

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มะพร้าว

มะพร้าวเป็นพืชตระกูลปาล์มชนิดหนึ่ง มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Cocos nucifera* Linn. สามารถจำแนกพันธุ์มะพร้าวได้เป็น 2 ประเภท คือ มะพร้าวพันธุ์ต้นสูง และมะพร้าวพันธุ์ต้นเตี้ย ซึ่งมีขนาด รูปร่างและสีของผลมะพร้าวแตกต่างกัน (ณรงค์ โฉมเฉลา, 2548; Woodroof, 1990) โดยที่มะพร้าวพันธุ์ต้นสูงมีผลโต เนื้อหนา ปริมาณเนื้อมาก ใช้เนื้อจากผลแก่ไปประกอบอาหาร ทำมะพร้าวแห้งสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันมะพร้าว ส่วนมะพร้าวพันธุ์ต้นเตี้ยจะมีผลขนาดเล็ก เมื่อผลแก่มีเนื้อบางและน้อย แต่เนื้อมีความอ่อนนุ่มและยืดหยุ่น นิยมปลูกไว้เพื่อรับประทาน ผลอ่อน (สุภาวดี ภัทรโกศล, 2542; ณรงค์ โฉมเฉลา, 2548; ธรา วิริยะพานิช, 2548) เนื่องจากมะพร้าวจะให้ผลผลิตในช่วงเดือนกรกฎาคม-ตุลาคมในปริมาณมาก อีกทั้งการเก็บรักษาเนื้อมะพร้าวสดไม่สามารถทำได้ ดังนั้น การทำแห้งจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการเก็บรักษาเนื้อมะพร้าว (Woodroof, 1990; Salunkhe & Kadam, 1995) โดยวิธีการคั้นน้ำออกแบบบออสโมซิสร่วมกับการอบแห้งเป็นกระบวนการหนึ่งที่ลดปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์ลง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสี เนื้อสัมผัส กลิ่นรส รสชาติและคุณค่าทางอาหารที่ดีและผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถเก็บรักษาได้นาน

1. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

1.1 ผล (Fruit)

ผลมะพร้าวเกิดเป็นช่อเรียกว่า ทะลาย (Bunch) มีเยื่อหุ้มผล (Pericarp) ประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 3 ชั้น (สุภาวดี ภัทรโกศล, 2542) คือ

1.1.1 Exocarp คือ เปลือกชั้นนอกสุดของผลมะพร้าว ประกอบด้วยเส้นใยที่เหนียวและแข็ง มีผิวเรียบ สีเปลือกอยู่ในช่วงสีเขียวถึงสีน้ำตาลแดง เมื่อมะพร้าวแก่เปลือกจะเปลี่ยนไปเป็นสีน้ำตาลเทา

1.1.2 Mesocarp คือ เปลือกชั้นกลาง เรียกว่า กาบมะพร้าว (Husk) ประกอบด้วยส่วนของเนื้อเยื่อทั้งหมดได้เปลือกชั้นนอกจนถึงกะลา มีความหนาประมาณ 2 เซนติเมตร

1.1.3 Endocarp คือ เปลือกชั้นใน เป็นส่วนของกะลามะพร้าว (Shell) ซึ่งตรงส่วนบริเวณขั้วของผลจะมีตา 3 ตา ซึ่งแต่ละตาจะอยู่ระหว่างเส้นแบ่งกะลาเป็น 3 ส่วน เป็นตาแข็งหรือตาบอด 2 ตา ส่วนอีกตาเป็นตาน้ำ มีขนาดใหญ่ และอยู่ตรงส่วนที่กว้างที่สุดของกะลา โดย

มีลักษณะ (Embryo) แทรกตัวอยู่ตรงตาน้ำม เมื่อต้นอ่อนงอกจะแทงทะลุตาน้ำมนี้ออกมาแล้วเจริญเป็นต้นใหม่ต่อไป

1.2 เมล็ด (Seed)

ส่วนของเมล็ด คือ ส่วนของผลทั้งหมดที่อยู่ในกะลา ประกอบด้วย เยื่อหุ้มเมล็ด (Seed Coat หรือ Testa) ซึ่งเป็นแผ่นบางสีน้ำตาลจนถึงเอนโดสเปิร์ม (Endosperm) ผลมะพร้าวมีเอนโดสเปิร์มอยู่ 2 ชนิด คือ เนื้อมะพร้าว (Solid Endosperm) และน้ำมะพร้าว (Liquid Endosperm) เมื่อผลแก่เยื่อหุ้มเมล็ดจะติดแน่นกับเนื้อมะพร้าว (สุภาวดี ภัทร โกศล, 2542)

2. การเปลี่ยนแปลงของผลมะพร้าวระหว่างการเจริญเติบโต

มะพร้าวเป็นพืชพวก Monococious คือ มีดอกตัวผู้และดอกตัวเมียอยู่แยกกันแต่อยู่ในช่อดอกเดียวกัน โดยการบานของดอกตัวผู้และดอกตัวเมียของมะพร้าวพันธุ์ต้นสูงจะบานไม่ตรงกัน ดังนั้น การผสมเกสรจึงเป็นการผสมข้ามโดยใช้เกสรจากต้นอื่น ประมาณ 2 สัปดาห์หลังการผสมเกสรแล้วจะสังเกตเห็นรูปทรงของผลมะพร้าวที่เจริญมาจากรังไข่ของดอกตัวเมียอย่างช้า ๆ ประมาณ 4 เดือน เปลือกและกะลาจะเริ่มมีความหนามากขึ้น ประมาณ 6 เดือน ผลมะพร้าวมีขนาดโตเต็มที่เริ่มมีเนื้อมะพร้าวเป็นชั้นบาง ๆ โดยเนื้อมะพร้าวจะถูกสร้างขึ้นจากด้านที่อยู่ตรงข้ามก้านผลและขยายออกไปบริเวณรอบ ๆ ภายในผล โดยในช่วงแรกเนื้อมะพร้าวจะบางและมีลักษณะเป็นรู้น ประมาณ 8 เดือน สังเกตเห็นเนื้อมะพร้าวสีขาว มีความอ่อนนุ่ม ต่อมาจะมีความหนาและความแข็งเพิ่มขึ้น กะลาเริ่มมีความแข็งและเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ประมาณ 10 เดือน เนื้อมะพร้าวจะมีความแข็งมากขึ้น แต่ยังคงมีสีขาว มีเยื่อหุ้มเมล็ดสีน้ำตาลอยู่ด้านนอกโดยรอบและติดกับกะลา เนื้อมะพร้าวที่มีอายุมากขึ้นจะมีกรดไขมันสายสั้น (Short-Chain Fatty Acid) เพิ่มขึ้นและมีกรดไขมันสายยาว (Long-Chain Fatty Acid) ลดลง ประมาณ 11-13 เดือน มะพร้าวจะแก่เต็มที่ โดยระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงของผลมะพร้าวระหว่างการเจริญเติบโตขึ้นกับสภาพภูมิอากาศที่เพาะปลูก ตลอดช่วงที่ผลมะพร้าวเริ่มแก่จนกระทั่งแก่เต็มที่ น้ำหนักของผลมะพร้าวจะลดลง เนื่องจาก เปลือกเริ่มแห้งและเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาลถึงน้ำตาลแดง รวมทั้งน้ำมะพร้าวมีปริมาตรลดลง (รัชณี จิตตวานิช, 2532; Salunkhe & Kadam, 1995; Santoso, Kubo, Ota, Tadokoro, & Moekawa, 1996) ผลมะพร้าวจัดเป็น Non-Climacteric Fruit ซึ่งเป็นกลุ่มของผลไม้ที่อัตราการหายใจไม่เปลี่ยนแปลงระหว่างที่ผลไม้สุก โดยผลจะสุกอยู่กับต้นสังเคราะห์เอทิลินได้น้อยและอัตราการหายใจแบบ Non-Climacteric จะลดลงตลอดเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (दनัย บุญเกียรติ และนิธิยา รัตนพานนท์, 2548)

3. คุณค่าทางโภชนาการของน้ำและเนื้อมะพร้าว

ผลมะพร้าวประกอบด้วยส่วนที่บริโภคได้ร้อยละ 72 ในเนื้อมะพร้าวสดจะมีไขมันและคาร์โบไฮเดรตสูงและมีโปรตีนปานกลาง โดยคุณค่าทางโภชนาการของมะพร้าวอ่อนและ

มะพร้าวแก่ แสดงดังตารางที่ 2-1 เมื่อมะพร้าวมีอายุมากขึ้นนอกจากเนื้อมะพร้าวจะมีความหนา
มากขึ้น และมีปริมาตรน้ำมะพร้าวลดลงแล้ว คุณค่าทางโภชนาการต่าง ๆ ของเนื้อและน้ำมะพร้าวยัง
เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนี้ น้ำมะพร้าวมีปริมาณความชื้นและโปรตีนมีค่ามากขึ้น ขณะที่ปริมาณ
ไขมันและคาร์โบไฮเดรตลดลง เนื่องจากระหว่างการเจริญเติบโต ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดของ
น้ำมะพร้าวมีปริมาณเพิ่มขึ้นจนถึงอายุ 8 เดือน หลังจากนั้นจึงมีปริมาณลดลง ส่วนเนื้อมะพร้าว
พบว่า เนื้อมะพร้าวมีปริมาณไขมัน คาร์โบไฮเดรตและโปรตีนเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณความชื้น
และใยอาหารลดลงเมื่อมะพร้าวมีอายุมากขึ้น (กองโภชนาการ, 2532; Gatchalian, Leon, &
Yano,1994)

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำและเนื้อมะพร้าวจากมะพร้าวอ่อนและมะพร้าวแก่ในส่วน
ที่บริโภคได้ 100 กรัม (กองโภชนาการ, 2532)

วัตถุดิบ	ความชื้น	ไขมัน	คาร์โบไฮเดรต	ใยอาหาร	โปรตีน	แก้ว
น้ำมะพร้าวอ่อน	94.40	0.40	4.50	0.00	0.20	-
น้ำมะพร้าวแก่	96.40	0.00	2.10	0.00	1.00	-
เนื้อมะพร้าวอ่อน	83.10	2.00	7.70	4.50	1.60	1.10
เนื้อมะพร้าวแก่	51.70	28.20	16.00	3.00	3.20	-

หมายเหตุ: หน่วย คือ ร้อยละของน้ำหนักเปียก และ - หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

3.1 คาร์โบไฮเดรตและใยอาหาร

คาร์โบไฮเดรตและใยอาหาร (Dietary Fiber) ของน้ำมะพร้าวประกอบด้วย
น้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรุคโตส ซึ่งเป็นน้ำตาลที่พบมากที่สุดใ้้น้ำมะพร้าวอ่อน โดยมีปริมาณ
ร้อยละ 44.90 และ 43.90 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ขณะที่พบน้ำตาลซูโครสเพียงร้อยละ 1.02
ของน้ำหนักแห้ง (Santoso et al., 1996) สำหรับคาร์โบไฮเดรตและใยอาหารของเนื้อมะพร้าว
ประกอบด้วยกาแลกโตแมนแนน (Galactomannan) และเซลลูโลส (Cellulose) ในทุกช่วงอายุ แต่
ไม่พบแมนแนน (Mannan) ในมะพร้าวอ่อน ซึ่งแมนแนนจะเพิ่มขึ้นเมื่อมะพร้าวมีอายุมากขึ้น
ทั้งนี้ กาแลกโตแมนแนนเป็นพอลิแซ็กคาไรด์หลักมีปริมาณมากถึงร้อยละ 61 ของปริมาณพอลิ-
แซ็กคาไรด์ทั้งหมดในเนื้อมะพร้าวแก่ รองลงมา คือ แมนแนนและเซลลูโลสซึ่งมีปริมาณร้อยละ 26
และ 13 ของปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ทั้งหมดในเนื้อมะพร้าวแก่ ตามลำดับ ซึ่งกาแลกโตแมนแนน
และเซลลูโลสเป็นส่วนที่ใช้สร้างเป็นผนังเซลล์ชั้นแรกของเนื้อมะพร้าว ขณะที่แมนแนนจะถูก

สะสมเป็นความหนาของเนื้อมะพร้าว องค์ประกอบของพอลิแซ็กคาไรด์ของผนังเซลล์ของเนื้อมะพร้าว ประกอบด้วยเพคติน (ประกอบด้วยฟรุคโตส กลูโคส แมนโนสและไซโลส) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) (ประกอบด้วยอะราบิโนส กาแลคโตสและกลูโคส) และแอลฟา-เซลลูโลส (ประกอบด้วยกลูโคส) (พิมลพรรณ ปุชกะวิมล, 2543) สำหรับพอลิแซ็กคาไรด์ของเนื้อมะพร้าว อ่อนประกอบด้วยเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักและมีเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน (Lignin) เพียงเล็กน้อย ขณะที่เนื้อมะพร้าวแก่ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 6.7-7.1 ของน้ำหนักแห้ง (Santoso et al., 1996)

3.2 โปรตีน

การสังเคราะห์โปรตีนของเนื้อมะพร้าว เริ่มจากบริเวณส่วนของเปลือกหุ้มเมล็ด เป็นส่วนแรก ดังนั้น เนื้อมะพร้าวส่วนที่สัมผัสน้ำมะพร้าวจึงมีปริมาณโปรตีนน้อยกว่าเนื้อมะพร้าว ส่วนที่ติดกับกะลา โดยที่เปลือกหุ้มเมล็ดและน้ำมะพร้าวมีปริมาณโปรตีนต่ำ และพบว่า โปรตีนในเนื้อมะพร้าวเป็นโปรตีนที่มีคุณภาพสูง เนื่องจากมีกรดอะมิโนไลซีน (Lysine) เมไทโอนีน (Methionine) และทริปโตเฟน (Thryptophan) ซึ่งเป็นกรดอะมิโนจำเป็นในปริมาณค่อนข้างสูง (Woodroof, 1990)

Santoso et al. (1996) ศึกษาองค์ประกอบของกรดอะมิโนในเนื้อมะพร้าว พบว่า เนื้อมะพร้าวอ่อนประกอบด้วยกรดอะมิโนไลซีน กรดแอสพาร์ติก (Aspartic Acid) และอะลานีน (Alanine) ในปริมาณสูง คือ 4.72 1.60 และ 1.13 มิลลิกรัมต่อกรัม และในเนื้อมะพร้าวแก่ ประกอบด้วยกรดอะมิโนอะลานีน กรดกลูตามิก (Glutamic Acid) และไลซีนในปริมาณสูง และมีกรดอะมิโนหลายชนิดที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น ได้แก่ อะลานีน เซอรีน (Serine) และอาร์จินีน (Arginine)

Jayalekshmy and Mathew (1990) วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนในเนื้อมะพร้าว ออบแห้ง พบว่า เนื้อมะพร้าวอบแห้งมีโปรตีนร้อยละ 8.54 และวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของกรดอะมิโนโดยการย่อยโปรตีน (Hydrolyses Protein) ในเนื้อมะพร้าวแห้ง พบว่า เนื้อมะพร้าวอบแห้งประกอบด้วยกรดอะมิโน 18 ชนิดและมีประมาณกรดอะมิโนทั้งหมด 7,416 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม โดยมีปริมาณกรดกลูตามิกมากที่สุด รองลงมา คือ อาร์จินีนและกรดแอสพาร์ติก ตามลำดับ (1,460 1,049 และ 771 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ) สำหรับการวิเคราะห์กรดอะมิโนอิสระของเนื้อมะพร้าวอบแห้ง เพื่อชี้บ่งการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด พบว่า มีปริมาณกรดอะมิโนอิสระในเนื้อมะพร้าวอบแห้งทั้งหมด 236.4 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม โดยมีปริมาณทริปโตเฟนมากที่สุด รองลงมาคือ กรดกลูตามิกและกรดแอสพาร์ติก ตามลำดับ (74.0 38.05 และ 30.97 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ)

3.3 ไขมัน

เนื้อมะพร้าวแก่มีปริมาณไขมันอยู่ในช่วงร้อยละ 34-45 โดยปริมาณไขมันจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นในเนื้อมะพร้าว ระยะการเติบโตและพันธุ์มะพร้าว เนื่องจากการสังเคราะห์ไขมันของเนื้อมะพร้าวเกิดขึ้นในเซลล์ใกล้เคียงกับเยื่อหุ้มเมล็ด ทำให้เนื้อมะพร้าวที่อยู่ติดกับเยื่อหุ้มเมล็ดมีปริมาณไขมันสูงและปริมาณไขมันจะลดลงในส่วนเนื้อมะพร้าวด้านในที่ติดกับน้ำมะพร้าว ไขมันในเนื้อมะพร้าวประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวมากกว่าร้อยละ 90 โดยมีปริมาณ กรดลอริก (Lauric Acid (C12:0)) มากที่สุด คือ มีปริมาณร้อยละ 40-50 (Salunkhe & Kadam, 1995; Santoso et al., 1996) จากการศึกษาของ Santoso et al. (1996) พบว่า ปริมาณกรดไขมันสายสั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อมะพร้าวมีอายุมากขึ้นและกรดไขมันสายยาวมีแนวโน้มลดลงในเนื้อมะพร้าวอายุ 8 เดือน ถึง 10 เดือน

3.4 เกลือแร่ และวิตามิน

ปริมาณเกลือแร่และวิตามินในน้ำและเนื้อมะพร้าวแสดงดังตารางที่ 2-2 และ 2-3 โดยพบว่า เนื้อมะพร้าวมีอายุมากขึ้นปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม โซเดียมและ ฟอสฟอรัสในน้ำมะพร้าวมีปริมาณมากขึ้น ขณะที่ปริมาณแมงกานีส เหล็กและวิตามินซีมีปริมาณลดลง สำหรับเนื้อมะพร้าว พบว่า เนื้อมะพร้าวมีอายุมากขึ้นปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม โซเดียม ฟอสฟอรัส แมกนีส เหล็ก โรอะมิน ไบโอฟลาวิน ในอะซิน วิตามินซี และแอลฟา-โทโคฟีรอลมีปริมาณลดลง (Santoso et al., 1996)

ตารางที่ 2-2 ปริมาณเกลือแร่ของน้ำและเนื้อมะพร้าวจากมะพร้าวอ่อนและมะพร้าวแก่ (Santoso et al., 1996)

วัตถุดิบ	เกลือแร่ (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง)						
	แคลเซียม	แมกนีเซียม	โพแทสเซียม	โซเดียม	ฟอสฟอรัส	แมงกานีส	เหล็ก
น้ำมะพร้าวอ่อน	0.47	0.11	3.50	0.03	0.08	20.3	4.06
น้ำมะพร้าวแก่	0.57	0.17	4.64	0.29	0.23	14.4	2.94
เนื้อมะพร้าวอ่อน	0.29	0.43	4.47	0.10	0.39	42.9	43.6
เนื้อมะพร้าวแก่	0.03	0.12	0.68	0.02	0.19	16.4	35.9

ตารางที่ 2-3 ปริมาณวิตามินของน้ำและเนื้อมะพร้าวจากมะพร้าวอ่อนและมะพร้าวแก่
(Santoso et al., 1996)

วัตถุดิบ	วิตามิน (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง)				
	ไรบอซิน	ไรโบฟลาวิน	ไนอะซิน	วิตามินซี	α -โทโคฟีรอล
น้ำมะพร้าวอ่อน	Tr	0.01	ND	7.41	ND
น้ำมะพร้าวแก่	0.01	0.01	ND	7.08	ND
เนื้อมะพร้าวอ่อน	0.26	0.14	11.6	37.8	38.1
เนื้อมะพร้าวแก่	0.10	0.02	1.49	5.27	0.94

หมายเหตุ : Tr หมายถึง Trace และ ND หมายถึง Not Detected

การใช้สารเคมีเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาวัตถุดิบ

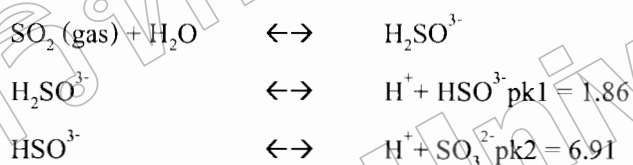
1. สารกลุ่มซัลไฟต์ (Sulfiting Agents)

สารกลุ่มซัลไฟต์เป็นวัตถุเจือปนอาหารที่ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการช่วยยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร โดยทำหน้าที่เป็นวัตถุกันเสียที่ช่วยในการป้องกันการเจริญของยีสต์ รา และแบคทีเรีย ชะลอการเกิดสีน้ำตาลในอาหารทั้งที่มีสาเหตุจากเอนไซม์และไม่เอนไซม์ เป็นวัตถุกันหืนและเป็นสารรีดิวซ์ในกระบวนการฟอกสีของอาหาร (ประสาร สวัสดิ์ชิตัง, 2538)

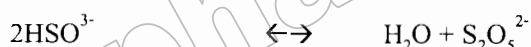
กระทรวงสาธารณสุขมีการประกาศอนุญาตให้ใช้สารกลุ่มซัลไฟต์เป็นวัตถุเจือปนอาหารตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 84 พ.ศ. 2527 เรื่องวัตถุเจือปนอาหาร ลงวันที่ 3 พฤศจิกายน พ.ศ. 2547 โดยสารกลุ่มซัลไฟต์ที่อนุญาตให้ใช้ในอาหาร ได้แก่ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และเกลือของซัลไฟต์ ได้แก่ โซเดียมและโพแทสเซียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3 , K_2SO_3) โซเดียมและโพแทสเซียมไบซัลไฟต์ (Na_2HSO_3 , K_2HSO_3) โซเดียมและโพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$, $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$) โซเดียมและแคลเซียมไฮโดรเจนซัลไฟต์ (Na_2HSO_3 , $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$) ซึ่งสารกลุ่มซัลไฟต์แต่ละชนิดจะเกิดปฏิกิริยาได้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งเป็นสารที่เกิดปฏิกิริยากับองค์ประกอบของอาหารในปริมาณที่แตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 2-4 โดยอนุญาตให้ใช้สารกลุ่มซัลไฟต์ได้ในอาหารบางประเภท ซึ่งกำหนดปริมาณสารซัลเฟอร์ไดออกไซด์สูงสุดที่อนุญาตให้ใช้ได้ผลิตภัณฑ์อาหารแสดงดังตารางที่ 2-5 นอกจากนี้ ข้อกำหนดของ FAO/WHO ด้านวัตถุเจือปนอาหารได้กำหนดค่าความปลอดภัย (ADI : Acceptable Daily Intake) ของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไว้ที่ระดับที่เข้าสู่ร่างกายไม่เกิน 0.7 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัมต่อวัน ซึ่งซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีผลกระทบต่อสุขภาพและร่างกายของมนุษย์ โดยเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ ทำให้หลอดลมเกิดการ

อีกเสบ ส่งผลให้เกิดอาหารแพ้ได้ง่ายต่อผู้ที่ เป็นโรคหอบหืด เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินอาหาร ทำลายวิตามินบี-1 และเมื่อสัมผัสผิวหนังจะทำให้เกิดการระคายเคือง แสบร้อนหรือไหม้ นอกจากนี้ การได้รับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในปริมาณมากเกินไปจะลดการใช้ประโยชน์ของโปรตีน และไขมันในร่างกาย มีผลต่อการทำลายเม็ดเลือดแดงและระบบการทำงานของกล้ามเนื้อหัวใจ ซึ่งอาจเป็นอันตรายถึงแก่ชีวิตได้ (Saper, 1993) จากมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 919-2532) อนุญาตให้ใช้สารประกอบซัลไฟด์เป็นวัตถุกันเสียในผลไม้แห้งชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ผลไม้แห้งชนิดไม่ปรุงแต่งรสหวานและชนิดปรุงแต่งรสหวาน กำหนดปริมาณการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไม่เกิน 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532)

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีน้ำหนักโมเลกุล 64.07 เป็นก๊าซที่ไม่มีสีและไม่ติดไฟ มีกลิ่นฉุนแสบจมูก ทำให้หายใจลำบาก หลอมเหลวที่ -10 องศาเซลเซียส ละลายในน้ำอัตราส่วน 36 ต่อ 1 โดยปริมาตร ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เมื่อละลายน้ำจะอยู่ในสมดุลมวลสารกับกรดซัลฟูรัส (H_2SO_3) ไฮโดรเจนซัลไฟด์หรือไบซัลไฟด์ (HSO_3^- , SO_3^{2-}) และไพโรซัลไฟด์ ($\text{S}_2\text{O}_5^{2-}$) โดยมีสมดุลของปฏิกิริยาเคมี ดังนี้



ไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเสถียรในสภาพสารละลายเจือจาง หากความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้น จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปไพโรซัลไฟด์



โดยสมดุลของปฏิกิริยานี้ขึ้นกับค่าความเป็นกรดต่างของสารละลาย ซึ่งจะมีผลต่อการแตกตัวของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แสดงดังภาพที่ 2-1 พบว่า ที่ค่าความเป็นกรดต่าง 2-3 ซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะอยู่ในรูปกรดซัลฟูรัสร้อยละ 6-35 อยู่ในรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์ร้อยละ 94-60 และอยู่ในรูปของไบซัลไฟด์เพียงเล็กน้อย (Russel & Gould, 2003)

สำหรับสารกลุ่มซัลไฟด์รูปแบบที่นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารมากที่สุด คือ โซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ มีสูตรโมเลกุล $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ มีน้ำหนักโมเลกุล 190.10 ความหนาแน่น 11,000 - 12,000 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงกว่า 170 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นผลึกร่วนหรือผงผลึกหรือเม็ดเล็ก ๆ สีขาวหรือไม่มีสี มีกลิ่นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ออกซิไดซ์ในอากาศที่ชื้นน้อยได้ซัลเฟต ละลายได้ในน้ำ แต่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ สูตรโครงสร้างของโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ แสดงในภาพที่ 2-2

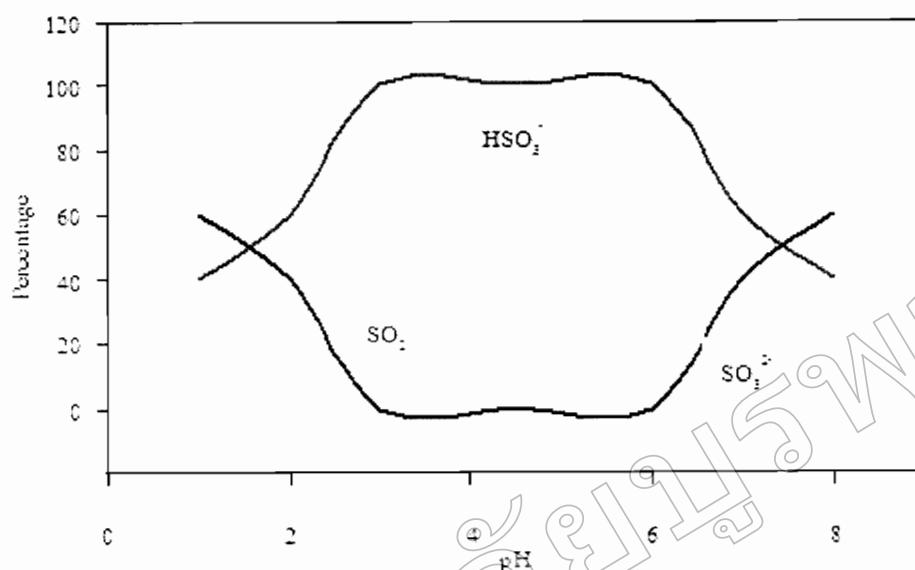
ตารางที่ 2-4 สูตรทางเคมี ผลการเกิดซัลเฟอร์ไดออกไซด์และการละลายน้ำของสารกลุ่มซัลไฟต์ (ไพบูลย์ ธรรมवासิก, 2529)

สารเคมี	สูตรเคมี	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ร้อยละ) การละลายน้ำที่ 20°C		
		ผลทางทฤษฎี	ค่าขั้นต่ำ	(g / 100 ml)
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	SO ₂	100	95	11
โซเดียมซัลไฟต์ (แห้ง)	Na ₂ SO ₃	50.82	48	28
โซเดียมซัลไฟต์ (มีน้ำ)	Na ₂ SO ₃ ·H ₂ O	25.41	24	24
โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟต์	NaHSO ₃	61.56	60	300
โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์	Na ₂ S ₂ O ₅	67.39	64	82
โพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟต์	K ₂ S ₂ O ₅	57.60	-	54
แคลเซียมไฮโดรเจนซัลไฟต์	Ca(HSO ₃) ₂	-	-	25

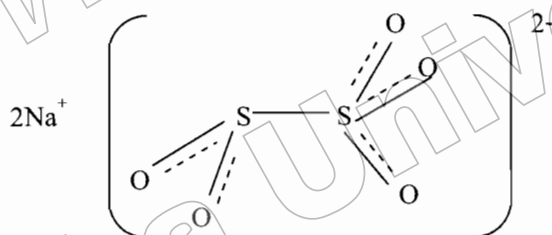
ตารางที่ 2-5 ปริมาณสารซัลเฟอร์ไดออกไซด์สูงสุดที่อนุญาตให้ใช้ได้ในการผลิตอาหาร (หนังสือแนบท้ายประกาศสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา เรื่องข้อกำหนดการใช้วัตถุเจือปนอาหาร, 2547)

ชนิดของอาหาร	ปริมาณสูงสุดที่ให้ได้ (มิลลิกรัมต่อ 1 กิโลกรัม)
เครื่องดื่ม	70
กลูโคสไซรัป	40
กลูโคสไซรัป สำหรับการผลิตลูกกวาด	400
กลูโคสไซรัปชนิดแห้ง	40
กลูโคสไซรัปชนิดแห้ง สำหรับการผลิตลูกกวาด	150
พืชผักผลไม้ที่รับประทานโดยไม่ผ่านความร้อน เช่น ขิง	ห้ามใช้
หน่อไม้ ถั่วงอก เป็นต้น	
พืชผักผลไม้ชนิดแห้งและแช่เย็น	1,500

* เว้นแต่ได้ระบุปริมาณเฉพาะไว้แล้ว



ภาพที่ 2-1 ผลของค่าความเป็นกรดด่างต่อสมดุลของสารกลุ่มซัลไฟต์ (Russel & Gould, 2003)



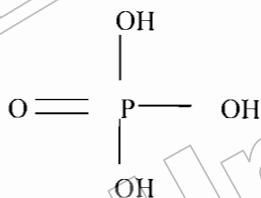
ภาพที่ 2-2 สูตรโครงสร้างของโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (ศิวาพร ศิวเวช, 2546)

สารกลุ่มซัลไฟต์เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวอยู่ใน 2 รูปแบบ คือ ซัลไฟต์ที่รวมกับองค์ประกอบของอาหาร (Bound Sulfite) และซัลไฟต์อิสระ (Free Sulfite) ได้แก่ กรดซัลฟูรัสไบซัลไฟต์ไอออน และซัลไฟต์ไอออน (SO_3^{2-}) ซัลไฟต์อิสระนี้จะมีผลต่อการป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ ปกติสารซัลไฟต์เมื่อเติมลงในอาหารจะถูกออกซิไดซ์เป็นซัลเฟตซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย แต่ถ้าเติมปริมาณมากจะเหลือตกค้างอยู่ในรูปของซัลไฟต์อิสระจำนวนมาก

2. กรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid)

กรดฟอสฟอริกมีสูตรโมเลกุล H_3PO_4 น้ำหนักโมเลกุล 98.0 ความหนาแน่น 1.685 กรัมต่อมิลลิลิตรและมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 42.35 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นของเหลวใส โดยมีความเข้มข้นร้อยละ 75-85 ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ละลายได้ในน้ำและแอลกอฮอล์ ผลิตได้โดย

การทำปฏิกิริยาระหว่างหินฟอสเฟตกับกรดซัลฟูริกหรือกรดไฮโดรคลอริก สูตรโครงสร้างของ กรดฟอสฟอริกแสดงในภาพที่ 2-3 กรดฟอสฟอริกเป็นกรดแก่และเป็นกรดอนินทรีย์เพียงชนิดเดียวที่อนุญาตให้ในผลิตภัณฑ์อาหาร โดยใช้เป็นวัตถุกันหืน วัตถุกันเสียและปรุงแต่งกลิ่นรส โดยใช้กรดฟอสฟอริกในผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ เช่น แยม เบียร์ ไขมันและน้ำมันและซ็อกโกเลต เป็นต้น จากข้อกำหนดของ FAO/WHO ด้านวัตถุเจือปนอาหารได้กำหนดค่าความปลอดภัยของ กรดฟอสฟอริกไว้ที่ระดับที่เข้าสู่ร่างกายไม่เกิน 70 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัมต่อวัน และสามารถใช้เป็นวัตถุกันหืนหรือเสริมฤทธิ์วัตถุกันหืนในปริมาณ 100-200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (สุกิจ นวนวงศ์, 2548) นอกจากนี้ ประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 84 พ.ศ. 2527 เรื่องวัตถุเจือปนอาหาร ลงวันที่ 3 พฤศจิกายน 2547 กำหนดปริมาณการใช้กรดฟอสฟอริกสำหรับเป็นวัตถุกันหืนในผลิตภัณฑ์ไขมันและน้ำมันทุกชนิดรวมทั้งผลิตภัณฑ์ที่มีไขมันและน้ำมันเป็นส่วนประกอบ ในปริมาณ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

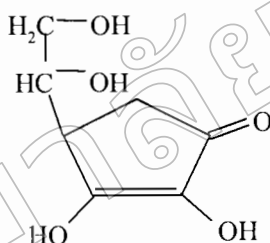


ภาพที่ 2-3 สูตรโครงสร้างของกรดฟอสฟอริก (ศิวาพร ศิวเวช, 2546)

3. กรดแอสคอร์บิก (Ascorbic Acid)

กรดแอสคอร์บิกหรือวิตามินซีมีสูตรโมเลกุล $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ มีน้ำหนักโมเลกุล 176.12 ความหนาแน่น 1.65 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 190-192 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงสีขาวหรือสีเหลืองอ่อน ละลายน้ำได้ดี แต่ไม่ละลายในไขมันและตัวทำละลายอินทรีย์ แตกตัวที่อุณหภูมิต่ำ ในสภาวะที่มีอากาศและแสงจะถูกออกซิไดส์อย่างรวดเร็ว และปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเร็วถ้ามีด่าง เหล็ก และทองแดงเป็นตัวเร่ง แต่เมื่ออยู่ในรูปเกลือโซเดียมจะมีความคงตัวมากกว่า (ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาลิก, 2532; ศิวาพร ศิวเวช, 2546; สุกิจ นวนวงศ์, 2548) สูตรโครงสร้างของกรดแอสคอร์บิกแสดงในภาพที่ 2-4 กรดแอสคอร์บิกจัดเป็นวัตถุเจือปนอาหารกลุ่มวัตถุกันเสีย เนื่องจาก กรดแอสคอร์บิกจะลดความเป็นกรดค้างของอาหารลง ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้ และกลุ่มวัตถุกันหืน เนื่องจากกรดแอสคอร์บิกสามารถถูกออกซิไดส์ได้ง่าย

จึงสามารถช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและยับยั้งปฏิกิริยาสีน้ำตาลในอาหารได้ นอกจากนี้ กรดแอสคอร์บิกยังเป็นสารจับโลหะ (Chelating Agents) ที่มีประสิทธิภาพดี ซึ่งเมื่อใช้ร่วมกับวัตถุกันหืน เช่น บีเอชเอ (BHA) และบีเอชที (BHT) จะช่วยเสริมฤทธิ์ของวัตถุกันหืน ทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่จะเกิดในอาหารเกิดช้าลงได้ (ศิวาพร ศิวเวช, 2546) โดยมีการใช้กรดแอสคอร์บิกเป็นสารกันหืนในผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ เช่น แยม เยลลี่ อาหารเสริมสำหรับเด็ก น้ำผลไม้ กุ้งแช่แข็งและเนยเทียม เป็นต้น (เทวี โพธิ์ผล, 2536) กรดแอสคอร์บิกจัดเป็น GRAS (Generally Recognize As Safe) จึงไม่จำกัดปริมาณที่ใช้ (Hudson, 1990)



ภาพที่ 2-4 สูตร โครงสร้างของกรดแอสคอร์บิก (ศิวาพร ศิวเวช, 2546)

การเตรียมวัตถุดิบขึ้นต้นก่อนการดองน้ำออกแบบอสมอล

1. การลวกหรือการต้ม

การลวกหรือการต้มเป็นขั้นตอนการให้ความร้อนแก่ชิ้นผลไม้ เนื่องจากผลไม้มีเอนไซม์เพอร์ออกซิเดส (Peroxidase) และพอลิฟีนอลออกซิเดส (Polyphenol Oxidase) ซึ่งจะทำให้เกิดสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ จึงจำเป็นต้องใช้ความร้อนเพื่อทำลายเอนไซม์ อีกทั้งการลวกจะทำให้โครงสร้างของผลไม้อ่อนตัวลง เนื้อเยื่อบางส่วนเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพไป ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสารจากชิ้นผลไม้เกิดได้เร็วขึ้น (จินตนา ศรีสุข, 2546; Moreno, Chiralt, Escriche, & Serra, 2000; Nieto, Castro, & Alzamora, 2001) ซึ่งระยะเวลาในการลวกผลไม้แต่ละชนิดจะแตกต่างกันไปตามความแข็งแรงของเนื้อเยื่อผลไม้ นอกจากนี้ ผลไม้บางชนิดอาจต้องลวกในสารละลายต่างกันเพื่อรักษาสีและเนื้อสัมผัสของผลไม้ให้คงอยู่ตามต้องการ หลังจากการลวกแล้วต้องทำให้เย็นลงทันที เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อนที่คงเหลือภายในผลไม้ (จินตนา ศรีสุข, 2546)

การลวกทำได้โดยการนำชิ้นผลไม้ไปให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดและให้อยู่ที่อุณหภูมินี้ระยะเวลาหนึ่งหลังจากนั้น ทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว ปัจจุบันที่มี

อิทธิพลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการลวก คือ ชนิดของผักและผลไม้ ขนาดของชิ้น อุณหภูมิและวิธีการให้ความร้อน (วิไล รังสาทอง, 2546)

1.1 ทฤษฎีและวัตถุประสงค์ของการลวกหรือการต้ม

การลวกเป็นการถ่ายเทความร้อน โดยการพาและการแผ่รังสีจากน้ำร้อนหรือน้ำไปยังวัตถุดิบ ทั้งนี้การลวกจะช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ (Enzyme Inactivation) ในวัตถุดิบ ก่อนนำไปแปรรูปเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางด้านประสาทสัมผัสและคุณภาพทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษา (วิไล รังสาทอง, 2546; Moreno et al., 2000) ทั้งนี้ หากอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ลวกวัตถุดิบไม่เพียงพอต่อการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ อาจทำให้เกิดผลเสียต่อผลิตภัณฑ์มากกว่าวัตถุดิบที่ไม่ได้ผ่านการลวก เพราะความร้อนที่ใช้อาจทำลายเนื้อเยื่อแต่ไม่ได้ทำลายเอนไซม์ ทำให้เอนไซม์รวมตัวกับสับสเตรต (Substrate) โดยความร้อนส่งผลให้เอนไซม์บางชนิดถูกทำลาย แต่เอนไซม์บางชนิดอาจถูกกระตุ้นให้มีกิจกรรมมากขึ้น ซึ่งจะไปเร่งปฏิกิริยาการเสื่อมสลายให้เกิดเร็วขึ้น โดยพิจารณาความคงทนต่อความร้อนของเอนไซม์ได้จากค่า D-Value และ Z-Value เอนไซม์ที่สำคัญที่มีผลกระทบต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการของผักและผลไม้ ได้แก่ เอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส โลพอกซิจีเนส (Lipoxygenase) คลอโรฟิลเลส (Chlorophyllase) และพอลิกลาแล็กโทโรนาส (Polygalactoronasa) และมีเอนไซม์อีก 2 ชนิด ที่พบในผักหลายชนิดที่ทนต่อความร้อนได้ดี คือ เอนไซม์แคแทเลส (Catalase) และเพอร์ออกซิเดส เอนไซม์เหล่านี้ใช้เป็นตัวชี้บ่งประสิทธิภาพของการลวก โดยเฉพาะเอนไซม์เพอร์ออกซิเดสมีความคงทนต่อความร้อนมากกว่าเอนไซม์แคแทเลส หากตรวจวัดกิจกรรมของเอนไซม์ในผักที่ผ่านการลวกแล้วไม่พบกิจกรรมของเอนไซม์เพอร์ออกซิเดส แสดงว่าเอนไซม์อื่นถูกทำลายหมดแล้ว (วิไล รังสาทอง, 2546) อีกทั้งการลวกยังช่วยทำลายและลดจำนวนจุลินทรีย์ปนเปื้อนอยู่บนผิวนอกของวัตถุดิบ ช่วยให้เก็บรักษาวัตถุดิบได้นานขึ้น ก่อนนำไปใช้แปรรูปในขั้นตอนต่อไป ซึ่งวัตถุดิบที่ไม่ได้ผ่านการลวกจะพบจำนวนจุลินทรีย์เพิ่มมากขึ้นระหว่างการนำอาหารแช่เยือกแข็งมาหั่นและลวกก่อนนำไปหุงต้ม เช่นเดียวกับการนำอาหารแห้งที่ไม่ได้ผ่านการลวกมาคั่วตัว (Rehydration) (จินตนา ศรีฟูย, 2546; วิไล รังสาทอง, 2546; Moreno et al., 2000)

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลวกหรือการต้ม

Beveridge and Weintraub (1995) ศึกษาผลของการลวกและการแช่เย็นแอปเปิลในสารละลายซัลไฟต์ก่อนการทำแห้ง ซึ่งการลวกทำได้โดยการลวกด้วยไอน้ำนาน 1 และ 3 นาที และการแช่สารละลายซัลไฟต์ความเข้มข้น 75 ppm นาน 1 นาที จากผลการทดลองพบว่า หลังการออสโมซิสเมื่อตัวอย่างแอปเปิลที่ผ่านการลวก การแช่ซัลไฟต์และแอปเปิลสดมีค่าปริมาณน้ำอิสระในช่วง 0.7-0.77 ซึ่แอปเปิลที่ผ่านการลวกจะมีค่าแรงตึงผิวไม่แตกต่างจากซึ่แอปเปิลที่

ผ่านการแช่ซัลไฟต์และแอปเปิลสด แต่เมื่อตัวอย่างแอปเปิลที่ผ่านการลวก การแช่ซัลไฟต์และแอปเปิลสดมีค่าปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.57 ซึ้นแอปเปิลที่ผ่านการลวกจะมีค่าแรงตักขาดเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงกว่าซึ้นแอปเปิลที่ผ่านการแช่ซัลไฟต์และแอปเปิลสด เมื่อพิจารณาการเกิดสีน้ำตาลของซึ้นแอปเปิลจากค่าความสว่าง พบว่า ซึ้นแอปเปิลที่ผ่านการลวกและมีค่าปริมาณน้ำอิสระเท่ากับ 0.7 เป็นตัวอย่างที่มีค่าความสว่างต่ำที่สุด

Vazquez-Gonzalez, Argaiz, and Lopez-Malo (1999) ศึกษาผลของการลวกก่อนการคั้่งนำ้ออกแบบออสโมซิสของมะละกอก่อนการแช่เยือกแข็ง โดยใช้สารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ นาน 30 นาที ในสภาวะบรรยากาศปกติ (ODA) และภายใต้ความดันสูญญากาศที่ 50 มิลลิบาร์ (ODV) โดยศึกษาการลวก 2 วิธี คือ การลวกทางการคั้่งในน้ำอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 1 นาที เปรียบเทียบกับการลวกที่อุณหภูมิคั้่งในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.4 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที จากผลการทดลอง พบว่า การลวกที่อุณหภูมิคั้่งทำให้มะละกามีปริมาณความซึ้นและลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีกว่าการลวกทางการคั้่ง เนื่องจาก การลวกที่อุณหภูมิคั้่งจะช่วยเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์เพคติน-เมทิลเอสเทอเรส (Pectinmethylesterase) ส่งเสริมให้เพคตินเกิดการสร้างโครงสร้างเป็นเพคเตท (Pectate) เมื่อนำมะละกอล้างแช่แข็งที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียสและนำมาละลายที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พบว่า มะละกอล้างแช่แข็งที่อุณหภูมิคั้่งร่วมกับ ODA และ OAV มีค่าการซึ้นไหลของน้ำ (Drip Loss) น้อยกว่าร้อยละ 1 ขณะที่มะละกอล้างแช่แข็งที่อุณหภูมิคั้่งร่วมกับ ODA มีค่าร้อยละ 1-2 และเมื่อร่วมกับ OAV มีค่าร้อยละ 2-6 สำหรับลักษณะเนื้อสัมผัสของมะละกอล้างแช่แข็งที่อุณหภูมิคั้่งร่วมกับ ODA และทำการละลายที่ 5 องศาเซลเซียสมีค่าดีที่สุด

Escobar, Galindo, Wadso, Najera, and Sjolholm (2007) ศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยวและการลวกก่อนการคั้่งนำ้ออกแบบออสโมซิสในแครอท โดยใช้สารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 50 กำหนดการกวนที่ความเร็วรอบ 260 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส การลวกทำได้โดย ลวกแครอทในน้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสแปรระยะเวลาการลวกเป็น 0 10 20 และ 30 วินาที จากผลการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและน้ำตาลซูโครสของแครอทมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการลวกนานขึ้น โดยที่การลวกนาน 30 วินาทีมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและน้ำตาลสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการลวก ร้อยละ 90 และ 50 ตามลำดับ เนื่องจาก การเสียสภาพธรรมชาติ (การตาย) ของเซลล์เนื้อเยื่อแครอท อีกทั้ง การสูญเสียน้ำตาลกลูโคสและอะราบินโนสซึ่งเป็นองค์ประกอบของเพคตินที่ผนังเซลล์แครอท ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผนังเซลล์และสูญเสียความสามารถในการควบคุมขนาดช่องเปิดของเซลล์

Fernandez, Norena, Silveira, and Brandelli (2007) ศึกษาผลของการลวกและความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกที่ใช้ในกระบวนการดองน้ำออกแบบออสโมซิสในแตงไทย (Muskmelon (*Cucumis melo*) ก่อนการอบแห้งด้วยลมร้อนต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยศึกษาความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 40 50 และ 60 องศาบริกซ์ จากผลการทดลองพบว่า การลวกไม่ส่งผลต่อการลดการเกิดสีน้ำตาลแต่ทำให้ปริมาณวิตามินซีลดลง โดยผลิตภัณฑ์จะเกิดสีน้ำตาลเพิ่มขึ้นเมื่อมีอายุการเก็บรักษา 4 สัปดาห์ที่อุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียส และปริมาณวิตามินซีลดลงประมาณร้อยละ 60 เมื่อผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บ 2 สัปดาห์ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส

Kowalska, Lenart, and Leszczyk (2008) ศึกษาการเตรียมขั้นต้นด้วยการลวกและการแช่แข็งก่อนการดองน้ำออกแบบออสโมซิสในฟักทอง ซึ่งการลวกทำได้โดย ลวกชั้นฟักทองในน้ำอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสนาน 1 นาทีแล้วแช่ในน้ำอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสนาน 5 วินาที สำหรับการแช่แข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 16 ชั่วโมง นำฟักทองหลังการลวกและการแช่แข็งมาแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส กลูโคสและสตาร์ชไซรัป ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 180 นาที จากผลการทดลองพบว่า ฟักทองที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นทั้งการลวกและการแช่แข็งก่อนการดองน้ำออกแบบออสโมซิสที่ใช้สารละลายออสโมติกชนิดเดียวกันมีค่าปริมาณน้ำที่สูญเสียและปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น ซึ่งการเตรียมขั้นต้นโดยการลวกและการแช่แข็งจะทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและของแข็งระหว่างการดองน้ำออกแบบออสโมซิสไม่แตกต่างกัน และพบว่าตัวอย่างที่ผ่านการลวกจะทำให้ฟักทองที่ออสโมซิสโดยการแช่ในสารละลายสตาร์ชไซรัปมีค่าปริมาณน้ำที่สูญเสียสูงที่สุดที่เวลา 180 นาที

2. การใช้สถานะสุญญากาศ

การประยุกต์ในสถานะสุญญากาศในกระบวนการดองน้ำออกแบบออสโมซิส แบ่งเป็น 2 แบบ คือ การดองน้ำออกแบบออสโมซิสในสถานะความดันสุญญากาศ (Vacuum Osmotic Dehydration; VOD) และ การใช้สถานะความดันสุญญากาศแบบเป็นจังหวะ (Pulse Vacuum Osmotic Dehydration; PVOD) ทำได้โดยการแช่ชิ้นอาหารในสารละลายออสโมติกแล้วให้สถานะสุญญากาศในภาชนะปิดสนิท ซึ่งเรียกสถานะนี้ว่า Vacuum Impregnation; VI ซึ่งเป็นกระบวนการที่ประยุกต์ใช้แรงขับเคลื่อนในการแพร่กระจายน้ำ (Hydrodynamic Mechanism; HDM) จากเนื้อเยื่อของชิ้นอาหารไปสู่ที่ที่มีแรงดันออสโมติกที่สูงกว่าผ่านเยื่อเลือกผ่านด้วยการใช้สถานะสุญญากาศ กระบวนการนี้ทำได้โดยการลดความดันอากาศลง จนทำให้เกิดสถานะความดันสุญญากาศในภาชนะปิดสนิทเมื่อเริ่มต้นกระบวนการเป็นระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นจะปล่อยให้กลับคืนความดันบรรยากาศ ในขณะที่ให้ความดันสุญญากาศ ก๊าซที่อยู่ในโครงสร้างของชิ้นอาหารจะมีปริมาณ

ของลดน้อยลง เนื่องจาก ก๊าซถูกบีบอัดจากความดันสุญญากาศ ทำให้ก๊าซเกิดการแผ่ขยายและเคลื่อนที่ออกนอกเนื้อเยื่ออาหาร หลังจากนั้น เมื่อความดันกลับสู่ความดันบรรยากาศ สารละลายออสโมติกจะแพร่กระจายเข้าภายในโครงสร้างของชิ้นอาหาร เนื่องจาก ก๊าซที่เหลือจากการถูกบีบอัดจะเป็นตัวนำสารละลายเข้าสู่เซลล์ทางช่องว่างระหว่างเซลล์ ทำให้การเคลื่อนย้ายมวลสารต่อพื้นที่เพิ่มมากขึ้น เป็นเหตุให้ปริมาณของตัวถูกละลายที่เข้าสู่ชิ้นอาหารมีปริมาณมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การแช่ชิ้นอาหารแบบดั้งเดิม (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย [วว.] ฝ่ายเทคโนโลยีอาหาร, 2550; Rastogi, Raghavarao, Niranjana, & Knorr, 2002; Welti-Chanes, Vlez-Ruiz, & Barbosa-Canovas, 2002)

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้สภาวะสุญญากาศ

Fito, Barat, and Chiralt (1999) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเนื้อเยื่อแอปเปิลขณะคั้นน้ำออกด้วยแบบออสโมซิส พบว่า เนื้อเยื่อและปริมาตรของแอปเปิลมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยในช่วงแรกของกระบวนการ แรงขับที่เกิดขึ้นยังคงมีค่าสูง จึงมีการไหลออกของน้ำเป็นจำนวนมาก หลังจากนั้น พบว่าอากาศที่แทรกตามช่องว่างของเนื้อเยื่อจะน้อยลง ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เกิดการหดตัวและมีปริมาตรลดลง

Mata, Perez, Garcia, and Tovar (1999) ศึกษาการคั้นน้ำออกแบบออสโมซิสในมะละกอ โดยใช้สารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 65 องศาบริกซ์ ปรับพีเอชให้เท่ากับ 2 ด้วยกรดฟอสฟอริก แช่ชิ้นมะละกอเป็นเวลา 0 20 และ 30 นาที ที่อุณหภูมิ 30 และ 45 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นกับคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสของมะละกอที่ผ่านการคั้นน้ำออกแบบออสโมซิสภายใต้ความดันบรรยากาศปกติกับการใช้สภาวะสุญญากาศที่ความดัน 211 มิลลิบาร์ พบว่า สภาวะการคั้นน้ำออกแบบออสโมซิสที่มีการใช้สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส สามารถลดปริมาณความชื้นของชิ้นมะละกอเหลือ 5 กรัม น้ำต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ในขณะที่การใช้สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ทำให้ชิ้นมะละกอมีปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นต่ำที่สุด และได้รับคะแนนความชอบจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะเนื้อสัมผัสและกลิ่นรสสูงที่สุด

Wang, Chang, and Chen (1999) ศึกษาการคั้นน้ำออกแบบออสโมซิสในมะละกอและผักขึ้นฉ่าย (Celery) โดยแปรสภาวะเป็น 3 สภาวะ คือ การออสโมซิสในสภาวะความดันปกติ (OD) การใช้สภาวะความดันสุญญากาศ (VOD) และการใช้สภาวะความดันสุญญากาศแบบเป็นจังหวะ (PVOD) โดยใช้สารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 25 40 และ 55 องศาบริกซ์ ที่อุณหภูมิ 25 40 และ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ระดับความดันสุญญากาศที่ใช้สำหรับสภาวะ VOD และ PVOD เท่ากับ 0 253 และ 506 มิลลิเมตรปรอท โดย PVOD จะลดความดันเป็นจังหวะ

ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ครั้งต่อนาที จากผลการทดลอง พบว่า ทั้งสภาวะ VOD และ PVOD สามารถเพิ่มอัตราการสูญเสียน้ำและค่าปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และสภาวะ PVOD จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับวัตถุดิบเริ่มต้น ดังนั้น สภาวะ PVOD จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีกว่าและใช้พลังงานน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ VOD

Chafer, Gonzalez-Martinez, Fernandez, Perez, and Chiralt (2003) ศึกษาผลของการลวกและการใช้สภาวะสูญญากาศแบบเป็นจังหวะ (PVOD) ก่อนการการคึ่งน้ำออกแบบออสโมซิสในแพร์ (Pear) โดยใช้สารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 65 องศาบริกซ์ ซึ่งระดับความดันสูญญากาศที่ใช้สำหรับสภาวะ PVOD เท่ากับ 50 มิลลิบาร์นาน 5 นาที จากผลการทดลองพบว่า การเตรียมชิ้นต้นด้วยการลวกและ PVOD ช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลสารของชิ้นแพร์ แต่ทำให้ชิ้นแพร์มีปริมาตรลดต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับสาลีที่ไม่ผ่านการเตรียมชิ้นต้น และพบว่า PVOD ทำให้ค่าเฉลี่ยและค่าความเข้มสีของแพร์มีค่าที่ดีกว่าชิ้นแพร์ที่ผ่านการลวกและชิ้นแพร์ที่ไม่ผ่านการเตรียมชิ้นต้น แต่ชิ้นแพร์มีความทึบแสงมากขึ้นและมีความคล้ำ เนื่องจาก การสูญเสียก๊าซในโครงสร้างของชิ้นแพร์

3. การใช้สนามไฟฟ้าแรงสูงแบบเป็นจังหวะ (Pulse Electric Field; PEF)

3.1 หลักการทำงานของเครื่อง PEF

การใช้สนามไฟฟ้าแรงสูงแบบเป็นจังหวะ เป็นเทคนิคการให้กระแสไฟฟ้าที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงลักษณะเป็นจังหวะ (Pulse) กับอาหารโดยผ่านขั้วอิเล็กโทรดในช่วงเวลาสั้นมาก (น้อยกว่า 1 วินาที) จัดเป็นวิธีการแปรรูปอาหารแบบไม่ใช้ความร้อน (Non-Thermal Processing) ซึ่งสามารถดำเนินการได้ที่สภาวะอุณหภูมิปกติ (กสิณ คงเกียรติขจร และธีรพัฒน์ จัดหงษา, 2549; สมเกียรติ สุภเดช และมนัส สังวรศิลป์, 2526; Barbosa-canovas, Pothakamury, & Palou, 1998; Barbosa-canovas & Zhang, 2001)

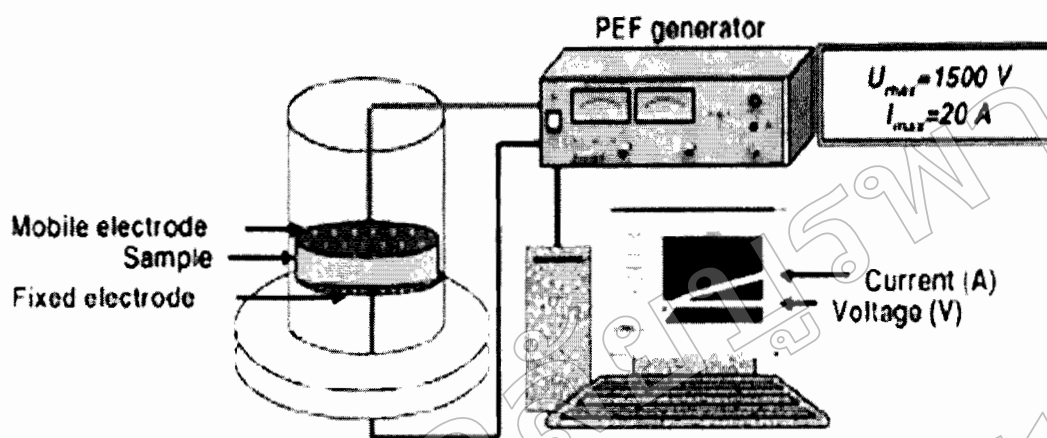
3.2 ส่วนประกอบของเครื่อง PEF

เครื่อง PEF มีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ ชุด High Voltage ชุด Pulse Generator และชุด Chamber แสดงดังภาพที่ 2-5 (กสิณ คงเกียรติขจร และธีรพัฒน์ จัดหงษา, 2549)

3.2.1 ชุด High Voltage หรือชุด Power Supply คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานสูง ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าในรูปแบบของไฟฟ้ากระแสตรงหรือไฟฟ้ากระแสสลับ ให้มีแรงดันประมาณ 30-40 kV เพื่อนำมาเป็นแหล่งจ่ายให้กับชุด Pulse Generator

3.2.2 ชุด Pulse Generator คือ ชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่สะสมพลังงานไฟฟ้าจากชุด High Voltage และทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรงหรือไฟฟ้ากระแสสลับให้มีลักษณะเป็นจังหวะ โดยทำงานในลักษณะของสวิตช์ทำหน้าที่เปิด-ปิดกระแสไฟฟ้า

3.2.3 ชุด Chamber คือ อุปกรณ์ที่มีช่องสำหรับใส่อาหารซึ่งอยู่ระหว่างอิเล็กโทรด 2 ขั้ว คือ ขั้วบวกและขั้วลบ โดยชุด Chamber นี้มีการออกแบบให้ทำงานแบบกะและแบบต่อเนื่อง



ภาพที่ 2-5 เครื่องให้สนามไฟฟ้าแรงสูงแบบเป็นจังหวะ (Amami, Fersi, Khezami, Vorobiev, & Kechaou, 2007)

3.3 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ PEF

3.3.1 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric Field Strength : E) คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรด จำแนกออกได้เป็น 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ $E \leq 0.1-0.3 \text{ kV/cm}$ ระดับปานกลาง $E = 0.3-1.5 \text{ kV/cm}$ และระดับสูง $E > 1.5 \text{ kV/cm}$ (Bazhal, Lebovka, & Vorobiev, 2003)

3.3.2 จำนวนพัลส์ (Number of Pulse : n) คือ จำนวนพัลส์ที่ให้ต่อกระบวนการ

3.3.3 ระยะเวลาของพัลส์ (Pulse Duration) คือ ระยะเวลาของพัลส์หรือความกว้างของพัลส์ แสดงลักษณะของพัลส์ดังภาพที่ 2-6 ซึ่งช่วงเวลาที่ปรากฏรูปพัลส์ (t_1) และช่วงที่ไม่ปรากฏรูปพัลส์ (t_2) จะมีช่วงระยะเวลาที่เท่ากัน

3.3.4 ค่าพลังงานจำเพาะที่ให้แก่ระบบ (Specific Energy Input : Q) โดยค่าพลังงานจำเพาะที่ให้แก่ระบบสามารถคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$Q = n \left[\frac{E_{\max}^2 K t}{10p} \right] \text{ (J/kg)}$$

เมื่อ $E_{\max}$ คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด (V/cm)

K คือ ค่าความสามารถในการนำไฟฟ้า (S/m)

p คือ ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ (kg/m²)

ก่อนการดึงน้ำออกแบบออสโมซิส เป็นต้น และรูปแบบที่สอง คือ Irreversible Electroporation เป็นการแตกของเยื่อหุ้มเซลล์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงมากกว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าวิกฤตอย่างมาก ($E \gg E_c$) จนทำให้เกิดการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์อย่างถาวรเกิดเป็นรูขนาดใหญ่ แสดงดังภาพที่ 2-7 (4) ซึ่งสามารถนำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้ในการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์เป็นการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์เพื่อการถนอมอาหารได้ (Barbosa-canovas et al., 1998; Angersbach, Heinz, & Knorr, 1999; Barbosa-canovas & Zhang, 2001; U.S. Food & Drug Administration, 2000; Von, Ingenieur, & Topft, 2006)

ลักษณะโครงสร้างเยื่อหุ้มเซลล์ของสิ่งมีชีวิตประกอบด้วย ชั้นของไขมันสองชั้น (Lipid Bilayer) แบ่งเป็นส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Region) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Region) โดยมีโปรตีนแทรกตัวอยู่ระหว่างชั้นของไขมัน แสดงดังภาพที่ 2-8 เยื่อหุ้มเซลล์ของสิ่งมีชีวิตที่มีส่วนประกอบของชั้นไขมันและโปรตีนที่สมบูรณ์จะมีความสามารถในการควบคุมการถ่ายเทมวลสารระหว่างเซลล์ เรียกสมบัตินี้ว่าการทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์ (สิริภัทร์ พราหมณีย์, 2548)

เมื่อเยื่อหุ้มเซลล์ได้รับการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าจาก PEF ในระดับที่ $E \geq E_c$ ทำให้เกิดการแยกตัวของโมเลกุลของชั้นไขมันออกเป็นรูปแบบ Reversible electroporation ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มลักษณะการเป็นเยื่อเลือกผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์ได้ดีขึ้น ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ยอมให้สารต่าง ๆ ผ่านเข้าออกเซลล์ได้ดีขึ้น สำหรับเนื้อเยื่อพืช การกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าที่ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วง 1.5-3.0 kV/cm และจำนวนพัลส์ 15-30 พัลส์ เป็นระดับที่เหมาะสมที่ช่วยเพิ่มลักษณะการเป็นเยื่อเลือกผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์ได้ดีที่สุด (Ade-Omowaye, Angersbach, Taiwo et al., 2001) แต่เมื่อเซลล์ได้รับการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าที่ระดับ $E \gg E_c$ จะทำให้การเรียงตัวของโมเลกุลไขมันที่เยื่อหุ้มเซลล์เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยจะเกิดการเรียงตัวให้ส่วนที่ชอบน้ำของโมเลกุลไขมันหันเข้าหากัน ทำให้เกิด Irreversible Electroporation ซึ่งเป็นผลจากการที่เยื่อหุ้มเซลล์ถูกทำลาย แสดงดังภาพที่ 2-9

3.5 ดัชนีการแตกของเยื่อหุ้มเซลล์ (Cell Disintegration Index: Zp)

ดัชนีการแตกของเยื่อหุ้มเซลล์ เป็นค่าที่ใช้ประเมินการแตกของเยื่อหุ้มเซลล์โดยเปรียบเทียบกับเยื่อหุ้มเซลล์ที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง (เริ่มต้น) ซึ่งอาศัยหลักการการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของเซลล์ทางไฟฟ้า

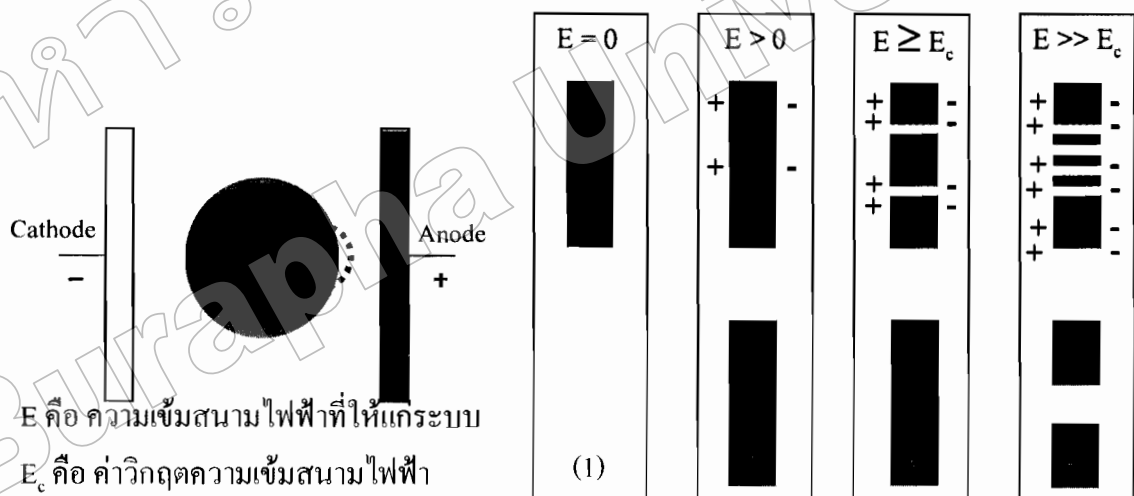
วิธีการหาค่า Zp ทำได้โดย ดัดขึ้นตัวอย่างให้มีขนาดเท่ากับขนาดของขั้วอิเล็กโทรดและมีความหนาพอดีกับระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดของเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า จากนั้นกระตุ้นขึ้นตัวอย่างด้วยไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ในช่วง 1 kHz ถึง 100 MHz วัดค่าการ

นำไฟฟ้าของตัวอย่างเริ่มต้นและตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการที่มีผลต่อการแตกของเยื่อหุ้มเซลล์ เช่น กระบวนการ PEF การใช้ความร้อน การแช่เยือกแข็ง การใช้แรงกลและการใช้เอนไซม์ เป็นต้น สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและระดับความถี่ของกระแสไฟฟ้าเพื่อหาระดับความถี่ต่ำสุดและสูงสุดที่เหมาะสมกับตัวอย่างที่ศึกษา โดยเรียกช่วงความถี่ที่ได้นี้ว่า β -Dispersion ซึ่งค่า Z_p คำนวณได้จากสูตร ดังนี้

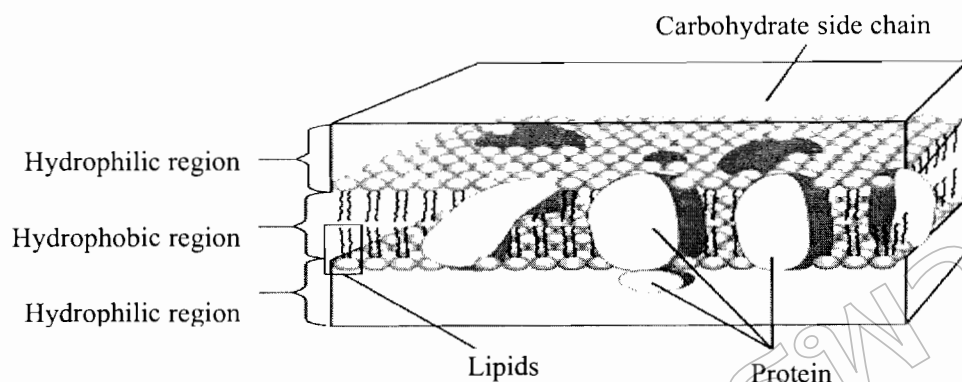
$$Z_p = \frac{\left(\frac{\sigma_h^i}{\sigma_h^t} \right) \cdot \sigma_l^t - \sigma_l^i}{\sigma_h^i - \sigma_l^i}$$

เมื่อ σ_l^i และ σ_l^t คือ ค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างเริ่มต้นและตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมขึ้นต้นในช่วงความถี่ต่ำ ตามลำดับ และ σ_h^i และ σ_h^t คือ ค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างเริ่มต้นและตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมขึ้นต้นในช่วงความถี่สูง ตามลำดับ โดยที่ $0 \leq Z_p \leq 1$ (0 หมายถึง เยื่อหุ้มเซลล์ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงและ 1 หมายถึง เยื่อหุ้มเซลล์เกิดการแตกอย่างสมบูรณ์)

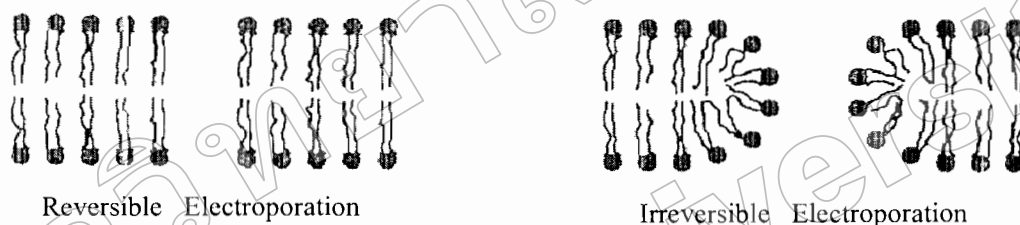
(Angersbach et al., 1999; Rastogi et al., 2000; Ade-Omowaye, Angersbach, Eshtiaghi et al., 2001)



ภาพที่ 2-7 ผลกระทบของสนามไฟฟ้าต่อเยื่อหุ้มเซลล์ของสิ่งมีชีวิต (Mertens & Knorr, 1992)



ภาพที่ 2-8 โครงสร้างเยื่อหุ้มเซลล์ของสิ่งมีชีวิต (สิริภัทร พรหมณีย์, 2548)



ภาพที่ 2-9 ลักษณะรูปแบบผันกลับได้และผันกลับไม่ได้ (Barbosa-canovas et al., 1998)

3.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้สนามไฟฟ้าแรงสูงแบบเป็นจังหวะ

Rastogi et al. (1999) ศึกษาการใช้เทคนิค PEF ในการเตรียมแครอทขั้นต้นก่อนการคั้นน้ำออกแบบออสโมซิส พบว่า การเพิ่มค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจาก 0-1.7 kV/cm ทำให้ค่า Z_p ของชิ้นแครอทมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0-0.82 เนื่องจาก การเพิ่มค่าความเข้มสนามไฟฟ้าทำให้จำนวนและขนาดของรูที่เยื่อหุ้มเซลล์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการเพิ่มคุณสมบัติการเป็นเยื่อเลือกผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์ได้มากขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงกับอัตราการถ่ายเทมวลสาร กล่าวคือ แครอทที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นด้วยเทคนิค PEF มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าแครอทที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น เนื่องจาก แครอทที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นมีอัตราการแพร่ของน้ำออกจากชิ้นแครอทได้ดีกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นและเมื่อเพิ่มค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ทำให้ปริมาณความชื้นของแครอทต่ำลง ขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นจะมีค่าปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเตรียม และพบว่า ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความเข้มสนามไฟฟ้า และการเตรียมขั้นต้นด้วยเทคนิค PEF ทำให้ชิ้นแครอทมีเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่มมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเตรียม

ขึ้นต้น คือ ใช้แรงกดน้อยเพื่อให้ชิ้นแครอทแตกและเมื่อเพิ่มค่าความเข้มสนามไฟฟ้าขึ้นทำให้ค่าแรงที่ใช้ในการทำให้ชิ้นแครอทแตกลดต่ำลง เนื่องจาก การเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้า ทำให้จำนวนและขนาดรูที่เยื่อหุ้มเซลล์เพิ่มขึ้น (ค่า Z_p เพิ่มขึ้น) ทำให้เนื้อเยื่อของชิ้นแครอทเรียงตัวกันอย่างหลวม ๆ ชิ้นแครอทจึงมีความนุ่มมากขึ้น

Ade-Omowaye, Angersbach, Taiwo et al. (2001) ศึกษาการใช้เทคนิค PEF เพื่อเพิ่มความสามารถในการเป็นเยื่อเลือกผ่านของเซลล์ในกระบวนการเตรียมขึ้นต้นของการแปรรูปมะพร้าว พบว่า การใช้เทคนิค PEF ที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า 2.5 kV/cm จำนวนพัลส์ 20 พัลส์ ระยะเวลาของพัลส์ 575 ไมโครวินาทีและความถี่ 1 Hz ทำให้ตัวอย่างขึ้นมะพร้าวมีค่าดัชนีการแตกของเยื่อหุ้มเซลล์ 0.75 และเมื่อนำมะพร้าวไปสกัดกะทิด้วยการตัดให้มีขนาด 6.5×1 มิลลิเมตร บรรจุในผ้าฝ้ายและใช้เครื่องกดที่ความดัน 15 MPa นาน 10 นาที โดยวางวัตถุน้ำหนัก 100 กรัม เพื่อกดไล่น้ำกะทิ พบว่า การใช้เทคนิค PEF ในการเตรียมขึ้นต้นก่อนการสกัดน้ำกะทิทำให้อัตราผลได้ของน้ำกะทิเพิ่มขึ้นร้อยละ 20 เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเตรียมขึ้นต้น ปริมาณไขมันและโปรตีนของตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมขึ้นต้นด้วยเทคนิค PEF มีค่าร้อยละ 58 และ 50 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างจากตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเตรียมขึ้นต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

Ade-Omowaye et al. (2002) ศึกษาการใช้เทคนิค PEF และการใช้ความร้อนระดับปานกลาง (25-55 องศาเซลเซียส) ในการเตรียมพริกหยวก (Red Bell Pepper) ขึ้นต้นก่อนการคั้นน้ำออกแบบออสโมซิส พบว่า การเพิ่มค่าความเข้มสนามไฟฟ้าทำให้ค่า Z_p ของชิ้นพริกหยวกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พริกหยวกที่ผ่านการเตรียมขึ้นต้นด้วยเทคนิค PEF มีค่าปริมาณน้ำที่สูญเสียในช่วงร้อยละ 36-50 ขณะที่การใช้ความร้อนมีค่าปริมาณน้ำที่สูญเสียในช่วงร้อยละ 32-48 ซึ่งมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเตรียมขึ้นต้นและเมื่อใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นส่งผลให้พริกหยวกมีค่าปริมาณน้ำที่สูญเสียสูงขึ้น ค่าปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นของตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมขึ้นต้นมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเตรียมขึ้นต้น และพบว่าตัวอย่างพริกหยวกที่ผ่านการเอาเปลือกออกมีค่า Z_p มากกว่าตัวอย่างที่ยังมีเปลือกอยู่ ทั้งนี้เนื่องจาก เปลือกของพริกหยวกจะเพิ่มความต้านทานต่อสนามไฟฟ้าได้มากขึ้น จึงลดการแตกออกของเยื่อหุ้มเซลล์ได้มากกว่าตัวอย่างที่ไม่มีเปลือก เมื่อพิจารณาปริมาณวิตามินซีของตัวอย่าง พบว่า ตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเตรียมขึ้นต้น ตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมขึ้นต้นด้วยเทคนิค PEF และตัวอย่างที่ใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส มีปริมาณวิตามินซีลดลงร้อยละ 5 7-13 และ 20 ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณแคโรทีนอยด์คงเหลือของตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมขึ้นต้นด้วยเทคนิค PEF และตัวอย่างที่ใช้ความร้อน มีค่าร้อยละ 72-74 และ 80 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเตรียมขึ้นต้นทั้งการใช้เทคนิค PEF และการใช้ความร้อนมีผลใน

การทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์มีความสามารถในการเป็นช่องเลือกผ่านเพิ่มขึ้น อัตราการถ่ายเทมวลสารของวิธีการทั้งสองจึงมีค่าใกล้เคียงกัน แต่การใช้ความร้อนมีผลในการทำลายวิตามินซีมากกว่าการใช้เทคนิค PEF

Eshtiaghi and Knorr (2002) ศึกษาการใช้เทคนิค PEF ในการเตรียมชิ้นต้นในกระบวนการสกัดน้ำตาลจากหัวบีท (Sugar Beet) พบว่า การใช้เทคนิค PEF ที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า 2.5 kV/cm จำนวนพัลส์ 20 พัลส์ ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ของหัวบีทแตกได้ภายในเวลา 3-20 วินาที ในขณะที่วิธีการเดิมที่ใช้ในการสกัด คือ การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75-80 องศาเซลเซียส ต้องใช้เวลา 5-15 นาที เมื่อนำหัวบีทที่เตรียมได้ไปสกัดน้ำตาล พบว่า หัวบีทที่ผ่านการเตรียมด้วยเทคนิค PEF มีปริมาณน้ำตาลที่สกัดได้ร้อยละ 88 ในขณะที่บีทที่ใช้ความร้อนในการเตรียมมีปริมาณน้ำตาลที่สกัดได้ร้อยละ 42 ในการสกัดสองครั้ง ดังนั้น การใช้เทคนิค PEF ในการเตรียมชิ้นต้นจึงเป็นวิธีที่ช่วยลดขั้นตอนของกระบวนการสกัดและลดการใช้พลังงาน

Taiwo, Angersbach, and Knorr (2002) ศึกษาการใช้เทคนิค PEF และการดึงน้ำออกแบบออสโมซิสในการเตรียมแอปเปิลชิ้นต้นก่อนการทำแห้งด้วยลมร้อนต่อความสามารถในการคืนรูปของแอปเปิล พบว่า การเตรียมชิ้นต้นโดยใช้เทคนิค PEF ร่วมกับการดึงน้ำออกแบบออสโมซิส ทำให้แอปเปิลมีค่าความสามารถคืนรูปเพิ่มขึ้น โดยการใช้เทคนิค PEF ทำให้ปริมาณของแข็งคงอยู่ในชิ้นแอปเปิลหลังการคืนรูปสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเตรียมชิ้นต้น ส่งผลให้แอปเปิลมีค่าความแน่นเนื้อที่ดี

Tedjo et al. (2002) ศึกษาการใช้เทคนิค PEF ในการเตรียมมะม่วงชิ้นต้นก่อนการดึงน้ำออกแบบออสโมซิส พบว่า การเพิ่มค่าความเข้มสนามไฟฟ้าทำให้ค่า Z_p ของชิ้นมะม่วงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมชิ้นต้นด้วยเทคนิค PEF มีค่าแรงที่ใช้ในการทำให้ชิ้นมะม่วงแตกกลดลง เนื่องจาก การเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้า ทำให้มีจำนวนและขนาดรูที่เยื่อหุ้มเซลล์เพิ่มขึ้น ทำให้เนื้อเยื่อของชิ้นมะม่วงเรียงตัวกันอย่างหลวม ๆ ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่า Z_p ซึ่งค่า Z_p มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 0.54 ที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า 2.67 kV/cm และเมื่อพิจารณาด้านการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นมะม่วง พบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมชิ้นต้นด้วยเทคนิค PEF มีค่าความสว่าง (L) และค่าความเป็นสีเหลือง (b) ไม่แตกต่างกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเตรียมชิ้นต้นที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 เนื่องจาก ระหว่างกระบวนการดึงน้ำออกแบบออสโมซิสตัวอย่างทั้งสองไม่เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลและการเตรียมชิ้นต้นด้วยเทคนิค PEF เป็นกระบวนการที่ไม่ใช้ความร้อนทำให้ตัวอย่างมีสีที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากวัตถุดิบสด

Ade-Omowaye, Rastogi, Angersbach, and Knorr (2003) ศึกษาการใช้เทคนิค PEF ในการเตรียมพริกหยวกชิ้นต้นร่วมกับวิธีการดึงน้ำออกแบบออสโมซิสก่อนการทำแห้งด้วยลมร้อน

พบว่า ความสามารถในการเป็นเชื้อเลือกผ่านของเชื้อหุ้มเซลล์ของพริกหยวกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นไฟฟ้าและจำนวนพัลส์เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการทำแห้งของพริกหยวกในช่วงแรกเร็วขึ้น คือ อัตราการทำแห้งของตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นด้วยเทคนิค PEF ร่วมกับการแช่ในสารละลายออสโมติก กับตัวอย่างไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นมีค่าอยู่ในช่วง 0.18-0.052 kg/ kg min และ 0.13-0.051 kg/ kg min ตามลำดับ เมื่อนำตัวอย่างมาแช่ในสารละลายออสโมติกเป็นเวลา 30 และ 60 นาที ตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นด้วยเทคนิค PEF มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ 0.94×10^{-9} และ $1.36 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ตามลำดับ ขณะที่ตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นมีค่า 0.87×10^{-9} และ $0.99 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ตามลำดับ

Ade-Omowaye, Taiwo, Eshtiaghi, Angersbach, and Knorr (2003) ศึกษาการใช้เทคนิค PEF และการแช่เยือกแข็งในการเตรียมพริกหยวกขั้นต้นก่อนการดองน้ำออกแบบออสโมซิส พบว่า ค่าปริมาณน้ำที่สูญเสียของตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นด้วยเทคนิค PEF มีค่าสูงกว่าวิธีการแช่เยือกแข็ง ขณะที่ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นของตัวอย่างที่เตรียมด้วยวิธีการแช่เยือกแข็งมีค่าสูงที่สุด จากการศึกษาสมการการถดถอยเชิงเส้นตรงระหว่างปริมาณน้ำที่สูญเสียกับปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น ทั้งปริมาณของแข็งทั้งหมดและปริมาณของแข็งที่ละลายได้ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) มีค่าอยู่ในช่วง 0.954-0.998 ดังนั้น อัตราการถ่ายเทมวลสารของกระบวนการดองน้ำออกแบบออสโมซิสจึงสามารถประมาณได้จากค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ เมื่อพิจารณาปริมาณวิตามินซีที่คงเหลือของตัวอย่างก่อนการดองน้ำออกแบบออสโมซิส พบว่า ตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเตรียมมีปริมาณวิตามินซีคงเหลือมากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและการใช้เทคนิค PEF ตามลำดับ ขณะที่การเพิ่มจำนวนพัลส์ทำให้ปริมาณวิตามินซีคงเหลือลดต่ำลง และเมื่อนำตัวอย่างมาผ่านกระบวนการดองน้ำออกแบบออสโมซิส พบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นด้วยเทคนิค PEF มีปริมาณวิตามินซีคงเหลือลดต่ำลงมาก คือ คงเหลือเพียงร้อยละ 12.3-28.4 ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นด้วยวิธีการแช่เยือกแข็งและตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นมีปริมาณวิตามินซีคงเหลือร้อยละ 30.0 และ 42.5 ตามลำดับ

Ade-Omowaye, Talens, Angersbach, and Knorr (2003) ศึกษาการใช้เทคนิค PEF ในการเตรียมพริกหยวกขั้นต้นก่อนการดองน้ำออกแบบออสโมซิส พบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นด้วยเทคนิค PEF มีอัตราการถ่ายเทมวลสารเพิ่มขึ้น คือ มีค่าปริมาณน้ำที่สูญเสียเพิ่มขึ้นร้อยละ 11-25 และปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 2-5 เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น

Amami, Vorobiev, and Kechaou (2006) ศึกษาการใช้เทคนิค PEF ในการเตรียมแอปเปิลขั้นต้นก่อนการดองน้ำออกแบบออสโมซิสพบว่า การเตรียมขั้นต้นด้วยเทคนิค PEF ช่วย

เพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลสารระหว่างการดึงน้ำออกแบบออสโมซิส คือ ตัวอย่างมีค่าร้อยละของปริมาณน้ำที่สูญเสียและปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นและจากการสร้างสมการเพื่อหาสัมประสิทธิ์การแพร่ตามสมการของฟิค พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและของแข็งจากการคำนวณของตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้น และพบว่า กระบวนการ PEF ที่ใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการเป็นเยื่อเลือกผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์ของเนื้อเยื่อพืชต้องใช้พลังงาน 1-10 kWh/ ton

Amami, Fersi, Khezami et al. (2007) ศึกษาการใช้เทคนิค PEF ในการเตรียมเครื่องปั่นก่อนการดึงน้ำออกแบบออสโมซิสร่วมกับการหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 5430 g พบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นด้วยเทคนิค PEF มีค่าปริมาณน้ำที่สูญเสียเพิ่มขึ้น โดยมีค่าร้อยละ 63 ในขณะที่ตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเตรียมขั้นต้นมีค่าปริมาณน้ำที่สูญเสียร้อยละ 42

Amami, Fersi, Vorobiev et al. (2007) ศึกษาการใช้เทคนิค PEF ในการเตรียมเครื่องปั่นก่อนการดึงน้ำออกแบบออสโมซิสร่วมกับการเติมเกลือในสารละลายออสโมติกและใช้การหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2400 g ในขั้นตอนการดึงน้ำออกแบบออสโมซิส พบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นด้วยเทคนิค PEF และการเติมเกลือในสารละลายออสโมติกทำให้ปริมาณน้ำที่สูญเสียและปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นมีค่าสูงขึ้น และการหมุนเหวี่ยงขณะการดึงน้ำออกแบบออสโมซิส ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่สูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นมีค่าลดลง ดังนั้น อัตราส่วนของปริมาณน้ำที่สูญเสียต่อปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้น แต่การเติมเกลือทำให้ค่านี้นี้มีค่าลดลง

การดึงน้ำออกแบบออสโมซิส (Osmotic Dehydration)

การดึงน้ำออกแบบออสโมซิสอาศัยหลักการเคลื่อนย้ายน้ำตามธรรมชาติที่มีอยู่บางส่วนจากเนื้อเยื่อผักและผลไม้ โดยการแช่ชิ้นผักหรือผลไม้ในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง (Hypertonic Solution) หรือสารละลายที่มีค่าออสโมติกที่ต่ำกว่าชิ้นผักหรือผลไม้ (Brennan, 1994) ซึ่งสภาวะเช่นนี้จะทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติกระหว่างภายในเซลล์ของชิ้นผักหรือผลไม้และสารละลายภายนอก เกิดเป็นแรงขับ (Driving Force) ให้มีการถ่ายเทมวลสารระหว่างเซลล์ของชิ้นผักหรือผลไม้และสารละลาย (อ๋อนรวิ รัตนพันธุ์, 2533) ในลักษณะสวนทางกัน ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ซึ่งทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน (Semi-Permeable Membrane) กล่าวคือ ตัวถูกละลายจะแพร่จากสารละลายภายนอกเข้าสู่เซลล์ของชิ้นผักหรือผลไม้ ในขณะที่ตัวน้ำภายในเซลล์ของชิ้นผักหรือผลไม้จะแพร่ออกสู่สารละลายภายนอกและจะเกิดสภาวะเช่นนี้จนเข้าสู่สมดุลของสารละลายทั้งสอง นอกจากนี้ องค์ประกอบที่ละลายน้ำได้บางอย่าง

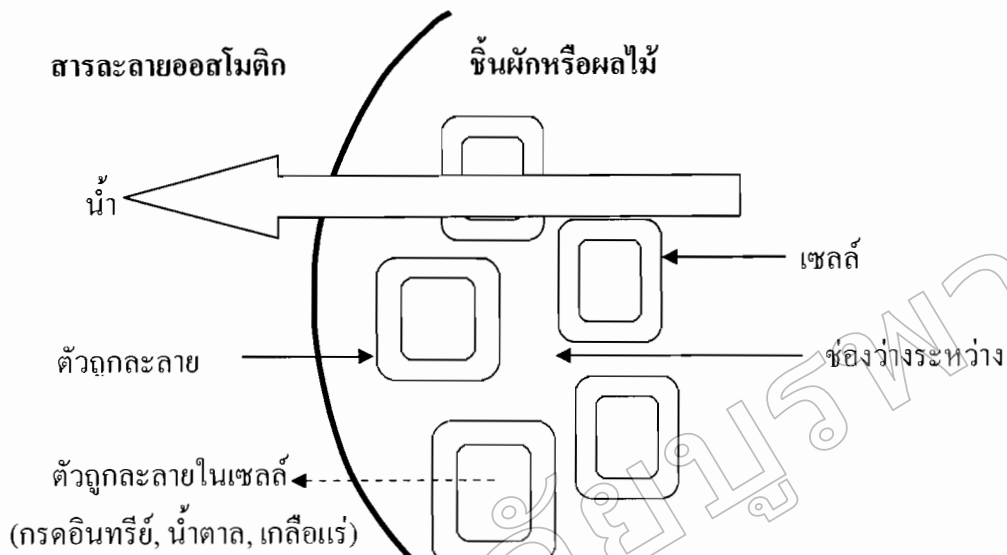
ที่มีอยู่ภายในเซลล์ชั้นผักหรือผลไม้โดยธรรมชาติ เช่น น้ำตาล กรดอินทรีย์ เกลือแร่และวิตามิน จะแพร่ออกสู่สารละลายภายนอก (Raoult-Wack et al., 1989; Torreggiani, 1993) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 2-10 สารละลายส่วนใหญ่ที่ใช้ในกระบวนการดึงน้ำออกแบบออสโมซิส คือ สารละลายน้ำตาลหรือเกลือ กล่าวคือ น้ำตาลหรือเกลือจะแพร่เข้าไปในชั้นผักหรือผลไม้ ในขณะที่เดียวกันน้ำก็จะแพร่ออกจากชั้นผักหรือผลไม้ การแพร่ของตัวถูกละลายจะเกิดขึ้นช้ากว่าการแพร่ของน้ำ ดังนั้น จึงสามารถควบคุมปริมาณน้ำตาลที่แพร่ได้ ถ้าหากว่าเซลล์ของชั้นผักหรือผลไม้ถูกทำลาย การแพร่ของน้ำตาลและน้ำจะสมดุลเร็วขึ้น (ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาลิก, 2532)

อาจกล่าวได้ว่าการดึงน้ำออกแบบออสโมซิสทำให้ปริมาณน้ำในชั้นผักหรือผลไม้ลดลง ปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นและน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ลดลงประมาณร้อยละ 50 โดยการถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้นนี้จะมีการถ่ายเทมวลของน้ำและตัวถูกละลาย (Solute) ในเวลาเดียวกัน เป็นการเคลื่อนที่แบบสวนทางกัน (Counter-Current Mass Transfer) (อ๋อนรวี รัตนพันธุ์ 2533) ดังนี้

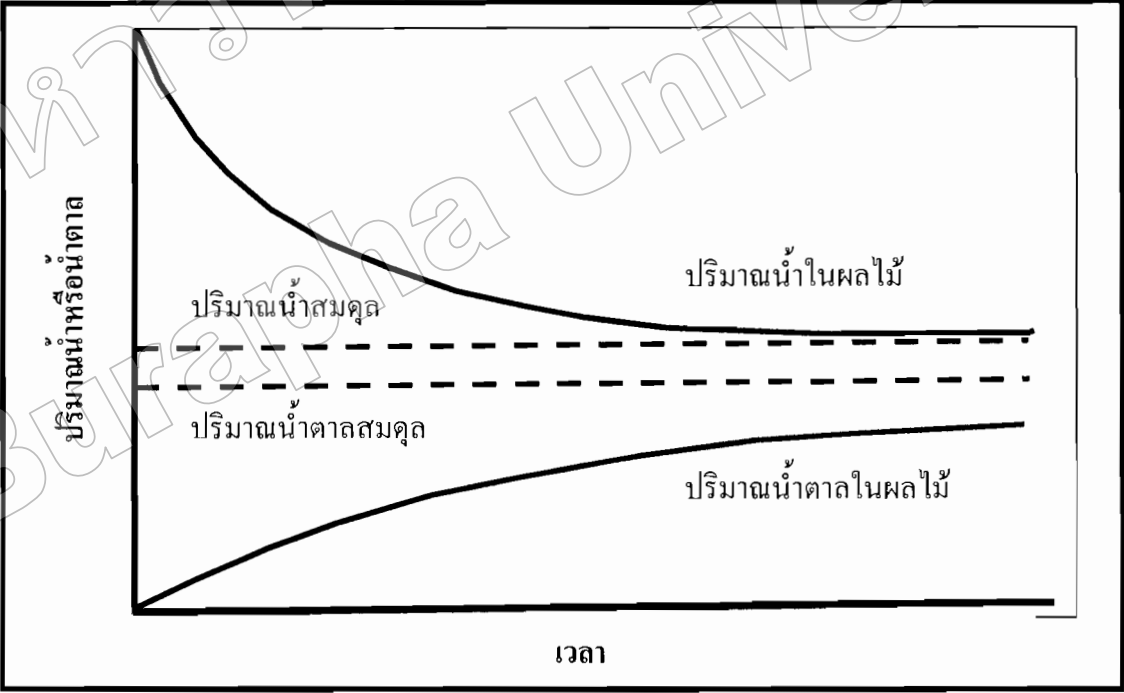
- 1) น้ำภายในเซลล์ของผักหรือผลไม้ จะแพร่ออกจากเซลล์สู่สารละลายภายนอก
- 2) ตัวถูกละลายภายนอก เช่น น้ำตาลหรือเกลือ จะแพร่เข้าสู่ภายในเซลล์ของผักหรือผลไม้หรือเนื้อเยื่อของผักหรือผลไม้

3) สารบางอย่างที่มีอยู่ภายในเซลล์โดยธรรมชาติ (Natural Soluble Substance) เช่น กรดอินทรีย์ น้ำตาลและเกลือแร่ เป็นต้น จะแพร่ออกนอกเซลล์สู่สารละลายภายนอก

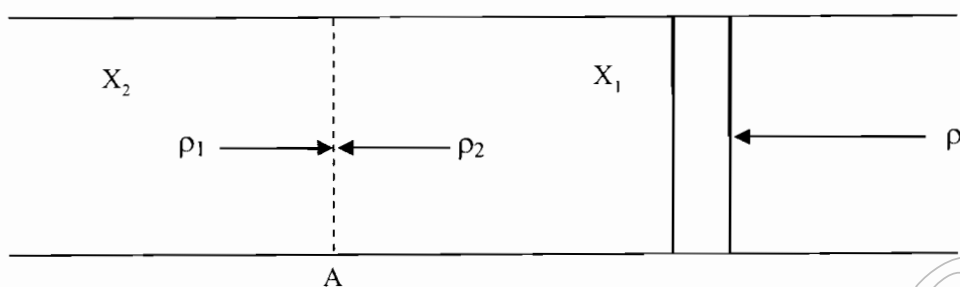
ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาลิก (2532) กล่าวว่า ในขณะที่ชั้นผักหรือผลไม้แช่ในสารละลาย เช่น ผลไม้แช่ในน้ำเชื่อม เยื่อหุ้มเซลล์จะทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน นั่นคือ ยอมให้น้ำแพร่ผ่านได้มากกว่าน้ำตาล และน้ำตาลส่วนใหญ่จะแพร่เข้าไปเฉพาะบริเวณขอบ ๆ และอยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์ ซึ่งสมดุลของสารละลายทั้งสองแสดงดังภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2-10 การถ่ายเทมวลสารระหว่างการดึงน้ำออกแบบออสโมซิส (Raoult-Wack et al., 1989)



ภาพที่ 2-11 สมดุลของน้ำและน้ำตาลระหว่างการดึงน้ำออกแบบออสโมซิส (ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาลิก, 2532)



หมายเหตุ : A หมายถึง เยื่อเลือกผ่าน

X_1 และ X_2 หมายถึง สารละลายชนิดที่ 1 และ 2 ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย ตามลำดับ
 p , p_1 และ p_2 หมายถึง ความดันไอที่ให้แก่สารละลาย และความดันไอย่อยของน้ำในสารละลายที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ภาพที่ 2-12 แบบจำลองการคั่งน้ำออกแบบออสโมซิส

จากภาพที่ 2-12 แสดงแบบจำลองอย่างง่ายของกระบวนการคั่งน้ำออกแบบออสโมซิส ซึ่งกำหนดให้ X_1 และ X_2 เป็นสารละลายชนิดที่ 1 และ 2 ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย ตามลำดับ สารละลายทั้งสองนี้ถูกกั้นจากกันด้วยเยื่อเลือกผ่าน (A) โมเลกุลของน้ำจะแพร่จากบริเวณที่มีความดันไอย่อย (Partial Pressure) สูงไปสู่บริเวณที่มีค่าต่ำกว่า เมื่อ p_1 และ p_2 เป็นค่าความดันไอย่อยของน้ำในสารละลายที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ถ้า $p_2 > p_1$ โมเลกุลของน้ำจะแพร่จากสารละลายที่ 2 ไป 1 ดังนั้น ถ้าต้องการให้เกิดสมดุลระหว่างสารละลายทั้งสอง สามารถทำได้โดยการให้ความดัน (p) แก่สารละลายที่ 1 ซึ่งคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$p = \frac{RT}{V} \ln \frac{p_2}{p_1}$$

เมื่อ R = ค่าคงที่ของก๊าซ ($82.0 \text{ cm}^3 \text{ atm K}^{-1} \text{ mole}^{-1}$)

T = อุณหภูมิ (K)

p = ความดันสมบูรณ์ (absolute pressure) (atm)

V = partial molar volume ของน้ำ ($\text{cm}^3 \text{ M}^{-1}$)

ในระหว่างกระบวนการคั่งน้ำออกแบบออสโมซิส จะมีแรงดันออสโมซิส (Osmotic Pressure) เกิดขึ้นจำนวนหนึ่งในสารละลายด้านที่มีความดันไอย่อยต่ำจนถึงสมดุลจะสามารถหยุดการแพร่ของน้ำได้พอดี (อ่อนรวี รัตนพันธุ์, 2533; วันวิสาข์ กระแสร์คุปต์, 2535)

1. ขั้นตอนการดิ่งน้ำออกแบบออสโมซิส

1.1 การเตรียมชิ้นผลไม้

การผ่าหรือหั่นชิ้นผลไม้ก่อนที่จะนำไปออสโมซิสมีอยู่หลายวิธีโดยขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้และความต้องการของตลาด เช่น หั่นเป็นชิ้นตามยาว หั่นเป็นชิ้นตามขวาง หั่นเป็นรูปลูกเต๋า เป็นต้น

1.2 การเตรียมชิ้นต้นก่อนการดิ่งน้ำออกแบบออสโมซิส

เป็นขั้นตอนการเตรียมชิ้นผลไม้ โดยการป้องกันการเปลี่ยนแปลงสีซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่อาจเกิดจากเอนไซม์และไม่ใช่เอนไซม์ เช่น การแช่ชิ้นผลไม้ในการละลายกลุ่มซัลไฟด์หรือสารละลายที่ให้ค่าความเป็นกรด ซึ่งสามารถป้องกันการเกิดสีน้ำตาลและช่วยป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ได้ รวมทั้งควรมีการรักษาเนื้อสัมผัสของผลไม้ให้คงรูป ไม่เปลี่ยนแปลง เช่น การแช่ชิ้นผลไม้ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น (จินตนา ศรีผุย, 2546)

ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นต้นก่อนการดิ่งน้ำออกแบบออสโมซิสยังเป็นขั้นตอนที่ช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลสารในระหว่างการดิ่งน้ำออกแบบออสโมซิสซึ่งโดยปกติจะเกิดขึ้นได้ช้า โดยการทำให้โครงสร้างเนื้อเยื่อของผลไม้เกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้การแพร่ของน้ำและตัวถูกละลายเข้าสู่สถานะสมดุลได้เร็วขึ้น ดังนั้น จึงมีการนำเทคนิคต่าง ๆ มาใช้เพื่อช่วยปรับปรุงการถ่ายเทมวลสาร เช่น การลวก การแช่แข็ง การใช้สถานะสุญญากาศ การใช้สนามไฟฟ้าแรงสูงแบบเป็นจังหวะ การใช้แรงดันสูง การใช้คลื่นเหนือเสียง เป็นต้น (Oliveira, Oliveira, Hendrickx, Knorr, & Gorris, 1999; Rastogi, Raghavarao, Niranjana, & Knorr, 2002)

1.3 การแช่ในสารละลายออสโมติก

การแช่ผลไม้ในสารละลายออสโมติกนี้เป็นขั้นตอนของการลดน้ำหนักหรือลดความชื้นของผลไม้ โดยสารละลายจะมีตัวถูกละลายช่วยให้เกิดแรงดันออสโมติก ตัวถูกละลายต่างชนิดกันจะให้ผลในการลดน้ำหนักหรือลดความชื้นได้ต่างกัน โดยส่วนใหญ่ในขั้นตอนนี้จะลดความชื้นของผลไม้ได้ประมาณร้อยละ 50-60 ในสารละลายออสโมติกอาจมีการใช้สารป้องกันการเกิดสีน้ำตาล ซึ่งจะเกิดสีน้ำตาลขึ้นในช่วงการทำแห้งและการเก็บรักษา ตัวอย่างสารป้องกันการเกิดสีน้ำตาลที่ใช้ เช่น โพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ เป็นต้น (วันวิสาข์ กระแสร์กุลป์, 2535)

2. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการดิ่งน้ำออกแบบออสโมซิส

2.1 ชนิดของสารละลายออสโมติก

สารละลายออสโมติกส่วนใหญ่จะเป็นสารละลายน้ำตาล น้ำเกลือ โซลบีทอล กลีเซอรอล เป็นต้น (อ่อนรวี รัตนพันธุ์, 2533) นอกจากนี้ ยังมีน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส

มอลโตส รวมทั้งน้ำเชื่อมข้าวโพดด้วย (Brennan, 1994) การเลือกใช้สารละลายออสโมติกขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ วิธีที่นำมาใช้วัดคุณภาพของสารละลายออสโมติก ได้แก่ อัตราการกำจัดน้ำและปริมาณน้ำสุดท้ายที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์

ศิริลักษณ์ สีนธวาลย์ (2522) กล่าวว่า สารละลายออสโมติกที่นิยมใช้กับผลไม้ ได้แก่ น้ำตาลซูโครส กลีเซอรอล เบะแซเหลว น้ำตาลแลกโทสผสมกับน้ำตาลซูโครสหรือผสมกับมอลโตเด็คซ์ทริน เป็นต้น ส่วนสารละลายออสโมติกที่นิยมใช้กับผัก ได้แก่ เกลือ-เกลือผสมกับน้ำตาลซูโครส กลีเซอรอล โพพิลีนไกลคอล เป็นต้น ในสารละลายออสโมติกยังอาจเติมสารอื่นที่ใช้ในการผลิตลงไปด้วย เช่น กรดซิตริก เกลือซัลไฟต์และแคลเซียมคลอไรด์ เป็นต้น สารละลายออสโมติกที่ใช้จะต้องมีค่าออสโมติกที่ต่ำ เป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคและมีรสชาติเป็นที่ยอมรับ ให้กลิ่นรสที่ดีต่อผลิตภัณฑ์สุดท้าย ซึ่งการเลือกใช้สารละลายออสโมติกควรพิจารณาเพิ่มเติมดังนี้ คือ ต้องไม่ทำให้คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป มีราคาต่อหน่วยถูก ไม่ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้นมากและสารออสโมติกที่ใช้ควรมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เพราะถ้ามีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีแรงดันออสโมติกสูง เช่น น้ำตาลกลูโคส จะมีแรงดันออสโมติกสูงกว่าน้ำตาลซูโครส จึงทำให้ปริมาณน้ำตาลแพร่เข้าไปในเนื้อเยื่อได้มากและเกิดการสูญเสียมากกว่าการใช้น้ำตาลซูโครสซึ่งเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์แข็งขึ้น (Ponting, Walters, Forrey, Jackson, & Stanley, 1996; Lerici, Pinnavaia, Dalla Rosa, & Bartolucci, 1985)

Flink (1975) กล่าวว่า การเลือกใช้สารละลายออสโมติกที่เหมาะสมสามารถเพิ่มปริมาณของแข็งในผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ถึงร้อยละ 28 และทำให้เวลาที่ใช้ในการทำแห้งลดลงร้อยละ 20 และศึกษาการใช้สารละลายผสมระหว่างน้ำตาลซูโครสและโซเดียมคลอไรด์ในการดองน้ำออกแบบออสโมซิสแอปเปิล พบว่า โซเดียมคลอไรด์ที่เติมลงไปจะช่วยเพิ่มแรงขับของสารละลายและยังช่วยลดค่าออสโมติกของผลิตภัณฑ์ ป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ ถึงแม้ว่าการใช้โซเดียมคลอไรด์ร่วมกับน้ำตาลซูโครสจะให้ผลดี แต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องของความเค็มที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์

Lerici et al. (1985) ศึกษาการใช้สารละลายออสโมติกชนิดต่าง ๆ คือ กลูโคส ความเข้มข้น 51 องศาบริกซ์ ซูโครสความเข้มข้น 59 องศาบริกซ์ กลูโคสร่วมกับฟรุคโตส (1 ต่อ 0.8) ความเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ โซลันจิน (กลูโคส มอลโตสและโพลิแซคคาไรด์ร้อยละ 35 45 และ 20 ตามลำดับ) ความเข้มข้น 68 องศาบริกซ์และโซลันจิน (กลูโคส ฟรุคโตสและมอลโตสร้อยละ 52 42 และ 3 ตามลำดับ) ความเข้มข้น 70 องศาบริกซ์ในการดองน้ำออกแบบออสโมซิสแอปเปิลโดยใช้เวลา 16 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง พบว่า โซลันจินมีการสูญเสียน้ำและการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในตัวอย่างแอปเปิลสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจาก โซลันจินมีส่วนประกอบของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวมากจึงทำให้การแพร่ของน้ำตาลเข้าสู่เซลล์ได้ดีกว่า ส่วนการใช้กลูโคส

ร่วมกับฟรุกโตสมีปริมาณน้ำที่สูญเสียและการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลรองลงมา เนื่องจากสารละลายมีความเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ ซึ่งน้อยกว่าไซรัปเอฟที่มีความเข้มข้น 70 องศาบริกซ์ ทำให้การแพร่ของน้ำตาลเข้าสู่เซลล์ได้ช้ากว่า เช่นเดียวกับสารละลายกลูโคสความเข้มข้น 51 องศาบริกซ์และซูโครส 59 องศาบริกซ์ ส่วนไซรัปจีมีโพลีแซคคาไรด์ ซึ่งมีขนาดโมเลกุลใหญ่จึงขัดขวางการแพร่ของน้ำตาลเข้าสู่เซลล์

Saurel, Raoult-Wack, Rois, and Guilbert (1994) ศึกษาผลของน้ำหนักรวมของตัวถูกละลายเอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol) โดยใช้สารละลายที่มีน้ำหนักรวมตั้งแต่ 62-3,000 คอลตัน พบว่า กระบวนการแช่ที่ใช้เวลาน้อยกว่า 30 นาที ปริมาณน้ำที่สูญเสียและปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก ตัวถูกละลายที่มีน้ำหนักรวมต่ำมีความดันออสโมติกสูง จึงมีการกักน้ำได้มากแต่อาจทำให้เนื้อเยื่ออาหารหดรัดตัวได้ง่าย เนื่องจาก มีการสูญเสียน้ำในปริมาณมาก สำหรับกระบวนการแช่ที่ใช้เวลานาน 360 นาที พบว่า การใช้สารละลายที่มีน้ำหนักรวมสูงจะทำให้มีค่าปริมาณน้ำที่สูญเสียสูงเนื่องจาก เวลาที่นานขึ้นตัวถูกละลายที่มีน้ำหนักรวมสูง ซึ่งถูกกักไว้ที่ผิวหน้าของชิ้นแอปเปิลมีจำนวนมาก ทำให้ความแตกต่างของความเข้มข้นที่ผิวหน้าและภายในชิ้นแอปเปิลมีค่าสูงขึ้นจึงเกิดการกักน้ำได้สูง

Azuara, Garcia, and Beristain (1996) ศึกษาผลของการใช้สารละลาย 3 ชนิด คือ สารละลายซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 70 โซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 30 และสารละลายผสมของซูโครสร้อยละ 45 กับโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 15 ต่อการดึงน้ำออกแบบออสโมซิสมันฝรั่งและแอปเปิลรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร สูง 0.5 เซนติเมตร พบว่า ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นของมันฝรั่งในสารละลายทั้ง 3 ชนิด มีค่าร้อยละ 6.61 22.39 และ 12.83 ตามลำดับ ขณะที่แอปเปิลมีค่าร้อยละ 7.93 19.73 และ 12.40 ตามลำดับ เนื่องจากโมเลกุลของเกลือมีขนาดเล็กกว่าน้ำตาล ทำให้เกลือแพร่เข้าสู่ชิ้นตัวอย่างได้มากกว่าน้ำตาล ทำให้ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นของตัวอย่างที่แช่ในสารละลายที่มีเกลือเป็นส่วนผสมมีค่าสูงกว่าการใช้สารละลายน้ำตาลเพียงอย่างเดียว

Serenó, Moreira, and Martínez (2001) ศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารระหว่างการดึงน้ำออกแบบออสโมซิสของแอปเปิลในสารละลายน้ำตาลซูโครส สารละลายโซเดียมคลอไรด์และสารละลายผสมของตัวถูกละลาย 2 ชนิด ที่ความเข้มข้น และอุณหภูมิต่าง ๆ นำมาหาค่าปริมาณความชื้นและปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นและคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของสารละลายทั้ง 3 ชนิด พบว่า อัตราส่วนของปริมาณน้ำที่สูญเสียต่อปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นของตัวอย่างที่ผ่านการดึงน้ำออกแบบออสโมซิสในสารละลายโซเดียมคลอไรด์อย่างเดียวมีค่าสูงที่สุด เนื่องจากมีปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นต่ำ

Marani, Agnelli, and Mascheroni (2007) ศึกษาผลของชนิดของสารละลาย ออสโมติกต่อการถ่ายเทมวลสาร พบว่า การใช้สารละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำในระดับความเข้มข้นสูง ได้แก่ สารละลายฟรุกโตส สามารถเร่งการสูญเสียน้ำออกจากกีวได้ดี ขณะที่มีการเพิ่มขึ้นของของแข็งไม่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารละลายกลูโคสความเข้มข้นต่ำ แต่การใช้สารละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีการสูญเสียน้ำจากกีวอย่างช้า ๆ ในช่วงแรกแต่จะมีอัตราเพิ่มขึ้นในช่วงท้ายของกระบวนการและมีการเพิ่มขึ้นของของแข็งต่ำตลอดกระบวนการที่ใช้เวลานาน 25 ชั่วโมง

2.2 ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติก

ความเข้มข้นของสารละลายมีส่วนความสำคัญที่ช่วยในการดึงน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ซึ่งจะมีผลต่อค่าวอเตอร์แอคทิวิตี ถ้าความเข้มข้นมากขึ้นมีผลทำให้ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าน้อยลงและทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารสูงขึ้น ซึ่งมีผลให้อัตราการดึงน้ำออกแบบออสโมซิสสูงขึ้น (วันวิสาข์ กระแสร์คุปต์, 2535) และสารละลายชนิดเดียวกันเมื่อเพิ่มความเข้มข้นขึ้น ทำให้น้ำแพร่ออกได้เร็วขึ้น ขณะที่น้ำตาลที่แพร่เข้าไปในผลไม้มีค่ามากขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่หวานจนเกินไป (อ่อนรวี รัตนพันธุ์, 2533)

Beristain, Azuara, Cortes, and Garcia (1990) ได้ศึกษาการทำแห้งสับประรดด้วยการดึงน้ำออกแบบออสโมซิสที่ความเข้มข้นของน้ำตาล 50 60 และ 70 องศาบริกซ์และที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส พบว่า ปริมาณน้ำที่สูญเสียของชิ้นผลไม้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล เนื่องจาก เมื่อความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลเพิ่มขึ้นทำให้ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของน้ำตาลและน้ำภายนอกและภายในเซลล์ของสับประรดมีค่าสูง จึงมีผลให้มีแรงขับสูงขึ้น

Sacchetti, Gionotti, and Dalla Rosa (2001) ศึกษาการดึงน้ำออกแบบออสโมซิสของแอปเปิ้ลโดยใช้ความแตกต่างของสารละลายน้ำตาลซูโครสที่มีความเข้มข้นสูงกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ ควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการเป็น 18-30 องศาเซลเซียส ซึ่งโซเดียมคลอไรด์จะช่วยเพิ่มอัตราการทำให้แห้งให้สูงขึ้น โดยใช้ความเข้มข้นที่ไม่มีผลในการยอมรับทางประสาทสัมผัส ถ้าความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสสูงเกินไปจะทำให้อัตราการทำให้แห้งลดลง ในขณะที่การใช้ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ร่วมกับน้ำตาลซูโครสจะเป็นการเพิ่มอัตราการทำให้แห้งให้สูงขึ้น

2.3 อุณหภูมิในการแช่วัตถุดิบ

เมื่ออุณหภูมิที่ใช้สูงขึ้นจะทำให้โครงสร้างบางส่วนของอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพไป คือ เยื่อหุ้มเซลล์อ่อนตัวลงจึงทำให้การแพร่ผ่านของน้ำและตัวถูกละลาย

เป็นไปได้ง่ายกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำ อีกทั้งการเพิ่มอุณหภูมิยังทำให้ความหนืดของน้ำเชื่อมลดลง ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของน้ำและน้ำตาลสะดวกขึ้น จึงช่วยเพิ่มอัตราการคั่งน้ำออกให้ (วันวิสาห์ กระแสร์คุปต์, 2535)

Ravindran (1989) ศึกษาการคั่งน้ำออกแบบออสโมซิสของชิ้นสับประดรูปวงแหวนที่อุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส) พบว่า การแลกเปลี่ยนมวลสารของน้ำกับน้ำตาลเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 8-10 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้น การถ่ายเทมวลสารจะดำเนินไปอย่างช้าๆ เนื่องจากเข้าสู่ภาวะสมดุล

Beristain et al. (1990) ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการคั่งน้ำออกแบบออสโมซิสของชิ้นสับประดที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส ในสารละลายซูโครสเข้มข้น 70 องศาบริกซ์ พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการเคลื่อนย้ายน้ำออกจากผลไม้เร็วขึ้นเป็นผลให้ปริมาณน้ำที่สูญเสียและปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นมีลักษณะเป็นเอกโปเนนเชียล (Exponential) กับเวลา

Rahman and Lamb (1991) ศึกษาการทำแห้งสับประดด้วยวิธีออสโมติกโดยแช่ชิ้นสับประดที่หั่นเป็นแว่น (หนา 6.5 มิลลิเมตร) ในสารละลายซูโครสความเข้มข้น 30 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 20 ถึง 65 องศาเซลเซียส พบว่า ปริมาณน้ำที่สูญเสียของสับประดมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตาลมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส หลังจากนั้น ปริมาณน้ำที่สูญเสียจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ทั้งนี้ เนื่องจาก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 50 องศาเซลเซียส ทำให้สารเพคตินซึ่งพบตามผนังเซลล์ของสับประดเกิดการละลาย มีผลทำให้การแพร่ของน้ำตาลช้าลง จากการทดลองยังพบว่า ที่อุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส อัตราการแพร่ของน้ำตาลซูโครสเกือบจะคงที่

Ponting (1973) และ Flink (1975) พบว่า อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราของการคั่งน้ำออกแบบออสโมซิสอย่างชัดเจน โดยที่อัตราการคั่งน้ำออกจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิแต่จะจำกัดเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส เนื่องจาก เยื่อหุ้มเซลล์ของผักผลไม้ถูกทำลาย ส่งผลให้กระบวนการคั่งน้ำออกเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์

2.4 เวลาที่ใช้ในการแช่วัตถุดิบ

เวลาที่ใช้ในการแช่วัตถุดิบในสารละลายมีผลต่อการคั่งน้ำออกแบบออสโมซิส เนื่องจาก การแช่วัตถุดิบเป็นเวลานาน ทำให้วัตถุดิบมีโอกาสสัมผัสกับสารละลายออสโมติกได้มากขึ้น น้ำในวัตถุดิบจะแพร่ออกมาในอัตราสูง โดยเฉพาะในช่วงแรก อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาผ่านไปช่วงระยะเวลาหนึ่ง น้ำจะแพร่ออกมาในอัตราที่ลดลง (ค่านวน ตันพันธุ์ และวัชรพงษ์ ทองสิมา, 2533)

Kowalska and Lenart (2001) ศึกษาผลของเวลาในกระบวนการคั่งน้ำออกแบบออสโมซิสต่อการถ่ายเทมวลสารใช้ตัวอย่างแอปเปิล พบว่า ปริมาณน้ำที่สูญเสียมีค่าร้อยละ 48 ในช่วง 0-30 นาที และมีค่าลดลงเหลือร้อยละ 30 ในช่วง 60-180 นาที กล่าวคือ การสูญเสียน้ำเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรกของกระบวนการคั่งน้ำออกแบบออสโมซิสและมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลานานขึ้น

2.5 การค่นหรือการกวนสารละลายออสโมติก

ในขณะที่เกิดกระบวนการคั่งน้ำออกแบบออสโมซิส ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติก บริเวณรอบ ๆ ชิ้นอาหารจะลดลง เนื่องจาก น้ำภายในชิ้นอาหารแพร่ผ่านออกมา ทำให้ประสิทธิภาพการคั่งน้ำออกแบบออสโมซิสต่ำลงไปด้วย (Ponting et al., 1996) ดังนั้น การค่นหรือการกวนจะช่วยให้เกิดการกระจายความเข้มข้น ทำให้สารละลายที่เข้มข้นกว่าไหลมาแทนที่สารละลายที่เจือจางกว่า ทำให้อัตราการคั่งน้ำออกสูงขึ้นด้วย (วันวิสาข์ กระแสร์คุปต์, 2535)

Azuara et al. (1996) ศึกษาผลของแรงหมุนเหวี่ยงที่ 64 g ในกระบวนการคั่งน้ำออกแบบออสโมซิสมันฝรั่งและแอปเปิลรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร สูง 0.5 เซนติเมตร ในสารละลายซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 70 พบว่า ปริมาณน้ำที่สูญเสียของชิ้นมันฝรั่งและแอปเปิลที่มีการใช้แรงหมุนเหวี่ยง (ร้อยละ 55 และ 50 ตามลำดับ) มีค่าน้อยกว่าการคั่งน้ำออกแบบออสโมซิสในสถานะนิ่ง (ร้อยละ 70 และ 55 ตามลำดับ) เล็กน้อย ในขณะที่ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นมีค่าลดลงถึงร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับการคั่งน้ำออกแบบออสโมซิสในสถานะนิ่ง ทั้งนี้เนื่องจาก การหมุนเหวี่ยงจะขัดขวางการแพร่ของของแข็งเข้าสู่เซลล์ของชิ้นตัวอย่างแต่ไม่ขัดขวางการแพร่ของน้ำ แต่อัตราการแพร่ของน้ำจะช้าในช่วงแรกของกระบวนการ

2.6 รูปร่างและขนาดของชิ้นอาหาร

รูปร่างและขนาดของชิ้นอาหารมีผลต่ออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตร ถ้าอัตราส่วนนี้สูงน้ำจะแพร่ออกมาได้เร็วขึ้น เนื่องจาก ตัวถูกละลายสามารถสัมผัสกับพื้นที่ผิวของอาหารได้มากขึ้น ถ้าอาหารมีชิ้นใหญ่ น้ำจะแพร่ออกได้น้อย หรือถ้ามีรูปร่างกลม น้ำจะแพร่ออกได้น้อยเช่นกัน เนื่องจากทั้งสองกรณีนี้มีค่าพื้นที่ผิวต่อปริมาตรน้อย (อ่อนรวี รัตนพันธุ์, 2535)

Lerici et al. (1985) กล่าวว่า การตัดผลไม้แบบวงแหวนจะมีการสูญเสียน้ำน้อยลง ในขณะที่มีค่าพื้นที่ผิวมาก อาจเป็นผลมาจากการลดลงของสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน ซึ่งเป็นผลมาจากการมีปริมาณของแข็งที่ผิวหน้าเพิ่มสูงขึ้น และภายใต้สภาวะการคั่งน้ำออกแบบออสโมซิสเดียวกัน ความแตกต่างของขนาดผลไม้ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะที่แตกต่างกันอีกด้วย

Ravindran (1989) ศึกษาการคั่งน้ำออกแบบออสโมซิสของสับปะรด โดยเตรียมสับปะรดให้มีรูปร่าง 2 ลักษณะ คือ รูปร่างแบนหนา 1.2 เซนติเมตร (เส้นผ่านศูนย์กลางวงใน 3 เซนติเมตรและวงนอก 8 เซนติเมตร) และรูปร่างแบบลูกเต๋าด้าน 1.2 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำการคั่งน้ำออกแบบออสโมซิสในสารละลายซูโครสที่ความเข้มข้น 50 60 และ 70 องศาบริกซ์ อัตราส่วนสารละลายต่อสับปะรดเป็น 4:1 ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า รูปร่างของสับปะรดมีผลต่อการสูญเสียน้ำและการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลน้อยมาก สำหรับการสูญเสียวิตามินซี พบว่า สับปะรดรูปลูกเต๋าส่งวิตามินซีมากกว่าสับปะรดรูปร่างแบน

2.7 ชนิดของผลไม้ พันธุ์และความสุก

คุณภาพวัตถุดิบมีผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น จึงต้องมีหลักในการกำหนดปัจจัยของคุณภาพของวัตถุดิบและความคมชัดวัตถุดิบให้อยู่ในระดับที่กำหนดไว้ ผลไม้บางชนิดสามารถออสโมซิสได้เร็ว บางชนิดทำได้ช้า เนื่องจาก การถ่ายเทมวลสารระหว่างน้ำตาลและตัวถูกละลาย ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างของผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ พบว่า น้ำในชั้นสับปะรดสามารถจะแพร่ออกได้เร็วกว่ามะละกอและมะม่วง ผลไม้ชนิดเดียวกันแต่ต่างสายพันธุ์จะมีอัตราในการคั่งน้ำออกต่างกันด้วย (อ่อนรวี รัตนพันธุ์, 2535) นอกจากนี้ ความสุกก็มีผลต่อการคั่งน้ำออกแบบออสโมซิสด้วยเช่นกัน โดยที่ผลไม้ที่นำมาแปรรูปด้วยกระบวนการคั่งน้ำออกวิธีออสโมติกต้องมีความสุกพอเหมาะ (Optimum Maturity) ซึ่งสามารถใช้องค์ประกอบทางเคมีของผลไม้เป็นเครื่องบ่งชี้ความแก่ของผลไม้ได้ เช่น ปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำตาล ปริมาณกรด โดยปริมาณความชื้นในผลไม้จะค่อย ๆ ลดลงเมื่อระดับความสุกเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก ส่วนประกอบที่เป็นทั้งส่วนที่ละลายได้ในน้ำและส่วนที่ไม่ละลายในน้ำมีปริมาณเพิ่มขึ้น ผลไม้ที่สุกและแก่เต็มที่จะมีปริมาณน้ำตาลสูงสุด สำหรับปริมาณกรดในผลไม้เปลี่ยนแปลงไปในทางที่ลดลงเมื่อระดับความสุกเพิ่มขึ้น (กมลจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร, 2546) ผลไม้สุกจะคั่งน้ำออกได้เร็วกว่าผลไม้ดิบแต่ถ้าสุกมากเกินไป ผลไม้จะเละไม่น่ารับประทาน (อ่อนรวี รัตนพันธุ์, 2535)

Kowalska and Lenart (2001) ศึกษาการคั่งน้ำออกแบบออสโมซิสแอปเปิล ฟักทองและแครอทในสารละลายน้ำตาลความเข้มข้นร้อยละ 61.5 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่า ฟักทองมีการถ่ายเทมวลสารดีที่สุด รองลงมาคือแครอท กล่าวคือ ฟักทองมีปริมาณการสูญเสียน้ำสูงขณะที่มีการเพิ่มขึ้นของของแข็งต่ำ ส่วนแอปเปิลมีปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นสูงเนื่องจากโครงสร้างเนื้อเยื่อของแอปเปิลมีความเป็นรูพรุนสูง ทำให้น้ำตาลสามารถแพร่เข้าสู่ชั้นแอปเปิลได้ง่าย

Mavroudis, Dejmek, and Sjöholm (2004) ศึกษาการดัดน้ำออกแบบออสโมซิส แอปเปิล 3 พันธุ์ในตอนใต้ของประเทศสวีเดน ได้แก่ พันธุ์ Jonagold, Kim และ Mutsu ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสในสารละลายซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 50 พบว่า แอปเปิลพันธุ์ Jonagold และ Kim มีปริมาณน้ำที่สูญเสียสูงกว่าพันธุ์ Mutsu และพบว่า พันธุ์ Jonagold มีปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นน้อยที่สุด รองลงมาคือ พันธุ์ Kim และพันธุ์ Mutsu มีปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุด จากการทดลองนี้ พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งไม่ได้เป็นผลมาจากขนาดรูพรุนของเนื้อเยื่อแอปเปิล เนื่องจากแอปเปิลพันธุ์ Kim มีขนาดรูที่เล็กกว่าพันธุ์ Jonagold แต่มีปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นมากกว่า

2.8 อัตราส่วนระหว่างปริมาณสารละลายออสโมติกและอาหาร

ถ้าอัตราส่วนระหว่างปริมาณสารละลายออสโมติกและอาหารเพิ่มขึ้นจะทำให้ น้ำแพร่ออกเร็วขึ้น เนื่องจาก ปริมาณน้ำที่แพร่ออกมาไม่มีผลต่อความเข้มข้นของสารละลายมากนัก ในกรณีที่สารละลายมีความเข้มข้นมาก ดังนั้น แรงขับ ซึ่งหมายถึง ความแตกต่างระหว่างปริมาณ น้ำภายในและภายนอกเซลล์มีค่าสูงอยู่ตลอดเวลา อย่างไรก็ตาม การใช้สารละลายออสโมติกปริมาณมากจะทำให้ค่าใช้จ่ายสูงและยังมีความยากในการจัดน้ำตาลภายหลังการดัดน้ำออกแบบออสโมซิส การใช้อัตราส่วนระหว่างสารละลายกับอาหารเพิ่มขึ้น มีผลให้อัตราการสูญเสียน้ำและอัตราการ เพิ่มขึ้นของน้ำตาลมากขึ้น (วันวิสาข์ กระแสร์คุปต์, 2535)

2.9 วิธีการเตรียมขั้นต้น (Pre-Treatment)

การบ่ม การใช้ความร้อน การแช่ซัลไฟต์และการจุ่มในสารละลายด่าง ส่งผลให้ เนื้อเยื่อของผักผลไม้เปลี่ยนแปลงไปจากธรรมชาติและทำให้มีอัตราการถ่ายเทมวลสารและการทำแห้งได้เร็วขึ้น การใช้สารเคมีสำหรับการเตรียมขั้นต้นมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการเปลี่ยนสีของผักผลไม้แต่อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพด้านกลิ่นรสและเนื้อสัมผัสของผักผลไม้ (อ่อนรวี รัตนพันธุ์, 2535; Ghosh, Agrawal, Jayas, & Kumbhar, 2004)

Le Marguer (1988) พบว่า การลวกหรือการแช่แข็งจะมีผลต่อการดัดน้ำออกแบบออสโมซิส โดยเพิ่มความสามารถในการเป็นเยื่อเลือกผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์

3. ดัชนีที่ใช้ประเมินผลของกระบวนการออสโมติก

Wongkrajang (1996) กล่าวว่า ในระหว่างการดัดน้ำออกแบบออสโมซิส สามารถทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นโดยใช้ตัวบ่งชี้กระบวนการ ซึ่งอาจวัดเป็นปริมาณน้ำที่สูญเสีย (Water Loss: WL) ปริมาณตัวถูกละลายหรือของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Solid Gain: SG) และ น้ำหนักที่ลดลง (Weight Reduction: WR)

3.1 Water Loss (WL) หมายถึง ปริมาณน้ำที่สูญเสียไปต่อน้ำหนักของตัวอย่าง เริ่มต้น 100 กรัม คำนวณได้จาก

$$\text{ร้อยละของปริมาณน้ำที่สูญเสีย (WL)} = \frac{\text{ปริมาณน้ำเริ่มต้น} - \text{ปริมาณน้ำที่เวลาวัด}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น}} \times 100$$

3.2 Solid Gain (SG) หรือ Solute Gain หมายถึง ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นต่อน้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น 100 กรัม คำนวณได้จาก

$$\text{ร้อยละของตัวถูกละลายที่เพิ่มขึ้น (SG)} = \frac{\text{ปริมาณของแข็งทั้งหมด} - \text{ปริมาณของแข็งเริ่มต้น}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น}} \times 100$$

3.3 Weight Reduction (WR) หมายถึง ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักต่อน้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น 100 กรัม คำนวณได้จาก

$$\text{ร้อยละของปริมาณน้ำหนักที่ลดลง (WR)} = \frac{\text{น้ำหนักเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักที่เวลาวัด}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น}} \times 100$$

3.4 Diffusion Coefficient (D_c) หมายถึง สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน ได้แก่ สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (D_{cw}) และสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวถูกละลาย (D_{cs}) โดยการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะใช้กฎข้อที่ 2 ของฟิค (Fick's Second Law) สำหรับการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวอย่างที่มีรูปทรงแบบแผ่น สามารถคำนวณได้ดังนี้ (Telis, Murari, & Yamashita, 2004; Andrade, Neto, Nobrega, Azoubel, & Guerra, 2007)

3.4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (D_{cw}) มีสูตรการคำนวณ ดังนี้

$$\frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-(2n+1)^2 \pi^2 \cdot \frac{D_{cw} t}{L^2} \right]$$

3.4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวถูกละลาย (D_{cs}) มีสูตรการคำนวณ ดังนี้

$$\frac{S_t - S_e}{S_o - S_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-(2n+1)^2 \pi^2 \cdot \frac{D_{cs} t}{L^2} \right]$$

เมื่อ M_o , M_t และ M_e คือ ปริมาณความชื้นเฉลี่ยของตัวอย่างที่เวลาเริ่มต้น เวลาหลังการออสโมซิส และที่สภาวะสมดุล (กรัมของน้ำ / 100 กรัมของน้ำหนักเริ่มต้น)

S_0 , S_i และ S_c คือ ปริมาณของแข็งเฉลี่ยในตัวอย่างที่เวลาเริ่มต้นที่เวลาหลังการออสโมซิส และที่สภาวะสมดุล (กรัม / 100 กรัมของน้ำหนักเริ่มต้น)

n คือ จำนวนตัวอย่าง

t คือ เวลาในการแพร่ (วินาที)

L คือ ความหนาของชิ้นตัวอย่าง (เซนติเมตร)

3.4.3 ข้อกำหนดในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับตัวอย่างที่มีรูปทรงแบบแผ่นมีดังนี้ (Togrul & Ispir, 2007)

3.4.3.1 ชิ้นตัวอย่างมีลักษณะแบบแผ่นบางมีความกว้างเท่ากับ $2L$

3.4.3.2 ปริมาณน้ำและความเข้มข้นของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในชิ้นตัวอย่างมีค่าคงที่ (Uniform)

3.4.3.3 สัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าคงที่ ($D \neq f(C)$)

3.4.3.4 กระบวนการคั่งน้ำออกแบบออสโมซิสดำเนินการในสภาวะที่อุณหภูมิคงที่

3.4.3.5 พิจารณาเฉพาะการแพร่ของน้ำออกจากชิ้นตัวอย่างและการแพร่ของตัวถูกละลายในสารละลายเข้าสู่ชิ้นตัวอย่างเท่านั้น ไม่พิจารณาการแพร่ของสารอื่น ๆ

3.4.3.6 กำหนดให้การเกิดขึ้นฟิล์มของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าตัวอย่างที่สภาวะสมดุล ความเข้มข้นของสารละลายและระยะเวลาของกระบวนการออสโมซิสมีผลโดยตรงต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

3.4.3.7 ไม่คำนึงการหดตัวของชิ้นตัวอย่าง

4. ข้อดีและข้อเสียของการคั่งน้ำออกแบบออสโมซิส

Ponting et al. (1996) และพีรยา โชติฉนอม (2008) ได้รายงานข้อดีและข้อเสียของกระบวนการคั่งน้ำออกแบบออสโมซิส ดังนี้

4.1 ข้อดี

4.1.1 สามารถลดความชื้นเบื้องต้นของวัตถุดิบลงได้ถึงร้อยละ 50-60 โดยไม่ใช้ความร้อนหรือไม่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำ

4.1.2 ลดการใช้พลังงานในขั้นตอนการทำแห้ง

4.1.3 ช่วยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากสารละลายออสโมติกจะช่วยลดการซึมผ่านของออกซิเจนเข้าสู่เนื้อเยื่อของอาหาร

4.1.4 การใช้ความเข้มข้นของสารละลายสูงจะสามารถป้องกันการเกิดสีน้ำตาลได้ ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีสีสวย

4.1.5 มีค่าใช้จ่ายด้านเครื่องมือและการดำเนินงานต่ำ

4.1.6 ช่วยรักษากลิ่นรสของวัตถุดิบได้ดีกว่าการทำแห้งโดยใช้ลมร้อน

4.1.7 การแพร่ผ่านของน้ำตาลจะทำให้รสชาติของผลิตภัณฑ์ดีขึ้นเหมาะสำหรับเป็นขนมขบเคี้ยวหรืออาหารว่าง

4.2 ข้อเสีย

4.2.1 ทำให้กรดที่มีอยู่ในผลไม้ลดปริมาณลง ดังนั้น ควรมีการเติมกรดผสมลงในสารละลายออกโมติก

4.2.2 ปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้นทำให้เกิดปัญหาการเป็นฟิล์มบางบริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์เมื่อนำไปอบแห้ง สามารถแก้ไขได้โดยการล้างในน้ำร้อนอย่างรวดเร็ว ภายหลังการดองน้ำออกแบบออสโมซิส

4.2.3 เกิดกลิ่นอับหรือกลิ่นหืนได้เมื่อเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีปริมาณน้ำตาลและน้ำมันหอมระเหย (Essential Oil) เหลืออยู่มากกว่าผลไม้แห้งทั่วไป จึงจำเป็นต้องใช้สารกันหืนเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา

4.2.4 กระบวนการนี้มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการทำแห้งโดยใช้ลมร้อนหรือการทำแห้งโดยใช้สุญญากาศ แต่จะมีราคาถูกกว่าการทำแห้งด้วยวิธีแช่แข็ง

อาหารกึ่งแห้ง

อาหารกึ่งแห้ง คือ อาหารที่มีปริมาณความชื้นและมีค่าวอเตอร์แอคทิวิตีต่ำกว่าอาหารสด ทำให้มีอายุการเก็บรักษานานขึ้น จากการตรวจสอบเอกสารพบว่า มีผู้ให้คำอธิบายถึงความชื้นและค่าวอเตอร์แอคทิวิตีของอาหารกึ่งแห้งไว้ ทั้งนี้ อาหารกึ่งแห้งเป็นอาหารที่ผ่านกระบวนการลดความชื้นเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง โดยมีค่าวอเตอร์แอคทิวิตีอยู่ในช่วง 0.6-0.9 (ปริยา วิบูลย์เศรษฐ์, 2528; Leistner, Rockland, & Stepwart, 1981) แต่ในทางการค้า อาหารกึ่งแห้งมักจะควบคุมให้มีค่าวอเตอร์แอคทิวิตีอยู่ในช่วง 0.7-0.85 (Brockmann, 1969) สำหรับปริมาณความชื้นในอาหารกึ่งแห้งนั้นได้มีรายงานปริมาณความชื้นที่เหมาะสมแตกต่างกันไป กล่าวคือ ร้อยละ 15-30 (Desrosier, 1970) ร้อยละ 15-40 (Smith & Norvell, 1975) ร้อยละ 20-40 (Leibetseder, 1980) ร้อยละ 15-50 (Edney, 1982) และร้อยละ 25-35 (Sylvester, 1984) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด

ไพโรจน์ วิริยะจารีย์ (2539) กล่าวว่า อาหารกึ่งแห้งเป็นอาหารที่มีค่าวอเตอร์แอคทิวิตีอยู่ในช่วง 0.65-0.85 มีความชื้นประมาณร้อยละ 15-30 ซึ่งเป็นระดับที่เชื้อจุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรียส่วนใหญ่ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ แต่อาจจะมีปัญหาเกี่ยวกับเชื้อราและยีสต์ที่อาจจะ

เจริญเติบโตได้ ซึ่งค่าออเตอร์แอคทีวิตีแสดงถึง ปริมาณน้ำที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ หากมีค่ามากกว่า 0.6 จะหมายถึง น้ำอิสระที่มีอยู่ในเนื้อเยื่อของอาหารทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย และถูกใช้สำหรับการเจริญของจุลินทรีย์ (สุเมธทา วัฒนสินธุ์, 2549) ตัวอย่างของอาหารกึ่งแห้งที่พบได้โดยทั่วไป เช่น กุนเชียง เนยแข็งบ่ม แฮมแห้ง เยลลี่ แยม น้ำผึ้ง แยมผลไม้ ผลไม้แห้ง และลูกกวาด ค่าออเตอร์แอคทีวิตีของอาหารกึ่งแห้งบางชนิดแสดงดังตารางที่ 2-6 อาหารกึ่งแห้งจะมีอายุการเก็บรักษาที่นานกว่าอาหารทั่วไป เนื่องจาก อาหารกึ่งแห้งมีปริมาณน้ำอิสระลดต่ำลงจนถึงระดับที่จุลินทรีย์ส่วนใหญ่โดยเฉพาะจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคไม่สามารถเจริญได้ อย่างไรก็ตาม อาหารกึ่งแห้งยังสามารถบริโภคได้โดยไม่ต้องคั้นตัวและยังคงมีปริมาณน้ำจำนวนหนึ่งจึงทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสอาหารยังคงเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (ไพโรจน์ วิริยะจารี, 2539; ชมพู ยัมโค, 2550; Barbosa-Canovas et al., 2003)

1. ประเภทของอาหารกึ่งแห้ง

ไพโรจน์ วิริยะจารี (2539) กล่าวว่า อาหารกึ่งแห้งอาจแบ่งออกได้ตามลักษณะของการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ดังนี้

1.1 อาหารกึ่งแห้งแบบดั้งเดิม (Traditional Types of Intermediate Moisture Foods)

เป็นอาหารแปรรูปที่มีการผลิตมานานแล้ว โดยการนำอาหารมาทำแห้งด้วยการผึ่งแดดให้ความชื้นลดลง ทำให้สามารถเก็บรักษาอาหารไว้ได้นานขึ้น ต่อมาได้มีการนำตัวถูกละลายมาใช้เพื่อลดปริมาณน้ำลง ตัวถูกละลายที่นิยมใช้ คือ เกลือและน้ำตาล เมื่อทำให้อาหารมีปริมาณน้ำลดลงเชื้อจุลินทรีย์ก็ไม่สามารถใช้น้ำได้ ทำให้การเก็บรักษาอาหารยาวนานขึ้น

1.2 อาหารกึ่งแห้งแบบที่มีการพัฒนาใหม่ (Modern Types of Intermediate Moisture Foods) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต่อมาได้มีการพัฒนาอาหารกึ่งแห้งให้ได้เป็นอาหารที่มีกลิ่น รสชาติและลักษณะเนื้อสัมผัสที่แปลกใหม่

1.2.1 หลักการการผลิตอาหารกึ่งแห้งแบบที่มีการพัฒนาใหม่ ดังนี้

1.2.1.1 การลดปริมาณความชื้นให้ต่ำหรือลดปริมาณน้ำที่เป็นประโยชน์ให้ต่ำลง โดยการใช้สารดูดความชื้น

1.2.1.2 การเติมสารยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ โดยเฉพาะเชื้อราและยีสต์

1.2.1.3 การเติมสารเคมีบางประเภท เพื่อปรับปรุงความคงทนและคุณสมบัติทางด้านกลิ่นรสและรสชาติของอาหาร

1.2.2 ปัจจัยสำคัญเพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยและพัฒนาารูปแบบของเทคโนโลยีการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารกึ่งแห้งนั้น มีปัจจัยต่างๆ ที่ต้องนำมาประกอบการพิจารณา ดังนี้

1.2.2.1 การลดค่าออเตอร์แอคทีวิตีโดยการเติมสารที่เป็นตัวถูกละลาย

1.2.2.2 การพัฒนาสูตรการผลิต โดยการหาสารดูดความชื้นชนิดใหม่ และเหมาะสมมาทำการผลิตอาหารกึ่งแห้ง โดยต้องคำนึงถึงข้อเสียในด้านกลิ่นรสและรสชาติของผลิตภัณฑ์รวมทั้งต้องมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภคด้วย

1.2.2.3 การใช้สารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่เหมาะสมโดยคำนึงถึงความปลอดภัยต่อผู้บริโภคและประสิทธิภาพของการใช้สารดังกล่าวในผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้รับการพัฒนาแล้ว

1.2.2.4 การพัฒนากระบวนการผลิตอาหารกึ่งแห้ง

1.2.2.5 ความคงทนในการเก็บรักษาอาหารกึ่งแห้ง

ตารางที่ 2-6 ค่าวอเตอร์แอกติวิตีในอาหารกึ่งแห้งบางชนิด (ไพโรจน์ วิริยะจารีย์, 2539)

ประเภทอาหารกึ่งแห้ง	ค่าวอเตอร์แอกติวิตี
กุนเชียง	0.82-0.85
ไส้กรอกประเภท landjager	0.79
ผลไม้แห้ง	0.72-0.80
แฮมและยาลลี่	0.82-0.94
น้ำผึ้ง	0.75
ไส้ที่ใช้กับเพสตรี	0.65-0.71

2. เทคนิคการผลิตอาหารกึ่งแห้ง

เทคนิคการผลิตอาหารกึ่งแห้งอาศัยหลักการทำให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตีของอาหารลดต่ำลง โดยการแช่หรือต้มชิ้นอาหารในสารละลายที่เหมาะสมจนค่าวอเตอร์แอกติวิตีของอาหารลดต่ำลงตามต้องการแล้วนำชิ้นอาหารไปทำแห้ง ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อระดับของค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ ประกอบด้วย ชนิดของสารละลาย ค่าความเป็นกรด่าง ชนิดหรือประมาณสารยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ รวมทั้งชนิดและปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ เริ่มต้น (ชมพู่ ยัมโต, 2550; Barbosa-Canovas et al., 2003)

3. การเปลี่ยนแปลงของอาหารกึ่งแห้งในระหว่างการเก็บรักษา

ความคงตัวของอาหารกึ่งแห้งในระหว่างการเก็บรักษาเป็นสิ่งสำคัญและเป็นปัจจัยหลักที่ต้องคำนึงถึงก่อนที่จะนำอาหารกึ่งแห้งถึงมือผู้บริโภค การทราบถึงสาเหตุของการเสื่อมเสียและลักษณะของการเสื่อมเสียต่าง ๆ ที่สามารถบ่งชี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร เป็นข้อมูลที่เป็น

ประโยชน์อย่างมากต่อการหาวิธีการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร (ไพโรจน์ วิริยะจารีย์, 2539; หมพู่ ยิมโต, 2550; บุญกร อุตรภิชาดิ, 2547)

การพิจารณาว่าอาหารใดเสื่อมเสียขึ้นอยู่กับการยอมรับของผู้บริโภค โดยปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณาเพื่อยอมรับคุณภาพของอาหาร ได้แก่ สี เนื้อสัมผัส กลิ่น กลิ่นรสและรสชาติของอาหาร รวมทั้งการไม่พบสิ่งผิดปกติที่ไม่ใช่ลักษณะของอาหารนั้น ๆ (บุญกร อุตรภิชาดิ, 2547) สาเหตุการเสื่อมเสียของอาหารแยกออกเป็น 2 ประเภท คือ การเสื่อมเสียของอาหารที่เกิดขึ้นจากภายใน (Endogenous Food Spoilage) ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสีย ได้แก่ เอนไซม์และการเสื่อมเสียของอาหารที่เกิดขึ้นจากภายนอก (Exogenous Food Spoilage) โดยลักษณะการเสื่อมเสียคุณภาพของอาหารสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ คุณภาพทางจุลินทรีย์ เคมีและกายภาพ (Singh, 1994)

3.1 การเปลี่ยนแปลงของอาหารทั้งหมั่เนื่องจากจุลินทรีย์

อาหารจะเกิดการเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ได้นั้น ต้องมีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในอาหาร จุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในอาหารอาจมาจาก ดิน น้ำ อากาศ ผัก ผลไม้ สัตว์ กระบวนการผลิตและการจำหน่าย ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์จำแนกได้ 2 ประเภท คือ ปัจจัยภายใน (Intrinsic Factors) และปัจจัยภายนอก (Extrinsic Factors) สำหรับปัจจัยภายในเป็นปัจจัยที่สัมพันธ์กับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์โดยตรง ได้แก่ สารอาหาร ความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ปริมาณออกซิเจน ความเป็นกรด-ด่างของอาหาร การถ่ายเทอิเล็กตรอนของอาหาร สารยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ รวมทั้งโครงสร้างทางชีววิทยาของอาหารตามธรรมชาติที่เป็นอุปสรรคต่อการเจริญของจุลินทรีย์ ในด้านของปัจจัยภายนอก หมายถึง ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมที่มีผลทางอ้อมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ คือ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในการเก็บรักษา รวมทั้งชนิดและปริมาณก๊าซในการเก็บรักษาอาหารในสภาวะดัดแปลงบรรยากาศ เมื่อจุลินทรีย์เจริญเติบโตในอาหารจะทำให้อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงไป โดยมากมักเกิดการเปลี่ยนแปลงในทางที่ไม่ต้องการ เช่น อาหารพวกขนมปังมีการเติบโตของราสีต่าง ๆ เช่น สีดำ สีเขียวและสีแดง ผักมีลักษณะเน่าเหม็นมีกลิ่นเหม็น ผลไม้มีการเติบโตของราสีดำ สีเขียวเทาหรือมีกลิ่นแอลกอฮอล์ (วิลาวัณย์ เจริญจิระตระกูล, 2539; สุมนหา วัฒนสินธุ์, 2549; Smith, 1993; Seiler, 1999)

ค่าวอเตอร์แอกติวิตีของอาหารเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโต การสร้างสปอร์และความคงทนของจุลินทรีย์ อาหารที่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตีสูง ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1.0 ได้แก่ อาหารสด เช่น เนื้อสัตว์ อาหารทะเลและผักสด จะเกิดการเน่าเสียได้ง่าย ส่วนอาหารที่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่ำกว่า 0.6 ได้แก่ อาหารแห้ง ธัญชาติ นมผงและกาแฟ จะเกิดการเสื่อมเสียได้ยากกว่า สามารถเก็บรักษาได้เป็นเวลานาน (คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, 2546) โดยทั่วไปจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุดในอาหารที่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตี

ในระดับที่เหมาะสม และการเจริญจะลดลงเมื่อค่าวอเตอร์แอกติวิตีลดลง จนกระทั่งถึงช่วงหนึ่งที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้ จุลินทรีย์แต่ละชนิดสามารถเจริญในอาหารที่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่ำที่สุดที่จุลินทรีย์สามารถเจริญได้ เรียกว่า Minimal Water Activity แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2-7 จุลินทรีย์ส่วนใหญ่จะเจริญในอาหารที่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตีสูง และมีจุลินทรีย์เพียงส่วนน้อยที่สามารถเจริญในอาหารที่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่ำ ดังนั้น การลดค่าวอเตอร์แอกติวิตีลงจะสามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ลงได้ แต่การยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการในอาหารกึ่งแห้งไม่เพียงพอแต่ใช้วิธีการลดค่าวอเตอร์แอกติวิตีจนถึงระดับที่ไม่เหมาะสมแก่การเจริญของจุลินทรีย์เท่านั้น แต่ยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ เช่น อิทธิพลของอุณหภูมิ สารกันเสียและค่าความเป็นกรด่าง เป็นต้น (ไพโรจน์ วิริยะจารีย์, 2539; สุมนชา วัฒนสินธุ์, 2549; Singh, 1994)

3.1.1 การเปลี่ยนแปลงของอาหารกึ่งแห้งเนื่องจากแบคทีเรีย

ความสัมพันธ์ของค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่ำสุดกับการเจริญของจุลินทรีย์แสดงดังตารางที่ 2-7 จะเห็นได้ว่า ถ้าอาหารมีค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่ำกว่า 0.90 จะสามารถยับยั้งการเจริญและการงอกของสปอร์ของแบคทีเรียแกรมลบ (Gram-Negative Bacteria) แบคทีเรียแกรมบวก (Gram-Positive Bacteria) และแบคทีเรียที่สร้างสปอร์ (Spore-Forming Bacteria) ได้ ยกเว้น *Staphylococcus aureus* และ *Halophilic bacteria*

3.1.2 การเปลี่ยนแปลงของอาหารกึ่งแห้งเนื่องจากเชื้อรา

อาหารที่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตีมากกว่า 0.90 โดยทั่วไปมักเกิดการเสื่อมเสียเนื่องจากแบคทีเรียมากกว่าราและยีสต์ แต่ถ้าหากค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่ำกว่า 0.90 การเสื่อมเสียของอาหารกึ่งแห้งในระหว่างการเก็บรักษามีแนวโน้มมาจากการเจริญของเชื้อรา ซึ่งเชื้อราที่สามารถเจริญและสร้างสปอร์ในอาหารกึ่งแห้ง ได้แก่ *Cladosporium* *Peacilomyces* *Penicillium* *Aspergillus* *Emericella* *Eremascus* *Wallemia* *Eurotium* *Chrysosporium* และ *Monascus* (ไพโรจน์ วิริยะจารีย์, 2539; สุมนชา วัฒนสินธุ์, 2549; Singh, 1994) ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญของเชื้อราในอาหารกึ่งแห้ง ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ อุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษา จำนวนเชื้อราที่ปนเปื้อนมาในอาหาร การเก็บอาหารกึ่งแห้งในภาชนะที่อากาศผ่านเข้าออกได้หรือมีความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่าอาหารจะทำให้อาหารมีความชื้นสูงขึ้น เชื้อราจะสามารถเจริญได้ จึงควรเลือกใช้ภาชนะบรรจุที่ไม่ให้อากาศผ่านเข้าออกได้และลดอุณหภูมิในการเก็บรักษาลงเพื่อเพิ่มอายุการเก็บรักษาของอาหารกึ่งแห้ง (ไพโรจน์ วิริยะจารีย์, 2539)

3.1.3 การเปลี่ยนแปลงของอาหารกึ่งแห้งเนื่องจากเชื้อยีสต์

อาหารที่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตีประมาณ 0.60-0.85 จะสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อยีสต์ส่วนใหญ่รวมทั้งยีสต์ที่เป็นพิษ (Pathogenic Yeast) ได้ แต่ยีสต์ชนิดทนน้ำตาล

ที่มีความเข้มข้นสูงได้ดี (Osmophilic Yeast) สามารถเจริญได้ในสภาวะที่มีค่าออกเตอร์แอคทีวิตีต่ำ จึงควรควบคุมปริมาณยีสต์ดังกล่าวในวัตถุดิบเริ่มต้นให้ต่ำที่สุดและอาจมีการเติมสารกันเสียในอาหารกึ่งแห้ง โดยใช้ภายใต้ข้อกำหนดของกฎหมายของแต่ละประเทศ สารกันเสียที่ใช้ ได้แก่ กรดซัลฟูริก กรดเบนโซอิก กรดซอร์บิก กรดพาราไฮดรอกซีเบนโซอิกและเกลือของกรดเหล่านี้ ซึ่งการเลือกใช้สารเคมีขึ้นกับชนิดของอาหารและแนวโน้มของเชื้อที่จะเจริญในอาหารนั้น (ไพโรจน์ วิริยะจารีย์, 2539; สุมณฑา วัฒนสินธุ์, 2549)

ตารางที่ 2-7 ความสัมพันธ์ของค่าออกเตอร์แอคทีวิตีต่ำสุดกับการเจริญของจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ (สุมณฑา วัฒนสินธุ์, 2549)

ชนิดจุลินทรีย์	a_w ต่ำสุด
แบคทีเรีย	0.91
ยีสต์	0.88
เชื้อรา	0.80
แบคทีเรียชนิดทนเกลือได้ดี	0.75
เชื้อราชนิดทนแห้งได้ดี	0.61
ยีสต์ชนิดทนน้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูงได้ดี	0.60
Achromobacter	0.96
Aerobacter aerogenes	0.95
Bacillus subtilis	0.95
Clostridium botulinum	0.95
Escherichia coli	0.96
Pseudomonas	0.97
Staphylococcus aureus	0.86
Saccharomyces rouxii	0.62
Salmonella	0.95

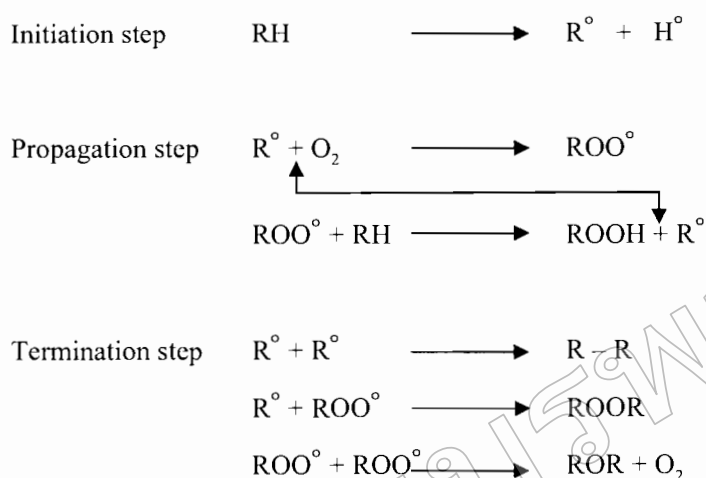
3.2 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของอาหารกึ่งแห้ง

แม้ว่าอาหารกึ่งแห้งจะมีค่าออกเตอร์แอคทีวิตีต่ำจนสามารถลดการเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ได้ แต่ผลจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญ คือ การหืน (Rancidity) ในอาหาร

(การหืนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันและไขมัน) และการเกิดสีน้ำตาลทั้งอาศัยและไม่อาศัยเอนไซม์ ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจะสูงที่สุดในช่วงของอาหารกึ่งแห้งแสดงดังภาพที่ 2-13 โดยผลของปฏิกิริยาจะทำให้คุณค่าทางโภชนาการของอาหารลดลง เกิดการเปลี่ยนแปลงกลิ่นรสและลักษณะปรากฏของอาหาร (ไพโรจน์ วิริยะจารีย์, 2539; Singh, 1994)

3.2.1 การหืนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative Rancidity) ระหว่างออกซิเจนกับน้ำมันและไขมันในอาหาร ที่ตำแหน่งพันธะคู่ในโมเลกุลของน้ำมันและไขมัน โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน (แสดงดังภาพที่ 2-14) ดังนี้ ขั้นที่หนึ่ง คือ Initiation Step เริ่มจากไขมัน (RH) เมื่อถูกกระตุ้นจากสภาพแวดล้อมจะแตกตัวเป็นอัลคิลเรดิคัล (Alkyl Radical; $R^\bullet$) ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระ (Free Radicals) และ $H^\bullet$ ขั้นที่สอง คือ Propagation Step เป็นขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ โดยอัลคิลเรดิคัลทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นเพอออกซิเรดิคัล (Peroxy Radicals; $ROO^\bullet$) แล้วเพอออกซิเรดิคัลเข้าทำปฏิกิริยากับไขมันเกิดเป็นเพอออกไซด์ (Peroxides; $ROOH$) และอัลคิลเรดิคัลขึ้นอีกเกิดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่และขั้นที่สาม คือ Termination Step เป็นขั้นตอนที่อนุมูลอิสระเกิดการรวมตัวกันในแบบต่าง ๆ ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เสถียรซึ่งการรวมตัวกันนี้ทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันหยุดลง

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันและไขมันก่อให้เกิดการแตกตัวของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว อาหารเกิดการเหม็นหืนเนื่องจาก สารไฮโดรเพอร์ออกไซด์เกิดการสลายตัวให้สารประกอบอัลดีไฮด์ คีโตน แอลกอฮอล์และกรดไขมันโมเลกุลสั้น เป็นต้น ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ทำให้อาหารมีกลิ่นเหม็นหืน นอกจากนี้ อนุมูลอิสระและเพอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นอาจทำให้สีของผลิตภัณฑ์ซีดจางลง เนื่องจาก เกิดการฟอกสี (Smith, 1993) ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันและไขมัน ได้แก่ ปริมาณออกซิเจน ระดับความไม่อิ่มตัวของกรดไขมัน กรรมวิธีการแปรรูป แสงสว่างและอุณหภูมิ (ไพบุลย์ ธรรมรัตน์วาศิก, 2532) จากภาพที่ 2-13 จะเห็นได้ว่า อัตราการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันและไขมันจะสูงในช่วงของอาหารกึ่งแห้งและอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าวอเตอร์แอคทีวิตีสูงขึ้น เนื่องจาก เมื่ออาหารมีปริมาณน้ำอิสระสูงขึ้น ทำให้สารตั้งต้นเคลื่อนที่ได้มากขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาละลายได้ดีและเซลล์ของอาหารพองตัวทำให้มีโอกาสการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

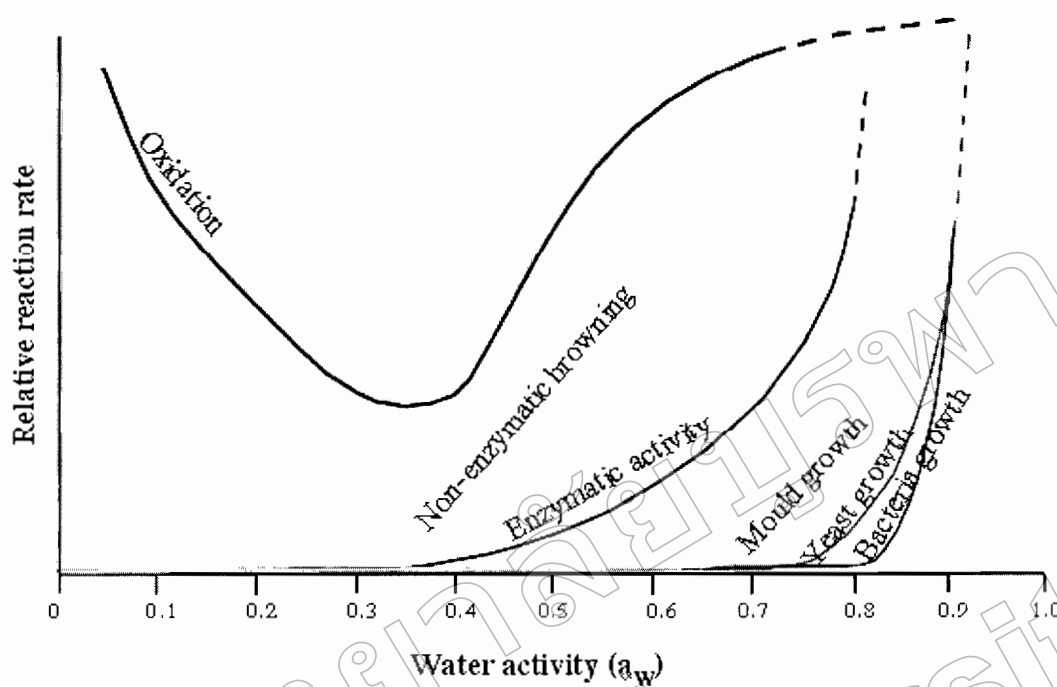


ภาพที่ 2-13 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (นิธิยา รัตนูปนันท, 2548)

วิธีการควบคุมการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันและไขมัน ทำได้โดยการใช้สารต้านออกซิเดชัน การเติมไฮโดรเจน การกำจัดอากาศในขั้นตอนการบรรจุ โดยควบคุมปริมาณออกซิเจนและการควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำลง ตามทฤษฎีของอาร์เรเนียส คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส (ไพโรจน์ วิริยจารี, 2539) วิธีการประเมินการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันและไขมัน ทำได้โดยการวิเคราะห์ค่าเพอร์ออกไซด์ (Peroxide Value, P.V.)

ค่าเพอร์ออกไซด์เป็นการวัด Degree of Lipid Oxidation โดยการหาปริมาณออกไซด์ที่มีอยู่ในน้ำมันและไขมัน สารเพอร์ออกไซด์จะเกิดขึ้นในน้ำมันและไขมันอย่างช้า ๆ ในระหว่างที่น้ำมันและไขมันถูกเก็บไว้ให้สัมผัสอากาศเรียกว่า Oxidative Rancidity เป็นการเกิดออกซิเดชันขึ้นที่พันธะคู่ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว ดังนั้น น้ำมันและไขมันที่มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุลมาก หรือมีค่าไอโอดีนสูง จะเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย จึงนิยมวัดค่าเพอร์ออกไซด์ เพื่อใช้ชี้บ่งการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันและไขมัน เพราะเพอร์ออกไซด์เป็นอินเทอร์มีเดียตของปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ค่าเพอร์ออกไซด์ หมายถึง จำนวนมิลลิกรัมของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ความเข้มข้น 0.002 นอร์มัลที่ใช้ในการไทเทรตน้ำมันและไขมัน 1 กรัม หรือหมายถึงจำนวนมิลลิสมมูลของเพอร์ออกไซด์ออกซิเจนต่อน้ำมันและไขมัน 1 กิโลกรัมหรือมิลลิโมลของออกซิเจนต่อกิโลกรัมของไขมัน (1 มิลลิโมลเท่ากับ 2 มิลลิสมมูล) (นิธิยา รัตนูปนันท, 2548)



ภาพที่ 2-14 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและจุลินทรีย์ที่ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีต่างๆ

3.2.2 การหืนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Rancidity) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อพันธะเอสเทอร์ในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ เกิดการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ไลเปส (Lipase) ทำให้น้ำมันและไขมันเกิดการสลายตัวได้กลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระ โดยเฉพาะกรดไขมันอิสระโมเลกุลสั้นจะมีกลิ่นเหม็นหืนมาก เมื่อเกิดการหืนจะทำให้น้ำมันและไขมันมีกลิ่นและรสชาติเปลี่ยนไป ความแตกต่างระหว่างการหืนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับการหืนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือ การหืนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นในสถานะที่ไม่มีออกซิเจน แต่จะเกิดขึ้นในสถานะที่มีความชื้น อุณหภูมิสูง และเมื่อมีเอนไซม์ไลเปสในอาหาร การประเมินการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันและไขมัน ทำได้โดยการวิเคราะห์ค่า Acid Value (A.V.) หรือ Free Fat Acid (FFA)

ค่า Acid Value (A.V.) ของน้ำมันและไขมัน คือ จำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทำใหกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมันและไขมัน 1 กรัมเป็นกลางพอดี ผลการทดลองอาจจะนำมาคำนวณเป็นร้อยละของกรดไขมันอิสระ ซึ่งค่า Acid Value ที่วิเคราะห์ได้ใช้เป็นตัวชี้บ่งว่าไตรเอซิลกลีเซอรอลที่มีอยู่ในน้ำมันและไขมันถูกทำลายด้วยเอนไซม์ไลเปสเป็นกรดไขมันอิสระมากเพียงใด ถ้าค่า Acid Value สูง แสดงว่า โมเลกุลของไตรเอซิล-

กลีเซอรอลถูกสลายตัวได้เป็นกรดไขมันอิสระมาก แสดงว่ามี Hydrolytic Rancidity เกิดขึ้นที่น้ำมันและไขมันนั้น ความร้อนและแสงช่วยเร่งให้เกิดการหืนได้เร็วขึ้น (นิธิยา รัตนานนท์, 2548)

3.2.3 ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ (Enzymatic Browning Reaction) เอนไซม์ที่ทำให้เกิดสีน้ำตาล คือ พอลิฟีนอลออกซิเดส (PPO; EC 1.10.3.1) เป็น Copper-Containing Enzyme เอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสพบมากในพืช เช่น มันฝรั่ง องุ่น มะม่วง สาลี่ ผักกาดหอม โกโก้ (Martinez & Whitaker, 1995) การเกิดสีน้ำตาลมักเกิดขึ้นบริเวณแผลหรือรอยตัดของผลผลิต โดยเฉพาะผลผลิตที่มีสารประกอบฟีนอลในปริมาณสูง (Heimdal, Kuhn, Poll, & Larsen, 1995) โดยเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส ทำการออกซิไดส์สารประกอบจำพวกฟีนอลในสภาพที่มีออกซิเจน ทำให้เกิดสารออร์โธไดฟีนอล (o-Diphenols) ซึ่งจะถูกรีดออกซิไดส์ต่อไปเป็นออร์โธควิโนน (o-Quinone) สารออร์โธควิโนนที่เกิดขึ้นนี้จะมีสีเล็กน้อยและเป็นสารอินเตอร์มีเดียทที่มีความไวต่อปฏิกิริยาการเกิดสี

3.2.4 ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ (Nonenzymatic Browning Reaction) การเกิดสีน้ำตาลจากปฏิกิริยาแบบไม่ใช้เอนไซม์ นอกจากจะทำให้เกิดสีที่ไม่ต้องการแล้วยังส่งผลให้เกิดการทำลายสารอาหาร เช่น กรดอะมิโนจำเป็น วิตามินซี ทำให้โปรตีนย่อยยาก ยับยั้งเอนไซม์ที่ใช้ย่อย รบกวนเมแทบอลิซึมและยังอาจเกิดสารพิษ สารก่อการกลายพันธุ์จากปฏิกิริยาเมลลาร์ด โดยเฉพาะอาหารจำพวกเนื้อ ที่ผ่านการหุงต้มมาแล้ว นอกจากนี้ การเปลี่ยนสีน้ำตาลอาจเกิดจากการเสื่อมสลายของน้ำตาลเอง (ประสาร สวัสดิ์ชิตัง, 2538; นิธิยา รัตนานนท์, 2549) ซึ่งสามารถแบ่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

3.2.4.1 ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction) เป็นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่มีสารตั้งต้น คือ กรดอะมิโน เพปไทด์หรือโปรตีน ทำปฏิกิริยากับหมู่ไกลโคซิดิกไฮดรอกซิล (Glycosidic Hydroxyl) ของน้ำตาล ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นเมลานอยดิน (Melanoidin) ซึ่งมีสีน้ำตาล ปฏิกิริยานี้ส่งผลต่อการสูญเสียคุณสมบัติของโปรตีน การคล้ำลงของสีและการเพิ่มขึ้นของรสขม ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล ได้แก่ อุณหภูมิสูง เนื่องจาก อุณหภูมิที่สูงจะเร่งอัตราการเกิดสีน้ำตาลให้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งอัตราการเกิดสีน้ำตาลจะเพิ่มขึ้น 3-4 เท่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ยังขึ้นกับค่าออกเตอร์แอคทิวิตี ชนิดของสารประกอบคาร์บอนิล เนื่องจาก โครงสร้างของสารประกอบคาร์บอนิลแบบเพนโตสจะเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าเฮกโซส ความเป็นกรด-ด่าง ค่าออกเตอร์แอคทิวิตีและชนิดของสารประกอบอะมิโนในอาหาร โดยสารประกอบอะมิโนที่ละลายน้ำได้จะเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าที่ไม่ละลายในน้ำ วิธีการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล ทำได้โดยการใช้สารประกอบซัลไฟต์ การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่ำ การลดค่าความเป็นกรด-ด่างให้ต่ำกว่า 5 ลดการใช้ปริมาณน้ำตาลในผลิตภัณฑ์และทำให้โปรตีนที่

มีอยู่ในผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปที่ไม่สามารถละลายได้ในน้ำ โดยการเลือกใช้ส่วนผสมที่มีปริมาณร้อยละการละลายของโปรตีนต่ำ (ไพโรจน์ วิริยจารี, 2539)

3.2.4.2 ปฏิริยาการเกิดคาเมลไลเซชัน (Caramelization) เกิดจากการให้ความร้อนแก่น้ำตาลที่อุณหภูมิสูง โดยมีกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิริยา ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบที่ระเหยได้ ลักษณะของการเกิดปฏิริยาเป็นแบบดีไฮเดรชัน (Dehydration) แฟลคเมนเตชัน (Fragmentation) และคอนเดนเซชัน (Condensation) (นิธิยา รัตนานันท์, 2548)

3.2.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของอาหารกึ่งแข็ง

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของอาหารกึ่งแข็งก่อให้เกิดผลต่อการสูญเสียการยอมรับของผู้บริโภค เนื่องจาก การเกิดกลิ่นเหม็นหืนจากปฏิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิริยาออกซิเดชันของน้ำมันและไขมันและการเกิดกลิ่นและสีที่ไม่ปกติโดยปฏิริยาเมลลาร์ด การสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ โดยการเกิดปฏิริยาเมลลาร์ดทำให้เกิดการสูญเสียกรดอะมิโนจำเป็น เช่น ไลซีน และกรดอะมิโนที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ อีกทั้ง การเปลี่ยนแปลงทางเคมียังอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษได้ จากการทดสอบในหนูทดลอง พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่เกิดปฏิริยาเมลลาร์ดทำให้น้ำหนักของหนูทดลองมีน้ำหนักลดลง รวมทั้งน้ำมันและไขมันที่ถูกออกซิไดส์ด้วยความร้อนจะทำให้เนื้อเยื่อของหนูทดลองถูกทำลาย (ไพโรจน์ วิริยจารี, 2539)

ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่มีผลต่อการสูญเสียการยอมรับของผู้บริโภคสำหรับผลิตภัณฑ์มะพร้าวกึ่งแข็ง คือ การเกิดกลิ่นเหม็นหืนของไขมันและน้ำมัน เนื่องจากมะพร้าวเป็นวัตถุดิบที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบสูง จากการศึกษาของ สุนทรชัน ศรีงามและศิริวรรณ เนติวรานนท์ (2532) พบว่า น้ำมันมะพร้าวจะเกิดกลิ่นเหม็นหืนได้จาก 3 สาเหตุ คือ เนื่องจากปฏิริยาไฮโดรไลซิส ปฏิริยาการเกิดคีโตนหรือคีโตนิกและปฏิริยาออกซิเดชันซึ่งกลิ่นเหม็นหืนของน้ำมันมะพร้าวจาก 2 ปฏิริยาแรกจะมีความรุนแรงมาก โดยกลิ่นเหม็นหืนจะขึ้นกับปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณคีโตนที่เกิดขึ้น ซึ่งมีสาเหตุจากเอ็นไซม์ไลเปสและการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ สำหรับกลิ่นเหม็นหืนจากปฏิริยาออกซิเดชันในน้ำมันมะพร้าวจะเกิดขึ้นน้อยมากและมีกลิ่นเหม็นหืนรุนแรงน้อยที่สุด เนื่องจากน้ำมันมะพร้าวมีความคงตัวต่อปฏิริยาออกซิเดชันเป็น 4.8 เท่าเมื่อเทียบกับน้ำมันรำข้าว ดังนั้น การป้องกันการเหม็นหืนของน้ำมันมะพร้าวทำได้โดยการทำลายเอ็นไซม์ไลเปสและลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่มีผลต่อการสูญเสียการยอมรับของผู้บริโภค สำหรับผลิตภัณฑ์มะพร้าวกึ่งแข็งอีกประการหนึ่ง คือ การเกิดสีน้ำตาล เนื่องจาก เนื้อมะพร้าวเป็นวัตถุดิบที่มีสีขาว จากการศึกษาปริมาณกรดอะมิโนอิสระในเนื้อมะพร้าวเพื่อขยับการเกิดปฏิริยาเมลลาร์ดของ Jayalekshmy and Mathew (1990) พบว่าเนื้อมะพร้าวมีปริมาณกรดอะมิโนอิสระทั้งหมด 236.4 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และความร้อนจาก

กระบวนการอบแห้งจะเร่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลได้ ดังนั้น การพัฒนาผลิตภัณฑ์มะพร้าวแห้งให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคจึงจำเป็นต้องป้องกันไม่ให้ผลิตภัณฑ์เกิดกลิ่นหืนและเกิดการเปลี่ยนแปลงสีตลอดอายุการเก็บรักษา

อายุการเก็บรักษาอาหาร

อายุการเก็บรักษา หมายถึง ช่วงระยะเวลาการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ผลิตผลิตภัณฑ์ออกมาและยังคงมีความปลอดภัยและมีคุณภาพเป็นที่ยอมรับ โดยการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ทางเคมีทางกายภาพ และทางจุลินทรีย์ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลทางโภชนาการที่ระบุไว้ (Garcia, Lopez, & Fernandez, 2008) ต่อเมื่อผลิตภัณฑ์เกิดการเสื่อมเสียหรือผู้บริโภคไม่ยอมรับในปัจจัยคุณภาพที่มีความสำคัญต่อผลิตภัณฑ์ แสดงว่าผลิตภัณฑ์นั้นหมดอายุการเก็บรักษาวัตถุประสงค์ของการศึกษาในเรื่องอายุการเก็บของอาหารคือ เพื่อคงคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับช่วงเวลาที่ต้องการภายใต้สภาวะการเก็บและการขนส่งหนึ่ง ๆ ซึ่งอายุการเก็บรักษาอาหารต่างชนิดกันจะมีความแตกต่างกันอีกทั้งยังขึ้นกับอุณหภูมิการเก็บรักษาด้วย (รุ่งนภา วิสิษฐุตรการ, 2540) การที่ผลิตภัณฑ์สามารถเก็บได้เป็นระยะเวลาหนึ่งโดยไม่เสื่อมเสียเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์และปัจจัยด้านสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ออกซิเจน และแสง ดังนั้น การศึกษาอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์จึงจำเป็นต้องเข้าใจถึงหลักการในการแปรรูปและลักษณะการเสื่อมเสียที่สำคัญที่อาจเกิดขึ้น ได้กับผลิตภัณฑ์อาหาร (ศิริลักษณ์ สินธวาลย์, 2535)

1. วิธีการทดสอบอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหาร (รุ่งนภา วิสิษฐุตรการ, 2540)

โดยทั่วไปวิธีการทดสอบอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหารแบ่งเป็น 4 วิธี คือ

1.1 การใช้ข้อมูลที่เคยมีอยู่แล้ว โดยศึกษาจากเอกสารหรืองานวิจัยที่ศึกษาอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ที่คล้ายคลึงกันได้

1.2 Turnover Time ช่วงเวลาเฉลี่ยที่ผลิตภัณฑ์อยู่บนชั้นขายปลีก (Retail Shelf) โดยการติดตามการขายจาก Retail Outlets ทำให้ประมาณอายุการเก็บที่ต้องการได้ ค่าที่ได้ไม่ได้ให้ค่าอายุการเก็บที่แท้จริงของผลิตภัณฑ์ แต่เป็นอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ โดยสมมติว่าผลิตภัณฑ์ที่ยังเป็นที่ยอมรับในช่วงเวลาหนึ่งหลังจากช่วงเวลาเฉลี่ยบนชั้นขายปลีก

1.3 End Point Study เป็นการศึกษาโดยสุ่มซื้อตัวอย่างของผลิตภัณฑ์จากร้านค้าปลีก และทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาคุณภาพ จากข้อมูลนี้จะสามารถประมาณอายุการเก็บที่เหมาะสมได้ เนื่องจากผลิตภัณฑ์อยู่ในสภาวะแวดล้อมจริง ๆ ระหว่างที่อยู่ในโกดังและร้านค้าปลีก

1.4 การทดสอบอายุการเก็บในสภาวะเร่ง (Accelerated Shelf Life Testing; ASLT) ทำการศึกษาในห้องปฏิบัติการโดยเร่งปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมหนึ่งที่ทราบค่า เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีการเสื่อมเสียด้วยอัตราที่เร็วกว่าปกติ วิธีนี้ใช้เพื่อประเมินผลของสภาวะแวดล้อมต่ออายุการเก็บของผลิตภัณฑ์

2. กระบวนการพื้นฐานของ ASLT มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ (รุ่งนภา วิสิษฐุตรการ, 2540; Gibbons, 1979; Scwald & Jon Devries, in press)

หลักการของการทดสอบอายุการเก็บในสภาวะเร่งจะมุ่งเน้นการจัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทั้งการสลาย (Degradation) และการสร้าง (Formation) ทั้งทางกายภาพ เคมี ประสาทสัมผัส ชีวภาพหรือจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์อาหารและใช้หลักการทางจลนพลศาสตร์ (Kinetic Approach) เพื่อคำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของสิ่งที่สนใจและนำมาพยากรณ์หาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งใช้ในการประมาณผลของปัจจัยภายนอก (Extrinsic Factors) เช่น อุณหภูมิ ความชื้น หรือแสง เป็นต้น ซึ่งปัจจัยที่ศึกษามีผลต่ออัตราของปฏิกิริยาการเสื่อมเสีย โดยการให้อาหารอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ควบคุมและให้ปัจจัยภายนอกหนึ่งหรือมากกว่าอยู่ในระดับที่สูงกว่าระดับปกติ ทำให้อัตราการเสื่อมเสียถูกเร่งให้เร็วขึ้น มีผลให้ผลิตภัณฑ์ไม่เป็นที่ยอมรับในช่วงเวลาสั้น ระดับของการเร่งสามารถคำนวณได้และสามารถคำนวณอายุการเก็บที่แท้จริงของผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะปกติ เนื่องจากสามารถประมาณผลของปัจจัยภายนอกที่มีต่อปฏิกิริยาการเสื่อมเสีย

3. หลักการจลนพลศาสตร์กับการประเมินอายุการเก็บรักษาในผลิตภัณฑ์อาหาร

ขั้นตอนพื้นฐานของการนำหลักการจลนพลศาสตร์กับการประเมินอายุการเก็บรักษาในผลิตภัณฑ์อาหารมีขั้นตอนดังนี้ (Labuza, 1982; Kilcast & Subramaniam, 2000)

3.1 เลือกปัจจัยที่เร่งกระบวนการเสื่อมเสีย

3.2 ทดสอบการศึกษาทางจลนพลศาสตร์ของกระบวนการเสื่อมเสียที่ระดับต่าง ๆ ของปัจจัยที่ใช้ในการเร่งเพื่อให้อัตราการเสื่อมเสียที่เร็วเพียงพอ

3.3 ประเมินค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์ (Kinetic Model) โดยการลากเส้นของข้อมูลต่อไปยังสภาวะการเก็บปกติ (ภาพที่ 2-15)

3.4 นำข้อมูลที่ได้จากการลากเส้นต่อออกไป หรือใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์เพื่อทำนายอายุการเก็บที่สภาวะการเก็บรักษาดังจริง

การเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหารในภาชนะบรรจุมักเกิดจากการเปลี่ยนแปลงที่มีผลมาจากปฏิกิริยาเคมีเป็นหลัก ซึ่งอัตราและกลไกของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในทางจลนพลศาสตร์จะระบุในรูปอันดับของปฏิกิริยา (Reaction Order) โดยรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างการเสื่อมเสีย

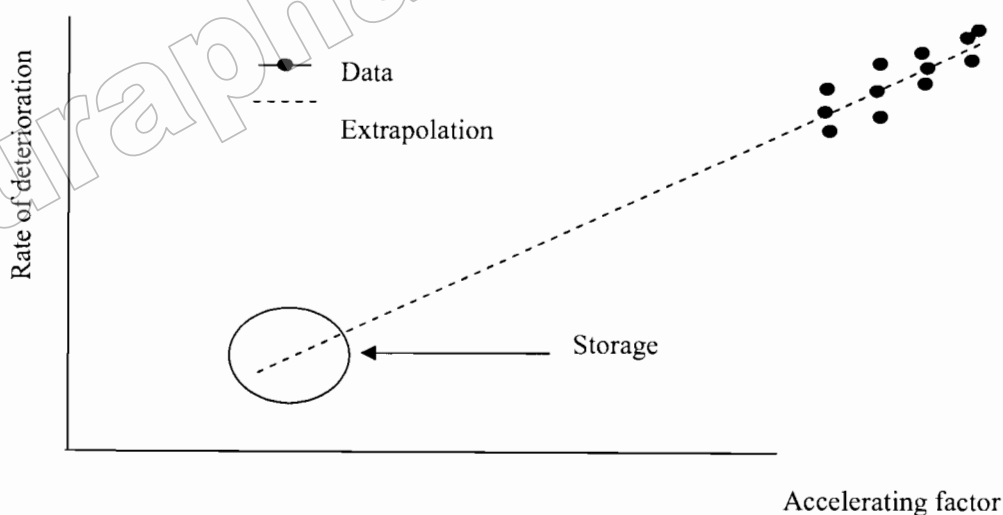
ของผลิตภัณฑ์อาหารกับอันดับปฏิกิริยาทางจลนพลศาสตร์ คือ ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (Zero-Order Kinetic) จะพบการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากเอนไซม์ พบในผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็ง ผักและผลไม้สด การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ พบในผลิตภัณฑ์ธัญชาติแห้ง และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน พบในผลิตภัณฑ์อาหารแห้งและอาหารแช่แข็ง ส่วนปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First-Order Kinetic) จะพบการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเกิดกลิ่นหืน พบในผลิตภัณฑ์ผักผลไม้แห้ง การเจริญของจุลินทรีย์ การเกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ (Off flavors) การสูญเสียปริมาณวิตามิน (Gibbons, 1979)

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าคงที่อัตรายังสามารถคำนวณหาค่า Q_{10} ซึ่ง Q_{10} หมายถึง อัตราส่วนของค่าคงที่อัตรา ณ อุณหภูมิที่มีความแตกต่างกัน 10 องศาเซลเซียส แสดงความสัมพันธ์ดังสมการ (Gibbons, 1979; Labuza, 1982; Kilcast & Subramaniam, 2000)

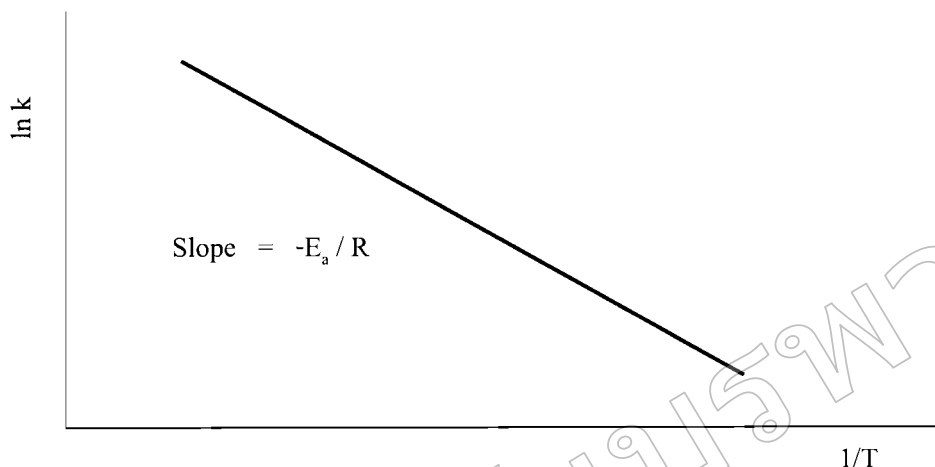
$$Q_{10} = (k_{T+10}) / (k_T)$$

4. ปัญหาของการทดสอบอายุการเก็บรักษาที่สภาวะเร่ง

ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทดสอบอายุการเก็บรักษาที่สภาวะเร่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประการ ได้แก่ การทดสอบอายุการเก็บที่สภาวะเร่งไม่มีการกำหนดปัจจัยทางจลนพลศาสตร์ที่ชัดเจน แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ที่ได้ใช้ได้กับสภาวะที่ศึกษาเท่านั้น และการทดสอบอายุการเก็บรักษาที่สภาวะเร่งนี้อาจมีความคลาดเคลื่อน ไม่ถูกต้องแม่นยำทั้งหมด (Kilcast & Subramaniam, 2000)



ภาพที่ 2-15 แบบจำลองการประมาณค่าอายุการเก็บรักษาจากการทดสอบในสภาวะเร่ง



ภาพที่ 2-16 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อค่าคงที่อัตราเกิดปฏิกิริยา

การวิเคราะห์รีเกรสชัน (Regression Analysis)

การวิเคราะห์รีเกรสชันเป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองชนิด คือ ตัวแปรตามหรือผลลัพธ์, y (Dependent Variable or Response Variable) และตัวแปรอิสระ, x (Independent Variable) โดยที่ตัวแปรตามมีเพียงตัวเดียว ส่วนตัวแปรอิสระนั้นมีกี่ตัวก็ได้ ($x_1, x_2, \dots, x_3$) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองชนิดนี้สามารถแสดงได้ในรูปฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_3)$$

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยากที่จะทราบฟังก์ชันความสัมพันธ์ที่แท้จริง ผู้ทดลองต้องเลือกฟังก์ชันที่เหมาะสมเพื่อประมาณ f สมการโพลีโนเมียลเป็นสมการที่ใช้ในการประมาณ f อย่างกว้างขวาง โดยทั่วไปในการวิเคราะห์สมการรีเกรสชันจะใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ไม่ได้มีการวางแผน เป็นข้อมูลที่ได้จากการสังเกต หรือการบันทึกข้อมูลในอดีต อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์สมการรีเกรสชันมีประโยชน์มากเกี่ยวกับการวางแผนการทดลอง โดยหลังจากที่ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากการทดลองแล้ว และทราบว่าปัจจัยใดที่มีความสำคัญบ้าง แล้วจะใช้การวิเคราะห์สมการรีเกรสชันในการสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่สำคัญนั้นและผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งในงานวิจัยด้านอาหาร เราสามารถใช้การวิเคราะห์สมการรีเกรสชันในการทดลองเกี่ยวกับการทดสอบอายุของผลิตภัณฑ์ เพื่อประมาณอัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพของผลิตภัณฑ์ตามฟังก์ชันของเวลา และประมาณอายุของผลิตภัณฑ์ (ไพโรจน์ วิริยาริ, 2544; Franklin & Hariharan, 1994)

1. การวิเคราะห์สมการรีเกรสชันเชิงเส้นตรงอย่างง่าย (Simple Linear Regression

Analysis)

การวิเคราะห์สมการรีเกรสชันเชิงเส้นตรงอย่างง่าย เป็นการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ 1 ตัว และตัวแปรตาม ซึ่งตัวแปรอิสระนั้นจะเป็นตัวแปรที่มีค่าต่อเนื่องที่ถูกควบคุมโดยผู้ทดลอง เมื่อมีการวางแผนการทดลอง ผู้ทดลองจะเป็นผู้เลือกค่าของ x และทำการสังเกตค่าของ y ที่สอดคล้องกัน

สมมติให้ความสัมพันธ์ระหว่าง y และ x เป็นเส้นตรง และค่าสังเกต y ที่แต่ละระดับของค่า x เป็นตัวแปรสุ่ม จะได้รูปแบบแสดงความสัมพันธ์ ดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (1)$$

เมื่อ β_0 คือ จุดตัดแกน y และ β_1 คือ ความชันของเส้นถดถอย ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า และ ε เป็นความคลาดเคลื่อนสุ่ม เราสามารถสร้างสมการรีเกรสชันหรือสมการถดถอยเชิงเส้นตรงได้ ดังนี้

$$E(y) = \beta_0 + \beta_1 x$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการนี้กับสมการที่ 1 จะเห็นว่า

$$\varepsilon = y - E(y)$$

ซึ่ง ε เป็นค่าความแตกต่างระหว่างค่า y ที่แท้จริงกับค่าคาดหวังของ y ที่แต่ละระดับของค่า x โดย ε เรียกว่า ค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งมีข้อสมมุติว่าต้องมีการแจกแจงแบบปกติมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และ ค่าความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 ถ้าเรามีข้อมูลทั้งหมด n คู่ ดังนี้ $(y_1, x_1), (y_2, x_2), \dots, (y_n, x_n)$ เราสามารถประมาณค่า β_0 และ β_1 จากข้อมูลเหล่านี้ได้โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares Method) เมื่อเราประมาณค่า β_0 และ β_1 โดยได้ค่าประมาณเป็น β'_0 และ β'_1 ตามลำดับ ดังนั้นจะได้สมการรีเกรสชัน ดังนี้

$$\hat{y} = \beta'_0 + \beta'_1 x \quad (2)$$

จากวิธีกำลังสองน้อยที่สุด เราสามารถหาค่า β'_0 และ β'_1 ได้ ดังนี้

$$\beta'_1 x = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}$$

และ
$$\hat{y} = \beta'_0 - y - \beta'_1 x$$

เมื่อ
$$x = \sum_{i=1}^n x_i / n \quad y = \sum_{i=1}^n y_i / n$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n x_i^2 - nx^2 \quad S_{yy} = \sum_{i=1}^n y_i^2 - ny^2$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n x_i y_i - nxy$$

สมการที่ 2 เรียกว่า Fitted Simple Linear Regression of y on x ซึ่งถูกใช้เป็นตัวแทนของสมการที่ 1 ซึ่งเป็นสมการสมมติฐาน หากสมการสมมติฐานไม่เหมาะสมแล้ว Fitted Model จะไม่เหมาะสมด้วย ดังนั้น ก่อนที่จะมีการยอมรับสมการรีเกรสชัน (สมการที่ 2) ต้องมีการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับพารามิเตอร์ในสมการที่ 1 ก่อน (ไพโรจน์ วิริยจารี, 2544; Franklin & Hariharan, 1994)

2. การวิเคราะห์สมการรีเกรสชันเชิงเส้นตรงแบบพหุ (Multiple Linear Regression Analysis)

โดยทั่วไป ในการวิเคราะห์สมการรีเกรสชันมักมีตัวแปรอิสระเข้ามาเกี่ยวข้องมากกว่า 1 ตัว เช่น กระบวนการผลิตอาหาร อาจมีอุณหภูมิ ส่วนประกอบและความชื้นเข้ามาเกี่ยวข้องกับผลผลิตที่ได้ ตัวแบบสำหรับสมการรีเกรสชันเชิงเส้นตรงแบบพหุ แสดงได้ ดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k$$

เรียกว่า Multiple Linear Regression Model มีสัมประสิทธิ์สมการรีเกรสชันที่เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า คือ β_j ; $j = 1, \dots, k$ สมการรีเกรสชันหรือเส้นถดถอยของตัวแบบนี้ คือ

$$E(y) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k$$

เพื่อประมาณสมการรีเกรสชันนี้เราจึงต้องประมาณค่า β_j ทุกตัวจากข้อมูลตัวอย่าง หรือข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยได้ Fitted Model ดังนี้

$$\hat{y} = \beta'_0 + \beta'_1 x_1 + \beta'_2 x_2 + \dots + \beta'_k x_k$$

เมื่อ β_j เป็นตัวประมาณของ β_j ซึ่งหาได้จากวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (วนิดา พงษ์ศักดิ์ชาติ, 2548; Richard, 1990; Julian, 2004)

ในการคำนวณหาความชันและจุดตัดเส้นตรงจะใช้วิธีเกณฑ์กำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Criterion) ซึ่งหมายถึงผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในการทำนายจะต้องต่ำสุด เมื่อได้เส้นถดถอยจากความชันและจุดตัดแล้ว ค่าผลรวมของความคลาดเคลื่อนในการทำนายเมื่อยกกำลังสองแล้วจะต้องได้ค่าต่ำที่สุด นั่นคือผลรวมของ Residual² หรือ $\sum[(Y_i - \hat{Y})^2]$ น้อยที่สุด ในการพิจารณาความเหมาะสมของสมการความสัมพันธ์ที่ได้ว่ามีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใดจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (Coefficient of Determination) สัมประสิทธิ์ตัวกำหนดเป็นค่าที่ใช้วัดว่าตัวแบบถดถอยนั้นมีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด

มีสัญลักษณ์คือ R^2 ค่านี้มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยคำนวณได้จากสูตร $R^2 = SSR/SST$ ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่าง ความผกผันในส่วนที่ตัวแบบถดถอยอธิบายได้ต่อความผกผันแปรรวมทั้งหมดของค่าตอบสนอง สมการที่มีความน่าเชื่อถือควรมีค่า R^2 อย่างน้อย 0.75 แต่หากสูงมากกว่า 0.90 จะถือว่าสมการที่ได้มีความน่าเชื่อถือมาก (Richard, 1990) นอกจากนี้การพิจารณาความเหมาะสมของสมการจะพิจารณาจากค่า RMS (Root Mean Square) ซึ่งบ่งบอกถึงค่าความคลาดเคลื่อนของการทำนายจากการใช้สมการ ถ้ามีค่าต่ำ แสดงว่าค่าที่ทำนายมีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริงน้อยโดยกำหนดว่าค่า RMS ควรน้อยกว่า 20 (Julian, 2004) ซึ่งค่า RMS คำนวณได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$RMS = 100 \sqrt{\frac{\sum [(Y_{cx} - Y_{pred})/Y_{pred}]^2}{N}}$$

Y_{cx} คือ ค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง

Y_{pred} คือ ค่าตอบสนองที่ได้จากการทำนาย

N คือ จำนวนข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

การพิจารณาความเหมาะสมของสมการอาจพิจารณาได้จากการทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลโดยพิจารณาค่า Significance หรือ p-value ของการทดสอบการแปรปรวน (Analysis of Variances) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS โดยเป็นค่าที่บ่งบอกความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระกับค่าตอบสนอง (ไพโรจน์ วิริยาริ, 2544; Franklin & Hariharan, 1994; Julian, 2004; Richard, 1990)

การสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM)

การสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองเป็นเทคนิคทางสถิติอย่างหนึ่งที่ใช้ Contour Plot ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เป็นที่สนใจของนักวิจัย ผลที่ตามมา คือนักวิจัยสามารถที่จะหาจุดที่เหมาะสมจากความสัมพันธ์เหล่านั้นได้ เมื่อพิจารณาปัจจัยที่สนใจเหล่านั้นพร้อมๆ กัน โดยความรู้พื้นฐานที่ต้องใช้ คือ การวางแผนการทดลอง การวิเคราะห์สมการรีเกรสชัน และความรู้ในการใช้โปรแกรมที่สร้าง Contour Plot contour plot (ไพโรจน์ วิริยาริ, 2544; อนุวัติ แจ่มชัด, 2545; วณิดา พงษ์ศักดิ์ชาติ, 2548)

1. วัตถุประสงค์ในการใช้ RSM

- 1.1 เพื่อหาระดับของปัจจัยที่ทำให้ผลผลิตหรือผลลัพธ์สูงที่สุด
- 1.2 เพื่อหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมกับข้อจำกัดของกระบวนการผลิต
- 1.3 เพื่อหาเงื่อนไขของการผลิตใหม่ที่จะพัฒนาคุณภาพของผลผลิตจากระดับเดิม

1.4 หาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเชิงปริมาณและผลผลิต

RSM เป็นวิธีการที่เราใช้ในการหาทริทเมนต์ร่วมระหว่างปัจจัยที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้ผลผลิตหรือผลลัพธ์ที่สูงที่สุด การทดลองในกระบวนการของ Response Surface มักเป็นการทดลองแบบต่อเนื่องเป็นขั้น ๆ โดยการทดลองแต่ละขั้นมีเป้าหมายเพื่อสร้างการทดลองที่จะทำให้ทราบถึงอิทธิพลของปัจจัยและ Response Surface ด้วย ซึ่งผลที่ได้จะเป็นแนวทางในการทดลองครั้งต่อไปเพื่อจะบอกได้ว่าการทดลองนั้นเสร็จสมบูรณ์แล้ว นั่นคือ จะได้ค่าที่ดีที่สุดนั่นเอง ขั้นตอนเริ่มต้นคือ สร้างการทดลองโดยเลือกทริทเมนต์ร่วมระหว่างปัจจัยเริ่มต้น โดยอาศัยความรู้จากผู้เชี่ยวชาญ ผู้ที่มีความคุ้นเคยกับระดับของปัจจัยที่ต้องการศึกษา การทดลองในขั้นแรกมักจะตั้งข้อสมมติฐานว่า ขอบเขตของการทดลองเป็นไปในแนวระนาบ (ตัวแบบเป็นแบบเส้นตรง) โดยที่พื้นผิวเชิงระนาบสองมิติมีความชันคงที่ในแต่ละทิศทาง สมมติว่าผลลัพธ์ของการทดลองอยู่บนระนาบแล้ว สามารถออกแบบการทดลองที่มีขนาดค่อนข้างเล็กได้ เนื่องจากต้องการประมาณค่าพารามิเตอร์ของเทอมเชิงเส้นตรงเท่านั้น แต่ไม่ต้องการประมาณค่าพารามิเตอร์ของเทอมกำลังสอง และไม่มีอิทธิพลของอิทธิพลร่วม (Interaction) มาเกี่ยวข้อง เมื่อตัวแบบมีเพียงเทอมเชิงเส้นตรงเท่านั้น ทำให้ระดับของแต่ละปัจจัยมีได้เพียงสองระดับและแผนแบบการทดลอง 2^k จะสมมุติว่าอิทธิพลร่วมทั้งหมดมีค่าเป็นศูนย์ จะได้ตัวแบบกำลังหนึ่ง (First Order Model) คือ

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon$$

เมื่อมีปัจจัยที่ศึกษา 2 ปัจจัย หรือ

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

เมื่อมีปัจจัยที่ศึกษา k ปัจจัย

จากขั้นตอนแรกที่เราสร้างตัวแบบกำลังหนึ่ง (First Order Model) ซึ่งทิศทางของการนำไปสู่ค่าที่สูงที่สุดนั้นหาได้จากค่าประมาณของ β_1 และ β_2 ถ้าการทดลองดีเพียงพอแล้วหรือค่าที่ได้ไม่มีนัยสำคัญจะแสดงผลดังนี้ ประการแรกได้จุดสูงสุดของผลลัพธ์แล้วทำให้ค่าประมาณไม่บ่งชี้ถึงทิศทางของการเพิ่มขึ้น ประการที่สองค่าที่ได้ไม่เข้าใกล้ค่าเริ่มต้นของการเพิ่มขึ้นของผลลัพธ์เลย การแยกสองกรณีนี้ออกจากกัน ต้องแน่ใจว่า แผนแบบการทดลองนั้นมีคุณสมบัติที่สามารถทดสอบข้อสมมุติเชิงระนาบได้ ถ้าเข้าใกล้จุดที่ดีที่สุด ระนาบจะไม่ใช้แนวโน้มที่ไม่เหมาะสมที่จะใช้อธิบายพื้นผิวแบบเส้นโค้ง (Curving Surface) แต่ถ้าไม่เข้าใกล้ค่าเริ่มต้นของการเพิ่มขึ้นของผลลัพธ์เลย ระนาบจะเป็นแนวโน้มที่เหมาะสมที่ใช้อธิบายพื้นผิวโดยรอบ ในทางปฏิบัติถ้าผลการทดลองไม่มีนัยสำคัญ แต่จากการสังเกตค่าของข้อมูลจะทำให้ทราบว่า ค่าผลลัพธ์ยังไม่ใช่ค่าที่สูงที่สุด จึงสันนิษฐานว่า การเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยไปในทิศทางของการเพิ่มขึ้นของผลลัพธ์จะทำให้ไปถึงค่าสูงสุดของผลลัพธ์ได้ ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้เรียกว่า Method of Steepest Ascent เมื่อได้ขอบเขต

ของค่าระดับปัจจัยจากการทดลองในขั้นตอนแรก และการทดสอบเกี่ยวกับพื้นผิวเชิงระนาบไม่มีนัยสำคัญแล้ว จะสรุปว่าเข้าใกล้ค่าสูงสุดของผลลัพธ์แล้ว จะเริ่มขั้นตอนที่สองโดยการเพิ่มเทอมของอิทธิพลร่วมและเทอมที่ไม่ใช่เส้นตรง (Non Linear) เข้าไปในตัวแบบ จะได้ตัวแบบกำลังสอง (Second Order Model) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นโค้ง (Quadratic Regression) ดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_2 x_2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon$$

เมื่อมีปัจจัยที่ศึกษา 2 ปัจจัย หรือ

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j^2 + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=1}^{k-1} \dots + \sum_{i=j+1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

เมื่อมีปัจจัยที่ศึกษา k ปัจจัย

เมื่อ Y คือ ค่าตอบสนองที่สังเกตได้

β_0 คือ จุดตัด (Intercept) หรือ grand mean

β_i คือ ผลเชิงเส้นตรง (Linear Effect) ของ X_i

β_{ii} คือ ผลเชิงเส้นโค้ง (Quadratic Effect) ของ X_i

β_{ij} คือ เป็นผลของปฏิกริยาสัมพันธ์ (Interaction Effect) ของ X_i และ X_j

การทดลองในขั้นตอนที่สองนี้มักจะมีขนาดใหญ่ ต้องการจำนวนทริทเมนต์ร่วมจำนวนมาก เพื่อใช้ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแบบกำลังสองนี้ อย่างไรก็ตาม การทดลองในขั้นตอนนี้มักเป็นการทดลองสุดท้ายที่จะทำ ซึ่งเรียกขั้นตอนนี้ว่า Method of Local Exploration

2. ขั้นตอนของการทำ RSM

ขั้นตอนของการทำ RSM สามารถสรุปได้ ดังนี้

2.1 เลือกแผนการทดลองสมการรีเกรสชันสำหรับการทดลอง

2.2 สร้างแผนการทดลองจากสมการรีเกรสชัน

2.3 ทำการทดลองตามแผนที่สร้างไว้

2.4 สร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและผลลัพธ์และวิเคราะห์ความ

เหมาะสมของสมการ

2.5 สร้าง Contour Plot หรือ Surface Plot จากสมการถดถอยที่หาได้ เพื่อดูจุดที่ดีที่สุดของผลลัพธ์

2.6 หาค่าระดับของปัจจัยที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

2.7 Verification โดยทำการ Independent Run ภายใต้ขอบเขตของตัวแปรแต่ละตัว

2.8 ถ้า Model ไม่เหมาะสมให้สร้าง Model ใหม่ โดยทำซ้ำข้อ 2-5

3. การทดสอบเกี่ยวกับพื้นผิวเชิงระนาบ

วิธีการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระจะเริ่มต้นด้วยการพิจารณาเกี่ยวกับจุดกึ่งกลาง (Center Point) สมมุติว่า จุดกึ่งกลางนั้นเป็นจุดเดียวกับจุดสูงสุด Response Surface ในขอบเขตของการทดลองนี้ควรมีรูปร่างไม่ใช่รูปแบบระนาบ แต่ควรมีรูปแบบคล้ายหอยก แต่จากค่าสังเกตเพียง 4 ค่า และไม่มีค่าสังเกตที่จุดกึ่งกลางหรือที่จุดใกล้เคียงกับจุดกึ่งกลางเลย ย่อมเป็นไปได้ที่จะทราบว่าจุดกึ่งกลางนั้นเป็นจุดที่อยู่เหนือจุดอื่นๆ อีก 4 จุดที่มีค่าสังเกตอยู่ ดังนั้น เพื่อแก้ไขปัญหานี้ จึงควรเพิ่มข้อมูลที่จุดกึ่งกลางเข้าไปในการทดลอง

4. Method of local exploration

ถ้าหากในการทดลองครั้งสุดท้าย คิดว่าเข้าใกล้จุดสูงสุดแล้ว นั่นคือ ได้ทรีทเมนต์ร่วมที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่สูงที่สุดแล้ว ต่อไปจะหา Response Surface ที่มีความถูกต้องมากกว่ารูปแบบระนาบ ซึ่งพิสูจน์แล้วว่าไม่ใช่รูปแบบที่เหมาะสม เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์นี้ต้องทำการทดลองที่มีแผนแบบค่อนข้างซับซ้อนมากกว่าที่ใช้ในการทำ Steepest Ascent ซึ่งเมื่อใช้แผนแบบการทดลองนี้จริง Response Surface จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง โดยมีค่าลดลงจากจุดสูงสุด และอัตราของการลดลงในแต่ละทิศทางนั้นไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดอิทธิพลร่วมนั่นเอง (ไพโรจน์ วิริยาริ, 2544; วนิตา พงษ์ศักดิ์ชาติ, 2548)

แผนการทดลองแบบ Central-Composite Design (CCD)

การจัดสิ่งทดลองแบบแฟคทอเรียลในบางครั้งพบว่า เกิดปัญหา คือ มีสิ่งทดลองในการทดลองเป็นจำนวนมาก อาจใช้เวลาและต้นทุนสูงในการดำเนินการตามแผน โดยเฉพาะการทดลองแบบ 3^n จะได้จำนวนการทดลองมาก ตัวอย่างเช่น $n=3$ จะได้สิ่งทดลอง 27 สิ่งทดลอง แต่การจัดสิ่งทดลองแบบ CCD เป็นการจัดสิ่งทดลองลักษณะเป็น 2^k แฟคทอเรียลเป็นพื้นฐานและมีจุดอื่นประกอบด้วย (ไพโรจน์ วิริยาริ, 2544; อิศรพงษ์ พงศ์ศิริกุล, 2544; วนิตา พงษ์ศักดิ์ชาติ, 2548)

1. การจัดสิ่งทดลองแบบหุนกำลังสอง (Second Order Model)

สิ่งทดลองแบบหุนกำลังสอง มีส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ

1.1 เป็นแผนแบบการทดลองแบบ 2^k แฟคทอเรียล ซึ่งประมาณค่าอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมของปัจจัยได้

1.2 เป็นแผนการทดลองที่มี Star หรือ Axial ซึ่งเชื่อมต่อกับส่วนประกอบอีกสองส่วน เพื่อช่วยในการประมาณเทอมกำลังสอง (Quadratic Term)

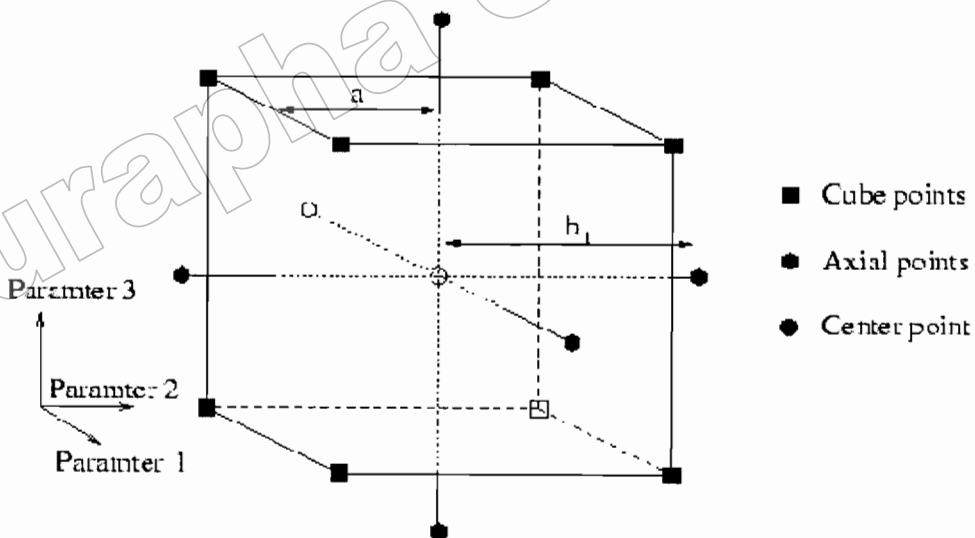
1.3 มีจุดของค่าสังเกต ณ จุดกึ่งกลางซึ่งสามารถประมาณค่าความคลาดเคลื่อนได้และยังช่วยให้การประมาณความโค้งของพื้นผิวมีความคงตัว (Stability) มากขึ้น

Star หรือ axial ในแผนแบบการทดลอง CCD คือ จุดที่เพิ่มเข้าไปในการทดลอง ซึ่งจุดเหล่านี้จะอยู่บนแกนนอนและแกนตั้งของแต่ละปัจจัย โดยมีระยะห่างจากศูนย์กลางของการทดลองเท่ากับ P_s (Star Point) ทั้งด้านบวกและด้านลบ โดยหา P_s ได้จาก

$$P_s = \pm 2^{n/4}$$

เมื่อ n คือ จำนวนปัจจัย

สำหรับการทดลองที่มี k ปัจจัย จะมี $2k$ Star Point จากที่เราสังเกตเห็นแล้วว่าการเพิ่มชุดของจุดกึ่งกลางในการทดลอง จะทำให้เราสามารถประมาณค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำซ้ำได้ จำนวนซ้ำ ณ จุดกึ่งกลางที่เหมาะสม คือ 2-4 ซ้ำ หรืออาจใช้เกณฑ์ว่า จำนวนซ้ำที่เหมาะสมอย่างน้อยจะเท่ากับจำนวนปัจจัยที่ศึกษาแบบแผนการทดลอง CCD แสดงดังภาพที่ 2-17 จะเห็นได้ว่า จุดที่อยู่ที่มุมของรูปสี่เหลี่ยมแสดงถึงแผนแบบ 2^k แฟกทอเรียล และจุดที่อยู่บนแกนนอนและแกนตั้งแสดงถึง Star Point และมีจุดหนึ่งจุดหรือมากกว่าอยู่ที่กึ่งกลางของแผนการทดลอง (0,0) ทริทเมนต์ร่วมของส่วนประกอบทั้งสามส่วน ทำให้เกิดเป็น CCD โดยแต่ละปัจจัยจะมีระดับของปัจจัย 5 ระดับ คือ $-P_s, -1, 0 +1 +P_s$ (ไพโรจน์ วิริยจารี, 2544; วณิดา พงษ์ศักดิ์ชาติ, 2548)



ภาพที่ 2-17 Central composite design สำหรับ 3 ปัจจัย (อิสรพงษ์ พงศ์ศิริกุล, 2544)