

## บทที่ 4

### การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

#### 4.1. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทำนายความเข้มข้นของแก๊สต่าง ๆ ที่เวลาใด ๆ ในบรรยากาศแบบบรรยากาศตัดแปรสำหรับฝักและผลไม้สด

จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.2.1 การชี้อายุการเก็บฝักและผลไม้สดทำได้โดยการปรับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศที่ล้อมรอบฝักและผลไม้สดในบรรจุภัณฑ์ให้มีความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนในปริมาณที่ต่ำและให้มีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูง ซึ่งสภาวะดังกล่าวจะเกิดขึ้นภายในบรรจุภัณฑ์ได้ก็ต่อเมื่อสามารถที่จะเลือกชนิดบรรจุภัณฑ์และกำหนดตัวแปรบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับฝักและผลไม้สดที่ถูกบรรจุ

ในการศึกษาการหาสภาวะบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์และการเลือกชนิดของบรรจุภัณฑ์ให้เหมาะสมสำหรับฝักและผลไม้สดแต่ละชนิดนั้น ในช่วงแรกนักวิจัยหลายท่านได้ใช้การทดลอง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการทดลองแบบอาศัยการลองผิดลองถูก จึงทำให้เสียเวลาในการทดลองนานและใช้ต้นทุนในการพัฒนาสูง นอกจากนี้ในบางครั้งผลจากการทดลองให้ค่าตัวแปรของบรรจุภัณฑ์เกินค่าความเป็นจริง [9] ดังนั้นจึงได้มีนักวิจัยหลายท่านพยายามอธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊สในบรรจุภัณฑ์กับเวลาด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ (ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3) และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ช่วยในการเลือก

บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับผักและผลไม้สด เพื่อประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการ  
ทดลอง

ระบบบรรจุภัณฑ์แบบ MAP สำหรับผักและผลไม้สดที่ถูกศึกษาในงานวิจัยนี้  
มีลักษณะดังรูป 2.3 และมีข้อกำหนดดังนี้

1. บรรจุภัณฑ์เป็นบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ที่มีรูปร่างใด ๆ ก็ได้ตามต้องการ เช่น ถุง  
พลาสติกที่ปิดผนึกด้านบนตรงตามยาว หรือถุงพลาสติกที่ปิดผนึกด้านบนด้วยการมัดรวมกัน  
เป็นจุดเดียว เป็นต้น

2. ผักและผลไม้สดถูกบรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ที่ถูกปิดสนิท มีการถ่ายเท  
มวลระหว่างภายในบรรจุภัณฑ์และสิ่งแวดล้อมภายนอกผ่านฟิล์มเนื่องจากการซึมผ่านอย่าง  
เดียว

3. ค่าการซึมผ่านของแก๊สในชั้นพอลิเมอร์มีค่าน้อยกว่าค่าการซึมผ่านของแก๊สใน  
อากาศมาก (ดูค่าจากตาราง 2.7) ดังนั้นจึงสมมุติให้ความเข้มข้นของแก๊สใด ๆ ในบรรจุภัณฑ์  
มีค่าสม่ำเสมอทุก ๆ จุดในบรรจุภัณฑ์

4. การแพร่เป็นไปตามกฎของฟิก เนื่องจากการแพร่ของแก๊สโมเลกุลเล็กผ่าน  
ฟิล์มพอลิเมอร์

5. ค่าการซึมผ่านฟิล์มของแก๊สมีค่าคงที่ตลอดช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการบรรจุ

6. อุณหภูมิระบบคงที่

7. ผักและผลไม้สดสำหรับบรรจุต้องอยู่ในภาวะก่อนขึ้นตอนการสุก

8. ความดันรวมภายในบรรจุภัณฑ์คงที่ที่ 1 atm เท่ากับความดันของบรรยากาศ  
ภายนอก

9. เนื่องจากบรรยากาศภายนอกบรรจุภัณฑ์เป็นอากาศ ดังนั้นความเข้มข้นของแก๊ส  
ภายนอกบรรจุภัณฑ์มีค่าคงที่ตลอดช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

10. ความเข้มข้นของแก๊สภายในมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาขึ้นอยู่กับอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดที่บรรจุ และอัตราการซึมผ่านของแก๊สเข้าออกจากระบบผ่านชั้นพอลิเมอร์

11. ภายในบรรจุภัณฑ์ที่ทำการศึกษาไม่มีผลกระทบของหยดน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยสมมติว่าระบบมีการใส่สารดูดซับไอน้ำหรือใช้บรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ที่ใช้สารป้องกันการเกิดหยดน้ำ (antifogging agent)

#### สภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต

การพัฒนาแบบจำลองสามารถกำหนดสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตได้ดังนี้

#### สภาวะเริ่มต้น

1. สภาวะภายในบรรจุภัณฑ์มีความเข้มข้นของแก๊สเริ่มต้นเหมือนกับความเข้มข้นของแก๊สในอากาศ คือมีความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน ( $C_{O_2}$ ) ร้อยละ 21 โดยปริมาตร และมีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $C_{CO_2}$ ) ร้อยละ 0.03 โดยปริมาตร [31, 32]

2. บรรยากาศภายนอกบรรจุภัณฑ์เป็นอากาศทั่วไป ซึ่งมีความเข้มข้นของแก๊สของแก๊สออกซิเจนร้อยละ 21 โดยปริมาตร และมีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 0.03 โดยปริมาตรเช่นเดียวกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทำนายความเข้มข้นของแก๊สภายในบรรจุภัณฑ์ที่  
เวลาใด ๆ [11, 19, 25, 34]

เมื่อทำการบรรจุผักและผลไม้สดในบรรจุภัณฑ์แล้ว แก๊สออกซิเจนภายในบรรจุ  
ภัณฑ์จะถูกใช้โดยการหายใจของผักและผลไม้ ในขณะที่เดียวกันจะมีการคายแก๊ส  
คาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ซึ่งจะมีผลทำให้ความดันย่อยของแก๊สทั้งสองเปลี่ยนไป ทำให้  
เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างภายในและภายนอกบรรจุภัณฑ์ จึงเกิดการแพร่ผ่าน  
ของแก๊สทั้งสองผ่านบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ โดยแก๊สออกซิเจนจะเกิดการแพร่เข้าสู่ภายใน  
บรรจุภัณฑ์ ในขณะที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการแพร่ออกสู่ภายนอกบรรจุภัณฑ์ ดัง  
นั้นตัวแปรสำคัญในการสร้างแบบจำลองคือ อัตราการหายใจของผักและผลไม้สด และอัตรา  
การซึมผ่านของแก๊สผ่านพอลิเมอร์ฟิล์ม

การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของแก๊สภายในบรรจุภัณฑ์จะหาได้จากการทำสม  
ดุลมวลที่เกิดการถ่ายเทในระบบดังนี้ (กำหนดทิศทางให้แก๊สเข้าในบรรจุภัณฑ์เป็นทิศทาง  
บวก)

#### สมดุลมวลของแก๊สออกซิเจน

$$\text{อัตราการซึมผ่าน} - \text{อัตราการซึมผ่าน} - \text{อัตราการใช้ออกซิเจน} = \text{อัตราการสะสม} \quad (4.1)$$

ของ  $O_2$  เข้าสู่ระบบ ของ  $O_2$  ออกจากระบบ ในระบบเนื่อง ของ  $O_2$  ในระบบ  
จากการหายใจ

#### สมดุลมวลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

$$\text{อัตราการซึมผ่าน} - \text{อัตราการซึมผ่าน} + \text{อัตราการผลิต} = \text{อัตราการสะสม} \quad (4.2)$$

ของ  $CO_2$  เข้าสู่ ของ  $CO_2$  ออก  $CO_2$  ในระบบเนื่อง ของ  $CO_2$  ใน  
ระบบ จากระบบ จากการหายใจ ระบบ

อัตราการซึมผ่านของแก๊สสุทธิที่เข้าออกจากระบบ

(พจน์ที่ 1 และ 2 ของสมการ (4.1) และ (4.2))

หลังจากเริ่มต้นบรรจุ ผักและผลไม้สดยังคงเกิดการหายใจ ทำให้ความเข้มข้นของแก๊สภายในบรรจุภัณฑ์เปลี่ยนแปลงมีค่าไม่เท่ากับความเข้มข้นของแก๊สภายนอกซึ่งเป็นความเข้มข้นของแก๊สในอากาศ ดังนั้นจึงเกิดความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างภายในและภายนอกบรรจุภัณฑ์ขึ้น ทำให้แก๊สเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ โดยแก๊สออกซิเจนเคลื่อนที่ผ่านเข้าภายในบรรจุภัณฑ์ ในขณะที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เคลื่อนที่ผ่านออกจากบรรจุภัณฑ์ การแพร่ของแก๊สผ่านฟิล์มพอลิเมอร์นี้สามารถใช้กฎของฟิค (Fick's Law) อธิบายการแพร่ได้ เนื่องจากแก๊สเป็นสารโมเลกุลเล็กเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ซึ่งเป็นวัสดุชนิดไม่มีรูพรุน [11] และถ้าพิจารณาให้ทิศทางการแพร่ของแก๊สผ่านฟิล์มมีทิศทางเดียว คือ ทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวฟิล์ม สมการการแพร่ของฟิคจะมีสมการดังนี้

$$F = -D \frac{dC}{dX} \quad (4.3)$$

โดย F คือ อัตราการถ่ายเทต่อพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วย (permeant flux)

C คือ ความเข้มข้นของสารที่แพร่ (permeant concentration)

X คือ ระยะทางที่เกิดการแพร่ (space co-ordinate) ในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวฟิล์ม

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient)

เมื่อความเข้มข้นของสารแพร่เปลี่ยนแปลงผ่านฟิล์มอย่างเส้นตรง และสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของสารตลอดฟิล์มมีค่าคงที่ สมการ (4.3) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$F = -D \frac{dC}{dX} = \frac{D(C_1 - C_2)}{L} \quad (4.4)$$

เมื่อ  $L$  คือ ความหนาของฟิล์ม และ  $C_1$  และ  $C_2$  คือความเข้มข้นของสารแพร่ที่พื้นผิวภายนอกที่มีความเข้มข้นสูงกว่าและพื้นผิวภายในที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ตามลำดับ

สำหรับระบบแก๊สที่แพร่ผ่านฟิล์มที่ความดันของแก๊สต่ำ ๆ นั้น ความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอและความเข้มข้นที่ผิวของฟิล์มจะเป็นเส้นตรงตามกฎของเฮนรี (Henry's law) [11]

$$C = Sp \quad (4.5)$$

โดย  $S$  คือ ความสามารถในการละลาย (solubility)

$p$  คือ ความดันย่อย (partial pressure)

เมื่อแทนสมการ (4.5) ในสมการ (4.4) สามารถที่จะเขียน  $F$  ใหม่ได้เป็น

$$F = \frac{DS(p_1 - p_2)}{L} \quad (4.6)$$

และจาก  $P = DS$  ดังนั้น

$$F = \frac{P(p_1 - p_2)}{L} \quad (4.7)$$

โดย  $P$  คือ ค่าการซึมผ่านของสารแพร่ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ (permeability coefficient)

(cc of gas.mil.hr<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>.atm<sup>-1</sup>)

ดังนั้น อัตราการซึมผ่านของแก๊สที่เข้าออกสุทธิ ( $Q$ , cc.hr<sup>-1</sup>) คือ

$$Q = \frac{PA(p_1 - p_2)}{L} = FA \quad (4.8)$$

โดย  $A$  คือ พื้นที่ผิวที่เกิดการแพร่ (m<sup>2</sup>)

อัตราการใช้หรือผลิตแก๊สในบรรยากาศเนื่องจากการหายใจ [4,7,8]

(พจน์ที่ 3 ของสมการ (4.1) และ (4.2))

อัตราการใช้หรือผลิตแก๊สนี้เกิดเนื่องจากการหายใจของผักและผลไม้สด ผักและผลไม้สดจะใช้แก๊สออกซิเจนในการหายใจและคายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ทำให้ความเข้มข้นของแก๊สในระบบเปลี่ยนแปลงไป จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1.1.2 กระบวนการหายใจของผักและผลไม้สดค่อนข้างจะซับซ้อน และมีปัจจัยหลายปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการหายใจ ซึ่งถ้าหากปัจจัยที่เกี่ยวข้องมารวมอยู่ในแบบจำลองการหายใจก็จะทำให้ได้สมการแบบจำลองการหายใจที่ยุ่งยากมากจนอาจจะมีคุณค่าจำกัดในการนำไปใช้งานต่อไป [25] จากเหตุผลที่กล่าวมานี้จึงได้มีนักวิจัยหลายท่าน [6, 19, 25, 30] เสนอสมการแบบจำลองอัตราการหายใจอย่างง่ายขึ้นมา โดยเสนอว่าอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดขึ้นกับเพียงความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในบรรยากาศที่ล้อมรอบผักและผลไม้สดนั้น ๆ ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของแก๊สเนื่องจากการหายใจสามารถเขียนได้ดังนี้

$$G = WR(p_o, p_c) \quad (4.9)$$

โดย  $G$  คือ อัตราการใช้หรือการผลิตแก๊สเนื่องจากการหายใจ ( $cc.hr^{-1}$ )

$R(p_o, p_c)$  คือ อัตราการหายใจ (อัตราการใช้หรือการผลิตเนื่องจากการหายใจ)

ต่อน้ำหนัก ( $cc.kg^{-1}.hr^{-1}$ ) ที่เป็นฟังก์ชันของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

$W$  คือ น้ำหนักของผักและผลไม้สดที่บรรจุ (kg)

ฟังก์ชันอัตราการหายใจ ( $R$ ) ในสมการ (4.9) นี้จะได้จากการหาค่าอัตราการหายใจจากผลการทดลองกับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแก๊สทั้งสองและอัตราการหายใจในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์นี้ยังไม่ทราบแน่ชัดว่ามีความสัมพันธ์ที่แน่นอนในรูปแบบใด ดังนั้นในงานวิจัยโดยทั่วไปรวมทั้งในงานวิจัยนี้ จึงเสนอสมการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ

แก๊สทั้งสองและอัตราการหายใจด้วยแบบจำลองรูปแบบต่าง ๆ ตามที่ได้เสนอไว้ในหัวข้อ 4.2  
ต่อไป

อัตราการสะสมของแก๊สในระบบ

(พจน์ที่ 4 ของสมการ (4.1) และ (4.2))

$$\text{ปริมาณของแก๊สที่สะสมในระบบต่อเวลา (cc.hr}^{-1}\text{)} = \frac{dv}{dt} \quad (4.10)$$

เมื่อ  $v$  คือ ปริมาณของแก๊สแต่ละชนิด (cc)

$t$  คือ เวลา (hr)

เมื่อแทนทุกพจน์จากสมการ (4.8) (4.9) และ (4.10) ลงในสมการ (4.1) และ (4.2) โดยใช้สัญลักษณ์ตัวห้อย (subscript) ดังนี้

O หมายถึง แก๊สออกซิเจน

C หมายถึง แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

1 หมายถึง ตำแหน่งภายนอกบรรจุภัณฑ์

และ 2 หมายถึง ตำแหน่งภายในบรรจุภัณฑ์

จะได้สมการอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแก๊สออกซิเจน (cc.hr<sup>-1</sup>) ในบรรจุภัณฑ์ และสมการอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (cc.hr<sup>-1</sup>) ในบรรจุภัณฑ์ ดังสมการ (4.11) และ (4.12) ตามลำดับ โดยสมมติว่า แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไม่รบกวนการแพร่ของแก๊สออกซิเจน และในทางกลับกัน แก๊สออกซิเจนไม่รบกวนการแพร่ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [2]

$$\frac{dv_{O_2}}{dt} = \frac{P_{OA}(p_{O_1} - p_{O_2})}{L} - WR_O(p_{O_2}, p_{C_2}) \quad (4.11)$$

$$\frac{dv_{C_2}}{dt} = \frac{P_{CA}(p_{C_1} - p_{C_2})}{L} + WR_C(p_{O_2}, p_{C_2}) \quad (4.12)$$



เมื่อนำปริมาตรอิสระในบรรจุก๊าซ (V (cc)) หาคลออกจะได้

$$\frac{dv_{O_2}/V}{dt} = \frac{P_{OA}(p_{O_1} - p_{O_2})}{VL} - \frac{WR_O(p_{O_2}, p_{C_2})}{V} \quad (4.13)$$

และ

$$\frac{dv_{C_2}/V}{dt} = \frac{P_{CA}(p_{C_1} - p_{C_2})}{VL} + \frac{WR_C(p_{O_2}, p_{C_2})}{V} \quad (4.14)$$

เนื่องด้วยแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ศึกษามีค่าความเข้มข้นต่ำ และระบบมีความดันต่ำเพียงบรรยากาศปกติจึงเหมาะสมที่จะสมมุติให้แก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบประพฤติตัวแบบแก๊สอุดมคติ สำหรับแก๊สอุดมคติที่อุณหภูมิและความดันรวมคงที่ จะได้ว่า

$$p_A = y_A \cdot P$$

และ  $v_A = y_A \cdot V$

โดย  $p_A$  คือ ความดันย่อยของแก๊ส A ในแก๊สผสม (atm)

$P$  คือ ความดันรวม (atm) เท่ากับ 1 atm

$v_A$  คือ ปริมาตรของแก๊ส A ในแก๊สผสม (cc.)

$V$  คือ ปริมาตรรวมของแก๊สทั้งหมด (cc)

$y_A$  คือ เศษส่วนโมล (ไม่มีหน่วย)

ซึ่งเมื่อแทนลงในสมการ (4.13) และ (4.14) แล้วจะได้

$$\frac{dy_{O_2}}{dt} = \frac{P_{OA}(y_{O_1} - y_{O_2})}{VL} - \frac{WR_O(y_{O_2}, y_{C_2})}{V} \quad (4.15)$$

และ

$$\frac{dy_{C_2}}{dt} = \frac{P_{CA}(y_{C_1} - y_{C_2})}{VL} + \frac{WR_C(y_{O_2}, y_{C_2})}{V} \quad (4.16)$$

และจากสถานะเริ่มต้น

$$\text{ที่ } t=0 \quad y_{O_1} = 0.21 \quad \text{และ} \quad y_{C_1} = 0.0003$$

เมื่อแทนสถานะเริ่มต้นในสมการ (4.15) และ (4.16) แล้วเปลี่ยนสัญลักษณ์ตัวห้อยเหลือเพียง O และ C ซึ่งหมายถึงความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศตามลำดับเพื่อความสะดวก สมการ (4.15) และ (4.16) จะกลายเป็น

$$\frac{dy_O}{dt} = \frac{P_{OA}(0.21 - y_O)}{VL} - \frac{WR_O(y_O, y_C)}{V} \quad (4.17)$$

และ

$$\frac{dy_C}{dt} = \frac{P_{CA}(0.0003 - y_C)}{VL} + \frac{WR_C(y_O, y_C)}{V} \quad (4.18)$$

จากสมการ (4.17) และ (4.18) จะสามารถหาความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ ได้ตั้งแต่เริ่มบรรจุจนกระทั่งเข้าสู่สมดุล โดยการแก้สมการทั้งสองพร้อม ๆ กัน (simultaneous solution) เนื่องจากสมการ (4.17) และ (4.18) นี้มีตัวแปรที่ใช้ร่วมกันคือความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $y_O, y_C$ ) ซึ่งสามารถแก้สมการทั้งสองนี้ได้โดยวิธีแก้สมการเชิงตัวเลข (numerical solution) และในงานวิจัยนี้จึงทำการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขโดยเลือกใช้วิธีรังกัดตาอันดับสี่ (Fourth Order Runge-Kutta Numerical Solution) เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากสามารถใช้ในการแก้สมการอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้นได้เป็นอย่างดี ให้ความแม่นยำในการคำนวณสูง และเป็นวิธีที่มีเสถียรภาพสูง

นอกจากนี้เมื่อ  $\frac{dy_O}{dt} = 0$  และ  $\frac{dy_C}{dt} = 0$  หมายความว่า ปริมาณแก๊สออกซิเจนและปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อระบบเข้าสู่สมดุล ดังนั้นสมการ (4.17) และ (4.18) จะเปลี่ยนเป็น

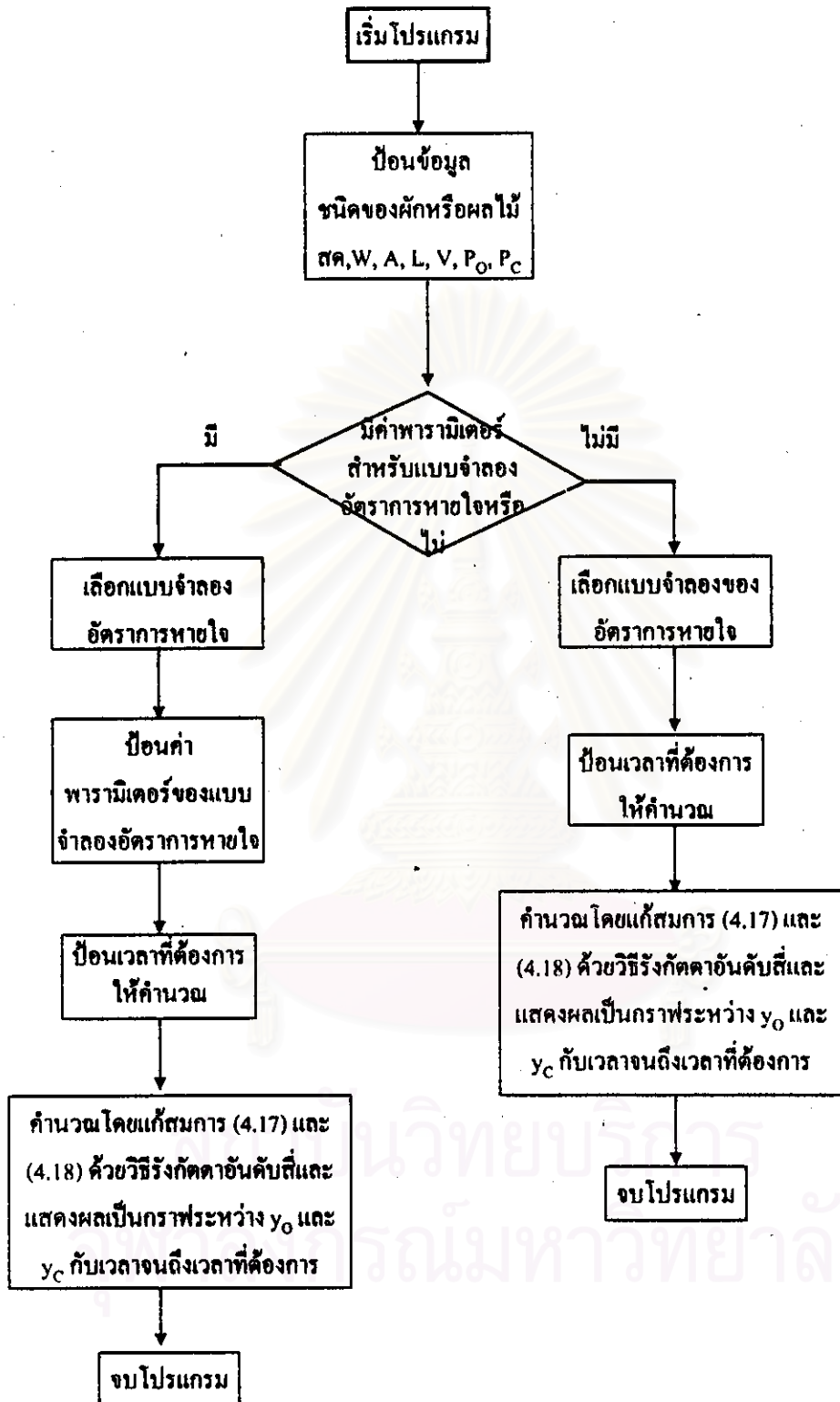
$$\frac{P_{OA}(0.21 - y_O)}{L} = WR_O(y_O, y_C) \quad (4.19)$$

$$-\frac{P_{CA}(0.0003 - y_C)}{L} = WR_C(y_O, y_C) \quad (4.20)$$

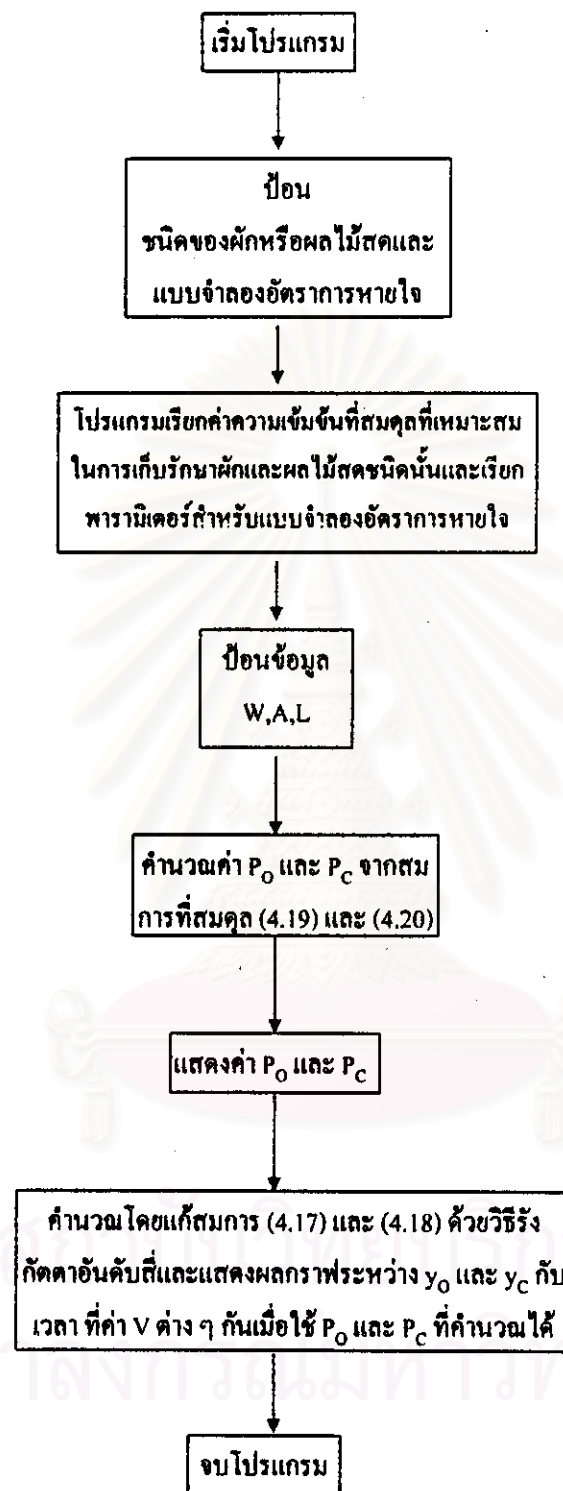
จากสมการ (4.19) และ (4.20) ถ้าทราบความเข้มข้นของแก๊สในบรรยากาศตัดแปรที่  
ต้องการ ( $y_O, y_C$ ) ก็จะสามารถเลือกพอลิเมอร์และออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมกับผักและ  
ผลไม้สดชนิดนั้น ๆ ได้

งานวิจัยนี้ได้ทำการเขียนโปรแกรมเพื่อคำนวณความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและ  
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์ที่เวลาต่าง ๆ ตามสมการ (4.17) และ (4.18) และ  
โปรแกรมเพื่อคำนวณหาค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ของแก๊สออกซิเจนและแก๊ส  
คาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อนำไปใช้ในการเลือกชนิดบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับผักและผล  
ไม้สดที่ต้องการบรรจุ โดยใช้สมการ (4.19) และ (4.20) โดยโปรแกรมที่เขียนขึ้นถูกพัฒนาอยู่  
บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เมทแลบ (Matlab) รุ่น 4.2c ของบริษัท The MathWorks ซึ่งมีชั้น  
ตอนของโปรแกรมดังรูป 4.1 และ 4.2 ดังนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 4.1. แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณหาความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์ที่เวลาต่าง ๆ



รูป 4.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนโปรแกรมการคำนวณหาค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับผักและผลไม้สดที่ต้องการบรรจุ

## 4.2. แบบจำลองอัตราการหายใจและการทดสอบความเหมาะสม

### 4.2.1 แบบจำลองอัตราการหายใจ

เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจกับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ยังไม่ทราบแน่ชัดว่ามีความสัมพันธ์ที่แน่นอนในรูปแบบใด ดังนั้นจึงได้มีนักวิจัยหลายท่านเสนอรูปแบบสมการอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแบบต่าง ๆ ขึ้นมา [19, 23, 24, 25, 26, 30] และทำการฟิตข้อมูลอัตราการหายใจจากผลการทดลอง เพื่อหาฟังก์ชันอัตราการหายใจสำหรับนำมาใช้ในการคำนวณแบบจำลองคณิตศาสตร์ของ MAP (สมการที่ (4.17) ถึง (4.20))

สำหรับงานวิจัยนี้ได้้นำแบบจำลองอัตราการหายใจจากงานวิจัยที่ผ่านมาพร้อมกับแบบที่เสนอขึ้นใหม่มาทดสอบหาความเหมาะสมในการนำไปใช้ โดยการฟิตสมการเหล่านี้กับอัตราการหายใจที่ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่าง ๆ ที่ได้จากผลการทดลองของงานวิจัยที่ผ่านมา แบบจำลองอัตราการหายใจที่ถูกวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้มี 7 แบบดังนี้

#### 1. แบบเส้นตรง (linear form) [19]

$$R = a_1 + a_2 * [O_2] + a_3 * [CO_2] \quad (4.21)$$

#### 2. แบบพหุนาม (polynomial form) [26]

$$R = a_1 + a_2 * [O_2] + a_3 * [CO_2] + a_4 * ([O_2])^2 + a_5 * ([CO_2])^2 \quad (4.22)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3. แบบเอกโปเนนเชียล (exponential form)

$$R = a_1 * \exp(a_4 * [O_2]) + a_2 * \exp(a_5 * [CO_2]) + a_3 \quad (4.23)$$

แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่ถูกเสนอขึ้นมาใหม่ในงานวิจัยนี้ โดยมีแนวคิดจากงานวิจัยที่ผ่านมา [24] ซึ่งได้เสนอว่าอัตราการใช้ออกซิเจนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนแบบเอกโปเนนเชียล แต่จากแนวคิดที่ว่าอัตราการหายใจนั้นขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอแบบจำลองในรูปสมการเอกโปเนนเชียลที่อัตราการหายใจขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

### 4. แบบไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพทิทีฟ [25]

(Michaelis-Menten: uncompetitive inhibition)

$$R = \frac{v_m * [O_2]}{k_m + [O_2] * \left(1 + \frac{[CO_2]}{k_i}\right)} \quad (4.24)$$

แบบจำลองชนิดนี้เคยถูกเสนอโดย Lee และคณะ [25] โดยมีแนวคิดที่ว่า การหายใจของผักและผลไม้สดนั้นมีปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเกือบทุกปฏิกิริยา [1] เช่น เอนไซม์เฮกโซไคเนส (hexokinase) ในปฏิกิริยาไกลโคไลซิส (glycolysis) เอนไซม์ฟูมาเรส (fumarase) ในปฏิกิริยาในวัฏจักรไตรคาร์บอกซิลิกหรือวัฏจักรเครปส์ (tricarboxylic acid cycle or Krebs cycle) และเอนไซม์ไซโตโครมรีดักเตส (cytochrome reductase) ในระบบการถ่ายเทอิเล็กตรอน (electron transport system) เป็นต้น ดังนั้น Lee และคณะจึงได้แนวคิดในการนำสมการไมเคิลลิสเมนเทน ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราเร็วในการทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ [35] มาใช้ในการคำนวณอัตราการหายใจของผักและผลไม้สด โดยเสนอสมการไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพทิทีฟ (Michaelis-Menten: uncompetitive inhibition) โดยเทียบว่าซับสเตรทหรือสารที่ต้องการให้เข้าทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ (substrate) คือแก๊สออกซิเจน ตัวยับยั้ง (inhibitor) คือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในแบบอันคอมเพทิทีฟนี้ แก๊สออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ในเนื้อผักและผลไม้สด แต่แก๊ส

คาร์บอนไดออกไซด์จะไม่ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ แต่จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบเชิงซ้อนของเอนไซม์และออกซิเจน

5. แบบไมเคลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพทิทีฟ [30]

(Michaelis-Menten: non-competitive inhibition)

$$R = \frac{v_m * [O_2]}{(k_m + [O_2]) * \left(1 + \frac{[CO_2]}{k_i}\right)} \quad (4.25)$$

แบบจำลองชนิดนี้ได้ถูกเสนอโดย Peppelenbos และคณะ [30] โดยมีแนวคิดเหมือนกับแบบจำลองแบบที่ 4 แต่แบบไมเคลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพทิทีฟนี้มีข้อแตกต่างจากแบบอันคอมเพทิทีฟคือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับทั้งเอนไซม์ และสารประกอบเชิงซ้อนเอนไซม์และออกซิเจน

6. แบบไมเคลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพทิทีฟ [30]

(Michaelis-Menten: competitive inhibition)

$$R = \frac{v_m * [O_2]}{[O_2] + k_m * \left(1 + \frac{[CO_2]}{k_i}\right)} \quad (4.26)$$

แบบจำลองชนิดนี้ได้ถูกเสนอโดย Peppelenbos และคณะ [30] เช่นกัน โดยมีแนวคิดเหมือนกับแบบจำลองแบบที่ 4 แต่แบบไมเคลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพทิทีฟนี้ แก๊สออกซิเจนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะแข่งขันกันในการทำปฏิกิริยากับเอนไซม์โดยตรง



## 7. แบบแลงเมียร์ (Langmuir form) [2]

$$R = \frac{k_1 k_2 [O_2]}{1 + k_1 [O_2] + k_3 [CO_2]} \quad (4.27)$$

แบบจำลองแบบแลงเมียร์นี้ยังไม่เคยถูกใช้ในการจำลองอัตราการหายใจในงานวิจัยที่ผ่านมา แต่ผู้วิจัยสังเกตเห็นในเชิงคณิตศาสตร์ว่า สมการแบบแลงเมียร์ให้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระในลักษณะที่คล้ายคลึงกับความสัมพันธ์ของอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดกับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ผู้วิจัยจึงได้นำแบบจำลองแบบนี้มาใช้เป็นแบบจำลองอัตราการหายใจของผักและผลไม้สด

โดยในสมการการหายใจทั้ง 7 แบบข้างต้นได้กำหนดให้

$R$  คือ อัตราการหายใจ (อัตราการใช้แก๊สออกซิเจนหรืออัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์) ( $cc.kg^{-1}.hr^{-1}$ )

$[O_2], [CO_2]$  คือ ความเข้มข้นโดยปริมาตรของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ)

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, v_m, k_m, k_1, k_2, k_3$  คือ พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แบบจำลองอัตราการหายใจที่ถูกศึกษาในงานวิจัยนี้ทั้ง 7 แบบสามารถสรุปได้ดัง

ตาราง 4.1

ตาราง 4.1 สรุปแบบจำลองอัตราการหายใจและพารามิเตอร์ที่ถูกศึกษาในงานวิจัยนี้

แบบจำลอง	ชื่อแบบจำลอง	พารามิเตอร์	รูปสมการ
1	เส้นตรง	$a_1, a_2, a_3$	สมการ (4.21)
2	โพลีโนเมียล	$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$	สมการ (4.22)
3	เอกโปเนนเชียล	$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$	สมการ (4.23)
4	แบบไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการ ยับยั้งแบบอันคอมเพทิทีฟ	$v_m, k_m, k_i$	สมการ (4.24)
5	แบบไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการ ยับยั้งแบบนอนคอมเพทิทีฟ	$v_m, k_m, k_i$	สมการ (4.25)
6	แบบไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการ ยับยั้งแบบคอมเพทิทีฟ	$v_m, k_m, k_i$	สมการ (4.26)
7	แบบแลงเมียร์	$k_1, k_2, k_3$	สมการ (4.27)

#### 4.2.2 การทดสอบความเหมาะสม

แบบจำลองอัตราการหายใจทั้ง 7 แบบข้างต้นได้ถูกนำมาทดสอบความเหมาะสม โดยใช้ข้อมูลอัตราการหายใจจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาดังตาราง 4.2 (แสดงข้อมูลดังตาราง ค.1 ถึง ค.6 ในภาคผนวก ค) และเปรียบเทียบผลการคำนวณของแบบจำลองคณิตศาสตร์ของ MAP กับข้อมูลความเข้มข้นของแก๊สที่เวลาใด ๆ ในระบบบรรจุภัณฑ์แบบ MAP จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาดังตาราง ค.7 ถึง ค.12 ในภาคผนวก ค ด้วยวิธีการดังนี้

4.2.2.1. พิจารณาแบบจำลองอัตราการหายใจทั้ง 7 แบบ กับข้อมูลอัตราการหายใจจากผลงานวิจัยที่ผ่านมา 6 งานวิจัยดังตาราง 4.2 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแต่ละแบบจำลอง

ตาราง 4.2 แหล่งข้อมูลอัตราดอกเบี้ยที่นำมาศึกษา

ข้อมูล	ผักและผลไม้สด	งานวิจัย
1	แอปเปิ้ลพันธุ์แมคอินทอช	Jurin และ Karel (1963) [17]
2	ดอกบรอกเคอลี่หั่น	Lee และคณะ (1991) [25]
3	มะเขือเทศแบบฟิลด์	Hayakawa และคณะ (1975) [19]
4	มะเขือเทศพันธุ์ซันนี่	Yang และ Chinnan (1988) [22]
5	บรอกเคอลี่พันธุ์มารารอน	Christie และคณะ (1995) [29]
6	พืชแบบ Crest Haven	Deily และ Rizvi (1981) [20]

ในการทดสอบการถดถอยกับข้อมูลอัตราดอกเบี้ยจากผลการทดลองนี้ใช้โปรแกรม Sigma Plot รุ่น 1.02 ของ บริษัท Jendel Corporation ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการคำนวณและการสร้างกราฟคล้ายกับโปรแกรม Excel โดยโปรแกรม Sigma Plot นี้ใช้อัลกอริทึม (algorithm) ของ Marquardt-Levenberg ในการทดสอบการถดถอยเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวแปรอิสระ ซึ่งวิธี Marquardt-Levenberg นี้จะทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่ให้ผลรวมของความแตกต่างระหว่างค่าที่นำมาพิตกับค่าที่คำนวณได้ของตัวแปรตาม ยกกำลังสองมีค่าต่ำสุด (least square method) เนื่องจากการใช้อัลกอริทึมของ Marquardt-Levenberg โปรแกรม Sigma Plot นี้จึงสามารถทำการทดสอบการได้ทั้งในรูปแบบการเชิงเส้นและรูปแบบการไม่เชิงเส้น

4.2.2.2. ค่าความค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination,  $R^2$ ) [21] ซึ่งมีสมการดังนี้

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum Y_i^2 - \frac{(\sum Y_i)^2}{n}} \quad (4.28)$$

- โดย  $Y_i$  คือ ค่าข้อมูลที่  $i$  ที่นำมาพิด  
 $\hat{Y}_i$  คือ ค่าของตัวแปรตามที่  $i$  ที่ได้จากการพิดสมการ  
 $n$  คือ จำนวนข้อมูลที่นำมาพิด

ค่า  $R^2$  นี้เป็นเครื่องวัดความใกล้ชิดระหว่างเส้นการถดถอยกับค่าที่นำมาพิด ถ้า  $R^2$  มีค่าสูงแสดงว่าค่าที่นำมาพิดจะอยู่ใกล้ชิดกับเส้นการถดถอย ถ้า  $R^2$  มีค่าต่ำแสดงว่าค่าที่นำมาพิดจะอยู่ห่างจากเส้นถดถอย ถ้า  $R^2$  เท่ากับ 1 แสดงว่าค่าที่นำมาพิดทุกค่าอยู่บนเส้นการถดถอย และถ้า  $R^2$  มีค่าเท่ากับศูนย์ แสดงว่าค่าที่นำมาพิดจะกระจายห่างจากเส้นการถดถอยมากจนหาแนวโน้มที่ถูกต้องไม่ได้

4.2.2.3. เปรียบเทียบค่า  $R^2$  ของแบบจำลองแต่ละแบบ สำหรับข้อมูลชุดหนึ่ง ๆ เพื่อดูว่าแบบจำลองแบบใดเหมาะสมกับข้อมูลอัตราการหายใจมากที่สุด

4.2.2.4 นำค่าพารามิเตอร์ของแต่ละแบบจำลองอัตราการหายใจที่ได้จากการพิดของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบต่าง ๆ มาแทนลงในสมการอนุพันธ์ที่ (4.17) และ (4.18) และใช้ค่าของตัวแปรต่าง ๆ จากงานวิจัยที่ผ่านมาดังตารางที่ 4.3 เพื่อคำนวณหาความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศที่เวลาต่าง ๆ โดยทำการคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลขแบบรังกัดตาอันดับสี่ที่ถูกเขียนขึ้นด้วยโปรแกรมแมทแล็บ ตามขั้นตอนดังแสดงในรูป 4.1

4.2.2.5 เปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากข้อ 4.2.2.4 กับผลการทดลองของแต่ละงานวิจัยที่ผ่านมา (ข้อมูลผลการทดลองจากงานวิจัยถูกแสดงดังตาราง ค.8 ถึง ค.14 ในภาคผนวก) เพื่อดูความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณหาบรรยากาศตัดแปรที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแต่ละแบบ โดยการเปรียบเทียบค่า  $R^2$

#### 4.3. การศึกษาผลกระทบของตัวแปรบรรจุภัณฑ์ต่อบรรจุภัณฑ์แบบ MAP สำหรับผักและผลไม้สด

ในส่วนนี้จะทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่ปรากฏในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (สมการ (4.17) และ (4.18)) คือ พื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์ (A) ความหนาของฟิล์มที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ (L) น้ำหนักของผักและผลไม้สด (W) ปริมาตรอิสระในบรรจุภัณฑ์ (V) ค่าการซึมผ่านพอลิเมอร์ของแก๊สออกซิเจน ( $P_O$ ) และค่าการซึมผ่านพอลิเมอร์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $P_C$ ) ว่ามีผลอย่างไรต่อการบรรจุแบบ MAP สำหรับผักและผลไม้สด เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อไป โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีแบบจำลองอัตราการหายใจที่เหมาะสมที่สุดซึ่งได้จากการทดสอบมาแล้วในหัวข้อ 4.2 มาใช้ในการคำนวณ

ระบบบรรจุภัณฑ์ที่เลือกเป็นตัวอย่างการศึกษาในส่วนนี้ คือ บรรจุภัณฑ์แบบ MAP สำหรับแอปเปิ้ล (จากข้อมูลที่ 1) ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อระบบบรรจุภัณฑ์แบบ MAP นี้จะดูจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล ( $\%O_{2(cq)}$ ,  $\%CO_{2(cq)}$ ) และเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุล ( $t_{cq}$ )

##### 4.3.1 การศึกษาผลกระทบของพื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์ (A)

เนื่องจากบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการบรรจุผักและผลไม้สดนี้มีหลายรูปแบบ เช่น แบบถุงแบบถาดที่ถูกปิดด้วยฟิล์มพอลิเมอร์ ซึ่งแต่ละแบบจะทำให้มีพื้นที่สำหรับการแลกเปลี่ยนแก๊สที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงทำการศึกษาผลกระทบของ A ที่เปลี่ยนแปลงว่ามีผลกระทบต่อระบบ MAP อย่างไร เพื่อเป็นตัวอย่างให้เห็นแนวโน้มจึงทำการคำนวณโดยเปลี่ยนแปลงค่า A จาก 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09 ถึง 0.1 ตารางเมตร โดยจะศึกษาผลกระทบนี้ด้วยการกำหนดให้ค่าตัวแปรอื่นในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (สมการ (4.17) และ (4.18)) เป็นค่าคงที่ดังปรากฏอยู่ในตาราง 4.3

#### 4.3.2 การศึกษาผลกระทบของความหนาของฟิล์มที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ (L)

ผลกระทบของความหนาของฟิล์มที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ต่อระบบบรรจุภัณฑ์แบบ MAP จะถูกศึกษาที่ความหนา 0.9, 1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 1.9 และ 2.1 มิล (mil) (1 mil เท่ากับ  $10^{-3}$  นิ้ว) ตามลำดับ ซึ่งความหนาเหล่านี้เป็นช่วงค่าความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ที่พบในการใช้งาน โดยทั่วไป โดยจะศึกษาผลกระทบนี้ด้วยการกำหนดให้ค่าตัวแปรอื่นในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (สมการ (4.17) และ (4.18)) เป็นค่าคงที่ดังปรากฏอยู่ในตาราง 4.3

#### 4.3.3 การศึกษาผลกระทบของน้ำหนักของผักและผลไม้สด (W)

ผลกระทบของน้ำหนักของผักและผลไม้สดต่อระบบบรรจุภัณฑ์แบบ MAP จะถูกศึกษาที่น้ำหนัก 0.125, 0.25, 0.375 และ 0.5 กิโลกรัมตามลำดับ (แอปเปิ้ล 1 ลูกหนักประมาณ 0.125 กิโลกรัม) โดยจะศึกษาผลกระทบนี้ด้วยการกำหนดให้ค่าตัวแปรอื่นในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (สมการ (4.17) และ (4.18)) เป็นค่าคงที่ดังปรากฏอยู่ในตาราง 4.3

#### 4.3.4 การศึกษาผลกระทบของค่าการซึมผ่านพอลิเมอร์ของแก๊สออกซิเจน ( $P_0$ )

เนื่องจากพอลิเมอร์ในปัจจุบันมีหลากหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีค่าการซึมผ่านพอลิเมอร์ของแก๊สออกซิเจนที่แตกต่างกัน ในส่วนนี้จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบของค่าการซึมผ่านพอลิเมอร์ของแก๊สออกซิเจนต่อระบบบรรจุภัณฑ์ MAP โดยจะทำการศึกษาที่ค่าการซึมผ่านพอลิเมอร์ของแก๊สออกซิเจนมีค่าเท่ากับ 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1000  $\text{cc.mil.hr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$  ตามลำดับ โดยจะศึกษาผลกระทบนี้ด้วยการกำหนดให้ค่าตัวแปรอื่นในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (สมการ (4.17) และ (4.18)) เป็นค่าคงที่ดังปรากฏอยู่ในตาราง 4.3

#### 4.3.5 การศึกษาผลกระทบของค่าการซึมผ่านพอลิเมอร์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

(P<sub>c</sub>)

เนื่องจากพอลิเมอร์แต่ละชนิดนอกจากจะมีค่าการซึมผ่านพอลิเมอร์ของแก๊สออกซิเจนที่แตกต่างกันแล้ว พอลิเมอร์แต่ละชนิดยังมีค่าการซึมผ่านพอลิเมอร์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างกันด้วย ในส่วนนี้จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบของค่าการซึมผ่านพอลิเมอร์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อระบบบรรจุภัณฑ์ MAP โดยจะทำการศึกษาที่ค่าการซึมผ่านพอลิเมอร์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 700, 1000, 1300, 1600, 1900, 2200, 2500, 3000, 4000 และ 5000 cc.mil.hr<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>.atm<sup>-1</sup> ตามลำดับ โดยจะศึกษาผลกระทบนี้ด้วยการกำหนดให้ค่าตัวแปรอื่นในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (สมการ (4.17) และ (4.18)) เป็นค่าคงที่ดังปรากฏอยู่ในตาราง 4.3

#### 4.3.6. การศึกษาผลกระทบของปริมาตรอิสระภายในบรรจุภัณฑ์ (V)

ผลกระทบของปริมาตรอิสระต่อระบบบรรจุภัณฑ์แบบ MAP จะถูกศึกษาที่ปริมาตร 50, 100, 250, 400, 550, 700, 850, 1000, 1500 และ 2000 มิลลิลิตรตามลำดับ โดยจะศึกษาผลกระทบนี้ด้วยการกำหนดให้ค่าตัวแปรอื่นในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (สมการ (4.17) และ (4.18)) เป็นค่าคงที่ดังปรากฏอยู่ในตาราง 4.3

#### 4.4 ตัวอย่างการเลือกบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับผักและผลไม้สด

ในส่วนนี้จะทำการคำนวณเป็นกรณีตัวอย่างเพื่อแสดงการเลือกชนิดบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับผักและผลไม้สด โดยใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้นตามขั้นตอนดังแสดงในรูป 4.2 ผักและผลไม้สดที่ทำการศึกษาได้แก่ผักและผลไม้สดตัวอย่าง 6 ชนิดในตารางที่ 4.2 และใช้ผลการศึกษาแนวโน้มผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ต่อบรรจุภัณฑ์จากหัวข้อ 4.3 ช่วยในการเลือกบรรจุภัณฑ์

#### 4.5 การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้นของแก๊สในบรรจุภัณฑ์

ในส่วนนี้จะทำการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้นของแก๊สในบรรจุภัณฑ์ ต่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP สำหรับผักและผลไม้สด (สมการที่ (4.17) และ (4.18)) โดยใช้โปรแกรมเมทแลบ MAP1 ที่เขียนขึ้น เพื่อศึกษาว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแก๊สในบรรจุภัณฑ์ถูกเปลี่ยนแปลงไป (ซึ่งอาจเกิดจากการเติมแก๊สที่มีความเข้มข้นหนึ่ง ๆ เข้าไปในบรรจุภัณฑ์ก่อนปิดผนึก) จะมีผลต่อความเข้มข้นของแก๊สในบรรจุภัณฑ์ที่เวลาใด ๆ และเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุลหรือไม่ ในการศึกษาได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แบบจำลองอัตราการทำหายใจที่เหมาะสมที่สุดซึ่งได้จากการทดสอบมาแล้วในหัวข้อ 4.2 มาใช้ในการคำนวณ และระบบบรรจุภัณฑ์ที่เลือกเป็นตัวอย่างการศึกษาในส่วนนี้ คือ บรรจุภัณฑ์แบบ MAP สำหรับแอปเปิ้ล (จากข้อมูลที่ 1) โดยทำการศึกษาเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของแก๊สเริ่มต้น 3 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1	%O <sub>2</sub> เท่ากับ 21	%CO <sub>2</sub> เท่ากับ 0.03
กรณีที่ 2	%O <sub>2</sub> เท่ากับ 6	%CO <sub>2</sub> เท่ากับ 3.5
กรณีที่ 3	%O <sub>2</sub> เท่ากับ 0	%CO <sub>2</sub> เท่ากับ 7

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตาราง 4.3 ข้อมูลระบบ MAP ของแต่ละงานวิจัยที่นำมาที่นำมาศึกษา

ข้อมูล	ผักและผลไม้สด	อุณหภูมิ (°C)	น้ำหนักของผักและผลไม้สด W (kg)	พื้นที่ผิวสัมผัส $A (m^2)$	ปริมาตรอิสระในบรรจุภัณฑ์ V (cc)	ความหนาของฟิล์ม L (mil)	ค่าการซึมผ่านฟิล์มของแก๊สออกซิเจน $P_o (cc \cdot mil \cdot hr^{-1} \cdot m \cdot atm)$	ค่าการซึมผ่านฟิล์มของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ $P_c (cc \cdot mil \cdot hr^{-1} \cdot m \cdot atm)$	ชนิดของพอลิเมอร์	งานวิจัย
1	แอปเปิ้ลพันธุ์แมคอินทอช	20	0.25	0.06	405	1.5	375	1458.33	พอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำ	[17]
2	ดอกบรอคเคอรี่	24	0.1373	0.072	659	2	198.5	696	พอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำ	[25]
3	มะเขือเทศแบบพัตต์	21	0.472	0.0342	843	0.75	1017.1875	5237.0625	พีวีซีชนิด RMF-61	[19]
4	มะเขือเทศพันธุ์จินนี่	21	0.645	0.1342	900	2	291.67	1416.67	ไคโอเวคฟิล์ม ชนิด E (Cryovac films)	[22]
5	บรอคเคอรี่พันธุ์มาราซอน	1.5	6.2	1	19500	0.984	310	1000	พอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำ	[29]
6	พีชแบบ Crest Haven	5	0.2059	0.1179	2340	1	166.67	200	ไคโอเวคฟิล์ม	[20]