

จลนศาสตร์การถ่ายเทมวลและคุณภาพทางเคมีกายภาพของมะขามป้อม จากการดึงน้ำออกโดยวิธีออสโมซิสด้วยสารละลายน้ำตาลผสมเข้มข้น

Mass Transfer Kinetics and Physicochemical Quality of Amla from Osmotic Dehydration using Mixed Sugar Concentrated Solutions

วิชมนิ ยืนยงพุททกาล^{1*} อภิสักดิ์ ไชยโรจน์วัฒนา² และ สุภิสรา เปี่ยมผล¹

Wichamanee Yuenyongputtakal^{1*}, Apisak Chairojwattana² and Supissara Piempol¹

Received: 5 November 2020, Revised: 25 December 2020, Accepted: 5 February 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของสัดส่วนน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสและน้ำตาลซูโครสในการเตรียมสารละลายออสโมติกความเข้มข้น 70 กรัม/100 กรัม สำหรับการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสจากเนื้อมะขามป้อม วิเคราะห์จลนศาสตร์การถ่ายเทมวลตามกฎข้อที่สองของฟิค ที่พิจารณาภายใต้เงื่อนไขสำหรับวัสดุที่มีรูปร่างเป็นแผ่นระนาบ โดยทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและของแข็ง ผลการทำนาย พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำมีค่าระหว่าง 1.41×10^{-8} m²/s และ 5.00×10^{-8} m²/s ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของของแข็งมีค่าระหว่าง 0.45×10^{-8} m²/s และ 2.15×10^{-8} m²/s จากผลการทดลองพบแนวโน้มว่าปริมาณน้ำที่สูญเสีย (WL) ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (SG) และปริมาณน้ำหนักรีดลดลง (WR) เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของซูโครสที่ใช้ โดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือการใช้สัดส่วนของน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตส 50% และน้ำตาลซูโครส 50% โดยออสโมซิสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง ทำให้มีค่า WL SG และ WR เท่ากับ 46.01%, 2.25% และ 41.75% ตามลำดับ โดยผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีกายภาพพบว่า มะขามป้อมหลังการออสโมซิสมีปริมาณความชื้นและค่า a_w ลดลง และมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณพฤกษเคมีลดลงกว่ามะขามป้อมสด โดยมะขามป้อมหลังการออสโมซิสมีปริมาณวิตามินซี 10.70 mg/g ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 248.17 mg GAE/g และสมบัติต้านอนุมูลอิสระ DPPH 78.10% ซึ่งมากกว่าเมื่อออสโมซิสด้วยน้ำตาลซูโครส 27.20% 20.13% และ 2.48% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการเลือกใช้โอลิโกฟรุคโตสรวมด้วยทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นจึงเหมาะสำหรับตลาดอาหารเพื่อสุขภาพมูลค่าสูง

คำสำคัญ: น้ำตาลโอลิโกฟรุคโตส, น้ำตาลซูโครส, มะขามป้อม, จลนศาสตร์การถ่ายเทมวล

¹ ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

¹ Department of Food Science, Faculty of Science, Burapha University, Saensook, Mueang, ChonBuri 20131, Thailand.

² ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

² Department of Mathematics, Faculty of Science, Burapha University, Saensook, Mueang, ChonBuri 20131, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): wich@go.buu.ac.th

ABSTRACT

The effect of proportions of oligofructose and sucrose to prepared 70 g/100g osmotic solution on Amla flesh osmotic dehydration were investigated. An analytical solution of Fick's second law for diffusion in infinite slab geometry successfully determined mass transfer kinetics in terms of the effective water and solid diffusion coefficient. The predicted water diffusion coefficients were between $1.41 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ and $5.00 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, whereas solid diffusion coefficients were between $0.45 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, and $2.15 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. Based on these results, it can be concluded that water loss (WL), solid gain (SG), and weight reduction (WR) increased with sucrose concentration. It was found that the most appropriate condition was using the proportion of 50% oligofructose and 50% sucrose and osmosis for 10 hours yielding WL, SG and WR equal to 46.01%, 2.25%, and 41.75%, respectively. The physicochemical quality resulted in reduction in moisture content and a_w value of Amla flesh after osmotic dehydration process as well as resulting in increased total soluble solid. However, the content of phytochemicals was lower than fresh Amla. The osmosed Amla remained 10.70 mg/g of vitamin C, 248.17 mg GAE/g of total phenolic compound and 78.10% of DPPH scavenging antioxidant property, which were greater than obtained from sucrose impregnation 27.20%, 20.13% and 2.48%, respectively. However, the use of oligofructose increases production costs, so it might be suitable for high-value health foods market.

Key words: oligofructose, sucrose, amla, mass transfer kinetic

บทนำ

มะขามป้อมเป็นสมุนไพรที่เป็นแหล่งที่ดีของวิตามินซี มีสารประกอบฟีนอลิกที่มีประโยชน์ด้านการต้านอนุมูลอิสระ และมีรายงานว่ามะขามป้อมมีสารออกฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาที่มีผลดีต่อสุขภาพ เช่น แก้ไอ ยับยั้งการเป็นพิษต่อตับและไต ด้านการเกิดแผลในกระเพาะอาหาร และเพิ่มภูมิคุ้มกัน เป็นต้น (Pitiporn, 2005; Rose *et al.*, 2018) แผนแม่บทแห่งชาติว่าด้วยการพัฒนาสมุนไพรไทย พ.ศ. 2560-2564 กำหนดรายการสมุนไพรที่มีศักยภาพของประเทศ ที่ควรวางแผนด้านการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ออกสู่ตลาด เพื่อสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจให้กับประเทศ โดยพบว่า มะขามป้อมจัดเป็นสมุนไพรที่มีศักยภาพ 1 ใน 5 ชนิด ร่วมกับ

กวาวเครือขาว กระชายดำ ขมิ้นชัน และบัวบก (Ministry of Public Health, 2016)

งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจปรับปรุงกระบวนการผลิตมะขามป้อมแช่อิ่ม โดยใช้หลักการออสโมซิสซึ่งทำได้โดยแช่ชิ้นผลไม้ในสารละลายออสโมติกที่มีความเข้มข้นสูง มีผลให้มีการถ่ายเทมวลสารระหว่างผลไม้กับสารละลายออสโมติก เป็นการดึงน้ำบางส่วนออกจากชิ้นผลไม้บางส่วน ซึ่งเป็นการลดปริมาณน้ำในชิ้นผลไม้ลง แรงดันออสโมติกของสารละลายเข้มข้นสูงเกิดเป็นแรงขับทำให้เกิดการแพร่ของน้ำจากผลไม้ (Rastogi and Raghavarao, 2004a) ข้อดีของการออสโมซิส เช่น ยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ รักษาสารให้กลิ่นรส ช่วยการคงสีตามธรรมชาติโดยไม่ต้องเติมซัลไฟต์ และเป็นการแปรรูปที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

สถานะของของเหลวจึงใช้พลังงานน้อย (Beristain *et al.*, 1990) รวมทั้งช่วยลดค่าออกเตอร์แอคติวิตีของผลไม้ด้วย (Corrêa *et al.*, 2010) โดยงานวิจัยนี้ใช้น้ำตาลโอลิโกฟรุคโตส (oligofructose) ทดแทนการใช้น้ำตาลซูโครส เนื่องจากน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสมีคุณสมบัติเป็นพรีไบโอติก ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของเชื้อกลุ่มที่มีประโยชน์อันส่งผลให้สามารถป้องกันการเกิดโรคต่างๆ ได้ และมีรสหวานน้อยกว่าน้ำตาลซูโครส (Niva, 2007) ซึ่งสอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภคยุคใหม่ที่สนใจในการรักษาสุขภาพ รวมทั้งกระบวนการแช่เป็นวิธีการที่สามารถเสริมสารอื่นที่ไม่พบในผลไม้ได้ (Sabater-Molina *et al.*, 2009) โดยการแพร่ของตัวถูกละลายในสารละลายออสโมติกเข้าไปในชิ้นผลไม้ระหว่างการแช่และสารดังกล่าวอาจเป็นประโยชน์ต่อสุขภาพหรือช่วยป้องกันโรคได้อีกทางหนึ่ง ดังนั้นการออสโมซิสด้วยสารละลายเข้มข้นที่มีส่วนผสมของน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสจึงเป็นแนวทางสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับมะขามป้อมแปรรูปได้อีกทางหนึ่ง อย่างไรก็ตาม การใช้น้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสในการออสโมซิส มีข้อจำกัดในการแพร่เพื่อเข้าไปกระตุ้นการถ่ายเทมวลสารต่ำกว่าน้ำตาลซูโครส เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า จึงมีโอกาสทำให้อัตราการสูญเสียน้ำออกจากชิ้นผลไม้ต่ำ (Matusek, 2008) การเข้าใจถึงกลไกการถ่ายเทมวลและการติดตามเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมีกายภาพที่เกิดขึ้นจากการออสโมซิสจะช่วยให้การปรับปรุงกระบวนการแช่มีประสิทธิภาพได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น Rubio-Arreaz *et al.* (2015) รายงานว่า ในการออสโมซิสขึ้นส้มโดยการให้สารให้ความหวานทางเลือก ได้แก่ ไอโซมอลทูโลส (isomaltulose) โอลิโกฟรุคโตส (oligofructose) และสารสกัดจากหญ้าหวาน พบว่า สามารถใช้รูปแบบสมการจลศาสตร์การถ่ายเทมวลตามกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) เพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การ

แพร่ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทมวลสารได้ โดยพบแนวโน้มว่าการใช้สารละลายผสมความเข้มข้นสูงช่วยเพิ่มแรงดันออสโมติก (osmotic pressure) ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสัดส่วนปริมาณน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสและน้ำตาลซูโครสที่ใช้เตรียมสารละลายออสโมติกต่อจลศาสตร์การถ่ายเทมวลสารและคุณภาพทางเคมีกายภาพของมะขามป้อมจากกระบวนการออสโมซิส

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่างมะขามป้อมและสารละลายออสโมติก

งานวิจัยนี้ใช้มะขามป้อมอินเดีย (*Phyllanthus indofischeri*) รับจากสวนในจังหวัดปราจีนบุรี เก็บรักษาในตู้แช่แข็ง (Sanyo รุ่น SF-C1497) ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส การนำมาใช้งานทำโดยละลายมะขามป้อมแช่แข็งโดยวางในตู้เย็นอุณหภูมิ 4-6 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วล้างทำความสะอาด โดยคัดเลือกผลที่มีขนาดและน้ำหนักใกล้เคียงกัน ไม่มีรอยชำรุดหรือแตก แล้วนำมาผ่าครึ่งผลตามความยาวผลจากขั้ว แบ่งให้เป็น 2 ชิ้น/ผล แล้วแกะเมล็ดออก นำมาเตรียมขึ้นต้น โดยการลวกด้วยไอน้ำ (อุณหภูมิ 90-95 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 5 นาที แล้วแช่ในน้ำผสมน้ำแข็ง (อุณหภูมิ 4-6 องศาเซลเซียส) ทันทีเป็นเวลา 1 นาที และสะเด็ดน้ำเป็นเวลา 5 นาที สำหรับงานวิจัยนี้เก็บวัตถุดิบมะขามป้อมในสถานะแช่แข็งก่อนการออสโมซิส จึงอาจมีลักษณะเนื้อสัมผัสไม่เหมือนของสด เนื่องจากในระหว่างการแช่แข็งเกิดผลึกน้ำแข็งซึ่งอาจเกิดการทิ่มแทงเซลล์ ทำให้ผนังเซลล์มีโอกาสเกิดรูขนาดเล็กที่เอื้อต่อการแพร่ออกของน้ำออกจากเซลล์ (Floury *et al.*, 2008) อย่างไรก็ตามมีรายงานว่า การแช่แข็งก่อนการออสโมซิสไม่มีผลต่อค่าการถ่ายเทมวลสาร ใน

ผักผลไม้เนื้อแข็งบางชนิด เช่น พื้กทอง เป็นต้น (Kowalska *et al.*, 2008) ดังนั้นคุณภาพวัตถุดิบจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาและควบคุม

ตัวถูกละลายที่ใช้ในการเตรียมสารละลายออสโมติกในงานวิจัยนี้ ได้แก่ น้ำตาลโอลิโกฟรุคโตส (P95, Beneo ORAFIT, ประเทศ เบลเยียม) และ น้ำตาลซูโครส (ตรามิตรผล, ประเทศไทย) แปรสัดส่วนปริมาณการใช้เป็น 5 ระดับ ตามรายละเอียดในตารางที่ 1 โดยควบคุมความเข้มข้นของตัวถูกละลายให้เท่ากับ 70 กรัม/100 กรัม เตรียมสารละลายออสโมติกโดยผสมน้ำตาลกับน้ำตามสัดส่วนที่กำหนด ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75-80 องศาเซลเซียส

เป็นเวลา 5 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องก่อนนำมาใช้งาน

2. การออสโมซิส

แช่ชิ้นมะขามป้อมในสารละลายออสโมติก โดยนำมะขามป้อมที่เตรียมไว้มาใส่ในตะกร้าสแตนเลสแบบโปร่ง รูปทรงกระบอกแบบมีฝาปิด ซึ่งมีขนาดรูตะแกรง 2×2 เซนติเมตร แล้วแช่ให้จุ่มในสารละลายออสโมติกที่บรรจุในโหลแก้วปิดด้วยอคูมิเนียมฟอยด์ที่อุณหภูมิห้อง กำหนดใช้อัตราส่วนระหว่างมะขามป้อมกับสารละลายออสโมติก คือ 1:5 (น้ำหนัก/ปริมาตร) (Nambiar *et al.*, 2016)

ตารางที่ 1 สัดส่วนปริมาณน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสและน้ำตาลซูโครสในการเตรียมสารละลายออสโมติก

สิ่งทดลองที่	สัดส่วน (%)		ปริมาณที่ใช้สำหรับสารละลายออสโมติก 100 กรัม		
	ซูโครส	โอลิโกฟรุคโตส	ซูโครส (กรัม)	โอลิโกฟรุคโตส (กรัม)	น้ำกลั่น (กรัม)
1	0	100	0.0	70.0	30.0
2	25	75	17.5	52.5	30.0
3	50	50	35.0	35.0	30.0
4	75	25	52.5	17.5	30.0
5	100	0	70.0	0.0	30.0

3. การศึกษาจลศาสตร์การถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิส

สุ่มตัวอย่างชิ้นมะขามป้อมเมื่อแช่ในสารละลายออสโมติกเป็นเวลา 0, 2, 4, 6, 8, 10, และ 12 ชั่วโมง นำตัวอย่างมาล้างน้ำเพื่อกำจัดสารละลายส่วนเกินที่ผิวออกแล้วชั่งให้แห้งด้วยกระดาษซับ ชั่งน้ำหนัก วิเคราะห์ปริมาณความชื้น (AOAC, 1990)

คำนวณหาค่าการถ่ายเทมวลสาร ได้แก่ ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (Water Loss; WL) ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Solid Gain; SG) และปริมาณน้ำหนักที่ลดลง (Weight Reduction; WR) เพื่ออธิบายการถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้นระหว่างการออสโมซิส โดยคำนวณตามสมการที่ (1) (2) และ (3) (Fernandes *et al.*, 2006)

ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (Water Loss; WL)

$$WL = \frac{(W_0 M_0 - W_t M_t)}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Solid Gain; SG)

$$SG = \frac{[w_t - (1 - M_t) - w_0(1 - M_0)]}{w_0} \times 100 \quad (2)$$

ปริมาณน้ำหนักที่ลดลง (Weight Reduction; WR)

$$WR = \frac{w_0 - w_t}{w_0} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ	W_0	คือ	น้ำหนักตัวอย่างที่เวลาเริ่มต้น (g)
	W_t	คือ	น้ำหนักตัวอย่างหลังการออสโมซิสที่เวลา t (g)
	M_0	คือ	ปริมาณความชื้นเฉลี่ยของตัวอย่างที่เวลาเริ่มต้น (g/g)
	M_t	คือ	ปริมาณความชื้นเฉลี่ยของตัวอย่างหลังการออสโมซิสที่เวลา t (g/g)

คำนวณค่าสัดส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) และค่าสัดส่วนของแข็ง (Solid ratio, SR) ระหว่างการแช่ในสารละลายออสโมติกตามสมการที่ (4) และ (5) คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ของน้ำและของแข็ง ตามจลศาสตร์การถ่ายเทมวลตามกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) พิจารณาภายใต้เงื่อนไขสำหรับวัสดุที่มีรูปร่างเป็นแผ่นระนาบ (infinite slab) ตามสมการที่ (6) และ (7) โดยพิจารณาความน่าเชื่อถือของสมการจากค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนกำลัง

สอง (Root mean square error, RMSE) ภายใต้สมมติฐานดังนี้ (Rastogi and Raghavarao, 2004b)

- 1) มีรูปแบบการแพร่ของน้ำและของแข็งเท่ากันในทุกทิศทาง
- 2) ไม่มีสภาวะการด้านการถ่ายเทมวลสารจากแหล่งอื่น
- 3) ไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การหดตัว
- 4) การออสโมซิสใช้สภาวะอุณหภูมิคงที่

ค่าสัดส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR)

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (4)$$

ค่าสัดส่วนของแข็ง (Solid ratio, SR)

$$SR = \frac{S_t - S_e}{S_0 - S_e} \quad (5)$$

เมื่อ	M_t	คือ	ปริมาณความชื้นเฉลี่ยของตัวอย่างหลังการออสโมซิสที่เวลา t (g/g)
	M_e	คือ	ปริมาณความชื้นสมดุล (g/g)
	M_0	คือ	ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่าง (g/g)
	S_t	คือ	ปริมาณของแข็งเฉลี่ยของตัวอย่างหลังการออสโมซิสที่เวลา t (g/g)
	S_e	คือ	ปริมาณของแข็งสมดุล (g/g)
	S_0	คือ	ปริมาณของแข็งเริ่มต้นของตัวอย่าง (g/g)

จลศาสตร์การถ่ายเทมวลตามกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) สำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (Water diffusion

coefficients, D_{ew}) และของแข็งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (Solid diffusion coefficients, D_{es}) (Rastogi and Raghavarao, 2004b)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[\frac{-D_{ew}\pi^2 t}{4l^2} \right] \quad (6)$$

$$SR = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[\frac{-D_{es}\pi^2 t}{4l^2} \right] \quad (7)$$

เมื่อ	D_{ew}	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (m^2/s)
	D_{es}	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของของแข็ง (m^2/s)
	t	คือ	เวลาการออสโมซิส (s)
	l	คือ	ความหนาของตัวอย่าง (m)

4. การวิเคราะห์ค่าการถ่ายเทมวลสารและคุณภาพ

ทางเคมีกายภาพของมะขามป้อมหลังการออสโมซิส

สุ่มตัวอย่างชิ้นมะขามป้อมหลังการออสโมซิส 10 ชั่วโมง มาวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (AOAC, 1990) และคำนวณค่าการถ่ายเทมวลสารตามสูตรที่ (1) (2) และ (3) รวมทั้งวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีกายภาพ ได้แก่ ปริมาณวิตามินซี (AOAC, 1990) ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Singleton *et al.*, 1999) สมบัติการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (Turkmen *et al.*, 2005) ค่า a_w ด้วยเครื่องวัดค่า a_w (Novasina, รุ่น AG Lab Master) และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) ด้วยเครื่อง Hand refractometer (Atago รุ่น Master, Japan) ทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (ANOVA) โดยวางแผนการทดลองแบบ CRD เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Tukey Test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab version 18

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. จลศาสตร์การถ่ายเทมวลสารของมะขามป้อมระหว่างการออสโมซิส

1.1 ค่าการถ่ายเทมวลสาร

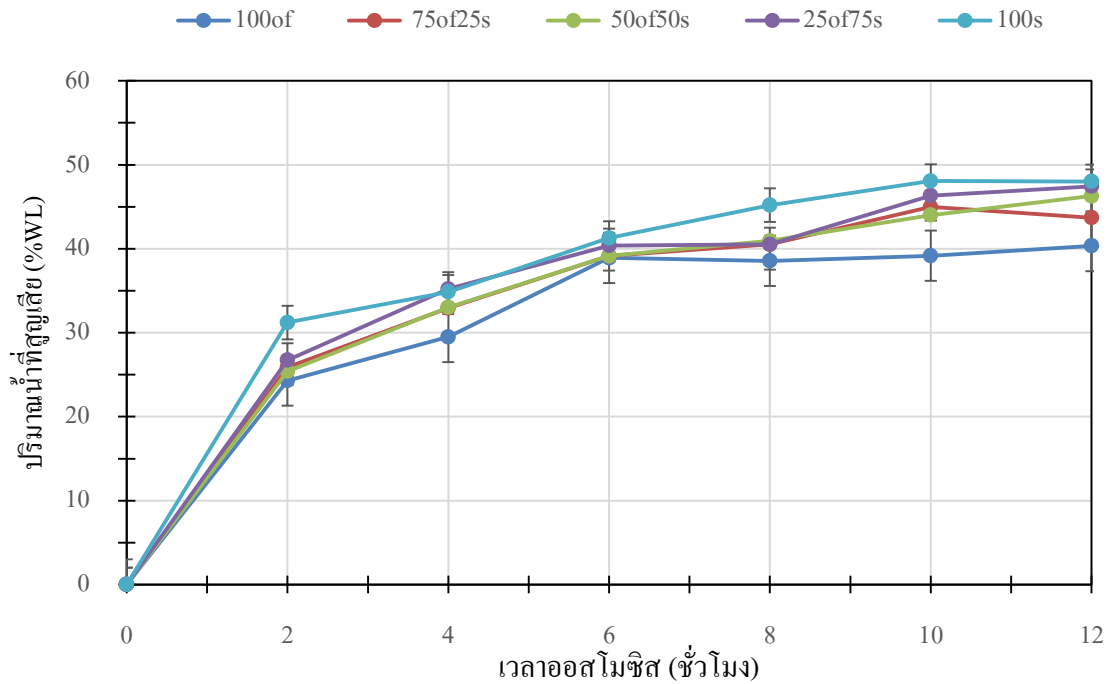
ภาพที่ 1 พบปริมาณน้ำที่สูญเสียของชิ้นมะขามป้อมเมื่อผ่านการออสโมซิสในสารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสและน้ำตาลซูโครสสัดส่วนต่างๆ ครบเวลา 12 ชั่วโมง มีค่า WL อยู่ในช่วง 40.34% - 48.01% โดยค่า WL มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะในช่วง 2 ชั่วโมงแรกของการออสโมซิส และพบแนวโน้มว่าเมื่อใช้น้ำตาลโอลิโก ฟรุคโตสเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้ค่า WL ต่ำกว่าสิ่งทดลองอื่น ในขณะที่เมื่อใช้น้ำตาลซูโครสเพียงอย่างเดียว มีแนวโน้มค่า WL สูงกว่าสิ่งทดลองอื่น Ahmed *et al.* (2016) กล่าวว่า ชนิดของสารละลายออสโมติกที่ต่างกันเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลสารในระหว่างการออสโมซิส โดยสาเหตุหนึ่งที่มีความสำคัญคือมวลโมเลกุล (molecular weight) ของน้ำตาลที่ใช้เตรียมสารละลายออสโมติก หากใช้น้ำตาลที่มีมวลโมเลกุลต่ำจะ

ส่งเสริมให้เกิดการถ่ายเทมวลสารมากกว่าน้ำตาลที่มีมวลโมเลกุลสูง โดยในระหว่างการออสโมซิสน้ำตาลที่มีมวลโมเลกุลต่ำจะสามารถแพร่เข้าสู่เซลล์ของผักผลไม้ได้ง่ายกว่าน้ำตาลที่มีมวลโมเลกุลสูง ทำให้เกิด osmotic pressure สูงกว่า จึงมีโอกาสกระตุ้นให้เกิดการถ่ายเทมวลของแข็งและมวลน้ำได้มากกว่า สำหรับงานวิจัยนี้ใช้น้ำตาลซูโครสซึ่งมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 342.30 กรัมต่อโมล และน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตส มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 828 กรัมต่อโมล (Khan, 2012) สิ่งทดลองที่มีการใช้น้ำตาลซูโครสมากก็จะสามารถแพร่เข้าไปในชิ้นมะขามป้อมได้มากกว่าการใช้น้ำตาลโอลิโกฟรุคโตส มีผลให้เกิด osmotic pressure สูงที่จะกระตุ้นให้เกิดการถ่ายเทมวลน้ำในระหว่างการออสโมซิส เซลล์พืชเกิดปรากฏการณ์พลาสโมไลซิส (plasmolysis) โดยโปรโทพลาสซึม (protoplasm) เกิดการหดตัวและเซลล์เหี่ยวจากการสูญเสียน้ำออกจากเซลล์ได้มาก (Mayor *et al.*, 2008)

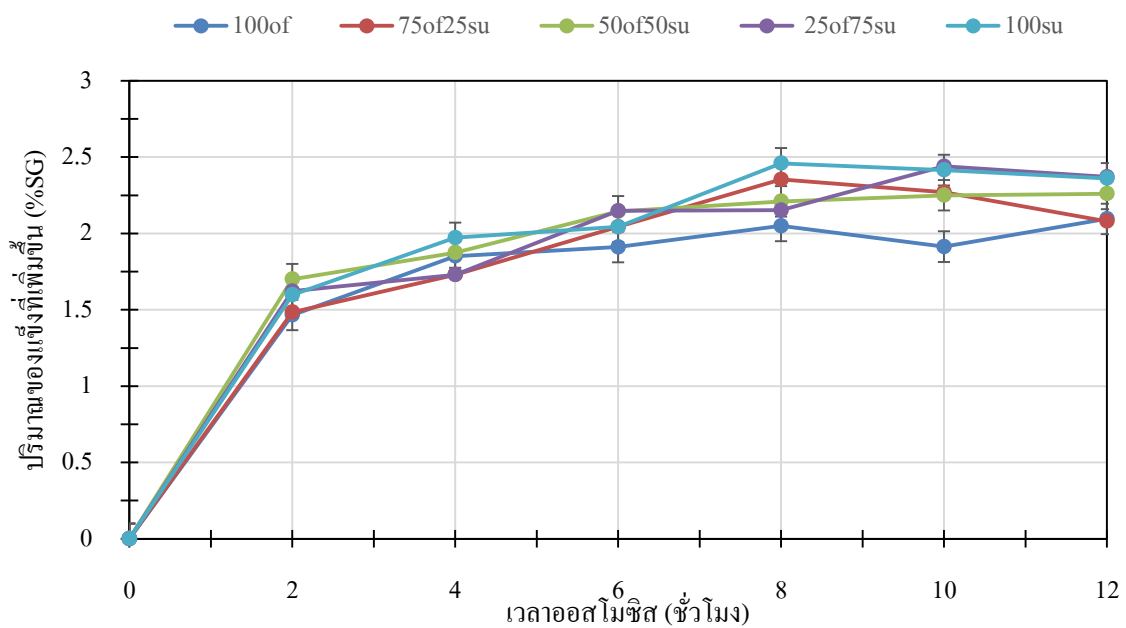
ภาพที่ 2 พบปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นของมะขามป้อมเมื่อผ่านการออสโมซิสในสารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสและน้ำตาลซูโครสสัดส่วนต่างๆ ระยะเวลา 12 ชั่วโมง มีค่า SG อยู่ในช่วง 2.06% - 3.06% ซึ่งพบว่ามีค่าน้อยกว่าค่า WL มาก (40.34% - 48.01%) Garcia-Noguera *et al.* (2010) กล่าวว่า ค่า SG ต่ำกว่าค่า WL มาก เนื่องจากมีความแตกต่างกันมากระหว่างขนาดโมเลกุลของน้ำและของแข็ง ซึ่งน้ำมีขนาดโมเลกุลน้อยกว่าของแข็งมากจึงสามารถแพร่ออกจากเซลล์พืชได้มากกว่า โดยในบางการทดลองอาจไม่พบว่าการแพร่เข้าของของแข็งหรือพบน้อยมาก

ภาพที่ 3 พบปริมาณน้ำหนัที่ลดลงของชิ้นมะขามป้อมเมื่อผ่านการออสโมซิสในสารละลาย

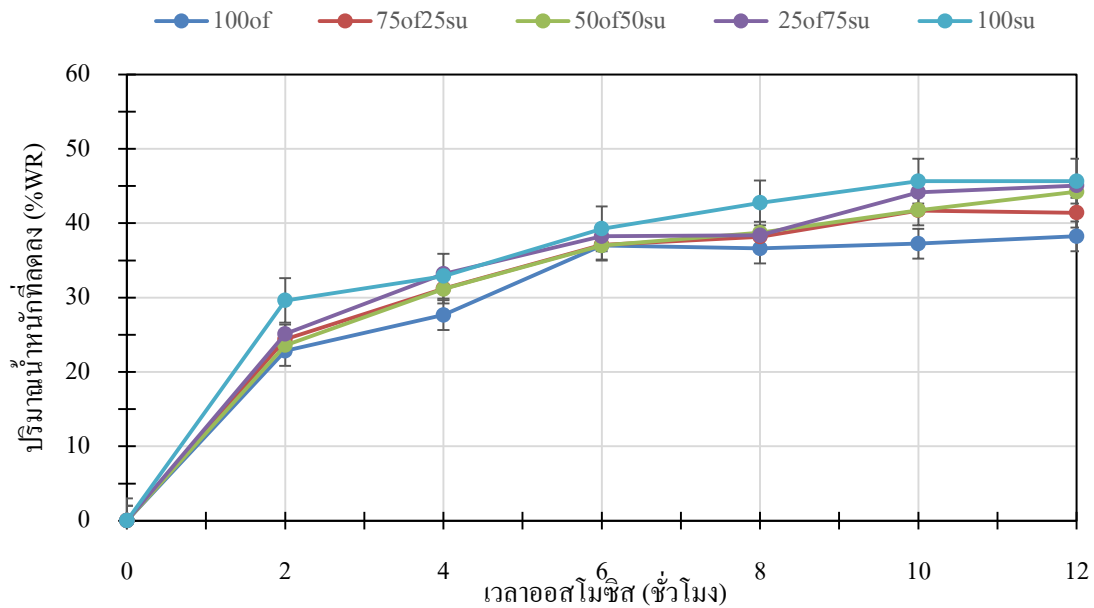
ออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสและน้ำตาลซูโครสสัดส่วนต่างๆ เมื่อออสโมซิสครบเวลา 12 ชั่วโมง มีค่า WR อยู่ในช่วง 38.25% - 45.25% โดยมีแนวโน้มคล้ายกับค่า WL (ภาพที่ 2) ที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะในช่วง 2 ชั่วโมงแรกของการออสโมซิส โดยยังคงพบแนวโน้มว่าเมื่อใช้น้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสเพียงอย่างเดียว (100of) ส่งผลให้ค่า WR ต่ำกว่าสิ่งทดลองอื่น ในขณะที่เมื่อใช้น้ำตาลซูโครสเพียงอย่างเดียว (100s) มีแนวโน้มค่า WR สูงกว่าสิ่งทดลองอื่น ค่า WR นี้เกี่ยวข้องกับสัมพันธ์กันกับค่า WL และค่า SG เนื่องจากเป็นน้ำหนักสุทธิของการถ่ายเทมวลสารหลังการออสโมซิส อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ดังกล่าวอาจขึ้นกับปัจจัยอื่น เช่น โครงสร้างของเนื้อเยื่อที่มีผลต่อการแพร่ของน้ำและตัวถูกละลาย Kowalska and Lenart (2001) รายงานว่า ใน การออสโมซิสผักผลไม้ในสารละลายน้ำตาลซูโครส ความเข้มข้น 61.5% ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ผลการทดลองมีแนวโน้มว่า ปริมาณน้ำหนักที่สูญเสียหลังการออสโมซิสขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่สูญเสียและปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น กรณีออสโมซิสผักทองพบว่า มีค่าปริมาณที่สูญเสียสูงแต่มีปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นต่ำ จึงเป็นผลให้ผักทองมีปริมาณน้ำหนัที่ลดลงมาก ในขณะที่การออสโมซิสแอปเปิ้ลพบว่า มีปริมาณน้ำที่สูญเสียสูงและมีปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นสูงด้วย เนื่องจากแอปเปิ้ลมีโครงสร้างเนื้อเยื่อที่มีความเป็นรูพรุน (porosity) สูง ทำให้น้ำตาลซูโครสจากสารละลายออสโมติกสามารถแพร่เข้าสู่ชั้นแอปเปิ้ลได้ง่ายและมากกว่าชิ้นผักทอง จึงเป็นผลให้แอปเปิ้ลมีปริมาณน้ำหนัที่ลดลงน้อยกว่าผักทอง



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่สูญเสีย (WL) กับเวลาการออสโมซิสขึ้นมะขามป้อมเมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตส (of) และน้ำตาลซูโครส (s) สัดส่วนต่างๆ



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (SG) กับเวลาการออสโมซิสเมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตส (of) และน้ำตาลซูโครส (s) สัดส่วนต่างๆ



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำหนักรที่ลดลง (WR) กับเวลาการออสโมซิสมะขามป้อมเมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตส (of) และน้ำตาลซูโครส (s) สัดส่วนต่างๆ

1.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณความชื้นสมดุล (M_c) และปริมาณของแข็งสมดุล (S_c) พบว่า การใช้ น้ำตาลโอลิโก ฟรุคโตสเพียงอย่างเดียวมีผลให้มี ปริมาณความชื้นสมดุลและปริมาณของแข็งสมดุลต่ำ ที่สุด แสดงให้เห็นว่าหากให้กลไกการถ่ายเทมวลสาร เกิดขึ้นนานเพียงพอจะสามารถลดปริมาณความชื้น ของตัวอย่างได้มากที่สุดโดยมีปริมาณตัวถูกละลาย แพร่เข้าไปในตัวอย่างน้อยที่สุดนั่นเอง ในขณะที่หาก

ใช้น้ำตาลซูโครสเพียงอย่างเดียวมีผลให้มีปริมาณ ความชื้นสมดุลและปริมาณของแข็งสมดุลสูงที่สุด จากผลการทดลองจึงสามารถพบแนวโน้มว่าการใช้ โอลิโกฟรุคโตสในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นจึงมีผลให้ค่า M_c และ S_c ลดลง เมื่อนำปริมาณมวลที่สมดุลนี้มาทำนาย ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยใช้ความสัมพันธ์ทางจล ศาสตร์การถ่ายเทมวลตามกฎข้อที่สองของฟิคได้ผล ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ปริมาณความชื้นสมดุล (M_c) และปริมาณของแข็งสมดุล (S_c) ของมะขามป้อมเมื่อใช้สารละลายออสโมติก ที่เตรียมจากน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสและน้ำตาลซูโครสสัดส่วนต่างๆ

สิ่งทดลองที่	สัดส่วน (%)		ปริมาณมวลที่สมดุล (g/g)	
	ซูโครส	โอลิโกฟรุคโตส	M_c	S_c
1	0	100	0.396 ± 0.001	0.521 ± 0.001
2	25	75	0.409 ± 0.002	0.598 ± 0.001
3	50	50	0.411 ± 0.001	0.608 ± 0.002
4	75	25	0.428 ± 0.003	0.678 ± 0.001
5	100	0	0.468 ± 0.001	0.825 ± 0.003

ตารางที่ 3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (D_{ew}) และสัมประสิทธิ์การแพร่ของของแข็ง (D_{es}) พบว่า การใช้ น้ำตาลซูโครสเพียงอย่างเดียวมีแนวโน้มค่า D_{ew} สูงกว่าสิ่งทดลองอื่น แสดงถึงเกิดการแพร่ของน้ำได้มาก เป็นผลให้เกิดการถ่ายโอนมวลน้ำจากชั้นมะขามป้อมได้ดีกว่าการใช้ น้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสรวมด้วย ทั้งนี้มีความสอดคล้องกับค่า WL ที่แสดงในภาพที่ 1 ที่แสดงให้เห็นว่าสิ่งทดลองที่ใช้ น้ำตาลซูโครสเพียงอย่างเดียว มีแนวโน้มค่า WL สูงกว่าสิ่งทดลองอื่น สัดส่วนและชนิดของตัวถูกละลายที่ใช้ในการเตรียมสารละลายออสโมติกมีผลให้เกิดแรงดันออสโมติกซึ่งเป็นแรงขับให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารแตกต่างกัน ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและของแข็งที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าการใช้ น้ำตาลซูโครสและโอลิโกฟรุคโตสในสัดส่วนต่างๆ ทำให้เกิดการแพร่และสูญเสีย น้ำออกจากมะขามป้อมรวมทั้งการแพร่และเพิ่มขึ้นของตัวถูกละลายแตกต่างกัน โดยพบว่า ค่า D_{ew} และ D_{es} ของทุกสิ่งทดลองอยู่ในช่วง 1.41×10^{-8} - 5.00×10^{-8} m^2/s และ 0.45×10^{-8} - 2.15×10^{-8} m^2/s ตามลำดับ มีค่า RMSE 0.08-0.35 ซึ่งแสดงถึงมีความน่าเชื่อถือในการทำนาย โดยพบข้อสังเกตว่าทุกสิ่งทดลองมีค่า D_{ew} มากกว่าค่า D_{es} สอดคล้องกับรายงานการวิจัยของการออสโมซิสในผักผลไม้ต่างๆ เช่น Zecchi and Gerla (2020) รายงานว่า ในการออสโมซิสมะเขือเทศแบบหั่นครึ่งผลโดยแช่ในสารละลายผสมระหว่าง น้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 35% (ซูโครส 30% และ โซเดียมคลอไรด์ 5%) และ 50% (ซูโครส 40% และ โซเดียมคลอไรด์ 10%) และทำนายค่า D_{ew} และ D_{es} ด้วยการใช้ความสัมพันธ์ทางจลศาสตร์การถ่ายเทมวลตามกฎของฟิก พบว่า ค่า D_{ew} (2.36×10^{-10} และ 3.87×10^{-10} m^2/s) มากกว่าค่า D_{es} (1.10×10^{-10} - 2.35×10^{-10} m^2/s) Prithani and Dash (2020) รายงานว่า ในการออสโมซิสกีวี่ที่อุณหภูมิ 25-60 องศาเซลเซียส

โดยใช้สารละลายผสมระหว่าง น้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ ซึ่งเตรียมสารละลายออสโมติกโดยการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ น้ำตาลซูโครส ในอัตราส่วน 3:7 พบว่า ค่า D_{ew} มีค่ามากกว่า D_{es} คิดเป็น 1.927-2.366 เท่า อย่างไรก็ตามในการออสโมซิสผลไม้บางชนิดที่มีความเป็นรูพรุนสูงให้ผลการทำนายค่า D_{ew} และ D_{es} ในทางตรงกันข้ามกับงานวิจัยนี้ โดยพบว่า มีค่า D_{es} มากกว่าค่า D_{ew} ตัวอย่างเช่น การออสโมซิสขึ้นแปปเปิ้ลด้วย น้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 42 องศาบริกซ์ สามารถทำนายค่า D_{es} (4.40×10^{-10} m^2/s) ได้มากกว่าค่า D_{ew} (2.94×10^{-10} m^2/s) เนื่องจากตัวถูกละลายสามารถแพร่เข้าไปในชั้นผลไม้ได้มากจนมีโอกาสดูดซึมน้ำระหว่างเซลล์ที่กั้นขวางการแพร่ของน้ำออกจากชั้นผลไม้ได้ (Akharume *et al.*, 2019)

จากผลการทดลอง พบว่า การลดปริมาณซูโครสลงและใช้ น้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสรวมด้วย มีผลทำให้ค่า D_{ew} และ D_{es} มีแนวโน้มลดลงอย่างมาก จากค่า D_{ew} เท่ากับ 5.00×10^{-8} m^2/s และค่า D_{es} เท่ากับ 2.15×10^{-8} m^2/s เหลือเพียง 1.41×10^{-8} m^2/s - 1.63×10^{-8} m^2/s และ 0.45×10^{-8} m^2/s - 0.87×10^{-8} m^2/s ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของตัวถูกละลายอาจมีผลต่อลักษณะทางกายภาพของน้ำเชื่อม เช่น ความหนืด ความสามารถในการเกาะติดที่ผิวตัวอย่าง และการแพร่ผ่านเข้าไปในรูพรุน เป็นต้น ซึ่งส่วนมีผลต่อการแพร่เข้าและออกของมวลสาร (Kowalska and Lenart, 2001) จึงอาจมีผลให้ประสิทธิภาพการแพร่ของน้ำและของแข็งลดลงได้ สอดคล้องกับที่ Assis *et al.* (2016) กล่าวว่า ประสิทธิภาพการแพร่ของน้ำและของแข็งในระหว่างการออสโมซิสขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น องค์ประกอบและโครงสร้างทางกายภาพของวัตถุดิบ และอุณหภูมิของกระบวนการ ยกตัวอย่างเช่น หากใช้อุณหภูมิในการออสโมซิสสูงจะช่วยเพิ่มการไหลรวมของน้ำและตัวถูกละลายใน

ระบบอาหาร และมีผลโดยตรงต่อการกระตุ้นการ
แพร่ของน้ำออกจากวัตถุดิบ รวมทั้งทำให้ความหนืด

ของสารละลายออสโมติกลดลงซึ่งลดความต้านทาน
ในการแพร่ของตัวถูกละลายได้อีกทางหนึ่ง

ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (D_{ew}) และสัมประสิทธิ์การแพร่ของของแข็ง (D_{es}) ของแข็งของมะขามป้อม
เมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสและน้ำตาลซูโครสสัดส่วนต่างๆ

สิ่งทดลองที่	สัดส่วน (%)		สัมประสิทธิ์การแพร่			
	ซูโครส	โอลิโกฟรุคโตส	D_{ew} (m ² /s)	RMSE	D_{es} (m ² /s)	RMSE
1	0	100	1.41×10^{-8}	0.28	0.45×10^{-8}	0.35
2	25	75	1.43×10^{-8}	0.25	0.57×10^{-8}	0.35
3	50	50	1.51×10^{-8}	0.26	0.67×10^{-8}	0.35
4	75	25	1.63×10^{-8}	0.25	0.87×10^{-8}	0.31
5	100	0	5.00×10^{-8}	0.08	2.15×10^{-8}	0.09

2. ค่าการถ่ายเทมวลสารและคุณภาพทางเคมีกายภาพ ของมะขามป้อมหลังการออสโมซิส

2.1 ค่าการถ่ายเทมวลสาร

จากการพิจารณาข้อมูลความสัมพันธ์
ระหว่างค่าการถ่ายเทมวลสารกับเวลาการออสโมซิส
เพื่อกำหนดเวลาการออสโมซิสที่เหมาะสม พบว่า
เวลาการออสโมซิสที่ 10 ชั่วโมง เพียงพอต่อการทำ
ให้มีค่าการถ่ายเทมวลสารมีแนวโน้มคงที่ จากผลการ
วิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า เมื่อออสโมซิส 10 ชั่วโมง
ค่าเฉลี่ยของ WL (46.33%) และ SG (2.25%) ไม่
แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับ
ค่าเฉลี่ยของ WL (48.01%) และ SG (2.26%) เมื่อ
ออสโมซิส 12 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาความคุ้มค่าของ
การใช้ทรัพยากร จึงใช้เวลาการออสโมซิสที่ 10
ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nambiar *et al.*
(2016) ที่พบว่าในการออสโมซิสมะขามป้อมที่หั่น
เป็นชิ้น โดยแช่ในสารละลายน้ำตาลฟรุคโตโอลิโก
แซคคาไรด์ความเข้มข้น 70° Brix ในการแช่ชิ้นผลไม้
ต่อสารละลายออสโมติก อัตราส่วนที่ 1 : 5 w/v พบ
แนวโน้มว่าค่าการถ่ายเทมวลสารต่างๆ เริ่มคงที่เมื่อ
เวลาออสโมซิส 10 ชั่วโมง โดยค่าการถ่ายเทมวลสาร

ของมะขามป้อมที่ผ่านการออสโมซิสเป็นเวลา 10
ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4 พบว่า การใช้น้ำตาล
ซูโครสเพียงอย่างเดียวมีแนวโน้มค่าการถ่ายเทมวล
สารมากที่สุด อย่างไรก็ตาม การใช้สัดส่วนของ
น้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสแทนน้ำตาลซูโครส 25% และ
50% ยังมีแนวโน้มให้ค่าการถ่ายเทมวลสารต่างๆ ไม่
แตกต่างจากการใช้น้ำตาลซูโครสเพียงอย่างเดียวมาก
นัก โดยพบว่า มีค่า WL SG และ WR ไม่แตกต่างกัน
อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) โดยมีค่า WL อยู่
ในช่วงประมาณ 46% -48% ค่า SG อยู่ในช่วงประมาณ
2.18-2.42% และค่า WR อยู่ในช่วงประมาณ 41.75%
-45.66% จากแนวโน้มผลการทดลอง พบว่า การใช้
โอลิโกฟรุคโตสเพียงอย่างเดียวมีทำให้ค่าการถ่ายเท
มวลสารน้อยกว่าการใช้ซูโครสมาก Rubio-Arreaz *et*
al. (2015) รายงานว่า การใช้ในรูปแบบสารละลาย
ผสม เช่น ใช้โอลิโกฟรุคโตสร่วมกับไอโซมอลทูลอส
และสารสกัดจากหญ้าหวาน โดยเตรียมให้ความ
เข้มข้นสูง สามารถเพิ่มการถ่ายเทมวลสารได้ สำหรับ
ลักษณะปรากฏของชิ้นมะขามป้อมทุกสิ่งทดลองที่
ผ่านการออสโมซิสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง แสดงดังภาพ

ที่ 4 แสดงให้เห็นว่าทุกสิ่งทดลองยังคงมีลักษณะปรากฏดี คงรูป ไม่นิ่มและ แต่มีลักษณะผิวขุ่นเล็กน้อย

2.2 คุณภาพทางเคมีกายภาพ

ตารางที่ 5-7 พบว่า สิ่งทดลองที่ใช้โพลิโกฟรุคโตสในสัดส่วน 75% และ 100% มีแนวโน้มรักษาสารพฤษเคมีที่สำคัญของมะขามป้อมไว้ได้มากกว่าสิ่งทดลองอื่น โดยมีปริมาณวิตามินซีอยู่ในช่วง 10.87-11.20 mg/g ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ในช่วง 303.87-314.10 mg GAE/g และมี % inhibition การต้านอนุมูลอิสระ DPPH อยู่ในช่วง 80.03-81.19 ($p < 0.05$) แม้ลดลงจากมะขามป้อมสดที่มีปริมาณวิตามินซี 19.65 mg/g ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 387 mg GAE/g และมี % inhibition การต้านอนุมูลอิสระ DPPH 85.35 ซึ่งคิดเป็นการสูญเสีย 43.00-44.68% 18.84-21.48% และ 4.87-6.23% ตามลำดับ เป็นผลมาจากกระบวนการแช่แข็งมะขามป้อมลงในสารละลายออสโมติกที่มีโอกาสเกิดการชะของสารพฤษเคมีทั้งวิตามินซีและสารประกอบฟีนอลิกที่มีสมบัติละลายน้ำได้ เมื่อพิจารณาร่วมกับค่า WL ในตารางที่ 4 พบว่า สิ่งทดลองที่ 1 และ 2 มีค่า WL ต่ำที่สุด แสดงถึงมีการสูญเสียน้ำออกจากตัวอย่างน้อยที่สุดจึงสอดคล้องกับแนวโน้มการรักษาปริมาณสารพฤษเคมีไว้ได้มากกว่าสิ่งทดลองอื่น การใช้โพลิโกฟรุคโตสแม้มีแนวโน้มประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลต่ำกว่าการใช้ซูโครสแต่มีข้อดีในแง่การรักษาสารพฤษเคมีที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพไว้ได้มากกว่า จึงเป็นข้อพิจารณาในการเลือกใช้ร่วมกับปัจจัยอื่นๆ เช่น ต้นทุน อย่างไรก็ตามจากการสูญเสียสารพฤษเคมีระหว่างการออสโมซิส จึงมีแนวทางแก้ปัญหาจาก

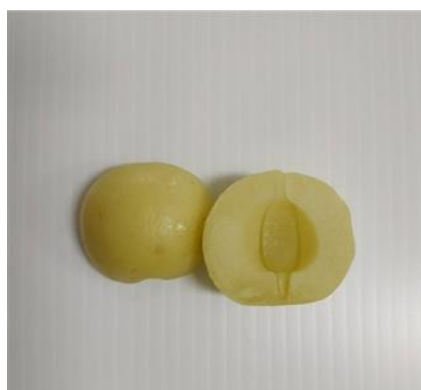
งานวิจัยต่างๆ เช่น การเติมสารพฤษเคมีในรูปสารสกัดเข้มข้นเพิ่มลงไปในการละลายออสโมติกด้วย Castagnini *et al.* (2015) แช่ชิ้นมะม่วงในสารละลายน้ำตาลซูโครสที่มีส่วนผสมของสารสกัดโพลีฟีนอลจากกากองุ่น พบว่า ได้ผลน่าพึงพอใจในการรักษาสารพฤษเคมีโดยเฉพาะปริมาณแคโรทีนอยด์และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

ตารางที่ 8 พบว่า มะขามป้อมที่ผ่านการออสโมซิสทุกสิ่งทดลองมีปริมาณความชื้นและค่า a_w ต่ำกว่ามะขามป้อมสด โดยมะขามป้อมสดมีปริมาณความชื้น 85.99% และมีค่า a_w 0.979 ตามหลักการของการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสจะทำให้ปริมาณน้ำในผักผลไม้ลดลง ปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น และทำให้น้ำหนักสุทธิตดลงได้ รวมถึงทำให้ค่า a_w ของผักผลไม้ลดลงด้วย ซึ่งกล่าวได้ว่าค่า a_w เกี่ยวข้องกับการที่ปริมาณน้ำอิสระลดลง จากการแพร่ออกของน้ำและการที่ตัวถูกละลายในสารละลายออสโมติกซึ่งได้แก่ น้ำตาลชนิดต่างๆ แพร่เข้าสู่เซลล์ของผักผลไม้ โดยโมเลกุลของน้ำตาลสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำอิสระ จึงมีโอกาสน้ำอิสระที่อยู่ในชิ้นผักผลไม้เปลี่ยนเป็นน้ำที่มีพันธะ (bound water) เป็นผลให้ค่า a_w ลดลงนั่นเอง (Raoult-Wack, 1994) สำหรับปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดพบว่า ทุกสิ่งทดลองซึ่งผ่านการออสโมซิสมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 45-52 °Brix โดยปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นนี้ส่วนใหญ่คือน้ำตาล ที่เป็นตัวถูกละลายจากสารละลายออสโมติกนั่นเอง โดยเพิ่มขึ้นจากมะขามป้อมสดมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเท่ากับ 8.0 °Brix

ตารางที่ 4 ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (WL) ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (SG) และปริมาณน้ำหนักรีดลดลง (WR) ของมะขามป้อม ที่ผ่านการออสโมซิสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง เมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตส และน้ำตาลซูโครสสัดส่วนต่างๆ

สิ่งทดลองที่	สัดส่วน (%)		ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (%)		
	ซูโครส	โอลิโกฟรุคโตส	WL	SG	WR
1	0	100	$39.17^b \pm 1.09$	$1.91^b \pm 0.06$	$37.25^b \pm 1.15$
2	25	75	$44.97^b \pm 3.41$	$2.27^a \pm 0.03$	$41.70^{ab} \pm 1.38$
3	50	50	$46.01^a \pm 0.44$	$2.25^a \pm 0.02$	$41.75^{ab} \pm 0.32$
4	75	25	$47.34^a \pm 1.53$	$2.18^a \pm 0.13$	$44.16^a \pm 0.57$
5	100	0	$48.07^a \pm 0.68$	$2.42^a \pm 0.55$	$45.66^a \pm 0.16$

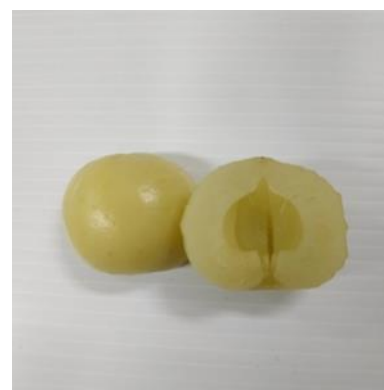
^{a,b} คือ ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



ก) 100of



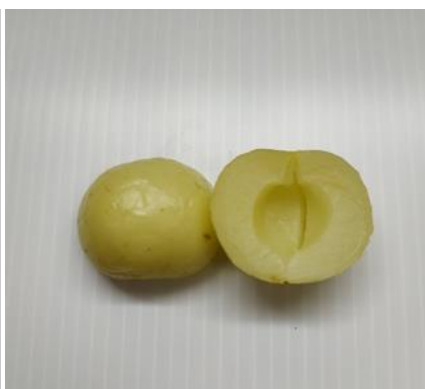
ข) 75of 25s



ค) 50of 50s



ง) 25of 75s



จ) 100s

ภาพที่ 4 ลักษณะปรากฏของชิ้นมะขามป้อมที่ผ่านการออสโมซิสเวลา 10 ชั่วโมง เมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตส (of) และน้ำตาลซูโครส (s) สัดส่วนต่างๆ

ตารางที่ 5 ปริมาณวิตามินซีของมะขามป้อมหลังการออสโมซิส 10 ชั่วโมง และใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลอลิโกฟรุคโตสและน้ำตาลซูโครสสัดส่วนต่างๆ

สิ่งทดลองที่	สัดส่วน (%)		ปริมาณวิตามินซี (mg/g)	ค่าการสูญเสีย*
	ซูโครส	โอลิโกฟรุคโตส		
1	0	100	11.20 ^a ± 0.09	43.00
2	25	75	10.87 ^a ± 0.18	44.68
3	50	50	10.70 ^a ± 0.08	45.55
4	75	25	7.98 ^b ± 0.09	59.39
5	100	0	7.79 ^b ± 0.09	60.36

^{a,b} คือ ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

* เมื่อเปรียบเทียบกับวิตามินซีของมะขามป้อมสด เท่ากับ 19.65 mg/g

ตารางที่ 6 สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของมะขามป้อมหลังการออสโมซิส 10 ชั่วโมง และใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลอลิโกฟรุคโตสและน้ำตาลซูโครสสัดส่วนต่างๆ

สิ่งทดลองที่	สัดส่วน (%)		สารประกอบ ฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/g)	ค่าการสูญเสีย*
	ซูโครส	โอลิโกฟรุคโตส		
1	0	100	314.10 ^a ± 0.88	18.84
2	25	75	303.87 ^a ± 0.79	21.48
3	50	50	248.17 ^b ± 0.28	35.87
4	75	25	205.32 ^c ± 0.98	46.95
5	100	0	198.22 ^d ± 0.39	48.78

^{a,b} คือ ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

* เมื่อเปรียบเทียบกับสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของมะขามป้อมสด เท่ากับ 387 mgGAE/g

ตารางที่ 7 สมบัติการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ของมะขามป้อมหลังการออสโมซิส 10 ชั่วโมง และใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสและน้ำตาลซูโครสสัดส่วนต่างๆ

สิ่งทดลองที่	สัดส่วน (%)		สมบัติการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (%inhibition)	ค่าการสูญเสีย*
	ซูโครส	โอลิโกฟรุคโตส		
1	0	100	81.19 ^a ± 3.10	4.87
2	25	75	80.03 ^a ± 2.39	6.23
3	50	50	78.10 ^b ± 3.20	8.49
4	75	25	76.10 ^c ± 1.98	10.84
5	100	0	76.16 ^c ± 3.01	10.77

^{a,b} คือ ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

* เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ของมะขามป้อมสดที่มี % inhibition เท่ากับ 85.35

ตารางที่ 8 ปริมาณความชื้น ค่า a_w และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) ของมะขามป้อมหลังการออสโมซิส 10 ชั่วโมง และใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสและน้ำตาลซูโครสสัดส่วนต่างๆ

สิ่งทดลองที่	สัดส่วน (%)		ค่าเฉลี่ย ±SD		
	ซูโครส	โอลิโกฟรุคโตส	ปริมาณความชื้น (%)	a_w	TSS (°Brix)
1	0	100	47.91 ^a ± 1.00	0.835 ^a ± 0.010	45 ^c ± 1
2	25	75	42.26 ^b ± 0.86	0.821 ^b ± 0.011	46 ^c ± 1
3	50	50	42.98 ^b ± 1.05	0.827 ^b ± 0.012	48 ^b ± 1
4	75	25	40.68 ^b ± 1.21	0.820 ^b ± 0.014	49 ^b ± 1
5	100	0	38.99 ^c ± 0.98	0.801 ^c ± 0.010	52 ^a ± 1

^{a,b} คือ ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

สรุป

สัดส่วนปริมาณน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสและน้ำตาลซูโครสที่ใช้เตรียมสารละลายออสโมติกมีผลต่อค่าการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิสขึ้นมะขามป้อม โดยพบแนวโน้มว่าการใช้น้ำตาลซูโครสมากทำให้มีค่า WL SG และ WR สูงที่สุด สอดคล้องกับผลการศึกษาด้านการถ่ายเทมวลสารที่ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่พบว่า การใช้น้ำตาลซูโครสเพียงอย่างเดียวมีผลทำให้ค่า D_{ew} เท่ากับ $5.00 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ และค่า D_{es} เท่ากับ $2.15 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ซึ่ง

มีค่าสูงที่สุด การลดปริมาณซูโครสลงและใช้น้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสร่วมด้วย มีผลทำให้ค่า D_{ew} และ D_{es} มีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามหากต้องการใช้น้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสร่วมด้วย พบว่า สิ่งทดลองที่เหมาะสมที่สุดที่มีการใช้สัดส่วนของน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสได้มากที่สุดและยังทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารสูง ได้แก่ การใช้สัดส่วนของน้ำตาลโอลิโกฟรุคโตส 50% และน้ำตาลซูโครส 50% โดยใช้เวลาในการออสโมซิส 10 ชั่วโมง ทำให้มีปริมาณสารพฤษเคมีที่สำคัญที่คงอยู่ ได้แก่ ปริมาณวิตามินซีและปริมาณสารประกอบฟีนอลิก รวมทั้งสมบัติการต้าน

อนุมูลอิสระมากกว่าสิ่งทดลองที่ใช้น้ำตาลซูโครส เพียงอย่างเดียว และยังมีค่า WL ค่า SG และค่า WR สูงที่สุด ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามการเลือกใช้อัลลิโกฟรุคโตสร่วมด้วยทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นจึงเหมาะสำหรับตลาดอาหารเพื่อสุขภาพมูลค่าสูง ความท้าทายในการปรับปรุงการถ่ายโอนมวลสารจึงเป็นเรื่องที่ควรศึกษาเพิ่มเติม แนวทางการวิจัย เช่น การเตรียมชั้นต้นวัตถุดิบเพื่อทำลายผนังเซลล์เพียงเล็กน้อยเพื่อกระตุ้นการแพร่

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยประเภทเงินรายได้ส่วนงาน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 เลขที่สัญญา SC10/2562

เอกสารอ้างอิง

- Ahmed, I., Qazi, I.M. and Jamal, S. 2016. Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. **Innovative Food Science & Emerging Technologies** 34: 29-43.
- Akharume, F., Singh, K. and Sivanandan, L. 2019. Effects of liquid smoke infusion on osmotic dehydration kinetics and microstructural characteristics of apple cubes. **Journal of Food Engineering** 246: 51-57.
- AOAC. 1990. **Official Method of Analysis**. 15th ed. The Association of official Analysis Chemists, Arlington Virginia.
- Assis, F.R., Morais, R.M.S.C. and Morais, A.M.M.B. 2016. Mass Transfer in Osmotic Dehydration of Food Products: Comparison Between

Mathematical Models. **Food Engineering Reviews** 8(2): 116-133.

- Beristain, C.I., Azuara, E., CortÉS, R. and Garcia, H.S. 1990. Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple rings. **International Journal of Food Science & Technology** 25(5): 576-582.
- Castagnini, J.M., Betoret, N., Betoret, E. and Fito, P. 2015. Vacuum impregnation and air drying temperature effect on individual anthocyanins and antiradical capacity of blueberry juice included into an apple matrix. **LWT - Food Science and Technology** 64(2): 128-1296.
- Corrêa, J.L.G., Pereira, L.M., Vieira, G.S. and Hubinger, M.D. 2010. Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas. **Journal of Food Engineering** 96(4): 498-504.
- Fernandes, F.A.N., Rodrigues, S., Gaspareto, O. and Oliveira, E. 2006. Optimization of osmotic dehydration of bananas followed by air-drying. **Journal of Food Engineering** 77: 188-193.
- Floury, J., Le Bail, A. and Pham, Q.T. 2008. A three-dimensional numerical simulation of the osmotic dehydration of mango and effect of freezing on the mass transfer rates. **Journal of Food Engineering** 85(1): 1-11.
- Garcia-Noguera, J., Oliveira, F.I.P., Gallão, M.I., Weller, C.L., Rodrigues, S. and Fernandes, F.A.N. 2010. Ultrasound-assisted osmotic dehydration of strawberries: effect of pretreatment time

- and ultrasonic frequency. **Drying Technology** 28: 294-303.
- Khan, M.R. 2012. Osmotic dehydration technique for fruit preservation-A review. **Pakistan Journal of Food Sciences** 22(2): 71-85.
- Kowalska, H. and Lenart, A. 2001. Mass exchange during osmotic pretreatment of vegetable. **Journal of food Engineering** 49: 137-140.
- Kowalska, H., Lenart, A. and Leszczyk, D. 2008. The effect of blanching and freezing on osmotic dehydration of pumpkin. **Journal of Food Engineering** 86(1): 30-38.
- Matusek, A.C. 2008. Comparison of diffusion of fructo-oligosaccharide components during vacuum impregnation and osmotic dehydration. **European Food Research Technology** 227: 417-423.
- Mayor, L., Pissarra, J. and Sereno, A.M. 2008. Microstructural changes during osmotic dehydration of parenchymatic pumpkin tissue. **Journal of Food Engineering** 85(3): 326-339.
- Ministry of Public Health. 2016. **National master plan of Thai herbs**. (1st ed. TS Interprint Co., Ltd., Nonthaburi. (in Thai)
- Nambiar, S.S., Basu, A., Shetty, N.P., Rastogi, N.K. and Prapulla, S.G. 2016. Infusion of fructooligosaccharide in Indian gooseberry (*Emblica officinalis*) fruit using osmotic treatment and its effect on the antioxidant activity of the fruit. **Journal of Food Engineering** 190: 139-146.
- Niva, M. 2007. All foods affect health: Understanding of functional foods and healthy eating among health-oriented finns. **Appetiite** 48: 384-393.
- Pitiporn, S. 2005. Amla: herbs that should not be overlooked. **Mo Chaoban Magazine** 26(309): 17-27. (in Thai)
- Prithani, R. and Dash, K.K. 2020. Mass transfer modelling in ultrasound assisted osmotic dehydration of kiwi fruit. **Innovative Food Science & Emerging Technologies** 64(2020): 102407.
- Raoult-Wack, A.L. 1994. Recent advances in the osmotic dehydration of foods. **Trends in Food Science and Technology** 5: 255-260.
- Rastogi, N.K. and Raghavarao, K.S.M.S. 2004a. Mass transfer during osmotic dehydration: Determination of moisture and solute diffusion coefficients from concentration profiles. **Food and Bioproducts Processing** 82(1): 44-48.
- Rastogi, N.K. and Raghavarao, K.S.M.S. 2004b. Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: Considering Fickian diffusion in cubical configuration. **LWT - Food Science and Technology** 37(1): 43-47.
- Rose, K., Wan, C., Thomas, A., Seeram, N.P. and Ma, H. 2018. Phenolic compounds isolated and identified from Amla (*Phyllanthus emblica*) juice powder and their antioxidant and neuroprotective activities. **Natural Product Communications** 13(10): 1309-1311.
- Rubio-Arreaez, S., Capella, J.V., Ortolá, M.D. and Castelló, M. 2015. Kinetics of osmotic dehydration of orange slices using healthy

- sweeteners. **International Food Research Journal** 22: 2162-2166.
- Sabater-Molina, M., Larqué, E., Torrella, F. and Zamora, S. 2009. Dietary fructooligosaccharides and potential benefits on health. **Journal of Physiology and Biochemistry** 65(3): 315-328.
- Singleton, V.L., Orthofer, R. and Lamuela-Raventos, R.M. 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. **Methods in Enzymology** 299: 152-178.
- Turkmen, N., Sari, F. and Velioglu, S. 2005. The effect of cooking methods on total phenolics and antioxidant activity of selected green vegetables. **Food Chemistry** 93: 713-718.
- Zecchi, B. and Gerla, P. 2020. Effective diffusion coefficients and mass flux ratio during osmotic dehydration considering real shape and shrinkage. **Journal of Food Engineering** 274(2020): 109821.