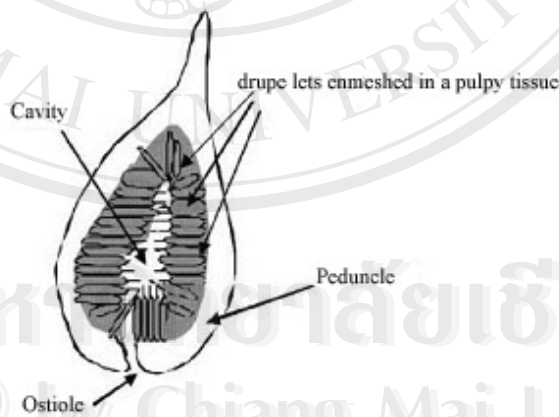


บทที่ 2

สาระสำคัญของเอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1 มะเดื่อฝรั่ง (Figs)

มะเดื่อฝรั่ง หรือ Figs (*Ficus carica*) เป็นไม้ผลในวงศ์ *Moraceae* (Mulberry family) มีถิ่นกำเนิดในเอเชียตะวันตกและขยายพันธุ์ไปในแถบทะเลเมดิเตอร์เรเนียน (Tous and Ferguson, 1996) เป็นไม้ผลยืนต้นในเขตกึ่งร้อน (Subtropical fruit) ต้องการอุณหภูมิสูงและต่ำในการเจริญเติบโต โดยอุณหภูมิสูงช่วยในการเจริญเติบโตทางกิ่งก้านและอุณหภูมิต่ำช่วยในการสร้างตาดอกและเพิ่มคุณภาพของผลโดยมะเดื่อฝรั่งมีลักษณะผลดังรูป 2.1 ข้อมูลผลผลิตมะเดื่อฝรั่งทั่วโลกในปัจจุบัน พบว่า ตุรกีเป็นประเทศที่ผลิตมากที่สุด ขณะที่กรีซเป็นลำดับที่ 2 รองลงมาและสหรัฐอเมริกาเป็นลำดับที่ 3 (ทวิศักดิ์, 2549) ซึ่งผลผลิตมะเดื่อฝรั่งนิยมนำมารับประทานสดและแปรรูปเป็นอบแห้งและบรรจุกระป๋อง คุณสมบัติเด่นทำให้มะเดื่อฝรั่งเป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและอุดมด้วยสารอาหารครบถ้วนที่เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรต กรดอะมิโนจำเป็น (Essential amino acid) วิตามิน และแร่ธาตุที่จำเป็นต่อร่างกาย (Sadhu, 1990) ดังตาราง 2.1



รูป 2.1 ภาพตัดขวางของผลมะเดื่อฝรั่ง (*F. carica* L. cv. Houraishi)

ที่มา : ดัดแปลงจาก Owino *et al.* (2004)

2.1 องค์ประกอบของมะเดื่อฝรั่ง (*Ficus carica*) สดและแห้งต่อ 100 กรัมของน้ำหนัก

| Nutrient | Units | Figs, raw (Value per 100 grams) | Figs, dried (Value per 100 grams) |
|--------------------------------|-------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Proximates | | | |
| Water | g | 79.11 | 30.05 |
| Energy | kcal | 74 | 249 |
| Protein | g | 0.75 | 3.30 |
| Total lipid (fat) | g | 0.30 | 0.93 |
| Ash | g | 0.66 | 1.86 |
| Carbohydrate, by difference | g | 19.18 | 63.87 |
| Fiber, total dietary | g | 2.9 | 9.8 |
| Sugars, total | g | 16.26 | 47.92 |
| Minerals | | | |
| Calcium, Ca | mg | 35 | 162 |
| Iron, Fe | mg | 0.37 | 2.03 |
| Magnesium, Mg | mg | 17 | 68 |
| Phosphorus, P | mg | 14 | 67 |
| Potassium, K | mg | 232 | 680 |
| Sodium, Na | mg | 1 | 10 |
| Zinc, Zn | mg | 0.15 | 0.55 |
| Copper, Cu | mg | 0.070 | 0.287 |
| Manganese, Mn | mg | 0.128 | 0.510 |
| Selenium, Se | mcg | 0.2 | 0.6 |
| Vitamins | | | |
| Vitamin C, total ascorbic acid | mg | 2.0 | 1.2 |
| Vitamin B-6 | mg | 0.113 | 0.106 |
| Folate, total | mcg | 6 | 9 |
| Vitamin A, IU | IU | 142 | 10 |
| Vitamin E (alpha-tocopherol) | mg | 0.11 | 0.35 |
| Vitamin K (phylloquinone) | mcg | 4.7 | 15.6 |
| Lipids | | | |
| Fatty acids, total saturated | g | 0.060 | 0.144 |
| Cholesterol | mg | 0 | 0 |

ที่มา: USDA Nutrient Database for Standard Reference¹⁸ (2005)

2.2 ผลไม้แห้ง

ความหมายของผลไม้แห้งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้แห้ง พ.ศ. 2532 หมายถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำผลไม้มาผ่านกรรมวิธีตามความเหมาะสม (ไม่รวมหมักดอง) แล้วนำมาลดความชื้นตามต้องการ โดยกรรมวิธีตามธรรมชาติหรือใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสม โดยมีการปรุงแต่งรสหวานด้วยน้ำตาลหรือไม่ก็ได้ การทำผลไม้แห้งเป็นการดึงเอาน้ำออกมาจากอาหาร ผลไม้แห้งจะมีปริมาณน้ำไม่เกินร้อยละ 25 มีค่า a_w (Water activity) ระหว่าง 0.65 – 0.85 (อรุณี, 2530)

2.3 การอบแห้ง

การอบแห้ง หรือการทำแห้ง (Drying หรือ Dehydration) จัดเป็นกระบวนการที่ใช้ในการแปรรูปหรือใช้ในการถนอมอาหารมาเป็นเวลานาน เนื่องจากมนุษย์ต้องการเก็บอาหารที่หามาได้เอาไว้รับประทานในช่วงที่อาหารขาดแคลนหรือช่วงนอกฤดูเก็บเกี่ยว วิธีง่ายที่สุดคือการตากแห้ง ต่อมาในปัจจุบันประชากรเพิ่มขึ้นทำให้ความต้องการสินค้าต่างๆ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว นักวิทยาศาสตร์จึงได้คิดค้นเครื่องมืออบแห้งเพื่อให้สามารถอบแห้งอาหารได้ง่ายและรวดเร็ว และได้ครั้งละจำนวนมาก ปัจจุบันเครื่องอบแห้งได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างมาก เพื่อให้เหมาะสมกับวัตถุดิบแต่ละชนิดและข้อสำคัญในการอบแห้งคือ เครื่องอบแห้งที่ใช้ควรเป็นเครื่องที่ใช้พลังงานความร้อนน้อยแต่ได้ผลผลิตสูงเพื่อลดต้นทุนในการผลิตลง

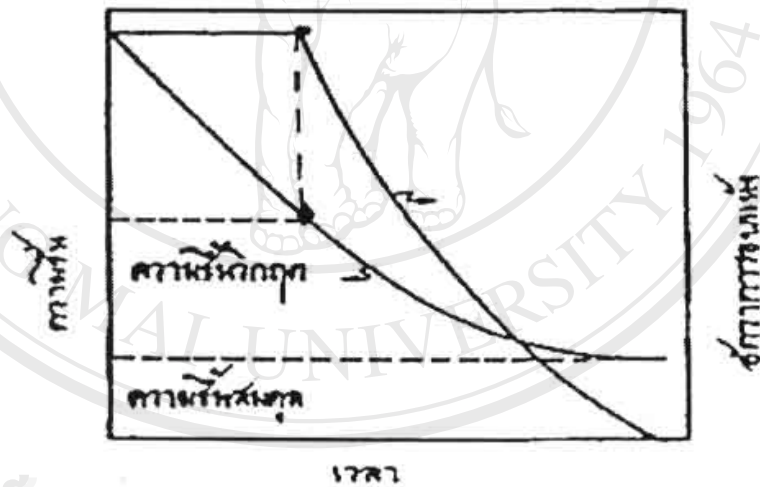
2.3.1 ทฤษฎีการอบแห้ง

การอบแห้งเป็นวิธีลดความชื้นที่มีอยู่ในวัตถุดิบ โดยทั่วไปใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งวัตถุดิบ โดยการถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปยังวัตถุดิบและการถ่ายเทมวลจากวัตถุดิบไปยังอากาศ ซึ่งการถ่ายเททั้งสองลักษณะจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กันดังตาราง 2.2

ตาราง 2.2 การถ่ายเทมวลและความร้อนระหว่างการลดความชื้น (วิล, 2546)

| บริเวณของอาหาร | ชนิดการถ่ายเท | ชนิดการถ่ายเทความร้อน |
|----------------|--|---|
| ฟิล์มบาง | การแพร่ของไอน้ำ | การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี |
| เปลือกแข็ง | การแพร่ของไอน้ำ | การนำความร้อน การเคลื่อนที่ของไอน้ำ (การพาความร้อน) |
| บริเวณการระเหย | การแพร่ของไอน้ำ การแพร่ที่ผิวการไหล เนื่องจากแรงแคปิลารี | การนำความร้อน การเคลื่อนที่ของไอน้ำ และน้ำ |
| ภายในอาหาร | การเคลื่อนที่เนื่องจากแรงแคปิลารี | การนำความร้อน |

ความร้อนส่วนใหญ่ถูกใช้ในการระเหยน้ำออกจากผิววัตถุ ถ้าผิววัตถุมีปริมาณน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก อุณหภูมิความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวจะคงที่จึงส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ด้วย ถ้าอุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วของอากาศมีค่าคงที่ เมื่อผิวของวัตถุมีปริมาณน้ำลดลงมากแล้ว อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัตถุข้อมเปลี่ยนแปลงไป โดยที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นและความเข้มข้นที่ลดลงจะส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งลดลงดังรูป 2.2 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาภายใต้อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วนิ่งของอากาศคงที่ โดยความชื้นที่อยู่ระหว่างช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเรียกว่า ความชื้นวิกฤต (สมชาติ, 2540) ดังนั้นการลดความชื้นของอาหารจนถึงระดับที่สามารถระงับการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้คือ มีค่า a_w (Water activity) ต่ำกว่า 0.70 ทำให้เก็บอาหารไว้ได้นาน (สุคนธ์ชื่น, 2546)



รูป 2.2 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และลดลง
ที่มา: สมชาติ (2540)

ผลผลิตทางการเกษตรส่วนใหญ่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุน ซึ่งสามารถแบ่งช่วงอัตราการอบแห้งได้เป็น 2 ช่วงคือ

1. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant drying rate) ในการอบแห้งวัตถุดิบที่มีความชื้นสูง ช่วงแรกของกระบวนการอบแห้งจะอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ซึ่งขั้นตอนของการอบแห้งนี้เกิดขึ้นกับวัตถุดิบที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ โดยน้ำจะเคลื่อนที่จากด้านในของวัตถุดิบออกมาด้วยอัตราเร็วเท่ากับน้ำที่ระเหยออกจากผิวหน้าวัตถุดิบ ทำให้ผิวหน้าจึงยังเปียกอยู่ขึ้นกับพารามิเตอร์ของสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งได้แก่ ความเร็วลม อุณหภูมิของอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

2. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling drying rate) เกิดขึ้นหลังจากช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และเกิดขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นของวัสดุมีค่าความชื้นต่ำกว่าความชื้นวิกฤต การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลไม่เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิววัสดุเท่านั้นแต่จะเกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุด้วย การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในเนื้อวัตถุดิบมายังบริเวณผิวหน้าจึงช้ากว่าการพาความชื้นจากผิววัตถุดิบไปยังอากาศส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลง

โดยทั่วไปปริมาณน้ำที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์มักถูกนิยามไว้ในรูปของความชื้นหรือสัดส่วนของน้ำต่อมวลวัตถุ สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ (Hall, 1980)

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis) คือ ปริมาณความชื้นแบบคิดเทียบกับน้ำหนักเปียก

$$\% MC_{wb} = \frac{W_w}{(W_w + W_d)} (100\%)$$

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis) คือ ปริมาณความชื้นแบบคิดเทียบกับน้ำหนักแห้ง

$$\% MC_{db} = \frac{W_w}{W_d} (100\%)$$

| | | |
|--------|-----------|--------------------------------------|
| โดยที่ | MC_{wb} | คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis) |
| | MC_{db} | คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis) |
| | W_w | คือ มวลของวัสดุ |
| | W_d | คือ มวลของวัสดุแห้ง |

2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง

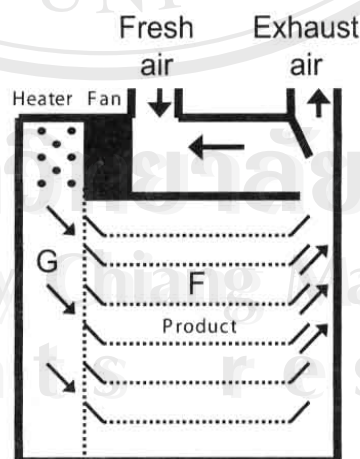
ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนย้ายน้ำจึงมีผลต่ออัตราเร็วการอบแห้ง ดังนี้

1. ธรรมชาติของอาหาร อาหารเนื้อที่โปร่งมีการเคลื่อนที่ของน้ำภายในอาหารแบบผ่านช่องแคบเร็วกว่าการแพร่ในอาหารที่มีลักษณะเนื้อแน่น ดังนั้นอาหารกลุ่มแรกจึงแห้งเร็วกว่ากลุ่มหลัง อาหารที่มีน้ำตาลสูงจะเหนียวเหนอะหนะ ซึ่งเป็นปัจจัยที่กีดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำทำให้การทำแห้งช้า อาหารที่มีการลวก นวดคลึง ทำให้เซลล์แตกจะแห้งได้เร็วขึ้น
2. ขนาดและรูปร่าง มีผลต่อพื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก เช่น อาหารที่มีรูปร่างเหมือนกัน ถ้ามีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากกว่าขนาดใหญ่จึงแห้งได้เร็วกว่า ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศที่จะเกิดการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปได้ด้วย ถ้าชิ้นเล็กมากทับถมกัน การระเหยเกิดได้เฉพาะที่ผิวสัมผัสกับอากาศจึงเกิดได้ช้าต่างๆ ที่พื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักมีมาก
3. ตำแหน่งของอาหารในเครื่องอบแห้ง อาหารจะสามารถลดความชื้นได้ดีก็ต่อเมื่อได้สัมผัสกับอากาศร้อนได้มากที่สุด
4. ปริมาณอาหารต่อถาด ถ้าปริมาณอาหารต่อถาดมากเกินไป อาหารส่วนล่างไม่ได้สัมผัสกับอากาศร้อน หรือได้รับความร้อนจากถาดแล้ว แต่ไอน้ำไม่สามารถแพร่กระจายผ่านชั้นอาหารตอนบนออกมาได้จึงแห้งช้า
5. ความสามารถในการรับไอน้ำของอากาศร้อน อากาศร้อนที่มีไอน้ำอยู่มากแล้วจะรับไอน้ำได้น้อยกว่าอากาศร้อนที่มีไอน้ำอยู่น้อย จึงมีผลต่ออัตราการทำให้แห้งคงที่
6. อุณหภูมิของอากาศร้อน ถ้าอากาศมีความชื้นคงที่ การเพิ่มอุณหภูมิของอากาศร้อนเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับไอน้ำ ซึ่งมีผลต่ออัตราการอบแห้งคงที่ และอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การแพร่ของน้ำในอาหารดีขึ้นด้วยจึงมีผลต่ออัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งจากการทดลองของสิริชัย (2539) กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศปกติที่มีอุณหภูมิ 30 °ซ ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์ ให้มีความร้อนของอากาศที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 60 - 70 °ซ และมีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 15 - 20% จะสามารถระเหยน้ำได้มากขึ้น
7. ความเร็วของอากาศร้อน อากาศร้อนทำหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปได้ด้วย ดังนั้นเมื่อความเร็วอากาศร้อนเพิ่มขึ้นการเคลื่อนย้ายไอน้ำก็จะเกิดขึ้นได้ดี (สุคนธ์ชัน, 2539)

2.3.3 ระบบการอบแห้งแบบถาด

เครื่องอบแห้งแบบถาด (Tray dryers) นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการและโรงงานต้นแบบ เนื่องจากใช้พื้นที่ในการวางน้อย ดังรูป 2.3 ประกอบด้วยห้องภายในที่บรรจุถาดความชื้นและความร้อนและมีถาดวางซ้อนกันเป็นชั้นๆ แต่ละถาดบรรจุชิ้นอาหารขนาดไม่เกิน 1 – 6 เซนติเมตร (Ramaswamy and Marcotte, 2006) โดยอากาศร้อนจะไหลเวียนอยู่ในตู้ที่ความเร็วลม 0.5 -5 เมตร/วินาที/เมตร² และมีระบบท่อเพื่อนำลมร้อนขึ้นไปด้านบนผ่านแต่ละถาดทำให้ลมร้อนกระจายไปอย่างสม่ำเสมอ อาจมีการติดตั้งเครื่องทำความร้อนเพิ่มด้านข้าง หรือด้านบนเพื่อเพิ่มอัตราการอบแห้ง (วิไล, 2546) ส่วนปัญหาของเครื่องอบแห้งชนิดนี้ที่พบบ่อยคือ การอบแห้งที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการกระจายลมไม่ทั่วถึง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่บริเวณทางเข้าของลมมีความแห้งมากกว่าที่ทางออกของลม สามารถแก้ไขได้โดยการสลับถาดหรือกลับทิศทางของลม แต่เครื่องอบแห้งชนิดนี้สามารถอบแห้งวัตถุดิบได้หลายชนิดจึงถูกใช้อย่างแพร่หลายในโรงงานอาหาร

หากการอบแห้งที่ไม่มีการควบคุมที่ดีทั้งด้านอุณหภูมิ ระยะเวลาในการอบ และความหนาของชั้นอาหารที่บรรจุอยู่บนถาด ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้จะมีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ เกิดการเสื่อมคุณภาพ เช่น สีเปลี่ยนไม่เป็นที่ต้องการ เกิดการหดตัวของอาหาร (Shrinkage) เกิดการแข็งของผิว (Case hardening) และประสิทธิภาพการกินรูปไม่ดี อย่างไรก็ตามปัญหาเหล่านี้แก้ไขได้โดยการปฏิบัติขั้นต้น (Pretreatment) เช่น การแช่ในสารเคมีเพื่อให้สีของผลิตภัณฑ์คงเดิมมากที่สุด หรือการทำแห้งโดยวิธีออสโมติก (Osmotic dehydration) เพื่อลดปริมาณความชื้นเริ่มต้นของอาหารก่อนการอบแห้ง ทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง (พิไลรัก, 2541)



รูป 2.3 ลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบถาด

ที่มา: Ramaswamy and Marcotte, (2006)

2.3.4 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างการอบแห้ง

1. **ผลของการอบแห้งที่มีต่อคุณค่าอาหาร** การอบแห้งจะระเหยไ้ความชื้นหรือน้ำออกจากอาหาร และเพิ่มความเข้มข้นขององค์ประกอบของอาหาร เช่น แป้ง ไขมัน โปรตีน การถนอมอาหารโดยวิธีอบแห้งจะทำให้คุณภาพลดลงโดยเฉพาะวิตามินที่ละลายน้ำจะสูญเสียไปกับน้ำจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และถ้ามีการลวกหรือแช่สารเคมีก่อนการอบแห้งเพื่อหยุดปฏิกิริยาเอนไซม์ วิตามินจะลดลงอีก และการตากแดดแห้งวิตามินจะลดลงไปมากกว่าการอบแห้งโดยใช้เครื่องมืออบแห้ง คือ การอบแห้งโดยวิธีการตากแห้งไม่สามารถควบคุมปัจจัยต่างๆ ได้ เช่น ความชื้น อากาศ แสงแดด และ อุณหภูมิ ส่วนการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งจะสามารถควบคุมปัจจัยต่างๆ ดังกล่าวได้

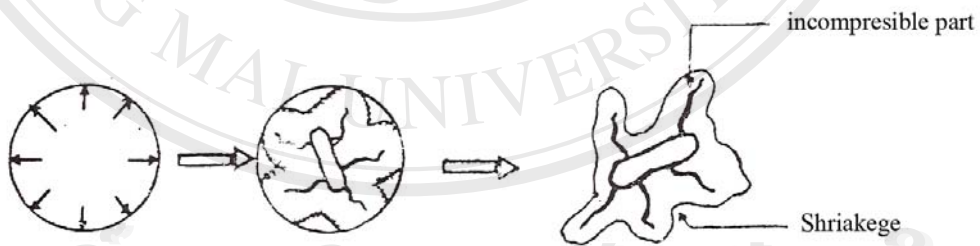
2. **ผลของการอบแห้งที่มีผลต่อคาร์โบไฮเดรต** การทำให้อาหารแห้งมีผลต่ออาหารพวกคาร์โบไฮเดรต จะมีปัญหาเรื่องการเกิดการเปลี่ยนสีของผลไม้ตากแห้งซึ่งเกิดจาก Non-enzymatic browning reaction ซึ่งปฏิกิริยานี้เกิดจากปฏิกิริยาของกรดอะมิโนในผลไม้กับน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาล การป้องกันโดยการใส่สารเคมีกำซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) หรือโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ และการรมควันจะสามารถควบคุมปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในอาหารแห้งได้ แต่อาหารนั้นต้องมีความชื้นต่ำมากๆ โดยอาหารอบแห้งจะเกิดสีน้ำตาลถ้าอาหารนั้นมีความชื้นประมาณ 30%

3. **ผลของการอบแห้งที่มีผลต่อเอนไซม์** กิจกรรมของเอนไซม์จะหยุดทำงานเมื่อใช้ความร้อนถึงอุณหภูมิ 100 °ซ เวลา 1 นาที แต่ถ้าใช้ความร้อนในการอบแห้งในกระบวนการ Dehydration หรือ Drying ปฏิกิริยาของเอนไซม์จะทนทานถึง 204 °ซ ดังนั้นในการอบแห้งในกระบวนการ Dehydration หรือ Drying จึงต้องลวกน้ำร้อนก่อนหรือใช้สารเคมี เพื่อหยุดยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์ที่จะนำไปอบแห้ง ปฏิกิริยาของเอนไซม์ขึ้นอยู่กับความชื้นของอาหาร ถ้าความชื้นในอาหารลดลงปฏิกิริยาก็ลดลงด้วย แต่อัตราเร็วของเอนไซม์ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเอนไซม์และอาหาร ถ้าความชื้นลดลงต่ำกว่า 1% ปฏิกิริยาของเอนไซม์จะไม่เกิดขึ้น

4. **ผลของการอบแห้งที่มีต่อจุลินทรีย์** จุลินทรีย์เป็นสาเหตุของการทำให้อาหารเสียหายหรือเน่าเสีย การลดความชื้นในอาหารให้เหลือน้อยที่สุดทำให้อาหารไม่เสียหายและเก็บไว้ได้นาน ถ้าหากความชื้นน้อยกว่า 12% เชื้อราจะเจริญเติบโตได้ แต่แบคทีเรียและยีสต์จะเจริญเติบโตได้ดีถ้าความชื้นมากกว่า 30% ขึ้นไป เมื่ออบแห้งแล้วต้องเก็บใส่หีบห่อให้ดีและไม่เก็บในที่ที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงเพราะเชื้อจุลินทรีย์จะเจริญเติบโตเร็ว (กุลยา, 2540)

5. ผลของการอบแห้งต่อการสูญเสียสารสีธรรมชาติ สีเป็นปัจจัยสำคัญในการบ่งชี้คุณภาพของอาหารที่มีอิทธิพลต่อผู้บริโภค เพราะสีสามารถบ่งชี้ว่าอาหารมีคุณภาพดีเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป ซึ่งสีธรรมชาติพบในผักและผลไม้ คือ แคโรทีนอยด์และคลอโรฟิลล์ การเก็บรักษาสีธรรมชาติให้อยู่ระหว่างการอบแห้งจึงมีความสำคัญ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์เป็นที่ยอมรับและดึงดูดความสนใจของผู้บริโภค ทั้งแคโรทีนอยด์และคลอโรฟิลล์เป็นสารสีที่ไม่ละลายน้ำและละลายได้ในไขมัน แคโรทีนอยด์จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงได้โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างการอบแห้ง เพราะโครงสร้างของแคโรทีนอยด์มีพันธะคู่มาก (นิธิยา, 2545)

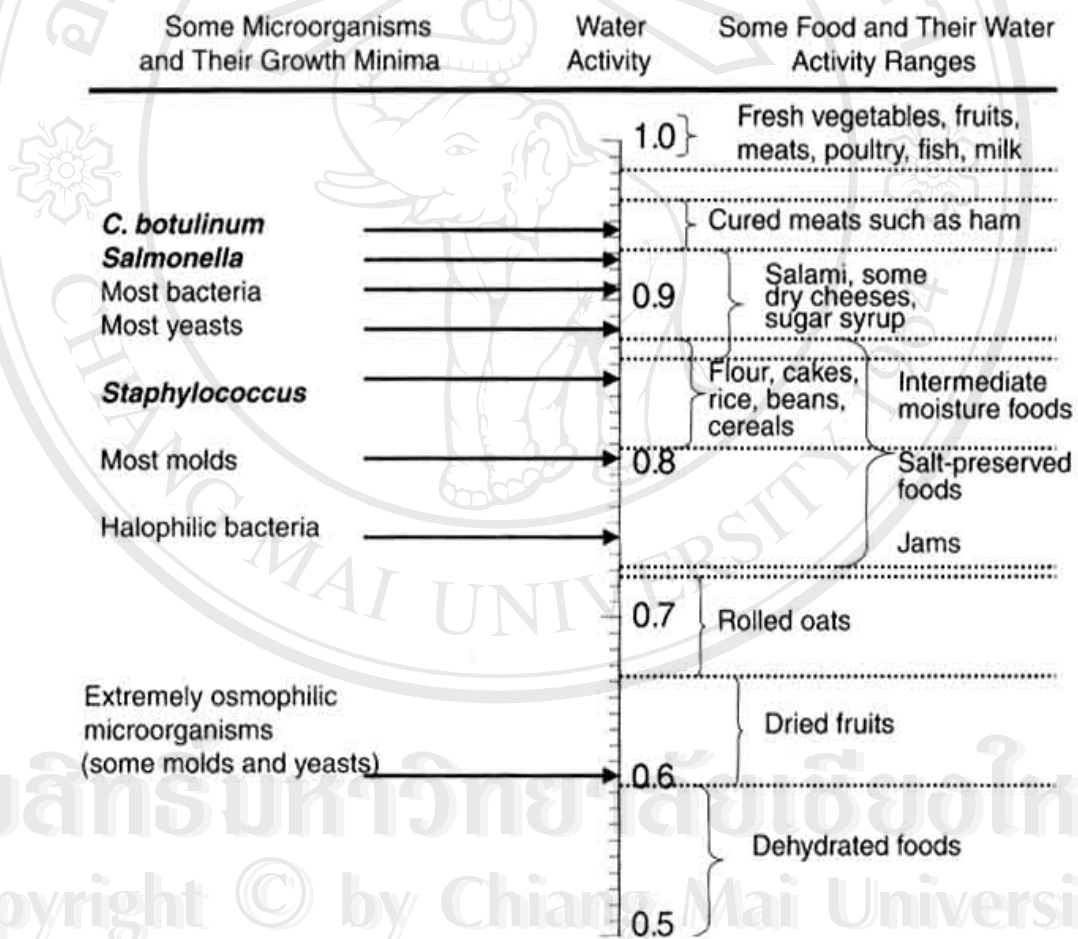
6. ผลของการอบแห้งที่มีต่อการหดตัวที่ทำให้โครงสร้างของอาหารเสียหาย โดยธรรมชาติเซลล์ในอาหารจะอยู่ในลักษณะของเซลล์ที่เต่งตึงเสมอ และผนังเซลล์จะมีคุณสมบัติในการยืดหยุ่นได้ เมื่อน้ำถูกระเหยออกไปจะทำให้เกิดช่องว่างขึ้น ซึ่งผิวของอาหารจะพยายามเข้าไปแทนที่ช่องว่างที่เกิดขึ้น ทำให้เซลล์ของอาหารหดตัว การหดตัวของผนังเซลล์ไม่สามารถหดไปเท่ากันทุกส่วนของอาหารได้ ทั้งนี้เนื่องจากธรรมชาติของอาหารจะมีส่วนที่ไม่สามารถถูกอัดไปได้ เรียกว่า Incompressible part ดังรูป 2.4 ตรงส่วนที่ไม่สามารถหดตัวเข้าไปได้ก็จะยืดตัวออก ในการยืดตัวออกผนังเซลล์จะทนต่อแรง Tensile strength ได้ขนาดหนึ่ง หากเกินกว่านั้นจะทำให้ผิวส่วนนั้นขาดเสียหายได้ (สมบัติ, 2529)



รูปที่ 2.4 ลักษณะการหดตัวระหว่างการอบแห้ง (Potter, 1968)

2.4 Water activity

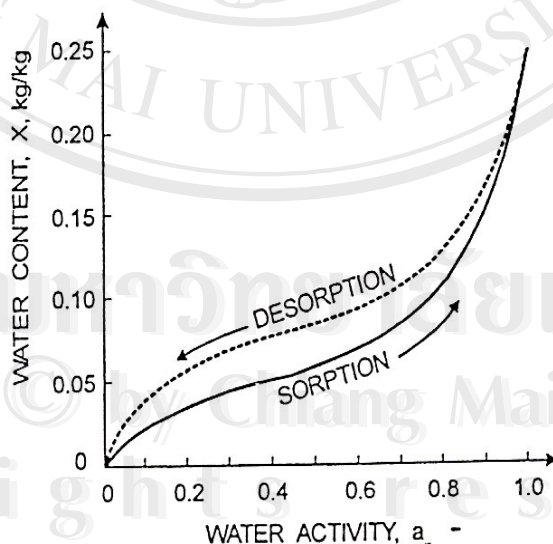
Water activity (a_w) หมายถึง ปริมาณน้ำอิสระ (Free water) ที่มีอยู่ในอาหารเป็นน้ำที่ จุลินทรีย์ทุกชนิดสามารถใช้ในการเจริญเติบโต กล่าวได้ว่า a_w ของอาหารเป็นปัจจัยสำคัญในการ ควบคุมการเจริญของจุลินทรีย์ในอาหาร ซึ่ง a_w ต่ำสุดที่จุลินทรีย์แต่ละชนิดต้องการในการเจริญ เติบโตมีค่าแตกต่างกัน ดังรูป 2.5 โดย a_w ของผักและผลไม้สดมีค่าอยู่ในช่วง 0.97 – 0.99 และการ ทำแห้ง (Dehydration) ทำให้ค่า a_w ต่ำกว่า 0.7 ซึ่งจุลินทรีย์ที่ก่อโรคไม่สามารถเจริญเติบโตได้



รูป 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Water activity กับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในอาหาร

ที่มา: Ramaswamy and Marcotte, (2006)

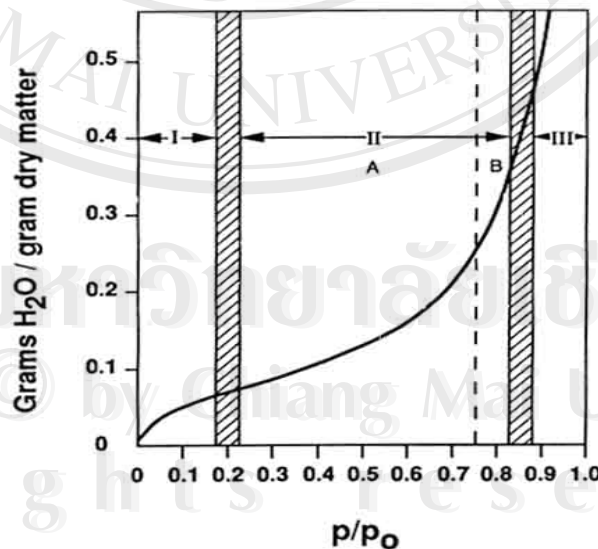
โดยทั่วไปควรหาค่า a_w เพื่อทำให้เห็นความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของอาหารได้ชัดเจนมากกว่า เพราะถ้าค่าความชื้นในอาหารเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยจะเห็นความแตกต่างของค่า a_w ได้ทันที ส่วนอาหารที่มีความชื้นสูงหรือมีปริมาณน้ำมากกว่าส่วนที่เป็นของแข็งจะมีค่า a_w เท่ากับ 1.0 และเมื่ออาหารมีความชื้นต่ำลงหรือมีปริมาณน้ำน้อยกว่าส่วนที่เป็นของแข็ง ค่า a_w จะลดลงต่ำกว่า 1.0 ถ้าหากนำค่า a_w มาเขียนเส้นกราฟกับปริมาณความชื้นในอาหารจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในอาหาร กับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหรือกับ a_w กราฟนี้เรียกว่า Sorption isotherms ซึ่งมีกระบวนการลดความชื้น (Desorption) และการเพิ่มความชื้น (Adsorption) เกิดขึ้นได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และส่งผลต่อค่า a_w ดังรูป 2.6 ซึ่งกระบวนการทั้งสองจะเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน โดยกราฟ Desorption isotherms เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทำแห้ง (Process of drying) และเป็นการวิเคราะห์ระดับความแห้งของอาหารที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นหรือความชื้นของอาหารที่ค่อยๆ ลดต่ำลงจนถึงจุดสมดุลกับความชื้นของอากาศขณะนั้น ส่วนกราฟ Adsorption isotherms เป็นการวิเคราะห์ความชื้นของอาหารที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากอาหารนั้นมีความสามารถในการดูดความชื้นจากอากาศได้ หากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และอาหารมีความสามารถในการดูดความชื้นได้มาก ทำให้เส้นกราฟ Adsorption isotherms จึงมีความชันมากกว่ากราฟ Sorption isotherms (Mujumdar, 2000 ; Ramaswamy and Marcotte, 2006)



รูป 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในอาหารและค่า Water activity

ที่มา: Mujumdar (2000)

กราฟของ Sorption isotherm โดยทั่วไปจะอยู่ในรูป Sigmoid และแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ซึ่งแตกต่างกันตามปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอาหาร หรือค่า a_w ดัง รูปที่ 2.7 ซึ่ง Zone I (Dry) เป็นน้ำไม่เคลื่อนที่และเกาะกับสารประกอบในอาหารอย่างเหนียวแน่น โดยเกิดปฏิกิริยาแรงดึงดูดระหว่าง Water-ion และ Water-dipole น้ำในส่วนนี้ไม่สามารถแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิ -40°C และไม่ละลาย Solutes ได้จึงมีพฤติกรรมเป็นส่วนหนึ่งของของแข็ง ถัดเป็นช่วงต่อระหว่าง Zone I และ Zone II เรียกว่า BET monolayer ซึ่งมีปริมาณ a_w ต่ำที่สุดของอาหารมีค่าเท่ากับ 0.2 และเป็นชั้นที่มีชั้นสูง ใน Zone II น้ำส่วนนี้มีการเชื่อมต่อน้ำระหว่างโมเลกุลของอาหารด้วยพันธะไฮโดรเจนที่สามารถเคลื่อนตัวได้น้อยกว่าน้ำโดยทั่วไปเล็กน้อยและไม่แข็งตัวที่อุณหภูมิ -40°C เช่นกัน บริเวณส่วนปลายของ Zone II น้ำทำให้อาหารพองตัวมีลักษณะยืดหยุ่นคล้ายพลาสติก (Plasticizing) จึงสามารถลดอุณหภูมิของ Glass transition ทำให้น้ำสามารถละลาย Solutes และสามารถเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ได้ ส่วนปลาย Zone II กับ III มีปริมาณน้ำมากพอทำให้ชั้น Monolayer เปื่อย เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ Glass transition ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Glass-rubber transition และโมเลกุลของน้ำส่วนใหญ่เกิดการเคลื่อนที่จึงเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ และส่วน Zone III เป็นน้ำอิสระที่มีอยู่ในเนื้อเยื่ออาหารทั้งพืชและสัตว์ สามารถกำจัดออกได้ง่าย น้ำเหล่านี้ทำหน้าที่เป็น Solvent และถูกนำมาใช้สำหรับการเจริญของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาทางเคมี ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารและอุณหภูมิ (Fennema, 1996)



รูป 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับ Water activity (p/p_0) ในอาหารที่อุณหภูมิ 20°C
ที่มา: Fennema (1996)

2.5 ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลในอาหาร

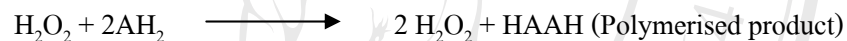
ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นในอาหารและผลิตภัณฑ์อาหารมี 2 แบบ คือ

2.5.1 ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ (Enzymatic browning reaction)

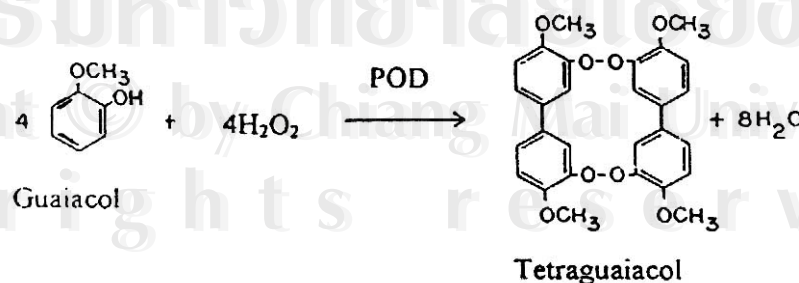
อาหารและผลิตภัณฑ์อาหารมากมายหลายชนิดมีปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ที่เกิดขึ้นระหว่างการแปรรูปและการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารมี 2 แบบคือ

2.5.1.1 เอนไซม์เปอร์ออกซิเดส (Peroxidase, POD)

เอนไซม์เปอร์ออกซิเดส (Peroxidase, POD) เป็นเอนไซม์ที่อยู่ในกลุ่มของเอนไซม์ออกซิโดรีดักเตส (Oxidoreductase) เป็นเอนไซม์ที่มีธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของโมเลกุลซึ่งสามารถออกซิไดส์สารประกอบฟีนอลได้ในสภาพที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และมีค่ากรด-ด่างที่เหมาะสมสำหรับการทำงานในช่วง 5.5 – 7.5 (Lamikanra and Watson, 2001) ปฏิกริยาของเปอร์ออกซิเดสมีลักษณะปฏิกริยาหลัก คือ Peroxidatic reaction



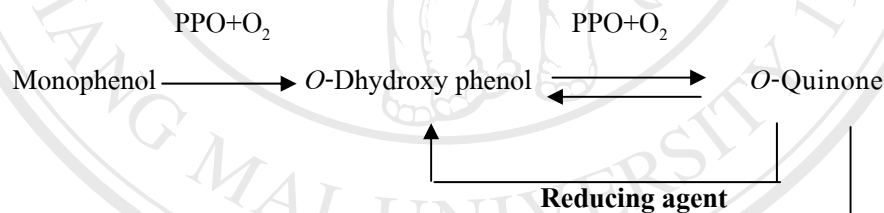
ปฏิกริยานี้เป็นปฏิกริยาหลักของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสใน *in vitro* ที่มีสารเริ่มต้นเป็นสารประกอบฟีนอล (A) เช่น พารา-ครีซอล (*p*-cresol) กัวอะคอล (Guaiacol) รีซอร์ซินอล (Resorcinol) และอะนิลีน (Aniline) เป็นต้น ดังนั้นการวัดเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสจึงยึดตามปฏิกริยาหลัก ดังตัวอย่างเช่น ปฏิกริยาการออกซิไดส์สารกัวอะคอลซึ่งเป็นตัวให้ไฮโดรเจนในขณะที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อสารทำปฏิกริยากับเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสจะได้ผลิตภัณฑ์ คือ Tetruguaiacol ซึ่งมีสีน้ำตาลดังรูป 2.8 (Whitaker, 1995)



รูป 2.8 ปฏิกริยา peroxidatic reaction ซึ่งเร่งปฏิกริยาโดยเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสในสภาพที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Whitaker, 1995)

2.51.2 เอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (Polyphenoloxidase, PPO)

เอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (Polyphenoloxidase, PPO) มีชื่อเรียกตามระบบ คือ *o*-diphenol oxygen oxidoreductase (Whitaker, 1995) โดยปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ที่เป็นของสารประกอบโมโนฟีนอลในพืช เมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศและมีเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (PPO) จะเกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชันได้เป็น *ออร์โท*-ไดฟีนอล (*o*-diphenol) และสารนี้จะถูกออกซิไดส์ต่อไปเป็น *ออร์โท*-ควิโนน (*o*-quinone) เอนไซม์ PPO อาจมีชื่อเรียกว่า โพลีฟีนอลเลส (Polyphenolase) ฟีนอลเลส (Phenolase) ไทโรซิเนส (Tyrosinase) *ออร์โท*-ไดฟีนอลออกซิเดส (*o*-diphenol oxidase) หรือ แคตาคอลออกซิเดส (Catechol oxidase) ควิโนนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่เร่งด้วยเอนไซม์ PPO นี้จะรวมตัวกันและเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบ ฟีนอลอื่นๆ หรือกับกรดอะมิโนได้เป็นสารประกอบสีน้ำตาลโดยไม่ต้องอาศัยเอนไซม์เป็นตัวเร่ง (รูป 2.9) ซึ่งมีค่ากรด-ด่างที่เหมาะสมสำหรับเอนไซม์ PPO อยู่ในช่วง 5 – 7 เป็นเอนไซม์ที่ไม่คงตัวสามารถทำลายได้ด้วยความร้อน และถูกยับยั้งได้ด้วยกรดแฮไลด์ (Halides) กรดฟีนอลิก ซัลไฟต์ คีเลตติ้งเอเจนต์ (Chelating agents) และรีดิวซิงเอเจนต์ (Reducing agent) เช่น กรดแอสคอร์บิก



| |
|--|
| : amino acid : protein : phenolic compounds : quinone |
|--|

Complex brown polymer

รูป 2.9 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ Polyphenoloxidase (Sapers, 1993)

หลักการของวิธีการวัดเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส

การวัดความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ PPO มีหลักการดังนี้

1. โดยการวัดอัตราการใช้ออกซิเจนในปฏิกิริยาออกซิเดชันของแคทีคอล
2. โดยวิธี Colorimetric วัดปริมาณของเพอพูโรแกลลลิน (Purpurogallin) ที่เกิดขึ้นจากไพโรแกลลอล (Pyrogallol) ภายในเวลา 5 นาที
3. โดยวิธี Chronometric วัดอัตราการสูญเสียวิตามินซี เนื่องจากออกซิเดชันโดยออร์โท-เบนโซควิโนน ที่เกิดจากแคทีคอล
4. โดยวัดอัตราการเกิดสีจากสารลูโค-2,6-ไดคลอโรเบนซีนอินโด-3'-คลอโรฟีนอล (Leuco-2,6-dichlorobenzenoneindo-3'-chlorophenol) ที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออร์โท-เบนโซควิโนน (นิธิยา, 2545)

การควบคุมและยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ในอาหาร

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ในอาหารส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนสี และทำให้รสชาติเปลี่ยนแปลงไปด้วย จึงมีผลเสียเพราะไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค การควบคุมไม่ให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลทำได้หลายวิธี ซึ่งต้องเลือกให้เหมาะสมกับชนิดของอาหาร

1. อุณหภูมิ

1.1 การใช้อุณหภูมิสูง เนื่องจากส่วนประกอบที่สำคัญของเอนไซม์คือ โปรตีน ซึ่งจะเสียสภาพเมื่อได้รับความร้อนสูง ดังนั้นการลวกจึงทำลายเอนไซม์ได้ แต่วิธีนี้ไม่นิยมนำมาใช้กับผลไม้ที่รับประทานในสภาพสดเพราะมีผลทำให้เนื้อสัมผัสนุ่มลง

1.2 การใช้อุณหภูมิต่ำ สามารถชะลอการเกิดสีน้ำตาลได้ โดยการชะลอการทำงานของเอนไซม์ให้ช้าลง เนื่องจากการใช้อุณหภูมิต่ำมีจุดประสงค์เพื่อลดอัตราเมแทบอลิซึมให้น้อยลงและลดอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

2. การดัดแปลงสภาพบรรยากาศ โดยการควบคุมส่วนประกอบของบรรยากาศภายในภาชนะบรรจุให้มีปริมาณออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในสัดส่วนที่เหมาะสมจะช่วยลดการเกิดสีน้ำตาลและลดการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์บางชนิดได้

3. การใช้สารประกอบซัลไฟต์ (Sulfite compounds) เป็นสารที่สามารถยับยั้ง การเกิดสีน้ำตาลได้ทั้งที่เกิดจากเอนไซม์และไม่ใช่เอนไซม์ และยังช่วยในการควบคุมเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นสารที่ราคาถูก หาได้ง่าย จึงทำให้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารหลายชนิด โดยเฉพาะกรรมควันดำไยเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา แต่การใช้สารจำพวกซัลไฟต์นี้ทำให้เกิดการแพ้อย่างรุนแรง

ได้ในคนที่เป็นหอบหืด (ประสาร, 2538) ด้วยเหตุนี้สำนักงานอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา (Food and Drug; FDA) จำกัดการใช้สารประกอบซัลไฟต์ได้เฉพาะกับอาหารบางจำพวกเท่านั้น ซึ่งมีความเข้มข้นที่ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์มีค่าเท่ากับ 5 ppm (Lecos, 1986) แต่ปัจจุบันได้มีการศึกษายับยั้งปฏิกิริยาสีน้ำตาลหลายชนิดเพื่อทดแทนสารประกอบซัลไฟต์ ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 6 กลุ่มดังนี้

กลุ่มที่ 1 สารที่มีฤทธิ์เป็นกรด (Acidulants) มีผลทำให้ค่ากรด-ด่างของสารละลายมีค่าต่ำกว่าจุดที่เหมาะสม ของเอนไซม์จึงลดประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ เช่น กรดซิตริก กรดแอสคอร์บิก

กลุ่มที่ 2 สารรีดิวซิง (Reducing agents) เป็นสารที่มีความสามารถในการใช้ไฮโดรเจนอะตอมจึงมีผลลดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากสารประกอบฟีนอลิกและช่วยลดการเกิดสารควิโนน ทำให้เกิดสารสีน้ำตาลน้อยลง เช่น กรดแอสคอร์บิก

กลุ่มที่ 3 สารจับโลหะ (Chelating agents) ทำหน้าที่จับโลหะซึ่งเป็นองค์ประกอบของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส คือ ทองแดง ทำให้ค่ากิจกรรมของเอนไซม์มีค่าลดลง เช่น ethylenediamine tetraacetic acid (EDTA)

กลุ่มที่ 4 สารประกอบเชิงซ้อน (Complexing agents) ซึ่งมีคุณสมบัติในการรวมตัวกับสารประกอบฟีนอลเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นลดลง เช่น cyclodextrin

กลุ่มที่ 5 สารยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ (Enzyme inhibitors) มีคุณสมบัติในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล เช่น 4-hexylresorcion ซึ่งเป็นสารที่มีประสิทธิภาพมากตัวหนึ่ง

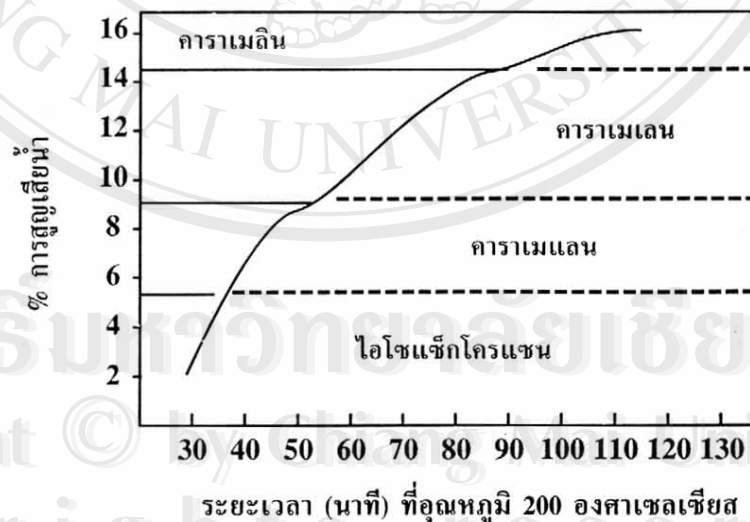
กลุ่มที่ 6 สารต้านการเกิดสีน้ำตาลอื่นๆ ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ เอนไซม์โปรติเอส น้ำผึ้ง Aromatic carboxylic, Chlorogenic acid, Cinnamic acid และ Kojic acid เป็นต้น (Garcia and Barrett, 2002)

2.5.2 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ (Non-enzymatic browning reaction)

การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลเกิดขึ้นเมื่ออาหารได้รับความร้อน มีการสูญเสียน้ำ (Dehydration) มีการสลายตัว (Degradation) และมีการรวมตัวกัน (Condensation) พัฒนาเป็นสารสีเหลืองจนถึงสารสีน้ำตาล และมีกลิ่นเฉพาะ ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลทำให้คุณค่าทางโภชนาการของอาหารลดลง ในอาหารบางชนิดเมื่อเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลทำให้มีคุณภาพด้านสี กลิ่น และรสชาติดีขึ้น แต่ก็มีอาหารบางชนิดที่ไม่พึงประสงค์จะให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

2.5.2.1 ปฏิกิริยาคาราเมลไลเซชัน (Caramelization)

ปฏิกิริยาคาราเมลไลเซชันใช้น้ำตาลเป็นสารเริ่มต้นเท่านั้น โดยปฏิกิริยานี้เป็นการใช้ความร้อนสลายโมเลกุลให้แยกออก (Thermolysis) และเกิดโพลีเมอร์ไซเคชันของสารประกอบคาร์บอนได้เป็นสารสีน้ำตาล เช่น การเข่าน้ำตาลซูโครสที่อุณหภูมิ 200 °ซ น้ำจะถูกกำจัดออกไป เกิดปฏิกิริยาดิไฮเดรชัน สารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่จะมีพันธะคู่และเป็นวงแหวน (Anhydro ring) มีความขุ่นหนืดและมีสีเข้มขึ้นซึ่งผันแปรตามระยะเวลาและระดับอุณหภูมิที่ใช้ จนกลายเป็นสารสีดำที่ไม่ละลาย เรียกว่า คาราเมลิน (Caramelin) ดังภาพที่ 2.10



รูป 2.10 สารประกอบที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาคาราเมลไลเซชัน เมื่อน้ำตาลซูโครสได้รับความร้อนสูงในระยะเวลาต่าง ๆ กันที่อุณหภูมิ 200 °ซ (นิริยา, 2543)

2.5.2.2 ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction)

ปฏิกิริยาเมลลาร์ดจะเกิดขึ้นเมื่ออาหารได้รับความร้อนมีการสูญเสียน้ำ (Dehydration) มีการสลายตัว (Degradation) และมีการรวมตัวกัน (Condensation) ซึ่งพัฒนาเป็นสารสีเหลืองจนถึงสีน้ำตาลและน้ำตาลแดง มีกลิ่นและรสชาติเฉพาะ โดยมีขั้นตอนของปฏิกิริยาเมลลาร์ดมีดังนี้

1. น้ำตาลรีดิวซ์ทั้งคีโตสและแอลโดส จะรวมตัวกับหมู่อะมิโนได้เป็นกลัยโคซิลเอมีน โดยที่น้ำตาลรีดิวซ์ คือน้ำตาลที่มีหมู่อัลดีไฮด์หรือคีโตนอิสระ ซึ่งเป็น Functional group เหลืออยู่ในโมเลกุล ทำให้สามารถรีดิวซ์สารที่เข้าทำปฏิกิริยา ส่วนน้ำตาลที่ไม่มีสมบัติดังกล่าว เรียกว่าน้ำตาลนอนรีดิวซ์ (รุ่งนภา, 2538)

2. เกิดปฏิกิริยาดิไฮเดรชันได้เป็นอิมีน (Imines หรือ Schiff base) และมีการเรียงตัวใหม่ซึ่งเรียกว่า Amadori rearrangement ได้เป็นแอลโดสเอมีน (Aldoseamine) หรือคีโตสเอมีน (Ketoseamine) เรียกว่า Amadori product ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องได้ เมื่อมีค่ากรด-ด่างเท่ากับ 5 หรือต่ำกว่า

3. เกิดปฏิกิริยา Anolization ของ Amadori products ได้เป็นไดคีโตสเอมีนหรือไดอะโนซูการ์ เช่น 3-ดีออกซีเฮกโซซูลอส

4. เกิดปฏิกิริยาดิไฮเดรชันต่อไดอะโนซูการ์ของฟูแรน (Furan) ถ้าเป็นน้ำตาลเฮกโซส ไดอะโนซูการ์ฟูแรน คือ 5-ไฮดรอกซีเมทิล-2-เฟอร์ลดีไฮด์ หรือ HMF

5. ไดอะโนซูการ์ฟูแรนวงแหวน เช่น HMF จะเกิดโพลีเมอร์หรืออย่างรวดเร็วกว่าได้เป็นสารสีน้ำตาลที่มีในโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยและไม่ละลายน้ำ ซึ่งต่างจากการเกิดคาราเมลไลเซชันซึ่งมีน้ำตาลเพียงอย่างเดียว สารสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นเรียกว่าเมลานอยดิน (Melanoidins) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาโมลต่อโมล (Mole per mole reaction)

ดังนั้นโปรตีนจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด จึงมีทั้งโพลีเมอร์ที่ละลายและไม่ละลายน้ำ และพบได้ในอาหารที่มีน้ำตาลรีดิวซ์ กรดอะมิโน โปรตีน หรือสารประกอบในโตรเจนอื่นๆ อยู่รวมกันและได้รับความร้อน ข้อเสียของปฏิกิริยาเมลลาร์ด คือ ทำให้กรดอะมิโนไลซีนซึ่งเป็นกรดอะมิโนจำเป็น ทั้งที่อยู่ในรูปอิสระและที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของโปรตีนลดน้อยลง ซึ่งทำให้คุณค่าทางโภชนาการของอาหารลดลงด้วย

การยับยั้งปฏิกิริยามอลลาร์ด

1. การควบคุมปฏิกิริยามอลลาร์ดที่ดีที่สุด คือ การกำจัดสารสับสเตรตของปฏิกิริยา น้ำตาลกลูโคสเกิดปฏิกิริยามอลลาร์ดได้ช้ากว่าน้ำตาลชนิดอื่น สามารถกำจัดน้ำตาลกลูโคสได้โดยออกซิไดซ์ให้เป็นกรดกลูโคนิกด้วยเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส
2. การล้างเป็นวิธีการง่ายๆ ที่ช่วยลดปริมาณน้ำตาลและกรดอะมิโนออกไปจากผิวนอกได้ เพราะสารเหล่านี้ละลายน้ำได้ดี
3. ภาวะที่ใช้แปรรูปอาหาร ควรใช้อุณหภูมิต่ำที่สุด เพื่อให้เกิดปฏิกิริยามอลลาร์ดน้อยที่สุด
4. ควบคุมปริมาณน้ำในอาหารให้ลดน้อยลงหรือเพิ่มปริมาณน้ำให้มากขึ้นจนสับสเตรตเจือจางลง
5. การลดค่ากรด-ด่างช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยามอลลาร์ดได้ และอาจเพิ่มค่ากรด-ด่างของผลิตภัณฑ์อาหารให้สูงขึ้นตามต้องการภายหลัง
6. ใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับ Degradation product ของอะมิโนซูการ์ ป้องกันไม่ให้เกิดการรวมตัวกันเกิดโพลีเมอร์เซชันเป็นเมลานอยดิน
7. การใช้สารเคมีช่วยยับยั้งการทำหน้าที่ของหมู่คาร์บอนิลอิสระหรือสารประกอบคาร์บอนิลอื่นๆ เช่น ใช้สารประกอบซัลไฟต์ คือ โซเดียมและโพแตสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ ยับยั้งปฏิกิริยาการรวมตัวของสารประกอบที่มีหมู่คาร์บอนิลกับเอมีน โดยหมู่ซัลไฟต์จะไปรวมตัวกับหมู่คาร์บอนิลของน้ำตาลแอลโดส และทำให้เกิดสารประกอบซัลโฟเนต ดังสมการ



8. หากสารประกอบคาร์บอนิลเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด การยับยั้งอาจทำได้โดยใช้สารต้านออกซิเดชัน สำหรับปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่งอาจใช้กรดแอสคอร์บิกได้ แต่การใช้ปริมาณกรดแอสคอร์บิกในปริมาณที่อาจทำให้ปฏิกิริยานี้เกิดได้เร็วขึ้นเนื่องจาก Oxidative degradation ของกรดแอสคอร์บิก และทำปฏิกิริยากับสารประกอบคาร์บอนิลผ่านเข้าทางแอลคอกเซนเซชัน หรือทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโน เกิดเป็นสารสีน้ำตาลได้ (นิธิยา, 2545)

ลิขสิทธิ์ © สงวนลิขสิทธิ์
All rights reserved

2.6 วัตถุเจือปนในอาหาร

ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 281 (2547) ได้ให้คำจำกัดความ วัตถุเจือปนอาหาร (Food Additives) หมายถึง วัตถุที่ปกติมิได้ใช้เป็นอาหาร หรือส่วนประกอบที่สำคัญของอาหาร ไม่ว่าจะวัตถุนั้นจะมีคุณค่าทางอาหารหรือไม่ก็ตาม แต่ใช้เจือปนในอาหาร เพื่อประโยชน์ทางเทคโนโลยีในการผลิต การบรรจุ การเก็บรักษา หรือการขนส่ง ซึ่งมีผลต่อคุณภาพ หรือมาตรฐาน หรือลักษณะอาหาร ทั้งนี้ให้ความหมายรวมถึงวัตถุที่มีได้เจือปนในอาหาร แต่มีภาชนะบรรจุไว้เฉพาะแล้วใส่รวมอยู่กับอาหารเพื่อประโยชน์ดังกล่าวข้างต้นด้วย เช่น วัตถุกันชื้น วัตถุออกซิเจน เป็นต้น

วัตถุประสงค์ของการใช้วัตถุเจือปนอาหาร เพื่อสงวนคุณค่าทางโภชนาการ ช่วยยืดอายุในการเก็บรักษา หรือช่วยให้อาหารนั้นมีคุณภาพคงที่ หรือช่วยปรับปรุงคุณภาพอาหาร ในด้านเกี่ยวกับสี กลิ่น รส ลักษณะเนื้อสัมผัส และลักษณะปรากฏ โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ หรือคุณภาพของอาหาร นอกจากนี้ยังช่วยในด้านที่เกี่ยวกับกรรมวิธีการแปรรูป การเตรียม การบรรจุ การขนส่ง และการเก็บรักษาอาหาร สารเคมีที่นิยมใช้ในอาหาร ได้แก่

1. สารประกอบซัลไฟต์ เป็นสารที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่มีประสิทธิภาพมาก ตัวอย่างของสารประกอบซัลไฟต์ที่มีการใช้มาก ได้แก่ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โซเดียมซัลไฟต์ โพแทสเซียมซัลไฟต์ โซเดียมไบซัลไฟต์ โพแทสเซียมไบซัลไฟต์ โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ และโพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ เป็นต้น การใช้สารประกอบซัลไฟต์เพื่อป้องกันการเกิดสีน้ำตาลในอาหาร ทั้งชนิดที่มีเอนไซม์และไม่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้อง สำหรับการป้องกันการเกิดสีน้ำตาลในอาหารชนิดที่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้องนั้น สารประกอบซัลไฟต์จะช่วยยับยั้งปฏิกิริยาของ PPO และทำปฏิกิริยากับสารประกอบตัวกลาง เพื่อป้องกันรงควัตถุที่เกิดขึ้น ส่วนการป้องกันการเกิดสีน้ำตาลแบบที่ไม่มีเอนไซม์เกี่ยวข้อง สารประกอบซัลไฟต์จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนิลที่เกิด ทำให้สามารถยับยั้งรงควัตถุที่จะเกิดขึ้นได้ การใช้สารประกอบซัลไฟต์ในปริมาณที่มากเกินไปจะเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค โดยเฉพาะโรคภูมิแพ้ต่างๆ เช่น โรคหืด เป็นต้น บางรายอาจเสียชีวิตได้ ดังนั้นการอนุญาตให้ใช้สารประกอบซัลไฟต์ โดยอนุญาตให้ใช้ในปริมาณที่กำหนด ดังตาราง 2.3 (ศิวาพร, 2546)

ตาราง 2.3 ปริมาณสารประกอบซัลไฟด์ที่มีการอนุญาตให้ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารชนิดต่างๆ ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 84 (2527)

| ชนิดอาหาร | ปริมาณสูงสุดไม่เกินมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม |
|--|---|
| ผลไม้แห้งและผักอบแห้ง | 2500 |
| ในอาหารชนิดอื่นเว้นแต่เนื้อสัตว์และน้ำตาลทรายดิบ | 500 |
| น้ำตาลทรายชนิดผงหรือป่น | 20 |
| เด็กโทรสโมโนไฮเดรต | 20 |
| น้ำตาลกลูโคสแห้ง | 40 |
| น้ำเชื่อมกลูโคส | 40 |
| น้ำตาลทรายขาว | 70 |
| น้ำตาลทรายบริสุทธิ์ | 20 |

การใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอาหารมีการกำหนดมาตรฐานให้ใช้ได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น ตัวอย่างค่ากำหนดที่อนุญาตให้ใช้ตามเกณฑ์ต่างๆ เช่น มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ไลน์ มอก.2089-2544 ได้กำหนดให้มีปริมาณ SO_2 ไม่เกิน 300 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 214 (พ.ศ.2543) กำหนดให้มีปริมาณ SO_2 ในเครื่องดื่มในภาชนะปิดสนิทได้ไม่เกิน 70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา(U.S.FDA) มีข้อกำหนดคือห้ามใช้กับ เนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์อาหารที่เป็นแหล่งวิตามินบี1(ไทอามีน)หรือผลไม้สด ผักสด อนุญาตให้ใช้กับน้ำผลไม้ใสหรือเข้มข้น ผลไม้แห้ง และผักแห้ง องค์การอนามัยโลก(WHO) กำหนดค่าความปลอดภัยไว้ คือ ปริมาณที่ได้รับไม่เกิน 0.7 มิลลิกรัม/คน/วัน (ADI : Acceptable Daily Intake) (สวารินทร์ ,2548)

2. กรดชนิดต่างๆ ในการใช้กรดชนิดต่างๆ มีจุดประสงค์เพื่อลดค่ากรด-ด่างเนื่องจากค่ากรด-ด่าง ที่ต่ำกว่า 4.6 สามารถควบคุมอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้ นอกจากนี้ยังมีการใช้กรดแอสคอร์บิก ซึ่งเป็นสารรีดิวซ์ (Reducing agent) ที่สามารถยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในผลไม้ชนิดต่างๆ ได้ แต่เนื่องจากกรดแอสคอร์บิกมีราคาแพง จึงมีการใช้กรดชนิดอื่นแทน เช่น กรดซิตริก ซึ่งเป็นกรดที่พบได้ในผลไม้ทั่วไป สามารถจับกับโลหะทองแดงที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส มีผลทำให้เอนไซม์ทำงานได้ช้าลง จึงส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลลดลงด้วย

3. แคลเซียม สารเคมีที่นิยมใช้ยึดอายุการเก็บรักษาผลไม้ คือ แคลเซียมอออน โดยแคลเซียมอออนสามารถทำให้เนื้อเยื่อภายในผลไม้มีความแข็งแรงได้ เพราะแคลเซียมอออนจะทำปฏิกิริยากับกรดเปคติกเกิดเป็นเปคเตตอยู่ที่ผนังเซลล์ แคลเซียมจึงช่วยรักษาสภาวะการซึมผ่านเข้า-ออกระหว่างผนังเซลล์ โดยการสร้างประจุไฟฟ้าขึ้นระหว่างผนังเซลล์สามารถลดอัตราการหายใจ นอกจากนี้การจุ่มผลไม้ลงในสารละลายที่มีแคลเซียมคลอไรด์ยังสามารถยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลได้ (จันทร์สุตา และนิธิยา, 2538)

2.7 การเก็บรักษาอาหารแห้ง

อาหารแห้งจะอยู่ในสภาพที่มีคุณภาพดี ปกติตามความต้องการของผู้บริโภคเป็นระยะเวลานานเท่าใดในระหว่างการเก็บรักษานั้น ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ โดยปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่ออายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์นั้น ได้แก่

1. ชนิดและคุณสมบัติของอาหารแห้ง อาหารแห้งแต่ละชนิดมีโครงสร้างองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน จะมีผลต่ออายุการเก็บรักษาของอาหารแห้ง นอกจากนี้อาหารแห้งยังมีคุณสมบัติในการดูดน้ำ (Hygroscopic property) ซึ่งขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น ความชื้นของอาหารแห้ง องค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างของอาหารแห้ง เป็นต้น ดังนั้นการเก็บอาหารแห้งไว้ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นในบรรยากาศสูงกว่าในอาหารแห้ง จึงทำให้น้ำภายนอกถูกดูดซึมเข้าไปในอาหารได้ โดยเฉพาะอาหารแห้งชนิดที่มีสารที่เป็นองค์ประกอบที่มีความสามารถในการดูดความชื้น เช่น น้ำตาล ผลของการดูดความชื้นเข้าไปในอาหารแห้งจะทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพ ดังนั้นเมื่อผ่านกระบวนการทำแห้งเรียบร้อยแล้วควรมีการบรรจุโดยเร็ว เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการดูดซึมของน้ำเข้าไปในอาหารแห้ง

2. สภาพแวดล้อมในการเก็บรักษาอาหารแห้ง เป็นปัจจัยหลักที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่มีอิทธิพลต่ออายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ ซึ่งสภาพแวดล้อมที่ควรคำนึงถึงในการเก็บรักษาอาหารแห้งได้แก่

2.1 ความชื้นสัมพัทธ์และออกซิเจนในบรรยากาศ อาหารที่ผ่านการทำแห้งนั้นจะมีปริมาณความชื้นต่ำ ถ้าเก็บไว้ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศปกติหรือในบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง ส่งผลให้อาหารดูดความชื้นจากบรรยากาศโดยรอบ ก่อให้เกิดการเสื่อมคุณภาพของอาหาร นอกจากนี้ออกซิเจนในบรรยากาศของสภาพแวดล้อมที่เก็บรักษาอาหารแห้งก็มีผลต่ออายุการเก็บรักษา เนื่องจากออกซิเจนเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอาหาร เช่น การเกิดออกซิเดชันของไขมันที่ทำให้เกิดการเหม็นหืน

2.2 อุณหภูมิและแสงขณะเก็บรักษา โดยทั่วไปการเก็บรักษาอาหารแห้งไว้ที่อุณหภูมิสูง ทำให้คุณภาพของอาหารแห้งเกิดการเสื่อมเสียได้ง่ายขึ้น ส่งผลต่ออายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ที่สั้นลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของอาหารนั้นก็เกิดเร็วขึ้น เช่น ปฏิกิริยาการออกซิเดชัน ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล นอกจากนี้แสงก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารแห้ง

2.3 สัตว์แมลง จุลินทรีย์ และสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ ในสภาพที่เก็บรักษาอาหารแห้ง ทำให้คุณภาพของอาหารแห้งด้อยลง

3. การยืดอายุการเก็บรักษาอาหารแห้ง เพื่อให้ทำให้อายุการเก็บรักษาของอาหารแห้งยาวนานขึ้น จำเป็นต้องควบคุมปัจจัยต่าง ๆ โดยเฉพาะในเรื่องของสภาพแวดล้อมในขณะที่เก็บรักษา ซึ่งการควบคุมปัจจัยดังกล่าวนี้สามารถปฏิบัติได้ดังนี้

3.1 การใช้บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม มีความสำคัญมากต่อการทำให้อายุการเก็บรักษาอาหารแห้งยาวนานขึ้น เนื่องจากภาชนะที่บรรจุทำหน้าที่ป้องกันสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเสื่อมเสียและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างการเก็บรักษา สภาพดังกล่าว ได้แก่ ความชื้น ออกซิเจน แสง สัตว์ แมลง จุลินทรีย์ และสิ่งปนเปื้อน ดังนั้นบรรจุภัณฑ์อาหารแห้งควรสามารถป้องกันสิ่งต่าง ๆ ดังกล่าวได้ และมีความคงทน ไม่เป็นพิษ และมีราคาเหมาะสม

3.2 การใช้ก๊าซในการบรรจุ ก๊าซบางชนิดนิยมใช้ร่วมในการบรรจุอาหารแห้งที่ค่อนข้างไวต่อการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของออกซิเจน เช่น อาหารแห้งที่มีไขมันอิ่มตัวอยู่สูงมักมีการเติมก๊าซ เช่น ก๊าซไนโตรเจน บรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ ทำให้สภาพแวดล้อมของอาหารภายในบรรจุภัณฑ์นั้นเป็นสภาวะที่มีออกซิเจนต่ำ จึงเกิดการเสื่อมเสียคุณภาพจากผลของออกซิเดชันได้ยาก ซึ่งทำให้เป็นการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์

3.3 การใช้ระบบสุญญากาศในการบรรจุ เป็นวิธีการดูดเอาอากาศออก โดยใช้เครื่องบรรจุระบบสุญญากาศ ซึ่งบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ต้องสามารถทนต่อความดันที่แตกต่างกัน ระหว่างสภาวะภายนอกและภายในบรรจุภัณฑ์ วิธีนี้เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงจากผลของออกซิเจน

3.4 การใช้สารกำจัดออกซิเจน (Deoxidizer) จะใส่ลงไปในบรรจุภัณฑ์อาหารแห้งที่เป็นภาชนะปิดสนิท สารดังกล่าวจะทำหน้าที่ลดปริมาณออกซิเจนที่ทำปฏิกิริยาต่าง ๆ

3.5 การใช้สารดูดความชื้น การใช้สารดูดความชื้นบางชนิด เช่น แคลเซียมออกไซด์ (ซิลิกาเจล) สารพวกนี้จะช่วยในการดูดความชื้นระหว่างการเก็บรักษาอาหารแห้ง (พรพล, 2545)

2.8 บรรจุกัณฑ์

บรรจุกัณฑ์เป็นทั้งศาสตร์และศิลป์ที่ใช้ในการบรรจุสินค้าในการจำหน่าย เพื่อสนองความต้องการของผู้ซื้อและผู้บริโภคด้วยต้นทุนที่เหมาะสม ดังนั้นจึงต้องใช้ความรู้ทางเทคโนโลยีอาหารเฉพาะทาง เช่น อาหารแห้ง อาหารที่มีความเป็นกรดต่ำ เป็นต้น เพื่อวิเคราะห์การเกิดปฏิกิริยาระหว่างอาหารและบรรจุกัณฑ์ พร้อมทั้งศึกษาวิธีการถนอมรักษาอาหารให้ได้ตามกำหนดเวลาที่ต้องการ หรือที่เรียกว่า shelf-life นอกจากนี้การกำหนดอายุของอาหารต้องรวมเวลาที่สินค้าอาหารอยู่ในตลาดและสามารถบริโภคได้หมดก่อนอาหารจะเปลี่ยนสภาพจนบริโภคไม่ได้

ชนิดและคุณสมบัติของวัสดุพลาสติกที่ใช้ทำบรรจุกัณฑ์

ปัจจุบันบรรจุกัณฑ์จากพลาสติกเข้ามามีบทบาทในการบรรจุหีบห่อมากขึ้น อาจเป็นเพราะว่าบรรจุกัณฑ์จากพลาสติกมีหลายรูปแบบ สามารถทำความสะอาดได้ง่าย และยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ พลาสติกจัดเป็นพอลิเมอร์ (Polymer) ที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์หนึ่งชนิดหรือมากกว่าและมีน้ำหนักโมเลกุลสูง สารพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งเป็นการรวมตัวของโมโนเมอร์ (Monomer) เข้าด้วยกันเป็นลักษณะโซ่ยาว และจำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดัวย ชนิดของฟิล์มพลาสติกที่นิยมใช้ทำบรรจุกัณฑ์เช่น

1. **ฟิล์มโพลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP)** เป็นฟิล์มที่จัดอยู่ในกลุ่มโพลิโอเลฟิน (Polyolefin) เช่นเดียวกับโพลิเอทิลีน จึงมีคุณสมบัติคล้ายกัน การผลิตนิยมกระทำโดยวิธีการเป่าให้โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวกัน สองทิศทางคือ ในแนวขนานและแนวขวางเครื่อง จึงเรียกว่า Biaxial orientation polypropylene หรือ Oriented polypropylene (BOPP or OPP)

คุณสมบัติเด่นของฟิล์ม PP คือ มีความใสและป้องกันความชื้นได้ดี อย่างไรก็ตามการป้องกันอากาศซึมผ่านของ PP ยังไม่ดีเท่ากับพลาสติกบางชนิด เนื่องจากช่วงอุณหภูมิในการหลอมละลายมีช่วงทิศทางเดียวกัน คุณสมบัติเด่นอีกประการหนึ่งของ PP คือ มีจุดหลอมเหลวสูง ทำให้สามารถใช้เป็นบรรจุกัณฑ์สำหรับอาหารในขณะร้อน (ปุ่นและสมพร, 2541) นอกจากนี้ PP ยังมีความสามารถทนทานต่อการขีดข่วนสูง ทนทานต่อการพับ มีความคงรูป และมีความปลอดภัย จึงสามารถใช้กับอาหารได้

2. **ฟิล์มโพลิเอทิลีน (Polyethylene, PE)** ซึ่งเป็นโพลิเมอร์ที่เกิดจากการรวมตัวของโมโนเมอร์ที่เป็นเอทิลีน นับเป็นฟิล์มพลาสติกที่นำมาใช้งานมากที่สุดชนิดหนึ่งและมีราคาถูก เนื่องจาก PE มีจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อเทียบกับพลาสติกอื่น ๆ ทำให้มีต้นทุนการผลิตต่ำ ฟิล์ม PE มีอยู่หลายชนิดและหลายชั้นคุณภาพ จึงนิยมแบ่งออกตามความหนาแน่น คือ

- ชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) มีความหนาแน่น 0.941–0.959 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
- ชนิดความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) มีความหนาแน่น 0.926–0.940 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
- ชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มีความหนาแน่น 0.910–0.925 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
- ชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) มีความหนาแน่น 0.910 – 0.925 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

LDPE เป็นพลาสติกที่นิยมใช้มาก เนื่องจากยึดตัวได้ดี ทนต่อการทิ่มทะลุ และการฉีกขาด สามารถใช้ความร้อนเชื่อมปิดผนึกได้ดี มีความปลอดภัย และใช้กับสิ่งของที่นำไปบริโภคได้ทันที โครงสร้างของ PE สามารถป้องกันความชื้นได้ดีพอสมควร ส่วนจุดอ่อนของ LDPE คือ ปล่อยให้ไขมันและอากาศซึมผ่านได้ง่าย (ปุ่นและสมพร, 2541) จากการทดลองของ Wang และ Qi (1997) พบว่า แดงกวาที่เก็บรักษาในถุง LDPE มีอาการสเห่นหนานน้อยกว่าแดงกวาที่ไม่ได้บรรจุถุง เมื่อเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 5 °ซ ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 90-95% เป็นเวลา 18 วัน โดยมีการสูญเสียน้ำประมาณ 1 % หรือการเก็บรักษาผล Loquat ในถุง PE ที่มีความหนา 20 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 5 °ซ สามารถเก็บรักษาได้เป็นระยะเวลา 2 เดือน (Ding *et al.* ,2001)

3. ถุง Nylon-PE ผลิตจากฟิล์มพลาสติกโพลีเอไมด์ (Nylon) และฟิล์มโพลีเอทิลีน (PE) ที่ผ่านวิธีการประกบ (Lamination) เข้าด้วยกัน คุณสมบัติของ Nylon-PE มีคุณสมบัติคล้ายกับฟิล์มโพลีเอไมด์ และฟิล์มพลาสติกโพลีเอทิลีนคือ มีความเหนียว สามารถต้านทานแรงทิ่มได้ดี โปร่งใส มีความคงรูป ต้านทานต่อการขีดสี ทนทานต่อกรดได้ดี แต่ไม่สามารถทนต่อด่าง มีความสามารถดูดซึมน้ำได้สูง ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้มาก ทั้งก๊าซออกซิเจน ไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ป้องกันการซึมผ่านของไขมันหรือน้ำมันได้สูง สามารถปิดผนึกด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 130 ถึง 180 °ซ มีความทนทานต่ออุณหภูมิร้อนหรือเย็นจัดได้ โดยสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ - 40 ถึง 160 °ซ มีประโยชน์หรือใช้งานกับอาหารที่ต้องการรักษากลิ่นและรส เช่น กาแฟ ปลาเค็ม เนย และเนื้อแปรรูป ซึ่งนิยมใช้ทั้งแบบสุญญากาศ (Vacuum pack) และแบบธรรมดา (ยงยุทธ, 2539) โดยการบรรจุผลิตภัณฑ์ให้อยู่ภายใต้สุญญากาศเป็นการดึงเอาอากาศภายในภาชนะหรือภายในผลิตภัณฑ์ออก และไม่มีกรพ่นก๊าซใด ๆ เข้าไปแทนที่ ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความดันภายในและภายนอกภาชนะ สังเกตได้จากการหดตัวของภาชนะบรรจุชนิดอ่อนตัว (Flexible form) หรือการยุบตัวของภาชนะประเภทกึ่งคงรูป (Semi-rigid) ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์และระบบการบรรจุ (งามทิพย์, 2538)

การเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมกับประเภทอาหาร มีปัจจัยอันดับแรกที่ต้องพิจารณาคือ คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น เป็นอาหารสดหรืออาหารที่ได้รับการแปรรูปแล้ว อันดับต่อมาคือ รูปแบบของบรรจุภัณฑ์ที่หาได้จากด้วยต้นทุนที่เหมาะสมกับสถานะตลาด พร้อมทั้งสามารถรักษาคุณภาพของอาหารได้ตามอายุ (Shelf – life) ที่ต้องการ ปัจจัยภายนอกที่ต้องคำนึง คือ เทคนิคในการบรรจุ สภาพะในการขนส่ง และการจัดเก็บ ปัจจัยที่สำคัญประการสุดท้ายคือ ช่องทางการจำหน่ายหรือวิธีขาย ซึ่งอาหารแต่ละชนิดควรเลือกบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมอย่างเช่น ตัวอย่างของกลุ่มอาหารที่ถนอมด้วยน้ำตาลและทำแห้ง ดังตาราง 2.4 (ปุ่นและสมพร, 2541)

ตาราง 2.4 กลุ่มของอาหารแปรรูปที่ถนอมอาหารด้วยน้ำตาลและทำแห้งควรเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม ดังตาราง

| ประเภทบรรจุภัณฑ์ | คำแนะนำและเหตุผล |
|--|--|
| 1. ซองพลาสติก PE | มีราคาถูกและปิดผนึกด้วยความร้อนได้ง่าย |
| 2. ซองพลาสติก PP | สามารถป้องกันความชื้นได้ดี แต่ปิดผนึกได้ยากกว่าฟิล์ม PE เนื้อพลาสติกมีความใสช่วยเพิ่มคุณค่าสินค้า |
| 3. เซลโลเฟลน หรือกระดาษแก้ว | สามารถป้องกันความชื้นได้ระดับหนึ่ง มักนิยมใช้ห่อบิดปลาย (twist wrap) |
| 4. กระบอกพลาสติกมีฝาปิด | เห็นสินค้าได้รอบตัว ควรปิดฝาด้วยเทปให้สนิท |
| 5. ถาดพลาสติกใสชนิดที่มีฝาปิด เป็นแบบกาบหอย (clam shell) | ควรปิดฝาด้วยความร้อนแทนที่จะใช้ลวดตะเข็บหรือใช้เทป |
| 6. กระจังโลหะ | สามารถสร้างจุดเด่นที่ดีให้แก่สินค้าและแปลกใหม่ แต่มีมูลค่าสูง |
| 7. กระจังกระดาษ | คล้ายคลึงกับกระจังโลหะ แต่พิมพ์ลายสวยงามได้ง่ายกว่า |
| 8. ถุงเคลือบหลายชั้น อาจใช้แบบวางตั้งได้และอาจมีซิปล | เป็นบรรจุภัณฑ์รูปลักษณะใหม่ที่เกิดความสะดวกในการบริโภค เปิดโอกาสให้ใช้เทคนิคระบบบรรจุภัณฑ์ใหม่ ๆ เช่น ระบบสุญญากาศ ระบบการปรับสถานะ (MAP) เป็นต้น ซึ่งช่วยยืดอายุอาหารเก็บได้นาน |

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Babalıs และ Belessiotis (2004) ศึกษาสภาวะการอบแห้งมะเดื่อฝรั่ง (*Ficus carica*) โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ที่อุณหภูมิ 55 – 85 °ซ และความเร็วลมในการอบแห้ง 0.5 - 3 เมตร/วินาที พบว่า อุณหภูมิมีผลต่อค่าคงที่ในการอบแห้งและแพร่ซึมผ่านของความชื้น เช่น ใช้ความเร็วลมในการอบแห้ง 3 m/s ที่อุณหภูมิ 55 °ซ ใช้เวลาอบแห้งนาน 55 ชั่วโมง ซึ่งการอบที่อุณหภูมิ 85 °ซ ใช้เวลาเพียง 12 ชั่วโมง ส่วน Doymaz (2005) ศึกษาการใช้แบบจำลองต่างๆ เพื่อให้ได้ข้อมูลการอบแห้งมะเดื่อฝรั่ง (*Ficus carica*) โดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ที่อุณหภูมิ 35 – 47 °ซ เป็นระยะเวลา 80 ชั่วโมง พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Verma *et al.* (1985) ที่มีค่าพารามิเตอร์ R^2 0.9945, X^2 0.000483 และ RMSE 0.062857 ใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการอบแห้งของมะเดื่อฝรั่งได้ดีกว่าแบบจำลองอื่น

Robbers *et al.* (1997) ได้เปรียบเทียบวิธีการอบแห้งผลกีวี พบว่า การอบแห้งแบบลมร้อนใช้เวลา น้อยที่สุด รองลงมาคือการอบแห้งแบบผสม และวิธีออสโมซิสใช้เวลา นานที่สุด (ที่ความชื้นสุดท้ายของผลกีวีที่มีค่าเท่ากัน) โดยค่าความแน่นเนื้อของผลกีวีที่ทำแห้งโดยใช้ลมร้อนและวิธีแบบผสมจะมีค่าสูงกว่าวิธีออสโมซิส แต่การอบแห้งแบบลมร้อนมีแนวโน้มที่จะมีสีคล้ำมากกว่าการอบแห้งวิธีแบบผสม ส่วนวิธีออสโมซิสมีแนวโน้มเพิ่มสีเหลือง-สีเขียวในผลิตภัณฑ์เพียงเล็กน้อย

Son *et al.* (2001) ศึกษาผลของสารต้านการเกิดสีน้ำตาล (Antibrowning agents) 5 กลุ่ม คือ กลุ่ม Carboxylic acids กลุ่ม Ascorbic acid derivatives กลุ่ม Sulfur-containing amino acids กลุ่ม phenolic acid และกลุ่มอื่นๆ อีก 36 ชนิด ในการควบคุมการเกิดสีน้ำตาลบนชิ้นเนื้อแอปเปิลพันธุ์ Liberty โดยการแช่ชิ้นเนื้อของผลแอปเปิลลงในสารละลายแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นต่างๆ เป็นเวลา 3 นาที พบว่าสารทุกกลุ่มสามารถยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลของผลแอปเปิลได้ แต่สารกลุ่ม Carboxylic acids และสารกลุ่ม Sulfur-containing amino acids ยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลได้ดีที่สุดในทำนองเดียวกันกับ Waqer *et al.* (1997) ได้ทดลองแช่มะเขือเทศหั่นชิ้นในสารละลาย 3 ชนิด คือ โพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ความเข้มข้น 2.0 % (w/v) แคลเซียมคลอไรด์ 1.0 % และโซเดียมคลอไรด์ 2.0 % ก่อนการอบแห้ง เพื่อป้องกันการสูญเสียแคโรทีนอยด์และการเกิดสีน้ำตาลในแป้งมะเขือเทศ จากนั้นเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 30 - 90 วัน ที่อุณหภูมิ 40 °ซ พบว่า การแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เพิ่มการสูญเสียแคโรทีนอยด์ ในขณะที่การแช่สารละลายโพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ 2.0 % ลดการสูญเสียแคโรทีนอยด์ ส่วนการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 2.0 % ก่อนการอบแห้งไม่มีผลต่อการสูญเสียแคโรทีนอยด์ ยังพบว่าการแช่สารละลายแคลเซียมคลอไรด์สามารถยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนสารละลายโพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ 2.0 %

สามารถยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลได้เล็กน้อย นอกจากนั้น การใช้โพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ 5 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตรในการลวกผักใบเขียว (Savoy beet, Amaranth และ Fenugreek) เป็นเวลา 1 นาที ที่ อุณหภูมิ 95 °ซ ก่อนการอบแห้ง พบว่า การใช้สารโพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟต์สามารถยับยั้งการ ทำงานของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส และลดการสูญเสียบีตา-แคโรทีน กรดแอสคอบิก รวมทั้ง คลอโรฟิลล์ (Negi and Roy, 2000)

Jiang and Fu (1998) ทำการแช่ผลลึนจี่นาน 5 นาที ในสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 100 มิลลิโมลต่อลิตร สารละลายกลูตาไทโอนความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อลิตร และสารละลายผสมทั้งสองชนิด เป็นเวลา 5 นาที พบว่า สารละลายกรดซิตริกสามารถยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้ 80 % แต่การใช้สารละลายทั้งสองชนิดร่วมกันจะใช้ผลดีกว่าการใช้กรดซิตริก หรือกลูตาไทโอนเพียงอย่างเดียว เช่นเดียวกับการทดลองของ Vamos-Vigyazo (1995) โดยแช่ห่อ พันธุ์ Elberta ในสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 1.0 % นาน 1 นาที พบว่าสามารถยับยั้งกิจกรรม ของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้ 30 % เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดซิตริกเป็น 3.0 % และใช้ เวลาแช่ 2 นาที สามารถยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้ 42 % ส่วนการใช้กรดซิ ตริกความเข้มข้น 0.3 % สามารถป้องกันการเกิดสีน้ำตาลของมะม่วงพันธุ์ Langra โดยเก็บรักษาที่ อุณหภูมิ -18 °ซ (Skred, 1996) และการใช้สารละลายกรดซิตริกเข้มข้น 10 % ป้องกันการเกิดสี น้ำตาลของผักกาดหอมหั่นชิ้นได้เช่นกัน

Dong *et al.* (2000) ได้ศึกษาการยืดอายุการเก็บรักษาผลสาลี่สามสายพันธุ์ (Bartlett, Bosc และ Anjou) พบว่าการแช่ผลสาลี่ในสารละลาย 4-เฮกซิลเรโซซินอลความเข้มข้น 0.01 % กับกรด แอสคอร์บิกความเข้มข้น 0.5 % และแคลเซียมแลคเตต ความเข้มข้น 1.0 % นาน 2 นาที ร่วมกับการ บรรจุภายใต้สุญญากาศและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 2 ถึง 5 °ซ สามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลสาลี่ได้ นานถึง 15 - 30 วัน โดยไม่เกิดสีน้ำตาล ส่วน Martin-Diana *et al.* (2005) ทำการแช่ผักกาดหอมสลัด ในสารละลายแคลเซียมแลคเตต (0.5 %, 1.5 % และ 3 %) และอุณหภูมิ (4, 25 และ 50 °ซ) หลังจากนั้นทำการบรรจุและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °ซ เป็นระยะเวลา 4 วัน พบว่า ผักกาดหอมสลัด ที่แช่ในสารละลายแคลเซียมแลคเตตความเข้มข้น 1.5 % ที่อุณหภูมิ 50 °ซ จะมีความสดและการ เกิดสีน้ำตาลน้อยกว่าสิ่งทดลองชุดอื่น

Severini *et al.* (2003) การตากแอปเปิลด้วยวิธี HTST ยับยั้งกิจกรรมเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้ แต่ทำให้เนื้อแอปเปิลนิ่ม เมื่อนำแอปเปิลไปตากในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.6 % พบว่า เนื้อแอปเปิลมีเนื้อไม่นิ่มและไม่เกิดสีน้ำตาล และ Monica *et al.* (2003) ใช้สารละลายผสมระหว่างแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 250 กรัมต่อลิตร และกรดซิตริกความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร พบว่า สามารถลดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในผักกาดหอมได้ ส่วนงานวิจัยของ Saper and Miller (1998) ได้ศึกษาการยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลในผลสาลี่หั่นชิ้น โดยแช่ในสารละลายผสมที่ประกอบด้วย โซเดียมออร์โทโรบเททความเข้มข้น 4 % คลอไรด์ความเข้มข้น 0.2 % และ 4-เฮกซิลเรโซซินอลความเข้มข้น 100 ส่วนในล้านส่วน เป็นเวลา 1 นาที แล้วบรรจุในสภาพดัดแปลงบรรยากาศ (MAP) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °ซ พบว่า สามารถเก็บรักษาผลสาลี่หั่นชิ้นได้นาน 14 วัน โดยไม่เกิดสีน้ำตาลที่บริเวณผิวของผลและการเสื่อมเสียทางกลิ่นรสหรือเนื้อสัมผัส