

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ ความชื้น
และค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์
ต่อบรรยากาศตัดแปรภายในบรรจุภัณฑ์สำหรับผักและผลไม้สด



นาย ยิ่งศักดิ์ บุญชำนาญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2543
ISBN 974-346-457-3
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MATHEMATICAL MODELING FOR INVESTIGATING THE IMPACT OF
TEMPERATURE, HUMIDITY, AND POLYMER FILM PERMEABILITY
ON MODIFIED ATMOSPHERE IN A PACKAGE FOR FRESH PRODUCE

Mr. Yingsak Boonchamnan

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

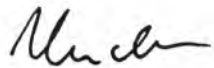
Academic Year 2000

ISBN 974-346-457-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ
ความชื้น และค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์
ต่อบรรยากาศดัดแปรภายในบรรจุภัณฑ์สำหรับผักและผลไม้สด


โดย นาย ยิ่งศักดิ์ บุญชำนาญ
ภาควิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. วรัญ เตไพลีสฐพงษ์

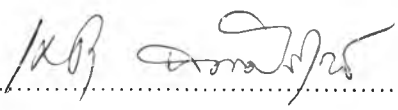
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. วรัญ เตไพลีสฐพงษ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เดชา จัตรศิริเวช)

ยิ่งศักดิ์ บุญชำนาญ : การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ ความชื้น และค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์ต่อบรรยากาศดัดแปรภายในบรรจุภัณฑ์สำหรับผักและผลไม้สด (MATHEMATICAL MODELING FOR INVESTIGATING THE IMPACT OF TEMPERATURE, HUMIDITY, AND POLYMER FILM PERMEABILITY ON MODIFIED ATMOSPHERE IN A PACKAGE FOR FRESH PRODUCE) อ. ที่ปรึกษา : ดร. วรวิทย์ เต๋อไพสิฐพงษ์ , 176 หน้า ISBN 974-346-457-3.

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร (Modified Atmosphere Packaging, MAP) ซึ่งประกอบด้วยสมการดุลมวลของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน และไอน้ำ ได้ถูกพัฒนาขึ้น สมการดุลมวลประกอบไปด้วยพจน์อัตราการซึมผ่านเข้าออกชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ของก๊าซและพจน์ของอัตราการผลิตหรือใช้ก๊าซเนื่องจากการหายใจหรือการคายน้ำของผักและผลไม้สด ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ในสมการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแบบอาเรเนียสและตามความชื้นสัมพัทธ์ภายในบรรจุภัณฑ์แบบเส้นตรง สมการอัตราการหายใจแบบไมเคลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพทิทีฟ (Michaelis-Menten Uncompetitive Type) ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแบบอาเรเนียสถูกนำมาใช้ อัตราการคายน้ำในสมการเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและเปลี่ยนแปลงตามความชื้นสัมพัทธ์ภายในบรรจุภัณฑ์แบบเส้นตรง โปรแกรม MAP 2000 ถูกเขียนขึ้นด้วยโปรแกรมไมโครซอฟต์วิซวลเบสิกเพื่อคำนวณหาความดันย่อยของก๊าซต่าง ๆ ภายในบรรจุภัณฑ์ ณ เวลาใด ๆ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีคำนวณเชิงตัวเลขแบบบังคับตาภิวัตน์อันดับที่สี่

โปรแกรม MAP 2000 ที่พัฒนาขึ้นสามารถคำนวณค่าความดันย่อยของก๊าซต่าง ๆ ณ เวลาใด ๆ ภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรได้อย่างถูกต้องและสอดคล้องกับผลการทดลอง 4 ชุดที่ได้รวบรวมจากงานวิจัยอื่น ๆ ที่ผ่านมา (ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ $R^2 > 0.90$) และสำหรับกรณีตัวอย่างที่ได้ศึกษาพบว่า (ก) เมื่ออุณหภูมิในการเก็บรักษา (T) สูงขึ้น ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนที่ภาวะคงตัวมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำที่ภาวะคงตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนเวลาในการเข้าสู่ภาวะคงตัวมีแนวโน้มลดลง โดยในช่วงอุณหภูมิต่ำจะมีอัตราการลดลงสูงกว่าช่วงอุณหภูมิสูง (ข) เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในการเก็บรักษา (%RH) สูงขึ้น (สำหรับพอลิเมอร์ที่ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มสูงขึ้นตามความชื้นสัมพัทธ์) ความดันย่อยที่ภาวะคงตัวของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มสูงขึ้น (ค) เมื่อความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มพอลิเมอร์ (P_{O_2}) เพิ่มสูงขึ้น ความดันย่อยที่ภาวะคงตัวของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ง) เมื่อความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มพอลิเมอร์ (P_{CO_2}) เพิ่มสูงขึ้น ความดันย่อยที่ภาวะคงตัวของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มลดลง (จ) สภาวะในการบรรจุมีผลกระทบต่อบรรยากาศดัดแปรที่เกิดขึ้นในบรรจุภัณฑ์น้อยกว่าสภาวะในการเก็บรักษา (ฉ) ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์ไม่มีผลกระทบต่อบรรยากาศดัดแปรที่ภาวะคงตัวและเวลาในการเข้าสู่ภาวะคงตัว นอกจากนี้ยังได้แสดงแนวทางการคำนวณหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของ $P_{O_2}A/dW$ และ $P_{CO_2}A/dW$ (A =พื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์ที่สัมผัสกับบรรยากาศ, d =ความหนาของฟิล์มที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ และ W =น้ำหนักของผักและผลไม้สดที่บรรจุ) ของบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับบรรจุผักและกะหล่ำปลี

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อ..... ยิ่งศักดิ์ บุญชำนาญ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4170468821 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD : MODIFIED ATMOSPHERE / FRESH PRODUCE / MODELING / TEMPERATURE / HUMIDITY

YINGSAK BOONCHAMNAN : MATHEMATICAL MODELING FOR INVESTIGATING THE IMPACT OF TEMPERATURE, HUMIDITY, AND POLYMER FILM PERMEABILITY ON MODIFIED ATMOSPHERE IN A PACKAGE FOR FRESH PRODUCE. THESIS ADVISOR : VARUN TAEPAISITPHONGSE, Ph.D. 176 pp. ISBN 974-346-457-3.

The mathematical model of modified atmosphere package (MAP) which contains 4 mass balance equations for oxygen, carbon dioxide, nitrogen and water vapor was developed. Each mass balance equation composed of the term for rate of permeation of gases through the polymeric film and the term for rate of consumption or production of gas from respiration or transpiration of fresh produce. The gas permeability of polymeric film, that changed with temperature according to Arrhenius' law and changed linearly with relative humidity inside the package, was used. The respiration term of Michaelis-Menten uncompetitive type, which changed with temperature according to Arrhenius' law, was employed. The transpiration rate, which was the function of temperature and changed linearly with relative humidity inside the package, was used. The MAP 2000 – a computer program for calculating the partial pressure of each gas inside the package as a function of time – was written under Microsoft Visual Basic program and used the 4th order Runge-Kutta-Gill numerical method to solve the above mass balance equations simultaneously.

It was found that the calculated results obtained from MAP 2000 were in good agreement with 4 experimental results available in the journals ($R^2 > 0.90$). For the cases studied, it was found that when storage temperature (T) was increased, the steady state partial pressure of oxygen was decreased but carbon dioxide and water vapor were increased. Also, the time to reach steady state was decreased with a higher rate at low temperature range than at higher temperature range. When initial relative humidity (%RH) of storage atmosphere was increased (for the case that the gas permeability increases with increasing humidity), the steady state partial pressure of oxygen and carbon dioxide were increased. When permeability of oxygen (P_{O_2}) were increased, the steady state partial pressure of oxygen and carbon dioxide were increased. However, when permeability of carbon dioxide (P_{CO_2}) were increased, the steady state partial pressure of oxygen and carbon dioxide were decreased. Storage condition affected the modified atmosphere inside the package more than the packing condition. Initial concentration of carbon dioxide inside the package had no effect on MAP and time to reach steady state. Additionally, the procedure to determine the proper values of $P_{O_2}A/dW$ and $P_{CO_2}A/dW$ (A=package surface area, d=film thickness and W=produce weight) of MAP for broccoli and cabbage were shown as examples.

Department Chemical Engineering

Field of study Chemical Engineering

Academic year 2000

Student's signature

Advisor's signature

Co-advisor's signature

Yingsak Boonchamnan
Varun Taepaisitphongse

กิตติกรรมประกาศ

“ สุวิชาโน ภวํ โหติ ”

“ ผู้รู้ดีเป็นผู้เจริญ ”

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร. วรัญ แต่ไพสิฐพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะแนวทางการทำวิจัยและข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขและปรับปรุงเพิ่มเติมวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดี

และขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล ประธานกรรมการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช กรรมการ ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และผู้มีอุปการะคุณที่ให้การสนับสนุนตลอด และเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญภาพ	ฌ
สารบัญตาราง	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 มूलเหตุและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 หลักการพื้นฐาน	7
2.1 การหายใจของผักและผลไม้สด	7
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการหายใจ	11
2.3 การคายน้ำ	22
2.4 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ	25
2.5 บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร	30
2.6 การสร้างบรรยากาศดัดแปรภายในบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์	32
บทที่ 3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	41
3.1 ส่วนข้อมูลและผลการทดลอง	41
3.2 ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	47

	หน้า
บทที่ 4 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และโปรแกรมคอมพิวเตอร์	58
4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	58
4.2 การแก้ปัญหาด้วยวิธีการเชิงตัวเลข	65
4.3 การทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	66
4.4 การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์	68
4.5 การศึกษาผลกระทบของของตัวแปรต่าง ๆ ต่อการเกิดบรรยากาศตัดแปร	70
4.6 การจัดทำกรณีศึกษาของการเลือกหาสถานะและตัวแปรต่าง ๆ ที่เหมาะสม สำหรับบรรจุก๊าซแบบบรรยากาศตัดแปร	71
บทที่ 5 ผลและบทวิเคราะห์ผล	74
5.1 ผลการทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	74
5.2 ผลการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ต่อการเกิดบรรยากาศตัดแปร สำหรับผักและผลไม้สด	83
5.3 กรณีศึกษาของการเลือกหาสถานะและตัวแปรต่าง ๆ ที่เหมาะสมสำหรับ บรรจุก๊าซแบบบรรยากาศตัดแปร	115
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	119
6.1 บทสรุป	119
6.2 ข้อเสนอแนะ	121
รายการอ้างอิง	122
ภาคผนวก	128
ภาคผนวก ก ผลการทดลองและผลการคำนวณ	129
ภาคผนวก ข รายละเอียดของโปรแกรม MAP 2000	132
ภาคผนวก ค ขั้นตอนการใช้โปรแกรม MAP 2000	167
ภาคผนวก ง การแก้สมการเชิงอนุพันธ์สามัญโดยวิธีเชิงตัวเลข	176
ภาคผนวก จ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของเอโนไซม์	180
ประวัติผู้เขียน	188

สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ปริมาณการผลิตผักและผลไม้ของประเทศไทย (พื้ันต้น) ระหว่างปี พ.ศ. 2504 – พ.ศ. 2536	1
รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบอัตราการหายใจของผลไม้แบบโคลแมคเทอริก และแบบนอนโคลแมคเทอริกในช่วงของการเจริญเติบโตระยะต่าง ๆ	13
รูปที่ 2.2 ผลของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออัตราการหายใจของบรอกโคลี่พันธุ์เอมเพอเรือ ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส	17
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดทั่วไปกับความดันของก๊าซออกซิเจน	18
รูปที่ 2.4 ผลกระทบของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการสังเคราะห์เอทิลีนของบรอกโคลี่ที่อุณหภูมิ 0 °ซ (ศึกษาเป็นเวลา 7 วัน)	20
รูปที่ 2.5 อัตราการหายใจและการผลิตเอทิลีนของมะเขือเทศ เมื่อถูกกระทบกระเทือนด้วยการตกกระทบของลูกเหล็กหลาย ๆ ครั้ง	21
รูปที่ 2.6 อิทธิพลของลักษณะการวางหน่อไม้ฝรั่งต่อองค์ประกอบทางเคมี	22
รูปที่ 2.7 การบรรจุหน่อไม้ฝรั่ง ข้าวโพดอ่อน และแครอท ในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร	37
รูปที่ 2.8 การบรรจุชมพูพร้อมบริโคในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร	37
รูปที่ 2.9 การบรรจุแอปเปิล ในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร	38
รูปที่ 2.10 การบรรจุผักกาดขาว ในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร	38
รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างการสร้างบรรยากาศดัดแปรแบบโดยตรงและแบบโดยอ้อมสำหรับผักและผลไม้สด	40
รูปที่ 3.1 การเปรียบเทียบอายุการเก็บรักษาสัมพัทธ์ของผักและผลไม้สดโดยทั่วไป ...	44
รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลของก๊าซยกกำลังสองกับค่าตัดแกนและความชันจากสมการ 3.1	48

รูปที่ 4.1	ระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด	59
รูปที่ 4.2	แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	68
รูปที่ 4.3	แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของส่วนการคำนวณของโปรแกรม	69
รูปที่ 5.1	การเปรียบเทียบความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์แบบ บรรยากาศดัดแปรที่เวลาต่าง ๆ กันระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับ ผลการทดลองของข้อมูลชุดที่ 1	74
รูปที่ 5.2	การเปรียบเทียบความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุ ภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่เวลาต่าง ๆ กันระหว่างแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ กับผลการทดลองของข้อมูลชุดที่ 1	75
รูปที่ 5.3	การเปรียบเทียบความดันย่อยของไอน้ำภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศ ดัดแปรที่เวลาต่าง ๆ กันระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลการ ทดลองของข้อมูลชุดที่ 1	75
รูปที่ 5.4	การเปรียบเทียบความดันรวมของก๊าซต่าง ๆ ภายในบรรจุภัณฑ์แบบ บรรยากาศดัดแปรที่เวลาต่าง ๆ กันระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับ ผลการทดลองของข้อมูลชุดที่ 1	76
รูปที่ 5.5	การเปรียบเทียบความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์แบบ บรรยากาศดัดแปรที่เวลาต่าง ๆ กันระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับ ผลการทดลองของข้อมูลชุดที่ 2	76
รูปที่ 5.6	การเปรียบเทียบความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุ ภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่เวลาต่าง ๆ กันระหว่างแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ กับผลการทดลองของข้อมูลชุดที่ 2	77
รูปที่ 5.7	การเปรียบเทียบความดันย่อยของไอน้ำภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศ ดัดแปรที่เวลาต่าง ๆ กันระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลการ ทดลองของข้อมูลชุดที่ 2	77
รูปที่ 5.8	การเปรียบเทียบความดันรวมของก๊าซต่าง ๆ ภายในบรรจุภัณฑ์แบบ บรรยากาศดัดแปรที่เวลาต่าง ๆ กันระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับ ผลการทดลองของข้อมูลชุดที่ 2	78
รูปที่ 5.9	การเปรียบเทียบความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์แบบ บรรยากาศดัดแปรที่เวลาต่าง ๆ กันระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับ ผลการทดลองของข้อมูลชุดที่ 3	78

รูปที่ 5.10	การเปรียบเทียบความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรยากาศแบบบรรยากาศดัดแปรที่เวลาต่าง ๆ กันระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลการทดลองของข้อมูลชุดที่ 3	79
รูปที่ 5.11	การเปรียบเทียบความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนภายในบรรยากาศแบบบรรยากาศดัดแปรที่เวลาต่าง ๆ กันระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองของข้อมูลชุดที่ 4	79
รูปที่ 5.12	ผลกระทบของอุณหภูมิ (T) ต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจน ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 1	89
รูปที่ 5.13	ผลกระทบของอุณหภูมิ (T) ต่อความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 1	90
รูปที่ 5.14	ผลกระทบของอุณหภูมิ (T) ต่อเวลาในการเข้าสู่สมดุล สำหรับกรณีศึกษาที่ 1	91
รูปที่ 5.15	ผลกระทบของอุณหภูมิ (T) ต่อความดันย่อยที่ภาวะคงตัวของก๊าซต่าง ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 1	92
รูปที่ 5.16	ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจน ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 2	96
รูปที่ 5.17	ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ต่อความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 2	97
รูปที่ 5.18	ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ต่อความดันย่อยของไอน้ำ ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 2	98
รูปที่ 5.19	ผลกระทบของความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจน ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 3	101
รูปที่ 5.20	ผลกระทบของความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ต่อความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 3	102
รูปที่ 5.21	ผลกระทบของความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจน ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 3	103
รูปที่ 5.22	ผลกระทบของความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 3	104

รูปที่ 5.23	ผลกระทบของสภาวะในการบรรจุต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 4 โดยเก็บรักษาที่สภาวะการเก็บรักษาแบบที่ 1 ..	107
รูปที่ 5.24	ผลกระทบของสภาวะในการบรรจุต่อความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 4 โดยเก็บรักษาที่สภาวะการเก็บรักษาแบบที่ 1	108
รูปที่ 5.25	ผลกระทบของสภาวะในการเก็บรักษาต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 4 โดยทำการบรรจุที่สภาวะการเก็บรักษาแบบที่ 1	109
รูปที่ 5.26	ผลกระทบของสภาวะในการเก็บรักษาต่อความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 4 โดยทำการบรรจุที่สภาวะการเก็บรักษาแบบที่ 1	110
รูปที่ 5.27	ผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 5	113
รูปที่ 5.28	ผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 5	114
รูปที่ ค.1	การเริ่มการติดตั้งโปรแกรม MAP 2000	167
รูปที่ ค.2	หน้าจอขณะกำลังเตรียมการติดตั้ง	168
รูปที่ ค.3	หน้าต่างแสดงการเปลี่ยนแผ่นดิสก์ติดตั้ง	168
รูปที่ ค.4	หน้าจอการติดตั้ง	168
รูปที่ ค.5	หน้าจอเลือกตำแหน่งที่จะติดตั้ง	169
รูปที่ ค.6	ปุ่มติดตั้งโปรแกรม MAP 2000	169
รูปที่ ค.7	หน้าจอแรกของโปรแกรม MAP 2000	171
รูปที่ ค.8	หน้าจอข้อมูลของผักและผลไม้สด	171
รูปที่ ค.9	หน้าจอข้อมูลของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์	172
รูปที่ ค.10	หน้าจอฐานข้อมูล	173
รูปที่ ค.11	หน้าจอข้อมูลของบรรจุภัณฑ์ สภาวะในการเก็บรักษา และการคำนวณ	174
รูปที่ ค.12	หน้าจอแสดงกราฟของผลการคำนวณ	174
รูปที่ ค.13	หน้าจอช่วยเหลือ	175

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1.1	มูลค่าการส่งออกผักสดแช่เย็นของประเทศไทย (ล้านบาท)	2
ตารางที่ 1.2	มูลค่าการส่งออกผลไม้สดแช่เย็นของประเทศไทย (ล้านบาท)	2
ตารางที่ 2.1	ความเข้มข้นต่ำสุดของก๊าซออกซิเจนที่ผักและผลไม้บางชนิดสามารถทน ได้	9
ตารางที่ 2.2	ความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผักและผลไม้บางชนิด สามารถทนได้	10
ตารางที่ 2.3	อัตราการหายใจของผักและผลไม้บางชนิด	11
ตารางที่ 2.4	ตัวอย่างของผลไม้แบบโคลแมคเทอริกและแบบนอนโคลแมคเทอริก	12
ตารางที่ 2.5	ตัวอย่างค่าอัตราส่วนการหายใจของผักและผลไม้สดชนิดต่าง ๆ	14
ตารางที่ 2.6	ตัวอย่างอัตราส่วนอุณหภูมิ (Q_{10}) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของผักบางชนิด	16
ตารางที่ 2.7	ความเข้มข้นต่ำสุดของเอทิลีนที่สามารถเร่งการสุกของผลไม้บางชนิด ...	20
ตารางที่ 2.8	การสูญเสียน้ำของผักและผลไม้สดที่ผู้บริโภคมักยอมรับคุณภาพ	22
ตารางที่ 2.9	ตัวอย่างของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มที่อุณหภูมิต่าง ต่าง ๆ	28
ตารางที่ 2.10	ตัวอย่างของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่อุณหภูมิต่างกัน และค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของก๊าซต่าง ๆ สำหรับพอลิเมอร์บางชนิด ..	29
ตารางที่ 2.11	สภาวะต่าง ๆ ในระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่เหมาะสมใน การเก็บรักษาผักและผลไม้สดบางชนิด	33
ตารางที่ 3.1	ตัวอย่างของงานวิจัยที่ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศดัดแปร ภายในบรรจุภัณฑ์สำหรับผักและผลไม้สด	42
ตารางที่ 3.2	ผลของความชื้นต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของ พอลิเมอร์บางชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	46
ตารางที่ 3.3	ค่าพารามิเตอร์ฟรีเอกซ์โพเนนเชียลของการหายใจ และพลังงานก่อกัม มันต์ของการหายใจของผักและผลไม้สดชนิดต่าง ๆ	51
ตารางที่ 3.4	ตัวอย่างค่าคงที่ในสมการ 3.6 สำหรับผักและผลไม้ชนิดต่าง ๆ	54
ตารางที่ 4.1	แหล่งข้อมูลที่นำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	67

	หน้า	
ตารางที่ 5.1	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของการทำนายความเข้มข้นของก๊าซต่าง ๆ ที่เวลาใด ๆ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งข้อมูลที่น่ามาศึกษา	80
ตารางที่ 5.2	กลุ่มตัวแปร $\frac{P_{O_2} A}{dW}$ และ $\frac{P_{CO_2} A}{dW}$ ที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาบรอคโคลี่ในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ	116
ตารางที่ 5.3	กลุ่มตัวแปร $\frac{P_{O_2} A}{dW}$ และ $\frac{P_{CO_2} A}{dW}$ ที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษากะหล่ำปลีในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่สภาวะต่าง ๆ	118
ตารางที่ ก.1	ความดันย่อยของก๊าซต่าง ๆ และความดันรวม ในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของข้อมูลชุดที่ 1	129
ตารางที่ ก.2	ความดันย่อยของก๊าซต่าง ๆ และความดันรวม ในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของข้อมูลชุดที่ 2	130
ตารางที่ ก.3	ความเข้มข้นของก๊าซต่าง ๆ ในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของข้อมูลชุดที่ 3	131
ตารางที่ ก.4	ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของข้อมูลชุดที่ 4	131

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

A	คือ	พื้นที่ของฟิล์มที่สัมผัสกับบรรยากาศ (cm^2)
a	คือ	ค่าพารามิเตอร์ของการหายใจ ขึ้นอยู่กับชนิดของผักและผลไม้ ($\frac{1}{\text{kPa}}$)
b	คือ	ค่าพารามิเตอร์ของการหายใจ ขึ้นอยู่กับชนิดของผักและผลไม้ $(\frac{\text{mmol}}{\text{kg} \cdot \text{hr}})$
C_1	คือ	ความเข้มข้นของซับสเตรท (substrate)
C_2	คือ	ความเข้มข้นของตัวยับยั้ง (inhibitor)
D	คือ	ค่าความสามารถในการแพร่ (diffusivity)
d	คือ	ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ (mm)
E_a	คือ	พลังงานก่อกัมมันต์ (activation energy) ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ ($\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$)
E_{af}	คือ	พลังงานก่อกัมมันต์ (activation energy) ของการหายใจของผลิตภัณฑ์ $(\frac{\text{kJ}}{\text{mol}})$
E_{coh}	คือ	พลังงานในการยึดเกาะ (cohesive energy)
h	คือ	ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ 3.976×10^{-32} $\frac{\text{m}^2 \cdot \text{kg}}{\text{hr}}$
I	คือ	ความเข้มข้นของตัวยับยั้งในสมการการหายใจแบบไมเคิลลิสเมนเทน
i	คือ	ค่าพารามิเตอร์ของการหายใจ ขึ้นอยู่กับชนิดของผักและผลไม้ ($\frac{1}{\text{kPa}}$)
J	คือ	อัตราการคายน้ำ ($\frac{\text{mmol}}{\text{hr}}$)

K	คือ	สัมประสิทธิ์การคายน้ำ (transpiration coefficient, $\frac{\text{mmol}}{\text{kg} \cdot \text{hr} \cdot \text{kPa}}$)
K_i	คือ	ค่าคงที่ของสมการการหายใจแบบไมเคลิส-เมนเทน
K_{i-O_2}	คือ	ค่าคงที่ของการยับยั้งของก๊าซออกซิเจน
K_{i-CO_2}	คือ	ค่าคงที่ของการยับยั้งของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
K_m	คือ	ค่าคงที่ของสมการการหายใจแบบไมเคลิส-เมนเทน
k	คือ	ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann's constant) มีค่าเท่ากับ $4.97 \times 10^{-20} \frac{\text{m}^2 \cdot \text{kg}}{\text{hr}^2 \cdot \text{K}}$
L	คือ	ค่าคงที่ของอะโวกาโดร (Avogadro's constant) มีค่าเท่ากับ $6.022 \times 10^{20} \frac{\text{molecules}}{\text{mmol}}$
N	คือ	จำนวนแหล่งกัมมันต์สำหรับยึดก๊าซออกซิเจน ($\frac{\text{molecules}}{\text{kg}}$)
n	คือ	จำนวนโมลของก๊าซ (mmol)
n	คือ	ค่าความชันของการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ (คงที่ที่ทุกอุณหภูมิ, $\frac{\text{mmol} \cdot \text{mm}}{\text{cm}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{kPa} \cdot \%RH}$)
n	คือ	จำนวนข้อมูลที่นำมาพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
m	คือ	อัตราการคายน้ำของผักและผลไม้สด (transpiration rate, $\frac{\text{mmol}}{\text{hr} \cdot \text{kg}}$)
P	คือ	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ (permeability, $\frac{\text{mmol} \cdot \text{mm}}{\text{cm}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{kPa}}$)
P_n	คือ	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซชนิด n ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ ($\frac{\text{mmol} \cdot \text{mm}}{\text{cm}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{kPa}}$)
P_o	คือ	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ อนันต์ ($\frac{\text{mmol} \cdot \text{mm}}{\text{cm}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{kPa}}$)
p	คือ	ความดัน (kPa)
p_n	คือ	ความดันย่อยของก๊าซ n (kPa)

Q	คือ	ปริมาณของสารที่ซึมผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ ($\frac{\text{mmol}}{\text{hr}}$)
Q ₁₀	คือ	อัตราส่วนอุณหภูมิ (temperature quotient)
R	คือ	อัตราการหายใจของผักและผลไม้สด (respiration rate, $\frac{\text{mmol}}{\text{hr} \cdot \text{kg}}$)
R	คือ	ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant)
R	คือ	ความต้านทานการเคลื่อนที่ของไอน้ำ
R ²	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
RH	คือ	ความชื้นสัมพัทธ์
r	คือ	อัตราการเกิดปฏิกิริยาการหายใจแบบไมเคิลลิสเมนเทน
r ₀	คือ	ค่าพารามิเตอร์พรีเอกซ์โพเนนเชียล (pre-exponential parameter) ของการหายใจ
S	คือ	ค่าความสามารถในการละลาย (solubility)
s	คือ	ความเข้มข้นของซับสเตรทในสมการการหายใจแบบไมเคิลลิสเมนเทน
T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature, K)
T _g	คือ	อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้ว (gas transition temperature)
t	คือ	เวลาในการเก็บรักษา (ชั่วโมง)
V	คือ	ปริมาตรของช่องว่างภายในบรรจุภัณฑ์
V _m	คือ	ค่าคงที่ของสมการการหายใจแบบไมเคิลลิสเมนเทน
V _f	คือ	ปริมาตรอิสระ (free volume, cm ³)
Y _i	คือ	ค่าข้อมูลที่ i ที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
\hat{Y}_i	คือ	ค่าข้อมูลที่ i ที่ได้จากการทดลอง
ΔG	คือ	ค่าพลังงานกระตุ้นของกิบส์สำหรับการยึดก๊าซออกซิเจน ($\frac{\text{m}^2 \cdot \text{kg}}{\text{hr} \cdot \text{mmol}}$)
Δp	คือ	ผลต่างของความดันระหว่างภายนอกและภายในบรรจุภัณฑ์ (kPa)
δ _p	คือ	ความสามารถในการในการละลายของพอลิเมอร์ (solubility parameter of polymer)
δ _w	คือ	ความสามารถในการในการละลายของไอน้ำ (solubility parameter of water vapor)

ตัวยก

ext	คือ	ภายนอกบรรจุภัณฑ์
pkg	คือ	ภายในบรรจุภัณฑ์
pro	คือ	บริเวณพื้นผิวของผักและผลไม้สด
ref	คือ	ค่าอ้างอิง
sat	คือ	สภาวะอิ่มตัว

ตัวย่อ

CO ₂	คือ	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
H ₂ O	คือ	ไอน้ำ
N ₂	คือ	ก๊าซไนโตรเจน
O ₂	คือ	ก๊าซออกซิเจน
P	คือ	พอลิเมอร์
ss	คือ	ภาวะคงตัว (steady state)
total	คือ	รวมทั้งหมด