB และค่า M_o ที่ทำนายจากแบบจำลอง BET ของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และที่ค่า a_w เดียวกัน ตัวอย่างที่เติมกลีเซอรอลมีปริมาณความชื้นที่ภาวะสมดุลสูงกว่าชุดควบคุม ซึ่งมีสาเหตุมาจากการที่กลีเซอรอลมีความสามารถในการดูดความชื้นได้ดี

Farahnaky และคณะ (2010) ศึกษาผลของกลูโคสไซรัปและกลีเซอรอลต่อ MSI และคุณภาพของมะเดื่อแช่อิ่มอบแห้ง โดยแปรชนิดของสารละลายออสโมติก ได้แก่ กลูโคสไซรัปและกลีเซอรอล ความเข้มข้น 40% (w/w) เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ไม่ผ่านการออสโมซิส จากนั้นอบแห้งตัวอย่างด้วยตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แล้วสร้าง MSI โดยใช้แบบจำลอง GAB พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่เติมกลีเซอรอลมีค่า M_o ที่ทำนายจากแบบจำลอง GAB มากกว่าผลิตภัณฑ์ที่เติมกลูโคสไซรัป และตัวอย่างควบคุม ตามลำดับ (26.6%, 13.2% และ 7.9% ตามลำดับ) นอกจากนี้พบว่าที่ระดับ a_w เดียวกัน ปริมาณความชื้นที่ภาวะสมดุลของตัวอย่างที่เติมกลีเซอรอลเทียบกับตัวอย่างที่เติมกลูโคสไซรัปมีแนวโน้มสูงขึ้นเช่นเดียวกับค่า M_o ที่ทำนายจากแบบจำลอง GAB

2.2.4 ผลของการใช้พอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ต่อคุณภาพของผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง

Mahayothee และคณะ (2009) ศึกษาผลของชนิดสารละลายออสโมติกต่อคุณภาพของลิ้นจี่แช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา โดยแปรชนิดของสารละลายออสโมติก ได้แก่ กลีเซอรอลและทรีฮาโลส ความเข้มข้น 5% ร่วมกับซูโครสความเข้มข้น 25 องศาบริกซ์ แช่ตัวอย่างในสารละลายออสโมติกเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นอบแห้งตัวอย่างที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนตัวอย่างมีค่า a_w อยู่ระหว่าง 0.5-0.6 เก็บตัวอย่างในถุงพอลิเอธิลีน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และสุ่มตัวอย่างวิเคราะห์ทุกเดือน เป็นเวลา 5 เดือน พบว่าผลิตภัณฑ์ทุกชุดการทดลองมีค่า a_w ระหว่างการเก็บใกล้เคียงกัน นอกจากนี้พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ใช้สารละลายกลีเซอรอลร่วมกับซูโครสในการออสโมซิสมีการเปลี่ยนแปลงของค่า L* และ ค่าเฉดสี ระหว่างการเก็บน้อยกว่าชุดการทดลองอื่น และมีความสามารถในการชะลอการเกิดสีน้ำตาลได้ดีที่สุด รองลงมาเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้กลีเซอรอลผสมกับทรีฮาโลสร่วมกับซูโครส และผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทรีฮาโลสร่วมกับซูโครส ตามลำดับ เนื่องจาก

กลีเซอรอลไม่มีหมู่คาร์บอนิลอิสระที่สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโน จึงช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ได้

Pattanapa และคณะ (2010) ศึกษาผลการทดแทนสารละลายซูโครสด้วยกลีเซอรอลต่อคุณภาพของส้ม (พันธุ์สายน้ำผึ้ง) แช่อิ่มอบแห้ง โดยแปรอัตราส่วนของสารลายซูโครส 60% (w/w) และสารละลายกลีเซอรอล 60% (w/w) 5 ระดับ ได้แก่ 9:1, 8:2, 7:3, 6:4 และ 5:5 แช่ตัวอย่างในสารละลายออสโมติกเป็นเวลา 7 ชั่วโมง ควบคุมอุณหภูมิของสารละลายออสโมติกให้อยู่ที่ 55 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างตัวอย่างกับสารละลายออสโมติก 1:5 จากนั้นอบแห้งตัวอย่างที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 360 นาที (ปริมาณความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 2.23-8.63 kg H_2O/kg solid) พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนของกลีเซอรอลในการออสโมซิสทำให้ปริมาณความชื้น ค่า a_w และความแข็งของผลิตภัณฑ์ลดลง ($p\leq0.05$) แต่ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีสีคล้ำมากขึ้น และมีสีแดงลดลง ($p\leq0.05$)

Farahnaky และคณะ (2010) ศึกษาผลของกลูโคสไซรัปและกลีเซอรอลต่อคุณภาพของมะเดื่อแช่อิ่มอบแห้ง โดยแปรชนิดของสารละลายออสโมติก ได้แก่ กลูโคสไซรัป และกลีเซอรอล ความเข้มข้น 40% (w/w) เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ไม่ผ่านการออสโมซิส จากนั้นอบแห้งตัวอย่างด้วยตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่า ชุดควบคุมมีค่าความแข็งมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่เติมกลูโคสไซรัป และผลิตภัณฑ์ที่เติมซอร์บิทอล ตามลำดับ เนื่องจากซอร์บิทอลที่ใช้เป็นสารออสโมติกมีความสามารถในการดูดความชื้นได้ดี ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งลดลง อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่เติมซอร์บิทอล และผลิตภัณฑ์ที่เติมกลูโคสไซรัปมีสีคล้ำกว่าชุดควบคุม ($p\leq0.05$)

Sritongtae และคณะ (2011) ศึกษาผลของพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ต่อคุณภาพของแคนตาลูปแช่อิ่มอบแห้ง โดยแปรชนิดของสารละลายออสโมติกเพื่อทดแทนซูโครสบางส่วนที่ความเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ ด้วยพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ 2 ชนิด ได้แก่ ซอร์บิทอลและกลีเซอรอล ที่ความเข้มข้น 10% และ 15% (w/v) เปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต 10% (v/v) (ชุดเปรียบเทียบ) และชุดควบคุมซึ่งไม่มีการทดแทนซูโครส (น้ำตาลซูโครส 50 องศาบริกซ์) จากนั้นอบแห้งตัวอย่างทุกชุดการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนมีค่า a_w ประมาณ 0.65 พบว่า ผลิตภัณฑ์แคนตาลูปแช่อิ่มอบแห้งที่ทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ในการออสโมซิส และชุดเปรียบเทียบมีค่า spin-lattice relaxation time (^{1}H NMR T_1) ซึ่งวัดโดยใช้เครื่อง nuclear magnetic resonance spectrometer (NMR) ต่ำกว่าชุดควบคุม ค่านี้แสดงถึงความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลน้ำของพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์และน้ำตาลอินเวิร์ตที่ดีกว่าซูโครสทำให้ความเป็นอิสระของน้ำมีค่าที่ต่ำกว่า

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงนำพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์มาประยุกต์ใช้ในการผลิตมะละกอแช่อิ่มอบแห้ง เนื่องจากการใช้สารในกลุ่มพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ซึ่งมีสมบัติในการจับน้ำได้ดีเข้าร่วมในกระบวนการผลิตจะส่งผลต่อพฤติกรรมการอบแห้ง การเคลื่อนที่ของน้ำหรือความสามารถในการเข้าร่วมปฏิกิริยาของน้ำ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งงานวิจัยที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของการเคลื่อนที่ของน้ำในการ

เข้าปฏิกิริยาและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้งและหลังการอบแห้งยังมีไม่มากนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้สารพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์สองชนิด คือ กลีเซอรอล และซอร์บิทอลร่วมกับซูโครสในกระบวนการผลิต และการใช้น้ำตาลอินเวิร์ตร่วมกับซูโครส ต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้น และค่า water activity ในระหว่างการอบแห้ง และความสามารถในการเข้าร่วมปฏิกิริยาของน้ำในผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง และทำนายพฤติกรรมการอบแห้งของผลิตภัณฑ์เมื่อมีสารพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ รวมทั้งการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายลักษณะการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ รวมถึงศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของมะละกอแช่อิ่มอบแห้ง ข้อมูลที่ได้สามารถเป็นประโยชน์ในการศึกษาเชิงลึก และเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับภาคอุตสาหกรรมผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง

บทที่ 2
ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัตถุดิบและสมบัติของมะละกอสด

มะละกอพันธุ์ฮอลแลนด์ซื้อจากตลาดมหานาค กรุงเทพฯ ในช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2554 ถึงมีนาคม พ.ศ. 2555 น้ำหนักผลประมาณ 2.5 – 3.0 กิโลกรัม เปลือกมีสีเขียวปนเหลือง เนื้อภายในผลมีสีแดงอมชมพูตลอดทั้งผล ระยะการสุกหนึ่งในสอง (ศักดิ์สิทธิ์ ศรีวิชัย, 2545)

วิเคราะห์ปริมาณความชื้น (AOAC, 2000) ค่าสีในระบบ CIELAB ด้วยเครื่อง Color Flex® แหล่งกำเนิดแสง D_{65} มุมมอง 10° ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดด้วย hand refractometer ปริมาณกรดในรูปกรดซิตริก (AOAC, 2000) และความแข็งของเนื้อมะละกอด้วยเครื่อง Texture Analyzer (TA-XT2i, Stable Micro Systems Ltd., UK) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ผลเพื่อใช้รายงานสมบัติทางกายภาพและเคมีของมะละกอที่ใช้ทดลอง

2.2 ศึกษาผลของวิธีการออสโมซิสต่อการถ่ายเทมวลสารในระหว่างการออสโมซิส

ล้างและปอกเปลือกมะละกอ หั่นมะละกอตามขวาง จากนั้นหั่นเป็นชิ้นขนาด 1.5 x 1.5 x 7.0 cm. แช่มะละกอในสารละลายผสมที่ประกอบด้วยกรดซิตริก 1.0% (w/v) และแคลเซียมคลอไรด์ 1.0% (w/v) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วต้มมะละกอในน้ำเดือด 10 นาที ต่อมาจึงแช่มะละกอในสารละลายซูโครสที่อุณหภูมิห้อง โดยอุณหภูมิเริ่มต้นของสารละลายซูโครสที่ใช้เป็น 55 องศาเซลเซียส อัตราส่วนมะละกอต่อสารละลายเป็น 1:3 แปรวิธีการออสโมซิส 2 วิธี ดังนี้

1. วิธี single step: แช่ตัวอย่างในสารละลายซูโครสความเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ โดยทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วน [10% (v/v)] ด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต เป็นเวลา 15 ชั่วโมง
2. วิธี multiple step: แช่ตัวอย่างในสารละลายซูโครสความเข้มข้น 40, 50 และ 60 องศาบริกซ์ตามลำดับ เวลาในการแช่ความเข้มข้นละ 5 ชั่วโมง โดยที่ระดับความเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วน [10% (v/v)] ด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต

น้ำตาลอินเวิร์ตที่ใช้ในการทดลองเตรียมโดยเติมกรดซิตริก 5% (w/v) ในสารละลายซูโครสความเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 3 วัน เพื่อให้เกิดการไฮโดรไลส์อย่างสมบูรณ์ (Sritongtae *et al*., 2011)

ติดตามการถ่ายเทมวลสารของมะละกอด้วยการออสโมซิสทั้ง 2 วิธี ตลอดการออสโมซิสเป็นเวลา 15 ชั่วโมง คำนวณค่าการสูญเสียน้ำ (Water loss, WL) ค่าการเพิ่มขึ้นของของแข็ง (Solid gain, SG) และค่าการลดลงของน้ำหนัก (Weight reduction, WR) ซึ่งคำนวณดังสมการที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

$$\text{Water loss (\%)} = \frac{(M_o \times X_{wo}) - (M_t \times X_{wt})}{M_o} \quad \text{.....(1)}$$

$$\text{Solid gain (\%)} = \frac{(M_o \times X_{st}) - (M_o \times X_{so})}{M_o} \quad \text{.....(2)}$$

$$\text{Weight reduction (\%)} = \frac{(M_o - M_t)}{M_o} \quad \text{.....(3)}$$

เมื่อ M_o = น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)

M_t = น้ำหนักตัวอย่างที่ผ่านการออสโมซิสแล้ว (กรัม)

X_{so} = องศาบริกซ์เริ่มต้นของตัวอย่าง

X_{st} = องศาบริกซ์สุดท้ายหลังการออสโมซิส

X_{wo} = ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่าง (% โดยน้ำหนักเปียก)

X_{wt} = ปริมาณความชื้นของตัวอย่างหลังการออสโมซิส (% โดยน้ำหนักเปียก)

วางแผนการทดลองแบบ Completely randomized design (CRD) ทำการทดลองสามซ้ำ วิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

2.3 ศึกษาผลของการทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอล กลีเซอรอล และน้ำตาลอินเวิร์ตต่อการถ่ายเทมวลสารในระหว่างการออสโมซิส

เตรียมตัวอย่างมะละกอแช่อิ่มแบบ multiple step โดยทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนที่ระดับความเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ ด้วยพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ 2 ชนิด ได้แก่ กลีเซอรอล 10% (v/v) ใช้สัญลักษณ์ Su-Gly และซอร์บิทอล 10% (w/v) ใช้สัญลักษณ์ Su-Sor เปรียบเทียบกับการทดแทนซูโครส 10% (v/v) ด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต (Su-Inv) และชุดควบคุมที่ไม่มีการทดแทนน้ำตาลซูโครส (Su) ติดตามการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิสเป็นเวลา 15 ชั่วโมง โดยคำนวณค่า WL, SG และ WR ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

วางแผนการทดลองแบบ CRD ทำการทดลองสามซ้ำ วิเคราะห์ผลทางสถิติ และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

2.4 ศึกษาผลของการทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอล กลีเซอรอล และน้ำตาลอินเวิร์ตต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

เตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกับในขั้นตอนที่ 2.3 จากนั้นอบแห้งตัวอย่างที่ผ่านการออสโมซิส (ประมาณ 500 กรัม) ทั้งสี่ชุดการทดลองด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.3 เมตรต่อวินาที บันทึกน้ำหนักของตัวอย่างมะละกอตลอดการอบแห้ง จนกระทั่งผลิตภัณฑ์มีน้ำหนักคงที่ ทำการทดลองสองซ้ำ จากนั้นสร้างกราฟการอบแห้งระหว่างอัตราส่วนความชื้น (*MR*) กับเวลาการอบแห้ง โดยคำนวณค่า *MR* ได้จากสมการที่

4 และสร้างกราฟระหว่าง ln*MR* กับเวลาการอบแห้งเพื่อหาค่าคงที่ในการอบแห้งจากความชันของกราฟ ($k_{cal,slope}$) โดยคำนวณอัตราการอบแห้งจากสมการที่ 5

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_o - M_e)} \qquad \text{.....(4)}$$

เมื่อ MR = อัตราส่วนความชื้น

M_t = ปริมาณความชื้นที่เวลาใด ๆ (โดยน้ำหนักแห้ง)

M_o = ปริมาณความชื้นที่เริ่มต้น (โดยน้ำหนักแห้ง)

M_e = ปริมาณความชื้นที่สมดุล (โดยน้ำหนักแห้ง)

$$\text{Drying rate} = -d(MR)/dt \ .\text{dry solid}$$

$$= -d[\exp(-kt)]/dt \ .\text{dry solid}$$

$$= k.\exp(-kt) \ .\text{dry solid} \qquad \text{.....(5)}$$

เมื่อ MR = อัตราส่วนความชื้น

t = เวลาในการอบแห้ง (ชั่วโมง)

k = ค่าคงที่ของการอบแห้ง (1/ชั่วโมง)

จากนั้นเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 3 แบบ ได้แก่ Page ซึ่งมีรูปแบบ $MR = \exp(-kt^n)$ (Page, 1949), Henderson and Pabis ซึ่งมีรูปแบบ $MR = a\exp(-kt)$ (Henderson and Pabis, 1961) และ Modified Henderson and Pabis ซึ่งมีรูปแบบ $MR = a.\exp(-kt) + b.\exp(-gt) + c.\exp(-ht)$ (Karathanos, 1999) โดยที่ค่า a, b, c, g, h และ n เป็นค่าคงที่ในแบบจำลอง ค่า t เป็นเวลาในการอบแห้ง และค่า k เป็นค่าคงที่ของการอบแห้ง พิจารณาความเหมาะสมของแบบจำลองแต่ละแบบจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (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* คำนวณดังสมการที่ 6 และ 7 ตามลำดับ (Korsrilabut *et. al*., 2010)

$$MRS = \frac{\sum_{i=1}^{N} (MR_{\exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N-1} \qquad \text{.....(6)}$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(MR_{pre,i} - MR_{\exp,i})^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad \text{.....(7)}$$

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

2.5 ศึกษาผลของการทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอล กลีเซอรอล และน้ำตาลอินเวิร์ตต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้ง

เตรียมตัวอย่างทั้งสี่ชุดการทดลองดังวิธีการในขั้นตอนที่ 2.3 อบแห้งตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แล้วสุ่มตัวอย่างระหว่างการอบแห้งตลอดเวลา 16.5 ชั่วโมง (ชั่วโมงที่ 0, 2, 3.5, 5, 6.5, 8, 9.5, 11, 13.5, 15 และ 16.5) โดยใช้ข้อมูลจากกราฟการอบแห้งที่ได้ในขั้นตอนที่ 2.4 ในการคัดเลือกจุดสุ่มตัวอย่างแล้ววัดสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

2.5.1 ปริมาณความชื้น (AOAC, 2000)

2.5.2 ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีด้วยเครื่อง Water activity meter (Novasina, Switzerland)

2.5.3 ค่าสีในระบบ CIELAB ด้วยเครื่อง Color Flex® (HunterLab, Virginia) แหล่งกำเนิดแสง D_{65} มุมมอง 10°

2.5.4 การหดตัวของตัวอย่างโดยเก็บตัวอย่างก่อนและหลังการอบแห้ง วิเคราะห์ปริมาตรของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปจากการอบแห้ง ด้วยวิธี n-heptane displacement (Yan *et. al*., 2008)

วางแผนการทดลองแบบ CRD ทำการทดลองสองซ้ำ วิเคราะห์ผลทางสถิติ และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

2.6 ศึกษาผลของการทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอล กลีเซอรอล และน้ำตาลอินเวิร์ตต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้ง

เตรียมตัวอย่างทั้งสี่ชุดการทดลองเช่นเดียวกับในขั้นตอนที่ 2.3 หลังจากนั้นอบแห้งตัวอย่างที่ผ่านการออสโมซิสทั้งสี่ชุดด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนมีปริมาณความชื้นสุดท้ายประมาณ 16% (โดยน้ำหนักเปียก) แล้วตรวจสอบคุณภาพต่าง ๆ ดังนี้

2.6.1 ปริมาณความชื้น (AOAC, 2000) และค่าวอเตอร์แอคทิวิตีด้วยเครื่อง Water activity meter (Novasina, Switzerland)

2.6.2 ความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำ โดยการวัดค่า spin-lattice relaxtion time (^{1}H NMR T_1) ด้วยเครื่อง nuclear magnetic resonance spectrometer (Oxford Instruments, California) (Sritongtae *et al*., 2011)

2.6.3 ปริมาณน้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุกโทส ในมะละกอสดและผลิตภัณฑ์เฉพาะสัปดาห์เริ่มต้น ด้วยเครื่อง High performance liquid chromatography (HPLC) คอลัมน์ Prevail Carbohydrate ES ขนาด 250 x 4.6 มิลลิเมตร เฟสเคลื่อนที่เป็นสารผสมระหว่างอะซีโตไนไทรล์ และน้ำปราศจากไอออน (69:31) อัตราการไหลของสาร 0.9 มิลลิลิตรต่อนาที ตั้งโปรแกรมแบบ isocratic ควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ให้อยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลโดยวัดการกระเจิงแสงด้วย evaporative light scattering detector (ELSD) วิธีการเตรียมตัวอย่างดัดแปลงจาก AOAC (2000)

2.6.4 ค่าสีในระบบ CIELAB ด้วยเครื่อง Color Flex® (HunterLab, Virginia) แหล่งกำเนิดแสง D_{65} มุมมอง 10°

2.6.5 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์เฉพาะสัปดาห์เริ่มต้น โดยทดสอบเชิงพรรณนาด้วยสเกลเส้นตรงระดับความเข้ม 0-10 (descriptive test with scaling) ประเมินลักษณะปรากฏด้านการเกิดผลึก การหดตัว ลักษณะเนื้อสัมผัส และรสชาติของผลิตภัณฑ์ (ภาคผนวก ก) ใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 20 คน

2.6.6 ลักษณะทางสัณฐานของเซลล์มะละกอด้วย scanning electron microscope (JEOL, Japan) กำลังขยาย 150 เท่า ค่าศักย์ไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอน 15 กิโลโวลต์ (พงษ์พิสุทธิ์ คุณะวันทนิต, 2553)

ข้อ 2.6.1 และ 2.6.4 วางแผนการทดลองแบบ CRD ทำการทดลองสามซ้ำ ข้อ 2.6.2 และ 2.6.3 วางแผนการทดลองแบบ CRD ทำการทดลองสองซ้ำ ข้อ 2.6.5 วางแผนการทดลองแบบ Randomized complete block design (RCBD) วิเคราะห์ผลทางสถิติ และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

2.7 ศึกษาผลของการทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอล กลีเซอรอล และน้ำตาลอินเวิร์ตต่อมอยส์เจอร์ซอร์พชันไอโซเทิร์มของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้ง

เก็บผลิตภัณฑ์ทุกชุดการทดลอง (ปริมาณความชื้นประมาณ 16% โดยน้ำหนักเปียก) 2.000 กรัม ใน equilibrium chamber ที่มีสารละลายเกลืออิ่มตัวซึ่งให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงตั้งแต่ 10-90 % ที่อุณหภูมิ 30 ± 2 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 2.1) บันทึกน้ำหนักตัวอย่างทุกวันจนน้ำหนักคงที่ ทดลองสองซ้ำ จากนั้นใช้แบบจำลองของ BET และ GAB ที่แสดงดังสมการที่ 8 และ 9 ตามลำดับ (Labuza and Altunakar, 2007) เพื่อสร้างมอยส์เจอร์ซอร์พชันไอโซเทิร์ม และทำนายค่า monolayer moisture content

ตารางที่ 2.1 การเตรียมสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

เกลือ	a_w	ปริมาณสารที่เติม	
		เกลือ (กรัม)	น้ำ (มิลลิลิตร)
LiCl	0.11	150	85
CH_3COOK	0.23	200	65
$MgCl_2$	0.32	200	25
K_2CO_3	0.42	200	90
$Mg(NO_3)_2$	0.52	200	30
NaBr	0.57	200	80
$SrCl_2$	0.69	200	50
NaCl	0.75	200	60
KCl	0.84	200	80
$BaCl_2$	0.89	250	70

$$\text{BET:}\quad M = \frac{M_o C a_w}{(1-a_w)(1+Ca_w-a_w)} \qquad \text{.....(8)}$$

$$\text{GAB:}\quad M = \frac{M_o C K a_w}{(1-Ka_w)(1-Ka_w+CKa_w)} \qquad \text{.....(9)}$$

เมื่อ M = ปริมาณความชื้นของตัวอย่างที่ภาวะสมดุล (กรัมน้ำ/ 100 กรัมของแข็งแห้ง)

M_o = monolayer moisture content (กรัมน้ำ/ 100 กรัมของแข็งแห้ง)

C, K = ค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.8 ศึกษาผลของการทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอล กลีเซอรอล และน้ำตาลอินเวิร์ตต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา

เก็บผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้ง (ปริมาณความชื้นประมาณ 16% โดยน้ำหนักเปียก) ในถุงพอลิโพรพิลีนปิดผนึกด้วยความร้อน ในสภาพบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกายภาพ เคมี จุลินทรีย์ และทางประสาทสัมผัสทุก 4 สัปดาห์ เป็นเวลา 16 สัปดาห์ (อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติไม่สามารถเก็บรักษาตัวอย่างทุกชุดการทดลองได้นานถึง 16 สัปดาห์ โดยมีเพียง Su-Gly และ Su-Inv ที่สามารถเก็บรักษาได้ ในขณะที่ชุดควบคุมและ Su-Sor เกิดการเสื่อมเสียเนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ในสัปดาห์ที่ 10 ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากค่าวอเตอร์แอคทิวิตีของทั้งสองชุดการทดลองที่มีค่าค่อนข้างสูง (0.78 และ 0.76 ตามลำดับ) โดยตรวจสอบคุณภาพต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.8.1 ปริมาณความชื้น (AOAC, 2000)

2.8.2 ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีด้วยเครื่อง Water activity meter (Novasina, Switzerland)

2.8.3 ลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแข็ง งานในการตัด และความเหนียวด้วยเครื่อง Texture analyzer (TA-XT2i, UK) (พงษ์พิสุทธิ์ คุณะวันทนิต, 2553)

2.8.4 ค่าสีในระบบ CIELAB ด้วยเครื่อง Color Flex® (HunterLab, Virginia) แหล่งกำเนิดแสง D_{65} มุมมอง 10°

2.8.5 การเกิดสีน้ำตาล (Baloch *et. al*., 1973)

2.8.6 ปริมาณเบตาแคโรทีนและไลโคปีน

ศึกษาปริมาณเบตาแคโรทีนและไลโคปีนในมะละกอสด ผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งเฉพาะสัปดาห์เริ่มต้นและสัปดาห์ที่ 8 ด้วยเครื่อง HPLC คอลัมน์ inerstril ODS-3 ใช้สารผสมระหว่างอะซีโตไนไทรล์กับเมทานอล (90:10 v/v) (เฟสเคลื่อนที่ A) ร่วมกับเอทิลอะซิเตทความเข้มข้น 100% (v/v) (เฟสเคลื่อนที่ B) เป็นเฟสเคลื่อนที่ ตั้งโปรแกรมวิเคราะห์แบบ gradient ที่เวลาเริ่มต้นของการวิเคราะห์ เฟสเคลื่อนที่ A มีความเข้มข้น 80% ขณะที่ เฟสเคลื่อนที่ B มีความเข้มข้น 20% ค่อย ๆ เปลี่ยนอัตราส่วนของ เฟสเคลื่อนที่จนเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที เฟสเคลื่อนที่ A มีความเข้มข้น 40% ขณะที่เฟสเคลื่อนที่ B มีความเข้มข้น 60% อัตราการไหล 0.9

มิลลิลิตรต่อนาที ควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ให้อยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ปริมาณเบตาแคโรทีนและไลโคปีน โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตร ด้วย UV-visible detector วิธีการเตรียมตัวอย่างและภาวะการทำงานของเครื่อง HPLC ดัดแปลงจาก Barba และคณะ (2006)

2.8.7 ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด ยีสต์ และรา (Harrigan and McCance, 1976)

ข้อ 2.8.1-2.8.5 วางแผนการทดลองแบบ CRD ทดลองสามซ้ำ ขณะที่ข้อ 2.8.6 วางแผนการทดลองแบบ CRD ทดลองสองซ้ำ วิเคราะห์ผลทางสถิติ และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's new-multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

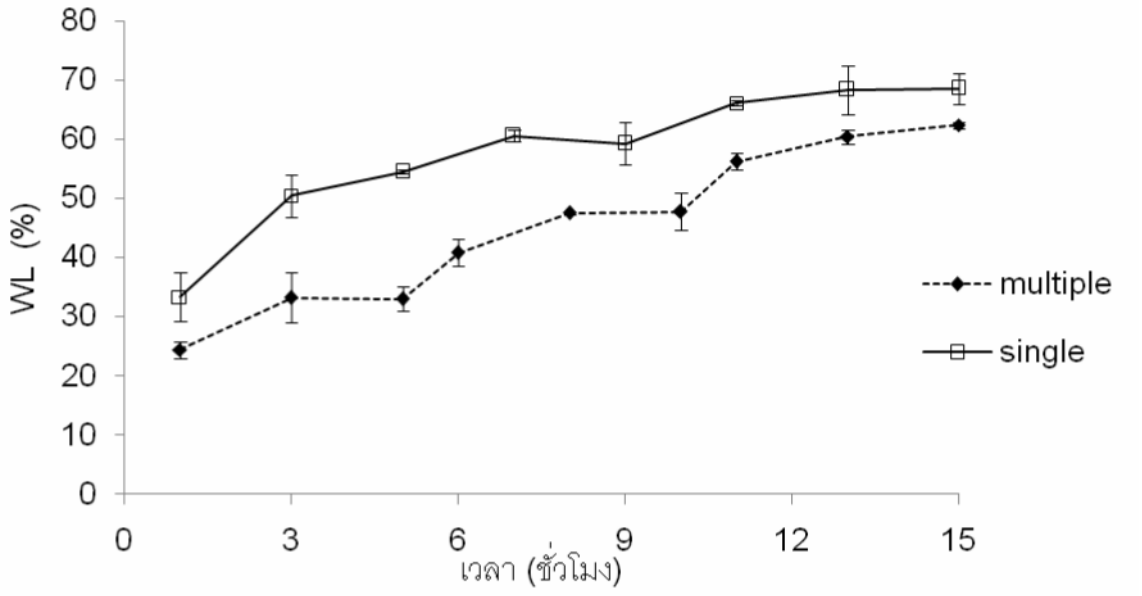
บทที่ 3
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของมะละกอสด

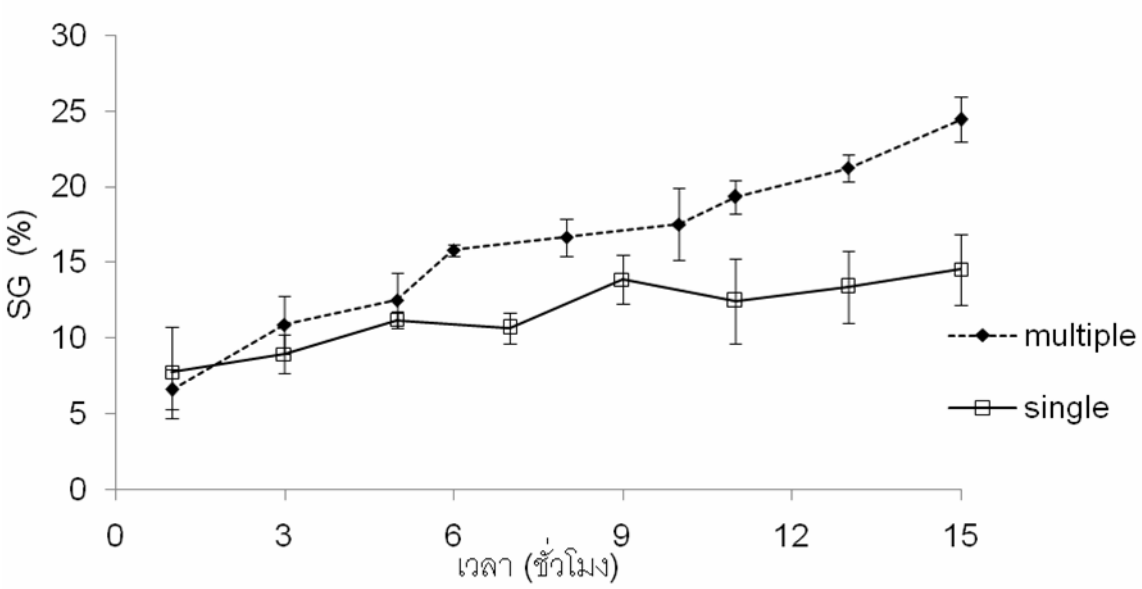
จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของมะละกอสด พบว่ามีปริมาณความชื้นประมาณ 88-89% (โดยน้ำหนักเปียก) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับองค์ประกอบของมะละกอสดที่รายงานโดย USDA (2011) นอกจากนี้พบว่า ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดอยู่ในช่วง 8-10 องศาบริกซ์ ค่า a* และ b* ของเนื้อมะละกออยู่ในช่วง 22-26 และ 32-36 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ค่า a* รวมถึงค่า b* ของเนื้อมะละกอมีค่าใกล้เคียงกับรายงานของ อาพร ละออกอ (2547) และวีรยา พรหมประเทศ (2551) ขณะที่ค่าความเป็นกรด (ในรูปกรดซิตริก) อยู่ในช่วง 0.03-0.05% ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับรายงานของ Rodrigues และคณะ (2006)

3.2 ผลของวิธีการออสโมซิสต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิส

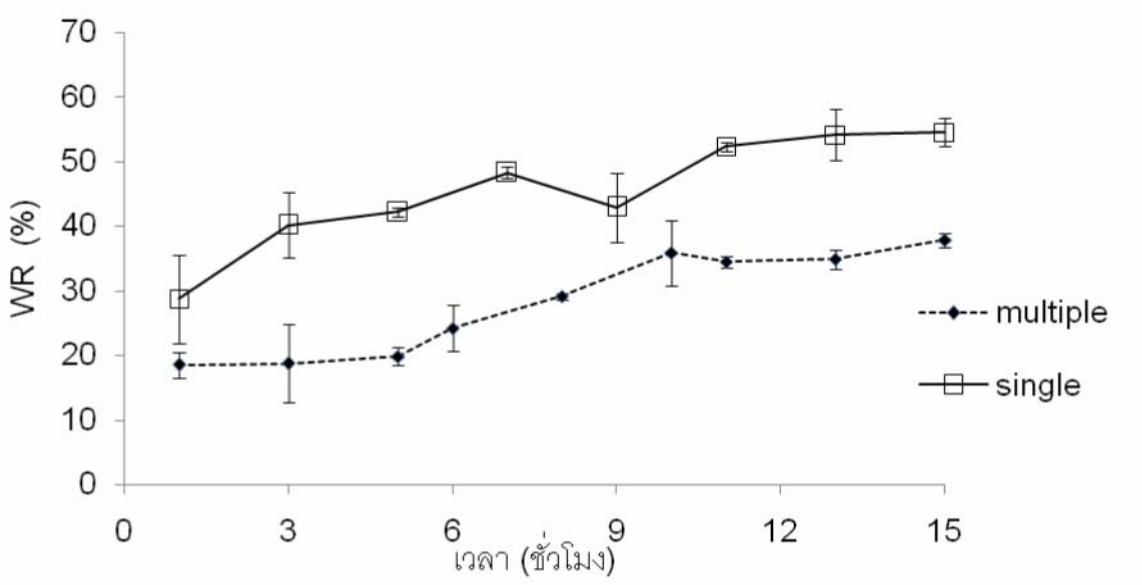
ผลการถ่ายเทมวลสารของมะละกอแช่อิ่มในช่วงการออสโมซิส 15 ชั่วโมง แสดงผลในรูปของค่าการสูญเสียน้ำ (WL) ค่าการเพิ่มขึ้นของของแข็ง (SG) และค่าการลดลงของน้ำหนัก (WR) แสดงดังรูปที่ 3.1, 3.2 และ 3.3



รูปที่ 3.1 ค่าการสูญเสียน้ำของมะละกอในระหว่างการออสโมซิสด้วยวิธีการออสโมซิสแบบ single step และ multiple step



รูปที่ 3.2 ค่าการเพิ่มขึ้นของของแข็งของมะละกอในระหว่างการออสโมซิสด้วยวิธีการออสโมซิสแบบ single step และ multiple step



รูปที่ 3.3 ค่าการลดลงของน้ำหนักของมะละกอในระหว่างการออสโมซิสด้วยวิธีการออสโมซิสแบบ single step และ multiple step

จากรูปที่ 3.1, 3.2 และ 3.3 พบว่า ค่า WL, SG และ WR ของการออสโมซิสแบบ single step และ multiple step มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาในการออสโมซิส การออสโมซิสแบบ single step ทำให้ค่า WL เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 3 ชั่วโมงแรก จากนั้นค่า WL จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และค่อนข้างคงที่ ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่า SG และ WR ขณะที่การออสโมซิสแบบ multiple step ทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำและของแข็งเพิ่มขึ้นเป็นลำดับขั้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกแบบลำดับขั้นระหว่างการออสโมซิส ส่งผลให้แรงดันออสโมติกสูงขึ้นตลอดการออสโมซิส (Torreggiani, 1993)

เมื่อพิจารณาความแตกต่างของค่า WL, SG และ WR จากการออสโมซิสทั้ง 2 แบบ ในช่วงเวลาที่ 1-5 ชั่วโมง และช่วงเวลาที่ 11-15 ชั่วโมง ของการออสโมซิส (ตารางที่ 3.1) พบว่า ค่า WL และ WR ของการออสโมซิสแบบ single step มีค่าสูงกว่าการออสโมซิสแบบ multiple step อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ส่วนค่า SG ของการออสโมซิสแบบ single step ในช่วงเวลาที่ 1-5 ชั่วโมง มีค่าไม่แตกต่างจากการออสโมซิสแบบ multiple step อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แต่ในช่วงเวลาที่ 11-15 ชั่วโมง มีค่าสูงกว่าการออสโมซิสแบบ single step อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 3.1 ค่าการสูญเสียน้ำ ค่าการเพิ่มขึ้นของของแข็ง และค่าการลดลงของน้ำหนักระหว่างการออสโมซิสแบบ single step และ multiple step

ชั่วโมง	WL (%)		SG (%)		WR (%)	
	single	multiple	single	multiple	single	multiple
1	33.38* ± 4.11	24.38 ± 1.50	7.78 ± 3.03	6.63 ± 1.31	28.74 ± 6.81	18.58 ± 1.98
3	50.43* ± 3.53	33.25 ± 4.17	8.99 ± 1.29	10.95 ± 1.91	40.21* ± 5.14	18.79 ± 6.00
5	54.48* ± 0.31	32.96 ± 2.06	11.25 ± 0.53	12.54 ± 1.82	42.20* ± 0.75	19.84 ± 1.35
11	66.13* ± 0.37	56.18 ± 1.41	12.50* ± 2.79	19.40 ± 1.10	53.26* ± 0.70	34.49 ± 0.85
13	66.34* ± 4.54	60.42 ± 1.22	13.42* ± 2.36	21.27 ± 0.90	54.14* ± 3.97	34.89 ± 1.54
15	68.56* ± 2.65	62.38 ± 0.81	14.57* ± 2.36	24.49 ± 1.50	54.58* ± 2.19	37.88 ± 1.05

ตัวเลขที่มีเครื่องหมาย * กำกับแสดงว่าค่า WL, SG หรือ WR ของวิธีการ single step และ multiple step ที่ชั่วโมงเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จากตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่า มะละกอที่ผ่านการออสโมซิสแบบ multiple step มีค่า SG สูงกว่ามะละกอที่ผ่านการออสโมซิสแบบ single step ชี้ให้เห็นว่ามะละกอที่ผ่านการออสโมซิสแบบ multiple step มีปริมาณน้ำตาลที่แทรกผ่านเข้าไปในชิ้นตัวอย่างมากกว่ามะละกอที่ผ่านการออสโมซิสแบบ single step นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า WL ของมะละกอที่ผ่านการออสโมซิสทั้ง 2 แบบ พบว่า มะละกอที่ผ่านการออสโมซิสแบบ single step จะมีค่า WL สูงกว่าตัวอย่างที่ผ่านการออสโมซิสแบบ multiple step เพียงเล็กน้อยเท่านั้น (9%) เนื่องจากตัวอย่างที่มีปริมาณน้ำตาลสูงจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ โดยน้ำตาลในผลิตภัณฑ์มีส่วนช่วยในการป้องกันการสูญเสียของรงควัตถุ และสารระเหยได้ในอาหาร และทำให้โครงสร้างของเนื้อเยื่อมีความคงรูปมากขึ้น (Raoult-Wack, 1994) ดังนั้นจึงเลือกวิธีการออสโมซิสแบบ multiple step ในการทดลองขั้นต่อไป

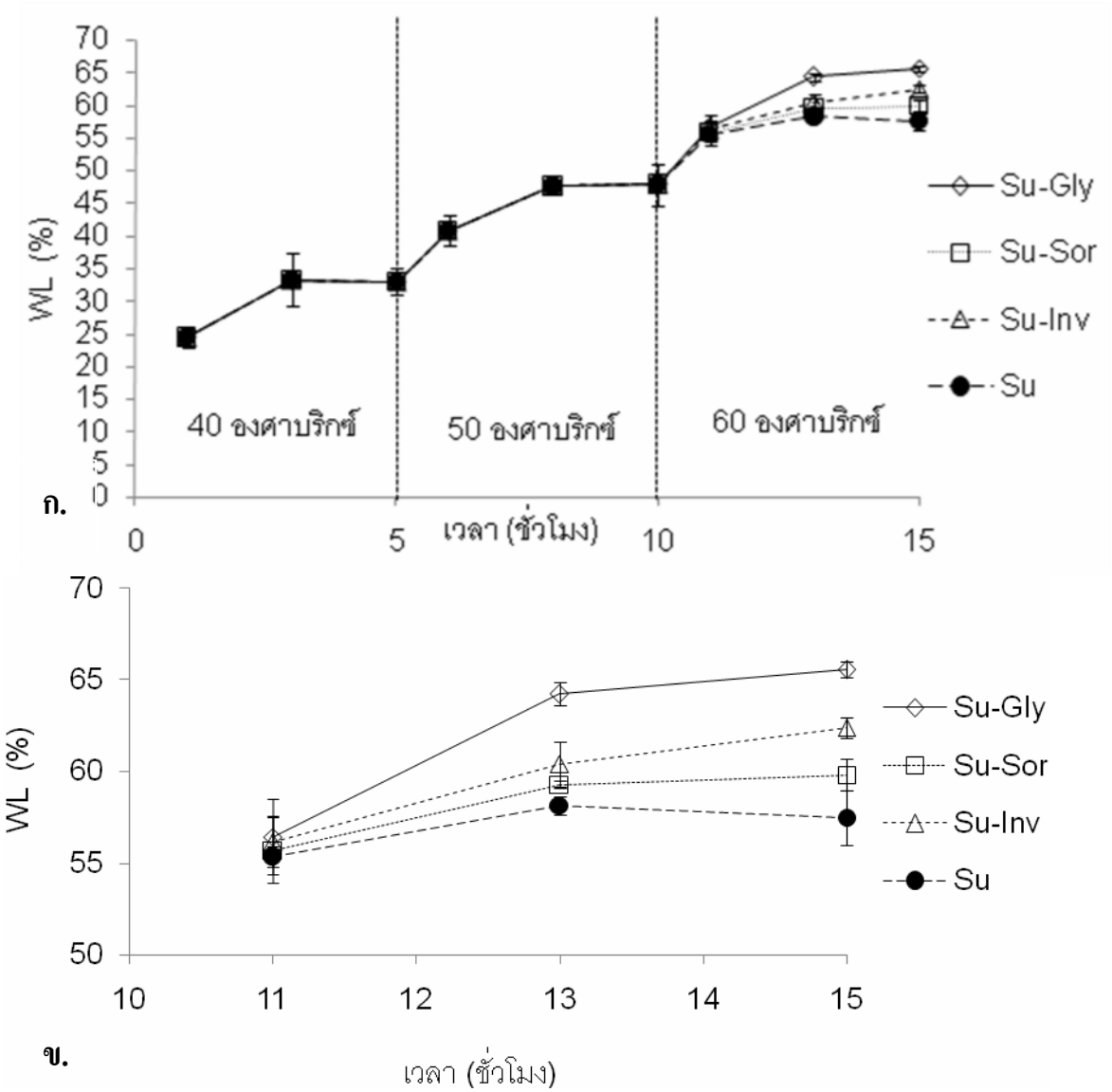
แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า SG ระหว่างการออสโมซิสแบบ multiple step สอดคล้องกับ Korsrilabut และคณะ (2010) ซึ่งรายงานว่าการแทรกตัวของน้ำตาลเข้าสู่ชิ้นผลไม้ระหว่างการออสโมซิสมักใช้เวลานาน จึงมีการใช้วิธีออสโมซิสแบบ stepwise หรือ multiple step โดยการแช่ชิ้นผลไม้ในสารละลาย

ออสโมติกที่ความเข้มข้นสูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งทำให้ค่า SG ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้ในการผลิตผลไม้แช่อิ่มอบแห้งในระดับอุตสาหกรรมของประเทศไทย

3.2 ผลของการการทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอล กลีเซอรอล และน้ำตาลอินเวิร์ตต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิส

การถ่ายเทมวลสารในระหว่างการออสโมซิสจะแสดงในรูปของค่าการสูญเสียน้ำ (WL) ค่าการเพิ่มขึ้นของของแข็ง (SG) และค่าการลดลงของน้ำหนัก (WR)

เมื่อพิจารณาค่า WL ระหว่างการออสโมซิส (รูปที่ 3.4) พบว่า ค่า WL ของมะละกอที่แช่ในสารละลายซูโครสความเข้มข้น 40 องศาบริกซ์ ในช่วง 3 ชั่วโมงแรกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นค่า WL จะเพิ่มขึ้นช้าลงในชั่วโมงที่ 5 และเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายซูโครสเป็น 50 องศาบริกซ์ พบว่า ค่า WL จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงชั่วโมงที่ 8 จากนั้นค่า WL จะเพิ่มขึ้นช้าลงในชั่วโมงที่ 10 และเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายซูโครสเป็น 60 องศาบริกซ์ พบว่า ทุกชุดการทดลองจะมีค่า WL เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงชั่วโมงที่ 13 จากนั้นจะมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ในชั่วโมงที่ 15 เมื่อพิจารณาค่า WL ของทุกชุดการทดลองในชั่วโมงที่ 15 ของการออสโมซิส (ตารางที่ 3.2) พบว่า ทุกชุดการทดลองมีค่า WL มากกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดย Su-Gly มีค่า WL สูงสุด รองลงมาเป็น Su-Inv และ Su-Sor ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยกลีเซอรอล น้ำตาลอินเวิร์ต หรือซอร์บิทอล ทำให้สารละลายออสโมติกมีค่า a_w ต่ำกว่าการใช้ซูโครสเพียงอย่างเดียว (ตารางที่ 3.3) ส่งผลให้ความแตกต่างของแรงดันออสโมติกระหว่างภายในชิ้นตัวอย่างกับสารละลายออสโมติกมีค่าสูง จึงเกิดการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากชิ้นตัวอย่างได้มากกว่าการใช้ซูโครส ผลที่ได้สอดคล้องกับ Pattanapa และคณะ (2010) ซึ่งศึกษาผลการทดแทนสารละลายซูโครสด้วยกลีเซอรอลต่อคุณภาพของส้ม (พันธุ์สายน้ำผึ้ง) แช่อิ่มอบแห้ง โดยแปรอัตราส่วนของสารละลายซูโครส 60% (w/w) และสารละลายกลีเซอรอล 60% (w/w) 5 ระดับ ได้แก่ 9:1, 8:2, 7:3, 6:4 และ 5:5 และพบว่า เมื่ออัตราส่วนของกลีเซอรอลสูงขึ้น ส่งผลให้ค่า WL สูงขึ้น เนื่องจากกลีเซอรอลมีมวลโมเลกุลต่ำกว่าซูโครส เมื่อใช้กลีเซอรอลและซูโครสในปริมาณเท่ากัน โมลของกลีเซอรอลจะมากกว่าโมลของซูโครส ทำให้แรงดันออสโมติกของกลีเซอรอลสูงกว่าซูโครส อย่างไรก็ตามผลที่ได้ไม่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Behsnilian และ Spiess (2006) และงานวิจัยของ Pereira และคณะ (2006) ซึ่งรายงานว่าการใช้สารออสโมติกที่มีมวลโมเลกุลสูงจะทำให้ค่า WL สูง เนื่องจากสารโมเลกุลใหญ่จะเคลื่อนที่เข้าไปในชิ้นตัวอย่างน้อย ส่งผลให้ความแตกต่างของแรงดันออสโมติกยังมีค่าสูงในระหว่างการออสโมซิส และทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากชิ้นผลไม้มากกว่าการใช้สารออสโมติกที่มีมวลโมเลกุลต่ำ โดยทดลองกับแครอทและมะละกอตามลำดับ



รูปที่ 3.4 ค่าการสูญเสียน้ำของมะละกอ ก.) ตลอดการออสโมซิส 15 ชั่วโมง ข.) ชั่วโมงที่ 11-15

ตารางที่ 3.2 ค่าการสูญเสียน้ำ ค่าการเพิ่มขึ้นของของแข็ง ค่าการลดลงของน้ำหนักของมะละกอระหว่างการออสโมซิส

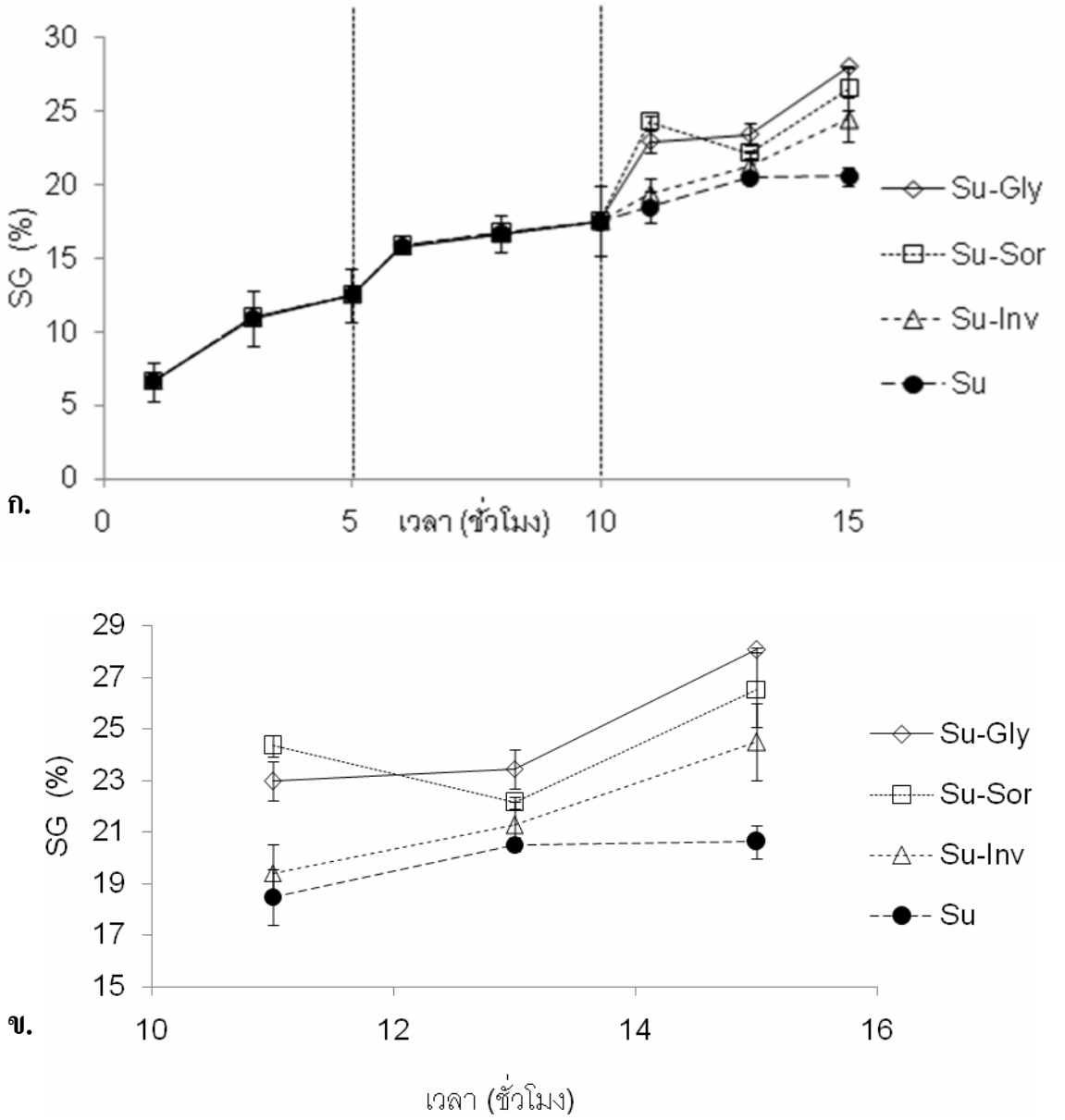
ช่วงการออสโมซิส	ชุดการทดลอง	WL (%)	SG (%)	WR (%)	WL/SG
ชั่วโมงที่ 5 ของการออสโมซิสในสารละลายออสโมติก เข้มข้น 40 องศาบริกซ์	ทุกชุดการทดลอง	32.96 ± 2.06	12.54 ± 1.82	19.84 ± 1.35	2.65 ± 0.24
ชั่วโมงที่ 10 ของการออสโมซิสในสารละลายออสโมติก เข้มข้น 50 องศาบริกซ์	ทุกชุดการทดลอง	47.46 ± 3.13	17.55 ± 2.38	35.92 ± 5.06	2.75 ± 0.30
ชั่วโมงที่ 11 ของการออสโมซิสในสารละลายออสโมติก เข้มข้น 60 องศาบริกซ์	Su	$55.36^{ns} \pm 0.55$	$18.48^{b} \pm 1.07$	$33.59^{ab} \pm 1.60$	$3.00^{a} \pm 0.19$
	Su-Inv	$56.18^{ns} \pm 1.41$	$19.40^{b} \pm 1.10$	$34.49^{a} \pm 0.85$	$2.90^{a} \pm 0.91$
	Su-Sor	$55.71^{ns} \pm 1.79$	$24.33^{a} \pm 0.43$	$30.58^{c} \pm 1.85$	$2.28^{b} \pm 0.14$
	Su-Gly	$56.45^{ns} \pm 2.07$	$22.97^{a} \pm 0.76$	$32.36^{ab} \pm 2.45$	$2.46^{b} \pm 0.17$
ชั่วโมงที่ 13 ของการออสโมซิสในสารละลายออสโมติกเข้มข้น 60 องศาบริกซ์	Su	$58.17^{c} \pm 0.49$	$20.50^{c} \pm 0.27$	$32.92^{c} \pm 0.31$	$2.84^{ns} \pm 0.22$
	Su-Inv	$60.42^{b} \pm 1.22$	$21.27^{bc} \pm 0.90$	$34.89^{ab} \pm 1.54$	$2.84^{ns} \pm 0.11$
	Su-Sor	$59.30^{bc} \pm 0.21$	$22.13^{ab} \pm 0.23$	$34.25^{ab} \pm 0.52$	$2.68^{ns} \pm 0.27$
	Su-Gly	$64.23^{a} \pm 0.62$	$23.44^{a} \pm 0.77$	$37.48^{a} \pm 2.67$	$2.72^{ns} \pm 0.80$
ชั่วโมงที่ 15 ของการออสโมซิสในสารละลายออสโมติกเข้มข้น 60 องศาบริกซ์	Su	$57.50^{d} \pm 1.48$	$20.61^{c} \pm 0.64$	$27.74^{c} \pm 0.92$	$2.84^{a} \pm 0.10$
	Su-Inv	$62.38^{b} \pm 0.81$	$24.49^{b} \pm 1.50$	$37.88^{a} \pm 1.05$	$2.55^{b} \pm 0.12$
	Su-Sor	$59.82^{c} \pm 0.85$	$26.53^{ab} \pm 1.45$	$31.53^{b} \pm 0.49$	$2.26^{c} \pm 0.13$
	Su-Gly	$65.55^{a} \pm 0.43$	$28.06^{a} \pm 0.08$	$39.14^{a} \pm 0.24$	$2.34^{bc} \pm 0.02$

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

ตารางที่ 3.3 ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี ความเป็นกรดด่าง และความหนืดของสารละลายออสโมติกแต่ละชนิดก่อนและหลังการออสโมซิส

ชนิดของสารละลายออสโมติก	ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (°Brix)		ค่าวอเตอร์แอคติวิตี (a_w)		ความเป็นกรดด่าง (pH)		ความหนืด (cP)	
	ก่อนออสโมซิส	หลังออสโมซิส	ก่อนออสโมซิส	หลังออสโมซิส	ก่อนออสโมซิส	หลังออสโมซิส	ก่อนออสโมซิส	หลังออสโมซิส
40 °Brix	40.0 ± 0.0	35.7 ± 0.1	0.951 ± 0.000	0.953 ± 0.000	7.11 ± 0.07	3.76 ± 0.05	9.1 ± 0.0	6.7 ± 0.0
50 °Brix	50.0 ± 0.0	47.8 ± 0.3	0.932 ± 0.000	0.940 ± 0.000	6.83 ± 0.05	4.48 ± 0.07	17.0 ± 0.1	13.1 ± 0.0
Su	60.0 ± 0.0	57.1 ± 0.1	0.891 ± 0.002	0.913 ± 0.002	6.85 ± 0.00	6.12 ± 0.06	35.2 ± 0.1	29.1 ± 0.1
Su-Inv	60.1 ± 0.1	58.0 ± 0.0	0.887 ± 0.000	0.895 ± 0.000	2.58 ± 0.00	2.52 ± 0.09	39.5 ± 0.0	30.2 ± 0.1
Su-Sor	60.0 ± 0.0	58.2 ± 0.0	0.880 ± 0.002	0.890 ± 0.003	6.92 ± 0.00	6.25 ± 0.00	37.2 ± 0.1	29.8 ± 0.0
Su-Gly	62.8 ± 0.2	64.1 ± 0.1	0.785 ± 0.000	0.832 ± 0.005	6.53 ± 0.04	5.23 ± 0.03	107.9 ±	74.1 ± 0.1

จากรูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นว่า ค่า SG ของมะละกอที่แช่ในสารละลายซูโครสความเข้มข้น 40 องศาบริกซ์ ในช่วง 3 ชั่วโมงแรกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นค่อนข้างคงที่ในชั่วโมงที่ 5 และเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายซูโครสเป็น 50 องศาบริกซ์ พบว่า ค่า SG เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในชั่วโมงที่ 6 จากนั้นจะมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่จนถึงชั่วโมงที่ 10 และเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายซูโครสเป็น 60 องศาบริกซ์ พบว่า ทุกชุดการทดลองจะมีค่า SG เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาค่า SG ของทุกชุดการทดลองในชั่วโมงที่ 15 ของการออสโมซิส (ตารางที่ 3.4) พบว่า ทุกชุดการทดลองมีค่า SG ของตัวอย่างสูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดย Su-Gly มีค่า SG สูงสุด รองลงมาเป็น Su-Sor และSu-Inv ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากกลีเซอรอล (มวลโมเลกุล 92.094 กรัม/โมล) ซอร์บิทอล (มวลโมเลกุล 182.17 กรัม/โมล) และน้ำตาลอินเวิร์ต (มวลโมเลกุลของกลูโคสและฟรุกโทส 180.16 กรัม/โมล) มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าซูโครส (มวลโมเลกุล 342.30 กรัม/โมล) จึงเคลื่อนที่เข้าไปในชิ้นผลไม้ได้ง่ายกว่าซูโครส ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับ Behsnilian และ Spiess (2006) ที่ศึกษาผลของชนิดสารละลายออสโมติกต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิสของแครอท โดยแปรสารละลายออสโมติก 4 ชนิด (a_w = 0.91) ได้แก่ ซูโครส กลูโคส ซอร์บิทอล และกลีเซอรอล แช่ตัวอย่างสารละลายออสโมติกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า แครอทที่แช่ในสารละลายกลีเซอรอลมีค่า SG สูงที่สุด รองลงมาเป็นกลูโคส ซอร์บิทอล และซูโครส ตามลำดับ โดยค่า SG มีความสัมพันธ์กับมวลโมเลกุล เนื่องจากสารออสโมติกที่มวลโมเลกุลต่ำมีความสามารถในการแพร่ผ่านเนื้อเยื่อดีกว่าสารออสโมติกที่มีมวลโมเลกุลสูง (Torreggiani, 1993)

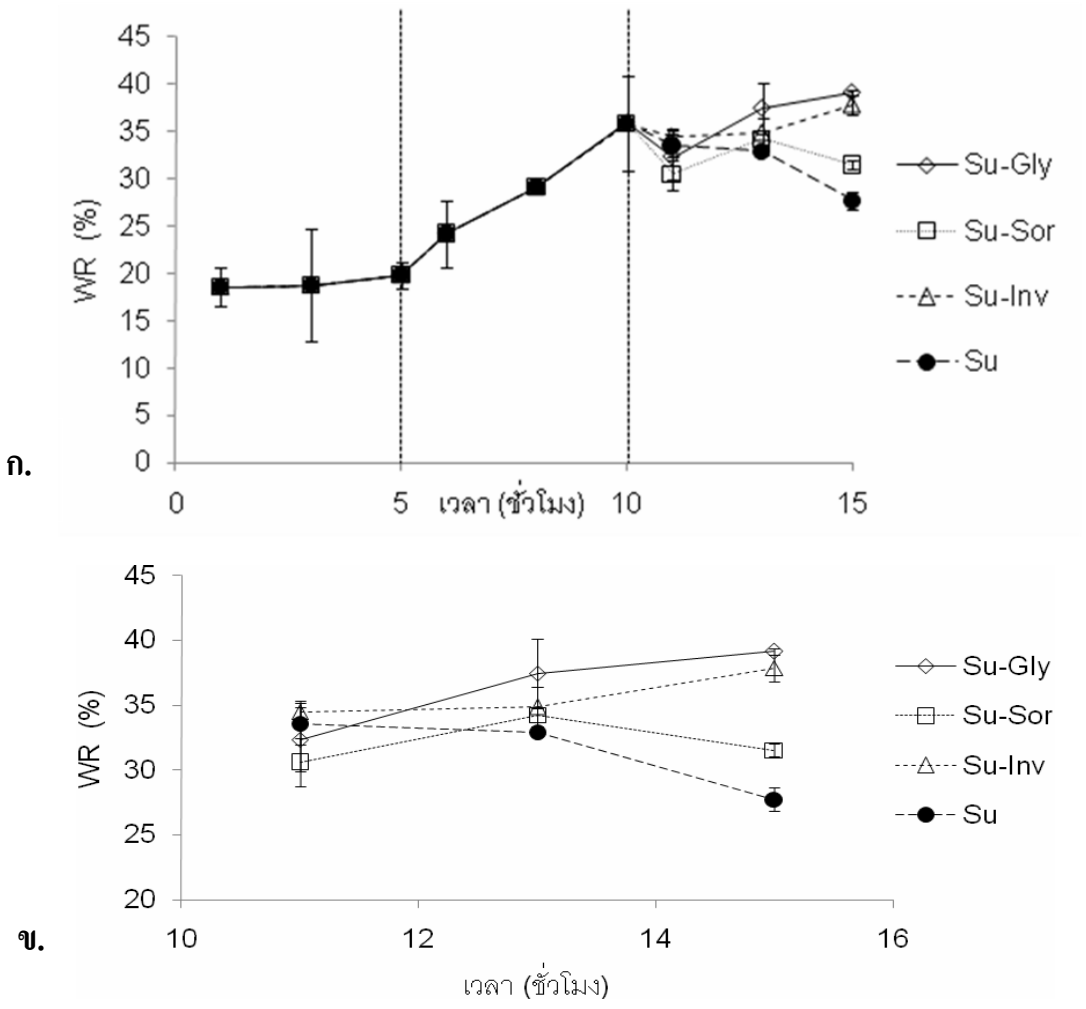


รูปที่ 3.5 ค่าการเพิ่มขึ้นของของแข็งของมะละกอ ก.) ตลอดการออสโมซิส 15 ชั่วโมง ข.) ชั่วโมงที่ 11-15

เมื่อพิจารณาความหนืดของสารละลายออสโมติกแต่ละชนิด (ตารางที่ 3.3) พบว่า สารละลายออสโมติกที่ทดแทนซูโครสบางส่วน (60 องศาบริกซ์) ด้วยกลีเซอรอลมีความหนืดค่อนข้างสูงกว่าสารออสโมติกชนิดอื่น อย่างไรก็ตามผลของการถ่ายเทมวลสารกลับแตกต่างจาก Sritongtae และคณะ (2011) ซึ่งพบว่าตัวอย่างแคนตาลูปที่ทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยกลีเซอรอล 10% (w/v) มีค่า SG ต่ำ แต่มีค่า WL สูง เนื่องจากสารออสโมติกที่มีความหนืดสูงทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำตาลเข้าไปในชิ้นตัวอย่างได้น้อย และทำให้ตัวอย่างมีการสูญเสียน้ำมาก ความแตกต่างของผลการทดลองอาจเกิดจากความแตกต่างของชนิดของชนิดผลไม้ซึ่งมีความเป็นรูพรุน และลักษณะของเนื้อเยื่อที่แตกต่างกัน ส่งผลให้การถ่ายเทมวลสารต่างกันตามไปด้วย (Lazarides, 2001)

จากตารางที่ 3.2 ชี้ให้เห็นว่า ค่า pH ของสารละลายออสโมติกที่ใช้ในชุด Su-Inv มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายออสโมติกชนิดอื่น ซึ่งความเป็นกรดของสารละลายออสโมติกชนิดนี้เกิดจากการเติมกรดซิตริกความเข้มข้น 5% (w/v) เพื่อไฮโดรไลส์ซูโครสให้กลายเป็นกลูโคสและฟรุกโทส (น้ำตาลอินเวิร์ต) กลูโคสและฟรุกโทสเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว และมีมวลโมเลกุลต่ำ ทำให้ Su-Inv มีค่า WL และ SG สูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และเมื่อพิจารณาค่า pH ของสารละลายออสโมติกชนิดอื่น พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 6.53-7.11 ซึ่งสูงกว่าค่า pH ของสารละลายออสโมติกใน Su-Inv ซึ่งเป็นชุดเปรียบเทียบอย่างชัดเจน

เมื่อพิจารณาค่า WR ระหว่างการออสโมซิส (รูปที่ 3.6) พบว่า เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายออสโมติก ค่า WR ของมะละกอจะเพิ่มขึ้นเป็นลำดับขั้น เช่นเดียวกับค่า WL และ SG เมื่อพิจารณาค่า WR ของทุกชุดการทดลองในชั่วโมงที่ 15 ของการออสโมซิส (ตารางที่ 3.2) พบว่า Su-Gly, Su-Sor และ Su-Inv มีค่า WR ของตัวอย่างสูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อาจเนื่องมาจากการที่ตัวอย่างที่มีการทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยสารออสโมติกเหล่านี้มีค่า WL สูงกว่าชุดควบคุม ทำให้น้ำหนักของชุดควบคุมมีการลดลงมากกว่าตัวอย่างที่ทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยสารออสโมติกชนิดอื่น



รูปที่ 3.6 ค่าการลดลงของน้ำหนักของมะละกอ ก.) ตลอดการออสโมซิส 15 ชั่วโมง ข.) ชั่วโมงที่ 11-15

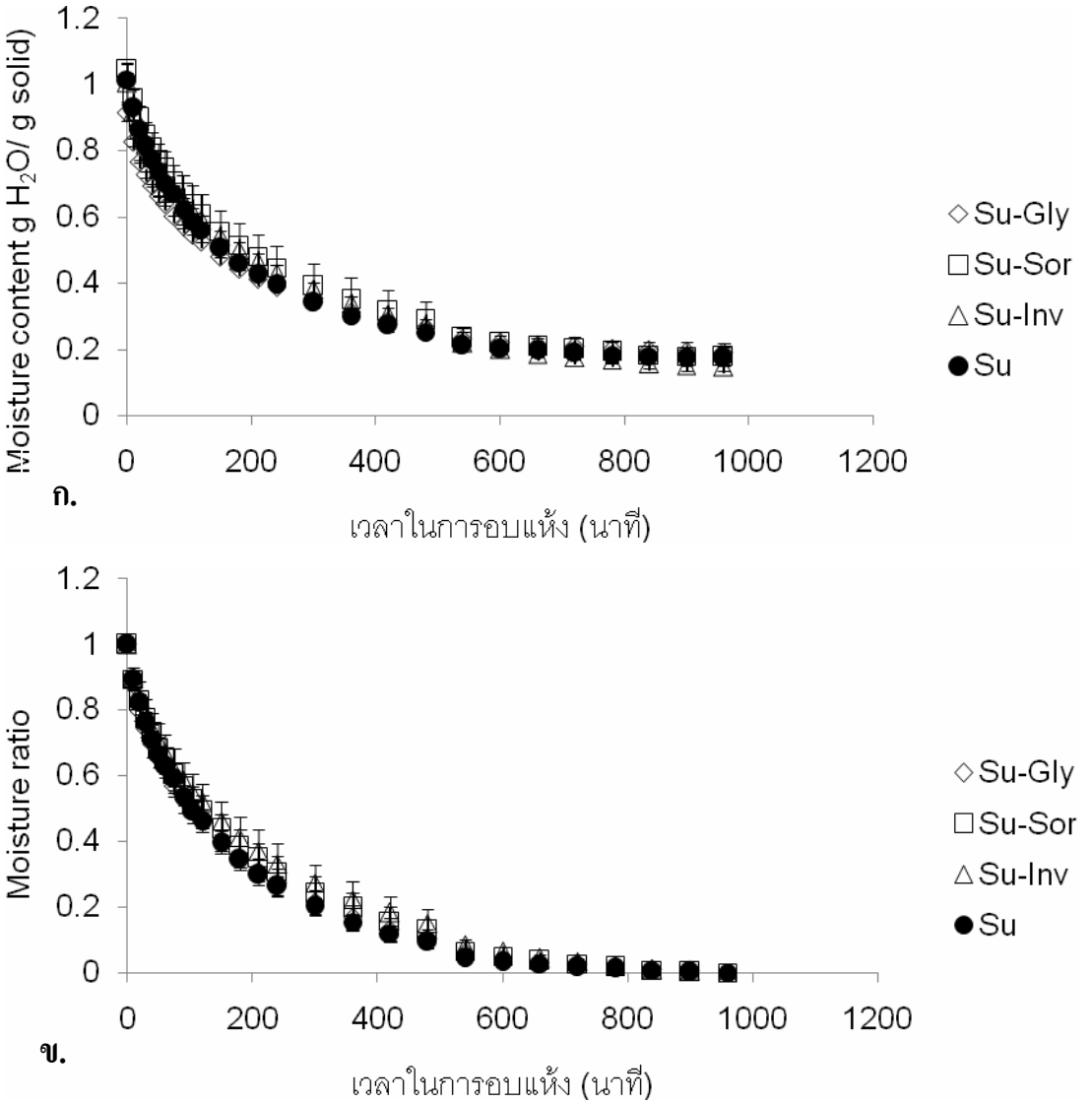
อัตราส่วนของ WL/SG เป็นดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการกำจัดน้ำของสารออสโมติก (dehydration efficiency index) โดยสารออสโมติกที่ทำให้ตัวอย่างมีค่านี้สูง แสดงว่า สารออสโมติกมีความสามารถในการกำจัดน้ำได้ดี แต่มีการเคลื่อนที่ของน้ำตาลเข้าไปในชิ้นผลไม้น้อย (Lazarides, 2001) เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของ WL/SG ในทุกชุดการทดลองในชั่วโมงที่ 15 ของการออสโมซิส (ตารางที่ 3.2) พบว่าชุดควบคุมมีอัตราส่วนของ WL/SG สูงสุด รองลงมาเป็น Su-Inv, Su-Gly และ Su-Sor ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้ซูโครสเพียงชนิดเดียวมีความสามารถในการกำจัดน้ำดีที่สุด อย่างไรก็ตามในการเลือกใช้สารออสโมติกต้องพิจารณาคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายและการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บควบคู่ไปด้วย

จากผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า ชนิดของสารละลายออสโมติกมีผลต่อการถ่ายเทมวลสารของมะละกอในระหว่างการออสโมซิส

3.4 ผลของการทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอล กลีเซอรอล และน้ำตาลอินเวิร์ตต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

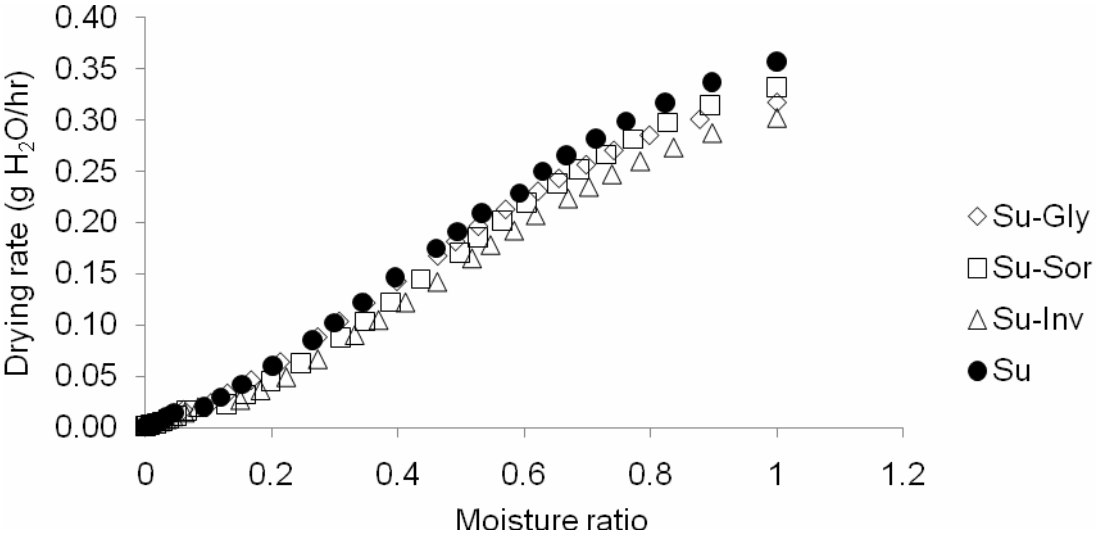
จากกราฟการอบแห้ง (รูปที่ 3.7 ก) แสดงให้เห็นว่า เมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น ปริมาณความชื้นของตัวอย่างในทุกชุดการทดลองจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 3 ชั่วโมงแรก (ลดลงประมาณ 73%) แล้วค่อย ๆ ลดลงจนมีค่าคงที่ในช่วงท้ายของการอบแห้ง เนื่องจากตัวอย่างมีการสูญเสียน้ำที่แตกต่างกันระหว่างการออสโมซิส ทำให้ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างในแต่ละชุดการทดลองไม่เท่ากัน โดยชุดควบคุม Su-Inv, Su-Sor และ Su-Gly มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 1.02, 1.01, 1.05 และ 0.91 g H_2O/g solid ตามลำดับ ส่งผลให้ไม่สามารถเปรียบเทียบการลดลงของปริมาณความชื้นในแต่ละชุดการทดลองได้ ดังนั้นจึงต้องคำนวณปริมาณความชื้นของตัวอย่างในรูปของอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, *MR*) เพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากัน (รูปที่ 3.7 ข)

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้น (รูปที่ 3.8) พบว่าในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งหรือช่วงที่ตัวอย่างมีปริมาณความชื้นสูง อัตราการอบแห้งของชุดควบคุมสูงกว่า Su-Sor, Su-Gly และ Su-Inv ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในช่วงท้ายของการอบแห้งหรือช่วงที่ตัวอย่างมีความชื้นต่ำ (< 0.3 g H_2O/g solid) อัตราการอบแห้งของทุกชุดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ผลที่ได้สอดคล้องกับ Sritongtae และคณะ (2011) ซึ่งศึกษาผลของการทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอลและกลีเซอรอลต่อการอบแห้งแคนตาลูปแช่อิ่ม และพบว่า ตัวอย่างที่ทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์มีอัตราการอบแห้งต่ำกว่าตัวอย่างที่ใช้ซูโครสเพียงอย่างเดียว เนื่องจากพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์มีความสามารถในการจับน้ำได้ดีกว่าซูโครส ทำให้การระเหยของน้ำระหว่างการอบแห้งทำได้ยากกว่า



รูปที่ 3.7 กราฟการอบแห้งของมะละกอแช่อิ่มที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายออสโมติกชนิดต่าง ๆ ก.) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและเวลาในการอบแห้งของมะละกอแช่อิ่ม ข.) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาในการอบแห้งของมะละกอแช่อิ่ม

Riva และคณะ (2005) ศึกษาผลของชนิดสารละลายออสโมติกต่อการอบแห้งแอปริคอท พบว่า ตัวอย่างที่ใช้ซูโครสมีอัตราการอบแห้งต่ำกว่าชุดการทดลองที่ใช้ซอร์บิทอล เนื่องจากซูโครสมีมวลโมเลกุลสูง จึงแพร่เข้าไปในชิ้นตัวอย่างเฉพาะบริเวณผิวหน้า ทำให้เกิดการตกผลึกของน้ำตาลที่ผิวหน้าของตัวอย่างระหว่างการอบแห้ง โดยชั้นน้ำตาลที่เกิดขึ้นอาจขัดขวางการระเหยของน้ำระหว่างการอบแห้ง ผลการทดลองเป็นไปในแนวทางเดียวกับ ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์, ชาตรี มั่นกลาง และ พีรยา โชติถนอม (2552) ซึ่งพบว่า ชุดการทดลองที่ใช้ซอร์บิทอลซึ่งมีมวลโมเลกุลขนาดเล็ก มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าซูโครส ความแตกต่างของผลการทดลองอาจเนื่องมาจากในงานวิจัยนี้ใช้พอลิไฮดริกแอลกอฮอล์แทนซูโครสทั้งหมด ส่งผลให้ผลของสารออสโมติกต่ออัตราการอบแห้งมีแนวโน้มแตกต่างกัน



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นของมะละกอแช่อิ่มที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายออสโมติกชนิดต่าง ๆ

เนื่องจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นของมะละกอแช่อิ่ม (รูปที่ 3.8) มีลักษณะแบบ exponential จึงใช้สมการ exponential อย่างง่ายในการทำนายพฤติกรรมการอบแห้ง และคำนวณค่าคงที่การอบแห้ง (ค่าคงที่ k) จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln*MR* กับเวลาการอบแห้ง พบว่า ชุดควบคุมมีค่าคงที่การอบแห้งสูงสุด รองลงมาเป็น Su-Sor, Su-Gly และ Su-Inv ตามลำดับ (ตารางที่ 3.4) ทั้งนี้อาจเนื่องจากพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์และน้ำตาลอินเวิร์ตมีความสามารถในการจับน้ำได้ดีกว่าซูโครส ทำให้การระเหยของน้ำออกจากผลิตภัณฑ์เกิดได้ช้ากว่า (Sritongtae *et al*., 2011) ในการทดลองนี้ค่าคงที่การอบแห้งที่ได้เกิดจากการทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์และน้ำตาลอินเวิร์ต ส่งผลให้ อัตราการอบแห้งของตัวอย่างที่มีการทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์แตกต่างจากตัวอย่างที่ใช้พอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ทดแทนซูโครสทั้งหมด

ตารางที่ 3.4 ค่าคงที่การอบแห้งที่ได้จากการอบแห้ง (60 องศาเซลเซียส) ของมะละกอที่ผ่านการออสโมซิส

ชุดการทดลอง	ค่าคงที่ k (h^{-1})	R^2
Su	0.357	0.963
Su-Sor	0.332	0.954
Su-Gly	0.318	0.988
Su-Inv	0.302	0.966

เมื่อพิจารณาความเหมาะสมของการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 3 ชนิด ได้แก่ แบบจำลองของ Page, Henderson and Pabis และ Modified Henderson and Pabis เพื่อทำนายพฤติกรรมการอบแห้ง พบว่า แบบจำลอง Modified Henderson and Pabis มีความเหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งได้ดีที่สุด รองลงมาเป็นแบบจำลองของ Page และแบบจำลองของ Henderson and Pabis ตามลำดับ (ตารางที่ 3.5) ทั้งนี้เนื่องจากค่า r ของแบบจำลองชนิดนี้มีค่าสูงสุด ขณะที่ค่า *RMSE* และ *MRS* มีค่าต่ำที่สุด สาเหตุที่แบบจำลอง Modified Henderson and Pabis มีความเหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งของมะละกอแช่อิ่มมากที่สุด เนื่องจากแบบจำลองประเภทนี้มีการทำนายลักษณะของผลิตภัณฑ์ในแต่ละชั้นที่แตกต่างกัน โดยภายนอกมีลักษณะแห้ง ขณะที่ภายในยังมีลักษณะชุ่มน้ำ (จิราพร กอศรีลบุตร, 2549) อย่างไรก็ตามแบบจำลอง Modified Henderson and Pabis เหมาะสมกับการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งของมะละกอแช่อิ่มทั้งสี่ชุดการทดลอง เมื่ออบแห้งตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเท่านั้น เนื่องจากการที่ตัวอย่างมีอุณหภูมิสม่ำเสมอระหว่างการอบแห้งเป็นสมมุติฐานของการอบแห้งชั้นบาง ซึ่งเป็นพื้นฐานของการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ในการทำนายพฤติกรรมการอบแห้ง

พงษ์พิสุทธิ์ คุณะวันทนิต (2553) ศึกษาผลของน้ำผึ้งและน้ำสับปะรดต่อการอบแห้งของบีตรูตแช่อิ่ม พบว่า แบบจำลอง Modified Henderson and Pabis มีความเหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับแบบจำลองของ Page และ Henderson and Pabis ผลที่ได้เป็นไปในแนวทางเดียวกับ Korsrilabut และคณะ (2010) ที่ศึกษาผลของน้ำตาลอินเวิร์ตต่อจลนพลศาสตร์ในการอบแห้งแคนตาลูปแช่อิ่ม โดยเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 6 ชนิด (Page, Modified Page, Henderson and-Pabis, Modified Henderson and Pabis, Two-term exponential และ Verma) พบว่า แบบจำลอง Modified Henderson and Pabis มีความเหมาะสมที่สุด ในการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งของแคนตาลูปแช่อิ่มในทุกชุดการทดลอง

ตารางที่ 3.5 ค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของมะละกอแช่อิ่มแต่ละชุดการทดลอง

ชุดการทดลอง	ค่าสัมประสิทธิ์	Page	Henderson and Pabis	Modified Henderson and Pabis
Su	k	0.4508	0.3345	0.2887
	n	0.8092	-	-
	a	-	0.9222	0.8204
	b	-	-	0.0888
	g	-	-	2.4166
	c	-	-	0.0888
	h	-	-	2.4166
	MRS	1.45×10^{-4}	6.10×10^{-4}	5.38×10^{-5}
	RMSE	1.11×10^{-2}	2.42×10^{-2}	7.20×10^{-3}
	r	0.9994	0.9970	0.9997

ตารางที่ 3.5 (ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของมะละกอแช่อิ่มแต่ละชุดการทดลอง

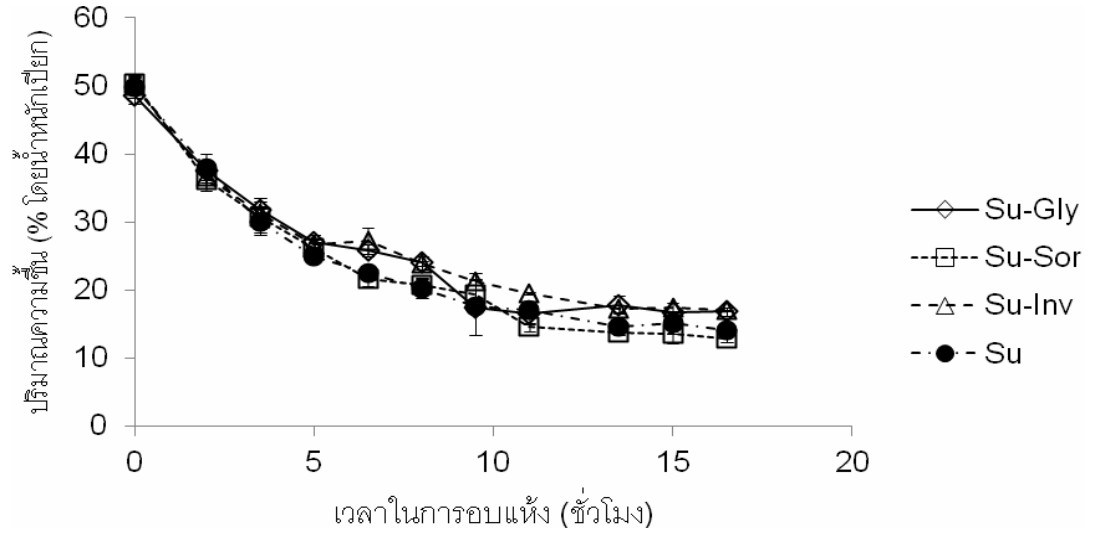
ชุดการทดลอง	ค่าสัมประสิทธิ์	Page	Henderson and Pabis	Modified Henderson and Pabis
Su-Sor	k	0.4133	0.2860	0.2511
	n	0.7926	-	-
	a	-	0.9097	0.8251
	b	-	-	0.0864
	g	-	-	2.8131
	c	-	-	0.0864
	h	-	-	2.8131
	MRS	3.31× 10-4	7.90 × 10-4	1.25 × 10-4
	RMSE	1.78 × 10-2	2.75 × 10-2	1.09 × 10-2
	r	0.9985	0.9960	0.9993
Su-Gly	k	0.4711	0.3189	0.2707
	n	0.7628	-	-
	a	-	0.8973	0.7947
	b	-	-	0.1011
	g	-	-	2.9518
	c	-	-	0.1011
	h	-	-	2.9518
	MRS	2.06×10^{-4}	9.02×10^{-4}	5.23×10^{-5}
	RMSE	1.41×10^{-2}	2.95×10^{-2}	7.10×10^{-3}
	r	0.9990	0.9954	0.9997
Su-Inv	k	0.3882	0.2639	0.2340
	n	0.7932	-	-
	a	-	0.9092	0.8314
	b	-	-	0.0833
	g	-	-	2.8212
	c	-	-	0.0833
	h	-	-	2.8212
	MRS	4.08×10^{-4}	8.24×10^{-4}	1.66×10^{-4}
	RMSE	1.98×10^{-2}	2.81×10^{-2}	1.26×10^{-2}
	r	0.9981	0.9958	0.9992

3.5 ผลของการทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอล กลีเซอรอล และน้ำตาลอินเวิร์ตต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้ง

สุ่มตัวอย่างทุกชุดการทดลองระหว่างการอบแห้ง โดยใช้ข้อมูลจากกราฟการอบแห้งที่ได้ในขั้นตอนที่ 2.4 เพื่อวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ค่า a_w ค่าสีของตัวอย่าง และการหดตัวของตัวอย่างหลังการอบแห้งโดยเปรียบเทียบกับปริมาตรของตัวอย่างก่อนอบแห้ง ได้ผลการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้งดังนี้

3.5.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้ง

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นระหว่างการอบแห้ง (รูปที่ 3.9) พบว่าตัวอย่างในทุกชุดการทดลองมีปริมาณความชื้นลดลงตามระยะเวลาการอบแห้ง โดยในช่วงแรกของการอบแห้งปริมาณความชื้นของตัวอย่างลดลงอย่างรวดเร็ว จากนั้นความชื้นของตัวอย่างจะลดในอัตราที่ช้าลงในช่วงหลังจนกระทั่งคงที่ เนื่องจากในช่วงแรกของการอบแห้งเกิดการระเหยของน้ำที่บริเวณผิวของตัวอย่างได้ดี แต่เมื่อเวลาผ่านไปน้ำภายในตัวอย่างอาจเคลื่อนที่มายังผิวหน้าของตัวอย่างช้าลง ทำให้เกิดการระเหยของน้ำได้ช้าลง การลดลงของปริมาณความชื้นในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง (ตารางที่ 3.6) พบว่าปริมาณความชื้นของ Su-Inv และ Su-Gly มากกว่าชุดควบคุม อาจเนื่องจากความสามารถของน้ำตาลอินเวิร์ตและกลีเซอรอลในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำที่ดีกว่าซูโครส ทำให้เมื่ออบแห้งที่เวลาเท่ากันเกิดการระเหยน้ำออกจากตัวอย่างได้น้อยกว่า อย่างไรก็ตามหลังผ่านการอบแห้ง 16.5 ชั่วโมง พบว่า Su-Sor มีปริมาณความชื้นใกล้เคียงกับชุดควบคุมและต่ำกว่า Su-Gly และ Su-Inv ซึ่งอาจเกิดจากค่าคงที่การอบแห้งของ Su-Sor และชุดควบคุมมีค่าใกล้เคียงกันและมากกว่า Su-Gly และ Su-Inv (ตารางที่ 3.4) ทำให้เกิดการระเหยของน้ำได้มากกว่าที่เวลาการอบแห้งนานขึ้น



รูปที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของมะละกอแช่อิ่มระหว่างการอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส

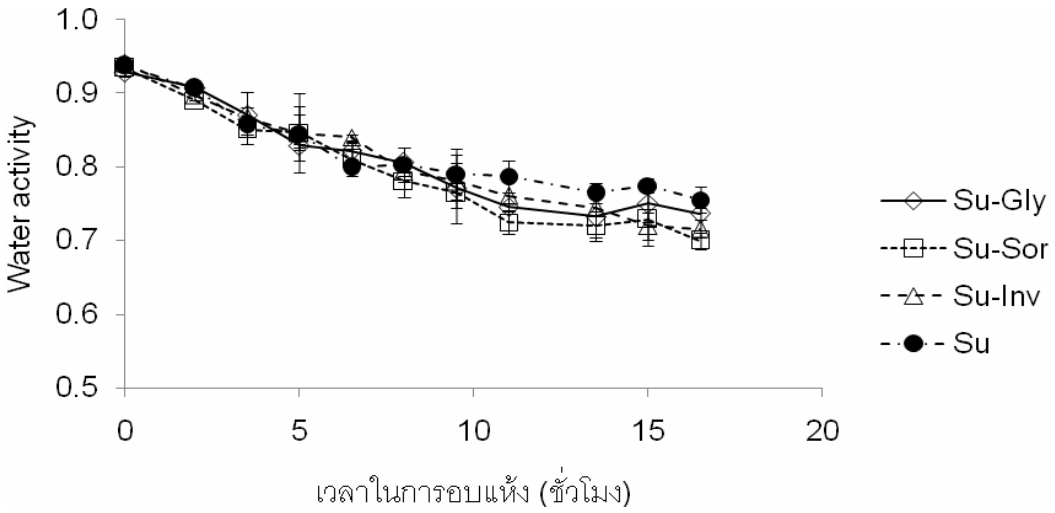
ตารางที่ 3.6 ปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอคทิวิตีของมะละกอแช่อิ่มหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16.5 ชั่วโมง

ชุดการทดลอง	ปริมาณความชื้น (% โดยน้ำหนักเปียก)	ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี
Su	$14.04^{ab} \pm 0.55$	$0.756^{a} \pm 0.018$
Su-Inv	$17.01^{a} \pm 0.14$	$0.716^{bc} \pm 0.012$
Su-Sor	$12.90^{b} \pm 0.55$	$0.700^{c} \pm 0.011$
Su-Gly	$16.85^{a} \pm 0.64$	$0.737^{ab} \pm 0.007$

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

3.5.2 การเปลี่ยนแปลงค่าวอเตอร์แอคทิวิตีของผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้ง

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า a_w ระหว่างการอบแห้ง (รูปที่ 3.10) พบว่าแนวโน้มการลดลงของค่า a_w ในทุกชุดการทดลองคล้ายกับการลดลงของปริมาณความชื้น โดย Su-Inv, Su-Gly และ Su-Sor มีการลดลงของค่า a_w สูงกว่าชุดควบคุม (ลดลงประมาณ 20%-24% ในช่วงเวลา 16.5 ชั่วโมง) ค่า a_w ของ Su-Inv, Su-Gly และ Su-Sor ต่ำกว่าชุดควบคุมหลังการอบแห้งเป็นเวลา 16.5 ชั่วโมง (ตารางที่ 3.6) เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของน้ำตาลอินเวิร์ตและพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์มีอัตราส่วนระหว่างจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล (OH) และคาร์บอน (C) มากกว่าซูโครส โดยกลีเซอรอลและซอร์บิทอลมีอัตราส่วนระหว่าง OH:C เป็น 1:1 น้ำตาลอินเวิร์ตมีอัตราส่วนระหว่าง OH:C เท่ากับ 0.83:1 และซูโครสมีอัตราส่วน OH:C เท่ากับ 0.67:1 ทำให้สารออสโมติกเหล่านี้มีส่วนชอบน้ำ(hydrophilic) มากกว่าซูโครส จึงมีความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ดีกว่า ส่งผลให้ค่า a_w ของตัวอย่างลดลงมากกว่าการใช้ซูโครสเพียงชนิดเดียว (Sagiv and Marcus, 2003)



รูปที่ 3.10 การเปลี่ยนแปลงวอเตอร์แอคทิวิตีของมะละกอแช่อิ่มระหว่างการอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส

บูรฉัตร ศรีทองแท้ (2551) พบว่า ตัวอย่างแคนตาลูปแช่อิ่มที่ทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอล 10% (w/v) และตัวอย่างที่ทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยกลีเซอรอล 10% (w/v) ซึ่งอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสจนปริมาณความชื้นคงที่ มีค่า a_w ต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการทดแทนน้ำตาลซูโครสอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์มีความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ดีกว่าซูโครส ส่งผลให้ความสามารถของน้ำในการทำปฏิกิริยาเคมีลดลง ค่า a_w จึงลดลง

3.5.3 การเปลี่ยนแปลงค่าสีของผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้ง

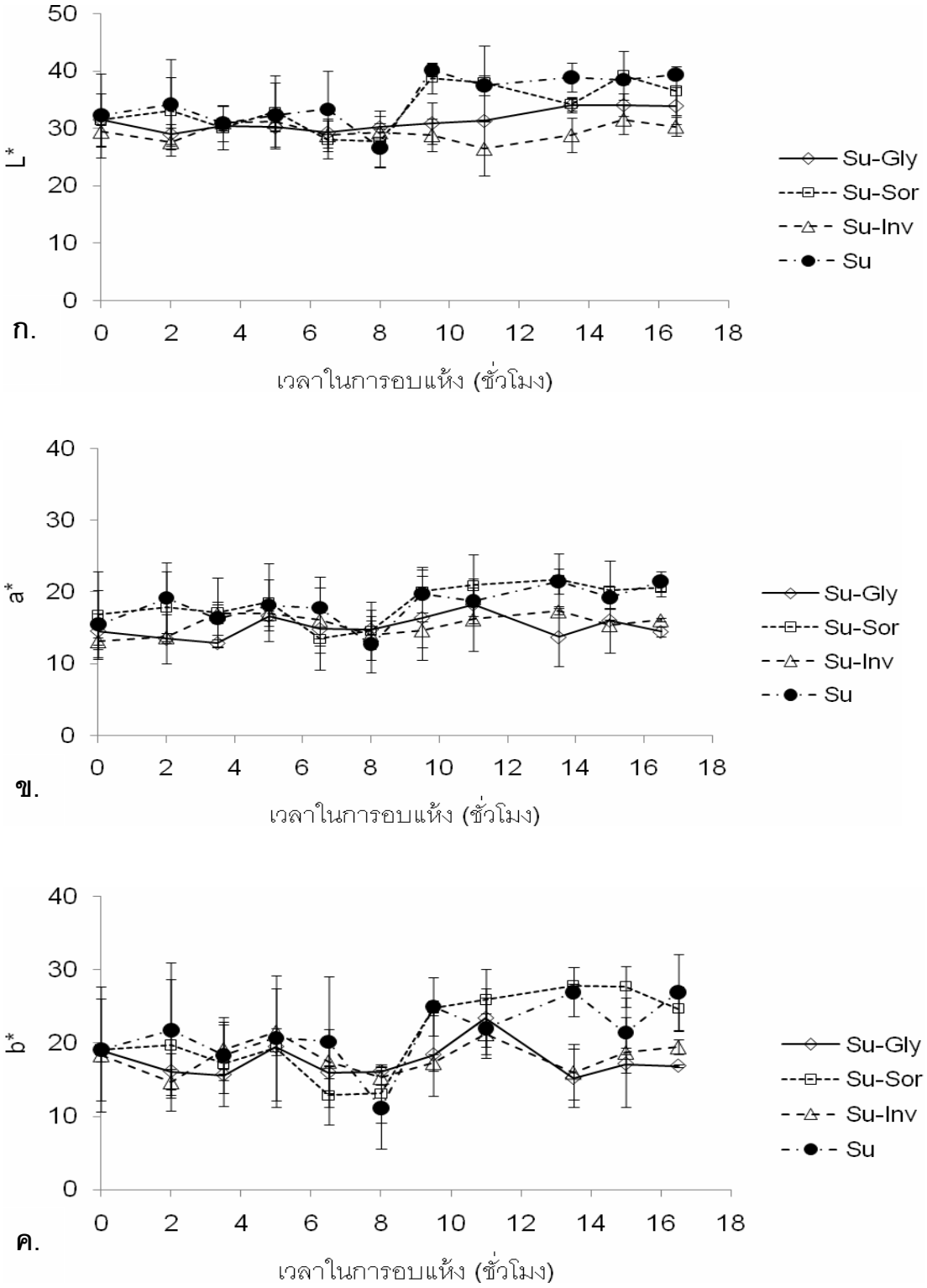
จากรูปที่ 3.11 พบว่า ในช่วงการอบแห้งนั้น มะละกอแช่อิ่มทุกชุดการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงค่า L* ระหว่าง 27-39 ค่า a* ระหว่าง 12-21 และค่า b* ระหว่าง 11-27 ตามลำดับ เนื่องจากการอบแห้งมีผลต่อปริมาณความชื้นและลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ ทำให้มีผลต่อค่าสีที่วัดได้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า chroma และ hue angle ของผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้ง (รูปที่ 3.12) พบว่า ตัวอย่างแต่ละชุดการทดลองมีค่า chroma ค่อนข้างแตกต่างกัน นั่นคือตัวอย่างมีความเข้มข้นสีต่างกัน โดยชุดควบคุมและ Su-Sor มีการกระจายของค่า chroma ในระหว่างการอบแห้งมากกว่า Su-Gly และ Su-Inv ขณะที่ค่า hue angle ของตัวอย่างอยู่ในช่วงเฉดสีแดง โดยตัวอย่างแต่ละชุดการทดลองมีเฉดสีใกล้เคียงกัน

3.5.4 การหดตัวของผลิตภัณฑ์จากการอบแห้ง

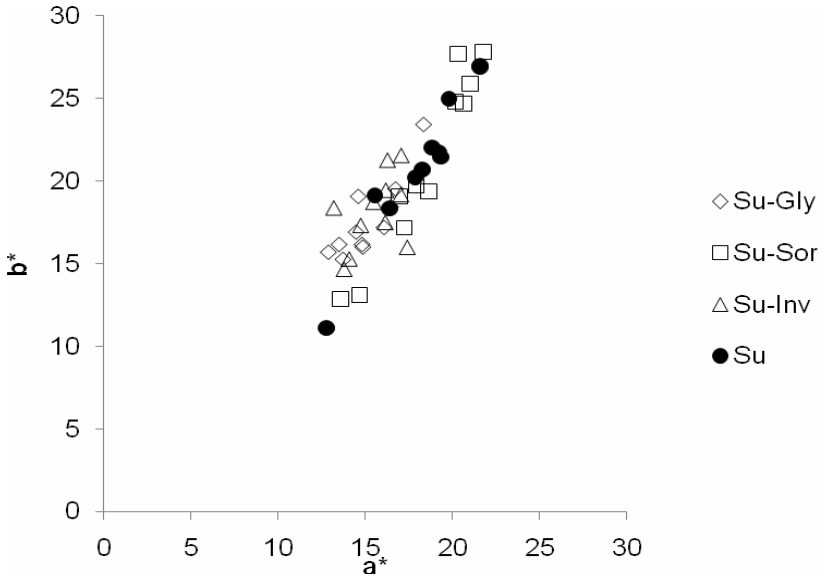
ในการทดลองนี้ใช้หลักการแทนที่ด้วย n-heptane เพื่อคำนวณปริมาตรของผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังการอบแห้ง (16.5 ชั่วโมง) ในแต่ละชุดการทดลอง และนำปริมาตรที่ได้ไปคำนวณค่าการหดตัวของผลิตภัณฑ์ เนื่องจาก n-heptane ไม่ทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบของตัวอย่าง และมีความหนาแน่นต่ำ จึงใช้ในการวัดการแทนที่ได้ดี จากตารางที่ 3.7 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่มีการทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอล กลีเซอรอล หรือน้ำตาลอินเวิร์ต มีค่าการหดตัวใกล้เคียงกัน และมีค่าต่ำกว่าชุดควบคุม ทั้งนี้อาจเกิดจากการที่ชุดการทดลองดังกล่าวมีค่า SG สูงกว่าชุดควบคุม (ตารางที่ 3.2) ซึ่งหมายถึงมีปริมาณน้ำตาลแทรกเข้าไปในเซลล์ของผลิตภัณฑ์สูง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่มีการทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอล กลีเซอรอล หรือน้ำตาลอินเวิร์ตมีความคงรูปที่ดี จึงมีการหดตัวน้อยในระหว่างการอบแห้งเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

ตารางที่ 3.7 การหดตัวของผลิตภัณฑ์จากการอบแห้งเป็นเวลา 16.5 ชั่วโมง

ชุดการทดลอง	การหดตัว (%)
Su	46.91 ± 1.83
Su-Inv	41.73 ± 1.65
Su-Sor	41.45 ± 1.91
Su-Gly	41.23 ± 0.20



รูปที่ 3.11 การเปลี่ยนแปลงค่าสีมะละกอระหว่างอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส ก.) L* ข.) a* ค.) b*



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า a* และ b* ของมะละกอแช่อิ่มระหว่างการอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส

3.6. ผลของการทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอล กลีเซอรอล และน้ำตาลอินเวิร์ตต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้ง

คุณภาพของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งทั้งสี่ชุดการทดลองซึ่งมีปริมาณความชื้นประมาณ 16% (โดยน้ำหนักเปียก) ในด้านต่าง ๆ มีดังนี้

3.6.1 ปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอคทิวิตีของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้ง

จากตารางที่ 3.8 พบว่า ผลิตภัณฑ์ทุกชุดการทดลองมีปริมาณความชื้นหลังการอบแห้งประมาณ 16% (โดยน้ำหนักเปียก) และเมื่อเปรียบเทียบค่า a_w ของผลิตภัณฑ์แต่ละชุดการทดลอง พบว่า Su-Inv และ Su-Gly มีค่า a_w ต่ำกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากน้ำตาลอินเวิร์ตและกลีเซอรอลมีความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้ดีกว่าซูโครส ส่งผลให้ความสามารถของน้ำในการทำปฏิกิริยาลดลง ค่า a_w ของตัวอย่างจึงลดลง ในขณะที่ชุดควบคุมและ Su-Sor มีค่า a_w ค่อนข้างสูง (มากกว่า 0.75) ซึ่งจะส่งผลต่ออายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ที่อาจมีการเสื่อมเสียเนื่องจากเชื้อราได้ง่าย

ตารางที่ 3.8 ปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอคทิวิตีของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้ง

ชุดการทดลอง	ปริมาณความชื้น^{ns} (% โดยน้ำหนักเปียก)	ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี
Su	15.93 ± 0.29	0.781^{a} ± 0.016
Su-Inv	16.72 ± 1.08	0.693^{b} ± 0.009
Su-Sor	16.23 ± 1.12	0.761^{a} ± 0.018
Su-Gly	15.76 ± 0.25	0.696^{b} ± 0.022

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

ns ข้อมูลไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

3.6.2 ความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้ง

จากตารางที่ 3.9 พบว่า ผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งทุกชุดการทดลองมีค่า spin-lattice relaxation time (^{1}H NMR T_1) ต่ำกว่าตัวอย่างมะละกอหลังการออสโมซิสอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$) โดยตัวอย่างที่มีค่า ^{1}H NMR T_1 สูงแสดงว่าน้ำในผลิตภัณฑ์ตัวอย่างมีความเป็นอิสระในการเคลื่อนที่ได้ดีขณะที่ตัวอย่างที่มีค่า ^{1}H NMR T_1 ต่ำแสดงว่าน้ำในผลิตภัณฑ์ตัวอย่างมีความเป็นอิสระในการเคลื่อนที่ได้น้อย เมื่อให้สนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงของคลื่นความถี่วิทยุ จะทำให้นิวเคลียสในระดับพลังงานต่ำเกิดการ spinning ไปอยู่ในระดับพลังงานสูง ดังนั้นโปรตอนของน้ำจะเกิดการเคลื่อนที่สู่ระดับพลังงานที่แตกต่างกัน จากนั้นเมื่อหยุดการให้สนามแม่เหล็ก ระบบจะเกิดการผ่อนคลาย โปรตอนของน้ำจะเกิดการคายพลังงานกลับสู่ภาวะสมดุล หากโมเลกุลอื่นอยู่ห่างไกลจากโปรตอนของน้ำ การคายพลังงานของโปรตอนเพื่อกลับสู่ภาวะสมดุลจะเกิดขึ้นได้ช้ากว่า ทำให้ใช้เวลานานกว่าในการกลับสู่สภาวะปกติ (ธนจันทร์ มหาวนิช, 2554) ซึ่งการที่ผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งมีค่า^{1}H NMR T_1 ลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างหลังออสโมซิส เกิดจากการอบแห้งทำให้ปริมาณน้ำอิสระในผลิตภัณฑ์ลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในผลิตภัณฑ์ต่ำลง ดังนั้นปริมาณน้ำอิสระสำหรับการทำปฏิกิริยาเคมี และการนำไปใช้ของจุลินทรีย์ลดลง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เก็บไว้ได้นานขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบค่า^{1}H NMR T_1 ของตัวอย่างหลังการออสโมซิสแต่ละชุดการทดลอง (ตารางที่ 3.9) พบว่าชุดควบคุมมีค่า ^{1}H NMR T_1 สูงกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$) โดยอาจมีสาเหตุมาจากการที่ชุดควบคุม (Su) มีปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (SG) ต่ำกว่าชุดอื่น ๆ นอกจากนี้ซูโครสมีความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำน้อยกว่าน้ำตาลอินเวิร์ตและพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ทั้งสองชนิด การที่ชุดควบคุมมีค่า ^{1}H NMR T_1 สูงสอดคล้องกับค่าคงที่การอบแห้งที่มีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่น (ตารางที่ 3.4) โดยที่ชุดควบคุมมีการระเหยน้ำอย่างรวดเร็วในระหว่างการอบแห้ง

ภายหลังการอบแห้ง (ตารางที่ 3.9) พบว่า Su-Inv มีค่า ^{1}H NMR T_1 สูงสุด ส่วนการใช้พอลิไฮดริกแอลกอฮอล์มีผลให้ค่า ^{1}H NMR T_1 ต่ำกว่าชุดควบคุม ซึ่งเห็นผลได้ชัดเจนในชุด Su-Gly โดยผลที่ได้สอดคล้องกับค่า a_w ของ Su-Gly ที่ต่ำกว่าชุดควบคุม (ตารางที่ 3.8) ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยความสามารถในการจับน้ำของพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ที่ดีกว่า ผลของค่า ^{1}H NMR T_1 ในชุดการทดลองที่ทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอลหรือกลีเซอรอลเป็นไปในทิศทางเดียวกับ Sritongtae และคณะ (2011) ซึ่งพบว่า การทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอลหรือกลีเซอรอล (10% w/v) ในการออสโมซิส ทำให้แคนตาลูปแช่อิ่มอบแห้งมีค่า ^{1}H NMR T_1 ต่ำกว่าแคนตาลูปแช่อิ่มอบแห้งที่แช่ในซูโครสเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 3.9 ค่า spin-lattice relaxation time ของตัวอย่างมะละกอหลังการออสโมซิส และผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้ง

ช่วงการเก็บตัวอย่าง	spin-lattice relaxation time (mS)			
	Su	Su-Sor	Su-Gly	Su-Inv
หลังการออสโมซิส	$916.55^{aA} \pm 12.23$	$848.75^{aBC} \pm 17.47$	$801.10^{aC} \pm 13.44$	$855.90^{aB} \pm 28.00$
หลังการอบแห้ง	$559.80^{bB} \pm 11.60$	$557.80^{bB} \pm 6.79$	$502.75^{bC} \pm 1.48$	$630.25^{bA} \pm 32.46$

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

A, B, C ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันตามแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

3.6.3 ปริมาณน้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุกโทสของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้ง

ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ฟรุกโทส ซูโครส และน้ำตาลทั้งหมดในผลิตภัณฑ์ชุดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3.10 เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำตาลในมะละกอสด พบว่า ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ฟรุกโทส และซูโครสที่วัดได้ใกล้เคียงกับค่าที่รายงานโดย USDA (2011) เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำตาลในแต่ละชุดการทดลอง พบว่าชุดควบคุมมีปริมาณน้ำตาลซูโครสและปริมาณน้ำตาลทั้งหมดสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากมีการใช้ซูโครสเพียงอย่างเดียวในการออสโมซิส ขณะที่ Su-Inv มีปริมาณน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากชุดการทดลองนี้มีการทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต (กลูโคสและฟรุกโทส) และค่า pH ของสารละลายออสโมซิสต่ำ(pH 2.6) จึงเกิดการไฮโดรไลซิสของน้ำตาลทรายได้น้ำตาลอินเวิร์ตเพิ่มขึ้น น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวมีมวลโมเลกุลต่ำสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าซูโครส ดังนั้นจึงทำให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสสูงขึ้น การที่ Su-Sor และ Su-Gly มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดต่ำกว่าชุดควบคุมอาจเกิดจากการทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอลหรือกลีเซอรอล ทำให้ซอร์บิทอลหรือกลีเซอรอลเคลื่อนที่เข้าไปในชิ้นมะละกอแทนที่ซูโครส นอกจากนี้การที่ Su-Inv มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมาก ทำให้มีปริมาณของแข็งน้อย ส่งผลให้น้ำมีความเป็นอิสระมาก ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปของค่า ^{1}H NMR T_1 ที่สูงกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 3.9)

ตารางที่ 3.10 ปริมาณน้ำตาลในผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้ง

ชุดการทดลอง	ปริมาณน้ำตาล (กรัม/ 100 กรัมตัวอย่าง)				
	กลูโคส	ฟรุกโทส	ซูโครส	กลูโคส+ฟรุกโทส	น้ำตาลทั้งหมด
มะละกอสด	$3.64^{a} \pm 0.10$	$2.90^{b} \pm 0.13$	nd	$6.54^{b} \pm 0.23$	$6.54^{e} \pm 0.23$
Su	$2.52^{b} \pm 0.05$	$2.21^{c} \pm 0.04$	$38.67^{a} \pm 1.07$	$4.74^{c} \pm 0.08$	$43.41^{a} \pm 0.98$
Su-Sor	$1.95^{c} \pm 0.23$	$1.67^{d} \pm 0.09$	$34.64^{b} \pm 0.52$	$3.63^{d} \pm 0.33$	$38.27^{c} \pm 0.86$
Su-Gly	$2.88^{b} \pm 0.29$	$2.44^{c} \pm 0.25$	$36.31^{b} \pm 0.51$	$5.32^{c} \pm 0.54$	$41.62^{b} \pm 1.05$
Su-Inv	$3.81^{a} \pm 0.15$	$3.56^{a} \pm 0.14$	$26.22^{c} \pm 0.40$	$7.38^{a} \pm 0.29$	$33.60^{d} \pm 0.69$

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

nd ตรวจไม่พบ

3.6.4 ค่าสีของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้ง

เมื่อพิจารณาค่าสีของผลิตภัณฑ์แต่ละชุดการทดลอง (ตารางที่ 3.11) พบว่า Su-Inv มีค่า a* สูงกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ขณะที่ค่า L* และ b* ของผลิตภัณฑ์แต่ละชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) สาเหตุที่ Su-Inv มีค่า a* ต่างจากชุดการทดลองอื่นอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล การเกิดผลึกน้ำตาลที่ผิวของผลิตภัณฑ์ รวมถึงการสลายตัวของเบตาแคโรทีนและไลโคปีน ซึ่งเป็นรงควัตถุหลักของมะละกอ โดยอธิบายสาเหตุความแตกต่างของค่าสีในผลิตภัณฑ์แต่ละชุดการทดลองในหัวข้อ 3.8.6

ตารางที่ 3.11 ค่า L*, a* และ b* ของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้ง

ชุดการทดลอง	L*^{ns}	a*	b*^{ns}
Su	40.05 ± 2.97	20.26^{b} ± 1.34	25.55 ± 5.24
Su-Sor	40.10 ± 2.58	19.81^{b} ± 0.58	25.44 ± 2.42
Su-Gly	39.78 ± 2.68	20.69^{b} ± 2.30	27.13 ± 3.31
Su-Inv	35.48 ± 1.97	23.66^{a} ± 0.36	28.96 ± 1.39

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

ns ข้อมูลในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

3.6.5 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้ง

ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนาของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง (สเกล 10 คะแนน) ในด้านการเกิดผลึก การหดตัว ลักษณะเนื้อสัมผัส และรสชาติของผลิตภัณฑ์ โดยใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 20 คน แสดงดังตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.12 คะแนนความเข้มจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนาของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้ง

	Su	Su-Sor	Su-Gly	Su-Inv
การเกิดผลึก	7.99^{A} ± 0.97	5.98^{B} ± 0.91	6.38^{B} ± 0.49	1.47^{C} ± 0.38
ความคงรูป	3.19^{C} ± 0.82	5.30^{B} ± 0.96	3.21^{C} ± 0.57	7.03^{A} ± 0.99
ความแข็ง	6.54^{A} ± 1.40	5.00^{BC} ± 0.92	5.61^{B} ± 1.59	4.23^{C} ± 1.19
ความเหนียว	2.44^{B} ± 0.72	3.52^{A} ± 0.91	2.64^{B} ± 0.80	2.99^{AB} ± 0.97
ความชุ่มน้ำ	3.48^{B} ± 0.84	4.23^{AB} ± 1.05	3.41^{B} ± 1.23	5.18^{A} ± 1.11
รสหวาน	6.12^{A} ± 1.26	6.15^{A} ± 1.42	5.84^{A} ± 0.95	4.70^{B} ± 0.61
รสแปลกปลอม^{ns}	1.50 ± 0.33	1.30 ± 0.40	0.93 ± 0.24	1.06 ± 0.29

A, B, C.. ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันตามแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns ข้อมูลในแนวนอนไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

เมื่อพิจารณาการเกิดผลึกของผลิตภัณฑ์แต่ละชุดการทดลองด้วยวิธีทดสอบเชิงพรรณนา (ตารางที่ 3.12) พบว่า Su-Sor, Su-Gly และ Su-Inv มีคะแนนความเข้มด้านผลึกน้ำตาลบนผิวผลิตภัณฑ์ต่ำกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดย Su-Inv มีคะแนนความเข้มด้านผลึกน้ำตาลบนผิวผลิตภัณฑ์ต่ำสุด ($p \leq 0.05$) Duangmal และคณะ (2005) รายงานว่า ผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งที่ทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยน้ำตาลอินเวิร์ตในการออสโมซิส มีค่า L* ต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ที่ใช้ซูโครสเพียงอย่างเดียว เนื่องจากน้ำตาลอินเวิร์ตลดการเกิดผลึกน้ำตาลบนผิวของผลิตภัณฑ์ และจากตารางที่ 3.12 พบว่า Su-Inv และ Su-Sor มีคะแนนความเข้มด้านความคงรูปสูงกว่า Su-Gly และชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อาจเนื่องจากการใช้สารเหล่านี้จะช่วยลดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้พบว่า Su-Inv มีคะแนนความเข้มด้านความชุ่มน้ำสูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่ไม่แตกต่างจาก Su-Sor อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

เมื่อพิจารณาคะแนนความเข้มด้านลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีทดสอบเชิงพรรณนา (ตารางที่ 3.12) พบว่า Su-Sor และ Su-Inv มีคะแนนความเข้มด้านความแข็งต่ำกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และเมื่อพิจารณาความเหนียวของผลิตภัณฑ์แต่ละชุดการทดลอง (ตารางที่ 3.12) พบว่า Su-Sor มีคะแนนความเข้มด้านความเหนียวสูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่ไม่แตกต่างจาก Su-Inv อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

จากการพิจารณาคะแนนความเข้มด้านรสหวานของผลิตภัณฑ์แต่ละชุดการทดลอง (ตารางที่ 3.12) พบว่า Su-Inv มีคะแนนความเข้มด้านรสหวานน้อยกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยทั่วไปน้ำตาลฟรุกโทสที่เป็นองค์ประกอบของน้ำตาลอินเวิร์ตมีรสหวานมากกว่าซูโครส อย่างไรก็ตามผลที่ได้อาจเกิดจากการที่ Su-Inv มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดต่ำกว่าชุดการทดลองอื่น (ตารางที่ 3.10) และจากตารางที่ 3.12 พบว่ารสแปลกปลอมของผลิตภัณฑ์แต่ละชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างคะแนนความเข้มและคะแนนที่ผู้ทดสอบคาดหวังของผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีทดสอบเชิงพรรณนา (ตารางที่ 3.13) พบว่า Su-Inv มีอัตราส่วนระหว่างคะแนนความเข้มและคะแนนที่ผู้ทดสอบคาดหวังด้านความคงรูป ความชุ่มน้ำและรสหวานใกล้ 1 มากที่สุด แสดงให้เห็นว่า Su-Inv มีลักษณะด้านความคงรูป ความชุ่มน้ำและรสหวานใกล้เคียงกับลักษณะที่ผู้บริโภคต้องการมากกว่าชุดการทดลองอื่น อย่างไรก็ตาม Su-Sor ยังมีอัตราส่วนระหว่างคะแนนความเข้มและคะแนนที่ผู้ทดสอบคาดหวังด้านความคงรูปและความชุ่มน้ำใกล้เคียงกับ Su-Inv นอกจากนี้พบว่า Su-Sor มีอัตราส่วนระหว่างคะแนนความเข้มและคะแนนที่ผู้ทดสอบคาดหวังด้านความแข็ง และความเหนียวใกล้ 1 มากที่สุด แสดงให้เห็นว่า Su-Sor มีลักษณะด้านความแข็งและความเหนียวใกล้เคียงกับลักษณะที่ผู้บริโภคต้องการ

ตารางที่ 3.13 อัตราส่วนระหว่างคะแนนความเข้มและคะแนนที่ผู้ทดสอบคาดหวังของมะละกอแช่อิ่มอบแห้ง

	Su	Su-Sor	Su-Gly	Su-Inv
ความคงรูป	0.32 ± 0.08	0.53 ± 0.10	0.32 ± 0.05	0.70 ± 0.10
ความแข็ง	1.31 ± 0.28	1.00 ± 0.18	1.12 ± 0.32	0.85 ± 0.24
ความเหนียว	0.49 ± 0.14	0.70 ± 0.18	0.53 ± 0.16	0.60 ± 0.19
ความชุ่มน้ำ	0.70 ± 0.17	0.85 ± 0.21	0.68 ± 0.25	1.04 ± 0.22
รสหวาน	1.22 ± 0.25	1.23 ± 0.28	1.17 ± 0.19	0.94 ± 0.12

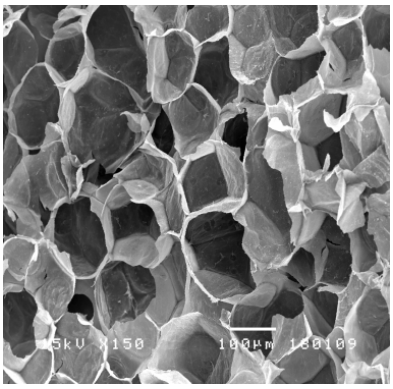
3.6.6 ลักษณะทางสัณฐานของเซลล์มะละกอ

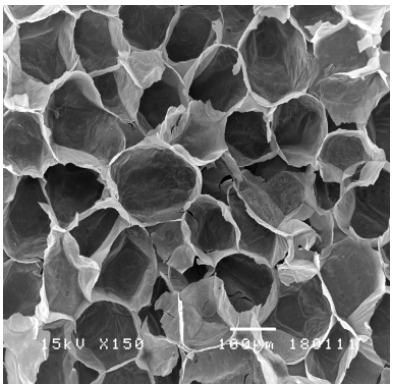
ลักษณะทางสัณฐานของเซลล์มะละกอสด มะละกอหลังการแช่ในสารละลายผสมระหว่างแคลเซียมคลอไรด์และกรดซิตริก มะละกอที่ผ่านการออสโมซิส และผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง ภายใต้การส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังรูปที่ 3.13 และ 3.14 ตามลำดับ

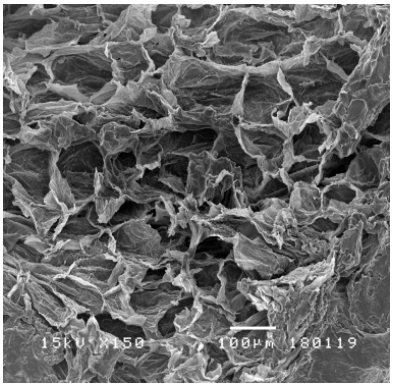
เมื่อพิจารณาเซลล์ของมะละกอสดและมะละกอหลังการแช่ในสารละลายผสมระหว่างแคลเซียมคลอไรด์และกรดซิตริก (รูปที่ 3.13 ก, ข) พบว่า เซลล์ของมะละกอที่พบเป็นเซลล์พาเรนไคมาที่มีหน้าที่ในการสะสมอาหารของเซลล์พืช มีลักษณะกลมรี ไม่หดตัว มีช่องว่างระหว่างเซลล์น้อย และเห็นขอบเขตของเซลล์ชัดเจน อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเซลล์ของมะละกอสดกับเซลล์ของมะละกอที่ผ่านการออสโมซิส (รูปที่ 3.13 ก, ค-ฉ) พบว่า เซลล์ของมะละกอที่ผ่านการออสโมซิสมีการหดตัวมากกว่ามะละกอสด เนื่องจากการแช่ตัวอย่างในสารละลายออสโมติกความเข้มข้นสูงทำให้เกิดจากการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากเซลล์มะละกอ ส่งผลให้เซลล์มีลักษณะเหี่ยวลง เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าพลาสโมไลซิส ความคงตัวของเซลล์อาจส่งผลต่อการคงรูปของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง

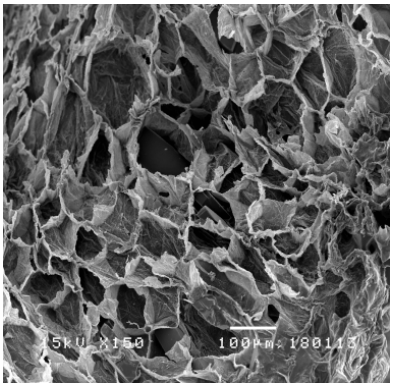
Moreno และคณะ (2004) รายงานว่า เซลล์ของมะละกอที่ผ่านการออสโมซิสมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและมีขนาดของเซลล์เล็กลง ซึ่งเกิดจากการสูญเสียน้ำระหว่างการออสโมซิส นอกจากนี้ Pereira และคณะ (2009) รายงานว่า เซลล์พาเรนไคมาของผลฝรั่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายซูโครสหรือมอลโทสที่ความเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ มีการหดตัว และมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการเกิดพลาสโมไลซิส เมื่อเทียบกับเซลล์ของผลฝรั่งสด

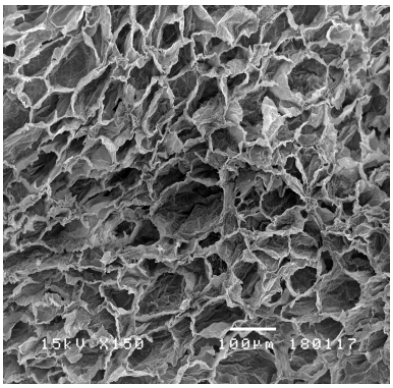
เมื่อพิจารณาเซลล์ของมะละกอหลังการออสโมซิสแต่ละชุดการทดลอง (รูปที่ 3.13 ค-ฉ) พบว่า ในชุดควบคุมมีการหดตัวของเซลล์และเห็นขอบเขตของเซลล์ไม่ชัดเจนเมื่อเทียบกับชุดการทดลองอื่น ซึ่งอาจเกิดจากการที่ตัวอย่างมีค่า SG น้อยกว่าชุดการทดลองอื่น (ตารางที่ 3.2) ทำให้ชุดควบคุมมีน้ำตาลเคลื่อนที่เข้าไปในเซลล์ระหว่างการออสโมซิสน้อย และส่งผลให้ความสามารถในการคงรูปของเซลล์ต่ำ

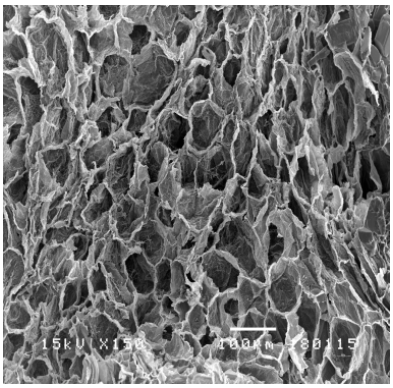
ก. 

ข. 

ค. 

ง. 

จ. 

ฉ. 

รูปที่ 3.13 ลักษณะเซลล์มะละกอสด มะละกอที่ผ่านการปรับสภาพก่อนการออสโมซิส และมะละกอที่ผ่านการออสโมซิสในแต่ละชุดการทดลองจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 150 เท่า

ก. มะละกอสด (วัตถุดิบ)

ข. มะละกอที่ผ่านการแช่ในสารละลายผสมแคลเซียมคลอไรด์และกรดซิตริก (ปรับสภาพก่อนการออสโมซิส)

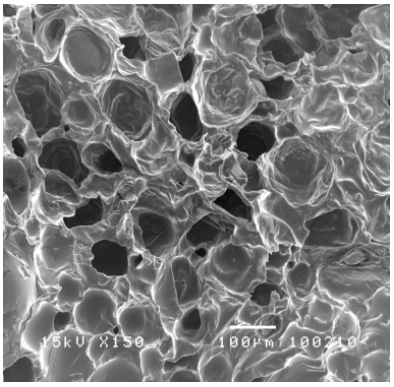
ค. มะละกอที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสโดยไม่มีการทดแทน (Su)

ง. มะละกอที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยซอร์บิทอล 10% (Su-Sor)

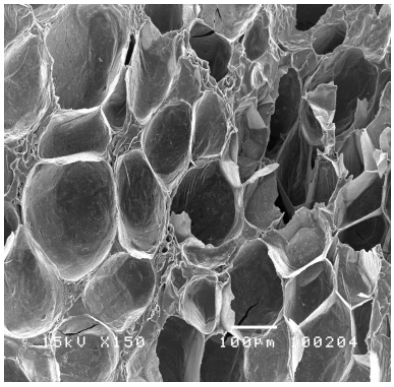
จ. มะละกอที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยกลีเซอรอล 10% (Su-Gly)

ฉ. มะละกอที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต 10% (Su-Inv)

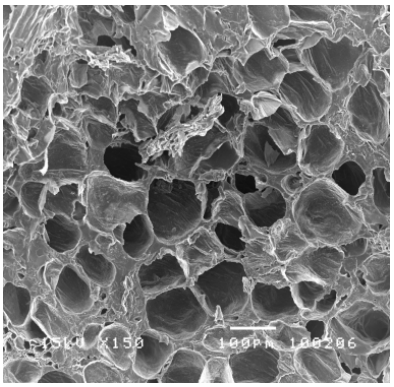
ก.



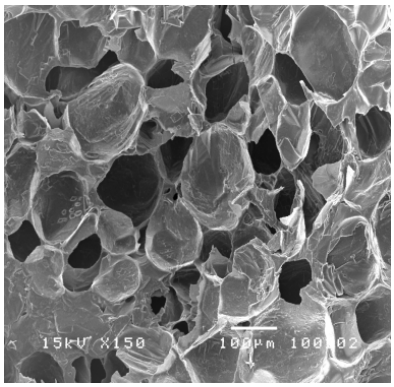
ข.



ค.



ง.



รูปที่ 3.14 ลักษณะเซลล์ของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 150 เท่า

ก. มะละกอที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสโดยไม่มีการทดแทน และอบแห้ง (Su)

ข. มะละกอที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยซอร์บิทอล 10% และอบแห้ง (Su-Sor)

ค. มะละกอที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยกลีเซอรอล 10% และอบแห้ง (Su-Gly)

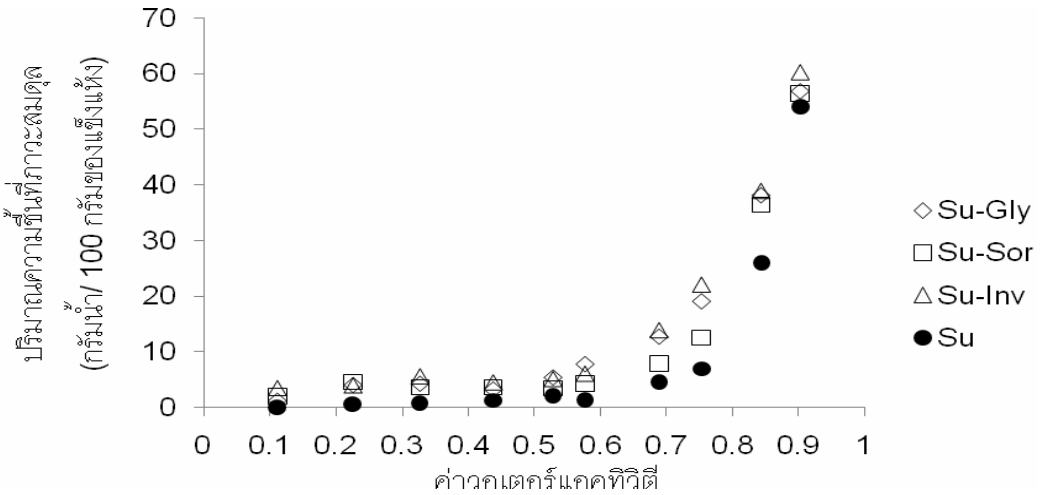
ง. มะละกอที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต 10% และอบแห้ง (Su-Inv)

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะเซลล์ของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง (รูปที่ 3.14 ก-ง) พบว่า ผลิตภัณฑ์ชุด Su-Sor และ Su-Inv มีลักษณะเซลล์กลมรีที่มีขนาดใหญ่กว่าชุดควบคุม และชุด Su-Gly ซึ่งอาจเกิดจากการที่ซอร์บิทอลและน้ำตาลอินเวิร์ตมีขนาดเล็กกว่าซูโครส ทำให้เกิดการเคลื่อนที่เข้าไปในผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าซูโครสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับค่า SG (ตารางที่ 3.2) โดยสารออสโมติกที่แพร่เข้าไปในเซลล์มีส่วนช่วยรักษาโครงสร้างของเซลล์ และทำให้ในระหว่างการอบแห้งเซลล์ของผลิตภัณฑ์มีการหดตัวน้อยกว่าชุดควบคุม ผลที่ได้เป็นไปในทำนองเดียวกับ บูรฉัตร ศรีทองแท้ (2551) ที่พบว่า ตัวอย่างแคนตาลูปแช่อิ่มที่ทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอล 10% (w/v) ตัวอย่างที่ทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต 10% (v/v) และตัวอย่างที่ทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยกลีเซอรอล 10% (w/v) ที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนมีค่า a_w ประมาณ 0.65 มีลักษณะของเซลล์ที่คงรูปมากกว่า แคนตาลูปแช่อิ่มอบแห้งที่ใช้ซูโครสเพียงอย่างเดียวในการออสโมซิส การที่ Su-Sor และ Su-Inv มีการหดตัวของเซลล์น้อยกว่าชุดควบคุมสอดคล้องกับค่าการหดตัวของ

ตัวอย่างระหว่างการอบแห้ง (ตารางที่ 3.7) และผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส (ตารางที่ 3.12) ที่พบว่าชุดควบคุมมีการหดตัวมากกว่าชุดการทดลองอื่น

3.7 ผลของการทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอล กลีเซอรอล และน้ำตาลอินเวิร์ตต่อมอยส์เจอร์ซอร์พชันไอโซเทิร์มของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้ง

รูปแบบของมอยส์เจอร์ซอร์พชันไอโซเทิร์ม (MSI) ที่อุณหภูมิ 30 ± 2 องศาเซลเซียส ของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งซึ่งมีปริมาณความชื้นประมาณ 16% (โดยน้ำหนักเปียก) แสดงดังรูปที่ 3.15 ชี้ให้เห็นว่าในช่วงค่า a_w ต่ำกว่า 0.6 ปริมาณความชื้นที่ภาวะสมดุลของผลิตภัณฑ์ทั้งสี่ชุดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงค่า a_w สูงกว่า 0.6 ปริมาณความชื้นที่ภาวะสมดุลของผลิตภัณฑ์ทุกชุดการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีการเพิ่มขึ้นในอัตราที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นกับองค์ประกอบ และชนิดของน้ำตาลภายในผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามรูปแบบ MSI ของผลิตภัณฑ์ทั้งสี่ชุดการทดลองเป็นแบบ Type-III หรือ J-shape ซึ่งพบได้ทั่วไปในอาหารที่มีปริมาณน้ำตาลหรือเกลือสูง สาเหตุที่ปริมาณความชื้นที่ภาวะสมดุลของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค่า a_w สูงกว่า 0.6 Falade และคณะ (2003) อธิบายว่าในช่วง a_w ต่ำกว่า 0.6 น้ำตาลในชิ้นผลไม้อยู่ในรูปผลึก ซึ่งมีความสามารถในการดูดความชื้นต่ำ แต่เมื่อค่า a_w สูงกว่า 0.6 น้ำตาลจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปอสัณฐาน โดยน้ำตาลในรูปอสัณฐานมีความสามารถในการดูดความชื้นได้ดีกว่าในรูปผลึก ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการดูดความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 3.15 มอยส์เจอร์ซอร์พชันไอโซเทิร์มของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งที่อุณหภูมิ 30 ± 2 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาความชันของ MSI (ที่อุณหภูมิ 30 ± 2 องศาเซลเซียส) ในช่วงค่า a_w สูงกว่า 0.6-0.9 ของผลิตภัณฑ์แต่ละชุดการทดลอง พบว่า Su-Sor และ Su-Gly มีความชันของ MSI สูงกว่าชุดควบคุม แต่น้อยกว่า Su-Inv และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณความชื้นที่ภาวะสมดุลของผลิตภัณฑ์แต่ละชุดการทดลองที่ค่า a_w เดียวกัน พบว่า ชุดควบคุมมีปริมาณความชื้นที่ภาวะสมดุลต่ำสุด โดย Su-Gly, Su-Sor และ Su-Inv มีปริมาณความชื้นที่ภาวะสมดุลสูงกว่าชุดควบคุม เนื่องจากพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์และน้ำตาลอินเวิร์ตมีความสามารถในการดูดความชื้นได้ดีกว่าซูโครส เพราะมีค่า OH:C มากกว่าซูโครส (Sagiv and Marcus, 2003)

เมื่อนำค่าปริมาณความชื้นที่ภาวะสมดุลและค่า a_w มาแทนค่าในแบบจำลอง BET และแบบจำลอง GAB เพื่อทำนายรูปแบบ MSI ของผลิตภัณฑ์ โดยใช้เกณฑ์แบบจำลองที่เหมาะสมจะมีค่า *RMSE* และค่า *MRS* ต่ำ แต่มีค่า r สูง เมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่น จากตารางที่ 3.14 พบว่า แบบจำลอง GAB มีความเหมาะสมในการทำนายรูปแบบ MSI ของผลิตภัณฑ์ทุกชุดการทดลองมากกว่าแบบจำลอง BET เนื่องจากมีค่า *RMSE* และ *MRS* ต่ำกว่า แต่มีค่า r สูงกว่าในทุกชุดการทดลอง สาเหตุที่แบบจำลอง GAB มีความเหมาะสมในการทำนาย MSI ของผลิตภัณฑ์ทุกชุดการทดลองมากกว่าแบบจำลอง BET เนื่องจากแบบจำลอง GAB พัฒนาจากแบบจำลองของ BET โดยมีการเพิ่มค่าคงที่ *K* ในแบบจำลอง (สมการที่ 8 และ 9 ตามลำดับ) จึงสามารถ fit curve ครอบคลุมช่วงค่า a_w กว้างกว่าแบบจำลอง BET ที่เหมาะสมกับการทำนาย MSI ที่ช่วงค่า a_w ระหว่าง 0.05-0.50 (Timmermann *et al*., 2001) นอกจากนี้ค่า C ที่ได้ จากสมการ GAB (ตารางที่ 3.14) มีค่าน้อยกว่า 2.0 ยืนยันว่ารูปแบบสมการที่ได้เป็น J-shape

ตารางที่ 3.14 ค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณจากแบบจำลอง BET และแบบจำลอง GAB ของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งชุดการทดลองต่าง ๆ

แบบจำลอง	ค่าสัมประสิทธิ์	Su	Su-Sor	Su-Gly	Su-Inv
BET	M_o	14.15	7.41	6.35	6.64
	C	0.07	0.35	0.98	1.04
	RMSE	1.27	2.71	1.86	2.18
	MRS	1.80	8.13	3.85	5.30
	r	0.9971	0.9883	0.9943	0.9930
GAB	M_o	16.71	24.09	19.16	16.35
	C	0.06	0.10	0.21	0.27
	K	1.00	0.94	0.92	0.93
	RMSE	1.27	2.52	1.45	1.91
	MRS	1.78	7.07	2.33	4.03
	r	0.9972	0.9900	0.9968	0.9953

เมื่อพิจารณาค่า monolayer moisture content (M_o) ที่ได้จากแบบจำลอง GAB ของผลิตภัณฑ์ทุกชุดการทดลอง พบว่า M_o ของผลิตภัณฑ์ที่มีการทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์มีค่าสูงกว่า M_o ของชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่าพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์มีความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ดีกว่าซูโครส จึงทำให้ค่า M_o ที่ได้มีค่าสูงกว่า ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับค่า ^{1}H NMR T_1 (ตารางที่ 3.9) ที่ผลิตภัณฑ์ที่มีการทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์มีค่า ^{1}H NMR T_1 ต่ำกว่าชุดควบคุม เพราะมีโมเลกุลอื่น ๆ อยู่ล้อมรอบโมเลกุลของน้ำในระยะที่ใกล้กว่าจึงเกิดการถ่ายเทพลังงานได้ง่ายกว่า

3.8 ผลการทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอล กลีเซอรอล และน้ำตาลอินเวิร์ตต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา

3.8.1 ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษา

จากตารางที่ 3.15 พบว่า ผลิตภัณฑ์ทุกชุดการทดลองมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นประมาณ 16% (โดยน้ำหนักเปียก) และเมื่อเก็บผลิตภัณฑ์ในช่วง 8 สัปดาห์ ผลิตภัณฑ์มีปริมาณความชื้นลดลงเล็กน้อย โดยมีเพียง Su-Gly ที่มีปริมาณความชื้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$) อย่างไรก็ตามปริมาณความชื้นของ Su-Gly ที่เวลาการเก็บ ต่าง ๆ มีค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งการที่ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงระหว่างการเก็บเกิดจากการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์สู่ภาวะแวดล้อม อย่างไรก็ตามการเก็บผลิตภัณฑ์ในถุงพอลิโพรพิลีนที่มีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี อาจเป็นสาเหตุให้ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ทุกชุดการทดลองลดลงเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้พบว่า ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์แต่ละชุดการทดลองที่เวลาการเก็บเดียวกันมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

ตารางที่ 3.15 ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา

ระยะการเก็บ	ปริมาณความชื้น (% โดยน้ำหนักเปียก)			
(สัปดาห์)	Su^{ns}	Su-Sor^{ns}	Su-Gly	Su-Inv^{ns}
0^{ns}	15.93 ± 0.29	16.23 ± 1.12	15.76^{a} ± 0.25	16.72 ± 1.08
4^{ns}	15.14 ± 1.88	16.64 ± 0.19	16.10^{a} ± 0.81	16.08 ± 0.18
8^{ns}	14.14 ± 0.24	14.86 ± 0.33	14.40^{b} ± 0.37	14.22 ± 0.05

a, b.. ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันตามแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$)

ns ข้อมูลในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

3.8.2 ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษา

ผลการเปลี่ยนแปลงของค่า a_w ระหว่างการเก็บรักษา แสดงดังตารางที่ 3.16 เมื่อเก็บผลิตภัณฑ์เป็นเวลานานขึ้น พบว่า ค่า a_w ของผลิตภัณฑ์ทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ มีเพียงชุด Su-Gly ที่มีค่า a_w เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$) แต่เมื่อพิจารณาตัวเลขจะพบว่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบค่า a_w ของผลิตภัณฑ์แต่ละชุดการทดลองที่เวลาการเก็บเดียวกัน พบว่า Su-Inv และ Su-Gly มีค่า a_w ต่ำกว่าชุดควบคุมตลอดระยะเวลาการเก็บอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$) เนื่องจากน้ำตาลอินเวิร์ตและกลีเซอรอลมีความสามารถในการจับกับโมเลกุลของน้ำได้ดีกว่าซูโครส ส่งผลให้ความสามารถของน้ำในการทำปฏิกิริยาลดลง ค่า a_w ของตัวอย่างจึงลดลง

ตารางที่ 3.16 ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา

ระยะการเก็บ (สัปดาห์)	a_w			
	Su^{ns}	Su-Sor^{ns}	Su-Gly	Su-Inv^{ns}
0	$0.781^{A} \pm 0.016$	$0.761^{A} \pm 0.018$	$0.696^{bB} \pm 0.022$	$0.693^{B} \pm 0.009$
4	$0.790^{A} \pm 0.011$	$0.772^{A} \pm 0.007$	$0.729^{aB} \pm 0.012$	$0.696^{C} \pm 0.014$
8	$0.789^{A} \pm 0.006$	$0.778^{A} \pm 0.003$	$0.739^{aB} \pm 0.008$	$0.701^{C} \pm 0.014$

a, b.. ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันตามแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$)

A, B, C.. ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันตามแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$)

ns ข้อมูลในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

3.8.3 ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษา

ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็ง ค่างานในการตัด และค่าความเหนียวของผลิตภัณฑ์ซึ่งวัดด้วยเครื่อง Texture analyzer โดยใช้หัววัด BSK with knife แสดงในตารางที่ 3.17, 3.18 และ 3.19 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.17 ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา

ระยะการเก็บ (สัปดาห์)	ค่าความแข็ง (N)			
	Su	Su-Sor	Su-Gly	Su-Inv
0	$73.49^{cA} \pm 3.74$	$54.49^{cC} \pm 3.35$	$62.50^{cB} \pm 1.22$	$53.90^{cC} \pm 5.06$
4	$127.82^{bA} \pm 3.45$	$105.06^{bC} \pm 1.70$	$122.92^{bB} \pm 0.85$	$62.50^{bD} \pm 1.45$
8	$149.74^{aA} \pm 5.30$	$124.17^{aB} \pm 1.18$	$147.31^{aA} \pm 5.19$	$105.53^{aC} \pm 3.93$

a, b, c.. ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันตามแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$)

A, B, C.. ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันตามแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$)

ตารางที่ 3.18 ค่างานในการตัดของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา

ระยะการเก็บ (สัปดาห์)	ค่างานในการตัด (N.s)			
	Su	Su-Sor	Su-Gly	Su-Inv
0	$184.34^{cA} \pm 1.88$	$181.83^{cA} \pm 1.01$	$184.30^{cA} \pm 4.05$	$170.52^{cB} \pm 5.79$
4	$347.17^{bA} \pm 4.98$	$297.93^{bB} \pm 4.79$	$350.18^{bA} \pm 5.34$	$198.21^{bB} \pm 4.33$
8	$388.02^{aA} \pm 2.80$	$335.80^{aB} \pm 3.11$	$391.49^{aA} \pm 0.84$	$302.14^{aC} \pm 5.01$

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

A, B, C.. ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันตามแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 3.19 ค่าความเหนียวของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา

ระยะการเก็บ (สัปดาห์)	ค่าความเหนียว (N.s)			
	Su	Su-Sor	Su-Gly	Su-Inv
0^{ns}	$0.79^{a} \pm 0.11$	$0.90^{a} \pm 0.14$	$0.90^{a} \pm 0.07$	$0.89^{a} \pm 0.09$
4^{ns}	$0.34^{b} \pm 0.03$	$0.34^{b} \pm 0.04$	$0.33^{b} \pm 0.09$	$0.45^{b} \pm 0.09$
8^{ns}	$0.30^{b} \pm 0.04$	$0.29^{b} \pm 0.04$	$0.32^{b} \pm 0.03$	$0.40^{b} \pm 0.09$

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

ns ข้อมูลในแนวนอนไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

จากตารางที่ 3.17-3.19 พบว่า เมื่อเวลาในการเก็บเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งและค่างานในการตัดของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่ง Su-Inv มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็ง และค่างานในการตัดน้อยกว่าชุดการทดลองอื่น ขณะที่ Su-Sor มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็ง และค่างานในการตัดใกล้เคียงกับ Su-Inv แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณมีเนื้อสัมผัสที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับเริ่มต้นเมื่อเก็บไว้ 8 สัปดาห์ ส่วนค่าความเหนียวของผลิตภัณฑ์ทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มลดลงระหว่างการเก็บอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตามค่าความเหนียวมีค่าต่ำมาก ดังนั้นค่าความแข็งและค่างานในการตัดจึงเป็นสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์นี้

เมื่อพิจารณาค่าความแข็ง และค่างานในการตัดของผลิตภัณฑ์ที่เวลาการเก็บเดียวกัน (ตารางที่ 3.17 และ 18) พบว่า ค่าความแข็งของ Su-Sor และ Su-Inv ต่ำกว่าชุดควบคุมตลอดเวลาการเก็บอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ส่วนค่างานในการตัดของ Su-Inv ต่ำกว่าชุดควบคุมตลอดเวลาการเก็บอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) Farahnaky และคณะ (2010) พบว่า ผลิตภัณฑ์มะเดื่อแช่อิ่มอบแห้งที่ใช้กลีเซอรอลในการออสโมซิสมีค่าความแข็งต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ที่ใช้กลูโคสในการออสโมซิส และผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านการออสโมซิส ตามลำดับ ผลของน้ำตาลอินเวิร์ตต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เป็นไปในทิศทางเดียวกับ Duangmal และคณะ (2005) ที่พบว่า ผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งที่มีการทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยน้ำตาลอินเวิร์ตในการออสโมซิส มีค่างานในการตัด

ต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ที่ใช้ซูโครสเพียงอย่างเดียวในการออสโมซิสตลอดระยะเวลาการเก็บ 21 สัปดาห์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งที่ได้กับผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มทางการค้า (ตารางที่ 3.20) พบว่า ทุกชุดการทดลองมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับผลิตภัณฑ์ทางการค้า อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ทุกชุดการทดลองมีค่าความเหนียวต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ทางการค้าตลอดการเก็บรักษา

ตารางที่ 3.20 ค่าความแข็ง ค่างานในการตัด และค่าความเหนียวของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มทางการค้า

	ค่าความแข็ง (N)	ค่างานในการตัด (N.s)	ค่าความเหนียว (N.s)
ตราสินค้า A	63.06 ± 2.65	161.28 ± 11.07	1.36 ± 0.18
ตราสินค้า B	73.13 ± 1.48	252.14 ± 8.78	2.92 ± 0.35

3.8.4 ค่าสีในระบบ CIELAB ของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษา

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าสีของผลิตภัณฑ์แต่ละชุดการทดลองในระหว่างการเก็บ (ตารางที่ 21-23) พบว่า ค่า L* ของผลิตภัณฑ์ทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ยกเว้น Su-Inv ที่มีค่า L* ค่อนข้างคงที่ ($p > 0.05$) ขณะที่ค่า a* และค่า b* ของผลิตภัณฑ์ทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มลดลง โดยค่า a* ของผลิตภัณฑ์ทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อพิจารณาค่าความเข้มสี (chroma) และค่าเฉดสี (hue angle) ของผลิตภัณฑ์แต่ละชุดการทดลองระหว่างการเก็บรักษาจากรูปที่ 3.16 พบว่าเมื่อเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ทุกชุดการทดลองมีค่าเฉดสีใกล้เคียงกัน แต่ค่าความเข้มสีจะค่อย ๆ ลดลง ซึ่งการลดลงของความเข้มสีอาจเกิดจากการสลายตัวของแคโรทีนอยด์ในมะละกอ

ตารางที่ 3.21 ค่า L* ของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา

ระยะเวลาการเก็บ	L*			
(สัปดาห์)	Su	Su-Sor	Su-Gly	Su-Inv^{ns}
0^{ns}	40.05^{b} ± 2.97	40.10^{b} ± 2.58	39.78^{b} ± 2.68	35.48 ± 1.97
4^{ns}	50.52^{a} ± 2.88	51.39^{a} ± 3.66	50.24^{a} ± 5.62	42.69 ± 4.46
8	50.98^{aA} ± 0.45	54.96^{aA} ± 1.01	52.48^{aA} ± 5.27	42.25^{B} ± 2.00

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

A, B.. ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันตามแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns ข้อมูลในแนวนอนไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 3.22 ค่า a* ของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา

ระยะเวลาการเก็บ (สัปดาห์)	a*			
	Su	Su-Sor	Su-Gly	Su-Inv
0	$20.26^{aB} \pm 1.34$	$19.81^{aB} \pm 0.58$	$20.69^{aB} \pm 2.30$	$23.66^{aA} \pm 0.36$
4	$13.55^{bB} \pm 1.45$	$14.00^{bB} \pm 1.22$	$14.47^{abB} \pm 3.20$	$19.54^{bA} \pm 1.68$
8	$12.88^{bB} \pm 1.29$	$9.69^{cB} \pm 0.72$	$11.84^{bB} \pm 3.46$	$19.27^{bA} \pm 2.48$

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

A, B.. ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันตามแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

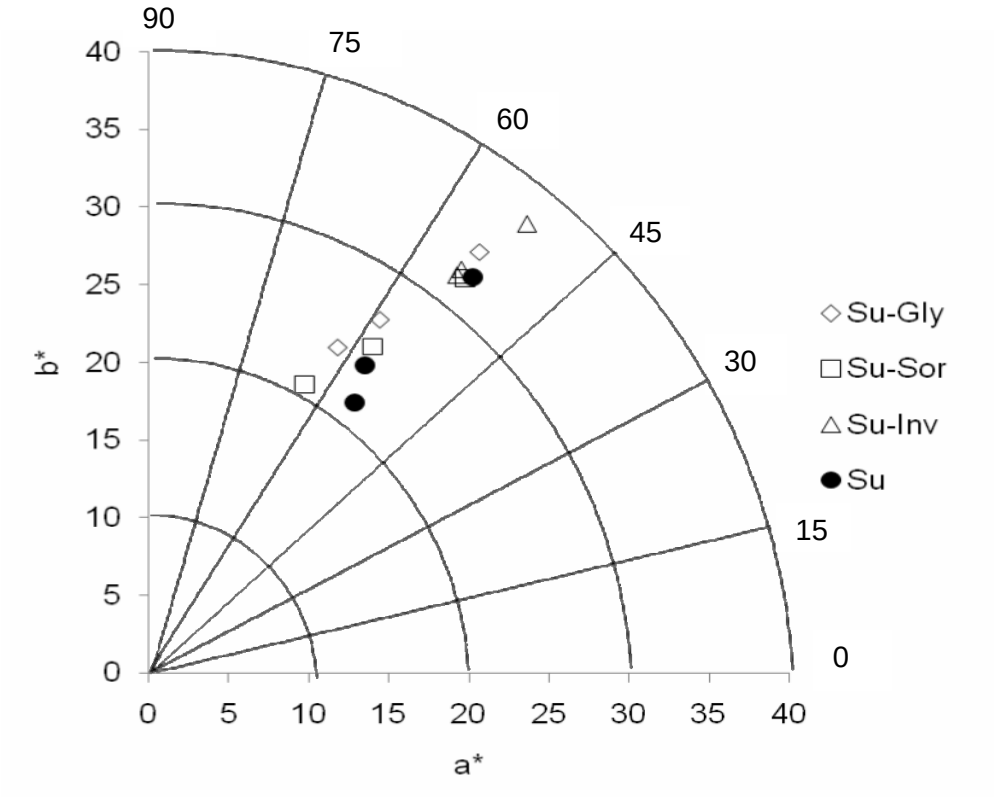
ตารางที่ 3.23 ค่า b* ของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา

ระยะเวลาการเก็บ (สัปดาห์)	b*			
	Su ^{ns}	Su-Sor	Su-Gly ^{ns}	Su-Inv
0 ^{ns}	25.55 ± 5.25	$25.44^{a} \pm 2.42$	27.13 ± 3.31	$28.96^{a} \pm 1.39$
4	$19.87^{C} \pm 1.54$	$21.04^{abBC} \pm 1.87$	$22.77^{B} \pm 0.42$	$26.02^{bA} \pm 1.30$
8	$17.43^{C} \pm 0.32$	$18.61^{bBC} \pm 0.40$	$20.99^{AB} \pm 1.82$	$25.66^{bA} \pm 0.70$

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

A, B, C.. ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันตามแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns ข้อมูลไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า a* และ b* ของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษา

เมื่อเปรียบเทียบค่าสีในระบบ CIELAB ของผลิตภัณฑ์แต่ละชุดการทดลองตลอดระยะการเก็บ (ตารางที่ 3.21-3.23) พบว่า Su-Inv มีการเปลี่ยนแปลงค่า L*, a* และ b* น้อยที่สุด การเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล การเพิ่มขึ้นของผลึกน้ำตาลที่ผิวของผลิตภัณฑ์ซึ่งส่งผลต่อการรับรู้สี รวมถึงการสลายตัวของเบตาแคโรทีนและไลโคปีน ซึ่งเป็นรงควัตถุหลักของมะละกอ

3.8.5 การเกิดสีน้ำตาลของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษา

ในงานวิจัยนี้ติดตามการเกิดสารสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ โดยใช้สารละลายกรดอะซิติกสกัดสารสีน้ำตาลจากผลิตภัณฑ์ แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร (A_{420}) จากตารางที่ 3.24 พบว่าค่า A_{420} ของผลิตภัณฑ์ทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาในการเก็บ โดย Su-Gly และ Su-Inv มีการเพิ่มขึ้นของค่า A_{420} อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตามค่า A_{420} ที่วัดได้ในทุกชุดการทดลองมีค่าต่ำมาก (ต่ำกว่า 0.1) จึงอาจเป็นไปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าการเกิดสีน้ำตาลมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งระหว่างการเก็บเกิดการเปลี่ยนแปลงนี้น้อย

ตารางที่ 3.24 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ของสารสกัดจากผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา

ระยะการเก็บ	A_{420}			
(สัปดาห์)	Su ^{ns}	Su-Sor ^{ns}	Su-Gly	Su-Inv
0	0.068 ± 0.009	0.035 ± 0.015	0.044^{b} ± 0.009	0.031^{b} ± 0.008
4	0.072 ± 0.008	0.045 ± 0.008	0.062^{ab} ± 0.007	0.050^{b} ± 0.007
8	0.088 ± 0.004	0.068 ± 0.004	0.073^{a} ± 0.005	0.075^{a} ± 0.006

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

ns ข้อมูลในแนวนอนไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

3.8.6 ปริมาณเบตาแคโรทีนและไลโคปีนของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษา

จากตารางที่ 3.25 และ 3.26 พบว่าผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งทุกชุดการทดลองในสัปดาห์เริ่มต้นของการเก็บมีปริมาณเบตาแคโรทีนและไลโคปีนลดลงเมื่อเทียบกับมะละกอสดอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) ซึ่งอาจเกิดจากการสลายตัวของเบตาแคโรทีนและไลโคปีนในมะละกอเนื่องจากความร้อนและปฏิกิริยาออกซิเดชันในระหว่างการอบแห้ง

ตารางที่ 3.25 ปริมาณเบตาแคโรทีนของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา

ระยะการเก็บ	ปริมาณเบตาแคโรทีน (ไมโครกรัม/ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง)				
(สัปดาห์)	มะละกอสด	Su	Su-Sor	Su-Gly	Su-Inv
0	$275.48^{A} \pm 62.97$	$125.22^{aBC} \pm 16.72$	$70.31^{aC} \pm 4.05$	$84.54^{aBC} \pm 19.50$	$140.14^{aB} \pm 9.56$
8	-	$40.66^{bB} \pm 5.22$	$35.32^{bB} \pm 3.17$	$37.83^{bB} \pm 1.28$	$56.58^{bA} \pm 9.87$

a, b.. ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันตามแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05)

A, B, C.. ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันตามแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05)

ตารางที่ 3.26 ปริมาณไลโคปีนของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งระหว่างการเก็บรักษา

ระยะการเก็บ	ปริมาณไลโคปีน (ไมโครกรัม/ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง)				
(สัปดาห์)	มะละกอสด	Su	Su-Sor^{ns}	Su-Gly	Su-Inv
0	$1220.78^{A} \pm 108.92$	$389.65^{aBC} \pm 2.30$	$301.56^{C} \pm 71.37$	$472.80^{aB} \pm 60.31$	$402.40^{aBC} \pm 87.88$
8	-	$144.03^{bC} \pm 24.37$	$254.29^{A} \pm 21.93$	$185.18^{bB} \pm 31.79$	$202.12^{bB} \pm 21.16$

a, b.. ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันตามแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05)

A, B, C.. ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับไว้ต่างกันตามแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05)

ns ข้อมูลของผลิตภัณฑ์ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05)

จากตารางที่ 3.25 พบว่าผลิตภัณฑ์แต่ละชุดการทดลองมีปริมาณเบตาแคโรทีนเริ่มต้นแตกต่างกัน โดยชุดการทดลอง Su และ Su-Inv มีปริมาณแบตาแคโรทีนคงเหลือสูงกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ โดยมีปริมาณคงเหลือประมาณร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับมะละกอสด ในขณะที่ชุดการทดลอง Su-Sor และ Su-Gly จะมีปริมาณแบตาแคโรทีนคงเหลือประมาณร้อยละ 25-30 เมื่อเทียบกับมะละกอสด ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างของวัตถุดิบ รวมถึงชนิดของสารละลายน้ำตาลที่ใช้ในการออสโมซิส แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ในแต่ละชุดการทดลองมาเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ พบว่าชุดการทดลอง Su-Gly และ Su-Sor จะมีปริมาณเบตาแคโรทีนคงเหลือสูงกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ คือคงเหลือประมาณร้อยละ 45-50 ในขณะที่ชุดการทดลอง Su และ Su-Inv จะมีปริมาณแบตาแคโรทีนคงเหลือประมาณร้อยละ 35-40 เมื่อเทียบกับสัปดาห์ที่ 0 ของการเก็บรักษา ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการใช้พอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ จะมีผลในการช่วยชะลอการเสื่อมสลายของเบตาแคโรทีนในผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งได้

จากตารางที่ 3.26 เมื่อพิจารณาปริมาณไลโคปีนภายหลังการอบแห้ง พบว่าปริมาณไลโคปีนจะลดลงเมื่อเทียบกับมะละกอสด โดยชุดการทดลอง Su, Su-Sor และ Su-Inv มีปริมาณไลโคปีนคงเหลือประมาณร้อยละ 25-33 ในขณะที่ชุดการทดลอง Su-Gly มีปริมาณไลโคปีนคงเหลือสูงกว่า คือมีปริมาณคงเหลือประมาณร้อยละ 40 ดังนั้นอาจเป็นได้ว่าการใช้กลีเซอรอลจะช่วยลดการสลายตัวของไลโคปีนเนื่องจากความร้อนของการอบแห้งได้ดีกว่าสารอื่น เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ในแต่ละชุดการทดลองมาเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ พบว่าชุดการทดลอง Su, Su-Gly และ Su-Inv จะมีปริมาณไลโคปีนคงเหลือประมาณร้อยละ 37-50 ในขณะที่ชุดการทดลอง Su-Sor จะปริมาณไลโคปีนคงเหลือสูงที่สุด คือเหลือประมาณร้อยละ 85 เมื่อเทียบกับสัปดาห์ที่ 0 ของการเก็บรักษา

จากตารางที่ 3.25 และ 3.26 จะเห็นได้ว่าซอร์บิทอลจะมีผลดีในแง่การช่วยชะลอการเสื่อมสลายของเบตาแคโรทีนและไลโคปีนเนื่องจากความร้อน และจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในระหว่างการอบแห้ง อย่างไรก็ตามการลดลงของปริมาณรงควัตถุทั้งสองชนิดนี้ไม่มีความสัมพันธ์กับอัตราการอบแห้งของผลิตภณฑ์ในแต่ละชุดการทดลอง (รูปที่ 3.8 และตารางที่ 3.4) นอกจากนี้ยังพบว่าซอร์บิทอลช่วยลดการสลายตัวของของเบตาแคโรทีนและไลโคปีนในระหว่างการเก็บรักษาได้อีกด้วย การที่ผลิตภัณฑ์ที่มีการทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอล กลีเซอรอล หรือน้ำตาลอินเวิร์ตสามารถรักษาปริมาณรงควัตถุได้ดีกว่าชุดควบคุม อาจเกิดจากค่า SG ในช่วงออสโมซิสที่สูงกว่าชุดควบคุม (ตารางที่ 3.2) ทำให้มีการแพร่ผ่านของตัวถูกละลายเข้าสู่ผลิตภัณฑ์มากกว่าชุดควบคุม และการเกิดชั้นฟิล์มของน้ำตาลบนผิวของตัวอย่าง จะช่วยลดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดจากออกซิเจนในระหว่างการอบแห้งและการเก็บรักษา (Shi *et al*., 1999)

อย่างไรก็ตามยังไม่พบงานวิจัยที่ศึกษาผลของชนิดสารออสโมติกต่อความเสถียรของเบตาแคโรทีนและไลโคปีนในผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง ชนิดของน้ำตาลอาจไม่ได้มีผลโดยตรงต่อความเสถียรของแคโรทีนอยด์ดังเช่นชนิดของน้ำตาลมีผลต่อเสถียรภาพของแอนโทไซยานิน Chottamom และคณะ (2012) พบว่า ลูกหม่อนแช่อิ่มอบแห้งที่ผ่านการออสโมซิสด้วยมอลโตสมีปริมาณแอนโทไซยานินมากกว่าลูกหม่อนแช่อิ่มอบแห้งที่ผ่านการออสโมซิสด้วยซูโครสหรือซอร์บิทอลอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากชนิดของน้ำตาลมีผลต่อเสถียรภาพของแอนโทไซยานิน

เมื่อพิจารณาผลของการเกิดผลึกน้ำตาล (ตารางที่ 12) ค่าการเกิดสีน้ำตาล (ตารางที่ 3.24) และปริมาณของเบตาแคโรทีนและไลโคปีน (ตารางที่ 3.25 และ 3.26) ต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์ (ตารางที่ 21-22) พบว่า การที่ Su-Inv มีค่าสี a* สูง แต่มีค่า L* ต่ำกว่าชุดการทดลองอื่น อาจมีสาเหตุหลักจากจากความสามารถของน้ำตาลอินเวิร์ตในการลดการเกิดผลึกน้ำตาลบนผิวของผลิตภัณฑ์ และการที่ Su-Inv มีปริมาณเบตาแคโรทีนคงเหลือในช่วงการเก็บสูงกว่าชุดการทดลองอื่น ($p \leq 0.05$) ขณะที่ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ทุกชุดการทดลองเกิดขึ้นน้อยมากในระหว่างการเก็บ จึงไม่น่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้สีของผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างกัน

3.8.7 ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด ยีสต์ และราของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษา

จากการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ พบว่า ผลิตภัณฑ์ทุกชุดการทดลองมีจำนวนแบคทีเรียทั้งหมดน้อยกว่า 300 CFU/g และตรวจไม่พบยีสต์และรา ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมผลไม้แห้งที่กำหนดให้ ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดไม่เกิน $1x10^4$ CFU/g ปริมาณยีสต์และราไม่เกิน $1x10^2$ CFU/g (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลิตภัณฑ์กลุ่มนี้มีปริมาณน้ำตาลสูงและมีค่า a_w ต่ำ แต่เมื่อเก็บผลิตภัณฑ์ชุดควบคุม (Su) พบว่า เมื่อเก็บรักษาไว้ถึง 10 สัปดาห์ ผลิตภัณฑ์ชุดควบคุมเริ่มมีการเน่าเสียจากเชื้อรา ทั้งนี้อาจจะเป็นไปได้ว่าค่า a_w ของผลิตภัณฑ์มีค่าสูง ทำให้ไม่สามารถเก็บผลิตภัณฑ์ได้นานตามที่เสนอไว้ในโครงการ

บทที่ 4
สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองในด้านกระบวนการผลิต พบว่า การทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอล (Su-Sor) หรือกลีเซอรอล (Su-Gly) ทำให้ตัวอย่างมีค่าการสูญเสียน้ำ (WL) และค่าการเพิ่มขึ้นของของแข็ง (SG) ระหว่างการออสโมซิสสูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่มีค่าคงที่การอบแห้งต่ำกว่าชุดควบคุมทำให้ต้องใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่า เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีความชื้นใกล้เคียงกัน ในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้ง พบว่า การทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอลหรือกลีเซอรอลทำให้ตัวอย่างมีแนวโน้มการลดลงของค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (a_w) ระหว่างการอบแห้งสูงกว่าชุดควบคุม แต่มีการหดตัวน้อยกว่าชุดควบคุม นอกจากนี้พบว่า Su-Gly หลังการอบแห้งมีค่า a_w และค่า spin-lattice relaxation time (^{1}H NMR T_1) ต่ำกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ขณะที่ Su-Sor มีการหดตัวของเซลล์ผลิตภัณฑ์น้อยกว่าชุดควบคุม และเมื่อเปรียบเทียบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีทดสอบเชิงพรรณนา พบว่า Su-Sor สามารถลดการเกิดผลึก รักษาความคงรูป รวมถึงปรับปรุงลักษณะด้านความแข็ง ความเหนียว และความชุ่มน้ำของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าชุดควบคุม จากการศึกษามอยส์เจอร์ซอร์พชันไอโซเทิร์ม (MSI) ของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งที่อุณหภูมิ 30±2 องศาเซลเซียส พบว่า Su-Sor และ Su-Gly มีความชันของ MSI ในช่วงค่า a_w 0.6-0.9 และมีค่า monolayer moisture content (M_o) ที่ทำนายจากแบบจำลอง GAB สูงกว่าชุดควบคุม แสดงถึงความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำของพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ที่ดีกว่าซูโครส ในระหว่างการเก็บ พบว่า Su-Sor มีค่าความแข็งและค่างานในการตัดต่ำกว่าชุดควบคุมตลอดระยะการเก็บ และมีปริมาณไลโคปีนหลังผ่านการเก็บสูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และมีค่าใกล้เคียงกับ Su-Inv ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการทดแทนซูโครสด้วยพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์มีแนวโน้มในการปรับปรุงกระบวนการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าการใช้ซูโครสเพียงอย่างเดียวในการออสโมซิส

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างผลิตภัณฑ์ที่ทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอลหรือกลีเซอรอลกับผลิตภัณฑ์ที่ทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต (Su-Inv) ในด้านกระบวนการผลิต พบว่า Su-Gly มีค่า WL และ SG สูงกว่า Su-Inv อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ขณะที่ Su-Sor มีค่า WL ต่ำกว่า Su-Inv อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่มีค่า SG ไม่แตกต่างจาก Su-Inv อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) นอกจากนี้พบว่า Su-Sor และ Su-Gly มีค่าคงที่การอบแห้งสูงกว่า Su-Inv เล็กน้อย ในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้ง พบว่า Su-Sor และ Su-Gly มีแนวโน้มการลดลงของค่า a_w และการหดตัวระหว่างการอบแห้งใกล้เคียงกับ Su-Inv ซึ่งชี้ให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์มีการคงรูปใกล้เคียงกัน สำหรับผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง พบว่า Su-Gly และ Su-Inv มีค่า a_w ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตาม Su-Gly ทั้งหลังการออสโมซิสและหลังการอบแห้งมีค่า ^{1}H NMR T_1 ต่ำกว่า Su-Inv อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความมีอิสระของน้ำต่ำกว่า จากการพิจารณาลักษณะของเซลล์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่า Su-Sor และ Su-Inv หลังการ

อบแห้งมีลักษณะเซลล์ใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส พบว่า Su-Sor มีลักษณะด้านความแข็งกับความเหนียวใกล้เคียงกับลักษณะที่ผู้บริโภคคาดหวังมากกว่าชุดการทดลองอื่น รวมถึงมีลักษณะด้านการเกิดผลึก ความคงรูปและความชุ่มน้ำใกล้เคียงกับ Su-Inv เมื่อพิจารณา MSI ของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 30±2 องศาเซลเซียส พบว่า Su-Gly และ Su-Sor มีค่า M_o ที่คำนวณจากแบบจำลอง GAB สูงกว่า Su-Inv ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการจับน้ำที่ดีกว่า เมื่อพิจารณาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บ พบว่า Su-Sor มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งและค่างานในการตัดใกล้เคียงกับ Su-Inv และมีปริมาณไลโคปีนคงเหลือหลังผ่านการเก็บสูงกว่า Su-Inv อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จากผลการทดลองทั้งในด้านกระบวนการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ พบว่า การทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอลอาจเป็นทางเลือกในการปรับปรุงกระบวนการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์แทนการทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต ซึ่งมีใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง

เอกสารอ้างอิง

จิราพร กอศรีลบุตร. 2549. ผลของน้ำตาลอินเวิร์ตต่อการทำแห้งและคุณภาพของแคนตาลูป *Cucumis melon* L. แช่อิ่มอบแห้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์, ชาตรี มั่นกลาง และ พีรยา โชติถนอม. 2552. ผลของการพรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายเคมีและสารละลายออสโมติกที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งผลหม่อน. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 40(1): 477-480.

ธนจันทร์ มหาวนิช. 2554. การใช้นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปีเพื่อติดตามการเคลื่อนที่ของน้ำในระบบอาหาร. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 39: 409-420.

บูรฉัตร ศรีทองแท้. 2551. ผลของพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ต่อการทำแห้งและคุณภาพของแคนตาลูปแช่อิ่มอบแห้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พงษ์พิสุทธิ์ คุณะวันทนิต. 2553. ผลของน้ำผึ้งและน้ำสับปะรดต่อการอบแห้งและคุณภาพของบีตรูทแช่อิ่มอบแห้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, สำนักงาน. 2532. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้แห้ง. มอก. 919-2532. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม.

ศรีวิกรณ์ ดิษฐอุดมโพธิ์ และ ชลธิชา ปิตตาระเต. 2550. การถ่ายเทมวลสารระหว่างการทำแห้งด้วยวิธีการออสโมซิสมะเขือเทศโดยใช้น้ำตาลซูโครส ซอร์บิทอล และมอลทิทอล. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 38(6): 115-118.

Al-Muhtaseb, A. H., Mcminn, W. A. M. and Magee, T. R. A. 2002. Moisture sorption isotherm charactheristics of food products: a review. Food and Bioproducts Processing 80: 118-128.

AOAC. 2000. Official Methods of Analysis. 17th ed. Washington, DC: The Association of Official Analytical Chemists.

Azoubel, P. and Murr, F. E. X. 2004. Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato. Journal of Food Engineering 61: 291–295.

Azuara, E., Cortes, R., Garcia, H. S. and Berstian, C. I. 1992. Kinetic model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's Second Law. International Journal of Food Science and Technology 27: 239-242.

Baker, C. G. J. 1997. Industrial Drying of Foods. London: Blackie Academic & Professional.

Baloch, A. K., Buckle, K. A., and Edwards, R. A. 1973. Measurement of non enzymatic browning of dehydrated carrot. Journal of Science of Food and Argriculture 24: 389-398.

Barba, A. O., Hurtado, M. C., Mata, M. C. S., Ruiz, V. F., and Tejada, M. L. S. 2006. Application of a UV-vis detection-HPLC method for a rapid determination of lycopene and β-carotene in vegetables. Food Chemistry 95: 328-336.

Behsnilian, D. and Spiess, W. E. L. 2006. Osmotic dehydration of fruits and vegetables. IUFoST World Congress. 13th World Congress of Food Science and Technology, pp. 1857-1869. France, 17-21 September 2006.

Cánovas, G. V. B. and Mercado, H. V. 1996. Dehydration of Foods. New York: Chapman & Hall. 330 p.

Chottanom, P., Kongmanee, R., Manklang, C., and Soponronnarit, S. 2012. Effect of osmotic treatment on drying kinetics and antioxidant properties of dried mulberry. Drying Technology 30: 80-87.

Collignan, A. and Raoult-Wack, A. L. 1994. Dewatering and salting of cod by immersion in concentrated sugar/salt solutions. Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie 27: 259-264.

Duangmal, K., Laorko, A. and Tattiyakul, J. 2005. Effects of invert sugar on quality changes in osmotically dehydrated papaya. In Fito, P. and Toldra, F. (eds.), Proceedings of Innovations in Traditional Foods (INTRADFOOD 2005), pp. 113-116. London: Elsevier.

Falade, K. O., Adetunji, A. I., and Aworh, O. C. 2003. Adsorption isotherm and heat of sorption of fresh- and osmo-oven dried plantain slices. European Food Research and Technology 217: 230–234.

Farahnaky, A., Ansari, S. and Majzoobi, M. 2009. Effect of glycerol on the moisture sorption isotherms of figs. Journal of Food Engineering 93: 468-473.

Farahnaky, A., Ansari, S. and Majzoobi, M. 2010. The effect of glucose syrup and glycerol on some physical properties of dried figs. Journal of Texture Studies 41(5): 633-650.

Feeters, R. F. and Tang, H. C. L. 1983. Relation among cell wall constituents, calcium and texture during cucumber fermentation and storage. Journal of Food Science 48: 66-70.

Fennema, O. R. 1996. Water and Ice. Food Chemistry. 3rd ed. pp. 17-94. New York: Marcel Decker.

Gustavo, V., Barbosa-Canovas, J. J., Fernandez-Molina, S. M., Alzamora, M. S. and Tapia, A. L. M. 2007. Handling and Preservation of Fruits and Vegetables by Combined Methods for Rural Areas. 1st ed. Daya Publishing House.

Harrigan, W. F. and McCance, M. E. 1976. Laboratory Methods in Foods and Dairy Microbiology. London: Academic Press.

Henderson, S. M. and Pabis, S. 1961. Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. Journal of Agricultural Engineering Research 6: 169-174.

Karathanos, V. T. 1999. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. Journal of Food Engineering. 39: 337-344.

Korsrilabut, J., Borompichaichartkul, C. and Duangmal, K. 2010. Effect of invert sugar on the drying kinetics and water mobility of osmosed-air dried cantaloupe. International Journal of Food Science and Technology 45: 1524-1531.

Labuza, T. P., and Altunakar, B. 2007. Water activity prediction and moisture sorption isotherm. In Water Activity in Foods - Fundamentals and Applications, pp. 109-154. Oxford: Blackwell Publishing.

Lazarides, H. N. 2001. Reasons and possibilities to control solids uptake during osmotic treatment of fruits and vegetables. In P. Fito., A. Chiralt., J. M. Barat., W. E. L. Spiess and D. Behsnilian (eds.), Osmotic Dehydration and Vacuum Impregnation, pp. 33-42. Pennsylvania: Technomic Publishing.

Mahayothee, B., Udomkun, P., Nagle, M., Haewsungcharoen, M., Janjai, S. and Mueller, J. 2009. Effects of pretreatments on colour alterations of litchi during drying and storage. European Food Research and Technology 229: 329-337.

Mathlouthi, M. 2001. Water content, water activity, water structure and the stability of foodstuffs. Food Control 12: 409-417.

Moreira, R., Chenlo, F., Torres, M. D. and Vazquez, G. 2007. Effect of stirring in the osmotic dehydration of chestnut using glycerol solutions. LWT- Food Science and Technology 40: 1507-1514.

Moreno, J., Bugueno, G., Velasco, V., Petzold, G. and Tabilo-munizaga, G. 2004. Osmotic dehydration and vacuum impregnation on physicochemical properties of chilean papaya (*Carica candamarcensis*). Journal of Food Science 69: 102-106.

O' Neil, M. J., Smith, A., Heckelman, P. E., Obenchain, J. R., Gallipeas, J. A. R., D'Arecca, M. A. and Budavari, S. 2001. The Merck Index: An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals. 13th ed. New Jersey: Whitehouse Station.

Ozen, B. F., Dock, L. L., Ozdemir1, M. and John, D. F. 2002. Processing factors affecting the osmotic dehydration of diced green peppers. International Journal of Food Science and Technology 37: 497-502.

Page, G. E. 1949. Factors influencing the maximum rate of air drying shelled corn in thin-layers. M.S.Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana.

Pattanapa, K., Therdthai, N., Chantraporncha, W. and Zhou, W. 2010. Effect of sucrose and glycerol mixtures in the osmotic solution on characteristics of osmotically dehydrated mandarin cv. (Sai-Namphaung). International Journal of Food Science and Technology 45: 1918-1924.

Pereira, L. M., Carmello-Guerreiro, S. M. and Hubinger, M. D. 2009. Microscopic features, mechanical and thermal properties of osmotically dehydrated guavas. LWT - Food Science and Technology. 42: 378-384.

Pereira, L. M., Ferrari, C. C., Mastrantonio, S. D. S., Rodrigues, A. C. C. and Hubinger, M. D. 2006. Kinetics aspects, texture, and color evaluation of some tropical fruits during osmotic dehydration. Drying Technology 24: 475-484.

Raoult-Wack, A. L. 1994. Recent advances in the osmotic dehydration of food. Trends in Food Science and 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.

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.

Shi, J., Maguer, M. L., Kakuda, Y., Liptay, A. and Niekamp, F. 1999. Lycopene degradation and isomerization in tomato dehydration. Food Research International 32: 15-21.

Sritongtae, B., Mahawanich, T. and Duangmal, K. 2011. Drying of osmosed cantaloupe: effect of polyols on drying and water mobility. Drying Technology 29: 527-535.

Therdthai, N., Zhou, W. and Pattanapa, K. 2011. Microwave vacuum drying of osmotically dehydrated mandarin cv. (*Sai-Namphaung*). International Journal of Food Science and Technology. 46: 2401-2407.

Therdthai, N. and Visalrakkij, T. 2012. Effect of osmotic dehydration on dielectric properties, microwave vacuum drying kinetics and quality of mangosteen. International Journal of Food Science and Technology. 47: 2606–2612.

Timmermann, E. O., Chirife, J. and Iglesias, H. A. 2001. Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters ?. Journal of Food Engineering 48: 19-31.

Torreggiani, D. 1993. Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. Food Research International 26: 59-68.

Torreggiani, D. and Bertolo, G. 2001. Osmotic pre-treatments in fruit processing: chemical, physical and structural effects. Journal of Food Engineering 49: 247-253.

USDA., 2011. National Nutrient Database for Standard Reference. [Online]. Available from: http://www.nal.usda.gov/fnic/foodcomp/cgi-bin/list_nut_edit.pl [2011, November 27]

Wolever, T. M. S., Piekarz, A., Hollands, M. and Younker, K. 2002. Sugar alcohols and diabetes: a review. Canadian Journal of Diabetes 26: 356-362.

Xianquan, S., Shi, J., Kakuda, Y. and Yueming, J. 2005. Stability of lycopene during food processing and storage. Journal of Medicinal Food 8(4): 413-422.

Yan, Z., Sousa-Gallagher, M. J. and Oliveira, F. A. R. 2008. Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. Journal of Food Engineering 84: 430-440.

Zenoozian, M. S., Feng, H., Razavi, S. M. A., Shahidi, F. and Pourreza, H. R. 2008. Image analysis and dynamic modeling of thin-layer drying of osmotically dehydrated pumpkin. Journal of Food Processing and Preservation 32: 88-102.

Output จากโครงการวิจัย

ผลลัพธ์	**ปริมาณ**
ด้านองค์ความรู้	
ผลการทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ต่อการออสโมซิสและการอบแห้งมะละกอแช่อิ่ม	1
ผลการทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ต่อคุณภาพของมะละกอแช่อิ่มอบแห้ง และมอยส์เจอร์ซอร์พชันไอโซเทิร์ม	1
ด้านผลงานตีพิมพ์	
วารสารนานาชาติ (ขณะนี้กำลังจัดเตรียมต้นฉบับโดยส่งไปยังวารสาร Journal of Food Engineering)	1
วารสารในประเทศ (บทความวิจัย ขณะนี้อยู่ระหว่างการพิจารณา โดยส่งบทความไปยังวารสารวิทยาศาสตร์ มข.)	1
ด้านผลิตภัณฑ์ต้นแบบ	
มะละกอแช่อิ่มอบแห้งที่มีการทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยซอร์บิทอล	1
ด้านการผลิตบัณฑิต	
ระดับปริญญาโท (นายสิทธิโชค เถลิงนวชาติ)	1