บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

2.1 ลักษณะทั่วไปของข้าวโพดหวาน

ข้าวโพดหวาน (sweet corn) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays* L. var saccharata จัดอยู่ในวงศ์ Gramineae (Poaceae) เป็นพืชในสกุล saccharata ข้าวโพดหวานเป็นพืชผัก และพืชอุตสาหกรรมที่สำคัญชนิดหนึ่ง โดยเป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนของมนุษย์และสัตว์ ข้าวโพดมีแหล่งกำเนิดที่ประเทศเม็กซิโก ในทวีปอเมริกาตอนกลาง มีจำนวนโครโมโซม 2n = 20 (ปริญญาวดี, 2553)

ข้าวโพดเป็นพืชที่มีช่อดอกเพศผู้ และเพศเมียอยู่บนต้นเดียวกัน แต่อยู่คนละตำแหน่ง (monoecious plant) ช่อดอกเพศผู้ (staminate inflorescence) เกิดที่ส่วนปลายของลำต้น เป็นช่อดอกแบบ panicle ฝักข้าวโพด (ear) พัฒนามาจากช่อดอกเพศเมีย (pistillate inflorescence) แบบ spike เกิดจากตาที่มุมใบของข้อที่ 7 หรือ 8 ของลำต้น

ก้านช่อดอก หรือก้านฝัก (shank) ไม่ยืดตัว และบริเวณก้านฝักเกิดใบที่มีเฉพาะกาบใบ เรียกว่าเปลือกหุ้มฝัก (husk) ดอกย่อยเพศเมีย (pistillate spikelet) เกิดเป็นแถวยาวบนแกนกลางช่อดอกที่เรียกว่า ซัง (cob) ช่อดอกเพศเมียจะพัฒนาไปเป็นดอกข้าวโพดที่มีแถวของเมล็ดเป็นคู่ในแนวตั้ง กลุ่มดอกย่อยมีก้านดอก (pedicel) สั้นจึงคล้ายกับว่าอยู่ติดกับซัง เกสรเพศเมียมีส่วนรับละอองเกสรที่ยาว 10-30 เซนติเมตร เรียกว่าไหม (silk)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ดอกที่อยู่ส่วนกลางของฝักจะส่งไหมออกจากเปลือกหุ้มฝักได้ก่อน และจะได้รับการผสมเกสรก่อน ส่วนดอกที่อยู่บริเวณโคนของฝักมีการเจริญในเวลาเดียวกับดอกที่อยู่ส่วนกลางของฝัก แต่ต้องใช้เวลาที่นานกว่าจะส่งไหมพ้นจากเปลือกหุ้มฝัก ส่วนดอกที่อยู่ปลายฝักเป็นดอกที่มีการเจริญและส่งไหมออกมาช้าที่สุด จึงมีโอกาสได้รับการผสมน้อยกว่าดอกในส่วนอื่น ดังนั้นเมล็ดที่อยู่ตอนกลางจึงมีขนาดใหญ่กว่าเมล็ดที่อยู่ส่วนโคน และส่วนปลายฝัก

เมล็ด (kernel) เป็นผลแบบ caryopsis มีเยื่อหุ้มผลติดกับเยื่อหุ้มเมล็ดเป็นเยื่อบางๆ ใสไม่มีสี บนเมล็ดมีร่องที่เกิดจากไหมหลุดออกไป เรียกว่า silk scar ภายในเมล็ดประกอบด้วยคัพภะ (embryo) และ

เอนโดสเปิร์ม (endosperm) ที่ใช้สะสมอาหาร ส่วนใบเลี้ยงไม่มีการพัฒนารูปร่างของเมล็ดขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของจำนวนเมล็ดบนฝัก เมล็ดส่วนปลาย และส่วนโคนของฝักมีลักษณะค่อนข้างกลม เมล็ดกลางฝักจะแบนและมีเหลี่ยมมุม (รังสฤษฎ์ และคณะ, 2541)

ข้าวโพดหวานเป็นข้าวโพดที่มีปริมาณน้ำตาลมากโดยเฉพาะซูโครส (sucrose) ควบคุมโดยโครโมโซมคู่ที่ 4 ปัจจุบันมียีนอย่างน้อย 8 ยีน ที่มีผลต่อการสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรตในเมล็ดข้าวโพด (Hallauer, 2001) นอกจากนี้ปริมาณแป้งในข้าวโพดหวานจะถูกสังเคราะห์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่ง 20 วันหลังการผสมเกสรแล้วจะคงที่ แต่ปริมาณของ phytoglycogen จะเพิ่มจนถึงวันที่ 30-40 หลังวันผสมเกสร จึงทำให้ปริมาณคาร์โบไฮเดรตรวมของข้าวโพดหวานสูงใกล้เคียงกับข้าวโพดไร่ ส่วนที่แตกต่างระหว่างข้าวโพดหวาน และข้าวโพดไร่ คือ ข้าวโพดหวานมีปริมาณ phytoglycogen มาก และปริมาณแป้งมีน้อยกว่าข้าวโพดไร่ (กฤษฎา, 2531) จึงทำให้ข้าวโพดหวานที่แก่มีลักษณะเมล็ดเหี่ยวย่น (wrinkle) (รังสฤษฎ์ และคณะ, 2541) นอกจากนี้ข้าวโพดหวานต่างชนิดและต่างสายพันธุ์ จะมีความแตกต่างของชนิด และปริมาณของคาร์โบไฮเดรตในเมล็ดด้วย

2.2 ประเภทของข้าวโพดหวาน

ข้าวโพดหวานมีลักษณะที่สำคัญคือ มีปริมาณน้ำตาลในเมล็ดสูง และมีอัตราการเปลี่ยนน้ำตาลเป็นแป้งช้ากว่าข้าวโพดไร่ ลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดความแตกต่างจากข้าวโพดทั่วไป โดยมียีนเป็นสิ่งควบคุมภายในและใช้ในการแยกประเภทของข้าวโพดหวานได้เป็น 4 กลุ่ม คือ

2.2.1 ข้าวโพดหวานจากยีนเดียว เป็นข้าวโพดหวานที่ปลูกกันมากที่สุด ได้แก่

1) ข้าวโพดหวาน (sweet corn) เป็นข้าวโพดหวานที่มียีนซูการ์รี (sugary, su/su) อยู่ในสภาพด้อย มียีนที่ควบคุมการเปลี่ยนน้ำตาลที่สังเคราะห์ในเมล็ดไปเป็นแป้งเกิดได้ช้ากว่าปกติ แต่มีเปลือกหุ้มเมล็ดค่อนข้างหนา เมื่อรับประทานจะติดฟันมากกว่าข้าวโพดชนิดอื่น ข้าวโพดหวานหากเก็บเกี่ยวช้ากว่ากำหนด จะมีผลทำให้ความหวานลดลง และเมล็ดแข็ง ลักษณะเมล็ดแก่จะเหี่ยวย่นเล็กน้อย และค่อนข้างใส

2) ข้าวโพดหวานพิเศษ (super sweet corn) คนทั่วไปมักเรียกว่า ข้าวโพดสวีท ในประเทศไทยนิยมปลูกเพื่อบริโภคฝักสด ข้าวโพดหวานพิเศษมียีนในกลุ่มชรังเคน (shrunken gene, sh/sh หรือ sh2/sh2) หรือยีนกลุ่มบริตเติล (brittle gene, bt/bt หรือ bt2/bt2)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ข้าวโพดหวานพิเศษมีการเปลี่ยนน้ำตาลในเมล็ดไปเป็นแป้งได้ช้ามาก ทำให้มีรสหวานจัด (บุญสม, 2524) เมล็ดแก่จะมีลักษณะเหี่ยวย่นมาก และเมล็ดมีสีขุ่นทึบ

2.2.2 ข้าวโพดหวานที่เกิดจากยีนเสริม เมล็ดพันธุ์ของข้าวโพดหวานจะมียีนที่เป็น homozygous recessive อยู่หนึ่งตำแหน่ง และ heterozygous อีกหนึ่งตำแหน่ง เมื่อนำไปปลูกเพื่อผลิตฝักสด ยีนที่เป็น heterozygous จะแยกตัวตามกฎของ Mendel ทำให้ 25 เปอร์เซ็นต์ของเมล็ดบนฝัก เป็น double recessive เมล็ดบนฝักมีความหวานมากกว่าข้าวโพดหวานธรรมดา แต่หวานน้อยกว่าข้าวโพดหวานพิเศษ มีลักษณะเด่นคือ มีความนุ่ม และเนื้อสัมผัสเป็นครีมเล็กน้อย เนื่องจากมี phytoglycogen ซึ่งเป็น branched carbohydrate เป็นส่วนประกอบ โดยทั่วไปเรียกว่า water soluble polysaccharides (WSP) ข้าวโพดหวานกลุ่มนี้มียีน su เป็นพื้นฐาน และมีการนำยีน ซูการ์รีเอ็นฮานเซอร์ (sugary enhancer, se) หรือ sh2 มาช่วยเสริมทำให้มีความหวานเพิ่มขึ้น ลักษณะข้าวโพดหวานกลุ่มนี้ คือ เมล็ดบนฝักมีสองสี คือสีเหลือง และสีขาว อัตราส่วน 75 ต่อ 25 เรียกทั่วไปว่า ไบคัลเลอร์ (bi-color)

2.2.3 ข้าวโพดหวานที่เกิดจากยีนร่วม เป็นข้าวโพดหวานที่นักปรับปรุงพันธุ์นำยีนต่างๆ มาอยู่ร่วมกันในสภาพ homozygous recessive ที่ทุกๆ ตำแหน่ง (locus) ทำให้มีปริมาณน้ำตาลสูงขึ้น มากกว่าข้าวโพดหวานธรรมดา และแก้ไขปัญหาอัตราความงอกที่พบในข้าวโพดหวานพิเศษ (ทวีศักดิ์, 2540)

2.3 การเก็บเกี่ยวข้าวโพดหวาน

ข้าวโพดหวานมีอายุการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม คือ ประมาณ 70-75 วัน หลังปลูก หรือ ระยะ 18-20 วัน หลังข้าวโพดหวานออกไหม 50 เปอร์เซ็นต์ ของจำนวนต้น (ข้าวโพดหวาน 100 ต้นมีไหม 50 ต้น) โดยไหมจะเริ่มเป็นสีน้ำตาล แต่ในช่วงอากาศหนาวเย็นอายุการเก็บเกี่ยวอาจจะยืดออกไป (ปริญญาวดี, 2553) หรือพิจารณาจากระยะที่ฝักพัฒนาจนมีเมล็ดเต็ม ไหมมีสีน้ำตาล และเริ่มแห้ง เมื่อบีบเมล็ดให้แตกเกิดน้ำคล้ายน้ำนม หรือเรียกว่าระยะ milky stage (Sinha, 2011)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.4 คาร์โบไฮเดรตในข้าวโพดหวาน

ข้าวโพดหวานเป็นพืชอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการ โดยเฉพาะคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นสารอาหารหลักในข้าวโพดหวาน โดยสามารถแยกเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้ คือ

2.4.1 น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharide) และ โอลิโกแซ็กคาไรด์ (oligosaccharide) ส่วนใหญ่น้ำตาลในข้าวโพดหวานจะเป็นน้ำตาลซูโครส (sucrose) และมีน้ำตาลกลูโคส (glucose) ฟรุกโตส หรือฟรักโทส (fructose) และมอลโทส (maltose) เป็นส่วนน้อย

2.4.2 น้ำตาลนิวคลีโอไทด์ (Sugar nucleotides) เป็นสารที่มีความสำคัญในการสร้าง oligosaccharides

2.4.3 พอลิแซ็คคาไรด์ (Polysaccharides) ข้าวโพดหวานมี polysaccharides 2 กลุ่ม คือ

1) starch ประกอบด้วย amylase และ amylopectin

2) phytoglycogen เป็นน้ำตาลโมเลกุลเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ (water soluble polysaccharides, WSP) มีโครงสร้างเป็นโมเลกุลกลูโคสที่เกาะติดกันโดยพันธะ ∝-D-(1,4) และมี branched carbohydrate ∝-D-(1,6) พบมากในข้าวโพดหวานที่มียีนชนิด su ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ทำให้เนื้อข้าวโพดหวานนุ่ม (กฤษฎา, 2531)

2.5 การสูญเสียของผลิตผลภายหลังการเก็บเกี่ยว

ผลิตผลเมื่อตัดออกมาจากต้นยังคงเป็นสิ่งมีชีวิต มีกระบวนการทางชีวเคมีเกิดขึ้นมากมายเพื่อใช้ในการดำรงชีวิต กระบวนการดังกล่าวเป็นการใช้สารอาหารที่พืชสะสมขณะอยู่ติดกับต้น ทำให้เกิดการสูญเสียทั้งคุณค่าทางอาหาร และทำให้คุณภาพของผลิตผลลดลง กระบวนการเสื่อมสภาพของผลิตผล เกิดจากการกระตุ้นโดยหลายปัจจัย เริ่มตั้งแต่ผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยว เมื่อนำมาจากแปลงปลูกจะมีอุณหภูมิสูงเท่ากับอุณหภูมิของอากาศ หรือสภาพแวดล้อมขณะทำการเก็บเกี่ยว ความร้อนที่ติดมากับผลิตผลจากแปลงปลูก เรียกว่า field heat เมื่อขนย้ายผลิตผลมารวมกันไว้หากอากาศถ่ายเทไม่สะดวก จะทำให้ความร้อนที่คายออกมาจากผลิตผลซึ่งเกิดจากการหายใจ เรียกว่า respiration heat หรือ vital heat (ยงยุทธ, 2539) รวมกับ field heat ถูกสะสมอยู่ในกองผลิตผล ทำให้ผลิตผลมีอุณหภูมิสูงขึ้น และไปเร่งกระบวนการเมแทบอลิซึมต่างๆ ภายในเซลล์ของผลิตผลให้เกิดเร็วขึ้น ทำให้คุณภาพผลิตผลลดลง และมีอายุการเก็บรักษาสั้นลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดอุณหภูมิผลิตผลให้ต่ำลง เพื่อนำความร้อนจากแปลงปลูกซึ่งติดมากับผลิตผลออกไปให้เร็วที่สุด และมากที่สุด ผลิตผลที่มีอุณหภูมิต่ำจะทำให้กระบวนการเมแทบอลิซึมต่างๆ เกิดช้าลง เช่น ผลิตผลมีการหายใจช้าลง จะทำให้อัตราการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เสื่อมสลายช้าลง มีการคายน้ำช้าลง และการเข้าทำลายของเชื้อจุลินทรีย์ช้าลง เป็นการลดความสูญเสียและยืดอายุการเก็บรักษาได้นานขึ้น (ดนัย และนิธิยา, 2548)

นอกจากความร้อนจากการหายใจและความร้อนที่ติดมาจากแปลงปลูกแล้ว ยังมีความร้อนจากสิ่งแวดล้อมที่ไม่ได้เป็นของผลิตผลโดยตรง เช่น ความร้อนที่ติดมากับบรรจุภัณฑ์ ความร้อนของอากาศรอบๆ ผลิตผล ความร้อนเหล่านี้ก็ส่งผลต่อผลิตผล ดังนั้นการลดอุณหภูมิผลิตผลจึงจำเป็นต้องพิจารณาการนำความร้อนเหล่านี้ออกไปด้วย (จริงแท้, 2541)

การสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวข้าวโพดหวานมีปัจจัยที่เร่งกระบวนการเสื่อมสภาพ ซึ่งประกอบด้วย

2.5.1 อุณหภูมิ อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดหลังการเก็บเกี่ยวผลิตผลสด เพราะมีผลต่อกระบวนการต่างๆ ภายใน และภายนอกผลิตผล อุณหภูมิสูงจะเร่งปฏิกิริยาเคมีภายในผลิตผล เช่น อัตราการหายใจ และเกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีอย่างรวดเร็ว ทำให้คุณภาพผลิตผลลดลง (จริงแท้, 2541) ข้าวโพดหวานเป็นผลิตผลที่มีอัตราการหายใจสูง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีอัตราการหายใจเป็น 5 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส (Ryall and Lipton, 1972) การหายใจของผลิตผลภายหลังการเก็บเกี่ยว เป็นการใช้อาหารสะสมที่มีอยู่ อัตราการหายใจสูงส่งผลให้สารอาหารลดลงอย่างรวดเร็ว จนขาดแคลน และเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพ (ดนัย, 2556) ที่อุณหภูมิสูงยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญในข้าวโพดหวาน ทำให้ปริมาณน้ำตาลในเมล็ดลดลง ข้าวโพดหวานกลุ่มชูการ์รี (su) เมื่อเก็บเกี่ยวแล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องพบว่า เมล็ดข้าวโพดหวานสูญเสียน้ำตาลมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 24 ชั่วโมง แต่การสูญเสียน้ำตาลสามารถทำให้เกิดช้าได้หากลดอุณหภูมิทันทีภายหลังการเก็บเกี่ยว การเก็บรักษาข้าวโพดหวานที่อุณหภูมิ 5-10 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำตาลซูโครสจะลดลง 30-65 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 3 วัน (Hallauer, 2001) Garwood *et al*. (1976) พบว่า ข้าวโพดหวานกลุ่มยีน sh2 เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 48 ชั่วโมง มีปริมาณน้ำตาลเป็นสองเท่าของข้าวโพดหวานกลุ่ม su และปริมาณน้ำตาลซูโครสในเมล็ดของข้าวโพดหวานกลุ่มยีน sh2 จะไม่เปลี่ยนแปลงหากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และสามารถเก็บรักษาได้นาน 96 ชั่วโมง นอกจากนี้อุณหภูมิสูงเป็นสภาพที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภายหลังการเก็บเกี่ยว โดยเฉพาะเชื้อราเจริญได้ดีในอุณหภูมิ 32-38 องศาเซลเซียส เพื่อลดการสูญเสียจึงใช้อุณหภูมิต่ำในการเก็บรักษาผลิตผล

2.5.2 ความชื้น ผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวมีน้ำเป็นองค์ประกอบ 80-95 เปอร์เซ็นต์ และอากาศมีน้ำอยู่ในรูปของไอน้ำ ซึ่งเรียกว่า ความชื้นในอากาศ โดยจะผันแปรตามอุณหภูมิและความดัน ความแตกต่างของปริมาณน้ำในผลิตผลและสภาพแวดล้อมก่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนซึ่งกันและกัน โดยปกติปริมาณน้ำในผลิตผลจะมีมากกว่า จึงสูญเสียให้กับสภาพแวดล้อมตลอดเวลา ผลิตผลมีการสูญเสียน้ำหนัก เกิดอาการเหี่ยว และมีคุณภาพลดลง (ดนัย, 2556) การสูญเสียน้ำของข้าวโพดหวานเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพ โดยทำให้เปลือกหุ้มฝักแห้ง สีเปลี่ยนแปลงไป เมล็ดเหี่ยวและยุบตัว ซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่ต้องการของผู้บริโภค การรักษาความชื้นของข้าวโพดหวานสามารถทำโดยการเก็บส่วนที่เป็นเปลือกหุ้มฝักไว้เพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำของเมล็ดภายใน แต่กรณีที่ต้องส่งจำหน่ายฝักสด ผู้ผลิตจะใช้บรรจุภัณฑ์ช่วยรักษาความชื้นของเปลือกหุ้มฝักด้วย (Ryall and Lipton, 1972) สำหรับการเก็บรักษาข้าวโพดหวาน Snowdon (1991) ได้แนะนำให้เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ และมีความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ เพื่อรักษาความสด แต่ในสภาพความชื้นที่สูง เชื้อราจะเจริญ และงอกสปอร์ได้ดี ดังนั้นในห้องเก็บรักษา ต้องหมุนเวียนของอากาศที่ดี และเพียงพอ

2.5.3 สภาพบรรยากาศ โดยทั่วไปอากาศประกอบด้วยแก๊สไนโตรเจน 78 เปอร์เซ็นต์ แก๊สออกซิเจน 21 เปอร์เซ็นต์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 0.03 เปอร์เซ็นต์ และแก๊สอื่นๆ 1 เปอร์เซ็นต์ การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของแก๊สในอากาศให้มีความแตกต่างไปจากปกติ ส่งผลให้ผลิตผลที่เก็บรักษามีอัตราการหายใจเปลี่ยนแปลงไป (ดนัย และนิธิยา, 2548) ข้าวโพดหวานหากเก็บรักษาในสภาพอากาศที่มีแก๊สออกซิเจนต่ำกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ จะเกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน เกิดกลิ่น และรสที่ผิดปกติ (Spalding *et al*., 1978) แต่ในสภาพที่มีการควบคุมให้แก๊สออกซิเจนต่ำ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง 5-10 เปอร์เซ็นต์ สามารถชะลอการสูญเสียน้ำตาลในเมล็ดข้าวโพดหวาน ลดอัตราการหายใจ และชะลอการเปลี่ยนสีเขียวของเปลือกหุ้มฝักข้าวโพดได้ นอกจากนี้ยังช่วยลดการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคด้วย (Aharoni *et al*. 1996; Schouten, 1993)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.6 การลดอุณหภูมิผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยว

การลดอุณหภูมิผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยวให้ต่ำ เพื่อขจัดความร้อนจากแปลงปลูกที่ติดมากับผลิตผลออกให้เร็วที่สุด เมื่อผลิตผลมีอุณหภูมิต่ำจะทำให้กระบวนการเมแทบอลิซึมต่างๆ เกิดช้าลง เช่น การหายใจ หากการหายใจช้าลงอัตราการเสื่อมสลายจะช้าลง และมีผลทำให้การคายน้ำลดลง จุลินทรีย์ต่างๆ จะเจริญได้ช้าลง เป็นการลดการสูญเสีย และยืดอายุการเก็บรักษาได้นานขึ้น (ดนัย และนิธิยา, 2548)

ดนัย และนิธิยา (2548) รายงานว่า การลดอุณหภูมิผลิตผลเป็นการนำ (conduction) ความร้อนในผลิตผลออกสู่ผิวนอก ความร้อนของอากาศซึ่งแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างของเนื้อเยื่อบริเวณต่างๆ รวมถึงช่องว่างระหว่างเซลล์ความร้อนจะถูกพา (convection) ออกไปโดยตัวกลางอาจเป็นน้ำเย็น หรืออากาศเย็นที่สัมผัสบริเวณผิวของผลิตผลสู่ระบบทำความเย็น (refrigeration system) อัตราเร็วของการลดอุณหภูมิมีปัจจัยประกอบด้วย (Thompson, 2003)

2.6.1 ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผลิตผล และตัวกลางที่นำมาใช้ลดอุณหภูมิ
2.6.2 การเข้าถึงระหว่างตัวกลางที่ใช้ลดอุณหภูมิและผลิตผล
2.6.3 ลักษณะ และธรรมชาติของตัวกลางที่ใช้ในการลดอุณหภูมิ
2.6.4 ความเร็วของตัวกลางที่ใช้ลดอุณหภูมิ
2.6.5 อัตราแลกเปลี่ยนความร้อนของพืช และตัวกลางที่ใช้ลดอุณหภูมิ

2.7 วิธีการลดอุณหภูมิ

2.7.1 การลดอุณหภูมิด้วยห้องเย็น (Room cooling) เป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด ใช้กับผลิตผลที่มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนาน และเหมาะต่อการเก็บแบบสะสมเพื่อให้เพียงพอต่อการส่งจำหน่าย วิธีการทำโดยนำผลิตผลไปวางในห้องเย็นที่มีการเป่าอากาศเย็นจากด้านบนของเพดานห้อง อากาศเย็นจะไหลลงสู่ด้านล่างซึ่งมีผลิตผลจัดวางอยู่ การไหลของอากาศในห้องเย็นควรมีความเร็วประมาณ 200-400 ฟุต/นาที เมื่อผลิตผลมีอุณหภูมิลดลงตามที่ต้องการแล้ว จะลดความเร็วของอากาศให้เหลือเพียง 10-20 ฟุต/นาที เพื่อลดการสูญเสียน้ำของผลิตผล การใช้ห้องเย็นมีข้อจำกัดคือ ภาชนะบรรจุผลิตผลที่ใช้ต้องมีการถ่ายเทอากาศที่ดี การจัดเรียงต้องเหมาะสม มีช่องว่างระหว่างแถวเพื่อให้อากาศไหลเวียนได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

นอกจากนี้การใช้ห้องเย็นลดอุณหภูมิผลิตผลได้ช้า ผลิตผลสูญเสียความชื้นมาก จึงไม่เหมาะกับผลิตผลที่เสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว (Thompson, 2003)

2.7.2 การลดอุณหภูมิด้วยการผ่านอากาศเย็น (Forced-air cooling) วิธีการคือ นำผลิตผลไปไว้ในห้องเย็น แล้วควบคุมความดันอากาศทางด้านหนึ่งของบรรจุภัณฑ์ที่บรรจุผลิตผล ทำให้เกิดความแตกต่างของความดันอากาศระหว่างสองฝั่ง อากาศเย็นฝั่งที่มีความดันสูงกว่าจะไหลผ่านช่องว่างของบรรจุภัณฑ์ และผลิตผลภายในบรรจุภัณฑ์นั้น ทำให้ผลิตผลมีอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว สิ่งที่แตกต่างจากการลดอุณหภูมิด้วยห้องเย็นคือ มีวิธีการควบคุมอากาศเย็นให้ไหลผ่านผลิตผล เวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิเร็วกว่าการลดอุณหภูมิด้วยห้องเย็น 4-10 เท่า แต่การเพิ่มความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านผลิตผลทำให้การสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นด้วย (ยงยุทธ, 2539)

2.7.3 การลดอุณหภูมิด้วยน้ำเย็น (Hydrocooling) การลดอุณหภูมิวิธีนี้ทำโดยนำผลิตผลไปสัมผัสกับน้ำเย็น น้ำเย็นจะต้องไหลผ่านผิวของผลิตผล ความร้อนจากผลิตผลจะถ่ายเทสู่น้ำ ซึ่งเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการใช้ลมเย็น เนื่องจากน้ำมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าอากาศ ผลิตผลจะเย็นเร็วมาก และไม่ก่อให้เกิดการสูญเสียความชื้น การลดอุณหภูมิด้วยน้ำเย็นนิยมใช้กับผลิตผลหลายชนิด แต่มีข้อจำกัดคือ ผลิตผลที่นำมาลดอุณหภูมิต้องสัมผัสกับน้ำได้ มีโครงสร้างทางสรีรวิทยาทนทานต่อการเปียกน้ำ และทนต่อสารป้องกันกำจัดโรคพืชที่ผสมในน้ำ เช่น คลอรีน เป็นต้น (Thompson, 2003; จริงแท้, 2541)

2.7.4 การลดอุณหภูมิด้วยน้ำแข็ง (Icing) การใช้น้ำแข็งเพื่อลดอุณหภูมิผลิตผลเป็นวิธีที่ปฏิบัติมานานหลายทศวรรษ เป็นวิธีการที่ง่ายโดยนำน้ำแข็งบดวางปิดทับบนผลิตผลที่บรรจุในภาชนะบรรจุ น้ำแข็งและน้ำเย็นที่ได้จากการละลายของน้ำแข็งจะไหลผ่านผลิตผลและทำให้ผลิตผลเย็นลง ในทางปฏิบัตินิยมใช้ลดอุณหภูมิผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยวตั้งแต่ในแปลงและในการขนส่ง ผลิตผลที่จะลดอุณหภูมิด้วยวิธีนี้ต้องสามารถสัมผัสกับน้ำ และน้ำแข็งได้ และทนต่ออุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตามการใช้น้ำแข็งจะทำให้เกิดน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นโดยเฉพาะในการขนส่งซึ่งส่งผลต่อค่าใช้จ่าย ผลิตผลที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 35 องศาเซลเซียส ต้องใช้น้ำแข็งน้ำหนัก 35-40 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักผลิตผลในการลดอุณหภูมิ (Kays, 1991)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.7.5 การลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศ (Vacuum cooling) เป็นวิธีการลดอุณหภูมิที่รวดเร็วที่สุด อาศัยความร้อนที่ติดอยู่ในผลิตผลทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะที่ความดันต่ำเป็นไอน้ำ ในการปฏิบัติทำโดยนำผลิตผลวางไว้ในห้องแล้วใช้ปั๊มดูดอากาศในห้องออกเพื่อลดความดันจนถึงระดับ 4.6 มิลลิเมตรปรอท ที่ระดับความดันนี้น้ำเดือดกลายเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ผลิตผลมีอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว และสม่ำเสมอ การระเหยของน้ำเกิดขึ้นบริเวณผิวของผลิตผล ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำ 1 เปอร์เซ็นต์ ต่อการลดลงของอุณหภูมิ 5-6 องศาเซลเซียส (Kays, 1991) เพื่อลดปัญหาการสูญเสียน้ำของผลิตผล และคงความสดสำหรับผักบางชนิดการพ่นละอองน้ำลงบนผลิตผลก่อนลดความดันสามารถช่วยได้ ผลิตผลที่ใช้การลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศได้ดีและใช้เวลาน้อยในการลดอุณหภูมิ ต้องมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวของผลิตผลต่อปริมาตรหรือน้ำหนักมาก เช่น ผักกาดหอมห่อ กะหล่ำปลี เป็นต้น การลดอุณหภูมิด้วยวิธีสุญญากาศเป็นวิธีที่สะอาด ทำได้รวดเร็ว แต่ระบบต้องมีโครงสร้างที่แข็งแรงสามารถรับแรงดันได้ จึงทำให้มีราคาแพง รวมถึงผู้ใช้งานต้องมีความชำนาญ จึงนิยมใช้กับผลิตผลที่มีปริมาณมากๆ เพื่อให้คุ้มค่ากับค่าใช้จ่าย (ดนัย และนิธิยา, 2548)

2.8 ส่วนประกอบของระบบลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศ (ภาพที่ 2.1)

เครื่องลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศ โดยทั่วไปประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ (Wang and Sun, 2001) คือ

2.8.1 ห้องสุญญากาศ (vacuum chamber) เป็นห้องที่ใช้จัดวางผลิตผลที่ต้องการลดอุณหภูมิ มีลักษณะเป็นห้องที่สามารถปิดสนิท มีความแข็งแรงสูงเพื่อทนต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงดันอากาศภายในที่ลดลง มีขนาดแตกต่างกันไปตามขนาดของเครื่องลดอุณหภูมิและปริมาณผลิตผลที่นำมาใช้

2.8.2 ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) เป็นเครื่องที่ใช้สำหรับดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ ขนาดของปั๊มสุญญากาศขึ้นอยู่กับขนาดของห้องสุญญากาศ หากห้องสุญญากาศมีขนาดใหญ่ ปั๊มสุญญากาศจะมีขนาดใหญ่เพื่อสามารถดูดอากาศออกในอัตราเร็วที่สัมพันธ์กันอย่างเหมาะสม โดยทั่วไปใช้ปั๊ม oil-sealed rotary pump

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

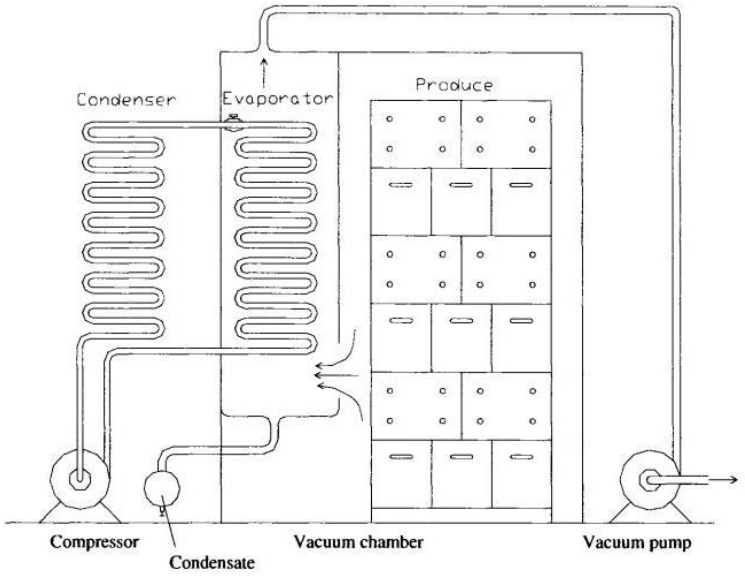
2.8.3 ระบบทำความเย็น ประกอบด้วย

1) คอยล์เย็น (evaporator) เมื่อเครื่องลดอุณหภูมิทำงาน ภายในห้องสุญญากาศจะมีความดันต่ำจนเกิดไอน้ำขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งคอยล์เย็นเป็นส่วนที่ใช้ในการจับไอน้ำภายในอากาศให้กลายเป็นน้ำแข็ง เพื่อช่วยในการลดความดันภายในห้องสุญญากาศให้ต่ำลง เนื่องจากปั๊มสุญญากาศไม่สามารถดูดไอน้ำออกไปภายนอกได้หมด

2) คอยล์ร้อน (condenser) ทำหน้าที่เปลี่ยนสถานะของสารทำความเย็นจากสถานะแก๊สให้กลั่นตัวเป็นของเหลว ด้วยการระบายความร้อน

3) คอมเพสเซอร์ (compressor) ทำหน้าที่ดูดและอัดสารทำความเย็นจากคอยล์เย็น ส่งไปคอยล์ร้อน ก่อนส่งสารทำความเย็นกลับเข้าสู่คอยล์เย็น

2.8.4 เครื่องควบแน่น (condensate) ทำหน้าที่เก็บน้ำที่จับโดยคอยล์เย็น



ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบของเครื่องลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศ (Rennie, 1999)

2.9 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศ (Sun and Zheng, 2005)

2.9.1 นำผลิตผลที่จะลดอุณหภูมิวางในห้องสุญญากาศ และปิดห้องให้สนิท

2.9.2 เปิดเครื่องให้ทำงาน ปั๊มสุญญากาศจะดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ ความดันในห้องสุญญากาศจะเริ่มลดลงจนถึงระดับที่มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิผลิตผล ซึ่งเวลาที่ใช้ขึ้นอยู่กับขนาดของห้อง และประสิทธิภาพของปั๊มสุญญากาศ

2.9.3 เมื่อความดันในห้องสุญญากาศถึงระดับที่มีผลต่ออุณหภูมิของผลิตผล เรียกจุดนี้ว่า flash point เป็นจุดที่ความดันมีผลทำให้น้ำกลายเป็นไอน้ำ อุณหภูมิของผลิตผลจะเริ่มลดลงอย่างรวดเร็ว

2.9.4 เมื่อเกิดไอน้ำจำนวนมากขึ้นภายในห้องสุญญากาศ ไอน้ำดังกล่าวจะเกาะบนคอยล์เย็นและเกิดเป็นน้ำแข็ง

2.9.5 อุณหภูมิจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนครบระยะเวลาที่กำหนด หรือผลิตผลมีอุณหภูมิลดลงตามที่ต้องการ

2.9.6 เมื่อเสร็จสิ้นการลดอุณหภูมิ ปั๊มสุญญากาศจะหยุดทำงาน วาล์วระบายอากาศของห้องสุญญากาศจะเปิดออกเพื่อให้อากาศไหลกลับเข้าสู่ห้อง ห้องจะถูกเปิดออกและนำผลิตผลออกมาเก็บรักษาในห้องอุณหภูมิต่ำ

2.10 ผลของการลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศต่อคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวผลิตผลสด

ผักกาดหอมห่อที่ผ่านการลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศจากอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็น 1 องศาเซลเซียส แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส พบว่ามีอายุการวางจำหน่ายได้นาน 14 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับการเก็บรักษาผักกาดหอมห่อที่อุณหภูมิห้องมีอายุการเก็บรักษานาน 3-5 วัน (Zheng and Sun, 2006) และกฤษติยา (2552) รายงานว่าผักกาดหอมห่อที่ผ่านการลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศ แล้วเก็บรักษาในห้องเย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส สามารถเก็บได้นาน 17 วัน ในขณะที่ผักกาดหอมห่อที่ไม่ผ่านการลดอุณหภูมิมีอายุเก็บรักษานาน 3 วัน นอกจากนี้แบบสุญญากาศใช้ลดอุณหภูมิยอดซาโยเต้อินทรีย์จากอุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส เป็น 8 องศาเซลเซียส แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียส สามารถชะลอการสูญเสียน้ำหนักสด ชะลอการเน่าเสียและมีอายุการเก็บ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

รักษานาน 7 วัน ซึ่งต่างจากยอดซาโยเต้ที่ไม่ผ่านการลดอุณหภูมิก่อนเก็บรักษา ที่มีอายุการเก็บรักษา 5 วัน (เกษม, 2553) และจากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำตาลในเมล็ดข้าวโพดหวานของ Boyette *et. al.* (1990) พบว่าการเก็บรักษาข้าวโพดหวานที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ทำให้น้ำตาลสูญเสียไป 60 เปอร์เซ็นต์ จากปริมาณน้ำตาลทั้งหมดขณะเริ่มต้นเก็บรักษา และการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เมล็ดข้าวโพดหวานจะมีอัตราการสูญเสียน้ำตาลเป็น 4 เท่าเมื่อเทียบกับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 1, 4 และ 10 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 90-95 เปอร์เซ็นต์ ข้าวโพดหวานมีอายุการเก็บรักษานาน 8,5 และ 2 วัน ตามลำดับ (Thompson, 2003)

จากผลการศึกษาเปรียบเทียบการลดอุณหภูมิด้วยวิธีต่างๆ พบว่า การลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศมีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากสามารถใช้กับผลิตผลจำนวนมาก และใช้เวลาในการลดอุณหภูมิน้อยที่สุด Zhang and Sun (2006) ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการลดอุณหภูมิบรอคโคลี และแครอทหั่นชิ้น 4 วิธีการคือ การลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศ การลดอุณหภูมิด้วยวิธีเป่าลมเย็น (blast cooling) การลดอุณหภูมิด้วยห้องเย็น และการลดอุณหภูมิด้วยแผ่นทำความเย็น (plate cooling) พบว่า การลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศมีประสิทธิภาพสูง สามารถลดการสูญเสียน้ำหนักสดของบรอคโคลี และแครอทหั่นชิ้นได้ เนื่องจากใช้น้ำพ่นบนผลิตผลในระหว่างการลดอุณหภูมิ นอกจากนี้ Patrick (2005) พบว่าการลดอุณหภูมิข้าวโพดหวานแบบสุญญากาศใช้เวลาน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับการลดอุณหภูมิด้วยวิธีการผ่านลมเย็น และการใช้น้ำเย็น นอกจากนี้การลดอุณหภูมิข้าวโพดหวานก่อนเก็บรักษาสามารถชะลอการสูญเสียปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ความชื้น ตลอดอายุการเก็บรักษา ในผักกาดฮ่องเต้ที่ผ่านการลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศ โดยกำหนดความดันสุดท้ายในห้องสุญญากาศ (holding pressure) เท่ากับ 6 มิลลิลาร์ และให้ผลิตผลอยู่ภายใต้ความดันที่กำหนดเป็นเวลา (holding time) นาน 20 นาที และนำไปวางจำหน่ายที่อุณหภูมิ 5±2 องศาเซลเซียส พบว่ามีอายุวางจำหน่ายนาน 8 วัน ส่วนผักกาดฮ่องเต้ที่ไม่ได้ผ่านการลดอุณหภูมิมีอายุการวางจำหน่าย 4 วัน (วีนิล, 2552)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.11 บรรจุภัณฑ์ (Packaging)

บรรจุภัณฑ์ หมายถึง ภาชนะหรือโครงสร้างใดๆ ที่ใช้เพื่อบรรจุ ห่อหุ้ม และรวบรวมผลิตภัณฑ์ให้เป็นหน่วยเพื่อนำส่งถึงผู้บริโภคในสภาพที่สมบูรณ์ หน้าที่หลักข้อหนึ่งของ บรรจุภัณฑ์ คือ การถนอมรักษาและคุ้มครองผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่การผลิตจนถึงการนำมาบริโภค ในทางผลิตผลทาง

การเกษตรหมายถึง การรักษาให้มีคุณภาพทางประสาทสัมผัส คือ สี กลิ่น รส และเนื้อสัมผัส คุณค่าทางโภชนาการ และคุณภาพด้านความสะอาดปลอดภัย (งามทิพย์, 2550)

พลาสติกที่นิยมนำมาผลิตบรรจุภัณฑ์บรรจุอาหารสามารถแบ่งได้เป็น

2.11.1 พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) เป็นพลาสติกที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากมีราคาต่ำ เพราะมีจุดหลอมเหลวต่ำ สามารถขึ้นรูปและผลิตได้ง่าย บรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนมีคุณสมบัติดังนี้คือ มีความเฉื่อยต่อสารเคมีค่อนข้างสูง ป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้ดี และทนต่ออุณหภูมิต่ำได้ พอลิเอทิลีนแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) เป็นที่รู้จักในชื่อถุงเย็น สามารถนำมาผลิตฟิล์มหด และฟิล์มยืด เนื่องจากมีความเหนียวทนต่อการแทงทะลุ และฉีกขาด แต่แก๊สสามารถซึมผ่านได้ง่าย

2) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (Medium density polyethylene, MDPE) เป็นพลาสติกที่ไม่นิยมนำมาผลิตบรรจุภัณฑ์ใช้สำหรับอาหาร มักใช้ในการผลิต ตะกร้า ถัง และท่อน้ำ

3) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) เนื่องจากมีความหนาแน่นสูงจึงมีคุณสมบัติเหนียวและทน สามารถป้องกันการซึมผ่านของแก๊สได้ดี แต่มีความใสลดลง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงใช้ในการผลิตขวด และถาดพลาสติกเป็นส่วนใหญ่

2.11.2 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เป็นพลาสติกที่รู้จักในชื่อ ถุงร้อน เนื่องจากทนความร้อนได้ดี พอลิโพรพิลีนมีลักษณะใส ทนอุณหภูมิสูง ป้องกันการซึมผ่านของความชื้นและแก๊สได้ดี ต้านทานแรงดึงได้ดีกว่าพอลิเอทิลีน แต่มีความยืดหยุ่นน้อยกว่า

2.11.3 พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) เป็นพลาสติกที่ป้องกันการซึมผ่านของแก๊ส ไอน้ำ และไขมันได้น้อย ไม่ทนต่ออุณหภูมิสูง จึงไม่นิยมที่นำมาใช้กับการบรรจุอาหารที่มีอุณหภูมิสูง ตัวอย่างที่ใช้ในปัจจุบันคือ ถาดโฟม กล่องโฟม เป็นต้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.11.4 พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride, PVC) เป็นพลาสติกที่นิยมใช้มาก เนื่องจากมีคุณสมบัติป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ และแก๊ส มีลักษณะโปร่งใส เหนียว และทนต่อสารเคมี ปัจจุบันนำมาผลิตเป็นขวด และฟิล์ม (ปุ่น และสมพร, 2541)

2.12 การบรรจุแบบบรรยากาศดัดแปลง

จากคุณสมบัติที่หลากหลายของพลาสติกซึ่งนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่าง ผู้ผลิตอาหารสามารถเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ ในปัจจุบันการผลิตอาหารได้เปลี่ยนไปเป็นระบบอุตสาหกรรมที่มีการผลิตจำนวนมาก และต้องส่งจำหน่ายในพื้นที่ห่างไกล จึงมีการพัฒนารูปแบบการบรรจุเพื่อรักษาคุณภาพ และยืดอายุการเก็บรักษาให้ยาวนาน โดยนำวิธีการดัดแปลงสภาพบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์มาใช้ ซึ่งจะเปลี่ยนส่วนประกอบของอากาศปกติ ที่มีแก๊สออกซิเจน 21 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 78 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนไดออกไซด์ 0.03 เปอร์เซ็นต์ ให้มีปริมาณแก๊สออกซิเจนน้อยลง และเพิ่มปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือแก๊สไนโตรเจนให้มากขึ้น เรียกวิธีการนี้ว่า การบรรจุแบบดัดแปลงบรรยากาศ หรือ modified atmosphere packaging : MAP (Parry, 1993)

2.13 ประโยชน์ของการบรรจุผัก และผลไม้ในสภาพบรรยากาศดัดแปลง

2.13.1 ชะลออัตราการหายใจของผลิตผล

ปฏิกิริยาการหายใจของพืชเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันสารอาหารที่สะสมภายในเซลล์พืช เพื่อสร้างพลังงานสำหรับการดำรงชีวิต อาหารที่สะสมในพืชจึงหมดไปอย่างรวดเร็ว เมื่อผลิตผลมีอัตราการหายใจสูงจะมีอายุสั้น แก๊สออกซิเจนเป็นสารที่ใช้ในการออกซิเดชันร่วมกับน้ำตาลในกระบวนการสร้างพลังงานของผลิตผล การควบคุมแก๊สออกซิเจนในบรรยากาศที่เก็บรักษาผลิตผลให้มีปริมาณต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ผลิตผลมีอัตราการหายใจลดลง และสามารถหยุดการหายใจได้เมื่อมีปริมาณแก๊สออกซิเจน 2-4 เปอร์เซ็นต์ ตามชนิดของผลิตผล (Aruanitoyannis and Bouletis, 2012) ส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ สามารถชะลออัตราการหายใจของพืช แต่ถ้าสูงเกินไปพืชก็อาจจะหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนแม้ว่าในสภาพบรรยากาศจะมีแก๊สออกซิเจน ซึ่งกรณีนี้จะขึ้นกับชนิดของผลิตผล ใน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สภาพที่มีแก๊สออกซิเจนไม่เพียงพอ พืชจะหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic respiration) และเกิดแอลกอฮอล์ และแอลดีไฮด์ (aldehyde) ทำให้เกิดกลิ่น และรสผิดปกติ (off-flavor) เซลล์ของพืชจะถูกทำลาย รวมถึงเพิ่มอัตราการหายใจ เนื่องจากการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้พลังงานน้อยกว่าการหายใจแบบใช้ออกซิเจน (งามทิพย์, 2538) ผลของแก๊สออกซิเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการชะลอการหายใจ และเมแทบอลิซึมต่างๆ ในพืชจะส่งเสริมกัน คือ การใช้แก๊สเพียงชนิดใดชนิดหนึ่งจะมีผลน้อยกว่าการใช้ร่วมกันทั้งสองชนิด

2.13.2 ชะลอการสังเคราะห์เอทิลีน

เอทิลีนเป็นฮอร์โมนพืชที่มีผลกระตุ้นการสุก และเสื่อมสภาพผลิตผล ความเข้มข้น 0.1 ส่วนในล้านส่วน สามารถกระตุ้นให้พืชเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้น การลดความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนในบรรยากาศให้น้อยกว่า 8 เปอร์เซ็นต์ จะลดการสังเคราะห์เอทิลีนได้ นอกจากนี้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงสามารถป้องกันผลกระทบของเอทิลีนที่มีต่อพืชได้ด้วย (Robertson, 2006)

2.13.3 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของผลิตผล

การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในผลิตผลจะแสดงออกมาในรูปของการเปลี่ยนแปลงด้านคุณภาพทางประสาทสัมผัส คือ สี เนื้อสัมผัส กลิ่น รส และคุณค่าทางอาหาร

1) การเปลี่ยนสี ในสภาพที่มีแก๊สออกซิเจนน้อยและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากจะลดการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ ทำให้ผลิตผลนั้นมีสีสดนาน
2) การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส การบรรจุผลิตผลในสภาพบรรยากาศดัดแปลงจะช่วยชะลออัตราการหายใจ และการสังเคราะห์เอทิลีนจึงเป็นการชะลอการสุก การเสื่อมสภาพ ส่งผลให้เนื้อสัมผัสไม่เกิดการอ่อนนิ่ม
3) การเปลี่ยนกลิ่นรส กลิ่นและรสของผลิตผลเกิดจากกระบวนการหายใจ และเมแทบอลิซึมต่างๆ เมื่อนำผลิตผลบรรจุในสภาพบรรยากาศดัดแปลงจะส่งผลต่อกลิ่นและรสของผลิตผล เช่น มันฝรั่งที่เก็บในสภาพที่มีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 5-20 เปอร์เซ็นต์ และมีแก๊สออกซิเจนน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ จะไม่เปลี่ยนแป้งไปเป็นน้ำตาล

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4) การเปลี่ยนแปลงคุณค่าทางอาหาร การบรรจุผลิตผลในสภาพบรรยากาศดัดแปลงจะช่วยรักษาปริมาณกรดแอสคอร์บิค (ascorbic acid) หรือวิตามินซีในผลิตผลดีกว่าการเก็บรักษาในสภาพปกติ (งามทิพย์, 2538; Aruanitoyannis and Bouletis, 2012)

2.13.4 ลดการเน่าเสียเนื่องจากจุลินทรีย์

การดัดแปลงสภาพบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ ให้มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ได้ เช่น ยับยั้งการเจริญของเชื้อ *Botrytis cinerea* และ *Rhizopus stolonifer* บนผล สตรอเบอรี บลูเบอรี และราสเบอรี เป็นต้น

ในแง่ของการจัดการหลังการเก็บเกี่ยว การใช้บรรจุภัณฑ์แบบดัดแปลงสภาพบรรยากาศกับผัก และผลไม้นิยมใช้ร่วมกับการลดอุณหภูมิให้ต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิต่ำเป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมการทำงานของเอนไซม์ในกระบวนการหายใจ และเมแทบอลิซึมต่างๆ ของผลิตผล ทำให้ผลิตผลสามารถเก็บรักษาได้ยาวนานขึ้น (Robertson, 2006)

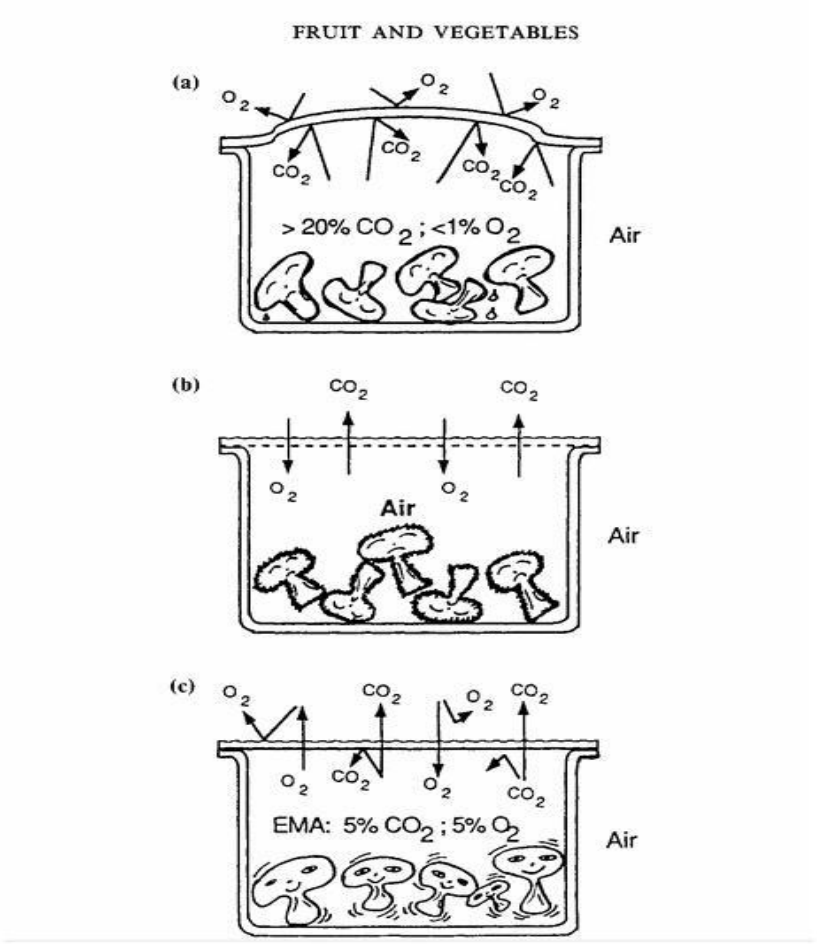
2.14 บรรจุภัณฑ์แบบแอกทีฟ (Active packaging)

บรรจุภัณฑ์แบบแอกทีฟเป็นรูปแบบหนึ่งของการบรรจุในสภาพบรรยากาศดัดแปลง เป็นบรรจุภัณฑ์ที่สามารถกำจัดองค์ประกอบที่ไม่ต้องการ (unwanted component) ภายในบรรจุภัณฑ์ออก และการเติมสารบางชนิดที่ต้องการ หรือป้องกันกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ หรือเปลี่ยนแปลงการผ่านของแก๊ส เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง มีคุณสมบัติแตกต่างจากฟิล์มทั่วไป ซึ่งจะไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปัจจัยทางกายภาพในบรรจุภัณฑ์ (พรชัย, 2552) เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา รวมถึงการเพิ่มความปลอดภัยให้กับอาหารภายใน การบรรจุแบบแอคทีฟมีหลายวิธีการ ได้แก่ การใช้วัตถุดูดกลืน (absorb) มีลักษณะแผ่นหรือซองสำหรับดูดกลืนแก๊สออกซิเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เอทิลีน หรือความชื้น การดูดซับ (adsorption) การใช้วัตถุปลดปล่อยสาร (emitter) รวมถึงการบรรจุภายใต้บรรยากาศแก๊ส (Robertson, 2006)

จากองค์ความรู้ทางวัสดุศาสตร์ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติของฟิล์มพลาสติกที่ยอมให้แก๊ส และความชื้นผ่านเข้า-ออก และสามารถเกิดสภาพบรรยากาศที่เปลี่ยนแปลงไปภายในบรรจุภัณฑ์ได้ ปัจจุบันนักพัฒนาบรรจุภัณฑ์ได้นำเทคโนโลยีการปรับแต่งโครงสร้างของพอลิเมอร์ระดับโมเลกุล ทำให้ฟิล์มที่นำมาผลิตบรรจุภัณฑ์ยอมให้แก๊สซึมผ่านได้สูงขึ้น สามารถเลือกประเภทของแก๊สที่ผ่าน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เข้าออก และเกิดภาวะบรรยากาศดัดแปลงแบบสมดุล (equillibrium modified atmosphere package) (ภาพที่ 2.2) ซึ่งส่งผลต่ออัตราการหายใจ การคายน้ำ และชะลอการเสื่อมสภาพของผลิตผลทางการเกษตรตามที่ผู้ใช้ต้องการ (กาญจนา, 2548)



Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาพที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบผลของบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกัน a) บรรจุภัณฑ์ที่ไม่ยอมให้แก๊สซึมผ่านได้ : เกิดสภาพไม่เหมาะสม มีการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน b) บรรจุภัณฑ์ที่แก๊สผ่านเข้าออกได้สะดวก : ไม่สามารถควบคุมสภาพบรรยากาศภายในได้ และ c) บรรจุภัณฑ์ที่ควบคุมการผ่านเข้าออกของแก๊สได้ : สภาพบรรยากาศภายในเกิดสภาพบรรยากาศดัดแปลงแบบสมดุล (Day, 1993)

2.15 ผลของการบรรจุในสภาพบรรยากาศดัดแปลง

สมโภชน์ และคณะ (2553) ศึกษาอายุการเก็บรักษาแครอทหั่นชิ้นในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศที่มีสัดส่วน N_2:CO_2:O_2 เท่ากับ 90:5:5 และ 85:10:5 แล้วเก็บที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 90-95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าสามารถเก็บรักษาผลิตผลตัวอย่างได้นาน 2 เดือน เมื่อเทียบกับการบรรจุในถุงพอลิเอทิลีนที่เก็บรักษาได้นาน 1 เดือน การบรรจุในสภาพบรรยากาศดัดแปลงนอกจากจะสามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลสดแล้วยังส่งผลต่อคุณภาพด้านอื่น ซึ่งมันเทศที่เก็บรักษาโดยบรรจุในถุงพอลิเอทิลีมีการสูญเสียน้ำหนักสดลดลง (Thompson, 2002) นอกจากนี้การใช้ฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) หุ้มข้าวโพดหวานเพื่อขนส่งและวางจำหน่ายทำให้ในบรรจุภัณฑ์มีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ปริมาณแก๊สออกซิเจนลดลงและสูญเสียน้ำหนักสดน้อยลง โดยที่อุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส สามารถวางจำหน่ายข้าวโพดหวานได้นาน 12 วัน ในขณะที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เก็บรักษาได้นาน 2 วัน (Aharoni, 1996) มีรายงานของ Charles (2007) ถึงการสูญเสียสีเขียว และลดการเกิดสีน้ำตาลใน เอนไดว์ (*Cichorium intybus* L.) ที่บรรจุในสภาพบรรยากาศดัดแปลง ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์มีผลต่อคุณภาพของผลิตผลสด การศึกษาผลของบรรจุภัณฑ์แอกทีฟในการรักษาคุณภาพของเห็ดหอม (*Lentinula edodes*) หลังการเก็บเกี่ยวร่วมกับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ พบว่าการใช้บรรจุภัณฑ์แบบแอกทีฟที่ทำให้เกิดการสะสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 7-10 เปอร์เซ็นต์ และมีแก๊สออกซิเจน 2 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สามารถเก็บรักษาเห็ดหอมได้นาน 17 วัน โดยที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นสูงส่งผลให้เห็ดหอมมีอัตราการหายใจลดลง สูญเสียความแน่นเนื้อน้อยลง สูญเสียน้ำตาล วิตามินซี และ polyphenol oxidase ช้าลง รวมถึงเกิดสีน้ำตาลช้าลง (Ye *et al.*, 2012)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved