บทที่ 2

หลักการพื้นฐาน

การยืดอายุการเก็บผักและผลไม้สดโดยวิธีบรรจุในบรรยากาศดัดแปรนั้น ต้องอาศัยความรู้หลาย ๆ ด้านประกอบเข้าด้วยกัน ทั้งความรู้ในด้านสรีรศาสตร์ของผักและผลไม้สด วิธีการเก็บแบบบรรยากาศดัดแปร ตลอดจนถึงบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการบรรจุเพื่อให้เกิดบรรยากาศดัดแปร ซึ่งจะได้กล่าวดังหัวข้อข้างล่างต่อไปนี้

2.1 สรีรศาสตร์ของผักและผลไม้สดหลังการเก็บเกี่ยว

(Physiology of Postharvest Fresh Produces)

2.1.1 การหายใจของผักและผลไม้สดและปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการหายใจ

2.1.1.1 การหายใจของผักและผลไม้สด

การหายใจของผักและผลไม้สดเกิดขึ้นในเซลล์ของผักและผลไม้สด เป็นกระบวนการทางเมตาบอลิซึม (metabolism) ที่ย่อยสารประกอบอินทรีย์ในเซลล์ให้เป็นสารโมเลกุลย่อย เพื่อให้ได้สารที่พร้อมในการทำปฏิกิริยาอื่น ๆ และพลังงาน (Adenosine Triphosphate, ATP และความร้อน) [1] สำหรับตัวพาพลังงานอันได้แก่ ATP นี้จะมีหน้าที่หลัก 3 ประการคือ

1) สนับสนุนปฏิกิริยาเมตาบอลิซึมอื่น ๆในเซลล์

2) ลำเลียงสารตัวกลาง (transport metabolites)

3) รักษาองค์ประกอบของเซลล์ และความสามารถในการซึมผ่านของสารต่าง ๆ ผ่านเมมเบรน (membrane)

สารประกอบอินทรีย์ที่ผักและผลไม้สดใช้ในกระบวนการหายใจนั้นจะต้องเป็นสารที่มีอยู่ภายในเซลล์เป็นจำนวนมาก และสามารถที่จะถูกออกซิไดซ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งคาร์โบไฮเดรทนับว่าเป็นสารที่สำคัญมากที่ผักและผลไม้สดนำมาใช้ในกระบวนการหายใจ สารคาร์โบไฮเดรทที่ผักและผลไม้สดนำมาใช้ในการหายใจที่สำคัญมีด้วยกันหลายชนิด คือ กลูโคส (glucose) ฟรุคโตส (fructose) ซูโครส (sucrose) แป้ง ไขมัน และกรดอะมิโน (amino acid) เมื่อคาร์โบไฮเดรทเหล่านี้ถูกออกซิไดซ์แล้วจะได้ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ พลังงาน และสารประกอบอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ซึ่งสารประกอบอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหายใจนี้จะถูกนำไปใช้ในการสังเคราะห์สาร (anabolism) ที่มีความสำคัญต่อคุณภาพของผักและผลไม้ เช่น กรดอะมิโน กรดไขมัน สารประกอบอะโรมาติก (aromatic) และเม็ดสี (pigment) [1, 2, 6, 8]

ในขณะเกิดกระบวนการหายใจ ถ้ามีแก๊สออกซิเจนเพียงพอจะเรียกกระบวนการหายใจนี้ว่าการหายใจแบบใช้ออกซิเจน (aerobic respiration) ถ้าผักและผลไม้สดใช้น้ำตาลเฮกโซส (hexose sugar) เป็นสารเริ่มต้นปฏิกิริยา ก็สามารถเขียนสมการรวมปฏิกิริยาการหายใจ [1, 2, 3, 6, 8] ได้ดังนี้

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \text{ ----------> } 6CO_2 + 6H_2O + \text{พลังงาน} \qquad (2.1)$$

กระบวนการหายใจที่เกิดขึ้นนี้ประกอบด้วยปฏิกิริยาย่อยหลายขั้นตอน เช่น ปฏิกิริยาฟอสฟอรีเลชัน (phosphorylation) ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซีเลชัน (decarboxylation) และปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (isomerization) เป็นต้น และแต่ละขั้นตอนจะมีเอนไซม์หลายชนิดภายในเซลล์ช่วยในการดำเนินไปของปฏิกิริยาด้วย [1, 8] น้ำที่ได้จากกระบวนการหายใจจะยังคงอยู่ภายในเนื้อเยื่อ (tissue) แต่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จะถูกขับออกจากเนื้อเยื่อ ซึ่งการสูญเสียแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นี้นับว่าเป็นการสูญเสียน้ำหนักของผักและผลไม้สด อย่างไรก็ตามการ

สูญเสียน้ำหนักเนื่องจากเหตุนี้ถือว่ามีผลน้อยมาก เพราะว่าน้ำหนักของผักและผลไม้สดนี้จะสูญหายเพียงร้อยละ 3-5 [1]

เมื่อเฮกโซส 1 กรัมโมลถูกออกซิไดซ์ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำทั้งหมดจะมีพลังงาน ATP เกิดขึ้น 36 กรัมโมล (แต่ละ 1 กรัมโมลของ ATP จะให้พลังงาน 31.8 กิโลจูล หรือ 7.6 กิโลคาลอรี) ซึ่งถือว่าเป็นร้อยละ 40 ของพลังงานอิสระทั้งหมดเมื่อเกิดปฏิกิริยาและพลังงานอิสระประมาณร้อยละ 60 ที่เหลือจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งพลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นมานี้จะมีผลกระทบต่อคุณภาพของผักและผลไม้สดที่เก็บอย่างมาก โดยจะไปเร่งอัตราการเสื่อมคุณภาพให้เร็วขึ้น [1, 2, 8]

การหายใจของผักและผลไม้จะยังดำเนินไปอย่างต่อเนื่องหลังจากการเก็บเกี่ยว ดังนั้นอัตราการหายใจจึงเป็นตัวบ่งชี้อายุการเก็บผักและผลไม้สดได้อย่างดี ตาราง 2.1 แสดงตัวอย่างอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดบางชนิดที่ 5 °ซ [1] ถ้าอัตราการหายใจสูง การเปลี่ยนแปลงเมตาบอลิซึมภายในเนื้อเยื่อผักและผลไม้ก็สูง ทำให้ผักและผลไม้สดแก่หง่อมจนกระทั่งเน่าเสียได้เร็ว อายุการเก็บก็จะสั้น แต่ถ้าอัตราการหายใจต่ำ การเปลี่ยนแปลงเมตาบอลิซึมภายในเนื้อเยื่อผักและผลไม้ก็ต่ำ อายุการเก็บก็จะยาวนานขึ้น

ตาราง 2.1 อัตราการหายใจของผักและผลไม้สดบางชนิด [1]

อัตราการหายใจที่ 5 °ซ ($มก.CO_2$ต่อกก.ต่อชม.)	ผักและผลไม้
5-10	แอปเปิ้ล องุ่น มันฝรั่ง หัวหอมใหญ่
10-20	แอปพริคอท (apricot) แครอท กระหล่ำปลี เชอรี่ ผักกาดหอม พีช ลูกพลัม พริกไทย มะเขือเทศ
20-40	แบลคเบอรี่ (blackberry) ถั่วลิมา (lima bean) กระหล่ำดอก ราสเบอรี่ (rasberry) สตรอเบอรี่ (strawberry)
40-60	บรัสเซลสเพาท์ (brussels spouts) หอมหัวใหญ่แบบเขียว (green onion) ถั่วสแนป (snap bean)
>60	หน่อไม้ฝรั่ง บรอคเคอลี่ เห็ด ถั่วลันเตา ผักขม ข้าวโพดหวาน

การติดตามกระบวนการของปฏิกิริยาการหายใจ (respiratory process) นั้นสามารถทำได้โดยดูจากอัตราส่วนระหว่างปริมาณของออกซิเจนที่ใช้ไปต่อหน่วยเวลาต่อปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาต่อหน่วยเวลา ซึ่งอัตราส่วนนี้ถูกเรียกว่า เศษส่วนการหายใจ (respiratory quotient, R.Q.) ค่า R.Q. จะอยู่ในช่วง 0.7 ถึง 1.3 สำหรับการหายใจแบบใช้ออกซิเจน ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้น ถ้าสารตั้งต้นเป็นคาร์โบไฮเดรท เช่น กลูโคส และฟรุคโตส สารตั้งต้นนี้จะถูกออกซิไดซ์อย่างสมบูรณ์ในกระบวนการการหายใจของผักและผลไม้สด ทำให้ R.Q. เท่ากับ 1 ถ้ากรดอินทรีย์ถูกออกซิไดซ์ R.Q. จะมากกว่า 1 แต่ถ้าไขมันถูกออกซิไดซ์ R.Q. จะน้อยกว่า 1 อย่างไรก็ตามถ้าสารที่ใช้ในการหายใจมีหลายสาร R.Q. จะมีค่าเป็นผลเฉลี่ย [1, 2, 6, 8]

แต่ในสภาวะที่มีแก๊สออกซิเจนไม่เพียงพอสำหรับการหายใจแบบใช้ออกซิเจนของผักและผลไม้สด การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic respiration) อาจเกิดขึ้นได้ ซึ่งจะเป็นปฏิกิริยาที่เกิดการออกซิเดชัน (oxidation) ไม่สมบูรณ์ ทำให้ได้เอทธานอลออกมาซึ่งจะแปรเปลี่ยนไปเป็นอะเซตัลดีไฮด์ (acetaldehyde) หรือกรดแลคติก (lactic acid) ต่อไปคล้ายกับการหมัก ซึ่งสารเหล่านี้ก่อให้เกิดกลิ่นผิดปกติในบรรจุภัณฑ์ที่เก็บผักและผลไม้สดที่เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้ [1, 8] ปฏิกิริยาการหายใจแบบไม่ใช้แก๊สออกซิเจนสามารถเขียนได้ดังนี้

$$C_6H_{12}O_6 \text{ ----------> } 2C_2H_5OH+2CO_2+2ATP+2H_2O \qquad (2.2)$$

การสะสมของแอลกอฮอล์และแอลดีไฮด์ทำให้เกิดกลิ่นรสผิดปกติ (off-flavor) ในผักและผลไม้สดและทำให้เซลล์พืชถูกทำลาย นอกจากนี้การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะสร้างพลังงานน้อยกว่าการหายใจแบบปกติ (เพียง 2 ATP) โดยเฮกโซส 1 กรัมโมลจะให้พลังงานเพียง 64 กิโลจูล หรือ 15.2 กิโลคาลอรี [1, 8] ซึ่งน้อยกว่าที่ได้จากการหายใจแบบใช้ออกซิเจนมาก ทำให้พืชต้องเพิ่มการหายใจให้มากขึ้นเพื่อให้ได้พลังงานเพียงพอกับความต้องการ จึงเป็นการเร่งการใช้สารอาหารที่สะสมอยู่ในเซลล์พืช เมื่อคาร์โบไฮเดรทถูกใช้หมดไป พืชจะนำโปรตีนและไขมันมาใช้แทนพร้อมกับสร้างกรดและแอลกอฮอล์ออกมา

ด้วย ทำให้เกิดกลิ่นรสผิดปกติมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้การสะสมกรดในเซลล์พืชจะทำลายผนังเซลล์ เป็นผลให้ปฏิกิริยาชีวเคมีต่าง ๆ เกิดได้มากขึ้น และเชื้อจุลินทรีย์เข้ามาทำให้เกิดการเน่าเสียได้ง่ายยิ่งขึ้น ดังนั้นการกำหนดความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่ล้อมรอบผักและผลไม้สดให้เหมาะสมนั้น จะพิจารณาจากอัตราการหายใจที่ลดลงเพียงอย่างเดียวมิได้ จะต้องคำนึงถึงความทนทานของพืชต่อแก๊สออกซิเจนความเข้มข้นต่ำ ๆ ด้วย มิฉะนั้นจะเกิดความเสื่อมเน่าเสียเร็วยิ่งกว่าการเก็บรักษาในบรรยากาศปกติ [1, 2, 4, 6, 9]

2.1.1.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการหายใจ

2.1.1.2.1 ปัจจัยภายใน [1, 2, 6, 7, 9]

ปัจจัยภายในที่มีผลกระทบต่ออัตราการหายใจโดยตรงคือเนื้อเยื่อ (plant tissues) ของผักและผลไม้สดนั้น ๆ เมื่อปฏิกิริยาการหายใจเกิดขึ้น เซลล์ในเนื้อเยื่อของผักและผลไม้สดจะต้องการแก๊สออกซิเจนในการดำเนินปฏิกิริยาและจะผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ซึ่งการเข้าหรือออกของแก๊สในเซลล์นี้จะเกิดจากกระบวนการแพร่ผ่านเนื้อเยื่อของผักและผลไม้สด กระบวนการเริ่มต้นของการหายใจจะเริ่มจากการแพร่ของโมเลกุลของแก๊สเนื่องจากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของแก๊สที่ล้อมรอบผักและผลไม้สดและความเข้มข้นของแก๊สภายในเนื้อผักและผลไม้สด สำหรับแก๊สออกซิเจนในบรรยากาศที่ล้อมรอบผิวนอกของผักและผลไม้นั้น เริ่มแรกจะเกิดการแพร่อย่างทันทีทันใดสู่ภายในผักและผลไม้นั้น ๆ ในรูปของวัฏภาคแก๊ส (gas phase) ผ่านทางช่องว่างภายในเนื้อผักและผลไม้ โดยจะเข้าถึงเพียงเนื้อเยื่อหุ้มเซลล์ภายในผักและผลไม้ หลังจากนั้นจึงเกิดการละลายของแก๊สเป็นของเหลวแล้วค่อยแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าไปสู่ใจกลางของเซลล์ ซึ่งปฏิกิริยาการหายใจได้เกิดขึ้นภายในนั้น ส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สเอทธิลีนที่เกิดขึ้นจากการหายใจนี้ก็จะแพร่ผ่านย้อนกลับออกมาสู่บรรยากาศภายนอกเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นด้วยกระบวนการเช่นเดียวกัน เนื้อเยื่อของผักและผลไม้สดเหล่านี้จึงทำหน้าที่เสมือนตัวป้องกัน (barrier) การแพร่ของแก๊สต่าง ๆ

และจากผลการศึกษาการแลกเปลี่ยนแก๊สในเนื้อเยื่อพืชชี้ให้เห็นว่า ผิวของพืชนั้นเป็นตัวกั้นขวางการแพร่ที่สำคัญที่สุด ซึ่งส่งผลโดยตรงต่ออัตราการหายใจ ดังนั้นการเคลือบแวกซ์ (wax) ที่ผิวจะยิ่งช่วยเพิ่มความต้านทานการแพร่ของแก๊สมากขึ้น [1]

โดยทั่วไปแก๊สจะแพร่ผ่านเส้นทางที่มีตัวกั้นขวางหรือความต้านทานการแพร่น้อยที่สุด สำหรับการแพร่ของแก๊สภายในผักและผลไม้สดนั้น แก๊สจะแพร่ผ่านช่องว่างภายในเนื้อของผักและผลไม้สดนั่นเอง ผลไม้แต่ละชนิดจะมีปริมาณช่องว่างภายในเนื้อไม่เท่ากัน เช่น มันฝรั่งมีเพียงร้อยละ 1 ถึง 2 โดยปริมาตร ในขณะที่มะเขือเทศมีถึงร้อยละ 15 ถึง 20 โดยปริมาตร ซึ่งความแตกต่างกันของปริมาณช่องว่างภายในเนื้อนี้ก็เป็นสาเหตุหนึ่งของความแตกต่างกันของความต้านทานการแพร่ของแก๊สหรืออัตราการหายใจของผลไม้แต่ละชนิด นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงภายในเนื้อของพืช เช่น การเหี่ยวหรือการสุก ซึ่งผนังเซลล์ภายในเนื้อบางส่วนเกิดความเสียหาย ทำให้สารภายในเซลล์มาอยู่แทนที่ช่องว่างอากาศภายในเนื้อ ปริมาณช่องว่างอากาศภายในเนื้อลดลง ซึ่งส่งผลให้การแพร่ผ่านของแก๊สเกิดได้ลำบากขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงภายในเนื้อของพืชจึงเป็นปัจจัยอีกปัจจัยหนึ่งที่ช่วยเพิ่มความต้านทานการแพร่ของแก๊สที่สำคัญนอกเหนือจากผิวของพืชนั้น ๆ

นอกจากสภาพของเนื้อของผักและผลไม้สดที่มีผลต่ออัตราการแพร่และอัตราการหายใจแล้ว ยังพบว่าอัตราการแพร่และอัตราการหายใจขึ้นอยู่กับขั้นตอนการเติบโต (growth stage) ของผักและผลไม้สดชนิดนั้น ๆ ด้วย [1, 2]

โดยส่วนใหญ่ผลไม้แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่เมื่อแบ่งตามขั้นตอนการเจริญเติบโต [1, 2, 6, 7, 9] คือ ผลไม้แบบไคลแมคเทอริก (climacteric type) และผลไม้แบบนอนไคลแมคเทอริก (non-climacteric type) สำหรับผลไม้จำพวกไคลแมคเทอริกนี้ ในตอนเริ่มต้นของขั้นสุก อัตราการหายใจและกระบวนการทางเมตาบอลิซึมที่เกี่ยวข้อง (เช่นการผลิตเอทธิลีน) จะมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงจุดสูงสุดซึ่งเรียกว่าจุดไคลแมคเทอริก หลังจากนั้นจะค่อย ๆ ลดลง ซึ่งกระบวนการเช่นนี้ก็ยังคงเกิดขึ้นแม้ว่าผลไม้ชนิดนั้นได้ถูกเก็บเกี่ยวแล้ว และนอกจากแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อการหายใจแล้ว แก๊สเอทธิ

ลีนหรือแก๊สโพรพิลีนก็จะมีผลต่อการหายใจอย่างมากด้วย [1, 2, 6] แต่ผลไม้แบบนอนไคลแมคเทอริกจะไม่มีจุดไคลแมคเทอริก การสุกจะดำเนินต่อไปอย่างสม่ำเสมอจะไม่มีการเพิ่มขึ้นของอัตราการหายใจอย่างรวดเร็ว และแก๊สเอทธิลีนหรือแก๊สโพรพิลีนแทบจะไม่มีผลกระทบต่ออัตราการหายใจของผลไม้จำพวกนี้ ส่วนผักโดยส่วนใหญ่นั้นจะมีพฤติกรรมเหมือนกับผลไม้จำพวกนอนไคลแมคเทอริก ยกเว้นมะเขือเทศ ตาราง 2.2 แสดงตัวอย่างผักและผลไม้ไคลแมคเทอริกและนอนไคลแมคเทอริกบางชนิด [1] นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการหายใจนอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดและขั้นตอนการเติบโตของผักและผลไม้สดแล้ว อัตราการหายใจยังเปลี่ยนแปลงอย่างมากกับวิธีการเพาะปลูกที่แตกต่างกันด้วย [1]

ตาราง 2.2 ตัวอย่างของผักและผลไม้สดไคลแมคเทอริกและนอนไคลแมคเทอริก [1]

ผักและผลไม้สดจำพวกไคลแมคเทอริก	ผักและผลไม้สดจำพวกนอนไคลแมคเทอริก
แอปเปิ้ล	บลูเบอรี่
แอปพริคอท	เชอรี่
อโวกาโด	แตงกวา
กล้วย	องุ่น
มะม่วง	แตงโม
มะละกอ	มะนาว
แพสชั่นฟรุต(passion fruit)	เกรฟฟรุต(grapefruit)
พีช	ส้ม
แพร์	สับปะรด
พลัม	สตรอเบอรี่
มะเขือเทศ	

2.1.1.2.2 ปัจจัยภายนอก

ก. อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่สำคัญที่สุดปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่ออายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สดหลังการเก็บเกี่ยว เนื่องจากกระบวนการหายใจและเมตาบอลิซึมต่าง ๆ ในผักและผลไม้สดถูกควบคุมโดยเอนไซม์หลายชนิด และอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมการทำงานของเอนไซม์เหล่านี้

อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ในผักและผลไม้สดส่วนใหญ่แปรผันตามอุณหภูมิแบบเอกโปเนนเชียล และอธิบายได้โดยสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius equation) [1, 6] ดังนี้คือ

$$\ln k = \frac{Ea}{R} \ln T \qquad (2.3)$$

โดย k คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาการหายใจ

T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature)

Ea คือพลังงานกระตุ้น (activation energy)

R คือค่าคงที่แก๊ส (gas constant)

เนื่องด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาหรืออัตราการหายใจแปรผันตามอุณหภูมิ จึงมีการกำหนดตัวแปรตัวหนึ่งขึ้นมาเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 10 °ซ ซึ่งเรียกว่าเศษส่วนอุณหภูมิ (temperature quotient หรือ Q_{10}) ตัวแปรนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ความเร็วสัมพัทธ์ของการหายใจที่เพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิ [1, 6]

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

R_1 คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ T

R_2 คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ T+10

หรือกรณีที่ความแตกต่างอุณหภูมิไม่เท่ากับ 10°ซ สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

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

Q_{10} ของผักและผลไม้ทั่วไปมีค่าประมาณ 2.5-4 ในช่วง 0-10°ซ มีค่า 2.0-2.5 ในช่วง 10-20 °ซ มีค่า 1.5-2.0 ในช่วง 20-30 °ซ และมีค่า 1.0-1.5 ในช่วง 30-40 °ซ ตัวอย่างค่า Q_{10} ของผักบางชนิดที่อุณหภูมิในการเก็บต่าง ๆ ถูกแสดงดังตาราง 2.3 [1]

ตาราง 2.3 ตัวอย่างเศษส่วนอุณหภูมิ (Q_{10}) ของผักบางชนิด [1]

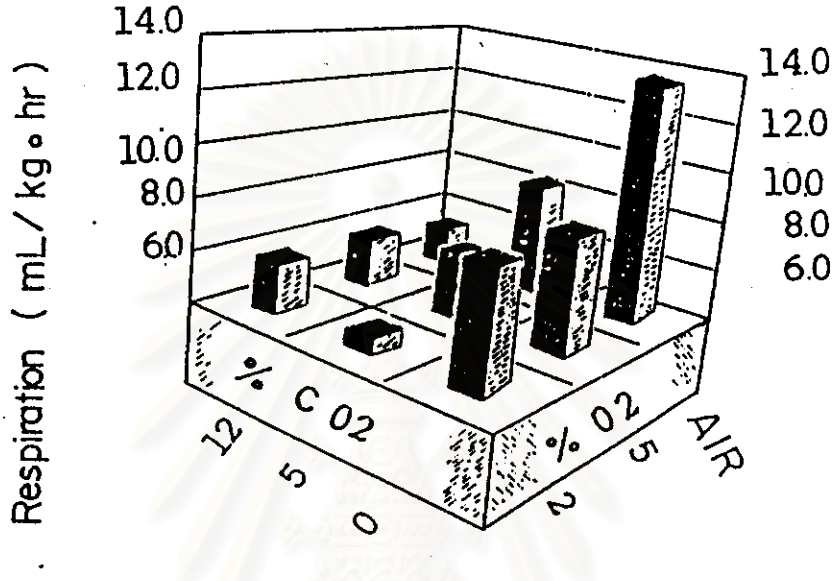
ชนิดผัก	อุณหภูมิ (°ซ)			
	0-5	5-10	10-15	15-20
หน่อไม้ฝรั่ง	3.3	4.2	1.2	2.3
บรอคเคอลี่	5.2	4.6	3.9	2.7
บรัสเซล สเปาท์ (brussels spouts)	4.9	2.7	1.5	-
แครอท	2.0	2.3	1.5	2.8
กระหล่ำดอก	1.8	2.4	1.7	2.7
ขึ้นฉ่ายฝรั่ง (celery)	3.5	4.0	1.7	-
ใบผักกาดหอม	2.0	1.7	2.3	2.3
แตงโมและแคนตาลูป	5.2	2.5	4.6	1.7
แรดิช (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

ดังนั้นหลังจากการเก็บเกี่ยวแล้วควรจะเก็บรักษาและผลไม้สดไว้ในที่อุณหภูมิต่ำทันทีที่เป็นไปได้เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของผักและผลไม้สดให้ยาวนานที่สุด อย่างไรก็ตามถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปอาจเป็นอันตรายต่อผักและผลไม้สดได้ ซึ่งเรียกว่า ความเสียหายเนื่องจากความเย็น (chilling injury) ลักษณะที่แสดงออกมาเช่น การเน่าเสีย สีผิดปกติ รอยช้ำ รอยบุ๋ม เนื้อฉ่ำน้ำผิดปกติ การสุกไม่สม่ำเสมอ เป็นต้น [6] ดังนั้นการกำหนดอุณหภูมิเก็บรักษาที่เหมาะสมจึงจำเป็นมาก

ข. ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จากการศึกษาของนักวิจัยหลายท่าน [6, 18, 23, 25, 30] พบว่าอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดนั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศที่ล้อมรอบผักและผลไม้สดนั้น ดังตัวอย่างในรูป 2.1 [6] ที่พบว่าบรอคเคอลี่มีแนวโน้มอัตราการหายใจลดลงเมื่อความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 เป็น 5 และ 12 โดยปริมาตรตามลำดับที่ความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนในแก๊สผสมมีค่าร้อยละ 5 และ 21 โดยปริมาตร และเมื่อความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนลดลงจากร้อยละ 21 เป็น 5 และ 2 โดยปริมาตรตามลำดับที่ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมมีค่าร้อยละ 5 โดยปริมาตร บรอคเคอลี่ก็จะมีอัตราการหายใจลดลงด้วยเช่นกัน และยังพบอีกว่าผลของแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการชะลอหรือยับยั้งกระบวนการหายใจและเมตาบอลิซึมต่าง ๆ ของผักและผลไม้สดนั้นเป็นแบบเสริมซึ่งกันและกัน (additive effect) กล่าวคือ การใช้แก๊สใดแก๊สหนึ่งเพียงอย่างเดียวจะมีผลน้อยกว่าการใช้แก๊สทั้งสองร่วมกัน [1, 6] นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาแนวโน้มผลกระทบของความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดได้จากสมการ 2.1 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการหายใจแบบใช้ออกซิเจน จะเห็นได้ว่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาหรืออัตราการหายใจแบบใช้ออกซิเจนนี้สามารถถูกควบคุมได้ด้วยการควบคุมปริมาณของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ การควบคุมแก๊สออกซิเจนให้มีปริมาณที่ต่ำและควบคุมปริ

มาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้มีปริมาณที่สูงจะเป็นการช่วยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้ช้าลงซึ่งก็คือการชะลออัตราการหายใจนั่นเอง [1-7, 9]



รูป 2.1 ผลกระทบของความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออัตราการหายใจของบรอคเคอลี่ที่อุณหภูมิ 0 °ซ (ศึกษาเป็นเวลา 7 วัน) [6]

นอกจากผลกระทบของความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่ออัตราการหายใจแล้ว ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้นยังมีผลต่อลักษณะทางกายภาพและแบบการหายใจของผักและผลไม้สดด้วย เนื่องจากถ้าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนต่ำเกินไป (น้อยกว่าร้อยละ 2 โดยปริมาตร) จนกระทั่งผักและผลไม้สดนั้นมีแก๊สออกซิเจนไม่เพียงพอสำหรับการหายใจแบบใช้ออกซิเจนก็จะก่อให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อผักและผลไม้สดได้ (ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1.1.1) และถ้าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศรอบ ๆ ผักและผลไม้สดสูงเกินไป (ประมาณร้อยละ

20 โดยปริมาตรหรือสูงกว่า) ก็จะก่อให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนเช่นเดียวกัน ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของพืชและความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่มีอยู่ด้วย [6] นอกจากนี้ยังพบว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 5-20 โดยปริมาตรอาจเป็นเหตุให้เอนไซม์ในวงจรเครบส์ (Krebs cycle) ทำงานผิดปกติ ทำให้การหายใจเปลี่ยนไปเป็นแบบไม่ใช้ออกซิเจน และยังพบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเซลล์ เช่น การลดขนาด และเปลี่ยนรูปร่างของไมโทคอนเดรีย (mitochondria) ซึ่งเชื่อว่าเกี่ยวข้องโดยตรงกับการเสื่อมเน่าเสียของพืช (senescence) อย่างไรก็ตามกลไกการทำงานของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อการหายใจและเมตาบอลิซึมต่าง ๆ ในเซลล์พืชยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด [6] ความเข้มข้นต่ำสุดของแก๊สออกซิเจนที่ผักและผลไม้สดบางชนิดทนทานได้ และความเข้มข้นสูงสุดของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผักและผลไม้บางชนิดทนทานได้ถูกแสดงดังตาราง 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ [6]

ตาราง 2.4 ความเข้มข้นต่ำสุดของแก๊สออกซิเจนที่ผักและผลไม้สดบางชนิดทนทานได้ [6]

ความเข้มข้นต่ำสุดของแก๊สออกซิเจนที่ผักและผลไม้สดทนทานได้ (ร้อยละโดยปริมาตร)	ผักและผลไม้สด
1	แอปเปิ้ล บรอคเคอรี่ เห็ด ลูกแพร์
2	แอปเปิ้ล แอปพริคอท บรัสเซลสเพาท์ (brussels sprouts) กระหล่ำปลี แคนตาลูป กระหล่ำดอก เซเลอรี่ (celery) เชอรี่ ข้าวโพดหวาน กีวี มะละกอ พีช ลูกแพร์ สับปะรด พลัม สตรอเบอรี่
3	อาติโชค (artichoke) อโวกาโด แตงกวา พริกไทย มะเขือเทศ
5	หน่อไม้ฝรั่ง ผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว ถั่วลันเตา มันฝรั่ง

ตาราง 2.5 ความเข้มข้นสูงสุดของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผักและผลไม้สดบางชนิดทนทานได้ [6]

ความเข้มข้นสูงสุดของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผักและผลไม้สดทนทานได้ (ร้อยละโดยปริมาตร)	ผักและผลไม้สด
2	แอปเปิ้ลพันธุ์ golden delicious แอปพริคอท อาติโชค เซเลอรี่ กระหล่ำปลี องุ่น ผักกาดหอม ลูกแพร์ พริกหวาน มะเขือเทศ มันฝรั่งชนิดหวาน
5	แอปเปิ้ลพันธุ์ทั่วไป อโวกาโด กล้วย บรัสเซลสเพาท์ กระหล่ำปลีฝรั่ง แครอท กระหล่ำดอก แครนเบอรี่ (cranberry) กีวี มะม่วง ส้ม มะละกอ พีช ถั่วลันเตา พริกหยวก พลัม เรดีช (radish)
10	หน่อไม้ฝรั่ง บรอคเคอลี่ แตงกวา เกรฟฟรุต (grapefruit) มะนาว มันฝรั่ง ผักชีฝรั่ง ถั่วเขียว สับปะรด
15	แบลคเบอรี่ บลูเบอรี่ แคนตาลูป เห็ด ราสเบอรี่ ผักขม สตรอเบอรี่ เชอรี่ ข้าวโพดหวาน

ค. แก๊สเอทธิลีน (Ethylene)

เอทธิลีนเป็นฮอร์โมนสำคัญที่ผักและผลไม้สดสังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อควบคุมการเจริญเติบโต การสุกและการเสื่อมเน่าเสียของผักและผลไม้ เอธทิลีนความเข้มข้นเพียง 0.1 ส่วนในล้านส่วนที่สะสมในระหว่างการเก็บรักษาผักและผลไม้สดสามารถกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ [1, 2, 6]

1) เร่งอัตราการหายใจของผักและผลไม้สด ทำให้อายุการเก็บรักษาลดลง

2) เร่งความสุกและความเสื่อมเน่าเสีย

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

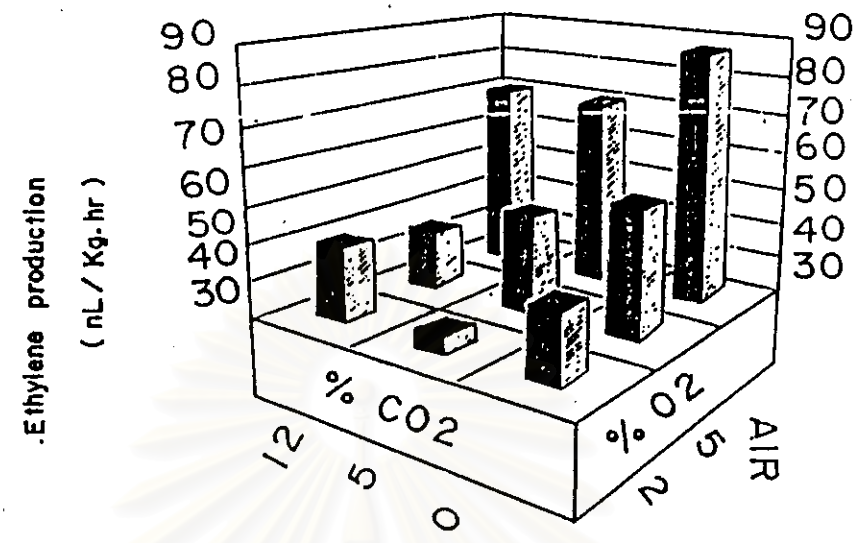
4) เร่งการร่วงของใบ (abscission)

5) เร่งการสังเคราะห์เอทธิลีน (autocatalyse of ethylene) ทำให้ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกระตุ้นการตอบสนองของเซลล์พืชต่อเอทธิลีนให้รุนแรงขึ้น

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

การสังเคราะห์เอทธิลีนและการทำงานของเอธทิลีนขึ้นกับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนในบรรยากาศ โดยอัตราการสังเคราะห์เอธทิลีนของพืชจะลดลงเมื่อออกซิเจนมีน้อยกว่าร้อยละ 8 โดยปริมาตรและอัตราการสังเคราะห์นี้จะลดลงถึงร้อยละ 50 โดยปริมาตร เมื่อออกซิเจนมีเพียงร้อยละ 2.5 โดยปริมาตร [6]

สำหรับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นสูงอาจจะเร่งหรือยับยั้งหรือไม่มีผลใดเลยต่อการสังเคราะห์เอทธิลีน ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของพืชและความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อย่างไรก็ตามแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถช่วยป้องกันหรือยับยั้งผลกระทบของเอทธิลีนที่มีต่อพืชได้ นอกจากนี้ถ้ามีแก๊สออกซิเจนความเข้มข้นต่ำร่วมอยู่ด้วยจะช่วยชะลอการสังเคราะห์เอทธิลีนได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากแก๊สทั้งสองมีผลต่อการสังเคราะห์เอทธิลีนเช่นเดียวกับผลต่อการหายใจของพืชดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1.1.2.2 ข. (ดูรูป 2.2) [6] ตารางที่ 2.6 แสดงความเข้มข้นต่ำสุดของเอทธิลีนที่สามารถเร่งการสุกของผลไม้บางชนิด ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของเอทิลีนที่จำเป็นนั้นมีค่าต่ำมากและแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของผักและผลไม้สด [6]



รูป 2.2 ผลกระทบของความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการสังเคราะห์เอทธิลีนของบรอคเคอลี่ที่อุณหภูมิ 0 °ซ (ศึกษาเป็นเวลา 7 วัน) [6]

ตารางที่ 2.6 ความเข้มข้นต่ำสุดของเอทธิลีนที่สามารถเร่งการสุกของผลไม้บางชนิด [6]

ผักและผลไม้สด	ความเข้มข้นต่ำสุดของแก๊สเอทธิลีนที่สามารถเร่งการสุกของผลไม้บางชนิด (ส่วนในล้านส่วน)
อโวกาโด	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

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นอกเหนือจากแก๊สเอทธิลีนแล้ว แก๊สไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ เช่น แก๊สโพรพิลีน (propylene) และแก๊สอะเซ็ตทิลีน (acetylene) ก็มีผลกระทบต่อการหายใจของผักและผลไม้สดด้วย [1]

ง. ความเครียด (Stresses)

ความเสียหายทางกายภาพ เช่น รอยแผลที่ผิว รอยถลอกเนื่องจากแรงกระแทกและการสั่นสะเทือน เป็นต้น สามารถกระตุ้นอัตราการหายใจและการผลิตเอทธิลีนให้สูงขึ้นได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของผักและผลไม้สดและลักษณะของความเสียหาย [2] โดยปกติแล้วอัตราการหายใจที่เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับรอยถลอกหรือรอยขีดข่วน อย่างไรก็ตามรอยถลอกหรือรอยขีดข่วนจะมีผลในเชิงพาณิชย์มากกว่าผลกระทบต่ออัตราการหายใจ นั่นคือ ผู้บริโภคไม่ชอบที่จะซื้อผักและผลไม้สดที่มีรอยถลอกหรือรอยขีดข่วนนั่นเอง

ความเครียดเนื่องจากน้ำที่เป็นผลมาจากการสูญเสียน้ำไปสู่บรรยากาศรอบ ๆ ผักและผลไม้สดก็สามารถกระตุ้นอัตราการหายใจได้ แม้ว่าการสูญเสียน้ำเกินร้อยละ 5 ของน้ำหนักจะทำให้อัตราการหายใจลดลง แต่ก็จะก่อให้เกิดการหดตัวและเหี่ยวเฉาของเนื้อได้ [2]

2.1.2 การระเหยของน้ำ (Transpiration)

หลังจากการเก็บเกี่ยวแล้ว ผักและผลไม้สดยังคงมีการสูญเสียน้ำอย่างต่อเนื่องเนื่องจากการระเหยของน้ำจากเนื้อเยื่อ (tissue) และการสูญเสียน้ำนี้เป็นกระบวนการที่สำคัญอันหนึ่งที่ส่งผลให้เกิดความเน่าเสียทางกายภาพได้เร็วขึ้น [2, 9] เมื่อการระเหยของน้ำจากเนื้อเยื่อเกิดอย่างต่อเนื่องจะทำให้ผักและผลไม้สดนี้เหี่ยว หดตัว ความแน่นของเนื้อลดลง สูญเสียความกรอบและความฉ่ำ ซึ่งทำให้ลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส และรสชาติเปลี่ยนไป ผักและผลไม้สดส่วนใหญ่เสียความสดเมื่อสูญเสียน้ำร้อยละ 3-10 ของน้ำหนักเริ่มต้น [2] นอกจากการสูญเสียน้ำหนักและความสดแล้ว การระเหยของน้ำยังก่อให้เกิดความเครียดเนื่องจากน้ำ (water stress) ที่ทำให้ผักและผลไม้สดเน่าเสียได้เร็วขึ้น

2.2 บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด

(Modified Atmosphere Packaging for Fresh Produces)

คุณภาพและอายุการเก็บรักษาของผักและผลไม้สดหลังการเก็บเกี่ยว นอกจากจะขึ้นกับชนิด สายพันธุ์ คุณภาพขณะเก็บเกี่ยว ความสะอาด วิธีการขนส่ง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ใช้ในการขนส่งและใช้ในการเก็บรักษาแล้ว ยังขึ้นกับสภาพบรรยากาศรอบ ๆ หรืออีกนัยหนึ่งคือความเข้มข้นของแก๊สชนิดต่าง ๆ ที่ล้อมรอบผักและผลไม้สดนั้น ทั้งนี้เนื่องมาจากภายหลังที่ผักและผลไม้สดถูกเก็บเกี่ยว เซลล์ในผักและผลไม้สดยังคงเป็นสิ่งมีชีวิตอยู่ ซึ่งกระบวนการหายใจและเมตาบอลิซึม (metabolism) ต่าง ๆ ที่นำไปสู่ความแก่ (maturation) ความสุก (ripening) และความเสื่อมเน่าเสีย (senescence) ยังคงเกิดต่อเนื่องตลอดเวลา [6] และจากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1.1.2.2.ข. ถึงผลกระทบของความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สด กล่าวคือการลดความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและการเพิ่มความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศรอบผักและผลไม้สดสามารถช่วยชะลออัตราการหายใจได้ ซึ่งมีผลให้อายุการเก็บรักษายาวนานขึ้น ดังนั้นการควบคุมปริมาณแก๊สภายในบรรจุภัณฑ์ให้เหมาะสมจึงจำเป็นในการเก็บรักษาผักและผลไม้สดให้มีอายุการเก็บนานขึ้น การบรรจุผักและผลไม้สดโดยการควบคุมปริมาณแก๊สภายในบรรจุภัณฑ์ให้อยู่ภายใต้บรรยากาศของแก๊สชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิด โดยที่อัตราส่วนของแก๊สชนิดต่าง ๆ นั้นแตกต่างไปจากอัตราส่วนที่พบในบรรยากาศปกติ สามารถทำได้ 4 วิธีดังนี้ [3, 4, 6]

1. บรรยากาศควบคุม (controlled atmosphere, CA) เป็นวิธีการควบคุมบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์ โดยการตรวจวัด และปรับความเข้มข้นของแก๊สต่าง ๆ ในบรรจุภัณฑ์ให้เหมาะสมตลอดเวลา ซึ่งวิธีนี้ต้องใช้อุปกรณ์ประกอบทำให้มีต้นทุนในการประกอบการที่ค่อนข้างสูง

2. บรรยากาศดัดแปร (modified atmosphere, MA) เป็นวิธีการควบคุมบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ให้อยู่ภายใต้บรรยากาศที่อัตราส่วนของแก๊สชนิดต่าง ๆ แตกต่างไปจาก

บรรยากาศปกติ และอัตราส่วนนี้อาจเปลี่ยนแปลงได้ตามระยะเวลา โดยขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์ที่บรรจุ อัตราส่วนของแก๊สแรกเริ่ม วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ และสภาวะการเก็บผลิตภัณฑ์นั้น ๆ

3. การไล่ด้วยแก๊ส (gas-flush) เป็นวิธีการบรรจุผลิตภัณฑ์ให้อยู่ภายใต้บรรยากาศของแก๊สชนิดใดชนิดหนึ่ง โดยการพ่นแก๊สนั้น ๆ เข้าไปแทนที่อากาศภายในภาชนะ

4. สูญญากาศ (vacuum) เป็นวิธีการบรรจุผลิตภัณฑ์ให้อยู่ภายใต้สูญญากาศ โดยการดึงเอาอากาศภายในภาชนะออกไป และไม่มีการใส่แก๊สใด ๆ เข้าไปแทนที่

การใช้แก๊สเพื่อช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สดเป็นวิทยาการที่มนุษย์รู้จักมากว่า 1,000 ปีแล้ว แต่มีการนำมาใช้ในระดับอุตสาหกรรมเมื่อประมาณครึ่งศตวรรษที่ผ่านมา [6] โดยส่วนใหญ่มักจะใช้วิธีการบรรจุของ CA หรือ MA เนื่องจากบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการนั้นควรจะมีทั้งแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์รวมถึงแก๊สไนโตรเจนด้วย ดังนั้นวิธีการบรรจุแบบการไล่ด้วยแก๊สและสูญญากาศจึงไม่นิยมใช้ในการบรรจุผักและผลไม้สด

นอกจากการบรรจุผักและผลไม้สดภายใต้ CA และ MA ที่มีความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนต่ำและความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงจะช่วยลดอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแล้ว บรรยากาศที่เกิดจากการบรรจุแบบนี้ยังก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างอื่นที่มีผลดีต่อผักและผลไม้สดอีกดังนี้ คือ

(1) ชะลอการสังเคราะห์แก๊สเอทธิลีนและเอนไซม์ต่าง ๆ ที่ช่วยเร่งการสุก ทำให้ชะลออัตราการแก่ของผักและผลไม้สดได้

(2) ลดการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ (chlorophyll) และลดการสังเคราะห์แคโรทีนอยด์ (carotenoids) และแอนโทไซยานิน (anthocyanins) ซึ่งรงค์วัตถุสองชนิดหลังนี้ให้สีเหลือง ส้ม และแดงอมน้ำเงินตามลำดับแก่พืช ทำให้ผักและผลไม้สดมีสีไม่เปลี่ยนแปลงมากนักระหว่างการเก็บ

(3) ช่วยให้เนื้อสัมผัสของผักและผลไม้สดอ่อนนิ่มช้าลง ตัวอย่างเช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร สามารถป้องกันมิให้เนื้อของบรอคเคอลี่เหนียว แต่อ่อนนุ่มพอดี (tender) และนุ่มกว่าตอนเก็บเกี่ยวใหม่ ๆ ถ้าความเข้มข้นเป็นร้อยละ 12 โดยปริมาตร จะลดความเหนียวของหน่อไม้ฝรั่งเนื่องจากมีเส้นใยมากเกินไป ถ้าใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 5 โดยปริมาตร ร่วมกับแก๊สออกซิเจนร้อยละ 2 โดยปริมาตร สามารถลดการอ่อนนิ่มของผลกีวีได้ดี ส่วนแก๊สออกซิเจนร้อยละ 2.5 โดยปริมาตร สามารถชะลอการอ่อนนิ่มของเนื้อแอปเปิ้ลได้

(4) ลดการสูญเสียน้ำตาล ดังนั้น ความหวานยังคงเดิม

(5) ลดการสลายของกรดอินทรีย์ ทำให้ความเปรี้ยวและความเป็นกรดด่าง (pH) ยังคงเดิม

(6) ลดการเปลี่ยนแปลงคุณค่าทางอาหาร (nutritional change) ตัวอย่างเช่น บรรยากาศที่มีแก๊สออกซิเจนร้อยละ 4 โดยปริมาตร กับคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 9 โดยปริมาตร ช่วยลดการสลายตัวของวิตามินซีในผักขม (spinach) ได้ถึงร้อยละ 50 โดยปริมาตร เมื่อเทียบกับการเก็บในบรรยากาศปกติ แก๊สออกซิเจนร้อยละ 1 โดยปริมาตร สามารถช่วยลดการสูญเสียวิตามินซีในผักกาดขาวปลีหางหงษ์ และชะลอการสลายตัวของคลอโรฟิลล์และน้ำตาล

(7) ลดการเน่าเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ เพราะเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้ผักและผลไม้สดเน่าเสียนั้นจะไม่สามารถเจริญเติบโตได้ในบรรยากาศที่มีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง ๆ ดังนั้นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร (MAP) สามารถลดการเน่าเสียเนื่องจากการกระทำของจุลินทรีย์ได้สำหรับผักและผลไม้ที่สามารถทนทานแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง ๆ ได้ (ประมาณร้อยละ 20 โดยปริมาตรหรือสูงกว่า) เช่น สตรอเบอรี่ บลูเบอรี่ เชอรี่ และราสพ์เบอรี่ นอกจากนั้นการบรรจุผักและผลไม้ในฟิล์มพลาสติกสามารถช่วยลดการปนเปื้อนและการแพร่กระจายของจุลินทรีย์และสปอร์ได้

บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศควบคุม (CAP) โดยทั่วไปจะใช้ระหว่างการเก็บผักและผลไม้สดในห้องเย็นขนาดใหญ่หรือระหว่างการขนส่งที่ใช้ตู้สินค้าขนาดใหญ่ (container) และระยะเวลาเดินทางค่อนข้างยาวนาน การรักษาความเข้มข้นของแก๊สให้คงที่ตลอดเวลาอาจใช้วิธีการพ่นแก๊สที่ต้องการเข้าไปอย่างสม่ำเสมอเพื่อแทนที่อากาศภายในห้องเย็นหรือตู้สินค้า หรืออาจใช้สารเคมีที่สามารถปล่อยแก๊สที่ต้องการหรือดูดแก๊สที่ไม่ต้องการ ดังนั้นต้นทุนดำเนินการของ CAP ค่อนข้างสูงจึงนิยมใช้สำหรับผักและผลไม้ที่สามารถมีอายุการเก็บรักษาค่อนข้างยาวนานเพื่อการบริโภคตลอดปี เช่น กะหล่ำปลี แอปเปิ้ล ผลกีวี ผลสาลี่ เป็นต้น

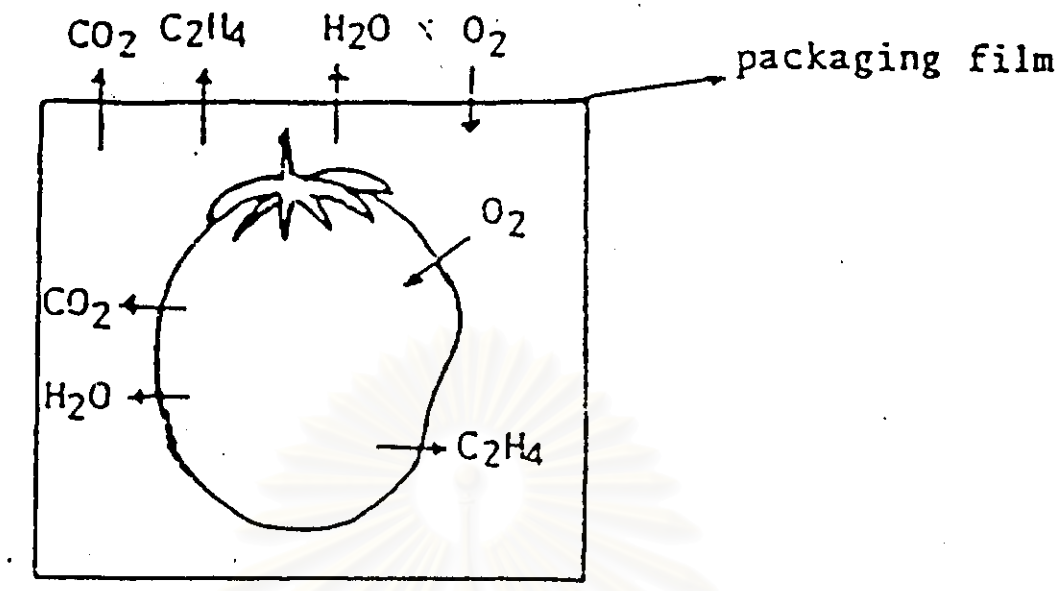
ในปัจจุบันนี้บรรจุภัณฑ์แบบ MAP ได้รับความนิยมมากกว่า CAP และมีการนำมาใช้ทั้งในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่และเล็ก สามารถใช้ได้ทั้งในระหว่างการเก็บในห้องเย็น การขนส่งและการวางจำหน่ายปลีก การบรรจุมีตั้งแต่ขนาดใหญ่ (bulk package) จนถึงขนาดย่อยเพื่อขายปลีก (retail package) ต้นทุนดำเนินการต่ำกว่า เนื่องจากไม่ต้องมีการควบคุมความเข้มข้นของแก๊สหลังการบรรจุในบรรจุภัณฑ์เรียบร้อยแล้ว [6,10]

2.2.1 หลักการพื้นฐานของการบรรจุแบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด [1, 2, 4, 6, 9]

การบรรจุผักและผลไม้สดแบบบรรยากาศดัดแปรดังกล่าวนี้จะต้องใช้บรรจุภัณฑ์ชนิดที่มีความสามารถในการยอมให้มีการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ บรรจุภัณฑ์ที่ทำจากพอลิเมอร์จึงเป็นบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรอย่างยิ่ง เนื่องจากพอลิเมอร์ในปัจจุบันมีหลากหลายชนิดและสามารถที่จะเลือกค่าการซึมผ่านของแก๊สต่าง ๆ ได้ในช่วงกว้าง ระบบบรรจุภัณฑ์แบบ MAP สำหรับผักและผลไม้สดถูกแสดงดังรูป 2.3 [21] เมื่อทำการบรรจุผักและผลไม้สดลงในบรรจุภัณฑ์และทำการปิดภาชนะบรรจุให้สนิทแล้ว ผักและผลไม้สดในบรรจุภัณฑ์ซึ่งยังคงหายใจอยู่นั้น จะใช้แก๊สออกซิเจนภายในภาชนะเพื่อการหายใจ พร้อม ๆ กับที่จะผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ในระยะแรกอัตราการหายใจค่อนข้างสูง เนื่องจาก

ความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนยังสูงอยู่ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ยังมีน้อย หลังจากนั้นอัตราการหายใจจะค่อย ๆ ลดลงตามการลดลงของปริมาณแก๊สออกซิเจนและการเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในขณะเดียวกันจากการที่แก๊สออกซิเจนถูกใช้ไปในการหายใจ ทำให้ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนลดลงจึงเกิดแรงขับดัน (driving force) ให้แก๊สออกซิเจนภายนอกซึมผ่านฟิล์มเข้าไปในภาชนะบรรจุ ขณะเดียวกันแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการหายใจของผักและผลไม้สดนั้นจะซึมผ่านฟิล์มออกไปภายนอก ถ้าอัตราการใช้แก๊สออกซิเจนของผักและผลไม้สูงกว่าอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนเข้ามาในบรรจุภัณฑ์แล้วความเข้มข้นของออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์จะลดลง และถ้าอัตราการคายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของผักและผลไม้สดนี้สูงกว่าอัตราการซึมผ่านของแก๊สนี้ผ่านฟิล์มออกไปภายนอก ก็จะเกิดการสะสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในภาชนะบรรจุเช่นกัน ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไปนี้จะมีผลต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สด โดยผักและผลไม้สดจะมีอัตราการหายใจลดลงเมื่อความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนต่ำลงและความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น

กระบวนการดังกล่าวนี้จะดำเนินอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งอัตราการใช้แก๊สออกซิเจนและการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของผักและผลไม้สดเท่ากับอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านพอลิเมอร์ฟิล์มตามลำดับ ณ จุดนี้ ความเข้มข้นของแก๊สทั้งสองภายในบรรจุภัณฑ์จะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่จุดนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการซึมผ่านฟิล์มของแก๊สทั้งสองและอัตราการหายใจของพืช ดังนั้นการสร้างบรรจุภัณฑ์แบบ MAP สำหรับผักและผลไม้สดจึงต้องคำนึงถึงชนิดของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์และอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิดเป็นสำคัญ ซึ่งผลกระทบของปัจจัยทั้งสองนี้จะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อต่อไป



รูป 2.3 ระบบบรรจุภัณฑ์แบบ MAP สำหรับผักและผลไม้สด [21]

2.2.2. ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร [2,9]

(Factors Affecting MAP)

บรรยากาศดัดแปรภายในบรรจุภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนั้นมีผลกระทบมาจากปัจจัยหลาย ๆ อย่าง ซึ่งรวมถึงชนิดของผักและผลไม้สดและบรรยากาศแวดล้อมขณะนั้นด้วย ดังนี้

2.2.2.1 การหายใจของผักและผลไม้สด

(Respiration of Fresh Produces)

หลังการบรรจุผักและผลไม้สดลงในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP แล้ว ความเข้มข้นของแก๊สต่าง ๆ ภายในบรรจุภัณฑ์เริ่มเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งเกิดขึ้นจากการหายใจของผักและผลไม้สดที่บรรจุ อัตราการหายใจจะถูกกำหนดโดยชนิดของผักและผลไม้สด ระดับความแก่อ่อน สภาวะทางกายภาพ ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สเอทธิลีนภายในบรรจุภัณฑ์ ปริมาณของผักและผลไม้สดที่บรรจุ อุณหภูมิ และแสง [2] ซึ่งรายละเอียดของผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้ถูกกล่าวมาแล้วดังหัวข้อ 2.1

จากปัจจัยหลายปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการหายใจดังที่กล่าวมาแล้วนี้ เห็นได้ว่าถ้าคำนึงถึงความสัมพันธ์ของทุกปัจจัย ความสัมพันธ์นี้จะซับซ้อนมาก ทำให้เป็นการยากที่จะทำนายอัตราการหายใจในเชิงปริมาณได้ [2]

2.2.2.2. คุณสมบัติของพอลิเมอร์ฟิล์มที่นำมาเป็นบรรจุภัณฑ์

พอลิเมอร์เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยหน่วยเล็ก ๆ ที่ซ้ำ ๆ กันต่อกันเป็นสายโซ่ยาว ซึ่งหน่วยเล็ก ๆ นี้จะเรียกว่า โมโนเมอร์ (monomer) ความแตกต่างกันของโมโนเมอร์ของโครงสร้างของสายโซ่พอลิเมอร์ และความแตกต่างกันของแรงที่ยึดกันระหว่างสายโซ่ จะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ [5,6]

คุณสมบัติสำคัญของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ต้องใช้ในการพิจารณาในการเลือกฟิล์มบรรจุภัณฑ์ [1] คือ

(ก) ค่าการซึมผ่านของแก๊ส

(ข) ค่าการซึมผ่านของไอน้ำ

(ค) คุณสมบัติเชิงกล

(ง) ความใส

(จ) การปิดผนึก

(ฉ) ความปลอดภัย

และ (ช) ความสามารถในการทำปฏิกิริยาใด ๆ ต่อผักและผลไม้สดที่บรรจุ [1]

คุณสมบัติตั้งแต่ข้อ (ค) ถึงข้อ (ช) นี้เป็นคุณสมบัติที่บรรจุภัณฑ์ทั่วไปควรจะถูกคำนึงอยู่แล้ว แต่สำหรับการสร้างบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด ค่าการซึมผ่านของแก๊สและค่าการซึมผ่านของไอน้ำเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างยิ่งอีกข้อหนึ่งที่ต้องถูกพิจารณา เนื่องจากผักและผลไม้สดยังคงมีการหายใจอย่างต่อเนื่องหลังการบรรจุ การสร้างและการรักษาบรรยากาศดัดแปรที่ต้องการในบรรจุภัณฑ์จึงต้องอาศัยฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าการซึมผ่านของแก๊สที่เหมาะสม และจากการที่ผักและผลไม้สดแต่ละชนิดมีค่าอัตราการ

หายใจที่แตกต่างกัน จึงต้องทำการเลือกคู่ระหว่างฟิล์มพอลิเมอร์กับผักและผลไม้สดแต่ละชนิดให้เหมาะสม

ค่าการซึมผ่านฟิล์มของสารใด ๆ ถูกนิยามว่าเป็นการแพร่ของสารนั้น ๆ ผ่านวัสดุหรือฟิล์มที่มีความต้านทาน โดยที่วัสดุหรือฟิล์มนั้นไม่มีการฉีกขาดหรือมีรู กลไกของการซึมผ่านของแก๊สผ่านฟิล์มได้ถูกเสนอว่าเป็นการแพร่แบบที่ถูกกระตุ้น (activated diffusion) ซึ่งแบ่งกลไกได้เป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ [9, 10] คือ

1. แก๊สละลายลงในเนื้อฟิล์มพอลิเมอร์ในด้านความเข้มข้นของแก๊สที่สูงกว่า ขั้นตอนนี้เรียกว่า ขั้นตอนการละลาย (solution stage) ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของแก๊สในพอลิเมอร์แต่ละชนิด (solubility coefficient)

2. แก๊สที่ละลายในเนื้อฟิล์มเคลื่อนที่ผ่านเนื้อฟิล์มไปยังด้านที่มีความเข้มข้นของแก๊สต่ำกว่า เนื่องจากความแตกต่างกันของความเข้มข้น ในขั้นตอนนี้เรียกว่า ขั้นตอนการแพร่ (diffusion)

3. หลังจากที่แก๊สเคลื่อนที่สู่อีกด้านหนึ่งของฟิล์มแล้ว แก๊สจะระเหยออกจากผิวมาเป็นสถานะแก๊สเหมือนเดิม ซึ่งขั้นตอนนี้เรียกว่า ขั้นตอนการระเหย (evaporation)

ในขั้นตอนที่หนึ่งและที่สามนี้อัตราการละลายและการระเหยจะขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊สและชนิดของพอลิเมอร์นั้น ๆ ส่วนในขั้นตอนที่สองที่เป็นขั้นตอนการแพร่นี้ อัตราการแพร่ของแก๊สไม่เพียงขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊สและพอลิเมอร์เท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และความมีขั้วของโมเลกุลแก๊สที่แพร่ผ่าน ความเป็นผลึก (crystallinity) ปริมาณร่างแห (degree of cross-linking) และความสามารถในการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ในเนื้อพอลิเมอร์นั้น ๆ [9, 11]

ดังนั้นค่าการซึมผ่านของแก๊สเข้าและออกจากพอลิเมอร์ จึงขึ้นอยู่กับโครงสร้างของพอลิเมอร์ ธรรมชาติของโมเลกุลแก๊ส พื้นที่ใช้ในการแพร่ ความแตกต่างของความเข้มข้นที่คร่อมฟิล์ม ความแตกต่างของความดันลดคร่อมฟิล์ม อุณหภูมิ และความชื้น [9]

จากการศึกษาของ Kumins และ Roteman [12] พบว่า ถ้าไม่มีแรงกระทำกันระหว่างสารที่ซึมผ่านกับตัวพอลิเมอร์ ค่าการซึมผ่านของสารใด ๆ จะลดลงตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสารนั้น ๆ ในพอลิเมอร์ส่วนมากเมื่อความเป็นร่างแหของฟิล์มพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การแพร่จะลดลง ส่วนพลาสติไซเซอร์ (plasticizers) ที่ถูกเติมในพอลิเมอร์นั้นจะช่วยลดแรงโคฮีซีพ (cohesive force) ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งมีผลให้ความสามารถในการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าการซึมผ่านของสารผ่านพอลิเมอร์ก็จะเพิ่มขึ้นตามด้วย [9, 13]

สำหรับพอลิเมอร์บางชนิดที่มีสายโซ่หลัก (backbone) ที่มีพันธะแบบไม่อิ่มตัว (เช่น กลุ่มเอทธิล (ethyl group)) จะช่วยให้สัมประสิทธิ์การแพร่สูงขึ้น เนื่องจากพันธะแบบไม่อิ่มตัวจะทำให้การหมุนหรือการเคลื่อนไหวของสายโซ่เกิดได้ง่ายกว่าพันธะอิ่มตัว (เช่น กลุ่มเมทธิล (methyl group)) [9, 11]

จากผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วนี้ พร้อมกับเทคโนโลยีในปัจจุบันที่ได้พัฒนาไปอย่างมาก ทำให้สามารถผลิตพอลิเมอร์ฟิล์มที่มีค่าการซึมผ่านของแก๊สผ่านพอลิเมอร์ฟิล์มได้หลากหลายตามต้องการได้

ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไนโตรเจน จะมีค่าที่แตกต่างกัน สำหรับฟิล์มพอลิเมอร์ส่วนใหญ่แล้ว ค่าการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มจะสูงกว่าค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน และค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนผ่านฟิล์มจะสูงกว่าค่าการซึมผ่านของแก๊สไนโตรเจน โดยอัตราส่วนของค่าการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน และอัตราส่วนของค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนต่อค่าการซึมผ่านของแก๊สไนโตรเจน จะมีค่าประมาณ 3 ถึง 5 [4]

สำหรับผักและผลไม้สดส่วนใหญ่ ฟิล์มที่เหมาะสมจะต้องมีค่าการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าออกซิเจนมาก ๆ เพื่อว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์ไม่สูงมากจนก่อให้เกิดผลเสียกับผักและผลไม้สดที่บรรจุ และฟิล์มควรจะมีค่าการซึม

ผ่านของน้ำน้อย ซึ่งฟิล์มทั่วไปในเชิงพาณิชย์ก็มีค่าการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าออกซิเจนดังที่กล่าวมาแล้ว และมีค่าการซึมผ่านของน้ำน้อย ดังนั้นฟิล์มทั่วไปในเชิงพาณิชย์จึงมีเหมาะสมที่จะนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด ตาราง 2.7 แสดงค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในฟิล์มพลาสติกบางชนิดและในอากาศ และตาราง 2.8 แสดงค่าแฟคเตอร์พรีเอกโปเนนเชียลของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (P^{*}_{O2}, P^{*}_{CO2}) และพลังงานกระตุ้นของค่าการซึมผ่านของแก๊สในพอลิเมอร์ฟิล์มบางชนิด [28, 33]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 2.7 ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในฟิล์มพลาสติกบางชนิดและในอากาศ [28, 33]

ฟิล์ม	ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน, P_{o2} ($ml.mil.m^{-2}.h^{-1}.atm^{-1}$)	ค่าการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์, P_{co2} ($ml.mil.m^{-2}.h^{-1}.atm^{-1}$)	ค่าความสามารถในการเลือก (selectivity) (P_{CO2}/P_{O2})
ยางซิลิโคน (เมมเบรนของ Marcelin)	$1.10*10^{4}$	$7.13*10^{4}$	6.5
เอทธิลเซลลูโลส (ผ่านการพลาสติไซด์)	$1.55*10^{3}$	$3.78*10^{3}$	2.4
ยางธรรมชาติ	$9.50*10^{2}$	$6.72*10^{3}$	7.1
พอลิบิวตะไดอีน	$8.39*10^{2}$	$7.73*10^{3}$	9.2
พอลิบิวตะไดอีน-สไตรีน	$7.36*10^{2}$	$6.52*10^{3}$	9.2
พอลิไวนิลคลอไรด์-ไวนิลอะซีเตต	$2.62*10^{2}$	$1.74*10^{3}$	6.6
พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC-RMF 61)	$2.30*10^{2}$	$1.40*10^{3}$	6.1
พอลิเอธทิลีนความหนาแน่นต่ำ (0.922 g/ml)	$1.20*10^{2}$	$8.10*10^{2}$	6.7
เซลลูโลสอะซีเตต (Lumarith)	$3.90*10^{1}$	$3.14*10^{2}$	8.0
ยางบิวทิล	$3.60*10^{1}$	$1.60*10^{2}$	4.4
ยางไฮโดรคลอไรด์ (ผ่านการพลาสติไซด์-Piofilm G)	$1.50*10^{1}$	$3.07*10^{1}$	2.2
พอลิเอธทิลีนความหนาแน่นสูง (0.964 g/ml)	$1.53*10^{0}$	$7.40*10^{0}$	4.8
พอลิเอธทิลีนเทอเรฟธาเลต (Mylar)	$1.44*10^{0}$	$4.93*10^{0}$	3.4
พอลิเอไมด์ (Nylon)	$8.16*10^{-1}$	$3.84*10^{0}$	4.7
ชาราน	$4.54*10^{-2}$	$4.63*10^{-1}$	10.2
อากาศ	$2.88*10^{9}$	$2.22*10^{9}$	0.77

ตาราง 2.8 แฟคเตอร์พรีเอกโพเนนเชียล (preexponential factor) และพลังงานกระตุ้นของค่าการซึมผ่านพอลิเมอร์ฟิล์มของแก๊ส [28, 33]

ฟิล์ม	แฟคเตอร์พรีเอกโปเนนเชียลของออกซิเจน, $P^{*}_{O_2}$ ($ml.mil.m^{-2}hr^{-1}atm^{-1}$)	แฟคเตอร์พรีเอกโปเนนเชียลของคาร์บอนไดออกไซด์, $P^{*}_{CO_2}$ ($ml.mil.m^{-2}hr^{-1}atm^{-1}$)	Eo_2 ($kJ.mol^{-1}$)	Eco_2 ($kJ.mol^{-1}$)
เซลลูโลสอะซีเตต (Lumarith)	$3.45*10^{5}$	$1.25*10^{8}$	20.9	29.7
เอทธิลเซลลูโลส (ผ่านการพลาสติไซด์)	$2.23*10^{6}$	$4.81*10^{4}$	16.7	5.9
พอลิเอไมด์(Nylon)	$1.32*10^{8}$	$1.74*10^{8}$	43.5	40.6
พอลิบิวตะไดอีน	$3.37*10^{8}$	$1.04*10^{8}$	29.7	21.8
พอลิบิวตะไดอีน-สไตรีน	$4.25*10^{8}$	$2.06*10^{8}$	30.5	23.8
พอลิคลอโรปรีน(นีโอปรีน)	$7.97*10^{9}$	$4.69*10^{9}$	41.4	35.5
พอลิเอธทิลีนความหนาแน่นต่ำ(0.922 g/ml)	$1.62*10^{10}$	$2.38*10^{9}$	43.1	34.3
พอลิเอธทิลีนความหนาแน่นสูง(0.964 g/ml)	$6.37*10^{7}$	$3.51*10^{6}$	35.1	30.1
พอลิเอธทิลีนเทอเรฟธาเลต (Mylar)	$1.62*10^{5}$	$3.68*10^{5}$	26.8	25.9
พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC-VF)	$1.21*10^{9}$	$9.50*10^{9}$	41.4	33.1
พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC-RMF)	$2.61*10^{10}$	$1.34*10^{7}$	36.9	27.6
พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC-AF)	$5.70*10^{8}$	$2.69*10^{7}$	40.5	30.6
พอลิไวนิลคลอไรด์-ไวนิลอะซีเตต	$1.19*10^{10}$	$5.10*10^{9}$	40.6	34.3
ยางไฮโดรคลอไรด์(ผ่านการพลาสติไซด์-Piofilm G)	$6.77*10^{7}$	$2.25*10^{8}$	35.1	36.0
ยางบิวทิล	$9.83*10^{9}$	$1.02*10^{10}$	44.7	41.4
ยางเมทธิล	$4.47*10^{10}$	$1.34*10^{11}$	47.3	46.8
ยางธรรมชาติ	$7.96*10^{8}$	$4.33*10^{8}$	31.4	25.5
ยางซิลิโคน (เมมเบรนของ Marcelin)	$3.96*10^{5}$	$7.13*10^{4}$	8.4	0.0
ซาราน	$1.61*10^{11}$	$2.25*10^{9}$	66.5	51.5
พอลิไวนิลคลอไรด์ (ไม่ผ่านการพลาสติไซด์	$2.56*10^{10}$	$1.33*10^{11}$	55.8	56.8

2.2.2.3. ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นในหัวข้อ 2.2 ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะมีผลต่ออายุการเก็บผักและผลไม้สด โดยแก๊สออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นต่ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นสูงสามารถช่วยชะลออัตราการหายใจได้ อย่างไรก็ตามการกำหนดความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการบรรจุสำหรับผักและผลไม้สดชนิดใด ๆ นั้น จะพิจารณาจากอัตราการหายใจที่ลดลงเพียงอย่างเดียวไม่ได้ เนื่องจากความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่ต่ำเกินไปหรือความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงเกินไปจะก่อให้เกิดความเสียหายผักและผลไม้สดได้ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1.1.2.2.ข. ความเข้มข้นของแก๊สที่สามารถชะลออัตราการหายใจได้มากและไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อผักและผลไม้สดเมื่อถูกเก็บภายในบรรยากาศของแก๊สนั้น ๆ จะเป็นความเข้มข้นของแก๊สที่เหมาะสมสำหรับการบรรจุผักและผลไม้สดชนิดนั้น ๆ ซึ่งความเข้มข้นของแก๊สที่เหมาะสมนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของผักและผลไม้สดที่ต้องการเก็บรักษา และอายุขณะการเก็บเกี่ยว ดังนั้นความเข้มข้นของแก๊สที่เหมาะสมสำหรับผักและผลไม้แต่ละชนิดนั้นจะได้จากการทำการทดลอง

ดังนั้นความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุลที่มีค่าคงที่ซึ่งเกิดจากสภาวะคงตัวภายในบรรจุภัณฑ์ภายหลังจากการบรรจุผักและผลไม้สดใน MAP ในระยะเวลาหนึ่ง ๆ นั้น ควรเป็นความเข้มข้นของแก๊สที่เหมาะสมที่สุดเพื่อการยืดอายุการเก็บของผักและผลไม้สดให้ยาวนานที่สุด ตัวอย่างของสภาวะของบรรยากาศดัดแปรหรือความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุลที่เหมาะสมในการบรรจุสำหรับผลไม้สดและผักบางชนิดแบบบรรยากาศดัดแปรถูกแสดงในตารางที่ 2.9 และ 2.10 ตามลำดับ [6]

ตาราง 2.9 MA ที่เหมาะสมในการเก็บรักษาและขนส่งผลไม้สดบางชนิด [6]

ผลไม้	ช่วงอุณหภูมิ (°C) [a]	ความเข้มข้นของแก๊ส [b]		ศักยภาพ [c] ในการเก็บ	หมายเหตุ [d]
		$\%O_2$	$\%CO_2$		
แอปเปิล	0-5	2-3	1-2	A	40% ของการผลิตถูกเก็บภายใต้ CA
แอปพริคอท	0-5	2-3	2-3	C	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์
เชอรีหวาน	0-5	3-10	10-12	B	มีการใช้ในเชิงพาณิชย์บางส่วน
ฟิก (fig)	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
สตรอเบอรี	0-5	10	15-20	A	มีอัตราการใช้เพิ่มขึ้น
ถั่วและผลไม้แห้ง	0-25	0-1	0-100	A	เพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันแมลง
อโวกาโด	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 ความเข้มข้นของแก๊สอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บ

c A=ดีมาก B=ดี C=พอใช้ D=ไม่ดี

d เฉพาะการตลาดภายในประเทศอเมริกา

I18031924

ตารางที่ 2.10 MA ที่เหมาะสมในการเก็บรักษาและขนส่งผักบางชนิด [6]

ผัก	ช่วงอุณหภูมิ (°C)[a]	ความเข้มข้นของแก๊ส[b]		ศักยภาพ[c] ในการเก็บ	หมายเหตุ[d]
		$\%O_2$	$\%CO_2$		
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	None	None	D	ความชื้น 98-100% ให้ผลดีมาก
บรอคเคอลี	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	None	None	D	ความชื้น 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
แตง honeydew	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%
เห็ด	0-5	อากาศ	10-15	C	การใช้ในเชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
กระเจี๊ยบมอญ	8-12	3-5	0	C	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์ ควรเก็บที่ 5-10%CO_2 ที่ 5-8°C
หอมหัวใหญ่ (ตากแห้ง)	0-5	1-2	0	B	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์ ควรเก็บที่ 75%ความชื้น
หอมหัวใหญ่สด	0-5	1-2	10-20	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
มันฝรั่ง	4-12	None	None	D	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์
หัวไช้เท้า	0-5	None	None	D	ความชื้น 98-100% ให้ผลดีมาก
ผักขม	0-5	อากาศ	10-20	C	ยังไม่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์
มะเขือเทศ					
-ก่อนสุก(เขียว)	12-20	3-5	5-15	B	การใช้ในเชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
-ค่อนข้างสุก	8-12	3-5	5-15	B	การใช้ในเชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด

a ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทั่วไป มีความชื้นสัมพัทธ์ 85 ถึง 95 %

b ความเข้มข้นของแก๊สอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บ

c A=ดีมาก B=ดี C=พอใช้ D=ไม่ดี

d เฉพาะการตลาดภายในประเทศอเมริกา

2.2.2.4. ปัจจัยภายนอก

อุณหภูมิ ความชื้น ความดันภายนอกภาชนะบรรจุ และแสง เป็นปัจจัยภายนอกที่นับว่ามีความสำคัญอย่างมากต่อบรรจุภัณฑ์แบบ MAP จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1.1.2.2 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีผลกระทบต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สด นอกจากนี้อุณหภูมิยังมีผลต่อค่าการซึมผ่านของแก๊สด้วย โดยมีการเสนอว่าค่าการซึมผ่านของแก๊สผ่านฟิล์ม (P) นี้ขึ้นโดยตรงกับอุณหภูมิแบบเอกโปเนนเชียลและอธิบายได้โดยสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius equation) [6, 13] ดังนี้คือ

$$P = P^{*}.e\left(-\frac{E}{RT}\right) \qquad (2.6)$$

โดย P^{*} คือ แฟคเตอร์พรีเอกโปเนนเชียล (preexponential factor)

E คือ พลังงานกระตุ้น (activation energy)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (gas constant)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature)

จากสมการ 2.6 จะพบว่า ln P จะแปรผันแบบเส้นตรงกับ 1/T ดังนี้

$$\ln P = \ln P^{*} - \frac{E}{RT} \qquad (2.7)$$

นั่นคือ P จะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ผลของอุณหภูมิต่อ P นี้จะแตกต่างกันไปตามชนิดของฟิล์มพลาสติก

ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป อัตราการหายใจและค่าการซึมผ่านของแก๊สผ่านฟิล์มจะเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ความเข้มข้นแก๊สสมดุลภายในบรรจุภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไปด้วย ยกเว้นว่าอัตราการแพร่ของแก๊สผ่านฟิล์มที่เปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิและอัตราการหายใจที่เปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิจะมีผลพอดี (match) กัน [13] จากการศึกษาของนักวิจัยหลายท่าน [2] พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของออกซิเจนที่สมดุลในบรรจุภัณฑ์จะลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุลจะมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ถ้า

อุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการระเหยของน้ำออกจากผักและผลไม้สดก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ผักและผลไม้สดเหี่ยวได้เร็วขึ้น

นอกจากอุณหภูมิแล้ว ความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่มีผลต่อ MAP [6, 9] ถ้าภายในบรรจุภัณฑ์มีความชื้นสูงอาจทำให้เกิดการกลั่นตัวของไอน้ำกลายเป็นหยดน้ำ ซึ่งมีผลส่งเสริมให้การเจริญเติบโตของแบคทีเรียและเชื้อราได้ดีขึ้น นอกจากนี้หยดน้ำที่เกาะบนผิวของผักและผลไม้สดหรือบนผิวของฟิล์มอาจมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการซึมผ่านของแก๊สได้ เนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายในน้ำได้ดีมาก [9] ดังนั้นในบางครั้งอาจมีการใส่ถุงที่บรรจุสารประกอบเคมีที่ดูดซับน้ำได้ดีลงภายในบรรจุภัณฑ์ เช่น โปแตสเซียมคลอไรด์ (KCl) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ซอร์บิทอล (sorbitol) เป็นต้น เพื่อควบคุมปริมาณความชื้นภายในบรรจุภัณฑ์ [9]

โดยทั่วไปแล้วเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น การซึมผ่านของแก๊สผ่านฟิล์มมักจะมีค่าลดลง เนื่องจากการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำของไอน้ำลงบนผิวฟิล์ม อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์บางชนิด เช่น พอลิเอไมด์ (polyamide) อาจจะไม่ให้ผลอย่างที่กล่าวมานี้ เนื่องจากเมื่อน้ำจากการกลั่นตัวหยดบนผิวฟิล์ม จะทำให้ฟิล์มพอลิเอไมด์เกิดการบวมพอง ซึ่งมีผลให้ค่าการซึมผ่านของแก๊สผ่านฟิล์มสูงขึ้น [6, 9]

แสงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อบรรจุภัณฑ์ MAP สำหรับผักและผลไม้สด เพราะว่าถ้าผักและผลไม้สดที่ถูกบรรจุสัมผัสกับแสง เนื้อเยื่อส่วนที่เขียวอาจเกิดการสังเคราะห์แสง ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตได้จากการหายใจถูกนำกลับมาใช้ในการสังเคราะห์แสงพร้อม ๆ กับที่แก๊สออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการสังเคราะห์แสงนี้ ซึ่งมีผลทำให้อัตราการหายใจเพิ่มขึ้น

2.2.3. วิธีการสร้างบรรยากาศดัดแปรภายในบรรจุภัณฑ์

การสร้างสภาวะบรรยากาศดัดแปรที่ต้องการสำหรับผักและผลไม้สดนั้นทำได้ 2 วิธี [2, 3, 6, 9] คือ

2.2.3.1. การสร้างบรรยากาศดัดแปรแบบโดยอ้อม (Passive MA)

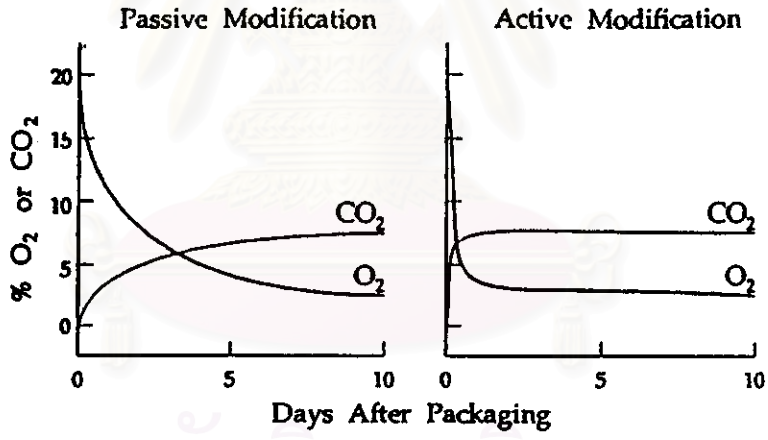
วิธีนี้บรรยากาศของแก๊สที่ต้องการในบรรจุภัณฑ์ที่ปิดสนิท (คือบรรยากาศที่มีแก๊สออกซิเจนในปริมาณต่ำ แต่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณสูง) จะเกิดจากสมดุลระหว่างอัตราการผลิตและใช้แก๊สในการหายใจ กับอัตราการซึมผ่านของแก๊สต่าง ๆ ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ โดยที่องค์ประกอบของแก๊สเริ่มต้นเป็นองค์ประกอบเดียวกับแก๊สในอากาศปกติ (คือมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 0.03 โดยปริมาตร และมีแก๊สออกซิเจนร้อยละ 21 โดยปริมาตร) [31, 32] หลังจากการบรรจุ องค์ประกอบของบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์จะมีการเปลี่ยนแปลงกับเวลา เนื่องจากการหายใจของผักและผลไม้สดและการซึมผ่านของแก๊สผ่านบรรจุภัณฑ์ จนกระทั่งเกิดสภาวะคงตัวของความเข้มข้นของแก๊ส ได้บรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการ ถ้าทำการเลือกชนิดบรรจุภัณฑ์ได้เหมาะสมกับชนิดของผักและผลไม้สดที่ทำการบรรจุ

2.2.3.2. การสร้างบรรยากาศดัดแปรแบบโดยตรง (Active MA)

วิธีนี้บรรยากาศดัดแปรที่ต้องการจะได้จากการพ่นแก๊สตามความเข้มข้นที่กำหนดไว้เข้าไปในห้องเย็นหรือภาชนะบรรจุ หรืออาจได้จากการใช้สารเคมีที่ให้แก๊สที่ต้องการหรือดูดกลืนแก๊สที่ไม่ต้องการออกไปจากบรรยากาศที่ล้อมรอบผักและผลไม้สด หรือการใส่สารที่ช่วยลดปริมาณแก๊สออกซิเจนและเพิ่มปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อย่างรวดเร็ว เช่น เฟอรัสคาร์บอเนต (ferrous carbonate) ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

$$4FeCO_3 + O_2 + 6H_2O \longrightarrow 4Fe(OH)_3 + 4CO_2 \qquad (2.8)$$

วิธีสร้างบรรยากาศดัดแปรแบบโดยตรงจะคล้ายคลึงกับวิธีการไล่ด้วยแก๊ส แต่แตกต่างกันตรงที่วิธีนี้ใช้บรรจุภัณฑ์ชนิดที่ยอมให้มีการซึมผ่านของแก๊สได้ วิธีการสร้างบรรยากาศดัดแปรแบบโดยตรงนี้ทำให้ได้ความเข้มข้นของแก๊สที่ต้องการในบรรจุภัณฑ์เกิดขึ้นทันที ซึ่งเป็นข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับการสร้างบรรยากาศดัดแปรแบบโดยอ้อมที่ต้องใช้ระยะเวลาช่วงหนึ่งก่อนที่จะได้ความเข้มข้นของแก๊สที่ต้องการ (ดังรูปที่ 2.4) อย่างไรก็ตาม การใส่สารดูดซับเพิ่มลงไปในบรรจุภัณฑ์หรือการพ่นแก๊สทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้น ทำให้เป็นข้อจำกัดของวิธีการสร้างบรรยากาศดัดแปรแบบโดยตรง



รูป 2.4 การเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ของความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างการสร้างบรรยากาศแบบโดยตรงและแบบโดยอ้อมสำหรับผักและผลไม้สด [2]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.4. ระบบบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์สำหรับบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด

บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สดต้องมีคุณสมบัติด้านการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมดังได้กล่าวมาแล้ว นอกจากนั้นแล้วบรรจุภัณฑ์ต้องมีคุณสมบัติสำคัญอื่น ๆ ดังนี้ [1]

(1) สามารถช่วยป้องกันการเติบโตของจุลินทรีย์และแมลงในผักและผลไม้สดที่ถูกบรรจุ

(2) สามารถทำการขนส่ง และขายปลีกสู่ผู้บริโภคได้โดยสะดวก

(3) สามารถต้านทานต่อผลกระทบทางกายภาพได้ดี เช่น แรงกระแทก การสั่นสะเทือน และแรงกดอัด เป็นต้น

(4) สามารถให้ค่าการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำเหมาะสมกับผักและผลไม้ที่ถูกบรรจุ

(5) สามารถเก็บในที่อุณหภูมิต่ำได้โดยไม่เกิดความเสียหายต่อบรรจุภัณฑ์

2.2.4.1. คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรของผักและผลไม้สด

วัสดุที่นำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สดต้องมีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับด้านแรงกระแทก (impact) การดึงยืด (tensile strength) และแรงเค้นเชิงกล (mechanical stress) ที่อาจจะได้รับระหว่างการบรรจุและการขนส่ง คุณสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีของวัสดุจะทำให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ภายในได้ และวัสดุที่นำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สดนี้จะต้องสามารถถูกปิดผนึกได้อย่างสมบูรณ์ เพื่อรักษาบรรยากาศดัดแปรภายในไว้ให้คงที่ [6]

นอกจากนี้บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สดควรเป็นบรรจุภัณฑ์แบบใส เพื่อว่าผู้บริโภคจะสามารถเห็นผลิตภัณฑ์ที่ถูกบรรจุได้ชัดเจน ทำให้ง่ายต่อการตัดสินใจในการเลือกซื้อ อย่างไรก็ตามผักและผลไม้สดที่ถูกบรรจุที่อุณหภูมิต่ำจะมีความชื้นสูง จึงมีแนวโน้มที่จะสร้างไอหมอกภายในบรรจุภัณฑ์ได้ ทำให้เห็นผลิตภัณฑ์ได้ไม่ชัดเจน ดังนั้นฟิล์มที่ใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรหลายชนิดจึงถูกปรับปรุงด้วยการเคลือบหรือเติมสารป้องกันการเกิดหยดน้ำ (antifogging agent) [1, 6] การปรับปรุงนี้จะมีผลกระทบต่อความสามารถในการเปียกของฟิล์ม (wettability) เท่านั้น และแทบจะไม่มีผลต่อคุณสมบัติอัตราการซึมผ่านของแก๊สเลย แต่เนื่องจากฟิล์มประเภทนี้มีราคาสูง จึงมักนิยมใช้กับผักและผลไม้ที่ผ่านการเตรียม (ล้าง หั่นเรียบร้อยแล้วพร้อมบริโภคได้ทันที) เช่น ผักสลัดชนิดต่าง ๆ และแครอทขูดฝอย เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ได้รับความนิยมมากในยุโรป เช่น ฝรั่งเศสและอังกฤษ [4]

จากที่กล่าวมาแล้วนี้จึงสรุปได้ว่า ฟิล์มพลาสติกที่เหมาะสมสำหรับนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สดควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. มีค่าการซึมผ่านของแก๊สต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับความต้องการ
2. มีความใสและดูสวยงาม
3. มีน้ำหนักเบา
4. มีความทนทานต่อการฉีกขาดและการดึงยืด
5. มีความสามารถที่จะถูกปิดผนึกในอุณหภูมิไม่สูงเกินไปที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อผักและผลไม้สดที่บรรจุได้
6. ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภค
7. ไม่ทำปฏิกิริยาใด ๆ ต่อผักและผลไม้สดที่บรรจุ
8. สามารถป้องกันการเกิดหยดน้ำในบรรจุภัณฑ์
9. สามารถถูกบรรจุและขนส่งได้สะดวก

10. มีความเหมาะสมในการใช้เชิงพาณิชย์ คือให้ต้นทุนที่เหมาะสม สามารถผลิตได้ทั่วไป และเป็นวัสดุที่สามารถนำมาหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้

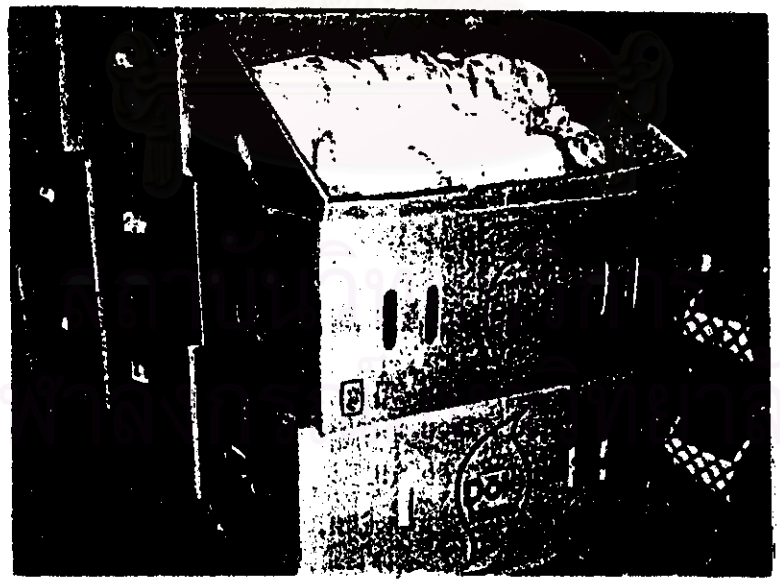
11. สามารถพิมพ์หรือติดฉลากลงบนบรรจุภัณฑ์ได้

ส่วนรูปแบบของบรรจุภัณฑ์ที่ถูกใช้นั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของผักและผลไม้สดและจุดมุ่งหมายในการวางจำหน่ายว่าจะเป็นแบบขายปลีกหรือขายส่ง ซึ่งรูปแบบของบรรจุภัณฑ์ที่ถูกนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด โดยทั่วไปจะมี 3 รูปแบบคือ ถุงพลาสติกชนิดยืดหยุ่นได้ที่มีลักษณะรูปร่างคล้ายหมอน (flexible pillow packs) ถาดกึ่งแข็งที่ถูกคลุมด้วยฟิล์มพลาสติก (semi-rigid tray and lidding film systems) และถุงพลาสติกบรรจุในกล่อง (bag-in-box containers) รูป 2.5 และ 2.6 แสดงตัวอย่างบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด [10]

2.2.4.2 พอลิเมอร์ที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ MAP สำหรับผักและผลไม้สด

พอลิเมอร์ชนิดแรกที่ถูกนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ MAP สำหรับผักและผลไม้สด คือ ยางไฮโดรคลอไรด์ (hydrochloride rubber) ที่มีชื่อในทางการค้าว่าไพโอฟิล์ม (Piofilm) [26] ฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดนี้มีความแข็งแรง ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี และสามารถถูกปิดผนึกได้ด้วยความร้อน แต่ฟิล์มชนิดนี้ให้ค่าการซึมผ่านของแก๊สต่ำมาก (ดูตาราง 2.7) ดังนั้นในการใช้จึงต้องมีการเจาะรูอยู่เสมอ ด้วยเหตุนี้ไพโอฟิล์มจึงไม่ค่อยถูกนำมาใช้และไม่เหมาะสมในการนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับ MAP เท่าใดนัก แต่ในปัจจุบันที่เทคโนโลยีทางพอลิเมอร์พัฒนาไปอย่างมาก ทำให้มีพอลิเมอร์หลายชนิดที่เหมาะสมสำหรับเป็นบรรจุภัณฑ์แบบ MAP สำหรับผักและผลไม้สด พอลิเมอร์ที่พบมากในการถูกนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ MAP สำหรับผักและผลไม้สด คือพอลิเอทธิลีน (polyethylene, PE, $-C_2H_4-$) พอลิ โพรพิลีน (polypropylene, PP, $-C_2H_3CH_3-$) พอลิสไตรีน (polystyrene, PS, $-C_2H_3C_6H_5-$) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride, PVC, $-C_2H_3Cl-$) เป็นต้น [9]

รูป 2.5 การบรรจุบรัสเซลล์สเพาท์ (brussels sprouts) และ ถั่วฝักยาว แบบบรรยากาศดัดแปรเพื่อการขายปลีก [10]



รูป 2.6 การบรรจุกล้วยหอมแบบบรรยากาศดัดแปรในกล่องเพื่อการขนส่ง [10]

พอลิโอลิฟินส์ (polyolefins) เป็นพลาสติกที่ค่อนข้างถูกนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์มาก [9] พลาสติกกลุ่มนี้ประกอบด้วยพอลิเอทธิลีน พอลิโพรพิลีน และพอลิบิวทิลีน (polybutylene, PBI, $-C_2H_3C_2H_5-$) รวมถึงโคพอลิเมอร์ของสารเหล่านี้ และยังรวมถึงไอโอโนเมอร์ (ionomer) ของพอลิโอลิฟินส์ ซึ่งมีส่วนประกอบของโซเดียมและสังกะสีอิออนที่ก่อให้เกิดร่างแห โดยทั่วไปฟิล์มพอลิโอลิฟินส์นี้จะมีคุณสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้ดี ให้ค่าการซึมผ่านของแก๊สค่อนข้างสูง และสามารถถูกปิดผนึกด้วยความร้อนได้เป็นอย่างดี พอลิเอทธิลีนเป็นฟิล์มที่ถูกนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผักและผลไม้สดมากที่สุด พอลิเอทธิลีนแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือพอลิเอทธิลีนความหนาแน่นสูง (ค่าความถ่วงจำเพาะ 0.941 ถึง 0.965) ความหนาแน่นปานกลาง (ค่าความถ่วงจำเพาะ 0.926 ถึง 0.940) และความหนาแน่นต่ำ (ค่าความถ่วงจำเพาะ 0.910 ถึง 0.925) แม้ว่าพอลิเอทธิลีนจะมีคุณสมบัติด้านทานการดึงยืดที่ไม่ดีนัก แต่พอลิเอทธิลีนมีคุณสมบัติในการต้านทานการฉีกขาดที่ดีมาก ทนต่อสารเคมีได้ดี และให้ค่าการซึมผ่านของแก๊สสูง โดยเฉพาะให้ค่าการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าแก๊สออกซิเจนมาก [9] ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนลดลงโดยมิให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์ที่สูงเกินไป ส่วนพอลิโพรพิลีนก็เป็นฟิล์มพลาสติกอีกชนิดที่ใช้กันมาก พอลิโพรพิลีนจะมีความหนาแน่นต่ำกว่าพอลิเอทธิลีน มีสมบัติในการต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี แต่สำหรับแก๊สให้การซึมผ่านปานกลาง สมบัติอื่น ๆ คล้ายพอลิเอทธิลีน แต่มีความใสมากกว่า [5, 9]

พอลิไวนิลคลอไรด์มีลักษณะเป็นฟิล์มยืดหยุ่น ฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์มีคุณสมบัติในการให้ค่าการซึมผ่านฟิล์มของไอน้ำได้ปานกลาง ฟิล์มมีลักษณะอ่อนนุ่ม ใส ไม่เป็นหมอก และทนต่อการฉีกขาด ฟิล์มพีวีซีบางชนิด เช่น พีวีซีที่ผ่านการพลาสติไซด์แล้ว จะมีอัตราส่วนระหว่างค่าการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สออกซิเจนสูงมาก ซึ่งเหมาะสำหรับนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบ MAP ฟิล์มพีวีซีส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้คลุมถาดผักและผลไม้สด และถูกนำมาใช้ห่อผักและผลไม้โดยตรง [5, 9]

พอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งที่มีค่าการซึมผ่านของแก๊สสูงและมีอัตราส่วนระหว่างค่าการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สออกซิเจนค่อนข้างสูง พอลิสไตรีนส่วนใหญ่มักถูกนำมาใช้ห่อผักกาดหอมและมะเขือเทศ เพราะว่าพอลิสไตรีนมีคุณสมบัติในการเกิดปฏิกิริยาใด ๆ ต่อสารอื่นได้ยากและมีความใสค่อนข้างสูง นอกจากนี้พอลิสไตรีนที่อยู่ในรูปของโฟม คือ สไตโรโฟม (styrofoam) มักถูกใช้เป็นถาดที่นำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์อีกด้วย [5, 9]

พอลิเมอร์ทั่วไปบางชนิดมีความแข็งแรงค่อนข้างสูงและมีอัตราส่วนระหว่างค่าการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สออกซิเจนเหมาะสมสำหรับนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบ MAP แต่ค่าการซึมผ่านจริงของแต่ละแก๊สมีค่าต่ำมากจนไม่สามารถที่ทำให้เกิด MAP ได้ ตัวอย่างของพอลิเมอร์จำพวกนี้ได้แก่ ไนลอน (nylon) ไมลาร์ (mylar) พอลิเอสเทอร์ (polyester) เป็นต้น

อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีในด้านการรีดร่วม (co-extrusion technology) ได้ถูกพัฒนาไปอย่างมาก จึงเป็นไปได้ว่าจะสามารถผลิตวัสดุที่ให้ค่าการซึมผ่านของแก๊สตามที่ต้องการได้ การรีดร่วมโดยทั่วไปจะรวมเรซินหลายชนิดในการขึ้นรูปเพื่อผลิตพอลิเมอร์ที่มีหลายชั้น ซึ่งพบว่าสามารถผลิตฟิล์มที่มีค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนจาก 0.1 ถึง 20,000 มิลลิลิตรต่อมิลต่อตารางเมตรต่อวัน ที่ 22 °ซ ด้วยเทคโนโลยีการรีดร่วมฟิล์ม [9] ฟิล์มแบบรีดร่วมที่ถูกนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผักและผลไม้สดที่นิยมใช้มากคือฟิล์มที่รีดร่วมระหว่างพอลิเอทธิลีนความหนาแน่นต่ำและความหนาแน่นปานกลางที่ผสมเอทธิลไวนิลอซีเตต (ethyl vinyl acetate) นอกจากนี้การทำการจัดเรียง (orientation) เส้นใยพอลิเมอร์ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ช่วยเปลี่ยนแปลงค่าการซึมผ่านของพอลิเมอร์ได้ [9, 13] สำหรับพอลิเมอร์แบบมีโครงสร้างเป็นผลึก (crystalline polymer) การจัดเรียงเส้นใยช่วยให้ค่าการซึมผ่านของแก๊สลดลงร้อยละ 10 ถึง 50 [9] และค่าการซึมผ่านของไอน้ำก็จะลดลงด้วย แต่สำหรับพอลิเมอร์แบบอสัณฐาน (amorphous polymer) ค่าการซึมผ่านฟิล์มของแก๊สและไอน้ำจะไม่ได้รับผลกระทบจากกระบวนการการจัดเรียงเส้นใย

2.2.5. ความปลอดภัยทางด้านจุลินทรีย์ของบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด [6]

เชื้อจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารจำแนกเป็น 2 ประเภท คือ เชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสีย (spoilage microorganisms) และเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเป็นพิษ (pathogenic microorganisms) [6] อาหารที่เน่าเสีย (spoilage food) อาจจะเป็นพิษ (pathogenic) หรือไม่ก็ได้ สามารถสังเกตุอาหารเน่าเสียได้จากกลิ่นและหรือสีที่ผิดปกติ การมีฟองอากาศหรือการมีเมือก เป็นต้น ส่วนอาหารที่เป็นพิษอาจจะไม่แสดงอาการเน่าเสียก็ได้ ซึ่งเป็นอันตรายมากเนื่องจากผู้บริโภคไม่สามารถสังเกตุได้จากลักษณะภายนอก จนกระทั่งเกิดอาการเจ็บป่วยหลังจากบริโภคอาหารนั้น ๆ

โดยทั่วไปบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นสูง ๆ จะสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสียได้ดี เนื่องจากส่วนใหญ่จะเป็นแบคทีเรียที่ชอบอากาศ (aerobic bacteria) เช่น แบคทีเรีย *Pseudomas* เชื้อราเกือบทุกสายพันธุ์ ยกเว้นเชื้อราบางชนิดที่ทำให้อาหารเป็นพิษ เช่น เชื้อรา *Aspergillus flavus* ที่สามารถสร้างสารพิษ alfatoxin ซึ่งเป็นสาเหตุของโรค Turkey X เชื้อรา *Alternaria ochraceus* ที่สร้างสารพิษ ochratoxin เชื้อรา *Penicillium islandicum* ที่สร้างสารพิษที่เรียกว่า yellow rice เป็นต้น [6] บางครั้งพบว่าเมื่อเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสียเหล่านี้ไม่สามารถเจริญเติบโตได้จะทำให้เชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเป็นพิษกลับเจริญเติบโตได้ดีขึ้น เนื่องจากไม่มีการแข่งขัน (competition) เพื่อความอยู่รอดระหว่างเชื้อจุลินทรีย์ต่างชนิดกัน หรือไม่มีสารยับยั้งการเจริญเติบโต เช่น กรดที่เชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสียบางสายพันธุ์สามารถสร้างขึ้นได้ระหว่างการเจริญเติบโต นอกจากนี้เชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเป็นพิษมักเจริญเติบโตได้ดีในสภาพไร้แก๊สออกซิเจน หรือมีแก๊สออกซิเจนน้อย ๆ การใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นสูง ๆ บางครั้งก็ไม่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตและการสร้างสารพิษของเชื้อจุลินทรีย์ประเภทนี้ได้ [6]