บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

เนื่องจากผักและผลไม้สดยังมีการหายใจเกิดขึ้นตลอดเวลาหลังการเก็บเกี่ยว ทำให้อายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สั้นลง ดังนั้นจึงมีการคิดค้นวิธีการยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้ให้ยาวนานขึ้น ซึ่งวิธีหนึ่งที่นิยมใช้คือ การเก็บรักษาภายใต้สภาพบรรยากาศดัดแปร (Modified Atmosphere Packaging (MAP)) [5, 9, 10, 20, 38] ซึ่งเป็นการทำให้ผักและผลไม้มีอัตราการหายใจลดต่ำลงด้วยการเก็บรักษาผักและผลไม้ไว้ในบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมเพื่อปรับสภาพบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ให้มีความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แตกต่างจากบรรยากาศปกติและเหมาะสมกับผักและผลไม้แต่ละชนิด นอกจากนี้บรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์ที่เลือกใช้จะต้องมีค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำเพียงพอต่อการรักษาความชื้นภายในบรรจุภัณฑ์ให้อยู่ในระดับสูง โดยไม่ทำให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำบนผิวฟิล์มพอลิเมอร์หรือบนผิวของผักและผลไม้ซึ่งจะทำให้ผักและผลไม้เน่าเสียได้

ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องเข้าใจถึงปัจจัยและองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพการเก็บรักษาผักและผลไม้ภายใต้สภาพบรรยากาศดัดแปร ซึ่งจะกล่าวดังต่อไปนี้

2.1 การหายใจของผักและผลไม้

การหายใจ (respiration) คือ กระบวนการออกซิไดส์สารอาหาร เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน โดยอาศัยเอนไซม์ภายในเซลล์ เพื่อให้ได้พลังงานในการดำรงชีพและการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต [3] กระบวนการหายใจนี้ประกอบด้วยปฏิกิริยาหลายขั้นตอน ซึ่งแต่ละขั้นตอนจะมีการเร่งปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์ ที่จะช่วยทำให้โมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างซับซ้อนเกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน เหมาะกับการนำไปใช้ในกระบวนการหายใจต่อไป [42]

กระบวนการหายใจแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การหายใจแบบใช้ออกซิเจน (aerobic respiration) และการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic respiration) โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1) การหายใจแบบใช้ออกซิเจน (aerobic respiration)

เป็นกระบวนการออกซิไดส์สารอาหาร โดยอาศัยเอนไซม์ในเซลล์ในสภาพที่มีก๊าซออกซิเจนเพื่อให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ พร้อมทั้งพลังงาน 38 ATP (adenosine triphosphate, ATP) ดังสมการ 2.1 [3, 42]

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

พลังงานประมาณร้อยละ 40 ของที่ผลิตได้ถูกนำไปใช้ในกระบวนการชีวเคมีของพืช และส่วนที่เหลือประมาณร้อยละ 60 จะถูกปล่อยออกมาในรูปความร้อน [42, 43]

พืชในสภาพทั่วไปจะใช้คาร์โบไฮเดรตที่อยู่ในรูปของกลูโคส (glucose) และ ฟรุคโตส (fructose) หรือเรียกว่าน้ำตาลเฮกโซส (hexose) เป็นสารตั้งต้นสำหรับการหายใจก่อนสารอื่นทั้งหมด โดยมีอัตราส่วนการหายใจ (respiratory quotient, RQ) เท่ากับ 1 (อัตราส่วนการหายใจ คือ อัตราส่วนของอัตราการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนเนื่องจากการหายใจของพืช) เมื่อพืชใช้คาร์โบไฮเดรตหมดแล้วจึงใช้ไขมันแทนโดยเปลี่ยนหรือย่อยไปเป็นกรดไขมันและกลีเซอรอล ทำให้อัตราส่วนการหายใจมีค่าน้อยกว่า 1 [3, 9, 43] แต่ถ้าไม่มีทั้งคาร์โบไฮเดรตและไขมันสำหรับใช้ในการหายใจ พืชก็จะใช้โปรตีนแทนโดยมีอัตราส่วนการหายใจมากกว่า 1 [3, 9, 43] ซึ่งโปรตีนจะเปลี่ยนเป็นกรดอะมิโน (amino acid) ก่อนจะถูกออกซิไดส์ หลังจากออกซิไดส์จึงเปลี่ยนไปเป็นเอไมด์ (amide) แล้วจึงเปลี่ยนเป็นแอมโมเนีย (ammonia) กับพลังงาน ซึ่งแอมโมเนียนี้ถ้าเกิดในเซลล์เป็นปริมาณมาก ๆ จะทำให้เซลล์เนื้อเยื่อตายได้ [4]

(2) การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic respiration)

การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน จะสร้างพลังงานเพียง 2 ATP ดังสมการ 2.2 ซึ่งน้อยกว่าการหายใจแบบใช้ออกซิเจน ทำให้พืชต้องเพิ่มการหายใจให้มากขึ้นเพื่อให้ได้พลังงานเพียงพอกับความต้องการ จึงเป็นการเร่งการใช้สารอาหารที่สะสมในเซลล์พืชโดยมีค่า RQ มากกว่า 1.3 รวมทั้งยังเกิดการสะสมแอลกอฮอล์และแอลดีไฮด์ที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดกลิ่นรสผิดปกติ และเซลล์ถูกทำลายได้ [2, 41]

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

2.1.1 กลไกการหายใจ

การหายใจแบบใช้ออกซิเจน เป็นการออกซิไดส์น้ำตาลในพืชโดยเริ่มจากกลูโคส 1 โมเลกุล ถูกออกซิไดส์อย่างต่อเนื่องโดยผ่านกระบวนการ 3 กระบวนการดังนี้ [44]

2.1.1.1 กระบวนการไกลโคไลซิส (glycolysis)

เป็นกระบวนการที่น้ำตาลกลูโคสถูกย่อยหรือออกซิไดส์เป็นกรดไพรูวิก (pyruvic acid) เกิดขึ้นในไซโทพลาซึม (cytoplasm) ของเซลล์ที่มีชีวิต ทั้งในสภาพที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน ซึ่งในขั้นตอนนี้การออกซิไดส์กลูโคส 1 โมเลกุล เป็นกรดไพรูวิก 2 โมเลกุล จะได้ ATP 2 โมเลกุล และ NADH 2 โมเลกุล ซึ่ง NADH ที่เกิดขึ้นนี้จะเข้าสู่ระบบการถ่ายทอดอิเลคตรอนจะได้พลังงาน

เท่ากับ 3 ATP ต่อ NADH 1 โมเลกุล ดังนั้นในกระบวนการไกลโคไลซิสจะมี ATP เกิดขึ้นทั้งหมดเท่ากับ 8 ATP

2.1.1.2 วัฏจักรเครบส์ (Kreb's cycle)

กรดไพรูวิกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไกลโคไลซิส 1 โมเลกุลจะถูกออกซิไดส์ในวัฏจักรเครบส์โดยใช้เอนไซม์หลายชนิดจนได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ NADH 3 โมเลกุล $FADH_2$ 1 โมเลกุล และ GTP (guanosine-triphosphate) 1 โมเลกุลโดย GTP 1 โมเลกุลมีพลังงานเทียบเท่ากับ ATP 1 โมเลกุล

2.1.1.3 ระบบการถ่ายทอดอิเลคตรอน (electron transport system, ETP)

การถ่ายเทอิเลคตรอนจะเป็นไปตามลำดับจากสารหนึ่งไปยังอีกสารหนึ่งโดยมีเอนไซม์ควบคุมการถ่ายทอดอิเลคตรอนในแต่ละขั้นตอน กระบวนการนี้เกิดขึ้นในเมทริกซ์ของไมโทคอนเดรีย (mitchondria) ซึ่ง NADH 3 โมเลกุล และ$FADH_2$ 1 โมเลกุลจากวัฏจักรเครบส์ จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานได้ทั้งหมด 14 ATP

ดังนั้นปฏิกิริยาการออกซิไดส์กลูโคส 1 โมเลกุลโดยผ่านกระบวนการทั้ง 3 กระบวนการนี้จะทำให้ได้พลังงานทั้งหมด 38 ATP ซึ่งรายละเอียดแสดงขั้นตอนการหายใจของพืชแสดงในภาคผนวก ก.

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการหายใจ

2.1.2.1 ปัจจัยภายใน

2.1.2.1.1 ชนิดของผักและผลไม้

ผักและผลไม้แต่ละชนิดมีอัตราการหายใจแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1 ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างของลักษณะเนื้อเยื่อ โครงสร้าง พันธุกรรม โปรโตพลาซึม (protoplasm) ของเซลล์เนื้อเยื่อแต่ละชนิด [41, 10]

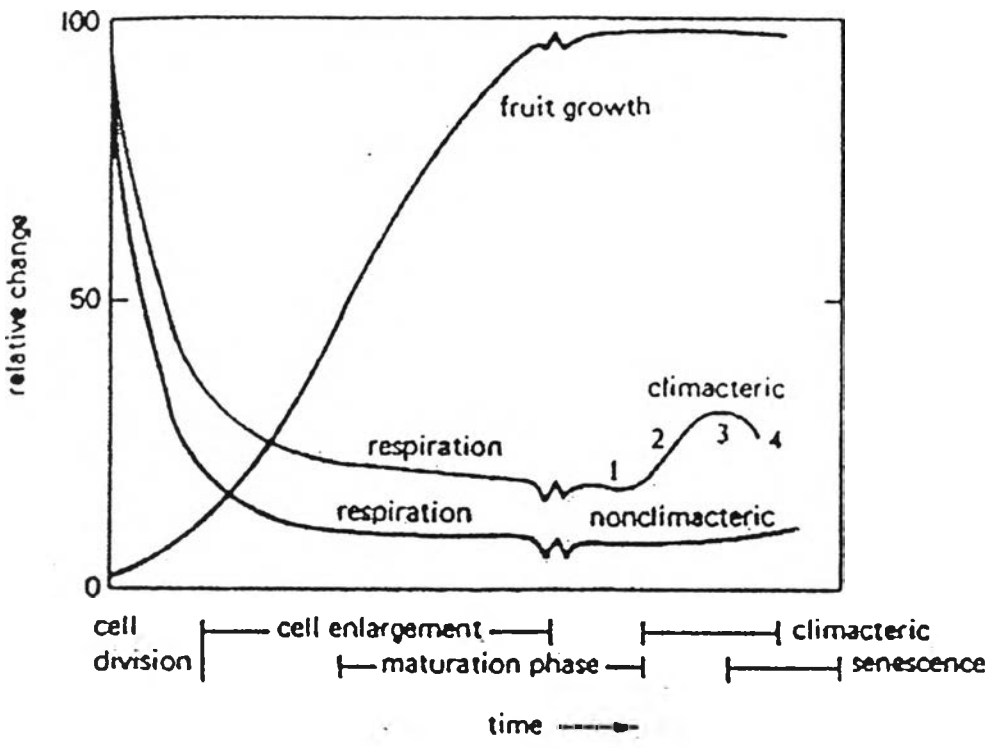
ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทผักและผลไม้ตามอัตราการหายใจในบรรยากาศปกติและที่ความเข้มข้นออกซิเจนร้อยละ 3 โดยปริมาตร [10]

ผักและผลไม้	อัตราการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ml kg^{-1} hr^{-1})						อัตราการหายใจโดยเทียบที่10 °C ในอากาศ
	อากาศ			3% O_2			
	0 °C	10 °C	20 °C	0 °C	10 °C	20 °C	
หัวหอม	2	4	5	1	2	2	ต่ำ (< 10)
กะหล่ำปลี	2	4	11	1	3	6	
รากบีท	2	6	11	3	4	6	
ผักชี	4	6	19	3	5	12	
แตงกวา	3	7	8	3	4	6	
มะเขือเทศ	3	8	17	2	3	7	
ผักกาดหอม	5	9	21	4	6	14	
พริกไทย	4	11	20	5	7	9	กลาง (10-20)
แครอทปอกเปลือก	-	12	26	-	-	-	
สะตอ	4	14	23	3	6	17	
มันฝรั่งปอกเปลือก	-	14	33	-	-	-	
มะม่วง	-	15	61	-	-	-	
กะหล่ำปลี	6	16	23	4	8	17	
ผักกาดหอม	8	17	42	8	13	25	
ต้นกะหล่ำดอก	10	24	71	7	24	34	ค่อนข้างสูง (20-40)
บรัสเซลล์สเพราท์	9	27	51	7	19	40	
สตรอเบอรี่	8	28	72	6	24	49	
แบลคเบอรี่	11	33	88	8	27	71	
หน่อไม้ฝรั่ง	14	34	72	13	24	42	
ผักขม	25	43	85	26	46	77	สูง (40-60)
วอเตอร์เครส	9	43	117	5	38	95	
ถั่ว (board)	18	46	82	20	29	45	
ข้าวโพดหวาน	16	48	119	14	32	68	
ราสเบอรี่	12	49	113	11	30	73	
แครอท	-	65	145	-	-	-	สูงมาก (>60)
เห็ดหั่นเป็นชิ้น	-	67	191	-	-	-	
ฝักถั่ว	20	69	144	15	45	90	
บรอคโคลี่สเพราท์	39	91	240	33	61	121	

2.1.2.1.2 การเจริญเติบโตภายหลังการเก็บเกี่ยว

อัตราการหายใจของพืชในส่วนที่กำลังเริ่มเจริญเติบโตจะสูงมาก และจะลดต่ำลงเมื่อส่วนนั้นได้เจริญเติบโตขึ้นแล้ว โดยสามารถจำแนกประเภทของผลไม้ตามอัตราการหายใจตามช่วงที่กำลังเจริญเติบโตได้เป็น 2 ประเภท คือผลไม้แบบไคลแมคเทอริก (climacteric type) และผลไม้แบบนอนไคลแมคเทอริก (non-climacteric type) ดังแสดงในตารางที่ 2.2

จากการเปรียบเทียบอัตราการหายใจของผักและผลไม้แบบไคลแมคเทอริกและแบบนอนไคลแมคเทอริกดังรูปที่ 2.1 จะเห็นว่า สำหรับผลไม้แบบไคลแมคเทอริกในช่วงเริ่มต้นของการเจริญเติบโต อัตราการหายใจและการสันดาปที่เกี่ยวข้อง เช่น การสังเคราะห์เอทิลีนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดสูงสุด เรียกว่าจุดไคลแมคเทอริก (climacteric peak) หลังจากนั้นอัตราการหายใจจะค่อย ๆ ลดลง ซึ่งการหายใจแบบนี้ยังคงเกิดขึ้นแม้ว่าพืชจะถูกเก็บเกี่ยวแล้ว ส่วนผลไม้แบบนอนไคลแมคเทอริกอัตราการหายใจจะค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงการเจริญเติบโตและความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนไม่มีผลกระทบต่ออัตราการหายใจมากนัก [3]



รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบอัตราการหายใจของผลไม้แบบไคลแมคเทอริกและแบบนอนไคลแมคเทอริก [3]

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของชนิดผลไม้แบบไคลแมคเทอริกและแบบนอนไคลแมคเทอริก [3]

ประเภทของผลไม้	ชนิดผลไม้
ไคลแมคเทอริก	กล้วย ขนุน มังคุด ละมุด มะเขือเทศ มะเดื่อ มะละกอ บ๊วย มะม่วง ท้อ แอปเปิ้ล อะโวกาโด แคนตาลูป สาลี่ พลับ แอปปริคอท ลูกแพร์
นอน-ไคลแมคเทอริก	แตงกวา ชมพู่ มะนาว พริก ส้ม ลิ้นจี่ ลำไย สับปะรด เชอรี่ แตงโม ส้ม มะม่วงหิมพานต์ องุ่น สตรอเบอรี่ บลูเบอรี่ มะกอก แตงกวา เกรพฟรุต

2.1.2.2 ปัจจัยภายนอก

2.1.2.2.1 อุณหภูมิ

เนื่องจากปฏิกิริยาการหายใจเป็นปฏิกิริยาเคมีที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งอัตราการหายใจจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อาศัยเอนไซม์ต่าง ๆ ในพืช แปรผันตรงกับอุณหภูมิแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้สมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) [15, 39, 43] ดังสมการ 2.3 ซึ่งอัตราการหายใจที่อุณหภูมิอนันต์และพลังงานก่อกัมมันต์ของการหายใจสำหรับผักบางชนิดได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

$$r = r_0 \exp(-E_r/RT) \qquad (2.3)$$

เมื่อ r คือ อัตราการหายใจ

r_0 คือ อัตราการหายใจที่อุณหภูมิอนันต์

E_r คือ พลังงานก่อกัมมันต์ของการหายใจ

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

R คือ ค่าคงที่ก๊าซ

หรือสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในทุกช่วง 10 °C ที่เรียกว่า อัตราส่วนอุณหภูมิ (Q_{10}) [10, 42, 45] ดังแสดงในสมการ 2.4 โดยมีค่าแตกต่างกันตามชนิดของผักและผลไม้ดังแสดงในตารางที่ 2.4

$$Q_{10} = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{\frac{10}{T_2 - T_1}} \qquad (2.4)$$

เมื่อ R_1 คือ อัตราการหายใจที่อุณหภูมิ T_1

R_2 คือ อัตราการหายใจที่อุณหภูมิ T_2

T_1, T_2 คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ที่สภาวะที่หนึ่งและสภาวะที่สองตามลำดับ (K)

ตารางที่ 2.3 อัตราการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอนันต์และพลังงานก่อกัมมันต์ของการหายใจสำหรับผักบางชนิดที่ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนร้อยละ 3 โดยปริมาตร [15]

ผักและผลไม้	R_o(ml kg^{-1} hr^{-1})	E_r (kJ mol^{-1})
หน่อไม้ฝรั่ง	1.26×10^8	36.6
ถั่ว (board)	5.12×10^5	23.0
บีทส์	1.00×10^4	16.9
บรอคโคลี่ (sprouting)	1.33×10^9	39.7
บรูสเซลส์ สเพราท์	1.25×10^{11}	53.6
กะหล่ำปลี	2.20×10^{10}	51.7
กะหล่ำดอก	1.45×10^{10}	48.7
ขึ้นฉ่าย (white)	6.13×10^9	49.1
แตงกวา	7.05×10^4	23.1
พริกไทยเขียว	5.10×10^4	21.2
ผักกาดหอม	3.53×10^8	58.1
มันฝรั่ง	9.86×10^7	36.6

ตารางที่ 2.4 อัตราส่วนอุณหภูมิ (Q_{10}) สำหรับผักชนิดต่าง ๆ [45]

ผักและผลไม้	อัตราส่วนอุณหภูมิ (Q_{10})			
	ช่วงอุณหภูมิ (°C)			
	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
บรูสเซลล์สเพราท์	4.9	2.7	1.5	-
แครอท	2.0	2.3	1.5	2.8
ดอกกะหล่ำ	1.8	2.4	1.7	2.7
ผักชี	3.5	4.0	1.7	-
ใบผักกาด	2.0	1.7	2.3	2.3
ผักกาด (สายพันธุ์ Romaine)	-	2.7	1.5	2.2
แตง และแคนตาลูป	5.2	2.5	4.6	1.7
หัวไชเท้า	2.2	3.4	2.5	2.1
ผักขม	6.8	2.8	2.8	-
แกนผักข้าวโพดหวาน	6.0	1.9	2.0	2.8
มะเขือเทศสุก	-	-	-	2.1

2.1.2.2.2 ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ในกระบวนการหายใจแบบใช้ออกซิเจน พบว่า ก๊าซออกซิเจนในบรรยากาศประมาณร้อยละ 21 โดยปริมาตรเป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อกระบวนการหายใจของพืช การลดปริมาณก๊าซออกซิเจนมีผลทำให้อัตราการหายใจลดลง แต่ถ้าปริมาณก๊าซออกซิเจนต่ำจนเกินไป อาจจะส่งผลทำให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนขึ้นได้ สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้น พบว่าการเพิ่มปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะลดอัตราการหายใจลงได้ ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความเข้มข้นสูงทำให้ปากใบปิดและก๊าซออกซิเจนไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปได้ นอกจากนี้ยังสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์บางชนิดในวัฏจักรเครบส์อีกด้วย [9]

เนื่องจากผักและผลไม้แต่ละชนิดมีลักษณะโครงสร้างภายในของเนื้อเยื่อต่างกัน ทำให้ผักและผลไม้แต่ละชนิดมีระดับความทนทานของก๊าซออกซิเจนต่ำสุดและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่ไม่ทำให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.5 และ 2.6

ตารางที่ 2.5 ความเข้มข้นต่ำสุดของก๊าซออกซิเจนที่ผักและผลไม้บางชนิดทนได้ [9]

ร้อยละโดยปริมาตรของความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนต่ำสุด	ชนิดของผักและผลไม้สด
1	แอปเปิ้ล บลอคโคลี่ เห็ด ลูกแพร์
2	แอปปริคอท ถั่วงอก กะหล่ำปลี แคนตาลูป กะหล่ำดอก ขึ้นฉ่าย เชอรี่ ข้าวโพด ผลกีวี่ มะละกอ ลูกท้อ สับปะรด พลัม สตรอเบอรี่
3	อะโวกาโด แตงกวา มะเขือเทศ
5	หน่อไม้ฝรั่ง ผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว มันฝรั่ง

ตารางที่ 2.6 ความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผักและผลไม้บางชนิดทนได้ [9]

ร้อยละโดยปริมาตรของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด	ชนิดของผักและผลไม้สด
2	แอปเปิ้ล (*golden delicious*) แอบปริคอท ขึ้นฉ่าย องุ่น กะหล่ำ ลูกแพร์ มันฝรั่งหวาน มะเขือเทศ
5	แอบเปิ้ล (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 แบลคเบอรี่ แคนตาลูป เชอรี่ ข้าวโพด เห็ด สตรอเบอรี่ ผักขม ราสเบอรี่

อย่างไรก็ตามสำหรับสภาพการใช้งานจริงนั้นอาจมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบในการจัดเก็บ เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นในขณะจัดเก็บ ดังนั้นช่วงความเข้มข้นของออกซิเจนที่ใช้ควรมีค่ามากกว่าที่ระบุได้ในตาราง ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดสภาพการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นในการจัดเก็บ

2.1.2.2.3 ก๊าซเอทิลีน

อิทธิพลของก๊าซเอทิลีนต่อการหายใจนั้นสามารถแยกได้เป็น 2 ลักษณะคือ ลักษณะแรกได้แก่ ผลไม้ไคลแมคเทอริก ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนจากภายนอกจะกระตุ้นให้เกิดจุดไคลแมคเทอริก (climacteric peak) ได้เร็วขึ้น แต่ไม่มีผลให้อัตราการหายใจสูงขึ้นมากนัก เมื่อเกิดไคลแมคเทอริกขึ้นแล้วอัตราการหายใจจะไม่ตอบสนองต่อก๊าซเอทิลีนจากภายนอก อีกลักษณะหนึ่งได้แก่ ในผลไม้ประเภทนอนไคลแมคเทอริก และในเนื้อเยื่อผักอื่น ๆ ก๊าซเอทิลีนจะกระตุ้นให้มีอัตราการหายใจสูงขึ้น ยิ่งมีความเข้มข้นก๊าซเอทิลีนสูงขึ้นอัตราการหายใจจะสูงขึ้นเช่นกันและจะคงที่อยู่ที่ระดับนี้ถ้ายังมีก๊าซเอทิลีนอยู่ แต่เมื่อใดที่ไม่มีก๊าซเอทิลีนแล้วอัตราการหายใจจะลดลงมาใกล้เคียงกับการหายใจในระดับเดิมได้ [3]

2.2 การคายน้ำ

การสูญเสียน้ำออกจากเซลล์พืชหรือจากผลที่เก็บเกี่ยวมาแล้วเป็นการเคลื่อนที่แบบแพร่กระจายของไอน้ำที่เคลื่อนที่ออกจากผลิตผลซึ่งอิ่มตัวด้วยไอน้ำไปสู่อากาศภายนอกที่มีความดันไอน้ำต่ำกว่า ซึ่งการเคลื่อนที่ของน้ำแบบแพร่กระจายนี้เป็นไปตามกฎการแพร่กระจายของฟิกส์ (Fick' s law) นั้นคือ [3]

$$J = \frac{A}{B}(p^{sat}_{H_2O} - p_{H_2O}) \qquad (2.5)$$

เมื่อ J คือ อัตราการถ่ายเทมวลของไอน้ำ

A คือ พื้นที่ผิวของผักและผลไม้ในการถ่ายเทมวลของไอน้ำ

B คือ แรงต้านทานต่อการถ่ายเทมวลของน้ำ

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

p_{H_2O} คือ ความดันไอน้ำในบรรยากาศภายนอก

สำหรับค่าความดันไอน้ำภายในผลิตผลจะเท่ากับความดันไอน้ำอิ่มตัวซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ [46] ดังสมการ 2.6

$$\ln(p^{sat}_{H_2O}) = -5.8 \times 10^{3} T^{-1} + 1.391 - 4.864 \times 10^{-2} T + 4.176 \times 10^{-5} T^{2} - 1.445 \times 10^{-8} T^{3} + 6.545 \ln(T) \qquad (2.6)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

$p_{H_2O}^{sat}$ คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (Pa)

ส่วน $\frac{A}{B}$ สามารถแสดงในรูปสัมประสิทธิ์การคายน้ำ (k) ซึ่งขึ้นอยู่กับผักและผลไม้แต่ละชนิด[47] ดังแสดงในตารางที่ 2.7

2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการสูญเสียน้ำของผลิตผล

2.2.1.1 ปัจจัยภายในที่มีผลต่อการสูญเสียน้ำของผลิตผล [3]

2.2.1.1.1 ขนาดผลิตผล

ผลิตผลที่มีขนาดใหญ่ มีพื้นที่ผิวที่จะระเหยน้ำได้มากกว่าผลิตผลที่มีขนาดเล็กอย่างเด่นชัด แต่เมื่อคิดเทียบต่อน้ำหนักที่เท่ากันแล้ว ผลขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากกว่า ดังนั้นผลขนาดเล็กจะสูญเสียน้ำได้มากและเหี่ยวได้เร็วกว่าผลขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของผลิตผลแต่ละส่วนก็มีอัตราการคายน้ำแตกต่างกัน ทั้งนี้เพราะมีโครงสร้างเนื้อเยื่อต่างกัน บางส่วนมีช่องเปิดที่ยอมให้น้ำและอากาศผ่านเข้าออกได้มาก อัตราการคายน้ำจึงสูง

2.2.1.1.2 ปากใบ (Stomata)

ปากใบเป็นช่องเปิดที่พืชใช้สำหรับคายน้ำเพื่อระบายความร้อน อัตราการสูญเสียน้ำขึ้นอยู่กับ จำนวนปากใบ การเปิดปิดของปากใบ ขนาดและโครงสร้างของปากใบ ซึ่งปากใบจะมีมากในส่วนของใบ ดังนั้นผลิตผลที่ใช้รับประทานใบจึงมีอัตราการสูญเสียน้ำมาก

2.2.1.1.3 เลนติเซล (lenticel) ไตรโครม (trichrome) และ คิวติเคิล (cuticle)

เลนติเซล เป็นช่องเปิดอีกอย่างหนึ่งของผลิตผลที่ยอมให้น้ำและอากาศผ่านเข้าออกได้ ส่วนไตรโครมมีลักษณะเป็นขนที่จะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการคายน้ำออกจากผลิตผลได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามไตรโครมอาจจะทำให้ชั้นอากาศบาง ๆ ซึ่งอิ่มตัวด้วยน้ำที่อยู่รอบผลิตผลมีความหนามากขึ้น ส่งผลให้การสูญเสียน้ำลดต่ำลงได้ สำหรับคิวติเคิลนั้นเป็นชั้นที่ปกคลุมอยู่บนผนังเซลล์ด้านนอกของเนื้อเยื่อ ซึ่งจะต้านทานต่อการแพร่ผ่านของน้ำเนื่องจากคิวติเคิลประกอบด้วยสารประเภทไข ได้แก่ แวกซ์ และ คิวติน ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ไม่ชอบน้ำ

ตารางที่ 2.7 สัมประสิทธิ์การคายน้ำ (k) สำหรับผักชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 0-5 °C ความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 80% การสูญเสียน้ำหนักในผักน้อยกว่า 10% และความเร็วของอากาศที่ล้อมรอบเท่ากับ 0 m/s [47]

ชนิดผัก	สัมประสิทธิ์การคายน้ำ (10^{10} kg kg^{-1} Pa^{-1} s^{-1})
ถั่ว	6.2
บีทแดง	3
บรัสเซลล์สเพราท์	1.3
กะหล่ำปลี	0.95
กะหล่ำปลีแดง	1.7
แครอท	7.5
กะหล่ำดอก	7.5
ขึ้นฉ่าย	11
แตงกวา	2.5
ลีค	5.0
ผักกาดหอม	13
เห็ด	24
ผักชีฝรั่ง	19
พริกไทยหวาน	2.5
หัวไชเท้า	12
ผักขม	31
มะเขือเทศ	0.3

2.2.1.1.4 บาดแผล

บาดแผลเป็นอีกช่องทางหนึ่งที่น้ำจะผ่านออกไปจากผลิตผลได้ง่ายและสะดวกกว่าช่องทางอื่น ๆ เพราะสิ่งกีดขวางการเข้าออกของน้ำถูกทำลายหมดไป นอกจากบาดแผลที่เป็นช่องเปิดโดยตรงแล้ว รอยช้ำที่เกิดจากการกระทบกระเทือนจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำได้มากขึ้นเช่นกัน เพราะเมื่อเซลล์ถูกทำลาย จุลินทรีย์จะเข้าเจริญเติบโต และทำลายโครงสร้างในการป้องกันการสูญเสียน้ำให้หมดไป เกิดเป็นช่องเปิดทำให้สูญเสียน้ำได้มากขึ้น

2.2.1.2 ปัจจัยภายนอกที่มีอิทธิพลต่อการสูญเสียน้ำของผลิตผล

2.2.1.2.1 ความชื้นในอากาศ [3]

ความชื้นหรือความดันไอน้ำในบรรยากาศปกติจะต่ำกว่าระดับความชื้นอิ่มตัว จึงมีโอกาสที่บรรยากาศปกติจะรับไอน้ำได้อีก ส่วนในผักและผลไม้ดังได้กล่าวแล้วว่ามีน้ำเป็นองค์ประกอบโดยเฉลี่ยมากกว่าร้อยละ 70 และส่วนใหญ่จะมีน้ำอยู่มากกกว่าร้อยละ 90 ไอน้ำรอบ ๆ เซลล์จะอยู่ในสมดุลกับน้ำภายในเซลล์จึงถือว่าความดันไอน้ำภายในผลิตผลจะมีค่าเท่ากับความดันไอน้ำอิ่มตัว

ในกรณีที่ความชื้นของบรรยากาศรอบ ๆ อิ่มตัวด้วยไอน้ำ การสูญเสียน้ำจากผลิตผลให้กับบรรยากาศก็อาจจะเกิดขึ้นได้เนื่องจากพลังงานความร้อนจากการหายใจของผลิตผลเกิดการถ่ายเทสู่บรรยากาศที่ล้อมรอบ ทำให้อุณหภูมิของบรรยากาศสูงขึ้น บรรยากาศจึงสามารถรับไอน้ำได้มากขึ้นกว่าเดิม

2.2.1.2.2 อุณหภูมิ [3]

ยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นการเคลื่อนไหวของโมเลกุลจะมีมากขึ้น โอกาสที่โมเลกุลของน้ำจะเปลี่ยนจากสถานะที่เป็นของเหลวไปอยู่ในสถานะที่เป็นก๊าซเกิดได้มากขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษาจะต้องควบคุมให้ต่ำและมีความสม่ำเสมอตลอดเวลา เพราะถ้าอุณหภูมิที่เก็บรักษาเพิ่มขึ้น ผลิตผลจะเกิดการสูญเสียน้ำออกไปจนถึงจุดอิ่มตัว และเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงไอน้ำจะถูกควบแน่นเป็นหยดน้ำอยู่ตามภาชนะบรรจุหรือผนังห้องเก็บรักษา และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอีกบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์จะสามารถรับไอน้ำจากผลิตผลได้เพิ่มขึ้นอีก ทำให้ผลิตผลสูญเสียน้ำมาก สภาพการเก็บรักษาชื้นแฉะ และผลิตผลเน่าเสียได้ง่าย

2.2.2 การป้องกันการคายน้ำจากผลิตผล [3]

การเก็บรักษาผลิตผลให้มีการสูญเสียน้ำน้อยที่สุด ทำได้โดยการควบคุมปัจจัยต่างๆ ให้ผลิตผลกับบรรยากาศภายนอกมีความแตกต่างของความดันไอน้ำน้อยที่สุด โดยต้องเริ่มตั้งแต่การเก็บเกี่ยว ต้องทำด้วยความระมัดระวังมิให้เกิดบาดแผลขึ้น แล้วทำให้ผลิตผลเย็นลงอย่างรวดเร็ว จากนั้นจึงเก็บรักษาไว้ในสภาพที่มีความชื้นสูงและมีอุณหภูมิต่ำดังตัวอย่างข้อมูลแสดงผลกระทบของค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิต่ออายุการเก็บรักษาผักชนิดต่าง ๆ โดยมีการสูญเสียน้ำหนักไม่เกิน ร้อยละ 20-30 ในตารางที่ 2.8

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.8 : ข้อมูลแสดงผลกระทบความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิต่ออายุการเก็บรักษาของผักชนิดต่าง ๆ [48]

ชนิดผัก	อุณหภูมิ (°C)	ร้อยละความชื้นสัมพัทธ์	อายุการเก็บรักษา (สัปดาห์)	การเสื่อมคุณภาพ
บรัสเซลล์ -	0-1	90-95	6-8	เหี่ยวเฉา
สเพราท์	0-1	98-100	10-12	มีสีเหลืองเน่า
กะหล่ำปลี	0-1	90-95	14-22	เหี่ยว เน่า เป็นสีเหลือง
	0-1	98-100	18-26	เน่า สีเหลือง
	3.5-4.5	90-95	10-14	เหี่ยว เน่า เป็นสีเหลือง
	7-8	90-95	8-12	เน่าและเกิดราก
แครอท	0-1	90-95	15-30	เน่าและผิวนิ่ม
	0-1	98-100	30-40	เน่า แตกหน่อและมีราก
	2-3	98-100	30-40	เน่า แตกหน่อและมีราก เน่าและผิวนิ่ม
	3.5-4.5	90-95	15-30	เน่า แตกหน่อและมีราก
	7-8	98-100	20-40	เน่า แตกหน่อและมีราก
ดอกกะหล่ำ	0-1	90-95	3-4	มีจุดน้ำตาลเกิดขึ้น
	0-1	98-100	3-4	มีจุดน้ำตาลเกิดขึ้น
ขึ้นฉ่าย	0-1	90-95	8-10	เหี่ยว เน่า เป็นสีเหลือง
	0-1	98-100	10-12	เน่า มีสีเหลือง
กะหล่ำปลี	0-1	90-95	8-12	เหี่ยว เน่า เป็นสีเหลือง
จีน	0-1	98-100	10-14	เน่า
ลีค	(-1)-(-1.3)	98-100	14-18	เน่า
	0-1	90-95	7-9	เน่า และเหี่ยว
	0-1	98-100	9-11	เน่า
หัวหอมใหญ่	0-1	75-80	35-40	แห้ง เน่า
	4-5	98-100	30-40	เน่า
สะตอ	0-1	90-95	20-30	เหี่ยว เน่า
	0-1	98-100	> 35	เน่า

2.3 การเก็บรักษาภายใต้สภาพบรรยากาศดัดแปร

การใช้ก๊าซเพื่อช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สดเป็นวิทยาการที่มนุษย์รู้จักมากกว่า 1,000 ปีแล้ว แต่มีการนำมาใช้ในระดับอุตสาหกรรมเมื่อประมาณครึ่งศตวรรษมานี้เอง โดยส่วนใหญ่มักจะใช้ในรูปของการควบคุมบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศควบคุม (CAP) และแบบบรรยากาศดัดแปร (MAP) [2]

การเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศควบคุม (Controlled Atmosphere Packaging, CAP) คือ การเก็บรักษาผักและผลไม้ภายใต้สภาพบรรยากาศที่มีองค์ประกอบของก๊าซต่าง ๆ เหมาะสมตามความต้องการของผักและผลไม้แต่ละชนิดซึ่งถูกควบคุมความเข้มข้นก๊าซให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา เพื่อทำให้มีอัตราการหายใจน้อยที่สุด การเก็บรักษาผักและผลไม้ด้วยวิธีนี้ใช้ต้นทุนในการควบคุมองค์ประกอบของก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์สูง จึงนิยมใช้กับสินค้าส่งออกที่มีมูลค่า และต้องการเวลาในการเก็บรักษานาน ๆ ก่อนการบริโภค เช่น แอปเปิ้ล กล้วย ผักกาดหอม เป็นต้น [2]

ส่วนการเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร (Modified Atmosphere Packaging, MAP) คือ การปรับองค์ประกอบของก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ให้มีความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะคงตัวเหมาะสมกับผักและผลไม้แต่ละชนิดเพื่อทำให้มีอัตราการหายใจน้อยที่สุดโดยการเลือกใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่เหมาะสมซึ่งจะสามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้อย่างมีประสิทธิภาพดังแสดงในตารางที่ 2.9

การเก็บรักษาทั้ง 2 วิธีนี้เป็นวิธีการยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้ที่มีประสิทธิภาพเหมือนกัน แต่ MAP มีต้นทุนต่ำกว่า CAP มาก เนื่องจากไม่ต้องมีการควบคุมความเข้มข้นของก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ ดังนั้นจึงเป็นที่นิยมในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่และเล็กซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งในระหว่างการเก็บในห้องเย็น การขนส่ง และการวางจำหน่ายปลีก [1,2]

ตารางที่ 2.9 ตัวอย่างการจัดเก็บผักและผลไม้ภายใต้สภาพบรรยากาศดัดแปร [31]

ผักและผลไม้	อุณหภูมิ (°C)	O_2 ร้อยละ โดยปริมาตร	CO_2 ร้อยละ โดยปริมาตร	อายุการเก็บรักษาใน บรรยากาศ (วัน)	อายุการเก็บรักษาใน MAP (วัน)
แอปเปิ้ล	0-2	1.5-2.5	1-5	120	180
อะโวกาโดร	5-13	2-5	3-10	42	84
กล้วย	13-16	2-5	2-5	28	49
ถั่ว	4-8	2-3	4-7	7	14
บลอคโคลี่	0-1	1-3	5-15	28	56
ผักกาดหอม	0-1	2-5	< 1	21	28
ลูกแพร์	-1-1	2-3	0-1	90	180
พริกไทย	7-12	2-5	2-5	21	28
สตรอเบอรี่	-0.5-0	5-10	15-20	14	21

2.3.1 ประเภทการเก็บรักษาแบบบรรยากาศดัดแปร (MAP)

การเก็บรักษาแบบบรรยากาศดัดแปรแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

2.3.1.1 การเก็บรักษาแบบบรรยากาศดัดแปรแบบ Active

เป็นการพ่นก๊าซที่ต้องการตามความเข้มข้นที่กำหนดไว้ในห้องเย็นหรือภาชนะบรรจุหรืออาจได้จากการใช้สารเคมีที่ให้ก๊าซที่ต้องการหรือดูดก๊าซที่ไม่ต้องการออกจากบรรยากาศที่ล้อมรอบผลิตภัณฑ์

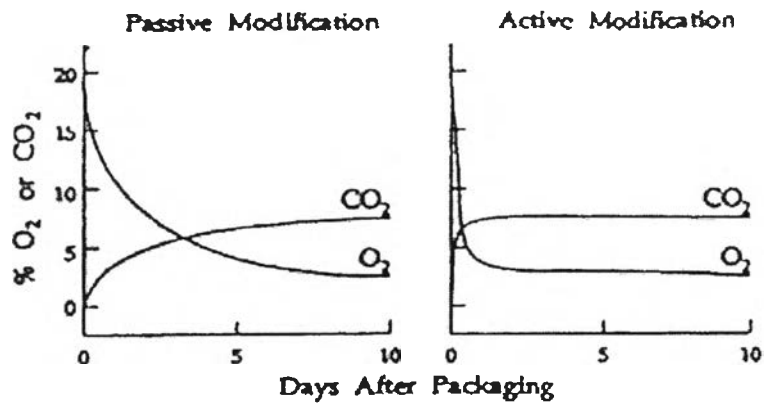
2.3.1.2 การเก็บรักษาแบบบรรยากาศดัดแปรแบบ Passive

เป็นการสร้างสภาวะบรรยากาศที่ต้องการภายในบรรจุภัณฑ์อีกวิธีหนึ่ง โดยการเลือกฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหมาะสมกับอัตราการหายใจของผักและผลไม้ ณ อุณหภูมิเก็บรักษาหนึ่ง

ผักและผลไม้จะใช้ก๊าซออกซิเจนและผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการหายใจ ทำให้ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์ลดลงจึงเกิดแรงขับดันให้ก๊าซออกซิเจนภายนอกซึมผ่านฟิล์มพอลิเมอร์เข้าไปในบรรจุภัณฑ์ได้ ขณะเดียวกันความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการหายใจของผักและผลไม้ทำให้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์สูงกว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใน

บรรยากาศปกติ ทำให้เกิดแรงขับดันให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านฟิล์มพอลิเมอร์จากภายในออกสู่ภายนอกบรรจุภัณฑ์ได้ โดยทั่วไปอัตราการคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของผักและผลไม้จะสูงกว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านฟิลม์พอลิเมอร์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้เกิดการสะสมตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์ และอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนของผักและผลไม้จะสูงกว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ของก๊าซออกซิเจน ทำให้ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์ลดลง ซึ่งการถ่ายเทมวลของก๊าซทั้งสองจะเกิดขึ้นตลอดเวลา เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์จะคงที่ซึ่งค่าความเข้มข้นที่สภาวะคงตัวนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์ พื้นที่ผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ อัตราการหายใจของผักและผลไม้ และน้ำหนักของผักและผลไม้ ณ สภาพการจัดเก็บหนึ่ง ๆ ดังนั้นหากเลือกบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำได้อย่างเหมาะสมแล้ว จะทำให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนกับเวลาของบรรยากาศดัดแปรแบบ Active (Active MAP) และ บรรยากาศดัดแปรแบบ Passive (Passive MAP) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าการเก็บรักษาผักและผลไม้ภายใต้สภาพบรรยากาศดัดแปรแบบ Active นั้นจะเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วกว่าแบบ Passive ดังแสดงในรูปที่ 2.2 [43]



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์ที่เก็บภายใต้สภาพบรรยากาศแบบ Active MAP และ Passive MAP กับเวลา [43]

2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเก็บรักษาผักและผลไม้ภายใต้สภาพบรรยากาศดัดแปร

2.3.2.1 อัตราการหายใจของผักและผลไม้

ในการกำหนดความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการเก็บรักษาภายใต้สภาพบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้ชนิดหนึ่ง ๆ นั้น จะพิจารณาจากอัตราการหายใจที่ลดลงอย่างเดียวไม่ได้ แต่จะต้องคำนึงถึงความทนทานต่อก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังแสดงในตารางที่ 2.5 และ 2.6 [3] ซึ่งถ้าใช้สภาพบรรยากาศที่มีความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนต่ำกว่าหรือความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าที่ทนทานได้ จะทำให้ผักและผลไม้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนและเน่าเสียอย่างรวดเร็วได้

อย่างไรก็ตามเนื่องจากลักษณะทางสรีรวิทยา เนื้อเยื่อของผักและผลไม้ สายพันธุ์ และอายุในขณะเก็บเกี่ยวส่งผลต่ออัตราการหายใจในผักและผลไม้ [5] ดังนั้นความเข้มข้นของก๊าซและสภาวะในการจัดเก็บจึงแตกต่างกัน

มีงานวิจัยมากมาย [1, 4, 5, 6, 16] ได้พยายามสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายอัตราการหายใจของพืชโดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ซึ่งใช้หลักการทางจลน์ศาสตร์ทางเอนไซม์ในการสร้างแบบจำลองดังกล่าว โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้ [6]

2.3.2.1.1 แบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดไม่มีการยับยั้ง (Michaelis-Menten without inhibition type equation) [6]

โดยพิจารณาเพียงความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน (ซับสเตรท) เท่านั้นที่ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบขั้นตอนเดียว โดยมีสมการแสดงอัตราการหายใจดังนี้

$$R_{O_2} = \frac{V_m [O_2]}{K_{m_{O_2}} + [O_2]} \qquad (2.7)$$

2.3.2.1.2 แบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้ง

เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ภายในเนื้อเยื่อส่งผลต่อเอนไซม์ในกระบวนการไกลโคไลซิส (glycolysis) และในวัฏจักรเครบส์ (Kreb's cycle) ทำให้อัตราการหายใจน้อยลงดังนั้นจึงมีการเสนอแบบจำลองการหายใจแบบยับยั้ง โดยแบ่งออกเป็น 3 ประเภท

2.3.2.1.2.1 แบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนซนิด มีการยับยั้งแบบคอมเพททิทีฟ (Michaelis-Menten competitive type equation) [6]

แบบจำลองนี้ได้เทียบว่าซับสเตรท (substrate) คือก๊าซออกซิเจน ตัวยับยั้ง (inhibitor) คือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยซับสเตรทหรือก๊าซออกซิเจนและตัวยับยั้งหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะแข่งขันกันทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการหายใจโดยตรง โดยมีสมการแสดงอัตราการหายใจดังนี้

$$R_{O_2} = \frac{V_{m_{O_2}}[O_2]}{[O_2] + K_{m_{O_2}}\left(1 + \frac{[CO_2]}{K_{m_{c,CO_2}}}\right)} \qquad (2.8)$$

2.3.2.1.2.2 แบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนซนิด มีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ (Michaelis-Menten uncompetitive type equation) [6]

แบบจำลองนี้ได้เทียบว่าซับสเตรท (substrate) หรือสารที่ต้องการให้เข้าทำปฏิกิริยากับเอนไซม์คือก๊าซออกซิเจน ตัวยับยั้ง (inhibitor) หรือสารที่ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาของซับสเตรทคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยซับสเตรทหรือก๊าซออกซิเจนจะทำปฏิริยากับเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการหายใจ ส่วยตัวยับยั้งหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะไม่ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์แต่จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบเชิงซ้อนของเอนไซม์กับก๊าซออกซิเจนเท่านั้น โดยมีสมการแสดงอัตราการหายใจดังนี้

$$R_{O_2} = \frac{V_{m_{O_2}}[O_2]}{K_{m_{O_2}} + [O_2]\left(1 + \frac{[CO_2]}{K_{m_{u,CO_2}}}\right)} \qquad (2.9)$$

2.3.2.1.2.3 แบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ (Michaelis-Menten noncompetitive type equation) [6]

แบบจำลองนี้ได้เทียบว่าซับสเตรท (substrate) หรือสารที่ต้องการให้เข้าทำปฏิกิริยากับเอนไซม์คือก๊าซออกซิเจน ตัวยับยั้ง (inhibitior) หรือสารที่ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาของซับสเตรทคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยซับสเตรทหรือก๊าซออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการหายใจ ส่วนตัวยับยั้งหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะไม่ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์แต่จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบเชิงซ้อนของเอนไซม์กับก๊าซออกซิเจนเท่านั้น โดยมีสมการแสดงอัตราการหายใจดังนี้

$$R_O = \frac{V_m [O_2]}{(K_m + [O_2])\left(1 + \frac{[CO_2]}{K_{m_i}}\right)} \qquad (2.10)$$

โดยที่ R_O คือ อัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน

V_m คือ อัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนสูงสุด

$[O_2]$ คือ ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจน

$[CO_2]$ คือ ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

K_m คือ ค่าคงที่ไมเคิลลิสเมนเทนสำหรับอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนชนิดไม่มีการยับยั้ง

K_m คือ ค่าคงที่ของไมเคิลลิสเมนเทนสำหรับอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพททิทีฟ

K_m คือ ค่าคงที่ของไมเคิลลิสเมนเทนสำหรับอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ

K_m คือ ค่าคงที่ของไมเคิลลิสเมนเทนสำหรับอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ

ค่า $V_{m_{O_2}}$ ขึ้นอยู่กับลักษณะของผักและผลไม้แต่ละชนิด หากผ่านกระบวนการหั่นหรือสับเป็นชิ้นเล็ก ๆ จะทำให้พื้นที่ผิวที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนก๊าซภายในและภายนอกเซลล์มากขึ้นทำให้ค่า $V_{m_{O_2}}$ จึงสูงขึ้น และหากอุณหภูมิในการจัดเก็บสูงขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์ต่าง ๆ ก็จะมีค่าสูงขึ้น ทำให้ค่า $V_{m_{O_2}}$ สูงขึ้นเช่นกัน

ส่วน $K_{m_{O_2}}$ จะขึ้นอยู่กับระยะทางในการแพร่ผ่านของก๊าซภายในผลิตผลและความต้านทานต่อการแพร่ผ่านของก๊าซภายในเซลล์ นั่นคือเมื่อระยะทางการแพร่เพิ่มมากขึ้น เช่น จากบริเวณพื้นผิวสู่ใจกลางของผลิตผล ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนภายในเซลล์จะน้อยกว่าภายนอกมาก จึงเกิดการแพร่ผ่านก๊าซออกซิเจนจากภายนอกสู่ภายในเซลล์ เพื่อที่จะทำให้ผลิตผลมีอัตราการหายใจแบบใช้ออกซิเจนน้อยที่สุด ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนภายในเซลล์จึงควรมีค่าต่ำจนเข้าใกล้ระดับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่ทนทานได้ ดังนั้นความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนภายนอกเซลล์จึงควรมีค่าต่ำ ($K_{m_{O_2}}$ ต่ำ) [4] แต่สำหรับผลิตผลที่มีระยะทางการแพร่น้อย เช่นผลิตผลที่ผ่านการหั่นหรือสับเป็นชิ้นเล็ก ๆ ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนภายในเซลล์ใกล้เคียงกับภายนอก ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้เกิดการหายใจแบบใช้ออกซิเจนภายในเซลล์น้อยที่สุด ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนภายนอกจึงควรมีค่าต่ำมาก ($K_{m_{O_2}}$ ต่ำมาก) ดังผลการทดลองของ McLaughlin และ Beirne [4] ซึ่งพบว่า ค่า $K_{m_{O_2}}$ ของแครอทและกะหล่ำปลีหั่นละเอียด จะน้อยกว่าผลของแครอทและกะหล่ำปลี

ส่วน $K_{m_{CO_2}}$, $K_{m_{u,CO_2}}$, $K_{m_{n,CO_2}}$ เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผักและผลไม้สามารถทนทานได้ [4]

สมการ 2.7-2.10 นี้สามารถใช้คำนวณหาอัตราการหายใจแบบใช้ออกซิเจนได้เท่านั้น ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาของแบบจำลองต่าง ๆ ได้แสดงในภาคผนวก ข. และมีงานวิจัยมากมาย [1, 5, 6, 7] ได้เสนอให้ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟในการคำนวณหาอัตราการหายใจของผักและผลไม้ชนิดต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใด ๆ ภายใต้สภาวะการจัดเก็บหนึ่ง ๆ เพราะเห็นว่าเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้องและเหมาะสมกว่าแบบจำลองอื่น ๆ

2.3.2.2 อุณหภูมิในการจัดเก็บ

ในการจัดเก็บผักและผลไม้ควรเก็บไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำ เพื่อทำให้มีอัตราการหายใจต่ำ แต่ทั้งนี้จะต้องไม่ต่ำจนทำให้เกิด chilling injury ได้ [8] แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติอาจจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างการจัดเก็บ ดังนั้นจึงควรกำหนดอุณหภูมิ

ในการจัดเก็บให้มากกว่าอุณหภูมิต่ำสุดที่กำหนดสำหรับผักและผลไม้แต่ละชนิด ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิด chilling injury ซึ่งวิธีการนี้มีข้อเสียคือ ทำให้อายุการเก็บรักษาสั้นลง [8]

นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้อัตราการหายใจสูงขึ้นมาก ในขณะที่ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์ลดต่ำลงและความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก จนอาจทำให้เกิดการเน่าเสียของผักและผลไม้อันเนื่องมาจากการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้

เพื่อแก้ปัญหาข้างต้นได้มีการคิดค้นฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดใหม่ขึ้นโดยมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซใกล้เคียงกับพลังงานกัมมันต์ของการหายใจ เมื่ออุณหภูมิในการจัดเก็บเพิ่มมากขึ้นเหนือ switch temperature ฟิล์มพอลิเมอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากแบบผลึกเป็นแบบไม่เป็นผลึก ทำให้มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซสอดคล้องกับอัตราการหายใจที่เพิ่มขึ้นได้ โดยอุณหภูมิ switch temperature จะถูกควบคุมให้อยู่ในช่วง ± 2 °C ของอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงลูกโซ่พอลิเมอร์ [5]

2.3.2.3 ความชื้นสัมพัทธ์

การสูญเสียความชื้นในผักและผลไม้ จะทำให้คุณภาพเสื่อมลง อายุการเก็บรักษาจึงสั้น ซึ่งการสูญเสียน้ำหนักของผักและผลไม้สดที่ผู้บริโภคยอมรับคุณภาพได้ในผักและผลไม้แต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 การสูญเสียน้ำหนักผักและผลไม้ที่ผู้บริโภคยังยอมรับคุณภาพได้ [2]

ชนิดผักและผลไม้	ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักที่ยอมรับได้
บรอคโคลี่ แตงกวา ถั่วเขียว ผักกาดหอม	3-5
หน่อไม้ฝรั่ง บีท กะหล่ำปลี แครอท ดอกกะหล่ำ	6-8
ลีค มันฝรั่ง มะเขือเทศ ข้าวโพดหวาน แบลคเบอรี่	6-8
ขึ้นฉ่าย หัวหอมใหญ่	10

ดังนั้นการลดการสูญเสียน้ำจากผักและผลไม้ สามารถทำได้โดยการลดอุณหภูมิ และการเพิ่มค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในบรรจุภัณฑ์ด้วยการเลือกฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำต่ำ ไอน้ำที่พืชคายออกมาจะช่วยเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ภายในบรรจุภัณฑ์ได้ แต่

ถ้าปริมาณไอน้ำภายในบรรจุภัณฑ์มากกว่าจุดอิ่มตัว ไอน้ำจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ทำให้ผักและผลไม้เน่าเสียได้ [2,9]

จากผลกระทบของปัจจัยดังกล่าวสามารถนำมาสรุปเป็นข้อมูลแสดงสภาวะที่เหมาะสมในการจัดเก็บรักษาผักภายใต้สภาพบรรยากาศดัดแปรดังในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 ข้อมูลแสดงสภาวะการเก็บรักษาผักภายใต้สภาพบรรยากาศดัดแปรที่เหมาะสม

ผักและผลไม้	O_2 [1] (%)	CO_2 [1] (%)	การจัดเก็บที่เหมาะสม [2]		การจัดเก็บในทางปฏิบัติ [2]	
			T (°C)	RH (%)	T (°C)	RH (%)
หน่อไม้ฝรั่ง	21	5-10	0	100	1-2	>95
บรัสเซลล์สเพราท์	1-2	5-7	0	100	1-2	>95
กะหล่ำปลี	3-5	5-7	0	100	1-2	>95
กะหล่ำดอก	2-5	2-5	0	100	1-2	>95
แตงกวา	3-5	0	11	95-98	11	>95
ลีค	1-2	3-5	0	100	1-2	>95
ผักกาดหอม	2-5	0	0	100	1-2	>95
หัวหอมใหญ่	1-2	10-20	0	80-85	1-2	80-85
ผักขม	21	10-20	0	100	1-2	>95

[1] เอกสารอ้างอิง [2]
[2] เอกสารอ้างอิง [12]

2.3.3 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์ (permeability)

การรักษาระดับความเข้มข้นก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมในสภาพบรรยากาศดัดแปรสามารถทำได้โดยการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำที่เหมาะสมกับผักและผลไม้แต่ละชนิด ถ้าผักและผลไม้มีอัตราการหายใจสูง ฟิล์มพอลิเมอร์ที่เลือกใช้ก็ควรมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซมาก แต่ถ้ามีอัตราการหายใจต่ำฟิล์มพอลิเมอร์ที่เลือกก็ควรมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซต่ำเช่นกัน [43] ตัวอย่างค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำในฟิล์มพอลิเมอร์แสดงในตารางที่ 2.12

ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์และก๊าซ รวมทั้งปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และก๊าซตามสมการนี้ [43]

$$P = F_i G_k \gamma_{i,k} \qquad (2.11)$$

เมื่อ P คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์

F_i คือ ฟังก์ชันของคุณสมบัติของพอลิเมอร์

G_k คือ ฟังก์ชันของคุณสมบัติของก๊าซที่ซึมผ่าน

$\gamma_{i,k}$ คือ พารามิเตอร์ที่แสดงปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และก๊าซ (มีค่าเท่ากับ 1 หากไม่มีปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และก๊าซ)

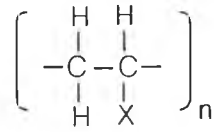
ตารางที่ 2.12 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซต่าง ๆ (P) ในฟิล์มพอลิเมอร์ [13]

ฟิล์มพอลิเมอร์	อุณหภูมิ (°C)	P x 10^{13}(cm^3 cm cm^{-2} s^{-1} Pa^{-1})		
		O_2	CO_2	H_2O
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (SG = 0.914)	25	2.2	9.5	68
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (SG = 0.964)	25	0.3	0.27	9.0
พอลิโพรพิลีน	30	1.7	6.9	51.0
พอลิไวนิลคลอไรด์ (unplasticized)	25	0.034	0.12	206
เอทิลเซลลูโลส	25	11.0	84.8	6700

2.3.3.1 ลักษณะคุณสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีผลต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ และไอน้ำ [18]

2.3.3.1.1 โครงสร้างของฟิล์มพอลิเมอร์

ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ส่งผลกระทบต่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซดังแสดงในตารางที่ 2.13 ซึ่งแสดงค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในพอลิเมอร์ที่มีหน่วยที่ซ้ำกันในโครงสร้าง [18] ดังนี้



เมื่อ X คือ หมู่ฟังก์ชัน

n คือ จำนวนหน่วยที่ซ้ำกัน

ตารางที่ 2.13 ผลกระทบของหมู่ฟังก์ชันต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน [18]

หมู่ฟังก์ชัน	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนสัมพัทธ์	
-OH	1	เทียบกับค่าความสามารถในการซึม
-CN	4	ผ่านของก๊าซออกซิเจนอ้างอิงเมื่อ
-Cl	800	X = -OH เท่ากับ 0.038 cm^3 mm
-F	1500	m^{-2} 24 hr^{-1} atm^{-1} ที่อุณหภูมิ 23 ^oC
-Acrylic	1700	และความชื้นสัมพัทธ์ 0%
$-CH_3$	15000	
-Phenyl	42000	
-H	48000	

2.3.3.1.2 ลักษณะความเป็นผลึก

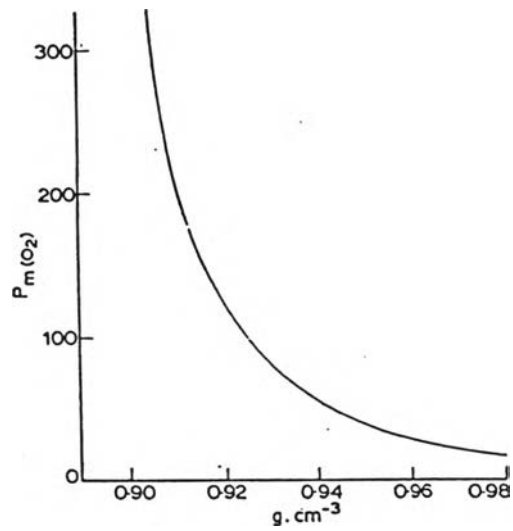
การเพิ่มค่าความเป็นผลึก (degree of crystallinity) จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และการละลายของก๊าซที่ซึมผ่านลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2.14 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น 2 เท่าจะทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนลดลง 5 เท่า

ตารางที่ 2.14 ผลกระทบของความเป็นผลึกต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน [18]

พอลิเมอร์	ร้อยละความเป็นผลึก	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน cm^3 mm m^{-2} $24h^{-1}atm^{-1}$ ที่ 23^oc
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ	50	182.0
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง	80	42.0
ไนลอน 66 (soaked)	20	3.0
ไนลอน 66 (annealed)	40	0.6

2.3.3.1.3 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์

ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นและความเป็นผลึก คือถ้าความหนาแน่นของพอลิเมอร์ต่ำค่าความสามารถในการซึมผ่านจะมาก [18] ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของพอลิเอทิลีนที่ค่าความหนาแน่นต่าง ๆ [18]

2.3.3.1.4 การจัดเรียงตัวของโมเลกุล (molecular orientation) และค่าความแข็งแรงของสายโซ่พอลิเมอร์ (chain stiffness)

หากมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเป็นระเบียบมาก ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนจะน้อยดังแสดงในตารางที่ 2.15 ส่วนพอลิเมอร์ที่มีค่าความแข็งแรงของสายโซ่พอลิเมอร์มากขึ้นซึ่งเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature) ที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนน้อยลง [39]

ตารางที่ 2.15 ผลกระทบการจัดเรียงตัวของโมเลกุลพอลิเมอร์ต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนในพอลิเมอร์ต่าง ๆ [39]

พอลิเมอร์	ระดับการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน $cm^3\ mm\ m^{-2}\ 24hr^{-1}atm^{-1}$ ที่ 23 °C
พอลิโพรพิลีน (PP)	0	57
	300%	30
พอลิสไตรีน (PS)	0	160
	300%	114
พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลท (PET)	0	3.8
	500%	1.9
Acrylonitrile/Styrene (70/30)	0	0.38
	300%	0.34

2.3.3.1.5 น้ำหนักโมเลกุลและระดับการเกิดพอลิเมอไรเซชัน (degree of polymerization)

เมื่อน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์และระดับการเกิดพอลิเมอไรเซชันมากจะทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซน้อยลง [18]

2.3.3.1.6 พันธะคู่ในโครงสร้างพอลิเมอร์

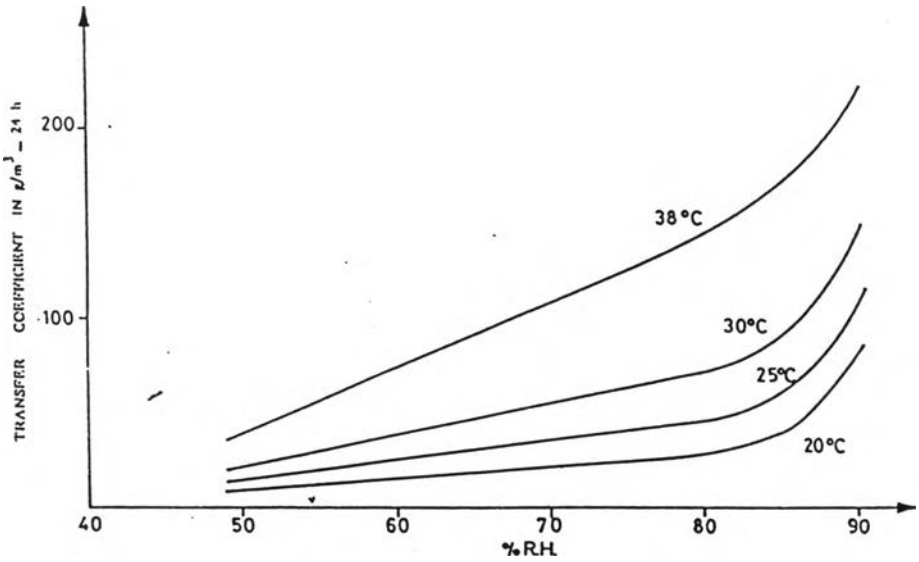
จำนวนพันธะคู่ในโครงสร้างของพอลิเมอร์มีผลต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์ ดังในงานวิจัยของ Morgan [49] ซึ่งพบว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำในพอลิบิวทาไดอีนสูงกว่าพอลิเอทิลีน

2.3.3.1.7 ความมีสมมาตรและสภาพขั้วของพอลิเมอร์

ถ้าลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์ไม่มีความสมมาตร จะทำให้พอลิเมอร์มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซสูงขึ้นเมื่อเทียบกับโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่มีความสมมาตรส่วนพอลิเมอร์ที่มีสภาพขั่วมาก แสดงว่ามีค่าพลังงานเชื่อมแน่นสูง พลังงานก่อกัมมันต์สำหรับการแพร่มาก ส่งผลให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซลดลง [18] ตัวอย่างเช่น พอลิไวนิลิดีนคลอไรด์มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซน้อยกว่าพอลิเอทิลีน 200 – 1000 เท่า

2.3.3.1.8 สารเติม (additives) และพลาสติกไซเซอร์ (plasticisers)

สารเติมและพลาสติกไซเซอร์ที่เติมลงในพอลิเมอร์เพื่อปรับคุณสมบัติจะทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้นเหมือนกับพฤติกรรมของไอน้ำในพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Polymer) [18] ทั้งนี้เนื่องจากการเติมสารเติมแต่งหรือพลาสติกไซเซอร์จะทำให้โมเลกุลเกิดการยืดหยุ่นทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของ OPA ที่มีความหนา 15 ไมครอน กับความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกต่าง ๆ (ความชื้นสัมพัทธ์ภายในเป็นศูนย์) [18]

2.3.3.1.9 สารเพิ่มเนื้อ (inert filler) และเม็ดสี (pigment)

ถ้าปริมาณของสารเพิ่มเนื้อหรือเม็ดสีเกินค่าวิกฤต จะทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะของสารเพิ่มเนื้อหรือเม็ดสีซึ่งอาจจะทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้นหรือลดลงดังแสดงในตารางที่ 2.16

I 20611018

ตารางที่ 2.16 ผลกระทบของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ [18]

ร้อยละ $CaCO_3$ โดยปริมาตร	ประเภทของ $CaCO_3$	$\frac{P(O_2) \text{ ที่มี } CaCO_3}{P(O_2) \text{ ที่ไม่มี } CaCO_3}$
0	-	1
15	Not treated	$\simeq 2$
25	Not treated	$\simeq 4$
15	Treated	$\simeq 0.5$
25	Treated	$\simeq 0.3$

$P(O_2)$ = 182 cm^3 mm m^{-2} 24h atm ที่ 23 °C

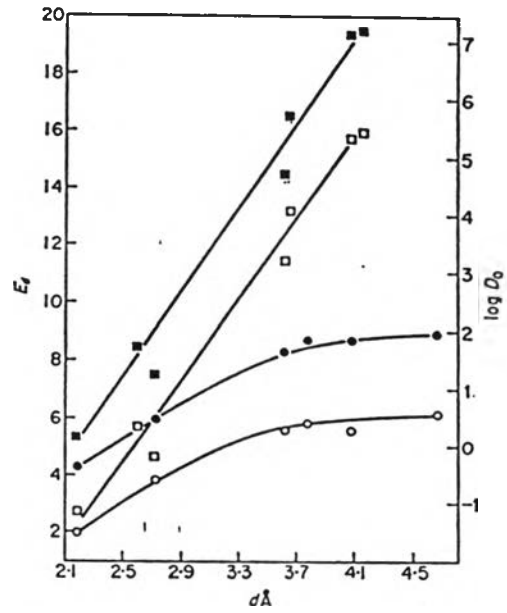
2.3.3.1.10 การเชื่อมโยงของสายโซ่พอลิเมอร์ (reticulation)

ได้มีการวิจัยเกี่ยวกับความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในสารจำพวกยางพบว่าการมีปริมาณซัลเฟอร์เพียงเล็กน้อย จะไม่ส่งผลต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซแต่ถ้าลักษณะของโมเลกุลยางมีการเชื่อมโยงมากขึ้นจะทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซน้อยลง

2.3.3.2 คุณสมบัติก๊าซที่ซึมผ่านต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์

2.3.3.2.1 ขนาดของโมเลกุล

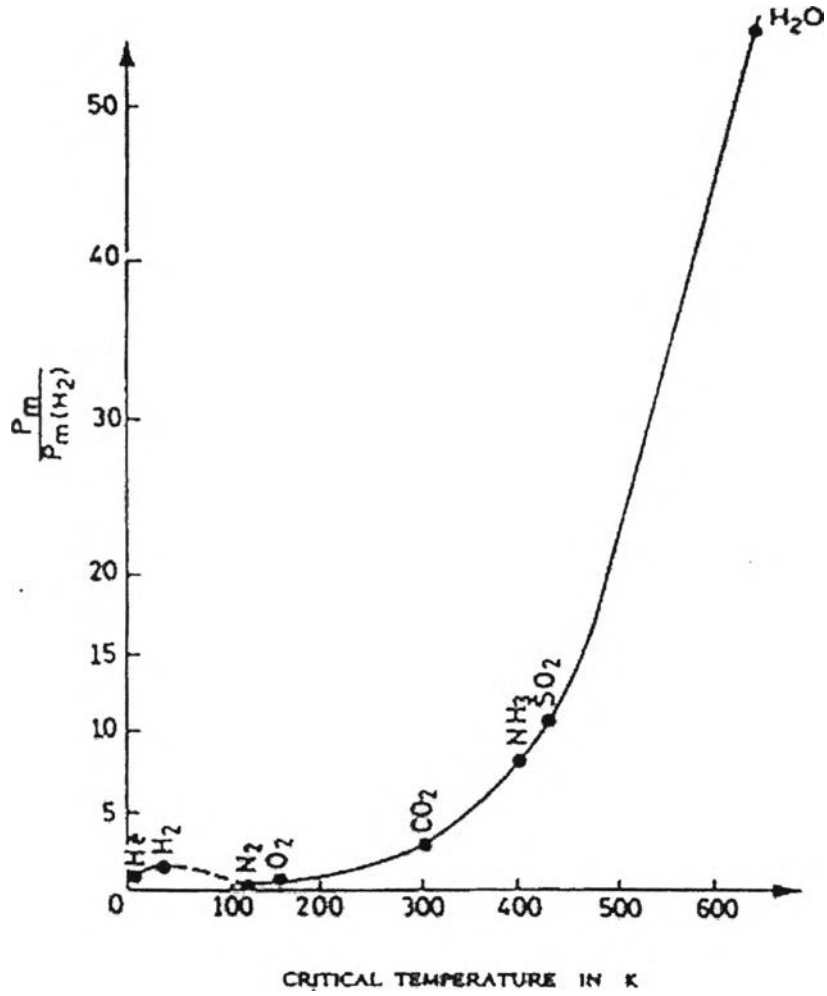
ถ้าขนาดของโมเลกุลยิ่งมีขนาดเล็กจะส่งผลให้ความสามารถในการแพร่และการซึมผ่านมากขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมา [11] ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ He, Ne, Ar, Kr, Xe ในพอลีสไตรีน และพีวีซี พบว่าความสามารถในการซึมผ่านและการแพร่ของก๊าซจะแปรผกผันกับขนาดของโมเลกุลที่ซึมผ่าน คือ He มีขนาดโมเลกุล 190 พิโคเมตร มีความสามารถในการแพร่มากกว่า Xe ซึ่งมีขนาดโมเลกุล 350 พิโคเมตร ประมาณ 3-4 เท่า [18] ซึ่งสอดคล้องกับค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของความสามารถในการแพร่ผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้นตามขนาดโมเลกุลก๊าซที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 [23]



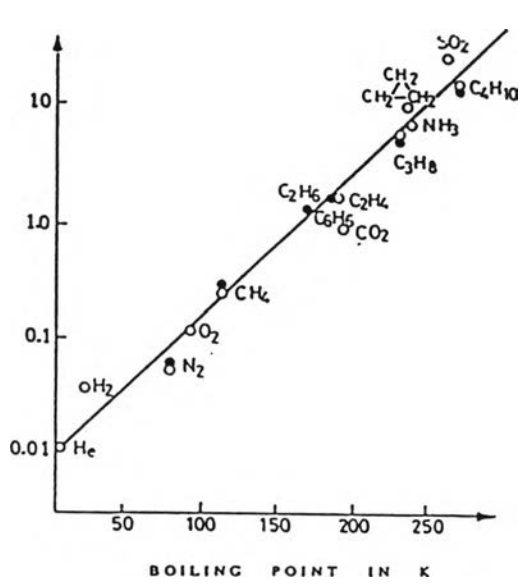
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการแพร่ (Diffusivity activation energy, E_d) และลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Logarithm of diffusion preexponential factor, log D_o) ของก๊าซที่มีขนาดโมเลกุลต่าง ๆ โดยที่ ● คือ พลังงานก่อกัมมันต์ของการแพร่ของก๊าซ ○ คือลอการิทึมค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซในยางธรรมชาติ และ ■ คือพลังงานก่อกัมมันต์ของการแพร่ของก๊าซ □ คือลอการิทึมค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซในพอลีไวนิลอะซิเตท (เมื่ออุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิแก้ว) [23]

2.3.3.2.2 ความสามารถในการควบแน่นและการละลายได้

หากก๊าซที่ซึมผ่านมีความสามารถในการควบแน่นในพอลิเมอร์ได้ดีจะมีความสามารถในการละลายในพอลิเมอร์ได้ดีเช่นกัน ส่งผลให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์นั้นมากขึ้น ซึ่งความสามารถในควบแน่นจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ทางกายภาพ [18] เช่น อุณหภูมิวิกฤต ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจนสัมพัทธ์ของยางต่อก๊าซต่าง ๆ ที่มีอุณหภูมิวิกฤตต่างกัน [18]



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการละลายได้ของก๊าซต่าง ๆ ในยางที่อุณหภูมิ 25 °C (●) และ 40 °C (O) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิจุดเดือดของก๊าซ [18]

2.3.3.3 อุณหภูมิ

ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิตามสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ดังนี้ [5, 13, 14, 15, 21]

$$P = P_0 \exp(-E_P/RT) \qquad (2.12)$$

เมื่อ P คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ

P_0 คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่อุณหภูมิอนันต์

E_P คือ พลังงานก่อกัมมันต์สำหรับการซึมผ่านของก๊าซ

R คือ ค่าคงที่ก๊าซ

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

หากอุณหภูมิในการใช้งานของพอลิเมอร์อยู่ต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเล็กน้อย แต่ถ้าอุณหภูมิในการใช้งานเข้าใกล้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว โมเลกุลพอลิเมอร์จะเกิดการเคลื่อนที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

2.3.3.4 ความดันย่อยของก๊าซ

ถ้าโมเลกุลก๊าซมีแรงดึงดูดกับต่อพอลิเมอร์น้อย ความดันย่อยของก๊าซจะไม่มีผลต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำในพอลิเมอร์ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic polymer) แต่สำหรับโมเลกุลก๊าซที่มีแรงดึงดูดกับพอลิเมอร์มาก เช่น การซึมผ่านของไอน้ำในพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (hydrophilic polymer) ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซจะเพิ่มขึ้นตามความดันย่อยของก๊าซ [18]

2.3.3.5 ความชื้น

ความชื้นจะส่งผลกระทบต่อพอลิเมอร์ที่มีขั้วหรือมีพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างโดยเมื่อพอลิเมอร์ได้รับความชื้นจะทำให้เกิดการพองตัวของโครงสร้าง การซึมผ่านของก๊าซต่าง ๆ จึงดีขึ้น [50]

จะเห็นได้ว่ามีปัจจัยหลายอย่างกำหนดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ดังนั้นฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งอาจมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่อาจจะไม่ตรงกับค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่ต้องการสำหรับการจัดเก็บผักและผลไม้ภายใต้บรรยากาศดัดแปรในสภาวะหนึ่งได้ ด้วยเหตุนี้จึงมีการคิดค้นวิธีหรือเทคนิคใหม่ ๆ ขึ้นมาแทนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ เทคนิคหนึ่งที่ใช้คือ การใช้บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรชนิดฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น ซึ่งเป็นการนำฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ มาวางเรียงซ้อนกันซึ่งความหนาของพอลิเมอร์แต่ละชนิดจะทำให้ได้ฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซโดยรวมต่างกัน

2.4 ฟิลม์พอลิเมอร์แบบหลายชั้น

ฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นได้มาจากการนำฟิล์มพอลิเมอร์หลายชนิดมาวางเรียงซ้อนกัน เป็นฟิลม์พอลิเมอร์แบบหลายชั้น [39, 15] ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบและกรรมวิธีในการผลิต ดังนี้

2.4.1 องค์ประกอบของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น [30]

2.4.1.1 วัสดุต้านทาน (barrier material) เป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในการปรับคุณสมบัติความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซต่าง ๆ ของบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น ตัวอย่างวัสดุต้านทานที่นิยมใช้คือ พอลิเอไมด์ 6 พอลิเอสเทอร์ และ EVOH ฯลฯ

2.4.1.2 สารยึดติด (bonding agent) เป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก ซึ่งจะช่วยในการยึดติดฟิล์มพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน ตัวอย่างสารยึดติดที่นิยมใช้ได้แก่ ไอโอโนเมอร์ EVA และ LLDPE โดยมีความหนาประมาณ 3 – 5 ไมครอน

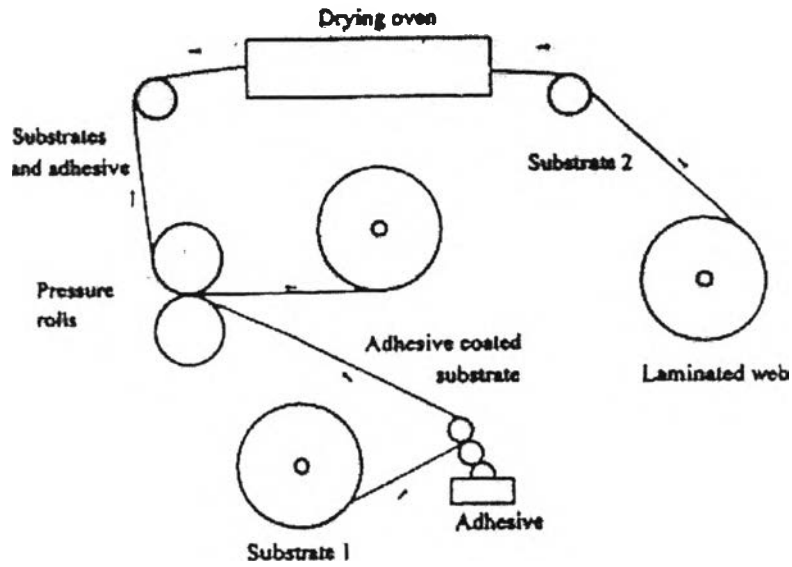
2.4.1.3 วัสดุอื่น ๆ เป็นชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี มีความสามารถในการพิมพ์ลาย พิมพ์สี และมีความต้านทานต่อความชื้น ตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และ EVA เป็นต้น

2.4.2 กรรมวิธีในการผลิตฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น

2.4.2.1 ลามิเนชัน

ลามิเนชัน คือ การนำวัสดุที่แตกต่างกันมาวางซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ซึ่งวัสดุที่นิยมใช้ ได้แก่ ฟิล์มพอลิเมอร์ กระดาษ และอลูมิเนียมฟอยล์ โดยมีการใช้กาวเป็นสารในการยึดติด [28, 29]การลามิเนชันแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ

2.4.2.1.1 การลามิเนชันแบบเปียก (wet bonding) เป็นกระบวนการที่มีการใช้กาวซึ่งมีตัวทำละลายหรือมีน้ำเป็นตัวทำละลายเป็นองค์ประกอบ กาวนี้จะถูกทาที่ผิวของวัสดุด้านหนึ่ง หลังจากนั้นจึงถูกนำไปวางทับกับวัสดุอีกชนิดหนึ่ง แล้วจึงผ่านไปยังขั้นตอนการอบแห้ง เพื่อทำให้สารทำละลายหรือน้ำที่อยู่ในกาวระเหยหมดไป พร้อมกับเกิดการสร้างพันธะการยึดติดกันอย่างสมบูรณ์ขึ้นได้ [28] ดังแสดงในรูปที่ 2.8

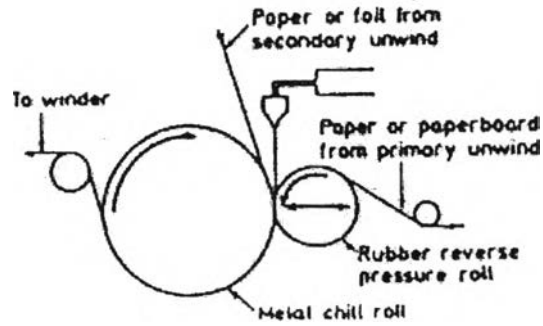


รูปที่ 2.8 กระบวนการลามิเนชันแบบเปียก [28]

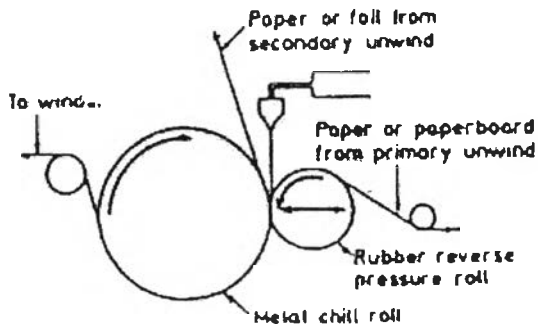
2.4.2.1.2 การลามิเนชันแบบแห้ง (dry bonding) เป็นกระบวนการที่มีการใช้กาวในการยึดติดเช่นเดียวกับกระบวนการลามิเนชันแบบเปียก (wet bonding) โดยหลังจากทากาวบนสารด้านหนึ่งแล้วจะผ่านขั้นตอนการอบแห้งเพื่อทำการกำจัดตัวทำละลายหรือน้ำออก แล้วจึงนำไปประกบกับวัสดุอีกชนิดหนึ่งซึ่งอาจจะผ่านกระบวนการทำให้ร้อนมาก่อน [29] ดังแสดงในรูปที่ 2.9 นอกจากนี้ยังสามารถผลิตได้จากวิธีที่เรียกว่า hot melt ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ

2.4.2.1.2.1 การลามิเนชันแบบอัดรีด (extrusion lamination) โดยมีการใช้พอลิเมอร์หลอมเหลว เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน หรือเทอร์โมพลาสติกต่าง ๆ เป็นสารเชื่อมวัสดุที่แตกต่างกันเข้าด้วยกัน [29] เช่น กระดาษ/พอลิเอทิลีน/อลูมิเนียมฟอยล์ หรือ กระดาษ/พอลิเอทิลีน/ฟิล์มเซลลูโลส ดังแสดงในรูปที่ 2.10

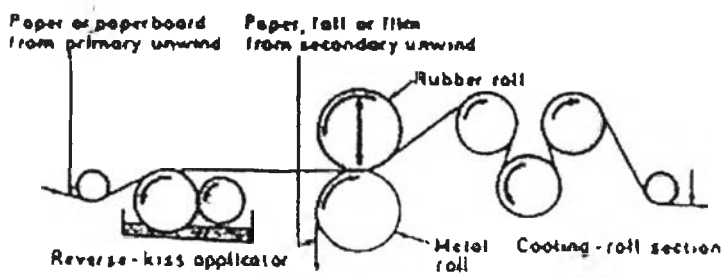
2.4.2.1.2.2 วิธี hot melt วัสดุชนิดหนึ่งจะถูกทาแวกซ์ด้วย reverse-kiss coater แล้วจึงนำไปประกบกับวัสดุอีกชนิดหนึ่ง [29] ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.9 การลามิเนชันแบบแห้ง [28]



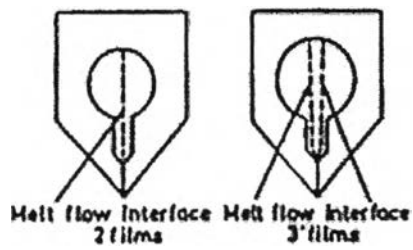
รูปที่ 2.10 การลามิเนชันแบบอัดรีด [29]



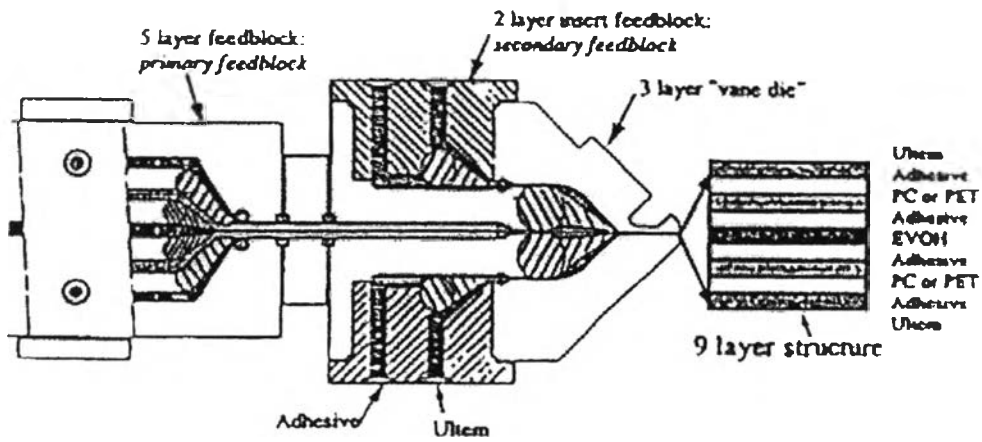
รูปที่ 2.11 การลามิเนชันแบบ hot melt [29]

2.4.2.2 การอัดรีดร่วม (coextrusion) วิธีนี้สามารถผลิตฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีจำนวน 2-3 ชั้น โดยปราศจากการใช้สารในการยึดเกาะ แต่ถ้ามากกว่า 3 ชั้นอาจจะต้องใช้กาวเป็นตัวช่วยในการยึดเกาะฟิล์มพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน [19] วิธีการผลิตแบบอัดรีดร่วมมีดังนี้

2.4.2.2.1 การอัดรีดร่วมแบบแผ่นฟิล์ม (coextrusion of sheet) จะประกอบด้วยวิธีการผลิต 2 ชนิด คือหัวฉีดทางเดียว (feed block) ดังรูปที่ 2.12 และหัวฉีดหลายทาง (multimanifold die) ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งแบบหัวฉีดหลายทางจะสามารถผลิตได้ทั้งฟิล์มแบบหล่อ (cast film), ฟิล์มแบบเป่า (blown film) ฯลฯ แต่ก็ไม่ค่อยนิยมใช้กันมากจนกระทั่งมีการพัฒนากรรมวิธีเป็นแบบหัวฉีดทางเดียว ซึ่งมีข้อดีมากกว่าวิธีหัวฉีดหลายทางดังแสดงในตารางที่ 2.17 ดังนั้นจึงนิยมใช้กันมากในปัจจุบัน [19]



รูปที่ 2.12 การผลิตฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นด้วยกระบวนการหัวฉีดทางเดียว



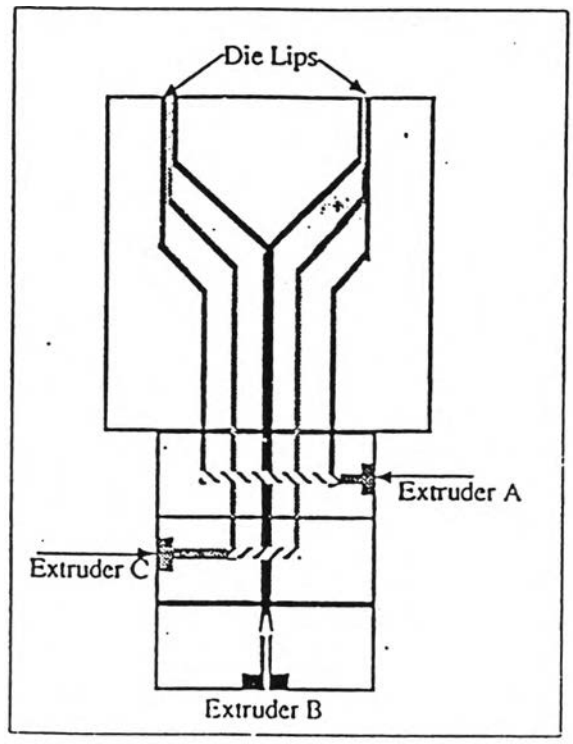
รูปที่ 2.13 การผลิตฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นด้วยกระบวนการหัวฉีดหลายทาง

2.4.2.2.2 การอัดรีดร่วมแบบเป่า (coextrusion of blown film) [19]

เป็นวิธีการที่นำมาใช้แทนการลามิเนชันฟิล์มเนื่องจากมีต้นทุนต่ำ ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งสามารถผลิตฟิล์มที่มีความบางและความหนาสม่ำเสมอมากกว่าวิธีลามิเนชัน และเกิดการดีลามิเนชันน้อยเมื่อเทียบกับวิธีลามิเนชัน

ตารางที่ 2.17 การเปรียบเทียบการอัดรีดร่วมในระบบหัวฉีดหลายทาง และหัวฉีดทางเดียว [19]

คุณสมบัติ	หัวฉีดหลายทาง	หัวฉีดทางเดียว
1. ความสามารถในการประยุกต์หัวฉีด	ไม่ดี	ดี
2. ความสามารถในการผลิตซึ่งมีจำนวนชั้นได้มากกว่า 3 ชั้น	ไม่ดี	ดีมาก
3. ความสามารถในการเพิ่มจำนวนชั้น	ไม่ดี	ดีมาก
4. ความสามารถในการเปลี่ยนความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชั้น	ไม่ดี	ดี
5. ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งลำดับชั้น	พอใช้	ดีมาก
6. ความสามารถในการผลิตฟิล์มแผ่นบาง	ดี	ดี
7. การทำให้ความหนาชั้นกาวบางมาก (25 ไมครอน)	พอใช้	ดีมาก
8. ความสามารถในการอัดรีดร่วมพอลิเมอร์ที่มีความแตกต่างความหนืดมาก (มีความแตกต่างมากกว่า 3 เท่า)	ดี	ดี
9. ความง่ายต่อการปรับหัวฉีด	พอใช้	ดีมาก



รูปที่ 2.14 กระบวนการอัดรีดร่วมแบบฟิล์มเป่า [19]

เมื่อเปรียบเทียบกรรมวิธีการผลิตฟิล์มทั้ง 2 วิธี พบว่า วิธีการอัดรีดร่วมสามารถผลิตฟิล์มที่มีความบางได้ดี มีโอกาสเกิดการดีลามิเนชันได้น้อย และมีต้นทุนด้านวัตถุดิบต่ำเมื่อเทียบกับการลามิเนชัน ดังนั้นวิธีการอัดรีดร่วมจึงมีความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์มากกว่าการลามิเนชันจึงเป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน [29]

2.5 รูปแบบบรรจุภัณฑ์ที่ใช้

พอลิเมอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุผักและผลไม้ส่วนใหญ่ได้แก่ พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน ฯลฯ พอลิเมอร์เหล่านี้เมื่อทำเป็นภาชนะบรรจุสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ ภาชนะแบบอ่อน และภาชนะแบบคงรูป [11]

2.5.1 ภาชนะแบบพลาสติกแบบอ่อน ได้แก่ ถุงและฟิล์ม มีคุณลักษณะแตกต่างกันดังนี้

2.5.1.1 ถุง ถุงพลาสติกส่วนใหญ่ทำจากพอลิเอทิลีน เช่น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) และพอลิโพรพิลีน (PP) ถุงเหล่านี้ยอมให้อากาศและน้ำผ่านได้น้อยมาก การใช้บรรจุผักและผลไม้จึงต้องเจาะรูให้อากาศถ่ายเทได้ มิฉะนั้นจะเกิดการควบแน่นเป็นหยดน้ำในถุง และเกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน ผักและผลไม้เน่าเสียง่าย

การใช้ถุงเหมาะสำหรับขนส่งเป็นระยะสั้น ๆ เพราะไม่สามารถป้องกันการกระทบเทือนต่อผักและผลไม้ได้ การเรียงซ้อนไม่ดี แต่ราคาถูก จึงใช้กับการขายปลีก และใช้กับผักเป็นส่วนใหญ่เพราะผักทนต่อการกระทบกระเทือนได้ดีกว่า ต้องการความชื้นสูงกว่า [11]

2.5.1.2 ฟิล์ม ฟิล์มพลาสติกที่ใช้ในการบรรจุผักและผลไม้สำหรับการขายปลีก ได้แก่ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และพอลิไวนิลิดีนคลอไรด์ (PVDC) แต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกัน การเลือกใช้ควรคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้คือ การหดตัว การยืดตัว การปิดผนึก การยอมให้อากาศและน้ำผ่าน ความเป็นเงามัน และความง่ายในการพิมพ์ นอกจากนั้นในฟิล์มชนิดเดียวกันอาจดัดแปลงให้มีคุณสมบัติแตกต่างกันได้ตามความหนาของฟิล์ม และตามกระบวนการผลิตฟิล์ม นอกจากนั้นในปัจจุบันยังมีการผลิตฟิล์มหลายชั้น (multilayer) ทั้งที่ทำจากพลาสติกชนิดเดียวกันและต่างชนิดกันเพื่อความเหมาะสมของการใช้งานต่าง ๆ กัน [11]

สำหรับผักและผลไม้ การใช้ฟิล์มพอลิเมอร์มี 2 รูปแบบ คือฟิล์มยืดและฟิล์มหด ฟิล์มยืดเป็นฟิล์มที่ใช้กันมากที่สุด ฟิล์มชนิดนี้ยืดหยุ่นได้และเกาะติดได้ดี จึงเรียกว่า cling film เป็นฟิล์มที่ทำจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตรง (LLDPE) เอทิลีนไวนิลอะซิเตท (EVA) ฯลฯ ใช้ในการวางขายปลีกเป็นส่วนใหญ่ ส่วนฟิล์มหดนั้นเป็นฟิล์มที่ใช้ความร้อนทำให้ฟิล์มหดตัวแนบกับผักและผลไม้ ปัจจุบันไม่นิยมใช้เนื่องจากต้นทุนสูง

2.5.2 ภาชนะพลาสติกแบบคงรูป

ส่วนใหญ่ใช้เป็นภาชนะหมุนเวียนที่รับน้ำหนักมาก ๆ เช่น ลัง หรือลังขนาดใหญ่ (bin) มักทำจากพอลิเอทิลีน และมีสีสรรต่างกันไป นอกจากนี้ยังมีพวกที่มีลักษณะเป็นโฟม ทำจากพอลิสไตรีน ซึ่งมีลักษณะเป็นรูพรุนเหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุกันกระแทก และเป็นภาชนะบรรจุที่สามารถรักษาความเย็นของผลิตผลได้ดี เพราะโฟมมีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ดี ผลิตผลที่ขนส่งในสภาพที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ดีพอ เช่น การขนส่งทางเครื่องบิน มักใช้กล่องโฟมบรรจุผลิตผลพร้อมด้วยน้ำแข็งหรือน้ำแข็งแห้ง หน่อไม้ฝรั่งที่ส่งออกไปยังประเทศญี่ปุ่นใช้กล่องโฟมบรรจุเป็นจำนวนมากที่เดียว [11]

ภาชนะพลาสติกแบบคงรูปชนิดที่บางและมีความใสมากในปัจจุบันมีใช้กันมากขึ้นโดยเฉพาะสำหรับการขายปลีก ส่วนใหญ่ทำเป็นรูปกล่องขนาดเล็กและมีฝาปิดในตัว โดยมากทำจากพอลิเอสเทอร์ (polyester) หรือพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethyleneterepthalate, PET) ซึ่งยอมให้น้ำและอากาศผ่านได้น้อย จำเป็นต้องเจาะรูให้อากาศถ่ายเทด้วย [11]

2.6 พอลิเมอร์ที่ใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์

ตารางที่ 2.18 แสดงตัวอย่างและคุณสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์บางชนิดที่นิยมนำมาใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์

ตารางที่ 2.18 คุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่นำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ [55]

พอลิเมอร์	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ความสามารถในการขึ้นรูป	ความต้านทานต่อกรด	ความต้านทานต่อด่าง	ความต้านทานต่อตัวทำละลาย	ประโยชน์
เอทิลีนไวนิลอะซิเตท (EVA)	0.926-0.937	E, IM, BM	พอใช้	ดี	ทนต่อแอลกอฮอล์ได้ดี แต่สารละลายอื่นทนได้ไม่ดี	ใช้ทำเป็นขวด ใช้ทำเป็นภาชนะเคลือบสำหรับอาหารแช่แข็ง
ไอโอโนเมอร์	0.940-0.960	E, IM,BM, VF	ไม่ดี	ดีมาก	ดี	บรรจุภัณฑ์แบบอัดรีด บรรจุภัณฑ์แบบสูญญากาศ
พอลิโพรพิลีน โคพอลิเมอร์	0.900-0.910	E, IM,BM, VF	ดีมาก	ดีมาก	ดีที่อุณหภูมิห้อง	ฟิล์มหด สามารถใช้ได้ที่อุณหภูมิต่ำ
พอลิบิวทีน-1	0.915	E, IM, BM	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ถุงปุ๋ย บรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์แบบหลายชั้น
ฮาโลจิเนทเตด (คลอรีน) พอลิเอทิลีน	1.110-1.250	E, IM, BM, VF	ดีมาก	ดีมาก	ทนต่ออะโรมาติกแอลกอฮอล์ไม่ดี แต่ทนต่อสารอื่นได้ดี	ฟิล์มยืดที่สามารถพิมพ์ลายได้ การเป่าขวดขึ้นรูป
พอลิฟีนิลลีนออกไซด์ (PPO)	1.060	E, IM, BM, VF	ดี	ดี	ดี	ภาชนะเป่าขึ้นรูป ภาชนะฉีดขึ้นรูป ฟิล์มยืด
พอลิพาราซิลีน	-	E, IM, BM	ดีมาก	ดีมาก	ดี	การเคลือบฟิล์ม
ไวนิลคลอไรด์โพรพิลีนโคพอลิเมอร์	1.100-1.700	E, IM, BM, VF	ดี	ดี	ดี	การเป่าขวดขึ้นรูป ฟิล์มห่อหุ้ม

E คือ การอัดรีด IM คือ การฉีดขึ้นรูป BM คือ การเป่าขึ้นรูป VF คือ การผลิตแบบสูญญากาศ