บทที่ 3
โปรแกรมการออกแบบบรรจุภัณฑ์สำหรับ MAP

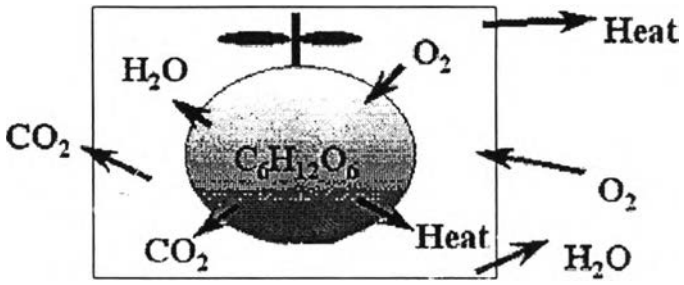
การยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สดแบบบรรยากาศดัดแปร สามารถทำได้ด้วยการเลือกบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำที่ให้ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ณ สภาวะคงตัวตามต้องการได้

ที่ผ่านมาพบว่ามีฟิล์มพอลิเมอร์บางชนิดเท่านั้นที่สามารถให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ตามความต้องการสำหรับการเก็บรักษาผักและผลไม้แต่ละชนิดภายใต้บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร ดังนั้นจึงมีการคิดค้นเทคนิคใหม่ ๆ ขึ้น เช่น การใช้บรรจุภัณฑ์แบบเจาะรู การสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ และการใช้บรรจุภัณฑ์ฟิลม์พอลิเมอร์แบบหลายชั้นซึ่งได้รับความสนใจในอุตสาหกรรมขนาดกลางและเล็ก [15, 52]

ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นให้ตรงตามความต้องการของผักและผลไม้แต่ละชนิดนั้น ส่วนใหญ่จะใช้วิธีการเลือกชนิดฟิล์มพอลิเมอร์และความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชั้นแบบสุ่มทดลอง ทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาวิธีการออกแบบบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการเก็บรักษาผักและผลไม้ภายใต้สภาพบรรยากาศดัดแปรได้อย่างเหมาะสมทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงเศรษฐศาสตร์ ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในขณะที่ผักและผลไม้ยังคงเกิดกระบวนการหายใจและการคายน้ำ หลังการบรรจุในบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์ ทำให้องค์ประกอบของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำภายในบรรจุภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรมีลักษณะดังรูปที่ 3.1 โดยมีสมมติฐานดังนี้



รูปที่ 3.1 ระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้

1) บรรจุภัณฑ์เป็นบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ที่มีรูปร่างใดก็ได้ตามต้องการ มีปริมาตรและพื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์ในการแลกเปลี่ยนก๊าซคงที่

2) ผักและผลไม้สดถูกบรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ที่ปิดสนิท มีการถ่ายเทมวลระหว่างภายในบรรจุภัณฑ์และสิ่งแวดล้อมภายนอกผ่านฟิล์มเนื่องจากการซึมผ่านเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

3) ความเข้มข้นของก๊าซต่าง ๆ ในบรรจุภัณฑ์มีความสม่ำเสมอทุก ๆ จุดในบรรจุภัณฑ์

4) อุณหภูมิของระบบบรรจุภัณฑ์มีค่าคงที่เท่ากับอุณหภูมิการจัดเก็บ (โดยให้ถือว่าพลังงานความร้อนที่เกิดจากการหายใจสามารถถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ทั้งหมด และให้ถือว่าสิ่งแวดล้อมเป็นแหล่งรับความร้อนขนาดใหญ่สามารถรับความร้อนได้โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ)

5) ความดันย่อยของก๊าซต่าง ๆ ภายในบรรจุภัณฑ์มีค่าน้อย ทำให้ก๊าซมีพฤติกรรมแบบอุดมคติ

6) ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นไปตามกฎอาร์เรเนียส

7) การหายใจของผักและผลไม้ภายในบรรจุภัณฑ์เป็นแบบใช้ออกซิเจนซึ่งอัตราการหายใจขึ้นอยู่กับความดันย่อยของก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ภายในบรรจุภัณฑ์

8) การหายใจขึ้นอยู่กับอุณหภูมิโดยเป็นไปตามกฎอาร์เรเนียส

9) ฟิล์มพอลิเมอร์มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่ไม่ขึ้นอยู่กับความชื้น

10) น้ำหนักผักและผลไม้ในสภาวะคงตัวเท่ากับน้ำหนักตอนเริ่มบรรจุ

3.1.1 สมดุลมวลระบบบรรจุภัณฑ์

จากระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่มีสมมติฐานดังกล่าวสามารถสร้างสมการสมดุลมวล (mass balance) ที่เกิดจากการถ่ายเทก๊าซในบรรยากาศแบบบรรยากาศดัดแปรได้ดังนี้

สมดุลมวลก๊าซออกซิเจน

อัตราการสะสมของออกซิเจนในระบบ = อัตราการซึมผ่านของออกซิเจนสุทธิ - อัตราการใช้ออกซิเจนเนื่องจากการหายใจ

$$\frac{dV_{O_2}^{pkg}}{dt} = \frac{P_{O_2} A}{X}\left(p_{O_2}^{ext} - p_{O_2}^{pkg}\right) - R_{O_2} W \qquad (3.1)$$

สมดุลมวลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

อัตราการสะสมของคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบ = อัตราการซึมผ่านของคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิ + อัตราการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบเนื่องจากการหายใจ

$$\frac{dV_{CO_2}^{pkg}}{dt} = \frac{P_{CO_2} A}{X}\left(p_{CO_2}^{ext} - p_{CO_2}^{pkg}\right) + R_{CO_2} W \qquad (3.2)$$

สมดุลมวลไอน้ำ

อัตราการสะสมของไอน้ำในระบบ = อัตราการซึมผ่านของไอน้ำสุทธิ + อัตราการเกิดไอน้ำในระบบเนื่องจากการหายใจ

$$\frac{dV_{H_2O}^{pkg}}{dt} = \frac{P_{H_2O} A}{X}\left(p_{H_2O}^{ext} - p_{H_2O}^{pkg}\right) + mW \qquad (3.3)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของก๊าซ

t คือ เวลา

P คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์

A คือ พื้นที่ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่สัมผัสกับบรรยากาศ

p คือ ความดันย่อยของก๊าซ

X คือ ความหนาของบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์

R คือ อัตราการหายใจของผักและผลไม้

W คือ น้ำหนักผักและผลไม้

m คือ อัตราการคายน้ำของผักและผลไม้(transpiration rate)

ตัวห้อย O_2 คือ ก๊าซออกซิเจน

CO_2 คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

H_2O คือ ไอน้ำ

ตัวยก ext คือ ภายนอกบรรจุภัณฑ์

pkg คือ ภายในบรรจุภัณฑ์

โดยที่ R_{O_2} ,R_{CO_2} และ m สามารถหาได้จากการทดลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์ของผักและผลไม้แต่ละชนิด [7]

เมื่อกำหนดชนิดและน้ำหนักของผักและผลไม้ พื้นที่ผิวและความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์และความดันย่อยของก๊าซต่าง ๆ ที่ต้องการภายในระบบที่สภาวะคงตัวแล้ว จากสมการ (3.1)-(3.3) สามารถหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซต่าง ๆ ที่ต้องการสำหรับบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์ได้ดังนี้

$$p_{O_2} = \left(\frac{R_{O_2} WX}{A(p_{O_2}^{ext} - p_{O_2}^{pkg})} \right) \tag{3.4}$$

$$p_{CO_2} = \left(\frac{- R_{CO_2} WX}{A(p_{CO_2}^{ext} - p_{CO_2}^{pkg})} \right) \tag{3.5}$$

$$p_{H_2O} = \left(\frac{- mWX}{A(p_{H_2O}^{ext} - p_{H_2O}^{pkg})} \right) \tag{3.6}$$

3.1.1 อัตราการหายใจของผักและผลไม้

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้แบบจำลองการหายใจไมเคิลลิส-เมนเทนชนิดยับยั้งแบบอันคอมเพทิทีฟ ที่ได้รับการเสนอจากงานวิจัยต่าง ๆ [1, 5, 6, 7] ว่าเป็นแบบจำลองทางจลนศาสตร์เอนไซม์ที่มีความเหมาะสมในการคำนวณหาอัตราการหายใจในผักและผลไม้ชนิดต่าง ๆ ได้ดีดังสมการ (2.9) ซึ่งสามารถจัดรูปแบบใหม่ได้ดังนี้

$$R_{O_2} = \frac{a_o b_o p_{O_2}}{1 + a_o p_{O_2} + a_o i_o p_{O_2} p_{CO_2}} \tag{3.7}$$

และ $$R_{CO_2} = R_{O_2} RQ \tag{3.8}$$

โดยที่ $a_0 = K^{-1}_{m_{O_2}}$

$b_0 = V_{m_{O_2}}$

$i = K^{-1}_{m_{u,CO_2}}$

เมื่อ p_{O_2} คือ ความดันก๊าซออกซิเจน

p_{CO_2} คือ ความดันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ซึ่งค่า RQ (respiratory quotient) จะขึ้นอยู่กับผักและผลไม้แต่ละชนิด โดยส่วนใหญ่จะกำหนดให้เท่ากับ 1

อัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนจากแบบจำลองการหายใจไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟที่อุณหภูมิใด ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.9) ซึ่งค่าคงที่สำหรับการคำนวณอัตราการหายใจในผักและผลไม้แต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 3.1

$$R_{O_2} = \left[\frac{a_0 b_0 p_{O_2}}{1 + a_0 p_{O_2} + a_0 i_0 p_{O_2} p_{CO_2}}\right]_{ref} \exp\left[\frac{-E_R}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right] \qquad (3.9)$$

หรือสามารถคำนวณหาอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนเนื่องจากกระบวนหายใจที่ความเข้มข้นของก๊าซค่าหนึ่ง ๆ กับอุณหภูมิตามสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ดังสมการ (3.10) และ (3.8) ซึ่งค่าคงที่ต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3.2

$$R_{CO_2} = R^{*}_{CO_2} \exp(-E_R/RT) \qquad (3.10)$$

และ $$R_{O_2} = R_{CO_2} / RQ \qquad (3.8)$$

3.1.2 อัตราการคายน้ำ

การสูญเสียน้ำในผักและผลไม้โดยส่วนใหญ่เป็นไปตามสมการ (3.11) [46]

$$m = k(p^{pro}_{H_2O} - p^{pkg}_{H_2O}) \qquad (3.11)$$

เมื่อ $$p^{pkg}_{H_2O} = \frac{RH^{pkg}}{100} p^{sat}_{H_2O} \qquad (3.12)$$

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การคายน้ำ

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่สำหรับการหายใจชนิดยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟในผักและผลไม้ชนิดต่าง ๆ

ชนิดผักและผลไม้	O_2 เหมาะสม (%)	CO_2 เหมาะสม (%)	T(°c)	a(o)	b(o)	i(o)	RQ
มะเขือเทศ[1]	10.0-21.0	0-9.0	289.18	0.3500	0.3900	0.1320	1
บรอคโคลี่[1]	10.0-21.0	0-9.0	289.15	0.5480	6.4700	0.0569	1
บรอคโคลี่[1]	1.0-21.0	0-10.0	291.85	0.1631	7.5446	0.1229	1
แอบเปิล (golden delicious)[3]	0-21.0	0.5-5.0	292.15	0.1418	1.1116	0.0292	1
แอบเปิ้ล (Elstar)[3]	0-21.0	0.5-5.0	292.75	0.2022	0.7188	0.0231	1
หน่อไม้ฝรั่ง[3]	0-20.0	0-20.0	291.75	0.3046	2.2500	0.0265	1
มังบีนแตกหน่อ[3]	0-21.0	0-5.0	291.05	1.2184	1.2679	0.0753	1
กะหล่ำปลีหั่นละเอียด[4]	3	5	278.15	3.09	0.8190	0.0691	0.835
	3	5	283.15	3.09	1.4000	0.0691	0.835
	3	5	288.15	3.09	2.3500	0.0691	0.835
	3	5	293.15	3.09	3.8700	0.0691	0.835
	3	5	298.15	3.09	6.2700	0.0691	0.835

[1] เอกสารอ้างอิง [16], [2] เอกสารอ้างอิง [7], [3] เอกสารอ้างอิง [6], [4] เอกสารอ้างอิง [32]

a(o) มีหน่วยเป็น kPa^{-1}, b(o) มีหน่วยเป็น $mmol\ kg^{-1}\ hr^{-1}$, i(o) มีหน่วยเป็น kPa^{-1}

ตารางที่ 3.2 อัตราการหายใจที่อุณหภูมิอนันต์และพลังงานก่อกัมมันต์ในผักและผลไม้ชนิดต่าง ๆ

ชนิดผักและผลไม้	O_2 เหมาะสม (%)	CO_2 เหมาะสม (%)	$R^{*}_{CO_2}$	E_R	อุณหภูมิที่เหมาะสม (^{o}c) [3]	RH (%) [4]	RQ
ถั่วเขียว (blue lake)	3 [1]	5 [1]	9.35E+08 [1]	42.15 [1]	278.15-293.15	90-95	1
ขึ้นฉ่ายหั่นเป็นชิ้น	3 [3]	3 [3]	6.13E+09 [3]	49.10 [3]	273.15-293.15	92-95	1
มะม่วง	4 [1]	7 [1]	3.21E+22 [1]	117.28 [1]	283.15-293.15	47-50	1
ราสเบอรี่	3 [3]	3 [3]	2.20E+12 [3]	59.10 [3]	273.15-293.15	90-95	1

[1] เอกสารอ้างอิง [9], [2] เอกสารอ้างอิง [14], [3] เอกสารอ้างอิง [15], [4] เอกสารอ้างอิง [12]

$R^{*}_{CO_2}$ คือ อัตราการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากการหายใจที่อุณหภูมิอนันต์ ($ml\ kg^{-1}\ hr^{-1}$)

E_R คือ พลังงานก่อกัมมันต์การเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากการหายใจ ($kJ\ mol^{-1}$)

RH คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%)

ค่าความดันไอน้ำอิ่มตัวสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.6) [46]

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

โดยที่ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

$p^{sat}_{H_2O}$ คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (Pa)

3.1.3 ความดันย่อยก๊าซและความดันรวมของก๊าซ

เนื่องจากบรรจุภัณฑ์ที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์คงรูป(rigid packaging) ปริมาตร และพื้นที่ผิวบรรจุภัณฑ์คงที่ ก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์มีการแลกเปลี่ยนกับบรรยากาศภายนอกจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัว ทำให้ความดันรวมก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ไม่เท่ากับความดันบรรยากาศโดยเป็นไปตามสมการ (3.13)

$$p^{pkg} = 0.79\left(\frac{1}{1 - \frac{V_{O_2}}{V} - \frac{V_{CO_2}}{V}}\right) + \frac{RH^{pkg}}{100} p^{sat}_{H_2O} \quad (3.13)$$

เมื่อ $\frac{V_{O_2}}{V}$ คือ เศษส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์ที่สภาวะคงตัว

$\frac{V_{CO_2}}{V}$ คือ เศษส่วนโดยปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์ที่สภาวะคงตัว

p^{pkg} คือ ความดันรวมก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ที่สภาวะคงตัว (atm)

RH^{pkg} คือ ความชื้นสัมพัทธ์ภายในบรรจุภัณฑ์ (%)

ดังนั้น ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำภายในบรรจุภัณฑ์ที่สภาวะคงตัวเป็นไปตามสมการ (3.14) – (3.16)

$$p^{pkg}_{O_2} = p^{pkg}\left(\frac{V_{O_2}}{V}\right) \quad (3.14)$$

$$p^{pkg}_{CO} = p^{pkg}\left(\frac{V_{CO_2}}{V}\right) \quad (3.15)$$

$$p_{H_2O}^{pkg} = \frac{RH^{pkg}}{100} p_{H_2O}^{sat} \quad (3.16)$$

3.2 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์

ในการคำนวณหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์มีสมมติฐานดังนี้

(1) ระบบอยู่ในสภาวะคงตัว

(2) การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซตลอดความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์เป็นเส้นตรง

(3) การแพร่มีทิศทางเดียว

(4) พิจารณาฟลักซ์ของการถ่ายเทมวลก๊าซในระบบพิกัดฉาก

(5) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์การละลาย (solubility coefficient) ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นก๊าซ

(6) การแพร่ของก๊าซเป็นไปตามกฎของฟิกส์ (Fick's Law)

(7) ก๊าซที่ซึมผ่านจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับฟิล์มพอลิเมอร์

(8) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลก๊าซที่ผิวฟิล์มพอลิเมอร์ด้านที่สัมผัสกับบรรยากาศภายในและภายนอกบรรจุภัณฑ์มีค่าสูงมาก

(9) ฟิล์มที่ใช้จะต้องไม่รั่ว มีรอยแตก หรือเจาะรู

การแพร่เป็นกระบวนการเคลื่อนที่ของก๊าซที่ซึมผ่านภายในตัวกลาง (ฟิล์มพอลิเมอร์) ซึ่งในขั้นแรกก๊าซจะถูกดูดซับบริเวณพื้นผิวพอลิเมอร์ด้านที่มีความเข้มข้นหรือความดันของก๊าซสูง แล้วก๊าซจะเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ไปยังพื้นผิวพอลิเมอร์อีกด้านหนึ่งที่มีความเข้มข้นหรือความดันก๊าซต่ำกว่า และจะเกิดการคายซับในบริเวณพื้นผิวนี้อีกครั้ง [21] ซึ่งหลักทฤษฎีการแพร่เป็นไปตามกฎของฟิกส์ (Fick's Law) ดังสมการ (3.17) [19, 20, 21]

$$J = -D\frac{dc}{dx} \quad (3.17)$$

เมื่อ J คือ อัตราการถ่ายเทมวลก๊าซต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อเวลา

D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซในพอลิเมอร์

$\frac{dc}{dx}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของก๊าซเทียบกับระยะทาง

c คือ ความเข้มข้นก๊าซ

x คือ ระยะทางการแพร่

จากกฎของฟิกส์ (Fick' s Law) สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อมีความแตกต่างของความเข้มข้นหรือความดันก๊าซระหว่างพื้นผิว 2 ด้านของฟิล์มพอลิเมอร์จะทำให้เกิดการแพร่ผ่านของก๊าซจากที่ที่มีความเข้นข้นหรือความดันก๊าซสูงไปสู่ด้านที่มีความเข้มข้นหรือความดันก๊าซต่ำ โดยอัตราการถ่ายเทมวลก๊าซจะเพิ่มขึ้นตามความแตกต่างของความเข้นข้นหรือความดันก๊าซที่เพิ่มขึ้นและจะลดลงตามระยะทางการแพร่ที่เพิ่มขึ้น [21]

3.2.1 การคำนวณค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์แบบชั้นเดียว

จากสมการ (3.17) เมื่อพิจารณาที่สภาวะคงตัวในระบบพิกัดฉากจะได้

$$J = \frac{D(c_1 - c_2)}{x} ; c_1 > c_2 \qquad (3.18)$$

เมื่อ D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์

c_1, c_2 คือ ค่าความเข้มข้นก๊าซ โดยที่ c_1 มากกว่า c_2

x คือ ระยะทางการแพร่

เนื่องจากก๊าซที่ซึมผ่านอยู่ในสถานะก๊าซ ดังนั้นจึงเปลี่ยนความเข้มข้นก๊าซให้อยู่ในรูปของความดันก๊าซโดยใช้กฎเฮนรี่ (Henry's Law) ดังสมการ (3.19) ซึ่งเหมาะสมกับระบบที่มีความเข้มข้นของก๊าซต่ำ เช่น ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน ภายในบรรจุภัณฑ์ผักและผลไม้ [22]

$$c = Sp \qquad (3.19)$$

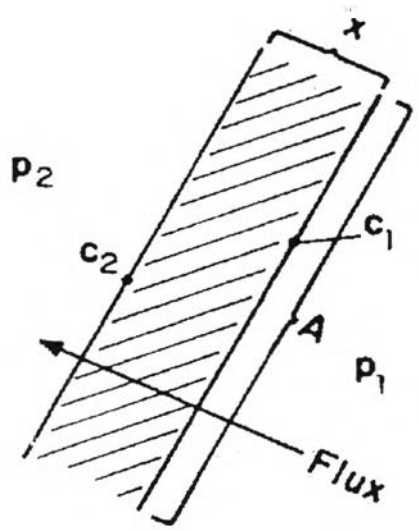
เมื่อ c คือ ความเข้มข้นของก๊าซ

S คือ ค่าสัมประสิทธิ์การละลายได้ของก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์

p คือ ค่าความดันของก๊าซ

ซึ่งค่าความสามารถในการละลายได้ของก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์จะไม่ขึ้นอยู่กับค่าความดันที่อุณหภูมิคงที่

สำหรับบรรจุภัณฑ์ผักและผลไม้ เมื่อพิจารณาฟลักซ์การถ่ายเทมวลในระบบพิกัดฉากดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ฟิล์มพอลิเมอร์แบบชั้นเดียว

จะได้ $$J = \frac{DS(p_1 - p_2)}{x}$$

แทน $$J = \frac{Q}{At}$$

เพราะฉะนั้น $$\frac{Q}{t} = \frac{DSA(p_1 - p_2)}{x}$$

แทน $$P = DS$$

จะได้อัตราการถ่ายเทก๊าซในระบบพิกัดฉากเป็นดังสมการ (3.20)

$$\frac{Q}{t} = \frac{PA(p_1 - p_2)}{x} \qquad (3.20)$$

เมื่อ Q คือ ปริมาณก๊าซที่ซึมผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

P คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์

x คือ ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์

เนื่องจากค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การแพร่และสัมประสิทธิ์การละลายได้ของก๊าซในพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิดังนี้

$$P = D^* S$$

จาก $$D = D_0 \exp(-E_d/RT) \qquad (3.21)$$

$$S = S_0 \exp(-\Delta H_s/RT) \qquad (3.22)$$

เพราะฉะนั้น $P = D_0S_0\exp[-(\Delta H_s+E_d)/RT]$

หรือ $P = P_0\exp(-E_P/RT)$ (3.23)

โดยที่ $P_0 = D_0S_0$

$E_P = \Delta H_s+E_d$

เมื่อ D_0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิอนันต์

E_d คือ ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการแพร่ก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

S_0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การละลายได้ของก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิอนันต์

ΔH_s คือ ความร้อนในการละลายก๊าซ

P_0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิอนันต์

E_P คือ พลังงานก่อกัมมันต์ในการซึมผ่านก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่วนสัมประสิทธิ์การละลายได้จะขึ้นอยู่กับก๊าซที่ซึมผ่านโดยถ้าเป็น Permanent gas ค่า ΔH_s จะมีค่าเป็นบวกและมีค่ามากซึ่งค่าความสามารถในการละลายจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น แต่ถ้าเป็นก๊าซที่สามารถควบแน่นได้ค่า ΔH_s จะมีค่าติดลบซึ่งค่าความสามารถในการละลายจะลดลงในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น

โดยส่วนใหญ่ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซจะขึ้นอยู่กับค่าความสามารถในการแพร่ ส่วนค่าความสามารถในการละลายจะมีอิทธิพลน้อยมาก ดังนั้นค่า E_P จึงมีค่าเป็นบวกเสมอ [2, 13, 18] โดยค่าพารามิเตอร์และพลังงานกัมมันต์สำหรับค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่อุณหภูมิอนันต์และพลังงานก่อกัมมันต์สำหรับค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในฟิล์มพอลิเมอร์

ฟิล์มพอลิเมอร์	P_0(O2)	P_0(CO2)	P_0(H2O)	E(O2)	E(CO2)	E(H2O)	SG	Cost
ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)[1]	7.96E+04	4.33E+04	-	31.40	25.50	-	1.38-1.41	20.00[8]
พอลิบิวทาไดอีน (Polybutadiene)[1]	3.37E+04	1.04E+04	-	29.70	21.80	-	0.91[5]	-
พอลิคลอโรพรีน (Polychloroprene)[1]	7.97E+05	4.69E+05	-	41.40	35.60	-	1.2-1.35[6]	-
ยางบิวทิล (Butyl Rubber)[1]	9.83E+05	1.02E+06	-	44.70	41.40	-	0.917-1.13[6]	-
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (ความถ่วงจำเพาะ 0.914)[2]	9.55E+05	8.90E+05	7.01E+05	42.70	38.90	33.50	0.914	28.50-29.00[5]
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (ความถ่วงจำเพาะ 0.922)[1]	1.62E+06	2.38E+05	9.00E+00	43.10	34.30	33.47	0.922	30.50-31.00[5]
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.967)[2]	6.17E+03	2.35E+03	-	34.73	28.87	-	0.967	28.50-29.00[5]
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.955)[2]	5.32E+03	4.21E+03	-	33.47	29.29	-	0.955	28.50-29.00[5]
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ความถ่วงจำเพาะ 0.964)[1]	6.37E+02	3.51E+02	-	35.10	30.10	-	0.964	29.00-29.50[5]
พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC-VF)[1]	1.21E+05	9.50E+04	-	41.40	33.10	-	1.3-1.35[4]	-
พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC-RMF)[1]	2.61E+06	1.34E+03	-	36.90	27.60	-	1.3-1.35[4]	-
พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC-AF)[1]	5.70E+04	2.69E+03	-	40.50	30.60	-	1.3-1.35[4]	-
พอลิบิวทาไดอีน-สไตรีน[1]	4.25E+04	2.06E+04	-	30.50	23.80	-	0.93-1.15	-
Rubber hydrochloride[1]	6.77E+03	2.25E+04	-	35.10	36.00	-	1.11	-
พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรท (Mylar)[2]	1.59E+01	3.70E+01	2.06E+04	26.78	25.94	2.09	1.333-1.455	31.50[7]
ซาราน 517[1]	1.61E+07	2.25E+05	-	66.50	51.50	-	1.65	-

ตารางที่ 3.3 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่อุณหภูมิอนันต์และพลังงานก่อกัมมันต์สำหรับค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในฟิล์มพอลิเมอร์ (ต่อ)

ฟิล์มพอลิเมอร์	$P_{\infty}(O2)$	$P_0(CO2)$	$P_0(H2O)$	E(O2)	E(CO2)	E(H2O)	SG	Cost
พอลิโพรพิลีน (molded)[1]	4.19E+06	3.65E+05	1.30E+11	47.70	38.07	41.84	0.900-0.905	26.00-27.00[5]
พอลิโพรพิลีน (extruded quench film)[2]	5.84E+06	2.09E+01	-	48.12	13.81	-	0.900-0.905	26.00-27.00[5]
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.907)[2]	4.00E+06	3.45E+05	1.30E+07	47.70	38.10	42.30	0.907	26.00-27.00[5]
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8871)[2]	1.68E+06	2.49E+06	3.58E+03	46.00	44.00	23.80	0.8871	26.00-27.00[5]
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8931)[2]	1.48E+06	2.13E+06	-	46.00	44.00	-	0.8931	26.00-27.00[5]
พอลิโพรพิลีน (ความถ่วงจำเพาะ 0.8998)[2]	1.28E+06	1.85E+06	-	46.00	44.00	-	0.8998	26.00-27.00[5]
พอลิไวนิลคลอไรด์ (unplasticized)[3]	2.57E+06	1.34E+07	2.93E+04	55.80	56.80	22.90	1.30-1.35	-

[1] รายการอ้างอิง [15], [2] รายการอ้างอิง [21], [3] รายการอ้างอิง [13], [4] รายการอ้างอิง [19]' [5] รายการอ้างอิง [35]

[6] รายการอ้างอิง [36], [7] รายการอ้างอิง [37], [8] บริษัท พี&พี จำกัด, [9] บริษัท อังเคิลฟิลด์ จำกัด

$P_0(O2)$ คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์มพอลิเมอร์ (ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1})

$P_0(CO2)$ คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในฟิล์มพอลิเมอร์ (ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1})

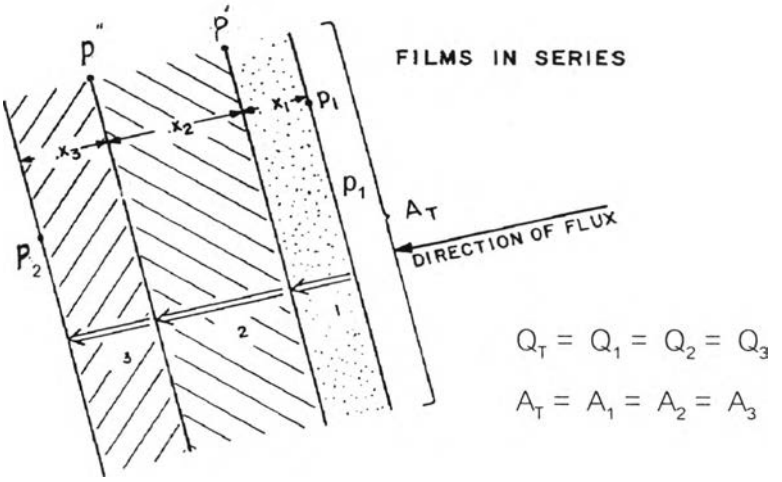
$P_{\infty}(H2O)$ คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มพอลิเมอร์ (ml mil cm^{-2} hr^{-1} atm^{-1})

SG คือ ความถ่วงจำเพาะ

Cost คือ ราคาพอลิเมอร์ (baht kg^{-1})

3.2.2 การคำนวณค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น

ถ้ากำหนดให้ฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นมีจำนวนทั้งหมด 3 ชั้นโดยมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น

เมื่อพิจารณาที่สภาวะคงตัว

$$Q_T = Q_1 = Q_2 = Q_3 \tag{3.24}$$

$$A_T = A_1 = A_2 = A_3 \tag{3.25}$$

แทนสมการ (3.24) ลงในสมการ (3.20) จะได้

$$\frac{Q_T}{t} = \frac{P_1A_1(p_1 - p')}{x_1} = \frac{P_2A_2(p' - p'')}{x_2} = \frac{P_3A_3(p'' - p_2)}{x_3}$$

เพราะฉะนั้น

$$p_1 - p' = \frac{Q_T}{t}\frac{x_1}{P_1A_1}$$

$$p' - p'' = \frac{Q_T}{t}\frac{x_2}{P_2A_2}$$

$$p'' - p_2 = \frac{Q_T}{t}\frac{x_3}{P_3A_3}$$

ดังนั้น

$$p_1 - p_2 = \frac{Q_T}{t}\left(\frac{x_1}{P_1A_1} + \frac{x_2}{P_2A_2} + \frac{x_3}{P_3A_3}\right)$$

แต่จากสมการ (3.25) จะได้

$$p_1 - p_2 = \frac{Q_T}{tA_T}\left(\frac{x_1}{P_1} + \frac{x_2}{P_2} + \frac{x_3}{P_3}\right)$$

$$\frac{Q_T}{t} = A_T(p_1 - p_2)\left[\frac{x_1}{P_1} + \frac{x_2}{P_2} + \frac{x_3}{P_3}\right]^{-1} \qquad (3.26)$$

เมื่อจัดสมการ (3.26) ให้มีรูปแบบเดียวกับสมการ (3.20) โดยที่ x_T คือค่าความหนารวมของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นซึ่งเปรียบเสมือนค่าความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์แบบชั้นเดียว (x) P_T คือค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นซึ่งเปรียบเสมือนค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์แบบชั้นเดียว (P) และ A_T คือพื้นที่ผิวของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นซึ่งเปรียบเสมือนพื้นที่ผิวฟิล์มพอลิเมอร์แบบชั้นเดียว (A) จะได้ว่า

$$\frac{x_T}{P_T} = \frac{x_1}{P_1} + \frac{x_2}{P_2} + \frac{x_3}{P_3} \qquad (3.27)$$

เมื่อ x_T คือ ความหนารวมของฟิล์มพอลิเมอร์

x_1, x_2, x_3 คือ ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ชั้นที่ 1, 2 แล 3 ตามลำดับ

P_T คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น

P_1, P_2, P_3 คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์ชั้นที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

กรณี n ชั้น จะได้

$$\frac{x_T}{P_T} = \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{P_i} \qquad (3.28)$$

เมื่อ n คือ จำนวนชั้นทั้งหมดของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น

i คือ ชนิดฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชั้น

x_i คือ ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ชั้นที่ i

P_i คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์ชั้นที่ i

สำหรับกรรมวิธีการผลิตฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4 อาจต้องมีการใช้กาวในการผสานพอลิเมอร์ที่แตกต่างกันเข้าด้วยกันทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการหาค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น Cooksey และคณะ [54] ได้รายงานว่าการคำนวณหาค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นอาจจะไม่ต้องนำผลกระทบต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซต่อชั้นกาวมาพิจารณาก็ได้ ซึ่งจะได้ค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซใกล้เคียงกัน

3.3 การคำนวณความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชั้นของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น

จากงานวิจัยที่ผ่าน [15, 52] มาพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์แบบชั้นเดียวอาจจะไม่สามารถตอบสนองต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่ต้องการสำหรับการเก็บรักษาผักและผลไม้ภายใต้สภาพบรรยากาศดัดแปรได้ วิธีหนึ่งที่นำมาใช้แทนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่คือ การใช้บรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น ซึ่งมีสมการการคำนวณค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซดังสมการ (3.28)

สำหรับการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นในปัจจุบันใช้วิธีสุ่มทดลอง ทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำหลักการทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการกำหนดชนิดและความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชั้นของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำตามต้องการ และมีต้นทุนด้านวัตถุดิบต่ำสุดในการคำนวณนี้กำหนดให้ฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชั้นวางซ้อนกันสนิทโดยไม่มีช่องว่างระหว่างชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ในฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น และไม่พิจารณาผลกระทบของชั้นกาวต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น โดยระบบสมการที่พิจารณามีดังนี้

3.3.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

$$Z_{min} = A\sum_{i=1}^{n} \rho_i c_i x_i \qquad (3.29)$$

3.3.2 ฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraint function)

สมการแสดงค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซออกซิเจน

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{P_{O_2,i}} = \frac{x_T}{P_{O_2,T}} \qquad (3.30)$$

สมการแสดงค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{P_{CO_2,i}} = \frac{x_T}{P_{CO_2,T}} \qquad (3.31)$$

สมการแสดงค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของไอน้ำ

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{P_{H_2O,i}} = \frac{x_T}{P_{H_2O,T}} \qquad (3.32)$$

สมการความหนารวม

$$\sum_{i=1}^{n} x_i = x_T \qquad (3.33)$$

เมื่อ Z_{min} คือ ต้นทุนวัตถุดิบต่ำสุดของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น

A คือ พื้นที่ผิวฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น

ρ คือ ค่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์ชนิด i ใด ๆ

c_i คือ ราคาพอลิเมอร์แต่ละชนิด

x_i คือ ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิด

x_T คือ ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์โดยรวม

$P_{O_2,i}$ คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของพอลิเมอร์ชนิดที่ i

$P_{CO_2,i}$ คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของพอลิเมอร์ชนิดที่ i

$P_{H_2O,i}$ คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของพอลิเมอร์ชนิดที่ i

$P_{O_2,T}$ คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น (ml(STP) mil cm^{-2} atm^{-1} hr^{-1})

$P_{CO_2,T}$ คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น

$P_{H_2O,T}$ คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น

n คือ จำนวนชั้นของฟิล์มพอลิเมอร์

ในการคำนวณเพื่อกำหนดชนิดและความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เหมาะสมในระบบสมการดังกล่าวที่มีจำนวนตัวแปร (x_i) จำนวน n ตัวซึ่งมากกว่าจำนวนฟังก์ชันข้อจำกัด (สำหรับระบบที่พิจารณามี 4 สมการ) จะมีจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้สูงสุดเท่ากับ

$$\frac{n!}{4!\,(n-4)!} \tag{3.34}$$

ดังนั้นจึงทำให้เสียเวลาในการหาคำตอบที่สอดคล้องกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จึงมีการคิดค้นวิธีซิมเพล็กซ์ (simplex method) ซึ่งเป็นวิธีในการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นตรงโดยมีรูปแบบดังนี้

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \ldots + c_nx_n$ (3.35)

ฟังก์ชันข้อจำกัด $a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1n}x_n \leq, \geq, = b_1$ (3.36)

$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \ldots + a_{2n}x_n \leq, \geq, = b_2$ (3.37)

$\vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots$

$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \ldots + a_{mn}x_n \leq, \geq, = b_m$ (3.38)

$x_j \geq 0$

เมื่อ Z = ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

c_j = กำไรหรือต้นทุนต่อหน่วยหรือค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรตัดสินใจในฟังก์ชันวัตถุประสงค์

a_{ij} = ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรตัดสินใจ

x_j = ตัวแปรที่ใช้ในการตัดสินใจ

b_i = ค่าคงที่แสดงจำนวนทรัพยากรชนิดที่ i ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดในฟังก์ชันข้อจำกัด

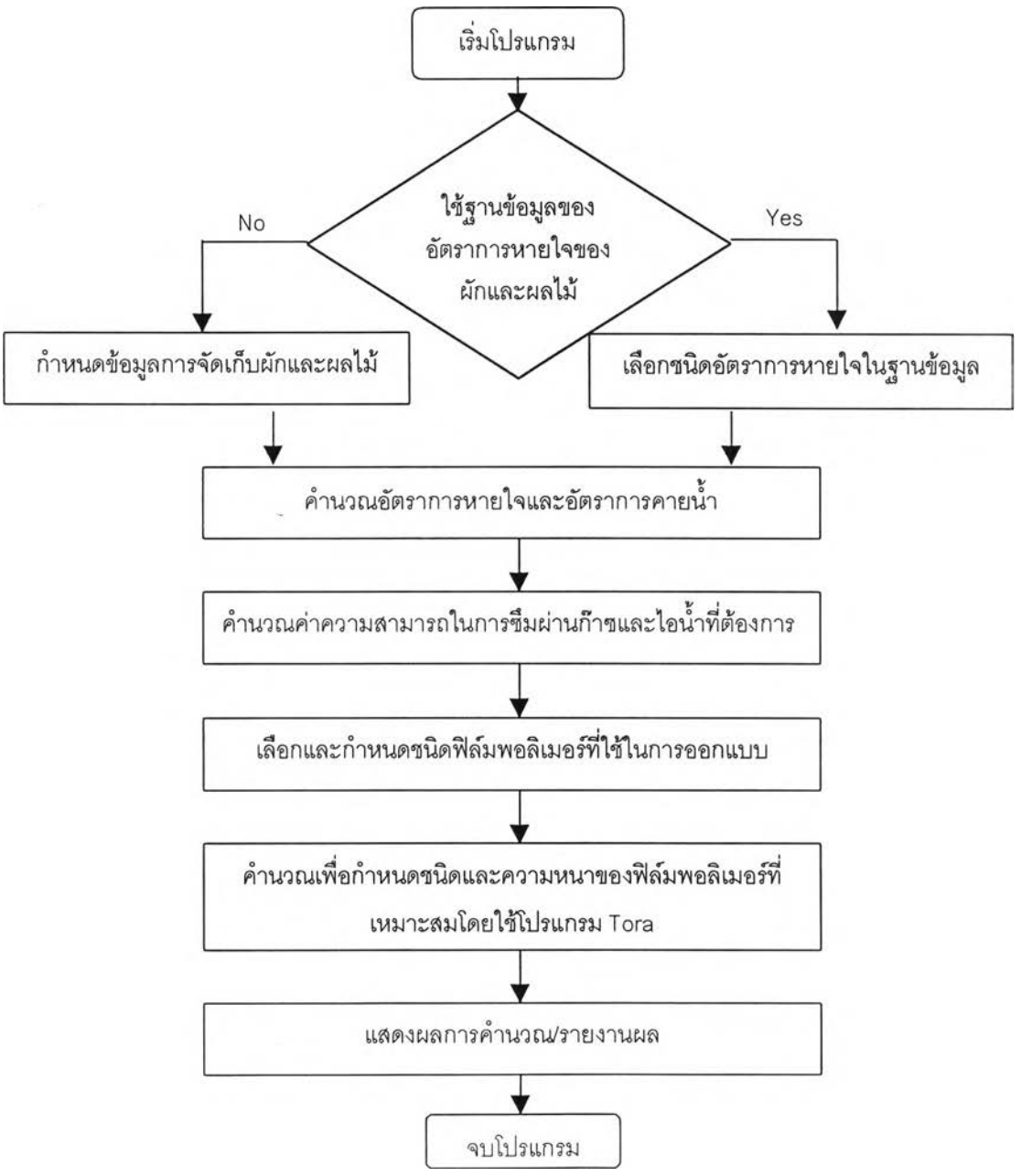
$i = 1, 2, \ldots, m$

$j = 1, 2, \ldots, n$

วิธีการซิมเพล็กซ์จะเริ่มหาคำตอบจากจุดยอด (extreme point) จุดหนึ่งซึ่งเป็นคำตอบหนึ่งในระบบสมการแล้วทำการคำนวณด้วยวิธีการดังแสดงในภาคผนวก ค. ไปยังจุดยอด (extreme point) ถัดไปเพื่อหาคำตอบที่สอดคล้องและเหมาะสมกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง [56]

3.4 แผนภูมิโปรแกรมการคำนวณ

ในงานวิจัยนี้ได้สร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้ในการกำหนดชนิดและความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชั้นสำหรับฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นด้วยภาษาไมโครซอฟท์ วิชวล เบสิค รุ่น 6 (Microsoft visual basic version 6) และโปรแกรมโทรา (Tora program) สำหรับนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรชนิดฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ตามต้องการ โดยมีต้นทุนด้านวัตถุดิบต่ำสุด ดังแผนภูมิแสดงขั้นตอนในโปรแกรมดังรูปที่ 3.4 ดังนี้



รูปที่ 3.4 แผนภูมิแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น

3.5 ข้อมูลตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาการออกแบบบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น

ในงานวิจัยนี้ได้นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้นมาใช้ในการกำหนดชนิดและความหนาของฟิลม์พอลิเมอร์แต่ละชั้นในบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นเพื่อให้ได้ค่าความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำที่ต้องการสำหรับการจัดเก็บผักและผลไม้ภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร โดยใช้ข้อมูลตัวอย่างในการศึกษาการออกแบบบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นดังนี้

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลตัวอย่างสำหรับการออกแบบบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น [15]

ชนิดผักและผลไม้	เศษส่วนโดยปริมาตร O_2	เศษส่วนโดยปริมาตร CO_2	R_{O_2}	R_{CO_2}	อุณหภูมิ (°C)	RH	ช่วง RH	k	W	A	x_T
แอบเปิ้ล (golden)	0.03	0.03	1.1	1.2	274	-	85-90	-	2.27	1320	1
กะหล่ำปลี	0.03	0.06	1.3	1.3	273	-	92-95	0.0342	0.5	627	1
ชิ้นฉ่ายตัดเป็นชิ้น	0.05	0.03	2.8	1.7	274.5	-	92-95	0.396	0.7	1210	1
พริกไทยสด	0.03	0.03	5.0	5.0	281.5	-	85-90	0.09	0.2	725	1
ลีค	0.022	0.049	10.0	9.0	274.5	95	-	0.18	0.3	888	1

RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ภายในบรรจุภัณฑ์ (%)

k คือ สัมประสิทธิ์การคายน้ำ (kg kg^{-1} atm^{-1} hr^{-1})

W คือ น้ำหนักผักและผลไม้ (kg)

A คือ พื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์ (cm^2)

x_T คือ ความหนาฟิล์มพอลิเมอร์โดยรวม (mil)

R_O คือ อัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน (ml kg^{-1} hr^{-1})

R_{CO_2} คือ อัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ml kg^{-1} hr^{-1})

3.6 โปรแกรมการคำนวณ

ในการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นให้มีความเหมาะสมต่อการเก็บรักษาผักและผลไม้ภายใต้บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร (MAP) จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมาดำเนินการเพื่อกำหนดชนิดและความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชั้นของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นได้อย่างเหมาะสม โดยคอมพิวเตอร์ที่ใช้โปรแกรมนี้จะต้องทำการติดตั้งโปรแกรมวิชวลเบสิค รุ่น 6 ไว้แล้ว เพื่อใช้ในการดำเนินโปรแกรมนี้ได้

ในแผ่นโปรแกรมจะประกอบด้วยไฟล์ต่าง ๆ คือ database fruit, Tora และ MAP โดยก่อนการดำเนินการใช้โปรแกรม ผู้ใช้จะต้องทำการติดตั้งไฟล์ Tora และ Database fruit ลงใน C:\Program Files แล้วจึงดำเนินการโปรแกรมดังนี้

(1) กดปุ่ม "start" ที่ทาสก์บาร์ตรงบริเวณส่วนล่างของหน้าจอ

(2) เลือกเมนู "Run..."

(3) กดปุ่ม "Browse" เพื่อทำการเปิดไฟล์ MAP ในไดร์ฟ A

(4) กดปุ่ม "OK"

3.3.1 การใช้โปรแกรม

ในการอธิบายการใช้โปรแกรม จะทำการอธิบายโดยแบ่งตามขั้นตอนการดำเนินงานเป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

(1) ขั้นตอนที่ 1 : ข้อมูลผักและผลไม้สำหรับ MAP
(Step 1 : Data for MAP Design)

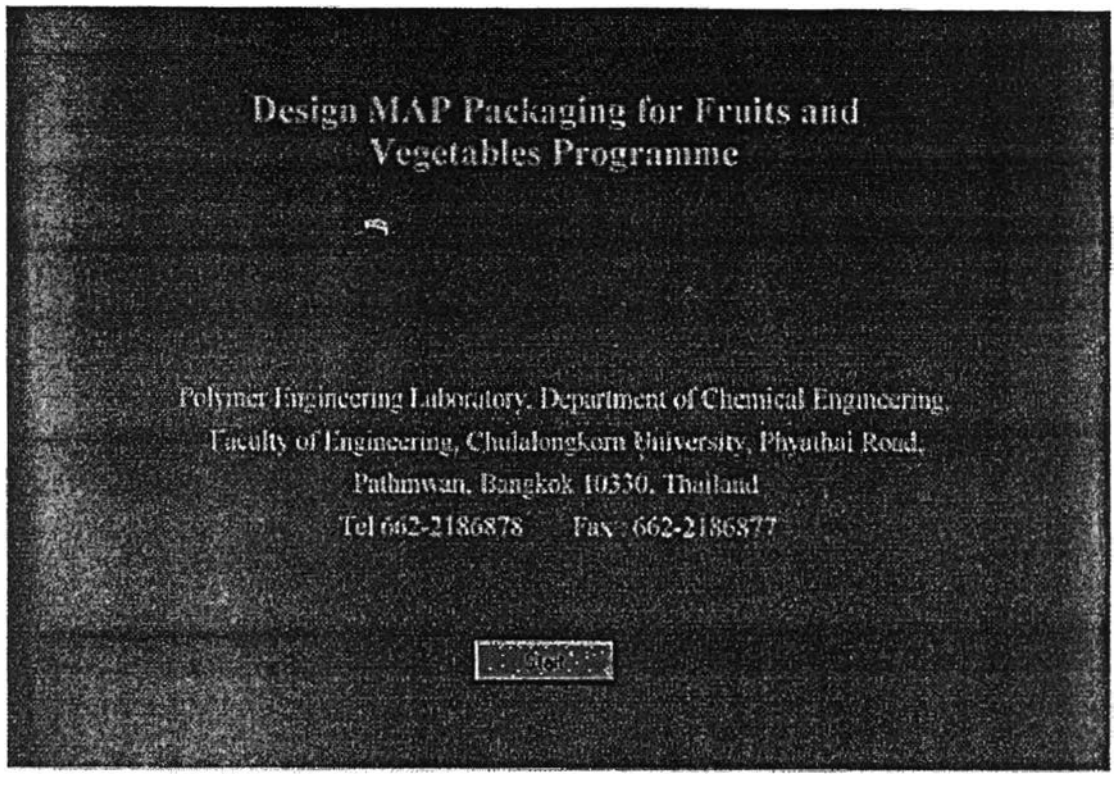
(2) ขั้นตอนที่ 2 : ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำที่ต้องการ
(Step 2 : Required gas permeability for fruits and vegetables)

(3) ขั้นตอนที่ 3 : การออกแบบพอลิเมอร์ (Step 3 : Polymer design)

(4) ขั้นตอนที่ 4 : การออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น
(Step 4 : Design multilayer film)

(5) ขั้นตอนที่ 5 : การสรุปและรายงานผล (Step 5 : Summary)

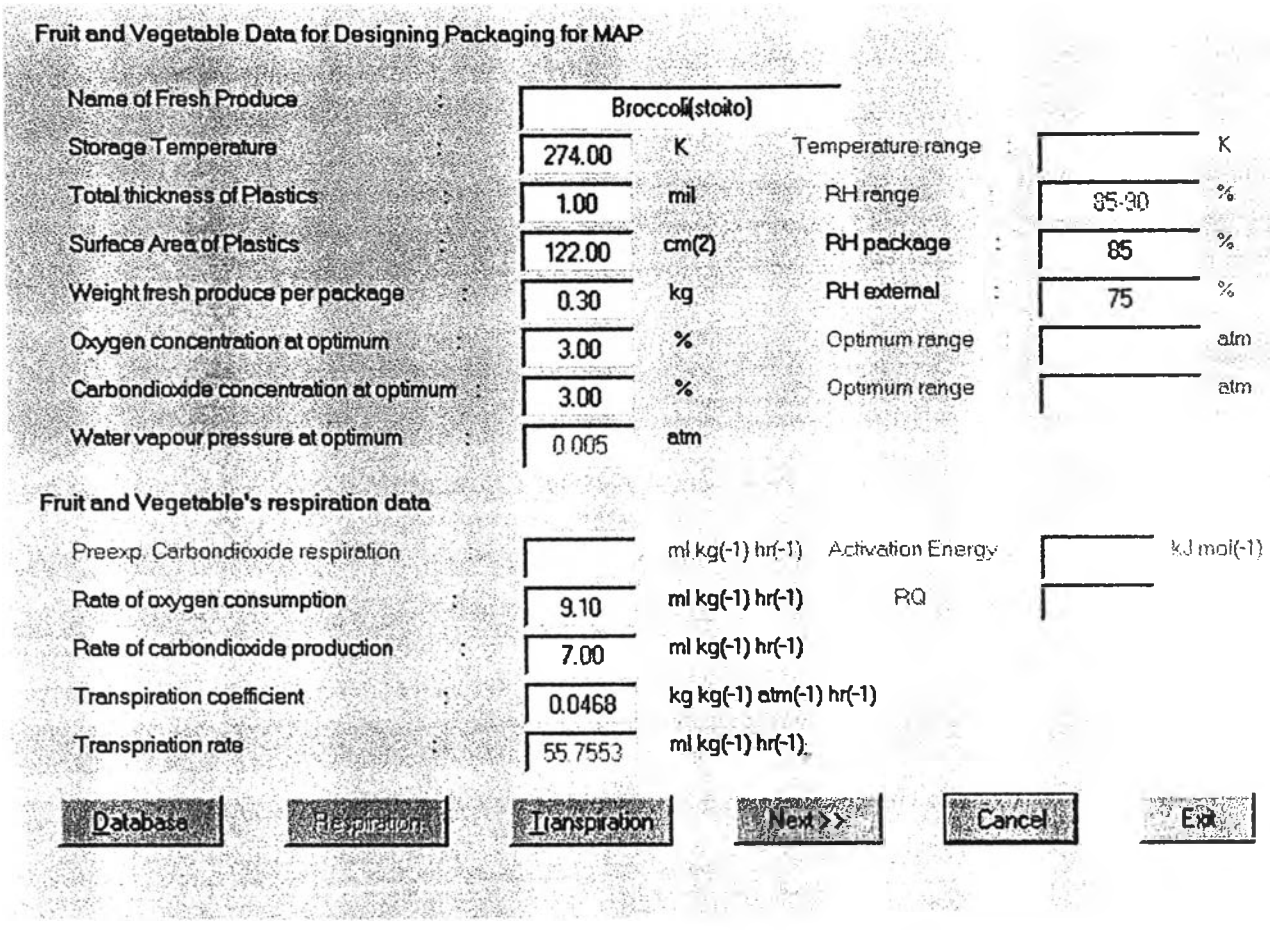
เมื่อทำการดำเนินโปรแกรมจะเข้าสู่หน้าจอแรกดังรูปที่ 3.5 หลังจากนั้นกดปุ่ม start เพื่อไปสู่ขั้นตอนที่ 1



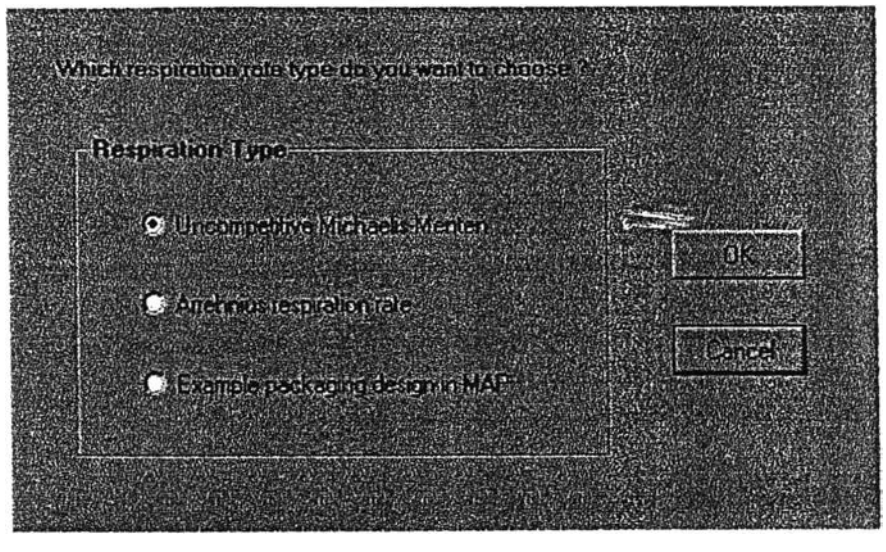
รูปที่ 3.5 หน้าจอเริ่มแรก

3.6.1 ขั้นตอนที่ 1

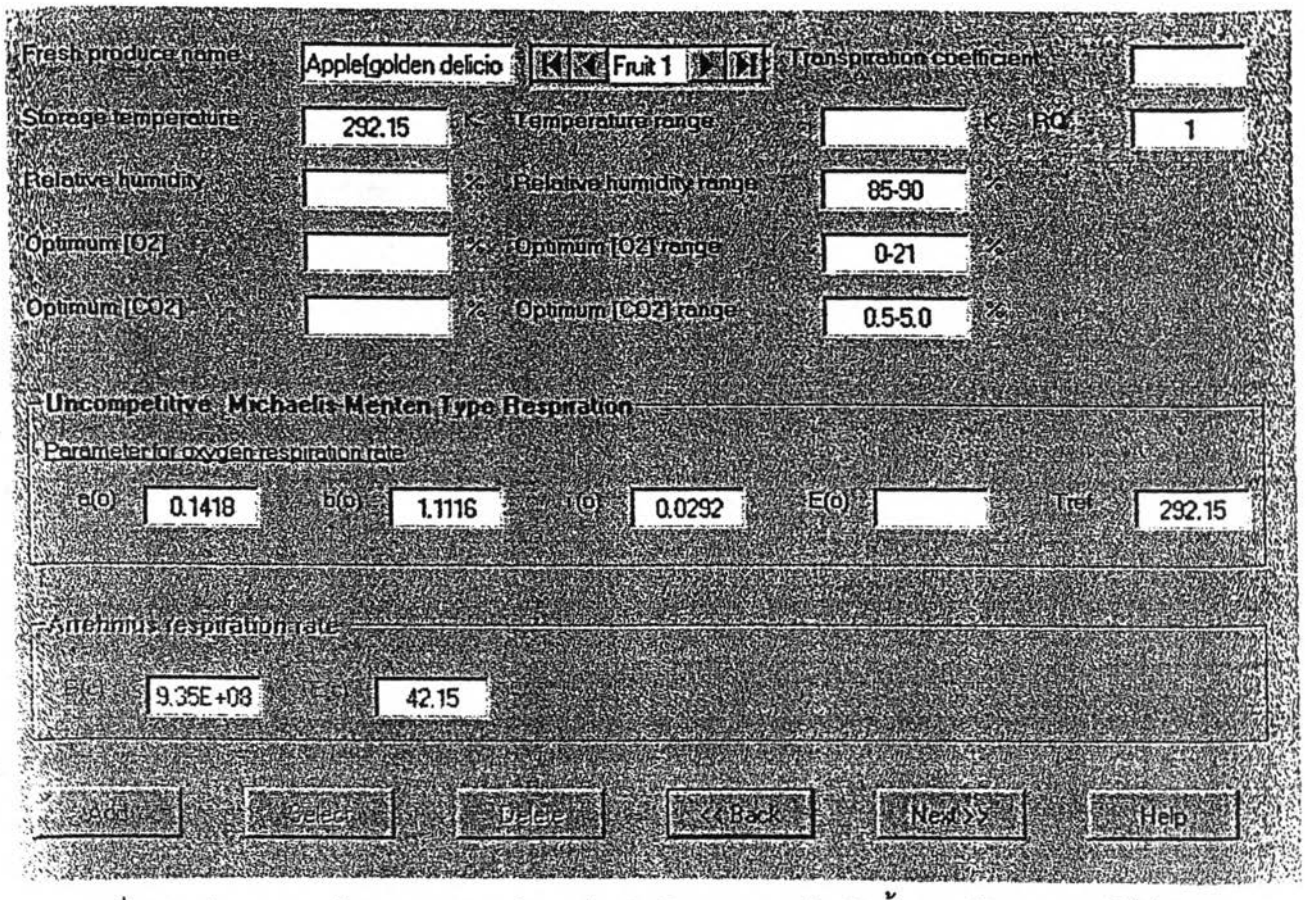
ในขั้นตอนที่ 1 จะปรากฏหน้าจอที่แสดงข้อมูลผักและผลไม้ที่ใช้ในการออกแบบ MAP ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยข้อมูลอาจจะระบุหรือเลือกจากฐานข้อมูลโดยกดปุ่ม "Database" ซึ่งจะสามารถเลือก แก้ไข และเพิ่มเติมในฐานข้อมูลทั้ง 3 ฐานข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งได้แก่ ฐานข้อมูลอัตราการหายใจไมเคิลลิสเมนเทนซนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ อัตราการหายใจของอาร์เรเนียส และตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบ MAP โดยมีหน้าจอดังแสดงในรูปที่ 3.8 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ



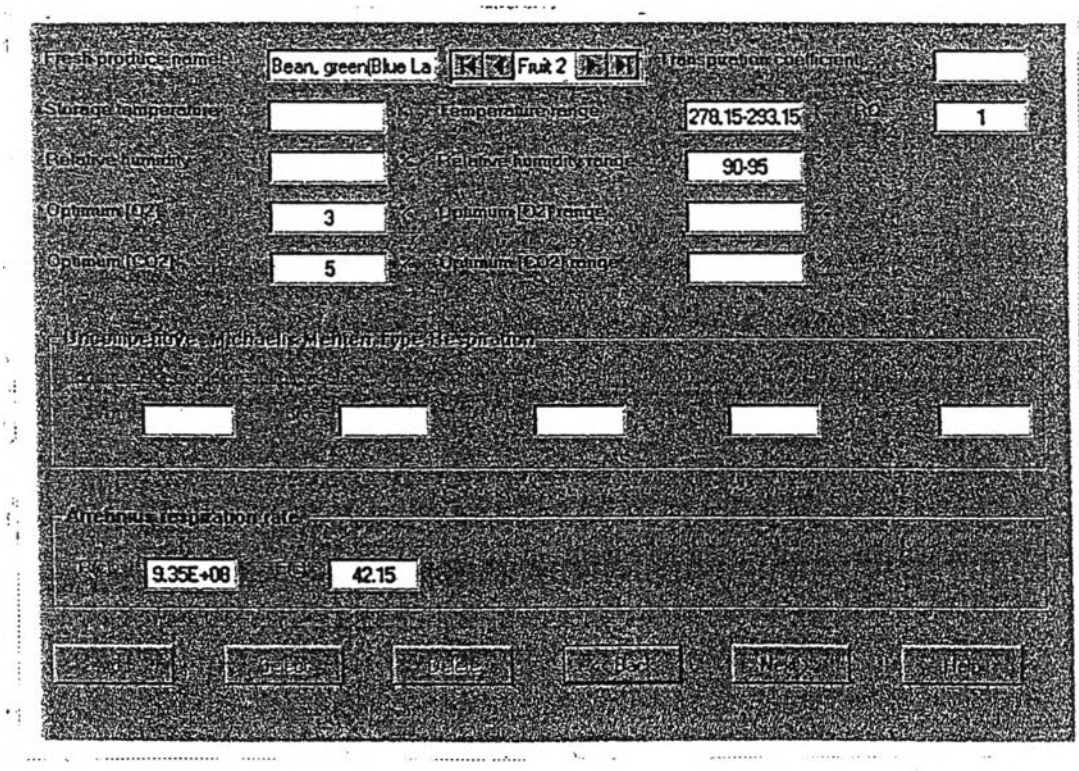
รูปที่ 3.6 หน้าจอข้อมูลผักและผลไม้



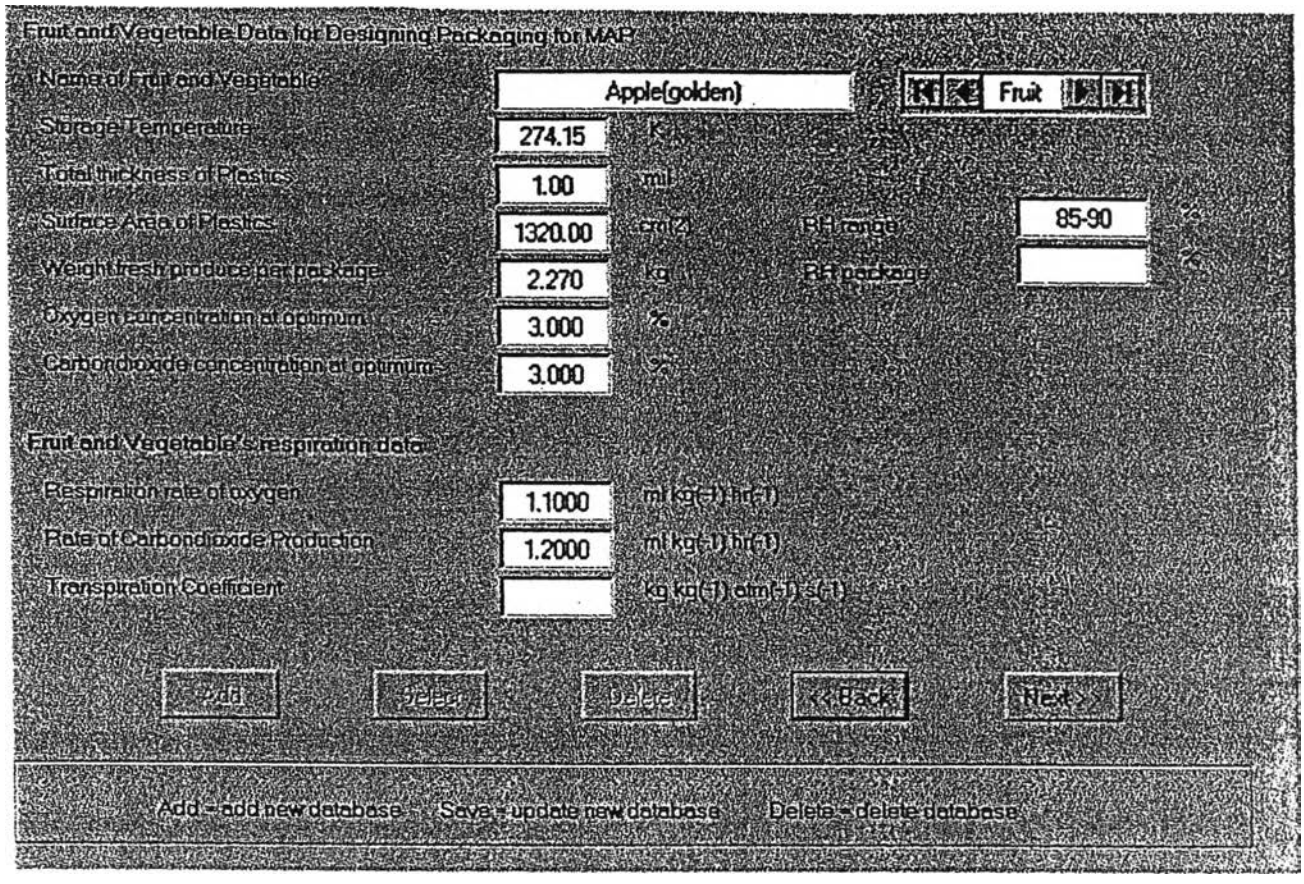
รูปที่ 3.7 หน้าจอ Respiration Type



รูปที่ 3.8 หน้าจอแสดงข้อมูลตามแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ



รูปที่ 3.9 หน้าจอแสดงข้อมูลพื้นฐานตามสมการอาร์เรเนียส



รูปที่ 3.10 หน้าจอแสดงตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบ

จากรูปที่ 3.8 – 3.10 จะปรากฏปุ่มคำสั่งต่าง ๆ ซึ่งมีหน้าที่ดังนี้

(1) ปุ่ม "Fruit1" "Fruit2" และ "Fruit" เพื่อใช้ในการดูข้อมูลต่าง ๆ ที่มีอยู่ในฐานข้อมูลนั้น

(2) ปุ่มคำสั่ง "Add" เพื่อใช้ในการเพิ่มเติมข้อมูลใหม่ลงในฐานข้อมูล

(3) ปุ่มคำสั่ง "Edit" เพื่อใช้ในการแก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงข้อมูลที่มีอยู่ในฐานข้อมูล

(4) ปุ่มคำสั่ง "Select" เพื่อใช้ในการบันทึกข้อมูลที่มีการแก้ไข เปลี่ยนแปลง หรือข้อมูลใหม่เพื่อบันทึกไว้ในฐานข้อมูล

(5) ปุ่มคำสั่ง "Delete" เพื่อใช้ในการลบข้อมูลออกจากฐานข้อมูล

(6) ปุ่มคำสั่ง "Back" เพื่อใช้ในการย้อนกลับไปยังหน้าจอข้อมูลผักและผลไม้ (รูปที่ 3.6)

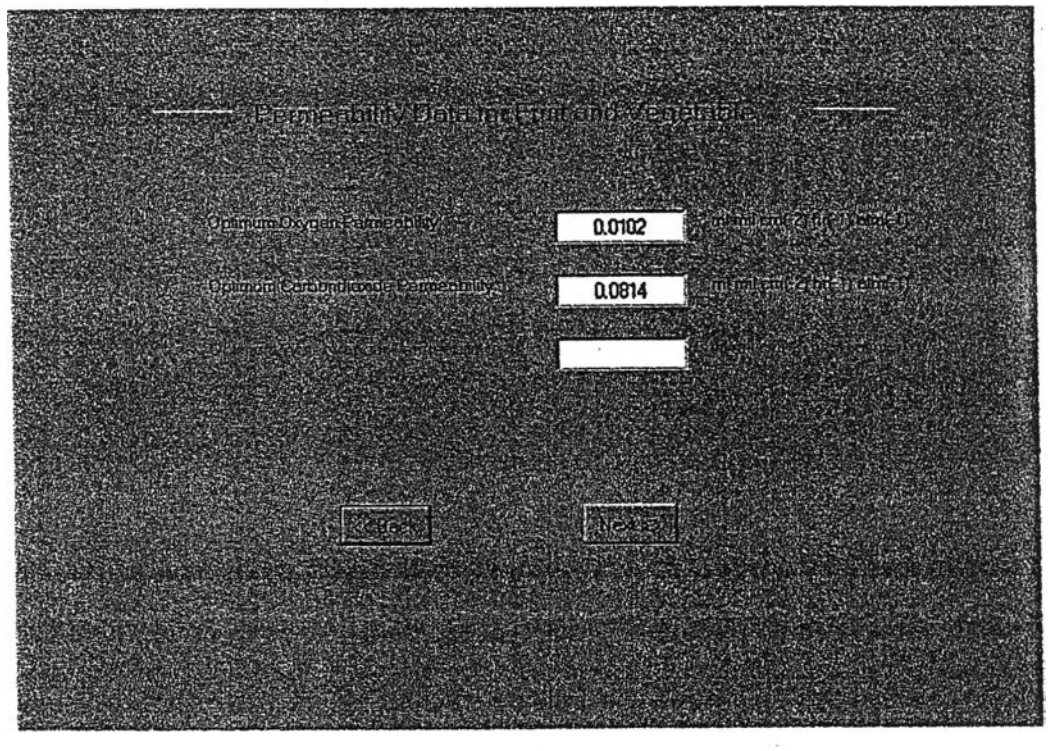
(7) ปุ่มคำสั่ง "Next" หลังจากที่ทำการเลือก แก้ไข และเพิ่มเติมข้อมูลเรียบร้อยแล้ว กดปุ่ม "Next" เพื่อไปยังขั้นตอนต่อไป

(8) ปุ่มคำสั่ง "Help" จะประกอบด้วยข้อมูลเบื้องต้นของ MAP ความหมาย และหน่วยของตัวแปรต่าง ๆ

หลังจากกดปุ่ม "Next" ข้อมูลที่ถูกเลือกจากฐานข้อมูลจะถูกระบุไว้ในหน้าจอแสดงข้อมูลผักและผลไม้ (รูปที่ 3.6) ซึ่งสามารถคำนวณอัตราการหายใจของพืชและอัตราการคายน้ำโดยการกดปุ่ม "Respiration" และ "Transpiration" ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถลบข้อมูลที่เลือกทั้งหมดโดยการกดปุ่ม "cancel" และออกจากโปรแกรมโดยการกดปุ่ม "exit"

3.6.2 ขั้นตอนที่ 2

หลังจากกดปุ่ม "Next" ในหน้าจอแสดงข้อมูลผักและผลไม้ (รูปที่ 3.6) จะเข้าสู่ขั้นตอนที่ 2 ซึ่งจะแสดงข้อมูลค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำที่ต้องการสำหรับการจัดเก็บผักและผลไม้ที่ต้องการได้ดังรูปที่ 3.11 โดยมีปุ่ม "Back" เพื่อย้อนกลับไปยังหน้าจอเดิม และปุ่ม "Next" เพื่อดำเนินไปยังขั้นตอนที่ 3 ถัดไป



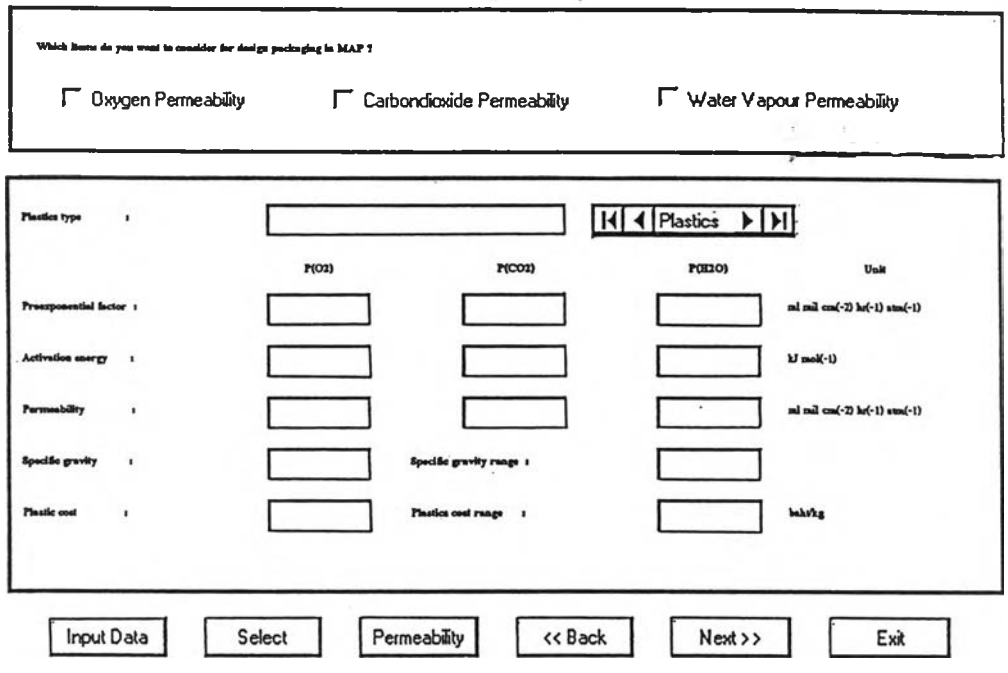
รูปที่ 3.11 หน้าจอแสดงค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำ

3.6.3 ขั้นตอนที่ 3

ในหน้าจอขั้นตอนที่ 3 ซึ่งเป็นหน้าจอการออกแบบพอลิเมอร์ ผู้ใช้สามารเลือกชนิดและกำหนดข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ โดยมีหน้าจอดังรูปที่ 3.12 ซึ่งมีขั้นตอนในการเลือกดังนี้

(1) ให้เลือกค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำที่ต้องการพิจารณาก่อน

(2) ทำการระบุหรือเลือกชนิดของพอลิเมอร์ที่มีค่าความสอดคล้องกับประเภทค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำที่ต้องการพิจารณา โดยอาจจะใช้ข้อมูลพลาสติกในฐานข้อมูลก็ได้



รูปที่ 3.12 หน้าจอการออกแบบพอลิเมอร์

ในหน้าจอนี้จะประกอบด้วยปุ่มคำสั่งต่าง ๆ ดังนี้

(1) ปุ่ม "Plastics" เพื่อใช้ในการดูข้อมูลต่าง ๆ ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่อยู่ในฐานข้อมูล

(2) ปุ่ม "Database" เพื่อเลือกชนิดฟิล์มพอลิเมอร์ที่ต้องการจากฐานข้อมูล และยังสามารถแก้ไข และเพิ่มเติมข้อมูลต่าง ๆ ในฐานข้อมูลได้ดังรูปที่ 3.13

(3) ปุ่ม "Select" เพื่อทำการบันทึกข้อมูลพอลิเมอร์ที่ทำการเลือกไว้ในตารางข้อมูล

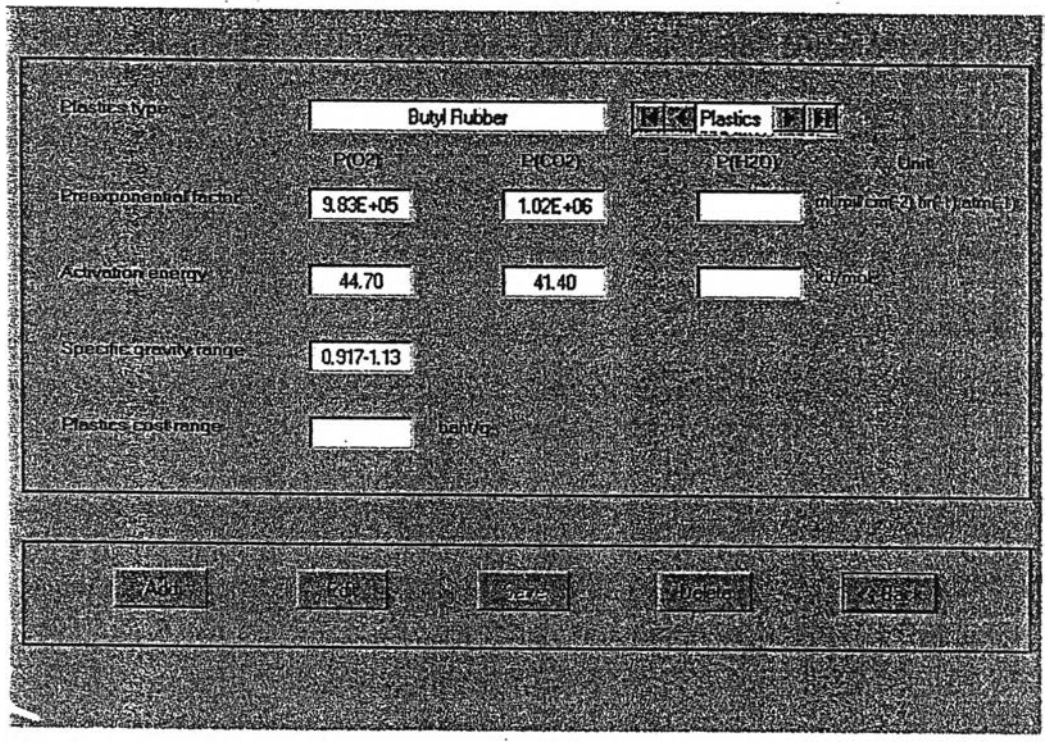
(4) ปุ่ม "Permeability" เพื่อใช้ในการคำนวณค่า Permeability ของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ

(5) ปุ่ม "Back" เพื่อใช้ในการย้อนกลับไปยังหน้าจอเดิม

(6) ปุ่ม "Next" หลังจากที่ทำการระบุหรือเลือกข้อมูลฟิล์มพอลิเมอร์เรียบร้อยแล้ว กดปุ่ม "Next" เพื่อไปยังขั้นตอนต่อไป

(7) ปุ่ม "Exit" ออกจากโปรแกรม

ในส่วนการแก้ไข และเพิ่มเติมข้อมูลฟิล์มพอลิเมอร์ในฐานข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 3.13 จะประกอบด้วยปุ่มคำสั่งดังนี้



รูปที่ 3.13 หน้าจอการแก้ไขและเพิ่มเติมข้อมูลพลาสติกในฐานข้อมูล

(1) ปุ่ม "Plastics" เพื่อดูข้อมูลฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิดในฐานข้อมูล

(2) ปุ่ม "Add" เพื่อใช้ในการเพิ่มเติมข้อมูลใหม่ในฐานข้อมูล

(3) ปุ่ม "Edit" เพื่อใช้ในการแก้ไขข้อมูลที่มีในฐานข้อมูล

(4) ปุ่ม "Save" เพื่อใช้ในการบันทึกข้อมูลที่มีการแก้ไขและเพิ่มเติมลงในฐานข้อมูล

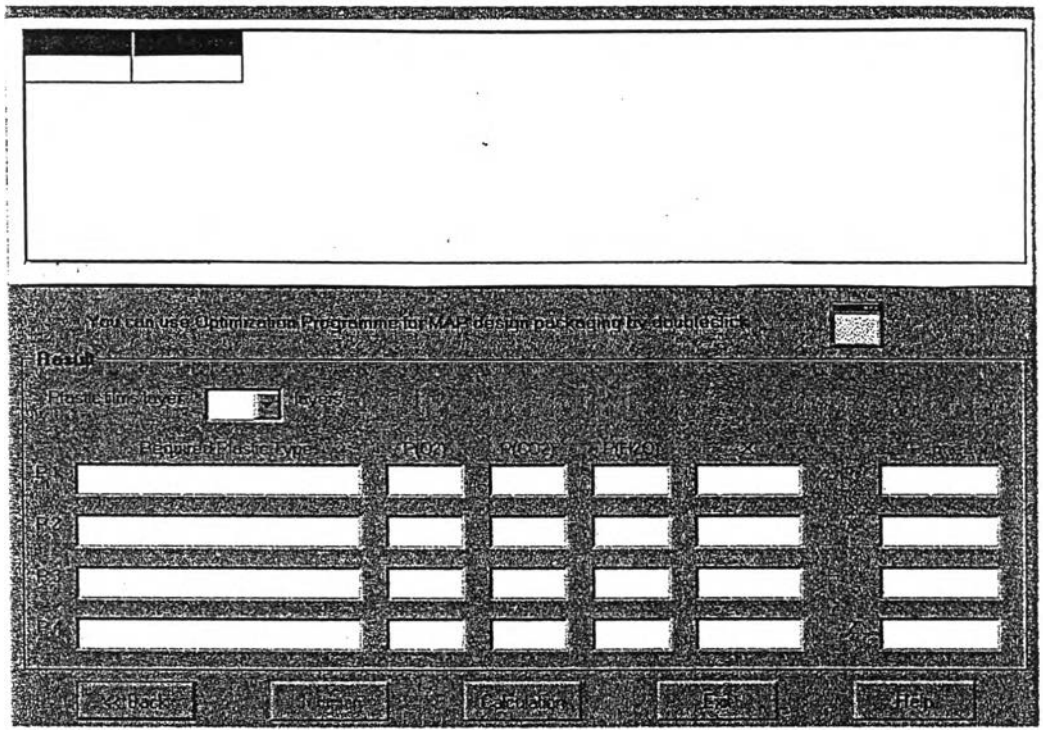
(5) ปุ่ม "Delete" เพื่อลบข้อมูลออกจากฐานข้อมูล

(6) ปุ่ม "Back" เมื่อทำการแก้ไขและเพิ่มเติมข้อมูลในฐานข้อมูลเรียบร้อยแล้ว กดปุ่ม "Back" จะกลับไปยังหน้าจอการออกแบบพอลิเมอร์ (รูปที่ 3.12) เพื่อดำเนินการต่อไป

หลังจากทำการเลือกชนิดฟิล์มพอลิเมอร์ในขั้นตอนที่ 3 เรียบร้อยแล้ว กดปุ่ม "Next" เพื่อไปยังขั้นตอนที่ 4 ต่อไป

3.6.4 ขั้นตอนที่ 4

เมื่อกดปุ่ม next จากขั้นตอนที่ 3 จะเข้าสู่หน้าจอขั้นตอนที่ 4 ดังรูปที่ 3.14 ซึ่งประกอบด้วยตารางแสดงข้อมูลพลาสติกต่าง ๆ ที่ต้องการพิจารณาในการออกแบบ มาใช้ในการคำนวณหาชนิดและความหนาของฟิลม์พอลิเมอร์แต่ละชั้นที่เหมาะสมสำหรับบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรชนิดฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น โดยการกด เพื่อเข้าสู่โปรแกรมโทรา (Tora)



รูปที่ 3.14 หน้าจอการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น

โปรแกรมโทรา เป็นโปรแกรมที่สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมสำหรับโปรแกรมเชิงเส้นตรงตามในสมการ (3.29) – (3.33) โดยทำการป้อนข้อมูลดังนี้

(1) ค่าสัมประสิทธิ์ของ x_i ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของพอลิเมอร์แต่ละชนิด คือ ค่าที่ระบุในตารางคอลัมน์ Objective function

(2) ค่าสัมประสิทธิ์ของ x_i ในฟังก์ชันข้อจำกัดของค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซออกซิเจน คือ ค่าที่ระบุในตารางคอลัมน์ CoeffP(O_2)

(3) ค่าสัมประสิทธิ์ของ x_i ในฟังก์ชันข้อจำกัดของค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คือ ค่าที่ระบุในตารางคอลัมน์ CoeffP(CO_2)

(4) ค่าสัมประสิทธิ์ของ x_i ในฟังก์ชันข้อจำกัดของค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของไอน้ำคือ ค่าที่ระบุในตารางคอลัมน์ CoeffP(H_2O)

(5) ค่าสัมประสิทธิ์ของ x_i ในฟังก์ชันข้อจำกัดของความหนารวม คือ ค่าที่ระบุในตารางคอลัมน์ Thickness

(6) ค่าคงที่ในสมการฟังก์ชันข้อจำกัดสำหรับค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซออกซิเจน คือ ค่าที่ระบุในตารางคอลัมน์ RHSP(O_2)

(7) ค่าคงที่ในสมการฟังก์ชันข้อจำกัดสำหรับค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คือ ค่าที่ระบุในตารางคอลัมน์ RHSP(CO_2)

(8) ค่าคงที่ในสมการฟังก์ชันข้อจำกัดสำหรับค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของไอน้ำ คือ ค่าที่ระบุในตารางคอลัมน์ RHSP(H_2O)

(9) ค่าคงที่ในสมการฟังก์ชันข้อจำกัดสำหรับความหนารวม คือ ค่าที่ระบุในตารางคอลัมน์ RHSthickness

เมื่อป้อนข้อมูลเรียบร้อยให้ทำการเลือกวิธีการหาคำตอบโดยเลือกวิธีซิมเพลกซ์ และเลือกเทคนิคการคำนวณสองระยะ (Two phase) เพื่อใช้ในการหาคำตอบที่เหมาะสมตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์

หลังจากสิ้นสุดการคำนวณหาชนิดและความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เหมาะสมจากโปรแกรมโทรา ให้ใส่ข้อมูลค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ (2, 3, 4) และค่าความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เหมาะสมรวมทั้งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้ลงในส่วนการรายงานผล

กดปุ่ม calculation (1) เพื่อคำนวณค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำที่ได้จากการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น หลังจากนั้นกดปุ่ม summary (2) เพื่อไปยังหน้าจอขั้นตอนที่ 5

แต่ถ้ากดปุ่ม back (3) จะย้อนกลับไปยังขั้นตอนที่ 3 และถ้าต้องการออกจากโปรแกรมให้กดปุ่ม exit (4)

3.6.5 ขั้นตอนที่ 5

เป็นหน้าจอที่แสดงข้อมูลการสรุปผลการออกแบบบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นให้เหมาะสมกับผักและผลไม้ที่เก็บรักษาภายใต้สภาพบรรยากาศดัดแปร ดังรูปที่ 3.15

MAP DESIGN PACKAGING REPORT

Fruit and Vegetable Name	Cabbage(marner lagerweiss)		Produce Weight	0.50	kg
Storage Temperature	273.00	K	RHpackaging	92	%
Surface area packaging	627.00	cm(2)	Total thickness	1.00	mil
[O2]	3.00	%	[CO2]	6.00	%
R(O2)	1.30	ml kg(-1) hr(-1)	R(CO2)	1.30	ml kg(-1) hr(-1)
Water vapour pressure	0.005	atm	Transpiration Rate	20.2120	ml kg(-1) hr(-1)

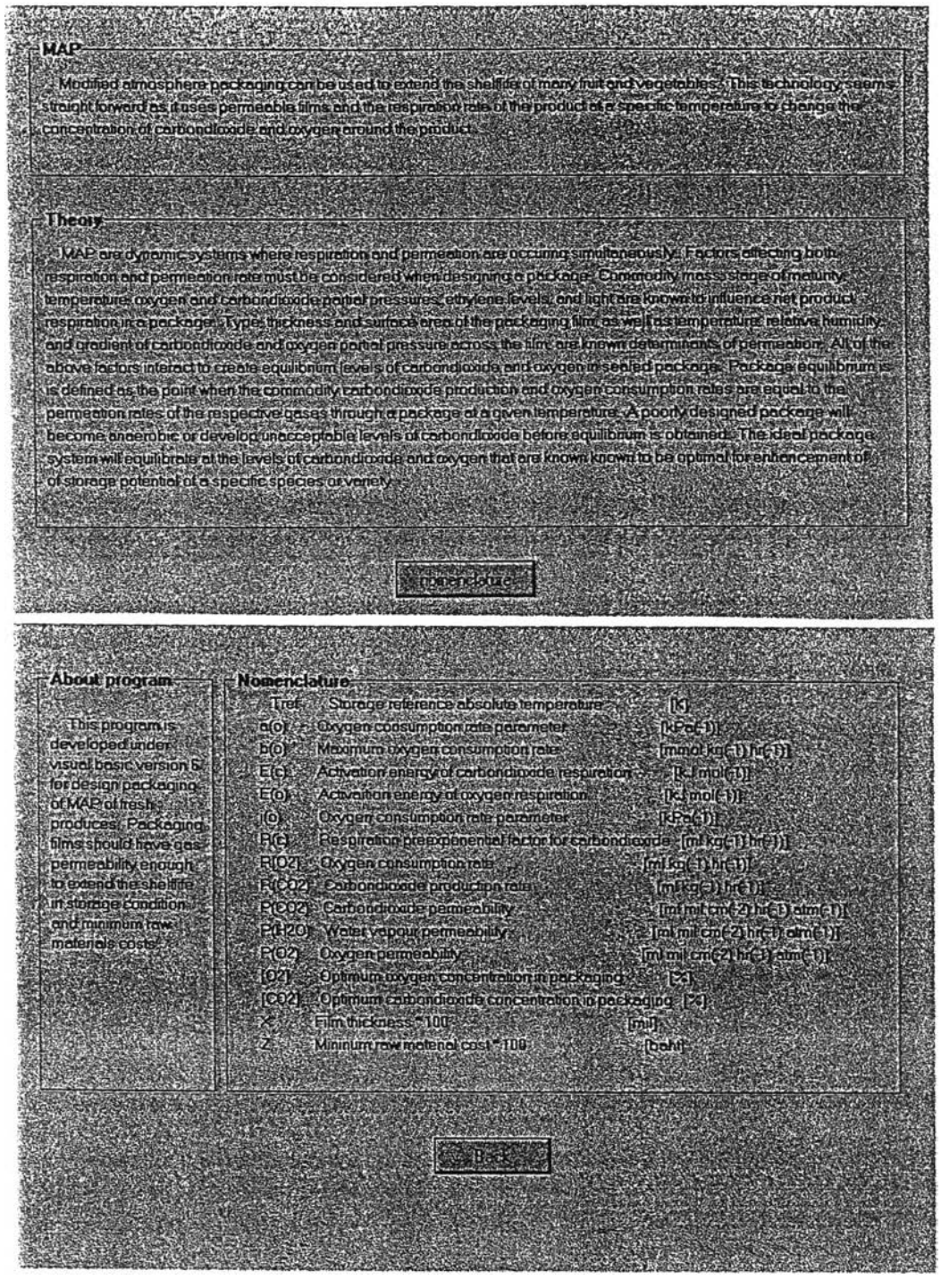
Permeability	Oxygen	Carbondioxide	Water Vapour	Thickness
Natural rubber	7.81E-02	5.72E-01	-	0.7794
PET(Mylar)	1.19E-04	4.03E-04	-	0.0093
PP(d=0.8931)	2.34E-03	8.12E-03	-	0.2113
No data	-	-	-	-
Required Permeability :	0.0056	0.0198	16.0000	
Designed Permeability :	0.0056	0.0198	-	
%Error :	0.00%	0.00%	-	
Min. Cost :	0.0427	Baht		

Unit : Permeability [ml mil cm(-2) hr(-1) atm(-1)] , Thickness [mil]

รูปที่ 3.15 หน้าจอการสรุปและรายงานผล

3.6.6 หน้าจอ Help

หน้าจอแสดงข้อมูลเกี่ยวกับ MAP และความหมายของตัวแปรและหน่วยของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในโปรแกรม ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 หน้าจอ Help