บทที่ 4
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การจัดเก็บรักษาผักและผลไม้ภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร คือการปรับองค์ประกอบของก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์เพื่อทำให้ผักและผลไม้มีอัตราการหายใจแบบใช้ออกซิเจนต่ำที่สุดได้ ซึ่งผักและผลไม้แต่ละชนิดมีอัตราการหายใจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับ ตัวแปรภายใน ได้แก่ ชนิดและสายพันธุ์พืช ลักษณะโครงสร้างของเซลล์พืช เป็นต้น และตัวแปรภายนอก ได้แก่ ความเข้มข้นหรือความดันของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ล้อมรอบและอุณหภูมิในการจัดเก็บ เป็นต้น ดังนั้นเพื่อให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้ได้ บรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์ซึ่งนำมาใช้กับการเก็บรักษาผักและผลไม้ภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรเป็นสิ่งสำคัญในการรักษาระดับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์ที่สภาวะคงตัว ซึ่งมีงานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเก็บรักษาผักและผลไม้ในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรดังนี้

4.1 แบบจำลองอัตราการหายใจของผักและผลไม้

มีงานวิจัยมากมายที่ได้พยายามสร้างแบบจำลองแสดงอัตราการหายใจของผักและผลไม้ซึ่งเป็นฟังก์ชันของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แทนการทดลอง โดยลักษณะของแบบจำลองต่าง ๆ ได้มีการนำเสนอในงานวิจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

Peppelenbos และ Leven [6] ได้ใช้ทฤษฎีด้านจลนศาสตร์ทางเอนไซม์ในการอธิบายอัตราการหายใจของแอปเปิ้ล บรอคโคลี่ หน่อไม้ฝรั่ง ซิโคลี่หั่น และ มังบีนสเพราท์ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยได้ทำการศึกษาด้วยแบบจำลองการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทน ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ประเภทคือ แบบจำลองการหายใจชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพททิทีฟ แบบอันคอมเพททีทีฟ แบบนอนคอมเพททิทีฟ และชนิดผสมของแบบคอมเพททิทีฟและแบบอันคอมเพททิทีฟ ซึ่งพบว่า อัตราการหายใจของผักและผลไม้สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการหายใจแบบยับยั้งได้ดีกว่าแบบจำลองการหายใจแบบไม่ยับยั้ง โดยผักและผลไม้แต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมกับแบบจำลองการหายใจไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.1 ทั้งนี้เนื่องจากเซลล์ของผักและผลไม้แต่ละชนิดจะมีความต้านทานต่อการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเซลล์และระหว่างบรรยากาศที่ล้อมรอบภายนอกต่างกัน รวมทั้งลักษณะโครงสร้างของเซลล์ก็มีลักษณะต่างกันด้วย จึงส่งผลให้มีแบบจำลองแสดงอัตราการหายใจเหมาะสมที่ต่างกัน

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรในแบบจำลองการหายใจชนิดต่าง ๆ ของผักและผลไม้แต่ละชนิด [6]

ชนิดของผักและผล	อุณหภูมิ (°C)	O_2 (%)	CO_2 (%)	แบบจำลอง	$V_{m_{O_2}}$	$K_{m_{O_2}}$	$K_{m_{c,CO_2}}$	$K_{m_{u,CO_2}}$	$K_{m_{n,CO_2}}$	R^2
แอปเปิ้ล *(Golden Delicious)*	19.0	0-21	0.5-5	1	23.0	6.4	-	-	-	96.0
				2	23.1	6.1	47.8	-	-	96.1
				3 *	24.9	6.9	-	33.8	-	96.4
				4 *	24.1	6.5	-	-	64.1	96.3
				5	24.9	6.9	-	33.8	-	96.2
แอปเปิ้ล *(Elstar)*	19.6	0-21	0.5-5	1	15.2	4.5	-	-	-	93.1
				2	15.2	4.5	42.9	-	-	93.1
				3 *	16.1	4.8	-	42.7	-	93.4
				4 *	15.7	4.6	-	-	91.0	93.3
				5	16.1	4.8	-	42.7	-	93.1
หน่อไม้ฝรั่ง	18.6	0-20	0-20	1	41.2	2.9	-	-	-	88.1
				2 *	43.0	1.2	5.0	-	-	96.3
				3	50.4	3.2	-	37.20	-	94.8
				4	49.3	2.7	-	-	45.1	95.7
				5 *	44.9	1.5	8.19	135	-	96.5
บรอคโคลี่	18.7	1-21	0-10	1	124	4.9	-	-	-	70.9
				2 *	132	2.5	2.37	-	-	94.2
				3	169	6.0	-	8.03	-	87.7
				4	159	4.7	-	-	11.5	92.0
				5 *	137	2.8	3.00	59.9	-	94.0
มังบีนแตกหน่อ	17.9	0-21	0-5	1	25.0	0.8	-	-	-	85.3
				2 *	24.9	0.1	0.71	-	-	95.2
				3	28.4	0.8	-	13.1	-	93.9
				4 *	28.1	0.6	-	-	14.2	95.0
				5 *	26.1	0.2	1.41	27.5	-	96.5

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรในแบบจำลองการหายใจชนิดต่าง ๆ ของผักและผลไม้แต่ละชนิด (ต่อ) [6]

ชนิดของผักและ	อุณหภูมิ (°C)	O_2 (%)	CO_2 (%)	แบบจำลอง	$V_{m_{O_2}}$	$K_{m_{O_2}}$	$K_{m_{c,CO_2}}$	$K_{m_{u,CO_2}}$	$K_{m_{n,CO_2}}$	R^2
ซิโคลี่หั่น	8.1	0-20	0-20	1	34.1	2.81	-	-	-	49.2
				2	44.8	2.61	3.41	-	-	72.7
				3 *	59.0	5.20	-	8.05	-	85.7
				4	52.1	3.68	-	-	13.5	83.4
				5	59.0	5.20	-	8.04	-	83.9

โดยที่ แบบจำลองที่ 1 คือ แบบจำลองการหายใจชนิดไม่มีการยับยั้ง ; แบบจำลองที่ 2 คือ แบบจำลองการหายใจชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพททิทีฟ ;แบบจำลองที่ 3 คือ แบบจำลองการหายใจชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ ; แบบจำลองที่ 4 คือ แบบจำลองการหายใจชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ ; แบบจำลองที่ 5 คือ แบบจำลองการหายใจชนิดมีการยับยั้งแบบผสมระหว่างคอมเพททิทีฟและอันคอมเพททิทีฟ

$V_{m_{O_2}}$ คือ อัตราการใช้ออกซิเจนสูงสุด ($ml\ kg^{-1}\ hr^{-1}$)

$K_{m_{O_2}}$ คือ ค่าคงที่ของไมเคิลลิสเมนเทน สำหรับอัตราการใช้ออกซิเจน ($\%O_2$)

$K_{m_{c,CO_2}}$ คือ ค่าคงที่ของไมเคิลลิสเมนเทน สำหรับอัตราการใช้ออกซิเจนในแบบจำลองการหายใจชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพททิทีฟ ($\%CO_2$)

$K_{m_{u,CO_2}}$ คือ ค่าคงที่ของไมเคิลลิสเมนเทน สำหรับแบบจำลองการหายใจชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ ($\%CO_2$)

$K_{m_{n,CO_2}}$ คือ ค่าคงที่ของไมเคิลลิสเมนเทน สำหรับแบบจำลองการหายใจชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ ($\%CO_2$)

R^2 คือ สัมประสิทธิ์ความถดถอย

* คือ แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับผักและผลไม้แต่ละชนิด

Song, Kim และ Yam [1] ได้ทำการศึกษาอัตราการหายใจของบลูเบอรี่ (*Vaccinium corymbosum L.*) สายพันธุ์ Coville, Blueray และ Jersay ซึ่งมีน้ำหนัก 1.61, 1.57 และ 1.67 กรัมตามลำดับ โดยวัดอัตราการหายใจในระบบปิดที่อุณหภูมิ 5, 15 และ 25 °C พบว่า สมการอัตราการหายใจของบลูเบอรี่ สอดคล้องกับแบบจำลองการหายใจชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟโดยมีค่าตัวแปรดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจของพืชกับอุณหภูมิเป็นไปตามกฎอาร์เรเนียสโดยมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของอัตราการใช้ออกซิเจนและอัตราการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 35.2 ± 1.2 และ 39.0 ± 1.6 kcal/mole ตามลำดับ แต่ค่า V_m ซึ่งเป็นค่าแสดงอัตราการหายใจสูงสุดไม่เป็นไปตามกฎอาร์เรเนียส ทั้งนี้เป็น

เพราะว่าในปฏิกิริยาการยับยั้งเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับสารต่าง ๆ ในกระบวนการซัคซินิคดีไฮโดรจีเนส (succinic dehydrogenase) ไซโตโซมออกซิเดส (cytochrome oxidase) และ ฟอสฟอฟรัคโตคิเนส (phosphofructokinase) เหล่านี้มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิต่างกันและมีผลต่อสมการกำหนดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ทำให้ค่า V_m ไม่เป็นไปตามกฎอาร์เรเนียส

ตารางที่ 4.2 ค่าตัวแปร V_m, K_m และ K_i ที่อุณหภูมิ 5, 15 และ 25 °C ของบลูเบอรี่สายพันธุ์ต่าง ๆ

สายพันธุ์บลูเบอรี่	อุณหภูมิ (°C)	V_m (mg kg^{-1} hr^{-1})	K_m (%O_2)	K_i (%CO_2)	R^2
	ค่าตัวแปรสำหรับอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน				
Coville	5	16.602	1.488	7.417	0.996
	15	68.006	0.444	2.914	0.991
	25	127.356	5.200	6.684	0.990
Blueray	5	11.802	1.593	11.725	0.998
	15	34.670	0.130	6.783	0.999
	25	76.247	0.100	11.044	0.999
Jersay	5	9.863	2.106	7.606	0.994
	15	35.868	0.678	3.296	0.996
	25	51.285	0.411	9.361	0.996
	ค่าตัวแปรสำหรับอัตราการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์				
Coville	5	12.539	0.429	15.486	0.998
	15	51.046	0.177	4.896	0.995
	25	99.032	0.520	13.502	0.996
Blueray	5	8.956	0.705	19.648	0.999
	15	30.203	-0.104	9.441	0.999
	25	76.049	0.125	19.057	0.997
Jersay	5	7.347	0.797	12.693	0.995
	15	29.942	0.784	4.449	0.998
	25	48.234	0.101	16.701	0.999

V_m คือ อัตราการหายใจสูงสุด K_m คือ ค่าคงที่ไมเคิลลิส-เมนเทน K_i คือ ค่าคงที่การยับยั้ง

ต่อมาได้มีการศึกษาและอธิบายเกี่ยวกับลักษณะของโครงสร้างภายในเซลล์ต่อค่าตัวแปรต่าง ๆ ในแบบจำลองการหายใจชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ ซึ่ง McLaughlin และ O'Beirne [4] ได้ทำการศึกษาอัตราการหายใจของสลัดที่ประกอบด้วยกะหล่ำปลีหั่นละเอียดร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก และแครอทหั่นละเอียดร้อยละ 20 โดยน้ำหนักโดยทำวัดอัตราการหายใจในระบบเปิดที่อุณหภูมิ 5 °C พบว่า สมการแสดงอัตราการหายใจแบบใช้ออกซิเจนมีความสอดคล้องกับแบบจำลองการหายใจชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟโดยมีค่า V_m เท่ากับ 22.72 ml kg^{-1} hr^{-1} , K_m เท่ากับ 1.083 $\%O_2$ และ K_i เท่ากับ 23.16 $\%CO_2$ ในขณะที่กะหล่ำปลีและแครอทมีค่า V_m เท่ากับ 7 และ 10 ml kg^{-1} hr^{-1} ตามลำดับ ค่า V_m K_m และK_i ของผักและผลไม้แต่ละชนิดจะแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า K_m สลัดมีค่าต่ำกว่าผักและผลไม้ทุกชนิดดังในตารางที่ 4.3 เนื่องจากการหายใจของพืชโดยทั่วไปเกิดขึ้นที่ไมโตคอนเดรียซึ่งอัตราการหายใจขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเซลล์ โดยความเข้มข้นของก๊าซทั้งสองขึ้นอยู่กับระยะทางในการแพร่ผ่านก๊าซและความสามารถในการต้านทานการแพร่ผ่านก๊าซที่ผิวและผนังเซลล์ เมื่อเซลล์มีการตัดหรือหั่นอย่างละเอียด จะทำให้ระยะทางในการแพร่ผ่านของก๊าซจากผิวของผักและผลไม้ไปยังบริเวณใจกลางลดลงเมื่อเทียบกับผักและผลไม้ที่ไม่ได้หั่น ความเข้มข้นของก๊าซทั้งสองภายในเซลล์จะมีค่าใกล้เคียงกับสภาพบรรยากาศภายนอกที่ล้อมรอบ ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้อัตราการหายใจพืชต่ำลงความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนที่ล้อมรอบควรมีค่าต่ำเช่นกัน แต่ระดับความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนนี้ไม่สามารถใช้ได้กับผักและผลไม้ชิ้นใหญ่ซึ่งมีระยะทางการแพร่ก๊าซมากกว่าเพราะจะทำให้ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนภายในเซลล์ต่ำเกินไปจนทำให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่า K_m ของสลัดจึงน้อย

นอกจากนี้การหั่นผักและผลไม้ทำให้มีพื้นผิวสัมผัสกับบรรยากาศที่ล้อมรอบมากขึ้น ดังนั้นความต้านทานการแพร่ผ่านของก๊าซจึงลดน้อยลง ส่งผลให้อัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนสูงสุดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนค่า K_i ในสลัดจะมีค่าต่ำทั้งนี้เนื่องจากระดับความสามารถในการทนทานต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของกะหล่ำปลีมีค่ามากกว่าแครอท ดังนั้นเพื่อให้เกิดการหายใจแบบใช้ออกซิเจน ระดับคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับสลัดควรมีค่าต่ำเพื่อป้องกันการเน่าเสียของแครอท

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ในแบบจำลองการหายใจชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟของผักชนิดต่าง ๆ [4]

ชนิดผัก	V_m (ml kg^{-1} hr^{-1})	K_m (%O_2)	K_i (%CO_2)
สลัดผัก	22.72	1.083	23.16
แครอทหั่น[1]	27.70	1.15	3.30
กระเทียมหั่น[1]	35.10	2.30	6.00
แตงกวาหั่น[1]	30.00	4.38	1.27
พริกไทยเขียว[1]	24.40	5.34	3.70
บรอคโคลี่หั่น[2]	219.4	1.40	114.7
แอปเปิ้ล[3]	24.90	6.96	33.8
บีนสพรอตท์[3]	28.40	0.81	13.1
หน่อไม้ฝรั่ง[3]	50.40	3.24	37.20

[1] Lee(1994) [33]

[2] Lee(1991) [7]

[3] Peppelenbos และ Leven(1996) [6]

จากการเสนอแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดต่าง ๆ [7] เพื่อใช้ในการอธิบายอัตราการหายใจแบบใช้ออกซิเจนของผักและผลไม้ที่ใช้ทฤษฎีพื้นฐานทางด้านจลนศาสตร์ทางเอนไซม์ พบว่าแบบจำลองที่ได้จากทฤษฎีจลนศาสตร์ทางเอนไซม์ไม่สามารถที่จะอธิบายอัตราการหายใจของผักและผลไม้ในทางปฏิบัติได้ทั้งหมด เพราะปฏิกิริยาการหายใจของพืชประกอบด้วยปฏิกิริยาการสันดาปหลายขั้นตอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้นที่ใช้ในการหายใจของพืชดังแสดงในงานวิจัยที่ผ่านมา [51] ดังนั้น Makino, Iwasaki และ Hirata [51] ได้นำเสนอแบบจำลองใหม่ที่มีทฤษฎีพื้นฐานจากทฤษฎีการดูดซับของแลงเมียร์ เนื่องจากลักษณะการดูดซับโมเลกุลของออกซิเจนในไซโตโซม ออกซิเดส คอมเพลกซ์ (cytochrome oxidase complex) เป็นแบบ 1 โมเลกุลออกซิเจนต่อ 1 แอคทีฟไซท์ ซึ่งมีสมการแสดงอัตราหายใจดังนี้

$$R_{O_2} = \frac{abp_o}{1 + ap_o} \qquad (4.1)$$

โดยที่ a และ b เป็นค่าคงที่

Markino และคณะ [51] ได้ทำการคำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ของแบบจำลองสำหรับอัตราการหายใจของผักกาดหอมหั่นละเอียด มะเขือเทศ และบรอคโคลี่ ในสภาพบรรยากาศที่ไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ค่าดังตารางที่ 4.4 และสรุปว่าแบบจำลองการหายใจที่เสนอเป็นแบบจำลองที่ใช้แสดงอัตราการหายใจของผักและผลไม้ได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ในแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์สำหรับผักและผลไม้ [51]

ชนิดผัก	อุณหภูมิ (°C)	a	b	R^2
ผักกาดหอมหั่นละเอียด	15	0.395	1.17	0.95
มะเขือเทศ	16	0.350	0.39	0.96
บรอคโคลี่	16	0.548	6.47	0.99

a คือ ตัวแปรแสดงอัตราการใช้ออกซิเจน (kPa^{-1})

b คือ อัตราการใช้ออกซิเจนสูงสุด ($mmol\ kg^{-1}\ hr^{-1}$)

R^2 คือค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย

ต่อมาในปี 1996 Makino และคณะ [16] ได้ศึกษาแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ที่ใช้ในการอธิบายการหายใจของผักและผลไม้ในสภาวะการจัดเก็บที่มีก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบ [16] ซึ่งมีแบบจำลองที่ต่างจากสมการ 4.1 ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสาเหตุให้เกิดการยับยั้งการสันดาปโดยลดการออกซิเดชันของกรดอินทรีย์ต่าง ๆ ในวัฏจักร TCA (tricarboxylic acid cycle) ซึ่งการยับยั้งนี้จะลดการเกิด NADH และ $FADH_2$ ส่งผลให้เกิดการยับยั้งการคายตัวของโมเลกุลออกซิเจนบนแอคทีฟไซด์ อัตราการหายใจของพืชจึงต่ำลง ซึ่งแบบจำลองมีรูปแบบสมการดังนี้

$$R_o = \frac{abp_o}{1 + ap_o + aip_op_c} \qquad (4.2)$$

เมื่อ R_o คือ อัตราการใช้ออกซิเจน

a คือ ค่าคงที่ของอัตราการใช้ออกซิเจน

b คือ อัตราการใช้ออกซิเจนสูงสุด

p_o คือ ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนที่ล้อมรอบผักและผลไม้

p_c คือ ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ล้อมรอบผักและผลไม้

i คือ ค่าคงที่ของอัตราการใช้ออกซิเจน

จะเห็นได้ว่าสมการดังกล่าวนี้มีรูปแบบเหมือนกับแบบจำลองการหายใจไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพทิทีฟ ซึ่งเป็นการแสดงว่าอัตราการหายใจที่ได้จากทฤษฎีการดูดซับของแลงเมียร์สามารถใช้อธิบายแทนความสลับซับซ้อนของปฏิกิริยาเคมีชีวภาพได้ โดย Makino และคณะนี้ได้ทำการตรวจสอบแบบจำลองกับอัตราการหายใจของกะหล่ำปลีหัน มะเขือเทศ และบรอคโคลี่ ซึ่งมีค่าตัวแปรต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 : ค่าตัวแปร a, b และ i สำหรับอัตราการใช้ออกซิเจนในผักชนิดต่าง ๆ

ชนิดผัก	อุณหภูมิ (°C)	CO_2	a (kPa^{-1})	b ($mmol\ kg^{-1}\ hr^{-1}$)	i (kPa^{-1})
กะหล่ำปลีหัน	15	+	4.200	2.57	0.0681
		-	4.200	2.57	-
มะเขือเทศ	16	+	0.350	0.39	0.132
		-	0.350	0.39	-
บรอคโคลี่	16	+	0.548	6.47	0.0569
		-	0.548	6.47	-
บรอคโคลี่ [1]	24	+	0.254	12.40	0.0134
		-	0.254	12.40	-

[1] Lee (1991) [7]

+ สภาวะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

- สภาวะไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ซึ่งตัวแปร a เป็นตัวแปรที่แปรผันตรงกับค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของก๊าซออกซิเจนจากบรรยากาศที่ล้อมรอบเข้าไปภายในเซลล์และไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนตัวแปร b เป็นตัวแปรแสดงอัตราการใช้ออกซิเจนสูงสุด ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของผักและผลไม้ อุณหภูมิในการจัดเก็บ และขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผักและผลไม้ ค่า b เป็นฟังก์ชันกับจำนวนแอคทีฟไซท์ทั้งหมดซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ล้อมรอบผักและผลไม้ที่อุณหภูมิจัดเก็บ และตัวแปร i เป็นตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงตามชนิดของผักและผลไม้เพราะผักและผลไม้แต่ละชนิดมีความสามารถในการแพร่ผ่านก๊าซและความสามารถในการละลายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในผักและผลไม้ต่างกัน รวมทั้งมีลักษณะการสันดาปของผักและผลไม้แต่ละชนิดต่างกัน ดังนั้นผักและผลไม้แต่ละชนิดจึงมีค่าตัวแปร a, b และ i ต่างกัน

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าสำหรับการจัดเก็บบรอคโคลี่ที่อุณหภูมิต่างกัน ค่า a, b และi มีค่าต่างกัน ดังนั้น Markino และคณะจึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้ โดยใช้ทฤษฎีทรานซิชันสเตทของ Eyring ซึ่งตัวแปร b มีการเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิดังสมการนี้

$$\ln\left(\frac{b}{T}\right) = -\frac{\Delta G}{RT} + \ln\left(\frac{N_T k}{Lh}\right) \qquad (4.3)$$

เมื่อ b คือ อัตราการใช้ออกซิเจนสูงสุด

ΔG คือ พลังงานกระตุ้นอิสระของกิปส์

R คือ ค่าคงที่ก๊าซ

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

N_T คือ จำนวนแอคทีฟไซท์ทั้งหมดสำหรับอัตราการใช้ออกซิเจน

k คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann

L คือ ค่าคงที่อะโวกาโดร

h คือ ค่าคงที่ของแพลงค์

ซึ่งข้อมูลแสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ในกะหล่ำปลีหั่น ผักกาดหอมหั่น บลูเบอรี่ และราสเบอรี่ ได้แสดงในตารางที่ 4.6 เพื่อใช้ในการคำนวณหาอัตราการหายใจของผักและผลไม้สูงสุด (b) ที่อุณหภูมิหนึ่งได้ตามสมการ 4.3 แต่สำหรับความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อค่า a และ i นั้นไม่ชัดเจนเหมือน b ซึ่งเป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการแพร่ผ่านก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในเซลล์พืช, ค่าความสามารถในการละลายก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในของเหลวภายในเซลล์ (cell sap) และความสัมพันธ์ของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์บนแอคทีฟไซท์ ดังนั้นจึงมีความยุ่งยากและสลับซับซ้อนในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อค่า a และ i จึงกำหนดให้ใช้ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่ในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง ๆ

ตารางที่ 4.6 ตัวแปร ΔG และ N_T ในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง ๆ ของผักและผลไม้ต่างๆ [6]

ชนิดผักและผลไม้	ช่วงอุณหภูมิ (K)	$\Delta G(m^2\ kg\ hr^{-2}\ mmol^{-1})$	N_T (molecule kg^{-1})
กะหล่ำปลีหั่น	278-303	8.81×10^{8}	7.74×10^{18}
ผักกาดหอมหั่น	278-303	7.28×10^{8}	3.50×10^{17}
บลูเบอรี่	273-298	8.90×10^{8}	2.63×10^{18}
ราสเบอรี่	273-298	6.30×10^{8}	2.60×10^{15}

4.2 การปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ สำหรับการเก็บรักษาผักและผลไม้ในบรรยากาศดัดแปร

ในปี 1994 Gong และ Corey [34] ได้ทำการศึกษาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์สำหรับมะเขือเทศ เพื่อให้การเก็บรักษามะเขือเทศแบบบรรยากาศดัดแปรมีปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน ณ สภาวะคงตัวที่เหมาะสมต่อการยืดอายุการเก็บรักษาได้ พบว่าการเลือกใช้อัตราส่วนของพื้นที่ผิวบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักของผักและผลไม้ที่เหมาะสมในฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดหนึ่ง ๆ นั้น สามารถจะให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่สมดุลแทนการเลือกพอลิเมอร์ชนิดใหม่เพื่อให้ได้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่ต้องการได้ ตามสมการดังนี้

$$\frac{A}{W_P} = \frac{100\sqrt{b^2 - 4a(c-[O_2]_P)}}{Po_2\,(20.8-[O_2]_P)} \quad \frac{10V}{W_R} \qquad (4.4)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ผิวของฟิล์มพอลิเมอร์

W_P คือ น้ำหนักของผักและผลไม้สด

$[O_2]_P$ คือ ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์

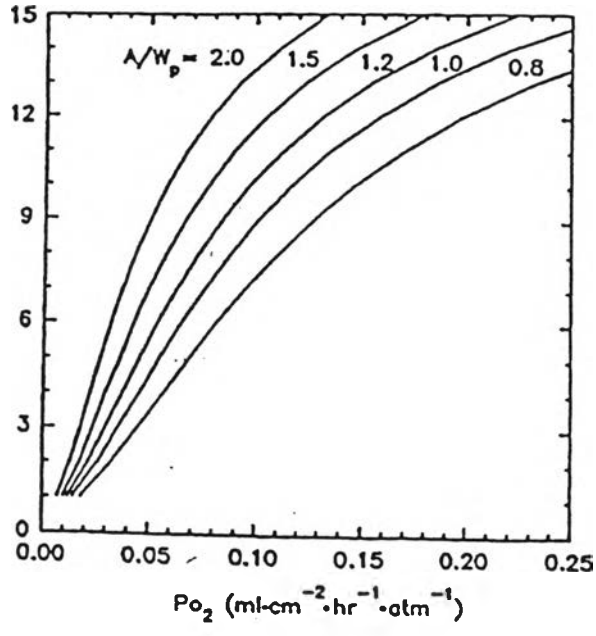
V คือ ปริมาตรอิสระของบรรจุภัณฑ์

W_R คือ น้ำหนักผักและผลไม้ที่ใช้ในการทดสอบวัดอัตราการหายใจ

Po_2 คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของพอลิเมอร์

a , b , c คือ ค่าคงที่

จากสมการดังกล่าวนี้สามารถนำมาใช้ในการเลือกฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และมีอัตราส่วนการบรรจุของพื้นที่ผิวบรรจุภัณฑ์ต่อน้ำหนักมะเขือเทศที่เหมาะสมได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ณ สภาวะคงตัว และค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน กับอัตราส่วนการบรรจุของผลิตผลสด $(A/W_p)(cm^2 \cdot g^{-1})$ ที่อุณหภูมิ 20 °C

โดยทั่วไปในการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการเก็บรักษาผักและผลไม้ภายใต้สภาพบรรยากาศดัดแปรจะกำหนดให้ค่าความดันก๊าซรวมภายในบรรจุภัณฑ์มีค่าเท่ากับ 1 บรรยากาศ เพื่อทำให้การออกแบบบรรจุภัณฑ์โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ง่ายขึ้น ซึ่งอาจจะไม่เป็นจริงเสมอไป ทำให้ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะสมดุลแตกต่างจากความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการออกแบบ

ดังนั้น Talasila และคณะ [17] จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบของค่าความดันก๊าซรวมภายในบรรจุภัณฑ์ที่สภาวะคงตัวซึ่งเป็นไปตามสมการ 4.5

$$p_T = 0.79 \left(\frac{1}{1 - \frac{V_{O_2}}{V} - \frac{V_{CO_2}}{V}} \right) \qquad (4.5)$$

เมื่อ p_T คือ ค่าความดันก๊าซรวมภายในบรรจุภัณฑ์ (atm)

V_{O_2}/V คือ เศษส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจน

V_{CO_2}/V คือ เศษส่วนโดยปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ซึ่งค่าความดันก๊าซรวมภายในบรรจุภัณฑ์สามารถนำไปใช้คำนวณหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต้องการได้ โดยบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ที่เลือกใช้จะต้องมีอัตราส่วนของความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นไปตามสมการ 4.6

$$\frac{P_{CO_2}}{P_{O_2}} = \frac{R_{CO_2}}{R_{O_2}}\left[\frac{p_{O_2,ext} - p_{O_2,pkg}}{p_{CO_2,pkg} - p_{CO_2,ext}}\right] \qquad (4.6)$$

เมื่อ P_{CO_2} คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

P_{O_2} คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

p_{CO_2} คือ ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

p_{O_2} คือ ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจน

R_{CO_2} คือ อัตราการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากกระบวนการหายใจ

R_{O_2} คือ อัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนเนื่องจากกระบวนการหายใจ

ext คือ ภายนอกบรรจุภัณฑ์

pkg คือ ภายในบรรจุภัณฑ์

จากการศึกษาการจัดเก็บผลกีวี่ที่มีน้ำหนัก 360 g ค่าความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ณ สภาวะคงตัวเท่ากับร้อยละ 2 และ 4 โดยปริมาตรตามลำดับ มีค่า RQ (Respiration Quotient) เท่ากับ 1 และอัตราการหายใจของผลกีวีที่อุณหภูมิ 5 °C มีค่าเท่ากับ 3.79×10^{-11} kmol kg^{-1} s^{-1} พบว่าเมื่อคำนวณหาค่าความดันก๊าซรวม ความดันย่อยก๊าซออกซิเจน และความดันย่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์ที่สภาวะคงตัว มีค่าเท่ากับ 0.84, 0.0168 และ 0.0336 atm ตามลำดับ และมีอัตราส่วนของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (P_{CO_2}/P_{O_2}) เท่ากับ 5.75 จากข้อมูลดังกล่าวจึงพิจารณาเลือกฟิล์ม PVC-RMF61 ซึ่งมี P_{CO}/P_O เท่ากับ 5.99 ซึ่งใกล้เคียงกับที่ต้องการมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์โดยมีพื้นที่ผิวสัมผัสของฟิล์มเท่ากับ 0.025 m^2 ความหนา

ฟิล์มเท่ากับ 0.013 mm และปริมาตรอิสระเท่ากับ 6.3856×10^{-4} m^3 นำข้อมูลที่ได้จากการออกแบบนี้ไปคำนวณหาความดันย่อยก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะได้เท่ากับร้อยละ 1.96 และ 3.86 โดยปริมาตรตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับที่ต้องการ แต่ถ้าใช้ความดันความดันก๊าซรวมภายในบรรจุภัณฑ์เท่ากับ 1 บรรยากาศ ในการคำนวณจะสามารถคำนวณค่าความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เท่ากับร้อยละ 1.34 และ 3.24 โดยปริมาตร ตามลำดับซึ่งจะเห็นได้ว่าความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ณ สภาวะคงตัวมีความคลาดเคลื่อนถึงร้อยละ 16 จึงเสนอให้ใช้สมการ 4.5 ในการคำนวณหาค่าความดันรวมของก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์แบบบรรยากาศดัดแปร เพื่อนำมาใช้คำนวณหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะคงตัวได้อย่างถูกต้อง

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนอัตราการหายใจและค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่มีความดันย่อยก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะคงตัวดังสมการ 4.7

$$\Delta p_{O_2,pkg} = (1 - \frac{X}{Y})(0.21 - p_{O_2,pkg}) \qquad (4.7)$$

$$\Delta p_{CO_2,pkg} = (\frac{X}{Y} - 1)p_{CO_2,pkg}$$

เมื่อ $\Delta p_{O_2,pkg}$ คือ ความคลาดเคลื่อนของค่าความดันย่อยก๊าซออกซิเจน

$\Delta p_{CO_2,pkg}$ คือ ความคลาดเคลื่อนของค่าความดันย่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

X คือ อัตราส่วนการหายใจจริงต่อการหายใจสมมติ

Y คือ อัตราส่วนค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซจริงต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซสมมติ

การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนดังกล่าวอาจจะทำให้ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์น้อยเกินไปจนทำให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนขึ้นได้ แต่ส่งผลกระทบน้อยมากต่อค่าความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งนี้เพราะผลต่างของความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในและภายนอกบรรจุภัณฑ์มีค่าน้อยมาก อย่างไรก็ตามผลการออกแบบบรรจุภัณฑ์ดังกล่าวนี้เหมาะสมกับสภาวะการจัดเก็บที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ เท่านั้น หากอุณหภูมิในการจัดเก็บเพิ่มสูงขึ้น การจัดเก็บไว้ในบรรจุภัณฑ์ดังกล่าวอาจจะไม่เหมาะสม ทำให้เกิดการเน่าเสียได้

ในปีค.ศ. 1993 Exama และคณะ [15] ได้ทำการวิจัยหาชนิดของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เหมาะสมในการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้ชนิดต่าง ๆ และค่าคงที่ของอัตราการหายใจ (respiration rate constant) ของผักและผลไม้หลายชนิด โดยสมมติว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ และค่าคงที่ของอัตราการหายใจของผักและผลไม้มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิตามสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius) จากงานวิจัยพบว่าไม่มีฟิล์มชนิดใดที่ให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามต้องการเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาได้ แต่สามารถเลือกใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ที่ให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเหมาะสมกับก๊าซใดก๊าซหนึ่งสำหรับการเก็บรักษาผักและผลไม้ที่มีอัตราการหายใจต่ำหรือปานกลางเท่านั้น จึงได้เสนอแนวทางแก้ไขปัญหาโดยการใช้บรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นหรือบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์แบบเจาะรู รวมทั้งได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเก็บรักษาผักและผลไม้จะทำให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิมีผลทำให้อัตราการหายใจของผักและผลไม้สดสูงขึ้นมากกว่าการเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์มาก ซึ่งอาจจะแก้ไขได้โดยการใช้บรรจุภัณฑ์ที่มีช่องเปิด เพื่อป้องกันการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง และปิดบรรจุภัณฑ์อีกครั้งเมื่ออุณหภูมิลดลง ดังนั้นในการเลือกบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์นอกจากจะพิจารณาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิจัดเก็บหนึ่งแล้ว จะต้องพิจารณาถึงผลกระทบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการจัดเก็บด้วย เพื่อทำให้การเก็บรักษาผักและผลไม้ในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรมีประสิทธิภาพ

ในปี ค.ศ. 1997 Makino และ Hirata [53] ได้ทำการศึกษาการใช้บรรจุภัณฑ์ลามิเนต 2 ชั้นที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ 2 ชนิด คือไคโตซาน-เซลลูโลส (chitosan-cellulose) และพอลิคาโปรแลคโทน (polycaprolactone) มาทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับการจัดเก็บผลิตผลสดในระบบการเก็บรักษาแบบบรรยากาศดัดแปรแทนพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ โดยค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซเป็นไปตามกฎของฟิกส์ และความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซกับอุณหภูมิเป็นไปตามกฎของอาร์เรเนียส เมื่อใช้หลักการของ Taylor expansion จะสามารถสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซกับอุณหภูมิได้ดังนี้

$$P = \frac{-LA_1A_2(E_1L_1A_2 + E_2L_2A_1)}{(L_1A_2 + L_2A_1)^2}\frac{1}{T} + \frac{LA_1A_2}{L_1A_2 + L_2A_1} \qquad (4.8)$$

เมื่อ P คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซ

A_1, A_2 คือ ค่าคงที่ของพอลิเมอร์ชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2 ตามลำดับ

E_1, E_2 คือ พลังงานก่อกัมมันต์ของพอลิเมอร์ชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2 ตามลำดับ

L คือ ค่าความหนารวมของฟิล์มพอลิเมอร์ 2 ชั้น

L_1, L_2 คือ ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2 ตามลำดับ

R คือ ค่าคงที่ก๊าซ

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

จากสมการ 4.8 จะสามารถหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซได้อย่างถูกต้องในช่วงอุณหภูมิ 10 – 25 °C เท่านั้น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนเท่ากับ 0.988 และสหสัมพันธ์สำหรับค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 0.995 หากมีการเพิ่มพจน์อื่น ๆ เข้าไปในสมการอาจจะทำให้สามารถขยายช่วงอุณหภูมิการใช้งานได้

ในปี ค.ศ. 2001 Nawa และคณะ [52] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ที่เหมาะสมกับการจัดเก็บบรอคโคลี่ที่มีอัตราการหายใจสูงซึ่งต้องการพอลิเมอร์ที่มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 10000 ml m^{-2} $24h^{-1}$ atm^{-1} จากการพิจารณาพอลิเมอร์แต่ละชนิดพบว่าไม่มีพอลิเมอร์ชนิดใดที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนตรงตามความต้องการได้ ดังนั้นจึงใช้เทคนิค microperforation ในการผลิตฟิล์ม microperforation ที่ประกอบด้วยชั้นของ OPP (oriented polypropylene) และชั้นของพอลิเอทิลีนโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะเท่ากับ 50-100 ไมครอน มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนสูงประมาณ 1000-100000 ml m^{-2} $24h^{-1}$ atm^{-1} จากการเลือกใช้ฟิล์ม microperforation ที่ประกอบด้วย MP-OPP/PE-2 มีความหนารวมของบรรจุภัณฑ์เท่ากับ 39.7 ไมครอนสามารถยืดอายุการเก็บรักษาบรอคโคลี่ภายใต้สภาพบรรยากาศดัดแปรที่อุณหภูมิ 15 °C ได้ 14 วัน โดยมีความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์ที่สภาวะคงตัวเท่ากับ 5% และ 16.5% ตามลำดับ ในขณะที่การเลือกใช้ฟิล์มพอลิเอทิลีนที่มีความหนา 15.1 ไมครอนจะสามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้เพียง 7 วันโดยมีความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 5% และ 4.5% ตามลำดับ