



การศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและ
พอลิเอทิลีนออกไซด์ สำหรับยืดอายุการเก็บรักษากล้วยไม้ตัดดอก



โดย
นางสาวรมย์ธีรา ชันดีสา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและ
พอลิเอทิลีนออกไซด์ สำหรับยืดอายุการเก็บรักษากล้วยไม้ตัดดอก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

STUDY ON PROPERTIES OF PLA/PEO BLEND FILMS FOR
EXTENDED SHELF-LIFE OF ORCHIDS CUT FLOWERS



By
MISS Romteera KHANTEESA

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Engineering (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2021

Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ การศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด
และ
พอลิเอทิลีนออกไซด์ สำหรับยืดอายุการเก็บรักษากล้วยไม้ตัดดอก
โดย นางสาวรมย์ธีรา ชันดีสา
สาขาวิชา วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา
มหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พูนทรัพย์ ตริภพนาถกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. อำนาจ สิทธิธรรมกุล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาเจรา พัฒนถาบุตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พูนทรัพย์ ตริภพนาถกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร. อำนาจ สิทธิธรรมกุล)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ดร. ชนินทร์ กุลเศรษฐัญญชลี)

61402218 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

คำสำคัญ : พอลิแลคติกแอซิด, พอลิเอทิลีนออกไซด์, ซีโอไลต์, การแลกเปลี่ยนไอออน

นางสาว รมย์ธีรา ชันดีสา: การศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเอทิลีนออกไซด์ สำหรับยืดอายุการเก็บรักษากล้วยไม้ตัดดอก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พูนทรัพย์ ตรีภพนาถกุล

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์สำหรับยืดอายุกล้วยไม้ตัดดอก โดยการศึกษาแบ่งเป็น 3 ตอน ได้แก่ ตอนแรกเป็นการศึกษาผลของพอลิเอทิลีนออกไซด์ (PEO) ปริมาณ 5, 10 และ 15% โดยน้ำหนัก และมีน้ำหนักโมเลกุล 100,000-400,000 กรัมต่อโมล ต่อสมบัติของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัด พบว่า PEO สามารถเปลี่ยนพฤติกรรมการแตกหักจากแบบเปราะไปเป็นแบบยืดหยุ่นเมื่อเติม PEO 10% โดยน้ำหนัก และฟิล์ม PLA ผสม PEO ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น ส่งผลให้ PEO เกิดการแยกเฟสออกจาก PLA ตอนที่สองเป็นการศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์ (Zeolite) ปริมาณ 1, 3 และ 5% โดยน้ำหนัก โดยทำการปรับปรุงผิวซีโอไลต์ด้วยสารเชื่อมประสานไซเลนชนิด (3-Aminopropyl) trimethoxysilane ต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PEO 10 % โดยน้ำหนัก และมีน้ำหนักโมเลกุล 100,000 กรัมต่อโมล พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เติมซีโอไลต์ยังคงมีการแตกหักแบบยืดหยุ่นและการเติมซีโอไลต์ลงในเมทริกซ์พอลิเมอร์จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับฟิล์ม PLA/PEO แต่ในขณะเดียวกันก็จะทำให้ความยืดหยุ่นของฟิล์ม PLA/PEO ลดลง นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังทำหน้าที่เป็นสารกักเก็บให้กับ PLA และโครงสร้างรูพรุนของซีโอไลต์ทำให้โมเลกุลของก๊าซสามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนได้ จึงเป็นการลดอัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน (O_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไอน้ำ ผ่านฟิล์ม PLA/PEO ส่งผลให้อัตราการหายใจและการสูญเสียน้ำของกล้วยไม้ตัดดอกที่บรรจุในฟิล์ม PLA/PEO ลดลง จึงสามารถยืดอายุของกล้วยไม้ตัดดอกให้มีความสดได้นานขึ้น และในส่วนที่สามเป็นการศึกษาผลของสารปรับปรุงซีโอไลต์ด้วยไอออนชนิด Li^+ และ K^+ ที่ปริมาณ 1.25, 2.5 และ 3.75 % โดยน้ำหนักของซีโอไลต์ ที่เติมลงในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO/Zeolite พบว่าค่าการซึมผ่านของก๊าซ O_2 , CO_2 และไอน้ำผ่านฟิล์ม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ผ่านการปรับปรุง สามารถเรียงลำดับตามไอออนที่ทำการปรับปรุงได้ดังนี้ $K^+ < Li^+ < Na^+$ (Unmodified) และเมื่อปริมาณไอออนเพิ่มขึ้น ค่าการซึมผ่านของก๊าซ O_2 , CO_2 และไอน้ำผ่านฟิล์ม PLA/PEO/Zeolite จะลดลง และจากการศึกษาการยืดอายุกล้วยไม้ตัดดอกโดยการบรรจุในบรรจุภัณฑ์จากฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO/Zeolite พบว่าฟิล์ม PLA/PEO/Zeolite- K^+ สามารถยืดอายุกล้วยไม้ตัดดอกได้นานกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO/Zeolite- Li^+

61402218 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Keyword : poly(lactic acid), poly(ethylene oxide), zeolite, ion exchange

MISS ROMTEERA KHANTEESA : STUDY ON PROPERTIES OF PLA/PEO BLEND FILMS FOREXTENDED SHELF-LIFE OF ORCHIDS CUT FLOWERS THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR POONSUB THREEPOP NATKUL, Ph.D.

This research aims to develop packaging film for extended shelf-life *Dendrobium* Orchids. This research was separated into 3 sections. The first part was to study the effect of poly(ethylene oxide) (PEO) content at 5, 10 and 15 wt% and molecular weight of 100,000 to 400,000 g/mol on properties of poly(lactic acid) (PLA) films. Films were produced via the compression molding process. The addition of PEO 10 wt% into PLA changed failure behavior from brittle to ductile fracture. In addition, PLA blended with higher molecular weights of PEO led to phase separation of PEO from PLA matrix. The second part was to study the effect of zeolite at 1, 3 and 5 wt% on properties of PLA blended with PEO 10 wt% and molecular weight of 100,000 g/mol. Zeolite was treated by using (3-Aminopropyl) trimethoxysilane as coupling agent. The failure behavior of PLA/PEO/Zeolite films was still ductile fracture. Tensile strength of PLA/PEO blended with zeolite films was higher than the one with PLA/PEO film. However, flexibility of PLA/PEO/Zeolite films was lower than the one with PLA/PEO film. Moreover, zeolite acted as a nucleating agent of PLA. Gas molecules could be trapped into the pore of zeolite resulting in reduces the oxygen (O₂), carbon dioxide (CO₂) and water vapor transmission rate through PLA/PEO film. As a result, the orchid respiration rate and water loss from orchid were decreased. Therefore, the addition of zeolite into PLA/PEO films could extend orchid shelf life. The third part was to study the effect of modified zeolite by Li⁺ and K⁺ at 1.25, 2.5 and 3.75 wt% of zeolite on properties of PLA/PEO/Zeolite films. The permeability of O₂, CO₂ and water vapor through PLA/PEO films with cation exchanged zeolite could be sorted in ascending order: K⁺ < Li⁺ < Na⁺ (Unmodified), respectively. In addition, O₂, CO₂ and water vapor permeations were decreased with the increasing of ion concentration. Finally, PLA/PEO/Zeolite-K⁺ film packaging was able to extend shelf-life of orchid longer than PLA/PEO/Zeolite-Li⁺ film packaging.

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัยเพื่อบรรลุเป้าหมายของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูนทรัพย์ ตริภพนาถกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และอาจารย์ ดร.อำนาจ สิทธิตระกูล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการดำเนินงานวิจัยต่างๆ ส่งผลให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาเจรา พัฒนถาบุตร รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย และ ดร.ชนินทร์ กุลเศรษฐ์ชัยสิทธิ์ ที่มาเป็นกรรมการสอบและแนะแนวทางต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ความรู้และสามารถนำไปใช้ในการทำงานต่อไปได้ และขอขอบคุณบุคลากรทุกท่านของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย รวมถึงการอำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานจนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้องปริญญาโท นักศึกษาภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ รวมทั้ง GOT 7 และครอบครัว ที่คอยให้คำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาต่างๆ และอยู่เคียงข้างเป็นกำลังใจจนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จตามแผนที่วางไว้

นางสาว รมย์ธีรา ชันดีสา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ท
บทที่ 1 บทนำ (Introduction)	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา (Statements and significance of the problem)	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย (Objective of research).....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย (Scope or delimitation of the study).....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Review of related literature).....	5
2.1 พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid) : PLA).....	5
2.2 พอลิเอทิลีนออกไซด์ (Poly(ethylene oxide) : PEO).....	6
2.3 ซีโอไลต์ (Zeolite).....	7
2.3.1 ซีโอไลต์เอ (Zeolite A).....	8
2.4 สารประกอบไนเตรต.....	9
2.4.1 ลิเทียมไนเตรต (Lithium nitrate).....	10
2.4.2 โพแทสเซียมไนเตรต (Potassium nitrate).....	10
2.5 รัศมีไอออน (Ionic radius).....	10

2.6 สารเชื่อมประสานซิลิโคน (Silane coupling agent).....	11
2.6.1 สารเชื่อมประสานซิลิโคนชนิด (3-Aminopropyl) trimethoxysilane	12
2.7 ขนาดโมเลกุลของก๊าซต่างๆ.....	12
2.8 กล้วยไม้ (Orchids).....	13
2.8.1 สถานการณ์กล้วยไม้โลก.....	13
2.8.2 การผลิตกล้วยไม้ของประเทศไทย.....	13
2.8.3 แนวโน้มการส่งออก.....	13
2.9 การหายใจของพืชหลังการเก็บเกี่ยว	14
2.10 การเสื่อมสภาพของดอกไม้.....	15
2.11 เอทิลีน (Ethylene).....	15
2.12 การสังเคราะห์เอทิลีน	16
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	25
3.1 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	25
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	25
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	25
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล	26
3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน.....	26
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	26
3.2.1 การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PEO (PLA/PEO blend films)	26
3.2.2 การทดสอบสมบัติของ PLA/PEO blend films.....	27
3.2.3 การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PEO ที่มีการเติมซีโอไซด์.....	31
3.2.4 การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PEO ที่มีการเติมซีโอไซด์ที่ทำการปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต	33

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 36

4.1 ผลการศึกษาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PEO (PLA/PEO blend films)..... 36

4.1.1 การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)..... 36

4.1.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO 39

4.1.3 การศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO..... 45

4.1.4 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)..... 48

4.1.5 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA)..... 54

4.1.6 การศึกษาความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO..... 57

4.1.7 การศึกษาความสามารถในการยึดอายุกล้วยไม้ตัดดอกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO 63

4.2 ผลการศึกษาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ (PLA/PEO/Zeolite films) 66

4.2.1 การตรวจสอบการปรับปรุงผิวของซีโอไลต์ ด้วย (3-Aminopropyl) trimethoxysilane ปริมาณ 2 wt% ของซีโอไลต์ 66

4.2.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ (PLA/PEO/Zeolite films) 69

4.2.3 ผลการศึกษาพื้นฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ (PLA/PEO/Zeolite films) 73

4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ (PLA/PEO/Zeolite films) ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)..... 74

4.2.5 ผลการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติม ซีโอไลต์ (PLA/PEO/Zeolite films) ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA) 76

4.2.6 การศึกษาความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ (PLA/PEO/Zeolite films)..... 79

4.2.7 การศึกษาความสามารถในการยึดอายุกล้วยไม้ตัดดอกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ (PLA/PEO/Zeolite films).....	82
4.3 ผลการศึกษาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต (PLA/PEO/Z-Li ⁺ , PLA/PEO/Z-K ⁺ films)	85
4.3.1 การตรวจสอบการแลกเปลี่ยนประจุ (Cation exchange) ของซีโอไลต์ด้วยเทคนิค XRD. 85	
4.3.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต (PLA/PEO/Z-Li ⁺ , PLA/PEO/Z-K ⁺ films).....	90
4.3.3 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต (PLA/PEO/Z-Li ⁺ , PLA/PEO/Z-K ⁺ films) ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC).....	95
4.3.4 ผลการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติม ซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต (PLA/PEO/Z-Li ⁺ , PLA/PEO/Z-K ⁺ films) ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA).....	97
4.3.5 การศึกษาความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต (PLA/PEO/Z-Li ⁺ , PLA/PEO/Z-K ⁺ films).....	99
4.3.6 การศึกษาความสามารถในการยึดอายุกล้วยไม้ตัดดอกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต (PLA/PEO/Z-Li ⁺ , PLA/PEO/Z-K ⁺ films).....	103
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	111
5.1 การศึกษาผลของพอลิเอทิลีนออกไซด์ (PEO) ที่ส่งผลต่อสมบัติของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA).....	111
5.2 การศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์ที่ทำการปรับปรุงด้วย (3-Aminopropyl) trimethoxysilane ต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO	111
5.3 การศึกษาผลของสารปรับปรุงซีโอไลต์ด้วยไอออน Li ⁺ และ K ⁺ ต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO/Zeolite	112
5.4 ข้อเสนอแนะ	112

ภาคผนวก.....	115
ภาคผนวก ก ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่างๆ	116
ภาคผนวก ข แสดงวิธีการคำนวณ	172
ภาคผนวก ค การนำเสนอผลงานวิจัย.....	177
รายการอ้างอิง	184
ประวัติผู้เขียน.....	195



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ขนาดรูพรุนของซีโอไลต์แต่ละชนิด [20].....	8
ตารางที่ 2.2 ขนาดโมเลกุลของก๊าซต่างๆ [29]	12
ตารางที่ 2.3 อัตราการหายใจของพืชแต่ละชนิด [32]	14
ตารางที่ 2.4 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO [9]	19
ตารางที่ 2.5 อัตราการซึมผ่านของออกซิเจนของฟิล์ม PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO [9]	19
ตารางที่ 2.6 แสดงผลของขนาดรูพรุนที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพการแยกก๊าซ [35]	20
ตารางที่ 2.7 การดูดซับและความหนาแน่นของฮีเลียมในซีโอไลต์ที่แลกเปลี่ยนด้วยไอออนลิเทียม [36]	24
ตารางที่ 3.1 แสดงสัดส่วนการผสมและชื่อย่อที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO.....	31
ตารางที่ 3.2 แสดงสัดส่วนการผสมและชื่อย่อที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่มีการ เติมซีโอไลต์	33
ตารางที่ 3.3 แสดงสัดส่วนการผสมและชื่อย่อที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่มีการ เติมซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต	35
ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม Neat PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่มีปริมาณและ น้ำหนักโมเลกุลของ PEO แตกต่างกัน	42
ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลที่ได้จาก DSC ของ Neat PLA, pure PEO และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO	54
ตารางที่ 4.3 แสดงข้อมูลที่ได้จาก TGA ของ Neat PLA, pure PEO และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO	56
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และ อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO	61
ตารางที่ 4.5 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์.....	72
ตารางที่ 4.6 แสดงข้อมูลที่ได้จาก DSC ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์.....	76

ตารางที่ 4.7 แสดงข้อมูลที่ได้จาก TGA ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์.....	78
ตารางที่ 4.8 แสดงค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์.....	81
ตารางที่ 4.9 แสดงค่ารัศมีไอออนิก มวลอะตอม และค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของไอออนต่างๆ[25, 97]	89
ตารางที่ 4.10 แสดงค่า Unit cell parameter ของซีโอไลต์ 5A และซีโอไลต์ 5A ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต	89
ตารางที่ 4.11 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน	93
ตารางที่ 4.12 แสดงข้อมูลที่ได้จาก DSC ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน.....	96
ตารางที่ 4.13 แสดงข้อมูลที่ได้จาก TGA ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน.....	99
ตารางที่ 4.14 แสดงค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน	102
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มสูตรต่างๆ ด้วยเครื่อง Universal testing machine.....	116

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 วัฏจักรของพอลิแลคติกแอซิด [18]	5
รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิแลคติกแอซิด [18]	6
รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนออกไซด์ [19]	7
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของซีโอไลต์ [20]	7
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของซีโอไลต์เอ [21]	9
รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของลิเธียมไนเตรต [24]	10
รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างของโพแทสเซียมไนเตรต [23]	10
รูปที่ 2.8 รัศมีไอออนและขนาดอะตอม (Å) [25]	11
รูปที่ 2.9 สูตรทั่วไปของสารเชื่อมประสานซิลิโคน [26]	11
รูปที่ 2.10 การทำปฏิกิริยาของออร์แกโนซิลิโคนกับซิลิโคนและพอลิเมอร์ [26]	12
รูปที่ 2.11 ซิลิโคนชนิด (3-Aminopropyl) trimethoxysilane [28]	12
รูปที่ 2.12 กล้วยไม้สกุลหวาย (Dendrobium orchids) [30]	13
รูปที่ 2.13 การสังเคราะห์เอทิลีนในพืช [34]	16
รูปที่ 2.14 ความต้านทานต่อแรงดึงยึดและการยึดที่จุดแตกหักของฟิล์ม PLA/PEO [8]	17
รูปที่ 2.15 ความต้านทานแรงกระแทกแบบไม่บากของ PLA บริสุทธิ์ [8]	18
รูปที่ 2.16 ภาพ SEM ของพื้นผิวแตกหักจากแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO : a.PEO-0, b.PEO-1, c.PEO-3, d.PEO-5 [8]	18
รูปที่ 2.17 ความต้านทานต่อแรงกระแทกและการดึงยึดที่จุดแตกหักของฟิล์ม PLA/PEO [9]	19
รูปที่ 2.18 ภาพ SEM ของพื้นผิวแตกหักของ (a) PLA ที่ไม่เติมซีโอไลต์, (b) PLA ที่เติมซีโอไลต์ [2] 21	
รูปที่ 2.19 แสดงผลของซีโอไลต์ต่อความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (WVP) [2]	21
รูปที่ 2.20 แสดงผลของซีโอไลต์ต่อความสามารถในการซึมผ่านของออกซิเจน (OTR) ของฟิล์มคอมพอสิต PLA-ซีโอไลต์ (50%RH, 23°C) [2]	21

รูปที่ 2.21 แสดง X-ray diffractograms ของ Na A, Li A และ KA zeolites [36].....	22
รูปที่ 2.22 ภาพ SEM ของซีโอไลต์ (a) K A, (b) Li A, และ (c) Na A [36].....	23
รูปที่ 2.23 ภาพ TEM ของ Li A zeolites [36].....	23
รูปที่ 2.24 อันตรกิริยาระหว่างแคทไอออนของโลหะหมู่หนึ่งกับพันธะไพของเอทิลีน (a) และอันตรกิริยาระหว่างออกซิเจนของซีโอไลต์กับหมู่ CH ของเอทิลีน (b) [37]	24
รูปที่ 3.1 แสดงแผนภูมิการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO	30
รูปที่ 3.2 แสดงแผนภูมิการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่มีการเติมซีโอไลต์	32
รูปที่ 3.3 แสดงแผนภูมิการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่มีการเติมซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วย ลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต	34
รูปที่ 4.1 แสดงกลไกพลาสติกไซเซชันของ PEO ในเมทริกซ์ PLA.....	37
รูปที่ 4.2 สเปกตรัม FTIR ของ Neat PLA, 1PEO และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO	37
รูปที่ 4.3 สเปกตรัม FTIR ของ Neat PLA, PEO และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO	38
รูปที่ 4.4 แสดงเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของ Neat PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่มีปริมาณและน้ำหนักโมเลกุลของ PEO แตกต่างกัน	40
รูปที่ 4.5 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม Neat PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่มีปริมาณและน้ำหนักโมเลกุลของ PEO แตกต่างกัน : (a) Tensile strength, (b) Young's Modulus และ (c) Elongation at break.....	41
รูปที่ 4.6 แผนภาพแสดงกลไกพลาสติกไซเซชันของ PEO ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และ PEO ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงในเมทริกซ์ PLA	44
รูปที่ 4.7 สันฐานวิทยาของพื้นผิวแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงดึงของฟิล์ม Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO	47
รูปที่ 4.8 DSC thermogram ในขั้น cooling ของ Neat PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO : (a) 1PEO, (b) 2PEO, (c) 3PEO และ (d) 4PEO.....	49
รูปที่ 4.9 DSC thermogram ในขั้น second heating ของ Neat PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO : (a) 1PEO, (b) 2PEO, (c) 3PEO และ (d) 4PEO.....	50
รูปที่ 4.10 แสดงความเป็นผลึกของ Neat PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO.....	51

รูปที่ 4.11 DSC thermogram ในขั้น cooling ของ Neat PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO : (a) 5 wt%, (b) 10 wt% และ (c) 15 wt%	52
รูปที่ 4.12 DSC thermogram ในขั้น second heating ของ Neat PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO : (a) 5 wt%, (b) 10 wt% และ (c) 15 wt%	53
รูปที่ 4.13 แสดงเทอร์โมแกรมของ Neat PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO : (a) TGA และ (b) DTG	55
รูปที่ 4.14 แสดงกลไกทั่วไปสำหรับก๊าซหรือไอน้ำที่แพร่ผ่านฟิล์มพลาสติก.....	58
รูปที่ 4.15 ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซผ่านฟิล์ม Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO : (a) Oxygen permeability และ (b) Carbon dioxide permeability	59
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านก๊าซกับปริมาณผลึกของฟิล์ม Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO	60
รูปที่ 4.17 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO.....	62
รูปที่ 4.18 แสดงกล้วยไม้บรรจุในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO	65
รูปที่ 4.19 แสดงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารเชื่อมประสานไซเลนและซีโอไลต์	67
รูปที่ 4.20 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างซีโอไลต์ที่ได้รับการปรับปรุงผิวแล้วกับ PLA และ PEO. 68	
รูปที่ 4.21 สเปกตรัม FTIR ของ (a) ซีโอไลต์ และ (b) ซีโอไลต์ที่ได้รับการปรับปรุงผิวด้วย APTMS 69	
รูปที่ 4.22 แสดงเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของฟิล์ม Neat PLA, ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์.....	70
รูปที่ 4.23 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ : (a) Tensile strength, (b) Young's Modulus และ (c) Elongation at break.. 71	
รูปที่ 4.24 แสดงสัญญาณวิทยาของพื้นผิวแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO (a), ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ในปริมาณต่างๆ ที่กำลังขยาย 10 kx (b-d) และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ ที่กำลังขยาย 2 kx (e).....	74
รูปที่ 4.25 DSC thermogram ในขั้น heating ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์	75

รูปที่ 4.26 แสดงเทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ : (a) TGA และ (b) DTG	77
รูปที่ 4.27 ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ : (a) Oxygen permeability, (b) Carbon dioxide permeability และ (c) Water vapor transmission rate	80
รูปที่ 4.28 แสดงกล้วยไม้บรรจุในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO/Zeolite	84
รูปที่ 4.29 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ 5A และซีโอไลต์ 5A ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรตในปริมาณต่างๆ	86
รูปที่ 4.30 แสดงสัณฐานวิทยาของพื้นผิวแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ (a) และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน (b-g)	88
รูปที่ 4.31 แสดงโครงสร้างสามมิติของซีโอไลต์ A [99]	90
รูปที่ 4.32 แสดงเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน	91
รูปที่ 4.33 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน : (a) Tensile strength, (b) Young's Modulus และ (c) Elongation at break	92
รูปที่ 4.34 แสดงสัณฐานวิทยาของพื้นผิวแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนในปริมาณ 3.75 wt% ของซีโอไลต์	95
รูปที่ 4.35 แสดงเทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน : (a) TGA และ (b) DTG	98
รูปที่ 4.36 ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน : (a) O ₂ permeability, (b) CO ₂ permeability และ (c) Water vapor transmission rate	100
รูปที่ 4.37 แสดงกล้วยไม้บรรจุในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO/Z-Li ⁺	105
รูปที่ 4.38 แสดงกล้วยไม้บรรจุในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO/Z-K ⁺	107

รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านก๊าซกับปริมาณผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ใส่ซีไอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน (a) PLA/PEO/Z-Li ⁺ และ (b) PLA/PEO/Z-K ⁺	109
รูปที่ 5.1 การบรรจุหีบห่อกล้วยไม้ก่อนการขนส่ง (a) ห่อกล้วยไม้ด้วยฟิล์ม PP และ (b) บรรจุกล้วยไม้ลงกล่องกระดาษ [113].....	114
รูปที่ ก.1 DSC thermogram ของ Neat PLA.....	129
รูปที่ ก.2 DSC thermogram ของ Pure 1PEO	129
รูปที่ ก.3 DSC thermogram ของ Pure 2PEO	129
รูปที่ ก.4 DSC thermogram ของ Pure 3PEO	130
รูปที่ ก.5 DSC thermogram ของ Pure 4PEO	130
รูปที่ ก.6 DSC thermogram ของ PLA/1PEO 5%.....	130
รูปที่ ก.7 DSC thermogram ของ PLA/2PEO 5%	131
รูปที่ ก.8 DSC thermogram ของ PLA/3PEO 5%.....	131
รูปที่ ก.9 DSC thermogram ของ PLA/4PEO 5%	131
รูปที่ ก.10 DSC thermogram ของ PLA/1PEO 10%.....	132
รูปที่ ก.11 DSC thermogram ของ PLA/2PEO 10%.....	132
รูปที่ ก.12 DSC thermogram ของ PLA/3PEO 10%.....	132
รูปที่ ก.13 DSC thermogram ของ PLA/4PEO 10%.....	133
รูปที่ ก.14 DSC thermogram ของ PLA/1PEO 15%.....	133
รูปที่ ก.15 DSC thermogram ของ PLA/2PEO 15%.....	133
รูปที่ ก.16 DSC thermogram ของ PLA/3PEO 15%.....	134
รูปที่ ก.17 DSC thermogram ของ PLA/4PEO 15%.....	134
รูปที่ ก.18 DSC thermogram ของ PLA/1PEO 10% (New run).....	134
รูปที่ ก.19 DSC thermogram ของ PLA/PEO/Z 1%	135
รูปที่ ก.20 DSC thermogram ของ PLA/PEO/Z 3%	135

รูปที่ ก.21 DSC thermogram ของ PLA/PEO/Z 5%	135
รูปที่ ก.22 DSC thermogram ของ PLA/PEO/Z-Li ⁺ 1.25	136
รูปที่ ก.23 DSC thermogram ของ PLA/PEO/Z-Li ⁺ 2.5.....	136
รูปที่ ก.24 DSC thermogram ของ PLA/PEO/Z-Li ⁺ 3.75	136
รูปที่ ก.25 DSC thermogram ของ PLA/PEO/Z-K ⁺ 1.25	137
รูปที่ ก.26 DSC thermogram ของ PLA/PEO/Z-K ⁺ 2.5	137
รูปที่ ก.27 DSC thermogram ของ PLA/PEO/Z-K ⁺ 3.75	137
รูปที่ ก.28 TGA thermogram ของ Neat PLA	138
รูปที่ ก.29 TGA thermogram ของ Pure 1PEO	138
รูปที่ ก.30 TGA thermogram ของ Pure 2PEO	138
รูปที่ ก.31 TGA thermogram ของ Pure 3PEO	139
รูปที่ ก.32 TGA thermogram ของ Pure 4PEO	139
รูปที่ ก.33 TGA thermogram ของ PLA/1PEO 5%	139
รูปที่ ก.34 TGA thermogram ของ PLA/2PEO 5%	140
รูปที่ ก.35 TGA thermogram ของ PLA/3PEO 5%	140
รูปที่ ก.36 TGA thermogram ของ PLA/4PEO 5%	140
รูปที่ ก.37 TGA thermogram ของ PLA/1PEO 10%	141
รูปที่ ก.38 TGA thermogram ของ PLA/2PEO 10%	141
รูปที่ ก.39 TGA thermogram ของ PLA/3PEO 10%	141
รูปที่ ก.40 TGA thermogram ของ PLA/4PEO 10%	142
รูปที่ ก.41 TGA thermogram ของ PLA/1PEO 15%	142
รูปที่ ก.42 TGA thermogram ของ PLA/2PEO 15%	142
รูปที่ ก.43 TGA thermogram ของ PLA/3PEO 15%	143
รูปที่ ก.44 TGA thermogram ของ PLA/4PEO 15%	143

รูปที่ ก.45 TGA thermogram ของ PLA/1PEO 10% (New run).....	143
รูปที่ ก.46 TGA thermogram ของ PLA/PEO/Z 1%	144
รูปที่ ก.47 TGA thermogram ของ PLA/PEO/Z 3%	144
รูปที่ ก.48 TGA thermogram ของ PLA/PEO/Z 5%	144
รูปที่ ก.49 TGA thermogram ของ PLA/PEO/Z-Li ⁺ 1.25	145
รูปที่ ก.50 TGA thermogram ของ PLA/PEO/Z-Li ⁺ 2.5	145
รูปที่ ก.51 TGA thermogram ของ PLA/PEO/Z-Li ⁺ 3.75	145
รูปที่ ก.52 TGA thermogram ของ PLA/PEO/Z-K ⁺ 1.25	146
รูปที่ ก.53 TGA thermogram ของ PLA/PEO/Z-K ⁺ 2.5	146
รูปที่ ก.54 TGA thermogram ของ PLA/PEO/Z-K ⁺ 3.75	146
รูปที่ ก.55 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม Neat PLA	147
รูปที่ ก.56 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/1PEO 5%.....	147
รูปที่ ก.57 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/2PEO 5%.....	147
รูปที่ ก.58 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/3PEO 5%.....	148
รูปที่ ก.59 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/4PEO 5%.....	148
รูปที่ ก.60 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/1PEO 10%	148
รูปที่ ก.61 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/2PEO 10%	149
รูปที่ ก.62 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/3PEO 10%	149
รูปที่ ก.63 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/4PEO 10%	149
รูปที่ ก.64 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/1PEO 15%	150
รูปที่ ก.65 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/2PEO 15%	150
รูปที่ ก.66 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/3PEO 15%	150
รูปที่ ก.67 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/4PEO 15%	151
รูปที่ ก.68 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/PEO/Z 1%.....	151

รูปที่ ก.93 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/PEO/Z-Li ⁺ 1.25	159
รูปที่ ก.94 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/PEO/Z-Li ⁺ 2.5.....	160
รูปที่ ก.95 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/PEO/Z-Li ⁺ 3.75	160
รูปที่ ก.96 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/PEO/Z-K ⁺ 1.25	160
รูปที่ ก.97 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/PEO/Z-K ⁺ 2.5	161
รูปที่ ก.98 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/PEO/Z-K ⁺ 3.75	161
รูปที่ ก.99 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม Neat PLA.....	161
รูปที่ ก.100 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/1PEO 5%.....	162
รูปที่ ก.101 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/2PEO 5%	162
รูปที่ ก.102 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/3PEO 5%	162
รูปที่ ก.103 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/4PEO 5%	163
รูปที่ ก.104 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/1PEO 10%.....	163
รูปที่ ก.105 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/2PEO 10%.....	163
รูปที่ ก.106 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/3PEO 10%.....	164
รูปที่ ก.107 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/4PEO 10%.....	164
รูปที่ ก.108 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/1PEO 15%.....	164
รูปที่ ก.109 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/2PEO 15%.....	165
รูปที่ ก.110 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/3PEO 15%.....	165
รูปที่ ก.111 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/4PEO 15%.....	165
รูปที่ ก.112 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/PEO/Z 1%.....	166
รูปที่ ก.113 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/PEO/Z 3%.....	166
รูปที่ ก.114 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/PEO/Z 5%.....	166
รูปที่ ก.115 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/PEO/Z-Li ⁺ 1.25%.....	167
รูปที่ ก.116 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/PEO/Z-Li ⁺ 2.5%.....	167

รูปที่ ก.117 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/PEO/Z-Li⁺ 3.75%..... 167

รูปที่ ก.118 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/PEO/Z-K⁺ 1.25% 168

รูปที่ ก.119 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/PEO/Z-K⁺ 2.5%..... 168

รูปที่ ก.120 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/PEO/Z-K⁺ 3.75% 168

รูปที่ ก.121 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของ Zeolite 5A 169

รูปที่ ก.122 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของ Zeolite 5A-Li⁺ 1.25 169

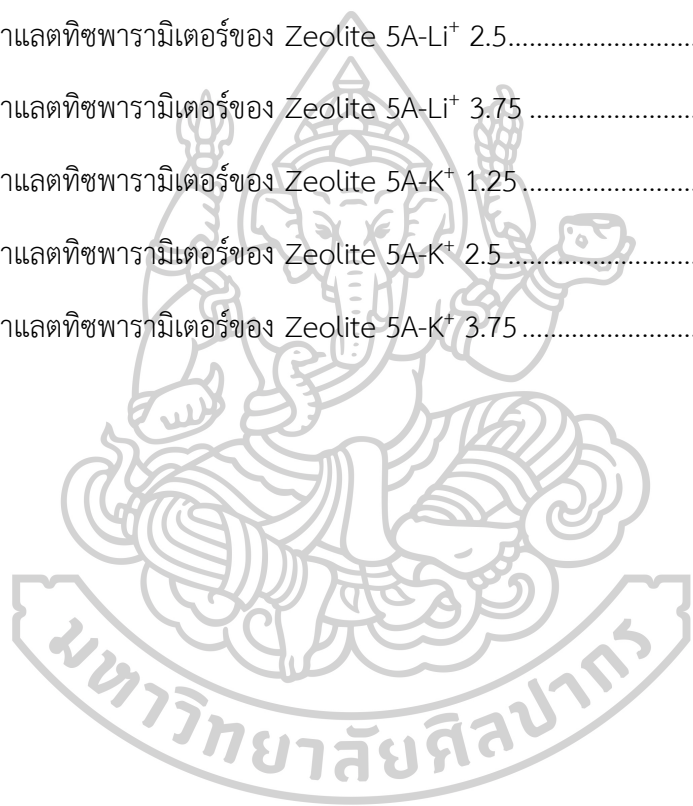
รูปที่ ก.123 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของ Zeolite 5A-Li⁺ 2.5..... 170

รูปที่ ก.124 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของ Zeolite 5A-Li⁺ 3.75 170

รูปที่ ก.125 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของ Zeolite 5A-K⁺ 1.25..... 171

รูปที่ ก.126 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของ Zeolite 5A-K⁺ 2.5 171

รูปที่ ก.127 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของ Zeolite 5A-K⁺ 3.75 172



บทที่ 1

บทนำ (Introduction)

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา (Statements and significance of the problem)

ประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกกล้วยไม้ตัดดอกเขตร้อนรายใหญ่รายหนึ่งของโลก ซึ่งกล้วยไม้ที่ส่งออกมากที่สุดก็คือกล้วยไม้สกุลหวาย (Dendrobium orchids) เนื่องจากมีสี ขนาด และรูปร่างที่หลากหลาย โดยการบรรจุกล้วยไม้เพื่อการส่งออกนั้นจะตัดช่อดอกตามมาตรฐาน เสียบหลอดพลาสติกที่มีสาลีน้ำหุ้มปลายก้านเพื่อให้มีน้ำมาหล่อเลี้ยงช่อดอก มัดเป็นกำ และห่อด้วยฟิล์มที่ยังคงเปิดด้านบนไว้หนึ่งด้าน ก่อนจะบรรจุลงในกล่องกระดาษและควบคุมอุณหภูมิระหว่างการขนส่ง โดยอายุของดอกขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และระบบดำเนินงานหลังการเก็บเกี่ยว นอกจากนี้การผลิตฮอร์โมนเอทิลินของดอกจะทำให้กลีบดอกเหี่ยวและหลุดร่วง ส่งผลให้ระยะเวลาในการขนส่งและการปักแจกันลดลง จึงต้องมีการให้อาหารและใช้สารเคมีในการยับยั้งการผลิตและการทำงานของเอทิลินเพื่อยืดอายุกล้วยไม้ตัดดอก [1] โดยบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active packaging) เป็นหนึ่งในนวัตกรรมที่ช่วยยืดอายุและรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการเก็บเกี่ยว เช่น ผัก ผลไม้ และไม้ตัดดอก ให้มีความสดใหม่และเน่าเสียช้าลง ซึ่งสามารถทำได้โดยเติมสารสกัดจากธรรมชาติหรือสารอินทรีย์เข้าไปทำหน้าที่ช่วยยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์และ / หรือควบคุมการผ่านเข้า-ออกของก๊าซต่างๆ เช่น ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และเอทิลิน ให้มีความเหมาะสมตามความต้องการของผลิตภัณฑ์นั้นๆ แต่ในปัจจุบันทั่วโลกได้ประสบปัญหาการจัดการขยะ ซึ่ง 30% ของขยะทั้งหมดเป็นขยะที่เกิดจากบรรจุภัณฑ์พลาสติก โดยปกติแล้วบรรจุภัณฑ์จะผลิตจากพอลิเมอร์ที่ได้จากปิโตรเลียม ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพและใช้เวลาย่อยสลายนานมาก จึงเป็นเหตุผลให้นำพอลิเมอร์ที่ได้จากทรัพยากรหมุนเวียนและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้ทดแทนเพื่อลดปัญหาขยะที่เกิดขึ้น [2]

โดยพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid (PLA)) เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ในกลุ่มอะลิฟาติกพอลิเอสเตอร์ (Biodegradable aliphatic polyester) ที่ผลิตจากทรัพยากรหมุนเวียน เช่น อ้อย ข้าวโพด และมันสำปะหลัง ซึ่งไม่เป็นพิษ อีกทั้งมีความแข็งแรงเชิงกลสูง สามารถเข้ากันได้ทางชีวภาพ มีความโปร่งใส และขึ้นรูปง่าย จึงนิยมนำไปใช้งานทางด้านบรรจุภัณฑ์และฟิล์มบรรจุอาหาร [3] แต่ PLA มีความเปราะ จึงนิยมนำมาผสมกับพอลิเมอร์อื่น ยกตัวอย่างเช่น พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(butylene succinate) (PBS)) เนื่องจาก PBS มีความยืดหยุ่นและมีความเหนียวสูง ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความยืดหยุ่นให้กับพอลิเมอร์ผสมแต่ต้องใช้ PBS ถึง 20 wt% และแสดงการแยกเฟสกัน [4, 5] ในขณะที่ Feng-Jiao Li และคณะ ได้ทำการศึกษา PLA ผสมกับพอลิเอทิลีนไกลคอล (Poly(ethylene glycol) (PEG)) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณแตกต่างกัน พบว่าเมื่อ

น้ำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงยึด (Tensile strength) เพิ่มขึ้น แต่ค่าการยืดตัวที่จุดขาด (Elongation at break) และความเข้ากันได้ลดลง [6, 7] นอกจากนี้ Yoojun Eom ผสม PLA กับพอลิเอทิลีนออกไซด์ (Poly(ethylene oxide) (PEO)) ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 100,000 แสดงความเข้ากันได้ดี ไม่แยกเฟส และที่ปริมาณของ PEO 5 wt% มีค่าการยืดตัวที่จุดแตกหักเพิ่มขึ้นถึง 4 เท่า และค่าความต้านทานต่อแรงดึงยึดลดลงเพียง 17% [8] ซึ่งโดยทั่วไปมักใช้ PEO ในทางการแพทย์ เนื่องจากมีความเป็นพิษต่ำและมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกการผสม PEO ลงในเมทริกซ์ PLA เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติการดึงยึดและช่วยเพิ่มความสามารถเข้ากันได้ทางชีวภาพของ PLA [9, 10]

นอกจากนี้ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่าเอทิลีนเป็นฮอร์โมนพืชที่ผลิตเพื่อควบคุมกระบวนการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งเอทิลีนเป็นสาเหตุหลักต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของพืชผลทางการเกษตร ตัวอย่างเช่น การทำลายคลอโรฟิลล์ โดยเอทิลีนทำให้ผลไม้เปลี่ยนสีและลำต้นดอกไม้เหี่ยวแห้ง การสะสมของเอทิลีนในระหว่างการขนส่งจะสามารถลดคุณภาพของสินค้าเกษตรอย่างมาก โดยการศึกษาก่อนหน้านี้มีความพยายามที่จะควบคุมการสะสมของเอทิลีนโดยใช้ตัวดูดซับ เช่น โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) และถ่านกัมมันต์ อย่างไรก็ตาม $KMnO_4$ มีข้อจำกัดของการเป็นสารปนเปื้อนในอาหารและถ่านกัมมันต์ไม่ใช่ตัวเลือกเพื่อการดูดซับเอทิลีน ซึ่งซีโอไลต์ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างมีรูพรุนขนาดใหญ่และระบบรูพรุนนี้จะช่วยให้การแลกเปลี่ยนไอออนบวกระหว่างสารละลายที่เป็นของเหลวและตำแหน่งภายในผลึกของซีโอไลต์เกิดได้ง่ายขึ้น การแลกเปลี่ยนไอออนของไอออนบวกในซีโอไลต์นี้ส่งผลให้เกิดซีโอไลต์ที่มีสมบัติเฉพาะ เช่น การดูดซับเฉพาะจุด ซึ่งจะช่วยดูดซับก๊าซเอทิลีนและยังส่งผลถึงสมบัติการซึมผ่านก๊าซของฟิล์ม นำไปสู่ความสามารถในการยืดอายุการเก็บรักษาและลดปริมาณเอทิลีนในบรรจุภัณฑ์ได้ [11] โดย Niramai Sue-aok และคณะ รายงานว่าการตัดแปลงซีโอไลต์กับไอออนหมู่ 1 ของโลหะทำให้ความสามารถในการดูดซับเอทิลีนเพิ่มขึ้น [12]

ซีโอไลต์เป็นสารอนินทรีย์มีโครงสร้างเป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตสามมิติของเตตระฮีดรอลที่เชื่อมกันด้วยอะตอมของออกซิเจนซึ่งมีขั้วสูงมาก ทำให้มีอุปสรรคในการนำซีโอไลต์ใส่ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ เนื่องจากความเข้ากันได้ไม่ดีระหว่างอนุภาคของสารตัวเติมอนินทรีย์และเมทริกซ์พอลิเมอร์ ดังนั้นจึงมีการดัดแปลงพื้นผิวซีโอไลต์กับสารเชื่อมประสานซิลเลน (Silane coupling agent) เช่น γ -(2,3-epoxypropoxy) propyltrimethoxysilane, *N*-Propyl-trimethoxy-silane, (3-aminopropyl) triethoxysilane [13-15] เพื่อปรับเปลี่ยนสมบัติพื้นผิวของซีโอไลต์จากชอบน้ำไปเป็นไม่ชอบน้ำ (hydrophilic to hydrophobic) และเพิ่มความสัมพันธ์ของซีโอไลต์กับหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์เมทริกซ์ [16] ซึ่งการศึกษาก่อนหน้านี้ทำการเติมซีโอไลต์ที่ปรับปรุงผิวด้วย (3-aminopropyl) trimethoxysilane ลงในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PBS/PLA พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่

ใช้สารเชื่อมประสานไฮเลนมีสมบัติเชิงกลสูงกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ใช้สารเชื่อมประสานไฮเลน และจากภาพ SEM พบว่าซีโอไลต์มีการกระจายตัวบนเมทริกซ์พอลิเมอร์ผสมดีขึ้น [17]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ช่วยยืดอายุการเก็บรักษากล้วยไม้ตัดดอก หลังการเก็บเกี่ยวและทำการทดสอบให้มีสภาวะใกล้เคียงกับการนำไปใช้งานจริง โดยใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PEO ที่ทำการเติมซีโอไลต์ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต โดยทำการศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณของ PEO รวมถึงผลของปริมาณและสารปรับปรุงสมบัติของซีโอไลต์ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ รวมถึงอายุการเก็บรักษากล้วยไม้ตัดดอกของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย (Objective of research)

1. ศึกษาผลของพอลิเอทิลีนออกไซด์ (PEO) ปริมาณ 5, 10 และ 15% โดยน้ำหนัก และมีน้ำหนักโมเลกุล 100,000-400,000 กรัมต่อโมล ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการซึมผ่านของก๊าซ รวมถึงอายุการเก็บรักษากล้วยไม้ตัดดอกของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA)
2. ศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์ชนิด 5A ปริมาณ 1, 3 และ 5 % โดยน้ำหนัก ที่ทำการปรับปรุงผิวด้วย (3-Aminopropyl) trimethoxysilane (APTMS) ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการซึมผ่านของก๊าซ รวมถึงอายุการเก็บรักษากล้วยไม้ตัดดอกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO
3. ศึกษาผลของสารปรับปรุงซีโอไลต์ด้วยไอออนชนิด Li^+ และ K^+ ที่ปริมาณ 1.25, 2.5 และ 3.75 % โดยน้ำหนักของซีโอไลต์ ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการซึมผ่านของก๊าซ รวมถึงอายุการเก็บรักษากล้วยไม้ตัดดอกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO/Zeolite

1.3 ขอบเขตของการวิจัย (Scope or delimitation of the study)

1. ใช้พอลิแลคติกแอซิด (PLA) เกรด 4043D มีค่า MFR 6 g/10 min จากบริษัท NatureWorks LLC จำกัด ประเทศไทย
2. ใช้พอลิเอทิลีนออกไซด์ (PEO) จากบริษัท ACS xenon (Sigma-Aldrich) ประเทศสิงคโปร์ น้ำหนักโมเลกุล 100,000, 200,000, 300,000 และ 400,000 g/mol ในปริมาณ 5, 10 และ 15 wt%
3. ใช้ซีโอไลต์ (Zeolite) ชนิด 5A จากบริษัท ACS xenon (Sigma-Aldrich) ประเทศสิงคโปร์ ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 10 ไมโครเมตรและมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน 5 Å ถูกปรับเปลี่ยน

ไอออนด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต ปริมาณ 1.25, 2.5 และ 3.75% ของ ซีโอไลต์

4. ผสมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Brabender Internal mixer)
5. ขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการกดอัด (Compression molding) เนื่องจากในการผสมพอลิเมอร์ด้วยเครื่องผสมแบบปิดจะได้พอลิเมอร์ผสมปริมาณน้อย ซึ่งไม่เพียงพอต่อการนำไปขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดขึ้นรูป (Cast film extruder)
6. ศึกษาการยืดอายุกล้วยไม้ตัดดอกที่ถูกบรรจุอยู่ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ทำการซีลปิดสามด้านและหุ้มปลายก้านดอกด้วยสาลีชุบน้ำ เพื่อจำลองการทดสอบให้สอดคล้องกับการนำไปใช้งานจริง

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ในงานวิจัยนี้มีความคาดหวังว่าจะสามารถปรับปรุงสมบัติความยืดหยุ่นของ PLA และสามารถพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์สำหรับยืดอายุการเก็บรักษากล้วยไม้ตัดดอกที่สามารถลดการผ่านเข้า-ออกของก๊าซต่างๆ ได้

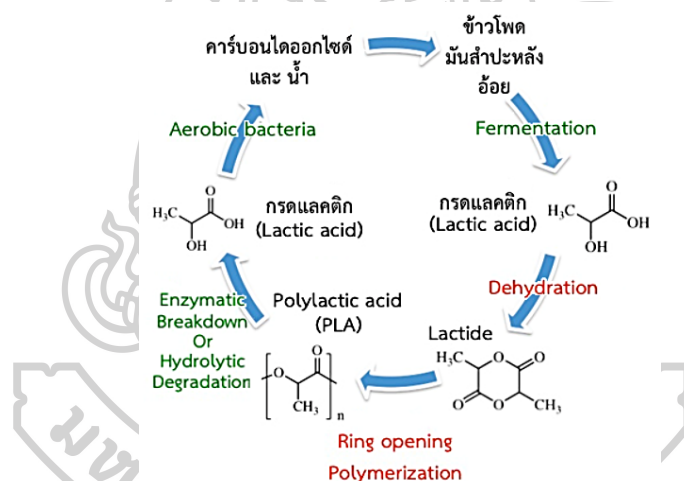


บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Review of related literature)

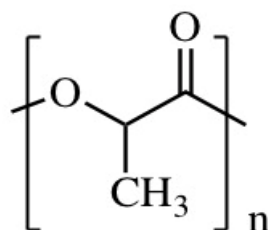
2.1 พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid) : PLA)

พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid (PLA)) เป็นพลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติภายหลังจากการใช้งาน ซึ่ง PLA ผลิตมาจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (Renewable resource) เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย เป็นต้น โดยการบดหรือโม้พืชให้ละเอียดเป็นแป้งแล้วใช้เอนไซม์ย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลกลูโคสผ่านกระบวนการหมัก (Fermentation) โดยใช้แบคทีเรีย *Lactobacillus brevis* ได้ผลผลิตเป็นกรดแลคติก (Lactic acid) ผ่านกระบวนการทางเคมีได้ Lactide มีโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวน แล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) กลับในระบบสุญญากาศเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างได้เป็นพอลิเมอร์ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วัฏจักรของพอลิแลคติกแอซิด [18]

- ชื่อทางเคมี (Chemical Name) : Polylactic acid
- ชื่อพ้อง (Synonyms) : พอลิแลคติก, Polylactide, PLA
- สูตรเคมีอย่างง่าย (Chemical Formula) : $(\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_2)_n$
- น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight) : ประมาณ 60,000 (ทั้งนี้จำนวน n ประมาณ 30,000)
- โครงสร้างทางเคมี (Chemical Structure) : แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิแลคติกแอซิด [18]

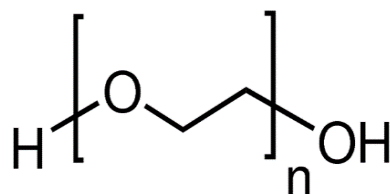
คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี : Polylactic acid มีช่วงการหลอมเหลว (Melting range) 173-178 °C แต่อย่างไรก็ตามสามารถทนความร้อนได้ไม่เกิน 110 °C มีปริมาณความเป็นผลึก (Crystallinity) ประมาณ 37% และอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature) อยู่ระหว่าง 60-65 °C มีสมบัติขวางกั้น (Barrier properties) ดี เข้ากับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต (Biocompatibility) และมีคุณสมบัติพิเศษคือมีความใส ไม่ย่อยสลายในสภาพแวดล้อมทั่วไป แต่สามารถย่อยสลายได้เองเมื่อนำไปฝังกลบในดิน การขึ้นรูปสามารถทำได้ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกทั่วไป เช่น กระบวนการการอัดรีด (Extrusion) และกระบวนการฉีด (Injection molding)

การใช้งานและผลิตภัณฑ์ : ฟิล์มสำหรับห่ออาหาร ผลิตภัณฑ์บรรจุอาหาร เช่น กล่อง จาน ช้อน มีด ส้อม ตะเกียบ แก้วน้ำ ที่ใช้ครั้งเดียวทิ้ง รวมทั้งถุงหูหิ้ว เป็นต้น รวมทั้งเส้นใยและสิ่งทอนำมาใช้ในงานด้านการผลิตเป็นเสื้อผ้าและผ้าเบาชนิด [18]

2.2 พอลิเอทิลีนออกไซด์ (Poly(ethylene oxide) : PEO)

พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol (PEG)) หรือที่เรียกว่าพอลิออกซีเอทิลีน (Polyoxyethylene) หรือพอลิเอทิลีนออกไซด์ (Poly(ethylene oxide) (PEO)) โดยโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.3 เป็นพอลิเอเทอร์สังเคราะห์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลในช่วงกว้าง โดยพอลิเมอร์ที่มี $M_w < 100,000$ มักเรียกว่า PEG ในขณะที่พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะถูกจัดประเภทเป็น PEO ซึ่งพอลิเมอร์เหล่านี้เป็น Amphiphilic คือเป็นสารที่มีโครงสร้างโมเลกุล 2 ส่วน คือ ได้แก่ ส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ชอบไขมัน และละลายได้ในน้ำ เช่นเดียวกับในตัวทำละลายอินทรีย์หลายชนิด (เช่น เมทิลีนคลอไรด์ เอทานอล โทลูอิน อะซีโตน และคลอโรฟอร์ม) PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ($M_w < 1,000$) จะเป็นของเหลวที่มีความหนืดและไม่มีสี ในขณะที่ PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงขึ้นจะเป็นของแข็งสีขาวที่มีจุดหลอมเหลวตามสัดส่วนน้ำหนักโมเลกุลจนถึงขีดจำกัดสูงสุดที่ประมาณ 67 °C ซึ่งพบว่า PEG ไม่เป็นพิษและได้รับการอนุมัติจากองค์การอาหารและยาเพื่อใช้เป็นสารเพิ่มปริมาณหรือใช้ในสูตรยาอาหารและเครื่องสำอาง โดย PEG ส่วนใหญ่ที่มี $M_w < 1,000$ จะสลายจากร่างกายอย่างรวดเร็ว คุณสมบัตินี้รวมกับความพร้อมใช้งานของ PEG ที่มีฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลายทำให้มีการ

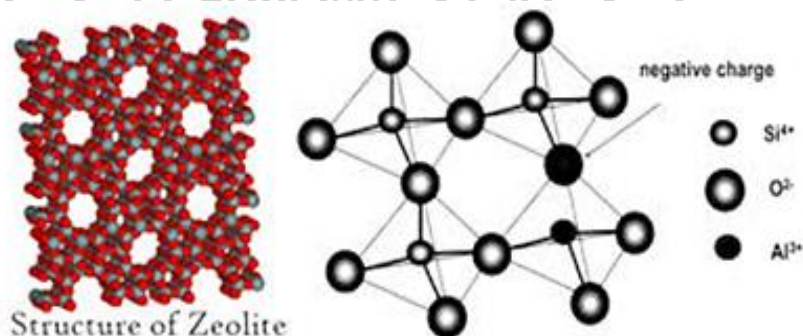
ใช้ PEG ในการวิจัยทางชีวการแพทย์ที่หลากหลาย เช่น การส่งยา วิศวกรรมเนื้อเยื่อ และอีกมากมาย [19]



รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนออกไซด์ [19]

2.3 ซีโอไลต์ (Zeolite)

ซีโอไลต์ (Zeolite) คือ สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยประกอบด้วยอะตอมซิลิคอนหรืออะลูมิเนียมหนึ่งอะตอม และอะตอมของออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron) โดยอะตอมซิลิคอนหรืออะลูมิเนียมอยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุล แสดงดังรูปที่ 2.4 ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็งและมีรูพรุนขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 \AA เท่ากับ 1×10^{-10} เมตร) โดยจะมีขนาดของรูพรุนแตกต่างกันตามชนิดของซีโอไลต์ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 นอกจากนี้ซิลิคอนและออกซิเจนแล้วในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม และแคลเซียม เกาะอยู่อย่างหลวมๆ และยังมีโมเลกุลของน้ำอยู่ในช่องว่างในโครงผลึกสามารถต้มให้เดือดระเหยออกไปได้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของซีโอไลต์ [20]

โดยซีโอไลต์ได้เริ่มจากการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ (A) เอกซ์ (X) และวาย (Y) และนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการที่สำคัญสำหรับอุตสาหกรรม ได้แก่ การดูดซับ (Adsorption) โดยเริ่มจากการใช้ซีโอไลต์ A เป็นตัวดูดความชื้นในแก๊สทำความเย็นหรือแก๊สธรรมชาติ (ปี 1955) ต่อมาใช้ในกระบวนการแยกสารประกอบ n-butane และ iso-butane (ปี 1959) ซึ่งการประยุกต์ใช้ซีโอไลต์กับ

กระบวนการดูดซับหรือการเร่งปฏิกิริยาต้องอาศัยหลักการแพร่ของโมเลกุลสารผ่านรูพรุนของซีโอไลต์ โดยโครงสร้างซีโอไลต์สามารถจำแนกตามขนาดรูพรุน ได้เป็น 3 ชนิด

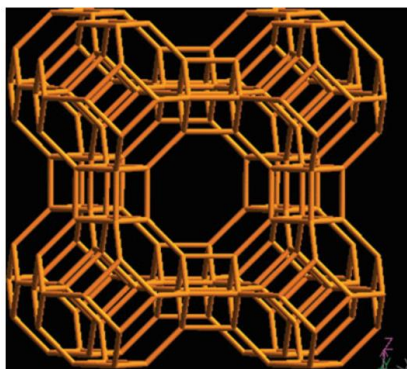
ตารางที่ 2.1 ขนาดรูพรุนของซีโอไลต์แต่ละชนิด [20]

Small pore zeolites	Middle pore zeolites	Large pore zeolites
8-membered ring	10-membered ring	12-membered ring
3.0-4.5 Å	4.5-6.0 Å	6.0-8.0 Å
Zeolite A	Zeolite ZSM-5	Zeolite L
Erionite	ZSM-11	Faujasite (X, Y)
Chabazite	Ferriete	Mordenite
Gismonite	Stibite	ZSM-12
Phillipsite	ZSM-23	Zeolite Beta

2.3.1 ซีโอไลต์เอ (Zeolite A)

ซีโอไลต์เอ (Zeolite A) หรือที่เรียกว่า LTA (Linde Type A) มีสูตรโมเลกุลคือ $(\text{Na}^+_{12}(\text{H}_2\text{O})_{27})_{18}[\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48}]_8$ โดยโซเดียมไอออนในซีโอไลต์เอ สามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนบวกอื่นๆ เช่น ลิเทียม (Li-LTA) โพแทสเซียม (K-LTA) หรือแคลเซียม (Ca-LTA) หน่วยหลักของซีโอไลต์เอ คือไซตาไลต์ ซึ่งเชื่อมต่อกันสี่วงก่อตัวเป็นโครงข่ายสามมิติ (3D) และประกอบเป็นช่องกลวงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 11.4 Å (Supercage) เชื่อมต่อกันด้วยช่องเปิดแปดช่องที่มีรูขนาด 4.1 Å เกิดเป็นช่องเปิดซีโอไลต์เฟรมเวิร์กที่มีอัตราส่วนปริมาตรสูง 47% และมีโครงสร้างเป็นลูกบาศก์ เมื่อ Na^+ แลกเปลี่ยนกับ K^+ ที่มีขนาดใหญ่กว่า รูเปิดจะลดลงเหลือประมาณ 3 Å (K-LTA หรือซีโอไลต์ 3A) ในกรณีที่ Ca^{2+} แทนที่ 2Na^+ รูเปิดจะเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 5 Å (Ca-LTA หรือซีโอไลต์ 5A) ดังนั้นซีโอไลต์ Na-LTA ก็ถูกเรียกว่า ซีโอไลต์ 4A ตามขนาดของรูเปิด [21] แสดงโครงสร้างซีโอไลต์เอดังรูปที่

2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของซีโอไลต์เอ [21]

ประโยชน์ของซีโอไลต์ คือ ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น Hydrogenation, Alkylation, Aromatization และ Isomerization เป็นต้น ใช้เป็นสารดูดซับ (Sorption agent) เนื่องจากซีโอไลต์มีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนทำให้สามารถดูดซับสารต่างๆ ได้ เช่น ใช้ในขบวนการ Defying ของก๊าซธรรมชาติ โดยใช้แยก คาร์บอนไดออกไซด์และสารประกอบซัลเฟอร์จากแก๊สธรรมชาติ ใช้แยกสารที่ทำให้เกิดมลภาวะ เช่น SO_2 , NO_2 และ O_2 จากอากาศ เป็นต้น ใช้เป็น Water softeners โดยซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกในโครงร่างผลึกกับไอออนของแคลเซียมหรือแมกนีเซียมได้จึงช่วยลดความกระด้างของน้ำ และใช้เป็น Ion exchange resins จากคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของซีโอไลต์ทำให้สามารถนำไปใช้เป็นเรซิน เพื่อแลกเปลี่ยนกับไอออนบวก โดย Univalent หรือ Divalent Selectivity ของซีโอไลต์ แสดงดังนี้

สำหรับไอออนบวกที่เป็น Univalent



สำหรับไอออนบวกที่เป็น Divalent มีดังนี้



โครงสร้างของซีโอไลต์เป็นแบบเปิดประกอบไปด้วย Channel หรือ Interconnected void จำนวนมากซึ่งมีไอออนบวกและโมเลกุลของน้ำเกาะเชื่อมอยู่ภายใน เมื่อโมเลกุลของน้ำผ่านเข้ามาในช่องว่างทำให้ไอออนที่อยู่ในสารละลายสามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนที่อยู่ในโครงร่างได้ และซีโอไลต์ได้ชื่อว่าเป็น Molecular sieve เนื่องจากโมเลกุลมีช่องว่างที่สม่ำเสมอจำนวนมาก ซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติคล้าย Sieve บนโมเลกุลที่มีช่องว่างที่สม่ำเสมอ [22]

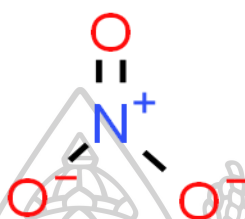
2.4 สารประกอบไนเตรต

โลหะไนเตรตทั้งหมดเป็นเกลืออนินทรีย์ของไอออนบวกและไอออนไนเตรต ไนเตรตไอออนมีประจุ -1 ที่ประกอบด้วยอะตอมของไนโตรเจนเพียงอะตอมเดียวที่จับกับออกซิเจนสามอะตอม (สูตร : NO_3^-) สารประกอบไนเตรตมักละลายในน้ำ วัสดุไนเตรตยังเป็นสารออกซิไดซ์ เมื่อผสมกับ

ไฮโดรคาร์บอน สารประกอบไนเตรตจะกลายเป็นส่วนผสมที่ติดไฟได้ ไนเตรตเป็นสารตั้งต้นที่ยอดเยี่ยมสำหรับการผลิตสารประกอบที่มีความบริสุทธิ์สูงเป็นพิเศษและวัสดุเร่งปฏิกิริยาและนาโนสเกล [23]

2.4.1 ลิเทียมไนเตรต (Lithium nitrate)

ลิเทียมไนเตรต (Lithium nitrate) มีสูตรโมเลกุลคือ LiNO_3 และมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 68.95 Da ซึ่งสูตรโครงสร้างของลิเทียมไนเตรตแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของลิเทียมไนเตรต [24]

2.4.2 โพแทสเซียมไนเตรต (Potassium nitrate)

โพแทสเซียมไนเตรต (Potassium nitrate) มีสูตรโมเลกุลคือ KNO_3 และมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 101.11 Da ซึ่งสูตรโครงสร้างของโพแทสเซียมไนเตรตแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างของโพแทสเซียมไนเตรต [23]

2.5 รัศมีไอออน (Ionic radius)

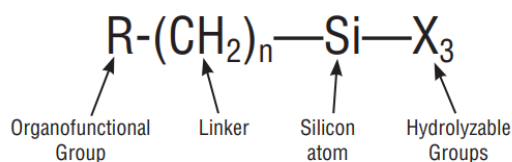
รัศมีไอออน (Ionic radius) คือขนาดของไอออน โดยไอออนของโลหะในหมู่เดียวกันจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเลขอะตอมเพิ่มขึ้น และไอออนของโลหะในคาบเดียวกันจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเลขอะตอมเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.8

Group 1A		Group 2A		Group 3A		Group 6A		Group 7A	
Li ⁺	Li	Be ²⁺	Be	B ³⁺	B	O	O ²⁻	F	F ⁻
0.68	1.34	0.31	0.90	0.23	0.82	0.73	1.40	0.71	1.33
Na ⁺	Na	Mg ²⁺	Mg	Al ³⁺	Al	S	S ²⁻	Cl	Cl ⁻
0.97	1.54	0.66	1.30	0.51	1.18	1.02	1.84	0.99	1.81
K ⁺	K	Ca ²⁺	Ca	Ga ³⁺	Ga	Se	Se ²⁻	Br	Br ⁻
1.33	1.96	0.99	1.74	0.62	1.26	1.16	1.98	1.14	1.96
Rb ⁺	Rb	Sr ²⁺	Sr	In ³⁺	In	Te	Te ²⁻	I	I ⁻
1.47	2.11	1.13	1.92	0.81	1.44	1.35	2.21	1.33	2.20

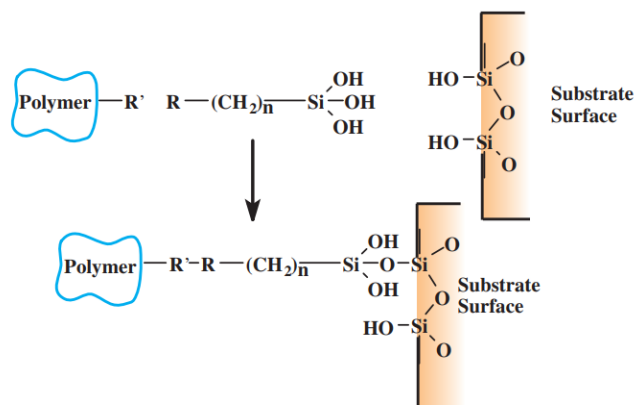
รูปที่ 2.8 รัศมีไอออนและขนาดอะตอม (Å) [25]

2.6 สารเชื่อมประสานซิลเลน (Silane coupling agent)

สารเชื่อมประสานซิลเลนมีความสามารถในการสร้างพันธะที่คงทนระหว่างวัสดุอินทรีย์และอนินทรีย์ สูตรทั่วไปสำหรับสารเชื่อมประสานซิลเลนจะแบ่งเป็นสองส่วนดังรูปที่ 2.9 คือ X เป็นหมู่ไฮโดรไลซ์โดยปกติคืออัลคอกซี, อะซิลอกซี, ฮาโลเจนหรือเอมีน เมื่อไฮโดรไลซิสจะเกิดกลุ่มซิลแลนอล ซึ่งสามารถควบแน่นกับกลุ่มซิลแลนอลอื่นๆ เช่น บนพื้นผิวของสารตัวเติมซิลิกอนจะสร้างพันธะซิลอกเซน ผลิตภัณฑ์ควบแน่นที่เสถียรยังสามารถสร้างพันธะกับออกไซด์อื่นๆ เช่น อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์, ดีบุก ไททาเนียม และนิกเกิล ส่วนพันธะที่เสถียรน้อยกว่าจะสร้างพันธะกับออกไซด์ของโบรอน เหล็ก และคาร์บอน โดยออกไซด์ของโลหะอัลคาไลน์และคาร์บอนจะไม่สร้างพันธะที่เสถียรกับ Si-O- นอกจากนี้ หมู่ R คืออนุมูลอินทรีย์ที่ไม่สามารถไฮโดรไลซ์ได้ ซึ่งอาจมีฟังก์ชันที่มีลักษณะที่ต้องการ ซึ่งหลังการทำปฏิกิริยาของออร์แกโนซิลเลนกับซิลิเกตแล้วจะมีการปรับเปลี่ยนลักษณะพื้นผิวอย่างมีนัยสำคัญ รวมถึงความสามารถในการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างวัสดุอินทรีย์และอนินทรีย์ด้วยดังรูปที่ 2.10 [26]



รูปที่ 2.9 สูตรทั่วไปของสารเชื่อมประสานซิลเลน [26]

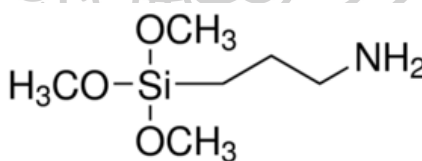


รูปที่ 2.10 การทำปฏิกิริยาของออร์แกโนไซเลนกับซับสเตรตและพอลิเมอร์ [26]

2.6.1 สารเชื่อมประสานไซเลนชนิด (3-Aminopropyl) trimethoxysilane

การปรับปรุงพื้นผิวจะดีที่สุดเมื่อไซเลนทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของซับสเตรตและแสดงจำนวนสูงสุดของพื้นที่ที่สามารถเข้าถึงได้ด้วยพลังงานพื้นผิวที่เหมาะสม ข้อพิจารณาเพิ่มเติมคือสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของบริเวณระหว่างเฟส

โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไซเลนชนิด (3-Aminopropyl) trimethoxysilane ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสานที่มีปลายด้านหนึ่งของโครงสร้างมีกลุ่มที่ใช้งานอยู่ เช่น อะมิโนและไวนิล ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของเรซินสังเคราะห์ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งคือ alkoxy (เมทอกซี) ที่เชื่อมต่อกับซิลิกอนและกลุ่มเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของฟิลเลอร์อนินทรีย์ได้ [27] แสดงโครงสร้างของ (3-Aminopropyl) trimethoxysilane ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ไซเลนชนิด (3-Aminopropyl) trimethoxysilane [28]

2.7 ขนาดโมเลกุลของก๊าซต่างๆ

ขนาดโมเลกุลของก๊าซต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ขนาดโมเลกุลของก๊าซต่างๆ [29]

Molecule	Diameter (Å)
Oxygen	3.6
Carbon dioxide	3.3
Ethylene	4.2

2.8 กล้ายไม้ (Orchids)

2.8.1 สถานการณ์กล้ายไม้โลก

ตลาดกล้ายไม้โลกมีมูลค่าประมาณ 7,000 ล้านบาท ส่วนใหญ่เป็นกล้ายไม้เขตร้อน โดยมีตลาดรับซื้อกว่า 60 ประเทศ ผู้นำเข้าที่สำคัญ ได้แก่ ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา เวียดนาม เนเธอร์แลนด์ และจีน คิดเป็นร้อยละ 69.83 ของการส่งออกรวม และแหล่งผลิตกล้ายไม้โลกที่สำคัญอื่นๆ ได้แก่ ไต้หวัน สิงคโปร์ นิวซีแลนด์ และจีน

2.8.2 การผลิตกล้ายไม้ของประเทศไทย

กล้ายไม้ถือเป็นหนึ่งในสินค้าที่เป็นสัญลักษณ์ของไทย พันธุ์ที่ส่งออกหลัก ได้แก่ สกุหลาว สกุลมอคคารา และสกุลอนซิเดียม มีช่วงผลผลิตสูง 2 ช่วง คือ เดือน มิ.ย. – ต.ค. และแหล่งผลิต (5 อันดับแรก) คือ นครปฐม สมุทรสาคร กรุงเทพฯ ราชบุรี และกาญจนบุรี โดยผลผลิตกล้ายไม้ไทยเป็นผลผลิตเพื่อการส่งออกประมาณ 45% ส่วนอีก 55% เป็นการผลิตเพื่อใช้ในประเทศ ปัจจุบันมีผู้ส่งออกกล้ายไม้ไทยประมาณ 200 รายและเกษตรกรผู้ปลูกกล้ายไม้ประมาณ 1,600 ราย ซึ่งกล้ายไม้สกุหลาวแสดงดังรูปที่ 2.12

คู่ค้าสำคัญในการส่งออกดอกกล้ายไม้ ได้แก่ ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา เวียดนาม จีน และอิตาลี (ร้อยละ 81.80) และต้นกล้ายไม้ ได้แก่ เนเธอร์แลนด์ บราซิล อินเดีย สหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่น (ร้อยละ 65.76)

คู่แข่งที่สำคัญในการส่งออกดอกกล้ายไม้ ได้แก่ เนเธอร์แลนด์ ไต้หวัน และต้นกล้ายไม้ ได้แก่ เวียดนาม ไต้หวัน



รูปที่ 2.12 กล้ายไม้สกุหลาว (Dendrobium orchids) [30]

2.8.3 แนวโน้มการส่งออก

มูลค่าการส่งออกสินค้ากล้ายไม้เดือน ม.ค. – พ.ค. 2564 เพิ่มขึ้น 16.83% เมื่อเทียบกับช่วงเดียวกันของปีก่อน เนื่องจากทั่วโลกเกิดการแพร่ระบาด COVID-19 รวมถึงตลาดหลัก ที่ส่งออก ได้แก่ จีน ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา ยุโรป ส่งผลกระทบให้การส่งออกสินค้ากล้ายไม้ได้ลดลง และค่าขนส่งสินค้ามี

ราคาสูงขึ้น ทำให้ ผู้นำเข้าจากต่างประเทศมีความต้องการซื้อลดลง และพฤติกรรมผู้บริโภคของตลาดต่างประเทศค่อนข้างหลากหลาย ผู้บริโภคมีความต้องการดอกกล้วยไม้ที่มีคุณภาพ/กล้วยไม้สายพันธุ์ใหม่ๆ ทำให้ผู้ประกอบการต้องรักษามาตรฐานในการผลิต รวมถึงการพัฒนาสายพันธุ์ใหม่ๆ [31]

2.9 การหายใจของพืชหลังการเก็บเกี่ยว

ผลิตผลทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวออกจากต้นแล้ว เซลล์ยังมีชีวิตและมีการหายใจอยู่ การหายใจแบบใช้ออกซิเจนของพืชจะรับออกซิเจนจากสิ่งแวดล้อมเข้าไปเพื่อเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตที่สะสมไว้ในเซลล์พืชในรูปของแป้งและน้ำตาลได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงานในรูปของพลังงานความร้อน

พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการหายใจของพืช เรียกว่า Vital heat หรือ Respiration heat ทำให้เกิดการเน่าเสียได้ง่าย ผักและผลไม้ที่มีอัตราการหายใจสูงจะผลิตความร้อนออกมา มากกว่าผักและผลไม้ที่มีอัตราการหายใจต่ำ เพราะจะมีอัตราการสลายโมเลกุลของสารอาหารมากกว่าและเสื่อมคุณภาพเร็วกว่า ซึ่งอัตราการหายใจของพืชแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 อัตราการหายใจของพืชแต่ละชนิด [32]

อัตราการหายใจ	(mg CO ₂ /Kg-hr) ที่อุณหภูมิ (°C)	Vital heat (Btu/ton/24 hrs)	ตัวอย่างผักและผลไม้
ต่ำมาก	< 5	< 1100	ผลแห้ง เช่น ถั่วเมล็ดแห้ง นัท
ต่ำ	5-10	1100-2200	แอปเปิ้ล ผลไม้ตระกูลส้ม องุ่น กีวี กระเทียม หอมหัวใหญ่ มันฝรั่ง มันเทศ
ปานกลาง	10-20	2200-4400	กล้วย เซอร์รี่ ท้อ แคนทาริน สาลี่ พลัม มะเดื่อ กะหล่ำปลี แครอท มะเขือเทศ
สูง	20-40	4400-8800	สตอเบอรี่ แบลคเบอรี่ ราสเบอรี่
สูงมาก	40-60	8800-13200	Artichoke, snap bean, ต้นหอม, Brussels sprouts, ไม้ตัดดอก
สูงมากที่สุด	> 60	> 13200	หน่อไม้ฝรั่ง บรอกโคลี spinach ข้าวโพดหวาน

$$\text{Vital heat (Btu/ton/24 hrs)} = \text{mgCO}_2/\text{Kg-hr} \times 220$$

อัตราการหายใจยังมีความสำคัญต่อการพิจารณาเลือกใช้เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม เช่น การออกแบบระบบการแช่เย็นผักและผลไม้ ผลิตผลทางการเกษตรที่มีอัตราการหายใจสูงกว่ามีแนวโน้มที่จะมีอายุการเก็บรักษาที่สั้นกว่าผลิตผลที่มีอัตราการหายใจที่ต่ำกว่า

2.10 การเสื่อมสภาพของดอกไม้

ดอกไม้ในขณะที่ยังอยู่บนต้นจะได้รับธาตุอาหารและน้ำซึ่งส่งขึ้นมาจากราก ใบที่ติดอยู่บนกิ่งจะทำหน้าที่สังเคราะห์แสงเพื่อเลี้ยงกิ่งนั้น เมื่อมีการตัดดอกออกมาจากต้นจะทำให้ระบบการส่งน้ำและอาหารถูกตัดขาดออก ดอกไม้นั้นจะเข้าสู่ระยะชราภาพอย่างรวดเร็วและแห้งเหี่ยวไป การนำก้านดอกแช่ในน้ำเป็นเพียงการช่วยรักษาความเต่งของเซลล์เท่านั้น โดยไม่ได้ทำให้กระบวนการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการชราภาพเกิดช้าลง

ฮอร์โมนสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมสภาพดอกคือเอทิลีน ผลจากเอทิลีนที่ดอกสร้างขึ้นจะทำให้กลีบดอกมีสีซีดลง กลีบดอกเหี่ยว และหมดสภาพการใช้งานโดยปกติกลีบดอกทำหน้าที่ล่อแมลงเพื่อให้เข้ามาดูดน้ำหวาน ซึ่งจะก่อให้เกิดการผสมเกสร เมื่อการผสมเกสรเกิดขึ้น แล้วกลีบดอกก็จะหมดหน้าที่ไป และจะเกิดการขยายขนาดของรังไข่ขึ้นมาแทนและเจริญต่อไปกลายเป็นผล ในขณะที่เกิดการผสมเกสรจะพบว่าการสร้างเอทิลีนขึ้นมามากในบริเวณรังไข่ ซึ่งก๊าซเอทิลีนนี้จะแพร่กระจายออกมาทำให้กลีบดอกเหี่ยวและหมดสภาพ ดังนั้นดอกที่ตัดออกมาจากต้น ถ้าผ่านการผสมเกสรแล้วจะทำให้อายุการปักแจกันสั้นลงกว่าปกติ ในบางกรณีที่ดอกไม้ไม่เกิดการผสมเกสร แต่เกสรตัวผู้หรือตัวเมียถูกทำลาย ก็จะทำให้เกิดการเหี่ยวของกลีบดอกได้เช่นกัน โดยเป็นผลมาจากเอทิลีนในสภาวะเครียดที่ดอกสร้างขึ้นเมื่อเกิดบาดแผล นอกจากนั้นการตัดก้านดอกออกมาจากต้นก็จะเกิดการสร้างเอทิลีนในสภาวะเครียดที่บริเวณรอยแผลนั้น ซึ่งจะมีผลอย่างมากในการทำให้ก้านดอกอุดตัน และกลีบดอกเหี่ยว

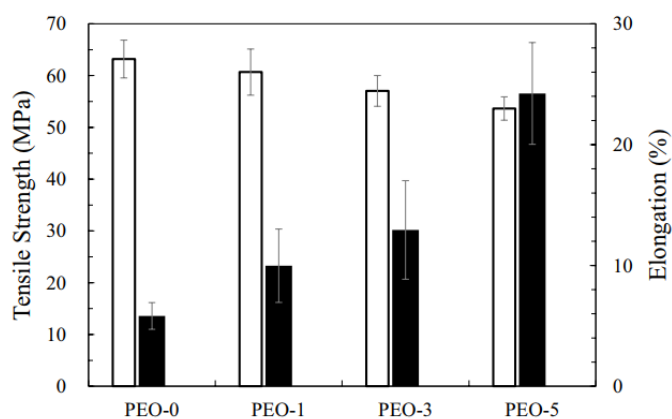
ปัจจัยสำคัญอีกข้อหนึ่งที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของดอกคือ การอุดตันของท่อน้ำภายในก้านดอกเนื่องจากจุลินทรีย์ เซลล์ของก้านดอกบางส่วนที่แช่อยู่ในน้ำจะตายไปตามอายุและเป็นที่ยึดของจุลินทรีย์ซึ่งจะแบ่งตัวอย่างรวดเร็วและกระจายไปทั่วในน้ำที่ใช้ปักแจกัน จุลินทรีย์เหล่านี้ อาจสร้างสารบางอย่างขึ้นมาและเป็นสาเหตุให้ท่อน้ำอุดตัน และตัวจุลินทรีย์เหล่านี้ ถ้ามีปริมาณมากก็จะขัดขวางทางเดินน้ำได้ จึงมีผลให้ก้านดอกดูดน้ำไม่ได้และเหี่ยวอย่างรวดเร็วเนื่องจากการขาดน้ำ [33]

2.11 เอทิลีน (Ethylene)

เอทิลีน (Ethylene) เป็นฮอร์โมนพืชซึ่งควบคุมการเจริญเติบโตในหลายแง่ เช่น การพัฒนาและการเสื่อมสลาย ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาและสถานที่ ผลของเอทิลีนมีทั้งในแง่ที่เป็นประโยชน์และเป็นโทษต่อพืช เอทิลีนเป็นฮอร์โมนที่มีสภาพเป็นก๊าซซึ่งรู้จักกันมานานแล้วจากการบ่มผลไม้ ในปี ค.ศ. 1934 ได้มีการพิสูจน์ให้เห็นว่าเอทิลีนเป็นก๊าซที่สังเคราะห์ขึ้นโดยพืชและสามารถเร่งกระบวนการสุกได้ ต่อมาพบว่าการก่อกองไฟใกล้ๆ สวนมะม่วงและสับปะรดจะกระตุ้นให้ออกดอก ซึ่งสารที่ทำให้เกิดการออกดอก คือ เอทิลีน นั่นเอง นอกจากนี้เอทิลีนเป็นฮอร์โมนพืชที่สำคัญในด้านหลังเก็บเกี่ยวด้วย

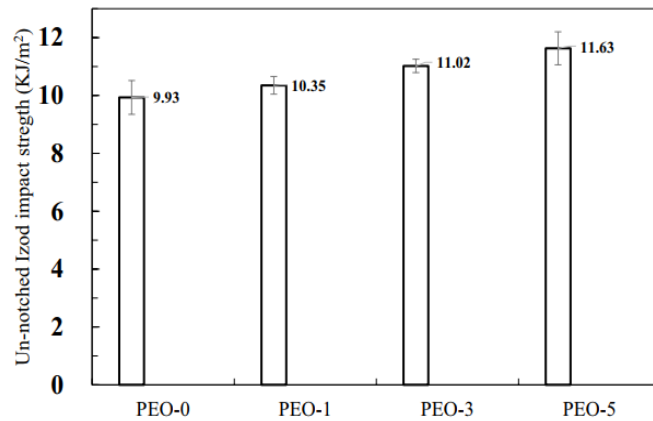
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yoojun Eom และคณะ [8] ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PEO โดยใช้ PEO ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 100,000 ใส่ใน PLA ที่ปริมาณ 1, 3, และ 5 wt% ด้วย Twin-screw extruder พบว่าค่าการดึงยึดที่จุดแตกหัก (Elongation at break), ความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength), ความชอบน้ำ (Hydrophilicity) และระดับความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature (T_g)), อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature (T_m)), Cold crystallization temperature (T_{cc}) และความต้านทานต่อแรงกระแทก (Tensile strength) ของ PLA มีค่าลดลง โดยที่ 5 wt% ของ PEO ทำให้การดึงยึดที่จุดแตกหักเพิ่มขึ้น 4 เท่าดังรูปที่ 2.14 ในขณะที่ความต้านทานต่อแรงกระแทก ลดลง 17% ดังรูปที่ 2.15 เพราะฉะนั้นฟิล์ม PLA มีความเหนียวเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ PEO

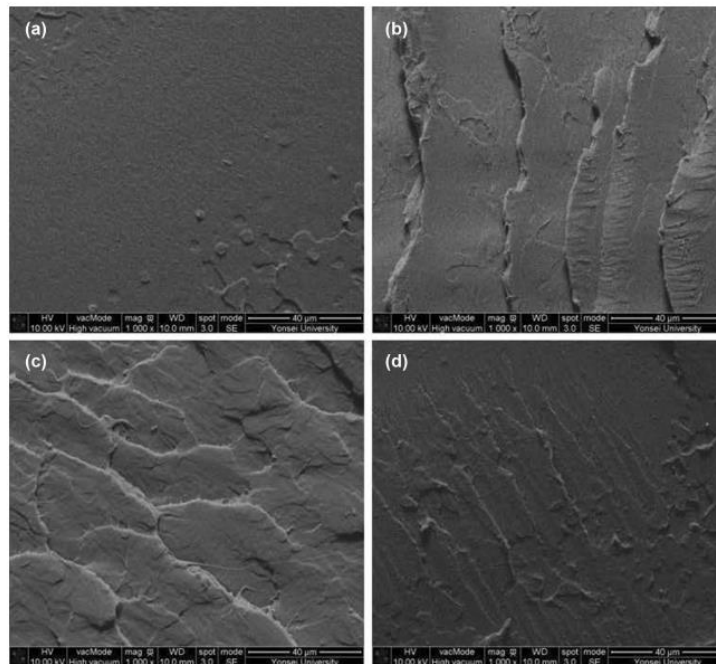


รูปที่ 2.14 ความต้านทานต่อแรงดึงยึดและการยึดที่จุดแตกหักของฟิล์ม PLA/PEO [8]

นอกจากนี้จะเห็นว่าความต้านทานแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.15 นอกจากนี้พอลิเมอร์ผสม PLA/PEO แสดงความเข้ากันได้ดี ไม่มีการแยกเฟสกัน เมื่อปริมาณ PEO เพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.16 เนื่องจาก PEO จะไปเพิ่มปริมาตรอิสระ (Free volume) ความสามารถในการเคลื่อนไหว และการเลื่อนผ่านของสายโซ่ของ PLA ทำให้พอลิเมอร์ผสมสามารถดูดซับพลังงานการกระแทกไว้ได้



รูปที่ 2.15 ความต้านทานแรงกระแทกแบบไม่บากของ PLA บริสุทธิ์ [8]

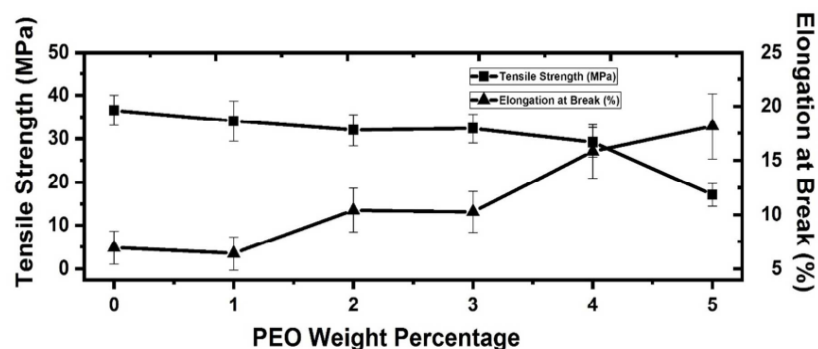


รูปที่ 2.16 ภาพ SEM ของพื้นผิวแตกหักจากแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO :

a.PEO-0, b.PEO-1, c.PEO-3, d.PEO-5 [8]

Debarghya Saha และคณะ [9] ได้ศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PEO โดยใช้ PEO ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 5,000,000 ใสใน PLA ที่ปริมาณ 1-5 wt% ขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธี Solvent casting พบว่า ปริมาณ PEO ที่เหมาะสมที่สุดคือ 4 wt% และความต้านทานต่อแรงดึงยืดลดลงเนื่องจากการกระจายตัวที่ไม่ดีและเกิดการแยกเฟสในเมทริกซ์ของ PLA เมื่อปริมาณ PEO เพิ่มขึ้น และค่าการยึดตัวที่จุดแตกหักเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจาก Plasticizing effect ของ PEO แสดงดังรูปที่ 2.17 และอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water Vapor Transmission Rate : WVTR) เพิ่มขึ้น

จาก 175 ถึง 292 $\text{g/m}^2\text{day}$ เนื่องจากความชอบน้ำของ PEO และอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน (Oxygen Transmission Rate : OTR) เพิ่มขึ้นจาก 318 ถึง 525 $\text{cc/m}^2\text{day}$ เนื่องจากเมื่อเติม PEO จะทำให้ปริมาตรอิสระเพิ่มขึ้น แสดงดังตารางที่ 2.4 และ 2.5



รูปที่ 2.17 ความต้านทานต่อแรงกระทำและการดึงยืดที่จุดแตกหักของฟิล์ม PLA/PEO [9]

ตารางที่ 2.4 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO [9]

Composition	Water Vapor Transmission Rate ($\text{g/m}^2\text{ day}$)	Thickness (μm)
PLA	175 ± 2	40 ± 3
PLA/4 wt% PEO	292 ± 1	41 ± 2
PLA/4 wt% PEO/1 wt% PEG	189 ± 2	38 ± 3

ตารางที่ 2.5 อัตราการซึมผ่านของออกซิเจนของฟิล์ม PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO [9]

Composition	Oxygen Transmission Rate ($\text{cc/m}^2\text{ day}$)	Thickness (μm)
PLA	318 ± 2	43 ± 2
PLA/4 wt% PEO	525 ± 2	39 ± 3
PLA/4 wt% PEO/1 wt% PEG	201 ± 1	41 ± 2

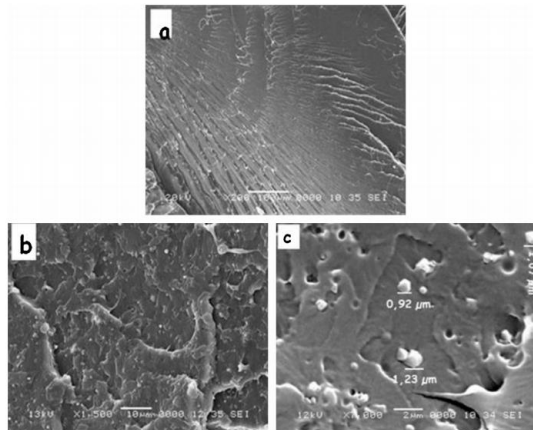
Tutuk Djoko Kusworo และคณะ [35] ศึกษาอัตราการซึมผ่านก๊าซของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิอิมิด (Polyimide (PI)) และพอลิเอเทอร์ซัลโฟน (Polyethersulfone (PES)) ที่เติมซีโอไลต์ 3 เกรด คือ 4A, 5A และ 13X จากตารางที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่าการเลือก (Selectivity) ของเมทริกซ์ที่เติมซีโอไลต์ 5A สูงกว่าเมทริกซ์ที่เติมซีโอไลต์ 13X อย่างไรก็ตามการซึมผ่านของก๊าซขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ ขนาดรู และโครงสร้างของรูของซีโอไลต์

นอกจากนี้ตารางที่ 2.6 แสดง PI / PES-zeolite 4A มีคุณสมบัติการแยกที่ดีกว่า PI / PES-zeolite 13X ซึ่ง PI / PES-zeolite 4A แสดงการซึมผ่านของ CO₂, CH₄, O₂ และ N₂ ที่ต่ำกว่าและการเลือกสรรสูงกว่า PI / PES บริสุทธิ์ ผลการวิจัยพบว่าเป็นผลจากอันตรกิริยาที่พื้นผิวของรูพรุน (Interfacial void) ระหว่างอนุภาคซีโอไลต์และพอลิเมอร์ ปรากฏการณ์การซึมผ่านของก๊าซที่ลดลงบ่งชี้ว่าเป็นบทบาทของขนาดรูพรุนของซีโอไลต์ส่งผลต่อสมบัติการขนส่งก๊าซของเมมเบรนแบบผสมโดยซีโอไลต์ 4A มีโครงสร้างผลึกแบบเปิดและขนาดรูพรุนที่ค่อนข้างเล็ก สามารถทำให้ต้านทานการแพร่ของก๊าซผ่านรูพรุนของซีโอไลต์ ยิ่งกว่านั้นเนื่องจากขนาดรูพรุนที่เล็ก ซีโอไลต์สามารถเลือกการผ่านของก๊าซบนพื้นฐานของความแตกต่างของขนาดและรูปร่างของโมเลกุล อย่างไรก็ตามในกรณีนี้ PI / PES-zeolite 13X แสดงให้เห็นว่ามีการซึมผ่านสูงขึ้นสำหรับก๊าซทุกชนิดที่ศึกษา ตัวอย่างเช่นการซึมผ่าน CO₂ ของ PI / PES-zeolite 13X สูงกว่า PI / PES-zeolite 4A ถึง 2.8 เท่าและสูงกว่า PI / PES บริสุทธิ์ 2.3 เท่า ตามลำดับ อาจเกิดจากขนาดรูพรุนของซีโอไลต์ 13X คือ 8 Å ในขณะที่ขนาดโมเลกุลของก๊าซที่ศึกษาคือ 3.3 Å สำหรับ CO₂ และ 3.8 Å สำหรับ CH₄ ดังนั้นสามารถขนส่งโมเลกุลก๊าซผ่านซีโอไลต์ได้ง่ายขึ้น ในกรณีของเมมเบรน PI / PES-zeolite 4A มีการซึมผ่านลดลงเมื่อเทียบกับ PI / PES บริสุทธิ์ ผลลัพธ์นี้บ่งชี้ว่ารูพรุนของซีโอไลต์ 4A นั้นเล็กมากจนสามารถขัดขวางการขนส่งโมเลกุลก๊าซ

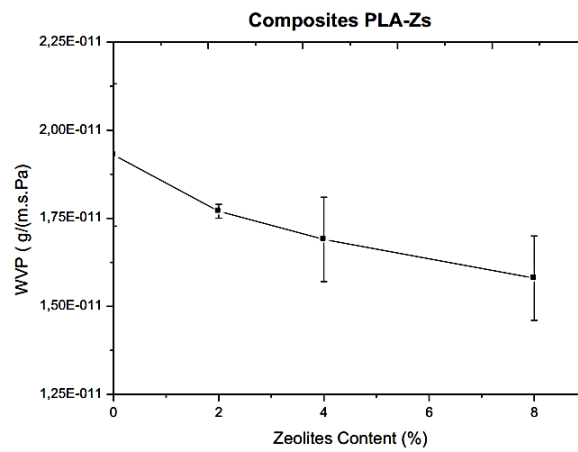
ตารางที่ 2.6 แสดงผลของขนาดรูพรุนที่ต่างกันต่อประสิทธิภาพการแยกก๊าซ [35]

Membrane	Single gas permeance (barrer)				Selectivity	
	CO ₂	CH ₄	O ₂	N ₂	CO ₂ /CH ₄	O ₂ /N ₂
PI/PES neat	6.54	0.195	1.12	0.185	33.59	6.05
4A	5.02	0.109	0.834	0.112	46.05	7.45
5A	5.97	0.147	1.023	0.151	40.67	6.75
13X	15.04	0.398	3.12	0.507	38.69	6.15

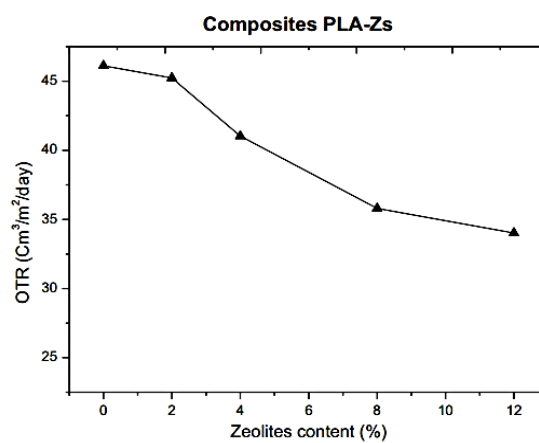
Dounia Bendahou และคณะ [2] ได้ศึกษาผลของซีโอไลต์ที่กระจายตัวใน PLA โดยซีโอไลต์ปรับปรุงด้วยโลหะทองแดงและขึ้นรูปโดย Brabender และ Compression molding ภาพจาก SEM แสดงดังรูปที่ 2.18 แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของซีโอไลต์ในเมทริกซ์ PLA ที่ดี นอกจากนี้รูปที่ 2.19 และ 2.20 แสดงความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจนลดลงเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการใส่ซีโอไลต์จะเพิ่มความเป็นผลึกทำให้โมเลกุลก๊าซผ่านไม่ได้และเพิ่มเส้นทางการแพร่ของโมเลกุลก๊าซ



รูปที่ 2.18 ภาพ SEM ของพื้นผิวแตกหักของ (a) PLA ที่ไม่เติมซีโอไลต์, (b) PLA ที่เติมซีโอไลต์ [2]



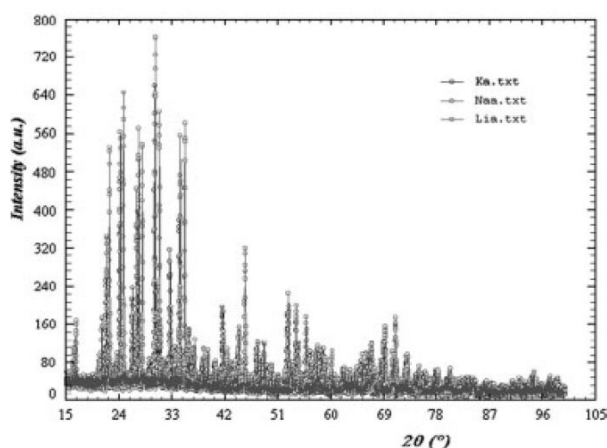
รูปที่ 2.19 แสดงผลของซีโอไลต์ต่อความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (WVP) [2]



รูปที่ 2.20 แสดงผลของซีโอไลต์ต่อความสามารถในการซึมผ่านของออกซิเจน (OTR)

ของฟิล์มคอมพอสิต PLA-ซีโอไลต์ (50%RH, 23°) [2]

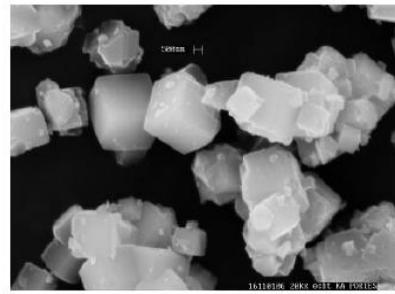
ในปี ค.ศ. 2002 Saadet Beyaz Kayiran และคณะ [36] ได้ศึกษาการดูดซับไฮโดรเจนในซีโอไลต์โซเดียม LTA (Na A) ที่แลกเปลี่ยนไอออนโพแทสเซียมและลิเทียม โดยซีโอไลต์ Na A สังเคราะห์ขึ้นโดยใช้วิธีไฮโดรเทอร์มอลและการแลกเปลี่ยนไอออนโดยการสัมผัสต่อเนื่องกัน และวัดการแลกเปลี่ยนที่อุณหภูมิ 293 K ความดัน 1 MPa แสดงดังรูปที่ 2.21



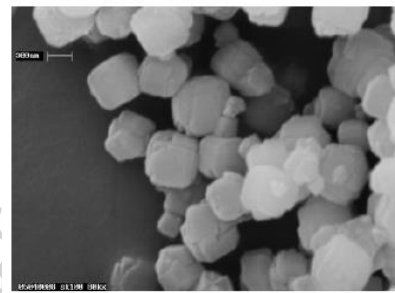
รูปที่ 2.21 แสดง X-ray diffractograms ของ Na A, Li A และ KA zeolites [36]

เราสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงระหว่างสามฟีกของซีโอไลต์ที่ตกผลึกอย่างดี เนื่องจากการแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนบวกที่ต่างกันได้ ค่าคงที่แลตทิซของซีโอไลต์ที่แลกเปลี่ยนคำนวณจาก diffractograms เหล่านี้และแปรผันด้วยรัศมีไอออนิกของไอออนบวกที่แลกเปลี่ยน (ตารางที่ 2.7) : K^+ มีรัศมีไอออนิกที่ใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับ Na^+ และ Li^+ ดังนั้นค่าคงที่แลตทิซของมันก็ใหญ่ที่สุดเช่นกัน

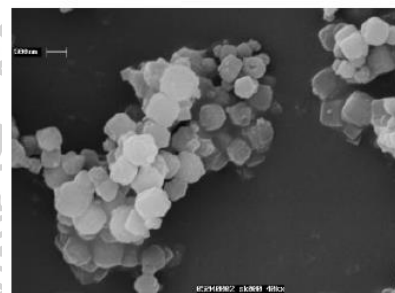
ในรูปที่ 2.22 แสดงภาพ SEM แสดงสัณฐานวิทยาของ LTA zeolite แบบลูกบาศก์อย่างชัดเจน และไม่สูญเสียความเป็นผลึกหลังจากทำการแลกเปลี่ยนไอออน และรูปที่ 2.23 แสดงภาพ TEM ของ Li A zeolite พบว่า microdiffractogram ของผลึกของ Li A zeolite ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกซีโอไลต์



a

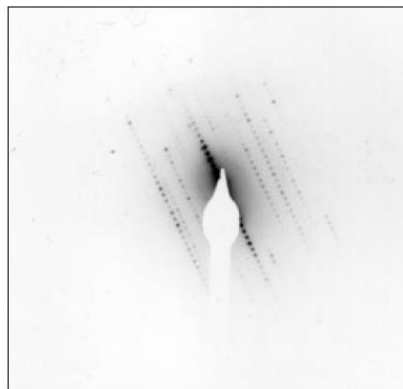


b



c

รูปที่ 2.22 ภาพ SEM ของซีโอไลต์ (a) K A, (b) Li A, และ (c) Na A [36]



รูปที่ 2.23 ภาพ TEM ของ Li A zeolites [36]

ในระหว่างการแลกเปลี่ยนไอออนบวก ไอออนโซเดียมจะถูกแทนที่โดยไอออนลิเทียมและโพแทสเซียมในโครงสร้างซีโอไลต์ ไอออนลิเทียมมีเส้นผ่านศูนย์กลางและมวลอะตอมน้อยกว่าไอออนโซเดียมและโพแทสเซียม และไอออนโพแทสเซียมมีเส้นผ่านศูนย์กลางและมวลอะตอมมากกว่าไอออน

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องชั่งสาร
2. ตูบสาร
3. Hot plate
4. อลูมิเนียมฟอยล์
5. ปีกเกอร์
6. กระจกบอทดวง
7. แท่งแก้วคนสาร
8. หลอดหยดสาร
9. ช้อนตักสาร
10. กระจกชากรอง
11. ชุดกรอง Buchner
12. ฟอรัเซป
13. หลอดพลาสติกเสียบดอกกล้วยไม้

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. พอลิแลคติกแอซิด (PLA) เกรด 4043D มีค่า MFR 6 g/10 min จากบริษัท NatureWorks LLC จำกัด ประเทศไทย
2. พอลิเอทิลีนออกไซด์ (PEO) ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 100,000, 200,000, 300,000 และ 400,000 g/mol จากบริษัท ACS xenon (Sigma-Aldrich) ประเทศสิงคโปร์
3. ซีโอไลต์ (Zeolite) ชนิด 5A จากบริษัท ACS xenon (Sigma-Aldrich) ประเทศสิงคโปร์ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 10 ไมโครเมตรและมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน 5 Å
4. สารเชื่อมประสานชนิด (3-Aminopropyl) trimethoxysilane จากบริษัท ACS xenon (Sigma-Aldrich) ประเทศสิงคโปร์
5. โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) จากบริษัท Ajax Finechem ประเทศไทย
6. ลิเทียมไนเตรต (LiNO_3) จากบริษัท LOBA CHEMIE PVT.LTD ประเทศอินเดีย
7. น้ำกลั่น (Distilled water) และน้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

8. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) จากบริษัท RCI Labscan จำกัด ประเทศไทย มีความเข้มข้น 37 wt% ความหนาแน่นอยู่ที่ 1.19 g/cm³
9. เมทานอล (Methanol) จากบริษัท Merck Ltd ประเทศเยอรมัน

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล

1. เครื่องวัดความหนาของฟิล์ม (Micrometer)
2. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) รุ่น Lab-X, XRD-6100 (CuK α , λ = 1.5418 Å) จากบริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น
3. เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeter, DSC) รุ่น DSC1 จากบริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
4. เครื่องวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal Gravimetric Analyzer, TGA) รุ่น TGA/DSC1 จากบริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
5. เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) ชื่อทางการค้า Instron โมเดล 5969 บริษัท Instron Engineering Corporation จากประเทศสหรัฐอเมริกา
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ TESCAN รุ่น Mira3 จากบริษัท Czech Republic ประเทศมาเลเซีย
7. เครื่องพิสูจน์เอกลักซ์ (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) รุ่น VERTEX70 จากบริษัท BRUKER
8. เครื่องทดสอบสมบัติการกั้นผ่านของก๊าซ (Gas Permeability Tester) รุ่น GDP-C-Gas Permeability Tester จากบริษัท Brugger feinmechanik จำกัด ประเทศเยอรมนี

3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน

1. เครื่องผสมแบบปิด (Brabender Internal mixer) รุ่น PLASTI-CORDER LAB-STATION+W50EHT จากบริษัท Brabender® GmbH & Co. KG ประเทศเยอรมนี โดยมีปริมาตรช่องผสม 55-80 cm³ และค่า Torque สูงสุด 200 Nm
2. เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด (Compression molding) จากบริษัท LABTECH ENGINEERING COMPANY LTD

3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PEO (PLA/PEO blend films)

1. อบเม็ดพลาสติก PLA ที่อุณหภูมิ 60 °C และอบผง PEO ที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น

2. นำเม็ดพลาสติก PLA ผสมกับ PEO ในอัตราส่วน 5, 10 และ 15 wt% และน้ำหนักโมเลกุลของ PEO คือ 100,000-400,000 g/mol โดยใช้เครื่อง Brabender Internal mixer ที่อุณหภูมิ 180 °C ความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 50 rpm เป็นเวลา 15 นาที
3. นำพอลิเมอร์ผสมไป grinder ให้มีขนาดเป็นเม็ดที่เล็กลง
4. นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ grinder แล้วไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเครื่อง Compression ที่อุณหภูมิ 180 °C ความดัน 100 bar และใช้เวลา pre heating, pressing & venting, full pressing และ cooling เท่ากับ 4, 2, 3 และ 2 นาที ตามลำดับ โดยฟิล์มที่ได้มีขนาด 20 x 20 cm² และมีความหนาประมาณ 0.3 ± 0.05 mm

3.2.2 การทดสอบสมบัติของ PLA/PEO blend films

1. ทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO
โดยทดสอบสมบัติการดึงยึดด้วยเครื่อง Universal testing machine และใช้มาตรฐาน ASTM D882-02 ขนาดชิ้นงาน กว้าง x ยาว เท่ากับ 1 x 7 in² ขนาดของ gauge length เท่ากับ 5 in ขนาด Load cell 5 kN และอัตราเร็วในการดึงชิ้นงาน 12.5 mm/min
2. ทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO
ทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน โดยใช้ตัวอย่างปริมาณหนึ่งในสามของ aluminium crucible pan และทดสอบในโหมด temperature scan แบบ heat-cool-heat ในช่วงอุณหภูมิ 0-200 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 °C/min เพื่อศึกษาอุณหภูมิกลายแก้ว (T_g), อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และความเป็นผลึก (Percent crystallinity : X_c (%)) ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 3.1

$$X_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H_m^\circ \times \phi} \times 100 \% \quad (\text{สมการที่ 3.1})$$

- โดย X_c คือ ปริมาณผลึก (Degree of crystallinity)
- ΔH_m คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมผลึกต่อหนึ่งหน่วย (J/g)
- ΔH_{cc} คือ พลังงานความร้อนที่ทำให้เกิดผลึกต่อหนึ่งหน่วย (J/g)
- ΔH_m[°] คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมผลึก 100% (J/g)
- และ φ คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์

3. ทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์ม Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO

ทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนโดยใช้เครื่อง เครื่อง Thermal Gravimetric Analyzer (TGA) ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน โดยใช้ตัวอย่างปริมาณหนึ่งในสามของ alumina crucible และทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 50-600 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 °C/min เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เริ่มสลายตัว (Onset Temperature) อุณหภูมิสลายตัวสูงสุด (Inflection point) และอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว (Endset Temperature)

4. ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานฟิล์ม Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO

ทดสอบด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) โดยใช้ชิ้นงานแตกหักของฟิล์มที่ผ่านการดิงยัดแล้วนำชิ้นงานมาเคลือบด้วยทอง เพื่อศึกษาลักษณะการแตกหักและความเข้ากันได้ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

5. ทดสอบเอกลักษณ์ของฟิล์ม Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO

ทดสอบด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) โดยชุดตัวอย่างให้เป็นผง จากนั้นนำมาผสมกับ KBr ในอัตราส่วน 1 : 9 และสแกนในช่วงเลขคลื่น 4000-400 cm^{-1} เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของพอลิเมอร์ผสม

6. ทดสอบอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor transmission rate : WVTR) ของฟิล์ม Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO

ทดสอบโดยใช้วิธี Cup method แบบ Desiccant ทำได้โดยการเตรียมสารละลายอิ่มตัว NaCl ปริมาตร 500 ml ใส่ลงใน Desiccator ให้มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ 75% จากนั้นนำซิลิกาเจลที่อบแล้วใส่ในแก้วให้มีปริมาณเท่าๆ กัน แล้วปิดปากแก้วด้วยชิ้นงานฟิล์มตัวอย่างโดยใช้พาราฟินฟิล์ม แล้วนำไปใส่ไว้ใน ใส่ลงใน Desiccator และบันทึกน้ำหนักของถ้วยแก้วทุกๆ 24 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่ โดยอัตราการซึมผ่านไอน้ำสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.2

$$WVTR = \frac{\text{ความชันของกราฟ (น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของฟิล์ม}} \quad (\text{สมการที่ 3.2})$$

โดยกำหนดพื้นที่หน้าตัดของฟิล์ม เท่ากับ 0.000962 m^2

7. ทดสอบอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO

ทดสอบด้วยเครื่อง Gas Permeability Tester โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างให้มีขนาด $5 \times 5 \text{ cm}^2$ แล้วนำฟิล์มติดลงบนฟอยล์ทดสอบ จากนั้นนำไปใส่ในเครื่องทดสอบ โดยใช้เวลาในการไล่อากาศ (Evacuation Period) 3 ชั่วโมง และใช้เวลาในการทดสอบ (Test Period) 3 ชั่วโมง โดยอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

$$OP = GTR \times L \quad (\text{สมการที่ 3.3})$$

โดย OP คือ อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ($\text{mm cm}^3/\text{m}^2 \text{ day bar}$)

GTR คือ อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่ได้จากเครื่องทดสอบ ($\text{cm}^3/\text{m}^2 \text{ day bar}$)

L คือ ความหนาของฟิล์มตัวอย่าง (mm)

$$CP = GTR \times L \quad (\text{สมการที่ 3.4})$$

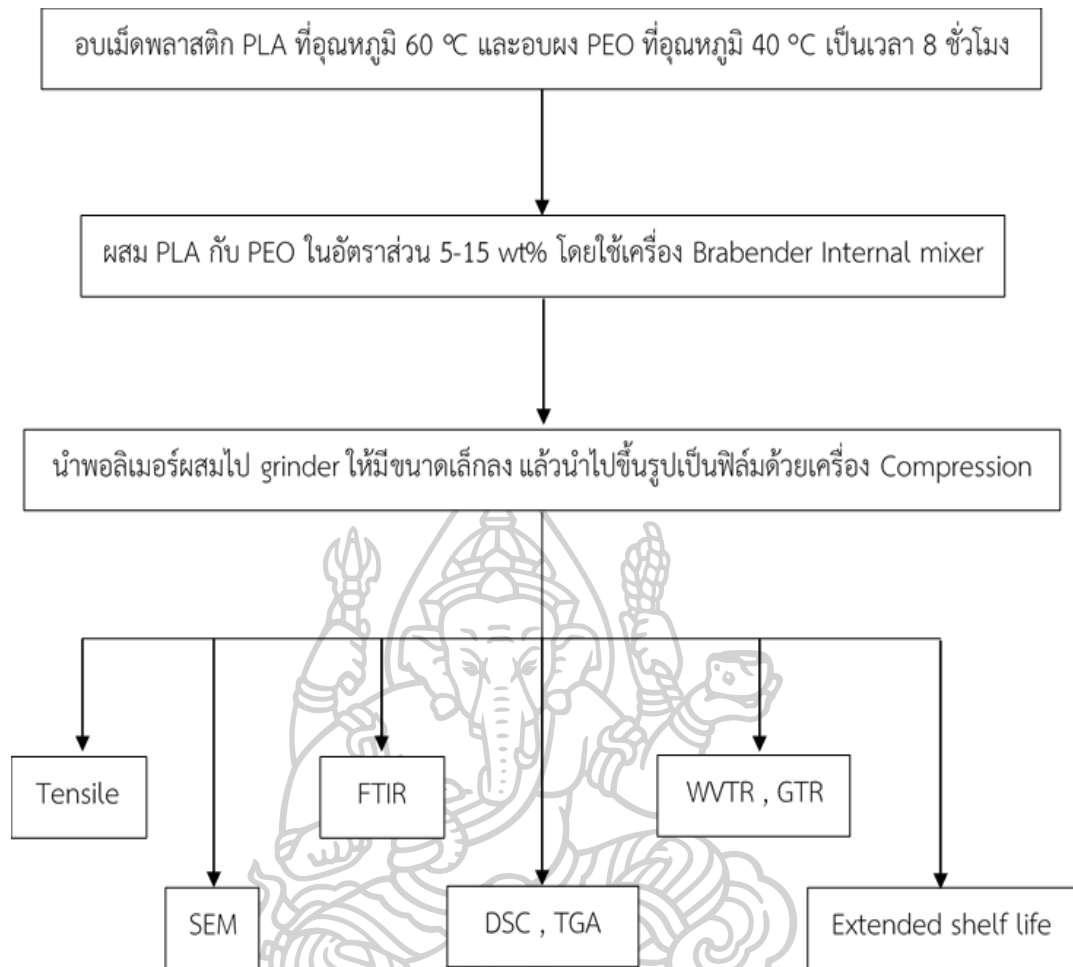
โดย CP คือ อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($\text{mm cm}^3/\text{m}^2 \text{ day bar}$)

GTR คือ อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากเครื่องทดสอบ ($\text{cm}^3/\text{m}^2 \text{ day bar}$)

L คือ ความหนาของฟิล์มตัวอย่าง (mm)

8. ทดสอบการยืดอายุ (Extended shelf life) ของกล้วยไม้

ทำโดยการนำฟิล์ม Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO มาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ขนาดประมาณ $20 \times 20 \text{ cm}$ จากนั้นนำกล้วยไม้สกุลหวาย (Dendrobium) ใส่ลงในบรรจุภัณฑ์และหุ้มปลายก้านด้วยสำลีชุบน้ำใส่ลงในหลอดพลาสติก เก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ $8 \text{ }^\circ\text{C}$ และสังเกตการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพพร้อมถ่ายรูปทุกวันจนกว่าดอกไม้จะเหี่ยวหรือเริ่มดำ



รูปที่ 3.1 แสดงแผนภูมิการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO



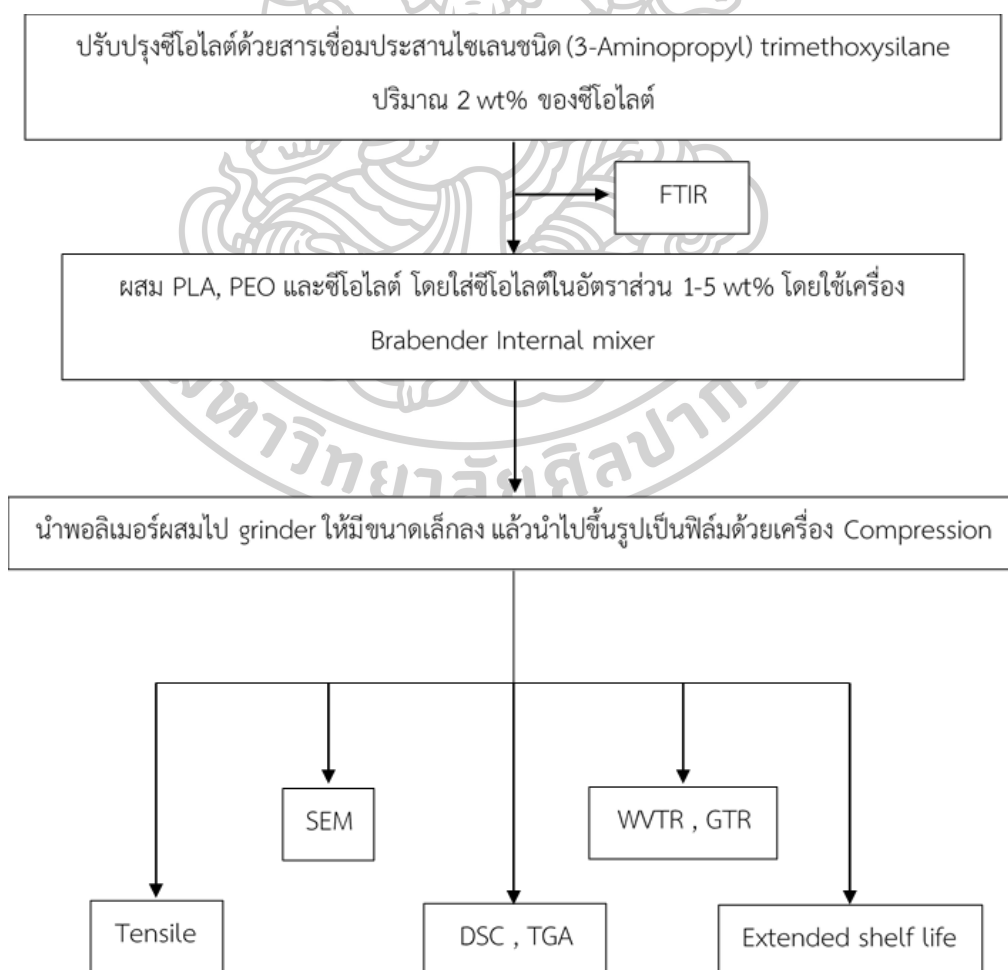
ตารางที่ 3.1 แสดงสัดส่วนการผสมและชื่อย่อที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO

ชื่อย่อ	PLA (wt%)	PEO (wt%)			
		M _w 100,000 g/mol	M _w 200,000 g/mol	M _w 300,000 g/mol	M _w 400,000 g/mol
Neat PLA	100	-	-	-	-
PLA/1PEO 5%	95	5	-	-	-
PLA/2PEO 5%	95	-	5	-	-
PLA/3PEO 5%	95	-	-	5	-
PLA/4PEO 5%	95	-	-	-	5
PLA/1PEO 10%	90	10	-	-	-
PLA/2PEO 10%	90	-	10	-	-
PLA/3PEO 10%	90	-	-	10	-
PLA/4PEO 10%	90	-	-	-	10
PLA/1PEO 15%	85	15	-	-	-
PLA/2PEO 15%	85	-	15	-	-
PLA/3PEO 15%	85	-	-	15	-
PLA/4PEO 15%	85	-	-	-	15

3.2.3 การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PEO ที่มีการเติมซีโอไลต์

1. ทำการปรับปรุงซีโอไลต์ด้วยสารเชื่อมประสานไซเลนชนิด (3-Aminopropyl) trimethoxysilane โดยนำซีโอไลต์ที่อบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มา 98 กรัม ละลายในสารละลายผสมระหว่างเมทานอลและน้ำกลั่นที่อัตราส่วน 2 : 1 โดยปริมาตร (ใช้เมทานอล 309.7 cm³ และใช้น้ำกลั่น 154.9 cm³ จากนั้นหยดสารเชื่อมประสานไซเลน ปริมาณ 2 wt% ของซีโอไลต์ ลงในสารละลายผสมที่อุณหภูมิห้อง แล้วกวน 15 นาที เมื่อครบเวลาจะหยุดกรดไฮโดรคลอริกลงไปจนกระดาษลิตมัสเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นแดง และกวนผสมด้วยความเร็วระดับ 4 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อครบเวลาจะนำสารละลายไปกรองและอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. นำสูตรที่ดีที่สุดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO จากตอนที่ 1 (หัวข้อ 3.2.1) ได้แก่ PLA/1PEO 10% มาผสมกับซีโอไลต์จากข้อ 1 ด้วยเครื่อง Brabender Internal mixer ที่อุณหภูมิ 180 °C ความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 50 rpm เป็นเวลา 15 นาที ตามอัตราส่วนที่แสดงไว้ดังตารางที่ 3.2
3. นำพอลิเมอร์ผสมไป grinder ให้มีขนาดเป็นเม็ดที่เล็กลง
4. นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ grinder แล้วไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเครื่อง Compression ที่อุณหภูมิ 180 °C ความดัน 100 bar และใช้เวลา pre heating, pressing & venting, full pressing และ cooling เท่ากับ 4, 2, 3 และ 2 นาที ตามลำดับ โดยฟิล์มที่ได้มีขนาด 20 x 20 cm² และมีความหนาประมาณ 0.3 ± 0.05 mm
5. นำฟิล์มที่ได้ไปทดสอบสมบัติดังหัวข้อ 3.2.2 ซึ่งการทดสอบ FTIR จะเป็นการทดสอบเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของซีโอไลต์หลังจากที่ได้รับการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน เพื่อเป็นการยืนยันผลของการปรับปรุงดังกล่าว



รูปที่ 3.2 แสดงแผนภูมิการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่มีการเติมซีโอไลต์

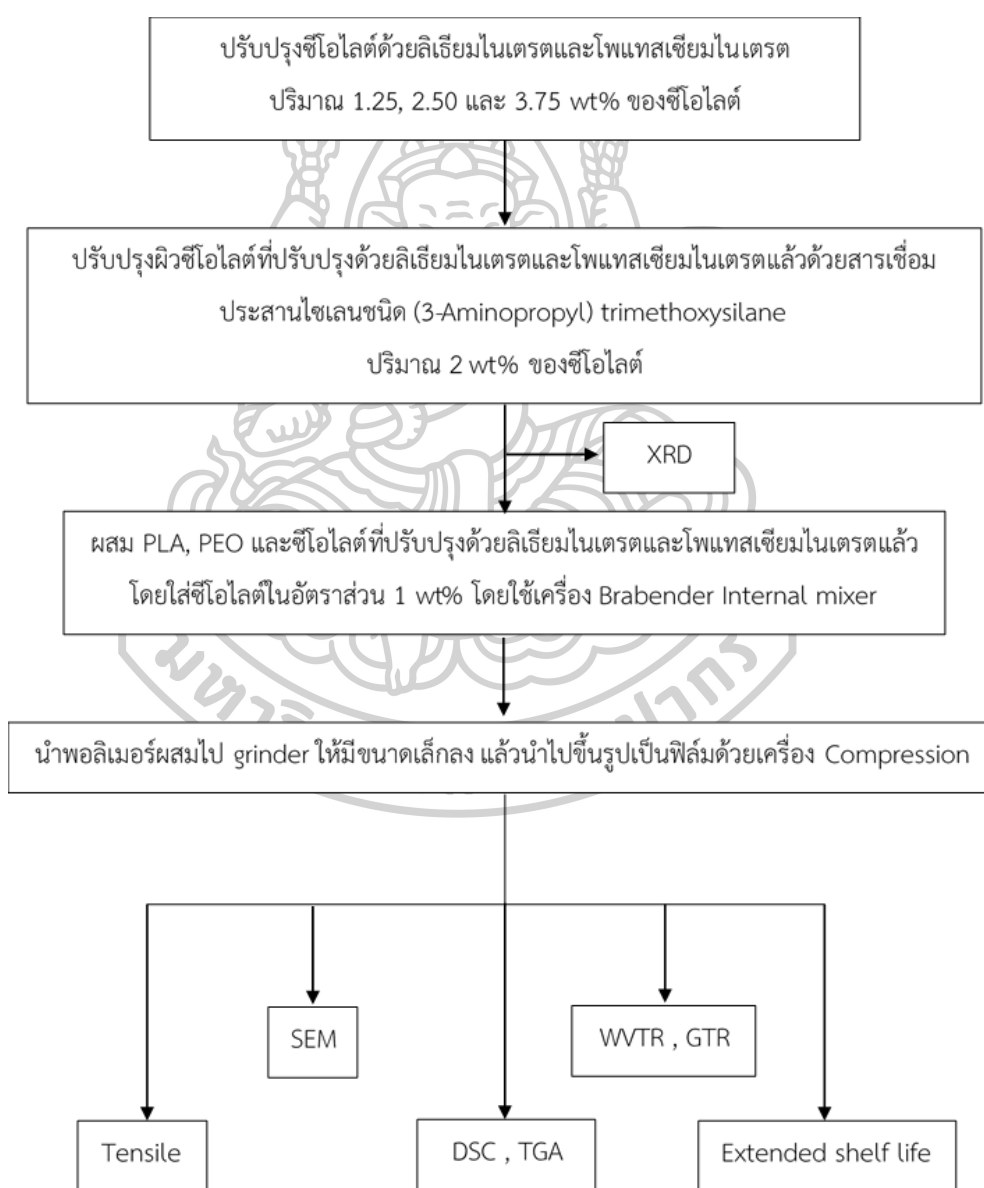
ตารางที่ 3.2 แสดงสัดส่วนการผสมและชื่อย่อที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่มีการเติมซีโอไลต์

ชื่อย่อ	PLA (wt%)	PEO (wt%)	zeolite (wt%)
PLA/PEO/Z 1%	89.10	9.90	1
PLA/PEO/Z 3%	87.30	9.70	3
PLA/PEO/Z 5%	85.50	9.50	5

3.2.4 การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PEO ที่มีการเติมซีโอไลต์ที่ทำการปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต

1. ปรับปรุงซีโอไลต์ด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต เริ่มจากเตรียมสารละลายระหว่างลิเทียมไนเตรตกับน้ำปราศจากไอออน โดยใช้ลิเทียมไนเตรต 1.25, 2.50 และ 3.75 wt% ของซีโอไลต์ และใช้น้ำปราศจากไอออน 400 ml นำมาผสมกันและกวน 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำซีโอไลต์ที่อบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ผสมลงในสารละลายที่ได้ในอัตราส่วน 98.75, 97.50 และ 96.25 g / 400 ml แล้วกวนต่อที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปกรองและอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำซ้ำโดยเปลี่ยนจากลิเทียมไนเตรตเป็นโพแทสเซียมไนเตรต
2. นำซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรตจากข้อ 1 มาปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสานไฮดรอกซิล (3-Aminopropyl) trimethoxysilane ตามหัวข้อ 3.2.3 (1)
3. นำซีโอไลต์ที่ปรับปรุงแล้วจากข้อที่ 2 มาผสมกับ PLA และ PEO ที่อัตราส่วนซีโอไลต์ 1% (เป็นสัดส่วนการผสมที่ดีที่สุดที่ได้จากตอนที่ 2 (หัวข้อ 3.2.3) ด้วยเครื่อง Brabender Internal mixer ที่อุณหภูมิ 180 °C ความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 50 rpm เป็นเวลา 15 นาที ตามอัตราส่วนที่แสดงไว้ดังตารางที่ 3.3
4. นำพอลิเมอร์ผสมไปเข้าเครื่อง grinder ให้มีขนาดเป็นเม็ดที่เล็กลง
5. นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ grind แล้วไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเครื่อง Compression ที่อุณหภูมิ 180 °C ความดัน 100 bar และใช้เวลา pre heating, pressing & venting, full pressing และ cooling เท่ากับ 4, 2, 3 และ 2 นาที ตามลำดับ โดยฟิล์มที่ได้มีขนาด 20 x 20 cm² และมีความหนาประมาณ 0.3 ± 0.05 mm

6. นำฟิล์มที่ได้ไปทดสอบสมบัติดังหัวข้อ 3.2.2 (ยกเว้น 3.2.2 (5)) นอกจากนี้จะมีการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) ของซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต ทำโดยใส่ผงซีโอไลต์บน glass slide ใช้การทดสอบด้วย Cu-K α radiation โดยทดสอบในช่วง 5-40° อัตราเร็วในการทดสอบ 2 °/min ปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 20 mA และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 kV เพื่อนำไปคำนวณหาค่า Lattice parameter โดยใช้โปรแกรม Unit cell เพื่อเป็นการยืนยันผลของการปรับปรุงดังกล่าว



รูปที่ 3.3 แสดงแผนภูมิการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่มีการเติมซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต

ตารางที่ 3.3 แสดงสัดส่วนการผสมและชื่อย่อที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่มี การเติมซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต

ชื่อย่อ	PLA (wt%)	PEO (wt%)	zeolite (wt%)	LiNO ₃ (wt% Z)	KNO ₃ (wt% Z)
PLA/PEO/Z-Li ⁺ 1.25	89.10	9.90	1	1.25	-
PLA/PEO/Z-Li ⁺ 2.5	89.10	9.90	1	2.50	-
PLA/PEO/Z-Li ⁺ 3.75	89.10	9.90	1	3.75	-
PLA/PEO/Z-K ⁺ 1.25	89.10	9.90	1	-	1.25
PLA/PEO/Z-K ⁺ 2.5	89.10	9.90	1	-	2.50
PLA/PEO/Z-K ⁺ 3.75	89.10	9.90	1	-	3.75



บทที่ 4

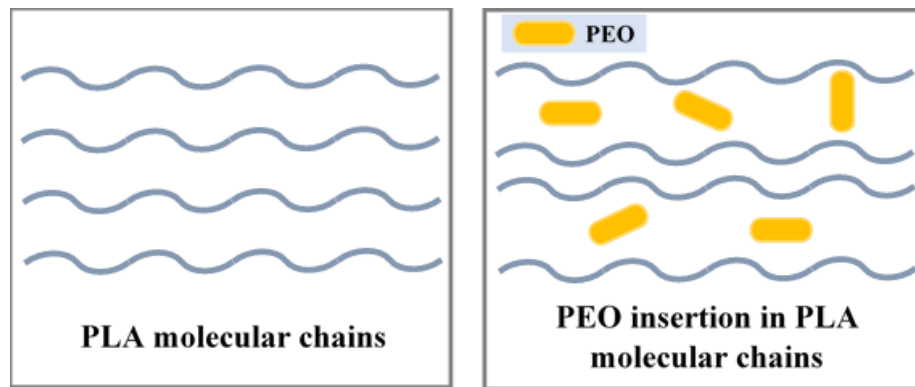
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมพอลิเอทิลีนออกไซด์ (PEO) เพื่อใช้สำหรับยืดอายุกล้วยไม้ตัดดอก ซึ่งในส่วนแรกจะศึกษาผลของปริมาณและน้ำหนักโมเลกุลของ PEO ที่เติมต่อสมบัติของฟิล์ม PLA โดยเติม PEO ปริมาณ 5, 10 และ 15 %wt และปรับเปลี่ยนน้ำหนักโมเลกุลของ PEO คือ 100,000 – 400,000 g/mol เมื่อทราบปริมาณและน้ำหนักโมเลกุลของ PEO ที่เหมาะสมจากส่วนแรกแล้วจะนำมาศึกษาผลของซีโอไลต์ชนิด 5A ในปริมาณการเติม 1, 3 และ 5 %wt ต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม จากนั้นจะศึกษาผลของการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange) ของ Li^+ และ K^+ ในซีโอไลต์ด้วยปริมาณการเติมไอออน 1.25, 2.5 และ 3.75 wt% ของซีโอไลต์ ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการซึมผ่านของก๊าซ และความสามารถในการยืดอายุกล้วยไม้ตัดดอกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีการปรับปรุงผิวของซีโอไลต์ด้วย (3-Aminopropyl) trimethoxysilane ปริมาณ 2 wt% ของซีโอไลต์ เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเมทริกซ์ของพอลิเมอร์และซีโอไลต์ โดยในกระบวนการทดลองทั้งหมดจะใช้เครื่องผสมแบบปิด (Brabender Internal mixer) และทำการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มโดยใช้เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด (Compression molding) ซึ่งฟิล์มที่ได้มีขนาด $20 \times 20 \text{ cm}^2$ และมีความหนาประมาณ $0.3 \pm 0.05 \text{ mm}$ จากนั้นนำฟิล์มมาพิสูจน์เอกลักษณ์ ซึ่งแสดงผลของ PEO ต่อสมบัติฟิล์ม PLA ดังนี้

4.1 ผลการศึกษาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PEO (PLA/PEO blend films)

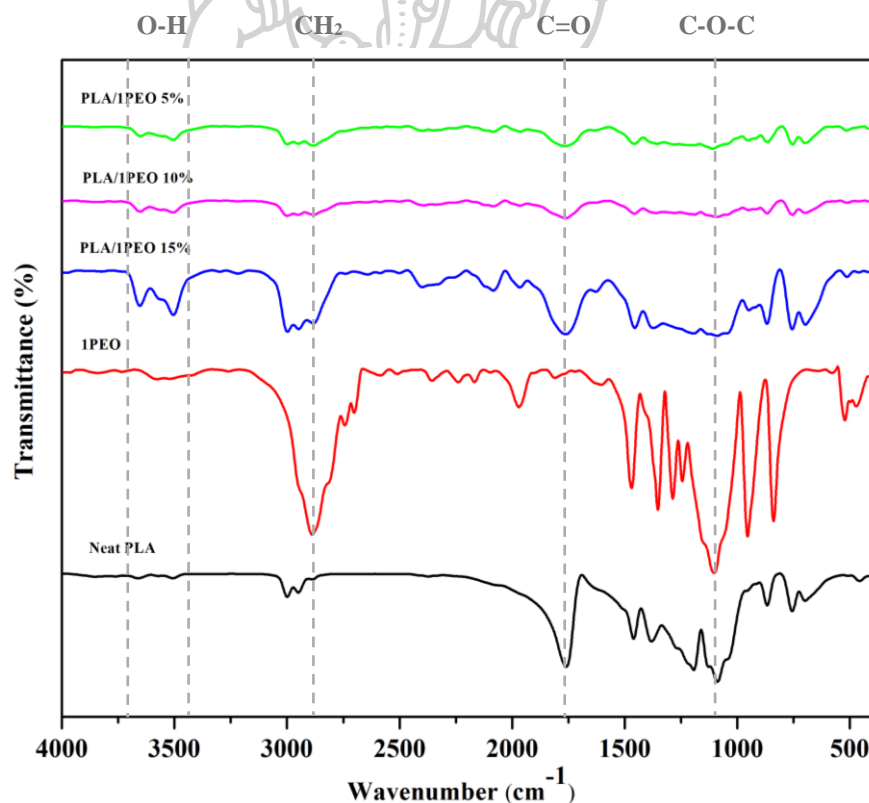
4.1.1 การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

FT-IR Spectroscopy เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถอ่านข้อมูลได้จากสเปกตรัมของตัวอย่างรวมทั้งกำหนดรูปร่างของไอโซเมอร์จากความถี่เลขคลื่น (wavenumber frequency) โดยงานวิจัยในส่วนนี้ได้ทำการผสม PLA และ PEO เข้าด้วยกัน ซึ่ง PEO มีความเหมาะสมเป็นพลาสติกไฮเซอร์ เมื่อใส่เข้าไปใน PLA ที่มีความเปราะ จะทำให้ PLA มีความยืดหยุ่นและอ่อนนุ่มขึ้น



รูปที่ 4.1 แสดงกลไกพลาสติกไซเซชันของ PEO ในเมทริกซ์ PLA

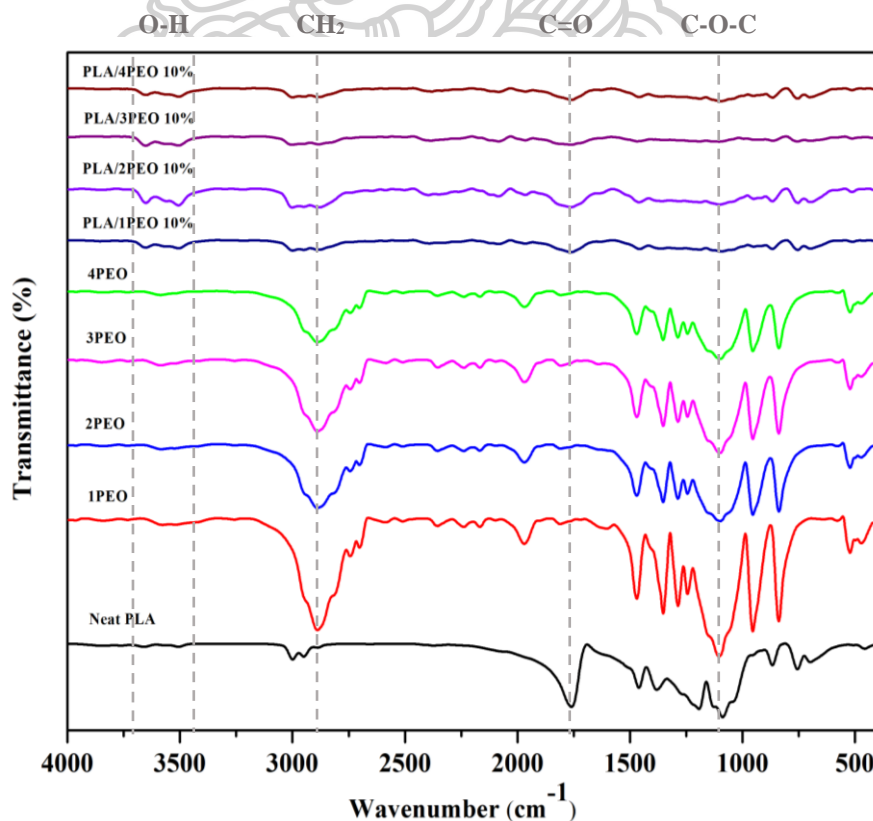
โดยกลไกการทำงานของพลาสติกไซเซชันนั้นจะไม่ได้เกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์แต่จะแทรกตัวเองอยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์และแสดงอันตรกิริยาทางกายภาพกับพอลิเมอร์ (Physical interaction) ซึ่งจะมาแทนที่อันตรกิริยาของพอลิเมอร์ด้วยตัวเอง ทำให้ระยะห่างระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์มากขึ้นและสะดวกต่อการเคลื่อนไหวมากขึ้น [38] แสดงดังแผนภาพในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.2 สเปกตรัม FTIR ของ Neat PLA, 1PEO และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO

จากสเปกตรัม FTIR ของ Neat PLA ในรูปที่ 4.2 พบว่าปรากฏพีคที่มีลักษณะเฉพาะของหมู่ C=O ที่ 1759 cm^{-1} นอกจากนี้ยังแสดงพีคที่ 1087 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ C-O-C และพีคที่ 2999 และ 2949 cm^{-1} แสดงถึงการยืดแบบไม่สมมาตรและสมมาตรของ CH_3 ในขณะที่พีคที่ 1460 และ 1381 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบงอแบบไม่สมมาตรและสมมาตรของ CH_3 ตามลำดับ [39] ในกรณีของ PEO ปรากฏพีคประมาณ $3600\text{-}3400$ และ 2889 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการยืดของ O-H และ CH_2 นอกจากนี้พีคที่ 1102 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบยืดของ C-O-C ether linkage [9]

อย่างไรก็ตามในพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO แสดงแถบของการดูดกลืน FTIR ที่โดดเด่นทั้งหมดของ PLA และ PEO เนื่องจากโครงสร้างของ PLA และ PEO มีลักษณะคล้ายกันคือประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนและออกซิเจน ซึ่งในงานวิจัยนี้พบความแตกต่างเล็กน้อยของความเข้มพีคกล่าวคือ เมื่อปริมาณ PEO เพิ่มขึ้น ความเข้มของพีคที่ $3400\text{-}3600$ และ 2889 cm^{-1} ก็เพิ่มขึ้นด้วยเนื่องจากเป็นพีคที่แสดงถึงหมู่ O-H และ CH_2 ที่เป็นหมู่ฟังก์ชันเอกลักษณ์ของ PEO ดังนั้นความเข้มของพีคดังกล่าวเพิ่มขึ้นจึงแสดงถึงการมีอยู่ของ PEO ที่มากขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังไม่พบพันธะหรือแรงทางเคมีที่เกิดขึ้นใหม่ระหว่าง PLA และ PEO [40] ดังที่กล่าวไปข้างต้นว่า PEO ไม่ได้เกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์แต่จะแทรกตัวเองอยู่ระหว่างโมเลกุลของ PLA และแสดงอันตรกิริยาทางกายภาพกับ PLA

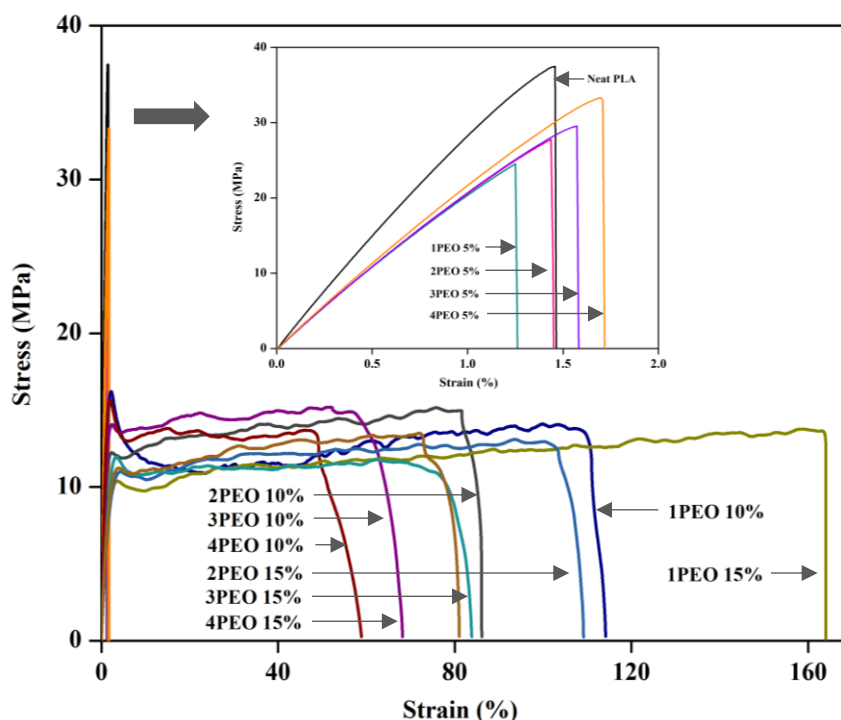


รูปที่ 4.3 สเปกตรัม FTIR ของ Neat PLA, PEO และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO

เมื่อพิจารณาผลของน้ำหนักโมเลกุลของ PEO ในสเปกตรัม FTIR ดังรูปที่ 4.3 พบว่าในพอลิเมอร์ผสมที่มีน้ำหนักโมเลกุลของ PEO ต่างกัน แสดงพีคของพอลิเมอร์ผสมมีลักษณะเหมือนกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ruilong Li และคณะ [41] พวกเขาทำการผสม PLA กับ PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 2000-8000 g/mol พบว่าถึงแม้ว่าน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ในพอลิเมอร์ผสมจะแตกต่างกัน แต่มีลักษณะพีคพื้นฐานเหมือนกัน ซึ่งบ่งชี้ว่าน้ำหนักโมเลกุลของ PEG มีผลเพียงเล็กน้อยต่อสเปกตรัม FTIR ของพอลิเมอร์ผสม นอกจากนี้ Peng Ji และคณะ [42] ทำการผสมพอลิเอทิลีนฟูแรนไดคาร์บอกซิเลท (PEF) กับพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 600-20,000 g/mol พบว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ค่อยๆ เพิ่มขึ้น ความกว้างของพีคจะเปลี่ยนไปเล็กน้อยแต่ไม่ได้สังเกตเห็นชัดเจน

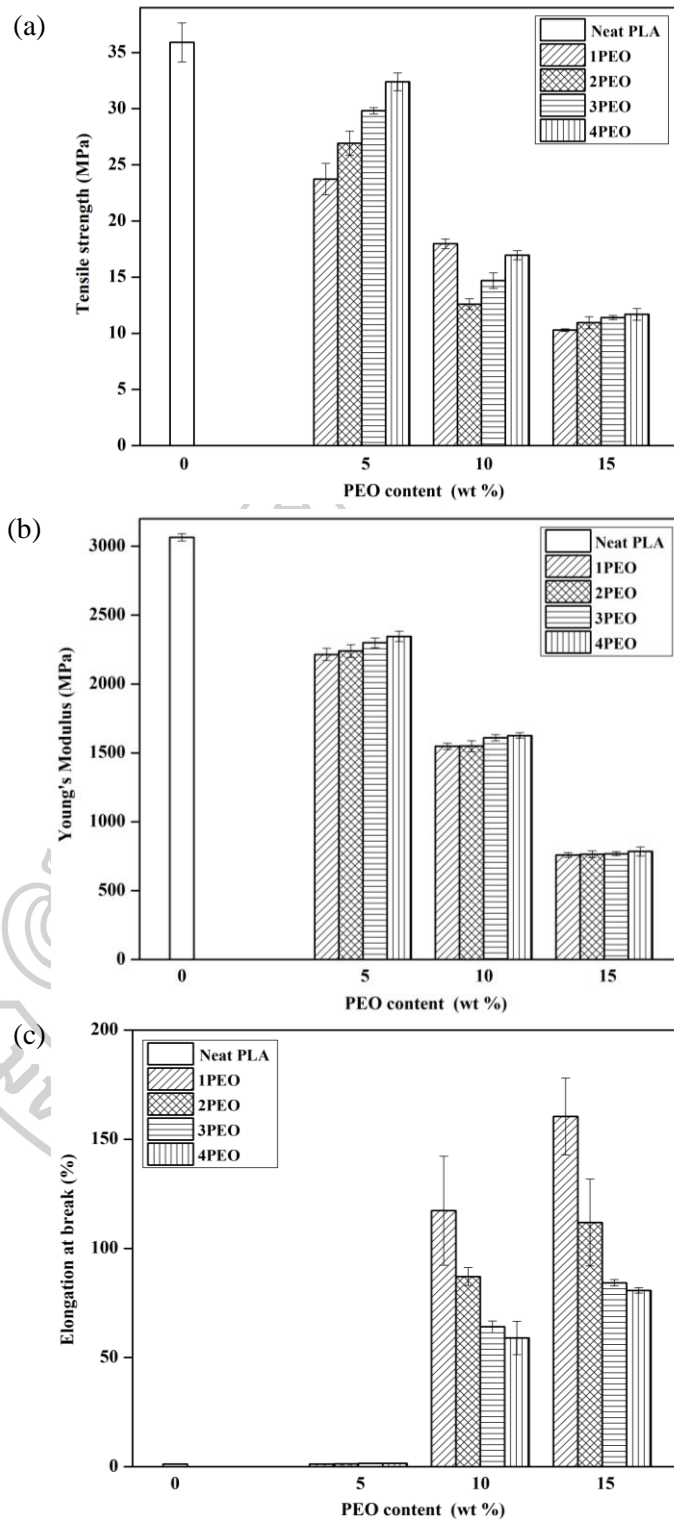
4.1.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO

สมบัติเชิงกลของวัสดุเป็นสิ่งที่บ่งบอกว่าวัสดุนั้นๆ สามารถที่จะรับหรือทนทานแรงเชิงกลภายนอกที่มากกระทำได้น้อยเพียงใด ดังนั้นสมบัติเชิงกลของวัสดุจึงมีความสำคัญมาก ในงานวิจัยนี้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ถูกนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึงยึด (Tensile strength), ยั่งมอดูลัส (Young's Modulus) และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) โดยเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แสดงถึงลักษณะพื้นฐานของสมบัติเชิงกลของวัสดุ ดังรูปที่ 4.4 แสดงเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของ Neat PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่มีปริมาณและน้ำหนักโมเลกุลของ PEO ต่างกัน



รูปที่ 4.4 แสดงเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของ Neat PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่มีปริมาณและน้ำหนักโมเลกุลของ PEO ต่างกัน

จากเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดพบว่า Neat PLA และพอลิเมอร์ผสมที่เติม PEO 5 wt% ไม่แสดงการเกิด necking ซึ่งพอลิเมอร์ผสมยังคงแสดงพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะเช่นเดียวกับ Neat PLA นอกจากนี้พบว่า tensile stress at yield ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ลดลงเมื่อปริมาณของ PEO เพิ่มขึ้น ในขณะที่ tensile strain at yield ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PEO มากกว่า 5 wt% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนพฤติกรรมการแตกหักจากแบบเปราะไปเป็นการแตกหักแบบยืดหยุ่น (Brittle to ductile fracture) และสังเกตเห็นการเกิด necking นอกจากนี้พบว่า tensile strain at break และการเกิด necking ลดลง เมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้นซึ่งชี้ให้เห็นว่า PEO ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงความเหนียว (Ductility) ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO มากกว่า PEO ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Feng-jiao Li และคณะ [43]



รูปที่ 4.5 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม Neat PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่มีปริมาณและน้ำหนักโมเลกุลของ PEO แตกต่างกัน : (a) Tensile strength, (b) Young's Modulus และ (c) Elongation at break

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม Neat PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่มีปริมาณและน้ำหนักโมเลกุลของ PEO แตกต่างกัน

Samples	Tensile properties		
	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
Neat PLA	35.90 ± 1.73 ^a	3064.37 ± 27.21 ^a	1.27 ± 0.13 ^f
PLA/1PEO 5%	23.73 ± 1.40 ^e	2214.84 ± 44.70 ^d	1.23 ± 0.14 ^f
PLA/2PEO 5%	26.92 ± 1.08 ^d	2239.81 ± 46.08 ^{c,d}	1.37 ± 0.10 ^f
PLA/3PEO 5%	29.82 ± 0.27 ^c	2299.22 ± 35.39 ^{b,c}	1.52 ± 0.03 ^f
PLA/4PEO 5%	32.40 ± 0.79 ^b	2346.02 ± 38.04 ^b	1.61 ± 0.08 ^f
PLA/1PEO 10%	17.98 ± 0.42 ^f	1547.84 ± 21.67 ^g	117.27 ± 24.98 ^b
PLA/2PEO 10%	12.60 ± 0.47 ^h	1549.43 ± 39.71 ^{f,g}	87.10 ± 4.07 ^c
PLA/3PEO 10%	14.69 ± 0.70 ^g	1609.80 ± 21.83 ^{e,f}	64.09 ± 2.69 ^{d,e}
PLA/4PEO 10%	16.96 ± 0.41 ^f	1625.75 ± 20.11 ^e	59.03 ± 7.66 ^e
PLA/1PEO 15%	10.28 ± 0.12 ⁱ	759.26 ± 17.03 ^h	160.42 ± 17.62 ^a
PLA/2PEO 15%	10.94 ± 0.54 ^{h,i}	764.02 ± 23.62 ^h	111.84 ± 19.85 ^b
PLA/3PEO 15%	11.40 ± 0.18 ^{h,i}	767.99 ± 14.44 ^h	84.26 ± 1.50 ^{c,d}
PLA/4PEO 15%	11.69 ± 0.52 ^{h,i}	784.68 ± 32.21 ^h	80.77 ± 1.26 ^{c,d,e}

หน้าที่หลักของพลาสติกไฮเซอรัคือ การปรับปรุงการยึดตัว ณ จุดขาดและเพิ่มความเหนียวของวัสดุพอลิเมอร์ดังที่กล่าวมาข้างต้น แต่ต้องแลกมากับค่าความต้านทานแรงดึงและมอดูลัสที่ลดลง [44] โดยความต้านทานแรงดึง มอดูลัส และการยึดตัวที่จุดขาดของ Neat PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO แสดงไว้ในรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.1

จากรูปที่ 4.5(a) พบว่าความต้านทานแรงดึงของ Neat PLA มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Debarghya Saha และคณะ [9] และเมื่อเติม PEO ลงใน PLA พบว่าความต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมต่ำกว่า Neat PLA และเมื่อปริมาณของ PEO เพิ่มขึ้น พบว่าความต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก PEO เข้าไปแทรกระหว่างโมเลกุล PLA (รูปที่ 4.1) ทำให้แรงระหว่างโมเลกุล (Intermolecular force) ระหว่างสายโซ่ PLA อ่อนลงจึงทำให้ PLA มีความยืดหยุ่นและนิ่มมากขึ้น

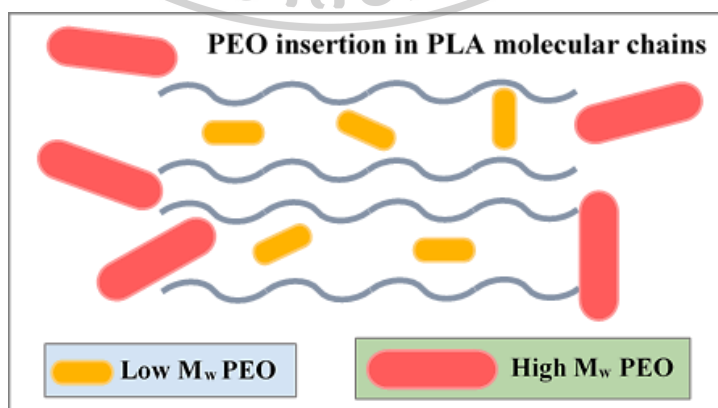
เมื่อพิจารณาโมดูลัส (รูปที่ 4.5(b)) พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีค่าโมดูลัสต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ Neat PLA และเมื่อปริมาณของ PEO เพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสของพอลิเมอร์ผสมก็มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่าง PEO และ PLA ซึ่งจะทำให้อันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของ PLA และ PLA อ่อนแอลงและเป็นการปรับปรุงการจัดเรียงตัวระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ภายใต้แรงดึงยืด และให้ความยืดหยุ่นแก่ PLA ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Byung-Sik Park และคณะ [44] พวกเขาผสม PLA กับ PEG (M_w 35,000 g/mol) ด้วยเครื่อง Brabender และ Compression ขึ้นรูปฟิล์ม พบว่าการเพิ่ม PEG จะเปลี่ยนพฤติกรรมแรงดึงของ PLA จากการแตกหักแบบเปราะ (brittle fracture) ไปเป็นการแตกหักแบบยืดหยุ่น (ductile fracture) ของ PLA/PEG หลังจากที่ผ่านมาการทดสอบแรงดึง Neat PLA มีความแข็งแต่เปราะมาก ซึ่งเมื่อเติม PEG ลงไป 5 wt% ความต้านทานแรงดึงและโมดูลัสลดลงเพียง 7 และ 0.98 % ตามลำดับ แต่เมื่อเติม PEG ลงไป 10% ความต้านทานแรงดึงและโมดูลัสลดลงถึง 23 และ 19.6 % ตามลำดับ และงานวิจัยของ Debarghya Saha และคณะ [9] ศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PEO (M_w 5,000,000 g/mol) ในปริมาณการเติม PEO 1-5 %wt พบว่าความต้านทานแรงดึงของ PLA ลดลง (จาก 36 เป็น 29 MPa) เมื่อใส่ PEO 1-4 wt% ในขณะที่เมื่อใส่ PEO 5 wt% ความต้านทานแรงดึงลดลงอย่างมีนัยสำคัญเกือบครึ่งหนึ่งของฟิล์ม PLA บริสุทธิ์ ซึ่งอาจเกิดจากการกระจายตัวที่ไม่เหมาะสมและการแยกเฟสของ PEO นอกจากนี้ M. Bijarimi และคณะ [45] กล่าวว่าโดยทั่วไปการใส่ PEG จะลดความต้านทานแรงดึงและโมดูลัสของเมทริกซ์ PLA เนื่องจากความไม่เข้ากันของ PEG และ PLA

เมื่อพิจารณาค่าการยืดตัวที่จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม (รูปที่ 4.5(c)) พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ Neat PLA และเห็นการเปลี่ยนแปลงชัดเจนเมื่อใส่ PEO มากกว่า 5 wt% ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนพฤติกรรมการแตกหักจาก brittle ไปเป็น ductile failure ภายใต้แรงดึงดังที่กล่าวมาข้างต้นและสอดคล้องกับภาพพื้นผิวการแตกหักจากแรงดึง ดังรูปที่ 4.7(a)-(e) แสดงให้เห็นพื้นผิวการแตกหักของ Neat PLA และพอลิเมอร์ผสมที่เติม PEO 5 wt% พบว่าพื้นผิวมีลักษณะเรียบและแสดงการแตกหักแบบเปราะ อาจกล่าวได้ว่าการเติม PEO 5 wt% ยังไม่เพียงพอที่จะสามารถปรับปรุงความเหนียวของ PLA ได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าการใส่ PEG ลงใน PLA ต่ำกว่า 5 wt% ค่าการยืดตัวที่จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมจะลดลงเล็กน้อย แต่เมื่อใส่ PEG มากกว่า 5 wt% ค่าการยืดตัวที่จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น และเมื่อใส่ PEG 5-15 wt% ค่าการยืดตัวที่จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนจากการเสียรูปแบบเปราะเป็นการเสียรูปแบบเหนียวภายใต้การรับแรงดึงเมื่อ PEG เข้าใกล้ 5 wt% [43]

เมื่อพิจารณาผลของน้ำหนักโมเลกุลของ PEO พบว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเติม PEO ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงในเมทริกซ์ PLA จะช่วยเพิ่มแรงระหว่างโมเลกุล พลังงานพื้นผิว และการเกี่ยวพันของสาย

โซโม่เลกุล ทำให้สายโซ่ของ PLA เลื่อนผ่านกันได้ยากขึ้น เป็นผลให้ความต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น [43] แต่ที่ปริมาณการเติม PEO 10 wt% พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้น สายโซ่มีความยาวมากขึ้น ทำให้ความเข้ากันได้ของพลาสติกไซเซออร์และพอลิเมอร์จะลดลง แสดงดังแผนภาพในรูปที่ 4.6 และเกิดการรวมกลุ่มและแยกเฟส ดังรูปที่ 4.7(g)-(i) อย่างไรก็ตามเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้นจาก 200,000 g/mol ไปเป็น 400,000 g/mol ค่าความต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะแรงระหว่างโมเลกุล พลังงานพื้นผิว และการเกี่ยวพันของสายโซ่โม่เลกุลเพิ่มขึ้นดังที่กล่าวไปข้างต้น แต่ที่ปริมาณการเติม PEO 15 wt% พบว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้นจาก 200,000 g/mol ไปเป็น 400,000 g/mol ค่าความต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมพบว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้น ค่ามอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะ PEO ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าจะมีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่า ซึ่งทำให้ง่ายต่อการแทรกตัวเข้าไปในสายโซ่ของ PLA ดังแผนภาพในรูปที่ 4.6 ส่งผลให้แรงระหว่างโมเลกุลของ PLA ลดลงและง่ายต่อการเคลื่อนไหวและการจัดเรียงตัวของสายโซ่เมื่อได้รับแรงภายนอกมากระทำ ซึ่งเป็นเหตุให้มอดูลัสต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใส่ PEO ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Byung-Sik Park และคณะ [44] PLA ถูกผสมกับ PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันแบบขยายสายโซ่ที่ปริมาณคงที่ พบว่ามอดูลัสและความต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมของ PLA/CE-PEG เพิ่มขึ้นหลังจากเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ซึ่งอันที่จริงเป้าหมายหลักของการใส่ PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงลงในเมทริกซ์ PLA คือการลดความแข็ง (stiffness) ในขณะที่สมบัติความแข็งแรงของพอลิเมอร์ยังคงอยู่ในระดับที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามที่ปริมาณการเติม PEO 15 wt% พบว่าค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

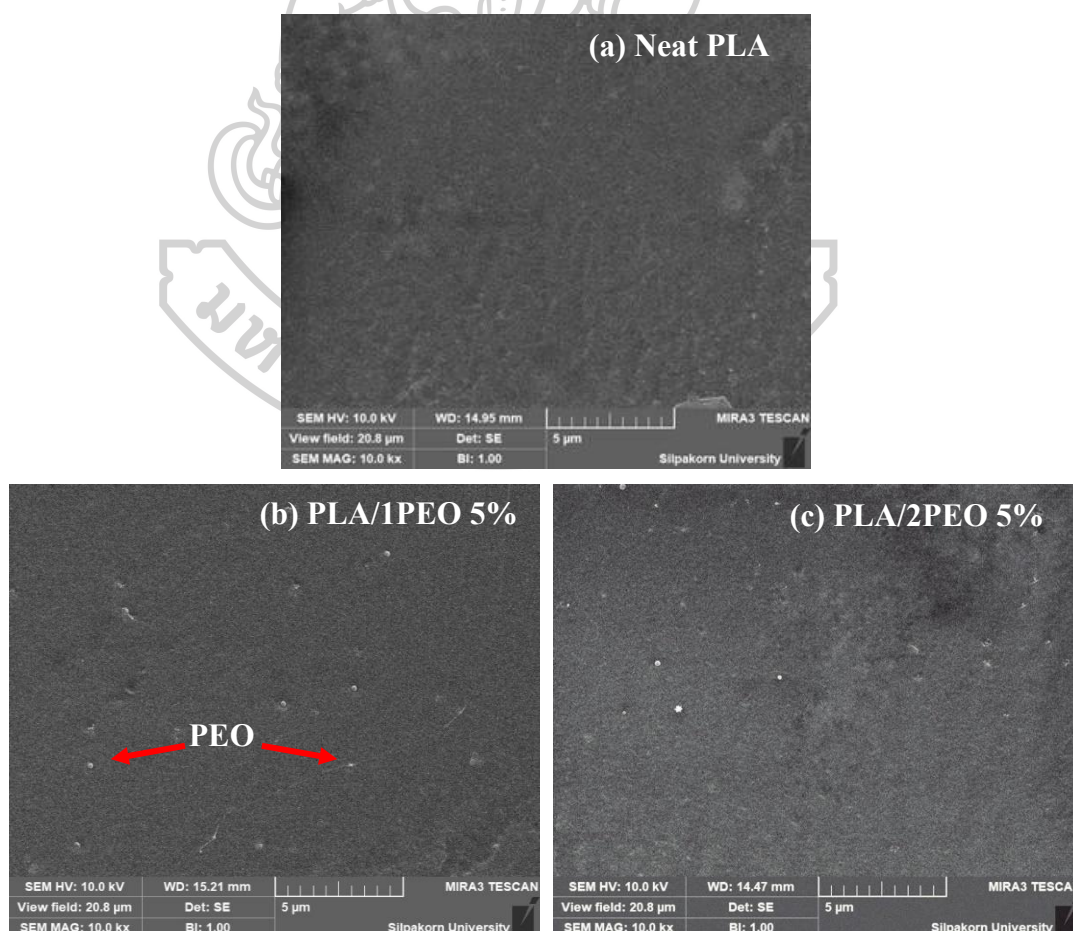


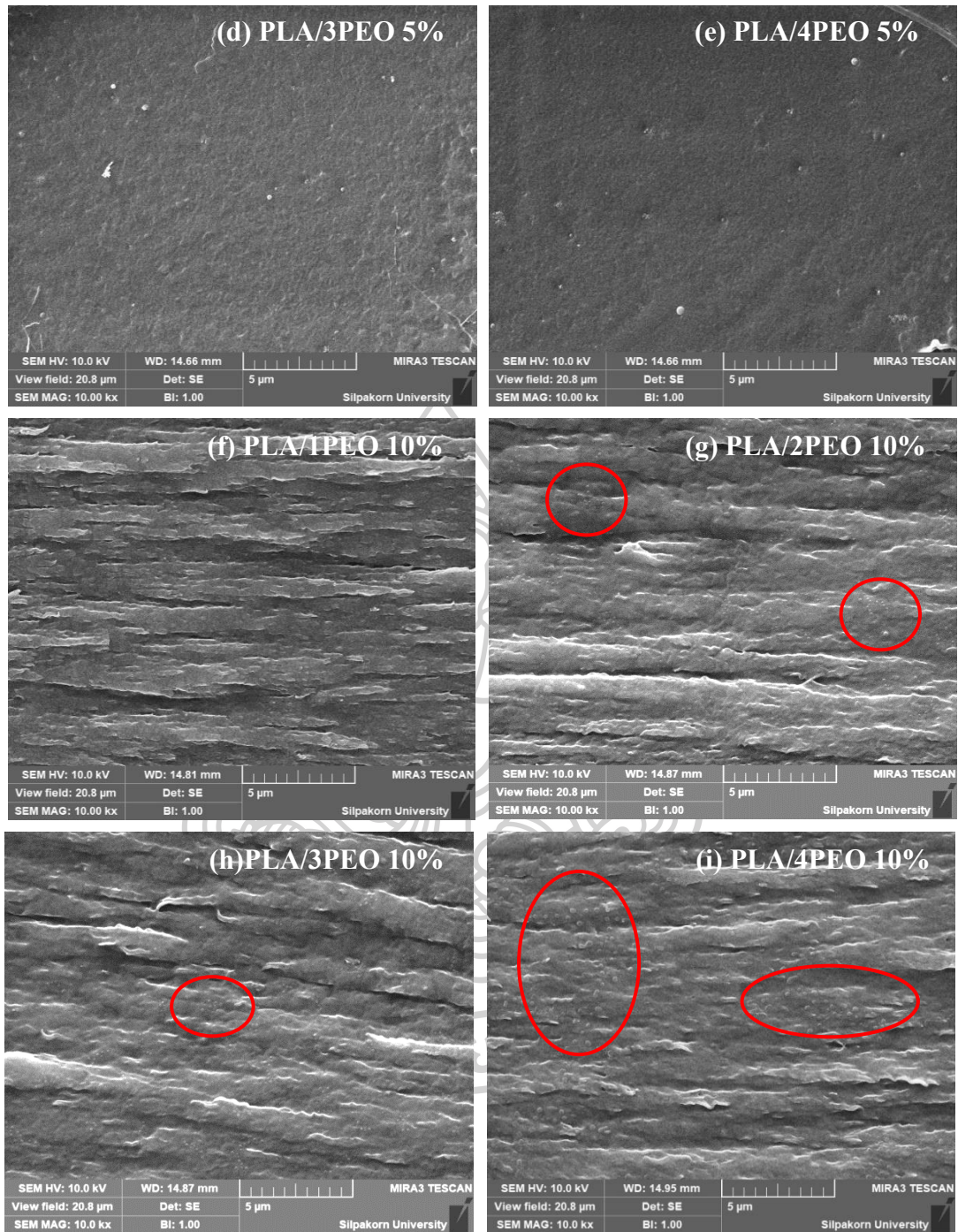
รูปที่ 4.6 แผนภาพแสดงกลไกพลาสติกไซเซชันของ PEO ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และ PEO ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงในเมทริกซ์ PLA

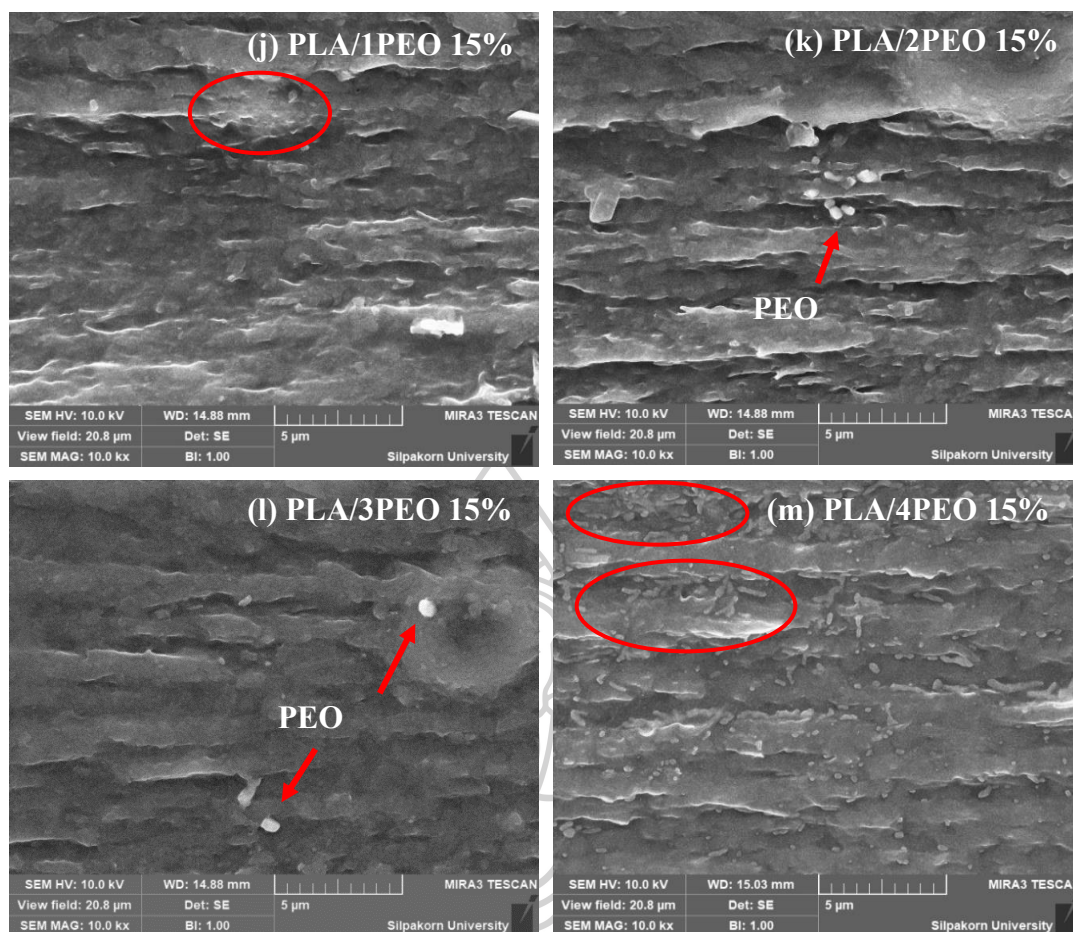
เมื่อพิจารณาค่าการยึดตัวที่จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO พบว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้น ค่าการยึดตัวที่จุดขาดมีแนวโน้มลดลง ที่ปริมาณการเติม PEO มากกว่า 5 wt% เนื่องจากเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้น จะเกิดการรวมกลุ่มกัน ความเข้ากันได้ของพลาสติกไฮเซออร์และพอลิเมอร์จะลดลง เกิดการแยกเฟส และทำให้สายโซ่เลื่อนผ่านกันได้ง่ายขึ้น ดังรูปที่ 4.7(g)–(m) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Feng-Jiao Li และคณะ [43] เขาทำการผสม PLA และ PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 6000, 10,000 และ 20,000 g/mol ในปริมาณ 10 wt% พบว่าการยึดตัวที่จุดขาดลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่า PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถปรับปรุงความเหนียวของ PLA ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่า PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถเพิ่มความเข้ากันได้กับ PLA และลดอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ PLA/PEG ทำให้การเลื่อนผ่านของสายโซ่ PLA เกิดได้ง่ายขึ้น

4.1.3 การศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO

เพื่อตรวจสอบกลไกการยึดตัวที่เพิ่มขึ้นที่เกิดจากการเติม PEO จากพื้นฐานวิทยาของพื้นผิวแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงดึงโดยใช้เทคนิค SEM และไมโครกราฟแสดงในรูปที่ 4.7







รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงดึงของฟิล์ม Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO

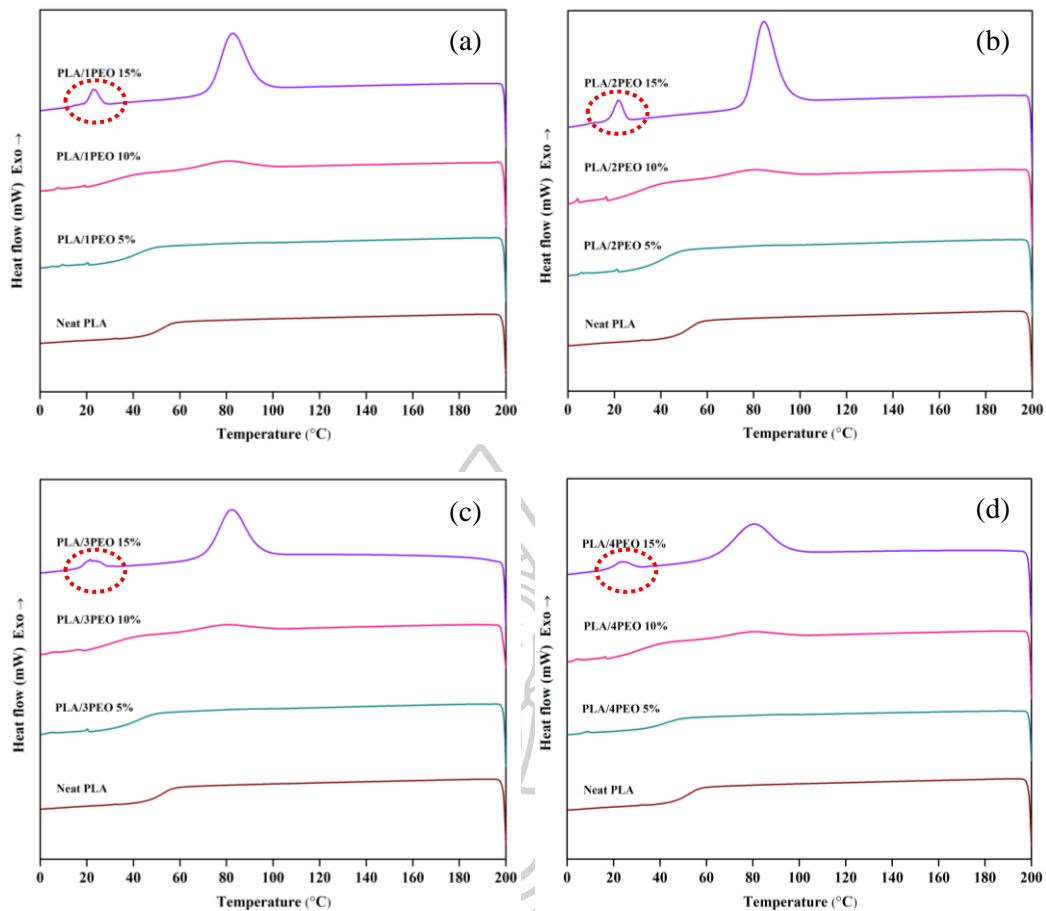
จากรูปที่ 4.7(a)-(e) แสดงภาพ SEM ของพื้นผิวแตกหักจากแรงดึงของฟิล์ม Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO 5% สังเกตได้ว่าพื้นผิวแตกหักของฟิล์ม Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO 5% มีพื้นผิวค่อนข้างเรียบ แสดงว่าชิ้นงานทดสอบมีรอยแตกแบบเปราะภายใต้แรงดึง ดังที่แสดงให้เห็นก่อนหน้านี้ว่าการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติม PEO 5 wt% นั้นไม่แตกต่างจากฟิล์ม Neat PLA นอกจากนี้จะเห็นได้จากรูปที่ 4.7(f)-(m) ว่าพื้นผิวการแตกหักจากแรงดึงของฟิล์ม PLA/PEO กลายเป็นหยากกว่าเมื่อปริมาณ PEO เพิ่มขึ้นเป็น 10-15 wt% อาจเป็นเพราะการเติม PEO สามารถปรับปรุงความคล่องตัวของสายโซ่ PLA และการเพิ่มขึ้นของปริมาณ PEO สามารถช่วยอำนวยความสะดวกในการเลื่อนผ่านของสายโซ่โมเลกุลของ PLA ซึ่งจะช่วยให้ชิ้นงานทดสอบ PLA/PEO สามารถกระจายแรงได้มากขึ้น ดังนั้นพื้นผิวแตกหักของ PLA/PEO จะหยากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนสถานะการเสียรูปจากแบบเปราะไปเป็นเหนียว (brittle-ductile transition) ภายใต้แรงดึง อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณ PEO เพิ่มขึ้นยังแสดงให้เห็นถึงการแยก

เฟสกันของ PLA และ PEO ชัดเจนขึ้นเมื่อปริมาณ PEO เพิ่มขึ้นถึง 15 wt% (รูปที่ 4.7(j)-(m)) แสดงให้เห็นถึงการผสมกันได้บางส่วน (Partial miscible blend) ซึ่งก็ยังคงมีความสามารถในการปรับปรุงความเหนียวของ PLA ได้ (รูปที่ 4.5(c)) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้กล่าวว่าสังเกตเห็นการแยกเฟสของ PEG กับ PLA เมื่อความเข้มข้นของ PEG สูงกว่า 10 wt% [46]

เมื่อพิจารณาพื้นฐานวิทยาของพื้นผิวแตกหักจากแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่มีน้ำหนักโมเลกุลของ PEO แตกต่างกันได้ สามารถสังเกตได้จากรูปที่ 4.7(f)-(i) และ 4.7(j)-(m) ว่าพื้นผิวการแตกหักของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO จะเรียบเนียนขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้นจาก 100,000 เป็น 400,000 g/mol ตามที่รายงานโดย Feng-Jiao Li และคณะ [6] ว่าประสิทธิภาพในการ plasticizing ของ PEO จะลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้น เนื่องจากการใส่ PEO ที่น้ำหนักโมเลกุลสูงจะลดความยืดหยุ่นของสายโซ่ PLA สามารถชะลอการเลื่อนผ่านกันของสายโซ่โมเลกุลของ PLA ได้ และลดความสามารถของ PLA/PEO ต่อการเสียรูปพลาสติก (Plastic deformation) นอกจากนี้เมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้นยังพบการรวมกลุ่มกันของ PEO ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ดังรูปที่ 4.7(g)-(l) และพบอนุภาคยวรีเป็นท่อนๆ ดังรูปที่ 4.7(m) การรวมตัวกันของอนุภาค PEO นี้ ทำให้ PEO กระจายตัวไม่สม่ำเสมอในเมทริกซ์ PLA ดังนั้นจึงส่งผลให้ ค่าการยึดตัวที่จุดขาดลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้น (รูป 4.5(c))

4.1.4 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)

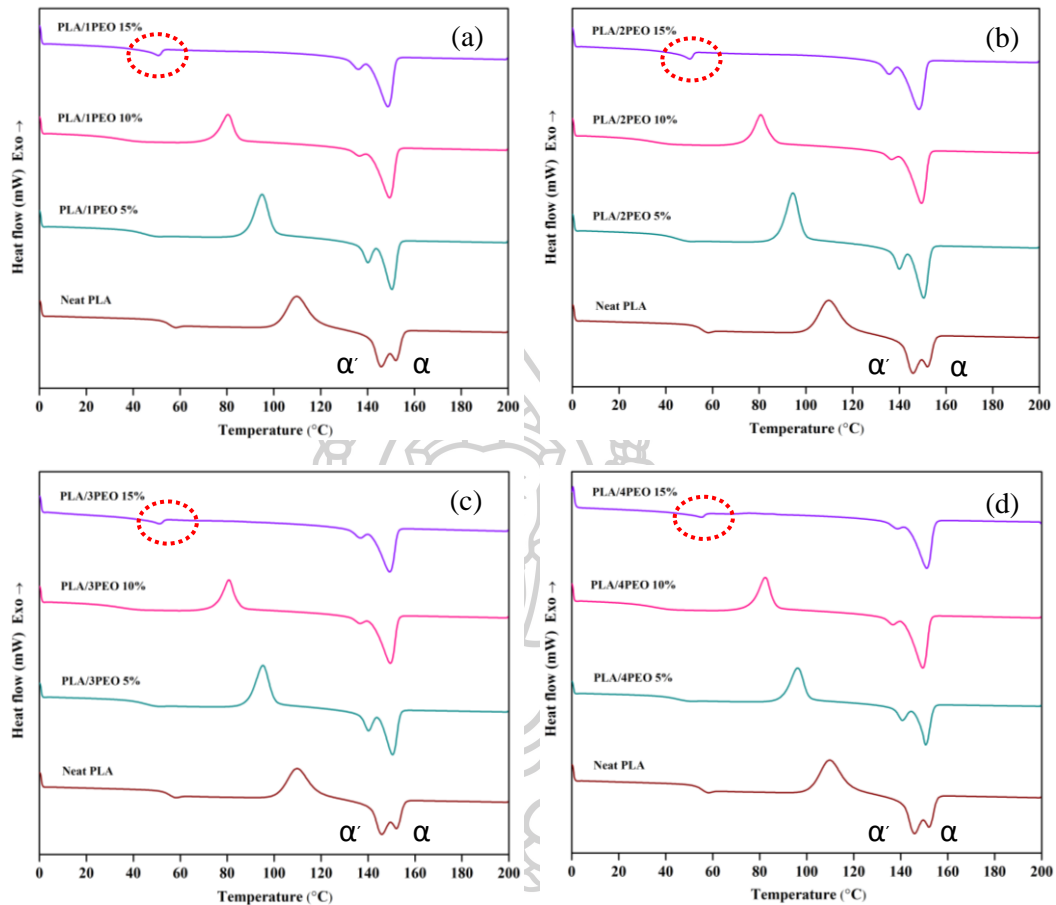
เมื่อวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพมักจะมีความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องเสมอ ซึ่งเทคนิค Differential Scanning Calorimetry หรือ DSC เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของวัสดุ โดยทำการวัดปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุเมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่ศึกษาได้โดยใช้ DSC เช่น อุณหภูมิการหลอมเหลว การเกิดผลึก และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PEO เทคนิคนี้จึงสามารถบอกพฤติกรรมทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมโดยอาศัยอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ไม่เท่ากันระหว่างพอลิเมอร์แต่ละชนิดรวมทั้งสามารถบอกพฤติกรรมการตกผลึกของพอลิเมอร์ผสมได้อีกด้วย



รูปที่ 4.8 DSC thermogram ในขั้น cooling ของ Neat PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO :
(a) 1PEO, (b) 2PEO, (c) 3PEO และ (d) 4PEO

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณ PEO ต่อสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ด้วยเทคนิค DSC จาก DSC thermogram ในรูป 4.8(a)-(d) และข้อมูลทางความร้อนที่สำคัญแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 พบว่าไม่พบพีคของการตกผลึก (T_c) ใน Neat PLA เนื่องจาก PLA มีความเป็นอสัณฐาน [6] แต่เมื่อเติม PEO อย่างน้อย 10 wt% ลงในเมทริกซ์ PLA จะสังเกตเห็น T_c (~ 79 °C) และเมื่อเติม PEO 15 wt% พบว่า T_c และ ΔH_c มีค่าเพิ่มขึ้น โดย T_c และ ΔH_c ที่เพิ่มขึ้นนี้ แสดงให้เห็นว่าการเติม PEO สามารถช่วยปรับปรุงการตกผลึกของ PLA ได้ เนื่องจาก PEO จะเข้าไปแทรกกระหว่างสายโซ่ PLA ทำให้สายโซ่ของ PLA เคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้นและเร่งอัตราการตกผลึก ซึ่งทำให้ PLA สามารถตกผลึกในระดับที่มากขึ้นเมื่อเย็นตัวลงและตกผลึกที่อุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งคล้ายกับพฤติกรรมการตกผลึกของ PLA ผสมกับ PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 g/mol ที่รายงานโดย Feng-Jiao Li และคณะ [6] นอกจากนี้ยังพบพีคการตกผลึกขนาดเล็ก (ดังแสดงในวงกลมของรูปที่ 4.8(a)-(d)) สามารถ

สังเกตได้เมื่อเติม PEO มากกว่า 10 %wt อาจเป็นเพราะ PEO เริ่มเกิดการแยกเฟสออกจากระบบผสม

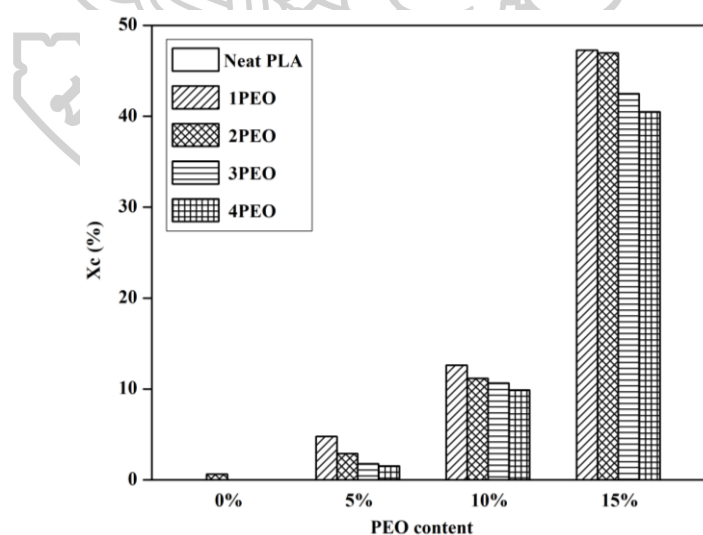


รูปที่ 4.9 DSC thermogram ในขั้น second heating ของ Neat PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO : (a) 1PEO, (b) 2PEO, (c) 3PEO และ (d) 4PEO

จาก DSC thermogram ในรูปที่ 4.9(a)-(d) สังเกตเห็นว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ลดลงจาก 54.15 °C ของ Neat PLA ไปที่ ~ 35 °C เมื่อเติม PEO 10 wt% แต่เมื่อเติม PEO 15 wt% นั้นเห็น T_g ไม่ชัดเจน การค้นพบนี้คล้ายกับงานวิจัยอื่นๆ พบว่าการใส่ PEG หรือ PEO ใน PLA ระหว่างการผสมจะทำให้ T_g ลดลง [8, 45, 47, 48] เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการตกผลึกเมื่อให้ความร้อน (T_{cc}) พบว่าลดลงจาก 109.86 °C ของ Neat PLA ไปที่ ~ 80 °C เมื่อเติม PEO 10 wt% แต่เมื่อเติม PEO 15 wt% นั้นไม่สามารถสังเกตเห็น T_{cc} ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าการเติม PEG ลงใน PLLA จะช่วยอำนวยความสะดวกในกระบวนการตกผลึกเมื่อให้ความร้อน โดยค่า T_{cc} ของ PLLA จะลดลง เป็นข้อบ่งชี้เกี่ยวกับความเข้ากันได้ระหว่างเฟส PEG และ PLLA [49] นอกจากนี้ Wang คณະ ได้สังเกตเห็นผลลัพธ์ที่คล้ายคลึงกันของการลดลงของ T_{cc} ควบคู่ไปกับการ

เปลี่ยนแปลงของ T_g [50] การลดลงของ T_g และ T_{cc} นี้แสดงให้เห็นว่าระบบผสมนี้เป็นการผสมเข้ากันได้บางส่วน (partially miscible system) [44]

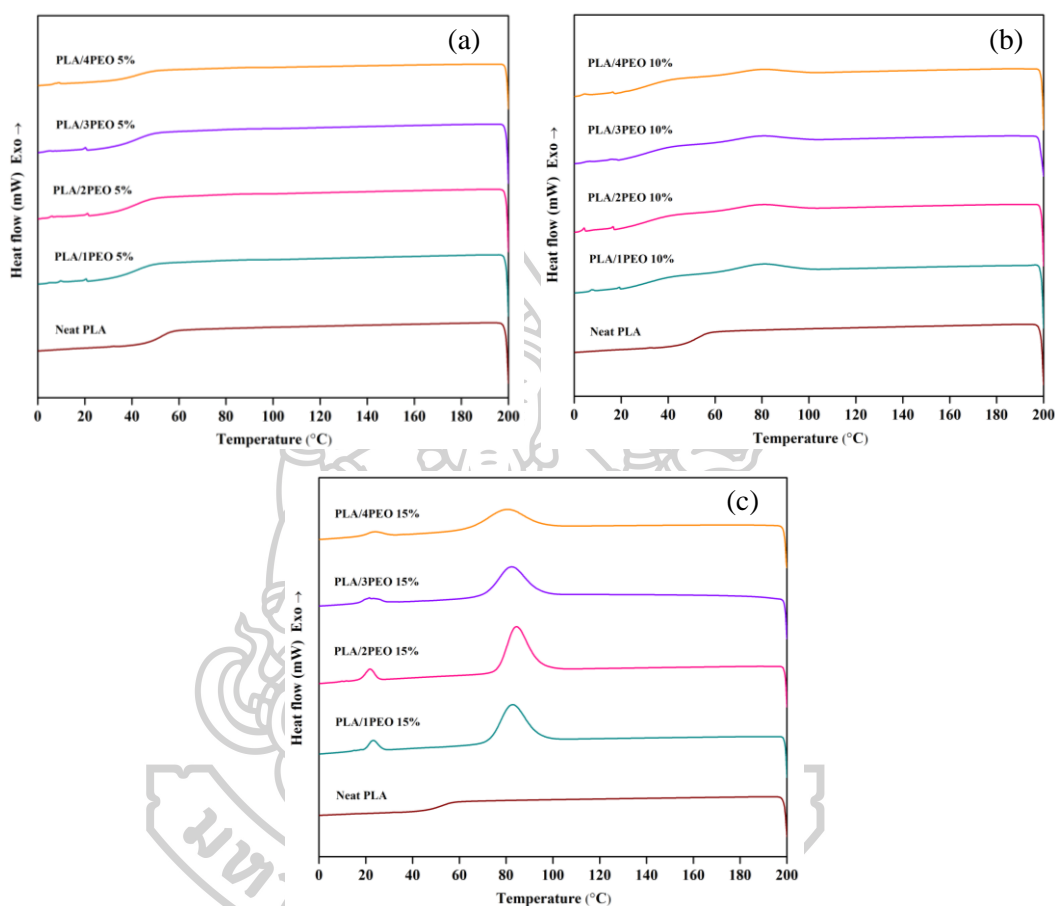
ในกรณีที่อุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) ของพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อเทียบกับ Neat PLA และแสดง 2 พีค ซึ่งแสดงถึงการมีผลึก 2 รูปแบบ คือ α และ α' โดยผลึกรูปแบบ α' เป็นผลึกที่มีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ (disorderly structure) และหลอมที่อุณหภูมิต่ำกว่า (T_{m1}) หลังจากนั้นจะเกิดการตกผลึกอีกครั้งในรูปแบบ α จะหลอมที่อุณหภูมิสูงกว่า (T_{m2}) [51] นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นพีค T_m เล็กๆ ในพอลิเมอร์ผสม ซึ่งใกล้เคียงกับ T_m ของ PEO (ในตารางที่ 4.2) เมื่อใส่ PEO มากกว่า 10 wt% (วงกลมในรูปที่ 4.9(a)-(d)) อาจจะเป็นเพราะว่า PEO เกิดการแยกเฟสออกจากพอลิเมอร์ผสม เนื่องจาก PEO เกิดการรวมกลุ่ม (Agglomerate) กันดังภาพ SEM รูปที่ 4.7(j)-(m) อีกทั้งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [6] พบว่าการแยกเฟสของ PEG ออกจากพอลิเมอร์ผสมมักเกิดขึ้นเมื่อปริมาณ PEG เกิน 10 wt% เช่นกัน และเมื่อพิจารณาความเป็นผลึกดังรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อปริมาณ PEO เพิ่มขึ้น ปริมาณผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจาก PEO สามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) ให้กับ PLA ดังนั้น PEO สามารถทำหน้าที่ได้ทั้งพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งจะช่วยลดอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และเป็นสารก่อผลึก ซึ่งช่วยเพิ่มอัตราการตกผลึกเนื่องด้วยสาเหตุจากการเพิ่มการเคลื่อนที่ของสายโมเลกุล PLA ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Debarghya Saha และคณะ และ Annauniv Santhoskumar และคณะ [9, 52]



รูปที่ 4.10 แสดงความเป็นผลึกของ Neat PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO

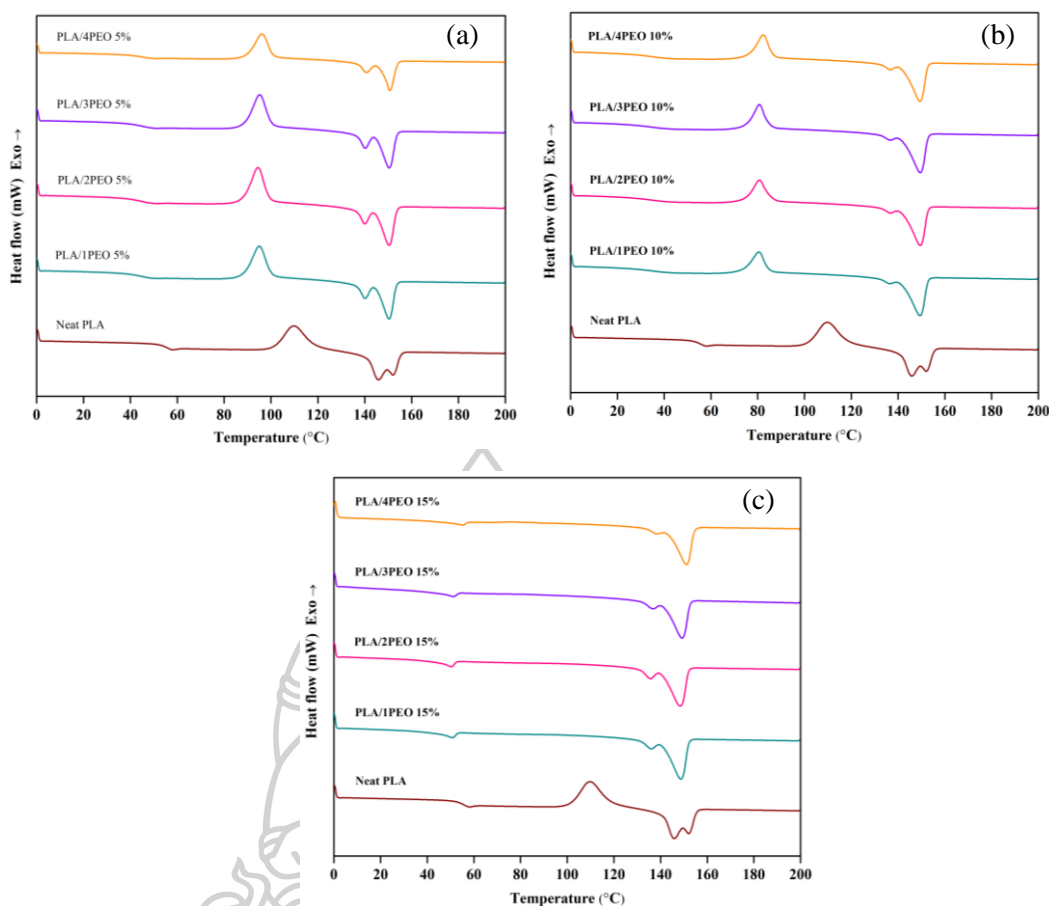
เมื่อพิจารณาน้ำหนักโมเลกุลของ PEO จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า T_c , ΔH_c และ ΔH_m ของ pure PEO มีแนวโน้มลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่า PEO ที่มีน้ำหนัก

โมเลกุลสูงจะลดความสามารถในการตกผลึกของพอลิเมอร์ผสมเมื่อปริมาณ PEO คงที่ ทั้งนี้เป็นเพราะ PEO ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าจะมีขนาดโมเลกุลที่เล็กและสายโซ่โมเลกุลสั้น จึงสามารถแทรกเข้าไปในโมเลกุลของ PLA ได้ง่ายกว่าและสามารถทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ที่ดีบน PLA อย่างไรก็ตาม T_m ของ pure PEO ไม่แตกต่างกันตามน้ำหนักโมเลกุลของ PEO ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.11 DSC thermogram ในขั้น cooling ของ Neat PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO :
(a) 5 wt%, (b) 10 wt% และ (c) 15 wt%

เมื่อพิจารณาผลของน้ำหนักโมเลกุลของ PEO ต่อสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO จาก DSC thermogram ในรูปที่ 4.11(a)-(c) พบว่าไม่สังเกตเห็น T_c ที่ปริมาณการเติม PEO 5 wt% และ T_c มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้น ที่ปริมาณการเติม PEO 10 และ 15 wt% แต่ ΔH_c มีแนวโน้มลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้น แสดงว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้นจะลดความสามารถในการตกผลึกของพอลิเมอร์ผสม เนื่องจาก PEO น้ำหนักโมเลกุลต่ำจะแทรกเข้าไปในโมเลกุลของ PLA และสามารถจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ง่ายกว่า PEO ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง แสดงดังตารางที่ 4.2 และแผนภาพรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.12 DSC thermogram ในขั้น second heating ของ Neat PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO : (a) 5 wt%, (b) 10 wt% และ (c) 15 wt%

จาก DSC thermogram ในรูปที่ 4.12(a) และ 4.12(b) พบว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้น T_g และ T_m ไม่แตกต่างกันมากนัก และแสดง T_m 2 พิก ซึ่งแสดงถึงการมีผลึก 2 รูปแบบ คือ α และ α' ดังที่กล่าวมาข้างต้น แต่ T_{cc} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้น และในรูปที่ 4.12(c) ที่ปริมาณการเติม PEO 15 wt% พบว่า T_{m2} คืออุณหภูมิในการหลอมผลึก PLA ที่มีโครงสร้างสมบูรณ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจาก PEO ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ไปรบกวนการเกิดผลึกของ PLA จึงทำให้เกิดผลึกที่มีโครงสร้างสมบูรณ์มากกว่า ดังนั้นจึงต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นในการหลอมผลึก PLA

นอกจากนี้ปริมาณผลึกมีแนวโน้มลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO สูงขึ้น ความยาวสายโซ่จะเพิ่มขึ้น ในขณะที่จำนวนหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ลดลงและอาจเพิ่มความเกี่ยวพันกันของสายโซ่ PEO และ PLA ส่งผลให้ความเสถียรและความเข้ากันได้ของ PEO และ PLA ลดลง ดังรูปที่ 4.7(m) การเติม PEO 400,000 g/mol ปริมาณ 15 wt% นั้น PEO จะแยกเฟสออกจาก PLA มีรูปร่างลักษณะยาวรีเป็นท่อนๆ ปริมาณผลึกจึงลดลง (ตารางที่ 4.2)

ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Byung-Sik Park และคณะ [44] พบว่าการเติม PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ($M_w = 35,000 \text{ g/mol}$) ลงในเมทริกซ์ PLA ส่งผลให้พีคการตกผลึกชัดเจนขึ้น แสดงให้เห็นว่า PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีผลต่อความสามารถในการตกผลึกของ PLA เหมือนเป็นพลาสติกไซเซอร์ และการเติม PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (PEG ที่ขยายสายโซ่ด้วย MDI) จะพบทั้ง T_m ของ PLA บริสุทธิ์ และ T_m ของ PEG ซึ่งบ่งชี้ว่า PLA และ PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงนั้นเข้ากันไม่ได้ทางอุณหพลศาสตร์ อย่างไรก็ตาม PEO ที่น้ำหนักโมเลกุลสูงยังคงมีความสามารถในการตกผลึกได้ดีในระดับหนึ่ง อาจเป็นไปได้ว่า PEO ที่น้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้เกิดเฟสผลึกของ PEO เองจะไปเชื่อมต่อกับส่วนที่เคลื่อนไหวได้น้อยของ PEO และสะดวกต่อการจัดเรียงตัวเป็นผลึก [53]

ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลที่ได้จาก DSC ของ Neat PLA, pure PEO และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO

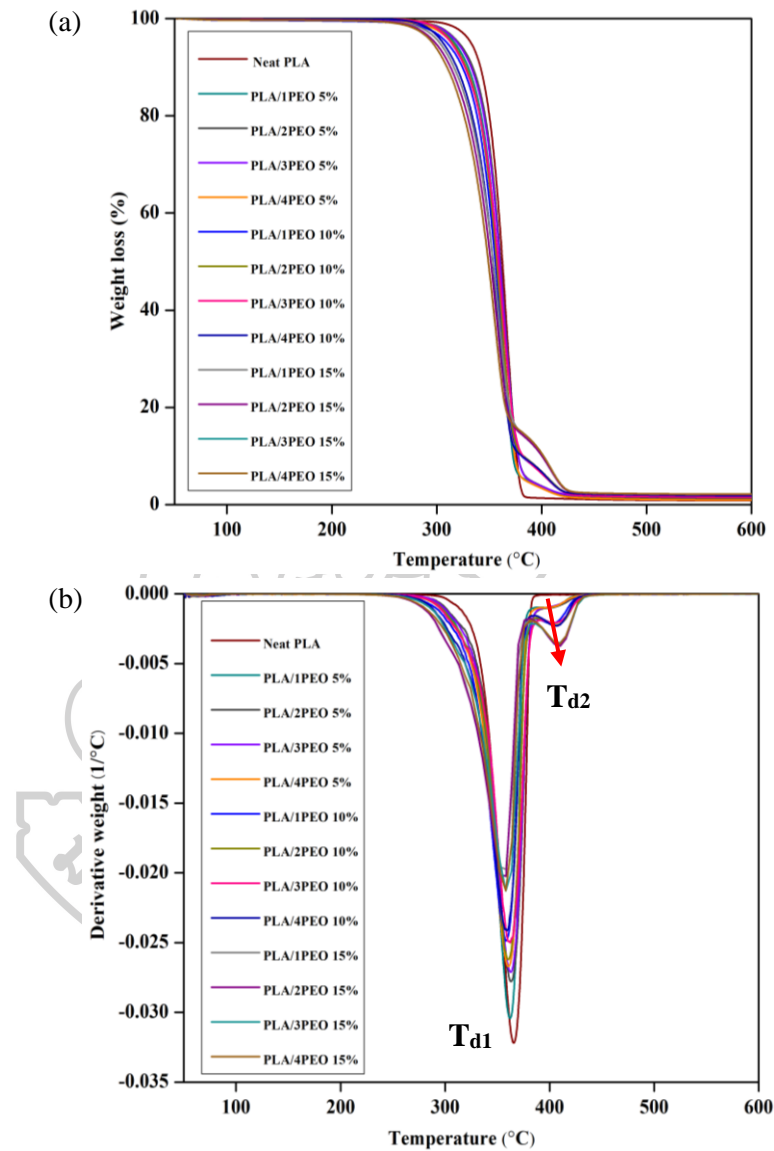
Samples	T_g (°C)	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)	T_{cc} (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)
Neat PLA	54.15	-	-	109.86	146.00	152.04	32.92	0.63
PLA/1PEO 5%	43.51	-	-	94.94	140.11	150.40	34.78	4.78
PLA/2PEO 5%	43.15	-	-	94.46	140.10	150.38	34.84	2.91
PLA/3PEO 5%	43.86	-	-	95.29	140.12	150.58	34.16	1.79
PLA/4PEO 5%	43.66	-	-	96.08	140.88	150.70	25.44	1.54
PLA/1PEO 10%	35.71	79.68	5.22	80.51	136.54	149.38	34.26	12.61
PLA/2PEO 10%	34.17	79.67	4.86	80.69	136.87	149.54	33.94	11.18
PLA/3PEO 10%	34.60	79.68	5.03	80.71	136.54	149.54	33.91	10.65
PLA/4PEO 10%	35.60	79.67	4.38	82.37	136.61	149.38	33.01	9.89
PLA/1PEO 15%	-	23.13, 82.65	2.45, 27.92	-	136.18	148.71	37.59	47.25
PLA/2PEO 15%	-	21.80, 84.19	2.88, 28.18	-	135.67	148.40	37.35	46.95
PLA/3PEO 15%	-	21.61, 82.27	2.50, 25.93	-	136.84	149.22	33.80	42.48
PLA/4PEO 15%	-	23.60, 80.38	1.92, 22.16	-	138.57	151.04	32.21	40.49
1PEO	-	45.26	134.07	-	63.22	-	137.46	-
2PEO	-	44.61	131.28	-	63.44	-	135.54	-
3PEO	-	42.02	123.25	-	63.40	-	127.38	-
4PEO	-	38.04	122.91	-	62.74	-	127.09	-

4.1.5 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ด้วยเทคนิค

Thermal Gravimetric Analysis (TGA)

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เราจะใช้เทคนิค Thermal Gravimetric Analysis หรือ TGA โดยการวัดน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ TGA เพื่อศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของ

พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PEO โดยดูจากอุณหภูมิเริ่มสลายตัว (Onset temperature (T_{onset})), อุณหภูมิสลายตัวสูงสุด (Degradation temperature (T_d)) และอุณหภูมิสลายตัวสุดท้าย (Endset temperature (T_{endset}))



รูปที่ 4.13 แสดงเทอร์โมแกรมของ Neat PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO :

(a) TGA และ (b) DTG

ตารางที่ 4.3 แสดงข้อมูลที่ได้จาก TGA ของ Neat PLA, pure PEO และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO

Samples	T _{onset} (°C)	T _{d1} (°C)	T _{d2} (°C)	T _{endset} (°C)
Neat PLA	347.84	365.29	-	377.28
PLA/1PEO 5%	342.86	363.14	~ 400	~ 420-422
PLA/2PEO 5%	343.77	364.13		
PLA/3PEO 5%	342.81	363.28		
PLA/4PEO 5%	340.85	361.82		
PLA/1PEO 10%	337.03	360.54	404.36	420.75
PLA/2PEO 10%	338.37	360.97	406.17	421.16
PLA/3PEO 10%	338.93	362.15	405.20	421.59
PLA/4PEO 10%	333.38	358.94	406.11	419.76
PLA/1PEO 15%	331.66	359.14	408.91	422.48
PLA/2PEO 15%	329.65	357.90	408.66	421.82
PLA/3PEO 15%	326.42	355.80	409.17	422.34
PLA/4PEO 15%	326.78	355.92	409.31	422.03
1PEO	386.81	-	405.79	421.40
2PEO	385.57	-	404.28	420.72
3PEO	384.65	-	405.29	420.86
4PEO	385.08	-	404.77	421.60

เทอร์โมแกรมของ Neat PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO แสดงในรูปที่ 4.13 และข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA ของ Neat PLA, pure PEO และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO แสดงดังตารางที่ 4.3

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณ PEO ต่อเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO จากเทอร์โมแกรมและตารางที่ 4.3 แสดงอุณหภูมิสลายตัวสูงสุด (Degradation temperature (T_d)) ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ปรากฏ 2 ชั้น โดยชั้นที่ 1 เป็นการสลายตัวของ PLA (T_{d1}) ที่อุณหภูมิ 356-364 °C และชั้นที่ 2 เป็นการสลายตัวของ PEO (T_{d2}) ที่อุณหภูมิ 404-409 °C และพบว่าอุณหภูมิเริ่มสลายตัว (Onset temperature (T_{onset})) และ T_{d1} ของพอลิเมอร์ผสมต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ Neat PLA และเมื่อปริมาณของ PEO เพิ่มขึ้น T_{onset} และ T_{d1} เลื่อนไปที่อุณหภูมิต่ำลง เนื่องจาก

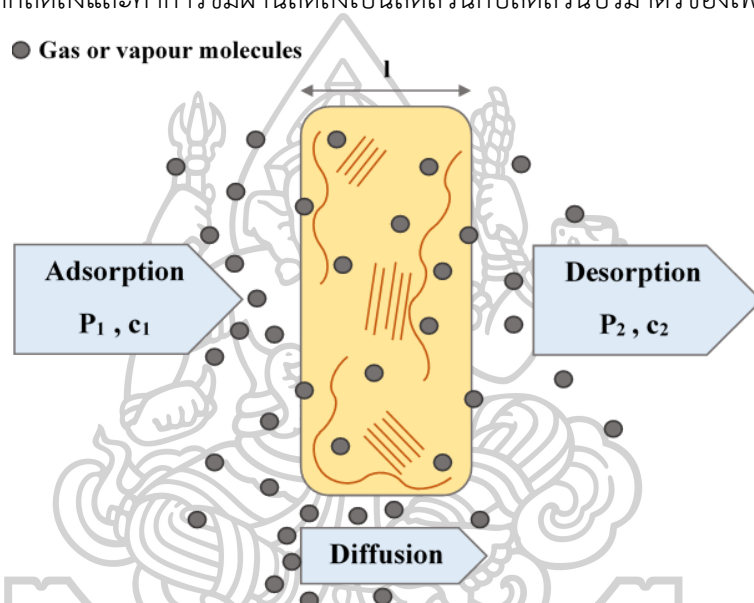
เมื่อปริมาณ PEO เพิ่มขึ้น จะแสดงผลของพลาสติกไซเซอร์มากขึ้น คือทำให้โมเลกุลของ PLA สามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น จึงกลายเป็นกลไกหลักที่ช่วยในการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม [49] และอุณหภูมิการสลายตัวของเฟส PEO นั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของ PEO เพิ่มขึ้น เนื่องจากเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงของ PEO ซึ่งงานวิจัยก่อนหน้านี้กล่าวว่าเสถียรภาพทางความร้อนของ PEO บริสุทธิ์นั้นสูงกว่า PLA บริสุทธิ์ ทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์ม PLA ค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PEO เพิ่มขึ้น [8] อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ผสมที่เติม PEO 5 wt% มี T_{d2} (~ 400 °C) ต่ำกว่า T_d ของ PEO (~ 404 °C) อาจเป็นเพราะว่าปริมาณการใส่ PEO น้อยเกินไป นอกจากนี้พบว่า T_{endset} ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับ Neat PLA แต่มีค่าไม่แตกต่างกัน เมื่อปริมาณ PEO เพิ่มขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกับ T_{endset} ของ pure PEO ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ M. Bijarimi [45] ทำการผสม PLA กับ PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 1,000 g/mol พบว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG-1,000 แสดงอุณหภูมิเริ่มสลายตัวและอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดต่ำกว่าแต่มีอุณหภูมิการสลายตัวสุดท้ายสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ Neat PLA

เมื่อพิจารณาผลของน้ำหนักโมเลกุลของ PEO ต่อเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO พบว่า PEO ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกัน T_{onset} , T_{d2} และ T_{endset} มีค่าไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4.3) แต่ T_{onset} และ T_{d1} ของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO สูงขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO สูงขึ้น ความยาวสายโซ่จะเพิ่มขึ้น ในขณะที่จำนวนหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ลดลงและอาจเพิ่มความเกี่ยวพันกันของสายโซ่ PEO และ PLA ส่งผลให้ความเสถียรและความเข้ากันได้ของ PEO และ PLA ลดลง [6] ซึ่งส่งผลไปยังความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่ลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO สูงขึ้นดังที่แสดงในรูปที่ 4.10 โดย Mohapatra และคณะ กล่าวว่า การที่ความเป็นผลึกรวมของพอลิเมอร์ลดลงนี้จะทำให้พอลิเมอร์สลายตัวได้ง่ายขึ้น [54] ส่วน T_{d2} และ T_{endset} ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าไม่แตกต่างกันเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO สูงขึ้น

4.1.6 การศึกษาความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO

ปัจจัยหลายประการสามารถมีอิทธิพลต่อสมบัติการกั้นผ่าน (barrier properties) ของวัสดุบรรจุภัณฑ์ เช่น การสัมผัสอาหารและสภาพแวดล้อม ซึ่งแนวความคิดของการซึมผ่านก๊าซและไอน้ำมักจะเกี่ยวข้องกับการประเมินสมบัติการกั้นผ่านของวัสดุพลาสติก ในวัสดุที่ไม่มีข้อบกพร่อง เช่น รูหรือรอยแตก กลไกหลักสำหรับการไหลของก๊าซและไอน้ำผ่านฟิล์มหรือสารเคลือบเป็นการแพร่แบบกระตุ้น หมายความว่าตัวซึมผ่านจะละลายในเมทริกซ์ฟิล์มด้านที่มีความเข้มข้นสูงกว่า แพร่ผ่านฟิล์มไปยังด้านที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าและระเหยออกจากพื้นผิว โดยกลไกทั่วไปสำหรับก๊าซหรือไอน้ำที่แพร่ผ่านฟิล์มพลาสติกแสดงในรูปที่ 4.14 สำหรับฟิล์มพอลิเมอร์ที่เป็นเนื้อเดียวกันที่มีความหนา l

และ p เป็นความดันคงที่ (โดย $p_1 > p_2$) และ c คือ ความเข้มข้นคงที่ (โดย $c_1 > c_2$) ซึ่งความแตกต่างในการละลายจำเพาะของก๊าซอาจมีอิทธิพลต่อการแพร่ของก๊าซทั่วทั้งแผ่นฟิล์ม โดยขั้นที่สองของปรากฏการณ์การซึมผ่าน การแพร่จะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และขั้วของโมเลกุลของก๊าซที่เคลื่อนที่ผ่านฟิล์มและความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ ระดับของการเชื่อมขวางและการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ของเมทริกซ์พอลิเมอร์ตามรายงานจาก Valentina Siracusa และคณะ [55] โมเลกุลของก๊าซไม่สามารถซึมผ่านผลึกของพอลิเมอร์ได้เพราะว่ามันไม่ละลายในวัสดุ ดังนั้นการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์ก็ผลึกจะอยู่ในบริเวณอสัณฐาน การลดลงของการซึมผ่านเกิดจากเส้นทางคดเคี้ยวขนาดใหญ่ระหว่างผลึกลดลงและค่าการซึมผ่านลดลงเป็นสัดส่วนกับสัดส่วนปริมาตรของเฟสผลึก [56]

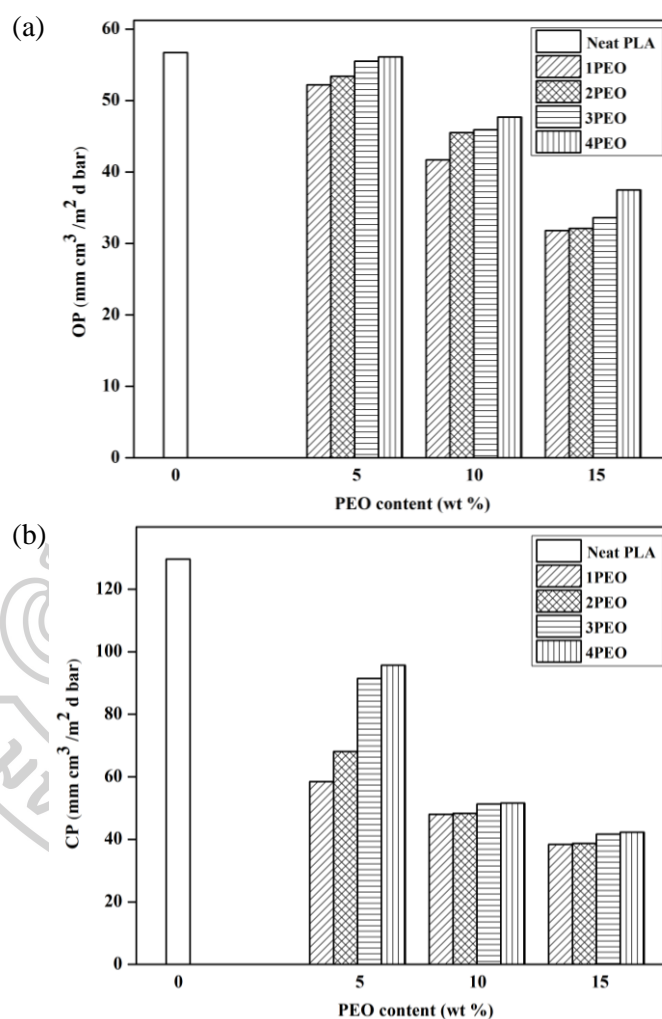


รูปที่ 4.14 แสดงกลไกทั่วไปสำหรับก๊าซหรือไอน้ำที่แพร่ผ่านฟิล์มพลาสติก

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และไอน้ำ เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความสดของไม้ดอก โดยก๊าซเหล่านี้อาจถ่ายโอนผ่านผนังบรรจุภัณฑ์ส่งผลต่ออายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการศึกษากการซึมผ่านของก๊าซจึงเป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจและค้นหาบรรจุภัณฑ์ที่ดีที่สุดเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายในระหว่างการขนส่ง [57]

สมบัติการกั้นก๊าซออกซิเจนของบรรจุภัณฑ์มีบทบาทสำคัญในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ โดยค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen permeability coefficients (OP)) เป็นตัวบ่งชี้ปริมาณออกซิเจนต่อหน่วยพื้นที่และเวลาที่ซึมผ่านวัสดุบรรจุภัณฑ์ ($\text{mm cm}^3/\text{m}^2 \text{ d bar}$) ดังนั้นเมื่อบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพอลิเมอร์มีค่า OP ต่ำ ความดันออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์ลดลงจนถึงจุดที่เกิดการชะลอกการเกิดออกซิเดชัน จะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้ โดยทั่วไปแล้วพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น พอลิแลคติกแอซิด (PLA) เป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีความนิยมนำมาใช้ในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งแสดงค่าอัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน (OTR) ต่ำกว่าพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ใช้ในงาน

เดียวกันอย่างเช่น พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต (PET) และพอลิสไตรีนที่มีการจัดเรียงโมเลกุล (OPS) [56] ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการเติม PEO ในปริมาณต่างๆ และ PEO ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ ต่อความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน (OP) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CP) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO เปรียบเทียบกับฟิล์ม Neat PLA โดยแสดงดังรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.4

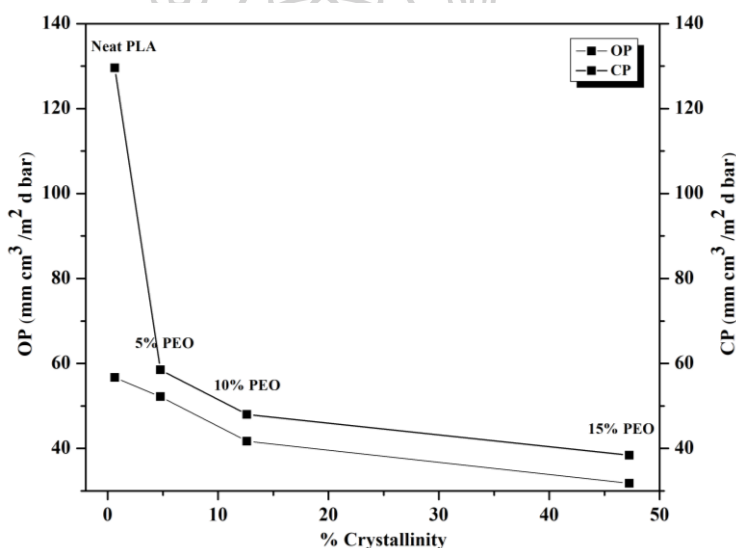


รูปที่ 4.15 ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซผ่านฟิล์ม Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO :

(a) Oxygen permeability และ (b) Carbon dioxide permeability

จากรูปที่ 4.15(a) และตารางที่ 4.4 พบว่าค่า OP ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO มีค่าต่ำกว่าค่า OP ของฟิล์ม Neat PLA และเมื่อพิจารณาผลของปริมาณ PEO พบว่าค่า OP มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ PEO เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากเมื่อปริมาณ PEO เพิ่มขึ้น ปริมาณผลึกของ PLA ก็เพิ่มขึ้นด้วย แสดงดังกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านก๊าซกับปริมาณผลึกดังรูปที่ 4.16 เพราะ PEO ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) ให้กับ PLA ดังที่กล่าวไปก่อนหน้า ซึ่งปริมาณ

ผลึกที่เพิ่มขึ้นนี้จะเป็นตัวขัดขวางและเพิ่มเส้นทางการแพร่ของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ส่งผลให้ค่า OP ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kurniawan Yuniarto และคณะ [58] ทำการผสม PLA กับ PEG-400 พบว่าการเติมพลาสติกไซเซอร์ PEG ทำให้ OTR ลดลง การลดลงของ OTR เมื่อพลาสติกไซเซอร์เพิ่มขึ้นเนื่องจากพอลิเมอร์มีการเกิดผลึกเพิ่มขึ้น และ Candra Irawan และคณะ [47] กล่าวว่าระดับความเป็นผลึกมีผลอย่างมากต่อสมบัติการกั้นก๊าซออกซิเจน ระดับผลึกที่เพิ่มขึ้นของฟิล์ม PLA ที่ถูกพลาสติกไซต์ด้วย PEG-400 จะลดจำนวนการซึมผ่านของออกซิเจน อาจกล่าวได้ว่าบริเวณผลึกมีบทบาทในการป้องกันการแพร่ของออกซิเจนผ่านฟิล์ม PLA ซึ่งการวิเคราะห์ WAXS ส่งผลให้เห็นการเกิดผลึกรูปแบบ α ซึ่งสร้างผลึกที่เสถียรเนื่องจากปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ และส่งผลให้สมบัติการกั้นดีขึ้น ซึ่งรูปร่างและขนาดของผลึก โครงสร้างผลึกและระดับของผลึก มีอิทธิพลสำคัญต่อกระบวนการซึมผ่าน



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านก๊าซกับปริมาณผลึกของฟิล์ม Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO

เมื่อพิจารณาผลของน้ำหนักโมเลกุลของ PEO ต่อค่าการซึมผ่านออกซิเจนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO พบว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้น ค่า OP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.15(a) เนื่องจากเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณผลึกลดลง (รูปที่ 4.10) เป็นเหตุให้มีปริมาตรอิสระในพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น ก๊าซออกซิเจนจึงแพร่ผ่านได้มากขึ้น โดย Lihong Bao และคณะ [59] ทำการศึกษาการซึมผ่านก๊าซของฟิล์ม PLA กล่าวว่านอกจากการเสื่อมสภาพทางกายภาพและประวัติทางความร้อนของพอลิเมอร์แล้ว การแพร่และการดูดซับก๊าซในพอลิเมอร์ก็ขึ้นอยู่กัปัจจัยอื่นๆ เช่น ปฏิกริยาเคมีของโมเลกุลพอลิเมอร์และก๊าซ ปริมาตรอิสระในเฟสอสัณฐาน และความเป็นผลึก และงานวิจัยอื่นกล่าวว่าขนาดของพลาสติกไซเซอร์ยังมีบทบาทสำคัญต่ออัตราการ

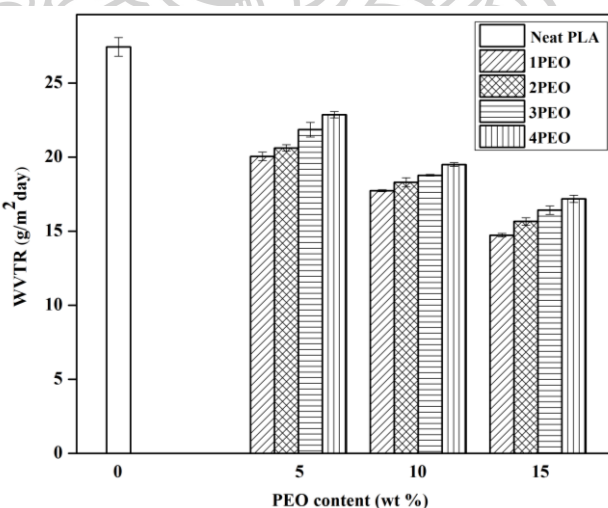
ซึมผ่าน เป็นที่สังเกตได้ว่าการเติม PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ PEO ส่งผลให้สมบัติการกั้นผ่าน (barrier properties) ดีกว่า ดังนั้นจึงยืดอายุการเก็บรักษาของวัสดุบรรจุภัณฑ์ได้ [9]

นอกจากนี้สมบัติการกั้นผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็มีความสำคัญต่อการใช้งานบรรจุภัณฑ์เช่นกัน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CP) แสดงไว้ในรูปที่ 4.15(b) และตารางที่ 4.4 พบว่าการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน คือค่า CP ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO มีค่าต่ำกว่าค่า CP ของฟิล์ม Neat PLA และเมื่อปริมาณ PEO เพิ่มขึ้น ค่า CP มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากมีปริมาณผลึกของ PLA เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.16) และเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้น ค่า CP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เหตุผลแสดงดังที่กล่าวไปข้างต้น

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO

Samples	OP (mm cm ³ /m ² d bar)	CP (mm cm ³ /m ² d bar)	WVTR (g/m ² day)
Neat PLA	56.7	129.6	27.44 ± 1.23 ^a
PLA/1PEO 5%	52.2	58.5	19.58 ± 0.59 ^{d,e}
PLA/2PEO 5%	53.4	68.1	20.62 ± 0.74 ^d
PLA/3PEO 5%	55.5	91.5	21.07 ± 0.62 ^c
PLA/4PEO 5%	56.1	95.7	21.45 ± 0.37 ^b
PLA/1PEO 10%	41.7	48.0	18.33 ± 0.17 ^{h,i}
PLA/2PEO 10%	45.5	48.3	18.33 ± 0.23 ^{g,h}
PLA/3PEO 10%	45.9	51.3	18.61 ± 0.48 ^{f,g}
PLA/4PEO 10%	47.7	51.6	19.23 ± 0.74 ^{e,f}
PLA/1PEO 15%	31.8	38.4	15.63 ± 0.42 ^l
PLA/2PEO 15%	32.1	38.7	15.97 ± 0.21 ^k
PLA/3PEO 15%	33.6	41.7	16.22 ± 0.37 ^{j,k}
PLA/4PEO 15%	37.5	42.3	18.05 ± 0.33 ^{i,j}

เมื่อพิจารณาค่า OP และ CP จะพบว่าค่า CP มีค่ามากกว่า OP ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Valentina Siracusa และคณะ [60] ศึกษาปรากฏการณ์การซึมผ่านก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PHB/PLA พบว่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าก๊าซออกซิเจน เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การละลายของก๊าซ (Solubility coefficient ; S) เป็นคุณลักษณะทางอุณหพลศาสตร์ที่กำหนดโดยการควบแน่นที่ซึมผ่านได้ (penetrant condensability) เช่นเดียวกับความเข้มข้นของอันตรกิริยาระหว่างไบโอพอลิเมอร์กับตัวแทรกซึม โดยค่า S ของ CO_2 ($2.1 \text{ cm}^3(\text{STP})/\text{cm}^3\text{atm}$) $>$ O_2 ($0.24 \text{ cm}^3(\text{STP})/\text{cm}^3\text{atm}$) [61] และมีความสอดคล้องกับอุณหภูมิวิกฤต (critical temperature) ของก๊าซที่แทรกซึม โดยที่ CO_2 มีอุณหภูมิวิกฤตที่ $31.15 \text{ }^\circ\text{C}$ (304.15 K) จะสามารถควบแน่นได้สูงภายในเมทริกซ์พอลิเมอร์เมื่อเปรียบเทียบกับ O_2 ที่มีอุณหภูมิวิกฤตที่ $-118.45 \text{ }^\circ\text{C}$ (154.55 K) ถ้าก๊าซมีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่าจะมีความสามารถในการละลายสูงกว่าเสมอ เพราะสามารถบ่งบอกถึงแนวโน้มของก๊าซที่แทรกซึมและจะควบแน่นภายในพอลิเมอร์ นอกจากนี้ H. Lin และคณะ [62] ยังพบว่า PEO แสดงให้เห็นถึงการคัดเลือกสูง (Selectivity) สำหรับโอเลฟินส์ ซึ่งมีอันตรกิริยาที่ดีระหว่างกลุ่มอีเทอร์ใน PEO และโอเลฟินส์ และพบว่าก๊าซ CO_2 สามารถซึมผ่านฟิล์ม PEO สูงกว่าก๊าซ O_2 ซึ่งผลเหล่านี้สอดคล้องกับการเพิ่มความสามารถในการละลายของ CO_2 ใน PEO



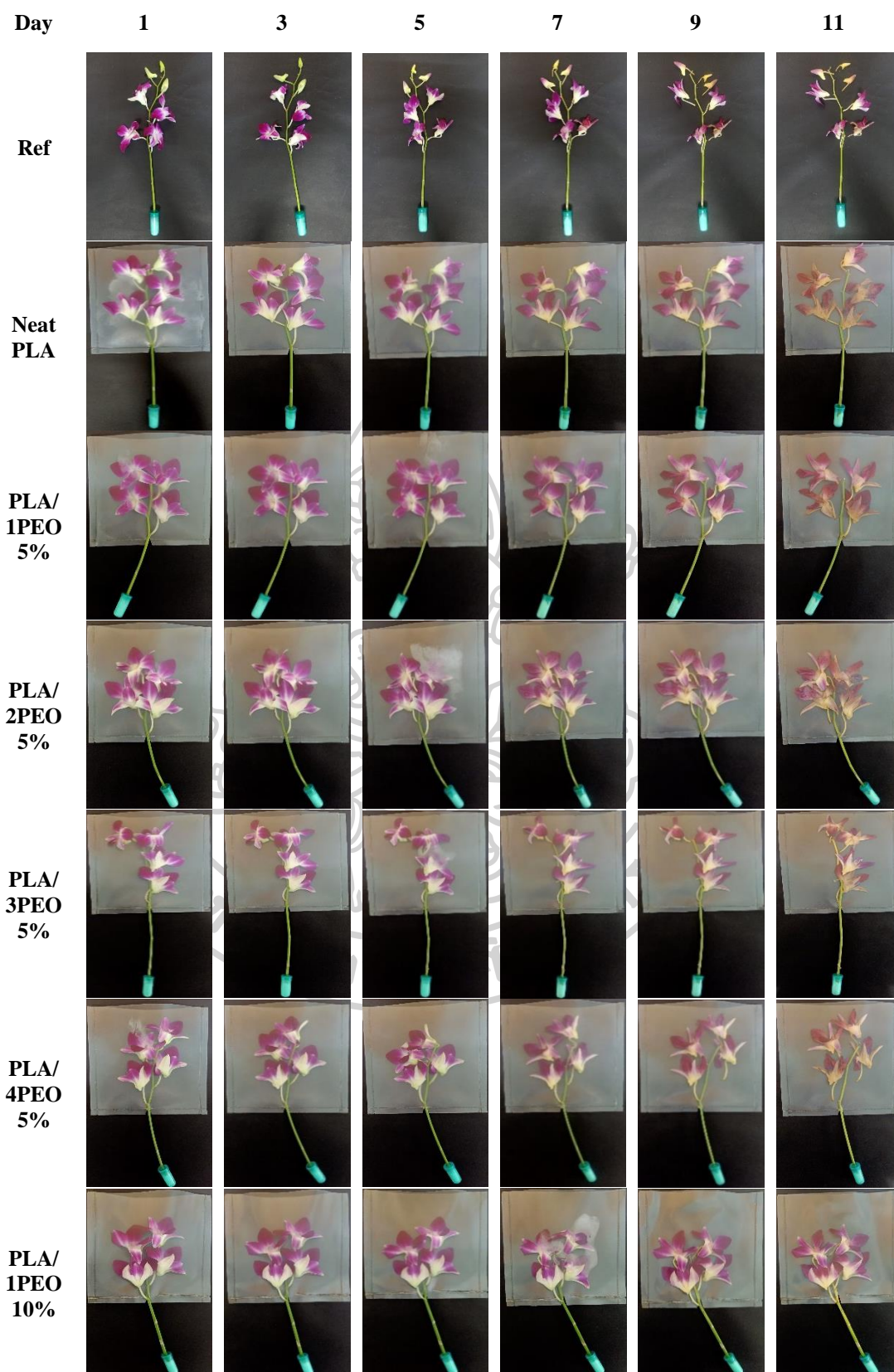
รูปที่ 4.17 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO

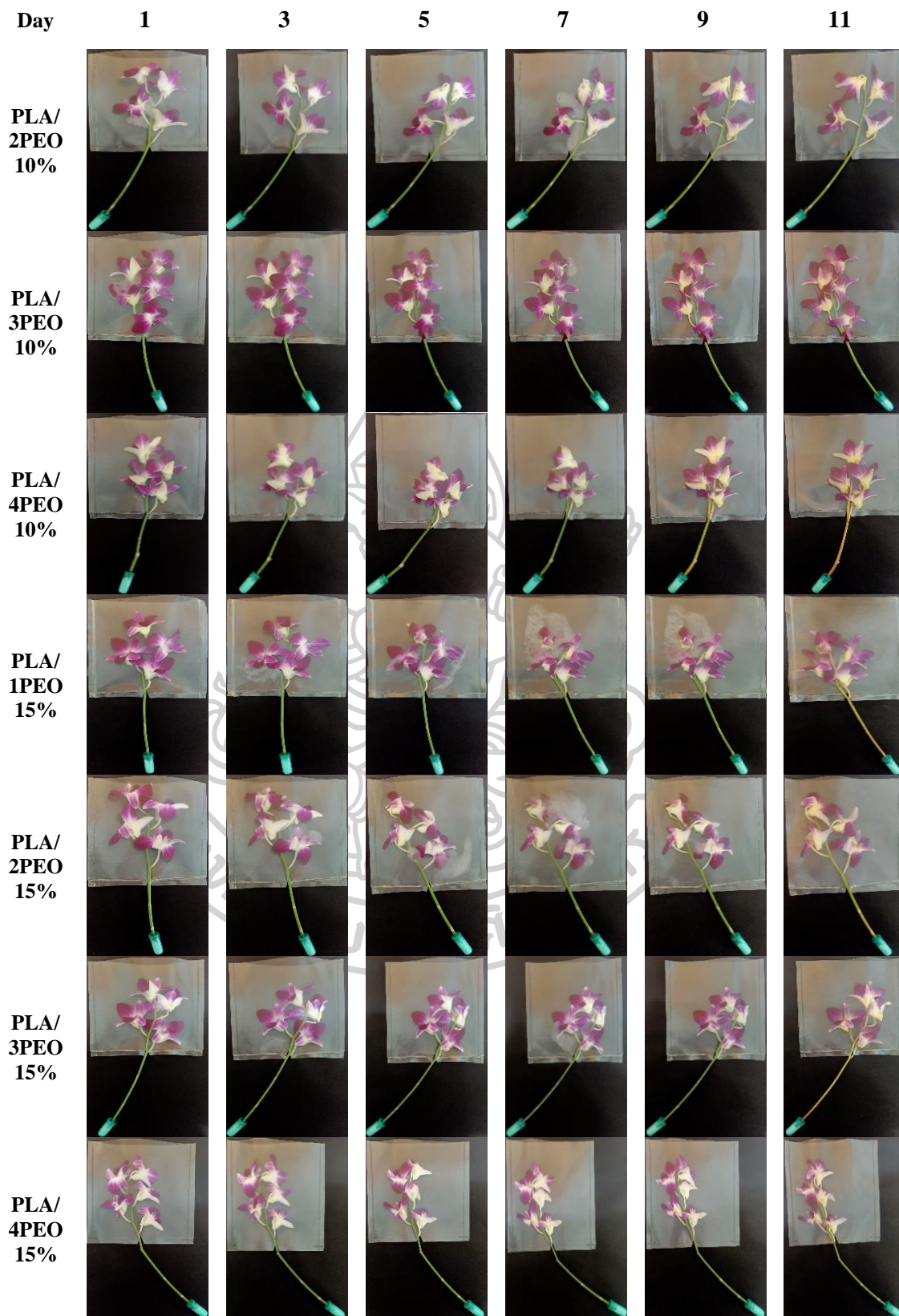
สมบัติการกั้นผ่านไอน้ำ (water vapour permeability) สำหรับบรรจุภัณฑ์เป็นสิ่งจำเป็นต่อการเสื่อมสภาพทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับความชื้นที่สมดุล ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการรักษาหรือยืดอายุการเก็บรักษา โดยอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water Vapour Transmission Rate ; WVTR) แสดงในหน่วย $\text{g}/\text{m}^2 \text{ day}$ สำหรับดอกไม้สด สิ่งสำคัญคือ

ต้องหลีกเลี่ยงการคายน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเน่าเสียได้ง่าย ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของปริมาณ และน้ำหนักโมเลกุลของ PEO ต่ออัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO เปรียบเทียบกับฟิล์ม Neat PLA โดยค่า WVTR แสดงดังรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.4 พบว่าค่า WVTR มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ คือค่า WVTR ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม Neat PLA และเมื่อปริมาณ PEO เพิ่มขึ้น ค่า WVTR มีแนวโน้มลดลง และเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO เพิ่มขึ้น ค่า WVTR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เหตุผลแสดงดังที่กล่าวไปข้างต้นว่าเป็นผลของปริมาณผลึกในพอลิเมอร์ผสม โดย Jon Trifol และคณะ [63] ศึกษาผลของความเป็นผลึกต่อการดูดซับ การแพร่ และการซึมผ่านไอน้ำของนาโนคอมโพสิตที่มี PLA เป็นพื้นฐาน กล่าวว่าโมเลกุลของน้ำแทบจะผ่านบริเวณที่เป็นผลึกไม่ได้ และการมีผลึกเพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มความยาวของเส้นทางที่โมเลกุลน้ำต้องผ่านในฟิล์ม (tortuosity) ซึ่งนำไปสู่การแพร่ที่ลดลงอย่างมาก นอกจากนี้ Debarghya Saha และคณะ กล่าวว่าผลึก α ของฟิล์ม PLA อยู่ในแนวเดียวกับผลึกธรรมชาติของฟิล์ม PLA/PEO ทำให้การจัดเรียงตัวของโมเลกุลดีขึ้นและลดการแพร่ ส่งผลให้สมบัติการกั้นผ่านไอน้ำของฟิล์มดีขึ้น ในขณะที่ค่า WVTR โดยรวมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO น้อยกว่า $1200 \text{ g/m}^2 \text{ day}$ ถือว่าเป็นที่ยอมรับว่าเป็นฟิล์มที่มี WVTR ต่ำสำหรับการนำไปใช้ในการบรรจุหีบห่อ [9]

4.1.7 การศึกษาความสามารถในการยืดอายุกล้วยไม้ตัดดอกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์เพื่อยืดอายุกล้วยไม้ตัดดอก ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจสำหรับส่งออกของประเทศไทย ในเบื้องต้นได้ศึกษาการยืดอายุกล้วยไม้ตัดดอกที่ถูกบรรจุอยู่ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ทำการซีลปิดสามด้านและหุ้มปลายก้านดอกด้วยสำลีชุบน้ำ เพื่อลดการสูญเสียน้ำและจำลองการทดสอบให้สอดคล้องกับการนำไปใช้งานจริง ดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยจัดเก็บภายในตู้เย็นที่อุณหภูมิ $8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ แสดงดังรูปที่ 4.18





รูปที่ 4.18 แสดงกล้วยไม้บรรจุในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO

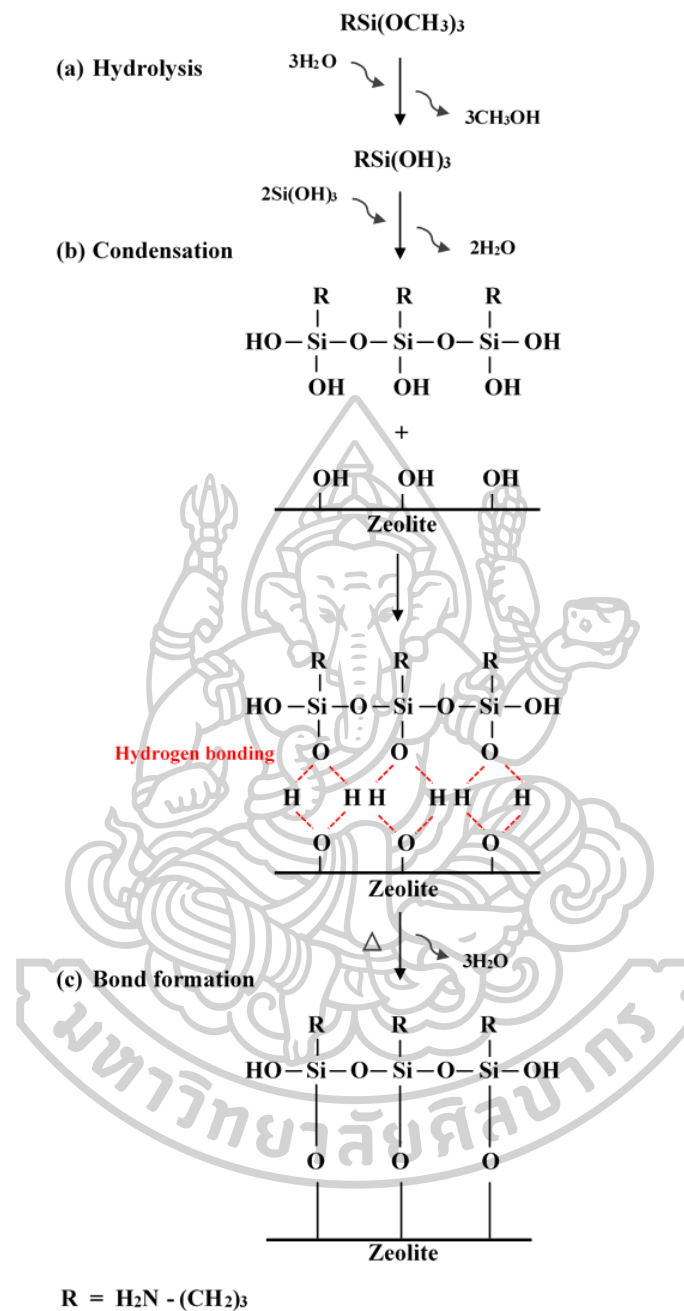
จากรูปที่ 4.18 พบว่ากล้วยไม้ที่ไม่ได้บรรจุอยู่ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO จะเริ่มเหี่ยวและเริ่มเหลืองในวันที่ 5 ส่วนฟิล์ม Neat PLA จะเริ่มเหี่ยวและเริ่มเหลืองในวันที่ 7 เมื่อพิจารณากล้วยไม้ที่บรรจุอยู่ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO พบว่ากล้วยไม้ที่บรรจุอยู่ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใส่ PEO ปริมาณ 5, 10 และ 15 wt% จะเริ่มเหี่ยวและเริ่มเหลืองในวันที่ 7, 9 และ 11 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ที่ว่าเมื่อปริมาณ PEO เพิ่มขึ้น อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ จะลดลง เนื่องจากปริมาณผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเป็นการบดบังและเพิ่มเส้นทางการแพร่ของโมเลกุลก๊าซและไอน้ำผ่านฟิล์ม ทำให้ลดอัตราการหายใจและการสูญเสียน้ำของดอก และเมื่อพิจารณาผลของน้ำหนักโมเลกุลของ PEO แล้วพบว่าไม่ได้มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

4.2 ผลการศึกษาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ (PLA/PEO/Zeolite films)

จากผลการศึกษาในตอนต้นที่ 1 ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA และ PEO ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 100,000 g/mol ปริมาณ 10 wt% เป็นสูตรที่มีค่าการดึงยึดที่จุดขาดสูง ในขณะที่ความต้านทานแรงดึงลดลงไม่มาก และจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์สำหรับยืดอายุกล้วยไม้ตัดดอก ดังนั้นจึงเลือกฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรนี้มาผสมกับซีโอไลต์ เนื่องจากซีโอไลต์มีโครงสร้างเป็นรูพรุนที่สามารถดูดซับโมเลกุลของก๊าซและไอน้ำได้ ทำให้กล้วยไม้มีอัตราการหายใจลดลงและลดการสูญเสียน้ำ จึงคาดว่าจะส่งผลให้กล้วยไม้เหี่ยวและเน่าช้าลง

4.2.1 การตรวจสอบการปรับปรุงผิวของซีโอไลต์ ด้วย (3-Aminopropyl) trimethoxysilane ปริมาณ 2 wt% ของซีโอไลต์

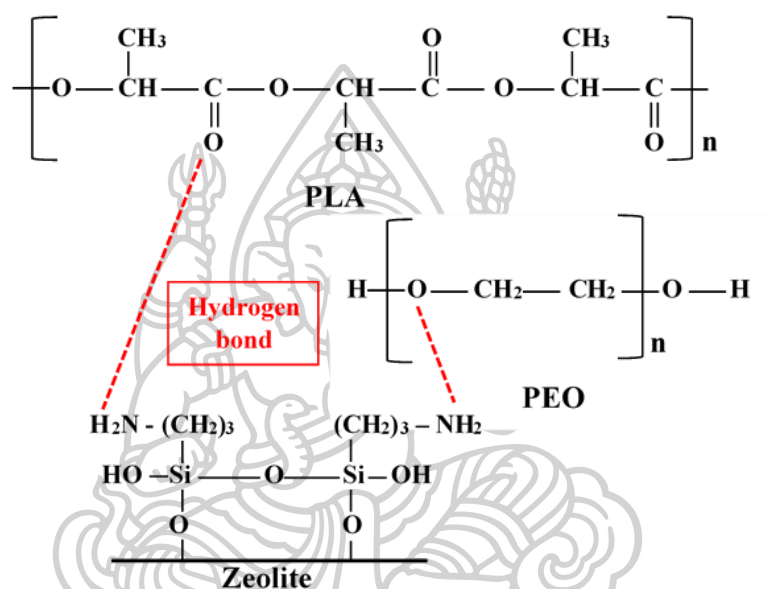
ในงานวิจัยนี้จะใส่ซีโอไลต์ลงในพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และเนื่องจากความแตกต่างของสมบัติของวัสดุทั้งสองชนิดนี้จึงต้องทำการปรับปรุงผิวของซีโอไลต์ ด้วย (3-Aminopropyl) trimethoxysilane (APTMS) ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างอนุภาคของสารตัวเติมอนินทรีย์ (ซีโอไลต์) และเมทริกซ์อินทรีย์ (PLA/PEO) โดยจะปรับเปลี่ยนสมบัติที่พื้นผิวของซีโอไลต์จากชอบน้ำไปเป็นไม่ชอบน้ำ (hydrophilic to hydrophobic) และเพิ่มความสัมพันธ์ของซีโอไลต์กับหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์เมทริกซ์ แสดงดังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 แสดงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารเชื่อมประสานซิลเลนและซีโอไลต์

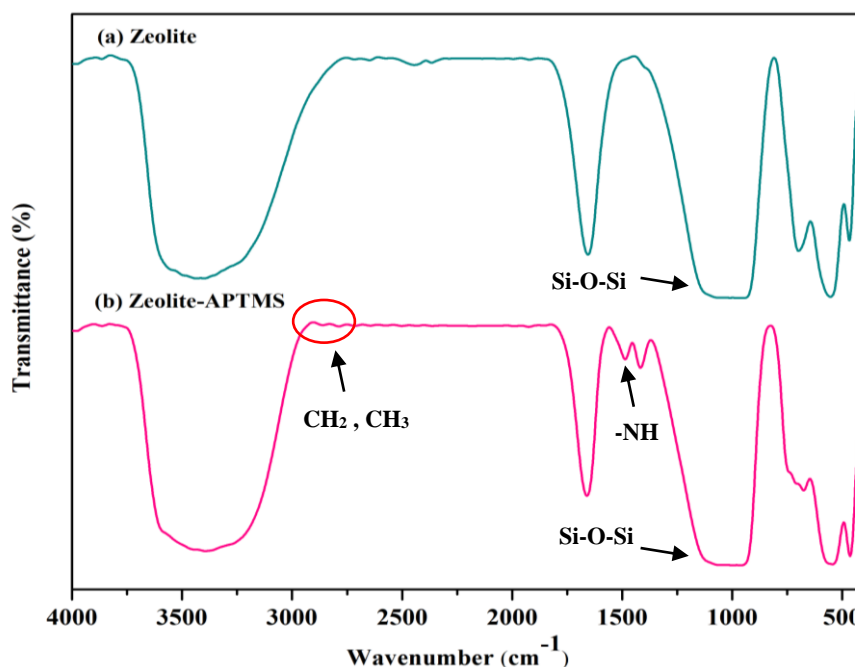
ในขั้นแรกสารเชื่อมประสานซิลเลน APTMS จะทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยหมู่แอลคอกซี (Alkoxy group) ของสารเชื่อมประสานซิลเลน ($-\text{OCH}_3$) จะเปลี่ยนเป็นหมู่ซิลานอล (Silanol (Si-OH)) และได้ผลิตภัณฑ์ร่วมเป็นเมทานอล (รูปที่ 4.19(a)) จากนั้นเมื่อใส่ซีโอไลต์ลงไป หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl ($-\text{OH}$)) บนผิวของซีโอไลต์จะทำปฏิกิริยาควบนั่นกับหมู่ซิลานอลของสาร

เชื่อมประสานไซเลน โดยการฟอร์มเป็นพันธะไฮโดรเจน (รูปที่ 4.19(b)) ได้เป็นซีโอไลต์ที่ได้รับการปรับปรุงผิวแล้ว (Treated zeolite) จะมีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น (Hydrophobic) (รูปที่ 4.19(c)) และเมื่อนำซีโอไลต์ที่ได้รับการปรับปรุงผิวแล้วไปผสมกับพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO หมู่อะมิโนของสารเชื่อมประสานไซเลนจะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่คาร์บอนิล (-C=O) ของสายโซ่ PLA และเกิดพันธะไฮโดรเจนกับออกซิเจนในสายโซ่ PEO (รูปที่ 4.20) ทำให้เมทริกซ์พอลิเมอร์และซีโอไลต์มีความเข้ากันได้มากขึ้นและทำให้ซีโอไลต์กระจายตัวในเมทริกซ์พอลิเมอร์ได้ดีขึ้น [17]



รูปที่ 4.20 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างซีโอไลต์ที่ได้รับการปรับปรุงผิวแล้วกับ PLA และ PEO

ซึ่งเราสามารถตรวจสอบผลของการปรับปรุงผิวของซีโอไลต์ ด้วย (3-Aminopropyl) trimethoxysilane (APTMS) จากผลการทดสอบด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) แสดงดังรูปที่ 4.21



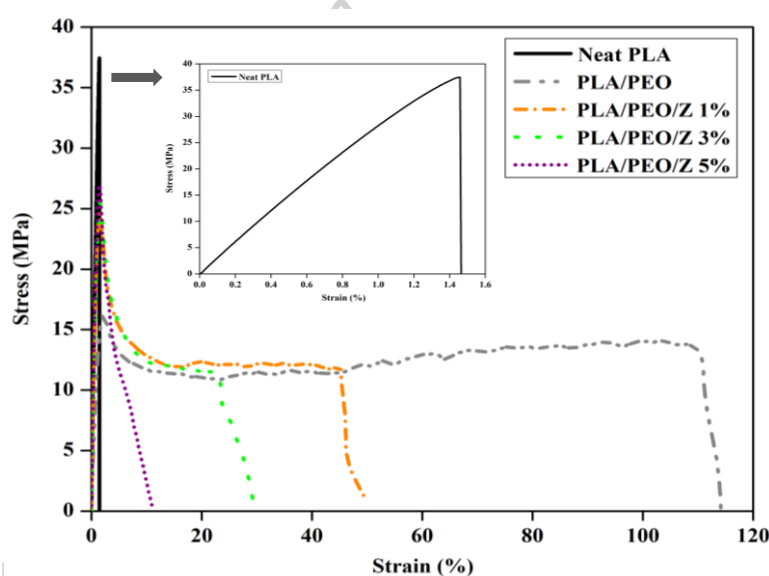
รูปที่ 4.21 สเปกตรัม FTIR ของ (a) ซีโอไลต์ และ (b) ซีโอไลต์ที่ได้รับการปรับปรุงผิวด้วย APTMS

จากรูปที่ 4.21(a) ซีโอไลต์ที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงผิวด้วย APTMS จะปรากฏพีคที่ 3200-3600, 1600-1700 และ 1000-1100 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับหมู่ -OH stretching, -OH bending และ Si-O-Si stretching ตามลำดับ [64] และเมื่อพิจารณาสเปกตรัมของซีโอไลต์ที่ได้รับการปรับปรุงผิวด้วย APTMS (รูปที่ 4.21(b)) พบว่าปรากฏพีคที่ 3200-3600, 2850-3000, 1460 และ 1000-1100 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับหมู่ -OH stretching, -CH stretching, NH bending และ Si-O-Si stretching ตามลำดับ ซึ่งการปรากฏพีค -CH stretching และ NH bending ในซีโอไลต์ที่ได้รับการปรับปรุงผิวด้วย APTMS เป็นการยืนยันแล้วว่ามีเกิดการเกิดอันตรกิริยาของไซเลนกับซีโอไลต์ผ่านปฏิกิริยาควบแน่นระหว่างไซเลนที่ถูกไฮโดรไลซ์ (Hydrolyzed silane) และหมู่ไฮดรอกซิลของซีโอไลต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้เราศึกษาความเข้ากันได้และอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวของพอลิสไตรีนและซีโอไลต์ที่ได้รับการปรับปรุงผิวด้วย APTMS พบว่าซีโอไลต์ที่ได้รับการปรับปรุงผิวด้วย APTMS จะปรากฏพีคที่ 1460 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับหมู่ NH bending ถือเป็นการยืนยันการเกิดอันตรกิริยาระหว่างไซเลนและซีโอไลต์ [65]

4.2.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ (PLA/PEO/Zeolite films)

ซีโอไลต์เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีโครงสร้างเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิคอน (หรือ

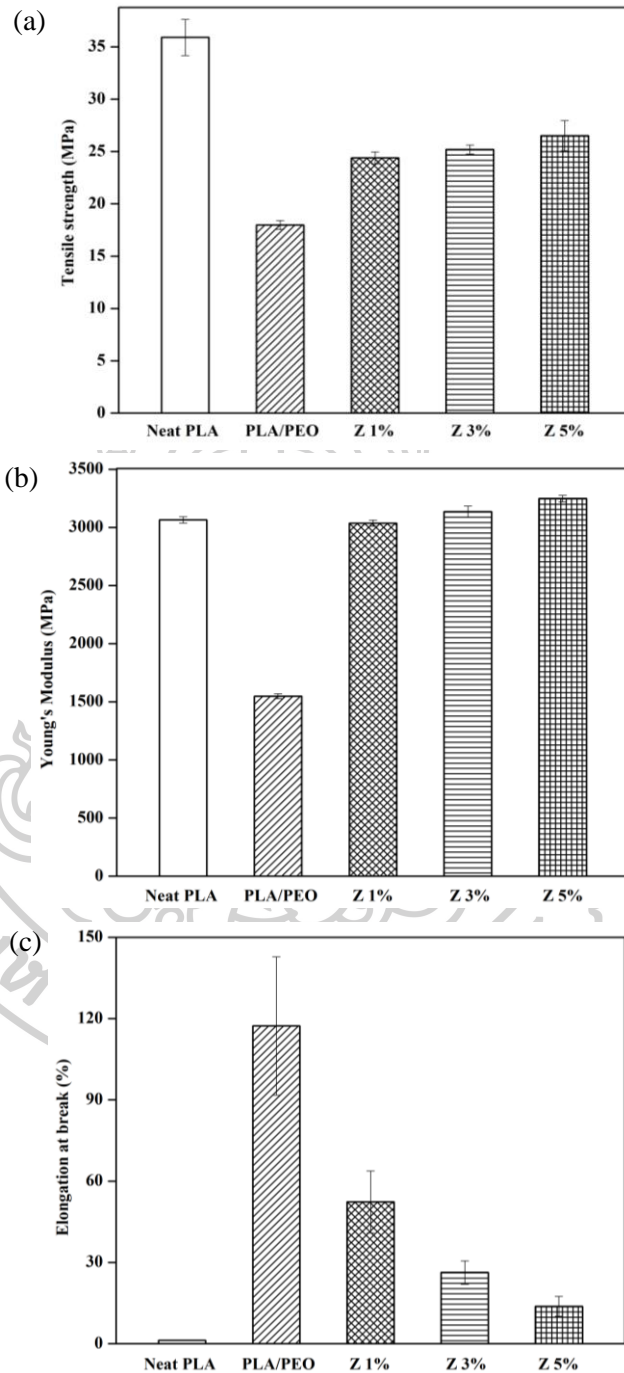
อะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนสี่มุมเป็นทรงสี่หน้า (Tetrahedral) ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุลที่เชื่อมต่อกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ทำให้ซีโอไลต์มีความเป็นผลึกที่แข็ง [66] ดังนั้นเมื่อนำซีโอไลต์มาผสมกับพอลิเมอร์จึงมีความสำคัญต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์อย่างแน่นอน เป็นเหตุให้ในงานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติเชิงกลของระบบพอลิเมอร์ที่ทำการเติมซีโอไลต์ลงไป ปริมาณที่แตกต่างกันคือ 1-5 wt% ซึ่งเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ แสดงดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 แสดงเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของฟิล์ม Neat PLA, ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์

จากเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ พบว่ามีการแตกหักแบบยืดหยุ่น (Ductile fracture) และสังเกตเห็นการเกิด necking ซึ่ง tensile stress at yield ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์มีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ไม่ได้เติมซีโอไลต์และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของซีโอไลต์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า tensile strain at break ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์มีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ไม่ได้เติมซีโอไลต์และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของซีโอไลต์เพิ่มขึ้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเติมซีโอไลต์ลงในเมทริกซ์พอลิเมอร์จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ แต่ในขณะเดียวกันก็จะขัดขวางการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์เมื่อได้รับแรงภายนอกมากกระทำจึงทำให้

ความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ลดลง [17] ซึ่งงานวิจัยก่อนหน้านี้นักกล่าวไว้ที่ค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นอาจเนื่องจากการยึดเกาะที่ดีระหว่างฟิลเลอร์และพอลิเมอร์เมทริกซ์ [67, 68]



รูปที่ 4.23 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ : (a) Tensile strength, (b) Young's Modulus และ (c) Elongation at break

ตารางที่ 4.5 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์

Samples	Tensile properties		
	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
Neat PLA	35.90 ± 1.73 ^a	3064.37 ± 27.21 ^c	1.27 ± 0.13 ^d
PLA/PEO	17.98 ± 0.42 ^d	1547.84 ± 21.67 ^d	117.27 ± 24.98 ^a
PLA/PEO/Z 1%	24.39 ± 0.58 ^c	3035.50 ± 26.94 ^c	52.33 ± 11.43 ^b
PLA/PEO/Z 3%	25.20 ± 0.42 ^{b,c}	3136.05 ± 47.10 ^b	26.30 ± 4.29 ^c
PLA/PEO/Z 5%	26.51 ± 1.43 ^b	3247.68 ± 27.78 ^a	13.79 ± 3.71 ^{c,d}

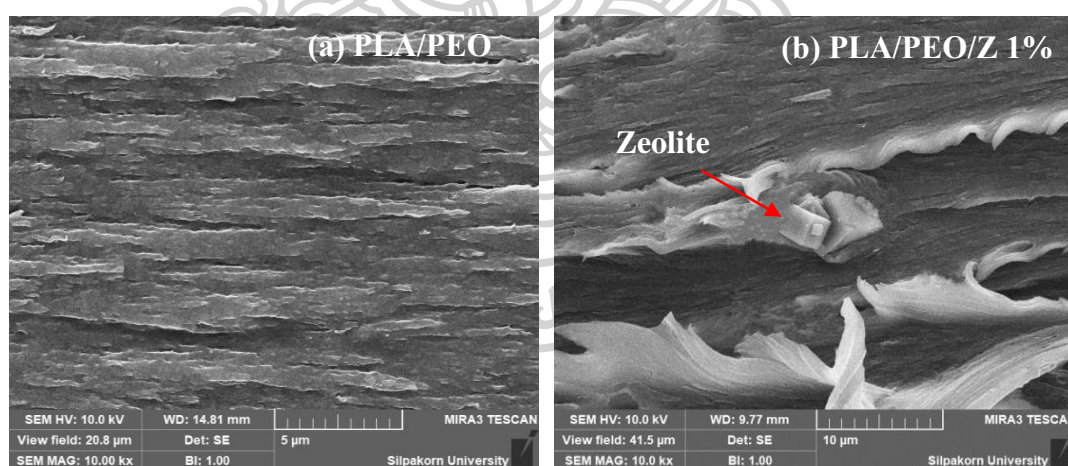
จากรูปที่ 4.23 และตารางที่ 4.5 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ พบว่าค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และมอดูลัส (Modulus) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ (รูปที่ 4.23(a) และ 4.23(b)) มีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ไม่ได้เติมซีโอไลต์และเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของซีโอไลต์เพิ่มขึ้นจาก 1-5 wt% อาจเนื่องจากซีโอไลต์ที่ทำการปรับปรุงผิวให้มีความไม่ชอบน้ำมากขึ้นสามารถยึดเกาะกับเมทริกซ์ PLA ได้ดีขึ้น ดังนั้นพอลิเมอร์จึงสามารถถ่ายโอนแรงดึงไปยังซีโอไลต์ ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นและธรรมชาติของสารตัวเติมอนินทรีย์ที่ทำให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น

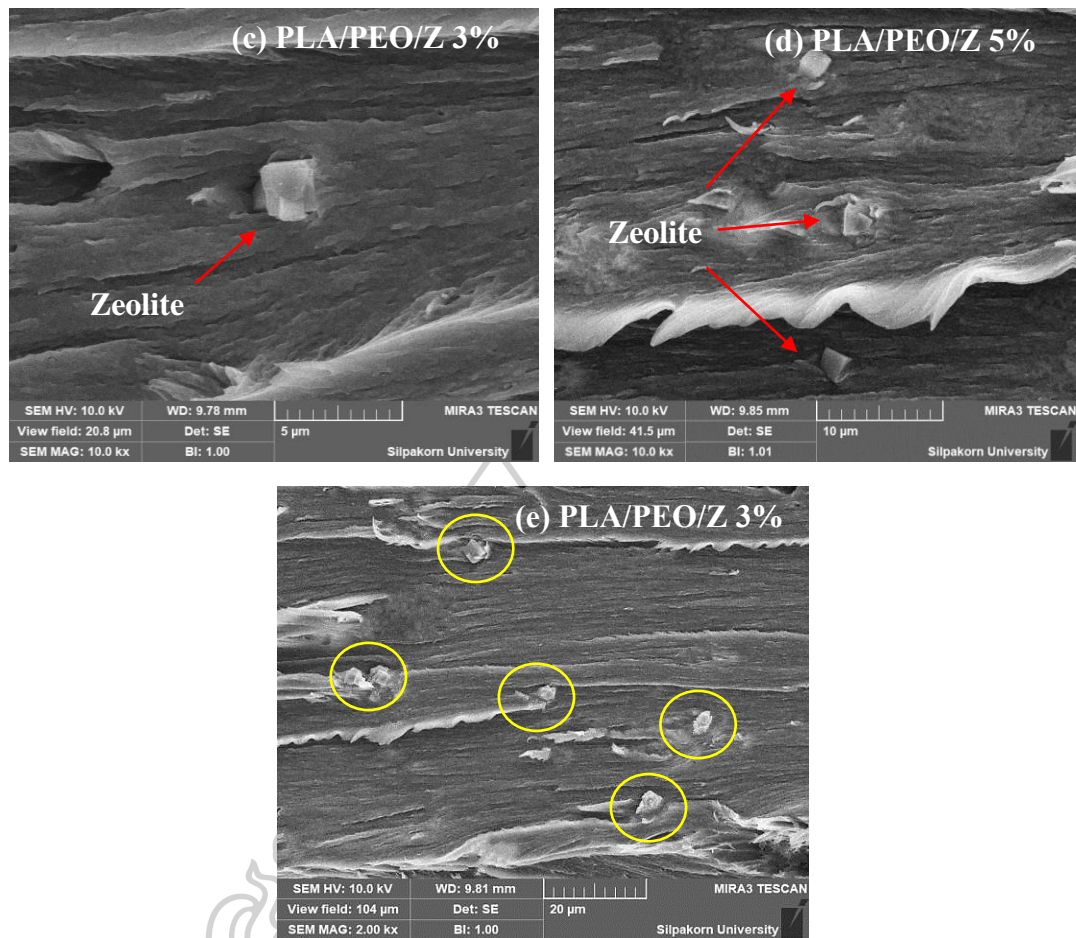
เมื่อพิจารณาค่าการยืดตัวที่จุดขาด (Elongation at break) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ (รูปที่ 4.23(c)) พบว่ามีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ไม่ได้เติมซีโอไลต์และลดลงเมื่อปริมาณของซีโอไลต์เพิ่มขึ้นจาก 1-5 wt% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ โดย Susan Selke และคณะ [69] ผสมซีโอไลต์ชนิด 4A ในปริมาณ 1-5 wt% ลงใน PLA พบว่าความต้านทานแรงดึงและมอดูลัสเพิ่มขึ้น ในขณะที่การยืดตัวที่จุดขาดลดลง ซึ่งโดยทั่วไปการใส่สารตัวเติมที่มีอนุภาคแข็งจะเป็นการเพิ่มค่ามอดูลัสแต่ลดการยืดตัวที่จุดขาดอย่างมาก และในหลายกรณีอนุภาคสารตัวเติมยังลดค่าความต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์เมทริกซ์ แต่ในกรณีนี้ค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นอาจเนื่องจากการยึดเกาะที่ระหว่างสารตัวเติมและเมทริกซ์พอลิเมอร์ เป็นที่แน่ชัดว่าการยึดเกาะที่ผิวระหว่างซีโอไลต์กับเมทริกซ์ PLA และการกระจายตัวของอนุภาคซีโอไลต์ในเมทริกซ์ PLA ดีพอที่จะรักษาความต้านทานแรงดึงได้ แสดงดังรูปที่ 4.24(b-e) นอกจากนี้ N. D. Zaharri และคณะ [70] ศึกษาสมบัติเชิงกลของ EVA ที่เติมซีโอไลต์ที่ปรับปรุงผิวด้วย Octadecylamine กล่าวว่า

การเพิ่มขึ้นของความต้านทานแรงดึงของซีโอไลต์/EVA เกิดจากการมีอันตรกิริยาที่ตื้นระหว่างซีโอไลต์และเมทริกซ์ EVA ซึ่งอันตรกิริยาที่ตื้นระหว่างเฟสซีโอไลต์ที่กระจายตัวและเมทริกซ์ของ EVA นี้ จะอำนวยความสะดวกในการถ่ายโอนแรงจากเฟสของ EVA สู่เฟสการเสริมแรงของซีโอไลต์ และพบว่าความยืดตัวที่จุดขาดของ EVA คอมโพสิตลดลงตามปริมาณซีโอไลต์ที่เพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะคอมโพสิตมีความเหนียวลดลงเมื่อมีการรวมตัวของซีโอไลต์เข้ากับ EVA และการใส่ซีโอไลต์ลงในเมทริกซ์ EVA ทำให้ค่ามอดูลัสของคอมโพสิตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเป็นเพราะคุณสมบัติโดยธรรมชาติของสารตัวเติมอนินทรีย์ซึ่งมีความแข็งและได้รับการพิสูจน์แล้วว่าประสิทธิภาพในการทำให้พอลิเมอร์แข็งแรงแรงขึ้น

4.2.3 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ (PLA/PEO/Zeolite films)

ในการศึกษาความเข้ากันระหว่างสารตัวเติมและเมทริกซ์พอลิเมอร์ รวมถึงสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์นั้นสามารถใช้ลักษณะทางสัณฐานวิทยา มาช่วยในการวิเคราะห์ผลร่วมด้วยได้ ซึ่งสัณฐานวิทยาของพื้นผิวแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ในปริมาณต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.24





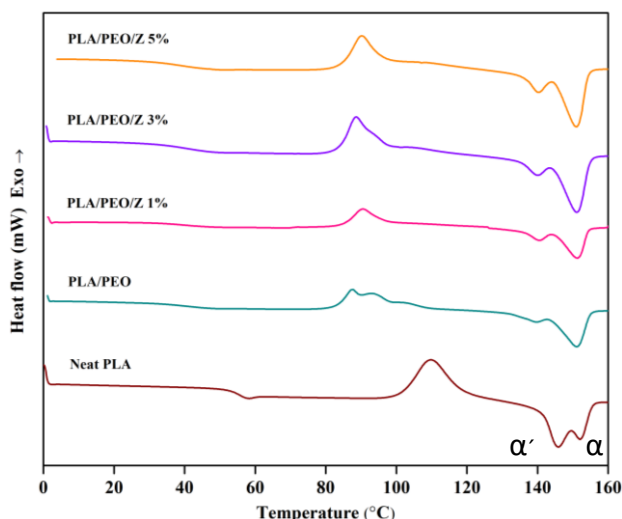
รูปที่ 4.24 แสดงลักษณะวิทยาของพื้นผิวแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO (a), ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ในปริมาณต่างๆ ที่กำลังขยาย 10 kx (b-d) และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ ที่กำลังขยาย 2 kx (e)

จากรูปที่ 4.24(b)-(d) พบการเกิดไฟบริล (fibril) หลังจากการแตกหักแสดงว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ยังคงมีการเสียรูปแบบยืดหยุ่น (Ductile fracture) นอกจากนี้ยังพบอนุภาคซีโอไลต์ขนาดประมาณ 2.5 ไมครอน กระจายและฝังตัวอยู่ในเฟสพอลิเมอร์แสดงให้เห็นถึงการยึดเกาะที่ดีระหว่างพื้นผิวของเมทริกซ์ PLA/PEO และซีโอไลต์ที่ได้รับการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน จึงส่งผลให้มีการปรับปรุงที่สำคัญของค่าความต้านทานแรงดึงดั่งที่กล่าวมาข้างต้น

4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ (PLA/PEO/Zelite films) ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ ทำเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m), % การเกิดผลึก (X_c) และอุณหภูมิการเปลี่ยน

สภาวะคล้ายแก้ว (T_g) หลังจากที่ทำกาเติมซีโอไลต์แล้ว ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.25 และสรุปข้อมูลไว้ดังตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.25 DSC thermogram ในขั้น heating ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์

จากรูปที่ 4.25 และตารางที่ 4.6 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์มี T_g และ T_{m1} ต่ำกว่า Neat PLA แต่มี T_g และ T_{m1} เท่ากับและใกล้เคียงฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ไม่ได้เติมซีโอไลต์และปริมาณซีโอไลต์ไม่ส่งผลต่อ T_g และ T_m ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO [64] แสดงว่าซีโอไลต์ไม่ได้ขัดขวางการทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ของ PEO ใน PLA

เมื่อพิจารณาความเป็นผลึกพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์มีปริมาณผลึกสูงกว่า Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ไม่ได้เติมซีโอไลต์ แสดงให้เห็นว่าการเติมซีโอไลต์ลงในเมทริกซ์พอลิเมอร์ ซีโอไลต์จะทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) [64, 71] ซึ่งสามารถเหียนำให้ PLA เกิดผลึกได้ง่ายขึ้นและปริมาณผลึกก็เพิ่มขึ้นตามปริมาณการใส่ซีโอไลต์ที่เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งปริมาณผลึกที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลึกรูปแบบ α เป็นผลึกที่มีโครงสร้างเป็นระเบียบสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าการเติมซีโอไลต์ชนิด 5A และ 13X ลงในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PBS/PLA ซีโอไลต์จะทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PBS/PLA และเมื่อปริมาณซีโอไลต์มากขึ้น ทำให้ปริมาณผลึกของ PLA เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณนิวเคลียสในการเกิดผลึกมากขึ้น [72] และงานวิจัยของ Susan Selke และคณะ [69] ผสมซีโอไลต์ชนิด 4A ในปริมาณ 1-5 wt% ลงใน PLA พบว่าปริมาณของซีโอไลต์ชนิด 4A ไม่ส่งผลต่อ T_g และ T_m ของ PLA และซีโอไลต์ชนิด 4A

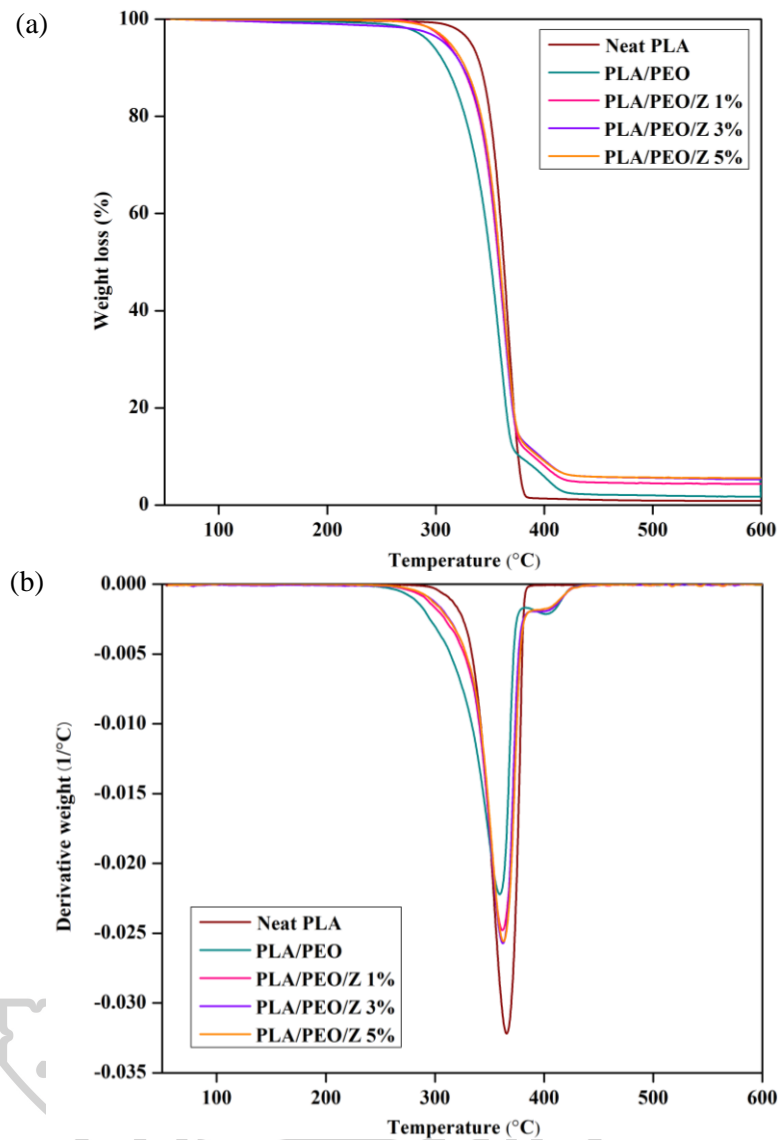
ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกใน PLA นอกจากนี้ Run และคณะ ยังกล่าวว่า mesoporous zeolite ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกในเมทริกซ์ PET อีกด้วย [73]

ตารางที่ 4.6 แสดงข้อมูลที่ได้จาก DSC ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์

Samples	T_g (°C)	ΔH_{cc} (J/g)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)
Neat PLA	54.15	32.33	146.00	152.04	32.92	0.63
PLA/PEO	40.62	30.88	139.82	151.17	40.51	11.43
PLA/PEO/Z 1%	40.45	10.45	140.55	151.29	20.18	11.67
PLA/PEO/Z 3%	40.34	24.67	140.05	151.16	36.71	14.73
PLA/PEO/Z 5%	40.65	23.17	140.37	151.00	36.06	16.11

4.2.5 ผลการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ (PLA/PEO/Zeolite films) ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA)

ซีโอไลต์มีการนำไปใช้งานและมีบทบาทในอุตสาหกรรมหลายด้าน เช่น ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้เป็นส่วนผสมในผงซักฟอก ใช้เป็นสารลดความกระด้างของน้ำ และใช้เป็นสารดูดซับ [74] และสามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างตั้งแต่อุณหภูมิต่ำไปจนถึงอุณหภูมิสูงกว่า 1000 °C [75-78] ดังนั้นเมื่อนำซีโอไลต์มาผสมกับพอลิเมอร์น่าจะส่งผลต่อสมบัติทางความร้อนที่สำคัญ จึงเป็นเหตุให้ในงานวิจัยนี้ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่ทำการเติมซีโอไลต์ลงไปปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงข้อมูลที่ได้ดังรูปที่ 4.26 และตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.26 แสดงเทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ : (a) TGA และ (b) DTG

จากเทอร์โมแกรมรูปที่ 4.26 และตารางที่ 4.7 แสดงอุณหภูมิสลายตัวสูงสุด (Degradation temperature (T_d)) 2 ชั้น โดยชั้นที่ 1 เป็นการสลายตัวของ PLA (T_{d1}) และชั้นที่ 2 เป็นการสลายตัวของ PEO (T_{d2}) และพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์มี T_{onset} และ T_{d1} ต่ำกว่า Neat PLA แต่สูงกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ไม่ได้เติมซีโอไลต์ เนื่องจากการใส่ PEO ลงใน PLA จะทำให้ T_{onset} และ T_{d1} ต่ำกว่า Neat PLA ดังที่กล่าวไปในตอนที่ 1 เมื่อใส่ซีโอไลต์ลงในพอลิเมอร์ผสมจะทำให้ T_{onset} และ T_{d1} เลื่อนไปที่อุณหภูมิสูงขึ้นเพราะเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงของซีโอไลต์ที่กล่าวมาข้างต้น อย่างไรก็ตามการใส่ซีโอไลต์ลงในพอลิเมอร์ผสมไม่ส่งผลต่อ T_{d2} ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าการใส่ซีโอไลต์ 5A และ 13X ลงในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

PBS/PLA จะทำให้ T_{onset} และ T_{d1} เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อทำการให้ความร้อน พอลิเมอร์จะส่งผ่านพลังงานความร้อนไปยังซีโอไลต์ที่มีค่าความจุความร้อนจำเพาะมากกว่าพอลิเมอร์ ส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นและแสดงให้เห็นว่าการเติมซีโอไลต์ลงในฟิล์มพอลิเมอร์จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้กับฟิล์ม พอลิเมอร์แต่การใส่ซีโอไลต์ลงในฟิล์ม PBS/PLA ไม่ส่งผลต่อ T_{d2} [72] และเมื่อปริมาณของซีโอไลต์เพิ่มขึ้นจะพบว่า T_{onset} และ T_{d1} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากจากเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงของซีโอไลต์ (T_d มากกว่า 900 °C [79]) แต่ไม่ส่งผลต่อ T_{d2} ซึ่ง Zhang และคณะ [80] ได้ผลลัพธ์ที่คล้ายกันรายงานว่า การกระจายตัวของสารตัวเติมในพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ดีอาจมีประสิทธิภาพในการขัดขวางการแพร่ของผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวที่ระเหยได้มากขึ้น จึงนำไปสู่เสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น

ตารางที่ 4.7 แสดงข้อมูลที่ได้จาก TGA ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์

Samples	T_{onset} (°C)	T_{d1} (°C)	T_{d2} (°C)	T_{endset} (°C)	Residue (%wt)
Neat PLA	347.84	365.29	-	377.28	0.85
PLA/PEO	329.53	359.80	404.20	424.22	1.72
PLA/PEO/Z 1%	338.32	361.87	404.15	425.61	4.34
PLA/PEO/Z 3%	340.26	362.12	404.20	425.52	5.27
PLA/PEO/Z 5%	340.31	362.83	404.48	425.87	5.55

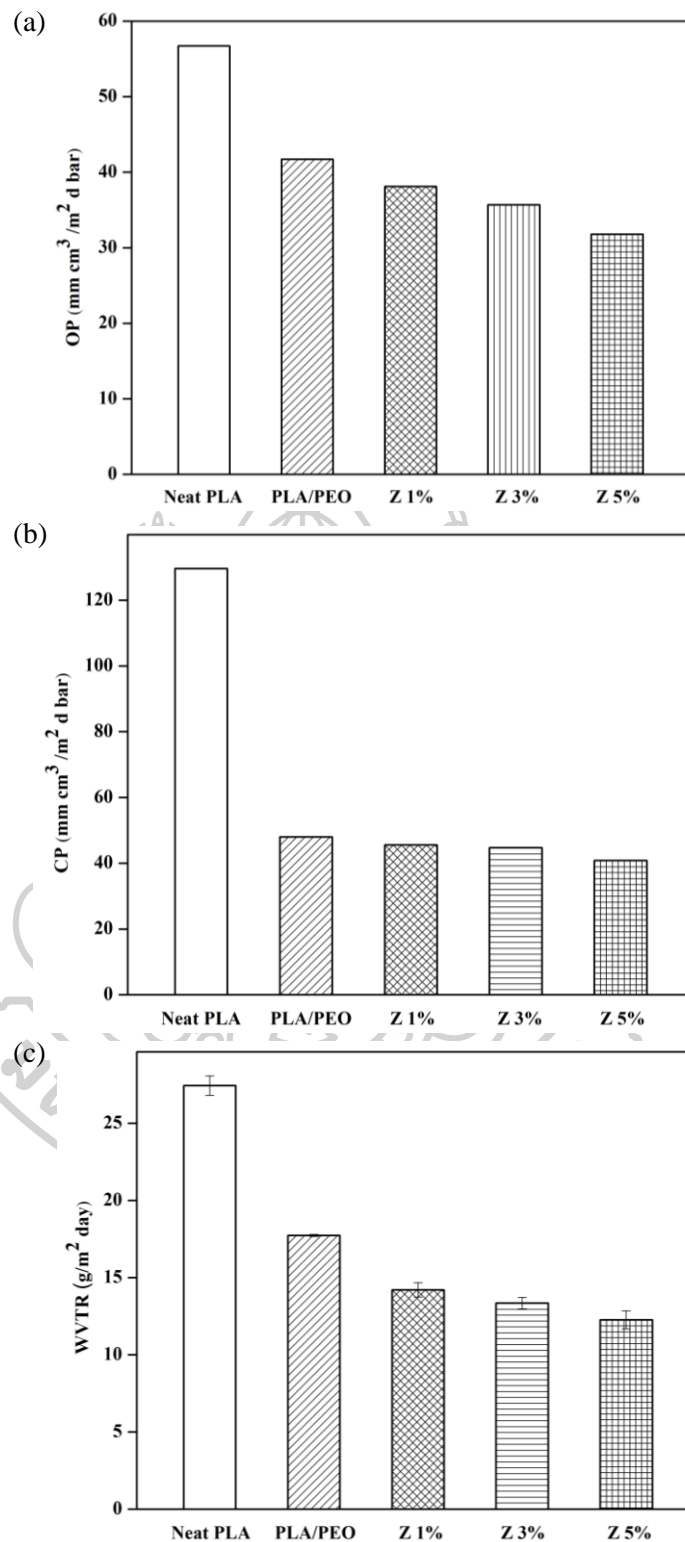
เมื่อพิจารณาสารที่เหลือหลังจากการสลายตัว (Residue) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ พบว่ามีปริมาณสารที่เหลือหลังจากการสลายตัวมากกว่าฟิล์ม Neat PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ไม่ได้เติมซีโอไลต์ และเมื่อปริมาณของซีโอไลต์เพิ่มขึ้น สารที่เหลือจากการสลายตัวก็มากขึ้นด้วย เนื่องจากซีโอไลต์มีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงมาก ซึ่งโดยปกติแล้วจะนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 °C ในการแยกแก๊สอุตสาหกรรม [81] แต่ในการทดสอบนี้ทำที่อุณหภูมิ 50-600 °C ดังนั้นส่วนที่สลายไปจึงเป็นเพียงพอลิเมอร์และสารที่เหลืออยู่คาดว่าป็นซีโอไลต์ ซึ่ง N. D. Zaharri และคณะ [70] ผสม EVA และซีโอไลต์ที่ปรับปรุงผิวด้วย octadecylamine ในปริมาณ 5-25 wt% กล่าวว่าเปอร์เซ็นต์ของสารตกค้างของซีโอไลต์เมื่อเสร็จสิ้นการย่อยสลายของ EVA แล้วพบว่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีโอไลต์ที่เพิ่มขึ้นในเมทริกซ์

4.2.6 การศึกษาความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ (PLA/PEO/Zeolite films)

ในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active packaging) หรือบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ (Modified atmosphere packaging) อัตราการผลิตก๊าซ O_2 และ CO_2 ควรสมดุลกับการซึมผ่านของ O_2 และ CO_2 ของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ โดยทั่วไปฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหารมีอัตราส่วนการซึมผ่านของ CO_2/O_2 ประมาณ 4-8 : 1 ซึ่งในหลายกรณีอัตราส่วนนี้อาจจะไม่ค่อยดีนักเพราะช่วยให้ CO_2 ซึมผ่านในอัตราที่สูงกว่า O_2 ดังนั้นในงานวิจัยของ Rafael Auras และคณะ ที่ศึกษา PLA/Zeolite composites พบว่าการใส่ซีโอไลต์ 5 wt% ทำให้มีอัตราส่วนการซึมผ่านของ CO_2/O_2 เท่ากับ 0.16 ซึ่งบ่งบอกถึงศักยภาพและความเหมาะสมในการนำ PLA/Zeolite composites มาใช้สำหรับระบบบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศหรือบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ [71]

โดยสังเกตว่าซีโอไลต์มีโครงสร้างผลึกที่มีรูพรุน ซึ่งมีขนาดรูพรุนตั้งแต่ 3 ถึง 15 Å โดยทั่วไปโครงสร้างของซีโอไลต์ประกอบด้วย SiO_4 และ AlO_4 tetrahedra ซึ่งเป็นโครงข่ายของช่องและโพรง ในขณะที่วัสดุซึบสเตรตพอลิเมอร์นั้นไม่มีช่องว่างที่ไม่เลกุลต่างๆจะสามารถซึมผ่านได้อย่างมาก ดังนั้นในวัสดุผสมระหว่างพอลิเมอร์และซีโอไลต์ โครงสร้างรูพรุนที่โดดเด่นของซีโอไลต์นั้นจึงถูกใช้เพื่อดักจับโลหะทรานซิชัน ก๊าซ ของเหลวประเภทต่างๆ และสารประกอบที่มีกลิ่น [71]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และซีโอไลต์ ในปริมาณ 1-5 wt% เพราะความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำเหล่านี้เป็นตัวแปรสำคัญต่ออายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้หมายถึงอายุการเก็บรักษาดอกกล้วยไม้ โดยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.27 และตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.27 ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไซด์ : (a) Oxygen permeability, (b) Carbon dioxide permeability และ (c) Water vapor transmission rate

จากรูปที่ 4.27 และตารางที่ 4.8 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์มีค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OP) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CP) และอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (WVTR) ต่ำกว่าฟิล์ม Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ไม่ได้เติมซีโอไลต์และ OP, CP และ WVTR ผ่านฟิล์ม PLA/PEO ลดลงเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการที่เติมซีโอไลต์ลงในเมทริกซ์พอลิเมอร์ ส่งผลให้ปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นตามที่กล่าวมาข้างต้น (ตารางที่ 4.6) ซึ่งปริมาณผลึกที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเป็นตัวขัดขวางการแพร่ผ่านของโมเลกุลแก๊สและไอน้ำ และจะเป็นการเพิ่มเส้นทางการแพร่ของโมเลกุลก๊าซและไอน้ำ จึงทำให้ค่า OP, CP และ WVTR ลดลง นอกจากนี้ยังสังเกตพบว่ามีค่าการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากกว่าก๊าซออกซิเจน เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (3.3 Å) มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าก๊าซออกซิเจน (3.6 Å) จึงทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแพร่ผ่านฟิล์มและรูพรุนของซีโอไลต์ได้ง่ายกว่าก๊าซออกซิเจน [64, 72, 82]

จากที่กล่าวไปข้างต้นว่าซีโอไลต์มีโครงสร้างผลึกที่มีรูพรุน ซึ่งในงานวิจัยนี้ซีโอไลต์มีขนาดรูพรุน 5 Å และขนาดโมเลกุลของก๊าซ O₂, CO₂ และไอน้ำ มีค่าเท่ากับ 3.6, 3.3 และ 3.2 Å [29, 83] ดังนั้นโมเลกุลของก๊าซ O₂, CO₂ และไอน้ำ จะสามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์ได้ ซึ่งกลไกการดูดซับจะประกอบไปด้วย 3 ระยะ ดังนี้ ระยะที่ 1 โมเลกุลของก๊าซและไอน้ำจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของผิวฟิล์ม ระยะที่ 2 โมเลกุลของก๊าซและไอน้ำจะแพร่กระจายเข้าไปในฟิล์มและเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์ ระยะที่ 3 โมเลกุลของก๊าซและไอน้ำจะถูกดูดติดผิวรูพรุนของซีโอไลต์ [74] จึงทำให้อัตราการซึมผ่านก๊าซ O₂, CO₂ และไอน้ำ ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ลดลง

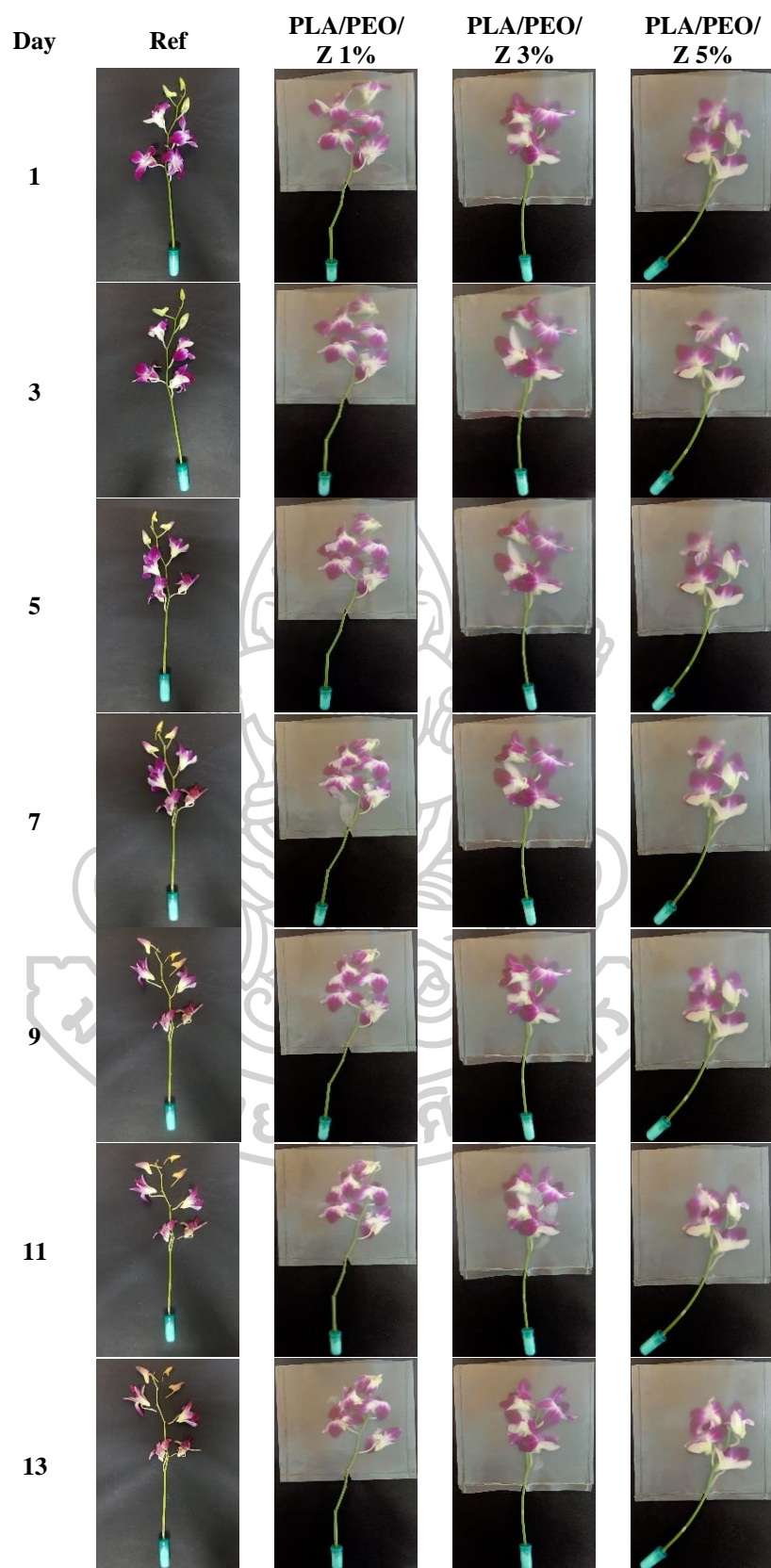
ตารางที่ 4.8 แสดงค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์

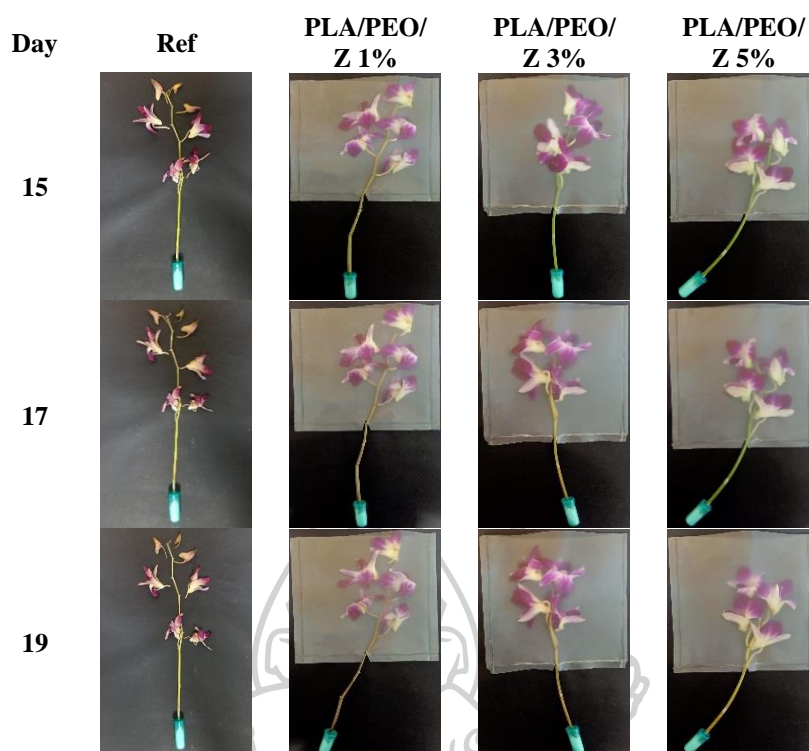
Samples	OP (mm cm ³ /m ² d bar)	CP (mm cm ³ /m ² d bar)	WVTR (g/m ² day)
Neat PLA	56.7	129.6	27.44 ± 0.63 ^a
PLA/PEO	41.7	48	17.74 ± 0.06 ^b
PLA/PEO/Z 1%	38.1	45.6	14.21 ± 0.47 ^c
PLA/PEO/Z 3%	35.7	44.7	13.35 ± 0.37 ^{c,d}
PLA/PEO/Z 5%	31.8	40.8	12.27 ± 0.58 ^d

งานวิจัยก่อนหน้านี้ก็กล่าวว่าโมเลกุลของก๊าซไม่สามารถผ่านบริเวณผลึกพอลิเมอร์ได้ และการปรากฏตัวของสารตัวเติม (clay) อาจทำให้เกิดนิเวศและตกผลึก ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของระดับของผลึกและสามารถมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติการขนส่ง [84] การลดลงของการซึมผ่านพร้อมกับความเป็นผลึกที่เพิ่มขึ้นมักจะอธิบายในสองวิธี ประการแรกคือบริเวณผลึกที่ก๊าซผ่านไม่ได้นี้จะลดปริมาณของเฟสอสัณฐานที่ก๊าซสามารถแพร่ผ่านได้ ประการที่สองคือผลึกของสารตัวเติมที่ซึมผ่านไม่ได้จะช่วยเพิ่มความคดเคี้ยวของเส้นทางการแพร่ [85, 86] นอกจากนี้ Amita Bhatia และคณะ [87] ใส่ clay ลงในพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS พบว่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำลดลงเมื่อปริมาณ clay เพิ่มขึ้นถึง 5 wt% และพวกเขาบอกว่าหลักการทั่วไปสำหรับการขนส่งไอน้ำคือน้ำจะซึมผ่านระหว่างชั้นมอนอเมอร์โพลีโอสเตอโรไลต์เกิดเป็นกลุ่มน้ำในนาโนคอมโพสิท ไม่ให้น้ำผ่านได้อย่างรวดเร็วและด้วยเหตุนี้การแพร่และการขนส่งโดยรวมของไอน้ำผ่านฟิล์มจึงลดลง และ Dounia Bendahou และคณะ [2] ศึกษาผลของซีโอไลต์ที่กระจายตัวใน PLA โดยซีโอไลต์ปรับปรุงด้วยโลหะทองแดง ทำการผสมและขึ้นรูปด้วยเครื่อง Brabender และ Compression molding พบว่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจนลดลงเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมซีโอไลต์จะเพิ่มความเป็นผลึกทำให้โมเลกุลก๊าซผ่านไม่ได้และเพิ่มเส้นทางการแพร่ของโมเลกุลก๊าซ

4.2.7 การศึกษาความสามารถในการยืดอายุกล้วยไม้ตัดดอกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ (PLA/PEO/Zeolite films)

ในการทดลองส่วนนี้ทำการใส่ซีโอไลต์ลงในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และจากที่กล่าวมาข้างต้นว่าซีโอไลต์มีโครงสร้างเป็นรูพรุนจึงมีสมบัติในการดูดซับก๊าซต่างๆ ไว้ในรูพรุนได้ ในการทดลองนี้จึงได้ศึกษาการยืดอายุกล้วยไม้ตัดดอกที่ถูกบรรจุอยู่ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ใส่ซีโอไลต์ในปริมาณ 1, 3 และ 5 wt% ที่ทำการซีลปิดสามด้านและหุ้มปลายก้านดอกด้วยสำลีชุบน้ำ เพื่อลดการสูญเสียน้ำ จัดเก็บภายในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 8 °C จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพแสดงดังรูปที่ 4.28





รูปที่ 4.28 แสดงกล้วยไม้บรรจุในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO/Zeolite

จากรูปที่ 4.28 พบว่ากล้วยไม้ที่ไม่ได้บรรจุอยู่ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO จะเริ่มเหี่ยวและเริ่มเหลืองในวันที่ 5 เมื่อพิจารณากล้วยไม้ที่บรรจุอยู่ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ใส่ซีโอไลต์ ปริมาณ 1, 3 และ 5 wt% จะเริ่มเหี่ยวและเริ่มเหลืองในวันที่ 15, 17 และ 19 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ที่ว่าเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ จะลดลง เนื่องจากการที่ใส่ซีโอไลต์ลงในเมทริกซ์พอลิเมอร์จะเป็นการเพิ่มเส้นทางการแพร่ของโมเลกุลแก๊สและไอน้ำ และปริมาณผลึกที่เพิ่มขึ้นอาจเป็นตัวขัดขวางการแพร่ของโมเลกุลแก๊สและไอน้ำ และจากโครงสร้างรูพรุนของซีโอไลต์ทำให้โมเลกุลของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ สามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์ได้ จึงเป็นการลดอัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ส่งผลให้อัตราการหายใจและการสูญเสียน้ำของดอกลดลงเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น จึงสามารถยืดอายุของดอกไม้ให้มีความสดได้นานขึ้น

4.3 ผลการศึกษาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรต และโพแทสเซียมไนเตรต (PLA/PEO/Z-Li⁺, PLA/PEO/Z-K⁺ films)

ซีโอไลต์เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนบวกอนินทรีย์และวัสดุดูดซับที่สำคัญที่สุด คุณสมบัติทั้งสองนี้เกิดจากปฏิกิริยาพื้นผิว (Reactive surfaces) เนื่องจากการมี Al³⁺ และ Si⁴⁺ อยู่บนตำแหน่งการดูดซับและระบบผลึกไมโครพอร์ โดยแสดงการคัดเลือกการแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่สูง (cation exchange selectivities), ทนต่ออุณหภูมิ และเข้ากับสิ่งแวดล้อมได้ดี ดังนั้นซีโอไลต์จึงถูกนำมาใช้ในเทคโนโลยีสมัยใหม่ในฐานะตัวดูดซับแบบเลือกสรร (Selective adsorbents), ตะแกรงโมเลกุล (Molecular sieves) และโดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysts) สมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนยังถูกใช้เป็นตัวเร่งในการปรับแต่งโครงสร้างตามลำดับเพื่อให้ได้สมรรถนะที่เฉพาะเจาะจง ดังนั้นในอุตสาหกรรมจึงใช้ซีโอไลต์และเรซินที่แลกเปลี่ยนไอออนบวกในกระบวนการผลิตน้ำและการทำน้ำเสียให้บริสุทธิ์ [88]

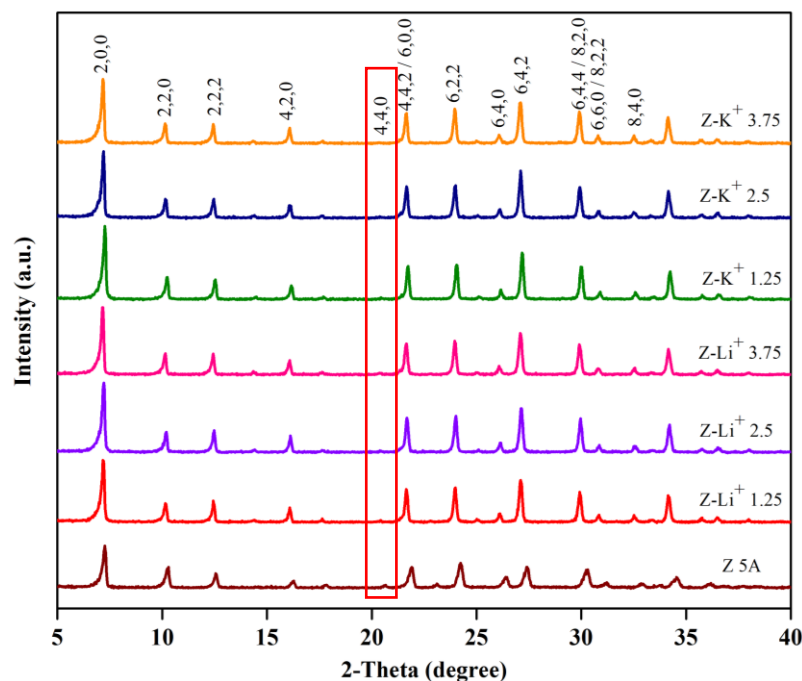
การแลกเปลี่ยนไอออนสามารถทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติและเหมาะสมกับการใช้งานต่างกัน ตัวอย่างเช่น K-A ใช้ในกระบวนการทำให้แห้งด้วยเอทานอล [89] และ K/Na-A ที่แลกเปลี่ยนบางส่วนใช้เพื่อแยก CO₂ ออกจากแก๊สผสม CO₂/N₂ [90] และ Li-A ถูกเสนอให้เป็นวัสดุนำส่งที่เป็นไปได้สำหรับการศึกษาทางเภสัชวิทยา [91] ซีโอไลต์ที่แลกเปลี่ยนด้วย Li ยังใช้สำหรับการแยกไนโตรเจนออกจากอากาศ [92] จากเหตุผลที่กล่าวมาทั้งหมดในงานวิจัยนี้จึงทำการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะอัลคาไล (Monovalent alkali metals) คือ Li⁺ และ K⁺ ในปริมาณ 1.25, 2.5 และ 3.75 wt% ของซีโอไลต์ และนำซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วย Li⁺ และ K⁺ แล้วปริมาณ 1 wt% ผสมลงในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ตามสัดส่วนที่ดีที่สุดจากตอนที่ 1 และตอนที่ 2 เนื่องจากค่าการยึดตัวที่จุดขาดไม่ลดลงมาก และค่าการซึมผ่านแก๊สออกซิเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ไม่แตกต่างจากการใส่ซีโอไลต์ปริมาณอื่นมากนัก ดังนั้นการใส่ซีโอไลต์ปริมาณ 1 wt% จึงเหมาะสมที่สุด เพื่อศึกษาการดูดซับก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และก๊าซเอทิลีน สำหรับพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์ยืดอายุกล้วยไม้ตัดดอก ซึ่งเบื้องต้นจะทำการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค XRD เพื่อศึกษาผลลัพธ์ของการแลกเปลี่ยนไอออนดังนี้

4.3.1 การตรวจสอบการแลกเปลี่ยนประจุ (Cation exchange) ของซีโอไลต์ด้วยเทคนิค

XRD

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD pattern) ของซีโอไลต์ 5A และซีโอไลต์ 5A ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรต (LiNO₃) และโพแทสเซียมไนเตรต (KNO₃) ในปริมาณต่างๆ ดังรูปที่ 4.29 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนหลักๆ ของซีโอไลต์และแสดงให้เห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญของระดับผลึกและโครงสร้างของซีโอไลต์หลังจากการแลกเปลี่ยนด้วย Li⁺ และ K⁺ ซึ่งความเข้มของพีค

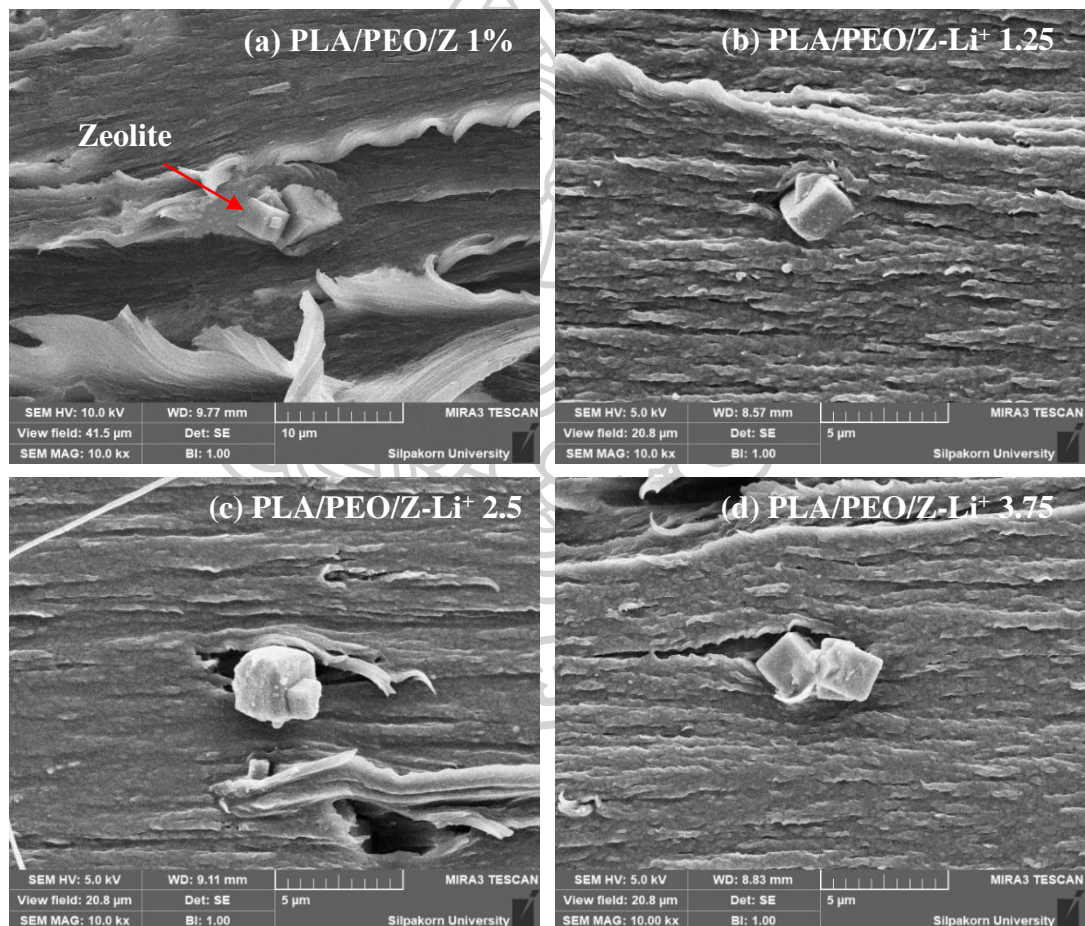
อาจมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยคาดว่า เป็นผลมาจากการครอบครองตำแหน่งของไอออนบวกที่แตกต่างเล็กน้อยในรูพรุน [93] และสำหรับซีโอไลต์ที่แลกเปลี่ยนด้วย K^+ พบว่าพีคการสะท้อนที่ (4,4,0) เกือบจะหายไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lührs และคณะ ที่ทำการศึกษการแลกเปลี่ยนกับ K^+ และ Ca^{2+} อย่างสมบูรณ์ [94]

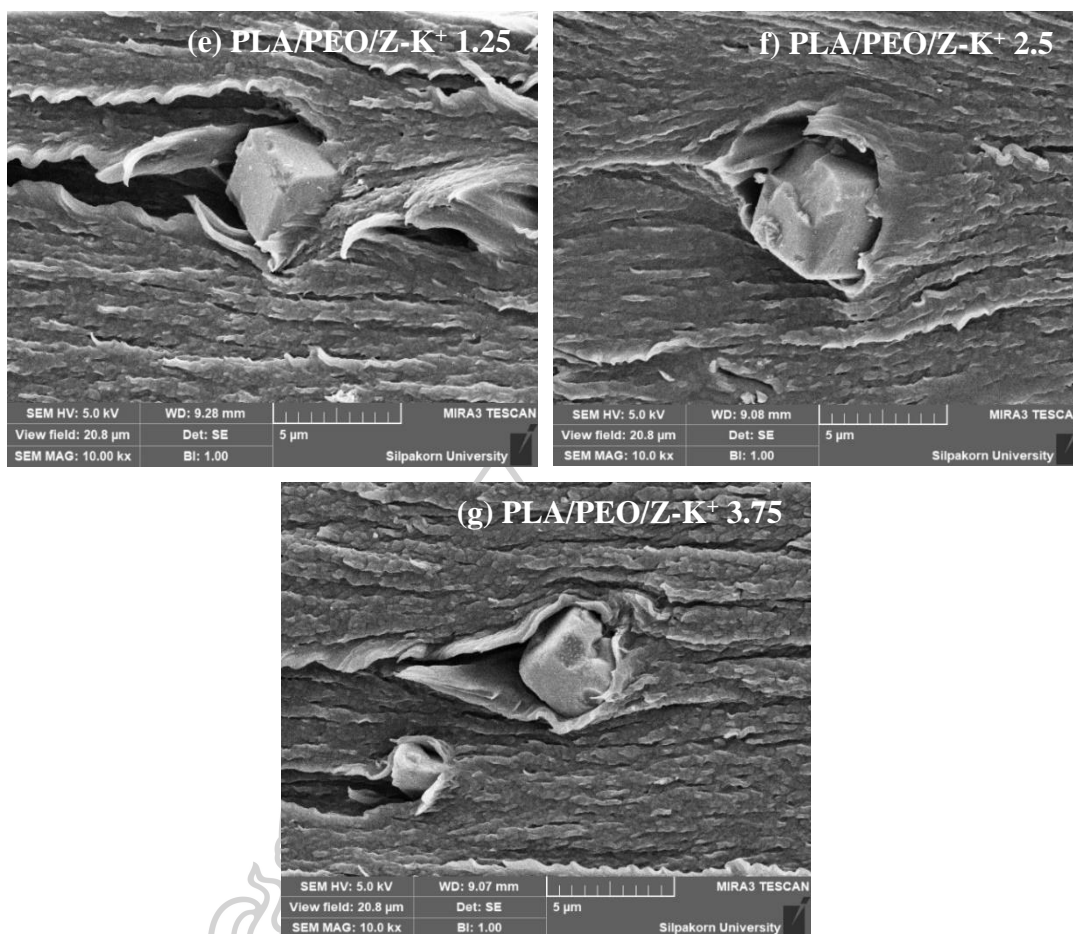


รูปที่ 4.29 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ 5A และซีโอไลต์ 5A ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรตในปริมาณต่างๆ

นอกจากนี้ Niramai Sue-aok และคณะ [12] กล่าวว่ารูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ NaY และซีโอไลต์ NaY ที่ปรับปรุงด้วยโลหะหมู่ 1 มีลักษณะเหมือนกัน ซึ่งบ่งชี้ว่าการดัดแปลงซีโอไลต์ด้วยสารละลายต่างๆ ไม่ได้นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่สำคัญในซีโอไลต์ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Rewadee Anuwattana [95] พบว่าซีโอไลต์ 5A และซีโอไลต์ 5A ที่ปรับปรุงด้วย $LiNO_3$ มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ ขนาด 2-3 ไมครอน และรูปแบบ XRD แสดงพีคมาตรฐานของซีโอไลต์ และ Muhammad Ayoub และคณะ [96] พบว่าการแลกเปลี่ยนไอออนลิเทียมในซีโอไลต์ไม่ได้ทำให้เกิดการทำลายโครงสร้างของซีโอไลต์ Y (ZeY) และจากภาพ SEM พบว่าผลึกของ ZeY หลังจากดัดแปลงด้วยไอออนลิเทียมมีความชัดเจนและมีขอบที่แหลมคมและหยากกว่า เนื่องจาก Li^+ เป็นอัลคาไลที่แรงซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความเป็นผลึกของซีโอไลต์หลัก โดยรวมแล้วสัญญาณวิทยาของซีโอไลต์ที่ดัดแปลงด้วยไอออนลิเทียมมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับวัสดุตั้งเดิม และในปี 2002 Saadet Beyaz

Kayiran และคณะ [97] ศึกษาการดูดซับไฮโดรเจนในซีโอไลต์ Linde Type A (Na-LTA : Na-A) ที่แลกเปลี่ยนด้วยไอออนโพแทสเซียมและลิเทียมแสดงสัญญาณวิทยาของ LTA zeolite มีลักษณะเป็นทรงลูกบาศก์อย่างชัดเจน และไม่สูญเสียความเป็นผลึกหลังจากทำการแลกเปลี่ยนไอออน และจากภาพ TEM ของ Li-A zeolite พบว่าผลึกของ Li-A zeolite ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกซีโอไลต์ ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.30 แสดงสัญญาณวิทยาของพื้นผิวแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ (รูปที่ 4.30(a)) และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน (รูปที่ 4.30(b-g)) พบว่าซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนแล้วยังคงมีลักษณะเป็นทรงลูกบาศก์แต่จะมีความคมและชัดเจนขึ้น รวมถึงมีพื้นผิวที่ขรุขระมากขึ้น





รูปที่ 4.30 แสดงสัญญาณวิทยาของพื้นผิวแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ (a) และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน (b-g)

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังรูปที่ 4.29 แสดงพิกัด XRD ของซีโอไลต์ที่แลกเปลี่ยนด้วยไอออนโพแทสเซียมและลิเทียมมีการเลื่อน (shifting) ที่ต่างกันเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Saadet Beyaz Kayiran และคณะ [97] สังเกตเห็นการเลื่อนระหว่างพิกัด XRD ของซีโอไลต์ Na LTA (Na A) ที่แลกเปลี่ยนด้วยไอออนโพแทสเซียมและลิเทียมเล็กน้อย เนื่องมาจากการแลกเปลี่ยนไอออน Na กับไอออนบวกที่แตกต่างกัน และค่าแลตทิซพารามิเตอร์จะคำนวณจาก diffractograms ซึ่งจะแปรผันตามรัศมีไอออนิกของไอออนบวกที่นำมาแลกเปลี่ยน โดย K^+ มีรัศมีไอออนิกที่ใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับ Na^+ และ Li^+ ดังนั้น K^+ จึงมีค่าแลตทิซพารามิเตอร์มากที่สุด ในระหว่างการแลกเปลี่ยนไอออนบวก ไอออนโซเดียมจะถูกแทนที่โดยไอออนลิเทียมและโพแทสเซียมในโครงสร้างซีโอไลต์ ไอออนลิเทียมมีเส้นผ่านศูนย์กลางและมวลอะตอมน้อยกว่าไอออนโซเดียมและโพแทสเซียม และไอออนโพแทสเซียมมีเส้นผ่านศูนย์กลางและมวลอะตอมมากกว่าไอออนโซเดียม ทำ

ให้ค่าแลตทิซ พารามิเตอร์ลดลงสำหรับซีโอไลต์ Na LTA ที่แลกเปลี่ยนด้วยไอออนลิเทียมและเพิ่มขึ้น สำหรับการแลกเปลี่ยนด้วยไอออนโพแทสเซียม ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงค่ารัศมีไอออนิก มวลอะตอม และค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของไอออนต่างๆ [25, 97]

Ion	Ionic radius (Å)	Atomic mass (amu)	Unit cell parameter , a (Å)
Li ⁺	0.68	6.93	24.044
Na ⁺	0.97	22.99	24.553
K ⁺	1.33	39.10	24.602

ซึ่งค่า Unit cell parameters (a) สำหรับซีโอไลต์ 5A และซีโอไลต์ 5A ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรตในปริมาณต่างๆ ในงานวิจัยนี้จะคำนวณจากตำแหน่งของพีค XRD และดัชนีมิลเลอร์ (h k l) ที่ (200), (220), (222), (442) และ (622) โดยใช้โปรแกรม UnitCell แสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 แสดงค่า Unit cell parameter ของซีโอไลต์ 5A และซีโอไลต์ 5A ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต

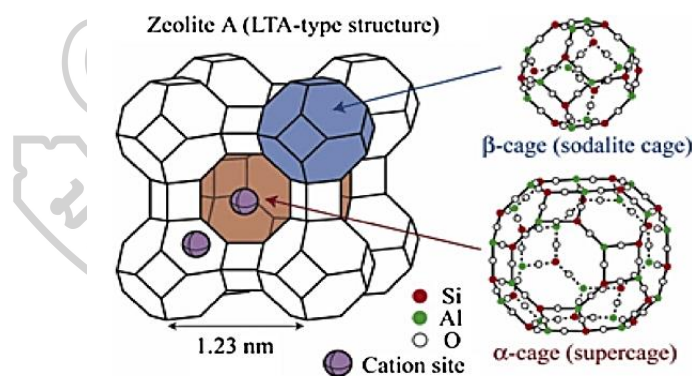
Sample	Unit cell parameter , a (Å)
Z 5A	24.585
Z-Li ⁺ 1.25	24.339
Z-Li ⁺ 2.5	24.498
Z-Li ⁺ 3.75	24.557
Z-K ⁺ 1.25	24.609
Z-K ⁺ 2.5	24.613
Z-K ⁺ 3.75	24.618

จากตารางที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าซีโอไลต์เมื่อแลกเปลี่ยน Na⁺ (0.97 Å) ด้วย Li⁺ (0.68 Å) ขนาดยูนิตเซลล์จะลดลงและเมื่อแลกเปลี่ยนกับ K⁺ (1.33 Å) ขนาดยูนิตเซลล์จะเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของไอออนเพิ่มขึ้น ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lisa Price และคณะ [93] พวกเขาทำการแลกเปลี่ยนไอออนหมู่ที่ 1 กับซีโอไลต์ A และคำนวณค่า Unit cell

parameters (a) โดยใช้โปรแกรม UnitCell พบว่าขนาดยูนิตเซลล์ลดลงประมาณ 1% เมื่อแลกเปลี่ยนไอออน Na^+ ด้วย Li^+ ที่มีขนาดเล็กกว่าและขนาดยูนิตเซลล์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อแลกเปลี่ยนกับ K^+ และ Rb^+ ที่มีขนาดใหญ่กว่า ในทำนองเดียวกันแลตทิซพารามิเตอร์จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจาก $\text{Li} < \text{Na} < \text{K} < \text{Rb}$ -A ตามรัศมีไอออนิกที่เพิ่มขึ้นของไอออนบวกโมโนวาเลนต์ ดังนั้นผลการทดลองนี้จึงเป็นการยืนยันการแลกเปลี่ยนไอออน Li และ K ภายในโครงสร้างของซีโอไลต์ว่าเกิดขึ้นจริง

4.3.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต (PLA/PEO/Z-Li⁺, PLA/PEO/Z-K⁺ films)

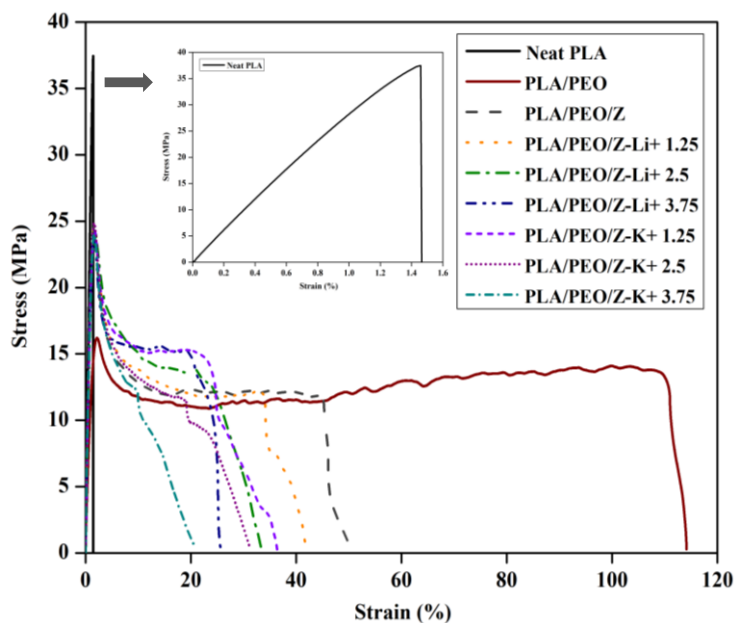
ซีโอไลต์มีโครงสร้างสามมิติของเตตระฮีดรอลของ SiO_4 และ AlO_4 ซึ่งอะลูมิเนียมไอออนอยู่ในตำแหน่งตรงกลางของเตตระฮีดรอลและล้อมรอบด้วยอะตอมออกซิเจนสี่อะตอมนี้ทำให้เกิดประจุลบในเฟรมเวิร์กดังรูปที่ 4.31 ซึ่งจะสมดุลกับไอออนบวกที่แลกเปลี่ยนได้ (เช่น Na, K และ Ca ซึ่งโดยทั่วไปมีสัดส่วนที่สูงกว่า Mg, Ba, Sr เป็นต้น) ไอออนบวกภายในของซีโอไลต์เหล่านี้สามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนบวกอื่นๆ ได้ ซึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์มีหลายประการ เช่น โครงสร้าง ขนาดและรูปร่างของไอออน ความหนาแน่นของประจุ ประจุไอออนิก และความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ภายนอก เป็นต้น [98]



รูปที่ 4.31 แสดงโครงสร้างสามมิติของซีโอไลต์ A [99]

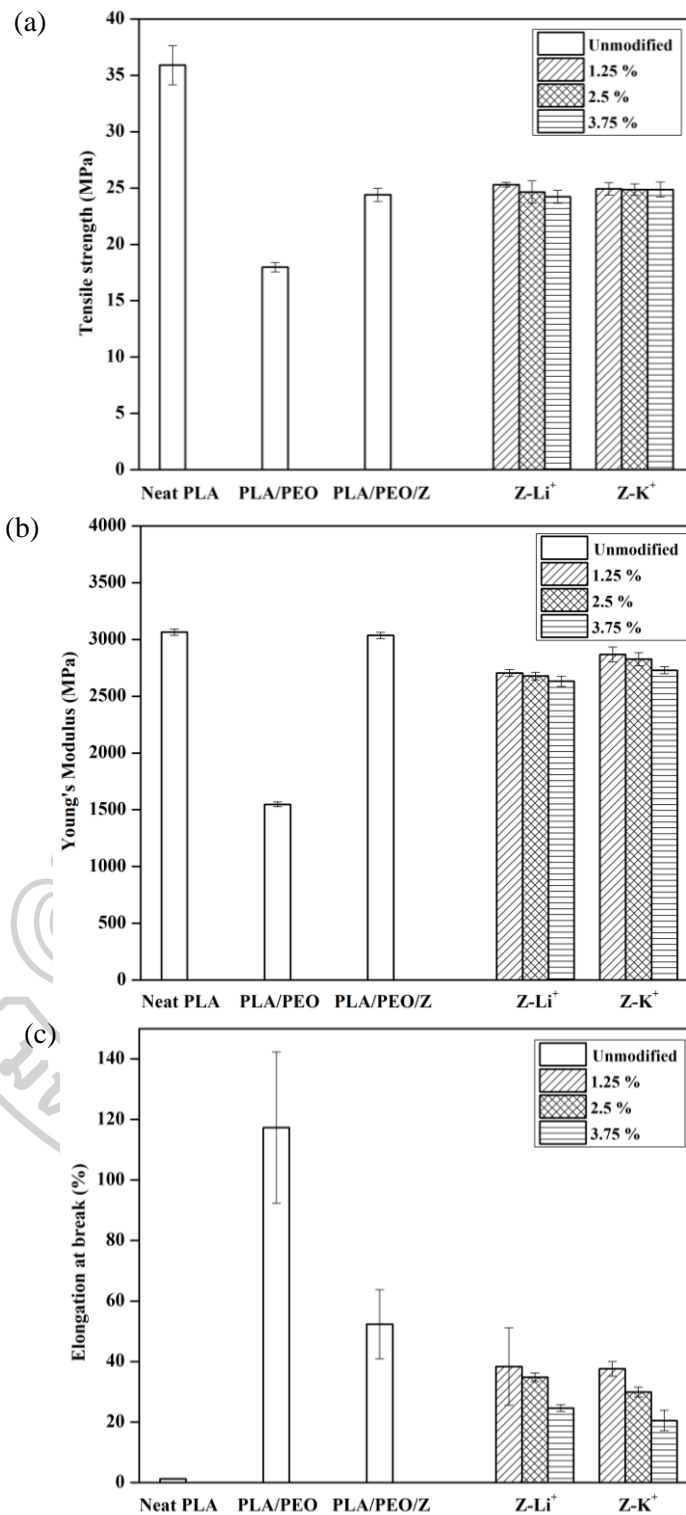
ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะอัลคาไล (Monovalent alkali metals) คือ Li^+ และ K^+ โดยใช้ LiNO_3 และ KNO_3 ในปริมาณ 1.25, 2.5 และ 3.75 wt% ของซีโอไลต์ และนำซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วย Li^+ และ K^+ แล้วปริมาณ 1 %wt ผสมลงในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO จากความแตกต่างของไอออนทั้งสองชนิด รวมถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนดังที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้คาดว่าซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม เป็นเหตุให้ในงานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติเชิงกลของระบบพอลิเมอร์ผสมที่ทำการเติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน แสดงดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 แสดงเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน

จากเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ในรูปที่ 4.32 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนยังคงมีการแตกหักแบบยืดหยุ่น (Ductile fracture) ซึ่ง tensile stress at yield ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนมีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ไม่ได้ทำการแลกเปลี่ยนไอออน และพบว่า tensile strain at break ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนมีค่าต่ำกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ไม่ได้ทำการแลกเปลี่ยนไอออน และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของไอออนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.33 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีไอไลต์และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีไอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน : (a) Tensile strength, (b) Young's Modulus และ (c) Elongation at break

ตารางที่ 4.11 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีไอไลต์และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีไอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน

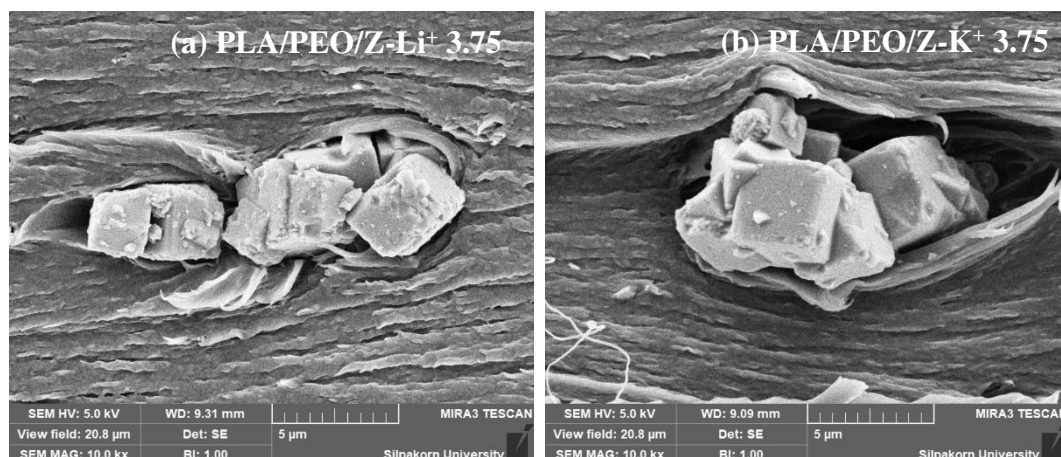
Samples	Tensile properties		
	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
Neat PLA	35.90 ± 1.73 ^a	3064.37 ± 27.21 ^a	1.27 ± 0.13 ^d
PLA/PEO	17.98 ± 0.42 ^c	1547.84 ± 21.67 ^e	117.27 ± 24.98 ^a
PLA/PEO/Z	24.39 ± 0.58 ^b	3035.50 ± 26.94 ^a	52.33 ± 11.43 ^b
PLA/PEO/Z-Li ⁺ 1.25	25.30 ± 0.21 ^b	2704.76 ± 29.48 ^{c,d}	38.35 ± 12.80 ^{b,c}
PLA/PEO/Z-Li ⁺ 2.5	24.65 ± 0.99 ^b	2677.35 ± 34.22 ^{c,d}	34.82 ± 1.37 ^{b,c}
PLA/PEO/Z-Li ⁺ 3.75	24.23 ± 0.57 ^b	2631.35 ± 44.42 ^d	24.61 ± 1.11 ^c
PLA/PEO/Z-K ⁺ 1.25	24.92 ± 0.55 ^b	2867.83 ± 65.27 ^b	37.58 ± 2.40 ^{b,c}
PLA/PEO/Z-K ⁺ 2.5	24.86 ± 0.51 ^b	2826.07 ± 56.74 ^b	29.93 ± 1.59 ^c
PLA/PEO/Z-K ⁺ 3.75	24.87 ± 0.67 ^b	2729.27 ± 31.64 ^c	20.53 ± 3.39 ^{c,d}

จากรูปที่ 4.33(a) และตารางที่ 4.11 พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีไอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนด้วย Li⁺ และ K⁺ มีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีไอไลต์ที่ไม่ได้ทำการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้นี้ได้ทำการแลกเปลี่ยนไอออนภายในโครงสร้างของซีไอไลต์ โดยนำซีไอไลต์ไปปรับปรุงด้วยสารเชื่อมประสานไซเลนก่อนและนำมาทำการแลกเปลี่ยนไอออนแล้วจึงนำไปผสมลงในพอลิเมอร์ผสม PBS/PLA พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติมซีไอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนมีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติมซีไอไลต์ที่ไม่ได้ทำการแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากในขั้นตอนการปรับปรุงซีไอไลต์ด้วยสารเชื่อมประสานไซเลนก่อนแล้วจึงนำมาทำการแลกเปลี่ยนไอออนอาจทำให้ไอออนไปจับกับ lone pair electron บริเวณหมู่อะมิโนของสารเชื่อมประสานไซเลนที่ต้องนำไปเชื่อมต่อกับพอลิเมอร์ ทำให้การเชื่อมต่อระหว่างพอลิเมอร์กับซีไอไลต์ที่ถูกปรับปรุงนั้นไม่ดี สมบัติเชิงกลจึงลดลง [72] แต่ในงานวิจัยนี้้นำซีไอไลต์ไปทำการแลกเปลี่ยนไอออนก่อนและปรับปรุงด้วยสารเชื่อมประสานไซเลนที่หลังแล้วจึงนำไปผสมลงในพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO จึงอาจทำให้โอกาสที่ไอออนไปจับกับ lone pair electron บริเวณหมู่อะมิโนของสารเชื่อมประสานไซเลนนั้นลดลง ทำให้พอลิเมอร์สามารถเชื่อมกับซีไอไลต์ที่ถูกปรับปรุงได้ดีขึ้น สามารถสังเกตได้จากภาพ SEM (รูปที่ 4.30(b-g)) จะเห็นว่า

ซีโอไลต์ที่ถูกปรับปรุงนั้นฝังตัวอยู่ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ซึ่งแสดงถึงการยึดเกาะที่ดี และเมื่อปริมาณไอออนเพิ่มขึ้นพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมไม่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาค่ามอดูลัส (รูปที่ 4.33(b)) พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนมีค่ามอดูลัสต่ำกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ไม่ได้ทำการแลกเปลี่ยนไอออน อาจเป็นไปได้ว่าสารเชื่อมประสานไซเลน APTMS ที่เติมลงไปนั้นมีบางส่วนทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดเป็นหมู่ซิลานอล (Si-OH) ดังรูปที่ 4.19(a) ซึ่งหมู่ซิลานอลนี้อาจรวมตัวกันเป็น Siloxane (Si-O-Si) และเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ทำให้ความต้านทานต่อการเสียรูปลดลง และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่แลกเปลี่ยนด้วย Li^+ มีค่ามอดูลัสต่ำกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่แลกเปลี่ยนด้วย K^+ เล็กน้อย นอกจากนี้เมื่อปริมาณไอออนเพิ่มขึ้นพบว่าค่ามอดูลัสมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

เมื่อพิจารณาค่าการยึดตัวที่จุดขาด (รูปที่ 4.33(c)) พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนมีค่าการยึดตัวที่จุดขาดต่ำกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ไม่ได้ทำการแลกเปลี่ยนไอออน อาจเนื่องจากซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนมีความเป็นขั้วของอันตรกิริยาสูงกว่าซีโอไลต์ที่ไม่ได้ทำการแลกเปลี่ยนไอออน ทำให้ความเข้ากันได้ระหว่างเมทริกซ์พอลิเมอร์และซีโอไลต์ลดลง และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่แลกเปลี่ยนด้วย K^+ มีค่าการยึดตัวที่จุดขาดต่ำกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่แลกเปลี่ยนด้วย Li^+ อาจเนื่องจากค่า Selectivity ของการแลกเปลี่ยนไอออนของ $\text{K}^+ > \text{Li}^+$ [100] ทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนในซีโอไลต์ของ K^+ ดีกว่า Li^+ ในทางกลับกันเมื่อแลกเปลี่ยนได้ดี ความเป็นขั้วของอันตรกิริยาก็อาจมากกว่าส่งผลให้ความเข้ากันได้ระหว่างเมทริกซ์พอลิเมอร์และซีโอไลต์ลดลง และเมื่อปริมาณไอออนเพิ่มขึ้นพบว่าค่าการยึดตัวที่จุดขาดมีแนวโน้มลดลง อาจเป็นเพราะว่าเมื่อปริมาณไอออนเพิ่มขึ้น ความเป็นขั้วของอันตรกิริยาของซีโอไลต์ก็เพิ่มขึ้นด้วยทำให้ความเข้ากันได้ระหว่างเมทริกซ์พอลิเมอร์และซีโอไลต์ลดลง ซีโอไลต์รวมกลุ่มกันมากขึ้น ดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 แสดงลักษณะหน้าผิวแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนในปริมาณ 3.75 wt% ของซีโอไลต์

4.3.3 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต (PLA/PEO/Z-Li⁺, PLA/PEO/Z-K⁺ films) ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการแลกเปลี่ยนไอออน Li⁺ และ K⁺ ในซีโอไลต์ในปริมาณแตกต่างกัน แล้วผสมลงในพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ซึ่งซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนอาจส่งผลกระทบต่อสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมนี้ แสดงผลที่ได้ดังตารางที่ 4.12

จากตารางที่ 4.12 พบว่าหลังจากใส่ซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนแล้วลงในพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ยังคงมี T_g และ T_{m1} ต่ำกว่า Neat PLA แต่มี T_g และ T_{m1} เท่ากับและใกล้เคียงกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ไม่ได้ทำการแลกเปลี่ยนไอออน รวมถึงชนิดและปริมาณไอออนไม่ส่งผลต่อ T_g และ T_m ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO แสดงว่าซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนไม่ได้ขัดขวางการทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ของ PEO ใน PLA ซึ่งงานวิจัยก่อนหน้านี้ระบุว่า การเติมซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมไนเตรตลงในฟิล์มพอลิเมอร์ ไม่ส่งผลต่อค่า T_g และ T_m [17, 64]

ตารางที่ 4.12 แสดงข้อมูลที่ได้จาก DSC ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน

Samples	T _g (°C)	ΔH _{cc} (J/g)	T _{m1} (°C)	T _{m2} (°C)	ΔH _m (J/g)	X _c (%)
Neat PLA	54.15	32.33	146.00	152.04	32.92	0.63
PLA/PEO	40.62	30.88	139.82	151.17	40.51	11.43
PLA/PEO/Z	40.45	10.45	140.55	151.29	20.18	11.67
PLA/PEO/Z-Li ⁺ 1.25	40.21	22.77	140.74	151.39	33.38	12.72
PLA/PEO/Z-Li ⁺ 2.5	40.55	23.52	140.53	151.17	33.79	12.31
PLA/PEO/Z-Li ⁺ 3.75	40.45	21.69	140.54	151.01	31.8	12.12
PLA/PEO/Z-K ⁺ 1.25	40.60	25.43	140.02	151.20	35.52	12.10
PLA/PEO/Z-K ⁺ 2.5	40.44	24.75	139.71	151.01	34.6	11.81
PLA/PEO/Z-K ⁺ 3.75	40.07	11.85	140.37	151.93	21.63	11.73

เมื่อพิจารณาความเป็นผลึกพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนมีปริมาณผลึกสูงกว่า Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ไม่ได้เติมซีโอไลต์ และมีผลึกใกล้เคียงกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ไม่ได้ทำการแลกเปลี่ยนไอออน แสดงให้เห็นว่าการเติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนลงในเมทริกซ์พอลิเมอร์ผสมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนยังคงทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) ให้กับ PLA [64, 72] และพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่แลกเปลี่ยนด้วย K⁺ มีความเป็นผลึกต่ำกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่แลกเปลี่ยนด้วย Li⁺ เล็กน้อย (~ 0.5%) อาจเป็นเพราะว่า Li⁺ มี Ionic radius น้อยกว่า K⁺ [25] เมื่อทำการแลกเปลี่ยน Li⁺ เข้าไปในซีโอไลต์ ทำให้มีพื้นที่ผิวที่จะเป็นจุดเริ่มต้นในการเกิดนิวเคลียสเพื่อพัฒนาไปเป็นผลึกมากกว่าพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ที่แลกเปลี่ยนด้วย K⁺ และปริมาณผลึกมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณไอออนเพิ่มขึ้น เป็นไปได้ว่าปริมาณไอออนที่เพิ่มขึ้นมีโอกาสไปขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ระบุว่า การเติมซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมไนเตรตลงในฟิล์ม PBAT ส่งผลให้ความเป็นผลึกลดลง เนื่องจาก K⁺ มีขนาดใหญ่กว่า Na⁺ ในซีโอไลต์ เมื่อแลกเปลี่ยนไอออนแล้วทำให้ซีโอไลต์มีพื้นที่ผิวในการเหนี่ยวนำให้ PBAT ตกผลึกน้อยลง [64]

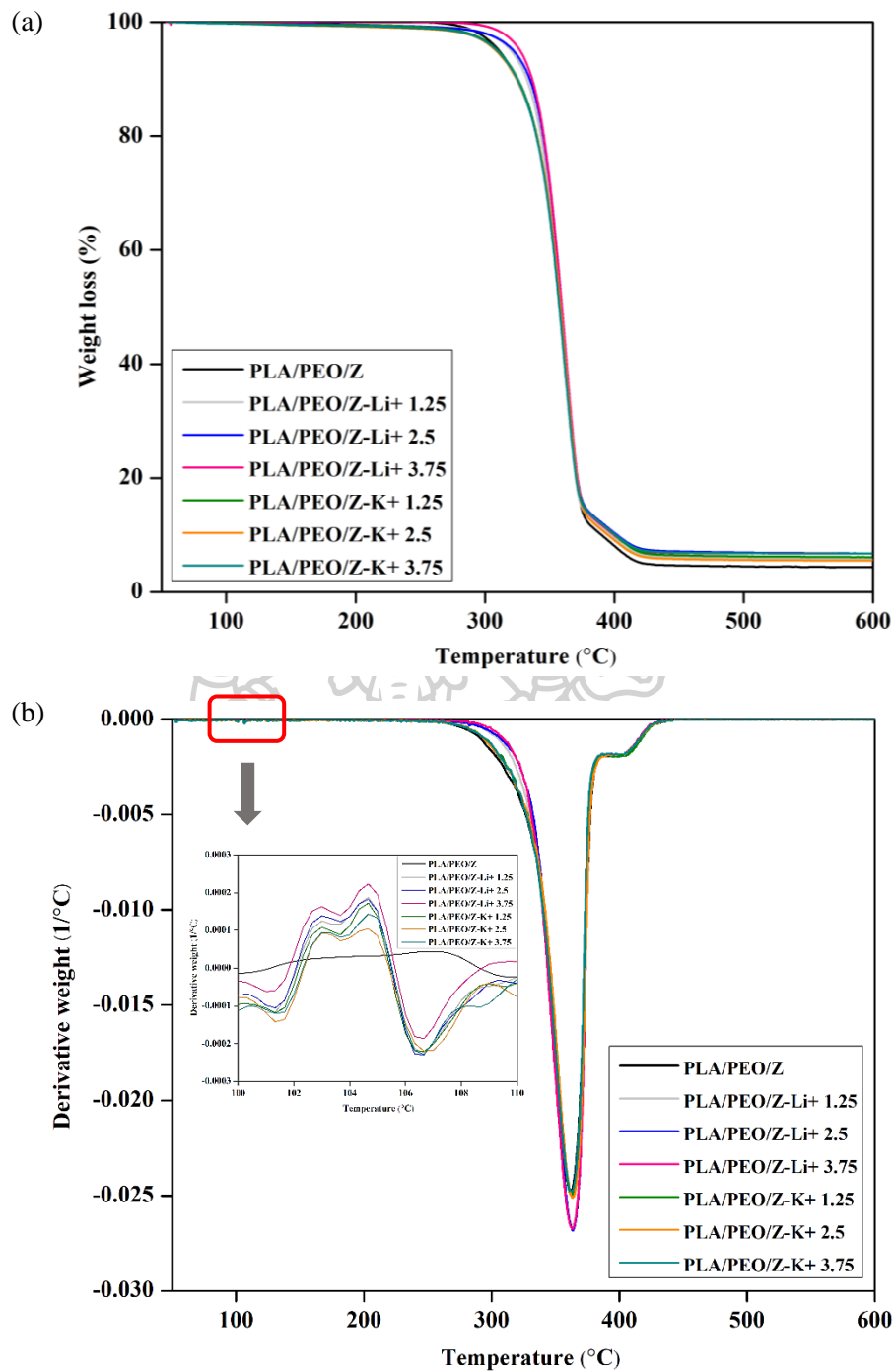
4.3.4 ผลการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต (PLA/PEO/Z-Li⁺, PLA/PEO/Z-K⁺ films) ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA)

ดังที่กล่าวมาข้างต้นว่าซีโอไลต์มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงและถูกนำไปใช้ในหลายอุตสาหกรรม ดังนั้นเมื่อนำซีโอไลต์มาทำการปรับปรุงโดยการแลกเปลี่ยนไอออนด้วย Li⁺ และ K⁺ และผสมกับพอลิเมอร์ จึงเป็นเหตุให้ในงานวิจัยนี้ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่ทำการเติมซีโอไลต์ที่แลกเปลี่ยนไอออนด้วย Li⁺ และ K⁺ ในปริมาณแตกต่างกัน ซึ่งแสดงข้อมูลที่ได้นำมาจัดรูปที่ 4.35 และตารางที่ 4.13

จากเทอร์โมแกรมรูปที่ 4.35 และตารางที่ 4.13 แสดงอุณหภูมิสลายตัวสูงสุด (Degradation temperature (T_d)) 2 ชั้น โดยชั้นที่ 1 เป็นการสลายตัวของ PLA (T_{d1}) และชั้นที่ 2 เป็นการสลายตัวของ PEO (T_{d2}) และพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่แลกเปลี่ยนไอออนมี T_{onset} และ T_{d1} ต่ำกว่า Neat PLA แต่สูงกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ไม่ได้เติมซีโอไลต์

เมื่อเปรียบเทียบฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ไม่ได้ทำการแลกเปลี่ยนไอออนกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนมี T_{onset} เลื่อนไปที่อุณหภูมิสูงขึ้นเล็กน้อย (1-3 °C) อาจเนื่องจากการใส่ไอออนเข้ามาในรูพรุนของซีโอไลต์ ทำให้ไอออนสามารถดูดน้ำไว้ในซีโอไลต์ได้มากขึ้น ดังนั้นจึงต้องใช้ความร้อนสูงขึ้นเพื่อสลายโมเลกุลของน้ำออกไปที่อุณหภูมิประมาณ 100-110 °C แสดงดังรูปที่ 4.35(b) [101] อย่างไรก็ตามการใส่ซีโอไลต์ที่แลกเปลี่ยนไอออนลงในพอลิเมอร์ผสมไม่ส่งผลต่อ T_{d1} และ T_{d2}

นอกจากนี้พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่แลกเปลี่ยนด้วย K⁺ มี T_{onset}, T_{d1} และ T_{d2} ใกล้เคียงกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่แลกเปลี่ยนด้วย Li⁺ อาจกล่าวได้ว่าชนิดและปริมาณไอออนไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 4.35 แสดงเทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน : (a) TGA และ (b) DTG

ตารางที่ 4.13 แสดงข้อมูลที่ได้จาก TGA ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน

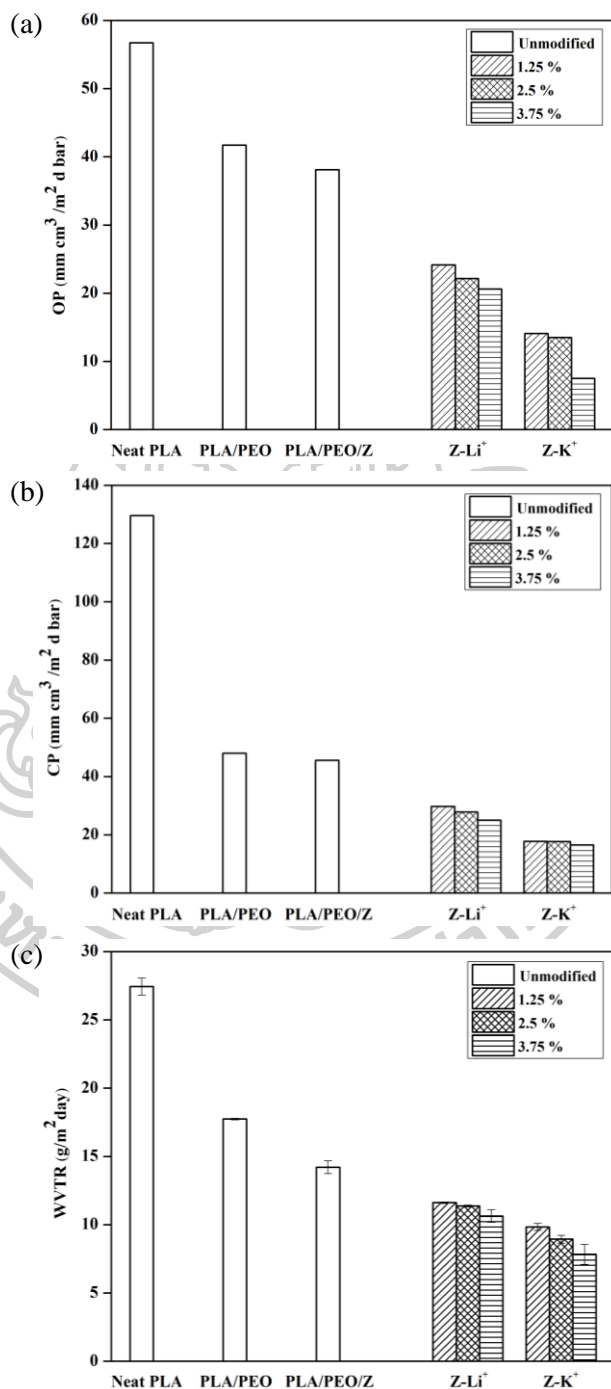
Samples	T _{onset} (°C)	T _{d1} (°C)	T _{d2} (°C)	T _{endset} (°C)
Neat PLA	347.84	365.29	-	377.28
PLA/PEO	329.53	359.80	404.20	424.22
PLA/PEO/Z	338.32	361.87	404.15	425.61
PLA/PEO/Z-Li ⁺ 1.25	340.77	362.36	404.29	418.69
PLA/PEO/Z-Li ⁺ 2.5	341.99	362.62	404.83	425.05
PLA/PEO/Z-Li ⁺ 3.75	341.58	362.65	404.01	420.53
PLA/PEO/Z-K ⁺ 1.25	340.00	361.87	404.27	422.11
PLA/PEO/Z-K ⁺ 2.5	340.12	362.45	404.24	425.28
PLA/PEO/Z-K ⁺ 3.75	339.27	361.78	404.07	421.26

4.3.5 การศึกษาความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต (PLA/PEO/Z-Li⁺, PLA/PEO/Z-K⁺ films)

ในงานวิจัยก่อนหน้านี้นี้มีการศึกษาการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนของซีโอไลต์ LTA ที่แลกเปลี่ยนด้วยไอออนลิเทียมและโพแทสเซียม พบว่าการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเมื่อแลกเปลี่ยนด้วยไอออนโพแทสเซียมในซีโอไลต์ LTA เทียบกับซีโอไลต์ Li A และ Na A และการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนลดลงสำหรับซีโอไลต์ Li A เนื่องจากรูพรุนของซีโอไลต์ถูกจำกัด ดังนั้นจึงส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติในการดูดซับ [97] และงานวิจัยของ Rewadee Anuwattana [95] ศึกษาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของตัวดูดซับ Granular activated carbon (GAC) และซีโอไลต์ 5A ที่ปรับปรุงด้วย LiNO₃ แล้วผสมลงใน Polyethyleneimine (PEI) ระบุว่า การใส่ซีโอไลต์ 5A สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับได้ และความสามารถในการคัดเลือก CO₂/CH₄ ของ LiNO₃/5A สูงกว่า GAC ซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วย LiNO₃ เป็นตัวดูดซับเคมี ซึ่งความเป็นไอออนิกที่แข็งแรงจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับ CO₂

จากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงซีโอไลต์ด้วยไอออนของโลหะหมู่ที่ 1 มีความสามารถในการดูดซับก๊าซต่างๆ เพิ่มขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาความสามารถในการซึม

ผ่านก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต ในปริมาณต่างๆ แสดงผลการศึกษาดังรูปที่ 4.36 และตารางที่ 4.14



รูปที่ 4.36 ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน : (a) O₂ permeability, (b) CO₂ permeability และ (c) Water vapor transmission rate

จากรูปที่ 4.36 และตารางที่ 4.14 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน มีค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OP) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CP) และอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (WVTR) ต่ำกว่า Neat PLA และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ไม่ได้เติมซีโอไลต์ เนื่องจากซีโอไลต์มีรูพรุนทำให้สามารถดูดซับก๊าซและไอน้ำไว้ในรูพรุนได้และการที่ใส่ซีโอไลต์ลงในเมทริกซ์พอลิเมอร์จะเป็นการเพิ่มเส้นทางการแพร่ของโมเลกุลก๊าซและไอน้ำดังที่กล่าวไปในตอนที่ 2

เมื่อเปรียบเทียบฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ไม่ได้ทำการแลกเปลี่ยนไอออนกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนมีค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OP) (รูปที่ 4.36(a)) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CP) (รูปที่ 4.36(b)) และอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (WVTR) (รูปที่ 4.36(c)) ต่ำกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ไม่ได้ทำการแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากไอออนที่เติมลงไปจะไปเกิด π -complexation bond กับโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนหรือคาร์บอนไดออกไซด์ และไอออนสามารถไปจับกับ lone pair electron ของโมเลกุลของน้ำได้ รวมถึงยังสามารถเกิด Hydrogen bonding ระหว่างผิวของซีโอไลต์และโมเลกุลของน้ำ ทำให้โมเลกุลของก๊าซและน้ำเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มได้น้อยลง [72] จึงทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนมีค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ลดลง

นอกจากนี้พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่แลกเปลี่ยนด้วย K^+ มีค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ต่ำกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่แลกเปลี่ยนด้วย Li^+ เป็นผลมาจาก Replacing power ที่แตกต่างกัน หมายความว่าไอออนบวกต่างชนิดกันจะดูดซับอยู่ที่ผิวของซีโอไลต์และถูกไล่ออกจากผิวด้วยไอออนบวกชนิดอื่นได้ยากง่ายต่างกัน ไอออนบวกบางชนิดจะดูดซับอยู่ที่ผิวของซีโอไลต์อย่างหลวมๆ จึงถูกแทนที่ได้ง่าย ซึ่ง Replacing power ของ $K^+ > Na^+ > Li^+$ ตาม Ionic radius [102] นั่นคือ Na^+ (Unmodified) จะดูดซับอยู่ที่ผิวของซีโอไลต์ได้เหนียวแน่นกว่า Li^+ แต่จะเหนียวแน่นน้อยกว่า K^+ ดังนั้นซีโอไลต์ที่แลกเปลี่ยนด้วย K^+ จึงมีประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำได้ดีกว่าซีโอไลต์ (Unmodified) และซีโอไลต์ที่แลกเปลี่ยนด้วย Li^+ ควรมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้อยที่สุด แต่จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าซีโอไลต์ที่แลกเปลี่ยนด้วย Li^+ มีประสิทธิภาพในการดูดซับดีกว่าซีโอไลต์ (Unmodified) อาจเนื่องมาจาก Li^+ มีค่า Charge density มากกว่า Na^+ (Li^+ (52

$C \text{ mm}^{-3}) > Na^+ (24 C \text{ mm}^{-3})$) [103] ซึ่งการที่ Charge density ของไอออนมีค่ามากจะทำให้ไอออนมีความสามารถในการเกิด π -complexation bond กับโมเลกุลของก๊าซและไปจับกับ lone pair electron ของโมเลกุลของน้ำได้ดีกว่า [72]

เมื่อพิจารณาปริมาณของไอออนที่เติมลงไป พบว่าเมื่อปริมาณไอออนเพิ่มขึ้น ค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ จะลดลงและลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อใส่ไอออน 3.75 wt% ของซีโอไลต์ เนื่องจากจะมีไอออนไปเกิด π -complexation bond กับโมเลกุลของก๊าซและไปจับกับ lone pair electron ของโมเลกุลของน้ำได้มากขึ้นนั่นเอง ซึ่งปริมาณผลึกมีค่าใกล้เคียงกันมาก (ตารางที่ 4.12) จึงอาจจะไม่ส่งผลต่อค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ อย่างเห็นได้ชัด

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน

Samples	OP ($\text{mm cm}^3/\text{m}^2 \text{ d}$ bar)	CP ($\text{mm cm}^3/\text{m}^2 \text{ d}$ bar)	WVTR ($\text{g}/\text{m}^2 \text{ day}$)
Neat PLA	56.70	129.60	27.44 ± 0.63^a
PLA/PEO	41.70	48.00	17.74 ± 0.06^b
PLA/PEO/Z	38.10	45.60	14.21 ± 0.47^c
PLA/PEO/Z-Li ⁺ 1.25	24.15	29.79	11.61 ± 0.06^d
PLA/PEO/Z-Li ⁺ 2.5	22.14	27.84	11.37 ± 0.06^d
PLA/PEO/Z-Li ⁺ 3.75	20.61	25.05	$10.64 \pm 0.47^{d,e}$
PLA/PEO/Z-K ⁺ 1.25	14.10	17.76	$9.84 \pm 0.26^{e,f}$
PLA/PEO/Z-K ⁺ 2.5	13.50	17.67	$8.94 \pm 0.28^{f,g}$
PLA/PEO/Z-K ⁺ 3.75	7.50	16.53	7.83 ± 0.73^g

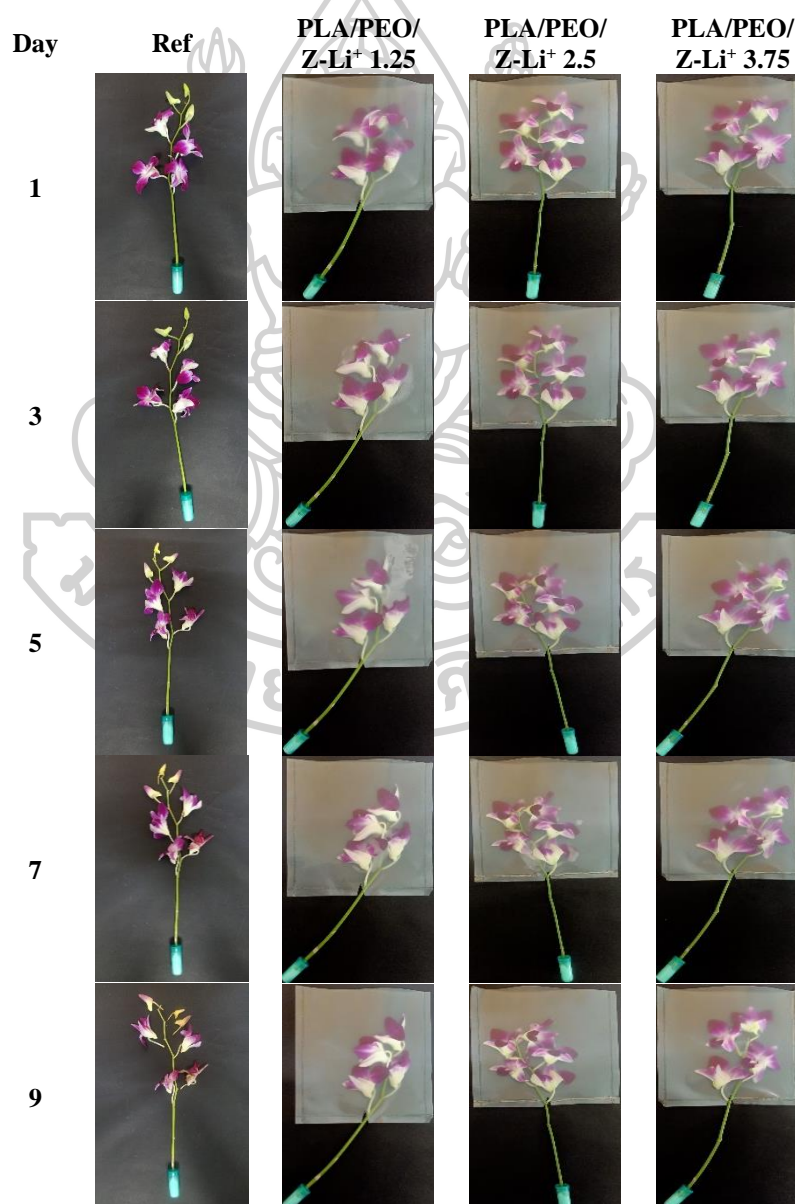
4.3.6 การศึกษาความสามารถในการยืดอายุกล้วยไม้ตัดดอกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ปรับปรุงด้วยลิเทียมไนเตรตและโพแทสเซียมไนเตรต (PLA/PEO/Z-Li⁺, PLA/PEO/Z-K⁺ films)

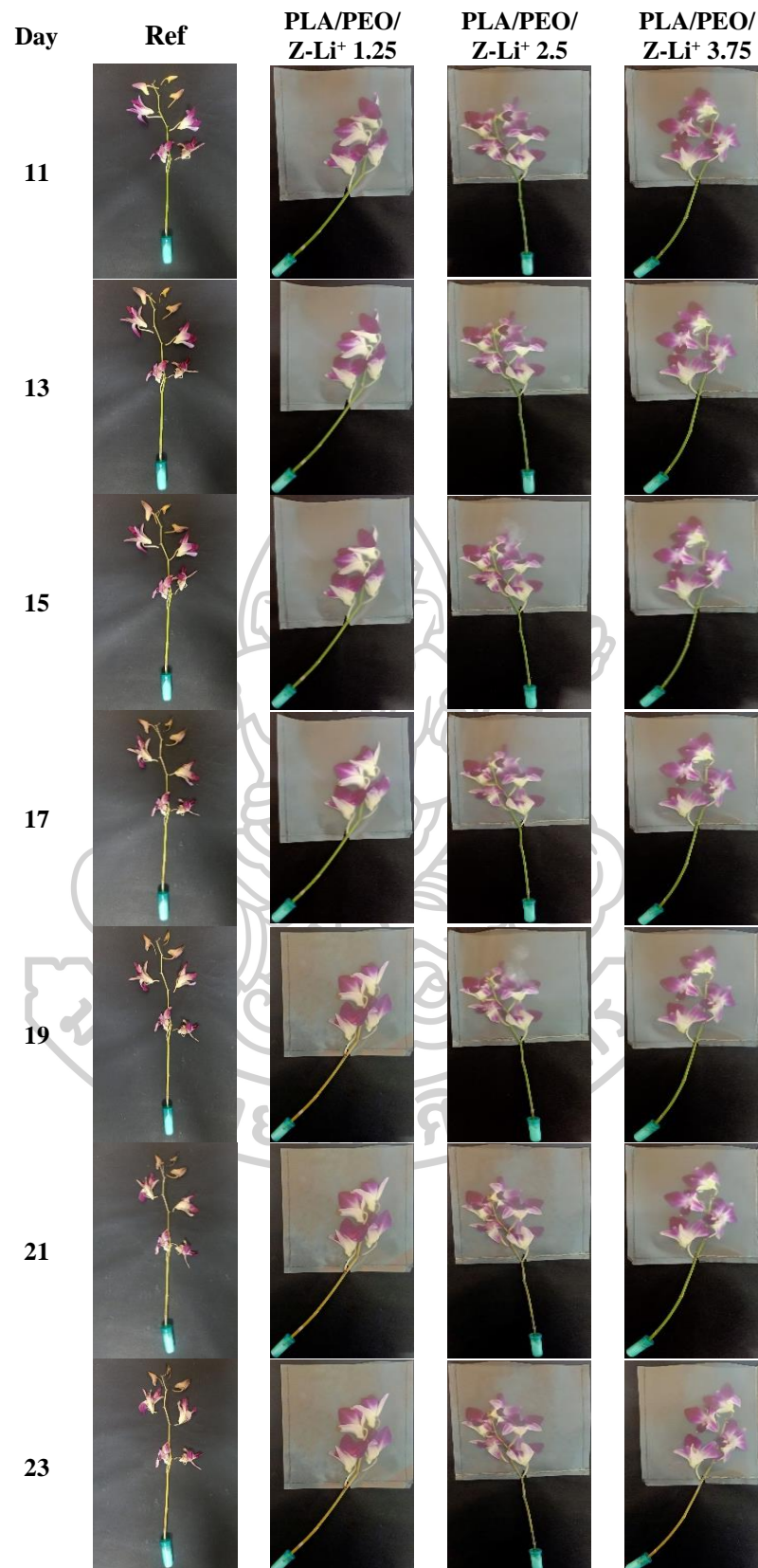
เอทิลีนเป็นฮอร์โมนพืชที่ผลิตเพื่อควบคุมกระบวนการเจริญเติบโต สาเหตุของเอทิลีนต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผักและผลไม้ ตัวอย่างเช่น การทำลายคลอโรฟิลล์ โดยเอทิลีนทำให้ผลไม้เปลี่ยนสีและลำต้นเหี่ยวแห้งในดอกไม้ การสะสมของเอทิลีนในระหว่างการขนส่งสามารถลดคุณภาพของสินค้าเกษตรอย่างมาก [12] ผัก ผลไม้ และดอกไม้หลายชนิดมีความไวต่อเอทิลีน และความชราภาพในช่วงต้นอาจเกิดขึ้นได้เมื่อสินค้าโภคภัณฑ์เหล่านี้สัมผัสกับเอทิลีนที่มีความเข้มข้นต่ำ (โดยทั่วไป <math>< 0.1-1.0 \mu\text{l l}^{-1}</math>) ดอกไม้และดอกตูมก็ไวต่อเอทิลีนเช่นกัน และก๊าซเอทิลีนบางชนิดจะปล่อยออกมาเมื่อถูกตัดหรือเสียหาย ผลกระทบที่เป็นอันตรายที่สุดบางประการของเอทิลีนบนพืชคือพืชเจริญเติบโตช้า อายุแก่นสั้นลงของไม้ตัดดอก (การตัดใบและกลีบดอก) ยับยั้งการพัฒนาของดอกตูมที่ยังไม่บรรลุนิติภาวะ เร่งความชราของพืชทุกชนิด และไวต่อการเกิดโรค รวมถึงการเกิดเอทิลีนในระหว่างการขนส่งหรือการเก็บรักษาสินค้าบางชนิดสามารถผลิตเอทิลีนที่สามารถส่งผลให้คุณภาพและอายุการเก็บรักษาลดลง นอกจากนี้ ความเข้มข้นของเอทิลีนที่สร้างความเสียหายมักเกิดขึ้นที่จุดขนส่งหรือศูนย์กระจายสินค้า เนื่องจากการสุกที่ระบายนการหายใจออกได้ไม่ดี/ห้องปรับอากาศ รถยก และอื่นๆ หนึ่งในวัสดุที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดที่ใช้กำจัดเอทิลีนคือโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากคุณสมบัติทางเคมีของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมีข้อควรระวังป้องกันการปนเปื้อนของผลิตภัณฑ์อาหาร การค้นหาวัสดุอื่นๆ ที่มีความสามารถในการกำจัดเอทิลีนและด้วยมาตรการป้องกันที่น้อยลงได้เน้นความสนใจไปที่ซีโอไลต์เป็นอย่างมาก [104, 105]

งานวิจัยก่อนหน้านี้ใช้ nano zeolite-KMnO₄ เป็นตัวดูดซับเอทิลีนของกล้วย (Musa paradisiaca) พบว่าการใช้ nano zeolite-KMnO₄ 3 กรัม บรรจุในกระดาดเซลลูโลสและติดบนบรรจุภัณฑ์ LDPE สามารถยืดอายุกล้วยได้ที่อุณหภูมิ 25°C, RH 85% นานถึง 23 วัน หรือนานกว่ากล้วยที่ไม่ได้ใช้ nano zeolite-KMnO₄ บรรจุในกระดาดเซลลูโลสและติดบนบรรจุภัณฑ์ LDPE 17 วัน [106] และ Alejandro Coloma และคณะ [107] ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเอทิลีนของซีโอไลต์ธรรมชาติของซิลิ (NZ-Ch) พบว่าหลังจาก 50 ชั่วโมง เอทิลีนลดลง 37% เมื่อใส่ ZN-Ch 10% ในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ LDPE นอกจากนี้การเพิ่มจำนวนของ active groups ที่มีอยู่บนพื้นผิวของวัสดุสามารถปรับปรุงความสามารถในการกำจัดสารประกอบที่เป็นกลาง [108] ซีโอไลต์เป็นสารประกอบที่มีประจุลบซึ่งสามารถดัดแปลงเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับเอทิลีนได้ ซึ่งความสามารถในการดูดซับเอทิลีนของซีโอไลต์ K⁺, ซีโอไลต์ Cs⁺ และซีโอไลต์ Rb⁺ เท่ากับ 102.5, 8.5 และ 90.15 L g⁻¹

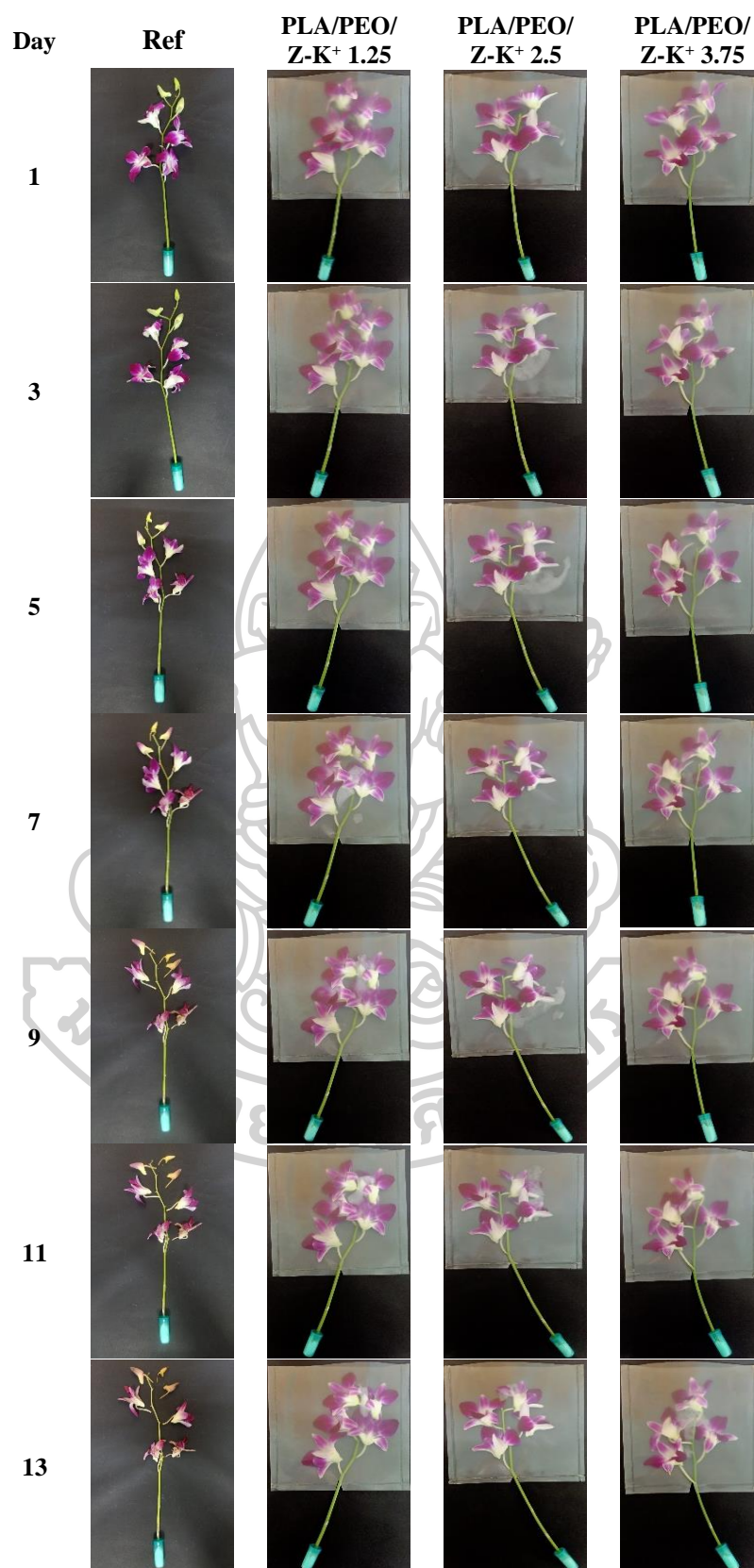
ตามลำดับ ดังนั้นซีโอไลต์ที่ดัดแปลงมีความสามารถในการดูดซับสูงจึงสามารถดูดซับก๊าซเอทิลีนในปริมาณที่สูงขึ้นจากผลิตผลสดได้มาก [12]

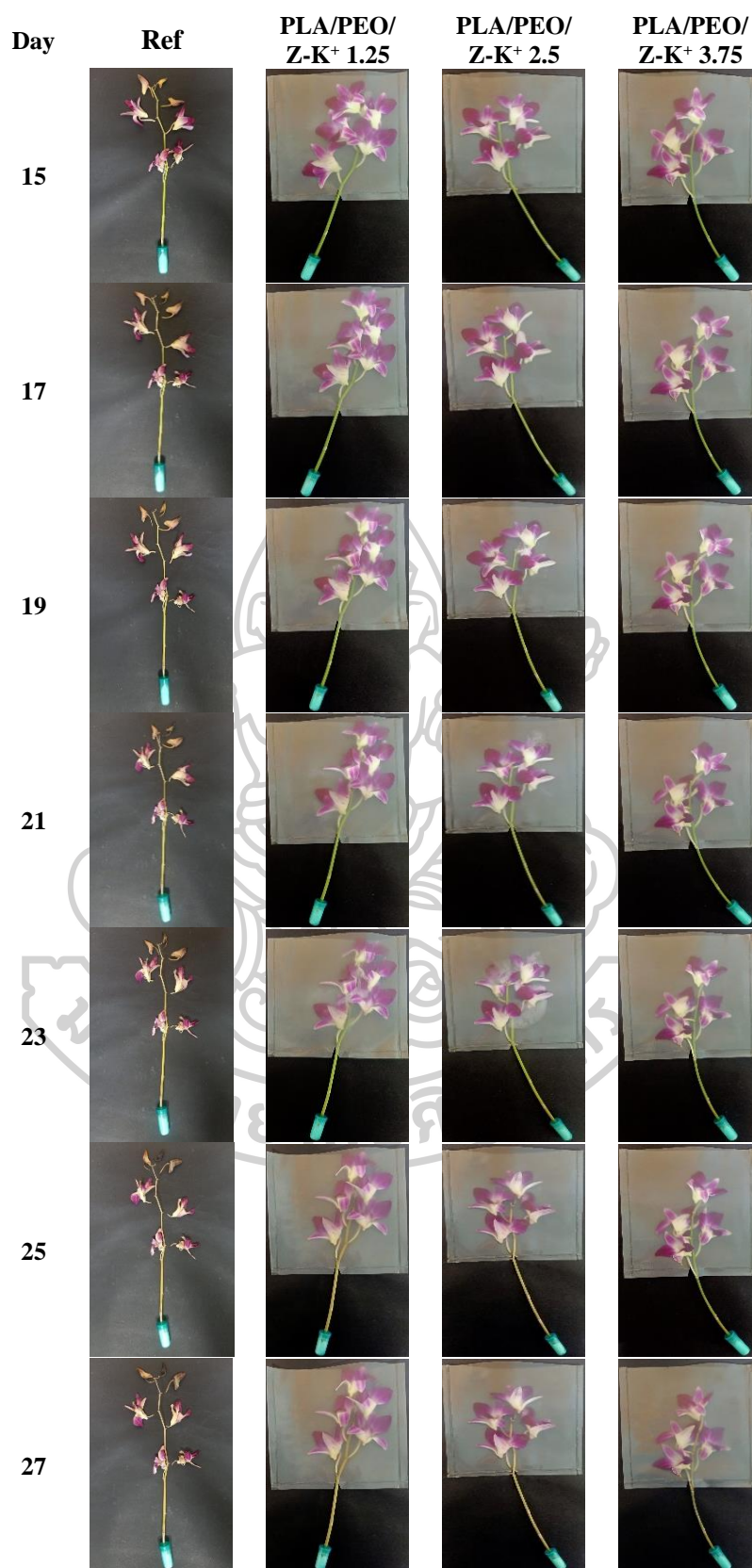
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงปรับปรุงซีโอไลต์ด้วยไอออน Li^+ และ K^+ เพื่อเพิ่มความสามารถของซีโอไลต์ในการดูดซับแก๊สต่างๆ ที่แพร่ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO เพื่อยืดอายุกล้วยไม้ตัดดอก ทำโดยบรรจุกล้วยไม้ตัดดอกในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ใส่ซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน Li^+ และ K^+ ในปริมาณ 1.25, 2.5 และ 3.75 wt% และทำการซีลปิดสามด้านและหุ้มปลายก้านดอกด้วยสำลีชุบน้ำ เพื่อลดการสูญเสียน้ำ จัดเก็บภายในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 8 °C จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ แสดงดังรูปที่ 4.37 และรูปที่ 4.38





รูปที่ 4.37 แสดงกล้วยไม้บรรจุในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO/Z-Li⁺





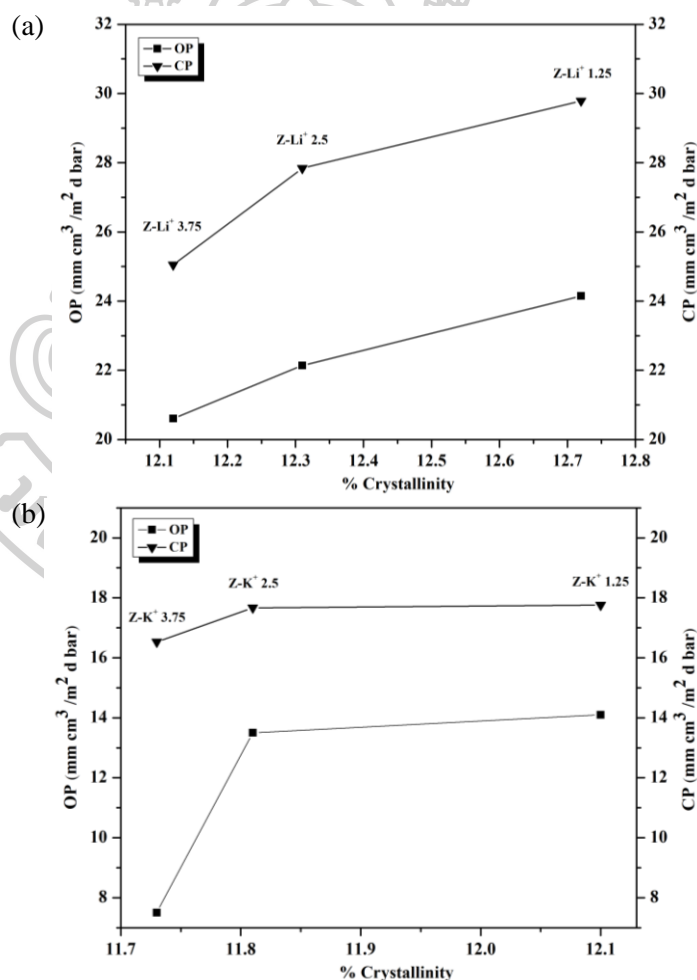
รูปที่ 4.38 แสดงกล้วยไม้บรรจุในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO/Z-K⁺

จากรูปที่ 4.37 และ 4.38 พบว่ากล้วยไม้ที่ไม่ได้บรรจุอยู่ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO จะเริ่มเหี่ยวและเริ่มเหลืองในวันที่ 5 เมื่อพิจารณากล้วยไม้ที่บรรจุอยู่ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ใส่ซีไอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน Li^+ ปริมาณ 1.25, 2.5 และ 3.75 wt% (รูปที่ 4.37) จะเริ่มเหี่ยวและเริ่มเหลืองในวันที่ 19, 21 และ 23 ตามลำดับ และพบว่ากล้วยไม้ที่บรรจุอยู่ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ใส่ซีไอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน K^+ ปริมาณ 1.25, 2.5 และ 3.75 wt% (รูปที่ 4.38) จะเริ่มเหี่ยวและเริ่มเหลืองในวันที่ 25, 25 และ 27 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ที่ว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ใส่ซีไอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน Li^+ มีการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ สูงกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ใส่ซีไอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน K^+ รวมถึงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างไอออนกับก๊าซเอทิลีน (รูปที่ 2.24(a)) โดยจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างไอออนบวกบนพื้นผิวของซีไอไลต์กับ π -electron จากพันธะคู่ของเอทิลีน ซึ่งระดับของอันตรกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีไอออนของไอออนบวกของโลหะเพิ่มขึ้น [12] ดังนั้นกล้วยไม้ที่บรรจุในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ใส่ซีไอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน Li^+ จึงเหี่ยวและเหลืองเร็วกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ใส่ซีไอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน K^+

เมื่อพิจารณาปริมาณไอออน พบว่าเมื่อปริมาณไอออนเพิ่มขึ้นก็จะมีไอออนไปเกิด π -complexation bond กับโมเลกุลของก๊าซและไปจับกับ lone pair electron ของโมเลกุลของน้ำได้มากขึ้น รวมถึงจะมีไอออนไปเกิดอันตรกิริยากับก๊าซเอทิลีนที่เกิดขึ้นภายในฟิล์มได้มากขึ้น ซึ่งเป็นแรงอันตรกิริยาที่แข็งแรงกว่าอันตรกิริยาระหว่างอะตอมไฮโดรเจนของก๊าซเอทิลีนกับอะตอมออกซิเจนที่ผิวของซีไอไลต์ (รูปที่ 2.24(b)) จึงทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ใส่ซีไอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนปริมาณมากกว่าสามารถยึดอายุกล้วยไม้ตัดดอกได้นานกว่า

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านก๊าซกับปริมาณผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ใส่ซีไอไลต์ที่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออน ดังรูปที่ 4.39 พบว่าความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ใส่ซีไอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน ส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านก๊าซและความสามารถในการยึดอายุกล้วยไม้ตัดดอกเพียงเล็กน้อยเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.16 แต่ฟิล์ม PLA/PEO ที่ใส่ซีไอไลต์ที่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนมีความสามารถยึดอายุกล้วยไม้ได้ยาวนานมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จากเดิมฟิล์ม PLA/PEO ที่เติมซีไอไลต์ที่ไม่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออน 1 wt% สามารถยึดอายุได้ 15 วัน เป็น 19-27 วัน ซึ่งสามารถยึดอายุกล้วยไม้ได้มากขึ้นประมาณ 2 เท่า นอกจากนี้อิทธิพลของ Li^+ หรือ K^+ ซึ่งเกิดอันตรกิริยากับ O_2 , CO_2 , ไอน้ำ และก๊าซเอทิลีน ได้ดี จึงทำให้ฟิล์มสามารถยึดอายุกล้วยไม้ได้ดีมากแล้วอาจมีปัจจัยภายนอกอื่นๆ อีกที่ส่งผลต่ออายุการเก็บรักษา

กล้วยไม้ตัดดอก เช่น ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเอทิลีนและทำให้ดอกกล้วยไม้ชราภาพเร็วขึ้น ได้แก่ อายุของดอก บทความก่อนหน้านี้นี้ตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างการผลิตเอทิลีนกับการเปิดของดอกตูมของดอกกล้วยไม้แอร์นดา พบว่ามีการผลิตเอทิลีนจำนวนมากในดอกตูมและปริมาณเพิ่มขึ้นตามการเจริญเติบโตของดอกตูม มีค่าสูงในดอกครึ่งเปิดและตามมาด้วยการลดลงทีละน้อย การผลิตเอทิลีนเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อดอกแสดงอาการชราภาพ [109] นอกจากนี้มีการศึกษาการผลิตเอทิลีนของกล้วยไม้สกุลหวายพบว่าดอกตูมผลิตเอทิลีนสูงกว่าดอกที่บานแล้ว ($5-40 \text{ nl g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) และปริมาณของ 1-aminocyclo-propane-1-carboxylic acid (ACC) ในดอกตูมก็มากกว่าดอกที่บานแล้ว ซึ่ง ACC เป็นเอนไซม์ที่เป็นตัวเร่งในการผลิตเอทิลีนในขั้นตอนแรก [110] ดังนั้นจะต้องให้ความระมัดระวังเป็นพิเศษกับดอกตูมและดอกไม้ในขั้นตอนการเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยวและการจัดการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับผู้ที่เกี่ยวข้องในระยะตูม



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านก๊าซกับปริมาณผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่ใส่ซีไอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน (a) PLA/PEO/Z-Li⁺ และ (b) PLA/PEO/Z-K⁺

เมื่อเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับบรรจุภัณฑ์ดัดแปรบรรยากาศ (Modified atmosphere packaging หรือ MAP) ซึ่งโดยทั่วไปจะควบคุมความเข้มข้นของก๊าซ O_2 ข้างใน MAP ให้น้อยกว่า 21 % และก๊าซ CO_2 ข้างใน MAP ให้มากกว่า 0.03 % เพื่อช่วยลดอัตราการหายใจของดอกกล้วยไม้ โดยงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ศึกษาโดย Warinthon Yimyong และคณะ [111] พวกเขาศึกษาผลของบรรจุภัณฑ์ดัดแปรบรรยากาศของฟิล์มพอลิเอทิลีน (PE), ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE), ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE), ฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และฟิล์มพอลิโพรพิลีน (PP) ต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาของกล้วยไม้ตัดดอกสกุลหวาย โดยจะตัดแต่งช่อดอกแต่ละช่อก่อนใส่ลงในหลอดพลาสติกที่มีน้ำกลั่นและบรรจุในกล่องกระดาษแข็ง กล่องแต่ละกล่องถูกห่อด้วยฟิล์มแต่ละชนิดและซีลปิดด้วยความร้อน (heat sealing) ซึ่งความเข้มข้นเฉลี่ยของก๊าซ O_2 และ CO_2 ข้างใน MAP เท่ากับ 20.76 % และ 0.1 % ตามลำดับ และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ $13^{\circ}C$ โดยมีความชื้นสัมพัทธ์ 95% พบว่า MAP ที่ใช้ฟิล์ม PE, LDPE, HDPE, PP และ PVC สามารถยืดอายุการเก็บรักษากล้วยไม้ตัดดอกสกุลหวายได้ 12, 15, 15, 18 และ 12 วัน ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า MAP ทั้งหมดสามารถลดการสูญเสียน้ำหนัก อัตราการหายใจ และการผลิตเอทิลีนของดอกกล้วยไม้ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้สามารถยืดอายุการเก็บรักษากล้วยไม้ตัดดอกได้ 19-27 วัน จากการควบคุมสภาวะการทดลองให้ใกล้เคียงกับการนำไปใช้งานจริงและผลการทดลองที่ได้สามารถใช้ได้จริงจากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของดอกกล้วยไม้ด้วยตาเปล่า



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 การศึกษาผลของพอลิเอทิลีนออกไซด์ (PEO) ที่ส่งผลต่อสมบัติของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA)

จากการศึกษาผลของปริมาณและน้ำหนักโมเลกุลของ PEO ต่อสมบัติของฟิล์ม PLA พบว่าการเติม PEO นั้นไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับ PLA แต่จะทำหน้าเป็นพลาสติกไซเซอร์ให้กับ PLA ทำให้ระยะห่างระหว่างสายโซ่ของ PLA มากขึ้นและสะดวกต่อการเคลื่อนไหวมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อเติม PEO ลงใน PLA แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนพฤติกรรมการแตกหักจากแบบเปราะไปเป็นการแตกหักแบบยืดหยุ่น (Brittle to ductile fracture) เมื่อเติม PEO 10% โดยน้ำหนัก แต่ความแข็งแรงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมก็ลดลงอย่างมากเช่นเดียวกัน และเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO สูงขึ้น จะทำให้ PEO เกิดการแยกเฟสออกจาก PLA การเติม PEO ลงใน PLA จะช่วยให้กระบวนการตกผลึกทำได้ง่ายขึ้น เพราะ PEO ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) ให้กับ PLA ส่งผลให้เมื่อพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณ PEO เพิ่มขึ้น ปริมาณผลึกก็เพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน (OP), อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CP) และอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (WVTR) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO มีแนวโน้มลดลง เพราะปริมาณผลึกที่เพิ่มขึ้นนี้จะเป็นตัวขัดขวางและเพิ่มเส้นทางการแพร่ของก๊าซต่างๆ ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ผสม แต่ค่า OP, CP และ WVTR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEO สูงขึ้น และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO สามารถยืดอายุกล้วยไม้ตัดดอกได้นานกว่าฟิล์ม Neat PLA

5.2 การศึกษาผลของการเติมซีโอไลต์ที่ทำการปรับปรุงด้วย (3-Aminopropyl) trimethoxysilane ต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO

ในการศึกษาปริมาณของซีโอไลต์ที่ปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสานไฮเลนชนิด (3-Aminopropyl) trimethoxysilane ต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PEO 10 % โดยน้ำหนัก และมีน้ำหนักโมเลกุลของ PEO 100,000 กรัมต่อโมล พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เติมซีโอไลต์ยังคงมีการแตกหักแบบยืดหยุ่น (Ductile fracture) และการเติมซีโอไลต์ลงในเมทริกซ์พอลิเมอร์จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ แต่ในขณะเดียวกันก็จะขัดขวางการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์เมื่อได้รับแรงภายนอกมากระทำจึงทำให้ความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ลดลง นอกจากนี้ปริมาณซีโอไลต์ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ T_g และ T_m ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO และซีโอไลต์ยังทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก ซึ่งสามารถเหนี่ยวนำให้ PLA เกิดผลึกได้ง่ายขึ้น และเมื่อปริมาณการเติม

ซีโอไลต์เพิ่มขึ้น ปริมาณผลึกก็เพิ่มขึ้น การเติมซีโอไลต์ลงในพอลิเมอร์ผสมจะทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น และโครงสร้างรูพรุนของซีโอไลต์ทำให้โมเลกุลของก๊าซสามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนได้ จึงเป็นการลดอัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน (O_2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไอน้ำ ผ่านฟิล์ม PLA/PEO ส่งผลให้อัตราการหายใจและการสูญเสียน้ำของกล้วยไม้ตัดดอกที่บรรจุในฟิล์ม PLA/PEO ลดลง จึงสามารถยืดอายุของกล้วยไม้ตัดดอกให้มีความสดได้นานขึ้น

5.3 การศึกษาผลของสารปรับปรุงซีโอไลต์ด้วยไอออน Li^+ และ K^+ ต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO/Zeolite

ในการศึกษาการปรับปรุงซีโอไลต์ด้วย Li^+ และ K^+ พบว่าโครงสร้างของซีโอไลต์ไม่เปลี่ยนแปลง ซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนแล้วยังคงมีลักษณะเป็นทรงลูกบาศก์แต่จะมีความคมและชัดเจนขึ้น รวมถึงมีพื้นผิวที่ขรุขระมากขึ้น ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนยังคงมีการแตกหักแบบยืดหยุ่น (Ductile fracture) แต่ความยืดหยุ่นของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO ที่เติมซีโอไลต์ที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของไอออนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าชนิดและปริมาณไอออนไม่ส่งผลต่อ T_g และ T_m ของฟิล์ม PLA/PEO/Zeolite และค่าการซึมผ่านของก๊าซ O_2 , CO_2 และไอน้ำผ่านฟิล์ม PLA/PEO/Zeolite สามารถเรียงลำดับตามไอออนที่ทำการปรับปรุงได้ดังนี้ $K^+ < Li^+ < Na^+$ (Unmodified) เนื่องจากค่า replacing power และค่า charge density ที่แตกต่างกัน และเมื่อปริมาณไอออนเพิ่มขึ้น ค่าการซึมผ่านของก๊าซ O_2 , CO_2 และไอน้ำ ผ่านฟิล์ม PLA/PEO/Zeolite จะลดลง และจากการศึกษาการยืดอายุกล้วยไม้ตัดดอกโดยการบรรจุในบรรจุภัณฑ์จากฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO/Zeolite พบว่าฟิล์ม PLA/PEO/Zeolite- K^+ สามารถยืดอายุกล้วยไม้ตัดดอกได้นานกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEO/Zeolite- Li^+

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการผสมในเครื่องผสมแบบปิดและการกดอัดเพื่อขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ซึ่งใช้เวลานานและได้ปริมาณน้อย ดังนั้นจึงควรศึกษาต่อในการหาสถานะขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการอัดรีดขึ้นรูป
2. อาจเลือกไอออนชนิดอื่นมาศึกษาเพิ่มเติม เช่น Ag^+ เนื่องจากมีค่า charge density สูง จึงอาจจะสามารถดูดซับก๊าซเอทิลีนได้ดีขึ้น
3. ควรทดสอบการดูดซับก๊าซเอทิลีนของฟิล์มพอลิเมอร์ในเชิงปริมาณ เช่น เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC)

4. ควรทดสอบค่าการต้านทานการฉีกขาด (Tear strength) ของฟิล์มพอลิเมอร์
5. ศึกษาการยืดอายุการเก็บรักษาดอกไม้ชนิดอื่นของประเทศไทยที่มีมูลค่าการส่งออกสูง เช่น ดอกหน้าวัว และไม้ดอกไม้ประดับต่างๆ
6. วัดค่าเฉลี่ยของดอกกล้วยไม้เพื่อเพิ่มความแม่นยำ
7. ข้อมูลการส่งออกกล้วยไม้ สำหรับการศึกษาครั้งต่อไป มีรายละเอียดดังนี้

บริษัทผู้ส่งออกกล้วยไม้มีการปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับความสะดวกและปัจจัยในการจัดการ ได้แก่ สภาพโรงเรือนคัดบรรจุ ระบบห้องเย็น การใช้สารเคมีในการชะลอการเสื่อมสภาพ การรมสารเมทิลโบรไมด์เพื่อกำจัดเพลี้ยไฟ สภาพการขนส่ง และสภาพการบรรจุหีบห่อ ซึ่งมีหลายลักษณะขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้สั่งซื้อ การปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวและบรรจุหีบห่อจึงมักไม่มีรูปแบบที่แน่นอน จึงได้มีคำแนะนำดังนี้

การรวบรวมและขนส่ง

- รวมเป็นกำ กำละ 20-25 ช่อ ไม่ควรให้กลีบดอกเบียดกันจนเสียหาย
- ขนส่งโดยรถเข็นมายังโรงเรือนโดยหลีกเลี่ยงบริเวณที่มีแสงแดดส่อง
- การให้น้ำอาจใช้สาลิซุบน้ำและหุ้มปลายก้านหรือแช่ปลายก้านในน้ำสะอาดหรือน้ำยายืดอายุ ระหว่างรอขนส่ง
- การขนส่งไปยังบริษัทผู้ส่งออกควรใช้รถห้องเย็นปรับอุณหภูมิ 2-15 องศาเซลเซียส

การเตรียมการบรรจุหีบห่อ

- คัดเลือกดอกไม้สมบูรณ์ กลีบดอกไม้ฉีกขาด ปลอดจากโรคและแมลง
- ใส่ยายืดอายุที่ปลายก้านช่อดอก แล้ววางฝั่งให้แห้ง
- คัดขนาดตามมาตรฐานชั้นคุณภาพ นำไปรมด้วยเมทิลโบรไมด์ 20-24 กรัม/ลบม.
- นำไปเก็บในห้องเย็นอุณหภูมิ 8-12 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 85-95 เปอร์เซ็นต์เป็นเวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมงก่อนการบรรจุหีบห่อ หากเป็นอุณหภูมิช่วง 8 - 10 องศาเซลเซียสไม่ควรเก็บนานเกิน 1 ชั่วโมง และหากอุณหภูมิมากกว่า 10 - 12 องศาเซลเซียสไม่ควรเก็บน้อยกว่า 2 ชั่วโมง หากเป็นช่วงหน้าฝน ความชื้นในบรรยากาศสูง ควรลดความชื้นสัมพัทธ์ให้ต่ำกว่า 85% - 95%

การบรรจุหีบห่อ ใช้วัสดุบรรจุได้หลายแบบคือ

- ถุงพลาสติก pp (polypropylene) เจาะรู บรรจุถุงละ 10 ช่อ
- ห่อช่อดอก 10 ช่อ ด้วยกระดาษขาวบาง โดยใส่สารดูดซับเอทิลีนไว้ใกล้ช่อดอก แล้วใส่

ถุงพลาสติก pp ไม่เจาะรูอีกชั้นหนึ่ง

- ห่อด้วย pp (polypropylene) บรรจุกล่องกระดาษ กล่องละ 20, 40, 60 หรือ 80 ช่อ

แสดงดังรูปที่ 5.1

- ขนส่งด้วยรถห้องเย็นปรับอุณหภูมิ 12 - 15 องศาเซลเซียส ไปยังสนามบิน [112]



(a)

(b)

รูปที่ 5.1 การบรรจุหีบห่อกล้วยไม้ก่อนการขนส่ง (a) ห่อกล้วยไม้ด้วยฟิล์ม PP และ (b) บรรจุกล้วยไม้ลงกล่องกระดาษ [113]





ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่างๆ

ก-1 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มสูตรต่างๆ ด้วยเครื่อง Universal testing machine

Sample	No.	Elongation at break (%)	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)
Neat PLA	1	1.74	3241.46	43.72
	2	1.12	3052.10	29.93
	3	1.51	3035.57	37.77
	4	1.77	3147.89	44.89
	5	1.68	3180.33	43.59
	6	1.46	3093.15	37.45
	7	1.64	3159.34	40.72
	8	1.45	3157.88	35.84
	9	1.36	3093.73	34.60
	10	1.23	3348.45	33.80
	11	1.19	3047.29	30.30
	12	1.43	3015.41	33.78
	Mean	1.46	3131.05	37.20
	S.D.	0.22	96.41	5.11
PLA/1PEO 5%	1	1.14	2318.23	22.58
	2	0.90	2210.46	17.33
	3	1.46	2253.66	27.21
	4	1.25	2279.10	24.51
	5	1.21	2370.11	24.85
	6	0.72	2270.52	14.05
	7	1.30	2281.21	25.16
	8	1.32	2233.58	24.85

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มสูตรต่างๆ ด้วยเครื่อง Universal testing machine (ต่อ)

Sample	No.	Elongation at break (%)	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)
PLA/1PEO 5%	9	1.01	2343.32	20.39
	10	1.11	2267.53	21.87
	11	0.93	2236.75	17.97
	12	1.64	2139.76	28.07
	Mean	1.17	2267.02	22.40
	S.D.	0.26	61.08	4.25
PLA/2PEO 5%	1	1.72	2334.54	33.60
	2	1.44	2329.11	28.80
	3	1.71	2334.31	33.64
	4	1.66	2340.31	31.12
	5	1.55	2264.85	29.17
	6	1.44	2281.97	27.76
	7	1.56	2327.89	30.26
	8	1.42	2272.29	27.53
	9	1.40	2321.03	27.00
	10	1.19	2184.19	22.25
	11	1.35	2195.77	25.38
	12	1.72	2323.82	29.34
	Mean	1.51	2292.51	28.82
S.D.	0.17	54.41	3.23	
PLA/3PEO 5%	1	1.49	2311.67	27.67
	2	1.52	2327.07	30.17
	3	0.94	2271.52	18.95
	4	1.22	2333.11	23.07

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มสูตรต่างๆ ด้วยเครื่อง Universal testing machine (ต่อ)

Sample	No.	Elongation at break (%)	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)
PLA/3PEO 5%	5	1.57	2249.27	29.53
	6	1.51	2189.88	27.18
	7	1.34	2252.71	25.69
	8	0.94	2235.94	17.74
	9	1.35	2339.63	27.15
	10	1.39	2181.21	26.09
	11	1.41	2293.54	27.75
	12	1.52	2415.80	31.83
	Mean	1.35	2283.45	26.07
	S.D.	0.22	67.19	4.25
	PLA/4PEO 5%	1	1.70	2324.64
2		1.51	2228.89	29.00
3		1.64	2212.34	31.53
4		1.71	2267.78	32.15
5		1.99	2498.29	38.51
6		1.83	2328.52	33.15
7		1.93	2305.10	34.84
8		1.76	2376.85	35.62
9		1.55	2395.00	31.85
10		1.78	2303.46	34.72
11		2.03	2197.17	34.50
12		1.67	2103.64	29.23
Mean		1.76	2295.14	33.20
S.D.	0.16	103.72	2.70	

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มสูตรต่างๆ ด้วยเครื่อง Universal testing machine (ต่อ)

Sample	No.	Elongation at break (%)	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)
PLA/1PEO 10%	1	37.30	1672.92	17.55
	2	150.72	1607.60	18.61
	3	33.85	1549.50	17.66
	4	82.26	1635.40	18.18
	5	27.56	1535.07	16.42
	6	64.84	1579.07	18.36
	7	174.42	1567.41	18.52
	8	19.45	1557.74	19.60
	9	17.16	1519.74	16.61
	10	31.31	1519.15	17.60
	11	114.13	1555.05	16.20
	12	175.84	1685.76	17.58
	Mean	77.40	1582.03	17.74
	S.D.	61.13	56.54	0.99
PLA/2PEO 10%	1	100.67	1609.93	13.75
	2	90.04	1506.41	13.57
	3	91.78	1531.37	14.10
	4	85.99	1534.37	13.15
	5	65.67	1385.87	12.29
	6	71.21	1395.79	14.33
	7	83.08	1565.07	14.69
	8	91.32	1387.73	14.72
	9	81.39	1385.59	13.08
	10	71.08	1439.29	12.24

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มสูตรต่างๆ ด้วยเครื่อง Universal testing machine (ต่อ)

Sample	No.	Elongation at break (%)	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)
PLA/2PEO 10%	11	69.46	1492.07	12.02
	12	86.09	1452.23	12.23
	Mean	82.31	1473.81	13.35
	S.D.	10.82	77.40	0.99
PLA/3PEO 10%	1	58.87	1782.25	15.65
	2	42.99	1608.70	13.34
	3	60.86	1632.64	14.55
	4	63.60	1516.26	13.71
	5	48.20	1625.40	14.04
	6	62.72	1576.25	13.04
	7	66.42	1606.03	15.16
	8	109.77	1520.76	13.05
	9	100.41	1542.95	13.88
	10	68.15	1494.09	14.06
	11	32.41	1453.59	12.98
	12	62.81	1506.21	13.88
	Mean	64.77	1572.09	13.94
S.D.	21.67	87.52	0.84	
PLA/4PEO 10%	1	56.15	1640.15	19.40
	2	283.08	1609.36	18.03
	3	206.46	1581.45	16.51
	4	206.65	1701.55	18.68
	5	102.25	1620.31	17.74
	6	33.13	1608.18	18.61

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มสูตรต่างๆ ด้วยเครื่อง Universal testing machine (ต่อ)

Sample	No.	Elongation at break (%)	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)
PLA/4PEO 10%	7	72.87	1536.58	17.50
	8	18.11	1617.07	17.67
	9	17.31	1559.94	16.86
	10	101.12	1572.49	16.95
	11	73.99	1706.38	18.18
	12	6.67	1659.40	18.42
	Mean	98.15	1617.74	17.88
	S.D.	88.55	52.73	0.85
PLA/1PEO 15%	1	164.03	756.58	10.39
	2	130.00	753.42	9.59
	3	133.89	759.95	10.68
	4	72.20	830.77	10.13
	5	66.00	801.56	10.54
	6	108.06	738.96	10.25
	7	152.81	686.92	13.46
	8	175.19	635.95	12.99
	9	176.19	756.01	12.98
	10	194.83	651.22	12.33
	11	69.09	790.67	10.21
	12	27.95	729.00	10.42
	Mean	122.52	740.92	11.16
S.D.	53.47	58.27	1.36	
PLA/2PEO 15%	1	36.05	744.55	8.03
	2	30.32	761.95	10.24

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มสูตรต่างๆ ด้วยเครื่อง Universal testing machine (ต่อ)

Sample	No.	Elongation at break (%)	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)
PLA/2PEO 15%	3	180.21	730.88	12.18
	4	192.61	699.83	14.52
	5	91.38	676.17	8.55
	6	89.72	759.72	9.62
	7	51.00	821.57	10.00
	8	127.97	818.51	10.54
	9	72.02	798.17	12.16
	10	119.65	888.99	12.84
	11	83.82	832.17	11.95
	12	130.48	762.79	11.52
	Mean	100.44	777.61	11.01
	S.D.	51.94	60.08	1.86
	PLA/3PEO 15%	1	93.36	866.77
2		44.43	773.89	11.66
3		51.82	673.62	10.11
4		81.60	777.58	11.14
5		109.12	714.67	10.99
6		56.22	730.78	11.49
7		37.36	909.36	11.26
8		59.75	742.65	10.90
9		95.79	770.00	10.67
10		90.78	775.83	11.47
11		178.28	706.39	12.46
12		107.89	721.20	11.39

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มสูตรต่างๆ ด้วยเครื่อง Universal testing machine (ต่อ)

Sample	No.	Elongation at break (%)	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)
PLA/3PEO 15%	Mean	83.87	763.56	11.32
	S.D.	38.73	67.05	0.65
PLA/4PEO 15%	1	156.72	889.92	11.86
	2	89.04	832.92	11.77
	3	141.49	781.73	10.24
	4	177.06	727.78	14.18
	5	74.94	755.43	10.69
	6	52.58	597.78	11.14
	7	90.50	647.38	12.42
	8	74.13	695.64	9.63
	9	201.25	645.56	13.98
	10	84.74	703.16	10.53
	11	113.73	756.29	10.62
	12	81.00	796.99	11.23
	Mean	111.43	735.88	11.52
	S.D.	46.81	83.99	1.42
PLA/PEO/Z 1%	1	15.63	3521.64	27.85
	2	8.70	3222.18	26.92
	3	6.58	3230.99	24.54
	4	34.24	3194.96	28.76
	5	12.14	3188.56	27.01
	6	53.08	3279.06	30.36
	7	19.84	3081.00	24.33
	8	12.96	3021.86	25.08

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มสูตรต่างๆ ด้วยเครื่อง Universal testing machine (ต่อ)

Sample	No.	Elongation at break (%)	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)
PLA/PEO/Z 1%	9	60.64	3032.69	23.35
	10	18.47	3031.41	25.31
	11	50.35	3010.54	24.65
	12	63.34	2979.09	22.49
	Mean	29.66	3149.50	25.89
	S.D.	21.46	156.00	2.32
PLA/PEO/Z 3%	1	11.24	1713.58	26.87
	2	6.47	1713.75	25.54
	3	11.80	2225.94	24.94
	4	42.37	3196.43	28.98
	5	26.74	3177.60	28.78
	6	22.59	3097.11	23.77
	7	31.22	3105.37	27.68
	8	60.78	3103.73	26.56
	9	21.34	2924.64	25.43
	10	29.62	2979.47	25.50
	11	59.67	2885.14	24.57
	12	87.39	2925.13	22.18
	Mean	34.27	2753.99	25.90
	S.D.	24.19	548.43	2.00
PLA/PEO/Z 5%	1	11.06	3387.75	26.97
	2	4.55	3500.47	28.78
	3	6.05	3269.95	22.22
	4	3.41	3230.56	19.13

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มสูตรต่างๆ ด้วยเครื่อง Universal testing machine (ต่อ)

Sample	No.	Elongation at break (%)	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)
PLA/PEO/Z 5%	5	14.55	2988.97	23.53
	6	3.53	3315.32	24.61
	7	10.28	3232.36	18.97
	8	9.38	3252.76	26.10
	9	7.96	3205.28	23.18
	10	19.66	3289.52	25.25
	11	13.39	3253.32	25.47
	12	24.44	3114.42	22.97
	Mean	10.69	3253.39	23.93
	S.D.	6.50	126.86	2.93
	PLA/PEO/Z-Li ⁺ 1.25	1	70.46	2754.72
2		79.54	2690.03	28.05
3		64.91	2647.08	25.56
4		35.04	2680.33	22.40
5		65.26	2660.38	24.99
6		26.87	2581.12	21.76
7		59.63	2692.01	25.27
8		63.02	2626.06	25.24
9		39.53	2584.48	22.39
10		61.47	2706.70	27.07
11		63.92	2445.07	21.39
12		30.70	2618.22	25.42
Mean		55.03	2640.52	24.59
S.D.	17.25	79.84	2.12	

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มสูตรต่างๆ ด้วยเครื่อง Universal testing machine (ต่อ)

Sample	No.	Elongation at break (%)	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)
PLA/PEO/Z-Li ⁺ 2.5	1	29.47	2958.96	29.57
	2	25.57	2740.18	25.45
	3	36.88	2825.10	29.51
	4	14.00	2683.99	22.13
	5	34.84	2695.43	25.96
	6	20.51	2662.72	26.00
	7	33.37	2540.88	24.37
	8	33.80	2717.30	27.04
	9	30.26	2627.31	23.84
	10	35.20	2621.08	25.92
	11	22.27	2535.86	23.67
	12	29.52	2501.72	22.28
	Mean	28.81	2675.88	25.48
	S.D.	6.96	128.77	2.42
PLA/PEO/Z-Li ⁺ 3.75	1	34.16	2877.33	25.89
	2	45.15	2696.29	23.34
	3	24.81	2711.92	26.62
	4	46.97	2633.88	23.78
	5	22.82	2794.89	23.07
	6	25.66	2636.12	24.35
	7	22.48	2569.81	23.96
	8	25.36	2801.61	25.18
	9	22.62	2694.55	23.87
	10	32.19	2622.40	23.52

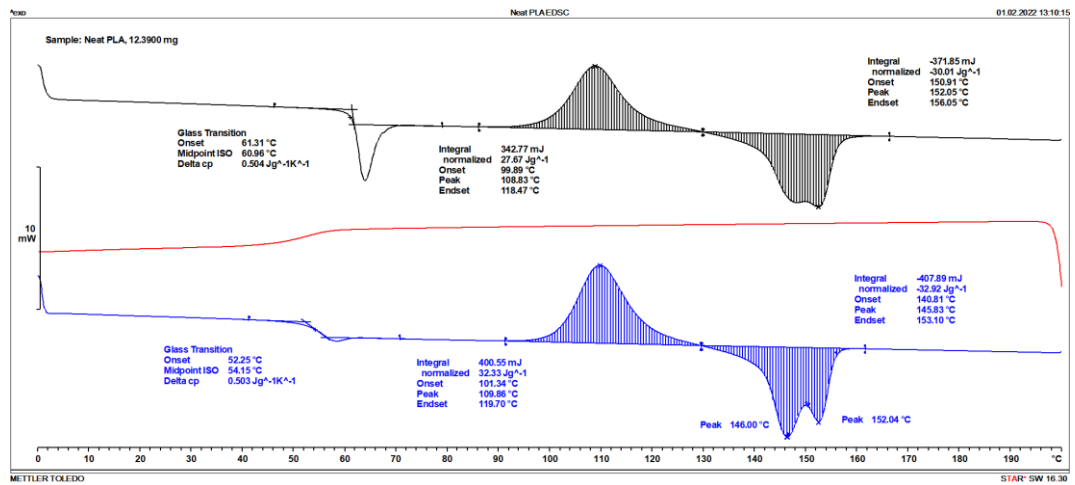
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มสูตรต่างๆ ด้วยเครื่อง Universal testing machine (ต่อ)

Sample	No.	Elongation at break (%)	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)
PLA/PEO/Z-Li ⁺ 3.75	11	29.08	2545.09	22.58
	12	24.41	2722.83	23.48
	Mean	29.64	2692.23	24.14
	S.D.	8.53	98.25	1.19
PLA/PEO/Z-K ⁺ 1.25	1	14.43	3312.98	30.71
	2	38.97	2958.14	27.41
	3	40.53	2802.41	25.46
	4	35.18	2641.60	22.96
	5	43.08	2859.69	24.78
	6	36.27	2788.29	22.95
	7	41.88	2758.61	24.60
	8	41.08	2749.58	22.69
	9	29.84	2776.62	23.30
	10	36.38	2659.42	24.27
	11	44.76	2755.00	26.34
	12	46.16	2851.07	25.52
	Mean	37.38	2826.12	25.08
	S.D.	8.53	175.28	2.30
PLA/PEO/Z-K ⁺ 2.5	1	10.93	3120.46	28.44
	2	40.89	3061.03	28.62
	3	4.65	2925.42	24.65
	4	20.30	2881.40	23.61
	5	24.37	2976.24	25.24
	6	23.39	2851.44	24.11

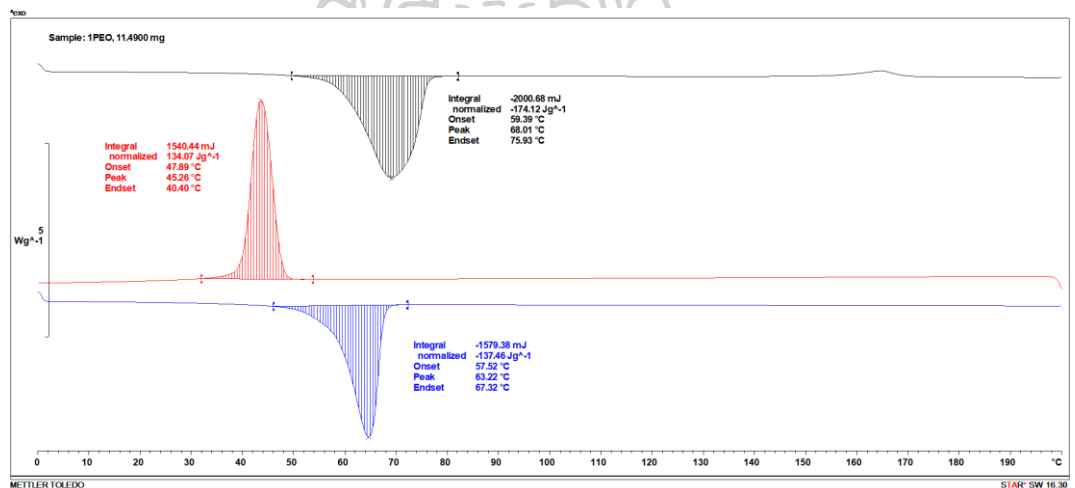
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มสูตรต่างๆ ด้วยเครื่อง Universal testing machine (ต่อ)

Sample	No.	Elongation at break (%)	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)
PLA/PEO/Z-K ⁺ 2.5	7	31.43	2888.36	24.88
	8	28.80	2810.95	26.17
	9	28.43	2555.99	23.04
	10	32.80	2754.93	25.86
	11	29.12	2576.99	22.51
	12	31.85	2769.33	25.41
	Mean	25.58	2847.71	25.21
	S.D.	9.90	170.50	1.90
PLA/PEO/Z-K ⁺ 3.75	1	11.71	3097.04	31.73
	2	22.87	3041.27	31.01
	3	10.41	2883.21	25.89
	4	34.76	2854.71	26.64
	5	13.52	2919.97	25.13
	6	10.32	2722.22	23.51
	7	17.19	2781.88	25.56
	8	20.94	2635.38	24.03
	9	17.03	2865.37	25.35
	10	24.64	2731.66	26.34
	11	10.52	2709.40	24.29
	12	10.80	2701.20	23.15
	Mean	17.06	2828.61	26.05
	S.D.	7.58	141.85	2.71

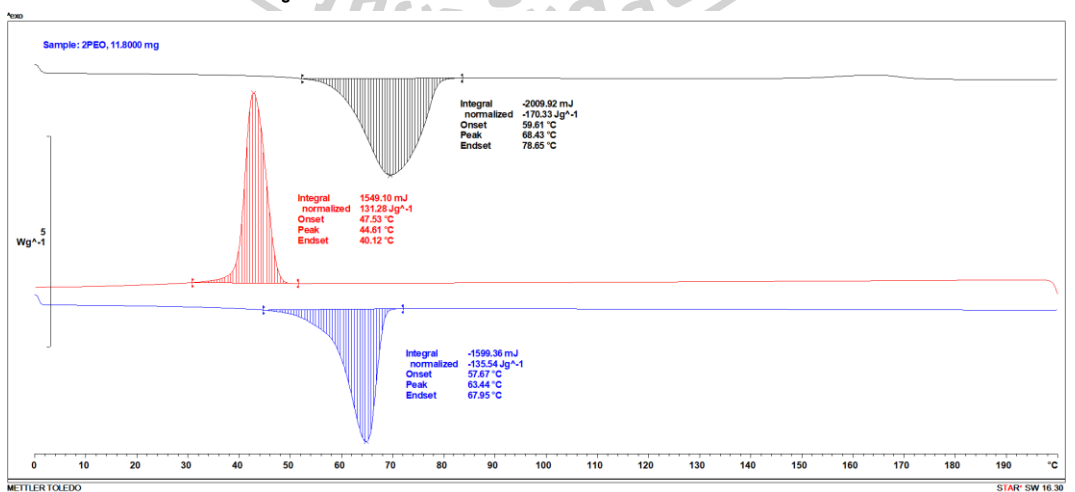
ก-2 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของฟิล์ม



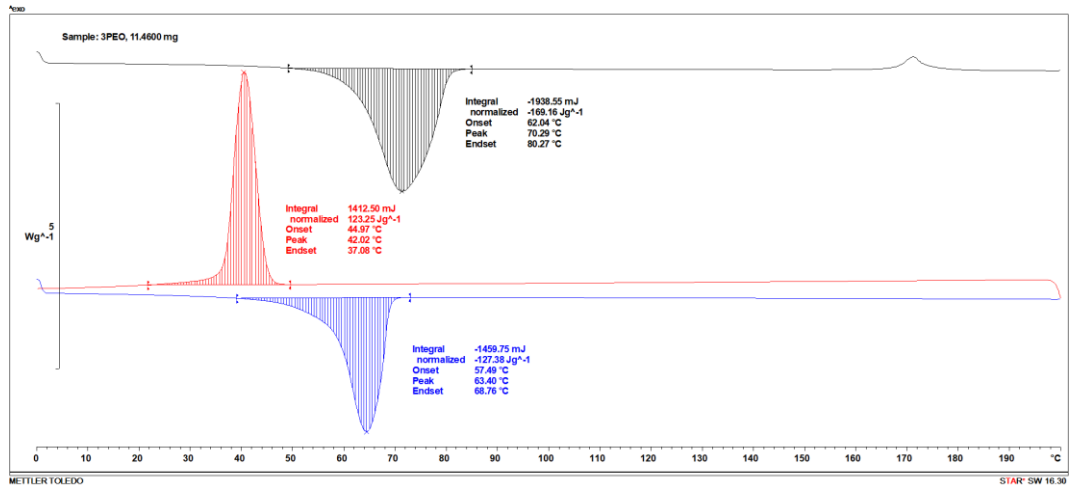
รูปที่ ก.1 DSC thermogram ของ Neat PLA



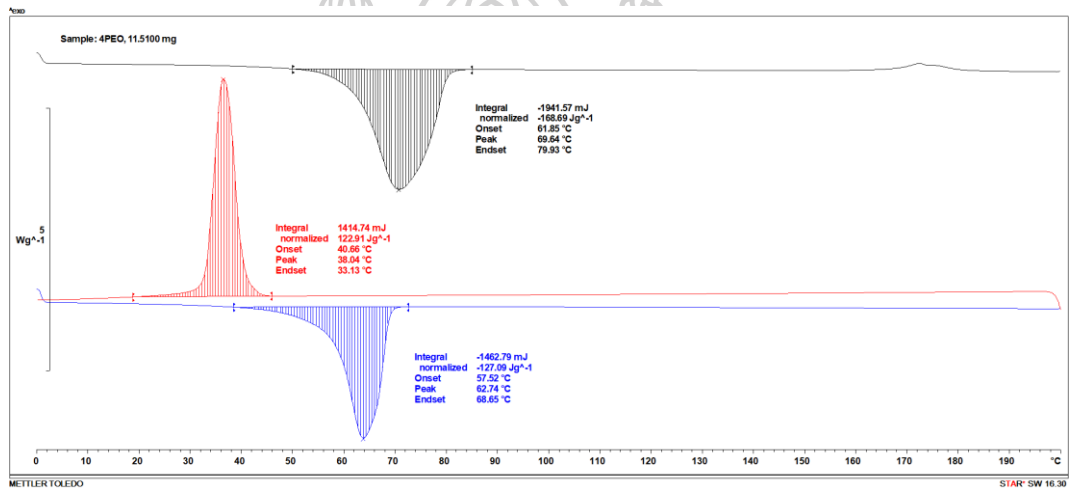
รูปที่ ก.2 DSC thermogram ของ Pure 1PEO



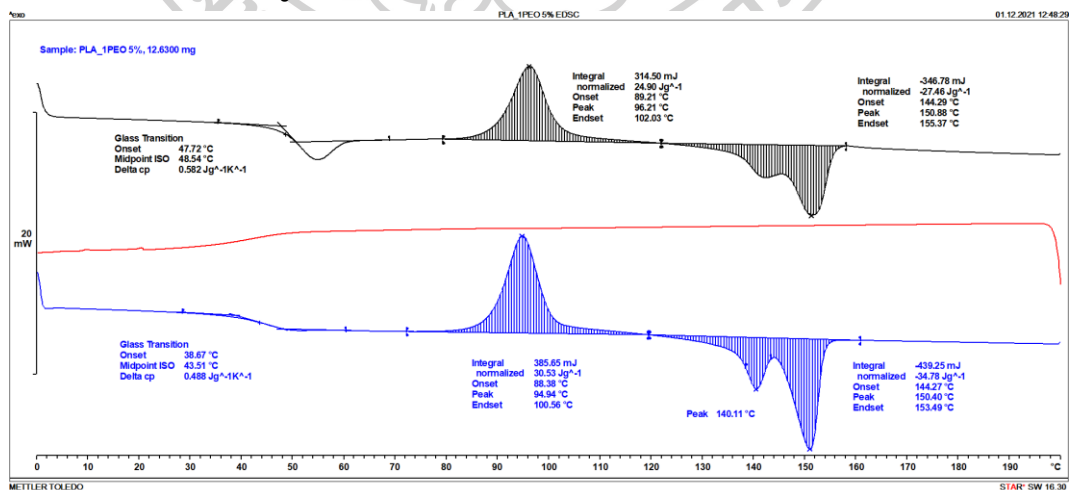
รูปที่ ก.3 DSC thermogram ของ Pure 2PEO



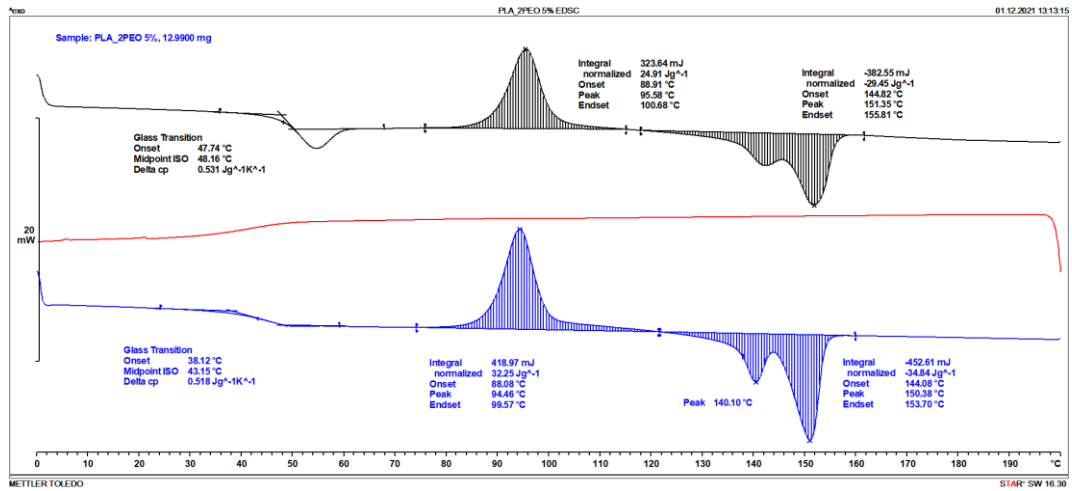
รูปที่ ก.4 DSC thermogram ของ Pure 3PEO



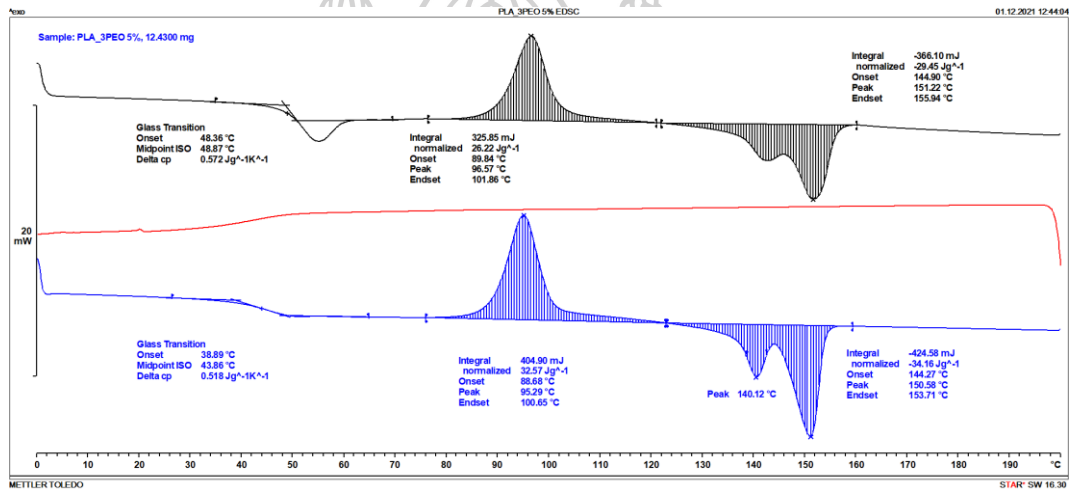
รูปที่ ก.5 DSC thermogram ของ Pure 4PEO



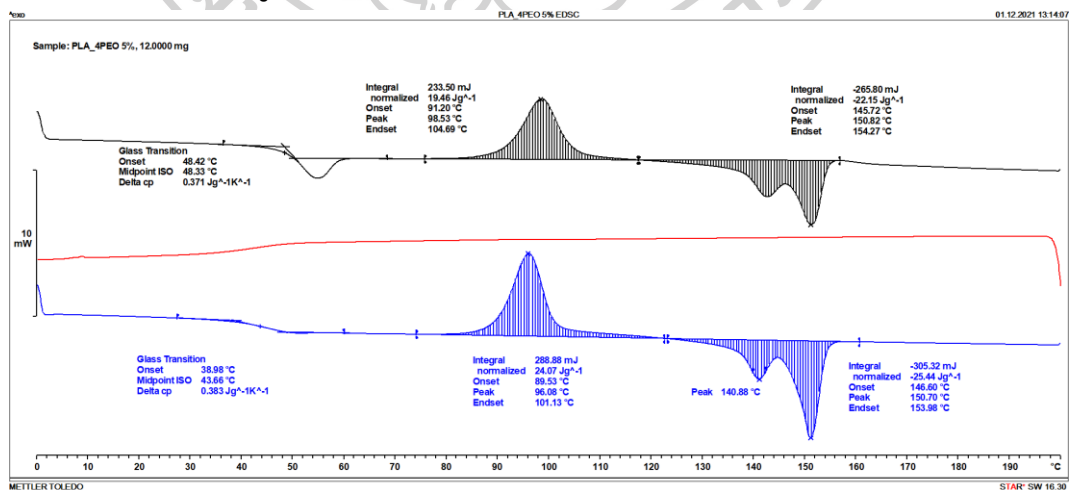
รูปที่ ก.6 DSC thermogram ของ PLA/1PEO 5%



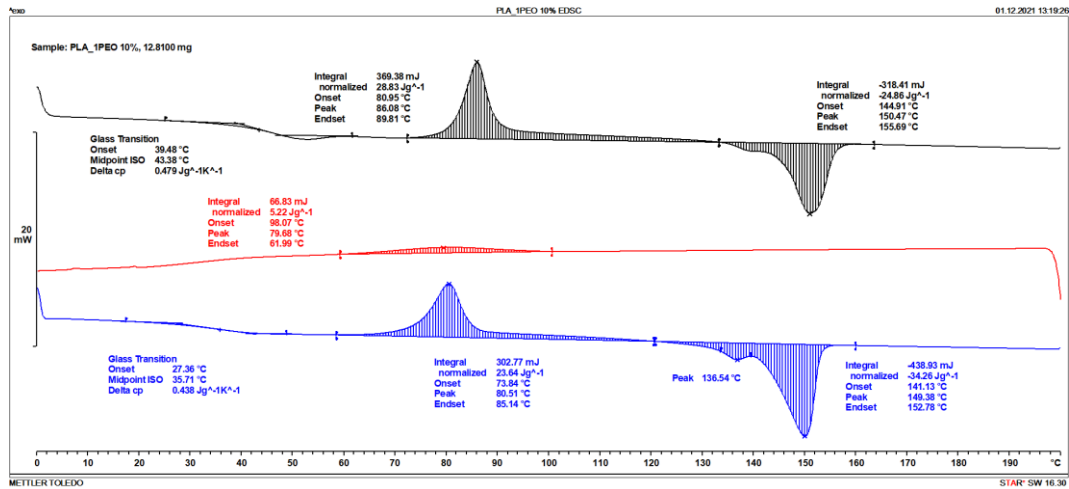
รูปที่ ก.7 DSC thermogram ของ PLA/2PEO 5%



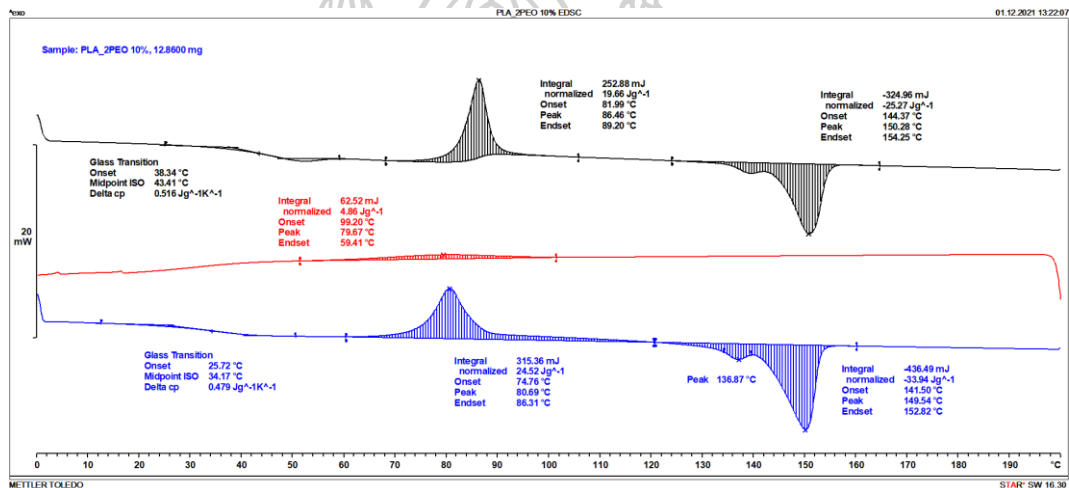
รูปที่ ก.8 DSC thermogram ของ PLA/3PEO 5%



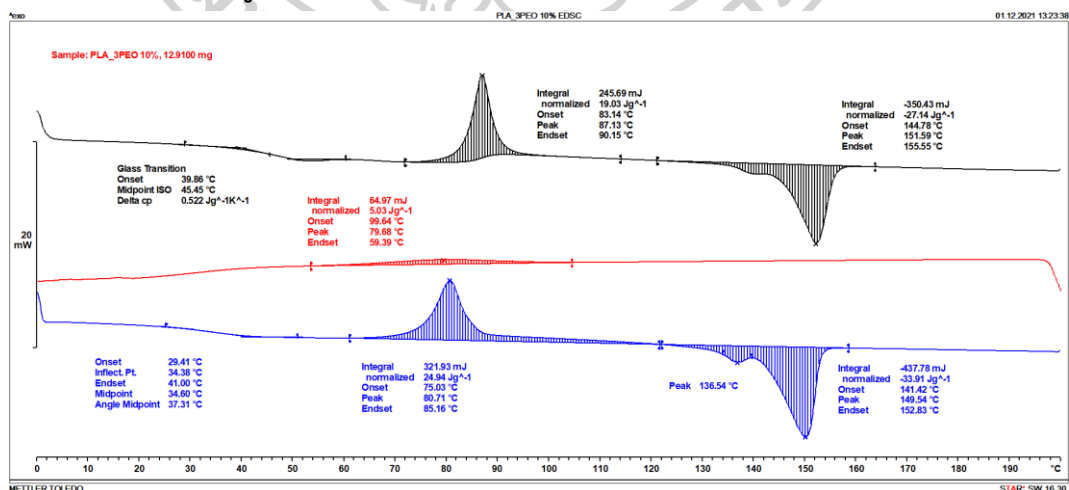
รูปที่ ก.9 DSC thermogram ของ PLA/4PEO 5%



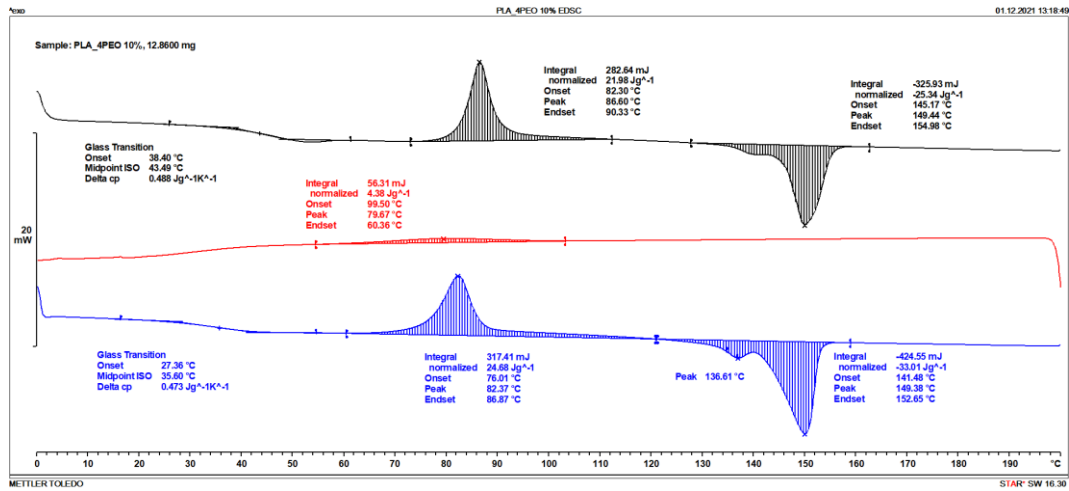
รูปที่ ก.10 DSC thermogram ของ PLA/1PEO 10%



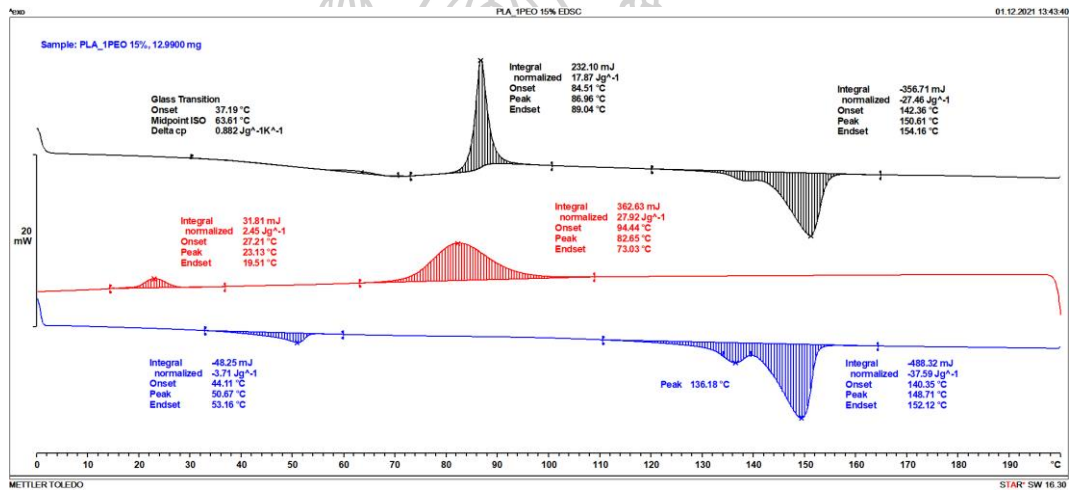
รูปที่ ก.11 DSC thermogram ของ PLA/2PEO 10%



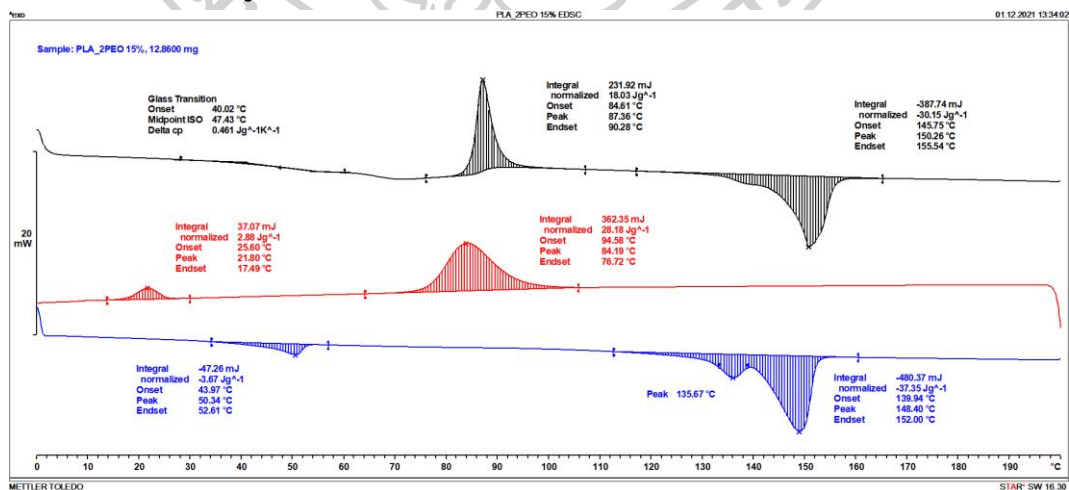
รูปที่ ก.12 DSC thermogram ของ PLA/3PEO 10%



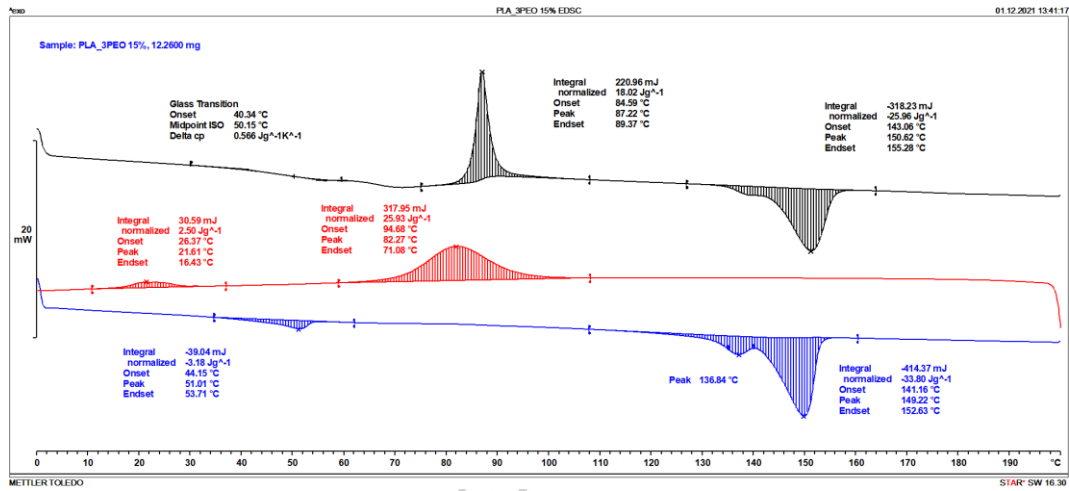
รูปที่ ก.13 DSC thermogram ของ PLA/4PEO 10%



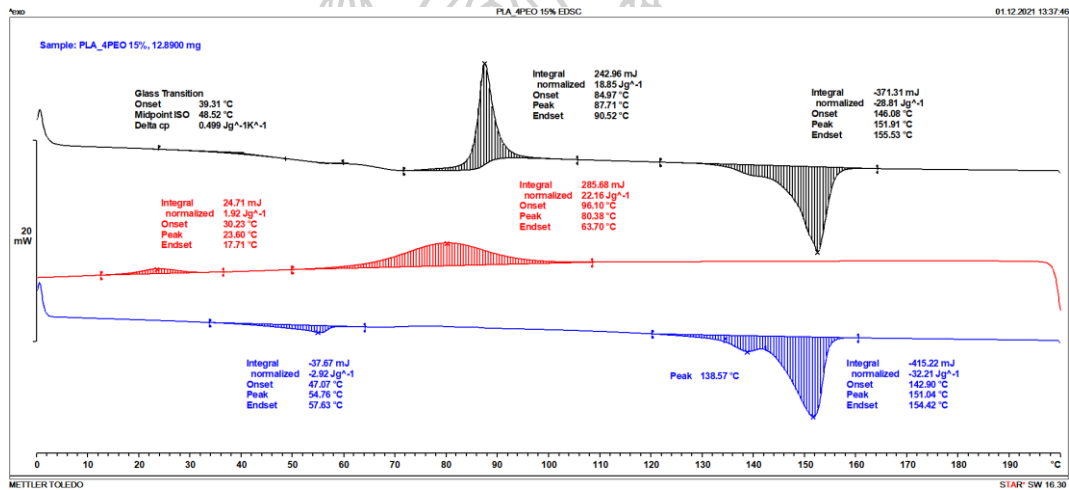
รูปที่ ก.14 DSC thermogram ของ PLA/1PEO 15%



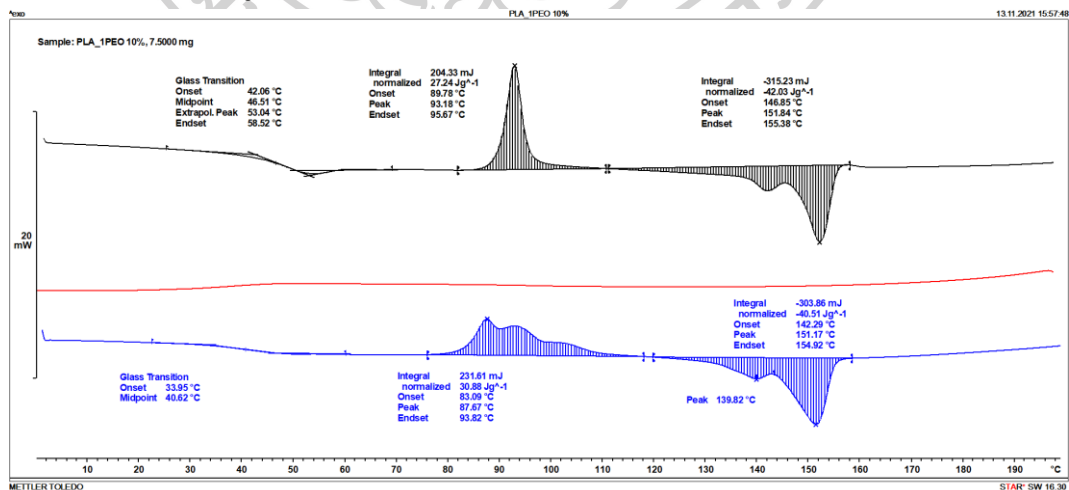
รูปที่ ก.15 DSC thermogram ของ PLA/2PEO 15%



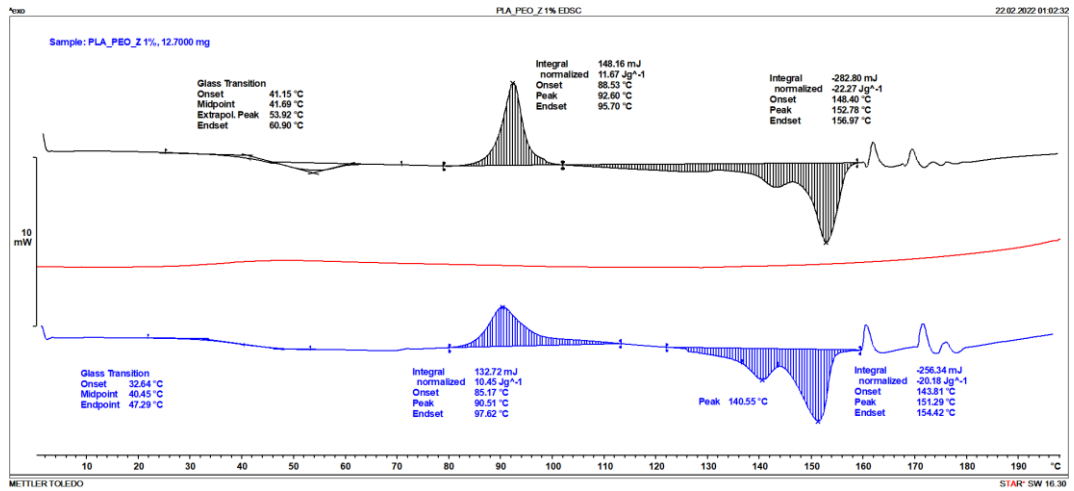
รูปที่ ก.16 DSC thermogram ของ PLA/3PEO 15%



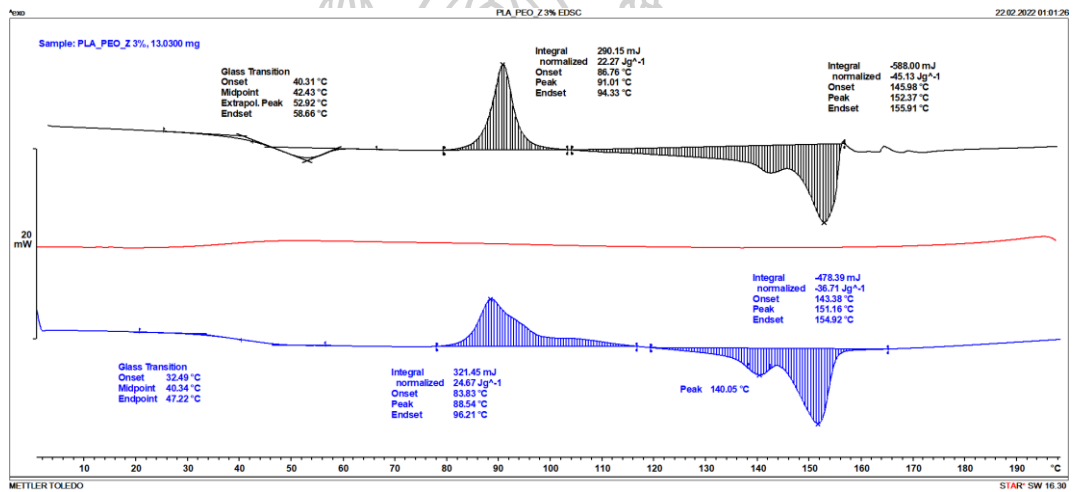
รูปที่ ก.17 DSC thermogram ของ PLA/4PEO 15%



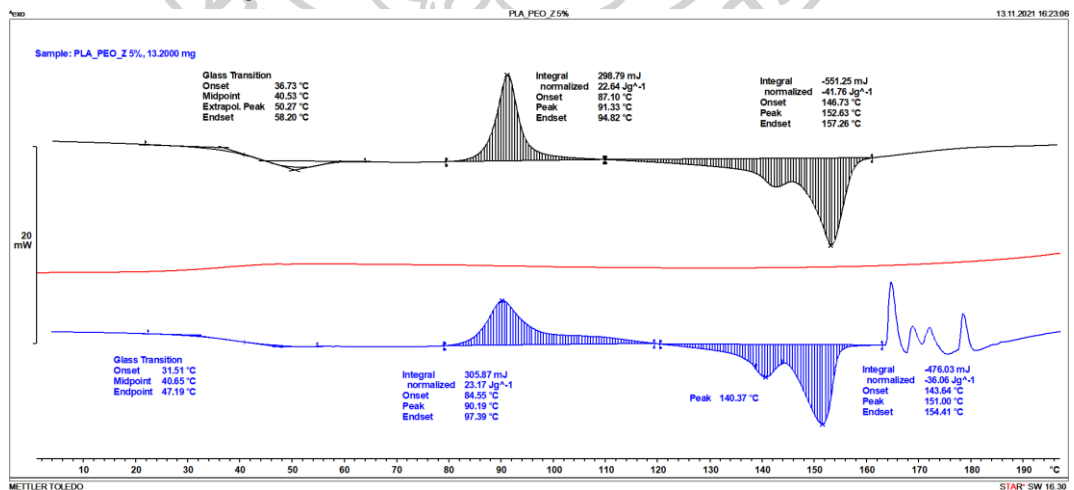
รูปที่ ก.18 DSC thermogram ของ PLA/1PEO 10% (New run)



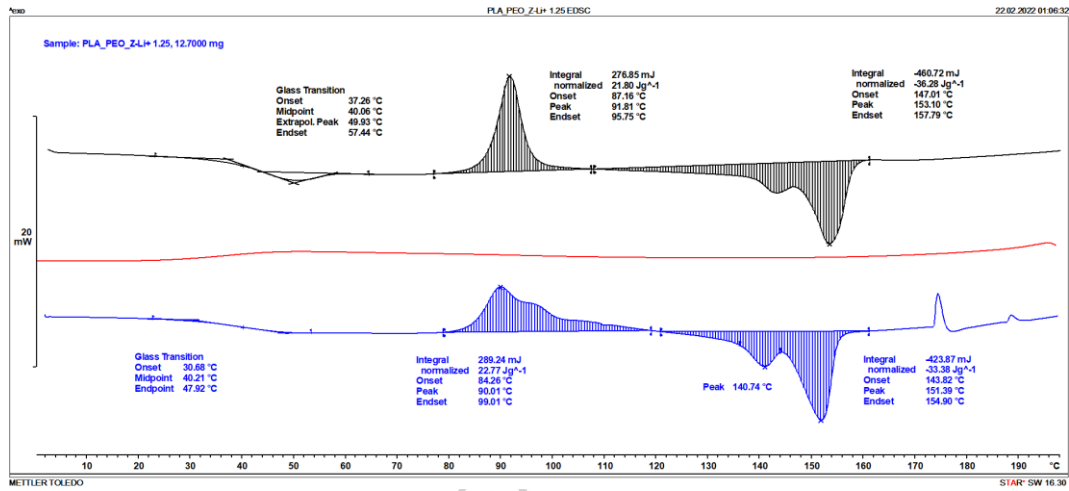
รูปที่ ก.19 DSC thermogram ของ PLA/PEO/Z 1%



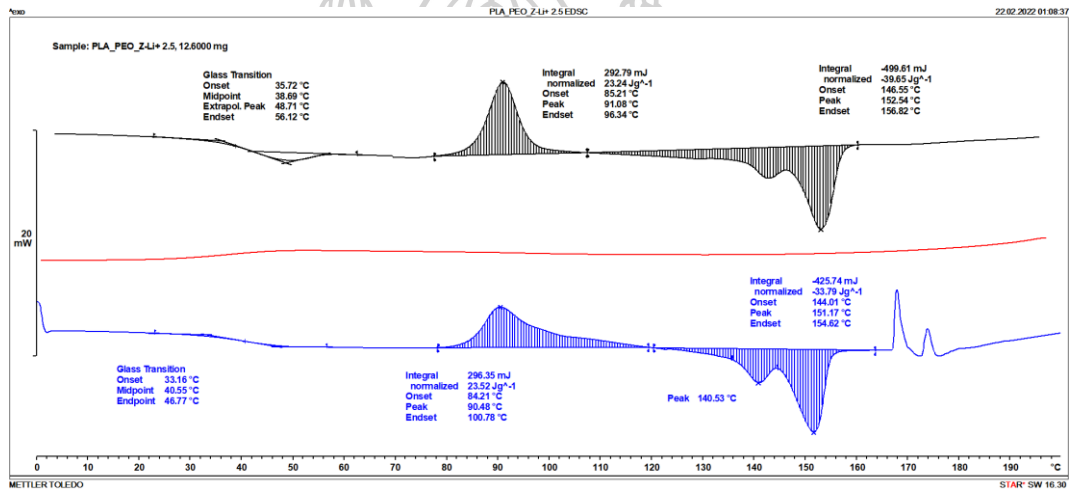
รูปที่ ก.20 DSC thermogram ของ PLA/PEO/Z 3%



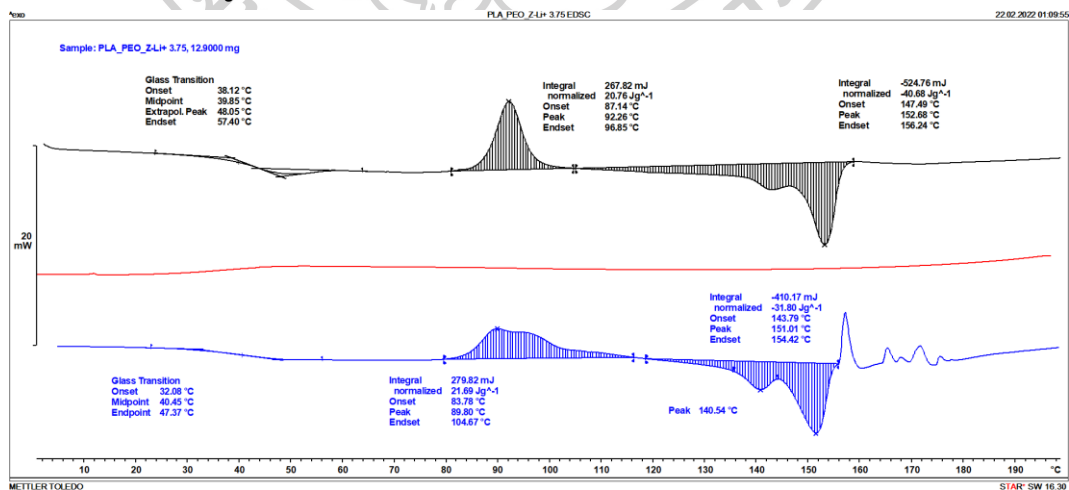
รูปที่ ก.21 DSC thermogram ของ PLA/PEO/Z 5%



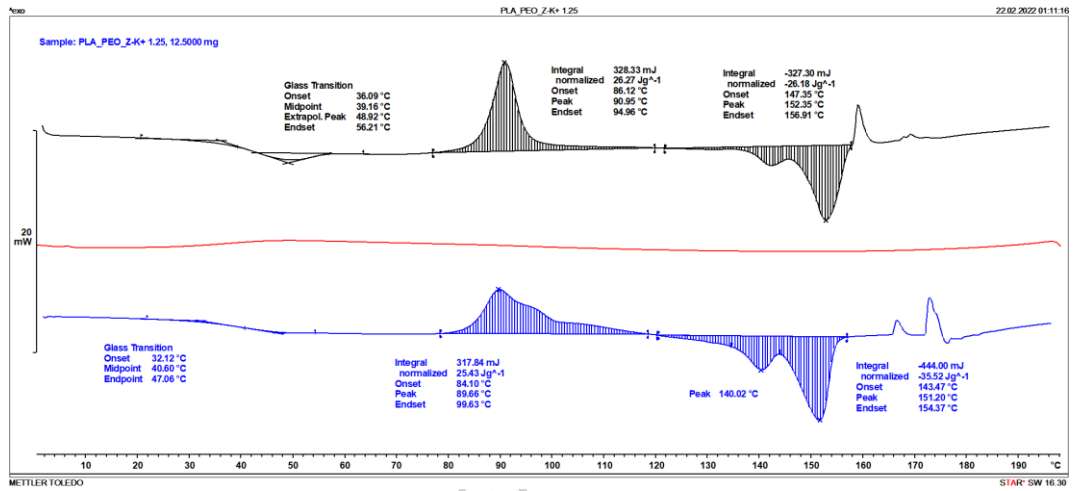
รูปที่ ก.22 DSC thermogram ของ PLA/PEO/Z-Li⁺ 1.25



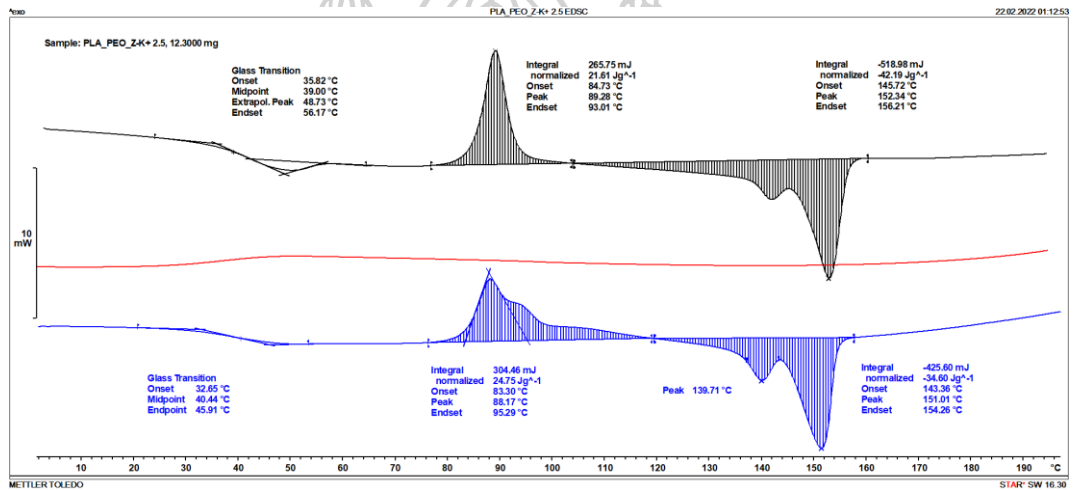
รูปที่ ก.23 DSC thermogram ของ PLA/PEO/Z-Li⁺ 2.5



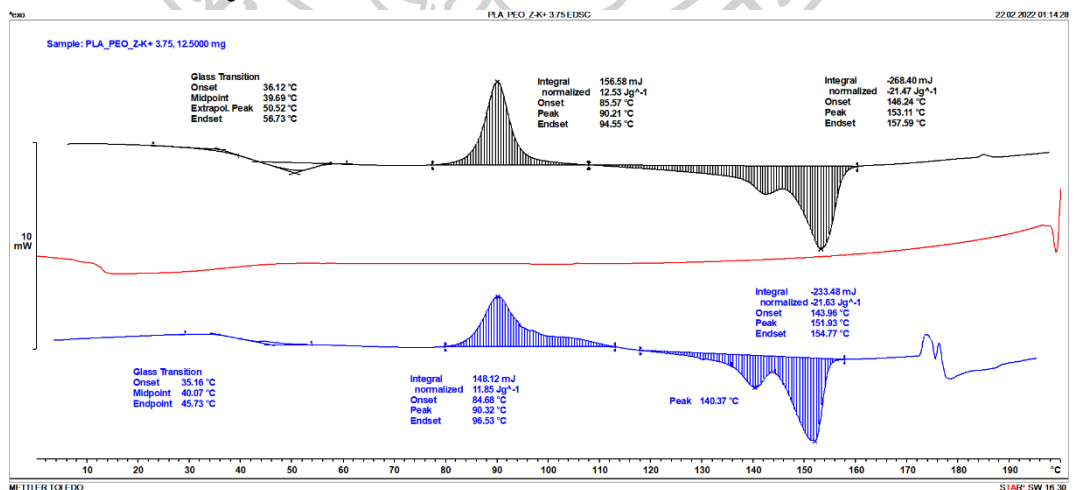
รูปที่ ก.24 DSC thermogram ของ PLA/PEO/Z-Li⁺ 3.75



รูปที่ ก.25 DSC thermogram ของ PLA/PEO/Z-K⁺ 1.25

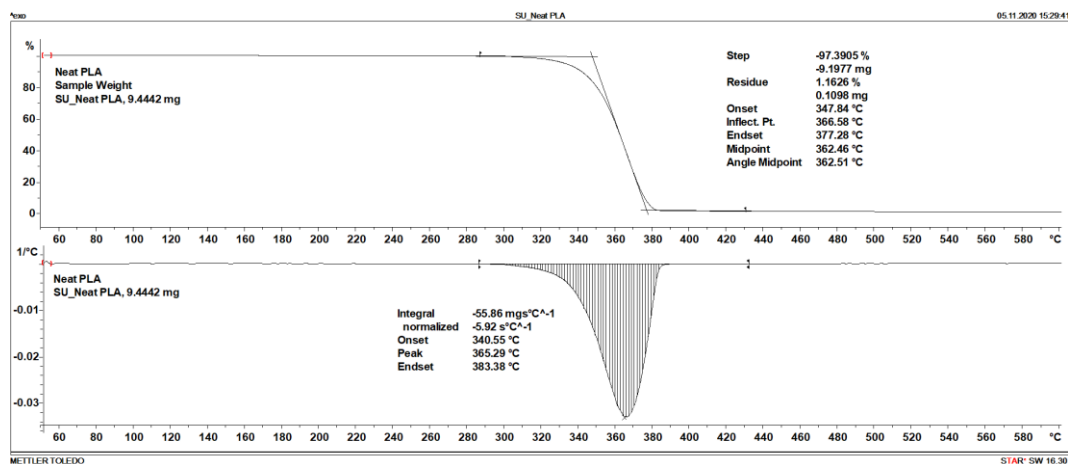


รูปที่ ก.26 DSC thermogram ของ PLA/PEO/Z-K⁺ 2.5

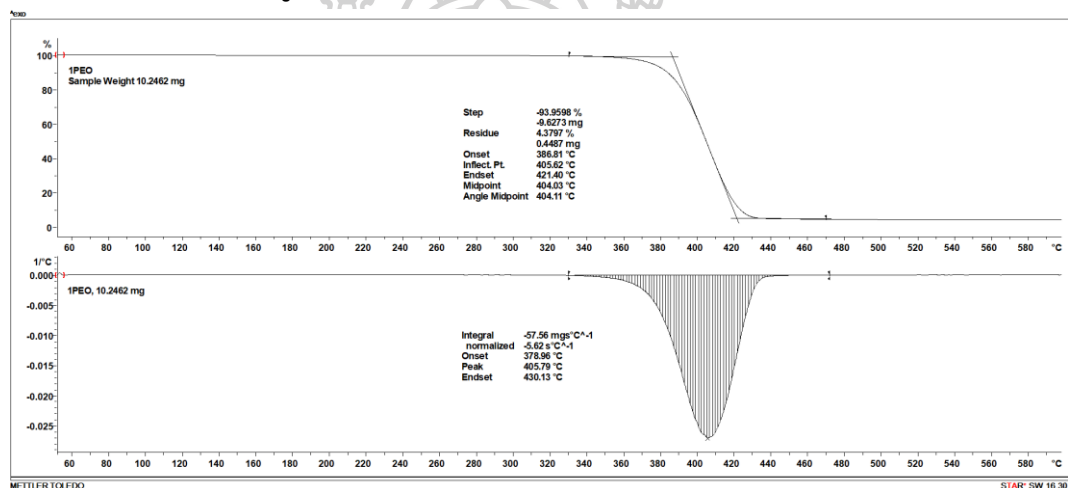


รูปที่ ก.27 DSC thermogram ของ PLA/PEO/Z-K⁺ 3.75

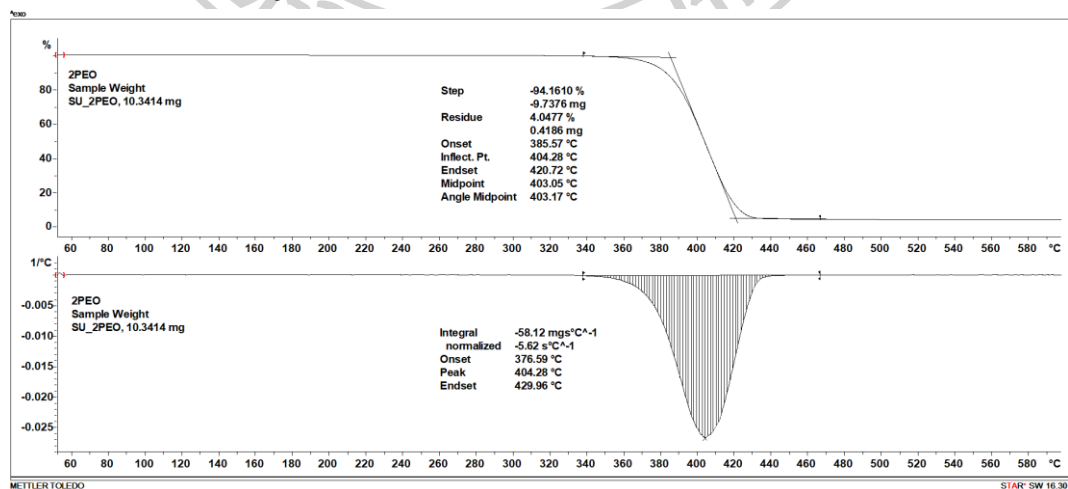
ก-3 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ของฟิล์ม



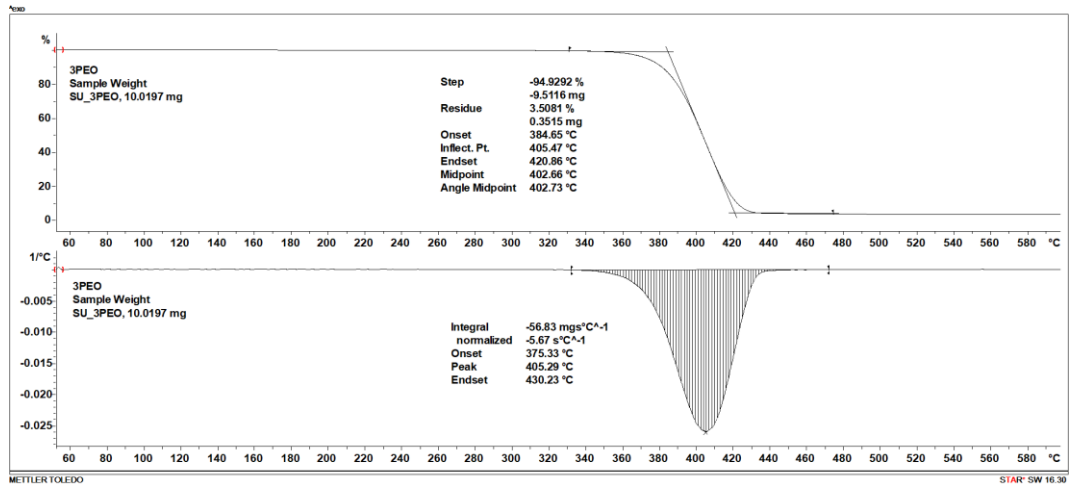
รูปที่ ก.28 TGA thermogram ของ Neat PLA



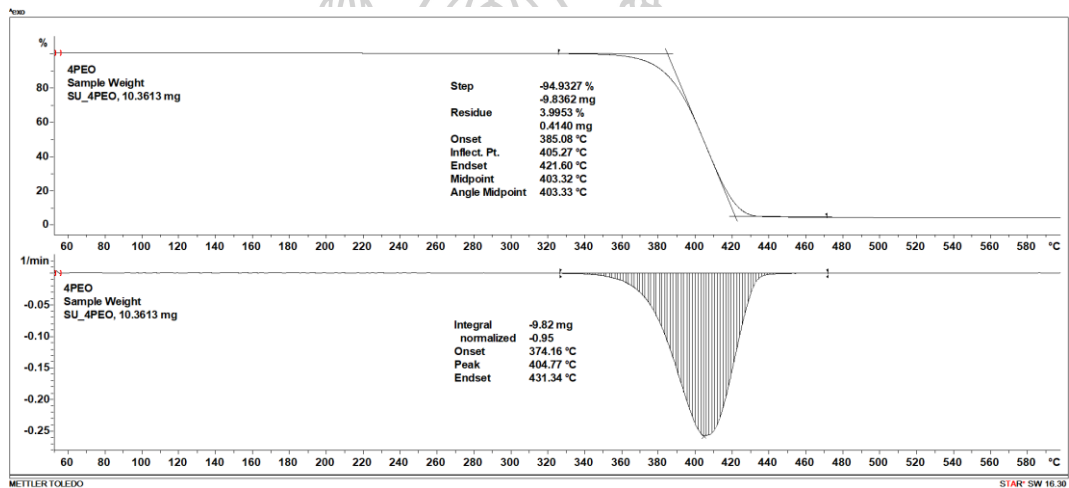
รูปที่ ก.29 TGA thermogram ของ Pure 1PEO



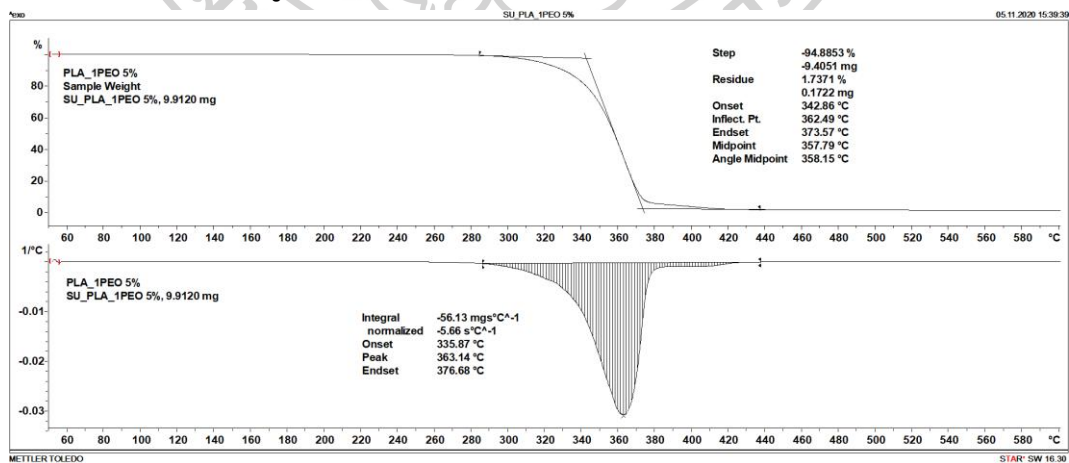
รูปที่ ก.30 TGA thermogram ของ Pure 2PEO



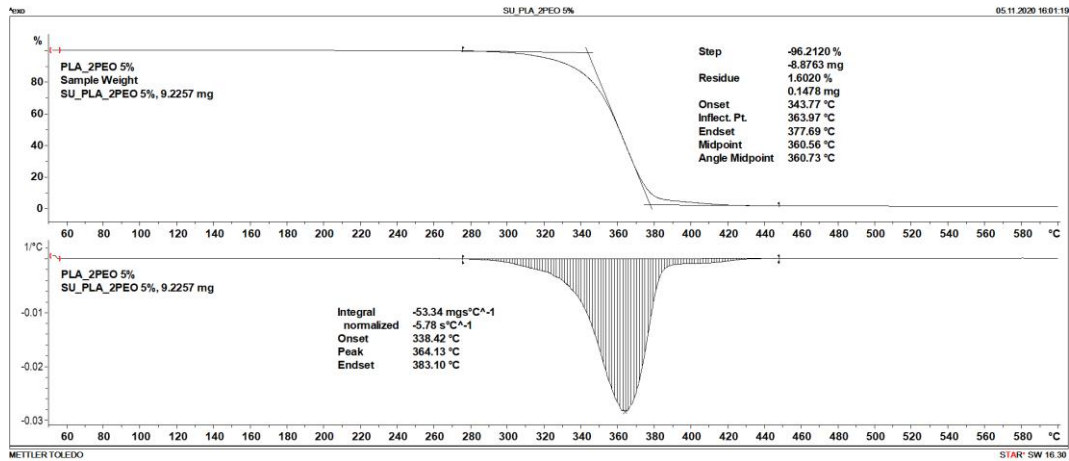
รูปที่ ก.31 TGA thermogram ของ Pure 3PEO



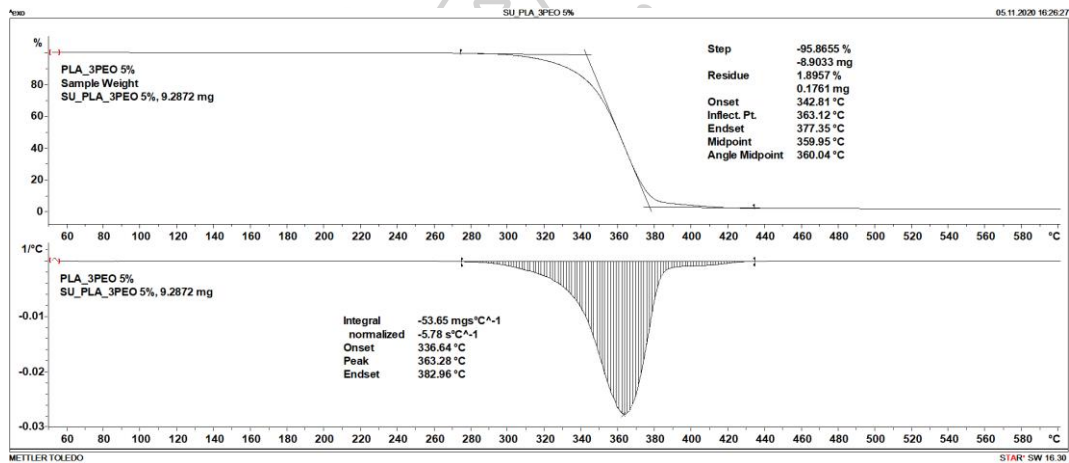
รูปที่ ก.32 TGA thermogram ของ Pure 4PEO



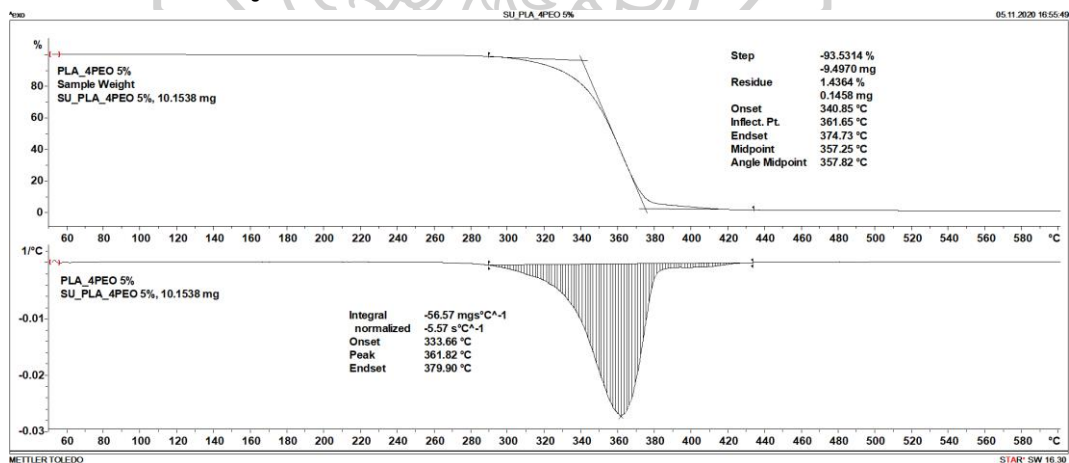
รูปที่ ก.33 TGA thermogram ของ PLA/1PEO 5%



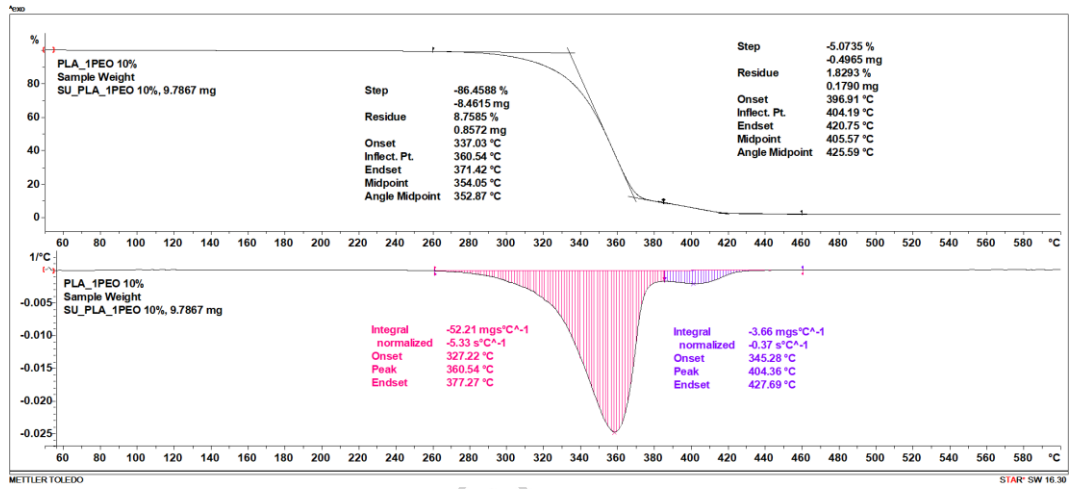
รูปที่ ก.34 TGA thermogram ของ PLA/2PEO 5%



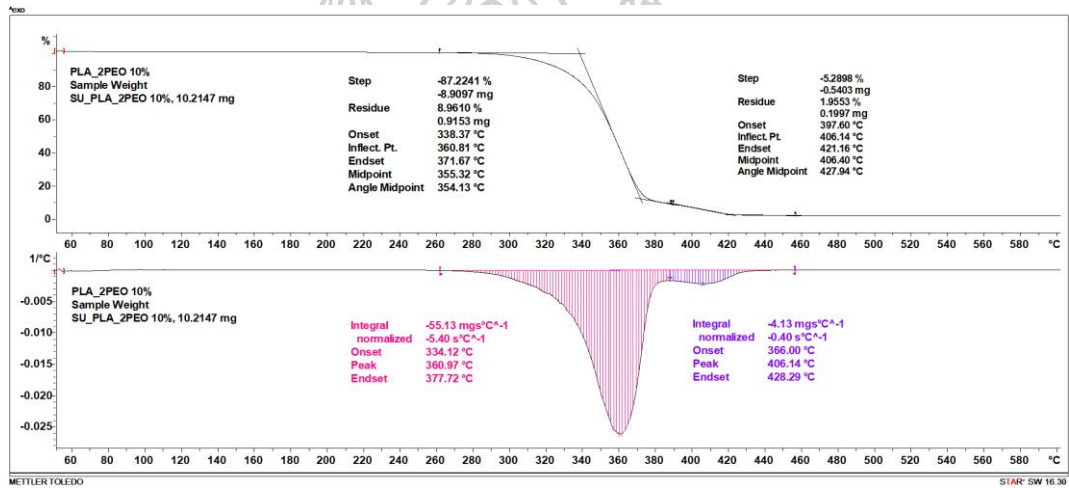
รูปที่ ก.35 TGA thermogram ของ PLA/3PEO 5%



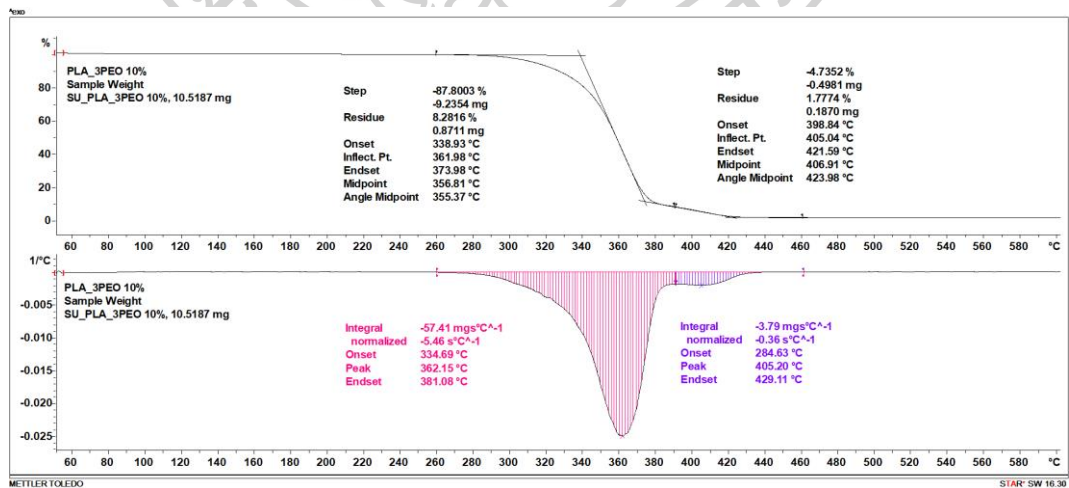
รูปที่ ก.36 TGA thermogram ของ PLA/4PEO 5%



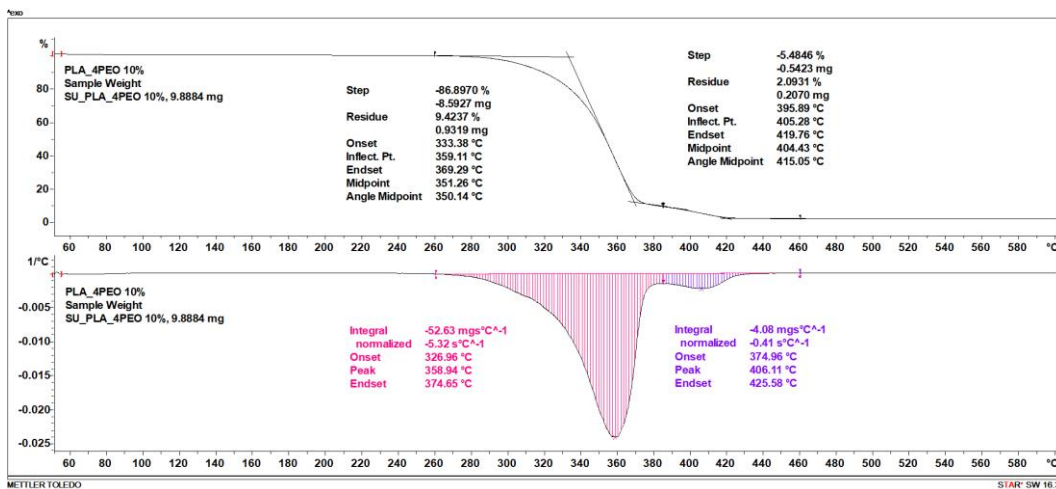
รูปที่ ก.37 TGA thermogram ของ PLA/1PEO 10%



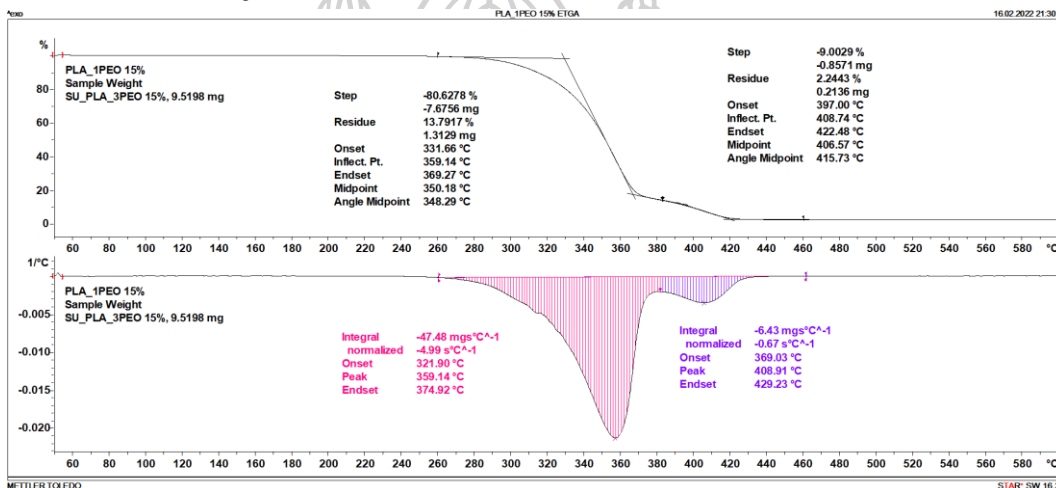
รูปที่ ก.38 TGA thermogram ของ PLA/2PEO 10%



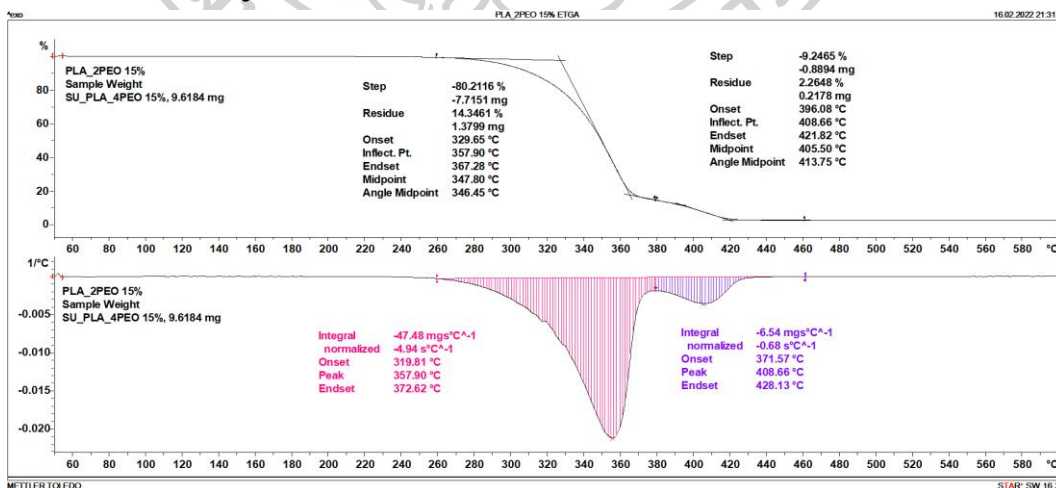
รูปที่ ก.39 TGA thermogram ของ PLA/3PEO 10%



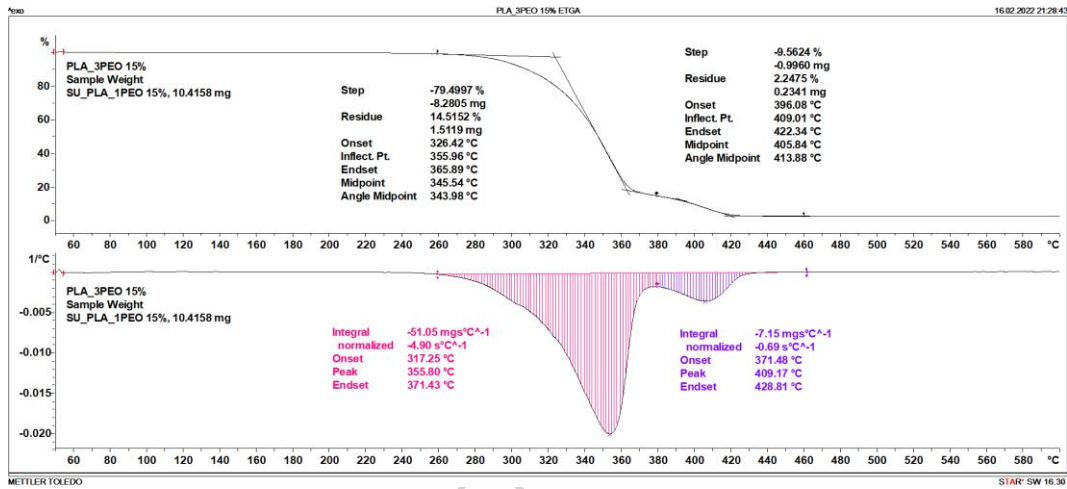
รูปที่ ก.40 TGA thermogram ของ PLA/4PEO 10%



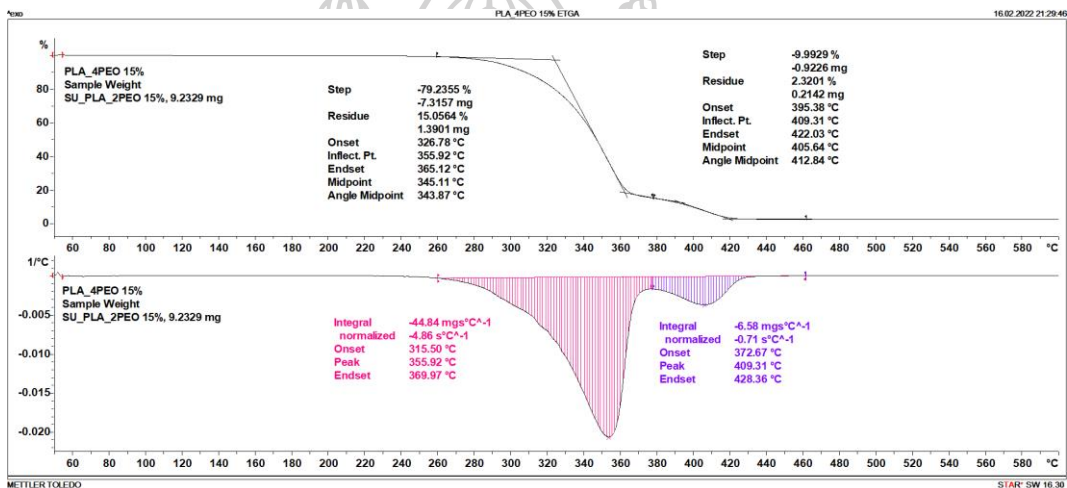
รูปที่ ก.41 TGA thermogram ของ PLA/1PEO 15%



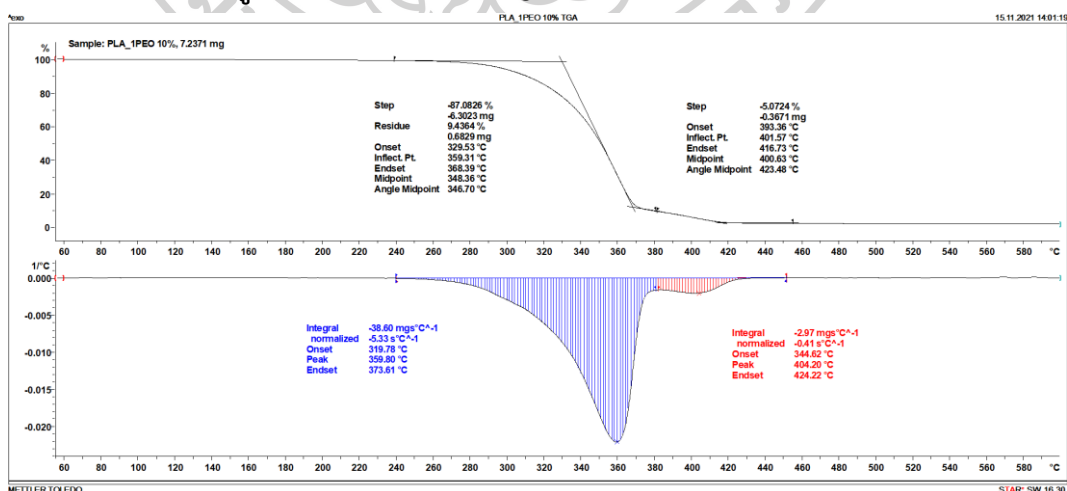
รูปที่ ก.42 TGA thermogram ของ PLA/2PEO 15%



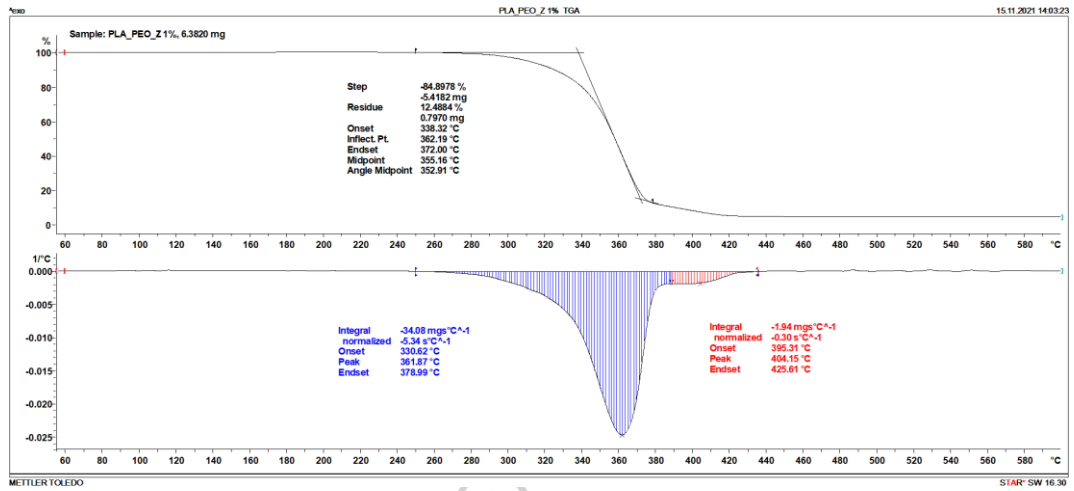
รูปที่ ก.43 TGA thermogram ของ PLA/3PEO 15%



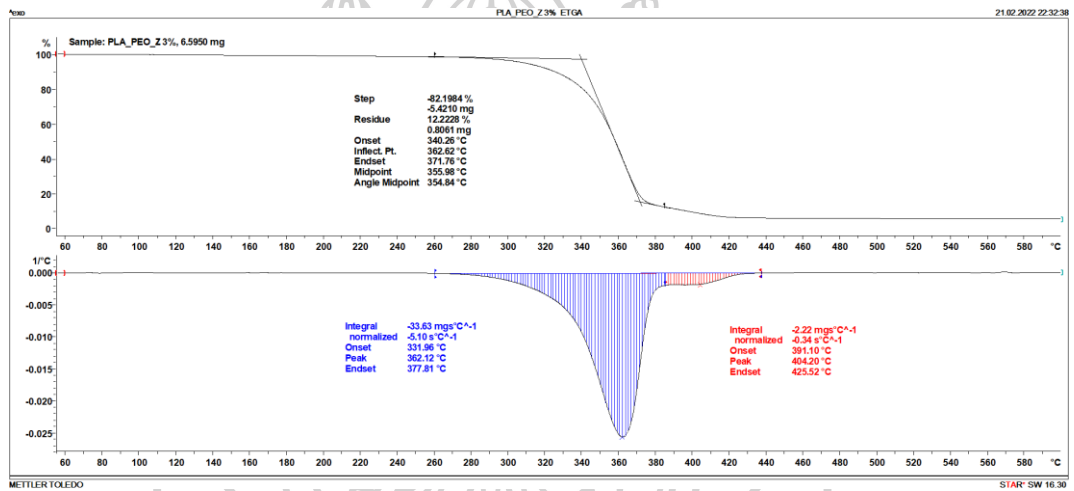
รูปที่ ก.44 TGA thermogram ของ PLA/4PEO 15%



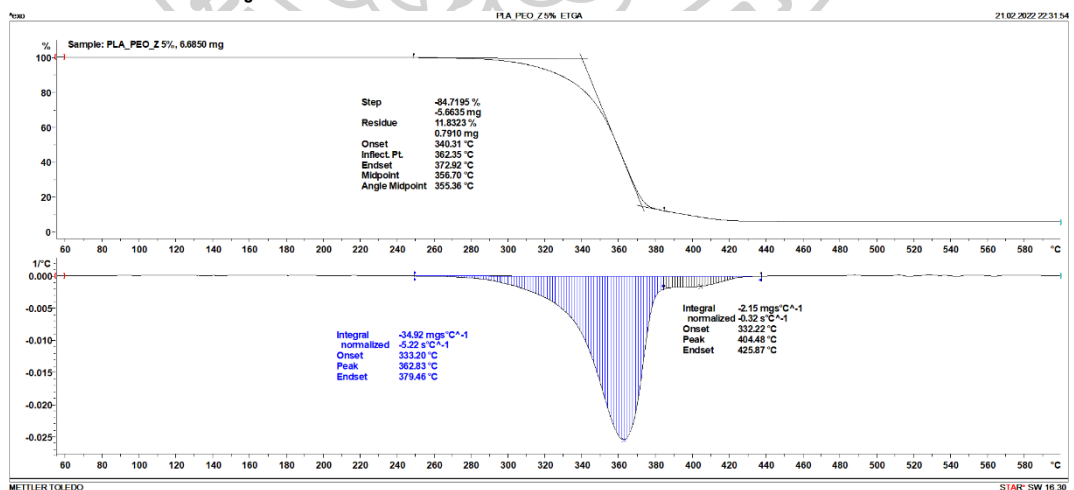
รูปที่ ก.45 TGA thermogram ของ PLA/1PEO 10% (New run)



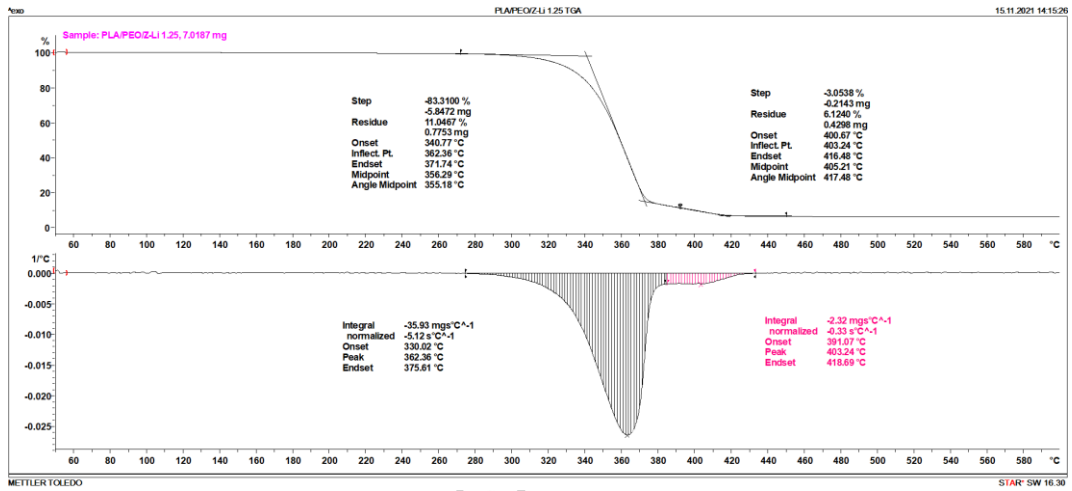
รูปที่ ก.46 TGA thermogram ของ PLA/PEO/Z 1%



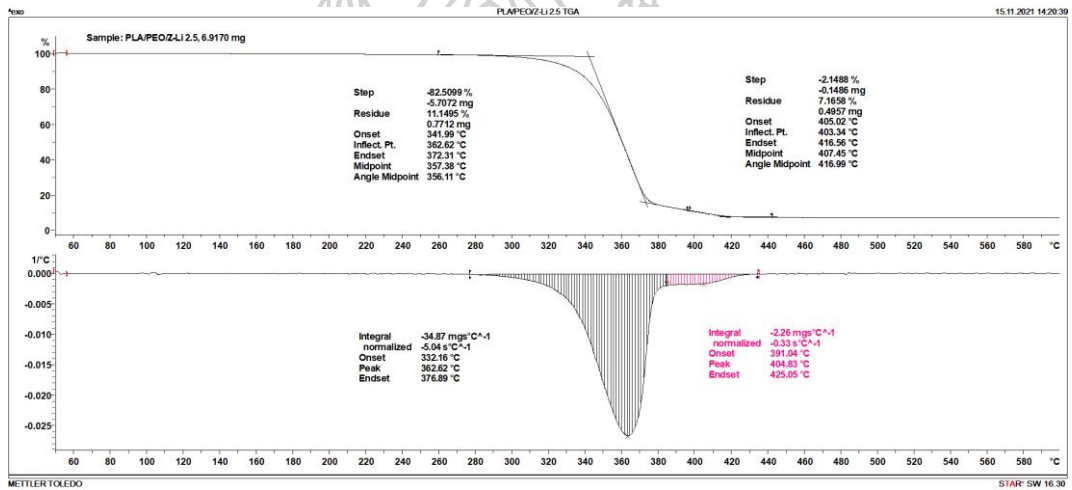
รูปที่ ก.47 TGA thermogram ของ PLA/PEO/Z 3%



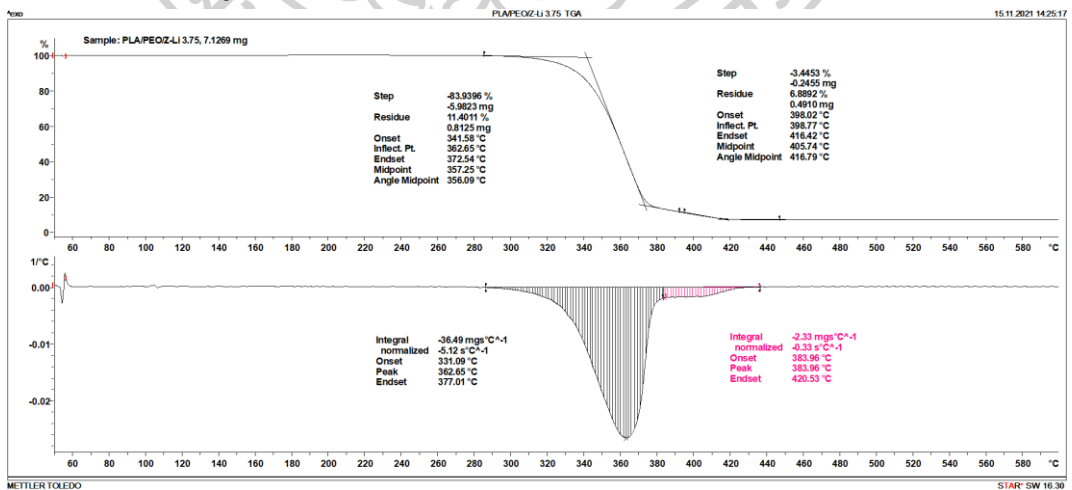
รูปที่ ก.48 TGA thermogram ของ PLA/PEO/Z 5%



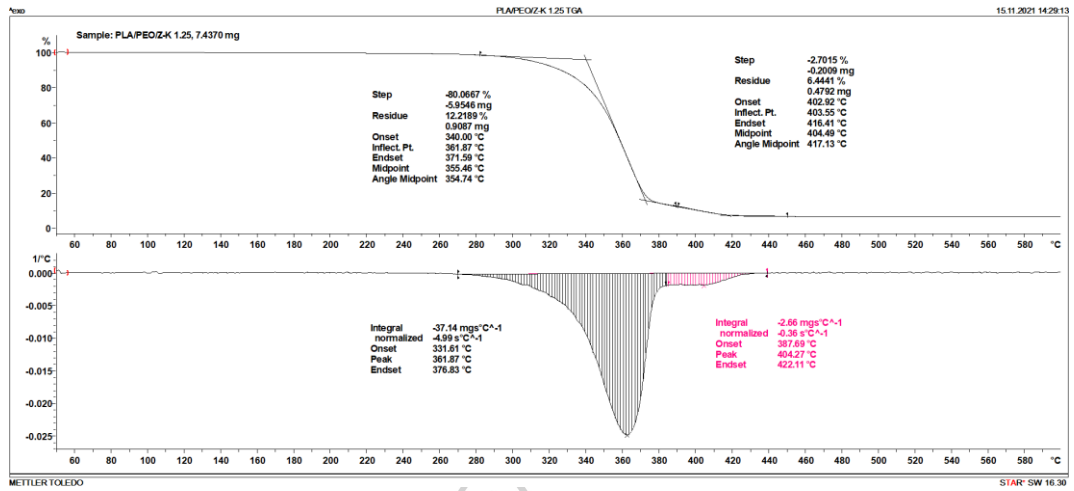
รูปที่ ก.49 TGA thermogram ของ PLA/PEO/Z-Li⁺ 1.25



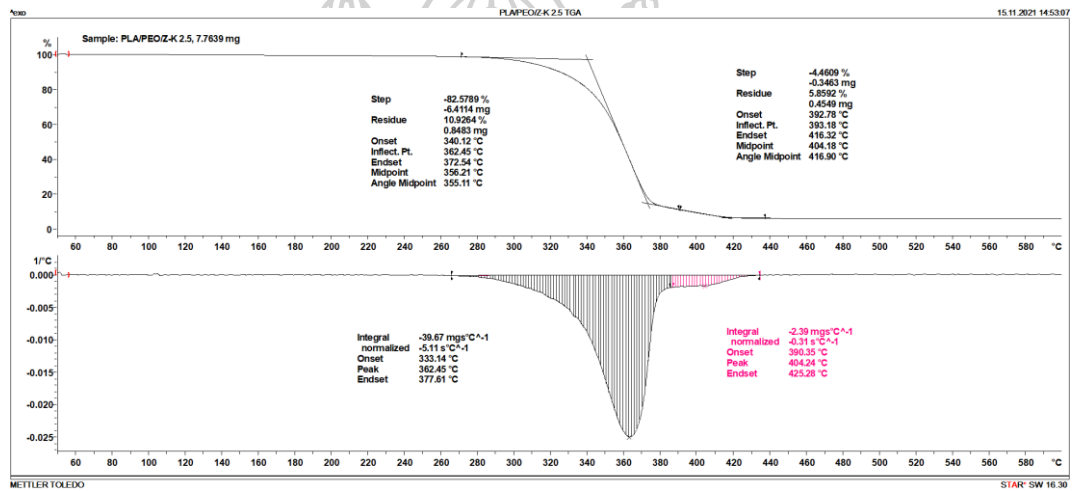
รูปที่ ก.50 TGA thermogram ของ PLA/PEO/Z-Li⁺ 2.5



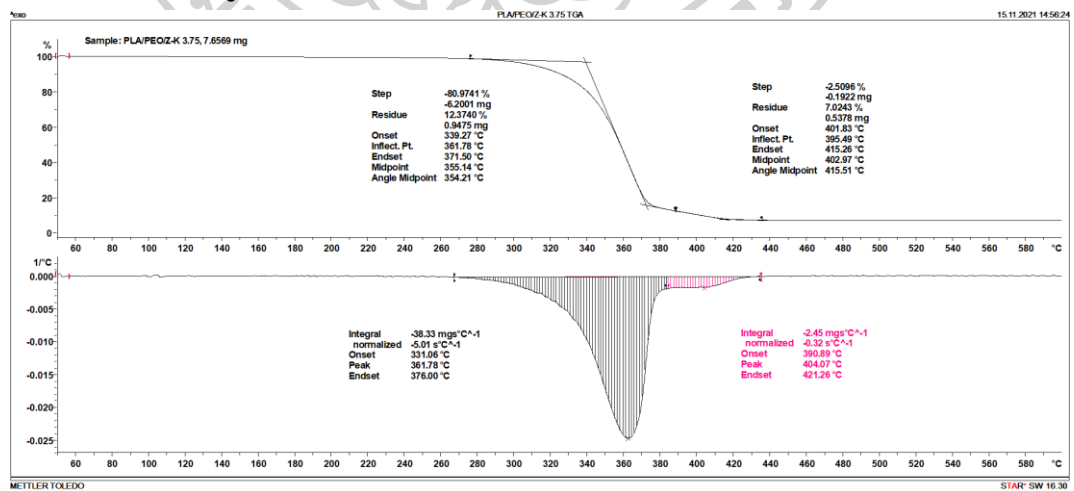
รูปที่ ก.51 TGA thermogram ของ PLA/PEO/Z-Li⁺ 3.75



รูปที่ ก.52 TGA thermogram ของ PLA/PEO/Z-K⁺ 1.25

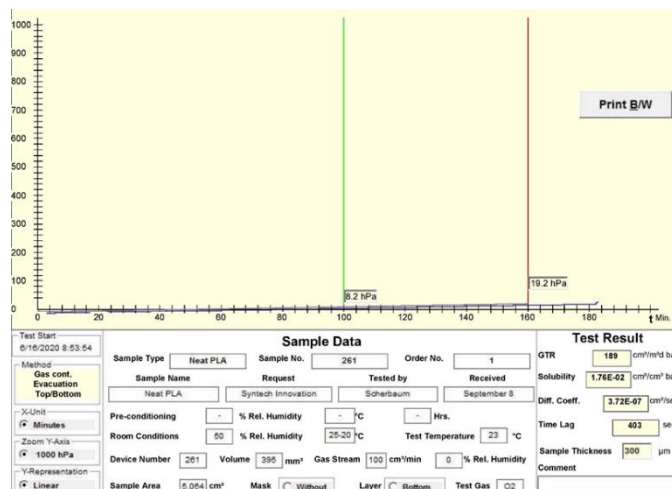


รูปที่ ก.53 TGA thermogram ของ PLA/PEO/Z-K⁺ 2.5

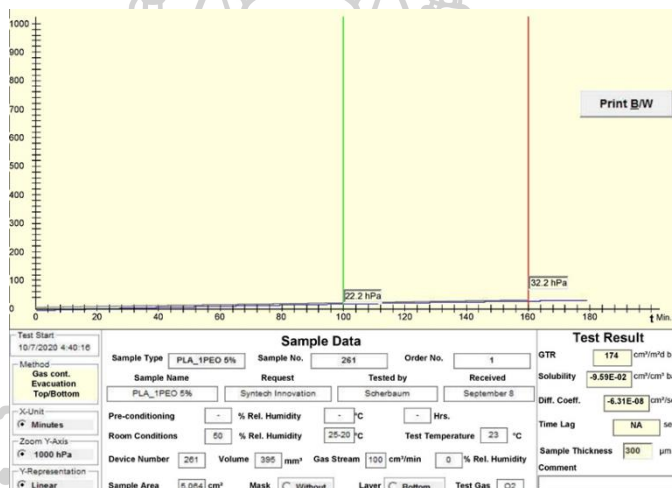


รูปที่ ก.54 TGA thermogram ของ PLA/PEO/Z-K⁺ 3.75

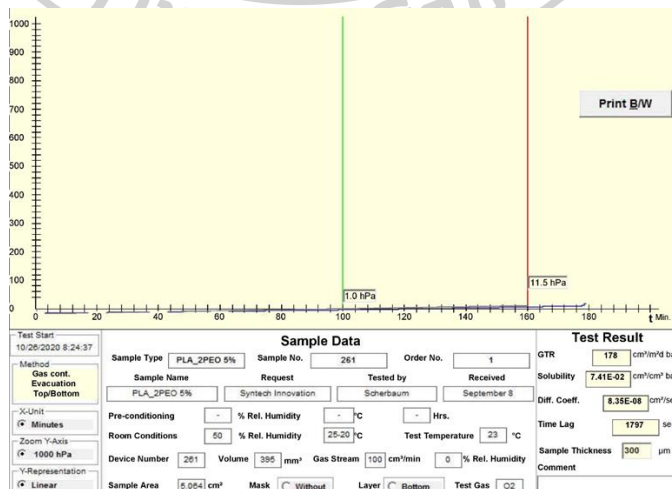
ก-4 ผลการศึกษาอัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม



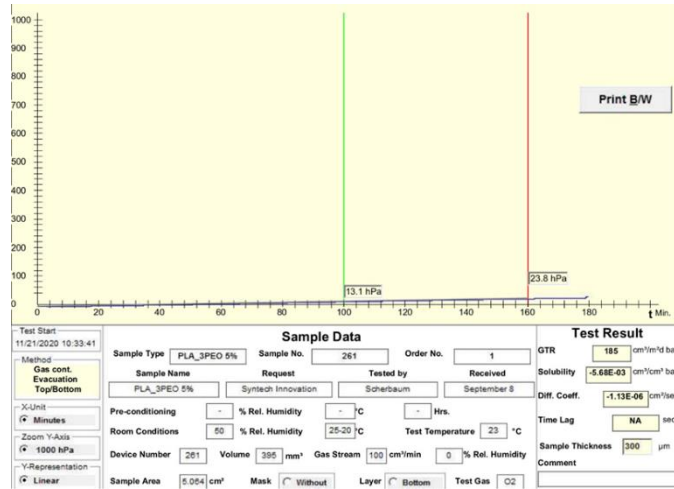
รูปที่ ก.55 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม Neat PLA



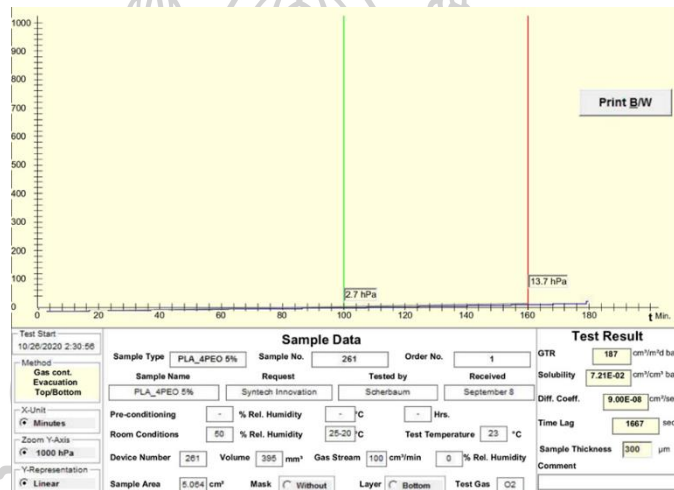
รูปที่ ก.56 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/1PEO 5%



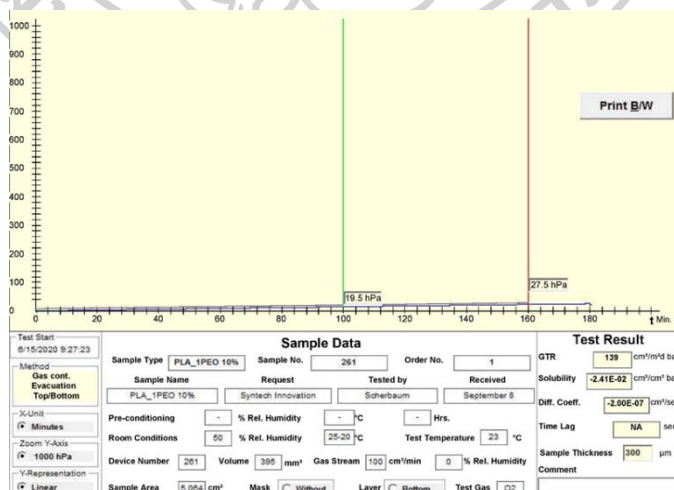
รูปที่ ก.57 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/2PEO 5%



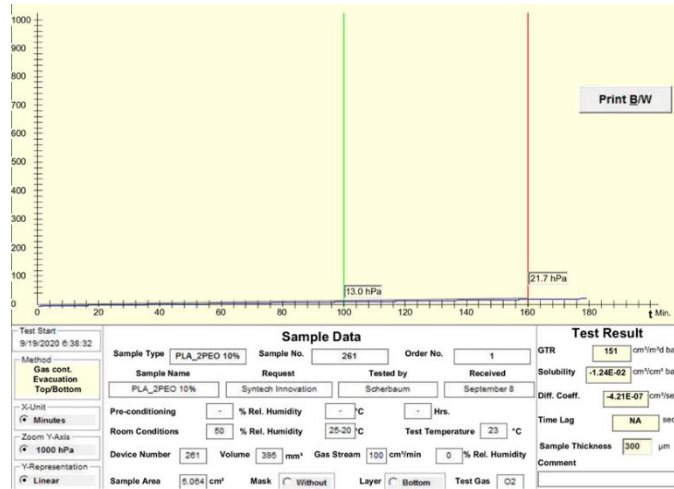
รูปที่ ก.58 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/3PEO 5%



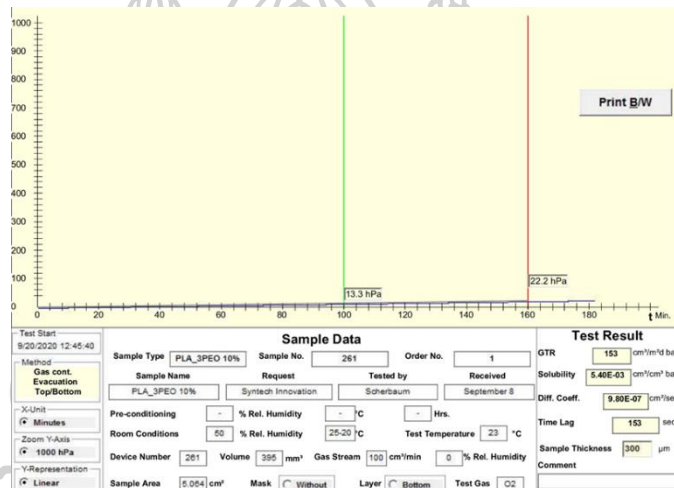
รูปที่ ก.59 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/4PEO 5%



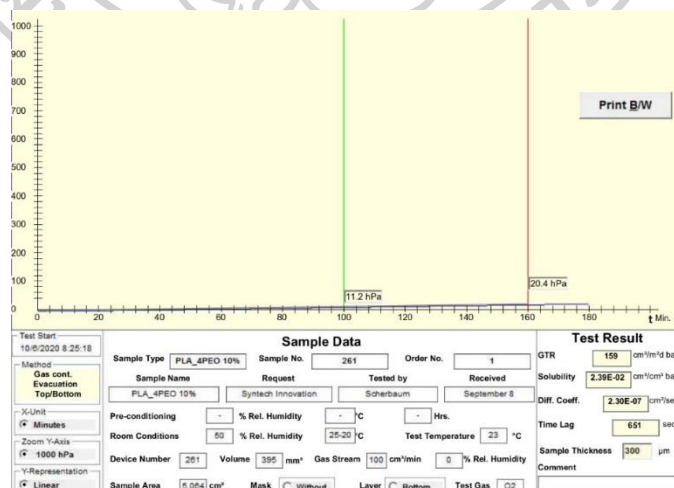
รูปที่ ก.60 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/1PEO 10%



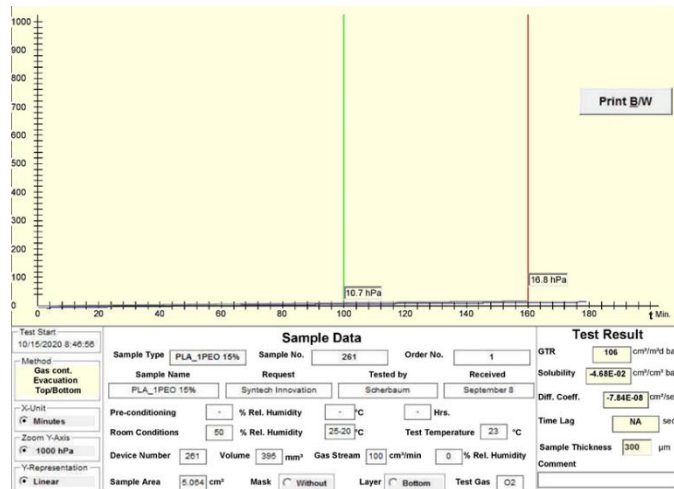
รูปที่ ก.61 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/2PEO 10%



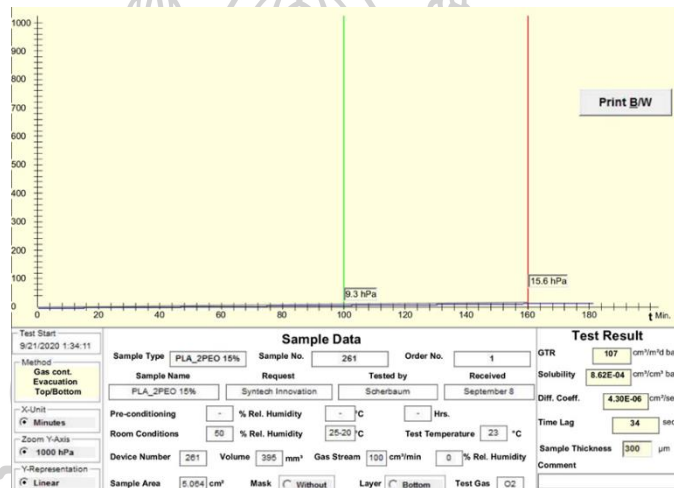
รูปที่ ก.62 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/3PEO 10%



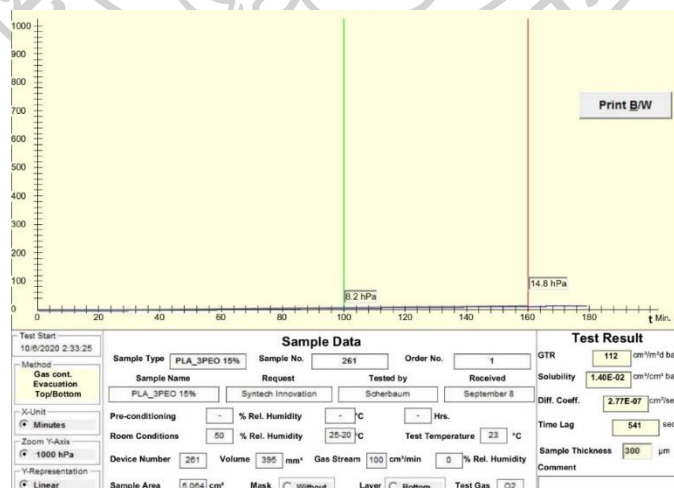
รูปที่ ก.63 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/4PEO 10%



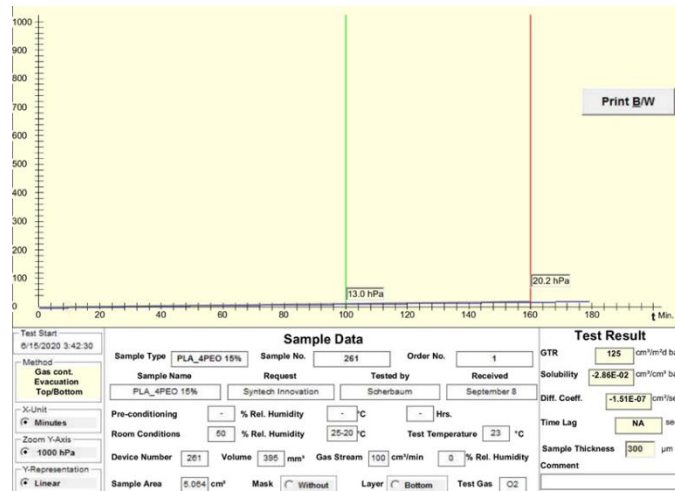
รูปที่ ก.64 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/1PEO 15%



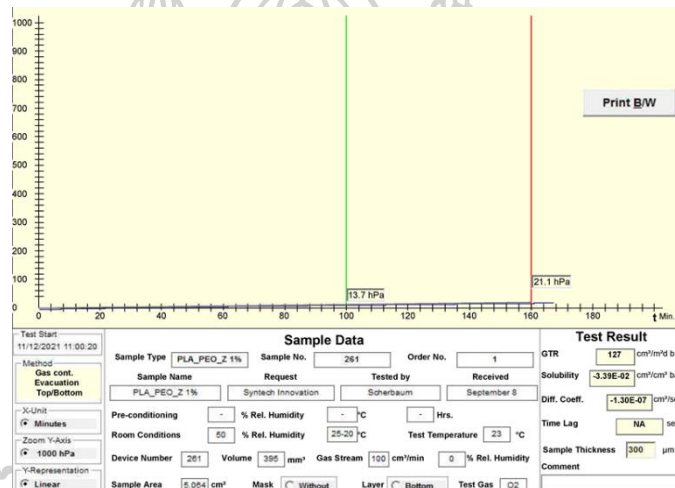
รูปที่ ก.65 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/2PEO 15%



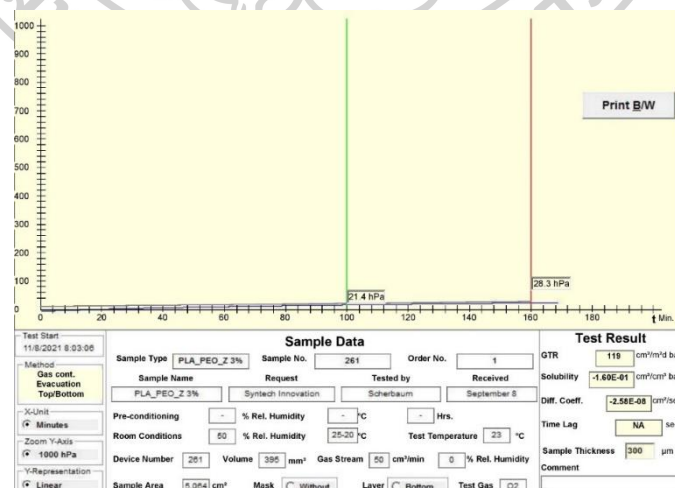
รูปที่ ก.66 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/3PEO 15%



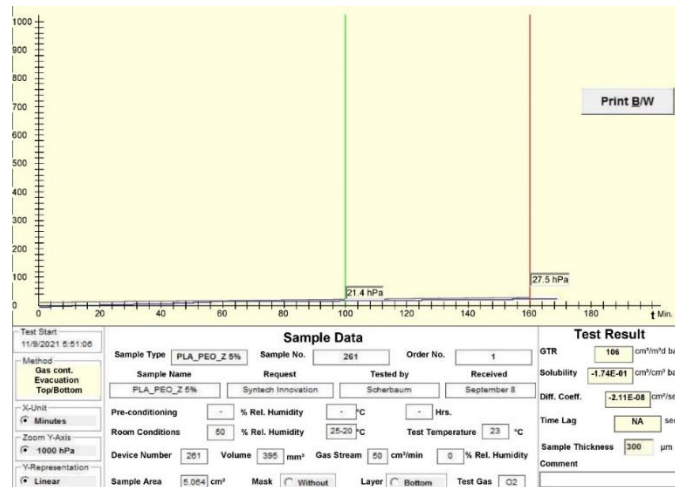
รูปที่ ก.67 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/4PEO 15%



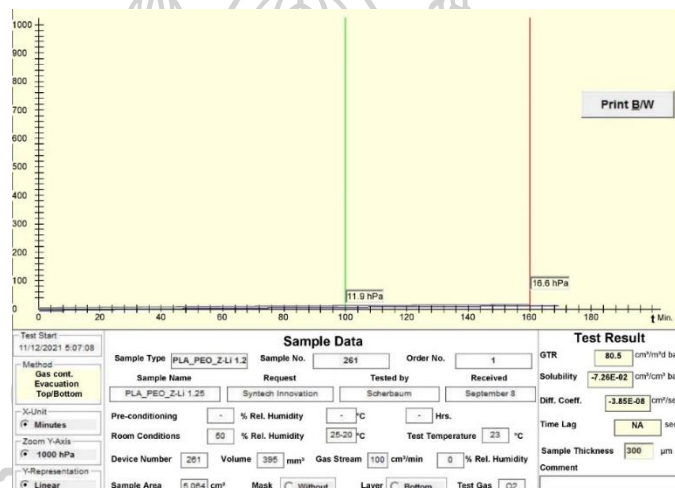
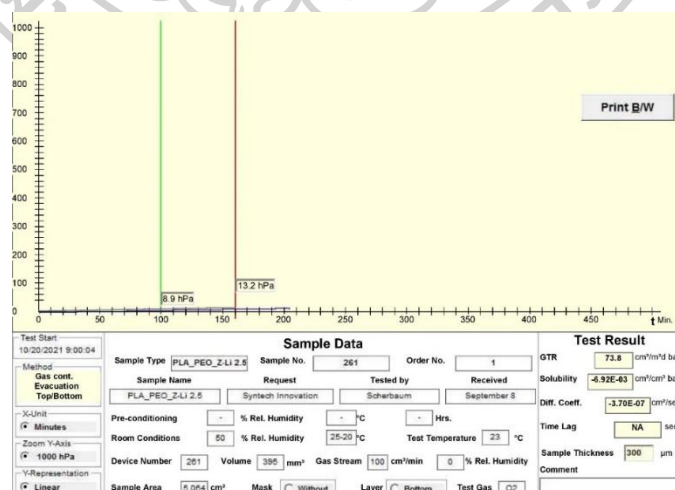
รูปที่ ก.68 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/PEO/Z 1%

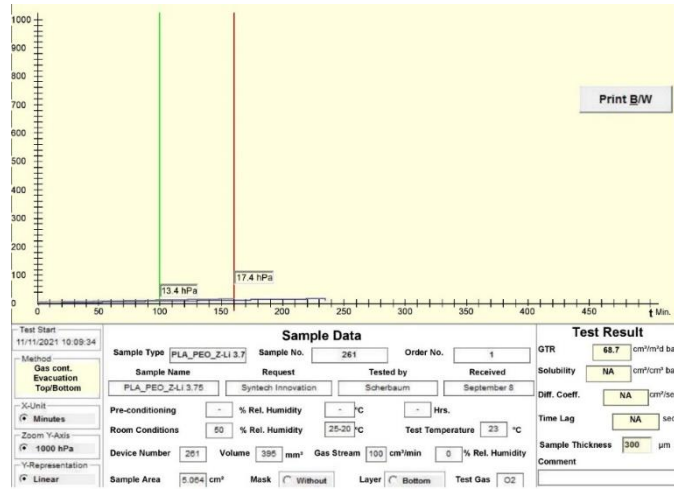


รูปที่ ก.69 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/PEO/Z 3%

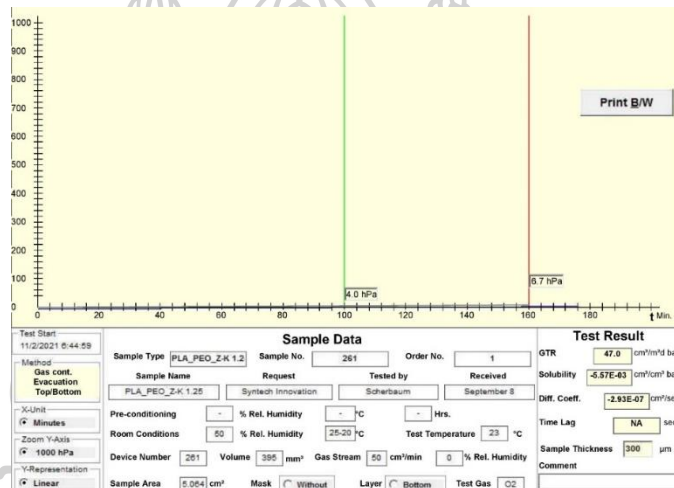


รูปที่ ก.70 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/PEO/Z 5%

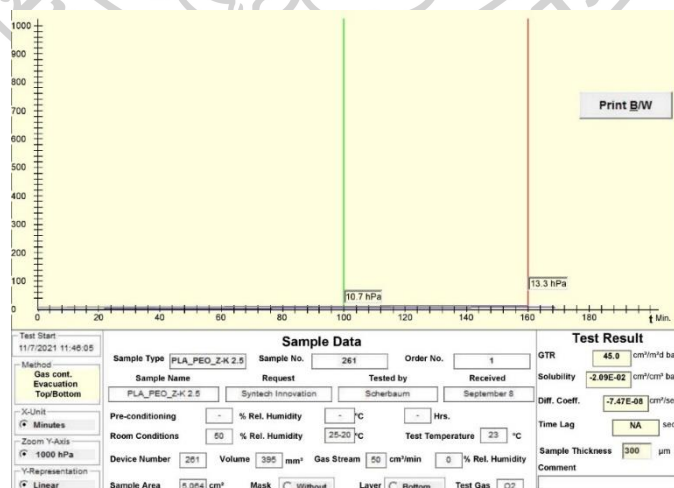
รูปที่ ก.71 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/PEO/Z-Li⁺ 1.25รูปที่ ก.72 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/PEO/Z-Li⁺ 2.5



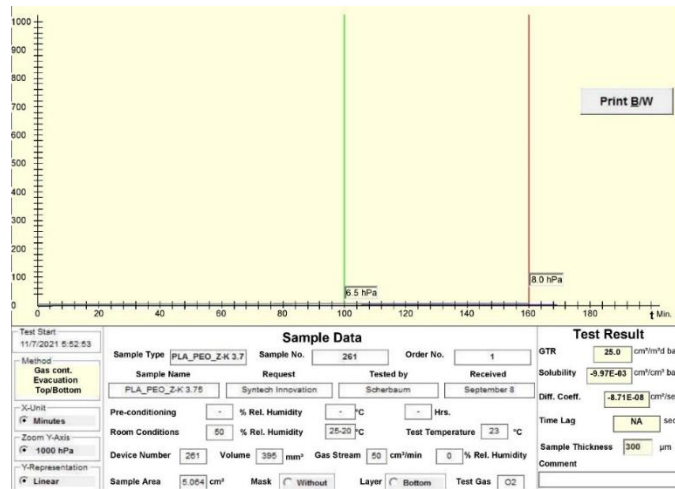
รูปที่ ก.73 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/PEO/Z-Li⁺ 3.75



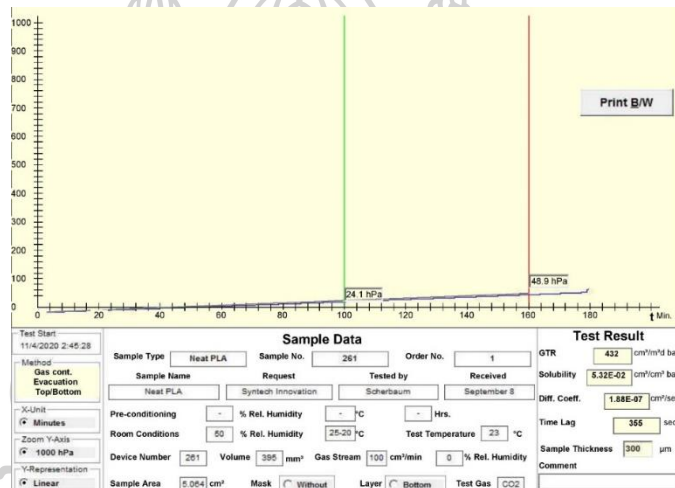
รูปที่ ก.74 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/PEO/Z-K⁺ 1.25



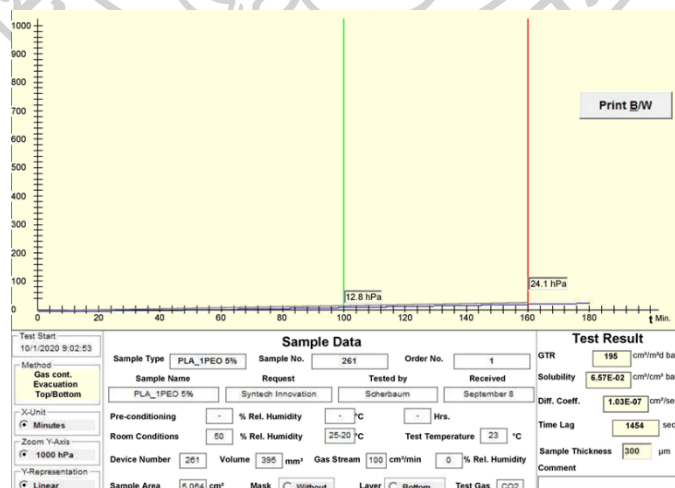
รูปที่ ก.75 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/PEO/Z-K⁺ 2.5



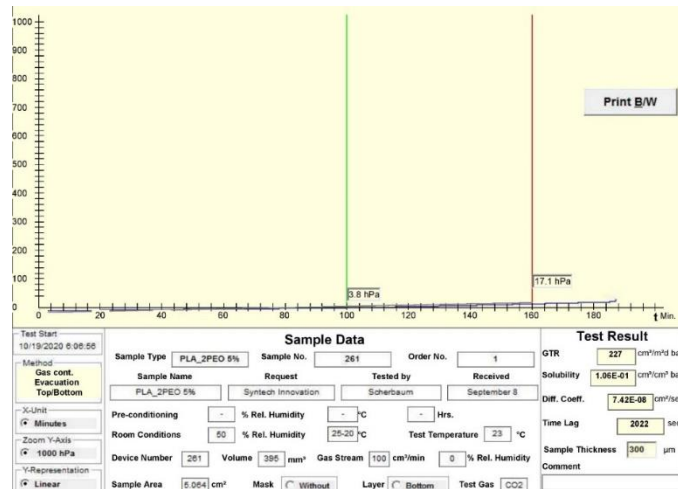
รูปที่ ก.76 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PLA/PEO/Z-K⁺ 3.75



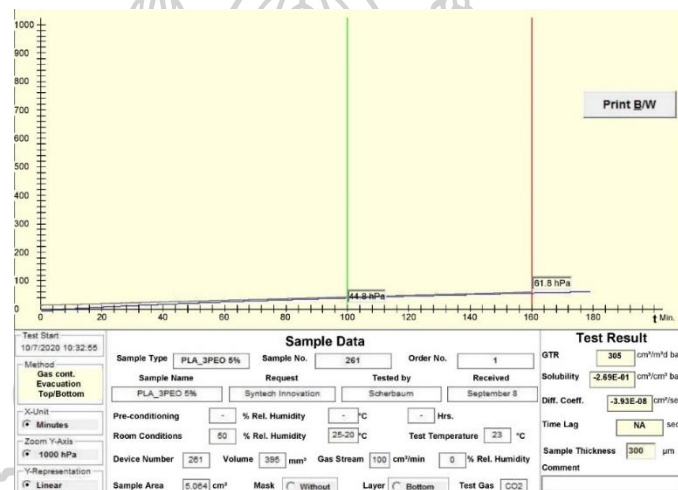
รูปที่ ก.77 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PLA



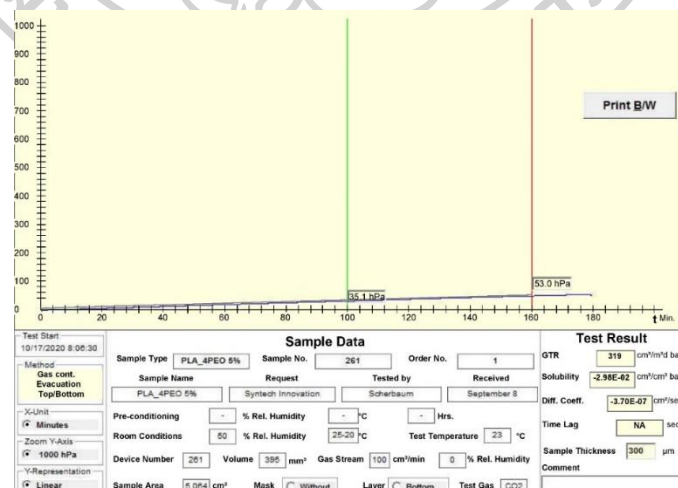
รูปที่ ก.78 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/1PEO 5%



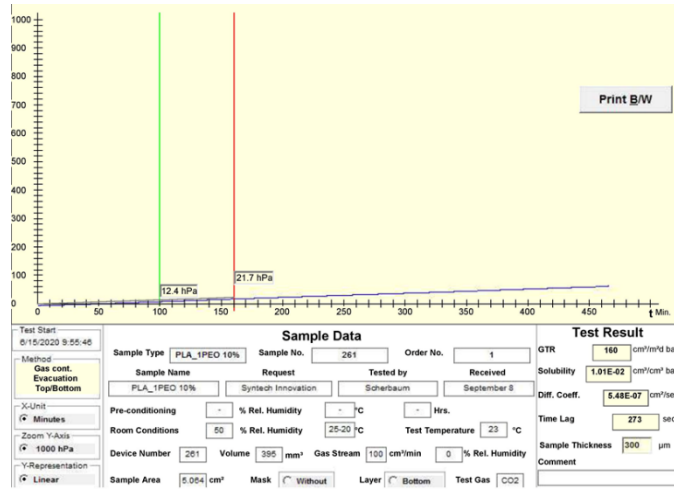
รูปที่ ก.79 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/2PEO 5%



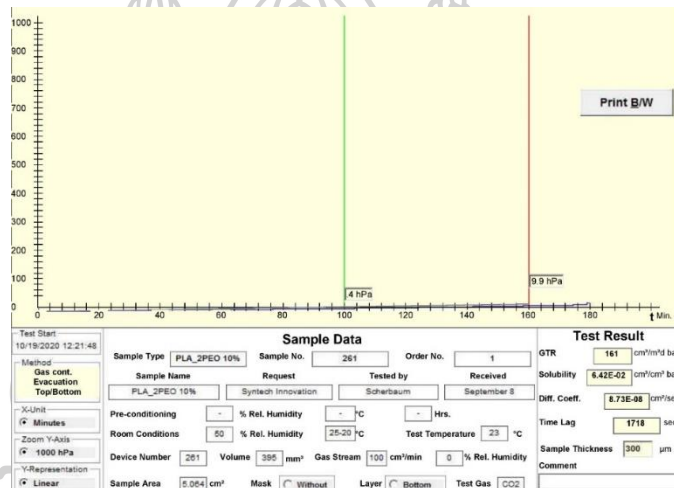
รูปที่ ก.80 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/3PEO 5%



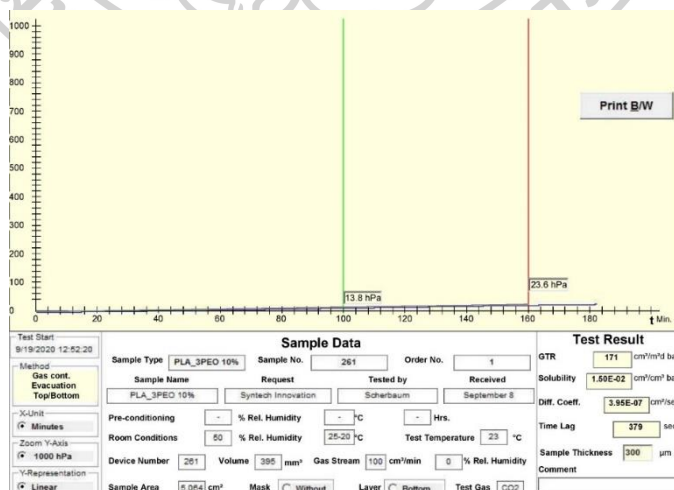
รูปที่ ก.81 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/4PEO 5%



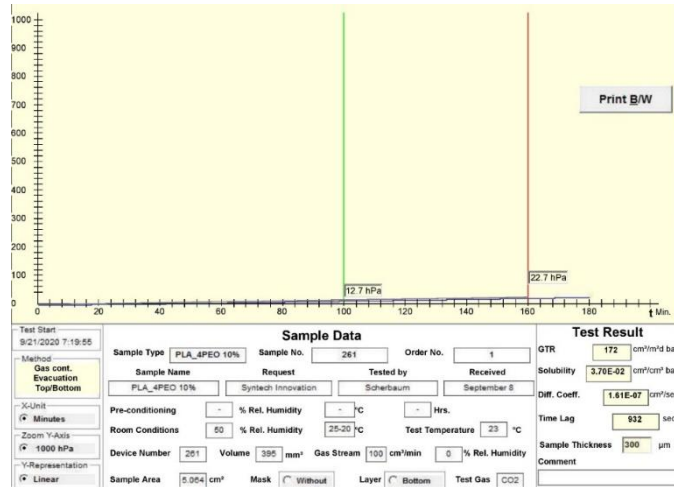
รูปที่ ก.82 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/1PEO 10%



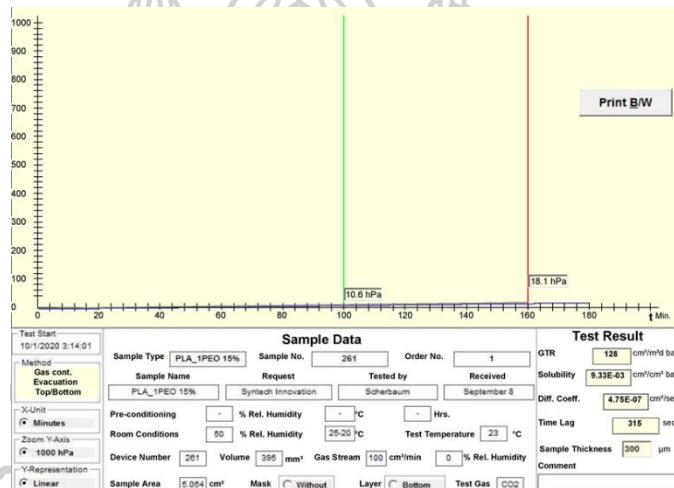
รูปที่ ก.83 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/2PEO 10%



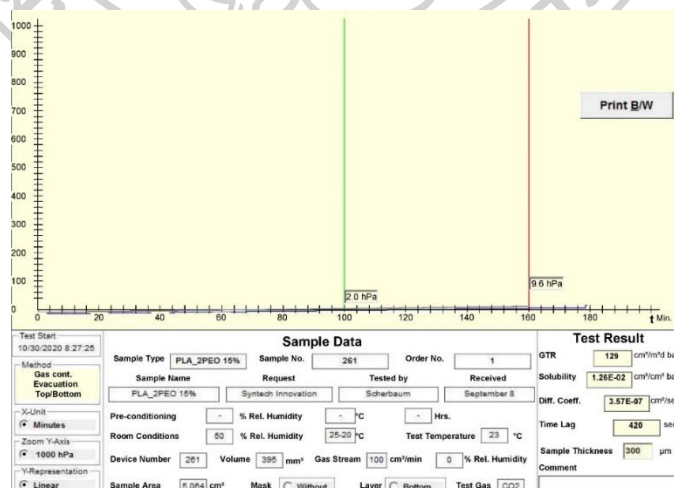
รูปที่ ก.84 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/3PEO 10%



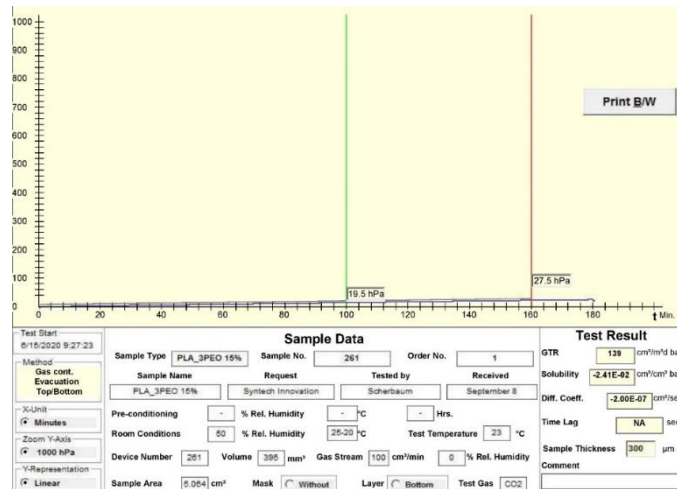
รูปที่ ก.85 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/4PEO 10%



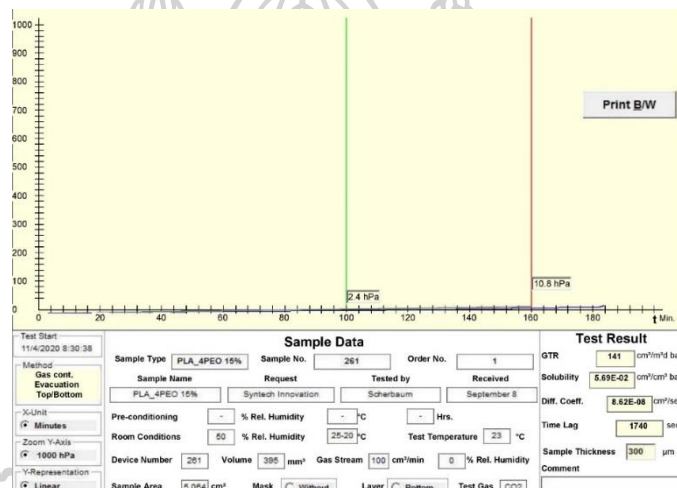
รูปที่ ก.86 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/1PEO 15%



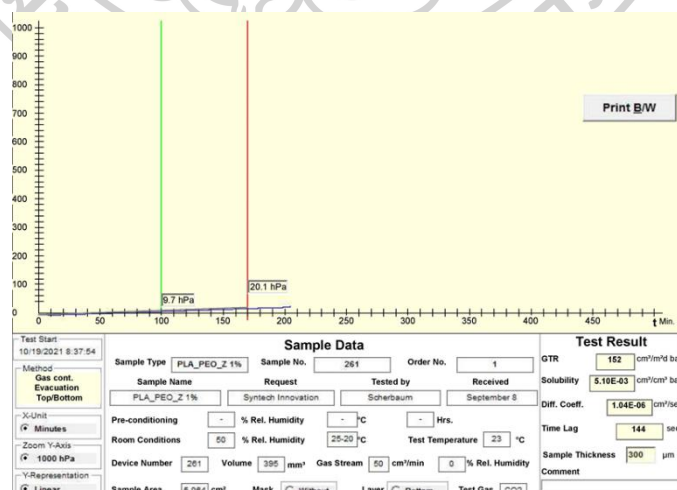
รูปที่ ก.87 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/2PEO 15%



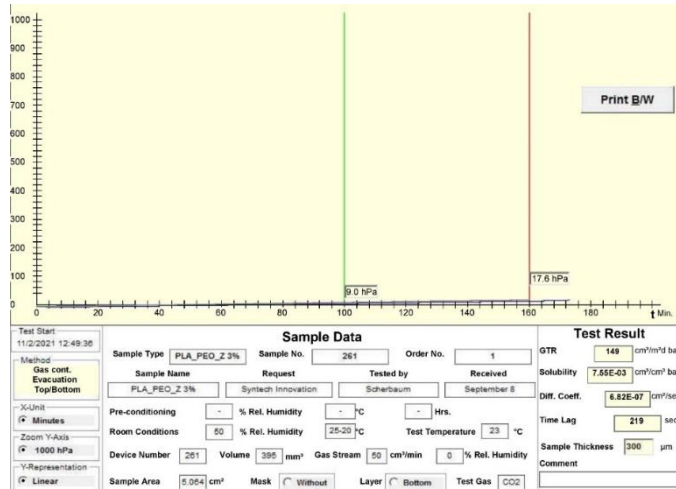
รูปที่ ก.88 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/3PEO 15%



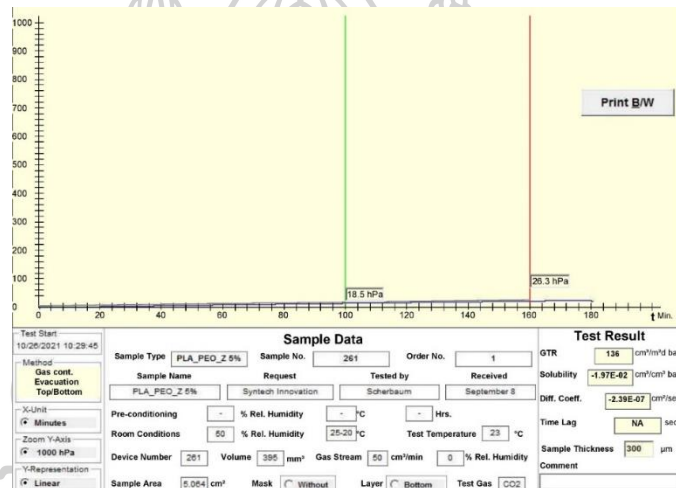
รูปที่ ก.89 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/4PEO 15%



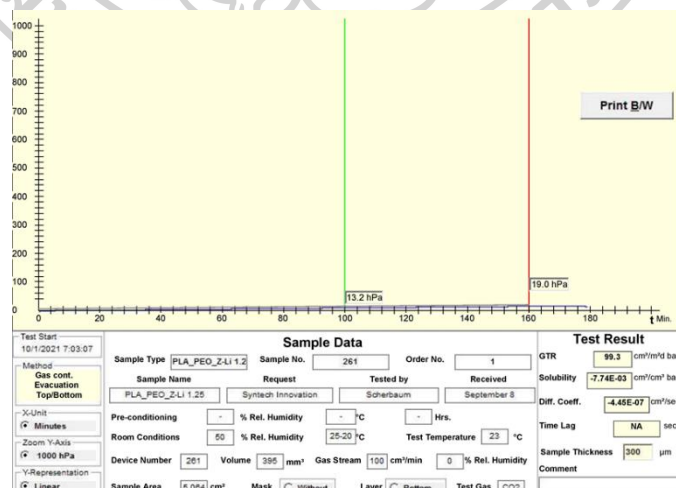
รูปที่ ก.90 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/PEO/Z 1%



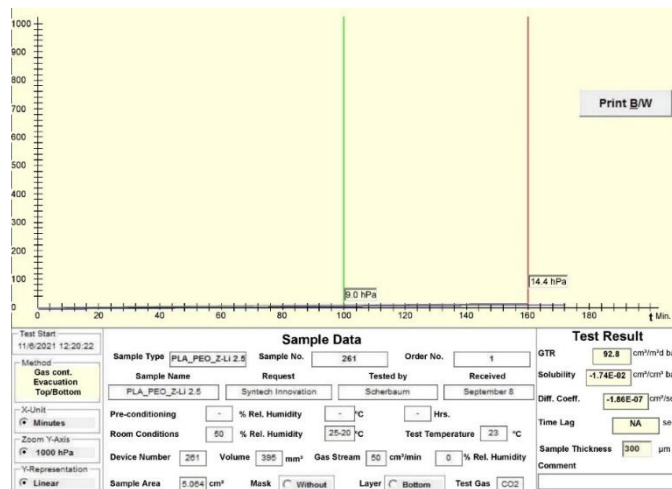
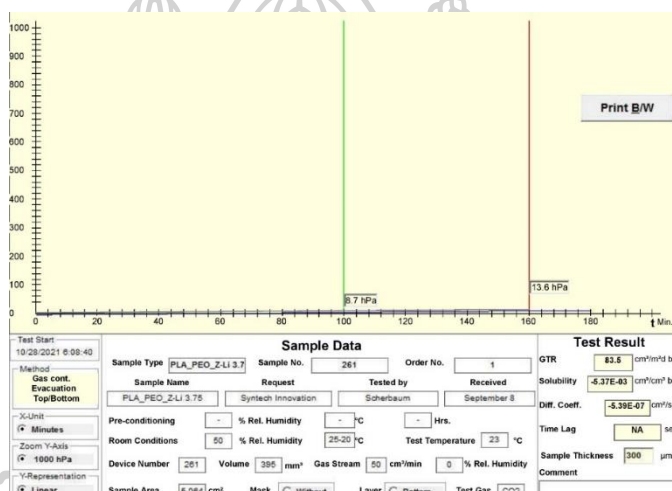
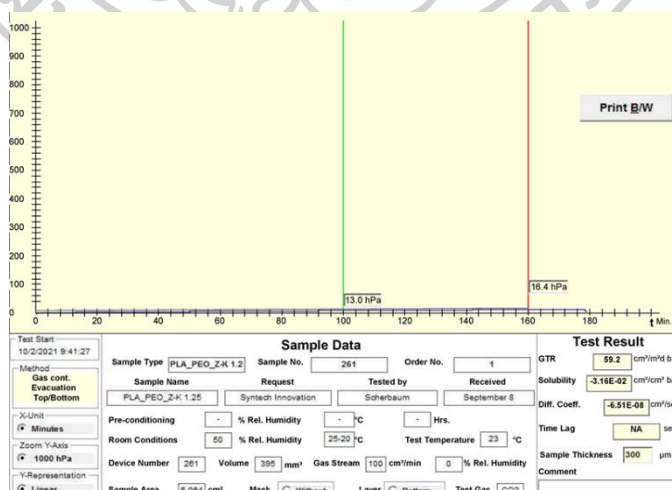
รูปที่ ก.91 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/PEO/Z 3%

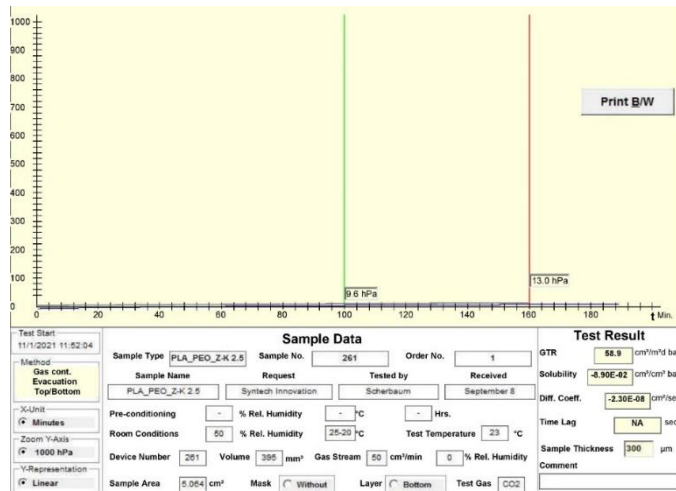


รูปที่ ก.92 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/PEO/Z 5%

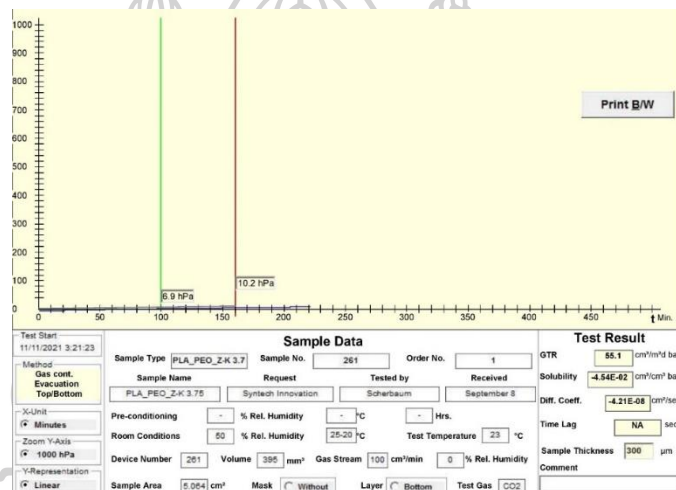


รูปที่ ก.93 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/PEO/Z-Li⁺ 1.25

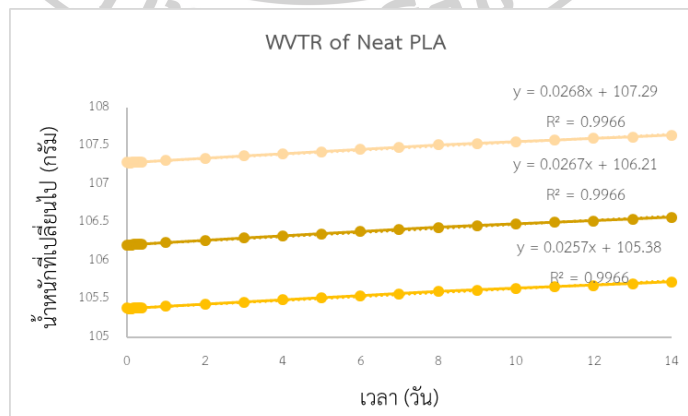
รูปที่ ก.94 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/PEO/Z-Li⁺ 2.5รูปที่ ก.95 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/PEO/Z-Li⁺ 3.75รูปที่ ก.96 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/PEO/Z-K⁺ 1.25



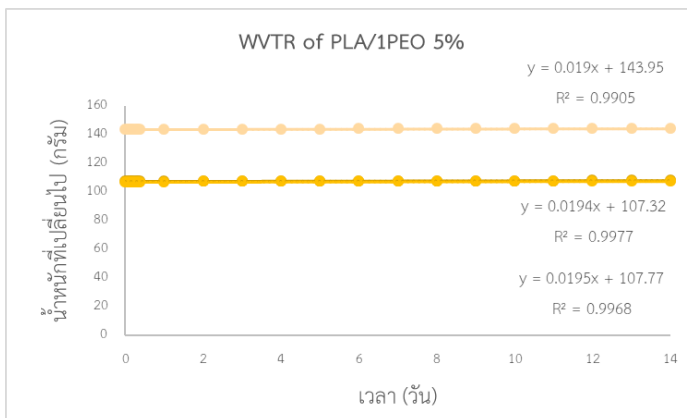
รูปที่ ก.97 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/PEO/Z-K⁺ 2.5



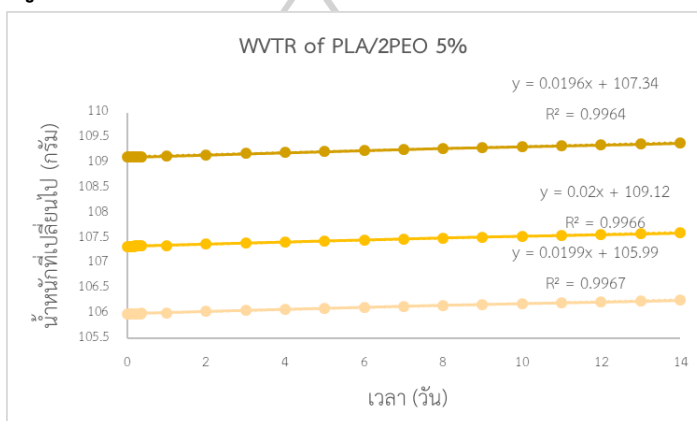
รูปที่ ก.98 อัตราการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA/PEO/Z-K⁺ 3.75
ก-5 ผลการศึกษาอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม



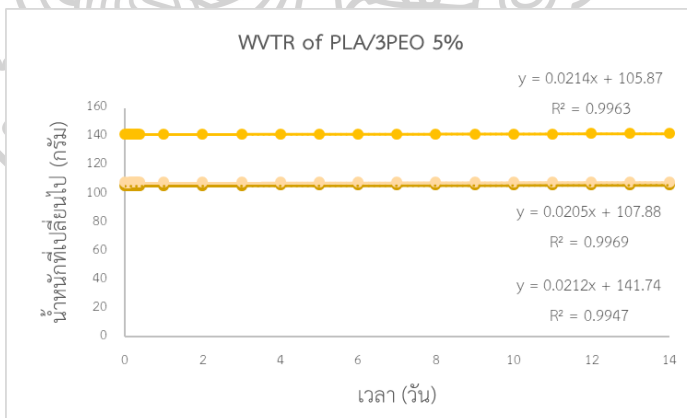
รูปที่ ก.99 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม Neat PLA



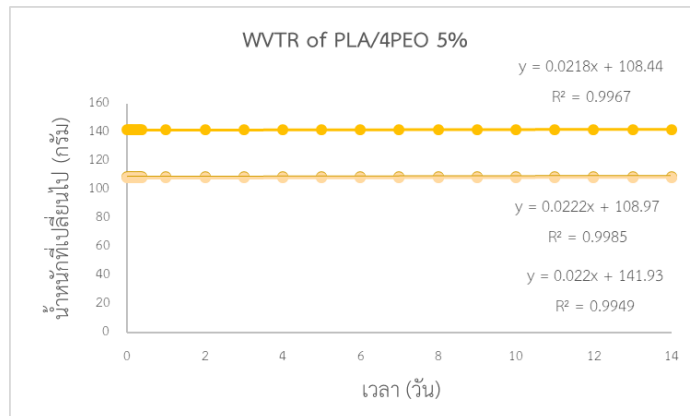
รูปที่ ก.100 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/1PEO 5%



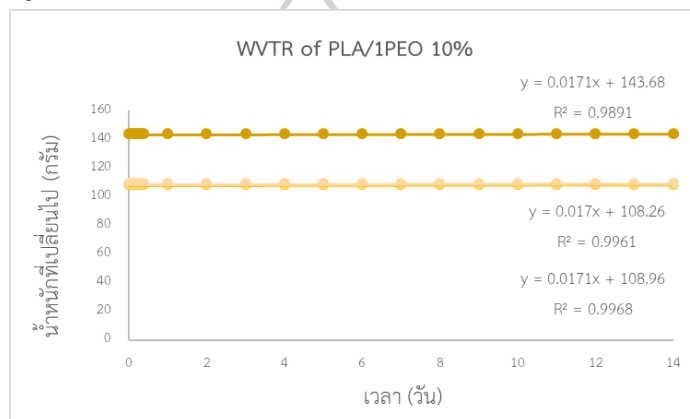
รูปที่ ก.101 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/2PEO 5%



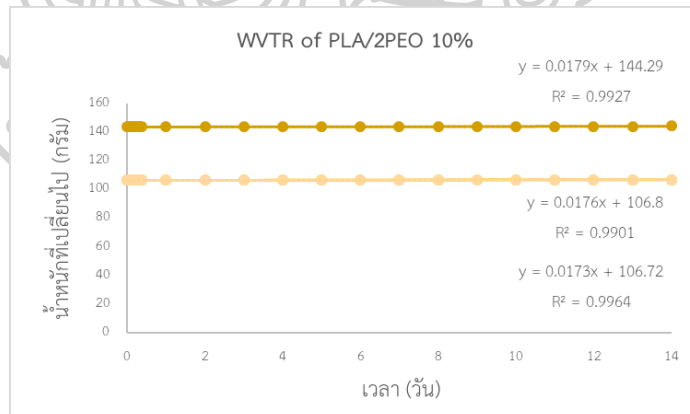
รูปที่ ก.102 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/3PEO 5%



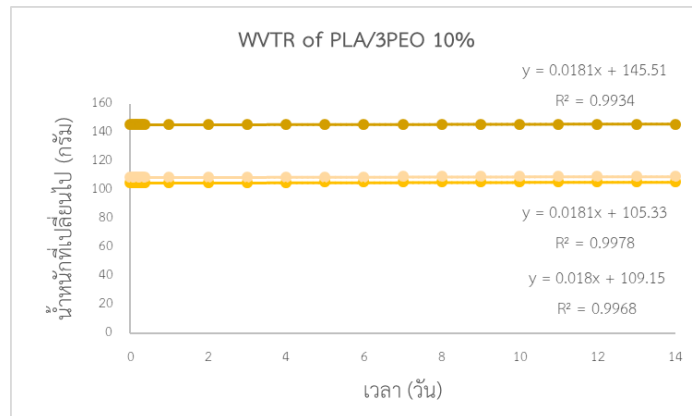
รูปที่ ก.103 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/4PEO 5%



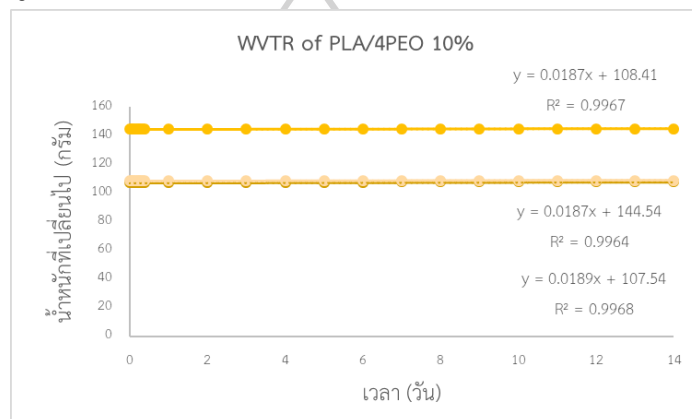
รูปที่ ก.104 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/1PEO 10%



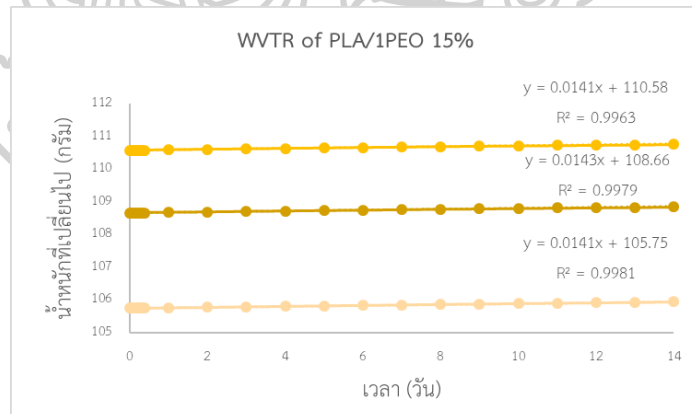
รูปที่ ก.105 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/2PEO 10%



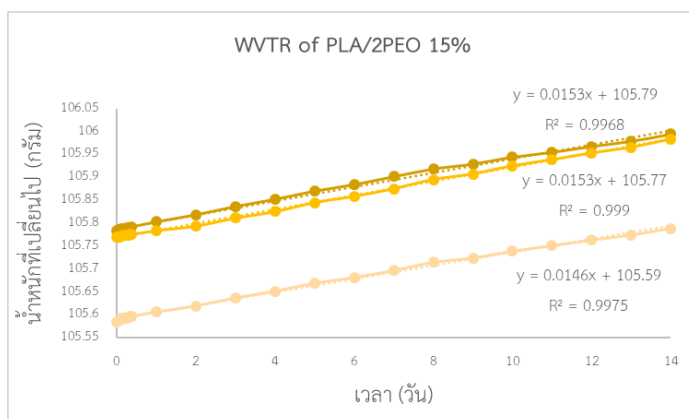
รูปที่ ก.106 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/3PEO 10%



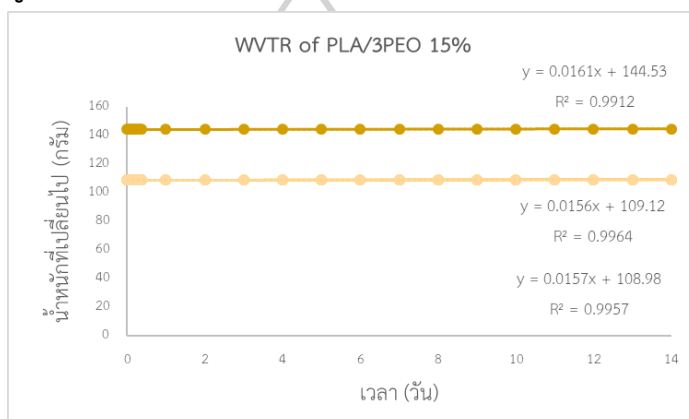
รูปที่ ก.107 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/4PEO 10%



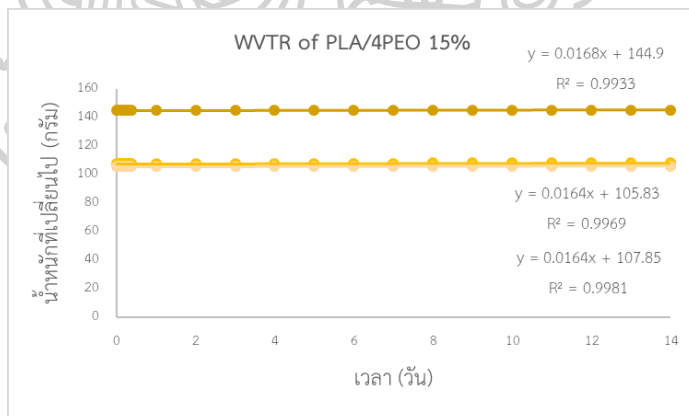
รูปที่ ก.108 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/1PEO 15%



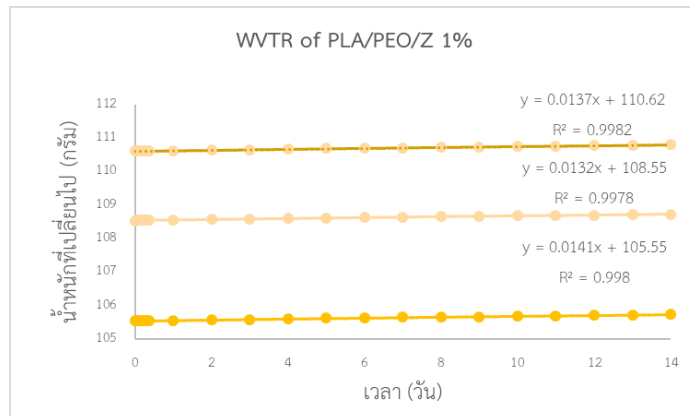
รูปที่ ก.109 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/2PEO 15%



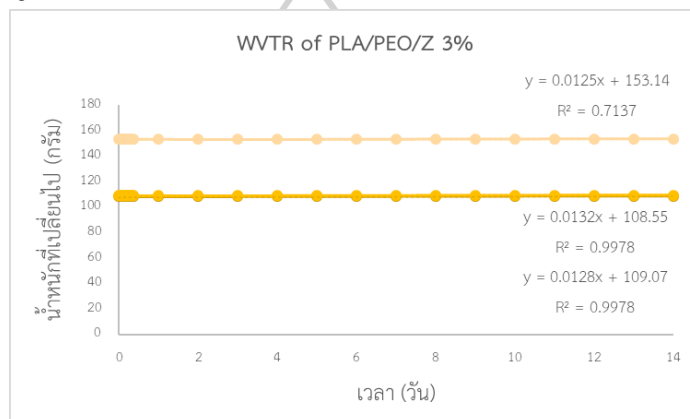
รูปที่ ก.110 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/3PEO 15%



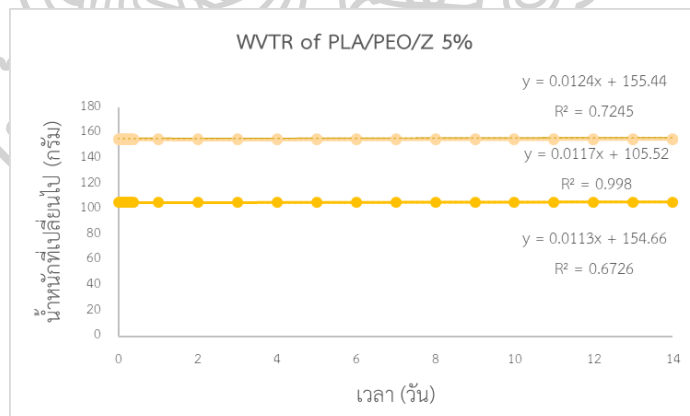
รูปที่ ก.111 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/4PEO 15%



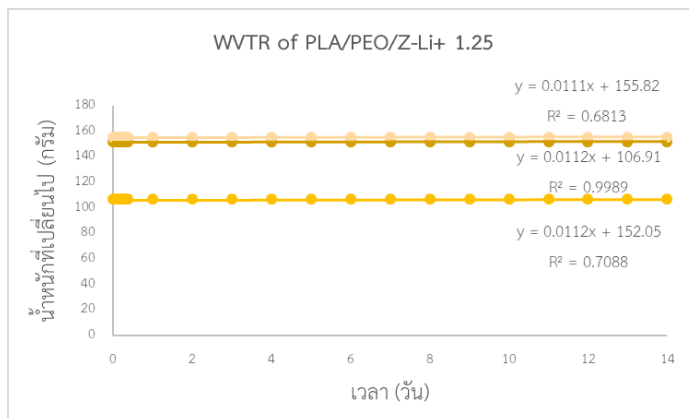
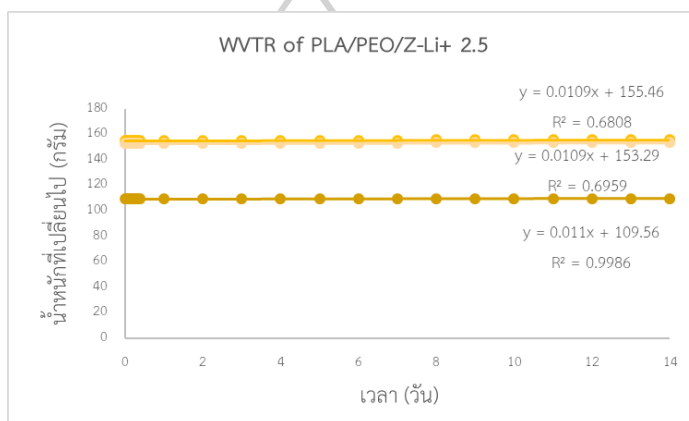
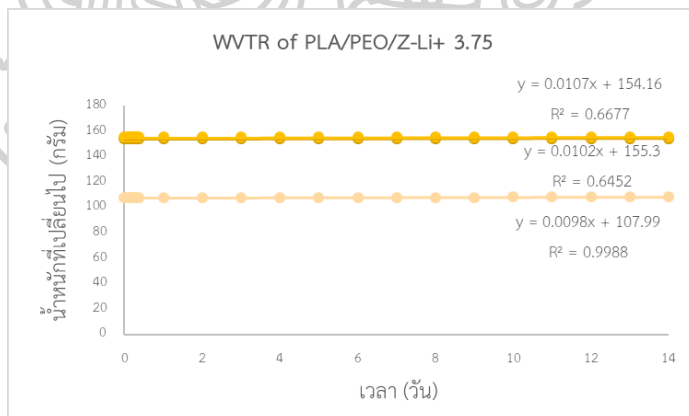
รูปที่ ก.112 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/PEO/Z 1%

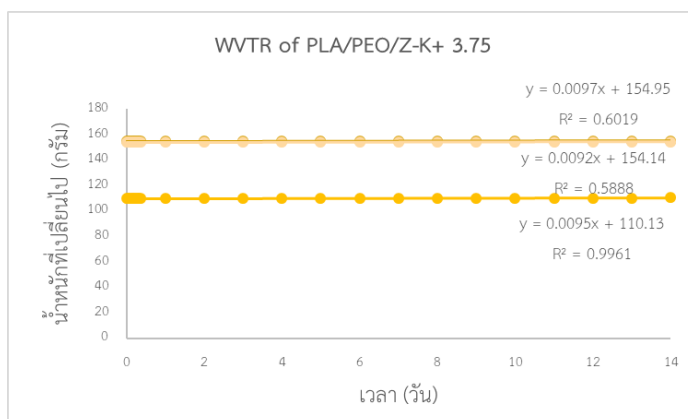
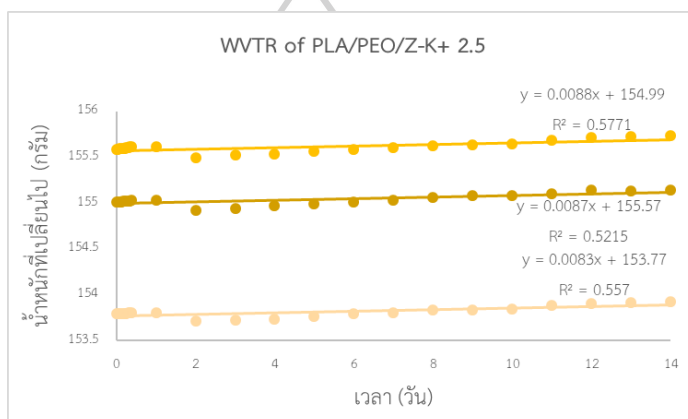
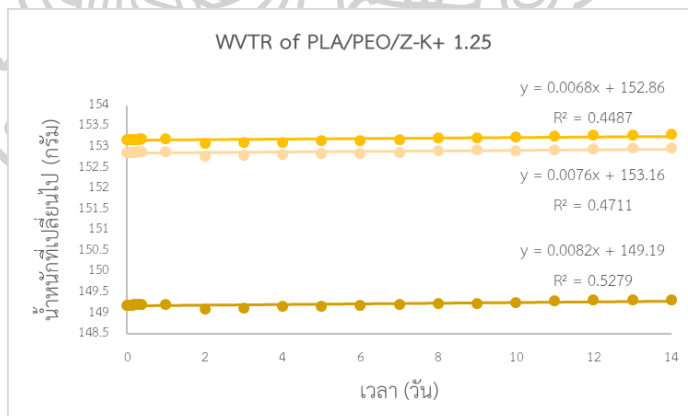


รูปที่ ก.113 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/PEO/Z 3%



รูปที่ ก.114 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/PEO/Z 5%

รูปที่ ก.115 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/PEO/Z-Li⁺ 1.25%รูปที่ ก.116 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/PEO/Z-Li⁺ 2.5%รูปที่ ก.117 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/PEO/Z-Li⁺ 3.75%

รูปที่ ก.118 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/PEO/Z-K⁺ 1.25%รูปที่ ก.119 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/PEO/Z-K⁺ 2.5%รูปที่ ก.120 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PLA/PEO/Z-K⁺ 3.75%

ก-6 ผลการศึกษาค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของฟิล์มด้วยโปรแกรม Unit cell

```

Output from program UnitCell - method of TJB Holland & SAT Redfern 1995
sample title: hkl 2theta
refined in cubic system, using wavelength 1.540593 Å
minimising the sum of squares of residuals in 2 theta
Weighted assuming a value of sigma(2theta) = 0.005 deg
Cell parameter errors scale in direct proportion to this weighting value

parameter      value      sigma  95% conf
      a 24.58549  0.00330  0.00913
cell voll4860.6124  5.9814  16.5506

residuals: standard, average, and maximum deviations:-
sd (2T) = 0.0100 aad (2T) =0.0090 maxdev (2T) =0.0147
sigmafit = 2.2310
students t = 2.77

Reciprocal cell parameters:

params      a*
sigma      0.0000055

Observed and fitted results: {dependent-variable residuals >2sd are bulleted}

no  h  k  l      d(obs)  d(calc)  res(d)  2T.obs  2T.calc  res(2T)
1  2  0  0      12.26772  12.25275  -0.02503  7.200  7.185  0.015
2  2  2  0      8.65933  8.65223  0.00705  10.160  10.168  -0.008
3  2  2  2      7.09821  7.09722  0.00099  12.460  12.462  -0.002
4  4  4  2      4.05960  4.05758  0.00202  21.660  21.671  -0.011
5  6  2  2      3.70492  3.70640  -0.00148  24.000  23.990  0.010

Regression diagnostics (for deletion of each observation i):

(a) potentially deleterious or influential observations affecting the fit:

no  h  k  l      hat  dffits  Rstudt  sigma[1]  d(sig)%
4  4  4  2      0.347  -0.943  -1.293  2.0642  -7.5
5  6  2  2      0.428  1.057  1.222  2.1048  -5.7

```

รูปที่ ก.121 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของ Zeolite 5A

```

Output from program UnitCell - method of TJB Holland & SAT Redfern 1995
sample title: hkl 2theta
refined in cubic system, using wavelength 1.540593 Å
minimising the sum of squares of residuals in 2 theta
Weighted assuming a value of sigma(2theta) = 0.005 deg
Cell parameter errors scale in direct proportion to this weighting value

parameter      value      sigma  95% conf
      a 24.33892  0.00323  0.00894
cell voll4417.9588  5.7430  15.8911

residuals: standard, average, and maximum deviations:-
sd (2T) = 0.0226 aad (2T) =0.0184 maxdev (2T) =0.0316
sigmafit = 5.0470
students t = 2.77

Reciprocal cell parameters:

params      a*
sigma      0.0000055

Observed and fitted results: {dependent-variable residuals >2sd are bulleted}

no  h  k  l      d(obs)  d(calc)  res(d)  2T.obs  2T.calc  res(2T)
1  2  0  0      12.16647  12.16946  -0.00299  7.260  7.258  0.002
2  2  2  0      8.63155  8.60511  0.02644  10.240  10.272  -0.032
3  2  2  2      7.04192  7.02604  0.01588  12.560  12.588  -0.028
4  4  4  2      4.05156  4.05649  -0.00493  21.920  21.893  0.027
5  6  2  2      3.66878  3.66923  -0.00045  24.240  24.237  0.003

Regression diagnostics (for deletion of each observation i):

(a) potentially deleterious or influential observations affecting the fit:

no  h  k  l      hat  dffits  Rstudt  sigma[1]  d(sig)%
4  4  4  2      0.347  1.114  1.527  4.3709  -13.4
5  6  2  2      0.428  0.119  0.137  5.8095  15.1

```

รูปที่ ก.122 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของ Zeolite 5A-Li⁺ 1.25

Output from program UnitCell - method of TJB Holland & SAT Redfern 1995

sample title: hkl 2theta

refined in cubic system, using wavelength 1.540593 Å
minimising the sum of squares of residuals in 2 theta

Weighted assuming a value of sigma(2theta) = 0.005 deg
Cell parameter errors scale in direct proportion to this weighting value

parameter	value	sigma	95% conf
a	24.49754	0.00327	0.00906
cell voll14701.6969		5.8955	16.3131

residuals: standard, average, and maximum deviations:-
sd (2T) = 0.0353 aad (2T) = 0.0329 maxdev (2T) = 0.0489
sigmafit = 7.5015
students t = 2.77

Reciprocal cell parameters:

params	a*
sigma	0.0000055

Observed and fitted results: {dependent-variable residuals >2sd are bulleted}

no	h	k	l	d(obs)	d(calc)	res(d)	2T.obs	2T.calc	res(2T)
1	2	0	0	12.16647	12.24877	-0.08230	7.260	7.211	0.049
2	2	2	0	8.63155	8.66119	-0.02964	10.240	10.205	0.035
3	2	2	2	7.05310	7.07183	-0.01873	12.540	12.507	0.033
4	4	4	2	4.08469	4.08292	0.00177	21.740	21.750	-0.010
5	6	2	2	3.69885	3.69314	0.00570	24.040	24.078	-0.038

Regression diagnostics (for deletion of each observation i):

(a) potentially deleterious or influential observations affecting the fit:

no	h	k	l	hat	dffits	Rstuds	sigma[i]	d(sig)%
5	6	2	2	0.428	-1.216	-1.407	7.0821	-10.4

limit : 0.400 0.894 2.000

รูปที่ ก.123 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของ Zeolite 5A-Li⁺ 2.5

Output from program UnitCell - method of TJB Holland & SAT Redfern 1995

sample title: hkl 2theta

refined in cubic system, using wavelength 1.540593 Å
minimising the sum of squares of residuals in 2 theta

Weighted assuming a value of sigma(2theta) = 0.005 deg
Cell parameter errors scale in direct proportion to this weighting value

parameter	value	sigma	95% conf
a	24.55743	0.00329	0.00911
cell voll14809.7936		5.9539	16.4746

residuals: standard, average, and maximum deviations:-
sd (2T) = 0.0120 aad (2T) = 0.0057 maxdev (2T) = 0.0201
sigmafit = 2.6754
students t = 2.77

Reciprocal cell parameters:

params	a*
sigma	0.0000055

Observed and fitted results: {dependent-variable residuals >2sd are bulleted}

no	h	k	l	d(obs)	d(calc)	res(d)	2T.obs	2T.calc	res(2T)
1	2	0	0	12.26772	12.27872	-0.01100	7.200	7.194	0.006
2	2	2	0	8.66531	8.68236	-0.01706	10.200	10.180	0.020
3	2	2	2	7.08688	7.08912	-0.00224	12.480	12.476	0.004
4	4	4	2	4.09586	4.09291	0.00296	21.680	21.696	-0.016
5	6	2	2	3.70188	3.70217	-0.00029	24.020	24.018	0.002

Regression diagnostics (for deletion of each observation i):

(a) potentially deleterious or influential observations affecting the fit:

no	h	k	l	hat	dffits	Rstuds	sigma[i]	d(sig)%
2	2	2	0	0.075	0.616	2.164	1.9303	-27.9
4	4	4	2	0.347	-1.360	-1.866	2.1017	-21.4
5	6	2	2	0.428	0.142	0.165	3.0755	15.0

รูปที่ ก.124 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของ Zeolite 5A-Li⁺ 3.75

Output from program UnitCell - method of TJB Holland & SAT Redfern 1995

sample title: hkl 2theta

refined in cubic system, using wavelength 1.540593 Å
minimising the sum of squares of residuals in 2 theta

Weighted assuming a value of sigma(2theta) = 0.005 deg

Cell parameter errors scale in direct proportion to this weighting value

parameter	value	sigma	95% conf
a	24.60892	0.00330	0.00914
cell vol	14903.1421	6.0044	16.6144

residuals: standard, average, and maximum deviations:-
sd (2T) = 0.0086 aad (2T) = 0.0071 maxdev (2T) = 0.0129
sigmafit = 1.9126
students t = 2.77

Reciprocal cell parameters:

params	a*
sigma	0.0000055

Observed and fitted results: {dependent-variable residuals >2sd are bulleted}

no	h	k	l	d(obs)	d(calc)	res(d)	2T.obs	2T.calc	res(2T)
1	2	0	0	12.30185	12.30446	-0.00262	7.180	7.178	0.002
2	2	2	0	8.69933	8.70057	-0.00123	10.160	10.159	0.001
3	2	2	2	7.10957	7.10998	0.00059	12.440	12.450	-0.010
4	4	4	2	4.10334	4.10149	0.00185	21.640	21.650	-0.010
5	6	2	2	3.70797	3.70993	-0.00197	23.980	23.967	0.013

Regression diagnostics (for deletion of each observation i):

(a) potentially deleterious or influential observations affecting the fit:

no	h	k	l	hat	dffits	Rstuds	sigma[i]	d(sig)%
4	4	4	2	0.347	-1.054	-1.446	1.6955	-11.3
5	6	2	2	0.428	2.962	3.427	0.9962	-47.9

รูปที่ ก.125 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของ Zeolite 5A-K⁺ 1.25

Output from program UnitCell - method of TJB Holland & SAT Redfern 1995

sample title: hkl 2theta

refined in cubic system, using wavelength 1.540593 Å
minimising the sum of squares of residuals in 2 theta

Weighted assuming a value of sigma(2theta) = 0.005 deg

Cell parameter errors scale in direct proportion to this weighting value

parameter	value	sigma	95% conf
a	24.61341	0.00331	0.00915
cell vol	14911.2878	6.0088	16.6266

residuals: standard, average, and maximum deviations:-
sd (2T) = 0.0105 aad (2T) = 0.0088 maxdev (2T) = 0.0167
sigmafit = 2.3440
students t = 2.77

Reciprocal cell parameters:

params	a*
sigma	0.0000055

Observed and fitted results: {dependent-variable residuals >2sd are bulleted}

no	h	k	l	d(obs)	d(calc)	res(d)	2T.obs	2T.calc	res(2T)
1	2	0	0	12.30185	12.30670	-0.00486	7.180	7.177	0.003
2	2	2	0	8.71645	8.70215	0.01429	10.140	10.157	-0.017
3	2	2	2	7.10957	7.10528	0.00430	12.440	12.448	-0.008
4	4	4	2	4.09960	4.10223	-0.00264	21.660	21.646	0.014
5	6	2	2	3.71102	3.71061	0.00041	23.960	23.963	-0.003

Regression diagnostics (for deletion of each observation i):

(a) potentially deleterious or influential observations affecting the fit:

no	h	k	l	hat	dffits	Rstuds	sigma[i]	d(sig)%
4	4	4	2	0.347	1.405	1.927	1.8052	-22.8
5	6	2	2	0.428	-0.227	-0.262	2.6761	14.2

รูปที่ ก.126 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของ Zeolite 5A-K⁺ 2.5

```

Output from program UnitCell - method of TJB Holland & SAT Redfern 1995
sample title: hkl 2theta
refined in cubic system, using wavelength 1.540593 Å
minimising the sum of squares of residuals in 2 theta
|
Weighted assuming a value of sigma(2theta) = 0.005 deg
Cell parameter errors scale in direct proportion to this weighting value

parameter  value      sigma  95% conf
-----
a          24.61758  0.00331  0.00915
cell vol  14918.8756  6.0130  16.6380

residuals: standard, average, and maximum deviations:-
sd (2T) = 0.0040 aad (2T) = 0.0036 maxdev (2T) = 0.0054
sigmafit = 0.9843
students t = 2.77

Reciprocal cell parameters:

params    a*
-----
sigma     0.0406214
sigma     0.0000055

Observed and fitted results: (dependent-variable residuals >2sd are bulleted)

no  h  k  l      d(obs)  d(calc)  res(d)  2T.obs  2T.calc  res(2T)
---  -  -  -      -      -      -      -      -      -
1   2  0  0      12.30185  12.30879  -0.00694  7.180  7.176  0.004
2   2  2  0      8.69933  8.70363  -0.00430  10.160  10.155  0.005
3   2  2  2      7.10957  7.10648  0.00309  12.440  12.445  -0.005
4   4  4  2      4.10334  4.10293  0.00041  21.640  21.642  -0.002
5   6  2  2      3.71102  3.71124  -0.00022  23.960  23.959  0.001

Regression diagnostics (for deletion of each observation i):

(a) potentially deleterious or influential observations affecting the fit:

no  h  k  l      hat  diffits  Rstuds  sigma[i]  d(sig)%
---  -  -  -      -      -      -      -      -
5   6  2  2      0.428  0.336  0.389  0.9962  12.7

limit :      0.400  0.894  2.000

```

รูปที่ ก.127 ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของ Zeolite 5A-K⁺ 3.75

ภาคผนวก ข แสดงวิธีการคำนวณ

ภาคผนวก ข-1 แสดงการคำนวณปริมาณ PLA, PEO และ Zeolite ที่ใช้ต่อ 1 สูตร

- สำหรับปริมาณ PEO 10 wt% ของสารทั้งหมด
กำหนด ใช้สารทั้งหมด 100 g ต่อ 1 สูตร (PLA/PEO)
จะได้ $100 \text{ g total} \times \frac{10 \text{ g PEO}}{100 \text{ g total}} = 10 \text{ g PEO}$
ดังนั้นจะใช้ปริมาณ PEO ต่อ 1 สูตร เท่ากับ 10 g
และจะใช้ปริมาณ PLA ต่อ 1 สูตร เท่ากับ $100 \text{ g total} - 10 \text{ g PEO} = 90 \text{ g PLA}$
- สำหรับปริมาณ treated zeolite 1 wt% ของสารทั้งหมด
กำหนด ใช้สารทั้งหมด 100 g ต่อ 1 สูตร (PLA/PEO/treated zeolite)
จะได้ $100 \text{ g total} \times \frac{1 \text{ g treated zeolite}}{100 \text{ g total}} = 1 \text{ g treated zeolite}$
ดังนั้นจะใช้ปริมาณ treated zeolite ต่อ 1 สูตร เท่ากับ 1 g
และจะใช้ปริมาณ PLA และ PEO รวม ต่อ 1 สูตร เท่ากับ $100 \text{ g total} - 1 \text{ g treated zeolite} = 99 \text{ g PLA/PEO}$

กำหนดสัดส่วนการผสมของ PLA : PEO เท่ากับ 90 : 10

$$\text{จะได้ว่า ปริมาณ PLA ที่ใช้ต่อ 1 สูตร เท่ากับ } 99 \text{ g} \times \frac{90}{100} = 89.1 \text{ g PLA}$$

$$\text{และปริมาณ PEO ที่ใช้ต่อ 1 สูตร เท่ากับ } 99 \text{ g} \times \frac{10}{100} = 9.9 \text{ g PEO}$$

ภาคผนวก ข-2 แสดงการคำนวณปริมาณ zeolite ที่มีการปรับปรุงผิวด้วย (3-Aminopropyl) trimethoxysilane ปริมาณ 2 wt% ของ zeolite ที่ใช้ต่อ 1 สูตร

- **คำนวณความหนาแน่นของสารละลายผสมระหว่างน้ำกับเมทานอล**

โดยที่ความหนาแน่นของเมทานอลเท่ากับ 0.792 g/cm^3 และความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1 g/cm^3

กำหนด อัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำ เท่ากับ 2 : 1

$$\text{จะได้ } \frac{0.792 \text{ g}}{\text{cm}^3} \left(\frac{2}{3}\right) + \frac{1 \text{ g}}{\text{cm}^3} \left(\frac{1}{3}\right) = 0.861 \text{ g/cm}^3$$

ดังนั้นความหนาแน่นของสารละลายผสม เท่ากับ 0.861 g/cm^3

- **คำนวณปริมาตรของเมทานอลและน้ำที่ใช้ในสารละลายต่อ 1 สูตร**

สำหรับปริมาณ treated zeolite 1 wt% ของสารทั้งหมด

กำหนด อัตราส่วนระหว่างสารต่อสารละลาย เท่ากับ 1 : 4

$$\text{จะได้ } 1 \text{ g treated zeolite} \times \frac{4 \text{ g solution}}{1 \text{ g treated zeolite}} \times \frac{1 \text{ cm}^3}{0.861 \text{ g solution}} = 4.646 \text{ cm}^3$$

ดังนั้นจะใช้ปริมาตรของเมทานอลเท่ากับ $4.646 \text{ cm}^3 \left(\frac{2}{3}\right) = 3.097 \text{ cm}^3$

และใช้ปริมาณน้ำเท่ากับ $4.646 \text{ cm}^3 \left(\frac{1}{3}\right) = 1.549 \text{ cm}^3$

- **คำนวณปริมาตรของ silane ที่ใช้ต่อ 1 สูตร**

โดยที่ความหนาแน่นของ silane เท่ากับ 1.027 g/cm^3

$$\text{จะได้ } 1 \text{ g treated zeolite} \times \frac{2 \text{ g silane}}{100 \text{ g treated zeolite}} \times \frac{1 \text{ cm}^3}{1.027 \text{ g silane}} = 0.0195 \text{ cm}^3$$

ดังนั้นปริมาตรของ silane ที่ใช้ต่อ 1 สูตร เท่ากับ 0.0195 cm^3

- **คำนวณปริมาณ zeolite ที่ใช้ต่อ 1 สูตร**

$$\text{จะได้ น้ำหนักของ silane ที่ใช้} = 0.0195 \text{ cm}^3 \times \frac{1.027 \text{ g silane}}{1 \text{ cm}^3} = 0.02 \text{ g silane}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ $1 \text{ g treated zeolite} - 0.02 \text{ g silane} = 0.98 \text{ g zeolite}$

ดังนั้นปริมาณ zeolite ที่ใช้ต่อ 1 สูตร เท่ากับ 0.98 g

ภาคผนวก ข-3 แสดงการคำนวณปริมาณ zeolite ที่มีการปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมไนเตรตและลิเทียมไนเตรต และใช้ (3-Aminipropyl) trimethoxysilane ปริมาณ 2 wt% ของ Modified zeolite ต่อ 1 สูตร

1. ในขั้นตอนแรกจะปรับปรุง zeolite ด้วยโพแทสเซียมไนเตรต สำหรับปริมาณ Modified zeolite 1 wt% ของสารทั้งหมด (100 g total)

- ปริมาณโพแทสเซียมไนเตรตที่ใช้ต่อ 1 สูตร

กำหนด ปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมไนเตรต 1.25 %wt ของ zeolite

$$\text{จะได้ } 1 \text{ g zeolite} \times \frac{1.25 \text{ g KNO}_3}{100 \text{ g zeolite}} = 0.0125 \text{ g KNO}_3$$

ดังนั้นจะใช้ปริมาณโพแทสเซียมไนเตรต ต่อ 1 สูตร เท่ากับ 0.0125 g

- ปริมาณ zeolite ที่ใช้ต่อ 1 สูตร

$$\text{จะได้ } 1 \text{ g zeolite} - 0.0125 \text{ g KNO}_3 = 0.9875 \text{ g zeolite}$$

ดังนั้นปริมาณ zeolite ที่ใช้ต่อ 1 สูตร เท่ากับ 0.9875 g

- ปริมาณปริมาตรน้ำ DI ที่ใช้ในการปรับปรุง zeolite ด้วยโพแทสเซียมไนเตรต ต่อ 1 สูตร

กำหนดอัตราส่วนปริมาณสารต่อน้ำ DI เท่ากับ 1 : 4

$$\text{จะได้ } 1 \text{ g total} \times \frac{4 \text{ g DI water}}{1 \text{ g total}} \times \frac{1 \text{ cm}^3 \text{ DI water}}{1 \text{ g DI water}} = 4 \text{ cm}^3$$

ดังนั้นปริมาตรน้ำ DI ต่อ 1 สูตร เท่ากับ 4 cm³

2. ในขั้นที่สองจะนำ zeolite ที่ปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมไนเตรต (Modified zeolite) มาปรับปรุงผิวด้วย (3-Aminipropyl) trimethoxysilane ปริมาณ 2 wt% ของ Modified zeolite

- ปริมาตรของ silane ที่ใช้ต่อ 1 สูตร

โดยที่ความหนาแน่นของ silane เท่ากับ 1.027 g/cm³

$$\text{จะได้ } 0.9875 \text{ g modified zeolite} \times \frac{2 \text{ g silane}}{100 \text{ g modified zeolite}} \times \frac{1 \text{ cm}^3}{1.027 \text{ g silane}} = 0.01923 \text{ cm}^3$$

ดังนั้นปริมาตรของ silane ที่ใช้ต่อ 1 สูตร เท่ากับ 0.01923 cm³

- ปริมาณ Modified zeolite ที่ใช้ต่อ 1 สูตร

$$\text{จะได้ น้ำหนักของ silane ที่ใช้} = 0.01923 \text{ cm}^3 \times \frac{1.027 \text{ g silane}}{1 \text{ cm}^3} = 0.01975 \text{ g silane}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ $0.9875 \text{ g modified zeolite} - 0.01975 \text{ g silane} = 0.968 \text{ g modified zeolite}$

ดังนั้นปริมาณ modified zeolite ที่ใช้ต่อ 1 สูตร เท่ากับ 0.968 g

- คำนวณปริมาตรของเมทานอลและน้ำที่ใช้ในสารละลายต่อ 1 สูตร

สำหรับปริมาณ modified zeolite 1 wt% ของสารทั้งหมด

กำหนด อัตราส่วนระหว่างสารต่อสารละลาย เท่ากับ 1 : 4

$$\text{จะได้ } 1 \text{ g modified zeolite} \times \frac{4 \text{ g solution}}{1 \text{ g treated zeolite}} \times \frac{1 \text{ cm}^3}{0.861 \text{ g solution}} = 4.646 \text{ cm}^3$$

ดังนั้นจะใช้ปริมาตรของเมทานอลเท่ากับ $4.646 \text{ cm}^3 (2/3) = 3.097 \text{ cm}^3$

และใช้ปริมาณน้ำ DI เท่ากับ $4.646 \text{ cm}^3 (1/3) = 1.549 \text{ cm}^3$

3. ปรับปรุง zeolite ด้วยลิเทียมไนเตรตตามที่กล่าวมาตั้งข้อ 1 และ 2

ภาคผนวก ข-4 แสดงการคำนวณปริมาณผลึกของฟิล์ม

กำหนดพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมผลึก 100% (J/g) ของ PLA เท่ากับ 93.6 J/g

จากสมการที่ 3.1

$$X_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H_m^\circ \times \phi} \times 100 \%$$

โดย X_c คือ ปริมาณผลึก (Degree of crystallinity)

ΔH_m คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมผลึกต่อหนึ่งหน่วย (J/g)

ΔH_{cc} คือ พลังงานความร้อนที่ทำให้เกิดผลึกต่อหนึ่งหน่วย (J/g)

ΔH_m° คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมผลึก 100% (J/g)

และ ϕ คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์

จะสามารถคำนวณผลึกของฟิล์ม Neat PLA ได้ดังนี้

$$X_c = \frac{32.92 \text{ J/g} - 32.33 \text{ J/g}}{93.6 \text{ J/g} \times 1} \times 100\% = 0.63 \%$$

ภาคผนวก ข-6 แสดงการคำนวณอัตราการซึมผ่านไอน้ำ

จากสมการที่ 3.2

$$WVTR = \frac{\text{ความชันของกราฟ (น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของฟิล์ม}}$$

โดยกำหนดพื้นที่หน้าตัดของฟิล์ม เท่ากับ 0.000962 m^2

และความชันของกราฟในรูปที่ ก.99 จะสามารถคำนวณอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม Neat PLA ได้ดังนี้

$$WVTR_1 = \frac{0.0268 \text{ g/day}}{0.000962 \text{ m}^2} = 27.86 \text{ g/m}^2 \text{ day}$$

$$WVTR_2 = \frac{0.0267 \text{ g/day}}{0.000962 \text{ m}^2} = 27.75 \text{ g/m}^2 \text{ day}$$

$$WVTR_3 = \frac{0.0257 \text{ g/day}}{0.000962 \text{ m}^2} = 26.72 \text{ g/m}^2 \text{ day}$$

ดังนั้น WVTR ของฟิล์ม Neat PLA เท่ากับ $27.86 + 27.75 + 26.72 = 27.44 \text{ g/m}^2 \text{ day}$

ภาคผนวก ข-5 แสดงการคำนวณอัตราการซึมผ่านก๊าซ

กำหนดความหนาของฟิล์มเท่ากับ 0.3 mm

จากสมการที่ 3.3

$$OP = GTR \times L$$

และจากรูปที่ ก.55 จะได้ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม Neat PLA เท่ากับ $189 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \text{ d bar}$

$$\text{จะได้ } OP = 189 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \text{ d bar} \times 0.3 \text{ mm} = 56.7 \text{ mm cm}^3/\text{m}^2 \text{ d bar}$$

ดังนั้นอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม Neat PLA เท่ากับ $56.7 \text{ mm cm}^3/\text{m}^2 \text{ d bar}$

และจากสมการที่ 3.4

$$CP = GTR \times L$$

และจากรูปที่ ก.77 จะได้ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PLA เท่ากับ $432 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \text{ d bar}$

$$\text{จะได้ } CP = 432 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \text{ d bar} \times 0.3 \text{ mm} = 129.6 \text{ mm cm}^3/\text{m}^2 \text{ d bar}$$

ดังนั้นอัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PLA เท่ากับ $129.6 \text{ mm cm}^3/\text{m}^2 \text{ d bar}$

ภาคผนวก ค การนำเสนอผลงานวิจัย

ภาคผนวก ค-1 การประชุมวิชาการระดับนานาชาติในงาน International Conference on Engineering and Industrial Technology (ICEIT 2020)

บันทึกงานการประชุม (Proceeding)

IOPscience  Journals ▾ Books Publishing Support [kiatkittipong_w ▾](#)

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering

Table of contents

Volume 965

2020

[◀ Previous issue](#) [Next issue ▶](#)

International Conference on Engineering and Industrial Technology (ICEIT2020) 6-8 May 2020, Pattaya, Thailand

Accepted papers received: 16 October 2020

Published online: 05 November 2020



PAPER • OPEN ACCESS

Effect of poly(ethylene oxide) on the properties of poly(lactic acid)-based blends

To cite this article: R. Khanteesa *et al* 2020 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **965** 012031

View the [article online](#) for updates and enhancements.

EXTENDED ABSTRACT DEADLINE: DECEMBER 18, 2020

ECS **239th ECS Meeting**
with the 18th International Meeting on Chemical Sensors (IMCS)

May 30-June 3, 2021 **SUBMIT NOW →**

Effect of poly(ethylene oxide) on the properties of poly(lactic acid)-based blends

R. Khanteesa¹, P. Threepopnatkul^{1*} and A. Sittatrakul¹

¹Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000, Thailand

*Corresponding author: poonsubt@yahoo.com

Abstract. Poly(lactic acid) (PLA) was blended with poly(ethylene oxide) (PEO) with four different molecular weights of 1×10^5 , 2×10^5 , 3×10^5 , and 4×10^5 g/mol to improve the flexibility of PLA. The blends were compounded in an internal mixer at 190 °C with 50 rpm for 15 minutes and using a hot press to mold rectangular sample sheets. The mechanical properties of PLA blends were analyzed to prove the ductility. Additionally, phase morphologies of blends were investigated by using tensile fracture surface. The addition of PEO into PLA matrix leads to slight increase in tensile strength, while the elongation at break was decreased by increasing the molecular weight of PEO. However, the elongation at break of PLA/PEO blends was higher than the one of neat PLA. In other words, PEO enhanced the flexibility of PLA blends, according to scanning electron microscope images. In brief, PLA-based blends greatly increased in ductility.

1. Introduction

Currently, biopolymers have been considered as a substitute for traditional petroleum-based polymers. Poly(lactic acid) (PLA) is biodegradable aliphatic polyester that is derived from renewable resources such as corn, cassava, potato and sugarcane. PLA has a wide range of applications such as in properties such as high mechanical strength, high modulus, biodegradability, biocompatibility, bioabsorbability, transparency, low toxicity and easy process ability [1]. However, PLA have been limited for applications due to poor thermal stability and low impact strength [2].

The toughness of PLA can be improved by blending with other polymers, such as poly(butylene succinate) (PBS) [3], poly(ethylene glycol) (PEG) [4], and poly(ethylene oxide) (PEO) [5]. PEG and PEO have a similar chemical structure and they are biodegradability, biocompatibility, and nontoxicity. It will be called PEO when the molecular weight was over 100,000 g/mol. Meanwhile, the incorporation of PEG can still maintain biodegradability, biocompatibility and low toxicity of PLA [6].

Recently, many studies on properties of PLA-based blends. Jacobsen et al. [7] investigated the effect of different plasticizers (i.e., glucose monoesters, PEG [$M_n = 1500$ g/mol], and partial fatty acid esters) on the mechanical properties of PLA. They found that the best amount of the three plasticizers was 10 %wt. The incorporation of PEG to PLA caused the greatest reductions in glass transition temperature (T_g), tensile modulus and strength, whereas the largest increments in elongation at break (up to 180%) and impact strength. Feng-Jiao Li et al. [8] plasticized PLA using PEG with different molecular weights (6,000, 10,000, and 20,000 g/mol) and different contents (0-20 %wt). They reported that the tensile modulus and strength increased, while tensile stress at break and strain at break decreased when increasing the molecular weight of PEG. Zhang et al. [6] blended PLA and PEG with five different

molecular weights (200–20,000 g/mol) and various content of PEG-10,000 ranged from 0 to 20 %wt and reported the increases in both V-notched Izod and Charpy impact strengths of PLA/PEG-10,000 blends were 206.10% and 137.25%, respectively. Meanwhile, the crystallinity of PLA/PEG-10,000 blends increased from 3.95% to 43.42%. For 10 %wt PEG content, the crystallization and impact properties of PLA/PEG blends mainly depended upon PEG molecular weight. The introduction of PEG reduced the intermolecular force and enhanced the mobility of PLA chains, thus improving the crystallization capacity and flexibility of PLA. Yoojun et al. [9] have investigated the mechanical and thermal properties of PLA films blended with PEO ($M_w = 100,000$ g/mol). The blend films exhibited a elongation at break was increased by 4 times at 5 %wt PEO loading, while the tensile strength was decreased by 17%. In addition, the glass transition temperature (T_g), melting temperature (T_m), and cold crystallization temperature (T_{cc}) decreased with adding 5 %wt PEO.

Furthermore, the high molecular weight of PEO is an important factor that affects on properties of polymer blends. However, there have been very few researches. Therefore, the major objective of this research is to study the effects of high molecular weight of PEO on the mechanical properties and morphologies of PLA/PEO blends.

2. Experimental

Materials

PLA (4043D, $M_w = 190,000$ g/mol) was purchased from NatureWorks. Density, melt flow index, glass transition temperature (T_g), and melting temperature (T_m) were 1.24 g/cm³, 6 g/10 min, 60 °C, and 160 °C, respectively. PEOs were purchased from Sigma Aldrich. Molecular weight (M_w) and melting temperature (T_m) were $10^5 - 4 \times 10^5$ g/mol and 65 °C, respectively.

Melt blends and sample preparation

The blends were carried out in internal mixer (Brabender Mixer Docking Station W50EHT series) at 190 °C with a capacity of 50 g and rotor speed of 50 rpm for 15 minutes. The sample sheets were obtained using a hot press at 190 °C into rectangular sample sheets. The thickness of each sheet was in range of 300-350 microns. The specimens were then kept in plastic bags before testing. The composition of PLA blends were shown in Table 1.

Table 1 Compositions of PLA-based blends with PEO

Sample	Molecular weight (M_w) of PEO (g/mol)	Composition (%wt)	
		PLA	PEO
Neat PLA	-	100	0
PLA_1PEO	100,000	90	10
PLA_2PEO	200,000	90	10
PLA_3PEO	300,000	90	10
PLA_4PEO	400,000	90	10

Characterizations

Mechanical properties of the blends were performed by Universal Testing Machine according to ASTM D882 (Instron 5969, USA). A 5 kN load cell was used. The crosshead speed was 12.5 mm/min. The morphology of the tensile fractured surface of specimens was investigated using a Scanning Electron Microscope (SEM) (Hitachi TM3030, Japan). The samples were sputtered coated with Pd/Au.

3. Results and discussion

3.1. Mechanical properties

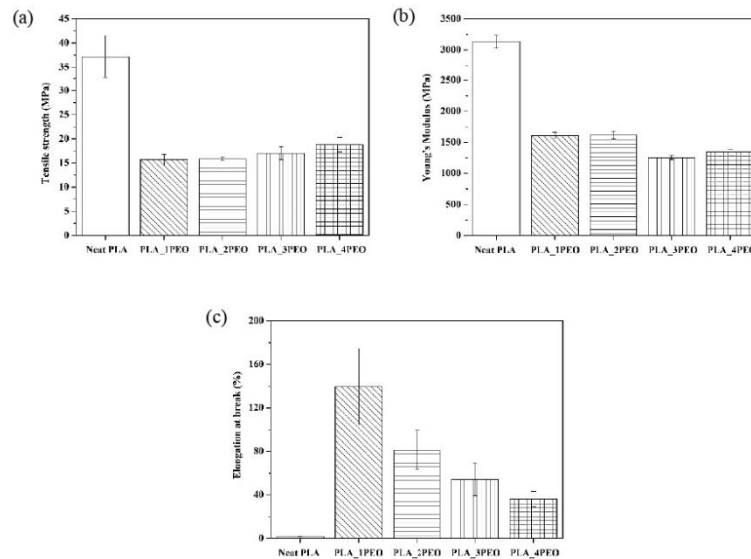


Figure 1. Effect of PEO molecular weight on tensile properties (a) Tensile strength, (b) Young's Modulus and (c) Elongation at break of PLA/PEO (90/10) blends

Figure 1 presents the mechanical properties of neat PLA compared with PLA blended with different molecular weight of PEO. Tensile strength is an importance parameter to characterize the largest stress limit of materials under tensile load. Tensile strength of neat PLA was 37.16 MPa. Similar mechanical values of neat PLA have been reported previously, i.e., tensile strength of neat PLA was from 36 to 52 MPa [5, 10]. The tensile strength of PLA/PEO blends gradually increases with an increase in molecular weight of PEO. The increase of intermolecular forces, surface energy and molecular chain entanglement were caused by the increment of the molecular weight of PEO during this study. This could reduce the slippage of PLA molecular chains under tensile loading which resulted in an increase of tensile strength. The addition of PEO into the PLA matrix reduced the tensile modulus of the blends in comparison with neat PLA. This is due to the interactions between plasticizer and polymers which weaken the polymeric intermolecular interactions and therefore improved the rearrangement between polymer chains under external force, and flexibility to the PLA. The elongation at break of PLA/PEO blends was improved compared with the one of neat PLA. However, the elongation at break of PLA blended with lower molecular weight PEO was higher than the one with higher molecular weight PEO. This illustrated that lower molecular weight PEO can more efficiently improve the ductility of PLA. Generally, the miscibility of PEG with other polymers deteriorated with an increase in PEG molecular weight [6].

3.2. Fracture surface morphology analysis

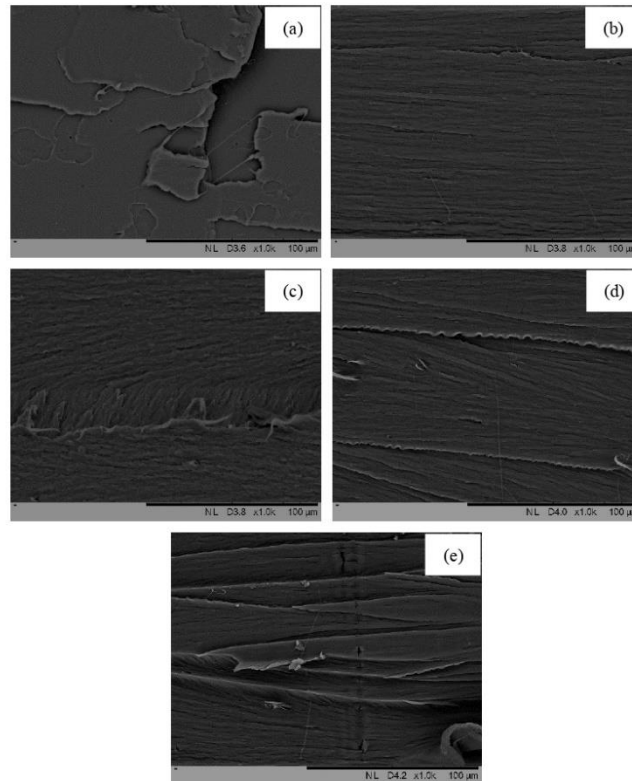


Figure 2. Scanning electron micrographs of tensile fracture surfaces of (a) Neat PLA, (b) PLA/1PEO, (c) PLA/2PEO, (d) PLA/3PEO, and (e) PLA/4PEO blends containing 10 %wt PEO content.

SEM was utilized to investigate the morphologies of the tensile fractured surface of PLA blended with four different molecular weight PEO. From Figure 2, neat PLA (Fig. 2a) shows a smoother surface than PLA/PEO blends (Fig. 2b-2e). When the molecular weight of PEO was increased, the fracture surface of PLA/ PEG blend becomes rougher because of the increment of entanglement between higher molecular weight PEG and PLA molecular chains [6].

4. Conclusion

To improve the ductility of PLA and reduce brittleness, PLA was blended with four different molecular weight PEO at a constant concentration of 10 %wt. The PLA/PEO blends were prepared using an internal mixer and then hot press into specimens. The properties of the blends were characterized by

Tensile testing and SEM. The ductility of PLA was significantly increased when PEO was added into PLA matrix. The tensile modulus of PLA blends film declined but the tensile strength increased by addition of higher molecular weight of PEO. In this study, the elongation at break of PLA/PEO blends increased when compared with neat PLA, but decreased with increasing molecular weight of PEO. SEM images reveal that when the molecular weight of PEO was increased, the fracture surface of the PLA/PEO blends becomes rougher. Besides, PEO enhanced the flexibility of PLA blends.

5. Acknowledgement

This research was financially supported by the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakom University.

References

- [1] Öz A, Süfer Ö and Celebi sezer Y 2017 *Food Sci Technol Int.* **2** 000131.
- [2] Auras R, Harte B and Selke S 2004 *Macromol Biosci.* **4** 835-864.
- [3] Pivsa-Art W, Fujii K, Nomura K, Aso Y, Ohara H and Yamane H 2016 *J. Appl. Polym. Sci.* **133** 43044.
- [4] Bijarimi M, Ahmad S, Rasid R, Khushairi M A and Zakir M 2016 *AIP Conference Proceedings.* **1727** 020002.
- [5] Saha D, Samal S K, Biswal M, Mohanty S and Nayak S K 2019 *Polym. Int.* **68** 164-172.
- [6] Li F, Zhang S, Liang J and Wang J 2015 *Polym Advan Technol.* **26** 465-475.
- [7] Jacobsen S and Fritz H G 1999 *Polym. Eng. Sci.* **39** 1303-1310.
- [8] Li F, Liang J, Zhang S and Zhu B 2015 *J. Polym Environ.* **23**
- [9] Eom Y, Choi B and Park S 2018 *J. Polym Environ.* **27**
- [10] Park B, Song J C, Park D H and Yoon K B 2012 *J. Appl. Polym.* **123** 2360-2367.

รายการอ้างอิง

1. Kongklom, N., et al., *Improved keeping quality of Dendrobium “Bom” orchids using nutrients entrapped in a biodegradable hydrogel*. *Scientia Horticulturae*, 2018. **234**: p. 184-192.
2. Dounia, B., et al., *New nanocomposite design from zeolite and poly(lactic acid)*. *Industrial Crops and Products*, 2015. **72**: p. 107-118.
3. Oz, A., Ö. Süfer, and Y. Çelebi Sezer, *Poly (Lactic Acid) Films in Food Packaging Systems*. *Food Science and Nutrition Technology*, 2017. **2**(4): p. 000131.
4. Fortunati, E., et al., *Processing Conditions, Thermal and Mechanical Responses of Stretchable Poly (Lactic Acid)/Poly (Butylene Succinate) Films*. *Materials*, 2017. **10**: p. 809.
5. Bhatia, A., et al., *Compatibility of biodegradable poly (lactic acid) (PLA) and poly (butylene succinate) (PBS) blends for packaging application*. *Korea-australia Rheology Journal*, 2007. **19**: p. 125-131.
6. Li, F.-J., et al., *Effect of polyethylene glycol on the crystallization and impact properties of polylactide-based blends*. *Polymers for Advanced Technologies*, 2015. **26**(5): p. 465-475.
7. Feng-Jiao, L., *Tensile Properties of Polylactide/Poly(ethylene glycol) Blends*. *Journal of polymers and the environment*, 2015. **23**(3): p. 407-415.
8. Eom, Y., B. Choi, and S.-i. Park, *A Study on Mechanical and Thermal Properties of PLA/PEO Blends*. *Journal of Polymers and the Environment*, 2019. **27**: p. 256-262.
9. Saha, D., et al., *Preparation and Characterization of PLA/PEO Blend Film: Effects of Poly(Ethylene Oxide) and Poly(Ethylene Glycol) on the Properties*. *Polymer International*, 2018. **68**(1): p. 164-172.
10. Bailey, F.E.K.J.V., *Poly(ethylene oxide)*. 1976, New York: Academic Press.
11. Ozdemir, M. and J. Floros, *Active Food Packaging Technologies*. *Critical reviews in food science and nutrition*, 2004. **44**: p. 185-93.
12. Sue-aok, N., et al., *Study of ethylene adsorption on zeolite NaY modified with*

- group I metal ions. *Applied Surface Science*, 2010. **256**(12): p. 3997-4002.
13. Han, X., et al., *Preparation and properties of silane coupling agent modified zeolite as warm mix additive*. *Construction and Building Materials*, 2020. **244**: p. 118408.
 14. Calabrese, L., et al., *Electrochemical behavior of hydrophobic silane-zeolite coatings for corrosion protection of aluminum substrate*. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2014. **11**: p. 883-898.
 15. Martínez Galeano, Y., L. Cornaglia, and A.M. Tarditi, *NaA zeolite membranes synthesized on top of APTES-modified porous stainless steel substrates*. *Journal of Membrane Science*, 2016. **512**: p. 93-103.
 16. Li, Y., et al., *Effects of novel silane modification of zeolite surface on polymer chain rigidification and partial pore blockage in polyethersulfone (PES)-zeolite A mixed matrix membranes*. *Journal of Membrane Science - J MEMBRANE SCI*, 2006. **275**: p. 17-28.
 17. Chakorn, V., J. Tayawit, and K. Pongsapak, *Effect of zeolite on properties of PBS/PLA film*. 2017.
 18. engineering, P.c. พ ล า ส ต ิ ก PLA (Polylactic acid). 2 0 1 2 ; Available from: <https://enchemcom1po.wordpress.com/bioplastics>ไบโอพลาสติก/พลาสติก-pla-poly-lactic-acid/.
 19. Sigmaaldrich. *Poly(ethylene glycol) and Poly(ethylene oxide)* Available from: <https://www.sigmaaldrich.com/materials-science/material-science-products.html?TablePage=20204110>.
 20. nanama, S., การดูดซับด้วยซีโอไลต์. 2018.
 21. Julbe, A. and M. Drobek, *Zeolite A Type*, in *Encyclopedia of Membranes*, E. Drioli and L. Giorno, Editors. 2016, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 2055-2056.
 22. ชูมี, ด.จ., การดูดซับโลหะทองแดงในสารละลายด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากแกลบข้าว. 2012, มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.
 23. elements, A. *Potassium Nitrate*. 2022; Available from: <https://www.americanelements.com/potassium-nitrate-7757-79-1>.
 24. elements, A. *Lithium Nitrate*. 2022; Available from:

- <https://www.americanelements.com/lithium-nitrate-7790-69-4>.
25. Mieney, C., *Ionic Polymer Metal Composites as Tactile Sensors - Thesis*. 2012.
 26. shinetsusilicone, *Silane coupling agent*. 2017.
 27. Technology, J.J.C. *Silane Coupling Agent 3 -Aminopropyltriethoxysilane*. Available from: <http://thai.pharma-powder.com/sale-13800068-cas-919-30-2-silane-coupling-agent-3-aminopropyltriethoxysilane.html>.
 28. aldrich, S. (3 -Aminopropyl)trimethoxysilane. Available from: <https://www.sigmaaldrich.com/TH/en/product/aldrich/281778>.
 29. Defu, L. and W. Jinq, *The Adsorption and Separation of Ethylene, Oxygen and Carbon Dioxide Gases on Molecular Sieves*. Adsorption Science & Technology, 2002. **20**(1): p. 83-90.
 30. Nanthippawannan. ดอกกล้วยไม้สกุลหวาย (*Dendrobium*). Available from: <https://sites.google.com/site/nanthippawannan/dxk-klw-mi-skul-hway>.
 31. กระทรวงพาณิชย์, ก. สถานการณ์กล้วยไม้โลก. 2564; Available from: https://ditp.go.th/ditp_web61/article_sub_view.php?filename=contents_attach/539560/539560.pdf&title=539560&cate=743&d=0.
 32. พรเฉลิมพงศ์, ผ.ต.พ. การเปลี่ยนแปลงของผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว. Available from: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/3369>.
 33. ทองอำไพ, พ. อายุปักแจกันไม้ดอก. 2014; Available from: <https://www.thaikasetsart.com/อายุปักแจกันไม้ดอก/>.
 34. พลพันธ์, ป. เอทิลีน (*Ethylene*). Available from: <https://sites.google.com/site/planthormonesbio39/xe-ththi-lin-ethylene>.
 35. Kusworo, T.D., et al., *The effect of type on the gas transport properties of polyimide-based mixed matrix membranes*. Reaktor, 2008. **12**: p. 68-77.
 36. Beyaz Kayiran, S. and F. Lamari Darkrim, *Synthesis and ionic exchanges of zeolites for gas adsorption*. Surface and Interface Analysis, 2002. **34**(1): p. 100-104.
 37. Sue-aok, N., et al., *Study of ethylene adsorption on zeolite NaY modified with group I metal ions*. Applied Surface Science, 2010. **256**: p. 3997-4002.
 38. Thai Poly Chemicals Co., L. *Plasticizer*. Available from: <https://thaipolychemicals.weebly.com/plasticizer.html>.

39. Yuniarto, K., et al., *Infrared and Raman studies on polylactide acid and polyethylene glycol-400 blend*. AIP Conference Proceedings, 2016. **1725**(1): p. 020101.
40. Krongkarn, B., *Study and preparation of PLA/PEG blended films incorporated with antimicrobial agent for prolonging shelf-life of mushroom*. 2021.
41. Li, R., et al., *Effect of molecular weight of polyethylene glycol on crystallization behaviors, thermal properties and tensile performance of polylactic acid stereocomplexes*. RSC Advances, 2020. **10**(69): p. 42120-42127.
42. Ji, P., et al., *Modification of Poly(Ethylene 2,5-Furandicarboxylate) with Poly(Ethylene glycol) for Biodegradable Copolyesters with Good Mechanical Properties and Spinnability*. Polymers, 2019. **11**(12): p. 2105.
43. Li, F.-J., et al., *Tensile Properties of Polylactide/Poly(ethylene glycol) Blends*. Journal of Polymers and the Environment, 2015. **23**: p. 407-415.
44. Park, B.-S., et al., *PLA/chain-extended PEG blends with improved ductility*. Journal of Applied Polymer Science, 2012. **123**(4): p. 2360-2367.
45. Bijarimi, M., et al., *Poly(lactic acid) / Poly(ethylene glycol) blends: Mechanical, thermal and morphological properties*. AIP Conference Proceedings, 2016. **1727**(1): p. 020002.
46. Baiardo, M., et al., *Thermal and mechanical properties of plasticized poly(L-lactic acid)*. Journal of Applied Polymer Science, 2003. **90**(7): p. 1731-1738.
47. Yuniarto, K., et al., *Morphological, Thermal and Oxygen Barrier Properties Plasticized Film Poly(lactic acid)*. Journal of Applied Packaging Research, 2017. **9**(3): p. 1-9.
48. Nijenhuis, A.J., et al., *High molecular weight poly(l-lactide) and poly(ethylene oxide) blends: thermal characterization and physical properties*. Polymer, 1996. **37**(26): p. 5849-5857.
49. Athanasoulia, I.-G. and P.A. Tarantili, *Preparation and characterization of polyethylene glycol/poly(L-lactic acid) blends*. Pure and Applied Chemistry, 2017. **89**(1): p. 141-152.
50. Wang, B.-Y., et al., *Electrospun polylactide/poly(ethylene glycol) hybrid fibrous scaffolds for tissue engineering*. Journal of Biomedical Materials Research Part A,

2012. **100**(2): p. 441-449.
51. Backes, E., et al., *Analysis of the Degradation During Melt Processing of PLA/Biosilicate® Composites*. Journal of Composites Science, 2019. **3**: p. 52.
 52. Santhoskumar, A. and A. Ramkumar, *Preparation/characterization of plasticized poly (lactic acid) for packaging applications*. Turkish Journal of Science & Technology, 2014. **9**(1): p. 73-79.
 53. Pielichowski, K. and K. Flejtuch, *Differential scanning calorimetry studies on poly(ethylene glycol) with different molecular weights for thermal energy storage materials*. Polymers for Advanced Technologies, 2002. **13**(10-12): p. 690-696.
 54. Yuniarto, K., et al., *Thermal Properties, Crystallinity, and Oxygen Permeability of Na-montmorillonite Reinforced Plasticized Poly(lactic acid) Film*. Makara Journal of Technology, 2016. **20**(1): p. 1-6.
 55. Siracusa, V., M. Dalla Rosa, and A.L. Iordanskii, *Performance of Poly(lactic acid) Surface Modified Films for Food Packaging Application*. Materials (Basel, Switzerland), 2017. **10**(8): p. 850.
 56. Siracusa, V., *Food Packaging Permeability Behaviour: A Report*. International Journal of Polymer Science, 2012. **2012**: p. 1-11.
 57. Siracusa, V., et al., *Barrier Properties of Poly(Propylene Cyclohexanedicarboxylate) Random Eco-Friendly Copolyesters*. Polymers, 2018. **10**(5): p. 502.
 58. Yuniarto, K., et al., *Effect of Plasticizer on Oxygen Permeability of Cast Polylactic acid (PLA) Films Determined using Dynamic Accumulation Method* Journal of Applied Packaging Research, 2014. **6**: p. 51-57.
 59. Bao, L., et al., *Gas permeation properties of poly(lactic acid) revisited*. Journal of Membrane Science, 2006. **285**(1): p. 166-172.
 60. Siracusa, V., et al., *Gas Transport Phenomena and Polymer Dynamics in PHB/PLA Blend Films as Potential Packaging Materials*. Polymers, 2020. **12**(3): p. 647.
 61. Aitken, C.L., W.J. Koros, and D.R. Paul, *Effect of structural symmetry on gas transport properties of polysulfones*. Macromolecules, 1992. **25**(13): p. 3424-

- 3434.
62. Lin, H. and B.D. Freeman, *Gas solubility, diffusivity and permeability in poly(ethylene oxide)*. Journal of Membrane Science, 2004. **239**(1): p. 105-117.
 63. Trifol, J., et al., *Effect of Crystallinity on Water Vapor Sorption, Diffusion, and Permeation of PLA-Based Nanocomposites*. ACS Omega, 2020. **5**(25): p. 15362-15369.
 64. Kamonchanok, W., J. Chonlada, and R. Nattanan, *Development of Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Packaging Film for Agricultural Product Life Extension*. 2018, .
 65. Phattarateera, S., P. Threepopnatkul, and C. Kulsetthanchalee, *Comparative Performance of Coupling Agent and Compatibilizer on Polystyrene/Zeolite composites*. Chiang Mai Journal of Science, 2013. **40**: p. 1035-1045.
 66. OKnation. ซีโอไลต์ แร่ธาตุสารพัดประโยชน์ในชีวิตประจำวัน. 2008; Available from: <http://oknation.nationtv.tv/blog/print.php?id=305253>.
 67. Nielsen, L.E.L.R.F., *Mechanical properties of polymers and composites*. 1994.
 68. Jesse, E., *Plastics additives and modifiers handbook*. 1992: Springer; New Ed edition (March 31, 1992).
 69. Yuzay, I.E., R. Auras, and S. Selke, *Poly(lactic acid) and zeolite composites prepared by melt processing: Morphological and physical-mechanical properties*. Journal of Applied Polymer Science, 2010. **115**(4): p. 2262-2270.
 70. Zaharri, N., N. Othman, and M. Ishak, *Effect of Zeolite Modification via Cationic Exchange Method on Mechanical, Thermal, and Morphological Properties of Ethylene Vinyl Acetate/Zeolite Composites*. Advances in Materials Science and Engineering, 2013. **2013**: p. 1-9.
 71. Auras, R., S. Selke, and I.E. Yuzay, *Poly (lactic acid) and zeolite composites and method of manufacturing the same*. 2010, Google Patents.
 72. Raksina, P., *Study the effect of zeolite on properties of polybutylene succinate/polylactic acid films*. 2020.
 73. Run, M., et al., *Melting behaviors and isothermal crystallization kinetics of poly(ethylene terephthalate)/mesoporous molecular sieve composite*. Polymer, 2005. **46**(14): p. 5308-5316.

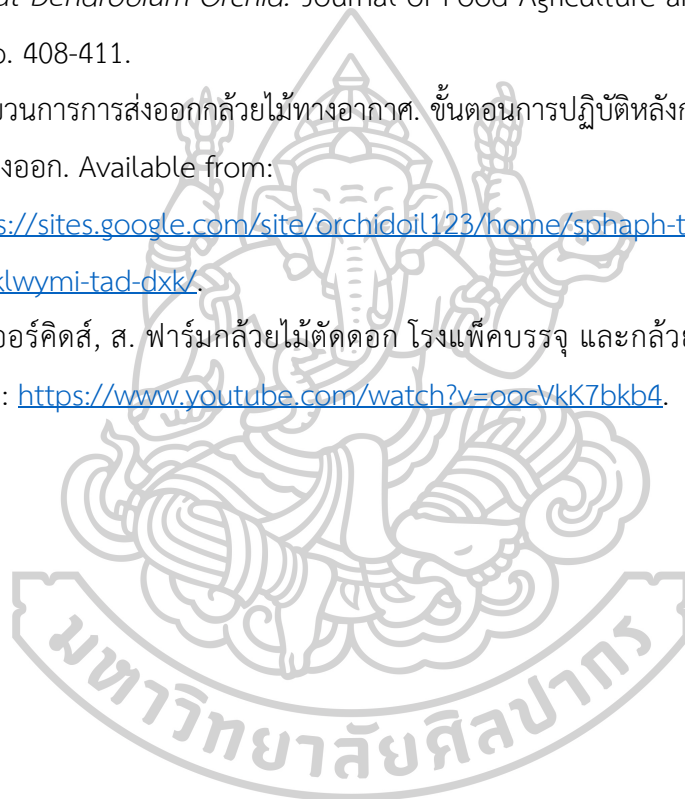
74. Pawanee, T., *Adsorption of carbon dioxide and nitrogen in the mixture of synthetic gas on standard zeolite 4A*. 2013.
75. Buchori, L., et al., *Effect of Temperature and Concentration of Zeolite Catalysts from Geothermal Solid Waste in Biodiesel Production from Used Cooking Oil by Esterification–Transesterification Process*. *Processes*, 2020. **8**(12): p. 1629.
76. Sayılğan, Ş.Ç., M. Mobedi, and S. Ülkü, *Effect of regeneration temperature on adsorption equilibria and mass diffusivity of zeolite 13x-water pair*. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2016. **224**: p. 9-16.
77. Sujan, A.R., et al., *High-Temperature Activation of Zeolite-Loaded Fiber Sorbents*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018. **57**(34): p. 11757-11766.
78. Van Reeuwijk, L.P., *The thermal dehydration of natural zeolites*. 1974 : Wageningen University and Research.
79. Şen, S., et al., *Polyfuran/zeolite LTA composites and adsorption properties*. *European Polymer Journal*, 2008. **44**(8): p. 2708-2717.
80. Zhang, W.a., et al., *Effects of clay-modifying agents on the morphology and properties of poly (methyl methacrylate)/clay nanocomposites synthesized via γ -ray irradiation polymerization*. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2003. **41**(21): p. 3218-3226.
81. Akhtar, F., et al., *Structuring adsorbents and catalysts by processing of porous powders*. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014. **34**(7): p. 1643-1666.
82. Natnaree, A., *Preparation and characterization of poly(butylene adipate-co-terephthalate) biocomposites films for extended shelf-life of fruits*. 2020.
83. Li, Y., et al., *Effects of novel silane modification of zeolite surface on polymer chain rigidification and partial pore blockage in polyethersulfone (PES)–zeolite A mixed matrix membranes*. *Journal of Membrane Science*, 2006. **275**(1-2): p. 17-28.
84. Sekelik, D.J., et al., *Oxygen barrier properties of crystallized and talc-filled poly(ethylene terephthalate)*. *Journal of Polymer Science Part B*, 1999. **37**: p. 847-857.

85. Vieth, W.R., *Diffusion in and through polymers : principles and applications*. 1991, Munich; New York; New York: Hanser Publishers ; Distributed in the U.S.A. and in Canada by Oxford University Press.
86. Hedenqvist, M. and U. Gedde, *Diffusion of small-molecule penetrants in semicrystalline polymers*. *Progress in Polymer Science*, 1996. **21**(2): p. 299-333.
87. Bhatia, A., et al., *Analysis of gas permeability characteristics of poly (lactic acid)/poly (butylene succinate) nanocomposites*. *Journal of Nanomaterials*, 2012. **2012**: p. 1-11.
88. Rashed, M.N. and P.N. Palanisamy, *Introductory chapter: Adsorption and ion exchange properties of zeolites for treatment of polluted water*. *Zeolites and Their Applications*. Vol. 1. 2018.
89. Lalik, E., et al., *Microcalorimetric study of sorption of water and ethanol in zeolites 3A and 5A*. *Catalysis today*, 2006. **114**(2-3): p. 242-247.
90. Liu, Q., et al., *NaKA sorbents with high CO₂-over-N₂ selectivity and high capacity to adsorb CO₂*. *Chemical Communications*, 2010. **46**(25): p. 4502-4504.
91. Navarrete-Casas, R., et al., *Study of lithium ion exchange by two synthetic zeolites: Kinetics and equilibrium*. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007. **306**(2): p. 345-353.
92. Kim, H.S., S.Y. Choi, and W.T. Lim, *Complete Li⁺ exchange into zeolite X (FAU, Si/Al= 1.09) from undried methanol solution*. *Journal of Porous Materials*, 2013. **20**(6): p. 1449-1456.
93. Price, L., K.M. Leung, and A. Sartbaeva, *Local and Average Structural Changes in Zeolite A upon Ion Exchange*. *Magnetochemistry*, 2017. **3**(4): p. 42.
94. Lührs, H., J. Derr, and R.X. Fischer, *K and Ca exchange behavior of zeolite A*. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2012. **151**: p. 457-465.
95. Anuwattana, R., P. Phungngamphan, and P. Chawakitchareon, *The Efficiency of Carbon Dioxide and Hydrogen Sulphide Adsorption using Impregnated Granular Activated Carbon and Zeolite*. *Journal of Physical Science*, 2018. **29**: p. 29-36.
96. Ayoub, M., et al., *Performance of lithium modified zeolite Y catalyst in solvent-free conversion of glycerol to polyglycerols*. *Journal of Taibah University for Science*, 2014. **8**(3): p. 231-235.

97. Beyaz Kayiran, S. and F. Lamari Darkrim, *Synthesis and ionic exchanges of zeolites for gas adsorption*. Surface and Interface Analysis: An International Journal devoted to the development and application of techniques for the analysis of surfaces, interfaces and thin films, 2002. **34**(1): p. 100-104.
98. Morante, F., et al., *Cation Exchange of Natural Zeolites: Worldwide Research*. Sustainability, 2021. **13**: p. 7751.
99. Noroozi, R., et al., *Removal of cyanide using surface-modified Linde Type-A zeolite nanoparticles as an efficient and eco-friendly material*. Journal of Water Process Engineering, 2018. **21**: p. 44-51.
100. oasen. *The design for ion exchange column*. 2 0 1 5 ; Available from: <https://www.oasen.nl/files/imported-ion-exchange-research-project>.
101. Musyoka, N.M., et al., *Thermal stability studies of zeolites A and X synthesized from South African coal fly ash*. Research on Chemical Intermediates, 2015. **41**(2): p. 575-582.
102. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ค.ศ., สมบัติทางเคมีของดิน. 2005.
103. Compounds, T.P.o.S.S.I. *Charge Densities of Selected Ions*. Available from: https://bcs.whfreeman.com/WebPub/Chemistry/raynercanham6_e/Appendices/Rayner-Canham%202005_e%200_Appendix%2002%20-%20Charge%20Densities%20of%20Selected%20Ions.pdf.
104. Peiser, G. and T. Suslow, *Factors affecting ethylene adsorption by zeolite: The last word (from us)*. Perishables Handling Quarterly, 1998. **95**: p. 17-19.
105. Smith, A.W., et al., *A new palladium-based ethylene scavenger to control ethylene-induced ripening of climacteric fruit*. Platinum Metals Review, 2009. **53**(3): p. 112-122.
106. Syamsu, K., et al., *Nano Zeolite-KMnO₄ as Ethylene Adsorber in Active Packaging of Horticulture Products (Musa Paradisiaca)*. International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR), 2016. **30**: p. 93-103.
107. Coloma, A., et al., *Development of an active film with natural zeolite as ethylene scavenger*. Journal of the Chilean Chemical Society, 2014. **59**: p. 2409-2414.
108. Sadeghi, K., Y.S. Lee, and J. Seo, *Ethylene Scavenging Systems in Packaging of*

Fresh Produce: A Review. Food Reviews International, 2019. **37**: p. 1-22.

109. Yip, K. and C. Hew, *Ethylene production by young Aranda orchid flowers and buds*. Plant growth regulation, 1988. **7**(3): p. 217-222.
110. Ketsa, S. and F. Thampitakorn, *Characteristics of ethylene production of Dendrobium orchid flowers*, in *VI International Symposium on Postharvest Physiology of Ornamental Plants*. 1995. p. 253-263.
111. Yimyong, W. and P. Soni, *Effects of Modified Atmosphere Packaging on Quality of Cut Dendrobium Orchid*. Journal of Food Agriculture and Environment, 2014. **12**: p. 408-411.
112. กระบวนการการส่งออกกล้วยไม้ทางอากาศ. ขั้นตอนการปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวกล้วยไม้เพื่อการส่งออก. Available from: <https://sites.google.com/site/orchidoil123/home/sphaph-thawpi-khxng-kar-sng-xxk-klwymi-tad-dxk/>.
113. แอร์ออร์คิดส์, ส. ฟาร์มกล้วยไม้ตัดดอก โรงแพ็คบรรจุ และกล้วยไม้โชว์. 2017; Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=oocVkJ7bkb4>.





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	รมย์ธีรา ชันดีสา
วัน เดือน ปี เกิด	9 สิงหาคม 2538
สถานที่เกิด	จ.นครปฐม
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) ปีโพลีเอทิลีนและโพลีแลคติกแอซิด
ที่อยู่ปัจจุบัน	16 ม.2 ต.บ้านหลวง อ.ดอนตูม จ.นครปฐม 73150
ผลงานตีพิมพ์	Romteera Khanteesa, Poosub Threepopnatkul and Amnard Sittattrakul "Effect of poly(ethylene oxide) on the properties of poly(lactic acid)-based blends" International Conference on Engineering and Industrial Technology (ICEIT,2020), The ZIGN Hotel Pattaya, Chonburi, Thailand, 11-13 September, 2020
รางวัลที่ได้รับ	พ.ศ.2561-2562 (4 ภาคการศึกษา) ได้รับทุนการศึกษาและทุนนักศึกษาผู้ช่วยสอน จากภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

