

การกำหนดความหนาและชนิดขององค์ประกอบของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น
สำหรับใช้เป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร



นางสาวธิดา ตติยไพบูลย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1419-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- 3 ก.ย. 2546

I 206 110 18

DETERMINATION OF THICKNESSES AND TYPES OF COMPONENTS OF THE
MULTILAYER POLYMERIC FILM FOR MODIFIED ATMOSPHERE PACKAGING

Miss Thida Tatiyapaiboon

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 2001

ISBN 974-03-1419-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การกำหนดความหนาและชนิดขององค์ประกอบฟิล์มพอลิเมอร์
แบบหลายชั้นสำหรับใช้เป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร

โดย

นางสาว ธิดา ตติยไพบูลย์

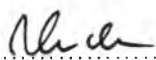
สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

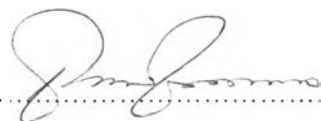
อาจารย์ที่ปรึกษา

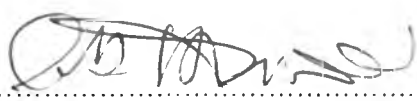
อาจารย์ ดร.วรัญ แต่ไพสิฐพงษ์

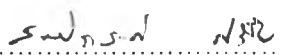
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ชรินพานิชกุล)


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


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สมประสงค์ ศรีชัย)

ธิดา ตติยไพบูลย์ : การกำหนดความหนาและชนิดขององค์ประกอบของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น สำหรับใช้ เป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร.

(DETERMINATION OF THICKNESSES AND TYPES OF COMPONENTS OF THE MULTILAYER POLYMERIC FILM FOR MODIFIED ATMOSPHERE PACKAGING)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร.วรัญ เต้ไพสิฐพงษ์, 175 หน้า. ISBN 974-03-1419-8.

งานวิจัยนี้ได้จัดทำโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับกำหนดความหนาและชนิดขององค์ประกอบของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับใช้เป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร โดยใช้วิธีซิมเพล็กซ์ (Simplex method) และการคำนวณสองระยะ (Two phase method)

ผลการคำนวณจากโปรแกรมพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านก๊าซตามต้องการ จะต้องประกอบด้วยชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านก๊าซมากกว่า และน้อยกว่าที่ต้องการโดยมีความหนาต่าง ๆ กัน การเลือกใช้เฉพาะฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านก๊าซมากกว่าที่ต้องการหรือมีค่าน้อยกว่าที่ต้องการเท่านั้นไม่สามารถนำมาวางเรียงซ้อนกันเป็นฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านก๊าซรวมตามต้องการได้ การเพิ่มความหนารวมของบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้จะทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านรวมของก๊าซที่ต้องการเพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนโดยตรง แต่ความหนาของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิดในฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนารวม นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในระหว่างการจัดเก็บและจำหน่าย จะทำให้อัตราการหายใจของผักและผลไม้เพิ่มมากขึ้นซึ่งอาจจะมากกว่าการเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถในการซึมผ่านก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นจนทำให้ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์แตกต่างจากค่าที่ต้องการซึ่งมีผลให้ประสิทธิภาพในการยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้ภายใต้สภาพบรรยากาศดัดแปรลดลงได้

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนิสิตใจดี.....ตติยไพบูลย์.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

##4270359121 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD : MODIFIED ATMOSPHERE/ PERMEABILITY/ MULTILAYER PACKAGING/ POLYMER FILM/ SIMPLEX METHOD

THIDA TATIYAPAIBOON : DETERMINATION OF THICKNESSES AND TYPES OF COMPONENTS OF THE MULTILAYER POLYMERIC FILM FOR MODIFIED ATMOSPHERE PACKAGING. THESIS ADVISOR : VARUN TAEPASITPHONGSE, Ph.D. 175 pp. ISBN 974-03-1419-8.

In this work, the computer program for determining the thicknesses and types of components of the multilayer polymeric film for modified atmosphere packaging using the simplex method and two phase method algorithms had been developed.

It was found that the multilayer polymeric film with required permeability could not be obtained from using only components that had higher or lower gas permeability than required. The multilayer film needed to contain films with higher and lower permeability than required at different thicknesses. The permeability of the multilayer film increased proportionally with increasing total film thickness, but the thickness of each individual layer did not increase proportionally. Change in storage or distribution temperature from the designed temperature of the package should be avoided since it affected the respiration rate of produces more than the permeability of the film. This led to higher carbondioxide and lower oxygen concentrations than designed value inside the package and could reduce the storage life of produces.

Department Chemical Engineering
Field of study Chemical Engineering
Academic year 2001

Student's signature

Advisor's signature

Co-advisor's signature

Thida
Varun Taepasitphongse

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร. วรัญ เต้ไพสิฐพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะแนวทางการทำวิจัยและข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขและปรับปรุงเพิ่มเติมวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสมบูรณ์และสำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดี

และขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วยรองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล ประธานกรรมการ และ อาจารย์ ดร. สมประสงค์ ศรีชัย กรรมการ ที่ได้กรุณาให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 มूलเหตุและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	6
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	6
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	8
2.1 การหายใจของผักและผลไม้.....	8
2.2 การคายน้ำ.....	17
2.3 การเก็บรักษาภายใต้สภาพบรรยากาศดัดแปร.....	22
2.4 फिल्मพอลิเมอร์แบบหลายชั้น.....	41
2.5 รูปแบบบรรจุภัณฑ์ที่ใช้.....	46
2.6 พอลิเมอร์ที่ใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์.....	48
บทที่ 3 โปรแกรมการออกแบบบรรจุภัณฑ์สำหรับ MAP.....	49
3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	49
3.2 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์.....	56
3.3 การคำนวณความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชั้นของฟิล์มพอลิเมอร์ แบบหลายชั้น.....	64
3.4 แผนภูมิโปรแกรมการคำนวณ.....	67

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 ข้อมูลตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาการออกแบบบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์ แบบหลายชั้น.....	68
3.6 โปรแกรมการคำนวณ.....	69
บทที่ 4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	81
4.1 แบบจำลองอัตราการหายใจของผักและผลไม้.....	81
4.2 การปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ สำหรับการเก็บรักษาผักและผลไม้ใน บรรยากาศดัดแปร.....	90
บทที่ 5 กรณีศึกษาและการวิเคราะห์ผล.....	96
5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม.....	96
5.2 ผลกระทบค่าความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มพอลิเมอร์ต่าง ๆ ต่อการออกแบบ ฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น.....	100
5.3 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของฟิล์มพอลิเมอร์ แบบหลายชั้นต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชั้น.....	108
5.4 การออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการจัดเก็บผักและผลไม้ ภายใต้บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร.....	111
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	121
6.1 บทสรุป.....	121
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	123
รายการอ้างอิง.....	124
ภาคผนวก.....	129
ภาคผนวก ก กลไกการหายใจ.....	130
ภาคผนวก ข กลไกการเกิดปฏิกิริยาของเอทิลีน.....	138
ภาคผนวก ค การโปรแกรมเชิงเส้นตรง.....	146

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ง ผลการออกแบบบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์.....	160
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	175

สารบัญญภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	ปริมาณการส่งออกผักและผลไม้สดแช่เย็นและแช่แข็งของประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2530 ถึง พ.ศ. 2543.....	1
1.2	มูลค่าการส่งออกผักและผลไม้สดแช่เย็นและแช่แข็งของประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2530 ถึง พ.ศ. 2543.....	1
1.3	ตัวอย่างบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศตัดแปรสำหรับสमु่นไพร.....	3
1.4	ตัวอย่างบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศตัดแปรสำหรับกระเจี๊ยบ.....	4
1.5	ตัวอย่างบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศตัดแปรสำหรับพริกไทยสด.....	4
2.1	การเปรียบเทียบอัตราการหายใจของผลไม้แบบโคลแมคเทอร์ริกและแบบ นอนโคลแมคเทอร์ริก.....	12
2.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนและก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์ที่เก็บภายใต้สภาพบรรยากาศตัดแปร แบบ Active MAP และ Passive MAP กับเวลา.....	24
2.3	การเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของพอลิเอทิลีน ที่ค่าความหนาแน่นต่าง ๆ.....	33
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของ OPA ที่มีความ หนา 15 ไมครอนกับความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกต่าง ๆ (ความชื้นสัมพัทธ์ภายใน เป็นศูนย์).....	35
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการแพร่ (Diffusivity activation energy, E_D) และลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Logarithm of diffusion preexponential factor, $\log D_0$) ของก๊าซที่มีขนาดโมเลกุลต่าง ๆ โดยที่ ● คือพลังงานก่อกัมมันต์การแพร่ ○ คือลอการิทึมค่าสัมประสิทธิ์การ แพร่ในยางธรรมชาติ และ □ คือพลังงานกระตุ้นการแพร่ ■ คือลอการิทึมค่า สัมประสิทธิ์การแพร่ในพอลิไวนิลอะซิเตท (เมื่ออุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิ แก้ว).....	37
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการซึมผ่านไฮโดรเจนสัมพัทธ์ของยาง ต่อก๊าซต่าง ๆ ที่มีอุณหภูมิวิกฤตต่างกัน.....	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการละลายได้ของก๊าซต่าง ๆ ในยางที่อุณหภูมิ 25°C (●) และ 40°C (○) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิจุดเดือดของก๊าซ	39
2.8	กระบวนการลามิเนชันแบบเปียก.....	42
2.9	การลามิเนชันแบบแห้ง.....	43
2.10	การลามิเนชันแบบอัดรีด.....	43
2.11	การลามิเนชันแบบ hot melt.....	43
2.12	การผลิตฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นด้วยกระบวนการหิวฉีดทางเดียว.....	44
2.13	การผลิตฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นด้วยกระบวนการหิวฉีดหลายทาง.....	44
2.14	กระบวนการอัดรีดร่วมแบบฟิล์มเป่า.....	46
3.1	ระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้.....	50
3.2	ฟิล์มพอลิเมอร์แบบชั้นเดียว.....	58
3.3	ฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น.....	62
3.4	แผนภูมิแสดงลำดับขั้นตอนการคำนวณในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น...	66
3.5	หน้าจอเริ่มแรก.....	70
3.6	หน้าจอข้อมูลผักและผลไม้.....	71
3.7	หน้าจอ Respiration Type.....	71
3.8	หน้าจอแสดงข้อมูลตามแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดยับยั้งแบบอันคอมเพททิฟ.....	72
3.9	หน้าจอแสดงข้อมูลพื้นฐานตามสมการอาร์เรเนียส.....	72
3.10	หน้าจอแสดงตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบ.....	73
3.11	หน้าจอแสดงค่าความสามารถในการซึมผ่านก๊าซและไอน้ำ.....	74
3.12	หน้าจอการออกแบบ พอลิเมอร์.....	75
3.13	หน้าจอการแก้ไข และเพิ่มเติมข้อมูลพลาสติกในฐานะข้อมูล.....	76
3.14	หน้าจอการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น.....	77
3.15	หน้าจอการสรุปและรายงานผล.....	79
3.16	หน้าจอ Help.....	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ณ สภาวะคงตัวและค่าความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนกับอัตราส่วนการบรรจุของผลิตภัณฑ์ (AW _p) (cm ² /g) ที่อุณหภูมิ 20 °C.....	91
ก.1	ปฏิกิริยาและเอ็นไซม์ในกระบวนการไกลโคไลซิส.....	132
ก.2	ปฏิกิริยาและเอ็นไซม์ต่าง ๆ ในวัฏจักรเครบส์.....	134
ก.3	การเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนในลูกโซ่การหายใจ.....	135
ข.1	กราฟหาค่า K _m และ V _m	140
ค.1	พื้นที่ที่หาคำตอบได้ (feasible region) ภายใต้ฟังก์ชันข้อจำกัด.....	148
ค.2	เส้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เมื่อ Z ₁ = 30,000 และ Z ₂ = 24,000.....	149
ค.3	คำตอบที่ดีที่สุดเมื่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นค่าต่ำสุด.....	150

สารบัญญัตินี้

ตาราง		หน้า
1.1	ปริมาณและมูลค่าการส่งออกผักสดและผลไม้สดแช่เย็นและแช่แข็งตั้งแต่ปี พ.ศ. 2530 ถึง พ.ศ. 2544.....	1
2.1	การแบ่งประเภทผักและผลไม้ตามอัตราการหายใจในบรรยากาศปกติและที่ความเข้มข้นออกซิเจนร้อยละ 3 โดยปริมาตร.....	11
2.2	ตัวอย่างของชนิดผลไม้แบบโคลแมคเทอร์ริก และแบบนอนโคลแมคเทอร์ริก	13
2.3	อัตราการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอนันต์และพลังงานก่อกัมมันต์ของการหายใจสำหรับผักบางชนิดที่ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนร้อยละ 3 โดยปริมาตร.....	14
2.4	อัตราส่วนอุณหภูมิ (Q_{10}) สำหรับผักชนิดต่าง ๆ.....	15
2.5	ความเข้มข้นต่ำสุดของก๊าซออกซิเจนที่ผักและผลไม้บางชนิดทนได้.....	16
2.6	ความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผักและผลไม้บางชนิดทนได้.....	16
2.7	สัมประสิทธิ์การคายน้ำ (k) สำหรับผักชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 0-5 °C ความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 80% การสูญเสียน้ำหนักในผักน้อยกว่า 10% และความเร็วจของอากาศที่ล้อมรอบเท่ากับ 0 m/s.....	19
2.8	ข้อมูลแสดงผลกระทบความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิต่ออายุการเก็บรักษาของผักชนิดต่าง ๆ.....	21
2.9	ตัวอย่างการจัดเก็บผักและผลไม้ภายใต้สภาพบรรยากาศดัดแปร.....	22
2.10	การสูญเสียน้ำหนักผักและผลไม้ที่ผู้บริโภคยังยอมรับคุณภาพได้.....	29
2.11	ข้อมูลแสดงสภาวะการเก็บรักษาผักภายใต้สภาพบรรยากาศดัดแปรที่เหมาะสม.....	30
2.12	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซต่าง ๆ (P) ในฟิล์มพอลิเมอร์.....	31
2.13	ผลกระทบของหมู่ฟังก์ชันต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน.....	32
2.14	ผลกระทบของความเป็นผลึกต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน.....	32

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
2.15	ผลกระทบการจัดเรียงตัวของโมเลกุลพอลิเมอร์ต่อค่าความสามารถในการ ซึมผ่านก๊าซออกซิเจนในพอลิเมอร์ต่าง ๆ.....	34
2.16	ผลกระทบของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อค่าความสามารถในการ ซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในพอลิเอทิลีนความหนาแน่น ต่ำ.....	36
2.17	การเปรียบเทียบการอัดรีดร่วมในระบบหัวฉีดหลายทางและหัวฉีดทาง เดียว.....	45
2.18	คุณสมบัติพอลิเมอร์ที่นำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์.....	48
3.1	ค่าคงที่สำหรับการหายใจชนิดยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟในผักและผลไม้ ชนิดต่าง ๆ.....	54
3.2	อัตราการหายใจที่อุณหภูมิหนึ่งและพลังงานก่อกัมมันต์ในผักและผลไม้ ชนิดต่าง ๆ.....	54
3.3	ค่าความสามารถในการซึมผ่านก๊าซที่อุณหภูมิหนึ่งและพลังงานก่อก กัมมันต์สำหรับค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ในฟิล์มพอลิเมอร์.....	60
3.4	ข้อมูลตัวอย่างสำหรับการออกแบบบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์แบบ หลายชั้น.....	68
4.1	ค่าตัวแปรในแบบจำลองการหายใจชนิดต่าง ๆ ของผักและผลไม้แต่ละ ชนิด.....	82
4.2	ค่าตัวแปร V_m , K_m และ K_i ที่อุณหภูมิ 5, 15 และ 20 °C ของบลูเบอร์รี่สาย พันธุ์ต่าง ๆ.....	84
4.3	ค่าคงที่ในแบบจำลองการหายใจชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ ของผักชนิดต่าง ๆ.....	86
4.4	ค่าคงที่ในแบบจำลองการดูดซับของแสงเมียร์สำหรับผักและผลไม้.....	87
4.5	ค่าตัวแปร a, b และ i สำหรับอัตราการใช้ออกซิเจนในผักชนิดต่าง ๆ.....	88
4.6	ตัวแปร ΔG และ N_T ในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง ๆ ของผักและผลไม้ต่าง ๆ.....	89
5.2	ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการเก็บรักษา กะหล่ำปลีโดยเลือกจากฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่าน ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าที่ต้องการเท่านั้น.....	104

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
5.3	ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการเก็บรักษา กะหล่ำปลีโดยเลือกจากฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่าน ของก๊าซออกซิเจนมากกว่าที่ต้องการเท่านั้น.....	105
5.4	ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการเก็บรักษา กะหล่ำปลีโดยเลือกจากฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่าน ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าที่ต้องการเท่านั้น.....	106
5.5	ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการเก็บรักษา กะหล่ำปลีโดยเลือกจากฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่าน ของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าและมากกว่าที่ ต้องการ.....	107
5.6	ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการจัดเก็บพริกไทย สดในบรรจุภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นต่าง ๆ กัน.....	108
5.7	ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการเก็บรักษา ลิ้นจี่ (Leek)	113
5.8	ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการเก็บรักษา พริกไทยสด.....	114
5.9	ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการเก็บรักษา แอปเปิ้ล.....	115
5.10	ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการเก็บรักษา ขึ้นฉ่าย.....	116
5.11	ผลการออกแบบฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นสำหรับการเก็บรักษา กะหล่ำปลีหั่นละเอียด.....	119
5.12	ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะคงตัว สำหรับการเก็บรักษากะหล่ำปลีหั่นละเอียดในฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลาย ชั้นต่าง ๆ ในช่วงอุณหภูมิการจัดเก็บตั้งแต่ 278.15 ถึง 298.15 เคลวิน.....	120

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

A	พื้นที่ผิวของผักและผลไม้ในการเคลื่อนไหวของไอน้ำ
A	พื้นที่ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่สัมผัสกับบรรยากาศ (cm^2)
A_1, A_2	ค่าคงที่ของพอลิเมอร์ชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2 ตามลำดับ ($\text{mmol m}^{-1} \text{hr}^{-1} \text{kPa}^{-1}$)
a	ค่าคงที่
a	ตัวแปรการใช้ออกซิเจนเนื่องจากกระบวนการหายใจ ($\text{mmol kg}^{-1} \text{hr}^{-1}$)
a	รัศมีภายในทรงกระบอก (cm)
b	ค่าคงที่
b	รัศมีภายนอกทรงกระบอก (cm)
b	อัตราการใช้ออกซิเจนสูงสุด ($\text{mmol kg}^{-1} \text{hr}^{-1}$)
c	ค่าคงที่
c	ความเข้มข้นก๊าซ (mol cm^{-3})
c_1, c_2	ค่าความเข้มข้นก๊าซ (mol cm^{-3})
c_i	ราคาพอลิเมอร์แต่ละชนิด (baht/g)
D	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์ ($\text{cm}^2 \text{sec}^{-1}$)
$\frac{dc}{dx}$	อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของก๊าซเทียบระยะทาง ($\text{mol cm}^{-3} \text{cm}^{-1}$)
E_1, E_2	พลังงานก่อกัมมันต์ (J mmol^{-1})
E_r	พลังงานก่อกัมมันต์ของการหายใจ (kg mol^{-1})
F_i	ฟังก์ชันของคุณสมบัติของพอลิเมอร์
G_k	ฟังก์ชันของคุณสมบัติของก๊าซที่ซึมผ่าน
h	ค่าคงที่ของแพลงค์ ($3.98 \times 10^{-32} \text{m}^2 \text{kg hr}^{-1}$)
i	ชนิดฟิล์มพอลิเมอร์
l	ความเข้มข้นด้วยบัพยั้ง
J	อัตราการเคลื่อนไหวของไอน้ำ
J	อัตราการถ่ายเทมวลก๊าซต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เวลา ($\text{mol cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$)
K_m	ค่าคงที่
K_{m, CO_2}	ค่าคงที่ไม่เคลิลิสเมนเทนสำหรับอัตราการใช้ออกซิเจนแบบยับยั้งชนิดแข่งขัน ($\% \text{CO}_2$)

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

$K_{m_{r,CO_2}}$	ค่าคงที่ของไมเคิลลิสเมนเทนสำหรับอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนแบบยับยั้งชนิดนอนคอมเพทิทีฟ (%CO ₂)
$K_{m_{O_2}}$	ค่าคงที่ไมเคิลลิสเมนเทนสำหรับอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนแบบไม่ยับยั้ง (%O ₂)
$K_{m_{i,CO_2}}$	ค่าคงที่ของไมเคิลลิสเมนเทนสำหรับอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนแบบยับยั้งชนิดอันคอมเพทิทีฟ (%CO ₂)
K_i	ค่าคงที่
k	สัมประสิทธิ์การคายน้ำ
k	ค่าคงที่ของ Boltzmann ($4.97 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \text{ kg hr}^{-2} \text{ K}^{-1}$)
L	ค่าคงที่อะโวกาโดร ($6.02 \times 10^{20} \text{ molecule/mmol}$)
m	อัตราการคายน้ำของผักและผลไม้ ($\text{ml(STP) kg}^{-1} \text{ hr}^{-1}$)
n	จำนวนชั้นฟิล์มพอลิเมอร์
N_T	จำนวนแอกทีฟไซต์ทั้งหมดสำหรับอัตราการใช้ออกซิเจน
P	ค่าความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์ ($\text{ml (STP) mil cm}^{-2} \text{ hr}^{-1} \text{ atm}^{-1}$)
P	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซโดยรวม ($\text{mmol m}^{-1} \text{ hr}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$)
P_{O_2}	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน
$P_{O_2,i}$	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของพอลิเมอร์ชนิดที่ i ($\text{ml(STP) mil cm}^{-2} \text{ atm}^{-1} \text{ hr}^{-1}$)
$P_{O_2,T}$	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนโดยรวมสำหรับฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น ($\text{ml(STP) mil cm}^{-2} \text{ atm}^{-1} \text{ hr}^{-1}$)
P_{CO_2}	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
$P_{CO_2,i}$	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของพอลิเมอร์ชนิดที่ i ($\text{ml(STP) mil cm}^{-2} \text{ atm}^{-1} \text{ hr}^{-1}$)
$P_{CO_2,T}$	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยรวมสำหรับฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น ($\text{ml(STP) mil cm}^{-2} \text{ atm}^{-1} \text{ hr}^{-1}$)
$P_{H_2O,T}$	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำโดยรวมสำหรับฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น ($\text{ml(STP) mil cm}^{-2} \text{ atm}^{-1} \text{ hr}^{-1}$)
p	ความดันย่อยของก๊าซ (atm)

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

p_c	ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ล้อมรอบผักและผลไม้ (kPa)
p_{CO_2}	ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
p_{H_2O}	ความดันไอน้ำในบรรยากาศภายนอก
$p_{H_2O}^{sat}$	ความดันไอน้ำอิ่มตัวในบรรยากาศภายนอก
p_o	ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนที่ล้อมรอบผักและผลไม้ (kPa)
p_{O_2}	ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจน
p^{pkg}	ความดันรวมก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ที่สภาวะคงตัว (atm)
p_T	ค่าความดันก๊าซรวมภายในบรรจุภัณฑ์ (atm)
Q	ปริมาณของก๊าซที่ซึมผ่านฟิล์มพอลิเมอร์
Q_{10}	อัตราส่วนอุณหภูมิ
R	ค่าคงที่ก๊าซ ($0.008314 \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
R	ค่าคงที่ก๊าซ ($1.08 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ kg hr}^{-2} \text{ mmol}^{-1} \text{ K}$)
R	แรงต้านทานต่อการเคลื่อนไหวของน้ำ
R	อัตราการหายใจของผักและผลไม้ ($\text{ml(STP) kg}^{-1} \text{ hr}^{-1}$)
r	อัตราการเกิดปฏิกิริยา ($\text{ml kg}^{-1} \text{ hr}^{-1}$)
R_1	อัตราการหายใจที่อุณหภูมิ T_1 ($\text{ml kg}^{-1} \text{ hr}^{-1}$)
R_2	อัตราการหายใจที่อุณหภูมิ T_2 ($\text{ml kg}^{-1} \text{ hr}^{-1}$)
R^2	สัมประสิทธิ์ความถดถอย
RH^{pkg}	ความชื้นสัมพัทธ์ภายในบรรจุภัณฑ์ (%)
R_o	อัตราการใช้ออกซิเจนเนื่องจากกระบวนการหายใจ ($\text{mmol kg}^{-1} \text{ hr}^{-1}$)
R_{O_2}	อัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน ($\text{ml kg}^{-1} \text{ hr}^{-1}$)
R_p	อัตราการเกิดปฏิกิริยา
R_{CO_2}	อัตราการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากกระบวนการหายใจ ($\text{mmol kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$)
R_o	อัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนเนื่องจากกระบวนการหายใจ ($\text{mmol kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$)
r_o	อัตราการหายใจที่อุณหภูมิอนันต์ ($\text{ml kg}^{-1} \text{ hr}^{-1}$)
S	ค่าสัมประสิทธิ์การละลายได้ของก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์
S	ความเข้มข้นสับสเตรต

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

T	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
t	เวลา (hr)
V	ปริมาตรของก๊าซ
V	ค่าคงที่ของสมการ
V_{mO_2}	อัตราการใช้ออกซิเจนสูงสุด ($ml\ kg^{-1}\ hr^{-1}$)
$\frac{V_{O_2}}{V}$	เศษส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุก๊าซที่สภาวะคงตัว
$\frac{V_{CO_2}}{V}$	เศษส่วนโดยปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุก๊าซที่สภาวะคงตัว
W	น้ำหนักผักและผลไม้ (kg)
W_R	น้ำหนักผักและผลไม้ที่ใช้ในการทดสอบวัดอัตราการหายใจ
X	อัตราส่วนการหายใจจริงต่อการหายใจสมมติ
x	ความหนาของบรรจุก๊าซฟิล์มพอลิเมอร์ (mil)
x	ระยะทางการแพร่ (cm)
x_i	ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิด (mil)
x_T	ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์โดยรวม (mil)
Y	อัตราส่วนค่าความสามารถในการซึมผ่านก๊าซจริงต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านก๊าซสมมติ
Z_{min}	ต้นทุนวัตถุดิบต่ำสุดของฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น (baht)
ΔG	พลังงานกระตุ้นกิปีส์อิสระ ($m^2\ kg^{-2}\ mmol^{-1}$)
$\Delta p_{O_2, pk}$	ความคลาดเคลื่อนของค่าความดันย่อยก๊าซออกซิเจน
$\Delta p_{CO_2, pk}$	ความคลาดเคลื่อนของค่าความดันย่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
ρ	ค่าความหนาแน่นแต่ละชนิด (g/cm^3)
γ_{ik}	พารามิเตอร์ที่แสดงปฏิริยาระหว่างพอลิเมอร์และก๊าซ
*	แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับผักและผลไม้แต่ละชนิด
[CO ₂]	ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (%)
[O ₂]	ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจน (%)