จลนศาสตร์การถ่ายเทมวลในระหว่างกระบวนการออสโมติคไชโป๊วหวาน

นวภัทรา หนูนาค [*1)] และ อมรรัตน์ มุขประเสริฐ [2)]

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนตัวอย่างต่อสารละลายออสโมติคและความดันที่มีต่อค่าการถ่ายเทมวลในระหว่างกระบวนการ ออสโมติคไชโป๊วหวานภายใต้อุณหภูมิห้องและใช้รูปแบบ กฎการแพร่ข้อที่สอง ของ Fick สำหรับการหาค่าการถ่ายเทมวล จากการทดลองพบว่า ค่าการสูญเสียน้ำและการเพิ่มขึ้นของของแข็งเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนตัวอย่างต่อสารละลายออสโมติคและระดับความดันเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มค่าดังกล่าวจะส่งผลต่อการลดแรงดันออสโมติคเช่นกัน ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำที่ได้จากงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 5.75×10^{-8} m^2/s ถึง 2.57×10^{-7} m^2/s และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของของแข็งอยู่ในช่วง $4.64 \times 10^{-8} m^2/s$ ถึง 1.12×10^{-7} m^2/s

คำสำคัญ: ไชโป๊วหวาน สัมประสิทธิ์การแพร่ การถ่ายเทมวล กระบวนการออสโมติค

[*1)] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร - ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 อีเมล์: kbnavaph@kmitl.ac.th

[2)] รองศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระ-นครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

[*] Corresponding Author

Mass Transfer Kinetics during Osmotic Process of Sweetened White Radish

Navaphattra Nunak[*1)] and Amornrat Mukprasert[2)]

Abstract

The objective of this paper was to study the effect of ratios of samples to osmotic solution and pressure on mass transfer values during the osmotically sweentened white radish process at room temperature. Mass transfer during osmotic dehydration was modeled using Fick's second law of diffusion. From the experiment, it was found that water loss and solid gain increased with increasing of ratio of samples to solution and pressure. However, an addition of solution and pressure also decreased the driving force of osmotic process. The effective diffusivity values in this research were found to be in the range of 5.75×10^{-8} m^2/s to 2.57×10^{-7} m^2/s for water loss and $4.64 \times 10^{-8} m^2/s$ to 1.12×10^{-7} m^2/s for solid gain.

Keywords: Sweetened white radish, Effective diffusivity, Mass transfer, Osmotic process

[*1)] Assistant Professor, Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520 Email: kbnavaph@kmitl.ac.th

[2)] Associate Professor, Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok 10800

[*] Corresponding Author

1. บทนำ

ไชโป๊วหวานเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปจากหัวไชเท้า (*Raphanus sativus Linn*) ได้จากการนำไชโป๊วเค็มมาแช่ในสารละลายน้ำตาลความเข้มข้นสูงโดยอาศัยกลไกการถ่ายเทมวลด้วยหลักการออสโมติค กระบวนการออสโมติค (Osmotic Process) เป็นกระบวนการแปรรูปอาหารที่อาศัยการดึงน้ำบางส่วนออกจากอาหารโดยปราศจากการเปลี่ยนสถานะของน้ำ โดยการแช่ชิ้นอาหารเช่น ผักหรือผลไม้ ลงในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงหรือสารละลายออสโมติค เช่น สารละลายน้ำตาลและสารละลายเกลือเป็นต้น ในระหว่างกระบวนการออสโมติคเกิดกลไกการถ่ายเทมวลสองอย่างขึ้นพร้อมกันในทิศทางตรงข้ามกัน โดยน้ำจะซึมออกจากอาหารผ่านผนังเซลล์เข้าสู่สารละลายออสโมติค (Dewatering) และของแข็งหรือสารออสโมติคจะเคลื่อนที่จากสารละลายออสโมติคเข้าสู่ภายในเซลล์อาหาร (Solute Impregnation) กระบวนการทั้งหมดจะดำเนินไปจนกระทั่งเกิดความสมดุลคงที่ระหว่างแรงดันออสโมติคในชิ้นอาหารและสารละลายออสโมติค (Nieto et al., 2004; Garcia-Segovia et al., 2010)

กระบวนการดึงน้ำออกหรือการเพิ่มปริมาณของแข็งด้วยวิธีออสโมติคโดยทั่วไปเป็นการทำงานอย่างช้า ๆ ใช้ระยะเวลาค่อนข้างนานเพื่อที่จะให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ตรงตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ โดยอาศัยกลไกความแตกต่างระหว่างค่าความเข้มข้นของอาหารกับสารละลายออสโมติคเป็นแรงขับดันให้เกิดการแลกเปลี่ยนมวลสาร หรือเรียกว่า ค่าความดันออสโมติค โดยค่าความแตกต่างยิ่งสูงอัตราการถ่ายเทมวลสารจะมีค่าสูงด้วย การสูญเสียน้ำและการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งในระหว่างกระบวนการออสโมติคขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่ อุณหภูมิและ ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติค (Falade et al., 2007; Panades et al., 2008; Garcia-Segovia et al., 2010) ชนิดของสารละลาย (Azoubel and Murr, 2004; El-Aouar et al., 2006) ชนิดของผักผลไม้ พันธุ์และความสุกแก่ (Kowalska and Lenart, 2001) รูปร่างและขนาดของชิ้นอาหาร (Rastogi et al., 1997; Rastogi et al., 2000) ระดับการเคลื่อนที่ของสารละลาย (Moreira and Sereno, 2003) กระบวนการเบื้องต้น เช่น การลวก การใช้ความดันสูง การใช้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ การใช้สนามไฟฟ้าความเข้มสูง การใช้คลื่นความถี่สูงในย่านอุล ตร้าโซนิค (Del Valle et al., 1998; Simal et al., 1998; Rastogi and Niranjan, 1998; Bouzrara and Vorobiev, 2000; Carcel et al., 2007) การใช้ความดันสูงในกระบวนการออสโมติค (100-800 MPa) สามารถช่วยเร่งอัตราการถ่ายเทมวลได้ โดยความดันจะทำลายโครงสร้างของผนังเซลล์ส่งผลให้น้ำและของแข็งเคลื่อนที่ผ่านได้ง่ายมากขึ้น อัตราการถ่ายเทมวลจึงมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีกระบวนการภายใต้ความดันบรรยากาศ (Rastogi et al., 2002) และอัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวอย่างต่อปริมาณสารละลายออสโมติค โดย Bongirwar และ Srinivasan (1977) ทำการทดลองกับกล้วยและ Singh et al. (2007) ทำการทดลองกับแครอท พบว่าปริมาณสารละลายที่เพิ่มมากขึ้น (อัตราส่วนสูง)จะส่งผลให้ค่าความดันออสโมติคคงที่ตลอดกระบวนการ ปริมาณการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากตัวอย่างและการเคลื่อนที่ของของแข็งเข้าสู่ตัวอย่างจึงมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับที่ปริมาณสารละลายต่ำกว่า (อัตราส่วนต่ำ)

จากปัจจัยดังกล่าวข้างต้น มีหลายปัจจัย สามารถเร่งอัตราการถ่ายเทมวลในระหว่างกระบวนการออสโมติคได้ แต่ละปัจจัยจะส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน ซึ่งต้อง พิจารณาเลือกปัจจัยให้เหมาะสมสำหรับการออสโมติคอาหารแต่ละชนิด โดยทั่วไปกลไกการถ่ายเทมวล หลักที่สำคัญ ในระหว่างกระบวนการออสโมติคไชโป๊วหวาน คือการเพิ่มปริมาณของแข็ง (น้ำตาล) ในหัวไชโป๊วเค็มซึ่งเป็นกระบวนการที่ เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ใช้ระยะเวลานาน การเพิ่มความดันและการเพิ่มปริมาณสารละลายสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวล (น้ำตาล)ได้ ซึ่งมีหลายงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับ การเพิ่มอัตรา การถ่ายเทมวลในชิ้นอาหารในกระบวนการออสโมติค อย่างไรก็ตามยังไม่พบการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทมวลในระหว่างกระบวนการออสโมติคไชโป๊วหวาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของกระบวนการ

ออสโมติคไชโป๊วหวานภายใต้ความดันสูงกว่าบรรยากาศ และอัตราส่วนระหว่างปริมาณไชโป๊วต่อสารละลาย ที่มีต่ออัตราการถ่ายเทมวล

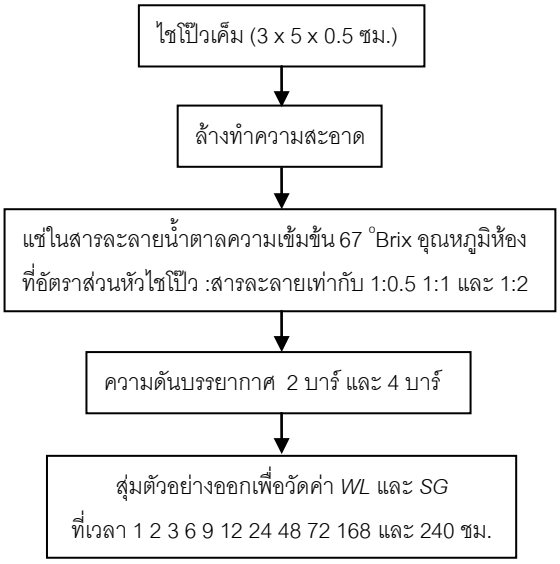
2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำน้ำตาลที่ซื้อจากร้านสะดวกซื้อมาเตรียมเป็นสารละลายออสโมติค และนำหัวไชโป๊วเค็มจากโรงงานแม่ทองสุข จ.ราชบุรี มาเก็บรักษาโดยคลุกเคล้าหัวไชโป๊วเค็มกับเกลือเม็ดที่อัตราส่วนระหว่างหัวไชโป๊วเค็มต่อเกลือเม็ด 1:2 เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง ก่อนการทดลองสุ่มเลือกหัวไชโป๊วเค็มที่มีขนาดประมาณ 3 x 10 x 0.5 ซม. มาล้างทำความสะอาดเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นวางเรียงไว้บนตะแกรงโดยมีกระดาษทิชชูวางซับแล้วตัดหัวตัดท้ายออก เตรียมชิ้นไชโป๊วเค็มที่นำไปแปรรูปเป็นไชโป๊วหวานให้มีขนาด 3 x 5 x 0.5 ซม.หัวไชโป๊วเค็มที่นำมาใช้ในการทดลองมีค่าปริมาณความชื้นโดยเฉลี่ยเท่ากับ 78$\pm$3.09% (ฐานเปียก) ค่าปริมาณน้ำอิสระโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.95$\pm$0.002 (Aqualab รุ่น CX3TE, USA) และค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ชนิดเกลือโดยเฉลี่ยเท่ากับ 16$\pm$0.76 % และชนิดน้ำตาลโดยเฉลี่ยเท่ากับ 12$\pm$0.87 °Brix (Refractometer, Atago รุ่น Master 4T, Japan)

2.2 การทดลอง

แช่ชิ้นไชโป๊วเค็มที่เตรียมไว้ในสารละลายน้ำตาลเข้มข้น 67°Brix ซึ่งเป็นความเข้มข้นสูงสุดและนิยมใช้ในอุตสาหกรรมการแปรรูปไชโป๊วหวาน ที่อัตราส่วนไชโป๊วต่อสารละลาย (w/w) เท่ากับ 1:0.5 1:1 และ 1:2 ที่ความดัน 3 ระดับคือ ความดันบรรยากาศ ความดัน 2 บาร์ และ 4 บาร์ ที่อุณหภูมิห้อง โดยตลอดระยะเวลาการแช่ชิ้นไชโป๊วเค็มถูกกดด้วยถุงพลาสติกบรรจุสารละลายทางด้านบนเพื่อให้ชิ้นตัวอย่างแช่อยู่ในสารละลายตลอดเวลา สุ่มเก็บตัวอย่างจำนวน 6 ชิ้น ที่เวลา 1 2 3 6 9 12 24 48 72 120 168 และ 240 ชั่วโมง เพื่อพิจารณาระยะเวลาการเข้าสู่สภาวะสมดุลของการถ่ายเทมวลของชิ้นตัวอย่าง (แผนผังการทดลองแสดงดังรูปที่ 1) นำชิ้นตัวอย่างที่สุ่มเก็บจากสารละลายล้างด้วยน้ำสะอาดอย่างรวดเร็วและซับน้ำด้วยกระดาษทิชชูเพื่อกำจัดสารละลายที่ติดอยู่บริเวณผิวของชิ้นตัวอย่าง ปรับค่าความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลให้คงที่ทุกครั้งที่สุ่มเก็บตัวอย่าง ทำการวิเคราะห์ปริมาณการสูญเสียน้ำออกจากชิ้นตัวอย่างและปริมาณของแข็งจากสารละลายน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นในชิ้นตัวอย่าง โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ใช้การวางแผนการทดลองแบบสุ่มตัวอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD)



รูปที่ 1 *แผนผังการทดลองการออสโมติคไชโป๊วหวาน*

2.3 การวิเคราะห์

2.3.1 การสูญเสียน้ำและการเพิ่มขึ้นของของแข็ง

หาความชื้นของ งชิ้นตัวอย่างที่แช่ในสารละลายเป็นระยะเวลาต่าง ๆ โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C ในตู้อบแห้งสุญญากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมงหรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างจะคงที่ จากนั้นวิเคราะห์ค่าการสูญเสียน้ำและการเพิ่มขึ้นของของแข็ง (น้ำตาล) ในชิ้นตัวอย่างโดยใช้สมการที่ (1) และ (2) (Falade, 2007)

$$WL = \frac{\left(M_o - m_o\right) - \left(M - m\right)}{M_o} \quad (1)$$

$$SG = \frac{m - m_o}{M_o} \quad (2)$$

โดย *WL* คือ ค่าการสูญเสียน้ำ (%) *SG* คือค่าการเพิ่มขึ้นของของแข็ง (%) M_o คือน้ำหนักเริ่มต้นของไชโป๊ว (g) m_o

คือปริมาณของแข็งเริ่มต้นของไชโป๊ว (g) *M* คือน้ำหนักของไชโป๊วหลังแช่ที่เวลาใด ๆ (g) และ *m* คือปริมาณของแข็งในไชโป๊วที่เวลาใด ๆ (g)

2.3.2 สัมประสิทธิ์การแพร่

พิจารณาสัมประสิทธิ์การแพร่ในชิ้น ตัวอย่างที่แปรรูปด้วยหลักการออสโมติค โดยใช้รูปแบบกฎการแพร่ข้อที่สองของ Fick ตัวอย่างที่ใช้มีลักษณะเป็นแผ่นบางมี ความหนาเท่ากับ 2 L (คิดการถ่ายเทมวลแบบมิติเดียว) และมีเงื่อนไขขอบเขตและเวลาดังนี้

- ปริมาณความชื้นและของแข็งเริ่มต้นมีค่าเท่ากันตลอดทั่วทั้งชิ้นตัวอย่าง $MC(z,0) = MC(0)$
- ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นตัวอย่างที่สมมาตร $(z = 0)$

$$\frac{\partial M(t)}{\partial z} = \frac{m - m_o}{M_o}$$

- *ปริมาณความชื้นและของแข็งที่บริเวณผิวเท่ากับที่สภาวะสมดุล* $MC(L, t) = MC_{eq}$

จากกฎการแพร่ข้อที่สองของ Fick และเงื่อนไขต่าง ๆ สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและของแข็งได้ดังแสดงในสมการที่ 3-4 (Crank, 1975, Falade, 2007)

$$MR = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \times \exp\left(-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{ew} t}{4L^2} \right) \quad (3)$$

$$SR = \frac{S_t - S_e}{S_o - S_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \times \exp\left(-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{es} t}{4L^2} \right) \quad (4)$$

โดย

D_{ew} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (m^2/s)

D_{es} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวถูกละลาย (m^2/s)

t คือ เวลา (s)

$2L$ คือ ค่าความหนาของวัตถุดิบ(m)

MR คือ อัตราส่วนความชื้น

SR คือ อัตราส่วนของแข็ง

X_t คือ ปริมาณความชื้นหลังแช่วัตถุดิบในสารละลายออสโมติคที่เวลา t

X_o คือ ปริมาณความชื้นก่อนแช่วัตถุดิบในสารละลายออสโมติค (g water/g dry solid)

X_e คือ ปริมาณความชื้นวัตถุดิบที่จุดสมดุล (g water/g dry solid)

S_t คือ ปริมาณของแข็งที่ถูกแทนที่หลังแช่ในสารละลายออสโมติคที่เวลา t

S_o คือ ปริมาณของแข็งวัตถุดิบก่อนแช่ในสารละลายออสโมติค (g)

S_e คือ ปริมาณของแข็งวัตถุดิบที่จุดสมดุล (g)

จากสมการที่ (3) และ (4) สามารถแสดงความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงได้ดังสมการที่ (5)

$$\ln MR = A - Bt \quad (5)$$

โดย $B = \frac{\pi^2 D_e}{4L^2}$

A คือค่าคงที่ $= \ln(8/\pi^2)$

ค่าความชัน B หาได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln MR และเวลา ค่าอัตราส่วนของแข็ง SR สามารถใช้หลักการเช่นเดียวกับการคำนวนหาค่า MR

3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 ผลของอัตราส่วนไชโป๊วต่อสารละลายที่มีต่อการถ่ายเทมวล

ในระหว่างกระบวนการออสโมติคไชโป๊วหวาน ค่าการสูญเสียน้ำและการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 3 ชั่วโมงแรก จากนั้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าการถ่ายเทมวลดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ดังแสดงในรูปที่ 1-3 เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นค่าแรงดันออสโมติคระหว่างไชโป๊วกับสารละลายมีค่าสูง ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารได้มาก และเมื่อเวลาผ่านไปปริมาณน้ำในตัวอย่างลดลงและสารออสโมติค (น้ำตาล) ซึมผ่านเข้าไชโป๊วมากขึ้น จึงทำให้ค่าความแตกต่างของ ความ ดันออสโมติคลดลงอัตราการถ่ายเทมวลจึงลดลงจนเข้าใกล้สภาวะสมดุล (Falade, 2007; Singh et al., 2007) โดยการถ่ายเทมวลของชิ้นตัวอย่างเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 72 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าปริมาณความชื้น ค่าปริมาณน้ำอิสระ และค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้โดย เฉลี่ย $33 \pm 1.32\%$ 0.88 ± 0.01 และ $30.17 \pm 1.44^\circ$ Brix ตามลำดับ เมื่อ

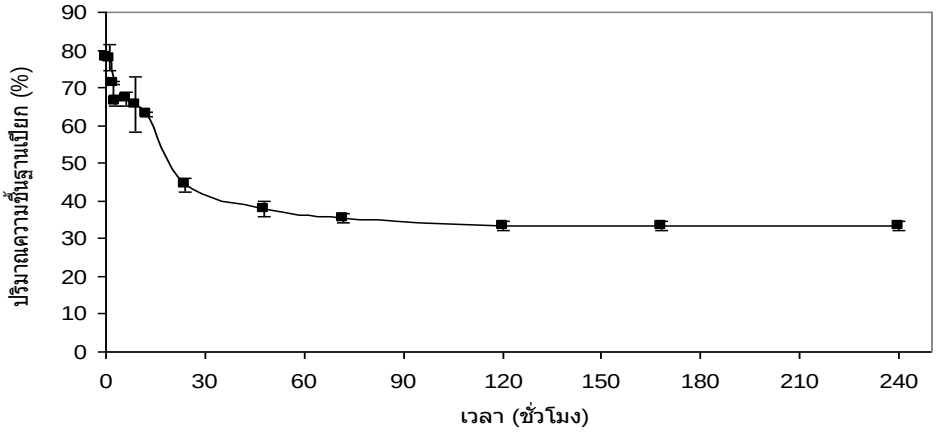
พิจารณาผลของการเพิ่มปริมาณสารละลาย พบว่าค่าอัตราการถ่ายเทมวล (น้ำ) เพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณสารละลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากในระหว่างกระบวนการออสโมติคค่าความเข้มข้นของสารละลายจะเจือจางลง ส่งผลให้ ความ ดันออสโมติคลดลง แต่เมื่อปริมาณสารละลายมากเพียงพอจะทำให้ค่าความเข้มข้นคงที่ ความ ดันออสโมติค จึงคงที่ตลอดกระบวนการ ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทมวลของน้ำ โดยการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายหรือการควบคุมให้คงที่ตลอดกระบวนการ จะเป็นการเพิ่มค่าปริมาณการสูญเสียน้ำออกจากตัวอย่าง (El-Aouar et al., 2006; Singh et al., 2007; Garcia-Segovia et al., 2010)

เมื่อพิจารณาปริมาณการเพิ่มขึ้นของของแข็ง (น้ำตาล) ในไชโป๊วที่ระยะเวลาการแช่ในสารละลายออสโมติคที่นานขึ้น พบว่า ที่อัตราส่วน 1 :2 การเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งมีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากกระบวนการออสโมติคเป็นกระบวนการที่เริ่มต้นจากผิวหน้าของชิ้นตัวอย่าง หากปริมาณสารละลายสูงมากจนเกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณตัวอย่าง อัตราการถ่ายเทมวลในช่วงแรกจะมีค่าสูงและส่งผลให้เกิดการเสียรูปของผนังเซลล์ที่บริเวณผิวหน้าเนื่องจากเกิดการสูญเสียน้ำมากและในขณะเดียวกันของแข็งปริมาณสูงที่อยู่ในสารละลายจะเกิดการถ่ายเทเข้าสู่เซลล์บริเวณผิวหน้า ทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของของแข็งเข้าสู่เซลล์ชั้นใน ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Sablani and Rahman (2003) Chiralt and Talens (2005) และ Garcia-Segovia et al. (2010) ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการเสียรูปของเซลล์ (cell death) เกิดขึ้นบริเวณเซลล์ชั้นนอกโดยมีระยะทางจากผิวของชิ้นอาหารลึกเข้าสู่ด้านในประมาณ 2-3 มม.

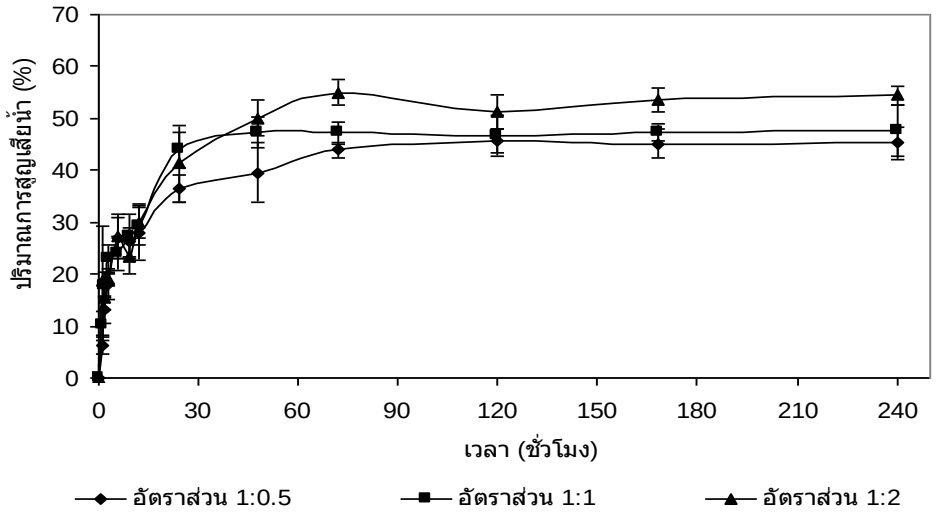
3.2 ผลของความดันที่มีต่อการถ่ายเทมวล

พิจารณารูปที่ 5-6 พบว่า การสูญเสียน้ำและการเพิ่มขึ้นของของแข็ง (น้ำตาล) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของกระบวนการ ที่ทุกระดับความดัน ในช่วง 3 ชั่วโมงแรกของกระบวนการเมื่อเพิ่มความดัน สูงกว่าความดันบรรยากาศ ปริมาณการสูญเสียน้ำและปริมาณการเพิ่มขึ้นของของแข็ง (น้ำตาล) ในตัวอย่างมีค่าสูงขึ้น การเพิ่มความดันเป็นการทำให้เซลล์ต่าง ๆ ในชิ้นอาหารไม่รวมติดเป็นชิ้นเดียวกัน การเคลื่อนที่ของน้ำและของแข็งจึงผ่านผนังเซลล์ได้ง่ายขึ้น ของแข็งในสารละลายเข้าไปแทนที่น้ำในเซลล์ของไชโป๊ว ส่งผลให้น้ำในเซลล์ถูกดันออกมาสู่สารละลายภายนอก กลไกการถ่ายมวลในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงระยะแรกของกระบวนการ โดยทั่วไปการเพิ่มความดันจะใช้ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการออสโมติค โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มปริมาณของแข็งในชิ้นตัวอย่าง ตัวอย่างที่พบได้แก่ กระบวนการออสโมติคสับปะรด (Rastogi and Niranjan, 1998) และมันฝรั่ง (Rastogi et al., 2000) เป็นต้น โดยอัตราการสูญเสียน้ำและการเพิ่มขึ้นของของแข็งมีค่าสูงมากที่บริเวณผิวสัมผัสของชิ้นอาหารกับสารละลายออสโมติค

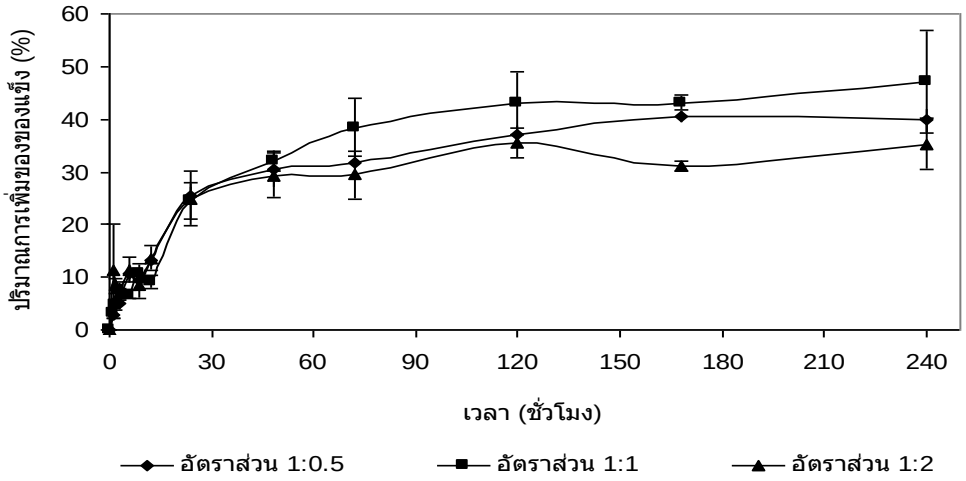
ในช่วงหลังของกระบวนการออสโมติค (มากกว่า 3 ชั่วโมง) ภายใต้ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ ปริมาณการสูญเสียน้ำมีค่าสูง โดยที่ความดัน 4 บาร์มีค่าปริมาณการสูญเสียน้ำสูงที่สุดและเข้าสู่สภาวะสมดุลเร็วที่สุด เมื่อพิจารณาปริมาณการเพิ่มขึ้นของของแข็ง พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของของแข็งในชิ้นตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ อั ตราการ ถ่ายเทมวลที่สูงในช่วงแรกส่งผลให้อัตราการ แทรกซึม ของของแข็ง เข้าไปสู่เซลล์ ในช่วงหลังของกระบวนการเป็นไปได้ยาก เนื่องจากการสูญเสียน้ำทำให้เซลล์เปลี่ยนรูปร่างและ การเกิดการจับตัวแข็งที่บริเวณเซลล์ชั้นนอกของ ตัวอย่าง โดยกระบวนการภายใต้ความดันสูงกว่าบรรยากาศ (ความดัน 2 บาร์และ 4 บาร์) มีค่าปริมาณการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในชิ้นตัวอย่างใกล้เคียงกันและมีค่าสูงกว่ากระบวนการที่ความดันบรรยากาศอย่างชัดเจน



รูปที่ 2 *ปริมาณความชื้นของชิ้นไชโป๊วเค็มที่แช่ในสารละลายน้ำตาลความเข้มข้น 67°Brix ที่อัตราส่วนไชโป๊วต่อสารละลาย 1:1 ที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง*



รูปที่ 3 *ผลของอัตราส่วนไชโป๊วต่อสารละลายที่มีต่อการสูญเสียน้ำในไชโป๊วที่แช่ในสารละลายน้ำตาลความเข้มข้น 67°Brix ที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง*



รูปที่ 4 *ผลของอัตราส่วนไชโป๊วต่อสารละลายที่มีต่อการเพิ่มขึ้นของของแข็งในไชโป๊วที่แช่ในสารละลายน้ำตาลความเข้มข้น 67°Brix ที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง*

3.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและของแข็ง

ตารางที่ 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและของแข็ง (น้ำตาล) ในไชโป๊วที่แช่อยู่ในสารละลาย 67^{O}Brix ที่อุณหภูมิห้องที่อัตราส่วนไชโป๊วต่อสารละลายและสภาวะความดันต่าง ๆ โดยคิดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากระยะเวลาเริ่มต้นกระบวนการออสโมติคจนถึงสภาวะสมดุล

ที่สภาวะเดียวกันค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของของแข็ง ผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ El-Aouar et al. (2006) พิจารณาการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารละลายภายใต้ความดันเดียวกัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณสารละลายที่เพิ่มขึ้นทำให้น้ำที่แพร่ออกมาจากไชโป๊วไม่เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย ดังนั้น ความ ดันออสโมติคซึ่งเกิดจากค่าความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำภายในเซลล์และภายนอกเซลล์จึงมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการ เมื่อพิจารณาการเพิ่มความดันพบว่า เมื่อเพิ่มความดันค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ความดัน 2 บาร์และเมื่อเพิ่มความดันจนถึงระดับ 4 บาร์ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของของแข็งมีค่าลดลง เนื่องจากในช่วงแรกของกระบวนการผลของความดันทำให้ปริมาณน้ำถูกขับออกมาจากไชโป๊วอย่างมากเกิดการเสียรูปของเซลล์และปริมาณของแข็งมีอัตราการแทรกซึมเข้าไปสู่เซลล์ที่สูงเกิดการจับตัวแข็งของตัวกลางบริเวณเซลล์ชั้นนอกของไชโป๊ว ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแข็งจึงลดลงที่ความดัน 4 บาร์ ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Bongirwar and Srinivasan (1977) และ Sablani and Rahman (2003)

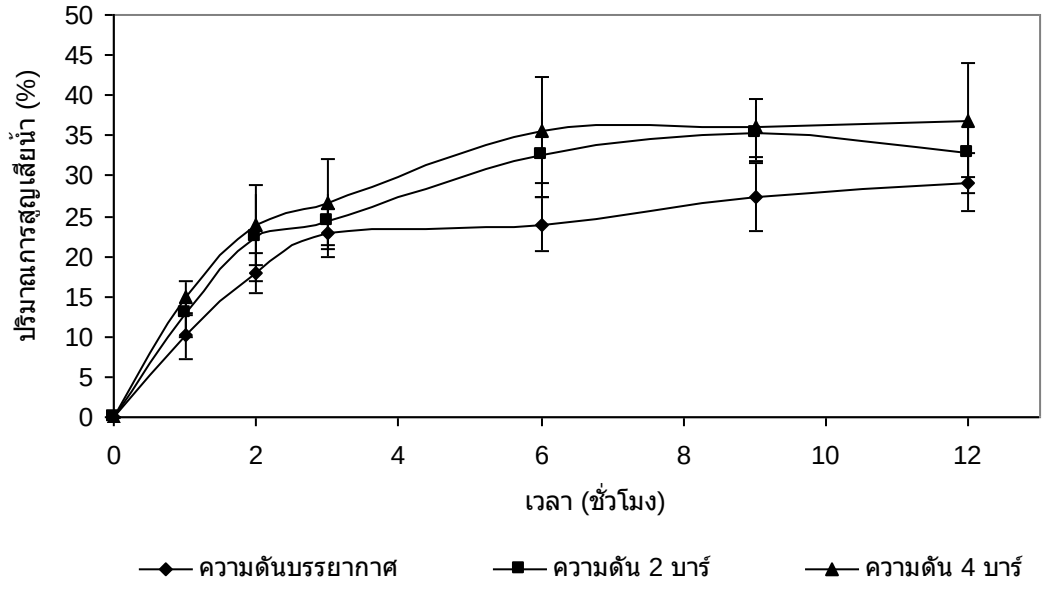
อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่ได้จากการทดลองนี้กับงานวิจัยอื่น ๆ ค่าที่ได้ค่อนข้างสูงกว่า เนื่องจากตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไชโป๊วเค็มซึ่งเป็นตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการออสโมติคเบื้องต้นด้วยสารละลายเกลือมาแล้วเป็นระยะเวลานานประมาณ 6 เดือน โครงสร้างของตัวอย่างจึงเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยน้ำหนักของหัวไชเท้าสดเมื่อนำมาแปรรูปเป็นไชโป๊วเค็มลดลงมากกว่า 100 % ผนังเซลล์ของไชโป๊วเค็มน่าจะเกิดการเสียรูปและมีสภาพไม่เหมือนผักหรือผลไม้สด Del Valle et al. (1998) ได้ศึกษาอัตราการถ่ายเทมวลในระหว่างกระบวนการออสโมติค ชิ้นอาหารที่เซลล์เกิดการเสียสภาพ พบว่าปริมาณการสูญเสียน้ำและการเพิ่มขึ้นของของแข็งจะเกิดขึ้นสูงกว่าชิ้นอาหารทั่วไปมาก

4. สรุปผลการทดลอง

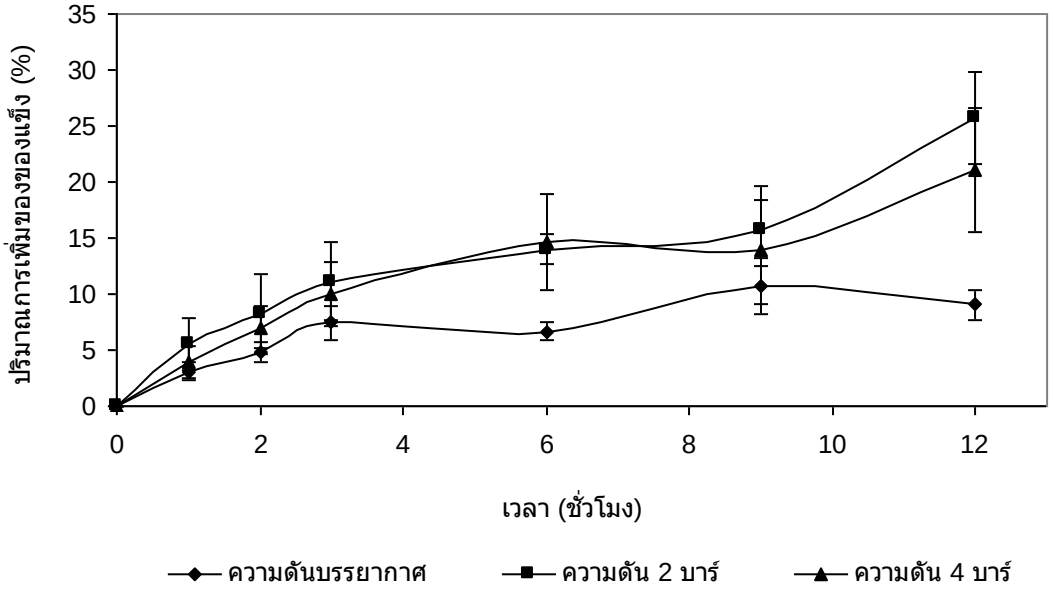
ค่าการสูญเสียน้ำและการเพิ่มขึ้นของของแข็งในระหว่างกระบวนการออสโมติคไชโป๊วหวานมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนตัวอย่างต่อสารละลายออสโมติคและระดับความดัน โดยค่าการสูญเสียน้ำและการเพิ่มขึ้นของของแข็งเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนตัวอย่างต่อสารละลายออสโมติคและระดับความดันเพิ่มขึ้น โดยสภาวะที่ความดัน 2 บาร์และอัตราส่วนตัวอย่างต่อสารละลาย 1: 2 ให้ค่าอัตราการถ่ายเทมวล (น้ำตาล) เข้าสู่ไชโป๊วดีที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คำนวณตามกฎการแพร่ข้อที่สอง ของ Fick ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำอยู่ในช่วง 5.75 x 10^{-8} m^2/s ถึง 2.57 x 10^{-7} m^2/s และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของของแข็งอยู่ในช่วง 4.64 x 10^{-8} m^2/s ถึง 1.12 x 10^{-7} m^2/s

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโรงงานไชโป๊วแม่ทองสุข จ.ราชบุรี ที่ให้ความร่วมมือสนับสนุนด้านวัตถุดิบทำให้การดำเนินงานในโครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี



รูปที่ 5 *ผลของความดันที่มีต่อการสูญเสียน้ำในไซโป๊วที่แช่ในสารละลายน้ำตาลความเข้มข้น 67°Brix อัตราส่วนไซโป๊วต่อสารละลาย 1:1 ที่อุณหภูมิห้อง*



รูปที่ 6 *ผลของความดันที่มีต่อการเพิ่มขึ้นของของแข็งในไซโป๊วที่แช่ในสารละลายน้ำตาลความเข้มข้น 67°Brix อัตราส่วนไซโป๊วต่อสารละลาย 1:1 ที่อุณหภูมิห้อง*

ตารางที่ 1 *สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและของแข็งของไชโป๊วที่แช่อยู่ในสารละลาย 67 Brix ที่อุณหภูมิห้อง*

ความดัน (บาร์)	อัตราส่วนไชโป๊วต่อสารละลาย	สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)	
		น้ำ	ของแข็ง
1.013	1:0.5	5.75×10^{-8}	4.64×10^{-8}
	1:1	8.06×10^{-8}	6.67×10^{-8}
	1:2	1.53×10^{-7}	7.13×10^{-8}
2	1:0.5	7.04×10^{-8}	8.24×10^{-8}
	1:1	1.05×10^{-7}	1.10×10^{-7}
	1:2	1.65×10^{-7}	1.12×10^{-7}
4	1:0.5	9.66×10^{-8}	6.28×10^{-8}
	1:1	1.19×10^{-7}	8.06×10^{-8}
	1:2	2.57×10^{-7}	9.72×10^{-8}

เอกสารอ้างอิง

Azoubel, P.M. and Murr, F.E.X. 2004. Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato. **Journal of Food Engineering**. Vol. 61, No.3, 291-295.

Bongirwar, D.R. and Srinivasan, A. 1977. Studies on osmotic dehydration of banana. **Journal of Food Science and Technology**. Vol.14, 104-112.

Bouzrara, H. and Vorobiev, E. 2000. Solids/liquid expression of cellular materials enhanced by pulsed electric field. **Chemical Engineering and Processing**. Vol. 42, No.4, 249-257.

Carcel, J.A., Benedito, J., Rossello, C. and Mulet, A. 2007. Influence of ultrasound intensity on mass transfer in apple immersed in a sucrose solution. **Journal of Food Engineering**. Vol. 78, No. 2, 472-479.

Chiralt, A. and Tales, P. 2005. Physical and chemical induced by osmotic dehydration in plant tissues. **Journal of Food Engineering**. Vol. 67,167-177.

Crank, J. 1975. **Mathematics of diffusion** (2^{nd} ed., pp. 24-25). Oxford: Clarendon Press.

Del Valle, J.M., Aranguiz, V. and Leon, H. 1998. Effects of blanching and calcium infiltration on PPO activity, texture, microstructure and kinetics of osmotic dehydration of apple tissue. **Food Research International**. Vol. 31, No. 8, 557-569.

El-Aouar, A.A., Azoubel, P.M., Barbosa Jr., J.L. and Murr, F.E.X. 2006. Influence of the osmotic agent on the osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya* L.) **Journal of Food Engineering**. Vol. 75, 267-274.

Falade, K.O., Igbeka, J.C. and Ayanwuyi, F. A. 2007. Kinetics of mass transfer, and colour changes during osmotic dehydration of watermelon. **Journal of Food Engineering**. Vol. 80, No. 3, 979-985.

Garcia-Segovia, P., Mognetti, C., Andres-Bello, A. and Martinez-Monzo, J. 2010. Osmotic dehydration of Aloe vera *(Aloe barbadensis*

Miller). **Journal of Food Engineering**. Vol. 97, 154-160.

Kowalska, H. and Lenart, A. 2001. Mass exchange during osmotic pretreatment of vegetables. **Journal of Food Engineering**. Vol. 49, No. 2-3, 137-140.

Mavroudis, N.E., Gekas V. and Sjoeholm, I. 1998. Osmotic dehydration of Apples –Effects of agitation and raw material characteristics. **Journal of Food Engineering**. Vol. 35, No. 2, 191-209.

Moreira R. and Sereno, A.M. 2003. Evaluation of mass transfer coefficients and volumetric shrinkage during osmotic dehydration of apple using sucrose solutions in static and non-static conditions. **Journal of Food Engineering**. Vol. 57, No. 1, 25-31.

Nieto, A.B., Salvatori, D.M., Castro, M.A. and Alzamora, S.M. 2004. Structural changes in apple tissue during glucose and sucrose osmotic dehydration: Shrinkage, porosity, density and microscopic features. **Journal of Food Engineering**. Vol. 61, No. 2, 269-278.

Panades, G., Castro D., Chiralt, A., Fito, P., Nunez, M. and Jimenez, R. 2008. Mass transfer mechanisms occurring in osmotic dehydration of guava. **Journal of Food Engineering**. Vol. 87, 386-390.

Rastogi, N.K., Angersbach, A. and Knorr, D. 2000. Synergistic effect of high hydrostatic pressure pretreatment and osmotic stress on mass transfer during osmotic dehydration. **Journal of Food Engineering**. Vol. 45, No.1, 25-31.

Rastogi, N.K. and Niranjan, K. 1998. Enhanced mass transfer during osmotic dehydration of high pressure treated pineapple. **Journal of Food Science**. Vol. 63, No. 3, 508-511.

Rastogi, N.K., Raghavarao, K.S.M.S. and Niranjan, K. 1997. Mass transfer during osmotic dehydration of banana: Fickian diffusion in cylindrical configuration. **Journal of Food Engineering**. Vol. 31, No. 4, 423-432.

Rastogi, N.K., Raghavarao, K.S.M.S., Niranjan, K. and Knorr, D. 2002. Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. **Trends in Food Science and Technology**. Vol. 13, No. 2, 48-59.

Sablani, S.S. and Rahman, M.S. 2003. Effect of syrup concentration, temperature and sample geometry on equilibrium distribution coefficients during osmotic dehydration of mango. **Food Research International**. Vol. 36, No. 1, 65-71.

Simal, S., Benedito, J., Sanchez, E.S. and Rossello, C. 1998. Use of ultrasound to increase mass transport rates during osmotic dehydration. **Journal of Food Engineering**. Vol. 36, No. 3, 323-336.

Singh B., Kumar, A. and Gupta, A.K. 2007. Study of mass transfer kinetics and effective diffusivity during osmotic dehydration of carrot cubes. **Journal of Food Engineering**. Vol. 79, 471-480.