ปัจจัยที่มีผลต่อการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสของผักและผลไม้

Factors Influencing on Dewatering by Osmotic Dehydration of Fruits and Vegetables

วิชมณี ยืนยงพุทธกาล*
ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
Wichamanee Yuenyongputtakal*
Department of Food Science, Faculty of Science, Burapha University.

บทคัดย่อ

ในบรรดาวิธีการต่างๆ ที่ใช้ลดความชื้นในผักผลไม้ การดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสจัดเป็นวิธีที่ไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนรุนแรง แต่สามารถลดปริมาณน้ำจากเนื้อเยื่อผักผลไม้ได้ นอกจากเป็นวิธีที่ใช้พลังงานต่ำแล้ว ยังมีข้อดีคือสามารถลดการเสื่อมเสียคุณภาพด้านต่างๆ เช่น สี เนื้อสัมผัส และกลิ่นรส ของผลิตภัณฑ์ได้ โดยการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสนี้สามารถใช้เป็นวิธีการเตรียมขั้นต้นก่อนการแปรรูปด้วยวิธีอื่นได้ เพื่อประโยชน์ในการประยุกต์ใช้การดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ บทความนี้จึงนำเสนอกลไกการถ่ายโอนมวลสารที่เกิดขึ้นในระหว่างการออสโมซิส และปัจจัยที่มีผลต่อการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสของผักและผลไม้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากผักและผลไม้

คำสำคัญ : การดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิส การแปรรูปอาหาร การถ่ายโอนมวลสาร ผักและผลไม้

Abstract

Among various fruit and vegetable dehydration methods, osmotic dehydration is considered to be gently thermal and effective process for removing water from fruit and vegetable tissues. Osmotic dehydration has received considerable attention not only due to its low energy requirements, but also due to its effectiveness in producing a high quality product in terms of colour, texture and flavour. This dehydration method can also be used as a pre-treatment step prior to further processing. In order to apply the osmotic dehydration method for product development. This article discussed on mass transfer occurred during the osmosis process and influential factors on dewatering and application for fruit and vegetable product development.

Keywords : dewatering by osmotic dehydration, food processing, mass transfer, fruit and vegetable

***E-mail:** wich@buu.ac.th

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

บทนำ

การดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิส (Osmotic dehydration) เป็นการแปรรูปอาหารที่สามารถลดปริมาณน้ำในอาหารลงได้ โดยส่วนใหญ่มักดำเนินการกับผักผลไม้ เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณน้ำมาก ทำได้โดยการแช่ผักผลไม้ในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงซึ่งเรียกว่าสารละลายออสโมติก เช่น สารละลายน้ำตาล สารละลายเกลือ และสารละลายผสมระหว่างน้ำตาลและเกลือ เป็นต้น การออสโมซิสสามารถลดปริมาณน้ำในวัตถุดิบลงได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้ความร้อนสูง เป็นวิธีลดปริมาณน้ำในผักผลไม้ที่ไม่รุนแรง จึงไม่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียคุณภาพไปจากของสดมากนัก มีการใช้ชื่อเรียกอื่นแทนการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิส ได้แก่ กระบวนการดึงน้ำออกและการจุ่มแช่ (Dewatering and impregnation soaking process, DIS process) (Raoult-Wack, 1994) หรือวิธีการแช่อิ่มที่คนไทยคุ้นเคยนั่นเอง ในการออสโมซิสมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายประการซึ่งมีผลต่อการถ่ายโอนมวลสารและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ บทความนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่ออธิบายกลไกการถ่ายโอนมวลสารระหว่างการออสโมซิสและรวบรวมปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิส เพื่อประโยชน์ในการประยุกต์ใช้การดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสให้เหมาะสมในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้ต่อไป

การถ่ายโอนมวลสารระหว่างการออสโมซิส (Mass transfer during the osmotic dehydration process)

การดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสอาศัยหลักการเคลื่อนย้ายน้ำบางส่วนจากเนื้อเยื่ออาหาร ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของแรงดันออสโมติกระหว่างภายในเซลล์ของอาหารและสารละลายออสโมติกเกิดเป็นแรงขับ (Driving force) ทำให้มีการถ่ายโอนมวลสารระหว่างเซลล์ของอาหารและสารละลายออสโมติก ในลักษณะสวนทางกันผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ซึ่งทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน (Semi-permeable membrane) สำหรับผักผลไม้ ผนังเซลล์สามารถยืดขยายตัวได้เมื่อมีแรงดันเกิดขึ้นภายในเซลล์ เยื่อหุ้มเซลล์จะทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน โดยยอมให้น้ำแพร่ผ่านได้มากกว่าตัวถูกละลายของสารละลายออสโมติก โดยการถ่ายโอนมวลสารที่เกิดขึ้นระหว่างการออสโมซิส ได้แก่ 1) น้ำภายในเซลล์ของผักผลไม้จะแพร่ออกจากเซลล์สู่สารละลายออสโมติก 2) ตัวถูกละลายของสารละลายออสโมติก เช่น น้ำตาลหรือเกลือ จะแพร่เข้าสู่ภายในเซลล์ผักผลไม้ และ 3) สารบางอย่างที่มีอยู่ภายในเซลล์ผักผลไม้ตามธรรมชาติ เช่น กรดอินทรีย์และเกลือแร่ จะแพร่ออกจากเซลล์สู่สารละลายออสโมติก ทั้งนี้การถ่ายโอนมวลสารหลักที่เกิดขึ้นคือการเคลื่อนย้ายของน้ำภายในเซลล์ของผักผลไม้ที่เกิดสวนทางกับการเคลื่อนย้ายของตัวถูกละลายของสารละลายออสโมติก โดยการถ่ายโอนมวลสารนี้จะเกิดขึ้นจนเข้าสู่สมดุลของสารละลายภายในและภายนอกเซลล์ ส่วนการเคลื่อนย้ายของสารที่มีอยู่ตามธรรมชาติในเซลล์ผักผลไม้นั้นจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสจะทำให้ปริมาณน้ำในผักผลไม้ลดลง ปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น และทำให้น้ำหนักสุทธิลดลงได้ รวมถึงทำให้ค่ากิจกรรมของน้ำ (water activity; a_w) ของผักผลไม้ลดลงด้วย (Torreeggiani, 1993; Raoult-Wack, 1994) การถ่ายโอนมวลสารที่เกิดขึ้นในระหว่างการออสโมซิสดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 1

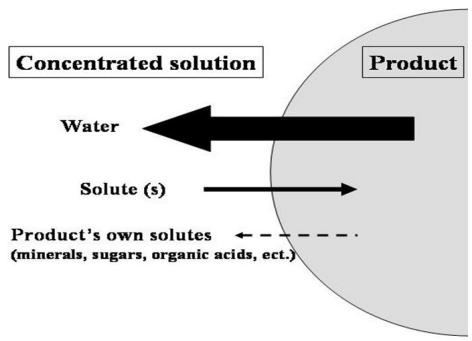
ปัจจัยที่มีผลต่อการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสในผักและผลไม้

จากการรวบรวมงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปถึงปัจจัยที่มีผลกับการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสในผักและผลไม้ที่มีต่อการถ่ายโอนมวลสารและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนี้

1. ลักษณะของผักและผลไม้

1.1 ชนิด พันธุ์ และความสุก องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบผักผลไม้และลักษณะทางกายภาพ เช่น ความเป็นรู การเรียงตัวและโครงสร้างของเซลล์ ลักษณะเส้นใยและผิว สัดส่วนของโพรโตเพคตินต่อเพคตินที่ละลายได้ ช่องว่างภายในเซลล์ และการยึดติดกันของเซลล์ เป็นต้น มีความแตกต่างกันเมื่อชนิดพันธุ์ และความสุกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลสารระหว่างเซลล์ผักผลไม้กับสารละลายออสโมติกและมีผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการออสโมซิสและความสามารถในการถ่ายโอนมวลสารระหว่างการออสโมซิส Kowalska and Lenart (2001) นำแอปเปิล ฟักทองและแครอทมาออสโมซิสในสภาวะเดียวกัน

พบว่า ฟักทองมีการถ่ายเทมวลน้ำสูงแต่มีการเพิ่มขึ้นของของแข็งต่ำ จึงเป็นผลให้ฟักทองมีน้ำหนักที่ลดลงมากที่สุด ส่วนแอปเปิลมีการถ่ายเทมวลน้ำสูงแต่มีการเพิ่มขึ้นของของแข็งสูงที่สุด เนื่องจากโครงสร้างเนื้อเยื่อของแอปเปิลมีความเป็นรูพรุนสูง ทำให้



ภาพที่ 1 การถ่ายโอนมวลสารระหว่างการออสโมซิสในผักและผลไม้ (ดัดแปลงจาก Raoult-Wack, 1994)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

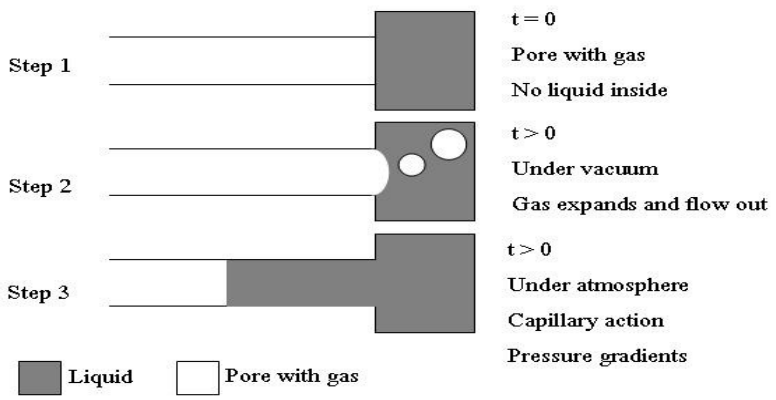
น้ำตาลสามารถแพร่เข้าสู่ชิ้นแอปเปิลได้ง่ายที่สุด จึงทำให้แอปเปิลมีน้ำหนักที่ลดลงสุทธิน้อยที่สุด Garcia *et al*. (2010) พบว่า การออสโมซิสโดยใช้มะละกอดิบทำให้มีปริมาณน้ำหนักที่ลดลงและปริมาณน้ำที่สูญเสียมากกว่ามะละกอสุก เนื่องจากมะละกอดิบมีลักษณะความเป็นรูพรุนในเซลล์มากกว่ามะละกอสุก จึงยอมให้น้ำที่อยู่ในเซลล์ถ่ายเทออกจากช่องว่างในเซลล์ได้มากกว่า

1.2 รูปร่างและขนาดของชิ้นอาหาร มีผลต่อพฤติกรรมการเคลื่อนที่ระหว่างการถ่ายโอนมวลสารขณะออสโมซิส ซึ่งเป็นผลจากระยะการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากชิ้นผักผลไม้และการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายจากสารละลายออสโมติก และมีผลต่อสัดส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารละลายออสโมติก ถ้ามีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก เช่น รูปร่างเป็นวงแหวนและขนาดชิ้นเล็ก น้ำจะมีโอกาสแพร่ออกมาได้มากกว่าการมีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อย เช่น รูปร่างเป็นแว่นและขนาดชิ้นใหญ่ Sablani and Rahman (2003) พบว่า การหั่นมะม่วงเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมลูกเต๋า (ขนาด 2 เซนติเมตร) มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำสูงที่สุด รองลงมาคือ การหั่นเป็นแท่งรูปสามเหลี่ยม (ยาว 5.5 เซนติเมตร และขนาดสามเหลี่ยม 2.0*2.0*1.5 เซนติเมตร) และหั่นเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม (3.5*1.8*1.0 เซนติเมตร) ตามลำดับโดยการมีผิวสัมผัสกับสารละลายออสโมติกมากจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำมากกว่า Yuenyonputtakal (2006) พบว่า การหั่นเนื้อลูกพลับเป็นแว่นกลม ซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารละลายออสโมติก มาก มีปริมาณน้ำหนักที่ลดลง ปริมาณน้ำที่สูญเสีย และปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น มากกว่าชิ้นสี่เหลี่ยมลูกเต๋า

2. การเตรียมขั้นต้น

2.1 การลวก สามารถทำได้โดยลวกในน้ำร้อนหรือลวกโดยใช้ไอน้ำร้อน การลวกจะทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ของผักผลไม้อ่อนตัวลง เพิ่มความสามารถในการเป็นเยื่อเลือกผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์ให้มากขึ้น เพิ่มโอกาสการแพร่ของน้ำออกจากเซลล์และทำให้ตัวถูกละลายจากสารละลายออสโมติก สามารถแพร่เข้าไปในเซลล์ได้มากขึ้น โดยพบว่าการลวกให้ผลดีกับผักผลไม้ที่มีเนื้อแข็ง Escobar *et al*. (2007) สรุปว่าการลวกแครอทในน้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและน้ำตาลซูโครสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการลวกนานขึ้น โดยที่การลวกนาน 30 วินาที ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและน้ำตาลสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการลวกร้อยละ 90 และ 50 ตามลำดับ เนื่องจากการลวกทำให้เซลล์เนื้อเยื่อแครอทถูกทำลายและเกิดการสูญเสียน้ำตาลกาแลคโตสและอะราบิโนสซึ่งเป็นองค์ประกอบของเพคตินที่ผนังเซลล์แครอท ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ควบคุมขนาดช่องเปิดของเซลล์ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับการไม่ลวก

2.2 การใช้สภาวะสุญญากาศ ทำได้โดยการลดความดันอากาศลง จนทำให้เกิดสภาวะความดันสุญญากาศในภาชนะปิดเมื่อเริ่มต้นกระบวนการออสโมซิสเป็นระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นจะปล่อยให้กลับคืนสู่ความดันบรรยากาศ เป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อนในการแพร่ของน้ำจากเนื้อเยื่อของชิ้นผักผลไม้ไปสู่สารละลายออสโมติกโดยเกิดกลไก Hydrodynamic (HDM) การเคลื่อนที่ของสาละลายในช่องว่างระหว่างเซลล์ที่เกิดขึ้น อธิบายดังภาพที่ 2 ในขั้นตอนที่ 1 เมื่อเริ่มแช่ชิ้นผักผลไม้ (t = 0) ที่สภาวะบรรยากาศ สารละลายภายนอกยังไม่มีการเคลื่อนที่เข้ามาภายในช่องว่างระหว่างเซลล์ ขั้นตอนที่ 2 เมื่อแช่ผักผลไม้ที่สภาวะสุญญากาศ (t > 0) ก๊าซที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์จะถูกดูดออกมาพร้อมกับการดูดอากาศ และขั้นตอนที่ 3 เมื่อหยุดการใช้สภาวะสุญญากาศและแช่ชิ้นผลไม้ต่อที่สภาวะบรรยากาศเป็นระยะเวลาหนึ่ง (t > 0) สารละลายแพร่ผ่านเข้ามาในช่องว่างระหว่างเซลล์ โดยเข้ามาแทนที่ก๊าซที่ถูกดูดออกไปโดยการแพร่ผ่านรูขนาดเล็ก (Capillary action)



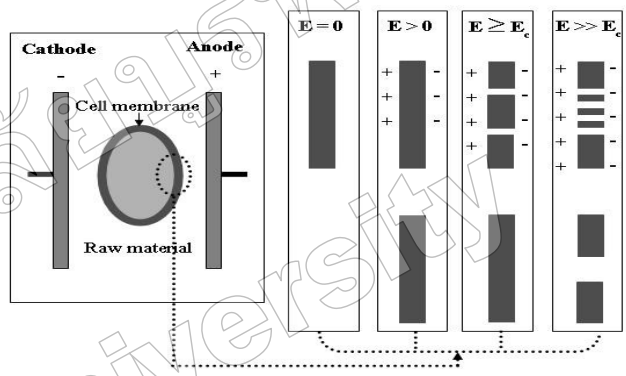
ภาพที่ 2 การเคลื่อนที่ของสารละลายในช่องว่างระหว่างเซลล์โดยกลไก HDM (ดัดแปลงจาก Chiralt & Fito, 2003)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

และเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงความดันบรรยากาศ (Pressure gradients) (Chiralt & Fito, 2003)

ในขณะที่ให้ความดันสุญญากาศ ก๊าซที่อยู่ในโครงสร้างของชิ้นผักผลไม้จะถูกบีบอัดทำให้เกิดการแพร่และเคลื่อนที่ออกจากเนื้อเยื่อ เมื่อความดันกลับสู่ความดันบรรยากาศ สารละลายออสโมติกก็จะแพร่เข้ามาในเนื้อเยื่อของผักผลไม้แทน โดยก๊าซที่เหลือจากการถูกบีบอัดจะเป็นตัวนำสารละลายเข้าสู่เซลล์ทางช่องว่างระหว่างเซลล์ ทำให้โอกาสการถ่ายโอนมวลสารต่อพื้นที่เพิ่มมากขึ้น การใช้สภาวะสุญญากาศทำได้ 2 แนวทาง คือ การใช้สุญญากาศเป็นเวลาสั้นในช่วงแรกของการออสโมซิส (Vacuum osmotic dehydration; VOD) เช่น ใช้สภาวะสุญญากาศ 20 นาที แล้วออสโมซิสต่อที่สภาวะบรรยากาศ ส่วนอีกแนวทางหนึ่งคือการใช้สุญญากาศแบบเป็นจังหวะ (Pulse vacuum osmotic dehydration; PVOD) เป็นการใช้สภาวะสุญญากาศเป็นเวลาสั้นในช่วงแรกแล้วกลับสู่สภาวะบรรยากาศเวลาสั้นแล้วใช้สภาวะสุญญากาศเป็นเวลาสั้นอีกครั้งก่อนออสโมซิสต่อที่สภาวะบรรยากาศ เช่น ใช้สภาวะสุญญากาศ 10 นาทีแล้วกลับสู่สภาวะบรรยากาศ 10 นาทีและให้สภาวะสุญญากาศอีกครั้งนาน 10 นาที แล้วจึงออสโมซิสต่อที่สภาวะบรรยากาศ การใช้สภาวะสุญญากาศมีแนวโน้มช่วยเพิ่มการถ่ายโอนมวลสารและช่วยรักษาคุณภาพบางประการได้ Tapia *et al*. (1999) เปรียบเทียบการออสโมซิสที่สภาวะบรรยากาศกับสภาวะ VOD ที่ความดัน 60 มิลลิบาร์ พบว่า สภาวะ VOD สามารถช่วยลดปริมาณความชื้นของมะละกอได้เร็วกว่าการใช้สภาวะบรรยากาศและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสและกลิ่นรสดีใกล้เคียงกับวัตถุดิบเริ่มต้น Chafer *et al*. (2003) พบว่าชิ้นลูกแพร์ มีอัตราการถ่ายโอนมวลสารเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สภาวะ PVOD เป็นจังหวะนาน 5 นาที ที่ความดัน 50 มิลลิบาร์ และทำให้สีเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าตัวอย่างที่ผ่านการลวกและตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น

2.3 การใช้สนามไฟฟ้าแรงสูงแบบเป็นจังหวะ (Pulsed Electric Fields ; PEF) ดำเนินการโดยให้สนามไฟฟ้า (E) ผ่านขั้วอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับอาหารจนเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดประจุไฟฟ้าที่เยื่อหุ้มเซลล์ เมื่อมีการสะสมประจุไฟฟ้าที่เยื่อหุ้มเซลล์จนทำให้มีค่าความเข้มสนามไฟฟ้ามากกว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าวิกฤตที่จะทำให้เกิดการแตกของเยื่อหุ้มเซลล์ (Ec) ซึ่งจะใช้เวลาสั้นมากและทำให้เกิดปรากฏการณ์ Electroporation หรือ Pore formation ซึ่งอธิบายดังภาพที่ 3 ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ Irreversible electroporation เป็นการแตกของเยื่อหุ้มเซลล์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงมากกว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าวิกฤตอย่างมาก (E>>Ec) จนทำให้เกิดการทำลายที่เยื่อหุ้มเซลล์อย่างถาวรเกิดเป็นรูขนาดใหญ่ นำมาประยุกต์ใช้ในการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์เพื่อการถนอมอาหารได้ และ Reversible electroporation เป็นการแตกของเยื่อหุ้มเซลล์จากการเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงกว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าวิกฤตเพียงเล็กน้อย (E≥Ec) เพื่อให้เยื่อหุ้มเซลล์เกิดรูขนาดเล็ก ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มอัตราการถ่ายโอนมวลสารเข้าออกผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เท่านั้น เซลล์ไม่ถูกทำลายมาก ประยุกต์ใช้กับการเตรียมขั้นต้นก่อนการดึงน้ำออกแบบออสโมซิสได้ (Von *et al*., 2006)



ภาพที่ 3 ปรากฏการณ์ Electroporation หรือ Pore formation (ดัดแปลงจาก Mertens & Knorr, 1992)

เมื่อใช้ PEF มักตรวจวัดค่าดัชนีการแตกของเยื่อหุ้มเซลล์ (Zp) ซึ่งใช้ประเมินการแตกของเยื่อหุ้มเซลล์โดยเปรียบเทียบกับเยื่อหุ้มเซลล์ที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของเซลล์ทางไฟฟ้า Zp มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดย 0 หมายถึง เยื่อหุ้มเซลล์ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง และ 1 หมายถึง เยื่อหุ้มเซลล์เกิดการแตกอย่างสมบูรณ์ Rastogi *et al*. (1999) พบว่า การเพิ่มค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจาก 0-1.7 kV/cm ทำให้ค่า Zp ของชิ้นแครอทมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0-0.82 มีผลให้จำนวนและขนาดของรูที่เยื่อหุ้มเซลล์เพิ่มขึ้นและเพิ่มสมบัติการเป็นเยื่อเลือกผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์ได้มากขึ้น แครอทจึงมีการสูญเสียน้ำมากกว่าและเนื้อสัมผัสอ่อนนุ่มกว่าแครอทที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น นอกจากนี้ปัจจัยด้านลักษณะของวัตถุดิบก็มีส่วนสำคัญต่อการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ด้วย Ade-Omowaye *et al*. (2002) พบว่าพริกหยวกที่เอาเปลือกออกมีค่า Zp มากกว่าตัวอย่างที่ยังมีเปลือกอยู่ เนื่องจากเปลือกของพริกหยวกจะเพิ่มความต้านทานต่อสนามไฟฟ้า ทำให้การแตกของเยื่อหุ้มเซลล์ลดลง

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

2.4 การใช้คลื่นอัลตราโซนิก คลื่นอัลตราโซนิก เป็นคลื่นที่มีความถี่สูงเกินความถี่ที่มนุษย์สามารถได้ยิน (มากกว่า 20 กิโลเฮิรตซ์) เป็นคลื่นที่ส่งพลังงานจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งด้วยการถ่ายโอนพลังงานกลของอนุภาค จำเป็นต้องใช้ตัวกลางในการเคลื่อนที่ ในการเคลื่อนที่ของคลื่นนี้จะเกิดปรากฏการณ์ Captivation effect ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในตัวกลางที่ได้รับคลื่นอัลตราโซนิกเนื่องมาจากฟองอากาศที่เกิดขึ้น โดยฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในตัวกลางของเหลวนี้จะสัมผัสกับแรงสั่นที่เกิดจากคลื่นอัลตร้าซาวน์เป็นระยะและเกิดการแลกเปลี่ยนแก๊สระหว่างกัน หากนำมาประยุกต์ใช้ในการเตรียมขั้นต้นก่อนการออสโมซิสผักผลไม้จะช่วยทำให้น้ำที่ยึดติดกับเนื้อเยื่อผักผลไม้สามารถแพร่ออกมาได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ฟองอากาศดังกล่าวมีผลทำให้เกิดรูขนาดเล็กขึ้นในชิ้นผักผลไม้ได้ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มโอกาสให้สารละลายออสโมติกสัมผัสกับเนื้อเยื่อได้มากขึ้น จึงมีโอกาสเกิดการถ่ายโอนมวลสารได้มากขึ้นนั่นเอง (Fernandes *et al*., 2009) การเตรียมขั้นต้นทำได้โดยนำชิ้นผักผลไม้แช่ในน้ำหรือสารละลายออสโมติกซึ่งใช้เป็นตัวกลางในการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิก กรณีผลไม้ที่มีลักษณะเนื้อไม่แข็งนัก เช่น เมลลอน สับปะรด สามารถใช้เวลาสั้นประมาณ 10-30 นาที แล้วจึงนำชิ้นผักผลไม้ไปออสโมซิสต่อในสภาวะปกติ จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคพบว่าการใช้คลื่นอัลตราโซนิกมีส่วนช่วยให้เนื้อเยื่อผักผลไม้มีลักษณะเป็นรูขนาดเล็กเพิ่มขึ้นและเกิดช่องว่างภายในเซลล์มากขึ้น ส่งผลให้เซลล์มีการยึดติดกันน้อยลง มีโอกาสสูญเสียน้ำออกจากเซลล์ได้มากขึ้น และส่งผลดีเมื่อนำตัวอย่างหลังการออสโมซิสไปทำแห้งแบบลมร้อนต่อ พบว่า มีส่วนช่วยให้การแพร่ออกของน้ำง่ายขึ้นและใช้เวลาในการทำแห้งลดลงได้ (Fernandes *et al*., 2009; Fernandes *et al*., 2008)

3. ลักษณะของสารละลายออสโมติก

3.1 ชนิดของสารละลายออสโมติก สารละลายออสโมติกที่นิยมใช้ คือ น้ำเชื่อมจากน้ำตาล อย่างไรก็ตามชนิดของน้ำตาลมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการถ่ายโอนมวลสาร Marani *et al*. (2007) พบว่า การใช้น้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น สารละลายฟรุกโตส สามารถเร่งการสูญเสียน้ำออกจากชิ้นกีวีได้ดี โดยมีปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น สารละลายซูโครส เนื่องจากการใช้สารละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงทำให้เกิดแรงดันออสโมติกต่ำทำให้มีการสูญเสียน้ำและทำให้ของแข็งเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในการใช้สารละลายออสโมติกมักมีความพยายามที่จะใช้สารละลายผสมซึ่งเป็นการเพิ่มแรงขับในการถ่ายโอนมวลสาร นิยมเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ปริมาณเล็กน้อยลงไปในสารละลายออสโมติกด้วย ซึ่งนอกจากจะช่วยเพิ่มแรงขับแล้วยังช่วยลดค่า aw ของผลิตภัณฑ์ป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ ด้วย การใช้น้ำคั้นจากผลไม้มาเตรียมเป็นสารละลายออสโมติกก็สามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการออสโมซิสได้ เนื่องจากสามารถเกิดการถ่ายเทสารธรรมชาติที่มีในน้ำคั้นเหล่านั้นกลับคืนมาได้ในผลิตภัณฑ์ได้ นอกจากนี้อาจเติมสารอื่นลงไปด้วย เช่น เติมกลีเซอรอลเพื่อช่วยให้ผลิตภัณฑ์คงรูปร่าง เนื้อสัมผัสไม่แข็งกระด้าง เป็นต้น

3.2 ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติก ในการออสโมซิสต้องใช้สารละลายออสโมติกที่มีความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นภายในชิ้นผักผลไม้เพื่อให้เกิดความแตกต่างของแรงดันเกิดเป็นแรงขับให้มีการถ่ายโอนมวลสาร ระดับความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกจึงเกี่ยวข้องโดยตรงกับประสิทธิภาพการแพร่ของน้ำและตัวถูกละลาย โดยมีแนวโน้มคือเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนมวลสารของน้ำและตัวถูกละลายมีค่าเพิ่มขึ้น และมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีค่า a_w ต่ำลง อย่างไรก็ตามการใช้สารละลายออสโมติกที่เข้มข้นมากเกินไปก็สามารถทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารลดลงได้ เนื่องจากหากสารละลายมีความเข้มข้นมากมักมีความหนืดมากและอาจเกิดชั้นบางๆ ที่ผิวของชิ้นวัตถุดิบซึ่งจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำและตัวถูกละลายระหว่างการออสโมซิสได้ (Sankat, *et al*., 1996)

4. อุณหภูมิและเวลาการออสโมซิส

เมื่ออุณหภูมิที่ใช้สูงขึ้นจะทำให้โครงสร้างบางส่วนของผักผลไม้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพไป คือ เยื่อหุ้มเซลล์อ่อนตัวลง จึงทำให้การแพร่ผ่านของน้ำและตัวถูกละลายเป็นไปได้ง่ายกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำ และในกรณีการออสโมซิสโดยใช้น้ำเชื่อม การเพิ่มอุณหภูมิในการออสโมซิส มีผลให้ความหนืดของน้ำเชื่อมลดลงทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำและน้ำตาลสะดวกขึ้น เป็นผลให้อัตราการออสโมซิสสูงขึ้นด้วย Flink (1979) กล่าวว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการดึงน้ำออกจากผักผลไม้ที่ชัดเจนมาก โดยอัตราการดึงน้ำออกจะสูงมากเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในการออสโมซิส อย่างไรก็ตามสำหรับการออสโมซิสผักผลไม้ แนวโน้มการเพิ่มขึ้นดังกล่าวจะจำกัดเมื่อใช้อุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากเยื่อหุ้มเซลล์ของผักผลไม้ถูกทำลายไป ส่งผลให้การดึงน้ำออกเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ เช่น กรณีสับปะรด เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 50 องศาเซลเซียส ทำให้สารเพคตินซึ่งเป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ของสับปะรดเกิดการละลาย มีผลทำให้การแพร่ของน้ำตาลซูโครสและน้ำช้าลง และพบว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส การแพร่ของน้ำตาลซูโครสเกือบจะคงที่ (Rahman

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

& Lamb, 1990) การใช้เวลาในการแช่ผักผลไม้ในสารละลายออสโมติกนาน มีโอกาสให้วัตถุดิบสัมผัสกับสารละลายออสโมติกมากขึ้น น้ำในวัตถุดิบสามารถแพร่ออกมาในอัตราสูงโดยเฉพาะในช่วงแรก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาผ่านไปช่วงหนึ่งน้ำจะแพร่ออกมาในอัตราที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากในช่วงแรกของการออสโมซิสเกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติกระหว่างเซลล์ผักผลไม้กับสารละลายออสโมติกมาก ทำให้เกิดแรงขับสูงที่จะเกิดการถ่ายโอนมวลมากและรวดเร็ว เมื่อเวลาในการออสโมซิสนานขึ้นจะเกิดการสะสมของน้ำที่แพร่ออกจากผักผลไม้มากขึ้น สารละลายออสโมติกจึงมีความเข้มข้นลดลงกว่าช่วงแรก จึงทำให้แรงดันออสโมติกมีค่าน้อยลงมีผลให้เกิดแรงขับที่จะถ่ายโอนมวลน้อยและช้าลง (Dermesonlouoglou *et al*., 2007; Kowalska & Lenart, 2001)

6. ปัจจัยอื่นๆ

นอกจากปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสในผักผลไม้ เช่น การคนหรือกวนสารละลายออสโมติก ในขณะที่เกิดการออสโมซิส ความเข้มข้นบริเวณรอบๆ ชิ้นอาหารจะลดลงเนื่องจากน้ำภายในชิ้นอาหารแพร่ออกมาสู่สารละลายออสโมติก จึงมีผลให้ประสิทธิภาพการออสโมซิสลดลงไปด้วย การคนหรือกวนเป็นการทำให้สารละลายออสโมติกมีการเคลื่อนที่ ซึ่งจะช่วยให้เกิดการกระจายความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกให้มีความสม่ำเสมอมากขึ้นได้ โดยทำให้สารละลายที่เข้มข้นกว่าไหลมาแทนที่สารละลายที่เจือจาง ทำให้ประสิทธิภาพการออสโมซิสสูงขึ้นด้วย อัตราส่วนระหว่างสารละลายออสโมติกกับผักผลไม้ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการออสโมซิส โดยถ้าอัตราส่วนนี้เพิ่มขึ้นจะทำให้น้ำแพร่ออกเร็วขึ้น

แนวทางการใช้เทคนิคการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์จากผักและผลไม้

1. ผลิตภัณฑ์แช่เยือกแข็ง ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการดึงน้ำออกโดยวิธีการออสโมซิสแล้วนำไปแช่แข็ง เรียกว่า Osmodehydrofrozen product โดยทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติหลังการละลายดีขึ้น สามารถเก็บรักษาผลไม้ได้นาน และมีรสชาติ สี และเนื้อสัมผัสเหมือนธรรมชาติ เนื่องจากโดยปกติการแช่เยือกแข็งผักผลไม้จะมีผลให้คุณภาพของผลไม้ลดลงเนื่องมาจากเนื้อสัมผัสเปลี่ยนไปและกิจกรรมของเอนไซม์ที่มีผลให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลขึ้น การใช้วิธีการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสในขั้นการเตรียมก่อนการแช่เยือกแข็ง ทำให้การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลลดลงได้ช่วยเพิ่มความเข้มข้นบางส่วนให้กับผักผลไม้และสามารถลดปริมาณน้ำในผักผลไม้ก่อนการแช่เยือกแข็งซึ่งเป็นการลดปริมาณผลึกน้ำแข็งที่มีโอกาสทำลายเนื้อเยื่อของผักผลไม้ได้มาก โดยผลิตภัณฑ์ Osmodehydrofrozen product สามารถนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์เบเกอรี ไอศกรีม หรือโยเกิร์ตได้ (Dermesonlouoglou *et al*., 2007)

2. ผลิตภัณฑ์กึ่งแห้งหรือแห้ง การดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสทำให้ปริมาณน้ำในชิ้นผลไม้ลดลงได้ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเริ่มต้น การแปรรูปต่อด้วยการทำแห้งเป็นการลดปริมาณความชื้น ค่า a_w ให้อยู่ในระดับที่ไม่เสี่ยงต่อการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์หรือระดับที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้ และช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย โดยอาจนำมาทำแห้งต่อได้หลายวิธี เช่น การอบแห้งด้วยลมร้อน การทำแห้งแบบสุญญากาศ และการทำแห้งแบบระเหิด โดยพบว่าการออสโมซิสผักผลไม้ก่อนทำให้ลดเวลาการทำแห้งลงได้ จึงช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดีกว่าการไม่ผ่านการออสโมซิส (El-Aouar *et al*., 2006)

3. ผลิตภัณฑ์แยม การนำผลไม้ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักของการผลิตแยมมาดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสก่อนนำไปกวนเป็นแยม จัดเป็นการลดปริมาณน้ำและเพิ่มปริมาณของแข็งในวัตถุดิบ ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการกวน ช่วยรักษาคุณค่าทางโภชนาการ ลดการเปลี่ยนแปลงด้านสี เนื้อสัมผัส กลิ่นรสของแยมที่ได้ นอกจากนี้ยังสามารถเก็บวัตถุดิบที่รอการผลิตไว้ได้นานกว่าการเก็บวัตถุดิบสดอีกด้วย เช่น การผลิตแยมกีวีและมาร์มาเลดส้ม โดยใช้ผลไม้ที่ผ่านการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสและใช้สารละลายออสโมซิสที่ใช้แล้วสามารถช่วยลดการใช้อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานในการกวนแยม จึงลดการเปลี่ยนแปลงสี และกลิ่นรสของกีวีและส้มได้ ช่วยให้แยมที่ได้มีความคงตัวอายุการเก็บรักษานานขึ้น และช่วยรักษาวิตามินไว้ได้ด้วย (Garcia *et al*., 2002)

4. ผลิตภัณฑ์อาหารสุขภาพ มีการนำการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสมาใช้พัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารสุขภาพหลายรูปแบบ ได้แก่ การใช้สารละลายออสโมติกที่มีสมบัติเป็นพรีไบโอติกในการออสโมซิสผักผลไม้ เช่น ใช้น้ำตาลโอลิโกฟรุกโตสในการออสโมซิสมะเขือเทศ (Dermesonlouoglou *et al*., 2007) การเติมแร่ธาตุหรือสารต้านอนุมูลอิสระในสารละลายออสโมติก เช่น การเสริมแคลเซียมและเหล็กในแอปเปิล (Barrera *et al*., 2004) และการเสริมสารประกอบฟีนอลิกจากเมล็ดองุ่นในแอปเปิล กล้วย และมันฝรั่ง (Rozek *et al*., 2010) นอกจากนี้ยังใช้การออสโมซิสในการเตรียมขั้นต้นก่อนนำอาหารไปทอดเพื่อลดการดูดซับน้ำมันในอาหารทอดได้ เนื่องจากการดูดซับน้ำมันของอาหารในระหว่างการทอดเกิดจากการที่น้ำในอาหารจะเคลื่อนมาที่เปลือกนอกและเปลี่ยนสถานะเป็นไอแล้วเคลื่อนที่ออกจากอาหาร ทำให้เกิด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ช่องว่างซึ่งน้ำมันสามารถผ่านเข้าไปในอาหารได้ ดังนั้นการออสโมซิสจึงเป็นการลดความชื้นในอาหารและการแพร่ผ่านของตัวถูกละลายจากสารละลายออสโมติกเข้าไปในชิ้นอาหารมีผลให้ลดการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากชิ้นอาหาร จึงช่วยลดการดูดซับน้ำมันในอาหารทอดได้ เช่น การนำกล้วยมาออสโมซิสก่อนทอดแบบน้ำมันท่วม (Ikoko & Kuri, 2007)

สรุป

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสในผักและผลไม้ ได้แก่ ลักษณะของผักและผลไม้ การเตรียมขั้นต้น อุณหภูมิและเวลาการออสโมซิส การคนหรือกวนสารละลายออสโมติก และ อัตราส่วนระหว่างสารละลายออสโมติกกับผักผลไม้ เนื่องจากการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสมีขั้นตอนไม่ยุ่งยากซับซ้อนและไม่ต้องการเทคโนโลยีขั้นสูงสนับสนุนมากนัก ดังนั้นอาจมีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ผักผลไม้ของประเทศได้ อย่างไรก็ตามควรมีความเข้าใจถึงกลไกการถ่ายโอนมวลสารที่เกิดขึ้น และปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้เลือกใช้ระดับของปัจจัยในการแปรรูปได้อย่างถูกต้องเหมาะสม

เอกสารอ้างอิง

Ade-Omowaye, B.I.O., Rastogi, N.K., Angersbach, A. & Knorr, D. (2002). Osmotic dehydration of bell peppers: influence of high intensity electric field pulses and elevated temperature treatment. *Journal of Food Engineering, 54*, 35–43.

Barrera, C., Betoret, N., & Fito, P. (2004). Ca^{2+} and Fe^{2+} influence on the osmotic dehydration kinetics of apple slices (var. Granny Smith). *Journal of Food Engineering, 65*, 9-14.

Chafer, M., Gonzalez-Martinez, C., Fernandez, B., Perez, L., & Chirait, A. (2003). Effect of blanching and vacuum pulse application on osmotic dehydration of pear. *Food Science and Technology Inyernational, 9*(5), 321-328.

Chiralt, A., & Fito, P. (2003). Transport mechanism in osmotic dehydration: the role of the structure. *Food Science Techonology Inernational, 9*(3), 179-186.

Dermesonlouoglou, E.K., Giannakourou, M.C., & Taoukis, P.S. (2007). Stability of dehydrofrozen tomatoes pretreated with alternative osmotic solutes. *Journal of Food Engineering, 78*, 272-280.

Ecobar, M.P., Galindo, G.F., Wadso, L., Najera, J.R., & Sjoholm, I. (2007). Effect of long-term storage and blanching pre-treatments on the osmotic dehydration kinetics of carrots (*Daucus carota L. Nerac*). *Journl of engineering, 81*, 313-317.

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

Fernandes, F.A.N., Gallao, M.I., & Rodrigues, S. (2008). Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration. *LWT - Food Science and Technology, 41*, 604-610.

Fernandes, F.A.N., Gallao, M.I. & Rodrigues, S. (2009). Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *Journal of Food Engineering, 90*, 186–190.

Flink, J.M. (1979). Dehydrated carrot slices; Influence of osmotic concentration on air drying behavior and product quality. *Food Process Eng, 1*, 412-418.

Garcia, Martinez E., Ruiz-Diaz G., Martinez-Monzo J., Camacho, M.M., Martinez-Navarrete, N., & Chiralt, A. (2002). Jam manufacture with osmodehydrated fruit. *Food Research International, 35*, 301-306.

Garcia, M., Diaz, R., Martinez, Y. & Casariego, A. (2010). Effect of chitosan coating on mass transfer during osmotic dehydration of papaya. *Food Research International, 43*, 1656-1660.

Ikoko, J., & Kuri, V. (2007). Osmotic pre-treatment effect on fat intake reduction and eating quality of deep-fried plantain. *Food Chemistry, 102*, 523-531.

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

Kowalska, H., & Lenart, A. (2001). Mass exchange during osmotic pretreatment of vegetable. *Journal of food engineering, 49*, 137-140.

Marani, C.M., Agnelli, M.E., & Mascheroni, R.H. (2007). Osmo-frozen fruits: mass transfer and quality evaluation. *Journal of Food Engineering, 79*, 1122-1130.

Mertens, B., & Knorr, D. (1992). Developments of non-thermal processes for food preservation. *Food Technology, 46*(124), 126-133.

Rahman, M. & J. Lamb. (1990). Osmotic dehydration of pineapple. *Journal of Food Science and Technology. 27*, 150-152.

Raoult-Wack, A. L. (1994). Recent advances in the osmotic dehydration foods. *Trend Food Sci. Tech, 5*, 255-260.

Rastogi, N.K., Eshtiaghi, M.N., & Knorr, D. (1999). Accelerated mass transfer during osmotic dehydration of high intensity electrical field pulse pretreatment carrots. *Journal of food science, 64*, 1020-1022.

Rozek, A., Garcia-Perez, J., Lopez, F., Guell, C., & Ferrando, M. (2010). Infusion of grape phenolics into fruits and vegetables by osmotic treatment: Phenolic stability during air drying. *Journal of Food Engineering, 99*, 142-150.

Sablani, S.S., & Rahman, M.S. (2003). Effect of syrup concentrate on temperature and sample geometry on equilibrium distribution coefficients during osmotic dehydration of mango. *Food Research International, 36*, 65–71.

Sankat, C.K., Castaigne, F. & Maharaj, R. (1996). The air drying behavior of fresh and osmotically dehydrated banana slices. *International Journal Food Science and Technology, 31*, 123-135.

Tapia, M.S., López-Malo, A.,Consuegra, R., Corte, P., & Welti-Chanes, J. (1999). Minimally processed papaya by vacuum osmotic dehydration techniques. *Food Science and Technology International, 5*, 41-49.

Torreggiani, D. (1993). Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. *Food Res. Int, 26*, 59-68.

Von, V., Ingenieur, D., & Topft, S. (2006). *Pulsed Electric Fields (PEF) for Permeabilization of Cell Membranes in Food- and Bioprocessing-Applications, Process and Equipment Design and Cost Analysis*. Berlin: Berlin University.

Yuenyongputtakal, W. (2006). *Osmotic pre-treatment in fruit product development from persimmon (Diospyros kaki)*. Ph.D. thesis, Kasetsart University.

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University