

## ปัจจัยและกระบวนการเบื้องต้นที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทมวลของ ชั้นอาหารในระหว่างกระบวนการออสโมติก

นวกัทรာ หนูนาค<sup>1</sup>

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

รับเมื่อ 27 ตุลาคม 2551 ตอบรับเมื่อ 22 มกราคม 2552

### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นบทความที่รวบรวมปัจจัยและกระบวนการเบื้องต้นต่างๆ ที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทมวลในชั้นอาหารในระหว่างกระบวนการออสโมติก กระบวนการออสโมติกเป็นกระบวนการเบื้องต้นในการเพิ่มปริมาณของแข็งและการลดปริมาณน้ำในอาหารที่ได้รับความนิยม คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นกับการถ่ายเทมวลภายในชั้นอาหารและผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดต้องการสภาวะเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ดังนั้น การเข้าใจถึงกลไกและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลจึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยปัจจัยที่กล่าวถึงในบทความนี้ได้แก่ ชนิดของสารละลาย ความเข้มข้นของสารละลาย อุณหภูมิ โครงสร้างและองค์ประกอบของอาหาร รูปร่างและขนาดของชั้นอาหาร อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของสารละลายและอาหาร รวมถึงระดับการเคลื่อนที่ของสารละลาย อีกทั้งยังได้มีการรวบรวมกระบวนการเบื้องต้น (การลวก การใช้ความดันสูง การใช้ความดันต่ำ การใช้คลื่นความถี่สูงอัลตราโซนิก การใช้สนามไฟฟ้าความเข้มสูง) ซึ่งสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลในชั้นอาหารไว้ในบทความนี้อีกด้วย

**คำสำคัญ :** กระบวนการออสโมติก / อัตราการถ่ายเทมวล / ปัจจัย / การลวก / อัลตราโซนิก / ความดัน

\*Corresponding author: Email: kbnavaph@kmitl.ac.th

<sup>1</sup> อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร, คณะวิศวกรรมศาสตร์

## A Review of Factors and Pre-Treatments Affecting Mass Transfer Rate of Food during Osmotic Process

Navaphattra Nunak <sup>1</sup>

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10140

*Received 27 October 2008 ; accepted 22 January 2009*

### Abstract

This paper reviews the effect factors and pre-treatments on mass transfer rate in food during osmotic process. Osmotic process is the most popular process as a pre-processing impregnation and dehydration step. The quality of each final product depends on mass transfer in the food and it needs own suitable process condition. Clearly understanding the main factors affecting the mass transfer in food is important. Therefore, the factors including type of solution, solution concentration, temperature, structure/composition of the materials, sample size and geometry, solution to solid volume ratio, level of agitation are explained. Also, various pre-treatments to increase the rate of mass transfer, such as blanching, application of ultrasound, high pressure, vacuum, high intensity electrical field pulses are presented.

**Keywords :** Osmotic Process / Mass Transfer Rate / Factors / Blanching / Ultrasound / Pressur

---

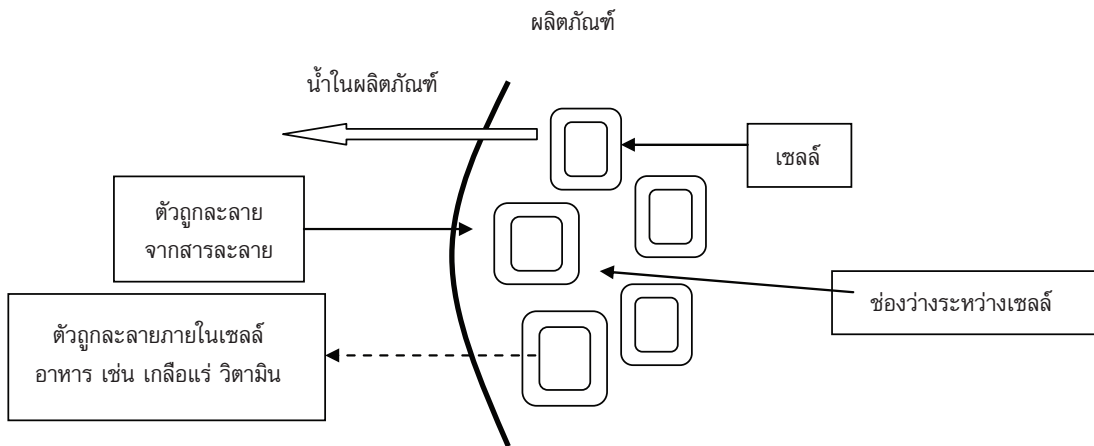
\*Corresponding author: Email: kbnavaph@kmit.ac.th

<sup>1</sup> Lecturer, Department of Food Engineering Faculty of Engineering.

## 1. บทนำ

กระบวนการออสโมติก (Osmotic Process) เป็นกระบวนการแปรรูปอาหารเบื้องต้นที่อาศัยการดึงน้ำบางส่วนออกจากอาหารโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำ โดยการแช่ชิ้นอาหารเช่น ผักหรือผลไม้ ลงในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงหรือสารละลายออสโมติกเช่น สารละลายน้ำตาลและสารละลายเกลือ เป็นต้น เนื่องจากสารละลายความเข้มข้นสูงเหล่านี้มีปริมาณน้ำอิสระต่ำ มีค่าความดันออสโมติกสูง จึงส่งผลให้เกิดแรงขับเคลื่อนของน้ำในชิ้นอาหารผ่านผนังเซลล์เมมเบรนซึ่งทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน ในระหว่างกระบวนการออสโมติกเกิดกลไกการถ่ายเทมวลสองอย่างขึ้นพร้อมกันในทิศทางตรงข้ามกัน ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการเป็นช่วงการถ่ายเทมวลที่สำคัญที่สุด น้ำจะซึมออกจากอาหารผ่านผนังเซลล์เข้าสู่

สารละลายออสโมติก และในขณะเดียวกันของแข็งที่ละลายอยู่ในสารละลายออสโมติกจะซึมผ่านเข้าสู่ภายในเซลล์อาหาร ในความเป็นจริงแล้วไม่เพียงแต่น้ำจากชิ้นอาหารที่ซึมออกจากเซลล์เท่านั้น แต่ของแข็งที่ละลายน้ำได้ที่อยู่ในอาหาร เช่น วิตามิน เกลือแร่ต่างๆ บางส่วนก็ซึมออกมาสู่สารละลายออสโมติกด้วยเช่นกัน (รูปที่ 1) แต่เนื่องจากปริมาณที่ซึมออกมาเป็นปริมาณเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการถ่ายเทมวลของน้ำในชิ้นอาหารและของแข็งในสารละลายดังกล่าวข้างต้น ดังนั้น ในการพิจารณาการถ่ายเทมวลในหลายกรณีจึงไม่พิจารณาการถ่ายเทมวลของของแข็งธรรมชาติที่อยู่ในเซลล์อาหาร [1-4] กระบวนการถ่ายเทมวลทั้งหมดจะดำเนินไปจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลระหว่างแรงดันออสโมติกในชิ้นอาหารและสารละลายออสโมติก



รูปที่ 1 หลักการถ่ายเทมวลในกระบวนการออสโมติก

กระบวนการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมติกนี้เป็นกระบวนการที่ปราศจากการให้ความร้อน จึงช่วยประหยัดพลังงาน อีกทั้งน้ำหนักโดยรวมของชิ้นอาหารที่ผ่านกระบวนการออสโมติกลดลง ทำให้ช่วยประหยัดต้นทุนในการขนส่ง ลดการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลในผลไม้ สามารถปรับแต่งคุณภาพของอาหารในด้านสี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัส นอกจากนี้ ในระหว่างการเก็บรักษาค่าปริมาณสารอาหารที่อยู่ในผลไม้ที่ผ่านการดึงน้ำออกด้วยวิธีนี้ยังคงมีปริมาณสูง [5-7] อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวิธีนี้เป็นการดึงน้ำออกเพียงบางส่วน จึงไม่สามารถเก็บรักษาอาหารได้เป็นระยะเวลาอันยาวนาน หากต้องการขยายระยะเวลาในการเก็บรักษา จำเป็นต้องมีกระบวนการอื่นร่วมด้วย เช่น การนำอาหารที่ผ่านกระบวนการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมติกไปผ่านกระบวนการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ ต่อไป เพื่อลดค่าปริมาณน้ำอิสระลงให้เหลือในปริมาณที่เหมาะสม เป็นต้น วัตถุประสงค์ที่นำมาใช้ในกระบวนการออสโมติกมีมากมายหลายชนิด เช่น เนื้อสัตว์ต่างๆ ผักและผลไม้ ซึ่งผักและผลไม้จะเป็นที่นิยมมาก เนื่องจากเป็นอาหารที่เสื่อมสภาพได้ง่าย มีปริมาณน้ำ แป้ง และน้ำตาล เป็นองค์ประกอบภายในสูง ซึ่งเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์

สารออสโมติกที่ใช้ต้องมีค่าปริมาณน้ำอิสระ (water activity,  $a_w$ ) ต่ำ ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพและไม่ทำให้เสียรสชาติของอาหาร สารออสโมติกที่นิยมใช้คือ สารละลายน้ำตาลและสารละลายเกลือ โดยสารละลายน้ำตาลนิยมใช้มากกับกระบวนการออสโมติกผลไม้และสารละลายเกลือนิยมใช้กับผัก น้ำตาลมีบทบาทสำคัญต่อการดึงน้ำออก มีตัวยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่ทำให้เกิดสีน้ำตาล และยังช่วยป้องกันการสูญเสียสารระเหยในระหว่างกระบวนการ อย่างไรก็ตาม การใช้สารละลายน้ำตาลจะถูกจำกัดที่ความเข้มข้นสูง เนื่องจากจะทำให้เกิดการตกผลึก สามารถแก้ไขได้โดยการเติมกรดน้ำส้มหรือกรดซิตริก ในส่วนของสารละลายเกลือก็มีบทบาทสำคัญเช่นกัน สามารถช่วยเพิ่มรสชาติให้กับอาหาร รวมทั้งช่วยลดยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ทำให้ยืดอายุการเก็บรักษาอาหารได้ [8-9]

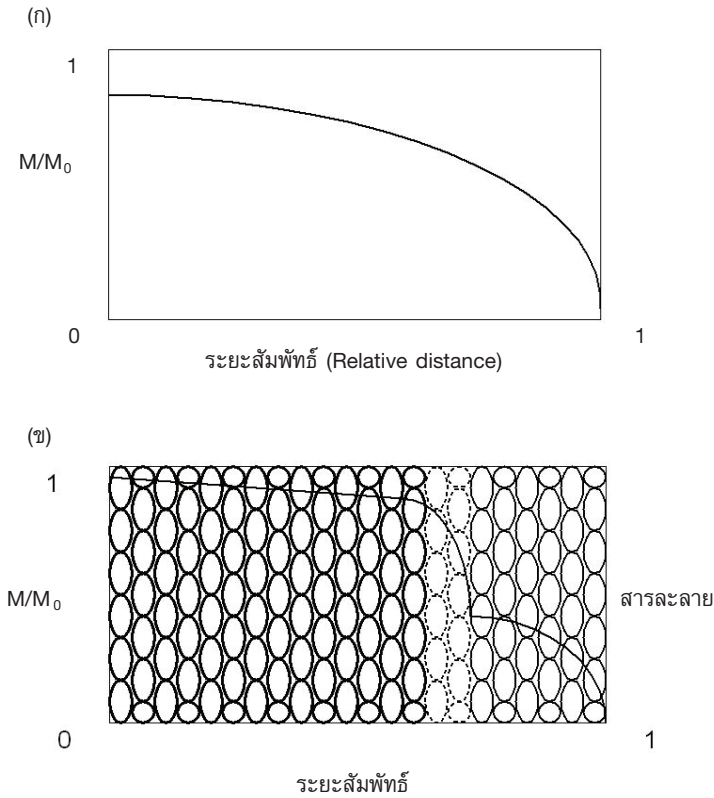
## 2. กลไกการถ่ายเทมวล

ในช่วงเริ่มต้นของการศึกษา กลไกการถ่ายเทมวลในกระบวนการออสโมติก นักวิจัยส่วนใหญ่พิจารณาให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าคงที่ภายใต้อิทธิพลของค่าเกรเดียนต์ของของความชื้น (uniform moisture gradient) ดังแสดงในรูปที่ 2ก [10] โดยค่าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ ( $M/M_0$ ) แสดงค่าความชื้นที่ระยะสัมพัทธ์ (Relative distance) ต่างๆ (0 และ 1 คือตำแหน่งกึ่งกลางและผิวหน้าของชิ้นอาหารตามลำดับ) เทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้นของชิ้นอาหาร ในระหว่างกระบวนการออสโมติกน้ำจะเคลื่อนที่ออกจากชิ้นอาหารเข้าสู่สารละลายบริเวณผิวหน้า มีค่าความชื้นน้อยที่สุดและมีค่าสูงขึ้นตามทิศทางเข้าหากึ่งกลางของชิ้นอาหาร ในเวลาต่อมา นักวิจัยพบว่า เมื่อกระบวนการออสโมติกผ่านช่วงเริ่มต้นไปแล้ว โครงสร้างทางกายภาพของวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลา ของกระบวนการ ทำให้ไม่สามารถพิจารณาว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ตลอดกระบวนการได้ (รูปที่ 2ข) พิจารณาจากรูปสามารถแบ่งระยะสัมพัทธ์ได้เป็น 3 บริเวณ ดังนี้ บริเวณผิวหน้าที่น้ำถูกดึงออกแล้ว บริเวณที่โครงสร้างทางกายภาพของวัสดุเริ่มเกิดการเสียรูป ( $\Delta x$ ) และบริเวณที่โครงสร้างทางกายภาพยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการออสโมติก การดึงน้ำจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของชิ้นอาหารที่สัมผัสกับสารละลายออสโมติก บริเวณ  $\Delta x$  จะอยู่ที่บริเวณผิวหน้า จากนั้นเมื่อระยะเวลาผ่านไป บริเวณ  $\Delta x$  จะเลื่อนโดยมีทิศทางการเลื่อนเข้าสู่ศูนย์กลางของชิ้นอาหาร

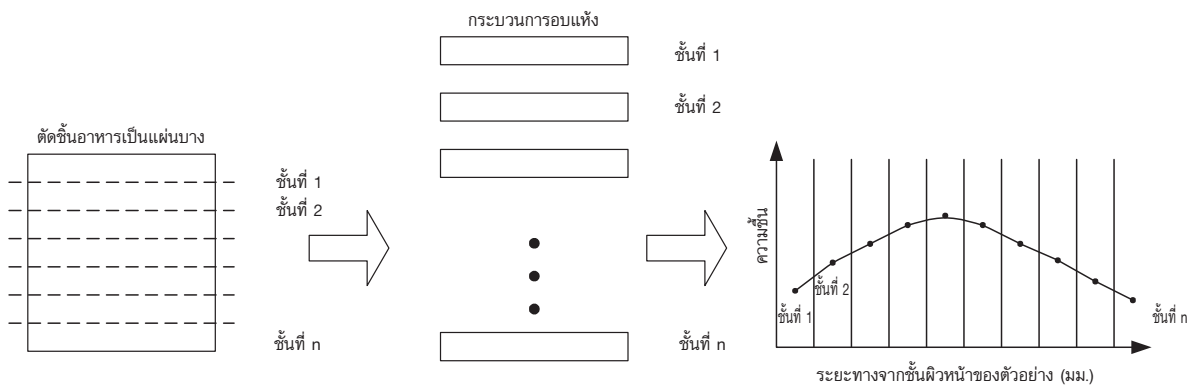
รูปที่ 3 แสดงค่าความชื้นของชิ้นอาหารที่ผ่านกระบวนการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมติกที่ตำแหน่งต่างๆ โดยชั้นที่ 1 เป็นบริเวณผิวหน้าและชั้นที่ n เป็นบริเวณผิวด้านล่าง ทั้งสองชั้นนี้สัมผัสกับสารละลายออสโมติกจึงทำให้มีค่าความชื้นต่ำที่สุด และค่าความชื้นสูงที่สุดพบที่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นอาหาร โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ดึงน้ำออกด้วยกระบวนการนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นส่วนใหญ่ที่บริเวณผิวหน้าของชิ้นอาหารที่สัมผัสกับสารละลายจนถึงระยะความลึกประมาณ 2-3 มม. โดย

บริเวณนี้จะได้รับการสูญเสียน้ำมากที่สุด ทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่เข้าของของแข็งจากสารละลาย และ

ยับยั้งการเคลื่อนที่ออกของของแข็งที่ละลายน้ำได้ที่อยู่ในชั้นอาหาร [2, 10-12]



**รูปที่ 2** กลไกการถ่ายเทมวลในระหว่างกระบวนการออสโมติก (ก) วัสดุที่มีสภาพเป็นเนื้อเดียวกัน (ข) วัสดุทางการเกษตร โดย  $M/M_0$  คือปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ [10]



**รูปที่ 3** กลไกการดึงน้ำออกจากชิ้นอาหารด้วยวิธีออสโมติก (การถ่ายเทมวลเกิดขึ้นในทิศทางเดียว) [12]

### 3. ปัจจัยและกระบวนการที่มีผลต่ออัตรา การถ่ายเทมวลระหว่างสารละลายและ ชิ้นอาหาร

กระบวนการดึงน้ำออกหรือการเพิ่มปริมาณของแข็งด้วยวิธีออสโมติกโดยทั่วไปเป็นการทำงานแบบช้าๆ ใช้ระยะเวลาค่อนข้างนานเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ตรงตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ โดยอาศัยกลไกความแตกต่างระหว่างค่าความเข้มข้นของอาหารกับสารละลายออสโมติกเป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการแลกเปลี่ยนมวลสารหรือเรียกว่าค่าความดันออสโมติก โดยค่าความแตกต่างยิ่งสูงอัตราการแลกเปลี่ยนของมวลสารจะมีค่าสูงด้วยอัตราการสูญเสียน้ำต่อปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ อีกหลายปัจจัย เช่น ชนิด โครงสร้างและคุณสมบัติของสารละลาย โครงสร้างของอาหาร และสภาวะการทำงานต่างๆ เป็นต้น

#### 3.1 ความเข้มข้นของสารละลาย

เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นอัตราการถ่ายเทมวลจะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากความดันออสโมติกระหว่างสารละลายกับชิ้นอาหารสูงขึ้น ทำให้แรงขับเคลื่อน (driving force) สูงขึ้น อัตราการถ่ายเทมวลจึงสูงขึ้น [13-14] ในระหว่างกระบวนการค่าความเข้มข้นของสารละลายจะถูกเจือจางด้วยน้ำในชิ้นอาหารที่เคลื่อนที่ออกมาและในขณะเดียวกันปริมาณของแข็งในชิ้นอาหารจะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากของแข็งในสารละลายเคลื่อนที่เข้าสู่ชิ้นอาหาร ในช่วงเริ่มต้น อัตราการถ่ายเทมวลจะมีค่าสูงและจะลดลงเมื่อความดันต่างมีค่าลดลง Sablani และ Rahman ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายที่มีต่อการถ่ายเทมวลของมะม่วงในกระบวนการออสโมติก พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของน้ำมีค่าสูงขึ้น ส่วนการเคลื่อนที่ของของแข็งมีค่าลดลง [15] เนื่องจากกระบวนการออสโมติกนี้เป็นกระบวนการที่เริ่มต้นจากผิวหน้าของชิ้นอาหาร หากความเข้มข้นของสารละลายสูงมากจนเกินไป อัตราการถ่ายเทมวลในช่วงแรกที่มีค่าสูงจะส่งผลให้เกิดการเสียรูปของผนังเซลล์ที่บริเวณผิวหน้าเนื่องจากเกิดการสูญเสียน้ำ

มากและในขณะเดียวกันของแข็งปริมาณสูงที่อยู่ในสารละลายจะเกิดการถ่ายเทเข้าสู่เซลล์บริเวณผิวหน้าทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำและของแข็งในเซลล์ชั้นใน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารละลายออสโมติกที่มีความเข้มข้นสูงมากกับสารละลายที่มีความเข้มข้นน้อย สารละลายความเข้มข้นสูงมากนี้อาจต้องใช้เวลานานกว่าเพื่อที่จะดึงน้ำออกจากอาหารให้อยู่ในระดับเดียวกันสำหรับผักและผลไม้นิยมใช้สารละลายน้ำตาลที่ช่วงความเข้มข้น 50-70°Bx เป็นสารละลายออสโมติก [1]

#### 3.2 ชนิดของสารละลาย

น้ำหนักโมเลกุลของตัวถูกละลายในสารละลายออสโมติกมีผลต่อการเคลื่อนที่ของน้ำและของแข็ง โดยสารละลายเกลือมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าสารละลายน้ำตาลทำให้อัตราการแทรกซึมสูงกว่าสารละลายน้ำตาล อย่างไรก็ตาม การใช้เกลือเป็นตัวถูกละลายจะถูกจำกัดที่รสชาติของผลิตภัณฑ์ได้

เมื่อเปรียบเทียบการแปรรูปมะเขือเทศด้วยวิธีออสโมติกโดยใช้สารละลายเกลือและสารละลายเกลือผสมน้ำตาล พบว่า การใช้สารละลายเกลือเพียงอย่างเดียวสามารถเพิ่มปริมาณการสูญเสียน้ำและปริมาณการซึมเข้าของของแข็งในชิ้นมะเขือเทศมากกว่าสารละลายเกลือที่มีน้ำตาลผสม เนื่องจากน้ำตาลมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าเกลือเมื่อโมเลกุลน้ำตาลซึมเข้าชิ้นอาหารจะเกิดการจับตัวที่บริเวณผิว ทำให้เป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ออกของน้ำและการเคลื่อนที่เข้าของของแข็ง [16] การเลือกใช้ชนิดของสารละลายขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ หากต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีทั้งรสเค็มและรสหวาน เช่น กระบวนการผลิตโซโป้วหวาน ต้องใช้สารละลายเกลือในชั้นต้นเพื่อลดค่าปริมาณน้ำอิสระ จากนั้นใช้สารละลายน้ำตาลเพื่อปรับให้โซโป้วมีรสชาติหวาน เป็นต้น El-Aouar et al. ทำออสโมติกมะละกอกายใต้สภาวะเดียวกันแต่ใช้สารละลายออสโมติกต่างชนิดกัน พบว่า ค่าการสูญเสียน้ำหนัก ปริมาณการสูญเสียน้ำและปริมาณการเพิ่มขึ้นของของแข็งภายใต้สารละลายน้ำตาลซูโครสมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้น้ำเชื่อมที่ทำจากข้าวโพด (corn syrup) [17]

### 3.3 อุณหภูมิของสารละลาย

ปริมาณการสูญเสียน้ำและปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้โครงสร้างของอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงส่งผลให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของของแข็งในสารละลายเข้าสู่ชั้นอาหารและการเคลื่อนที่ออกของน้ำออกจากชั้นอาหารง่ายขึ้น ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงมวลสารจึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ดีกว่าอุณหภูมิต่ำ [14] อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรสชาติ สีและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ [18] Sablani และ Rahman ศึกษาผลของอุณหภูมิของสารละลายที่มีต่อการถ่ายเทมวลของมะม่วงในกระบวนการออสโมติก พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของของแข็งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิของสารละลายเพิ่มขึ้น ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของน้ำมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของสารละลายเพิ่มขึ้น [15] จากเหตุผลของการเสียสภาพโครงสร้างดังกล่าวข้างต้นทำให้ง่ายต่อการเคลื่อนที่ของของแข็งในสารละลายเข้าสู่ชั้นอาหารและเมื่อปริมาณของแข็งมีค่ามากทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำออกจากชั้นอาหารทำได้ยากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของน้ำจึงมีค่าลดลง

### 3.4 ชนิดของอาหาร ผัก ผลไม้ พันธุ์

#### ระดับความสุกแก่

ผัก ผลไม้ หรืออาหารที่ต่างชนิดกัน รวมไปถึงผลไม้ชนิดเดียวกันแต่ระดับความสุกแก่แตกต่างกัน จะมีโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันไป จากหลักการออสโมซิสการเคลื่อนที่ของมวลสารที่เกี่ยวข้องจะอยู่ในรูปของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และปริมาณน้ำที่อยู่ภายในอาหาร เมื่ออาหารมีองค์ประกอบทางเคมีดังกล่าวแตกต่างกัน จะส่งผลให้ค่าความดันออสโมติก ระหว่างชั้นอาหารแต่ละชนิดกับสารละลายต่างกันเมื่อใช้สารละลายออสโมติกชนิดและความเข้มข้นเดียวกัน [19] เมื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทมวลของแอปเปิล ฟักทอง และแครอทที่ผ่านกระบวนการออสโมติกภายใต้สภาวะเดียวกันพบว่า สามารถดึงน้ำออกจากฟักทองได้มากที่สุดและมีปริมาณของแข็งซึมเข้าเนื้อฟักทองน้อยที่สุด ส่วนแอปเปิลมีค่าการถ่ายเทมวลต่ำที่สุด [20]

### 3.5 รูปร่างและขนาดของชิ้นอาหาร

อาหารชนิดเดียวกันที่มีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกัน การดึงน้ำออกจากชิ้นอาหารที่มีขนาดเล็กจะเกิดได้เร็วกว่าชิ้นอาหารที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากชิ้นอาหารยังมีขนาดใหญ่ระยะทางในการเคลื่อนที่จากผิวหน้าไปหาจุดกึ่งกลางของชิ้นอาหารยิ่งมาก ส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการรูปร่างของชิ้นอาหารเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ต้องพิจารณา โดยค่าอัตราการถ่ายเทมวลจะพิจารณาจากค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของชิ้นอาหารที่สัมผัสกับสารละลายต่อปริมาตรของชิ้นอาหาร รูปร่างของชิ้นอาหารที่มีค่าอัตราส่วนนี้สูงจะมีค่าอัตราการถ่ายเทมวลสูง [3] เนื่องจากกระบวนการออสโมติกเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้า กลไกการถ่ายเทมวลหลักจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสของชิ้นอาหารกับสารละลาย ดังนั้น ชิ้นอาหารที่มีรูปร่างที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารละลายออสโมติกมาก อัตราการถ่ายเทมวลจะมีค่าสูง อย่างไรก็ตาม ในระหว่างกระบวนการหากใช้ระยะเวลาในการรูปร่างของเซลล์ของชิ้นอาหารจะเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น เกิดการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียน้ำ เป็นต้น อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของชิ้นอาหารที่สัมผัสกับสารละลายจะมีค่าลดลงส่งผลให้อัตราการถ่ายเทมวลมีค่าลดลง [21] Lericci et al. ศึกษาผลของรูปร่างของชิ้นแอปเปิล (แท่ง แผ่นบาง สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ วงแหวน) ที่มีต่อการถ่ายเทมวล พบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักและปริมาณการเพิ่มขึ้นของของแข็งเพิ่มเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อค่าอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อค่าความยาวของชิ้นอาหาร [1]

### 3.6 อัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อปริมาณอาหาร

ค่าอัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อปริมาณอาหารสูงทำให้อัตราการถ่ายเทมวลเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากในระหว่างกระบวนการออสโมติกค่าความเข้มข้นของสารละลายจะเจือจางลง ส่งผลให้แรงดันออสโมติกลดลงเนื่องจากอาหารแต่ละชนิดมีองค์ประกอบที่แตกต่างกันจึงควรหาค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับอาหารชนิดนั้นๆ โดยพิจารณาจากค่าความเข้มข้นของสารละลายที่ลดลงต้องไม่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าแรงดันออสโมติก [13] และหากพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยใช้กฎของ

Fick (Fick's law) ค่าความเข้มข้นของสารละลายต้องมีค่าคงที่ Bongirwar และ Srinivasan พบว่าในกระบวนการออสโมติกเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างปริมาณกล้วยต่อสารละลายน้ำตาลจาก 1:1 เป็น 1:4.5 ส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปริมาณสารละลายที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าแรงดันออสโมติกคงที่ ปริมาณการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากกล้วยจึงมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับที่อัตราส่วนต่ำกว่า [22]

### 3.7 ระดับการเคลื่อนที่ของสารละลาย

การถ่ายเทมวลภายใต้หลักการออสโมติกสามารถเกิดขึ้นได้ เพียงนำชิ้นอาหารแช่หรือสัมผัสกับสารละลายเข้มข้นภายใต้อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศโดยปราศจากการให้แรงใดๆ กับชิ้นอาหาร ซึ่งการถ่ายเทมวลภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวเป็นไปได้ช้า ต้องใช้ระยะเวลานาน เนื่องจากในระหว่างกระบวนการดึงน้ำออกจากชิ้นอาหาร ความเข้มข้นของสารละลายรอบๆ ชิ้นอาหารจะลดลง เกิดเป็นชั้นบางๆ อยู่รอบชิ้นอาหาร ส่งผลให้ค่าแรงดันออสโมติกระหว่างชิ้นอาหารกับสารละลายลดลง อัตราการถ่ายเทมวลจึงลดลง หรือหากใช้สารละลายน้ำตาล (สารละลายออสโมติก) ที่มีค่าความเข้มข้นสูงในกระบวนการออสโมติก จะส่งผลให้เกิดการตกผลึกน้ำตาลที่บริเวณผิวหน้าของชิ้นอาหาร ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของน้ำที่อยู่ภายในและการเคลื่อนที่ของของแข็งจากสารละลายเข้าสู่ชิ้นอาหาร อัตราการถ่ายเทมวลจึงลดลง อย่างไรก็ตาม การถ่ายเทมวลสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการให้แรงกับชิ้นอาหารหรือสารละลายเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่เพื่อลดแรงต้านทานภายนอกที่อยู่บริเวณรอบผิวของชิ้นอาหาร แรงต้านนี้เกิดจากการที่น้ำเคลื่อนที่ออกจากชิ้นอาหารดังกล่าวข้างต้น โดยระดับการเคลื่อนที่ของชิ้นอาหารต้องมากเพียงพอที่จะทำลายชั้นบางๆ ที่อยู่รอบชิ้นอาหารนั้นได้ [23-26] อัตราการดึงน้ำออกจะเพิ่มขึ้นตามระดับการเคลื่อนที่ของสารละลายที่เพิ่มขึ้น โดยชิ้นอาหารที่แช่อยู่ในสารละลายออสโมติกที่มีการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน (turbulent) จะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงกว่าการเคลื่อนที่แบบราบเรียบ (laminar flow) Moreira และ Sereno ศึกษาผลของการเคลื่อนที่ของสารละลายในช่วงการไหลแบบราบเรียบ พบว่าอัตราการ

สูญเสียน้ำของแอปเปิลเพิ่มตามการเพิ่มความเร็วของการเคลื่อนที่ของสารละลาย ส่วนการเพิ่มปริมาณของแข็งไม่พบความแตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการออสโมติกภายใต้สภาวะสารละลายอยู่กับที่ [25]

### 3.8 กระบวนการเบื้องต้นก่อนกระบวนการออสโมติก

กระบวนการเริ่มต้นก่อนเริ่มกระบวนการออสโมติก เช่น การลวก การใช้ความดันสูง การใช้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ การใช้สนามไฟฟ้าความเข้มสูง กระบวนการเหล่านี้ล้วนมีผลต่อค่าอัตราการถ่ายเทมวลทั้งสิ้น

#### 3.8.1 การลวก

การลวกอาหารจะทำให้เกิดการแยกตัวของเซลล์ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลผ่านเซลล์ของชิ้นอาหารได้ง่าย อัตราการถ่ายเทมวลจึงมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นอาหารที่ไม่ผ่านการลวก อีกทั้งการลวกยังช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล อย่างไรก็ตาม ผลดังกล่าวทำให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์มีผลิตภัณฑ์บางชนิดจึงไม่เป็นที่นิยมโดยเฉพาะผักและผลไม้ ในขั้นตอนการลวก อุณหภูมิและระยะเวลาเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด จำเป็นต้องหาสภาวะที่เหมาะสมซึ่งจะเปลี่ยนไปตามชนิดของอาหาร [27]

#### 3.8.2 การใช้คลื่นความถี่สูงในย่านอัลตราโซนิค

คลื่นความถี่ย่านอัลตราโซนิคเป็นพลังงานคลื่นเสียงที่มีความถี่การสั่นของตัวกลางสูง (20 กิโลเฮิรตซ์) คลื่นความถี่สูงนี้จะทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นภายในของเหลวหรือเรียกว่าปรากฏการณ์ควิเตชัน (Cavitation effect) ทำให้เกิดการผสมผสานที่ดีขึ้น และในสารละลายออสโมติกชนิดน้ำตาล คลื่นอัลตราโซนิคสามารถช่วยลดความหนาของชั้นน้ำตาลที่ผิวของวัตถุ ซึ่งจะช่วยเพิ่มการถ่ายเทมวลได้ [28-30] ปัจจัยสำคัญของการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิค คือ ค่าความเข้มและความถี่อัลตราโซนิค (ultrasonic intensity and frequency) โดยค่าอัตราการถ่ายเทมวลจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่าความเข้มสูงขึ้นและเมื่อเพิ่มค่าความเข้มสูงจนถึงระดับหนึ่งค่าอัตราการถ่ายเทมวลจะมีค่าสูงกว่าวิธีการกวนสารละลายเพียงเล็กน้อยเท่านั้น [31-32] ในส่วนของ



ค่าความถี่พบว่า การเพิ่มความถี่ของคลื่นให้สูงขึ้นจะเป็น การเพิ่มการดูดซับพลังงานของสารละลาย ซึ่งคลื่นไม่สามารถเจาะทะลุเข้าไป ภายในของแข็งได้ อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันผลของความถี่ต่อค่าอัตราการถ่ายเทมวลยังไม่มี ข้ออธิบายที่แน่ชัด Simal et al. ได้ประยุกต์ใช้อ่างอัลตรา โซนิค (44 กิโลเฮิร์ตซ์) กับการออสโมติกแอปเปิล โดยใช้ สารละลายน้ำตาลเข้มข้น 70°Brix ที่อุณหภูมิ 40 °C เป็น เวลา 3 ชั่วโมง พบว่า การใช้คลื่นอัลตราโซนิคสามารถ เพิ่มค่าการสูญเสียได้ถึงร้อยละ 14-27 และเพิ่มค่าการ ซึมผ่านของของแข็งเข้าสู่ชั้นอาหารได้มากถึงร้อยละ 23 เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการออสโมติกที่ไม่ใช้คลื่น ความถี่ย่านอัลตราโซนิค [33]

### 3.8.3 การใช้ความดันสูง

การประยุกต์ใช้ความดันสูง (ความดันในช่วง 100-800 MPa) ในกระบวนการออสโมติกสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลได้ โดยความดันทำให้เซลล์ต่างๆ ในชั้นอาหารไม่รวมติดเป็นชั้นเดียวกัน การเคลื่อนที่ของน้ำและ ของแข็งจึงผ่านผนังเซลล์ได้ง่ายขึ้น โดยทั่วไปการใช้ความ ดันสูงจะใช้ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการออสโมติก ตัวอย่างที่พบได้แก่ การดื่มน้ำออกจากลัมบ์ [34] และ มันทฝรั่ง [21] เป็นต้น โดยอัตราการลดลงของน้ำและการ เพิ่มขึ้นของของแข็งมีค่าสูงมากที่บริเวณผิวสัมผัสของชั้น อาหารกับสารละลายออสโมติก

### 3.8.4 การใช้ความดันสุญญากาศ

กระบวนการดื่มน้ำออกด้วยวิธีออสโมติกภายใต้ ความดันสุญญากาศหรือความดันต่ำกว่าบรรยากาศเป็น อีกหนึ่งวิธีที่สามารถช่วยเร่งอัตราการถ่ายเทมวลได้เมื่อ เปรียบเทียบกับกระบวนการที่อยู่ภายใต้ความดันบรรยากาศ การประยุกต์ใช้ความดันสุญญากาศจะใช้ในช่วงเริ่มต้น ของกระบวนการออสโมติกเช่นเดียวกับการประยุกต์ใช้ ความดันสูง โดยอาหารที่ใช้ในสภาวะความดันสุญญากาศ ควรมีโครงสร้างที่มีช่องว่างอากาศค่อนข้างสูงและ ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ต้องการควรเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดที่ ต้องการปริมาณการเพิ่มขึ้นของของแข็งสูง ในขณะที่การใช้ ความดันสูงเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลโดยการทำให้ โครงสร้างของผนังเซลล์เปลี่ยนแปลง ซึ่งจะมีผลต่อเนื้อ

สัมผัสของผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างอาหารที่มีโครงสร้างเหมาะ สำหรับการใช้ความดันสุญญากาศได้แก่ โครงสร้างของ แอปเปิลซึ่งมีช่องว่างอากาศประมาณร้อยละ 20 ของ ปริมาตรโดยรวม เมื่ออาหารอยู่ในสภาวะความดันต่ำกว่า บรรยากาศ จะทำให้อากาศภายในเซลล์เกิดการขยายตัว และเคลื่อนที่ออกมาทำให้เกิดช่องว่างและเมื่อกลับเข้าสู่ สภาวะความดันที่สูงขึ้น สารละลายออสโมติกภายนอกจะ ซึมผ่านเข้าไปในอาหารได้เร็วกว่าสภาวะปกติ [35-36]

### 3.8.5 การใช้สนามไฟฟ้ากระตุ้นเป็นจังหวะ

การใช้สนามไฟฟ้าความเข้มสูงกระตุ้นเป็นจังหวะ (high intensity electric field pulse) ทำให้เกิดค้ำย ไฟฟ้าวิกฤตที่เซลล์เมมเบรนเพื่อแยกเซลล์ภายในชั้นอาหาร ช่วยเพิ่มความสามารถในการแทรกผ่านผนังเซลล์ ทำให้ ค่าอัตราการถ่ายเทมวลสูงขึ้น ประยุกต์ใช้งานโดยการใช้ สนามไฟฟ้ากระตุ้นในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการ โดย ความเข้มของสนามไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.22-1.60 กิโลโวลต์/ ซม. ความเข้มที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้กับชนิด อาหารแตกต่างกันไป ซึ่งการกระตุ้นในช่วงเวลา 0.01-0.1 วินาทีในช่วงความเข้มของสนามไฟฟ้าดังกล่าวจะไม่ส่งผล ต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผนังเซลล์ของผักและ ผลไม้ [37] งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำสนามไฟฟ้า ความเข้มสูงมาใช้ในกระบวนการออสโมติกเพื่อเพิ่มอัตรา การถ่ายเทมวลได้แก่ การศึกษาผลของสนามไฟฟ้าความ เข้มสูงต่อการถ่ายเทมวลของแอปเปิล [38-39] หัวบีท [40] มันทฝรั่ง [41] แครอท [42-43] เป็นต้น

## 4. บทสรุป

มีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทมวลในระหว่าง กระบวนการออสโมติก เช่น ชนิดและความเข้มข้นของ สารละลาย อุณหภูมิ โครงสร้างและองค์ประกอบของอาหาร รูปร่างและขนาดของชั้นอาหาร อัตราส่วนระหว่าง ปริมาตรของสารละลายและอาหาร ระดับการเคลื่อนที่ ของสารละลาย และกระบวนการเบื้องต้นอีกหลาย กระบวนการ สารละลายที่ต่างชนิดกันจะส่งผลให้ขนาด ของโมเลกุลต่างกัน เช่นเดียวกับลักษณะของโครงสร้าง และองค์ประกอบของอาหารที่ต่างชนิดกัน ซึ่งจะส่งผลให้ อัตราการถ่ายเทมวลแตกต่างกัน ชั้นอาหารที่มีพื้นที่ผิว

สัมผัสกับสารละลายมากหรือสารละลายมีการเคลื่อนที่จะส่งผลให้อัตราการถ่ายเทมวลมีค่าสูง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายและอุณหภูมิจะสามารถช่วยเร่งการถ่ายเทมวลได้ แต่อาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านรสชาติ สี และเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ หรือการพิจารณาใช้กระบวนการเบื้องต้นเพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวล เช่น การลวกและการใช้ความดันสูงอาจทำให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ไม่เป็นที่ต้องการ

ดังนั้น ในการพิจารณาเลือกปัจจัยต่างๆ ให้เหมาะสมสำหรับกระบวนการออสโมติกอาหารแต่ละชนิดนั้น สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือผลิตภัณฑ์สุดท้าย เช่น ในกระบวนการทำลูกกวาดต้องการเพิ่มปริมาณของแข็งในอาหารให้มาก ควรเลือกชนิดของของแข็งในสารละลายที่มีค่าน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ส่วนในกระบวนการที่ต้องการดึงน้ำออกสูงควรเลือกใช้ชนิดของแข็งในสารละลายที่มีค่าน้ำหนักโมเลกุลสูง เป็นต้น

## 5. เอกสารอ้างอิง

1. Lericci, C.L., Pinnavaia, G., Dalla Rosa, M., and Bartolucci, L., 1985, "Osmotic dehydration of fruit: Influence of osmotic agents on drying behaviour and product quality", *Journal of Food Science*, Vol. 50, No. 5, pp. 1217-1219.
2. Raoult-Wack, A.L., Lenart, A., and Guilbert, S., 1992, "Recent advances during dewatering through immersion in concentrated solution, In: A.S. Mujumdar, Editor", *Drying of Solids*, Elsevier Science, Amsterdam, pp. 21-51
3. Rastogi, N.K., Raghavarao, K.S.M.S., and Niranjana, K., 1997, "Mass transfer during osmotic dehydration of banana: Fickian diffusion in cylindrical configuration", *Journal of Food Engineering*, Vol. 31, No. 4, pp. 423-432.
4. 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, pp. 269-278.
5. Torreggiani, D., 1993, "Osmotic dehydration in fruits and vegetable processing", *Food Research International*, Vol. 26, No. 1, pp. 59-68.
6. Raoult-Wack, A.L., 1994, "Recent advances in the osmotic dehydration of foods", *Trends in Food Science and Technology*, Vol. 5, No. 8, pp. 255-260.
7. Krokida, M.K., Maroulis, Z.B., and Saravacos, G.D., 2001, "The effect of the method of drying on the colour of dehydrated products", *International Journal of Food Science and Technology*, Vol. 36, No. 1, pp. 53-59.
8. Adambounou, T.L., Castaigne, F., and Dillon, J.C., 1983, "Lowering the water activity of tropical vegetables by partial osmotic dehydration", *Sciences des Aliments*, Vol. 3, No.4, pp. 551-567.
9. Lenart, A., 1996, "Osmo-convective drying of fruits and vegetables tissues undergoing osmotic processing", *Drying Technology*, Vol. 14, No. 1, pp. 2-10.
10. Rastogi, N.K., Angersbach, A., and Knorr, D., 2000, "Evaluation of mass transfer mechanisms during osmotic treatment of plant materials", *Journal of Food Science*, Vol. 65, No. 6, pp. 1016-1021.
11. Marcotte, M. and Le Maguer, M., 1992, "Mass Transfer in cellular tissues part II: computer simulation vs experimental data", *Journal of Food Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 177-199.
12. Nunak, N. and Schleining, G., 2006, "A rapid blade-cutting method for the evaluation of osmotic dehydration of apples and potatoes", *Journal of Texture Studies*, Vol. 37, No. 1, pp. 80-93.
13. Rastogi, N.K., Raghavarao, K.S.M.S., Niranjana, 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, pp. 48-59.

14. 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, pp. 979-985.
15. 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, pp. 65-71.
16. 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, pp. 291-295.
17. 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, No. 2, pp. 267-274.
18. Garrote, R.L. and Bertone, R.A., 1989, "Osmotic concentration at low temperature of frozen strawberry halves. Effect of glycerol, glucose and sucrose solution on exudates loss during thawing", *Lebensmittel Wissenschaft und -Technologie*, Vol. 22, No. 3, p. 264.
19. Lazarides, H.N., Gekas, V., and Mavroudis, N., 1997, "Apparent mass diffusivities in fruit and vegetable tissues undergoing osmotic processing", *Journal of Food Engineering*, Vol. 31, No. 3, pp. 315-324.
20. Kowalska, H. and Lenart, A., 2001, "Mass exchange during osmotic pretreatment of vegetables", *Journal of Food Engineering*, Vol. 49, Nos. 2-3, pp. 137-140.
21. Rastogi, N.K., Angersbach, A., and Knorr, D., 2000b, "Synergistic effect of high hydrostatic pressure pretreatment and osmotic stress on mass transfer during osmotic dehydration", *Journal of Food Engineering*, Vol. 45, No. 1, pp. 25-31.
22. Bongirwar, D.R. and Srinivasan, A., 1977, "Studies on osmotic dehydration of banana", *Journal of Food Science and Technology*, Vol. 14, pp. 104-112.
23. Azuara, E., Garcia, H.S., and Beristain, C.I., 1996, "Effect of the centrifugal force on osmotic dehydration of potatoes and apples", *Food Research International*, Vol. 29, No. 2, pp. 195-199.
24. 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, pp. 191-209.
25. 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, pp. 25-31.
26. Rastogi, N.K. and Raghavarao, K.S.M.S., 1994, "Effect of temperature and concentration on osmotic dehydration of coconut", *Lebensmittel Wissenschaft und-Technologie*, Vol. 27, No. 6, pp. 564-567.
27. 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, pp. 557-569.
28. Kim, S.M. and Zayas, J.F., 1991, "Effects of ultrasonic treatment on the properties of chymosin", *Journal of Food Sciences*, Vol. 56, No. 4, pp. 926-930.
29. Mason, T.J. and Cordemans, E.D., 1996, "Ultrasonic intensification of chemical processing and related operations: a review", *Trans. IchemE*,

Vol. 74a, pp. 511-516.

30. Knorr, D., Zenker, M., Heinz, V., and Lee, D., 2004, "Applications and potential of ultrasonics in food processing", *Trends in Food Sciences and Technology*, Vol. 15, No. 5, pp. 261-266.

31. Floros, J.D. and Liang, H., 1994, "Acoustically assisted diffusion through membranes and biomaterials", *Food Technology*, Vol. 79, No. 1, p. 84.

32. 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, pp. 472-479.

33. 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, pp. 323-336.

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

35. Fito, P., 1994, "Modeling of vacuum osmotic dehydration of food", *Journal of Food Engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 313-328.

36. Deng, Y. and Zhao, Y., 2008, "Effects of pulsed-vacuum and ultrasound on the osmotic dehydration kinetics and microstructure of apples (Fuji)", *Journal of Food Engineering*, Vol. 85, No. 1, pp. 84-93.

37. 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, pp. 249-257.

38. Jemai, A.B. and Vorobiev, E., 2002, "Effect of moderate electric field pulses on the diffusion coefficient of soluble substance from apple slices", *International Journal of Food Science and Technology*, Vol. 37, No. 1, pp. 73-86.

39. Amami, E., Vorobiev, E., and Kechaou, N., 2005, "Effect of pulsed electric field on the osmotic dehydration and mass transfer kinetics of apple tissue", *Drying Technology*, Vol. 23, No. 3, pp. 581-595.

40. El-belghiti, K. and Vorobiev, E., 2004, "Mass transfer of sugar from beets enhanced by pulsed electric field", *Food and Bioprocess Processing*, Vol. 82, No. c3, pp. 226-230.

41. Lebovka, N.I., Shynkaryk, N.V., and Vorobiev, E., 2006, "Pulsed electric field enhanced drying of potato tissue", *Journal of Food Engineering*, Vol. 78, No. 2, pp. 606-613.

42. Rastogi, N.K., Eshtiaghi, M.N., and Knorr, D., 1999, "Accelerated mass transfer during osmotic dehydration of high intensity electrical field pulse pretreated carrots", *Journal of Food Science*, Vol. 64, No. 6, pp. 1020-1023.

43. Amami, E., Fersi, A., Vorobiev, E., and Kechaou, N., 2007, "Osmotic dehydration of carrot tissue enhanced by pulsed electric field, salt and centrifugal force", *Journal of Food Engineering*, Vol. 83, No. 4, pp. 605-613.