

การจำลองทางคณิตศาสตร์ของบรรยากาศคัดแปร  
ภายในบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์สำหรับผักและผลไม้สด

นางสาว ประภาพรรัตน์ ทองเนาวรัตน์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-638-525-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**MATHEMATICAL MODELING OF MODIFIED ATMOSPHERE  
IN THE POLYMERIC PACKAGE FOR FRESH PRODUCES**



**Miss Praphanrat Thongnawarat**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering  
Department of Chemical Engineering**

**Graduate School**

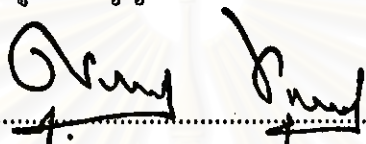
**Chulalongkorn University**

**Academic Year 1997**

**ISBN 974-638-525-9**


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การจำลองทางคณิตศาสตร์ของบรรยากาศตัดแปร  
ภายในบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์สำหรับผักและผลไม้สด  
โดย นางสาว ประภาพรรัตน์ ทองเนาวรัตน์  
ภาควิชา วิศวกรรมเคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. วรัญ แต่ไพสิฐพงษ์

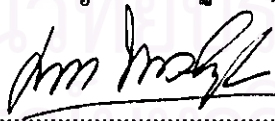
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

  
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ สุภวัฒน์ ชูติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร. วรัญ แต่ไพสิฐพงษ์)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. มล.สุภกนก ทองใหญ่)

ประพาวรัตน์ ทองเนาวรัตน์ : การจำลองทางคณิตศาสตร์ของบรรยากาศดัดแปรภายในบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ สำหรับผักและผลไม้สด (MATHEMATICAL MODELING OF MODIFIED ATMOSPHERE IN THE POLYMERIC PACKAGE FOR FRESH PRODUCES) อ. ที่ปรึกษา : ดร. วรวิทย์ เต๋อไพสิฐพงษ์ ; 234 หน้า. ISBN 974-638-525-9.

แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ประกอบด้วยพจน์การแพร่ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์แบบพิกเกียนและพจน์อัตราการทำลายใจของผักและผลไม้สดและโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับคำนวณความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ณ เวลาใด ๆ ในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สดได้ถูกพัฒนาขึ้น แบบจำลองอัตราการทำลายใจ 7 แบบ ได้แก่ แบบเส้นตรง แบบโพลีโนเมียล แบบเอกโปเนนเชียล แบบไมเคิลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพทิทีฟ แบบไมเคิลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอนคอมเพทิทีฟ แบบไมเคิลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพทิทีฟ และแบบแลงเมียร์ได้ถูกนำมาใช้ แบบจำลองคณิตศาสตร์ถูกคำนวณเชิงตัวเลขด้วยวิธีรังกัดตาอันดับสี่ ผลการคำนวณถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง 6 ชุดที่ได้รวบรวมจากงานวิจัยอื่น ๆ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงผลของพื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์ (A) ความหนาของพอลิเมอร์ฟิล์มที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ (L) ค่าการซึมผ่านพอลิเมอร์ของแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ( $P_O$ ,  $P_C$ ) น้ำหนักของผักและผลไม้สด (W) ปริมาตรอิสระในบรรจุภัณฑ์ (V) และความเข้มข้นเริ่มต้นของแก๊สในบรรจุภัณฑ์ต่อความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุลในบรรจุภัณฑ์ ( $\%O_{2(cq)}$ ,  $\%CO_{2(cq)}$ ) และเวลาเข้าสู่สมดุล ( $t_{eq}$ )

ผลการคำนวณพบว่า แบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถทำนายค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์ ณ เวลาใด ๆ ได้สอดคล้องกับผลการทดลอง และโดยรวมพบว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้แบบจำลองอัตราการทำลายใจแบบไมเคิลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพทิทีฟ หรือแบบไมเคิลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอนคอมเพทิทีฟสามารถทำนายให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้แบบจำลองอัตราการทำลายใจอื่น ๆ นอกจากนั้นพบว่าในกรณีตัวอย่างเมื่อ A เพิ่มขึ้น จะทำให้  $\%O_{2(cq)}$  เพิ่มขึ้น แต่  $\%CO_{2(cq)}$  และ  $t_{eq}$  ลดลง เมื่อ L และ W เพิ่มขึ้นทำให้  $\%O_{2(cq)}$  ลดลง แต่  $\%CO_{2(cq)}$  เพิ่มขึ้น แต่ L ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้  $t_{eq}$  เพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อ W เพิ่มขึ้น ค่า  $t_{eq}$  จะลดลง เมื่อ  $P_O$  เพิ่มขึ้นจะมีผลให้ค่า  $\%O_{2(cq)}$  และ  $t_{eq}$  ลดลง เมื่อ  $P_C$  เพิ่มขึ้นจะมีผลให้ค่า  $\%CO_{2(cq)}$  และ  $t_{eq}$  ลดลง ส่วน V จะไม่มีผลต่อ  $\%O_{2(cq)}$  และ  $\%CO_{2(cq)}$  แต่เมื่อ V เพิ่มขึ้น ค่า  $t_{eq}$  จะเพิ่มขึ้น ส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของแก๊สไม่มีผลต่อ  $\%O_{2(cq)}$  และ  $\%CO_{2(cq)}$  แต่เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแก๊สอยู่ใกล้  $\%O_{2(cq)}$  และ  $\%CO_{2(cq)}$  จะส่งผลให้  $t_{eq}$  ลดลง

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี .....  
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี .....  
ปีการศึกษา 2540 .....

ลายมือชื่อนิติ ..... ประพาวรัตน์ ทองเนาวรัตน์  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## C717086 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: MODIFIED ATMOSPHERE / FRESH PRODUCE / PACKAGING / MODELING / POLYMER

PRAPHANRAT THONGNAWARAT : MATHEMATICAL MODELING OF MODIFIED ATMOSPHERE IN THE POLYMERIC PACKAGE FOR FRESH PRODUCE. THESIS ADVISOR : VARUN TAEPISTPONG, Ph.D. 234 pp. ISBN 974-638-525-9.

The mathematical model which comprises of the Fickian diffusion term and the respiration term for calculating the concentration of oxygen and carbon dioxide gases at any time in the modified atmosphere package for fresh produce was developed. Seven types of respiration mathematical model, namely, linear, polynomial, exponential, Michaelis-Menten: uncompetitive type, Michaelis-Menten: noncompetitive type, Michaelis-Menten: competitive type, and Langmuir were employed. The computer program was written to solve the mathematical model with the 4th order Runge Kutta method. The calculated results were compared with 6 experimental works available in the journals. Additionally, the effects of package surface area ( $A$ ), the polymer film thickness ( $L$ ), the permeability of  $O_2$  and  $CO_2$  through film ( $P_O$ ,  $P_C$ ), the weight of fresh produce ( $W$ ), the free volume in package ( $V$ ), and the initial gas concentrations in package on the equilibrium concentration of  $O_2$  and  $CO_2$  ( $\%O_{2(cq)}$ ,  $\%CO_{2(cq)}$ ) and the time to reach equilibrium ( $t_{eq}$ ) were studied.

The developed mathematical model was found to predict the concentration of  $O_2$  and  $CO_2$  at any time in good agreement with the experimental results. Overall, the mathematical model with respiration term of the Michaelis-Menten: uncompetitive type or Michaelis-Menten: noncompetitive type were found to fit the data better than the model with other types of respiration model. Additionally, for the case studied it was found that when  $A$  was increased, the  $\%O_{2(cq)}$  was increased but  $\%CO_{2(cq)}$  and  $t_{eq}$  were decreased. When  $L$ ,  $W$  were increased, the  $\%O_{2(cq)}$  was decreased but  $\%CO_{2(cq)}$  was increased. However, when  $L$  was increased,  $t_{eq}$  was increased; but when  $W$  was increased,  $t_{eq}$  was decreased. When  $P_O$  was increased,  $\%O_{2(cq)}$  and  $t_{eq}$  were decreased. When  $P_C$  was increased,  $\%CO_{2(cq)}$  and  $t_{eq}$  were decreased. The  $V$  had no effect on  $\%O_{2(cq)}$  and  $\%CO_{2(cq)}$ ; but when  $V$  was increased, the  $t_{eq}$  was increased. The initial gas concentrations had no effect on  $\%O_{2(cq)}$  and  $\%CO_{2(cq)}$ ; but the closer the initial gas concentrations were to  $\%O_{2(cq)}$  and  $\%CO_{2(cq)}$ , the smaller the  $t_{eq}$ .

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา..... 2540

ลายมือชื่อนิสิต..... ประภาพรรัตน์ กานหาจางค์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. วรรณุ แต่ไพสิฐพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางการวิจัยและข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาด่าง ๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขและเพิ่มเติมวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตันชะพานิชกุล ประธานกรรมการ และอาจารย์ ดร. มล. ศุภกนก ทองใหญ่ กรรมการ ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยของสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยบางส่วน

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ รุ่นพี่ และน้อง ๆ ที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือตลอดจนกำลังใจด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และผู้มีอุปการะคุณที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ณ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฐ
สารบัญตาราง.....	ฑ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ผ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 มูลเหตุและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
<b>บทที่ 2 หลักการพื้นฐาน</b>	
2.1 สรีรศาสตร์ของผักและผลไม้สดหลังการเก็บเกี่ยว.....	6
2.1.1 การหายใจของผักและผลไม้สดและปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ หายใจ.....	6
2.1.2 การระเหยของน้ำ.....	21
2.2 บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศคัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด.....	22
2.2.1 หลักการพื้นฐานของการบรรจุแบบบรรยากาศคัดแปรสำหรับ ผักและผลไม้สด.....	25
2.2.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศคัดแปร.....	27
2.2.3 วิธีการสร้างบรรยากาศคัดแปรภายในบรรจุภัณฑ์.....	39

	หน้า
2.2.4 ระบบบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์สำหรับบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศ ดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด.....	41
2.2.5 ความปลอดภัยทางด้านจุลินทรีย์ของบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศ ดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด.....	47
<b>บทที่ 3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>48</b>
<b>บทที่ 4 การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์</b>	
4.1 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทำนายความเข้มข้น ของแก๊สต่าง ๆ ที่เวลาใด ๆ ในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศสำหรับผัก และผลไม้สด.....	68
4.2 แบบจำลองอัตราการหายใจของผักและการทดสอบความเหมาะสม.....	81
4.2.1 แบบจำลองอัตราการหายใจ.....	81
4.2.2 การทดสอบความเหมาะสม.....	85
4.3 การศึกษาผลกระทบของตัวแปรบรรจุภัณฑ์ต่อบรรจุภัณฑ์แบบ MAP สำหรับผักและผลไม้สด.....	88
4.3.1 การศึกษาผลกระทบของพื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์.....	88
4.3.2 การศึกษาผลกระทบของความหนาของฟิล์มที่ใช้ทำ บรรจุภัณฑ์.....	89
4.3.3 การศึกษาผลกระทบของน้ำหนักของผักและผลไม้สด.....	89
4.3.4 การศึกษาผลกระทบของค่าการซึมผ่านพอลิเมอร์ของแก๊ส ออกซิเจน.....	89
4.3.5 การศึกษาผลกระทบของค่าการซึมผ่านพอลิเมอร์ของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์.....	90
4.3.6 การศึกษาผลกระทบของปริมาณอัตราภายในบรรจุภัณฑ์.....	90



	หน้า
4.4 ตัวอย่างการเลือกบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับผักและผลไม้สด.....	90
4.5 การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้นของแก๊สในบรรจุภัณฑ์....	91
<b>บทที่ 5 ผลและบทวิเคราะห์ผล</b>	
5.1 ผลการทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองอัตราการหายใจ.....	93
5.2 ผลการทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP เมื่อใช้อัตราการหายใจ 7 แบบ.....	118
5.3 ผลการศึกษาผลกระทบของตัวแปรบรรจุภัณฑ์ต่อบรรจุภัณฑ์แบบ MAP สำหรับผักและผลไม้สด.....	139
5.3.1 ผลกระทบของพื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์ (A).....	139
5.3.2 ผลกระทบของความหนาของบรรจุภัณฑ์ (L).....	143
5.3.3 ผลกระทบของน้ำหนักของผักและผลไม้สด (W).....	146
5.3.4 ผลกระทบของค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์ของแก๊สออกซิเจน ( $P_O$ ).....	149
5.3.5 ผลกระทบของค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์ของแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ ( $P_C$ ).....	152
5.3.6 ผลกระทบของปริมาตรอิสระในบรรจุภัณฑ์ (V).....	155
5.4 ตัวอย่างการเลือกชนิดพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาเป็นบรรจุ ภัณฑ์แบบ MAP ของผักและผลไม้สด.....	158
5.5 ผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้นของแก๊สในบรรจุภัณฑ์.....	163
<b>บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ</b>	
6.1 บทสรุป.....	165
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	166
รายการอ้างอิง.....	168

	หน้า
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก โปรแกรมเมทแลบ (Matlab).....	172
ภาคผนวก ข การแก้สมการคณิตศาสตร์อนุพันธ์แบบธรรมดา (ordinary differential equation) โดยวิธีเชิงตัวเลข (numerical method)..	179
ภาคผนวก ค ผลการคำนวณ.....	182
ภาคผนวก ง โปรแกรมการคำนวณ.....	195
ภาคผนวก จ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์.....	226
ประวัติผู้เขียน.....	234

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูป 2.1 ผลกระทบของความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออัตราการหายใจของบรอกเคอลี่ที่อุณหภูมิ 0 °ซ (ศึกษาเป็นเวลา 7 วัน).....	16
รูป 2.2 ผลกระทบของความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการสังเคราะห์เอทิลีนของบรอกเคอลี่ที่อุณหภูมิ 0 °ซ (ศึกษาเป็นเวลา 7 วัน).....	20
รูป 2.3 ระบบบรรจุภัณฑ์แบบ MAP สำหรับผักและผลไม้สด.....	27
รูป 2.4 การเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ของความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างการสร้างบรรยากาศแบบโดยตรงและแบบโดยอ้อมสำหรับผักและผลไม้สด.....	40
รูป 2.5 การบรรจุบรัสเซลส์สเปทท์ (brussels sprouts) และ ถั่วฝักยาวแบบบรรยากาศคัดแปรเพื่อการขายปลีก.....	44
รูป 2.6 การบรรจุกล้วยหอมแบบบรรยากาศคัดแปรในกล่องเพื่อการขนส่ง.....	44
รูป 3.1 การหาความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่สมดุลของแอปเปิ้ลที่บรรจุในถุงพอลิเอทิลีนโดยวิธีการวาดกราฟ.....	51
รูป 3.2 ผลกระทบของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออัตราการใช้แก๊สออกซิเจนและอัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของมะเขือเทศ ที่ 23 °ซ.....	53
รูป 3.3 ผลกระทบของพื้นที่ต่อความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์แบบ RMF- 61.....	55
รูป 3.4 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำหนักต่อปริมาตรอิสระในบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์แบบ RMF- 61.....	55
รูป 3.5 ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนที่เหมาะสมกับการบรรจุมะเขือเทศ น้ำหนักต่าง ๆ กันภายใต้ MAP ที่มีความดันย่อยแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ.....	60

รูป 3.6	การคาดคะเนน้ำหนักมะเขือเทศที่เหมาะสมในการบรรจุภายใต้ MAP ที่มี ความดันย่อยแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ โดยใช้ฟิล์มที่มีค่าการซึมผ่านของแก๊ส ออกซิเจนต่าง ๆ.....	60
รูป 3.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อยแก๊สออกซิเจนกับเวลาที่แก๊สถึงสมดุล ในการบรรจุมะเขือเทศ 500 กรัมด้วยฟิล์มที่มีค่าการซึมผ่านของแก๊สเท่า กับ $13.43 \text{ cc.hr}^{-1}.\text{atm}^{-1}$ โดยมีปริมาตรอิสระภายในบรรจุภัณฑ์แตกต่างกัน.....	61
รูป 3.8	ผลกระทบของน้ำหนักของบรอกเคอส์ต่อความเข้มข้นของแก๊สที่สมดุลใน บรรจุภัณฑ์.....	65
รูป 3.9	ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความเข้มข้นของแก๊สที่สมดุลในบรรจุภัณฑ์.....	65
รูป 4.1	แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณหาความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์ที่เวลาต่าง ๆ.....	79
รูป 4.2	แผนภาพแสดงขั้นตอนโปรแกรมการคำนวณหาค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์ พอลิเมอร์ของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม สำหรับผักและผลไม้สดที่ต้องการบรรจุ.....	80
รูป 5.1	อัตราการใช้แก๊สออกซิเจนของแอปเปิ้ลจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารา มิเตอร์ที่ได้จากการพิดด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 1.....	99
รูป 5.2	อัตราการใช้แก๊สออกซิเจนของแอปเปิ้ลจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารา มิเตอร์ที่ได้จากการพิดด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 2.....	100
รูป 5.3	อัตราการใช้แก๊สออกซิเจนของแอปเปิ้ลจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารา มิเตอร์ที่ได้จากการพิดด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 3.....	101
รูป 5.4	อัตราการใช้แก๊สออกซิเจนของแอปเปิ้ลจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารา มิเตอร์ที่ได้จากการพิดด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 4.....	102
รูป 5.5	อัตราการใช้แก๊สออกซิเจนของแอปเปิ้ลจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารา มิเตอร์ที่ได้จากการพิดด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 5.....	103

รูป 5.6	อัตราการใช้แก๊สออกซิเจนของแอมป์เปิดจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการพีดด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 6.....	104
รูป 5.7	อัตราการใช้แก๊สออกซิเจนของแอมป์เปิดจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการพีดด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 7.....	105
รูป 5.8	อัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแอมป์เปิดจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการพีดด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 1.....	106
รูป 5.9	อัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแอมป์เปิดจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการพีดด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 2.....	107
รูป 5.10	อัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแอมป์เปิดจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการพีดด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 3.....	108
รูป 5.11	อัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแอมป์เปิดจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการพีดด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 4.....	109
รูป 5.12	อัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแอมป์เปิดจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการพีดด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 5.....	110
รูป 5.13	อัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแอมป์เปิดจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการพีดด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 6.....	111
รูป 5.14	อัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแอมป์เปิดจากข้อมูล 1 โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการพีดด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบที่ 7.....	112

	หน้า
รูป 5.15 การเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองอัตราการใช้แก๊สออกซิเจน 7 แบบ สำหรับข้อมูลทั้ง 6 ชุด.....	114
รูป 5.16 การเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองอัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 7 แบบ สำหรับข้อมูลทั้ง 6 ชุด.....	115
รูป 5.17 การเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการคำนวณของความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP ของข้อมูล 1.....	119
รูป 5.18 การเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการคำนวณของความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP ของข้อมูล 2.....	120
รูป 5.19 การเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการคำนวณของความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP ของข้อมูล 3.....	121
รูป 5.20 การเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการคำนวณของความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP ของข้อมูล 4.....	122
รูป 5.21 การเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการคำนวณของความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP ของข้อมูล 5.....	123
รูป 5.22 การเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการคำนวณของความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP ของข้อมูล 6.....	124
รูป 5.23 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แบบจำลองอัตราหายใจ 7 แบบสำหรับการทำนายความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์ที่เวลาใด ๆ สำหรับข้อมูลทั้ง 6 ชุด.....	126

รูป 5.24	การเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจ 7 แบบสำหรับการทำนายความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์ที่เวลาใด ๆ สำหรับข้อมูลทั้ง 6 ชุด.....	127
รูป 5.25	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์กับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล จากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18).....	140
รูป 5.26	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์กับเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุล จากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18).....	141
รูป 5.27	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของบรรจุภัณฑ์กับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล จากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18).....	144
รูป 5.28	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของบรรจุภัณฑ์กับเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุล จากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18).....	145
รูป 5.29	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของผักและผลไม้สดที่บรรจุกับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล จากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18).....	147
รูป 5.30	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของผักและผลไม้สดที่บรรจุกับเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุล จากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18).....	148
รูป 5.31	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ของแก๊สออกซิเจนกับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล จากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18).....	150
รูป 5.32	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ของแก๊สออกซิเจนกับเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุล จากการคำนวณด้วยสมการ(4.17) และ (4.18).....	151

รูป 5.33	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล จากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18).....	153
รูป 5.34	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุล จากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18).....	154
รูป 5.35	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรอิสระในบรรจุภัณฑ์กับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล จากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18).....	156
รูป 5.36	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรอิสระในบรรจุภัณฑ์กับเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุล จากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18).....	157
รูป 5.37	ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ จากการคำนวณด้วยสมการ (4.17) และ (4.18) เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของแก๊สในบรรจุภัณฑ์ 3 กรณี.....	164
รูป ง.1	จุดประสงค์ และสมการที่ ถูก ใช้ ในการ คำนวณ ใน โปรแกรม MAPI.....	206
รูป ง.2	การป้อนข้อมูลของระบบบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการคำนวณ.....	206
รูป ง.3	การแสดงผลแบบจำลองอัตราการหายใจที่มีอยู่ในโปรแกรม.....	207
รูป ง.4	การให้ผู้ใช้เลือกว่ามีพารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจหรือไม่....	207
รูป ง.5	ชนิดของผักและผลไม้สดที่มีพารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบใด ๆ ในฐานข้อมูลของโปรแกรม.....	208
รูป ง.6	การเลือกแบบจำลองอัตราการหายใจที่ต้องการเพื่อใช้ในการคำนวณในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP.....	208
รูป ง.7	ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ ภายในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP สำหรับผักและผลไม้สดที่ต้องการ.....	209



	หน้า	
รูป ง.8	กราฟแสดงความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เวลาใด ๆ ที่คำนวณได้ด้วยโปรแกรม MAPI ภายในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP สำหรับผักและผลไม้สดที่ต้องการ.....	210
รูป ง.9	ชนิดของผักและผลไม้สดที่ต้องการบรรจุ.....	222
รูป ง.10	โปรแกรมแสดงความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เหมาะสมสำหรับผักและผลไม้สดที่ทำการเลือก.....	222
รูป ง.11	การป้อนค่าตัวแปรของระบบบรรจุภัณฑ์ที่ผู้ใช้ต้องการ.....	223
รูป ง.12	รายการของแบบจำลองอัตราการหายใจที่มีฐานข้อมูลในโปรแกรม.....	223
รูป ง.13	การแสดงค่าการซึมผ่านพอลิเมอร์ของแก๊สออกซิเจนและแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณ.....	224
รูป ง.14	ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอิสระในบรรจุภัณฑ์จาก 100 ml. ถึง 1000 ml.....	225

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1	อัตราการทำลายของผักและผลไม้บางชนิด..... 8
ตาราง 2.2	ตัวอย่างของผักและผลไม้สด ไคลแมคเทอริกและนอนไคลแมคเทอริก..... 12
ตาราง 2.3	ตัวอย่างเศษส่วนอุณหภูมิ ( $Q_{10}$ ) ของผักบางชนิด..... 14
ตาราง 2.4	ความเข้มข้นต่ำสุดของแก๊สออกซิเจนที่ผักและผลไม้สดบางชนิดทนทานได้..... 17
ตาราง 2.5	ความเข้มข้นสูงสุดของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผักและผลไม้บางชนิดทนทานได้..... 18
ตาราง 2.6	ความเข้มข้นต่ำสุดของเอทิลีนที่สามารถเร่งการสุกของผลไม้บางชนิด..... 20
ตาราง 2.7	ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในฟิล์มพลาสติกบางชนิดและในอากาศ..... 32
ตาราง 2.8	แฟกเตอร์พรีเอกโปเนนเชียล (Preexponential factor) และพลังงานกระตุ้นของค่าการซึมผ่านพอลิเมอร์ฟิล์มของแก๊ส..... 33
ตาราง 2.9	MA ที่เหมาะสมในการเก็บรักษาและขนส่งผลไม้สดบางชนิด..... 35
ตาราง 2.10	MA ที่เหมาะสมในการเก็บรักษาและขนส่งผักบางชนิด..... 36
ตาราง 4.1	รูปแบบจำลองอัตราการทำลายและพารามิเตอร์ที่ถูกศึกษาในงานวิจัยนี้..... 85
ตาราง 4.2	แหล่งข้อมูลอัตราการทำลายที่นำมาศึกษา..... 86
ตาราง 4.3	ข้อมูลระบบ MAP ของแต่ละงานวิจัยที่ผ่านมาที่นำมาศึกษา..... 92
ตาราง 5.1	พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการทำลายแบบเส้นตรง (แบบที่ 1)..... 95
ตาราง 5.2	พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการทำลายแบบโพลีโนเมียล (แบบที่ 2)..... 95

	หน้า
ตาราง 5.3 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบเอกโปเนนเชียล (แบบที่ 3).....	96
ตาราง 5.4 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพทิทีฟ (แบบที่ 4).....	97
ตาราง 5.5 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพทิทีฟ (แบบที่ 5).....	97
ตาราง 5.6 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพทิทีฟ (แบบที่ 6).....	98
ตาราง 5.7 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบแลงเมียร์ (แบบที่ 7).....	98
ตาราง 5.8 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) จากผลของการฟิตอัตราการใช้แก๊สออกซิเจนสำหรับข้อมูลทั้ง 6 ชุดด้วยแบบจำลองอัตราการใช้แก๊สออกซิเจน 7 แบบ.....	113
ตาราง 5.9 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) จากผลของการฟิตอัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับข้อมูลทั้ง 6 ชุดด้วยแบบจำลองอัตราการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 7 แบบ.....	113
ตาราง 5.10 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ของการทำนายความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่เวลาใด ๆ ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจ 7 แบบ.....	125
ตาราง 5.11 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ของการทำนายความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจ 7 แบบ.....	125
ตาราง 5.12 ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำในการทำนายความเข้มข้นของแก๊สของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ MAP ที่ใช้แบบจำลองอัตราการหายใจแบบต่าง ๆ ของ 6 ข้อมูล.....	136

ตาราง 5.13	สภาวะของบรรจุภัณฑ์ที่ใช้เป็นกรณีตัวอย่าง ค่าการซึมผ่านพอลิเมอร์ของแก๊สที่คำนวณได้ และชนิดของพอลิเมอร์ที่เหมาะสมเป็นบรรจุภัณฑ์แบบ MAP สำหรับผักและผลไม้สดตัวอย่าง 6 ชนิด.....	161
ตาราง 5.14	ชนิดบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาค่า $P_0$ เป็นเกณฑ์เพียงค่าเดียว.....	162
ตาราง ค.1	ผลการพินิจอัตราการหายใจของข้อมูล 1 ด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบต่าง ๆ.....	183
ตาราง ค.2	ผลการพินิจอัตราการหายใจของข้อมูล 2 ด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบต่าง ๆ.....	184
ตาราง ค.3	ผลการพินิจอัตราการหายใจของข้อมูล 3 ด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบต่าง ๆ.....	185
ตาราง ค.4	ผลการพินิจอัตราการหายใจของข้อมูล 4 ด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบต่าง ๆ.....	186
ตาราง ค.5	ผลการพินิจอัตราการหายใจของข้อมูล 5 ด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบต่าง ๆ.....	187
ตาราง ค.6	ผลการพินิจอัตราการหายใจของข้อมูล 6 ด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจแบบต่าง ๆ.....	188
ตาราง ค.7	ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลาใน MAP ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณของข้อมูลชุดที่ 1.....	189
ตาราง ค.8	ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลาใน MAP ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณของข้อมูลชุดที่ 2.....	190
ตาราง ค.9	ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลาใน MAP ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณของข้อมูลชุดที่ 3.....	191
ตาราง ค.10	ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลาใน MAP ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณของข้อมูลชุดที่ 4.....	192

ตาราง ค.11	ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา ใน MAP ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณของข้อมูลชุดที่ 5.....	193
ตาราง ค.12	ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา ใน MAP ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณของข้อมูลชุดที่ 6.....	194



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## คำอธิบายสัญลักษณ์

A	พื้นที่ผิวสำหรับการแลกเปลี่ยนแก๊ส
$C_1, C_2$	ความเข้มข้นของสารที่แพร่ที่ตำแหน่งพื้นผิวภายนอกและที่พื้นผิวภายในตามลำดับ
$\%CO_{2(eq)}$	ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุลในบรรจุภัณฑ์
D	สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient)
F	อัตราการถ่ายเทต่อพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วย (Permeant flux)
G	อัตราการใช้หรือการผลิตแก๊สเนื่องจากการหายใจ
L	ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์
n	จำนวนข้อมูลที่นำมาพิต
$\%O_{2(eq)}$	ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่สมดุลในบรรจุภัณฑ์
$p_A$	ความดันย่อยของแก๊ส A ในแก๊สผสม
P	ความดันรวม
$P_A$	ค่าการซึมผ่านของแก๊ส A ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ (permeability coefficient) โดยสัญลักษณ์ห้อย O สำหรับแก๊สออกซิเจน และ C สำหรับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
Q	อัตราการซึมผ่านของแก๊สที่เข้าออกสุทธิ
$R(p_O, p_C)$	อัตราการหายใจ (อัตราการใช้หรือการผลิตเนื่องจากการหายใจ) ต่อน้ำหนัก
$R^2$	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination)
S	ความสามารถในการละลาย (Solubility)
t	เวลา
$t_{eq}$	เวลาที่ใช้เข้าสู่สมดุล

$v$	ปริมาณของแก๊สแต่ละชนิด
$v_A$	ปริมาตรของแก๊ส A ในแก๊สผสม
$V$	ปริมาตรอิสระในบรรจุภัณฑ์
$W$	น้ำหนักของผักและผลไม้สดที่บรรจุ
$X$	ระยะทางที่เกิดการแพร่ (Space co-ordinate) ในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวฟิล์ม
$y_o, y_c$	ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยปริมาตรตามลำดับ
$Y_i$	ค่าข้อมูลที่ $i$ ที่นำมาพิด
$\hat{Y}_i$	ค่าของตัวแปรตามที่ $i$ ที่ได้จากการพิดสมการ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย