ผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สด และค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

นางสาว นภาวิณี วินิจฉัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0312-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF TEMPERATURE ON THE RESPIRATION RATE OF FRESH PRODUCE AND THE GAS PERMEABILITY OF POLYMERIC FILM

Miss Napawinee Winitchai

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 974-03-0312-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดและค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์
โดย	นางสาว นภาวิณี วินิจฉัย
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. วรัญ แต้ไพสิฐพงษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. วรัญ แต้ไพสิฐพงษ์)

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นภาวิณี วินิจฉัย : ผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดและค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ (EFFECTS OF TEMPERATURE ON THE RESPIRATION RATE OF FRESH PRODUCE AND THE GAS PERMEABILITY OF POLYMERIC FILM) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร. วรัญ แต้ไพสิฐพงษ์ : 273 หน้า ISBN 974-03-0312-9.

งานวิจัยนี้ได้วัดอัตราการหายใจของมะเขือเทศ กล้วยน้ำว้า ส้มเขียวหวาน และพริกชี้ฟ้า ในระบบปิดที่อุณหภูมิ 5±1, 11±1 และ 29±1 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราการหายใจ และได้วัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ด้วยอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นที่อุณหภูมิ 5±1, 11±1 และ 29±1 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเอทธิลีนความหนาแน่นต่ำและฟิล์มพอลิโพรพิลีน

สำหรับอัตราการหายใจนั้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า กลไกการหายใจของมะเขือเทศ กล้วยน้ำว้า ส้มเขียวหวาน น่าจะเป็นไปตามกลไกของแบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ (Michaelis-Menten uncompetitive type equation) หรือชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ (Michaelis-Menten noncompetitive type equation) ส่วนพริกชี้ฟ้าน่าจะเป็นไปตามกลไกของแบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ พารามิเตอร์ V_m (ค่าอัตราการหายใจที่สูงที่สุด) ของทุกแบบจำลองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสำหรับผักและผลไม้สดทั้งสี่ชนิด ส่วนพารามิเตอร์ K_m (ค่าคงที่ไมเคิลลิสเมนเทน) และ K_i (ค่าคงที่ของการยับยั้ง) ของแต่ละแบบจำลองแปรผันกับอุณหภูมิในลักษณะต่าง ๆ กันขึ้นกับชนิดของผักและผลไม้สด แต่โดยรวมอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดทั้งสี่ชนิดแปรผันกับอุณหภูมิตามสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius equation)

สำหรับค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์นั้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อุปกรณ์การทดลองที่ได้จัดสร้างขึ้นสามารถใช้วัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ได้ และพบว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ขึ้นกับโครงสร้างของฟิล์มพอลิเมอร์ ชนิดของก๊าซ และแปรผันกับอุณหภูมิตามสมการอาร์รีเนียส ฟิล์มพอลิเอทธิลีนความหนาแน่นต่ำมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่อุณหภูมิอนันต์ (P_0) สำหรับก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 8.447 และ 4.507 $cm^2 s^{-1}$ ตามลำดับ และค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ (E_p) เท่ากับ 49.29 และ 45.98 kJ mol^{-1} ตามลำดับ ฟิล์มพอลิโพรพิลีนมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่อุณหภูมิอนันต์ (P_0) สำหรับก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 1.130 และ 1.109 $cm^2 s^{-1}$ ตามลำดับ และค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ (E_p) เท่ากับ 45.17 และ 43.34 kJ mol^{-1} ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อนิสิต ....
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ....
ปีการศึกษา 2544	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ....

4170356121 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD : RESPIRATION / MODIFIED ATMOSPHERE / TEMPERATURE / GAS PERMEABILITY

NAPAWINEE WINITCHAI : EFFECTS OF TEMPERATURE ON THE RESPIRATION RATE OF FRESH PRODUCE AND THE GAS PERMEABILITY OF POLYMERIC FILM. THESIS ADVISER : VARUN TAEPAISITPHONGSE, Ph.D. 273 pp. ISBN 974-03-0312-9.

This work had experimentally measured the respiration rates of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill), banana (*Musa acuminata* balbisiana), orange (*Citrus reticulata* Blanco) and long cayenne pepper (*Copsicum annuum* var acuminatum) in the closed system at 5 ± 1, 11 ± 1 and $29\pm1^{\circ}C$ to determine the effects of temperature on the respiration rate. This work also measured the gas permeability of low density polyethylene and polypropylene films for oxygen and carbon dioxide at 5 ± 1, 11 ± 1 and $29\pm1^{\circ}C$ to determine the effects of temperature on the gas permeability.

For respiration rate, the results showed that the respiration mechanism of tomato, banana, and orange either followed the Michaelis-Menten uncompetitive type equation or Michaelis-Menten noncompetitive type equation. The respiration machanism of long cayenne pepper followed the Michaelis-Menten uncompetitive type equation. The parameter V_m (maximum respiration rate) of both Michaelis-Menten equations increased with increasing temperature for all four produces. However, the parameters K_m (Michaelis-Menten constant) and K_i (Inhibition constant) of each Michaelis-Menten equation varied differently with temperature depending on type of produce. Overall, respiration rate of each produce varied with temperature according to Arrhenius equation.

For gas permeability, the results showed that the built apparatus was suitable for measuring the gas permeability. The gas permeability depended on morphology of the polymeric film, type of permeate gas, and varied with temperature according to Arrhenius equation. The pre-exponential factor (P_0) of gas permeability of LDPE film for oxygen and carbon dioxide were at 8.447 and 4.507 $cm^2\ s^{-1}$, respectively, and the activation energy of gas permeability (E_p) were at 49.29 and 45.98 $kJ\ mol^{-1}$, respectively. The P_0 of PP film for oxygen and carbon dioxide were at 1.130 and 1.109 $cm^2\ s^{-1}$, respectively, and the E_p were at 45.17 and 43.34 $kJ\ mol^{-1}$, respectively.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department	Chemical Engineering	Student's signature …………………….........
Field of study	Chemical Engineering	Advisor's signature ……………………........
Academic year	2001	Co-advisor's signature ……………...........

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. วรัญ แต้ไพสิฐพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้แนะแนวทางการทำวิจัยและกรุณาให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ในระหว่างการทำวิจัย ตลอดจนช่วยแก้ไขและปรับปรุงเพิ่มเติมวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างดียิ่ง

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ ประธานกรรมการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล กรรมการ ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภาควิชาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยบางส่วน และขอขอบคุณบริษัท สตรองแพ็ค จำกัด (มหาชน) ที่อนุเคราะห์ฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัย และคณะ อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่กรุณาให้ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ที่เป็นประโยชน์กับงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และผู้มีอุปการะคุณที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ
กิตติกรรมประกาศ .... ฉ
สารบัญ .... ช
สารบัญภาพ .... ฌ
สารบัญตาราง .... ณ

บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 มูลเหตุและที่มาของงานวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ 2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 หลักการพื้นฐาน 5
2.1 การหายใจของผักและผลไม้สด 5
2.2 การซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ 19
2.3 บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด 38

บทที่ 3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 57
3.1 อัตราการหายใจของผักและผลไม้สด 58
3.2 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ 65

บทที่ 4 การทดลอง 71
4.1 อัตราการหายใจของผักและผลไม้สด 71
4.2 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ 77

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล 87
5.1 อัตราการหายใจของผักและผลไม้สด 87
5.2 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ 132

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 145
6.1 บทสรุป 145
6.2 ข้อเสนอแนะ 148

รายการอ้างอิง 150

ภาคผนวก 154
ภาคผนวก ก รายละเอียดเกี่ยวกับผักและผลไม้สดที่ใช้ในการทดลอง 155
ภาคผนวก ข ก๊าซโครมาโตกราฟี 163
ภาคผนวก ค Calibration Curve 166
ภาคผนวก ง เครื่อง Oxygen Permeability Analyzer 171
ภาคผนวก จ ผลการทดลองวัดอัตราการหายใจของผักและผลไม้สด 173
ภาคผนวก ฉ ผลการคำนวณจากการฟิตแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทน 199
ภาคผนวก ช ผลการทดลองค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ 212
ภาคผนวก ซ การประมาณค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ 264

ประวัติผู้เขียน 273

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 การเปรียบเทียบอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดประเภทไคลแมคเทอริกและประเภทนอนไคลแมคเทอริกในช่วงของการเจริญเติบโตระยะต่าง ๆ 10

2.2 ตัวอย่างอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดประเภทไคลแมคเทอริก (ก) และประเภทนอนไคลแมคเทอริก (ข) 11

2.3 ผลกระทบของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออัตราการหายใจของบรอคเคอลี่พันธุ์เอมเพอเรอที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส (ศึกษาเป็นเวลา 7 วัน) 14

2.4 ผลกระทบของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออัตราการผลิตเอทธิลีนของบรอคเคอลี่พันธุ์เอมเพอเรอที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส (ศึกษาเป็นเวลา 7 วัน) 16

2.5 อัตราการหายใจและการผลิตก๊าซเอทธิลีนของมะเขือเทศเมื่อถูกกระทบกระเทือนด้วยการตกกระทบของลูกเหล็กหลาย ๆ ครั้ง 17

2.6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลาที่เกิดขึ้นในวิธีการวัดอัตราการหายใจแบบระบบปิด 18

2.7 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลาที่เกิดขึ้นในวิธีการวัดอัตราการหายใจแบบระบบเปิด 19

2.8 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่ออัตราการส่งผ่าน (transmission rate) ของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ 30

2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการละลายของก๊าซชนิดต่าง ๆ ในยางธรรมชาติกับค่าจุดเดือด ค่าอุณหภูมิวิกฤติและค่าอุณหภูมิของเลนนาดโจนส์ (Lennard-Jones temperature: ε / k) ของก๊าซแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 298 K 32

2.10 ระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด 41

2.11 การเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างการสร้างบรรยากาศดัดแปรแบบโดยอ้อมและแบบโดยตรงสำหรับผักและผลไม้สด 51

รูปที่		หน้า

2.12 การบรรจุการบรรจุมะเขือเทศในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร..................... 52

2.13 การบรรจุแตงโมพร้อมบริโภคในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร..................... 53

3.1 ความสัมพันธ์โดยประมาณระหว่างค่า Q_{10}^{R} ของผักและผลไม้สดกับค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ช่วงอุณหภูมิ 0-30 องศาเซลเซียส 67

4.1 เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (gas chromatography) ที่ใช้ในการทดลอง 73

4.2 ขวดบรรจุผักและผลไม้สดที่ใช้ในการทดลอง 73

4.3 อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ 77

4.4 เครื่อง Oxygen Permeability Analyzer 83

4.5 หลักการในการทำงานของ DSC, ค่ากำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกัน (เส้นประ), ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (เส้นไข่ปลา) 85

5.1 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 89

5.2 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 89

5.3 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 89

5.4 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 90

5.5 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 90

5.6 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 90

5.7 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 91

5.8 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 91

รูปที่ หน้า

5.9 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 91

5.10 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 92

5.11 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 92

5.12 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 92

5.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln R(O_2)$ ของมะเขือเทศกับ 1/T (1/K) (ข้อมูลจากตารางที่ 5.27 ในส่วนของแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ) 128

5.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln R(O_2)$ ของมะเขือเทศกับ 1/T (1/K) (ข้อมูลจากตารางที่ 5.27 ในส่วนของแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ) 128

5.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln R(CO_2)$ ของมะเขือเทศ กับ 1/T (1/K) (ข้อมูลจากตารางที่ 5.27 ในส่วนของแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ) 129

5.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln R(CO_2)$ ของมะเขือเทศ กับ 1/T (1/K) (ข้อมูลจากตารางที่ 5.27 ในส่วนของแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ) 129

5.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln P(O_2)$ กับ 1/T(1/K) ของฟิล์ม LDPE 135

5.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln P(CO_2)$ กับ 1/T(1/K) ของฟิล์ม LDPE 135

5.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln P(O_2)$ กับ 1/T(1/K) ของฟิล์ม PP 136

5.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln P(CO_2)$ กับ 1/T(1/K) ของฟิล์ม PP 136

ก.1 มะเขือเทศที่ใช้ในการทดลอง 157

ก.2 กล้วยน้ำว้าที่ใช้ในการทดลอง 159

ก.3 ส้มเขียวหวานที่ใช้ในการทดลอง 161

ก.4 พริกชี้ฟ้าที่ใช้ในการทดลอง 162

ข.1 องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี 164

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ หน้า

ค.1 Calibration Curve ของก๊าซออกซิเจน 167

ค.2 Calibration Curve ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 168

ค.3 Calibration Curve ของก๊าซไนโตรเจน 169

ง.1 หลักการทำงานของเครื่อง oxygen permeability analyzer 171

ช.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 240

ช.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 240

ช.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 241

ช.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 241

ช.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 242

ช.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 242

ช.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 243

ช.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 243

ช.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 244

ช.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 244

ช.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 245

ช.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 245

รูปที่ หน้า

ช.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 246

ช.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 246

ช.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 247

ช.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 247

ช.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 248

ช.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 248

ช.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 249

ช.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 249

ช.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 250

ช.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 250

ช.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 251

ช.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 251

ช.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 252

ช.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 252

รูปที่ หน้า

ช.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 253
ช.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 253
ช.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 254
ช.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 254
ช.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 255
ช.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 255
ช.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 256
ช.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 256
ช.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 257
ช.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 257
ช.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 258
ช.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 258
ช.39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 259
ช.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 259

รูปที่ หน้า

ช.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 260

ช.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 260

ช.43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 261

ช.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 261

ช.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 262

ช.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1) 262

ช.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (O_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 263

ช.48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (CO_2) กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2) 263

ซ.1 ค่าความร้อนในการหลอมเหลวของ LDPE 33 ไมครอน 265

ซ.2 ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ LDPE 33 ไมครอน 266

ซ.3 ค่าความร้อนในการหลอมเหลวของ PP 25 ไมครอน 267

ซ.4 ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ PP 25 ไมครอน 268

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของก๊าซออกซิเจนที่ผักและผลไม้สดบางชนิดสามารถทนได้........ 7

2.2 ความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผักและผลไม้สดบางชนิดสามารถทนได้ 8

2.3 ตัวอย่างของผักและผลไม้สดประเภทไคลแมคเทอริกและประเภทนอนไคลแมคเทอริก........ 10

2.4 อิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการเสื่อมสภาพและอายุในการเก็บรักษาของผักและผลไม้สด 13

2.5 ตัวอย่างของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซชนิดต่าง ๆ ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์.. 23

2.6 ผลกระทบของหมู่ฟังก์ชัน (functional groups) ที่มีต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ 26

2.7 ผลกระทบของค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่มีต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ ที่ 25 องศาเซลเซียส 27

2.8 ความสัมพันธ์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ (P) ค่าความสามารถในการแพร่ (D) และค่าความสามารถในการละลาย (S) ของก๊าซชนิดต่าง ๆ โดยเทียบกับก๊าซไนโตรเจน 27

2.9 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าอุณหภูมิของเลนนาดโจนส์ (Lennard-Jones temperature: ε / k) ของก๊าซชนิดต่าง ๆ 33

2.10 สภาวะต่าง ๆ ในระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่เหมาะสมในการเก็บรักษาผักและผลไม้สดบางชนิด 47

2.11 ค่าความหนาแน่น ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และค่าอุณหภูมิการหลอมตัวของพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ 55

ตารางที่ หน้า

2.12 คุณสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ 56

3.1 ค่าคงที่ต่าง ๆ ในสมการที่ 3.6 สำหรับผักและผลไม้สดแต่ละชนิด 63

5.1 สมการและอนุพันธ์อันดับหนึ่งของสมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิด 93

5.2 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ 94

5.3 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ 95

5.4 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ 96

5.5 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ 97

5.6 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ 98

5.7 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ 99

5.8 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ 100

5.9 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ 101

5.10 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ 102

5.11 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ 103

5.12 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ 104

5.13 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ 105

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ หน้า

5.14 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 111
5.15 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 111
5.16 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 111
5.17 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 112
5.18 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 112
5.19 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 112
5.20 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส.... 113
5.21 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส... 113
5.22 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส... 113
5.23 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส.......... 114
5.24 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส........ 114
5.25 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส........ 114
5.26 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) จากผลการฟิตแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนกับข้อมูลอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิด 115

ตารางที่ หน้า

5.27 ผลการคำนวณอัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทน โดยกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทุกอุณหภูมิมีค่าเท่ากัน 125
5.28 ผลการคำนวณอัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทน โดยกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทุกอุณหภูมิมีค่าเท่ากัน 125
5.29 ผลการคำนวณอัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทน โดยกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทุกอุณหภูมิมีค่าเท่ากัน 126
5.30 ผลการคำนวณอัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทน โดยกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทุกอุณหภูมิมีค่าเท่ากัน 126
5.31 ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการหายใจ (E_r) ของผักและผลไม้สดทั้ง 4 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง 130
5.32 อัตราการส่งผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง 133
5.33 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง 134
5.34 ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง 137
5.35 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิอนันต์ (P_0) 137
5.36 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ (E_p) จากตารางที่ 5.34 และค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิอนันต์ (P_0) จากตารางที่ 5.35 138

ตารางที่ หน้า

5.37 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองที่ได้จากบริษัทที่อนุเคราะห์ฟิล์ม Calibration Curve ของก๊าซออกซิเจน 139

5.38 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง Oxygen Permeability Analyzer 139

5.39 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองที่ได้จากการประมาณค่า 140

6.1 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิอนันต์ (P_0) และค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ (E_p) สำหรับฟิล์ม LDPE และ PP ที่ใช้ในการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 5-29 องศาเซลเซียส.. 148

ค.1 Calibration Curve ของก๊าซออกซิเจน 167

ค.2 Calibration Curve ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 168

ค.3 Calibration Curve ของก๊าซไนโตรเจน 169

ค.4 สมบัติของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนบริสุทธ์ 170

จ.1 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 173

จ.2 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 175

จ.3 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 176

จ.4 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 177

จ.5 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 178

จ.6 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 179

ตารางที่ หน้า

จ.7 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 180

จ.8 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 182

จ.9 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 183

จ.10 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 184

จ.11 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 185

จ.12 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 186

จ.13 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 187

จ.14 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 188

จ.15 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 189

จ.16 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 190

จ.17 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 191

จ.18 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 192

จ.19 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 193

จ.20 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 194

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ หน้า

จ.21 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 195

จ.22 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 196

จ.23 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 197

จ.24 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 198

ฉ.1 อัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 5±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ 200

ฉ.2 อัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 11±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ 201

ฉ.3 อัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 29±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ 202

ฉ.4 อัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 5±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ 203

ฉ.5 อัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 11±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ 204

ฉ.6 อัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 29±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ 205

ฉ.7 อัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 5±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ 206

ฉ.8 อัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 11±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ 207

ฉ.9 อัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 29±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ 208

ฉ.10 อัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 5±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ 209

ตารางที่ หน้า

ฉ.11 อัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 11±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ 210

ฉ.12 อัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 29±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ 211

ช.1 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 212

ช.2 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 212

ช.3 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 212

ช.4 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 213

ช.5 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 213

ช.6 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 213

ช.7 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 214

ช.8 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 214

ช.9 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 214

ช.10 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 215

ช.11 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 215

ช.12 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 215

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ หน้า

ช.13 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 216
ช.14 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 217
ช.15 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 218
ช.16 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 219
ช.17 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 220
ช.18 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 221
ช.19 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 222
ช.20 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 223
ช.21 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 224

ตารางที่ หน้า

ช.22 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 225
ช.23 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 226
ช.24 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 227
ช.25 การคำนวณหาค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 228
ช.26 การคำนวณหาค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 229
ช.27 การคำนวณหาค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 230
ช.28 การคำนวณหาค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 231
ช.29 การคำนวณหาค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 232
ช.30 การคำนวณหาค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 233
ช.31 การคำนวณหาค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 234
ช.32 การคำนวณหาค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 235
ช.33 การคำนวณหาค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 236

ตารางที่ หน้า

ช.34 การคำนวณหาค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส 237

ช.35 การคำนวณหาค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส 238

ช.36 การคำนวณหาค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส 239

ซ.1 ค่าระดับความเป็นผลึกและค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ LDPE และ PP ที่ใช้ในการทดลอง 264

ซ.2 การคำนวณค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม LDPE ที่ใช้ในการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ 271

ซ.3 การคำนวณค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม PP ที่ใช้ในการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ 272

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 มูลเหตุและที่มาของงานวิจัย

ผักและผลไม้สดมีการเสื่อมสภาพค่อนข้างเร็ว เน่าเสียได้ง่ายภายหลังจากการเก็บเกี่ยว เนื่องมาจากกระบวนการหายใจและการคายน้ำของผักและผลไม้สด จึงทำให้ผักและผลไม้สดมีช่วงอายุที่เหมาะสมต่อการบริโภคต่ำ [1,2,3,8] ดังนั้นถ้าสามารถยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สดให้นานขึ้นได้ ก็จะเป็นการเพิ่มแหล่งอาหารได้ทางหนึ่ง วิธีที่ใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สดให้ยาวนานขึ้นหรือที่เรียกว่าเทคโนโลยีภายหลังการเก็บเกี่ยว (post harvest technology) จึงได้ถูกคิดค้นอย่างต่อเนื่อง เทคโนโลยีภายหลังการเก็บเกี่ยวแบบหนึ่งที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายในหลาย ๆ ประเทศคือ บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร (modified atmosphere packaging หรือ MAP)

บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร (MAP) เป็นเทคโนโลยีหนึ่งซึ่งมีบทบาทสำคัญในการช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สดให้คงคุณภาพ ความสดและรสชาติไว้ให้ยาวนานมากขึ้น วิธีนี้มักจะใช้ร่วมกับการเก็บในสถานที่ที่มีอุณหภูมิต่ำ การยืดอายุการเก็บรักษาด้วยวิธีนี้อาศัยหลักการที่ว่าอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่รอบ ๆ ผักและผลไม้สด โดยถ้าสามารถทำให้สัดส่วนของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์มีค่าเหมาะสมที่ทำให้อัตราการหายใจของผักและผลไม้สดลดลงได้ ก็จะสามารถยืดอายุในการเก็บรักษาผักและผลไม้ให้ยาวนานขึ้นได้ [1,2,3,8] ดังนั้นการจัดหาหรือการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่จะทำให้ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์มีความแตกต่างจากบรรยากาศปกติหรือที่เรียกว่าบรรยากาศดัดแปรที่เหมาะสมกับผักและผลไม้สดชนิดหนึ่ง ๆ ได้นั้นต้องอาศัยข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญ ได้แก่ ข้อมูลเกี่ยวกับอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดชนิดนั้น ๆ ข้อมูลเกี่ยวกับค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร ข้อมูลเกี่ยวกับระดับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมภายในบรรจุภัณฑ์สำหรับเก็บรักษาผักและผลไม้สดชนิดนั้น ๆ รวมทั้งข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการเกิดบรรยากาศดัดแปร

ภายในบรรจุภัณฑ์ด้วย ซึ่งปัจจัยที่สำคัญที่สุดปัจจัยหนึ่งก็คืออุณหภูมิ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลง จะส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดที่ทำการเก็บรักษา และค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเกิดบรรยากาศดัดแปรภายในบรรจุภัณฑ์ด้วย [2,24] โดยผลกระทบของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นนี้จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของผักและผลไม้สด และชนิดของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร ดังนั้นถ้ามีข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเรื่องดังกล่าวก็จะช่วยให้การจัดหาและออกแบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่มีความเหมาะสมในการเก็บรักษาผักและผลไม้สดนั้นสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมา [11,13,14,16,31] ข้อมูลเกี่ยวกับอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดที่มีการเพาะปลูกภายในประเทศไทย และค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ยังมีไม่มากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบวิธีการทดลองเพื่อหาอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดที่อุณหภูมิต่าง ๆ และจัดสร้างอุปกรณ์และออกแบบวิธีการทดลองเพื่อหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อใช้ในการศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดและค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ ทั้งนี้เพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดของประเทศไทย และค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญสำหรับใช้ในการออกแบบและพัฒนาเกี่ยวกับบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักที่สำคัญดังต่อไปนี้

1.2.1 วัดอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดชนิดต่าง ๆ

1.2.2 ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สด

1.2.3 จัดสร้างอุปกรณ์สำหรับวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

1.2.4 วัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ

1.2.5 ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขตของงานวิจัยดังต่อไปนี้

1.3.1 วัดอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดประเภทไคลแมคเทอริก 2 ชนิด ได้แก่ มะเขือเทศ กล้วยน้ำว้า และผักและผลไม้สดประเภทนอนไคลแมคเทอริก 2 ชนิด ได้แก่ ส้มเขียวหวาน พริกชี้ฟ้า

1.3.2 ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สด โดยทำการทดลองที่ 5±1, 11±1 และ 29±1 องศาเซลเซียส

1.3.3 จัดสร้างอุปกรณ์สำหรับวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

1.3.4 วัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ 2 ชนิด ได้แก่ ฟิล์มพอลิเอทธิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene) และฟิล์มพอลิโพรพิลีน (polypropylene)

1.3.5 ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ โดยทำการทดลองที่ 5±1, 11±1 และ 29±1 องศาเซลเซียส

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้มีดังนี้

1.4.1 ได้รับความรู้ความเข้าใจถึงกระบวนการหายใจของผักและผลไม้สดและการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

1.4.2 ได้วิธีการทดลองหาอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดและค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

1.4.3 ได้อุปกรณ์สำหรับวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4.4 ได้ทราบถึงอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดและค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดที่ใช้ในการทดลอง

1.4.5 ได้ทราบถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดและค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

1.4.6 ได้ข้อมูลเกี่ยวกับอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดและค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและหรือจัดสร้างบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่มีประสิทธิภาพต่อไปได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

หลักการพื้นฐาน

บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร (modified atmosphere packaging หรือ MAP) เป็นเทคโนโลยีภายหลังการเก็บเกี่ยวแบบหนึ่งซึ่งมีบทบาทสำคัญในการช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สดให้คงคุณภาพ ความสดและรสชาติไว้ให้ยาวนานมากขึ้น ซึ่งในการจัดหาหรือการออกแบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่เหมาะสมกับผักและผลไม้สดชนิดหนึ่ง ๆ ได้นั้นต้องอาศัยความรู้พื้นฐานที่สำคัญในหลาย ๆ ด้านมาประกอบกัน เช่น ความรู้เกี่ยวกับการหายใจของผักและผลไม้สด ความรู้เกี่ยวกับการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ซึ่งถือว่าเป็นวัสดุที่นิยมนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร วิธีการเก็บรักษาแบบบรรยากาศดัดแปร รวมทั้งปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการหายใจของผักและผลไม้สด การซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์และการเกิดบรรยากาศดัดแปรภายในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ จะได้กล่าวถึงดังต่อไปนี้

2.1 การหายใจของผักและผลไม้สด

2.1.1 กระบวนการหายใจของผักและผลไม้สด

การหายใจเป็นกระบวนการทางชีวเคมีที่มีความสำคัญมากที่สุดกระบวนการหนึ่งในสิ่งมีชีวิต เพราะการหายใจเป็นกระบวนการที่พลังงานซึ่งอยู่ในรูปอาหารสะสมถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของพลังงาน (Adenosine Triphosphate, ATP) ที่สามารถนำไปใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ เช่น การเจริญเติบโต การเคลื่อนย้ายอาหาร และการขยายพันธุ์ได้ทันที แม้แต่ในส่วนของสิ่งมีชีวิตที่ไม่มีการเจริญเติบโตแล้วก็ยังต้องการพลังงานในการรักษาชีวิตให้คงอยู่ เช่น การรักษาคุณสมบัติในการควบคุมการผ่านเข้าออกของสารต่าง ๆ ของเยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) เป็นต้น พลังงานที่ได้จากการหายใจทำให้สิ่งมีชีวิต เช่น พืชสามารถสร้างอาหารจากการสังเคราะห์แสงซึ่งอาจอยู่ในรูปของน้ำตาล แป้ง หรือไขมัน เพื่อทดแทนอาหารสะสมที่ถูกใช้ไปได้ แต่ภายหลังจากการเก็บเกี่ยวกระบวนการหายใจและการสันดาป (metabolism) ต่าง ๆ ของผักและผลไม้สดยังเกิดต่อเนื่องตลอดเวลาและนำไปสู่ความแก่ (maturation) ความสุก (ripening) และความเน่าเสีย (senescence) โดยผักและผลไม้สดจะนำแหล่งอาหารที่สะสมไว้มาใช้ในกระบวนการหายใจโดยไม่มีการถูกชดเชย จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทางที่นำไปสู่การสิ้นอายุขัยของผักและผลไม้สดในที่สุด [2,3,17]

กระบวนการหายใจของผักและผลไม้สดนั้นเป็นการเปลี่ยนแปลงสารอาหารที่สะสมภายในเซลล์ให้เป็นพลังงานที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิต ถ้าผักและผลไม้สดอยู่ในสภาวะที่มีก๊าซออกซิเจนในบรรยากาศเพียงพอ จะเกิดการหายใจแบบใช้ก๊าซออกซิเจน (aerobic respiration) โดยกระบวนการหายใจที่เกิดขึ้นนี้ประกอบด้วยปฏิกิริยาย่อยหลายขั้นตอน เช่น ปฏิกิริยาฟอสฟอรีเลชัน (phosphorylation) ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซีเลชัน (decarboxylation) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) และปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (isomerization) เป็นต้น โดยแต่ละขั้นตอนจะมีเอนไซม์ (enzyme) หลายชนิดภายในเซลล์ช่วยในการดำเนินไปของปฏิกิริยาด้วย [3] ซึ่งโดยรวมแทนได้ด้วยสมการที่ 2.1 [2,3,7,17]

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 38ADP + 38Pi \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 38ATP \qquad (2.1)$$

พลังงานที่ได้จากกระบวนการหายใจนี้ส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการชีวเคมีต่าง ๆ ส่วนที่เหลือจะถูกปล่อยออกมาในรูปของความร้อน นอกจากนี้ยังได้สารประกอบที่ให้กลิ่นรส (flavor compounds) เฉพาะตัวของผักและผลไม้สดออกมาด้วย สำหรับน้ำที่ได้จากกระบวนการหายใจนี้จะยังคงอยู่ภายในเนื้อเยื่อของผักและผลไม้สด โดยมีบางส่วนระเหยออกจากเนื้อเยื่อซึ่งคิดเป็นปริมาณ 0.024 กรัมต่อกิโลกรัมของผักหรือผลไม้สดต่อชั่วโมงหรือประมาณร้อยละ 1.71 โดยน้ำหนักต่อเดือน [3] ในขณะที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตได้จะถูกขับออกจากเนื้อเยื่อ ซึ่งการสูญเสียก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นี้ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักของผักและผลไม้สด แต่อย่างไรก็ตามการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากเหตุนี้ถือว่ามีผลน้อยมาก เพราะว่าน้ำหนักของผักและผลไม้สดนี้จะสูญเสียไปเพียงร้อยละ 3-5 เท่านั้น [17]

เมื่อความดันของก๊าซออกซิเจนลดลงจนถึงระดับหนึ่งที่ปริมาณก๊าซออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการหายใจแบบใช้ก๊าซออกซิเจน ผักและผลไม้สดจะเปลี่ยนไปหายใจแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจน (anaerobic respiration) ซึ่งจะเป็นปฏิกิริยาที่เกิดการออกซิเดชันที่ไม่สมบูรณ์ โดยจะให้แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ (aldehyde) หรือกรดออกมา เช่น เอทานอล (ethanol) อะซิตัลดีไฮด์ (acetaldehyde) กรดแลคติก (lactic acid) เป็นต้น ซึ่งปฏิกิริยาการหายใจแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจนนี้โดยรวมแทนได้ด้วยสมการที่ 2.2 [2,3,7]

$$C_6H_{12}O_6 + 2ADP + 2Pi + 2H^+ \longrightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2 + 2H_2O + 2ATP \quad (2.2)$$

การหายใจแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจนจะสร้างพลังงานน้อยกว่าการหายใจแบบปกติมาก [2,3] โดยสำหรับการหายใจแบบใช้ก๊าซออกซิเจนจะได้พลังงาน 38 ATP ส่วนการหายใจแบบไม่ใช้

ก๊าซออกซิเจนได้พลังงานเพียง 2 ATP เท่านั้น ทำให้ผักและผลไม้สดต้องเพิ่มการหายใจให้มากขึ้น เพื่อให้ได้พลังงานเพียงพอกับความต้องการ จึงเป็นการเร่งการใช้สารอาหารที่สะสมไว้ เมื่อคาร์โบไฮเดรตถูกใช้ไปหมด ผักและผลไม้สดจะนำโปรตีนและไขมันมาใช้แทนพร้อมกับสร้างกรดและแอลกอฮอล์ออกมาด้วย ทำให้เกิดกลิ่นรสที่ผิดปกติมากยิ่งขึ้น [3] และเซลล์ถูกทำลายเป็นผลให้ปฏิกิริยาชีวเคมีต่างๆ เกิดได้มากขึ้น เชื้อจุลินทรีย์สามารถเข้ามาทำให้เกิดการเน่าเสียได้ง่ายยิ่งขึ้น [2] ดังนั้นการกำหนดความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่เหมาะสมต่อผักและผลไม้สดชนิดหนึ่ง ๆ ในการเก็บรักษาภายใต้บรรยากาศดัดแปรนั้น จะพิจารณาจากอัตราการหายใจที่ลดลงเพียงอย่างเดียวไม่ได้ แต่จะต้องคำนึงถึงความทนทานของผักและผลไม้สดต่อก๊าซออกซิเจนความเข้มข้นต่ำ ๆ ด้วย มิฉะนั้นจะเกิดการเสื่อมสภาพเร็วยิ่งกว่าการเก็บรักษาในบรรยากาศปกติ เนื่องจากถ้าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนต่ำเกินไปจนไม่เพียงพอต่อการหายใจแบบใช้ก๊าซออกซิเจนก็จะก่อให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจนได้ [2,27] ตัวอย่างของค่าความเข้มข้นต่ำสุดของก๊าซออกซิเจนที่ผักและผลไม้สดบางชนิดสามารถทนได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของก๊าซออกซิเจนที่ผักและผลไม้สดบางชนิดสามารถทนได้ [2,27]

ระดับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนต่ำสุด (ร้อยละโดยปริมาตร)	ชนิดของผักและผลไม้สด
1	แอปเปิ้ล บรอคเคอลี่ เห็ด ลูกแพร์
2	แอปปริคอท ถั่วงอก กะหล่ำปลี แคนตาลูป กะหล่ำดอก ขึ้นฉ่าย เชอรี่ ข้าวโพด ผลกีวี มะละกอ ลูกท้อ สัปปะรด พลัม สตรอเบอรี่
3	อะโวกาโด แตงกวา มะเขือเทศ
5	หน่อไม้ฝรั่ง ผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว มันฝรั่ง

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นสูง ๆ (ตั้งแต่ร้อยละ 1 โดยปริมาตร) สามารถชะลออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดได้เช่นกัน แต่ถ้าความเข้มข้นสูงเกินไปตั้งแต่ประมาณร้อยละ 20 โดยปริมาตรหรือสูงกว่า (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดผักและผลไม้สดและความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่มีอยู่ด้วย) อาจทำให้เกิดการสร้างและสะสมแอลกอฮอล์และแอลดีไฮด์ภายในเซลล์ของผักและผลไม้สดได้ เนื่องจากผักและผลไม้สดไม่สามารถหายใจตามปกติได้จึงหายใจแบบไม่ใช้ก๊าซ

ออกซิเจนแทน [2,4] นอกจากนี้ยังมีการค้นพบอีกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 5-20 โดยปริมาตร อาจเป็นสาเหตุให้เอนไซม์ในวงจรเครบส์ (Krebs' Cycle) ทำงานผิดปกติ ทำให้การหายใจเปลี่ยนไปเป็นแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจนได้ [2] และยังพบว่าอาจเป็นสาเหตุในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเซลล์ เช่น การลดขนาดและเปลี่ยนรูปร่างของไมโตคอนเดรีย (mitochondria) ซึ่งเชื่อว่าเกี่ยวข้องโดยตรงกับการเน่าเสียของพืช (senescence) ด้วย [2] อย่างไรก็ตามกลไกการทำงานของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อการหายใจและการสันดาปต่าง ๆ ในเซลล์ของผักและผลไม้สดยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด [2]

ในทำนองเดียวกับก๊าซออกซิเจน การกำหนดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับผักและผลไม้สดแต่ละชนิดในการเก็บรักษาภายใต้บรรยากาศดัดแปรนั้น ต้องพิจารณาถึงความทนทานของพืชต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นสูง ๆ ด้วย ตัวอย่างค่าความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผักและผลไม้สดบางชนิดสามารถทนได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผักและผลไม้สดบางชนิดสามารถทนได้ [2,27]

ระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด (ร้อยละโดยปริมาตร)	ชนิดของผักและผลไม้สด
2	แอปเปิ้ล (พันธุ์โกลเดนดิลิเชียส) แอปปริคอท ขึ้นฉ่าย องุ่น กะหล่ำ ลูกแพร์ มันฝรั่งหวาน มะเขือเทศ
5	แอปเปิ้ล (พันธุ์อื่น ๆ) อะโวกาโด กล้วยหอม ถั่วงอก กะหล่ำปลี ส้ม แครอท กะหล่ำดอก ผลกีวี มะม่วง มะละกอ ลูกท้อ พลัม หัวไช้เท้า
10	หน่อไม้ฝรั่ง บรอคเคอลี่ แตงกวา มะนาว สัปปะรด ผักชีฝรั่ง มันฝรั่ง
15	บลูเบอรี่ แบล็คเบอรี่ แคนตาลูป เชอรี่ ข้าวโพด เห็ด สตรอเบอรี่ ผักขม ราสเบอรี่

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการหายใจ

ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ปัจจัยภายในและปัจจัยภายนอก [3]

2.1.2.1 ปัจจัยภายในที่มีผลต่อการหายใจ

ก. พันธุกรรม

พันธุกรรมที่แตกต่างกันของผักและผลไม้สดแต่ละชนิดย่อมส่งผลให้มีอัตราการหายใจที่แตกต่างกันไป เช่น ผลส้มที่เก็บเกี่ยวมาแล้วไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เกิดขึ้นชัดเจน เพราะมีอัตราการหายใจต่ำกว่าผลไม้ชนิดอื่น เช่น กล้วย มะม่วง ทุเรียน ซึ่งต่างก็มีการสุกเกิดขึ้น สำหรับกะหล่ำดอกและบรอคโคลี่ซึ่งอยู่ในสปีชี่ส์ (species) เดียวกันและส่วนที่ใช้ในการบริโภคก็เป็นช่อดอกเหมือนกันแต่อัตราการหายใจกลับต่างกัน ซึ่งความแตกต่างเหล่านี้เกิดจากพันธุกรรมที่แตกต่างกันนั่นเอง [3]

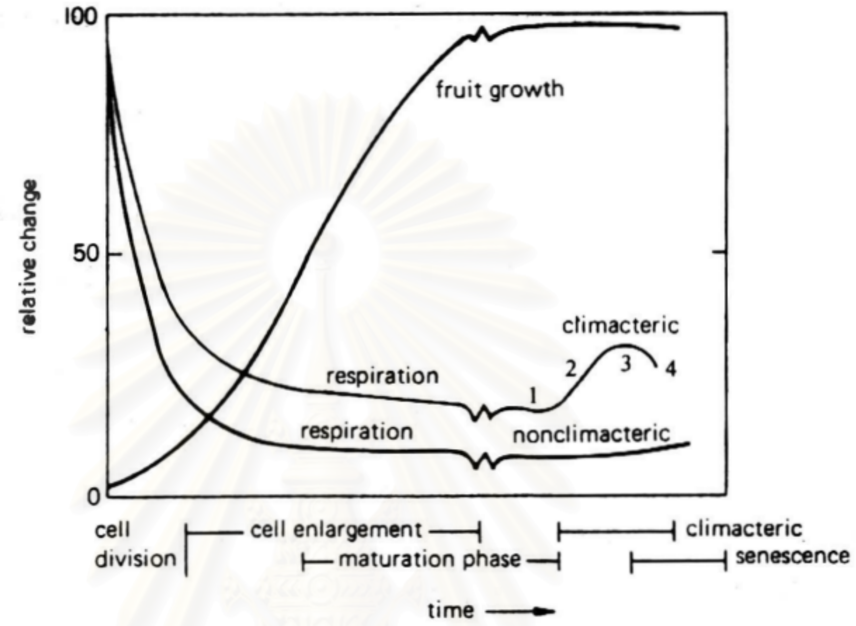
ข. ส่วนของผลิตผลที่เก็บเกี่ยว

ผลิตผลที่กำลังเจริญเติบโต เช่น หน่อไม้ฝรั่งมีอัตราการหายใจค่อนข้างสูงเพราะต้องใช้พลังงานไปในการเสริมสร้างส่วนต่าง ๆ ในขณะที่ผลิตผลที่อยู่ในระหว่างการพักตัว เช่น มันฝรั่ง มันเทศ จะมีอัตราการหายใจต่ำมาก

ค. ขั้นตอนของการพัฒนาภายหลังการเก็บเกี่ยว

ผักและผลไม้สดบางชนิดมีอัตราการหายใจในช่วงเริ่มเจริญเติบโตสูงมาก และจะลดต่ำลงเมื่อการเจริญเติบโตเข้าสู่ความบริบูรณ์ของสรีรระวิทยาและลดลงเรื่อย ๆ ภายหลังจากการเก็บเกี่ยว เรียกผักและผลไม้สดที่มีลักษณะการหายใจแบบนี้ว่าผักและผลไม้สดประเภทนอนไคลแมคเทอริก (non-climacteric type) แต่ในผักและผลไม้สดบางชนิดจะมีช่วงการสุกเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด อัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนในขณะที่ผักและผลไม้นั้นสุก ลักษณะของอัตราการหายใจที่สูงขึ้นนี้เรียกว่าไคลแมคเทอริก (climacteric) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ระยะด้วยกัน คือ (1) pre-climacteric เป็นระยะที่มีอัตราการหายใจต่ำ (2) climacteric rise เป็นระยะที่มีอัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้นพร้อม ๆ กับการสุก (3) climacteric peak เป็นช่วงที่มีอัตราการหายใจสูงสุด (4) post-climacteric คือช่วงสิ้นอายุขัย ซึ่งจะมีอัตราการหายใจลดลง เรียกผักและผลไม้สดที่มีลักษณะการหายใจแบบนี้ว่าผักและผลไม้สดประเภทไคลแมคเทอริก (climacteric type) [3] โดยรูปที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดประเภทไคลแมคเทอริกและประเภทนอนไคลแมคเทอริกในช่วงของการเจริญเติบโตระยะต่าง ๆ ตัวอย่างของผักและผลไม้สด

ประเภทไคลแมคเทอริกและประเภทนอนไคลแมคเทอริกได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3 และตัวอย่างอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดทั้ง 2 ประเภทนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2

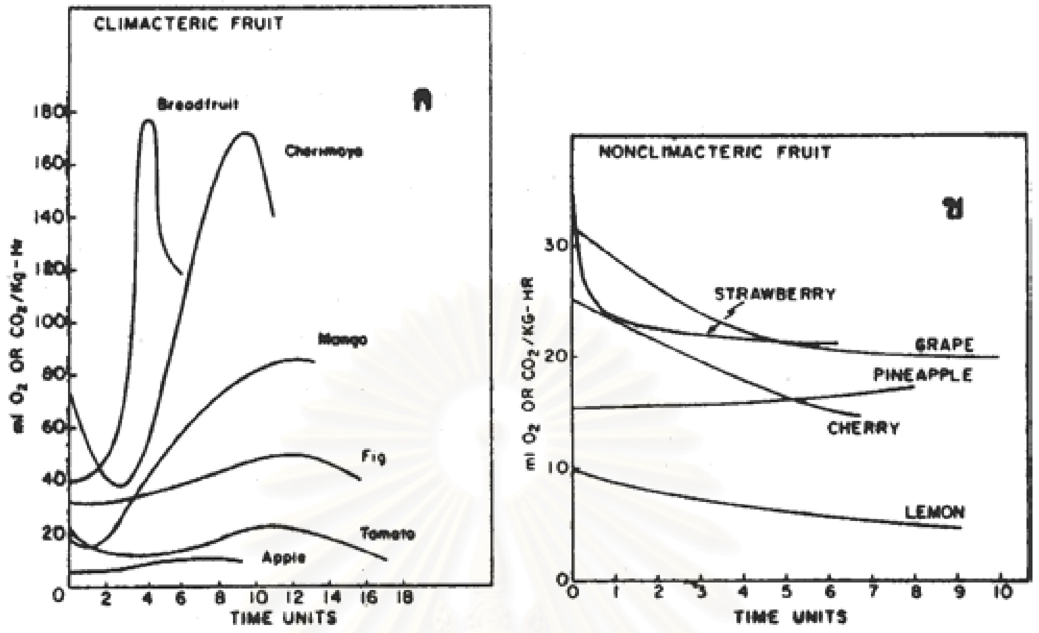


รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดประเภทไคลแมคเทอริก และประเภทนอนไคลแมคเทอริกในช่วงของการเจริญเติบโตระยะต่าง ๆ (1 = pre-climacteric 2 = climacteric rise 3 = climacteric peak 4 = post-climacteric) [3]

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างของผักและผลไม้สดประเภทไคลแมคเทอริกและประเภทนอนไคลแมคเทอริก [27]

ประเภทของผักและผลไม้สด	ชนิดของผักและผลไม้สด
ไคลแมคเทอริก	กล้วย ขนุน มังคุด ละมุด มะเขือเทศ มะเดื่อ มะละกอ บ๊วย มะม่วง ท้อ แอปเปิ้ล อะโวกาโด แคนตาลูป สาลี่ พลับ แอปปริคอท แพร์
นอนไคลแมคเทอริก	แตงกวา ชมพู่ มะนาว พริก ส้ม ลิ้นจี่ ลำไย สัปปะรด เชอรี่ แตงโม องุ่น สตอเบอรี่ บลูเบอรี่ มะกอก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างอัตราการหายใจของผักและผลไม้สด

ประเภทไคลแมคเทอริก (ก) และประเภทนอนไคลแมคเทอริก (ข) [3]

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยภายในอื่น ๆ ที่มีผลต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สด เช่น สารตั้งต้นของการหายใจ โดยสารตั้งต้นของการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิดจะแตกต่างกันไปมีทั้งคาร์โบไฮเดรต ไขมัน กรดอินทรีย์ ซึ่งจากสาเหตุนี้จะทำให้อัตราส่วนระหว่างปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตขึ้นต่อปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ใช้ไปในปฏิกิริยาหรือที่เรียกว่าเศษส่วนของการหายใจ (respiratory quotient, R.Q.) มีค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งถ้าเป็นการหายใจแบบใช้ก๊าซออกซิเจน ค่า R.Q. จะมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.7-1.3 และถ้าค่า R.Q. มีค่าสูงมากกว่านี้ อาจจะบ่งบอกว่าการหายใจที่เกิดขึ้นเป็นการหายใจแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจนได้ [3,8]

2.1.2.2 ปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการหายใจ

ก. อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่ออายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สดหลังการเก็บเกี่ยว เนื่องจากกระบวนการหายใจและการสันดาป (metabolism) ในผักและผลไม้สดถูกควบคุมโดยเอนไซม์หลายชนิด และอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมการทำงานของเอนไซม์เหล่านี้ [2,3]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ในผักและผลไม้สดแปรผันตามอุณหภูมิแบบเอกซ์โพเนนเชียล และสามารถอธิบายได้โดยสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius equation) ดังสมการที่ 2.3[2,24]

$$r = r_0 \exp(\frac{-E_r}{RT}) \tag{2.3}$$

โดย r คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาการหายใจหรืออัตราการหายใจ

r_0 คือ ค่าพารามิเตอร์พรีเอกซ์โพเนนเชียล (pre-exponential parameter)

E_r คือ พลังงานก่อกัมมันต์ของการหายใจ

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature)

เนื่องด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาหรืออัตราการหายใจแปรผันตามอุณหภูมิ จึงมีการกำหนดตัวแปรตัวหนึ่งขึ้นมาเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ 10 องศาเซลเซียสหรือเคลวิน ซึ่งเรียกว่าเศษส่วนของอุณหภูมิ (temperature quotient, Q_{10}) โดยค่าอัตราส่วนนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4 [2,3]

$$Q_{10} = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{\frac{10}{T_2 - T_1}} \tag{2.4}$$

โดย R_1 คือ อัตราการหายใจที่อุณหภูมิสัมบูรณ์ T_1

R_2 คือ อัตราการหายใจที่อุณหภูมิสัมบูรณ์ T_2

T_1 คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

T_2 คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ที่มากกว่า T_1 (เคลวิน)

ค่าของ Q_{10} นี้ทำให้สามารถคาดคะเนอัตราการเสื่อมสภาพของผักและผลไม้สดได้อย่างคร่าว ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 [3]

ตารางที่ 2.4 อิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการเสื่อมสภาพและอายุในการเก็บรักษาของผักและผลไม้สด [3]

อุณหภูมิ (°C)	Q_{10} ของการหายใจ	อัตราการเสื่อมสภาพ (เปรียบเทียบ)	อายุการเก็บรักษา (เปรียบเทียบ)
0		1.0	100
	3.0		
10		3.0	33
	2.5		
20		7.5	13
	2.0		
30		15.0	7
	1.5		
40		22.0	4

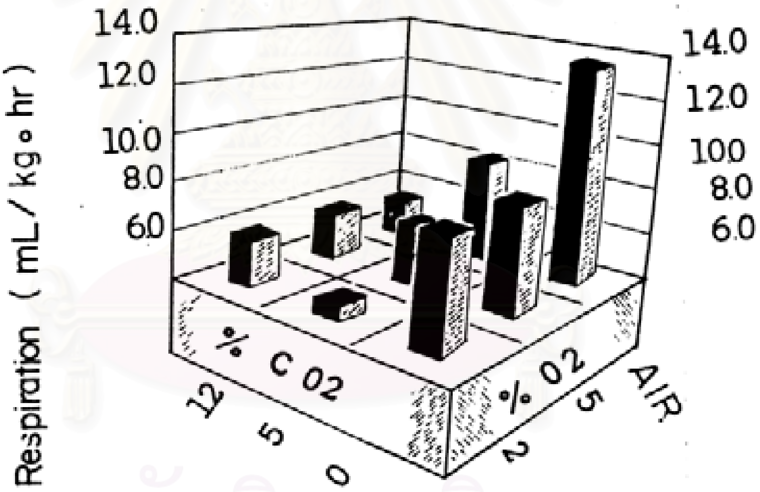
จากตารางที่ 2.4 จะสังเกตได้ว่า ที่อุณหภูมิช่วง 0-10 องศาเซลเซียส Q_{10} มีค่าประมาณ 3.0 และเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น ค่า Q_{10} จะมีค่าลดลง เช่น ที่อุณหภูมิช่วง 30-40 องศาเซลเซียส Q_{10} มีค่าประมาณ 1.5 ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง แม้ว่าอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดจะเพิ่มสูงขึ้นแต่ก็จะเพิ่มขึ้นไม่มากนัก จึงทำให้ค่า Q_{10} มีค่าลดลง และจากตารางที่ 2.4 นี้เองจะเห็นได้ว่า การเก็บรักษาผักและผลไม้สดที่อุณหภูมิต่ำมีความจำเป็นเนื่องจากทำให้อัตราในการเสื่อมสภาพของผักและผลไม้สดมีค่าลดลง ทำให้มีอายุในการเก็บรักษายาวนานมากขึ้น ดังนั้นหลังจากการเก็บเกี่ยวแล้วควรเก็บผักและผลไม้สดไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำเพื่อเป็นการยืดอายุการเก็บรักษาของผักและผลไม้สดให้ยาวนานที่สุด อย่างไรก็ตามถ้าอุณหภูมิต่ำจนเกินไปอาจเป็นอันตรายต่อผักและผลไม้สดได้ซึ่งเรียกว่า ความเสียหายเนื่องจากความเย็น (chilling injury) ลักษณะที่แสดงออกมา เช่น การเน่าเสีย รอยช้ำ รอยบุ๋ม เนื้อฉ่ำน้ำผิดปกติ การสุกไม่สม่ำเสมอ เป็นต้น [2] ดังนั้นการกำหนดอุณหภูมิในการเก็บรักษาที่เหมาะสมจึงจำเป็นมาก

ข. ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากผลงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา [2,3,5,10,18] พบว่าอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดนั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศที่ล้อมรอบผักและผลไม้สดนั้น ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.3 [2,5] ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจของบรอคเคอลี่พันธุ์เอมเพอเรอกับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส พบว่าผลของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการชะลอหรือยับยั้งกระบวนการหายใจและการสันดาปต่าง ๆ ของผักและผลไม้สดนั้นเป็นแบบเสริมซึ่งกันและกัน (additive effect) กล่าวคือ การใช้ก๊าซใดก๊าซหนึ่งเพียงอย่างเดียวจะมีผลน้อยกว่าการใช้ก๊าซทั้งสองร่วมกัน [2] นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการหายใจแบบใช้ก๊าซออกซิเจนนี้สามารถควบคุมได้ด้วยความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.1 จะได้ว่า การควบคุมให้ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจนต่ำและควบคุมความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้มีปริมาณสูงจะเป็นการช่วยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้ช้าลงซึ่งก็คือการชะลออัตราการหายใจนั่นเอง [2,3,5] แต่ทั้งนี้ต้องควบคุมไม่ให้ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนต่ำจนเกินไปและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงจนเกินไปจนกระทั่งก่อให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจนซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายต่อผักและผลไม้สดได้ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1.1



รูปที่ 2.3 ผลกระทบของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออัตราการหายใจของบรอคเคอลี่พันธุ์เอมเพอเรอที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส (ศึกษาเป็นเวลา 7 วัน) [2,5]

ค. ก๊าซเอทธิลีน

เอทธิลีนเป็นฮอร์โมนสำคัญที่ผักและผลไม้สดผลิตขึ้นมาเพื่อควบคุมการเจริญเติบโต การสุกและการเสื่อมเน่าเสียของผักและผลไม้สด อิทธิพลของเอทธิลีนที่มีต่อผักและผลไม้สดภายหลังการเก็บเกี่ยวมีดังนี้ [2,3]

1. เร่งอัตราการหายใจของผักและผลไม้สด
2. เร่งความสุกและความเน่าเสีย

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. เร่งการสูญเสียคลอโรฟิลล์ (chlorophyll) โดยพบมากในกรณีของส้มชนิดต่าง ๆ (ยกเว้นมะนาว) และกะหล่ำปลี

4. เร่งการร่วงของใบ (abscission)

5. เร่งการผลิตเอทธิลีน (autocatalyse of ethylene) ทำให้ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว กระตุ้นการตอบสนองของเซลล์พืชต่อเอทธิลีนให้รุนแรงขึ้น

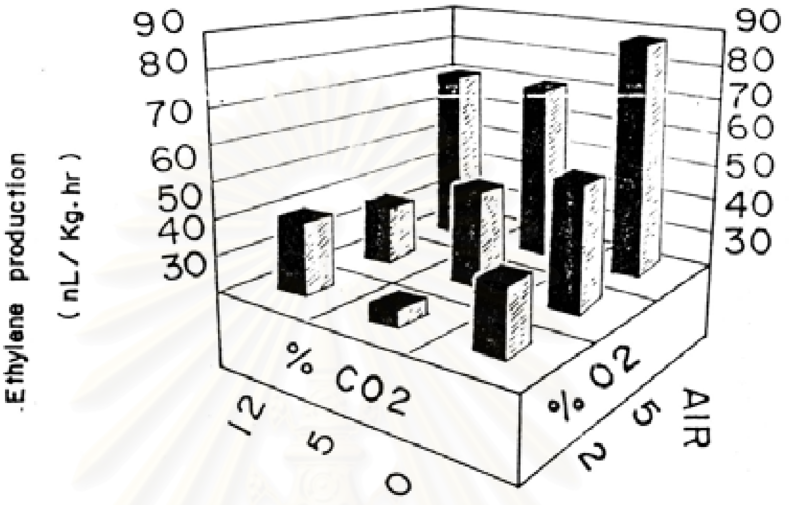
6. ทำให้เกิดความผิดปกติทางสรีระ (physiological disorders) ของผักและผลไม้สด เช่น การเพิ่มปริมาณเส้นใยในหน่อไม้ฝรั่ง ทำให้เนื้อเหนียวขึ้น การเกิดจุดสีน้ำตาลแดงหรือสีสนิมเหล็กบนใบผักกาดหอม (lettuce) ลักษณะดังกล่าวเรียกว่า brown spot หรือ russet spot การเกิดรสขมในแครอท และการเกิดเม็ดแป้งภายในเนื้อกีวี เป็นต้น

สำหรับการผลิตและการทำงานของเอทธิลีนในผักและผลไม้สดแต่ละชนิดจะแตกต่างกันไป โดยถ้าเป็นผักและผลไม้สดประเภทไคลแมคเทอริกจะมีการผลิตก๊าซเอทธิลีนภายในผลในระหว่างการเจริญเติบโตต่ำ จนกระทั่งเมื่อเริ่มสุก การผลิตก๊าซเอทธิลีนจึงเพิ่มขึ้นอย่างมากซึ่งจะไปกระตุ้นให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการหายใจและกระบวนการสุกของผักและผลไม้สด แต่หลังจากผ่านช่วงนี้ไปแล้วการผลิตก๊าซเอทธิลีนจะลดลงอย่างรวดเร็วและความเข้มข้นของก๊าซเอทธิลีนที่มีอยู่ก็จะไม่มีผลกระทบต่อการหายใจมากนัก ส่วนผักและผลไม้สดประเภทนอนไคลแมคเทอริกนั้น อัตราการผลิตและความเข้มข้นของก๊าซเอทธิลีนจะต่ำอยู่ตลอดขั้นตอนการพัฒนาของผักและผลไม้สด จึงทำให้ไม่มีผลต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดประเภทนี้มากนัก [3]

ในการผลิตและการทำงานของเอทธิลีนนอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดของผักและผลไม้สดแล้ว ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยถ้าอุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น การผลิตและการทำงานของเอทธิลีนก็จะเพิ่มสูงขึ้นด้วย [3] นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ โดยอัตราการผลิตเอทธิลีนจะลดลงเมื่อก๊าซออกซิเจนมีน้อยกว่าร้อยละ 8 โดยปริมาตร และอัตราในการผลิตนี้จะลดลงถึงร้อยละ 50 โดยปริมาตรเมื่อก๊าซออกซิเจนมีเพียงร้อยละ 2.5 โดยปริมาตร [2]

สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นสูงอาจจะเร่งหรือยับยั้งหรือไม่มีผลใดเลยต่อการผลิตเอทธิลีน ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของผักและผลไม้สดและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อย่างไรก็ตามก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถช่วยป้องกันหรือยับยั้งผลกระทบของเอทธิลีนที่มีต่อผักและผลไม้สดได้ นอกจากนี้ถ้ามีก๊าซออกซิเจนความเข้มข้นต่ำร่วมอยู่ด้วยจะช่วยชะลอการผลิตเอทธิลีนได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากก๊าซทั้งสองมีผลต่อการผลิตเอทธิลีน

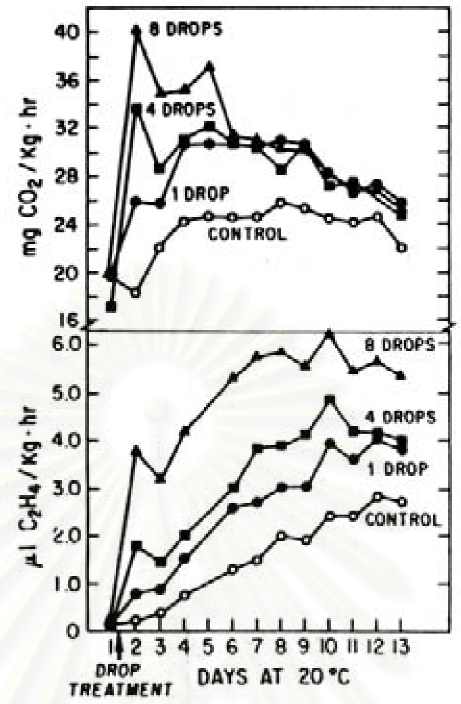
เช่นเดียวกับผลต่อการหายใจของผักและผลไม้สด รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างของผลกระทบของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อการผลิตเอทธิลีนของบรอคเคอลี่พันธุ์เอมเพอเรอที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส [2,5]



รูปที่ 2.4 ผลกระทบของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการผลิตเอทธิลีนของบรอคเคอลี่พันธุ์เอมเพอเรอที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส (ศึกษาเป็นเวลา 7 วัน) [2,5]

ง. ความเครียดทางกายภาพ

การกระทบกระเทือนของผักและผลไม้สดนอกจากจะก่อให้เกิดอาการช้ำได้แล้ว ยังทำให้อัตราการหายใจของผักและผลไม้สดนั้นเพิ่มสูงขึ้นด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.5 [3] สาเหตุของการเพิ่มขึ้นของอัตราการหายใจเนื่องมาจากความเครียดทางกายภาพนี้เกิดขึ้นพร้อม ๆ กับการเพิ่มขึ้นของก๊าซเอทธิลีนและอาจเป็นผลเนื่องมาจากก๊าซเอทธิลีนด้วย ดังนั้นการปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวจึงจำเป็นต้องทำด้วยความปราณีตที่สุด เพื่อลดความเสียหายและรักษาคุณภาพของผักและผลไม้สดนั้นไว้ให้นานที่สุด



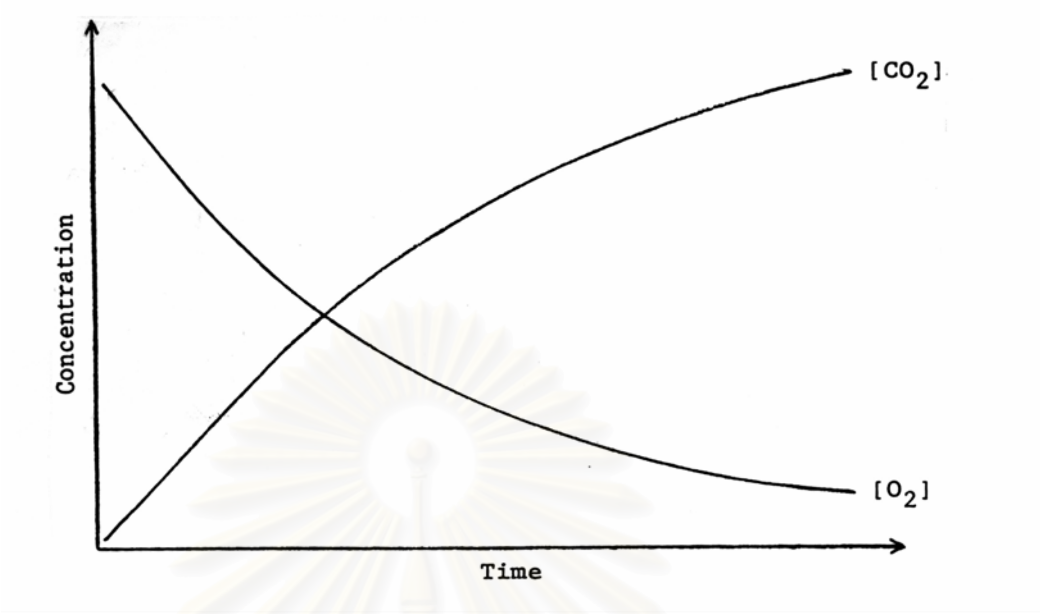
รูปที่ 2.5 อัตราการหายใจและการผลิตก๊าซเอทธิลีนของมะเขือเทศ
เมื่อถูกกระทบกระเทือนด้วยการตกกระทบของลูกเหล็กหลาย ๆ ครั้ง [3]

2.1.3 วิธีการวัดอัตราการหายใจของผักและผลไม้สด

วิธีที่นิยมในการวัดอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดคือ การวัดอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนในกระบวนการหายใจหรืออัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการหายใจโดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีดังนี้ [3,6]

2.1.3.1 ระบบปิด

ทำการบรรจุผลิตผลลงในภาชนะปิดที่มีก๊าซเริ่มต้นภายในภาชนะเป็นบรรยากาศปกติ ทำการวัดความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในภาชนะที่เวลาต่าง ๆ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากกระบวนการหายใจของผลิตผลนั้น ๆ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.6 จากนั้นทำการพลอตกราฟระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้กับเวลา แล้วนำค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งจากกราฟที่ได้มาคูณกับปริมาตรอากาศภายในภาชนะและหารด้วยน้ำหนักของผลิตผล จะได้อัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการหายใจของผลิตผลนั้น ๆ ซึ่งวิธีนี้เหมาะสำหรับผักและผลไม้สดที่มีอัตราการหายใจต่ำ



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลาที่เกิดขึ้นในวิธีการวัดอัตราการหายใจแบบระบบปิด [6]

2.1.3.2 ระบบเปิด

ทำการบรรจุผลิตผลลงในภาชนะที่มีทางผ่านเข้าออกของอากาศ 2 ด้าน ทำการผ่านก๊าซผสมที่มีสัดส่วนของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามที่ต้องการเข้าไปภายในภาชนะทางด้านหนึ่งแล้วปล่อยให้ก๊าซผสมไหลผ่านผลิตผล จากนั้นให้ก๊าซผสมไหลออกอีกด้านหนึ่งของภาชนะ วัดความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีค่าคงที่ทางด้านขาออกของภาชนะเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง (ดังแสดงในรูปที่ 2.7)

สำหรับค่าอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนในกระบวนการหายใจหรืออัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการหายใจที่วัดด้วยระบบเปิดสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{อัตราการใช้ } O_2 = \frac{([O_2]_{in} - [O_2]_{out})F}{W} \qquad (2.5)$$

$$\text{อัตราการผลิต } CO_2 = \frac{([CO_2]_{out} - [CO_2]_{in})F}{W} \qquad (2.6)$$

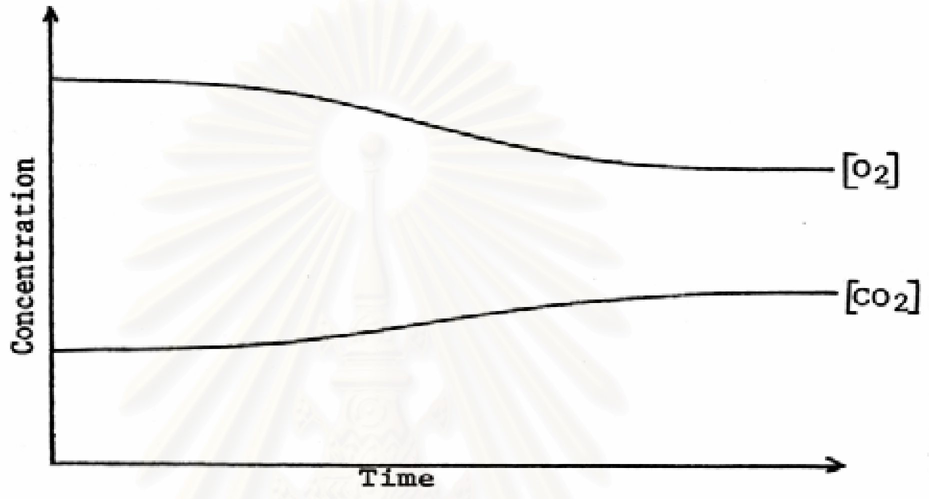
โดย $[O_2]_{in}$ และ $[CO_2]_{in}$ คือ ความเข้มข้นของ O_2 และ CO_2 ในก๊าซผสมขาเข้า

$[O_2]_{out}$ และ $[CO_2]_{out}$ คือ ความเข้มข้นของ O_2 และ CO_2 ในก๊าซผสมขาออก

F คือ อัตราการไหลของก๊าซผสมซึ่งมีอัตราคงที่

W คือ น้ำหนักของผลิตผลภายในภาชนะ

วิธีนี้เหมาะสำหรับผักและผลไม้สดที่มีอัตราการหายใจสูง โดยในการวัดด้วยวิธีนี้จะต้องบรรจุผักและผลไม้สดให้มีปริมาณมากจนทำให้พื้นที่ว่างภายในภาชนะมีน้อยที่สุดและต้องกำหนดให้อัตราการไหลของก๊าซผสมมีค่าต่ำ ๆ



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลาที่เกิดขึ้นในวิธีการวัดอัตราการหายใจแบบระบบเปิด [6]

2.2 การซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

2.2.1 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ (gas permeability)

การซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์คือ กระบวนการการแพร่ของก๊าซผ่านฟิล์มที่มีความต้านทานโดยที่ฟิล์มไม่มีการฉีกขาดหรือเป็นรู กลไกของการแพร่ซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มแบ่งได้ 3 ขั้นตอนดังนี้ [1,5,19,20]

1. ขั้นตอนการละลาย (solution stage) ก๊าซละลายลงในเนื้อฟิล์มในด้านความเข้มข้นของก๊าซที่สูงกว่า โดยขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของก๊าซแต่ละชนิดในฟิล์ม

2. ขั้นตอนการแพร่ (diffusion stage) ก๊าซที่ละลายในเนื้อฟิล์มเคลื่อนที่ผ่านเนื้อฟิล์มไปยังด้านที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า เนื่องจากความแตกต่างกันของความเข้มข้น

3. ขั้นตอนการระเหย (evaporation stage) หลังจากที่ก๊าซเคลื่อนที่สู่อีกด้านหนึ่งของฟิล์ม แล้วก๊าซจะระเหยออกจากผิวมาเป็นสถานะก๊าซเหมือนเดิม

ดังนั้นค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์แสดงได้ดังสมการที่ 2.7 [1,2,4,20]

$$P = DS \tag{2.7}$$

โดย P คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม (gas permeability)

D คือ ค่าความสามารถในการแพร่ (diffusivity)

S คือ ค่าความสามารถในการละลาย (solubility)

ถ้าพิจารณาให้ทิศทางการแพร่ของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่มีรูพรุนมีทิศทางเดียวคือ ทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวฟิล์ม ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทโดยการแพร่กับความเข้มข้นของสารที่แพร่ สามารถอธิบายได้โดยใช้กฎข้อที่หนึ่งของฟิก (Fick's first law) ดังสมการที่ 2.8 [1,19]

$$J = -D\frac{dc}{dx} \tag{2.8}$$

โดย J คือ อัตราการถ่ายเทของสารที่แพร่ต่อพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วย (flux)

c คือ ความเข้มข้นของสารที่แพร่

D คือ ค่าความสามารถในการแพร่

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

อัตราการถ่ายเทของสารที่แพร่ต่อพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วยยังสามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการที่ 2.9 [19]

$$J = \frac{Q}{At} \tag{2.9}$$

โดย Q คือ ปริมาณโดยรวมของสารที่แพร่ (total amount of permeant)

A คือ พื้นที่หน้าตัด

t คือ เวลาที่ใช้ในการแพร่

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่ภาวะคงตัว (steady state) ค่า J มีค่าคงที่ ดังนั้นเมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.8 ตลอดความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์และระหว่างสองความเข้มข้นของสารที่แพร่ โดยกำหนดให้ค่าความสามารถในการแพร่ (D) มีค่าคงที่และไม่ขึ้นกับค่าความเข้มข้นของสารที่แพร่ จะได้ดังสมการที่ 2.10 หรือ 2.11

$$Jx = -D(c_2 - c_1) \tag{2.10}$$

หรือ

$$J = \frac{D(c_1 - c_2)}{x} \tag{2.11}$$

โดย c_1 คือ ความเข้มข้นของสารที่แพร่ที่ตำแหน่งพื้นผิวภายนอกของฟิล์มที่มีความเข้มข้นสูงกว่า

c_2 คือ ความเข้มข้นของสารที่แพร่ที่ตำแหน่งพื้นผิวภายในของฟิล์มที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า

x คือ ระยะทางที่เกิดการแพร่หรือความหนาของฟิล์ม

เมื่อแทนสมการที่ 2.9 ลงในสมการที่ 2.11 จะได้ว่า

$$Q = \frac{D(c_1 - c_2)At}{x} \tag{2.12}$$

สำหรับระบบก๊าซที่แพร่ผ่านฟิล์มที่ความดันของก๊าซต่ำ ๆ นั้น ความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอกับค่าความเข้มข้นที่ผิวของฟิล์มจะเป็นไปตามกฎของเฮนรี่ (Henry’s law) [19,20]

$$c = Sp \tag{2.13}$$

โดย S คือ ค่าความสามารถในการละลาย (ซึ่งเป็นค่าคงที่ ไม่ขึ้นกับค่าความเข้มข้นของสารที่แพร่)

p คือ ความดันย่อยของก๊าซ

เมื่อแทนสมการที่ 2.13 ลงในสมการที่ 2.12 จะได้ว่า

$$Q = \frac{DS(p_1 - p_2)At}{x} \tag{2.14}$$

จากสมการที่ 2.7 ทำให้สามารถจัดสมการที่ 2.14 ได้เป็น

$$P = \frac{Qx}{At(p_1 - p_2)} \tag{2.15}$$

หรือ

$$\frac{Q}{At} = -\frac{P}{x}(\Delta p) \tag{2.16}$$

โดย P คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

$\frac{Q}{At}$ คือ อัตราการถ่ายเทของสารที่แพร่ต่อพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วย

Δp คือ ผลต่างของความดันย่อยของก๊าซ $(p_2 - p_1)$

จากสมการที่ 2.16 หน่วยของค่า P สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.17 [1,19,20]

$$P = \frac{\text{(ปริมาณโดยรวมของก๊าซที่แพร่)(ความหนาของฟิล์ม)}}{\text{(พื้นที่หน้าตัด)(เวลา)(ความแตกต่างของความดัน)}} \tag{2.17}$$

ตัวอย่างหน่วยของค่า P

1. cm^3(STP) cm cm^{-2} s^{-1} Pa^{-1} (ระบบ SI)

2. cm^3(STP) cm cm^{-2} s^{-1} $cmHg^{-1}$ (ระบบ metric)

สำหรับค่าความสามารถในการแพร่ (D) มีหน่วยเป็น พื้นที่ $เวลา^{-1}$ ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ในรูป cm^2 s^{-1} และจากสมการที่ 2.7 ค่าความสามารถในการละลาย (S) จึงมีหน่วยที่แตกต่างกันไปตามค่า P เช่น ในระบบ SI ค่า S มีหน่วยเป็น cm^3(STP) cm^{-3} Pa^{-1} เป็นต้น ตัวอย่างของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซชนิดต่าง ๆ ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์แสดงได้ดังตารางที่ 2.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซชนิดต่าง ๆ ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ [20,36]

พอลิเมอร์	อุณหภูมิ (^{o}C)	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ [*10^{13} (cm^3(STP) cm cm^{-2} s^{-1} Pa^{-1})]			รายการอ้างอิง
		N_2	O_2	CO_2	
พอลิเอทธิลีน					
ชนิดความหนาแน่นต่ำ	25	0.73	2.2	9.5	36
ชนิดความหนาแน่นสูง	25	0.11	0.3	0.27	36
พอลิโพรพิลีน	30	0.33	1.7	6.9	20
พอลิไวนิลคลอไรด์	25	0.0096	0.035	0.12	36
พอลิสไตรีน	25	-	0.61	3.9	36
พอลิบิวทาไดอีน	25	4.95	14.6	105	36
พอลิคลอโรพรีน	25	1.04	3.23	22.4	36
พอลิออกซิเมทธิลีน	25	0.05	0.2	1.01	36
พอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเรต	25	0.0055	0.0248	0.195	36
พอลิไวนิลอะซิเตต	25	0.06	0.2	-	36
พอลิเตตราฟลูออโรเอทธิลีน	25	1.0	3.2	7.5	20
พอลิ-4-เมทธิลเพนเทน-1	25	5.67	24.23	69.45	20
พอลิอะไครโลไนไตรล์	25	-	0.00015	0.00060	20
พอลิไวนิลลิดีนคลอไรด์	30	0.000706	0.000383	0.0218	20
เซลลูโลสไนเตรต	25	0.087	1.46	1.59	20

จากสมการที่ 2.16 ถ้ากำหนดให้หน่วยที่ใช้อยู่ในระบบเมตริก ความสัมพันธ์ของหน่วยในสมการที่ 2.16 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{cm^3(STP)}{cm^2\,s} = P\,\frac{cmHg}{cm} \qquad (2.18)$$

โดยค่า $\frac{Q}{t}$ ของก๊าซจะสามารถหาได้จากการทดลองโดยทำการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของความดันของก๊าซเมื่อกำหนดให้ค่าปริมาตรของก๊าซคงที่หรือทำการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของก๊าซเมื่อกำหนดให้ค่าความดันของก๊าซคงที่โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคงที่ ดังนั้นรูปแบบทั่วไปของการวัดค่า $\frac{Q}{t}$ จึงมักแทนด้วยพจน์ $\frac{d(pV)}{dt}$ และถ้าสมมติให้ก๊าซมีความประพฤติเป็นแบบก๊าซอุดมคติ ในการคำนวณหาค่า $\frac{Q}{t}$ ในหน่วยของ cm^3(STP) s^{-1} จึงต้องมีการเปลี่ยนหน่วยจากหน่วยของ $\frac{d(pV)}{dt}$ ดังสมการที่ 2.19 [19]

$$\frac{d(cm^3(STP))}{dt} = \frac{d(pV)}{dt}\frac{1}{\alpha}\frac{T_0}{T} \qquad (2.19)$$

โดย cm^3(STP) คือ ปริมาตรของก๊าซที่ 1 atm และ 273 เคลวิน

$\frac{1}{\alpha}\frac{T_0}{T}$ คือ dimensionless number

α คือ conversion factor ของการเปลี่ยนหน่วยความดันให้เป็น atm

T คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษา (เคลวิน)

T_0 คือ อุณหภูมิมาตรฐาน (273 เคลวิน)

ถ้าให้ M แทน cm^3(STP) จะได้ว่า

$$M \equiv cm^3(STP) = pV\frac{1}{\alpha}\frac{T_0}{T} \qquad (2.20)$$

ดังนั้น จากสมการที่ 2.16 – 2.20 จะได้ว่า

$$\frac{1}{A}\frac{d(pV)}{dt}\frac{1}{\alpha}\frac{T_0}{T} = -P\frac{\Delta p}{x} \qquad (2.21)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมการที่ 2.21 จะสังเกตได้ว่า ทั้ง 2 ด้านของสมการมีหน่วยของความดันเหมือนกัน จึงทำให้ค่า P มีหน่วยเป็น $cm^2\ s^{-1}$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าแตกต่างไปจากหน่วยที่กล่าวมาแล้วข้างต้น (สมการที่ 2.17) โดยความสัมพันธ์ของหน่วยทั้งสองสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.22 [19]

$$P(cm^2 s^{-1}) = P(cm^3 (STP)\ cm\ cm^{-2}\ s^{-1}\ pressure^{-1}) \frac{T}{T_0} \alpha \qquad (2.22)$$

โดย $P(cm^2 s^{-1})$ คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาและที่ความดัน 1 atm

ตัวอย่างการคำนวณค่า $P(cm^2 s^{-1})$ จากค่า $P(cm^3 (STP)\ cm\ cm^{-2}\ s^{-1}\ pressure^{-1})$ สามารถทำได้ดังนี้ ถ้ากำหนดให้ค่า P (O_2) ของฟิล์ม LDPE ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ $55*10^{-11} cm^3(STP)\ cm\ cm^{-2}\ s^{-1}\ cmHg^{-1}$ [19] ดังนั้นจากสมการที่ 2.22 จะได้ว่า

$$P(cm^2 s^{-1}) = 55*10^{-11} * (303/273) * 76 = 4.63*10^{-8}\ cm^2\ s^{-1} \qquad (2.23)$$

2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มดังนี้ [2,19,20,24]

ก. ธรรมชาติของพอลิเมอร์ ได้แก่ โครงสร้างทางเคมี การจัดเรียงโมเลกุล ความหนาแน่น ค่าความเป็นผลึก พันธะคู่ สภาพความเป็นขั้ว เช่น ถ้าพอลิเมอร์มีค่าความเป็นผลึกสูง มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์อย่างเป็นระเบียบมาก หรือมีหมู่ฟังก์ชัน (functional groups) จำพวกคลอไรด์ ฟลูออไรด์ ไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำให้พอลิเมอร์มีสภาพความเป็นขั้วสูง จะทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์มีค่าต่ำ [19] โดยตัวอย่างของผลกระทบของหมู่ฟังก์ชันที่มีต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ผลกระทบของหมู่ฟังก์ชัน (functional groups) ที่มีต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ [19]

หมู่ฟังก์ชัน (R) ใน $(-CH_2-CHR-)_n$	$P(O_2)*10^{11}$ [cm^3(STP) cm cm^{-2} s^{-1} $cmHg^{-1}$]
-OH	0.0006
-CN	0.0024
-Cl	0.48
-F	0.9
$-COOCH_3$	1.02
$-CH_3$	9.0
$-C_6H_5$	25.2
-H	28.8

สำหรับพอลิเมอร์บางชนิดที่มีสายโซ่หลัก (backbone) ที่มีพันธะแบบไม่อิ่มตัว เช่น กลุ่มเอทธิล (ethyl group) จะช่วยให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซสูงขึ้น เนื่องจากพันธะแบบไม่อิ่มตัวจะทำให้การหมุนหรือการเคลื่อนไหวของสายโซ่เกิดได้ง่ายกว่าพันธะอิ่มตัว เช่น กลุ่มเมทธิล (methyl group) [22]

พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างที่มีขั้วสูง เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol) มีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) ที่สามารถดูดซับความชื้นจากบรรยากาศภายนอกหรือจากของเหลวที่สัมผัสกับพอลิเมอร์ได้ โดยน้ำเปรียบเสมือนเป็นพลาสติไซเซอร์ (plasticizer) ที่จะช่วยลดแรงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ลง จึงส่งผลให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซมีค่ามากขึ้นเมื่อค่าความชื้นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะแตกต่างจากพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว เช่น พอลิเอทธิลีน (polyethylene) ที่ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซไม่เปลี่ยนแปลงตามการเพิ่มขึ้นของค่าความชื้น โดยตัวอย่างของผลกระทบของค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่มีต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ 25 องศาเซลเซียสแสดงไว้ในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ผลกระทบของค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่มีต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ ที่ 25 องศาเซลเซียส [19]

พอลิเมอร์	$P(O_2)*10^{11}[cm^3(STP)\ cm\ cm^{-2}\ s^{-1}\ cmHg^{-1}]$	
	0% RH	100% RH
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์	0.0006	1.5
เซลลูโลสแบบไม่เคลือบ	0.0078	12.0
ไนลอน 6	0.06	0.3
พอลิไวนิลอะซีเตต	3.3	9.0
อะไครโลไนไตรล์-สไตรีน โคพอลิเมอร์	0.06	0.06
พอลิเอทธิลีนเทเรฟธาเลต	0.42	0.36
พอลิเอทธิลีนความหนาแน่นสูง	6.6	6.6
พอลิเอทธิลีนความหนาแน่นต่ำ	28.8	28.8

ข. ธรรมชาติของก๊าซที่ซึมผ่าน ได้แก่ รูปร่างและขนาดของโมเลกุล สภาพความเป็นขั้ว ค่าความสามารถในการละลาย ค่าความสามารถในการแพร่ เช่น ถ้าไม่คำนึงถึงชนิดของฟิล์มพอลิเมอร์ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ (P) ค่าความสามารถในการแพร่ (D) และค่าความสามารถในการละลาย (S) ของก๊าซชนิดต่าง ๆ โดยเทียบกับก๊าซไนโตรเจน [20,36]

ก๊าซ	P	D	S
N_2	1	1	1
CO	1.2	1.1	1.1
CH_4	3.4	0.7	4.9
O_2	3.8	1.7	2.2
He	15	60	0.25
H_2	22.5	30	0.75
CO_2	24	1	24

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค. สารเติมแต่ง (additives) ได้แก่ พลาสติไซเซอร์ (plasticizer) แอนติออกซิแดนต์ (anti-oxidant) สารหล่อลื่น (lubricant) สารป้องกันการเกิดหยดน้ำ (anti-fogging agent) เป็นต้น เช่น พลาสติไซเซอร์เป็นสารที่ช่วยลดแรงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ลง ส่งผลให้โมเลกุลของฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้นและลดพลังงานก่อกัมมันต์ของการแพร่ของก๊าซผ่านฟิล์มด้วย จึงทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซมีค่ามากขึ้น [2]

ง. สิ่งแวดล้อม ได้แก่ ความดัน อุณหภูมิ ความชื้น

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ (P) สามารถอธิบายได้จากสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius equation) ดังสมการที่ 2.24 [2,11,19,20,24]

$$P = P_0 \exp(\frac{-E_p}{RT}) \tag{2.24}$$

โดย P_0 คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่อุณหภูมิอนันต์

E_p คือ พลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

จากสมการที่ 2.24 จะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ (P) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิโดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (1/T มีค่าลดลง) ซึ่งสืบเนื่องมาจากการที่อุณหภูมิมีผลต่อค่าความสามารถในการละลายของก๊าซ (S) และค่าความสามารถในการแพร่ของก๊าซ (D) ในแบบสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius equation) เช่นกัน โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าทั้งสองจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 2.25 และ 2.26 [19,20]

$$S = S_0 \exp(\frac{-\Delta H_s}{RT}) \tag{2.25}$$

โดย S_0 คือ ค่าความสามารถในการละลายของก๊าซที่อุณหภูมิอนันต์

ΔH_s คือ heat of solution โดยสำหรับก๊าซที่ไม่ควบแน่น ΔH_s จะมีค่าเป็นบวก

$$D = D_0 \exp(\frac{-E_d}{RT}) \tag{2.26}$$

โดย D_0 คือ ค่าความสามารถในการแพร่ของก๊าซที่อุณหภูมิอนันต์

E_d คือ ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการแพร่ โดย E_d จะมีค่าเป็นบวกเสมอ

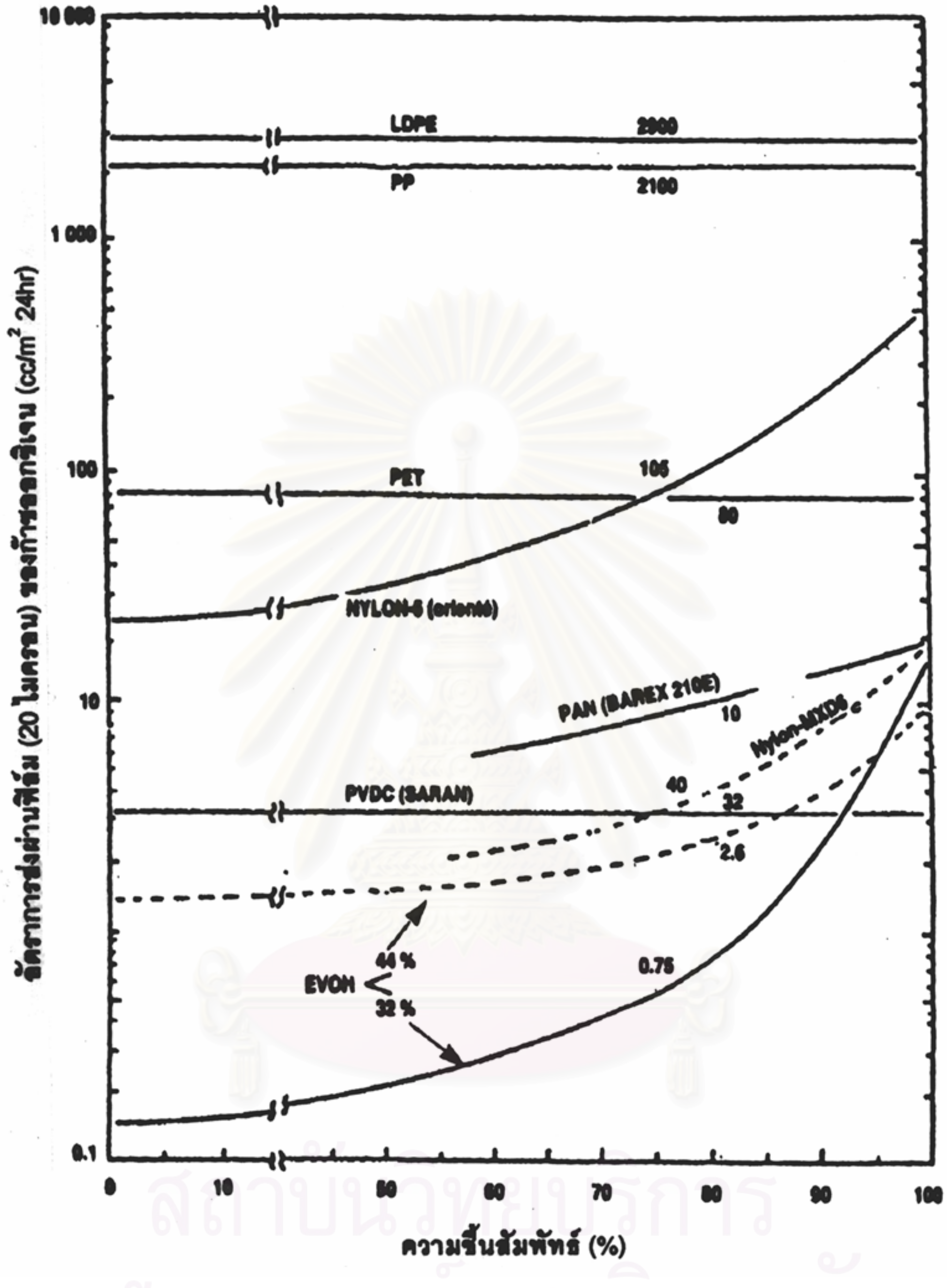
สำหรับผลของความชื้นที่มีต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์นั้นจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับโครงสร้างของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถแบ่งฟิล์มพอลิเมอร์ตามผลของความชื้นได้เป็น 2 ประเภท [2] คือ

1. ฟิล์มประเภทไม่ชอบน้ำ (hydrophobic film) หมายถึง ฟิล์มที่ไม่ดูดซับความชื้น แม้จะอยู่ในสภาวะที่มีความชื้นสูง เช่น อยู่ในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง ๆ คุณสมบัติในการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำ รวมทั้งความแข็งแรงจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามความชื้นของสภาพแวดล้อม ฟิล์มที่มีคุณสมบัติประเภทนี้ เช่น พอลิเอทธิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเรต และพอลิไวนิลลิดีนคลอไรด์ เป็นต้น

2. ฟิล์มประเภทชอบน้ำ (hydrophilic film) หมายถึง ฟิล์มที่สามารถดูดซับความชื้นจากสภาพแวดล้อมได้ โดยน้ำที่ฟิล์มดูดซับเข้าไปจะทำหน้าที่คล้ายพลาสติไซเซอร์ (plasticizer) เป็นผลให้โมเลกุลของฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้นและลดพลังงานก่อกัมมันต์ของการแพร่ของก๊าซผ่านฟิล์มด้วย จึงทำให้ความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำและความแข็งแรงของฟิล์มลดลง ฟิล์มที่มีคุณสมบัติประเภทนี้ เช่น พอลิเอไมด์ (polyamide) โดยเฉพาะไนลอน 6 และไนลอน 66 เป็นต้น

รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่ออัตราการส่งผ่าน (transmission rate) ของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ (โดยค่าอัตราการส่งผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์คือค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์หารด้วยความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.8 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่ออัตราการส่งผ่าน (transmission rate)
ของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ [2]

2.2.3 การประมาณค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

การประมาณค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์นี้อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์กับค่าความสามารถในการละลายและค่าความสามารถในการแพร่ของก๊าซดังที่ได้แสดงไว้ในสมการที่ 2.7 และความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ ค่าความสามารถในการละลาย และค่าความสามารถในการแพร่ของก๊าซกับอุณหภูมิตามสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius equation) ดังที่ได้แสดงไว้ในสมการที่ 2.24, 2.25 และ 2.26 [20,36]

$$P = DS \tag{2.7}$$

$$P = P_0 \exp(\frac{-E_p}{RT}) \tag{2.24}$$

$$S = S_0 \exp(\frac{-\Delta H_s}{RT}) \tag{2.25}$$

$$D = D_0 \exp(\frac{-E_d}{RT}) \tag{2.26}$$

เนื่องจาก $\log x = \frac{1}{2.3}\ln x$ หรือ $0.435\ln x$ ดังนั้นสมการที่ 2.24, 2.25 และ 2.26 สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\log P(T) = \log P_0 - 0.435\frac{E_p}{RT} \tag{2.27}$$

$$\log S(T) = \log S_0 - 0.435\frac{\Delta H_s}{RT} \tag{2.28}$$

$$\log D(T) = \log D_0 - 0.435\frac{E_d}{RT} \tag{2.29}$$

ที่อุณหภูมิ 298 เคลวิน จะได้ว่า

$$\log P(298) = \log P_0 - 1.46*10^{-3}\frac{E_p}{R} \tag{2.30}$$

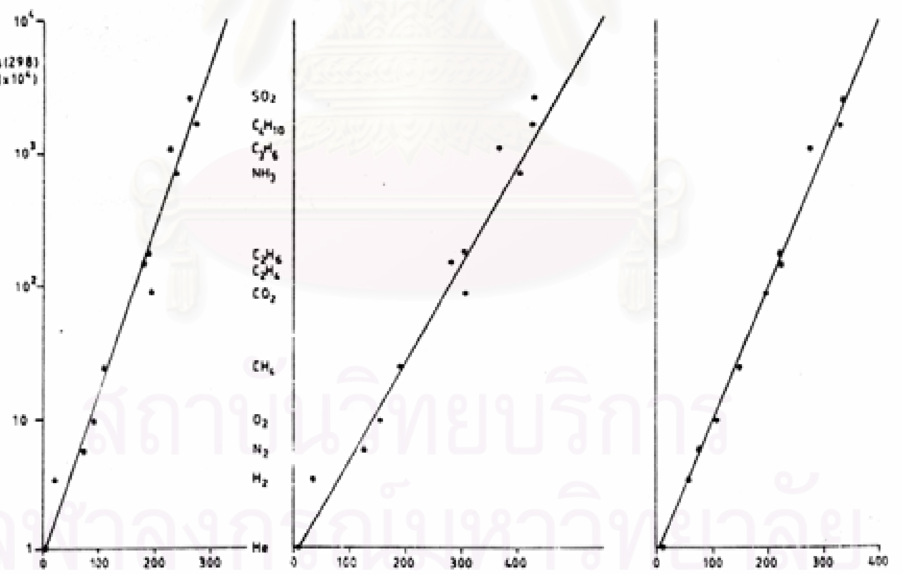
$$\log S(298) = \log S_0 - 1.46*10^{-3}\frac{\Delta H_s}{R} \tag{2.31}$$

$$\log D(298) = \log D_0 - 1.46*10^{-3}\frac{E_d}{R} \tag{2.32}$$

จากสมการที่ 2.27–2.29 จะเห็นได้ว่าในการคำนวณหา $P(T)$, $S(T)$ และ $D(T)$ ที่อุณหภูมิใด ๆ นั้นจำเป็นต้องรู้ค่าตัวแปรอื่น ๆ ได้แก่ P_0, S_0, D_0, E_p, ΔH_s และ E_d ซึ่งตัวแปรแต่ละตัวสามารถคำนวณหาค่าได้โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

2.2.3.1 ค่าความสามารถในการละลายของก๊าซ [36]

จากการศึกษาถึงค่าความสามารถในการละลายของก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์ของก๊าซชนิดต่าง ๆ ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนในฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ พบว่าค่าความสามารถในการละลายของก๊าซชนิดหนึ่ง ๆ ในฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิดมีค่าไม่แตกต่างกันมาก ดังนั้นค่าความสามารถในการละลายของก๊าซในฟิล์มพอลิเมอร์จึงขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซเป็นหลัก ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างค่าความสามารถในการละลายของก๊าซชนิดต่าง ๆ ในยางธรรมชาติกับค่าจุดเดือด ค่าอุณหภูมิวิกฤติ และค่าอุณหภูมิของเลนนาดโจนส์ (Lennard-Jones temperature: ε / k) ของก๊าซแต่ละชนิดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 (สำหรับค่าอุณหภูมิของเลนนาดโจนส์ (Lennard-Jones temperature: ε / k) ของก๊าซแต่ละชนิดสามารถแสดงได้ในตารางที่ 2.9)



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการละลายของก๊าซชนิดต่าง ๆ ในยางธรรมชาติกับค่าจุดเดือด ค่าอุณหภูมิวิกฤติและค่าอุณหภูมิของเลนนาดโจนส์ (Lennard-Jones temperature: ε / k) ของก๊าซแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิ 298 K [36]

ตารางที่ 2.9 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าอุณหภูมิของเลนนาดโจนส์ (Lennard-Jones temperature: ε / k) ของก๊าซชนิดต่าง ๆ [20,36]

ก๊าซ	σ (nm)	ε / k (K)
He	25.5	10.2
H_2O	26.4	809
H_2	28.3	60
Ne	28.2	33
NH_3	29.0	558
O_2	34.7	107
Ar	35.4	93
CH_3OH	36.3	482
Kr	36.6	179
CO	36.9	92
CH_4	37.6	149
N_2	38.0	71
CO_2	39.4	195
Xe	40.5	231
SO_2	41.1	335
C_2H_4	41.6	225
C_2H_6	44.4	216
CH_2Cl_2	49.0	356
C_3H_8	51.2	237
C_6H_6	53.5	412

โดย σ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก๊าซ

ε คือ ค่าคงที่พลังงานศักย์ (potential energy constant)

k คือ ค่าคงที่โบลซ์แมนน์ (Boltzmann constant)

จากรูปที่ 2.9 จึงได้สมการที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

$$\log S(298) \approx -7.0 + 0.0123T_b \quad (2.33)$$

$$\log S(298) \approx -7.0 + 0.0074T_{cr} \quad (2.34)$$

$$\log S(298) \approx -7.0 + 0.010\frac{\varepsilon}{k} \quad (2.35)$$

จากสมการที่ 2.33–2.35 นี้ได้พบว่าสมการที่ 2.35 มีความแม่นยำมากที่สุดและใช้ได้ดีกับพอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous polymers) โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ ±0.25 [36]

นอกจากนี้ ยังพบว่าค่า ΔH_s ของก๊าซหลายชนิดขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิของเลนนาดโจนส์ (Lennard-Jones temperature: ε / k) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$10^{-3}\frac{\Delta H_s}{R} = 1.0 - 0.010\frac{\varepsilon}{k} \pm 0.5 \quad (2.36)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 2.31, 2.35 และ 2.36 จะได้ว่า

$$\log S_0 = -5.5 - 0.005\frac{\varepsilon}{k} \pm 0.8 \quad (2.37)$$

สมการที่ 2.35–2.37 จะใช้ในการคำนวณหาค่า S สำหรับพอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะคล้ายยาง (rubbery state) ซึ่งมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) น้อยกว่า 298 เคลวิน ในส่วนของพอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะคล้ายแก้ว (glassy state) ซึ่งมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมากกว่า 298 เคลวิน จะมีสมการในการคำนวณในลักษณะที่คล้ายกับสมการที่ 2.35-2.37 แต่ค่าที่คำนวณได้จะมีค่าต่ำกว่าและมีความคลาดเคลื่อนมากกว่า ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

สำหรับพอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะคล้ายยาง (rubbery state)

$$\log S(298) = -7.0 + 0.010\frac{\varepsilon}{k} \pm 0.25 \quad (2.38)$$

$$10^{-3}\Delta H_s / R = 1.0 - 0.010\frac{\varepsilon}{k} \pm 0.5 \quad (2.36)$$

$$\log S_0 = -5.5 - 0.005\frac{\varepsilon}{k} \pm 0.8 \quad (2.37)$$

สำหรับพอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะคล้ายแก้ว (glassy state)

$$\log S(298) = -7.4 + 0.010\frac{\varepsilon}{k} \pm 0.6 \quad (2.39)$$

$$10^{-3}\frac{\Delta H_s}{R} = 0.5 - 0.010\frac{\varepsilon}{k} \pm 1.2 \quad (2.40)$$

$$\log S_0 = -6.65 - 0.005\frac{\varepsilon}{k} \pm 1.8 \quad (2.41)$$

สำหรับพอลิเมอร์ทุกชนิด

$$\log S(T) = \log S_0 - 0.435\frac{\Delta H_s}{RT} \quad (2.28)$$

สำหรับพอลิเมอร์ผลึก (crystalline polymers) ที่มีค่าความเป็นผลึกสูงมาก ๆ ค่า S จะมีค่าเข้าใกล้ 0 และสำหรับพอลิเมอร์กึ่งผลึก (semi-crystalline polymers) ค่า S จะ ขึ้นอยู่กับระดับของความเป็นผลึก (degree of crystallinity) ดังนี้

$$S_{sc} = S_a(1 - x_c) \quad (2.42)$$

โดย x_c คือ ระดับของความเป็นผลึก (degree of crystallinity)

S_{sc} คือ ค่าความสามารถในการละลายของก๊าซในพอลิเมอร์กึ่งผลึก (cm^3(STP) cm^{-3} Pa^{-1})

S_a คือ ค่าความสามารถในการละลายของก๊าซในพอลิเมอร์อสัณฐาน (cm^3(STP) cm^{-3} Pa^{-1})

2.2.3.2 ค่าความสามารถในการแพร่ของก๊าซ [36]

จากการศึกษาถึงค่าความสามารถในการแพร่ของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ของก๊าซชนิดต่าง ๆ ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ พบว่าค่าความสามารถในการแพร่ของก๊าซชนิดหนึ่ง ๆ ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการแพร่ของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ โดยค่า E_d เป็นตัวแปรที่สำคัญตัวแปรหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการแพร่ของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าค่า E_d มีความสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลก๊าซ โดยค่า E_d เป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ

โมเลกุลก๊าซยกกำลังสอง (σ^2) ซึ่งถ้ากำหนดให้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซมาตรฐานในการเปรียบเทียบจะได้ว่า

$$(\frac{\sigma_{N_2}}{\sigma_x})^2 10^{-3} \frac{E_d}{R} = p \tag{2.43}$$

โดยตัวแปร p มีความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ของพอลิเมอร์ดังนี้

สำหรับพอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะคล้ายยาง (rubbery state)

$$p = 7.5 - 2.5 * 10^{-4} (298 - T_g)^2 \tag{2.44}$$

สำหรับพอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะคล้ายแก้ว (glassy state)

$$p = 7.5 - 2.5 * 10^{-4} (T_g - 298)^{\frac{3}{2}} \tag{2.45}$$

ตัวแปรที่สำคัญอีกตัวแปรหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการแพร่ของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์คือ D_0 โดยจากการศึกษาพบว่าค่า D_0 มีความสัมพันธ์กับค่า E_d ดังนี้

สำหรับพอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะคล้ายยาง (rubbery state)

$$\log D_0 = 10^{-3} \frac{E_d}{R} - 4.0 \tag{2.46}$$

สำหรับพอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะคล้ายแก้ว (glassy state)

$$\log D_0 = 10^{-3} \frac{E_d}{R} - 5.0 \tag{2.47}$$

ดังนั้น จากสมการที่ 2.43-2.47 สามารถสรุปได้ดังนี้

สำหรับพอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะคล้ายยาง (rubbery state)

$$10^{-3} \frac{E_d}{R} = \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{N_2}}\right)^2 \{7.5 - 2.5 * 10^{-4} (298 - T_g)^2\} \pm 0.6 \tag{2.48}$$

$$\log D_0 = 10^{-3} \frac{E_d}{R} - 4.0 \pm 0.4 \tag{2.49}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับพอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะคล้ายแก้ว (glassy state)

$$10^{-3}\frac{E_d}{R}=\left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{N_2}}\right)^2\{7.5-2.5*10^{-4}(T_g-298)^{\frac{3}{2}}\}\pm 1.0 \quad (2.50)$$

$$\log D_0 = 10^{-3}\frac{E_d}{R}-5.0\pm 0.8 \quad (2.51)$$

สำหรับพอลิเมอร์ทุกชนิด

$$\log D(T)=\log D_0 - 0.435\frac{E_d}{RT} \quad (2.29)$$

สำหรับพอลิเมอร์กึ่งผลึก (semi-crystalline polymers) ค่า D ขึ้นอยู่กับระดับของความเป็นผลึก (degree of crystallinity) ดังนี้

$$D_{sc}=D_a(1-x_c) \quad (2.52)$$

โดย x_c คือ ระดับของความเป็นผลึก (degree of crystallinity)

D_{sc} คือ ค่าความสามารถในการแพร่ของก๊าซผ่านพอลิเมอร์กึ่งผลึก ($cm^2 s^{-1}$)

D_a คือ ค่าความสามารถในการแพร่ของก๊าซผ่านพอลิเมอร์อสัณฐาน ($cm^2 s^{-1}$)

2.2.3.3 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ [36]

สมการต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์นี้ได้มาจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองซึ่งเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความสามารถในการละลายและค่าความสามารถในการแพร่ของก๊าซดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.2.3.1 และ 2.2.3.2 สำหรับการคำนวณหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์นี้อาจใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.7 ในการคำนวณได้ถ้ารู้ค่าความสามารถในการละลายและค่าความสามารถในการแพร่ของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ต้องการ ซึ่งสมการต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์สามารถสรุปได้ดังนี้

สำหรับพอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะคล้ายยาง (rubbery state)

$$\log P_0 = -10.1+10^{-3}\frac{E_p}{R}\pm 0.25 \quad (2.53)$$

สำหรับพอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะคล้ายแก้ว (glassy state)

$$\log P_0 = -11.25 + 10^{-3}\frac{E_p}{R} \pm 0.75 \qquad (2.54)$$

สำหรับพอลิเมอร์ทุกชนิด

$$\log P(T) = \log P_0 - 0.435\frac{E_p}{RT} \qquad (2.27)$$

สำหรับพอลิเมอร์กึ่งผลึก (semi-crystalline polymers)

$$P_{sc} = S_{sc}D_{sc} = S_a D_a (1 - x_c)^2 = P_a (1 - x_c)^2 \qquad (2.55)$$

โดย x_c คือ ระดับของความเป็นผลึก (degree of crystallinity)

P_{sc} คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านพอลิเมอร์กึ่งผลึก (cm^3(STP) cm cm^{-2} s^{-1} Pa^{-1})

P_a คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านพอลิเมอร์อสัณฐาน (cm^3(STP) cm cm^{-2} s^{-1} Pa^{-1})

2.3 บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด (Modified Atmosphere Packaging for Fresh Produces)

คุณภาพและอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สดหลังการเก็บเกี่ยว นอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิด สายพันธุ์ คุณภาพขณะเก็บเกี่ยว ความสะอาด วิธีการขนส่ง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ใช้ในการขนส่งและใช้ในการเก็บรักษาแล้ว ยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซชนิดต่าง ๆ ที่ล้อมรอบผักและผลไม้สดนั้น ทั้งนี้เนื่องมาจากภายหลังที่ผักและผลไม้สดถูกเก็บเกี่ยว เซลล์ในผักและผลไม้สดยังคงมีชีวิตอยู่ ซึ่งกระบวนการหายใจและการสันดาปต่าง ๆ ที่นำไปสู่ความแก่ (maturation) ความสุก (ripening) และความเน่าเสีย (senescence) ยังคงเกิดต่อเนื่องตลอดเวลา [2] และจากที่กล่าวมาแล้วถึงผลกระทบของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สด กล่าวคือการลดความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศรอบผักและผลไม้สดสามารถช่วยชะลออัตราการหายใจได้ ซึ่งมีผลให้อายุการเก็บรักษายาวนานขึ้น ดังนั้นการควบคุมปริมาณก๊าซต่าง ๆ ภายในบรรจุภัณฑ์ให้เหมาะสมจึงจำเป็นในการเก็บรักษาผักและผลไม้สดให้มีอายุใน

การเก็บยาวนานขึ้น การควบคุมปริมาณก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ให้อยู่ภายใต้บรรยากาศของก๊าซชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดโดยที่อัตราส่วนของก๊าซชนิดต่าง ๆ แตกต่างกันไปจากอัตราส่วนที่พบในบรรยากาศปกติ สามารถทำได้ 4 วิธีคือ [2,23]

ก. บรรยากาศควบคุม (controlled atmosphere, CA) เป็นวิธีการควบคุมบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์ โดยการตรวจวัดและปรับความเข้มข้นของก๊าซต่าง ๆ ในบรรจุภัณฑ์ให้เหมาะสมตลอดเวลา ซึ่งวิธีนี้ต้องใช้อุปกรณ์ประกอบ ทำให้ต้นทุนในการประกอบการค่อนข้างสูง

ข. บรรยากาศดัดแปร (modified atmosphere, MA) เป็นวิธีการควบคุมบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ให้อยู่ภายใต้บรรยากาศที่มีอัตราส่วนของก๊าซชนิดต่าง ๆ แตกต่างไปจากบรรยากาศปกติโดยอัตราส่วนนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดยขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์ที่บรรจุ อัตราส่วนของก๊าซเริ่มต้น วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ และสภาวะในการเก็บผลิตภัณฑ์นั้น ๆ

ค. การไล่ด้วยก๊าซ (gas flush) เป็นวิธีการบรรจุผลิตภัณฑ์ให้อยู่ภายใต้บรรยากาศของก๊าซชนิดใดชนิดหนึ่ง โดยพ่นก๊าซนั้น ๆ เข้าไปแทนที่อากาศภายในภาชนะ

ง. สุญญากาศ (vacuum) เป็นวิธีการบรรจุผลิตภัณฑ์ให้อยู่ภายใต้สุญญากาศ โดยการดึงเอาอากาศภายในภาชนะออกไปและไม่มีการใส่ก๊าซใด ๆ เข้าไปแทนที่

โดยส่วนใหญ่วิธีการบรรจุแบบ CA และ MA จะเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สดเนื่องจากบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการนั้นควรจะมีทั้งก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนด้วย ดังนั้นวิธีการบรรจุแบบการไล่ด้วยก๊าซและสุญญากาศจึงไม่นิยมใช้ในการบรรจุผักและผลไม้สด [6]

บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศควบคุม (CAP)

โดยทั่วไปวิธีนี้นิยมใช้ในการเก็บรักษาผักและผลไม้สดในห้องเย็นขนาดใหญ่หรือระหว่างการขนส่งที่ใช้ตู้สินค้าขนาดใหญ่ (container) และระยะเวลาเดินทางค่อนข้างยาวนาน การรักษาความเข้มข้นของก๊าซให้คงที่ตลอดเวลาอาจใช้วิธีการพ่นก๊าซที่ต้องการเข้าไปอย่างสม่ำเสมอเพื่อแทนที่อากาศภายในห้องเย็นหรือตู้สินค้าหรืออาจใช้สารเคมีที่สามารถปล่อยก๊าซที่ต้องการเข้าไปหรือดูดก๊าซที่ไม่ต้องการออก ดังนั้นต้นทุนของการดำเนินการของ CAP ค่อนข้างสูง จึงนิยมใช้กับผักและผลไม้สดที่มีอายุการเก็บค่อนข้างยาวนานเพื่อการบริโภคตลอดปี เช่น กะหล่ำปลี แอปเปิ้ล ผลกีวี ผลสาลี่ เป็นต้น [2,22]

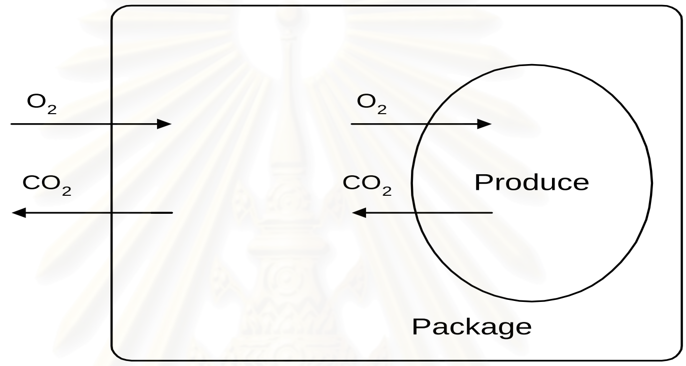
บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร (MAP)

วิธีนี้ได้รับความนิยมมากกว่า CAP และมีการนำมาใช้ทั้งในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดใหญ่ สามารถใช้ได้ทั้งในระหว่างการเก็บในห้องเย็น การขนส่ง และการวางจำหน่ายปลีก การบรรจุมีตั้งแต่ขนาดใหญ่ (bulk package) จนถึงขนาดย่อยเพื่อขายปลีก (retail package) ต้นทุนการดำเนินการต่ำกว่า CAP เนื่องจากไม่ต้องมีการควบคุมความเข้มข้นของก๊าซหลังการบรรจุในบรรจุภัณฑ์เรียบร้อยแล้ว [2,22]

2.3.1 หลักการพื้นฐานของการเก็บรักษาแบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด [2,4,22,23]

การเก็บรักษาผักและผลไม้สดแบบบรรยากาศดัดแปรนี้จะต้องใช้บรรจุภัณฑ์ชนิดที่มีความสามารถในการยอมให้มีการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ บรรจุภัณฑ์ที่ทำจากฟิล์มพอลิเมอร์จึงเป็นบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรอย่างยิ่ง เนื่องจากฟิล์มพอลิเมอร์ในปัจจุบันมีหลากหลายชนิดและสามารถที่จะเลือกค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซต่าง ๆ ได้ตามต้องการ ระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สดแสดงดังรูปที่ 2.10 [24] เมื่อทำการบรรจุผักและผลไม้สดลงในบรรจุภัณฑ์และทำการปิดบรรจุภัณฑ์ให้สนิทแล้ว ผักและผลไม้สดในบรรจุภัณฑ์ซึ่งยังคงหายใจอยู่นั้นจะใช้ก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์เพื่อการหายใจ พร้อม ๆ กับที่จะผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ในระยะแรกอัตราการหายใจค่อนข้างสูงเนื่องจากความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนยังสูงอยู่และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังมีน้อย หลังจากนั้นอัตราการหายใจจะค่อย ๆ ลดลงตามการลดลงของปริมาณก๊าซออกซิเจนและการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในขณะเดียวกันจากการที่ก๊าซออกซิเจนถูกใช้ไปในการหายใจ ทำให้ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนลดลง จึงเกิดแรงขับดัน (driving force) ให้ก๊าซออกซิเจนภายนอกซึมผ่านฟิล์มเข้าไปภายในภาชนะบรรจุ ขณะเดียวกันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการหายใจของผักและผลไม้สดนั้นจะซึมผ่านฟิล์มออกสู่ภายนอก กระบวนการดังกล่าวนี้จะดำเนินอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของผักและผลไม้สดเท่ากับอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ ณ จุดนี้ ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์จะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งความเข้มข้นของก๊าซทั้งสอง ณ จุดนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดและอัตราในการซึมผ่านของก๊าซทั้งสองผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ ดังนั้นในการสร้างบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สดชนิดหนึ่ง ๆ นั้นจึงต้องคำนึงถึงอัตราการ

หายใจของผักและผลไม้สดชนิดนั้นและชนิดของฟิล์มพอลิเมอร์ที่จะนำมาใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรเป็นสำคัญ เพราะถ้าเกิดกรณีที่อัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนของผักและผลไม้สดสูงกว่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มเข้ามาภายในบรรจุภัณฑ์แล้ว ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์จะลดลง และถ้าอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของผักและผลไม้สดนี้สูงกว่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มไปสู่บรรยากาศภายนอก ก็จะเกิดการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์ขึ้นได้



รูปที่ 2.10 ระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด [24]

2.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทำนายความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า เมื่อทำการบรรจุผักและผลไม้สดในบรรจุภัณฑ์แล้ว ก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์จะถูกใช้ไปโดยการหายใจของผักและผลไม้สด ในขณะที่จะมีการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างของความดันย่อยของก๊าซทั้งสองชนิดระหว่างภายในกับภายนอกบรรจุภัณฑ์ จึงเกิดการซึมผ่านของก๊าซทั้งสองผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ โดยก๊าซออกซิเจนจะเกิดการซึมผ่านฟิล์มเข้าสู่ภายในบรรจุภัณฑ์ ในขณะที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดการซึมผ่านฟิล์มออกสู่บรรยากาศภายนอก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของก๊าซทั้งสองภายในบรรจุภัณฑ์จะสามารถหาได้จากสมการดุลมวลที่เกิดการถ่ายเทขึ้นในระบบดังนี้ (กำหนดทิศทางให้ก๊าซเข้าไปภายในบรรจุภัณฑ์เป็นทิศทางบวก) [8,24]

<u>ดุลมวลของก๊าซออกซิเจน</u>

อัตราการซึมผ่านสุทธิ ของ O_2 เข้าสู่ระบบ	- อัตราการใช้ O_2 ในระบบ เนื่องจากการหายใจ	=	อัตราการสะสม ของ O_2 ในระบบ	(2.56)

$$\frac{P_{O_2}A(c_{O_2}^{ext}-c_{O_2}^{pkg})}{L}-WR_{O_2}(c_{O_2}^{pkg},c_{CO_2}^{pkg})=V\left(\frac{dc_{O_2}^{pkg}}{dt}\right) \qquad (2.57)$$

<u>ดุลมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์</u>

อัตราการซึมผ่านสุทธิของ CO_2 เข้าสู่ระบบ + อัตราการผลิต CO_2 ในระบบเนื่องจากการหายใจ = อัตราการสะสมของ CO_2 ในระบบ (2.58)

$$\frac{P_{CO_2}A(c_{CO_2}^{ext}-c_{CO_2}^{pkg})}{L}+WR_{CO_2}(c_{O_2}^{pkg},c_{CO_2}^{pkg})=V\left(\frac{dc_{CO_2}^{pkg}}{dt}\right) \qquad (2.59)$$

โดย P คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

A คือ พื้นที่ผิวฟิล์มที่เกิดการซึมผ่านของก๊าซ

L คือ ความหนาของฟิล์ม

W คือ น้ำหนักของผักและผลไม้สดที่บรรจุ

c คือ ความเข้มข้นของก๊าซ

$R(c_{O_2}^{pkg},c_{CO_2}^{pkg})$ คือ อัตราการหายใจ (อัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนหรืออัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากการหายใจ) ต่อน้ำหนักของผักและผลไม้สดซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์

V คือ ปริมาตรอิสระในบรรจุภัณฑ์

$\frac{dc}{dt}$ คือ อัตราการสะสมของความเข้มข้นของก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์

ตัวห้อย o_2 คือ ก๊าซออกซิเจน

co_2 คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตัวยก ext คือ ตำแหน่งภายนอกบรรจุภัณฑ์

pkg คือ ตำแหน่งภายในบรรจุภัณฑ์

เนื่องด้วยก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ศึกษามีค่าความเข้มข้นต่ำและระบบมีความดันต่ำเพียงบรรยากาศปกติเท่านั้น จึงเหมาะสมที่จะสมมติให้ก๊าซออกซิเจนและก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ในระบบประพฤติตัวแบบก๊าซอุดมคติ โดยสำหรับก๊าซอุดมคติที่อุณหภูมิและความดันรวมคงที่ จะได้ว่า

$$PV = nRT \tag{2.60}$$

หรือเขียนอยู่ในรูปความเข้มข้นของก๊าซ จะได้ว่า

$$\frac{P}{RT} = c = \frac{n}{V} \tag{2.61}$$

ดังนั้นจากสมการที่ 2.57 และ 2.59 เมื่อนำมาหารตลอดด้วยค่าความเข้มข้นของก๊าซ (จากสมการที่ 2.61) จะได้ว่า

$$\frac{P_{O_2} A(y_{O_2}^{ext} - y_{O_2}^{pkg})}{VL} - \frac{WR_{O_2}(y_{O_2}^{pkg}, y_{CO_2}^{pkg})}{V} = \frac{dy_{O_2}^{pkg}}{dt} \tag{2.62}$$

$$\frac{P_{CO_2} A(y_{CO_2}^{ext} - y_{CO_2}^{pkg})}{VL} + \frac{WR_{CO_2}(y_{O_2}^{pkg}, y_{CO_2}^{pkg})}{V} = \frac{dy_{CO_2}^{pkg}}{dt} \tag{2.63}$$

โดย y คือ เศษส่วนโมลของก๊าซ

ถ้ากำหนดสภาวะเริ่มต้นที่ t = 0 ให้ $y_{O_2}^{ext}$ = 0.21 และ $y_{CO_2}^{ext}$ = 0.0003 (ค่าเศษส่วนโมลของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศปกติตามลำดับ) [25] โดยเมื่อแทนสภาวะเริ่มต้นลงในสมการที่ 2.62 และ 2.63 จะได้ว่า

$$\frac{P_{O_2} A(0.21 - y_{O_2}^{pkg})}{VL} - \frac{WR_{O_2}(y_{O_2}^{pkg}, y_{CO_2}^{pkg})}{V} = \frac{dy_{O_2}^{pkg}}{dt} \tag{2.64}$$

$$\frac{P_{CO_2} A(0.0003 - y_{CO_2}^{pkg})}{VL} + \frac{WR_{CO_2}(y_{O_2}^{pkg}, y_{CO_2}^{pkg})}{V} = \frac{dy_{CO_2}^{pkg}}{dt} \tag{2.65}$$

เมื่อระบบเข้าสู่ภาวะคงตัว แสดงว่าปริมาณก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นจากสมการที่ 2.64 และ 2.65 จะได้ว่า

$$\frac{P_{O_2} A(0.21 - y_{O_2}^{pkg,ss})}{L} = WR_{O_2}(y_{O_2}^{pkg,ss}, y_{CO_2}^{pkg,ss}) \tag{2.66}$$

$$-\frac{P_{CO_2} A(0.0003 - y_{CO_2}^{pkg,ss})}{L} = WR_{CO_2}(y_{O_2}^{pkg,ss}, y_{CO_2}^{pkg,ss}) \tag{2.67}$$

โดย ตัวยก pkg, ss คือ ตำแหน่งภายในบรรจุภัณฑ์ที่ภาวะคงตัว

ดังนั้นถ้าทราบความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของบรรยากาศดัดแปรภายในบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการให้เกิดขึ้นที่ภาวะคงตัวและข้อมูลอื่น ๆ ที่จำเป็นแล้ว ก็จะสามารถใช้สมการที่ 2.66 และ 2.67 ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่เหมาะสมกับผักและผลไม้สดชนิดนั้น ๆ ได้ (กล่าวคือสามารถเลือกชนิดของฟิล์มพอลิเมอร์ให้มีค่า $P(O_2)$และ $P(CO_2)$ ที่ต้องการ หรือกำหนดค่าของ A หรือ L หรือ W ที่ต้องการได้)

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร [2,4,5]

ก. การหายใจของผักและผลไม้สด

หลังจากการบรรจุผักและผลไม้สดลงภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรแล้ว ความเข้มข้นของก๊าซต่าง ๆ ภายในบรรจุภัณฑ์เริ่มเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งเกิดจากการหายใจของผักและผลไม้สดที่บรรจุโดยอัตราการหายใจจะถูกกำหนดโดยชนิดของผักและผลไม้สด ระดับความแก่อ่อน สภาวะทางกายภาพ ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซเอทธิลีนภายในบรรจุภัณฑ์ ปริมาณของผักและผลไม้สดที่บรรจุ อุณหภูมิ ซึ่งรายละเอียดของผลกระทบเหล่านี้ถูกกล่าวมาแล้วดังหัวข้อ 2.1.2

ข. คุณสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ที่นำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์

คุณสมบัติสำคัญของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการพิจารณาในการเลือกฟิล์มมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ [4] คือ

1. ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ
2. ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ
3. คุณสมบัติเชิงกล
4. ความใส
5. การปิดผนึก
6. ความปลอดภัย
7. ความสามารถในการทำปฏิกิริยาใด ๆ ต่อผักและผลไม้สดที่บรรจุ

คุณสมบัติตั้งแต่ข้อ 3 ถึงข้อ 7 เป็นคุณสมบัติที่บรรจุภัณฑ์ทั่วไปควรจะคำนึงถึงอยู่แล้ว แต่สำหรับการสร้างบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำก็เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างมากในการนำมาพิจารณา เนื่องจากได้กล่าวมาแล้วว่าผักและผลไม้สดยังมีการหายใจอย่างต่อเนื่องหลังจากการบรรจุและเนื่องจากผักและผลไม้สดแต่ละชนิดมีอัตราการหายใจที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการสร้างและการเก็บรักษาผัก

และผลไม้สดชนิดหนึ่ง ๆ ในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรนั้น จึงต้องเลือกชนิดของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซให้เหมาะสมกับชนิดของผักและผลไม้สดชนิดนั้น ๆ ด้วย

โดยส่วนใหญ่ฟิล์มพอลิเมอร์ที่เหมาะสมในการใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรนั้นต้องมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าก๊าซออกซิเจน เพื่อไม่ให้เกิดการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์มากนักซึ่งจะก่อให้เกิดผลเสียต่อผักและผลไม้สดที่บรรจุ นอกจากนี้ฟิล์มที่ใช้ควรมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำน้อยเพื่อไม่ให้ผักและผลไม้สดเกิดการสูญเสียน้ำมากนัก ซึ่งฟิล์มทั่วไปที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ก็มีคุณสมบัติดังกล่าวอยู่แล้ว ดังนั้นฟิล์มทั่วไปในเชิงพาณิชย์จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรของผักและผลไม้สดได้เป็นอย่างดี [2]

ค. ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล

จากที่กล่าวมาแล้วว่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะมีผลต่ออายุการเก็บผักและผลไม้สด โดยถ้าก๊าซออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์มีความเข้มข้นต่ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์มีความเข้มข้นสูงจะสามารถช่วยชะลออัตราการหายใจได้ แต่อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนก็ไม่ควรต่ำเกินไป ในขณะที่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็ไม่ควรสูงเกินไปเพราะจะก่อให้เกิดความเสียหายแก่ผักและผลไม้สดได้ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สามารถชะลออัตราการหายใจได้และไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อผักและผลไม้สดที่บรรจุอยู่ภายในบรรจุภัณฑ์นั้นจะต้องเป็นความเข้มข้นในระดับที่เหมาะสมสำหรับการบรรจุผักและผลไม้สดชนิดนั้น ๆ ซึ่งความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมนี้ต้องขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของผักและผลไม้สด อายุการเก็บเกี่ยว น้ำหนัก ปริมาณของผักและผลไม้สด ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษา เป็นต้น ซึ่งค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับผักและผลไม้สดแต่ละชนิดนั้นมักจะได้จากการทดลอง

ง. ปัจจัยภายนอก

อุณหภูมิและความชื้นนับว่าเป็นปัจจัยภายนอกที่สำคัญที่มีผลกระทบต่อบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีผลกระทบต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดและค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ดังแสดงในสมการที่ 2.3 และ 2.24 [2,24] ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป อัตราการหายใจและค่า

ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์จะเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ความเข้มข้นของก๊าซที่ภาวะคงตัวภายในบรรจุภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไปด้วย จากการศึกษาของนักวิจัยหลายท่าน [19] พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่ภาวะคงตัวในบรรจุภัณฑ์จะลดลงในขณะที่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะคงตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มของอุณหภูมิที่เท่ากัน อัตราการหายใจของผักและผลไม้สดจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นมากกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการคายน้ำของผักและผลไม้สดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยซึ่งมีผลทำให้ผักและผลไม้สดเหี่ยวได้เร็วยิ่งขึ้น

นอกจากอุณหภูมิแล้ว ความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่มีผลต่อบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร [2,22] ถ้าภายในบรรจุภัณฑ์มีความชื้นสูงอาจทำให้เกิดการกลั่นตัวของไอน้ำกลายเป็นหยดน้ำ ซึ่งส่งผลให้เกิดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและเชื้อราได้ดีขึ้น นอกจากนี้หยดน้ำที่เกาะบนผิวของผักและผลไม้สดหรือบริเวณผิวฟิล์มอาจมีผลต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซได้ ดังนั้นในบางครั้งอาจมีการใส่ถุงที่บรรจุสารประกอบเคมีที่ดูดซับน้ำได้ดีลงในบรรจุภัณฑ์ เช่น โปแตสเซียมคลอไรด์ (KCl) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ซอร์บิทอล (sorbitol) เป็นต้น เพื่อควบคุมความชื้นภายในบรรจุภัณฑ์ [22]

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรของผักและผลไม้สดมีด้วยกันหลายประการซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของผักและผลไม้สด โดยตารางที่ 2.10 แสดงตัวอย่างของสภาวะที่ใช้ในระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่เหมาะสมในการเก็บรักษาผักและผลไม้สดบางชนิด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.10 สภาวะต่าง ๆ ในระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่เหมาะสมในการเก็บรักษาผักและผลไม้สดบางชนิด [2]

ผลิตผล	ช่วงอุณหภูมิ (°C) [a]	ความเข้มข้นของก๊าซ [b]		ศักยภาพในการเก็บ [C]	หมายเหตุ [d]
		$\%O_2$	$\%CO_2$		
อาทิโชค (artichokes)	0-5	2-3	3-5	B	ยังไม่มีใช้ในเชิงพาณิชย์
หน่อไม้ฝรั่ง	0-5	อากาศ	5-10	B	การใช้เชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
ถั่วเหลือง	5-10	2-3	5-10	C	ศักยภาพในการเก็บขึ้นกับผู้ผลิต
หัวบีท (beet)	0-5	-	-	D	RH[e] 98-100% ให้ผลดีมาก
บรอคเคอลี่	0-5	1-2	5-10	B	การใช้เชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
กะหล่ำปลี	0-5	3-5	5-7	B	มีการใช้เชิงพาณิชย์บางส่วน
แคนตาลูป	3-7	3-5	10-15	B	การใช้เชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
แครอท	0-5	-	-	D	RH[e] 98-100% ให้ผลดีมาก
กระหล่ำดอก	0-5	2-5	2-5	C	ยังไม่มีใช้ในเชิงพาณิชย์
ขึ้นฉ่าย	0-5	2-4	0	C	การใช้เชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
ข้าวโพดหวาน	0-5	2-4	10-20	B	การใช้เชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
แตงกวา	8-12	3-5	0	C	ยังไม่มีใช้ในเชิงพาณิชย์
แตงฮันนี่ดิว	10-12	3-5	0	C	ยังไม่มีใช้ในเชิงพาณิชย์
ลีค (leek)	0-5	1-2	3-5	B	ยังไม่มีใช้ในเชิงพาณิชย์
ผักกาดหอม	0-5	2-5	0	B	มีการใช้เชิงพาณิชย์บางส่วน มักเติม CO 2-3%
กระเจี๊ยบมอญ	8-12	3-5	0	C	ยังไม่มีใช้ในเชิงพาณิชย์ ควรเก็บที่ 5-10%CO_2 ที่ 5-8°C
เห็ด	0-5	อากาศ	10-15	C	การใช้เชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
พริกหยวก	8-12	3-5	0	C	การใช้เชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
หอมหัวใหญ่	0-5	1-2	10-20	C	การใช้เชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด

ตารางที่ 2.10 (ต่อ) สภาวะต่าง ๆ ในระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่เหมาะสมในการเก็บรักษาผักและผลไม้สดบางชนิด [2]

ผลิตผล	ช่วงอุณหภูมิ (^{o}C) [a]	ความเข้มข้นของก๊าซ [b]		ศักยภาพ[c] ในการเก็บ	หมายเหตุ [d]
		$\%O_2$	$\%CO_2$		
พริก	8-12	3-5	0	C	ยังไม่มีใช้ในเชิงพาณิชย์ ควรเก็บที่ 10-15%CO_2 ที่ 5-8^{o}C
มันฝรั่ง	4-12	-	-	D	ยังไม่มีใช้ในเชิงพาณิชย์
หัวไช้เท้า	0-5	-	-	D	RH[e] 98-100% ให้ผลดีมาก
ผักขม	0-5	อากาศ	10-20	C	ยังไม่มีใช้ในเชิงพาณิชย์
มะเขือเทศ (ก่อนสุก)	12-20	3-5	5-15	B	การใช้เชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
มะเขือเทศ (ค่อนข้างสุก)	8-12	3-5	5-15	B	การใช้เชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
แอปเปิล	0-5	2-3	1-2	A	40%ของผลิตผลถูกเก็บภายใต้ CA
แอปปริคอท	0-5	2-3	2-3	C	ยังไม่มีใช้ในเชิงพาณิชย์
เชอรี่หวาน	0-5	3-10	10-12	B	มีการใช้เชิงพาณิชย์บางส่วน
มะเดื่อ	0-5	5	15	B	การใช้เชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
กีวี	0-5	2	5	A	มีการใช้เชิงพาณิชย์บางส่วน
เนคทารีน (nectarine)	0-5	1-2	5	B	การใช้เชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
ลูกพีช	0-5	1-2	3-5	B	การใช้เชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
ลูกแพร์	0-5	2-3	0-1	A	มีการใช้เชิงพาณิชย์บางส่วน
ลูกพลับ	0-5	3-5	5-8	C	ยังไม่มีใช้ในเชิงพาณิชย์
ลูกพลัมและลูกพรุน	0-5	1-2	0-5	B	ยังไม่มีใช้ในเชิงพาณิชย์
สตรอเบอรี่	0-5	10	15-20	A	มีอัตราการใช้เพิ่มขึ้น

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.10 (ต่อ) สภาวะต่าง ๆ ในระบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่เหมาะสมในการเก็บรักษาผักและผลไม้สดบางชนิด [2]

ผลิตผล	ช่วงอุณหภูมิ (°C) [a]	ความเข้มข้นของก๊าซ [b]		ศักยภาพ [C] ในการเก็บ	หมายเหตุ [d]
		$\%O_2$	$\%CO_2$		
อะโวกาโด	5-13	2-3	3-10	B	การใช้เชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด
กล้วย	12-15	2-5	2-5	A	มีการใช้เชิงพาณิชย์บางส่วน
เกรฟฟรุต (grapefruit)	10-15	3-10	5-10	C	ยังไม่มีใช้ในเชิงพาณิชย์
มะนาว	10-15	5	0-5	B	ยังไม่มีใช้ในเชิงพาณิชย์
มะนาวใหญ่	10-15	5	0-10	B	ยังไม่มีใช้ในเชิงพาณิชย์
โอลีฟ	8-12	2-5	5-10	C	ยังไม่มีใช้ในเชิงพาณิชย์
ส้ม	5-10	10	5	C	ยังไม่มีใช้ในเชิงพาณิชย์
มะม่วง	10-15	5	5	C	ยังไม่มีใช้ในเชิงพาณิชย์
มะละกอ	10-15	5	10	C	ยังไม่มีใช้ในเชิงพาณิชย์
สัปปะรด	10-15	5	10	C	ยังไม่มีใช้ในเชิงพาณิชย์

[a] ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทั่วไป มีความชื้นสัมพัทธ์ 85-95 %

[b] ความเข้มข้นของก๊าซอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บ

[c] A = ดีมาก B = ดี C = พอใช้ D = ไม่ดี

[d] เฉพาะการตลาดภายในประเทศสหรัฐอเมริกา

[e] ความชื้นสัมพัทธ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.4 วิธีการสร้างบรรยากาศดัดแปรภายในบรรจุภัณฑ์

การสร้างสภาวะบรรยากาศดัดแปรที่ต้องการสำหรับผักและผลไม้สดนั้นทำได้ 2 วิธี [2,22] คือ

2.3.4.1 การสร้างบรรยากาศดัดแปรแบบโดยอ้อม (passive MA)

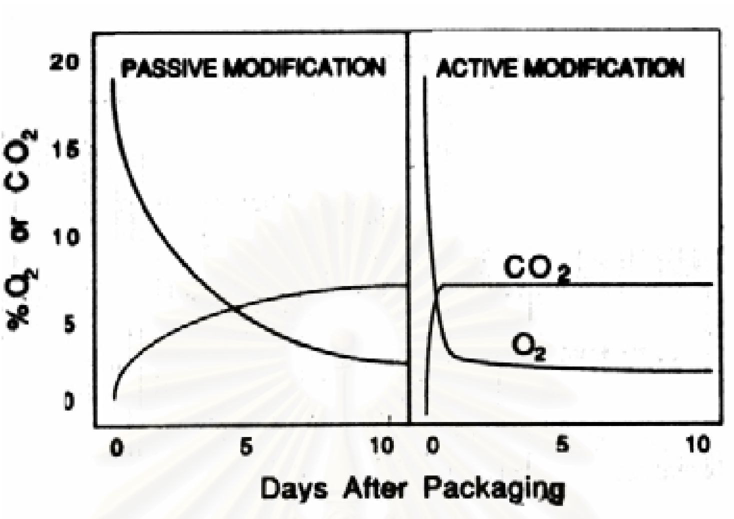
วิธีนี้บรรยากาศของก๊าซที่ต้องการในบรรจุภัณฑ์ที่ปิดสนิทจะเกิดจากสมดุลระหว่างอัตราการผลิตและอัตราการใช้ก๊าซในการหายใจกับอัตราการซึมผ่านของก๊าซต่าง ๆ ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ โดยที่องค์ประกอบของก๊าซเริ่มต้นเป็นองค์ประกอบเดียวกันกับก๊าซในบรรยากาศปกติ (คือมีก๊าซออกซิเจนร้อยละ 21 โดยปริมาตรและมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 0.03 โดยปริมาตร [25]) หลังจากการบรรจุแล้วองค์ประกอบของบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์จะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เนื่องจากการหายใจของผักและผลไม้สดและการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ จนกระทั่งเกิดสภาวะคงตัวของความเข้มข้นของก๊าซ จะได้บรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการ ถ้าเลือกชนิดของฟิล์มพอลิเมอร์ให้เหมาะสมกับชนิดของผักและผลไม้สดที่ทำการบรรจุ

2.3.4.2 การสร้างบรรยากาศดัดแปรแบบโดยตรง (active MA)

วิธีนี้บรรยากาศดัดแปรที่ต้องการจะได้จากการพ่นก๊าซตามความเข้มข้นที่กำหนดไว้เข้าไปในห้องเย็นหรือภาชนะบรรจุ หรืออาจได้จากการใช้สารเคมีที่ให้ก๊าซที่ต้องการหรือดูดกลืนก๊าซที่ไม่ต้องการออกไปจากบรรยากาศที่ล้อมรอบผักและผลไม้สด หรือการใส่สารที่ช่วยลดปริมาณก๊าซออกซิเจนและเพิ่มปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างรวดเร็ว เช่น เฟอรัสคาร์บอเนต (ferrous carbonate) ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

$$4FeCO_3 + O_2 + 6H_2O \longrightarrow 4Fe(OH)_3 + 4CO_2 \quad (2.68)$$

วิธีการสร้างบรรยากาศดัดแปรแบบโดยตรงจะคล้ายกับวิธีการไล่ด้วยก๊าซ แต่แตกต่างกันตรงที่วิธีนี้ใช้บรรจุภัณฑ์ชนิดที่ยอมให้มีการซึมผ่านของก๊าซได้ วิธีการสร้างบรรยากาศดัดแปรโดยตรงนี้ทำให้ได้ความเข้มข้นของก๊าซที่ต้องการในบรรจุภัณฑ์เกิดขึ้นได้ทันที ซึ่งเป็นข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับการสร้างบรรยากาศดัดแปรโดยอ้อมที่ต้องใช้ระยะเวลาช่วงหนึ่งก่อนที่จะได้ความเข้มข้นของก๊าซที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 2.11 อย่างไรก็ตามการใส่สารดูดซับหรือการพ่นก๊าซเข้าไปในบรรจุภัณฑ์นั้นทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นข้อจำกัดของวิธีการนี้



รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างการสร้างบรรยากาศดัดแปร แบบโดยอ้อมและแบบโดยตรงสำหรับผักและผลไม้สด [2,22]

2.3.5 คุณสมบัติของบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด

บรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สดต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ [2,19]

1. สามารถให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำเหมาะสมกับผักและผลไม้สดที่บรรจุ

2.สามารถควบคุมความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์ให้ต่างไปจากบรรยากาศปกติ ซึ่งทำให้สามารถช่วยป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และแมลงในผักและผลไม้สดที่บรรจุได้ เนื่องจากจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตได้บนผักและผลไม้สดส่วนใหญ่อาศัยก๊าซออกซิเจนในการหายใจ ดังนั้นเมื่อทำให้ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนต่ำลง การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บนผักและผลไม้สดก็จะลดลงด้วย

3. สามารถทำการขนส่งและขายปลีกสู่ผู้บริโภคได้โดยสะดวก

4. สามารถต้านทานต่อผลกระทบทางกายภาพได้ดี เช่น แรงกระแทก แรงสั่นสะเทือน และแรงกดอัด เป็นต้น

5. สามารถเก็บไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำได้โดยไม่เกิดความเสียหายต่อบรรจุภัณฑ์

6. สามารถทำการปิดผนึกได้อย่างสมบูรณ์ในอุณหภูมิที่ไม่สูงจนเกินไปทั้งนี้เพื่อรักษาบรรยากาศดัดแปรภายในบรรจุภัณฑ์ให้คงที่และไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อผักและผลไม้ที่บรรจุได้

7. ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภค

8. ไม่ทำปฏิกิริยาใด ๆ กับผักและผลไม้สดที่บรรจุ

9. มีความใสและดูสวยงามและมีน้ำหนักเบา

10. มีความเหมาะสมในการใช้เชิงพาณิชย์ คือ ให้ต้นทุนที่เหมาะสม สามารถผลิตได้ทั่วไปและเป็นวัสดุที่สามารถนำมาหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้

11. สามารถพิมพ์หรือติดฉลากลงบนบรรจุภัณฑ์ได้

ส่วนรูปแบบของบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่ใช้นั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของผักและผลไม้สดและจุดมุ่งหมายในการวางจำหน่ายว่าจะเป็นแบบขายปลีกหรือขายส่ง รูปที่ 2.12 และ 2.13 แสดงตัวอย่างบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด

รูปที่ 2.12 การบรรจุมะเขือเทศในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร

รูปที่ 2.13 การบรรจุแตงโมพร้อมบริโภคในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร

2.3.6 ฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าฟิล์มพอลิเมอร์ทั่วไปในเชิงพาณิชย์มีความเหมาะสมที่จะนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรของผักและผลไม้สดได้เป็นอย่างดี ซึ่งฟิล์มที่พบมากและมีความเหมาะสมในการนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด ได้แก่ พอลิเอทิลีน (polyethylene) พอลิโพรพิลีน (polypropylene) พอลิสไตรีน (polystyrene) พอลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride) เป็นต้น [2,7,24]

พอลิเอทิลีน (polyethylene : PE)

พอลิเอทิลีนเป็นฟิล์มที่ถูกนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผักและผลไม้สดมากที่สุด [22] โดยฟิล์มพอลิเอทิลีนที่นิยมใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผักและผลไม้สดสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด [3] ได้แก่

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene : LDPE) เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างประกอบด้วยโซ่ยาวของ CH_2 ที่มีการแตกกิ่งก้านเป็นสาขาโซ่ ซึ่งสาขาโซ่ส่วนใหญ่เป็นโซ่สั้น ๆ ที่เป็นเอทิลและบิวทิล สำหรับสมบัติทางกายภาพของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำนี้แตกต่างออกไปบ้างขึ้นกับปริมาณของสาขาโซ่ โดยทั่วไปถ้าโมเลกุลมีสาขาโซ่มาก พอลิเมอร์จะมีความเป็นผลึกต่ำเพราะโอกาสที่อะตอมต่าง ๆ ในโมเลกุลจะจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบเพื่อเกิดลักษณะผลึกมีน้อยกว่า สมบัติทางกายภาพต่าง ๆ เช่น ความหนาแน่น จุดหลอมตัว ความแข็งก็

ต่ำลงด้วย และเพราะความหนาแน่นต่ำนี้เองทำให้คุณสมบัติในการซึมผ่านของก๊าซมีค่าสูง โดยทั่วไปพอลิ เอทธิลีนความหนาแน่นต่ำมีค่าร้อยละความเป็นผลึกประมาณ 20-60 มีความหนาแน่นประมาณ 0.91-0.94 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร มีความเหนียว มีคุณสมบัติต้านทานแรงดึง การตกกระแทก และการฉีกขาดที่ดี ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซสูงมากแต่ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำไม่ดีนัก นอกจากนี้ยังสามารถทนต่อสารเคมี กรดและเบสได้เป็นอย่างดีอีกด้วย [1,19]

พอลิเอทธิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene : HDPE) เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นตรง เพราะพอลิเมอร์นี้มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงเกือบทั้งหมด (มีสาขาโซ่บ้างแต่น้อยมาก) ดังนั้นสายโซ่พอลิเมอร์นี้จึงมีความเป็นระเบียบมาก เป็นเหตุให้มีค่าความเป็นผลึกสูงมากคือประมาณร้อยละ 75-90 มีความหนาแน่นประมาณ 0.941-0.965 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร พอลิเอทธิลีนความหนาแน่นสูงมีความแข็ง ความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าพอลิเอทธิลีนความหนาแน่นต่ำ และสามารถทนต่อสารเคมี กรดและเบสได้ดีกว่า แต่ความต้านทานต่อการตกกระแทกและการฉีกขาดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซและค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าต่ำกว่าพอลิเอทธิลีนความหนาแน่นต่ำ และมีสีขุ่นกว่า [1,19]

พอลิโพรพิลีน (polypropylene : PP)

พอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงโดยตลอด มีโครงสร้างเป็นแบบไอโซแทกติก (isotactic) (หมู่ฟังก์ชันทุกหมู่อยู่ข้างเดียวกันของสายโซ่หลักของพอลิเมอร์) ถึงร้อยละ 95-98 มีค่าความเป็นผลึกสูง มีความหนาแน่นประมาณ 0.900 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และเนื่องจากค่าความเป็นผลึกสูงนี้เองเป็นเหตุให้พอลิเมอร์นี้มีสมบัติเชิงกลดีมาก ดังนั้นจึงมีความเหนียว ความแข็ง ความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าพอลิเอทธิลีน ทนต่อกรดและเบสได้ดี ทนต่ออุณหภูมิสูงและการขีดข่วนได้ดี มีความใสกว่าพอลิเอทธิลีน แต่ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซปานกลาง ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าต่ำ [1,19]

พอลิสไตรีน (polystyrene : PS)

พอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงแบบอะแทกติก (atactic) (หมู่ฟังก์ชันจัดสลับกันอย่างไม่เป็นระเบียบรอบสายโซ่หลักของพอลิเมอร์) ไม่มีความเป็นผลึกเลย มีความหนาแน่นประมาณ 1.05 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร พอลิเมอร์นี้มีสมบัติโปร่งแสงและใส ทนต่อกรดและเบสได้ดี ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซค่อนข้างสูง ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำสูง พอลิสไตรีนส่วนใหญ่มักถูกนำมาใช้ห่อผักกาดหอม นอกจากนี้พอลิสไตรีนที่อยู่ในรูป

ของโฟมซึ่งขึ้นรูปได้ง่ายและมีราคาถูกคือสไตโรโฟม (styrofoam) มักถูกใช้เป็นถาดที่นำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์อีกด้วย [1,19]

พอลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride : PVC)

พอลิไวนิลคลอไรด์เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นแบบอะแทกติก (atactic) (หมู่ฟังก์ชันจัดสลับกันอย่างไม่เป็นระเบียบรอบสายโซ่หลักของพอลิเมอร์) นอกจากนี้ยังพบว่ามีสาขาโซ่บ้าง ดังนั้นพอลิไวนิลคลอไรด์จึงมีความเป็นผลึกต่ำมาก มีความหนาแน่นประมาณ 1.39-1.43 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร คุณสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดนี้จะมีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของพลาสติไซเซอร์ที่ใส่ลงไป ดังนั้นฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ผ่านการพลาสติไซเซอร์แล้วมักมีความยืดหยุ่น มีความใส ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซค่อนข้างสูง ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำสูง จึงนิยมใช้เป็นฟิล์มยืดห่อเนื้อสดและผักและผลไม้สด [1,19]

คุณสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ทั้ง 5 ชนิดที่กล่าวข้างต้นได้ถูกรวบรวมไว้ในตารางที่ 2.11 และ 2.12

ตารางที่ 2.11 ค่าความหนาแน่น ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และค่าอุณหภูมิการหลอมตัวของพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ [1,19]

พอลิเมอร์	ความหนาแน่น (g cm^{-3})	อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) (^{o}C)	อุณหภูมิการหลอมตัว (T_m) (^{o}C)
LDPE	0.91-0.94	-25	98
HDPE	0.941-0.965	-125	137
PP	0.90-0.91	-18	176
PS	1.04-1.12	100	240
PVC	1.39-1.43	87	212

ตารางที่ 2.12 คุณสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ [2,3]

คุณสมบัติ	หน่วยที่ใช้	ชนิดฟิล์ม					รายการอ้างอิง
		LDPE	HDPE	PP	PS	PVC	
Tensile strength	kg cm^{-2}	100-150	200-500	400-600	600-850	300-1000	3
Approx. elongation until failure	%	200-600	20-400	150-600	10-70	10-500	3
Approx. heat shrink	%	20-50	-	50-70	40-70	50-70	3
อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ	$38^{o}C$,90%RH g $m^{-2}day^{-1}(25\mu)$	16-24	4.7	11	110-160	80-500	3
ความสามารถในการซึมผ่านของ O_2	cc-mil $m^{-2}atm^{-1}day^{-1}$	3900-13000	-	1300-6400	2600-7700	620-2248	2
ความสามารถในการซึมผ่านของ CO_2	cc-mil $m^{-2}atm^{-1}day^{-1}$	7000-77000	-	7700-21000	10000-26000	4263-8138	2
อัตราส่วนระหว่างค่าความสามารถในการซึมผ่านของ CO_2 ต่อ O_2	-	2.0-5.9	-	3.3-5.9	3.4-3.8	3.9-6.9	2
ความใส	-	ต่ำ-ปานกลาง	ต่ำ	ปานกลาง	ดีมาก	ปานกลาง-ดี	3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สดโดยการใช้บรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรนั้นได้มีการศึกษากันมาอย่างแพร่หลายในช่วงหลายปีที่ผ่านมา โดยงานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการทดลองเพื่อศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมในการทำบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด เช่น การหาความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดชนิดหนึ่ง ๆ การหาชนิดของฟิล์มพอลิเมอร์ การหาขนาดของบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม เป็นต้น นอกจากการทดลองแล้วยังได้มีผู้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สดเพื่อใช้ในการทำนายหาตัวแปรต่าง ๆ ที่เหมาะสมสำหรับผักและผลไม้สดชนิดหนึ่ง ๆ ทั้งนี้เพื่อช่วยในการยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สดให้คงคุณภาพ ความสด และรสชาติไว้ให้ยาวนานมากขึ้น

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการจัดหาและพัฒนาบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่เหมาะสมกับผักและผลไม้สดซึ่งได้แก่ ข้อมูลที่เกี่ยวกับอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดชนิดต่าง ๆ ข้อมูลเกี่ยวกับค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ และผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดและค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดชนิดต่าง ๆ รวมทั้งแบบจำลองอัตราการหายใจที่ใช้ในการทำนายอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนในการหายใจและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิด และการศึกษาเกี่ยวกับค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ รวมทั้งผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดและค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ด้วย

3.1 อัตราการหายใจของผักและผลไม้สด

ปี ค.ศ. 1991 Lee และคณะ [10] ได้เสนอแบบจำลองอัตราการหายใจในมุมมองทางชีวเคมีในรูปของจลน์ศาสตร์ของเอนไซม์ (enzyme kinetics) โดยมีแนวความคิดที่ว่าการหายใจของผักและผลไม้สดนั้นมีเอนไซม์เข้ามาเกี่ยวข้องในทุกขั้นตอนของกระบวนการหายใจ โดยสมมติว่าก๊าซออกซิเจนมีบทบาทเป็นตัวซับสเตรทในปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีบทบาทเป็นตัวยับยั้งในปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์ ดังนั้นพวกเขาจึงได้เสนอสมการการทำงานของเอนไซม์ของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ (Michaelis-Menten uncompetitive type equation) แทนอัตราการหายใจได้ดังนี้

$$r = \frac{V_m[O_2]}{K_m + [O_2](1+\frac{[CO_2]}{K_i})} \tag{3.1}$$

โดย r คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาการหายใจ

$[O_2]$ คือ ความเข้มข้นของซับสเตรต (substrate) ซึ่งก็คือ ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในกรณีของการหายใจ

V_m คือ ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาการหายใจที่สูงที่สุด

K_m คือ ค่าคงที่ไมเคิลลิสเมนเทน

$[CO_2]$ คือ ความเข้มข้นของตัวยับยั้ง (inhibitor) ซึ่งก็คือ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกรณีของการหายใจ

K_i คือ ค่าคงที่ของการยับยั้ง

Lee และคณะ [10] ได้ทำการทดลองวัดอัตราการหายใจของบรอคเคอลี่ที่อุณหภูมิ 24±0.5 องศาเซลเซียสเพื่อใช้ในการพิสูจน์แบบจำลองอัตราการหายใจที่ได้นำเสนอและยังได้นำผลการทดลองของนักวิจัยท่านอื่นมาใช้ในการพิสูจน์แบบจำลองอัตราการหายใจนี้ด้วย พบว่าแบบจำลองอัตราการหายใจที่ได้นำเสนอขึ้นนี้สามารถใช้แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการหายใจทั้งในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและอัตราของการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างใกล้เคียง และเมื่อรวมแบบจำลองนี้เข้ากับกฎของฟิก (Fick's law) สำหรับการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะได้ชุดสมการอนุพันธ์ที่เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบ MAP

ซึ่งเมื่อนำชุดสมการนี้มาคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลาที่เกิดขึ้นภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร พบว่าการคำนวณนี้สามารถให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองเป็นอย่างมาก

ในปี ค.ศ.1995 Fishman และคณะ [12] ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดโดยได้ทำการทดลองวัดอัตราการหายใจของพริกหยวกที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยสำหรับการทดลองนี้ใช้การวัดอัตราการหายใจแบบระบบปิดซึ่งได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 กลุ่ม โดยทั้ง 2 กลุ่มนี้จะใช้พริกหยวกที่มีน้ำหนักและขนาดเท่า ๆ กันแต่ต่างกันตรงที่กลุ่มที่หนึ่งจะมีการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ [$Ca(OH)_2$] ซึ่งเป็นตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงไปในภาชนะแก้วที่ใช้ในการทดลอง ในขณะที่กลุ่มที่สองจะไม่มีการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลงไป จากการทดลองนี้พบว่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนภายในภาชนะที่มีการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงไปนั้นมีค่าลดลงมากกว่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนภายในภาชนะที่ไม่มีการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลงไปในช่วงเวลาที่เท่ากันทั้ง ๆ ที่ก๊าซเริ่มต้นภายในภาชนะทั้งสองนั้นเป็นบรรยากาศปกติเหมือนกัน แสดงว่าพริกหยวกที่อยู่ในภาชนะที่มีการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงไปนั้นมีอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนในการหายใจมากกว่าพริกหยวกที่อยู่ในภาชนะที่ไม่มีการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลงไป ดังนั้นจากผลการทดลองนี้จึงแสดงให้เห็นว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลกระทบต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดโดยจะเป็นตัวยับยั้งในการเกิดปฏิกิริยาการหายใจของผักและผลไม้สด ดังนั้นจึงได้มีการนำแบบจำลองอัตราการหายใจที่ได้นำเสนอโดย Lee และคณะ [10] มาใช้แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดกับค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเมื่อนำแบบจำลองนี้มารวมเข้ากับสมการดุลมวลของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรแล้ว พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลาที่เกิดขึ้นภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรที่คำนวณได้สามารถให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองเป็นอย่างมากด้วย

ต่อมาในปี ค.ศ. 1996 Peppelenbos และคณะ [18] ได้มีแนวความคิดเหมือนกับ Lee และคณะ [10] ที่ว่าการหายใจของผักและผลไม้สดนั้นมีเอนไซม์เข้ามาเกี่ยวข้องในทุกขั้นตอนของกระบวนการหายใจ และจากการรวบรวมงานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้ทำการศึกษาถึงกระบวนการหายใจของผักและผลไม้สดยังพบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลกระทบโดยตรงต่อการทำงานของ

เอนไซม์ชนิดต่าง ๆ ในกระบวนการหายใจด้วย ดังนั้นจึงได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดของไมเคิลลิสเมนเทน (Michaelis-Menten equation) 4 ชนิด คือ ชนิดไม่มีการยับยั้ง (without inhibition type) ชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ (uncompetitive type) ชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ (noncompetitive type) และชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพททิทีฟ (competitive type) กับข้อมูลจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมาและข้อมูลจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดอีกหลายชนิด ได้แก่ แอปเปิ้ลพันธุ์โกลเดนดิลิเชียส (Golden Delicious) และพันธุ์เอลสตาร์ (Elstar) หน่อไม้ฝรั่ง บรอคเคอลี่ ถั่วงอก โดยได้ทำการศึกษาเฉพาะผลกระทบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่ออัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนเท่านั้น ซึ่งแบบจำลองอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนของผักและผลไม้สดของไมเคิลลิสเมนเทนแต่ละชนิดสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.2- 3.5 ดังนี้

แบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดไม่มีการยับยั้ง (Michaelis-Menten without inhibition type equation)

$$r_{O_2} = \frac{V_{m_{O_2}}[O_2]}{K_{m_{O_2}} + [O_2]} \tag{3.2}$$

โดย r_{O_2} คือ อัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน

$[O_2]$ คือ ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน

$V_{m_{O_2}}$ คือ ค่าอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนที่สูงที่สุด

$K_{m_{O_2}}$ คือ ค่าคงที่ไมเคิลลิสเมนเทนสำหรับการใช้ก๊าซออกซิเจน

แบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ (Michaelis-Menten uncompetitive type equation)

$$r_{O_2} = \frac{V_{m_{O_2}}[O_2]}{K_{m_{O_2}} + [O_2]\left(1 + \frac{[CO_2]}{K_{mu_{CO_2}}}\right)} \tag{3.3}$$

โดย $[CO_2]$ คือ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

$K_{mu_{CO_2}}$ คือ ค่าคงที่ไมเคิลลิสเมนเทนสำหรับการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่ออัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน

แบบจำลองนี้ได้เทียบว่าซับสเตรท (substrate) หรือสารที่ต้องการให้เข้าทำปฏิกิริยากับเอนไซม์คือก๊าซออกซิเจน ตัวยับยั้ง (inhibitor) หรือสารที่ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาของซับสเตรทคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยซับสเตรทหรือก๊าซออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการหายใจ ส่วนตัวยับยั้งหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะไม่ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์แต่จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบเชิงซ้อนของเอนไซม์กับก๊าซออกซิเจนเท่านั้น

แบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ (Michaelis-Menten noncompetitive type equation)

$$r_{O_2} = \frac{V_{m_{O_2}}[O_2]}{\left(K_{m_{O_2}} + [O_2]\right)\left(1 + \frac{[CO_2]}{K_{mn_{CO_2}}}\right)} \tag{3.4}$$

โดย $K_{mn_{CO_2}}$ คือ ค่าคงที่ไมเคิลลิสเมนเทนสำหรับการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่ออัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน

แบบจำลองนี้ได้เทียบว่าซับสเตรท (substrate) คือก๊าซออกซิเจน ตัวยับยั้ง (inhibitor) คือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยตัวยับยั้งหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับทั้งเอนไซม์และสารประกอบเชิงซ้อนของเอนไซม์กับก๊าซออกซิเจน

แบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพททิทีฟ (Michaelis-Menten competitive type equation)

$$r_{O_2} = \frac{V_{m_{O_2}}[O_2]}{[O_2] + K_{m_{O_2}}\left(1 + \frac{[CO_2]}{K_{mc_{CO_2}}}\right)} \tag{3.5}$$

โดย $K_{mc_{CO_2}}$ คือ ค่าคงที่ไมเคิลลิสเมนเทนสำหรับการยับยั้งแบบคอมเพททิทีฟของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่ออัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน

แบบจำลองนี้ได้เทียบว่าซับสเตรท (substrate) คือก๊าซออกซิเจน ตัวยับยั้ง (inhibitor) คือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยซับสเตรตหรือก๊าซออกซิเจนและตัวยับยั้งหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะแข่งขันกันทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการหายใจโดยตรง

Peppelenbos และคณะ [18] พบว่าแบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดไม่มีการยับยั้งให้ค่าความสัมพันธ์ของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนกับค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากการทดลองมากโดยเฉพาะในขณะที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความเข้มข้นสูง ๆ แสดงว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลกระทบโดยตรงต่อการทำงานของเอนไซม์ในกระบวนการหายใจ และเมื่อทำการเปรียบเทียบแบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งทั้ง 3 แบบกับผลการทดลองที่ได้ พบว่าแบบจำลองอัตราการหายใจแต่ละแบบให้ค่าความสัมพันธ์ของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนกับค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใกล้เคียงมากที่สุดกับผลการทดลองของผักและผลไม้สดต่างชนิดกันไป แต่เมื่อคิดโดยเฉลี่ยแล้วพบว่าแบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนที่ให้ค่าความสัมพันธ์ของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนกับค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองของผักและผลไม้สดทุกชนิดที่นำมาใช้ในการทดลองคือ แบบจำลองอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแบบไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ

ในปี ค.ศ. 1996 นี้ Makino และคณะ [30] ได้นำเสนอแบบจำลองอัตราการหายใจในแง่มุมของการดูดซับโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนลงบนแหล่งกัมมันต์ (active site) โดยมีโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวยับยั้ง ดังแสดงตามสมการที่ 3.6

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

โดย R_{O_2} คือ อัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนในการหายใจ

p_{O_2} คือ ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจน

p_{CO_2} คือ ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

a, b คือ ค่าพารามิเตอร์ของการหายใจ ซึ่งมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของผักและผลไม้สดและอุณหภูมิ โดยค่าพารามิเตอร์ทั้งสองนี้ไม่ขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

i คือ ค่าพารามิเตอร์ของการหายใจ ซึ่งมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของผักและผลไม้สดและอุณหภูมิ โดยค่าพารามิเตอร์นี้ขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ล้อมรอบผักและผลไม้สดชนิดนั้น ๆ

นอกจากนี้ Makino และคณะ [30] ยังได้ทำการทดลองวัดอัตราการหายใจกะหล่ำปลีหั่นฝอยที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส มะเขือเทศและบรอคเคอลี่ที่อุณหภูมิ 16 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการพิสูจน์แบบจำลองอัตราการหายใจที่ได้นำเสนอ พบว่าแบบจำลองอัตราการหายใจที่ได้นำเสนอขึ้นนี้สามารถใช้แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการหายใจกับค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างใกล้เคียง โดยค่าคงที่ต่าง ๆ ในสมการที่ 3.6 สำหรับผักและผลไม้สดแต่ละชนิดแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และเมื่อนำแบบจำลองอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดที่ได้นี้มาแทนลงในสมการดุลมวลของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรแล้ว พบว่าสมการดุลมวลสามารถคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลาที่เกิดขึ้นภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรได้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองเป็นอย่างมาก และเมื่อทำการเปรียบเทียบแบบจำลองอัตราการหายใจตามสมการที่ 3.6 กับแบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟตามสมการที่ 3.1 พบว่ารูปแบบของสมการมีลักษณะเหมือนกัน โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในสมการที่ 3.1 และ 3.6 สามารถเปรียบเทียบกันได้ดังสมการที่ 3.7-3.9 ดังนี้

$$a = \frac{1}{K_m p_T} * 100 \tag{3.7}$$

$$b = V_m \tag{3.8}$$

$$i = \frac{1}{K_i p_T} * 100 \tag{3.9}$$

โดย p_T คือ ความดันรวมของก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ มีค่าประมาณ 101.3 kPa

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่ต่าง ๆ ในสมการที่ 3.6 สำหรับผักและผลไม้สดแต่ละชนิด [30]

ชนิดของผักและผลไม้สด	อุณหภูมิ(^{o}C)	a (kPa^{-1})	b (mmol kg^{-1} hr^{-1})	i (kPa^{-1})
กะหล่ำปลีหั่นฝอย	15	4.20	2.57	0.0681
มะเขือเทศ	16	0.350	0.390	0.132
บรอคเคอลี่	16	0.548	6.47	0.0569

ต่อมาในปี พ.ศ. 2540 ประพาฬรัตน์ ทองเนาวรัตน์ [8] ได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองอัตราการหายใจที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของอัตราการหายใจกับค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของผักและผลไม้สดหลาย ๆ แบบกับข้อมูลจากงานวิจัยต่าง ๆ พบว่าแบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ (uncompetitive type) และชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ (noncompetitive type) มีความเหมาะสมกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบอื่น ๆ เนื่องจากโดยเฉลี่ยแล้วแบบจำลองอัตราการหายใจทั้งสองแบบนี้ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองของงานวิจัยต่าง ๆ ที่รวบรวมมามากที่สุด

จากงานวิจัยต่าง ๆ ที่กล่าวมานี้ จะเห็นได้ว่าแบบจำลองที่นิยมนำมาใช้ในการทำนายอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดชนิดต่าง ๆ และมีความแม่นยำในการทำนายมากที่สุดคือแบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ (uncompetitive type) และชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ (noncompetitive type)

สำหรับในส่วนของผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดนั้นได้มีการศึกษาในรูปแบบที่คล้าย ๆ กัน โดยในปี ค.ศ. 1994 Joles และคณะ [16] ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราการหายใจของราสเบอรี่ (*Rubus idaeus* L.) พันธุ์เฮอริเทจ (Heritage) ที่บรรจุในฟิล์ม LDPE โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 0,10 และ 20 องศาเซลเซียส ซึ่งได้กำหนดให้อัตราการหายใจเป็นไปตามแบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดไม่มีการยับยั้งตามสมการที่ 3.2 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการหายใจของราสเบอรี่มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อนำแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดไม่มีการยับยั้งมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น ค่า $V_{m_{O_2}}$ (ค่าอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนที่สูงที่สุด) มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า $K_{m_{O_2}}$ (ค่าคงที่ไมเคิลลิสเมนเทนสำหรับการใช้ก๊าซออกซิเจน) มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแต่ Joles และคณะ [16] เห็นว่าควรเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ

ต่อมาในปี ค.ศ. 1998 Smyth และคณะ [31] ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราการหายใจของผักกาดหอม (*Lactuca sativa* L.) พันธุ์ซาลิแนส (Salinas) ที่หั่นเป็นชิ้นเท่า ๆ กันที่บรรจุในฟิล์ม LDPE โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 5 และ 10 องศาเซลเซียส ซึ่งได้กำหนดให้อัตราการหายใจเป็นไปตามแบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดไม่มีการยับยั้งตามสมการที่ 3.2 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการหายใจของผักกาดหอมมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อนำ

แบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดไม่มีการยับยั้งมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น ค่า $V_{m_{O_2}}$ (ค่าอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนที่สูงที่สุด) มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า $K_{m_{O_2}}$ (ค่าคงที่ไมเคิลลิสเมนเทนสำหรับการใช้ก๊าซออกซิเจน) มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น

ต่อมาในปี ค.ศ. 1999 Lakakul และคณะ [11] ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราการหายใจของแอปเปิ้ล (*Malus x domestica Borkh*) ที่ฝานเป็นชิ้นบาง ๆ ที่บรรจุในฟิล์ม LDPE โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 0, 5, 10 และ 15 องศาเซลเซียส ซึ่งได้กำหนดให้อัตราการหายใจเป็นไปตามแบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดไม่มีการยับยั้งตามสมการที่ 3.2 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการหายใจของแอปเปิ้ลที่ฝานเป็นชิ้นบาง ๆ มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อนำแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดไม่มีการยับยั้งมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าค่า $V_{m_{O_2}}$ (ค่าอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนที่สูงที่สุด) และค่า $K_{m_{O_2}}$ (ค่าคงที่ไมเคิลลิสเมนเทนสำหรับการใช้ก๊าซออกซิเจน) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น

จากงานวิจัยทั้งสามที่กล่าวมานี้ จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น ค่า $V_{m_{O_2}}$ (ค่าอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนที่สูงที่สุด) มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า $K_{m_{O_2}}$ (ค่าคงที่ไมเคิลลิสเมนเทนสำหรับการใช้ก๊าซออกซิเจน) มีทั้งเพิ่มขึ้น คงที่และลดลง ซึ่งไม่มีแบบแผนที่แน่นอนแต่ก็ควรเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ

นอกจากนี้งานวิจัยทั้งสาม (11,16,31) ยังพบว่าการหายใจของราสเบอรี่ แอปเปิ้ลและผักกาดหอมจะเปลี่ยนจากการหายใจแบบใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจนเมื่อค่า R.Q. มีค่ามากกว่า 1.3 และค่า R.Q. นี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อการหายใจเป็นแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจน

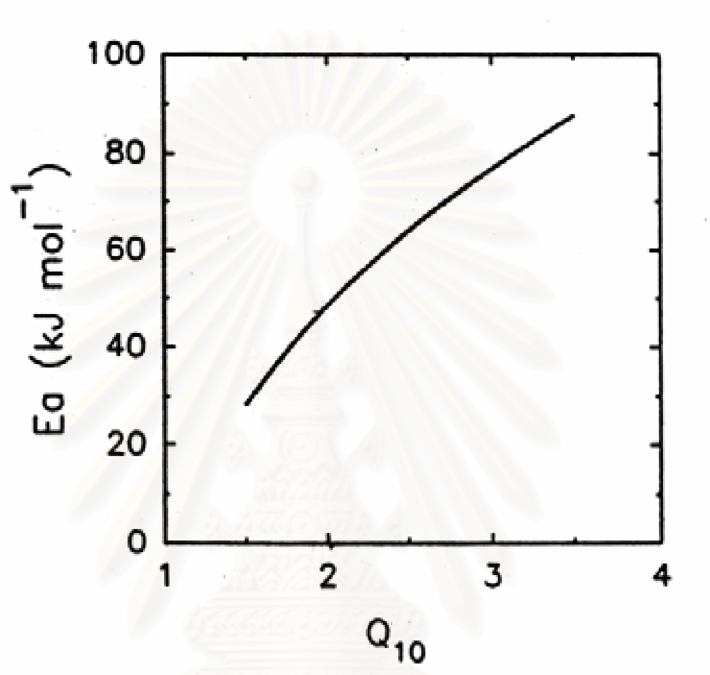
3.2 **ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์**

ในปี ค.ศ. 1993 Exama และคณะ [27] ได้ทำการวิจัยหาชนิดของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เหมาะสมในการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สดชนิดต่าง ๆ โดยทำการทดลองและรวบรวมข้อมูลค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ และอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิด พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่เหมาะสม

สำหรับผักและผลไม้สดที่มีอัตราการหายใจต่ำและปานกลางเท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่าไม่มีฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดใดที่ทำให้เกิดบรรยากาศดัดแปรที่มีความเข้มข้นของทั้งก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมภายในเวลาเดียวกันได้ แต่สามารถทำให้ได้ความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับก๊าซชนิดใดชนิดหนึ่งเท่านั้นซึ่งโดยส่วนมากจะพิจารณาจากความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่เหมาะสมก่อน ซึ่งการแก้ปัญหานี้สามารถทำได้โดยการเจาะรูขนาดเล็ก (perforation) บนฟิล์มพอลิเมอร์ และเมื่อศึกษาถึงผลของอุณหภูมิต่อค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเก็บรักษาผักและผลไม้สด จะทำให้เกิดการขาดแคลนก๊าซออกซิเจนและเกิดการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากเกินพอภายในบรรจุภัณฑ์จนอาจทำให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจนขึ้นได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีผลทำให้อัตราการหายใจของผักและผลไม้สดเพิ่มเร็วขึ้นมากกว่าการเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์มาก โดยจากการศึกษาค่า Q_{10} ของอัตราการหายใจของผักและผลไม้สด (Q_{10}^{R}) และของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ (Q_{10}^{P}) พบว่าค่า Q_{10}^{R} ของผักและผลไม้สดส่วนใหญ่มีค่าประมาณ 2-3 ในขณะที่ค่า Q_{10}^{P} ของฟิล์มพอลิเมอร์มีค่าประมาณ 1-2 ซึ่งจากผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า ในการเก็บรักษาผักและผลไม้สดจึงควรมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดระยะเวลาในการเก็บรักษา มิฉะนั้นผักและผลไม้สดอาจเกิดการเน่าเสียได้ง่าย แต่ในความเป็นจริงแล้วผักและผลไม้สดอาจมีการเคลื่อนย้ายบ้าง ทำให้การควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดระยะเวลาในการเก็บรักษานั้นเป็นไปได้ยาก

ต่อมาในปี ค.ศ. 1995 Cameron และคณะ [28] ได้ทำการศึกษาถึงชนิดของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าการเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่เพียงพอต่อค่าการเพิ่มขึ้นของอัตราการนำก๊าซออกซิเจนไปใช้ในการหายใจของผักและผลไม้สดหลายชนิด โดยทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 0-25 องศาเซลเซียส พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์มากกว่า 40 kJ mol^{-1} จะสามารถให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่เพียงพอต่ออัตราการนำก๊าซออกซิเจนไปใช้ในการหายใจของผักและผลไม้สดที่เพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 0-25 องศาเซลเซียสได้ แต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับชนิดของผักและผลไม้สดด้วย โดยถ้าเป็นผักและผลไม้สดที่มีค่า Q_{10}^{R} สูงมาก ๆ เช่น บรอคเคอลี่ (Q_{10}^{R} เท่ากับ 3.9) ฟิล์มพอลิเมอร์ที่นำมาใช้อาจต้องมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ถึง 100 kJ mol^{-1}

นอกจากนี้ Cameron และคณะ [28] ยังได้นำเสนอกราฟความสัมพันธ์โดยประมาณระหว่างค่า Q_{10}^{R} ของผักและผลไม้สดกับค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ช่วงอุณหภูมิ 0-30 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์โดยประมาณระหว่างค่า Q_{10}^{R} ของผักและผลไม้สดกับค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ช่วงอุณหภูมิ 0-30 องศาเซลเซียส [28]

ต่อมาในปี ค.ศ. 1996 Young และ Wooster [7] ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์กับอุณหภูมิพบว่าเป็นไปตามสมการอาร์รีเนียส นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลกระทบอื่น ๆ ที่มีผลต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซด้วย ทั้งนี้เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด โดยสามารถสรุปได้ว่าบรรจุภัณฑ์ที่มีความเหมาะสมสำหรับผักและผลไม้สดนั้น นอกจากจะคำนึงถึงปัจจัยในการเกิดบรรยากาศดัดแปรแล้ว สมบัติทางกายภาพของบรรจุภัณฑ์ก็เป็นสิ่งสำคัญ เช่น ความแข็งแรง ความใสของบรรจุภัณฑ์ ซึ่งถ้าพิจารณาโดยรวมแล้วพอลิเมอร์ที่เหมาะสมในการนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สดก็คือพอลิเมอร์พวกพอลิโอลิฟินส์ (polyolefins)

ในปี พ.ศ. 2540 มยุรี ภาคลำเจียก [4] ได้ทำการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับหลักการในการทำบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด พบว่าวัสดุที่นิยมใช้ในการทำบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรคือฟิล์มพอลิเมอร์ เนื่องจากมีหลายชนิดให้เลือกตามที่ต้องการ และคุณสมบัติที่สำคัญที่ต้องพิจารณาเป็นอันดับแรกในการเลือกใช้ฟิล์มพอลิเมอร์สำหรับการทำบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สดก็คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ซึ่งต้องมีความเหมาะสมกับชนิดของผักและผลไม้สดรวมทั้งสภาวะในการเก็บรักษาอีกด้วย ซึ่งสรุปโดยรวมแล้วฟิล์มพอลิเมอร์ที่เหมาะสมในการนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด ได้แก่ พอลิเอธทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิไวนิลคลอไรด์

สำหรับในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลองเพื่อวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์นั้น (gas permeability, P) ส่วนใหญ่ค่าที่วัดได้จากการทดลองจะอยู่ในรูปของอัตราการส่งผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ (gas transmission rate, GTR) (โดย GTR= $\frac{P}{x}$, x คือความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์) และยังได้มีการสร้างอุปกรณ์ขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองด้วย

ในปี ค.ศ. 1992 Moyls และคณะ [13] ได้ทำการทดลองวัดค่าอัตราการส่งผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเอธทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่มีความหนา 0.8 mil และ 1.5 mil (โดยที่ 1 mil = 0.001 นิ้ว) ในช่วงอุณหภูมิ 0-42 องศาเซลเซียส โดยได้สร้างอุปกรณ์ขึ้นเพื่อใช้ในการวัดอัตราการส่งผ่านของก๊าซทั้ง 2 ชนิดผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ การทดลองเริ่มจากการพ่นก๊าซผสมที่มีสัดส่วนของก๊าซออกซิเจนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างไปจากบรรยากาศปกติเข้าไปภายในอุปกรณ์ก่อนเพื่อให้เกิดความแตกต่างระหว่างความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ภายในอุปกรณ์กับบรรยากาศภายนอก จากนั้นทำการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในอุปกรณ์โดยใช้เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (gas chromatography) และเมื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณหาอัตราการส่งผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ พบว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนี้สามารถวัดค่าอัตราการส่งผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ได้ทุกช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลอง โดยค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากเครื่องมือที่ใช้วัดค่าอัตราการส่งผ่านของก๊าซที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าอัตราการส่งผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม LDPE มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius equation) และพบว่าเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น ค่าอัตราการส่งผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ลดลง ในขณะที่ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของอัตราการส่งผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ซึ่งมีความหนาต่างกันที่คำนวณได้กลับมีค่าใกล้เคียงกันมาก

ในปี ค.ศ. 1995 Christie และคณะ [15] ได้ทำการทดลองวัดค่าอัตราการส่งผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม LDPE ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 และที่อุณหภูมิ 1.5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100 โดยสร้างอุปกรณ์ขึ้นเพื่อใช้ในการทดลอง พบว่าอัตราการส่งผ่านของก๊าซที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากเครื่องมือที่ใช้วัดอัตราการส่งผ่านของก๊าซที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้ยังได้นำฟิล์ม LDPE ที่รู้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว (โดยการคำนวณจากอัตราการส่งผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่วัดได้คูณด้วยความหนาของฟิล์มที่ใช้ในการทดลอง) มาใช้ในการเก็บบรอคเคอลี่พันธุ์มาราธอนที่สภาวะเดียวกับที่ทำการวัดอัตราการส่งผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE โดยได้แทนค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่วัดได้จากการทดลองลงไปในสมการดุลมวลของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายในบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร พบว่าอัตราการหายใจที่คำนวณได้จากสมการดุลมวลนี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าอัตราการหายใจที่วัดได้จากการทดลองเป็นอย่างมากตั้งแต่เวลาเริ่มต้นจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะคงตัว

ต่อมาในปี ค.ศ. 1998 Moyls และคณะ [14] ได้ทำงานวิจัยต่อเนื่องจากงานวิจัยของพวกเขาในปี ค.ศ. 1992 [13] โดยการนำอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการวัดอัตราการส่งผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์มาใช้ในการทดลองเพื่อหาค่าอัตราการส่งผ่านของก๊าซทั้ง 2 ชนิดผ่านฟิล์มพอลิเอธทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่มีความหนาแตกต่างกันจากผู้ผลิต 3 บริษัทโดยศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 0 - 23.2 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ค่าอัตราการส่งผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE ของผู้ผลิตแต่ละบริษัทมีค่าแตกต่างกันมากถึงแม้ว่าจะมีความหนาใกล้เคียงกันก็ตาม แสดงว่าธรรมชาติของพอลิเมอร์เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อค่าอัตราการส่งผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์มากกว่าความหนาของฟิล์ม และเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น อัตราการส่งผ่านของก๊าซทั้งสองจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่อัตราส่วนระหว่างอัตราการส่งผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อก๊าซออกซิเจนกลับมีค่าลดลง และยังพบว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์

ของอัตราการส่งผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์ม LDPE ที่คำนวณได้โดยอาศัยสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius equation) มีค่ามากกว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของอัตราการส่งผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการส่งผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์มากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การทดลอง

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการศึกษาถึงอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดและส่วนของการศึกษาถึงค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ของการทดลองในแต่ละส่วนมีดังนี้

4.1 อัตราการหายใจของผักและผลไม้สด

4.1.1 ประเภทของผักและผลไม้สดที่ใช้ในการทดลอง

ผักและผลไม้สดที่ใช้ในการทดลองมี 2 ประเภท (รวม 4 ชนิด) ได้แก่

ก. ผักและผลไม้สดประเภทไคลแมคเทอริก 2 ชนิด ได้แก่

1. มะเขือเทศ (*Lycopersicon esculentum* Mill) รูปทรงท้อ
2. กล้วยน้ำว้า (*Musa acuminata* balbisiana) พันธุ์กาบขาว

ข. ผักและผลไม้สดประเภทนอนไคลแมคเทอริก 2 ชนิด ได้แก่

1. ส้มเขียวหวาน (*Citrus reticulata* Blanco) พันธุ์ผิวเรียบ
2. พริกชี้ฟ้า (*Copsicum annuum* var acuminatum)

(รายละเอียดเกี่ยวกับผักและผลไม้สดแต่ละชนิดแสดงไว้ในภาคผนวก ก)

4.1.2 การทดลอง

ทำการทดลองเพื่อวัดอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดทั้ง 4 ชนิดที่อุณหภูมิ 5±1, 11±1 และ 29±1 องศาเซลเซียส โดยใช้การวัดอัตราการหายใจแบบระบบปิด ซึ่งมีรายละเอียดของการทดลองดังนี้

4.1.2.1 การทำ calibration curve แสดงความสัมพันธ์กันระหว่างค่าพื้นที่พีคกับจำนวนโมลของก๊าซออกซิเจน ก๊าซไนโตรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

นำก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ปริมาตรต่าง ๆ กันมาฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (gas chromatography) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ได้ผลออกมาเป็นพื้นที่พีคที่แตกต่างกัน (โดยในการทดลองนี้ใช้เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟีผลิต

โดยบริษัท Shimudzu รุ่น GC-8A ของศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยรายละเอียดต่าง ๆ ของเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี แสดงไว้ในภาคผนวก ข) จากนั้นนำค่าพื้นที่พีคที่ได้ของก๊าซแต่ละชนิดมาพลอตกับค่าจำนวนโมลของก๊าซที่ได้จากการคำนวณโดยตั้งสมมติฐานว่าก๊าซทั้งสามชนิดมีพฤติกรรมเป็นไปตามกฎของก๊าซอุดมคติ (Ideal gas law) จะได้กราฟที่แสดงความสัมพันธ์กันระหว่างค่าพื้นที่พีคกับจำนวนโมลของก๊าซออกซิเจน ก๊าซไนโตรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามลำดับ (รายละเอียดต่าง ๆ ของ calibration curve แสดงไว้ในภาคผนวก ค)

4.1.2.2 การเตรียมขวดทดลองวัดอัตราการหายใจแบบระบบปิด

นำผักหรือผลไม้สดที่จะใช้ในการทดลองซึ่งมีลักษณะภายนอก ได้แก่ สี ผิวสัมผัส รูปร่าง และขนาดที่เท่า ๆ กัน (โดยผักและผลไม้สดทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองนี้ซื้อมาจากท๊อปส์ซูเปอร์มาร์เก็ต) มาล้างทำความสะอาด เช็ดให้แห้ง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักให้ได้ตามที่ต้องการ แล้วนำไปไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิตามที่จะทำการทดลอง โดยถ้าเป็นอุณหภูมิในช่วง 5±1 หรือ 11±1 องศาเซลเซียสให้เก็บไว้ในตู้เย็นไม่ต่ำกว่า 12 ชั่วโมง แต่ถ้าเป็นอุณหภูมิที่ 29±1 องศาเซลเซียสให้วางไว้ที่บรรยากาศปกติ หลังจากนั้นนำมาบรรจุลงในขวดที่มีปริมาตร 1 ลิตรโดยภายในขวดจะใส่ซิลิกาเจล (silica gel) ไว้ประมาณ 10 กรัม (เพื่อให้บรรยากาศภายในขวดมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ) แล้วปิดฝาขวดให้สนิท (บริเวณฝาขวดจะมีการติด septum ไว้) ดังแสดงในรูปที่ 4.2

4.1.2.3 การวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ

นำขวดบรรจุผักหรือผลไม้สดที่เตรียมไว้ไปวางไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิตามที่จะทำการทดลอง โดยถ้าเป็นอุณหภูมิในช่วง 5±1 หรือ 11±1 องศาเซลเซียสให้เก็บไว้ในตู้เย็น แต่ถ้าเป็นอุณหภูมิที่ 29±1 องศาเซลเซียสให้วางไว้ที่บรรยากาศปกติ จากนั้นทำการวัดหาค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่ใช้ในการทดลองที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (gas chromatography) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยทำการเก็บตัวอย่างก๊าซจากทาง septum จำนวน 0.3 มิลลิลิตร แล้วฉีดตัวอย่างเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี ค่าที่ได้อยู่ในรูปพื้นที่พีค (รายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ข)

รูปที่ 4.1 เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas chromatography) ที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 4.2 ขวดบรรจุผักและผลไม้สดที่ใช้ในการทดลอง

4.1.3 การคำนวณ

4.1.3.1 การคำนวณหาร้อยละความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

นำค่าพื้นที่พีคที่เวลาใด ๆ ที่ได้จากข้อ 4.1.2.3 มาหาค่าจำนวนโมลของก๊าซออกซิเจน ก๊าซไนโตรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จาก calibration curve ของก๊าซออกซิเจน ก๊าซไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากข้อ 4.1.2.1 (ดังแสดงในภาคผนวก ค) จากนั้นทำการคำนวณหาร้อยละความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง โดยในการทดลองนี้ได้สมมติให้อากาศภายในขวดประกอบด้วยก๊าซเพียง 3 ชนิดเท่านั้นคือก๊าซออกซิเจน ก๊าซไนโตรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นในการคำนวณหาร้อยละความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงหาได้จากสมการที่ 4.1 และ 4.2 ดังนี้

$$\text{ร้อยละความเข้มข้นของ } O_2 = \frac{\text{จำนวนโมล}O_2 * 100}{(\text{จำนวนโมล}O_2+\text{จำนวนโมล}CO_2+\text{จำนวนโมล}N_2)} \quad (4.1)$$

$$\text{ร้อยละความเข้มข้นของ } CO_2 = \frac{\text{จำนวนโมล}CO_2 * 100}{(\text{จำนวนโมล}O_2+\text{จำนวนโมล}CO_2+\text{จำนวนโมล}N_2)} \quad (4.2)$$

4.1.3.2 การคำนวณหาอัตราการหายใจของผักและผลไม้สด

นำร้อยละความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองจากข้อ 4.1.3.1 มาพลอตกับเวลาจะได้กราฟที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของผักและผลไม้สดแต่ละชนิด ทำการฟิตข้อมูลผลการทดลองนี้ด้วยสมการแบบต่าง ๆ ได้แก่ สมการเส้นตรง สมการโพลิโนเมียลอันดับ 2 และสมการเอกซ์โพเนนเชียล เพื่อให้ได้สมการที่ดีที่สุด ซึ่งสมการที่ได้นี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลาของผักและผลไม้สดแต่ละชนิด ทั้งนี้เพื่อนำสมการดังกล่าวมาใช้แทนค่าร้อยละความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ได้จริงจากการทดลอง โดยแทนค่าช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองลงในสมการจากนั้นนำสมการแต่ละสมการที่ได้มาคำนวณหาอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิดโดยหาอนุพันธ์อันดับหนึ่งของแต่ละสมการเทียบกับเวลา ซึ่งสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งที่ได้นี้จะเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นแทนค่า

เวลาที่ใช้ในการทดลองลงในสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง และคูณด้วยปริมาตรอากาศภายในขวด (ml) หารด้วยน้ำหนักของผักหรือผลไม้สดชนิดนั้น (kg) จะได้อัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิด ซึ่งอยู่ในรูปของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทั้งสองรูปแบบนี้มีหน่วยที่เหมือนกันคือ ml $kg^{-1}hr^{-1}$

4.1.4 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองอัตราการหายใจ

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำแบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทน (ซึ่งเป็นแบบจำลองอัตราการหายใจที่ใช้ในงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมาดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.1) มาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิดที่คำนวณได้จากข้อ 4.1.3.2 โดยแบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนที่นำมาวิเคราะห์นี้มี 4 แบบ คือ

1. แบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดไม่มีการยับยั้ง (Michaelis-Menten without inhibition type equation)

$$r = \frac{V_m[O_2]}{K_m + [O_2]} \tag{4.3}$$

2. แบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ (Michaelis-Menten uncompetitive type equation)

$$r = \frac{V_m[O_2]}{K_m + [O_2]\left(1 + \frac{[CO_2]}{K_{mu}}\right)} \tag{4.4}$$

3. แบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ (Michaelis-Menten noncompetitive type equation)

$$r = \frac{V_m[O_2]}{(K_m + [O_2])\left(1 + \frac{[CO_2]}{K_{mn}}\right)} \tag{4.5}$$

4. แบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพททิทีฟ (Michaelis-Menten competitive type equation)

$$r = \frac{V_m[O_2]}{[O_2] + K_m\left(1 + \frac{[CO_2]}{K_{mc}}\right)} \tag{4.6}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการนำแบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนทั้ง 4 แบบมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิดที่คำนวณได้จากหัวข้อ 4.1.3.2 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแต่ละแบบจำลองนั้น งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Sigma Plot รุ่น 1.02 ของบริษัท Jendel Corporation ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการคำนวณและสร้างกราฟ โดยโปรแกรม Sigma Plot นี้ใช้อัลกอริธึม (algorithm) ของ Marquardt-Levenberg ในการฟิตสมการกับข้อมูลเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งวิธี Marquardt-Levenberg นี้จะทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่ให้ผลรวมของความแตกต่างระหว่างค่าที่นำมาฟิตกับค่าที่คำนวณได้ของตัวแปรตามยกกำลังสองมีค่าต่ำที่สุด (least square method) และเนื่องจากใช้อัลกอริธึม (algorithm) ของ Marquardt-Levenberg โปรแกรมนี้จึงสามารถทำการฟิตสมการได้ทั้งในรูปสมการเชิงเส้นและรูปสมการไม่เชิงเส้น นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังมีการเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองแต่ละแบบกับข้อมูลอัตราการหายใจโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$R^2 = 1 - \frac{\sum\left(Y_i - \hat{Y}_i\right)^2}{\sum Y_i^2 - \frac{\left(\sum Y_i\right)^2}{n}} \tag{4.7}$$

โดย Y_i คือ ค่าข้อมูลที่ i ที่นำมาฟิต

$\hat{Y}_i$ คือ ค่าของตัวแปรตามที่ i ที่ได้จากการฟิตสมการ

n คือ จำนวนข้อมูลที่นำมาฟิต

ค่า R^2 นี้เป็นเครื่องวัดความใกล้ชิดระหว่างเส้นการถดถอยกับค่าที่นำมาฟิต โดยถ้าค่า R^2 มีค่าสูงแสดงว่าค่าที่นำมาฟิตจะอยู่ใกล้ชิดกับเส้นถดถอย แต่ถ้าค่า R^2 มีค่าต่ำแสดงว่าค่าที่นำมาฟิตอยู่ห่างจากเส้นถดถอย เช่น ถ้าค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าค่าที่นำมาฟิตทุกค่าอยู่บนเส้นการถดถอย แต่ถ้าค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าค่าที่นำมาฟิตกระจายห่างจากเส้นการถดถอยมากจนไม่สามารถหาแนวโน้มที่ถูกต้องได้

4.2 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

4.2.1 ชนิดของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง

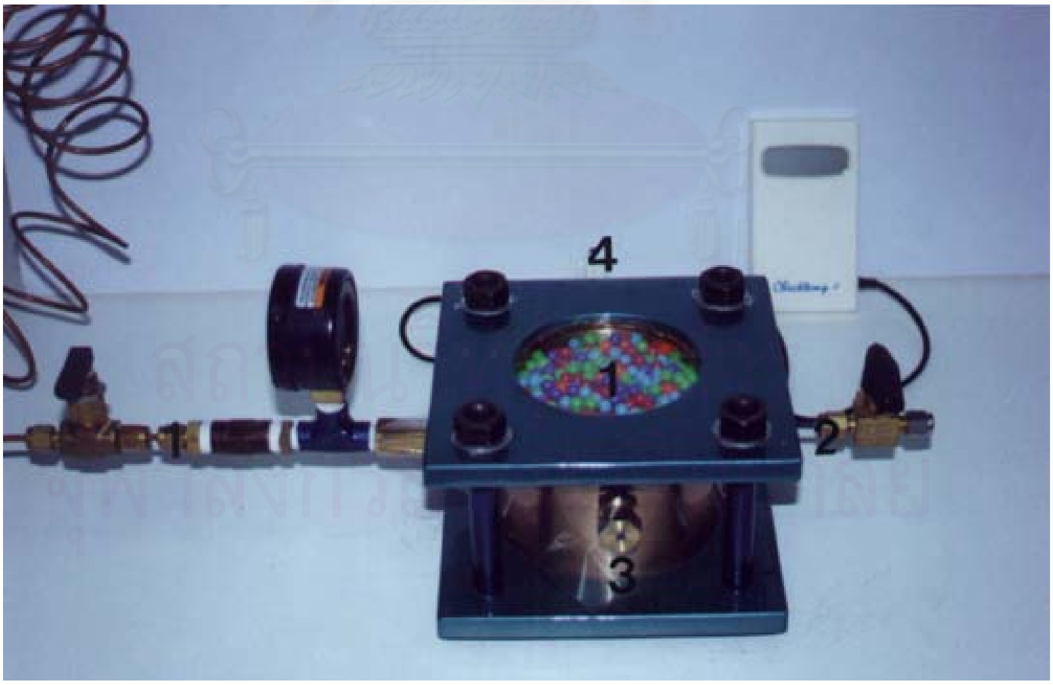
ฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิด ได้แก่

1. พอลิเอทธิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) ความหนาแน่น 0.92 g cm^{-3} ความหนา 33 และ 45 ไมครอน

2. พอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) ความหนาแน่น 0.90 g cm^{-3} ความหนา 25 และ 50 ไมครอน

(ฟิล์มทั้ง 2 ชนิดนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท สตรองแพ็ค จำกัด (มหาชน))

ในการหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์นี้ใช้วิธีการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นซึ่งมีปริมาตรคงที่ โดยอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนี้ได้เลียนแบบมาจากอุปกรณ์ของ Moyls และคณะ [13] ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดลอง
หาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนี้มีปริมาตรอากาศภายใน chamber 29.91 ลูกบาศก์เซนติเมตร (ซึ่งอันที่จริงอุปกรณ์นี้มีปริมาตรอากาศภายใน chamber 303.51 ลูกบาศก์เซนติเมตร แต่เนื่องจากปริมาตรนี้มากเกินไปจนทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซภายใน chamber เกิดขึ้นน้อยมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดปริมาตรอากาศภายใน chamber ลงโดยใส่ลูกบอลพลาสติกตันที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.65 เซนติเมตรเพิ่มลงไปจำนวนหนึ่งซึ่งมีปริมาตรโดยรวม (โดยใช้การแทนที่น้ำ) เท่ากับ 273.60 ลูกบาศก์เซนติเมตร) และมีพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศภายนอก 50.27 ตารางเซนติเมตร ส่วนล่างของอุปกรณ์ประกอบด้วยท่อ 4 ท่อโดยแต่ละท่อได้ติดตั้งอุปกรณ์ที่แตกต่างกันดังนี้

ท่อที่ 1 ติดตั้งวาล์วปิดเปิดและเครื่องวัดความดัน

ท่อที่ 2 ติดตั้งวาล์วปิดเปิด

ท่อที่ 3 ติด septum

ท่อที่ 4 ติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิ (thermocouple) (รุ่น checktemp 1 ผลิตโดยบริษัท Hanna Instruments)

สำหรับรายละเอียดในการทดลองและขั้นตอนในการคำนวณค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์สามารถอธิบายได้ดังนี้

4.2.2 การทดลอง

ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 5±1, 11±1 และ 29±1 องศาเซลเซียส โดยทำการวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ ภายในอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นซึ่งมีรายละเอียดของการทดลองดังนี้

4.2.2.1 การเตรียมอุปกรณ์เพื่อใช้ในการทดลอง

นำฟิล์มพอลิเมอร์ที่จะใช้ในการทดลองมาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10x10 ตารางเซนติเมตรแล้วนำมาวางบริเวณตำแหน่งที่ 1 บนส่วนล่างของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น จากนั้นนำส่วนบนของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาวางไว้ด้านบนส่วนล่างแล้วขันน๊อตทั้ง 4 ตัวให้แน่น

4.2.2.2 การวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ

นำอุปกรณ์จากข้อ 4.2.2.1 มาต่อเข้ากับถังก๊าซผสมโดยต่อท่อก๊าซกับวาล์วที่ 1 เปิดวาล์วที่ 1 และ 2 เพื่อให้ก๊าซผสมจากถังก๊าซผสมผ่านเข้ามาภายในอุปกรณ์ประมาณ 2-3 นาทีแล้วปิดวาล์วทั้งสองพร้อมกัน (ก๊าซผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นก๊าซผสมที่มีอัตราส่วนของก๊าซออกซิเจนร้อยละ 10 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 10 และก๊าซไนโตรเจนร้อยละ 80 โดยประมาณ ซึ่งได้จัดซื้อมาจากบริษัทไทยอินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด (มหาชน)) จากนั้นนำอุปกรณ์นี้ไปวางไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิตามที่จะทำการทดลอง โดยถ้าเป็นอุณหภูมิในช่วง 5±1 หรือ 11±1 องศาเซลเซียสให้เก็บไว้ในตู้เย็นไม่ต่ำกว่า 12 ชั่วโมง โดยมีการใส่ซิลิกาเจล 100 กรัมไว้ภายในตู้เย็นด้วยจึงเป็นผลให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศภายในตู้เย็นมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 50-60 แต่ถ้าเป็นอุณหภูมิในช่วง 29±1 องศาเซลเซียสให้วางไว้ที่บรรยากาศปกติซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วงร้อยละ 65-75 จากนั้นทำการวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (gas chromatography) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยทำการเก็บตัวอย่างก๊าซจากทาง septum จำนวน 0.3 มิลลิลิตร แล้วฉีดตัวอย่างเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี ค่าที่ได้อยู่ในรูปพื้นที่พีค (โดยรายละเอียดต่าง ๆ ของเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟีแสดงไว้ในภาคผนวก ข)

4.2.3 การคำนวณ

4.2.3.1 การคำนวณหาค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ

นำค่าพื้นที่พีคที่เวลาต่าง ๆ ที่ได้จากข้อ 4.2.2.2 มาคำนวณหาค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ โดยปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ 4.1.3.1

4.2.3.2 การคำนวณหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง

จากที่กล่าวมาแล้วว่าการหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์นี้ใช้วิธีการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในอุปกรณ์ที่มีปริมาตรคงที่ ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.21 โดยไม่คำนึงถึงพจน์ $\frac{1}{\alpha}\frac{T_0}{T}$ (dimensionless number) จะได้สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองดังสมการที่ 4.8

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{P}{x}\frac{A}{V}(p - p_A) \tag{4.8}$$

โดย P คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ ($cm^2\,s^{-1}$)

x คือ ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ (cm)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของฟิล์มพอลิเมอร์ (cm^2)

V คือ ปริมาตรของอากาศภายใน chamber ของอุปกรณ์ (cm^3)

p คือ ความดันย่อยของก๊าซภายในอุปกรณ์ (atm)

p_A คือ ความดันย่อยของก๊าซในบรรยากาศ (atm)

และจากการกำหนดให้ [13,21]

อัตราการส่งผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม ($cm^3\,cm^{-2}\,s^{-1}$) $= \dfrac{P}{x}$ (4.9)

(gas transmisstion rate (GTR))

ดังนั้น จากสมการที่ 4.8 และ 4.9 จะได้ว่า

$$\frac{dp}{dt} = -GTR\frac{A}{V}(p - p_A) \tag{4.10}$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 4.10 โดยกำหนดให้

$(p - p_A) = \Delta p$ ที่ t ใด ๆ

$(p^0 - p_A) = \Delta p^0$ ที่ t เริ่มต้น (t = 0)

โดย p^0 คือ ความดันย่อยของก๊าซภายในอุปกรณ์ที่เวลาเริ่มต้น (atm)

ดังนั้นจากสมการที่ 4.10 จะได้ว่า

$$\ln\left(\frac{\Delta p}{\Delta p^0}\right) = -GTR\frac{A}{V}t \tag{4.11}$$

ทำการพลอตกราฟระหว่างค่า $\ln\left(\frac{\Delta p}{\Delta p^0}\right)$ กับเวลา (t) ค่าความชัน (slope) ที่ได้จากกราฟนี้คือค่า $-GTR\frac{A}{V}$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$GTR = \frac{-slopeV}{A} \tag{4.12}$$

จากสมการที่ 4.9 และค่า GTR ที่ได้จากสมการที่ 4.12 จะสามารถหาค่า P ได้ดังสมการที่ 4.13

$$P(cm^2s^{-1}) = GTR(cm^3cm^{-2}s^{-1})x(cm) \quad (4.13)$$

ดังนั้นในการคำนวณหาค่า GTR ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ ที่ได้จากข้อ 4.2.3.1 จึงถูกนำมาใช้ในคำนวณหาค่าความดันย่อยของก๊าซแต่ละชนิดที่เปลี่ยนแปลงไปภายในอุปกรณ์ได้ดังสมการที่ 4.14 และ 4.15 โดยตั้งสมมติฐานว่าก๊าซทั้งสองชนิดมีพฤติกรรมเป็นไปตามกฎของก๊าซอุดมคติ (ideal gas law)

$$p_{O_2} = \frac{\%O_2}{100} p_T \quad (4.14)$$

$$p_{CO_2} = \frac{\%CO_2}{100} p_T \quad (4.15)$$

โดย p_T คือ ความดันบรรยากาศ 1 atm

นำค่า p_{O_2} และ p_{CO_2} ที่ได้ไปคำนวณหาค่า Δp ของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลา (t) ใด ๆ โดยกำหนดให้ p_A ของก๊าซออกซิเจนมีค่าเท่ากับ 0.21 atm และ p_A ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 0.0003 atm แล้วทำการพลอตกราฟระหว่างค่า $\ln\left(\frac{\Delta p}{\Delta p^0}\right)$ ของก๊าซทั้ง 2 ชนิดที่ได้กับเวลา (t) ตามสมการที่ 4.11 ค่าความชันที่ได้จากกราฟนี้ คือค่า $-GTR\frac{A}{V}$ จากนั้นจึงสามารถหาค่า GTR ของก๊าซทั้ง 2 ชนิดได้จากสมการที่ 4.12 โดยค่า V = 29.91 cm^3 ค่า A = 50.27 cm^2 และสามารถนำค่า GTR ที่ได้นี้นำมาคำนวณหาค่า P ของก๊าซทั้ง 2 ชนิดได้จากสมการที่ 4.13

4.2.3.3 การคำนวณหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง

นำค่า P ของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่ได้จากหัวข้อ 4.2.3.2 มาคำนวณหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ตามสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius equation) (สมการที่ 2.24) โดยทำการพลอตระหว่างค่าลอกาลิธึมธรรมชาติ (ln) ของค่า P ของก๊าซทั้ง 2 ชนิดกับค่าส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์ (1/T) หาค่าความชัน (slope) ของกราฟที่ได้

จากการฟิตด้วยสมการเส้นตรง ซึ่งค่าความชัน (slope) ที่ได้เป็นค่า $\left(\frac{-E_p}{R}\right)$ ดังนั้นการคำนวณหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มแต่ละชนิดจึงสามารถทำได้ดังสมการที่ 4.16

$$E_p = -(slope)R \tag{4.16}$$

ในที่นี้กำหนดให้ค่า R มีค่าเท่ากับ 8.3144*10^{-3} kJ mol^{-1} K^{-1} ดังนั้นค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มแต่ละชนิดที่ได้จึงมีหน่วยเป็น kJ mol^{-1}

นอกจากนี้แล้ว ค่าตัดแกน Y (Y intercept) ที่อ่านได้จากกราฟที่พลอตระหว่างค่าลอกาลิธึมธรรมชาติของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์กับค่าส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์ (1/T) นี้ยังสามารถนำมาคำนวณค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิอนันต์ (P_0) ได้ตามสมการที่ 4.17 โดยค่าที่ได้มีหน่วยเป็น cm^2 s^{-1}

$$P_0 = e^{Y\,\mathrm{int}\,ercept} \tag{4.17}$$

4.2.3.4 นำค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ (E_p) และค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิอนันต์ (P_0) ที่คำนวณได้จากหัวข้อที่ 4.2.3.3 มาคำนวณหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยอาศัยความสัมพันธ์ของอาร์รีเนียส (Arrhenius equation) (สมการที่ 2.24) ซึ่งค่าที่ได้มีหน่วยเป็น cm^2 s^{-1} ทั้งนี้เพื่อนำค่าที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ได้จากแหล่งอื่น ๆ ดังแสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.2.4

4.2.4 การตรวจสอบค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ได้จากการทดลอง

ทำการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่คำนวณได้จากข้อ 4.2.3.4 กับค่าความสามารถในการซึม

ผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่รวบรวมได้จากแหล่งอื่น ๆ ดังนี้

ก. ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองที่ได้จากบริษัทที่อนุเคราะห์ฟิล์ม

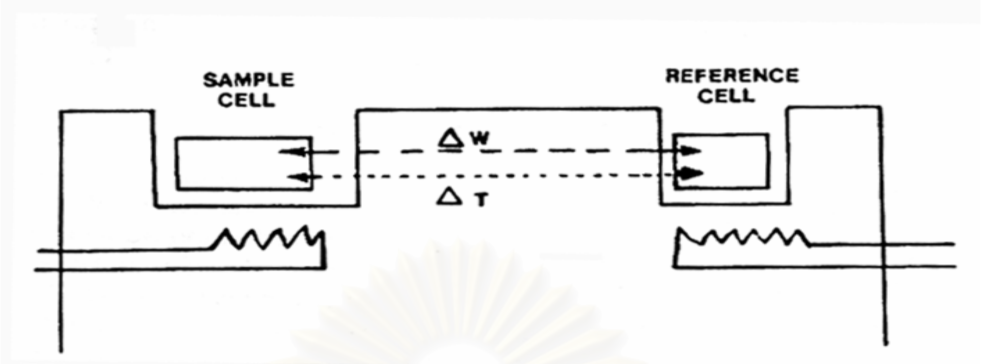
ข. ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองที่ได้จากการนำฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองไปวัดด้วยเครื่อง oxygen permeability analyzer รุ่น 8500 ของบริษัท Illinois Instruments ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยได้รับความอนุเคราะห์จากคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (รายละเอียดของเครื่อง oxygen permeability analyzer แสดงไว้ในภาคผนวก ง)

รูปที่ 4.4 เครื่อง oxygen permeability analyzer

ค. ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองที่ได้จากการประมาณค่าโดยการคำนวณตามสมการในหัวข้อที่ 2.2.3 โดยในการคำนวณหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์นี้จะใช้การคำนวณจากค่าความสามารถในการละลายและค่าความสามารถในการแพร่ของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.7 ซึ่งใน

การคำนวณหาค่าความสามารถในการละลายและค่าความสามารถในการแพร่ของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้จะต้องใช้สมการที่ใช้ในการคำนวณสำหรับพอลิเมอร์อสัณฐานที่อยู่ในสถานะคล้ายยาง (rubbery state) เนื่องจากฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองคือ LDPE และ PP ต่างก็มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) น้อยกว่า 298 K [1,19,20,36] และเนื่องจาก LDPE และ PP เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (semi-crystalline polymers) [1,19,20,36] ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาค่าความสามารถในการละลายและค่าความสามารถในการแพร่ของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์กึ่งผลึกจากสมการที่ 2.42 และ 2.52 ตามลำดับ(ขั้นตอนในการคำนวณแสดงในภาคผนวก ซ) จากนั้นจึงนำค่าที่ได้จากสมการที่ 2.42 และ 2.52 มาคำนวณหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์จากสมการที่ 2.55 ก็จะได้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม LDPE และ PP ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจากวิธีการคำนวณทั้งหมดที่กล่าวมานี้ จะเห็นได้ว่ามีสมการที่เข้ามาเกี่ยวข้องเป็นจำนวนมาก ซึ่งในแต่ละสมการก็จะมีตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องนำมาใช้ในการคำนวณด้วย ซึ่งตัวแปรที่จำเป็นต้องรู้ค่าเพื่อใช้ในการคำนวณคือ ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) และค่าระดับของความเป็นผลึก (degree of crystallinity) ของฟิล์ม LDPE และ PP ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี differential scanning calorimetry (DSC)

Differential scanning calorimetry (DSC) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการหาอุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ค่าระดับของความเป็นผลึก (degree of crystallinity) และค่าความร้อนในการหลอมเหลว (heat of fusion) ของพอลิเมอร์ โดยการทดสอบด้วยวิธีนี้อาศัยหลักการในการดูดพลังงานความร้อน (endothermic) หรือการคายพลังงานความร้อน (exothermic) จากตัวอย่างที่นำมาทดสอบ ซึ่งหลักการในการทำงานของ DSC แสดงได้ดังรูปที่ 4.5 โดยนำตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ (sample) และตัวอ้างอิง (reference) วางลงในถาดโลหะบาง ๆ (ถาดอลูมิเนียม) ที่มีตัววัดอุณหภูมิอยู่ใต้ถาด ซึ่งระบบการวัดของ DSC มี 2 แบบ คือ วัดจากค่าความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าหรือค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างตัวอย่างที่ต้องการทดสอบกับตัวอ้างอิง [37]



รูปที่ 4.5 หลักการในการทำงานของ DSC, ค่ากำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกัน (เส้นประ), ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (เส้นไข่ปลา) [37]

สำหรับการวิเคราะห์ด้วย DSC ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่อง NETZSCH DSC 200 ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบ่งการวิเคราะห์เป็น 2 ส่วนคือ

<u>ส่วนที่ 1</u> ค่าระดับของความเป็นผลึก (degree of crystallinity)

1. ใส่ฟิล์มพอลิเมอร์ที่ตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ประมาณ 5 มิลลิกรัมลงในถาดอลูมิเนียม ปิดผนึกด้วยฝาที่ทำจากอลูมิเนียม แล้วนำตัวอย่างที่ได้นี้ใส่ลงในเครื่อง DSC โดยกำหนดให้ตัวอ้างอิงเป็นถาดอลูมิเนียมเปล่า

2. ให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของตัวอย่างจากอุณหภูมิห้องไปจนถึง 200 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน โดยกำหนดให้อัตราในการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งการให้ความร้อนในครั้งแรกนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดความทรงจำคุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่เกิดจากกระบวนการผลิต (thermal history) จากนั้นให้คงอุณหภูมิไว้ที่ 200 องศาเซลเซียสประมาณ 2 นาที

3. ลดอุณหภูมิลงจนถึง 40 องศาเซลเซียส โดยกำหนดให้อัตราในการลดอุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

4. ให้ความร้อนเพื่อเพิ่มจากอุณหภูมิห้องไปจนถึง 200 องศาเซลเซียสอีกครั้งหนึ่ง โดยกำหนดให้อัตราในการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากข้อนี้จะสามารถหาค่าความร้อนในการหลอมเหลว (heat of fusion) ของตัวอย่างที่นำมาทดสอบได้ โดยหาได้จากค่าพื้นที่ใต้กราฟที่เกิดขึ้น

5. นำค่าความร้อนในการหลอมเหลว (heat of fusion) ที่ได้จากข้อ 4 มาคำนวณหาค่าระดับของความเป็นผลึก (degree of crystallinity) ของพอลิเมอร์ที่นำมาทดสอบได้โดยการนำค่าความร้อนในการหลอมเหลวที่อ่านได้มาหารด้วยความร้อนในการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ชนิดเดียวกับที่นำมาทดสอบที่มีค่าระดับของความเป็นผลึกร้อยละ 100

ส่วนที่ 2 ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g)

1. ขั้นตอนที่ 1 และ 2 เหมือนส่วนที่ 1 แต่ใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ประมาณ 20 มิลลิกรัมและให้อัตราในการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที

2. ลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วจนถึง -100 องศาเซลเซียสและให้คงอุณหภูมิไว้ที่ -100 องศาเซลเซียสประมาณ 2 นาที

3. ให้ความร้อนเพื่อเพิ่มจากอุณหภูมิห้องไปจนถึง 200 องศาเซลเซียสอีกครั้งหนึ่ง โดยกำหนดให้อัตราในการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จากข้อนี้จะสามารถหาค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ของพอลิเมอร์ที่นำมาทดสอบได้

นำค่าระดับของความเป็นผลึก (degree of crystallinity) และค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ของพอลิเมอร์ที่ได้จากการทดสอบด้วย DSC นี้ไปแทนค่าลงในสมการตามที่ได้กล่าวไว้ในข้อ ค ในหัวข้อที่ 4.2.4 เพื่อทำการประมาณค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

5.1 อัตราการหายใจของผักและผลไม้สด

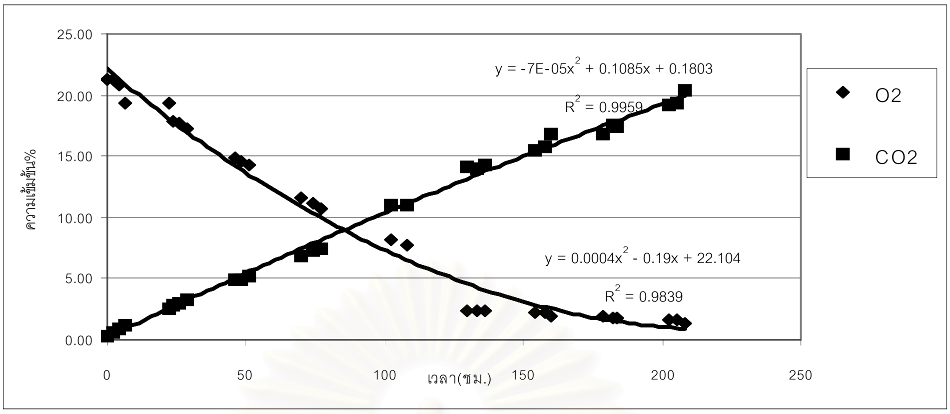
5.1.1 อัตราการหายใจของผักและผลไม้สดที่ได้จากการทดลอง

จากการทดลองวัดอัตราการหายใจของผักและผลไม้สด 4 ชนิด ได้แก่ ผักและผลไม้สดประเภทไคลแมคเทอริก 2 ชนิด คือ มะเขือเทศ กล้วยน้ำว้า และผักและผลไม้สดประเภทนอนไคลแมคเทอริก 2 ชนิด คือ ส้มเขียวหวาน พริกชี้ฟ้า ที่อุณหภูมิ 5±1, 11±1 และ 29±1 องศาเซลเซียส โดยใช้การวัดอัตราการหายใจแบบระบบปิดตามรายละเอียดที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.1.2 ซึ่งในการวัดอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิดนี้ได้ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้งพร้อม ๆ กันที่แต่ละอุณหภูมิแล้วนำข้อมูลมาเฉลี่ย ข้อมูลขั้นต้นที่ได้เป็นร้อยละของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ ซึ่งได้จากการคำนวณตามหัวข้อที่ 4.1.3.1 จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิดโดยทำการคำนวณตามหัวข้อที่ 4.1.3.2 ซึ่งสมการที่นำมาแทนความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ คือ สมการโพลิโนเมียลอันดับ 2 เนื่องจากเป็นสมการที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) โดยรวมสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสมการแบบอื่น ๆ ซึ่งสมการที่ได้นี้ถูกนำมาแทนค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง และนำไปใช้ในการคำนวณหาอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิด โดยหาอนุพันธ์อันดับหนึ่งของแต่ละสมการเทียบกับเวลา ซึ่งสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งที่ได้นี้จะเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นแทนค่าเวลาที่ใช้ในการทดลองลงในสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งและคูณด้วยปริมาตรอากาศภายในขวด (ml) หารด้วยน้ำหนักของผักหรือผลไม้สดชนิดนั้น (kg) จะได้อัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิด ซึ่งอยู่ในรูปของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทั้งสองรูปแบบนี้มีหน่วยที่เหมือนกันคือ ml $kg^{-1}hr^{-1}$

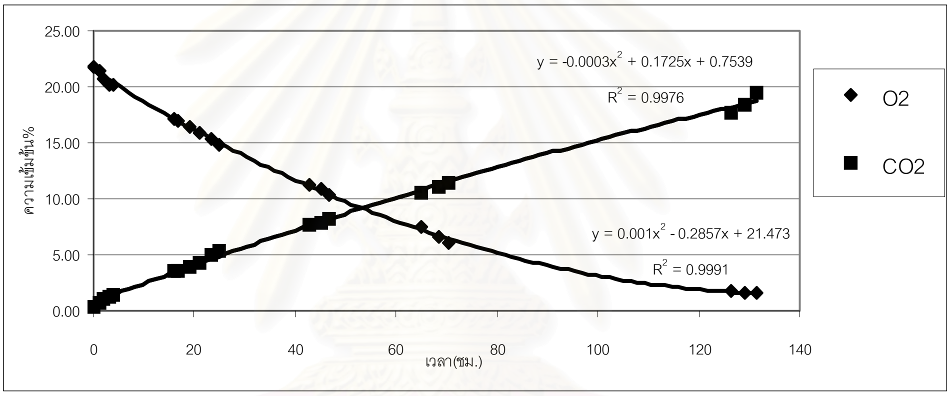
รูปที่ 5.1 ถึง 5.12 คือกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ ของผักและผลไม้สดแต่ละชนิด ตารางที่ 5.1 แสดงสมการและอนุพันธ์อันดับหนึ่งของสมการโพลิโนเมียลที่ใช้ในการคำนวณอัตราการหายใจ

ของผักและผลไม้สดแต่ละชนิด และตารางที่ 5.2 ถึง 5.13 แสดงค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ และอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิดที่ได้จากการคำนวณโดยสมการและอนุพันธ์อันดับหนึ่งของสมการโพลิโนเมียลตามลำดับ (ค่าพื้นที่พีค ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลอง ปริมาตรอากาศภายในขวดและน้ำหนักของผักและผลไม้สดแต่ละชนิดโดยเฉลี่ยแสดงไว้ในภาคผนวก จ)

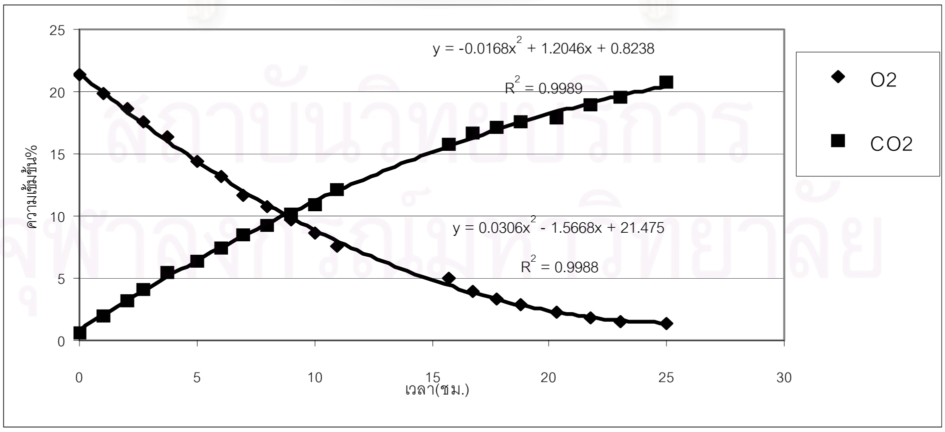
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.1 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

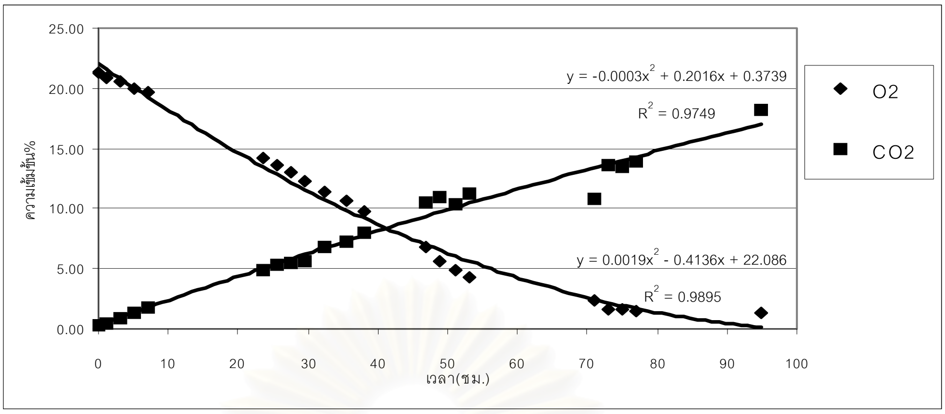


รูปที่ 5.2 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

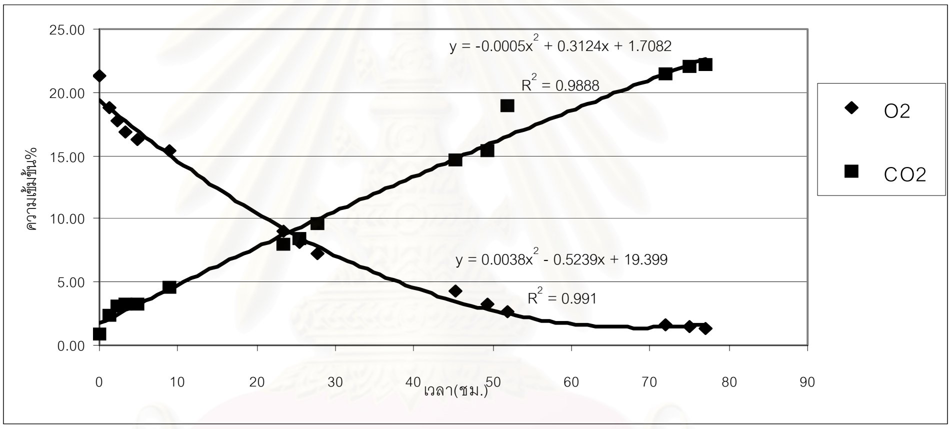


รูปที่ 5.3 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

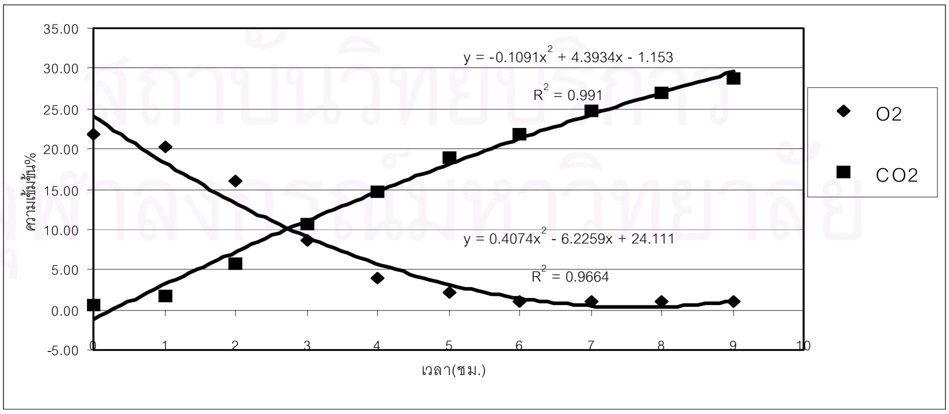
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



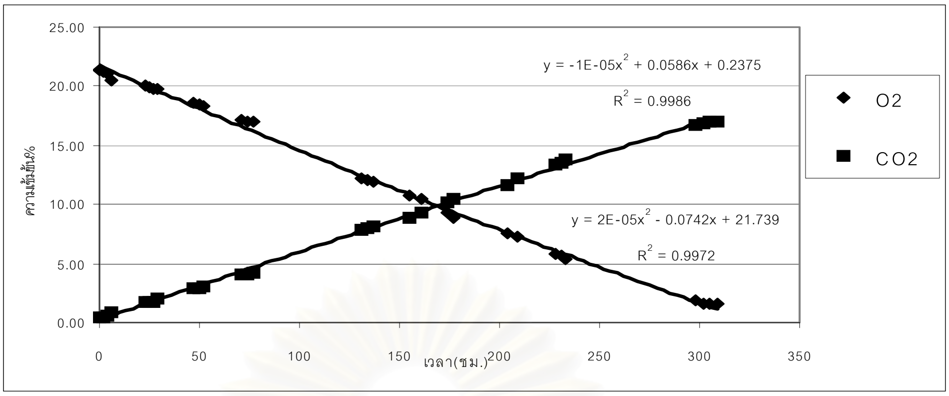
รูปที่ 5.4 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส



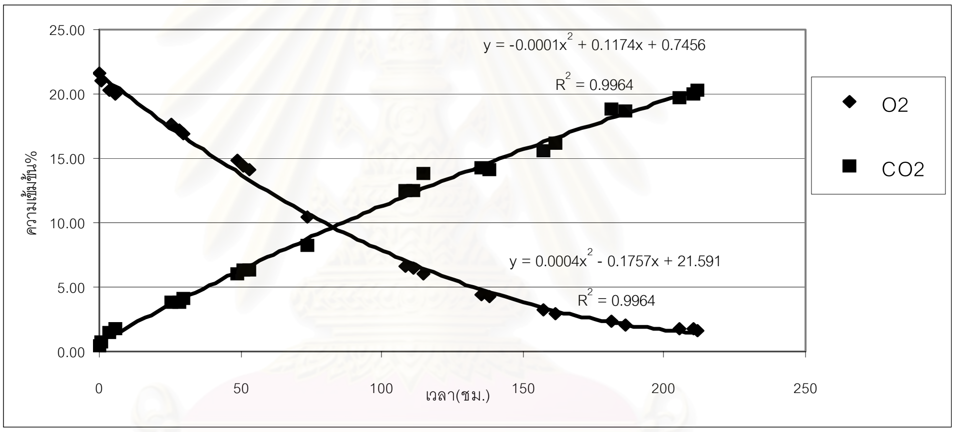
รูปที่ 5.5 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส



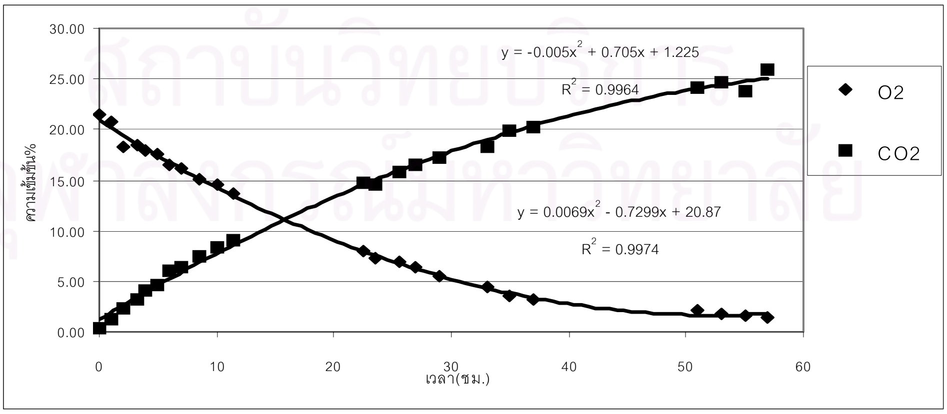
รูปที่ 5.6 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.7 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

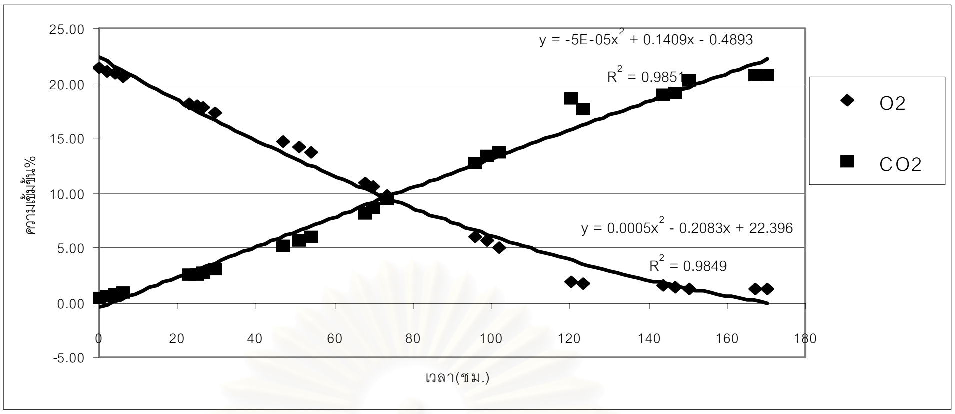


รูปที่ 5.8 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

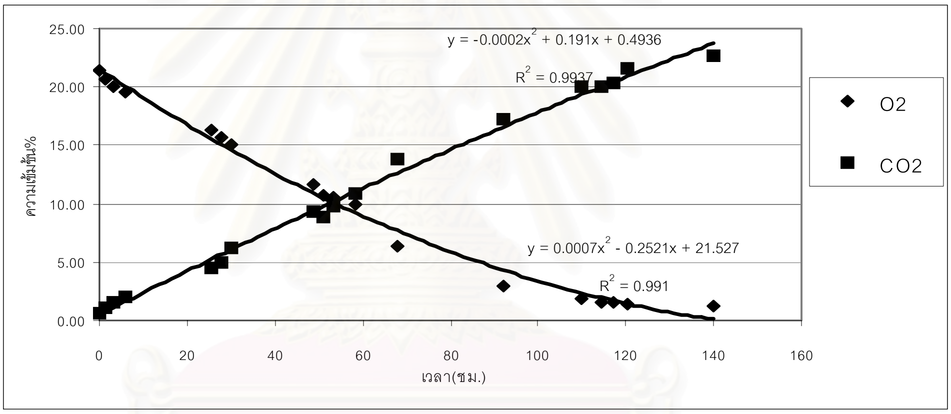


รูปที่ 5.9 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

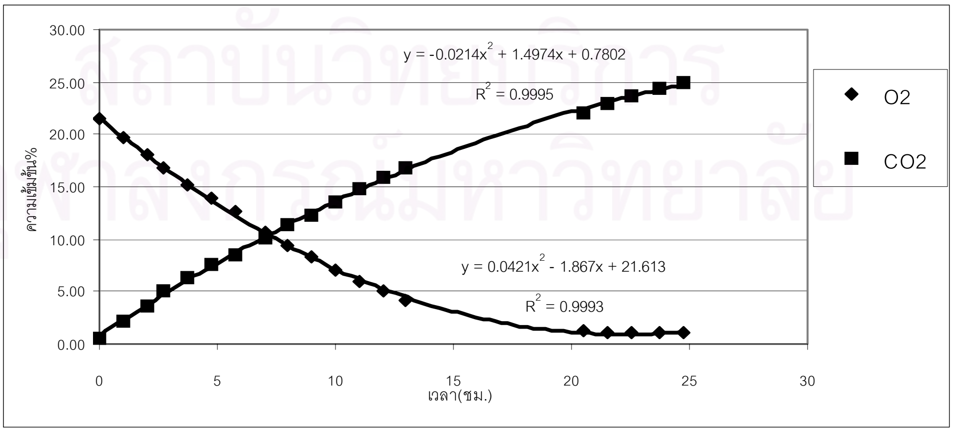
สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.10 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.11 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.12 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่เวลาต่าง ๆ ของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.1 สมการและอนุพันธ์อันดับหนึ่งของสมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิด

ชนิดของผัก/ผลไม้	ช่วงอุณหภูมิ	ก๊าซ	สมการ	อนุพันธ์อันดับหนึ่งของสมการ
มะเขือเทศ	5±1 °C	O_2	$y = 0.0004x^2 - 0.1900x + 22.104$	dy/dx = 0.0008x-0.1900
		CO_2	$y = -0.00007x^2 + 0.1085x + 0.1803$	dy/dx =-0.00014x+0.1085
	11±1 °C	O_2	$y = 0.001x^2 - 0.2857x + 21.473$	dy/dx = 0.002x-0.2857
		CO_2	$y = -0.0003x^2 + 0.1725x + 0.7539$	dy/dx =-0.0006x+0.1725
	29±1 °C	O_2	$y = 0.0306x^2 - 1.5668x + 21.475$	dy/dx = 0.0612x-1.5668
		CO_2	$y = -0.0168x^2 + 1.2046x + 0.8238$	dy/dx =-0.0336x+1.2046
กล้วยน้ำว้า	5±1 °C	O_2	$y = 0.0019x^2- 0.4136x + 22.086$	dy/dx = 0.0038x-0.4136
		CO_2	$y = -0.0003x^2 + 0.2016x + 0.3739$	dy/dx =-0.0006x+0.2016
	11±1 °C	O_2	$y = 0.0038x^2 - 0.5239x + 19.399$	dy/dx = 0.0076x-0.5239
		CO_2	$y = -0.0005x^2 + 0.3124x + 1.7082$	dy/dx =-0.0010x+0.3124
	29±1 °C	O_2	$y = 0.4074x^2 – 6.2259x + 24.111$	dy/dx = 0.8148x-6.2259
		CO_2	$y = -0.1091x^2 + 4.3934x - 1.153$	dy/dx =-0.2182x+4.3934
ส้มเขียวหวาน	5±1 °C	O_2	$y = 0.00002x^2-0.0742x + 21.739$	dy/dx = 0.00004x-0.0742
		CO_2	$y = -0.00001x^2 + 0.0586x + 0.2375$	dy/dx =-0.00002x+0.0586
	11±1 °C	O_2	$y = 0.0004x^2 - 0.1757x + 21.591$	dy/dx = 0.0008x-0.1757
		CO_2	$y = -0.0001x^2 + 0.1174x + 0.7456$	dy/dx =-0.0002x+0.1174
	29±1 °C	O_2	$y = 0.0069x^2 - 0.7299x + 20.870$	dy/dx = 0.0138x-0.7299
		CO_2	$y = -0.0050x^2 + 0.7050x + 1.225$	dy/dx =-0.010x+0.7050
พริกชี้ฟ้า	5±1 °C	O_2	$y = 0.0005x^2 - 0.2083x + 22.396$	dy/dx = 0.0010x-0.2083
		CO_2	$y = -0.00005x^2 + 0.1409x - 0.4893$	dy/dx = -0.0001x+0.1409
	11±1 °C	O_2	$y = 0.0007x^2 - 0.2521x + 21.527$	dy/dx = 0.0014x-0.2521
		CO_2	$y = -0.0002x^2 + 0.1910x + 0.4936$	dy/dx =-0.0004x+0.1910
	29±1 °C	O_2	$y = 0.0421x^2 - 1.867x + 21.613$	dy/dx = 0.0842x-1.867
		CO_2	$y = -0.0214x^2 + 1.4974x + 0.7802$	dy/dx =-0.0428x+1.4974

โดย y คือ ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (%)

x คือ เวลา (ชั่วโมง)

ตารางที่ 5.2 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ

x	$\%O_2$	$(-dy/dx)(O_2)$	$R(O_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})	$\%CO_2$	$(dy/dx)(CO_2)$	$R(CO_2)$ (ml $kg^{-1}hr^{-1}$)
0	22.10	0.1900	4.59	0.18	0.1085	2.62
2	21.73	0.1884	4.55	0.40	0.1082	2.61
4	21.35	0.1868	4.51	0.61	0.1079	2.61
6.25	20.93	0.1850	4.47	0.86	0.1076	2.60
22	18.12	0.1724	4.17	2.53	0.1054	2.55
24	17.77	0.1708	4.13	2.74	0.1051	2.54
26	17.43	0.1692	4.09	2.95	0.1049	2.53
29	16.93	0.1668	4.03	3.27	0.1044	2.52
46	14.21	0.1532	3.70	5.02	0.1021	2.47
48	13.91	0.1516	3.66	5.23	0.1018	2.46
51	13.45	0.1492	3.60	5.53	0.1014	2.45
70	10.76	0.1340	3.24	7.43	0.0987	2.38
74	10.23	0.1308	3.16	7.83	0.0981	2.37
77	9.85	0.1284	3.10	8.12	0.0977	2.36
102	6.89	0.1084	2.62	10.52	0.0942	2.28
108	6.25	0.1036	2.50	11.08	0.0934	2.26
130	4.16	0.0860	2.08	13.10	0.0903	2.18
133	3.91	0.0836	2.02	13.37	0.0899	2.17
136	3.66	0.0812	1.96	13.64	0.0895	2.16
154	2.33	0.0668	1.61	15.23	0.0869	2.10
157.5	2.10	0.0640	1.55	15.53	0.0865	2.09
160	1.94	0.0620	1.50	15.75	0.0861	2.08
178.75	0.92	0.0470	1.14	17.34	0.0835	2.02
182	0.77	0.0444	1.07	17.61	0.0830	2.01
184	0.69	0.0428	1.03	17.77	0.0827	2.00
202.5	0.03	0.0280	0.68	19.28	0.0802	1.94
205.5	-0.05	0.0256	0.62	19.52	0.0797	1.93
208	-0.11	0.0236	0.57	19.72	0.0794	1.92

ตารางที่ 5.3 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ

x	$\%O_2$	$(-dy/dx)(O_2)$	$R(O_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})	$\%CO_2$	$(dy/dx)(CO_2)$	$R(CO_2)$ (ml kg^{-1}hr^{-1})
0	21.47	0.2857	6.92	0.75	0.1725	4.18
1	21.19	0.2837	6.87	0.93	0.1719	4.16
2	20.91	0.2817	6.82	1.10	0.1713	4.15
3	20.62	0.2797	6.78	1.27	0.1707	4.13
4	20.35	0.2777	6.73	1.44	0.1701	4.12
16	17.16	0.2537	6.15	3.44	0.1629	3.95
16.75	16.97	0.2522	6.11	3.56	0.1625	3.94
19	16.41	0.2477	6.00	3.92	0.1611	3.90
21	15.91	0.2437	5.90	4.24	0.1599	3.87
23.5	15.31	0.2387	5.78	4.64	0.1584	3.84
25	14.96	0.2357	5.71	4.88	0.1575	3.82
42.75	11.09	0.2002	4.85	7.58	0.1469	3.56
45	10.64	0.1957	4.74	7.91	0.1455	3.52
46.75	10.30	0.1922	4.66	8.16	0.1445	3.50
64.75	7.17	0.1562	3.78	10.67	0.1337	3.24
68.25	6.63	0.1492	3.61	11.13	0.1316	3.19
70.5	6.30	0.1447	3.51	11.42	0.1302	3.15
126.25	1.34	0.0332	0.80	17.75	0.0968	2.34
129.25	1.25	0.0272	0.66	18.04	0.0950	2.30
131.25	1.20	0.0232	0.56	18.23	0.0938	2.27

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.4 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ

x	$\%O_2$	$(-dy/dx)(O_2)$	$R(O_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})	$\%CO_2$	$(dy/dx)(CO_2)$	$R(CO_2)$ (ml $kg^{-1}hr^{-1}$)
0	21.48	1.5668	37.53	0.82	1.2046	28.86
1	19.94	1.5056	36.07	2.01	1.1710	28.05
2	18.46	1.4444	34.60	3.17	1.1374	27.25
2.75	17.40	1.3985	33.50	4.01	1.1122	26.64
3.75	16.03	1.3373	32.03	5.10	1.0786	25.84
5	14.41	1.2608	30.20	6.43	1.0366	24.83
6	13.18	1.1996	28.74	7.45	1.0030	24.03
7	12.01	1.1384	27.27	8.43	0.9694	23.22
8	10.90	1.0772	25.80	9.39	0.9358	22.42
9	9.85	1.0160	24.34	10.30	0.9022	21.61
10	8.87	0.9548	22.87	11.19	0.8686	20.81
11	7.94	0.8936	21.41	12.04	0.8350	20.00
15.75	4.39	0.6029	14.44	15.63	0.6754	16.18
16.75	3.82	0.5417	12.98	16.29	0.6418	15.37
17.75	3.31	0.4805	11.51	16.91	0.6082	14.57
18.75	2.86	0.4193	10.04	17.50	0.5746	13.76
20.33	2.27	0.3226	7.73	18.37	0.5215	12.49
21.75	1.87	0.2357	5.65	19.08	0.4738	11.35
23	1.63	0.1592	3.81	19.64	0.4318	10.34
25	1.43	0.0368	0.88	20.44	0.3646	8.73

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.5 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ

x	$\%O_2$	$(-dy/dx)(O_2)$	$R(O_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})	$\%CO_2$	$(dy/dx)(CO_2)$	$R(CO_2)$ (ml $kg^{-1}hr^{-1}$)
0	22.09	0.4136	10.31	0.37	0.2016	5.03
1	21.67	0.4098	10.22	0.58	0.2010	5.01
3	20.86	0.4022	10.03	0.98	0.1998	4.98
5	20.07	0.3946	9.84	1.37	0.1986	4.95
7	19.28	0.3870	9.65	1.77	0.1974	4.92
23.5	13.42	0.3243	8.09	4.95	0.1875	4.68
25.5	12.77	0.3167	7.90	5.32	0.1863	4.65
27.5	12.15	0.3091	7.71	5.69	0.1851	4.62
29.5	11.54	0.3015	7.52	6.06	0.1839	4.59
32.5	10.65	0.2901	7.23	6.61	0.1821	4.54
35.5	9.80	0.2787	6.95	7.15	0.1803	4.50
38	9.11	0.2692	6.71	7.60	0.1788	4.46
47	6.84	0.2350	5.86	9.19	0.1734	4.32
49	6.38	0.2274	5.67	9.53	0.1722	4.29
51	5.93	0.2198	5.48	9.88	0.1710	4.26
53	5.50	0.2122	5.29	10.22	0.1698	4.23
71	2.30	0.1438	3.59	13.18	0.1590	3.96
73	2.02	0.1362	3.40	13.49	0.1578	3.94
75	1.75	0.1286	3.21	13.81	0.1566	3.91
77	1.50	0.1210	3.02	14.12	0.1554	3.88
95	-0.06	0.0526	1.31	16.82	0.1446	3.61

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.6 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ

x	%O_2	(-dy/dx)(O_2)	R(O_2) (ml kg^{-1} hr^{-1})	%CO_2	(dy/dx)(CO_2)	R(CO_2) (ml $kg^{-1}hr^{-1}$)
0	19.40	0.5239	13.17	1.71	0.3124	7.85
1.25	18.75	0.5144	12.93	2.10	0.3112	7.82
2.25	18.24	0.5068	12.74	2.41	0.3102	7.80
3.25	17.74	0.4992	12.55	2.72	0.3092	7.77
4.75	17.00	0.4878	12.26	3.18	0.3077	7.73
9	14.99	0.4555	11.45	4.48	0.3034	7.63
23.5	9.19	0.3453	8.68	8.77	0.2889	7.26
25.5	8.51	0.3301	8.30	9.35	0.2869	7.21
27.75	7.79	0.3130	7.87	9.99	0.2847	7.16
45.25	3.47	0.1800	4.52	14.82	0.2672	6.72
49.25	2.81	0.1496	3.76	15.88	0.2632	6.62
51.75	2.46	0.1306	3.28	16.54	0.2607	6.55
72	1.38	-0.0233	-0.59	21.61	0.2404	6.04
75	1.48	-0.0461	-1.16	22.33	0.2374	5.97
77	1.59	-0.0613	-1.54	22.80	0.2354	5.92

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.7 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ

x	$\%O_2$	$(-dy/dx)(O_2)$	$R(O_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})	$\%CO_2$	$(dy/dx)(CO_2)$	$R(CO_2)$ (ml $kg^{-1}hr^{-1}$)
0	24.11	6.2259	163.66	-1.15	4.3934	115.49
1	18.29	5.4111	142.24	3.13	4.1752	109.75
2	13.29	4.5963	120.82	7.20	3.9570	104.02
3	9.10	3.7815	99.40	11.05	3.7388	98.28
4	5.73	2.9667	77.99	14.68	3.5206	92.55
5	3.17	2.1519	56.57	18.09	3.3024	86.81
6	1.42	1.3371	35.15	21.28	3.0842	81.07
7	0.49	0.5223	13.73	24.25	2.8660	75.34
8	0.38	-0.2925	-7.69	27.01	2.6478	69.60
9	1.08	-1.1073	-29.11	29.55	2.4296	63.87

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.8 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ

x	$\%O_2$	$(-dy/dx)(O_2)$	$R(O_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})	$\%CO_2$	$(dy/dx)(CO_2)$	$R(CO_2)$ (ml $kg^{-1}hr^{-1}$)
0	21.74	0.0742	2.32	0.24	0.0586	1.83
2	21.59	0.0741	2.32	0.35	0.0586	1.83
4	21.44	0.0740	2.31	0.47	0.0585	1.83
6	21.29	0.0740	2.31	0.59	0.0585	1.83
23	20.04	0.0733	2.29	1.58	0.0581	1.82
25	19.90	0.0732	2.29	1.70	0.0581	1.82
27	19.75	0.0731	2.28	1.81	0.0581	1.81
29	19.60	0.0730	2.28	1.93	0.0580	1.81
47	18.30	0.0723	2.26	2.97	0.0577	1.80
50	18.08	0.0722	2.26	3.14	0.0576	1.80
52	17.93	0.0721	2.25	3.26	0.0576	1.80
71	16.57	0.0714	2.23	4.35	0.0572	1.79
74	16.36	0.0712	2.23	4.52	0.0571	1.78
77	16.14	0.0711	2.22	4.69	0.0571	1.78
131	12.36	0.0690	2.15	7.74	0.0560	1.75
134	12.16	0.0688	2.15	7.91	0.0559	1.75
137	11.95	0.0687	2.15	8.08	0.0559	1.75
155	10.72	0.0680	2.12	9.08	0.0555	1.73
161	10.31	0.0678	2.12	9.41	0.0554	1.73
174	9.43	0.0672	2.10	10.13	0.0551	1.72
177	9.23	0.0671	2.10	10.30	0.0551	1.72
203.5	7.47	0.0661	2.06	11.75	0.0545	1.70
209	7.10	0.0658	2.06	12.05	0.0544	1.70
227.75	5.88	0.0651	2.03	13.06	0.0540	1.69
230.5	5.70	0.0650	2.03	13.21	0.0540	1.69
233	5.54	0.0649	2.03	13.35	0.0539	1.69
298	1.40	0.0623	1.95	16.81	0.0526	1.64
302	1.15	0.0621	1.94	17.02	0.0526	1.64
305	0.97	0.0620	1.94	17.18	0.0525	1.64
308.5	0.75	0.0619	1.93	17.36	0.0524	1.64

ตารางที่ 5.9 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ

x	$\%O_2$	$(-dy/dx)(O_2)$	$R(O_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})	$\%CO_2$	$(dy/dx)(CO_2)$	$R(CO_2)$ (ml $kg^{-1}hr^{-1}$)
0	21.59	0.1757	5.37	0.75	0.1174	3.59
1	21.42	0.1749	5.34	0.86	0.1172	3.58
3.5	20.98	0.1729	5.28	1.16	0.1167	3.57
6	20.55	0.1709	5.22	1.45	0.1162	3.55
25.5	17.37	0.1553	4.75	3.67	0.1123	3.43
28	16.99	0.1533	4.68	3.95	0.1118	3.42
30	16.68	0.1517	4.64	4.18	0.1114	3.40
49	13.94	0.1365	4.17	6.26	0.1076	3.29
51	13.67	0.1349	4.12	6.47	0.1072	3.28
53	13.40	0.1333	4.07	6.69	0.1068	3.26
74	10.78	0.1165	3.56	8.89	0.1026	3.14
108.5	7.24	0.0889	2.72	12.31	0.0957	2.92
111	7.02	0.0869	2.66	12.54	0.0952	2.91
114.5	6.72	0.0841	2.57	12.88	0.0945	2.89
135	5.16	0.0677	2.07	14.77	0.0904	2.76
137.75	4.98	0.0655	2.00	15.02	0.0899	2.75
157.25	3.85	0.0499	1.52	16.73	0.0860	2.63
161.5	3.65	0.0465	1.42	17.10	0.0851	2.60
181	2.89	0.0309	0.94	18.72	0.0812	2.48
186	2.75	0.0269	0.82	19.12	0.0802	2.45
205.5	2.38	0.0113	0.35	20.65	0.0763	2.33
210	2.33	0.0077	0.24	20.99	0.0754	2.30
212	2.32	0.0061	0.19	21.14	0.0750	2.29

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.10 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ

x	$\%O_2$	$(-dy/dx)(O_2)$	$R(O_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})	$\%CO_2$	$(dy/dx)(CO_2)$	$R(CO_2)$ (ml $kg^{-1}hr^{-1}$)
0	20.87	0.7299	21.46	1.23	0.7050	20.73
1	20.15	0.7161	21.06	1.93	0.6950	20.44
2	19.44	0.7023	20.65	2.62	0.6850	20.14
3.25	18.57	0.6851	20.14	3.46	0.6725	19.77
4	18.06	0.6747	19.84	3.97	0.6650	19.55
5	17.39	0.6609	19.43	4.63	0.6550	19.26
6	16.74	0.6471	19.03	5.28	0.6450	18.97
7	16.10	0.6333	18.62	5.92	0.6350	18.67
8.5	15.16	0.6126	18.01	6.86	0.6200	18.23
10	14.26	0.5919	17.40	7.78	0.6050	17.79
11.5	13.39	0.5712	16.80	8.67	0.5900	17.35
22.5	7.94	0.4194	12.33	14.56	0.4800	14.11
23.5	7.53	0.4056	11.93	15.03	0.4700	13.82
25.5	6.74	0.3780	11.11	15.95	0.4500	13.23
27	6.19	0.3573	10.51	16.62	0.4350	12.79
29	5.51	0.3297	9.69	17.47	0.4150	12.20
33	4.30	0.2745	8.07	19.05	0.3750	11.03
35	3.78	0.2469	7.26	19.78	0.3550	10.44
37	3.31	0.2193	6.45	20.47	0.3350	9.85
51	1.59	0.0261	0.77	24.18	0.1950	5.73
53	1.57	-0.0015	-0.04	24.55	0.1750	5.15
55	1.60	-0.0291	-0.86	24.88	0.1550	4.56
57	1.68	-0.0567	-1.67	25.17	0.1350	3.97

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.11 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ

x	$\%O_2$	$(-dy/dx)(O_2)$	$R(O_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})	$\%CO_2$	$(dy/dx)(CO_2)$	$R(CO_2)$ (ml $kg^{-1}hr^{-1}$)
0	22.40	0.2083	14.01	-0.49	0.1409	9.48
2	21.98	0.2063	13.88	-0.21	0.1407	9.46
4	21.57	0.2043	13.74	0.07	0.1405	9.45
6	21.16	0.2023	13.61	0.35	0.1403	9.44
23	17.87	0.1853	12.46	2.72	0.1386	9.32
25	17.50	0.1833	12.33	3.00	0.1384	9.31
26.5	17.23	0.1818	12.23	3.21	0.1383	9.30
29.5	16.69	0.1788	12.03	3.62	0.1380	9.28
47	13.71	0.1613	10.85	6.02	0.1362	9.16
51	13.07	0.1573	10.58	6.57	0.1358	9.13
54	12.61	0.1543	10.38	6.97	0.1355	9.11
68	10.54	0.1403	9.44	8.86	0.1341	9.02
70	10.27	0.1383	9.30	9.13	0.1339	9.01
73.5	9.79	0.1348	9.07	9.60	0.1336	8.98
96	7.01	0.1123	7.55	12.58	0.1313	8.83
99	6.67	0.1093	7.35	12.97	0.1310	8.81
102	6.35	0.1063	7.15	13.36	0.1307	8.79
120.5	4.56	0.0878	5.91	15.76	0.1289	8.67
123.5	4.30	0.0848	5.70	16.15	0.1286	8.65
144	2.77	0.0643	4.32	18.76	0.1265	8.51
147	2.58	0.0613	4.12	19.14	0.1262	8.49
150.5	2.37	0.0578	3.89	19.58	0.1259	8.46
167.5	1.53	0.0408	2.74	21.71	0.1242	8.35
170.5	1.42	0.0378	2.54	22.08	0.1239	8.33

ตารางที่ 5.12 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ

x	$\%O_2$	$(-dy/dx)(O_2)$	$R(O_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})	$\%CO_2$	$(dy/dx)(CO_2)$	$R(CO_2)$ (ml $kg^{-1}hr^{-1}$)
0	21.53	0.2521	16.99	0.49	0.1910	12.87
1.25	21.21	0.2504	16.87	0.73	0.1905	12.84
3.33	20.70	0.2474	16.68	1.13	0.1897	12.78
5.75	20.10	0.2441	16.45	1.59	0.1887	12.72
25.5	15.55	0.2164	14.59	5.23	0.1808	12.19
28	15.02	0.2129	14.35	5.68	0.1798	12.12
30	14.59	0.2101	14.16	6.04	0.1790	12.06
49	10.85	0.1835	12.37	9.37	0.1714	11.55
51	10.49	0.1807	12.18	9.71	0.1706	11.50
53.5	10.04	0.1772	11.94	10.14	0.1696	11.43
58.5	9.17	0.1702	11.47	10.98	0.1676	11.30
68	7.62	0.1569	10.58	12.56	0.1638	11.04
92	4.26	0.1233	8.31	16.37	0.1542	10.39
110	2.27	0.0981	6.61	19.08	0.1470	9.91
114.5	1.84	0.0918	6.19	19.74	0.1452	9.79
117	1.61	0.0883	5.95	20.10	0.1442	9.72
120.33	1.33	0.0836	5.64	20.58	0.1429	9.63
140	-0.05	0.0561	3.78	23.31	0.1350	9.10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.13 ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียสที่ได้จากสมการ

x	$\%O_2$	$(-dy/dx)(O_2)$	$R(O_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})	$\%CO_2$	$(dy/dx)(CO_2)$	$R(CO_2)$ (ml $kg^{-1}hr^{-1}$)
0	21.61	1.8670	128.86	0.78	1.4974	103.35
1	19.79	1.7828	123.04	2.26	1.4546	100.39
2	18.05	1.6986	117.23	3.69	1.4118	97.44
2.75	16.80	1.6355	112.87	4.74	1.3797	95.22
3.75	15.20	1.5513	107.06	6.09	1.3369	92.27
4.75	13.69	1.4671	101.25	7.41	1.2941	89.32
5.75	12.27	1.3829	95.44	8.68	1.2513	86.36
7	10.61	1.2776	88.18	10.21	1.1978	82.67
8	9.37	1.1934	82.37	11.39	1.1550	79.72
9	8.22	1.1092	76.55	12.52	1.1122	76.76
10	7.15	1.0250	70.74	13.61	1.0694	73.81
11	6.17	0.9408	64.93	14.66	1.0266	70.85
12	5.27	0.8566	59.12	15.67	0.9838	67.90
13	4.46	0.7724	53.31	16.63	0.9410	64.95
20.5	1.03	0.1409	9.72	22.48	0.6200	42.79
21.5	0.93	0.0567	3.91	23.08	0.5772	39.84
22.5	0.92	-0.0275	-1.90	23.64	0.5344	36.88
23.75	1.02	-0.1328	-9.16	24.27	0.4809	33.19
24.75	1.19	-0.2170	-14.97	24.73	0.4381	30.24

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 5.2-5.13 ที่แสดงข้อมูลอัตราการหายใจของผักและผลไม้สด 4 ชนิด ได้แก่ มะเขือเทศ กล้วยน้ำว้า ส้มเขียวหวานและพริกชี้ฟ้า ที่อุณหภูมิ 5±1, 11±1 และ 29±1 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิดทั้งในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แต่ละอุณหภูมิจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาที่ใช้ในการทดลองผ่านไปมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากขวดทดลองที่ใช้เป็นระบบปิด ดังนั้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการทดลองผ่านไปมากขึ้น ก๊าซออกซิเจนถูกใช้ไปในการหายใจโดยไม่ได้รับการทดแทน ทำให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนภายในขวดบรรจุผักและผลไม้สดที่ใช้ในการทดลองมีค่าลดลง ในขณะที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการหายใจถูกสะสมอยู่ภายในขวด ทำให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจากลักษณะดังกล่าวที่เกิดขึ้นนี้ทำให้อัตราการหายใจของผักและผลไม้สดมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น และสอดคล้องกับหลักการพื้นฐานที่ว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ล้อมรอบผักและผลไม้สดมีผลต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สด กล่าวคือเมื่อพิจารณาถึงปฏิกิริยาการหายใจแบบใช้ก๊าซออกซิเจน (สมการที่ 2.1) จะเห็นได้ว่า ถ้าค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่อยู่ล้อมรอบผักและผลไม้สดนั้นมีค่าลดลงในขณะที่ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้ช้าลง จึงทำให้อัตราการหายใจของผักและผลไม้สดมีค่าลดลงนั่นเอง [2,3,5] และเมื่อพิจารณาถึงผลงานวิจัยอื่น ๆ ที่ผ่านมา [8,10,12,18,30] ที่มีแนวคิดในลักษณะเดียวกันว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลกระทบต่ออัตราการหายใจโดยเป็นตัวยับยั้งในการเกิดปฏิกิริยาการหายใจของผักและผลไม้สด ดังนั้นเมื่อค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้อัตราการหายใจของผักและผลไม้สดทั้งในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นช้าลง อนึ่งลักษณะดังกล่าวที่เกิดขึ้นข้างต้นจะเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อผักและผลไม้สดมีการหายใจแบบใช้ก๊าซออกซิเจนเท่านั้น เนื่องจากเมื่อถึงระดับหนึ่งที่ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนมีค่าต่ำจนเกินไปหรือค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงจนเกินไป ผักและผลไม้สดจะเปลี่ยนการหายใจเป็นการหายใจแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจนแทน และเมื่อเป็นเช่นนั้นแล้ว อัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการหายใจกลับมีค่าเพิ่มขึ้นสูงมาก ทั้ง ๆ ที่ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงอยู่แล้ว [3] ซึ่งจากการทดลองในงานวิจัยนี้ จะพบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการทดลองผ่านไปได้ระยะหนึ่ง ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากผิดปกติ ในขณะที่ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนมีค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งน่าจะสันนิษฐานได้ว่าผักและผลไม้สดน่าจะมีการเปลี่ยนการหายใจจากแบบใช้ก๊าซออกซิเจน

เป็นแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจนแทน ดังนั้นผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.2-5.13 นี้จึงเป็นข้อมูลในส่วนก่อนที่จะถึงจุดนี้เท่านั้น เนื่องจากงานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาเฉพาะการหายใจของผักและผลไม้สดที่เป็นการหายใจแบบใช้ก๊าซออกซิเจนซึ่งถือว่าเป็นการหายใจแบบปกติเท่านั้น

สำหรับผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดทั้ง 4 ชนิดที่ใช้ในการทดลองนี้ พบว่าจากตารางที่ 5.2-5.13 จะเห็นได้ว่าผักและผลไม้สดแต่ละชนิดมีอัตราการหายใจทั้งในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น (โดยสังเกตจากความแตกต่างของอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของจุดที่ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดที่บรรจุผักและผลไม้สดแต่ละชนิดที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน) ทั้งนี้เนื่องมาจากกระบวนการหายใจของผักและผลไม้สดนั้นประกอบด้วยปฏิกิริยาย่อย ๆ หลายขั้นตอน และในแต่ละขั้นตอนมีเอนไซม์หลายชนิดภายในเซลล์ช่วยในการดำเนินไปของปฏิกิริยา โดยมีอุณหภูมิเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญที่สุดในการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาและการทำงานของเอนไซม์เหล่านี้ [2,3] ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาย่อยต่าง ๆ จะเกิดขึ้นได้ในอัตราที่สูงขึ้น จึงทำให้ผักและผลไม้สดมีอัตราการหายใจที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิสูง ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่อยู่ภายในขวดที่ใช้บรรจุผักและผลไม้สดที่ใช้ในการทดลองจะมีค่าลดลงเร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ในขณะที่ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ผักและผลไม้สดแต่ละชนิดจะมีอัตราการหายใจที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอัตราการหายใจมีทั้งในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นเมื่ออัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนในการหายใจและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่อยู่ภายในขวดบรรจุผักและผลไม้สดที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าลดลง ในขณะที่ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในขวดมีค่าเพิ่มขึ้นเร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำนั่นเอง ดังนั้นที่อุณหภูมิสูง โอกาสที่ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนจะมีค่าลดลงจนถึงระดับที่ไม่เพียงพอต่อการหายใจแบบใช้ก๊าซออกซิเจนของผักและผลไม้สดแต่ละชนิดนั้นจึงเกิดขึ้นได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำ และเมื่อผักและผลไม้สดชนิดนั้นเกิดการหายใจแบบไม่ใช้ก๊าซออกซิเจนขึ้น จะส่งผลให้ผักและผลไม้สดเกิดการเน่าเสียได้เร็วยิ่งขึ้น [2,5]

สำหรับในงานวิจัยนี้ไม่ได้มีการศึกษาถึงอิทธิพลของก๊าซเอทธิลีนที่มีต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดที่ใช้ในการทดลอง เนื่องจากสำหรับกรณีของส้มเขียวหวานและพริกชี้ฟ้าที่ใช้

ในการทดลองนี้เป็นผักและผลไม้สดประเภทนอนไคลแมคเทอริก ซึ่งอัตราการผลิตและความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนของผักและผลไม้สดประเภทนี้จะอยู่ในระดับต่ำตลอดขั้นตอนของการพัฒนาการเจริญเติบโต จึงทำให้ก๊าซเอทิลีนไม่มีผลต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดประเภทนี้มากนัก [3] ในขณะที่มะเขือเทศและกล้วยน้ำว้าที่ใช้ในการทดลองเป็นผักและผลไม้สดประเภทไคลแมคเทอริก ซึ่งสำหรับผักและผลไม้สดประเภทนี้จะมีการผลิตก๊าซเอทิลีนในระหว่างการเจริญเติบโตต่ำ จนกระทั่งเมื่อเริ่มสุกหรือเมื่อถึงขั้น climacteric rise การผลิตก๊าซเอทิลีนจึงเพิ่มขึ้นสูงมาก แต่หลังจากผ่านช่วงนี้ไปแล้ว การผลิตก๊าซเอทิลีนจะลดลงอย่างรวดเร็วและความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนที่มีอยู่ก็จะไม่มีผลกระทบต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดประเภทนี้มากนัก [3] ซึ่งสำหรับมะเขือเทศที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นมะเขือเทศที่อยู่ในระยะผลสุกคือมีสีแดงทั้งผล โดยได้ผ่านช่วงระยะเริ่มสุกที่ผลจะมีสีแดงประมาณ 1 ใน 3 ปรากฏให้เห็นมาแล้ว [32] ในขณะที่กล้วยน้ำว้าที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นกล้วยน้ำว้าที่อยู่ในระยะผลดิบคือมีเปลือกเป็นสีเขียวและลักษณะเนื้อแข็งสีขาว ซึ่งยังไม่ได้เข้าสู่ในระยะเริ่มสุกที่เปลือกจะมีสีเขียวอ่อนหรือสีเหลืองอมเขียวและลักษณะเนื้อเริ่มอ่อนตัว [33] ดังนั้นจึงถือได้ว่าสำหรับในการทดลองนี้ ก๊าซเอทิลีนมีผลต่ออัตราการหายใจของมะเขือเทศและกล้วยน้ำว้าที่ใช้ในการทดลองไม่มากนัก

นอกจากนี้ สำหรับในกรณีของมะเขือเทศและกล้วยน้ำว้าซึ่งเป็นผักและผลไม้สดประเภทไคลแมคเทอริกที่อัตราการหายใจจะเปลี่ยนไปตามช่วงของการเจริญเติบโต โดยสำหรับมะเขือเทศมีอัตราการหายใจเปลี่ยนไปตามช่วงของการเจริญเติบโตดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 แต่จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่ามะเขือเทศที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นมะเขือเทศที่อยู่ในระยะผลสุก [32] ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าอัตราการหายใจที่วัดได้จากการทดลองนี้ดังแสดงในตารางที่ 5.2-5.4 อาจมีค่าน้อยกว่ามะเขือเทศที่อยู่ในระยะเริ่มสุกซึ่งอัตราการหายใจในช่วงนั้นน่าจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่านี้ สำหรับในกรณีของกล้วยน้ำว้าที่เป็นผลไม้สดประเภทไคลแมคเทอริกที่มีอัตราการหายใจสูง เนื่องจากกล้วยน้ำว้าเกิดการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก มีการสุกเกิดขึ้นอย่างชัดเจน และเมื่อเกิดการสุกขึ้นอัตราการหายใจจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากด้วย [3] แต่จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่ากล้วยน้ำว้าที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นกล้วยน้ำว้าที่อยู่ในระยะผลดิบ [33] ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าอัตราการหายใจที่วัดได้จากการทดลองนี้ดังแสดงในตารางที่ 5.5-5.7 อาจมีค่าน้อยกว่ากล้วยน้ำว้าที่มีการสุกเกิดขึ้นซึ่งอัตราการหายใจในช่วงนั้นน่าจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่านี้ สำหรับในส่วนของส้มเขียวหวานและพริกชี้ฟ้าที่เป็นผักและผลไม้สดประเภทนอนไคลแมคเทอริกที่อัตราการหายใจจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ตามช่วงการเจริญเติบโตและจะมีค่าลดลงอย่างช้า ๆ เมื่อผักและผลไม้สดประเภทนี้เกิดความบริบูรณ์ทางสรีระวิทยา (physiological maturity) หรือเมื่อมีการเจริญเติบโตเต็มที่ โดยอัตราการหายใจของผัก

และผลไม้สดประเภทนี้จะมีค่าสูงหรือต่ำแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของผักและผลไม้สดด้วย [3] ดังนั้นจากผลการทดลองที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 5.8-5.13 จึงสามารถสรุปได้ว่าส้มเขียวหวานมีอัตราการหายใจต่ำ ทั้งนี้เนื่องมาจากส้มเป็นผลไม้ที่ไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เกิดขึ้นอย่างชัดเจน จึงทำให้ส้มมีอัตราการหายใจต่ำ [3] ในขณะที่พริกชี้ฟ้ามีอัตราการหายใจที่ค่อนข้างสูง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.1.2 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองอัตราการหายใจ

นำแบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดไม่มีการยับยั้ง ชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ ชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ และชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพททิทีฟมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิดที่คำนวณได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.2 ถึง 5.13 โดยในการฟิตสมการกับข้อมูลอัตราการหายใจนี้ได้ใช้โปรแกรม Sigma Plot ช่วยในการคำนวณดังแสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 4.1.4 ซึ่งข้อมูลอัตราการหายใจที่นำมาฟิตนั้นจะนำเฉพาะข้อมูลในตารางตรงส่วนที่ไม่แรเงามาใช้ในการฟิตเท่านั้น กล่าวคือใช้ข้อมูลเฉพาะส่วนที่ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0 ถึง 21 ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากกว่าร้อยละ 0.03 ขึ้นไป และค่าอัตราการหายใจต้องมีค่าเป็นบวกเท่านั้น นอกจากนี้ข้อมูลส่วนที่ไม่แรเงายังเป็นข้อมูลที่ค่าเศษส่วนของการหายใจ (respiration quotient, R.Q.) มีค่าไม่เกิน 2 (กล่าวคืออัตราการหายใจเหล่านี้ยังถือว่าอยู่ในช่วงการหายใจแบบใช้ก๊าซออกซิเจน) ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนแต่ละแบบที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิดแสดงไว้ในตารางที่ 5.14 ถึง 5.25 (สำหรับผลการคำนวณอัตราการหายใจที่ได้จากแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนแต่ละแบบเทียบกับอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิดที่ได้จากการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ ฉ.1 ถึง ฉ.12 ในภาคผนวก ฉ)

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) ที่ได้จากการฟิตแบบจำลองแต่ละแบบกับข้อมูลอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิดนั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.26 โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดเกณฑ์พิจารณาความแม่นยำออกเป็น 5 กลุ่ม ดังนี้

ถ้า R^2 มีค่าตั้งแต่ 0.90 ขึ้นไป จัดว่าอยู่ในเกณฑ์ดีมาก

ถ้า R^2 มีค่าตั้งแต่ 0.80 แต่น้อยกว่า 0.90 จัดว่าอยู่ในเกณฑ์ดี

ถ้า R^2 มีค่าตั้งแต่ 0.70 แต่น้อยกว่า 0.80 จัดว่าอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง

ถ้า R^2 มีค่าตั้งแต่ 0.60 แต่น้อยกว่า 0.70 จัดว่าอยู่ในเกณฑ์พอใช้

ถ้า R^2 มีค่าต่ำกว่า 0.60 ลงมา จัดว่าอยู่ในเกณฑ์ต่ำ

ตารางที่ 5.14 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

สมการ	พารามิเตอร์	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
$R(O_2)$	V_m	5.3112	5.5238	5.1693	5.3137
	K_m	5.8938	3.0057	1.3300	5.9019
	K_i	-	16.1035	16.4817	$2.29*10^7$
	R^2	0.9656	0.9940	0.9936	0.9657
$R(CO_2)$	V_m	2.4473	2.6613	2.6604	2.4474
	K_m	0.2203	0.0363	0.0279	0.2205
	K_i	-	62.6122	62.5507	$2.88*10^6$
	R^2	0.7035	0.9972	0.9972	0.7038

ตารางที่ 5.15 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

สมการ	พารามิเตอร์	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
$R(O_2)$	V_m	11.6535	10.5988	9.2699	11.6306
	K_m	15.2395	10.9447	6.7091	15.1870
	K_i	-	38.9424	40.2071	$4.10*10^5$
	R^2	0.9969	0.9999	0.9999	0.9969
$R(CO_2)$	V_m	4.7326	4.5159	4.4497	4.7327
	K_m	3.3806	1.3979	1.0420	3.3809
	K_i	-	53.7209	53.6437	$1.46*10^6$
	R^2	0.9759	0.9997	0.9997	0.9759

ตารางที่ 5.16 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

สมการ	พารามิเตอร์	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
$R(O_2)$	V_m	63.0391	62.3281	55.0684	63.0388
	K_m	15.4241	14.0859	9.7637	15.4240
	K_i	-	79.0391	75.7735	$5.58*10^6$
	R^2	0.9989	0.9995	0.9996	0.9989
$R(CO_2)$	V_m	32.4163	33.8133	32.3893	32.4175
	K_m	4.2948	2.8935	1.8010	4.2954
	K_i	-	38.2622	38.7668	$9.10*10^7$
	R^2	0.9758	0.9995	0.9994	0.9758

ตารางที่ 5.17 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

สมการ	พารามิเตอร์	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
$R(O_2)$	V_m	12.6790	12.5897	11.6704	12.6848
	K_m	7.1993	3.8733	1.8913	7.2078
	K_i	-	16.9275	17.3809	$1.88*10^6$
	R^2	0.9649	0.9979	0.9977	0.9650
$R(CO_2)$	V_m	4.7957	5.1119	5.1068	4.7958
	K_m	0.4481	0.1080	0.0841	0.4483
	K_i	-	55.8025	55.7049	$2.74*10^6$
	R^2	0.8079	0.9980	0.9979	0.8080

ตารางที่ 5.18 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

สมการ	พารามิเตอร์	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
$R(O_2)$	V_m	23.1949	22.5029	19.1890	23.1928
	K_m	15.0522	13.2415	7.8875	15.0493
	K_i	-	59.0426	46.5989	$9.77*10^5$
	R^2	0.9994	0.9999	0.9999	0.9994
$R(CO_2)$	V_m	7.9436	8.0539	8.0463	7.9436
	K_m	0.5933	0.1202	0.0979	0.5933
	K_i	-	91.1848	90.8376	$3.21*10^7$
	R^2	0.9194	0.9999	0.9999	0.9194

ตารางที่ 5.19 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

สมการ	พารามิเตอร์	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
$R(O_2)$	V_m	214.1418	214.1628	214.1418	214.1418
	K_m	9.8595	9.8615	9.8595	9.8595
	K_i	-	$5.32*10^6$	$4.26*10^7$	$2.66*10^7$
	R^2	0.9905	0.9905	0.9905	0.9905
$R(CO_2)$	V_m	112.6383	116.4017	116.0541	112.6398
	K_m	1.0563	0.2894	0.2188	1.0564
	K_i	-	72.0706	71.8172	$1.38*10^6$
	R^2	0.9130	0.9995	0.9995	0.9131

ตารางที่ 5.20 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

สมการ	พารามิเตอร์	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
$R(O_2)$	V_m	2.1990	2.3352	2.3350	2.1990
	K_m	0.1451	0.0163	0.0136	0.1451
	K_i	-	91.2114	91.2218	$2.12*10^7$
	R^2	0.5968	0.9987	0.9987	0.5968
$R(CO_2)$	V_m	1.7701	1.8378	1.8378	1.7731
	K_m	0.0839	0.0070	0.0063	0.0839
	K_i	-	151.3682	151.3753	$1.63*10^7$
	R^2	0.5863	0.9969	0.9969	0.5863

ตารางที่ 5.21 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

สมการ	พารามิเตอร์	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
$R(O_2)$	V_m	10.8250	10.8241	10.2185	8.2078
	K_m	22.1393	22.1361	19.5492	11.5591
	K_i	-	$2.48*10^5$	351.7760	41.6301
	R^2	0.9988	0.9988	0.9989	0.9991
$R(CO_2)$	V_m	3.7687	3.7556	3.7273	3.7687
	K_m	1.8521	0.6910	0.5081	1.8521
	K_i	-	66.2444	65.4455	$2.64*10^6$
	R^2	0.9611	0.9996	0.9996	0.9611

ตารางที่ 5.22 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

สมการ	พารามิเตอร์	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
$R(O_2)$	V_m	37.5063	36.2463	31.9044	37.5086
	K_m	16.0831	14.1227	9.7578	16.0848
	K_i	-	87.9858	89.8066	$5.71*10^5$
	R^2	0.9992	0.9999	0.9999	0.9992
$R(CO_2)$	V_m	26.2287	25.3763	24.0057	26.2022
	K_m	6.2911	4.0462	2.6198	6.2782
	K_i	-	52.4136	53.7239	$1.18*10^5$
	R^2	0.9886	0.9996	0.9995	0.9885

ตารางที่ 5.23 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

สมการ	พารามิเตอร์	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
$R(O_2)$	V_m	20.1090	19.1273	16.6409	20.0836
	K_m	11.4479	8.0761	4.1366	11.4185
	K_i	-	33.8571	33.1486	$1.21*10^{6}$
	R^2	0.9949	0.9999	0.9999	0.9949
$R(CO_2)$	V_m	9.3847	9.4809	9.4793	9.3846
	K_m	0.3519	0.0330	0.0292	0.3519
	K_i	-	183.0222	182.8030	$4.62*10^{6}$
	R^2	0.8753	0.9999	0.9999	0.8753

ตารางที่ 5.24 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

สมการ	พารามิเตอร์	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
$R(O_2)$	V_m	18.5880	19.7336	18.7383	18.6312
	K_m	4.5253	2.5766	1.3131	4.5362
	K_i	-	25.3815	25.9462	$1.77*10^{6}$
	R^2	0.9481	0.9968	0.9967	0.9481
$R(CO_2)$	V_m	12.2959	13.1164	13.0948	12.9262
	K_m	0.4680	0.1233	0.0941	0.4681
	K_i	-	73.4689	73.3751	$1.08*10^{7}$
	R^2	0.8403	0.9980	0.9980	0.8403

ตารางที่ 5.25 พารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนที่ได้จากการนำมาฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

สมการ	พารามิเตอร์	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
$R(O_2)$	V_m	201.0777	191.8370	201.0830	201.0854
	K_m	13.1620	9.9847	13.1627	13.1629
	K_i	-	44.0082	$3.95*10^{6}$	$1.08*10^{7}$
	R^2	0.9963	0.9999	0.9963	0.9963
$R(CO_2)$	V_m	117.2042	115.6873	117.2042	117.2042
	K_m	4.0470	2.0102	4.0470	4.0470
	K_i	-	48.6262	$4.33*10^{7}$	$1.26*10^{7}$
	R^2	0.9730	0.9995	0.9730	0.9730

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.26 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) จากผลการฟิตแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนกับข้อมูลอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิด

ผัก/ผลไม้	สมการ	อุณหภูมิ (°C)	R^2 ของแต่ละแบบจำลอง			
			ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
มะเขือเทศ	$R(O_2)$	5±1	0.9656	0.9940	0.9936	0.9657
		11±1	0.9969	0.9999	0.9999	0.9969
		29±1	0.9989	0.9995	0.9996	0.9989
	$R(CO_2)$	5±1	0.7035	0.9972	0.9972	0.7038
		11±1	0.9759	0.9997	0.9997	0.9759
		29±1	0.9758	0.9995	0.9994	0.9758
กล้วยน้ำว้า	$R(O_2)$	5±1	0.9649	0.9979	0.9977	0.9650
		11±1	0.9994	0.9999	0.9999	0.9994
		29±1	0.9905	0.9905	0.9905	0.9905
	$R(CO_2)$	5±1	0.8079	0.9980	0.9979	0.8080
		11±1	0.9194	0.9999	0.9999	0.9194
		29±1	0.9130	0.9995	0.9995	0.9131
ส้มเขียวหวาน	$R(O_2)$	5±1	0.5968	0.9987	0.9987	0.5968
		11±1	0.9988	0.9988	0.9989	0.9991
		29±1	0.9992	0.9999	0.9999	0.9992
	$R(CO_2)$	5±1	0.5863	0.9969	0.9969	0.5863
		11±1	0.9611	0.9996	0.9996	0.9611
		29±1	0.9886	0.9996	0.9995	0.9885
พริกชี้ฟ้า	$R(O_2)$	5±1	0.9949	0.9999	0.9999	0.9949
		11±1	0.9481	0.9968	0.9967	0.9481
		29±1	0.9963	0.9999	0.9963	0.9963
	$R(CO_2)$	5±1	0.8753	0.9999	0.9999	0.8753
		11±1	0.8403	0.9980	0.9980	0.8403
		29±1	0.9730	0.9995	0.9730	0.9730

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อพิจารณาค่า R^2 ดังแสดงในตารางที่ 5.26 ที่ได้จากการฟิตแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนกับข้อมูลอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดทีละชนิดพบว่า (กำหนดให้แบบจำลองที่ 1 คือแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดไม่มีการยับยั้ง แบบจำลองที่ 2 คือแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ แบบจำลองที่ 3 คือแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ และแบบจำลองที่ 4 คือแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพททิทีฟ)

<u>มะเขือเทศ</u>

ในส่วนของอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน พบว่าแบบจำลองทั้ง 4 แบบสามารถฟิตข้อมูลอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนในทุกอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองอยู่ในเกณฑ์ดีมากทั้งสิ้น (R^2 มีค่าตั้งแต่ 0.96 ขึ้นไป) แต่เมื่อพิจารณาที่ทุกอุณหภูมิพบว่า แบบจำลองแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ให้ค่า R^2 อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกันมากและให้ค่า R^2 สูงกว่าแบบจำลองแบบที่ 1 และแบบที่ 4

ในส่วนของอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าแบบจำลองแบบที่ 2 และแบบที่ 3 สามารถฟิตข้อมูลอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในทุกอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองอยู่ในเกณฑ์ดีมาก (R^2 มีค่าตั้งแต่ 0.99 ขึ้นไป) และให้ค่า R^2 ใกล้เคียงกันมาก ในขณะที่แบบจำลองแบบที่ 1 และแบบที่ 4 ให้ค่า R^2 ใกล้เคียงกันที่แต่ละอุณหภูมิแต่น้อยกว่าอีก 2 แบบจำลอง กล่าวคือสำหรับอุณหภูมิ 5$\pm$1 องศาเซลเซียส แบบจำลองแบบที่ 1 และแบบที่ 4 นี้ให้ค่า R^2 อยู่ในเกณฑ์ปานกลางเท่านั้น (R^2 มีค่าเท่ากับ 0.7035 และ 0.7038 ตามลำดับ) สำหรับอุณหภูมิ 11$\pm$1 องศาเซลเซียสและ 29$\pm$1 องศาเซลเซียส แบบจำลองทั้งสองให้ค่า R^2 ที่มีค่าเท่ากันโดยอยู่ในเกณฑ์ดีมาก (R^2 มีค่าเท่ากับ 0.9759 และ 0.9758 ตามลำดับ) ดังนั้นเมื่อพิจารณาในทุกอุณหภูมิแล้ว พบว่าแบบจำลองแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ให้ค่า R^2 โดยรวมสูงกว่าแบบจำลองแบบที่ 1 และแบบที่ 4

<u>กล้วยน้ำว้า</u>

ในส่วนของอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน พบว่าแบบจำลองทั้ง 4 แบบสามารถฟิตข้อมูลอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนในทุกอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองอยู่ในเกณฑ์ดีมากทั้งสิ้น (R^2 มีค่าตั้งแต่ 0.96 ขึ้นไป) แต่เมื่อพิจารณาที่ทุกอุณหภูมิแล้ว พบว่าแบบจำลองแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ให้ค่า R^2 ใกล้เคียงกันมากและให้ค่า R^2 โดยรวมสูงกว่าแบบจำลองแบบที่ 1 และแบบที่ 4

ในส่วนของอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าแบบจำลองแบบที่ 2 และแบบที่ 3 สามารถฟิตข้อมูลอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในทุกอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองอยู่ในเกณฑ์ดีมากทั้งสิ้น (R^2 มีค่าตั้งแต่ 0.99 ขึ้นไป) และมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ในขณะที่แบบจำลองแบบที่ 1 และแบบที่ 4 ให้ค่า R^2 ใกล้เคียงกันในแต่ละอุณหภูมิแต่น้อยกว่าแบบจำลองแบบที่ 2 และแบบที่ 3 กล่าวคือสำหรับอุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส แบบจำลองแบบที่ 1 และแบบที่ 4 ให้ค่า R^2 อยู่ในเกณฑ์ดี (R^2 มีค่าเท่ากับ 0.8079 และ 0.8080 ตามลำดับ) ส่วนอุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียสและ 29±1 องศาเซลเซียส แบบจำลองแบบที่ 1 และแบบที่ 4 ให้ค่า R^2 อยู่ในเกณฑ์ดีมากทั้งสิ้น (R^2 มีค่าตั้งแต่ 0.91 ขึ้นไป) ดังนั้นเมื่อพิจารณาในทุกอุณหภูมิแล้ว พบว่าแบบจำลองแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ให้ค่า R^2 โดยรวมสูงกว่าแบบจำลองแบบที่ 1 และแบบที่ 4

<u>ส้มเขียวหวาน</u>

ในส่วนของอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน พบว่าแบบจำลองแบบที่ 2 และแบบที่ 3 สามารถฟิตข้อมูลอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนในทุกอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองอยู่ในเกณฑ์ดีมากทั้งสิ้น (R^2 มีค่าตั้งแต่ 0.99 ขึ้นไป) และมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ในขณะที่แบบจำลองแบบที่ 1 และแบบที่ 4 ให้ค่า R^2 ในแต่ละอุณหภูมิใกล้เคียงกันแต่น้อยกว่าแบบจำลองแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ซึ่งสำหรับอุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส แบบจำลองแบบที่ 1 และแบบที่ 4 ให้ค่า R^2 เท่ากันโดยอยู่ในเกณฑ์ต่ำ (R^2 มีค่าเท่ากับ 0.5968) ส่วนอุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส แบบจำลองทั้งสองให้ค่า R^2 ใกล้เคียงกันโดยอยู่ในเกณฑ์ดีมากทั้งสิ้น (R^2 มีค่าเท่ากับ 0.9988 และ 0.9991 ตามลำดับ) และที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส แบบจำลองทั้งสองให้ค่า R^2 เท่ากันโดยอยู่ในเกณฑ์ดีมาก (R^2 มีค่าเท่ากับ 0.9992) และเมื่อพิจารณาในทุกอุณหภูมิแล้ว พบว่าแบบจำลองแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ให้ค่า R^2 โดยรวมสูงกว่าแบบจำลองแบบที่ 1 และแบบที่ 4

ในส่วนของอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าแบบจำลองแบบที่ 2 และแบบที่ 3 สามารถฟิตข้อมูลอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในทุกอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองอยู่ในเกณฑ์ดีมากทั้งสิ้น (R^2 มีค่าตั้งแต่ 0.99 ขึ้นไป) และมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ในขณะที่แบบจำลองแบบที่ 1 และแบบที่ 4 ให้ค่า R^2 ในแต่ละอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันแต่น้อยกว่าแบบจำลองแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ซึ่งสำหรับอุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส แบบจำลองแบบที่ 1 และแบบที่ 4 ให้ค่า R^2 เท่ากันโดยอยู่ในเกณฑ์ต่ำ (R^2 มีค่าเท่ากับ

0.5863) ส่วนอุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียสและ 29±1 องศาเซลเซียส พบว่าแบบจำลองแบบที่ 1 และแบบที่ 4 ให้ค่า R^2 ใกล้เคียงกันมากโดยอยู่ในเกณฑ์ดีมากทั้งสิ้น (R^2 มีค่าตั้งแต่ 0.96 ขึ้นไป) และเมื่อพิจารณาในทุกอุณหภูมิแล้ว พบว่าแบบจำลองแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ให้ค่า R^2 โดยรวมสูงกว่าแบบจำลองแบบที่ 1 และแบบที่ 4

พริกชี้ฟ้า

ในส่วนของอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน พบว่าแบบจำลองทั้ง 4 แบบสามารถฟิตข้อมูลอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนในทุกอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองอยู่ในเกณฑ์ดีมากทั้งสิ้น (R^2 มีค่าตั้งแต่ 0.94 ขึ้นไป) และเมื่อพิจารณาในทุกอุณหภูมิแล้ว พบว่าแบบจำลองแบบที่ 2 ให้ค่า R^2 โดยรวมสูงกว่าแบบจำลองแบบอื่น ๆ เล็กน้อย

ในส่วนของอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียสและ 11±1 องศาเซลเซียส แบบจำลองแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ให้ค่า R^2 เท่ากันโดยอยู่ในเกณฑ์ดีมากทั้งสิ้น (R^2 มีค่าเท่ากับ 0.9999 และ 0.9980 ตามลำดับ) ในขณะที่แบบจำลองแบบที่ 1 และแบบที่ 4 ให้ค่า R^2 เท่ากันโดยมีค่าอยู่ในเกณฑ์ดี (R^2 มีค่าเท่ากับ 0.8753 และ 0.8403 ตามลำดับ) ส่วนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส พบว่าแบบจำลองทั้ง 4 แบบให้ค่า R^2 อยู่ในเกณฑ์ดีมากทั้งสิ้น (R^2 มีค่าตั้งแต่ 0.97 ขึ้นไป) โดยแบบจำลองแบบที่ 2 ให้ค่า R^2 สูงกว่าแบบจำลองแบบอื่น ๆ และเมื่อพิจารณาในทุกอุณหภูมิแล้ว พบว่าแบบจำลองแบบที่ 2 ให้ค่า R^2 โดยรวมสูงที่สุด รองลงมาเป็นแบบจำลองแบบที่ 3 ในขณะที่แบบจำลองแบบที่ 1 และแบบที่ 4 ให้ค่า R^2 โดยรวมเท่ากันและมีค่าต่ำที่สุด

ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงค่า R^2 โดยรวมที่ได้จากการฟิตแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนทั้ง 4 แบบกับข้อมูลอัตราการหายใจทั้งในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของผักและผลไม้สดทั้ง 4 ชนิดในทุกอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองพบว่าแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ (แบบที่ 2) และชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ (แบบที่ 3) ให้ค่า R^2 โดยรวมใกล้เคียงกันและสูงกว่าแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดไม่มีการยับยั้ง (แบบที่ 1) และแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพททิทีฟ (แบบที่ 4) แสดงว่าแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ (แบบที่ 2) และชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ (แบบที่ 3) มีความเหมาะสมในการทำนายอัตราการหายใจทั้งในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของผักและผลไม้สดทั้ง 4 ชนิดที่ทุกอุณหภูมิและความเข้มข้นของก๊าซ

ออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลองมากกว่าแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดไม่มีการยับยั้ง (แบบที่ 1) และชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพททิทีฟ (แบบที่ 4)

นอกจากนี้ ค่า R^2 ที่ได้จากการฟิตแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนทั้ง 4 แบบกับข้อมูลอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดทั้ง 4 ชนิดในแต่ละอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองยังสามารถนำมาใช้พิจารณาถึงผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อการยับยั้งอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ โดยถ้าค่า R^2 ของแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งทั้ง 3 แบบมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าค่า R^2 ของแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดไม่มีการยับยั้ง แสดงว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อการยับยั้งอัตราการหายใจน้อยมากหรือแทบจะไม่มีผลเลย แต่ถ้าแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบใดแบบหนึ่งมีค่า R^2 มากกว่าแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดไม่มีการยับยั้ง แสดงว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อการยับยั้งอัตราการหายใจ โดยกระบวนการยับยั้งน่าจะเป็นไปตามแบบจำลองแบบนั้น ๆ และถ้ามีแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งมากกว่า 1 แบบที่มีค่า R^2 มากกว่าแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดไม่มีการยับยั้งแล้ว ก็ให้ถือว่ากระบวนการยับยั้งน่าจะเป็นไปตามแบบจำลองที่มีค่า R^2 สูงที่สุด ซึ่งจากการพิจารณาค่า R^2 ของแบบจำลองแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิดที่ใช้ในการทดลองพบว่า

มะเขือเทศ

ทั้งในส่วนของอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าในทุกอุณหภูมิ แบบจำลองแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ให้ค่า R^2 มากกว่าแบบจำลองแบบที่ 1 ในขณะที่แบบจำลองแบบที่ 4 ให้ค่า R^2 ใกล้เคียงกับแบบจำลองแบบที่ 1 แสดงให้เห็นว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อการยับยั้งอัตราการหายใจทั้งในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยกระบวนการยับยั้งน่าจะเป็นไปตามแบบจำลองแบบที่ 2 หรือแบบที่ 3

กล้วยน้ำว้า

ในส่วนของอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน พบว่าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส แบบจำลองแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ให้ค่า R^2 มากกว่าแบบจำลองแบบที่ 1 ในขณะที่แบบจำลองแบบที่ 4 ให้ค่า R^2 ใกล้เคียงกับแบบจำลองแบบที่ 1 มาก แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมินี้ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อการยับยั้งอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน โดยกระบวนการยับยั้งน่าจะเป็นไปตามแบบจำลองแบบที่ 2 หรือแบบที่ 3 ส่วนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

แบบจำลองทั้ง 4 แบบให้ค่า R^2 ใกล้เคียงกันมาก โดยแบบจำลองแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ให้ค่า R^2 สูงกว่าแบบจำลองแบบอื่น ๆ เล็กน้อย และสำหรับอุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส แบบจำลองทั้ง 4 แบบให้ค่า R^2 เท่ากัน แสดงให้เห็นว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อการยับยั้งอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนน้อยมากโดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

ในส่วนของอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าในทุกอุณหภูมิ แบบจำลองแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ให้ค่า R^2 สูงกว่าแบบจำลองแบบที่ 1 มาก ในขณะที่แบบจำลองแบบที่ 4 ให้ค่า R^2 ใกล้เคียงกับแบบจำลองแบบที่ 1 มาก แสดงให้เห็นว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อการยับยั้งอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยกระบวนการยับยั้งน่าจะเป็นไปตามแบบจำลองที่ 2 หรือแบบที่ 3

<u>ส้มเขียวหวาน</u>

ในส่วนของอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน พบว่าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส แบบจำลองแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ให้ค่า R^2 สูงกว่าแบบจำลองแบบที่ 1 มาก ในขณะที่แบบจำลองแบบที่ 4 ให้ค่า R^2 เท่ากับแบบจำลองแบบที่ 1 แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมินี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อการยับยั้งอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน โดยกระบวนการในการยับยั้งน่าจะเป็นไปตามแบบจำลองแบบที่ 2 หรือแบบที่ 3 ส่วนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียสและ 29±1 องศาเซลเซียส แบบจำลองทั้ง 4 แบบให้ค่า R^2 ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิเหล่านี้ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อการยับยั้งอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนน้อยมาก

ในส่วนของอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าที่ทุกอุณหภูมิ แบบจำลองแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ให้ค่า R^2 สูงกว่าแบบจำลองแบบที่ 1 มาก ในขณะที่แบบจำลองแบบที่ 4 ให้ค่า R^2 ใกล้เคียงกับแบบจำลองแบบที่ 1 แสดงให้เห็นว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อการยับยั้งอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยกระบวนการยับยั้งน่าจะเป็นไปตามแบบจำลองแบบที่ 2 หรือแบบที่ 3

<u>พริกชี้ฟ้า</u>

ในส่วนของอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน พบว่าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียสและ 11±1 องศาเซลเซียส แบบจำลองแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ให้ค่า R^2 สูงกว่าแบบจำลองแบบที่ 1 ในขณะที่แบบจำลองแบบที่ 4 ให้ค่า R^2 เท่ากับแบบจำลองแบบที่ 1

แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิดังกล่าว ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อการยับยั้งอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน โดยกระบวนการยับยั้งน่าจะเป็นไปตามแบบจำลองแบบที่ 2 หรือแบบที่ 3 ส่วนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส แบบจำลองแบบที่ 2 ให้ค่า R^2 สูงกว่าแบบที่ 1 เล็กน้อย ในขณะที่แบบจำลองแบบที่ 3 และแบบที่ 4 ให้ค่า R^2 เท่ากับแบบจำลองแบบที่ 1 แสดงให้เห็นว่าในอุณหภูมินี้ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อการยับยั้งอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนน้อยมาก

ในส่วนของอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียสและ 11±1 องศาเซลเซียส แบบจำลองแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ให้ค่า R^2 สูงกว่าแบบจำลองแบบที่ 1 มาก ในขณะที่แบบจำลองแบบที่ 4 ให้ค่า R^2 เท่ากับแบบจำลองแบบที่ 1 แสดงให้เห็นว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อการยับยั้งอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยกระบวนการยับยั้งน่าจะเป็นไปตามแบบจำลองแบบที่ 2 หรือแบบที่ 3 ส่วนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส แบบจำลองแบบที่ 2 ให้ค่า R^2 สูงกว่าแบบจำลองแบบที่ 1 ในขณะที่แบบจำลองแบบที่ 3 และแบบที่ 4 ให้ค่า R^2 เท่ากับแบบจำลองแบบที่ 1 แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมินี้ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อการยับยั้งอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งกระบวนการในการยับยั้งน่าจะเป็นไปตามแบบจำลองแบบที่ 2

จากข้อมูลที่กล่าวมานี้ได้แสดงให้เห็นว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อการยับยั้งอัตราการหายใจทั้งในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของผักและผลไม้สดทั้ง 4 ชนิดภายใต้ช่วงอุณหภูมิและความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง โดยกระบวนการยับยั้งส่วนใหญ่จะเป็นไปตามแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ (แบบที่ 2) หรือชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ (แบบที่ 3)

นอกจากนี้จากข้อมูลอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดทั้ง 4 ชนิดที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ และค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองอัตราการหายใจแบบต่าง ๆ ที่คำนวณได้ดังแสดงในตารางที่ 5.14-5.25 พบว่าถ้าแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดที่มีการยับยั้งแบบใดให้ค่า R^2 เท่ากันหรือใกล้เคียงกันมาก ๆ กับแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดที่ไม่มีการยับยั้งแล้ว จะพบว่าค่าพารามิเตอร์ V_m และ K_m ของแบบจำลองนั้น ๆ จะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดที่ไม่มีการยับยั้ง ส่วนค่าพารามิเตอร์ K_i ของแบบจำลองนั้น ๆ จะมีค่าสูงมาก

เมื่อเทียบกับค่า K_i ของแบบจำลองชนิดที่มีการยับยั้งที่ให้ค่า R^2 แตกต่างไปจากแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดที่ไม่มีการยับยั้ง เช่น จากตารางที่ 5.14 พบว่าแบบจำลองชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพททิทีฟให้ค่า R^2 ใกล้เคียงกับแบบจำลองชนิดไม่มีการยับยั้งมาก จะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ V_m และ K_m ของแบบจำลองชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพททิทีฟนี้มีค่าใกล้เคียงแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดที่ไม่มีการยับยั้ง ในขณะที่ค่า K_i ของแบบจำลองชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพททิทีฟนี้มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับค่า K_i ของแบบจำลองชนิดที่มีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟและแบบนอนคอมเพททิทีฟที่ให้ค่า R^2 แตกต่างไปจากแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดที่ไม่มีการยับยั้ง ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อพิจารณาถึงรูปแบบของแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดที่มีการยับยั้งทั้ง 3 แบบแล้วจะพบว่าค่า K_i เป็นตัวหารของพจน์ $[CO_2]$ เสมอ ดังนั้นเมื่อค่า K_i ของแบบจำลองใดมีค่าสูง จะทำให้พจน์ $\frac{[CO_2]}{K_i}$ ของแบบจำลองนั้นมีค่าลดลง และถ้าค่า K_i มีค่าสูงมากก็จะทำให้พจน์ $\frac{[CO_2]}{K_i}$ มีค่าลดลงมาก ๆ จนเข้าใกล้ศูนย์ ทำให้แบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดที่มีการยับยั้งแบบนั้น ๆ มีรูปแบบของแบบจำลองที่คล้ายกับแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดที่ไม่มีการยับยั้งมาก

นอกจากนี้ในเรื่องของผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการฟิตกับข้อมูลอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดทั้ง 4 ชนิดนี้ โดยในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนเฉพาะแบบที่ให้ค่า R^2 โดยรวมสูงกว่าแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนแบบอื่น ๆ เมื่อเปรียบเทียบกันเท่านั้น โดยสำหรับมะเขือเทศ กล้วยน้ำว้าและส้มเขียวหวาน จะพิจารณาเฉพาะแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟและชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟเท่านั้น และสำหรับพริกชี้ฟ้าจะพิจารณาเฉพาะแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟเท่านั้น ดังนั้นผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

สำหรับค่า V_m (ค่าอัตราการหายใจที่สูงที่สุด) ทั้งในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแบบจำลองทุกแบบที่นำมาพิจารณาสำหรับผักและผลไม้สดทั้ง 4 ชนิดที่นำมาทดลองจะมีแนวโน้มในแบบเดียวกันทั้งหมดคือมีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่นจากตารางที่ 5.14-5.16 จะเห็นได้ว่าสำหรับมะเขือเทศ ค่า V_m ของแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5.5238

ไปเป็น 62.3281 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 5±1 องศาเซลเซียสไปเป็น 29±1 องศาเซลเซียส เป็นต้น ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา [11,16,31]

สำหรับค่า K_m (ค่าคงที่ไมเคิลลิสเมนเทน) ในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน พบว่าแบบจำลองแต่ละแบบที่นำมาพิจารณาสำหรับผักและผลไม้สดแต่ละชนิดมีแนวโน้มที่แตกต่างกันไปตามชนิดของผักและผลไม้สดและช่วงอุณหภูมิ โดยมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่นสำหรับมะเขือเทศ (จากตารางที่ 5.14-5.16) พบว่าค่า K_m ในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนของแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในขณะที่สำหรับกล้วยน้ำว้าพบว่าค่า K_m ในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนของแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 5±1 องศาเซลเซียสไปเป็น 11±1 องศาเซลเซียส และมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 11±1 องศาเซลเซียสไปเป็น 29±1 องศาเซลเซียส เป็นต้น แต่โดยส่วนใหญ่แล้วพบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และผลที่ได้นี้มีลักษณะในทำนองเดียวกับผลงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา [11,31] ส่วนค่า K_m (ค่าคงที่ไมเคิลลิสเมนเทน) ในรูปแบบของอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่ามีแนวโน้มในแบบเดียวกันทั้งหมดคือมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

สำหรับค่า K_i (ค่าคงที่ของการยับยั้ง) ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ K_{mu} (ค่าคงที่ของการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ) K_{mn} (ค่าคงที่ของการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ) และ K_{mc} (ค่าคงที่ของการยับยั้งแบบคอมเพททิทีฟ) โดยในส่วนของอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน พบว่าแบบจำลองแต่ละแบบที่นำมาพิจารณาสำหรับผักและผลไม้สดแต่ละชนิดมีแนวโน้มที่แตกต่างกันไปตามชนิดของผักและผลไม้สดและช่วงอุณหภูมิ โดยมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ส่วนใหญ่พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และในส่วนของอัตราการหายใจในรูปแบบของอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าแบบจำลองแต่ละแบบที่นำมาพิจารณาสำหรับผักและผลไม้สดแต่ละชนิดมีแนวโน้มที่แตกต่างกันไปเช่นเดียวกับในส่วนของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน แต่ส่วนใหญ่พบว่ามีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

จากที่กล่าวมานี้ จะเห็นได้ว่าแม้ว่าอุณหภูมิจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบหนึ่ง ๆ สำหรับผักและผลไม้สดชนิดหนึ่ง ๆ แตกต่างกันไป แต่เมื่อมีการแทนค่าพารามิเตอร์ลงไปในแบบจำลองนั้น ๆ แล้ว จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการหายใจของผักและผลไม้สดชนิดนั้นที่คำนวณได้จากแบบจำลองนั้น ๆ มี

ค่าเพิ่มขึ้น เมื่อกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ล้อมรอบผักและผลไม้สดชนิดนั้นมีค่าเท่ากันและการหายใจเป็นแบบใช้ก๊าซออกซิเจนเท่านั้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิดที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ ที่ได้มีการแทนค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ลงไปโดยกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในทุกอุณหภูมิมีค่าเท่ากันและค่าเศษส่วนของการหายใจ (respiration quotient, R.Q.) มีค่าไม่เกิน 2 ซึ่งผลการคำนวณสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.27-5.30 (โดยในที่นี้ทำการคำนวณเฉพาะแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนแบบที่ให้ค่า R^2 โดยรวมสูงกว่าแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนแบบอื่น ๆ เมื่อเปรียบเทียบกันเท่านั้น โดยสำหรับมะเขือเทศ กล้วยน้ำว้าและส้มเขียวหวาน จะพิจารณาเฉพาะแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟและชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟเท่านั้น และสำหรับพริกชี้ฟ้าจะพิจารณาเฉพาะแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟเท่านั้น)

จากตารางที่ 5.27-5.30 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการหายใจของผักและผลไม้สดทั้งในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของผักและผลไม้สดทั้ง 4 ชนิดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ล้อมรอบผักและผลไม้สดชนิดนั้นมีค่าเท่ากันและการหายใจเป็นแบบใช้ก๊าซออกซิเจน ซึ่งจากผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลที่ได้กล่าวไว้แล้วในข้างต้น แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งที่มีผลกระทบต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สด โดยผลกระทบของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นนี้จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของผักและผลไม้สด แต่อย่างไรก็ตามในการเก็บรักษาผักและผลไม้สดทุกชนิดเพื่อให้คงคุณภาพ ความสดและรสชาติไว้ให้ได้นานนั้น จึงควรเก็บรักษาไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการเก็บรักษาไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิสูง ผักและผลไม้สดจะมีอัตราการหายใจสูง ซึ่งจะเป็นการเร่งการใช้สารอาหารที่สะสมไว้ภายในเซลล์เพื่อใช้ในการหายใจมากขึ้น ส่งผลให้อัตราในการเสื่อมสภาพของผักและผลไม้สดเกิดได้เร็วขึ้น เซลล์ของผักและผลไม้สดถูกทำลายได้ง่ายเป็นเหตุให้เชื้อจุลินทรีย์เข้ามาทำให้เกิดการเน่าเสียได้ง่ายขึ้น ทำให้อายุในการเก็บรักษาผักและผลไม้สดสั้นลงเมื่อเทียบกับการเก็บรักษาไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำ [2,3]

ตารางที่ 5.27 ผลการคำนวณอัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทน โดยกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทุกอุณหภูมิมีค่าเท่ากัน

ความเข้มข้น (%)		แบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ						แบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ					
O_2	CO_2	$R(O_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})			$R(CO_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})			$R(O_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})			$R(CO_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})		
		5±1°C	11±1°C	29±1°C	5±1°C	11±1°C	29±1°C	5±1°C	11±1°C	29±1°C	5±1°C	11±1°C	29±1°C
20	1	4.5561	6.7383	36.3017	2.6148	4.1487	28.8803	4.5697	6.7729	36.5217	2.6149	4.1520	28.9664
15	5	3.6560	5.7043	31.1279	2.4590	3.8068	25.5469	3.6431	5.6967	31.2915	2.4589	3.8059	25.6137
10	10	2.8747	4.5077	24.5860	2.2876	3.4058	21.8051	2.8396	4.4428	24.6149	2.2873	3.3966	21.8182
6	15	2.2709	3.3025	17.6196	2.1365	2.9863	18.0407	2.2153	3.1873	17.4966	2.1359	2.9628	17.9617

ตารางที่ 5.28 ผลการคำนวณอัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทน โดยกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทุกอุณหภูมิมีค่าเท่ากัน

ความเข้มข้น (%)		แบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ						แบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ					
O_2	CO_2	$R(O_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})			$R(CO_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})			$R(O_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})			$R(CO_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})		
		5±1°C	11±1°C	29±1°C	5±1°C	11±1°C	29±1°C	5±1°C	11±1°C	29±1°C	5±1°C	11±1°C	29±1°C
20	1	10.0569	13.4025	143.4374	4.9954	7.9195	113.1932	10.0821	13.4726	143.4329	4.9957	7.9199	113.2217
15	5	8.1094	11.4376	129.2134	4.6607	7.5777	106.9210	8.0484	11.3574	129.2112	4.6600	7.5771	106.9403
10	10	6.3691	9.0246	107.8280	4.2957	7.1802	99.6852	6.2299	8.8322	107.8284	4.2935	7.1781	99.6884
6	15	4.9764	6.5019	81.0122	3.9726	6.7992	92.6498	4.7629	6.2717	81.0146	3.9678	6.7951	92.6249

ตารางที่ 5.29 ผลการคำนวณอัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทน โดยกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทุกอุณหภูมิมีค่าเท่ากัน

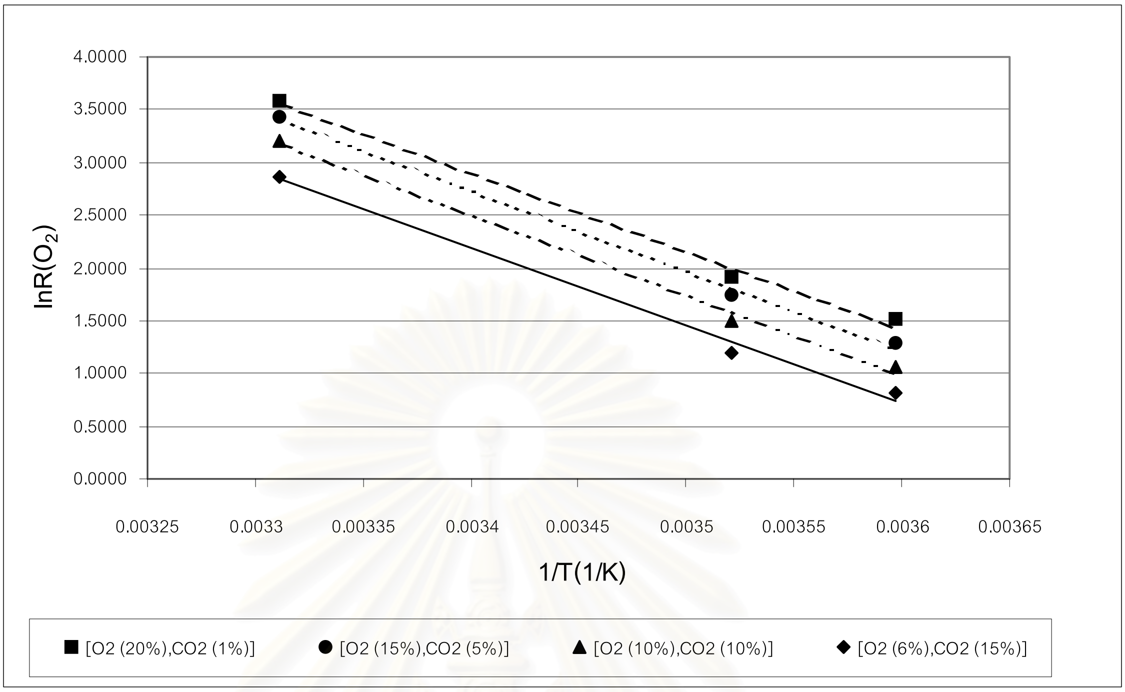
ความเข้มข้น (%)		แบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ						แบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ					
O_2	CO_2	$R(O_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})			$R(CO_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})			$R(O_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})			$R(CO_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})		
		5±1°C	11±1°C	29±1°C	5±1°C	11±1°C	29±1°C	5±1°C	11±1°C	29±1°C	5±1°C	11±1°C	29±1°C
20	1	2.3080	5.1377	21.1041	1.8251	3.5780	20.7766	2.3081	5.1528	21.2066	1.8252	3.5802	20.8375
15	5	2.2116	4.3720	18.1382	1.7782	3.3486	18.5888	2.2117	4.3743	18.3105	1.7783	3.3493	18.6964
10	10	2.1014	3.3682	14.3497	1.7228	3.0782	15.9058	2.1015	3.3625	14.5298	1.7228	3.0769	16.0371
6	15	2.0007	2.3082	10.2848	1.6703	2.7993	12.9434	2.0007	2.3016	10.4094	1.6704	2.7956	13.0626

ตารางที่ 5.30 ผลการคำนวณอัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทน โดยกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทุกอุณหภูมิมีค่าเท่ากัน

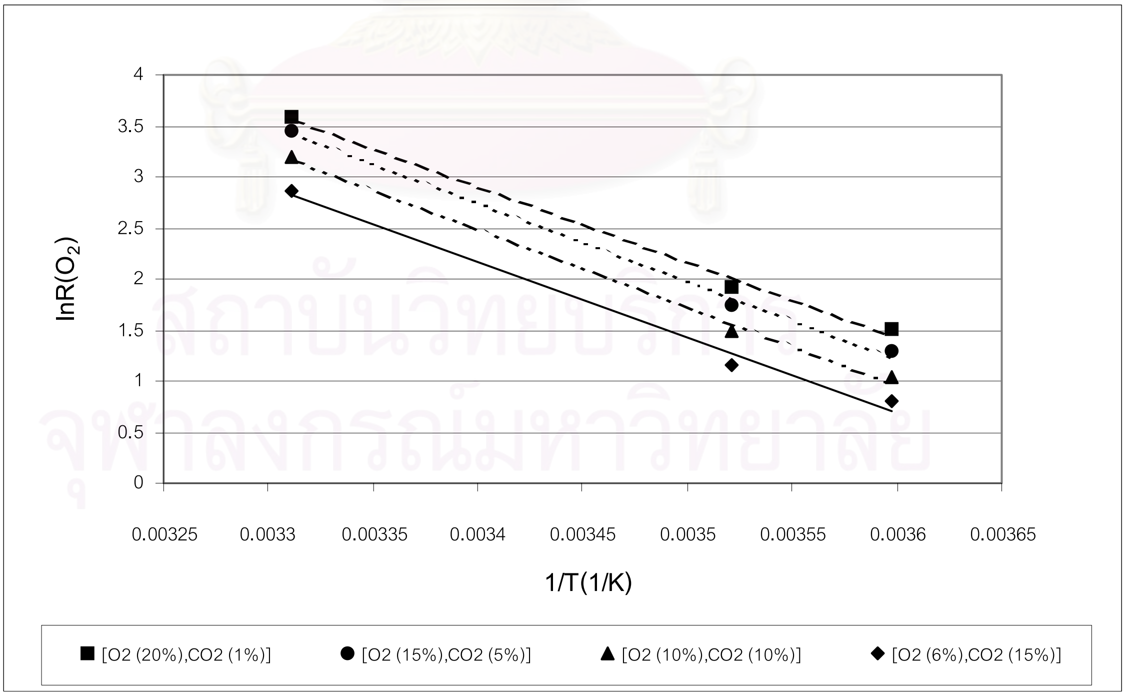
ความเข้มข้น (%)		แบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ					
O_2	CO_2	$R(O_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})			$R(CO_2)$ (ml kg^{-1} hr^{-1})		
		5±1°C	11±1°C	29±1°C	5±1°C	11±1°C	29±1°C
20	1	13.3446	16.8919	126.0462	9.4139	12.8620	103.1932
15	5	11.3442	14.4171	107.8183	9.2091	12.1868	93.5347
10	10	9.0954	11.9478	86.1917	8.9617	11.4210	82.2419
6	15	6.8580	9.7671	63.8401	8.7184	10.7097	70.3904

นอกจากนี้ข้อมูลในตารางที่ 5.27-5.30 สามารถนำมาพลอตกราฟระหว่างค่าลอกาลิธึมธรรมชาติของอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิดที่ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่าใด ๆ กับค่าส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองได้ (กำหนดให้การหายใจเป็นแบบใช้ก๊าซออกซิเจน) โดยตัวอย่างกราฟที่ได้นี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.13-5.16

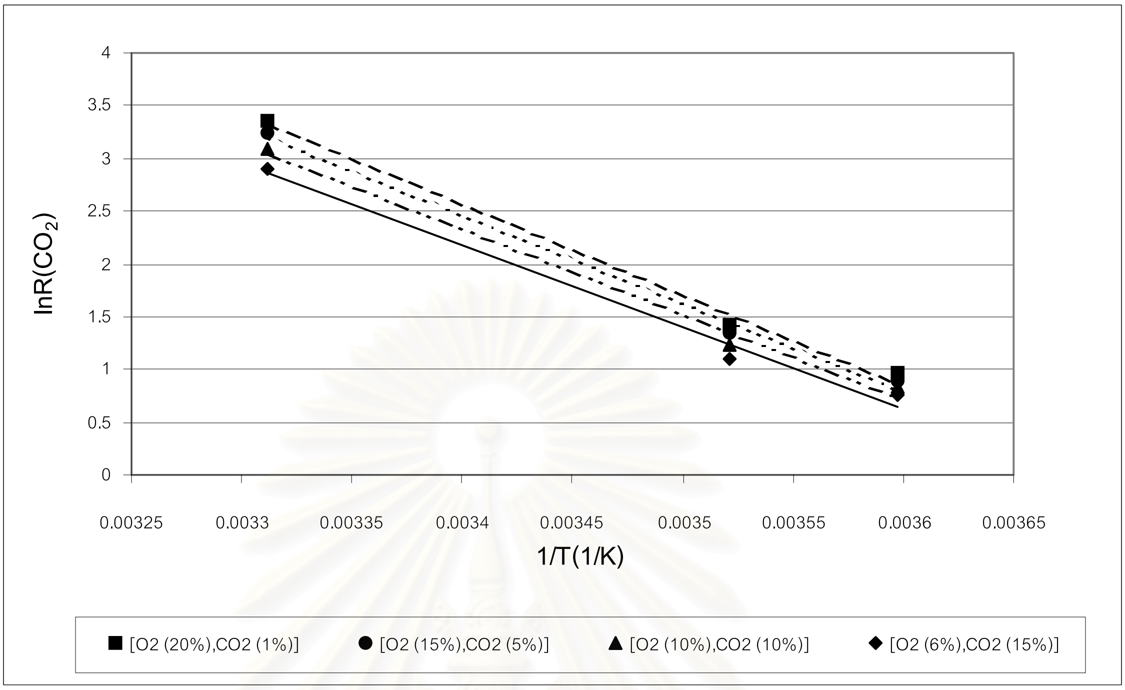
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



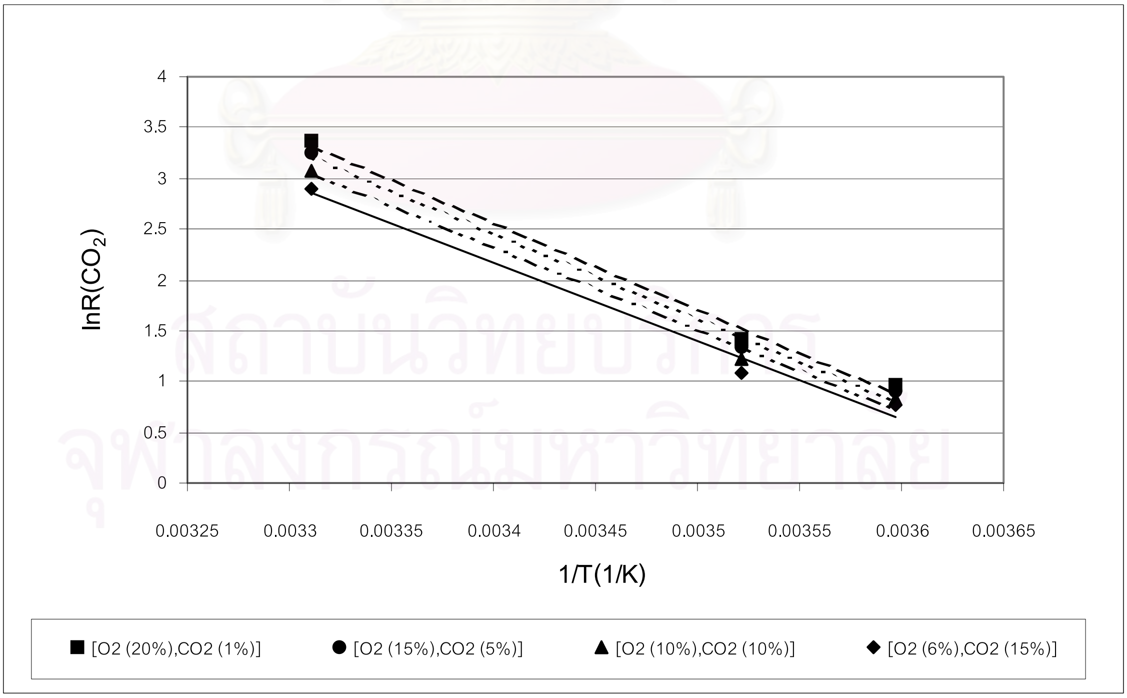
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง lnR(O_2) ของมะเขือเทศ กับ 1/T (1/K) (ข้อมูลจากตารางที่ 5.27 ในส่วนของแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ)



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง lnR(O_2) ของมะเขือเทศ กับ 1/T (1/K) (ข้อมูลจากตารางที่ 5.27 ในส่วนของแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ)



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง lnR(CO_2) ของมะเขือเทศ กับ 1/T (1/K) (ข้อมูลจากตารางที่ 5.27 ในส่วนของแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ)



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง lnR(CO_2) ของมะเขือเทศ กับ 1/T (1/K) (ข้อมูลจากตารางที่ 5.27 ในส่วนของแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตัวอย่างกราฟที่พลอตระหว่างค่าลอกาลิธึมธรรมชาติ (ln) ของอัตราการหายใจของมะเขือเทศที่ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่าใด ๆ กับค่าส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์ที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.13-5.16 รวมทั้งกราฟของผักและผลไม้สดที่เหลืออีก 3 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง พบว่ากราฟมีลักษณะแบบเดียวกันคือได้กราฟเป็นเส้นตรงและมีความชันเป็นลบ โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจหรือค่า R^2 ของผลการฟิตสมการเส้นตรงมีค่าอยู่ในเกณฑ์ดีมากทั้งสิ้น (ค่า R^2 มีค่ามากกว่า 0.96 ขึ้นไป) แสดงให้เห็นว่าผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดทั้ง 4 ชนิดที่ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่าใด ๆ เป็นไปตามสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius equation) ตามสมการที่ 2.3 (กำหนดให้การหายใจเป็นแบบใช้ก๊าซออกซิเจน) นอกจากนั้นจากกราฟเหล่านี้ยังแสดงให้เห็นว่าค่าความชันของกราฟแต่ละเส้นในรูปหนึ่ง ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน (แต่แตกต่างกันไปในแต่ละรูป) แสดงว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการหายใจ (E_r) ของผักและผลไม้สดชนิดหนึ่ง ๆ มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการหายใจ โดยค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิดที่คำนวณได้จากค่าความชัน (slope) ของกราฟสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.31

ตารางที่ 5.31 ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการหายใจ (E_r) ของผักและผลไม้สดทั้ง 4 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง

ผักและผลไม้สด	อันคอมเพททิทีฟ		นอนคอมเพททิทีฟ	
	E_r (O_2) (kJ mol^{-1})	E_r (CO_2) (kJ mol^{-1})	E_r (O_2) (kJ mol^{-1})	E_r (CO_2) (kJ mol^{-1})
มะเขือเทศ	62.39±1.20	68.08±3.18	62.84±1.16	68.09±3.23
กล้วยน้ำว้า	83.89±2.17	94.06±0.13	84.29±2.57	94.08±0.14
ส้มเขียวหวาน	57.51±5.03	65.81±4.94	57.80±4.66	66.01±4.57
พริกชี้ฟ้า	67.99±0.73	68.60±3.87	-	-

จากค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการหายใจของผักและผลไม้สดทั้ง 4 ชนิดที่ใช้ในการทดลองที่คำนวณได้ดังแสดงในตารางที่ 5.31 พบว่าถ้าพิจารณาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการหายใจเฉลี่ยของผักและผลไม้สดแต่ละชนิด จะเห็นได้ว่าผักและผลไม้สดแต่ละชนิดที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการหายใจไม่เท่ากัน ซึ่งจากงานวิจัยนี้พบว่ากล้วยน้ำว้ามีค่า

พลังงานก่อกัมมันต์ของการหายใจเฉลี่ยสูงที่สุด ในขณะที่ส้มเขียวหวานมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการหายใจเฉลี่ยต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อุณหภูมิจะส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้ามากที่สุด ในขณะที่จะส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการหายใจของส้มเขียวหวานน้อยที่สุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

5.2.1 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ได้จากการทดลอง

จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ 2 ชนิด ได้แก่ พอลิเอทธิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) ความหนา 33 และ 45 ไมครอน และพอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) ความหนา 25 และ 50 ไมครอน โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 5±1, 11±1 และ 29±1 องศาเซลเซียส ซึ่งรายละเอียดของการทดลองได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.2.2 โดยได้ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้งในแต่ละอุณหภูมิ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งรายละเอียดในการคำนวณได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.2.3.1 และ 4.2.3.2 โดยในการคำนวณค่า GTR ของก๊าซออกซิเจน (OTR) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2TR) สำหรับฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิดสามารถหาได้จากการนำค่าความชัน (slope) ที่ได้จากการพลอตกราฟระหว่างค่า $\ln\left(\frac{\Delta p}{\Delta p^0}\right)$ ของก๊าซทั้ง 2 ชนิดกับเวลา (t) มาคูณด้วยปริมาตรอากาศภายใน chamber ของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น (V) แล้วหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของฟิล์มที่สัมผัสกับบรรยากาศภายนอก (A) ดังแสดงไว้ในสมการที่ 4.12

$$GTR = \frac{-slopeV}{A} \tag{4.12}$$

โดย V = 29.91 cm^3

A = 50.27 cm^2

และสำหรับค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.13

$$P(cm^2s^{-1}) = GTR(cm^3cm^{-2}s^{-1})x(cm) \tag{4.13}$$

ตารางที่ 5.32 แสดงค่า GTR ของก๊าซออกซิเจน (OTR) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2TR) สำหรับฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองแต่ละชนิดที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.12 และ

ตารางที่ 5.33 แสดงค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองแต่ละชนิดที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.13 (สำหรับค่าพื้นที่พีคที่อ่านได้จากเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คำนวณได้ ค่า $\ln\left(\frac{\Delta p}{\Delta p^0}\right)$ ของก๊าซทั้ง 2 ชนิดที่ได้จากการคำนวณรวมทั้งกราฟที่พลอตระหว่าง $\ln\left(\frac{\Delta p}{\Delta p^0}\right)$ ของก๊าซทั้ง 2 ชนิดกับเวลา (t) ของฟิล์มแต่ละชนิดและค่าความชันที่หาได้จากกราฟแสดงไว้ในภาคผนวก ช)

ตารางที่ 5.32 อัตราการส่งผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ฟิล์ม	ความหนา (ไมครอน)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการส่งผ่านของ O_2 (OTR) $*10^6(cm^3\ cm^{-2}\ s^{-1})$			อัตราการส่งผ่านของ CO_2 (CO_2TR) $*10^6(cm^3\ cm^{-2}\ s^{-1})$		
			ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
LDPE	33	5±1	1.22	1.34	1.28	2.99	3.21	3.10
		11±1	2.05	1.98	2.015	4.36	3.98	4.17
		29±1	7.92	7.82	7.87	14.54	14.41	14.475
	45	5±1	1.09	1.10	1.095	2.36	2.45	2.405
		11±1	1.95	1.60	1.775	3.90	3.67	3.785
		29±1	5.21	5.49	5.35	10.58	13.12	11.85
PP	25	5±1	1.39	1.36	1.375	2.81	3.09	2.95
		11±1	1.83	1.72	1.775	3.77	3.60	3.685
		29±1	6.38	7.09	6.735	14.23	12.25	13.24
	50	5±1	0.92	0.79	0.855	2.08	1.82	1.95
		11±1	1.16	1.19	1.175	2.38	2.45	2.415
		29±1	3.26	4.08	3.67	8.00	7.97	7.985

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.33 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ฟิล์ม	อุณหภูมิ (^{o}C)	ความหนา (ไมครอน)	$P(O_2)$ $*10^9(cm^2 s^{-1})$	$P(CO_2)$ $*10^9(cm^2 s^{-1})$	ความหนา (ไมครอน)	$P(O_2)$ $*10^9(cm^2 s^{-1})$	$P(CO_2)$ $*10^9(cm^2 s^{-1})$	$P(O_2)$ เฉลี่ย $*10^9(cm^2 s^{-1})$	$P(CO_2)$ เฉลี่ย $*10^9(cm^2 s^{-1})$
LDPE	5±1	33	4.22	10.23	45	4.93	10.82	4.58	10.53
	11±1		6.65	13.76		7.99	17.03	7.32	15.40
	29±1		25.97	47.77		24.08	53.33	25.03	50.55
PP	5±1	25	3.44	7.38	50	4.28	9.75	3.86	8.57
	11±1		4.44	9.21		5.88	12.08	5.16	10.65
	29±1		16.84	33.10		18.35	39.93	17.60	36.52

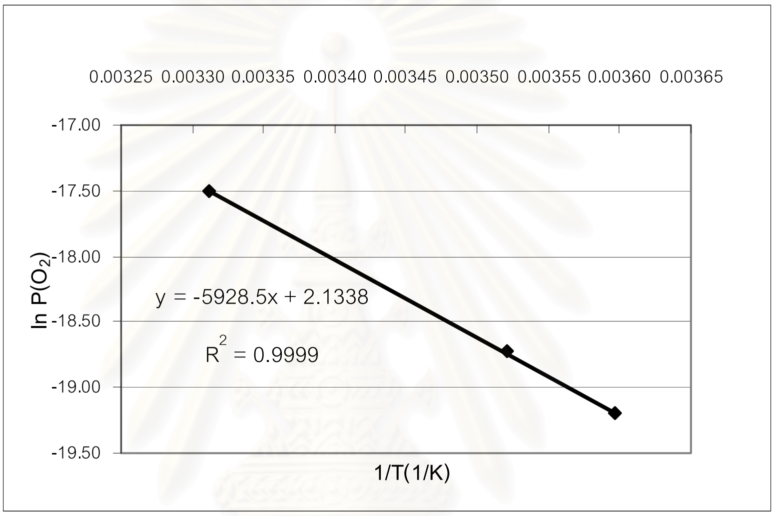
5.2.2 การคำนวณหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง

นำค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์เฉลี่ยของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิดดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 5.33 มาคำนวณหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ตามสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius equation) ดังแสดงในสมการที่ 2.24 โดยรายละเอียดของการคำนวณค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.2.3.3 โดยค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์สามารถคำนวณได้จากค่าความชัน (slope) ที่ได้จากการฟิตด้วยสมการเส้นตรงของกราฟที่พลอตระหว่างค่าลอกาลิธึมธรรมชาติ (ln) ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์เฉลี่ยของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิดกับค่าส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์ (1/T) คูณด้วยค่าคงที่ของก๊าซ (R) ดังสมการที่ 4.16

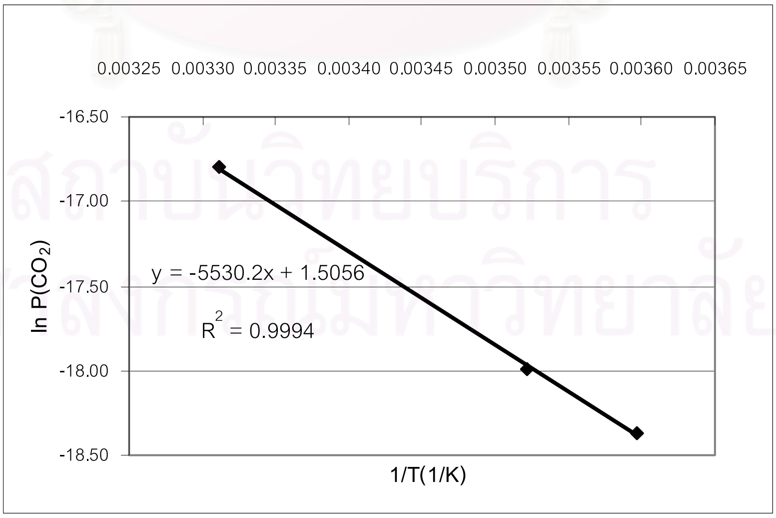
$$E_p = -(slope)R \qquad (4.16)$$

โดย R = 8.3144*10^{-3} kJ mol^{-1} K^{-1}

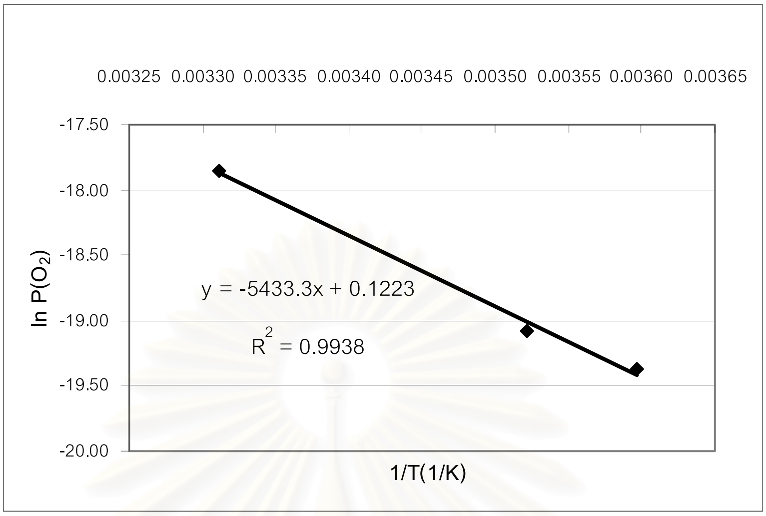
รูปที่ 5.17-5.20 แสดงกราฟที่พลอตระหว่างค่าลอกาลิธึมธรรมชาติของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์เฉลี่ยของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิดกับค่าส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์ (1/T) และสำหรับค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.16 สามารถแสดงได้ในตารางที่ 5.34 ซึ่งมีหน่วยเป็น kJ mol^{-1}



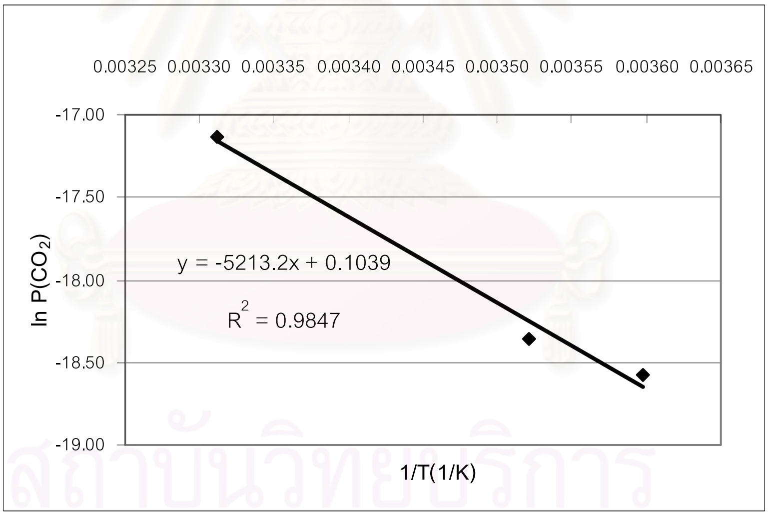
รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln P(O_2) กับ 1/T(1/K) ของฟิล์ม LDPE



รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln P(CO_2) กับ 1/T(1/K) ของฟิล์ม LDPE



รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln P(O_2) กับ 1/T(1/K) ของฟิล์ม PP



รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln P(CO_2) กับ 1/T(1/K) ของฟิล์ม PP

ตารางที่ 5.34 ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ฟิล์ม	พลังงานก่อกัมมันต์ (E_p) (kJ mol^{-1})	
	O_2	CO_2
LDPE	49.29	45.98
PP	45.17	43.34

สำหรับค่าตัดแกน Y (Y intercept) ที่ได้จากการแทนค่าส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์ (1/T) เท่ากับศูนย์ลงในสมการที่ได้จากการฟิตกับข้อมูลผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.17-5.20 สามารถนำมาคำนวณค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิอนันต์ (P_0) ได้ตามสมการที่ 4.17 โดยค่า P_0 ที่คำนวณได้นี้สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.35

ตารางที่ 5.35 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิอนันต์ (P_0)

ฟิล์ม	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิอนันต์ (P_0) (cm^2 s^{-1})	
	O_2	CO_2
LDPE	8.447	4.507
PP	1.130	1.109

5.2.3 นำค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ (E_p) ที่ได้จากตารางที่ 5.34 และค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิอนันต์ (P_0) ที่ได้จากตารางที่ 5.35 มาคำนวณหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตามสมการของ

อาร์รีเนียส (Arrhenius equation) (สมการที่ 2.24) ดังแสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 4.2.3.4 ซึ่งค่าที่คำนวณได้สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.36

ตารางที่ 5.36 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ (E_p) จากตารางที่ 5.34 และค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิอนันต์ (P_0) จากตารางที่ 5.35

ฟิล์ม	อุณหภูมิ (^{o}C)	P (O_2) *10^9($cm^2 s^{-1}$)	P (CO_2) *10^9($cm^2 s^{-1}$)
LDPE	5	4.63	10.34
	11	7.26	15.74
	25	19.37	39.30
	29	25.21	50.25
PP	5	3.68	7.97
	11	5.56	11.85
	25	13.66	28.07
	29	17.40	35.39

5.2.4 การตรวจสอบค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ได้จากการคำนวณ (ตารางที่ 5.36)

ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์จากแหล่งต่าง ๆ มีดังนี้

ก. ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองที่ได้จากบริษัทที่อนุเคราะห์ฟิล์ม โดยต้องแปลงจากค่าอัตราการส่งผ่านของก๊าซ (gas transmission rate) ที่บริษัทให้มาเป็นค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.37

ตารางที่ 5.37 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองที่ได้จากบริษัทที่อนุเคราะห์ฟิล์ม

ฟิล์ม	ความหนา (ไมครอน)	อุณหภูมิ (^{o}C)	อัตราการส่งผ่านของ O_2 ($cm^3\ m^{-2}\ day^{-1}$)	P (O_2) $*10^9$($cm^2 s^{-1}$)	P (O_2)เฉลี่ย $*10^9$($cm^2 s^{-1}$)
LDPE	33	25	5700	21.77	21.83
LDPE	45	25	4200	21.82	
PP	25	25	4200	12.15	12.15
PP	50	25	2100	12.15	

ข. ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองที่ได้จากการนำฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองไปวัดด้วยเครื่อง oxygen permeability analyzer (ตามรายละเอียดในภาคผนวก ง) สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.38

ตารางที่ 5.38 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง Oxygen Permeability Analyzer

ฟิล์ม	ความหนา (ไมครอน)	อุณหภูมิ (^{o}C)	อัตราการส่งผ่านของ O_2 ($cm^3\ m^{-2}\ day^{-1}$)			P (O_2) $*10^9$($cm^2 s^{-1}$)	P (O_2) เฉลี่ย $*10^9$($cm^2 s^{-1}$)
			ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย		
LDPE	33	25	5454	5660	5557	21.22	21.42
LDPE	45	25	4241	4062	4151.5	21.62	
PP	25	25	4122	4285	4203.5	12.16	11.90
PP	50	25	1938	2082	2010	11.63	

ค. ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองที่ได้จากการประมาณค่าโดยการคำนวณตามสมการในหัวข้อที่ 2.2.3 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.39 (รายละเอียดในการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ซ)

ตารางที่ 5.39 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองที่ได้จากการประมาณค่า

อุณหภูมิ (°C)	ก๊าซ	ช่วงของค่า	LDPE		PP	
			P (cm^3(STP) cm cm^{-2} s^{-1} Pa^{-1})	*P* (cm^2 s^{-1})	*P* (cm^3(STP) cm cm^{-2} s^{-1} Pa^{-1})	*P* (cm^2 s^{-1})
5	O_2	ต่ำสุด	1.66E-15	1.70E-10	8.68E-16	8.84E-11
		สูงสุด	4.19E-13	4.26E-08	2.18E-13	2.22E-08
	CO_2	ต่ำสุด	1.60E-15	1.63E-10	7.88E-16	8.03E-11
		สูงสุด	4.00E-13	4.08E-08	1.97E-13	2.00E-08
11	O_2	ต่ำสุด	2.40E-15	2.49E-10	1.27E-15	1.31E-10
		สูงสุด	6.05E-13	6.27E-08	3.18E-13	3.30E-08
	CO_2	ต่ำสุด	2.42E-15	2.51E-10	1.21E-15	1.25E-10
		สูงสุด	6.10E-13	6.33E-08	3.04E-13	3.15E-08
25	O_2	ต่ำสุด	2.41E-14	2.63E-09	1.30E-14	1.42E-09
		สูงสุด	4.81E-13	5.25E-08	2.61E-13	2.84E-08
	CO_2	ต่ำสุด	3.05E-14	3.33E-09	1.58E-14	1.72E-09
		สูงสุด	6.06E-13	6.61E-08	3.13E-13	3.41E-08
29	O_2	ต่ำสุด	8.71E-15	9.63E-10	4.75E-15	5.25E-10
		สูงสุด	2.19E-12	2.43E-07	1.19E-12	1.32E-07
	CO_2	ต่ำสุด	1.06E-14	1.17E-09	5.50E-15	6.09E-10
		สูงสุด	2.65E-12	2.93E-07	1.38E-12	1.53E-07

การเปรียบเทียบข้อมูลในตารางที่ 5.36-5.39 พบว่า

1. เมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์ม LDPE และ PP ที่ได้จากการคำนวณ (ตารางที่ 5.36) กับค่าที่ได้จากบริษัทที่อนุเคราะห์ฟิล์ม (ตารางที่ 5.37) โดยเปรียบเทียบกันเฉพาะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์ม LDPE และ PP ที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากบริษัทที่อนุเคราะห์ฟิล์ม

2. เมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์ม LDPE และ PP ที่ได้จากการคำนวณ (ตารางที่ 5.36) กับค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง Oxygen Permeability Analyzer (ตารางที่ 5.38) โดยเปรียบเทียบกันที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์ม LDPE และ PP ที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง Oxygen Permeability Analyzer

3. เมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม LDPE และ PP ที่ได้จากการคำนวณ (ตารางที่ 5.36) กับค่าที่ได้จากการประมาณค่า (ตารางที่ 5.39) พบว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม LDPE และ PP ที่ได้จากการทดลองมีค่าอยู่ในช่วงของค่าสูงสุด-ต่ำสุดที่ได้จากการประมาณค่าที่ทุกอุณหภูมิ และโดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม LDPE และ PP ที่ได้จากการคำนวณ (ตารางที่ 5.36) ก็ยังอยู่ในช่วงของค่าสูงสุด-ต่ำสุดที่ประมาณค่าได้ แม้ว่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสนี้จะมีช่วงของค่าสูงสุด-ต่ำสุดแคบมากกว่าที่อุณหภูมิอื่น ๆ (รายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ซ)

ดังนั้นผลจากการเปรียบเทียบที่ได้ทั้ง 3 ข้อข้างต้น ทำให้สามารถสรุปได้ว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม LDPE และ PP ที่ได้จากการคำนวณจากผลการทดลอง (ตารางที่ 5.36) เป็นค่าที่ถูกต้องทุก ๆ อุณหภูมิ

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนระหว่างค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อก๊าซออกซิเจนของฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ดังที่แสดงในตารางที่ 2.12 พบว่าสำหรับฟิล์ม LDPE อัตราส่วนระหว่างค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อก๊าซออกซิเจนมีค่าเท่ากับ 2.0-5.9 สำหรับอัตราส่วนระหว่างค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อก๊าซออกซิเจนที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 2.0-2.2 ซึ่งค่าที่ได้อยู่ในช่วงดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.12 ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม LDPE ที่ได้จากการทดลองอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถเป็นไปได้

ในส่วนของฟิล์ม PP พบว่าอัตราส่วนระหว่างค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อก๊าซออกซิเจนดังแสดงในตารางที่ 2.12 มีค่าเท่ากับ 3.3-5.9 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนระหว่างค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อ

ก๊าซออกซิเจนที่ได้จากการทดลองพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 2.0-2.2 ซึ่งน้อยกว่าช่วงที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.12 แต่เมื่อพิจารณาถึงค่าอัตราการส่งผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม PP จากที่ได้รายงานโดย Party [42] ซึ่งพบว่ามีค่าเท่ากับ 3700 และ 10000 cm^3 m^{-2} day^{-1} ตามลำดับสำหรับฟิล์ม PP ที่มีความหนา 25 ไมครอน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อเปลี่ยนค่าดังกล่าวให้อยู่ในรูปของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม PP แล้วจะมีค่าเท่ากับ 10.71 และ 28.94 cm^2 s^{-1} ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม PP มีค่าที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม PP ที่ได้จากการทดลองอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถเป็นไปได้

จากผลการวิเคราะห์ต่าง ๆ ข้างต้นจะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม LDPE และ PP ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีความแม่นยำและเหมาะสมพอสมควร แต่การที่ค่าเหล่านี้มีลักษณะตามที่ทดลองได้และมีความแตกต่างจากค่าที่ได้รายงานไว้ในแหล่งอื่น ๆ บ้าง อาจเนื่องมาจากปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าดังกล่าวซึ่งสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ดังนี้

1. ธรรมชาติของพอลิเมอร์

เนื่องจาก LDPE เป็นพอลิเมอร์ที่มีสาขาโซ่โดยโครงสร้างประกอบด้วยโซ่ยาวของ CH_2 ที่มีการแตกกิ่งก้านออกไป ซึ่งสาขาโซ่ส่วนใหญ่เป็นโซ่สั้น ๆ ที่เป็นกลุ่มเอทธิล (ethyl group) และกลุ่มบิวทิล (butyl group) โดยทั่วไปถ้าโมเลกุลมีสาขาโซ่มาก โอกาสที่อะตอมต่าง ๆ ในโมเลกุลจะจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบเพื่อให้เกิดลักษณะผลึกขึ้นจึงมีน้อย ซึ่งจากสาเหตุนี้จึงทำให้ LDPE มีค่าความเป็นผลึกต่ำ ในขณะที่ PP เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงโดยตลอด จึงทำให้โซ่พอลิเมอร์มีความเป็นระเบียบมาก จึงทำให้ PP มีค่าความเป็นผลึกสูง (โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่าความเป็นผลึกของ LDPE และ PP จากการวัดค่าระดับความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ทั้งสองจาก DSC ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ซ ซึ่งพบว่า LDPE มีค่าความเป็นผลึกเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 32.87 และ PP มีค่าความเป็นผลึกเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 46.50) ซึ่งจากการที่ PP มีค่าความเป็นผลึกที่สูงกว่า LDPE นี้เอง จึงทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ของ PP มีค่าน้อยกว่า LDPE เนื่องจากพอลิเมอร์ที่มีค่าความเป็นผลึกสูง การจับตัวกันของสายโซ่

จะดีกว่าพอลิเมอร์ที่มีค่าความเป็นผลึกต่ำ จึงทำให้ปริมาตรอิสระ (free volume) ของพอลิเมอร์ที่ก๊าซสามารถผ่านไปได้มีจำนวนลดลง [19]

นอกจากนี้ปริมาตรอิสระ (free volume) ของพอลิเมอร์ยังมีความสัมพันธ์กับค่า T_g ของพอลิเมอร์ด้วย โดยสำหรับพอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะคล้ายยาง (rubbery state) (T_g มีค่าน้อยกว่า 298 เคลวิน) ปริมาตรอิสระของพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า T_g ของพอลิเมอร์ลดลง [36] ดังนั้นสำหรับ LDPE และ PP ที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่า T_g น้อยกว่า 298 เคลวิน [1,19,20,36] โดยค่า T_g ของ LDPE มีค่าน้อยกว่า PP (โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่า T_g ของ LDPE และ PP จากการวัดค่า T_g จาก DSC ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ซ ซึ่งพบว่า LDPE มีค่า T_g เฉลี่ยเท่ากับ –18.75 องศาเซลเซียส และ PP มีค่า T_g เฉลี่ยเท่ากับ –9.45 องศาเซลเซียส) แสดงให้เห็นว่า LDPE มีปริมาตรอิสระมากกว่า PP จึงทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ของ LDPE มีค่ามากกว่า PP นั่นเอง

2. ธรรมชาติของก๊าซที่ซึมผ่าน

เมื่อพิจารณาถึงค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม LDPE และ PP ดังตารางที่ 5.36 พบว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากกว่าก๊าซออกซิเจนเสมอ ซึ่งถ้าสังเกตจากตารางที่ 2.8 [20,36] จะเห็นได้ว่าถึงแม้ว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าความสามารถในการแพร่ (D) ที่ต่ำกว่าก๊าซออกซิเจน แต่เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าความสามารถในการละลาย (S) ที่สูงกว่าก๊าซออกซิเจนมาก จึงทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าความสามารถในการซึมผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ (P) ที่สูงกว่าก๊าซออกซิเจนนั่นเอง

3. สารเติมแต่ง (additives)

สารเติมแต่ง (additives) เป็นสารที่ใช้เติมใส่พอลิเมอร์เพื่อช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น [43] โดยสำหรับในส่วนของ LDPE และ PP ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้อาจมีการใส่สารเติมแต่งลงในพอลิเมอร์ ซึ่งจากการใส่สารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ ลงในพอลิเมอร์นี้จะทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไปรวมทั้งค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ด้วย แต่เนื่องจากบริษัทที่อนุเคราะห์ฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่ได้รายงานว่ามีการใส่สารเติมแต่งตัวใดและมีปริมาณเท่าไรลงในพอลิเมอร์บ้าง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่สามารถประเมินผลกระทบของสารเติมแต่งต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซที่วัดได้นี้

4. อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นวัตถุประสงค์หลักในการศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้ โดยจากตารางที่ 5.36 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และงานวิจัยนี้ได้มีการพลอตกราฟระหว่างค่าลอกาลิธึมธรรมชาติ (ln) ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม LDPE และ PP ที่ใช้ในการทดลองกับค่าส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.17-5.20 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจหรือค่า R^2 ของผลการฟิตสมการเส้นตรงนั้นมีค่าอยู่ในเกณฑ์ดีมากทั้งสิ้น (ค่า R^2 มีค่าตั้งแต่ 0.9847 ขึ้นไป) ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่า ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นไปตามสมการของอาร์รีเนียส ซึ่งผลที่ได้นี้มีความสอดคล้องกับหลักการที่ว่าอุณหภูมิมีผลต่อค่าความสามารถในการละลายของก๊าซ (S) และค่าความสามารถในการแพร่ของก๊าซ (D) ตามสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius equation) ดังที่ได้แสดงไว้ในสมการที่ 2.25 และ 2.26 โดยสำหรับในการทดลองนี้ ก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่ไม่มีการควบแน่นในช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง จึงทำให้ค่า ΔH_s (heat of solution) และค่า E_d (ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการแพร่) มีค่าเป็นบวกเสมอ [19,20] จึงทำให้เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความสามารถในการละลายของก๊าซ (S) และค่าความสามารถในการแพร่ของก๊าซ (D) มีค่าเพิ่มขึ้น และผลของค่าทั้งสองนี้จึงส่งผลโดยตรงต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ (P) (ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.7) โดยค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์นี้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius equation) ด้วยดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.24 นอกจากนี้ยังพบว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองที่คำนวณได้นี้มีค่ามากกว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ดังแสดงในตารางที่ 5.34) แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อุณหภูมิจะส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์มากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

บทที่ 6
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

6.1.1 อัตราการหายใจของผักและผลไม้สด

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองวัดอัตราการหายใจของผักและผลไม้สด 4 ชนิด ได้แก่ ผักและผลไม้สดประเภทไคลแมคเทอริก 2 ชนิด คือ มะเขือเทศ กล้วยน้ำว้า และผักและผลไม้สดประเภทนอนไคลแมคเทอริก 2 ชนิด คือ ส้มเขียวหวาน พริกชี้ฟ้า ที่อุณหภูมิ 5±1, 11±1 และ 29±1 องศาเซลเซียส โดยใช้การวัดอัตราการหายใจแบบระบบปิด ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

6.1.1.1 การวัดอัตราการหายใจแบบระบบปิดเป็นวิธีที่สามารถใช้วัดอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดทั้งในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สะดวกและได้ค่าที่เหมาะสม

6.1.1.2 อัตราการหายใจของผักและผลไม้สดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ล้อมรอบผักและผลไม้สด ชนิดของผักและผลไม้สด และอุณหภูมิ

6.1.1.3 กลไกการหายใจตามแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทน (Michaelis-Menten equation) ชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ (uncompetitive type) และชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ (noncompetitive type) มีความเหมาะสมในการทำนายอัตราการหายใจทั้งในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของมะเขือเทศ กล้วยน้ำว้า และส้มเขียวหวาน ที่ทุกอุณหภูมิและความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลองมากกว่าแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดไม่มีการยับยั้ง (without inhibition type) และชนิดมีการยับยั้งแบบคอมเพททิทีฟ (competitive type) ในส่วนของพริกชี้ฟ้า แบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟมีความเหมาะสมในการทำนายอัตราการหายใจทั้งในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด ดังนั้นกระบวนการยับยั้งของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออัตราการหายใจทั้งในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของผักและผลไม้สดทั้ง 4 ชนิดภายใต้ช่วงอุณหภูมิและความเข้มข้นของก๊าซ

ออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง โดยส่วนใหญ่เป็นไปตามแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟหรือชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ

6.1.1.4 อุณหภูมิมีผลต่อค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนสำหรับผักและผลไม้สดทั้ง 4 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง โดยสำหรับแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟและชนิดมีการยับยั้งแบบนอนคอมเพททิทีฟ (สำหรับมะเขือเทศ กล้วยน้ำว้า และส้มเขียวหวาน) และแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ (สำหรับพริกชี้ฟ้า) ค่า V_m (ค่าอัตราการหายใจที่สูงที่สุด) ทั้งในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สำหรับค่า K_m (ค่าคงที่ไมเคิลลิสเมนเทน) ในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนมีแนวโน้มที่แตกต่างกันไปตามชนิดของผักและผลไม้สดและช่วงอุณหภูมิ แต่โดยส่วนใหญ่แล้วมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่วนในรูปแบบของอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ K_m มีค่าเพิ่มขึ้นทั้งหมดเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สำหรับค่า K_i (ค่าคงที่ของการยับยั้ง) ในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนมีแนวโน้มที่แตกต่างกันไปตามชนิดของผักและผลไม้สดและช่วงอุณหภูมิ แต่โดยส่วนใหญ่แล้วมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่วนในรูปแบบของอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ K_i มีแนวโน้มที่แตกต่างกันไปเช่นเดียวกัน แต่ส่วนใหญ่มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

6.1.1.5 แม้ว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบหนึ่ง ๆ สำหรับผักและผลไม้สดชนิดหนึ่ง ๆ แตกต่างกันไป แต่ผลกระทบโดยรวมเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการหายใจของผักและผลไม้สดชนิดนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นและเป็นไปตามสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius equation) เมื่อกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ล้อมรอบผักและผลไม้สดชนิดนั้นมีค่าเท่ากันและการหายใจเป็นแบบใช้ก๊าซออกซิเจน

6.1.1.6 ค่าพารามิเตอร์พรีเอกซ์โพเนนเชียล (r_0) ของอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดทั้ง 4 ชนิดมีค่าขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ล้อมรอบผักและผลไม้สด ส่วนค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการหายใจ (E_r) ของอัตราการหายใจทั้งในรูปแบบของอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนและอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของผักและผลไม้สดทั้ง 4 ชนิดในช่วงอุณหภูมิ 5-29 องศาเซลเซียสมีค่าคงที่โดยขึ้นอยู่กับรูปแบบของ

แบบจำลองอัตราการหายใจและชนิดของผักและผลไม้สด แต่ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ล้อมรอบผักและผลไม้สดนั้น ซึ่งค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการหายใจของผักและผลไม้สดทั้ง 4 ชนิดที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.31 โดยกล้วยน้ำว้ามีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการหายใจเฉลี่ยสูงที่สุด ในขณะที่ส้มเขียวหวานมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการหายใจเฉลี่ยต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อุณหภูมิจะส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้ามากที่สุด ในขณะที่จะส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการหายใจของส้มเขียวหวานน้อยที่สุด

6.1.2 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ 2 ชนิด ได้แก่ พอลิเอทธิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) ความหนา 33 และ 45 ไมครอน และพอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) ความหนา 25 และ 50 ไมครอน ที่อุณหภูมิ 5$\pm$1, 11$\pm$1 และ 29$\pm$1 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

6.1.2.1 อุปกรณ์การทดลองสำหรับวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่ได้สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ โดยเลียนแบบมาจากอุปกรณ์ของ Moyls และคณะ [13] สามารถใช้วัดหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ได้พร้อมกัน และให้ค่าที่มีความแม่นยำพอสมควร

6.1.2.2 อุณหภูมิมีผลต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม LDPE และ PP ที่ใช้ในการทดลองในช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดมีค่าเพิ่มขึ้น และเป็นไปตามสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius equation)

6.1.2.3 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิอนันต์ (P_0) และค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ (E_p) สำหรับฟิล์ม LDPE และ PP ที่ใช้ในการทดลองมีค่าแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิอนันต์ (P_0) และค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ (E_p) สำหรับฟิล์ม LDPE และ PP ที่ใช้ในการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 5-29 องศาเซลเซียส

ฟิล์ม	P_0 ($cm^2\ s^{-1}$)		E_p ($kJ\ mol^{-1}$)	
	O_2	CO_2	O_2	CO_2
LDPE	8.447	4.507	49.29	45.98
PP	1.130	1.109	45.17	43.34

6.1.2.4 ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม LDPE และ PP มีค่าน้อยกว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถซึมผ่านฟิล์ม LDPE และ PP ได้เร็วกว่าก๊าซออกซิเจน ในขณะที่อุณหภูมิจะส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์ม LDPE และ PP มากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

6.1.2.5 ธรรมชาติของพอลิเมอร์ ธรรมชาติของก๊าซที่ซึมผ่าน สารเติมแต่งในฟิล์มพอลิเมอร์ และอุณหภูมิ มีผลต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ในการทดลองวัดอัตราการหายใจของผักหรือผลไม้สดชนิดหนึ่ง ๆ ควรพยายามใช้ผักหรือผลไม้สดชนิดนั้น ๆ ที่ได้มาจากแหล่งเพาะปลูกเดียวกันและทราบอายุการเก็บเกี่ยวที่แน่นอน เพื่อว่าจะสามารถบ่งบอกได้อย่างชัดเจนว่าอัตราการหายใจของผักหรือผลไม้สดที่วัดได้นั้นเป็นค่าที่ช่วงอายุการเก็บเกี่ยวเท่าใด และได้ผลการทดลองที่สม่ำเสมอมากขึ้น

6.2.2 ในการวัดอัตราการหายใจแบบระบบปิด ควรเก็บข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในภาชนะในช่วงเวลาที่ถี่มากขึ้น เพื่อให้ได้จำนวนข้อมูลมากขึ้น จะได้สามารถนำมาคำนวณหาอัตราการหายใจที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น

6.2.3 ควรทำการศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ให้มากขึ้น เพื่อให้ได้ทราบถึงผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์มากยิ่งขึ้น

6.2.4 ควรทำการศึกษาค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้น เนื่องจากฟิล์มพอลิเมอร์แบบหลายชั้นมีคุณสมบัติบางอย่างที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในการทำบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปรมากกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ชั้นเดียว

6.2.5 ควรทำการศึกษาอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดและค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันให้มากขึ้น เพื่อทำให้ได้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์และค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิอนันต์ที่แม่นยำมากขึ้นและใช้งานได้กว้างขวางขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. William E. Brown. Plastics in Food Packaging : Properties, Design and Fabrication. New York : Marcel Dekker, Inc., 1992.
2. งามทิพย์ ภู่วโรดม. ก๊าซกับการบรรจุผลิตภัณฑ์อาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์สำนักส่งเสริมและฝึกอบรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ , 2537.
3. จริงแท้ ศิริพานิช. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2541.
4. มยุรี ภาคลำเจียก. บรรจุภัณฑ์พลาสติกสำหรับอาหาร. วารสารพลาสติก. 14, กค.-สค. 2540 : 23-36.
5. D. Zagory and A.A. Kader. Modified Atmosphere Packaging of Fresh Produce. Food Technology. 42 (9), SEP 1988 : 70-77.
6. Julian J.L. Lee. The Design of Controlled or Modified Packaging Systems for Fresh Produce. Food Product-Package Compatibility. 1987 : 157-169.
7. Gina L. Young and Jeffry J. Wooster. Designing Packages for Fresh-cut Produce. TAPPI Journal. 79 (6), Jun 1996 : 205-211.
8. ประพาพรัตน์ ทองเนาวรัตน์. การจำลองทางคณิตศาสตร์ของบรรยากาศดัดแปรภายในบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์สำหรับผักและผลไม้สด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
9. อภิญญา เจริญกูล. การเก็บรักษาผลมะนาวสดโดยบรรจุแต่ละผลในฟิล์มพลาสติก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
10. D.S. Lee, P.E. Haggar, J. Lee and K.L. Yam. Model for Fresh Produce Respiration in Modified Atmospheres Based on Principles of Enzyme Kinetics. Journal of Food Science. 56 (6), 1991 : 1580-1585.
11. R. Lakakul, R.M. Beaudry and R.J. Hernandez. Modeling Respiration of Apple Slices in Modified–Atmosphere Packages. Journal of Food Science. 64 (1), 1999 : 105-110.

12. Svetlana Fishman, V. Rodov, J. Peretz and S. Ben–Yehoshua. Model for Gas Exchange Dynamics in Modified–Atmosphere Packages of Fruits and Vegetables. Journal of Food Science. 60 (5), 1995 : 1078-1083.

13. L. Moyls, R. Hocking, T. Beveridge, G. Timbers. Exponential Decay Method for Determining Gas Transmission Rate of Films. Transaction of the ASAE. 35(4), July-August 1992 : 1259-1265.

14. L. Moyls, D.L. McKenzie, R.P. Hocking, P.M.A. Toivonen, P. Delaquis, B. Girard and G. Mazia. Variability in O_2, CO_2 and H_2O Transmission Rates Among Commercial Polyethylene Films for Modified Atmosphere Packaging. Transaction of the ASAE. 41 (5), 1998 : 441-1446.

15. G.B.Y. Christie, J.I. Macdiarmid, K. Schliephake and R.B. Tomkins. Determination of Film Requirements and Respiratory Behavior of Fresh Produce in Modified Atmosphere Packaging. Postharvest Biology and Technology. 6, 1995: 41-54.

16. Dennis W. Joles, Arthur C. Cameron, Ahmad Shirazi and Peter D. Petracek. Modified Atmosphere Packaging of 'Heritage' Red Raspberry Fruit : Respiratory Response to Reduced Oxygen, Enhanced Carbon Dioxide and Temperature. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 119 (3), 1994 : 540-545.

17. D.P. William and J.S. Brent. Modified Atmosphere Packaging of Fruits and Vegetables. In Ooraikul, B. and Stiles M.E. (eds.). Modified Atmosphere Packaging of Food. 1991 : 169-228.

18. Herman W. Peppelenbos and Johan van't Leven. Evaluation of Four Types of Inhibition for Modelling the Influence of Carbon Dioxide on Oxygen Consumption of Fruits and Vegetables. Postharvest Biology and Technology. 7, 1996 : 27-40.

19. Gordon L. Robertson. Food Packaging. New York : Marcel Dekker, Inc., 1993.

20. O.-G. Piringer and A.L. Baner. Plastic Packaging Materials for Food. Weinheim : WILEY-VCH., 2000.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

21. Kay Cooksey, Kenneth S.Marsh and Leroy H. Doar. Predicting Permeability & Transmission Rate for Multilayer Materials. Food Technology. 53 (9), SEP 1999 : 60-63.

22. A.A. Kader, D. Zagory and E.L. Kerbel. Modified atmosphere packaging of fruits and vegetables. Critical Rev. in Food Sci. and Nutrition. 28, 1989 : 1-30.

23. R.T. Parry. Principles and Applications of Modified Atmosphere Packaging of Food. New York : Blackie Academic, 1989.

24. Adel A. Kader, R. Paul Singh and Jatal D. Mannapperuma. Food Storage Stability. Boca Raton, FL : CRC Press, 1998.

25. วิไลลักษณ์ ตั้งเจริญ. อุตุนิยมวิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : อักษราพิพัฒน์, 2540.

26. วัลย์ลดา หงส์ทอง. การบรรจุภัณฑ์ผักและผลไม้สดเพื่อการส่งออก. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2538.

27. A. Exama, J. Arul, R.W. Lencki, L.Z. Lee and C. Toupin. Suitability of Plastic Films for Modified Atmosphere Packaging of Fruits and Vegetables. Journal of Food Science. 58, 1993 :1365-1370.

28. Authur C. Cameron, P. Chowdary Talasila and Dennis W. Joles. Predicting Film Permeability Needs for Modified-atmosphere Packaging of Lightly Processed Fruits and Vegetables. Hort. Science. 30 (1), 1995 : 25-30.

29. แม้น อมรสิทธิ์, อมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร : ชวนพิมพ์, 2539.

30. Y. Makino, K. Iwasaki and T. Hirata. A Theoretical Model for Oxygen Consumption in Fresh Produce Under an Atmosphere with Carbon Dioxide. J. Agric. Eng. Res. 63, 1996 : 193-203.

31. Anne B. Smyth, Jun Song and Arthur C. Cameron. Modified Atmosphere Packaged Cut Iceberg Lettuce: Effect of Temperature and O_2 Partial Pressure on Respiration and Quality. J. Agric. Food Chem. 46,1998 : 4556-4562.

32. คณะกลุ่มเกษตรสัญจร. มะเขือเทศ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : พรสาส์น, 2531.

33. พาณิชย์ ยศปัญญา. กล้วยในเมืองไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มติชน, 2541.

34. เปรมปรี ณ สงขลา. รวมกลยุทธ์ส้ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : เจริญรัตน์การพิมพ์, 2538.

35. มณีฉัตร นิกรพันธุ์. พริก. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : โอเดียนสโตร์, 2541.

36. D.W. Van Krevelen. Properties of Polymers. Their Correlation with Chemical Structure; Their Numerical Estimation and Prediction from Additive Group Contributions. Amsterdam : Elsevier, 1990.

37. Nicholas P. Cheremisinoff. Product Design and Testing of Polymeric Materials. New York : Marcel Dekker, Inc., 1990.

38. R.A. Shanks, J. Li and L. Yu. Polypopylene-polyethylene blend morphology controlled by time-temperature-miscibility. Polymer. 41, 2000 : 2133-2139.

39. S. Vanden Eynde, V. Mathot, M.H.J. Koch and H. Reynaers. Thermal Behavior and Morphology of Homogeneous Ethylene-Propylene and Ethylene-1-Butene Copolymers with High Comonomer Contents. Polymer. 41, 2000 : 3437-3453.

40. H.D. Hoekstra, J.L. Spoormaker and J. Breen. In : Proceedings of the International Conference on Advances in the Stabilization and Degradation of Polymers. Luzern, 1996.

41. J. Brandrup and E.H. Immergut. Polymer Handbook. New York : John Wiley, 1989.

42. R.T. Party. Principles and Applications of Modified Atmosphere Packaging of Foods. London : Blackie Academic & Professional, 1993.

43. ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. เคมีโพลิเมอร์พื้นฐาน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : โอเดียนสโตร์, 2527.

44. Jasenka Gajdos Gajdos and Kata Galic Galic. Gas Permeability and DSC Characteristics of Polymers used in Food Packaging. Polymer Testing. 20, 2001 : 49-57.

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

รายละเอียดเกี่ยวกับผักและผลไม้สดที่ใช้ในการทดลอง

1. มะเขือเทศ [32]

มะเขือเทศเป็นพืชที่นิยมปลูกกันมาก ผลของมะเขือเทศสามารถนำมาประกอบอาหารได้หลายอย่าง และนำมาแปรรูปในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายชนิด เช่น ทำน้ำมะเขือเทศ ซอสมะเขือเทศ เป็นต้น

1.1 ชื่อทางวิทยาศาสตร์ *Lycopersicon esculentum* Mill

1.2 พันธุ์ที่ปลูกในประเทศไทย

มะเขือเทศที่นิยมปลูกในประเทศไทยมีหลายพันธุ์ ซึ่งแต่ละพันธุ์มีลักษณะแตกต่างกันออกไปทั้งลักษณะการเจริญเติบโต ขนาดรูปร่างและสีผล รวมทั้งประโยชน์ที่ได้จากการนำไปใช้งานก็ต่างกันด้วย โดยพันธุ์ที่ปลูกเพื่อขายในตลาดนั้น มีทั้งแบบผลเล็กและผลใหญ่ โดยแบบผลเล็กนิยมพันธุ์ที่มีผลสีชมพูมากกว่าสีแดง ส่วนแบบผลโตมักมีทรงผลกลมคล้ายแอปเปิ้ล ผลเมื่อสุกจะมีสีแดงเข้ม เนื้อหนาแข็ง เปลือกไม่เหนียว มีจำนวนช่องภายในผลมากและไม่กลวง ซึ่งพันธุ์ต่าง ๆ ที่นิยมปลูกกันนั้น ได้แก่

1.2.1 พันธุ์มานาปาล มีลักษณะการเจริญเติบโตของลำต้นแบบทอดยอด เป็นพันธุ์ที่สามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้ค่อนข้างดี มีทรงพุ่มใหญ่ ใบแน่น รูปทรงของผลกลม ขนาดของผลปานกลาง มีน้ำหนักประมาณ 170 กรัมต่อผล

1.2.2 พันธุ์ฟลอราเดล ลำต้นทอดยอด ทรงพุ่มใหญ่ ใบปกคลุมหนา ผลทรงกลมแป้น ขนาดของผลปานกลาง มีน้ำหนักประมาณ 170 กรัมต่อผล ผนังผลหนา เนื้อหนา

1.2.3 พันธุ์มาร์โกลบ พันธุ์นี้เกษตรกรนิยมปลูกกันมานานแล้ว เป็นพันธุ์ที่ให้ผลดก ขนาดผลปานกลาง มีน้ำหนักประมาณ 170 กรัมต่อผล รูปทรงผลแป้น เนื้อหนา

1.2.4 พันธุ์สีดา มก. เป็นพันธุ์ที่มีการเจริญเติบโตในสภาพภูมิอากาศและดินต่าง ๆ ได้ค่อนข้างดี ทนทานต่ออุณหภูมิสูง มีลักษณะทรงต้นค่อนข้างสูง มีกิ่งก้านใหญ่และใบมาก ขนาดของผลเล็ก มีน้ำหนักประมาณ 25-27 กรัมต่อผล รูปทรงของผลคล้ายรูปไข่ เนื้อแน่น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2.5 <u>พันธุ์มาสเตอร์เบอร์ 2</u> มีลักษณะการเจริญเติบโตของลำต้นแบบทอดยอด เป็นพันธุ์ที่ปลูกง่าย ให้ผลผลิตสูง ทนทานต่ออุณหภูมิสูงได้ดีมาก ขนาดผลใหญ่ น้ำหนักประมาณ 250 กรัมต่อผล

1.2.6 <u>พันธุ์คาลิปโซ</u> ลำต้นไม่ทอดยอด สามารถปลูกได้ในสภาพอากาศร้อนชื้น ติดผลดี ขนาดผลปานกลาง น้ำหนักประมาณ 198 กรัมต่อผล

1.2.7 <u>พันธุ์แอล 22</u> ลักษณะผลเป็นรูปลูกพลัม ผิวเปลือกบาง แตกง่าย ผลอ่อนมีสีขาว ผลสุกมีสีแดงแสดปนส้ม ผลดก ทรงต้นเป็นพุ่ม มีการเจริญเติบโตสม่ำเสมอดี ปลูกได้ในทุกสภาพแวดล้อม ให้ผลผลิตสูงและค่อนข้างทนร้อนกว่าพันธุ์อื่น ๆ

1.2.8 <u>พันธุ์เอสวีอาร์ดีซี - 4</u> ลักษณะผลเล็กนิ่ม เป็นรูปลูกพลัม ผิวเปลือกบาง ให้ผลผลิตสูง ทรงต้นเป็นพุ่มกว้าง มีกิ่งก้านแข็งแรง ปลูกได้ในทุกสภาพแวดล้อม และเป็นพันธุ์ที่ทนร้อนทนฝนได้ดี

นอกจากพันธุ์ต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้ว ในปัจจุบันยังมีพันธุ์อื่น ๆ อีกหลายพันธุ์ที่นิยมปลูกกัน โดยสำหรับมะเขือเทศที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นมะเขือเทศรูปทรงท้อ ซึ่งพบว่ามีด้วยกันหลายพันธุ์ เช่น พันธุ์ดอนน่า 091 พันธุ์มิชชั่น 102 พันธุ์เรดเลดี้ 252 เป็นต้น โดยในแต่ละพันธุ์มีลักษณะผลที่คล้ายกันมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่สามารถบอกพันธุ์ของมะเขือเทศที่นำมาใช้ในการทดลองได้

1.3 <u>คุณค่าทางโภชนาการ</u>

คุณค่าทางโภชนาการในผลมะเขือเทศสดจากส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม มีดังนี้

น้ำ	94.0	กรัม
พลังงาน	19.0	แคลอรี่
โปรตีน	0.7	กรัม
ไขมัน	น้อยมาก	กรัม
คาร์โบไฮเดรต	4.0	กรัม
ฟอสฟอรัส	24.0	มิลลิกรัม
แคลเซียม	12.0	มิลลิกรัม
เหล็ก	0.4	มิลลิกรัม
โปแตสเซียม	222.0	มิลลิกรัม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไรโบฟลาวิน	0.04	มิลลิกรัม
ไทอามีน	0.05	มิลลิกรัม
ไนอาซีน	0.7	มิลลิกรัม
กรดแอสคอบิค	21.0	มิลลิกรัม
วิตามินเอ	822.0	IU

รูปที่ ก.1 มะเขือเทศที่ใช้ในการทดลอง

2. กล้วยน้ำว้า [33]

กล้วยน้ำว้าเป็นกล้วยที่ปลูกกันทั่วไปในประเทศไทย เนื้อกล้วยมีคุณค่าทางอาหารมาก ใช้เป็นอาหารเด็กอ่อน กินสด ทำเป็นขนมหลายชนิด เช่น ขนมกล้วย กล้วยทอด กล้วยบวชชี กล้วยตาก กล้วยฉาบ กล้วยกวน เป็นต้น

2.1 <u>ชื่อทางวิทยาศาสตร์</u> *Musa acuminata* balbisiana

2.2 <u>พันธุ์ที่ปลูกในประเทศไทย</u>

2.2.1 <u>พันธุ์กาบขาว</u> มีลำต้นสูงประมาณ 2.5-3.5 เมตร กาบลำต้นด้านนอกมีสีเขียวอ่อน โคนกาบมีสีน้ำตาลปนแดง มีประดำเล็กน้อย ด้านในสีเขียวอ่อน ก้านใบมีร่องค่อนข้างแคบ เส้นกลางใบมีสีเขียว ท้องใบมีนวลมาก ผลดิบมีสีเขียวนวล มีเหลี่ยมเห็นชัด เปลือกค่อนข้างหนา เมื่อผลสุก เหลี่ยมจะลบและผลมีสีเหลืองกระดังงา เนื้อสีขาว เหนียว ไส้กลางมีสีเหลือง รสหวาน

2.2.2 <u>พันธุ์แดง</u> มีลำต้นสูงประมาณ 2.5-3 เมตร กาบลำต้นด้านนอกมีสีเขียวอ่อนปนแดง มีประดำเล็กน้อย หน่อมีสีแดงจัดกว่าพันธุ์กาบขาว ก้านใบมีร่องค่อนข้างแคบ เส้นกลางใบสีเขียวหม่น ท้องใบมีนวลมาก ลักษณะภายนอกของผลเหมือนกล้วยน้ำว้ากาบขาว เมื่อผลสุกเนื้อในเป็นสีขาวปนชมพู ไส้กลางมีสีชมพูแดง รสหวาน เนื้อเหนียวกว่า

2.2.3 <u>พันธุ์มะลิอ่อง</u> มีลำต้นสูงไม่เกิน 2.5 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น 15 เซนติเมตร กาบลำต้นด้านนอกมีสีเขียวปนแดง มีประดำค่อนข้างมาก ก้านใบสีเขียวสด ท้องใบมีนวลมาก ลักษณะภายนอกของผลเหมือนกล้วยน้ำว้ากาบขาว ผลสุกมีสีเหลืองปนน้ำตาล เปลือกบาง บางครั้งมีกระที่ผิว เนื้อในมีสีขาวเหลือง รสหวานจัดกว่าทุกพันธุ์

2.2.4 <u>พันธุ์ดง</u> มีลำต้นสูงใหญ่แข็งแรงระหว่าง 3.5-4.5 เมตร กาบลำต้นมีสีเขียวจัด มีประดำค่อนข้างมาก ด้านในสีเขียวอ่อน ใบมีขนาดใหญ่ ท้องใบมีนวลมาก ทนความแห้งแล้งได้ดี ผลมีขนาดใหญ่ เมื่อดิบมีสีเขียว นวลจับเห็นเด่นชัด เมื่อสุกผิวมีสีเหลืองคล้ำ เนื้อในมีสีขาว ไส้กลางมีสีเหลือง รสหวาน บางครั้งมีรสฝาดและมีเมล็ด

2.2.5 <u>พันธุ์กาบเขียว</u> มีลำต้นสูงประมาณ 2.5-3.5 เมตร กาบลำต้นด้านนอกมีสีเขียวมะกอก โคนกาบมีสีน้ำตาลปนแดง มีประดำบริเวณโคนก้านใบ และก้านใบมีร่องค่อนข้างแคบ เส้นกลางใบมีสีเขียว ผลดิบมีสีเขียวสด ไม่มีนวล เปลือกค่อนข้างหนา เมื่อสุกเหลี่ยมจะไม่ลบหมด และผิวสีเหลืองอมเขียว ที่สันของเหลี่ยมผลจะยังมีสีเขียวจาง ๆ อยู่ เนื้อในมีสีขาวเหนียว ไส้กลางสีเหลือง รสหวานเจือเปรี้ยวเล็กน้อย ไม่นิยมกินผลสด แต่ใช้ทำเป็นขนมกล้วยทอดดี

2.3 <u>คุณค่าทางโภชนาการ</u>

คุณค่าทางโภชนาการในผลกล้วยน้ำว้าจากส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม มีดังนี้

น้ำ	69.02	กรัม
โปรตีน	0.9	กรัม
ไขมัน	0.76	กรัม
คาร์โบไฮเดรต	22.21	กรัม
ฟอสฟอรัส	25.10	มิลลิกรัม
แคลเซียม	19.99	มิลลิกรัม
เหล็ก	11.39	มิลลิกรัม
กรดแอสคอบิค	18.35	มิลลิกรัม

วิตามินเอ	281.37	IU
เบต้าแคโรทีน	118.40	ไมโครกรัม

รูปที่ ก.2 กล้วยน้ำว้าที่ใช้ในการทดลอง

3. ส้มเขียวหวาน [34]

ส้มเขียวหวานเป็นผลไม้ค่อนข้างกลม แป้นเล็กน้อย มีผิวสีเขียวอมเหลืองจนถึงเหลืองเข้ม ขนาดผลเล็กใหญ่ต่างกันไป โดยทั่วไปนิยมบริโภคกันทั้งในรูปของหวานหลังอาหาร หรือในยามว่าง หรืออยู่ในรูปของน้ำส้มคั้น

3.1 ชื่อทางวิทยาศาสตร์ *Citrus reticulata* Blanco

3.2 พันธุ์ที่ปลูกในประเทศไทย

3.2.1 พันธุ์แหลมทอง เป็นส้มที่มีลำต้นขนาดใหญ่ ผลผลิตปานกลาง ขนาดผลปานกลาง แต่มีรสหวานจัดดี แม้ผลส้มยังไม่ถึงอายุ รสส้มก็ไม่เปรี้ยวมาก ในปัจจุบันมีปลูกกันน้อยมาก เนื่องจากให้ผลผลิตที่ไม่ดกนัก

3.2.2 พันธุ์ผิวเรียบ หรือที่เรียกว่า ส้มบางล่าง ขนาดผลปานกลาง ทรงผลค่อนข้างกลม แป้นเล็กน้อย ก้นผลราบหรือเว้าเล็กน้อย เปลือกผลบางเรียบ รสหวาน

นอกจากนี้ยังมีส้มเขียวหวานอีกชนิดหนึ่งที่มีเปลือกค่อนข้างหนาหรือที่เรียกว่า ส้มบางบน ซึ่งผลมีขนาดใหญ่ รูปร่างผลมีจุกนูนเล็กน้อย น้ำหนักผลดี มีรสหวานปานกลาง ไม่หวานแหลมนัก

3.3 คุณค่าทางโภชนาการ

คุณค่าทางโภชนาการในผลส้มเขียวหวานสดจากส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม มีดังนี้

น้ำ	88.7	กรัม
พลังงาน	44.0	แคลอรี่
โปรตีน	0.6	กรัม
ไขมัน	0.2	กรัม
คาร์โบไฮเดรต	9.9	กรัม
เส้นใย	0.2	กรัม
ฟอสฟอรัส	18.0	มิลลิกรัม
แคลเซียม	31.0	มิลลิกรัม
เหล็ก	0.8	มิลลิกรัม
ไรโบฟลาวิน	0.04	มิลลิกรัม
ไทอามีน	0.05	มิลลิกรัม
กรดแอสคอบิค	18.0	มิลลิกรัม
วิตามินเอ	4000.0	IU

รูปที่ ก.3 ส้มเขียวหวานที่ใช้ในการทดลอง

4. พริกชี้ฟ้า [35]

พริกชี้ฟ้าเป็นพืชผักที่เราใช้บริโภคส่วนของผล ใช้ประกอบอาหารโดยตรงและนำไปแปรรูปอาหารอื่น ๆ ได้อีก มีแหล่งดั้งเดิมอยู่ในอเมริกากลาง พริกชี้ฟ้าเป็นพืชที่มีอายุยืนและมีรสเผ็ด ผลเมื่ออ่อนเป็นสีเขียวแต่พอแก่จะค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีแดง

4.1 ชื่อทางวิทยาศาสตร์ *Copsicum annuum* var acuminatum

4.2 พันธุ์ที่ปลูกในประเทศไทย

พริกชี้ฟ้าถือเป็นสายพันธุ์หนึ่งของพริกที่อยู่ในสกุล *Copsicum annuum* L. ซึ่งถือว่าเป็นชนิดที่ปลูกกันมากและมีความสำคัญมากที่สุดเมื่อเทียบกับพริกชนิดอื่น ๆ โดยพริกสกุลนี้มีแหล่งดั้งเดิมอยู่ในอเมริกากลาง หลังจากนั้นได้กระจายไปยังทวีปเอเชียและแอฟริกา

พริกในสกุลนี้เห็นชัดว่าแตกต่างจากสกุลอื่น ได้แก่ การที่มีดอกเดี่ยวและผลเดี่ยว ๆ และมีกลีบดอกสีขาว จากการสำรวจในประเทศไทยพบว่า พริกในสกุลนี้มีมากสายพันธุ์ที่สุดเมื่อเทียบกับพริกสกุลอื่น รวบรวมได้ 31 สายพันธุ์ โดยชื่อสายพันธุ์เรียกตามชื่อพื้นเมือง ได้แก่ พริกชี้ฟ้า พริกจินดา พริกแดง พริกฟักทอง พริกขี้หนู พริกขี้หนูชี้ฟ้า พริกขี้หนูจินดา พริกหวาน และพริกยักษ์ เป็นต้น

4.3 คุณค่าทางโภชนาการ

คุณค่าทางโภชนาการในพริกสดจากส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม มีดังนี้

พลังงาน	116.0	กิโลแคลอรี่
โปรตีน	6.3	กรัม
เส้นใย	15.0	กรัม
แคลเซียม	86.0	มิลลิกรัม
เหล็ก	3.6	มิลลิกรัม
แคโรทีน	6.6	มิลลิกรัม
ไรโบฟลาวิน	0.51	มิลลิกรัม
ไทอามีน	0.37	มิลลิกรัม
ไนอาซีน	2.5	มิลลิกรัม
กรดแอสคอบิค	96.0	มิลลิกรัม

รูปที่ ก.4 พริกชี้ฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ก๊าซโครมาโตกราฟี (gas chromatography)

ก๊าซโครมาโตกราฟีเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้สำหรับแยกสารผสมที่สามารถเปลี่ยนเป็นวัฏภาคก๊าซได้ที่อุณหภูมิหนึ่ง (ไม่เกิน 450 องศาเซลเซียส) ถ้าสารใดเปลี่ยนให้เป็นวัฏภาคก๊าซได้ยาก ก็อาจใช้เทคนิคอื่น ๆ เข้าช่วย เช่น อาศัยปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนให้เป็นอนุพันธ์อื่น ๆ หรืออาจใช้เทคนิคการแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis) เมื่อสารนั้นถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปวัฏภาคก๊าซแล้วจะปล่อยให้สารเหล่านั้นผ่านไปยังคอลัมน์ที่บรรจุด้วยวัฏภาคคงที่ (stationary phase) โดยอาศัยการพาไปของวัฏภาคเคลื่อนที่ (mobile phase) หรือ carrier gas ซึ่งจะทำให้สารผสมเหล่านั้นเกิดการแยกออกเป็นองค์ประกอบต่าง ๆ ขึ้นได้

ก๊าซโครมาโตกราฟีสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

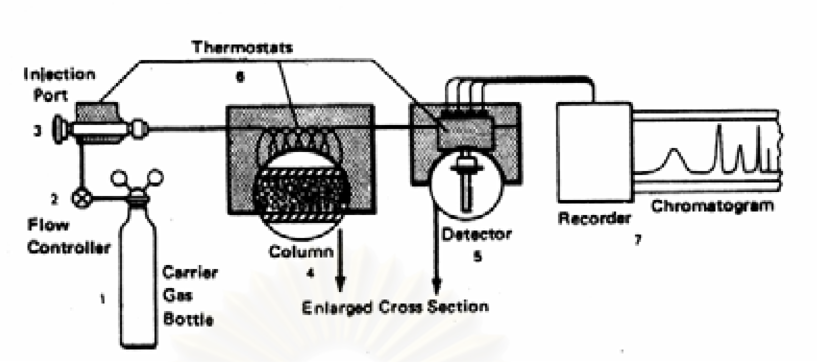
1. โครมาโตกราฟีแบบก๊าซ-ของแข็ง (gas-solid chromatography หรือ GSC)

วิธีนี้ใช้วัฏภาคคงที่เป็นของแข็งและไม่มีสารอื่นใดเคลือบอยู่ โดยสามารถดูดซับ (adsorption) สารที่เป็นก๊าซซึ่งต้องการแยกได้ ส่วนใหญ่แล้ววิธีนี้ใช้งานได้ค่อนข้างแคบเพราะใช้แยกสารที่เป็นก๊าซหรือสารที่เป็นโมเลกุลเล็ก ๆ ได้เท่านั้น เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน คาร์บอนมอนออกไซด์ หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเช่น มีเทน อีเทน ดังนั้นคอลัมน์ที่ใช้ส่วนใหญ่จะบรรจุด้วยวัตถุกัมมันต์ (active solids) เช่น molecular sieves หรือ พอลิเมอร์พรุน (porous polymer), ซิลิกาเจล (silica gel), อลูมิน่า (alumina) และถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นต้น

2. โครมาโตกราฟีแบบก๊าซ-ของเหลว (gas-liquid chromatography หรือ GLC)

วิธีนี้เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับแยกสารที่เป็นก๊าซหรือสารที่สามารถเปลี่ยนเป็นวัฏภาคไอหรือก๊าซได้ที่อุณหภูมิกำหนด ในวิธีนี้เมื่อสารที่เป็นก๊าซหรือไอของสารที่ผสมกันอยู่ได้ผ่านคอลัมน์ จะสามารถแยกออกจากกันได้โดยอาศัยการกระจายตัวที่แตกต่างกันของก๊าซหรือไอระหว่างวัฏภาคเคลื่อนที่กับวัฏภาคคงที่ที่มีของเหลว (liquid phase) ฉาบอยู่บนของแข็ง ตัวอย่างของเหลวที่ฉาบอยู่บนวัฏภาคคงที่ได้แก่ พอลิเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycols) และน้ำมันซิลิโคน (silicone oils) การเลือกวัฏภาคคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ต้องการแยกและอุณหภูมิที่ใช้งาน

องค์ประกอบของเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟีแสดงได้ดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี [29]

1. ก๊าซพา (carrier gas) หรือวัฏภาคเคลื่อนที่เพื่อจะพาไอของสารตัวอย่างผ่านเข้าไปยังคอลัมน์ ส่วนมากจะเป็นก๊าซเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการแยกและไม่ใช่สารชนิดเดียวกับสารที่ต้องการแยก ก๊าซที่นิยมใช้ได้แก่ ฮีเลียม ไนโตรเจน และอาร์กอน เป็นต้น

2. ส่วนควบคุมการไหลของก๊าซต่าง ๆ (flow controller)

3. ส่วนฉีดป้อนสารตัวอย่าง (injection port)

4. คอลัมน์ (column) ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดที่ใช้สำหรับแยกสาร

5. ตัวตรวจวัด (detector) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับตรวจวัดสารแต่ละชนิดที่ถูกแยกออกมาจากแต่ละคอลัมน์

6. ส่วนควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) ใช้ควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ ตัวตรวจวัด และส่วนฉีดป้อนสารตัวอย่าง

7. ส่วนประมวลผล ได้แก่ อินทิเกรเตอร์ เครื่องบันทึกโครมาโตแกรม หรือคอมพิวเตอร์

ขั้นตอนการทำงานอย่างย่อ ๆ ของเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟีมีดังนี้

ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างโดยใช้เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟีมีขั้นตอนคือ เมื่อเลือกสภาวะต่าง ๆ ของการวิเคราะห์และจัดสภาวะของเครื่องเรียบร้อยแล้ว จึงนำสารตัวอย่างไปฉีดเข้าที่ส่วนฉีดป้อนสารตัวอย่าง (injection port) สารจะกลายเป็นไอแล้วถูกพาเข้าไปในคอลัมน์ด้วยก๊าซพา (carrier gas) อย่างช้า ๆ สารผสมจะถูกแยกเป็นส่วน ๆ ที่คอลัมน์นี้ แล้วทยอยออกสู่ตัวตรวจวัด (detector) จะทำให้ได้สัญญาณเกิดขึ้น ซึ่งสามารถเขียนออกมาเป็นโครมาโตแกรมด้วยเครื่องบันทึกผล (recorder) หรือต่อเข้ากับอินทิเกรเตอร์ (integrator) ก็จะทำให้สามารถทราบองค์ประกอบของสารตัวอย่างได้

เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟีที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้คือเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟีรุ่น GC-8A ผลิตโดยบริษัท Shimudzu ประเทศญี่ปุ่น ของศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยสภาวะของเครื่องที่ใช้มีดังนี้

1. สารที่ตรวจสอบคือก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจน

   คอลัมน์ (column) : molecular sieve 5A ขนาด 80/100 mesh ความยาว 2 เมตร

   ก๊าซพา (carrier gas) : ฮีเลียม (He)

   ตัวตรวจวัด (detector) : thermal conductivity detector (TCD)

   อุณหภูมิส่วนฉีดป้อนและตัวตรวจวัด : 80 องศาเซลเซียส
   (injector/detector temperature)

   อุณหภูมิคอลัมน์ (column temperature) : 50 องศาเซลเซียส

   กระแสไฟฟ้า (current) : 90 มิลลิแอมแปร์

   อัตราเร็วของก๊าซพา (carrier gas flow rate) : 25 มิลลิลิตรต่อนาที

2. สารที่ตรวจสอบคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

   คอลัมน์ (column) : Porapak Q ขนาด 80/100 mesh ความยาว 2 เมตร

   ก๊าซพา (carrier gas) : ฮีเลียม (He)

   ตัวตรวจวัด (detector) : thermal conductivity detector (TCD)

   อุณหภูมิส่วนฉีดป้อนและตัวตรวจวัด : 80 องศาเซลเซียส
   (injector/detector temperature)

   อุณหภูมิคอลัมน์ (column temperature) : 50 องศาเซลเซียส

   กระแสไฟฟ้า (current) : 90 มิลลิแอมแปร์

   อัตราเร็วของก๊าซพา (carrier gas flow rate) : 25 มิลลิลิตรต่อนาที

ภาคผนวก ค

Calibration Curve

ขั้นตอนในการทำ calibration curve ของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจน (ยกตัวอย่างเฉพาะก๊าซออกซิเจนเท่านั้น)

1. เตรียมสภาวะของเครื่องโครมาโตกราฟีตามรายละเอียดในภาคผนวก ข
2. ฉีดก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ปริมาตร 0.05 มิลลิลิตรเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี
3. คำนวณจำนวนโมลของก๊าซปริมาตร 0.05 มิลลิลิตรที่ฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี โดยตั้งสมมติฐานว่าก๊าซออกซิเจนมีพฤติกรรมเป็นไปตามกฎของก๊าซอุดมคติ (Ideal gas law) จะได้ว่า

$$PV = nRT$$

โดย P คือ ความดันบรรยากาศ 1 atm

V คือ ปริมาตรของก๊าซ (0.05 มิลลิลิตร)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (82.05 cm^3 atm $gmol^{-1}$ K^{-1})

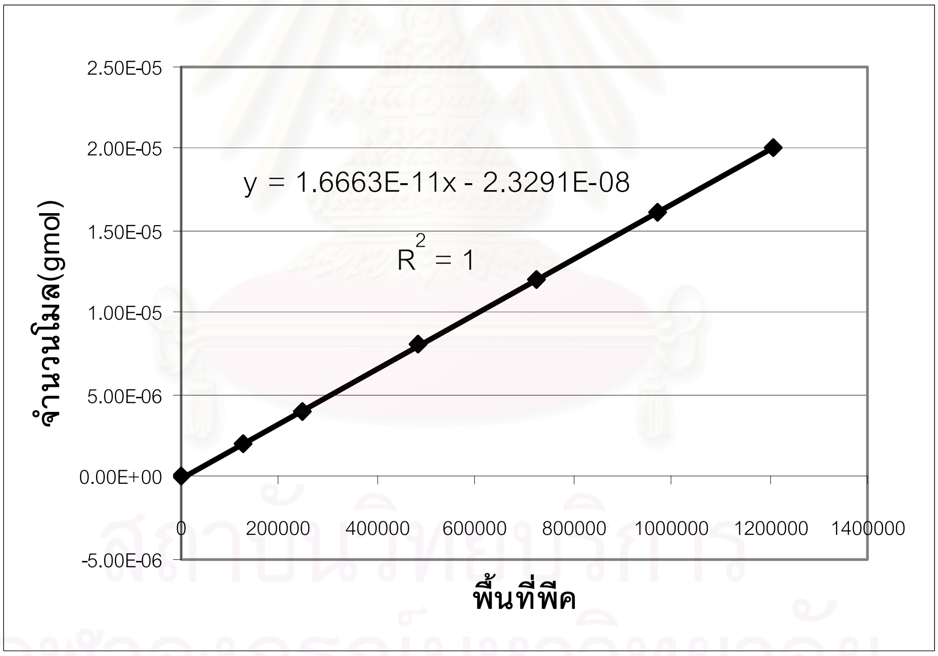
T คือ อุณหภูมิห้อง (302.5 K)

ดังนั้นค่า n (จำนวนโมลของก๊าซออกซิเจน) มีค่าเท่ากับ $2.01449*10^{-6}$ gmol

4. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 และ 3 โดยเปลี่ยนปริมาตรก๊าซที่ฉีดเป็น 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 มิลลิลิตร
5. นำพื้นที่พีคที่ได้จากเครื่องก๊าซโครมาโตรกราฟีมาพลอตกับค่าจำนวนโมลของก๊าซออกซิเจนที่คำนวณได้จากข้อ 3 โดยให้พื้นที่พีคเป็นแกน x และค่าจำนวนโมลของก๊าซออกซิเจนที่คำนวณได้เป็นแกน y
6. ทำการฟิตหาสมการแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลในข้อ 5 โดยใช้โปรแกรม Excel ช่วยในการคำนวณ ซึ่งสมการที่ดีควรเป็นสมการที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) เข้าใกล้ 1 มากที่สุด (ในที่นี้ได้สมการเส้นตรง)
7. สำหรับ calibration curve ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนสามารถทำได้เช่นเดียวกับก๊าซออกซิเจน โดยทำซ้ำขั้นตอนในข้อ 1 ถึง 6 ซึ่ง calibration curve ของก๊าซทั้ง 3 ชนิดนี้แสดงไว้ในตารางที่ ค.1-ค.3

ตารางที่ ค.1 Calibration Curve ของก๊าซออกซิเจน

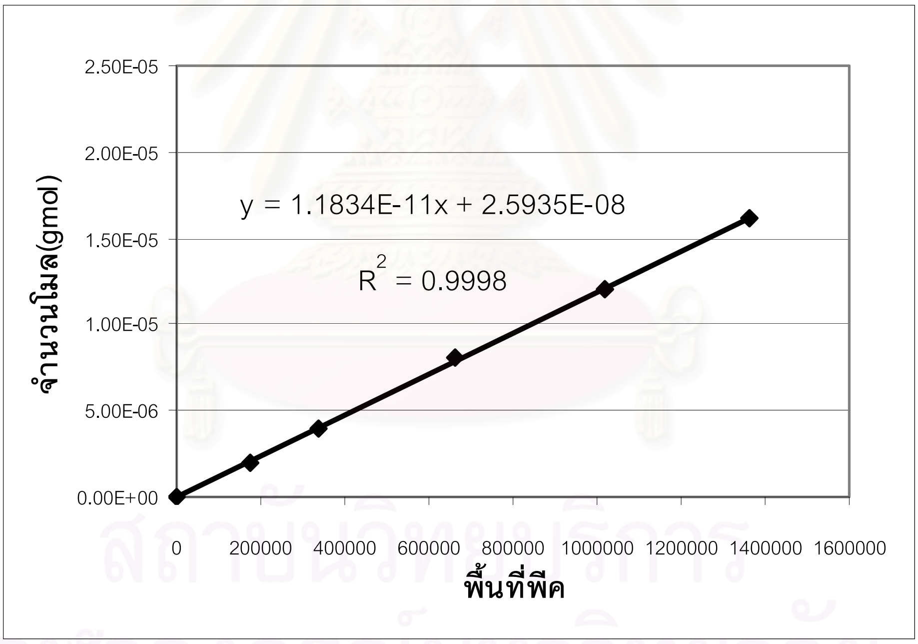
ปริมาตร (ml)	พื้นที่พีค ครั้งที่1	พื้นที่พีค ครั้งที่2	พื้นที่พีค เฉลี่ย	จำนวนโมล (gmol)
0	0	0	0	0
0.05	122870	124932	123901.0	2.01449E-06
0.1	242039	248458	245248.5	4.02899E-06
0.2	484414	479587	482000.5	8.05798E-06
0.3	725266	723984	724625.0	1.20870E-05
0.4	976768	970555	973661.5	1.61160E-05
0.5	1211802	1204600	1208201.0	2.01449E-05



รูปที่ ค.1 Calibration Curve ของก๊าซออกซิเจน

ตารางที่ ค.2 Calibration Curve ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

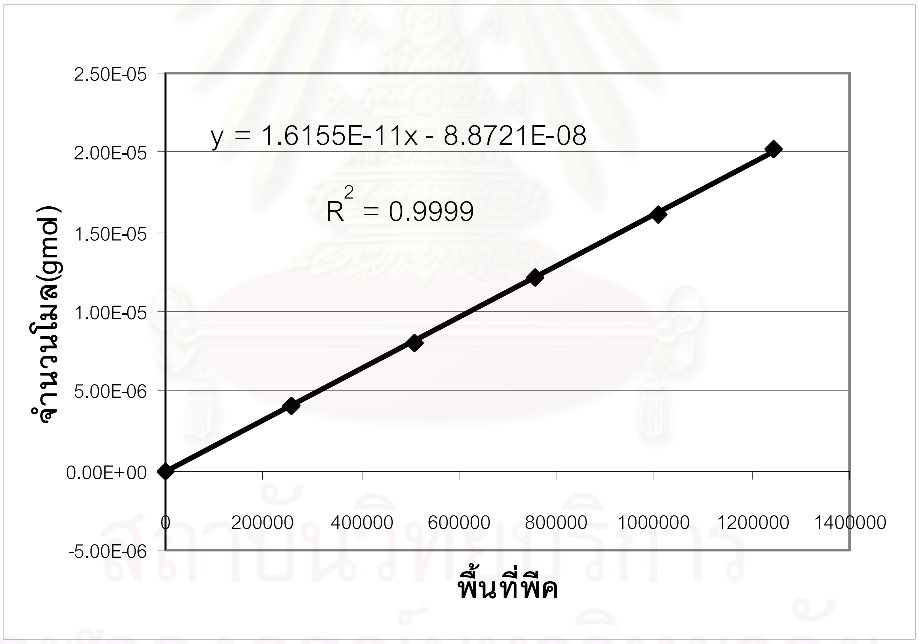
ปริมาตร (ml)	พื้นที่พีค			จำนวนโมล (gmol)
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	
0	0	0	0	0
0.05	175676	175103	175389.5	2.01449E-06
0.1	338730	332161	335445.5	4.02899E-06
0.2	661735	668816	665275.5	8.05798E-06
0.3	1017329	1024096	1020712.5	1.20870E-05
0.4	1368254	1361173	1364713.5	1.61160E-05



รูปที่ ค.2 Calibration Curve ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ ค.3 Calibration Curve ของก๊าซไนโตรเจน

ปริมาตร	พื้นที่พีค			จำนวนโมล
(ml)	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	(gmol)
0	0	0	0	0
0.1	257540	255945	256742.5	4.02899E-06
0.2	509061	510200	509630.5	8.05798E-06
0.3	758484	748863	753673.5	1.20870E-05
0.4	1005313	1009785	1007549.0	1.61160E-05
0.5	1240791	1251758	1246274.5	2.01449E-05



รูปที่ ค.3 Calibration Curve ของก๊าซไนโตรเจน

สำหรับสมบัติของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ ค.4

ตารางที่ ค.4 สมบัติของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่ใช้ในการทำ calibration curve

สมบัติ	ก๊าซออกซิเจน	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	ก๊าซไนโตรเจน
ความบริสุทธิ์ (%)	99.6	99.8	99.998
บริษัทผู้ผลิต	Scott Specialty Gases		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

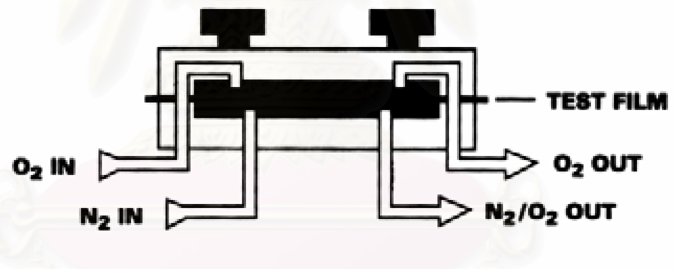
ภาคผนวก ง

เครื่อง Oxygen Permeability Analyzer

หลักการทำงานของเครื่อง Oxygen Permeability Analyzer

เครื่อง Oxygen Permeability Analyzer ใช้สำหรับวัดค่าอัตราการส่งผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ (oxygen transmission rate : OTR) โดยวางแผ่นฟิล์มไว้ใน chamber แล้วให้ก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 ไหลเข้าทางส่วนบนของ chamber จากนั้นโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนที่อยู่ส่วนบนของ chamber จะแพร่ผ่านแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์เข้าสู่ chamber ส่วนล่างและถูกพาไปยังเซนเซอร์โดยก๊าซไนโตรเจนดังแสดงในรูปที่ ง.1

ค่าที่วัดได้จะอยู่ในรูปของค่าอัตราการส่งผ่านของก๊าซออกซิเจนซึ่งมีหน่วยเป็น cc m^{-2} day^{-1} หรือ cc $100in^{-2}$ day^{-1}



รูปที่ ง.1 หลักการทำงานของเครื่อง Oxygen Permeability Analyzer

สำหรับการคำนวณค่าอัตราการส่งผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ (OTR) ของเครื่อง Oxygen Permeability Analyzer สามารถแสดงได้ดังนี้

$$OTR = f\,\frac{p_2}{p}\,\frac{1}{A} \qquad (ง.1)$$

โดย p_2 คือ ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนที่อยู่ใน chamber ส่วนล่างที่สภาวะคงตัว

p คือ ความดันรวมของก๊าซที่อยู่ใน chamber ส่วนล่าง

f คือ อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน (ปริมาตรต่อเวลา)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของฟิล์ม

เครื่อง Oxygen Permeability Analyzer ที่ใช้ในการทดลองคือเครื่อง Oxygen Permeability Analyzer รุ่น 8500 ผลิตโดยบริษัท Illinois Instruments ประเทศสหรัฐอเมริกา (โดยได้รับความอนุเคราะห์จากคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์) โดยสภาวะของเครื่องที่ใช้มีดังนี้

พื้นที่ในการทดสอบของฟิล์มตัวอย่าง (sample test area) : 100 ตารางเซนติเมตร

อัตราเร็วของก๊าซไนโตรเจน (N_2 flow rate) : 34 มิลลิลิตรต่อนาที

อัตราเร็วของก๊าซออกซิเจน (O_2 flow rate) : 34 มิลลิลิตรต่อนาที

ความดันขาเข้าของก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจน : 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
(N_2 & O_2 input pressure)

สภาวะที่ใช้ (operating condition) : อุณหภูมิ : 25 องศาเซลเซียส

: ความชื้นสัมพัทธ์ : 0 %

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ผลการทดลองวัดอัตราการหายใจของผักและผลไม้สด

ตารางที่ จ.1 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

น้ำหนักมะเขือเทศเฉลี่ยเท่ากับ 300.89 กรัม

ปริมาตรอากาศภายในขวดเฉลี่ยเท่ากับ 727 มิลลิลิตร

ชั่วโมงที่	พื้นที่พีคเฉลี่ย		
	O_2	N_2	CO_2
0	154134.5	586423.5	1400.5
2	148865.0	564770.5	4233.5
4	146662.5	568974.0	5990.0
6.25	146913.5	589567.0	9645.0
22	138129.0	599469.0	23484.5
24	130798.0	596548.0	25987.0
26	128533.0	592208.5	27139.5
29	123870.0	589246.0	30480.5
46	106801.0	591529.0	46011.0
48	103171.5	583832.0	46275.5
51	101965.5	591259.0	49816.5
70	83661.5	597483.0	66455.0
74	80048.0	599959.5	69906.5
77	81197.5	632628.5	76182.0
102	58196.0	584075.0	105537.0
108	56615.0	607362.5	108274.5
130	18576.0	609210.0	137015.5
133	17984.0	621626.0	138084.5
136	17963.5	614001.5	139726.5
154	16860.0	604069.5	151415.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชั่วโมงที่	พื้นที่พีคเฉลี่ย		
	O_2	N_2	CO_2
157.5	16925.0	611627.0	156701.0
160	15347.5	594786.0	163862.0
178.75	15214.0	603707.0	167231.0
182	14074.5	580848.5	168196.0
184	13783.0	583811.0	168176.5
202.5	13446.5	584222.0	189456.0
205.5	13086.5	587388.0	192528.5
208	11308.0	576242.5	200297.0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.2 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

น้ำหนักมะเขือเทศเฉลี่ยเท่ากับ 299.71 กรัม

ปริมาตรอากาศภายในขวดเฉลี่ยเท่ากับ 726 มิลลิลิตร

ชั่วโมงที่	พื้นที่พีคเฉลี่ย		
	O_2	N_2	CO_2
0	162070.0	594723.5	2033.5
1	155576.0	581155.5	5480.0
2	149939.0	584271.0	7817.5
3	148604.0	587786.0	9967.0
4	143319.5	581947.5	12139.0
16	130797.5	618572.0	36422.5
16.75	127914.0	616738.5	35844.0
19	119255.5	594590.0	38183.5
21	119586.5	613949.0	42837.5
23.5	113442.5	606231.0	48753.0
25	112721.5	624137.0	55449.5
42.75	79447.5	586511.5	72182.5
45	76861.0	586276.0	74057.5
46.75	73900.0	590353.5	79049.5
64.75	54726.0	611234.5	103898.0
68.25	48354.5	608581.5	109167.0
70.5	44556.5	603441.0	110849.5
126.25	14758.0	644327.0	188177.0
129.25	14194.5	643001.5	197253.0
131.25	13480.5	634407.5	208581.5

ตารางที่ จ.3 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

น้ำหนักมะเขือเทศเฉลี่ยเท่ากับ 301.82 กรัม

ปริมาตรอากาศภายในขวดเฉลี่ยเท่ากับ 723 มิลลิลิตร

ชั่วโมงที่	พื้นที่พีคเฉลี่ย		
	O_2	N_2	CO_2
0	157162.5	591341.0	4383.0
1	142944.0	579583.5	18318.0
2	133004.5	572992.0	29198.0
2.75	125486.5	578511.5	38887.5
3.75	117381.5	579221.5	52364.0
5	100894.0	568821.5	59159.5
6	90685.0	558641.0	68436.0
7	80561.0	563038.5	79038.0
8	74284.5	562949.5	86079.5
9	67695.0	571697.0	96105.0
10	60266.5	569665.5	101961.5
11	52438.5	564042.0	112525.5
15.75	40180.0	629823.5	167736.5
16.75	30718.5	614100.0	172797.0
17.75	25971.0	599514.5	171576.0
18.75	22290.0	601038.0	177611.0
20.33	17248.5	586022.5	175342.0
21.75	14199.5	586319.0	186952.0
23	12316.5	590307.0	196102.5
25	10845.0	582424.0	206638.0

ตารางที่ จ.4 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

น้ำหนักกล้วยน้ำว้าเฉลี่ยเท่ากับ 296.35 กรัม

ปริมาตรอากาศภายในขวดเฉลี่ยเท่ากับ 739 มิลลิลิตร

ชั่วโมงที่	พื้นที่พีคเฉลี่ย		
	O_2	N_2	CO_2
0	165759.0	627226.5	1290.5
1	158889.0	619671.5	3057.0
3	156958.5	616713.5	6635.0
5	146230.0	596458.5	11109.5
7	138668.0	571320.0	15809.5
23.5	118222.5	693400.5	54272.5
25.5	112938.5	687360.0	58866.5
27.5	107685.5	693796.0	61531.5
29.5	100563.5	689941.5	62303.5
32.5	88334.5	647411.5	69946.0
35.5	80421.0	638376.0	73474.0
38	75616.5	646645.5	83613.0
47	53462.0	653612.5	110060.5
49	45425.5	679140.0	108708.5
51	39095.5	673448.5	118516.0
53	33476.5	665901.5	118961.5
71	20859.5	722222.0	156503.5
73	15027.5	725671.5	154748.5
75	14679.0	731084.5	159026.0
77	14132.5	724344.0	174680.5
95	10439.0	578843.5	200393.5

ตารางที่ จ.5 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

น้ำหนักกล้วยน้ำว้าเฉลี่ยเท่ากับ 294.37 กรัม

ปริมาตรอากาศภายในขวดเฉลี่ยเท่ากับ 740 มิลลิลิตร

ชั่วโมงที่	พื้นที่พีคเฉลี่ย		
	O_2	N_2	CO_2
0	150451.0	567869.0	6370.5
1.25	134426.5	582943.5	21524.5
2.25	126121.5	581093.0	28202.0
3.25	126341.0	613351.5	31557.5
4.75	126296.5	641919.0	33722.0
9	112921.5	602744.0	45155.5
23.5	65217.0	610644.5	76726.0
25.5	62217.0	653036.5	87082.0
27.75	53337.0	623819.0	94873.5
45.25	32048.5	611448.0	147195.5
49.25	26749.0	650281.0	164068.5
51.75	20148.0	589754.5	190013.0
72	13483.5	606475.5	226386.0
75	11967.0	596201.0	230982.0
77	11242.0	604506.0	233984.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.6 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

น้ำหนักกล้วยน้ำว้าเฉลี่ยเท่ากับ 285.12 กรัม

ปริมาตรอากาศภายในขวดเฉลี่ยเท่ากับ 749.5 มิลลิลิตร

ชั่วโมงที่	พื้นที่พีคเฉลี่ย		
	O_2	N_2	CO_2
0	155176.0	571593.5	3913.5
1	140268.0	553742.0	15135.0
2	111146.5	559579.0	53934.5
3	64423.5	604403.0	106621.0
4	31060.5	628770.5	152510.5
5	17800.0	607561.5	193600.5
6	8748.5	556851.0	211939.0
7	8276.5	510014.5	228185.5
8	8112.5	514894.0	259367.5
9	7769.0	496498.5	272150.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.7 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

น้ำหนักส้มเขียวหวานเฉลี่ยเท่ากับ 253.46 กรัม

ปริมาตรอากาศภายในขวดเฉลี่ยเท่ากับ 792 มิลลิลิตร

ชั่วโมงที่	พื้นที่พีคเฉลี่ย		
	O_2	N_2	CO_2
0	156014.5	589477.0	1967.0
2	153944.5	585977.5	2666.5
4	148670.5	568248.0	3856.0
6	147745.0	584040.5	6272.0
23	143069.0	576946.0	14701.0
25	142402.0	576760.5	15232.0
27	146060.0	596415.0	16220.5
29	140806.0	574055.0	17645.0
47	134201.5	583068.0	26410.5
50	133121.5	583052.5	27713.5
52	131664.0	579998.0	28572.0
71	121934.0	573959.0	37330.0
74	122088.5	580855.0	38452.0
77	120616.0	577510.0	40096.5
131	87817.5	586290.5	75974.5
134	84981.5	577741.5	76306.5
137	84415.5	583522.5	78518.5
155	77176.5	586325.5	85663.5
161	73478.5	579336.0	88262.5
174	64698.5	572485.5	95836.0
177	62077.5	574880.0	98540.5
203.5	56398.0	608917.0	116925.5
209	53989.5	608926.5	121929.0

ชั่วโมงที่	พื้นที่พีคเฉลี่ย		
	O_2	N_2	CO_2
227.75	42178.5	597383.5	130631.5
230.5	41139.5	597564.0	132088.5
233	39545.5	592634.0	134848.0
298	14335.5	596087.0	163645.5
302	13411.5	616509.0	170026.5
305	12976.0	615759.5	172597.0
308.5	12983.5	631490.0	177074.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.8 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

น้ำหนักส้มเขียวหวานเฉลี่ยเท่ากับ 257.20 กรัม

ปริมาตรอากาศภายในขวดเฉลี่ยเท่ากับ 786 มิลลิลิตร

ชั่วโมงที่	พื้นที่พีคเฉลี่ย		
	O_2	N_2	CO_2
0	156146.0	583594.0	2100.5
1	151948.0	584629.5	5933.5
3.5	145424.0	577333.0	12563.0
6	152094.0	611140.5	16612.5
25.5	130918.5	602638.0	36878.5
28	127960.5	605949.0	38256.5
30	127167.0	610087.5	40865.0
49	114158.0	623079.5	62885.5
51	108839.5	612219.0	64633.0
53	109690.5	633526.5	65633.5
74	77616.5	618963.5	82352.0
108.5	48862.5	600376.5	119801.0
111	47445.5	595530.5	125521.0
114.5	45109.5	610339.5	139406.0
135	32455.0	592650.0	139026.0
137.75	32411.5	608126.5	140969.0
157.25	24061.0	598015.0	153795.0
161.5	23142.0	621539.5	165725.5
181	18632.5	591760.0	189560.5
186	16879.0	603330.0	190204.0
205.5	13494.5	582431.5	195760.5
210	13507.5	564132.0	193072.5
212	12813.0	562703.5	195309.5

ตารางที่ จ.9 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

น้ำหนักส้มเขียวหวานเฉลี่ยเท่ากับ 264.25 กรัม

ปริมาตรอากาศภายในขวดเฉลี่ยเท่ากับ 777 มิลลิลิตร

ชั่วโมงที่	พื้นที่พีคเฉลี่ย		
	O_2	N_2	CO_2
0	147203.0	553893.0	1959.5
1	137900.5	536762.5	8864.0
2	125911.5	563853.5	20516.0
3.25	122989.0	534190.0	27923.0
4	120574.5	543708.0	35788.0
5	118983.0	543474.0	42170.5
6	115878.5	559770.5	56911.0
7	112695.5	558536.5	60673.0
8.5	102931.0	540399.5	67402.0
10	101860.0	556508.5	80074.5
11.5	99194.5	574866.5	88253.5
22.5	56693.0	564445.5	140497.5
23.5	53741.5	577279.0	145809.0
25.5	48727.5	552168.0	151274.0
27	43077.5	528379.5	150639.5
29	40050.5	559440.5	166030.0
33	31782.0	546887.5	173632.0
35	24754.0	529085.0	183749.0
37	23147.5	555423.5	195504.0
51	15625.0	536129.5	234117.5
53	13977.5	526273.0	235800.5
55	13095.5	557816.5	239016.0
57	11152.5	499319.0	239084.5

ตารางที่ จ.10 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกชี้ฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 134.85 กรัม

ปริมาตรอากาศภายในขวดเฉลี่ยเท่ากับ 907 มิลลิลิตร

ชั่วโมงที่	พื้นที่พีคเฉลี่ย		
	O_2	N_2	CO_2
0	150973.5	569712.0	1104.5
2	149231.0	571821.5	3033.5
4	147635.5	571893.0	4498.5
6	141167.5	555786.5	6019.5
23	133871.5	602432.5	23396.5
25	124862.5	568632.0	22803.0
26.5	122857.0	565648.5	23929.5
29.5	119682.5	565373.5	27493.5
47	108325.0	606604.5	50014.0
51	101910.5	594062.0	54122.5
54	99113.0	597576.0	58576.5
68	80192.5	608887.5	81052.5
70	75717.0	592697.5	83812.5
73.5	70692.0	593207.0	91055.0
96	45481.5	623269.0	129939.5
99	42504.0	619366.5	136031.5
102	36826.0	607706.5	137043.5
120.5	14832.0	591557.5	184097.0
123.5	14137.0	638386.5	186852.0
144	12465.0	614599.5	195891.0
147	11699.0	626757.5	201159.0
150.5	10882.5	617184.0	213353.0
167.5	10639.5	597887.5	213730.0
170.5	10434.5	595095.0	212101.0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.11 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกชี้ฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 134.79 กรัม

ปริมาตรอากาศภายในขวดเฉลี่ยเท่ากับ 908.5 มิลลิลิตร

ชั่วโมงที่	พื้นที่พีคเฉลี่ย		
	O_2	N_2	CO_2
0	161305.5	603797.5	4260.5
1.25	147626.5	575076.5	8428.0
3.33	143597.0	577138.0	13551.0
5.75	144146.0	593243.5	17765.5
25.5	120438.0	600342.5	43479.0
28	116026.5	606386.5	49023.0
30	113581.5	608274.5	62121.5
49	88066.0	607996.5	95627.5
51	85160.5	658208.5	95090.5
53.5	82452.5	634256.5	102899.5
58.5	72880.5	597823.5	107822.0
68	48404.0	614585.5	141179.5
92	23403.0	614279.0	177357.0
110	15034.5	573419.5	196362.0
114.5	13326.5	601745.5	206743.5
117	12238.5	588283.0	204296.5
120.33	11855.0	595817.0	222750.5
140	10013.0	556601.5	222257.5

ตารางที่ จ.12 พื้นที่พีคเฉลี่ยจากการทดลองวัดอัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกชี้ฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 132.43 กรัม

ปริมาตรอากาศภายในขวดเฉลี่ยเท่ากับ 914 มิลลิลิตร

ชั่วโมงที่	พื้นที่พีคเฉลี่ย		
	O_2	N_2	CO_2
0	146856.5	551473.5	3596.0
1	136646.5	558887.5	18733.5
2	126174.0	561232.0	32960.5
2.75	115434.5	555437.5	45855.0
3.75	103696.5	551655.5	57708.5
4.75	96604.0	563106.0	70475.0
5.75	88725.5	562328.5	80567.0
7	75696.0	570715.0	96788.5
8	64789.5	554624.0	104992.5
9	58211.5	565646.5	116287.0
10	50567.0	569581.0	129454.5
11	40423.0	544058.5	135792.0
12	34265.0	543050.5	144560.0
13	28887.0	541628.0	152801.0
20.5	9462.5	533538.5	205743.5
21.5	8764.5	527503.5	212539.5
22.5	8295.0	521603.0	218756.0
23.75	8138.5	513675.5	224341.0
24.75	8086.0	511178.5	230772.0

ตารางที่ จ.13 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

ชั่วโมงที่	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	2.545E-06	9.385E-06	4.251E-08	1.197E-05	21.26	0.36
2	2.457E-06	9.035E-06	7.603E-08	1.157E-05	21.24	0.66
4	2.421E-06	9.103E-06	9.682E-08	1.162E-05	20.83	0.83
6.25	2.337E-06	9.618E-06	1.401E-07	1.209E-05	19.32	1.16
22	2.366E-06	9.535E-06	3.039E-07	1.220E-05	19.38	2.49
24	2.156E-06	9.549E-06	3.335E-07	1.204E-05	17.91	2.77
26	2.118E-06	9.478E-06	3.471E-07	1.194E-05	17.74	2.91
29	2.041E-06	9.431E-06	3.866E-07	1.186E-05	17.21	3.26
46	1.756E-06	9.467E-06	5.704E-07	1.179E-05	14.89	4.84
48	1.696E-06	9.343E-06	5.736E-07	1.161E-05	14.60	4.94
51	1.676E-06	9.463E-06	6.155E-07	1.175E-05	14.26	5.24
70	1.371E-06	9.564E-06	8.124E-07	1.175E-05	11.67	6.92
74	1.311E-06	9.604E-06	8.532E-07	1.177E-05	11.14	7.25
77	1.330E-06	1.013E-05	9.275E-07	1.239E-05	10.73	7.49
102	9.464E-07	9.347E-06	1.275E-06	1.157E-05	8.18	11.02
108	9.201E-07	9.723E-06	1.307E-06	1.195E-05	7.70	10.94
130	2.862E-07	9.753E-06	1.647E-06	1.169E-05	2.45	14.10
133	2.764E-07	9.954E-06	1.660E-06	1.189E-05	2.32	13.96
136	2.760E-07	9.830E-06	1.679E-06	1.179E-05	2.34	14.25
154	2.576E-07	9.670E-06	1.818E-06	1.175E-05	2.19	15.48
157.5	2.587E-07	9.792E-06	1.880E-06	1.193E-05	2.17	15.76
160	2.324E-07	9.520E-06	1.965E-06	1.172E-05	1.98	16.77
178.75	2.302E-07	9.664E-06	2.005E-06	1.190E-05	1.93	16.85
182	2.112E-07	9.295E-06	2.016E-06	1.152E-05	1.83	17.50
184	2.064E-07	9.343E-06	2.016E-06	1.157E-05	1.78	17.43
202.5	2.008E-07	9.349E-06	2.268E-06	1.182E-05	1.70	19.19
205.5	1.948E-07	9.401E-06	2.304E-06	1.190E-05	1.64	19.36
208	1.651E-07	9.220E-06	2.396E-06	1.178E-05	1.40	20.34

ตารางที่ จ.14 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

ชั่วโมงที่	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	2.677E-06	9.519E-06	5.000E-08	1.225E-05	21.86	0.41
1	2.569E-06	9.300E-06	9.079E-08	1.196E-05	21.48	0.76
2	2.475E-06	9.350E-06	1.184E-07	1.194E-05	20.72	0.99
3	2.406E-06	9.411E-06	1.439E-07	1.196E-05	20.12	1.20
4	2.412E-06	9.331E-06	1.696E-07	1.191E-05	20.24	1.42
16	2.156E-06	9.904E-06	4.570E-07	1.252E-05	17.23	3.65
16.75	2.108E-06	9.875E-06	4.501E-07	1.243E-05	16.96	3.62
19	1.964E-06	9.517E-06	4.778E-07	1.196E-05	16.42	4.00
21	1.969E-06	9.830E-06	5.329E-07	1.233E-05	15.97	4.32
23.5	1.867E-06	9.705E-06	6.029E-07	1.217E-05	15.33	4.95
25	1.855E-06	9.994E-06	6.821E-07	1.253E-05	14.80	5.44
42.75	1.301E-06	9.386E-06	8.801E-07	1.157E-05	11.24	7.61
45	1.257E-06	9.383E-06	9.023E-07	1.154E-05	10.89	7.82
46.75	1.208E-06	9.448E-06	9.614E-07	1.162E-05	10.40	8.28
64.75	8.886E-07	9.786E-06	1.255E-06	1.193E-05	7.45	10.52
68.25	7.824E-07	9.743E-06	1.318E-06	1.184E-05	6.61	11.13
70.5	7.192E-07	9.660E-06	1.338E-06	1.172E-05	6.14	11.42
126.25	2.226E-07	1.032E-05	2.253E-06	1.280E-05	1.74	17.61
129.25	2.132E-07	1.030E-05	2.360E-06	1.287E-05	1.66	18.34
131.25	2.013E-07	1.016E-05	2.494E-06	1.286E-05	1.57	19.40

ตารางที่ จ.15 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

ชั่วโมงที่	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	2.596E-06	9.464E-06	7.780E-08	1.214E-05	21.38	0.64
1	2.359E-06	9.274E-06	2.427E-07	1.188E-05	19.86	2.04
2	2.193E-06	9.168E-06	3.715E-07	1.173E-05	18.69	3.17
2.75	2.068E-06	9.257E-06	4.861E-07	1.181E-05	17.51	4.12
3.75	1.933E-06	9.269E-06	6.456E-07	1.185E-05	16.31	5.45
5	1.658E-06	9.101E-06	7.260E-07	1.148E-05	14.44	6.32
6	1.488E-06	8.936E-06	8.358E-07	1.126E-05	13.21	7.42
7	1.319E-06	9.007E-06	9.613E-07	1.129E-05	11.69	8.52
8	1.215E-06	9.006E-06	1.045E-06	1.126E-05	10.78	9.27
9	1.105E-06	9.147E-06	1.163E-06	1.141E-05	9.68	10.19
10	9.809E-07	9.114E-06	1.233E-06	1.133E-05	8.66	10.88
11	8.505E-07	9.023E-06	1.358E-06	1.123E-05	7.57	12.09
15.75	6.462E-07	1.009E-05	2.011E-06	1.274E-05	5.07	15.78
16.75	4.886E-07	9.832E-06	2.071E-06	1.239E-05	3.94	16.71
17.75	4.095E-07	9.596E-06	2.056E-06	1.206E-05	3.39	17.05
18.75	3.481E-07	9.621E-06	2.128E-06	1.210E-05	2.88	17.59
20.33	2.641E-07	9.378E-06	2.101E-06	1.174E-05	2.25	17.89
21.75	2.133E-07	9.383E-06	2.238E-06	1.183E-05	1.80	18.91
23	1.819E-07	9.448E-06	2.347E-06	1.198E-05	1.52	19.59
25	1.574E-07	9.320E-06	2.471E-06	1.195E-05	1.32	20.68

ตารางที่ จ.16 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

ชั่วโมงที่	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	2.739E-06	1.004E-05	4.121E-08	1.282E-05	21.36	0.32
1	2.624E-06	9.922E-06	6.211E-08	1.261E-05	20.81	0.49
3	2.592E-06	9.874E-06	1.045E-07	1.257E-05	20.62	0.83
5	2.413E-06	9.547E-06	1.574E-07	1.212E-05	19.92	1.30
7	2.287E-06	9.141E-06	2.130E-07	1.164E-05	19.65	1.83
23.5	1.947E-06	1.111E-05	6.682E-07	1.373E-05	14.18	4.87
25.5	1.859E-06	1.102E-05	7.226E-07	1.360E-05	13.67	5.31
27.5	1.771E-06	1.112E-05	7.541E-07	1.364E-05	12.98	5.53
29.5	1.652E-06	1.106E-05	7.632E-07	1.347E-05	12.26	5.66
32.5	1.449E-06	1.037E-05	8.537E-07	1.267E-05	11.43	6.74
35.5	1.317E-06	1.022E-05	8.954E-07	1.244E-05	10.59	7.20
38	1.237E-06	1.036E-05	1.015E-06	1.261E-05	9.81	8.05
47	8.675E-07	1.047E-05	1.328E-06	1.267E-05	6.85	10.49
49	7.336E-07	1.088E-05	1.428E-06	1.304E-05	5.62	10.95
51	6.282E-07	1.079E-05	1.312E-06	1.273E-05	4.93	10.31
53	5.345E-07	1.067E-05	1.428E-06	1.263E-05	4.23	11.31
71	3.243E-07	1.158E-05	1.434E-06	1.334E-05	2.43	10.75
73	2.271E-07	1.163E-05	1.878E-06	1.374E-05	1.65	13.67
75	2.213E-07	1.172E-05	1.857E-06	1.380E-05	1.60	13.46
77	2.122E-07	1.161E-05	1.908E-06	1.373E-05	1.55	13.89
95	1.507E-07	9.262E-06	2.093E-06	1.151E-05	1.31	18.19

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.17 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

ชั่วโมงที่	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	2.484E-06	9.085E-06	1.013E-07	1.167E-05	21.28	0.87
1.25	2.217E-06	9.329E-06	2.807E-07	1.183E-05	18.74	2.37
2.25	2.078E-06	9.299E-06	3.597E-07	1.174E-05	17.71	3.06
3.25	2.082E-06	9.820E-06	3.994E-07	1.230E-05	16.92	3.25
4.75	2.081E-06	1.028E-05	4.250E-07	1.279E-05	16.27	3.32
9	1.858E-06	9.649E-06	5.603E-07	1.207E-05	15.40	4.64
23.5	1.063E-06	9.776E-06	9.339E-07	1.177E-05	9.03	7.93
25.5	1.013E-06	1.046E-05	1.056E-06	1.253E-05	8.09	8.43
27.75	8.655E-07	9.989E-06	1.149E-06	1.200E-05	7.21	9.57
45.25	5.107E-07	9.789E-06	1.768E-06	1.207E-05	4.23	14.65
49.25	4.224E-07	1.042E-05	1.968E-06	1.281E-05	3.30	15.36
51.75	3.124E-07	9.439E-06	2.275E-06	1.203E-05	2.60	18.91
72	2.014E-07	9.709E-06	2.705E-06	1.262E-05	1.60	21.44
75	1.761E-07	9.543E-06	2.759E-06	1.248E-05	1.41	22.11
77	1.640E-07	9.677E-06	2.795E-06	1.264E-05	1.30	22.12

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.18 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

ชั่วโมงที่	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	2.562E-06	9.145E-06	7.225E-08	1.178E-05	21.75	0.61
1	2.314E-06	8.857E-06	2.050E-07	1.138E-05	20.34	1.80
2	1.829E-06	8.951E-06	6.642E-07	1.144E-05	15.98	5.80
3	1.050E-06	9.675E-06	1.288E-06	1.201E-05	8.74	10.72
4	4.943E-07	1.007E-05	1.831E-06	1.239E-05	3.99	14.77
5	2.733E-07	9.726E-06	2.317E-06	1.232E-05	2.22	18.81
6	1.225E-07	8.907E-06	2.534E-06	1.156E-05	1.06	21.91
7	1.146E-07	8.151E-06	2.726E-06	1.099E-05	1.04	24.80
8	1.119E-07	8.229E-06	3.095E-06	1.144E-05	0.98	27.06
9	1.062E-07	7.932E-06	3.247E-06	1.128E-05	0.94	28.77

ตารางที่ จ.19 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

ชั่วโมงที่	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	2.576E-06	9.434E-06	4.921E-08	1.206E-05	21.36	0.41
2	2.542E-06	9.378E-06	5.749E-08	1.198E-05	21.22	0.48
4	2.454E-06	9.091E-06	7.157E-08	1.162E-05	21.12	0.62
6	2.439E-06	9.346E-06	1.002E-07	1.189E-05	20.52	0.84
23	2.361E-06	9.232E-06	1.999E-07	1.179E-05	20.02	1.70
25	2.350E-06	9.229E-06	2.062E-07	1.178E-05	19.94	1.75
27	2.411E-06	9.546E-06	2.179E-07	1.217E-05	19.80	1.79
29	2.323E-06	9.185E-06	2.347E-07	1.174E-05	19.78	2.00
47	2.213E-06	9.331E-06	3.385E-07	1.188E-05	18.62	2.85
50	2.195E-06	9.330E-06	3.539E-07	1.188E-05	18.48	2.98
52	2.171E-06	9.281E-06	3.641E-07	1.182E-05	18.37	3.08
71	2.008E-06	9.184E-06	4.747E-07	1.167E-05	17.22	4.07
74	2.011E-06	9.295E-06	4.740E-07	1.178E-05	17.07	4.02
77	1.987E-06	9.241E-06	5.004E-07	1.173E-05	16.94	4.27
131	1.440E-06	9.383E-06	9.250E-07	1.175E-05	12.26	7.87
134	1.393E-06	9.245E-06	9.289E-07	1.157E-05	12.04	8.03
137	1.383E-06	9.338E-06	9.551E-07	1.168E-05	11.85	8.18
155	1.263E-06	9.383E-06	1.040E-06	1.169E-05	10.81	8.90
161	1.201E-06	9.270E-06	1.070E-06	1.154E-05	10.41	9.27
174	1.055E-06	9.160E-06	1.160E-06	1.137E-05	9.27	10.20
177	1.011E-06	9.198E-06	1.192E-06	1.140E-05	8.87	10.46
203.5	9.165E-07	9.748E-06	1.410E-06	1.207E-05	7.59	11.67
209	8.763E-07	9.748E-06	1.469E-06	1.209E-05	7.25	12.15
227.75	6.795E-07	9.562E-06	1.572E-06	1.181E-05	5.75	13.31
230.5	6.622E-07	9.565E-06	1.589E-06	1.182E-05	5.60	13.45
233	6.357E-07	9.485E-06	1.622E-06	1.174E-05	5.41	13.81
298	2.156E-07	9.541E-06	1.963E-06	1.172E-05	1.84	16.75
302	2.002E-07	9.871E-06	2.038E-06	1.211E-05	1.65	16.83
305	1.929E-07	9.859E-06	2.068E-06	1.212E-05	1.59	17.07
308.5	1.931E-07	1.011E-05	2.121E-06	1.243E-05	1.55	17.07

ตารางที่ จ.20 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

ชั่วโมงที่	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	2.579E-06	9.339E-06	5.079E-08	1.197E-05	21.54	0.42
1	2.509E-06	9.356E-06	9.615E-08	1.196E-05	20.97	0.80
3.5	2.400E-06	9.238E-06	1.746E-07	1.181E-05	20.32	1.48
6	2.511E-06	9.784E-06	2.225E-07	1.252E-05	20.06	1.78
25.5	2.158E-06	9.647E-06	4.624E-07	1.227E-05	17.59	3.77
28	2.109E-06	9.700E-06	4.787E-07	1.229E-05	17.16	3.90
30	2.096E-06	9.767E-06	5.095E-07	1.237E-05	16.94	4.12
49	1.879E-06	9.977E-06	7.701E-07	1.263E-05	14.88	6.10
51	1.790E-06	9.802E-06	7.908E-07	1.238E-05	14.46	6.39
53	1.804E-06	1.015E-05	8.026E-07	1.275E-05	14.15	6.29
74	1.270E-06	9.911E-06	1.000E-06	1.218E-05	10.43	8.21
108.5	7.909E-07	9.610E-06	1.485E-06	1.189E-05	6.65	12.49
111	7.673E-07	9.532E-06	1.470E-06	1.177E-05	6.52	12.49
114.5	7.284E-07	9.771E-06	1.676E-06	1.218E-05	5.98	13.76
135	5.175E-07	9.486E-06	1.671E-06	1.167E-05	4.43	14.32
137.75	5.168E-07	9.736E-06	1.694E-06	1.195E-05	4.33	14.18
157.25	3.776E-07	9.572E-06	1.846E-06	1.180E-05	3.20	15.65
161.5	3.623E-07	9.952E-06	1.987E-06	1.230E-05	2.95	16.15
181	2.872E-07	9.471E-06	2.269E-06	1.203E-05	2.39	18.87
186	2.580E-07	9.658E-06	2.277E-06	1.219E-05	2.12	18.67
205.5	2.016E-07	9.320E-06	2.343E-06	1.186E-05	1.70	19.74
210	2.018E-07	9.025E-06	2.311E-06	1.154E-05	1.75	20.03
212	1.902E-07	9.002E-06	2.337E-06	1.153E-05	1.65	20.27

ตารางที่ จ.21 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

ชั่วโมงที่	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	2.430E-06	8.859E-06	4.912E-08	1.134E-05	21.43	0.43
1	2.275E-06	8.583E-06	1.308E-07	1.099E-05	20.70	1.19
2	2.075E-06	9.020E-06	2.687E-07	1.136E-05	18.26	2.36
3.25	2.026E-06	8.541E-06	3.564E-07	1.092E-05	18.55	3.26
4	1.986E-06	8.695E-06	4.495E-07	1.113E-05	17.84	4.04
5	1.959E-06	8.691E-06	5.250E-07	1.118E-05	17.53	4.70
6	1.908E-06	8.954E-06	6.994E-07	1.156E-05	16.50	6.05
7	1.855E-06	8.934E-06	7.439E-07	1.153E-05	16.08	6.45
8.5	1.692E-06	8.641E-06	8.236E-07	1.116E-05	15.16	7.38
10	1.674E-06	8.902E-06	9.735E-07	1.155E-05	14.49	8.43
11.5	1.630E-06	9.198E-06	1.070E-06	1.190E-05	13.70	9.00
22.5	9.214E-07	9.030E-06	1.710E-06	1.166E-05	7.90	14.66
23.5	8.722E-07	9.237E-06	1.730E-06	1.184E-05	7.37	14.61
25.5	7.887E-07	8.832E-06	1.816E-06	1.144E-05	6.90	15.88
27	6.945E-07	8.447E-06	1.809E-06	1.095E-05	6.34	16.52
29	6.441E-07	8.949E-06	1.991E-06	1.158E-05	5.56	17.19
33	5.063E-07	8.746E-06	2.081E-06	1.133E-05	4.47	18.36
35	3.892E-07	8.459E-06	2.200E-06	1.105E-05	3.52	19.92
37	3.624E-07	8.884E-06	2.340E-06	1.159E-05	3.13	20.19
51	2.371E-07	8.572E-06	2.796E-06	1.161E-05	2.04	24.10
53	2.096E-07	8.413E-06	2.816E-06	1.144E-05	1.83	24.62
55	1.949E-07	8.923E-06	2.854E-06	1.197E-05	1.63	23.84
57	1.625E-07	7.978E-06	2.855E-06	1.100E-05	1.48	25.97

ตารางที่ จ.22 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

ชั่วโมงที่	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	2.492E-06	9.115E-06	3.901E-08	1.165E-05	21.40	0.33
2	2.463E-06	9.149E-06	6.183E-08	1.167E-05	21.10	0.53
4	2.437E-06	9.150E-06	7.917E-08	1.167E-05	20.89	0.68
6	2.329E-06	8.890E-06	9.717E-08	1.132E-05	20.58	0.86
23	2.207E-06	9.644E-06	3.028E-07	1.215E-05	18.16	2.49
25	2.057E-06	9.098E-06	2.958E-07	1.145E-05	17.97	2.58
26.5	2.024E-06	9.049E-06	3.091E-07	1.138E-05	17.78	2.72
29.5	1.971E-06	9.045E-06	3.513E-07	1.137E-05	17.34	3.09
47	1.782E-06	9.711E-06	6.178E-07	1.211E-05	14.71	5.10
51	1.675E-06	9.508E-06	6.664E-07	1.185E-05	14.13	5.62
54	1.628E-06	9.565E-06	7.191E-07	1.191E-05	13.67	6.04
68	1.313E-06	9.748E-06	9.851E-07	1.205E-05	10.90	8.18
70	1.238E-06	9.486E-06	1.018E-06	1.174E-05	10.55	8.67
73.5	1.155E-06	9.495E-06	1.103E-06	1.175E-05	9.82	9.39
96	7.346E-07	9.980E-06	1.564E-06	1.228E-05	5.98	12.73
99	6.850E-07	9.917E-06	1.636E-06	1.224E-05	5.60	13.37
102	5.903E-07	9.729E-06	1.648E-06	1.197E-05	4.93	13.77
120.5	2.239E-07	9.468E-06	2.205E-06	1.190E-05	1.88	18.53
123.5	2.123E-07	1.022E-05	2.237E-06	1.267E-05	1.67	17.65
144	1.844E-07	9.840E-06	2.344E-06	1.237E-05	1.49	18.95
147	1.716E-07	1.004E-05	2.406E-06	1.261E-05	1.36	19.08
150.5	1.580E-07	9.882E-06	2.551E-06	1.259E-05	1.26	20.26
167.5	1.540E-07	9.570E-06	2.555E-06	1.228E-05	1.25	20.81
170.5	1.506E-07	9.525E-06	2.536E-06	1.221E-05	1.23	20.77

ตารางที่ จ.23 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

ชั่วโมงที่	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	2.665E-06	9.666E-06	7.635E-08	1.241E-05	21.48	0.62
1.25	2.437E-06	9.202E-06	1.257E-07	1.176E-05	20.71	1.07
3.33	2.369E-06	9.235E-06	1.863E-07	1.179E-05	20.10	1.58
5.75	2.379E-06	9.495E-06	2.362E-07	1.211E-05	19.64	1.95
25.5	1.984E-06	9.610E-06	5.405E-07	1.213E-05	16.35	4.45
28	1.910E-06	9.707E-06	6.061E-07	1.222E-05	15.63	4.96
30	1.869E-06	9.738E-06	7.611E-07	1.237E-05	15.11	6.15
49	1.444E-06	9.733E-06	1.158E-06	1.234E-05	11.71	9.38
51	1.396E-06	1.054E-05	1.151E-06	1.309E-05	10.66	8.79
53.5	1.351E-06	1.016E-05	1.244E-06	1.275E-05	10.59	9.75
58.5	1.191E-06	9.569E-06	1.302E-06	1.206E-05	9.87	10.79
68	7.833E-07	9.840E-06	1.697E-06	1.232E-05	6.36	13.77
92	3.667E-07	9.835E-06	2.125E-06	1.233E-05	2.97	17.24
110	2.272E-07	9.175E-06	2.350E-06	1.175E-05	1.93	19.99
114.5	1.988E-07	9.632E-06	2.473E-06	1.230E-05	1.62	20.10
117	1.806E-07	9.415E-06	2.444E-06	1.204E-05	1.50	20.30
120.33	1.742E-07	9.537E-06	2.662E-06	1.237E-05	1.41	21.51
140	1.436E-07	8.903E-06	2.656E-06	1.170E-05	1.23	22.70

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.24 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

ชั่วโมงที่	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	2.424E-06	8.820E-06	6.849E-08	1.131E-05	21.43	0.61
1	2.254E-06	8.940E-06	2.476E-07	1.144E-05	19.70	2.16
2	2.079E-06	8.978E-06	4.160E-07	1.147E-05	18.12	3.63
2.75	1.900E-06	8.884E-06	5.686E-07	1.135E-05	16.74	5.01
3.75	1.705E-06	8.823E-06	7.089E-07	1.124E-05	15.17	6.31
4.75	1.586E-06	9.008E-06	8.599E-07	1.145E-05	13.85	7.51
5.75	1.455E-06	8.996E-06	9.794E-07	1.143E-05	12.73	8.57
7	1.238E-06	9.131E-06	1.171E-06	1.154E-05	10.73	10.15
8	1.056E-06	8.871E-06	1.268E-06	1.120E-05	9.43	11.33
9	9.467E-07	9.049E-06	1.402E-06	1.140E-05	8.31	12.30
10	8.193E-07	9.113E-06	1.558E-06	1.149E-05	7.13	13.56
11	6.503E-07	8.701E-06	1.633E-06	1.098E-05	5.92	14.87
12	5.477E-07	8.684E-06	1.737E-06	1.097E-05	4.99	15.83
13	4.581E-07	8.661E-06	1.834E-06	1.095E-05	4.18	16.75
20.5	1.344E-07	8.531E-06	2.461E-06	1.113E-05	1.21	22.12
21.5	1.228E-07	8.433E-06	2.541E-06	1.110E-05	1.11	22.90
22.5	1.149E-07	8.338E-06	2.615E-06	1.107E-05	1.04	23.63
23.75	1.123E-07	8.210E-06	2.681E-06	1.100E-05	1.02	24.36
24.75	1.114E-07	8.169E-06	2.757E-06	1.104E-05	1.01	24.98

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฉ

ผลการคำนวณจากการฟิตแบบจำลองของไมเคิลลิสเมนเทน

ผลการคำนวณจากการฟิตแบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนกับข้อมูลอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดแต่ละชนิดแสดงไว้ในตารางที่ ฉ.1 ถึง ฉ.12

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ.1 อัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 5±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ

$\%O_2$	$\%CO_2$	อัตราการใช้ O_2 (ml kg^{-1} hr^{-1})					อัตราการผลิต CO_2 (ml kg^{-1} hr^{-1})				
		การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ	การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
20.93	0.86	4.47	4.14	4.61	4.62	4.14	2.60	2.42	2.62	2.62	2.42
18.12	2.53	4.17	4.01	4.18	4.18	4.01	2.55	2.42	2.55	2.55	2.42
17.77	2.74	4.13	3.99	4.12	4.12	3.99	2.54	2.42	2.54	2.54	2.42
17.43	2.95	4.09	3.97	4.07	4.07	3.97	2.53	2.42	2.54	2.54	2.42
16.93	3.27	4.03	3.94	4.00	4.00	3.94	2.52	2.42	2.52	2.52	2.42
14.21	5.02	3.70	3.75	3.63	3.62	3.75	2.47	2.41	2.46	2.46	2.41
13.91	5.23	3.66	3.73	3.58	3.58	3.73	2.46	2.41	2.45	2.45	2.41
13.45	5.53	3.60	3.69	3.53	3.52	3.69	2.45	2.41	2.44	2.44	2.41
10.76	7.43	3.24	3.43	3.17	3.17	3.43	2.38	2.40	2.37	2.37	2.40
10.23	7.83	3.16	3.37	3.10	3.10	3.37	2.37	2.40	2.36	2.36	2.40
9.85	8.12	3.10	3.32	3.05	3.05	3.32	2.36	2.39	2.35	2.35	2.39
6.89	10.52	2.62	2.86	2.64	2.64	2.86	2.28	2.37	2.27	2.27	2.37
6.25	11.08	2.50	2.73	2.55	2.55	2.73	2.26	2.36	2.25	2.25	2.36
4.16	13.10	2.08	2.20	2.18	2.18	2.20	2.18	2.32	2.19	2.19	2.32
3.91	13.37	2.02	2.12	2.13	2.13	2.12	2.17	2.32	2.18	2.18	2.32
3.66	13.64	1.96	2.03	2.07	2.07	2.03	2.16	2.31	2.17	2.17	2.31
2.33	15.23	1.61	1.50	1.71	1.71	1.50	2.10	2.24	2.11	2.11	2.24
2.10	15.53	1.55	1.40	1.63	1.63	1.39	2.09	2.21	2.10	2.10	2.21
1.94	15.75	1.50	1.32	1.57	1.57	1.31	2.08	2.20	2.10	2.10	2.20
0.92	17.34	1.14	0.72	1.03	1.03	0.72	2.02	1.97	2.02	2.02	1.97
0.77	17.61	1.07	0.61	0.92	0.92	0.61	2.01	1.90	2.00	2.00	1.90
0.69	17.77	1.03	0.56	0.86	0.85	0.56	2.00	1.86	1.99	1.99	1.85

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ.2 อัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 11±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ

$\%O_2$	$\%CO_2$	อัตราการใช้ O_2 (ml kg^{-1} hr^{-1})					อัตราการผลิต CO_2 (ml kg^{-1} hr^{-1})				
		การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ	การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
20.91	1.10	6.82	6.74	6.83	6.83	6.74	4.15	4.07	4.15	4.15	4.07
20.62	1.27	6.78	6.70	6.78	6.78	6.70	4.13	4.07	4.14	4.14	4.07
20.35	1.44	6.73	6.66	6.73	6.73	6.66	4.12	4.06	4.12	4.12	4.06
17.16	3.44	6.15	6.17	6.14	6.14	6.17	3.95	3.95	3.94	3.94	3.95
16.97	3.56	6.11	6.14	6.10	6.10	6.14	3.94	3.95	3.93	3.93	3.95
16.41	3.92	6.00	6.04	6.00	6.00	6.04	3.90	3.92	3.90	3.90	3.92
15.91	4.24	5.90	5.95	5.90	5.90	5.95	3.87	3.90	3.87	3.87	3.90
15.31	4.64	5.78	5.84	5.78	5.78	5.84	3.84	3.88	3.83	3.83	3.88
14.96	4.88	5.71	5.77	5.71	5.71	5.77	3.82	3.86	3.81	3.81	3.86
11.09	7.58	4.85	4.91	4.86	4.86	4.91	3.56	3.63	3.56	3.56	3.63
10.64	7.91	4.74	4.79	4.75	4.75	4.79	3.52	3.59	3.53	3.53	3.59
10.30	8.16	4.66	4.70	4.66	4.67	4.70	3.50	3.56	3.51	3.51	3.56
7.17	10.67	3.78	3.73	3.78	3.78	3.73	3.24	3.22	3.24	3.24	3.22
6.63	11.13	3.61	3.53	3.61	3.61	3.53	3.19	3.13	3.18	3.18	3.13
6.30	11.42	3.51	3.41	3.50	3.50	3.41	3.15	3.08	3.15	3.15	3.08

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ.3 อัตราการหายใจของมะเขือเทศที่อุณหภูมิ 29±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ

$\%O_2$	$\%CO_2$	อัตราการใช้ O_2 (ml kg^{-1} hr^{-1})					อัตราการผลิต CO_2 (ml kg^{-1} hr^{-1})				
		การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ	การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
19.94	2.01	36.07	35.54	35.99	36.01	35.54	28.05	26.67	28.23	28.24	26.67
18.46	3.17	34.60	34.34	34.57	34.57	34.34	27.25	26.30	27.28	27.28	26.30
17.40	4.01	33.50	33.42	33.50	33.50	33.42	26.64	26.00	26.60	26.60	26.00
16.03	5.10	32.03	32.13	32.07	32.07	32.13	25.84	25.57	25.74	25.73	25.57
14.41	6.43	30.20	30.45	30.27	30.26	30.45	24.83	24.97	24.70	24.70	24.97
13.18	7.45	28.74	29.05	28.82	28.80	29.05	24.03	24.45	23.91	23.90	24.45
12.01	8.43	27.27	27.60	27.34	27.33	27.60	23.22	23.88	23.14	23.13	23.88
10.90	9.39	25.80	26.10	25.85	25.85	26.10	22.42	23.25	22.38	22.38	23.25
9.85	10.30	24.34	24.57	24.34	24.35	24.57	21.61	22.57	21.63	21.63	22.57
8.87	11.19	22.87	23.02	22.83	22.84	23.02	20.81	21.84	20.89	20.89	21.84
7.94	12.04	21.41	21.42	21.30	21.31	21.42	20.00	21.04	20.14	20.14	21.04
4.39	15.63	14.44	13.97	14.15	14.16	13.97	16.18	16.39	16.35	16.37	16.39
3.82	16.29	12.98	12.51	12.74	12.75	12.51	15.37	15.26	15.49	15.50	15.26
3.31	16.91	11.51	11.14	11.40	11.40	11.14	14.57	14.11	14.60	14.61	14.11
2.86	17.50	10.04	9.86	10.14	10.14	9.86	13.76	12.96	13.69	13.69	12.96
2.27	18.37	7.73	8.09	8.38	8.36	8.09	12.49	11.21	12.27	12.25	11.21

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ.4 อัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 5±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ

$\%O_2$	$\%CO_2$	อัตราการใช้ O_2 (ml kg^{-1} hr^{-1})					อัตราการผลิต CO_2 (ml kg^{-1} hr^{-1})				
		การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ	การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
20.86	0.98	10.03	9.43	10.12	10.13	9.43	4.98	4.69	5.00	5.00	4.69
20.07	1.37	9.84	9.33	9.88	9.88	9.33	4.95	4.69	4.96	4.96	4.69
19.28	1.77	9.65	9.23	9.64	9.64	9.23	4.92	4.69	4.93	4.93	4.69
13.42	4.95	8.09	8.25	7.96	7.96	8.25	4.68	4.64	4.66	4.66	4.64
12.77	5.32	7.90	8.11	7.78	7.78	8.11	4.65	4.63	4.63	4.63	4.63
12.15	5.69	7.71	7.96	7.61	7.60	7.96	4.62	4.63	4.60	4.60	4.63
11.54	6.06	7.52	7.81	7.43	7.43	7.81	4.59	4.62	4.57	4.57	4.62
10.65	6.61	7.23	7.57	7.18	7.17	7.56	4.54	4.60	4.53	4.53	4.60
9.80	7.15	6.95	7.31	6.93	6.93	7.31	4.50	4.59	4.49	4.49	4.59
9.11	7.60	6.71	7.08	6.72	6.72	7.08	4.46	4.57	4.45	4.45	4.57
6.84	9.19	5.86	6.18	5.97	5.97	6.18	4.32	4.50	4.33	4.33	4.50
6.38	9.53	5.67	5.96	5.80	5.81	5.96	4.29	4.48	4.30	4.30	4.48
5.93	9.88	5.48	5.73	5.63	5.64	5.73	4.26	4.46	4.28	4.28	4.46
5.50	10.22	5.29	5.49	5.45	5.46	5.49	4.23	4.43	4.25	4.25	4.43
2.30	13.18	3.59	3.07	3.64	3.64	3.07	3.96	4.01	3.98	3.98	4.01
2.02	13.49	3.40	2.78	3.39	3.39	2.78	3.94	3.93	3.95	3.95	3.92
1.75	13.81	3.21	2.48	3.12	3.12	2.48	3.91	3.82	3.90	3.90	3.82
1.50	14.12	3.02	2.19	2.85	2.84	2.19	3.88	3.69	3.86	3.86	3.69

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ.5 อัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 11±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ

$\%O_2$	$\%CO_2$	อัตราการใช้ O_2 (ml kg^{-1} hr^{-1})					อัตราการผลิต CO_2 (ml kg^{-1} hr^{-1})				
		การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ	การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
19.40	1.71	13.17	13.06	13.15	13.16	13.06	7.85	7.71	7.86	7.86	7.71
18.75	2.10	12.93	12.87	12.92	12.92	12.87	7.82	7.70	7.82	7.82	7.70
18.24	2.41	12.74	12.71	12.74	12.74	12.71	7.80	7.69	7.80	7.80	7.69
17.74	2.72	12.55	12.55	12.55	12.55	12.55	7.77	7.69	7.77	7.77	7.69
17.00	3.18	12.26	12.30	12.28	12.27	12.30	7.73	7.68	7.73	7.73	7.68
14.99	4.48	11.45	11.57	11.49	11.47	11.57	7.63	7.64	7.62	7.62	7.64
9.19	8.77	8.68	8.79	8.69	8.69	8.79	7.26	7.46	7.26	7.26	7.46
8.51	9.35	8.30	8.38	8.29	8.29	8.38	7.21	7.43	7.21	7.21	7.43
7.79	9.99	7.87	7.91	7.84	7.85	7.91	7.16	7.38	7.16	7.16	7.38
3.47	14.82	4.52	4.35	4.44	4.45	4.35	6.72	6.78	6.73	6.73	6.78
2.81	15.88	3.76	3.65	3.76	3.76	3.65	6.62	6.56	6.62	6.62	6.56
2.46	16.54	3.28	3.26	3.38	3.37	3.26	6.55	6.40	6.55	6.55	6.40

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ.6 อัตราการหายใจของกล้วยน้ำว้าที่อุณหภูมิ 29±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ

$\%O_2$	$\%CO_2$	อัตราการใช้ O_2 (ml kg^{-1} hr^{-1})					อัตราการผลิต CO_2 (ml kg^{-1} hr^{-1})				
		การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ	การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
18.29	3.13	142.24	139.14	139.14	139.14	139.14	109.75	106.49	109.89	109.89	106.49
13.29	7.20	120.82	122.94	122.94	122.94	122.94	104.02	104.34	103.77	103.77	104.35
9.10	11.05	99.40	102.78	102.78	102.78	102.78	98.28	100.92	98.22	98.22	100.92
5.73	14.68	77.99	78.71	78.71	78.71	78.71	92.55	95.11	92.81	92.81	95.11
3.17	18.09	56.57	52.10	52.10	52.10	52.10	86.81	84.49	86.72	86.72	84.48

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ.7 อัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 5±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ

$\%O_2$	$\%CO_2$	อัตราการใช้ O_2 (ml kg^{-1} hr^{-1})					อัตราการผลิต CO_2 (ml kg^{-1} hr^{-1})				
		การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ	การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
20.04	1.58	2.29	2.18	2.29	2.29	2.18	1.82	1.76	1.82	1.82	1.76
19.90	1.70	2.29	2.18	2.29	2.29	2.18	1.82	1.76	1.82	1.82	1.76
19.75	1.81	2.28	2.18	2.29	2.29	2.18	1.81	1.76	1.82	1.82	1.76
19.60	1.93	2.28	2.18	2.29	2.29	2.18	1.81	1.76	1.81	1.81	1.76
18.30	2.97	2.26	2.18	2.26	2.26	2.18	1.80	1.76	1.80	1.80	1.76
18.08	3.14	2.26	2.18	2.26	2.26	2.18	1.80	1.76	1.80	1.80	1.76
17.93	3.26	2.25	2.18	2.25	2.25	2.18	1.80	1.76	1.80	1.80	1.76
16.57	4.35	2.23	2.18	2.23	2.23	2.18	1.79	1.76	1.79	1.79	1.76
16.36	4.52	2.23	2.18	2.22	2.22	2.18	1.78	1.76	1.78	1.78	1.76
16.14	4.69	2.22	2.18	2.22	2.22	2.18	1.78	1.76	1.78	1.78	1.76
12.36	7.74	2.15	2.17	2.15	2.15	2.17	1.75	1.76	1.75	1.75	1.76
12.16	7.91	2.15	2.17	2.15	2.15	2.17	1.75	1.76	1.75	1.75	1.76
11.95	8.08	2.15	2.17	2.14	2.14	2.17	1.75	1.76	1.74	1.74	1.76
10.72	9.08	2.12	2.17	2.12	2.12	2.17	1.73	1.76	1.73	1.73	1.76
10.31	9.41	2.12	2.17	2.11	2.11	2.17	1.73	1.76	1.73	1.73	1.76
9.43	10.13	2.10	2.17	2.10	2.10	2.17	1.72	1.75	1.72	1.72	1.75
9.23	10.30	2.10	2.16	2.10	2.10	2.16	1.72	1.75	1.72	1.72	1.75
7.47	11.75	2.06	2.16	2.06	2.06	2.16	1.70	1.75	1.70	1.70	1.75
7.10	12.05	2.06	2.15	2.06	2.06	2.15	1.70	1.75	1.70	1.70	1.75
5.88	13.06	2.03	2.15	2.04	2.04	2.15	1.69	1.75	1.69	1.69	1.75
5.70	13.21	2.03	2.14	2.03	2.03	2.14	1.69	1.74	1.69	1.69	1.74
5.54	13.35	2.03	2.14	2.03	2.03	2.14	1.69	1.74	1.69	1.69	1.74
1.40	16.81	1.95	1.99	1.95	1.95	1.99	1.64	1.67	1.65	1.65	1.67
1.15	17.02	1.94	1.95	1.94	1.94	1.95	1.64	1.65	1.64	1.64	1.65
0.97	17.18	1.94	1.91	1.94	1.94	1.91	1.64	1.63	1.64	1.64	1.63
0.75	17.36	1.93	1.84	1.93	1.93	1.84	1.64	1.59	1.64	1.64	1.59

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ.8 อัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 11±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ

$\%O_2$	$\%CO_2$	อัตราการใช้ O_2 (ml kg^{-1} hr^{-1})					อัตราการผลิต CO_2 (ml kg^{-1} hr^{-1})				
		การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ	การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
20.98	1.16	5.28	5.27	5.27	5.27	5.24	3.57	3.46	3.58	3.58	3.46
20.55	1.45	5.22	5.21	5.21	5.22	5.19	3.55	3.46	3.56	3.56	3.46
17.37	3.67	4.75	4.76	4.76	4.76	4.76	3.43	3.41	3.43	3.43	3.41
16.99	3.95	4.68	4.70	4.70	4.70	4.70	3.42	3.40	3.41	3.41	3.40
16.68	4.18	4.64	4.65	4.65	4.65	4.66	3.40	3.39	3.40	3.40	3.39
13.94	6.26	4.17	4.18	4.18	4.18	4.20	3.29	3.33	3.28	3.28	3.33
13.67	6.47	4.12	4.13	4.13	4.13	4.15	3.28	3.32	3.27	3.27	3.32
13.40	6.69	4.07	4.08	4.08	4.08	4.10	3.26	3.31	3.26	3.26	3.31
10.78	8.89	3.56	3.54	3.54	3.54	3.57	3.14	3.22	3.13	3.13	3.22
7.24	12.31	2.72	2.67	2.67	2.67	2.67	2.92	3.00	2.93	2.93	3.00
7.02	12.54	2.66	2.61	2.61	2.61	2.61	2.91	2.98	2.92	2.92	2.98
6.72	12.88	2.57	2.52	2.52	2.52	2.52	2.89	2.95	2.90	2.90	2.95
5.16	14.77	2.07	2.05	2.05	2.05	2.03	2.76	2.77	2.77	2.77	2.77
4.98	15.02	2.00	1.99	1.99	1.99	1.97	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75
3.85	16.73	1.52	1.60	1.60	1.61	1.58	2.63	2.54	2.62	2.62	2.54
3.65	17.10	1.42	1.53	1.53	1.53	1.50	2.60	2.50	2.59	2.59	2.50

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ.9 อัตราการหายใจของส้มเขียวหวานที่อุณหภูมิ 29±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ

$\%O_2$	$\%CO_2$	อัตราการใช้ O_2 (ml kg^{-1} hr^{-1})					อัตราการผลิต CO_2 (ml kg^{-1} hr^{-1})				
		การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ	การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
20.87	1.23	21.46	21.18	21.44	21.45	21.18	20.73	20.15	20.85	20.85	20.14
20.15	1.93	21.06	20.86	21.04	21.04	20.86	20.44	19.99	20.50	20.51	19.98
19.44	2.62	20.65	20.53	20.64	20.64	20.53	20.14	19.82	20.17	20.17	19.81
18.57	3.46	20.14	20.10	20.14	20.14	20.10	19.77	19.59	19.76	19.76	19.58
18.06	3.97	19.84	19.84	19.84	19.84	19.84	19.55	19.45	19.52	19.52	19.44
17.39	4.63	19.43	19.49	19.44	19.43	19.49	19.26	19.26	19.21	19.21	19.25
16.74	5.28	19.03	19.13	19.04	19.04	19.13	18.97	19.06	18.90	18.90	19.06
16.10	5.92	18.62	18.76	18.64	18.64	18.76	18.67	18.86	18.60	18.60	18.85
15.16	6.86	18.01	18.20	18.04	18.03	18.20	18.23	18.54	18.15	18.15	18.53
14.26	7.78	17.40	17.63	17.44	17.43	17.63	17.79	18.20	17.72	17.71	18.19
13.39	8.67	16.80	17.04	16.83	16.83	17.04	17.35	17.84	17.29	17.29	17.84
7.94	14.56	12.33	12.40	12.31	12.32	12.40	14.11	14.63	14.20	14.20	14.63
7.53	15.03	11.93	11.96	11.90	11.90	11.96	13.82	14.29	13.91	13.92	14.29
6.74	15.95	11.11	11.08	11.06	11.07	11.08	13.23	13.57	13.32	13.33	13.57
6.19	16.62	10.51	10.42	10.44	10.45	10.42	12.79	13.01	12.88	12.88	13.01
5.51	17.47	9.69	9.57	9.64	9.64	9.57	12.20	12.25	12.27	12.28	12.25
4.30	19.05	8.07	7.91	8.05	8.05	7.91	11.03	10.65	11.01	11.01	10.65
3.78	19.78	7.26	7.14	7.31	7.30	7.14	10.44	9.84	10.37	10.36	9.85
3.31	20.47	6.45	6.40	6.59	6.58	6.40	9.85	9.04	9.71	9.70	9.04

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ.10 อัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 5±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ

$\%O_2$	$\%CO_2$	อัตราการใช้O_2(ml kg^{-1} hr^{-1})					อัตราการผลิตCO_2(ml kg^{-1} hr^{-1})				
		การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ	การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
17.87	2.72	12.46	12.26	12.48	12.49	12.25	9.32	9.20	9.33	9.33	9.20
17.50	3.00	12.33	12.16	12.34	12.34	12.15	9.31	9.20	9.31	9.31	9.20
17.23	3.21	12.23	12.08	12.23	12.23	12.08	9.30	9.20	9.30	9.30	9.20
16.69	3.62	12.03	11.93	12.02	12.02	11.93	9.28	9.19	9.28	9.28	9.19
13.71	6.02	10.85	10.96	10.83	10.82	10.96	9.16	9.15	9.16	9.16	9.15
13.07	6.57	10.58	10.72	10.56	10.55	10.72	9.13	9.14	9.13	9.13	9.14
12.61	6.97	10.38	10.54	10.36	10.35	10.54	9.11	9.13	9.11	9.11	9.13
10.54	8.86	9.44	9.64	9.43	9.43	9.64	9.02	9.08	9.02	9.02	9.08
10.27	9.13	9.30	9.51	9.30	9.30	9.51	9.01	9.07	9.00	9.00	9.07
9.79	9.60	9.07	9.27	9.07	9.07	9.27	8.98	9.06	8.98	8.98	9.06
7.01	12.58	7.55	7.64	7.58	7.59	7.64	8.83	8.94	8.83	8.83	8.94
6.67	12.97	7.35	7.40	7.37	7.38	7.41	8.81	8.91	8.81	8.81	8.91
6.35	13.36	7.15	7.17	7.17	7.18	7.18	8.79	8.89	8.79	8.79	8.89
4.56	15.76	5.91	5.73	5.91	5.91	5.73	8.67	8.71	8.67	8.67	8.71
4.30	16.15	5.70	5.49	5.70	5.70	5.49	8.65	8.67	8.65	8.65	8.67
2.77	18.76	4.32	3.92	4.28	4.26	3.92	8.51	8.33	8.51	8.51	8.33

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ.11 อัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 11±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ

$\%O_2$	$\%CO_2$	อัตราการใช้ O_2 (ml kg^{-1} hr^{-1})					อัตราการผลิต CO_2 (ml kg^{-1} hr^{-1})				
		การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ	การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
20.70	1.13	16.68	15.25	16.88	16.89	15.26	12.78	12.02	12.84	12.84	12.02
20.10	1.59	16.45	15.17	16.57	16.57	15.18	12.72	12.02	12.76	12.76	12.02
15.55	5.23	14.59	14.40	14.39	14.38	14.40	12.19	11.94	12.15	12.15	11.94
15.02	5.68	14.35	14.28	14.14	14.14	14.29	12.12	11.92	12.08	12.08	11.92
14.59	6.04	14.16	14.19	13.95	13.94	14.19	12.06	11.91	12.03	12.03	11.91
10.85	9.37	12.37	13.12	12.28	12.28	13.12	11.55	11.79	11.52	11.52	11.79
10.49	9.71	12.18	12.99	12.12	12.12	12.99	11.50	11.77	11.47	11.47	11.77
10.04	10.14	11.94	12.81	11.92	11.91	12.81	11.43	11.75	11.40	11.40	11.75
9.17	10.98	11.47	12.45	11.52	11.52	12.44	11.30	11.70	11.28	11.28	11.70
7.62	12.56	10.58	11.66	10.77	10.77	11.66	11.04	11.58	11.05	11.05	11.58
4.26	16.37	8.31	9.01	8.77	8.78	9.01	10.39	11.08	10.48	10.48	11.08
2.27	19.08	6.61	6.21	6.84	6.84	6.20	9.91	10.19	9.98	9.98	10.19
1.84	19.74	6.19	5.37	6.21	6.21	5.37	9.79	9.80	9.82	9.82	9.80
1.61	20.10	5.95	4.88	5.82	5.82	4.87	9.72	9.53	9.71	9.71	9.53
1.33	20.58	5.64	4.22	5.26	5.26	4.22	9.63	9.10	9.55	9.55	9.10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ.12 อัตราการหายใจของพริกชี้ฟ้าที่อุณหภูมิ 29±1 °C ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองไมเคิลลิสเมนเทนแบบต่าง ๆ

$\%O_2$	$\%CO_2$	อัตราการใช้ O_2 (ml kg^{-1} hr^{-1})					อัตราการผลิต CO_2 (ml kg^{-1} hr^{-1})				
		การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ	การทดลอง	ไม่มีการยับยั้ง	อันคอมเพททิทีฟ	นอนคอมเพททิทีฟ	คอมเพททิทีฟ
19.79	2.26	123.04	120.76	123.30	120.76	120.76	100.39	97.31	100.77	97.31	97.31
18.05	3.69	117.23	116.28	117.19	116.28	116.28	97.44	95.74	97.44	95.74	95.74
16.80	4.74	112.87	112.75	112.71	112.75	112.75	95.22	94.45	95.05	94.45	94.45
15.20	6.09	107.06	107.76	106.86	107.76	107.76	92.27	92.56	92.00	92.56	92.56
13.69	7.41	101.25	102.52	101.09	102.52	102.52	89.32	90.46	89.04	90.46	90.46
12.27	8.68	95.44	97.01	95.39	97.01	97.01	86.36	88.13	86.18	88.13	88.13
10.61	10.21	88.18	89.75	88.28	89.75	89.75	82.67	84.84	82.67	84.84	84.84
9.37	11.39	82.37	83.62	82.53	83.62	83.62	79.72	81.85	79.85	81.85	81.85
8.22	12.52	76.55	77.30	76.76	77.30	77.30	76.76	78.54	77.02	78.54	78.54
7.15	13.61	70.74	70.78	70.90	70.78	70.78	73.81	74.84	74.11	74.84	74.84
6.17	14.66	64.93	64.18	65.00	64.18	64.18	70.85	70.78	71.09	70.78	70.78
5.27	15.67	59.12	57.49	59.01	57.49	57.49	67.90	66.29	67.90	66.29	66.29
4.46	16.63	53.31	50.89	53.04	50.89	50.89	64.95	61.45	64.53	61.45	61.45

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ช

ผลการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

ตารางที่ ช.1 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1				ครั้งที่ 2			
เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2	เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2
0	89708	606206	38023	0	95011	653481	40721
1	90055	606172	37846	0.5	94303	647797	40020
2	90756	607738	37536	1.5	92521	633676	37952
3.25	90972	606500	36598	2	92350	630450	37294
4	92583	614949	36515	3.5	93616	634103	36696
5	97415	643631	37441	4	95091	641054	36680

ตารางที่ ช.2 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1				ครั้งที่ 2			
เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2	เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2
0	101246	679404	49017	0	95293	660534	49456
1	99725	663788	47505	1	91341	627274	44444
1.5	100600	668174	47051	3	97640	658889	44971
2	99337	656051	45656	5	95528	634182	40980
2.5	100298	660455	45354	6	96318	636804	40015
4	101020	657493	43189	7	96924	634748	38699

ตารางที่ ช.3 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1				ครั้งที่ 2			
เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2	เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2
0	70889	575487	93693	0	75275	609867	102500
1	80755	605842	83975	1	80317	613068	92527
2	83836	608271	75704	2	83296	612764	80206
3	83785	583780	66533	3	86607	610225	74564
4	91213	615794	63691	4	87007	593205	67500
5	94406	619528	59350	5	93305	619697	63308

ตารางที่ ซ.4 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1				ครั้งที่ 2			
เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2	เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2
0	105281	675497	25936	0	87902	619717	46834
0.5	105057	672714	25640	1	88317	619758	46712
1	104232	665059	25091	2.25	89813	625344	46719
2.5	112616	714612	26590	3	90184	626470	46218
3.5	110730	701129	25586	4	94213	651933	47149
4	111369	703160	25484	5	96478	664380	47400

ตารางที่ ซ.5 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1				ครั้งที่ 2			
เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2	เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2
0	101580	699314	47842	0	97312	667082	54980
2	103712	695047	46699	1	96100	654768	53698
4	106419	701836	44616	1.5	96618	655572	53171
5	105301	691922	42784	2	96355	652398	52451
5.5	105014	686540	42082	2.5	96067	648370	51500
6	105908	688690	41706	3	96403	648109	50711

ตารางที่ ซ.6 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1				ครั้งที่ 2			
เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2	เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2
0	77034	618813	104449	0	74705	588047	78490
0.5	81794	634031	103399	1	75867	585248	67563
1	84687	644678	100306	2	81868	609618	64548
1.5	82273	617448	94537	3	83200	609323	59038
2	82956	614469	91293	4	86469	613437	54269
3	83778	608863	82849	5	87703	612819	50899

ตารางที่ ซ.7 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1				ครั้งที่ 2			
เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2	เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2
0	94636	654047	41922	0	96130	660260	41433
1	96462	662165	41407	1	94557	643386	39972
2	98647	673666	41379	3	96660	651886	39248
3	95046	644495	39189	4	96277	643988	37871
4	95543	644616	38444	5	96981	646330	37328
5	95910	644326	37264	5.5	96829	644353	36596

ตารางที่ ซ.8 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1				ครั้งที่ 2			
เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2	เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2
0	86773	610957	45432	0	88887	624269	45255
2	90523	633066	46251	1	89829	628900	45381
3	90217	624767	44972	2	90221	628833	44773
4	96962	665562	46605	4	94376	645755	44017
6	95857	649225	43246	6	93585	632941	41043
7	96072	646968	42183	7	95638	643036	40539

ตารางที่ ซ.9 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1				ครั้งที่ 2			
เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2	เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2
0	78132	632821	100734	0	74582	605879	99520
0.5	80108	636360	92276	1	80059	609664	90976
1	80794	632946	86382	2	82857	609648	80251
1.5	80600	625170	81838	3	85214	604754	74170
2	85022	646045	80859	4	88225	605712	70428
2.5	86790	645735	77787	5	88932	596372	64056

ตารางที่ ซ.10 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1				ครั้งที่ 2			
เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2	เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2
0	87703	613555	48144	0	90395	647455	59229
1.5	89657	622169	47484	0.5	90461	647056	58758
2.5	92465	639829	48083	1	90349	644831	58019
3	92972	642378	47819	1.5	90251	642747	57541
3.5	92966	640385	47622	2	89434	635876	56703
4	91787	631651	46685	2.5	90424	641762	56920

ตารางที่ ซ.11 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1				ครั้งที่ 2			
เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2	เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2
0	88023	635627	55041	0	87278	628299	55300
1	88563	635864	54787	1	87659	626029	54830
2	88150	630318	53881	2	88082	626667	53692
4	87076	615716	51010	3	88789	628120	53329
5	88817	624646	50848	4	89222	627565	52511
6	89604	627676	50252	5	89587	627005	51456

ตารางที่ ซ.12 พื้นที่พีคจากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1				ครั้งที่ 2			
เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2	เวลา (ชม.)	O_2	N_2	CO_2
0	85596	659311	86559	0	70784	574868	95146
0.5	83439	639899	78867	1	75987	579607	85809
1.5	83983	634495	73530	2	77043	574864	79689
2	84779	636627	71730	3	78922	576837	75020
2.5	85317	634826	70133	4	80299	576473	71760
3	87087	642267	69700	5	81680	577023	69680

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ.13 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.472E-06	9.705E-06	4.759E-07	1.165E-05	12.63	4.08
1	1.477E-06	9.704E-06	4.738E-07	1.166E-05	12.68	4.07
2	1.489E-06	9.729E-06	4.701E-07	1.169E-05	12.74	4.02
3.25	1.493E-06	9.709E-06	4.590E-07	1.166E-05	12.80	3.94
4	1.519E-06	9.846E-06	4.581E-07	1.182E-05	12.85	3.87
5	1.600E-06	1.031E-05	4.690E-07	1.238E-05	12.93	3.79

ครั้งที่ 2

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.560E-06	1.047E-05	5.078E-07	1.254E-05	12.44	4.05
0.5	1.548E-06	1.038E-05	4.995E-07	1.242E-05	12.46	4.02
1.5	1.518E-06	1.015E-05	4.751E-07	1.214E-05	12.51	3.91
2	1.516E-06	1.010E-05	4.673E-07	1.208E-05	12.55	3.87
3.5	1.537E-06	1.016E-05	4.602E-07	1.215E-05	12.65	3.79
4	1.561E-06	1.027E-05	4.600E-07	1.229E-05	12.70	3.74

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ.14 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.664E-06	1.089E-05	6.060E-07	1.316E-05	12.65	4.61
1	1.638E-06	1.063E-05	5.881E-07	1.286E-05	12.74	4.57
1.5	1.653E-06	1.071E-05	5.827E-07	1.294E-05	12.78	4.50
2	1.632E-06	1.051E-05	5.662E-07	1.271E-05	12.84	4.46
2.5	1.648E-06	1.058E-05	5.627E-07	1.279E-05	12.88	4.40
4	1.660E-06	1.053E-05	5.370E-07	1.273E-05	13.04	4.22

ครั้งที่ 2

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.565E-06	1.058E-05	6.112E-07	1.276E-05	12.26	4.79
1	1.499E-06	1.004E-05	5.519E-07	1.210E-05	12.39	4.56
3	1.604E-06	1.056E-05	5.581E-07	1.272E-05	12.61	4.39
5	1.568E-06	1.016E-05	5.109E-07	1.224E-05	12.82	4.18
6	1.582E-06	1.020E-05	4.995E-07	1.228E-05	12.88	4.07
7	1.592E-06	1.017E-05	4.839E-07	1.224E-05	13.00	3.95

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ.15 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.158E-06	9.208E-06	1.135E-06	1.150E-05	10.07	9.87
1	1.322E-06	9.699E-06	1.020E-06	1.204E-05	10.98	8.47
2	1.374E-06	9.738E-06	9.218E-07	1.203E-05	11.42	7.66
3	1.373E-06	9.342E-06	8.133E-07	1.153E-05	11.91	7.05
4	1.497E-06	9.859E-06	7.797E-07	1.214E-05	12.33	6.42
5	1.550E-06	9.920E-06	7.283E-07	1.220E-05	12.71	5.97

ครั้งที่ 2

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.231E-06	9.764E-06	1.239E-06	1.223E-05	10.06	10.13
1	1.315E-06	9.815E-06	1.121E-06	1.225E-05	10.77	9.15
2	1.365E-06	9.810E-06	9.751E-07	1.215E-05	11.23	8.03
3	1.420E-06	9.769E-06	9.083E-07	1.210E-05	11.74	7.51
4	1.427E-06	9.495E-06	8.247E-07	1.175E-05	12.14	7.02
5	1.531E-06	9.922E-06	7.751E-07	1.223E-05	12.52	6.34

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ.16 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.731E-06	1.082E-05	3.329E-07	1.289E-05	13.43	2.58
0.5	1.727E-06	1.078E-05	3.294E-07	1.284E-05	13.46	2.57
1	1.714E-06	1.066E-05	3.229E-07	1.269E-05	13.50	2.54
2.5	1.853E-06	1.146E-05	3.406E-07	1.365E-05	13.58	2.50
3.5	1.822E-06	1.124E-05	3.287E-07	1.339E-05	13.61	2.46
4	1.832E-06	1.127E-05	3.275E-07	1.343E-05	13.64	2.44

ครั้งที่ 2

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.441E-06	9.923E-06	5.802E-07	1.194E-05	12.07	4.86
1	1.448E-06	9.923E-06	5.787E-07	1.195E-05	12.12	4.84
2.25	1.473E-06	1.001E-05	5.788E-07	1.207E-05	12.21	4.80
3	1.479E-06	1.003E-05	5.729E-07	1.208E-05	12.24	4.74
4	1.547E-06	1.044E-05	5.839E-07	1.257E-05	12.30	4.64
5	1.584E-06	1.064E-05	5.869E-07	1.282E-05	12.36	4.58

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ.17 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.669E-06	1.121E-05	5.921E-07	1.347E-05	12.39	4.40
2	1.705E-06	1.114E-05	5.786E-07	1.342E-05	12.70	4.31
4	1.750E-06	1.125E-05	5.539E-07	1.355E-05	12.91	4.09
5	1.731E-06	1.109E-05	5.322E-07	1.335E-05	12.97	3.99
5.5	1.727E-06	1.100E-05	5.239E-07	1.325E-05	13.03	3.95
6	1.741E-06	1.104E-05	5.195E-07	1.330E-05	13.10	3.91

ครั้งที่ 2

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.598E-06	1.069E-05	6.766E-07	1.296E-05	12.33	5.22
1	1.578E-06	1.049E-05	6.614E-07	1.273E-05	12.40	5.20
1.5	1.587E-06	1.050E-05	6.552E-07	1.274E-05	12.45	5.14
2	1.582E-06	1.045E-05	6.466E-07	1.268E-05	12.48	5.10
2.5	1.577E-06	1.039E-05	6.354E-07	1.260E-05	12.52	5.04
3	1.583E-06	1.038E-05	6.260E-07	1.259E-05	12.57	4.97

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ.18 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.260E-06	9.908E-06	1.262E-06	1.243E-05	10.14	10.15
0.5	1.340E-06	1.015E-05	1.250E-06	1.274E-05	10.51	9.81
1	1.388E-06	1.033E-05	1.213E-06	1.293E-05	10.74	9.38
1.5	1.348E-06	9.886E-06	1.145E-06	1.238E-05	10.89	9.25
2	1.359E-06	9.838E-06	1.106E-06	1.230E-05	11.05	8.99
3	1.373E-06	9.747E-06	1.006E-06	1.213E-05	11.32	8.30

ครั้งที่ 2

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.222E-06	9.411E-06	9.548E-07	1.159E-05	10.54	8.24
1	1.241E-06	9.366E-06	8.255E-07	1.143E-05	10.85	7.22
2	1.341E-06	9.760E-06	7.898E-07	1.189E-05	11.28	6.64
3	1.363E-06	9.755E-06	7.246E-07	1.184E-05	11.51	6.12
4	1.418E-06	9.821E-06	6.682E-07	1.191E-05	11.91	5.61
5	1.438E-06	9.811E-06	6.283E-07	1.188E-05	12.11	5.29

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ.19 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.554E-06	1.048E-05	5.220E-07	1.255E-05	12.38	4.16
1	1.584E-06	1.061E-05	5.159E-07	1.271E-05	12.46	4.06
2	1.620E-06	1.079E-05	5.156E-07	1.293E-05	12.53	3.99
3	1.560E-06	1.032E-05	4.897E-07	1.237E-05	12.61	3.96
4	1.569E-06	1.033E-05	4.809E-07	1.237E-05	12.68	3.89
5	1.575E-06	1.032E-05	4.669E-07	1.236E-05	12.74	3.78

ครั้งที่ 2

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.579E-06	1.058E-05	5.163E-07	1.267E-05	12.46	4.07
1	1.552E-06	1.031E-05	4.990E-07	1.236E-05	12.56	4.04
3	1.587E-06	1.044E-05	4.904E-07	1.252E-05	12.68	3.92
4	1.581E-06	1.031E-05	4.741E-07	1.237E-05	12.78	3.83
5	1.593E-06	1.035E-05	4.677E-07	1.241E-05	12.83	3.77
5.5	1.590E-06	1.032E-05	4.590E-07	1.237E-05	12.86	3.71

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ช.20 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.423E-06	9.781E-06	5.636E-07	1.177E-05	12.09	4.79
2	1.485E-06	1.014E-05	5.733E-07	1.220E-05	12.18	4.70
3	1.480E-06	1.000E-05	5.581E-07	1.204E-05	12.29	4.63
4	1.592E-06	1.066E-05	5.775E-07	1.283E-05	12.41	4.50
6	1.574E-06	1.040E-05	5.377E-07	1.251E-05	12.58	4.30
7	1.578E-06	1.036E-05	5.251E-07	1.247E-05	12.66	4.21

ครั้งที่ 2

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.458E-06	9.996E-06	5.615E-07	1.202E-05	12.13	4.67
1	1.474E-06	1.007E-05	5.630E-07	1.211E-05	12.17	4.65
2	1.480E-06	1.007E-05	5.558E-07	1.211E-05	12.23	4.59
4	1.549E-06	1.034E-05	5.468E-07	1.244E-05	12.45	4.40
6	1.536E-06	1.014E-05	5.116E-07	1.218E-05	12.61	4.20
7	1.570E-06	1.030E-05	5.057E-07	1.238E-05	12.69	4.09

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ.21 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.279E-06	1.013E-05	1.218E-06	1.263E-05	10.12	9.64
0.5	1.312E-06	1.019E-05	1.118E-06	1.262E-05	10.39	8.86
1	1.323E-06	1.014E-05	1.048E-06	1.251E-05	10.58	8.38
1.5	1.320E-06	1.001E-05	9.944E-07	1.233E-05	10.71	8.07
2	1.393E-06	1.035E-05	9.828E-07	1.272E-05	10.95	7.72
2.5	1.423E-06	1.034E-05	9.465E-07	1.271E-05	11.19	7.45

ครั้งที่ 2

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.219E-06	9.699E-06	1.204E-06	1.212E-05	10.06	9.93
1	1.311E-06	9.760E-06	1.103E-06	1.217E-05	10.77	9.06
2	1.357E-06	9.760E-06	9.756E-07	1.209E-05	11.22	8.07
3	1.397E-06	9.681E-06	9.037E-07	1.198E-05	11.66	7.54
4	1.447E-06	9.697E-06	8.594E-07	1.200E-05	12.05	7.16
5	1.459E-06	9.546E-06	7.840E-07	1.179E-05	12.37	6.65

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ.22 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.438E-06	9.823E-06	5.957E-07	1.186E-05	12.13	5.02
1.5	1.471E-06	9.962E-06	5.879E-07	1.202E-05	12.23	4.89
2.5	1.517E-06	1.025E-05	5.949E-07	1.236E-05	12.28	4.81
3	1.526E-06	1.029E-05	5.918E-07	1.241E-05	12.30	4.77
3.5	1.526E-06	1.026E-05	5.895E-07	1.237E-05	12.33	4.76
4	1.506E-06	1.012E-05	5.784E-07	1.220E-05	12.35	4.74

ครั้งที่ 2

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.483E-06	1.037E-05	7.269E-07	1.258E-05	11.79	5.78
0.5	1.484E-06	1.036E-05	7.213E-07	1.257E-05	11.81	5.74
1	1.482E-06	1.033E-05	7.125E-07	1.252E-05	11.84	5.69
1.5	1.481E-06	1.029E-05	7.069E-07	1.248E-05	11.86	5.66
2	1.467E-06	1.018E-05	6.970E-07	1.235E-05	11.88	5.64
2.5	1.483E-06	1.028E-05	6.995E-07	1.246E-05	11.90	5.61

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ.23 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.443E-06	1.018E-05	6.773E-07	1.230E-05	11.73	5.51
1	1.452E-06	1.018E-05	6.743E-07	1.231E-05	11.80	5.48
2	1.446E-06	1.009E-05	6.636E-07	1.220E-05	11.85	5.44
4	1.428E-06	9.858E-06	6.296E-07	1.192E-05	11.98	5.28
5	1.457E-06	1.000E-05	6.277E-07	1.209E-05	12.05	5.19
6	1.470E-06	1.005E-05	6.206E-07	1.214E-05	12.11	5.11

ครั้งที่ 2

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.431E-06	1.006E-05	6.804E-07	1.217E-05	11.76	5.59
1	1.437E-06	1.002E-05	6.748E-07	1.214E-05	11.84	5.56
2	1.444E-06	1.004E-05	6.613E-07	1.214E-05	11.90	5.45
3	1.456E-06	1.006E-05	6.570E-07	1.217E-05	11.96	5.40
4	1.463E-06	1.005E-05	6.474E-07	1.216E-05	12.03	5.32
5	1.469E-06	1.004E-05	6.349E-07	1.214E-05	12.10	5.23

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ.24 ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.403E-06	1.056E-05	1.050E-06	1.302E-05	10.78	8.07
0.5	1.367E-06	1.025E-05	9.592E-07	1.258E-05	10.87	7.63
1.5	1.376E-06	1.016E-05	8.961E-07	1.243E-05	11.07	7.21
2	1.389E-06	1.020E-05	8.748E-07	1.246E-05	11.15	7.02
2.5	1.398E-06	1.017E-05	8.559E-07	1.242E-05	11.26	6.89
3	1.428E-06	1.029E-05	8.508E-07	1.257E-05	11.36	6.77

ครั้งที่ 2

เวลา	จำนวนโมล (gmol)				ความเข้มข้น (%)	
(ชม.)	O_2	N_2	CO_2	รวม	O_2	CO_2
0	1.156E-06	9.198E-06	1.152E-06	1.151E-05	10.05	10.01
1	1.243E-06	9.275E-06	1.041E-06	1.156E-05	10.75	9.01
2	1.260E-06	9.198E-06	9.690E-07	1.143E-05	11.03	8.48
3	1.292E-06	9.230E-06	9.137E-07	1.144E-05	11.30	7.99
4	1.315E-06	9.224E-06	8.751E-07	1.141E-05	11.52	7.67
5	1.338E-06	9.233E-06	8.505E-07	1.142E-05	11.71	7.45

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ.25 การคำนวณหาค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	p(O_2) (atm)	p_A(O_2) (atm)	p- p_A(O_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (O_2)	p(CO_2) (atm)	p_A(CO_2) (atm)	p- p_A(CO_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (CO_2)
0	12.63	4.08	0.1263	0.21	-0.0837	-	0.0408	0.0003	0.0405	-
1	12.68	4.07	0.1268	0.21	-0.0832	-0.0060	0.0407	0.0003	0.0404	-0.0025
2	12.74	4.02	0.1274	0.21	-0.0826	-0.0132	0.0402	0.0003	0.0399	-0.0149
3.25	12.80	3.94	0.1280	0.21	-0.0820	-0.0205	0.0394	0.0003	0.0391	-0.0352
4	12.85	3.87	0.1285	0.21	-0.0815	-0.0266	0.0387	0.0003	0.0384	-0.0532
5	12.93	3.79	0.1293	0.21	-0.0807	-0.0365	0.0379	0.0003	0.0376	-0.0743

ครั้งที่ 2

เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	p(O_2) (atm)	p_A(O_2) (atm)	p- p_A(O_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (O_2)	p(CO_2) (atm)	p_A(CO_2) (atm)	p- p_A(CO_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (CO_2)
0	12.44	4.05	0.1244	0.21	-0.0856	-	0.0405	0.0003	0.0402	-
0.5	12.46	4.02	0.1246	0.21	-0.0854	-0.0023	0.0402	0.0003	0.0399	-0.0075
1.5	12.51	3.91	0.1251	0.21	-0.0849	-0.0082	0.0391	0.0003	0.0388	-0.0354
2	12.55	3.87	0.1255	0.21	-0.0845	-0.0129	0.0387	0.0003	0.0384	-0.0458
3.5	12.65	3.79	0.1265	0.21	-0.0835	-0.0248	0.0379	0.0003	0.0376	-0.0669
4	12.70	3.74	0.1270	0.21	-0.0830	-0.0308	0.0374	0.0003	0.0371	-0.0803

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ.26 การคำนวณหาค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	$p(O_2)$ (atm)	$p_A(O_2)$ (atm)	$p-p_A(O_2)$ (atm)	$\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (O_2)	$p(CO_2)$ (atm)	$p_A(CO_2)$ (atm)	$p-p_A(CO_2)$ (atm)	$\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (CO_2)
0	12.65	4.61	0.1265	0.21	-0.0835	-	0.0461	0.0003	0.0458	-
1	12.74	4.57	0.1274	0.21	-0.0826	-0.0108	0.0457	0.0003	0.0454	-0.0088
1.5	12.78	4.50	0.1278	0.21	-0.0822	-0.0157	0.0450	0.0003	0.0447	-0.0243
2	12.84	4.46	0.1284	0.21	-0.0816	-0.023	0.0446	0.0003	0.0443	-0.0333
2.5	12.88	4.40	0.1288	0.21	-0.0812	-0.0279	0.0440	0.0003	0.0437	-0.0469
4	13.04	4.22	0.1304	0.21	-0.0796	-0.0478	0.0422	0.0003	0.0419	-0.0890

ครั้งที่ 2

เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	$p(O_2)$ (atm)	$p_A(O_2)$ (atm)	$p-p_A(O_2)$ (atm)	$\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (O_2)	$p(CO_2)$ (atm)	$p_A(CO_2)$ (atm)	$p-p_A(CO_2)$ (atm)	$\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (CO_2)
0	12.26	4.79	0.1226	0.21	-0.0874	-	0.0479	0.0003	0.0476	-
1	12.39	4.56	0.1239	0.21	-0.0861	-0.0150	0.0456	0.0003	0.0453	-0.0495
3	12.61	4.39	0.1261	0.21	-0.0839	-0.0409	0.0439	0.0003	0.0436	-0.0878
5	12.82	4.18	0.1282	0.21	-0.0818	-0.0662	0.0418	0.0003	0.0415	-0.1371
6	12.88	4.07	0.1288	0.21	-0.0812	-0.0736	0.0407	0.0003	0.0404	-0.1640
7	13.00	3.95	0.1300	0.21	-0.0800	-0.0885	0.0395	0.0003	0.0392	-0.1942

ตารางที่ ซ.27 การคำนวณหาค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	$p(O_2)$ (atm)	$p_A(O_2)$ (atm)	$p-p_A(O_2)$ (atm)	$\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (O_2)	$p(CO_2)$ (atm)	$p_A(CO_2)$ (atm)	$p-p_A(CO_2)$ (atm)	$\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (CO_2)
0	10.07	9.87	0.1007	0.21	-0.1093	-	0.0987	0.0003	0.0984	-
1	10.98	8.47	0.1098	0.21	-0.1002	-0.0869	0.0847	0.0003	0.0844	-0.1535
2	11.42	7.66	0.1142	0.21	-0.0958	-0.1318	0.0766	0.0003	0.0763	-0.2544
3	11.91	7.05	0.1191	0.21	-0.0909	-0.1843	0.0705	0.0003	0.0702	-0.3377
4	12.33	6.42	0.1233	0.21	-0.0867	-0.2316	0.0642	0.0003	0.0639	-0.4317
5	12.71	5.97	0.1271	0.21	-0.0829	-0.2765	0.0597	0.0003	0.0594	-0.5047

ครั้งที่ 2

เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	$p(O_2)$ (atm)	$p_A(O_2)$ (atm)	$p-p_A(O_2)$ (atm)	$\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (O_2)	$p(CO_2)$ (atm)	$p_A(CO_2)$ (atm)	$p-p_A(CO_2)$ (atm)	$\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (CO_2)
0	10.06	10.13	0.1006	0.21	-0.1094	-	0.1013	0.0003	0.1010	-
1	10.77	9.15	0.1077	0.21	-0.1023	-0.0671	0.0915	0.0003	0.0912	-0.1021
2	11.23	8.03	0.1123	0.21	-0.0977	-0.1131	0.0803	0.0003	0.0800	-0.2331
3	11.74	7.51	0.1174	0.21	-0.0926	-0.1667	0.0751	0.0003	0.0748	-0.3003
4	12.14	7.02	0.1214	0.21	-0.0886	-0.2109	0.0702	0.0003	0.0699	-0.3681
5	12.52	6.34	0.1252	0.21	-0.0848	-0.2547	0.0634	0.0003	0.0631	-0.4704

ตารางที่ ซ.28 การคำนวณหาค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	p(O_2) (atm)	p_A(O_2) (atm)	p- p_A(O_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (O_2)	p(CO_2) (atm)	p_A(CO_2) (atm)	p- p_A(CO_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (CO_2)
0	13.43	2.58	0.1343	0.21	-0.0757	-	0.0258	0.0003	0.0255	-
0.5	13.46	2.57	0.1346	0.21	-0.0754	-0.0040	0.0257	0.0003	0.0254	-0.0039
1	13.50	2.54	0.1350	0.21	-0.0750	-0.0093	0.0254	0.0003	0.0251	-0.0158
2.5	13.58	2.50	0.1358	0.21	-0.0742	-0.0200	0.0250	0.0003	0.0247	-0.0319
3.5	13.61	2.46	0.1361	0.21	-0.0739	-0.0241	0.0246	0.0003	0.0243	-0.0482
4	13.64	2.44	0.1364	0.21	-0.0736	-0.0281	0.0244	0.0003	0.0241	-0.0565

ครั้งที่ 2

เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	p(O_2) (atm)	p_A(O_2) (atm)	p- p_A(O_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (O_2)	p(CO_2) (atm)	p_A(CO_2) (atm)	p- p_A(CO_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (CO_2)
0	12.07	4.86	0.1207	0.21	-0.0893	-	0.0486	0.0003	0.0483	-
1	12.12	4.84	0.1212	0.21	-0.0888	-0.0056	0.0484	0.0003	0.0481	-0.0041
2.25	12.21	4.80	0.1221	0.21	-0.0879	-0.0158	0.0480	0.0003	0.0477	-0.0125
3	12.24	4.74	0.1224	0.21	-0.0876	-0.0192	0.0474	0.0003	0.0471	-0.0252
4	12.30	4.64	0.1230	0.21	-0.0870	-0.0261	0.0464	0.0003	0.0461	-0.0466
5	12.36	4.58	0.1236	0.21	-0.0864	-0.0330	0.0458	0.0003	0.0455	-0.0597

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ.29 การคำนวณหาค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	p(O_2) (atm)	p_A(O_2) (atm)	p- p_A(O_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (O_2)	p(CO_2) (atm)	p_A(CO_2) (atm)	p- p_A(CO_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (CO_2)
0	12.39	4.40	0.1239	0.21	-0.0861	-	0.0440	0.0003	0.0437	-
2	12.70	4.31	0.1270	0.21	-0.0830	-0.0367	0.0431	0.0003	0.0428	-0.0208
4	12.91	4.09	0.1291	0.21	-0.0809	-0.0623	0.0409	0.0003	0.0406	-0.0736
5	12.97	3.99	0.1297	0.21	-0.0803	-0.0697	0.0399	0.0003	0.0396	-0.0985
5.5	13.03	3.95	0.1303	0.21	-0.0797	-0.0772	0.0395	0.0003	0.0392	-0.1087
6	13.10	3.91	0.1310	0.21	-0.0790	-0.0861	0.0391	0.0003	0.0388	-0.1189

ครั้งที่ 2

เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	p(O_2) (atm)	p_A(O_2) (atm)	p- p_A(O_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (O_2)	p(CO_2) (atm)	p_A(CO_2) (atm)	p- p_A(CO_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (CO_2)
0	12.33	5.22	0.1233	0.21	-0.0867	-	0.0522	0.0003	0.0519	-
1	12.40	5.20	0.1240	0.21	-0.0860	-0.0081	0.0520	0.0003	0.0517	-0.0039
1.5	12.45	5.14	0.1245	0.21	-0.0855	-0.0139	0.0514	0.0003	0.0511	-0.0155
2	12.48	5.10	0.1248	0.21	-0.0852	-0.0174	0.0510	0.0003	0.0507	-0.0234
2.5	12.52	5.04	0.1252	0.21	-0.0848	-0.0222	0.0504	0.0003	0.0501	-0.0353
3	12.57	4.97	0.1257	0.21	-0.0843	-0.0281	0.0497	0.0003	0.0494	-0.0494

ตารางที่ ซ.30 การคำนวณหาค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	p(O_2) (atm)	p_A(O_2) (atm)	p- p_A(O_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (O_2)	p(CO_2) (atm)	p_A(CO_2) (atm)	p- p_A(CO_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (CO_2)
0	10.14	10.15	0.1014	0.21	-0.1086	-	0.1015	0.0003	0.1012	-
0.5	10.51	9.81	0.1051	0.21	-0.1049	-0.0347	0.0981	0.0003	0.0978	-0.0342
1	10.74	9.38	0.1074	0.21	-0.1026	-0.0568	0.0938	0.0003	0.0935	-0.0791
1.5	10.89	9.25	0.1089	0.21	-0.1011	-0.0716	0.0925	0.0003	0.0922	-0.0931
2	11.05	8.99	0.1105	0.21	-0.0995	-0.0875	0.0899	0.0003	0.0896	-0.1217
3	11.32	8.30	0.1132	0.21	-0.0968	-0.1150	0.0830	0.0003	0.0827	-0.2019

ครั้งที่ 2

เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	p(O_2) (atm)	p_A(O_2) (atm)	p- p_A(O_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (O_2)	p(CO_2) (atm)	p_A(CO_2) (atm)	p- p_A(CO_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (CO_2)
0	10.54	8.24	0.1054	0.21	-0.1046	-	0.0824	0.0003	0.0821	-
1	10.85	7.22	0.1085	0.21	-0.1015	-0.0301	0.0722	0.0003	0.0719	-0.1327
2	11.28	6.64	0.1128	0.21	-0.0972	-0.0734	0.0664	0.0003	0.0661	-0.2168
3	11.51	6.12	0.1151	0.21	-0.0949	-0.0973	0.0612	0.0003	0.0609	-0.2987
4	11.91	5.61	0.1191	0.21	-0.0909	-0.1404	0.0561	0.0003	0.0558	-0.3862
5	12.11	5.29	0.1211	0.21	-0.0889	-0.1626	0.0529	0.0003	0.0526	-0.4452

ตารางที่ ซ.31 การคำนวณหาค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	p(O_2) (atm)	p_A(O_2) (atm)	p- p_A(O_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (O_2)	p(CO_2) (atm)	p_A(CO_2) (atm)	p- p_A(CO_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (CO_2)
0	12.38	4.16	0.1238	0.21	-0.0862	-	0.0416	0.0003	0.0413	-
1	12.46	4.06	0.1246	0.21	-0.0854	-0.0093	0.0406	0.0003	0.0403	-0.0245
2	12.53	3.99	0.1253	0.21	-0.0847	-0.0176	0.0399	0.0003	0.0396	-0.0420
3	12.61	3.96	0.1261	0.21	-0.0839	-0.0270	0.0396	0.0003	0.0393	-0.0496
4	12.68	3.89	0.1268	0.21	-0.0832	-0.0354	0.0389	0.0003	0.0386	-0.0676
5	12.74	3.78	0.1274	0.21	-0.0826	-0.0426	0.0378	0.0003	0.0375	-0.0965

ครั้งที่ 2

เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	p(O_2) (atm)	p_A(O_2) (atm)	p- p_A(O_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (O_2)	p(CO_2) (atm)	p_A(CO_2) (atm)	p- p_A(CO_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (CO_2)
0	12.46	4.07	0.1246	0.21	-0.0854	-	0.0407	0.0003	0.0404	-
1	12.56	4.04	0.1256	0.21	-0.0844	-0.0118	0.0404	0.0003	0.0401	-0.0075
3	12.68	3.92	0.1268	0.21	-0.0832	-0.0261	0.0392	0.0003	0.0389	-0.0378
4	12.78	3.83	0.1278	0.21	-0.0822	-0.0382	0.0383	0.0003	0.0380	-0.0612
5	12.83	3.77	0.1283	0.21	-0.0817	-0.0443	0.0377	0.0003	0.0374	-0.0772
5.5	12.86	3.71	0.1286	0.21	-0.0814	-0.0480	0.0371	0.0003	0.0368	-0.0933

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ.32 การคำนวณหาค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	p(O_2) (atm)	p_A(O_2) (atm)	p- p_A(O_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (O_2)	p(CO_2) (atm)	p_A(CO_2) (atm)	p- p_A(CO_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (CO_2)
0	12.09	4.79	0.1209	0.21	-0.0891	-	0.0479	0.0003	0.0476	-
2	12.18	4.70	0.1218	0.21	-0.0882	-0.0102	0.0470	0.0003	0.0467	-0.0191
3	12.29	4.63	0.1229	0.21	-0.0871	-0.0227	0.0463	0.0003	0.0460	-0.0342
4	12.41	4.50	0.1241	0.21	-0.0859	-0.0366	0.0450	0.0003	0.0447	-0.0629
6	12.58	4.30	0.1258	0.21	-0.0842	-0.0566	0.0430	0.0003	0.0427	-0.1086
7	12.66	4.21	0.1266	0.21	-0.0834	-0.0661	0.0421	0.0003	0.0418	-0.1299

ครั้งที่ 2

เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	p(O_2) (atm)	p_A(O_2) (atm)	p- p_A(O_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (O_2)	p(CO_2) (atm)	p_A(CO_2) (atm)	p- p_A(CO_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (CO_2)
0	12.13	4.67	0.1213	0.21	-0.0887	-	0.0467	0.0003	0.0464	-
1	12.17	4.65	0.1217	0.21	-0.0883	-0.0045	0.0465	0.0003	0.0462	-0.0043
2	12.23	4.59	0.1223	0.21	-0.0877	-0.0113	0.0459	0.0003	0.0456	-0.0174
4	12.45	4.40	0.1245	0.21	-0.0855	-0.0367	0.0440	0.0003	0.0437	-0.0600
6	12.61	4.20	0.1261	0.21	-0.0839	-0.0556	0.0420	0.0003	0.0417	-0.1068
7	12.69	4.09	0.1269	0.21	-0.0831	-0.0652	0.0409	0.0003	0.0406	-0.1335

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ.33 การคำนวณหาค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	$p(O_2)$ (atm)	$p_A(O_2)$ (atm)	$p-p_A(O_2)$ (atm)	$\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (O_2)	$p(CO_2)$ (atm)	$p_A(CO_2)$ (atm)	$p-p_A(CO_2)$ (atm)	$\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (CO_2)
0	10.12	9.64	0.1012	0.21	-0.1088	-	0.0964	0.0003	0.0961	-
0.5	10.39	8.86	0.1039	0.21	-0.1061	-0.0251	0.0886	0.0003	0.0883	-0.0846
1	10.58	8.38	0.1058	0.21	-0.1042	-0.0432	0.0838	0.0003	0.0835	-0.1405
1.5	10.71	8.07	0.1071	0.21	-0.1029	-0.0558	0.0807	0.0003	0.0804	-0.1784
2	10.95	7.72	0.1095	0.21	-0.1005	-0.0794	0.0772	0.0003	0.0769	-0.2229
2.5	11.19	7.45	0.1119	0.21	-0.0981	-0.1035	0.0745	0.0003	0.0742	-0.2586

ครั้งที่ 2

เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	$p(O_2)$ (atm)	$p_A(O_2)$ (atm)	$p-p_A(O_2)$ (atm)	$\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (O_2)	$p(CO_2)$ (atm)	$p_A(CO_2)$ (atm)	$p-p_A(CO_2)$ (atm)	$\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (CO_2)
0	10.06	9.93	0.1006	0.21	-0.1094	-	0.0993	0.0003	0.0990	-
1	10.77	9.06	0.1077	0.21	-0.1023	-0.0671	0.0906	0.0003	0.0903	-0.0920
2	11.22	8.07	0.1122	0.21	-0.0978	-0.1121	0.0807	0.0003	0.0804	-0.2081
3	11.66	7.54	0.1166	0.21	-0.0934	-0.1581	0.0754	0.0003	0.0751	-0.2763
4	12.05	7.16	0.1205	0.21	-0.0895	-0.2008	0.0716	0.0003	0.0713	-0.3282
5	12.37	6.65	0.1237	0.21	-0.0863	-0.2372	0.0665	0.0003	0.0662	-0.4024

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ.34 การคำนวณหาค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	p(O_2) (atm)	p_A(O_2) (atm)	p- p_A(O_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (O_2)	p(CO_2) (atm)	p_A(CO_2) (atm)	p- p_A(CO_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (CO_2)
0	12.13	5.02	0.1213	0.21	-0.0887	-	0.0502	0.0003	0.0499	-
1.5	12.23	4.89	0.1223	0.21	-0.0877	-0.0113	0.0489	0.0003	0.0486	-0.0264
2.5	12.28	4.81	0.1228	0.21	-0.0872	-0.0171	0.0481	0.0003	0.0478	-0.0430
3	12.30	4.77	0.1230	0.21	-0.0870	-0.0194	0.0477	0.0003	0.0474	-0.0514
3.5	12.33	4.76	0.1233	0.21	-0.0867	-0.0228	0.0476	0.0003	0.0473	-0.0535
4	12.35	4.74	0.1235	0.21	-0.0865	-0.0251	0.0474	0.0003	0.0471	-0.0577

ครั้งที่ 2

เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	p(O_2) (atm)	p_A(O_2) (atm)	p- p_A(O_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (O_2)	p(CO_2) (atm)	p_A(CO_2) (atm)	p- p_A(CO_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (CO_2)
0	11.79	5.78	0.1179	0.21	-0.0921	-	0.0578	0.0003	0.0575	-
0.5	11.81	5.74	0.1181	0.21	-0.0919	-0.0022	0.0574	0.0003	0.0571	-0.0070
1	11.84	5.69	0.1184	0.21	-0.0916	-0.0054	0.0569	0.0003	0.0566	-0.0158
1.5	11.86	5.66	0.1186	0.21	-0.0914	-0.0076	0.0566	0.0003	0.0563	-0.0211
2	11.88	5.64	0.1188	0.21	-0.0912	-0.0098	0.0564	0.0003	0.0561	-0.0246
2.5	11.90	5.61	0.1190	0.21	-0.0910	-0.0120	0.0561	0.0003	0.0558	-0.0300

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ช.35 การคำนวณหาค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	$p(O_2)$ (atm)	$p_A(O_2)$ (atm)	$p-p_A(O_2)$ (atm)	$\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (O_2)	$p(CO_2)$ (atm)	$p_A(CO_2)$ (atm)	$p-p_A(CO_2)$ (atm)	$\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (CO_2)
0	11.73	5.51	0.1173	0.21	-0.0927	-	0.0551	0.0003	0.0548	-
1	11.80	5.48	0.1180	0.21	-0.0920	-0.0076	0.0548	0.0003	0.0545	-0.0055
2	11.85	5.44	0.1185	0.21	-0.0915	-0.0130	0.0544	0.0003	0.0541	-0.0129
4	11.98	5.28	0.1198	0.21	-0.0902	-0.0273	0.0528	0.0003	0.0525	-0.0429
5	12.05	5.19	0.1205	0.21	-0.0895	-0.0351	0.0519	0.0003	0.0516	-0.0602
6	12.11	5.11	0.1211	0.21	-0.0889	-0.0418	0.0511	0.0003	0.0508	-0.0758

ครั้งที่ 2

เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	$p(O_2)$ (atm)	$p_A(O_2)$ (atm)	$p-p_A(O_2)$ (atm)	$\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (O_2)	$p(CO_2)$ (atm)	$p_A(CO_2)$ (atm)	$p-p_A(CO_2)$ (atm)	$\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ (CO_2)
0	11.76	5.59	0.1176	0.21	-0.0924	-	0.0559	0.0003	0.0556	-
1	11.84	5.56	0.1184	0.21	-0.0916	-0.0087	0.0556	0.0003	0.0553	-0.0054
2	11.90	5.45	0.1190	0.21	-0.0910	-0.0153	0.0545	0.0003	0.0542	-0.0255
3	11.96	5.40	0.1196	0.21	-0.0904	-0.0219	0.0540	0.0003	0.0537	-0.0348
4	12.03	5.32	0.1203	0.21	-0.0897	-0.0297	0.0532	0.0003	0.0529	-0.0498
5	12.10	5.23	0.1210	0.21	-0.0890	-0.0375	0.0523	0.0003	0.0520	-0.0670

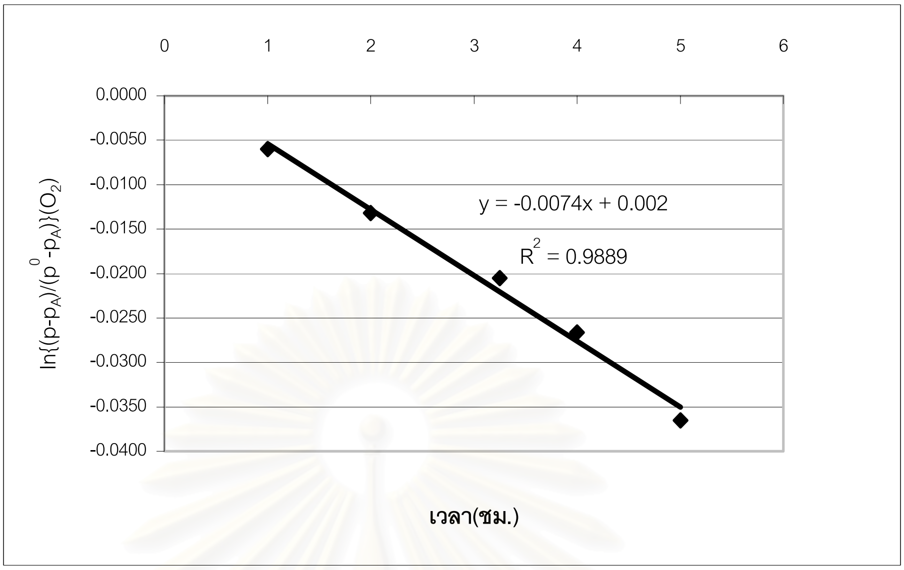
ตารางที่ ซ.36 การคำนวณหาค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} จากการทดลองวัดค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1

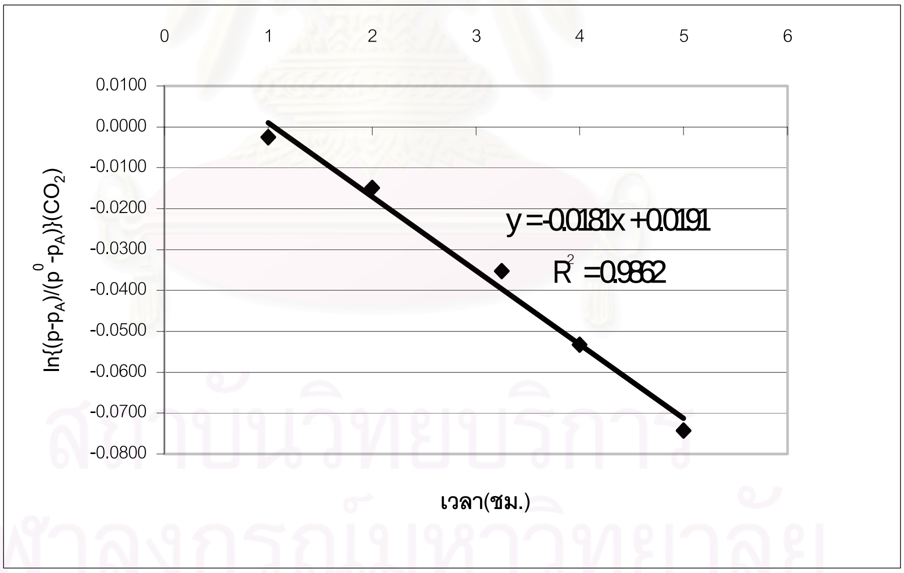
เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	p(O_2) (atm)	p_A(O_2) (atm)	p- p_A(O_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (O_2)	p(CO_2) (atm)	p_A(CO_2) (atm)	p- p_A(CO_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (CO_2)
0	10.78	8.07	0.1078	0.21	-0.1022	-	0.0807	0.0003	0.0804	-
0.5	10.87	7.63	0.1087	0.21	-0.1013	-0.0088	0.0763	0.0003	0.0760	-0.0563
1.5	11.07	7.21	0.1107	0.21	-0.0993	-0.0288	0.0721	0.0003	0.0718	-0.1131
2	11.15	7.02	0.1115	0.21	-0.0985	-0.0369	0.0702	0.0003	0.0699	-0.1399
2.5	11.26	6.89	0.1126	0.21	-0.0974	-0.0481	0.0689	0.0003	0.0686	-0.1587
3	11.36	6.77	0.1136	0.21	-0.0964	-0.0584	0.0677	0.0003	0.0674	-0.1764

ครั้งที่ 2

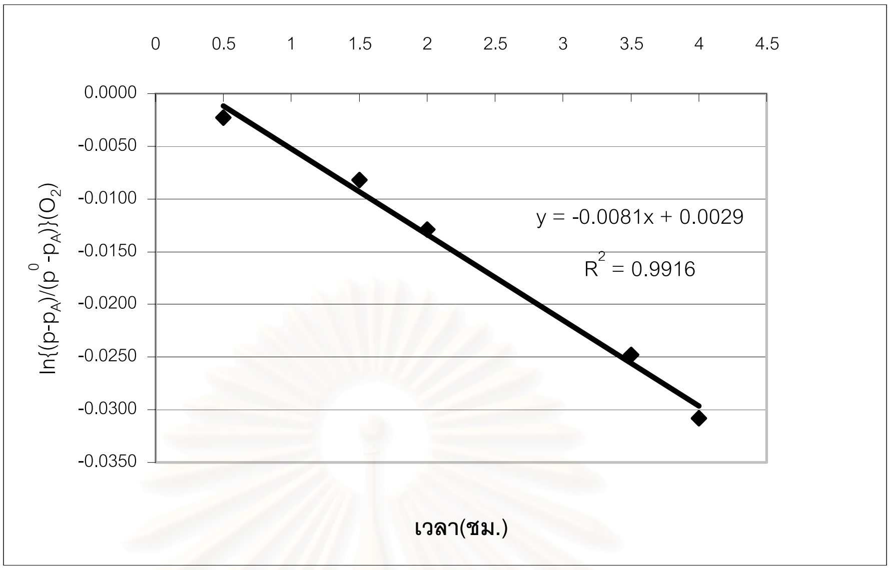
เวลา (ชม.)	O_2 (%)	CO_2 (%)	p(O_2) (atm)	p_A(O_2) (atm)	p- p_A(O_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (O_2)	p(CO_2) (atm)	p_A(CO_2) (atm)	p- p_A(CO_2) (atm)	ln{(p-p_A)/ (p^0-p_A)} (CO_2)
0	10.05	10.01	0.1005	0.21	-0.1095	-	0.1001	0.0003	0.0998	-
1	10.75	9.01	0.1075	0.21	-0.1025	-0.0661	0.0901	0.0003	0.0898	-0.1056
2	11.03	8.48	0.1103	0.21	-0.0997	-0.0938	0.0848	0.0003	0.0845	-0.1664
3	11.30	7.99	0.1130	0.21	-0.0970	-0.1212	0.0799	0.0003	0.0796	-0.2262
4	11.52	7.67	0.1152	0.21	-0.0948	-0.1442	0.0767	0.0003	0.0764	-0.2672
5	11.71	7.45	0.1171	0.21	-0.0929	-0.1644	0.0745	0.0003	0.0742	-0.2964



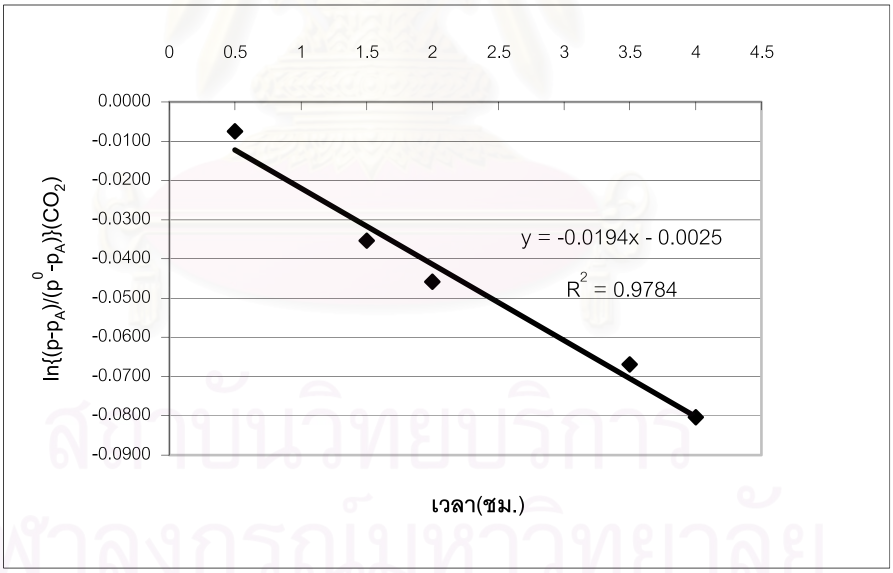
รูปที่ ซ.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)



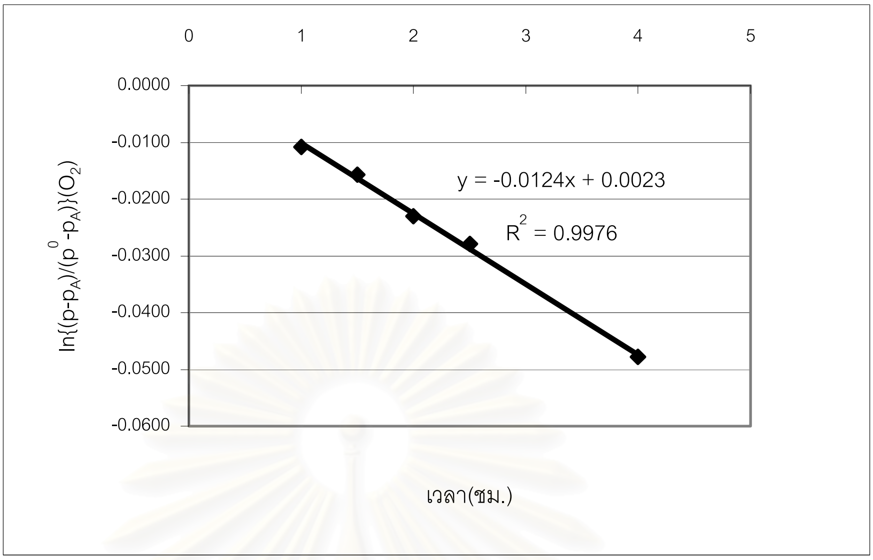
รูปที่ ซ.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)



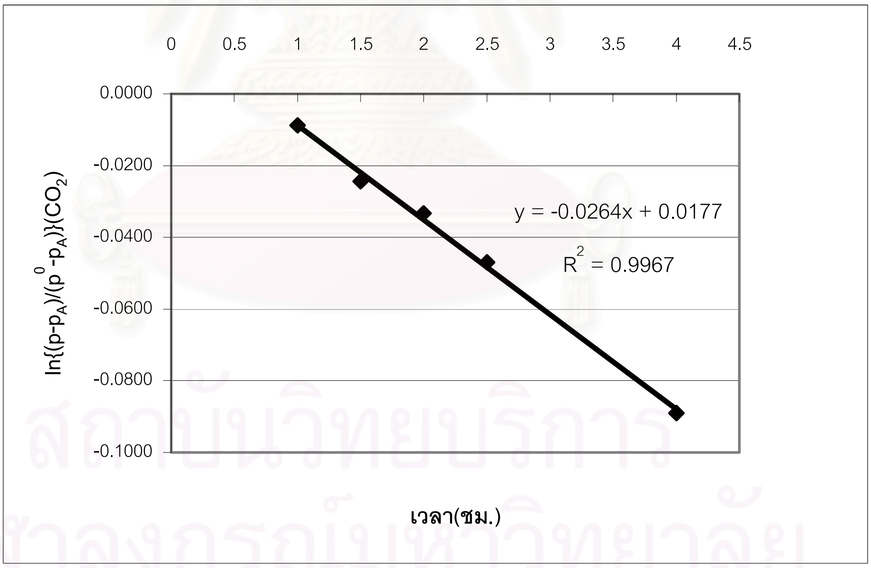
รูปที่ ซ.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)



รูปที่ ซ.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)

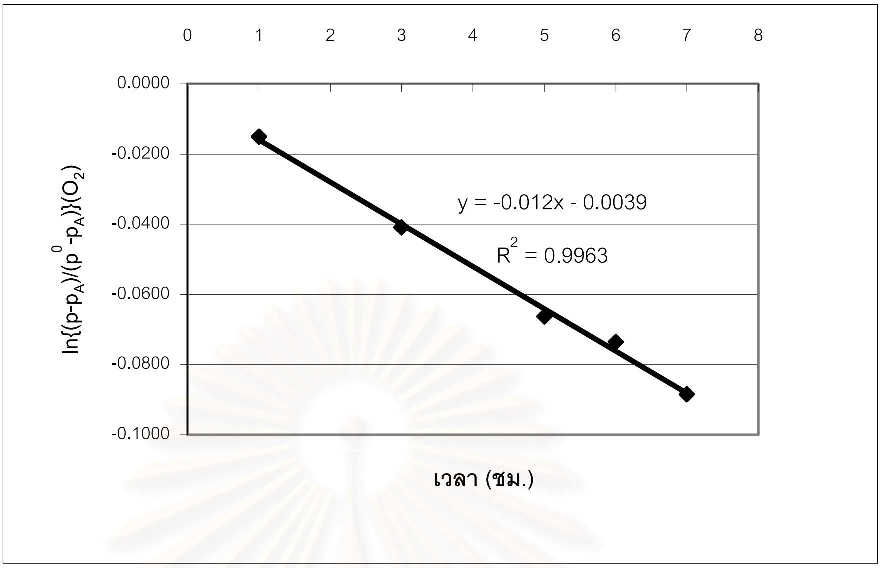


รูปที่ ซ.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)

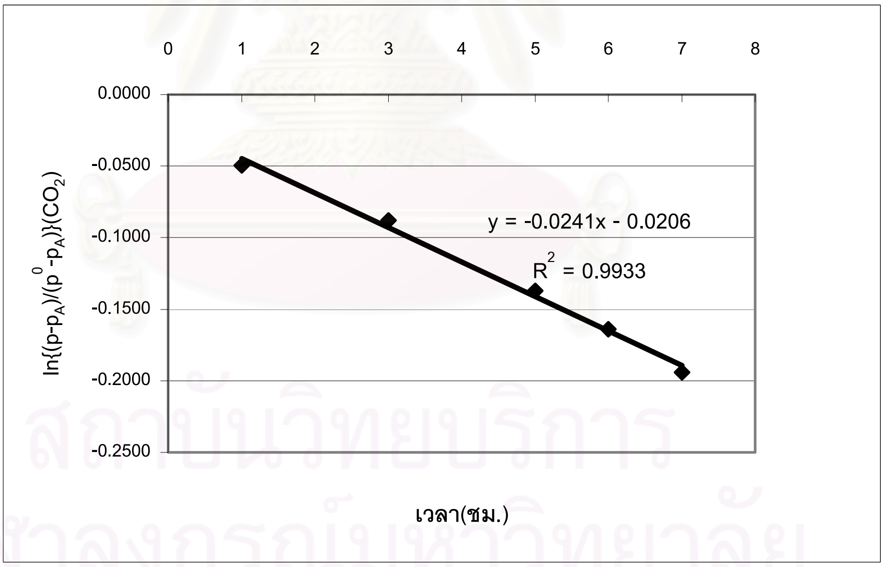


รูปที่ ซ.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} (CO_2) ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)

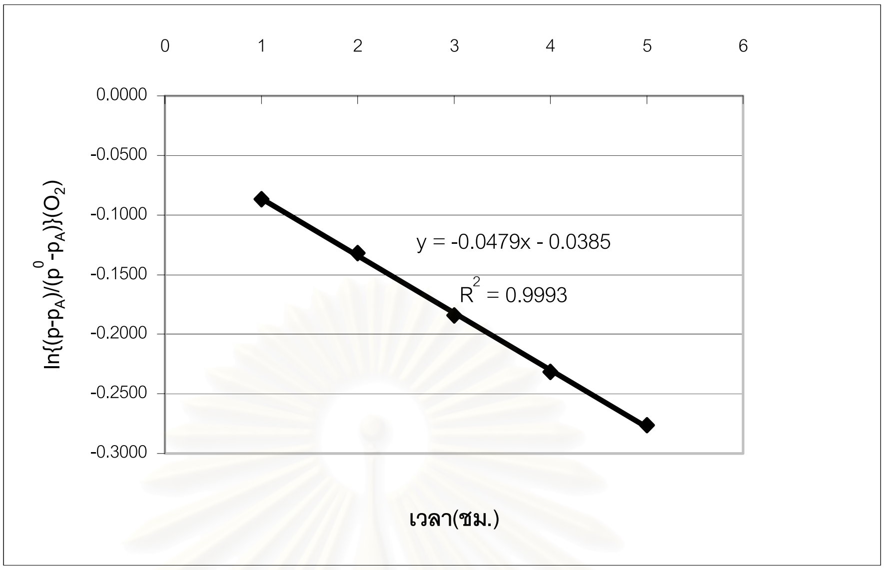
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



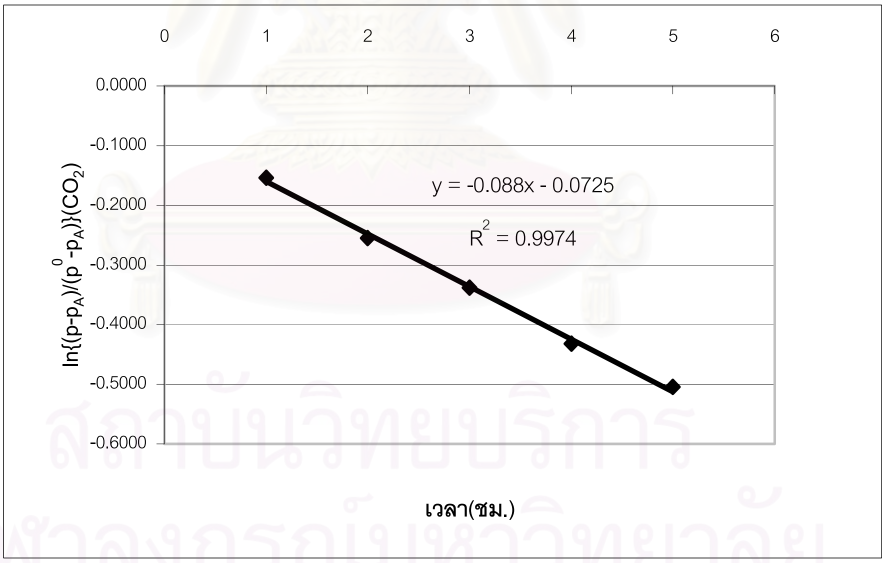
รูปที่ ช.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)



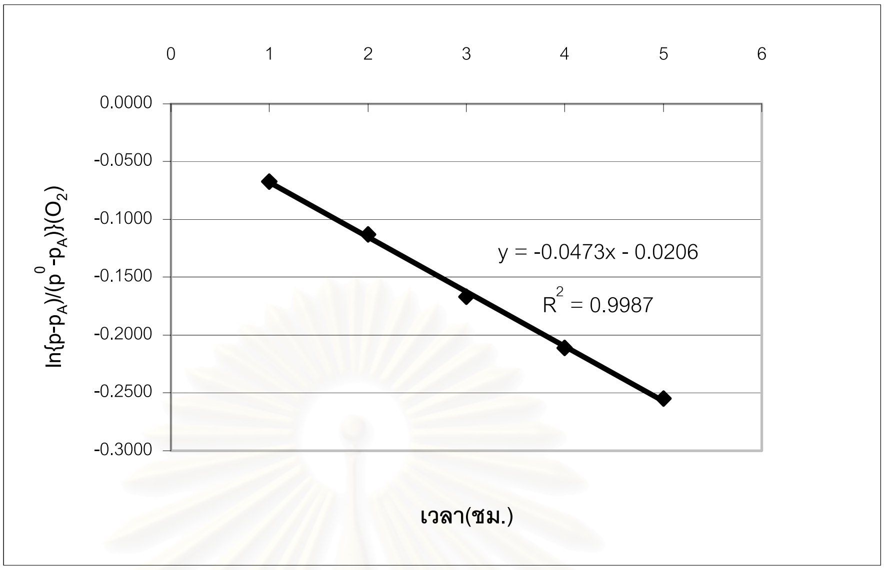
รูปที่ ช.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)



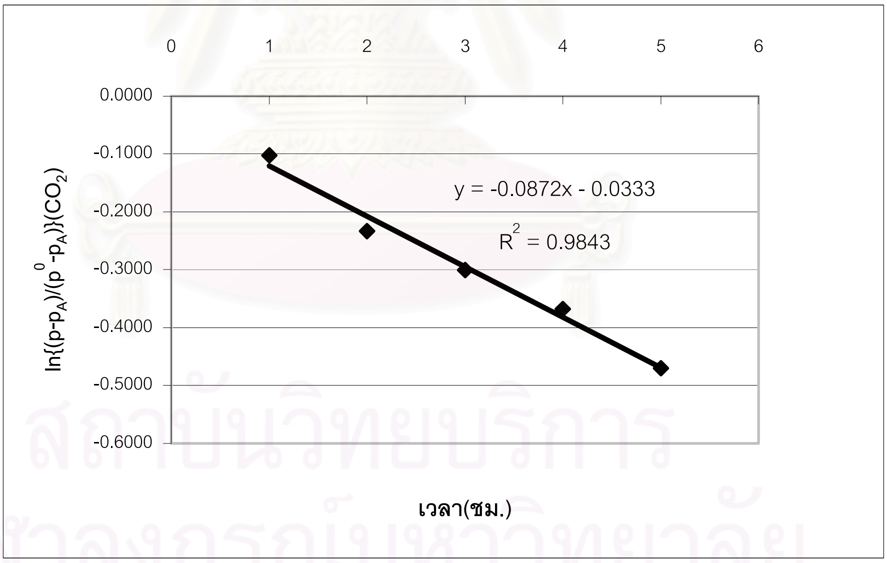
รูปที่ ซ.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)



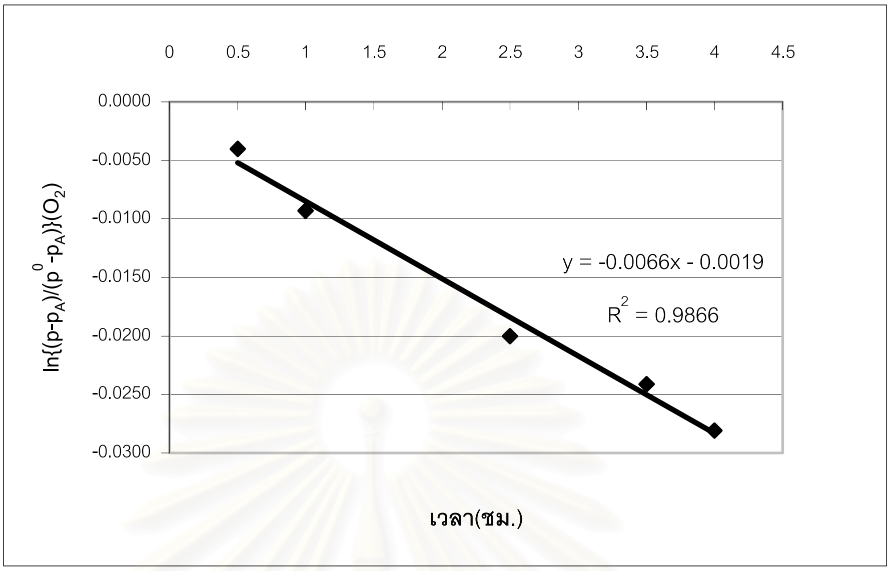
รูปที่ ซ.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)



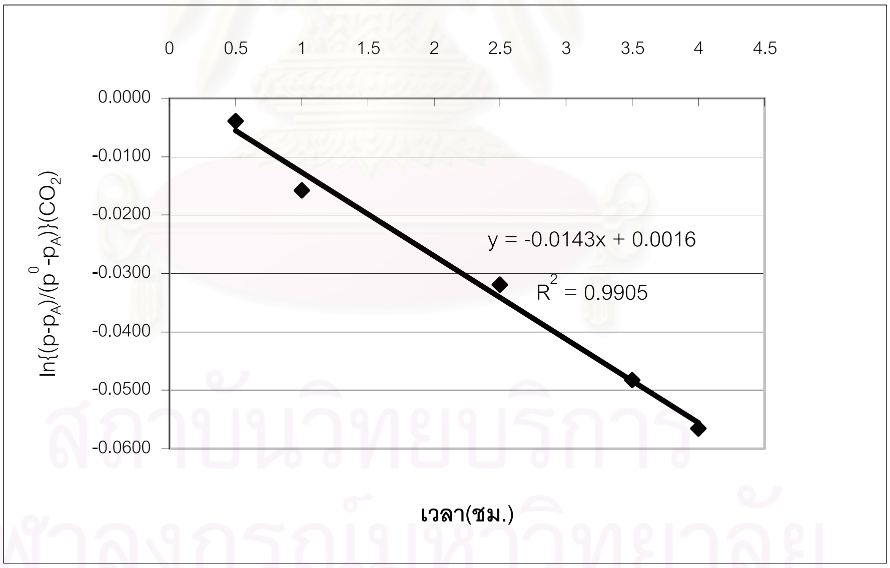
รูปที่ ซ.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)



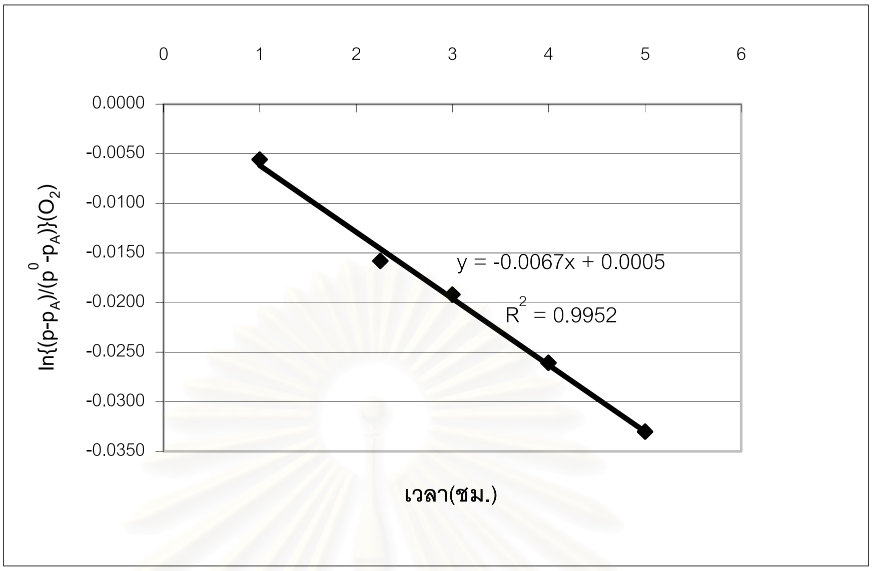
รูปที่ ซ.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 33 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)



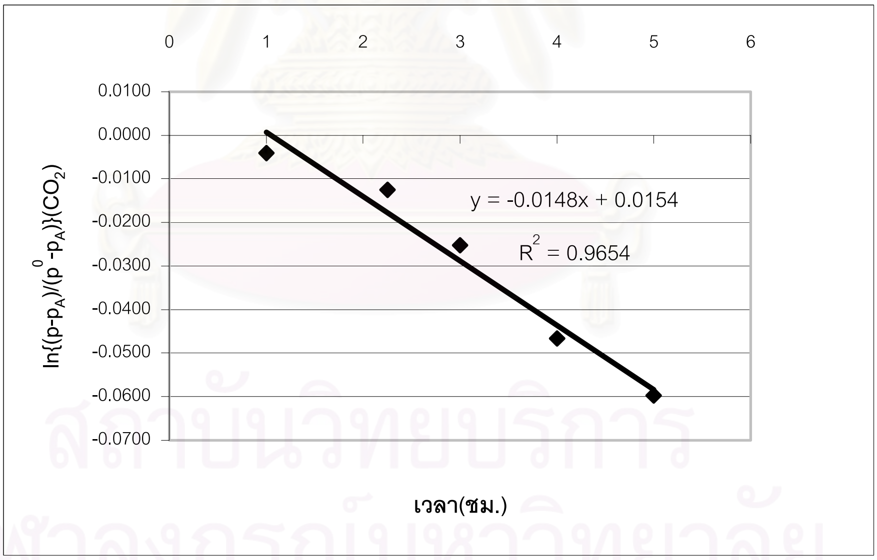
รูปที่ ซ.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)



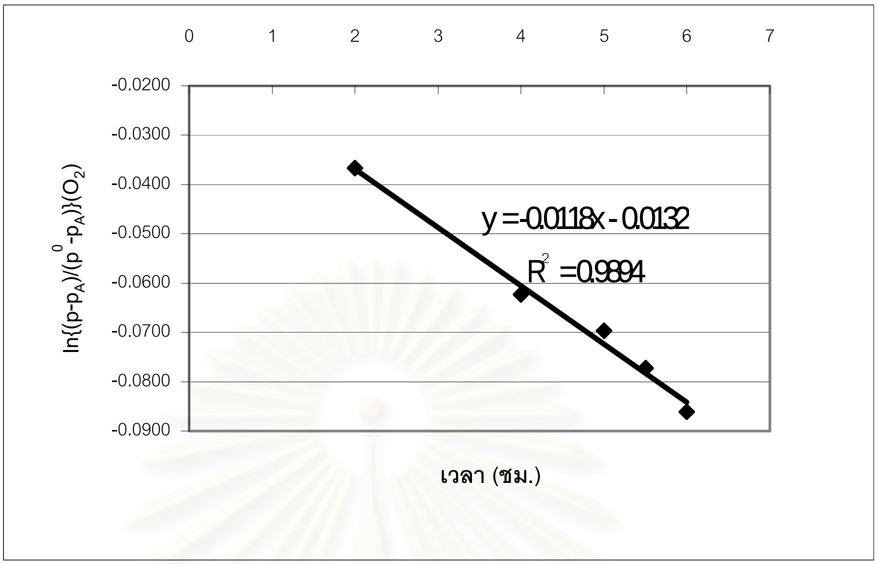
รูปที่ ซ.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)



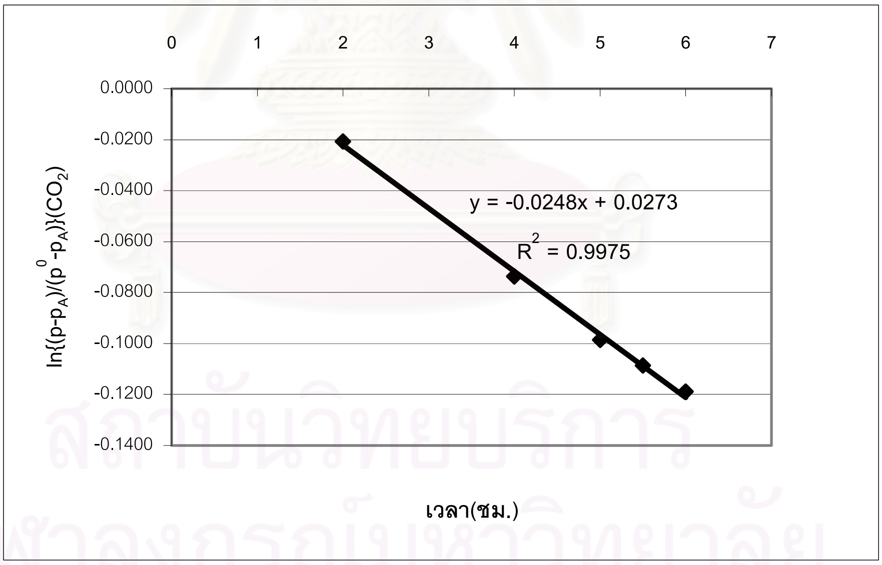
รูปที่ ซ.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)



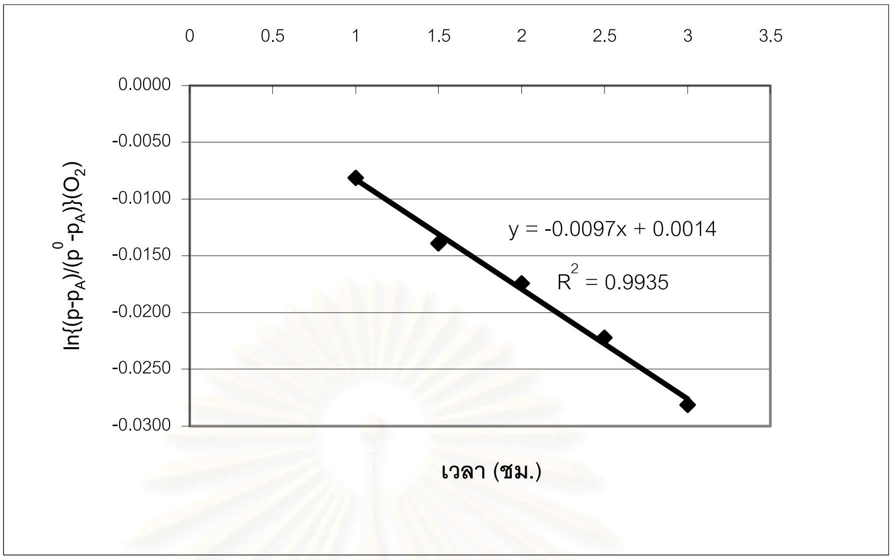
รูปที่ ซ.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)



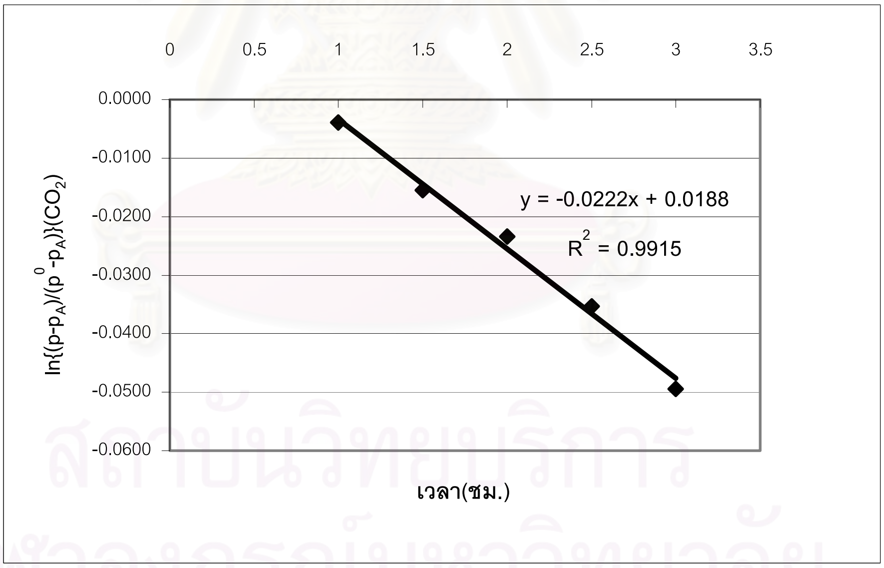
รูปที่ ซ.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)



รูปที่ ซ.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)

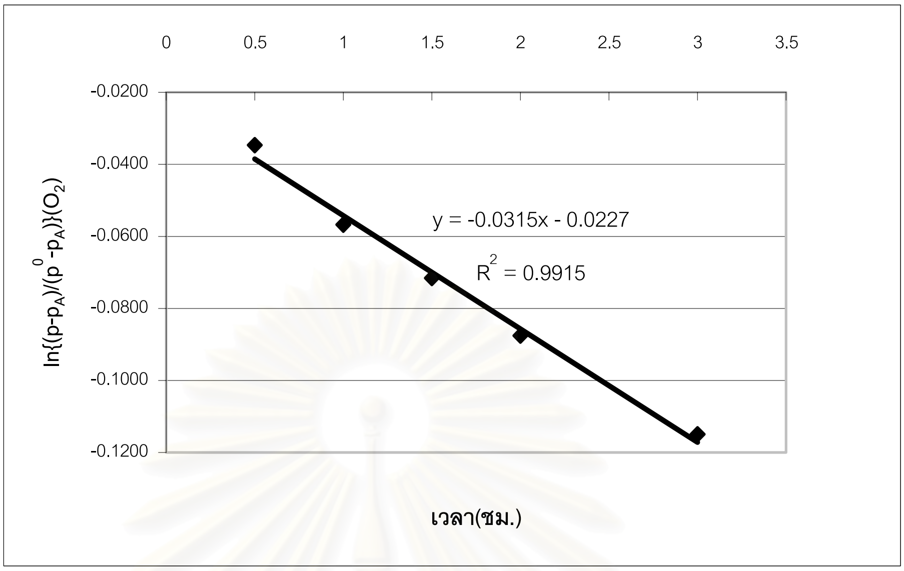


รูปที่ ซ.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)

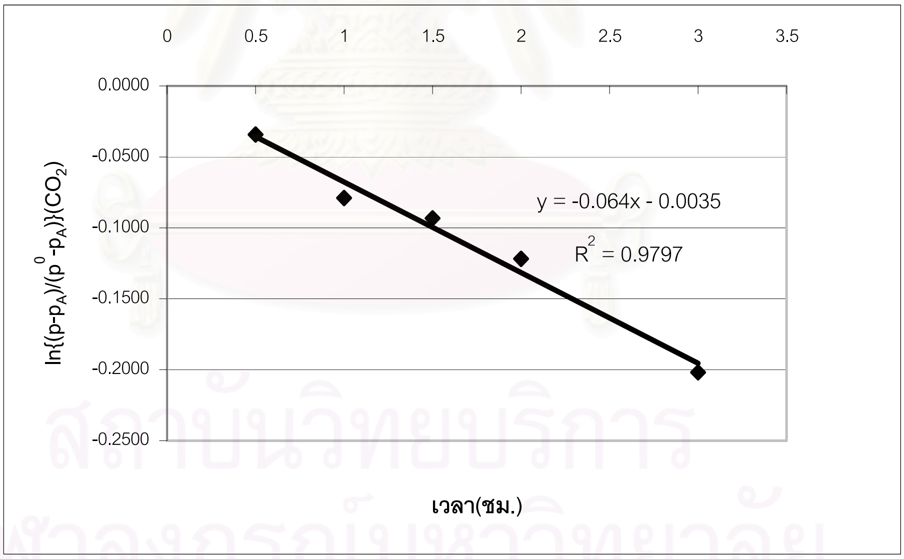


รูปที่ ซ.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)

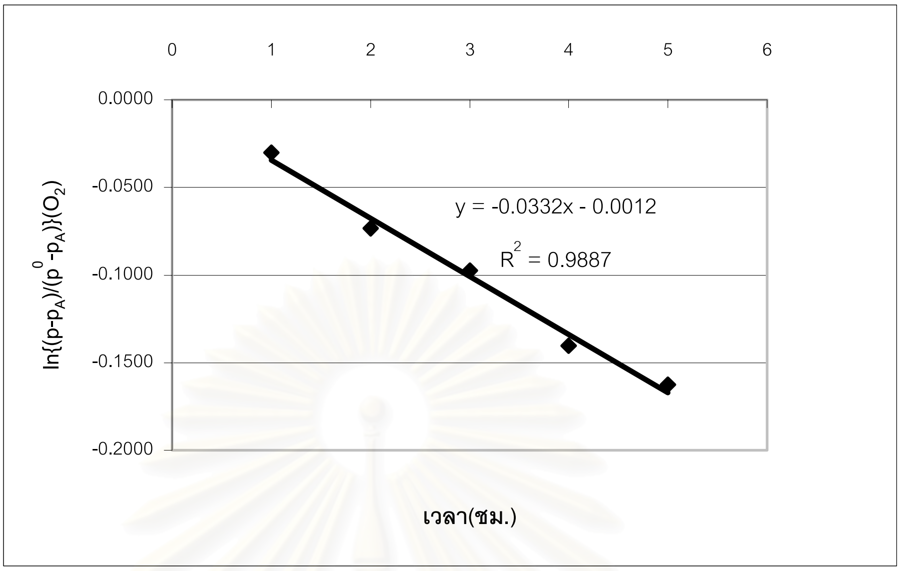
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



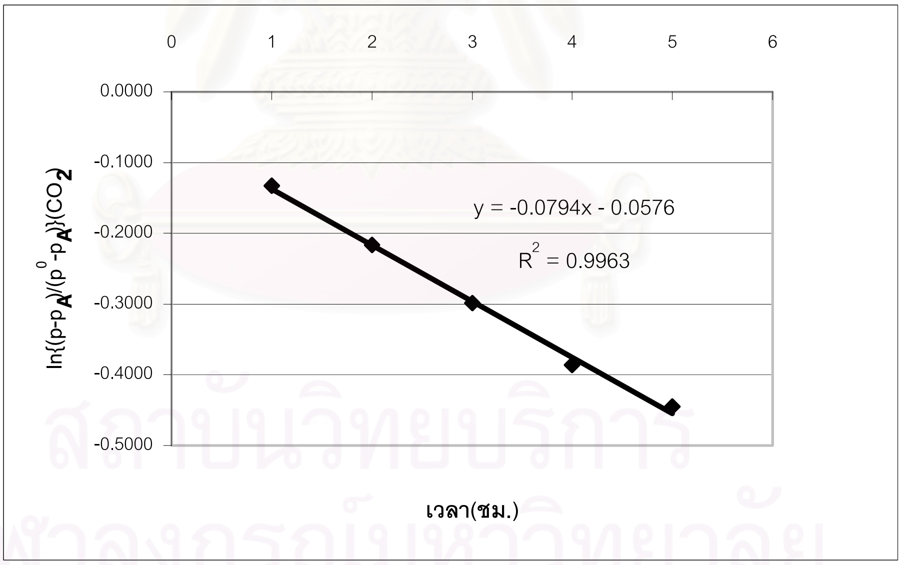
รูปที่ ซ.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)



รูปที่ ซ.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)

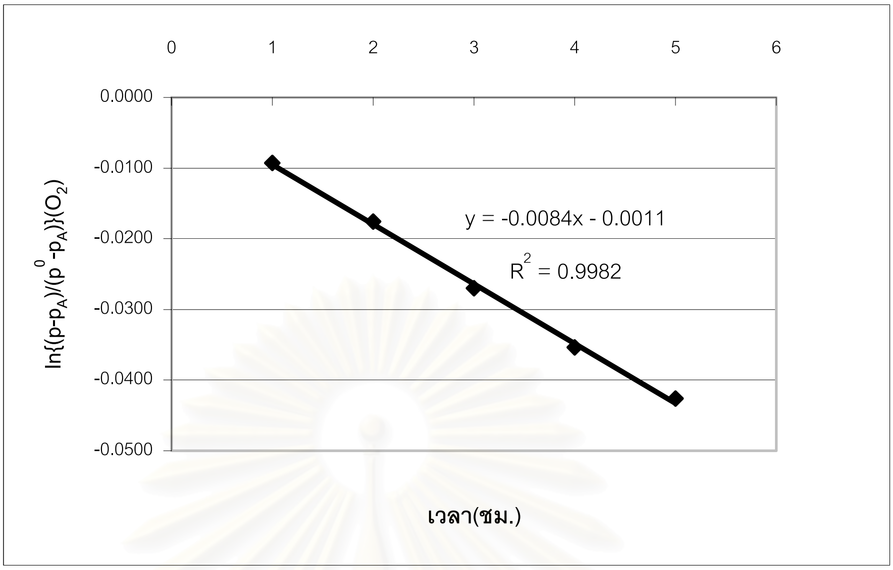


รูปที่ ช.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)

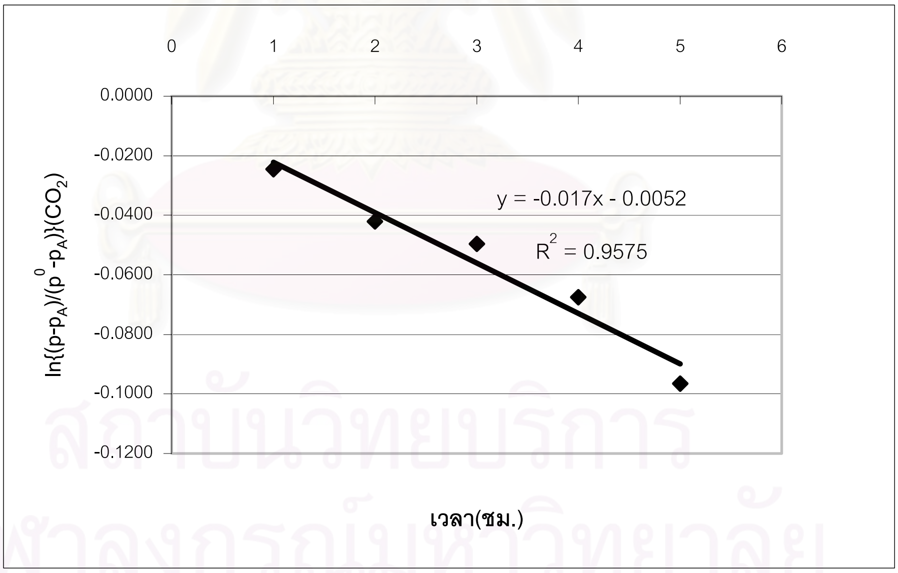


รูปที่ ช.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม LDPE 45 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

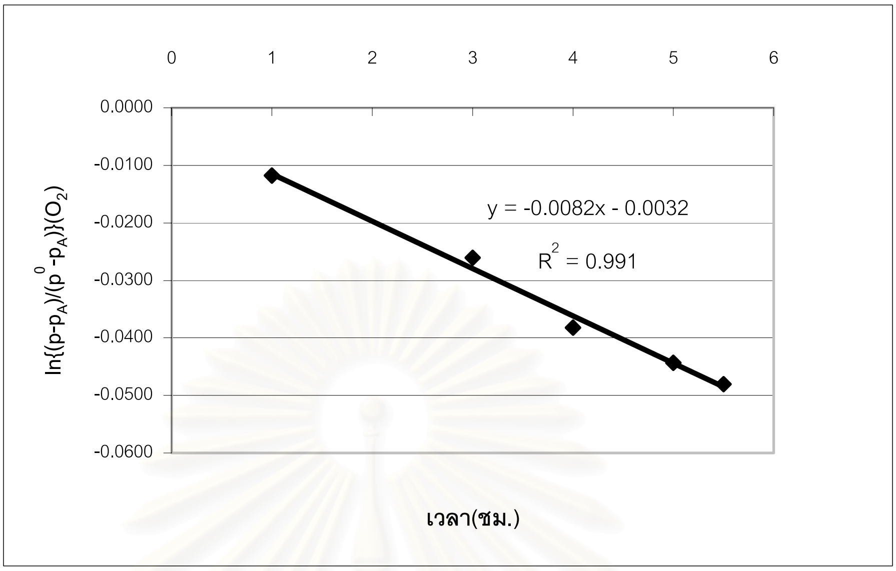


รูปที่ ซ.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)

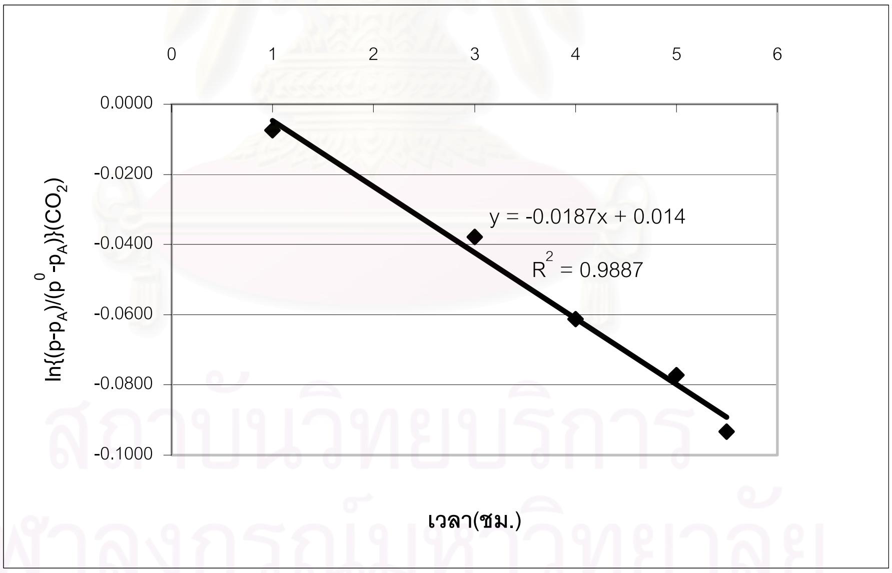


รูปที่ ซ.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

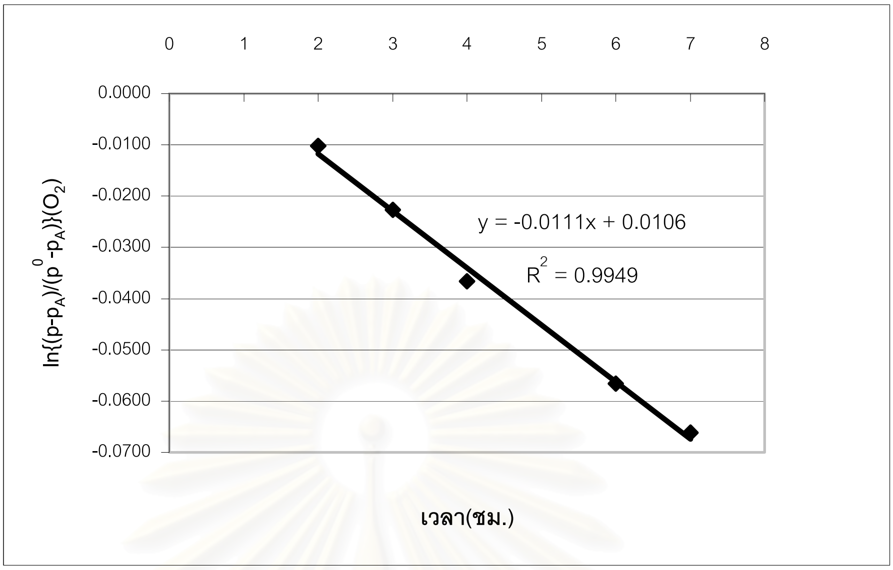


รูปที่ ช.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)

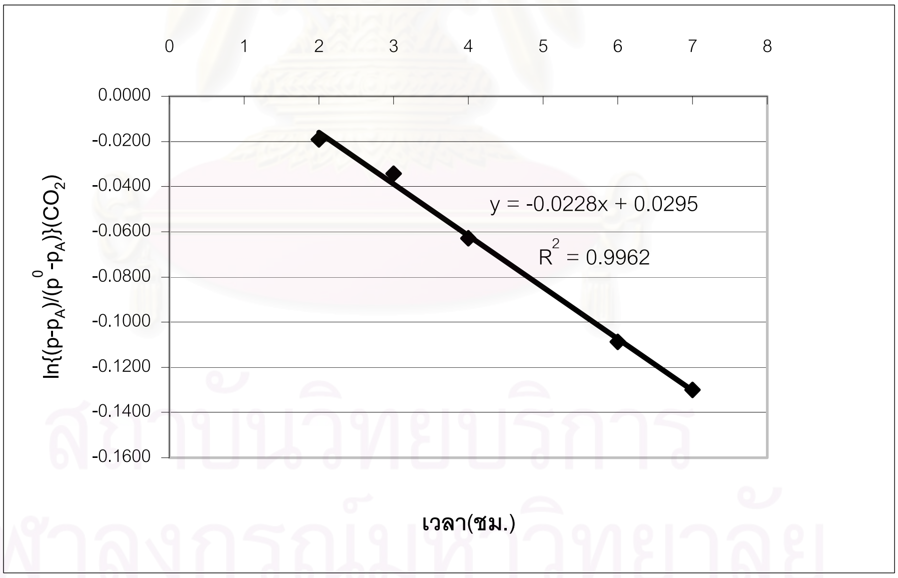


รูปที่ ช.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)

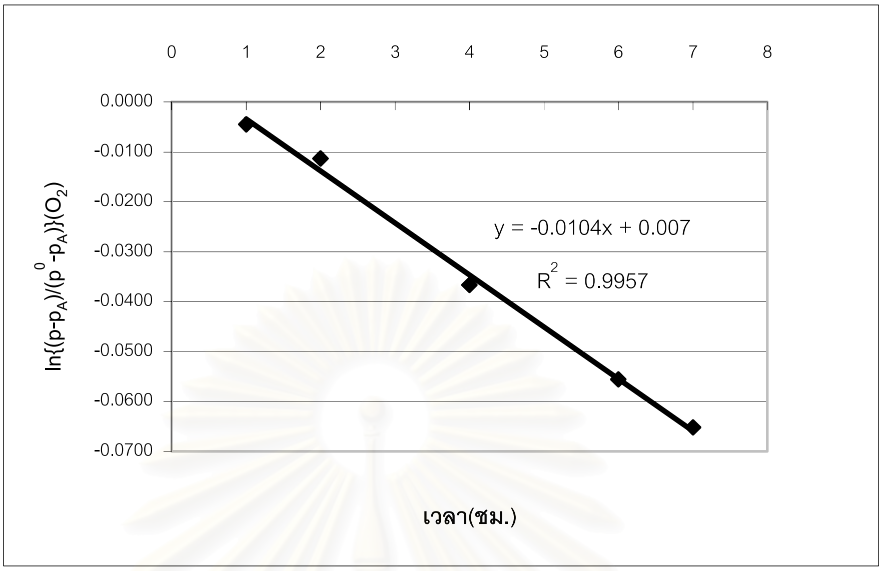
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



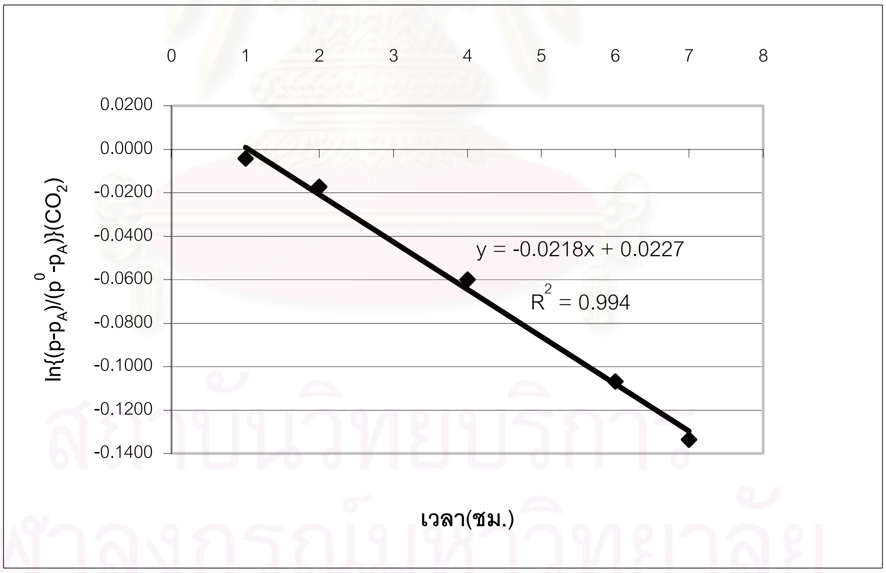
รูปที่ ซ.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)



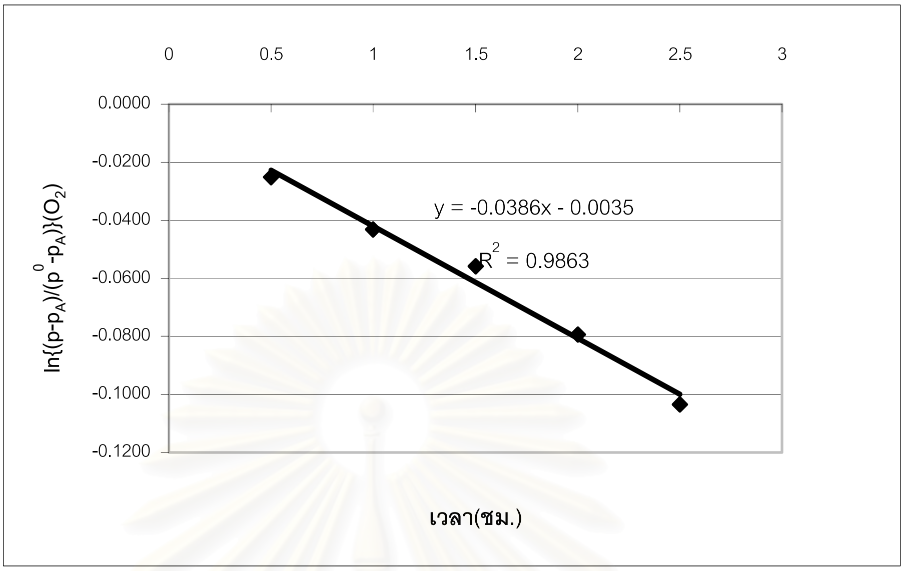
รูปที่ ซ.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\{(p-p_A)/(p^0-p_A)\}$ ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)



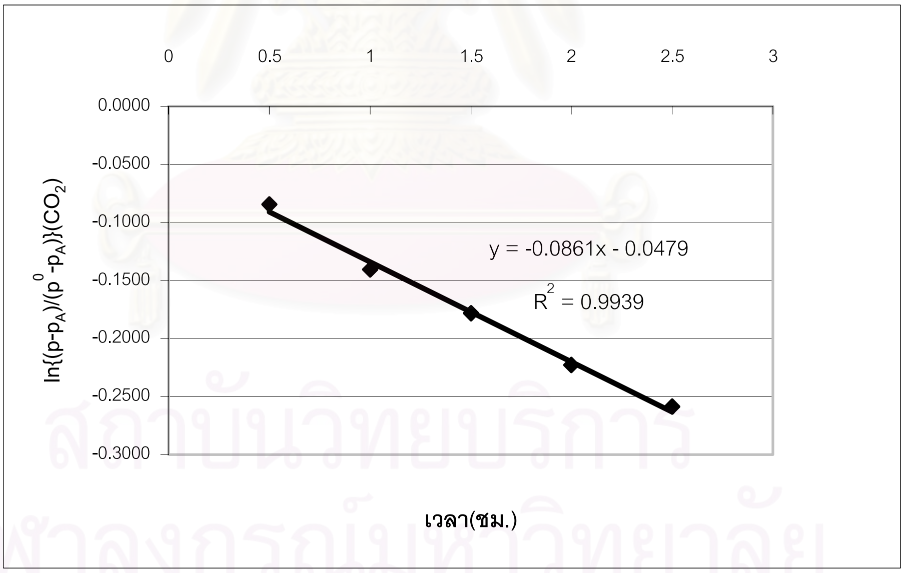
รูปที่ ช.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)



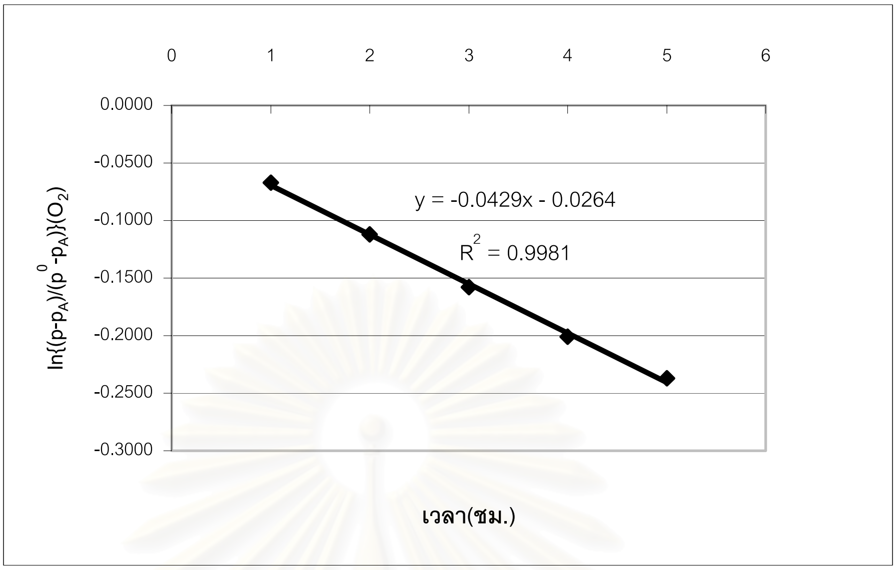
รูปที่ ช.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)



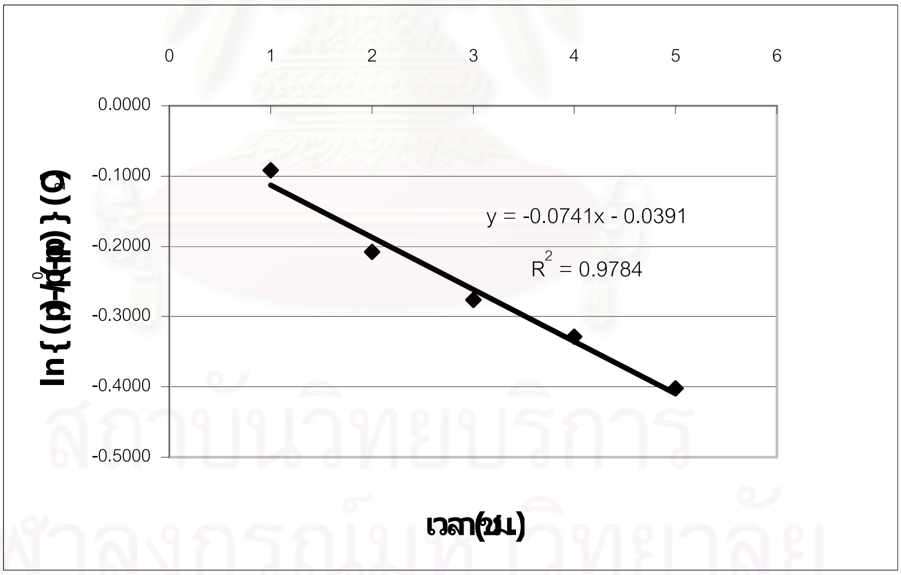
รูปที่ ซ.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)



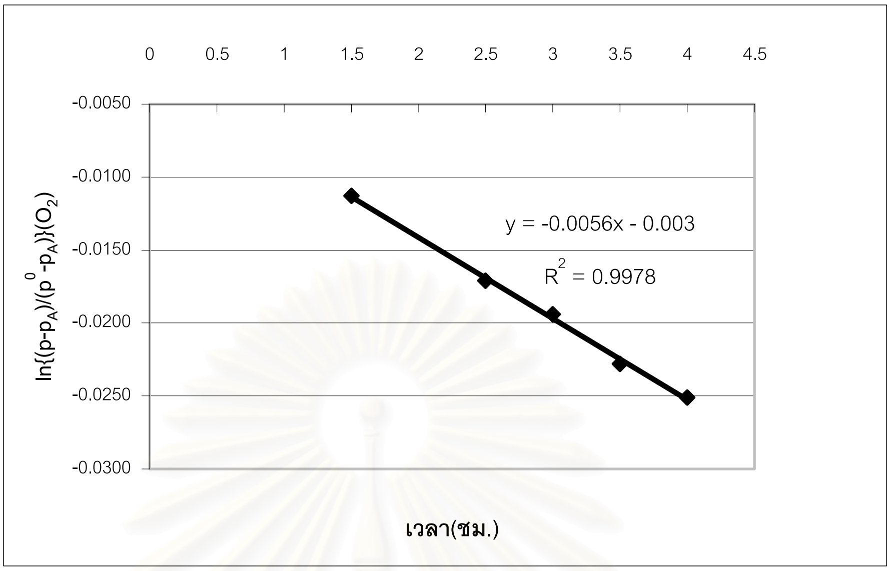
รูปที่ ซ.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)



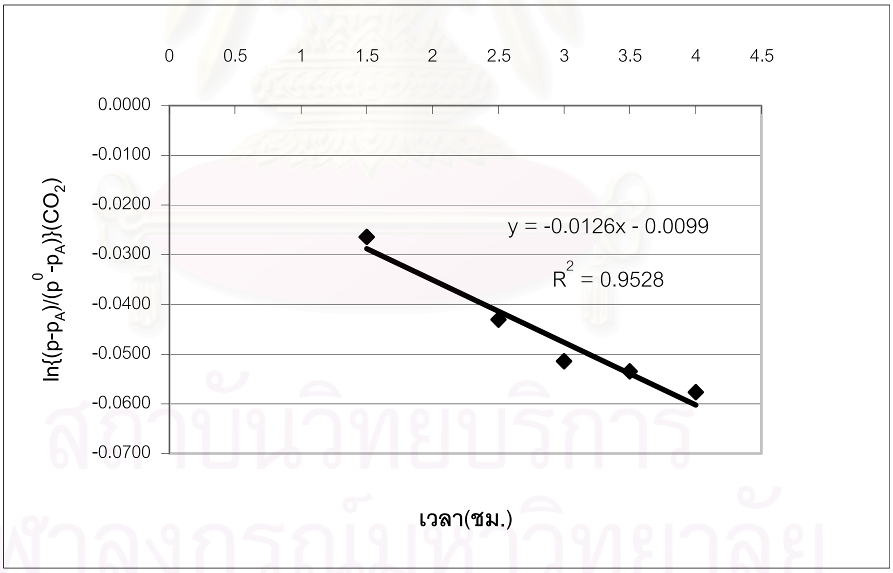
รูปที่ ซ.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)



รูปที่ ซ.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 25 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)

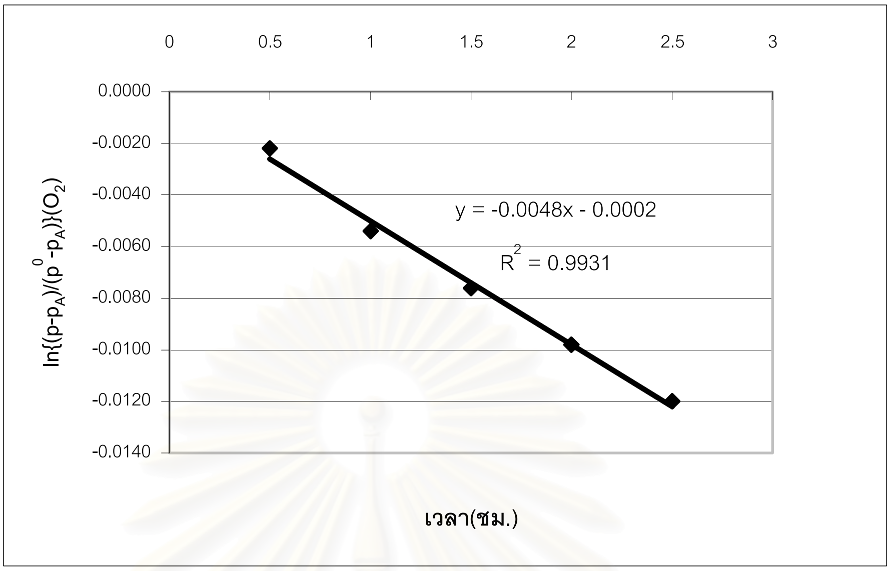


รูปที่ ซ.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)

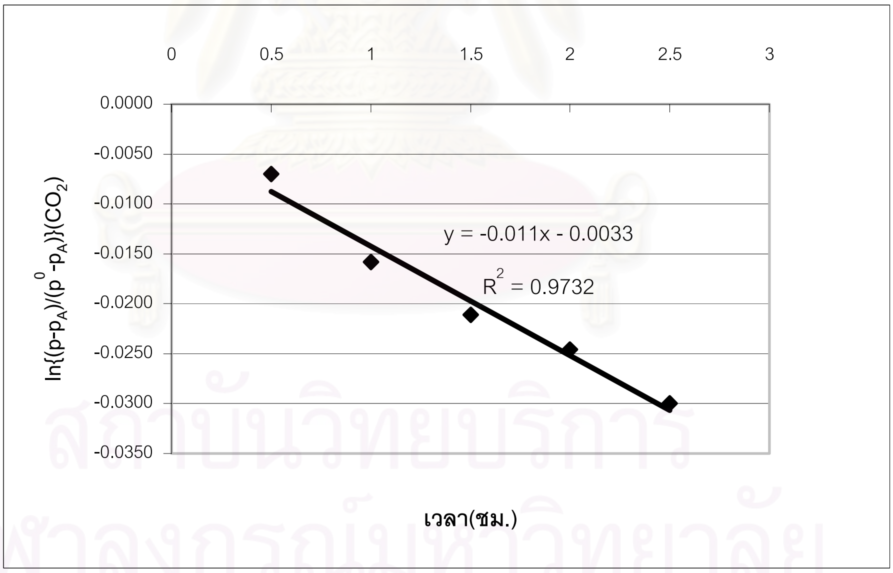


รูปที่ ซ.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)

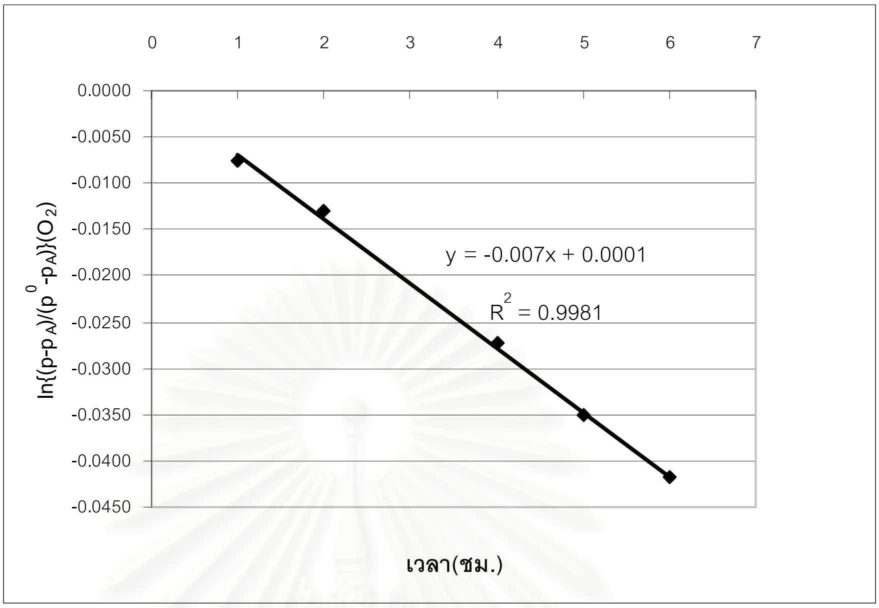
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



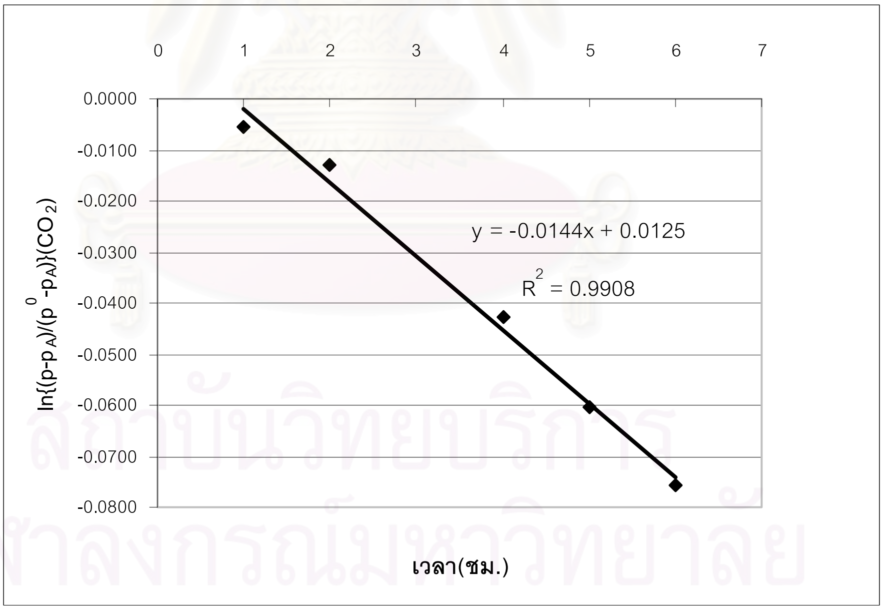
รูปที่ ซ.39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)



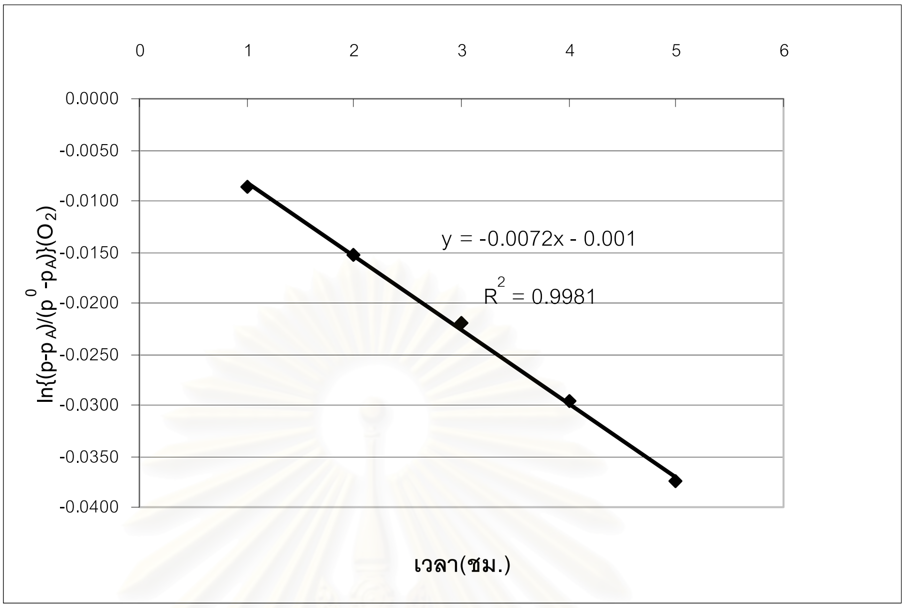
รูปที่ ซ.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)



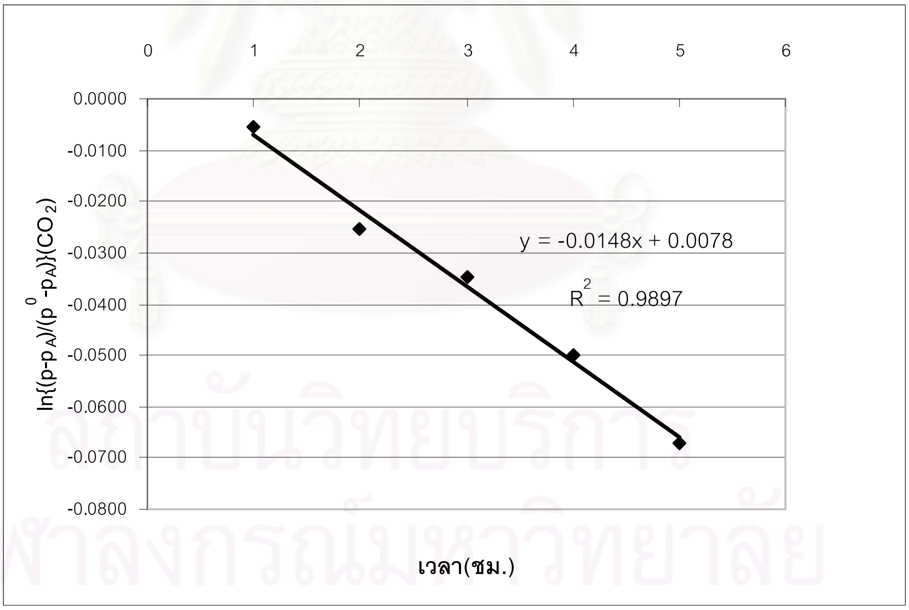
รูปที่ ซ.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)



รูปที่ ซ.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)

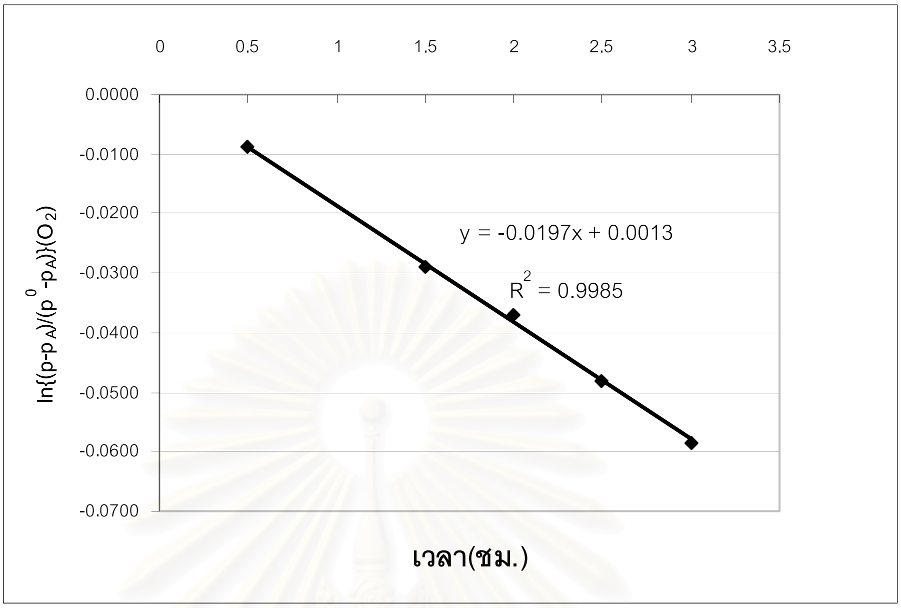


รูปที่ ซ.43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)

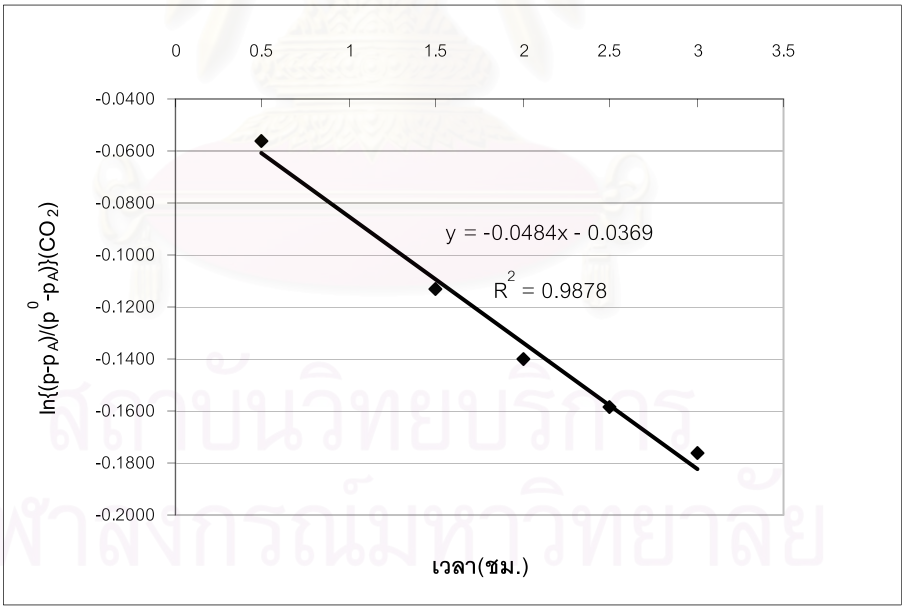


รูปที่ ซ.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 11±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

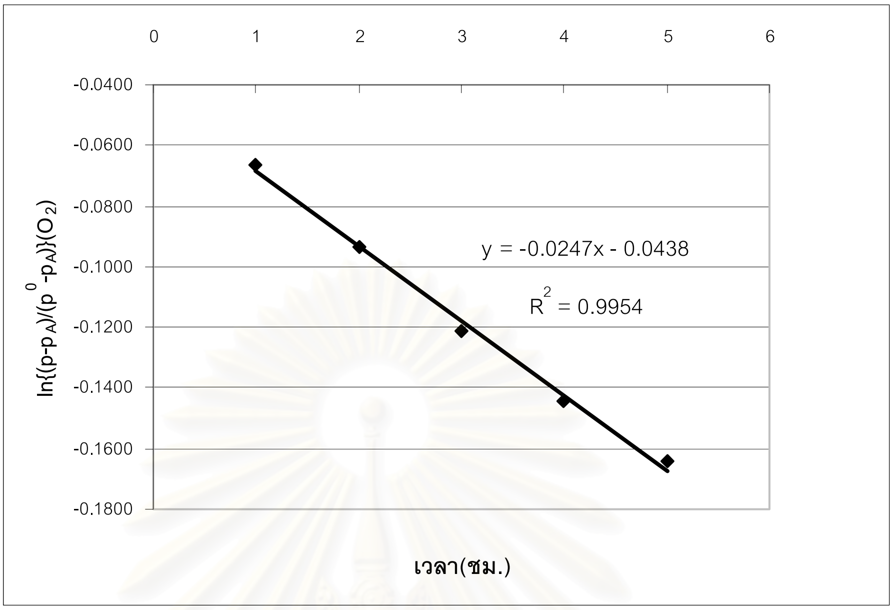


รูปที่ ซ.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)

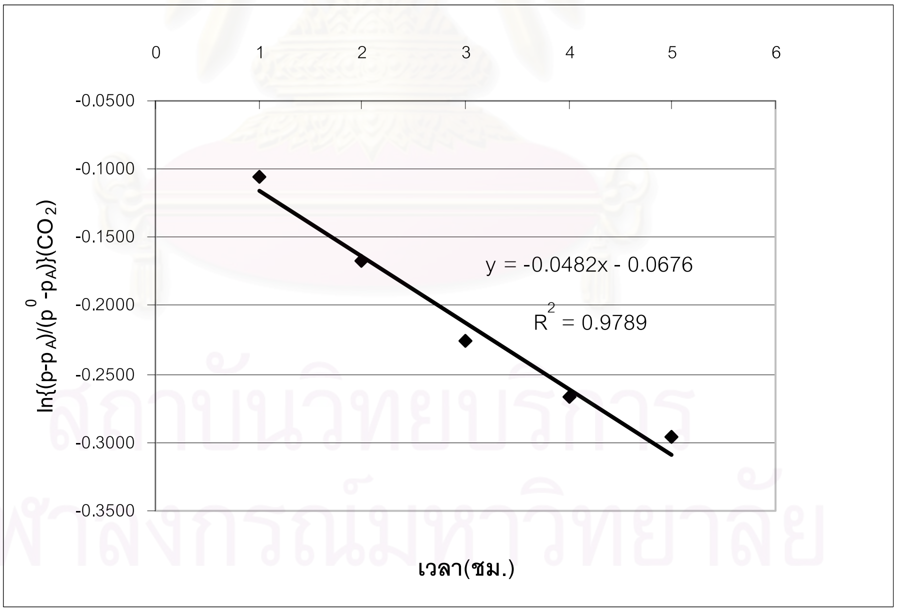


รูปที่ ซ.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ซ.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซออกซิเจนกับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)



รูปที่ ซ.48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln{(p-p_A)/(p^0-p_A)} ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา (ชม.) ของฟิล์ม PP 50 ไมครอนที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)

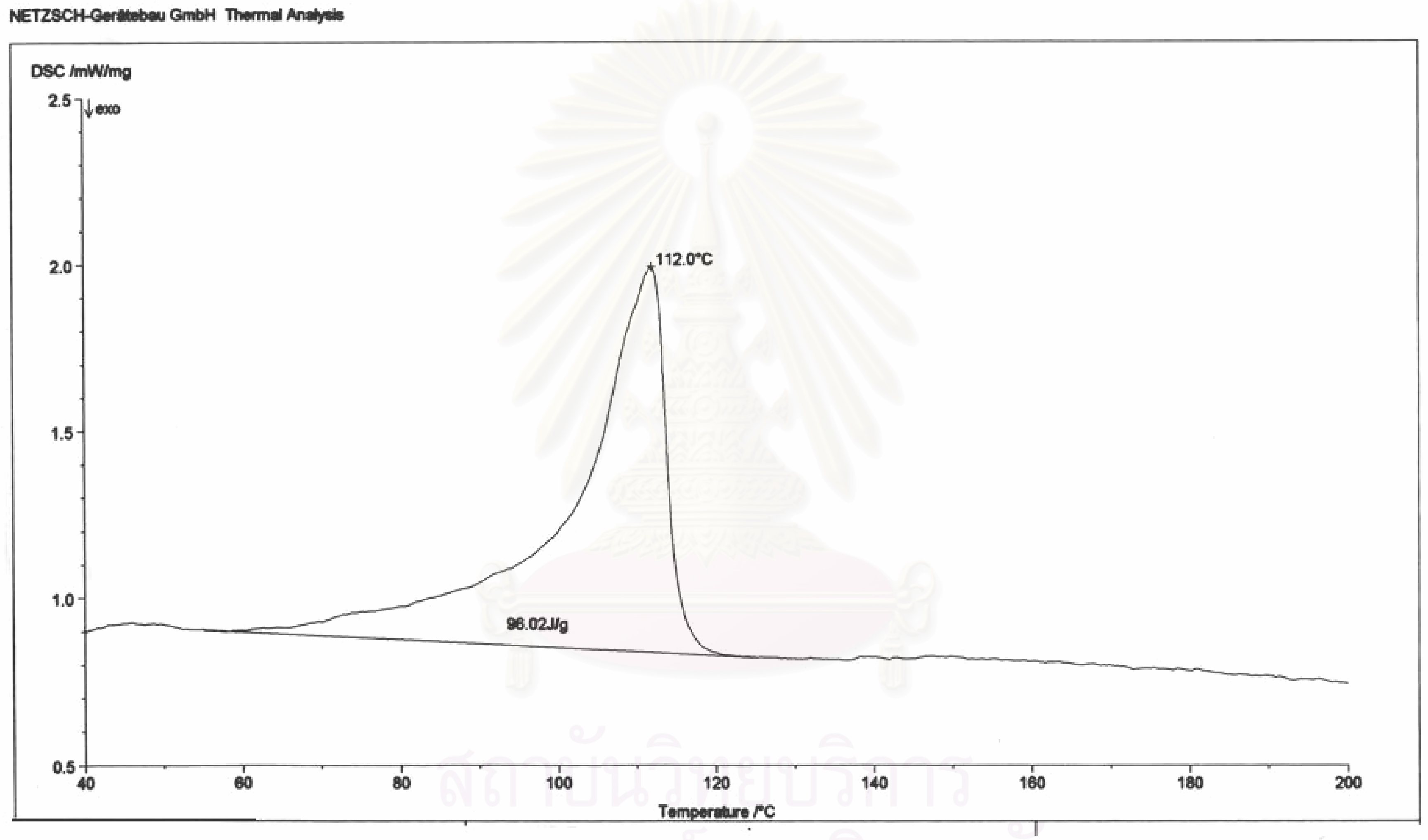
ภาคผนวก ซ
การประมาณค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มพอลิเมอร์

ในการประมาณค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม LDPE และ PP ที่ใช้ในการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ใช้การคำนวณตามสมการในหัวข้อที่ 2.2.3 โดยวิธีการในการคำนวณทำตามหัวข้อที่ 4.2.4.3 ซึ่งค่าตัวแปรที่ต้องรู้ค่าเพื่อใช้ในการคำนวณ คือ ค่าระดับของความเป็นผลึก (degree of crystallinity) และค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC โดยสำหรับค่าระดับของความเป็นผลึก (degree of crystallinity) ของพอลิเมอร์สามารถหาได้จากการนำค่าความร้อนในการหลอมเหลว (heat of fusion, H_f) ของพอลิเมอร์ที่นำมาทดสอบที่อ่านได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC หารด้วยค่าความร้อนในการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันที่มีค่าระดับความเป็นผลึกร้อยละ 100 ($H_{f,c}$) ซึ่งในงานวิจัยนี้ กำหนดให้ค่าความร้อนในการหลอมเหลวของ LDPE ที่มีค่าระดับความเป็นผลึกร้อยละ 100 มีค่าเท่ากับ 287 J g^{-1} [40] ในขณะที่ค่าความร้อนในการหลอมเหลวของ PP ที่มีค่าระดับความเป็นผลึกร้อยละ 100 มีค่าเท่ากับ 39.6 cal g^{-1} (166.3 J g^{-1}) [41] โดยสำหรับค่าระดับความเป็นผลึกและค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ LDPE และ PP ที่ใช้ในการทดลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ ซ.1 และสำหรับตัวอย่างกราฟของค่าความร้อนในการหลอมเหลวและค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ LDPE และ PP ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC สามารถแสดงได้ดังรูปที่ ซ.1 ถึง ซ.4

ตารางที่ ซ.1 ค่าระดับความเป็นผลึกและค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ LDPE และ PP ที่ใช้ในการทดลอง

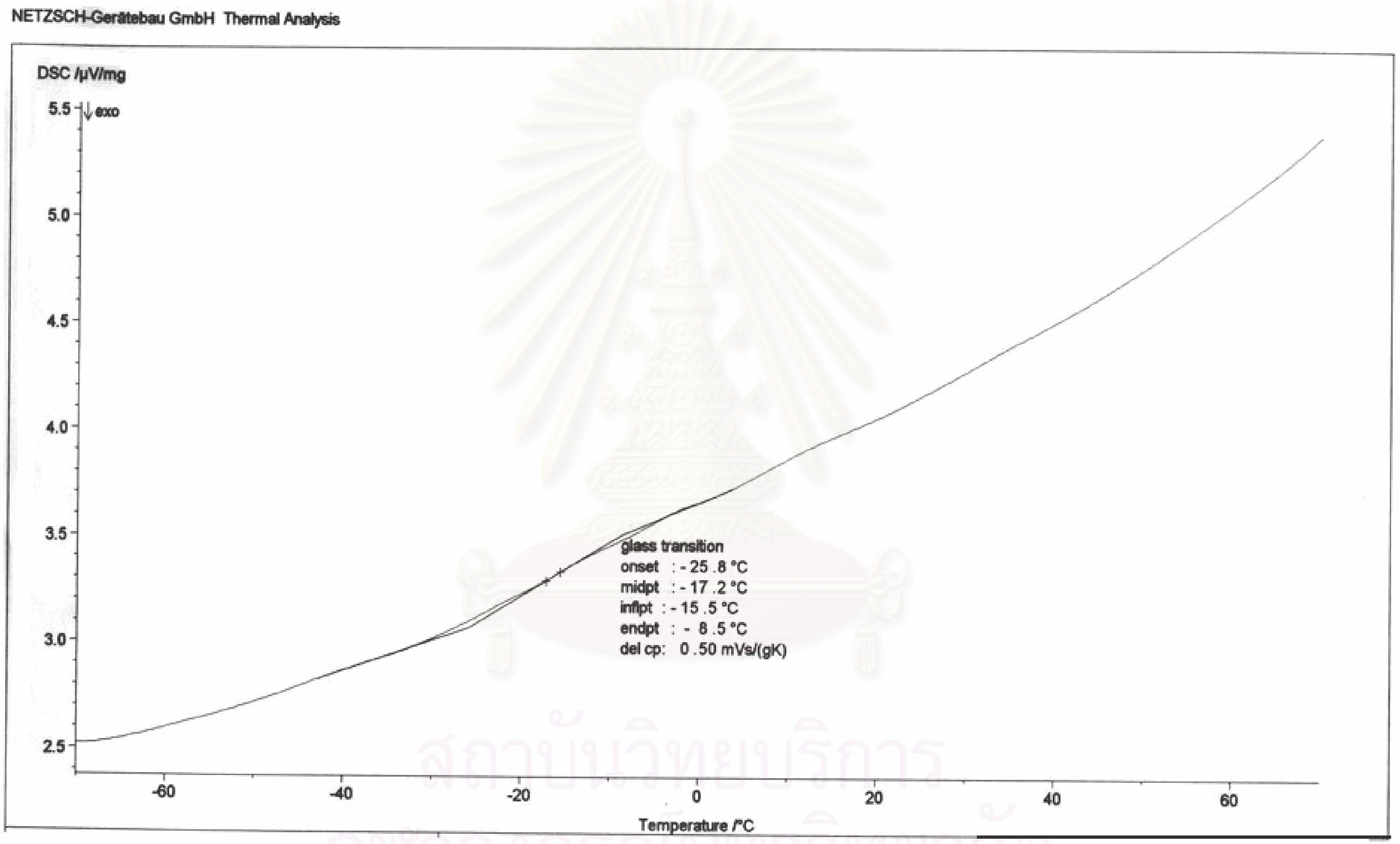
ฟิล์มพอลิเมอร์	ความหนา (μ)	H_f (J g^{-1})	$H_{f,c}$ (J g^{-1})	ระดับของความเป็นผลึก (%)	ระดับของความเป็นผลึกเฉลี่ย (%)	ค่า T_g (^oC)	ค่า T_g เฉลี่ย (^oC)
LDPE	33	96.02	287	33.46	32.87	-17.2	-18.75
	45	92.62	287	32.27		-20.3	
PP	25	78.95	166.3	47.47	46.50	-8.1	-9.45
	50	75.71	166.3	45.53		-10.8	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

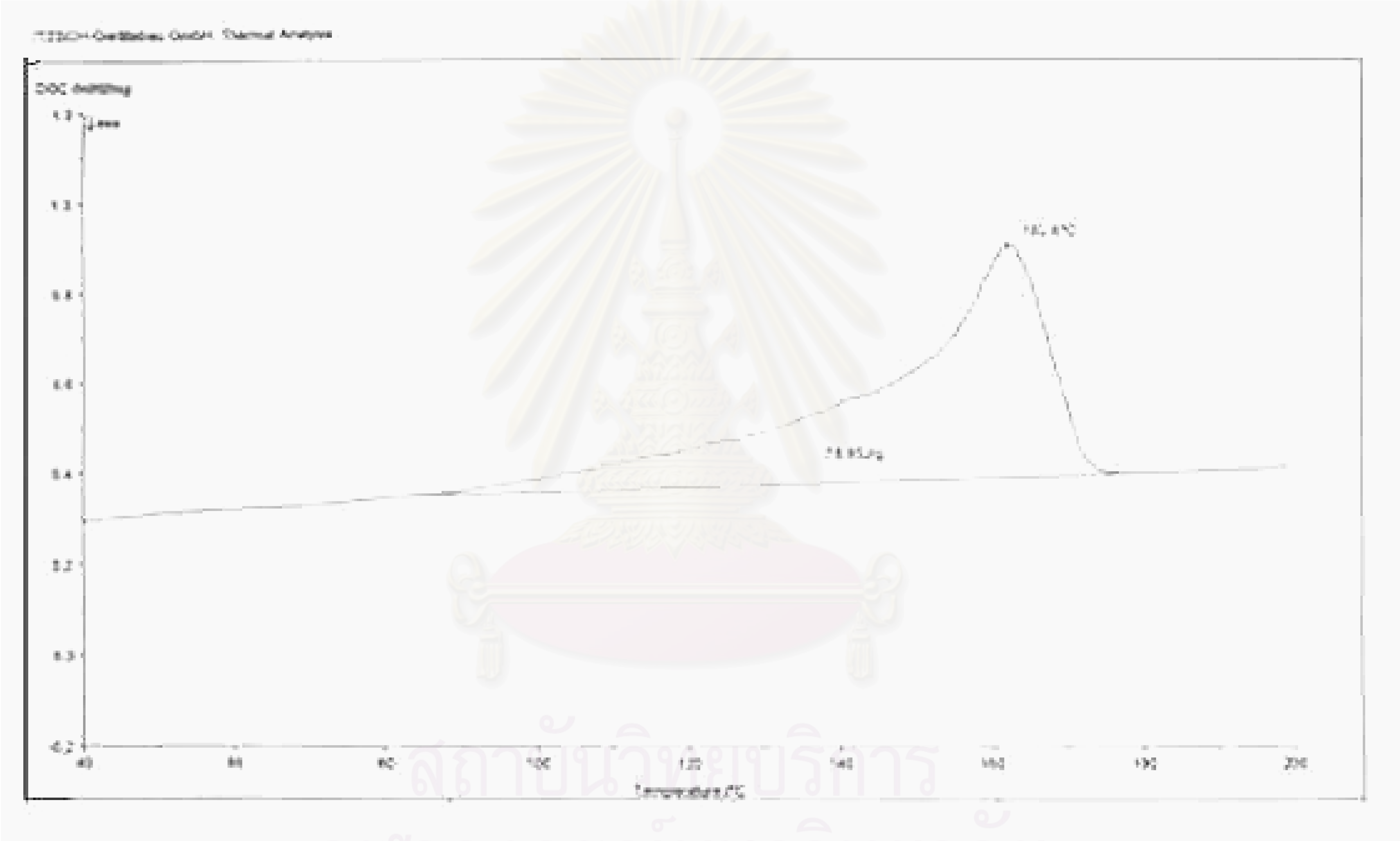


รูปที่ ซ.1 ค่าความร้อนในการหลอมเหลวของ LDPE 33 ไมครอน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

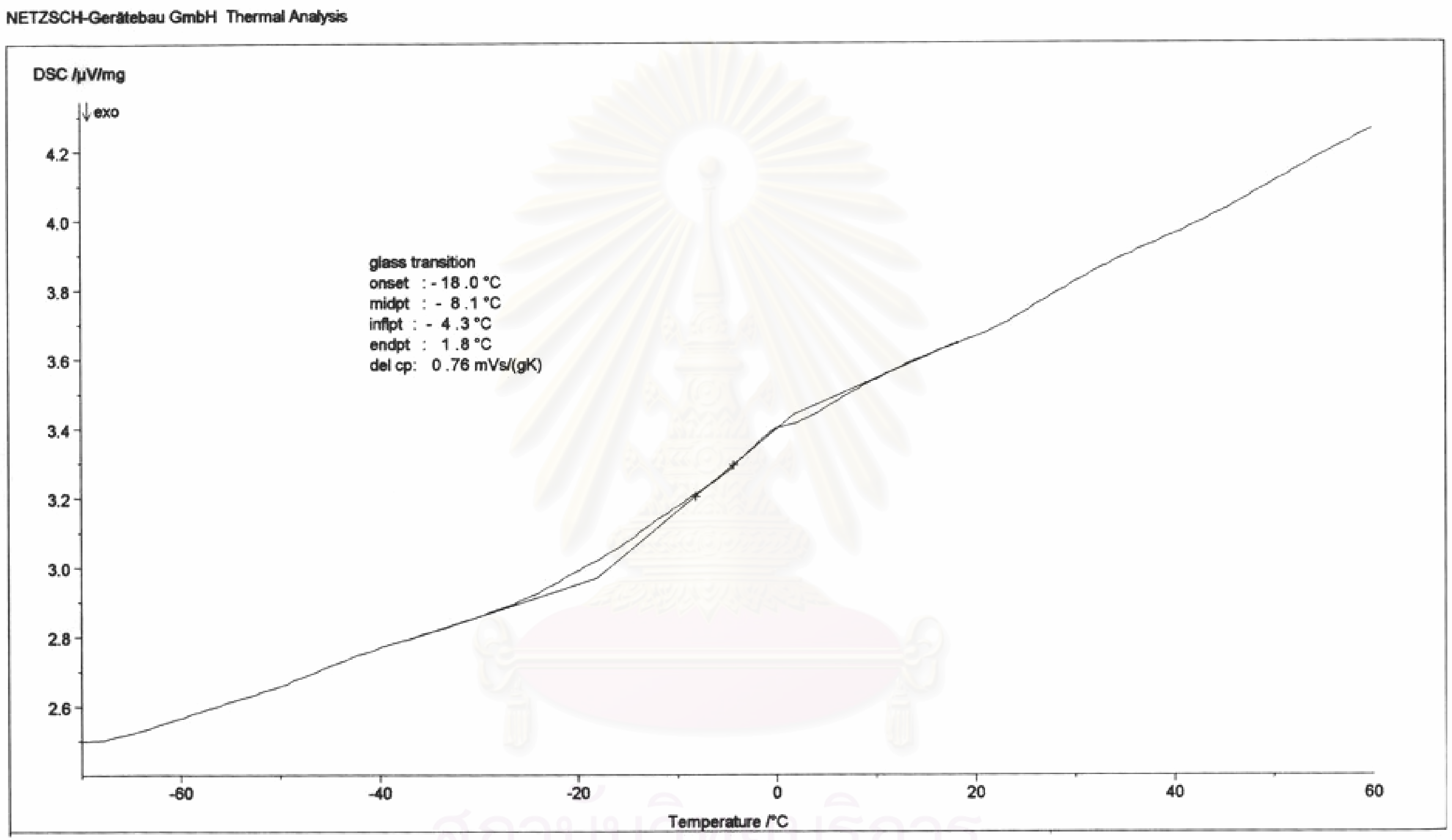


รูปที่ ซ.2 ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ LDPE 33 ไมครอน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ซ.3 ค่าความร้อนในการหลอมเหลวของ PP 25 ไมครอน



รูปที่ ซ.4 ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ PP 25 ไมครอน

สำหรับวิธีการประมาณค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม LDPE และ PP ที่ใช้ในการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ นี้ได้ใช้การคำนวณตามข้อ ค ในหัวข้อที่ 4.2.4 ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

$$\log S(T) = \log S_0 - 0.435\frac{\Delta H_s}{RT} \quad (2.28)$$

$$10^{-3}\frac{\Delta H_s}{R} = 1.0 - 0.010\frac{\varepsilon}{k} \pm 0.5 \quad (2.36)$$

$$\log S_0 = -5.5 - 0.005\frac{\varepsilon}{k} \pm 0.8 \quad (2.37)$$

$$\log S(298) = -7.0 + 0.010\frac{\varepsilon}{k} \pm 0.25 \quad (2.38)$$

$$S_{sc} = S_a(1 - x_c) \quad (2.42)$$

$$\log D(T) = \log D_0 - 0.435\frac{E_d}{RT} \quad (2.29)$$

$$10^{-3}\frac{E_d}{R} = \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{N_2}}\right)^2 \{7.5 - 2.5*10^{-4}(298 - T_g)^2\} \pm 0.6 \quad (2.48)$$

$$\log D_0 = 10^{-3}\frac{E_d}{R} - 4.0 \pm 0.4 \quad (2.49)$$

$$D_{sc} = D_a(1 - x_c) \quad (2.52)$$

$$P_{sc} = S_{sc}D_{sc} \quad (2.55)$$

โดยค่า $\frac{\varepsilon}{k}$ ของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 107 และ 195 เคลวินตามลำดับ (จากตารางที่ 2.9) ค่า σ ของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 34.7 และ 39.4 นาโนเมตรตามลำดับ (จากตารางที่ 2.9) และค่า x_c และ T_g ใช้ค่าเฉลี่ยจากตารางที่ ซ.1 ซึ่งการประมาณค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม LDPE และ PP ที่ใช้ในการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ นี้สามารถแสดงได้ดังตารางที่ ซ.2 และ ซ.3 ตามลำดับ (โดยในการคำนวณจะใช้หลักการเดียวกันกับ [36])

ในส่วนของการคำนวณค่าความสามารถในการละลายของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม LDPE และ PP ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสนี้ จะใช้สมการที่ 2.38 ในการคำนวณแทนสมการที่ 2.28, 2.36 และ 2.37 ทั้งนี้เพื่อทำให้ช่วงของค่าที่คำนวณได้แคบลง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ.2 การคำนวณค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม LDPE ที่ใช้ในการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	ก๊าซ	ช่วงของค่า	S					D					P (cm^3(STP) cm cm^{-2} s^{-1}Pa^{-1})	P (cm^2 s^{-1})
			$10^{-3}\frac{\Delta H_s}{R}$	$\log S_0$	$\log S(T)$	$S(T)$	S_{sc}	$10^{-3}\frac{E_d}{R}$	$\log D_0$	$\log D(T)$	$D(T)$	D_{sc}		
5	O_2	ต่ำสุด	-0.07	-6.835	-6.7255	1.88E-07	1.26E-07	5.8549	1.4549	-7.7066	1.97E-08	1.32E-08	1.66E-15	1.70E-10
		สูงสุด		-5.235	-5.1255	7.49E-06	5.03E-06		2.2549	-6.9066	1.24E-07	8.32E-08	4.19E-13	4.26E-08
	CO_2	ต่ำสุด	-0.95	-7.275	-5.7885	1.63E-06	1.09E-06	7.5484	3.1484	-8.6629	2.17E-09	1.46E-09	1.60E-15	1.63E-10
		สูงสุด		-5.675	-4.1885	6.48E-05	4.35E-05		3.9484	-7.8629	1.37E-08	9.20E-09	4.00E-13	4.08E-08
11	O_2	ต่ำสุด	-0.07	-6.835	-6.7274	1.87E-07	1.26E-07	5.8549	1.4549	-7.5447	2.85E-08	1.91E-08	2.40E-15	2.49E-10
		สูงสุด		-5.235	-5.1274	7.46E-06	5.01E-06		2.2549	-6.7447	1.80E-07	1.21E-07	6.05E-13	6.27E-08
	CO_2	ต่ำสุด	-0.95	-7.275	-5.8148	1.53E-06	1.03E-06	7.5484	3.1484	-8.4543	3.51E-09	2.36E-09	2.42E-15	2.51E-10
		สูงสุด		-5.675	-4.2148	6.10E-05	4.09E-05		3.9484	-7.6543	2.22E-08	1.49E-08	6.10E-13	6.33E-08
25	O_2	ต่ำสุด	-	-	-6.18	6.61E-07	4.44E-07	5.8549	1.4549	-7.0917	8.1E-08	5.44E-08	2.41E-14	2.63E-09
		สูงสุด		-	-5.68	2.09E-06	1.40E-06		2.2549	-6.2917	5.11E-07	3.43E-07	4.81E-13	5.25E-08
	CO_2	ต่ำสุด	-	-	-5.3	5.01E-06	3.36E-06	7.5484	3.1484	-7.8702	1.35E-08	9.06E-09	3.05E-14	3.33E-09
		สูงสุด		-	-4.8	1.58E-05	1.06E-05		3.9484	-7.0702	8.51E-08	5.71E-08	6.06E-13	6.61E-08
29	O_2	ต่ำสุด	-0.07	-6.835	-6.7342	1.84E-07	1.24E-07	5.8549	1.4549	-6.9785	1.05E-07	7.05E-08	8.71E-15	9.63E-10
		สูงสุด		-5.235	-5.1342	7.34E-06	4.93E-06		2.2549	-6.1785	6.63E-07	4.45E-07	2.19E-12	2.43E-07
	CO_2	ต่ำสุด	-0.95	-7.275	-5.9066	1.24E-06	8.32E-07	7.5484	3.1484	-7.7243	1.89E-08	1.27E-08	1.06E-14	1.17E-09
		สูงสุด		-5.675	-4.3066	4.94E-05	3.32E-05		3.9484	-6.9243	1.19E-07	7.99E-08	2.65E-12	2.93E-07

ตารางที่ ซ.3 การคำนวณค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม PP ที่ใช้ในการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	ก๊าซ	ช่วงของค่า	S					D					P (cm^3(STP) cm cm^{-2} s^{-1}Pa^{-1})	P (cm^2 s^{-1})
			$10^{-3}\frac{\Delta H_s}{R}$	$\log S_0$	$\log S(T)$	$S(T)$	S_{sc}	$10^{-3}\frac{E_d}{R}$	$\log D_0$	$\log D(T)$	$D(T)$	D_{sc}		
5	O_2	ต่ำสุด	-0.07	-6.835	-6.7255	1.88E-07	1.01E-07	6.0065	1.6065	-7.7922	1.61E-08	8.63E-09	8.68E-16	8.84E-11
		สูงสุด		-5.235	-5.1255	7.49E-06	4.01E-06		2.4065	-6.9922	1.02E-07	5.45E-08	2.18E-13	2.22E-08
	CO_2	ต่ำสุด	-0.95	-7.275	-5.7885	1.63E-06	8.72E-07	7.7438	3.3438	-8.7733	1.69E-09	9.04E-10	7.88E-16	8.03E-11
		สูงสุด		-5.675	-4.1885	6.48E-05	3.47E-05		4.1438	-7.9733	1.06E-08	5.67E-09	1.97E-13	2.00E-08
11	O_2	ต่ำสุด	-0.07	-6.835	-6.7274	1.87E-07	1.00E-07	6.0065	1.6065	-7.6261	2.37E-08	1.27E-08	1.27E-15	1.31E-10
		สูงสุด		-5.235	-5.1274	7.46E-06	3.99E-06		2.4065	-6.8261	1.49E-07	7.97E-08	3.18E-13	3.30E-08
	CO_2	ต่ำสุด	-0.95	-7.275	-5.8148	1.53E-06	8.19E-07	7.7438	3.3438	-8.5592	2.76E-09	1.48E-09	1.21E-15	1.25E-10
		สูงสุด		-5.675	-4.2148	6.10E-05	3.26E-05		4.1438	-7.7592	1.74E-08	9.31E-09	3.04E-13	3.15E-08
25	O_2	ต่ำสุด	-	-	-6.18	6.61E-07	3.54E-07	6.0065	1.6065	-7.1614	6.90E-08	3.69E-08	1.30E-14	1.42E-09
		สูงสุด		-	-5.68	2.09E-06	1.12E-06		2.4065	-6.3614	4.35E-07	2.33E-07	2.61E-13	2.84E-08
	CO_2	ต่ำสุด	-	-	-5.3	5.01E-06	2.68E-06	7.7438	3.3438	-7.9601	1.1E-08	5.89E-09	1.58E-14	1.72E-09
		สูงสุด		-	-4.8	1.58E-05	8.45E-06		4.1438	-7.1601	6.92E-08	3.70E-08	3.13E-13	3.41E-08
29	O_2	ต่ำสุด	-0.07	-6.835	-6.7342	1.84E-07	9.84E-08	6.0065	1.6065	-7.0453	9.01E-08	4.82E-08	4.75E-15	5.25E-10
		สูงสุด		-5.235	-5.1342	7.34E-06	3.93E-06		2.4065	-6.2453	5.68E-07	3.04E-07	1.19E-12	1.32E-07
	CO_2	ต่ำสุด	-0.95	-7.275	-5.9066	1.24E-06	6.63E-07	7.7438	3.3438	-7.8104	1.55E-08	8.29E-09	5.50E-15	6.09E-10
		สูงสุด		-5.675	-4.3066	4.94E-05	2.64E-05		4.1438	-7.0104	9.76E-08	5.22E-08	1.38E-12	1.53E-07

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาว นภาวิณี วินิจฉัย

เกิด 9 พฤษภาคม พ.ศ. 2520

การศึกษา พ.ศ. 2541 : สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการบรรจุ จากคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2541 : เข้าศึกษาในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย