

## บทที่ 2

### สรุปสาระสำคัญจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แครอท

Carrot : (*Daucus carota* L.var.*sativa* (Hoffm.) Thell) เป็นผักในตระกูล *Apiaceae* (Umbelliferae) มีถิ่นกำเนิดอยู่แถบเอเชียกลางจนถึงทางตะวันออก จากนั้นจะเผยแพร่เข้าไปในยุโรป และประเทศจีน แครอทที่ปลูกในระยะแรก ๆ จะมีหัวสีแดง ปัจจุบันนิยมหัวสีเหลือง-ส้ม พันธุ์ป่าที่เจริญอยู่ทั่วไปใน ออฟกานิสถาน อาจจะมีสีหัวสีม่วง สีขาว หรือเหลืองในศตวรรษที่ 16 ได้มีการปรับปรุงพันธุ์ โดยคัดเลือกสี ขนาดและลักษณะของหัว ในระยะแรกแครอทถูกนำมาใช้เป็นพืชสมุนไพร เริ่มนำมาประกอบอาหารในศตวรรษที่ 20 แครอทเป็นแหล่งสารโภชนาการที่สำคัญ เช่น เบต้า-แคโรทีน ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นวิตามิน เอ ทำให้แครอทมีวิตามิน เอ สูง (11,000 IU) (Lorenz and Maynard, 1980) มีวิตามิน B1, B2 และ C ส่วนของเปลือกที่แก่ จะมีแคโรทีนสูง โดยจะเพิ่มปริมาณตามอายุของพืช วิตามิน เอ ทำให้ร่างกายมีความต้านทานต่อไข้หวัด นอกจากนี้ยังมีสารโภชนาการอื่นๆที่สำคัญ ดังแสดง ในตารางที่ 2.1

#### 2.2 การผลิตแครอทในประเทศไทย

แครอทนั้นมีมากมายหลากหลายสายพันธุ์ ซึ่งแต่ละสายพันธุ์นั้นก็จะมีเอกลักษณ์และมีความเหมาะสมในการแปรรูปแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีหลากหลายสีอื่นอีกด้วยโดยในประเทศไทยเองนั้นมีสายพันธุ์ที่ได้รับความนิยมปลูกดังนี้ หงษ์แดง, New kuruda, Imperater และ Nante (นิพนธ์, 2545) แครอทนั้นปลูกได้ดีในช่วงฤดูฝน ในฤดูร้อนมีการปลูกลดลงเนื่องจากการดูแลสูง แม้ว่าแครอทจะผลิตได้เป็นปริมาณมากในฤดูฝน แต่คุณภาพของแครอทกลับไม่ได้คุณภาพเท่ากับในช่วงฤดูร้อนหรือฤดูหนาว คุณภาพไม่ตรงตามความต้องการของโรงงานแปรรูป จึงมี แครอทเหลือและตกเกรดเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังได้มีการนำเข้า แครอทมาจากประเทศจีนซึ่งมีสีและรูปร่างที่สวยงามกว่าแครอทที่ผลิตได้ในประเทศไทย ทำให้แครอทที่ผลิตได้ในประเทศมีปริมาณมากเกินความต้องการและราคาต่ำ (โครงการหลวง, 2548)

ตารางที่ 2.1 คุณค่าทางโภชนาการ จากส่วนที่เป็นอาหารได้ 100 กรัม

สาร โภชนาการ	ปริมาณ
น้ำ	88 %
พลังงาน	42 cal
โปรตีน	1.1 g
ไขมัน	0.2 g
คาร์โบไฮเดรต	9.7 g
แคลเซียม	37 mg
ฟอสฟอรัส	36 mg
เหล็ก	0.7 mg
โซเดียม	47 mg
โปแตสเซียม	341 mg
วิตามิน เอ	11,000 IU
โทอะมีน	0.06 mg
ไรโบฟลาวิน	0.05 mg
ไนอะซิน	0.6 mg
แอสคอร์บิก แอซิด	8.0 mg

ที่มา : Lorenz and Maynard (1980)

### 2.3 การแปรรูปแครอทในประเทศไทย

แครอทสดเป็นส่วนประกอบอาหารได้หลายอย่าง เช่น ทำสลัด ส้มตำ ต้มจืด ผัดกับเนื้อสัตว์ หรือตกแต่งอาหารหรือขนมให้สวยงาม นอกจากนี้ยังสามารถนำมาแปรรูปเป็น น้ำแครอท แครอทอบแห้ง แยมแครอท แครอท 3 รส และเป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอางค์ เช่น สบู่ เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ให้ความสนใจกับการแปรรูปด้วยวิธีแช่อบแห้ง ซึ่งเป็นวิธีที่เกษตรกรหรือผู้ประกอบการแปรรูปสามารถกระทำได้ง่ายในต้นทุนต่ำ และผลิตภัณฑ์ที่สามารถเก็บรักษาไว้ได้ที่สภาวะปกติ ซึ่งจะได้กล่าวถึงหลักการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแปรรูปนี้ พร้อมทั้งได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องไว้ในบทนี้ด้วย

### 2.3.1 การแปรรูปด้วยวิธีการทำแห้ง

การทำผักผลไม้อบแห้งคือ การระเหยน้ำออกจากเนื้อเยื่อของผักและผลไม้จนกระทั่งลดลงอยู่ในระดับที่ไม่เกิดการเน่าเสีย ซึ่งการกระทำดังกล่าวจะมีผลต่อการลดค่า  $a_w$  ของอาหาร ซึ่งหมายถึงปริมาณน้ำอิสระที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญ และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ โดยที่น้ำในอาหารมี 2 ชนิด คือน้ำอิสระ (free water) ที่ไม่ถูกเนื้ออาหารตรึงไว้ และน้ำไม่อิสระที่ถูกเนื้ออาหารตรึงไว้ (bound water) ซึ่งน้ำไม่อิสระนี้จุลินทรีย์ไม่สามารถนำไปใช้ในการเจริญได้ การลดค่า  $a_w$  ในอาหารมีหลัก 3 ประการ ได้แก่ การเอาน้ำออก โดยการระเหย การตกผลึกของน้ำที่กลายเป็นน้ำแข็ง และการเติมสารละลาย โดยทั่วไปวิธีการกำจัดน้ำในกรณีนี้นิยมใช้ความร้อนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งถ้าไม่ควบคุมอย่างเหมาะสมจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและโครงสร้างของผักหรือผลไม้ได้มาก เช่นการมีผิวหน้ำที่แห้งแข็ง การเสียโครงสร้างของโปรตีน การเกิดสีน้ำตาล การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบบางชนิด ตลอดจนการเน่าเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์ทางกายภาพที่เกิดขึ้นในระหว่างการอบแห้งที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งที่สำคัญนั้นมี 2 ประการ คือ การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลน้ำในอาหาร (บุษกร, 2547; ลินธนา, 2542)

การทำแห้งนั้น มีผลต่อการควบคุม  $a_w$  ในอาหาร ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญมากต่ออายุการเก็บของอาหาร ในขณะที่อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) และปัจจัยอื่น ๆ มีผลกระทบบต่อความเร็วในการเจริญของจุลินทรีย์ในอาหาร  $a_w$  จะเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการควบคุมการเสี้ยวของอาหาร ตัวอย่างเช่น แบคทีเรียเกือบทุกชนิดไม่สามารถเจริญได้ที่  $a_w$  ต่ำกว่า 0.91 ในขณะที่ราส่วนมากหยุดการเจริญเมื่อ  $a_w$  ต่ำกว่า 0.80 ซึ่ง  $a_w$  เป็นปัจจัยควบคุมการเจริญของจุลินทรีย์ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 นอกจากนี้  $a_w$  ยังมีผลกระทบบต่อการทำงานของเอนไซม์ และวิตามินในอาหารซึ่งเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงสี รส และกลิ่นของอาหาร อย่างชัดเจน (บุษกร, 2547)

สามารถจัดกลุ่มอาหารตามค่า  $a_w$  ดังนี้

- อาหารที่มีความชื้นสูง เป็นอาหารที่มีความชื้นมากกว่า 50 % หรือมี  $a_w$  มากกว่าหรือเท่ากับ 0.95 เช่นอาหารสดทุกชนิด
- อาหารที่มีความชื้นปานกลาง เป็นอาหารที่มีความชื้น 15-50 % หรือมี  $a_w$  ระหว่าง 0.65-0.85 เช่น ปลาหมึกปรุงรสมีความชื้นไม่เกิน 28 %
- อาหารที่มีความชื้นต่ำ เป็นอาหารที่มีความชื้นไม่มากกว่า 25 % หรือมี  $a_w$  น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.65 เช่น นมผง แป้งมัน ไข่ผง และกาแฟผงสำเร็จรูป เป็นต้น มาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศไทยกำหนดให้กาแฟผงสำเร็จรูปมีความชื้นไม่เกิน 4.5 % (บุษกร, 2547)

ตารางที่ 2.2 ค่า Water Activity น้อยที่สุดที่จุลินทรีย์ชนิดสำคัญ ๆ จะเจริญเติบโตได้

ชนิดของจุลินทรีย์	Water Activity น้อยที่สุดที่จุลินทรีย์สามารถเจริญได้
Normal Bacteria	0.91
Normal Yeasts	0.88
Normal Molds	0.80
Xerophilic Molds	0.65
Osmophilic Yeasts	0.60

ที่มา : เข็มทอง (2538)

เข็มทอง (2538), สีนธนา 2542) และ นิธิยา (2543) ได้อธิบายผลของ  $a_w$  ต่อการเสียดของอาหารและการเกิดปฏิกิริยาเคมีในอาหารดังต่อไปนี้

### 2.3.1.2 ผลของ Water Activity ต่อการเสียดของอาหาร

เนื่องจาก ซีสต์ รา และแบคทีเรียจำเป็นต้องใช้น้ำอิสระในการเจริญ การผลิตอาหารให้ มีค่า  $a_w$  ต่ำกว่า 0.6 จะช่วยควบคุมการเน่าเสียเนื่องจากจุลินทรีย์เหล่านี้ได้ ตัวอย่างของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียดของอาหารและระดับของ  $a_w$  ที่จุลินทรีย์เหล่านี้สามารถเจริญเติบโตได้แสดงใน ตารางที่ 2.2 วิธีที่ง่ายที่สุดในการลด  $a_w$  ในอาหารคือการกำจัดน้ำในอาหารเช่น การทำให้สุก การอบ หรือการทำให้แห้ง การใช้อุณหภูมิสูง

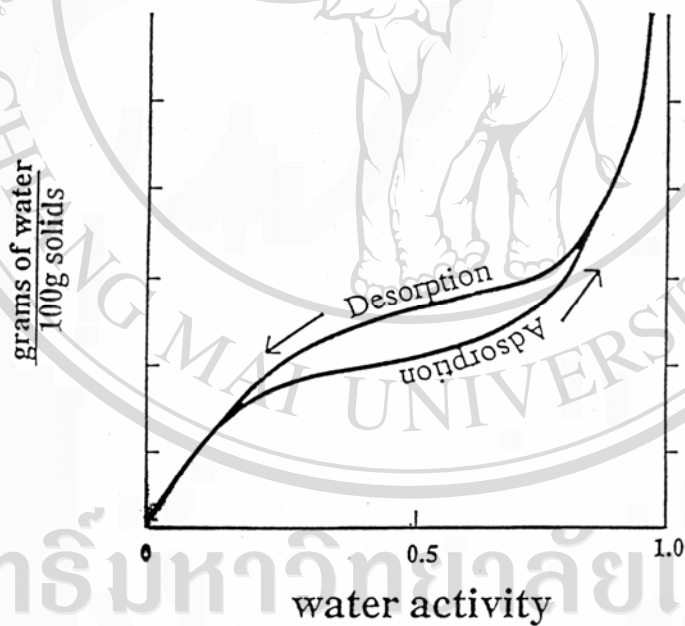
### 2.3.1.3 ผลของ Water Activity ต่อปฏิกิริยาเคมีในอาหาร

อาหารมักจะมีโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตซึ่งมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยา Millard ซึ่งทำให้เกิดสีน้ำตาล ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากเอ็นไซม์ การเกิดสีน้ำตาล เนื่องจาก Millard Reaction มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อค่า  $a_w$  สูงขึ้น โดยจะเกิดได้สูงสุดที่ช่วง  $a_w$  เท่ากับ 0.6 ถึง 0.7 (นิธิยา, 2543) แต่ในผลิตภัณฑ์บางชนิดเมื่อเพิ่มค่า  $a_w$  ก็จะขัดขวางการเกิด Millard Reaction ได้ ดังนั้นการตรวจวัด และควบคุมค่า  $a_w$  ในผลิตภัณฑ์ จึงเป็นวิธีที่ดีในการควบคุมปัญหาการเกิดสีน้ำตาลจาก Millard Reaction

$a_w$  มีผลกระทบต่อความคงตัวในด้านคุณสมบัติตามธรรมชาติของโปรตีนและเอ็นไซม์ เอ็นไซม์และโปรตีนเกือบทุกชนิดต้องรักษาสภาพตามธรรมชาติไว้เพื่อให้สามารถทำหน้าที่ได้ตามปกติ ดังนั้นการรักษาระดับของ  $a_w$  เพื่อป้องกันและการเปลี่ยนแปลงสภาพของสารเหล่านี้จึงมีความสำคัญต่อคุณภาพของอาหารอย่างมาก ปฏิกิริยาจากเอ็นไซม์ ส่วนมากจะช้าลงที่ระดับ  $a_w$

### 2.3.1.4 Water Activity และความชื้น

อาหารแต่ละชนิดจะมีการดูดซับ (adsorption) และคาย (desorption) ความชื้นแตกต่างกัน ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจะทำให้อาหารมีค่า  $a_w$  แตกต่างกันที่ระดับความชื้นเดียวกันส่งผลให้ความสามารถในการเก็บรักษานั้นแตกต่างกันไปด้วย ความสัมพันธ์ระหว่าง  $a_w$  และ ความชื้น นั้นสามารถแสดงได้ในรูปกราฟ Moisture sorption Isotherm ดังรูปที่ 2.1 รูปทรงของกราฟนี้จะเป็นแบบ Sigmoidal สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารส่วนใหญ่ แต่อาหารที่มีปริมาณน้ำตาลมากหรือมีโมเลกุลที่ละลายได้น้อยเส้นกราฟจะมีรูปร่างคล้ายตัว J



รูปที่ 2.1 กราฟ Moisture Sorption Isotherm

ที่มา: นิธิยา (2543)

Moisture Sorption Isotherm แสดงความสามารถในการดูดซึม (Adsorption) และคายความชื้น (Desorption) ของอาหารที่อุณหภูมิและในเวลาที่กำหนด ซึ่งพฤติกรรมดูดซึมและคายความชื้นนี้ไม่จำเป็นต้องเป็นเส้นเดียวกัน ความแตกต่างของเส้นกราฟแสดงการดูดและการคาย

$$\text{ความชื้นสัมพัทธ์สมมูล (\%)} = \frac{\text{ความดันไอของน้ำในบรรยากาศ}}{\text{ความดันไอน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน}} \times 100 \quad (2.1)$$

สามารถใช้ Moisture Sorption Isotherm ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นและกำหนดสภาวะการอบแห้ง คัดเลือกบรรจุภัณฑ์ ทำนายอายุระหว่างการเก็บรักษาอาหารแห้งทำให้ผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างเนื้อสัมผัสที่ดี ลดการเปลี่ยนแปลงจากปฏิกิริยาเคมีและปลอดภัยจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มากที่สุด (นักสิทธิ์, 2546)

### 2.3.2 การทำแห้งด้วยวิธีออสโมซิส (Osmotic Dehydration)

#### 2.3.2.1 หลักการ

การทำแห้งด้วยวิธีออสโมซิส เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การแช่แข็ง แช่ทอง (2538) ได้อธิบาย หลักการต่างๆเกี่ยวกับการแช่แข็งผักและผลไม้ไว้มีต่อไปนี้ การแช่แข็งผักและผลไม้ คือ การทำให้น้ำตาลแพร่เข้าไปในเนื้อเยื่อของผักและผลไม้จนกระทั่งมีความเข้มข้นสูงพอที่จะป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ ส่วนมากการแช่แข็งจะใช้กับผลไม้ ลักษณะที่ดีของผักและผลไม้แช่แข็ง คือ การมีสีสรรที่สดใสน้ำตาลต่ำ คงรูปร่างได้ดี ไม่นิ่มและเหนียว มีความหวานสม่ำเสมอทั้งชิ้น ผลไม้และผักแช่แข็งที่มีจำหน่ายในท้องตลาดนั้นแบ่งออกได้เป็น 3 สภาพคือ ผลไม้แช่แข็งเปลือก ผลไม้แช่แข็งแห้ง และผลไม้แช่แข็งแบบมีน้ำตาลเคลือบ

วิธีการทำผักหรือผลไม้แช่แข็ง สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีการหลัก คือ การแช่แข็งแบบเร็ว และการแช่แข็งแบบช้า ผลไม้ที่จะนำมาแช่แข็งควรเลือกชนิดที่มีกลิ่นรสจัด มีสภาพแก่จัดถึง



วิธีการแช่อบแบบเร็ว หรือ การเชื่อมผักและผลไม้ เป็นวิธีการใช้ความร้อนเพื่อเร่งให้น้ำตาลหรือน้ำเชื่อมความเข้มข้นประมาณ 55-70% แพร่เข้าสู่เนื้อเยื่อของผักและผลไม้ เมื่อใช้การแช่อบเช่นนี้ กับผักหรือผลไม้ที่มีเนื้อแน่นแข็ง เช่น มันเทศ มะละกอดิบ ฟักทอง นิยมเตรียมน้ำเชื่อมตั้งต้นให้มีความเข้มข้นปานกลางประมาณ 35 – 50 °Brix แล้วใส่ผักหรือผลไม้ แล้วจึงนำไปเคี่ยว ส่วนในกรณีที่ผักหรือผลไม้มีเนื้อนุ่มและมีน้ำมาก จะใช้น้ำตาลประมาณ 0.8–1.0 เท่าของน้ำหนักเนื้อผักหรือผลไม้คลุกรวมกับเนื้อผลไม้ ตั้งทิ้งไว้ให้น้ำบางส่วนแพร่ออกมาจากผักหรือผลไม้ แล้วจึงนำไปเคี่ยวโดยใช้ความร้อนต่อไป การเคี่ยวเพื่อเร่งให้น้ำตาลแพร่เข้าสู่เนื้อเยื่อของผักและผลไม้รวดเร็วยิ่งขึ้นนี้ไม่ควรใช้อุณหภูมิสูงมาก เพราะทำให้ผักหรือผลไม้แช่อบมีสีคล้ำหตุและเหนียวข้นมากและเกิดการนิ่มและได้ง่ายอุณหภูมิของน้ำเชื่อมควรอยู่ที่ 80 – 90 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่าได้ระบบความดันต่ำ

เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลในเนื้อเยื่อของผักผลไม้สูงเท่าที่ต้องการแล้ว อาจแช่ผักหรือผลไม้ชิ้นทิ้งไว้ในน้ำเชื่อมอีกประมาณ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อช่วยให้การกระจายตัวของน้ำเชื่อมในเนื้อเยื่อของผักและผลไม้สม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น ในกรณีที่ต้องการเก็บรักษาไว้เป็นเวลานาน ๆ ควรบรรจุผักหรือผลไม้เชื่อมที่ได้ลงในขวดที่สะอาดทันทีหลังจากเชื่อมเสร็จแล้ว ปิดฝาให้สนิทเช่นเดียวกับการทำแยมลี่ ผักหรือผลไม้เชื่อมเช่นนี้นิยมจำหน่ายหรือบริโภคโดยตรง ในสภาพที่มีน้ำเชื่อมติดอยู่ตามผิวหนังโดยตรง จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ผักหรือผลไม้แช่อบเปียกหรือผักผลไม้แช่อบชื้น

การแช่อบแบบช้า เป็นวิธีที่ไม่มีการเร่งให้น้ำเชื่อมหรือน้ำตาลเข้าสู่เนื้อเยื่อผักผลไม้ด้วยความร้อน การแพร่ของน้ำเชื่อมจะค่อยๆเกิดขึ้น ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งความเข้มข้นของน้ำตาล ในเนื้อเยื่อของผักหรือผลไม้สูงเท่าที่ต้องการ การแช่อบเช่นนี้ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเสียหายจากความร้อนน้อยมากจึงมีสีที่ดีกว่า ไม่และหรือเหนียวข้น มีการหตุและความหวานในเนื้อเยื่อสม่ำเสมอกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแช่อบแบบเร็ว

การแช่อบแบบช้า เริ่มด้วยการเตรียมน้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้นประมาณ 30 – 35 °Brix แล้วแช่ผักหรือผลไม้ให้ท่วมแช่ทิ้งไว้ให้เกิดการแพร่ของน้ำเชื่อมเข้าสู่เนื้อเยื่อของผักและผลไม้ ใน

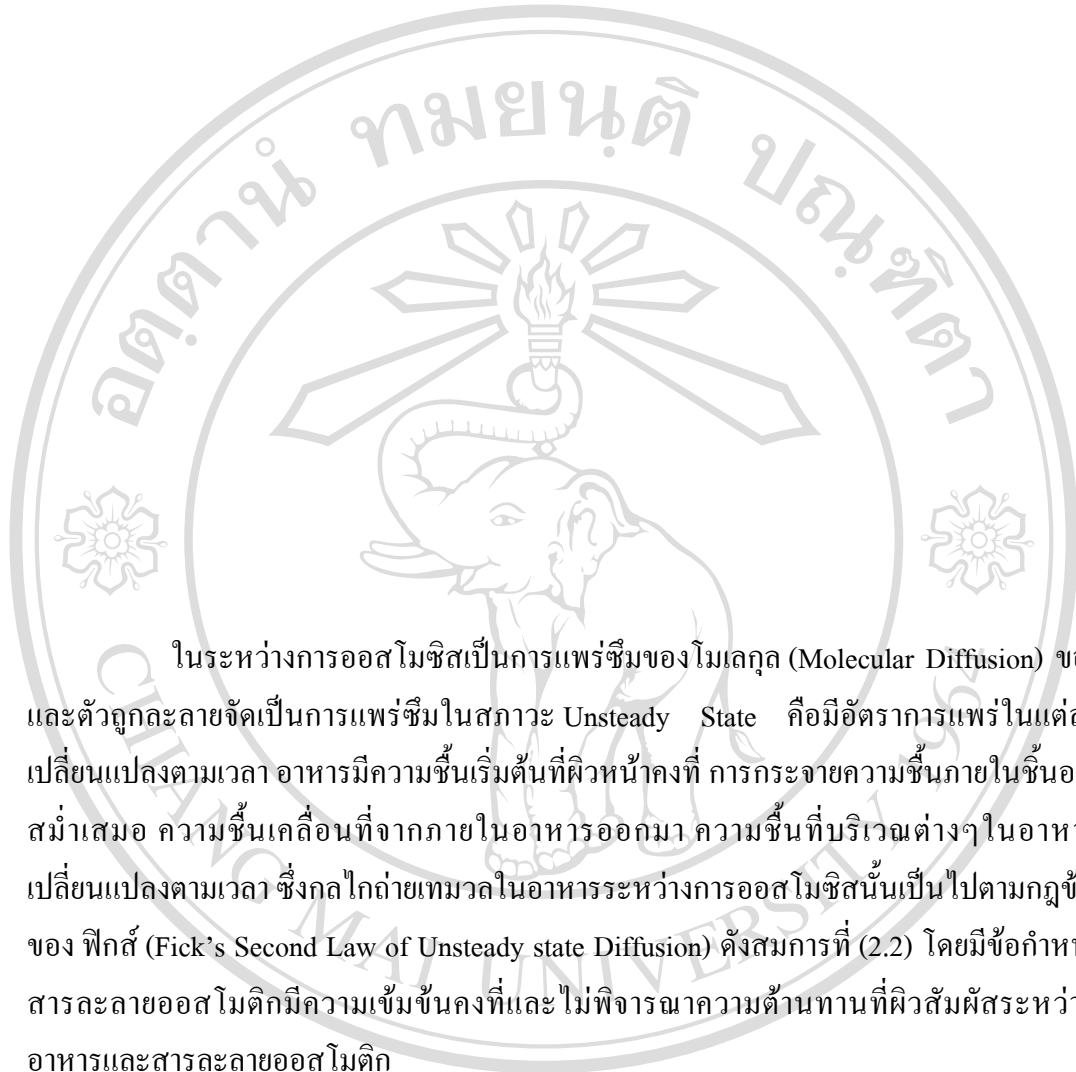


ผักและผลไม้แช่อิ่มที่ได้เมื่อนำมาล้างคราบน้ำตาลตามผิวออก ด้วยน้ำอุ่นหรือน้ำร้อน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 48-71 องศาเซลเซียส หรือผึ่งแดดพอให้ผิวนอกแห้ง ก็จะได้ผักหรือผลไม้แช่อิ่มแห้ง (Fruit Candy) และถ้านำผักหรือผลไม้แช่อิ่มนี้มาเคลือบด้วยน้ำเชื่อมอิมตัว แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 48 องศาเซลเซียส พอแห้งจะได้ผักหรือผลไม้แช่อิ่มเคลือบ (Glaze fruit) ที่มีผิวเป็นประกายใสเนื่องจากการมีน้ำเชื่อมเคลือบอยู่ (เจ็มทอง, 2538)

#### 2.3.2.2 ความสำคัญและการประยุกต์ใช้

การทำแห้งด้วยวิธีการแช่ชิ้นอาหารในสารละลายความเข้มข้นสูง (Hypertonic Solution) หรือสารละลายที่มีค่า  $a_w$  ต่ำกว่าอาหาร จะทำให้เกิดการแพร่ของน้ำและสารถูกละลายขึ้นทันทีเพราะความแตกต่างของแรงดันออสโมติก (Osmotic Pressure) ระหว่างภายในและภายนอก





ในระหว่างการออสโมซิสเป็นการแพร่ซึมของโมเลกุล (Molecular Diffusion) ของน้ำ และตัวถูกละลายจัดเป็นการแพร่ซึมในสภาวะ Unsteady State คือมีอัตราการแพร่ในแต่ละจุดเปลี่ยนแปลงตามเวลา อาหารมีความชื้นเริ่มต้นที่ผิวหน้าลงที่ การกระจายความชื้นภายในชั้นอาหารสม่ำเสมอ ความชื้นเคลื่อนที่จากภายในอาหารออกมา ความชื้นที่บริเวณต่างๆ ในอาหารจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งกลไกถ่ายเทมวลในอาหารระหว่างการออสโมซิสนั้นเป็นไปตามกฎข้อที่ 2 ของ ฟิคส์ (Fick's Second Law of Unsteady state Diffusion) ดังสมการที่ (2.2) โดยมีข้อกำหนดว่า สารละลายออสโมติกมีความเข้มข้นคงที่และไม่พิจารณาความต้านทานที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นอาหารและสารละลายออสโมติก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright © by Chiang Mai University  
All rights reserved

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.2)$$

เมื่อ

- c คือ ความเข้มข้น
- D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient)
- x คือ ระยะทางในการแพร่ในแนวแกน x
- t คือ เวลา

### 2.3.2.3. ชนิดและคุณสมบัติของสารละลายออสโมติก

น้ำตาล (Sugar) น้ำตาลเป็นหนึ่งในสารที่นิยมใช้ในการแช่แข็งเนื่องจากให้รสหวาน และเพิ่มรสชาติให้กับอาหารในที่นี่จะกล่าวถึงน้ำตาลที่นิยมใช้ในการแช่แข็งอาหาร คือน้ำตาลทราย ซึ่ง หมายถึง ฟรุคโตส (Fructose) ที่มีความบริสุทธิ์สูงสุด มีลักษณะเป็นเกล็ดใสที่มีสีขาว ปราศจากน้ำตาล (Molasses) เกือบไม่มีความชื้นเลย น้ำตาลทรายนั้นมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีจึงทำให้สารละลายน้ำตาลเป็นสารละลายออสโมติกที่มีประสิทธิภาพซึ่งความสามารถในการละลายสูงสุดของน้ำตาลที่อุณหภูมิต่างๆแสดงไว้ในตารางที่ 2.3

กลูโคสซีรัป (Glucose syrup) (สุวรรณ, 2543) หรือเรียกอีกอย่างว่า คอร์นซีรัป (corn syrup) เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้เตรียมในระยะแรกๆ คือ ข้าวโพด ปัจจุบันผลิตได้จากการไฮโดรไลซ์ แป้งที่บริโภคได้ เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่งเพียงบางส่วน โดยผ่านการควบคุม ทำให้บริสุทธิ์ และทำให้เข้มข้น กลูโคสซีรัปที่ได้จะเป็นสารละลายเนื้อเดียวของ ดี(+)-กลูโคส มอลโตส และ โพลีเมอร์อื่นๆ ของกลูโคส จัดเป็นวัตถุดิบที่สำคัญต่อการผลิตลูกกวาดทุกชนิดรองลงมาจากน้ำตาล จึงถูกเปรียบเทียบว่าทำหน้าที่เสมือนเป็นเนื้อของลูกกวาดกลูโคสซีรัป ปัจจุบันคนไทยนิยมเรียกกลูโคสซีรัปว่าเบะแซ มีลักษณะเป็นของเหลวข้นหนืด สีขาวใสสะอาด รสหวานเล็กน้อย เบะแซที่ขายกันทั่วไปจะมีความเข้มข้นประมาณ 80-85 °Brix หากมากกว่านี้จะหนืดมาก ราคาแพง คุณสมบัติบางประการของเบะแซคือ สามารถป้องกันการดูดความชื้นและการเกิดสีน้ำตาล สามารถควบคุมการเกิดผลึกของน้ำตาล ความหวาน ความหนืดและการเหนียวติดกัน และให้คุณค่าทางอาหาร

กลีเซอรอล (ไพโรจน์, 2544) ลักษณะเป็นของเหลวใส หนืด มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 92 จุดหลอมเหลว 18.17 องศาเซลเซียส มีจุดเดือดที่ 290 องศาเซลเซียส เมื่อผสมกับน้ำมีจุดเยือกแข็งที่ -46.5 องศาเซลเซียส เป็นสารที่ได้มาจากการหมักน้ำตาล ไม่มีพิษ ไม่ทำให้เกิดการระคายเคือง มีความหวาน 65% ของน้ำตาลซูโครส ละลายในน้ำมันได้เล็กน้อยแต่สามารถละลายได้ในสารละลายต่างๆชนิด ให้พลังงาน 4.32 แคลลอรี่ต่อกรัม FDA จัดให้เป็นสารเจือปนในอาหาร (Generally Recognized as Safe, GRAS) มีค่าความถ่วงจำเพาะ 96 กรัม/100มิลลิลิตร

ตารางที่ 2.3 อัตราการละลายสูงสุดของน้ำตาลซูโครสที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน

อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ของ สารละลาย ซูโครส (°Brix)	ปริมาณน้ำตาล ละลายในน้ำ 100 มล. (กรัม)	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ของ สารละลาย ซูโครส (°Brix)	ปริมาณน้ำตาล ละลายในน้ำ 100 มล. (กรัม)
0	64.40	180.9	50	72.04	257.6
5	64.81	184.2	55	73.10	271.8
10	65.32	188.4	60	74.20	287.6
15	65.92	193.4	65	75.32	305.2
20	66.60	193.4	70	76.45	324.7
25	67.35	206.3	75	77.59	346.3
30	68.18	214.3	80	78.74	370.3
35	69.07	223.3	85	79.87	396.8
40	70.01	233.4	90	81.00	426.2
45	71.00	244.8			

ที่มา : เข็มทอง (2538)

ในผลิตภัณฑ์อาหาร มีการใช้กลีเซอรอลเป็นตัวทำละลาย เป็นสารให้ความชุ่มชื้น (Humectant) และ สารหล่อลื่น (Plasticizer) กลีเซอรอลช่วยในการยับยั้งการเกิดผลึกน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ลูกกวาด ทำให้ลูกกวาดที่ได้มีเนื้อสัมผัสนุ่มเนียนและเป็นครีมหรือในบางครั้งอาจใช้ซอร์บิทอลแทนกลีเซอรอล หรือ โพรพิลีน ไกลคอลร้อยละ 4 โดยน้ำหนักเพื่อทำหน้าที่เป็น สารให้ความชุ่มชื้น และ สารปรับความนุ่มของเนื้อสัมผัส (Softener) ในเนื้อมะพร้าวที่หั่นเป็นชิ้นเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเนื้อสัมผัสนุ่มและชุ่มชื้น ในบางครั้งยังมีกลีเซอรอลเป็นสารหล่อลื่น เครื่องจักรในโรงงานเนื่องจากกลีเซอรอลมีจุดเยือกแข็งค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้กลีเซอรอลไม่ระเหยที่อุณหภูมิห้องจึงทำให้ไม่เกิดการสูญเสียเนื่องจากการระเหย

### 2.3.2.4 ชนิดของสารละลายออสโมติกและการเลือกใช้

รัตนาและพิไลรัก (2541) ได้สรุปชนิดและวิธีการเลือกใช้ออสโมติกไว้ดังนี้

สารออสโมติกที่ใช้ต้องมีค่าปริมาณน้ำอิสระต่ำ ( $a_w$ ) ต่ำ เป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค และมีรสชาติเป็นที่ยอมรับ ในการพิจารณาเลือกใช้ออสโมติกควรพิจารณาคุณสมบัติเพิ่มเติมอีก 3 ข้อ คือ

- สารออสโมติกที่ใช้ ต้องไม่ส่งผลทำให้คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์อันได้แก่ สี กลิ่น รสชาติ และลักษณะเนื้อสัมผัสที่เปลี่ยนไป
  - ราคาของสารออสโมติก ต้องมีราคาต่อหน่วยถูก ไม่ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงมาก
  - สารออสโมติกที่ใช้ควรมีน้ำหนักโมเลกุลสูง เพราะถ้ามีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น น้ำตาลกลูโคส จะทำให้ปริมาณน้ำตาลซึมเข้าไปอยู่ในเนื้อผลไม้เพิ่มมากกว่าการสูญเสีย น้ำ
- ชนิดของสารออสโมติก ที่นิยมใช้กับผลไม้ ได้แก่ น้ำตาลทรายขาว (ซูโครส) น้ำผลไม้เข้มข้น น้ำตาลแลคโตสผสมน้ำตาลทรายขาว น้ำตาลแลคโตสผสมกับมอลโตเด็กซ์ทริน กลีเซอรอล แบะแซเหลว เป็นต้น สารออสโมติกที่นิยมใช้กับผัก ได้แก่ เกลือ เกลือผสมน้ำตาลทราย กลีเซอรอล โพพิวรีนไกลโค เป็นต้น ในสารละลายออสโมติก ยังอาจมีการเติมสารอื่นๆ ที่ใช้ในการผลิตลงไปด้วยก็ได้ เช่น การเติมกรดซิตริก เกลือซัลไฟด์ แคลเซียมคลอไรด์ เป็นต้น

### 2.2.2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชัน

รัตนา และพิไลรัก (2541) ได้สรุปปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการออสโมซิสไว้ดังนี้

- อุณหภูมิ ในระหว่างการทำออสโมติกดีไฮเดรชัน ถ้าเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายออสโมติกให้สูงขึ้นประมาณ 30-50 องศาเซลเซียส พบว่า อัตราการออสโมซิสเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น เป็นผลให้อัตราการสูญเสียน้ำของชิ้นผักผลไม้เพิ่มขึ้นแต่เพียงอย่างเดียว แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายให้สูงเกิน 70 องศาเซลเซียส พบว่า อัตราการสูญเสียน้ำและการซึมผ่านของตัวถูกละลายเข้าไปในเนื้อผักผลไม้เพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้เป็นเพราะความร้อนขนาด 70 องศาเซลเซียส มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลไม้

- การกวนหรือการคน สารละลายที่ระหว่างกระบวนการออสโมซิส เพื่อรักษาความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้แช่ให้มีความสม่ำเสมอ เท่ากันทั้งหมด โดยเฉพาะบริเวณรอบๆ ชิ้นผักผลไม้ อัตราการออสโมซิสของสารละลายที่มีการคนตลอดเวลาจะเร็วกว่าของสารละลายที่ไม่ได้คน เพราะจะทำลายชั้นฟิล์มของตัวถูกละลายรอบๆผิวของชิ้นอาหาร

- อัตราส่วนของผักผลไม้กับสารละลายออสโมติก มีผลต่ออัตราการ ออสโมซิส เพราะถ้าอัตราส่วนของผัก : สารละลายออสโมติกน้อยเกินไปมีผลทำให้ความเข้มข้นของสารละลายเจือจางลงส่งผลให้แรงดันออสโมซิสลดลงด้วย

- ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายออสโมติก สารละลายออสโมติกควรมีความเข้มข้นสูงเพราะความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกยิ่งสูง อัตราการสูญเสียน้ำยิ่งเพิ่มขึ้นและอัตราการแพร่เข้าของตัวถูกละลายยิ่งลดลง นอกจากความเข้มข้นแล้วยังพบว่า สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะลดการแพร่เข้าของตัวถูกละลาย และเพิ่มการสูญเสียน้ำเป็นผลให้น้ำหนักลดลงด้วย

### 2.3.2.6. คำนวณการออสโมซิส (รัตนา และพิไลรัก, 2541)

คำนวณการออสโมซิสได้แก่ปริมาณตัวถูกละลายที่เพิ่มขึ้น (solute gain), ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (water loss) และน้ำหนักลดลง (weight reduction)

$$\% \text{ ตัวถูกละลายที่เพิ่มขึ้น (SG)} = \frac{\text{ปริมาณของแข็งทั้งหมด} - \text{ปริมาณของแข็งเริ่มต้น}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น}} \times 100 \quad (2.3)$$

$$\% \text{ ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (WL)} = \frac{\text{ปริมาณน้ำเริ่มต้น} - \text{ปริมาณน้ำที่เหลือ}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น}} \times 100 \quad (2.4)$$

$$\% \text{ ปริมาณน้ำหนักลดลง (WR)} = \frac{\text{น้ำหนักเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักที่เหลือ}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น}} \times 100 \quad (2.5)$$

### 2.3.2.7. ข้อดีของการแช่อบแห้ง

รัตนา และพิไลรัก (2541) ได้อธิบายข้อดีของการแช่อบแห้งดังนี้

- ผักผลไม้เมื่อนำมาผ่านกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันก่อนนำไปอบแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง อบแห้งแบบสุญญากาศ และอบแห้งแบบลมร้อนจะช่วยลดระยะเวลาในการอบ และประหยัดพลังงาน

- ผักผลไม้เมื่อนำมาผ่านกระบวนการออสโมซิส เมื่อนำไปอบแห้ง จะทำให้ได้ผักผลไม้ที่มีรสชาติดีขึ้น อันเนื่องจากระหว่างการทำออสโมติก ตัวถูกละลายบางส่วน (กรดเกลือ น้ำตาล) ที่อยู่ในผักผลไม้จะออสโมซิสออกไปกับน้ำด้วย



- ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้แช่ผักผลไม้ในระหว่างการทำแห้งแบบออสโมซิสสูงมากจนทำให้เอนไซม์ที่ทำให้เกิดสีน้ำตาลในผักผลไม้ทำงานช้าลง เป็นผลให้สีของผักผลไม้ไม่เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล
- ผักผลไม้ที่ผ่านการทำแห้งแบบออสโมซิส ไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการอบแห้งเป็นผลให้กลิ่นของผักผลไม้คงอยู่ได้มากกว่า

### 2.3.3 การทำแห้ง (เข็มทอง, 2538; สนิธนา, 2542)

#### 2.3.3.1 ปรัชญาการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้ง

ปรากฏการณ์สำคัญที่เกิดขึ้นในระหว่างการอบแห้งได้แก่ การถ่ายเทความร้อนและมวลสารวิธีการกำจัดน้ำออกจากอาหารนั้นนิยมใช้ความร้อน ซึ่งการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้น ณ จุดที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิเท่านั้น การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นอาจเป็นแบบ การนำความร้อน การพาความร้อนหรือการแผ่รังสีความร้อนอย่างใดอย่างหนึ่งหรือรวมกันก็ได้ ถ้าความแตกต่างของอุณหภูมิจากอาหารและตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นการระเหยน้ำออกจากอาหารก็จะรวดเร็วยิ่งขึ้น เมื่ออาหารได้รับความร้อน น้ำบริเวณผิวหน้าของอาหารจะระเหยออกไปก่อน ทำให้ความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าของอาหารเพิ่มสูงขึ้น จึงเกิดการเคลื่อนย้ายของน้ำออกจากเซลล์ที่อยู่ข้างในไปยังเซลล์ที่อยู่ผิวหน้า เพื่อเป็นการปรับค่า ความดันออสโมติกระหว่างเซลล์อาหารของเนื้ออาหารให้สมดุลกัน แต่ที่น้ำเมื่อเคลื่อนที่ออกมาภายนอกก็จะระเหยกลายเป็นไอ ไปสู่บรรยากาศของตู้อบต่อไป จึงทำให้การเคลื่อนย้ายของน้ำในอาหารเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง การเคลื่อนย้ายนี้จะหยุดลงก็ต่อเมื่อน้ำในเซลล์ผิวหน้าไม่สามารถระเหยออกไปได้อีกแล้ว เท่านั้นดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ปัจจัยที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อน และการเคลื่อนย้ายของน้ำในอาหารนั้น ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นบรรยากาศ ความเร็วของกระแสลม พื้นที่ผิวของอาหาร ตลอดจนความดันบรรยากาศ ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ข้างต้นกับอัตราการระเหยน้ำเป็นดังนี้ คือ

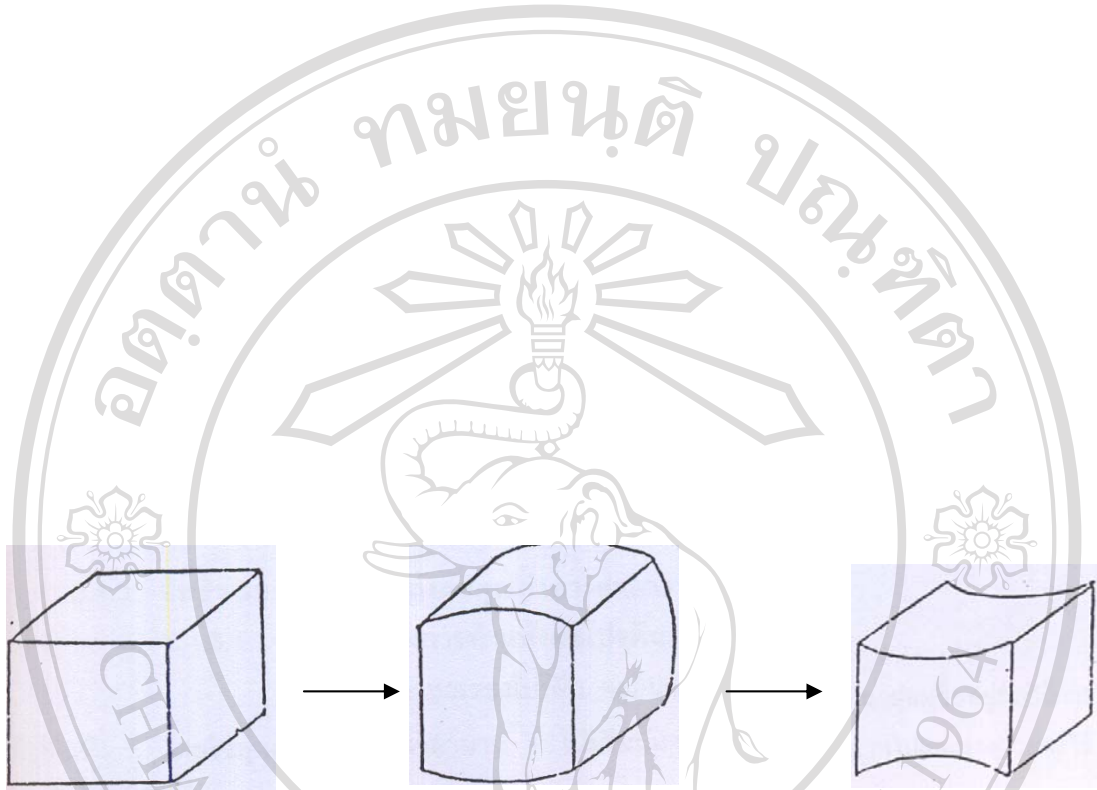
- ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิกระเปาะแห้งและกระเปาะเปียก (Dry Bulb and Wet Bulb Temperature) ในระหว่างการอบแห้งอาหาร อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง ในขณะที่อุณหภูมิของอากาศที่ผ่านออกจากอาหารหรืออุณหภูมิกระเปาะเปียก พบว่า ถ้าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิทั้งสองนี้สูง จะทำให้การระเหยน้ำออกจากผักและผลไม้รวดเร็วขึ้น แต่ว่าการใช้อุณหภูมิกระเปาะแห้งควรระวังไม่ให้สูงเกินไป เพราะสามารถทำให้เกิดความเสียหายได้หลายประการ เช่น การเกิดผิวหน้าแห้งแข็ง การหดตัวของผลิตภัณฑ์ไม่



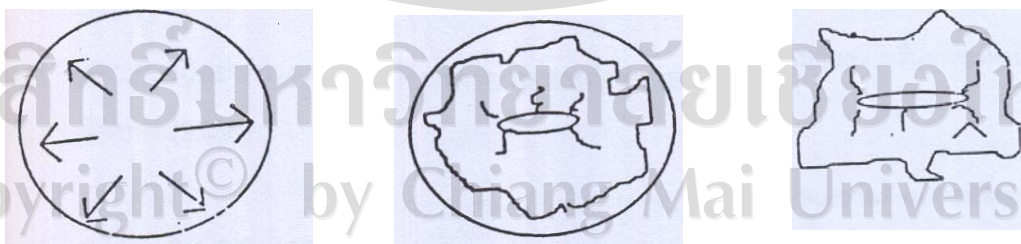
- ความชื้นของอากาศ ถ้าอากาศในระบบการอบแห้งมีความชื้นต่ำ จะทำให้การระเหยน้ำออกจากผักและผลไม้ เข้าสู่บรรยากาศเกิดขึ้นได้ง่าย ดังนั้นอัตราการระเหยน้ำของผักและผลไม้จะรวดเร็วขึ้น
- การเคลื่อนที่ของอากาศ พบว่าถ้าอากาศที่มีในระบบการอบแห้งมีการเคลื่อนที่ในทิศทางและความเร็วที่เหมาะสม จะช่วยให้น้ำระเหยออกจากอาหารรวดเร็วขึ้น เพราะการเคลื่อนที่ของอากาศจะช่วยพาอากาศชื้นออกจากอาหารและนำเอาอากาศแห้งเข้ามาแทนที่ จึงทำให้น้ำในอาหารระเหยเข้าสู่บรรยากาศได้รวดเร็วยิ่งขึ้น
- พื้นที่ผิวของอาหาร ถ้าพื้นที่ผิวของอาหารสูง เช่น ผักที่มีใบกว้าง รูพรุน ขนาดเล็ก อัตราการระเหยน้ำจะรวดเร็วกว่าผักหรือผลไม้ที่มีพื้นที่ต่ำ เนื่องจากพื้นที่ผิวที่จะสัมผัสกับตัวกลาง ความร้อนเพื่อทำให้น้ำระเหยออกไปมีมากกว่านั่นเอง
- ความดันอากาศในตู้อบ พบว่า ถ้าความดันของอากาศในเครื่องอบแห้งต่ำ การระเหยของน้ำจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิที่เท่ากัน

### 2.3.3.1 การเปลี่ยนแปลงเนื้อเยื่อในอาหารระหว่างการทำแห้ง (เจ็มทอง, 2538)

การเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อในอาหารเกิดขึ้นเนื่องจากการย้ายที่ของสารที่ละลายได้ (Changes due to Migration of Soluble Constituents) การเปลี่ยนแปลงแบบนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก ในเซลล์อาหารมักมีของแข็งที่ละลายได้อยู่ เช่น น้ำตาล กรด เมื่อถูกระเหยออกไปก็จะนำเอาพวกของแข็งที่ละลายได้ตามไปด้วย นอกจากนี้ยังเกิด การจับตัวกันเป็นก้อนแข็งบริเวณผิวของอาหาร โดยเฉพาะลักษณะของอาหารประเภทแป้ง และ โปรตีนหรืออาหารที่สามารถเกิดเจลได้สูงเมื่อทำการอบไปนาน ๆ ความร้อนทำให้น้ำในเซลล์ลดลงเกิดการจับตัวเป็นเจลแห้งแข็งบริเวณผิวหน้า (Case hardening) ส่งผลให้น้ำซึมผ่านออกมาได้ยาก การระเหยน้ำออกจากอาหารต่ำ น้ำจะเหลืออยู่ในอาหารสูง ถ้าใช้ความร้อนสูงๆ ก็จะทำให้เกิดปัญหาอื่น ๆ ตามมา สารอาหารเกิดการสูญเสียได้ โดยเฉพาะการสูญเสียวิตามิน เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือการสูญเสียของสารที่ระเหยได้ เนื่องจากความร้อน ส่วนการสูญเสียลักษณะของเซลล์นั้นสามารถนำกลับมาได้บางส่วน โดยธรรมชาติในเซลล์ของอาหารจะอยู่ในลักษณะของเซลล์ที่เต่งตึงเสมอและผนังของเซลล์จะมีสมบัติในการยืดหยุ่นได้ ซึ่งเป็นลักษณะของผนังเซลล์ที่มีความต้านทานต่อแรงหรือการยืดตัวขนาดหนึ่ง ถ้าเกินความสามารถที่จะรับไว้ได้ผนังเซลล์ก็จะแตกปริ ทำให้ลักษณะเซลล์ผิดรูปไปในการทำแห้งอาหารเมื่อน้ำถูกระเหยออกไป จะทำให้เกิดช่องว่างขึ้นซึ่งผิวของอาหารจะพยายามเข้าไปแทนที่

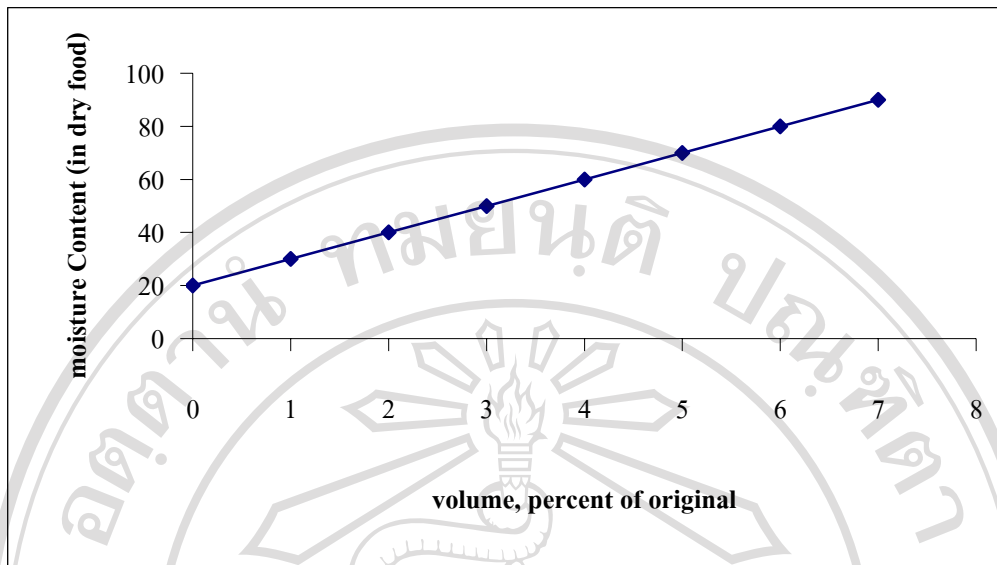


รูปที่ 2.2 รูปร่างของชิ้นอาหารก่อนการอบแห้งและหลังการอบแห้ง  
ที่มา : (เจ็มทอง, 2538)



Incompressible part

รูปที่ 2.3 ลักษณะการหดตัวระหว่างการอบแห้ง ของชิ้นอาหาร  
ที่มา : (เจ็มทอง, 2538)



รูปที่ 2.4 อัตราการลดลงของปริมาณอาหารหลังจากอบแห้งเทียบกับความชื้นของอาหาร  
ที่มา : สมบัติ (2529)

### 2.3.2 อิทธิพลของการทำแห้งต่อคุณค่าทางอาหาร

การทำแห้งนั้นมีผลต่อคุณภาพด้านต่างๆของอาหาร โดยเฉพาะการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต เอนไซม์ เม็ดสี และแคโรทีนอยด์คุณค่าทางอาหารของโปรตีน จะมากขึ้นขึ้นอยู่กับวิธีการทำให้แห้ง หากใช้อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน โปรตีนนั้นจะเปลี่ยนสภาพไปและไม่สามารถละลายน้ำได้ร่างกายจึงใช้ประโยชน์ได้น้อยลง นอกจากนี้ปัญหาสำคัญของอาหารแห้ง คือ การเกิดกลิ่นเหม็นหืน ซึ่งจะมากขึ้นถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นดังนั้น การทำแห้งควรใช้อุณหภูมิต่ำ ๆ หรืออาจใช้สารเคมีบางอย่างสามารถป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยใช้สารต่อต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidants) เช่น Butylated Hydroxy Toluene (BHT) ในระหว่างการทำแห้งจะเกิดการเปลี่ยนสีของผลไม้ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดอินทรีย์และน้ำตาลจะเกิดสีดำ จึงควบคุมได้โดยการใช้สารจำพวก Antibrowning เช่น โซเดียมแอสคอร์บेट โซเดียมโซลไฟต์ กรดแอสคอร์บิก โดยทั่วไปเอนไซม์จะหยุดการทำงานอย่างสิ้นเชิง ถ้าให้ความร้อนขึ้นใกล้ จุดเดือดของน้ำ แต่อาจมีเอนไซม์บางชนิดสามารถทนทานได้บ้างแต่โดยทั่วไปการใช้ความร้อน 100 องศาเซลเซียส เวลา 1 นาที จะมีผลทำให้เอนไซม์หยุดการทำงานลงอย่างสิ้นเชิง อย่างไรก็ตามการใช้ความร้อนสูงจะมีผลต่อ เม็ดสีพวกแคโรทีนอยด์ และแอนโทไซยานินส์ ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นสีซีดจาง ถ้าหากใช้อุณหภูมิสูง และเวลานาน ในขณะที่ทำให้แห้ง และพร้อมกันนั้นถ้าหากใช้สารเคมีบางอย่างเพื่อหยุดยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์ บางครั้งอาจจะมีอิทธิพล

เนื่องจากแคโรทีนอยด์นั้นเป็นสารสำคัญในแคโรทีนที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้จึงได้รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องได้แก่โครงสร้าง ปัจจัยที่มีต่อการสลายตัว และการวิเคราะห์ไว้ดังต่อไปนี้ โครงสร้างโมเลกุลของแคโรทีนอยด์ประกอบด้วยหน่วยไอโซพรีน (isoprene unit) จำนวน 8 หน่วยที่เกิดพันธะโควาเลนต์กัน และทำให้เกิดคอนจูเกชันของพันธะคู่เป็นสายยาว (extensive conjugated double bond) ซึ่งระบบคอนจูเกชันนี้เองที่ทำให้แคโรทีนอยด์สามารถดูดกลืนพลังงานแสงอัลตราไวโอเล็ต และแสงสีขาวย และทำให้แคโรทีนอยด์เป็นสารที่มีสีและมีคุณสมบัติในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันโมเลกุลของแคโรทีนอยด์อาจเป็นเส้นตรง ดังที่พบในไลโคพีน (lycopene) หรือเป็นวงแหวน (ring) ที่ปลายโซ่ของโมเลกุล ดังที่พบในเบตาแคโรทีน (beta-carotene) สามารถจำแนกแคโรทีนอยด์เป็น 2 กลุ่ม คือ hydrogenated และ oxygenated carotenoid derivatives โดยกลุ่ม hydrogenated carotenoid derivatives หรือกลุ่มแคโรทีน (carotene) เป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยสายไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) ทำให้เป็นสารไม่มีขั้วและละลายได้ในไขมัน ตัวอย่างแคโรทีนอยด์ในกลุ่มนี้ ได้แก่ เบตาแคโรทีน และ ไลโคพีน เป็นต้น ส่วนกลุ่มที่ 2 คือกลุ่ม oxygenated carotenoid derivatives หรือกลุ่มแซนโทฟิลล์ (xanthophyll) นั้น มีอะตอมของออกซิเจนอยู่ในโมเลกุล จึงมีขั้วมากกว่าและละลายในไขมันได้น้อยกว่าแคโรทีนอยด์กลุ่มแรก ตัวอย่างแคโรทีนอยด์ในกลุ่มนี้ได้แก่ลูทีน (lutein) ซีแซนทีน (zeaxanthin) และแอสตาแซนทีน (astaxanthin) เป็นต้น



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ  $\beta$ -carotene  
ที่มา : นิธิยา (2543)

แคโรทีนอยด์ตั้งชื่อมาจากชื่อของแครอท เนื่องจากพบแคโรทีนอยด์มากในแครอท สีของแคโรทีนอยด์จะผันแปรไปตามจำนวนของพันธะในโมเลกุล ถ้ามีจำนวนพันธะคู่มากจะทำให้มีสีแดงขึ้น จำนวนพันธะคู่ในโมเลกุลของแคโรทีนอยด์ที่น้อยที่สุดมี 7 อัน ซึ่งจะทำให้สีเหลือง พันธะคู่อาจอยู่ในรูป cis หรือ trans ก็ได้ แต่แคโรทีนอยด์ที่พบในอาหารส่วนใหญ่อยู่ในรูป all-trans อาจพบ cis บ้างเป็น mono-cis หรือ di-cis แต่น้อยมากแคโรทีนอยด์ที่มีโครงสร้างอยู่ในรูป all-trans จะมีสีเข้ม ถ้ามีพันธะคู่ที่อยู่ในรูป cis เพิ่มมากขึ้นสีจะจางลง (นิธิยา, 2543)

รุจิภรณ์ (2546) ได้อธิบายปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวของแคโรทีนอยด์ในอาหารดังนี้ ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนโครงสร้างของแคโรทีนอยด์จาก tran เป็น cis คือแสง ความร้อน และกรด เมื่ออาหารได้รับอนุมูลสูงจะเกิด tran-cis isomerization ได้ หากอยู่ในรูป cis มากขึ้นจะทำให้ vitamin A activity ลดลง แคโรทีนอยด์ยังสลายตัวได้ง่ายเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยเฉพาะเมื่อละลายอยู่ในน้ำมัน จึงถูกทำลายได้ง่ายเมื่อน้ำมันถูกออกซิไดซ์

ปฏิกิริยา ไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization) เกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยต่างๆดังนี้

- ความร้อน แคโรทีนอยด์ที่พบในธรรมชาติส่วนใหญ่เป็นรูป tran หากได้รับแสงและมีความร้อนหรือรังสี จะทำให้โครงสร้างเกิดการบิดตัวไป 180 องศา เปลี่ยนเป็นรูป cis ซึ่งรูป cis จะไม่ค่อยเสถียร มีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสั้นลง และมี molecular extinction coefficient ต่ำ ที่ปรากฏจะอ่อนกว่ารูป tran form การเกิด thermal isomerization เป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต โดยอนุมูลสูงจะทำให้เกิดการสูญเสียแคโรทีนอยด์มากกว่าระยะเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน ดังนั้นในกระบวนการผลิตจึงไม่ควรให้ความร้อนแบบ high temperature short time และควรเก็บรักษาตัวอย่างอาหารที่มีสารแคโรทีนอยด์ที่อุณหภูมิต่ำเพื่อลดการสูญเสียแคโรทีนอยด์

- ความเป็นกรด ในสภาพเป็นกรดทำให้  $\beta$ -carotene เปลี่ยนเป็น epoxide isomer ซึ่งเกิดการจับตัวของออกซิเจนที่พันธะคู่ของวงแหวนในโครงสร้าง เกิดเป็น 5,6-epoxide ซึ่งมีสีจางกว่า  $\beta$ -carotene

- ปฏิกิริยาออกซิเดชัน เมื่อแคโรทีนอยด์สัมผัสกับอากาศ ที่ตำแหน่งพันธะคู่ในโครงสร้างของโมเลกุล จะไปจับกับออกซิเจนเกิดเป็นสีน้ำตาลของของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide) สารประกอบคาร์บอนิล และสารระเหยอื่นๆ ปฏิกิริยานี้เป็น direct oxidation อัตราการสูญเสียแคโรทีนอยด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ไม่ได้ขึ้นอยู่กับออกซิเจนเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับอนุมูล ความเข้มของแสง และความร้อนเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาด้วย หากเก็บรักษาแคโรทีนอยด์ในสถานะที่มีออกซิเจนจะเกิดการสูญเสีย  $\beta$ -carotene เป็นอันดับแรก แคนตาแซนทีน iva ต่อการ



การป้องกันการเกิดออกซิเดชันสามารถกระทำได้โดยการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidants) เช่น กรดแอสคอร์บิก และบิวทิลเลทไฮดรอกซีโทลูอีน (Butylated hydroxytoluen; BHT) เป็นต้น หรือไม่ให้อาหารสัมผัสกับอากาศขณะเก็บรักษา เช่น บรรจุก๊าซเฉื่อยในภาชนะบรรจุ หรือบรรจุแบบสุญญากาศ

- แสงสว่าง ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ถูกเร่งด้วยแสงสว่าง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี กลิ่น และรสชาติ การเกิดออกซิเดชันในสถานะที่มีแสงสว่างจะรุนแรงมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับ ปริมาณของออกซิเจนในอากาศด้วย

- เอนไซม์ การเสื่อมสลายของแคโรทีนอยด์ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ จะเกิดขึ้นได้เนื่องจาก แคโรทีนอยด์ที่อยู่ภายในเซลล์ในรูปของ pigment-protein complex ซึ่งมีความเสถียรมาก ถูกทำลาย ด้วยเอนไซม์ หากแคโรทีนอยด์อยู่ในรูปอิสระ ก็จะเกิดการเสื่อมสลายได้ง่าย

ชนิดและปริมาณของสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ที่เป็นส่วนประกอบทางเคมีในอาหาร สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีการต่างๆ (รุจิภรณ์, 2546) วิธีที่นิยมใช้กันส่วนใหญ่ คือ วิธี liquid chromatography โดยจะสกัดสารในกลุ่มของแคโรทีนอยด์ออกมาด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ ซึ่งตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดมักเป็นตัวทำละลายผสม 2 ชนิดที่มีขั้ว มาก-น้อยแตกต่างกันตัวทำละลายบาง ชนิดเมื่อผสมแล้วอาจได้สารอื่นเกิดขึ้นได้ เช่น หากใช้คลอโรฟอร์มผสมกับเมทานอลในการสกัด จะเกิดเป็นกรดไฮโดรคลอริกขึ้น ดังนั้นจึงไม่ใช่ตัวทำละลาย 2 ชนิดนี้ผสมกันในการสกัด แคโรทีนอยด์

หลักการพื้นฐานของวิธี liquid chromatography คือ การทำให้สารที่ต้องการแยกอยู่ในรูป ของสารละลาย โดยนำตัวอย่างมาผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลาย จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปผ่าน สารดูดซับ (stationary phase) ซึ่งสารดูดซับจะอยู่ในรูปใดขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับและวิธี chromatography ที่ใช้ สารละลายตัวอย่างจะเคลื่อนที่ผ่านสารดูดซับ โดยมีตัวทำละลายพาเคลื่อนที่ ไป (mobile phase) สารที่เป็นส่วนประกอบในสารละลายตัวอย่างชนิดใดที่ติดอยู่กับตัวดูดซับ ได้ดี จะเคลื่อนที่ไปบนสารดูดซับได้ช้ากว่าสารที่ติดอยู่กับสารดูดซับได้ไม่ดี ดังนั้นสารประกอบที่ ละลายอยู่ในสารละลายตัวอย่างจะแยกออกจากกันได้ ตามความสามารถในการจับอยู่กับสารดูดซับ วิธี liquid chromatography สามารถแบ่งออกได้หลายแบบ ได้แก่

- Open Column Chromatography (OCC) เป็นการบรรจุสารที่สามารถแยกสารในกลุ่ม ของแคโรทีนอยด์ที่ผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลายมาแล้ว ตัวอย่างของสารดูดซับที่ใช้ในการบรรจุ ในคอลัมน์ เช่น ซิลิกาเจล (silica gel) แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgO) และ MgO-Hyflo Supercel ซึ่งกา



- Thin Layer Chromatography (TLC) เป็นการนำสารดูดซับที่ต้องการแยกไปเคลือบบนแผ่นกระจก แล้วให้สารละลายตัวอย่างที่สกัดมาเคลื่อนที่ไปบนแผ่นเคลือบ วิธีนี้สามารถจำแนกสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ได้ถึงไอโซเมอร์ของมัน ว่าเป็นชนิด  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  แต่ยังไม่สามารถบอกได้ว่าอยู่ในรูปของ trans หรือ cis

- High Performance Liquid Chromatography (HPLC) ใช้หลักการในการแยกเหมือนกับ open chromatography แต่วิธีนี้จะสามารถจำแนกชนิดของสารแคโรทีนอยด์ได้ละเอียดถึงระดับที่สามารถแยกรูป trans และ cis ได้

วิธีการแยกทั้ง 2 วิธีจะต้องนำสารที่แยกได้ไปวัดค่าดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง Spectrophotometer เพื่อวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของแคโรทีนอยด์ที่แยกได้ โดยสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์แต่ละชนิด จะสามารถดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดแตกต่างกัน และตัวทำละลายต่างชนิดกันก็จะทำให้สารชนิดเดียวกันดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดได้แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิธีทางเคมีกายภาพ (Physico-chemical method) ตัวอย่างเช่น Mass spectrometry และ Nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy

### 2.3.3.3 อัตราเร็วของการทำให้แห้ง (drying rate)

อัตราเร็วของการทำให้แห้งหมายถึง ปริมาณน้ำที่ถูกกำจัดออกจากอาหารภายในช่วงเวลาหนึ่งตามปกติมักจะบอกเป็นปริมาณน้ำที่หายไป (กิโลกรัม) ต่ออาหารหนึ่งกิโลกรัมต่อชั่วโมง กระบวนการทำให้แห้งอาจแบ่งออกเป็นสองตอน ตอนหนึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของน้ำจากส่วนในของอาหารออกมาถึงผิวหน้า จึงทำให้พื้นผิวของอาหารชุ่มชื้นอยู่เสมอ อีกส่วนหนึ่งเป็นการระเหยของน้ำจากบริเวณผิวหน้าของอาหารเป็นส่วนใหญ่ ในตอนต้นของการทำให้แห้งการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในจะรวดเร็วกว่าการระเหยและผิวหน้าของอาหารยังชุ่ม ต่อมาการระเหยจะเกิดรวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่ของน้ำจึงทำให้ผิวหน้าของอาหารเริ่มแห้งและอัตราความเร็วของการทำให้แห้งจะลดลงอาหารจะแห้งเร็วหรือช้า ขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกหลายอย่างคืออุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วของอากาศ หรือลมร้อนภายนอก และพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศ อาหารจะแห้งเร็วเมื่ออากาศรอบ ๆ อาหารมีอุณหภูมิสูงและมีความชื้นน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามถ้าอุณหภูมิในระยะเริ่มต้นสูง จะทำให้ผิวหน้าของอาหารแห้งเร็วจนเกินไป ทำให้ความชื้นภายในอาหารระเหยออกมาได้ยากขึ้น นอกจากนี้อาหารจะแห้งช้าลงถ้าวิธีการระบายความชื้นที่ออกจากอาหาร ไม่มีประสิทธิภาพ อาหารที่

#### 2.3.3.4 วิธีการอบแห้ง

วิธีการอบแห้งสำหรับการแปรรูปอาหารนั้นมีหลายวิธี แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ซึ่งได้แก่ การอบแห้งแบบลมร้อน การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง และการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ

**การอบแห้งแบบลมร้อน (Air drying)** คือ การทำแห้งด้วยอากาศร้อน เมื่ออากาศสัมผัสกับอาหาร ความร้อนจากอากาศจะถูกถ่ายเทไปยังผิวของอาหาร และทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำ ไอน้ำนี้จะแพร่ผ่านชั้นของอากาศรอบๆ อาหารและถูกพาไปพร้อมกับการเคลื่อนที่ของอากาศร้อน ทำให้ความดันไอน้ำของอากาศที่ผิวลดลง เกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำของความชื้นในอาหารกับอากาศร้อน ความแตกต่างนี้จะเป็นแรงผลักดันให้น้ำจากอาหารระเหยออกมา น้ำจะเคลื่อนที่จากด้านในของชิ้นอาหารออกมาสู่ที่ผิวด้วยกลไกเหล่านี้คือ

(1) น้ำที่เป็นของเหลวจะเคลื่อนที่ด้วยแรงแคปิลลารี (capillary force)

(2) น้ำที่เป็นของเหลวจะเคลื่อนที่โดยการแพร่ เนื่องจากในแต่ละส่วนของชิ้นอาหารมีความเข้มข้นของตัวทำละลายต่างกัน

(3) การแพร่ของของเหลวซึ่งถูกดูดซับที่ผิวขององค์ประกอบที่เป็นของแข็งในอาหาร

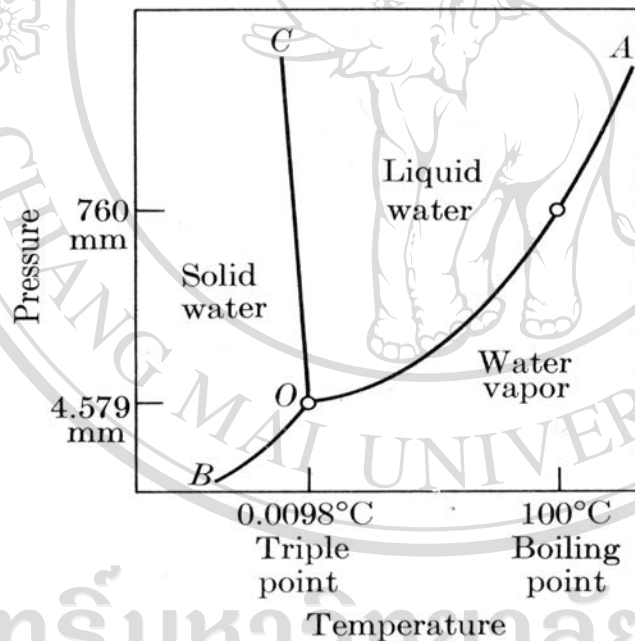
(4) การแพร่ของไอน้ำในโพรงอากาศในชิ้นอาหารเนื่องจากความแตกต่างของความดัน

ไอน้ำ

คุณสมบัติของอาหารที่ผ่านการอบแห้งแบบลมร้อน

เกิดลักษณะเปลือกแข็ง (case hardening) เกิดขึ้นเนื่องจากในช่วงแรกของการอบแห้งอาหารความชื้นจะเกิดการระเหยเร็ว และใช้ความเร็วอากาศร้อนสูง ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศต่ำมากและอาหารมีชั้นบาง ความชื้นจากภายในอาหารเคลื่อนที่มาไม่เท่ากับความเร็วที่ระเหยออกจากผิวหน้าอาหาร เกิดการหดตัว (Shrinkage) ระหว่างการอบแห้งความชื้นในเซลล์ผิวระเหยออกไปทำให้เกิดช่องว่างภายใน เซลล์และเกิดการหดตัวจากผิวนอก การหดตัวไม่สามารถเกิดได้เท่ากันทุกส่วน ส่วนที่ไม่สามารถหดตัวได้ก็จะยืดออก การยืดตัวของเซลล์จะทนแรงได้ขนาดหนึ่งหากมากกว่านั้นผนังเซลล์ตรงบริเวณนั้นจะขาด การเกิดสีน้ำตาล (Browning) ในระหว่างการอบแห้ง

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) คือการกำจัดน้ำออกจากอาหารในสภาวะที่น้ำเป็นของแข็งให้กลายเป็นไอหรือเรียกว่าการระเหิด การระเหิดจะเกิดขึ้นได้เมื่อความดันไอและอุณหภูมิต่ำ สำหรับน้ำบริสุทธิ์การระเหิดจะเกิดขึ้นที่จุดอุณหภูมิและความดันไอที่ผิวหน้าของน้ำแข็งมีค่าต่ำกว่าจุดวิกฤตของก๊าซ ของเหลวและของแข็ง ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กราฟแสดง Phase diagram ของน้ำบริสุทธิ์

ที่มา: ไพโรจน์ (2542)

จากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่า น้ำบริสุทธิ์มี 3 สถานะ คือ ของแข็ง (น้ำแข็ง) ของเหลว (น้ำ) และ ก๊าซ (ไอน้ำ) ซึ่งอยู่ในภาวะสมดุลกัน และ ณ จุด Triple Point (0 องศาเซลเซียส, 4.579 ทอร์) ถ้าน้ำอยู่ในสภาวะที่มีความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียสจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นไอน้ำ ด้วยการระเหิด

จากหลักการดังกล่าวสามารถนำมาทำอาหารแห้งได้ โดยนำอาหารมาแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของสารละลายในอาหารนั้นๆ จากนั้นนำอาหารไปไว้ในสภาวะที่มีความดันต่ำ น้ำแข็งในเนื้ออาหารจะเกิดการระเหิดอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งน้ำที่เป็นของแข็งในอาหารถูกถ่ายเทออกไปทำให้อาหารแห้ง การระเหิดของน้ำแข็งจะต้องใช้ความร้อนจำนวนหนึ่งซึ่งเรียกว่า ความร้อนในการระเหิด (Heat of sublimation) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 675.6 cal/g น้ำในผลิตภัณฑ์จะระเหิดออกไปโดยไม่กลายเป็นของเหลวทำให้การเคลื่อนที่ของสารละลายต่างๆ ในผลิตภัณฑ์เกิดน้อย โครงสร้างของผลิตภัณฑ์จะยังคงอยู่รูปเดิมโดยไม่มีทรหดตัว ในกระบวนการทำแห้งอุณหภูมิที่ใช้จะต่ำทำให้สามารถรักษาสี กลิ่น รสชาติและคุณค่าทางอาหารได้ดี

กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเกิดขึ้นใน 3 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนการแช่เยือกแข็ง (Freezing stage) คือการทำให้ น้ำในผลิตภัณฑ์แข็งตัวโดยการนำอาหารมาแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของสารละลายในอาหารนั้น จนทำให้องค์ประกอบทุกอย่างที่สามารถแข็งตัวได้ ในอาหารเกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์

ขั้นตอนการระเหิด (Primary drying stage) การระเหิดเอาส่วนของสารละลายที่แข็งตัวออกจากผลิตภัณฑ์โดยการลดความดันรอบๆ ชิ้นอาหารให้ต่ำลง จนน้ำแข็งเกิดการระเหิดอย่างต่อเนื่อง

ขั้นตอนการระเหย (Secondary drying stage) คือการระเหยเอาสารละลายเข้มข้นที่ไม่แข็งตัวในผลิตภัณฑ์ออก ซึ่งต้องมีการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

อาหารแห้งที่ได้จากการทำแห้งโดยกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้นมีคุณสมบัติที่ดีกว่าอาหารที่ได้จากการทำแห้งวิธีอื่นๆ ดังนี้ (ไพโรจน์ และจิตพัทธ์, 2542)

- ลักษณะทางกายภาพ อาหารแห้งจากกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีลักษณะแห้งเป็นรูพรุน ผลิตภัณฑ์มีความชื้นต่ำ ร้อยละของของแข็งที่ละลายได้ (% Soluble solid) มีค่าสูง มีน้ำหนักเบากว่าอาหารสดมาก เพราะแตกหักได้ง่ายมีขนาดเท่ากับอาหารสดก่อนการทำแห้ง

- สี (Pigment) ของอาหารที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีการเปลี่ยนแปลงน้อย เนื่องจากทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ตัวอย่างเช่น การเปลี่ยน คลอโรฟิลล์ เป็น ฟิโอฟิติน ซึ่งมีสีน้ำตาล จะเกิดเมื่ออุณหภูมิของการทำแห้งสูง การเปลี่ยนแปลงของ แคโรทีน เกิดการลดความเข้มข้นของสีจะเกิดได้เมื่อใช้อุณหภูมิสูงและใช้เวลาอบแห้งนาน สีของอาหารที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีสีอ่อนกว่ากระบวนการอื่น เพราะกระบวนการอื่นมีการหดตัวซึ่งจะเป็นการเพิ่มความเข้มสี

- การหดตัว อาหารแห้งที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะมีการหดตัวน้อย เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นน้ำแข็งขณะทำแห้ง ทำให้เกิดรูพรุนเมื่อน้ำออกไปและสามารถเกิดการดูดซับได้

- การคั้นรูปอาหารเมื่อผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งก่อนนำมาบริโภคต้องทำการคั้นรูปก่อน อาจใช้วิธีแช่ในน้ำร้อนหรือ เดิมน้ำร้อนลงไปใช้เวลาในการคั้นรูป 2-3 นาที ค่าร้อยละของการคั้นรูปของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะมีค่าสูง นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์หลังการคั้นรูปจะมีเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับอาหารที่ปรุงตามปกติไม่เหนียว หรือแข็ง กระจ่าง เนื่องจากน้ำสามารถแทรกไปตามรูพรุนของอาหารได้อย่างทั่วถึง ทำให้การกลับคืนสู่สภาพเดิมเกิดได้ค่อนข้างสมบูรณ์

- กลิ่นและรสชาติ กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารระเหยง่าย สี กลิ่น ของอาหารน้อยที่สุด การสูญเสียกลิ่นรสเนื่องจากเอนไซม์ จะเกิดได้น้อยลง ถ้าอาหารผ่านการต้มหรือลวก เนื่องจากความร้อนจะไปทำลายหรือยับยั้งการทำงานของเอนไซม์

**การทำแห้งด้วยไมโครเวฟ** คือ การทำให้อาหารแห้งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นของไมโครเวฟที่มีความถี่ช่วง 915 - 2,450 เมกะเฮิร์ต ความร้อนจะถ่ายเทให้กับผิวก่อนที่จะถ่ายเทเข้าไปในชิ้นอาหารโดยการนำความร้อนซึ่งจะเกิดการถ่ายเททั่วทั้งชิ้นอาหารในเวลาเดียวกัน ทำให้ชิ้นอาหารที่ได้มีความโปร่ง เนื่องจากน้ำจะระเหยอย่างรวดเร็วพร้อมกันทั้งชิ้น และนอกจากนี้ยังลดการเกิดเปลือกแข็ง (case hardening) ในผลิตภัณฑ์ได้ แต่เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการทำค่อนข้างแพง จึงนิยมใช้ในช่วงสุดท้าย หรือในระหว่างกลางกระบวนการทำแห้งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะโปร่ง (วิจิตร, 2546; กิตติพงษ์, มปป)

ปัจจัยที่มีผลต่อการแปรรูปอาหารด้วยคลื่นไมโครเวฟ ได้แก่ (วิจิตร, 2546)

- ค่าความถี่ ความถี่ที่ใช้จะมีผลต่อระดับการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟเข้าไปในเนื้ออาหาร โดยปกติที่ค่าความถี่ต่ำ (915 เมกะเฮิร์ต) จะสามารถให้ความร้อนได้ลึกกว่า นอกจากนี้ค่าความถี่ยังมีผลต่อสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอาหารแต่ละชนิดด้วยซึ่งจะมีรูปแบบแตกต่างกันไปตามชนิดของอาหาร

- ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า (กำลังไฟฟ้าของระบบไมโครเวฟ) กำลังไฟฟ้าที่ใช้จะอยู่ในช่วง 5-100 กิโลวัตต์ ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นจะช่วยเร่งการให้ความร้อนกับอาหาร ดังนั้นจึงนิยมปรับกำลังไฟฟ้าของระบบเพื่อควบคุมความเร็วในการทำให้อาหารร้อน อย่างไรก็ตามการเร่ง



- ค่าความชื้นในอาหาร นำเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดการดูดซึมพลังงานทำให้สามารถให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ อาหารที่มีปริมาณความชื้นสูงจะดูดซึมพลังงานไมโครเวฟได้ดีกว่าอาหารที่มีปริมาณความชื้นต่ำกว่า ดังนั้นอาหารที่มีปริมาณความชื้นสูงจะร้อนได้เร็วกว่าอาหารที่มีปริมาณความชื้นต่ำ

- ความหนาแน่นของอาหาร โดยปกติอากาศเป็นฉนวนกั้นความร้อน ดังนั้นอาหารที่โป่งหรือพองซึ่งมีอากาศแทรกอยู่มากจะทำให้ร้อนช้า แต่สำหรับระบบไมโครเวฟอากาศไม่มีผลต่อการทำให้เนื้ออาหารร้อน ดังนั้นในการอบขนมปังจะใช้เวลาเพียง 1 ใน 3 ของเวลาที่ใช้ในการอบด้วยเตาอบแบบลมร้อน

- อุณหภูมิของอาหาร มีผลต่อระบบไมโครเวฟคือ ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงพลังงานอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงแล้วแต่ชนิดของอาหารเนื่องจากอุณหภูมิและความชื้นเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในระหว่างการทำให้อากาศร้อนพบว่าน้ำแข็งในการแช่แข็ง มีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงพลังงานเนื่องจากความโปร่งใสของน้ำแข็งทำให้การดูดซึมความร้อนไม่ดีพอ เพื่อง่ายต่อการควบคุมจึงนิยมละลายน้ำแข็งให้อุณหภูมิที่ได้ต่ำกว่าจุดหลอมละลายเท่านั้น ส่วนอุณหภูมิเริ่มต้นของอาหารควรทราบหรือถูกกำหนดไว้ เพื่อง่ายต่อการปรับกำลังไฟฟ้าให้เหมาะสมสำหรับการระบุดูดซึมสูงสุดท้ายที่ต้องการเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ พบว่าถ้าอุณหภูมิเริ่มต้นของอาหารสูงอาหารจะสุกได้เร็วกว่าปกติหรือเร็วกว่าอาหารที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นต่ำกว่า

- รูปร่างของอาหาร มีความสำคัญคือ ถ้าขนาดชิ้นอาหารนั้นใหญ่มากโดยเฉพาะความหนาจะทำให้คลื่นไมโครเวฟเข้าไม่ถึงจุดกึ่งกลาง ยังผลให้เกิดความร้อนไม่ทั่วทั้งชิ้นอาหาร ถ้าความหนาของชิ้นใกล้เคียงกับความสามารถของคลื่นไมโครเวฟที่จะทะลุผ่านได้ ทำให้อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางความหนาของชิ้นมีอุณหภูมิสูงที่สุด จึงควรเลือกขนาดความถี่ที่เหมาะสมโดยถ้าเป็นอาหารที่มีลักษณะชิ้นหนาควรใช้ความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตอย่างไรก็ตามการเลือกขนาดของอาหารให้เหมาะสมกับความถี่จะทำให้ง่ายกว่าอาหารมีรูปร่างขนาดกว้างยาวทั้งชิ้น จะถูกทำให้ร้อนได้สม่ำเสมอกว่า จึงควรหลีกเลี่ยงรูปร่างที่มีขอบแหลมหรือมีมุม ซึ่งจะไหม้ได้

- ค่าการนำไฟฟ้า ในการเกิดความร้อนด้วยระบบไมโครเวฟ เชื่อว่าเกิดจาก dipolar rotation ของโมเลกุลในอาหาร ซึ่งสัมพันธ์กันกับค่าการนำไฟฟ้าของอาหารนั้นๆ ดังนั้นถ้าเราเพิ่มการนำไฟฟ้า เช่นเติมเกลือให้กับอาหาร จะช่วยเร่งการให้ความร้อนกับอาหารนั้นได้ แต่ก็อาจมีผลต่อความสามารถในการเจาะลึกเข้าไปในเนื้ออาหารของคลื่นไมโครเวฟและทำให้การให้ความร้อนไม่สม่ำเสมอ



- ค่าการนำความร้อน ค่าการนำความร้อนจะมีผลกับอาหารชิ้นใหญ่ โดยที่คลื่นไมโครเวฟไม่สามารถเจาะลึกพอที่จะทำให้จุดกึ่งกลางของอาหารร้อนสม่ำเสมอได้หรือเมื่อต้องการใช้ระยะเวลาในการทำให้อาหารร้อนนาน ในกรณีที่ใช้เวลาน้อย ค่าการนำความร้อนจะมีอิทธิพลต่อการให้ความร้อนน้อย

- ปริมาณของอาหาร มีผลต่อเวลาในการแปรรูปอาหารโดยไมโครเวฟ ถ้าอาหารมีปริมาณมาก จะต้องใช้เวลาในการแปรรูปมาก เพราะอาหารจะร้อนช้ากว่าปริมาณอาหารน้อย ซึ่งต่างจากวิธีดั้งเดิมคือ การใช้เตาอบแบบลมร้อนในการแปรรูปอาหารจะไม่ขึ้นกับปริมาณของอาหาร

- องค์ประกอบของอาหาร อาหารต่างๆมีส่วนประกอบที่แตกต่างกันมากรวมทั้งส่วนประกอบที่จำเป็นต้องใช้ในการปรุงรสอาหาร เช่นเกลือ น้ำตาล หรือแป้ง เป็นต้น ล้วนแต่มีผลที่แตกต่างกันออกไปเมื่อนำมาแปรรูปด้วยไมโครเวฟ ในกรณีอาหารที่มีปริมาณโปรตีนจากเนื้อสัตว์ที่มีเนื้อเยื่อเกี่ยวพันอยู่เป็นปริมาณสูง จะมีความเหนียวมากเมื่อนำมาแปรรูปด้วยไมโครเวฟ เพราะเป็นการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วเกินไปจนเนื้อเยื่อเกี่ยวพันไม่มีโอกาสที่จะสลายตัวได้เลยจึงมักเหนียวกว่าวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.4.1. กระบวนการออสโมซิส

Gornicki (2007) ได้ศึกษาอิทธิพลของชนิดของสารละลายออสโมติกและเวลาในการลวกต่อลักษณะเนื้อแครอทและอัตราการทำแห้งโดยพบว่า จากการลวกในสารละลายเกลือ 5% เป็นเวลา 3 นาที และในน้ำเดือด เป็นเวลา 3 และ 6 นาที ตามลำดับพบว่าที่อุณหภูมิน้ำเดือด 6 นาทีทำให้เนื้อสัมผัสแข็ง จากผลการอบแห้งสามารถสร้างสมการคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอัตราการอบแห้งได้ 2 แบบ คือ สมการเส้นตรงในการอบแห้งช่วงแรก (first drying period) และสมการไม่เป็นเส้นตรง (non-linear model) ในการอบแห้งช่วงที่สอง (second drying period)

จากการทดลองของ Escobar et al. (2006) ซึ่งได้ศึกษาผลของเวลาในการเก็บแครอทและเวลาในการลวกแครอทต่อ จลศาสตร์ของการดึงน้ำออกจากแครอทโดยใช้เวลาในการเก็บเป็นเวลา 12 สัปดาห์ และใช้อุณหภูมิในการลวก 4 อุณหภูมิ คือ 0 10 20 และ 30 วินาที พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการเก็บและอุณหภูมิในการลวกแครอทจะส่งผลต่อค่า diffusion coefficients เนื่องจาก หากมีการเพิ่มเวลาในการลวกมากขึ้น จะทำให้เซลล์ของแครอทเกิดความเสียหายทำให้มีการสูญเสียสารออกนอกเซลล์ได้ง่ายขึ้นแต่ในขณะที่หากทำการเก็บแครอทไว้นานมากเกินไปจะทำให้โครงสร้าง metabolic บางส่วนเสียหายทำให้ลดการสูญเสียสารออกนอกเซลล์

ปวีณา และพิชญา (2549) ได้ทำการศึกษาเวลาและอุณหภูมิในการแช่ชิ้นมะม่วงแก้วในสารละลายออสโมติก ที่ประกอบด้วย โซเดียมคลอไรด์ น้ำตาล กลีเซอรอล น้ำ แคลเซียมคลอไรด์ โพแทสเซียมซอเบท โพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟด์ ใช้เวลา 3 และ 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40 และ 50 องศาเซลเซียส และอบแห้งโดยวิธีสเปาเค็ดเบด ที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 3.65 เมตร/วินาที ใช้เวลาในการอบ เท่ากับ 75 และ 60 นาที พบว่าการแช่ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงสุด โดยปริมาณความชื้นในชิ้นมะม่วงจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก หลังจากนั้นจะลดลงอย่างช้าๆ และจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่า ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสให้ค่าการยอมรับรสชาติโดยรวมดีกว่าที่อุณหภูมิอื่น อย่างมีนัยสำคัญ อุณหภูมิในการอบ ไม่มีผลต่อคุณสมบัติทางด้านประสาทสัมผัส

Amami et al. (2006) ได้ศึกษาการใช้เทคนิค Centrifugal osmotic dehydration กับการทำ rehydration ร่วมกับการใช้ pre-treated pulsed electric field (PEF) พบว่าหากมีการเติมเกลือและใช้วิธี PEF ก่อนการหมนเหี่ยวจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายของน้ำในแครอท แต่แรงในการหมนเหี่ยวจะลดการรับของแข็งเข้าสู่แครอท และความสามารถในการคืนรูปเพิ่มขึ้นในขณะที่ความแน่น ของผลิตภัณฑ์ลดลง

Sauza et al. (2007) ได้ทำการศึกษาการทำแห้งแบบแช่อบร่วมกับการทำแห้งแบบลมร้อน โดยใช้ น้ำตาลซูโครส น้ำ และเกลือโดยปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิ เพื่อหาวิธีการลดระยะเวลาในการทำแห้งให้รวดเร็วที่สุด โดยได้สูตรสารละลายที่เหมาะสมคือ น้ำตาลซูโครส 35 % เกลือ 5% อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งคือ 60 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าเปลือกของมะเขือเทศมีผลต่อระยะเวลาในการอบแห้งอีกด้วย ถ้าหากใช้การอบแห้งเพียงอย่างเดียวมะเขือเทศที่ไม่มีเปลือกจะสามารถอบแห้งได้เร็วกว่าที่มีเปลือก แต่หากผ่านกระบวนการออสโมซิสพบว่ามะเขือเทศที่มีเปลือกจะใช้เวลาในการอบแห้งรวดเร็วกว่า

Aroldo and Murr (2006) ศึกษาผลของการลวกร่วมกับการแช่แข็งแครอทและฝักทอง ก่อนการทำแห้งแบบสูญญากาศ โดยเลือกใช้อุณหภูมิในการทำแห้งคือ 50-70 องศาเซลเซียส ความดัน 5 และ 15 KPa นำมาสร้างกราฟอัตราการทำแห้งและใช้กฎข้อที่สอง Fick พบว่าการลวกร่วมกับการแช่แข็งมีผลต่อการถ่ายเทความชื้นในระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยพบว่าค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเท (D) ของฝักทองอยู่ในช่วง  $2.01 \times 10^{-9}$  -  $5.70 \times 10^{-9}$   $m^2/s$  ซึ่งมากกว่าแครอทคือมีค่า D ในช่วง  $1.654 \times 10^{-9}$  -  $4.844 \times 10^{-9}$   $m^2/s$

Tregunno and Goff (1996) ได้ศึกษาการใช้ กระบวนการออสโมซิสร่วมกับวิธีการแช่แข็ง แอปเปิ้ล เพื่อช่วยในการดึงน้ำออกในช่วงแรกโดยพบว่าการออสโมซิสและการแช่เยือกแข็ง

Giraldo et al. (2003) ได้ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายซูโครสในระดับต่างๆ คือ 35, 45, 55 และ 65°Brix ร่วมกับอุณหภูมิที่ใช้ในการแช่ที่ 30 องศาเซลเซียส ในสภาวะบรรยากาศและสภาวะสูญญากาศที่ 50 mbar เป็นเวลา 10 นาที พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อลดความเข้มข้นของสารละลาย และจะยิ่งสูงมากขึ้นเมื่อใช้สภาวะสูญญากาศ

Sablani and Rahman (2002) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครส 30-70% อุณหภูมิในการออสโมซิสในช่วง 22-90 องศาเซลเซียส และลักษณะของชิ้นมะม่วง คือ ลูกเต๋าสไลด์ และลิ้ม ต่อค่า Equilibrium distribution coefficient โดยค่า Equilibrium distribution coefficient ของน้ำ ในมะม่วงแบบลูกเต๋าสไลด์เท่ากับ  $0.908 \times 10^{-6}$  -  $2.12 \times 10^{-6} \text{ m}^2$  แบบสไลด์  $0.919 \times 10^{-6}$  -  $1.74 \times 10^{-6} \text{ m}^2$  และแบบลิ้ม คือ  $0.915 \times 10^{-6}$  -  $1.95 \times 10^{-6} \text{ m}^2$  ในขณะที่ค่า Equilibrium distribution coefficient ของของแข็ง ในมะม่วงแบบลูกเต๋าสไลด์และแบบเหลี่ยมคือ  $0.520 \times 10^{-6}$  -  $1.183 \times 10^{-6} \text{ m}^2$   $0.683 \times 10^{-6}$  -  $1.13 \times 10^{-6} \text{ m}^2$  และ  $0.592 \times 10^{-6}$  -  $1.17 \times 10^{-6} \text{ m}^2$  ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าค่า distribution coefficient ของน้ำ จะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแช่ และพื้นที่ผิวแต่ค่า distribution coefficient ของน้ำ จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายและเพิ่มความหนาของชิ้นมะม่วง ส่วนค่า distribution coefficient ของของแข็งจะเป็นส่วนกลับกันคือ จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิและเพิ่มพื้นที่ผิวของมะม่วง และจะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายและความหนาของชิ้นมะม่วง

Aleksander et al. (2005) ได้ใช้เทคนิคการหาพื้นที่ตอบสนองในการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทน้ำและของแข็ง ใน sugar beet cossettes โดยใช้น้ำตาลซูโครสร่วมกับ NaCl เวลาในการแช่ 30-240 นาที ความเข้มข้นของซูโครส 30-70% (w/w) ความเข้มข้นของ NaCl 0-8% (w/w) และอุณหภูมิในการออสโมซิส 30-50 องศาเซลเซียส โดยพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามเป็นแบบ Quadratic เวลาในการแช่และความเข้มข้นของสารละลายซูโครส มีผลต่อค่า water loss ส่วนค่า solid gain เวลาในการแช่และความเข้มข้นของ NaCl มีผลมากที่สุด

นิษณาและบุศราภรณ์ (2549) ได้ศึกษาหาสูตรในการผลิตสับประรดแช่อิ่มอบแห้งที่เหมาะสม พบว่า สูตรที่เหมาะสมคือ หั่นชิ้นสับประรดให้มีความหนา 1.5 เซนติเมตร ในสารละลายที่มีความเข้มข้นของ  $\text{CaCl}_2$  ร้อยละ 1 และกรดซิตริก ร้อยละ 1.5 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำมาลวกที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที และทำการแช่ในสารละลายน้ำตาลกับน้ำสับประรดที่มีค่าของแข็งที่ละลายได้  $25^\circ\text{Brix}$  มีความเป็นกรดต่าง 3.8 และมีการเติมกลีเซอรอล 10% โดยแช่เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส จนกระทั่งผลิตภัณฑ์มีค่า  $a_w$  เท่ากับ 0.55

Mujica-Paz et al. (2002) ศึกษาการใช้การออสโมซิสร่วมกับการควบคุมความดัน ในมะม่วง แอปเปิ้ลและแตงโม โดยใช้ความดันในช่วง 135-674 mbar และความเข้มข้นของสารละลายซูโครสในช่วง  $41-60^\circ\text{Brix}$  โดยพบว่าเมื่อใช้ความดันที่ 674 mbar ร่วมกับความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลซูโครส  $50^\circ\text{Brix}$  จะทำให้แอปเปิ้ลและมะม่วงมีค่า  $a_w$  ที่ต่ำที่สุดแต่แตงโมจะต้องใช้ความดัน 593 mbar ร่วมกับความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลซูโครส  $57^\circ\text{Brix}$  ค่า solid gain ในแอปเปิ้ล มีค่าสูงกว่า แตงโมและมะม่วง มะม่วงและแตงโมมีค่า weight loss 8.9% แต่ในแอปเปิ้ลมีค่าสูงกว่า

Rastogi and Raghavarao (1997) ได้ศึกษาการถ่ายเทมวลในระหว่างกระบวนการแช่อิ่มแครอท โดยเลือกใช้ความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครส  $40-70^\circ\text{Brix}$  และอุณหภูมิที่ใช้ในการแช่อิ่มคือ  $30-50$  องศาเซลเซียส จากการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ โดยใช้กฎของ Fick ในสภาวะ unsteady state พบว่าอัตราการแพร่ของน้ำและสารถูกละลายนั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย กล่าวคือสัมประสิทธิ์การแพร่จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของสารละลายออสโมติกเพิ่มขึ้น

#### 2.4.2. การอบแห้ง

Zielinska and Markowski (2007) ได้ศึกษาผลของการลวกและอุณหภูมิในการทำแห้งต่อจุลศาสตร์หรือคุณภาพของแครอทแห้ง โดยดูจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลและพลังงาน ค่าการหดตัว โดยพบว่าเวลาในการลวกนั้นมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับจลนศาสตร์การทำแห้ง แต่อุณหภูมิไม่มีผลต่อจลนศาสตร์การทำแห้ง เนื่องจากการลวกจะส่งผลให้เซลล์เสียหาย และมีอิทธิพลมากกว่า

Litvin et al. (1997) ได้ศึกษาการทำแห้งแครอทด้วยวิธี อบแห้งเยือกแข็ง ไมโครเวฟ และ อบแห้งลมร้อน โดยได้หาเวลาที่เหมาะสมในการทำแห้งแต่ละวิธีเปรียบเทียบกันพบว่าเมื่อใช้วิธีอบแห้งแช่เยือกแข็ง เพียงอย่างเดียว ใช้เวลา 9.5 ชั่วโมง มีความชื้นเหลือ 40 % และเมื่อใช้วิธีอบแห้งเยือกแข็งเป็นเวลา 3.5 ชั่วโมงร่วมกับการใช้ไมโครเวฟเป็นเวลา 50 วินาที สามารถลดความชื้นให้ลดลงเหลือ 5% แต่ถ้าใช้การอบแห้งเยือกแข็งเป็นเวลา 3.5 ชั่วโมง ร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3.75 ชั่วโมงทำให้แครอทมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 5%

Mulet et al. (1987) ได้ศึกษาความเร็วลมในการทำแห้งแครอทโดยใช้ความเร็วลมตั้งแต่ 1000 – 9000 kg/m<sup>2</sup> h โดยพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วลมมากขึ้นเรื่อยๆจะมีผลต่ออัตราการแห้งของแครอทแต่เมื่อเพิ่มขึ้นมากกว่า 6000 kg/m<sup>2</sup> h อัตราการอบแห้งจะไม่แตกต่างกัน

Frederic et al. (2000) ได้ศึกษาผลของการออสโมซิสต่อการทำแห้งแบบ ไมโครเวฟ-ลมร้อน พบว่าหากทำการออสโมซิสก่อนการทำแห้งจะทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้มีลักษณะที่ดีแต่จะลดอัตราการแห้งลง และ ทำให้ผนังเซลล์มีความหนามากขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียน้ำในระหว่างการอบแห้งได้ช้ากว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการออสโมซิส

Inci (2004) ได้ศึกษาการสกัดแคโรทีนอยด์จากเปลือกส้ม มันฝรั่งและแครอทหลังจากนั้นนำไปทำให้ด้วยวิธีการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง แล้วเก็บในสภาวะที่มีแสงและที่อุณหภูมิ 4 และ 40 องศาเซลเซียส พบว่าแคโรทีนอยด์มีการสูญเสียมากที่สุดที่เก็บที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มันฝรั่งเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสมีการสูญเสียแคโรทีนอยด์น้อยที่สุด และพบว่าการมีแสงหรือไม่ มีแสงในระหว่างการเก็บไม่มีผลต่อปริมาณการสูญเสียแคโรทีนอยด์ นอกจากนี้ยังพบอีกด้วยว่า แคโรทีนอยด์ที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะลดการสูญเสียลงได้



Lin et al. (1998) ได้เปรียบเทียบการอบแห้งแครอทสไลด์ 3 วิธี ประกอบด้วย การอบแห้งแบบลมร้อน การอบแห้งแบบไมโครเวฟ และ การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่าการอบแห้งแบบไมโครเวฟ ทำให้ตัวอย่างแครอทมีค่าการคืนตัวดีที่สุดและปริมาณของ beta-carotene และปริมาณวิตามิน ซี สูงที่สุด ผลึกกันท์มีความหนาแน่นต่ำ และมีเนื้อสัมผัสนุ่มกว่า ตัวอย่างจากการอบแห้งแบบลมร้อน แต่เมื่อเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งพบว่าไม่ต่างกัน



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved