

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ลักษณะทั่วไปและความสำคัญของแก้วมังกร

แก้วมังกร (dragon fruit) เป็นพืชในตระกูล *Hylocereus* มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Hylocereus undatus* (Haw.) Britton and Rose (คชนิยม, 2544) แก้วมังกรเป็นพืชท้องถิ่นทางตอนใต้ของประเทศเม็กซิโก และอเมริกากลาง (Mizrahi *et al.*, 1997) รูปร่างโดยทั่วไปของแก้วมังกรมีลักษณะคล้ายลูกแก้วมังกรที่อยู่กับตัวมังกรในเทพนิยายจีน ซึ่งเป็นที่มาของชื่อพืชชนิดนี้ เนื่องจากแก้วมังกรเป็นพืชตระกูลเดียวกับกระบองเพชรจึงมีรูปร่างและลักษณะของลำต้นคล้ายกระบองเพชร ต้นแก้วมังกรเป็นกระบองเพชรประเภทไม้เลื้อย ลำต้นมีลักษณะสีเขียวเข้ม (ใบของต้นแก้วมังกร) ยกเว้นต้นอ่อนที่เป็นสีเขียวอ่อน ลำต้นแยกเป็น 3 แฉกมีหยักโดยตลอด (ภาพที่ 2.1 a) ส่วนรากของแก้วมังกรจะอยู่ลึกกลงไปในพื้นดินโดยจะเกาะตัวกันมองดูไม่เป็นระเบียบ บางครั้งอาจพบว่ารากของแก้วมังกรจะเลื้อยเกาะตามวัตถุที่อยู่ใกล้ เนื่องจากรากของแก้วมังกรสามารถเลื้อยเกาะวัตถุในบริเวณที่รากพืชแสวงหาอาหารได้ ในการออกดอกของแก้วมังกรนั้นเมื่อนับระยะเวลาในการออกดอกตั้งแต่เริ่มปลูกในแปลงจนมีดอกใช้เวลาประมาณ 8-12 เดือน ซึ่งดอกของแก้วมังกรจะมีความยาวประมาณ 30 เซนติเมตร ลักษณะของดอกแก้วมังกรเวลาบานเต็มที่จะมีลักษณะคล้ายแตรปากบาน และจัดเป็นดอกไม้ประเภทบานตอนหัวค่ำหรือบานตอนกลางคืนถ้ามีแสงก็จะหุบโดยธรรมชาติ ส่วนผลอ่อนมีลักษณะเป็นสีเขียว ทรงกระบอก มีสันฐานคล้ายลูกขอย เมื่อออกผลแล้วประมาณ 5 สัปดาห์ ผลอ่อนแก้วมังกรก็จะสุกและเกษตรกรสามารถเก็บออกสู่ตลาดได้ ลักษณะของผลแก้วมังกร มีลักษณะเป็นวงรี เปลือกเป็นสีชมพูอมแดง บางสายพันธุ์ก็อาจจะเป็นสีเหลืองทอง ภายนอกเปลือกจะมีก้านสีเขียวอยู่ประมาณ 5-10 ก้าน เมื่อผ่าลูกแก้วมังกรออกเป็น 2 ส่วน จะพบว่าเนื้อของแก้วมังกรมีลักษณะโดยรวมของเนื้อเป็นวงกลมคล้ายลูกส้ม เนื้อจะกรอบนุ่ม มีสีขาว สีแดง และสีเหลือง ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ ภายในเนื้อแก้วมังกรจะมีเมล็ดคล้ายเมล็ดงาหรือเมล็ดแมงลักติดอยู่โดยทั่วไป (ภาพที่ 2.1 b) และเนื้อของแก้วมังกรสามารถเก็บไว้ได้นาน 2-3 สัปดาห์ ส่วนรสชาติของแก้วมังกรนั้นจะมีรสหวานเล็กน้อยเป็นรสหวานที่ให้ความรู้สึกเย็นและมีรสเปรี้ยวเล็กน้อย



ภาพ 2.1 (a) ลักษณะลำต้นของแก้วมังกร (b) ลักษณะผลแก้วมังกรผ่าครึ่ง  
 ที่มา : ภาพ (a) [http://www.fruitboard.doae.go.th/news/20%20Nov\\_03.html](http://www.fruitboard.doae.go.th/news/20%20Nov_03.html) (2552)  
 ภาพ (b) <http://bbs.soizaa.com/viewthread.php?action=printable&tid=9175> (2552)

ส่วนประกอบทางเคมีของผลแก้วมังกรสายพันธุ์ *Hylocerrus undatus* แสดงดังตารางที่ 2.1

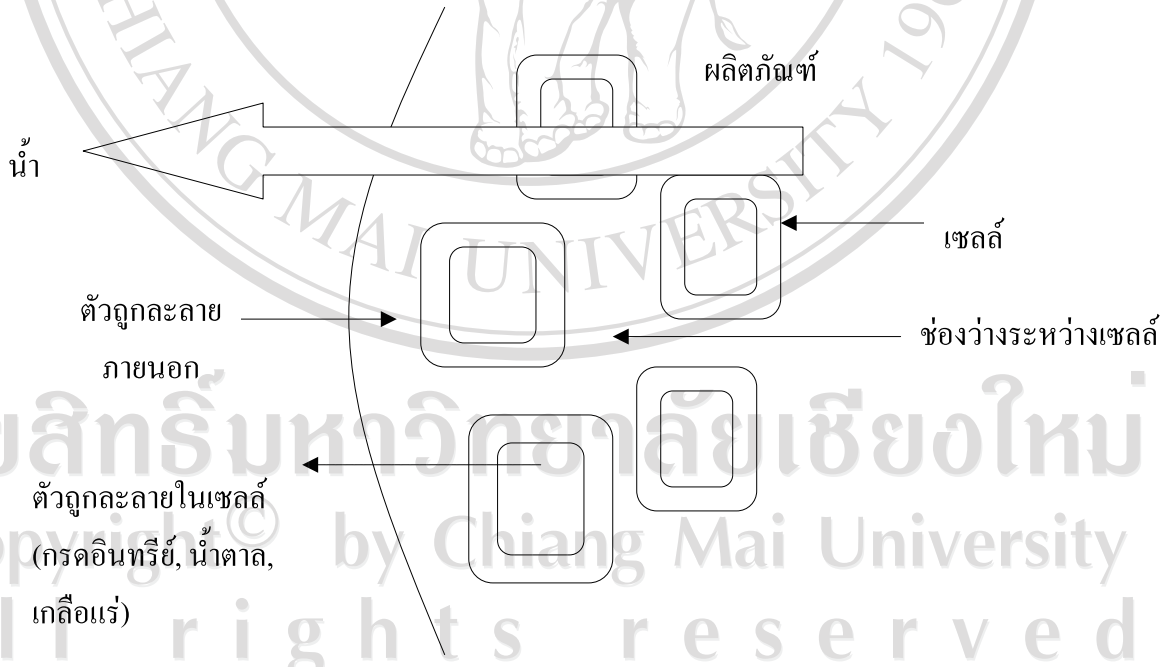
ตาราง 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของผลแก้วมังกรสายพันธุ์ *Hylocerrus undatus*

ส่วนประกอบทางเคมี	ปริมาณต่อ 100 กรัมของส่วนที่บริโภคได้
ปริมาณน้ำ	82.5 - 83.0 กรัม
โปรตีน	0.159 - 0.229 กรัม
ไขมัน	0.21-0.61 กรัม
เส้นใย	0.7-0.9 กรัม
เถ้า	0.54-0.68 กรัม
แคลเซียม	6.3-8.8 มิลลิกรัม
ฟอสฟอรัส	30.2-36.1 มิลลิกรัม
เหล็ก	0.55-0.65 มิลลิกรัม
แคโรทีน	0.005-0.012 มิลลิกรัม
วิตามินบีหนึ่ง (ไทอะมิน)	0.28-0.43 มิลลิกรัม
วิตามินบีสอง (ไรโบฟลาวิน)	0.043-0.045 มิลลิกรัม
ไนอะซิน	0.297-0.430 มิลลิกรัม
วิตามินซี (กรดแอสคอร์บิก)	8.0-9.0 มิลลิกรัม

ที่มา : คัดแปลงจาก Morton (1987)

## 2.2 ออสโมติกดีไฮเดรชัน (osmotic dehydration)

ออสโมติกดีไฮเดรชันเป็นกระบวนการลดความชื้นโดยอาศัยหลักการออสโมซิส ซึ่งเป็น การลดปริมาณน้ำบางส่วนจากอาหาร โดยการแช่ชิ้นอาหารไว้ในสารละลายที่มีแรงดันออสโมติก สูงหรือสารละลายที่มีค่ากิจกรรมของน้ำต่ำกว่าอาหาร ทำให้เกิดการออสโมซิสขึ้นเพราะความ แตกต่างของแรงดันออสโมติกระหว่างภายในเซลล์และสารละลายภายนอก น้ำที่อยู่ภายในอาหาร จะซึมผ่านผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ออกมาในสารละลายขณะเดียวกันตัวถูกละลายในสารละลาย จะซึมผ่านผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์เข้าไป เนื่องจากสารละลายภายนอกมีความเข้มข้นสูงกว่า ภายในเซลล์ แสดงดังภาพที่ 2.2 การออสโมซิสจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งระบบอยู่ในสมดุล สาร ออสโมติกเป็นสารเพิ่มแรงดันออสโมติกให้แก่สารละลาย โดยสารออสโมติกต้องมีค่ากิจกรรมของ น้ำต่ำ ไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค มีรสชาติเป็นที่ยอมรับ (รัตนานะและพิไลรักษ์ , 2541) โดยทั่วไปสาร ออสโมติกที่นิยมใช้ ได้แก่ น้ำตาลซูโครส แล็กโตส กลูโคส มอลโตเดกซ์ตริน ฟรุคโตส และ คอร์นไซรัป นอกจากนี้ยังมีการใช้น้ำตาลแอลกอฮอล์ เช่น กลีเซอรอล และไซลิทอล และเกลือบาง ชนิด เช่น โซเดียมคลอไรด์ อีกด้วย



ภาพ 2.2 การถ่ายเทมวลสารระหว่างภายในเซลล์และสารละลายภายนอก

ที่มา : อ่อนรวี (2533)

### 2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชัน (รัตนาและพิไลรัก, 2541)

#### ก. อุณหภูมิระหว่างการทำออสโมติกดีไฮเดรชัน

ถ้าเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายออสโมติกให้สูงขึ้นประมาณ 30-50 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราการออสโมซิสเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เป็นผลให้อัตราการสูญเสียน้ำของชิ้นผักและผลไม้ เพิ่มขึ้นแต่เพียงอย่างเดียว แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายให้สูงเกิน 70 องศาเซลเซียส พบว่า อัตราการสูญเสียน้ำและการซึมผ่านของตัวถูกละลายเข้าไปในเนื้อผักและผลไม้เพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้ เป็นเพราะความร้อน 70 องศาเซลเซียส มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผักและผลไม้

#### ข. การกวนหรือการคนสารละลายออสโมติกระหว่างกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชัน

การกวนจะช่วยรักษาความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกที่ใช้เข้าให้มีความสม่ำเสมอเท่ากันทั้งหมด โดยเฉพาะบริเวณรอบๆ ชิ้นผักและผลไม้ อัตราการออสโมซิสของสารละลายที่มีการกวนหรือคนตลอดเวลาจะเร็วกว่าอัตราการออสโมซิสที่ไม่มีการคนหรือกวนเพราะจะทำให้ลายชั้นฟิล์มของตัวถูกละลายรอบๆ ผิวของชิ้นอาหาร

#### ค. อัตราส่วนของผักและผลไม้ กับสารละลายออสโมติก

อัตราส่วนของผักและผลไม้ต่อสารละลายออสโมติก มีผลต่ออัตราการออสโมซิส เพราะหากอัตราส่วนของผักและผลไม้ต่อสารละลายออสโมติก มากเกินไปจะมีผลทำให้ความเข้มข้นของสารละลายเจือจางลง และส่งผลให้ความดันออสโมติกลดลง

#### ง. ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติก

สารละลายออสโมติกควรมีความเข้มข้นสูง เพราะความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกยิ่งสูงจะทำให้อัตราการสูญเสียน้ำเพิ่มขึ้นและอัตราการแพร่ของตัวถูกละลายในเซลล์เพิ่มขึ้น

### 2.2.2 ข้อดีของการทำออสโมติกดีไฮเดรชัน (รัตนาและพิไลรัก, 2541)

ก. ผักและผลไม้ เมื่อนำมาผ่านกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันก่อนนำไปทำแห้งจะช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งและช่วยประหยัดพลังงาน เนื่องจากกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันสามารถลดปริมาณน้ำบางส่วนออกจากอาหาร โดยการออสโมซิส และเป็นการเตรียมผักและผลไม้ก่อนการทำแห้ง ทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีคุณภาพดีกว่าการทำแห้งเพียงอย่างเดียว โดยจากการศึกษาการลดเวลาการทำแห้งห้วหอมใหญ่ด้วยกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันของนักสิทธิ์ (2546) พบว่าห้วหอมใหญ่เมื่อผ่านกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันแล้วนำไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบถาดสามารถลดเวลาการทำแห้งจาก 6 ชั่วโมง เหลือ 5 ชั่วโมง 30 นาที และเมื่อทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบพลังงานแสงอาทิตย์สามารถลดเวลาการทำแห้งจาก 14 ชั่วโมง เหลือ 13 ชั่วโมง โดยมีความชื้นสุดท้าย 12 % และ 8% (ฐานเปียก) ตามลำดับ นอกจากนี้ Toringa *et al.*

(2001) ยังพบว่ากระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันสามารถลดความชื้นของเห็ดได้ 30 % ก่อนนำไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งระบบไมโครเวฟและสามารถลดการไหม้บริเวณตรงกลางของชิ้นเห็ดเนื่องจากการทำแห้งด้วยระบบไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว

ข. สามารถลดการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในผักและผลไม้ เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกที่ใช้แช่ผักและผลไม้ในระหว่างกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันสูงมากจนทำให้เอนไซม์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในผักและผลไม้ทำงานช้าลง เป็นผลให้สีของผักและผลไม้ไม่เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล

ค. ผักและผลไม้ที่ผ่านกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชัน ไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการทำแห้ง ซึ่งจะส่งผลให้กลิ่นของผักและผลไม้คงอยู่ได้มากกว่า

### 2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชัน

วัฒนา (2545) ศึกษาเนื้อลิ้นจี่ทำแห้งด้วยกระบวนการแช่อบแบบช้าและกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชัน การแช่อบแบบช้าใช้เวลาในการแช่ 5 วัน มีความเข้มข้นของสารละลายออสโมติก (น้ำตาลซูโครส) เริ่มต้นที่ 35 องศาบริกซ์ แล้วเพิ่มความเข้มข้นทุกวันเป็น 40 และ 45 องศาบริกซ์ เปรียบเทียบกับกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชัน โดยใช้สารละลายออสโมติกความเข้มข้น 70 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 3 - 4 ชั่วโมง จากนั้นทำการทำแห้งเนื้อลิ้นจี่ที่ได้ทั้งสองกระบวนการเป็นเวลา 14 ชั่วโมง เท่ากัน พบว่ากระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันให้ผลการลดค่ากิจกรรมของน้ำ และ  $L^*$  (ความสว่าง) ดีกว่าวิธีการแช่อบแบบช้า จากการเก็บรักษาเนื้อลิ้นจี่ทำแห้งในถุงสุญญากาศ ถุงโพลีโพรพิลีนที่มีสารดูดความชื้นและสารดูดออกซิเจน และถุงอลูมิเนียม พบว่าเก็บรักษาในถุงอลูมิเนียมให้ผลดีที่สุด

ปวีณา (2550) ศึกษากระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันร่วมกับเทคนิคฟลูอิดไดเซชันในการทำแห้งเนื้อมะม่วงแก้ว โดยทำการบ่มมะม่วงให้สุกเป็นเวลา 1.5 วันก่อน จากนั้นหั่นมะม่วงแก้วให้ได้ขนาด  $0.5 \times 0.5 \times 0.5$  เซนติเมตร แช่ในสารละลายออสโมติกที่ประกอบด้วยน้ำตาล กลีเซอรอล โซเดียมคลอไรด์ โพแทสเซียมซอร์เบต และโพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ เป็นเวลา 3 และ 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิของสารละลายออสโมติก 40 และ 50 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก และค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ เมื่อเวลาผ่านไป โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำอยู่ในช่วง  $2.37 \times 10^{-10}$  ถึง  $3.36 \times 10^{-10}$  ตารางเมตรต่อวินาที จากนั้นนำเนื้อมะม่วงที่ผ่านกระบวนการออสโมติกแล้วทำแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันที่อุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 3.65 เมตรต่อวินาที พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส เท่ากับ 80 และ 65 นาที ตามลำดับ ผลการประเมินทางประสาทสัมผัสพบว่าไม่มี

แตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติ การเก็บรักษามะม่วงแก้วในถุงอลูมิเนียมเปลวที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ทำให้เนื้อมะม่วงแก้วมีคุณภาพดีที่สุด

Kolawole *et al.* (2007) ศึกษาการถ่ายเทมวลและการเปลี่ยนแปลงสีของแตงโม ระหว่างกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชัน ที่อุณหภูมิ 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส สารละลาย ออสโมติก (น้ำตาลซูโครส) ที่ความเข้มข้น 40, 50 และ 60 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยการศึกษากฎการถ่ายเทมวลได้ใช้กฎข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการแช่แตงโมสูงขึ้นและความเข้มข้นของสารออสโมติกเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การ แพร่ของน้ำและของแข็งที่ละลายได้มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง  $1.030 \times 10^{-8}$  ถึง  $3.549 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที และ  $1.117 \times 10^{-8}$  ถึง  $8.540 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ในการ เปลี่ยนแปลงสีรายงานผลเป็น  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  เมื่อแตงโมผ่านกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันทำให้สี ของแตงโมเข้มขึ้น

Mohammad and Javad (2007) ศึกษาการถ่ายเทมวลของแอฟริคอต ระหว่าง กระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชัน ที่อุณหภูมิ 30, 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส สารละลาย ออสโมติก (น้ำตาลซูโครส) ที่ความเข้มข้น 50%, 60% และ 70% เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยการศึกษา กฎการถ่ายเทมวลได้ใช้กฎข้อที่สองของฟิคส์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการแช่แอฟริคอตสูงขึ้นและ ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและของแข็งที่ละลาย ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง  $1.066 \times 10^{-9}$  ถึง  $4.061 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที และ  $7.69 \times 10^{-9}$  ถึง  $3.127 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ

Tonon *et al.* (2007) ได้ศึกษาผลกระทบของการทำแห้งด้วยกระบวนการออสโมติกดีไฮ- เดรชัน โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ 20 ถึง 40 องศาเซลเซียส ต่ออัตราการถ่ายเทมวลของมะเขือเทศ เซอร์รี่ พบว่าเมื่ออุณหภูมิของสารละลายออสโมติกสูงขึ้น การลดลงของปริมาณน้ำในมะเขือเทศ เซอร์รี่จะเร็วขึ้น เนื่องจากความหนืดของสารละลายออสโมติกจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ อัตราการไหลเวียนของสารละลายออสโมติกเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลต่อการลดปริมาณน้ำใน มะเขือเทศเซอร์รี่

Varanyanond and Wongkrajang (2002) ศึกษากระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันมะม่วง แก้วที่สารละลายออสโมติก (น้ำตาลซูโครส) ความเข้มข้น 50 ถึง 70 องศาบริกซ์ ที่อุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส เวลา 2 ถึง 6 ชั่วโมง พบว่าการแช่ในสารละลายออสโมติกความเข้มข้น 60 องศา- บริกซ์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

Rahman (1995) ศึกษากระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันสำหรับสับปะรด ที่ความเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ ที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการสูญเสียน้ำและอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างและอัตราการสูญเสียน้ำต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลมีค่าลดลง

Laura and Rodolfo (2005) ศึกษาอัตราการสูญเสียน้ำและอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลระหว่างกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันสับปะรด ที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส ในสารละลายน้ำตาลซูโครส 61% (w/w) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าอัตราการแพร่ของน้ำและน้ำตาลเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

Chenlo *et al.* (2007) ศึกษากระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันเกาลัด โดยใช้น้ำตาลซูโครสเป็นสารละลายออสโมติกความเข้มข้น 40%, 50% และ 60% (w/w) ที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณการสูญเสียน้ำ ปริมาณน้ำตาลซูโครส มีค่าเพิ่มขึ้น

Garia *et al.* (1999) ศึกษาการถ่ายเทมวลสำหรับสับปะรด โดยใช้น้ำตาลซูโครสเป็นสารละลายออสโมติกความเข้มข้น 50, 60 และ 70 องศาบริกซ์ ที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ค่าพีเอช 6, 7 และ 8 โดยพิจารณาการแพร่ด้วยกฎของฟิกค์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง  $1.11 \times 10^{-5}$  ถึง  $2.7 \times 10^{-5}$  ตารางเมตรต่อวินาที และ  $1.49 \times 10^{-5}$  ถึง  $3.15 \times 10^{-5}$  ตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ และให้ผลของแบบจำลองของสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและของแข็งมีค่า  $R^2 = 0.94$

Rastogi and Raghavarao (2004) ศึกษาการถ่ายเทมวลสำหรับสับปะรดซึ่งมีลักษณะเป็นลูกบาศก์ โดยพิจารณาการแพร่ด้วยกฎของฟิกค์ ระหว่างกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันที่อุณหภูมิช่วง 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส โดยใช้น้ำตาลซูโครสเป็นสารละลายออสโมติกความเข้มข้น 40 ถึง 70 องศาบริกซ์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการแช่สับปะรดสูงขึ้นและความเข้มข้นของสารออสโมติกเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและของแข็งที่ละลายได้มีค่าเพิ่มขึ้น และให้ผลของแบบจำลองของสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำมีค่า  $R^2 = 0.99$  และของแข็งมีค่า  $R^2 = 0.96$

Otoniel and Nelson (2007) ศึกษาสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำสำหรับปลาซาร์ดินแผ่นระหว่างกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันที่อุณหภูมิ 30 และ 38 องศาเซลเซียส ในสารละลายออสโมติกหาระดับคือ 0.15, 0.18, 0.21, 0.24 และ 0.27 kg NaCl/kg พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ อยู่ในช่วง  $2.084 \times 10^{-12}$  ถึง  $3.015 \times 10^{-12}$  ตารางเมตรต่อวินาที ที่ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกต่ำกว่า 0.24 kg NaCl/kg และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ

มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความเข้มข้นของสารออกซิเจนที่เท่ากับหรือสูงกว่า 0.24 kg NaCl/kg เมื่อเพิ่มอุณหภูมิค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำมีค่าลดลง

Otoniel *et al.* (2007) ศึกษาการทำนายความชื้น และความเข้มข้นของเกลือสำหรับปลาซาร์ดีนแผ่น ระหว่างกระบวนการออกซิเดชันแบบ vacuum pulse ที่อุณหภูมิ 30 ถึง 38 องศาเซลเซียส สารละลายออกซิเจนในช่วงของความเข้มข้น 0.15 ถึง 0.27 kg NaCl/kg ประยุกต์การใช้ vacuum pulse 11.0 kPa เวลา 10 นาที ในการทำนายความชื้น และความเข้มข้นของเกลือ โดยใช้แบบจำลอง Peleg พบว่ามีค่า regression coefficients ที่สูง ( $R^2 > 0.97$ ) และ mean relative error ที่ต่ำ ( $< 10\%$ )

### 2.3 การถ่ายเทมวล (Mass transfer)

การถ่ายเทมวลเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อระบบประกอบด้วยองค์ประกอบจำนวนสองหรือมากกว่า โดยองค์ประกอบเหล่านั้นมีความเข้มข้นแตกต่างกัน มวลจึงถูกถ่ายเทไปเพื่อลดความแตกต่างของความเข้มข้นในระบบ องค์ประกอบหนึ่งนั้นจะถูกถ่ายเทจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ในที่สุดความเข้มข้นของทุกองค์ประกอบจะมีค่าสม่ำเสมอทั้งระบบ การถ่ายเทมวลก็จะหยุดลง

เมื่อมีสาร A และสาร B แล้วสาร A เคลื่อนที่ในสาร B เนื่องจากความต่างของความเข้มข้น ซึ่งปริมาณสาร A ที่เคลื่อนที่จะเป็นไปตามกฎข้อที่หนึ่งของฟิคค์ดังนี้ (เมธินี, 2542 ; สมชาติ, 2540)

$$J_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dz} \quad (1)$$

เมื่อ  $J_A$  = จำนวน โมลของ A ที่เคลื่อนที่ (ฟลักซ์เชิงโมล)

$D_{AB}$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร A ในสาร B

$\frac{dC_A}{dz}$  = ผลต่างของความเข้มข้นของสาร A ที่ระยะทางที่ห่างกัน  $dz$

หรืออีกนัยหนึ่ง คือเกรเดียนต์ของความเข้มข้น (concentration gradient)

โดยทั่วไปการแพร่ในของแข็งจะเกิดขึ้นในสภาวะไม่คงตัว นั่นคือ ความเข้มข้นของสารนอกจากจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งแล้วยังขึ้นอยู่กับเวลาอีกด้วย ซึ่งเป็นไปตามกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคค์ โดยมีรูปแบบเดียวกันกับกฎของ Fourier ในเรื่องการถ่ายเทความร้อน แสดงดังสมการที่ 2



$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \left( \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

กรณีของการแพร่ในแผ่นบาง (slab) ที่มีความหนา  $2a$  ลักษณะการแพร่จะเป็นการแพร่ผ่านผิวหน้าที่อยู่ตรงข้ามกันเพียงสองด้าน (สำหรับการแพร่หนึ่งทิศทาง) คำตอบของสมการที่ 2 จะอยู่ในรูปของสมการที่ 3

$$E = \frac{C_{At} - C_{A\infty}}{C_{A0} - C_{A\infty}} = f\left(\frac{D_{AB} \cdot t}{a^2}\right) = E_a \quad (3)$$

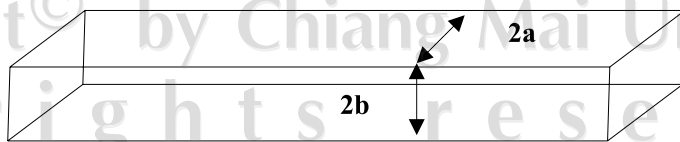
กำหนดให้  $\left(\frac{D_{AB} \cdot t}{a^2}\right) = \tau$  จะได้

$$E = \frac{8}{\pi^2} \left[ \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} \cdot \tau\right) + \frac{1}{9} \exp\left(-9 \frac{\pi^2}{4} \cdot \tau\right) + \frac{1}{25} \exp\left(-25 \frac{\pi^2}{4} \cdot \tau\right) + \dots \right] \quad (4)$$

เมื่อ  $C_{A0}, C_{At}$  = ความเข้มข้นของสาร A เฉลี่ยที่เวลาเริ่มต้น และเวลา  $t$  ตามลำดับ  
 $C_{A\infty}$  = ความเข้มข้นของสาร A ที่ผิวหน้าของแข็งซึ่งจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา  
 $2a$  = ความหนาของแผ่นบาง  
 $D_{AB}$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ของ A ใน B

กรณีที่วัตถุมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ความหนา  $2a$  และความกว้าง  $2b$  (ภาพที่ 2.3)

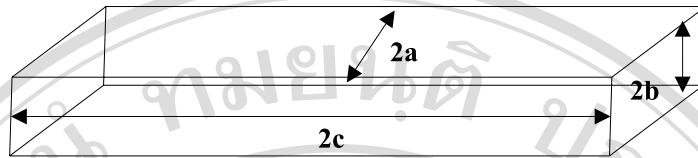
การแพร่ผ่านผิวหน้าที่ตรงข้ามกันสองคู่สี่ด้าน (สำหรับการแพร่สองทิศทาง) โดยมีรูปแบบของสมการดังสมการที่ 5



ภาพ 2.3 รูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า ความหนา  $2a$  และความกว้าง  $2b$

$$E = f\left(\frac{Dt}{a^2}\right) f\left(\frac{Dt}{b^2}\right) = E_a E_b \quad (5)$$

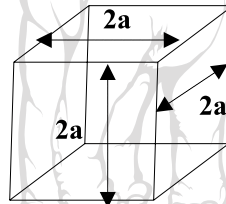
กรณีของวัตถุมีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $2a \times 2b \times 2c$  (ภาพที่ 2.4) การแพร่ผ่านผิวหน้า  
ที่ตรงข้ามกันสามคู่หัดด้าน (การแพร่ในสามทิศทาง) โดยมีรูปแบบของสมการดังสมการที่ 6



ภาพ 2.4 รูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $2a \times 2b \times 2c$

$$E = f\left(\frac{Dt}{a^2}\right) f\left(\frac{Dt}{b^2}\right) f\left(\frac{Dt}{c^2}\right) = E_a E_b E_c \quad (6)$$

กรณีของวัตถุมีรูปร่างทรงลูกบาศก์ (ภาพที่ 2.5) กำหนดให้มีความยาว  $2a$  เท่ากันทุกด้าน  
สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 7



ภาพ 2.5 รูปร่างทรงลูกบาศก์

$$E = \left(\frac{8}{\pi^2}\right)^3 \left[ \exp\left(-3\pi^2 \frac{Dt}{a^2}\right) + \left(\frac{3}{9}\right) \exp\left(-11\pi^2 \frac{Dt}{a^2}\right) + \left(\frac{3}{25}\right) \exp\left(-27\pi^2 \frac{Dt}{a^2}\right) \right] \quad (7)$$

จากสมการที่ 2 สามารถเขียนให้อยู่ในระบบแกนโพลาาร์ โดยมีรูปแบบของสมการดัง  
สมการที่สมการที่ 8

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \left( \frac{\partial^2 C_A}{\partial r^2} + \frac{c}{r} \frac{\partial C_A}{\partial r} \right) \quad (8)$$

เมื่อ  $r$  = ระยะในแนวรัศมี

$c = 1$  สำหรับการแพร่ในแนวรัศมีทรงกระบอก

$c = 2$  สำหรับการแพร่ในแนวรัศมีทรงกลม

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $E$  กับ  $r$  ของวัตถุรูปทรงต่างๆ ถ้าวัตถุมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $2a$  (ภาพที่ 2.6) การแพร่เกิดขึ้นในทิศทางรัศมี คำตอบของสมการที่ 8 จะมีรูปแบบของสมการดังสมการที่ 9



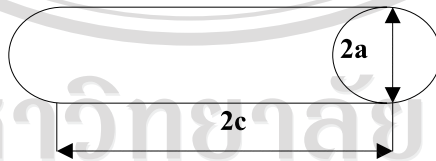
ภาพ 2.6 รูปร่างทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง  $2a$

$$E = f\left(\frac{Dt}{a^2}\right) = E_r \quad (9)$$

คำตอบของสมการที่ 9 จะอยู่ในรูปของสมการที่ 10

$$E_r = \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{4}{\lambda_n^2} \right) \exp\left( -\lambda_n^2 X^2 \frac{Dt^{1/2}}{4} \right) \quad (10)$$

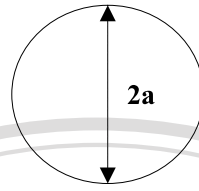
กรณีวัตถุมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น  $2a$  และยาว  $2c$  (ภาพที่ 2.7) การแพร่ผ่านผิวหน้าโดยรอบ โดยมีรูปแบบของสมการดังสมการที่ 11



ภาพ 2.7 รูปร่างทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง  $2a$  ยาว  $2c$

$$E = f\left(\frac{Dt}{a^2}\right) f\left(\frac{Dt}{c^2}\right) = E_r E_c \quad (11)$$

กรณีวัตถุมีรูปร่างเป็นทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น  $2a$  (ภาพที่ 2.8) การแพร่ผ่านโดยรอบ โดยมีรูปแบบของสมการดังสมการที่ 12



ภาพ 2.8 รูปร่างทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง  $2a$

$$E = f\left(\frac{Dt}{a^2}\right) = E_s \quad (12)$$

คำตอบของสมการที่ 12 จะอยู่ในรูปของสมการที่ 13

$$E_r = \frac{6}{\pi^2} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \pi^2 X^2 \frac{Dt^{1/2}}{9}\right) \right\} \quad (13)$$

เมื่อ  $X =$  พื้นที่ผิวต่อปริมาตรของทรงกลม

$\lambda_n =$  รากของเบสเซลฟังก์ชันอันดับที่ศูนย์ (zero<sup>th</sup> order Bessel function)

จากสมการที่ 3 และ 4 สามารถเขียนสมการสำหรับการแพร่ของความชื้นระหว่างการทำแห้งสำหรับหนึ่งทิศทางในพิกัดฉาก โดยมีรูปแบบของสมการดังสมการที่ 14

$$E = \frac{m - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{8}{\pi^2} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 Dt}{4 a^2}\right] \right\} \quad (14)$$

ในการทดลองจึงประยุกต์ใช้กฎของฟิคกับแก้วมังกรซึ่งมีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยพิจารณาการแพร่ในสามทิศทาง ดังนั้นจะสามารถหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและสัมประสิทธิ์การแพร่ของแข็งที่ละลายได้ได้จากความชันของกราฟเส้นตรงที่พล็อตระหว่าง  $\ln E$  กับเวลา และสามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและสัมประสิทธิ์การแพร่ของแข็งที่ละลายได้สำหรับรูปทรงแผ่นบางในสามทิศทาง จากสมการที่ 15 และ 16

$$\ln E = \ln \frac{8^3}{\pi^2} - Dt\pi^2 \left( \frac{1}{4a^2} + \frac{1}{4b^2} + \frac{1}{4c^2} \right) \quad (15)$$

$$E = \frac{m - m_e}{m_0 - m_e} \quad (16)$$

เมื่อ  $D$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำหรือสัมประสิทธิ์การแพร่ของของแข็งที่ละลายได้  
 $m$  = ปริมาณความชื้นหรือปริมาณของแข็งที่ละลายได้ที่เวลาใดใด  
 $m_0$  = ปริมาณความชื้นหรือปริมาณของแข็งที่ละลายได้ที่เวลาเริ่มต้น  
 $m_e$  = ปริมาณความชื้นหรือปริมาณของแข็งที่ละลายได้ที่สภาวะสมดุล

เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่นั้นขึ้นอยู่กับความดัน อุณหภูมิ และส่วนประกอบของระบบ จากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่แตกต่างกันจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊สมีค่าอยู่ในช่วง  $5 \times 10^{-6}$  ถึง  $1 \times 10^{-5}$  ตารางเมตรต่อวินาที ซึ่งในของเหลวที่มีค่าอยู่ในช่วง  $10^{-10}$  ถึง  $10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที และของแข็งมีค่าอยู่ในช่วง  $10^{-14}$  ถึง  $10^{-10}$  ตารางเมตรต่อวินาที (เมธินี, 2542)

#### 2.4 การทำแห้ง

การทำแห้งอาหารมีมาตั้งแต่สมัยโบราณ โดยอาศัยความร้อนจากแสงแดดทำให้อาหารมีลักษณะแห้งสามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น การทำแห้งหรือการลดปริมาณน้ำในวัสดุ (drying) หมายถึง การใช้ความร้อนภายใต้สภาวะควบคุมเพื่อลดปริมาณน้ำส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในอาหาร โดยการระเหยน้ำเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาอาหารและการลดค่ากิจกรรมของน้ำให้ต่ำกว่า 0.60 ซึ่งมีผลยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ ในการเก็บรักษาผักที่ทำแห้งเพื่อให้มีอายุการเก็บรักษานานขึ้นควรมีปริมาณความชื้นหลังการทำแห้งต่ำกว่า 10% (ฐานเปียก) ซึ่งทำให้มีผลยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ได้ อาหารแห้งแต่ละชนิดจะมีความชื้นในระดับที่ปลอดภัยแตกต่างกัน เช่น ผลไม้แช่อิ่มสามารถเก็บรักษาได้ที่ความชื้น 15-20% (ฐานเปียก) แต่ถ้าเป็นเมล็ดธัญพืชเก็บไว้ที่ความชื้นนี้จะเกิดราได้ (วิไล, 2546) การทำแห้งอาหารนอกจากจะสามารถป้องกันการเน่าเสียของอาหารเนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ ปฏิกิริยาเคมีและเอนไซม์แล้ว ยังเป็นการลดน้ำหนักของอาหารทำให้สะดวกในการบรรจุ เก็บรักษาและขนส่งอีกด้วย และสิ่งที่มีบทบาทสำคัญต่อการทำแห้งผลิตภัณฑ์อาหารคือน้ำที่มีอยู่ในอาหาร เมื่อก้าวถึงสมบัติทางเคมี กายภาพ และเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำที่ขีดยึดเกาะในอาหาร (รุ่งนภา, 2535) พบว่ามีน้ำอยู่ 3 ประเภท คือ

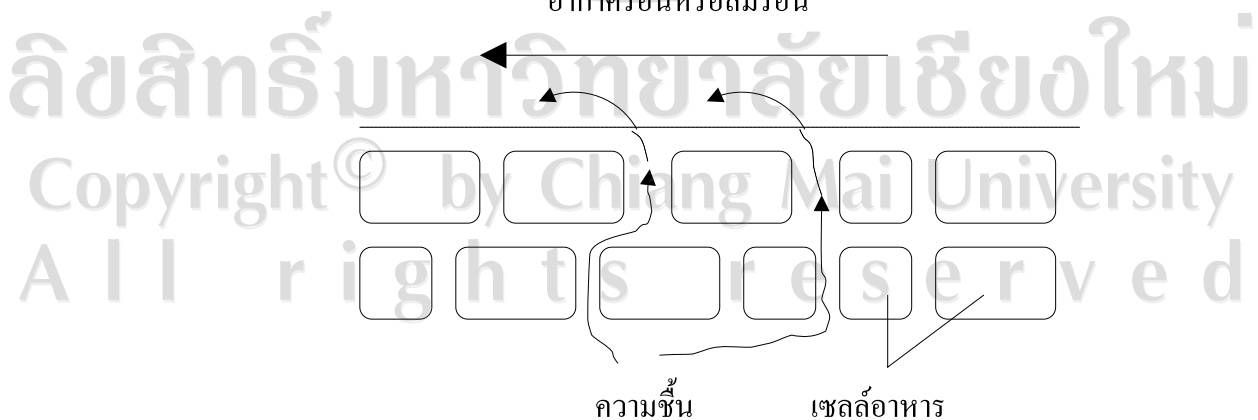
1. น้ำที่ขีดยึดกับอิมมูนิกกรูป ได้แก่ กลุ่มคาร์บอกซิล และอะมิโน
2. น้ำที่ขีดยึดกับกลุ่มไฮดรอกซิลและอะไมด์ (amide) ด้วยพันธะไฮโดรเจน
3. น้ำอิสระซึ่งพบมากในช่องว่างอินเตอร์สทิเชียล (interstitial pores)

ระดับความยากง่ายของการกำจัดน้ำออกไปจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับว่าน้ำนั้นอยู่ในกลุ่มใด ซึ่งระดับความยากในการกำจัดความชื้นออกไปจะลดลงตามลำดับจากประเภทที่ 1 จนถึงประเภทที่ 3 และ โอกาสที่น้ำจะถูกกำจัดออกไปเป็นอันดับแรก คือน้ำอิสระซึ่งระเหยและกำจัดออกไปในตอนแรก จากนั้นจะเป็น โมเลกุลที่ยึดด้วยพันธะไฮโดรเจน และสุดท้ายจะเป็นน้ำที่ยึดด้วยพันธะออสโมติก ดังนั้นพลังงานที่ต้องใช้ในการกำจัดความชื้นจากน้ำแต่ละชนิดที่กล่าวมาแล้วอาจจะใช้ปริมาณพลังงานที่แตกต่างกันในการกำจัดออกไป นอกจากนี้ กลไกที่แตกต่างกันของน้ำที่ยึดกับของแข็งยังมีผลต่อลักษณะเฉพาะของคุณภาพอาหาร ระหว่างการเก็บรักษาอีกด้วย

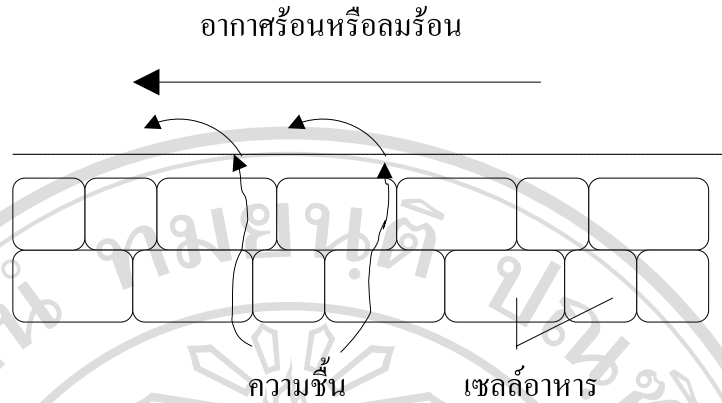
#### 2.4.1 กลไกการทำแห้ง

การเคลื่อนที่ของน้ำในอาหารออกจากอาหารนั้นมี 2 วิธีด้วยกัน คือ การเคลื่อนที่ด้วยแรงคาพิลารีจะเกิดกับอาหารที่มีเซลล์โปร่ง ความพรุนสูง และมีความต่อเนื่องระหว่างเซลล์ (ภาพที่ 2.9) โดยมักจะเกิดขึ้นในช่วงต้นของการทำแห้ง และการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ผ่านเซลล์จะเกิดกับอาหารที่มีเนื้อแน่นไม่มีช่องว่างระหว่างเซลล์ (ภาพที่ 2.10) หรือเกิดกับอาหารที่ผ่านการทำแห้งไประยะหนึ่ง เซลล์เกิดการหดตัวทำให้แรงคาพิลารีหมดไป น้ำจึงต้องเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ ในขณะที่ทำแห้งเมื่ออากาศหรือลมร้อนพัดผ่านผิวหน้าอาหารที่เปียก ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิวของอาหารและจะระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดไอ ใอน้ำจะแพร่ผ่านฟิล์มอากาศและถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่ สภาวะดังกล่าวจะทำให้ความดันไอที่ผิวหน้าของอาหารต่ำกว่าความดันไอด้านในอาหาร เป็นผลให้เกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำ อาหารชั้นด้านในจะมีความดันไอสุงและค่อยๆ ลดต่ำลงเมื่อชั้นอาหารเข้าใกล้ลมร้อน ความแตกต่างนี้ทำให้เกิดแรงดันเพื่อไล่น้ำออกจากอาหาร น้ำจะเคลื่อนที่ไปยังผิวหน้าอาหาร

อากาศร้อนหรือลมร้อน



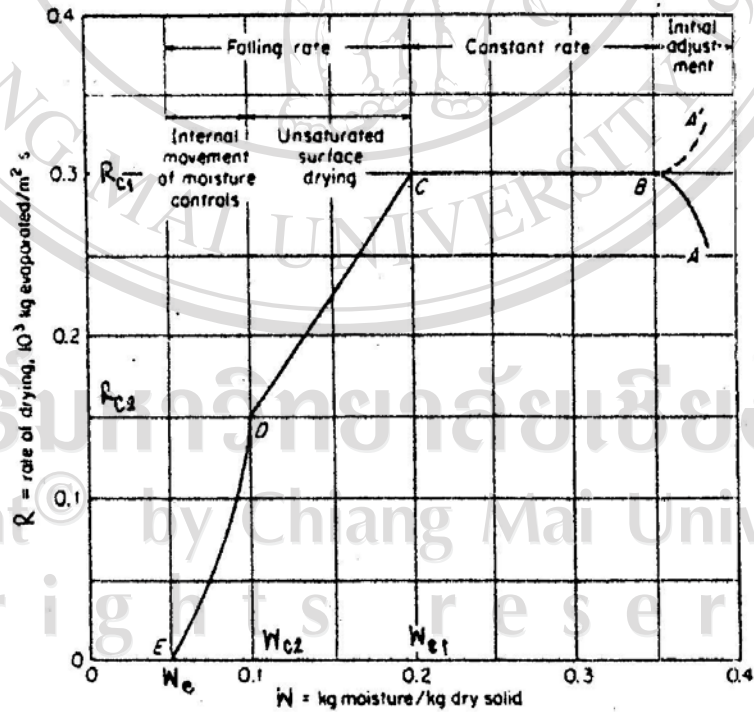
ภาพ 2.9 การเคลื่อนที่ด้วยแรงคาพิลารี



ภาพ 2.10 การเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ผ่านเซลล์อาหาร

2.4.2 อัตราการทำให้แห้ง

อัตราการทำให้แห้งมีนิยามว่าเป็นอัตราการระเหยของน้ำต่อหนึ่งหน่วยเวลาต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เมื่อน้ำระเหยออกไปจากอาหารอัตราการทำให้แห้งจะมีการเปลี่ยนแปลงตามการลดลงของความชื้นในอาหาร ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำให้แห้งกับความชื้นแสดงดังภาพที่ 2.11



ภาพ 2.11 กราฟอัตราการแห้ง (จุด E คือความชื้นสมดุล,  $W_e$ )

ที่มา: Geankoplis (2003)

จากภาพการทำแห้งจะดำเนินไปโดยแบ่งออกเป็นช่วงได้ 3 ช่วง ได้แก่

ก. ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (initial adjustment period) เป็นช่วงที่ความชื้นที่มีอยู่ในอาหารปรับตัวเพื่อมีอุณหภูมิเท่ากับลมร้อน อัตราการแห้งจะต่ำและจะค่อยๆเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงช่วงที่อัตราการอบแห้งคงที่ จากภาพที่ 2.11 คือ ช่วง AB ส่วนช่วง A'B เป็นกรณีที่บริเวณผิวหน้าของแข็งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่จะเริ่มเกิดการระเหยในตอนแรกจะสูงและค่อยๆลดลงจนคงที่

ข. ช่วงอัตราการแห้งคงที่ (constant rate period) เป็นช่วงที่น้ำในอาหารระเหยเป็นไออย่างต่อเนื่อง คล้ายกับการระเหยของน้ำโดยทั่วไป

ค. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) เป็นช่วงที่ความชื้นในอาหารเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารอย่างไม่ต่อเนื่อง ทำให้ชั้นของเหลวที่ปกคลุมอยู่ไม่สม่ำเสมอ อัตราการแห้งจึงลดลง และเมื่อเวลาผ่านไป ความชื้นจะลดลงเรื่อยๆ จนถึงความชื้นสมดุล ซึ่งน้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก

### 2.4.3 การถ่ายเทความร้อนและมวล (รุ่งนภา, 2535)

ในการทำแห้งจะต้องมีการให้พลังงานแก่อาหาร ทำให้น้ำในอาหารเปลี่ยนสถานะเป็นไอแล้วเคลื่อนย้ายออกจากอาหาร แสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนจากธรรมชาติและกระแสลมที่พัดผ่านอาหารทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายไอน้ำ เนื่องจากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ให้อุณหภูมิไม่ได้สูงนักและกระแสลมธรรมชาติไม่สูงพอ ทำให้การตากแห้งต้องใช้เวลาาน ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเครื่องทำที่มีการให้พลังงานความร้อนในปริมาณที่ควบคุมได้ และมีอุปกรณ์ในการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกจากผิวอาหาร การถ่ายเทความร้อนและมวลเกิดได้เร็ว อาหารจึงแห้งได้เร็วขึ้น

การถ่ายเทความร้อน (heat transfer) จัดเป็นหน่วยปฏิบัติการหน่วยหนึ่งที่สำคัญในกระบวนการแปรรูปอาหาร ทั้งนี้กระบวนการแปรรูปอาหารส่วนใหญ่จำเป็นต้องอาศัยการถ่ายเทความร้อน ทั้งในแง่ของการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ และในแง่ของการนำความร้อนออกจากตัวผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามในที่นี่จะเน้นการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ตัวผลิตภัณฑ์เท่านั้น

การถ่ายเทความร้อน จะเกิดขึ้นเมื่อส่วนของระบบ 2 ส่วนมีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ความร้อนจะถ่ายเทจากที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำ การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้ 3 วิธีดังนี้

ก. การนำความร้อน (heat conduction) เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการแลกเปลี่ยนความร้อนของโมเลกุลหนึ่งกับโมเลกุลข้างเคียงซึ่งจะขึ้นกับสภาพการนำความร้อนของวัสดุนั้นๆ

ข. การพาความร้อน (heat convection) เป็นการถ่ายเทความร้อน โดยการเคลื่อนที่ของกลุ่มโมเลกุลซึ่งตัวกลางที่ความร้อนไหลผ่านมีการเคลื่อนที่ เช่น การพาความร้อนในของเหลว



ค. การแผ่รังสีความร้อน ( heat radiation) เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Fellows, 1997) โดยจะเกิดการถ่ายเทที่ผิวหน้าของวัตถุ 2 ชนิดการแผ่รังสีความร้อนจะเป็นการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างจากการนำความร้อนและการพาความร้อน เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนโดยไม่ต้องมีวัตถุเป็นกลางในการถ่ายเทความร้อน ( Singh and Heldman, 1993) เช่น เครื่องให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

การเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่งการอบแห้ง สามารถทำได้หลายวิธีคือ

ก. การให้กระแสลมร้อนเคลื่อนที่ผ่านอาหาร กระแสลมร้อนทำหน้าที่ให้ความร้อนและเคลื่อนย้ายไอน้ำ การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เป็นแบบการพาความร้อน (convection)

ข. การแผ่อาหารเป็นชั้นบางๆบนพื้นผิวที่ให้ความร้อน อาหารได้รับความร้อนแบบการนำความร้อน (conduction) ทำให้ไอน้ำกระจายตัวออกไปสู่บรรยากาศเหนืออาหาร อาหารที่ร้อนทำให้ไอน้ำกระจายตัวได้ดี อาหารจึงแห้งในเวลาสั้นๆ อาจมีระบบดูดอากาศออกจากผิวอาหาร ซึ่งทำให้สามารถลดความชื้นได้ต่ำลงอีกหรือไม่ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงนัก

ค. การให้ความร้อนแก่อาหารในเครื่องอบด้วยการนำความร้อนหรือการแผ่รังสีร่วมกับการดูดอากาศที่มีไอน้ำออกไปควบแน่นข้างนอก

ง. การปรับสภาพความดันและอุณหภูมิให้น้ำในอาหารเป็นของแข็งที่ระดับต่ำกว่าจุดรวมสามสถานะ (triple point) แล้วให้พลังงานความร้อนหรือลดความดันลงอีกทำให้เกิดการระเหิด โดยน้ำเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นไอโดยตรง วิธีการนี้เรียกว่าการทำแห้งด้วยการแช่เยือกแข็ง (freeze drying หรือ lyophilization)

การถ่ายเทมวล (heat transfer) เป็นปรากฏการณ์อย่างหนึ่งซึ่งเกิดขึ้นเมื่อระบบประกอบด้วยองค์ประกอบจำนวนสองหรือมากกว่า โดยที่องค์ประกอบเหล่านั้นมีความเข้มข้นแตกต่างกัน มวลจึงถูกถ่ายเทเพื่อลดความแตกต่างของความเข้มข้นในระบบลงซึ่งจะเกิดการถ่ายเทมวลจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า เมื่อระบบเข้าสู่สมดุลการถ่ายเทมวลก็จะหยุดลง โดยกลไกการถ่ายเทมวลแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ การถ่ายเทมวลโดยการแพร่ของโมเลกุลและการพามวล โดยกลไกของการแพร่ของโมเลกุลจะเกิดขึ้นจากโมเลกุลจะเคลื่อนที่แบบสุ่มและตัวกลางของผสมจะอยู่หนึ่งหรือมีการเคลื่อนที่แบบลามินาร์ ทั้งนี้กระบวนการแพร่ของโมเลกุลการจะดำเนินไปอย่างช้าๆ ส่วนกลไกการพามวลจะเกิดขึ้นโดยที่ตัวกลางของผสมมีการไหลหรือเคลื่อนที่ อันเนื่องมาจากการกวนทางกลใดๆ การถ่ายเทมวลทั้งสองแบบนี้อาจเกิดขึ้นได้พร้อมกัน ขณะที่การถ่ายเทมวลแบบใดแบบหนึ่งอาจมีบทบาทสำคัญกว่าอีกแบบหนึ่งก็ได้ โดยกฎการถ่ายเท

มวลงจะแสดงถึงควมสัมพันธ์ระหว่งฟลักซ์ของสารแพร่และเกรเดียนท์ของความเข้มข้นที่ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลง

#### 2.4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำแห้ง

การทำแห้งคือ การเคลื่อนย้ายน้ำออกจากอาหาร ปัจจัยใดๆที่มีผลต่อการเคลื่อนย้ายนี้ จึงมีผลต่ออัตราการการทำแห้ง ได้แก่

##### ก. ลักษณะของอาหาร

เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่ออัตราการการทำแห้งของอาหาร ซึ่งลักษณะธรรมชาติของอาหารขึ้นอยู่กับโครงสร้าง องค์ประกอบทางเคมี และสภาพน้ำในอาหาร อาหารเนื้อโปร่งมีการเคลื่อนที่ของน้ำภายในอาหารแบบผ่านช่องแคบซึ่งเร็วกว่าการแพร่ในอาหารเนื้อแน่น ดังนั้นอาหารเนื้อโปร่งจึงแห้งได้เร็วกว่าอาหารเนื้อแน่น อาหารที่มีน้ำตาลสูงจะเหนียวขัดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำจึงแห้งช้า อาหารที่มีการลวก นวดคลึง ทำให้เซลล์แตกจึงแห้งได้เร็วขึ้น

##### ข. ขนาดและรูปร่างของอาหาร

ขนาดและรูปร่างของอาหารมีผลต่อพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักเช่น รูปร่างของอาหารเหมือนกันแต่มีขนาดของอาหารเล็กกว่าจะมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากกว่าอาหารที่มีขนาดใหญ่จึงแห้งได้เร็วกว่า แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวที่สัมผัสอากาศที่จะเกิดการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไป ถ้าอาหารชิ้นเล็กมากและทับถมกันการระเหยจะเกิดได้เฉพาะที่ผิวอาหารสัมผัสกับลมร้อน อัตราการทำแห้งจึงเกิดได้ช้าที่พื้นที่ต่อหน่วยน้ำหนักมาก

##### ค. ตำแหน่งของอาหารในเครื่องอบแห้ง

อาหารที่อยู่ในตำแหน่งสัมผัสกับลมร้อนได้ดีกว่า หรือสัมผัสกับลมร้อนที่มีความชื้นต่ำกว่า ย่อมมีอัตราการระเหยน้ำที่ดีกว่า

##### ง. ปริมาณอากาศต่อถาด

ถ้าปริมาณอากาศต่อถาดมากเกินไปจนอากาศร้อนทับกัน อาหารที่อยู่ส่วนล่างหรือโดนทับจะไม่ได้สัมผัสกับลมร้อนหรือได้รับความร้อนเพียงเล็กน้อย และไอน้ำไม่สามารถผ่านชั้นอาหารที่อยู่ข้างบนออกมาได้ทำให้อาหารแห้งช้า

##### จ. ความสามารถในการรับไอน้ำของลมร้อน

ลมร้อนที่มีไอน้ำอยู่มากแล้วจะรับไอน้ำได้น้อยจะมีผลในช่วงอัตราการการทำแห้งคงที่ เนื่องจากขณะที่น้ำที่ผิวหน้าของอาหารระเหย ไอน้ำจะแพร่เข้าไปในที่ว่างของลมร้อนทำให้เกิดความแตกต่างของความดันไอและทำให้อาหารแห้ง ถ้าหากเกิดความแตกต่างของความดันไอน้อย อัตราการทำแห้งก็จะลดลง

#### ฉ. อุณหภูมิของลมร้อน

ถ้าลมร้อนมีความชื้นคงที่ การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับไอน้ำจึงมีผลต่อการทำแห้งในช่วงอัตราการทำแห้งคงที่และอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การแพร่กระจายของน้ำดีขึ้นจึงมีผลต่อการอบในช่วงอัตราการทำแห้งลดลงด้วย

#### ซ. ความเร็วของลมร้อน

ลมร้อนทำหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไป เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจึงเคลื่อนย้ายได้ดีขึ้น นอกจากนั้นความเร็วลมทำให้เกิดกระแสปั่นป่วนของอากาศในเครื่องอบแห้ง อากาศจึงสัมผัสอาหารได้ดีขึ้น

### 2.4.5 ผลของการทำแห้งต่ออาหาร

#### ก. ผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัส

การทำแห้งทำให้อาหารมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบทางเคมี เช่น ความชื้น ไขมัน โปรตีนและคาร์โบไฮเดรต รวมทั้งเซลล์โลส สตาร์ช และเพกติน ซึ่งจะแปรผันตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการอบ

การทำแห้งอาหารโดยใช้ลมร้อนเป็นที่นิยมใช้กันมากเพราะเสียค่าใช้จ่ายต่ำ แต่วิธีนี้จะทำลายลักษณะเนื้อสัมผัสอย่างถาวร ทำให้อาหารเกิดการหดตัวและเมื่อแช่น้ำจะเกิดการคืนรูปได้ไม่สมบูรณ์ โดยเฉพาะผักทำแห้งจะหดตัวมาก เพราะท่อคาพิลลารีเสียหายและหดตัว ซึ่งมีผลกระทบต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ และปัจจัยที่เป็นสาเหตุของการหดตัวของผักเมื่อทำแห้ง คือ การสูญเสียสภาพการซึมผ่านในเยื่อหุ้มเซลล์ สูญเสียความดันเต่ง (turgor pressure) ภายในเซลล์ โปรตีนเสียหายธรรมชาติ สตาร์ชเกิดผลึก และมีการสลายพันธะไฮโดรเจนของสารประกอบที่มีโมเลกุลใหญ่ ดังนั้นลักษณะเนื้อสัมผัสของผักที่ทำแห้งด้วยลมร้อนจะเสื่อมสลายระหว่างเก็บรักษา อีกทั้งการให้ความร้อนสูงและรวดเร็วจะทำให้ผิวหน้าของอาหารแห้งและแข็งเร็ว เป็นการปิดกั้นการระเหยของน้ำจากภายในชิ้นอาหาร ไม่ให้ออกสู่ภายนอก ทำให้ภายในชิ้นอาหารยังมีความชื้นและไขมันหลงเหลืออยู่มาก เมื่อนำไปเก็บรักษาจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในออกมาด้านนอก ทำให้อาหารนุ่มลง ซึ่งจะทำให้คุณภาพการบริโภคลดลงและอายุในการเก็บรักษาของอาหารสั้นลง ยกเว้นการนำไปแช่เยือกแข็ง ส่วนการทำแห้งอาหารโดยการใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมหรือไม่สูงมาก จะทำให้น้ำจากภายในอาหารแพร่กระจายออกมาภายนอกและระเหยไปจากผิวหน้า

ของอาหารได้มากกว่าก่อนที่ผิวหน้าของอาหารจะแห้งแข็ง และภายในชั้นอาหารก็จะมีปริมาณน้ำในอาหารหลงเหลืออยู่น้อยและแห้ง ทำให้สามารถเก็บรักษาอาหารได้นานขึ้น (นิธิยา, 2543)

#### ข. กลิ่น รสชาติและสี

การทำแห้งทำให้เกิดการเปลี่ยนสีผิวของอาหารและเปลี่ยนการสะท้อนแสง เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารแคโรทีนอยด์และคลอโรฟิลล์ ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนและการออกซิเดชันระหว่างการทำแห้ง ซึ่งการทำแห้งที่ใช้เวลานานและอุณหภูมิสูงจะทำให้กลิ่น รสชาติ และสีของอาหารเปลี่ยนแปลงได้ง่าย โดยความร้อนนอกจากจะทำให้หน้าภายในอาหารระเหยแล้วยังทำให้สารหอมระเหยบางชนิดสูญเสียไปพร้อมกับน้ำภายในอาหารด้วย และอาจเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลระหว่างการเก็บรักษาหากยังมีการทำงานของเอนไซม์เหลืออยู่ ซึ่งสามารถป้องกันการทำงานของเอนไซม์ได้โดยนำไปลวกและรมแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์หรือวิตามินซี แต่แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตกค้างทำให้สีเปลี่ยนไปและผู้บริโภคบางคนอาจเกิดอาการแพ้ได้ เช่น มีอาการหอบหืด (วิล, 2545) ทั้งนี้การรมด้วยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะช่วยป้องกันการเกิดออกซิเดชันของแคโรทีนอยด์ในแครอทที่ไม่ผ่านการลวกก่อนนำไปอบแห้งได้ แครอทที่ไม่ได้ลวกแต่แช่ในสารละลายซัลไฟต์แล้วนำไปอบแห้งจะมีปริมาณแคโรทีนอยด์มากกว่าแครอทที่อบแห้งโดยไม่ผ่านการลวกและแช่ซัลไฟต์ถึง 2.9 เท่า ถึงแม้แครอทจะผ่านการลวกก่อนการ ทำแห้ง แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถช่วยป้องกันการเกิดออกซิเดชันของแคโรทีนอยด์ได้ และประสิทธิภาพจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์มากขึ้น สำหรับคลอโรฟิลล์ซึ่งเป็นสารสีเขียวที่พบอยู่ในผัก พบว่าระหว่างการอบแห้งปริมาณก่อนข้างคงตัวในภาวะที่มีความชื้นต่ำ การสลายตัวของคลอโรฟิลล์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ พีเอช เวลา การทำงานของเอนไซม์ ออกซิเจน และแสง สำหรับกลไกการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ คือจะเปลี่ยนเป็นฟีโอไฟติน (pheophytin) ในภาวะที่เป็นกรด และจากการศึกษาการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 ถึง 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ถึง 29 ชั่วโมง จะทำลายองค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ภายในมะเขือเทศ เช่น ไลโคปีน ปริมาณวิตามินซี และสารต้านอนุมูลอิสระอื่นๆ (Muratore *et al.*, 2005; Zanoni *et al.*, 1998) อีกทั้ง Shi *et al.* (1999) ยังพบว่าการทำแห้งมะเขือเทศด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ถึง 10 ชั่วโมง ทำให้ไลโคปีนที่อยู่ในมะเขือเทศเกิดไอโซเมอร์ไรเซชัน (isomerization) และออกซิเดชัน ซึ่งทำให้ไลโคปีนที่อยู่ในรูป trans-form เปลี่ยนเป็น cis-form มากกว่ามะเขือเทศที่ทำ

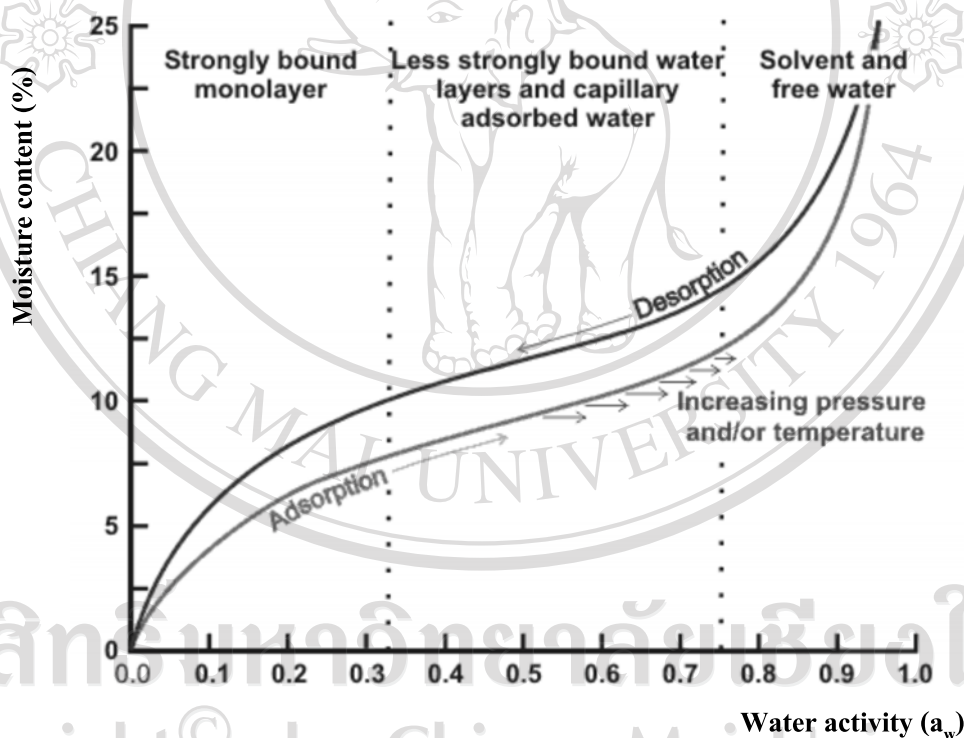
แห้งด้วยกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชัน โดยใช้สารละลายกลูโคส ความเข้มข้น 65 องศาบริกซ์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะทางกายภาพที่ดี โดยเฉพาะสีของมะเขือเทศ

#### 2.4.6 อิทธิพลของค่ากิจกรรมของน้ำ (นิธิยา, 2543)

ค่ากิจกรรมของน้ำมีบทบาทสำคัญมากต่อการแปรรูปอาหารและเก็บรักษาอาหารที่ผ่านการทำแห้ง ค่ากิจกรรมของน้ำเป็นอัตราส่วนของความดันไอน้ำของน้ำในอาหารต่อความดันไอน้ำของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน และมีผลต่อปฏิกิริยาที่ทำให้อาหารเน่าเสีย การเจริญหรือความคงตัวของจุลินทรีย์ และปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่เกิดภายในอาหารซึ่งความสัมพันธ์กับความคงตัวของอาหารปัจจุบันเป็นที่ทราบแน่ชัดแล้วว่าจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้ในอาหารที่มีปริมาณน้ำในอาหารน้อยหรืออาหารแห้ง เมื่ออาหารนั้นมีค่ากิจกรรมของน้ำต่ำกว่า 0.60 แต่ก็ยังมีปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นได้ทั้งที่มีเอนไซม์และไม่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่ง เช่น ปฏิกิริยาไลโปออกซิเดชันและปฏิกิริยาเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ เป็นต้น ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวหากเกิดขึ้นกับอาหารจะทำให้มีสี กลิ่น รสชาติ และความคงตัวเปลี่ยนไปด้วยระหว่างการแปรรูปและเก็บรักษา ดังนั้นจึงใช้ค่ากิจกรรมของน้ำเป็นตัวชี้บ่งหรือทำนายการเน่าเสียของอาหารและเป็นตัวกำหนดการสิ้นสุดอายุการเก็บรักษาของอาหารที่ทำแห้ง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งที่สามารถเก็บรักษาได้นานและมีความคงตัวดี

ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) กับค่ากิจกรรมของน้ำเรียกว่า sorption isotherm ซึ่งเป็นคุณลักษณะสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการทำอาหารแห้งและการเก็บรักษา รูปแบบของ isotherm จะเป็นตัวชี้บ่งความคงตัวระหว่างการเก็บรักษาของอาหารแห้งซึ่งสามารถนำไปกำหนดลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งที่สัมพันธ์กับวิธีการทำแห้งอาหารที่ใช้ ชนิดของภาชนะบรรจุและภาวะที่ใช้เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างเช่น ผลิตภัณฑ์ที่ทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็งจะดูดซับไอน้ำได้มากกว่าการทำแห้งแบบสุญญากาศ ค่ากิจกรรมของน้ำมีอิทธิพลต่อทั้งไลโปออกซิเดชันและปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ เช่น การเกิด autoxidation ของลิปิดจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อมีค่ากิจกรรมของน้ำต่ำ และอัตราเร็วจะลดลงเมื่อค่ากิจกรรมของน้ำเพิ่มมากขึ้นจนถึง 0.30 - 0.50 และการเกิด autoxidation ของลิปิดจะเพิ่มมากขึ้นอีกหลังจากค่ากิจกรรมของน้ำสูงกว่า 0.50 ส่วนปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค่ากิจกรรมของน้ำอยู่ในช่วง 0.40 - 0.60 และจะเกิดช้าลงเมื่อค่ากิจกรรมของน้ำสูงหรือต่ำกว่าช่วงนี้และยังขึ้นอยู่กับธรรมชาติของอาหาร (โดยเฉพาะอาหารที่มีกรดอะมิโนและน้ำตาล เป็นองค์ประกอบ) พีเอชและค่ากิจกรรมของน้ำด้วย ที่สำคัญคือ ช่วงค่ากิจกรรมของน้ำที่เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลน้อยที่สุดจะเกิด autoxidation ของลิปิดมากที่สุด

โดยทั่วไป sorption isotherms แบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนแตกต่างกันตามปริมาณความสัมพันธ์ระหว่างน้ำและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพ ส่วนที่ 1 เป็นส่วนที่มีปริมาณความชื้นต่ำ มีค่ากิจกรรมของน้ำในช่วง 0-0.25 เส้นกราฟจะมีลักษณะค่อนข้างชัน เป็นน้ำซึ่งยึดอยู่กับสารประกอบต่างๆ ในอาหาร และกำจัดออกจากอาหารได้ยากที่สุด ส่วนที่ 2 ส่วนที่มีปริมาณน้ำปานกลาง มีค่ากิจกรรมของน้ำในช่วง 0.25-0.75 เส้นกราฟจะมีลักษณะค่อนข้างราบ ในส่วนนี้จะประกอบด้วยน้ำจากส่วนที่ 1 รวมกับน้ำที่ก่อกันระกับน้ำเอง และน้ำที่ก่อกันระกับอาหาร เกิดเป็นมัลติเลเยอร์บนผิวของอาหาร และจะมีพลังงานระหว่างพันธะน้อยกว่าส่วนที่ 1 สำหรับส่วนที่ 3 เป็นส่วนที่มีความชื้นสูงมีค่ากิจกรรมของน้ำสูงกว่า 0.75 ประกอบด้วยน้ำอิสระจำนวนมาก สามารถกำจัดออกได้ง่ายซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย ใช้สำหรับการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการเจริญของจุลินทรีย์ แสดงดังภาพที่ 2.12



ภาพ 2.12 sorption isotherms

ที่มา: Fennema (1996)

#### 2.4.7 จุลินทรีย์ (นิธิยา, 2543)

ระหว่างการทำแห้งอาจมีจำนวนจุลินทรีย์บางส่วนลดจำนวนลงหรือถูกทำลาย แต่ก็อาจมีจุลินทรีย์บางส่วนสามารถมีชีวิตรอดอยู่ได้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการ ทำ

แห้ง ค่ากิจกรรมของน้ำของอาหาร ที่ผ่านการทำแห้ง ค่าพีเอช สารกันบูด ออกซิเจน และอื่นๆ ดังนั้นการมีชีวิตรอดของจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสียจึงเป็นปัญหาและจะเป็นปัญหามากยิ่งขึ้น หากพบว่าจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคปนเปื้อนอยู่ด้วย

ในการทำแห้งอาหารวิธีการหรือสถานะที่ใช้ในการทำแห้งมักคำนึงถึงการรักษาสี กลิ่น และรสชาติของธรรมชาติไว้ให้มากที่สุด ดังนั้นจึงพยายามใช้อุณหภูมิต่ำที่สุดหรือระยะเวลาสั้นที่สุด ไม่ว่าจะใช้กระบวนการทำแห้งวิธีใดที่อุณหภูมิต่ำ หรือที่อุณหภูมิสูงก็ไม่สามารถทำลาย จุลินทรีย์ที่มีอยู่ในอาหารได้อย่างสมบูรณ์ และมีบางส่วนสามารถมีชีวิตอยู่รอดได้ โดยเฉพาะ จุลินทรีย์ที่ทนความร้อนได้ดี ได้แก่ สปอร์ของแบคทีเรีย ยีสต์ราและ thermophilic bacteria ดังนั้นจึงอาจมีการเจริญของจุลินทรีย์เกิดขึ้นก่อนการทำแห้ง โดยเฉพาะจุลินทรีย์ก่อโรคหรือสร้าง สารพิษซึ่งเป็นอันตรายแก่ผู้บริโภค การลวกเป็นวิธีหนึ่งในการลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ บนผิวของอาหาร อีกทั้งยังช่วยทำลายเอนไซม์ที่ทำให้เกิดสีน้ำตาลและปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วย ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อจำนวนจุลินทรีย์ของอาหารที่ทำแห้งคือ จำนวนจุลินทรีย์เริ่มต้น ในวัตถุดิบที่ใช้และการเตรียมผลิตภัณฑ์ก่อนทำการอบแห้ง รวมทั้งอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ทำแห้ง ปริมาณความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ ความสะอาด และสุขอนามัยระหว่างกระบวนการ

## 2.5 การเก็บรักษา

โดยทั่วไปผู้ผลิตสินค้าประเภทอาหารมักไม่ให้ความสำคัญเรื่องภาชนะที่ใช้บรรจุ อาหาร แต่จะคำนึงถึงอาหารและกรรมวิธีการแปรรูป หรือวิธีถนอมอาหารเท่านั้น ส่วนภาชนะที่ใช้บรรจุ อาหาร จะใช้การบรรจุซึ่งหาง่ายและราคาถูกมาใส่อาหาร ในการปฏิบัติที่ถูกต่อนั้นก่อนที่จะวาง แผนการผลิต ควรกำหนดภาชนะที่จะใช้บรรจุตลอดจนวิธีการบรรจุ โดยถือว่าการบรรจุเป็น ขั้นตอนที่สำคัญยิ่งของการผลิตเช่นกัน ทั้งนี้เพื่อให้การใช้งานของภาชนะบรรจุหรือวิธีการบรรจุ เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ในบางกรณีการใช้ภาชนะบรรจุหีบห่อที่เหมาะสมจะช่วยลดเวลา ที่ใช้ในการแปรรูปอาหารได้ อาหารแห้งโดยทั่วไปเก็บรักษาไว้ที่ค่ากิจกรรมของน้ำต่ำกว่า 0.60 จะ ปลอดภัยจากจุลินทรีย์ ทั้งนี้จะต้องรักษาค่ากิจกรรมของน้ำไม่ให้เพิ่มขึ้นระหว่างการเก็บรักษา (สุคนธ์ชื่น, 2546)

การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียต่อคุณภาพของอาหารที่พบบ่อยใน ระหว่างการเก็บรักษาและขนส่ง ได้แก่ การบอบช้ำ การบวม แดกหัก เปียกน้ำ ความชื้นเพิ่มขึ้นหรือ ลดลง เป็นต้น ความเสื่อมเสียนี้สามารถแก้ไขได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยการเลือกวิธีการบรรจุให้ เหมาะสม อนึ่งการเปลี่ยนแปลงความชื้นของอาหารทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงแม้บางครั้งจะดูเหมือนเป็น การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ แต่ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความชื้นนี้มักจะเป็นการเร่งให้เกิด

การเชื่อมทางเคมีและทางจุลชีววิทยาได้ จึงมักจัดเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเชิงฟิสิกส์ การเปลี่ยนแปลงนี้นอกจากจะเกี่ยวข้องกับความชื้นของอาหารแล้ว ยังมีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็น กรด -ด่าง หรือความเข้มข้นของสารละลายในอาหาร การเสื่อมเสียคุณภาพของอาหาร เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเชิงฟิสิกส์ที่สำคัญ ได้แก่ การเกาะรวมกันของอาหารผง การละลายของสารอาหารผงลดลง การเกิดผลึกแยกตัวออกจากอาหาร การแยกชั้นของอิมัลชัน (emulsion) และการหุดตัวของเจล (งามทิพย์, 2550)

ปัจจุบันมีการนำวิทยาการเกี่ยวกับการนำแก๊สมาใช้สำหรับกระบวนการบรรจุผลิตภัณฑ์อาหารมากขึ้น การใช้แก๊สบรรจุผลิตภัณฑ์อาหารจะแตกต่างกันออกไปขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์ แต่ก็เพื่อเป้าหมายหลักเดียวกันก็คือชะลอหรือป้องกันการเสื่อมเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารนั้น ก่อนเวลาอันควรสามารถจำแนกวัตถุประสงค์ออกเป็น 6 ประการสำคัญคือ (งามทิพย์, 2537)

ก. ชะลอหรือป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเคมีในอาหาร จะทำให้อาหารเหม็นหืน เมื่อเกิดกับวิตามินจะทำให้คุณค่าทางอาหารลดลงหรือสีของอาหารซีดจางลง เป็นต้น

ข. ชะลอหรือป้องกันการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสียคุณภาพอาหาร

ค. ชะลออัตราการหายใจของพืช โดยทั่วไปพืชจะหายใจช้าลงเมื่อความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนในบรรยากาศลดลง และหรือความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์เพิ่มขึ้น โดยทั่วไปความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนไม่ควรต่ำกว่าระดับที่ผักและผลไม้จะทนได้ มิฉะนั้นจะเกิดการหมักทำให้ผักและผลไม้เน่าเสียเร็วขึ้น ส่วนความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ถ้าสูงเกินไปอาจเป็นอันตรายต่อเซลล์ของผักและผลไม้ได้ อัตราส่วนความเข้มข้นของแก๊สที่ใช้จะขึ้นกับชนิดของผักและผลไม้

ง. ชะลอหรือป้องกันการเจริญเติบโตและการ ฟ้าไข่ของหนอน แมลงต่างๆที่อาจติดอยู่ในอาหาร

จ. รักษาสีแดงของเนื้อ สารไมโอโกลบินเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเจนชัน (oxygenation) จะได้สารชื่อออกซิไมโอโกลบิน (oxymyoglobin) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เนื้อมีสีแดง สารนี้จะเสถียรขึ้นเมื่ออยู่ในบรรยากาศที่มีความดันของแก๊สออกซิเจนสูง

ฉ. ป้องกันการเสียรูปทรงของผลิตภัณฑ์ เมื่อต้องการบรรจุผลิตภัณฑ์ในสภาพสุญญากาศ หากใช้ระบบสุญญากาศจะทำให้เกิดการบีบรัดของภาชนะบรรจุประเภทอ่อนตัว เช่น การแตกหักของชั้นมันฝรั่งทอด การยุบตัวของขนมปัง เป็นต้น การบรรจุภายใต้บรรยากาศของแก๊สจึงเหมาะสมกว่า และยังช่วยลดการแตกหักได้ด้วย



### 2.5.1 การบรรจุภายใต้บรรยากาศ

วิธีการบรรจุผลิตภัณฑ์ให้อยู่ภายใต้บรรยากาศของแก๊สชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิด เรียกว่า gas-exchanger packaging โดยอัตราส่วนของแก๊สชนิดต่าง ๆ นั้นจะแตกต่างกันไปจากอัตราส่วนที่พบในบรรยากาศปกติ มักเรียกการบรรจุภายใต้บรรยากาศนี้ว่า controlled atmosphere packaging สามารถจำแนกกระบวนการบรรจุนี้ออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ (งามทิพย์, 2537)

#### ก. Controlled Atmosphere Packaging (CAP)

การบรรจุผลิตภัณฑ์ให้อยู่ภายใต้บรรยากาศที่มีอัตราส่วนของแก๊สชนิดต่างๆ แตกต่างไปจากบรรยากาศปกติ และอัตราส่วนนี้จะคงที่ตลอดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์

#### ข. Modified Atmosphere Packaging (MAP)

การบรรจุผลิตภัณฑ์ให้อยู่ภายใต้บรรยากาศที่มีอัตราส่วนของแก๊สชนิดต่างๆ แตกต่างไปจากบรรยากาศปกติ และอัตราส่วนนี้อาจเปลี่ยนแปลงได้ตามระยะเวลา โดยขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์ ที่บรรจุ อัตราส่วนของแก๊สแรกเริ่ม วัสดุบรรจุที่ใช้ และสถานะการเก็บผลิตภัณฑ์นั้นๆ

#### ค. Gas-flush packaging

การบรรจุผลิตภัณฑ์ให้อยู่ภายใต้บรรยากาศของแก๊สชนิดใดชนิดหนึ่ง เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือแก๊สไนโตรเจน โดยการพ่นแก๊สนั้นๆ เข้าไปแทนที่อากาศภายในภาชนะ วิธีนี้นิยมใช้สำหรับใส่แก๊สออกซิเจนในภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น อาหารที่มีไขมันมาก น้ำผลไม้ เป็นต้น

#### ง. Vacuum packaging

การบรรจุผลิตภัณฑ์ให้อยู่ภายใต้สุญญากาศ โดยการดึงเอาอากาศภายในภาชนะหรือภายในผลิตภัณฑ์ออกไป และไม่มีแก๊สใดๆ เข้าไปแทนที่ ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความดันภายในและภายนอกภาชนะ สังเกตได้จากการหดตัวของภาชนะบรรจุชนิดอ่อนตัว (flexible form) หรือการยุบตัวของภาชนะประเภทกึ่งคงรูป (semi-rigid form) โดยทั่วไปความดันภายในภาชนะจะมีค่าประมาณ 0.5-8 ทอร์ (Torr) ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์และระบบการบรรจุ

แก๊สที่ใช้สำหรับแทนที่อากาศภายในบรรจุภัณฑ์มีด้วยกันหลายชนิด เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไนโตรเจน และแก๊สออกซิเจน เป็นต้น แต่แก๊สที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมอาหารคือ แก๊สไนโตรเจน ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

ก. เป็นแก๊สเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี จึงมักใช้ในการแทนที่แก๊สออกซิเจนเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในอาหาร นอกจากนี้ยังนิยมใช้แก๊สไนโตรเจนเพื่อรักษาระดับความดันในภาชนะบรรจุ ป้องกันการยุบตัวของภาชนะ และการแตกหักเสีรูปร่างของผลิตภัณฑ์

- ข. ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส จึงสามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์อาหารทุกชนิด
- ค. ละลายในน้ำและไขมันได้น้อยมาก

### 2.5.2 ชนิดของบรรจุภัณฑ์

บรรจุภัณฑ์อาหารมีบทบาทสำคัญในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อรักษาคุณภาพของอาหารให้คงอยู่ การเลือกบรรจุภัณฑ์ควรคำนึงถึงคุณสมบัติเฉพาะของบรรจุภัณฑ์และวิธีการบรรจุ เพื่อรักษาคุณภาพของอาหารหลังผ่านกระบวนการแปรรูปให้คงอยู่ตลอดการเก็บรักษา

โพลีเอทิลีน (polyethylene: PE) เป็นพลาสติกที่มีความยืดหยุ่นดี แบ่งได้เป็น โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene: LDPE) และโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene: HDPE) โพลีเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีความต้านทานการกัดกร่อนดี ความแข็งแรงต่ำ กันความชื้นได้ดี ยึดตัวได้ดี และทนต่อแรงฉีกขาดได้ ป้องกันการซึมผ่านแก๊สได้ดี สำหรับโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงเป็นที่นิยมใช้มากเพราะรับแรงกระแทกได้ดี น้ำหนักเบา ดูดซับความชื้นน้อย มีความแข็งแรงสูง ไม่เป็นพิษ สามารถใช้บรรจุอาหารได้

โพลีโพรพิลีน (polypropylene: PP) มีคุณสมบัติคล้ายกับโพลีเอทิลีน ทนความร้อนได้สูงกว่าแต่มีความเปราะที่อุณหภูมิต่ำ ใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์

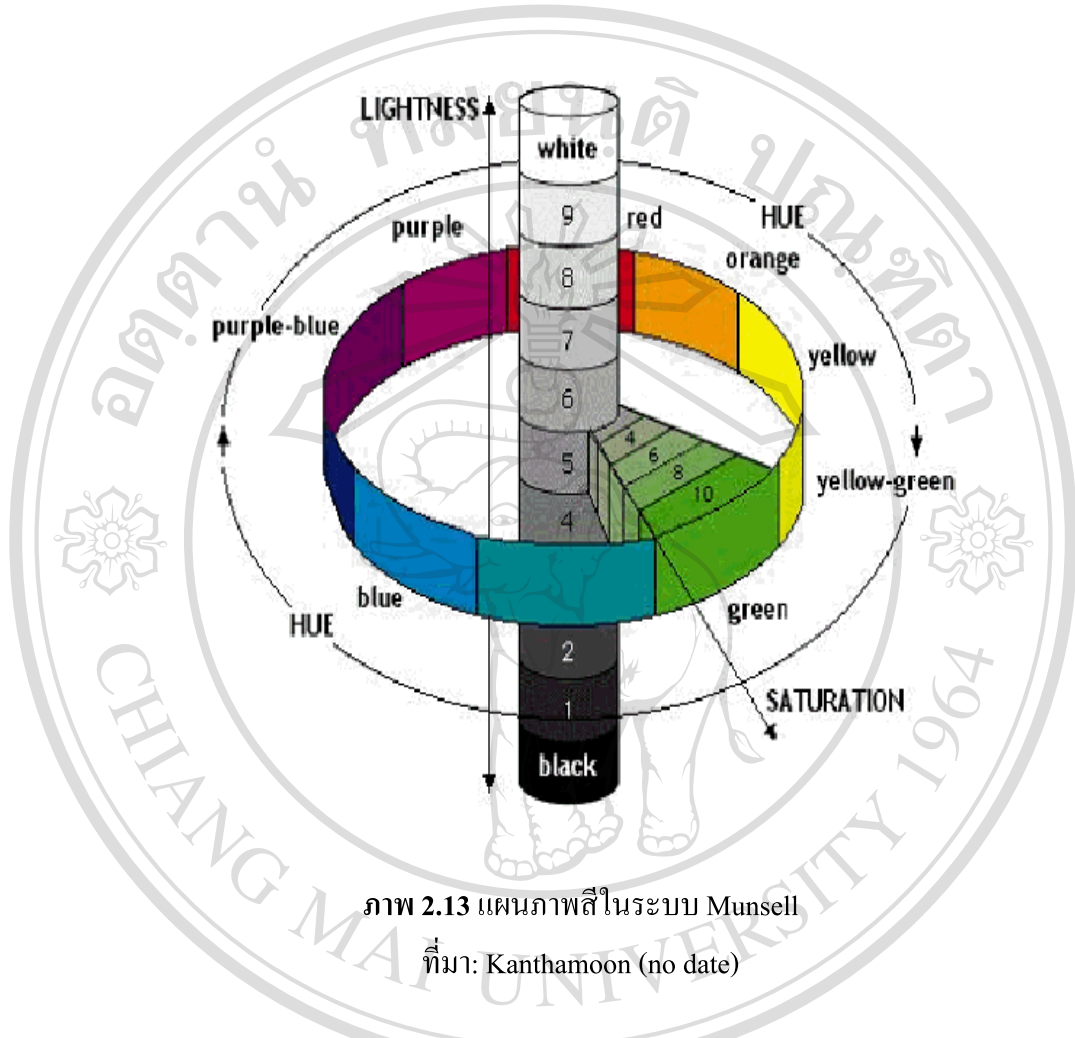
โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene Terephthalate: PET) เป็นพลาสติกโพลีเอสเทอร์ชนิดหนึ่ง สามารถป้องกันการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำได้

อลูมิเนียมเปลว เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการป้องกันการแพร่ผ่านของความชื้น ออกซิเจน สารหอมระเหย แก๊ส และยังมีคุณสมบัติที่ดีในการป้องกันแสงอีกด้วย ดังนั้นจึงมักใช้อลูมิเนียมเปลว และลามิเนทอลูมิเนียมเปลว เมื่อต้องการให้อาหารมีอายุการเก็บรักษาที่นานขึ้น (Manuela and Felix, 2007)

### 2.6 ระบบการวัดสี

สีแสดงถึงคุณภาพของอาหารและผลิตผลทางการเกษตรโดยตรง เป็นปัจจัย ที่สำคัญซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพการยอมรับของผู้บริโภค ถ้าสีของอาหารหรือผลิตผลทางการเกษตรผิดปกติ ผู้บริโภคส่วนใหญ่จะไม่ยอมรับ และอาจไม่คำนึงถึงคุณภาพด้านอื่น เช่น กลิ่น รสชาติ หรือ เนื้อสัมผัส ตาของมนุษย์เป็นเครื่องมือวัดค่า สีที่สามารถแยกแยะสีได้มากที่สุด แต่มนุษย์ไม่สามารถจดจำและอธิบายค่าสีที่เห็นให้เข้าใจตรงกันได้ จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดค่าสีออกมาในเชิงปริมาณ การวัดค่าของสีจะระบุค่าสีของวัตถุเป็น 3 ค่า เพื่อความชัดเจน ได้แก่ ระบบ Munsell ระบบ Hunter Lab และ CIE ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ก. ระบบ Munsell การบอกค่าสีในระบบนี้ใช้ค่า 3 ค่า คือ Hue, Value และ Chroma แสดง  
 ดังภาพที่ 2.13



ภาพ 2.13 แผนภาพสีในระบบ Munsell

ที่มา: Kanthamoon (no date)

- Hue (เฉดสี) เป็นชื่อของสีหลักที่แตกต่างกัน ในระบบ munsell จะแบ่งออกเป็น 5 สี คือ แดง เหลือง เขียว น้ำเงิน ม่วง
- Value (Lightness) หมายถึง ค่าแสดงความสว่างของสี หรือปริมาณแสงที่สะท้อนออกมา จากวัตถุหากมีปริมาณแสงที่สะท้อนออกมามากจะทำให้เห็นสีสว่าง ถ้าปริมาณแสงสะท้อนน้อยจะทำให้เห็นสีเข้ม หรือมืด มีค่าตั้งแต่ 0 = black (หมายถึงวัตถุดำสมบูรณ์) ถึง 10 = white (หมายถึงวัตถุขาวสมบูรณ์)
- Chroma (Saturation) คือค่าที่แสดงความบริสุทธิ์ (purity) ของสี สีที่บริสุทธิ์มากที่สุด คือ สีที่ไม่มีแสงสีเทาผสมเลย ซึ่งได้แก่สีหลัก (Hue) ทั้ง 10 สี แบ่งสเกลเป็น 0 ถึง 18 เป็นการวัดความแตกต่างของสีหลักจากสีเทาที่ lightness เดียวกัน

ข. ระบบ CIE อาศัยพื้นฐานจากการผสมแม่สีสเปกตรัม (primary spectrum) 3 สีเข้าด้วยกันคือ สเปกตรัมสีแดง สเปกตรัมสีเขียว และสเปกตรัมสีน้ำเงิน ซึ่งเป็นแม่สีในอุดมคติ ( imaging primaries) มาแทนแม่สีที่มีอยู่จริง โดยใช้สัญลักษณ์ X,Y,Z แทนสเปกตรัมสีทั้ง 3 ตามลำดับ ซึ่งเรียกว่า “tristimulus values” โดยที่ X คือ ปริมาณสีแดงที่นำมาผสม Y คือ ปริมาณสีเขียวที่นำมาผสม และยังบอกถึงค่าความสว่างซึ่งเทียบได้กับค่า Value ในระบบ Munsell Z คือ ปริมาณสีน้ำเงินที่นำมาผสม ต่อมามีการพัฒนาระบบ CIE ขึ้นใหม่ เป็นระบบ CIE  $L^*a^*b^*$  ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบเก่าโดยกำหนดค่าต่างๆดังนี้

-  $L^*$  ใช้กำหนดค่าความสว่าง (Lightness)

$L = 0$  หมายถึง วัตถุดำสมบูรณ์

$L = 100$  หมายถึง วัตถุขาวสมบูรณ์

-  $a^*$  ใช้กำหนดสีแดง หรือสีเขียว

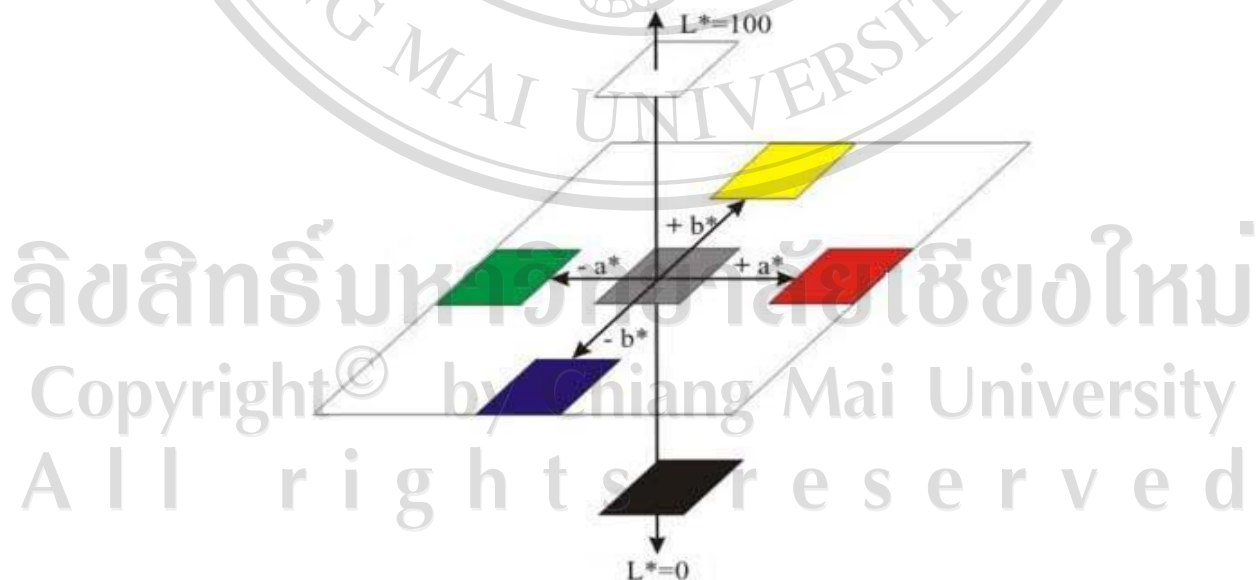
$a$  เป็นบวก หมายถึง วัตถุมีสีออกแดง

$a$  เป็นลบ หมายถึง วัตถุมีสีออกเขียว

-  $b^*$  ใช้กำหนดสีเหลือง หรือสีน้ำเงิน

$b$  เป็นบวก หมายถึง วัตถุมีสีออกเหลือง

$b$  เป็นลบ หมายถึง วัตถุมีสีออกน้ำเงิน



ภาพ 2.14 CIE Lab ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ )

ที่มา: Kanthamoon (no date)

ความสัมพันธ์ของ CIE  $L^* C^*$  และ  $h^\circ$  ในระบบสีสามารถอธิบายโดย

- $L^*$  แสดงค่า lightness ซึ่งเหมือนกับ  $L^*$  ในระบบ  $L^*a^*b^*$
- $C^*$  แสดงค่า chroma  $C^*$  เริ่มจาก 0 ซึ่งเป็นค่าที่ศูนย์กลางและเพิ่มมากขึ้นตามระยะที่ห่างจากศูนย์กลางมากขึ้น
- $h^\circ$  แสดงค่า hue angle เป็นค่ามุมที่ทำกับแกนบวก  $a^*$  โดยค่า  $0^\circ$  เท่ากับบวก  $a^*$  (สีแดง), ค่า  $90^\circ$  เท่ากับบวก  $b^*$  (สีเหลือง), ค่า  $180^\circ$  เท่ากับลบ  $a^*$  (สีเขียว) และค่า  $270^\circ$  เท่ากับลบ  $b^*$  (สีน้ำเงิน)

ซึ่งค่า  $C^*$  และ  $h^\circ$  สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{Chroma} \quad C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (17)$$

$$\text{Hue angle} \quad h^\circ = \tan^{-1}(b^* / a^*) \quad (18)$$

ค. ระบบ Hunter lab เป็นระบบที่แสดงค่า  $L a b$

- $L$  ใช้กำหนดค่าความสว่าง

$$L = 0 = \text{วัตถุดำสมบูรณ์}$$

$$L = 100 = \text{วัตถุขาวสมบูรณ์}$$

เปรียบได้กับค่า  $Y$  ในระบบ CIE หรือ ค่า Value ในระบบ Munsell

- $a$  ใช้กำหนดสีแดง หรือสีเขียว

$a$  เป็นบวก วัตถุมีสีออกแดง

$a$  เป็นลบ วัตถุมีสีออกเขียว

เปรียบได้กับค่า  $x, y$  ในระบบ CIE

- $b$  ใช้กำหนดสีเหลือง หรือสีน้ำเงิน

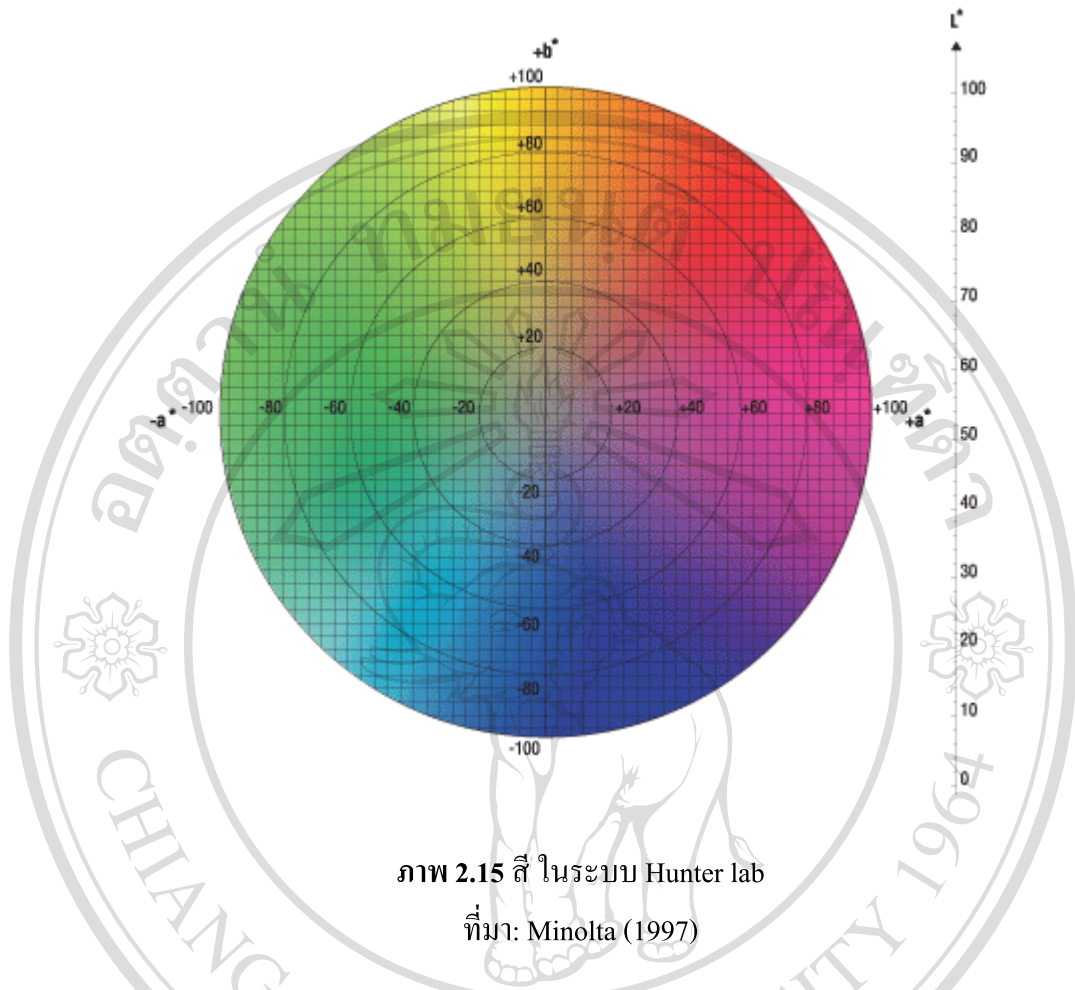
$b$  เป็นบวก วัตถุมีสีออกเหลือง

$b$  เป็นลบ วัตถุมีสีออกน้ำเงิน

เปรียบได้กับค่า  $z, y$  ในระบบ CIE

การที่ค่า  $a$  และ  $b$  มีค่าเป็นทั้งค่าบวกและลบทำให้โครงสร้างของระบบ Hunter lab สามารถ

แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังภาพที่ 2.15



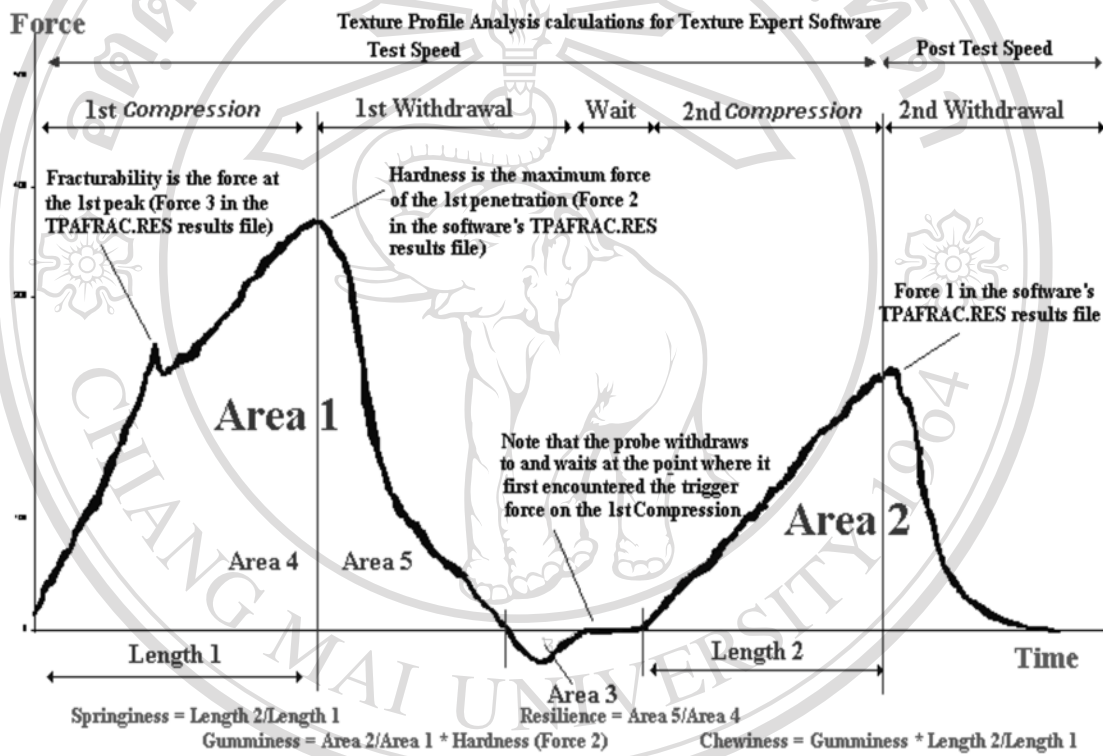
ภาพ 2.15 สี ในระบบ Hunter lab  
ที่มา: Minolta (1997)

## 2.7 ลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร

ลักษณะเนื้อสัมผัส ลักษณะปรากฏและกลิ่นรส คือ องค์ประกอบหลักที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจถึงคุณภาพและการยอมรับของผู้บริโภค ซึ่งลักษณะเนื้อสัมผัสของชิ้นอาหารได้เข้าไปมีบทบาทอย่างมากในงานวิจัย งานอุตสาหกรรมอาหาร และผู้บริโภค ผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดย่อมมีลักษณะเนื้ออาหารเฉพาะและแตกต่างกัน เช่น มะม่วงสุก ลูกท้อ ลูกพลัม มีลักษณะเนื้อนุ่ม (soft) ข้าวโพดหวานมีลักษณะเนื้อชุ่มน้ำหรือฉ่ำ (juicy) มันฝรั่งทอดลักษณะมีเนื้อกรอบ (crisp) เป็นต้น ลักษณะเนื้ออาหารดังกล่าวมนุษย์สามารถรู้สึกและสัมผัสได้ด้วยมือ หรือปาก และวัดค่าโดยใช้เครื่องมือ ค่าของลักษณะเนื้ออาหารที่วัดได้นี้ สามารถนำมาเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของอาหารและบ่งบอกความอ่อน-แก่ หรือความสดของอาหารด้วย (ชยานินทร์, 2543)

การนำคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสมาประยุกต์หรือดัดแปลงให้อยู่ในรูปของเครื่องมือที่ใช้ในการวัดเนื้อสัมผัส ทำให้มีความสะดวกสบายและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น เนื้อสัมผัสของอาหารใช้เป็นตัวชี้ถึงลักษณะของส่วนประกอบและโครงสร้างภายในอาหาร ซึ่งแสดงผลออกมาในรูปแบบ

ของพฤติกรรมกรไหล หรือการสูญเสียรูปร่างของอาหารจากแรงกดจากการบดเคี้ยว หรือการกดทับของแรงจากเครื่องมือ เครื่องมือที่สร้างขึ้น ได้เลียนแบบลักษณะการเคี้ยวของมนุษย์ มีมอเตอร์ทำหน้าที่ให้ชุดทดสอบเคลื่อนที่ขึ้นลง และติดตั้งเกจเพื่อวัดแรงดันที่เกิดขึ้น ซึ่งผลการวิเคราะห์จะออกมาในรูปของกราฟแรงและเวลา ดังภาพที่ 2.16 Fracturability, Hardness, Cohesiveness, Adhesiveness, Springiness, Gumminess และ Chewiness



ภาพ 2.16 ลักษณะของกราฟ TPA (Texture Profile Analysis)

ที่มา : Szczesniak (1998)

จากภาพที่ 2.16 สามารถอธิบายลักษณะของเนื้อสัมผัสได้ 7 ลักษณะคือ

1. Fracturability คือ แรงจุดแรกที่ทำให้โครงสร้างภายในชิ้นอาหารเสียหาย แต่ไม่แตกออกจากกัน แต่เดิมเรียกว่าจุด Brittleness
2. Hardness คือ แรงที่มีค่ามากที่สุดในช่วงการกดครั้งแรก (First bite)
3. Cohesiveness คือ อัตราส่วนพื้นที่ของแรงที่เป็นบวกในการกดครั้งที่สองต่อครั้งที่หนึ่ง (A1/A2) หรือความสามารถในการยึดเกาะกันภายในชิ้นอาหาร

4. Adhesiveness คือ พื้นที่ของแรงที่เป็นลบในการกดครั้งแรก ซึ่งแสดงถึงงานที่ต้องใช้ในการดึง หรือความสามารถในการยึดติดของชิ้นอาหาร

5. Springiness คือ ความสามารถของชิ้นอาหารที่กลับสู่สภาวะเดิม

6. Gumminess คือ ผลคูณของ hardness กับ cohesiveness ซึ่งแสดงถึงพลังงานที่ใช้ในการทำให้อาหารกึ่งแข็งแยกตัวออกจนถึงขั้นพร้อมที่จะกลืนได้

7. Chewiness คือ ผลคูณของ gumminess กับ springiness (เท่ากับ  $\text{hardness} \times \text{cohesiveness} \times \text{springiness}$ ) ซึ่งแสดงถึงพลังงานที่ใช้ในการเคี้ยวอาหารแข็งจนถึงขั้นพร้อมที่จะกลืน

โดยทั่วไปเครื่องมือที่ใช้ในการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารส่วนมาก อาศัยหลักเกี่ยวกับการวัดแรงต้านทานที่เกิดขึ้นในลักษณะต่างๆดังนี้

1. การกดหรืออัด (compression) หมายถึง แรงกดหรืออัดที่ทำให้มีขนาดหรือปริมาตรเล็กลงโดยมีรูปทรงเหมือนเดิม

2. การเฉือน (shearing) หมายถึง แรงที่กระทำต่ออาหาร ทำให้อาหารถูกแยกตัวออกเป็นสองส่วนหรือมากกว่าโดยส่วนหนึ่งจะเลื่อนแยกตัวออกจากเดิม

3. การตัด (cutting) หมายถึง แรงที่กระทำต่ออาหาร ทำให้อาหารขาดเป็นชิ้นส่วนแยกออกจากกัน โดยแต่ละส่วนที่ขาดแยกออกจากกันนั้นยังคงรูปเดิมอยู่

4. การฉีก (tensile strength) หมายถึง แรงที่กระทำต่ออาหาร ทำให้อาหารเกิดการฉีกขาดออกจากกัน

5. การเฉือนอัด (shear-press) หมายถึง แรงที่กระทำต่ออาหารพร้อมกันสองแรง คือ ทั้งอัดและเฉือนอาหารนั้น ไปในตัวซึ่งคล้ายการทำงานของฟันกรามขณะเคี้ยวอาหาร