บทที่ 2

หลักการพื้นฐาน

โดยทั่วไป บรรจุภัณฑ์มีหน้าที่หลักคือ ป้องกันผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่ภายในจากผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม ส่วนจุดประสงค์อื่น ๆ ของบรรจุภัณฑ์ ได้แก่ เพื่อให้เกิดความสะดวกในการขนส่ง เพื่อความสวยงาม หรือเพื่อสื่อสาร โฆษณา ถึงผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายใน นอกจากนี้บรรจุภัณฑ์บางประเภท เช่น บรรจุภัณฑ์ที่ยอมให้ก๊าซซึมผ่านได้ ยังมีประโยชน์ในการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่ภายในให้ยาวนานขึ้น การบรรจุผักและผลไม้สดในบรรยากาศดัดแปรก็เป็นวิธีการหนึ่ง ซึ่งการยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สดโดยวิธีนี้นั้นต้องอาศัยความรู้ในหลาย ๆ ด้านมาประกอบเข้าด้วยกันทั้งความรู้ในด้านการหายใจของผักและผลไม้สด ปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการหายใจ วิธีการเก็บรักษาแบบบรรยากาศดัดแปร ตลอดจนถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์เพื่อให้เกิดบรรยากาศดัดแปร ซึ่งจะได้กล่าวถึงดังต่อไปนี้

2.1 การหายใจของผักและผลไม้สด

การหายใจเป็นกระบวนการทางชีวเคมีที่มีความสำคัญมากที่สุดกระบวนการหนึ่งในสิ่งมีชีวิต เพราะเป็นกระบวนการที่พลังงานซึ่งอยู่ในรูปอาหารสะสมถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของพลังงาน (Adenosine Triphosphate, ATP) ที่สามารถนำไปใช้สำหรับกิจกรรมต่าง ๆ เช่น การเจริญเติบโต การเคลื่อนย้ายอาหาร และการขยายพันธุ์ ได้ทันที แม้แต่ในส่วนของสิ่งมีชีวิตที่ไม่มีการเจริญเติบโตแล้วก็ยังต้องการพลังงานในการรักษาชีวิตให้คงอยู่ เช่น การรักษาคุณสมบัติในการควบคุมการผ่านเข้าออกของสารต่าง ๆ ของเยื่อหุ้มเซล (cell membrane) อาหารสะสมในพืชได้จากการสังเคราะห์แสงแต่อาจสะสมอยู่ในรูปต่าง ๆ กัน เช่น น้ำตาล แป้ง หรือไขมัน เมื่ออาหารเหล่านี้ถูกใช้ไปในกระบวนการหายใจ พืชก็สามารถสร้างทดแทนขึ้นมาใหม่ได้ แต่หลังจากการเก็บเกี่ยวจากต้นแล้ว กระบวนการหายใจและการสันดาป (metabolism) ต่าง ๆ ของผักและผลไม้สดที่นำไปสู่ความแก่ (maturation) ความสุก (ripening) และความเน่าเสีย (senescence) ตามลำดับ ยังเกิดต่อเนื่องตลอดเวลา

กระบวนการหายใจของพืชเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (oxidation) และรีดักชั่น (reduction) ของสารอาหารที่สะสมภายในเซลพืชเพื่อสร้างพลังงานที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิต ถ้าพืชอยู่ในสภาวะที่มีก๊าซออกซิเจนในบรรยากาศเพียงพอจะเกิดการหายใจแบบใช้ก๊าซออกซิเจน (aerobic respiration) ซึ่งเป็นไปดังสมการที่ 2.1 [2,4,6,27,30,31]

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 38ADP + 38Pi \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 38ATP \quad (2.1)$$

กระบวนการหายใจที่เกิดขึ้นนี้ประกอบด้วยปฏิกิริยาย่อยหลายขั้นตอน เช่น ปฏิกิริยาฟอสฟอรีเลชั่น (phosphorylation) ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซีเลชั่น (decarboxylation ปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (oxidation)) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (hydration) และปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชั่น (isomerization) เป็นต้น และแต่ละขั้นตอนจะมีเอนไซม์ (enzyme) หลายชนิดภายในเซลช่วยในการดำเนินไปของปฏิกิริยาด้วย [30,31]

น้ำตาลที่ได้จากการย่อยแป้งโดยเอนไซม์จะถูกออกซิไดซ์ให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และพลังงาน ซึ่งพลังงานส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการชีวเคมีของพืช ส่วนที่เหลือจะถูกปล่อยออกมาในรูปของความร้อน นอกจากนี้ยังได้สารประกอบที่ให้กลิ่นรส (flavor compounds) เฉพาะตัวของผักและผลไม้ออกมาด้วย

น้ำที่ได้จากกระบวนการหายใจจะยังคงอยู่ภายในเนื้อเยื่อของพืช แต่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตได้จะถูกขับออกจากเนื้อเยื่อ ซึ่งการสูญเสียก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นี้นับว่าเป็นการสูญเสียน้ำหนักของผักและผลไม้สด อย่างไรก็ตามการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากเหตุนี้ถือว่ามีผลน้อยมาก เพราะว่าน้ำหนักของผักและผลไม้สดนี้จะสูญหายเพียงร้อยละ 3-5 [30]

เมื่อความดันของก๊าซออกซิเจนลดลงจนถึงระดับหนึ่งที่ปริมาณก๊าซออกซิเจนไม่เพียงพอให้พืชใช้ในการหายใจแบบใช้ก๊าซออกซิเจน พืชจะเปลี่ยนไปหายใจแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจน (anaerobic respiration) ซึ่งจะเป็นปฏิกิริยาที่เกิดการออกซิเดชั่นที่ไม่สมบูรณ์ และให้แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ (aldehyde) หรือกรดออกมา เช่น เอทานอล (ethanol) อะเซตัลดีไฮด์ (acetaldehyde) กรดแลคติก (lactic acid) เป็นต้น ซึ่งปฏิกิริยาการหายใจแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจนสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.2 [4,6,27]

$$C_6H_{12}O_6 + 2ADP + 2Pi + 2H^+ \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2 + 2H_2O + 2ATP \quad (2.2)$$

การหายใจแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจนจะสร้างพลังงานน้อยกว่าการหายใจแบบปกติมาก [30,31] โดยสำหรับการหายใจแบบใช้ก๊าซออกซิเจนจะได้พลังงาน 38 ATP ส่วนการหายใจแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจนได้พลังงานเพียง 2 ATP เท่านั้น ทำให้พืชต้องเพิ่มการหายใจให้มากขึ้นเพื่อให้ได้พลังงานเพียงพอกับความต้องการ จึงเป็นการเร่งการใช้สารอาหารที่สะสมในพืช เมื่อคาร์โบไฮเดรตถูกใช้ไปหมด พืชจะนำโปรตีนและไขมันมาใช้แทนพร้อมกับสร้างกรดและแอลกอฮอล์ออกมาด้วย ทำให้เกิดกลิ่นรสที่ผิดปกติมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้การสะสมของแอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ และกรดอินทรีย์ทำให้เกิดกลิ่นรสผิดปกติ (off-flavor) [8] และเซลพืชถูกทำลาย เป็นผลให้ปฏิกิริยาชีวเคมีต่าง ๆ เกิดได้มากขึ้น และเชื้อจุลินทรีย์เข้ามาทำให้เกิดการเน่าเสียได้ง่ายยิ่งขึ้น [4] ดังนั้นการกำหนดความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่เหมาะสมต่อพืชชนิดหนึ่ง ๆ ในการเก็บรักษาภายใต้บรรยากาศดัดแปรนั้น จะพิจารณาจากอัตราการหายใจที่ลดลงเพียงอย่างเดียวไม่ได้ แต่จะต้องคำนึงถึงความทนทานของพืชต่อก๊าซออกซิเจนความเข้มข้นต่ำ ๆ ด้วย มิฉะนั้นจะเกิดการเสื่อมสภาพเร็วยิ่งกว่าการเก็บรักษาในบรรยากาศปกติ ความเข้มข้นต่ำสุดของก๊าซออกซิเจนสำหรับผักและผลไม้สดบางชนิดแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 [4,15,21]

ตารางที่ 2.1 ความเข้มข้นต่ำสุดของก๊าซออกซิเจน
ที่ผักและผลไม้บางชนิดสามารถทนได้ [4,15,21]

ระดับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนต่ำสุด (ร้อยละโดยปริมาตร)	ชนิดของผักและผลไม้สด
1	แอปเปิล บรอคโคลี่ เห็ด ลูกแพร์
2	แอปริคอท ถั่วงอก กะหล่ำปลี แคนตาลูป กะหล่ำดอก ขึ้นฉ่าย เชอรี่ ข้าวโพด ผลกีวี่ มะละกอ ลูกท้อ สับปะรด พลัม สตรอเบอรี่
3	อะโวกาโด แตงกวา มะเขือเทศ
5	หน่อไม้ฝรั่ง ผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว มันฝรั่ง

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นสูง ๆ (ตั้งแต่ร้อยละ 1 โดยปริมาตร) สามารถชะลออัตราการหายใจของพืชได้เช่นกัน แต่ถ้าความเข้มข้นสูงเกินไปตั้งแต่ประมาณร้อยละ 20 โดยปริมาตรหรือสูงกว่า (ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของพืชและความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่มีอยู่ด้วย) อาจทำให้เกิดการสร้างและสะสมแอลกอฮอล์และแอลดีไฮด์ภายในเซลพืช เนื่องจากพืชไม่สามารถหายใจตามปกติได้จึงหายใจแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจน [4,8] นอกจากนี้ยังมีการค้นพบอีกว่า ก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 5-20 โดยปริมาตร อาจเป็นเหตุให้เอนไซม์ในวงจรเครบ (Krebs' Cycle) ทำงานผิดปกติ ทำให้การหายใจเปลี่ยนไปเป็นแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจน [14] นอกจากนี้ยังพบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเซล เช่น การลดขนาดและเปลี่ยนรูปร่างของไมโตคอนเดรีย (mitochondria) ซึ่งเชื่อว่าเกี่ยวข้องโดยตรงกับการเน่าเสียของพืช (senescence) [4] อย่างไรก็ตามกลไกการทำงานของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อการหายใจและการสันดาปต่าง ๆ ในเซลพืชยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด [4]

ในทำนองเดียวกับก๊าซออกซิเจน การกำหนดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับผักและผลไม้แต่ละชนิดในการเก็บรักษาภายใต้บรรยากาศดัดแปรนั้น ต้องพิจารณาความทนทานของพืชต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นสูงด้วย ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดสำหรับผักและผลไม้บางชนิด [4,15,21]

ตารางที่ 2.2 ความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผักและผลไม้บางชนิดสามารถทนได้ [4,15,21]

ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด (ร้อยละโดยปริมาตร)	ชนิดของผักและผลไม้สด
2	แอปเปิล(พันธุ์โกลเด้นดิลิเชียส) แอปปริคอท ขึ้นฉ่าย องุ่น กะหล่ำ ลูกแพร์ มันฝรั่งหวาน มะเขือเทศ
5	แอปเปิล(พันธุ์อื่น ๆ) อะโวกาโด กล้วยหอม ถั่วงอก กะหล่ำปลี ส้ม แครอท กะหล่ำดอก ผลกีวี่ มะม่วง มะละกอ ลูกท้อ พลัม หัวไช้เท้า
10	หน่อไม้ฝรั่ง บรอคโคลี่ แตงกวา มะนาว สับปะรด ผักชีฝรั่ง มันฝรั่ง
15	บลูเบอรี่ แบล็คเบอรี่ แคนตาลูป เชอรี่ ข้าวโพด เห็ด สตรอเบอรี่ ผักขม ราสเบอรี่

นอกจากนี้กระบวนการหายใจยังทำให้เกิดการสูญเสียน้ำของผักและผลไม้สด คิดเป็นปริมาณ 0.024 กรัมต่อกิโลกรัมของผักหรือผลไม้ต่อชั่วโมง หรือประมาณร้อยละ 1.71 โดยน้ำหนักต่อเดือน ซึ่งนับว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับอัตราการการสูญเสียน้ำของผักและผลไม้จากการคายน้ำ [27]

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการหายใจ

ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ปัจจัยภายใน และ ปัจจัยภายนอก

2.2.1 ปัจจัยภายในที่มีผลต่อการหายใจ

ผักและผลไม้สดต่าง ๆ ที่เก็บเกี่ยวมาแล้วมีอายุการเก็บรักษาแตกต่างกันมาก บางชนิดเก็บรักษาไว้ได้เพียงชั่วข้ามคืน เช่น เห็ด แต่บางชนิดก็เก็บรักษาได้เป็นปี อายุการเก็บรักษานี้มีความเกี่ยวข้องกับอัตราการการหายใจของผักและผลไม้นั้นเป็นอย่างมาก พวกที่มีอัตราการหายใจสูงมักจะมีอายุการเก็บรักษาสั้นกว่าพวกที่มีอัตราการหายใจต่ำ โดยสามารถจำแนกชนิดของผลิตผลต่าง ๆ นี้ออกเป็นกลุ่มตามอัตราการหายใจได้ดังแสดงในตารางที่ 2.3 [27]

ตารางที่ 2.3 อัตราการหายใจของผักและผลไม้บางชนิด [27]

ประเภทของอัตราการหายใจ	อัตราการหายใจสูงสุดที่ 25°ซ (อัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์) (มก. CO_2 / กก.ชม.)	ชนิดของผักและผลไม้
ต่ำมาก	< 5	เมล็ดมะม่วงหิมพานต์
ต่ำ	5 – 20	ส้ม กะหล่ำปลี หอมหัวใหญ่ มันฝรั่ง
ปานกลาง	20 100	เงาะ มังคุด มะเขือเทศ มะละกอ มะเขือยาว ผักกาดขาวปลี
สูง	100 – 200	น้อยหน่า หน่อไม้ฝรั่ง ผักคะน้า ผักบุ้งจีน มะม่วง
สูงมาก	> 200	ข้าวโพดอ่อน ทุเรียน ถั่วฝักยาว เห็ด

ปัจจัยภายในที่มีผลต่ออัตราการหายใจสามารถจำแนกได้ดังนี้

ก. พันธุกรรม

พันธุกรรมที่แตกต่างกันของผลิตผลแต่ละชนิดย่อมส่งผลให้มีอัตราการหายใจแตกต่างกันไป ผลส้มที่เก็บเกี่ยวมาแล้วไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เกิดขึ้นชัดเจน เพราะมีอัตราการหายใจต่ำกว่าผลไม้ชนิดอื่น เช่น กล้วย มะม่วง ทุเรียน ซึ่งต่างก็มีการสุกเกิดขึ้น การเปลี่ยนแปลงดังกล่าว

ย่อมต้องอาศัยพลังงานจากการหายใจมาใช้จำนวนมาก กะหล่ำดอกและบรอคโคลี่เป็นพืชที่อยู่ในสปีชี่ (species) เดียวกัน ส่วนที่ใช้ในการบริโภคก็เป็นช่อดอกเหมือนกัน แต่อัตราการหายใจกลับต่างกันทั้งนี้ก็เพราะพันธุกรรมที่แตกต่างกัน [4,27]

ข. ส่วนของพืชที่เก็บเกี่ยว

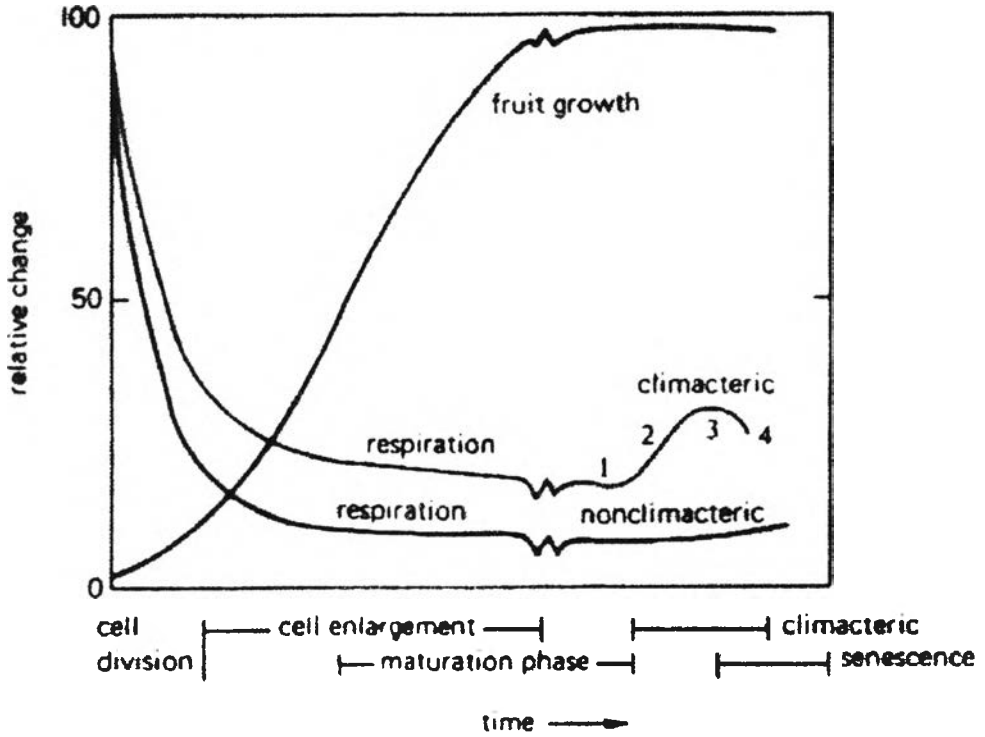
จากตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่าผลิตผลที่กำลังเจริญเติบโต เช่น หน่อไม้ฝรั่ง มีอัตราการหายใจค่อนข้างสูง เพราะว่าต้องใช้พลังงานไปในการเสริมสร้างส่วนต่าง ๆ แต่ในขณะที่ผลิตผลที่อยู่ในระหว่างการพักตัว เช่น มันฝรั่ง หอมหัวใหญ่ มีอัตราการหายใจต่ำมาก

ค. การเจริญเติบโตภายหลังการเก็บเกี่ยว

อัตราการหายใจของพืชในส่วนที่กำลังเริ่มเจริญเติบโตจะสูงมาก และจะลดต่ำลงเรื่อย ๆ เมื่อส่วนนั้นได้เจริญเติบโตขึ้นแล้ว โดยสามารถจำแนกประเภทของผลไม้ตามอัตราการหายใจในช่วงที่กำลังเจริญเติบโตได้เป็น 2 ประเภท คือผลไม้แบบไคลแมคเทอริก (climacteric type) และผลไม้แบบนอนไคลแมคเทอริก (non-climacteric type) สำหรับผลไม้แบบไคลแมคเทอริก ในช่วงเริ่มต้นของการเจริญเติบโต อัตราการหายใจและการสันดาปที่เกี่ยวข้อง เช่น การสังเคราะห์เอทิลีนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดสูงสุดเรียกว่าจุดไคลแมคเทอริก หลังจากนั้นอัตราการหายใจจะค่อย ๆ ลดลง ซึ่งการหายใจแบบนี้ยังคงเกิดขึ้นแม้ว่าพืชจะถูกเก็บเกี่ยวแล้ว และพบว่าปริมาณเอทิลีนมีผลต่ออัตราการหายใจด้วย ส่วนผลไม้แบบนอนไคลแมคเทอริก อัตราการหายใจจะค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงการเจริญเติบโต และความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนไม่มีผลกระทบต่ออัตราการหายใจมากนัก ส่วนผักโดยส่วนใหญ่จะมีพฤติกรรมเหมือนกับผลไม้แบบนอนไคลแมคเทอริก ยกเว้นมะเขือเทศ การเปรียบเทียบอัตราการหายใจของผลไม้แบบไคลแมคเทอริกและแบบนอนไคลแมคเทอริกแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 [27] และตัวอย่างของผลไม้แบบไคลแมคเทอริกและแบบนอนไคลแมคเทอริกแสดงไว้ในตารางที่ 2.4 [9,27]

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างของผลไม้แบบไคลแมคเทอริกและแบบนอนไคลแมคเทอริก [9,27]

ประเภทของผลไม้	ชนิดของผลไม้
ไคลแมคเทอริก	กล้วย ขนุน มังคุด ละมุด มะเขือเทศ มะเดื่อ มะละกอ บ๊วย มะม่วง ท้อ
นอนไคลแมคเทอริก	แอปเปิล อะโวกาโด แคนตาลูป สาลี่ พลับ แอปปริคอท อะโวกาโด แพร์ แตงกวา ชมพู่ มะนาว พริก ส้ม ลิ้นจี่ ลำไย สับปะรด เชอรี่ แตงโม ส้ม มะม่วงหิมพานต์ องุ่น สตรอเบอรี่ บลูเบอรี่ มะกอก แตงกวา เกรพฟรุต



รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบอัตราการหายใจของผลไม้แบบไคลแมคเทอริก และแบบนอนไคลแมคเทอริกในช่วงของการเจริญเติบโตระยะต่าง ๆ [27]

ง. สารตั้งต้นของการหายใจ

สารตั้งต้นของกระบวนการหายใจมักเป็นสารอาหารพวกคาร์โบไฮเดรต ซึ่งจำนวนของก๊าซออกซิเจนที่ถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยานั้นเท่ากับปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาหรือมีอัตราส่วนระหว่างปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 1 อัตราส่วนนี้เรียกว่า **อัตราส่วนการหายใจ** (respiratory quotient, RQ) โดยผักและผลไม้ที่ใช้สารชนิดอื่นเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาจะมีอัตราส่วนนี้แตกต่างกันออกไป เช่น ถ้าใช้ไขมันเป็นสารตั้งต้น อัตราส่วนการหายใจจะมีค่าน้อยกว่า 1 แต่ถ้าใช้กรดอินทรีย์เป็นสารตั้งต้น อัตราส่วนการหายใจจะมีค่ามากกว่า 1 และสำหรับการหายใจแบบใช้ก๊าซออกซิเจนพบว่าอัตราส่วนการหายใจมีค่าอยู่ระหว่าง 0.7 – 1.5 [5,27] โดยถ้าค่าอัตราส่วนการหายใจสูงกว่านี้จะบ่งบอกถึงสภาวะการเกิดการหายใจแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจน ตัวอย่างของค่าอัตราส่วนการหายใจของผักและผลไม้ต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.5 [5,7,17,18,28,41,45]

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างค่าอัตราส่วนการหายใจของผักและผลไม้สดชนิดต่าง ๆ [5,7,17,18,28,41,45]

ผักและผลไม้	ค่าอัตราส่วนการหายใจ (RQ)
บรอคโคลี่	0.707 – 0.86
กะหล่ำปลี	0.8 – 0.853
ผักกาดหอม	0.962
บลูเบอรี่	1.2 – 1.3
สตรอเบอรี่	1.7

2.2.2 ปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการหายใจ

นอกจากปัจจัยภายในของผักและผลไม้ที่มีต่อการหายใจดังกล่าวในหัวข้อ 2.2.1 แล้ว ยังมีปัจจัยภายนอกที่มีอิทธิพลต่อการหายใจอย่างมาก 3 ปัจจัยคือ อุณหภูมิ องค์ประกอบของบรรยากาศ และความเครียดทางกายภาพ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีความสำคัญต่ออายุการเก็บรักษาผักและผลไม้เป็นอย่างมาก เพราะเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมให้เหมาะสมกับผลิตผลแต่ละชนิดได้ง่าย ต่างกับปัจจัยภายในซึ่งมักเกี่ยวข้องกับพันธุกรรมทำให้ยากแก่การควบคุม

ก. อุณหภูมิ

การใช้บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรเก็บรักษาผักและผลไม้สดให้ได้ประโยชน์สูงสุดจะต้องมีการลดอุณหภูมิระหว่างการเก็บรักษาให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมกับชนิดของผักและผลไม้ควบคู่กันไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการหายใจและการสันดาป (metabolism) ในพืชถูกควบคุมโดยเอนไซม์หลายชนิดและอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมการทำงานของเอนไซม์เหล่านี้ อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ในพืชแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิแบบเอกซ์โพเนนเชียล และอธิบายได้โดยสมการของอาเรเนียส (Arrhenius equation) [2,8,15] ดังสมการ 2.3

$$r = r_0 e^{\left(\frac{-E_{af}}{RT}\right)} \qquad (2.3)$$

โดย r คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา

r_0 คือ ค่าพารามิเตอร์พรีเอกซ์โพเนนเชียล (pre-exponential parameter)

E_{af} คือ พลังงานก่อกัมมันต์ของการหายใจ (respiration activation energy)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature)

อุณหภูมิที่สูงขึ้นย่อมกระตุ้นให้สสารทุกอย่างมีพลังงานภายในสูงขึ้น ปฏิกิริยาต่าง ๆ รวมทั้งการหายใจก็สามารถเกิดขึ้นได้ในอัตราที่สูงขึ้น โดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น 10 เคลวิน ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดเร็วขึ้นประมาณ 2 เท่า การเปรียบเทียบอัตราการหายใจโดยมากจะใช้ค่าอัตราส่วนอุณหภูมิ (temperature quotient, Q_{10}) ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนระหว่างอัตราการหายใจของผักและผลไม้ที่อุณหภูมิหนึ่งกับอัตราการหายใจของผักและผลไม้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมินั้น 10 เคลวิน โดยค่าอัตราส่วนอุณหภูมิสามารถคำนวณได้ดังสมการ 2.4

$$Q_{10} = \frac{R_2}{R_1} \qquad (2.4)$$

โดย Q_{10} คือ อัตราส่วนอุณหภูมิ

R_1 คือ อัตราการหายใจที่อุณหภูมิ T_1

R_2 คือ อัตราการหายใจที่อุณหภูมิ T_2

หรือกรณีที่ความแตกต่างอุณหภูมิไม่เท่ากับ 10 เคลวิน สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.5

$$Q_{10} = \left[\frac{R_2}{R_1}\right]^{\frac{10}{T_2 - T_1}} \qquad (2.5)$$

โดย T_1 คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

T_2 คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ซึ่งมากกว่า T_1 (เคลวิน)

ค่าอัตราส่วนอุณหภูมิของผักและผลไม้ทั่วไปมีค่าประมาณ 2.5-4 ในช่วง 0-10 องศาเซลเซียส มีค่า 2.0-2.5 ในช่วง 10-20 องศาเซลเซียส มีค่า 1.5-2.0 ในช่วง 20-30 องศาเซลเซียส และมีค่า 1.0-1.5 ในช่วง 30-40 องศาเซลเซียส ตัวอย่างค่าอัตราส่วนอุณหภูมิของผักบางชนิดที่อุณหภูมิในการเก็บรักษาต่าง ๆ ถูกแสดงดังตารางที่ 2.6 [27,30]

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างอัตราส่วนอุณหภูมิ (Q_{10}) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของผักบางชนิด [27,30]

ชนิดผัก	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	0-5	5-10	10-15	15-20
หน่อไม้ฝรั่ง	3.3	4.2	1.2	2.3
บรอคโคลี่	5.2	4.6	3.9	2.7
บรัสเซลสเพราท์ (brussels sprouts)	4.9	2.7	1.5	-
แครอท	2.0	2.3	1.5	2.8
กระหล่ำดอก	1.8	2.4	1.7	2.7
ขึ้นฉ่ายฝรั่ง (celery)	3.5	4.0	1.7	-
ใบผักกาดหอม	2.0	1.7	2.3	2.3
แตงโมและแคนตาลูป	5.2	2.5	4.6	1.7
แรดิช (radishes)	2.2	3.4	2.5	2.1
ผักขม (ฤดูหนาว)	6.8	2.8	2.8	-
ข้าวโพดหวาน	6.0	1.9	2.0	2.8
มะเขือเทศ (กำลังสุก)	-	-	-	2.1

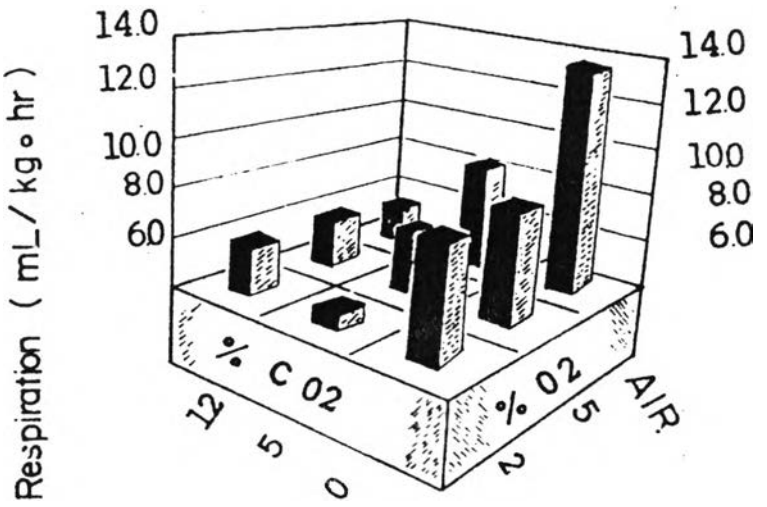
ดังนั้นหลังจากการเก็บเกี่ยวแล้วควรจะเก็บรักษาผักและผลไม้สดไว้ในที่อุณหภูมิต่ำทันทีที่เป็นไปได้เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของผักและผลไม้สดให้ยาวนานที่สุด อย่างไรก็ตามถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปอาจเป็นอันตรายต่อผักและผลไม้สดได้ซึ่งเรียกว่า อาการสะท้านหนาวหรือความเสียหายเนื่องจากความเย็น (chilling injury) ลักษณะที่แสดงออกมา เช่น การเน่าเสีย สีผิดปกติ รอยช้ำ รอยบุ๋ม เนื้อฉ่ำน้ำผิดปกติ การสุกไม่สม่ำเสมอ เป็นต้น [4] ซึ่งอาการต่าง ๆ เหล่านี้มักเกิดกับพืชในเขตร้อนหรือกึ่งร้อน ดังนั้นการกำหนดอุณหภูมิเก็บรักษาที่เหมาะสมจึงจำเป็นมาก

ข. องค์ประกอบของก๊าซต่าง ๆ ในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร

ข.1 ก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากผลงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา [4,6,13,27,28,43,44] และจากสมการที่ 2.1 พบว่าอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดนั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่โดยรอบผักและผลไม้สดนั้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์

ระหว่างอัตราการหายใจของบรอคโคลี่พันธุ์เอมเพอเรอที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส [8,24] พบว่าอัตราการหายใจของบรอคโคลี่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์สูงขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น

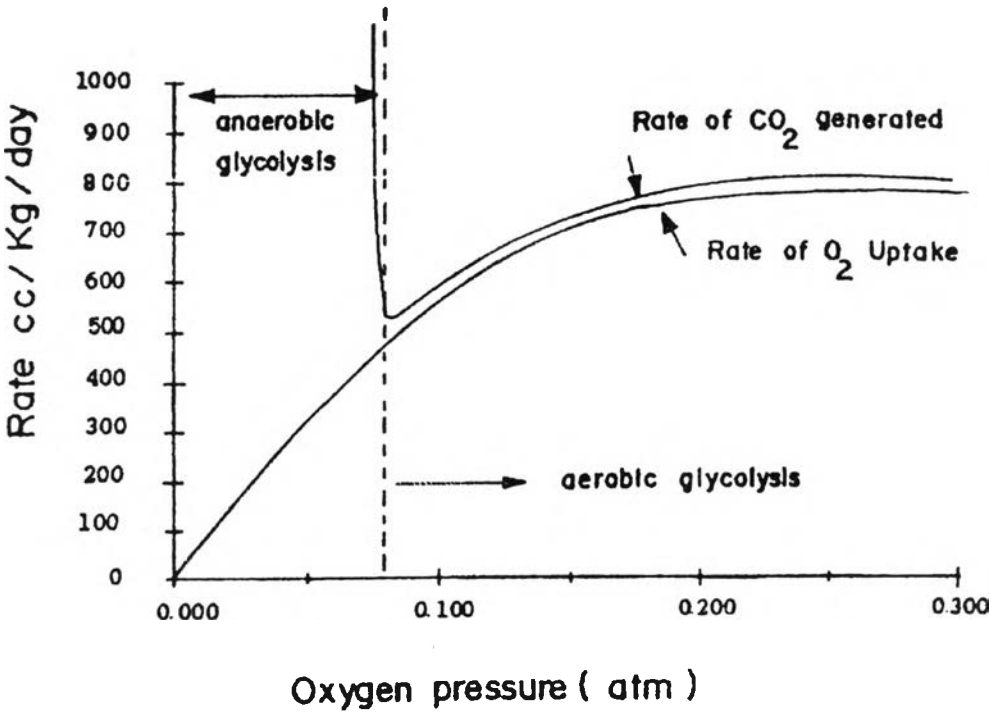


รูปที่ 2.2 ผลของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออัตราการหายใจของบรอคโคลี่พันธุ์เอมเพอเรอ ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส [8,24]

นอกจากนี้ยังมีการค้นพบอีกด้วยว่าผลของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการชะลอหรือยับยั้งกระบวนการหายใจและการสันดาปอื่น ๆ ของผักและผลไม้สดเป็นแบบเสริมกัน (additive effect) กล่าวคือการใช้ทั้งสองร่วมกันจะมีผลมากกว่าการใช้เพียงชนิดใดชนิดหนึ่งมาก [4,30] ดังนั้นการยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สดสามารถทำได้โดยการลดความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์ลงให้ต่ำกว่าความเข้มข้นในบรรยากาศปกติ และเพิ่มความความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์ให้สูงกว่าความเข้มข้นในบรรยากาศปกติ ซึ่งก็คือการลดกระบวนการหายใจและสันดาปต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในผักและผลไม้สดนั้น

อัตราการหายใจของพืชแปรผันกับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในบรรยากาศรอบ ๆ พืช ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [10,13] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราการหายใจของพืชจะลดต่ำลงเมื่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนในบรรยากาศลดลง แต่เมื่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนลดลงถึงระดับหนึ่งอัตราการหายใจของพืชนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเพราะผักและผลไม้สดนั้นจะเปลี่ยนรูปแบบการหายใจจากแบบใช้ก๊าซออกซิเจนไปเป็นแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจน (ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1) และในทำนองเดียวกันถ้าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง

พืชก็จะเปลี่ยนรูปแบบการหายใจจากแบบใช้ก๊าซออกซิเจนไปเป็นแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจนเช่นเดียวกัน เนื่องจากปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากเกินไปเป็นสาเหตุให้เอนไซม์ต่าง ๆ ในวงจรเครบส์ทำงานผิดปกติ [14]



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดทั่วไป กับความดันของก๊าซออกซิเจน [10,13]

ข.2 ก๊าซเอทิลีน

เอทิลีนเป็นฮอร์โมนสำคัญที่ผักและผลไม้สดสังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อควบคุมการเจริญเติบโต การสุก และการเสื่อมเน่าเสียของผักและผลไม้ เอทิลีนความเข้มข้นเพียง 0.1 ส่วนในล้านส่วนที่สะสมในระหว่างการเก็บรักษาผักและผลไม้สดสามารถกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ [2,4,27,30]

(1) เร่งอัตราการหายใจของผักและผลไม้สด ทำให้อายุการเก็บรักษาลดลง

(2) เร่งความสุกและความเสื่อมเน่าเสีย

(3) เร่งการสูญเสียคลอโรฟิลล์ (chlorophyll) ของพืช พบมากในกรณีของส้มชนิดต่าง ๆ (ยกเว้นมะนาว) และกะหล่ำปลี

(4) เร่งการร่วงของใบ (abscission)

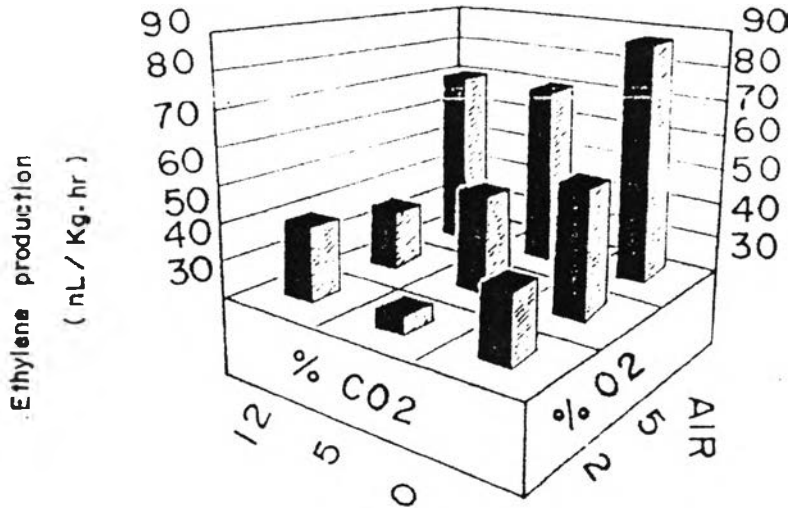
(5) เร่งการสังเคราะห์เอทิลีน (autocatalyse of ethylene) ทำให้ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว กระตุ้นการตอบสนองของเซลพืชต่อเอทิลีนให้รุนแรงขึ้น

(6) ทำให้เกิดความผิดปกติทางสรีระ (physiological disorders) ของผักและผลไม้ เช่น การเพิ่มปริมาณเส้นใยในหน่อไม้ฝรั่ง ทำให้เนื้อเหนียวขึ้น การเกิดจุดสีน้ำตาลแดงหรือสีสนิมเหล็กบนใบผักกาดหอม (lettuce) ลักษณะดังกล่าวเรียกว่า brown spot หรือ russet spot การเกิดรสขมในแครอท และการเกิดเม็ดแป้งภายในเนื้อกีวี่ เป็นต้น

การสังเคราะห์เอทิลีนและการทำงานของเอทิลีนขึ้นกับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในบรรยากาศ โดยอัตราการสังเคราะห์เอทิลีนของพืชจะลดลงเมื่อก๊าซออกซิเจนมีน้อยกว่าร้อยละ 8 โดยปริมาตรและอัตราการสังเคราะห์นี้จะลดลงถึงร้อยละ 50 โดยปริมาตรเมื่อก๊าซออกซิเจนมีเพียงร้อยละ 2.5 โดยปริมาตร [4]

สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นสูงอาจจะเร่งหรือยับยั้งหรือไม่มีผลใดเลยต่อการสังเคราะห์เอทิลีน ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของพืชและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อย่างไรก็ตามก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถช่วยป้องกันหรือยับยั้งผลกระทบของก๊าซเอทิลีนที่มีต่อพืชได้ นอกจากนี้ถ้ามีก๊าซออกซิเจนความเข้มข้นต่ำร่วมอยู่ด้วยจะช่วยชะลอการสังเคราะห์เอทิลีนได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากก๊าซทั้งสองมีผลต่อการสังเคราะห์เอทิลีนเช่นเดียวกับผลต่อการหายใจของพืชดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1 [4] โดยรูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างของผลกระทบของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการสังเคราะห์เอทิลีนของบรอคโคลี่ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และตารางที่ 2.7 แสดงความเข้มข้นต่ำสุดของเอทิลีนที่สามารถเร่งการสุกของผลไม้บางชนิด ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของเอทิลีนที่จำเป็นนั้นมีค่าต่ำมากและแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของผักและผลไม้สด [4]

สำหรับอิทธิพลของเอทิลีนที่มีต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดนั้นสามารถแบ่งแยกได้ 2 ลักษณะตามประเภทของผลไม้คือ ผลไม้แบบไคลแมคเทอริก และแบบนอนไคลแมคเทอริก สำหรับผลไม้แบบไคลแมคเทอริก เมื่อความเข้มข้นของเอทิลีนสูงขึ้น จะทำให้อัตราการหายใจสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างมากและรวดเร็ว แต่หลังจากผ่านช่วงนี้ไปแล้วความเข้มข้นของเอทิลีนจะไม่มีผลกระทบมากนัก ส่วนผลไม้แบบนอนไคลแมคเทอริกรวมทั้งผักต่าง ๆ เมื่อความเข้มข้นของเอทิลีนสูงขึ้น จะทำให้อัตราการหายใจของผักและผลไม้นั้นเพิ่มสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น [27] นอกเหนือจากก๊าซเอทิลีนแล้ว ก๊าซไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ เช่น ก๊าซโพรพิลีน (propylene) และก๊าซอะเซทิลีน (acetylene) ก็มีผลกระทบต่อการหายใจของผักและผลไม้สดด้วย [30]



รูปที่ 2.4 ผลกระทบของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการสังเคราะห์เอทิลีนของบรอคโคลี่ที่อุณหภูมิ 0 °ซ (ศึกษาเป็นเวลา 7 วัน) [4]

ตารางที่ 2.7 ความเข้มข้นต่ำสุดของเอทิลีนที่สามารถเร่งการสุกของผลไม้บางชนิด [4]

ผักและผลไม้สด	ความเข้มข้นต่ำสุดของก๊าซเอทิลีนที่สามารถเร่งการสุกของผลไม้บางชนิด (ส่วนในล้านส่วน)
อะโวกาโด	0.1
กล้วย	0.1-1.0
แคนตาลูป	0.1-1.0
แตงโม	0.3-1.0
มะม่วง	0.04-0.4
ส้ม	0.1
มะเขือเทศ	0.5

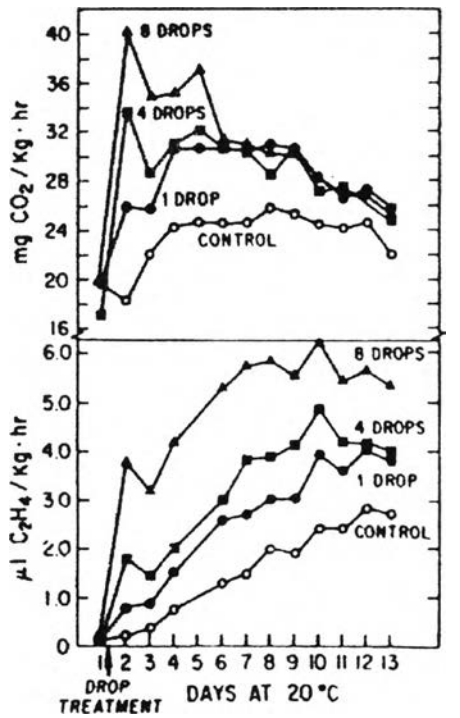
ค. สภาพการปลูกและการเก็บเกี่ยว

ในการศึกษาทางสรีรวิทยาของพืชหลังการเก็บเกี่ยวมักพบว่า อัตราการหายใจของผักและผลไม้สดนั้นแตกต่างกันไประหว่างปีการเพาะปลูก และระหว่างแหล่งที่ปลูก ทำให้สันนิษฐานได้ว่าสภาพภูมิอากาศในระหว่างการเจริญเติบโต หรือสภาพการดูแลบำรุงรักษาจะส่งผลต่ออัตราการหายใจ ตลอดจนคุณภาพภายหลังจากการเก็บเกี่ยว [4] เช่น การปลูกแอปเปิลในสภาพที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำ จะทำให้อัตราการหายใจของแอปเปิลสูงกว่าสภาพปกติ

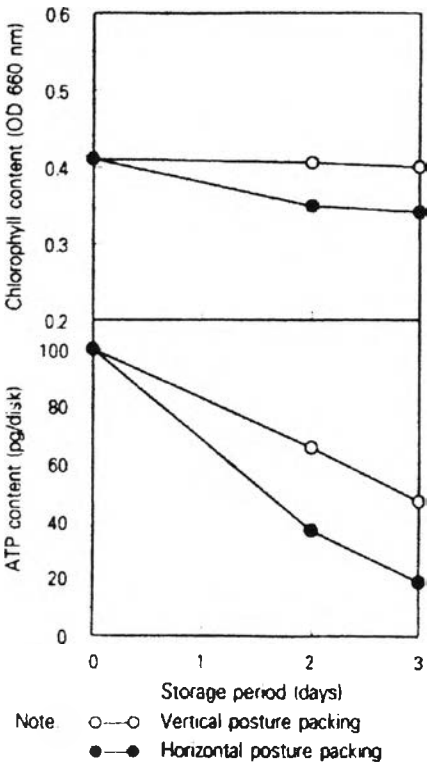
พอมุทกกรม กิจการนิสิต
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง. ความเครียดทางกายภาพ

การกระทบกระเทือนของผลิตผลนอกจากจะก่อให้เกิดอาการช้ำได้แล้ว ยังทำให้อัตราการหายใจของผักและผลไม้นั้นเพิ่มสูงขึ้นด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.5 [36] สาเหตุของการเพิ่มขึ้นของอัตราการหายใจนี้ก็เนื่องมาจากความเครียดทางกายภาพนี้เกิดขึ้นพร้อม ๆ กับการเพิ่มขึ้นของเอทิลีน และอาจเป็นผลเนื่องมาจากเอทิลีนด้วย นอกจากนี้ความเครียดทางกายภาพยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอื่น ๆ ภายในผักและผลไม้ เช่น การแปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอโรฟิลล์และระดับพลังงานของหน่อไม้ฝรั่งดังแสดงในรูปที่ 2.6 [37] ดังนั้นการปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวจึงจำเป็นต้องทำด้วยความปราณีตที่สุด เพื่อลดการเสียหายและรักษาคุณภาพของผักและผลไม้สดนั้นไว้ให้นานที่สุด



รูปที่ 2.5 อัตราการหายใจและการผลิตเอทิลีนของมะเขือเทศ
เมื่อถูกกระทบกระเทือนด้วยการตกกระทบของลูกเหล็กหลาย ๆ ครั้ง [36]



รูปที่ 2.6 อิทธิพลของลักษณะการวางหน่อไม้ฝรั่งต่อองค์ประกอบทางเคมี [37]

2.3 การคายน้ำ

ผักและผลไม้สดทั่วไปมีน้ำเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 70-95 โดยน้ำหนัก [4,6,27] ปริมาณน้ำบางส่วนจะสูญเสียไประหว่างการเก็บรักษา ทำให้ผลไม้สูญเสียน้ำหนัก ความกรอบลดลง และเหี่ยวเฉา เมื่อการสูญเสียน้ำมีมากขึ้นจะทำให้คุณภาพของผักและผลไม้สดไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคดังตารางที่ 2.8 [42]

ตารางที่ 2.8 การสูญเสียน้ำของผักและผลไม้สดที่ผู้บริโภคยังยอมรับคุณภาพ [42]

ผักและผลไม้สด	ระดับการสูญเสียน้ำที่ผู้บริโภคยอมรับ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
บรอคโคลี่ แตงกวา ถั่ว กะหล่ำ	3-5
หน่อไม้ฝรั่ง หัวบีท กะหล่ำปลี แครอท กะหล่ำดอก ลีค มันฝรั่ง ข้าวโพดหวาน แบล็คเบอรี่ ราสเบอรี่ สตรอเบอรี่	6-8
ขึ้นฉ่าย หัวหอม	10

การสูญเสียน้ำออกจากเซลของพืชหรือจากผักและผลไม้สดเป็นการเคลื่อนที่แบบแพร่กระจาย (diffusion flow) คือมีการเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของน้ำหรือความชื้นสูงไปสู่บริเวณที่ความเข้มข้นของน้ำต่ำกว่า การเคลื่อนที่ของน้ำแบบแพร่กระจายนี้เป็นไปตามสมการ 2.6 [4,27]

$$J = k\,\Delta p \qquad (2.6)$$

โดย J คือ อัตราการคายน้ำ

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient)

Δp คือ ความแตกต่างของความดันไอภายในผักหรือผลไม้กับบรรยากาศรอบผักและผลไม้

โดยทั่วไปน้ำจะเคลื่อนที่ออกจากผักและผลไม้สดไปสู่บรรยากาศภายนอก เพราะในสภาพปกติความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีค่าไม่ถึงร้อยละ 100 สำหรับน้ำในพืชนั้นเปรียบเหมือนกับน้ำที่อยู่ในภาชนะปิด มีช่องทางที่น้ำจะออกมาได้ค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวทั้งหมด ดังนั้นจึงอาจจะถือได้ว่าผลผลิตที่เก็บเกี่ยวมานี้มีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 100 หรือมีความดันไอในระดับอิ่มตัว (saturated vapor pressure) นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลยังแปรผันโดยตรงกับพื้นที่ไอน้ำเคลื่อนผ่านและแปรผกผันกับค่าความต้านทานการเคลื่อนที่ของไอน้ำ ดังนั้นสามารถเขียนสมการการแพร่ใหม่ได้ดังสมการที่ 2.7 [4,27]

$$J = \frac{A}{R}\left(p^{sat}_{H_2O} - p^{pkg}_{H_2O}\right) \qquad (2.7)$$

โดย A คือ พื้นที่ในการซึมผ่านของไอน้ำ

R คือ ความต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำ

$p^{sat}_{H_2O}$ คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว

$p^{pkg}_{H_2O}$ คือ ความดันไอน้ำภายในบรรจุภัณฑ์

เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.7 [4,27] จะพบว่าปัจจัยใด ๆ ก็ตามที่เพิ่มพื้นที่การสูญเสียของน้ำจะทำให้อัตราการคายน้ำสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามปัจจัยที่เพิ่มความต้านทานการเคลื่อนที่ของน้ำจะลดการสูญเสียน้ำของผักและผลไม้ลง ปัจจัยต่าง ๆ มีดังนี้

ก. ขนาดและชนิดของผักและผลไม้

ผักและผลไม้ที่มีขนาดใหญ่มีพื้นที่ผิวที่จะระเหยน้ำได้มากกว่าผลิตผลที่มีขนาดเล็กอย่างเด่นชัด แต่เมื่อคิดเทียบต่อน้ำหนักที่เท่ากันแล้ว ผักและผลไม้ขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากกว่า ดังนั้นผลขนาดเล็กกว่าจะสูญเสียน้ำได้มากกว่าและเหี่ยวได้เร็วกว่าผลขนาดใหญ่

ชนิดของผักและผลไม้มีผลทั้งต่อพื้นที่ในการเคลื่อนผ่านของไอน้ำ และความต้านทานการเคลื่อนที่ของไอน้ำ เช่น ผักและผลไม้ที่ต่างชนิดกันจะมีปริมาณปากใบ (stomata) และตำแหน่งของปากใบแตกต่างกัน ซึ่งโดยปกติแล้วปากใบจะมีอยู่มากบริเวณใบ แต่สำหรับพืชบางชนิดปากใบจะอยู่ลึกลงไปใต้ผิวใบทำให้ความต้านทานการเคลื่อนที่ของไอน้ำเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้พืชบางชนิดยังมีลักษณะพิเศษที่เกี่ยวข้องกับการคายน้ำ เช่น เงาะ ส่วนที่เป็นขนนั้นเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้นเป็น 2 เท่าทำให้เงาะมีอัตราการสูญเสียน้ำที่สูงมากถึงร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อวันที่อุณหภูมิห้อง [27]

ข. ความชื้นในบรรยากาศ

จากสมการที่ 2.6 และ 2.7 พบว่าอัตราการสูญเสียน้ำจะขึ้นกับผลต่างระหว่างความดันของไอน้ำในผักและผลไม้กับความดันของไอน้ำในบรรยากาศ แต่ความดันของไอน้ำภายในผักและผลไม้จะมีค่าใกล้เคียงกับความดันไอน้ำอิ่มตัว ดังนั้นอัตราการสูญเสียน้ำจึงขึ้นอยู่กับบรรยากาศรอบผักและผลไม้ว่าจะมีความชื้นมากน้อยเพียงใด ในกรณีที่ความชื้นของบรรยากาศรอบ ๆ อิ่มตัวด้วยน้ำ หรือมีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100 ก็ยังสามารถเกิดการสูญเสียของน้ำในผักและผลไม้สู่บรรยากาศได้ ทั้งนี้เนื่องจากการหายใจที่เกิดขึ้นของผักและผลไม้ทำให้มีการถ่ายเทพลังงานอุณหภูมิภายในบรรจุภัณฑ์จึงสูงขึ้นทำให้อากาศภายในบรรจุภัณฑ์สามารถรับไอน้ำได้มากกว่าเดิม

ค. อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับความชื้นและการสูญเสียของน้ำ ทั้งนี้เพราะสสารทุกอย่างมีการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา โดยเฉพาะของเหลวและก๊าซ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการเคลื่อนไหวของโมเลกุลก็จะมีมากขึ้น ทำให้โอกาสที่โมเลกุลของน้ำจะหลุดออกจากสถานะของเหลวไปสู่สถานะก๊าซมีมากขึ้น ความดันของไอน้ำภายในผักและผลไม้จึงเพิ่มสูงขึ้น แต่ความดันของไอน้ำในบรรยากาศไม่ได้เพิ่มขึ้นด้วย ผลต่างของความดันของทั้งสองบริเวณจึงมากขึ้น อัตราการสูญเสียน้ำจึงสูงขึ้นด้วย

ง. การเคลื่อนไหวของอากาศ

ชั้นของอากาศบาง ๆ (boundary layer) ที่ติดอยู่กับผลของผักและผลไม้ เป็นชั้นที่มีการเคลื่อนไหวของอากาศค่อนข้างน้อย สำหรับผลิตผลต่างชนิดกันชั้นอากาศนี้จะมีความหนาไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับแรงยึดเกาะระหว่างอากาศกับผิวของผลิตผล และความหนาของชั้นนี้ยังขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่ของอากาศโดยรอบด้วย ถ้าอากาศเคลื่อนไหวมากชั้นอากาศนี้ก็จะบางลง นั่นก็คือความต้านทานการเคลื่อนที่ของไอน้ำจะลดลง ดังนั้นผักและผลไม้ที่เก็บเกี่ยวมาแล้วควรเก็บไว้ในที่สงัดลมเพื่อสงวนการสูญเสียของน้ำ

บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสามารถลดการสูญเสียน้ำได้โดยการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในภาชนะให้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (equilibrium relative humidity) ของผักและผลไม้สดนั้น ซึ่งโดยทั่วไปมีค่าประมาณร้อยละ 80-95 หรือบางชนิดสูงถึงร้อยละ 98-100 [4,6,27] ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ที่นำมาใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำไม่สูงมาก ไอน้ำที่พืชคายออกมาจะช่วยเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ แต่ถ้าเพิ่มมากจนถึงจุดอิ่มตัว ไอน้ำบางส่วนจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ อาจทำให้พืชเน่าเสียได้ง่ายขึ้น ดังนั้นฟิล์มที่เลือกใช้กับผักและผลไม้ที่คายน้ำมากต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติ เช่น การเจาะรูเล็ก ๆ (perforation) หรือเติมสารป้องกันการรวมตัวของไอน้ำ (antifogging agent) นอกจากนี้อากาศภายในบรรจุภัณฑ์ยังมีการเคลื่อนที่น้อยทำให้ความต้านทานการเคลื่อนที่ของไอน้ำมีค่ามาก

2.4 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ (permeability)

การเก็บรักษาผักและผลไม้สดในบรรจุภัณฑ์ที่ยอมให้ก๊าซซึมผ่าน (gas exchange packaging) ให้ได้ผลดีนั้น จะพบว่าค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซของวัสดุบรรจุหรือภาชนะบรรจุที่เลือกใช้เป็นปัจจัยที่สำคัญมากต่อประสิทธิภาพของระบบบรรจุในการรักษาคุณภาพ และเพิ่มอายุเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์

ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซนิยามดังสมการที่ 2.8 [1,2,4,6,8]

$$P = \frac{Qd}{At(\Delta p)} \qquad (2.8)$$

โดยที่ P คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

Q คือ ปริมาณของสารที่ซึมผ่านฟิล์ม

d คือ ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์

A คือ พื้นที่ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่สัมผัสกับบรรยากาศ

t คือ เวลาที่ใช้ในการซึมผ่าน

Δp คือ ผลต่างของความดันระหว่างภายนอกและภายในบรรจุภัณฑ์

การซึมผ่านพอลิเมอร์ของโมเลกุลเล็ก ๆ เกิดขึ้นตามกลไกของการละลายและการแพร่ (solution-adsorption mechanism) ในขั้นแรกโมเลกุลของก๊าซจะละลายเข้าสู่ภายในเนื้อพอลิเมอร์ในด้านที่มีความเข้มข้นของก๊าซสูงกว่า เรียกว่าขั้นตอนการละลาย (solution stage) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความสามารถในการละลาย (solubility) ต่อมาก๊าซที่ละลายอยู่ภายในเนื้อฟิล์มพอลิเมอร์จะเคลื่อนที่ผ่านเนื้อพอลิเมอร์ไปยังด้านที่มีความเข้มข้นของก๊าซต่ำกว่า เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของก๊าซ เรียกว่าขั้นตอนการแพร่ (diffusion stage) ซึ่งขึ้นกับค่าความสามารถในการแพร่ (diffusivity) ดังนั้นค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซแสดงได้ดังสมการที่ 2.9 [1,2,4,5,8,25]

$$P = D \times S \qquad (2.9)$$

โดย D คือ ค่าความสามารถในการแพร่

S คือ ค่าความสามารถในการละลาย

ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มคือ

ก. ธรรมชาติของพอลิเมอร์ ได้แก่ โครงสร้างทางเคมี การจัดเรียงโมเลกุล ความหนาแน่น (density) ระดับการเกิดเป็นพอลิเมอร์ (degree of polymerization) ค่าความเป็นผลึก (crystallinity) พันธะคู่ (double bond) สภาพความเป็นขั้ว (polarity)

ข. ธรรมชาติของก๊าซที่ซึมผ่าน ได้แก่ รูปร่างและขนาดของโมเลกุล สภาพความเป็นขั้ว ความสามารถในการละลาย (solubility)

ค. สารเติมแต่ง (additives) เช่น พลาสติไซเซอร์ (plasticizer), anti-oxidant, anti-blocking agent, anti-fogging agent, สารหล่อลื่น (lubricant) สารให้สี (pigment) เป็นต้น

ง. สิ่งแวดล้อม ได้แก่ ความดัน อุณหภูมิ ความชื้น

ผลของอุณหภูมิต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ สามารถแสดงได้โดยสมการที่ 2.10 [1,2,4,6,17]

$$P = P_0 e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)} \qquad (2.10)$$

หรือจัดได้เป็นสมการที่ 2.11 [1,2,6]

$$\ln P = \ln P_0 - \frac{E_a}{RT} \qquad (2.11)$$

โดย P_o คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่อุณหภูมิอนันต์

E_a คือ พลังงานก่อกัมมันต์ (activation energy)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature)

จากสมการที่ 2.10 หรือ 2.11 จะเห็นว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง (1/T มีค่ามากขึ้น) แต่ผลจากอุณหภูมิต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซจะแตกต่างกันไปตามชนิดของพิล์มพอลิเมอร์ ตัวอย่างของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.9 [15,23,25,35] และตัวอย่างของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่อุณหภูมิอนันต์ และค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของก๊าซต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.10 [15,23,25,35]

ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป อัตราการหายใจและค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มก็จะเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ความเข้มข้นของก๊าซที่ภาวะคงตัวภายในบรรจุภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป และพบว่าโดยส่วนใหญ่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่ภาวะคงตัวภายในบรรจุภัณฑ์จะมีค่าลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะคงตัวภายในบรรจุภัณฑ์จะมีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.9 ตัวอย่างของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มที่อุณหภูมิต่าง ๆ [15,23,25,35]

พอลิเมอร์	อุณหภูมิ (°C)	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม $\left(\frac{mmol \cdot mm}{cm^2 \cdot hr \cdot kPa}\right)$				รายการอ้างอิง
		ก๊าซออกซิเจน (O_2)	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	ก๊าซไนโตรเจน (N_2)	ไอน้ำ (H_2O)	
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)	25	3.536×10^{-7}	1.527×10^{-6}	1.173×10^{-7}	1.093×10^{-5}	35
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)	25	4.821×10^{-8}	4.339×10^{-8}	1.768×10^{-8}	1.446×10^{-6}	35
พอลิโพรพิลีน (PP)	30	2.732×10^{-7}	1.109×10^{-6}	5.304×10^{-8}	8.196×10^{-6}	35
พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)	25	5.464×10^{-9}	1.929×10^{-8}	1.430×10^{-9}	3.311×10^{-5}	35
พอลิไวนิลิดีนคลอไรด์ (PVDC)	30	6.155×10^{-10}	3.504×10^{-9}	1.135×10^{-10}	1.125×10^{-6}	35
พอลิสไตรีน (PS)	25	3.214×10^{-7}	1.270×10^{-6}	9.482×10^{-8}	2.170×10^{-4}	35
พอลิเอทิลเมตาคริเลต (PEMA)	25	1.429×10^{-7}	6.091×10^{-7}	2.732×10^{-8}	3.825×10^{-4}	23
พอลิอะไครโลไนไตรล์ (PAN)	25	2.411×10^{-11}	9.643×10^{-11}	-	3.696×10^{-5}	23
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA)	25	1.069×10^{-9}	1.485×10^{-9}	-	-	23
พอลิเตตราฟลูออโรเอทิลีน (PTFE)	25	5.143×10^{-7}	1.205×10^{-6}	1.607×10^{-7}	-	15
พอลิบิวทาไดอีน (Polybutadiene)	25	2.298×10^{-7}	1.671×10^{-5}	7.779×10^{-7}	-	15
เซลโลเฟน (Cellophane)	25	1.069×10^{-9}	8.662×10^{-9}	8.984×10^{-10}	-	15
ไนลอน 6 (Nylon 6)	25	4.580×10^{-9}	1.061×10^{-8}	1.146×10^{-9}	2.234×10^{-8}	25
เอทิลเซลลูโลส (Ethyl cellulose)	25	1.769×10^{-6}	1.363×10^{-5}	5.336×10^{-7}	1.077×10^{-3}	25

ตารางที่ 2.10 ตัวอย่างของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่อุณหภูมิอนันต์
และค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของก๊าซต่าง ๆ สำหรับพอลิเมอร์บางชนิด [15,23,25,35]

พอลิเมอร์	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่อุณหภูมิอนันต์ $\left(P_0, \frac{mmol \cdot mm}{cm^2 \cdot hr \cdot kPa}\right)$				ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของก๊าซต่าง ๆ $\left(E_a, \frac{kJ}{mol}\right)$				รายการอ้างอิง
	O_2	CO_2	N_2	H_2O	O_2	CO_2	N_2	H_2O	
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)	10.69	9.96	52.88	7.84	42.7	38.9	49.4	33.5	35
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)	0.07	0.01	0.16	-	33.5	35.1	30.1	39.7	35
พอลิโพรพิลีน (PP)	44.67	3.86	205.71	144.64	47.7	38.1	55.7	42.3	35
พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)	28.77	149.46	1507.50	0.33	55.8	56.8	69.0	22.9	35
พอลิไวนิลิดีนคลอไรด์ (PVDC)	132.59	3.99	144.64	138.70	66.6	51.5	70.3	46.1	35
พอลิเอทิลเมตาคริเลต (PEMA)	0.34	0.07	0.35	0.25	36.4	28.9	40.6	18.0	23
พอลิเตตราฟลูออโรเอทิลีน (PTFE)	1.122×10^{-3}	3.986×10^{-4}	3.246×10^{-3}	-	19.1	14.0	24.4	-	15
พอลิบิวทาไดอีน (Polybutadiene)	3.648×10^{-1}	1.098×10^{-1}	7.891×10^{-1}	-	29.7	21.8	34.3	-	15
ไนลอน 6 (Nylon 6)	1.567×10^{-1}	1.929×10^{-1}	1.688×10^{-1}	-	43.5	40.6	46.9	-	25

2.5 บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร

อายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สดสามารถยืดให้ยาวนานขึ้นได้โดยการบรรจุผลิตภัณฑ์ให้อยู่ภายใต้บรรยากาศของก๊าซชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิด โดยอัตราส่วนของก๊าซชนิดต่าง ๆ นั้นจะแตกต่างไปจากอัตราส่วนที่พบในบรรยากาศปกติ ซึ่งสามารถจำแนกกระบวนการบรรจุนี้ตามวิธีการและก๊าซที่อยู่ภายในออกได้เป็น 4 ประเภท [1,2,4] คือ

ก. **บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศควบคุม** (controlled atmosphere packaging, CAP) เป็นวิธีการควบคุมบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์ โดยการตรวจวัด และปรับความเข้มข้นของก๊าซต่าง ๆ ในบรรจุภัณฑ์ให้เหมาะสมตลอดเวลา ซึ่งวิธีนี้ต้องใช้อุปกรณ์ประกอบ ทำให้มีต้นทุนในการประกอบการที่ค่อนข้างสูง

ข. **บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร** (modified atmosphere packaging, MAP) เป็นวิธีการควบคุมบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ให้อยู่ภายใต้บรรยากาศที่อัตราส่วนของก๊าซชนิดต่าง ๆ แตกต่างไปจากบรรยากาศปกติ และอัตราส่วนนี้อาจเปลี่ยนแปลงได้ตามเวลา โดยขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์ที่บรรจุ อัตราส่วนของก๊าซแรกเริ่ม วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ และสภาวะการเก็บผลิตภัณฑ์นั้น ๆ

ค. **บรรจุภัณฑ์แบบไล่ด้วยก๊าซ** (gas-flush packaging) เป็นวิธีการบรรจุผลิตภัณฑ์ให้อยู่ภายใต้บรรยากาศของก๊าซชนิดใดชนิดหนึ่ง เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซไนโตรเจน โดยการพ่นก๊าซนั้น ๆ เข้าไปแทนที่อากาศภายในภาชนะ วิธีนี้โดยมากใช้สำหรับไล่ก๊าซออกซิเจนในภาชนะที่บรรจุผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชั่น เช่น อาหารที่มีไขมันมาก น้ำผลไม้ เป็นต้น

ง. **บรรจุภัณฑ์แบบสุญญากาศ** (vacuum) เป็นวิธีการบรรจุผลิตภัณฑ์ให้อยู่ภายใต้สุญญากาศ โดยการดึงเอาอากาศภายในภาชนะออกไป และไม่มีการใส่ก๊าซใด ๆ เข้าไปแทนที่ ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความดันภายในและภายนอกภาชนะ สังเกตได้จากการหดรัดตัวของภาชนะบรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อนตัว (flexible form) หรือการยุบตัวของภาชนะประเภทกึ่งคงรูป (semi-rigid form) โดยทั่วไปความดันในภาชนะจะมีค่าประมาณ 0.5-8 ทอร์ ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์และระบบการบรรจุ

ก๊าซที่นำมาใช้มากที่สุดในบรรจุภัณฑ์ที่ยอมให้ก๊าซซึมผ่านได้ คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) และก๊าซออกซิเจน (O_2) ในบางกรณีจะพบก๊าซอื่น ๆ เช่น ก๊าซเอทิลีนออกไซด์ (C_2H_4O) ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) หรือก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ซึ่งก๊าซเหล่านี้ส่วนใหญ่จะใช้เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเป็นพิษ และใช้เฉพาะอาหารบางชนิดเท่านั้น แต่บางประเทศก็ไม่อนุญาตให้ใช้ก๊าซอื่นใดนอกเหนือไปจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน และก๊าซออกซิเจน [4]

การเก็บรักษาผักและผลไม้สดภายใต้บรรยากาศดัดแปรจะต้องคำนึงถึง [4,27]

ก. **ชนิดของผลิตผล** ผลิตผลต่างชนิดกันมีอัตราการหายใจและกระบวนการต่าง ๆ ไม่เท่ากัน ส่งผลให้ปริมาณการใช้ก๊าซออกซิเจน การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซเอทิลีนไม่เท่ากัน ซึ่งมีผลต่อบรรยากาศรอบ ๆ ผักและผลไม้ภายในบรรจุภัณฑ์

ข. **วัยและความสมบูรณ์ของผักและผลไม้สด** ผลิตผลที่มีวัยต่างกัน อัตราการหายใจ การสร้างก๊าซเอทิลีน และการสันดาปต่าง ๆ ไม่เท่ากัน โดยผลผลิตที่ยังอ่อนอยู่มักมีอัตราดังกล่าวต่ำ ผลไม้ที่ยังไม่สุกมีอัตราดังกล่าวต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับผลไม้ที่กำลังสุก

ค. **อุณหภูมิในการเก็บรักษา** อุณหภูมิยิ่งสูงอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ยิ่งสูงขึ้น มีผลต่อการใช้และการผลิตก๊าซชนิดต่าง ๆ ของผักและผลไม้สด

ง. **ปริมาณของผักและผลไม้ภายในบรรจุภัณฑ์** สำหรับปริมาตรของบรรจุภัณฑ์ที่เท่ากัน ถ้ามีผักและผลไม้บรรจุอยู่มากย่อมใช้ก๊าซออกซิเจนให้หมดไป และสะสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้มากขึ้นได้เร็วกว่าการบรรจุผลิตผลที่น้อยกว่า

จ. **ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ** ภาชนะบรรจุที่ยอมให้ก๊าซซึมผ่านเข้าออกได้ง่าย จะทำให้องค์ประกอบของก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ใกล้เคียงกับบรรยากาศปกติมากกว่าบรรจุภัณฑ์ที่ยอมให้ก๊าซต่าง ๆ ผ่านได้น้อย

ประโยชน์ของการเก็บรักษาในสภาพบรรยากาศดัดแปรนอกจากช่วยชะลอกระบวนการทางชีวเคมีต่าง ๆ ภายในผักและผลไม้ทำให้ยืดอายุการเก็บรักษาได้แล้ว ยังมีประโยชน์ในแง่อื่น ๆ ดังนี้ [4,27]

ก. ลดผลกระทบของเอทิลีนต่อผักและผลไม้ โดยทำให้การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่ถูกกระตุ้นโดยเอทิลีนเกิดขึ้นช้าลงได้ ทั้งนี้เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีโครงสร้างทางเคมีใกล้เคียงกับเอทิลีน สามารถไปแย่งชิงแหล่งกัมมันต์ (active site) กับเอทิลีนได้

ข. ลดการเหม็นหืน ในการเก็บรักษาผักและผลไม้ที่มีไขมันมาก เช่น มะม่วงหิมพานต์ และถั่วต่าง ๆ กรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวที่อยู่ภายในจะถูกออกซิไดซ์โดยก๊าซออกซิเจน การเก็บรักษาด้วยบรรยากาศดัดแปร ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนจะต่ำกว่าบรรยากาศปกติ ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง

ค. ลดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และแมลง จุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตได้บนผักและผลไม้ส่วนใหญ่อาศัยก๊าซออกซิเจนในการหายใจ ดังนั้นเมื่อทำให้ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนต่ำลง การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บนผักและผลไม้ก็จะลดลงด้วย

ง. ประโยชน์อื่น ๆ เช่น การเพิ่มปริมาณเส้นใยระหว่างการเก็บรักษาของหน่อไม้ฝรั่ง การลดผลของรอยช้ำและรอยแผลในผักและผลไม้ต่าง ๆ (แต่ยังไม่ทราบถึงสาเหตุที่แน่ชัดว่าปรากฏการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นได้อย่างไร)

ตัวอย่างของสภาวะของบรรยากาศดัดแปรที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาผักและผลไม้บางชนิดถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2.11 [2,4,15]

2.6 การสร้างบรรยากาศดัดแปรภายในบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์

วัสดุที่นำมาใช้ทำบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สดต้องมีคุณสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่น ๆ ที่เหมาะสมดังได้กล่าวมาแล้ว นอกจากนั้นแล้ววัสดุที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ต้องมีคุณสมบัติเชิงกลสำคัญอื่น ๆ เช่น ความต้านแรงกระแทก (impact resistance) และความแข็งแรงเชิงดึง (tensile strength) ที่เหมาะสม เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับบรรจุภัณฑ์ในระหว่างการบรรจุและการขนส่ง คุณสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีของวัสดุจะทำให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ภายในได้ และวัสดุที่นำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สดนี้จะต้องสามารถถูกปิดผนึกได้อย่างสมบูรณ์ เพื่อรักษาบรรยากาศดัดแปรภายในไว้ให้คงที่ [29]

ตารางที่ 2.11 สภาวะต่าง ๆ ในระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร ที่เหมาะสมในการเก็บรักษาผักและผลไม้สดบางชนิด [2,4,15]

ผลิตผล	ช่วงอุณหภูมิ (°C)[a]	ความเข้มข้นของก๊าซ[b]		ศักยภาพ[c] ในการเก็บ	หมายเหตุ [d]
		$\%O_2$	$\%CO_2$		
ผักสด					
อาทิโชค (artichokes)	0-5	2-3	3-5	B	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์
หน่อไม้ฝรั่ง	0-5	อากาศ	5-10	B	การใช้ในเชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
ถั่วเหลือง	5-10	2-3	5-10	C	ศักยภาพในการเก็บขึ้นกับผู้ผลิต
หัวบีท(beet)	0-5	-	-	D	RH[e] 98-100% ให้ผลดีมาก
บรอคโคลี่	0-5	1-2	5-10	B	การใช้ในเชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
กระหล่ำปลี	0-5	3-5	5-7	B	มีการใช้ในเชิงพาณิชย์บางส่วน
แคนตาลูป	3-7	3-5	10-15	B	การใช้ในเชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
แครอท	0-5	-	-	D	RH[e] 98-100% ให้ผลดีมาก
กระหล่ำดอก	0-5	2-5	2-5	C	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์
ขึ้นฉ่าย	0-5	2-4	0	C	การใช้ในเชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
ข้าวโพดหวาน	0-5	2-4	10-20	B	การใช้ในเชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
แตงกวา	8-12	3-5	0	C	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์
แตงฮันนี่ดิว	10-12	3-5	0	C	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์
ลีค(leek)	0-5	1-2	3-5	B	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์
ผักกาดหอม	0-5	2-5	0	B	มีการใช้ในเชิงพาณิชย์บางส่วน มักเติม CO 2-3%
กระเจี๊ยบมอญ	8-12	3-5	0	C	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์ ควรเก็บที่ 5-10%CO_2 ที่ 5-8°C
เห็ด	0-5	อากาศ	10-15	C	การใช้ในเชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
พริกหยวก	8-12	3-5	0	C	การใช้ในเชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
พริก	8-12	3-5	0	C	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์ ควรเก็บที่ 10-15%CO_2 ที่ 5-8°C

ตารางที่ 2.11 (ต่อ) สภาวะต่าง ๆ ในระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร ที่เหมาะสมในการเก็บรักษาผักและผลไม้สดบางชนิด [2,4,15]

ผลิตผล	ช่วงอุณหภูมิ ($^{\circ}C$)[a]	ความเข้มข้นของก๊าซ[b]		ศักยภาพ[c] ในการเก็บ	หมายเหตุ [d]
		$\%O_2$	$\%CO_2$		
หอมหัวใหญ่					
-ตากแห้ง	0-5	1-2	0	B	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์ ควรเก็บที่ RH[e] 75%
-สด	0-5	1-2	10-20	C	การใช้ในเชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
มันฝรั่ง	4-12	-	-	D	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์
หัวไช้เท้า	0-5	-	-	D	RH[e] 98-100% ให้ผลดีมาก
ผักขม	0-5	อากาศ	10-20	C	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์
มะเขือเทศ					
-ก่อนสุก	12-20	3-5	5-15	B	การใช้ในเชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
-ค่อนข้างสุก	8-12	3-5	5-15	B	การใช้ในเชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
ผลไม้สด					
แอปเปิล	0-5	2-3	1-2	A	40% ของผลผลิตถูกเก็บภายใต้ CA
แอปปริคอท	0-5	2-3	2-3	C	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์
เชอรี่หวาน	0-5	3-10	10-12	B	มีการใช้ในเชิงพาณิชย์บางส่วน
มะเดื่อ	0-5	5	15	B	การใช้ในเชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
กีวี	0-5	2	5	A	มีการใช้ในเชิงพาณิชย์บางส่วน
เนคทารีน (nectarine)	0-5	1-2	5	B	การใช้ในเชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
ลูกพีช	0-5	1-2	3-5	B	การใช้ในเชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
ลูกแพร์	0-5	2-3	0-1	A	มีการใช้ในเชิงพาณิชย์บางส่วน
ลูกพลับ	0-5	3-5	5-8	C	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์
ลูกพลัมและลูกพรุน	0-5	1-2	0-5	B	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์

ตารางที่ 2.11 **(ต่อ)** สภาวะต่าง ๆ ในระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร ที่เหมาะสมในการเก็บรักษาผักและผลไม้สดบางชนิด [2,4,15]

ผลิตผล	ช่วงอุณหภูมิ (°C)[a]	ความเข้มข้นของก๊าซ[b]		ศักยภาพ[c] ในการเก็บ	หมายเหตุ [d]
		$\%O_2$	$\%CO_2$		
สตรอเบอรี่	0-5	10	15-20	A	มีอัตราการใช้เพิ่มขึ้น
ถั่วและผลไม้แห้ง	0-25	0-1	0-100	A	เพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันแมลง
อะโวกาโด	5-13	2-3	3-10	B	การใช้ในเชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
กล้วย	12-15	2-5	2-5	A	มีการใช้ในเชิงพาณิชย์บางส่วน
เกรฟฟรุต (grapefruit)	10-15	3-10	5-10	C	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์
มะนาว	10-15	5	0-5	B	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์
มะนาวใหญ่	10-15	5	0-10	B	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์
โอลีฟ	8-12	2-5	5-10	C	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์
ส้ม	5-10	10	5	C	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์
มะม่วง	10-15	5	5	C	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์
มะละกอ	10-15	5	10	C	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์
สับปะรด	10-15	5	10	C	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์

[a] ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทั่วไป มีความชื้นสัมพัทธ์ 85 ถึง 95 %

[b] ความเข้มข้นของก๊าซอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บ

[c] A=ดีมาก B=ดี C=พอใช้ D=ไม่ดี

[d] เฉพาะการตลาดภายในประเทศสหรัฐอเมริกา

[e] ความชื้นสัมพัทธ์

I19423388X

นอกจากนั้นแล้วบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สดควรเป็นบรรจุภัณฑ์แบบใส เพื่อว่าผู้บริโภคจะสามารถเห็นผลิตภัณฑ์ที่ถูกบรรจุอยู่ได้ชัดเจน ทำให้ง่ายต่อการตัดสินใจในการเลือกซื้อ อย่างไรก็ตามผักและผลไม้สดที่ถูกบรรจุที่อุณหภูมิต่ำจะมีความชื้นสูง จึงมีแนวโน้มที่จะสร้างไอหมอกภายในบรรจุภัณฑ์ได้ ทำให้เห็นผลิตภัณฑ์ได้ไม่ชัดเจน ดังนั้นฟิล์มที่ใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรหลายชนิดจึงถูกปรับปรุงด้วยการเคลือบหรือเติมสารป้องกันการเกิดหยดน้ำ (antifogging agent) [4,30] การปรับปรุงนี้จะมีผลกระทบต่อความสามารถในการเปียกของฟิล์ม (wettability) เท่านั้น และแทบจะไม่มีผลต่อคุณสมบัติอัตราการซึมผ่านของก๊าซเลย แต่เนื่องจากฟิล์มประเภทนี้มีราคาสูง จึงมักนิยมใช้กับผักและผลไม้ที่ผ่านการเตรียม เช่น ล้างหรือหั่นเรียบร้อยแล้วพร้อมบริโภคได้ทันที เช่น ผักสลัดชนิดต่าง ๆ และแครอทขูดฝอย เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ได้รับความนิยมมากในยุโรป เช่น ฝรั่งเศสและอังกฤษ [29]

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาสามารถสรุปคุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุที่เหมาะสมสำหรับนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สดได้ดังนี้ [1,2,4,6,27]

(1) มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับความต้องการ

(2) มีความทนทานต่อการฉีกขาดและการดึงยืด

(3) มีความใสและดูสวยงาม

(4) มีน้ำหนักเบา

(5) มีความสามารถที่จะถูกปิดผนึกในอุณหภูมิไม่สูงเกินไปที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อผักและผลไม้สดที่บรรจุได้

(6) ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภค

(7) ไม่ทำปฏิกิริยาใด ๆ ต่อผักและผลไม้สดที่บรรจุ

(8) สามารถป้องกันการเกิดหยดน้ำในบรรจุภัณฑ์

(9) สามารถถูกบรรจุและขนส่งได้สะดวก

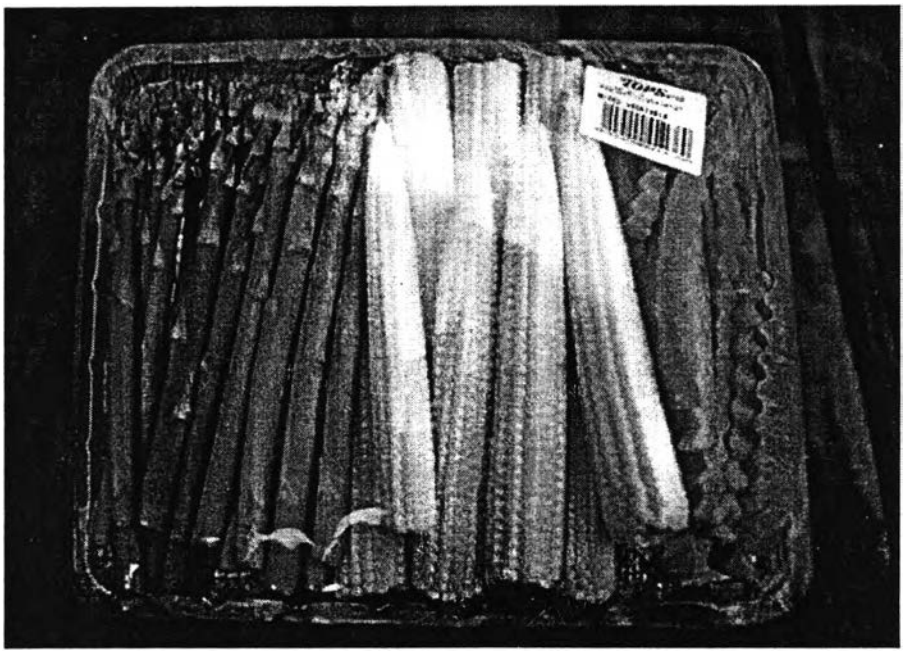
(10) มีความเหมาะสมในการใช้เชิงเศรษฐกิจ

(11) สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

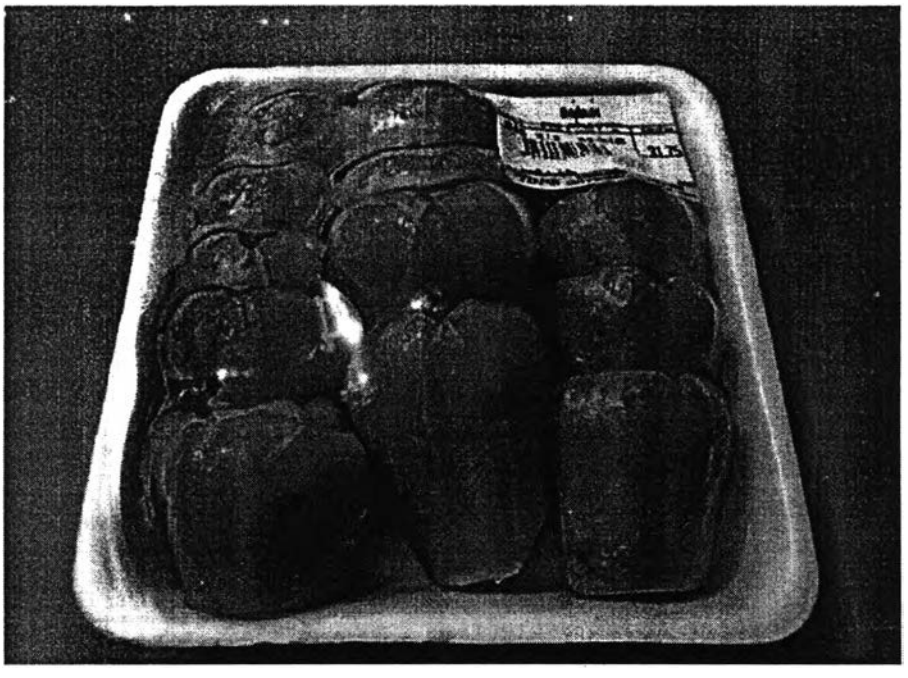
(12) สามารถพิมพ์หรือติดฉลากลงบนบรรจุภัณฑ์ได้

เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุที่เหมาะสมดังกล่าว พบว่าพอลิเมอร์เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่เหมาะสม [1,2,4,6] ส่วนรูปแบบของบรรจุภัณฑ์ที่ถูกใช้นั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของผักและผลไม้สดและจุดมุ่งหมายในการวางจำหน่ายว่าจะเป็นแบบขายปลีกหรือขายส่ง ซึ่งรูปแบบของบรรจุภัณฑ์ที่ถูกนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด โดยทั่วไป

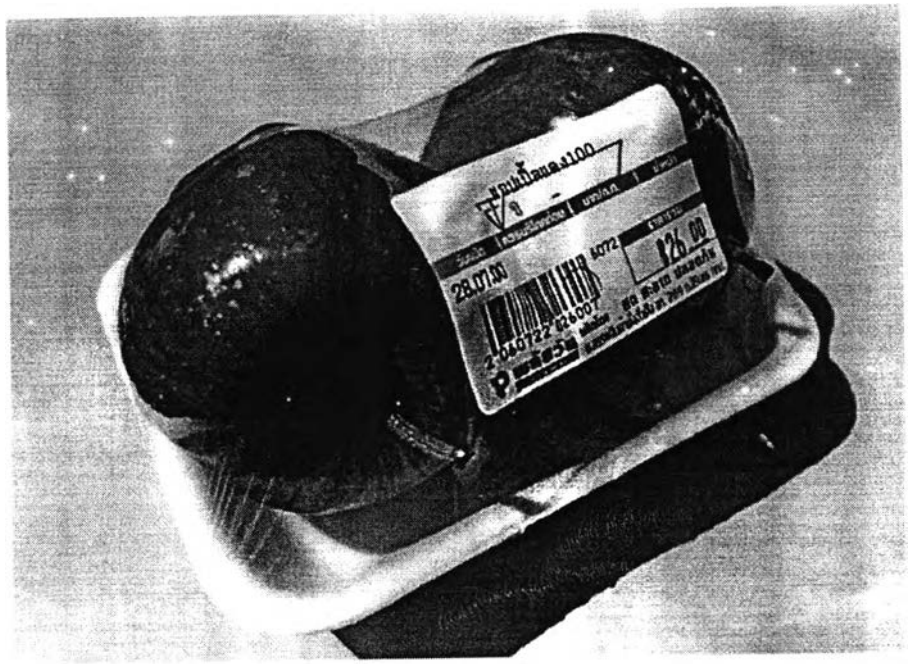
จะมี 3 รูปแบบคือ ถุงพลาสติกชนิดยืดหยุ่นได้ที่มีลักษณะรูปร่างคล้ายหมอน (flexible pillow packs) ถาดกึ่งแข็งที่ถูกคลุมด้วยฟิล์มพลาสติก (semi-rigid tray and lidding film systems) และถุงพลาสติกบรรจุในกล่อง (bag-in-box containers) รูปที่ 2.7 ถึงรูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด



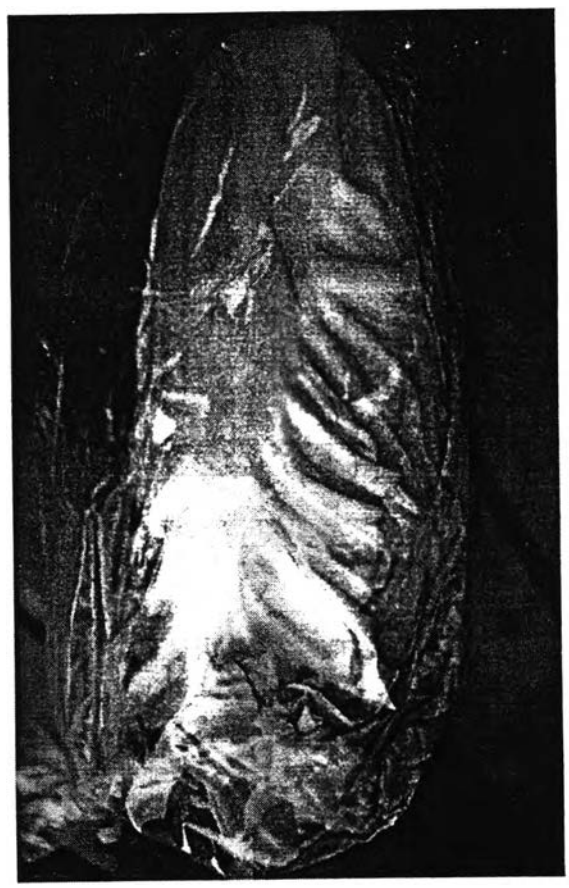
รูปที่ 2.7 การบรรจุหน่อไม้ฝรั่ง ข้าวโพดอ่อน และแครอท ในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร



รูปที่ 2.8 การบรรจุชมพู่พร้อมบริโภคในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร



รูปที่ 2.9 การบรรจุแอปเปิล ในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร



รูปที่ 2.10 การบรรจุผักกาดขาว ในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร

การสร้างสภาวะบรรยากาศดัดแปรที่ต้องการสำหรับผักและผลไม้สดนั้นทำได้ 2 วิธี คือ [1,2,4,22]

ก. การสร้างบรรยากาศดัดแปรแบบโดยอ้อม (Passive Modified Atmosphere)

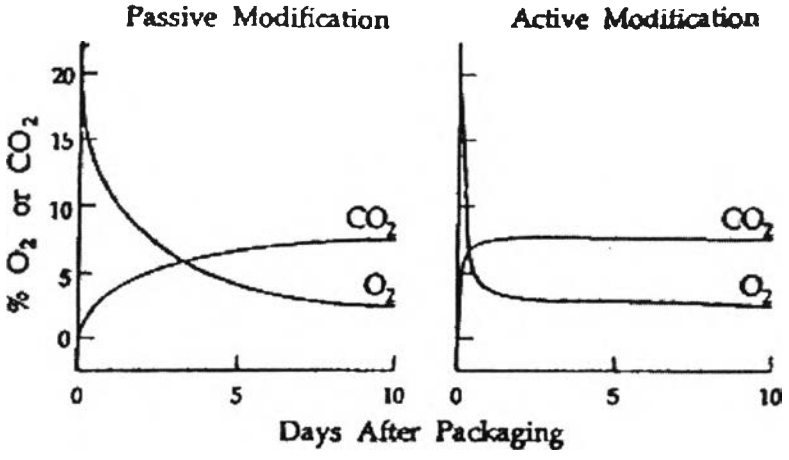
วิธีนี้บรรยากาศของก๊าซที่ต้องการในบรรจุภัณฑ์ที่ปิดสนิท จะเกิดจากสมดุลระหว่างอัตราการผลิตและใช้ก๊าซในการหายใจและการคายน้ำ กับอัตราการซึมผ่านของก๊าซต่าง ๆ ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ โดยที่องค์ประกอบและความเข้มข้นของก๊าซเริ่มต้นเป็นแบบเดียวกับอากาศปกติ ภายหลังจากการบรรจุแล้ว ความเข้มข้นของก๊าซของบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์จะมีการเปลี่ยนแปลงกับเวลา เนื่องจากการหายใจของผักและผลไม้สดและการซึมผ่านของก๊าซผ่านบรรจุภัณฑ์ จนกระทั่งเกิดสภาวะคงตัวของความเข้มข้นของก๊าซ ได้บรรยากาศดัดแปรภายในบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการ ถ้าเลือกชนิดบรรจุภัณฑ์ได้เหมาะสมกับชนิดของผักและผลไม้สดที่ทำการบรรจุ

ข. การสร้างบรรยากาศดัดแปรแบบโดยตรง (Active Modified Atmosphere)

วิธีนี้บรรยากาศดัดแปรที่ต้องการจะได้จากการพ่นก๊าซตามความเข้มข้นที่กำหนดไว้เข้าไปในห้องเย็นหรือภาชนะบรรจุ หรืออาจได้จากการใช้สารเคมีที่ให้ก๊าซที่ต้องการหรือดูดกลืนก๊าซที่ไม่ต้องการออกไปจากบรรยากาศที่ล้อมรอบผักและผลไม้สด หรือการใส่สารที่ช่วยลดปริมาณก๊าซออกซิเจนและเพิ่มปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างรวดเร็ว เช่น เฟอรัสคาร์บอเนต (ferrous carbonate) ซึ่งเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.12 [27]

$$4FeCO_3 + O_2 + 6H_2O \longrightarrow 4Fe(OH)_3 + 4CO_2 \qquad (2.12)$$

วิธีสร้างบรรยากาศดัดแปรแบบโดยตรงจะคล้ายคลึงกับวิธีการไล่ด้วยก๊าซ แต่แตกต่างกันตรงที่วิธีนี้ใช้บรรจุภัณฑ์ชนิดที่ยอมให้มีการซึมผ่านของก๊าซได้ วิธีการสร้างบรรยากาศดัดแปรแบบโดยตรงนี้ทำให้ได้ความเข้มข้นของก๊าซที่ต้องการในบรรจุภัณฑ์เกิดขึ้นทันที ซึ่งเป็นข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับการสร้างบรรยากาศดัดแปรแบบโดยอ้อมที่ต้องใช้ระยะเวลาช่วงหนึ่งก่อนที่จะได้ความเข้มข้นของก๊าซที่ต้องการดังรูปที่ 2.11 [2] อย่างไรก็ตามการใส่สารดูดซับเพิ่มลงไปในบรรจุภัณฑ์หรือการพ่นก๊าซทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้น ทำให้เป็นข้อจำกัดของวิธีการสร้างบรรยากาศดัดแปรแบบโดยตรง



รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างการสร้างบรรยากาศดัดแปรแบบโดยตรงและแบบโดยอ้อมสำหรับผักและผลไม้สด [2]