บทที่ 4

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สดโดยใช้บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ต่ำกว่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในบรรยากาศ และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์สูงกว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ ซึ่งสภาวะดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อสามารถเลือกชนิดของฟิล์มพอลิเมอร์และกำหนดขนาดของบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับผักและผลไม้แต่ละชนิดได้

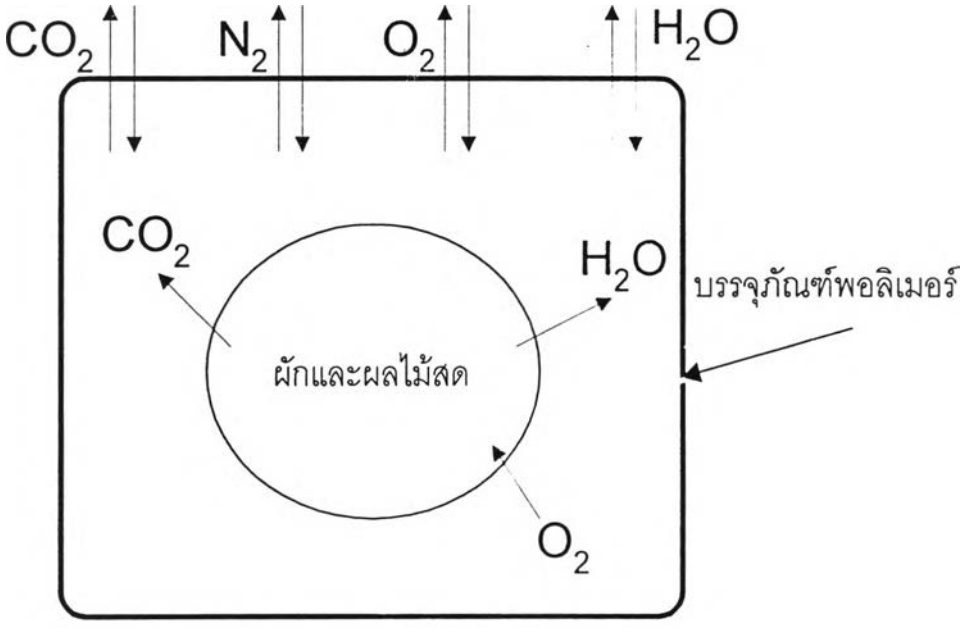
ในอดีตที่ผ่านมาการศึกษาหาตัวแปรต่าง ๆ ของบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่เหมาะสมสำหรับผักและผลไม้แต่ละชนิดนั้น ส่วนใหญ่จะใช้การทดลองแบบลองผิดลองถูก ซึ่งสูญเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการวิจัยสูง รวมทั้งในบางครั้งผลจากการทดลองที่ได้ยังไม่สามารถนำไปใช้ได้จริง ทำให้การใช้บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สดยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก [22] ต่อมานักวิจัยหลายท่านได้พยายามอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซต่าง ๆ ภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรกับเวลาด้วยสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่ก็ยังไม่สามารถทำนายได้อย่างถูกต้องแม่นยำเพราะสมการแบบจำลองอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ จนกระทั่งได้มีการพัฒนาแบบจำลองการหายใจแบบไมเคิลลิสเมนเทนขึ้น [28] ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 เมื่อนำแบบจำลองอัตราการหายใจนี้มาประยุกต์เข้ากับการทำนายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซต่าง ๆ กับเวลา พบว่าสามารถใช้ได้ผลดี [5,17,28]

4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เมื่อทำการบรรจุผักและผลไม้สดในบรรจุภัณฑ์ ก๊าซออกซิเจนที่อยู่ภายในบรรจุภัณฑ์จะถูกใช้ในการหายใจของผักและผลไม้ ในขณะเดียวกันก็มีการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการคายน้ำออกมาด้วย ซึ่งมีผลทำให้ความดันย่อยของก๊าซทั้งสามภายในบรรจุภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป จึงเกิดการซึมผ่านของก๊าซผ่านบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของก๊าซสูงสู่

บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า นั่นคือก๊าซออกซิเจนจะแพร่เข้าสู่ภายในบรรจุภัณฑ์ ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำจะแพร่ออกสู่ภายนอกบรรจุภัณฑ์ ดังนั้นตัวแปรสำคัญในการสร้างแบบจำลองเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์กับเวลาคืออัตราการซึมผ่านของก๊าซต่าง ๆ ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ อัตราการหายใจและอัตราการคายน้ำของผักและผลไม้สด

ระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สดที่ถูกศึกษาในงานวิจัยนี้มีลักษณะดังรูปที่ 4.1 และมีข้อสมมติฐานดังนี้



รูปที่ 4.1 ระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด

(1) บรรจุภัณฑ์เป็นบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ที่มีรูปร่างใด ๆ ก็ได้ตามต้องการ แต่เป็นบรรจุภัณฑ์แบบแข็ง (rigid package) ทำให้บรรจุภัณฑ์มีปริมาตรและพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนก๊าซคงที่

(2) ผักและผลไม้สดถูกบรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ที่ถูกปิดสนิท มีการถ่ายเทมวลระหว่างภายในบรรจุภัณฑ์และสิ่งแวดล้อมภายนอกผ่านฟิล์มเนื่องจากการซึมผ่านอย่างเดียว

(3) ค่าความสามารถในการแพร่ของก๊าซในชั้นฟิล์มพอลิเมอร์มีค่าน้อยกว่าค่าความสามารถในการแพร่ของก๊าซในอากาศมาก ดังนั้นจึงสมมุติให้ความเข้มข้นของก๊าซใด ๆ ในบรรจุภัณฑ์มีค่าสม่ำเสมอทุก ๆ จุดในบรรจุภัณฑ์

(4) ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิความชื้นและชนิดของพอลิเมอร์เท่านั้น

(5) ความดันย่อยของก๊าซต่าง ๆ ภายในบรรจุภัณฑ์มีค่าน้อย ทำให้ก๊าซประพฤติตัวเหมือนก๊าซอุดมคติ

(6) อุณหภูมิของระบบคงที่ (isothermal)

(7) ผักและผลไม้สดสำหรับบรรจุต้องอยู่ในภาวะก่อนขั้นตอนการสุก อัตราการหายใจขึ้นกับอุณหภูมิ ความดันย่อยภายในบรรจุภัณฑ์ของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้น

(8) ความดันย่อยของก๊าซภายนอกบรรจุภัณฑ์มีค่าคงที่ตลอดช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณเนื่องจากบรรยากาศภายนอกบรรจุภัณฑ์เป็นบรรยากาศปกติ

(9) ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่ใช้เป็นค่าที่ได้มาจากระบบสององค์ประกอบ (ก๊าซที่ศึกษาและฟิล์มพอลิเมอร์) หรือไม่คำนึงถึงผลกระทบของก๊าซอื่น ๆ ต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่ศึกษา

การคำนวณความเข้มข้นของก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรกับเวลาสามารถหาได้จากการดุลมวล (mass balance) ที่เกิดจากการถ่ายเทในระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรซึ่งมีสมการดังต่อไปนี้ (ในงานวิจัยนี้กำหนดทิศทางให้ก๊าซเข้าในบรรจุภัณฑ์เป็นทิศทางบวก)

<u>ดุลมวลของก๊าซออกซิเจน</u>

$$\begin{bmatrix}\text{อัตราการสะสม}\\ \text{ของ}O_2\text{ในระบบ}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\text{อัตราการซึมผ่าน}\\ \text{ของ}O_2\text{เข้าสู่ระบบ}\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}\text{อัตราการซึมผ่าน}\\ \text{ของ}O_2\text{ออกจากระบบ}\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}\text{อัตราการใช้}O_2\text{ในระบบ}\\ \text{เนื่องจากการหายใจ}\end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\frac{dn_{O_2}^{pkg}}{dt}=\frac{P_{O_2}A}{d}(p_{O_2}^{ext}-p_{O_2}^{pkg})-R_{O_2}W \quad (4.2)$$

<u>ดุลมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์</u>

$$\begin{bmatrix}\text{อัตราการสะสม}\\ \text{ของ}CO_2\text{ในระบบ}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\text{อัตราการซึมผ่าน}\\ \text{ของ}CO_2\text{เข้าสู่ระบบ}\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}\text{อัตราการซึมผ่าน}\\ \text{ของ}CO_2\text{ออกจากระบบ}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\text{อัตราการผลิต}CO_2\text{ในระบบ}\\ \text{เนื่องจากการหายใจ}\end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\frac{dn_{CO_2}^{pkg}}{dt}=\frac{P_{CO_2}A}{d}(p_{CO_2}^{ext}-p_{CO_2}^{pkg})+R_{CO_2}W \quad (4.4)$$

ดุลมวลของก๊าซไนโตรเจน

$$\begin{bmatrix}\text{อัตราการสะสม}\\ \text{ของ}N_2\text{ในระบบ}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\text{อัตราการซึมผ่าน}\\ \text{ของ}N_2\text{เข้าสู่ระบบ}\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}\text{อัตราการซึมผ่าน}\\ \text{ของ}N_2\text{ออกจากระบบ}\end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\frac{dn_{N_2}^{pkg}}{dt}=\frac{P_{N_2}A}{d}(p_{N_2}^{ext}-p_{N_2}^{pkg}) \quad (4.6)$$

ดุลมวลของไอน้ำ

$$\begin{bmatrix}\text{อัตราการสะสม}\\ \text{ของ}H_2O\text{ในระบบ}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\text{อัตราการซึมผ่าน}\\ \text{ของ}H_2O\text{เข้าสู่ระบบ}\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}\text{อัตราการซึมผ่าน}\\ \text{ของ}H_2O\text{ออกจากระบบ}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\text{อัตราการผลิต}H_2O\text{ในระบบ}\\ \text{เนื่องจากการคายน้ำ}\end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$\frac{dn_{H_2O}^{pkg}}{dt}=\frac{P_{H_2O}A}{d}(p_{H_2O}^{ext}-p_{H_2O}^{pkg})+mW \quad (4.8)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่สัมผัสกับบรรยากาศ

d คือ ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์

m คือ อัตราการคายน้ำของผักและผลไม้สด (transpiration rate)

n คือ จำนวนโมลของก๊าซ

P คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

p คือ ความดันย่อยของก๊าซ

t คือ เวลา

W คือ น้ำหนักของผักและผลไม้สด

ตัวยก ^{pkg} คือ ภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร

^{ext} คือ ภายนอกบรรจุภัณฑ์

ตัวห้อย $_{O_2}$ คือ ก๊าซออกซิเจน

$_{CO_2}$ คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

$_{N_2}$ คือ ก๊าซไนโตรเจน

$_{H_2O}$ คือ ไอน้ำ

แต่จากสมมติฐานที่ว่าความดันไอภายในภายในบรรจุภัณฑ์มีค่าน้อย ก๊าซประพฤติตัวเหมือนก๊าซอุดมคติ ดังนั้นจากกฎของก๊าซอุดมคติ (ideal gas law) ตามสมการที่ 4.9 และเมื่อนำกฎของก๊าซอุดมคติมาประยุกต์ใช้กับระบบสมการดุลมวลข้างต้น สามารถเขียนแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์เพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงความดันย่อยภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร ณ เวลาใด ๆ ได้ดังสมการที่ 4.10 ถึงสมการที่ 4.13

$$pV = nRT \tag{4.9}$$

$$\frac{V}{RT}\frac{dp_{O_2}^{pkg}}{dt} = \frac{P_{O_2}A}{d}(p_{O_2}^{ext} - p_{O_2}^{pkg}) - R_{O_2}W \tag{4.10}$$

$$\frac{V}{RT}\frac{dp_{CO_2}^{pkg}}{dt} = \frac{P_{CO_2}A}{d}(p_{CO_2}^{ext} - p_{CO_2}^{pkg}) + R_{CO_2}W \tag{4.11}$$

$$\frac{V}{RT}\frac{dp_{N_2}^{pkg}}{dt} = \frac{P_{N_2}A}{d}(p_{N_2}^{ext} - p_{N_2}^{pkg}) \tag{4.12}$$

$$\frac{V}{RT}\frac{dp_{H_2O}^{pkg}}{dt} = \frac{P_{H_2O}A}{d}(p_{H_2O}^{ext} - p_{H_2O}^{pkg}) + mW \tag{4.13}$$

โดยที่ V คือ ปริมาตรของช่องว่างภายในบรรจุภัณฑ์

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

ก. อัตราการหายใจของผักและผลไม้สด

อัตราการหายใจขึ้นกับความดันย่อยภายในบรรจุภัณฑ์ของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนในการหายใจกับความดันย่อยภายในบรรจุภัณฑ์ของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นแบบไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ ดังสมการที่ 3.6 [7,41] และอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการหายใจเป็นไปดังสมการที่ 4.14 [1,2,4,5,8] หรือสมการที่ 4.15 [7]

$$R_{O_2} = \frac{abp_{O_2}}{1 + ap_{O_2} + aip_{O_2}p_{CO_2}} \tag{3.6}$$

$$R_{CO_2} = RQ \times R_{O_2} \tag{4.14}$$

$$R_{CO_2} = \frac{abp_{O_2}}{1 + ap_{O_2} + ajp_{O_2}p_{CO_2}} \tag{4.15}$$

โดยที่ i, j คือ ค่าพารามิเตอร์ของการหายใจ ขึ้นอยู่กับชนิดของผักและผลไม้

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจกับอุณหภูมิเป็นไปดังสมการที่ 2.3 [2,8,15]

$$R = R_0 e^{\left(\frac{-E_{af}}{RT}\right)} \qquad (2.3)$$

ในงานวิจัยนี้คำนวณค่าอัตราการหายใจโดยการประยุกต์ทั้งสมการที่ 2.3, 3.6 และ 4.14 เข้าด้วยกัน โดยคำนวณค่าอัตราการหายใจซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอ้างอิง แล้วเปลี่ยนไปสู่ค่าอัตราการหายใจที่อุณหภูมิที่ต้องการดังสมการที่ 4.16

$$R_{O_2} = \frac{abp_{O_2}}{1 + ap_{O_2} + aip_{O_2} p_{CO_2}} \times e^{-\frac{E_{af}}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)} \qquad (4.16)$$

ข. อัตราการคายน้ำ

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.3 และ 3.2.3 อัตราการสูญเสียน้ำของผักและผลไม้ขึ้นอยู่กับ 2 กระบวนการคือจากการหายใจและจากการคายน้ำ แต่พบว่าการสูญเสียน้ำจากการหายใจมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียน้ำเนื่องจากการคายน้ำ [27] ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สมการแบบจำลองอัตราการคายน้ำดังสมการที่ 3.13 [19] และสมการที่ 3.14 [17,18,19,20,32]

$$m = K(p^{pro}_{H_2O} - p^{pkg}_{H_2O}) \qquad (3.13)$$

$$\ln(p^{pro}_{H_2O}) = \ln(p^{sat}_{H_2O}) = \frac{-5.8 \times 10^3}{T} + 1.391 - 4.864 \times 10^{-2} T + 4.176 \times 10^{-5} T^2$$
$$- 1.445 \times 10^{-8} T^3 + 6.545 \ln(T) \qquad (3.14)$$

ค. ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 และบทที่ 3 พบว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยก็คืออุณหภูมิและความชื้น ผลของอุณหภูมิต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเป็นไปดังสมการที่ 2.10 [1,2,4,6,17]

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

เนื่องจากข้อมูลผลกระทบของความชื้นต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซยังมีการศึกษาไม่มาก และข้อมูลที่มีอยู่สามารถประมาณได้โดยใช้ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงคำนวณผลของความชื้นต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซโดยให้มีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงดังสมการที่ 4.17

$$P = P_{ref} + n\,(RH^{pkg} - RH^{ref}) \qquad (4.17)$$

โดยที่ P_{ref} คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่ความชื้นสัมพัทธ์อ้างอิง

n คือ ค่าความชันของการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ (คงที่ที่ทุกอุณหภูมิ)

RH^{pkg} คือ ความชื้นสัมพัทธ์ภายในบรรจุภัณฑ์

RH^{ref} คือ ความชื้นสัมพัทธ์อ้างอิง

ความชื้นสัมพัทธ์ภายในบรรจุภัณฑ์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.18

$$RH^{pkg} = \frac{\bar{p}^{pkg}_{H_2O}}{p^{sat}_{H_2O}} \qquad (4.18)$$

ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากการประยุกต์สมการที่ 2.10 และสมการที่ 4.17 เข้าด้วยกันดังสมการที่ 4.19

$$P = P_0 e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)} + n(RH^{pkg} - RH^{ref}) \qquad (4.19)$$

4.2 การแก้ปัญหาด้วยวิธีการเชิงตัวเลข

เมื่อพิจารณาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สดได้แก่สมการที่ 4.10 ถึงสมการที่ 4.13 พบว่าเป็นระบบสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (ordinary differential equation) ที่ต้องแก้ปัญหาไปพร้อม ๆ กัน (simultaneous solution) เนื่องจากระบบสมการมีตัวแปรที่ต้องใช้ร่วมกัน ซึ่งไม่สามารถหาคำตอบเชิงวิเคราะห์ (analytical solution) ได้โดยง่าย การแก้ปัญหาด้วยวิธีการเชิงตัวเลข (numerical method) ก็เป็นอีกแนวทางเลือกหนึ่งที่สามารถทำได้ สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีรังกัตตากิลอันดับที่สี่ (4th order Runge-Kutta-Gill method) ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากและมีเสถียรภาพค่อนข้างสูงเหมาะสำหรับการแก้สมการอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้นได้เป็นอย่างดี [64] ซึ่งรายละเอียดของวิธีรังกัตตากิลอันดับที่สี่แสดงไว้ในภาคผนวก ง

สภาวะเริ่มต้นที่ใช้ในการแก้ปัญหาระบบสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด สามารถกำหนดได้ดังนี้

บรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด มีสภาวะเริ่มต้นเหมือนบรรยากาศที่อยู่ภายนอกบรรจุภัณฑ์ บรรยากาศภายนอกบรรจุภัณฑ์มีความดันรวมเท่ากับ 101.3 kPa และมีความคันย่อยของก๊าซเริ่มต้นเหมือนกับความความดันย่อยของก๊าซในอากาศปกติ คือในอากาศแห้ง (ไม่รวมไอน้ำ) มีความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนร้อยละ 20.97 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 0.03 โดยปริมาตร และมีความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนร้อยละ 79 โดยปริมาตร ส่วนความดันย่อยของไอน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเก็บรักษา (โดยทั่วไปค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยตลอดปีของประเทศในกลุ่มยุโรปและอเมริกามีค่าประมาณร้อยละ 50 ในขณะที่ประเทศไทยมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยประมาณร้อยละ 75) ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 จะมีความดันย่อยของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน และไอน้ำเท่ากับ 20.9784, 0.0300, 79.0317 และ 1.2598 kPa ตามลำดับ โดยลำดับการคำนวณแสดงไว้ในสมการที่ 4.20 ถึง 4.23

$$p_{H_2O}^{pkg} = p_{H_2O}^{sat} * RH^{pkg} \quad (4.20)$$

$$p_{O_2}^{pkg} = (0.2097) * (101.3 - p_{H_2O}^{pkg}) \quad (4.21)$$

$$p_{CO_2}^{pkg} = (0.0003) * (101.3 - p_{H_2O}^{pkg}) \quad (4.22)$$

$$p_{N_2}^{pkg} = (0.79) * (101.3 - p_{H_2O}^{pkg}) \quad (4.23)$$

4.3 การทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของงานวิจัยนี้ได้ถูกนำมาทดสอบความเหมาะสมโดยเปรียบเทียบผลการคำนวณกับข้อมูลจากการทดลองหาความเข้มข้นของก๊าซต่าง ๆ ที่เวลาใด ๆ ในระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สดจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งมีลักษณะของบรรจุภัณฑ์และสภาวะการเก็บรักษาดังตารางที่ 4.1 ด้วยวิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) [63] ซึ่งมีสมการดังสมการที่ 4.24

$$R^2 = 1 - \frac{\sum \left(Y_i - \hat{Y}_i\right)^2}{\sum Y_i^2 - \frac{\left(\sum Y_i\right)^2}{n}} \quad (4.24)$$

โดยที่ Y_i คือ ค่าข้อมูลที่ i ที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

$\hat{Y}_i$ คือ ค่าข้อมูลที่ i ที่ได้จากการทดลอง

n คือ จำนวนข้อมูลที่นำมาพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

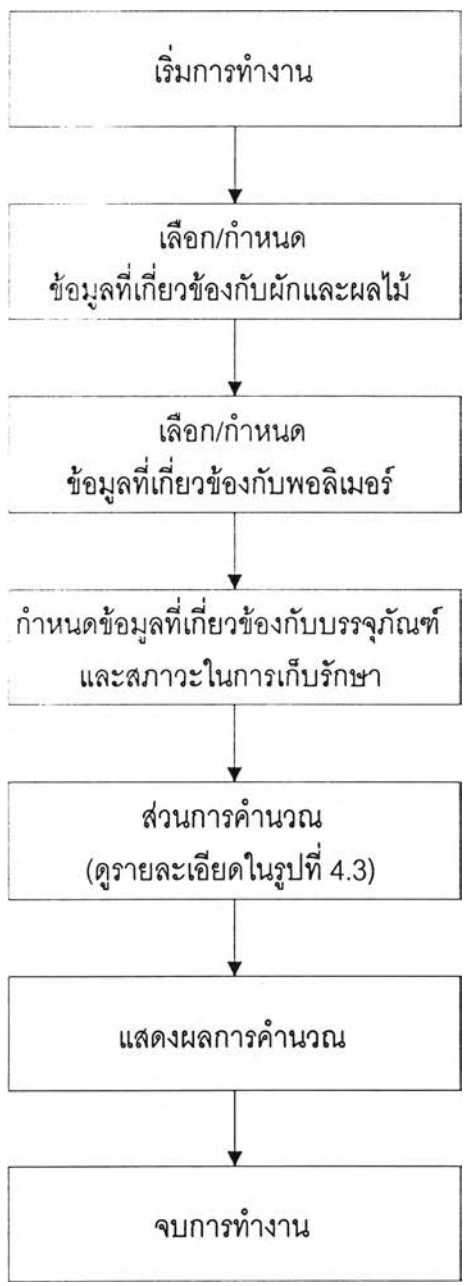
ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจนี้เป็นเครื่องวัดความสอดคล้องระหว่างผลการทดลองที่นำมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ถ้าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าสูงแสดงว่าค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะค่าสอดคล้องกับผลการทดลอง ในทางกลับกันถ้าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าต่ำแสดงว่าค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอยู่ไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง ในกรณีถ้าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 1 แสดงว่าค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทุกค่าเท่ากับผลการทดลองทุกค่า และถ้าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะแตกต่างจากผลการทดลองมากจนไม่มีความสอดคล้องหรือความสัมพันธ์ระหว่างกันเลย

ตารางที่ 4.1 แหล่งข้อมูลที่นำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

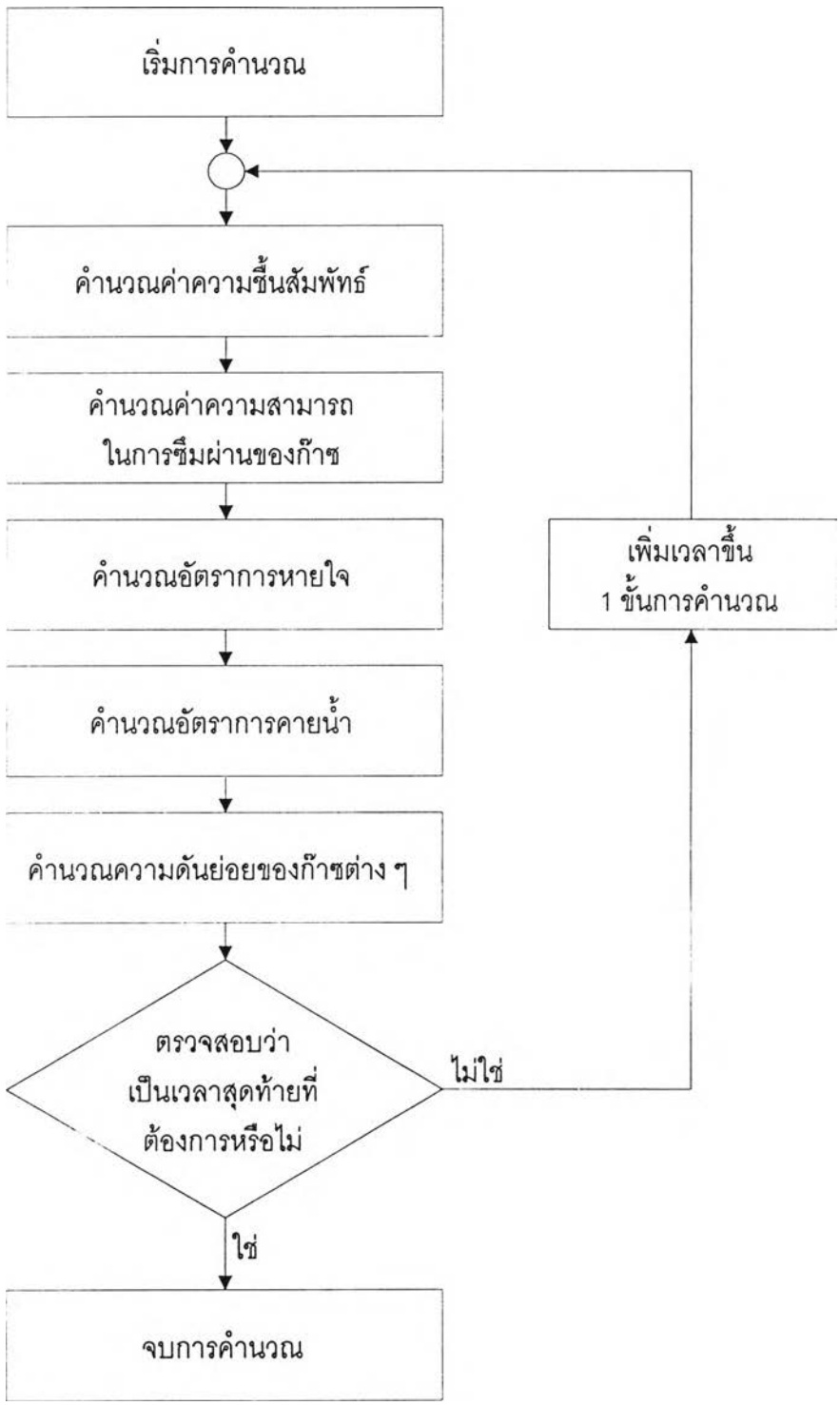
ตัวอย่างที่	นักวิจัย	ชนิดของผัก และผลไม้	อุณหภูมิในการเก็บรักษา (°C)	น้ำหนักของผัก และผลไม้สด (kg)	พื้นที่ผิว ของฟิล์ม (cm^2)	ปริมาตร อิสระ (cm^3)	ความหนา ของฟิล์ม (mm)	ชนิดของ พอลิเมอร์
1	Talasia และ Cameron [5]	บรอคโคลี่	0	0.5	4000	500	0.025	LDPE
2	Talasia และ Cameron [17]	บรอคโคลี่	0	0.04	600	300	0.029	LDPE
3	Hirata และคณะ [7]	กะหล่ำปลี	15	0.08	720	400	0.025	-
4	Makino [45]	ผักกาดหอม	10	0.08	150	100	0.025	LDPE

4.4 การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์

งานวิจัยนี้ได้ทำการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณค่าความดันย่อยของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน และไอน้ำ ที่เวลาต่าง ๆ ภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรของผักและผลไม้สด โดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟต์วิชวลเบสิก รุ่น 6.0 (Microsoft Visual Basic version 6.0) ของบริษัทไมโครซอฟต์ ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งขั้นตอนการทำงานหลักของโปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 และรายละเอียดของส่วนของการคำนวณซึ่งเป็นขั้นตอนหนึ่งของโปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงไว้ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานหลักของโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของส่วนการคำนวณของโปรแกรม

4.5 การศึกษาผลกระทบของของตัวแปรต่าง ๆ ต่อการเกิดบรรยากาศดัดแปร

ในส่วนนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่ปรากฏในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ อุณหภูมิ ปริมาณความชื้นของบรรยากาศภายนอกบรรจุภัณฑ์ และค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ ต่อการเกิดบรรยากาศดัดแปรภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อไป โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้จากหัวข้อ 4.4 มาใช้ในการคำนวณ

4.5.1 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการเก็บรักษา

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวและระดับความดันย่อยของก๊าซต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัว โดยผลกระทบของอุณหภูมิในการเก็บรักษาจะถูกศึกษาที่อุณหภูมิ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 องศาเซลเซียส และมีการกำหนดความชื้นภายนอกบรรจุภัณฑ์ ชนิดของพอลิเมอร์ และชนิดของผักและผลไม้ ให้เหมือนกันทุกอุณหภูมิ

4.5.2 การศึกษาผลกระทบของปริมาณความชื้น

ผลกระทบของความชื้นในบรรยากาศนอกบรรจุภัณฑ์ได้ถูกศึกษาที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0, 43, 76 และ 100 เพื่อหาผลกระทบต่อเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว ระดับความดันย่อยของก๊าซต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัว โดยกำหนดอุณหภูมิในการเก็บรักษา ชนิดของพอลิเมอร์ และชนิดของผักและผลไม้ ให้เหมือนกันทุกความชื้นที่ศึกษา

4.5.3 การศึกษาผลกระทบของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ

เนื่องจากในปัจจุบันมีพอลิเมอร์หลายชนิดถูกใช้ในการทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สดหลายชนิด ซึ่งพอลิเมอร์แต่ละชนิดก็มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซแตกต่างกัน และเปลี่ยนแปลงตามความชื้น โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของพอลิเมอร์ในช่วง P_{O_2} = 1.25 - 40 และ P_{CO_2} = 1.25 - 40 ในหน่วย $\frac{mmol \cdot mm}{cm^2 \cdot kPa \cdot hr}$ และหาผลกระทบต่อเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว ระดับความดันย่อยของ

ก๊าซต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัว โดยกำหนดอุณหภูมิ ความชื้นในการเก็บรักษา ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซไนโตรเจนและไอน้ำ ให้เหมือนกันทุกสภาวะที่ศึกษา

4.5.4 การศึกษาผลกระทบของสภาวะในการบรรจุและสภาวะในการเก็บรักษา

ในงายวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบของสภาวะในการบรรจุและสภาวะในการเก็บรักษาต่อการเกิดบรรยากาศดัดแปรภายในบรรจุภัณฑ์ โดยทำการคำนวณที่สภาวะในการบรรจุ 3 สภาวะ ได้แก่ 1) ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 2) ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 และ 3) อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 โดยใช้สภาวะในการเก็บรักษา 3 สภาวะ ได้แก่ 1) ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 2) ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 และ 3) อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 โดยใช้ผักหรือผลไม้สดและพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันในการทดสอบ

4.5.5 การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร

ผลกระทบของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นถูกศึกษาที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.03, 5.00, 10.00 และ 20.00 เพื่อหาผลกระทบต่อการเกิดบรรยากาศดัดแปรภายในบรรจุภัณฑ์ โดยกำหนดให้อุณหภูมิในการเก็บรักษา ชนิดของพอลิเมอร์ และชนิดของผักและผลไม้ ให้เหมือนกันทุกความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทำการศึกษา

4.6 การจัดทำกรณีศึกษาของการเลือกหาสภาวะและตัวแปรต่าง ๆ ที่เหมาะสมสำหรับบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร

ในงานวิจัยนี้ได้คำนวณหาสภาวะและตัวแปรต่าง ๆ ของบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมในการเก็บรักษาผลิตผลสด 2 ชนิด คือ บรอคโคลี่ และกะหล่ำปลี โดยอาศัยข้อมูลสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บรักษาผลิตผลทั้ง 2 ชนิดนี้ ที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.11

ตัวแปรที่ศึกษาคือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม พื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์ที่สัมผัสกับบรรยากาศ ความหนาของฟิล์มที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ และน้ำหนักของผลิตผลสดที่บรรจุภายในบรรจุภัณฑ์ โดยรวมกลุ่มเป็น $\frac{P \cdot A}{d \cdot W}$ (หน่วย $\frac{mmol}{hr \cdot kPa \cdot kg}$) เพราะตัวแปรเหล่านี้ล้วนมีผลต่อความเข้มของก๊าซที่ภาวะคงตัว (สมการที่ 4.10 ถึง 4.13) และการรวมกลุ่มตัวแปรสามารถลดปริมาณการทดลองและการคำนวณลง นอกจากนี้ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบได้มากขึ้น

การหาสภาวะที่เหมาะสมใช้โปรแกรม MAP 2000 คำนวณแบบลองผิดลองถูก (Trial and Error method) และกำหนดตัวแปรอื่น ๆ ให้คงที่ทุกการคำนวณ โดยค่า $\frac{P \cdot A}{d \cdot W}$ ที่เหมาะสมคือค่าที่ทำให้ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะคงตัวมีค่าเท่ากับค่าที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาดังแสดงในตารางที่ 2.11

ขั้นตอนในการคำนวณหาสภาวะและตัวแปรต่าง ๆ ของบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมในการเก็บรักษาสามารถแสดงได้ดังนี้

หาค่าของกลุ่มตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรอยู่ที่ภาวะคงตัว โดยจัดรูปแบบสมการที่ 4.10 และสมการที่ 4.11 เป็น

$$0 = \frac{P_{O_2} A}{d}(p_{O_2}^{ext} - p_{O_2}^{pkg}) - R_{O_2} W \tag{4.25}$$

$$0 = \frac{P_{CO_2} A}{d}(p_{CO_2}^{ext} - p_{CO_2}^{pkg}) + R_{CO_2} W \tag{4.26}$$

หรือ $$\frac{P_{O_2} A}{dW} = \frac{R_{O_2}}{(p_{O_2}^{ext} - p_{O_2}^{pkg})} \tag{4.27}$$

หรือ $$\frac{P_{CO_2} A}{dW} = \frac{R_{CO_2}}{(p_{CO_2}^{pkg} - p_{CO_2}^{ext})} \tag{4.28}$$

แทนค่าอุณหภูมิในการเก็บรักษา และความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการเก็บรักษาลงในสมการที่ 4.27 และ 4.28 จะได้กลุ่มตัวแปร $\frac{P \cdot A}{d \cdot W}$ ที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษา

ทั้งนี้จากตารางที่ 2.11 อุณหภูมิในการเก็บรักษา และความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการเก็บรักษามีค่าเป็นช่วง ดังนั้นการแทนค่าต้นและปลายของช่วงจะทำให้เกิดได้ค่าของกลุ่มตัวแปรที่เหมาะสมทั้งสิ้น 8 ค่า ต่อจากนั้นนำค่าของกลุ่มตัวแปรที่เหมาะสมที่ได้จากอุณหภูมิในการเก็บรักษาเดียวกันมาพิจารณาหาช่วงที่เหมาะสมสำหรับอุณหภูมินั้น ๆ โดยจะเลือกค่าของกลุ่มตัวแปรที่ทำให้ได้ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะคงตัวซึ่งเหมาะสมในการเก็บรักษา

สุดท้ายทดสอบผลลัพธ์ที่ได้โดยแทนค่าสูงสุดและต่ำสุดของช่วงของกลุ่มตัวแปร $\frac{P \cdot A}{d \cdot W}$ สุดท้ายที่คำนวณได้ลงในโปรแกรม MAP 2000 และตรวจสอบค่าความเข้มข้นที่ภาวะคงตัวว่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการเก็บรักษาดังแสดงในตารางที่ 2.11 หรือไม่