การพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรจากสารผสมระหว่างพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์

นายกันตพงศ์ สักลอ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Development of Modified Atmosphere Packaging
Film from Blend between Low Density Polyethylene and Thermoplastic Polyester Ela
stomer

Mr. Kantaphong Saklo

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

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 2018
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรจากสารผสมระหว่างพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์
โดย	นายกันตพงศ์ สักลอ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร.วรัญ แต้ไพสิฐพงษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ดร.วรัญ แต้ไพสิฐพงษ์)

.... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.กษิดิศ หนูทอง)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.จันจิรา จับศิลป์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กันตพงศ์ สักลอ : การพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรจากสารผสมระหว่างพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์. (Development of Modified Atmosphere Packaging Film from Blend between Low Density Polyethylene and Thermoplastic Polyester Elastomer) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ดร.วรัญ แต้ไพสิฐพงษ์

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร (Modified Atmosphere Packaging Film) โดยศึกษาถึงผลของปริมาณสารเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ (TPEE) ในสัดส่วน 0 - 50% โดยน้ำหนักที่ถูกผสมเข้าไปในพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และสภาวะการขึ้นรูปฟิล์ม ได้แก่ อัตราเร็วในการดึงฟิล์ม (Film Pulling Speed) ช่วง 200 - 240 rpm และอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์ม 15 – 50 องศาเซลเซียสต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านแก๊สและไอน้ำของฟิล์มที่ได้

ผลการทดลองพบว่าการเติม TPEE ลงใน LDPE ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สของ MAP Film มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะ TPEE มีความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สสูงกว่า LDPE นอกจากนี้การเพิ่มอัตราเร็วในการดึงฟิล์มส่งผลทำให้ช่องว่าง (Void) บริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคของ LDPE กับ TPEE กว้างขึ้น ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในทางกลับกัน การเพิ่มอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของฟิล์มเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สมีแนวโน้มลดลง ส่วนการทำนายเวลาที่แก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์เข้าสู่สภาวะคงตัวและปริมาณแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์โดยใช้โปรแกรม MATLAB พบว่า ภายใต้สภาวะที่ศึกษา แก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์เข้าสู่สภาวะคงตัวภายในเวลา 24 ชั่วโมง โดยที่ MAP Film ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนสูงกว่า ทำให้ปริมาณแก๊สออกซิเจนภายในถุงบรรจุภัณฑ์ที่สภาวะคงตัวมีค่าสูงกว่าและในทางกลับกัน MAP Film ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถุงบรรจุภัณฑ์ที่สภาวะคงตัวมีค่าน้อยกว่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อนิสิต	....
ปีการศึกษา	2561	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....

5870115121 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD: modified atmosphere packaging, low density polyethylene, thermoplastic polyester elastomer

Kantaphong Saklo : Development of Modified Atmosphere Packaging Film from Blend between Low Density Polyethylene and Thermoplastic Polyest er Elastomer. Advisor: Varun Taepaisitphongse, Ph.D.

This research was to develop a modified atmosphere packaging film (MAP film) by studying the effects of the amount of Thermoplastic Polyester Elastomer (TPEE) in range of 0 - 50 %wt that was blended into Low-density Polyethylene (LDPE) and the film casting conditions, such as the film pulling speed in range of 200 – 240 rpm and film cooling temperature in range of 15 – 50 °C on the water vapor and gas permeabilities of the resulting MAP films.

The experiments showed that increasing the TPEE content caused the water vapor and gas permeabilities of MAP film to increase because TPEE itself has higher water vapor and gas permeabilities than LDPE. In addition, the increase of film pulling speed resulted in increased water vapor and gases permeability of MAP film due to the larger void space between the interface of LDPE and TPEE. On the other hand, increasing the film cooling temperature resulted in higher percent crystallinity in the resulted films which, in turn, led to lower water vapor and gas permeabilities of MAP films. Calculation of the time to reach the steady state of the gases inside the packaging and their concentrations using MATLAB revealed that, under the case study of this work, the gases inside the packaging reached the steady state within 24 hours. At steady state, MAP films with higher oxygen permeability yielded a higher concentration of oxygen inside the packaging. Conversely, MAP films with higher carbon dioxide permeability produced a lower concentration of carbon dioxide inside the packaging at the steady state.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Field of Study: Chemical Engineering		Student's Signature ....
Academic Year: 2018		Advisor's Signature ....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้อย่างสมบูรณ์ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ดร. วรัญ แต้ไพสิฐพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำ ช่วยตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ศิริพร ดำรงศักดิ์กุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. กษิดิศ หนูทอง และ รองศาสตราจารย์ ดร. จันจิรา จับศิลป์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ นิสิตภาควิชาวิศวกรรมเคมี ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมพอลิเมอร์ ที่คอยให้คำปรึกษาและให้กำลังใจมาโดยตลอด โดยเฉพาะพี่นภพรรณ คุณานุสนธิ์ ขอขอบคุณพี่ที่คอยแนะนำการใช้เครื่องมือและสอนการใช้โปรแกรมหลายๆอย่างที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และคุณยายที่สนับสนุน ให้กำลังใจและความรักมาโดยตลอด

กันตพงศ์ สักลอ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ 1

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 บรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร (Modified Atmosphere Packaging) 4

2.2 สรีรวิทยาของผักและผลไม้สด 6

2.3 พอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) 7

2.4 เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ (Thermo Plastic Polyester Elastomer, TPEE) 8

2.5 กลไกการซึมผ่านของแก๊สผ่านพอลิเมอร์ 10

2.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์ 14

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 18

2.7.1 การเกิดรูบนพอลิเมอร์ 18

2.7.2 การใช้ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรห่อผักอองดีฟสดเพื่อยืดอายุหลังการเก็บเกี่ยว 19

2.7.3 อัตราการซึมผ่านไอน้ำที่มีผลต่อความสดของผักและผลไม้สด 22

2.7.4 สมการการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนและตัวแปรสำหรับคำนวนอัตราการหายใจของมะม่วงที่อุณหภูมิต่าง ๆ 24

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.7.5 การเกิดผลึกเนื่องจากแรงดึง (Strain Induced Crystallization) 26

บทที่ 3 วิธีการทดลอง 27

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 27

3.1.1 พอลิเอธิลีนชนิดความความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE)...... 27

3.1.2 เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Polyester Elastomer, TPEE) 28

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 28

3.3 วิธีการทดลอง 29

3.2.1 การผสมพอลิเมอร์ (Blending) 29

3.2.2 การขึ้นรูปฟิล์ม (Film Preparation) 31

3.2.3 การศึกษาความสามารถการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำผ่านฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร 34

3.2.3.1 ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำผ่านฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร (Water Vapor Transmission Rate) 34

3.2.3.2 ความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนผ่านฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร (Oxygen Transmission Rate) 34

3.2.3.3 ความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร (Carbon Dioxide Transmission Rate)...................... 35

3.2.4 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร....................... 36

3.2.5 การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร................................. 37

3.2.5.1 ความทนแรงดึง (Tensile Strength) 37

3.2.5.2 การต้านทานการฉีกขาด (Tear Resistance) 38

3.2.6 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร 39

3.2.7 การคำนวณโดยใช้แบบจำลองหาเวลาที่แก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์เข้าสู่สภาวะคงตัวและปริมาณแก๊สออกซิเจนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา 40

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 42
4.1 การศึกษาผลจากการเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ที่มีต่ออัตราการซึมผ่านไอน้ำและแก๊ส สมบัติเชิงความร้อน สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร 42
4.1.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร 42
4.1.2 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร 46
4.1.3 การศึกษาอัตราการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร 47
4.1.3.1 อัตราการซึมผ่านไอน้ำผ่านฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร (Water Vapor Transmission Rate) 48
4.1.3.2 อัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนผ่านฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร (Oxygen Transmission Rate) 49
4.1.3.3 อัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร (Carbon Dioxide Transmission Rate) 50
4.1.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร 53
4.1.4.1 ความทนแรงดึง (Tensile Strength) 53
4.1.4.2 ความต้านทานการฉีกขาด (Tear Resistance) 57
4.2 การศึกษาผลของอัตราเร็วในการดึงฟิล์ม (Film Pulling Speed) ที่มีต่ออัตราการซึมผ่านไอน้ำและแก๊ส สมบัติเชิงความร้อน สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร 59
4.2.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร 59
4.2.2 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร 62
4.2.3 การศึกษาอัตราการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร 63
4.2.3.1 อัตราเร็วในการดึงฟิล์มที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านไอน้ำ 63
4.2.3.2 อัตราเร็วในการดึงฟิล์มที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจน 64
4.2.3.3 อัตราเร็วในการดึงฟิล์มที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 66
4.2.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร 67

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2.4.1 ความทนแรงดึง (Tensile Strength) 67
4.2.4.2 การต้านทานการฉีกขาด (Tear Resistance) 72
4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์ม (Film Cooling Temperature) ที่มีต่ออัตราการซึมผ่านไอน้ำและแก๊ส สมบัติเชิงความร้อน สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร 74
4.3.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร 74
4.3.2 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร 77
4.3.3 การศึกษาอัตราการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร 78
4.3.3.1 อุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านไอน้ำ 78
4.3.3.2 อุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจน 79
4.3.3.3 อุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 80
4.3.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร 82
4.3.4.1 ความทนแรงดึง (Tensile Strength) 82
4.3.4.2 การต้านทานการฉีกขาด (Tear Resistance) 85
4.4 การทำนายด้วยแบบจำลองหาเวลาที่แก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์เข้าสู่สภาวะคงตัวและปริมาณแก๊สออกซิเจนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา 87
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 98
5.1 สรุปผลการทดลอง 98
5.2 ข้อเสนอแนะ 99
ภาคผนวก 100
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านไอน้ำและแก๊ส 100
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อน 107
ตอนที่ 1 การศึกษาปริมาณเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงความร้อน 107

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตอนที่ 2 การศึกษาอัตราเร็วในการดึงฟิล์ม (Film pulling speed) ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงความร้อน 108

ตอนที่ 3 การศึกษาอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์ม (Film cooling temperature) ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงความร้อน 110

ภาคผนวก ค. ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล 111

ค.1 ความทนแรงดึง (Tensile Strength) 112

ค.2 การต้านทานการฉีกขาด (Tear Resistance) 119

ภาคผนวก ง. การทำนายด้วยแบบจำลองหาปริมาณแก๊สออกซิเจนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและเวลาที่แก๊สในบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรเข้าสู่สภาวะคงตัว 122

ภาคผนวก จ. ภาพถ่ายฟิล์มบรรจุภัณฑ์ดัดแปร 140

บรรณานุกรม 146

ประวัติผู้เขียน 152

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ประเทศไทยสามารถส่งออกผลไม้ได้มากมายหลายชนิด เช่น ทุเรียน มะม่วง เงาะ มังคุด และสับปะรด ด้วยสภาพภูมิอากาศที่เหมาะสมแก่การเพาะปลูก ทำให้ผลไม้ไทยส่วนใหญ่มีคุณภาพดีและมีรสชาติอร่อย จึงเป็นที่ต้องการของชาวต่างชาติ เช่น ประเทศจีน เวียดนาม ฮ่องกง สหรัฐอเมริกา เป็นต้น [1] กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ได้นำเสนอผลสำรวจปี พ.ศ. 2557 พบว่ามะม่วงเป็นผลไม้ที่มีการเพาะปลูกมากที่สุดในประเทศไทย และสร้างรายได้ให้เกษตรกรสูงมาก โดยรายได้หลักจะมาจากการส่งออกมะม่วงน้ำดอกไม้และมะม่วงเขียวเสวย [2] แต่จากการปลูกมะม่วงที่มีจำนวนมากในประเทศไทยอาจจะทำให้เกิดมะม่วงล้นตลาด ทำให้ต้องชะลอการขายและอาจเกิดปัญหามะม่วงสุกมากเกินไปจนเน่าเสียได้เพราะเก็บมะม่วงไว้ในสภาวะหรือบรรจุภัณฑ์ที่ไม่เหมาะสม [3]

ปัจจุบันฟิล์มบรรจุภัณฑ์สำหรับห่อผักและผลไม้สดแบบทั่วไปตามท้องตลาด (Commercial Film Packaging) ส่วนใหญ่สามารถห่อเพื่อป้องกันผักและผลไม้สดจากสิ่งสกปรก สัตว์ หรือแมลงจากภายนอกได้ และทำให้หยิบจับได้สะดวก แต่ไม่สามารถยืดอายุหรือช่วยให้ผักและผลไม้คงความสดไว้ได้นาน เนื่องจากผักและผลไม้สดที่ถูกเก็บเกี่ยวจากต้นหรือแหล่งเพาะปลูกยังคงมีการหายใจ (Respiration) อยู่ตลอดเวลา ตามหลักสรีรวิทยาของพืชผักและผลไม้สดพบว่า ผักและผลไม้สดจะหายใจเอาแก๊สออกซิเจน (Oxygen, O_2) เข้าไปและคายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา (Carbon dioxide, CO_2) ทำให้ผักและผลไม้สดเสื่อมสภาพ [4] ดังนั้น เพื่อลดอัตราการหายใจซึ่งจะทำให้ผักและผลไม้มีอายุหลังการเก็บเกี่ยวมากขึ้น บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ห่อผักผลไม้สดจึงควรทำหน้าที่เป็นตัวปรับ (Regulator) ให้เกิดการแลกเปลี่ยนแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างแก๊สภายในบรรจุภัณฑ์กับอากาศภายนอก เพื่อให้แก๊สออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์มีปริมาณน้อยและมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น เพื่อลดอัตราการหายใจของผักและผลไม้สด [5] พบว่าฟิล์มบรรจุภัณฑ์ตามท้องตลาดจะยอมให้แก๊สและไอน้ำซึมผ่านได้น้อย ทำให้แก๊สออกซิเจนภายในถุงบรรจุภัณฑ์หมดลงและทำให้ภายในถุงบรรจุภัณฑ์เต็มไปด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งส่งผลเสียต่อผักและผลไม้สดเพราะจะเกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Respiration) ทำให้รสชาติ สี กลิ่นของผักและผลไม้สดเปลี่ยนไป [6]

การเก็บผักและผลไม้สดไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องจะเป็นวิธีที่ใช้กันมากเพื่อรักษาคุณภาพและชะลอการสุกของผลไม้ [7, 8] แต่พบว่าผักและผลไม้หลายชนิดไม่ทนทานต่ออุณหภูมิต่ำ จึงมีการคิดค้นวิธีที่จะช่วยลดอัตราการหายใจของผักผลไม้สดโดยอาศัยสภาวะบรรยากาศภายในถุงบรรจุภัณฑ์เป็นตัวช่วยลดอัตราการหายใจ โดยปรับองค์ประกอบของแก๊สภายในถุงบรรจุภัณฑ์ให้มีปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในช่วงที่เหมาะสมคือร้อยละ 2-10 % โดยปริมาตร [9] ซึ่งบรรจุภัณฑ์ที่มีการปรับองค์ประกอบของแก๊สภายในบรรจุภัณฑ์เป็นที่รู้จักกันในชื่อบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร (Modified Atmosphere Packaging, MAP) [10]

การทำให้เกิดบรรยากาศดัดแปรในถุงบรรจุภัณฑ์สามารถทำได้โดยใช้ฟิล์มบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ยอมให้แก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แพร่ผ่านได้ในปริมาณที่เหมาะสม โดยผักและผลไม้สดที่ห่อไว้ในถุงบรรจุภัณฑ์จะใช้แก๊สออกซิเจนในถุงเพื่อการหายใจส่งผลทำให้แก๊สออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์ลดต่ำลง ซึ่งการเลือกฟิล์มที่ยอมให้แก๊สออกซิเจนซึมผ่านได้ในปริมาณที่ไม่มากเกินไป จะช่วยรักษาปริมาณออกซิเจนในถุงบรรจุภัณฑ์ให้มีความเข้มข้นต่ำ ส่งผลให้ผักและผลไม้สดมีอัตราการหายใจลดลงตามความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่เหลืออยู่ [9] ซึ่งบรรจุภัณฑ์ประเภทนี้ถูกเรียกว่า บรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรแบบพาสซีพ (Passive MAP) หรือ Physiological Package [11]

พอลิเอธิลีชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene) หรือ LDPE เป็นพลาสติกที่มีราคาถูก ขึ้นรูปได้ง่ายและค่อนข้างเหนียว ทำให้ในปัจจุบันพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำส่วนใหญ่ถูกใช้ในการผลิตเป็นฟิล์มหรือถุงสำหรับห่ออาหาร [12] พอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีจุดด้อย คือ มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สค่อนข้างน้อย [13] จึงไม่เหมาะที่จะนำไปผลิตเป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร เพราะการเก็บผักและผลไม้สดไว้ในบรรจุภัณฑ์ที่ให้แก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านได้น้อย อาจส่งผลให้แก๊สออกซิเจนในถุงหมดลงและเกิดการสะสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุง นำไปสู่การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน ทำให้ผักและผลไม้สดเน่าเสียไวขึ้น [6]

เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Polyester Elastomer) หรือ TPEE เป็น Block-Copolymer ระหว่าง Ester และ Ether มีจุดเด่นด้านความยืดหยุ่นสูงเนื่องจากมี Polyether เป็นส่วนประกอบ [14] นอกจากนี้ Polyether มี Chain Mobility ค่อนข้างสูงซึ่งช่วยให้ไอน้ำและแก๊สสามารถซึมผ่านไปได้ง่าย [15, 16] เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์สามารถนำไปผสมกับพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพื่อเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรแบบพาสซีพ (Passive MAP Film) จากสารผสมระหว่างพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมกับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เนื่องจากเล็งเห็นว่าพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำสามารถนำมาปรับปรุงให้มีค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้ดีขึ้นได้จากการเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ซึ่งเป็นอีลาสโตเมอร์ที่มีความเหนียวและมีค่าการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยปัจจัยที่ต้องการศึกษาคือ ผลของปริมาณของเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ อัตราเร็วของการดึงฟิล์ม และอุณหภูมิของลูกกลิ้งหล่อเย็น ที่มีผลต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของแก๊ส สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร และศึกษาผลกระทบของค่าการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนไปของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรสูตรต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองต่อค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์ที่สภาวะคงตัว และเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวโดยใช้การทำนายด้วยแบบจำลองจากการคำนวโปรแกรมแมทแลป MATLAB)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร (Modified Atmosphere Packaging)

รูปที่ 2.1 บรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร [17]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรได้ถือกำเนิดขึ้นในช่วงศตวรรษที่ 19 โดยมีจุดประสงค์การใช้งานเพื่อถนอมอาหาร ช่วยให้เก็บอาหารไว้ได้นานและคงคุณภาพและความสดไว้ [10] บรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรถูกผลิตเพื่อใช้กับอาหารหลายประเภท เช่น กาแฟ เนื้อสด ผักและผลไม้สด เป็นต้น บรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรคือการเปลี่ยนองค์ประกอบของแก๊สภายในบรรจุภัณฑ์ให้มีองค์ประกอบเหมาะสมตามสัดส่วนที่ผู้ออกแบบต้องการ โดยที่องค์ประกอบของแก๊สดังกล่าวช่วยทำให้อัตราการหายใจและกระบวนการเมแทบอลิซึม (Metabolism) ของผักผลไม้สดลดลง เช่น สตรอว์เบอร์รี (Strawberry) เหมาะกับบรรยากาศที่มีแก๊สออกซิเจนร้อยละ 3-10 % โดยปริมาตร และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 15-20 % โดยปริมาตร ส่วนเชอร์รี (Cherry) เหมาะกับบรรยากาศที่มี

แก๊สออกซิเจนร้อยละ 3-10 % โดยปริมาตร และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 10-12 % โดยปริมาตร เป็นต้น [11]

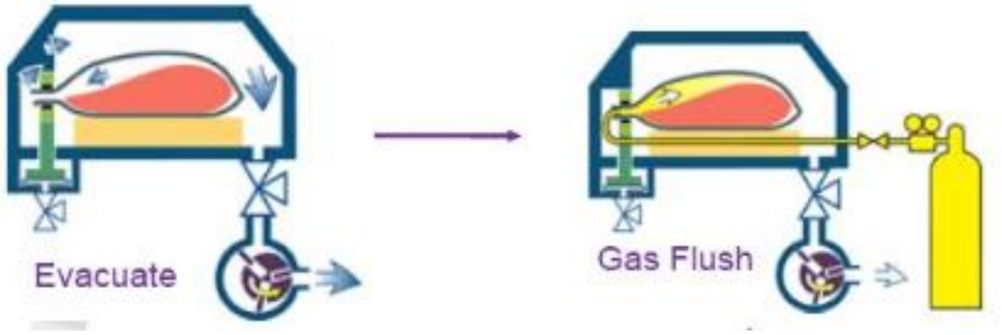
2.1.1 ชนิดของบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด

โดยทั่วไปแล้วจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ บรรจุภัณฑ์ดัดแปรบรรยากาศแบบแพทซีฟ (Passive MAP) และบรรจุภัณฑ์ดัดแปรบรรยากาศแบบแอคทีฟ (Active MAP) [11]

บรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรแบบพาสซีพ คือบรรจุภัณฑ์ที่สร้างบรรยากาศดัดแปรโดยยอมให้แก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์สามารถแลกเปลี่ยนกับสิ่งแวดล้อมได้ โดยต้องรักษาปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในช่วงที่เหมาะสมคือร้อยละ 2-10 % โดยปริมาตร [9]

เนื่องจากผักและผลไม้สดจะใช้ออกซิเจนในถุงบรรจุภัณฑ์ในกระบวนการหายใจ ส่งผลให้แก๊สออกซิเจนในถุงบรรจุภัณฑ์ค่อย ๆ ลดลง ดังนั้นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ต้องยอมให้แก๊สออกซิเจนจากสิ่งแวดล้อมซึมผ่านได้แต่ไม่มากจนเกินไป เพื่อรักษาความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์อยู่ในช่วงที่เหมาะสมแล้วแต่ชนิดของผักและผลไม้สด [9]

การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของแก๊สภายในบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรแบบแอคทีฟทำโดยเอาแก๊สในบรรจุภัณฑ์ออกมาก่อนแล้วค่อยพ่นแก๊สไนโตรเจน แก๊สออกซิเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เข้าไปในบรรจุภัณฑ์ตามสัดส่วนที่เหมาะสม ซึ่งขั้นตอนทำให้เกิดบรรยากาศดัดแปรแสดงดังรูปที่ 2.2 ปกติแล้วฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้ควรมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำเพื่อป้องกันไม่ให้แก๊สภายในบรรจุภัณฑ์แพร่ออกไปภายนอก และไม่ให้แก๊สจากภายนอกแพร่เข้ามาภายในบรรจุภัณฑ์ได้



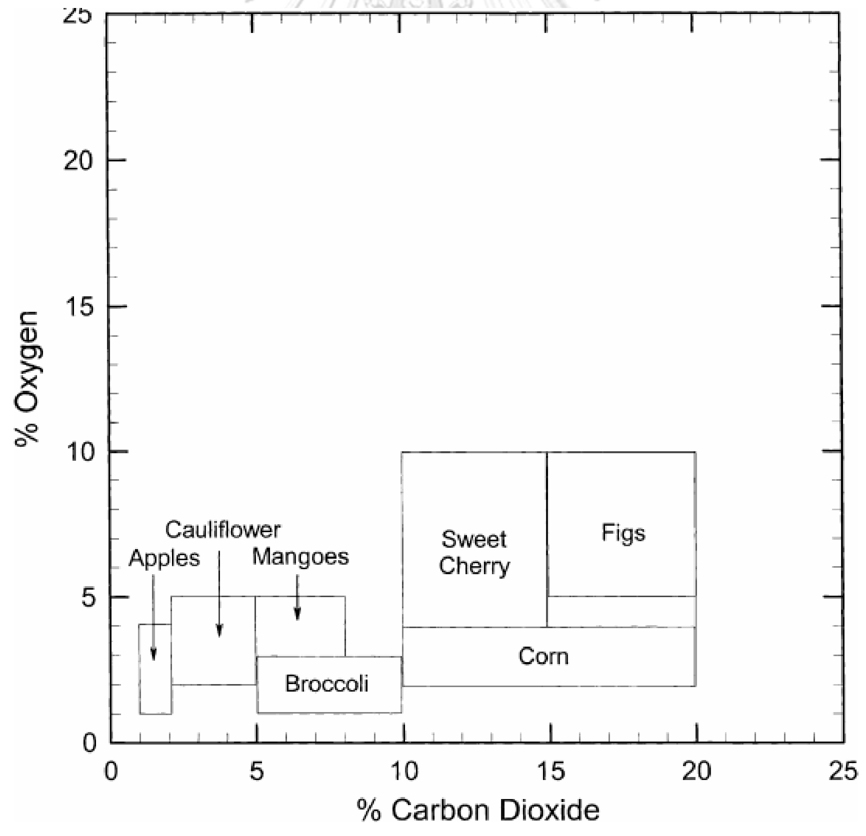
รูปที่ 2.2 บรรจุภัณฑ์บรรยากาศแบบ Active [18]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2 สรีรวิทยาของผักและผลไม้สด

หลังจากกระบวนการเก็บเกี่ยว ผักและผลไม้สดจะมีการหายใจตลอดเวลา ซึ่งการวางผักและผลไม้สดไว้ในบรรยากาศปกติ (Ambient) จะทำให้ผักและผลไม้สดสูญเสียความชุ่มชื้นไปพร้อม ๆ กับกระบวนการหายใจ ในขณะเดียวกันผักและผลไม้สดก็จะค่อย ๆ สุกแล้วเน่าเสียในเวลาต่อมา

การยืดอายุหลังการเก็บเกี่ยวของผักและผลไม้สดสามารถทำได้โดยใช้หลักการลดอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดให้ต่ำลง ซึ่งจำเป็นจะต้องเก็บผักและผลไม้สดไว้ในบรรยากาศที่มีปริมาณแก๊สออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ต่ำและมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมค่าหนึ่ง เพราะเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์มีค่าน้อยจะส่งผลให้อัตราการหายใจ (Respiration Rate) ของผักและผลไม้สดลงลด [19] ซึ่งนักวิจัยหลายกลุ่มได้ศึกษาปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมเพื่อช่วยลดอัตราการหายใจของผักผลไม้สดดังแสดงในรูป 2.3

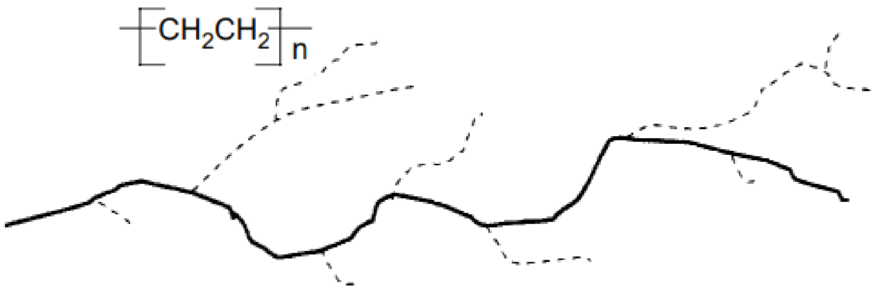


รูปที่ 2.3 ปริมาณ O_2 และ CO_2 ที่เหมาะสมเพื่อยืดอายุผักและผลไม้สดบางชนิด [19]

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรแบบพาสซีพที่ผลิตจากฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีอัตราการซึมผ่านของแก๊สที่เหมาะสม สามารถลดอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดได้ เพราะอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดมีค่าแปรผันตามปริมาณออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์ [20] โดยในช่วงแรกผักและผลไม้สดจะหายใจโดยใช้แก๊สออกซิเจนที่มีอยู่ภายในถุงบรรจุภัณฑ์ และคายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนภายในถุงบรรจุภัณฑ์จะลดลงอย่างต่อเนื่อง ส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์ก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้ผักและผลไม้มีอัตราการหายใจลดลง [19, 21]

การเลือกฟิล์มเพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรต้องคำนึงถึงอัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide Transmission Rate or CO2TR) ด้วย เพราะถ้าฟิล์มอัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำเกินไป จะทำให้มีการสะสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์มากเกินไป ทำให้ผักและผลไม้สดเปลี่ยนกลไกการหายใจแบบใช้อากาศ (Aerobic Respiration) เป็นการหายใจแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Respiration) ซึ่งทำให้คุณภาพของผักและผลไม้สดลดลงหรืออาจนำไปสู่การเน่าเสียได้เช่นกัน [22, 23]

2.3 พอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE)



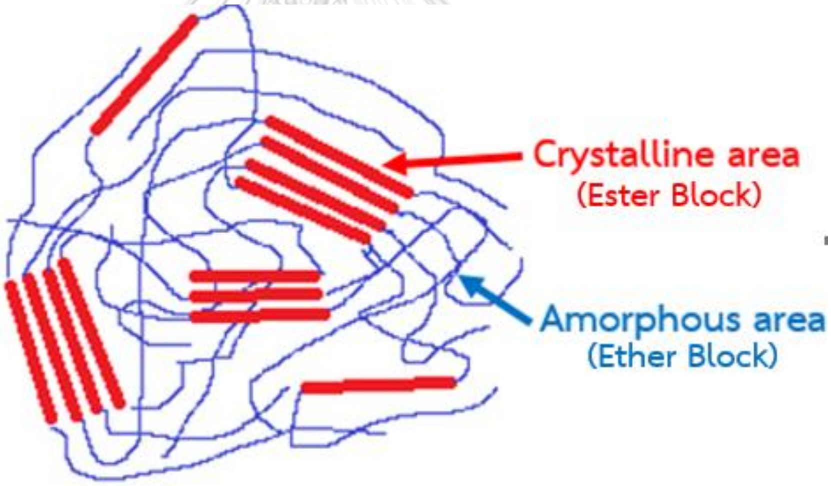
รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ [12]

พอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานหลากหลาย สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นถุงพลาสติก ฟิล์มห่ออาหาร ท่อน้ำ ขวด หรือภาชนะรูปแบบต่าง ๆ เพราะ พอลิเอธิลีนชนิดความ

หนาแน่นต่ำมีราคาถูก อุณหภูมิการขึ้นรูปไม่สูงมาก มีความยืดหยุ่นและมีน้ำหนักเบา มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.916 g/cm^3 ถึง 0.935 g/cm^3 [24]

เมื่อนำพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มพบว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สมีค่าต่ำมากเช่น ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนมีค่าเพียง 4015.7 – 7401.6 cc mil/m^2 day atm [25] ซึ่งถือว่าน้อยเกินไป หากนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ห่อผักและผลไม้สดจะทำให้ออกซิเจนสำหรับการหายใจของผักและผลไม้สดหมดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะนำไปสู่กระบวนการหายใจแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Respiration) ซึ่งจะทำให้เกิดการเน่าเสียได้ [26]

2.4 เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ (Thermo Plastic Polyester Elastomer, TPEE)



รูปที่ 2.5 รูปแบบการจัดเรียงสายโซ่ของเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ [14]

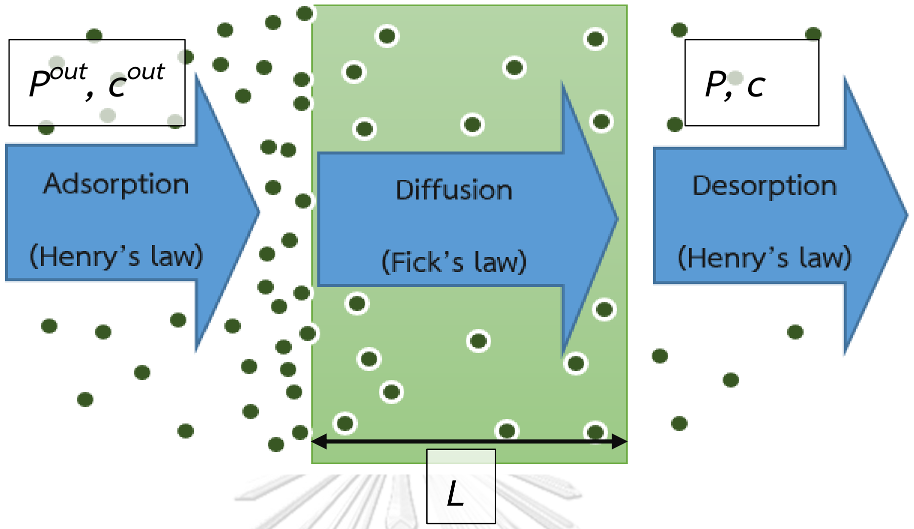
เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์เป็น Block-Copolymer ระหว่าง Ester และ Ether โดย Ester Block ประกอบด้วย Polybutylene Terephthalate ที่มีความแข็งแรงเพราะสามารถเกิดผลึกได้ ส่วน Ether Block ประกอบด้วย Polyether ที่มีสายโซ่ยาวและมีความยืดหยุ่นสูงและมีความสามารถให้ไอน้ำและแก๊สซึมผ่านไปได้ง่าย เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์เป็น Block-Copolymer ที่ประกอบด้วยสายโซ่ต่างกันสองแบบ ทำให้โครงสร้างภายในมีลักษณะร่วมกันของส่วนที่สามารถเกิดผลึกได้และส่วนที่ไม่เกิดผลึก โดย Ester Block สามารถเกิดผลึกได้ (Crystalline Phase) ส่วน Ether Block จะเป็นส่วนที่ไม่เกิดผลึกหรือเป็นอสัณฐาน

(Amorphous Area) ดังแสดงในรูป 2.5 การมีโครงสร้างแบบนี้ทำให้เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์-อิลาสโตเมอร์มีความยืดหยุ่นสูงซึ่งเป็นผลมาจาก Ether Block อีกทั้งมีสมบัติเชิงกลที่ดีจาก Ester Block ที่เรียงตัวกันเป็นผลึก [14]

เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์มีหลายเกรดให้เลือกใช้งาน โดยแต่ละเกรดจะแตกต่างกันไปขึ้นกับสัดส่วนของ Ether ต่อ Ester Block ในงานวิจัยนี้ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ General Purpose Grade ซึ่งจะมี Ether Block มากกว่า Ester Block สำหรับข้อดีของเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ General Purpose Grade คือมีความยืดหยุ่นสูงมาก เมื่อถูกดึงยืดแล้วสามารถคืนรูปกลับมาได้คล้ายกับยาง จึงสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นสารเคลือบสายไฟ ท่อ หรือฟิล์มได้ ข้อดีที่สำคัญมากอีกอย่างหนึ่งของเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ General Purpose Grade คือ การมี Ether Block ภายในโครงสร้างเป็นจำนวนมากจะช่วยทำให้ฟิล์มมี Free Volume มาก โดยโครงสร้างลักษณะนี้จะมี Chain Mobility ค่อนข้างสูง ซึ่งจะทำให้แก๊สและไอ-น้ำซึมผ่านไปได้ง่าย [15, 16]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.5 กลไกการซึมผ่านของแก๊สผ่านพอลิเมอร์



รูปที่ 2.6 กลไกการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สผ่านพอลิเมอร์ [7]

กลไกการซึมผ่านของแก๊สผ่านพอลิเมอร์ มี 3 ขั้นตอนคือ การดูดซับ (Adsorption) ของแก๊สบนผิวพอลิเมอร์ การแพร่ (Diffusion) ของแก๊สผ่านเนื้อพอลิเมอร์ และการคายซับ (Desorption) ของแก๊สออกจากผิวพอลิเมอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยแก๊สจะซึมผ่านไปได้มากหรือน้อยนั้นขึ้นกับสมบัติที่เรียกว่า สมบัติต้านทานการซึมผ่านแก๊ส (Gas Barrier Properties) ซึ่งสมบัติต้านทานการซึมผ่านแก๊สของพอลิเมอร์ขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ความเป็นผลึกของโครงสร้าง (Degree of Crystallinity) ปริมาณโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous Phase) ความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล (Chain mobility) เป็นต้น นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับหมู่ฟังก์ชันในสายโซ่ (Functional Group of Polymer) อีกด้วย [27]

โดยทั่วไปไอน้ำและแก๊สสามารถแพร่ผ่านบริเวณที่สายโซ่มีโครงร่างแบบอสัณฐานได้ง่ายกว่าบริเวณที่สายโซ่โมเลกุลจัดเรียงตัวโครงร่างผลึก เพราะที่สภาวะอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว สายโซ่โมเลกุลบริเวณโครงร่างผลึกจะจัดเรียงตัวกันแน่น ส่งผลให้ไอน้ำและแก๊สไม่สามารถทะลุผ่านบริเวณที่มีโครงร่างผลึกได้ [28] พอลิเมอร์ที่ความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลสูง เช่น Polyether จะมีค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สสูง [15, 16, 28] เพราะในขณะที่โมเลกุลของไอน้ำและแก๊สเคลื่อนที่อยู่ในพอลิเมอร์ สายโซ่โมเลกุลต้องขยับเล็กน้อยเพื่อให้โมเลกุลของไอน้ำและแก๊สแทรกผ่านไปได้ [28]

จากรูปที่ 2.6 สามารถเขียนสมการฟลักซ์การแพร่ (Permeate Flux) จากกฎการแพร่ของฟิก จะได้สมการที่ (2.1) ซึ่งเป็นการแพร่ในหนึ่งทิศทาง (One Dimension) [7]

$$J_i = -D_i \frac{\Delta c_i}{\Delta x} \tag{2.1}$$

เมื่อ J_i = Diffusion flux (mol m^{-2} s^{-1})

D_i = Diffusion Coefficient หรือ Diffusivity (m^2 s^{-1})

Δc_i = Concentration Difference (mol m^{-3})

Δx = ระยะทางที่แก๊สเคลื่อนที่ (m)

สำหรับระบบแก๊สที่แพร่ผ่านฟิล์มที่ความดันต่ำ ๆ สามารถใช้กฎของเฮนรี (Henry's law) เปลี่ยนความเข้มข้นให้กลายเป็นความดันไอ ด้วยสมการ $c = s\,p$ [29]

เมื่อ s = ความสามารถในการละลาย (Solubility) (mol m^{-3} atm^{-1})

p = ความดันย่อย (Partial pressure) (atm)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$J_i = D_i \frac{(sp^{out} - sp)}{L} \tag{2.2}$$

$$J_i = D_i\, s \frac{(p^{out} - p)}{L} \tag{2.3}$$

$$J_i = P_i \frac{(p^{out} - p)}{L} \tag{2.4}$$

เมื่อ	P_i	=	$D_i\, s$
	P_i	=	ค่าความสามารถในการซึมผ่านของแก๊ส (Gas Permeability) (mol s^{-1} m^{-2} atm^{-1}) (จาก Ideal gas law สามารถเปลี่ยนหน่วยเป็น (cc mil hr^{-1} m^{-2} atm^{-1}) โดยคูณด้วย 7.725)
	p^{out}	=	ความดันย่อยแก๊สนอกถุงบรรจุภัณฑ์ (atm)
	p	=	ความดันย่อยแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์ (atm)

เนื่องจากแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ศึกษามีความดันต่ำ จึงสมมุติให้แก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบประพฤติตัวแบบแก๊สในอุดมคติ สำหรับแก๊สในอุดมคติที่อุณหภูมิและความดันรวมคงที่จะพบว่า $p_i = y_i P_T$ เมื่อแทนสมการนี้ลงในสมการ (2.4) จะได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$J_{O2} = P_{O2} P_T \frac{(y_{O2}^{out} - y_{O2})}{L} \tag{2.5}$$

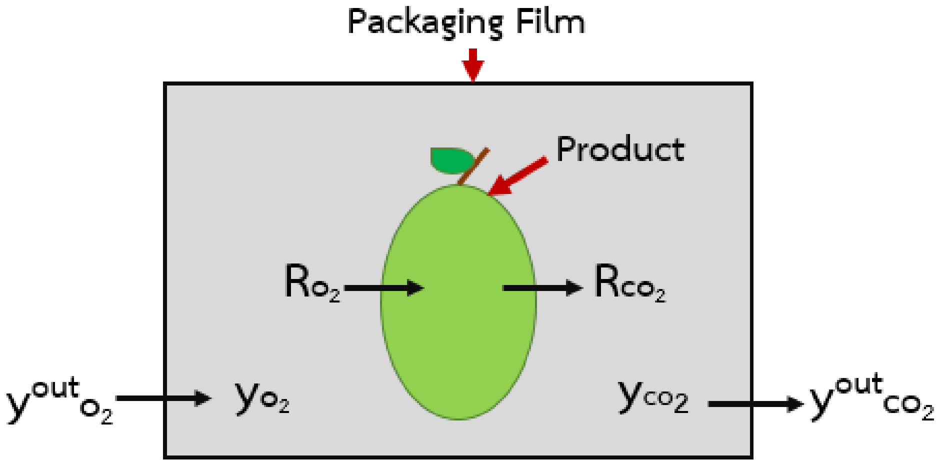
$$J_{CO2} = P_{CO2} P_T \frac{(y_{CO2}^{out} - y_{CO2})}{L} \tag{2.6}$$

เมื่อ	P_T	=	ความดันรวม = 1 atm
	y_i	=	molar fraction ของแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์ (-)
	y_i^{out}	=	molar fraction ของแก๊สนอกถุงบรรจุภัณฑ์ (-)

ตัวแปรสำคัญในสมการที่ (2.5) และ (2.6) คือ ความสามารถในการซึมผ่านของแก๊ส (Gas Permeability) หรือ P_i โดยความสามารถในการซึมผ่านแก๊สของพอลิเมอร์แต่ละชนิดจะแตกต่างกันไป การออกแบบบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรจะต้องทราบค่าความสามารถในการซึมผ่านแก๊สออกซิเจน (Oxygen Permeability) หรือ P_{O2} และค่าความสามารถในการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide Permeability) หรือ P_{CO2} ของฟิล์มเพื่อจะได้นำค่า P_{O2} และ P_{CO2} ไปใส่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถุงบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร ณ เวลาต่าง ๆ ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์



รูปที่ 2.7 การแลกเปลี่ยนแก๊สของบรรจุภัณฑ์ดัดแปรที่บรรจุผักผลไม้สด [5]

พิจารณารูปที่ 2.7 ระบบคือปริมาตรแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์ ณ เวลาเริ่มต้น ปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์เท่ากับปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสิ่งแวดล้อม (21 % แก๊สออกซิเจนและ 0.03% แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์) เมื่อเวลาผ่านไปผักและผลไม้สดจะใช้แก๊สออกซิเจนในถุงเพื่อการหายใจ (R_{O2}) และคายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา (R_{CO2}) [30] ส่งผลให้เกิดผลต่างความเข้มข้นระหว่างแก๊สในถุงกับสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้แก๊สออกซิเจนจากสิ่งแวดล้อมจะซึมผ่านเข้ามาในถุงบรรจุภัณฑ์เพราะในถุงบรรจุภัณฑ์มีปริมาณออกซิเจนน้อยกว่าสิ่งแวดล้อม ส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผักและผลไม้สดคายออกมาสะสมอยู่ในถุงก็จะซึมผ่านออกจากถุงไปยังสิ่งแวดล้อม [5]

จากรูปที่ 2.7 เมื่อทำสมดุลมวลโดยใช้สมมุติฐานว่าระบบมีความดันรวมคงที่และอุณหภูมิคงที่เพราะค่าความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สและอัตราการหายใจเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ [5] จะได้สมการสมดุลมวล (2.7)

$$\begin{bmatrix} \textit{Accumulation rate} \\ \textit{of gas in the} \\ \textit{packaging} \\ \textit{head space} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Transfer rate} \\ \textit{of gas through} \\ \textit{the packaging} \\ \textit{system} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Generation rate} \\ \textit{of gas from} \\ \textit{the produce} \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

$$\frac{d(V_{O2})}{dt} = A\,J_{O2} - R_{O2}M \tag{2.8}$$

$$\frac{d(V_{CO2})}{dt} = A\,J_{CO2} + R_{O2}M \tag{2.9}$$

เมื่อ V_{O2} = แก๊สออกซิเจนในถุงบรรจุภัณฑ์ (cc)

V_{CO2} = แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์ (cc)

R_{O2} = อัตราการใช้แก๊สออกซิเจนของผักและผลไม้สด (cc hr^{-1} kg^{-1})

R_{O2} = อัตราการสร้างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของผักและผลไม้สด (cc hr^{-1} kg^{-1})

M = น้ำหนักของผักและผลไม้สดที่บรรจุในถุง (kg)

เมื่อแทนสมการ (2.5) และ (2.6) ลงในสมการ (2.8) และ (2.9) จะได้

$$\frac{d(V_{O2})}{dt} = \frac{P_{O2}P_TA}{L}(y_{O2}^{out} - y_{O2}) - R_{O2}M \tag{2.10}$$

$$\frac{d(V_{CO2})}{dt} = \frac{P_{CO2}P_TA}{L}(y_{CO2}^{out} - y_{CO2}) + R_{CO2}M \tag{2.11}$$

เนื่องจากแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ศึกษามีความดันต่ำ จึงสมมุตให้แก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบประพฤติตัวแบบแก๊สในอุดมคติ สำหรับแก๊สในอุดมคติที่อุณหภูมิและความดันรวมคงที่จะพบว่า $V_i = y_iV_f$ แทนสมการนี้ลงในสมการที่ (2.10) และ (2.11) จะได้

$$V_f \frac{\mathrm{d}(y_{O2})}{\mathrm{d}t} = \frac{P_{O2}P_T A}{L}(y_{O2}^{out} - y_{O2}) - R_{O2}M \qquad (2.12)$$

$$V_f \frac{\mathrm{d}(y_{CO2})}{\mathrm{d}t} = \frac{P_{CO2}P_T A}{L}(y_{CO2}^{out} - y_{CO2}) + R_{CO2}M \qquad (2.13)$$

เมื่อ V_f = ปริมาตรว่างภายในบรรจุภัณฑ์ (cc)

การแก้สมการ (2.12) และ (2.13) จำเป็นต้องแทนพจน์ R_{O2} และ R_{CO2} ก่อน โดยนิยมแทน R_{O2} และ R_{CO2} ด้วยสมการอธิบายอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทนที่มีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ (Michaelis Menten Uncompetitive Inhibition) [31, 32] ดังแสดงตามสมการ (2.14) และ (2.15) ตามลำดับ

$$R_{O2} = \frac{V_{m,O2}\, y_{O2}}{K_{m,O2} + y_{O2}\,[1 + \frac{y_{CO2}}{K_{i,O2}}]} \qquad (2.14)$$

$$R_{CO2} = \frac{V_{m,CO2}\, y_{O2}}{K_{m,CO2} + y_{O2}\,[1 + \frac{y_{CO2}}{K_{i,CO2}}]} \qquad (2.15)$$

โดยที่ $V_{m,O2}$ = Maximum respiration rate for O_2 consumption (ml kg^{-1} h^{-1})

$V_{m,CO2}$ = Maximum respiration rate for CO_2 evolution (ml kg^{-1} h^{-1})

$K_{m,O2}$ = Michaelis-Menten constant for O_2 consumption (%O_2)

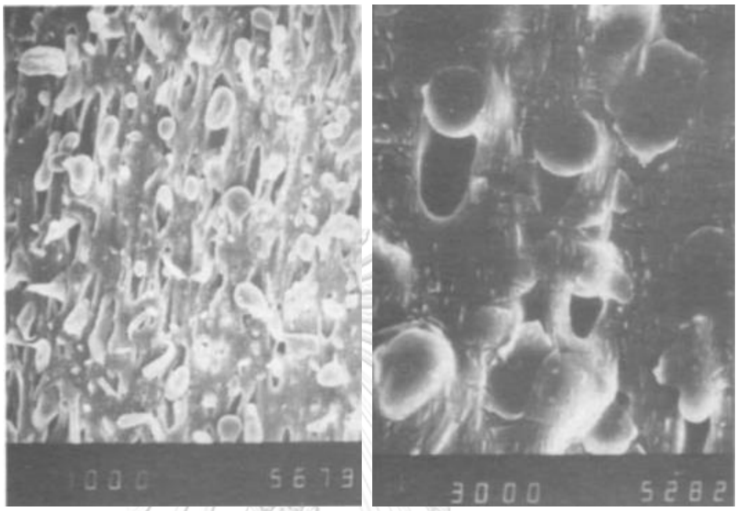
$K_{m,CO2}$	=	Michaelis-Menten constant for CO_2 evolution ($\%O_2$)
$K_{i,O2}$	=	Inhibition constant for O_2 consumption ($\%CO_2$)
$K_{i,CO2}$	=	Inhibition constant for CO_2 evolution ($\%CO_2$)

สมการอธิบายอัตราการหายใจของไมเคิลลิสเมนเทน (Michaelis Menten) อาศัยหลักการพื้นฐานที่ว่ากระบวนการหายใจของพืชเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของสารอาหาร เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน ซึ่งกระบวนการหายใจของพืชสามารถเกิดในสภาวะที่มีออกซิเจน เรียกว่า แอโรบิกเรสพิเรชั่น (Aerobic Respiration) และสภาพที่ปราศจากออกซิเจน เรียกว่า แอนแอโรบิกเรสพิเรชั่น (Anaerobic Respiration) [33] ตามหลักสรีรวิทยาของพืชพบว่ากลไกการออกซิเดชั่นน้ำตาลของพืชจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอน 1. ไกลโคไลซิส (Glycolysis) 2. วัฏจักรเครปส์ (Krebs's cycle) 3. ระบบถ่ายทอดอิเล็กตรอน (Electron Transport System) [34] ซึ่งทั้ง 3 กลไกนี้มีเอนไซม์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเสมอ เช่น เอนไซม์เฮกโซไคเนส (Hexokynase) ในขั้นตอนไกลโคไลซิส เอนไซม์ฟิวมาเรส (Fumarase) และเอนไซม์ไซโตโครมรีดักเตส (Cytochrome Reductase)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 การเกิดรูบนพอลิเมอร์

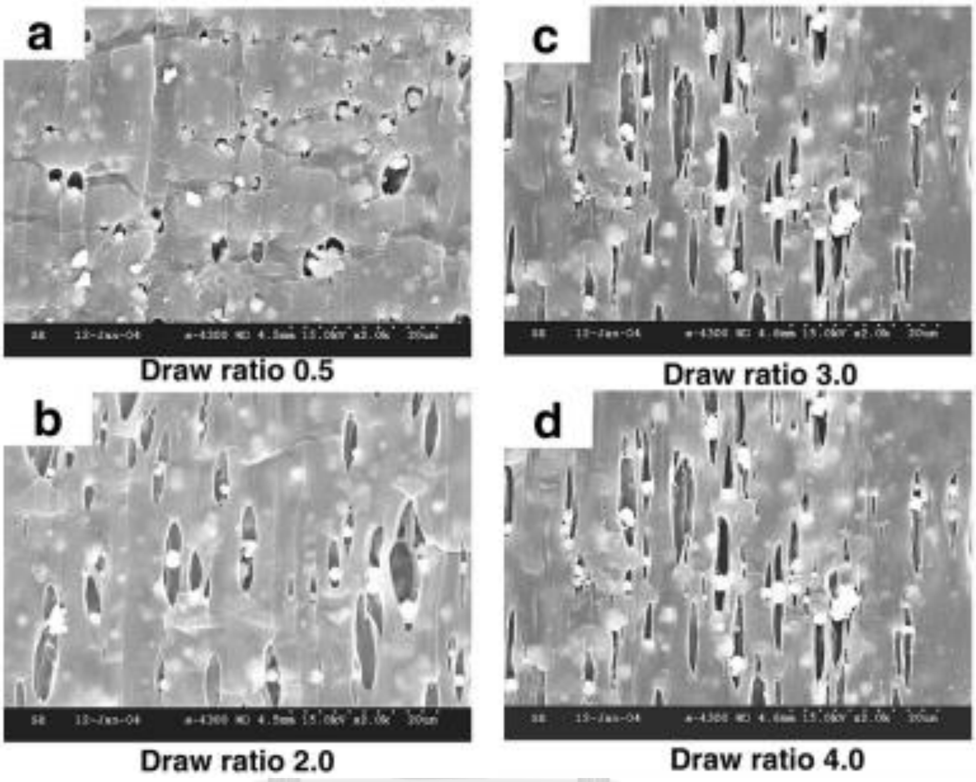


รูปที่ 2.8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสารผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่กำลังขยาย 1000 และ 3000 เท่าตามลำดับ [35]

การทำให้ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรมีรู เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ช่วยเพิ่มค่าการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สให้มากขึ้นได้ วิธีหนึ่งที่น่าสนใจคือ การใช้แรงดึงทำให้เกิดรอยแยกระหว่างเฟสหรือทำให้ชิ้นงานฉีกขาดเป็นรูขนาดเล็ก ซึ่งวิธีนี้ต้องอาศัยความเข้ากันไม่ได้ (Immiscible) ของพอลิเมอร์ เพราะพอลิเมอร์สองชนิดที่เข้ากันไม่ได้จะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟส (Interfacial Interaction) อ่อนแอ หากได้รับแรงดึงจะทำให้รอยต่อระหว่างเฟสเกิดรูขนาดเล็กขึ้นได้ [35, 36]

Biswas และคณ [37]ได้พัฒนา Porous Composite Film จากสารผสมระหว่าง Poly(propylene-co-ethylene) ผสม Zeolite โดยการผสม (Compounding) สารทั้งสองทำใน Twin-screw Extruder และการขึ้นรูปฟิล์มทำในเครื่อง Slit-die Extruder ขณะขึ้นรูปฟิล์มมีการปรับอัตราการดึง (Draw Ratio) ให้มีหลายระดับ จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รูปที่ 2.9 พบว่ามีช่องว่าง (Air Hole) เกิดขึ้น เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสของสารผสมทั้งสองค่อนข้างอ่อนแอ (Weak Adhesion) ทำให้รอยต่อระหว่างเฟสขยายตัวกลายเป็นช่องว่าง

จากงานวิจัยนี้ทำให้เห็นได้ว่า เมื่อ Draw Ratio เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดช่องว่างในฟิล์มมากขึ้น เพราะ Draw Ratio ที่มากขึ้นเปรียบเสมือนการดึงฟิล์มแรงขึ้น ซึ่งแรงดึงที่มากขึ้นส่งผลให้รอยต่อระหว่างเฟสที่อ่อนแอขยายใหญ่ขึ้น



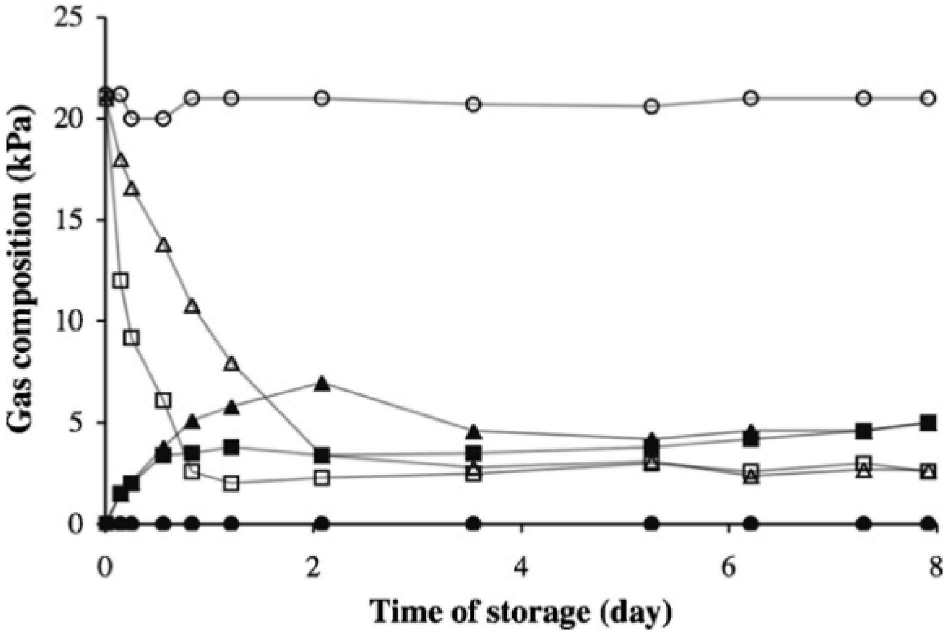
รูปที่ 2.9 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มจากสารผสมระหว่าง Poly(propylene-co-ethylene) ผสม Zeolite [37]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.7.2 การใช้ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรห่อผักกาดองดีฟสดเพื่อยืดอายุหลังการเก็บเกี่ยว

Charles และคณะ [21] ได้ศึกษาการเก็บผักอองดีฟสด (Fresh Endives) ไว้ในบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรแบบแพทซีฟ (Passive) และแบบแอคทีฟ (Active) เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการยืดอายุการเก็บผักอองดีฟให้นานขึ้นโดยใช้บรรจุภัณฑ์ฟิล์มพลาสติก 3 ชนิดคือ 1. ถุงฟิล์มพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีความหนา 50 ไมโครเมตร มีค่าความสามารถในซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนคือ 1,078 x 10^{-18} mol m^{-1} s^{-1} Pa^{-1} และค่าความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 4,143 x 10^{-18} mol m^{-1} s^{-1} Pa^{-1} (ใช้ตัวย่อ Passive LDPE) ส่วนบรรจุ

ภัณฑ์ชนิดที่ 2 คือ ถุงฟิล์ม Oriented พอลิโพรพิลีนที่ถูกเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm จำนวน 4 รูต่อพื้นที่ผิว 28 cm x 25.5 cm (ใช้ตัวย่อ UAP) และบรรจุภัณฑ์ชนิดที่ 3 คือ ถุงฟิล์มพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีความหนา 50 ไมโครเมตรซึ่งจะเติมสาร Oxygen Scavenger เข้าไปในบรรจุภัณฑ์ด้วย (ใช้ตัวย่อ Active LDPE) ผู้ทดลองนำผักอองดีฟหนัก 550 กรัมใส่ไว้ในบรรจุภัณฑ์ทั้ง 3 แล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิคงที่ 20 °C พื้นที่ผิวคงที่ 0.14 ตารางเมตร จากผลการทดลองพบว่าปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์จะเปลี่ยนแปลงตามเวลาและเข้าสู่สภาวะคงตัวดังแสดงในรูปที่ 2.10

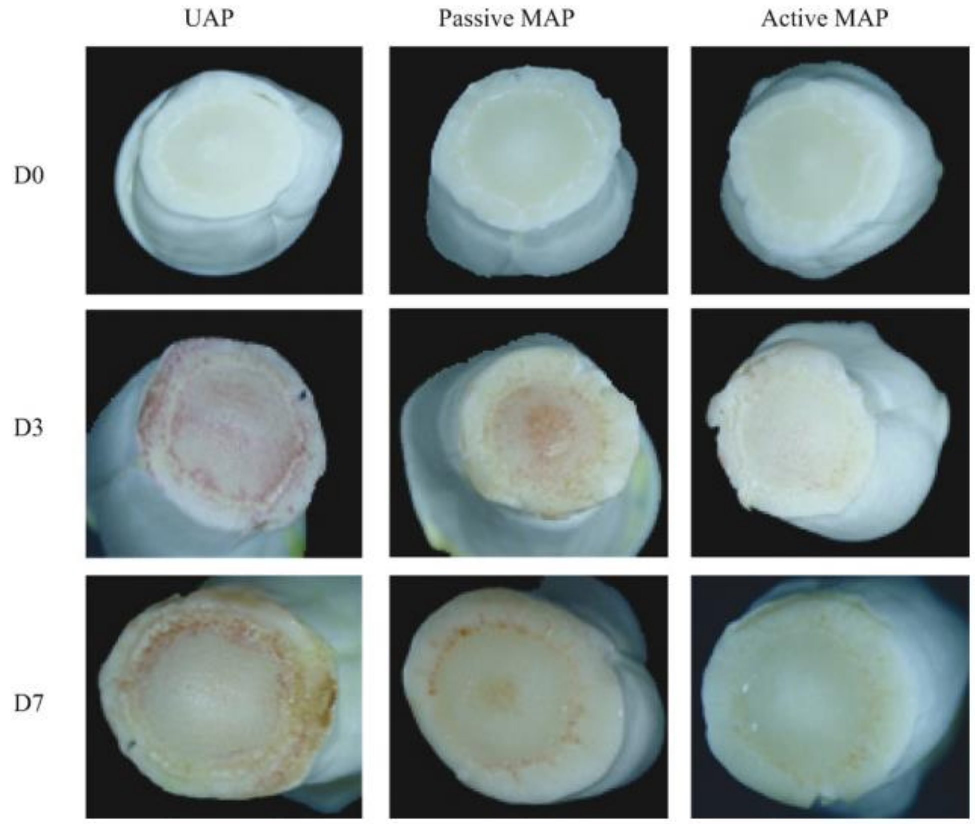


CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 2.10 ความดันย่อยของแก๊ส O_2 (สัญลักษณ์โปร่ง) และแก๊ส CO_2 (สัญลักษณ์ทึบ) ที่อุณหภูมิคงที่ 20 °C, Passive LDPE (△,▲), Macro-perforated OPP (○, ●), Active LDPE (□,■) [21]

จากรูปที่ 2.10 Passive LDPE และ Active LDPE สามารถทำให้ปริมาณแก๊สออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์ลดต่ำลงและทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น และคงที่เมื่อเวลาผ่านไปหลายวัน แต่กรณีของบรรจุภัณฑ์ Macro-perforated OPP พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์จะมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ (Ambient) เพราะบรรจุภัณฑ์ Macro-perforated OPP มีการเจาะรูบนฟิล์ม ทำให้ฟิล์มมีอัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนแก๊สได้มากกว่าบรรจุภัณฑ์แบบ Active LDPE และ Passive LDPE ซึ่งการแลกเปลี่ยน

แก๊สที่มากเกินไปทำให้ผักอองดีฟในถุงฟิล์มบรรจุภัณฑ์ UAP มีอัตราการหายใจสูงและเสียเร็วกว่าผักอองดีฟที่เก็บไว้ในบรรจุภัณฑ์แบบ Passive LDPE และ Active LDPE ดังแสดงในรูปที่ 2.11



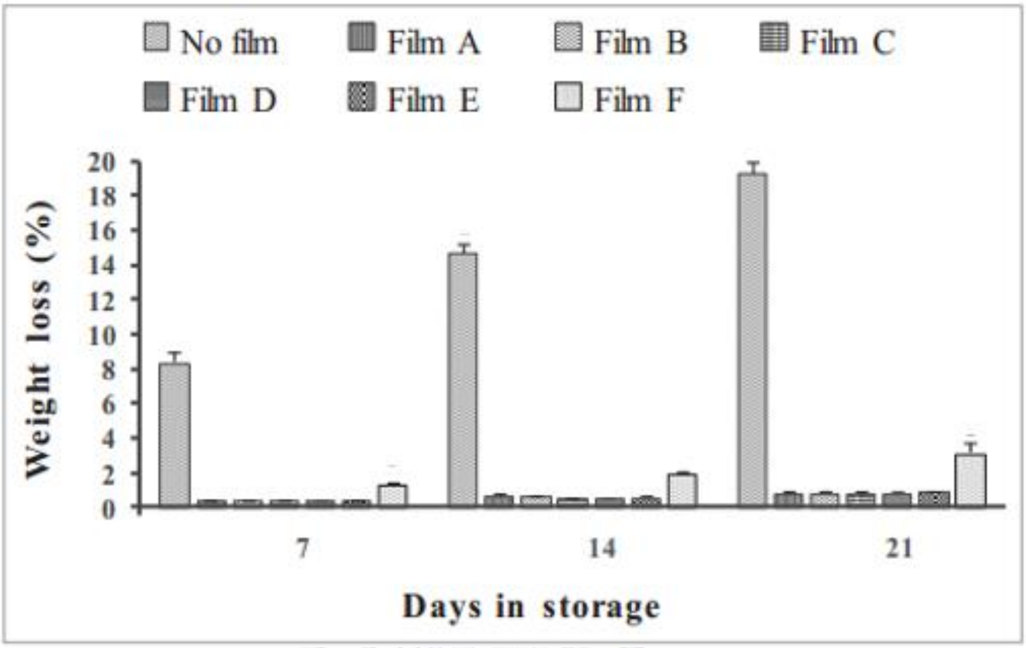
รูปที่ 2.11 ภาพถ่ายผักอองดีฟที่เก็บไว้ในบรรจุภัณฑ์ UAP, Passive LDPE และ Active LDPE ที่อุณหภูมิคงที่ 20 °C เป็นเวลา 0, 3 และ 7 วัน ตามลำดับ [21]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากงานวิจัยนี้ทำให้เห็นว่า Passive MAP สามารถยืดอายุการเก็บผักอองดีฟให้นานขึ้นเมื่อเทียบกับการเก็บผักอองดีฟไว้ใน UAP เนื่องจากผักอองดีฟที่เก็บไว้ใน Passive MAP มีอัตราการหายใจลดลงเมื่อปริมาณออกซิเจนในถุงบรรจุภัณฑ์ต่ำกว่าปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศ (Atmosphere) นอกจากนี้พบว่า Active MAP สามารถลดการเกิดจุดสีน้ำตาล (Browning) ในผักอองดีฟได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับ UAP และ Passive MAP เพราะ Active MAP สามารถลดอัตราการหายใจของผักอองดีฟได้รวดเร็วกว่าเพราะใส่ Oxygen Scavenger เข้าไปในถุง ทำให้ปริมาณแก๊สออกซิเจนในถุงบรรจุภัณฑ์ Active MAP ลดลงเร็วกว่า Passive MAP ดังนั้นเมื่อปริมาณออกซิเจนในถุงบรรจุภัณฑ์ลดต่ำลงเร็ว ผักอองดีฟก็จะมีอัตราการหายใจลดลงเร็วขึ้นตามไปด้วย

2.7.3 อัตราการซึมผ่านไอน้ำที่มีผลต่อความสดของผักและผลไม้สด

Aquino และคณะ [22] ศึกษาการเก็บมะเขือเทศเชอร์รี (Cherry Tomatoes) ไว้ในบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร โดยเก็บมะเขือเทศเชอร์รีไว้ในฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ถูกเจาะรู (Film A – Film F) เทียบกับมะเขือเทศเชอร์รีที่วางไว้ในบรรยากาศ (Atmosphere) โดยที่ฟิล์ม F เป็นฟิล์มที่มีรูมากที่สุดโดยจำนวนรูจะลดลงต่ำลำดับ E, D, C, B และ A มีรูน้อยที่สุด จากรูปที่ 2.12 ทำให้เห็นว่ามะเขือเทศเชอร์รีที่วางไว้ที่บรรยากาศสูญเสียน้ำหนักมากกว่ามะเขือเทศเชอร์รีที่เก็บไว้ในฟิล์มบรรจุภัณฑ์ เพราะฟิล์มบรรจุภัณฑ์ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำในมะเขือเทศเชอร์รีระเหยเร็วเกินไป นอกจากนี้พบว่าน้ำหนักที่หายไปของมะเขือเทศเชอร์รีจะสัมพันธ์กับจำนวนรูในฟิล์มบรรจุภัณฑ์ มะเขือเทศเชอร์รีที่เก็บไว้ในฟิล์ม F สูญเสียน้ำหนักมากกว่าฟิล์มชนิดอื่น เนื่องจากฟิล์ม F มีรูมากที่สุด การมีจำนวนรูมากบ่งบอกว่าฟิล์มดังกล่าวมีค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำมาก ส่งผลให้ความชื้นภายในถุงบรรจุภัณฑ์แพร่ออกไปด้านนอกได้มาก ทำให้มะเขือเทศเชอร์รีสูญเสียน้ำหนักมากขึ้นตามไปด้วย [22]



รูปที่ 2.12 น้ำหนักที่สูญเสียไปของมะเขือเทศเชอร์รี่โดยคิดเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้นของมะเขือเทศเชอรี่ ณ สภาวะอุณหภูมิคงที่ 20 ℃ [22]

จากงานวิจัยนี้ทำให้เห็นได้ว่า การไม่เก็บผักและผลไม้สดไว้ในบรรจุภัณฑ์ (วางไว้ที่ Atmosphere) หรือการเก็บผักและผลไม้สดไว้ในบรรจุภัณฑ์ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำมากเกินไป ทำให้ผักและผลไม้สดสูญเสียความชุ่มชื้น ส่งผลให้ผักและผลไม้สดเหี่ยวและไม่น่ารับประทาน (Bad Visual Quality) [22] ในทางกลับกัน การเก็บผักและผลไม้สดไว้ในบรรจุภัณฑ์ที่ให้ไอน้ำซึมผ่านน้อยเกินไปทำให้ในบรรจุภัณฑ์มีความชื้นสูงจนนำไปสู่การเน่าเสียและมีราขึ้นได้ [22]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.7.4 สมการการหายใจแบบไมเคิลลีสเมนเทนและตัวแปรสำหรับคำนวนอัตราการหายใจของมะม่วงที่อุณหภูมิต่าง ๆ

รูปที่ 2.13 มะม่วง (Mangifera indica L., Digha Maldah) [38]

Menon และคณะ [31] ได้พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการหายใจของมะม่วง โดยการทดลองทำในระบบปิดและควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ดังนี้ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 °C โดยใช้มะม่วง (Mangifera Indica L.) หนัก 1 กิโลกรัมซึ่งประกอบด้วยมะม่วง 5-7 ผล บรรจุอยู่ใน Chamber ซึ่งมี Head Space ประมาณ 100 ไมโครลิตร (μL) แก๊สตัวอย่างใน Chamber จะถูกป้อนเข้า Gas Chromatography เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

CHULALONGKORN UNIVERSITY

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จาก Gas Chromatography มาวิเคราะห์ด้วยวิธี Data Regression Analysis พบว่า อุณหภูมิที่เก็บมะม่วงมีผลต่ออัตราการหายใจของมะม่วงซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Mahajan และคณะ [32] เมื่อควบคุมให้อุณหภูมิในการทดลองคงที่ จะได้พารามิเตอร์สำหรับสมการอัตราการหายใจของไมเคิลลีสเมนเทนที่มีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟ ซึ่งคือสมการที่ (2.14) และ (2.15) โดยพารามิเตอร์แสดงในตารางที่ 2.1

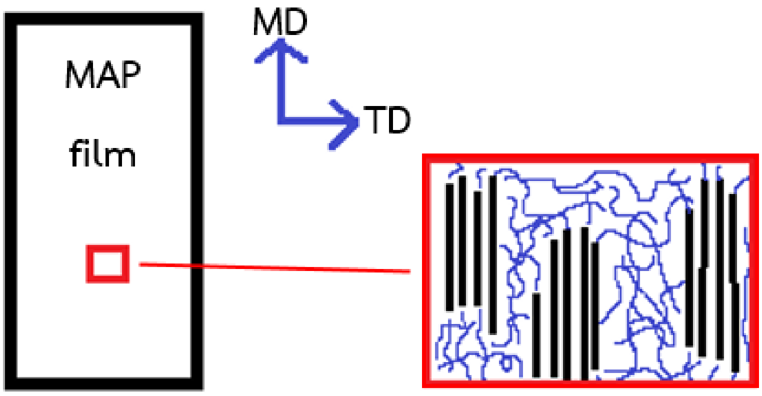
ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองการหายใจของไมเคิลลีสเมนเทนมีการยับยั้งแบบอันคอมเพททิทีฟของมะม่วงที่อุณหภูมิต่าง ๆ [31]

อุณหภูมิขณะทดสอบ (°C)	แก๊ส	$V_{m,i}$ (ml kg^{-1} h^{-1})	$K_{m,i}$ (% O_2)	K_i (% CO_2)	R^2
5	O_2	29.48	12.85	8.50	0.957
	CO_2	31.25	12.38	6.50	0.944
10	O_2	37.05	13.10	7.00	0.969
	CO_2	38.46	13.82	5.22	0.962
15	O_2	43.93	14.41	6.22	0.915
	CO_2	43.48	14.86	5.01	0.936
20	O_2	50.68	16.20	5.19	0.969
	CO_2	62.67	17.52	4.39	0.958
25	O_2	56.42	16.85	4.61	0.945
	CO_2	66.50	18.89	3.62	0.952
30	O_2	68.10	17.15	4.85	0.966
	CO_2	72.80	18.26	3.85	0.976

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.7.5 การเกิดผลึกเนื่องจากแรงดึง (Strain Induced Crystallization)

Zhang และคณะ [39] ได้ศึกษาผลกระทบของ Drawn-down ration ที่ส่งผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาและทิศทางการจัดเรียงตัวของผลึก (Crystalline Orientation) ในพอลิเอธิลีน ซึ่งประกอบด้วย พอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) โดยใช้วิธีเป่าเพื่อขึ้นรูปเป็นฟิล์ม ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า ทิศทางของการดึงฟิล์มมีผลต่อทิศทางการจัดเรียงตัวของผลึก กล่าวคือ สายโซ่จะเข้ามาอยู่ใกล้กันและจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกับแรงดึง ซึ่งสายโซ่ที่เข้ามาอยู่ใกล้กันสามารถเกิดเป็นผลึกในโครงสร้างได้ ผลึกที่เกิดขึ้นมีผลทำให้พอลิเอธิลีนมีความแข็งแรงในทิศทางตามการขึ้นรูป (Machine Direction) มากกว่าทิศตามขวาง (Transverse Direction)



รูปที่ 2.14 การจัดเรียงสายโซ่ตามแนวแรงดึงของฟิล์มพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (ดัดแปลงจากงานวิจัยของ Zhang และคณะ [39])

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
วิธีการทดลอง

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 พอลิเอธิลีนชนิดความความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE)

พอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำสำหรับขึ้นรูปฟิล์ม ชื่อทางการค้า InnoPlus LDPE เกรด LD2420K ของบริษัท PTT Global Chemical Pub Co., Ltd. มีอุณหภูมิการขึ้นรูป (Processing Temperature) อยู่ในช่วง 150 – 190 °C ดัชนีการไหล (Melt Flow Index) เท่ากับ 4.0 กรัมต่อ 10 นาที และมีความหนาแน่น 0.924 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ณ 190 °C, น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม)

รูปที่ 3.1 เม็ดพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

3.1.2 เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Polyester Elastomer, TPEE)

เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ (TPEE) ชื่อทางการค้า Hytrel เกรด G3548 NC010 ของบริษัท DuPont™ เป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานบางได้ง่าย มีอุณหภูมิการขึ้นรูป (Processing Temperature) อยู่ในช่วง 150 – 190 °C ดัชนีการไหล (Melt Flow Index) เท่ากับ 5.3 กรัมต่อ 10 นาที และมีความหนาแน่น 1.15 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ณ 190 °C, โหลด 2.16 กิโลกรัม)

รูปที่ 3.2 เม็ดเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ (TPEE Pellet)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. ตู้อบสุญญากาศ
2. เครื่อง Twin-Screw Extruder ของบริษัท LABTECH รุ่น LTE 20-40
3. เครื่องตัดเม็ดพลาสติกของบริษัท LABTECH รุ่น LZ-120
4. เครื่อง Cast Film Twin-Screw Extruder ของบริษัท Thermofisher Scientific ชื่อทางการค้า Haake Polylab System
5. เครื่องวัดความหนาฟิล์มของบริษัท Mitutoyo รุ่น C1012XBS
6. เครื่องทดสอบการซึมผ่านแก็สออกซิเจนของบริษัท Mocon, USA รุ่น OX-TRAN®

Model 2/21 module ST

7. เครื่องทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของบริษัท Mocon, USA รุ่น PERMATRAN-W® Model 398

8. เครื่องทดสอบการซึมผ่านแก็สคาร์บอนไดออกไซด์ของบริษัท Mocon, USA

9. เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ของบริษัท Mettler Toledo รุ่น Mettler Toledo DSC1 STAR^{e} System

10. เครื่อง Universal Testing Machine บริษัท Instron รุ่น 5567

3.3 วิธีการทดลอง

3.2.1 การผสมพอลิเมอร์ (Blending)

นำเม็ดพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเม็ดเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 °C ในตู้อบสุญญากาศเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำเม็ดพอลิเมอร์ที่อบแล้วมาผสมกันด้วยวิธีผสมแห้ง (Dry Blending) โดยชั่งเม็ดพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเม็ดเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ตามอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำต่อเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ที่ใช้ขึ้นรูปฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร	พอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (wt%)	เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ (wt%)
Neat LDPE:100/0	100	0
LDPE/TPEE:90/10	90	10
LDPE/TPEE:80/20	80	20
LDPE/TPEE:70/30	70	30
LDPE/TPEE:50/50	50	50
Neat TPEE:0/100	0	100

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3.3 Twin-Screw Extruder ของบริษัท LABTECH รุ่น LTE 20-40 [40]

หลังจากนั้นนำเม็ดพลาสติกที่ผสมแบบแห้งเสร็จไปป้อนเข้าสู่เครื่อง Twin-Screw Extruder Labtech เพื่อทำการผสมแบบหลอมเหลว (Melt Blending) โดยใช้อัตราเร็วของสกรูว 40 รอบต่อนาที และตั้งค่าอุณหภูมิบาร์เรลให้คงที่ตามตารางที่ 3.2 พอลิเมอร์หลอมเหลวถูกอัดรีดออกมาเป็นเส้น Extrudate และถูกตัดเป็นเม็ดทรงกระบอกด้วยเครื่องตัดรุ่น LZ-120 บริษัท Labtech Engineering Co., Ltd.

ตารางที่ 3.2 แสดงอุณหภูมิที่ใช้ในขณะผสมในเครื่อง Twin Screw Labtech

Barrel Temperature (°C)									
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
150	160	160	165	165	170	170	170	180	180

หมายเหตุ 1 = จุดป้อนเม็ดพลาสติก, 10 = หัวดาย (Die)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.2 การขึ้นรูปฟิล์ม (Film Preparation)

รูปที่ 3.4 Twin-Screw Extruder ของบริษัท Thermofisher Scientific ชื่อทางการค้า Haake Polylab System [41]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

นำเม็ดพอลิเมอร์ที่ได้จากขั้นตอน 3.2.1 ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 ^{o}C ในตู้อบสุญญากาศ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นขึ้นรูปฟิล์มโดยใช้เครื่อง Cast Film Twin-Screw Extruder ซึ่งหัวดายเป็นแบบ Tape, Sheet ribbon Die ซึ่งมีความกว้าง 15 เซนติเมตร ความหนา 1 มิลลิเมตร ใช้อุณหภูมิการขึ้นรูปจากตำแหน่ง Feed Zone ถึง Die Zone คงที่คือ 150, 170, 170, 180, 180, 180 และ 180 ^{o}C นอกจากนี้ความเร็วของสกรูและอัตราการป้อนเม็ดพลาสติกก็ถูกทำให้คงที่ที่ 100 รอบต่อนาทีและ 13.2 กรัมต่อนาทีตามลำดับ ใช้อัตราเร็วในการดึงฟิล์ม (Film Pulling Speed)คงที่ 200 รอบต่อนาทีและอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์ม (Film Cooling Temperature) คงที่ 35 ^{o}C ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรสำหรับการทดลองตอนที่ 1

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร	LDPE (wt%)	TPEE (wt%)	Film Pulling Speed (rpm)	Film Cooling Temperature (°C)
LDPE/TPEE:100/0 (S200T35)	100	0	200	35
LDPE/TPEE:90/10 (S200T35)	90	10	200	35
LDPE/TPEE:80/20 (S200T35)	80	20	200	35
LDPE/TPEE:70/30 (S200T35)	70	30	200	35
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	50	50	200	35
LDPE/TPEE:0/100 (S200T35)	0	100	200	35

ส่วนตอนที่ 2 เป็นศึกษาผลของอัตราเร็วในการดึงฟิล์ม (Film Pulling Speed) ใช้อัตราส่วนพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำต่อเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก สภาวะการขึ้นรูปของการทดลองตอนที่ 2 แสดงในตารางที่ 3.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3.4 สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรสำหรับการทดลองตอนที่ 2

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร	LDPE (wt%)	TPEE (wt%)	Film Pulling Speed (rpm)	Film Cooling Temperature (°C)
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	50	50	200	35
LDPE/TPEE:50/50 (S210T35)	50	50	210	35
LDPE/TPEE:50/50 (S220T35)	50	50	220	35
LDPE/TPEE:50/50 (S240T35)	50	50	240	35

ส่วนตอนที่ 3 เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิหล่อเย็นของฟิล์ม (Film Cooling Temperature) ใช้อัตราส่วนพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำต่อเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก สภาวะการขึ้นรูปของการทดลองตอนที่ 3 แสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรสำหรับการทดลองตอนที่ 3

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร	LDPE (wt%)	TPEE (wt%)	Film Pulling Speed (rpm)	Film Cooling Temperature (°C)
LDPE/TPEE:50/50 (S200T15)	50	50	200	15
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	50	50	200	35
LDPE/TPEE:50/50 (S200T50)	50	50	200	50

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.3 การศึกษาความสามารถการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำผ่านฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

3.2.3.1 ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำผ่านฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร (Water Vapor Transmission Rate)

ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (Water Vapor Transmission Rate) หรือ WVTR ถูกวัดด้วยเครื่อง Water Vapor Permeability Analyzer ชื่อทางการค้า PERMATRAN-W® Model 398 ของบริษัท Mocon (USA) ดังแสดงในรูป 3.5 โดยได้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E398 โดยใช้ฟิล์มขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร วางฟิล์มไว้ในเครื่องทดสอบที่ควบคุมให้อุณหภูมิและความชื้นให้คงที่ ณ 25 °C และ 50 %RH ตามลำดับ โดยต้องทดสอบซ้ำอย่างน้อย 3 ชิ้นต่อฟิล์ม 1 สูตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3.5 Water Vapor Permeability Analyzer, PERMATRAN-W® Model 398, MOCON (USA) [42]

3.2.3.2 ความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนผ่านฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร (Oxygen Transmission Rate)

ความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (Oxygen Gas Transmission Rate) หรือ OTR ถูกวัดด้วยเครื่อง Oxygen Permeability Analyzer ชื่อทางการค้า OX-TRAN® Model 2/21 module ST ของบริษัท Mocon (USA) ดังแสดงในรูป 3.6 ตามมาตรฐาน ASTM D3985 โดยใช้ฟิล์ม

ขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร วางฟิล์มไว้ในเครื่องทดสอบที่ควบคุมให้อุณหภูมิและความชื้นให้คงที่ ณ 23 °C และ 0 %RH ตามลำดับ โดยต้องทดสอบซ้ำอย่างน้อย 3 ชิ้นต่อฟิล์ม 1 สูตร

รูปที่ 3.6 Oxygen Permeability Analyzer, รุ่น OX-TRAN® Model 2/21 module ST, MOCON (USA) [43]

3.2.3.3 ความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร (Carbon Dioxide Transmission Rate)

ความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Oxygen Gas Transmission Rate) หรือ CO2TR ถูกวัดด้วยเครื่อง Carbon Dioxide Permeability Analyzer ตามวิธีการวัดที่อ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM D1434-82 โดยชิ้นงานถูกส่งไปทดสอบ ณ กองผลิตภัณฑ์อาหารและวัสดุสัมผัสอาหาร กรมวิทยาศาสตร์บริการ เขตพญาไท กรุงเทพมหานคร โดยตัดฟิล์มเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร โดยควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ 23 °C และความชื้นคงที่ 0 %RH แต่เนื่องจากมีข้อจำกัดในให้บริการ ทำให้ทดสอบการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพียงตัวอย่างละ 1 ครั้งเท่านั้น (โดยปกติแล้วจะต้องทำซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2.4 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

การศึกษาสมบัติทางความร้อนและปริมาณผลึกของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรทำโดยใช้เทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) ด้วยเครื่อง DSC ชื่อทางการค้า Mettler Toledo DSC1 STAR System ของบริษัท Mettler ซึ่งการทดสอบทำภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน และให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 25 °C ถึง 190 °C โดยใช้ Heating rate 10 °C/min ซึ่งลำดับการทดสอบของโปรแกรมมีดังนี้

1) คงอุณหภูมิไว้ที่ 25 °C เป็นเวลา 1 นาที

2) เพิ่มอุณหภูมิจาก 25 °C จนถึง 190 °C ด้วย Heating Rate 10 °C/min

3) คงอุณหภูมิไว้ที่ 190 °C เป็นเวลา 1 นาที

4) ลดอุณหภูมิจาก 190 °C จนถึง 25 °C ด้วย Cooling Rate 10 °C/min

5) คงอุณหภูมิไว้ที่ 25 °C เป็นเวลา 1 นาที

6) ให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 25 °C จนถึง 190 °C ด้วย Heating Rate 10 °C/min

7) เครื่อง DSC ลดอุณหภูมิลงจนถึง 25 °C

ปริมาณผลึกในชิ้นงานฟิล์มถูกคำนวณจากสมการ (3.1) รายงานเป็น เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก (Percent Crystallinity, $\%X_c$)

$$\%X_c = \frac{\Delta H_f^{obs}}{(\Delta H_{f,LDPE}^{o}\ w_{LDPE}) + (\Delta H_{f,TPEE}^{o}\ w_{TPEE})} \times 100\% \tag{3.1}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เมื่อ $\%X_c$ = เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก (-)

ΔH_f^{obs} = เอนทาลปีของการเกิดผลึกที่วัดได้จากเครื่อง DSC (J/g)

$\Delta H_{f,LDPE}^{o}$ = เอนทาลปีของการเกิดผลึกของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีผลึก 100% (J/g) เท่ากับ 286.7 J/g [44]

$\Delta H_{f,TPEE}^{o}$ = เอนทาลปีของการเกิดผลึกของเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ที่มีผลึก 100% (J/g) เท่ากับ 8 J/g [14]

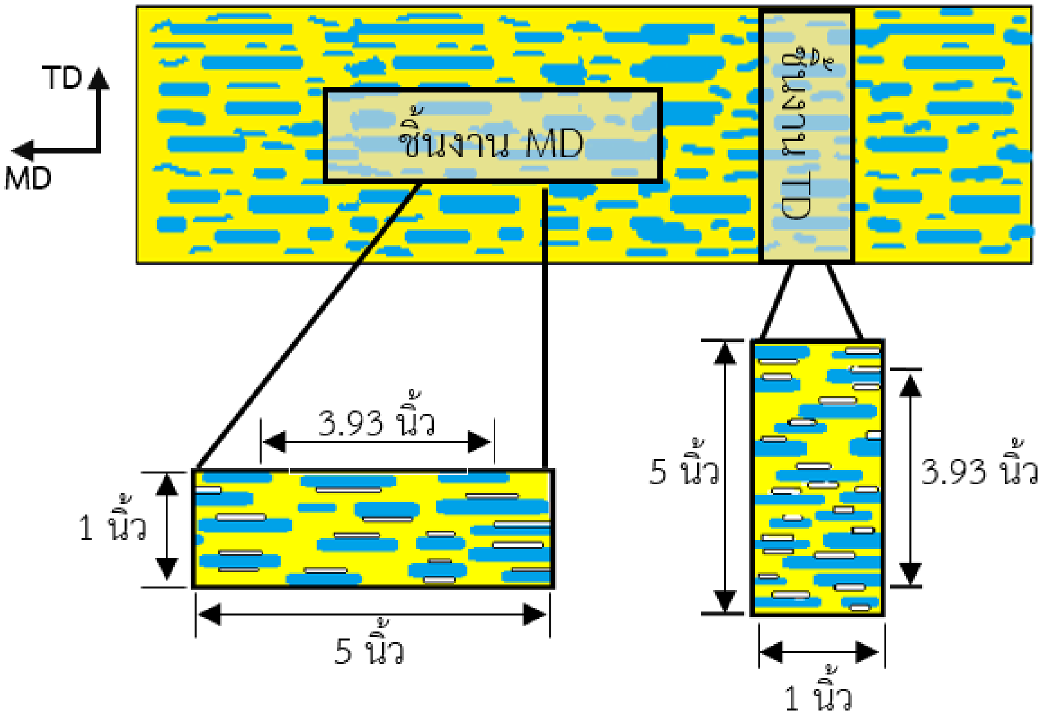
w_{LDPE} = เศษส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (-)

w_{TPEE} = เศษส่วนโดยน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ (-)

3.2.5 การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

3.2.5.1 ความทนแรงดึง (Tensile Strength)

การทดสอบความทนแรงดึงทำโดยเครื่อง Universal Testing Machine ของบริษัท Instron (Thailand) ตามมาตรฐาน ASTM D882 โดยชิ้นงานจะถูกตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 1 นิ้ว ยาว 5 นิ้ว ระยะ gauge length คือ 3.93 นิ้ว ขณะทดสอบใช้อัตราการดึง 10 mm/min และใช้โหลดเซลล์ขนาด 1 kN ทำซ้ำอย่างน้อย 5 ครั้ง ทั้งด้าน Machine Direction และ Transverse Direction

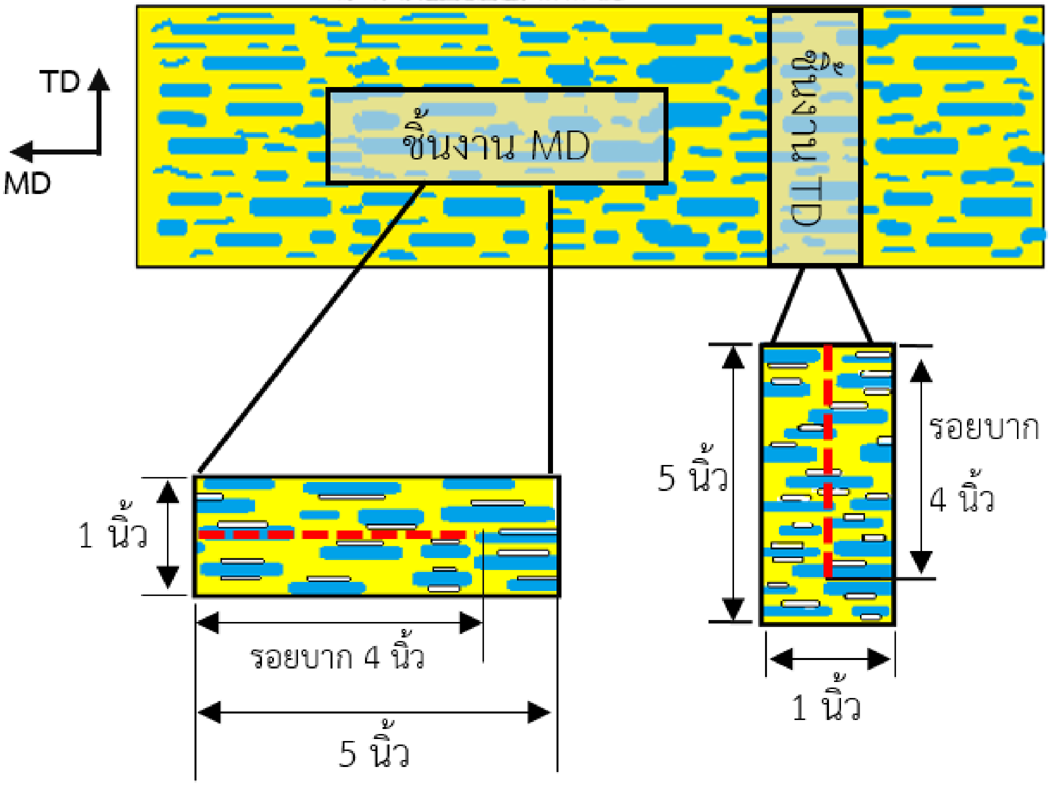


รูปที่ 3.7 ขนาดชิ้นงานที่ใช้ทดสอบความทนแรงดึง

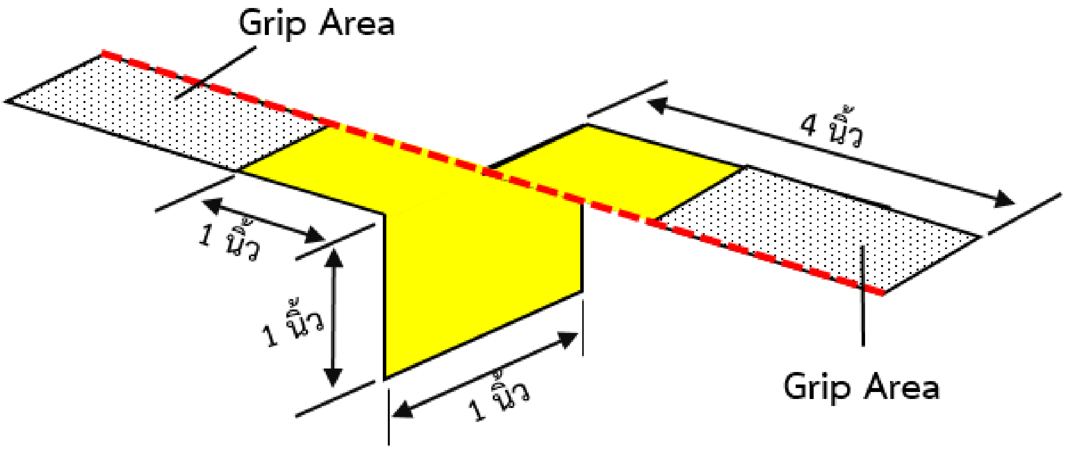
เครื่อง Universal Testing Machine สามารถแสดงค่าสมบัติเชิงกลที่สำคัญคือ ยังก์โมดูลัส (Young's Modulus) ความทนแรงดึง (Tensile Strength) และเปอร์เซ็นการดึงยืด (Percent Elongation) ผ่านทางหน้าจอมอนิเตอร์ของคอมพิวเตอร์ ซึ่งความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการหาค่าสมบัติเชิงกลได้ถูกอธิบายอย่างละเอียดในภาคผนวก ค.

3.2.5.2 การต้านทานการฉีกขาด (Tear Resistance)

การทดสอบการต้านทานการฉีกขาดทำโดยเครื่อง Universal Testing Machine ของบริษัท Instron (Thailand) ซึ่งใช้เกณฑ์การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1938 โดยชิ้นงานจะถูกตัดเป็นรูปบาร์ มีความกว้าง 1 นิ้ว ยาว 5 นิ้ว จากนั้นตัดตรงกลางลงมา 4 นิ้วตามรูปที่ 3.8 และ 3.9 ขณะทดสอบจะใช้อัตราการดึงคือ 10 mm/min และใช้โหลดเซลล์ขนาด 1 kN ในการทดสอบจะต้องทำซ้ำอย่างน้อย 5 ครั้ง ทั้งด้าน Machine Direction และ Transverse Direction



รูปที่ 3.8 ขนาดชิ้นงานที่ใช้ทดสอบการต้านทานการฉีกขาด



รูปที่ 3.9 ลักษณะชิ้นงานที่ใช้ทดสอบการต้านทานการฉีกขาด

3.2.6 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรได้ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ การส่องพื้นผิว (Surface Area) และการส่องภาพตัดขวาง (Cross-Sectional Area) เพื่อตรวจสอบหาช่องว่างบนผิวและในเนื้อฟิล์ม โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope ชื่อทางการค้า JEOL - JSM-6480LV ของบริษัท Jeol ในการส่องชิ้นงานทุกครั้งต้องเคลือบชิ้นงานด้วยทองและใช้ความต่างศักย์ 5 kV เพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นงานเสียหายจากความร้อนขณะส่อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL - JSM-6480LV

3.2.7 การคำนวณโดยใช้แบบจำลองหาเวลาที่แก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์เข้าสู่สภาวะคงตัวและปริมาณแก๊สออกซิเจนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

วัตถุประสงค์ของการคำนวณโดยใช้แบบจำลองหรือซิมมูเลชันในงานวิจัยนี้คือ ต้องการคำนวณหาปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะคงตัวและเวลาที่แก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์เข้าสู่สภาวะคงตัวได้ภายในเวลาไม่นานและประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดลองโดยไม่ต้องนำฟิล์มที่ขึ้นรูปได้ไปผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ดัดแปรและทดลองจริงกับผักและผลไม้สด ซึ่งจะต้องมีอุปกรณ์และขั้นตอนการวัดความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์เพิ่มเติม แต่จะต้องซิมมูเลชันภายใต้สมมุติฐานหลายอย่างเพื่อให้การคำนวณไม่ซับซ้อนจนเกินไป

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้มะม่วงในการซิมมูเลชั่นเพื่อเป็นตัวแทนของผักและผลไม้สด โดยโปรแกรมจะจำลองว่ามีมะม่วง 0.5 กิโลกรัมซึ่งเทียบเท่ากับมะม่วงจำนวน 2 ลูกบรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์ขนาด 18x18 เซนติเมตร มีพื้นที่ผิวทั้งสองด้านเท่ากับ 0.0648 ตารางเมตร (m^2) มี Head space ปริมาตร 200 cc [45] และฟิล์มที่ใช้ห่อมีความหนา 0.05 มิลลิเมตร (mm) โดยกำหนดให้ ณ สภาวะเริ่มต้นในบรรจุภัณฑ์มีแก๊สออกซิเจน 21% กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ CO_2 0.03% และมีอุณหภูมิคงที่ 10 °C

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การซิมมูเลชั่นจะทำในซอฟแวร์แมทแลป (MATLAB) รุ่น 9.4 ของปี ค.ศ. 2018 โดยใช้วิธีแก้สมการเชิงอนุพันธ์ด้วยวิธีรังกัตตา อันดับ 4 (Runge Kutta 4th Order) โดยวิธีการซิมมูเลชั่นอย่างละเอียดแสดงนภาคผนวก ง.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

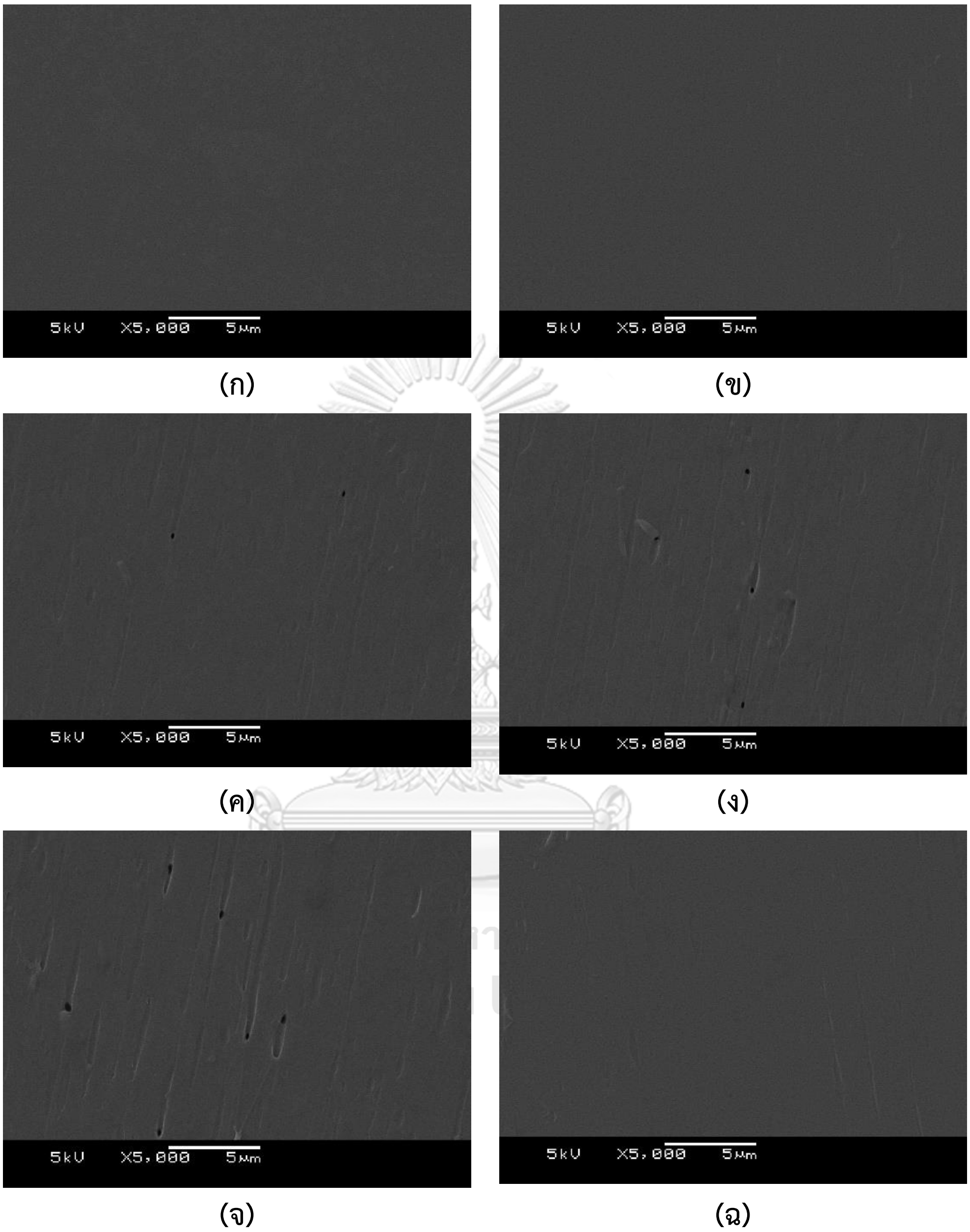
4.1 การศึกษาผลจากการเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ที่มีต่ออัตราการซึมผ่านไอน้ำและแก๊ส สมบัติเชิงความร้อน สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

งานวิจัยนี้ต้องการพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรให้มีอัตราการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สหลายระดับเพื่อให้นำไปใช้กับผักและผลไม้สดได้หลาย ๆ ชนิด เนื่องจากอัตราการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรจะขึ้นกับโครงสร้างและปริมาณผลึกของฟิล์ม ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจในการวิจารณ์ผลการทดลอง จึงเริ่มวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกในฟิล์มก่อน จากนั้นจึงนำผลการทดลองทั้งสองไปอธิบายผลการวัดอัตราการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สและผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

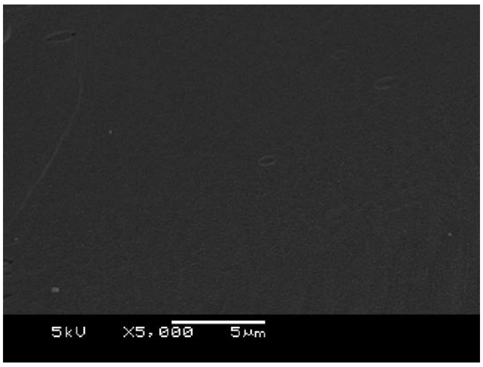
4.1.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

การศึกษาสัณฐานวิทยาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การส่องพื้นผิว (Surface Area) และการส่องภาพตัดขวาง (Cross Section) ซึ่งภาพถ่ายแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

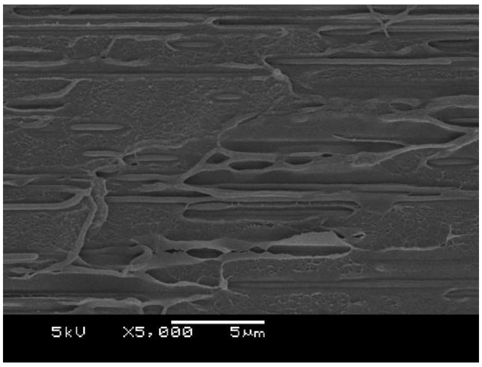
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



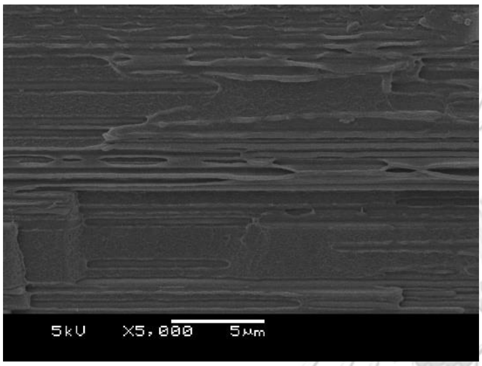
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายพื้นผิว (Surface) ของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของสารผสมระหว่างพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ (กำลังขยาย 5000 เท่า) (ก) Neat LDPE:100/0 (S200T35), (ข) LDPE/TPEE:90/10 (S200T35), (ค) LDPE/TPEE:80/20 (S200T35), (ง) LDPE/TPEE:70/30 (S200T35), (จ) LDPE/TPEE:50/50 (S200T35) และ (ฉ) Neat TPEE:0/100 (S200T35)



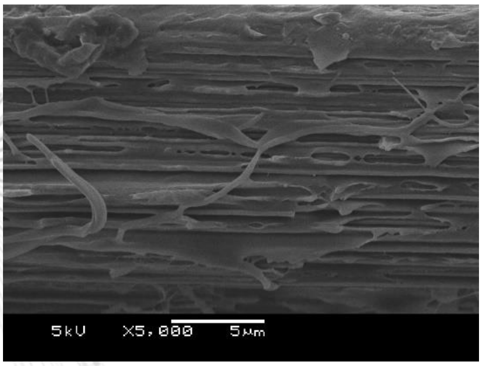
(ก)



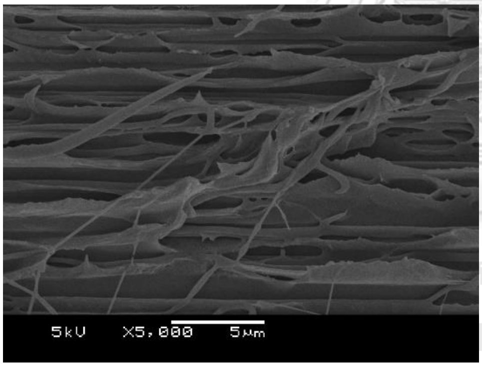
(ข)



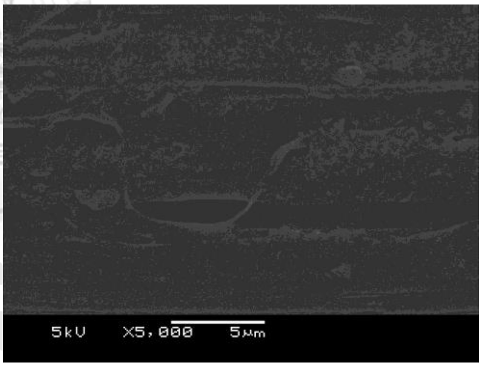
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.2 ภาพตัดขวาง (Cross Section) ของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของสารผสมระหว่างพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โม-พลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ (กำลังขยาย 5000 เท่า) (ก) Neat LDPE:100/0 S200T35) (ข) LDPE/TPEE:90/10 (S200T35), (ค) LDPE/TPEE:80/20 (S200T35), (ง) LDPE/TPEE:70/30 (S200T35), (จ) LDPE/TPEE:50/50 (S200T35) และ (ฉ) Neat TPEE:0/100 (S200T35)

จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าพื้นผิวของฟิล์มจากพอลิ-เอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ รูปที่ 4.1 ก. และฟิล์มจากเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ รูปที่ 4.1 ฉ. มีความราบเรียบ เพราะในขั้นตอนการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธี Cast Film พอลิเมอร์เหลวที่ออกมาจากหัวดายจะถูกดึงและรีดด้วยลูกกลิ้งจนกลายเป็นแผ่นฟิล์มจึงทำให้พื้นผิวค่อนข้างเรียบ เมื่อเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์มากขึ้นพบว่า พื้นผิวของชิ้นงานเริ่มมีช่องว่างขนาดเล็กเกิดขึ้นและมีความขรุขระ เนื่องจากพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ผสมกันได้บางส่วนเท่านั้น (Partial Miscible Blend) จึงทำให้ผิวขรุขระ นอกจากนี้ การขึ้นรูปด้วยวิธี Cast Film จะต้องดึงฟิล์มด้วยลูกกลิ้ง ซึ่งแรงจากกการดึงฟิล์มอาจส่งผลให้รอยต่อระหว่างวัฏภาคที่อ่อนแอของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์แยกตัวจนกลายเป็นช่องว่าง ซึ่งช่องว่างขนาดเล็กเหล่านี้เป็นทางผ่านให้ไอน้ำและแก๊สซึมผ่านไปได้ง่ายขึ้น

เมื่อพิจารณาภาพตัดขวาง รูปที่ 4.2 ข. – จ. พบว่าการเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นภายในชิ้นงาน โดยปริมาณและขนาดของช่องว่างจะมากขึ้นตามปริมาณการเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ ช่องว่างเกิดจากการดึงและรีดพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะขึ้นรูป ซึ่งแรงดึงส่งผลให้รอยต่อระหว่างวัฏภาคที่อ่อนแอของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์แยกตัวออกจนกลายเป็นช่องว่างซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Wu และคณะ [46]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.1.2 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

จากการวัดสมบัติทางความร้อนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรด้วยเครื่อง DSC ตามวิธีการทดลองในหัวข้อ 3.2.4 โดยมีช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาอยู่ระหว่าง 25 – 190 °C โดยผลการทดสอบได้แสดงในตารางที่ 4.1 ข้อมูลผลการทดลองอย่างละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.

ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก (Percent Crystallinity, $\%X_c$) และอุณหภูมิเกิดผลึก (Crystallization Temperature, T_c) ของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร (wt% LDPE/wt% TPEE)	เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก (Percent Crystallinity, $\%X_c$)	อุณหภูมิเกิดผลึก (°C) (T_c)
Neat LDPE:100/0 (S200T35)	23.2±0.3	111.1±0.5
LDPE/TPEE:90/10 (S200T35)	25.5±0.6	111.0±0.3
LDPE/TPEE:80/20 (S200T35)	24.2±0.7	111.1±0.4
LDPE/TPEE:70/30 (S200T35)	22.1±0.5	110.9±0.6
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	15.6±0.6	110.5±1.0
Neat TPEE:0/100 (S200T35)	8.6±0.3	107.7±0.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ฟิล์มจากเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ (Neat TPEE:0/100) มีเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกค่อนข้างต่ำ เพราะงานวิจัยนี้เลือกใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ เกรด General Purpose ซึ่งมีโครงสร้างของ Ether Block ที่ไม่สามารถเกิดผลึกได้อยู่เป็นจำนวนมาก [14] จึงเป็นสาเหตุทำให้ฟิล์มจากเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ (Neat TPEE:0/100) (S200T35) มีเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกน้อยกว่าพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Neat LDPE:100/0) และฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรสูตรอื่น ๆ

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรสูตร LDPE/TPEE:90/10 (S200T35) และสูตร LDPE/TPEE:80/20 (S200T35) พบว่าฟิล์มสองสูตรนี้มีเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกมากกว่าพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Neat LDPE:100/0) เพราะการเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์เข้าไปปริมาณน้อย ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์กระจายตัวเป็นวัฏภาคขนาดเล็กในพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ซึ่งวัฏภาค

ขนาดเล็กเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Nucleating Agent) [47] ส่งผลให้ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรมีปริมาณผลึกมากขึ้น ในทางกลับกันเมื่อเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์มากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลง เพราะเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ไม่สามารถกระจายตัวเป็นเฟสขนาดเล็กได้ อีกทั้งในเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์มี Ether Block ซึ่งไม่สามารถเกิดผลึกได้ จึงทำให้ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่เติมเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์มากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนักมีค่าร้อยละการเกิดผลึกลดลงตามลำดับ

จากการทดสอบ DSC เพื่อหาอุณหภูมิการเกิดผลึกพบว่า อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์อยู่ในช่วง 107.7±0.5 ถึง 111.1 ±0.5 ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลอง Liu และคณะ [48] กับ Chen และคณะ [49] ซึ่งรายงานว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ คือ 111.7 และ 114.3 °C ตามลำดับ

เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกสามารถใช้เป็นตัวบ่งบอกความสามารถในการซึมผ่านของพอลิเมอร์ได้ เพราะโมเลกุลขนาดเล็กเช่น ไอน้ำและแก๊สจะซึมผ่านส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ได้ง่ายกว่าส่วนที่เป็นผลึก เนื่องจากผลึกคือการที่สายโซ่พอลิเมอร์มาจัดเรียงตัวแน่นและเป็นระเบียบทำให้ไอน้ำและแก๊สซึมผ่านไปได้ยาก [50] นอกจากนี้ ปริมาณผลึกในพอลิเมอร์ยังส่งผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ กล่าวคือ พอลิเมอร์ที่มีผลึกจะทนทานต่อแรงดึงและการเสียรูป เพราะผลึกทำหน้าที่เป็นตัวเสริมแรงให้กับโครงสร้างพอลิเมอร์ [51, 52] ดังนั้นฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรจึงควรจะมีปริมาณผลึกไม่มากหรือไม่น้อยจนเกินไปเพราะจะส่งผลเสียต่ออัตราการซึมผ่านไอน้ำ แก๊ส และสมบัติเชิงกลได้

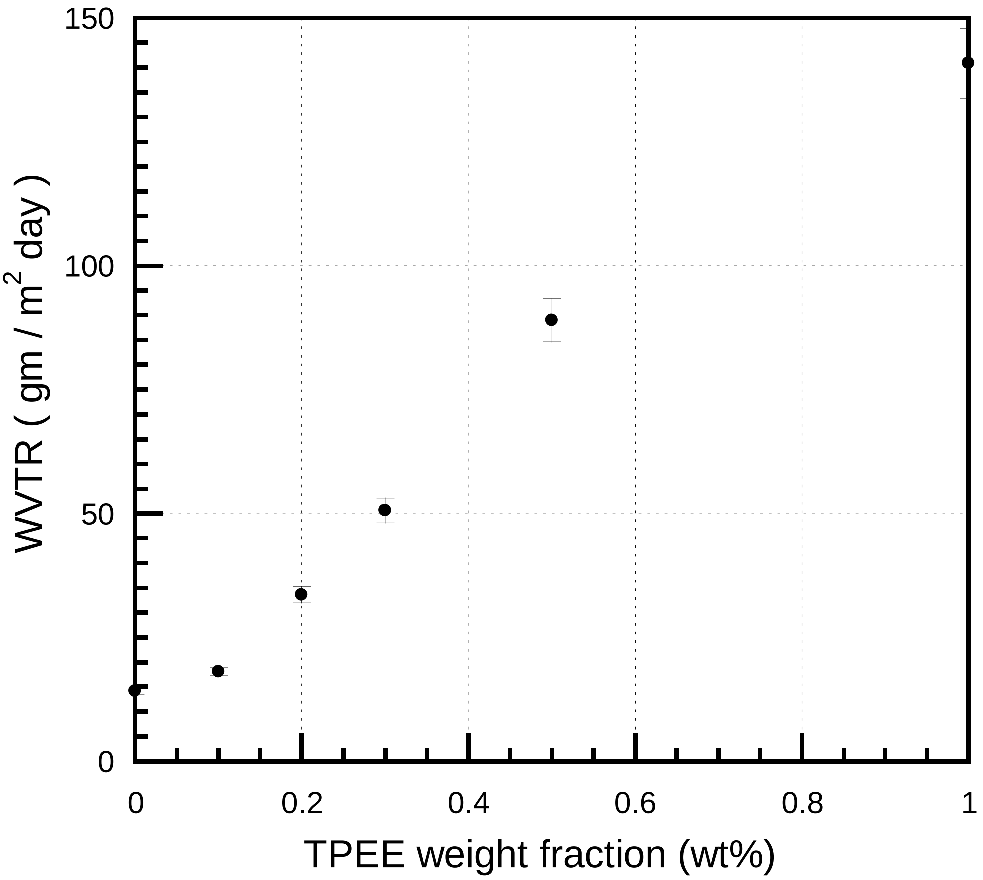
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.1.3 การศึกษาอัตราการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรจากสารผสมระหว่างพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ ที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำต่อเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ตามตารางที่ 3.1 ได้ถูกนำมาวัดความหนาด้วยเครื่อง Micrometer ก่อนนำไปทดสอบอัตราการซึมผ่านแก๊สและไอน้ำ โดยจะเลือกฟิล์มที่มีความหนาประมาณ 40 - 50 ไมครอนเหมือนกันทุกการทดสอบและทดสอบซ้ำอย่างน้อยสูตรละ 3 ครั้ง

4.1.3.1 อัตราการซึมผ่านไอน้ำผ่านฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร (Water Vapor Transmission Rate)

ผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านไอน้ำตามหัวข้อที่ 3.2.3.1 ด้วยวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E398 ได้ผลการทดสอบตามรูปที่ 4.3 ข้อมูลผลการทดสอบอย่างละเอียดแสดงในภาคผนวก ก



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ที่ส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

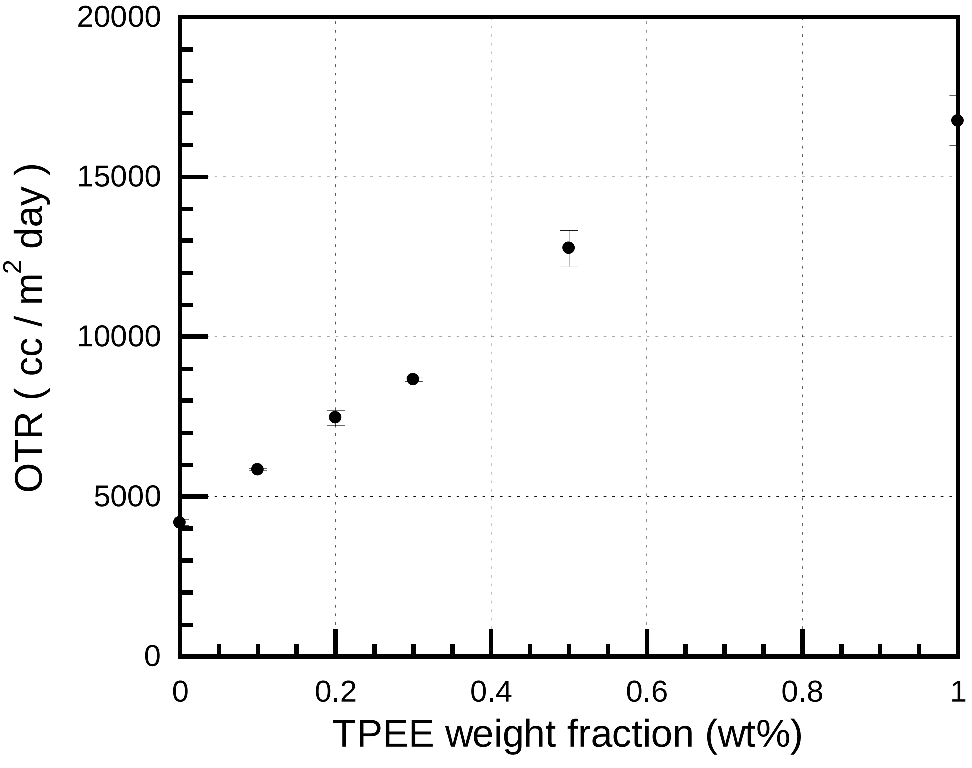
รูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์จะส่งผลให้อัตราการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้น เพราะเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์เป็นพอลิเมอร์ที่ยอมให้ไอน้ำซึมผ่านได้ดี เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์มีโครงสร้าง Ether Block ซึ่ง Ether Block มี Chain Mobility สูงจึงทำให้ไอน้ำสามารถแพร่ผ่านไปได้ง่าย [15, 53] นอกจากนี้การถ่ายภาพด้วยเทคนิค SEM ในหัวข้อ 4.1.1 ชี้เห็นให้ว่า การเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิ

เอสเทอร์อิลาสโตเมอร์มากขึ้น จะยิ่งทำให้เกิดการแยกเฟสและเพิ่มช่องว่างภายในเนื้อฟิล์มมากขึ้น ซึ่งช่องว่างภายในเนื้อฟิล์มส่งผลให้ไอน้ำแพร่ผ่านไปได้ง่ายขึ้น

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่ดีควรให้ไอน้ำซึมผ่านออกไปได้บ้าง เพราะในขณะที่ผักและผลไม้สดหายใจจะคายไอน้ำออกมา [54] ด้วยเหตุนี้ไอน้ำจากกระบวนการหายใจจะสะสมอยู่ภายในบรรจุภัณฑ์และทำให้ภายในบรรจุภัณฑ์มีความชื้นสูงเกินไป หากผักและผลไม้สดถูกเก็บไว้ในสภาวะนี้เป็นเวลานาน อาจนำไปสู่การเน่าเสียหรือมีเชื้อราขึ้นได้ [26]

4.1.3.2 อัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนผ่านฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร (Oxygen Transmission Rate)

ผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนตามหัวข้อที่ 3.2.3.2 โดยวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3985 ได้ผลการทดสอบตามรูปที่ 4.4 ข้อมูลผลการทดสอบอย่างละเอียดแสดงในภาคผนวก ก



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ที่ส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

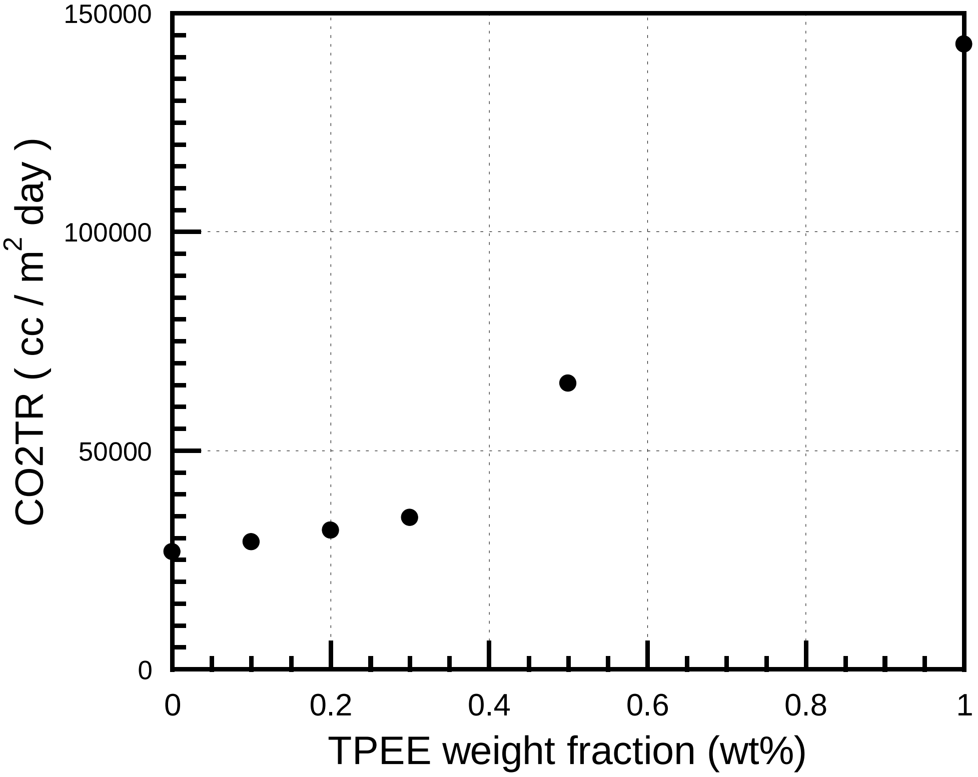
จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น โดยพบว่าฟิล์มจากเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์บริสุทธิ์ (TPEE 100 wt%) มีอัตราการซึมผ่านสูงถึง 16,752.8 cc/m^2 day ซึ่งมากกว่าพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำถึง 4 เท่า เนื่องจาก Ether Block ในเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์มี Chain Mobility สูง จึงทำให้แก๊สออกซิเจนซึมผ่านได้ง่าย [15, 53] นอกจากนี้ภาพจากเทคนิค SEM ในหัวข้อที่ 4.1.1 ยังชี้ให้เห็นว่าภายในฟิล์มมีช่องว่างขนาดเล็กเกิดขึ้น ซึ่งช่องว่างนี้ทำให้แก๊สออกซิเจนซึมผ่านได้ง่ายขึ้น

จากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ลงไปในพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำช่วยปรับปรุงอัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนให้มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการมีอัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนมากขึ้น จะทำให้แก๊สออกซิเจนจากภายนอกแพร่เข้าไปภายในบรรจุภัณฑ์ได้มากขึ้น ซึ่งช่วยป้องกันไม่ให้ปริมาณแก๊สออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์หมดหรือมีน้อยเกินไป เพราะหากปล่อยให้แก๊สในบรรจุภัณฑ์หมดหรือมีปริมาณน้อยเกินไปจะส่งผลให้ผักและผลไม้สดมีการหายใจแบบไม่ใช้อากาศ ซึ่งจะนำไปสู่การเน่าเสียได้ [26]

4.1.3.3 อัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร (Carbon Dioxide Transmission Rate)

ผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตามหัวข้อที่ 3.2.3.3 ด้วยวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1434-82 ได้ผลการทดสอบตามรูปที่ 4.5 แต่เนื่องจากข้อจำกัดในการให้บริการ ทำให้ทดสอบการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพียงตัวอย่างละ 1 ครั้งเท่านั้น (โดยปกติแล้วจะต้องทำซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง) ทำให้รูปที่ 4.5 ไม่สามารถคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ที่ส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

จากหัวข้อ 4.1.3.1 และ 4.1.3.2 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ผลของการเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สออกซิเจนพบว่า เมื่อปริมาณเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเมื่อวิเคราะห์รูปที่ 4.5 พบว่ามีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือ เมื่อปริมาณเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นด้วยเหตุผลเดียวกันกับหัวข้อ 4.1.3.1 และ 4.1.3.2 กล่าวคือ เนื่องจาก Ether Block ในเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์มี Chain Mobility สูง จึงทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านได้ง่าย [15, 53] นอกจากนี้ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM ในหัวข้อที่ 4.1.1 ยังชี้ให้เห็นว่าภายในฟิล์มมีช่องว่างขนาดเล็กเกิดขึ้น ซึ่งช่องว่างนี้ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านได้ง่ายขึ้น

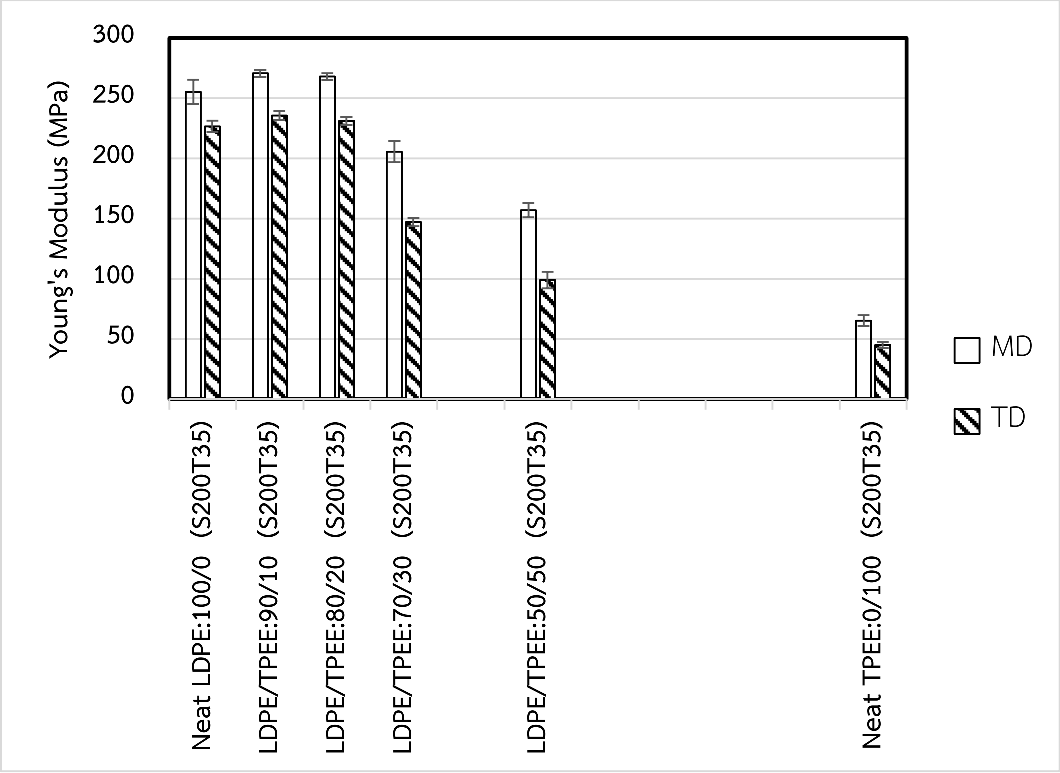
อัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีความสำคัญต่อการสร้างสภาวะบรรยากาศดัดแปรเป็นอย่างมาก เพราะผักและผลไม้สดส่วนใหญ่จะทนต่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ได้ไม่เกินช่วง 10 - 15 เปอร์เซ็นโดยปริมาตร หากความเข้มข้นเกิน 15 เปอร์เซ็นโดยปริมาตร ผักและผลไม้สดบางชนิด เช่น แอปเปิล มะม่วง หรือบล็อกโคลิ (Broccoli) จะเกิดการหายใจแบบไม่ใช้อากาศ [19] ซึ่งจะเร่งให้เกิดการเน่าเสียไวขึ้น [55] ดังนั้นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่นำมาห่อผักและผลไม้สดเหล่านี้ต้องยอมให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านออกไปได้ไม่มากหรือน้อยจนเกินไป เพื่อรักษาปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมคือ 2 – 10 เปอร์เซ็นโดยปริมาตร [9]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

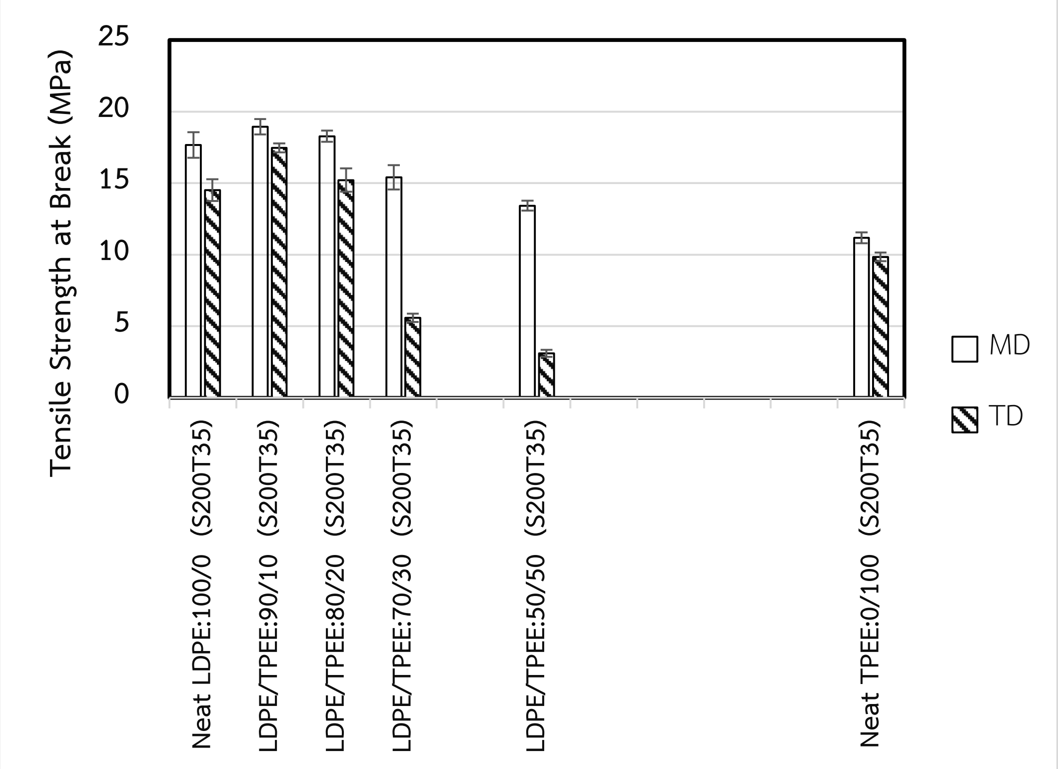
4.1.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

4.1.4.1 ความทนแรงดึง (Tensile Strength)

ผลการทดสอบความทนแรงดึงของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรระหว่างพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ สามารถแสดงค่ายังก์มอดุลัส (Young’s Modulus) ความทนแรงดึง (Tensile Strength) ค่าเปอร์เซ็นการดึงยืด (%Elongation) ได้ในรูปที่ 4.6 – 4.8 ตามลำดับ ข้อมูลผลการทดลองอย่างละเอียดแสดงในภาคผนวก ค.

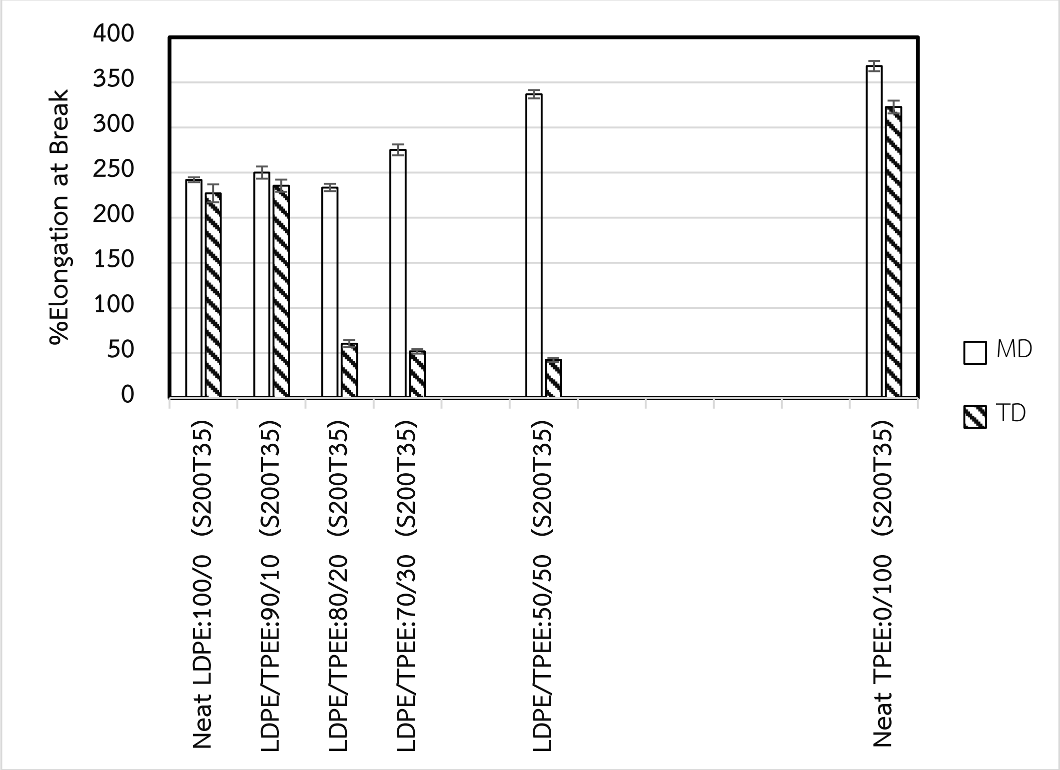


รูปที่ 4.6 ยังก์โมดูลัสของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรจากสารผสมระหว่างพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (MD = Machine Direction; TD = Transverse Direction)



รูปที่ 4.7 ความทนแรงดึงของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรจากสารผสมระหว่างพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (MD = Machine Direction; TD = Transverse Direction)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์การดึงยืดของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรจากสารผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (MD = Machine Direction; TD = Transverse Direction)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 เมื่อพิจารณาเฉพาะทิศตามการขึ้นรูป (Machine Direction) หรือ MD แสดงให้เห็นว่าการเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์เข้าไปอัตราส่วนน้อย ๆ ประมาณ 10 – 20 เปอร์เซ็นโดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่ายังก์โมดุลัสและค่าความทนแรงดึงของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรเพิ่มขึ้น เพราะการเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์น้อย ๆ จะทำให้เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Nucleating Agent) ให้กับพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำได้ แต่เมื่อเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่ายังก์โมดุลัสและค่าความทนแรงดึงมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์เริ่มผสมเข้ากันได้ยาก ประกอบกับในชิ้นงานมีรูขนาดเล็กเกิดขึ้นดังรูป 4.1 (ค)- (จ) และ 4.2 (ค)-(จ) ซึ่งเป็นจุดบกพร่อง (Weak Spot) ในชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานมีสมบัติเชิงกลลดลง

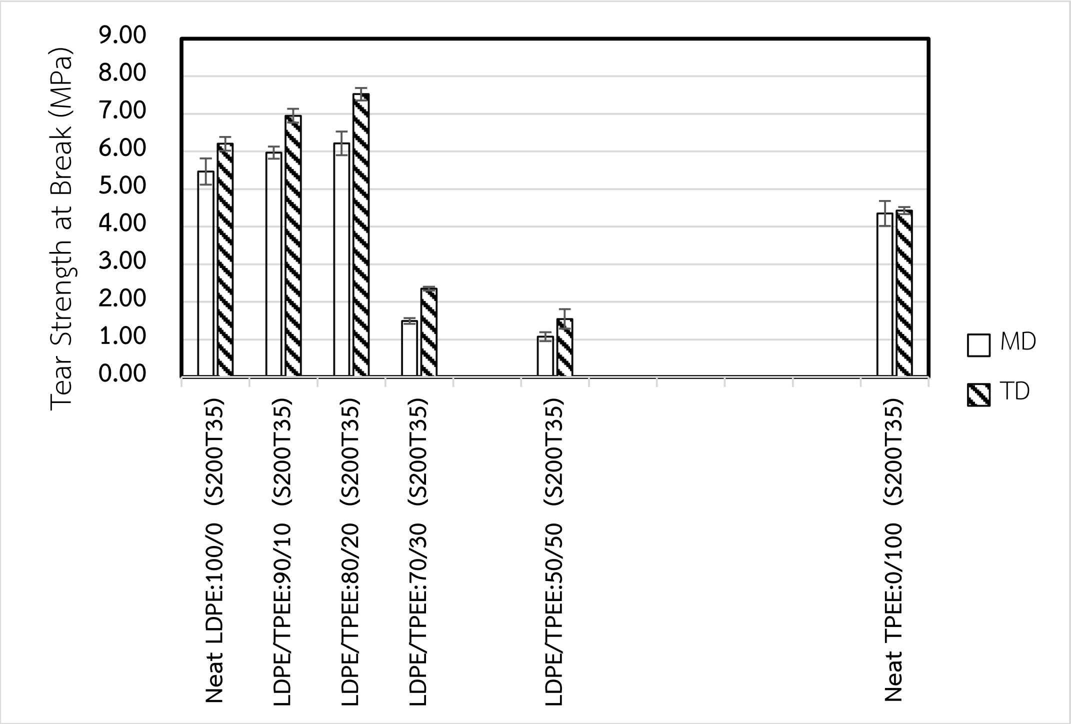
เมื่อพิจารณาในทิศตามขวาง (Transverse Direction) หรือ TD พบว่าค่ายังก์โมดูลัสและความทนแรงดึงของมีค่าน้อยกว่าทิศตามการขึ้นรูปหรือ MD เนื่องจากการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธี Cast Film จะมีการดึงฟิล์มในทิศ MD ซึ่งทำให้สายโซ่พอลิเมอร์จัดเรียงตัวและเกิดผลึกในทิศ MD มากกว่าทิศ TD จึงเป็นสาเหตุให้ค่ายังก์โมดูลัสและความทนแรงดึงของทิศตามขวางน้อยกว่าทิศตามการขึ้นรูป Zhang และคณะ [39] ได้ศึกษาการจัดเรียงตัวของโครงสร้าง (Structure Orientation) และความแข็งแรงของฟิล์มจากพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าฟิล์มพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีความแข็งแรงในทิศตามการขึ้นรูปมากกว่าทิศตามขวาง [39]

สำหรับเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%Elongation at Break) ของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร ในรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าการเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์การดึงยืดให้สูงขึ้น เพราะเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์มีความยืดหยุ่นสูง เนื่องจากมี Ether Block ที่มีความยืดหยุ่นสูงอยู่ในสายโซ่ ทำให้ยืดได้มากเมื่อเทียบกับพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.1.4.2 ความต้านทานการฉีกขาด (Tear Resistance)

จากผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรระหว่างพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ สามารถแสดงผลได้ในรูปที่ 4.9

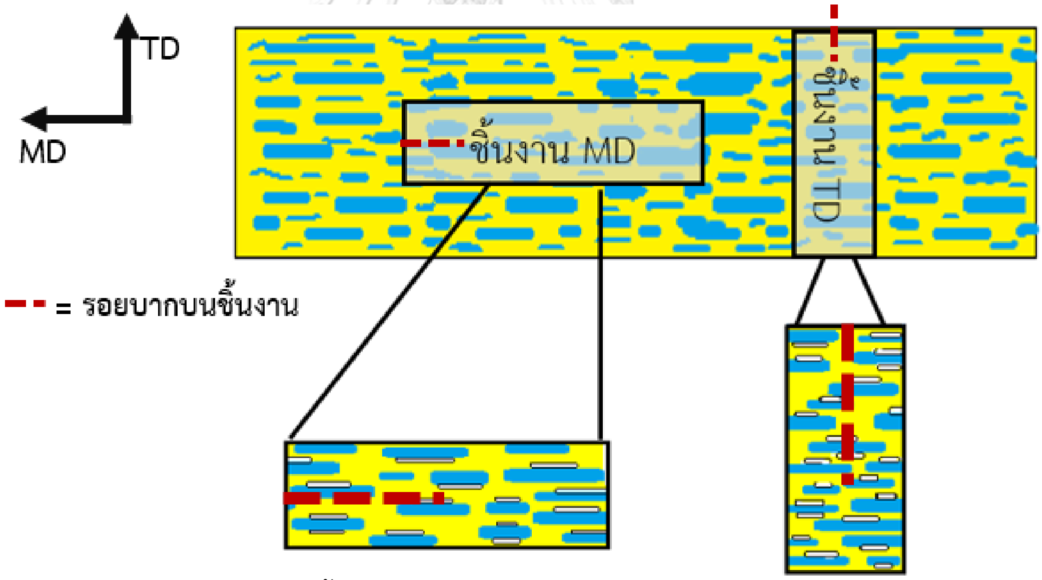


รูปที่ 4.9 ความแข็งแรงต่อการฉีกขาดของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรจากสารผสมระหว่างพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ-(MD = Machine Direction; TD = Transverse Direction)

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.9 พบว่าในช่วงแรกที่มีการเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ในปริมาณน้อยๆ จะส่งผลให้การต้านทานการฉีกขาดของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งในทิศตามการขึ้นรูป (MD) และทิศตามขวาง (TD) เพราะเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกให้กับพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ซึ่งปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้มากขึ้นจึงช่วยต้านทานการฉีกขาดได้ แต่เมื่อเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้การต้านทานการฉีกขาดลดลงอย่างมาก เพราะเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์เริ่มแยกเฟสออกจากพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

อีกทั้งในชิ้นงานมีรูขนาดเล็กเกิดขึ้นดังรูป 4.1 (ค)- (จ) และ 4.2 (ค)- (จ) ซึ่งเป็นจุดบกพร่อง (Weak Spot) ในชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานมีความต้านทานการฉีกขาดลดลงอย่างมาก

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงต่อการฉีกขาดระหว่างทิศตามการขึ้นรูป (MD) กับทิศตามขวาง (TD) พบว่า ทิศตามขวางมีความแข็งแรงต่อการฉีกขาดมากกว่าทิศตามการขึ้นรูป เนื่องจากการขึ้นรูปด้วยวิธี Cast Film มีการดึงพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะขึ้นรูป ส่งผลให้วัฏภาคของเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์มีลักษณะยืดออกตามแนวแรงดึง (ทิศทาง MD) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ดังนั้นการทำให้ฟิล์มฉีกในทิศตั้งฉากกับทิศทางการจัดเรียงตัว (Orientation) จะทำได้ยากกว่าทิศตามการขึ้นรูป Jianjun และคณะ [56] ได้ศึกษาความแข็งแรงต่อการฉีกขาดของฟิล์มจากสารผสมระหว่างพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ฟิล์มมีความต้านทานการฉีกขาดในทิศตามขวางมากกว่าทิศตามการขึ้นรูป ซึ่งผลการทดลองมีความสอดคล้องงานวิจัยนี้คือ พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้เข้ากันได้บางส่วนเท่านั้น (Partial Miscible Blend) พบว่าฟิล์มมีความต้านทานการฉีกขาดในทิศตามขวางมากกว่าทิศตามการขึ้นรูป



รูปที่ 4.10 ชิ้นงานสำหรับทดสอบความต้านทานการฉีกขาด

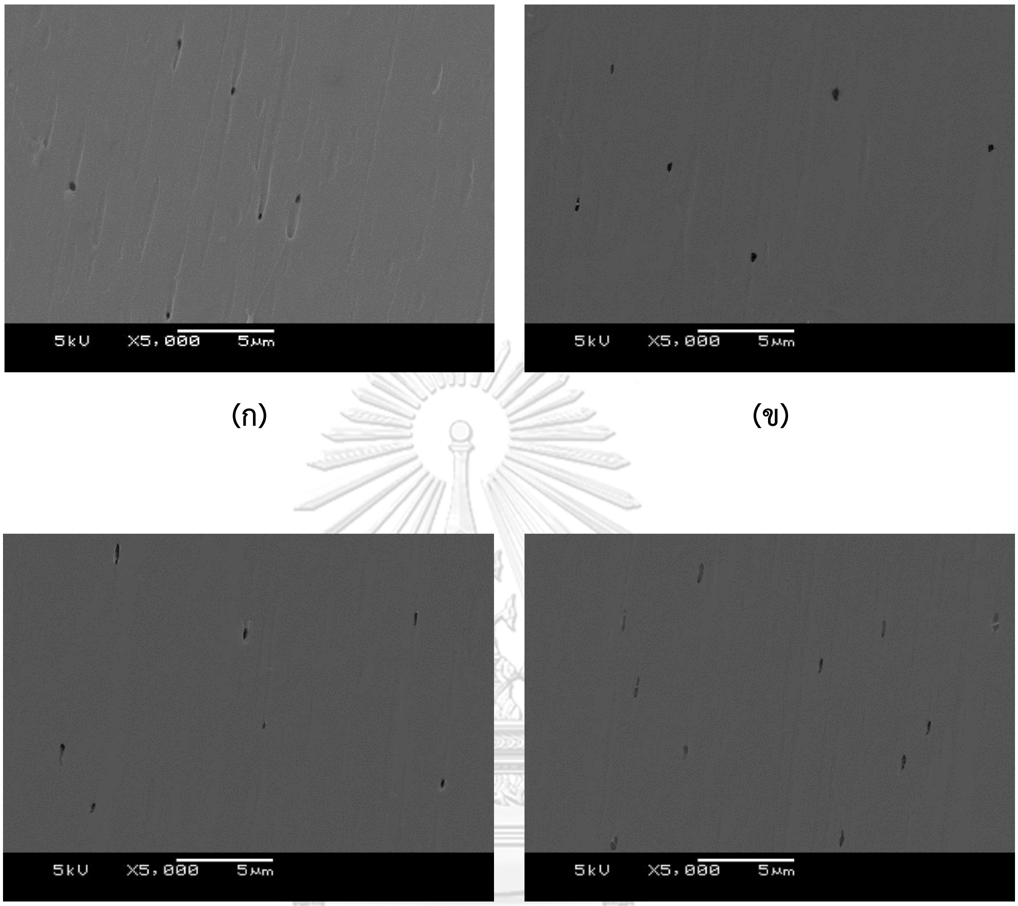
4.2 การศึกษาผลของอัตราเร็วในการดึงฟิล์ม (Film Pulling Speed) ที่มีต่ออัตราการซึมผ่านไอน้ำและแก๊ส สมบัติเชิงความร้อน สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

เนื่องจากการทดลองตอนที่ 1 ชี้ให้เห็นว่า การดึงฟิล์มในขณะขึ้นรูปส่งผลทำให้มีช่องว่างเกิดขึ้นในชิ้นงาน ซึ่งช่องว่างเหล่านี้ทำให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สมีค่ามากขึ้น [46] ดังนั้น ในตอนที่ 2 จึงมีการปรับเปลี่ยนอัตราเร็วในการดึงฟิล์ม (Film Pulling Speed) ให้มีหลายระดับ อยู่ที่ 200, 210, 220, และ 240 รอบต่อนาทีตามลำดับ โดยเลือกใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิ-ลาสโตเมอร์คงที่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มโดยใช้อุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มคงที่ 35 °C

4.2.1 การศึกษาลักษณะทางสัญฐานวิทยาของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

การศึกษาสัณฐานวิทยาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การส่องดูภาพพื้นผิว (Surface Area) และการส่องภาพตัดขวาง (Cross Section) ซึ่งภาพถ่ายแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

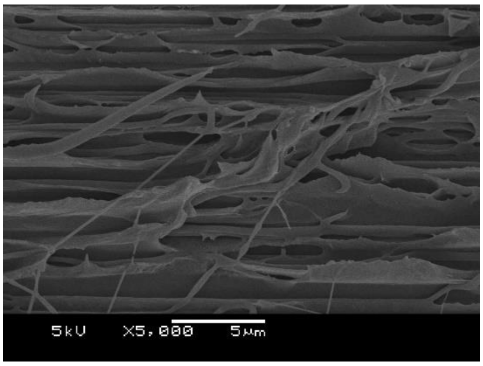


(ก) **(ข)**

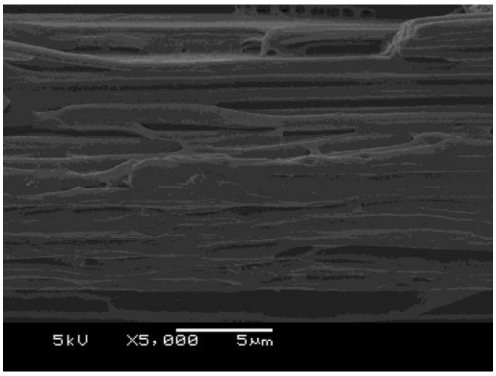
(ค) **(ง)**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

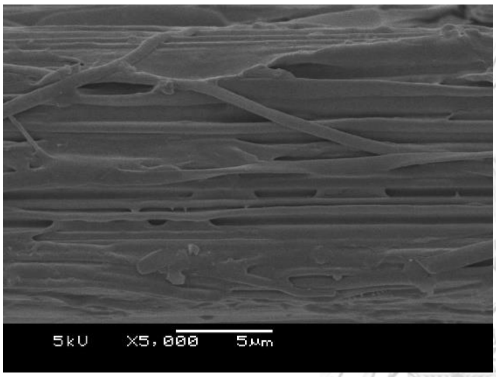
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายพื้นผิว (Surface) ของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของสารผสมระหว่างพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ (กำลังขยาย 5000 เท่า) (ก) LDPE/TPEE:50/50 (S200T35), (ข) LDPE/TPEE:50/50 (S210T35), (ค) LDPE/TPEE:50/50 (S220T35), (ง) LDPE/TPEE:50/50 (S240T35)



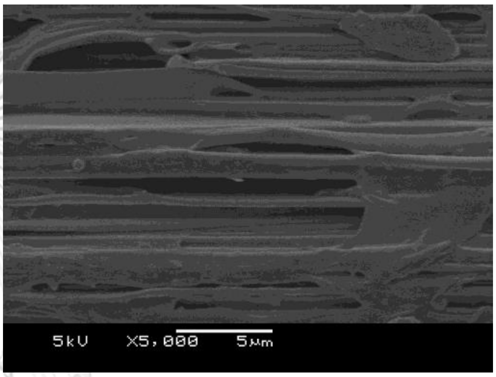
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.12 ภาพตัดขวาง (Cross-Section) ของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของสารผสมระหว่างพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โม-พลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ (กำลังขยาย 5000 เท่า) (ก) LDPE/TPEE:50/50 (S200T35), (ข) LDPE/TPEE:50/50 (S210T35), (ค) LDPE/TPEE:50/50 (S220T35), (ง) LDPE/TPEE:50/50 (S240T35)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ทำให้เห็นได้ว่าพื้นผิวของฟิล์มมีช่องว่างขนาดเล็กดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ก) - (ง) ซึ่งขนาดของช่องว่างจะใหญ่ขึ้นตามอัตราเร็วในการดึงฟิล์ม เพราะการดึงฟิล์มด้วยอัตราเร็วมากขึ้นทำให้ฟิล์มถูกดึงมากขึ้น จึงทำให้ช่องว่างขยายใหญ่ขึ้นตามไปด้วย [46]

เมื่อพิจารณาภาพตัดขวางแสดงในรูปที่ 4.12 (ก) – (ง) พบว่า ฟิล์มทุกสูตรมีช่องว่างเกิดขึ้นในชิ้นงาน โดยช่องว่างจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่ออัตราเร็วในการดึงฟิล์มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการขึ้นรูปด้วยวิธี Cast Film จะทำให้รอยต่อระหว่างวัฏภาคที่อ่อนแอของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์แยกตัว [46]

4.2.2 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

การวัดสมบัติทางเชิงความร้อนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรด้วยเครื่อง DSC ตามวิธีการทดลองในหัวข้อ 3.2.4 โดยมีช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาอยู่ระหว่าง 25 – 190 °C สามารถแสดงได้ในตารางที่ 4.2 ข้อมูลผลการทดลองอย่างละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (Percent Crystallinity, $\%X_c$) และอุณหภูมิเกิดผลึก (Crystallization Temperature, T_c) ของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่สภาวะการขึ้นรูปต่าง ๆ

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร (wt% LDPE/wt% TPEE)	เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก (Percent Crystallinity, $\%X_c$)	อุณหภูมิเกิดผลึก (°C)
LDPE/TPEE:50/50(SPEED200)	15.61±0.63	110.5±1.0
LDPE/TPEE:50/50(SPEED210)	15.82±0.37	111.2±0.3
LDPE/TPEE:50/50(SPEED220)	17.13±0.20	111.5±0.8
LDPE/TPEE:50/50(SPEED240)	19.87±0.34	111.0±0.9

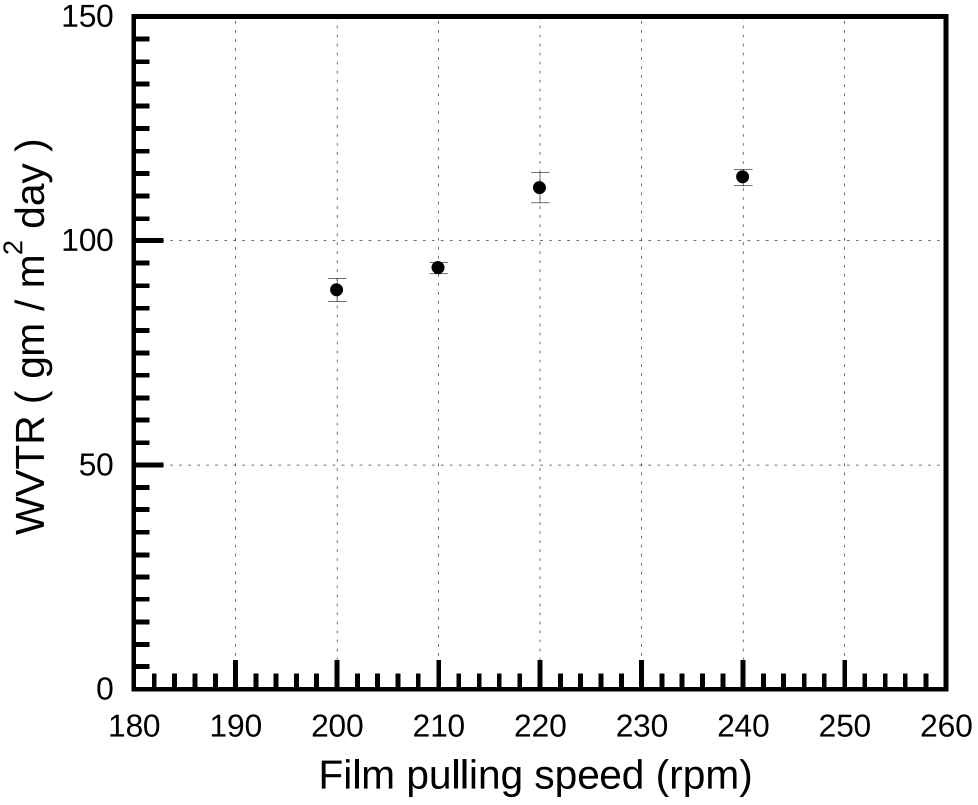
จากตารางที่ 4.2 พบว่า เมื่ออัตราเร็วในการดึงฟิล์มมากขึ้น ส่งผลทำให้ปริมาณเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการดึงฟิล์มในทิศทางตามการขึ้นรูป (Machine Direction) จะทำให้สายโซ่มาจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ โดยเรียกการเพิ่มขึ้นของผลึกเนื่องจากแรงดึงว่า Strain Induced Crystallization [39] การเกิดผลึกจากแรงดึงนั้นมีผลกระทบต่อสมบัติต่าง ๆ ไม่เหมือนกัน โดยพบว่าการมีผลึกเกิดเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สลดลง แต่จะทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าเพิ่มขึ้นได้

ในส่วนของอุณหภูมิการเกิดผลึกพบว่าอยู่ระหว่าง 110.5±1.0 ถึง 111.5±0.8 °C ซึ่งไม่ได้แตกต่างจากผลการทดลองของ Liu และคณะ [48] กับ Chen และคณะ [49] ซึ่งรายงานอุณหภูมิของพอลิเอ-ทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ คือ 111.7 และ 114.3 °C ตามลำดับ

4.2.3 การศึกษาอัตราการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

4.2.3.1 อัตราเร็วในการดึงฟิล์มที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านไอน้ำ

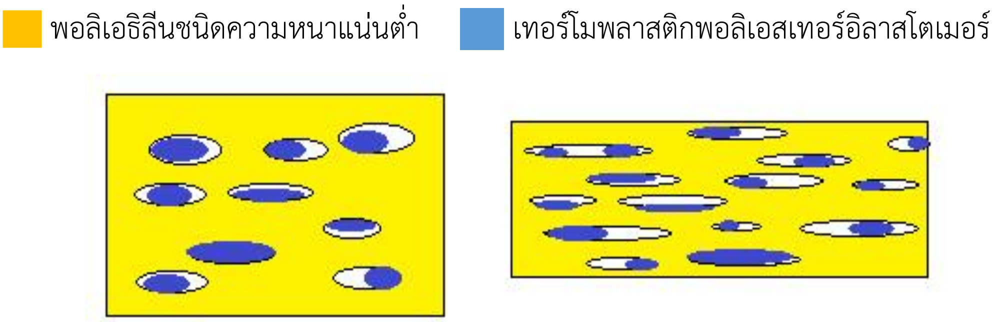
การทดสอบอัตราการซึมผ่านไอน้ำตามหัวข้อที่ 3.2.3.1 ด้วยวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E398 ได้ผลการทดลองตามรูปที่ 4.13 ข้อมูลผลการทดลองอย่างละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการดึงฟิล์มที่ส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่มีอัตราส่วนของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร้อยละ 50 โดยน้ำหนักและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเร็วในการดึงฟิล์มเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มอัตราเร็วในการดึงฟิล์มเปรียบเสมือนการเพิ่มแรงดึงที่กระทำต่อฟิล์มให้มากขึ้น ซึ่งแรงดึงนี้จะทำให้รอยต่อระหว่างเฟสของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์เกิดการแยกตัวจนกลายเป็นช่องว่าง โดยช่องว่างเหล่านี้เป็นเส้นทางให้ไอน้ำ

สามารถซึมผ่านไปได้ง่าย [46] ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ข. โดยรูปนี้ต้องการแสดงถึงการดึงฟิล์มด้วยอัตราเร็วที่มากขึ้นจะส่งผลให้รอยแยกมีขนาดใหญ่ขึ้น



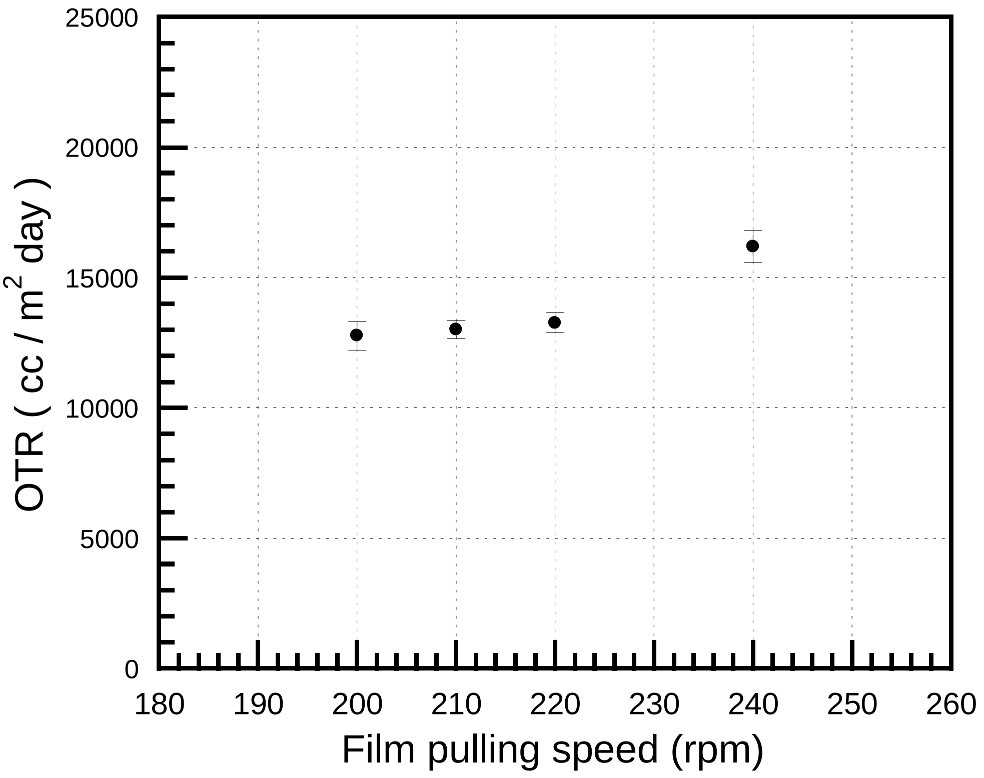
(ก.) (ข.)

รูปที่ 4.14 ช่องว่าง (Void) ภายในฟิล์มที่ถูกดึงยืดโดยในภาพ (ข.) คือฟิล์มที่ถูกดึงด้วยอัตราเร็วที่มากกว่าฟิล์มในภาพ (ก.)

4.2.3.2 อัตราเร็วในการดึงฟิล์มที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจน

การทดสอบอัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนตามหัวข้อที่ 3.2.3.2 ด้วยวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3985 ได้ผลการทดลองตามรูปที่ 4.15 ข้อมูลผลการทดลองอย่างละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



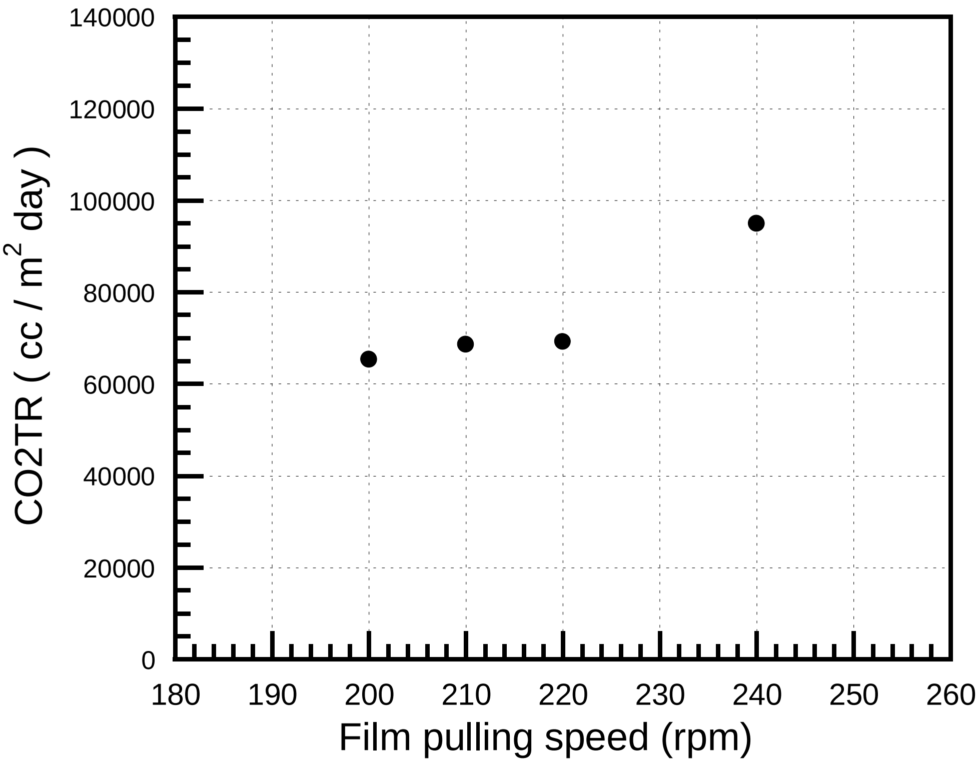
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการดึงฟิล์มที่ส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่มีอัตราส่วนของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร้อยละ 50 โดยน้ำหนักและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่า เมื่ออัตราเร็วในการดึงฟิล์มมากขึ้นจะส่งผลให้อัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยที่อัตราเร็วในการดึงฟิล์มที่ 240 รอบต่อนาที ทำให้มีอัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนสูงถึง 16,200 cc / m^2 day ซึ่งมากกว่าฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่ทำจากพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำถึง 3.8 เท่า (จากหัวข้อ 4.1.3.2 อัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนของฟิล์มที่ทำจากพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ คือ 4,187 cc / m^2 day)

สาเหตุที่ทำให้อัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนมากขึ้นเมื่ออัตราเร็วในการดึงมากขึ้น สามารถใช้แนวคิดเดียวกันกับหัวข้อ 4.2.3.1 คือ การเพิ่มอัตราเร็วในการดึงฟิล์มเปรียบเสมือนการเพิ่มแรงดึงที่กระทำต่อฟิล์มให้มากขึ้น ซึ่งแรงดึงนี้จะทำให้รอยต่อระหว่างเฟสของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์เกิดการแยกตัวจนกลายเป็นช่องว่าง โดยช่องว่างเหล่านี้เป็นเส้นทางให้แก๊สออกซิเจนสามารถซึมผ่านไปได้ง่าย [46]

4.2.3.3 อัตราเร็วในการดึงฟิล์มที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตามหัวข้อที่ 3.2.3.3 ด้วยวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1434-82 ได้แสดงในรูปที่ 4.16 เนื่องจากข้อจำกัดในการให้บริการทำให้ทดสอบการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพียงตัวอย่างละ 1 ครั้งเท่านั้น (โดยปกติแล้วจะต้องทำซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง) ทำให้รูปที่ 4.16 ไม่สามารถคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานได้



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการดึงฟิล์มที่ส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่มีอัตราส่วนของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร้อยละ 50 โดยน้ำหนักและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าอัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเร็วในการดึงฟิล์มเพิ่มขึ้น โดยแนวโน้มดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกับอัตราการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สออกซิเจนในหัวข้อ 4.2.3.1 และ 4.2.3.2 ซึ่งสาเหตุที่ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านได้มากขึ้นเกิดจากการเพิ่มอัตราเร็วในการดึงฟิล์มให้เร็วขึ้น โดยยิ่งเพิ่มอัตราเร็วในการดึงก็จะมีแรงกระทำต่อ

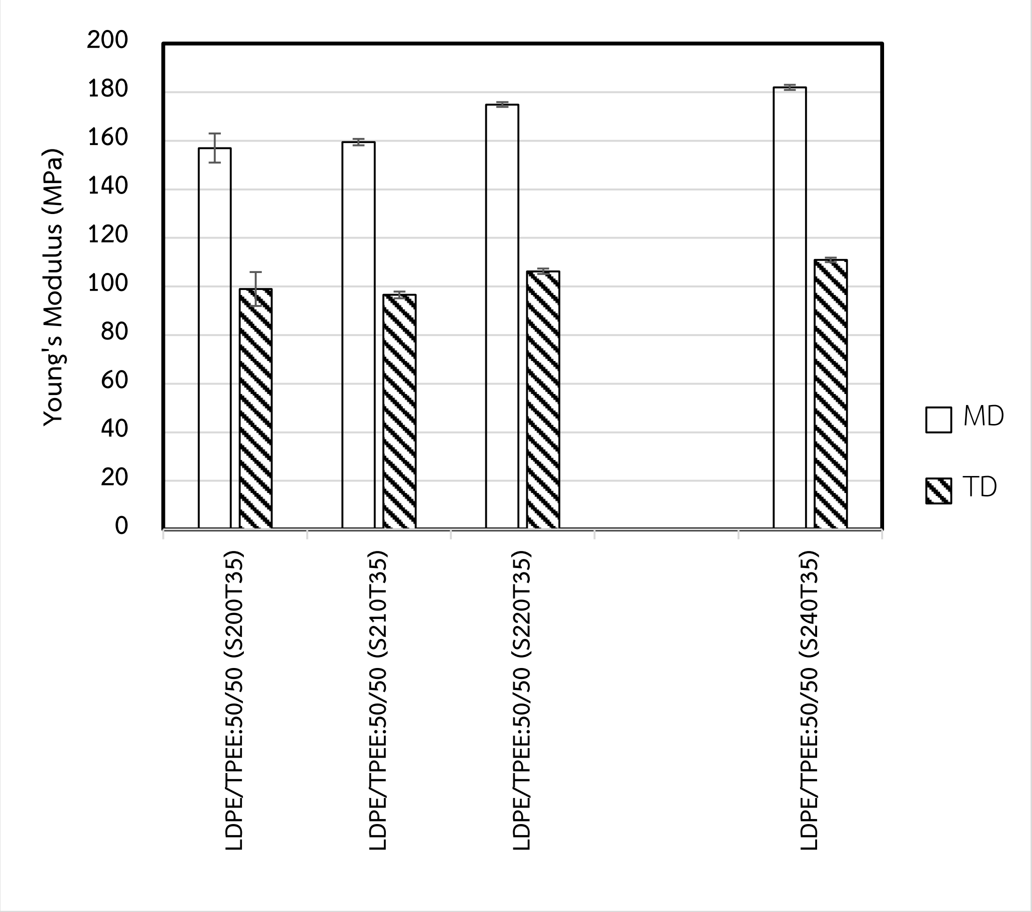
ฟิล์มมากขึ้น ซึ่งแรงที่กระทำต่อฟิล์มมีผลทำให้รอยต่อระหว่างเฟสของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์เกิดแยกออกจนกลายเป็นช่องว่าง จึงทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านได้มากขึ้น [46]

4.2.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

4.2.4.1 ความทนแรงดึง (Tensile Strength)

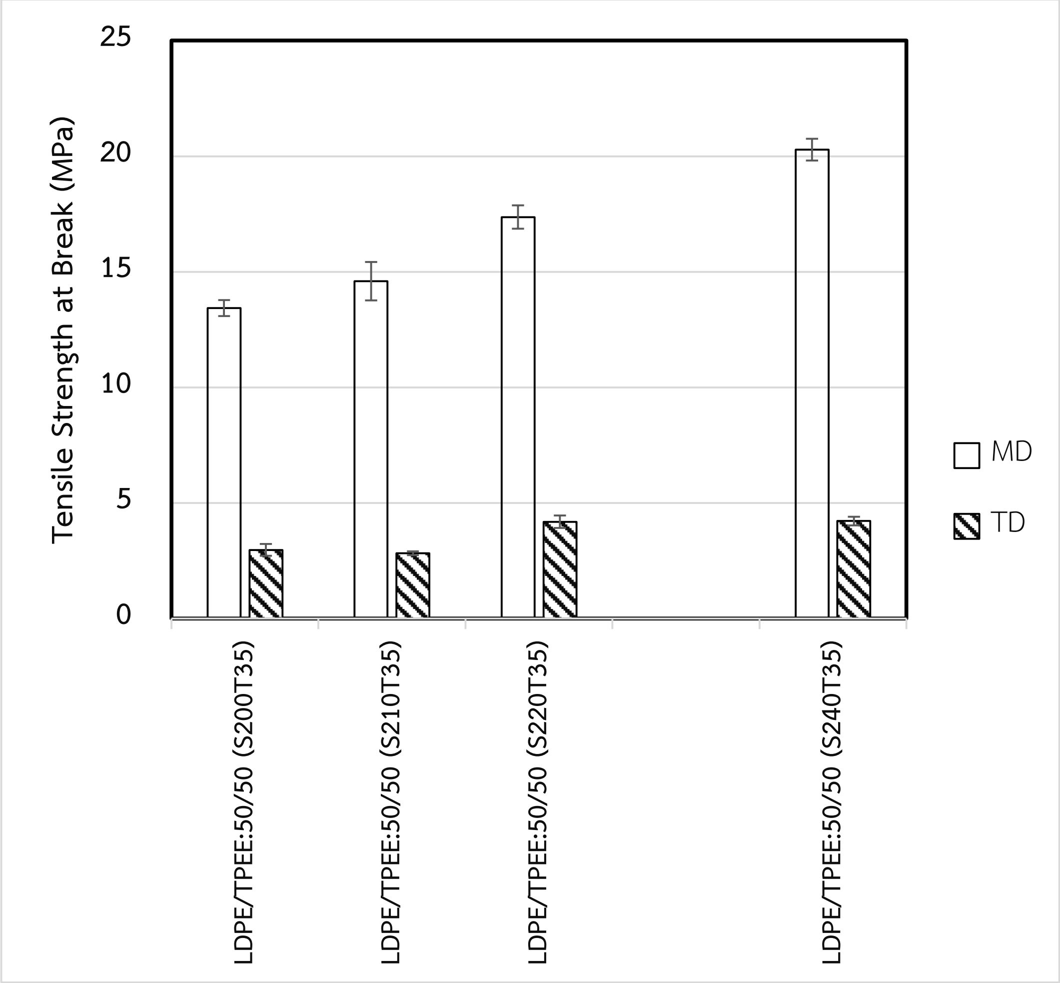
ผลการทดสอบความทนแรงดึงของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรสามารถแสดงค่ายังก์มอดุลัส (Young's Modulus) ความทนแรงดึง (Tensile Strength) ค่าเปอร์เซ็นการดึงยืด (%Elongation) ได้ในรูปที่ 4.17 – 4.19 ตามลำดับ ข้อมูลผลการทดลองอย่างละเอียดแสดงในภาคผนวก ค.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



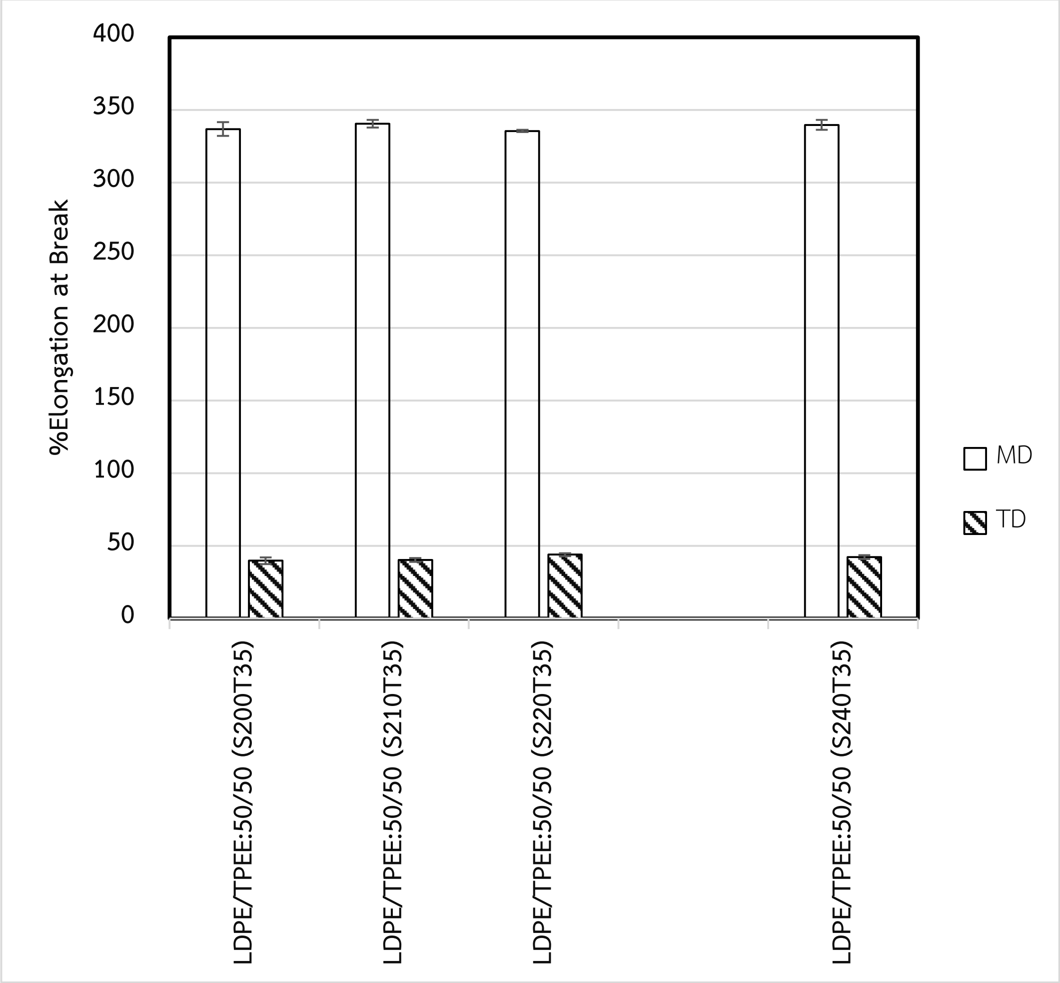
รูปที่ 4.17 ยังก์โมดูลัสของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่อัตราเร็วในการดึงฟิล์มต่าง ๆ โดยฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรมีอัตราส่วนของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร้อยละ 50 โดยมวลและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ร้อยละ 50 โดยมวล และมีอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มคงที่ 35 °C (MD = Machine Direction; TD = Transverse Direction)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.18 ความทนแรงดึงของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่อัตราเร็วในการดึงฟิล์มต่าง ๆ โดยฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรมีอัตราส่วนของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร้อยละ 50 โดยมวลและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ร้อยละ 50 โดยมวล และมีอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มคงที่ 35 °C (MD = Machine Direction; TD = Transverse Direction)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.19 เปอร์เซ็นต์การดึงยืดของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่อัตราเร็วในการดึงฟิล์มต่าง ๆ โดยฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรมีอัตราส่วนของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร้อยละ 50 โดยมวลและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ร้อยละ 50 โดยมวล และมีอุณหภูมิหล่อเย็นคงที่ 35 °C (MD = Machine Direction; TD = Transverse Direction)

รูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มอัตราเร็วในการดึงฟิล์มมีผลทำให้ค่ายังก์โมดูลัสและความทนแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งในทิศตามการขึ้นรูปและทิศตามขวาง เพราะการเพิ่มอัตราเร็วในการดึงฟิล์มมีผลทำให้ฟิล์มมีผลึกมากขึ้น ดังสอดคล้องผลการทดสอบเชิงความร้อนในตารางที่ 4.2 โดยที่เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกเพิ่มขึ้นตามอัตราเร็วในการดึงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการที่ฟิล์มมีผลึกอยู่ในโครงสร้างมากขึ้นทำให้ฟิล์มแข็งแรงมากขึ้นทำให้ต้องใช้แรงมากกว่าเดิมในการทำให้ฟิล์มเสียรูป

เมื่อพิจารณาในทิศตามขวาง (Transverse Direction) หรือ TD พบว่าค่ายังก์โมดูลัสและความทนแรงดึงของมีค่าน้อยกว่าทิศตามการขึ้นรูป (Machine Direction) หรือ MD เนื่องจากการขึ้นรูป

ฟิล์มด้วยเครื่อง Cast Film Extruder จะมีการดึงฟิล์มในทิศ MD ซึ่งทำให้สายโซ่พอลิเมอร์จัดเรียงตัวและเกิดผลึกในทิศ MD มากกว่าทิศ TD จึงเป็นสาเหตุให้ค่ายังก์โมดูลัสและความทนแรงดึงของทิศตามขวางน้อยกว่าทิศตามการขึ้นรูป ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Zhang และคณะ [39] ที่ว่าฟิล์มพอลิเอธิลีนที่ขึ้นรูปด้วยวิธีเป่า (Blown Film) จะมีความแข็งแรงทิศตามการขึ้นรูปมากกกว่าทิศตามขวาง

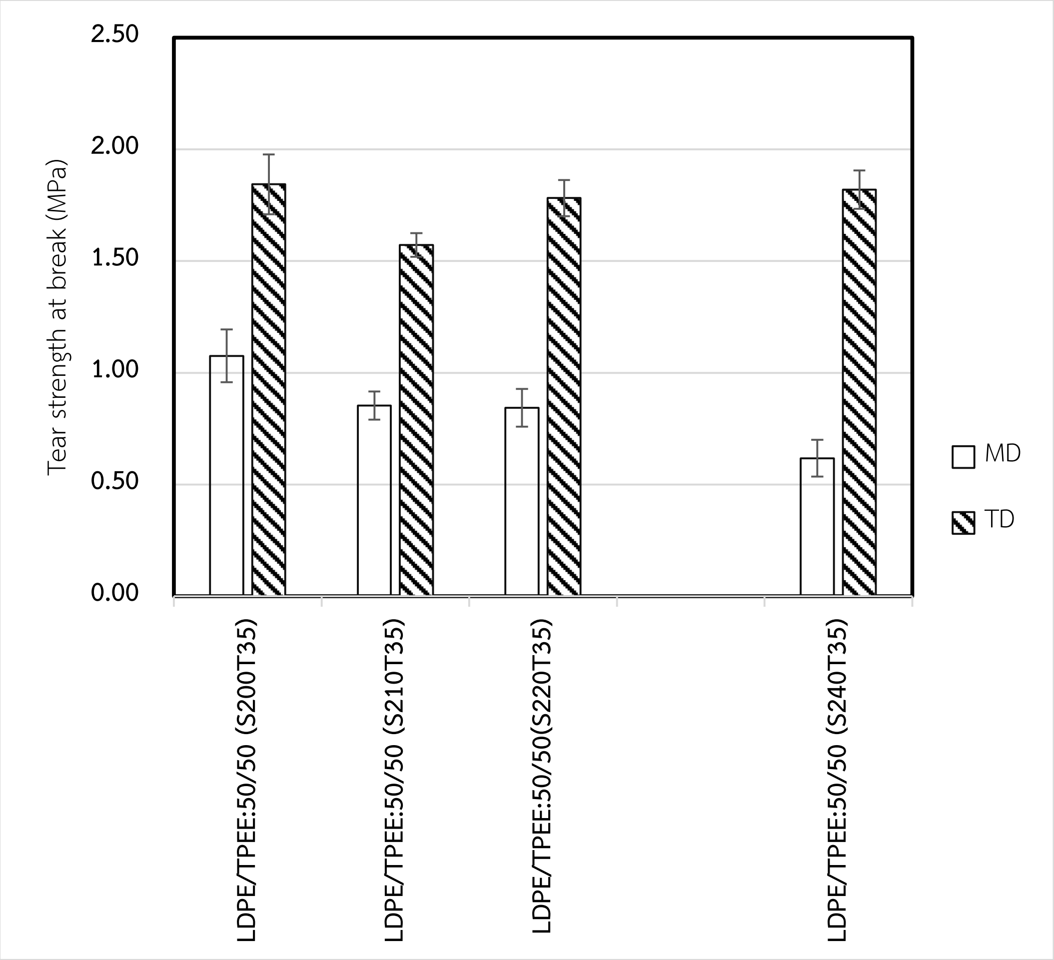
ในส่วนของเปอร์เซ็นการดึงยืดพบว่า อัตราเร็วในการดึงฟิล์มไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นการดึงยืด เนื่องจากฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรทั้งสี่สูตรเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วนเท่ากัน จึงทำให้ฟิล์มทั้งสี่สูตรมีความสามารถในการยืดไม่แตกต่างกันมากนัก

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นการดึงยืดในทิศทางตามขวางพบว่า ทิศตามขวางจะยืดได้น้อยกว่าทิศตามการขึ้นรูป โดยมีเหตุผลเดียวกับค่ายังก์โมดูลัสและความทนแรงดึงกล่าวคือ เนื่องจากการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่อง Cast Film Extruder จะมีการดึงฟิล์มในทิศ MD ซึ่งทำให้สายโซ่พอลิเมอร์จัดเรียงตัวและเกิดผลึกในทิศ MD มากกว่าทิศ TD จึงเป็นสาเหตุให้ฟิล์มมีความแข็งแรงในทิศตามการขึ้นรูปมากกว่าทิศตามขวาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2.4.2 การต้านทานการฉีกขาด (Tear Resistance)

ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรระหว่างพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ สามารถแสดงค่าความแข็งแรงต่อการฉีกขาด (Tear strength at break) ในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ความแข็งแรงต่อการฉีกขาดของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่อัตราเร็วในการดึงฟิล์มต่าง ๆ โดยฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรมีอัตราส่วนของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร้อยละ 50 โดยมวลและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ร้อยละ 50 โดยมวล และมีอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มคงที่ 35 °C (MD = Machine Direction; TD = Transverse Direction)

รูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นได้ว่าความแข็งแรงต่อการฉีกขาดในทิศตามการขึ้นรูป (MD) มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราเร็วในการดึงฟิล์มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการดึงฟิล์มให้เร็วขึ้นจะส่งผลให้เกิดรูในฟิล์มมากขึ้น โดยรูที่อยู่ในฟิล์มจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามอัตราเร็วในการดึงฟิล์มดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 โดยรูที่อยู่ในฟิล์มเปรียบเสียบจุดบกพร่องของชิ้นงาน จึงทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงต่อการฉีกขาดต่ำ

เมื่อพิจารณาความแข็งแรงต่อการฉีกขาดในทิศตามขวาง (TD) พบว่าในช่วงแรกความแข็งแรงต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง เพราะการดึงฟิล์มด้วยอัตราเร็วมากขึ้นส่งผลให้เกิดรูในฟิล์มมากขึ้น ซึ่งรูเหล่านี้เปรียบเสมือนจุดบกพร่องในชิ้นงาน ส่งผลให้ความแข็งแรงต่อการฉีกขาดลดลง แต่เมื่อดึงฟิล์มให้เร็วมากขึ้นจะทำให้ฟิล์มมีผลึกเพิ่มขึ้นจากการดึง (Strain Induced Crystallization) ทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นตามลำดับ [39]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

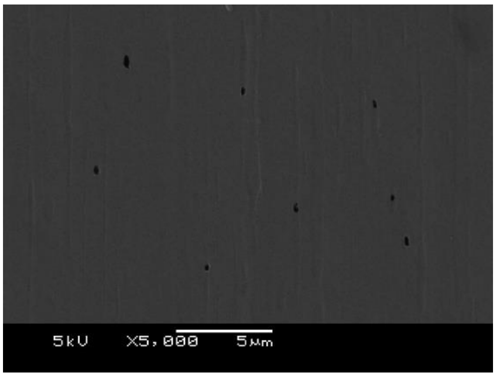
4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์ม (Film Cooling Temperature) ที่มีต่ออัตราการซึมผ่านไอน้ำและแก๊ส สมบัติเชิงความร้อน สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

เนื่องจากการทดลองตอนที่ 1 ชี้ให้เห็นว่า ความเป็นผลึกของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊ส [28] ดังนั้น ตอนที่ 3 จึงมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์ม (Film Cooling Temperature) ให้มีหลายระดับอยู่ที่ 15, 35 และ 50 °C โดยเลือกใช้อัตราส่วนโดยมวลระหว่างพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์คงที่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรได้ทำเหมือนการทดลองตอนที่ 1

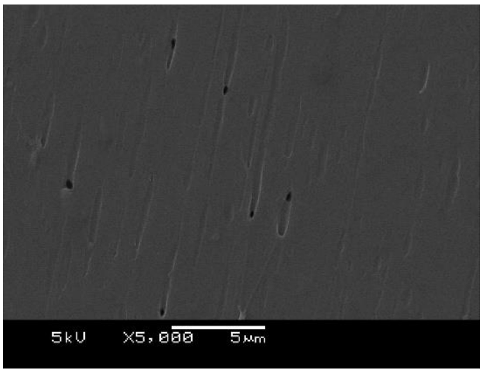
4.3.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

การศึกษาสัณฐานวิทยาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การส่องดูภาพพื้นผิว (Surface Area) และการส่องภาพตัดขวาง (Cross Section) ดังแสดงในรูปที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ

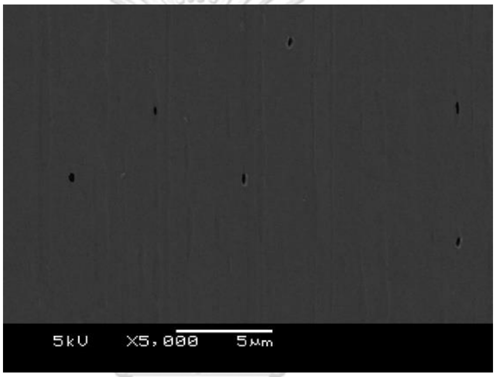
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



(ก)



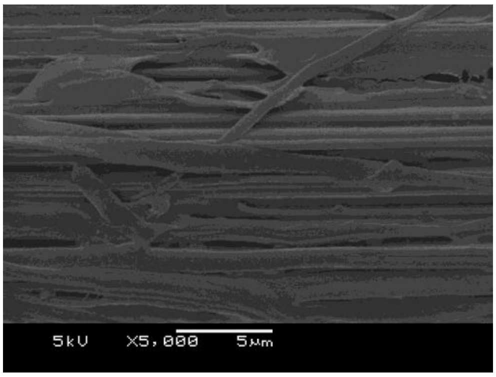
(ข)



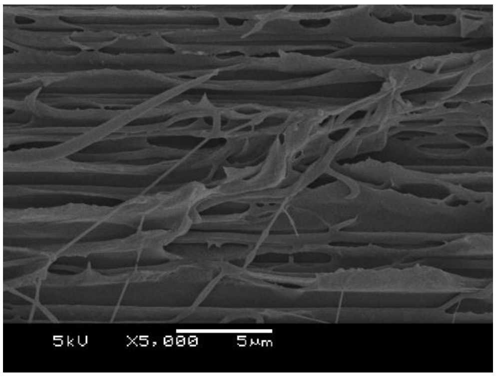
(ค)

รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายพื้นผิว (Surface) ของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของสารผสมระหว่างพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ (กำลังขยาย 5000 เท่า) (ก) LDPE/TPEE:50/50 (S200T15), (ข) LDPE/TPEE:50/50 (S200T35) และ (ค) LDPE/TPEE:50/50 (S200T50)

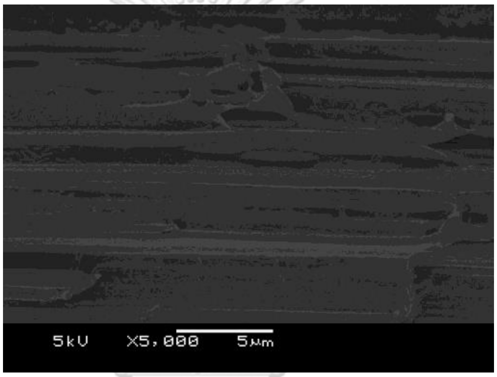
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายพื้นผิว (Surface) ของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของสารผสมระหว่างพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ (กำลังขยาย 5000 เท่า) (ก) LDPE/TPEE:50/50 (S200T15), (ข) LDPE/TPEE:50/50 (S200T35) และ (ค) LDPE/TPEE:50/50 (S200T50)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดรูปที่ 4.21 (ก)-(ค) พบว่า พื้นผิวฟิล์มที่อุณหภูมิหล่อเย็นแตกต่างกันมีช่องว่างขนาดเล็กเกิดขึ้น โดยขนาดของช่องว่างของฟิล์มแต่ละสูตรมีขนาดใกล้เคียงกัน ช่องว่างขนาดเล็กบนผิวฟิล์มเกิดจากรอยต่อระหว่างวัฏภาคของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์แยกตัวเนื่องจากแรงดึงขณะขึ้นรูปด้วยวิธี Cast Film [46]

เมื่อพิจารณาภาพตัดขวาง รูปที่ 4.22 (ก)-(ค) ก็พบเช่นกันว่าอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มไม่มีผลต่อการเกิดช่องว่างภายในฟิล์ม เนื่องจากจากฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรทั้งสามสูตรมีช่องว่าง

เกิดขึ้นในชิ้นงานเหมือนกัน จากแรงดึงขณะขึ้นรูปฟิล์มทำให้รอยต่อระหว่างวัฏภาคที่อ่อนแอของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์แยกตัวจนกลายเป็นช่องว่าง [46] แต่อุณหภูมิหล่อเย็นไม่มีผลกระทบเพิ่มเติม

4.3.2 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

การวัดสมบัติเชิงความร้อนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรด้วยเครื่อง DSC ด้วยวิธีการทดลองในหัวข้อ 3.2.4 โดยมีช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาอยู่ระหว่าง 25 – 190 °C สามารถแสดงผลได้ในตารางที่ 4.3 ข้อมูลผลการทดลองอย่างละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.

ตารางที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก (Percent Crystallinity, $\%X_c$) และอุณหภูมิเกิดผลึก (Crystallization Temperature, T_c) ของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร (wt% LDPE/wt% TPEE)	เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก (Percent Crystallinity, $\%X_c$)	อุณหภูมิเกิดผลึก (°C)
LDPE/TPEE:50/50 (S200T15)	14.79±0.68	110.8±0.6
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	15.61±0.63	110.5±1.0
LDPE/TPEE:50/50 (S200T50)	16.57±0.44	110.9±0.4

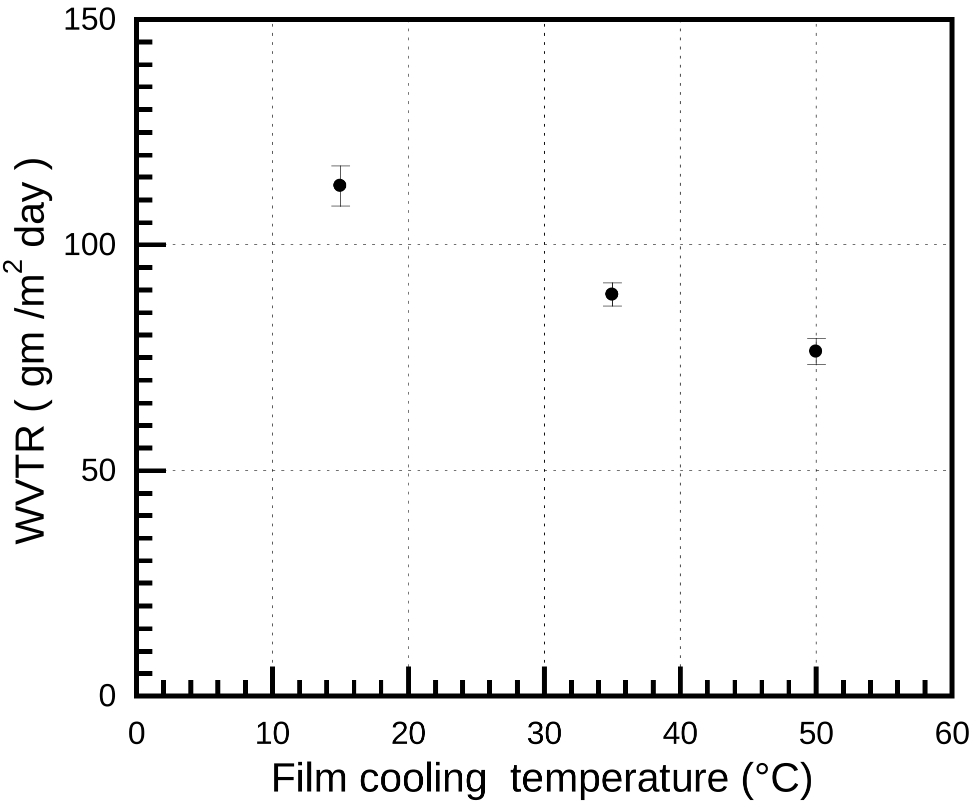
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.3 แสดงเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิหล่อเย็นเพิ่มขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เพราะเมื่อใช้อุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มต่ำจะทำให้พอลิเมอร์เหลวที่ออกมาจากหัวดายเย็นตัวทันทีสายโซ่พอลิเมอร์ไม่สามารถเรียงตัวไม่ทัน จึงไม่สามารถเกิดผลึกได้ในปริมาณมาก ในทางกลับกันหากอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มเพิ่มสูงขึ้นฟิล์มก็จะไม่ได้เย็นตัวทันที จึงส่งผลฟิล์มสามารถเกิดผลึกเพิ่มขึ้นได้บ้าง [57]

4.3.3 การศึกษาอัตราการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

4.3.3.1 อุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านไอน้ำ

การทดสอบอัตราการซึมผ่านไอน้ำตามหัวข้อที่ 3.2.3.1 ด้วยวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E398 ได้ผลการทดลองตามรูปที่ 4.23 ข้อมูลผลการทดลองอย่างละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มที่ส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่มีอัตราส่วนของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร้อยละ 50 โดยน้ำหนักและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

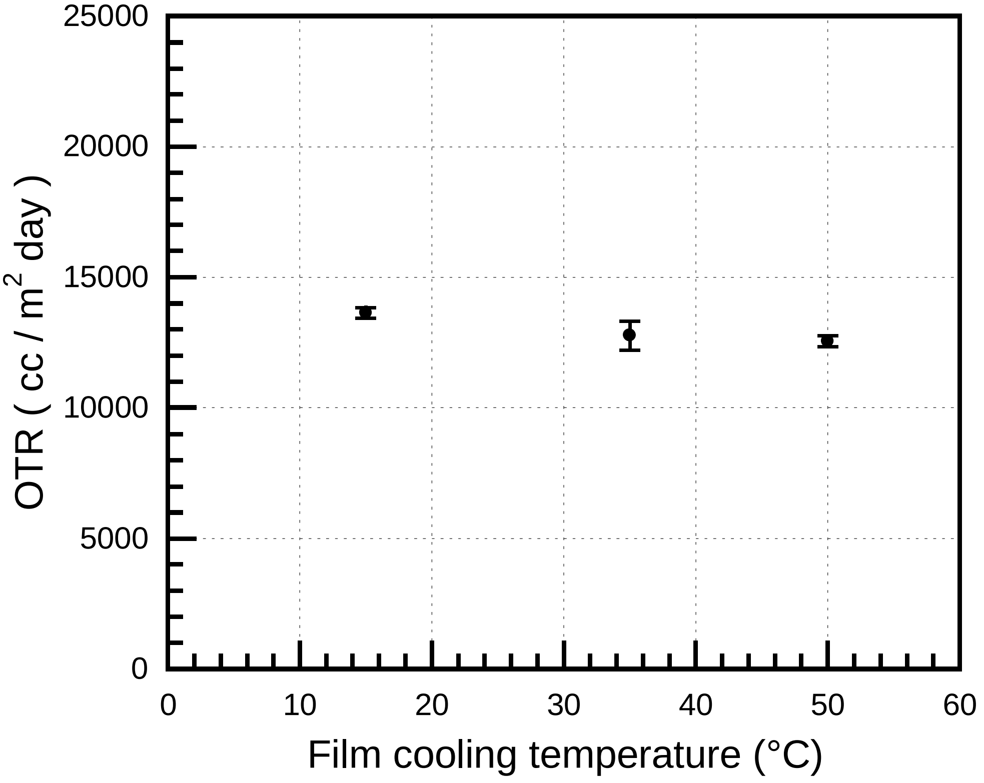
รูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มเป็นที่ 15, 35 และ 50 °C ตามลำดับส่งผลให้อัตราการซึมผ่านไอน้ำมีแนวโน้มลดลง แต่ไม่ได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการซึมผ่านไอน้ำจะมีความสัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกในฟิล์ม (Percent Crystallinity) จากตารางที่ 4.3 ในหัวข้อ 4.3.2 พบว่าเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกของฟิล์มบรรจุภัณฑ์

บรรยากาศดัดแปรที่มีอุณหภูมิหล่อเย็น 15, 35 และ 50 °C ไม่แตกต่างกันมากนัก จึงส่งผลให้อัตราการซึมผ่านไอน้ำไม่ได้แตกต่างกันมากด้วยเช่นกัน

โดยทั่วไปแล้วฟิล์มที่มีเปอร์เซ็นต์ผลึกมาก จะมีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สค่อนข้างน้อย เพราะผลึกทำหน้าที่เป็นตัวขัดขวางการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊ส [28] ดังนั้นการบังคับให้พอลิเมอร์หลอมเหลวที่ออกมาจากหัวดายเย็นตัว (Cooling) ทันที จะช่วยลดการเกิดผลึกในฟิล์มได้ เพราะสายโซ่ไม่สามารถจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ทัน

4.3.3.2 อุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจน

การทดสอบอัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนตามหัวข้อที่ 3.2.3.2 ซึ่งวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3985 ได้ผลการทดลองตามรูปที่ 4.24 ข้อมูลผลการทดลองอย่างละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.



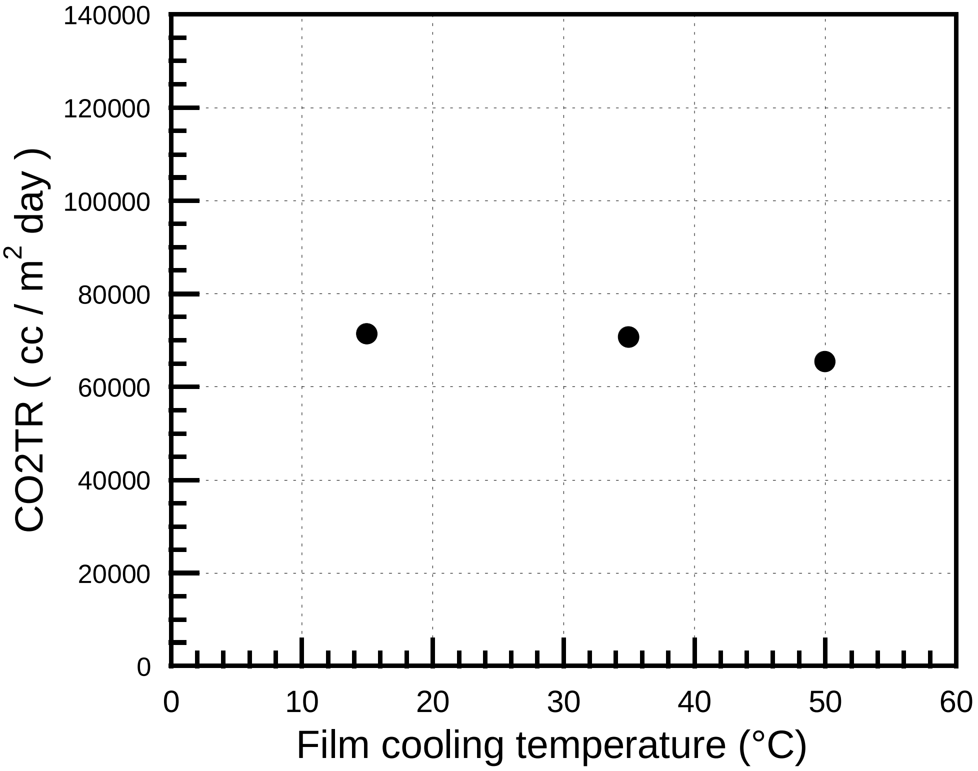
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มที่ส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่มีอัตราส่วนของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร้อยละ 50 โดยน้ำหนักและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.24 พบว่าเมื่ออุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มที่ 15 °C ทำให้ฟิล์มมีอัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนมากที่สุด คือ 13,630.6 cc / m^2 day จากนั้นอัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนจะค่อย ๆ ลดลงตามอุณหภูมิหล่อเย็นที่เพิ่มขึ้น แต่อัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนที่อุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มแตกต่างกันไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยการพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกในฟิล์ม (Percent Crystallinity) ในตารางที่ 4.3 หัวข้อ 4.3.2 จะพบว่า ปริมาณผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มที่เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณผลึกที่เพิ่มขึ้นก็ไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้อัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่ใช้อุณหภูมิหล่อเย็น 15, 35 และ 50 °C ไม่ได้ต่างกันมากนัก

4.3.3.3 อุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตามหัวข้อที่ 3.2.3.3 ด้วยวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1434-82 ได้ผลการทดลองตามรูปที่ 4.25 แต่เนื่องจากข้อจำกัดในการให้บริการ ทำให้ทดสอบการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพียงตัวอย่างละ 1 ครั้งเท่านั้น (โดยปกติแล้วจะต้องทำซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง) ทำให้รูปที่ 4.25 ไม่สามารถคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



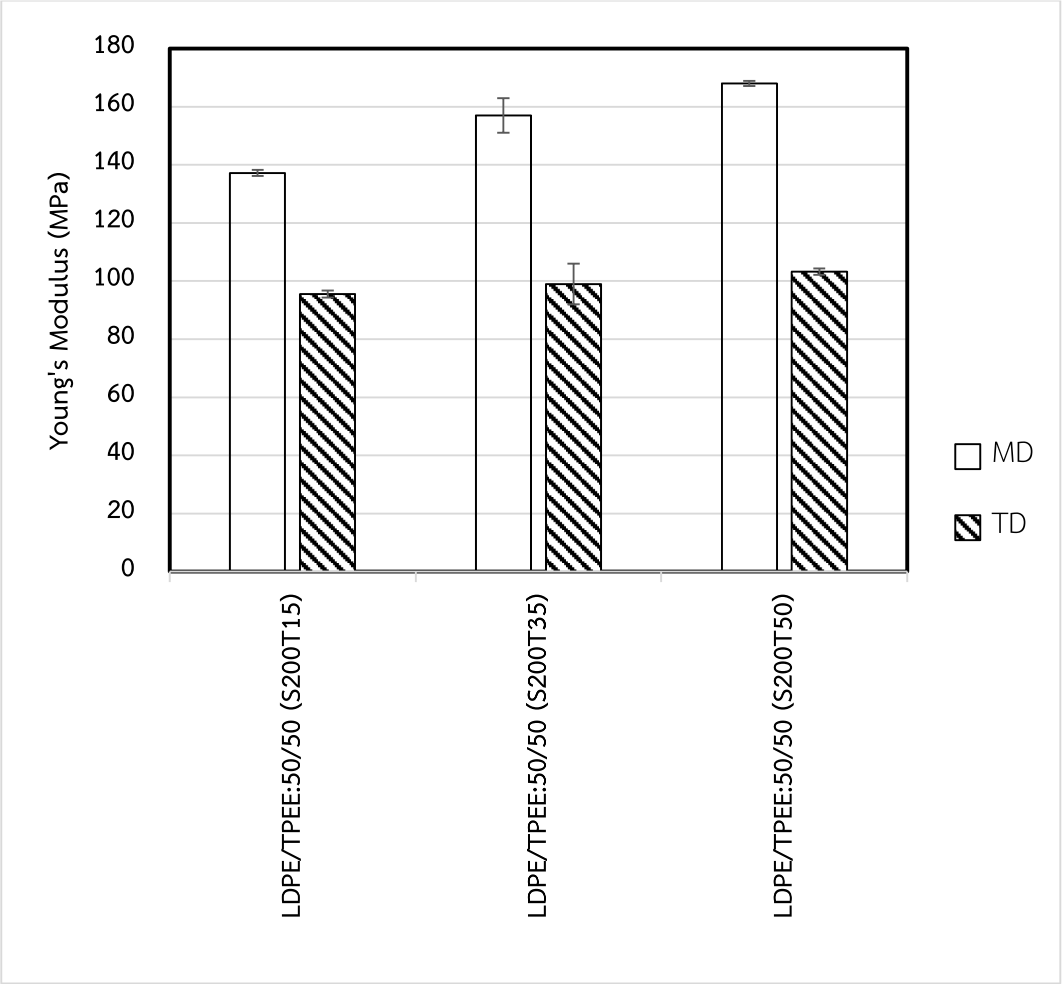
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มที่ส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่มีอัตราส่วนของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร้อยละ 50 โดยมวลและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ร้อยละ 50 โดยมวล

จากรูปที่ 4.25 พบว่าอัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ถึงแม้ว่าจะมีอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มที่แตกต่างกันก็ตาม เพราะเมื่อพิจารณาตารางที่ 4.3 พบว่าเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก (Percent Crystallinity) ของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่อุณหภูมิหล่อเย็น 15, 35 และ 50 °C มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน จึงส่งผลให้อัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มทั้ง 3 สูตรนี้มีค่าใกล้เคียงกัน

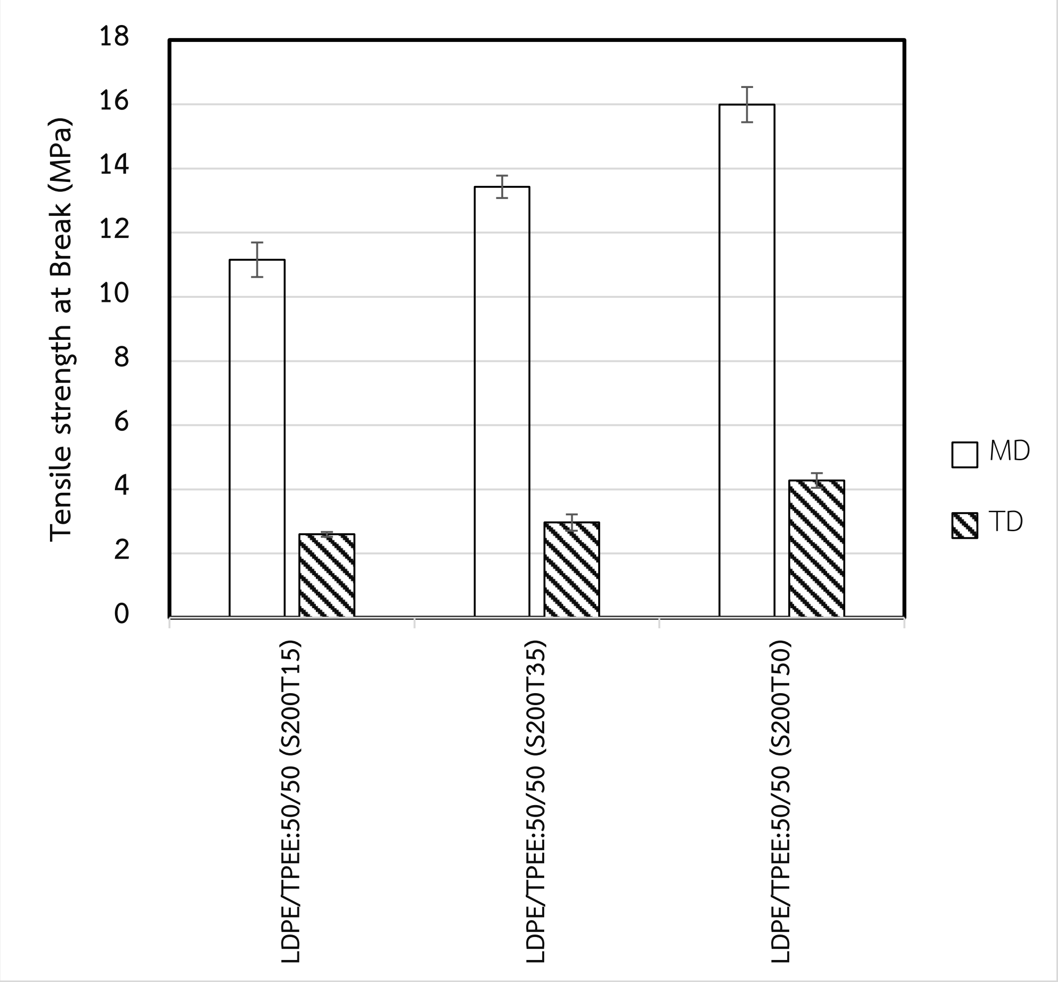
4.3.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

4.3.4.1 ความทนแรงดึง (Tensile Strength)

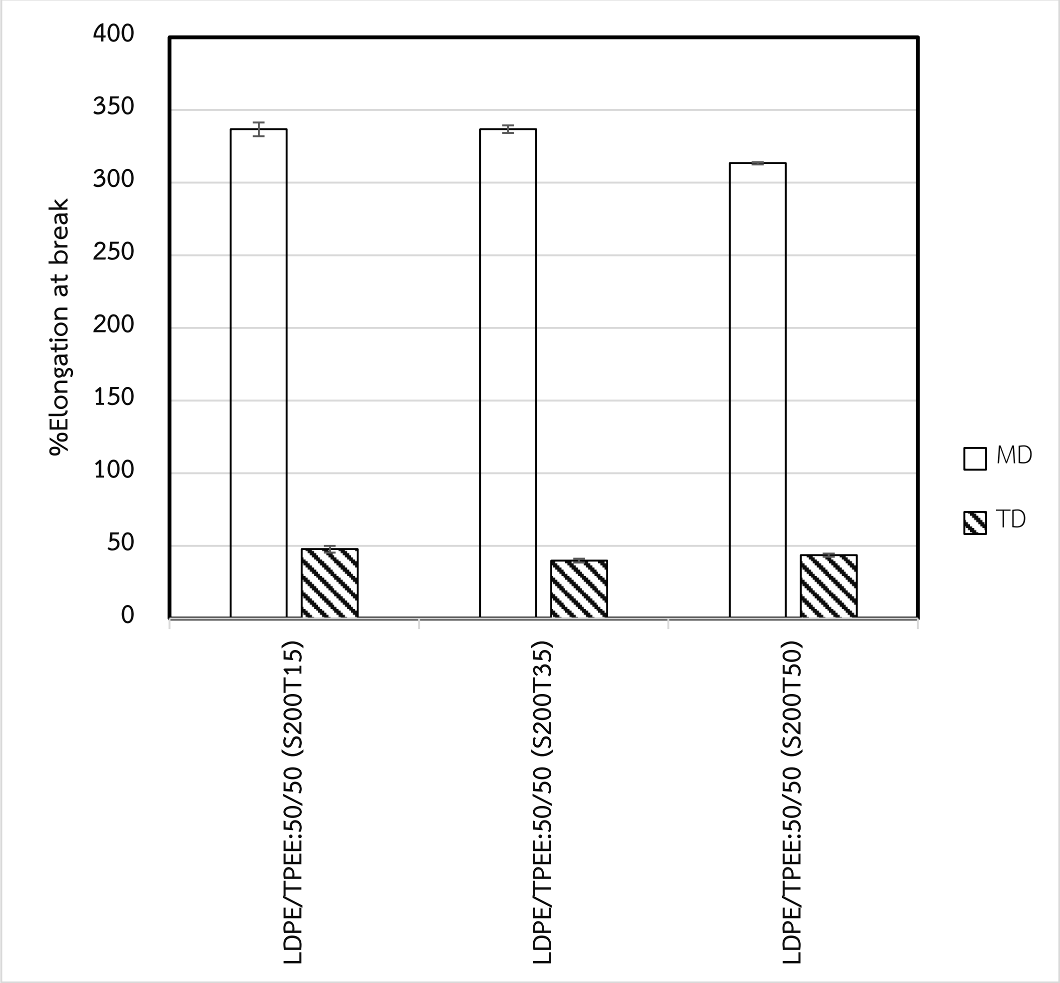
ผลการทดสอบความทนแรงดึงของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรระหว่างพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ สามารถแสดงค่ายังก์มอดุลัส (Young's Modulus) ความทนแรงดึง (Tensile Strength) ค่าเปอร์เซ็นการดึงยืด (%Elongation) ในรูปที่ 4.26 – 4.28 ตามลำดับ ข้อมูลผลการทดลองอย่างละเอียดแสดงในภาคผนวก ค.



รูปที่ 4.26 ยังก์โมดูลัสของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่อุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มต่าง ๆ โดยฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรมีอัตราส่วนของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร้อยละ 50 โดยมวลและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ร้อยละ 50 โดยมวล และมีอัตราเร็วการดึงฟิล์มคงที่ 200 รอบต่อนาที (MD = Machine Direction; TD = Transverse Direction)



รูปที่ 4.27 ความทนแรงดึงของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่อุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มต่าง ๆ โดยฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรมีอัตราส่วนของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร้อยละ 50 โดยมวลและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ร้อยละ 50 โดยมวล และมีอัตราเร็วการดึงฟิล์มคงที่ 200 รอบต่อนาที (MD = Machine Direction; TD = Transverse Direction)



รูปที่ 4.28 เปอร์เซ็นต์การดึงยืดของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่อุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มต่าง ๆ โดยฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรมีอัตราส่วนของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร้อยละ 50 โดยมวลและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ร้อยละ 50 โดยมวล และมีอัตราเร็วการดึงฟิล์มคงที่ 200 รอบต่อนาที (MD = Machine Direction; TD = Transverse Direction)

เมื่อพิจารณาค่ายังก์โมดูลัสและความทนแรงดึงในรูปที่ 4.26 และ 4.27 ทั้งทิศทางตามการขึ้นรูปและทิศตามขวางพบว่า เมื่ออุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ายังก์โมดูลัสและความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มทำให้ปริมาณผลึกในฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งการที่ฟิล์มมีผลึกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ฟิล์มมีค่ายังก์โมดูลัสและความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

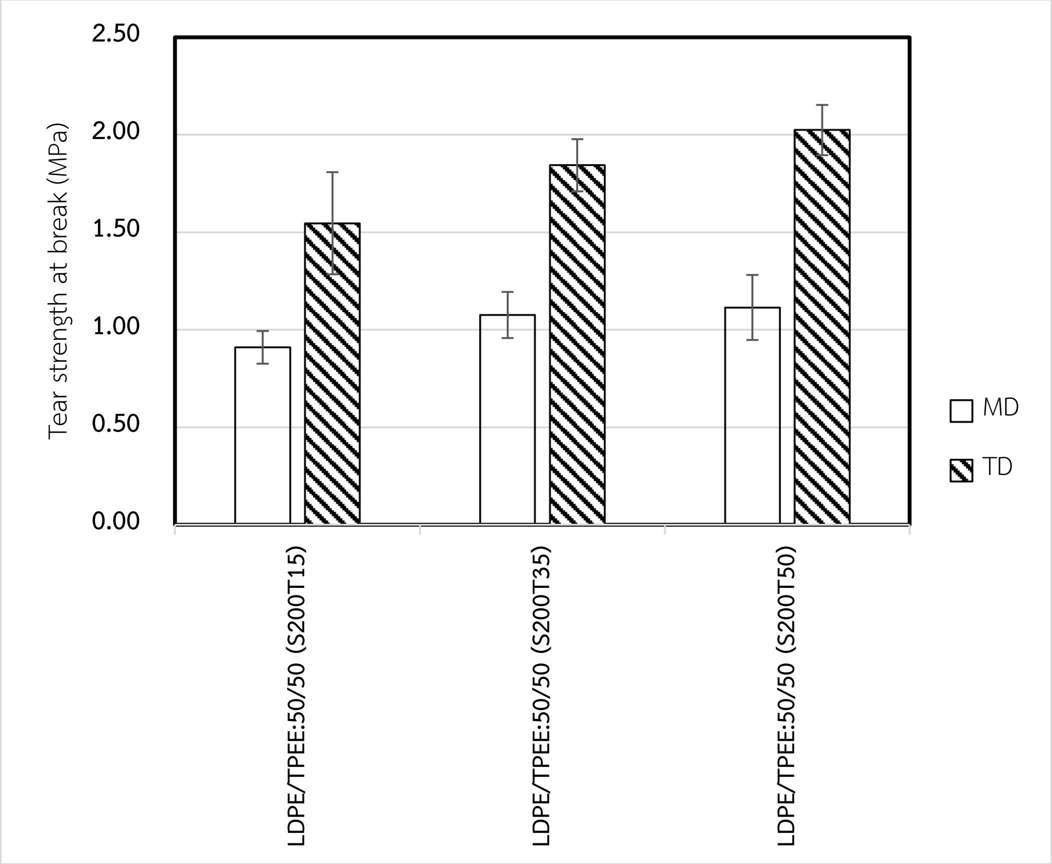
เมื่อเทียบค่ายังก์โมดูลัสและความทนแรงดึงระหว่างทิศตามการขึ้นรูปกับทิศตามขวางพบว่าทิศตามการขึ้นรูปมีความแข็งแรงมากกว่าทิศตามขวาง เนื่องจากการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธี Cast Film จะมีการดึงฟิล์มในทิศ MD ซึ่งทำให้สายโซ่พอลิเมอร์จัดเรียงตัวและเกิดผลึกในทิศ MD มากกว่าทิศ TD จึงเป็นสาเหตุให้ค่ายังก์โมดูลัสและความทนแรงดึงของทิศตามขวางน้อยกว่าทิศตามการขึ้นรูป ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Zhang และคณะ [39] พบว่าฟิล์มพอลิเอธิลีนที่ขึ้นรูปด้วยวิธีเป่า (Blown Film) จะมีความแข็งแรงทิศตามการขึ้นรูปมากกกว่าทิศตามขวาง

เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มที่มีผลต่อเปอร์เซ็นการดึงยืดในรูปที่ 4.28 พบว่าฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรทั้งสามสูตรมีเปอร์เซ็นการดึงยืดไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรทั้งสามสูตรเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วนเท่ากัน จึงทำให้ฟิล์มทั้งสี่สูตรมีความสามารถในการยืดไม่แตกต่างกันมากนัก

4.3.4.2 การต้านทานการฉีกขาด (Tear Resistance)

ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรระหว่างพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.29

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.29 ความแข็งแรงต่อการฉีกขาดของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่อุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มต่าง ๆ โดยฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรมีอัตราส่วนของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร้อยละ 50 โดยมวลและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ร้อยละ 50 โดยมวล และมีอัตราเร็วการดึงฟิล์มคงที่ 200 รอบต่อนาที (MD = Machine Direction; TD = Transverse Direction)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.29 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งทิศตามการขึ้นรูป (MD) และทิศตามขวาง (TD) เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มทำให้ฟิล์มมีปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งการที่ฟิล์มมีผลึกมากขึ้นทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงต่อการฉีกขาดมากขึ้น

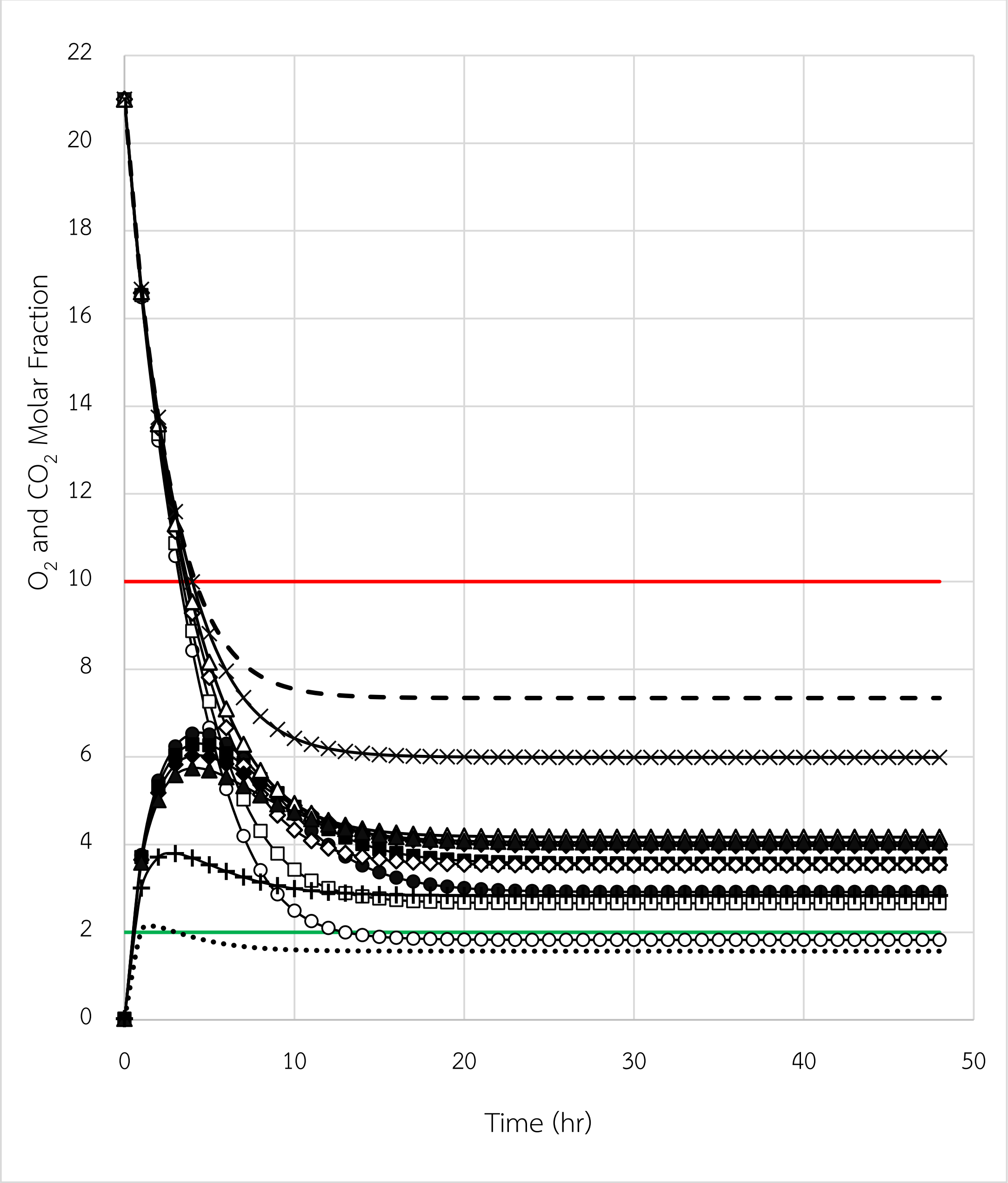
เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงต่อการฉีกขาดของทิศตามการขึ้นรูปกับทิศตามขวางพบว่า ทิศตามขวางมีความแข็งแรงต่อการฉีกขาดมากกว่าทิศตามการขึ้นรูปเพราะการขึ้นรูปแบบ Cast Film ทำให้วัฏภาคของเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์เรียงตัวในทิศตามการขึ้นรูปดังแสดงในรูปที่ 4.22 ส่งผลให้การทำให้ฟิล์มฉีกขาดในทิศตามการขึ้นรูปทำได้ง่ายกว่าทิศตามขวาง [56]

4.4 การทำนายด้วยแบบจำลองหาเวลาที่แก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์เข้าสู่สภาวะคงตัวและปริมาณแก๊สออกซิเจนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรเมื่อผักและผลไม้ (ในที่นี้กำหนดให้มะม่วงเป็นตัวแทน) ความดันของระบบ Head space พื้นที่ผิวฟิล์ม ความหนาฟิล์ม และอุณหภูมิคงที่ ดังนั้นเมื่อค่าความสามารถในการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มบรรจุภัณฑ์เปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้ปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะคงตัวและเวลาที่แก๊สทั้งสองชนิดเข้าสู่สภาวะคงตัวเปลี่ยนแปลงตามเวลา ด้วยเหตุนี้ซิมมูเลชันจึงมีบทบาทสำคัญในทำนายหาปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์เปลี่ยนแปลงตามเวลา

จากการซิมมูเลชันตามหัวข้อ 3.2.7 โดยใช้โปรแกรมแมทแลป (MATLAB) สามารถนำผลจากซิมมูเลชันมาวาดเป็นกราฟการเปลี่ยนแปลงของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตามเวลาได้ดังรูปที่ 4.30 เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ผลิตได้ในตอนที่ 1 ไปใช้ในซิมมูเลชั่น ตัวเลขผลจากการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง. (ตาราง ง2-ง7)

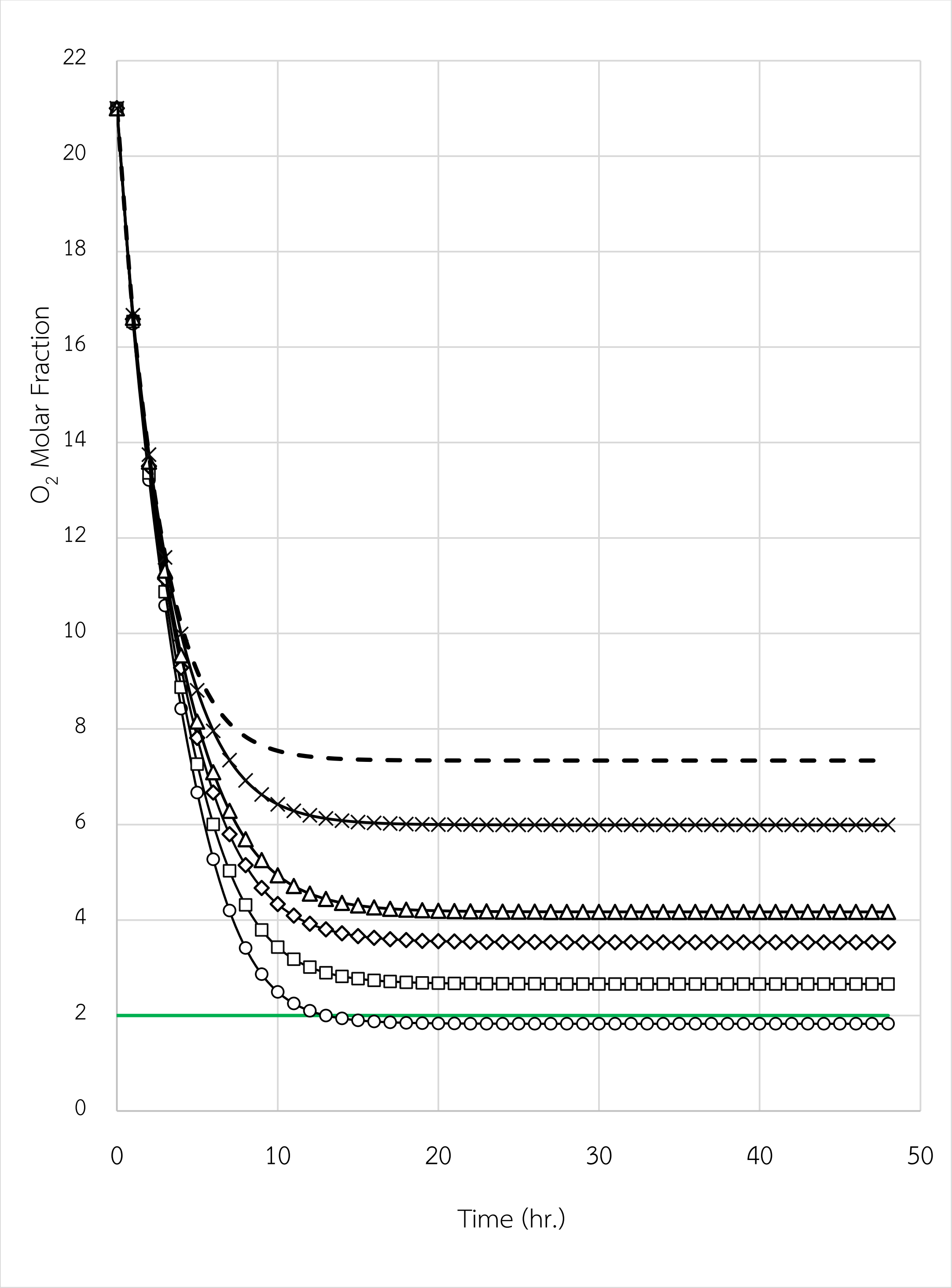
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



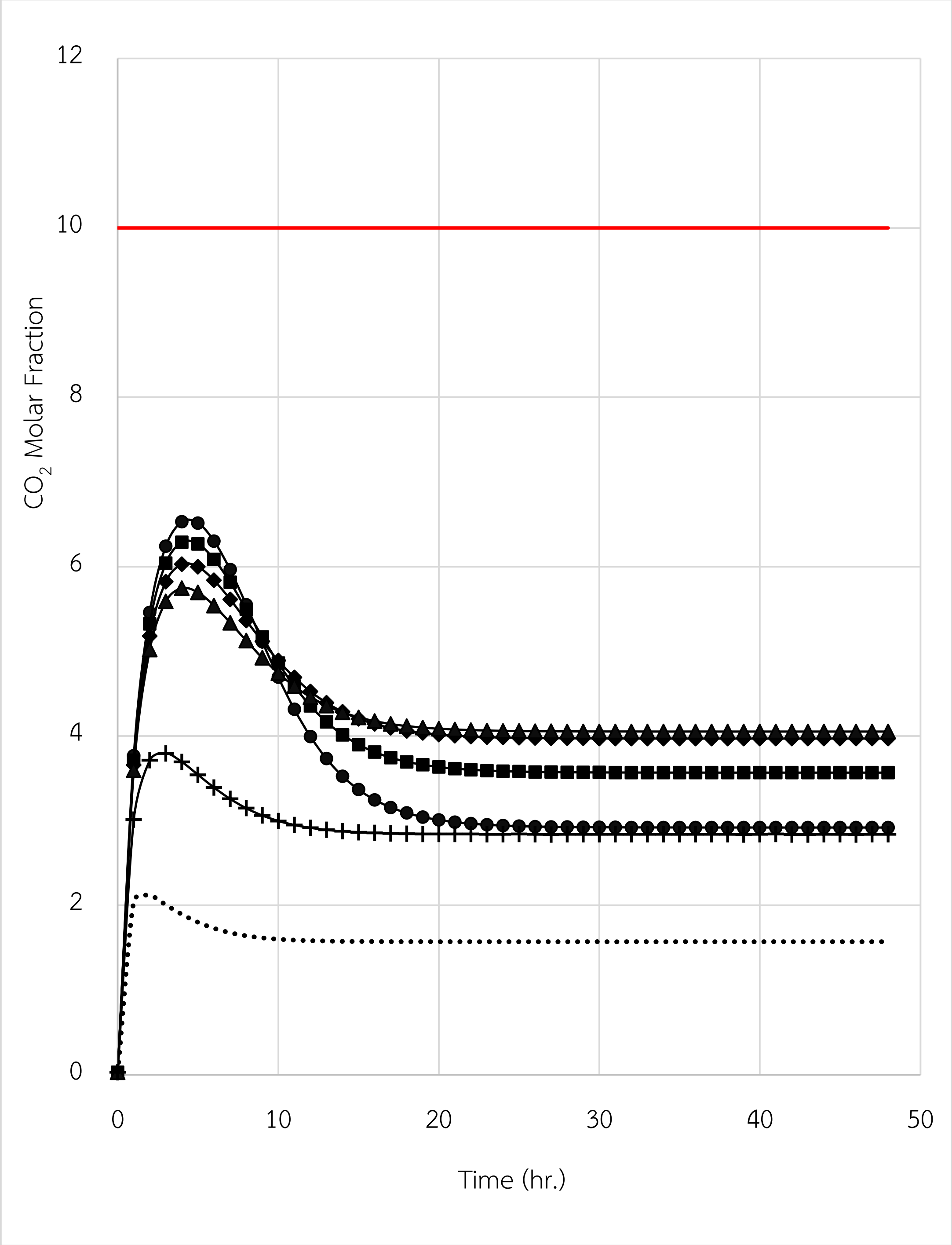
รูปที่ 4.30 ปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา Neat LDPE:100/0(S200T35) (○), LDPE/TPEE:90/10(S200T35) (□) LDPE/TPEE:80/20(S200T35) (◇) และ LDPE/TPEE:70/30(S200T35) (△) [สัญลักษณ์โปร่งคือปริมาณแก๊สออกซิเจน ส่วนสัญลักษณ์ทึบคือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์], ปริมาณแก๊สออกซิเจนใน LDPE/TPEE:50/50(S200T35) (×), ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ใน LDPE/TPEE:50/50 (S200T35) (+), ปริมาณแก๊สออกซิเจนใน Neat TPEE:0/100(S200T35) (- - -), ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ใน Neat TPEE:0/100(S200T35) (• • •), ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมสูงสุด (—) และปริมาณแก๊สออกซิเจนที่เหมาะสมต่ำสุด (—)

รูปที่ 4.30 แสดงให้เห็นว่า ในช่วงแรกแก๊สออกซิเจนในถุงบรรจุภัณฑ์ทุกสูตรมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงประมาณ 5 ชั่วโมงแรกแล้วเริ่มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เพราะมะม่วงใช้แก๊สออกซิเจนในถุงเพื่อการหายใจแล้วคายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 24 ชั่วโมงปริมาณแก๊สทั้งสองชนิดในถุงบรรจุภัณฑ์จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากแล้วล่เข้าสู่ค่าคงที่จนถือว่าอยู่ในสภาวะคงตัว เมื่อเปรียบเทียบผลซิมมูเลชันกับผลการทดลองของ Pesis และคณะ [58] ที่เก็บมะม่วงไว้ใน Microperforated Polyethylene พบว่าปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เก็บไว้ใน Microperforated Polyethylene ไม่เข้าสู่สภาวะคงตัวแม้เวลาจะผ่านไปมากกว่า 480 ชั่วโมงเพราะ Microperforated Polyethylene ยอมให้แก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แพร่ผ่านเข้าได้มากตลอดเวลา แต่ในงานนี้การที่ปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์เข้าสู่สภาวะคงตัวไวย่อมเกิดผลดีต่อมะม่วงที่เก็บในถุงบรรจุภัณฑ์เพราะมะม่วงจะมีการหายใจลดลง [59] ดังนั้นมะม่วงจะสุกและเน่าเสียช้ากว่าปกติได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.31 ปริมาณแก๊สออกซิเจนในถุงบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา Neat LDPE:100/0(S200T35) (○), LDPE/TPEE:90/10(S200T35) (□), LDPE/TPEE:80/20(S200T35) (◊), LDPE/TPEE:70/30(S200T35) (△),LDPE/TPEE:50/50(S200T35) (×), Neat TPEE:0/100 (S200T35) (- - -) และ ปริมาณแก๊สออกซิเจนที่เหมาะสมต่ำสุด (—)



รูปที่ 4.32 ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา Neat LDPE:100/0(S200T35) (●), LDPE/TPEE:90/10(S200T35) (■), LDPE/TPEE:80/20 (S200T35) (◆), LDPE/TPEE:70/30(S200T35) (▲), LDPE/TPEE:50/50 (S200T35) (+),Neat TPEE:0/100(S200T35) (• • •) และ ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมสูงสุด (—)

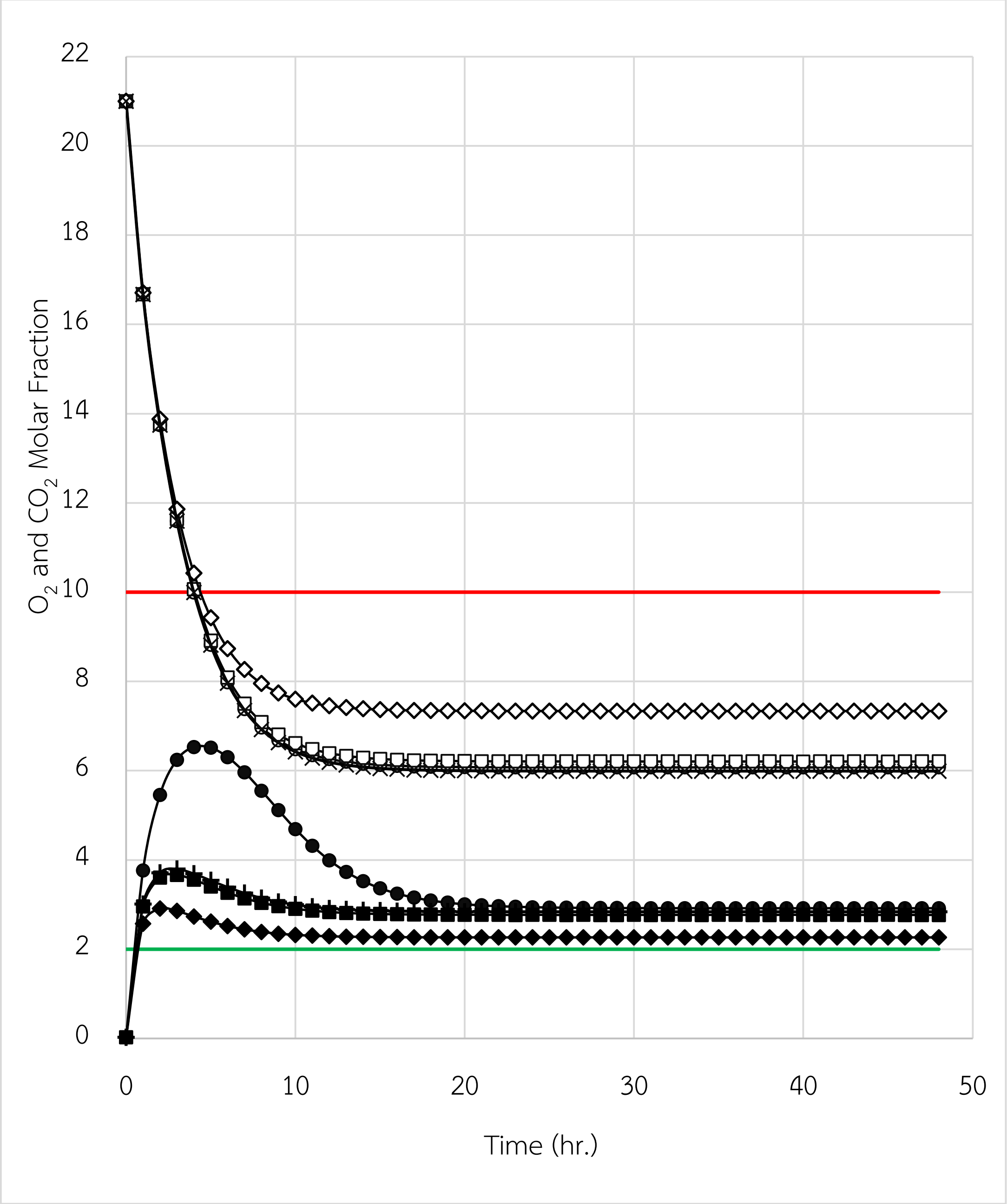
รูปที่ 4.31 และ 4.32 คือการนำรูปที่ 4.30 มาวาดใหม่โดยพิจารณาแยกระหว่างปริมาณแก๊สออกซิเจนกับปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ รูปที่ 4.31 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรทุกสูตรสามารถทำให้ปริมาณออกซิเจนในถุงบรรจุภัณฑ์ลดต่ำลงจนอยู่ภายในช่วงที่เหมาะสมสำหรับเก็บมะม่วง ยกเว้น Neat LDPE:100/0 (S200T35) ที่สภาวะคงตัวพบว่า ปริมาณแก๊สออกซิเจนในถุงบรรจุภัณฑ์ Neat LDPE:100/0 (S200T35) มีปริมาณต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม (ปริมาณออกซิเจนที่เหมาะสม 2-10%) เนื่องจาก Neat LDPE:100/0 (S200T35) มีอัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจน 4,187.4 cc / m^2 day atm ซึ่งถือว่าน้อยเกินไป ส่งผลให้ปริมาณแก๊สออกซิเจนจากภายนอกไม่สามารถซึมผ่านเข้ามาภายในบรรจุภัณฑ์ได้อย่างเหมาะสมทำให้ที่สภาวะคงตัวมีปริมาณน้อยกว่าปริมาณแก๊สออกซิเจนที่เหมาะสมต่ำสุด

รูปที่ 4.32 ทำให้เห็นได้ว่า ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรทุกสูตรสามารถทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและยังอยู่ในช่วงปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมสูงสุด ในสภาวะบรรยากาศที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าร้อยละ 1 ขึ้นไปสามารถชะลออัตราการหายใจของผักและผลไม้สดได้ เพราะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (สมการที่ 4.1 [30]) ของสารอาหารในผักและผลไม้สดหลังการเก็บเกี่ยว [6, 30]

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 38ADP + 38Pi \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 38ATP \qquad (4.1)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมื่อนำค่าความสามารถในการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มที่ได้จากการทดลองตอนที่ 2 ไปคำนวณหาเวลาที่แก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์เข้าสู่สภาวะคงตัวและปริมาณแก๊สออกซิเจนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ซิมมูเลชันผลซิมมูเลชั่นแสดงในรูปที่ 4.33 และตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.33 ปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา LDPE:50/50(S210T35) (○), LDPE/TPEE:50/50(S220T35) (□), LDPE/TPEE:50/50(S240T35) (◊) [เมื่อสัญลักษณ์โปร่งคือปริมาณแก๊สออกซิเจน ส่วนสัญลักษณ์ทึบคือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์] ปริมาณแก๊สออกซิเจนใน LDPE/TPEE:50/50(S200T35) (×),ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในLDPE/TPEE:50/50 (S200T35) (+), ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมสูงสุด (—) และปริมาณแก๊สออกซิเจนที่เหมาะสมต่ำสุด (—)

ตารางที่ 4.4 ปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะคงตัวของผลการทดลองตอนที่ 2

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร	แก๊สออกซิเจน (Molar Fraction)	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Molar Fraction)
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	5.99	2.84
LDPE/TPEE:50/50 (S210T35)	6.07	2.72
LDPE/TPEE:50/50 (S220T35)	6.21	2.77
LDPE/TPEE:50/50 (S240T35)	7.34	2.27

จากรูปที่ 4.33 ทำให้เห็นได้ว่า แก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนได้ไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์ทุกสูตรเข้าสู่สภาวะคงตัวภายในเวลาน้อยกว่า 24 ชั่วโมง ซึ่งเร็วกว่าการทดลองของ Charles และคณะ [21]

Charles และคณะ [21] เก็บผักอองดีฟ (Endive) ไว้ในบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรแบบพาสซีพ จากการทดลองทำให้เห็นได้ว่า บรรจุภัณฑ์ที่แก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงเข้าสู่สภาวะคงไวสามารถชะลอการเกิดสีน้ำตาลในผักอองดีฟและยืดอายุให้เก็บได้นานขึ้น [21]

ปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่สภาวะคงตัวสามารถสรุปเป็นตารางที่ 4.4 จากตารางที่ 4.4 ทำให้เห็นได้ว่าปริมาณแก๊สออกซิเจนในถุงฟิล์มบรรจุภัณฑ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเร็วในการดึงฟิล์มเพิ่มขึ้น เพราะการดึงฟิล์มด้วยอัตราเร็วมากขึ้นทำให้ช่องว่างในฟิล์มขยายใหญ่ขึ้น(ค่าความสามารถในการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนมากขึ้น) ส่งผลให้แก๊สออกซิเจนในบรรยากาศซึมผ่านเข้ามาในถุงบรรจุภัณฑ์ได้มากขึ้น เมื่อออกซิเจนซึมผ่านเข้ามาได้มากขึ้นทำให้ในถุงมีปริมาณแก๊สออกซิเจนที่สภาวะคงตัวมากขึ้นตามไปด้วย

เมื่อพิจารณาปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์ที่สภาวะคงตัวพบว่า ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราเร็วในการดึงฟิล์มเพิ่มขึ้น เพราะการดึงฟิล์มด้วยอัตราเร็วมากขึ้นทำให้ช่องว่างในฟิล์มขยายใหญ่ขึ้น (ค่าความสามารถในการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น) ส่งผลให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์ซึมผ่านออกไปด้าน

นอกถุงมากขึ้น เมื่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงซึมผ่านออกไปด้านนอกมากขึ้นส่งผลให้ในถุงบรรจุภัณฑ์มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลง

เมื่อนำค่าความสามารถในการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มที่ได้จากการทดลองตอนที่ 3 ไปคำนวณหาเวลาที่แก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์เข้าสู่สภาวะคงตัวและปริมาณแก๊สออกซิเจนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ซิมมูเลชัน ผลซิมมูเลชั่นแสดงในรูปที่ 4.34 และตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.5 ปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะคงตัวของผลการทดลองตอนที่ 3

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร	แก๊สออกซิเจน (Molar Fraction)	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Molar Fraction)
LDPE/TPEE:50/50 (S200T15)	6.36	2.73
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	5.99	2.84
LDPE/TPEE:50/50 (S200T50)	5.83	2.59

จากรูปที่ 4.34 ทำให้เห็นได้ว่า แก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์เข้าสู่สภาวะคงตัวภายในเวลาน้อยกว่า 24 ชั่วโมง ซึ่งเร็วกว่าการทดลองของ Pesis และคณะ [58] กับ Charles และคณะ [21] การที่แก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์เข้าสู่สภาวะคงตัวไว (ปริมาณแก๊สออกซิเจนในถุงบรรจุภัณฑ์ต้องน้อย ๆ) ทำให้ผักและผลไม้สดเข้าสู่สภาวะที่อัตราการหายใจต่ำเร็วขึ้น ส่งผลให้ผักและผลไม้สดเก็บไว้ได้นานมากขึ้น [21, 58]

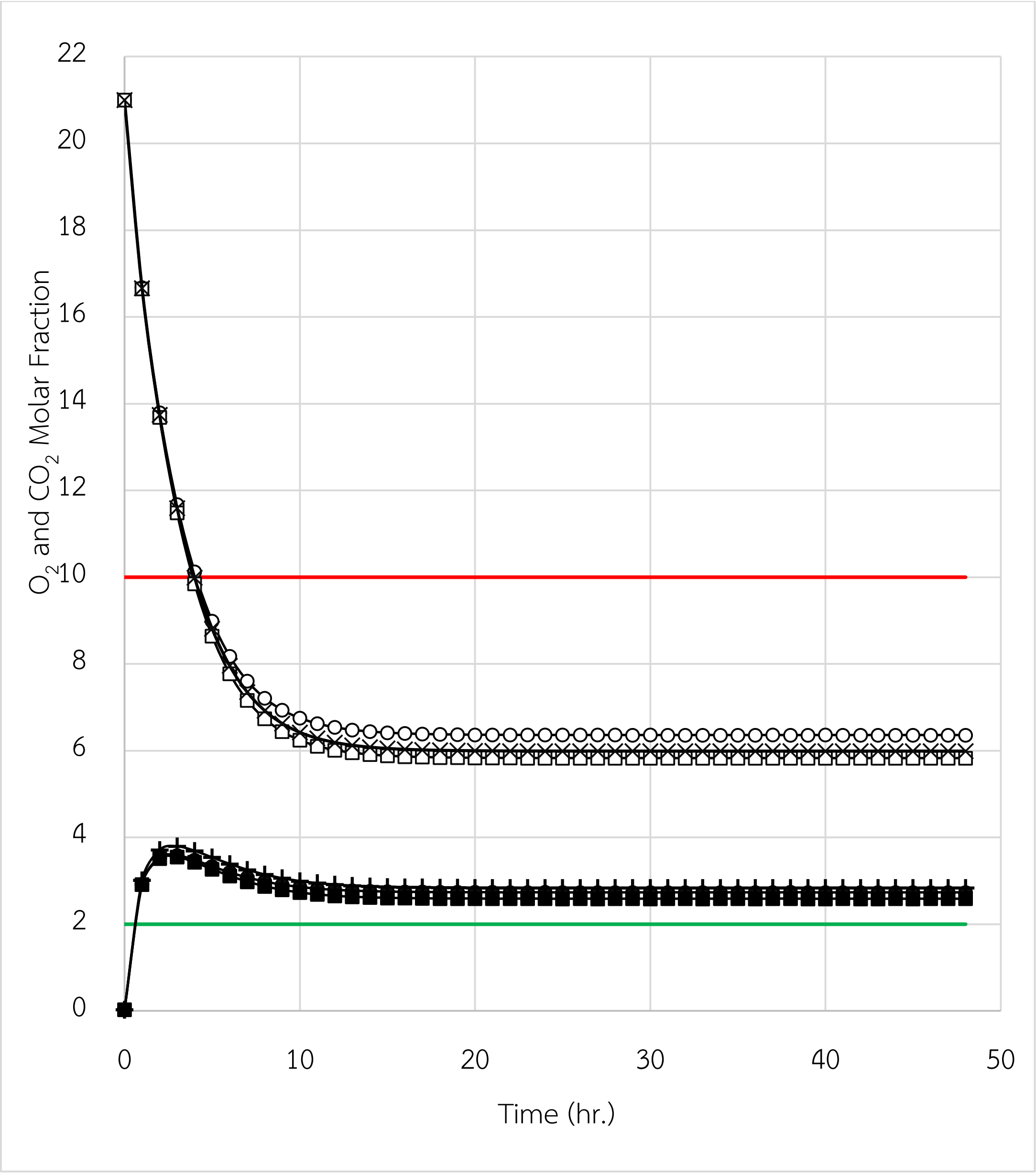
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมื่อพิจารณาปริมาณแก๊สออกซิเจนในถุงบรรจุภัณฑ์ที่สภาวะคงตัวในตารางที่ 4.5 พบว่าปริมาณแก๊สออกซิเจนในถุงบรรจุภัณฑ์มีแนวโน้มลดเมื่ออุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มเพิ่มขึ้น เพราะเมื่ออุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณผลึกในฟิล์มเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.3) ผลึกในฟิล์มบรรจุภัณฑ์ทำหน้าที่ขัดขวางไม่ให้แก๊สออกซิเจนซึมผ่านได้ ส่งผลให้ค่าความสามารถในแก๊สซึมผ่านแก๊สออกซิเจนลดลง ดังนั้นแก๊สออกซิเจนจากบรรยากาศภายนอกจึงซึมผ่านเข้ามาในถุงบรรจุภัณฑ์ได้น้อย ทำให้ปริมาณแก๊สออกซิเจนในถุงบรรจุภัณฑ์ที่สภาวะคงตัวน้อยลงตามไปด้วย

เมื่อพิจารณาปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์ที่สภาวะคงตัวในตารางที่ 4.5 พบว่า ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรกแล้วลดลงเพราเมื่ออุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณผลึกในฟิล์มเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.3) ผลึกในฟิล์มบรรจุ

ภัณฑ์ทำหน้าที่ขัดขวางไม่ให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านออกไปด้านนอกได้ ส่งผลให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์จึงซึมผ่านออกไปด้านนอกได้น้อย ทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์ที่สภาวะคงตัวเพิ่มขึ้นในช่วงแรก แต่การเพิ่มอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มเพิ่มขึ้นจะทำให้แก๊สออกซิเจนจากภายนอกซึมผ่านเข้ามาได้น้อย ทำให้มะม่วงมีอัตราการหายใจดลง ส่งผลให้มะม่วงคายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาได้น้อย ทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์ที่สภาวะคงตัวลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.34 ปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา [LDPE:50/50(S200T15) (○) และ LDPE/TPEE:50/50(S200T50) (□) เมื่อสัญลักษณ์โปร่งคือปริมาณแก๊สออกซิเจน สัญลักษณ์ทึบคือปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์], ปริมาณแก๊สออกซิเจนใน LDPE/TPEE:50/50(S200T35) (×),ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ใน LDPE/TPEE:50/50 (S200T35) (+), ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมสูงสุด (—) และปริมาณแก๊สออกซิเจนที่เหมาะสมต่ำสุด (—)

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ลงไปในพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้พอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สเพิ่มขึ้น เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์มี Ether Block อยู่ในโครงสร้าง Ether Block มี Chain mobility สูงทำให้ไอน้ำและแก๊สซึมผ่านไปได้ง่าย

5.1.2 การเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ลงในพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำปริมาณน้อย ๆ ประมาณร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้พอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ได้แก่ ความทนแรงดึงและความต้านทานการฉีกขาด เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ที่เติมลงไปในปริมาณน้อย ๆ ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก ทำให้พอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

5.1.3 การดึงฟิล์มให้เร็วขึ้นขณะขึ้นรูป ส่งผลให้ช่องว่างตรงรอยต่อระหว่างวัฏภาคของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์มีขนาดใหญ่ขึ้น ช่องว่างที่มีขนาดใหญ่ทำให้ไอน้ำและแก๊สซึมผ่านได้มากขึ้น นอกจากนี้ การดึงฟิล์มขณะขึ้นรูปทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึก (Strain Induced Crystallization) ส่งผลให้ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรมีความทนแรงดึงเพิ่มขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.1.4 การเพิ่มอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์ม ส่งผลให้ปริมาณผลึกของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศเพิ่มขึ้น เพราะที่อุณหภูมิหล่อเย็นสูงสายโซ่โมเลกุลสามารถจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้เพิ่มขึ้น ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่มีปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ฟิล์มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น แต่ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สจะลดลง เนื่องจากผลึกขัดขวางไม่ให้ไอน้ำและแก๊สซึมผ่านไปได้

5.1.5 ภายใต้สมมุติฐาน (Assumption) ที่กำหนดให้อุณหภูมิและความดันรวมในถุงบรรจุภัณฑ์คงที่ มะม่วงหนัก 0.5 กิโลกรัมเก็บไว้ในถุงบรรจุภัณฑ์ที่มีพื้นที่ผิว 0.0648 ตารางเมตร ปริมาตรว่าง 200 cc การคำนวณพบว่าปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์ใช้โปรแกรม MATLAB เข้าสู่สภาวะคงตัวภายในเวลาน้อยกว่า 24 ชั่วโมง

5.1.6 ปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์ ณ สภาวะคงตัว จะขึ้นกับค่าความสามารถในการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนและค่าความสามารถในการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม โดยที่ ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนสูงกว่า ทำให้แก๊สออกซิเจนภายในถุงบรรจุภัณฑ์ที่สภาวะคงตัวมีค่าสูงกว่าและฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถุงบรรจุภัณฑ์ที่สภาวะคงตัวมีค่าน้อยกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาผลกระทบของการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีอื่น เช่น การเป่าฟิล์มโดยใช้เครื่อง Blown Film Extruder

5.2.2 ควรศึกษาผลกระทบของการดึงฟิล์มหลังการขึ้นรูป (รอให้ฟิล์มเย็นตัวแล้วดึงฟิล์มให้ยืดออก) เพื่อศึกษาปริมาณรูและขนาดรูที่เกิดจากการยืดหลังการขึ้นรูป และผลกระทบที่มีต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สของฟิล์มที่ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านไอน้ำและแก๊ส

ตาราง ก.1 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มที่อัตราส่วนเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ต่าง ๆ (ใช้อัตราเร็วในการดึงฟิล์ม 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์ม 35 °C)

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร	อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water Vapor Transmission Rate) gm / m2 day				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Neat LDPE:100/0 (S200T35)	14.2	14.7	13.6	14.2	0.6
LDPE/TPEE:90/10 (S200T35)	17.1	18.5	18.6	18.1	0.8
LDPE/TPEE:80/20 (S200T35)	33.8	34.3	32.7	33.6	0.8
LDPE/TPEE:70/30 (S200T35)	51.6	50.0	50.2	50.6	0.9
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	86.0	88.6	92.4	89.0	3.2
Neat TPEE:0/100 (S200T35)	138.4	143.6	140.4	140.8	2.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ก.2 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มที่อัตราเร็วในการดึงฟิล์มต่างกัน (อัตราส่วนพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำต่อเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์คงที่ ที่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก)

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ บรรยากาศดัดแปร	อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water Vapor Transmission Rate) gm / m2 day				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	S.D.
LDPE/TPEE:50/50(S200T35)	86.0	88.6	92.4	89.0	2.6
LDPE/TPEE:50/50(S210T35)	93.4	92.7	95.7	93.9	1.3
LDPE/TPEE:50/50(S220T35)	110.7	116.3	108.3	111.8	3.3
LDPE/TPEE:50/50(S240T35)	116.1	111.7	114.4	114.1	1.8

ตาราง ก.3 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มที่อุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มต่างกัน (อัตราส่วนพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำต่อเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์คงที่ ที่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก)

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ บรรยากาศดัดแปร	อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water Vapor Transmission Rate) gm / m2 day				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	S.D.
LDPE/TPEE:50/50(S200T15)	119.5	109.4	110.3	113.1	4.5
LDPE/TPEE:50/50(S200T35)	86.0	88.6	92.4	89.0	2.6
LDPE/TPEE:50/50(S200T50)	80.4	75.2	73.5	76.4	2.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ก.4 อัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนของฟิล์มที่อัตราส่วนเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ต่าง ๆ (อัตราเร็วในการดึงฟิล์ม 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์ม 35 °C)

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร	อัตราการซึมผ่านแก๊สออกเจน (Oxygen Transmission Rate)				
	cc / m^2 day				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Neat LDPE:100/0 (S200T35)	4297.8	4123.2	4141.2	4187.4	96.0
LDPE/TPEE:90/10 (S200T35)	5845.4	5870.0	5814.9	5843.4	27.6
LDPE/TPEE:80/20 (S200T35)	7266.8	7734.2	7393.5	7464.9	241.7
LDPE/TPEE:70/30 (S200T35)	8689.2	8728.6	8590.6	8669.5	71.1
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	13347.4	12239.0	12721.0	12769.1	555.8
Neat TPEE:0/100 (S200T35)	16121.6	16505.9	17631.1	16752.8	784.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ก.5 อัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนที่อัตราเร็วในการดึงฟิล์มต่างกัน (อัตราส่วนพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำต่อเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์คงที่ ที่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก)

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ บรรยากาศดัดแปร	อัตราการซึมการผ่านแก๊สออกเจน (Oxygen Transmission Rate)				
	cc / m^2 day				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	S.D.
LDPE/TPEE:50/50(S200T35)	13347.4	12239.0	12721.0	12769.1	555.8
LDPE/TPEE:50/50(S210T35)	12531.2	13155.3	13341.5	13009.3	346.5
LDPE/TPEE:50/50(S220T35)	12833.8	13530.9	13445.9	13270.2	380.3
LDPE/TPEE:50/50(S240T35)	15685.7	16041.5	16873.4	16200.2	609.5

ตาราง ก.6 อัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนของฟิล์มที่อุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มต่างกัน (อัตราส่วนพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำต่อเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์คงที่ ที่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก)

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ บรรยากาศดัดแปร	อัตราการซึมผ่านแก๊สออกเจน (Oxygen Transmission Rate)				
	cc / m^2 day				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	S.D.
LDPE/TPEE:50/50(S200T15)	13466.4	13863.0	13562.5	13630.6	206.9
LDPE/TPEE:50/50(S200T35)	13347.4	12239.0	12721.0	12769.1	555.8
LDPE/TPEE:50/50(S200T50)	12790.3	12402.0	12452.3	12548.2	211.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ก.7 อัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มที่อัตราส่วนเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ต่าง ๆ (อัตราเร็วในการดึงฟิล์ม 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์ม 35 °C)

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร	อัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide Transmission Rate)				
	cc / m^2 day				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Neat LDPE:100/0 (S200T35)	26800	-	-	-	-
LDPE/TPEE:90/10 (S200T35)	29100	-	-	-	-
LDPE/TPEE:80/20 (S200T35)	31700	-	-	-	-
LDPE/TPEE:70/30 (S200T35)	34600	-	-	-	-
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	65300	-	-	-	-
Neat TPEE:0/100 (S200T35)	142800	-	-	-	-

เนื่องจากข้อจำกัดในการให้บริการ ทำให้ทดสอบการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพียงตัวอย่างละ 1 ครั้งเท่านั้น (โดยปกติแล้วจะต้องทำซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง) จึงไม่สามารถคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ก.8 อัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มที่อัตราเร็วในการดึงฟิล์มต่างกัน (อัตราส่วนพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำต่อเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์คงที่ ที่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก)

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร	อัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide Transmission Rate)				
	cc / m^2 day				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	S.D.
LDPE/TPEE:50/50(S200T35)	65300	-	-	-	-
LDPE/TPEE:50/50(S210T35)	69200	-	-	-	-
LDPE/TPEE:50/50(S220T35)	68600	-	-	-	-
LDPE/TPEE:50/50(S240T35)	94950	-	-	-	-

เนื่องจากข้อจำกัดในการให้บริการ ทำให้ทดสอบการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพียงตัวอย่างละ 1 ครั้งเท่านั้น (โดยปกติแล้วจะต้องทำซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง) จึงไม่สามารถคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ก.9 อัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มที่อุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มต่างกัน (อัตราส่วนพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำต่อเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์คงที่ ที่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก)

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร	อัตราการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide Transmission Rate) cc / m^2 day				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	S.D.
LDPE/TPEE:50/50(S200T15)	70600	-	-	-	-
LDPE/TPEE:50/50(S200T35)	65300	-	-	-	-
LDPE/TPEE:50/50(S200T50)	71300	-	-	-	-

เนื่องจากข้อจำกัดในการให้บริการ ทำให้ทดสอบการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพียงตัวอย่างละ 1 ครั้งเท่านั้น (โดยปกติแล้วจะต้องทำซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง) จึงไม่สามารถคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อน

ตอนที่ 1 การศึกษาปริมาณเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงความร้อน

ตาราง ข.1 น้ำหนักของตัวอย่างที่ในการทดสอบ DSC

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร	น้ำหนัก (กรัม)				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Neat LDPE:100/0 (S200T35)	3.7	4.1	3.4	3.7	0.3
LDPE/TPEE:90/10 (S200T35)	3.7	3.5	4.4	3.9	0.4
LDPE/TPEE:80/20 (S200T35)	3.9	3.2	4.7	3.9	0.6
LDPE/TPEE:70/30 (S200T35)	4.7	4.2	3.9	4.3	0.3
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	4.4	4.3	3.7	4.1	0.3
Neat TPEE:0/100 (S200T35)	3.5	3.6	4.1	3.7	0.3

ตาราง ข.2 เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกของฟิล์มที่อัตราส่วนเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ต่าง ๆ

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร	เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก (%)				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Neat LDPE:100/0 (S200T35)	23.67	22.89	23.15	23.24	0.32
LDPE/TPEE:90/10 (S200T35)	25.15	26.37	24.95	25.49	0.63
LDPE/TPEE:80/20 (S200T35)	24.51	23.25	24.73	24.16	0.65
LDPE/TPEE:70/30 (S200T35)	22.1	21.55	22.74	22.13	0.49
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	14.75	15.85	16.24	15.61	0.63
Neat TPEE:0/100 (S200T35)	8.92	8.53	8.23	8.56	0.28

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ข.3 อุณหภูมิการเกิดผลึกของฟิล์มที่อัตราส่วนเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ต่าง ๆ

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร	อุณหภูมิเกิดผลึก (°C)				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Neat LDPE:100/0 (S200T35)	111.8	111.1	110.5	111.1	0.5
LDPE/TPEE:90/10 (S200T35)	110.9	110.6	111.4	111.0	0.3
LDPE/TPEE:80/20 (S200T35)	111.3	110.6	111.4	111.1	0.4
LDPE/TPEE:70/30 (S200T35)	111.8	110.4	110.5	110.9	0.6
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	110.8	109.2	111.5	110.5	1.0
Neat TPEE:0/100 (S200T35)	108.4	107.6	107.2	107.7	0.5

ตอนที่ 2 การศึกษาอัตราเร็วในการดึงฟิล์ม (Film pulling speed) ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงความร้อน

ตาราง ข.4 น้ำหนักของตัวอย่างที่ในการทดสอบ DSC

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร	น้ำหนัก (กรัม)				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	S.D.
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	4.4	4.3	3.7	4.1	0.3
LDPE/TPEE:50/50 (S210T35)	3.5	4.4	4.5	4.1	0.4
LDPE/TPEE:50/50 (S220T35)	3.6	4.7	3.4	3.9	0.6
LDPE/TPEE:50/50 (S240T35)	3.9	4.2	3.6	3.9	0.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ข.5 เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร	เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก (%)				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	S.D.
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	14.75	15.85	16.24	15.61	0.63
LDPE/TPEE:50/50 (S210T35)	15.42	16.32	15.73	15.82	0.37
LDPE/TPEE:50/50 (S220T35)	17.21	16.85	17.32	17.13	0.20
LDPE/TPEE:50/50 (S240T35)	19.73	19.54	20.33	19.87	0.34

ตาราง ข.6 อุณหภูมิการเกิดผลึก

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร	อุณหภูมิเกิดผลึก (°C)				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	S.D.
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	110.8	109.2	111.5	110.5	1.0
LDPE/TPEE:50/50 (S210T35)	110.8	111.6	111.2	111.2	0.3
LDPE/TPEE:50/50 (S220T35)	112.6	110.6	111.4	111.5	0.8
LDPE/TPEE:50/50 (S240T35)	110.3	112.2	110.4	111.0	0.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตอนที่ 3 การศึกษาอุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์ม (Film cooling temperature) ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงความร้อน

ตาราง ข.7 น้ำหนักของตัวอย่างที่ในการทดสอบ DSC

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร	น้ำหนัก (กรัม)				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	S.D.
LDPE/TPEE:50/50 (S200T15)	4.0	3.8	4.9	4.2	0.5
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	4.4	4.3	3.7	4.1	0.3
LDPE/TPEE:50/50 (S200T50)	3.7	4.1	4.6	4.1	0.4

ตาราง ข.8 เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร	เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก (%)				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	S.D.
LDPE/TPEE:50/50 (S200T15)	14.53	14.12	15.72	14.79	0.68
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	14.75	15.85	16.24	15.61	0.63
LDPE/TPEE:50/50 (S200T50)	16.57	16.03	17.12	16.57	0.44

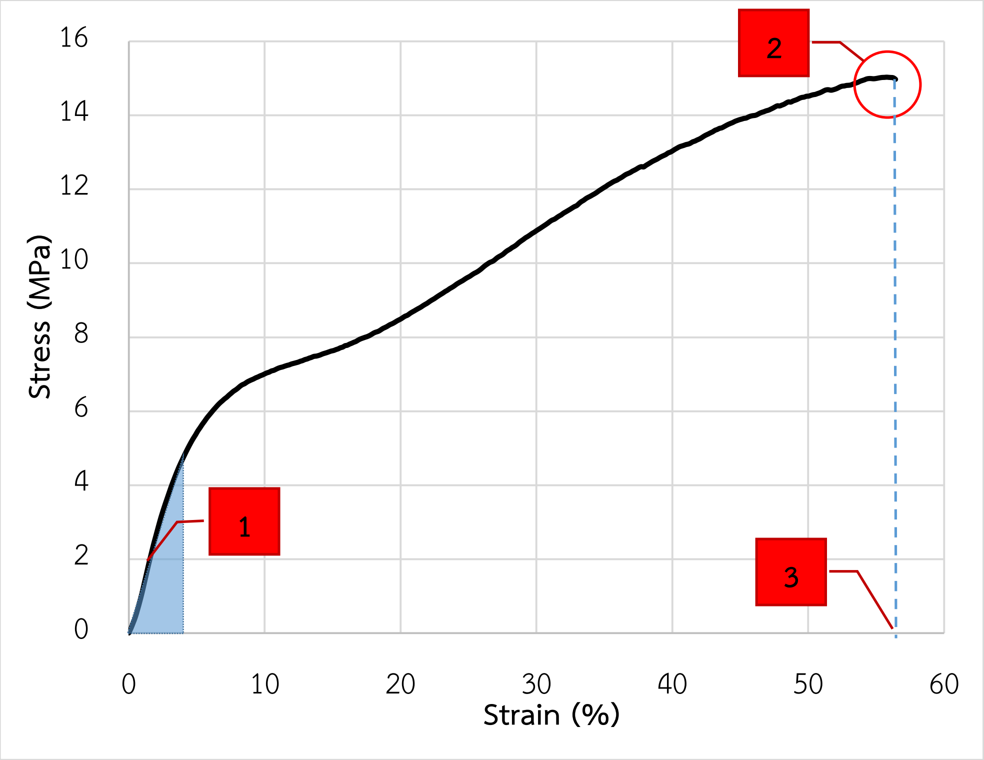
ตาราง ข.9 อุณหภูมิการเกิดผลึก

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร	อุณหภูมิเกิดผลึก (°C)				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	S.D.
LDPE/TPEE:50/50 (S200T15)	111.7	110.2	110.5	110.8	0.6
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	110.8	109.2	111.5	110.5	1.0
LDPE/TPEE:50/50 (S200T50)	111.3	111.1	110.4	110.9	0.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค. ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรเป็นสิ่งที่สำคัญไม่น้อยไปกว่าสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊ส เนื่องจากฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่จะนำไปห่อผักและผลไม้สดต้องมีความแข็งแรง ไม่ฉีกขาดขณะที่ห่อหรือใช้งานอยู่ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องมีการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร โดยการวัดสมบัติเชิงกลของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรจะใช้เครื่อง Universal Testing Machine ซึ่งกราฟตัวอย่างที่ได้จะแสดงดังรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 กราฟ Stress-Strain Curve ของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

รูปที่ ค.1 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร โดยหมายเลข 1 เป็นความชันของกราฟที่อยู่ในช่วงความเค้นและความเครียดยังสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง ซึ่งเรียกว่า ยังก์โมดูลัส (Young’s Modulus)

หมายเลข 2 คือ Tensile Strength ซึ่งเป็นความเค้นสูงสุดของฟิล์มบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร สำหรับงานวิจัยนี้จะรายงาน Tensile Strength เป็นค่าที่สูงสุด ณ ตำแหน่งที่ฟิล์มขาดออกจากกัน ซึ่งเป็นคนละตำแหน่งกับ Yield Strength

หมายเลข 3 คือ %Strain ซึ่งใช้สูตรคำนวณตามสมการที่ ค.1 จากสูตรพบว่า %Strain จะเทียบเท่ากับ %Elongation โดย %Elongation คือความยาวที่ชิ้นงานยืดออกเทียบกับชิ้นงานตอนเริ่มต้น ดังนั้นหากฟิล์มมี %Elongation มากแปลว่าฟิล์มมีความเหนียวมาก

$$\%strain = \frac{L_{final} - L_{initial}}{L_{initial}} \times 100\% \qquad (ค.1)$$

เมื่อ L_{final} = ความยาวก่อนขาด (mm)

$L_{initial}$ = ความยาวเริ่มต้น (mm)

ค.1 ความทนแรงดึง (Tensile Strength)

ตาราง ค.1.1 ผลการทดสอบความทนแรงดึงของ Neat LDPE:100/0 (S200T35)

ตัวอย่างที่	Machine Direction			Transverse Direction		
	Young's Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break	Young's Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break
	(MPa)	(MPa)	%	(MPa)	(MPa)	%
1	250.25	17.14	242.69	219.68	14.52	226.91
2	275.05	19.05	245.36	231.11	16.51	239.37
3	253.21	18.39	237.67	226.72	15.7	241.18
4	246.63	16.78	240.13	222.78	15.23	219.93
5	251.26	17.01	243.32	232.25	16.45	216.31
ค่าเฉลี่ย	255.28	17.67	241.83	226.51	15.68	228.74
S.D.	10.11	0.89	2.67	4.79	0.75	10.03

ตาราง ค.1.2 ผลการทดสอบความทนแรงดึงของ LDPE/TPEE:90/10 (S200T35)

ตัวอย่างที่	Machine Direction			Transverse Direction		
	Young's Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break	Young’s Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break
	(MPa)	(MPa)	%	(MPa)	(MPa)	%
1	271.56	18.6	247.13	232.67	17.46	235.36
2	269.16	18.52	260.12	239.71	17.85	218.12
3	274.96	19.78	245.65	231.15	17.69	236.12
4	271.7	19.37	241.23	234.33	17.18	227.66
5	265.97	18.46	255.48	240.32	18.09	225.89
ค่าเฉลี่ย	270.67	18.95	249.92	235.64	17.65	228.63
S.D.	2.99	0.53	6.88	3.72	0.31	6.64

ตาราง ค.1.3 ผลการทดสอบความทนแรงดึงของ LDPE/TPEE:80/20 (S200T35)

ตัวอย่างที่	Machine Direction			Transverse Direction		
	Young’s Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break	Young’s Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break
	(MPa)	(MPa)	%	(MPa)	(MPa)	%
1	268.69	18.36	227.5	228.47	15.221	60.24
2	266.78	17.67	235.88	234.23	16.94	54.04
3	272.25	18.89	230.38	227.19	15.39	65.93
4	268.44	18.38	234.46	229.77	15.43	56.3
5	263.83	18.11	238.64	235.98	17.06	58.58
ค่าเฉลี่ย	268.00	18.28	233.37	231.13	16.01	59.02
S.D.	2.74	0.40	3.97	3.39	0.81	4.04

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ค.1.4 ผลการทดสอบความทนแรงดึงของ LDPE/TPEE:70/30 (S200T35)

ตัวอย่างที่	Machine Direction			Transverse Direction		
	Young's Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break	Young's Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break
	(MPa)	(MPa)	%	(MPa)	(MPa)	%
1	210.24	15.29	275.64	146.48	5.59	51.8
2	214.09	16.22	264.43	142.84	5.41	47.33
3	196.28	14.63	280.15	152.37	6.19	53.65
4	213.65	16.54	274.14	144.41	5.87	49.07
5	193.63	14.36	281.64	149.37	6.03	53.02
ค่าเฉลี่ย	205.58	15.41	275.20	147.09	5.82	50.97
S.D.	8.82	0.86	6.05	3.43	0.28	2.41

ตาราง ค.1.5 ผลการทดสอบความทนแรงดึงของ LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)

ตัวอย่างที่	Machine Direction			Transverse Direction		
	Young's Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break	Young's Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break
	(MPa)	(MPa)	%	(MPa)	(MPa)	%
1	151.73	13.5	340.85	103.39	3.11	42.16
2	148.31	13.14	342.68	87.42	2.54	36.24
3	162.72	12.96	332.14	108.27	3.26	42.65
4	158.92	13.95	337.41	96.5	2.83	38.91
5	163.27	13.59	330.59	99.36	3.09	39.05
ค่าเฉลี่ย	156.99	13.43	336.73	98.99	2.97	39.80
S.D.	5.98	0.35	4.72	7.01	0.25	2.35

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ค.1.6 ผลการทดสอบความทนแรงดึงของ Neat TPEE:0/100 (S200T35)

ตัวอย่างที่	Machine Direction			Transverse Direction		
	Young's Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break	Young's Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break
	(MPa)	(MPa)	%	(MPa)	(MPa)	%
1	71.09	11.63	358.11	44.3	9.85	322.59
2	58.83	10.57	374.03	42.61	9.65	337.23
3	61.36	10.95	372.84	47.89	10.26	327.49
4	67.89	11.25	366.36	41.88	9.41	341.36
5	67.44	11.48	368.38	47.77	10.12	325.63
ค่าเฉลี่ย	65.32	11.18	367.94	44.89	9.86	330.86
S.D.	4.52	0.38	5.66	2.53	0.31	7.18

ตาราง ค.1.7 ผลการทดสอบความทนแรงดึงของ LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)

ตัวอย่างที่	Machine Direction			Transverse Direction		
	Young's Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break	Young's Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break
	(MPa)	(MPa)	%	(MPa)	(MPa)	%
1	151.73	13.5	340.85	103.39	3.11	42.16
2	148.31	13.14	342.68	87.42	2.54	36.24
3	162.72	12.96	332.14	108.27	3.26	42.65
4	158.92	13.95	337.41	96.5	2.83	38.91
5	163.27	13.59	330.59	99.36	3.09	39.05
ค่าเฉลี่ย	156.99	13.43	336.73	98.99	2.97	39.80
S.D.	5.98	0.35	4.72	7.01	0.25	2.35

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ค.1.8 ผลการทดสอบความทนแรงดึงของ LDPE/TPEE:50/50 (S210T35)

ตัวอย่างที่	Machine Direction			Transverse Direction		
	Young's Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break	Young's Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break
	(MPa)	(MPa)	%	(MPa)	(MPa)	%
1	159.42	14.67	341.33	97.14	2.85	40.13
2	157.16	15.36	337.06	94.28	2.81	42.14
3	160.41	13.27	337.75	95.94	2.98	41.15
4	159.27	14.12	342.15	97.08	2.74	39.74
5	161.03	15.54	344.15	98.21	2.77	38.15
ค่าเฉลี่ย	159.46	14.59	340.49	96.53	2.83	40.26
S.D.	1.32	0.83	2.69	1.33	0.08	1.35

ตาราง ค.1.9 ผลการทดสอบความทนแรงดึงของ LDPE/TPEE:50/50 (S220T35)

ตัวอย่างที่	Machine Direction			Transverse Direction		
	Young's Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break	Young's Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break
	(MPa)	(MPa)	%	(MPa)	(MPa)	%
1	174.35	17.81	334.35	106.42	4.06	43.84
2	175.84	16.51	336.34	104.39	3.87	44.05
3	174.03	17.23	336.14	107.1	4.67	44.67
4	176.28	17.95	335.41	105.94	4.23	45.11
5	173.84	17.34	334.96	107.45	4.09	42.14
ค่าเฉลี่ย	174.87	17.37	335.44	106.26	4.18	43.96
S.D.	1.00	0.51	0.74	1.07	0.27	1.02

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ค.1.10 ผลการทดสอบความทนแรงดึงของ LDPE/TPEE:50/50 (S240T35)

ตัวอย่างที่	Machine Direction			Transverse Direction		
	Young's Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break	Young's Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break
	(MPa)	(MPa)	%	(MPa)	(MPa)	%
1	181.72	20.06	341.64	110.84	4.23	42.74
2	183.41	19.84	338.24	111.74	4.14	41.32
3	180.41	21.03	337.61	112.24	3.92	40.37
4	182.74	20.64	335.41	109.68	4.48	43.54
5	181.31	19.87	345.14	110.21	4.31	43.54
ค่าเฉลี่ย	181.92	20.29	339.61	110.94	4.22	42.30
S.D.	1.06	0.47	3.41	0.94	0.19	1.26

ตาราง ค.1.11 ผลการทดสอบความทนแรงดึงของ LDPE/TPEE:50/50 (S200T15)

ตัวอย่างที่	Machine Direction			Transverse Direction		
	Young's Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break	Young's Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break
	(MPa)	(MPa)	%	(MPa)	(MPa)	%
1	138.37	11.74	338.32	95.12	2.63	48.14
2	136.23	10.75	337.37	94.61	2.46	47.63
3	135.84	11.53	334.94	96.35	2.57	45.05
4	138.51	10.31	336.68	97.51	2.66	49.07
5	137.14	11.46	335.92	94.12	2.67	48.57
ค่าเฉลี่ย	137.22	11.16	336.65	95.54	2.60	47.69
S.D.	1.08	0.54	1.16	1.23	0.08	1.40

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ค.1.12 ผลการทดสอบความทนแรงดึงของ LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)

ตัวอย่างที่	Machine Direction			Transverse Direction		
	Young's Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break	Young's Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break
	(MPa)	(MPa)	%	(MPa)	(MPa)	%
1	151.73	13.5	340.85	103.39	3.11	42.16
2	148.31	13.14	342.68	87.42	2.54	36.24
3	162.72	12.96	332.14	108.27	3.26	42.65
4	158.92	13.95	337.41	96.5	2.83	38.91
5	163.27	13.59	330.59	99.36	3.09	39.05
ค่าเฉลี่ย	156.99	13.43	336.73	98.99	2.97	39.80
S.D.	5.98	0.35	4.72	7.01	0.25	2.35

ตาราง ค.1.13 ผลการทดสอบความทนแรงดึงของ LDPE/TPEE:50/50 (S200T50)

ตัวอย่างที่	Machine Direction			Transverse Direction		
	Young's Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break	Young's Modulus	Tensile Strength	%Elongation at Break
	(MPa)	(MPa)	%	(MPa)	(MPa)	%
1	168.21	16.03	312.09	103.41	4.31	44.15
2	166.74	15.67	320.18	102.37	4.12	43.84
3	167.51	16.81	315.42	101.74	3.98	40.87
4	169.34	15.17	308.17	104.94	4.31	42.84
5	168.47	16.27	310.64	103.84	4.67	46.32
ค่าเฉลี่ย	168.05	15.99	313.30	103.26	4.28	43.60
S.D.	0.88	0.55	4.16	1.12	0.23	1.78

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ค.2 การต้านทานการฉีกขาด (Tear Resistance)

ตาราง ค.2.14 การต้านทานการฉีกขาดในทิศ Machine Direction ที่เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์อัตราส่วนต่าง ๆ

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์	Tear Resistance (MPa)						
บรรยากาศดัดแปร	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Neat LDPE:100/0 (S200T35)	5.62	4.97	5.34	6.03	5.37	5.47	0.35
LDPE/TPEE:90/10 (S200T35)	6.02	5.87	5.74	6.23	5.98	5.97	0.16
LDPE/TPEE:80/20 (S200T35)	6.35	6.77	6.07	5.91	5.98	6.22	0.31
LDPE/TPEE:70/30 (S200T35)	1.5	1.52	1.42	1.61	1.41	1.49	0.07
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	1.25	0.94	1.17	1.05	0.97	1.08	0.12
Neat TPEE:0/100 (S200T35)	4.25	4.11	4.9	3.97	4.54	4.35	0.33

ตาราง ค.2.15 การต้านทานการฉีกขาดในทิศ Transverse Direction ที่เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์อัตราส่วนต่าง ๆ

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์	Tear Resistance (MPa)						
บรรยากาศดัดแปร	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Neat LDPE:100/0 (S200T35)	6.4	6.27	5.92	6.37	6.07	6.21	0.18
LDPE/TPEE:90/10 (S200T35)	6.8	7.11	7.19	6.94	6.71	6.95	0.18
LDPE/TPEE:80/20 (S200T35)	7.4	7.81	7.54	7.32	7.55	7.52	0.17
LDPE/TPEE:70/30 (S200T35)	2.4	2.31	2.29	2.42	2.33	2.35	0.05
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	1.8	1.12	1.53	1.84	1.44	1.55	0.26
Neat TPEE:0/100 (S200T35)	4.4	4.31	4.57	4.36	4.49	4.43	0.09

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ค.2.16 การต้านทานการฉีกขาดในทิศ Machine Direction ที่อัตราเร็วการดึงฟิล์มต่าง ๆ

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ บรรยากาศดัดแปร	Tear Resistance (MPa)						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	1.25	0.94	1.17	1.05	0.97	1.08	0.12
LDPE/TPEE:50/50 (S210T35)	0.86	0.97	0.84	0.81	0.79	0.85	0.06
LDPE/TPEE:50/50 (S220T35)	0.77	0.92	0.96	0.83	0.74	0.84	0.08
LDPE/TPEE:50/50 (S240T35)	0.61	0.53	0.68	0.74	0.53	0.62	0.08

ตาราง ค.2.17 การต้านทานการฉีกขาดในทิศ Transverse Direction ที่อัตราเร็วการดึงฟิล์มต่าง ๆ

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ บรรยากาศดัดแปร	Tear Resistance (MPa)						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	1.94	1.83	2.03	1.78	1.64	1.84	0.13
LDPE/TPEE:50/50 (S210T35)	1.48	1.62	1.55	1.59	1.62	1.57	0.05
LDPE/TPEE:50/50 (S220T35)	1.73	1.83	1.65	1.87	1.83	1.78	0.08
LDPE/TPEE:50/50 (S240T35)	1.75	1.96	1.84	1.71	1.84	1.82	0.09

ตาราง ค.18 การต้านทานการฉีกขาดในทิศ Machine Direction ที่อุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มต่าง ๆ

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ บรรยากาศดัดแปร	Tear Resistance (MPa)						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
LDPE/TPEE:50/50 (S200T15)	0.95	0.92	1.17	1.05	0.97	1.08	0.12
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	1.25	0.94	1.17	1.05	0.97	1.08	0.12
LDPE/TPEE:50/50 (S200T50)	1.22	1.34	1.13	1.03	0.85	1.12	0.17

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ค.19 การต้านทานการฉีกขาดในทิศ Transverse Direction ที่อุณหภูมิหล่อเย็นฟิล์มต่าง ๆ

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ บรรยากาศดัดแปร	Tear Resistance (MPa)						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
LDPE/TPEE:50/50 (S200TC15)	1.8	1.12	1.53	1.84	1.44	1.55	0.26
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	1.94	1.83	2.03	1.78	1.64	1.84	0.13
LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)	2.16	2.2	1.94	1.89	1.93	2.02	0.13

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง. การทำนายด้วยแบบจำลองหาปริมาณแก๊สออกซิเจนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและเวลาที่แก๊สในบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรเข้าสู่สภาวะคงตัว

การซิมมูเลชันเพื่อคำนวณหาปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์ ใช้โปรแกรมแมทแลป (MATLAB) รุ่น 9.4 ของปี ค.ศ. 2018 สมการที่ใช้ในซิมมูเลชั่นคือ สมการที่ (ง.1) และ (ง.2) มาจากหัวข้อ 2.6

$$V_f \frac{\mathrm{d}(y_{O2})}{\mathrm{d}t} = \frac{P_{O2} P_T A}{L} (y_{O2}^{out} - y_{O2}) - R_{O2} M \quad \text{(ง.1)}$$

$$V_f \frac{\mathrm{d}(y_{CO2})}{\mathrm{d}t} = \frac{P_{CO2} P_T A}{L} (y_{CO2}^{out} - y_{CO2}) + R_{CO2} M \quad \text{(ง.2)}$$

เมื่อ V_f = ปริมาตรว่างภายในบรรจุภัณฑ์ (cc)

P_T = ความดันรวมในถุงบรรจุภัณฑ์ (atm)

P_{O2} = ความสามารถในการซึมผ่านแก๊สออกซิเจน (cc mil m^{-2} hr^{-1} atm^{-1})

P_{CO2} = ความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (cc mil m^{-2} hr^{-1} atm^{-1})

A = พื้นที่ผิวของฟิล์ม (Surface area) (m^2)

L = ความหนาของฟิล์ม (Film Thickness) (mm)

y_{O2}^{out} = เศษส่วนโมล O_2 นอกบรรจุภัณฑ์ (-)

y_{CO2}^{out} = เศษส่วนโมล CO_2 นอกบรรจุภัณฑ์ (-)

y_{O2} = เศษส่วนโมล O_2 ในบรรจุภัณฑ์ (-)

y_{CO2} = เศษส่วนโมล CO_2 ในบรรจุภัณฑ์ (-)

R_{O2} = อัตราการใช้แก๊สออกซิเจนของผักและผลไม้สด (cc hr^{-1} kg^{-1})

R_{CO2} = อัตราการสร้างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของผักและผลไม้สด (cc hr^{-1} kg^{-1})

M = น้ำหนักของผักผลไม้สดที่บรรจุในฟิล์มบรรจุภัณฑ์ (kg)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

R_{O2} , R_{CO2} คือ อัตราการหายใจของผักผลไม้สด โดยใช้แบบจำลองอัตราการหายใจของไมเคิล-ลิสเมนเทนชนิดมีการยับยั้งแบบอันคอมแพททิทีฟ สมการที่ (ง.3) และ (ง.4) ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้แทนในสมการ (ง.3) และ (ง.4) มาจากงานวิจัย Menon และ Goswami [31] โดยเลือกอุณหภูมิการซิมมูเลชั่น 10 °C

$$R_{O2} = \frac{V_{m,O2}\, y_{O2}}{K_{m,O2} + y_{O2}\,[1 + \frac{y_{CO2}}{K_{i,O2}}]} \quad (ง.3)$$

$$R_{CO2} = \frac{V_{m,CO2}\, y_{O2}}{K_{m,CO2} + y_{O2}\,[1 + \frac{y_{CO2}}{K_{i,CO2}}]} \quad (ง.4)$$

ตาราง ง.1 พารามิเตอร์ในสมการอัตราการหายใจของมะม่วงที่อุณหภูมิ 10 °C

อุณหภูมิขณะทดสอบ (°C)	**แก๊ส**	$V_{m,i}$ **(ml kg^{-1} h^{-1})**	$K_{m,i}$ **(% O_2)**	K_i **(% CO_2)**	**R^2**
10	O_2	37.05	13.10	7.00	0.969
	CO_2	38.46	13.82	5.22	0.962

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สมการ (ง.1)-(ง.4) และตัวแปรต่าง ๆ ถูกป้อนเข้าไปในโปรแกรมแมทแลป โดยสร้างหน้าต่างทำงานสองหน้าต่าง หน้าต่างที่ 1 ทำหน้าที่เก็บค่าคงที่ ตัวแปร และสมการเชิงอนุพันธ์ หน้าต่างที่ 2 นำค่าคงที่ ตัวแปร และสมการเชิงอนุพันธ์ของหน้าต่างที่ 1 ไปคำนวณและวาดกราฟปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยการใส่ค่า (Input) ความเข้มข้นเริ่มต้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์ต้องใส่เป็นร้อยละ คือ แก๊สออกซิเจนเริ่มต้นร้อยละ 21 และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นร้อยละ 0.03

<u>คำสั่งที่ถูกป้อนในหน้าต่างที่ 1 มีดังนี้</u>

```
%Physical parameters%

function fv = fm1(t,x)

fv=zeros(2,1)

OTR = input;        %O2TR (cc of O2/(m^2*atm*day))%

COTR = input;       %CO2TR(cc of CO2/(m^2*atm*day))%

V = 200;            %Volume of packaging (cc.)%

L = 1.377;          %Film thickness (mil)%

W = 0.50;           %Weight (kg)%

A = 0.0648;         %Surface area of packaging (m^2)%


%Respiration parameters%

vmy = 37;

kmy = 13;

kiy = 7;

vmz = 38.5;

kmz = 13.8;

kiz = 5.22;


%Differential equation of O2 and CO2 in packaging.%

%fv(1) and fv(2)unit is 1/s according to mole fraction is dimensionless%

fv(1)=100*(((A/(V*L))*((OTR*L)/24)*(0.21-(x(1)/100))-((W/V)*(vmy*x(1))/((kmy)+(x(1))
*(1+(x(2)/kiy))))));
```

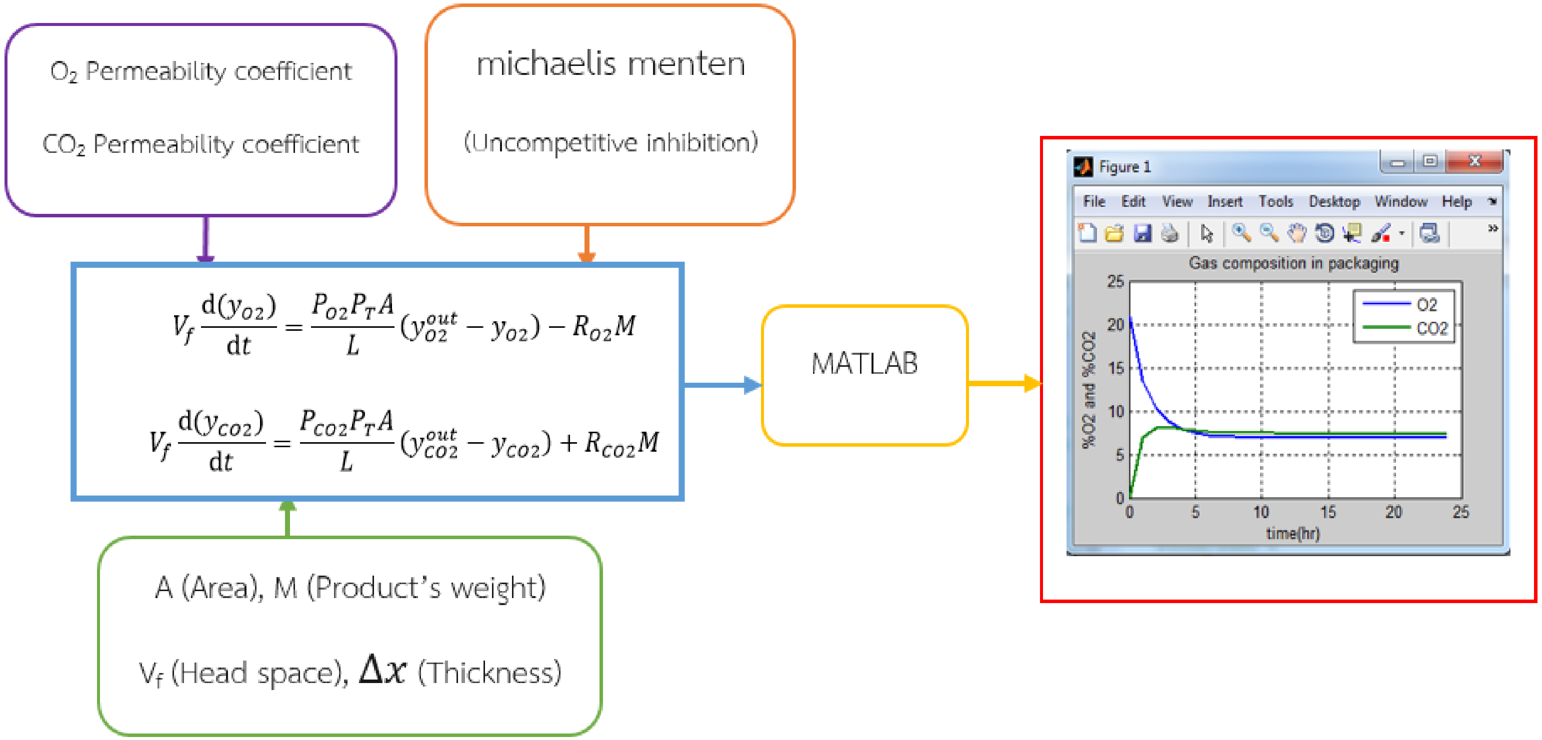
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

```
fv(2)=100*(((A/(V*L))*((COTR*L)/24)*(0-(x(2)/100)))+((W/V)*(vmz*x(1))/((kmz)+(x(1)
*(1+(x(2)/kiz))))));
```

<u>คำสั่งที่ถูกป้อนเข้าสู่หน้าต่างที่ 2 มีดังนี้</u>

```
%Gas in packaging simulation%
%Press F5 to start%
clc;
clear all;
global ky; global kz;

%O2 21%, CO2 0.03%
x0(1,1)=21;
x0(2,1)=0.03;

%Time, hr.%
tspan=[0:1:48];

%Diferential equation solving using Runge-Kutta 4.%
[t,y]=ode45('fm1',tspan,x0)

%Graph ploting.%
plot(t,y,'LineWidth',2); xlabel('time(hr)'); ylabel('%O2 and %CO2');
title('Gas composition in packaging'); legend('O2','CO2'); grid on;
```

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ ง.1 แผนผังแสดงการซิมมูเลชั่นเพื่อหาการซึมผ่านที่เหมาะสมของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ตาราง ง.2 ผลการซิมมูเลชั่นฟิล์ม Neat LDPE:100/0 (S200TC35)

เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์	
	O_2	CO_2		O_2	CO_2		O_2	CO_2
0	21.00	0.03	17	1.86	3.16	34	1.83	2.92
1	16.49	3.77	18	1.85	3.09	35	1.83	2.92
2	13.22	5.46	19	1.84	3.04	36	1.83	2.92
3	10.59	6.24	20	1.84	3.01	37	1.83	2.92
4	8.43	6.53	21	1.83	2.98	38	1.83	2.92
5	6.67	6.51	22	1.83	2.96	39	1.83	2.92
6	5.27	6.30	23	1.83	2.95	40	1.83	2.92
7	4.20	5.96	24	1.83	2.94	41	1.83	2.92
8	3.41	5.55	25	1.83	2.93	42	1.83	2.92
9	2.87	5.11	26	1.83	2.93	43	1.83	2.92
10	2.49	4.69	27	1.83	2.93	44	1.83	2.92
11	2.25	4.32	28	1.83	2.92	45	1.83	2.92
12	2.10	3.99	29	1.83	2.92	46	1.83	2.92
13	2.00	3.73	30	1.83	2.92	47	1.83	2.92
14	1.94	3.53	31	1.83	2.92	48	1.83	2.92
15	1.90	3.37	32	1.83	2.92			
16	1.87	3.25	33	1.83	2.92			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ง.3 ผลการซิมมูเลชั่นฟิล์ม LDPE/TPEE:90/10 (S200TC35)

เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์	
	O_2	CO_2		O_2	CO_2		O_2	CO_2
0	21.00	0.03	17	2.71	3.74	34	2.66	3.57
1	16.54	3.71	18	2.70	3.70	35	2.66	3.57
2	13.37	5.32	19	2.69	3.66	36	2.66	3.57
3	10.88	6.04	20	2.68	3.63	37	2.66	3.57
4	8.87	6.29	21	2.67	3.61	38	2.66	3.57
5	7.27	6.27	22	2.67	3.60	39	2.66	3.57
6	6.00	6.09	23	2.67	3.59	40	2.66	3.57
7	5.03	5.82	24	2.67	3.58	41	2.66	3.57
8	4.31	5.50	25	2.66	3.58	42	2.66	3.57
9	3.79	5.17	26	2.66	3.58	43	2.66	3.57
10	3.43	4.86	27	2.66	3.57	44	2.66	3.57
11	3.18	4.59	28	2.66	3.57	45	2.66	3.57
12	3.01	4.35	29	2.66	3.57	46	2.66	3.57
13	2.90	4.17	30	2.66	3.57	47	2.66	3.57
14	2.82	4.01	31	2.66	3.57	48	2.66	3.57
15	2.77	3.90	32	2.66	3.57			
16	2.73	3.81	33	2.66	3.57			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ง.4 ผลการซิมมูเลชั่นฟิล์ม LDPE/TPEE:80/20 (S200TC35)

เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์	
	O_2	CO_2		O_2	CO_2		O_2	CO_2
0	21.00	0.03	17	3.60	4.09	34	3.53	3.97
1	16.58	3.66	18	3.58	4.06	35	3.53	3.97
2	13.51	5.18	19	3.56	4.04	36	3.53	3.97
3	11.15	5.82	20	3.56	4.02	37	3.53	3.97
4	9.28	6.03	21	3.55	4.00	38	3.53	3.97
5	7.81	6.00	22	3.54	3.99	39	3.53	3.97
6	6.67	5.84	23	3.54	3.99	40	3.53	3.97
7	5.80	5.61	24	3.54	3.98	41	3.53	3.97
8	5.15	5.36	25	3.54	3.98	42	3.53	3.97
9	4.67	5.12	26	3.54	3.98	43	3.53	3.97
10	4.33	4.89	27	3.54	3.97	44	3.53	3.97
11	4.09	4.69	28	3.53	3.97	45	3.53	3.97
12	3.92	4.53	29	3.53	3.97	46	3.53	3.97
13	3.80	4.39	30	3.53	3.97	47	3.53	3.97
14	3.72	4.29	31	3.53	3.97	48	3.53	3.97
15	3.66	4.20	32	3.53	3.97			
16	3.63	4.14	33	3.53	3.97			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ง.5 ผลการซิมมูเลชั่นฟิล์ม LDPE/TPEE:70/30 (S200TC35)

เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์	
	O_2	CO_2		O_2	CO_2		O_2	CO_2
0	21.00	0.03	17	4.24	4.14	34	4.17	4.05
1	16.61	3.59	18	4.22	4.12	35	4.17	4.05
2	13.60	5.02	19	4.20	4.10	36	4.17	4.05
3	11.32	5.59	20	4.19	4.09	37	4.17	4.05
4	9.54	5.74	21	4.19	4.08	38	4.17	4.05
5	8.16	5.69	22	4.18	4.07	39	4.17	4.05
6	7.09	5.54	23	4.18	4.06	40	4.17	4.05
7	6.29	5.34	24	4.18	4.06	41	4.17	4.05
8	5.69	5.13	25	4.17	4.06	42	4.17	4.05
9	5.25	4.92	26	4.17	4.06	43	4.17	4.05
10	4.94	4.74	27	4.17	4.06	44	4.17	4.05
11	4.71	4.59	28	4.17	4.05	45	4.17	4.05
12	4.55	4.46	29	4.17	4.05	46	4.17	4.05
13	4.44	4.36	30	4.17	4.05	47	4.17	4.05
14	4.36	4.28	31	4.17	4.05	48	4.17	4.05
15	4.30	4.22	32	4.17	4.05			
16	4.26	4.18	33	4.17	4.05			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ง.6 ผลการซิมมูเลชั่นฟิล์ม LDPE/TPEE:50/50 (S200TC35)

เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์	
	O_2	CO_2		O_2	CO_2		O_2	CO_2
0	21.00	0.03	17	6.02	2.85	34	5.99	2.84
1	16.67	3.01	18	6.01	2.85	35	5.99	2.84
2	13.75	3.71	19	6.00	2.84	36	5.99	2.84
3	11.59	3.79	20	6.00	2.84	37	5.99	2.84
4	9.99	3.69	21	6.00	2.84	38	5.99	2.84
5	8.81	3.54	22	5.99	2.84	39	5.99	2.84
6	7.96	3.39	23	5.99	2.84	40	5.99	2.84
7	7.35	3.26	24	5.99	2.84	41	5.99	2.84
8	6.92	3.15	25	5.99	2.84	42	5.99	2.84
9	6.63	3.06	26	5.99	2.84	43	5.99	2.84
10	6.42	3.00	27	5.99	2.84	44	5.99	2.84
11	6.29	2.95	28	5.99	2.84	45	5.99	2.84
12	6.19	2.92	29	5.99	2.84	46	5.99	2.84
13	6.13	2.89	30	5.99	2.84	47	5.99	2.84
14	6.08	2.87	31	5.99	2.84	48	5.99	2.84
15	6.05	2.86	32	5.99	2.84			
16	6.03	2.85	33	5.99	2.84			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ง.7 ผลการซิมมูเลชั่นฟิล์ม Neat TPEE:0/100 (S200TC35)

เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์	
	O_2	CO_2		O_2	CO_2		O_2	CO_2
0	21.00	0.03	17	7.35	1.57	34	7.34	1.57
1	16.66	2.05	18	7.35	1.57	35	7.34	1.57
2	13.72	2.11	19	7.35	1.57	36	7.34	1.57
3	11.64	2.00	20	7.34	1.57	37	7.34	1.57
4	10.19	1.89	21	7.34	1.57	38	7.34	1.57
5	9.21	1.80	22	7.34	1.57	39	7.34	1.57
6	8.55	1.73	23	7.34	1.57	40	7.34	1.57
7	8.12	1.68	24	7.34	1.57	41	7.34	1.57
8	7.84	1.64	25	7.34	1.57	42	7.34	1.57
9	7.66	1.62	26	7.34	1.57	43	7.34	1.57
10	7.55	1.60	27	7.34	1.57	44	7.34	1.57
11	7.47	1.59	28	7.34	1.57	45	7.34	1.57
12	7.43	1.58	29	7.34	1.57	46	7.34	1.57
13	7.40	1.58	30	7.34	1.57	47	7.34	1.57
14	7.38	1.57	31	7.34	1.57	48	7.34	1.57
15	7.36	1.57	32	7.34	1.57			
16	7.36	1.57	33	7.34	1.57			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ง.8 ผลการซิมมูเลชั่นฟิล์ม LDPE/TPEE:50/50 (S200TC35)

เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์	
	O_2	CO_2		O_2	CO_2		O_2	CO_2
0	21.00	0.03	17	6.02	2.85	34	5.99	2.84
1	16.67	3.01	18	6.01	2.85	35	5.99	2.84
2	13.75	3.71	19	6.00	2.84	36	5.99	2.84
3	11.59	3.79	20	6.00	2.84	37	5.99	2.84
4	9.99	3.69	21	6.00	2.84	38	5.99	2.84
5	8.81	3.54	22	5.99	2.84	39	5.99	2.84
6	7.96	3.39	23	5.99	2.84	40	5.99	2.84
7	7.35	3.26	24	5.99	2.84	41	5.99	2.84
8	6.92	3.15	25	5.99	2.84	42	5.99	2.84
9	6.63	3.06	26	5.99	2.84	43	5.99	2.84
10	6.42	3.00	27	5.99	2.84	44	5.99	2.84
11	6.29	2.95	28	5.99	2.84	45	5.99	2.84
12	6.19	2.92	29	5.99	2.84	46	5.99	2.84
13	6.13	2.89	30	5.99	2.84	47	5.99	2.84
14	6.08	2.87	31	5.99	2.84	48	5.99	2.84
15	6.05	2.86	32	5.99	2.84			
16	6.03	2.85	33	5.99	2.84			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ง.9 ผลการซิมมูเลชั่นฟิล์ม LDPE/TPEE:50/50 (S210TC35)

เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์	
	O_2	CO_2		O_2	CO_2		O_2	CO_2
0	21.00	0.03	17	6.10	2.73	34	6.07	2.72
1	16.67	2.95	18	6.09	2.72	35	6.07	2.72
2	13.74	3.59	19	6.09	2.72	36	6.07	2.72
3	11.59	3.64	20	6.08	2.72	37	6.07	2.72
4	9.99	3.52	21	6.08	2.72	38	6.07	2.72
5	8.82	3.37	22	6.08	2.72	39	6.07	2.72
6	7.98	3.23	23	6.08	2.72	40	6.07	2.72
7	7.38	3.10	24	6.07	2.72	41	6.07	2.71
8	6.97	3.00	25	6.07	2.72	42	6.07	2.72
9	6.68	2.92	26	6.07	2.72	43	6.07	2.72
10	6.48	2.86	27	6.07	2.72	44	6.07	2.72
11	6.35	2.81	28	6.07	2.72	45	6.07	2.72
12	6.26	2.78	29	6.07	2.72	46	6.07	2.72
13	6.20	2.76	30	6.07	2.72	47	6.07	2.72
14	6.16	2.75	31	6.07	2.72	48	6.07	2.72
15	6.13	2.74	32	6.07	2.72			
16	6.11	2.73	33	6.07	2.72			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ง.10 ผลการซิมมูเลชั่นฟิล์ม LDPE/TPEE:50/50 (S220TC35)

เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์	
	O_2	CO_2		O_2	CO_2		O_2	CO_2
0	21.00	0.03	17	6.23	2.78	34	6.21	2.77
1	16.67	2.96	18	6.22	2.78	35	6.21	2.77
2	13.77	3.61	19	6.22	2.77	36	6.21	2.77
3	11.64	3.66	20	6.21	2.77	37	6.21	2.77
4	10.07	3.56	21	6.21	2.77	38	6.21	2.77
5	8.91	3.41	22	6.21	2.77	39	6.21	2.77
6	8.08	3.26	23	6.21	2.77	40	6.21	2.77
7	7.50	3.14	24	6.21	2.77	41	6.21	2.77
8	7.09	3.04	25	6.21	2.77	42	6.21	2.77
9	6.81	2.96	26	6.21	2.77	43	6.21	2.77
10	6.61	2.91	27	6.21	2.77	44	6.21	2.77
11	6.48	2.86	28	6.21	2.77	45	6.21	2.77
12	6.39	2.83	29	6.21	2.77	46	6.21	2.77
13	6.33	2.81	30	6.21	2.77	47	6.21	2.77
14	6.29	2.80	31	6.21	2.77	48	6.21	2.77
15	6.26	2.79	32	6.21	2.77			
16	6.24	2.78	33	6.21	2.77			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ง.11 ผลการซิมมูเลชั่นฟิล์ม LDPE/TPEE:50/50 (S240TC35)

เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์	
	O_2	CO_2		O_2	CO_2		O_2	CO_2
0	21.00	0.03	17	7.35	2.27	34	7.34	2.27
1	16.71	2.57	18	7.35	2.27	35	7.34	2.26
2	13.88	2.91	19	7.34	2.27	36	7.34	2.27
3	11.86	2.86	20	7.34	2.26	37	7.34	2.26
4	10.43	2.73	21	7.34	2.27	38	7.34	2.27
5	9.43	2.62	22	7.34	2.26	39	7.34	2.27
6	8.74	2.52	23	7.34	2.27	40	7.34	2.26
7	8.27	2.44	24	7.34	2.26	41	7.34	2.27
8	7.95	2.39	25	7.34	2.27	42	7.34	2.26
9	7.74	2.35	26	7.34	2.26	43	7.34	2.27
10	7.60	2.32	27	7.34	2.27	44	7.34	2.27
11	7.51	2.30	28	7.34	2.27	45	7.34	2.26
12	7.45	2.29	29	7.34	2.26	46	7.34	2.27
13	7.41	2.28	30	7.34	2.27	47	7.34	2.26
14	7.39	2.28	31	7.34	2.26	48	7.34	2.27
15	7.37	2.27	32	7.34	2.27			
16	7.36	2.27	33	7.34	2.26			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ง.12 ผลการซิมมูเลชั่นฟิล์ม LDPE/TPEE:50/50 (S200TC15)

เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์	
	O_2	CO_2		O_2	CO_2		O_2	CO_2
0	21.00	0.03	17	6.39	2.74	34	6.36	2.73
1	16.68	2.93	18	6.38	2.74	35	6.36	2.74
2	13.79	3.54	19	6.37	2.74	36	6.36	2.73
3	11.68	3.59	20	6.37	2.74	37	6.36	2.73
4	10.12	3.48	21	6.37	2.74	38	6.36	2.74
5	8.99	3.33	22	6.37	2.73	39	6.36	2.74
6	8.18	3.20	23	6.36	2.74	40	6.36	2.73
7	7.61	3.08	24	6.36	2.74	41	6.36	2.74
8	7.21	2.98	25	6.36	2.73	42	6.36	2.73
9	6.94	2.91	26	6.36	2.73	43	6.36	2.73
10	6.75	2.86	27	6.36	2.73	44	6.36	2.73
11	6.63	2.82	28	6.36	2.73	45	6.36	2.73
12	6.54	2.79	29	6.36	2.73	46	6.36	2.73
13	6.48	2.77	30	6.36	2.73	47	6.36	2.73
14	6.44	2.76	31	6.36	2.73	48	6.36	2.73
15	6.42	2.75	32	6.36	2.74			
16	6.40	2.75	33	6.36	2.73			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ง.13 ผลการซิมมูเลชั่นฟิล์ม LDPE/TPEE:50/50 (S200TC35)

เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์	
	O_2	CO_2		O_2	CO_2		O_2	CO_2
0	21.00	0.03	17	6.02	2.85	34	5.99	2.84
1	16.67	3.01	18	6.01	2.85	35	5.99	2.84
2	13.75	3.71	19	6.00	2.84	36	5.99	2.84
3	11.59	3.79	20	6.00	2.84	37	5.99	2.84
4	9.99	3.69	21	6.00	2.84	38	5.99	2.84
5	8.81	3.54	22	5.99	2.84	39	5.99	2.84
6	7.96	3.39	23	5.99	2.84	40	5.99	2.84
7	7.35	3.26	24	5.99	2.84	41	5.99	2.84
8	6.92	3.15	25	5.99	2.84	42	5.99	2.84
9	6.63	3.06	26	5.99	2.84	43	5.99	2.84
10	6.42	3.00	27	5.99	2.84	44	5.99	2.84
11	6.29	2.95	28	5.99	2.84	45	5.99	2.84
12	6.19	2.92	29	5.99	2.84	46	5.99	2.84
13	6.13	2.89	30	5.99	2.84	47	5.99	2.84
14	6.08	2.87	31	5.99	2.84	48	5.99	2.84
15	6.05	2.86	32	5.99	2.84			
16	6.03	2.85	33	5.99	2.84			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ง.14 ผลการซิมมูเลชั่นฟิล์ม LDPE/TPEE:50/50 (S200TC50)

เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์		เวลา (ชั่วโมง)	สัดส่วนแก๊สในถุงบรรจุภัณฑ์	
	O_2	CO_2		O_2	CO_2		O_2	CO_2
0	21.00	0.03	17	5.85	2.60	34	5.83	2.59
1	16.65	2.91	18	5.85	2.59	35	5.83	2.59
2	13.69	3.52	19	5.84	2.59	36	5.83	2.59
3	11.49	3.55	20	5.84	2.59	37	5.83	2.59
4	9.85	3.43	21	5.84	2.59	38	5.83	2.59
5	8.65	3.27	22	5.83	2.59	39	5.83	2.59
6	7.78	3.12	23	5.83	2.59	40	5.83	2.59
7	7.16	2.98	24	5.83	2.59	41	5.83	2.59
8	6.74	2.88	25	5.83	2.59	42	5.83	2.59
9	6.44	2.79	26	5.83	2.59	43	5.83	2.59
10	6.24	2.73	27	5.83	2.59	44	5.83	2.59
11	6.11	2.69	28	5.83	2.59	45	5.83	2.59
12	6.02	2.66	29	5.83	2.59	46	5.83	2.59
13	5.95	2.63	30	5.83	2.59	47	5.83	2.59
14	5.91	2.62	31	5.83	2.59	48	5.83	2.59
15	5.89	2.61	32	5.83	2.59			
16	5.87	2.60	33	5.83	2.59			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก จ. ภาพถ่ายฟิล์มบรรจุภัณฑ์ดัดแปร

รูปที่ จ.1 LDPE/TPEE:100/0 (S200T35)

รูปที่ จ.2 LDPE/TPEE:90/10 (S200T35)

รูปที่ จ.3 LDPE/TPEE:80/20 (S200T35)

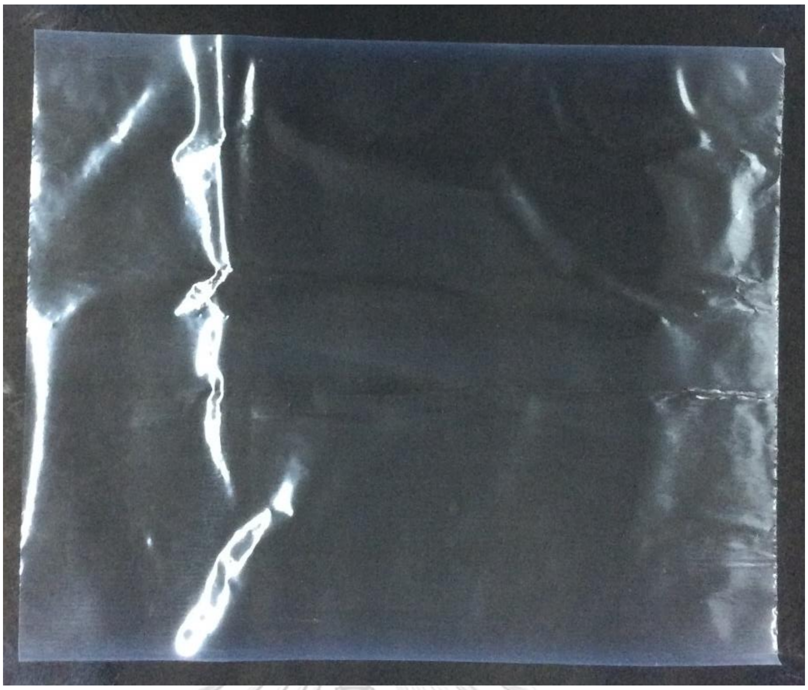
รูปที่ จ.4 LDPE/TPEE:70/30 (S200T35)

รูปที่ จ.5 LDPE/TPEE:50/50 (S200T35)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ จ.6 LDPE/TPEE:0/100 (S200T35)

รูปที่ จ.7 LDPE/TPEE:50/50 (S210T35)



รูปที่ จ.8 LDPE/TPEE:50/50 (S220T35)

รูปที่ จ.9 LDPE/TPEE:50/50 (S240T35)

รูปที่ จ.10 LDPE/TPEE:50/50 (S200T15)

รูปที่ จ.11 LDPE/TPEE:50/50 (S200T50)

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

[1] ประพัฒน์ บุญประพันธ์. มะม่วงเพื่อการส่งออก. กรุงเทพมหานคร: ชมรมไม้ผลแห่งประเทศไทย, 2530.

[2] กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. โครงการส่งเสริมมะม่วงเพื่อการส่งออก 2557.

[4] สาโรจน์ ศิริศันสนียกุล. วิศวกรรมเคมีชีวภาพพื้นฐาน 1. กรุงเทพฯ, 1995.

[11] งามทิพย์ ภู่วโรดม. ก๊าซกับการบรรจุผลิตภัณฑ์อาหาร. กรุงเทพฯ, 1994.

[18] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ and นิธิยา รัตนาปนนท์. Modified Atmosphere Packaging (MAP) 2018. Available from: http://www.foodnetworksolution.com/uploaded/MAP.JPG

[33] สมบุญ เตชะภิญญาวัฒน์. Plant Physiology, ed. 3, พ., 2538.

[34] สัมพันธ์ คัมภิรานนท์. หลักสรีรวิทยาของพืช. กรุงเทพมหานคร, 2526.

[59] ธวัชชัย รัตน์ชเลศ, วิลาวัลย์ คำปวน, ธีรนุช เจริญกิจ, and ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว. มะม่วง: การผลิตและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว. ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา, 2556.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

English

[3] Phavaphutanon, L. Fruit production, marketing and research and development system in Thailand. 2015, Food and Fertilizer Technology Center, Taiwan.

[5] Mahajan, P.V., Oliveira, F.A.R., Montanez, J.C., and Frias, J. Development of user-friendly software for design of modified atmosphere packaging for fresh and fresh-cut produce. Innovative Food Science & Emerging Technologies 8(1) (2007): 84-92.

[6] Kader, A.A., Zagory, D., Kerbel, E.L., and Wang, C.Y. Modified atmosphere packaging of fruits and vegetables. Critical Reviews in Food Science and Nutrition 28(1) (1989): 1-30.

[7] Belay, Z.A., Caleb, O.J., and Opara, U.L. Modelling approaches for designing and evaluating the performance of modified atmosphere packaging (MAP) systems for fresh produce: A review. Food Packaging and Shelf Life 10 (2016): 1-15.

[8] Xanthopoulos, G., Koronaki, E.D., and Boudouvis, A.G. Mass transport analysis in perforation-mediated modified atmosphere packaging of strawberries. Journal of Food Engineering 111(2) (2012): 326-335.

[9] Kader, A. Biochemical and physiological basis for effects of controlled and modified atmospheres on fruits and vegetables. Food technology (USA) (1986).

[10] McMillin, K.W. Where is MAP Going? A review and future potential of modified atmosphere packaging for meat. Meat Science 80(1) (2008): 43-65.

[12] Malpass, D.B. Introduction to industrial polyethylene: properties, catalysts, and processes. Vol. 45: John Wiley & Sons, 2010.

[13] Massey, L.K. Permeability Properties of Plastics and Elastomers - A Guide to Packaging and Barrier Materials (2nd Edition). William Andrew Publishing/Plastics Design Library.

[14] Dupont. Dupont™ Hytrel® Thermoplastic Polyester Elastomer Design Guide. USA, 2018.

[15] Armstrong, S., Freeman, B., Hiltner, A., and Baer, E. Gas permeability of melt-processed poly(ether block amide) copolymers and the effects of orientation. Polymer 53(6) (2012): 1383-1392.

[16] Rabiee, H., Ghadimi, A., Abbasi, S., and mohammadi, T. CO2 separation performance of poly(ether-b-amide6)/PTMEG blended membranes: Permeation and sorption properties. Chemical Engineering Research and Design 98 (2015): 96-106.

[17] COVERIS. MAP (MODIFIED ATMOSPHERE PACKAGING) 2018. Available from: http://www.coveris.com/wp-content/uploads/2015/09/MAP_web.jpg

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

[19] Paul, D.R. and Clarke, R. Modeling of modified atmosphere packaging based on designs with a membrane and perforations. Journal of Membrane Science 208(1) (2002): 269-283.

[20] Peppelenbos, H.W. and van't Leven, J. 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(1) (1996): 27-40.

[21] Charles, F., Guillaume, C., and Gontard, N. Effect of passive and active modified atmosphere packaging on quality changes of fresh endives. Postharvest Biology and Technology 48(1) (2008): 22-29.

[22] D'Aquino, S., Mistriotis, A., Briassoulis, D., Di Lorenzo, M.L., Malinconico, M., and Palma, A. Influence of modified atmosphere packaging on postharvest quality of cherry tomatoes held at 20 °C. Postharvest Biology and Technology 115 (2016): 103-112.

[23] Li, Y., Ishikawa, Y., Satake, T., Kitazawa, H., Qiu, X., and Rungchang, S. Effect of active modified atmosphere packaging with different initial gas compositions on nutritional compounds of shiitake mushrooms (Lentinus edodes). Postharvest Biology and Technology 92 (2014): 107-113.

[24] Wypych, G. LDPE low density polyethylene. in Wypych, G. (ed.)Handbook of Polymers (Second Edition), pp. 178-184: ChemTec Publishing, 2016.

[25] Massey, L.K. Chapter 36 - Low Density Polyethylene (LDPE). in Permeability Properties of Plastics and Elastomers (Second Edition), pp. 219-226. Norwich, NY: William Andrew Publishing, 2003.

[26] Dumont, M.J., Orsat, V., and Raghavan, V. 7 - Reducing Postharvest Losses A2 - Madramootoo, Chandra. in Emerging Technologies for Promoting Food Security, pp. 135-156. Oxford: Woodhead Publishing, 2016.

[27] Siracusa, V. Food Packaging Permeability Behaviour: A Report. International Journal of Polymer Science 2012 (2012): 11.

[28] Comyn, J. Introduction to Polymer Permeability and the Mathematics of Diffusion. in Comyn, J. (ed.)Polymer Permeability, pp. 1-10. Dordrecht: Springer Netherlands, 1985.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

[29] Vieth, W.R. and Sladek, K.J. A model for diffusion in a glassy polymer. Journal of Colloid Science 20(9) (1965): 1014-1033.

[30] Kader, A.A. Fruit Maturity, Ripening, and Quality Relationships. in, pp. 203-208: International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, 1999.

[31] Ravindra, M.R. and Goswami, T.K. Modelling the respiration rate of green mature mango under aerobic conditions. Biosystems Engineering 99(2) (2008): 239-248.

[32] Mahajan, P. and Goswami, T. PH—Postharvest Technology: Enzyme Kinetics Based Modelling of Respiration Rate for Apple. Journal of Agricultural Engineering Research 79(4) (2001): 399-406.

[35] Hudec, I., Sain, M.M., and Kozankova, J. Scanning electron microscopy methods for studying interfacial interaction in polymer blends. Polymer Testing 10(5) (1991): 387-397.

[36] Chinsirikul, W., et al. Porous Ultrahigh Gas-Permeable Polypropylene Film and Application in Controlling In-pack Atmosphere for Asparagus. Packaging Technology and Science 27(4) (2014): 313-325.

[37] Biswas, J., Kim, H., Yim, C.S., Cho, J., Kim, G.J., and Choe, S. Structural effects on the tensile and morphological properties of zeolite-filled polypropylene derivative composites. Macromolecular research 12(5) (2004): 443-450.

[38] Prasad, B.D., Kumar, R., Kumar, P., Patel, V.B., and Jha, R.N. Clonal variability studies in'langra'mango ('Mangifera indica'L.) using morphological, biochemical and molecular markers. International Journal of Agriculture, Environment & Biotechnology 8(3) (2015): 567.

[39] Zhang, X., Elkoun, S., Ajji, A., and Huneault, M. Oriented structure and anisotropy properties of polymer blown films: HDPE, LLDPE and LDPE. Polymer 45(1) (2004): 217-229.

[40] LabTech Engineering. 26MM Twin Screw Extruder 2018. Available from: http://www.milabtech.com/images/extrud3.jpg

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

[41] Thermo Scientific. HAAKE™ Rheomex CTW 100 OS Twin Screw Extruder for the HAAKE™ PolyLab™ OS System 2018.
Available from: https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/CAD/product-images/F82334~p.eps-250.jpg

[42] MOCON. PERMATRAN-W® Model 398 2018.
Available from: https://www.mocon.com/dynamic-media/assets/images/instruments/permatran398.png?gravity=northwest&v=aside-photo&k=uk0GaIuffkN6fYczEfSaGA

[43] MOCON. OX-TRAN® Model 2/21 2018.
Available from: https://www.mocon.com/dynamic-media/assets/images/instruments/oxtran221.png?gravity=northwest&v=aside-photo&k=1sLn1xEsWe6kgPchzQnfCg

[44] Corporation, H.H.-T.S. DSC Measurement of Polyehtylene. The correlation of polyehtylene density and melting (1986).

[45] Brandon, K., Beggan, M., Allen, P., and Butler, F. The performance of several oxygen scavengers in varying oxygen environments at refrigerated temperatures: implications for low-oxygen modified atmosphere packaging of meat. International journal of food science & technology 44(1) (2009): 188-196.

[46] Wu, P., Jones, G., Shelley, C., and Woelfli, B. Novel microporous films and their composites. Journal of engineered fibers and fabrics 2(1) (2007): 49-59.

[47] Lotti, C., Correa, C.A., and Canevarolo, S.V. Mechanical and morphological characterization of polypropylene toughened with olefinic elastomer. Materials Research 3 (2000): 37-44.

[48] Liu, C., Wang, J., and He, J. Rheological and thermal properties of m-LLDPE blends with m-HDPE and LDPE. Polymer 43(13) (2002): 3811-3818.

[49] Chen, J., Lv, Q., Wu, D., Yao, X., Wang, J., and Li, Z. Nucleation of a Thermoplastic Polyester Elastomer Controlled by Silica Nanoparticles. Industrial & Engineering Chemistry Research 55(18) (2016): 5279-5286.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

[50] Genovese, L., et al. Gas permeability, mechanical behaviour and compostability of fully-aliphatic bio-based multiblock poly(ester urethane)s. RSC Advances 6(60) (2016): 55331-55342.

[51] Zhang, X.M., Elkoun, S., Ajji, A., and Huneault, M.A. Effect of Crystalline Structure on Tear Resistance of LDPE and LLDPE-Blown Films. Journal of Plastic Film & Sheeting 20(1) (2004): 43-53.

[52] Lach, R., et al. Influence of Low-density Polyethylene Blown Film Thickness on the Mechanical Properties and Fracture Toughness. Vol. 29, 2013.

[53] Kim, J.H., Ha, S.Y., and Lee, Y.M. Gas permeation of poly(amide-6-b-ethylene oxide) copolymer. Journal of Membrane Science 190(2) (2001): 179-193.

[54] Castellanos, D.A., Herrera, D.R., and Herrera, A.O. Modelling water vapour transport, transpiration and weight loss in a perforated modified atmosphere packaging for feijoa fruits. Biosystems Engineering 151 (2016): 218-230.

[55] Beaudry, R.M. Effect of O2 and CO2 partial pressure on selected phenomena affecting fruit and vegetable quality. Postharvest Biology and Technology 15(3) (1999): 293-303.

[56] Lu, J.J. and Sue, H.J. Morphology and mechanical properties of blown films of a low-density polyethylene/linear low-density polyethylene blend. Journal of Polymer Science Part B-Polymer Physics 40(6) (2002): 507-518.

[57] Shanks, R.A. and Amarasinghe, G. Crystallisation of blends of LLDPE with branched VLDPE. Polymer 41(12) (2000): 4579-4587.

[58] Pesis, E., Aharoni, D., Aharon, Z., Ben-Arie, R., Aharoni, N., and Fuchs, Y. Modified atmosphere and modified humidity packaging alleviates chilling injury symptoms in mango fruit. Postharvest Biology and Technology 19(1) (2000): 93-101.

Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กันตพงศ์ สักลอ
วัน เดือน ปี เกิด	7 กุมภาพันธ์ 2535
สถานที่เกิด	บ้านร้องเชียงแรง ต. เชียงแรง อ. ภูซาง จ.พะเยา
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2557

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY