



การศึกษาและการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีการ  
เติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสำหรับการยืดอายุเห็ด

โดย

นางสาวกรองกาญจน์ บำรุงนอก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาและการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเอทิลีนไกล  
คอลที่มีการเติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสำหรับการยืดอายุเห็ด



โดย  
นางสาวกรองกาญจน์ บำรุงนอก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

STUDY AND PREPARATION OF PLA/PEG BLENDED FILMS INCORPORATED  
WITH ANTIMICROBIAL AGENT FOR PROLONGING SHELF-LIFE OF MUSHROOM



By

MISS Krongkarn BUMRUNGNOK

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 2020

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	การศึกษาและการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีการเติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสำหรับการยืดอายุเห็ด
โดย	กรรองกาญจน์ บำรุงนอก
สาขาวิชา	วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา มหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พูนทรัพย์ ตรีภพนาถกุล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

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

พิจารณาเห็นชอบโดย

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

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูนทรัพย์ ตรีภพนาถกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ดร.อำนาจ สิทธิัตตระกุล)

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

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก  
(ดร.ชนินทร์ กุลเศรษฐ์ชัยสิทธิ์ )



61402223 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : พอลิแลคติกแอซิด, พอลิเอทิลีนไกลคอล, น้ำมันสกัดเมล็ดคอกอน, สารขยายสายโซ่

นางสาว กรองกาญจน์ บำรุงนอก: การศึกษาและการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีการเติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสำหรับการยืดอายุเห็ด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พูนทรัพย์ ตรีภพนาถกุล

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นพัฒนาพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอซิด (PLA) เพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับยืดอายุเห็ด โดยแบ่งออกเป็น 4 ตอน ตอนที่ 1 ศึกษาการเติมสารพลาสติกไซเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ที่ 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก และตอนที่ 2 ศึกษาการเติมสารขยายสายโซ่ชนิด Joncryl ADR ที่ 1.00, 1.25 และ 1.50 phr ใน PLA/PEG10 เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PEG โดยพอลิเมอร์ผสมจะถูกเตรียมผ่านกระบวนการอัดรีดและขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการอัดรีดฟิล์ม พบว่า PEG ส่งผลให้ฟิล์มผสมสามารถประพฤติตัวแบบยืดหยุ่นได้ที่การเติม PEG 20% โดยน้ำหนัก แต่ความแข็งแรงของฟิล์มผสมและความแข็งแรงของพอลิเมอร์หลอมเหลวลดลงอย่างมาก ตอนที่ 2 การศึกษาอิทธิพลของ ADR พบว่า ADR ส่งผลให้ความสามารถในการขึ้นรูปดีขึ้น และฟิล์มผสม PLA/PEG สามารถประพฤติตัวแบบยืดหยุ่นได้ที่การเติม PEG 10% โดยน้ำหนัก เมื่อเติม ADR ที่ 1.25 และ 1.50 phr แสดงให้เห็นว่า PLA/PEG มีความเข้ากันได้มากขึ้น และแสดงสมบัติเชิงกล สมบัติด้านการไหล และสมบัติการซึมผ่านของแก๊สที่ดีที่สุดเมื่อเติม ADR 1.25 phr การปรับปรุงฟิล์มผสมของ PLA/PEG/ADR ให้เป็น Active packaging ด้วยการเติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันชนิดน้ำมันสกัดเมล็ดคอกอน (GSE) โดยมี PLA-g-MA ทำหน้าที่เพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง GSE และพอลิเมอร์ผสม โดยในตอน 3 และ 4 คือการศึกษาอิทธิพลของการเติม PLA-g-MA ที่ปริมาณ 0, 3, 6, 9 และ 12% โดยน้ำหนัก และอิทธิพลของ GSE ที่ 1, 2, 3 และ 4 phr ตามลำดับ ต่อฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 พบว่าการเติม PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก และ GSE 4 phr ในพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG10/ADR1.25 ส่งผลให้ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลที่ดี และมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากที่กล่าวมานี้สามารถสรุปได้ว่าฟิล์ม PLA/PEG10/ADR1.25 แสดงสมบัติเชิงกล สมบัติการไหล และการซึมผ่านของแก๊สที่ดีที่สุด และเมื่อเติม GSE 4 phr กับ PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก ฟิล์มผสมสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ และรักษาคุณภาพของเห็ดฟางได้นาน 5 วัน

61402223 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Keyword : poly(lactic acid), Poly(ethylene glycol), ADR, Grape seed extract

MISS KRONGKARN BUMRUNGNOK : STUDY AND PREPARATION OF PLA/PEG BLENDED FILMS INCORPORATED WITH ANTIMICROBIAL AGENT FOR PROLONGING SHELF-LIFE OF MUSHROOM THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR POONSUB THREEPOP NATKUL, D.Eng.

The aim of this research is to develop biodegradable polymer as poly(lactic acid), PLA for mushroom shelf life extension packaging. There are 4 parts : the first part is the determination on plasticizer as poly(ethylene glycol), PEG addition at 5, 10, 20 and 30%wt. Then is to study on PLA/PEG10 incorporated with chain extender (Joncryl ADR) at 1.00, 1.25 and 1.50 phr to act as compatibilizer of PLA and PEG. Polymer blends were processed via twin screw extruder and blended films were molded with cast film extrusion. PEG addition at 20%wt improved the flexibility of PLA. In contrast, the strength of blended films and melt strength of PLA were dramatically decreased. The incorporation of ADR increased the process ability and flexibility of PLA/PEG10 blended film. An active packaging was made with added antimicrobial and antioxidation agent as grape seed extract (GSE) together with PLA-g-MA to act as compatibilizer of GSE and polymer blend. Therefore, the third and last part were to study the impact of PLA-g-MA content at 0, 3, 6, 9 and 12% by weight and GSE content at 1, 2, 3 and 4 phr on to PLA/PEG10/ADR1.25 blended film respectively. The incorporation of PLA-g-MA 3% by weight and GSE 4 phr on PLA/PEG10/ADR1.25 blended film had shown good mechanical properties and effective antimicrobial and anti-oxidation activity. In conclusion, PLA/PEG10/ADR1.25 blended film illustrated good mechanical, rheological and gas transmission properties. The addition of GSE 4 phr and PLA-g-MA 3% by weight revealed effective antimicrobial and anti-oxidation activity which extend shelf life of straw mushroom (*Volvariella volvacea*) for 5 days.

## กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินการวิจัยเพื่อบรรลุเป้าหมายของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงได้ภายใต้ความช่วยเหลือของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูนทรัพย์ ตรีภพนาถกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร.อำนาจ สิทธิตระกูล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ช่วยให้ความรู้ คำปรึกษา และคำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย ซึ่งเป็นการเสียสละเวลามาเพื่อให้ความช่วยเหลืออย่างสุดความสามารถ ส่งผลให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาเจรา พัฒนถาบุตร รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย และ ดร.ชนินทร์ กุลเศรษฐัญชลี ที่มาเป็นกรรมการสอบและแนะนำแนวทางต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ในภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ทุกๆ ท่าน ที่มีส่วนช่วยเหลือในการให้ความรู้ในแขนงต่างๆ อย่างครบถ้วน และขอขอบคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้โอกาสและสนับสนุนเงินทุนในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ รวมไปถึงเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ และขอขอบคุณ คุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชา และ คุณไพโรจน์ ตั้งศุภธวัช ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้งานเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาทุกท่านที่ช่วยเหลือเกี่ยวกับการประสานงานตลอดจนวิทยานิพนธ์เสร็จสิ้น อีกทั้งขอขอบคุณ ดร.ศุภณัฐ ภัทรธีรา เจ้าหน้าที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติสำหรับการให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องอัดรีดฟิล์ม (Cast film extruder) และช่วยคำแนะนำในกระบวนการขึ้นรูปตลอดจนวิทยานิพนธ์เสร็จสิ้น

โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยทุนพัฒนาบัณฑิตศึกษา จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2563 จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ สำหรับมิตรภาพและกำลังใจที่ช่วยส่งเสริมให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถเสร็จสิ้นสมบูรณ์ได้ และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณมารดาและญาติพี่น้อง ที่ช่วยสนับสนุนให้การดำเนินงานวิทยานิพนธ์เป็นไปด้วยดี

กรรองกาญจน์ บำรุงนอก

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูปภาพ.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	3
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	7
2.1 พอลิแลคติกแอซิด (PLA) .....	7
2.2 พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG).....	10
2.3 สารขยายสายโซ่ (Chain extender).....	10
2.4 น้ำมันสกัดจากเมล็ดองุ่น (Grape seed oil).....	11
2.5 สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด Poly(lactic acid)-graft-Maleic anhydride.....	13
2.6 กระบวนการนำเสียของเห็ด .....	14
2.7 โรคเน่าสีน้ำตาลของเห็ด (Brown blotch).....	14

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	22
3.1 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	22
3.1.1. วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	22
3.1.2. สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย .....	23
3.2 เครื่องมือที่ใช้ดำเนินการวิจัย.....	24
3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	25
3.3.1. การเตรียมฟิล์มผสมของ PLA/PEG.....	25
3.3.3. การเตรียมฟิล์มผสมของ PLA/PEG10/ADR.....	28
3.3.5. การเตรียมฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 และ PLA-g-MA ที่ปริมาณแตกต่างกัน 29	
3.3.5.2 การเตรียมฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 และ PLA-g-MA ที่ปริมาณแตกต่างกันที่มีน้ำมันสกัดเมล็ดตงุ่น (GSE) 4 phr.....	31
3.3.7. การเตรียมฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 กับ GSE ที่ปริมาณแตกต่างกัน ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก.....	35
3.3.9. ศึกษา วิเคราะห์ และสรุปข้อมูลจากการทดลอง.....	36
3.3.10. เรียบเรียงรายงานการวิจัย .....	36
3.3.11. นำเสนองานวิจัย.....	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	37
4.1 ผลของการศึกษาฟิล์มผสมของ PLA/PEG.....	37
4.1.1. การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มผสมด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR).....	37
4.1.2. ผลของการศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม PLA/PEG ด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC).....	38
4.1.3. ผลของการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม PLA/PEG.....	41
4.1.4. ผลของการศึกษาสมบัติรีออลอยีของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG .....	44

4.1.5. ผลของการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนฟิล์มผสม PLA/PEG ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA) .....	46
4.1.6. แสดงผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มผสม PLA/PEG .....	47
4.1.7. ผลการศึกษาการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มผสม PLA/PEG.....	49
4.1.8. ผลการศึกษาการซึมผ่านของแก๊สของฟิล์มผสม PLA/PEG.....	50
4.2 ผลของการศึกษาฟิล์มผสมของ PLA/PEG10 ที่มีการเติมสารขยายสายโซ่ ADR.....	52
4.2.1. การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มผสมด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) .....	52
4.2.2. ผลของการศึกษาสมบัติทางความร้อนของ PLA/PEG10 ที่มีการเติมสารขยายสายโซ่ ADRด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) .....	54
4.2.3. ผลของการศึกษาสมบัติเชิงกลของ PLA/PEG และ PLA/PEG ที่มีการเติมสารขยายสายโซ่ ADR.....	56
4.2.4. ผลของการศึกษาสมบัติรีออลอจีของ PLA/PEG10 ที่มีการเติมสารขยายสายโซ่ ADR59	
4.2.5. ผลของการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของ PLA/PEG10 ที่มีการเติมสารขยายสายโซ่ ADR ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA).....	60
4.2.6. ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PLA/PEG10 ที่มีการเติมสารขยายสายโซ่ ADR.....	63
4.2.7. ผลการศึกษาการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม PLA/PEG10 ที่มีการเติมสารขยายสายโซ่ ADR.....	63
4.2.8. ผลการศึกษาการซึมผ่านของแก๊สของฟิล์ม PLA/PEG10 ที่มีการเติมสารขยายสายโซ่ ADR.....	65
4.3 ผลของการศึกษาเติม PLA-g-MA สำหรับกักเก็บ GSE ในฟิล์มผสม PLA/PEG/ADR.....	66
4.3.1. ผลของการศึกษาการเตรียมสารเพิ่มความเข้ากันได้ Poly(lactic acid)-grafted-maleic anhydride (PLA-g-MA) .....	66
4.3.1.1 เสถียรภาพทางความร้อนของ PLA-g-MA .....	66



4.3.1.2. ผลการศึกษาโครงสร้างทางเคมีของ PLA-g-MA ด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (NMR).....	67
4.3.2. ผลของ PLA-g-MA ต่อสมบัติของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่มี GSE 4 phr .....	68
4.3.2.1 การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มผสมด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR).....	68
4.3.2.2. ผลของ PLA-g-MA ต่อเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่มี GSE 4 phr.....	72
4.3.2.3 ผลของ PLA-g-MA ต่อสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่มี GSE 4 phr ที่ทดสอบด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC).....	74
4.3.2.4 ผลของ PLA-g-MA ต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่มี GSE 4 phr .....	76
4.3.2.5 ผลของ PLA-g-MA ต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่มี GSE 4 phr.....	79
4.3.2.6 ผลของ PLA-g-MA ต่ออัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่มี GSE 4 phr.....	80
4.3.2.7 ผลของ PLA-g-MA ต่ออัตราการซึมผ่านของแก๊สของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่มี GSE 4 phr.....	81
4.3.2.8 ผลของ PLA-g-MA ต่อการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิด <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ตามการทดสอบมาตรฐาน JIS-Z 2801 ของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่มี GSE 4 phr.....	83
4.3.2.9 ผลของ PLA-g-MA ต่อการต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH Assay ของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่มี GSE 4 phr .....	84
4.3.2.10 ผลของ PLA-g-MA ต่อการเก็บรักษาเม็ดฟางที่อุณหภูมิ 20°C ของฟิล์ม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่มี GSE 4 phr.....	86

4.4 ผลของการศึกษาการเติมน้ำมันสกัดเมล็ดองุ่น (GSE) ในฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก .....	88
4.4.1. การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มผสมด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) .....	88
4.4.2. ผลของการศึกษาเสถียรทางความร้อนของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่ปริมาณ GSE ที่แตกต่างกันที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA) .....	89
4.4.3. ผลของการศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่ปริมาณ GSE ที่แตกต่างกันที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) .....	90
4.4.4. ผลของการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่ปริมาณ GSE ที่แตกต่างกันที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก .....	92
4.4.5. ผลของการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่ปริมาณ GSE ที่แตกต่างกันที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก .....	94
4.4.6. ผลการศึกษาการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่ปริมาณ GSE ที่แตกต่างกันที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก .....	96
4.4.7. ผลการศึกษาการซึมผ่านของแก๊สของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่ปริมาณ GSE ที่แตกต่างกันที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก .....	96
4.4.8. ผลของการศึกษาการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิด <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ด้วยมาตรฐาน JIS-Z 2801 ของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่ปริมาณ GSE ที่แตกต่างกันที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก .....	98
4.4.9. ผลของการศึกษาการต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH Assay ของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่ปริมาณ GSE ที่แตกต่างกันที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก .....	99
4.4.10. ผลของการเก็บรักษาเห็ดฟางที่อุณหภูมิ 20°C ของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่ปริมาณ GSE ที่แตกต่างกันที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก .....	100
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	103



5.1 การศึกษาการเตรียมฟิล์มผสม PLA/PEG ที่เติม ADR .....	103
5.2 การศึกษาการเติม PLA-g-MA ในฟิล์มผสม PLA/PEG/ADR เพื่อทำหน้าที่กักเก็บ GSE.....	103
5.3 การศึกษาการเติม GSE ในฟิล์มผสม PLA/PEG/ADR ที่มี PLA-g-MA คงที่.....	104
5.4 ข้อเสนอแนะ .....	104
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดลอง.....	106
ภาคผนวก ข แสดงการคำนวณ.....	157
ภาคผนวก ค การนำเสนอผลงาน.....	159
รายการอ้างอิง.....	168
ประวัติผู้เขียน.....	173



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงสัดส่วนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG/ADR .....	4
ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิแลกติก [12] .....	9
ตารางที่ 2.2 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของแก๊สและความเลือกผ่านของแก๊สในฟิล์มคอมพอสิต [3]....	18
ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม PLA/CE-PEG (80/20) [25].....	19
ตารางที่ 2.4 แสดงประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียของฟิล์ม PLA/ZnO/ZEO และ PLA/ZnO/MEO ที่ปริมาณของน้ำมันหอมระเหยที่แตกต่างกัน [26] .....	20
ตารางที่ 3.1 แสดงสัดส่วนของการเติม GSE และ PLA ที่ปริมาณต่างๆ ใน PLA/PEG/ADR .....	33
ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติทางความร้อนของ PLA/PEG ที่ปริมาณ PEG แตกต่างกัน .....	40
ตารางที่ 4.2 แสดงเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG.....	48
ตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติทางความร้อนของ PLA/PEG ที่ปริมาณ PEG 10% โดยน้ำหนัก และ PLA/PEG10 ที่เติม ADR ที่ปริมาณแตกต่างกัน .....	55
ตารางที่ 4.4 แสดงเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG10/ADR .....	62
ตารางที่ 4.5 แสดง $^1\text{H}$ NMR spectrum ของ PLA และ PLA-g-MA .....	67
ตารางที่ 4.6 แสดงสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม PPA/GSE4 ที่ PLA-g-MA ปริมาณแตกต่างกัน .....	73
ตารางที่ 4.7 แสดงสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม PPA/GSE4 ที่ PLA-g-MA ปริมาณแตกต่างกัน .....	75
ตารางที่ 4.8 แสดงสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม PPA/PLA-g-MA3 ที่ GSE ปริมาณแตกต่างกัน .....	90
ตารางที่ 4.9 แสดงสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม PPA/PLA-g-MA3 ที่ GSE ปริมาณแตกต่างกัน .....	91
ตารางที่ ก.1 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PLA.....	107
ตารางที่ ก.2 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PLA/PEG5 .....	108

ตารางที่ ก.3 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PLA/PEG10.....	109
ตารางที่ ก.4 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PLA/PEG20.....	109
ตารางที่ ก.5 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PLA/PEG30.....	110
ตารางที่ ก.6 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PLA/PEG10/ADR1.00 .....	110
ตารางที่ ก.7 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PLA/PEG10/ADR1.25 .....	111
ตารางที่ ก.8 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PLA/PEG10/ADR1.50 .....	111
ตารางที่ ก.9 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PPA/GSE4/M0.....	112
ตารางที่ ก.10 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PPA/GSE4/M3....	112
ตารางที่ ก.11 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PPA/GSE4/M6....	113
ตารางที่ ก.12 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PPA/GSE4/M9....	113
ตารางที่ ก.13 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PPA/GSE4/M12 .	114
ตารางที่ ก.14 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PPA/GSE1/M3....	114
ตารางที่ ก.15 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PPA/GSE2/M3....	115
ตารางที่ ก.16 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PPA/GSE3/M3....	115

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด [11] .....	7
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างทางเคมีของพอลิแลคติกแอซิด [10] .....	8
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนไกลคอล [14] .....	10
รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ Joncryl ADR 4468 [15] .....	11
รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของ Oligomeric proanthocyanidin complexes (OPCs) [16].....	11
รูปที่ 2.6 ภาพจำลองกลไกการต่อต้านเชื้อแบคทีเรียของสารพอลิฟินอล [19] .....	13
รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ PLA-g-MA [20] .....	13
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของแบคทีเรียชนิด Pseudomonas [23].....	15
รูปที่ 2.9 แสดงผลของบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ ที่ส่งต่อสภาพที่ยอมรับได้ของเห็ดกระดุมที่ถูกเก็บในอุณหภูมิ 4±1°C เป็นเวลา 16 วัน [8].....	15
รูปที่ 2.10 แสดงผลของบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกันต่อความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนในการเก็บรักษาเห็ดกระดุมที่อุณหภูมิ 4±1°C เป็นเวลา 16 วัน [8].....	16
รูปที่ 2.11 แสดงสมบัติเชิงกลของ Neat PLA และ PLA-co-PEG โคพอลิเมอร์ ที่ปริมาณสารขยายสายโซ่ที่แตกต่างกัน [24].....	16
รูปที่ 2.12 แสดงปริมาณฟินอลทั้งหมด (a) และประสิทธิภาพในสกัดกัน DPPH (b) ของฟิล์ม PLA/ZnO ที่มีปริมาณของ MEO และ ZEO ที่แตกต่างกัน [26].....	20
รูปที่ 2.13 แสดงกราฟลอกการิทึมของการลดลงของเชื้อแบคทีเรียชนิดต่างๆ ในฟิล์มผสมของโคโตซานและสารสกัดเมล็ดองุ่น [9] .....	21
รูปที่ 3.1 แผนภูมิแสดงการเตรียมและพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์มผสม PLA/PEG .....	30
รูปที่ 3.2 แผนภูมิแสดงการเตรียมและพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์มผสม PLA/PEG/ADR .....	31
รูปที่ 3.3 แผนภูมิแสดงการเตรียมและพิสูจน์เอกลักษณ์ PLA-g-MA.....	32
รูปที่ 3.4 แผนภูมิแสดงการเตรียมและพิสูจน์เอกลักษณ์ฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 ที่มี GSE 4 phr และ PLA-g-MA ในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	34

รูปที่ 3.5 แผนภูมิแสดงการเตรียมและพิสูจน์เอกลักษณ์ฟิล์มผสมของ PLA/PEG/ADR ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก และ GSE ในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	36
รูปที่ 4.1 แสดง Fourier Transform Infrared Spectra ของ PLA/PEG ที่ PEG 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก .....	38
รูปที่ 4.2 แสดง DSC Thermogram ของ PLA/PEG ที่ปริมาณ PEG 5, 10, 20 และ 30% โดย น้ำหนัก.....	39
รูปที่ 4.3 แสดงสมบัติเชิงกลของ PLA และ PLA/PEG ที่ปริมาณ PEG 5, 10, 20 และ 30% โดย น้ำหนัก.....	43
รูปที่ 4.4 แสดงแผนภาพ Stress-Strain ของ PLA และ PLA/PEG ที่ปริมาณ PEG 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก .....	44
รูปที่ 4.5 แสดงสมบัติรีออลอจีที่ 180°C ของ PLA และ PLA/PEG ที่ PEG 5, 10, 20 และ 30% โดย น้ำหนัก.....	45
รูปที่ 4.6 แสดงการสลายตัวทางความร้อนของ PLA, PEG และ PLA/PEG ที่ PEG 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก .....	47
รูปที่ 4.7 แสดงภาพ Scanning electron microscope (SEM) ของ PLA และ PLA/PEG ที่ PEG 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก.....	49
รูปที่ 4.8 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของฟิล์ม PLA และ PLA/PEG ที่ PEG 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก .....	50
รูปที่ 4.9 แสดงอัตราการซึมผ่านของแก๊สของฟิล์ม PLA และ PLA/PEG ที่ PEG 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก.....	51
รูปที่ 4.10 แสดงภาพจำลองการเลือกผ่านของแก๊สออกซิเจน (O <sub>2</sub> ) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> ) ในฟิล์มผสมของ PLA/PEG .....	52
รูปที่ 4.11 แสดง Fourier Transform Infrared Spectra ของ PLA/PEG10 ที่ ADR 1.00, 1.25 และ 1.50 phr.....	53
รูปที่ 4.12 แสดงแผนภาพการเกิดปฏิกิริยาของ PLA, PEG และ ADR.....	54
รูปที่ 4.13 แสดง DSC Thermogram ของ PLA/PEG10 ที่เติม ADR 1.00, 1.25 และ 1.50 phr..	55
รูปที่ 4.14 แสดงสมบัติเชิงกลของ PLA และ PLA/PEG10 ที่เติม ADR 1.00, 1.25 และ 1.50 phr	57

รูปที่ 4.15 แสดงแผนภาพ Stress-Strain ของ PLA และ PLA/PEG10 ที่เติม ADR 1.00, 1.25 และ 1.50 phr.....	58
รูปที่ 4.16 แสดงสมบัติรีออลอยี่ที่ 180°C ของ PLA และ PLA/PEG10 ที่เติม ADR 1.00, 1.25 และ 1.50 phr.....	61
รูปที่ 4.17 แสดงการสลายตัวทางความร้อนของ PLA, PEG และ PLA/PEG10 ที่เติม ADR 1.00, 1.25 และ 1.50 phr.....	62
รูปที่ 4.18 แสดงภาพ Scanning electron microscope (SEM) ของ PLA และ PLA/PEG10 ที่ ADR 1.00, 1.25 และ 1.50 phr .....	64
รูปที่ 4.19 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของฟิล์ม PLA และ PLA/PEG10 ที่เติม ADR 1.00, 1.25 และ 1.50 phr.....	64
รูปที่ 4.20 แสดงอัตราการซึมผ่านของแก๊สของฟิล์ม PLA และ PLA/PEG10 ที่เติม ADR 1.00, 1.25 และ 1.50 phr.....	65
รูปที่ 4.21 แสดงพฤติกรรมสลายตัวทางความร้อนของ PLA และ PLA-g-MA .....	67
รูปที่ 4.22 แสดงสเปกตรัมของ H1 NMR ของ PLA (ก) และ PLA-g-MA (ข).....	68
รูปที่ 4.23 แสดงโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มผสม PPA ที่เติม PLA-g-MA 0, 3, 6, 9 และ 12% โดยน้ำหนัก ที่มี GSE 4 phr .....	69
รูปที่ 4.24 แสดงปฏิกิริยาที่มุ่งหมายให้เกิดขึ้นระหว่าง PLA/PEG10/ADR1.25, PLA-g-MA และ GSE .....	70
รูปที่ 4.25 แสดงภาพจำลองของปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้นกรณีที่ไม่มี PLA-g-MA (ก) และมี PLA-g-MA มากเกินไป (ข).....	71
รูปที่ 4.26 แสดงพฤติกรรมสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มผสม PPA ที่เติม PLA-g-MA 0, 3, 6, 9 และ 12% ที่มี GSE 4 phr.....	73
รูปที่ 4.27 แสดง DSC Thermogram ของฟิล์มผสม PPA ที่เติม PLA-g-MA 0, 3, 6, 9 และ 12% ที่มี GSE 4 phr .....	75
รูปที่ 4.28 แสดง Stress-Strain ของฟิล์มผสม PPA ที่เติม PLA-g-MA 0, 3, 6, 9 และ 12% ที่มี GSE 4 phr.....	77



รูปที่ 4.29 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม PPA ที่เติม PLA-g-MA 0, 3, 6, 9 และ 12% ที่มี GSE 4 phr.....	78
รูปที่ 4.30 แสดงภาพ Scanning electron microscope (SEM) ของผิวการขาดของฟิล์มผสม PPA ที่เติม PLA-g-MA 0, 3, 6, 9 และ 12% ที่มี GSE 4 phr.....	79
รูปที่ 4.31 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของฟิล์มผสม PPA ที่เติม PLA-g-MA 0, 3, 6, 9 และ 12% ที่มี GSE 4 phr .....	80
รูปที่ 4.32 แสดงอัตราการซึมผ่านของแก๊สของฟิล์ม PPA ที่เติม PLA-g-MA 0, 3, 6, 9 และ 12% ที่มี GSE 4 phr.....	81
รูปที่ 4.33 แสดงประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ของฟิล์มผสม PPA ที่เติม PLA-g-MA 0, 3, 6, 9 และ 12% ที่มี GSE 4 phr .....	83
รูปที่ 4.34 แสดงประสิทธิภาพการต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟิล์มผสม PPA ที่เติม PLA-g-MA 0, 3, 6, 9 และ 12% ที่มี GSE 4 phr .....	85
รูปที่ 4.35 แสดงลักษณะการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันของ GSE.....	85
รูปที่ 4.36 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเม็ดฟางที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 20°C ในระยะเวลา 6 วัน. 87	
รูปที่ 4.37 แสดงโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มผสม PPA ที่เติม GSE 1, 2, 3 และ 4 phr ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก .....	88
รูปที่ 4.38 แสดงพฤติกรรมกรสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มผสม PPA ที่เติม GSE 1, 2, 3 และ 4 phr ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก .....	89
รูปที่ 4.39 แสดง DSC Thermogram ของฟิล์มผสม PPA ที่เติม GSE 1, 2, 3 และ 4 phr ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก .....	91
รูปที่ 4.40 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม PPA ที่เติม GSE 1, 2, 3 และ 4 phr ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก.....	93
รูปที่ 4.41 แสดงแผนภาพ Stress-Strain ของฟิล์มผสม PPA ที่เติม GSE 1, 2, 3 และ 4 phr ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก .....	94
รูปที่ 4.42 แสดงภาพ Scanning electron microscope (SEM) ของผิวการขาดของฟิล์มผสม PPA ที่เติม GSE 1, 2, 3 และ 4 phr ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก .....	95

รูปที่ 4.43 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของฟิล์มผสม PPA ที่เติม GSE 1, 2, 3 และ 4 phr ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก .....	96
รูปที่ 4.44 แสดงอัตราการซึมผ่านของแก๊สของฟิล์มผสม PPA ที่เติม GSE 1, 2, 3 และ 4 phr ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก .....	97
รูปที่ 4.45 แสดงประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ของฟิล์มผสม PPA ที่เติม GSE 1, 2, 3 และ 4 phr ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก.....	98
รูปที่ 4.46 แสดงประสิทธิภาพการต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟิล์มผสม PPA ที่เติม GSE 1, 2, 3 และ 4 phr ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก.....	99
รูปที่ 4.47 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเม็ดฟางที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 20°C ในระยะเวลา 6 วัน .....	101
รูปที่ 4.48 แสดงภาพจำลองการทำงานของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 ที่เติม GSE 4 phr และ PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก .....	102
รูปที่ ก.1 แสดง DSC Thermogram ของ PLA.....	116
รูปที่ ก.2 แสดง DSC Thermogram ของ PEG.....	116
รูปที่ ก.3 แสดง DSC Thermogram ของ PLA/PEG5.....	117
รูปที่ ก.4 แสดง DSC Thermogram ของ PLA/PEG10.....	117
รูปที่ ก.5 แสดง DSC Thermogram ของ PLA/PEG20.....	117
รูปที่ ก.6 แสดง DSC Thermogram ของ PLA/PEG30.....	118
รูปที่ ก.7 แสดง DSC Thermogram ของ PLA/PEG10/ADR1.00 .....	118
รูปที่ ก.8 แสดง DSC Thermogram ของ PLA/PEG10/ADR1.25 .....	118
รูปที่ ก.9 แสดง DSC Thermogram ของ PLA/PEG10/ADR1.50 .....	119
รูปที่ ก.10 แสดง DSC Thermogram ของ PPA/GSE4/M0.....	119
รูปที่ ก.11 แสดง DSC Thermogram ของ PPA/GSE4/M3.....	119
รูปที่ ก.12 แสดง DSC Thermogram ของ PPA/GSE4/M6.....	120
รูปที่ ก.13 แสดง DSC Thermogram ของ PPA/GSE4/M9.....	120



รูปที่ ก.14 แสดง DSC Thermogram ของ PPA/GSE4/M12 .....	120
รูปที่ ก.15 แสดง DSC Thermogram ของ PPA/GSE1/M3.....	121
รูปที่ ก.16 แสดง DSC Thermogram ของ PPA/GSE2/M3.....	121
รูปที่ ก.17 แสดง DSC Thermogram ของ PPA/GSE3/M3.....	121
รูปที่ ก.18 แสดง TGA Thermogram ของ PLA .....	122
รูปที่ ก.19 แสดง TGA Thermogram ของ PEG .....	122
รูปที่ ก.20 แสดง TGA Thermogram ของ PLA/PEG5.....	123
รูปที่ ก.21 แสดง TGA Thermogram ของ PLA/PEG10 .....	123
รูปที่ ก.22 แสดง TGA Thermogram ของ PLA/PEG20 .....	124
รูปที่ ก.23 แสดง TGA Thermogram ของ PLA/PEG30 .....	124
รูปที่ ก.24 แสดง TGA Thermogram ของ PLA/PEG10/ADR1.00.....	125
รูปที่ ก.25 แสดง TGA Thermogram ของ PLA/PEG10/ADR1.25.....	125
รูปที่ ก.26 แสดง TGA Thermogram ของ PLA/PEG10/ADR1.50.....	126
รูปที่ ก.27 แสดง TGA Thermogram ของ PPA/GSE4/M0 .....	126
รูปที่ ก.28 แสดง TGA Thermogram ของ PPA/GSE4/M3 .....	127
รูปที่ ก.29 แสดง TGA Thermogram ของ PPA/GSE4/M6 .....	127
รูปที่ ก.30 แสดง TGA Thermogram ของ PPA/GSE4/M9 .....	128
รูปที่ ก.31 แสดง TGA Thermogram ของ PPA/GSE4/M12 .....	128
รูปที่ ก.32 แสดง TGA Thermogram ของ PPA/GSE1/M3 .....	129
รูปที่ ก.33 แสดง TGA Thermogram ของ PPA/GSE2/M3 .....	129
รูปที่ ก.34 แสดง TGA Thermogram ของ PPA/GSE3/M3 .....	130
รูปที่ ก.35 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PLA .....	130
รูปที่ ก.36 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PLA/PEG5 .....	131
รูปที่ ก.37 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PLA/PEG5 .....	131

รูปที่ ก.38 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PLA/PEG10 .....	132
รูปที่ ก.39 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PLA/PEG20 .....	132
รูปที่ ก.40 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PLA/PEG30 .....	133
รูปที่ ก.41 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PLA/PEG10/ADR1.00.....	133
รูปที่ ก.42 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PLA/PEG10/ADR1.25.....	134
รูปที่ ก.43 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PLA/PEG10/ADR1.50.....	134
รูปที่ ก.44 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PPA/GSE4/M0 .....	134
รูปที่ ก.45 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PPA/GSE4/M3 .....	135
รูปที่ ก.46 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PPA/GSE4/M6 .....	135
รูปที่ ก.47 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PPA/GSE4/M9 .....	136
รูปที่ ก.48 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PPA/GSE4/M12 .....	136
รูปที่ ก.49 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PPA/GSE1/M3 .....	136
รูปที่ ก.50 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PPA/GSE2/M3 .....	137
รูปที่ ก.51 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PPA/GSE3/M3 .....	137
รูปที่ ก.52 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PLA .....	138
รูปที่ ก.53 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PLA/PEG5.....	138
รูปที่ ก.54 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PLA/PEG10 .....	139
รูปที่ ก.55 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PLA/PEG20 .....	139
รูปที่ ก.56 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PLA/PEG30 .....	140
รูปที่ ก.57 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PLA/PEG10/ADR1.00.....	140
รูปที่ ก.58 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PLA/PEG10/ADR1.25.....	141
รูปที่ ก.59 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PLA/PEG10/ADR1.50.....	141
รูปที่ ก.60 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PPA/GSE4/M0 .....	142
รูปที่ ก.61 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PPA/GSE4/M3 .....	142

รูปที่ ก.62 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PPA/GSE4/M6 .....	143
รูปที่ ก.63 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PPA/GSE4/M9 .....	143
รูปที่ ก.64 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PPA/GSE4/M12 .....	144
รูปที่ ก.65 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PPA/GSE1/M3 .....	144
รูปที่ ก.66 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PPA/GSE2/M3 .....	145
รูปที่ ก.67 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PPA/GSE3/M3 .....	145
รูปที่ ก.68 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PLA .....	146
รูปที่ ก.69 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PLA/PEG5 .....	146
รูปที่ ก.70 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PLA/PEG10 .....	147
รูปที่ ก.71 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PLA/PEG20 .....	147
รูปที่ ก.72 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PLA/PEG30 .....	148
รูปที่ ก.73 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PLA/PEG10/ADR1.00 .....	148
รูปที่ ก.74 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PLA/PEG10/ADR1.25 .....	149
รูปที่ ก.75 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PLA/PEG10/ADR1.50 .....	149
รูปที่ ก.76 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PPA/GSE4/M0 .....	150
รูปที่ ก.77 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PPA/GSE4/M3 .....	150
รูปที่ ก.78 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PPA/GSE4/M6 .....	151
รูปที่ ก.79 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PPA/GSE4/M9 .....	151
รูปที่ ก.80 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PPA/GSE4/M12 .....	151
รูปที่ ก.81 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PPA/GSE1/M3 .....	152
รูปที่ ก.82 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PPA/GSE2/M3 .....	152
รูปที่ ก.83 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PPA/GSE3/M3 .....	152
รูปที่ ก.84 แสดงผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียของ PPA/GSE4/M3 .....	153
รูปที่ ก.85 แสดงผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียของ PPA/M3/GSE1-3 phr .....	154

รูปที่ ก.86 แสดงผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียของ PPA/GSE4/PLA-g-MA 0, 6, 9 และ 12  
โดยน้ำหนัก..... 155

รูปที่ ก.87 แสดงผลทดสอบการ Antioxidant ของฟิล์มผสมที่เติม GSE และ PLA-g-MA..... 156



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในระยะเวลาไม่กี่ปีมานี้ความนิยมในการบริโภคเห็ดของคนไทยเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก โดยสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.) พบว่าปัจจุบันคนไทยนิยมบริโภคเห็ดเพิ่มมากขึ้นและเห็ดยังเป็นสินค้าเกษตรชนิดหนึ่งที่ประเทศไทยมีศักยภาพในการผลิตที่สูง ส่งผลให้ตลาดและธุรกิจเห็ดขยายตัวเติบโตอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในปี 2558 มีปริมาณผลผลิตเห็ดสูงถึง 15,000 ตัน [1] โดยในอุตสาหกรรมการค้าเห็ดยังคงพบปัญหาในการเก็บรักษาเห็ดให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมอย่างเป็นเวลาานานได้ยาก เนื่องจากเห็ดมีอัตราการหายใจและกระบวนการเผาผลาญพลังงานที่สูง [2] และเห็ดไม่มีเปลือกห่อหุ้มจึงไม่สามารถป้องกันการทำลายเซลล์ที่ผิวของเห็ด เนื่องจากกระบวนการออกซิเดชัน จุลินทรีย์ และความชื้น ทำให้เห็ดเกิดการเสียสภาพเนื่องจากการเปลี่ยนสี เปลี่ยนกลิ่น หรือเปลี่ยนรสชาติ หลังจากเก็บเกี่ยวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เห็ดมีอายุในการเก็บรักษาที่สั้น [3] โดยที่ผ่านมามีการเก็บรักษาเห็ด จะใช้เป็นบรรจุภัณฑ์จำพวกฟิล์มพอลิเมอร์ทางการค้าต่างๆ เช่น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิโพรพิลีน (PP) หรือพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ซึ่งจากสถานการณ์ขยะพลาสติกในปัจจุบัน จากการรายงานของกรมควบคุมมลพิษพบว่าขยะพลาสติกในไทยมีมากกว่า 2 ล้านตัน และส่งผลให้ปริมาณขยะพลาสติกที่ลงสู่ทะเลของประเทศไทยมีปริมาณที่สูงเป็นอันดับ 6 ของโลก ทางรัฐบาลไทยจึงมีการกำหนดเป้าหมายการเลิกใช้พลาสติกแบบใช้แล้วทิ้ง 7 ชนิด ภายในปี 2025 นี้ นอกจากมาตรการการยกเลิกการใช้แล้ว ทางภาคเอกชนได้มีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการทดแทนผลิตภัณฑ์พลาสติกด้วยพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [4] ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการนำพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางธรรมชาติมาทดแทนพอลิเมอร์จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม โดยการนำพอลิแลคติกแอซิด (PLA) มาใช้เป็นฟิล์มบรรจุเห็ดแทนพอลิเมอร์ทางการค้า เนื่องจาก PLA เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้เองทางชีวภาพเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม สามารถสังเคราะห์ได้จากผลิตภัณฑ์ทางธรรมชาติ เช่น อ้อย ข้าวโพด และยังมีสมบัติเชิงกลที่ดีสามารถขึ้นรูปได้ง่ายด้วยวิธีการอัดรีด เทียบเท่าได้กับพอลิเมอร์ทางการค้าอื่นๆ ส่งผลให้ PLA ได้รับความนิยมในการนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารหรือพืชผักเป็นอย่างมากในปัจจุบัน ด้วยเหตุนี้ทำให้อุตสาหกรรมการผลิต PLA ในไทยเพิ่มมากขึ้น และมีราคาที่ต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตาม PLA ยังมีข้อเสียที่เด่นชัดคือความเปราะ ซึ่งไม่

เหมาะสมต่อการใช้งานเป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ [5] ดังนั้นในการนำ PLA มาใช้งานในที่นี้ จึงมีการปรับปรุงความยืดหยุ่นของฟิล์ม PLA ด้วยการผสมกับพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และยังสามารถสัมผัสกับอาหารได้ [6] โดย PEG เป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลหลากหลายช่วง จึงทำให้ PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ ถูกนิยมนำมาใช้เป็นสารพลาสติกไซเซอร์อย่างแพร่หลาย ซึ่งในงานวิจัยที่มีการศึกษาการใช้ PEG เป็นสารพลาสติกไซเซอร์สำหรับเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่ PLA พบว่าการจะทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นสูงๆ จะต้องเติม PEG ในปริมาณมาก (มากกว่า 20% โดยน้ำหนักของ PLA) [7] ซึ่งที่การเติม PEG ที่ปริมาณมากนี้ จะส่งผลให้ PLA และ PEG เข้ากันได้น้อยลง เนื่องจากที่ PEG ปริมาณมาก จะเกิดการรวมกลุ่มกันเองมากกว่าที่จะกระจายตัวได้ดีใน PLA ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงให้ความสำคัญกับการเพิ่มความยืดหยุ่นของ PLA ด้วยการเติม PEG ในปริมาณต่ำ และเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PEG ด้วยการเติมสารขยายสายโซ่ชนิด Multifunctional chain extender (Joncryl ADR) เพื่อทำหน้าที่ในการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของ PLA และ PEG แล้วส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ของ PLA และ PEG ทำให้ PEG สามารถกระจายตัวใน PLA ได้ดีและประพฤติตัวเป็นพลาสติกไซเซอร์ได้ดีที่ปริมาณต่ำ นอกจากนี้การนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ฟิล์มสำหรับเห็ดยังต้องคำนึงถึงความสามารถในการรักษาคุณภาพของเห็ดอีกด้วย ซึ่งจากที่กล่าวข้างต้นเห็ดมีอัตราการหายใจและการเผาผลาญพลังงานที่สูง โดยการใช้แก๊สออกซิเจน และได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังนั้นจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ในการควบคุมปริมาณแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์ โดยการศึกษาให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG มีอัตราการแพร่ผ่านของแก๊สทั้ง 2 ชนิดในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อให้เห็ดมีอัตราการหายใจที่ต่ำลง แต่ยังพอเพียงพอต่อการหายใจ เพื่อป้องกันการเกิดกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้แก๊สออกซิเจน ซึ่งจะทำให้ได้ผลผลิตเป็นแก๊สเอทิลีนที่จะทำให้เห็ดมีกลิ่นและรสชาติที่เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ปัจจัยดังกล่าวแล้วเห็ดยังสามารถเสียหายโดยการเกิดสีน้ำตาลบนผิวซึ่งส่งผลให้ไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค [8] และความชื้นที่เกิดจากกระบวนการหายใจและแบคทีเรียจากปัจจัยภายนอก ยังส่งผลให้เห็ดมีการเน่าเสียที่เร็วขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีการศึกษาการเติมสารเติมแต่งที่มีประสิทธิภาพในการต่อต้านต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันและเชื้อแบคทีเรียที่เป็นสารสกัดจากธรรมชาติจำพวกพอลิฟีนอล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของฟิล์ม ซึ่งสารดังกล่าวนี้มีอยู่หลากหลายชนิดไม่ว่าจะเป็นน้ำมันหอมระเหย ไคโตซาน หรือสารจำพวกแอนโทไซยานินที่ได้จากพืช ซึ่งนอกจากความต้องการของประสิทธิภาพดังกล่าวแล้ว การนำมาใช้กับผลิตภัณฑ์



บรรจุอาหารยังต้องการความไร้กลิ่นของสารเติมแต่ง เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงกลิ่นของอาหารอีกด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงให้ความสนใจในการใช้น้ำมันสกัดจากเมล็ดองุ่นซึ่งเป็นสารสกัดที่ไม่มีกลิ่นได้จากธรรมชาติ ไม่มีความเป็นพิษ และมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี โดยจากงานวิจัยของ Sogut E. และคณะพบว่า การเติมสารสกัดจากเมล็ดองุ่นลงในฟิล์มโคโตนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มเพิ่มขึ้น และสามารถเก็บรักษาออกไปได้นานยิ่งขึ้น [9]

จากที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด ในงานวิจัยนี้มีความสนใจที่จะศึกษาพอลิเมอร์ผสมของ PLA และ PEG ที่มีการเติมสารขยายสายโซ่ชนิด ADR สำหรับใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับเห็ด โดยเพิ่มประสิทธิภาพต่อการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนผิวเห็ดและส่งผลต่อการเสถียรภาพของเห็ด เนื่องจากเชื้อแบคทีเรีย โดยการเติมน้ำมันสกัดจากเมล็ดองุ่น และเพิ่มการยึดติดของสารธรรมชาตินี้กับพอลิเมอร์ด้วยการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PLA-g-MA

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของการเติมสารขยายสายโซ่ชนิด ADR ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ความเป็นผลึก และการแพร่ผ่านของแก๊สของฟิล์มผสมของ PLA/PEG ที่มีผลต่อการเก็บรักษาเห็ด
2. เพื่อศึกษาผลของการเติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันคือน้ำมันสกัดจากเมล็ดองุ่นต่อสมบัติของฟิล์ม PLA/PEG/ADR ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PLA-g-MA ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเก็บรักษาเห็ด

## 1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

1. ฟิล์มผสมของ PLA/PEG/ADR มีความยืดหยุ่นและความแข็งแรงที่สูง เหมาะสมต่อการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารและมีการซึมผ่านของแก๊สที่เหมาะสมต่อสภาวะการเก็บรักษาเห็ด
2. การเติมสารขยายสายโซ่ ADR ช่วยให้ PLA และ PEG มีความเข้ากันได้และมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น
3. การเติมน้ำมันสกัดจากเมล็ดองุ่นในฟิล์มผสม PLA/PEG/ADR ช่วยยับยั้งการเติบโตของแบคทีเรียและปฏิกิริยาออกซิเดชันในเห็ด และสามารถยืดอายุของเห็ดได้เป็นระยะเวลาานาน

4. การเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PLA-g-MA ช่วยให้สารสกัดจากธรรมชาติคือสารสกัดจากเมล็ดตองุ่นถูกกักเก็บในฟิล์มผสมได้ดียิ่งขึ้น

#### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG/ADR เตรียมได้จากเม็ดพลาสติก PLA เกรด 2003D ที่มี MFI 6 กรัม/10นาทีก และ PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 8,000 Da และใช้สารขยายสายโซ่ชนิด Joncryl ADR 4468 ด้วยสัดส่วนของ PLA/PEG/ADR ดังแสดงในตารางที่ 1.1

2. พอลิเมอร์ผสม PLA/PEG/ADR ถูกผสมเข้าด้วยกันด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extrusion) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์ม (Cast film extruder)

3. ศึกษาการเติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้น้ำมันสกัดจากเมล็ดตองุ่นที่ปริมาณแตกต่างกันเป็น 1, 2, 3 และ 4 phr ในฟิล์ม PLA/PEG/ADR ที่สัดส่วนที่ดีที่สุดที่ได้จากข้อที่ 1

4. ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PLA-g-MA เพื่อกักเก็บน้ำมันสกัดจากเมล็ดตองุ่นในฟิล์มผสม ที่ปริมาณแตกต่างกันเป็น 3, 6, 9 และ 12% โดยน้ำหนักของ PLA

5. พอลิเมอร์ผสม PLA/PEG/ADR จะถูกผสมเข้ากับน้ำมันสกัดจากเมล็ดตองุ่นและ PLA-g-MA และขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์ม (Cast film extruder)

ตารางที่ 1.1 แสดงสัดส่วนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG/ADR

ตัวอย่าง	PLA (%wt)	PEG (%wt)	ADR (phr)
PLA	100	0	0
PLA/PEG5	95	5	0
PLA/PEG10	90	10	0
PLA/PEG20	80	20	0
PLA/PEG30	70	30	0
PLA/PEG10/ADR1.00	90	10	1.00
PLA/PEG10/ADR1.25	90	10	1.25
PLA/PEG10/ADR1.50	90	10	1.50



## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. บันทึกและสรุปข้อมูลที่สนใจที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
3. วางแผนและออกแบบการทดลอง
4. จัดเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้
5. ดำเนินงานวิจัยโดยแบ่งเป็น 4 ตอน ได้แก่

ตอนที่ 1 การศึกษาการเตรียมฟิล์มและพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG โดยปรับเปลี่ยนปริมาณของ PEG 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก ผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์ม (Cast film extruder) และพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์มต่างๆ ดังนี้ ศึกษาสมบัติเชิงกล ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry และ Thermal gravimetric analysis ศึกษาโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy ศึกษาการซึมผ่านของแก๊สด้วย Gas transmission rate ศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ศึกษาลักษณะสัญญาณวิทยาของฟิล์มผสม และศึกษาพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์ผสมด้วย Rotation rheometer

ตอนที่ 2 การศึกษาการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PEG ด้วยสารขยายสายโซ่ชนิด Joncryl ADR ปริมาณ 1.00, 1.25 และ 1.50 phr ต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG10 โดยการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์ม (Cast film extruder) และพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์มต่างๆ ดังนี้ ศึกษาสมบัติเชิงกล ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry และ Thermal gravimetric analysis ศึกษาโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy ศึกษาการซึมผ่านของแก๊สด้วย Gas transmission rate ศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ศึกษาลักษณะสัญญาณวิทยาของฟิล์มผสม และศึกษาพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์ผสมด้วย Rotation rheometer

ตอนที่ 3.1 ศึกษาการเตรียม PLA-g-MA ด้วยวิธีการ Reactive blending ด้วย Twin-screw extrusion และศึกษาปริมาณการกราฟต์ด้วยวิธี Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (NMR) และเสถียรภาพทางความร้อนด้วย Thermal gravimetric analysis

ตอนที่ 3.2 ศึกษาผลของการเติมสาร PLA-g-MA ที่ปริมาณแตกต่างกัน ได้แก่ 0, 3, 6, 9 และ 12% โดยน้ำหนัก สำหรับทำหน้าที่ในการกักเก็บน้ำมันสกัดจากเมล็ดองุ่น (GSE) ในฟิล์ม PLA/PEG10/ADR1.25 ที่ได้จากตอนที่ 2 แล้วพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์มดังนี้ ศึกษาสมบัติเชิงกล ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry และ Thermal gravimetric analysis ศึกษาโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy ศึกษาการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Gas transmission rate ศึกษาการซึมผ่านของไอน้ำ ศึกษาประสิทธิภาพต่อการต้านเชื้อแบคทีเรียด้วยมาตรฐาน JIS Z 2801 ศึกษาประสิทธิภาพการต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเม็ดในฟิล์มบรรจุภัณฑ์จากภาพถ่าย

ตอนที่ 4 ศึกษาผลของการเติมสารต้านเชื้อแบคทีเรียและต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันชนิด GSE ที่ 1, 2, 3 และ 4 phr ในฟิล์ม PLA/PEG10/ADR1.25 โดยมี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก ที่ได้จากตอนที่ 3 แล้วพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์มดังนี้ ศึกษาสมบัติเชิงกล ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry และ Thermal gravimetric analysis ศึกษาโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy ศึกษาการซึมผ่านของแก๊สด้วย Gas transmission rate ศึกษาการซึมผ่านของไอน้ำ ศึกษาประสิทธิภาพต่อการต้านเชื้อแบคทีเรียด้วยมาตรฐาน JIS Z 2801 ศึกษาประสิทธิภาพการต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเม็ดจากภาพถ่าย

6. วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย

7. นำเสนอผลงานวิจัย

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

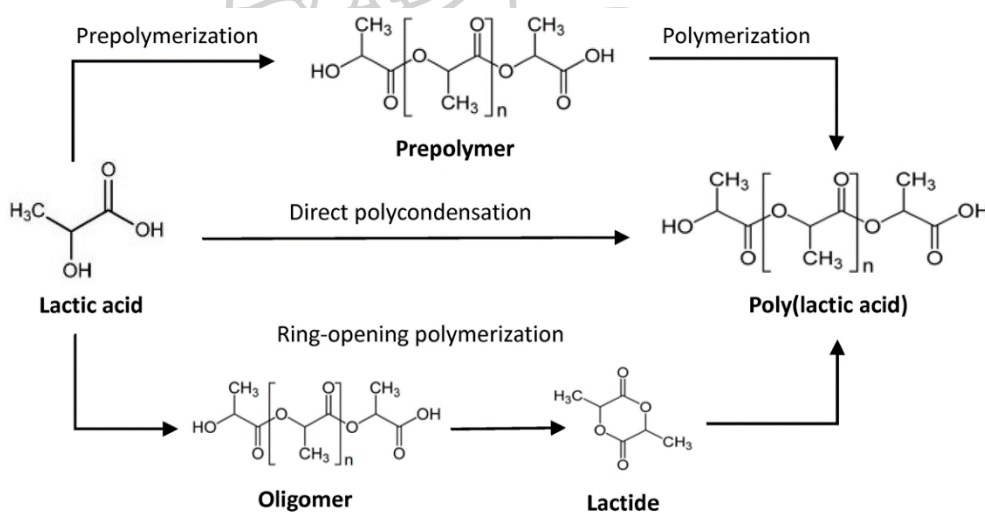
1. สามารถเตรียมฟิล์มผสม PLA/PEG/ADR ที่มีความยืดหยุ่นและความแข็งแรงที่ดี และมีการซึมผ่านของแก๊สที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาเม็ด
2. ฟิล์มผสม PLA/PEG/ADR ที่มีการเติมน้ำมันสกัดจากเมล็ดองุ่นสามารถใช้ในการเก็บรักษาและยืดอายุของเม็ด ได้โดยไม่มีการเปลี่ยนสี กลิ่น รส ได้เป็นระยะเวลาสั้นขึ้นและสามารถใช้ในทางการค้าได้

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พอลิแลคติกแอซิด (PLA)

Poly(lactic acid), (PLA) เป็นพลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ โดยได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติภายหลังจากการใช้งาน โดย PLA สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (Renewable resource) เช่น ผลิตมาจากพืช เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย เป็นต้น โดยการบดหรือโมพีชนั้นให้ละเอียดเป็นแป้งแล้วใช้เอนไซม์ย่อยแป้งให้กลายเป็นน้ำตาลกลูโคส ผ่านกระบวนการหมัก (Fermentation) โดยใช้แบคทีเรีย *Lactobacillus brevis* ได้ผลผลิตเป็นกรดแลคติก (Lactic acid) จากนั้นผ่านกระบวนการทางเคมีดังรูปที่ 2.1 ได้ Lactide มีโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวน แล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) กลั่นในระบบสุญญากาศเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างได้เป็นพอลิเมอร์ [10]



รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด [11]

ชื่อทางเคมี (Chemical Name) : Poly(lactic acid)

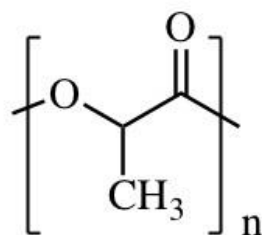
ชื่อพ้อง (Synonyms) : พอลิแลคติก, Polylactide, PLA

หมายเลข CAS (CAS Number) : 124-38-9

สูตรเคมีอย่างง่าย (Chemical Formula) :  $(C_3H_4O_2)_n$

น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight) : ประมาณ 60,000 (ทั้งนี้จำนวน n ประมาณ 30,000)

สูตรโครงสร้างทางเคมี (Chemical Structure) แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างทางเคมีของพอลิแลคติกแอซิด [10]

### 2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

Poly(lactic acid) มีช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting temperature range) 173-178 °C แต่อย่างไรก็ตามทนความร้อนได้ไม่เกิน 110 °C มีปริมาณความเป็นผลึก (Crystallinity) ประมาณ 37% และอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature) อยู่ระหว่าง 60-65 °C มีสมบัติด้านการซึมผ่านของแก๊สและของเหลว (Barrier properties) ดี เข้ากับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต (Biocompatibility) คุณสมบัติพิเศษคือมีความใส ไม่ย่อยสลายในสภาพแวดล้อมทั่วไป แต่สามารถย่อยสลายได้เอง เมื่อนำไปฝังกลบในดิน การขึ้นรูปสามารถทำได้ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกทั่วไป เช่น กระบวนการการอัดรีด (Extrusion) และกระบวนการฉีด (Injection molding) เป็นต้น [10]

### 2.1.2 สมบัติทางกล

PLA มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.25 หากไม่ผ่านการดึงยืด (Unoriented PLA) มีความเปราะมากแต่มีความคงรูป (Stiffness) และความแข็งแรง (Strength) สูง มีค่าประมาณแสดงในตารางที่ 2.1 เมื่อนำไปผ่านการดึงยืด (Oriented) จะมีสมบัติใกล้เคียงกับ Polyethylene terephthalate (PET) แต่ดีกว่า Polystyrene ที่ผ่านการดึงยืด (Oriented PS) โมดูลัสแรงดึงและแรงดัด (Tensile and flexural moduli) ของ PLA มีค่าสูงกว่า Polyethylene ความหนาแน่นสูง

(HDPE), Polypropylene (PP) และ Polystyrene (PS) แต่ความทนต่อแรงกระแทก (Izod impact strength) และการยืดที่จุดแตกหัก (Elongation at break) มีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ [11]

**ตารางที่ 2.1** แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติก [12]

สมบัติ	ค่า	หน่วย
Tensile strength at break	53	MPa
Tensile yield strength	60	MPa
Tensile modulus	3.5	GPa
Tensile elongation	6.0	%
Notched izod impact	16	J/m

### 2.1.3 สมบัติด้านการซึมผ่านของแก๊สและของเหลว (Barrier properties)

สมบัติด้านการซึมผ่านของแก๊สและของเหลวของ PLA มีค่าใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ทั่วไปที่ใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ เช่น PS หรือ PET ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้ CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> และ N<sub>2</sub> ผ่านได้ของ PLA มีค่าน้อยกว่า PS แต่สูงกว่า PET ส่วนการยอมให้น้ำซึมผ่านมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ PLA ยังมีสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของกลิ่นได้ดี โดยพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของสารประกอบอินทรีย์ เช่น เอทิลอะซิเตตและดีไลโมนีน (D-limonene) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับ PET [11]

### 2.1.4 การใช้งานและผลิตภัณฑ์

Poly(lactic acid) สามารถใช้เป็นพลาสติกใส นำมาใช้บรรจุอาหารที่ไม่มีความร้อนสูงมาก ไม่สามารถใช้กับไมโครเวฟได้

### 2.1.5 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์

- ฟิล์มสำหรับหุ้มอาหาร
- ผลิตภัณฑ์บรรจุอาหาร เช่น กล่อง จาน ช้อน มีด ส้อม ตะเกียบ แก้วน้ำ ที่ใช้ครั้งเดียวทิ้ง รวมทั้ง ถูหิ้ว ถูใส่กล่อง เป็นต้น
- เส้นใยและสิ่งทอนำมาใช้ในงานด้านการผลิตเป็นเสื้อผ้าและผ้าเบาะรถยนต์ [10]

## 2.2 พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG)

Poly(ethylene glycol) หรือ PEG เป็นสารเคมีสังเคราะห์และได้รับความนิยมสูง เนื่องจากมีสมบัติที่ดี เช่น มีความชอบน้ำสูง ทำให้สามารถนำไปผสมกับสารอื่นๆ ให้มีความชอบน้ำเพิ่มขึ้นได้ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ต่างๆ ด้วยสารประกอบดังกล่าวได้ เช่น เครื่องสำอาง ครีม โลชัน โดย PEG เองมีหลายชนิดแตกต่างกันตามน้ำหนักโมเลกุล เช่น PEG200, PEG300, PEG400 และ PEG600 ที่น้ำหนักโมเลกุลต่างๆ จะมีสถานะเป็นของเหลวใส [13]

### 2.2.1 ข้อมูลสารเคมีเบื้องต้น

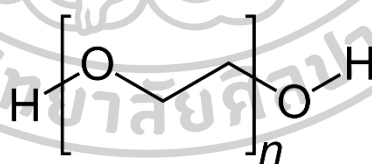
ชื่อเคมี IUPAC 1,2-Ethandiol

ชื่อเคมีทั่วไป Ethylene glycol

ชื่อพ้องอื่นๆ EG; Glycol; 1,2-Dihydroxyethane; Glycol Alcohol; Fridex; Ethane-1,2-diol; Dowtherm 4000; Dowtherm SR 1; Ethylene alcohol; Ethylene dihydrate; Lutrol-9; Macrogol 400 bpc; M.E.G.; Monoethylene glycol; Tescol; Norkool; Ucar 17; DuPont Zonyl FSE Fluorinated Surfactants; DuPont Zonyl FSO Fluorinated Surfactants; Ethylene Glycol

สูตรโมเลกุล  $C_2H_6O_2$

สูตรโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.3



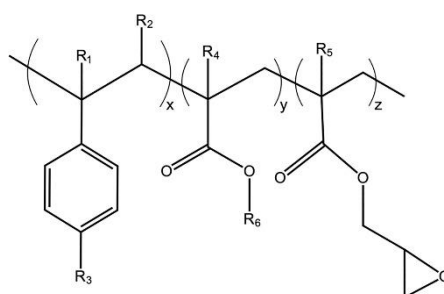
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนไกลคอล [14]

## 2.3 สารขยายสายโซ่ (Chain extender)

สารขยายสายโซ่เป็นสารที่ประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ สามารถเกิดปฏิกิริยากับปลายสายโซ่ของพอลิเมอร์ได้ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงขึ้น และอาจสามารถทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด ก็ได้ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารขยายสายโซ่ชนิด Multifunctional chain extender (Joncryl ADR 4468) ซึ่งเป็นสารที่หมู่ฟังก์ชันหลาย



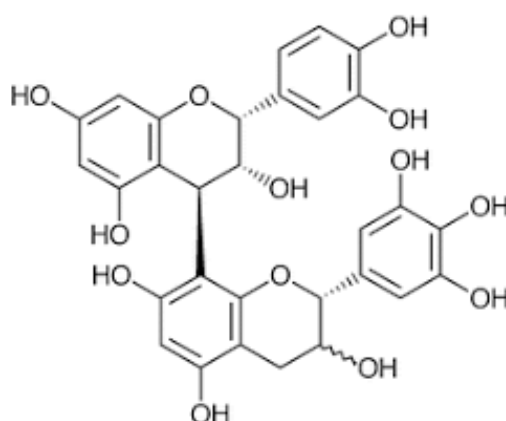
ชนิด และมีหมู่ฟังก์ชันอีพอกไซด์ที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.4 [15]



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ Joncryl ADR 4468 [15]

## 2.4 น้ำมันสกัดจากเมล็ดองุ่น (Grape seed oil)

Grape seed extract (GSE) คือสารสกัดจากเมล็ดองุ่นปกติ ได้จากเมล็ดขององุ่นแดง (*Vitis vinifera*) ซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By product) จากการผลิตน้ำองุ่น (Grape juice) สารสำคัญที่มีประโยชน์ในเมล็ดองุ่นเป็น สารกลุ่ม Phenolic compounds เช่น ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) หรือ พอลิฟีนอล (Polyphenol) คือ Oligomeric proanthocyanidin complexes (OPCs) [16]



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของ Oligomeric proanthocyanidin complexes (OPCs) [16]

OPC เป็นชื่อย่อของ Oligomeric Proanthocyanidin จัดเป็นสารชนิดหนึ่งที่อยู่ในกลุ่มไบโอฟลาโวนอยด์ (Bioflavonoid) เมื่อรับประทานเข้าไปในร่างกายจะเปลี่ยนเป็นสารสีแดงชื่อแอนโทไซยานิดิน

OPC เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ได้จากธรรมชาติ มีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระเหนือกว่า (Antioxidant) อื่นๆ จึงได้รับการขนานนามว่าเป็น Superantioxidant โดยพบว่ามีประสิทธิภาพแรงกว่าวิตามินซี 20 เท่า และแรงกว่าวิตามินอี 50 เท่า นอกจากนี้ OPC เมื่อรับประทานร่วมกับวิตามินซี จะช่วยเสริมฤทธิ์ให้วิตามินคงตัว และออกฤทธิ์ได้ดีขึ้นบางคนจึงเรียก OPC ว่าเป็นวิตามินซีโคแฟกเตอร์ (Vitamin C cofactor)

OPC พบในส่วนผสมของผิวและเมล็ดของผลไม้หลายชนิด คือ องุ่น บลูเบอร์รี่ เชอร์รี่ พลัม รวมทั้งเปลือกสน แต่แหล่งที่สำคัญของ OPC คือเมล็ดองุ่น (Grape seed) ความจริงในเนื้อองุ่นทั้ง องุ่นเขียว และองุ่นม่วงก็มีอยู่บ้าง แต่ไม่มากเท่าในเมล็ด ดังนั้นในไวน์แดง ซึ่งได้จากการหมักผลองุ่นพร้อมเมล็ดจึงมี OPC อยู่ไม่น้อย จึงมีผู้แนะนำให้ดื่มไวน์แดงเป็นประจำ เพื่อป้องกันโรคหัวใจ อย่างไรก็ตามผู้ที่คาดหวังจะได้ OPC มาก จากการดื่มไวน์แดงคงจะไม่คุ้มกัน เพราะจะได้รับแอลกอฮอล์เข้าไปไม่น้อย อาจทำให้เป็นโรคตับแข็งก่อนก็เป็นได้

ในเมล็ดองุ่นแม้จะเป็นแหล่งที่ดีของ OPC แต่ก็ไม่แนะนำให้รับประทานเมล็ดองุ่น โดยตรง เพราะมีสารชนิดอื่นๆ ซึ่งอาจเป็นอันตรายได้ จึงมีการนำเมล็ดองุ่นมาสกัดได้เป็นสารสกัดจากเมล็ดองุ่น (Grape seed Extract) ซึ่งอุดมด้วยสาร OPC พบว่าในสารสกัดจากเมล็ดองุ่นจะมีปริมาณของ OPC สูงสุดร้อยละ 95 รองลงมาคือเปลือกสนมี OPC ร้อยละ 80-85 นอกจากนี้ OPC จากเมล็ดองุ่นยังมีประสิทธิภาพและความเข้มข้นสูงกว่าที่พบในเปลือกสนด้วย [17]

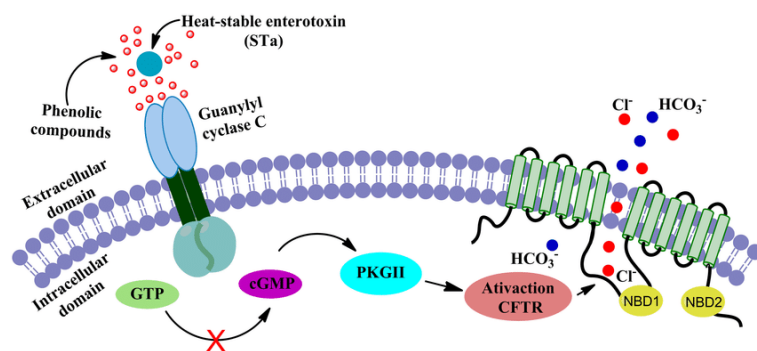
#### 2.4.1 กลไกการต่อต้านเชื้อแบคทีเรียและอนุมูลอิสระของสารพอลิฟีนอล

กลไกสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียคือความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) ที่จะช่วยให้สารเหล่านี้สามารถแตกตัวเข้าสู่ไขมันของผนังเซลล์แบคทีเรียได้ ซึ่งการแทรกซึมเข้าไปของสารเหล่านี้จะทำให้โครงสร้างของเซลล์แบคทีเรียถูกทำลาย และทำให้สารจำพวกนี้แพร่ผ่านเข้าไปได้มากขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ไอออนและเซลล์โมเลกุลของแบคทีเรียหลุดออก แม้ว่าเชื้อแบคทีเรียจะสามารถทนทานต่อการสูญเสียเหล่านี้ได้ แต่อย่างไรก็ตามการสูญเสียไอออนและโมเลกุลเหล่านี้ที่ปริมาณหนึ่งก็จะสามารถทำให้เชื้อแบคทีเรียตายลงได้

สารสกัดต่างๆ เหล่านี้อาจจะมีเป้าหมายเพียงอย่างเดียวหรือมากกว่าก็ได้ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบในโครงสร้างของสารชนิดนั้นๆ โดยกลไกการต้านเชื้อแบคทีเรียนี้สามารถเกิดขึ้นได้ดี เนื่องจากสารประกอบพีนอล สำหรับสารประกอบจำพวกคีโตนจะมีประสิทธิภาพดังกล่าวนี้ต่ำกว่าพีนอล ดังนั้นประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรียของสารแต่ละชนิดก็จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนปริมาณพีนอลเหล่านั้นนั่นเอง



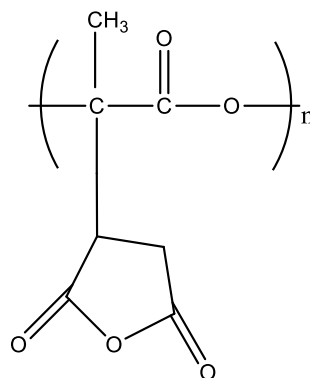
ในส่วนของสมบัติการต่อต้านอนุมูลอิสระของสารต่างๆ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของสารสกัดต่างๆ เช่นเดียวกัน ซึ่งเกิดจากการที่สารประกอบจำพวกฟีนอลิกทำปฏิกิริยาที่พันธะคู่ ซึ่งเป็นเหตุผลว่าเหตุใดในพืชผักจะมีสมบัติการต่อต้านอนุมูลอิสระ และเช่นเดียวกับการต้านเชื้อแบคทีเรีย การต่อต้านอนุมูลอิสระเป็นผลมาจากหมู่ฟีนอลจำพวก ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์และการแตกตัวของเปอร์ออกไซด์ จึงทำให้การทำงานของอนุมูลอิสระของออกซิเจนหยุดลงได้ดังแสดงในรูปที่ 2.6 [18]



รูปที่ 2.6 ภาพจำลองกลไกการต่อต้านเชื้อแบคทีเรียของสารพอลิฟีนอล [19]

## 2.5 สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด Poly(lactic acid)-graft-Maleic anhydride

Poly(lactic acid)-graft-Maleic anhydride หรือ PLA-g-MA แสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.7 เป็นโคพอลิเมอร์ของพอลิแลคติกแอซิดและมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ถูกผลิตขึ้นมาเพื่อใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์และสารต่างๆ ที่มีความชอบน้ำที่แตกต่างกัน โดยพอลิเมอร์ที่มีความไม่ชอบน้ำจะเข้ากันได้กับฝั่งที่เป็น Hydrophobic (PLA) ส่วนสารที่มีความชอบน้ำมากกว่าก็จะเข้ากันได้ดีกับฝั่ง Hydrophilic (MA) จะเห็นว่าสารชนิดนี้จะทำหน้าที่เชื่อมพอลิเมอร์และสารเอาไว้ด้วยกัน ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมหรือพอลิเมอร์คอมพอสิตมีความเข้ากันได้มากขึ้น



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ PLA-g-MA [20]

## 2.6 กระบวนเน่าเสียของเห็ด

โดยปกติแล้วเห็ดเป็นสิ่งมีชีวิตอยู่ในอาณาจักรของเห็ดราหรือฟังไจ มีกลไกของการหายใจและการเผาผลาญพลังงานโดยใช้แก๊สออกซิเจน จากนั้นแก๊สออกซิเจนจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการดังกล่าว และได้ผลผลิตเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยทั่วไปแล้วหลังจากการเก็บเกี่ยวหากเก็บรักษาเห็ดที่อุณหภูมิห้องเห็ดจะอยู่ได้ประมาณ 3 วัน ก่อนเน่าเสีย และอยู่ได้ 8 วันในสภาวะอุณหภูมิและความชื้นต่ำ จะเห็นว่าเห็ดมีอายุหลังเก็บเกี่ยวที่ต่ำมาก เนื่องจากอัตราการหายใจที่สูงมากจึงทำให้เห็ดเน่าเสียเร็ว นอกจากนี้เห็ดไม่มีเปลือกหรือผนังในการป้องกันพื้นผิวจากการสัมผัสกับความชื้นหรือแก๊สต่างๆ รวมทั้งเชื้อแบคทีเรีย ส่งผลให้สิ่งแวดล้อมเหล่านี้สามารถเข้าทำลายเห็ดได้ง่าย เช่น แก๊สออกซิเจนสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวเห็ดได้ ทำให้เห็ดเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาล ซึ่งเป็นสภาพที่ผู้บริโภคไม่ต้องการ ดังนั้นในการเก็บรักษาเห็ดให้มีอายุยาวนาน เห็ดควรอยู่ในสภาวะที่มีปริมาณระหว่างแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม โดยให้มีปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่า เพื่อยับยั้งการหายใจของเห็ดให้ช้าลง แต่ก็ยังคงต้องมีแก๊สออกซิเจนให้เห็ดยังสามารถใช้หายใจได้อย่างเพียงพอ เพื่อป้องกันการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนซึ่งจะส่งผลให้เกิดแก๊สเอทิลีน ทำให้เห็ดมีกลิ่นและรสชาติเปลี่ยนแปลงไป [8]

## 2.7 โรคเน่าสีน้ำตาลของเห็ด (Brown blotch)

อีกหนึ่งปัญหาหลักที่เกี่ยวกับการเน่าเสียของเห็ดคือการเกิดโรค Bacterial Blotch ซึ่งเป็นโรคที่ส่งผลเสียเป็นอย่างมากต่อประสิทธิภาพทางเศรษฐกิจของเห็ดที่มีสีขาว โดยโรคดังกล่าวนี้มีสาเหตุมาจากเชื้อแบคทีเรีย *Pseudomonas tolaasii* ซึ่งจะทำให้เห็ดเปลี่ยนสีกลายเป็นสีน้ำตาลสำหรับเห็ดเศรษฐกิจของไทย เช่น เห็ดนางรมนั้นก็ได้รับปัญหาจากโรคชนิดนี้เป็นอย่างมากเช่นกัน ดังนั้นแนวทางในการยืดอายุคุณภาพของเห็ด ปัจจัยในการป้องกันเชื้อแบคทีเรียชนิด *Pseudomonas tolaasii* จึงเป็นสิ่งสำคัญมากเช่นเดียวกัน [21]

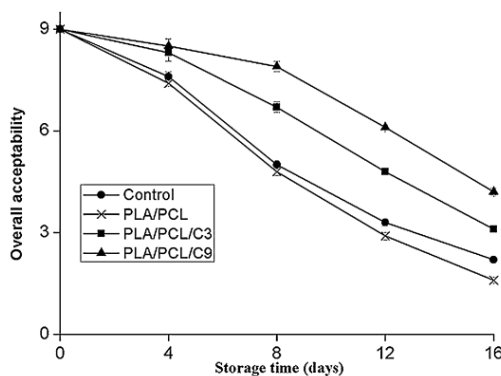
*Pseudomonas tolaasii* เป็นเชื้อแบคทีเรียในตระกูล *Pseudomonas* ซึ่งย้อมสีติดแกรมลบ มีรูปร่างเป็นท่อนดังแสดงในรูปที่ 2.8 เติบโตได้ดีในสภาวะที่มีออกซิเจนและอุณหภูมิต่ำ เชื้อแบคทีเรียตระกูลนี้เป็นสาเหตุหลักของการเน่าเสียของอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับอาหารที่ต้องเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ โดยแบคทีเรียชนิดนี้สามารถสร้างรงควัตถุได้ จึงส่งผลให้สีของอาหารหรือพืชมีสีที่เปลี่ยนแปลงไป เป็นสาเหตุหลักของการเกิดจุดน้ำตาลบนพืชผักผลไม้ และเนื่องจากแบคทีเรียชนิดนี้สามารถย่อยโปรตีนได้ ส่งผลให้ผักผลไม้เกิดการเน่าและเมื่อสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรีย [22]



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของแบคทีเรียชนิด Pseudomonas [23]

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

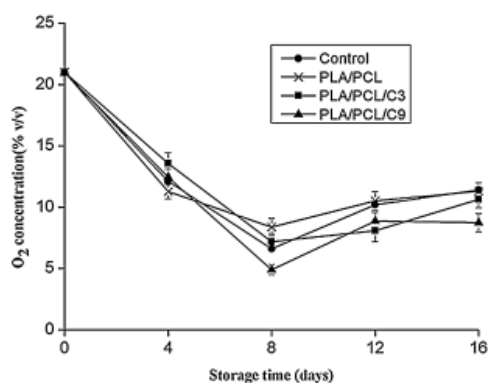
Qin Y. และคณะ [8] กล่าวว่าเห็ดเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีอัตราการหายใจและปริมาณความชื้นที่สูงที่จะส่งผลให้เห็ดมีการสูญเสียน้ำ ถูกทำลายจากเชื้อจุลินทรีย์ และการเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาล ส่งผลให้เห็ดเหล่านี้มีอายุการเก็บรักษาที่สั้น โดยหากเก็บที่อุณหภูมิห้องจะอยู่ได้เพียง 3 วัน และสามารถเก็บได้ประมาณ 8 วัน ในสภาวะที่มีการทำความเย็น โดยมีหลากหลายงานวิจัยที่มีการศึกษาการยืดอายุของเห็ด และพบว่าสภาวะอากาศภายในบรรจุภัณฑ์ที่ประกอบไปด้วยแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำที่ได้จากการหายใจ ส่งผลโดยตรงต่อเห็ด โดยพวกเขา กล่าวว่าบรรจุภัณฑ์สำหรับเห็ดนั้น ควรมีการแพร่ผ่านของแก๊สออกซิเจนเพื่อให้เห็ดใช้ในการหายใจ แต่ในขณะเดียวกันก็สามารถกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากบรรจุภัณฑ์ได้



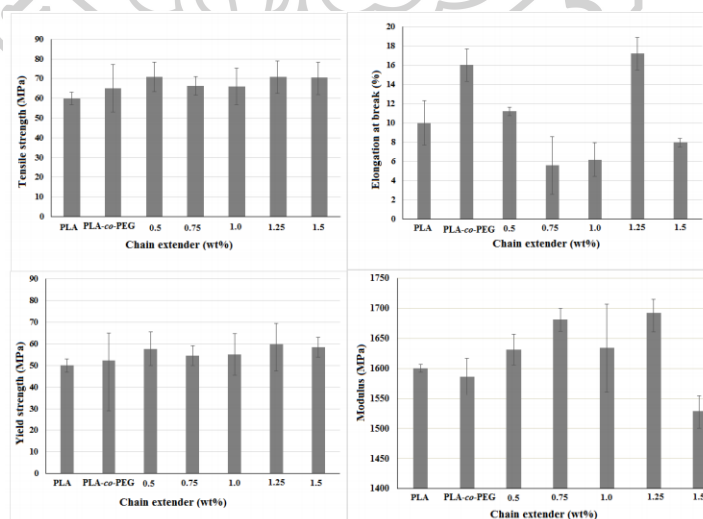
รูปที่ 2.9 แสดงผลของบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ ที่ส่งผลต่อสภาพที่ยอมรับได้ของเห็ดกระดุมที่ถูกเก็บในอุณหภูมิ  $4\pm 1^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 16 วัน [8]

อีกทั้งในงานวิจัยของพวกเขายังได้ศึกษาการเติม Cinnamaldehyde ในฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดเพื่อใช้เก็บรักษาเห็ด โดยมีการผสม PLA กับพอลิคาโปแลคโตน (PCL) เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นต่อฟิล์ม PLA ซึ่งจากงานวิจัยของพวกเขาพบว่า การเติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียช่วยรักษาสภาพเห็ดให้ผู้บริโภคสามารถยอมรับได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่มีการเติม ดังแสดงในรูปที่ 2.9 แต่อย่างไรก็ตามคุณภาพของเห็ดก็ยังคงลดลงตามเวลา

นอกจากนี้ จากผลการทดลองในรูปที่ 2.10 ฟิล์มผสมของ PLA/PCL/Cinnamaldehyde ยังช่วยกักเก็บแก๊สออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ได้ดีขึ้น และสามารถกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



รูปที่ 2.10 แสดงผลของบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกันต่อความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนในการเก็บรักษาเห็ดกระดุมที่อุณหภูมิ  $4\pm 1^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 16 วัน [8]



รูปที่ 2.11 แสดงสมบัติเชิงกลของ Neat PLA และ PLA-co-PEG โคพอลิเมอร์ ที่ปริมาณสารขยายสายโซ่ที่แตกต่างกัน [24]

Dahman Y. และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาศักยภาพการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ของ PLA และ PEG (PLA-co-PEG) ด้วยวิธีการ Direct melt polycondensation ที่ปราศจากตัวทำละลาย โดยที่มีการศึกษาศักยภาพการเติมสารขยายสายโซ่ชนิด ADR-4380 ซึ่งทำการศึกษาที่สัดส่วนของ PEG เป็น 20% โดยน้ำหนัก และศึกษาศักยภาพการเติม ADR ที่ปริมาณที่แตกต่างกันที่ 0.5, 0.75, 1.0, 1.25 และ 1.5% โดยน้ำหนัก ซึ่งผู้วิจัยพบว่าการเติม ADR ที่ 1.25% ส่งผลให้ค่า Tensile strength ของโคพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเป็น 70 MPa ในขณะที่ PLA มี Tensile strength อยู่ที่ 60 MPa ยิ่งไปกว่านั้นค่า Elongation at break ยังเพิ่มขึ้น 17% เมื่อเติม ADR 1.25% อีกด้วย ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.11 จากผลดังกล่าว และผลการทดสอบอื่นๆ ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยสรุปได้ว่าสารขยายสายโซ่ชนิด ADR สามารถประพฤติตัวเป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้สำหรับ PLA และ PEG ได้ โดยปริมาณที่เหมาะสมที่สุดคือ 1.25%

Marco A. และคณะ [3] ทำการศึกษาศักยภาพการต้านทานการซึมผ่านของแก๊สของ PLA เนื่องจากผลของความเป็นผลึก พบว่าความเป็นผลึกของ PLA นั้นส่งผลต่อสมบัติการต้านทานการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนมากกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงถึงการเลือกผ่านของแก๊สใน PLA ต่อแก๊สทั้งสองชนิดที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจเกิดจากขนาดโมเลกุลที่แตกต่างกันของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.2 ซึ่งอธิบายถึงการเติมอนุภาคซิลิกาในระดับนาโนใน PLA (PLA1, PLA4, PLA7) และการเติมเคลือบใน PLA (PLA8, PLA11, PLA14) นอกจากนี้ผู้วิจัยยังทำการเปรียบเทียบ PLA ที่ได้จากการสังเคราะห์เองและ PLA ที่เป็นเกรดทางการค้าว่ามีผลต่อการเลือกผ่านของแก๊สอย่างไร เขาพบว่าอนุภาคของซิลิกาส่งผลให้เส้นทางการแพร่ผ่านของแก๊ส CO<sub>2</sub> เกิดขึ้นได้มากกว่าแก๊ส O<sub>2</sub> ส่งผลให้ฟิล์ม PLA ที่เติมอนุภาคซิลิกามีการเลือกผ่านของแก๊ส CO<sub>2</sub> สูงขึ้นอย่างมาก

Park B. และคณะ [25] ศึกษาพอลิเมอร์ผสมของ PLA กับพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) โดยมีการปรับปรุง PEG ด้วยการเติมสารขยายสายโซ่ชนิด 4,4' methylenebis(phenylisocyanate) (MDI) เนื่องจาก PEG สามารถแยกเฟสออกจากพอลิเมอร์หลักได้เมื่อเวลาผ่านไป โดยพบว่าการเติม PEG ใน PLA ช่วยทำให้ %Elongation at break เพิ่มขึ้นถึง 405% และยังพบว่าค่า Tensile strength ลดลงอย่างมาก จากผลดังกล่าวนี้พวกเขาถือว่า PEG สามารถประพฤติตัวเป็นพลาสติกไฮเซออร์สำหรับ PLA ได้ แต่ในความเป็นจริงแล้วการเติม PEG ที่น้ำหนักโมเลกุลสูงจะช่วยให้มีส่วนที่มีความเหนียวได้มากขึ้น ในขณะที่เดียวกันก็ไม่ทำให้ความแข็งแรงของฟิล์ม PLA ลดลง พวกเขาจึง

ทำการศึกษาค่าการเติม PEG ที่มีการปรับปรุงน้ำหนักโมเลกุลให้สูงขึ้นด้วยการเติมสารขยายสายโซ่ใน ปริมาณที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.2 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของแก๊สและความเลือกผ่านของแก๊สในฟิล์มคอมพอสิต [3]

Sample	KP <sub>O2</sub> (cm <sup>3</sup> ·mm·m <sup>-2</sup> ·24h <sup>-1</sup> ·bar <sup>-1</sup> )	KP <sub>CO2</sub> (cm <sup>3</sup> ·mm·m <sup>-2</sup> ·24h <sup>-1</sup> ·bar <sup>-1</sup> )	Selectivity CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>
4032D	18.53 ± 0.34	93.35 ± 0.55	5.0
PLA0	10.52 ± 0.67	82.10 ± 0.28	7.8
PLA1	6.32 ± 0.45	73.78 ± 0.36	11.7
PLA4	4.72 ± 0.26	59.57 ± 0.30	12.6
PLA7	2.03 ± 0.19	43.35 ± 0.22	21.0
PLA8	9.12 ± 0.24	41.35 ± 0.24	4.5
PLA11	8.81 ± 0.36	53.59 ± 0.46	6.1
PLA14	8.63 ± 0.37	52.98 ± 0.37	6.1

จากการทดสอบพวกเขาพบว่าฟิล์ม PLA/CE-PEG-5 มีค่าโมดูลัสและ Tensile strength เป็น 880 MPa และ 38 MPa ตามลำดับ ในขณะที่ฟิล์ม PLA บริสุทธิ์มี Tensile strength เป็น 52 MPa จะเห็นว่ามีค่าต่างกันไม่สูงมากนัก เมื่อเทียบกับการเติม PEG ที่ไม่มีการเติมสารขยายสายโซ่ และพบว่าการขาดแบบเหนียว (Ductile) หยุ่นที่มีค่า %Elongation at break สูงถึง 540% ใน PLA/CE-PEG-5 มีการลดลงของค่าโมดูลัสและ Tensile strength เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังแสดงใน ตารางที่ 2.3 พวกเขาจึงสามารถสรุปได้ว่าการเติม CE-PEG ใน PLA ส่งผลให้ฟิล์มผสมที่ได้มีความ ยืดหยุ่นที่สูงมากเป็น 40 เท่า และ 20 เท่า ของ PLA บริสุทธิ์และ PLA-PEG อีกทั้งยังช่วยรักษาความ แข็งแรงของฟิล์มเอาไว้ได้อีกด้วย

Heydari-Majd M. และคณะ [26] ศึกษาการเติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและปฏิกิริยา ออกซิเดชันลงในฟิล์ม PLA เพื่อใช้สำหรับการเก็บรักษาพลาสติก โดยใช้ ZnO และน้ำมันหอมระเหย ชนิด ZEO และ MEO จากการทดสอบประสิทธิภาพในการเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มคอมพอสิตได้ผล การทดสอบดังตารางที่ 2.4 ซึ่งทำการทดสอบกับแบคทีเรีย 5 ชนิด ได้แก่ *Escherichia coli*,



*Salmonella enterica*, *Pseudo-monas aeruginosa*, *Bacillus cereus* และ *Staphylococcus aureus* โดยใช้วิธีการซีมผ่าน

ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม PLA/CE-PEG (80/20) [25]

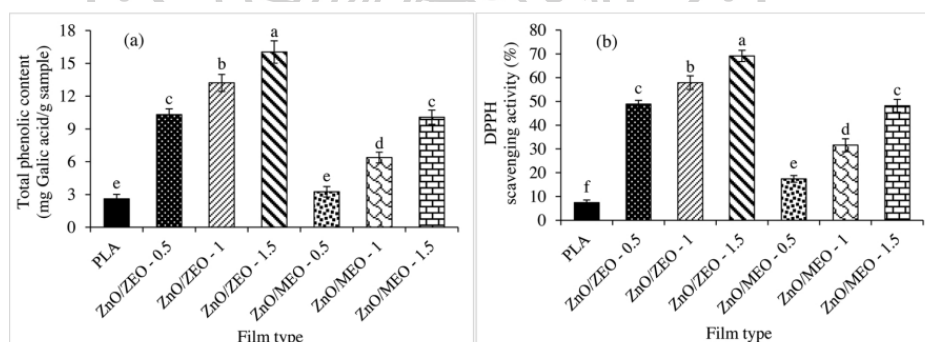
	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PLA	1020	52	2
PLA/PEG	420	16	390
PLA/CE-PEG-1	520	18	470
PLA/CE-PEG-3	830	31	505
PLA/CE-PEG-5	880	38	540

จากการทดสอบพวกเขาพบว่า PLA ที่เติม ZnO เพียงอย่างเดียวไม่แสดงการต้านเชื้อแบคทีเรีย และเมื่อทำการผสมน้ำมันหอมระเหยในฟิล์ม PLA พวกเขาพบว่า การเติมน้ำมันหอมระเหยชนิด MEO ที่ 0.5% โดยน้ำหนัก ไม่ได้แสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียอย่างชัดเจนนัก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 1.5% โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมลบได้ดี ในขณะที่แบคทีเรียจำพวกแกรมบวกสามารถต่อต้านต่อน้ำมันหอมระเหยชนิด MEO ได้อยู่ ซึ่งเกิดการที่แบคทีเรียแกรมบวกประกอบไปด้วยผนังเซลล์ภายนอกที่ป้องกันการแพร่ของน้ำมันหอมระเหยเข้าสู่เซลล์ของตัวเอง และพบว่าการเติมน้ำมันหอมระเหยชนิด ZEO ช่วยยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *Bacillus cereus* และ *Staphylococcus aureus* ได้ดีกว่าแบคทีเรียชนิด *Escherichia coli* ซึ่งผลการทดสอบที่แตกต่างกันนี้ เป็นผลมาจากองค์ประกอบจำพวกกรดฟีนอลิกที่แตกต่างกัน จึงทำให้มีกลไกและประสิทธิภาพในการต้านเชื้อที่แตกต่างกัน และพวกเขายังได้ทดสอบประสิทธิภาพในการป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยการวัดปริมาณกรดฟีนอลิก เพื่อบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชัน แสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งพบว่าการเติม MEO และ ZEO ส่งผลให้ปริมาณกรดฟีนอลิกเพิ่มสูงขึ้น และสูงที่สุดที่ปริมาณ ZEO 1.5% โดยน้ำหนัก ซึ่งสูงกว่าการใช้ MEO เนื่องจากในน้ำมันหอมระเหยชนิด ZEO มีองค์ประกอบจำพวกฟีนอลิกและเทอพินอลที่สูงกว่า MEO ในขณะที่องค์ประกอบของ MEO มีปริมาณเป็นจำพวกคีโตนเป็นส่วนใหญ่

ตารางที่ 2.4 แสดงประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียของฟิล์ม PLA/ZnO/ZEO และ PLA/ZnO/MEO ที่มีปริมาณของน้ำมันหอมระเหยที่แตกต่างกัน [26]

Film	Inhibition area (mm <sup>2</sup> )			
	E. coli	P. aeruginosa	B. cereus	S. aureus
PLA	ND <sup>e</sup>	ND <sup>d</sup>	ND <sup>g</sup>	ND <sup>g</sup>
PLA/ZnO	ND <sup>e</sup>	ND <sup>d</sup>	ND <sup>g</sup>	ND <sup>g</sup>
PLA/ZnO/ZEO-0.5	28.45 ± 3.95 <sup>d</sup>	ND <sup>d</sup>	50.46 ± 4.58 <sup>e</sup>	94.93 ± 4.70 <sup>e</sup>
PLA/ZnO/ZEO-1	176.54±11.56 <sup>b</sup>	28.25 ± 3.35 <sup>e</sup>	283.73 ± 5.66 <sup>e</sup>	593.33± 21.79 <sup>b</sup>
PLA/ZnO/ZEO-1.5	200.67±18.01 <sup>a</sup>	78.33± 13.57 <sup>a</sup>	515.33± 17.62 <sup>a</sup>	691.00 ± 13.0 <sup>a</sup>
PLA/ZnO/MEO-0.5	ND <sup>e</sup>	ND <sup>d</sup>	23 ± 2.00 <sup>f</sup>	50.41 ± 4.50 <sup>f</sup>
PLA/ZnO/MEO-1	31.08 ± 4.50 <sup>d</sup>	27.73 ± 2.61 <sup>e</sup>	78.47 ± 1.45 <sup>d</sup>	386.41 ± 5.64 <sup>d</sup>
PLA/ZnO/MEO-1.5	113.28± 5.10 <sup>d</sup>	63.56 ± 3.65 <sup>b</sup>	314.33 ± 10.7 <sup>b</sup>	513.33 ± 2.23 <sup>c</sup>

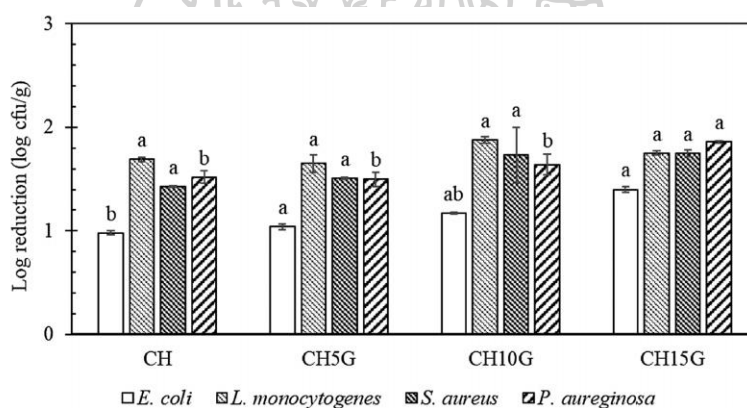
Note: ND = not detected; Values for zone of inhibition are presented as mean ± standard deviation of three independent measurement; Different letters in the same column indicate significant differences (p < 0.05).



รูปที่ 2.12 แสดงปริมาณฟีนอลทั้งหมด (a) และประสิทธิภาพในสกัดกั้น DPPH (b) ของฟิล์ม PLA/ZnO ที่มีปริมาณของ MEO และ ZEO ที่แตกต่างกัน [26]

Sogut E. และคณะ [9] ศึกษาการผสมสารสกัดจากเมล็ดตองุ่นลงในโคโตซาน เพื่อศึกษาฟิล์มผสมของโคโตซานกับสารสกัดจากเมล็ดตองุ่น ที่มีปริมาณแตกต่างกันที่ 5, 10 และ 15% โดยน้ำหนัก

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในอกไก่ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาอกไก่ แล้วพบว่า การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียต่อเชื้อแบคทีเรียที่แตกต่างกัน 4 ชนิด ดังนี้ *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus* และ *Pseudomonas aeruginosa* พบว่า ผลการศึกษาเป็นไปดังรูปที่ 2.13 โดยจะเห็นว่าการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย มีการลดลงที่สูงขึ้นที่ปริมาณของสารสกัดเมล็ดองุ่นที่ 10% โดยน้ำหนัก โดยที่ทุกๆ สัดส่วนของการเติมสารสกัดเมล็ดองุ่นส่งผลให้การลดลงของเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้นทั้งสิ้น เมื่อเทียบกับฟิล์มไคโตซานที่ไม่เติมสารสกัดจากเมล็ดองุ่น ซึ่งเป็นเหตุผลจากสารประกอบจำพวกฟีนอลิก ที่มีผลต่อทั้งการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยจากผลการทดลองในรูปที่ 2.13 จะเห็นว่าฟิล์มผสมของไคโตซานกับเมล็ดองุ่นสามารถต่อต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*) ได้ดีกว่าแกรมลบ (*Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*)



รูปที่ 2.13 แสดงกราฟฟลอการิทึมของการลดลงของเชื้อแบคทีเรียชนิดต่างๆ ในฟิล์มผสมของไคโตซานและสารสกัดเมล็ดองุ่น [9]

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

##### 3.1.1. วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- Hot plate
- เครื่องชั่งสาร
- ปีกเกอร์
- กระจกบอทดวง
- หลอดหยด (Droplet)
- แท่งแก้วคนสาร (Stirring rod)
- Glass plate
- ช้อนตักสาร (Spatula)
- Magnetic stirrer
- ที่คีบ (Forcep)
- กล้องเก็บสาร Super lock
- Micrometer
- ตู้อบ (Hot air oven)
- ตู้อบสูญญากาศ
- โมลโลหะรูปวงกลม
- โถดูดความชื้น (Desiccator)
- แก้วเล็ก
- เครื่องซีลปากถุง
- กล่องสำหรับผสมสาร
- กรรไกร คัตเตอร์ มีด แผ่นรองตัด
- เทปใส พาราฟินฟิล์ม
- อลูมิเนียมฟอยล์ ฟิล์มสำหรับ wrap อาหาร

- ถุงมือผ้า เกียง

### 3.1.2. สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- เม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด Poly(lactic) acid (PLA)
  - ผู้ผลิต NatureWorks
  - เกรด Ingeo 2003D
  - อัตราการไหลที่ 210°C 6 กรัม/10 นาที
  - อุณหภูมิในการหลอมเหลว 145-160°C
- พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) น้ำหนักโมเลกุล 8,000 Da
  - ผู้ผลิต SIGMA ALDRICH
  - น้ำหนักโมเลกุล 8,000 Da
  - ลักษณะ ผง
  - อุณหภูมิในการหลอมเหลว 50-60°C
- สารขยายสายโซ่ชนิด Multifunctional chain extender (Joncryl ADR)
  - ผู้ผลิต BASF
  - เกรด Joncryl ADR-4468
  - ลักษณะ เกล็ด
  - Epoxy equivalent weight 310 กรัม/โมล
  - น้ำหนักโมเลกุล 7250
- น้ำมันสกัดจากเมล็ดองุ่น (Grape seed extract, GSE)
  - ผู้ผลิต Kingvish Kompany
  - ชื่อทางพฤกษศาสตร์ Vitis Vinifera
  - ลักษณะ ของเหลวสีน้ำตาลเข้ม
  - การละลายน้ำ สามารถละลายน้ำได้
- Maleic anhydride
  - ผู้ผลิต MERCK
  - สูตรโมเลกุล C<sub>4</sub>H<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
  - น้ำหนักโมเลกุล 98.06

- |                          |                   |
|--------------------------|-------------------|
| ลักษณะ                   | ผง                |
| — Dicumyl peroxide (DCP) |                   |
| ผู้ผลิต                  | SIGMA ALDRICH     |
| สูตรโมเลกุล              | $C_{18}H_{22}O_2$ |
| น้ำหนักโมเลกุล           | 270.38            |
| — Dichloromethane (DCM)  |                   |
| ผู้ผลิต                  | RCI Labscan       |
| สูตรโมเลกุล              | $CH_2Cl_2$        |
| — แอลกอฮอล์เจือจาง       |                   |

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ดำเนินการวิจัย

- 3.2.1. เครื่องอัดรีดพลาสติกแบบเกลียวทวนอนคู่ (Twin-screw extruder) รุ่น SHJ-25 จากบริษัท Yongteng ประเทศจีน โดนสกรูมีความยาวอยู่ที่ 360 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร และมีค่า L/D เท่ากับ 144
- 3.2.2. เครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์ม (Cast film extruder) รุ่น HAAKE PolyLab OS จากบริษัท Thermo scientific โดยสกรูมีความยาวอยู่ที่ 62.5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร และมีค่า L/D เท่ากับ 25
- 3.2.3. เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeter, DSC) จากบริษัท Mettler-Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ รุ่น DSC1
- 3.2.4. เครื่องวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal Gravimetric Analyzer, TGA) ยี่ห้อ Perkin-Elmer
- 3.2.5. เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) ชื่อทางการค้า Instron โมเดล 5969 บริษัท Instron Engineering Corporation จากประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.6. เครื่องพิสูจน์เอกลักษณะ (Fourier Transform Spectrophotometer) รุ่น VERTEX70 จากบริษัท Bruker
- 3.2.7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ยี่ห้อ Tescan รุ่น Mira 3 จากบริษัท Czech Republic ประเทศมาเลเซีย



3.2.8. เครื่องทดสอบสมบัติการซึมผ่านของแก๊ส (Gas Permeability Tester) รุ่น GDP-C-Gas Permeability Tester จากบริษัท Brugger feinmechanik จำกัด ประเทศเยอรมัน

3.2.9. เครื่องทดสอบสมบัติการไหล (Rotational rheometer) รุ่น ARES-G2 ยี่ห้อ TA Instruments

### 3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.3.1. การเตรียมฟิล์มผสมของ PLA/PEG

##### 3.3.1.1. เตรียม Masterbatch ฟิล์มด้วยวิธีการ Solution casting

1. อบ PLA และ PEG ในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50°C และ 45°C ตามลำดับ
2. ละลาย PLA และ PEG เข้าด้วยกัน โดยมี Dichloromethane เป็นตัวทำละลาย โดยใช้ปริมาณของ PLA:PEG เป็น 1:1 ด้วยปริมาณ PEG ทั้งหมดที่ต้องใช้สำหรับแต่ละสัดส่วนตามตารางที่ 1.1 โดยละลาย PLA ในตัวทำละลายในอัตราส่วนโดยมวลต่อปริมาตรของ PLA:DCM เป็น 1:10 ที่อุณหภูมิห้อง แล้วเติม PEG ในสารละลาย PLA โดยไม่ต้องเพิ่มตัวทำละลาย ปล่อยให้ละลายเข้ากันที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
3. เทสารละลายที่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันเรียบร้อยแล้วลงในเพลทแก้ว แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวทำละลายระเหยออก และได้เป็นฟิล์ม Masterbatch
4. ตัดฟิล์ม Masterbatch เป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดใกล้เคียงกับเม็ดพลาสติก PLA แล้วนำไปอบไล่ตัวทำละลายและความชื้นอีกครั้งในตู้อบสุญญากาศที่ 40°C เป็นเวลา 9 ชั่วโมง

3.3.1.2. ผสมเม็ดพลาสติก PLA กับฟิล์ม Masterbatch เพื่อให้ได้อัตราส่วนตามตารางที่ 1.1 แล้วผสมเข้าด้วยกันด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) ที่อุณหภูมิทั้ง 8 โซนจากรวยป้อนถึงหัวตายนี้ เป็น 100, 130, 140, 150, 160, 165, 165, 150°C ตามลำดับ ด้วยความเร็วรอบของสกรู 90 rpm โดยหล่อเย็นด้วยน้ำ

3.3.1.3. ตัดเส้น Extrudate ที่ได้ด้วยเครื่องตัดเม็ด แล้วนำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่ 40°C เป็นเวลา 9 ชั่วโมง

3.3.1.4. ขึ้นรูปฟิล์มผสม PLA/PEG ทั้งหมด ด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์ม (Cast film extruder) ที่อุณหภูมิ 150, 155, 165, 150°C ด้วยความเร็วรอบสกรู 50 rpm, อัตราเร็ว ลูกกลิ้งหล่อเย็น (Chill roll) 220 rpm และอุณหภูมิหล่อเย็นเป็น 30°C จะได้ฟิล์มที่ ความหนาประมาณ 70 ไมโครเมตร

### 3.3.2. นำฟิล์มที่ได้ไปพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์มผสมได้แก่

#### 3.3.2.1. ศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม PLA/PEG

3.3.2.1.1. การทดสอบด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนสถานะที่อุณหภูมิ (Glass transition temperature ( $T_g$ ) และอุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting temperature ( $T_m$ )) เพื่อวิเคราะห์ความเป็นผลึก โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ -50°C - 200°C ใน 7 ขั้นตอน ด้วยอัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิ 10°C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และคำนวณปริมาณผลึกที่การหลอมเหลวในครั้งที่ 2 (Second heating) ตามสมการที่ 3.1

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

โดย  $\Delta H_m$  คือเอนทัลปีของการหลอมผลึก PLA 100% มีค่าเป็น 93.7 J/g และ

$\phi$  คือสัดส่วนโดยมวลของ PLA ในพอลิเมอร์ผสม

3.3.2.1.2. การทดสอบด้วยเครื่อง Thermal Gravimetric Analyzer (TGA) เพื่อศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่อุณหภูมิ 50-600°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10°C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนและพิจารณาอุณหภูมิในการสลายตัว ( $T_d$ ) และอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัว ( $T_{onset}$ ) ของพอลิเมอร์ผสม

3.3.2.2. ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม PLA/PEG ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ภายใต้มาตรฐาน ASTM D-882 โดยตัดชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $1 \times 7$  นิ้ว<sup>2</sup> ที่มีขนาดของ Gauge length เป็น 5 นิ้ว แล้วทำการทดสอบด้วยอัตราการดึง ยืด 12.5 มิลลิเมตร/นาที ด้วยขนาดของ Load cell เป็น 5 กิโลนิวตัน

3.3.2.3. ศึกษาโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มผสมด้วยเครื่อง Fourier Transform Spectrophotometer ด้วยโหมด ATR-FTIR ในช่วงความยาวคลื่น  $400-4000\text{ cm}^{-1}$  จำนวนสแกน 32 ครั้ง ที่ Resolution  $4\text{ cm}^{-1}$

3.3.2.4. ศึกษาอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มผสม PLA/PEG ด้วย Gas transmission rate (GTR) โดยดูดอากาศออกในกระบวนการ Evacuation เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการทดสอบเป็น 2 ชั่วโมง

$$OP = GTR \times l \quad (\text{สมการที่ 3.2})$$

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

GTR คือ อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของแก๊ส (Gas Permeability Tester) ( $\text{cm}^3/\text{m}^2.\text{day.bar}$ )

l คือ ความหนาของฟิล์มตัวอย่าง (mm)

$$CP = GTR \times l \quad (\text{สมการที่ 3.3})$$

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

GTR คือ อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของแก๊ส (Gas Permeability Tester) ( $\text{cm}^3/\text{m}^2.\text{day.bar}$ )

l คือ ความหนาของฟิล์มตัวอย่าง (mm)

3.3.2.5. ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) โดยแช่ชิ้นงานฟิล์มในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 15 นาที แล้วทำการหักชิ้นงาน แล้วเคลือบรอบแตกของชิ้นงานด้วยทอง นำไปทำการทดสอบที่ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลวัตต์

3.3.2.6. ศึกษาพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง Rotational rheometer โดยนำพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG ไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานรูวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm หนาประมาณ 1.5-2 mm แล้วนำไปทำการทดสอบที่อุณหภูมิ  $180^\circ\text{C}$  เริ่มต้นการทดสอบที่โหมด Strain sweep ที่ค่า Strain คงที่ที่ 1% เพื่อให้ได้ช่วงที่พอลิเมอร์ประพฤติตัวแบบ Viscoelastic แล้วนำช่วงที่ได้ไปทดสอบในโหมด Frequency sweep ที่ช่วงความถี่ 1-1000 rad/s เพื่อให้ได้ค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity), มอดูลัสสะสม (Storage modulus) และมอดูลัสสูญเสีย (Loss modulus)

3.3.2.7. ศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR) ด้วยมาตรฐาน ASTM F1249-90 ภายใต้อุณหภูมิ 100% ด้วยเทคนิค Cup method แบบ Desiccant โดยใช้สารละลายอิ่มตัวของ NaCl ปริมาณ 500 มิลลิลิตร เพื่อให้ได้ความชื้นสัมพัทธ์ในเดซิเคเตอร์ 75% และเตรียมชิ้นงานโดยปิดปากแก้วด้วยฟิล์มที่เตรียมได้ โดยที่ด้านในแก้วบรรจุด้วยซิลิกาเจล และบันทึกน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปทุกๆ 1 ชั่วโมง ใน 24 ชั่วโมงแรก และทุกๆ 24 ชั่วโมง หลังจากทดสอบไปเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยค่า WVTR ได้จากการคำนวณดังสมการที่ 3.4

$$WVTR = \frac{\text{slope}}{A} \quad (\text{สมการที่ 3.4})$$

โดย WVTR คือ อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ  
 slope คือ ความชันของกราฟเส้นตรงของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของแก้วที่บรรจุซิลิกาเจลและปิดปากด้วยฟิล์มกับเวลา  
 A คือพื้นที่หน้าตัดของปากแก้วที่ใช้ทดลอง

### 3.3.3. การเตรียมฟิล์มผสมของ PLA/PEG10/ADR

#### 3.3.3.1. เตรียม Masterbatch ฟิล์มด้วยวิธีการ Solution casting

1. อบ PLA และ PEG ในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50°C และ 45°C ตามลำดับ
2. ละลาย PLA, PEG และ ADR เข้าด้วยกัน โดยมี Dichloromethane เป็นตัวทำละลาย โดยละลาย PLA ในตัวทำละลายด้วยอัตราส่วนโดยมวลต่อปริมาตรของ PLA:DCM เป็น 1:10 ที่อุณหภูมิห้อง แล้วเติม PEG และ ADR ด้วยปริมาณทั้งหมดที่ต้องใช้สำหรับแต่ละสัดส่วนตามตารางที่ 1.1 ในสารละลาย PLA โดยไม่ต้องเพิ่มตัวทำละลาย ปล่อยให้สารทั้งหมดละลายเข้ากันดีที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
3. เทสารละลายที่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันเรียบร้อยแล้วลงในเพลทแก้ว แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวทำละลายระเหยออก และได้เป็นฟิล์ม Masterbatch
4. ตัดฟิล์ม Masterbatch เป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดใกล้เคียงกับเม็ดพลาสติก PLA แล้วนำไปอบไล่ตัวทำละลายและความชื้นอีกครั้งในตู้อบสูญญากาศที่ 40°C เป็นเวลา 9 ชั่วโมง

3.3.3.2. ผสมเม็ดพลาสติก PLA กับฟิล์ม Masterbatch เพื่อให้ได้อัตราส่วนตามตารางที่ 1.1 แล้วผสมเข้าด้วยกันด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนคู่ (Twin screw extruder) ที่อุณหภูมิทั้ง 8 โซนจากกรวยป้อนถึงหัวตายนี้ เป็น 100, 130, 140, 150, 160, 165, 165, 150°C ตามลำดับ ด้วยความเร็วรอบของสกรู 90 rpm โดยหล่อเย็นด้วยน้ำ

3.2.3.3. ตัดเส้น Extrudate ที่ได้ด้วยเครื่องตัดเม็ด แล้วนำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่ 40°C เป็นเวลา 9 ชั่วโมง

3.3.3.4. ขึ้นรูปฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR ทั้งหมด ด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์ม (Cast film extruder) ที่อุณหภูมิ 150, 155, 165, 150°C ด้วยความเร็วรอบสกรู 50 rpm, อัตราเร็วลูกกลิ้งหล่อเย็น (Chill roll) 220 rpm และอุณหภูมิหล่อเย็นเป็น 30°C จะได้ฟิล์มที่ความหนาประมาณ 70 ไมโครเมตร

**3.3.4. นำฟิล์มที่ได้ไปพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์มผสมได้แก่** สมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR ดังหัวข้อ 3.3.2.1, สมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR ดังหัวข้อ 3.3.2.2, ศึกษาโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มผสมดังหัวข้อ 3.3.2.3, ศึกษาอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มผสม PLA/PEG/ADR ดังหัวข้อ 3.3.2.4, ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PLA/PEG10/ADR ดังหัวข้อ 3.3.2.5, ศึกษาพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG10/ADR ดังหัวข้อ 3.3.2.6 และศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR) ของฟิล์ม PLA/PEG10/ADR ดังหัวข้อ 3.3.2.7

**3.3.5. การเตรียมฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 และ PLA-g-MA ที่ปริมาณแตกต่างกัน**

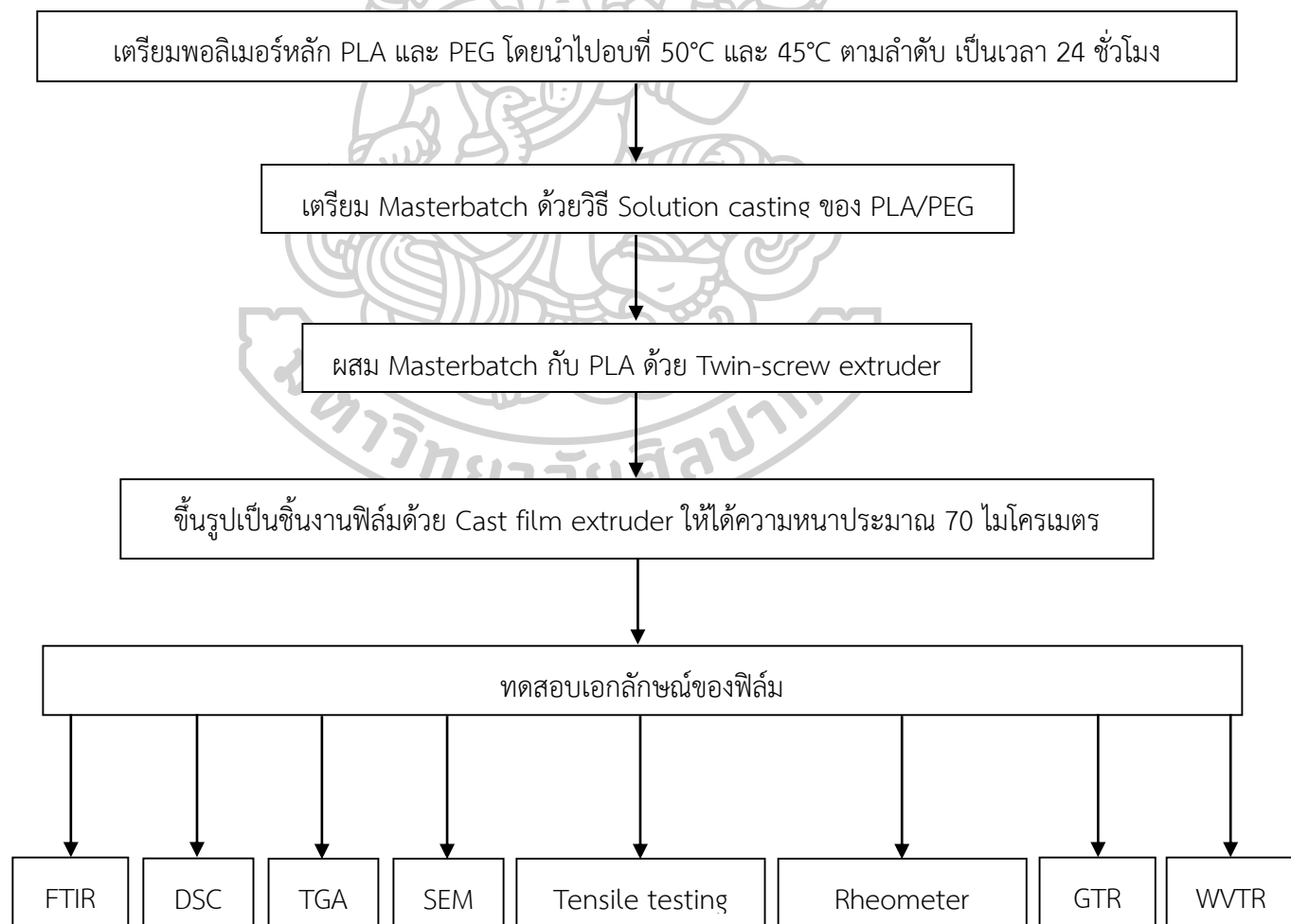
**3.3.5.1 การเตรียม PLA-g-MA จำนวน 200 กรัม**

1. เตรียม Masterbatch ของ PLA/MA/DCP โดยละลาย PLA 18 กรัม (ปริมาณเท่ากับปริมาณ MA ที่ใช้) ใน Dichloromethane 200 มิลลิลิตร และเติม MA 9% โดยน้ำหนักของ PLA (MA 18 กรัม) และเติม DCP ปริมาณ 3% โดยน้ำหนักของ MA (DCP 0.54 กรัม) แล้วกวนให้เกิดการละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นเทสารละลายลงเพลทแก้ว ปล่อยให้ตัวทำละลายระเหยออกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงนำ Masterbatch ฟิล์มมาตัดเป็นชิ้นขนาดใกล้เคียงกับเม็ดพลาสติก PLA

2. ผสม Masterbatch ที่ได้ทั้งหมด กับ PLA 164 กรัม (เพื่อให้ได้อัตราส่วนของ PLA:MA เป็น 91:9) แล้วกราฟต์ MA ลงบน PLA โดยให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างการผสมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนคู่ (Twin screw extruder) ที่อุณหภูมิ 100, 130, 140, 150, 160, 165, 165, 150°C ด้วยความเร็วรอบของสกรู 50 rpm โดยหล่อเย็นด้วยน้ำ

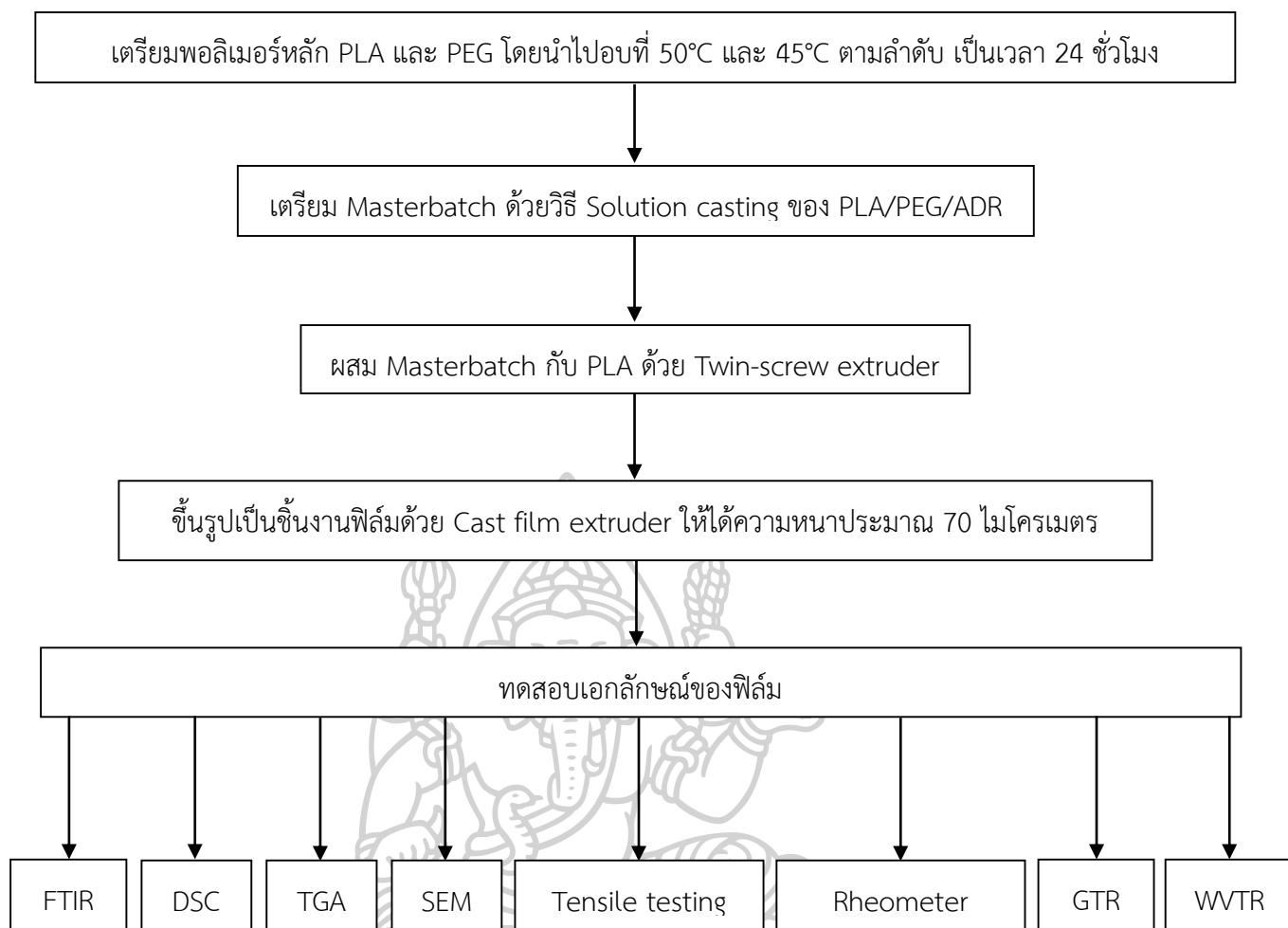
3.3.5.1.3. นำ Extrudate ที่ได้มาบดเป็นผงและเก็บไว้ในสภาวะ Desiccated

3.3.5.1.4. ศึกษาปริมาณการกราฟต์ที่ได้ด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (NMR) โดยพิจารณาปริมาณการกราฟต์ได้จากพื้นที่ใต้กราฟ และศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของ PLA-g-MA ด้วย Thermal Gravimetric Analyzer (TGA) ที่อุณหภูมิ 50-600°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10°C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน



รูปที่ 3.1 แผนภูมิแสดงการเตรียมและพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์มผสม PLA/PEG





รูปที่ 3.2 แผนภูมิแสดงการเตรียมและพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์มผสม PLA/PEG/ADR

### 3.3.5.2 การเตรียมฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 และ PLA-g-MA ที่ปริมาณแตกต่างกันที่มีน้ำมันสกัดเมล็ดตองุ่น (GSE) 4 phr

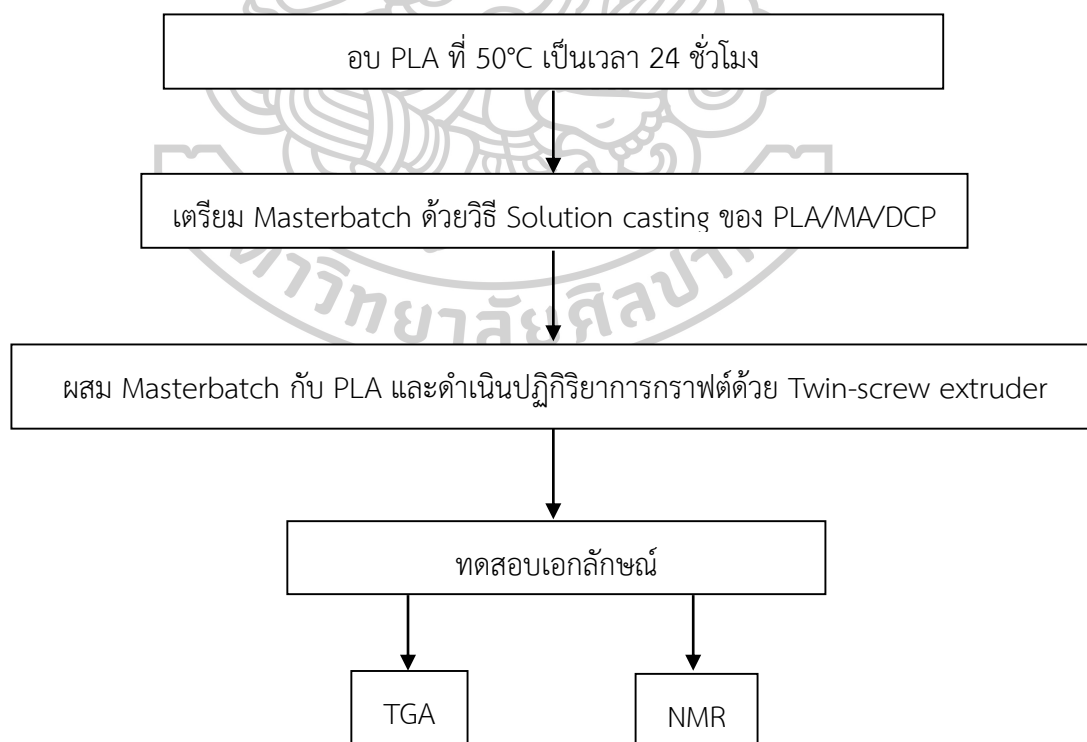
#### 1. เตรียม Masterbatch ฟิล์มด้วยวิธี Solution casting

1.1 นำพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG10/ADR1.25 ที่เตรียมได้จากหัวข้อ 3.3.3 และ PLA-g-MA มาอบไล่ความชื้นที่ 45°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ละลาย PLA/PEG10/ADR1.25 ใน Dichloromethane(DCM) ในอัตราส่วน PPA:DCM เป็น 1:10 โดยใช้ PLA/PEG10/ADR1.25 ปริมาณเท่ากับปริมาณของ PLA-g-MA ที่ใช้ตามสัดส่วนดังตารางที่ 3.1

1.2 เตรียมสารละลาย PLA-g-MA และ GSE โดยละลาย PLA-g-MA ที่ต้องการใช้ทั้งหมดใน Dichloromethane(DCM) ในอัตราส่วน PLA-g-MA:DCM เป็น 1:5 แล้วหยด GSE ทั้งหมดที่ใช้ในสารละลาย PLA-g-MA

1.3 ผสมสารละลายของ PLA-g-MA และ GSE ในสารละลาย PLA/PEG10/ADR ที่อุณหภูมิห้อง โดยกวนผสมเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วเทสารละลายที่ได้ในเพลทแก้ว จากนั้นปล่อยให้ตัวทำละลายระเหยออกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงนำมาตัดเป็นชิ้นที่มีขนาดเล็กกว่าเม็ดพลาสติก PLA

2. อบ Masterbatch ของ PLA/PEG10/ADR1.25/PLA-g-MA/GSE ที่ได้ในตู้อบลมร้อนที่ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปผสมกับเม็ดพลาสติก PLA เพื่อให้ได้สัดส่วนเป็นไปตามตารางที่ 3.1 ขึ้นรูปเป็นชิ้นงานฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์ม (Cast film extrusion) ที่อุณหภูมิ 150, 155, 165, 150°C ด้วยความเร็วรอบสกรู 50 rpm, อัตราเร็วลูกกลิ้งหล่อเย็น (Chill roll) 220 rpm และอุณหภูมิหล่อเย็นเป็น 30°C จะได้ฟิล์มผสมออกมาที่ความหนาประมาณ 70 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.3 แผนภูมิแสดงการเตรียมและพิสูจน์เอกลักษณ์ PLA-g-MA

**ตารางที่ 3.1** แสดงสัดส่วนของการเติม GSE และ PLA ที่ปริมาณต่างๆ ใน PLA/PEG/ADR

Sample	PLA/PEG/ADR (%wt)	PLA-g-MA (%wt of PLA)	GSE (phr)
PLA/PEG/ADR (Control)	100	-	-
PPA/GSE1/M3	100 (97 %PLA)	3	1
PPA/GSE2/M3	100 (97 %PLA)	3	2
PPA/GSE3/M3	100 (97 %PLA)	3	3
PPA/GSE4/M3	100 (97 %PLA)	3	4
PPA/GSE0/M3	100 (100 %PLA)	0	4
PPA/GSE4/M3	100 (97 %PLA)	3	4
PPA/GSE4/M6	100 (94 %PLA)	6	4
PPA/GSE4/M9	100 (91 %PLA)	9	4
PPA/GSE4/M12	100 (88 %PLA)	12	4

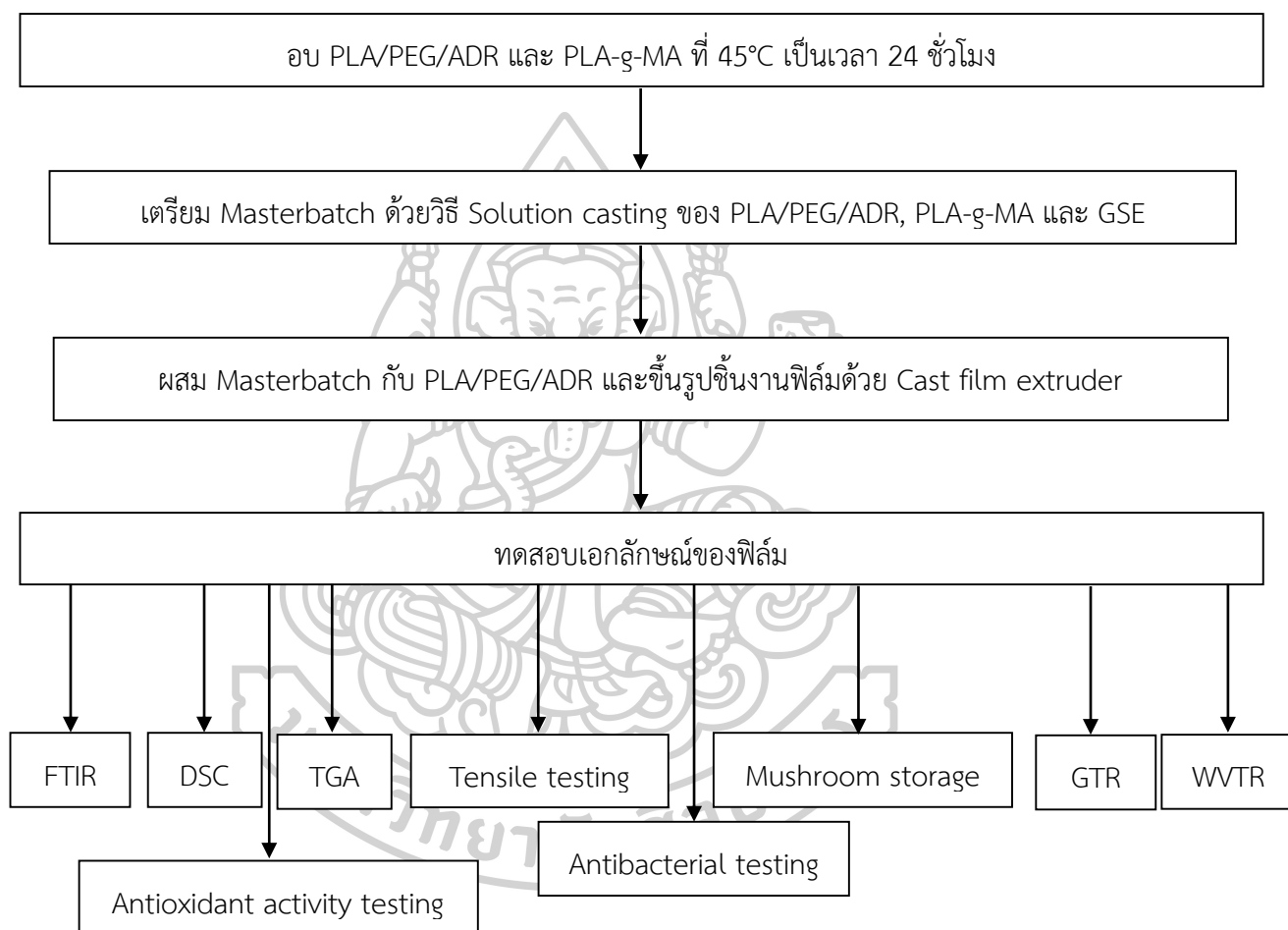
**หมายเหตุ** ตัวย่อ PPA แสดงถึง PLA/PEG10/ADR1.25 และตัวย่อ M แสดงถึง PLA-g-MA

### 3.3.6. นำฟิล์มผสมที่ได้ไปพิสูจน์เอกลักษณ์ได้แก่ สมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม

PPA/GSE4 ที่มี PLA-g-MA ที่แตกต่างกัน ดังหัวข้อ 3.3.2.1, สมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม PPA/GSE4 ที่มี PLA-g-MA ที่แตกต่างกัน ดังหัวข้อ 3.3.2.2, ศึกษาโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มผสม PPA/GSE4 ที่มี PLA-g-MA ที่แตกต่างกัน ดังหัวข้อ 3.3.2.3, ศึกษาอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มผสม PPA/GSE4 ที่มี PLA-g-MA ที่แตกต่างกัน ดังหัวข้อ 3.3.2.4, ศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR) ของฟิล์มผสม PPA/GSE4 ที่มี PLA-g-MA ที่แตกต่างกัน ดังหัวข้อ 3.3.2.5 และศึกษาสมบัติอื่นๆ เพิ่มเติม ได้แก่

3.3.6.1 ศึกษาการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟิล์มผสม PPA/GSE4 ที่มี PLA-g-MA ที่แตกต่างกัน ด้วยวิธี DPPH radical scavenging assay ฟิล์มตัวอย่างทั้งหมดจะถูกเตรียมให้อยู่ในรูปแบบของสารละลาย โดยละลายฟิล์มผสมจำนวน 50 มิลลิกรัม ในตัวทำละลาย Dimethyl sulfoxide (DMSO) 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วดำเนินการทดสอบโดยศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ซึ่งสารละลายของฟิล์มผสมจะถูกนำไปทำปฏิกิริยากับสารรีเอเจนท์คือ DPPH. ในสารละลายของ DPPH. ในเมทานอล ที่อุณหภูมิห้อง แล้ววัดปริมาณของ DPPH ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ตำแหน่งการดูดกลืนแสง 515 nm ซึ่งจะรายงานเป็นความเข้มข้นของ DPPH ที่เกิดขึ้นในหน่วย mgTEAC/ml



รูปที่ 3.4 แผนภูมิแสดงการเตรียมและพิสูจน์เอกลักษณ์ฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 ที่มี GSE 4 phr และ PLA-g-MA ในปริมาณที่แตกต่างกัน

3.3.6.2 ศึกษาประสิทธิภาพต่อการต้านเชื้อแบคทีเรีย *Pseudomonas aeruginosa* ด้วยมาตรฐาน JIS-Z 2801 ดำเนินการทดสอบโดยศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ โดยฟิล์มผสมจะถูกวางจานเพาะเชื้อ และถูกปิดเชื้อแบคทีเรียลงบนผิวฟิล์ม จากนั้นบ่มเชื้อที่

37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงล้างเชื้อแบคทีเรียที่ผิวฟิล์มออก นำสารละลายที่ได้จากการล้างเชื้อหยดลงบนอาหารแข็ง แล้วป่มเชื้อที่ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนับจำนวนโคโรนีที่เกิดขึ้น แล้วรายงานเป็นปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย (%Reduction) ซึ่งหาได้จาก

$$\%Reduction = \frac{CFU_{\text{ควบคุม}} - CFU_{\text{ทดสอบ}}}{CFU_{\text{ควบคุม}}} \times 100 \quad (\text{สมการที่ 3.5})$$

โดย  $CFU_{\text{ควบคุม}}$  คือ ปริมาณโคโรนีที่เกิดขึ้นของการทดสอบตัวอย่างควบคุม

$CFU_{\text{ทดสอบ}}$  คือ ปริมาณโคโรนีที่เกิดขึ้นของการทดสอบตัวอย่างทดสอบ

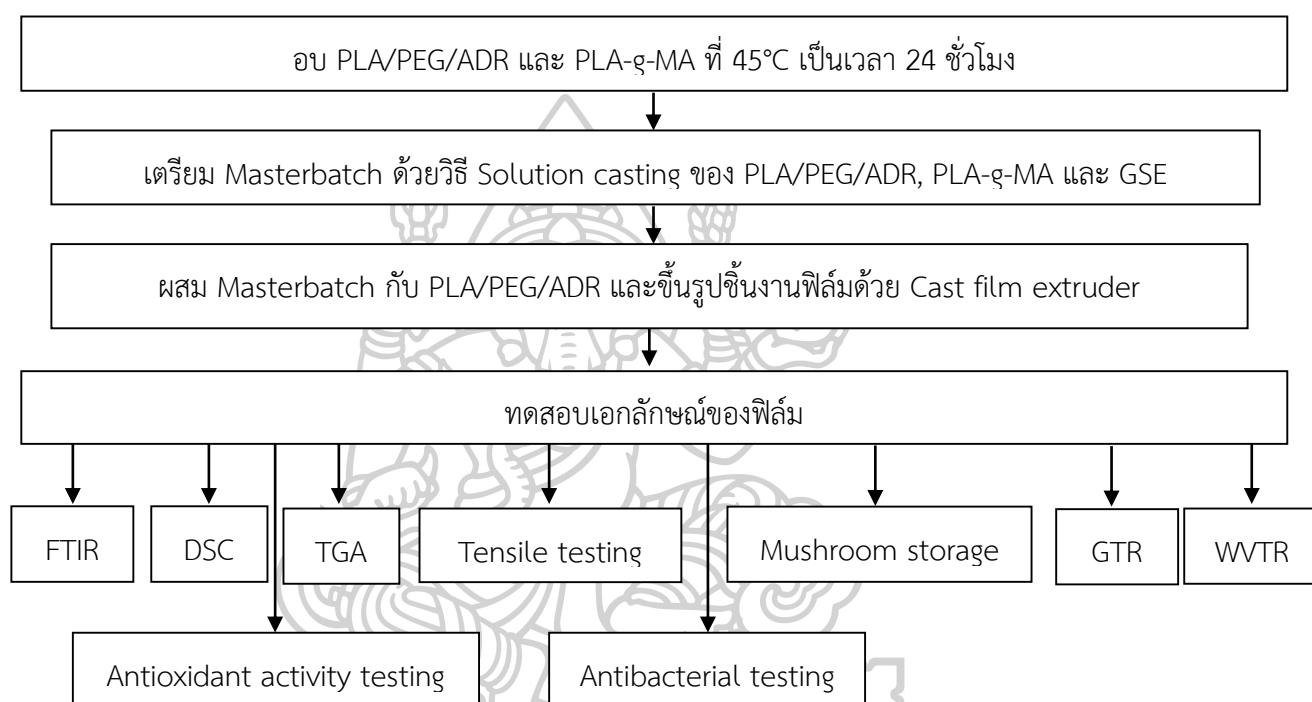
3.3.6.3 ศึกษาคุณภาพของฟิล์มในการเก็บรักษาเห็ด โดยเห็ดฟางจะถูกผ่าออกเป็นครึ่งหนึ่งและนำไปบรรจุในถาดพลาสติกพอลิโพรพิลีน โดยหวางผิวด้านในของเห็ดขึ้น และปิดปากถาดด้วยฟิล์มผสมที่เตรียมได้ บันทึกการเปลี่ยนแปลงของเห็ดด้วยการบันทึกภาพทุกๆ 24 ชั่วโมง โดยเก็บรักษาเห็ดในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 20°C

### 3.3.7. การเตรียมฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 กับ GSE ที่มีปริมาณแตกต่างกัน ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก

3.3.7.1. การเตรียมฟิล์มผสม PPA/M3 ที่มีปริมาณ GSE ที่แตกต่างกัน จะถูกเตรียมด้วยขั้นตอนดังหัวข้อ 3.3.5.2 โดยปริมาณของ PLA-g-MA จะคงที่ที่ 3% โดยน้ำหนัก และปรับเปลี่ยนปริมาณของ GSE เป็น 1, 2, 3 และ 4 phr ดังตารางที่ 3.1

3.3.8. นำฟิล์มที่ได้ไปพิสูจน์เอกลักษณ์ได้แก่ สมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม PPA/M3 ที่มี GSE ที่แตกต่างกัน ดังหัวข้อ 3.3.2.1, สมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม PPA/M3 ที่มี GSE ที่แตกต่างกัน ดังหัวข้อ 3.3.2.2, ศึกษาโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มผสม PPA/M3 ที่มี GSE ที่แตกต่างกัน ดังหัวข้อ 3.3.2.3, ศึกษาอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มผสม PPA/M3 ที่มี GSE ที่แตกต่างกัน ดังหัวข้อ 3.3.2.4, ศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR) ของฟิล์มผสม PPA/M3 ที่มี GSE ที่แตกต่างกัน ดังหัวข้อ 3.3.2.5, ศึกษาการต้านปฏิกิริยา

ออกซิเดชันของฟิล์มผสม PPA/M3 ที่มี GSE ที่แตกต่างกัน ดังหัวข้อ 3.3.6.1, ศึกษาประสิทธิภาพต่อการต้านเชื้อแบคทีเรีย *Pseudomonas aeruginosa* ของฟิล์มผสม PPA/M3 ที่มี GSE ที่แตกต่างกัน ดังหัวข้อ 3.3.6.2, ศึกษาคุณภาพของฟิล์มผสม PPA/M3 ที่มี GSE ที่แตกต่างกัน ในการเก็บรักษาเห็ด ดังหัวข้อ 3.3.6.3



รูปที่ 3.5 แผนภูมิแสดงการเตรียมและพิสูจน์เอกลักษณ์ฟิล์มผสมของ PLA/PEG/ADR ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก และ GSE ในปริมาณที่แตกต่างกัน

### 3.3.9. ศึกษา วิเคราะห์ และสรุปข้อมูลจากการทดลอง

### 3.3.10. เรียบเรียงรายงานการวิจัย

### 3.3.11. นำเสนองานวิจัย

#### 3.2.11.1 ดำเนินการสอบโครงการวิจัย

#### 3.2.11.2 ผลการนำเสนอหรือบทความโครงการวิจัยในงานประชุมวิชาการ



## บทที่ 4

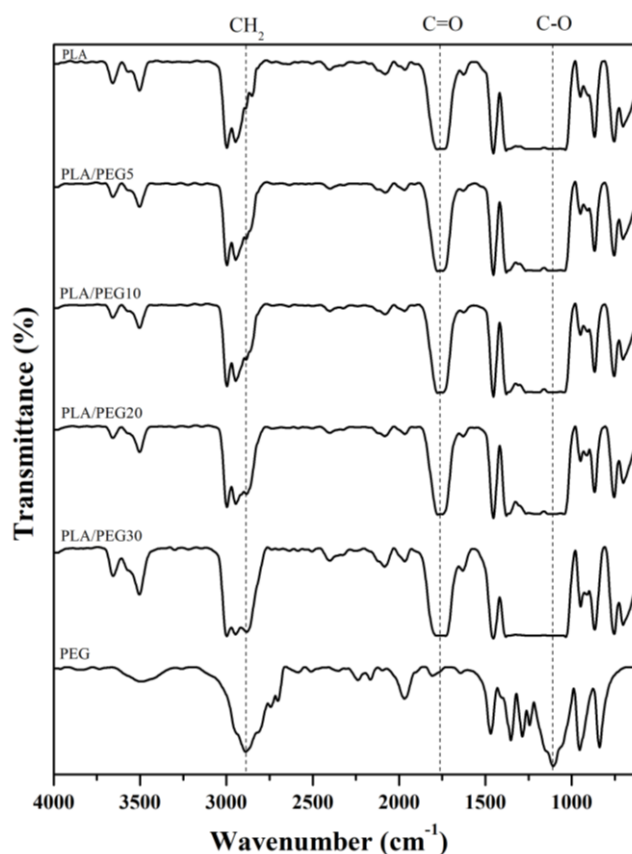
### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ Poly(lactic acid), PLA เพื่อให้ได้ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีลักษณะยืดหยุ่น และการเตรียมฟิล์มของ PLA ให้ได้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ชนิด Active packaging ด้วยการเติมสารต้านเชื้อแบคทีเรียและต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันคือน้ำมันสกัดเมล็ดองุ่น (GSE) โดยอาศัยสาร PLA-g-MA ในการทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ของ GSE และฟิล์มผสม ซึ่งในการศึกษาตอนที่ 1 เป็นการเตรียมฟิล์มยืดหยุ่นของ PLA ด้วยการเติมสารพลาสติกไซเซอร์ชนิด Poly(ethylene glycol) PEG ที่ 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก และตอนที่ 2 ศึกษาการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PEG ด้วยสารขยายสายโซ่ชนิด Joncryl ADR ซึ่งเป็นสารที่มีหมู่ฟังก์ชันที่หลากหลาย และมีหมู่ฮิพอกไซด์ที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่าง PLA และ PEG ให้มีความเข้ากันได้เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นในตอนที่ 2 จึงเป็นการศึกษาพอลิเมอร์ผสมของ PLA และ PEG 10% โดยน้ำหนัก ที่เติม ADR ที่แตกต่างกันเป็น 1.00, 1.25 และ 1.50 phr เพื่อให้ได้สัดส่วนของฟิล์มผสม PLA/PEG/ADR ที่ดีที่สุด แล้วนำไปศึกษาต่อในตอนที่ 3 คือการศึกษาอิทธิพลของ PLA-g-MA ที่ 0, 3, 9 และ 12% โดยน้ำหนัก ในฟิล์ม PLA/PEG/ADR ที่มีปริมาณ GSE คงที่ที่ 4 phr เพื่อให้ได้ปริมาณของ PLA-g-MA ที่ดีที่สุดในการกักเก็บ GSE แล้วนำไปศึกษาต่อในตอนที่ 4 โดยการเติม GSE ที่ 1, 2, 3 และ 4 phr โดยใช้ PLA-g-MA ในปริมาณคงที่จากตอนที่ 3

#### 4.1 ผลของการศึกษาฟิล์มผสมของ PLA/PEG

##### 4.1.1. การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มผสมด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)

การศึกษากการเพิ่มความยืดหยุ่นของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA) ด้วยการเติมสารพลาสติกไซเซอร์ชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอล (Poly(ethylene glycol), PEG) พบว่าลักษณะโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มผสมแสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่า PLA แสดงหมู่ฟังก์ชันที่มีการสั่นแบบยืด (Stretching) ที่เป็นเอกลักษณ์ ได้แก่ หมู่ C-O, หมู่ C=O, หมู่ -CH<sub>3</sub> symmetric และ หมู่ -CH<sub>3</sub> asymmetric ที่ 1110, 1764, 2949 และ 3001 cm<sup>-1</sup> ตามลำดับ และแสดงหมู่ฟังก์ชันที่มีการสั่นแบบงอ (Bending) ได้แก่ หมู่ -CH<sub>3</sub> symmetric และ หมู่ -CH<sub>3</sub> asymmetric ที่ 1373 และ 1462 cm<sup>-1</sup> ตามลำดับ ในส่วนของ PEG พบหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเอกลักษณ์ได้แก่ หมู่ C-O, หมู่ -CH<sub>2</sub> และหมู่ -OH ที่ 1110, 2875 และ 3450 cm<sup>-1</sup> ตามลำดับ [27]



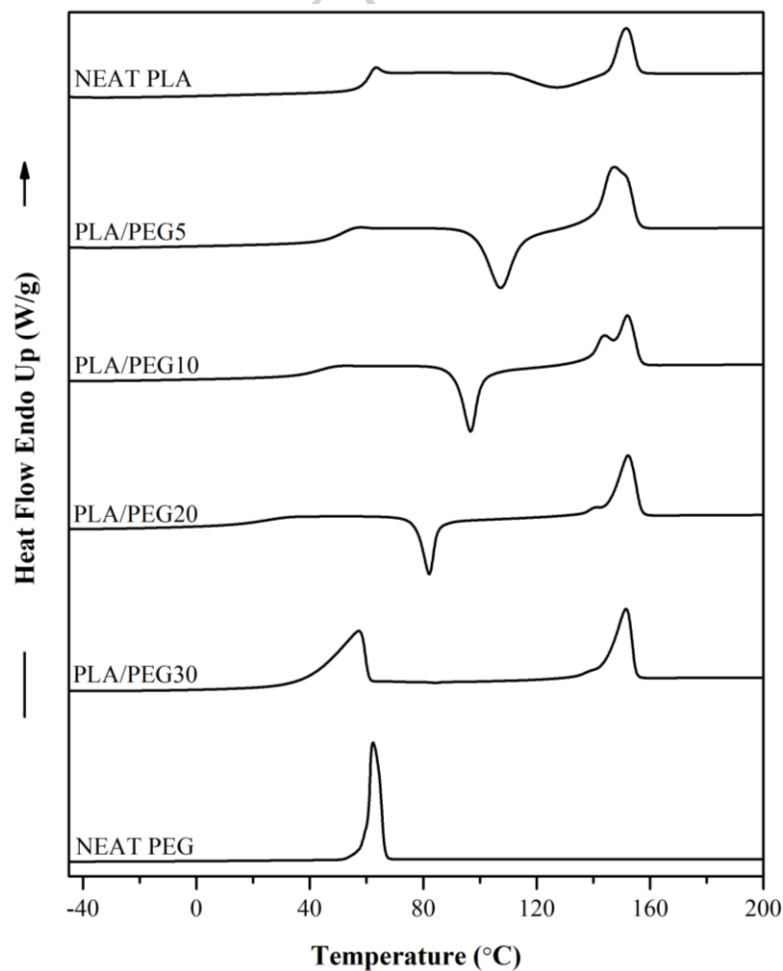
รูปที่ 4.1 แสดง Fourier Transform Infrared Spectra ของ PLA/PEG ที่ PEG 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.1 พบว่าการเติม PEG ที่ปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ความเข้มของพีคที่  $2877\text{ cm}^{-1}$  เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นพีคใหม่ที่ไม่พบใน PLA ที่ไม่มีการเติม PEG ซึ่งจะพบพีคที่ตำแหน่งดังกล่าวได้อย่างชัดเจนที่ปริมาณ PEG 20 และ 30% โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของ PEG เนื่องจากพีคที่  $2877\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงการสั่นของหมู่  $-\text{CH}_2$  ของ PEG ดังนั้นที่ปริมาณของ PEG สูงๆ จึงพบหมู่ดังกล่าวของ PEG ได้อย่างชัดเจน จากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถระบุได้ว่ามี PEG กระจายตัวอยู่ใน PLA และยังพบว่าในรูปที่ 4.1 ไม่แสดงให้เห็นถึงพันธะหรือแรงทางเคมีที่เกิดขึ้นใหม่ระหว่าง PLA และ PEG เกิดขึ้น

#### 4.1.2. ผลของการศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม PLA/PEG ด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)

การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG ด้วยเทคนิค DSC โดยพลติกรรมขณะได้รับความร้อนครั้ง 2 แสดงในรูปที่ 4.2 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ), อุณหภูมิการตกผลึกขณะให้ความร้อน (Cold crystallization,  $T_{cc}$ ), อุณหภูมิการหลอมผลึก (Melting temperature,  $T_m$ ) และปริมาณผลึก ( $X_c$ ) แสดงในตารางที่ 4.1

โดยพบว่า PLA เป็นพอลิเมอร์ที่มีความไม่เป็นระเบียบสูง มีปริมาณผลึกที่น้อยเป็น 2.30% และมี  $T_g$  และ  $T_m$  อยู่ที่  $59.62^\circ\text{C}$  และ  $151.65^\circ\text{C}$  ตามลำดับ ในส่วนของ PEG เป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นโซ่ตรงจึงสามารถจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบได้ดี จึงพบว่า PEG มีปริมาณผลึกที่สูงเป็น 92.49% โดยมีอุณหภูมิ  $T_m$  เป็น  $62.32^\circ\text{C}$  เมื่อพิจารณาการเติม PEG ที่ 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก ใน PLA พบว่าการเติม PEG ในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้  $T_g$  ของ PLA ลดลง เนื่องจากการประพุดตัวเป็นพลาสติกไซเซอร์ของ PEG ส่งผลให้สายโซ่ของ PLA เคลื่อนไหวได้ง่าย จึงใช้พลังงานน้อยลงในการทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนไหวเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูง



รูปที่ 4.2 แสดง DSC Thermogram ของ PLA/PEG ที่ปริมาณ PEG 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติทางความร้อนของ PLA/PEG ที่ปริมาณ PEG ต่างกัน

Sample	$T_g$ (°C)	$T_m, \alpha$ (°C)	$T_m, \alpha'$ (°C)	$T_{cc}$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)	$\Delta H_{cc}$ (J/g)	$X_c$ (%)
NEAT PLA	59.62	151.65	-	126.92	8.79	6.63	2.30
NEAT PEG	-	62.32	-	-	182.02	-	92.49
PLA/PEG5	49.65	151.52	147.50	107.34	27.43	23.23	4.72
PLA/PEG10	42.62	152.13	144.22	96.57	28.23	21.75	7.69
PLA/PEG20	24.92	152.24	140.47	82.06	26.86	17.19	12.91
PLA/PEG30	-	151.55	-	-	28.28	-	43.16

โดย PLA ที่เติม PEG 30% โดยน้ำหนัก ไม่สามารถสังเกตพบช่วง  $T_g$  ของ PLA ได้ เนื่องจากปรากฏพีคของการหลอมผลึกของ PEG ที่มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับ  $T_g$  ของ PLA จึงไม่สามารถสังเกตพฤติกรรมช่วงการเปลี่ยนสถานะของ PLA ได้ และยังพบว่าการเติม PEG ส่งผลให้เกิดผลึกขณะหลอมเหลวเกิดที่อุณหภูมิต่ำลง ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงของ  $T_g$  นั่นคือ PEG ช่วยให้สายโซ่ของ PLA เคลื่อนที่ได้ดี ส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในการเกิดผลึกขณะหลอมเหลวใช้พลังงานที่ต่ำลง อีกทั้งยังพบว่าการเติม PEG ส่งผลให้ปริมาณการเกิดผลึกขณะหลอมเหลวมีปริมาณมากขึ้นเมื่อเทียบกับไม่เติม ซึ่งเป็นผลจากการที่สายโซ่ PLA เคลื่อนที่ได้ง่าย [28] จากการประพฤติตัวเป็นพลาสติกไซเซอร์ของ PEG ส่งผลให้ PLA สามารถจัดเรียงตัวเพื่อเกิดผลึกขณะหลอมเหลวได้มากขึ้น และช่วงการเกิดผลึกขณะหลอมเหลวนี้นหายไปเมื่อเติม PEG ที่ 30% โดยน้ำหนัก ซึ่งเกิดจากการทับซ้อนของช่วงการหลอมเหลวของ PEG เช่นเดียวกับกรณีของ  $T_g$  ที่ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ ซึ่งพฤติกรรมของ PEG ที่ช่วยให้สายโซ่ของ PLA เคลื่อนที่ได้ง่าย และส่งผลให้ PLA สามารถจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ดีขึ้นนั้น แสดงให้เห็นชัดเจนที่ปริมาณผลึก ( $X_c$ ) โดยพบว่าเมื่อเติม PEG ที่ปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณผลึกของ PLA เพิ่มขึ้นด้วย จึงกล่าวได้ว่า PEG ช่วยปรับปรุงการเกิดผลึกของ PLA ได้ โดยการช่วยให้สายโซ่ของ PLA เคลื่อนที่ได้มากขึ้นและสามารถจัดเรียงตัวเพื่อสร้างผลึกได้ดี ทั้งนี้การเติม PEG 30% โดยน้ำหนัก สามารถสังเกตได้ถึงพฤติกรรมการหลอมผลึกของ PEG ที่เกิดแยกขึ้นมาอย่าง

ชัดเจน แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณ PEG สูง ส่งผลให้ PEG แยกเฟสออกจาก PLA และแยกไปเกิดผลึกนอก Spherulite ของ PLA จึงเห็นการหลอมผลึกของ PEG อย่างชัดเจน แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจาก PEG มีความสามารถในการเกิดผลึกที่ต่ำเยี่ยม การเกิดผลึกของ PEG จึงประพืดตัวคล้ายกับสารก่อผลึกและช่วยเหนี่ยวนำให้ PLA เกิดผลึกได้มากขึ้น จึงพบว่าผลึกของ PLA เพิ่มสูงขึ้นเป็น 43.16% ซึ่งในการเติม PEG ที่ต่ำกว่า 30% โดยน้ำหนัก ไม่แสดงให้เห็นถึงการหลอมผลึกของ PEG ที่แยกออกมา แสดงให้เห็นว่า PEG สามารถกระจายตัวใน Spherulite ของ PLA ได้ และช่วยให้ PLA จัดเรียงตัวเพื่อสร้างชั้นลามลลาได้ดี จึงส่งผลให้ปริมาณผลึกของ PLA สูงขึ้น [29]

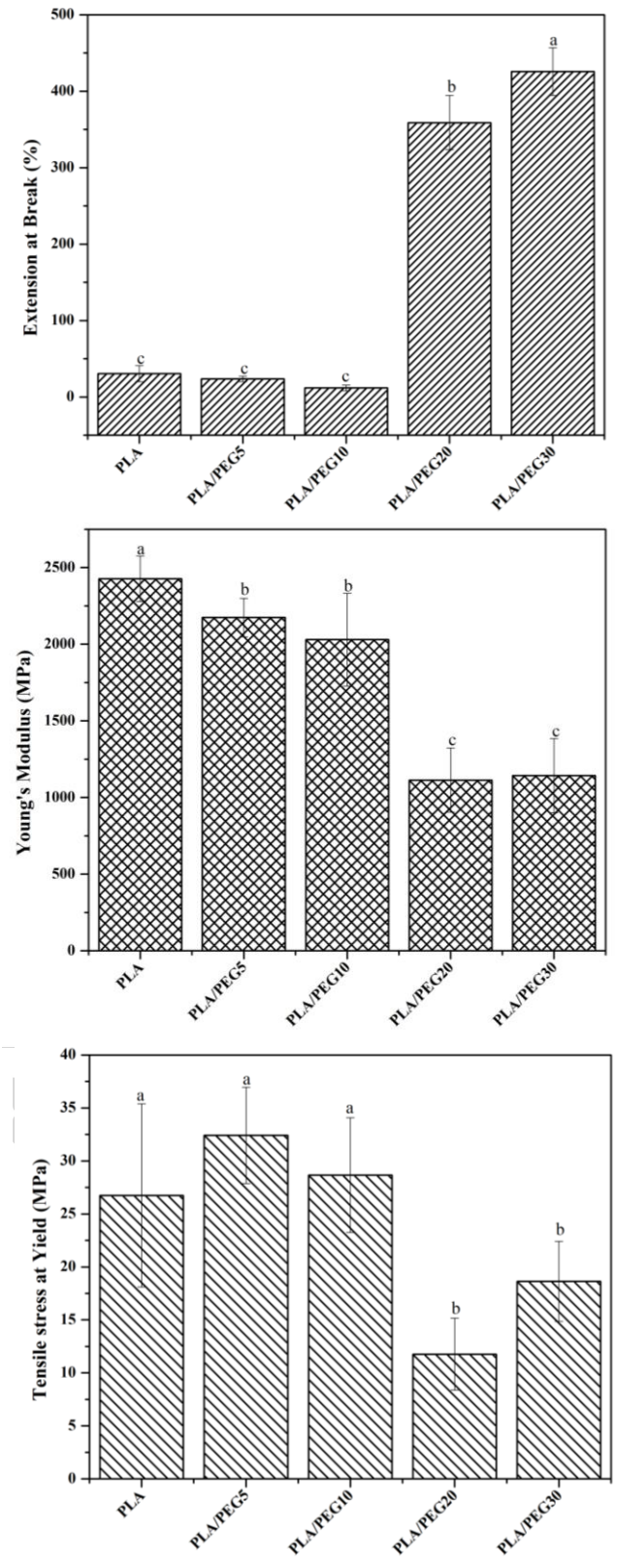
เมื่อพิจารณาพฤติกรรมที่บริเวณการหลอมผลึกของ PLA ที่  $T_m$  แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของ PEG ไม่มีผลอย่างเป็นนัยสำคัญต่อ  $T_m$  ของ PLA แต่พบว่าการเติม PEG ส่งผลให้พีคการหลอมผลึกของ PLA นั้นเกิดขึ้น 2 พีค เนื่องจาก PLA นั้นมีรูปแบบการเกิดผลึกหลายรูปแบบ ซึ่งรูปแบบที่เสถียรที่สุดคือรูปแบบอัลฟา ( $\alpha$ -form) ที่มีการจัดเรียงตัวแบบเกลียวในรูปแบบ Orthorhombic โดยอิทธิพลของการเติมสารพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของสายโซ่ PLA ขณะเกิดผลึก อาจส่งผลให้เกิดผลึกในรูปแบบที่เสถียรน้อยลงคือรูปแบบ  $\alpha'$  โดยผลึกรูปแบบนี้จะมีการจัดเรียงตัวที่คล้ายกับรูปแบบ  $\alpha$  แต่มีความไม่เป็นระเบียบสูงกว่า [30] หรือในอีกกลไกหนึ่งคือ PEG ส่งผลให้ PLA เกิดผลึกชั้นบางๆ ที่สามารถหลอมเหลวได้ง่ายกว่า จึงเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำในช่วงเริ่มต้นการหลอมเหลว จึงกล่าวได้ว่าพีคของการหลอมผลึกที่อุณหภูมิต่ำของ PLA แสดงถึงช่วงการหลอมของผลึกที่มีรูปแบบไม่สมบูรณ์ [28] แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของ PEG ต่อการเกิดผลึกของ PLA ส่งผลให้มีผลึกที่ไม่สมบูรณ์เกิดขึ้น โดยความเข้มของพีคดังกล่าวนั้นลดลงเมื่อปริมาณ PEG มากขึ้น เนื่องจากเมื่อ PEG สูงขึ้น ความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดผลึกของ PLA ก็เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณผลึกที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ PEG จากผลการทดสอบดังกล่าวข้างต้นนี้ จึงกล่าวได้ว่า PEG สามารถเข้ากันได้กับ PLA จึงส่งผลให้อุณหภูมิ  $T_g$  เปลี่ยนแปลงและปรับปรุงการเกิดผลึกของ PLA ได้

#### 4.1.3. ผลของการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม PLA/PEG

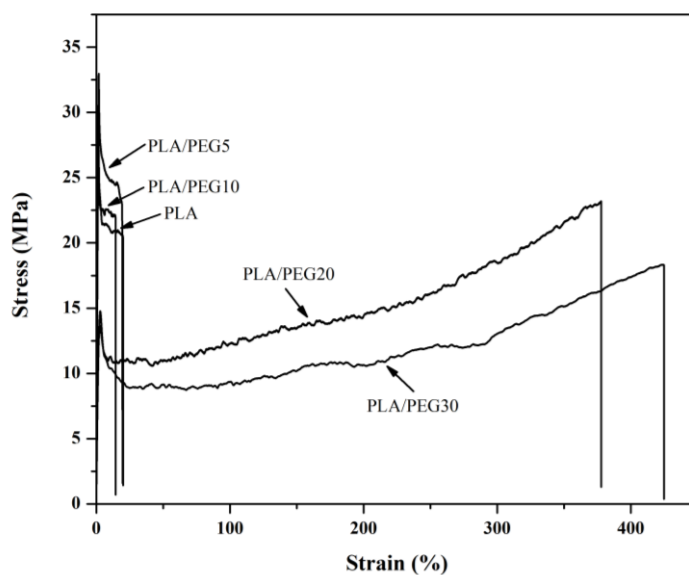
การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม PLA/PEG ถูกทดสอบด้วยวิธีการดึงยึดในทิศทางเดียวกับทิศทางการดึงของเครื่องขึ้นรูป ซึ่งผลการทดสอบการดึงยึดของฟิล์ม PLA และฟิล์มผสม PLA/PEG แสดงค่า Extension at break, Young's Modulus และ Tensile stress at yield ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบทั้งหมดผ่านการทดสอบวิธีการทางสถิติด้วยวิธี ANOVA พบว่าการ

เติม PLA แสดงการขาดแบบเปราะที่ค่าโมดูลัสสูง แสดงถึงการเป็นวัสดุแข็งเปราะและความแข็งแรงของฟิล์ม PLA ในการศึกษาอิทธิพลของการเติม PEG ใน PLA พบว่าที่ปริมาณ PEG 5 และ 10% โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลต่อค่าความยืดหยุ่นที่ Extension at break อย่างมีนัยสำคัญ แต่พบว่าเมื่อ PEG เพิ่มขึ้นเป็น 20 และ 30% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่า Extension at break เพิ่มขึ้นประมาณ 10 เท่า เมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า PEG ประพฤติตัวเป็นพลาสติกไฮเซอร์และเป็นส่วนที่ยืดหยุ่นในฟิล์ม PLA/PEG ส่งผลให้เมื่อฟิล์มผสมเกิดการยืดออก PEG จะช่วยให้สายโซ่ PLA สามารถจัดเรียงตัวไปตามแนวแรงและประพฤติตัวเป็นฟิล์มยืดหยุ่นได้ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากพฤติกรรมการเสียรูปในแผนภาพ Stress-Strain ในรูปที่ 4.4 ซึ่งพบว่าที่ PEG 20 และ 30% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้เกิดพฤติกรรม Stain hardening เกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่า PEG ช่วยให้สายโซ่ PLA สามารถจัดเรียงตัวไปตามแรงได้ และแสดงพฤติกรรมแบบวัสดุที่ยืดหยุ่น ในขณะที่ PEG 5 และ 10% แสดงพฤติกรรมขาดแบบเปราะ เมื่อพิจารณาที่ค่าโมดูลัสพบว่าเมื่อเติม PEG ที่ 5 และ 10% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าโมดูลัสลดลงและลดลงอย่างมากเมื่อ PEG เพิ่มขึ้นถึง 20 และ 30% โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่า PEG ที่ประพฤติตัวเป็นพลาสติกไฮเซอร์ส่งผลให้สายโซ่ PLA เคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น จึงใช้แรงน้อยลงในการทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ ซึ่งผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับการทดสอบสมบัติทางความร้อนที่พบว่าอุณหภูมิ  $T_g$  ลดลง เมื่อเติม PEG ในส่วนของ Tensile stress at yield พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเติม PEG ที่ 5 และ 10% โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเพิ่ม PEG เป็น 20 และ 30% โดยน้ำหนัก พบว่า Tensile stress ลดลงอย่างมาก ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันกับค่าโมดูลัส ซึ่งเป็นผลมาจาก PEG ที่ทำให้สายโซ่ PLA เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น จากผลการทดสอบดังกล่าวนี้จะเห็นว่าการเติม PEG 5 และ 10% โดยน้ำหนัก ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมในช่วงของ Plastic deformation และจุดที่ทำให้ฟิล์มพลาสติกเสียรูปถาวร แต่มีผลในช่วงของอีลาสติกซึ่งสายโซ่ PLA ยังไม่มีการเสียรูปถาวรและยังมีการเกี่ยวพันกันของสายโซ่อยู่เท่านั้น แสดงให้เห็นว่าที่ PEG ปริมาณต่ำ ไม่มีอิทธิพลมากเพียงพอที่จะเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงในการต้านทานการเสียรูปและเป็นส่วนยืดหยุ่นให้แก่ PLA ได้ ต้องใช้ PEG มากถึง 20% โดยน้ำหนัก จึงจะสามารถส่งอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลของ PLA ได้





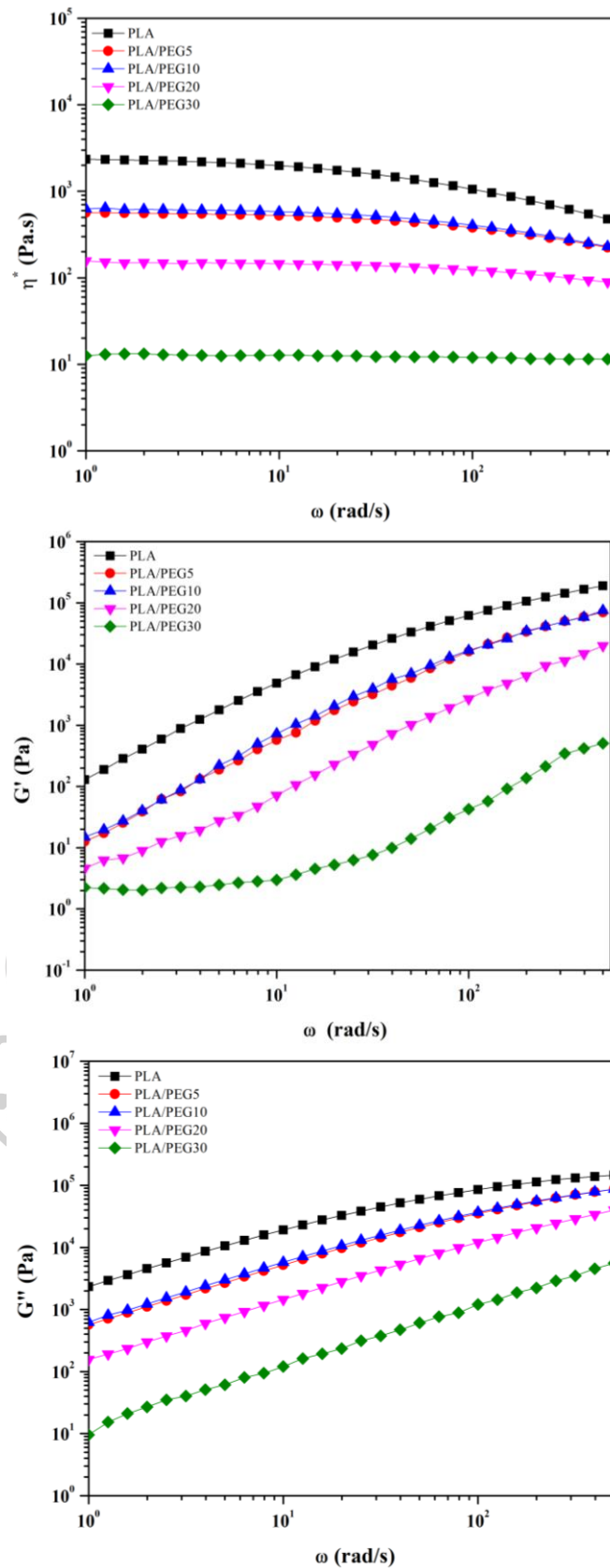
รูปที่ 4.3 แสดงสมบัติเชิงกลของ PLA และ PLA/PEG ที่ปริมาณ PEG 5, 10, 20 และ 30% โดย  
น้ำหนัก



รูปที่ 4.4 แสดงแผนภาพ Stress-Strain ของ PLA และ PLA/PEG ที่ปริมาณ PEG 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก

#### 4.1.4. ผลของการศึกษาสมบัติรีออลยีของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG

สมบัติรีออลยีถูกทดสอบเพื่อศึกษาสมบัติทางการไหลเพื่อพิจารณาความสามารถในการขึ้นรูปและศึกษาโครงสร้างเชิงจุลภาคเพื่อพิจารณาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม ด้วยวิธีการให้แรงเฉือนขณะหลอมเหลวที่ 180°C โดยสมบัติทางการไหลของพอลิเมอร์ผสมได้แก่ Complex viscosity ( $\eta^*$ ), Storage modulus ( $G'$ ) และ Loss modulus ( $G''$ ) แสดงในรูปที่ 4.5 พบว่า Complex viscosity ( $\eta^*$ ) ซึ่งแสดงความหนืดขณะได้รับแรงเฉือนของพอลิเมอร์ผสม พบว่า PLA แสดงพฤติกรรมในการไหลโดยมีพฤติกรรมแบบ Newtonian plateau ที่ช่วงความถี่ต่ำๆ และเกิด Shear thinning ที่ความถี่สูงๆ โดยการเติม PEG ส่งผลให้ความหนืดลดลง โดยที่ PEG 5 และ 10% โดยน้ำหนักมีความหนืดที่ใกล้เคียงกัน และลดลงอย่างมากเมื่อ PEG เพิ่มขึ้นเป็น 20 และ 30% โดยน้ำหนัก ซึ่งอธิบายได้ถึงการประพฤติตัวเป็นพลาสติกไซเซอร์ของ PEG ซึ่งส่งผลให้สายโซ่ของ PLA เคลื่อนไหวได้ง่าย และเกิดการคลายตัวจากการเกี่ยวพันกันในสายโซ่ได้ง่ายขึ้น จึงทำให้เห็นว่าความหนืดลดต่ำลงเมื่อเติม PEG มากยิ่งขึ้น และเมื่อพิจารณา Storage modulus ( $G'$ ) ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมความเป็นอีลาสติกหรือการประพฤติตัวคล้ายของแข็งของพอลิเมอร์ [31] ที่ซึ่งเมื่อได้รับแรงสายโซ่พอลิเมอร์จะดูดซับแรงเอาไว้โดยสายโซ่พอลิเมอร์ไม่เกิดการเสียรูป



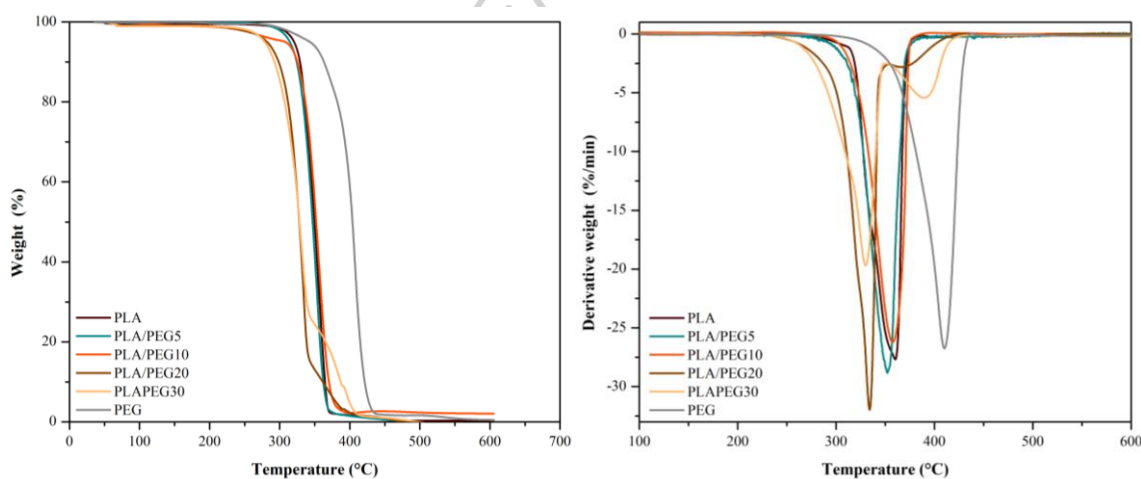
รูปที่ 4.5 แสดงสมบัติรีออลอจีที่ 180°C ของ PLA และ PLA/PEG ที่ PEG 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก

จากผลการทดสอบพบว่า  $G'$  ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG มีค่าลดต่ำลง เมื่อเติม PEG ในปริมาณที่สูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าความเป็นอีลาสติกของพอลิเมอร์ลดลง แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการรับแรงเฉือนโดยไม่เกิดการเสียรูปได้น้อยลง หรือกล่าวได้ว่าพอลิเมอร์ผสมเกิดการเสียรูปขณะหลอมเหลวได้ง่ายขึ้นนั่นเอง ซึ่งเป็นเหตุผลเดียวกันกับการลดลงของความหนืดเนื่องจาก PEG ส่งผลให้สายโซ่เคลื่อนไหวและคลายตัวได้ง่าย โดยแนวโน้มเดียวกันนี้ยังแสดงใน Loss modulus ( $G''$ ) ซึ่ง  $G''$  ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG ลดลงเมื่อปริมาณ PEG สูงขึ้น ซึ่ง  $G''$  แสดงคุณสมบัติวิคอสหรือการประพุดิตัวคล้ายของเหลวของพอลิเมอร์ ที่ซึ่งเมื่อพอลิเมอร์ได้รับแรงสายโซ่พอลิเมอร์จะมีการคายพลังงานออกมา เพื่อคืนตัวกลับ ดังนั้นจึงพบว่าเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้นจะต้องคายพลังงานมากขึ้นเพื่อให้เกิดการคืนตัวของสายโซ่ และเมื่อเติม PEG ซึ่งสายโซ่ PLA จะคลายตัวง่าย จึงส่งผลให้สายโซ่ PLA เคลื่อนไหวได้ง่ายและใช้แรงน้อยลงในการทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ จากผลการทดสอบจึงสรุปได้ว่าการเติม PEG มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์คือส่งผลให้สายโซ่ PLA เกิดการเคลื่อนที่และคลายตัวได้ง่าย [31] จากการประพุดิตัวเป็นพลาสติกไฮเซอร์ของ PEG ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันกับผลการทดสอบทางความร้อนและสมบัติเชิงกลก่อนหน้านี้

#### 4.1.5. ผลของการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนฟิล์มผสม PLA/PEG ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA)

รูปที่ 4.6 แสดงผลจากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ PLA, PEG และ PLA ที่เติม PEG 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิค TGA อุณหภูมิในการสลายตัวแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่า PLA และ PEG มีอุณหภูมิในการสลายตัวอยู่ที่  $357.15^{\circ}\text{C}$  และ  $409.49^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ แสดงว่า PEG มีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงกว่า PLA เนื่องจากสายโซ่หลักของ PEG ประกอบไปด้วยพันธะ C-C แบบโซ่ตรง ซึ่งมีพลังงานพันธะที่สูง และสามารถจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบได้ดี ส่งผลให้ความร้อนแพร่เข้าระหว่างสายโซ่ได้ยากขึ้น จึงส่งผลให้ PEG มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่า PLA และในการศึกษาอิทธิพลของ PEG ต่อเสถียรภาพทางความร้อนของ PLA พบว่า การเติม PEG 5 และ 10% โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของ PLA ซึ่งการเติม PEG ที่ปริมาณดังกล่าว พบการสลายตัวเพียงขั้นตอนเดียว และอุณหภูมิการสลายตัวของ PLA ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แสดงให้เห็นว่า PEG ที่ปริมาณต่ำสามารถกระจายตัวใน PLA ได้ดี จึงไม่พบการสลายตัวของ PEG แยกออกมา แต่อย่างไรก็ตาม PEG ที่ปริมาณต่ำ (น้อยกว่า 10% โดยน้ำหนัก) นั้นไม่มีอิทธิพลทางเคมีต่อสายโซ่ของ PLA จึงไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวของ PLA ซึ่งเป็น

อิทธิพลของพลังงานพันธะทางเคมีในโครงสร้างของพอลิเมอร์ และพบว่าเมื่อเพิ่ม PEG เป็น 20 และ 30% โดยน้ำหนัก อิทธิพลของ PEG ส่งผลให้ PLA เกิดการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำลง เนื่องจากสายโซ่ PLA สามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น ความร้อนจึงสามารถแพร่เข้าสู่ระหว่างสายโซ่ได้ดี และเริ่มสลายตัวได้เร็วขึ้น และพบการสลายตัวของ PEG เกิดขึ้นที่ตำแหน่งการสลายตัวของ PEG เอง แสดงให้เห็นว่า PEG ไม่มีความเข้ากันได้ที่เกิดจากแรงทางเคมีกับสายโซ่ PLA จึงส่งผลให้ PEG ไม่สามารถเหนี่ยวนำให้ PLA สลายตัวได้ในอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งอิทธิพลดังกล่าวเกิดขึ้นเช่นเดียวกันในสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่กล่าวไปข้างต้น



รูปที่ 4.6 แสดงการสลายตัวทางความร้อนของ PLA, PEG และ PLA/PEG ที่ PEG 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก

#### 4.1.6. แสดงผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มผสม PLA/PEG

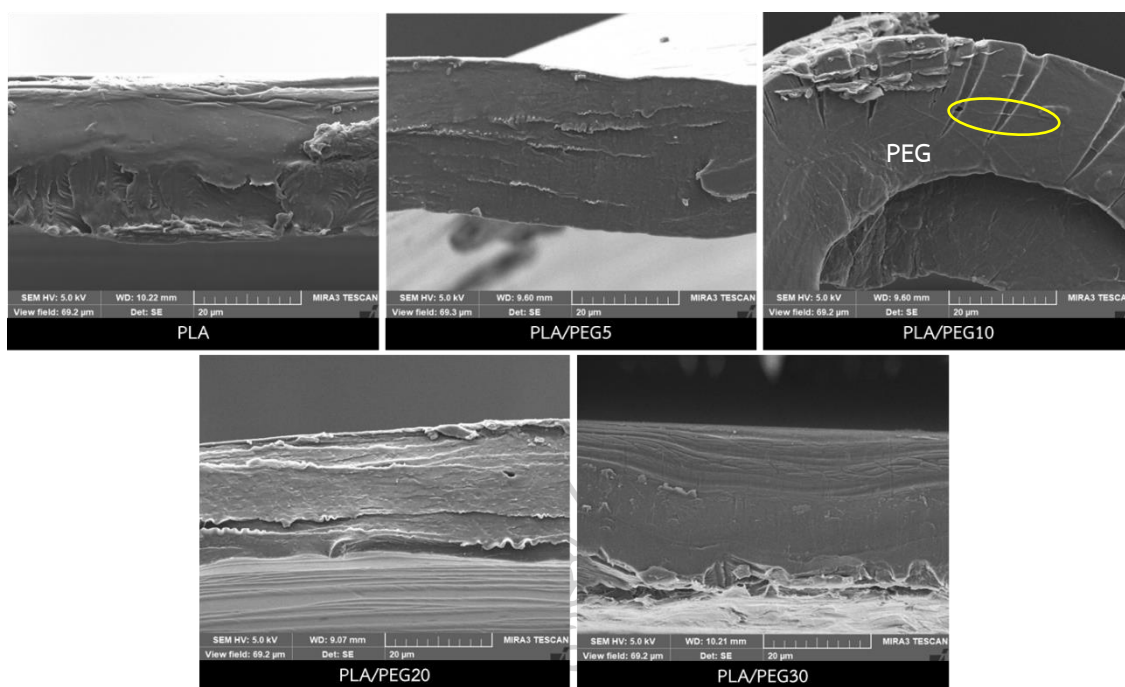
จากการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยวิธีการดัดยืด ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบได้ถูกนำมาศึกษา ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของการขาดของฟิล์มผสม โดยรูปที่ 4.7 แสดงภาพ SEM ของพื้นผิวการขาดของฟิล์ม PLA และ PLA/PEG ซึ่งพบว่า PLA แสดงพื้นผิวที่เรียบ แสดงถึงลักษณะการขาดแบบเปราะ โดยเมื่อพิจารณาอิทธิพลของ PEG พบว่า PLA ที่เติม PEG 5% โดยน้ำหนัก ยังคงแสดงลักษณะพื้นผิวที่เรียบที่แสดงถึงลักษณะของการขาดแบบเปราะ โดยแสดงให้เห็นถึงริ้วของการยืดเกิดขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณ PEG เป็น 10% โดยน้ำหนัก พบเส้นไฟบริลลักษณะเป็นเส้นยาววางตัวในแนวตั้งฉากกับทิศทางของแรงดึง

ตารางที่ 4.2 แสดงเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG

Sample	T <sub>onset</sub> (°C)	T <sub>d</sub> (°C)
PLA	333.02	357.15
PEG	381.96	409.49
PLA/PEG5	330.54	352.20
PLA/PEG10	334.98	359.11
PLA/PEG20	314.26	335.20
PLA/PEG30	304.05	331.39

ซึ่งเส้นไฟบริลดังกล่าวแสดงถึงส่วนที่ยึดของ PEG โดยจะเห็นว่า PEG ไม่ได้จัดเรียงตัวในทิศทางแรงดึง จึงไม่พบว่า PLA/PEG10 มีการขาดแบบเหนียว (Ductile) เช่นเดียวกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกล และยิ่งไปกว่านั้นยังพบการฉีกขาดที่ผิวในแนวตั้งฉากกับทิศแรงดึง แสดงให้เห็นว่าการวางตัวของไฟบริลในลักษณะดังกล่าวส่งผลเมื่อได้รับแรงดึง จะเกิดการกระจายแรงไปตามแนวไฟบริล และส่งผ่านแรงไปยังสายโซ่ของ PLA ได้ไม่ดี จึงทำให้เกิดการขาดในแนวตั้งฉากกับแรงดึง ก่อนที่สายโซ่ของพอลิเมอร์จะสามารถจัดเรียงตัวไปตามแนวแรงและเกิดการยึดออก ทำให้เห็นว่าฟิล์ม PLA/PEG10 เกิดการขาดแบบเปราะ เมื่อเพิ่ม PEG เป็น 20% โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นถึงการขาดแบบเหนียว (Ductile) โดยจะสังเกตเห็นเป็นริ้วที่แสดงถึงการขาดแบบเหนียว (Ductile) เกิดขึ้น โดย PLA ที่เติม PEG 30% โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นการขาดแบบเหนียว (Ductile) ที่ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยแสดงให้เห็นด้วยพื้นผิวที่มีลักษณะขรุขระ และพบว่ามีพื้นผิวที่ขรุขระที่สุดเมื่อเทียบกับการเติม PEG ที่ปริมาณต่ำ ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าว เป็นไปตามผลการทดสอบสมบัติเชิงกลที่แสดงไว้ก่อนหน้านี้

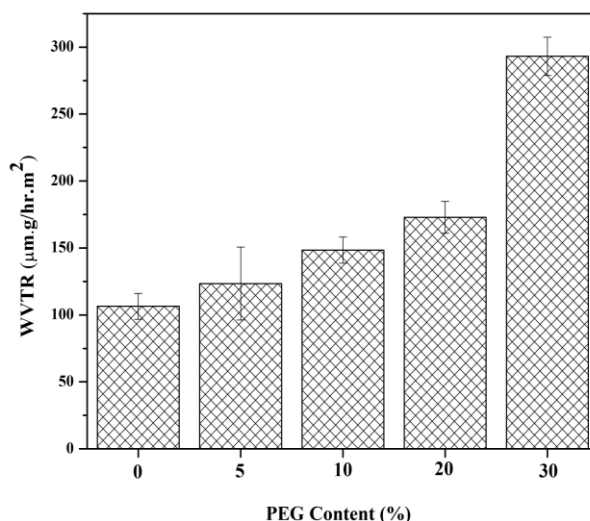




รูปที่ 4.7 แสดงภาพ Scanning electron microscope (SEM) ของ PLA และ PLA/PEG ที่ PEG 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก

#### 4.1.7. ผลการศึกษาการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มผสม PLA/PEG

อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของฟิล์มเพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารมีความสำคัญมากในการช่วยยืดอายุให้อาหารมีคุณภาพที่ดีในช่วงเวลาที่มากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงได้ดำเนินการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของฟิล์มผสม โดยศึกษาอิทธิพลของ PEG ต่อการซึมผ่านของไอน้ำบนฟิล์มพบว่าผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเติม PEG ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำผ่านฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากที่ PEG เป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่ปลายสายโซ่คือหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ส่งผลให้ PEG เป็นพอลิเมอร์ที่มีขี้และสามารถละลายน้ำได้ แสดงว่า PEG มีความชอบน้ำที่สูง ดังนั้นการเติม PEG ในฟิล์มจึงผลให้ฟิล์มมีความชอบน้ำมากขึ้น [32] จึงส่งผลให้ WVTR มีค่าสูงขึ้นเมื่อเติม PEG ในปริมาณที่มากขึ้นนั่นเอง



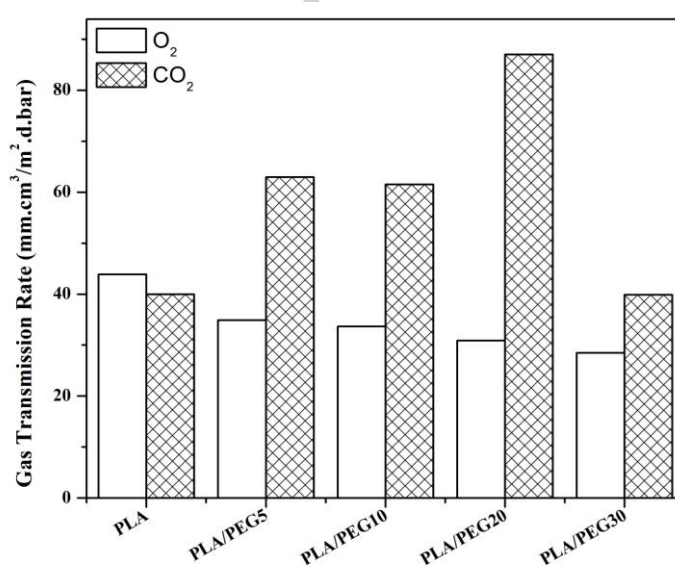
รูปที่ 4.8 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของฟิล์ม PLA และ PLA/PEG ที่ PEG 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก

#### 4.1.8. ผลการศึกษาการซึมผ่านของแก๊สของฟิล์มผสม PLA/PEG

การใช้งานฟิล์มพลาสติกเพื่อเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร อัตราการซึมผ่านของแก๊สเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญต่อการใช้งานดังกล่าว โดยการศึกษาอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PLA และ PLA/PEG แสดงอัตราการซึมผ่านของแก๊สในรูปที่ 4.9 ซึ่งพบว่าอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (OTR) ผ่านฟิล์มลดลง เมื่อปริมาณของ PEG เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากเส้นทางการเดินทางของแก๊สที่ซับซ้อนมากขึ้นจากผลึกในโครงสร้างของพอลิเมอร์ โดยจากการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC (หัวข้อ 4.1.2) ของการเติม PEG พบว่าส่งผลให้ปริมาณความเป็นผลึกของ PLA มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PEG มากขึ้น จึงทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่ผ่านของแก๊สออกซิเจนซับซ้อนและเคลื่อนที่ผ่านได้ยากขึ้นดังแสดงในแบบจำลองรูปที่ 4.10 จึงพบว่าแก๊สออกซิเจนเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มผสม PLA/PEG ได้น้อยลง ที่ปริมาณ PEG เพิ่มขึ้น ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของแก๊สออกซิเจนในฟิล์ม PLA/PEG เป็นอิทธิพลมาจากความเป็นผลึกมากที่สุด เนื่องจาก PLA/PEG มีความชอบน้ำที่มากขึ้นจากการเติม PEG ดังแสดงในผลการทดสอบ WVTR จึงไม่มีผลทางเคมีของฟิล์มพอลิเมอร์ต่อแก๊สออกซิเจนซึ่งไม่มีขั้ว

ในส่วนของอิทธิพลของ PEG ต่อการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าอัตราการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>TR) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณ PEG มากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลทางเคมีของหมู่อีเทอร์ (-O-) ใน PEG ส่งผลให้ความเข้ากันได้ระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และฟิล์มผสม PLA/PEG เพิ่มขึ้น ดังนั้น PEG จึงสามารถประพฤติตัวเป็นส่วน

ยึดหยุ่นยอมให้โมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แทรกผ่านได้ดังแสดงในแบบจำลองรูปที่ 4.10 จึงกล่าวได้ว่า PEG สามารถเหนี่ยวนำแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้เคลื่อนที่ผ่านฟิล์มผสม PLA/PEG ได้ดี [33] ส่งผลให้เมื่อเติม PEG มากขึ้น จะส่งผลให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เคลื่อนที่ผ่านได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามที่ปริมาณ PEG 30% โดยน้ำหนัก ซึ่งส่งผลให้ปริมาณผลึกของ PLA เพิ่มขึ้นอย่างมาก (จาก 2.3% เป็น 43.6%) ดังตาราง 4.1 ปริมาณผลึกจึงมีอิทธิพลมากกว่าแรงทางเคมีของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และหมู่ไฮดรอกซิลของ PEG จึงพบว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เคลื่อนที่ผ่านได้น้อยลง

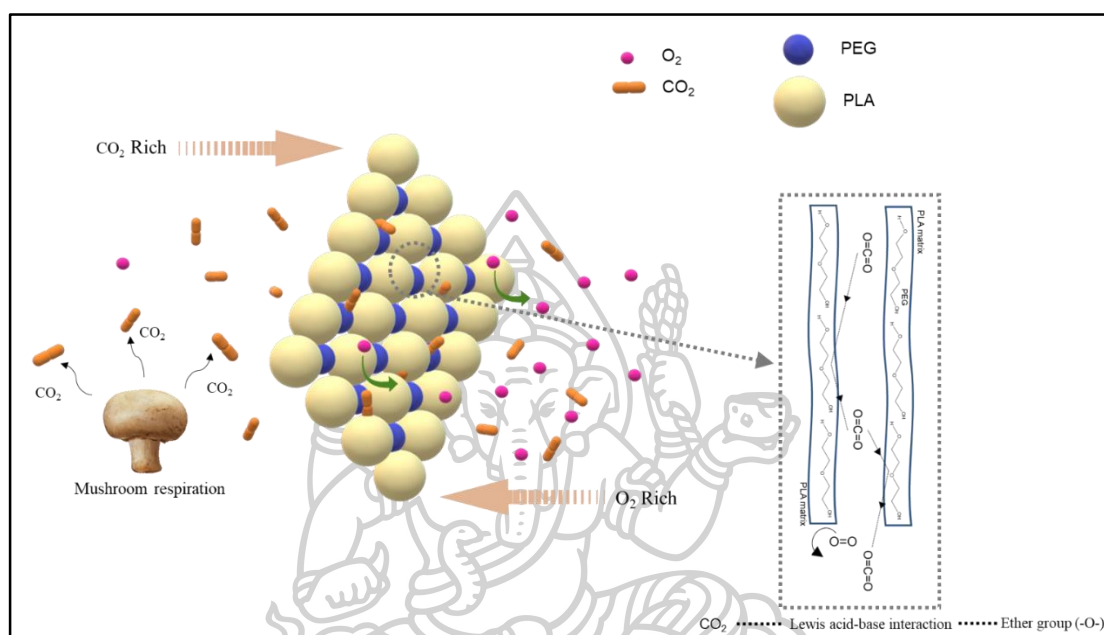


รูปที่ 4.9 แสดงอัตราการซึมผ่านของแก๊สของฟิล์ม PLA และ PLA/PEG ที่ PEG 5, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก

จากอิทธิพลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าฟิล์มผสม PLA/PEG สามารถประพฤติตัวเป็นฟิล์มเลือกผ่านที่ยอมให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านได้ และป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน ดังแสดงในแบบจำลองรูปที่ 4.10

จากผลการทดสอบที่กล่าวนี้ จะพบว่า PEG มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติด้านการไหล และสมบัติการซึมผ่านของแก๊สอย่างมากที่การเติม PEG 20% โดยน้ำหนัก ขึ้นไป ในฟิล์มผสม PLA/PEG ซึ่งที่การเติม PEG ที่ปริมาณดังกล่าวส่งผลให้ความแข็งแรงของฟิล์มผสม PLA/PEG ลดลง และความแข็งแรงของพอลิเมอร์หลอมเหลวลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับ PLA ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในขั้นรูปลดลง ดังนั้นในการศึกษาขั้นต่อไปจึงจะเป็นการศึกษาการเติม PEG ที่ปริมาณ

น้อยเพียง 10% โดยน้ำหนัก และเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PEG ด้วยการเติม ADR เพื่อให้อิทธิพลของ PEG ที่ปริมาณ PEG 10% โดยน้ำหนัก ส่งผลเทียบเท่ากับการเติม PEG ปริมาณสูง โดยที่การลดลงของความแข็งแรงของฟิล์มผสมเกิดขึ้นน้อยลง



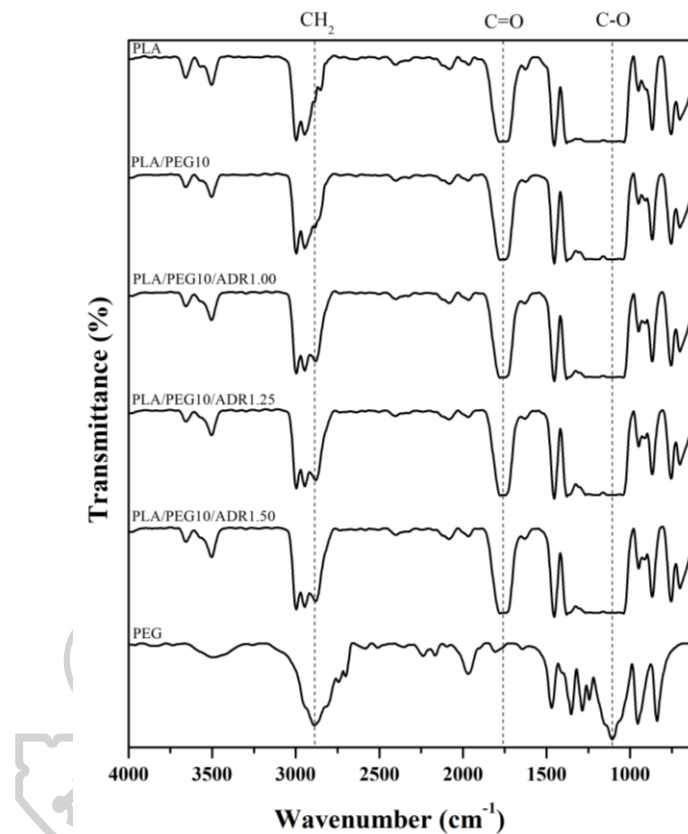
รูปที่ 4.10 แสดงภาพจำลองการเลือกผ่านของแก๊สออกซิเจน (O<sub>2</sub>) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ในฟิล์มผสมของ PLA/PEG

## 4.2 ผลของการศึกษาฟิล์มผสมของ PLA/PEG10 ที่มีการเติมสารขยายสายโซ่ ADR

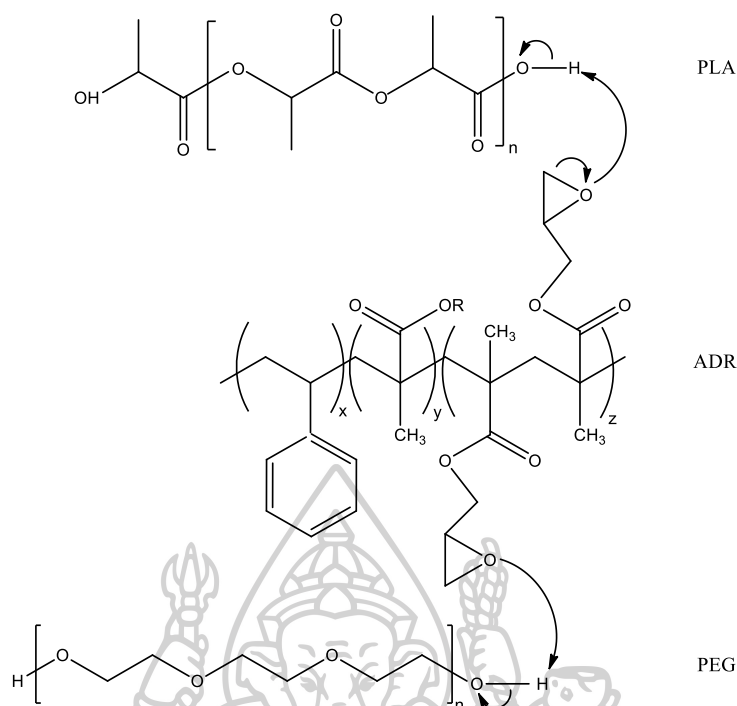
### 4.2.1. การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มผสมด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)

โครงสร้างทางเคมีของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR ดังรูปที่ 4.11 แสดงผลของการเติมสารขยายสายโซ่ ADR ใน PLA/PEG ซึ่งมี PEG 10% โดยน้ำหนัก (PLA/PEG10) จากที่กล่าวถึงพิกัดเอกลักษณ์ของ PLA และ PEG ในหัวข้อที่ 4.1.1 พบว่าเมื่อเติม ADR ที่ปริมาณ 1.00, 1.25 และ 1.50 phr ส่งผลให้มีพิกัดใหม่ปรากฏขึ้นที่  $2877\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพิกัดเอกลักษณ์ของ ADR แสดงถึงผลของการเปลี่ยนแปลงบนโครงสร้างทางเคมีบนสายโซ่ PLA เนื่องจากปฏิกิริยาของ ADR ที่เกิดขึ้นที่ปลาย

สายโซ่ของ PLA และ PEG [24] ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งส่งผลให้การสั้นของหมู่  $-CH_2$  เปลี่ยนแปลงไปและปรากฏเป็นพีคใหม่ ณ ตำแหน่งดังกล่าว [34] แสดงให้เห็นว่า ADR สามารถเกิดปฏิกิริยาที่ปลายสายโซ่กับหมู่ไฮดรอกซิลของ PLA และ PEG ได้



รูปที่ 4.11 แสดง Fourier Transform Infrared Spectra ของ PLA/PEG10 ที่ ADR 1.00, 1.25 และ 1.50 phr

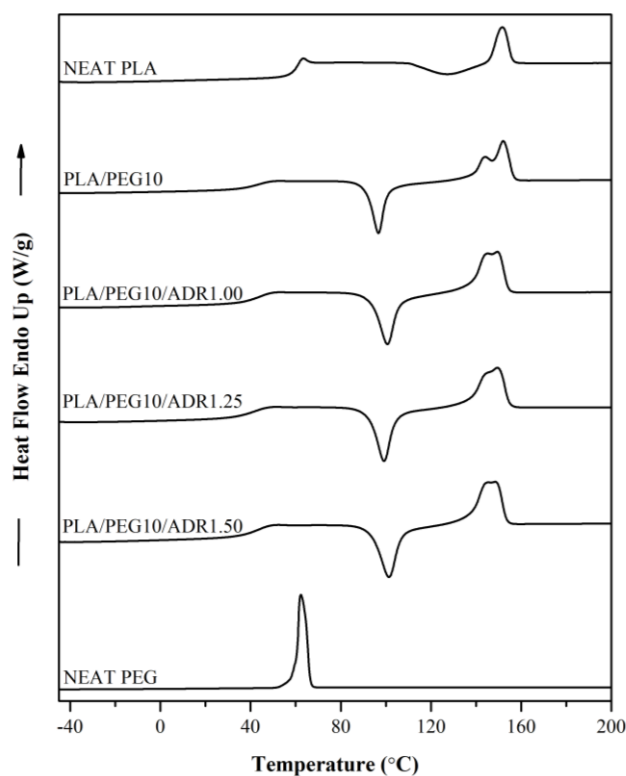


รูปที่ 4.12 แสดงแผนภาพการเกิดปฏิกิริยาของ PLA, PEG และ ADR

#### 4.2.2. ผลของการศึกษาสมบัติทางความร้อนของ PLA/PEG10 ที่มีการเติมสารขยายสายโซ่ ADR ด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)

ในรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG ที่เติม PEG 10% โดยน้ำหนัก และมีการเติมสารขยายสายโซ่ชนิด ADR ที่ 1.00, 1.25 และ 1.50 phr จากอิทธิพลของ ADR ต่อ PLA/PEG10 พบว่า  $T_g$  ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเติม ADR 1.00 และ 1.50 phr เมื่อเทียบกับ PLA/PEG10 แต่อย่างไรก็ตามที่ ADR 1.25 phr พบว่า  $T_g$  ของ PLA ลดลงประมาณ  $4^{\circ}\text{C}$  เมื่อเทียบกับ PLA/PEG10 แสดงให้เห็นว่า ADR ที่ 1.25 phr สามารถเกิดปฏิกิริยาที่ปลายสายโซ่ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดได้ และส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ของ PLA และ PEG จึงส่งผลให้ PLA และ PEG เข้ากันได้มากขึ้น จึงเห็นว่า  $T_g$  ของพอลิเมอร์ผสม ขยับเข้าใกล้  $T_g$  ของ PEG และยังพบว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกขณะหลอมเหลว ( $T_c$ ) นั้นสูงขึ้นเล็กน้อย เมื่อเติม ADR เมื่อเทียบกับ PLA/PEG10 แสดงให้เห็นว่าการเกิดปฏิกิริยาที่ปลายสายโซ่ของ ADR ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์มีความเกาะและเกิดการพันเกี่ยวกันมากขึ้น ดังนั้นในการจัดเรียงตัวเพื่อเกิดผลึกจึงเกิดได้ยากขึ้น





รูปที่ 4.13 แสดง DSC Thermogram ของ PLA/PEG10 ที่เติม ADR 1.00, 1.25 และ 1.50 phr

ตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติทางความร้อนของ PLA/PEG ที่ปริมาณ PEG 10% โดยน้ำหนัก และ PLA/PEG10 ที่เติม ADR ที่ปริมาณแตกต่างกัน

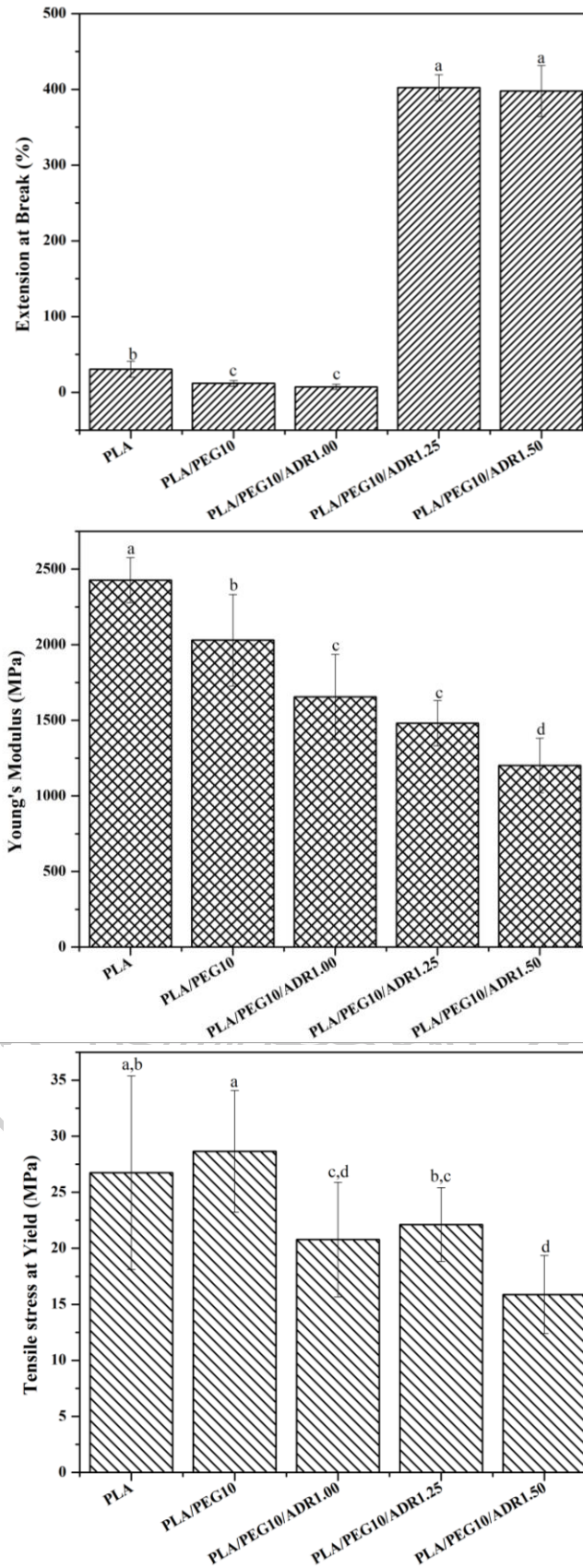
Sample	$T_g$ (°C)	$T_m, \alpha$ (°C)	$T_m, \alpha'$ (°C)	$T_{cc}$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)	$\Delta H_{cc}$ (J/g)	$X_c$ (%)
NEAT PLA	59.62	151.65	-	126.92	8.79	6.63	2.30
NEAT PEG	-	62.32	-	-	182.02	-	92.49
PLA/PEG10/ADR1.0	41.67	149.52	145.19	100.68	24.31	20.36	4.69
PLA/PEG10/ADR1.25	38.87	149.52	145.37	99.19	23.46	22.21	1.48
PLA/PEG10/ADR1.5	41.00	148.52	145.19	101.34	23.69	22.02	1.98

ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณผลึก ( $X_c$ ) ที่ลดลงเมื่อเติม ADR และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของการเพิ่มขึ้นของปริมาณ ADR พบว่า ADR ที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อ  $T_{cc}$  โดยเมื่อพิจารณาว่าการหลอมผลึกของ PLA พบว่า  $T_m$  ลดลงประมาณ 2°C เมื่อเทียบกับ PLA/PEG10 และจากกรณีของพีคการหลอมผลึก 2 ตำแหน่งที่พบใน PLA/PEG10 ที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้นี้ พบว่าเมื่อเติม ADR ส่งผลให้พีคการหลอมผลึกที่

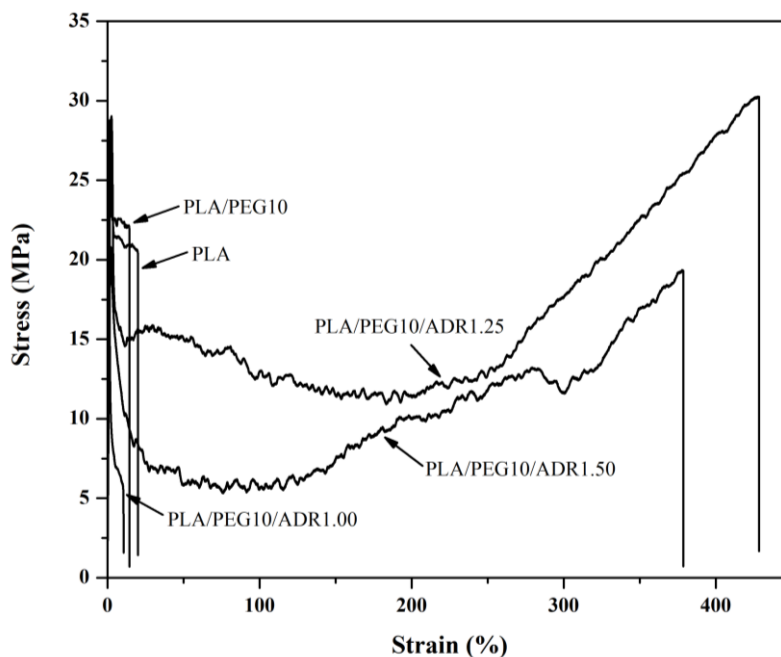
อุณหภูมิต่ำหรือพีคของการหลอมผลึกที่มีรูปแบบไม่สมบูรณ์นั้นมีความเข้มพีคสูงขึ้นเทียบเท่ากับพีคของการหลอมผลึก  $\alpha$  โดยที่ ADR 1.00 และ 1.50 phr พบลักษณะของพีคการหลอมผลึกที่เหมือนกัน แต่ในการเติม ADR 1.25 phr พบว่าพีคของผลึกที่มีรูปแบบไม่สมบูรณ์ ( $\alpha'$ ) มีความเข้มพีคลดลงต่ำกว่าพีคของการหลอมผลึกแบบสมบูรณ์ ( $\alpha$ ) จากผลการทดสอบดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าการขยายสายโซ่ของพอลิเมอร์ส่งผลให้มีความเกาะเกาะมากขึ้น และจัดเรียงตัวเป็นผลึกที่สมบูรณ์ได้น้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณผลึกที่ลดลงเมื่อเติม ADR จากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าการเติม ADR ส่งผลให้สายโซ่มีความเกาะเกาะและเกิดการเกี่ยวพันกันมากขึ้น จึงส่งผลให้  $T_g$  เพิ่มขึ้น และปริมาณผลึกลดลงเมื่อเทียบกับ PLA/PEG10 เนื่องจากสายโซ่เคลื่อนไหวได้ยากขึ้น โดยที่ ADR 1.25 phr สามารถทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดได้มากที่สุด เนื่องจากทำให้  $T_g$  ลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับ ADR ปริมาณอื่นๆ ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบ FTIR ที่แสดงให้เห็นว่า ADR สามารถสร้างอันตรกิริยาระหว่าง PLA และ PEG ได้

#### 4.2.3. ผลของการศึกษาสมบัติเชิงกลของ PLA/PEG และ PLA/PEG ที่มีการเติมสารขยายสายโซ่ ADR

ในการศึกษาอิทธิพลของการเติม ADR ใน PLA/PEG10 พบว่าฟิล์มผสมที่ได้มีสมบัติเชิงกลดังแสดงในรูปที่ 4.14 และมีพฤติกรรมการเสียรูปแสดงในแผนภูมิ Stress-Strain ในรูปที่ 4.15 ซึ่งพบว่าการเติม ADR 1.00 phr ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่า Extension at break เมื่อเทียบกับ PLA/PEG10 หรือกล่าวได้ว่าที่ ADR 1.00 แสดงพฤติกรรมการขาดแบบเปราะเช่นเดียวกับ PLA/PEG10 ในทางตรงกันข้ามการเติม ADR ที่ปริมาณมากขึ้นเป็น 1.25 และ 1.50 phr ส่งผลให้ค่า Extension at break เพิ่มขึ้นประมาณ 10 เท่าของ PLA/PEG10 โดยแสดงพฤติกรรมแบบวัสดุที่มีความยืดหยุ่น และเกิดพฤติกรรม Strain hardening ขณะเสียรูป แสดงให้เห็นว่าที่ PEG 10% โดยน้ำหนัก จะสามารถส่งอิทธิพลต่อ PLA ได้ดี เมื่อมีความเข้ากันได้กับ PLA มากขึ้น



รูปที่ 4.14 แสดงสมบัติเชิงกลของ PLA และ PLA/PEG10 ที่เติม ADR 1.00, 1.25 และ 1.50 phr



รูปที่ 4.15 แสดงแผนภาพ Stress-Strain ของ PLA และ PLA/PEG10 ที่เติม ADR 1.00, 1.25 และ 1.50 phr

ซึ่งการเติม ADR ที่เป็นสารขยายสายโซ่ ที่ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับปลายสายโซ่พอลิเมอร์ และเชื่อมต่อกับสายโซ่ของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดเข้าด้วยกัน หรือกล่าวได้ว่า ADR จะประพฤติตัวเสมือนสารเพิ่มความเข้ากันได้สำหรับพอลิเมอร์ผสม ส่งผลให้เมื่อเติม ADR ในปริมาณที่เหมาะสม ADR จะสามารถเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดได้ ทำให้ PLA/PEG มีความเข้ากันได้มากขึ้น และเมื่อ PEG มีความเข้ากันได้ดีและมีอันตรกิริยากับ PLA จึงส่งผลให้ PEG มีอิทธิพลต่อ PLA มากขึ้นและกระจายตัวใน PLA ได้ดี จึงพบว่าการเติม PEG ที่ 10% โดยน้ำหนัก ที่มี ADR 1.25 และ 1.50 phr นั้นส่งผลต่อ Extension at break ของ PLA เทียบเท่ากับการเติม PEG ที่ 20 และ 30% โดยน้ำหนัก ในส่วนของการพิจารณาค่าโมดูลัสพบว่าการเติม ADR ทำให้ PEG เข้ากับ PLA ได้มากขึ้น จึงทำให้ PEG ส่งผลให้ฟิล์มผสมมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าโมดูลัสของฟิล์มผสมลดลงเมื่อเทียบกับ PLA และ PLA/PEG10 เนื่องจาก PEG ที่ประพฤติตัวเป็น พลาสติกไฮเซอร์จึงส่งผลให้สายโซ่ของ PLA เกิดการเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น โดยเมื่อพิจารณาค่า Tensile stress at yield พบว่าการเติม ADR 1.00 และ 1.25 phr ส่งผลให้ฟิล์มมีค่า Tensile stress ใกล้เคียงกับ PLA และ PLA/PEG10 ซึ่งในกรณีของ ADR 1.00 phr เป็นเหตุมาจากการที่ปริมาณ ADR ดังกล่าว ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติเชิงกลของ PLA และ PLA/PEG10 เช่นเดียวกับผลของ Extension at break จึงแสดง

พฤติกรรมที่คล้ายกันกับ PLA/PEG10 โดยในส่วนของ การเติม ADR 1.25 phr ที่ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่กลับแสดงค่า Tensile stress ที่สูง แสดงให้เห็นถึงการเกิดอันตรกิริยาระหว่าง PLA และ PEG ที่จะช่วยยึดสายโซ่ให้เคลื่อนที่ผ่านกันได้ยากขึ้น ดังนั้นจึงต้องใช้แรงมากขึ้นในการทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ผ่านกันและเสียรูปถาวร ซึ่งที่การเติม ADR 1.50 phr แสดงค่า Tensile stress ที่ต่ำลง แสดงให้เห็นว่าอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจาก ADR อาจเกิดขึ้นน้อยกว่าที่การเติม ADR 1.25 phr เนื่องจากการเติม ADR ที่ปริมาณสูงเกินไป อาจส่งผลให้ ADR เกาะกลุ่มทำปฏิกิริยากันเอง และเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์น้อยลง ในอีกด้านหนึ่งเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ที่เกิดขึ้นนี้ ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์จัดเรียงตัวไปตามแนวแรงได้ยากขึ้น จึงจะเห็นในรูปที่ 4.15 ว่าพฤติกรรม Strain hardening เกิดขึ้นได้ช้ากว่า เมื่อเทียบกับการเติม PEG 20 และ 30% โดยน้ำหนัก ด้วยพฤติกรรมเหล่านี้จึงสามารถยืนยันได้ถึงการมีอยู่ของอันตรกิริยาระหว่าง PLA และ PEG ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวนี้เป็นไปในแนวโน้มเดียวกันกับการทดสอบสมบัติทางความร้อนที่พบว่า การเติม ADR 1.25 phr ใน PLA/PEG10 ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาที่ดีที่สุด

#### 4.2.4. ผลของการศึกษาสมบัติรีออลอจีของ PLA/PEG10 ที่มี การเติมสารขยายสายโซ่ ADR

ในการศึกษาอิทธิพลของการเติม ADR ใน PLA/PEG10 ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าการเติม ADR ส่งผลให้  $\eta^*$  ของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มสูงขึ้น โดยสูงกว่า PLA บริสุทธิ์ ที่ ADR ทุกสัดส่วน แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขนาดสายโซ่เนื่องจาก ADR ต่อ PLA ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์มีความเกาะกันมากขึ้น จึงทำให้เกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่ได้มากขึ้น โดยเมื่อสายโซ่พอลิเมอร์ได้รับแรงเฉือนสายโซ่จะเกิดการคลายตัวได้ยากขึ้น แสดงให้เห็นว่า  $\eta^*$  มีค่าสูงขึ้นเมื่อเติม ADR และยังคงพบว่าช่วง Newtonian plateau ของพอลิเมอร์ขยับไปอยู่ที่ความถี่ต่ำลง [35] ซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นได้ในช่วงความถี่ที่ทดสอบ แสดงให้เห็นถึงการเกิด Shear thinning ที่ความถี่ต่ำลง เมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ ปรากฏการณ์เช่นนี้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงบนสายโซ่ PLA เนื่องจาก ADR จึงช่วยยืนยันได้ว่า ADR สามารถเกิดปฏิกิริยาที่ปลายสายโซ่ของพอลิเมอร์ได้ และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณ ADR ที่ 1.00, 1.25 และ 1.50 phr พบว่า PLA/PEG10 ที่เติม ADR 1.00 และ 1.50 phr มีค่า  $\eta^*$  ที่ใกล้เคียงกันและต่ำกว่าการเติม ADR ที่ 1.25 phr จึงกล่าวได้ว่า PLA/PEG10/ADR1.25 มี  $\eta^*$  ที่สูงที่สุด

แสดงให้เห็นว่าที่ ADR 1.25 phr นอกจากจะช่วยขยายสายโซ่แก่ PLA ได้แล้ว ADR ยังช่วยเชื่อมต่อสายโซ่ของ PLA และ PEG เข้าด้วยกันได้ ซึ่งการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่นี้ เปรียบเสมือนการ

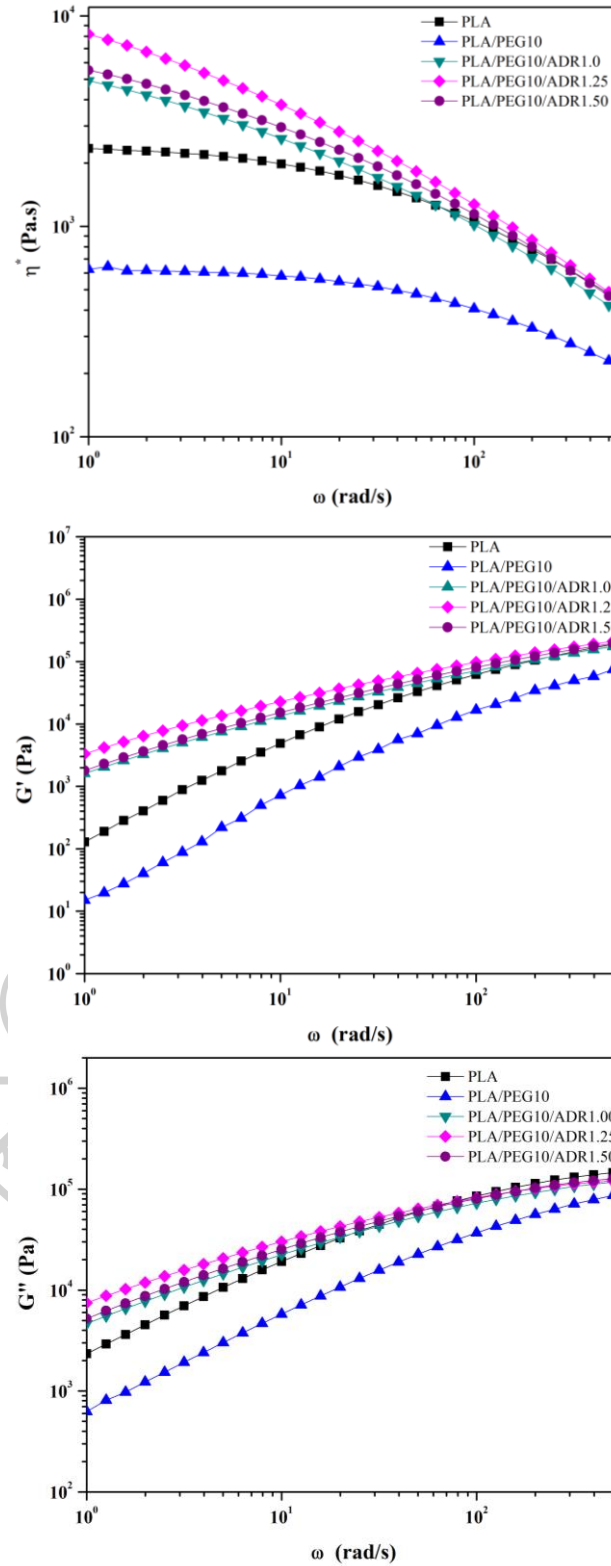


เชื่อมขวาง นั้นส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์มีการเกี่ยวพันกันที่มากและเคลื่อนที่ผ่านกันได้ยากขึ้นอีกด้วย จึงทำให้พบว่า PLA/PEG10/ADR1.25 มี  $\eta^*$  สูงที่สุด ซึ่งค่า Storage modulus ( $G'$ ) และ Loss modulus ( $G''$ ) แสดงผลการทดสอบที่เป็นแนวโน้มเดียวกับกับ  $\eta^*$  คือในการเติม ADR จะส่งผลให้ โมดูลัสมีค่าสูงขึ้นและสูงกว่า PLA บริสุทธิ์ ในช่วงความถี่ต่ำ และ PLA/PEG10/ADR1.25 แสดงค่า โมดูลัสที่สูงที่สุด อย่างไรก็ตามที่ ADR 1.50 phr ไม่แสดงแนวโน้มที่ดีขึ้น แม้ปริมาณ ADR จะมากขึ้นก็ตาม เป็นเหตุจากการที่ ADR ที่ปริมาณมาก โอกาสที่ ADR จะพบกับตำแหน่งที่ว่างไว้ต่อปฏิกิริยา เป็นตัว ADR ด้วยกันเองนั้นมีสูงขึ้น จึงส่งผลให้ที่การเติม ADR มากเกินพอดี ADR จะเกิดปฏิกิริยาต่อกันเอง และเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์น้อยลง แสดงให้เห็นว่าการเติม ADR จะช่วยให้พอลิเมอร์ผสมมีความแข็งแรงขณะหลอมเหลวมากขึ้น โดยสูงที่สุดที่ ADR 1.25 phr ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมาก สำหรับกระบวนการขึ้นรูป ที่จะสามารถดำเนินการได้สะดวกยิ่งขึ้น ซึ่งข้อสรุปดังกล่าวนี้เป็นแนวโน้ม เช่นเดียวกับกับผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลและงานวิจัยของ Dahman Y. และคณะ[24] ซึ่งพบว่า การเติม ADR 1.25% โดยน้ำหนัก ในโคพอลิเมอร์ของ PLA-co-PEG แสดงผลลัพธ์เชิงกลที่ดีที่สุด

#### 4.2.5. ผลของการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของ PLA/PEG10 ที่มีการเติมสารขยายสายโซ่ ADR ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA)

ในการพิจารณาอิทธิพลของการเติม ADR ต่อเสถียรภาพทางความร้อนของ PLA/PEG10 ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.4 พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวและอุณหภูมิที่เริ่มสลายตัวของ PLA เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติม ADR 1.25 และ 1.50 phr แสดงให้เห็นว่าการเติม ADR ที่ช่วยขยายสายโซ่แก่ PLA/PEG10 ส่งผลให้สายโซ่เคลื่อนที่ยากขึ้นและต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อทำให้สายโซ่เริ่มสลายตัว และความยาวของสายโซ่ที่เพิ่มขึ้นนี้ ส่งผลให้อุณหภูมิในการสลายตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอีกด้วย ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวนี้เป็นไปตามสมบัติเชิงกลที่พบการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลที่การเติม ADR 1.25 และ 1.50 phr เช่นเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสายโซ่ของ PLA และ PEG เนื่องจาก ADR ที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้นั้น อาจจะไม่แข็งแรงมากพอที่จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีบนสายโซ่ของ PLA ได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ในกราฟอนุพันธ์ของการสลายตัวของ PLA/PEG10 ที่เติม ADR นั้นพบการสลายตัวเล็กๆ อีกหนึ่งขั้น ที่อุณหภูมิประมาณ 400°C ซึ่งอนุมานว่าช่วงการสลายตัวดังกล่าวเป็นการสลายตัวของ ADR โดย ADR เป็นสารขยายสายโซ่ที่มีอุณหภูมิการสลายเป็นช่วงกว้างในช่วง 240-430°



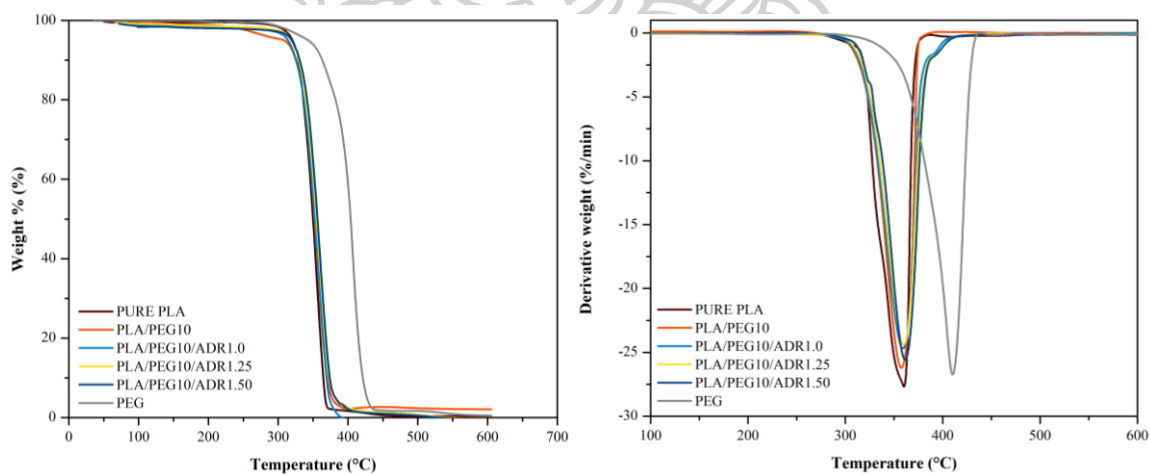


รูปที่ 4.16 แสดงสมบัติรีออลอจีที่ 180°C ของ PLA และ PLA/PEG10 ที่เติม ADR 1.00, 1.25 และ 1.50 phr

เนื่องจาก ADR ประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันที่หลากหลายประกอบไปด้วยหมู่ Styrene, Acrylic และ Epoxide [36] ส่งผลให้พบการสลายตัวบางส่วนของ ADR ที่อุณหภูมิสูง โดยการสลายตัวที่ขึ้นตอณดังกล่าวเกิดในลักษณะเดียวกันที่ ADR 1.00, 1.25 และ 1.50 phr

ตารางที่ 4.4 แสดงเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG10/ADR

Sample	T <sub>onset</sub> (°C)	T <sub>d</sub> (°C)
PLA	333.02	357.15
PEG	381.96	409.49
PLA/PEG10	334.98	359.11
PLA/PEG10/ADR1.00	333.87	358.79
PLA/PEG10/ADR1.25	336.52	360.59
PLA/PEG10/ADR1.50	338.33	360.82



รูปที่ 4.17 แสดงการสลายตัวทางความร้อนของ PLA, PEG และ PLA/PEG10 ที่เติม ADR 1.00, 1.25 และ 1.50 phr

#### 4.2.6. ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PLA/PEG10 ที่มีการเติมสารขยายสายโซ่ ADR

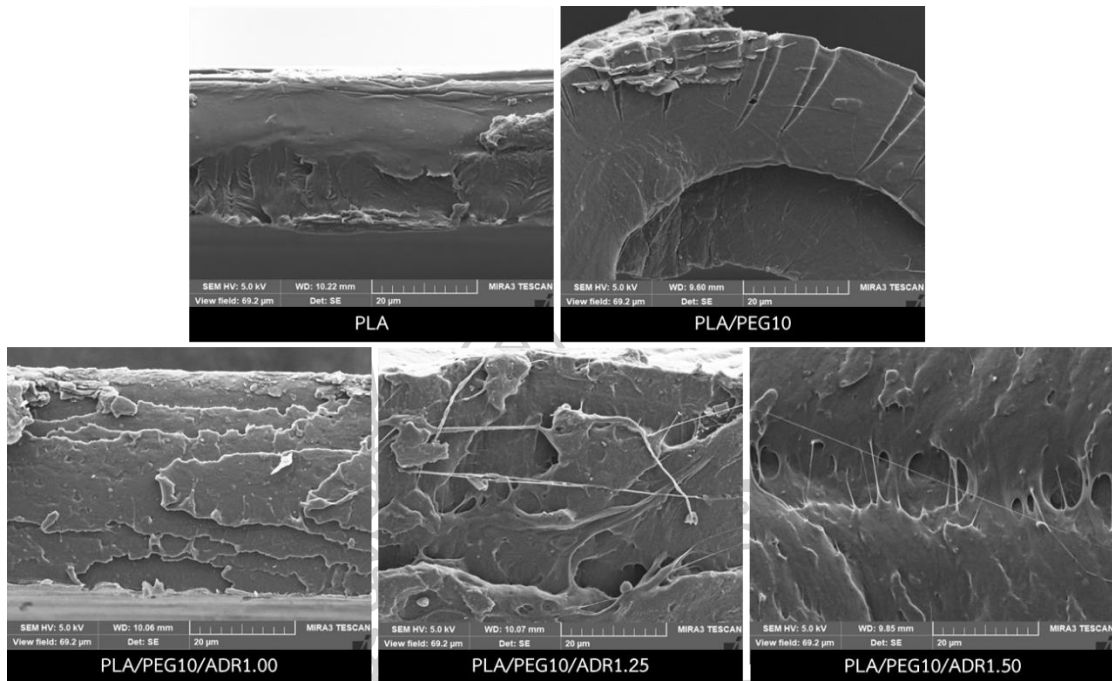
อิทธิพลของการเติม ADR ในฟิล์ม PLA/PEG10 ต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มที่ถูกดึงยืด แสดงในรูปที่ 4.18 พบว่าการเติม ADR 1.00 phr แสดงให้เห็นถึงลักษณะของพื้นผิวที่ขรุขระมากขึ้น เมื่อเทียบกับ PLA/PEG10 โดยมีลักษณะของพื้นผิวเป็นชั้น (Layer) ซ้อนกัน ซึ่งไม่เชื่อมต่อกันเป็น Co-continuous phase เนื่องจากแรงยึดติดที่พื้นผิวที่ไม่ดี และยังส่งผลให้เกิดรอยช่องว่าง (Void) ที่เป็นจุดบกพร่องต่อการส่งผ่านแรงเมื่อพอลิเมอร์ได้รับแรง ดังนั้นจึงพบว่าฟิล์ม PLA/PEG10/ADR1.00 มีความแข็งแรงที่ลดลง และไม่ประพติตัวเป็นฟิล์มยืดหยุ่นเมื่อเติม PEG โดยเมื่อเพิ่ม ADR เป็น 1.25 phr พบว่าพื้นผิวมีความขรุขระมากขึ้นแสดงถึงการขาดแบบเหนียว (Ductile) ที่มาก [37] และสังเกตเห็นไฟบริลที่เกิดจากส่วนที่ยืดหยุ่นเกิดขึ้น โดยพบว่าพื้นผิวมีการเชื่อมต่อเข้าหากัน และแสดงพื้นผิวเป็นแบบ Co-continuous phase แสดงถึงการยึดติดที่ผิวที่ดี และความเข้ากันได้ที่ดีของ PLA และ PEG เนื่องจาก ADR ที่เชื่อมต่อสายโซ่ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน จึงส่งผลให้ที่ปริมาณ PEG เท่ากันที่ 10% โดยน้ำหนัก แต่ที่การเติม ADR 1.25 phr ส่งผลให้ฟิล์มสามารถยืดหยุ่นได้สูงขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับไม่เติมและเติม ADR 1.00 phr แสดงให้เห็นถึงปริมาณที่เหมาะสมที่ช่วยให้ PEG มีอิทธิพลต่อ PLA ได้ดี และแสดงพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นได้

จากผลการทดสอบนี้ช่วยยืนยันได้ด้วยค่า Extension at break ที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก ที่แสดงในผลการทดสอบสมบัติเชิงกล และเมื่อเพิ่ม ADR เป็น 1.50 phr พบว่าลักษณะของพื้นผิวมีความขรุขระน้อยลงเมื่อเทียบกับการเติม ADR ที่ 1.25 phr แต่ยังคงแสดงได้ถึงลักษณะการขาดแบบเหนียว (Ductile) ซึ่งไม่ได้แสดงให้เห็นถึงการยึดติดของพื้นผิวที่ชัดเจนเช่นเดียวกับ PLA/PEG10/ADR1.25 จากการทดสอบ SEM จึงช่วยยืนยันต่อผลการทดสอบรีออลอยีและสมบัติเชิงกลได้ว่า PLA/PEG10/ADR1.25 ช่วยให้ PEG มีอิทธิพลต่อ PLA มากที่สุด

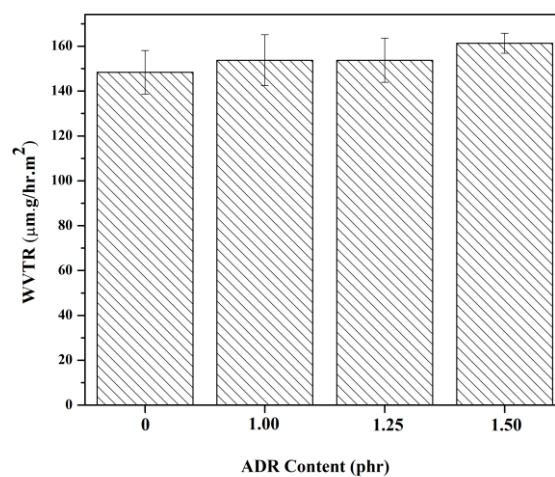
#### 4.2.7. ผลการศึกษาการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม PLA/PEG10 ที่มีการเติมสารขยายสายโซ่ ADR

สำหรับอิทธิพลของ ADR ต่ออัตราการซึมผ่านของไอน้ำของ PLA/PEG10 ดังแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าการเติม ADR ไม่ได้ส่งผลต่อค่า WVTR อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากโมเลกุลของไอน้ำมีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่กว่าช่องว่างระหว่างผลึกในระดับโมเลกุลของพอลิเมอร์ ดังนั้นอิทธิพลของความเป็ผลึกจึงไม่แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของการเคลื่อนที่ผ่านของไอน้ำ จึงพบว่าค่า WVTR มี

อิทธิพลหลักมาจากความชอบน้ำของพื้นผิวของฟิล์มเป็นหลัก และ ADR ที่ซึ่งมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณของ PEG ดังนั้นการเติม ADR จึงไม่มีอิทธิพลต่อความชอบน้ำที่ผิวฟิล์มที่มีการเติม PEG



รูปที่ 4.18 แสดงภาพ Scanning electron microscope (SEM) ของ PLA และ PLA/PEG10 ที่ ADR 1.00, 1.25 และ 1.50 phr

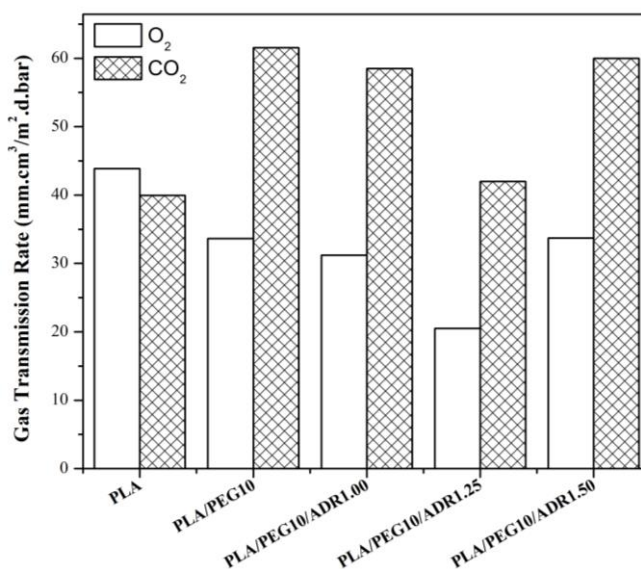


รูปที่ 4.19 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของฟิล์ม PLA และ PLA/PEG10 ที่เติม ADR 1.00, 1.25 และ 1.50 phr

#### 4.2.8. ผลการศึกษาการซึมผ่านของแก๊สของฟิล์ม PLA/PEG10 ที่มีการเติมสารขยายสายโซ่

##### ADR

การซึมผ่านของแก๊สผ่านฟิล์ม PLA/PEG10 ซึ่งได้รับอิทธิพลเนื่องจาก ADR ดังแสดงในรูปที่ 4.20 พบว่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (OTR) มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเติม ADR 1.00 และ 1.25 phr เมื่อเทียบกับ PLA และ PLA/PEG10 โดย PLA/PEG10/ADR1.00 ไม่แสดงให้เห็นถึง OTR ที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเติม ADR ที่ปริมาณ 1.0 phr ยังไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาระหว่าง PLA และ PEG ได้ดี ส่งผลให้ PEG ยังแสดงอิทธิพลได้ไม่มาก ดังแสดงในสมบัติเชิงกล ดังนั้นการเติม ADR จึงไม่ได้ส่งผลต่อการซึมผ่านของแก๊สได้อย่างมีนัยสำคัญ จึงเห็นว่าค่า OTR นั้นใกล้เคียงกับ PLA/PEG10 ที่ไม่มีการเติม ADR และยังพบค่า OTR ในแนวโน้มเดียวกันในการเติม ADR ที่ 1.50 phr ที่ถึงแม้ว่าจะช่วยให้ PEG ประพฤติตัวเป็นพลาสติกไซเซออร์ได้ดี และส่งผลให้ฟิล์มยืดหยุ่นขึ้นดังแสดงในสมบัติเชิงกลก็ตาม แต่ปริมาณของ ADR ที่มากเกินไป จะทำให้ ADR บางส่วนรวมตัวกันเอง และขัดขวางการแพทตัวของสายโซ่ ดังแสดงในผล DSC ที่พบว่าปริมาณผลึกลดลง จึงทำให้ OTR มีค่าสูงเทียบเท่ากับ PLA/PEG10 และในทางกลับกันการเติม ADR ที่ปริมาณที่เหมาะสมที่ 1.25 phr ซึ่งแสดงผลในสมบัติเชิงกลและรีออลอจี ส่งผลให้มีอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ PLA และ PEG มากขึ้น ทำให้เส้นทางในการเคลื่อนที่ของแก๊สออกซิเจนซับซ้อนและแสดงให้เห็นว่า OTR ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แม้ปริมาณผลึกดังแสดงในตารางที่ 4.3 จะต่ำลงเมื่อเทียบกับ PLA/PEG10 ก็ตาม



รูปที่ 4.20 แสดงอัตราการซึมผ่านของแก๊สของฟิล์ม PLA และ PLA/PEG10 ที่เติม ADR 1.00, 1.25 และ 1.50 phr



สำหรับอิทธิพลของการเติม ADR ต่ออัตราการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2\text{TR}$ ) พบว่าผลการทดลองที่ได้เป็นแนวโน้มเดียวกันกับ OTR ที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้ จึงกล่าวได้ว่าแนวโน้มของ  $\text{CO}_2\text{TR}$  มีสาเหตุมาจากเหตุผลเดียวกันที่ได้กล่าวถึงในผลการทดสอบ OTR

จากผลการทดสอบที่กล่าวมานี้จะพบว่าการศึกษาฟิล์มผสมยืดหยุ่น พบว่าฟิล์มผสมที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดคือฟิล์ม PLA/PEG10/ADR1.25 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ของ PLA และ PEG จากเหตุผลดังต่อไปนี้ ในผลการทดสอบ FTIR แสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของอันตรกิริยาระหว่าง PLA และ PEG ด้วยพีคของหมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงไปของหมู่  $-\text{CH}_2$  และการเปลี่ยนแปลงของ  $T_g$  ที่มากที่สุด ในการทดสอบสมบัติทางความร้อน ช่วยยืนยันข้ออนุมานดังกล่าวนี้ได้ด้วยผลการทดสอบรีออลอจีที่ ADR ส่งผลให้พอลิเมอร์หลอมเหลวมีความแข็งแรงมากขึ้นกว่า PLA และมีค่าที่สูงที่สุด และในผลการทดสอบเชิงกลแสดงให้เห็นว่าการเติม PEG 10% โดยน้ำหนัก สามารถส่งผลให้ฟิล์มผสมมีความยืดหยุ่นที่สูงได้ด้วยการเติม ADR 1.25 phr จากที่กล่าวมาจึงสามารถสรุปได้ว่าฟิล์ม PLA/PEG10/ADR1.25 สามารถประพฤติตัวเป็นฟิล์มยืดหยุ่นได้ดีที่สุด อีกทั้งยังมีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของแก๊สได้ดีอีกด้วย ดังนั้นฟิล์มผสมที่สัดส่วนดังกล่าวจึงเป็นส่วนที่ถูกเลือกใช้ในการนำไปศึกษาต่อไป โดยหลังจากนี้จะใช้ชื่อ PPA เพื่อเป็นตัวแทนของ PLA/PEG10/ADR1.25 ในตอนต่อไป

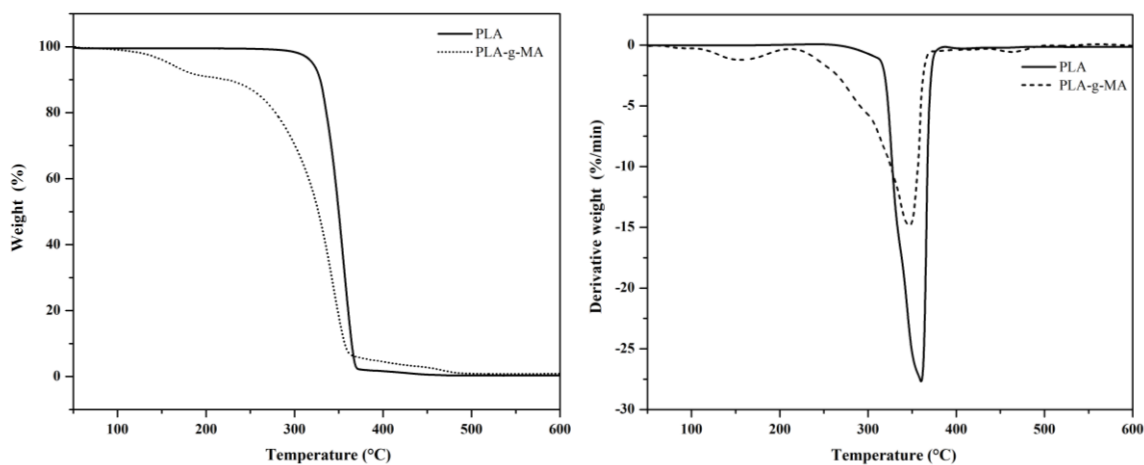
#### 4.3 ผลของการศึกษาเติม PLA-g-MA สำหรับกักเก็บ GSE ในฟิล์มผสม PLA/PEG/ADR

##### 4.3.1. ผลของการศึกษาการเตรียมสารเพิ่มความเข้ากันได้ Poly(lactic acid)-grafted-maleic anhydride (PLA-g-MA)

###### 4.3.1.1 เสถียรภาพทางความร้อนของ PLA-g-MA

การเตรียม PLA-g-MA โดยการเกิดปฏิกิริยาขณะหลอมเหลวนั้น สารริเริ่มปฏิกิริยา DCP จะส่งผลให้สายโซ่ PLA ถูกตัดบางส่วน เพื่อเกิดปฏิกิริยากับ Maleic anhydride ดังนั้นในการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของ PLA-g-MA ดังแสดงในรูปที่ 4.21 จึงพบว่าอุณหภูมิในการสลายตัวของ PLA ลดต่ำลง เมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ โดยแสดงการสลาย 3 ขั้นตอน ซึ่งเป็นขั้นแรกในช่วง 150-200°C เป็นการสลายตัวของ Maleic anhydride [1] และช่วงถัดมาเป็นการสลายตัวขั้นตอนหลักของ PLA แสดงให้เห็นว่า ขณะเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดการตัดสายโซ่ PLA เกิดขึ้น การสลายตัวในช่วงสุดท้ายอาจจะเป็นการสลายตัวของ PLA ที่ทำปฏิกิริยากับ MA แล้วเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปประมาณ 464°C





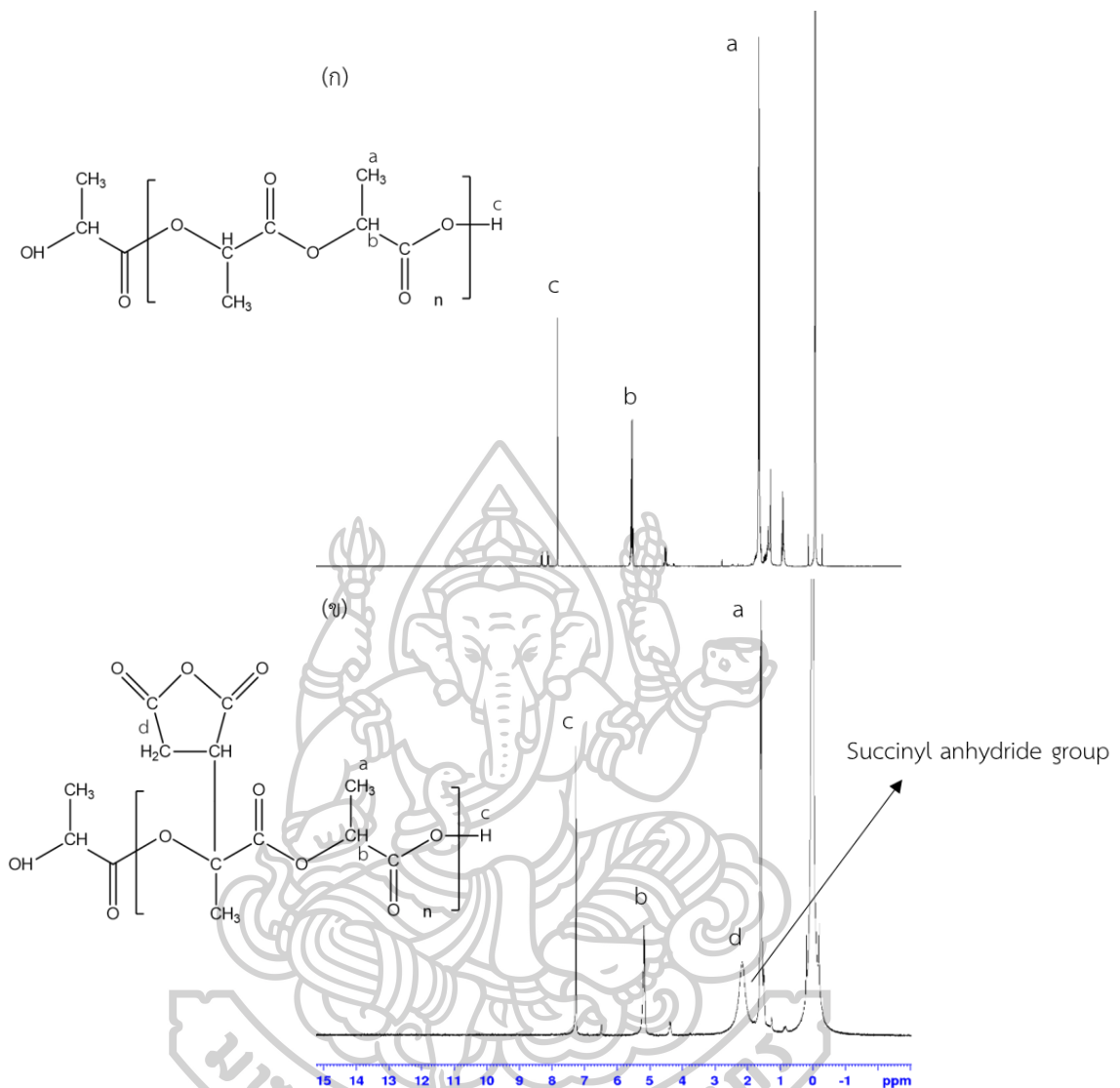
รูปที่ 4.21 แสดงพฤติกรรมของการสลายตัวทางความร้อนของ PLA และ PLA-g-MA

#### 4.3.1.2. ผลการศึกษาโครงสร้างทางเคมีของ PLA-g-MA ด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (NMR)

ในการเตรียม PLA-g-MA ด้วยวิธีการเกิดปฏิกิริยาขณะหลอมเหลว และใช้ Dicumyl peroxide (DCP) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา พบว่าผลการกราฟต์เป็นดังรูปที่ 4.22(ข) แสดงให้เห็นถึงพิกใหม่ที่ขึ้นในช่วง 2-3 ppm เมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ ซึ่งตำแหน่งพิกดังกล่าวนี้แสดงถึงหมู่ Succinyl anhydride [2] ซึ่งเกิดจากการเชื่อมต่อกันของสายโซ่ PLA และ Maleic anhydride จากผลการทดสอบดังกล่าวนี้ จึงช่วยยืนยันได้ว่าในการเตรียม PLA-g-MA สามารถกราฟต์ Maleic anhydride ลงบน PLA ได้จริง

ตารางที่ 4.5 แสดง  $^1\text{H}$  NMR spectrum ของ PLA และ PLA-g-MA

ตัวอย่าง	ตำแหน่ง	Chemical shift (ppm)
PLA	a	1.58
	b	5.16
	c	7.32
PLA-g-MA	a	1.58
	b	5.16
	c	7.32
	d	2.21



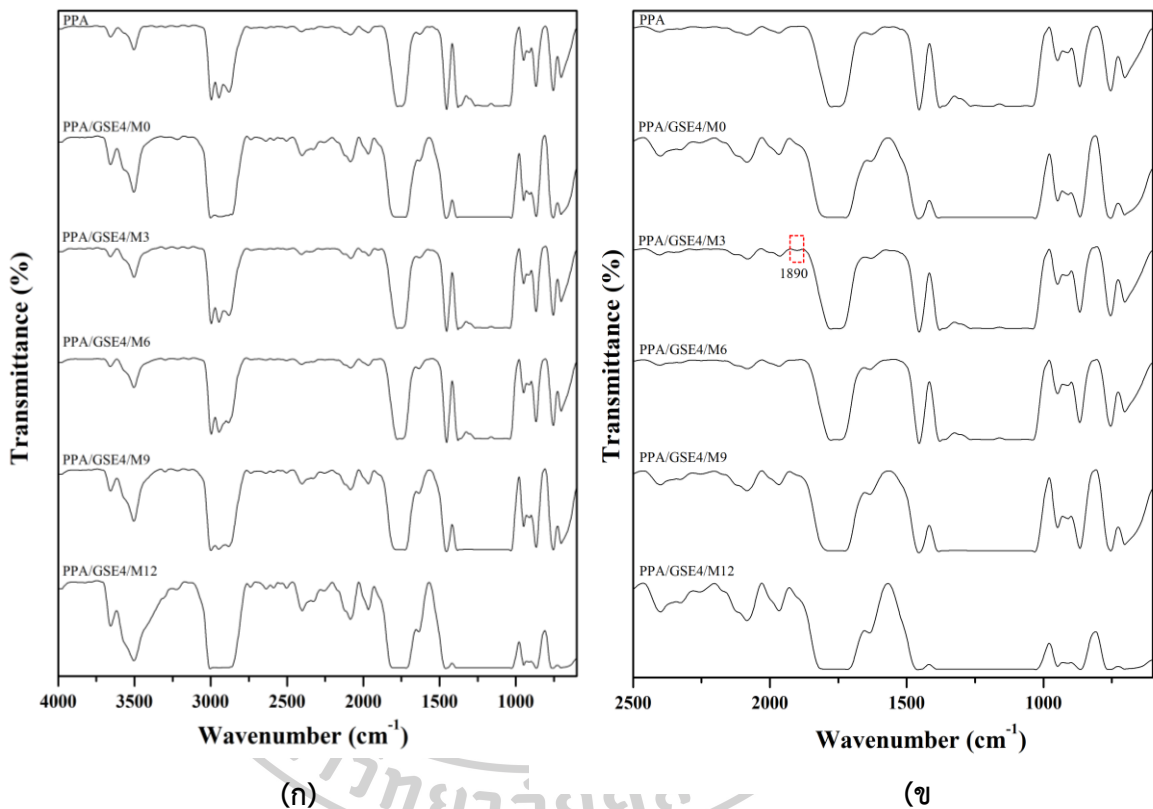
รูปที่ 4.22 แสดงสเปกตรัมของ  $^1\text{H}$  NMR ของ PLA (ก) และ PLA-g-MA (ข)

#### 4.3.2. ผลของ PLA-g-MA ต่อสมบัติของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่มี GSE 4 phr

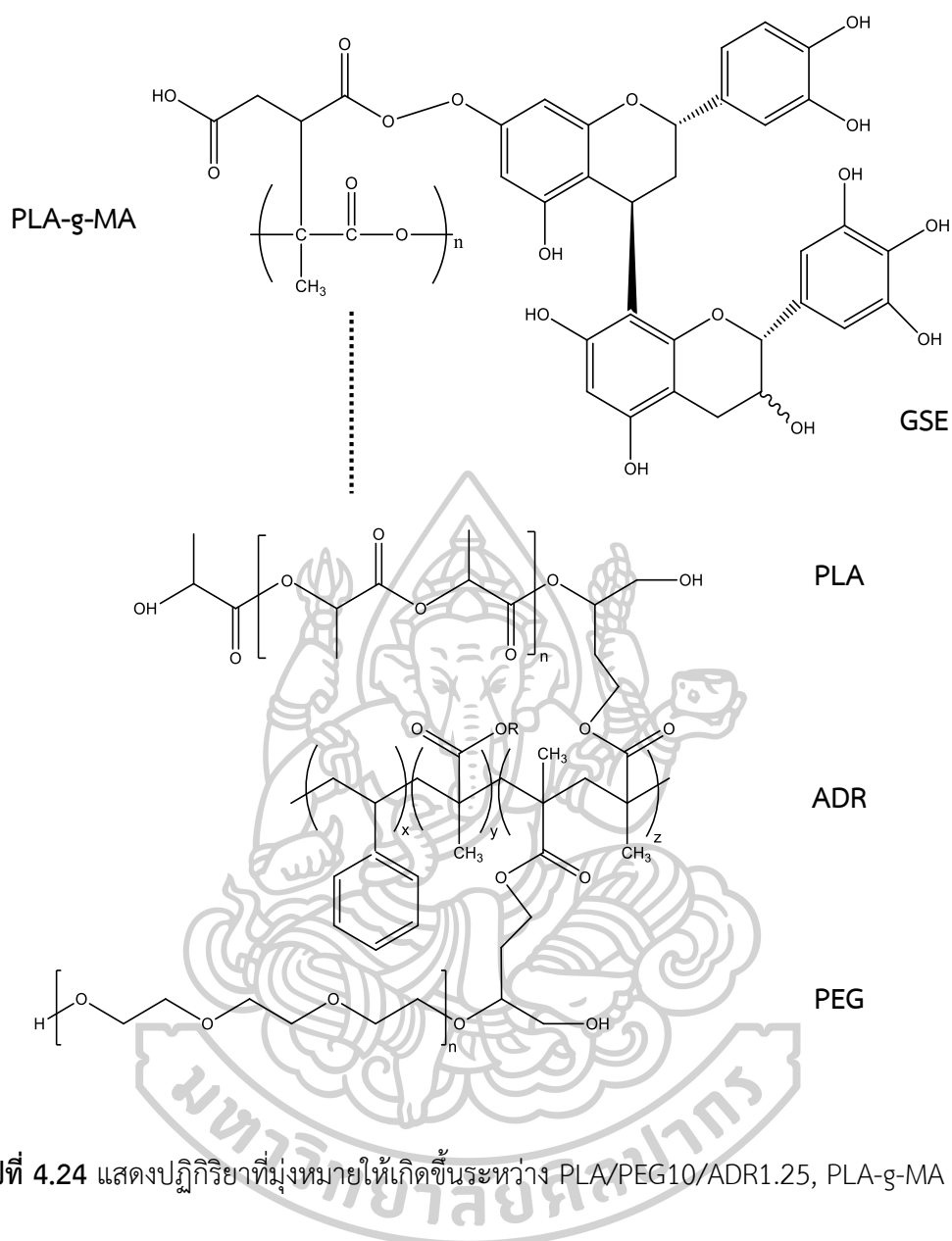
##### 4.3.2.1 การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มผสมด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)

การศึกษาการเติม PLA-g-MA เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ของ GSE และพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดย PLA-g-MA จะทำหน้าที่กักเก็บ GSE ในฟิล์มได้มีความเสถียรมากขึ้น ซึ่งจากการทดสอบพบว่าโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มผสมเป็นไปตามรูปที่ 4.23 โดยในรูปที่ 4.23(ข) พบว่าที่การ

เติม PLA-g-MA ที่ 3% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้เกิดพีคที่  $1890\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคที่เกิดจากการสั่นของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ในหมู่ Cyclic anhydride [20] แสดงให้เห็นว่า PLA-g-MA สามารถเกิดอันตรกิริยากับสายโซ่ของ PLA ได้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการดูดกลืนคลื่น และแสดงพีคใหม่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามที่การเติม PLA-g-MA ที่ 6, 9 และ 12% โดยน้ำหนัก ไม่พบพีคดังกล่าวเกิดขึ้น



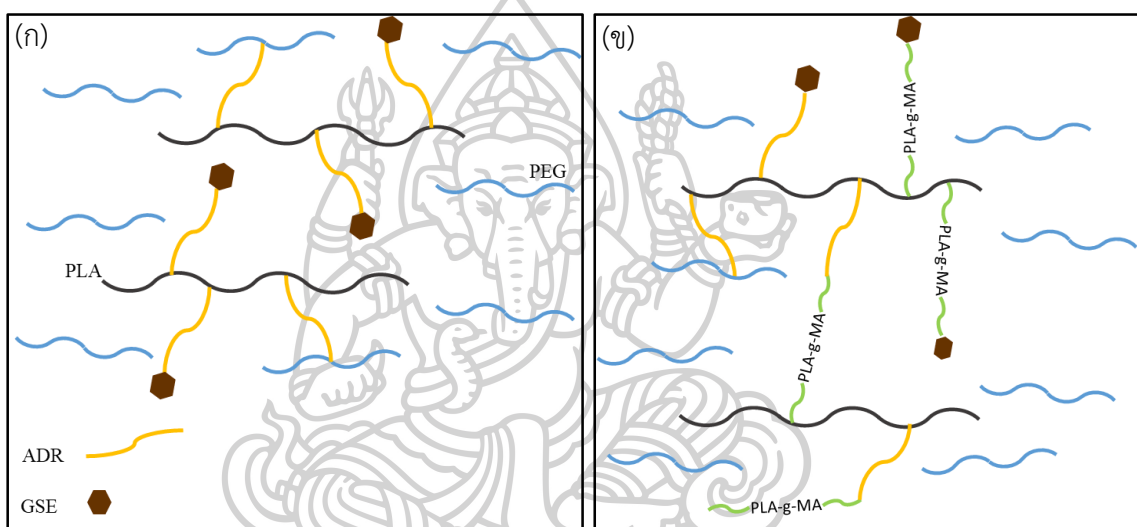
รูปที่ 4.23 แสดงโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มผสม PPA ที่เติม PLA-g-MA 0, 3, 6, 9 และ 12% โดยน้ำหนัก ที่มี GSE 4 phr



รูปที่ 4.24 แสดงปฏิกิริยาที่มุ่งหมายให้เกิดขึ้นระหว่าง PLA/PEG10/ADR1.25, PLA-g-MA และ GSE

จากผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเติม PLA-g-MA ที่ 3% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ PLA-g-MA มีความเข้ากันได้กับ PPA มากที่สุด และสามารถเกิดปฏิกิริยาดังอนุมานในรูปที่ 4.24 ซึ่งที่ตำแหน่งพิก 2875  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงหมู่  $-\text{CH}_2$  ของ ADR ที่เกิดปฏิกิริยาที่ปลายสายโซ่กับ PLA จากรูปที่ 4.23 พบว่าที่การเติม PLA-g-MA ที่ 3% โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลให้พิกที่ตำแหน่งดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อปริมาณ PLA-g-MA เป็น 0, 6, 9 และ 12% โดยน้ำหนัก พบว่าพิก  $-\text{CH}_2$  มีความเข้มพีคลดลง แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาของ ADR ที่ปลายสายโซ่ของ PLA นั้นเกิดขึ้นน้อยลงเนื่องจากปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดแข่งขันระหว่าง ADR และตำแหน่งที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาของ GSE ดังแสดงในรูปที่ 4.25(ก) และเมื่อเติม PLA-g-MA ในปริมาณที่เกินพอ PLA-g-MA ในด้านของ

PLA จะสามารถจะเกิดปฏิกิริยากับ ADR แข่งขันกับเมทริกซ์ PLA ได้ เนื่องจาก PLA ใน PLA-g-MA มีสายโซ่ที่สั้นกว่า จึงมีตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยาที่ปลายสายโซ่มากกว่าเมทริกซ์หลัก จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาแข่งขันดังรูปที่ 4.25(ข) ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ PLA และ PEG มีความเข้ากันได้ลดลง แต่อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ดังรูปที่ 4.25 ซึ่งแสดงถึงการแย่งเกิดปฏิกิริยานั้นไม่ปรากฏให้เห็นในการเติม PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก จึงกล่าวได้ว่าการเติม PLA-g-MA ที่ปริมาณดังกล่าวไม่ส่งผลให้ความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PEG ลดลง



รูปที่ 4.25 แสดงภาพจำลองของปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้นกรณีที่ไม่มี PLA-g-MA (ก) และมี PLA-g-MA มากเกินไป (ข)

#### 4.3.2.2. ผลของ PLA-g-MA ต่อเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่มี GSE 4 phr

ในการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ นอกจากจะสามารถศึกษาได้ถึงเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์แล้ว ยังสามารถศึกษาได้ถึงองค์ประกอบในพอลิเมอร์ผสมจากพฤติกรรมของการสลายตัวทางความร้อน ดังนั้นในการพิจารณาการเติม PLA-g-MA เพื่อกักเก็บ GSE ในฟิล์มผสมจึงสามารถใช้วิเคราะห์ได้ถึงการมีอยู่ของ GSE ในฟิล์มหลังจากผ่านกระบวนการขึ้นรูปได้ ซึ่งจากการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนซึ่งได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.26 และตารางที่ 4.6 พบว่าฟิล์มผสม PPA/GSE4 ทั้งที่มีการเติม PLA-g-MA 6, 9 และ 12% โดยน้ำหนัก และไม่เติม PLA-g-MA แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการสลายตัวลดลงประมาณ 4-8°C เมื่อเทียบกับ PPA โดยเมื่อเปรียบเทียบฟิล์มผสม PPA/GSE4 ที่เติม PLA-g-MA ที่ 6, 9 และ 12% โดยน้ำหนัก กับ PPA/GSE4 ที่ไม่เติม PLA-g-MA แสดงให้เห็นว่าการเติม PLA-g-MA ที่ปริมาณมากขึ้นไม่ได้ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของ PLA คืออุณหภูมิการสลายตัวของ PLA ที่การเติม PLA-g-MA 6, 9 และ 12% โดยน้ำหนัก มีค่าใกล้เคียงกับที่ไม่เติม PLA-g-MA แสดงให้เห็นว่าเสถียรภาพทางความร้อนที่ลดลงเมื่อเทียบกับ PPA นั้นอาจจะเป็นผลมาจากการเติม GSE ที่ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนไหวได้ง่ายเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังพบการสลายตัวทางความร้อนขั้นที่ 2 เกิดขึ้นสำหรับ PLA-g-MA 0, 6, 9 และ 12% โดยน้ำหนัก ที่ช่วง 449.98-492.50°C ซึ่งแสดงถึงการสลายตัวของ GSE ในฟิล์มผสมเนื่องจากน้ำหนักที่หายไปในช่วงนี้มีค่าประมาณ 4% ซึ่งเท่ากับปริมาณของ GSE ที่เติมลงในฟิล์มผสม และในงานวิจัยของ Locilento D.A. และคณะ [32] พบว่า GSE มีการสลายตัวในช่วงกว้างซึ่งแบ่งเป็น 3 ช่วง ได้แก่ 120-290°C, 430°C และ 505°C เนื่องจากโครงสร้างที่ซับซ้อนของ GSE จึงยืนยันได้ว่าการสลายตัวที่ 449°C เป็นของ GSE ซึ่งการสลายตัวในลักษณะเดียวกันนี้ยังพบในการศึกษา PCL/GSE ของ Liu J.S. และคณะ [38] อีกด้วย โดยพบว่าการสลายตัวของ GSE นี้เกิดที่อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อปริมาณของ PLA-g-MA เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า PLA-g-MA นั้นสามารถเกิดอันตรกิริยากับ GSE ได้ แล้วส่งผลให้ GSE มีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม PLA-g-MA นี้ไม่ส่งผลให้ GSE มีความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ผสม จึงพบว่า GSE เกิดการสลายตัวแยกออกมาและไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของ PLA

ซึ่งในการเติม PLA-g-MA ที่ 3% โดยน้ำหนัก นั้นแสดงพฤติกรรมที่ต่างจากการเติม PLA-g-MA ที่สัดส่วนอื่นๆ โดยแสดงการสลายตัว ทั้งหมด 3 ชั้น โดยการสลายตัวในขั้นที่ 1 เป็นการสลายตัวของ PLA โดยพบว่าเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลงประมาณ 23°C เมื่อเทียบกับใน PPA และในขั้นที่ 2 เกิดการสลายตัวที่ 7% โดยน้ำหนัก เป็นต้นไป จนถึงประมาณ 2% โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงถึงการสลายตัว

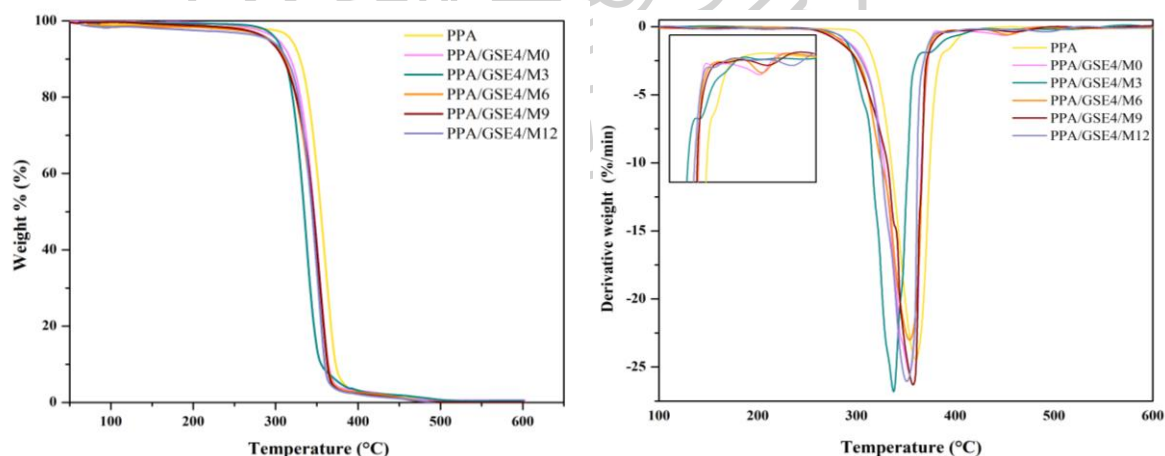


ของ GSE และในขั้นสุดท้ายเป็นการสลายตัวของสารขยายสายโซ่ ADR ซึ่งเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกันกับ ADR ใน PPA

ตารางที่ 4.6 แสดงสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม PPA/GSE4 ที่ PLA-g-MA ปริมาณแตกต่างกัน

Sample	$T_{\text{onset}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{\text{d1}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{\text{d2}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
PPA	336.52	360.59	-
PPA/GSE4/M0	328.10	354.54	449.98
PPA/GSE4/M3	316.79	337.98	-
PPA/GSE4/M6	325.30	354.08	454.03
PPA/GSE4/M9	329.07	356.23	462.35
PPA/GSE4/M12	326.96	352.00	492.50

จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่าการสลายตัวของ GSE ขยับไปเกิดใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น อีกทั้งยังส่งผลให้ PLA มีเสถียรภาพทางความร้อนลดลงด้วย แสดงให้เห็นว่าการเติม PLA-g-MA ที่ 3% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ GSE สามารถเข้ากันได้ดีกับ PLA จึงเป็นผลให้ PLA สลายตัวที่อุณหภูมิต่ำลงเนื่องจากการกระจายตัวของ GSE ที่สามารถประพุกติตัวเป็นพลาสติกไฮเซอริได้ แล้วทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ง่าย จึงเกิดการสลายตัวทางความร้อนได้ที่อุณหภูมิต่ำลง



รูปที่ 4.26 แสดงพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มผสม PPA ที่เติม PLA-g-MA 0, 3, 9 และ 12% ที่มี GSE 4 phr

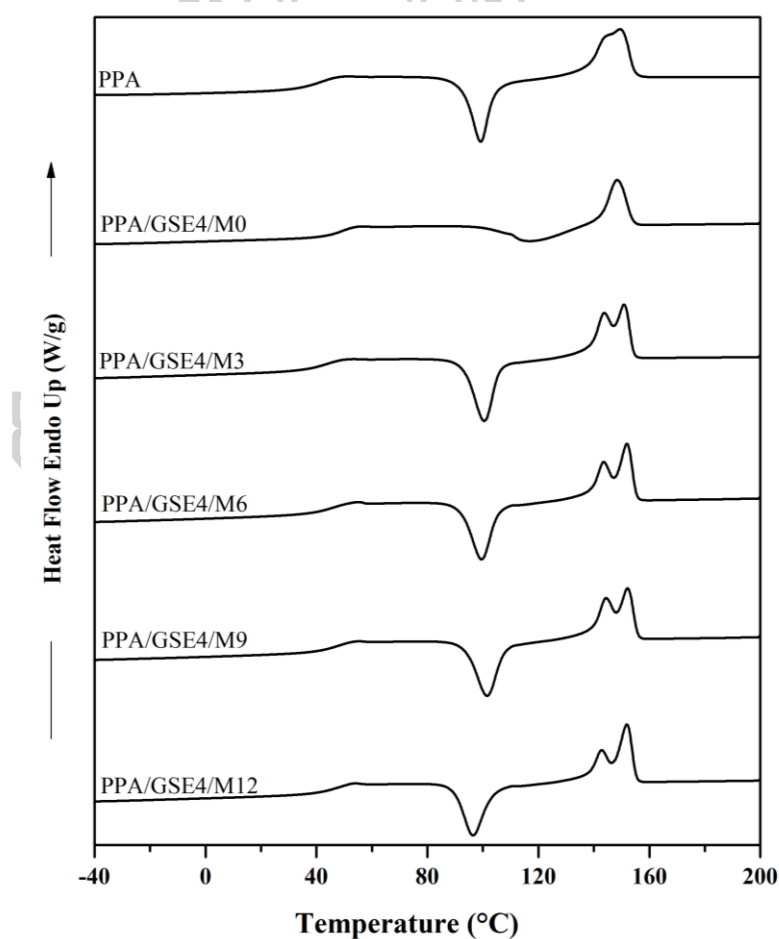
จากผลการทดสอบดังกล่าวนี้จึงกล่าวได้ว่าการศึกษาการเติม PLA-g-MA ในฟิล์มผสม PPA การประพดีตัวเป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ของ PLA-g-MA สามารถทำให้ GSE เข้ากันได้กับ PLA ที่ ปริมาณ PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ FTIR ที่ซึ่ง PLA-g-MA และ GSE นั้นส่งผลต่อการสั่นของหมู่ฟังก์ชันในพอลิเมอร์หลัก แต่ที่ปริมาณ PLA-g-MA ที่สูงอาจจะส่งผล ให้ PLA-g-MA จับตัว GSE แล้วมาเกาะกลุ่มกัน ไม่กระจายตัวในเมทริกซ์ของ PLA จึงส่งผลให้การ สลายตัวของ GSE เกิดขึ้นแยกออกจาก PLA อย่างชัดเจน

#### 4.3.2.3 ผล ของ PLA-g-MA ต่อ สมบัติ ทาง ความ ร้อน ของ ฟิล์ม ผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่มี GSE 4 phr ที่ทดสอบด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม PPA และ GSE 4 phr ที่มีการเติม PLA-g-MA ที่ 0, 3, 6, 9 และ 12% โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสมเป็นไปตามรูปที่ 4.27 และตารางที่ 4.7 พบว่าที่การเติม PLA-g-MA ปริมาณ 0, 6, 9 และ 12% โดยน้ำหนัก อุณหภูมิการ เปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) แตกต่างจาก  $T_g$  ของ PPA เพียง 1-2°C เท่านั้น แสดงให้เห็นว่าการเติม PLA-g-MA และ GSE ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิ  $T_g$  ของ PPA แต่ที่ PLA-g-MA 3% ส่งผลให้  $T_g$  มีลดลง มากที่สุดที่ 3°C แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณดังกล่าวส่งผลให้ GSE เข้ากันได้กับ PPA มากขึ้น โดย GSE ส่งผลให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ง่าย  $T_g$  จึงลดต่ำลง และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิการเกิดผลึกขณะ หลอมเหลว ( $T_{cc}$ ) พบว่า  $T_{cc}$  ของฟิล์มผสม PPA ที่เติม PLA-g-MA ที่ทุกสัดส่วน มีค่าใกล้เคียง PPA ซึ่งไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ในอีกด้านหนึ่งที่ PPA/GSE4 ที่ไม่เติม PLA-g-MA ปรากฏ อุณหภูมิ  $T_{cc}$  ที่จุดเริ่มต้นของการหลอมเหลวของ PLA แสดงถึงกระบวนการ Recrystallization ซึ่ง เป็นการเปลี่ยนแปลงผลึกจากรูปแบบที่ไม่เสถียร ( $\alpha'$ -form) ไปเป็นรูปแบบที่เสถียร ( $\alpha$ -form) จึง พบว่าที่อุณหภูมิการหลอมผลึก ( $T_m$ ) มีพีคการหลอมผลึกปรากฏเพียงพีคเดียว ซึ่งแตกต่างจาก ตัวอย่างอื่นๆ และจะเห็นได้อย่างชัดเจนที่ปริมาณผลึก ( $X_c$ ) ซึ่งปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นเป็น 12.02% แสดงให้เห็นว่าการเติม GSE 4 phr โดยไม่มี PLA-g-MA ส่งผลให้ GSE ไม่สามารถกระจายตัวและทำ หน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ แต่กลับเกาะกลุ่มกันและประพดีตัวเสมือนสารก่อผลึก เหนี่ยวนำให้สายโซ่ ของ PLA ก่อผลึกได้ดีมากยิ่งขึ้น เมื่อพิจารณาที่การเติม PLA-g-MA ในฟิล์มผสม PPA/GSE พบว่าที่ อุณหภูมิการหลอมผลึกแสดงพีคของการหลอมผลึก 2 พีค โดยพีคที่อุณหภูมิต่ำแสดงการหลอมของ ผลึกรูปแบบที่ไม่สมบูรณ์แบบ ( $\alpha'$ -form) และที่อุณหภูมิสูงแสดงการหลอมของผลึกรูปแบบที่ สมบูรณ์แบบ ( $\alpha$ -form) แสดงให้เห็นว่า การเติม PLA-g-MA ส่งผลให้ PLA เกิดผลึกในรูปแบบที่ไม่ สมบูรณ์มากขึ้นเมื่อเทียบกับไม่เติม

ตารางที่ 4.7 แสดงสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม PPA/GSE4 ที่ PLA-g-MA ปริมาณแตกต่างกัน

Sample	$T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_m, \alpha$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_m, \alpha'$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{cc}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta H_m$ (J/g)	$\Delta H_{cc}$ (J/g)	$X_c$ (%)
PPA	45.12	149.52	145.87	99.19	23.46	22.21	1.48
PPA/GSE4/M0	47.76	148.45	-	117.11	19.64	9.5	12.02
PPA/GSE4/M3	42.20	154.38	144.31	100.53	26.31	23.14	3.76
PPA/GSE4/M6	44.32	151.92	143.47	99.53	27.86	24.25	4.28
PPA/GSE4/M9	46.01	152.12	144.81	101.53	28.82	24.05	5.65
PPA/GSE4/M12	45.38	151.93	143.16	96.53	30.28	26.74	4.28



รูปที่ 4.27 แสดง DSC Thermogram ของฟิล์มผสม PPA ที่เติม PLA-g-MA 0, 3, 6, 9 และ 12% ที่มี GSE 4 phr

ซึ่งเป็นพฤติกรรมของการประพดีตัวเป็นพลาสติกไซเซอร์ของ GSE ที่ดีขึ้น การประพดีตัวเป็นพลาสติกไซเซอร์ของ GSE จะไปปรับปรุงการจัดเรียงตัวขณะพอลิเมอร์ก่อผลึก จึงอาจจะส่งผลให้สายโซ่ส่วนหนึ่งเกิดการจัดเรียงตัวเป็นแบบ  $\alpha'$ -form เช่นเดียวกับในกรณีของการเติม PEG ในตอนที่ 1 จึงพบว่าปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ PPA ยิ่งไปกว่านั้นยังพบว่าอุณหภูมิการหลอมผลึก ( $T_m$ ) ของ PPA/GSE ที่เติม PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก เพิ่มขึ้น  $5^{\circ}\text{C}$  เมื่อเทียบกับ PPA แสดงให้เห็นว่าสายโซ่ PLA มีอันตรกิริยาเกิดขึ้นกับ PLA-g-MA ทำให้การหลอมผลึกต้องใช้พลังงานสูงขึ้น จึงเห็นว่าอุณหภูมิ  $T_m$  มีค่ามากขึ้น

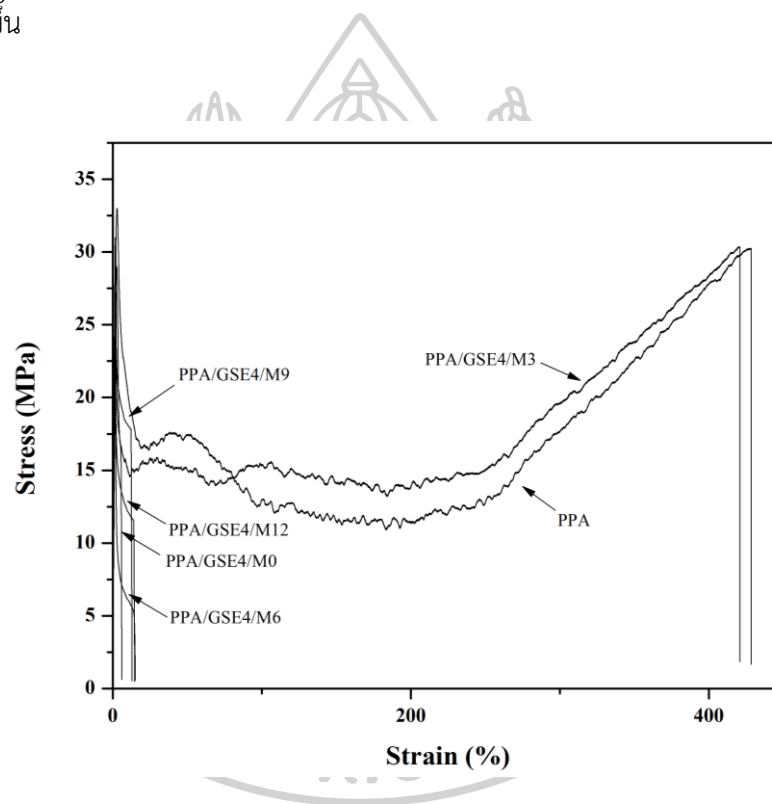
#### 4.3.2.4 ผลของ PLA-g-MA ต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25

(PPA) ที่มี GSE 4 phr

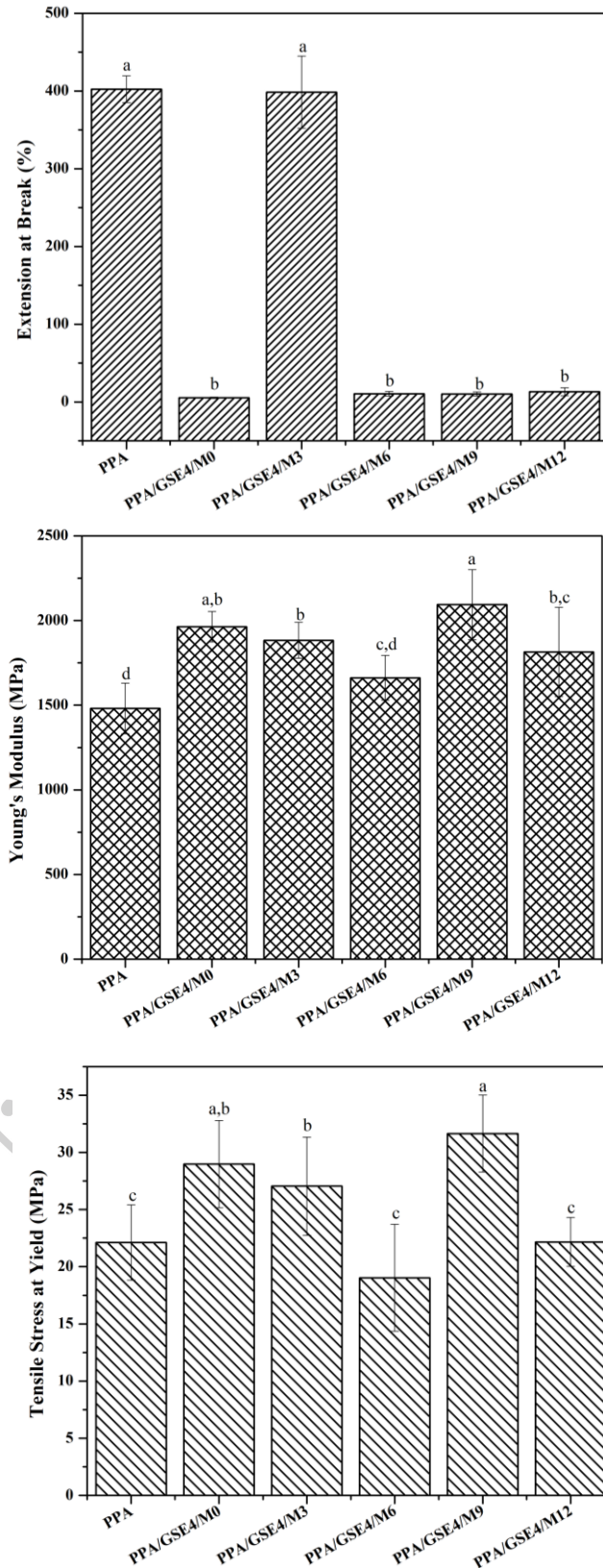
การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสมด้วยวิธีการดึงยืดแสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ Extension at break, Young's modulus และ Tensile strength at yield แสดงในรูปที่ 4.29 พบว่าการเติม GSE โดยไม่เติม PLA-g-MA และเติม PLA-g-MA 6, 9 และ 12% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ฟิล์มผสมเปราะลงอย่างมากเมื่อเทียบกับ PPA แสดงให้เห็นว่า PEG น่าจะเกิดการเกาะกลุ่มกันและเกิดจุดรวมแรง ทำให้ฟิล์มเปราะลง ในทางกลับกันเมื่อเติม PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก พบว่าฟิล์มผสม PPA/GSE มีความยืดหยุ่นที่สูงเทียบเท่ากับ PPA ที่ไม่เติม GSE แสดงให้เห็นว่า GSE สามารถกระจายตัวได้ดีใน PPA และไม่ส่งผลให้ PEG เกิดการรวมกลุ่มกัน เนื่องจาก PLA-g-MA เกิดปฏิกิริยาได้ดีกับ GSE และไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของ PPA แต่อย่างไรก็ตามการเติม PLA-g-MA ในปริมาณที่มากเกินไป อาจทำให้ PEG เกิดการรวมกลุ่มกันและตัว PLA-g-MA ส่งผลให้ PEG มีความเข้ากันได้กับ PLA น้อยลง เนื่องจากการแย่งเกิดปฏิกิริยากับ ADR จึงพบว่าฟิล์มผสมเปราะลงเมื่อเทียบกับฟิล์มผสม PPA เช่นเดียวกันกับที่ PLA-g-MA 0% โดยน้ำหนัก การแย่งเกิดปฏิกิริยาของ ADR กับ GSE นั้นเกิดขึ้นแทนที่ PLA กับ PEG จึงพบว่าฟิล์มเปราะลง เนื่องจากการเกาะกลุ่มกันของ PEG และในส่วนของความแข็งแรงพบว่าที่การเติม PLA-g-MA ที่ 0, 3 และ 9% ส่งผลให้ค่ามอดูลัสและ Tensile stress เพิ่มขึ้น ซึ่งในส่วนของฟิล์มผสม PPA/GSE ที่เติม PLA-g-MA ที่ 0 และ 9% โดยน้ำหนัก เป็นผลมาจากปริมาณผลึกที่สูงขึ้น ทำให้ความแข็งแรงของฟิล์มเพิ่มขึ้น ในส่วนของฟิล์มผสม PPA/GSE ที่เติม PLA-g-MA 6 และ 12% โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปริมาณผลึกที่ต่ำกว่าฟิล์มผสม PPA/GSE ที่เติม PLA-g-MA 0 และ 9% โดยน้ำหนัก ซึ่งถึงแม้ว่าที่ PLA-g-MA 0% โดยน้ำหนัก จะมีปริมาณผลึกที่สูงกว่าที่ 9% โดยน้ำหนัก แต่การเกิดจุดรวมแรงในฟิล์มเนื่องจาก PLA-g-MA นั้นสามารถดูดซับแรงไว้ได้ดีกว่าการที่มี GSE เพียงอย่างเดียว จึงทำให้เห็นว่าที่ PLA-g-MA 9% โดยน้ำหนัก ซึ่งมีปริมาณผลึก 5.64% นั้นส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งแรงเทียบเท่า

กับที่ไม่มีการเติม PLA-g-MA และมีปริมาณผลึก 12% และในส่วนของ การเติม PLA-g-MA 3% โดย น้ำหนัก ที่มีปริมาณผลึกในปริมาณต่ำ แต่การเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่เนื่องจาก PLA-g-MA นั้น ส่งผลให้สายโซ่เคลื่อนที่ผ่านกันยากขึ้น จึงเห็นว่าฟิล์มมีความแข็งแรงสูงขึ้นนั่นเอง

โดยในรูปที่ 4.28 แสดงรูปแบบการเสียรูปของฟิล์มผสมซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติม PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก สามารถเกิดปฏิกิริยากับ GSE แล้วส่งผลให้ GSE สามารถกระจายตัวได้ดีในฟิล์มผสม PPA ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลของ PPA ไม่แย่ง และมีลักษณะการเสียรูปที่เหมือนเดิม โดยมีความ แข็งแรงมากขึ้น จากอันตรกิริยาของ PLA-g-MA ที่ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ แล้วมีความ แข็งแรงมากขึ้น



รูปที่ 4.28 แสดง Stress-Strain ของฟิล์มผสม PPA ที่เติม PLA-g-MA 0, 3, 6, 9 และ 12% ที่มี GSE 4 phr



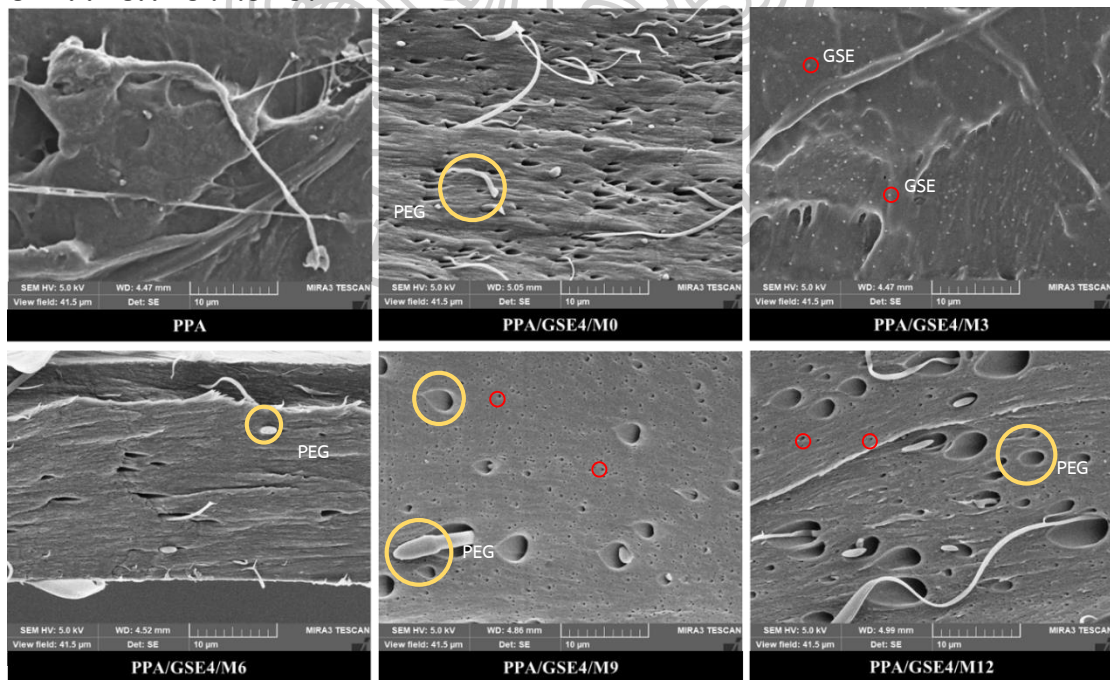
รูปที่ 4.29 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม PPA ที่เติม PLA-g-MA 0, 3, 6, 9 และ 12% ที่มี GSE 4

phr



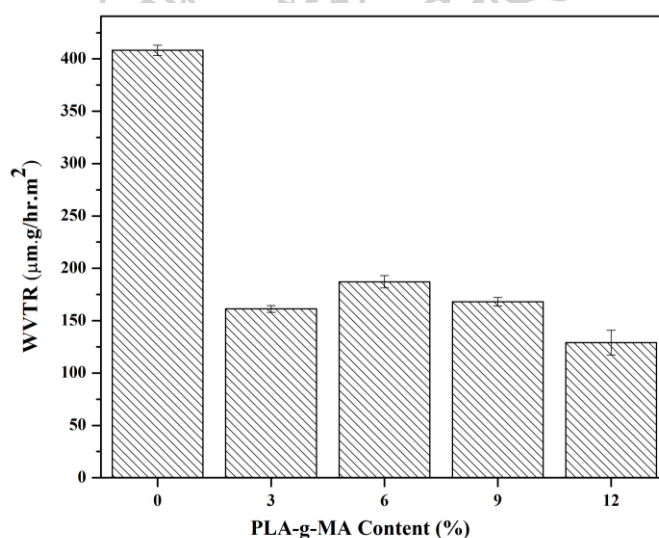
#### 4.3.2.5 ผลของ PLA-g-MA ต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่มี GSE 4 phr

ฟิล์มผสม PPA/GSE4 ที่ปริมาณ PLA-g-MA ที่แตกต่างกัน ซึ่งผ่านการทดสอบความทนทานต่อการดึงยืด ผิวของการขาดของฟิล์มที่ได้ ถูกนำมาศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่แสดงในรูปที่ 4.30 ซึ่งฟิล์ม PPA แสดงการขาดแบบเหนียว (Ductile) โดยแสดงพื้นผิวแบบขรุขระ และมีลักษณะของพอลิเมอร์ผสมเป็นแบบเนื้อเดียวกัน เมื่อเติม GSE 4 phr ใน PPA โดยไม่เติม PLA-g-MA (PPA/GSE4/M0) ปรากฏว่าฟิล์มมีการขาดแบบเปราะ ที่ปรากฏไฟบริลที่ยืดออกจากเนื้อพอลิเมอร์ในวงกลมสีเหลือง แสดงให้เห็นว่า PEG แยกเฟสกับ PLA โดยไฟบริลของ PEG หลุดออกจากเนื้อฟิล์ม และทิ้งเป็นช่องว่าง ส่งผลให้ฟิล์มมีการขาดแบบเปราะ และช่องว่างบางส่วนอาจเกิดจาก GSE ที่ระเหยออกขณะขึ้นงานถูกทำให้เป็นสุญญากาศก่อนทำการทดสอบ ซึ่งช่องว่างมีขนาดประมาณ 10 ไมโครเมตร แสดงให้เห็นว่า GSE นั้นเกาะกลุ่มกัน ไม่เกิดการกระจายตัวที่ดี ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่แสดงก่อนหน้านี้ และเมื่อทำการเติม PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก (PPA/GSE4/M3) พบว่าฟิล์มแสดงการขาดแบบเหนียว (Ductile) ด้วยผิวที่ขรุขระ และลักษณะของเนื้อพอลิเมอร์แสดงลักษณะของพอลิเมอร์เนื้อเดียว ไม่แสดงให้เห็นว่า PEG แยกเฟสจาก PLA จึงกล่าวได้ว่า PLA-g-MA สามารถเกิดปฏิกิริยากับ GSE ได้ดี และไม่แย่งเกิดปฏิกิริยากับ ADR จึงส่งผลให้พอลิเมอร์ผสม PPA ยังคงมีลักษณะเป็นเนื้อเดียว



รูปที่ 4.30 แสดงภาพ Scanning electron microscope (SEM) ของผิวการขาดของฟิล์มผสม PPA ที่เติม PLA-g-MA 0, 3, 6, 9 และ 12% ที่มี GSE 4 phr

ยิ่งไปกว่านั้นยังพบเฟสของ GSE (ในวงกลมสีแดง) กระจายตัวในฟิล์มได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่แสดงให้เห็นว่า PPA/GSE4 ที่ PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ดี และเมื่อเพิ่มปริมาณ PLA-g-MA เป็น 6, 9 และ 12% โดยน้ำหนัก พบว่าฟิล์มแสดงพื้นผิวแบบเรียบซึ่งแสดงถึงการขาดแบบเปราะทั้ง 3 สัดส่วน ซึ่งทั้ง 3 สัดส่วนแสดงให้เห็นถึงไพลริลของ PEG ที่ยึดออกจากเนื้อพอลิเมอร์ โดยเมื่อปริมาณ PLA-g-MA มากขึ้น พบว่า PEG มีลักษณะที่เกิดการรวมตัวกันมากขึ้น โดยพบว่าขนาดของไพลริลและช่องว่างมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อปริมาณ PLA-g-MA เพิ่มขึ้น เนื่องจาก PLA-g-MA แยงเกิดปฏิกิริยากับ ADR และ PEG แล้วส่งผลให้ PEG เกาะกลุ่มกัน จึงทำให้สมบัติเชิงกลของฟิล์มมีความยืดหยุ่นลดลง และแสดงการขาดแบบเปราะดังที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้ โดยผลการทดสอบดังกล่าวนี้ช่วยยืนยันได้ถึงการแยงเกิดปฏิกิริยากับ ADR ของ GSE และ PLA-g-MA ส่งผลให้ PLA และ PEG มีความเข้ากันได้ลดลงและ PEG เกิดการรวมกลุ่มและแยกเฟสจาก PLA ดังกล่าวถึงในผลการทดสอบ FTIR และสมบัติเชิงกล



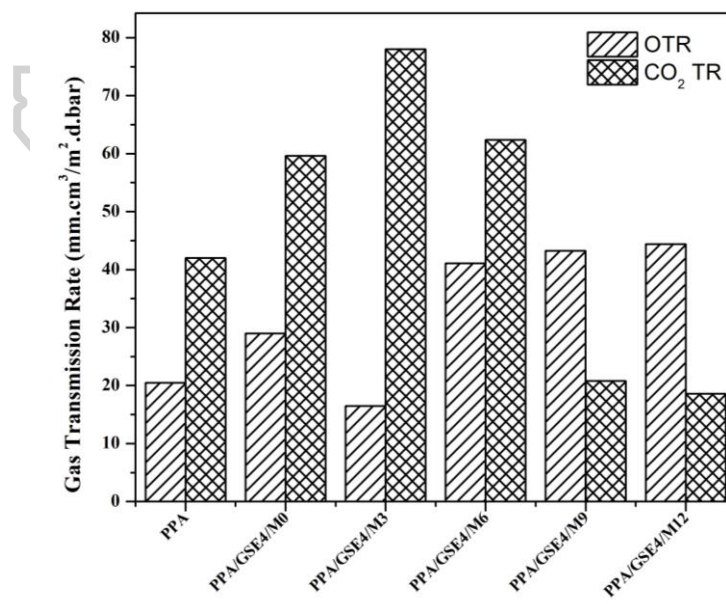
รูปที่ 4.31 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของฟิล์มผสม PPA ที่เติม PLA-g-MA 0, 3, 6, 9 และ 12% ที่มี GSE 4 phr

#### 4.3.2.6 ผลของ PLA-g-MA ต่ออัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่มี GSE 4 phr

การศึกษาฟิล์มเพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์นั้น การซึมผ่านของไอน้ำเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญต่อการใช้งาน ดังนั้นการทดสอบ Water Vapor Transmission Rate (WVTR) จึงถูกทดสอบกับฟิล์ม

PPA/GSE4 ที่ปริมาณ PLA-g-MA ต่างกัน และแสดงในรูปที่ 4.31 โดย WVTR ของฟิล์ม PPA ซึ่งแสดงไว้ก่อนหน้านี้มีค่า  $153.76 \mu\text{m.g/hr.m}^2$  พบว่าการเติม GSE 4 phr โดยไม่มีการเติม PLA-g-MA ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำสูงขึ้นอย่างมาก เนื่องจาก GSE ประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จำนวนมาก จึงส่งผลให้ GSE มีความเป็นขี้และความชอบน้ำ ซึ่งเมื่อไม่มี PLA-g-MA ที่ช่วยกักเก็บ GSE ส่งผลให้ GSE อยู่ทีบริเวณผิวฟิล์ม การเติม GSE จึงส่งผลให้ฟิล์มมีความชอบน้ำมากขึ้น และทำให้ไอน้ำซึมผ่านได้ดี และเมื่อเติม PLA-g-MA ในฟิล์ม พบว่าที่ PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลงและมีค่าใกล้เคียงกับ PPA แสดงให้เห็นว่า PLA-g-MA สามารถเกิดปฏิกิริยากับ GSE ได้ดี ทำให้ GSE ถูกกักเก็บอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ จึงส่งผลให้ผิวฟิล์มมีความชอบน้ำลดลง เมื่อเทียบกับไม่เติม PLA-g-MA โดยเมื่อเพิ่ม PLA-g-MA เป็น 6% โดยน้ำหนัก อัตราการซึมผ่านของไอน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเทียบกับที่ 3% และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ PLA-g-MA มากกว่า 6% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นผลมาจากเมื่อปริมาณ PLA-g-MA เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลของ GSE ลดลง ความชอบน้ำที่ผิวฟิล์มจึงมีค่าลดลง

#### 4.3.2.7 ผลของ PLA-g-MA ต่ออัตราการซึมผ่านของแก๊สของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่มี GSE 4 phr



รูปที่ 4.32 แสดงอัตราการซึมผ่านของแก๊สของฟิล์ม PPA ที่เติม PLA-g-MA 0, 3, 6, 9 และ 12% ที่มี GSE 4 phr

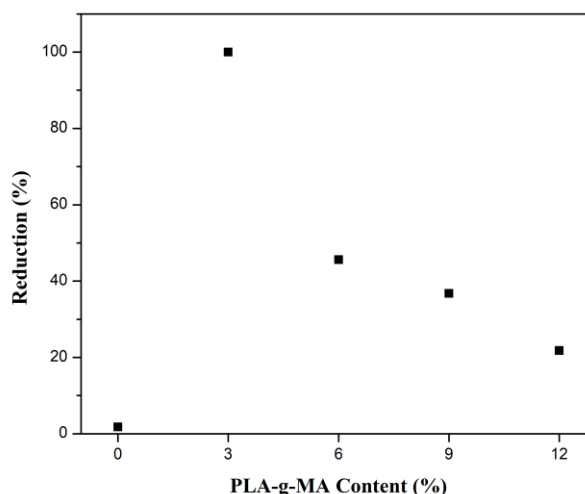
อิทธิพลของการเติม PLA-g-MA เพื่อทำหน้าที่กักเก็บ GSE ในฟิล์ม นั้นมีอิทธิพลต่ออัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 4.32 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (OTR) สูงขึ้น ที่ PLA-g-MA 0, 6, 9 และ 12% โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับ PPA แม้จะพบว่าการเกาะกลุ่มกันของ GSE และ PEG ดังแสดงในภาพ SEM (รูปที่ 4.30) จะส่งผลให้ปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นดังแสดงในผลการทดสอบ DSC (ตารางที่ 4.7) แต่ปริมาณผลึกที่เพิ่มขึ้นนี้อาจจะเป็นชั้นผลึกที่ทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้รอยต่อระหว่างผลึกทรงกลม (Spherulite) มีช่องว่างเกิดขึ้น ส่งผลให้แก๊สออกซิเจนเคลื่อนที่ผ่านได้ เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของ PLA-g-MA พบว่าการเพิ่มปริมาณ PLA-g-MA เป็น 6, 9 และ 12% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่า OTR เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับไม่เติม เป็นผลมาจากปริมาณผลึกที่ลดลงเมื่อเทียบกับที่ PLA-g-MA 0% โดยน้ำหนัก จึงส่งผลให้เกิดช่องว่างที่ทำให้แก๊สออกซิเจนเคลื่อนที่ผ่านได้ แต่อย่างไรก็ตามฟิล์ม PPA/GSE4 ที่มีการเติม PLA-g-MA ที่ 3% โดยน้ำหนัก พบว่า OTR มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก GSE ที่สามารถทำหน้าที่เป็น Oxygen scavenger ได้ และสามารถดักจับแก๊สออกซิเจนที่ผ่านเข้ามา ดังนั้นจึงส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนลดลงไปด้วย

ผลการทดสอบดังกล่าวนี้เป็นไปตามภาพ SEM (รูปที่ 4.30) ที่เกิดขึ้น ที่พบว่า PLA-g-MA 0, 6, 9 และ 12% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ PEG แยกเฟสออกจาก PLA และเกิดการเกาะกลุ่มกัน แสดงให้เห็นถึงอันตรกิริยาของ ADR ที่ลดลง จากการแย่งเกิดปฏิกิริยาของ ADR กับ PLA-g-MA และ GSE ส่งผลให้ GSE ไม่สามารถกระจายตัวได้ดี และมีหมู่ -OH หายไปจำนวนมาก จึงไม่สามารถแสดงประสิทธิภาพการเป็น Oxygen scavenger ได้ ดังนั้นการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนจึงได้รับอิทธิพลทางกายภาพเนื่องจากความเป็นผลึกเพียงอย่างเดียว

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของ PLA-g-MA ต่ออัตราการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2TR$ ) พบว่าเมื่อเติม GSE 4 phr โดยไม่เติม PLA-g-MA พบว่า  $CO_2TR$  เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับ PPA ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันกับ OTR ซึ่งเกิดจากช่องว่างระหว่างผลึกทรงกลม (Spherulite) ส่งผลให้แก๊สเคลื่อนที่ผ่านได้ดี และเมื่อเติม PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก ค่า  $CO_2TR$  เพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จากที่กล่าวถึงกลไกการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในตอนต้นที่ 1 ซึ่ง  $CO_2TR$  เป็นผลมาจากผลทางเคมีของหมู่เอเทอร์ (-O-) กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยในโครงสร้างทางเคมีของ GSE นั้นก็ประกอบด้วยหมู่เอเทอร์จำนวนมาก ดังนั้นการกระจายตัวที่ดีของ GSE ใน PPA จึงช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับฟิล์มผสม ส่งผลให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เคลื่อนที่ผ่านได้ดี จึงพบว่า  $CO_2TR$  เพิ่มขึ้นสูงอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเพิ่ม PLA-g-MA มากขึ้นพบว่า  $CO_2TR$  ลดลงอย่างมาก และลดต่ำกว่า PPA ที่ PLA-g-MA 9 และ 12% โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่า PEG และ GSE เกิดการเกาะกลุ่มกัน ไม่กระจายตัวในเมทริกซ์ ดังนั้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จึงไม่มีแรง

เหนียวมาจาก PEG และ GSE ในการเคลื่อนที่ อีกทั้งขนาดโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าแก๊สออกซิเจน ส่งผลให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เคลื่อนที่ผ่านฟิล์มได้ยากมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกลและภาพ SEM ที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้

4.3.2.8 ผลของ PLA-g-MA ต่อการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิด *Pseudomonas aeruginosa* ตามการทดสอบมาตรฐาน JIS-Z 2801 ของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่มี GSE 4 phr



รูปที่ 4.33 แสดงประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *Pseudomonas aeruginosa* ของฟิล์มผสม PPA ที่เติม PLA-g-MA 0, 3, 6, 9 และ 12% ที่มี GSE 4 phr

การศึกษาการเติม GSE ซึ่งเป็นสารจำพวกฟีนอลิกที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดีแสดงในรูปที่ 4.33 และการเติม PLA-g-MA เพื่อให้ GSE เข้ากันได้ดีกับ PPA และแสดงประสิทธิภาพที่ดีที่สุด พบว่าอิทธิพลของ PLA-g-MA ในฟิล์มผสม PPA/GSE4 ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสูงที่สุดที่ปริมาณ PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มปริมาณ PLA-g-MA พบว่าประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียลดลงอย่างมาก ซึ่งแสดงให้ถึงการหายไปหมู่ -OH ของ GSE ซึ่ง PLA-g-MA และ ADR ทำปฏิกิริยากับ GSE มากเกินไป ทำให้ GSE ไม่สามารถแสดงประสิทธิภาพออกมาได้ดี เนื่องจากหมู่ฟีนอลิกที่ลดลงจำนวนมากกับการทำปฏิกิริยากับ PLA-g-MA ที่มากเกินไปสำหรับ GSE ที่ 4 phr โดยเมื่อเติม PLA-g-MA ในปริมาณที่เหมาะสมที่ 3% โดยน้ำหนัก พบว่าประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรียสูงถึง 99.99 % เนื่องจาก GSE สามารถกระจายตัวได้ดีอย่างสม่ำเสมอบนฟิล์มดังแสดงในภาพ SEM (รูปที่ 4.30) ดังนั้นไม่ว่าเชื้อแบคทีเรียจะสัมผัสกับ

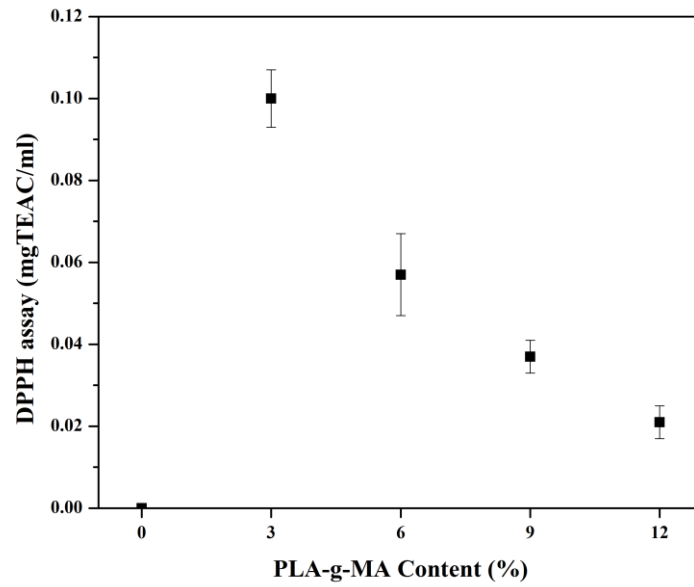


บริเวณใดของฟิล์มก็ตาม ก็จะได้รับอิทธิพลเนื่องจาก GSE ทั้งสิ้น ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวนี้เป็นแนวโน้มเดียวกันกับการทดสอบในด้านอื่นที่ผ่านมา

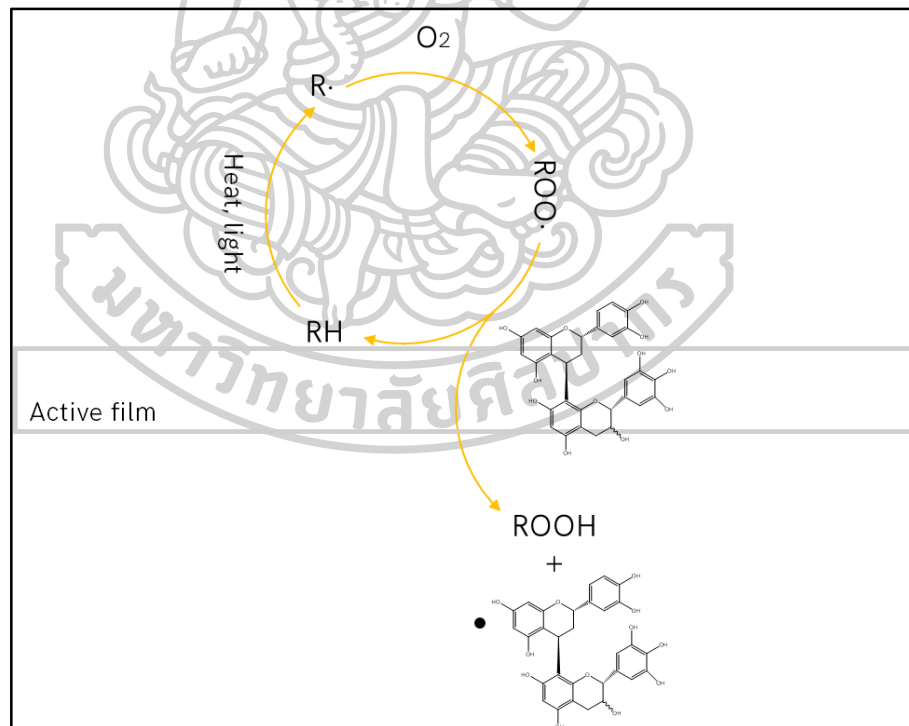
#### 4.3.2.9 ผลของ PLA-g-MA ต่อการต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH Assay ของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่มี GSE 4 phr

สำหรับการศึกษาอิทธิพลของ PLA-g-MA ต่อการต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นอีกหนึ่งปัจจัยของการเสถียรภาพ และเกิดสีน้ำตาลของเห็ดนั้น เป็นสาเหตุมาจากเมื่อเห็ดสัมผัสกับอากาศ ซึ่งมีแก๊สออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ แก๊สออกซิเจนจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) สารตัวนี้จะทำให้เกิดสารสีน้ำตาลบนผิวของเห็ดได้ ดังนั้นการเติม GSE ซึ่งเป็นสารจำพวกฟีนอลิกที่ประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก หมู่ไฮดรอกซิลเหล่านี้จะสามารถเกิดปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนเพื่อเปลี่ยนรูปให้ออกซิเจนอยู่ในรูปแบบที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วกลายเป็นสารอนุมูลอิสระดังรูปที่ 4.35 ดังนั้นการทดสอบจำดำเนินการภายใต้วิธี DPPH Assay และแสดงผลของการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟิล์มผสม PPA/GSE4 ที่ปริมาณ PLA-g-MA ที่แตกต่างกันที่ 0, 3, 6, 9 และ 12% โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.34 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มผสม PPA/GSE4 ที่ไม่มีการเติม PLA-g-MA นั้นไม่แสดงประสิทธิภาพในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งอาจเป็นเหตุจากในการเตรียมฟิล์มเป็นสารละลายเพื่อดำเนินการทดสอบ GSE อาจละลายออกจากฟิล์มและเสถียรภาพไปเนื่องจากความร้อนระหว่างการละลาย เนื่องจากไม่มีตัวรองรับเพื่อจับ GSE ไว้ในฟิล์มอย่างเสถียร และเมื่อเติม PLA-g-MA พบว่าประสิทธิภาพการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงที่สุดที่ PLA-g-MA 3% และลดลงเมื่อปริมาณ PLA-g-MA เพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการที่ PLA-g-MA เข้าทำปฏิกิริยากับฟีนอลิกใน GSE จนเหลือตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิลน้อยลง จึงทำให้ประสิทธิภาพการเป็นสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันลดลง ซึ่งผลการทดสอบนี้เป็นไปตามแนวโน้มเดียวกันกับการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย





รูปที่ 4.34 แสดงประสิทธิภาพการต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟิล์มผสม PPA ที่เติม PLA-g-MA 0, 3, 6, 9 และ 12% ที่มี GSE 4 phr

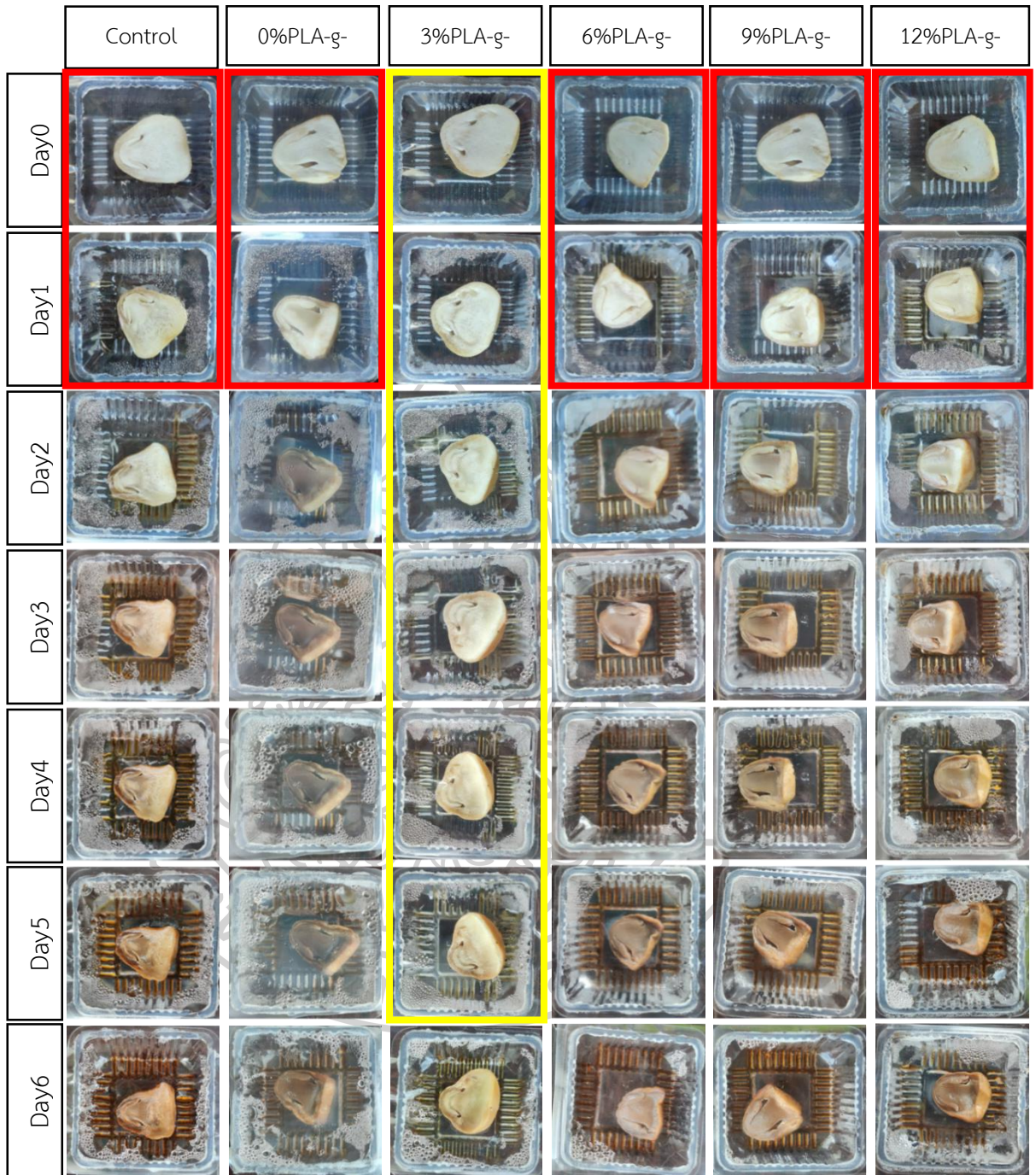


รูปที่ 4.35 แสดงลักษณะการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันของ GSE

#### 4.3.2.10 ผลของ PLA-g-MA ต่อการเก็บรักษาเห็ดฟางที่อุณหภูมิ 20°C ของฟิล์ม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่มี GSE 4 phr

จากการศึกษาการเตรียมฟิล์มผสมของ PPA ที่มี GSE 4 phr ที่ปริมาณ PLA-g-MA ต่างกันที่ 0, 3, 6, 9 และ 12% โดยน้ำหนัก เพื่อทำหน้าที่กักเก็บ GSE ให้สามารถบรรจุในฟิล์มได้อย่างเสถียร เพื่อเตรียมฟิล์มผสมที่ได้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับยืดอายุเห็ด ซึ่งฟิล์มผสมทุกสัดส่วนที่เตรียมได้ถูกนำมาทดสอบการบรรจุเห็ด ด้วยวิธีการบรรจุเห็ดฟางในสภาพพลาสติกและปิดปากภาตด้วยฟิล์มผสม และเก็บรักษาเห็ดในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 20°C พบการเปลี่ยนแปลงของเห็ดไปตามรูปที่ 4.36 พบว่าฟิล์ม PPA ที่มีความสามารถในการต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้การเปลี่ยนสีเริ่มที่วันที่ 3 แต่อย่างไรก็ตามฟิล์ม PPA ไม่มีฤทธิ์ในการต้านเชื้อแบคทีเรีย จึงทำให้เห็ดเสียสภาพจากการสูญเสียน้ำตั้งแต่วันที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจากผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียและการต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนั้นที่ฟิล์มผสม PPA/GSE4/PLA-g-MA3 มีค่าสูงที่สุดที่ 99.99% และ 0.1 mgTEAC/ml ตามลำดับ และในด้านการซึมผ่านของแก๊สพบว่าฟิล์มผสมสัดส่วนดังกล่าวนี้สามารถป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนได้ แต่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เคลื่อนที่ผ่านได้ดี ซึ่งกลไกการเน่าเสียของเห็ดนั้นจะเกิดการอัตราการหายใจที่สูง เชื้อแบคทีเรีย และการเปลี่ยนสีจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนั้นจึงเห็นว่าการเติม PLA-g-MA ที่ 3% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้สามารถยืดอายุเห็ดฟางได้นานที่สุดที่ 5 วัน ซึ่งโดยเริ่มเปลี่ยนสีและมีการสูญเสียน้ำที่มากในวันที่ 6 ทำให้เห็ดสูญเสียสภาพไป ซึ่งการเติม PLA-g-MA ปริมาณสูงขึ้น พบว่าเห็ดมีกระบวนการหายใจที่สูงมาก ทำให้สูญเสียอย่างมากตั้งแต่วันที่ 2 ประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียและปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ต่ำทำให้เห็ดเริ่มมีสีคล้ำตั้งแต่วันที่ 2 เป็นต้นไป ซึ่งที่แนวโน้มเดียวกันนี้ยังพบในฟิล์มผสม PPA/GSE4 ที่ไม่มีการเติม PLA-g-MA ที่เริ่มเปลี่ยนสีตั้งแต่วันแรกและสีคล้ำมากในวันที่ 2 เนื่องจากที่ฟิล์มสัดส่วนนี้ไม่มีประสิทธิภาพในการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และมีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียที่ต่ำ

จากผลการทดสอบทั้งหมดที่ผ่านมานี้ผลสรุปที่ได้พบว่าการเติม PLA-g-MA ที่ 3% โดยน้ำหนัก ในฟิล์มผสม PPA/GSE4 ส่งผลให้ GSE สามารถกระจายตัวและเข้ากันได้ดีกับฟิล์ม PPA แสดงให้เห็นถึงสมบัติเชิงกลที่ดีเทียบเท่า PPA โดยแสดงค่ามอดูลัสที่สูงขึ้น และเห็นได้อย่างชัดเจนในภาพ SEM จากคุณสมบัติที่ดีดังกล่าว จึงส่งผลให้ฟิล์มผสมสามารถป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและช่วยให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเกิดจากกระบวนการหายใจของเห็ดฟางเคลื่อนที่ผ่านออกไปได้ดี อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียและปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีที่สุดอีกด้วย ซึ่งแสดงผลลัพธ์ให้เห็นได้ในความสามารถในการยืดอายุเห็ดฟาง จึงสามารถสรุปได้ว่าการเติม PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก ในฟิล์ม PPA/GSE4 เป็นสัดส่วนที่ดีที่สุดในการเตรียมบรรจุภัณฑ์สำหรับเห็ด และเป็นสัดส่วนที่จะใช้ในการศึกษาอิทธิพลของปริมาณ GSE ต่อไป



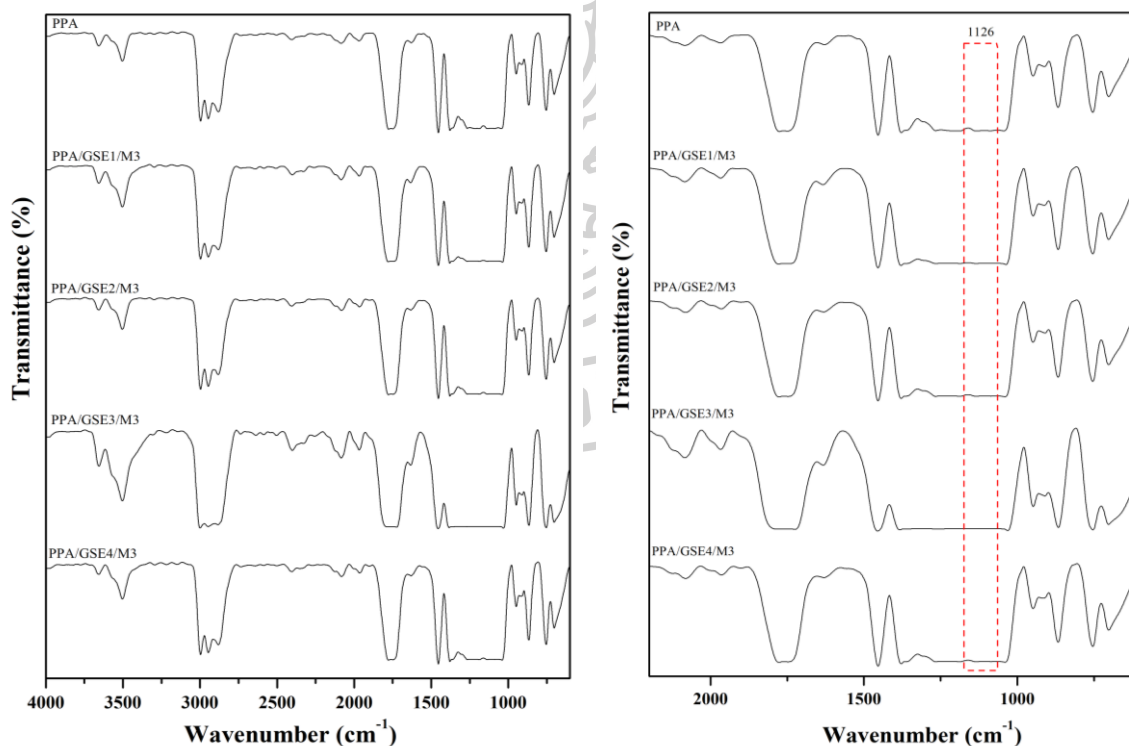
รูปที่ 4.36 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเห็ดฟางที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 20°C ในระยะเวลา 6 วัน



#### 4.4 ผลของการศึกษาการเติมน้ำมันสกัดเมล็ดองุ่น (GSE) ในฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก

##### 4.4.1. การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มผสมด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)

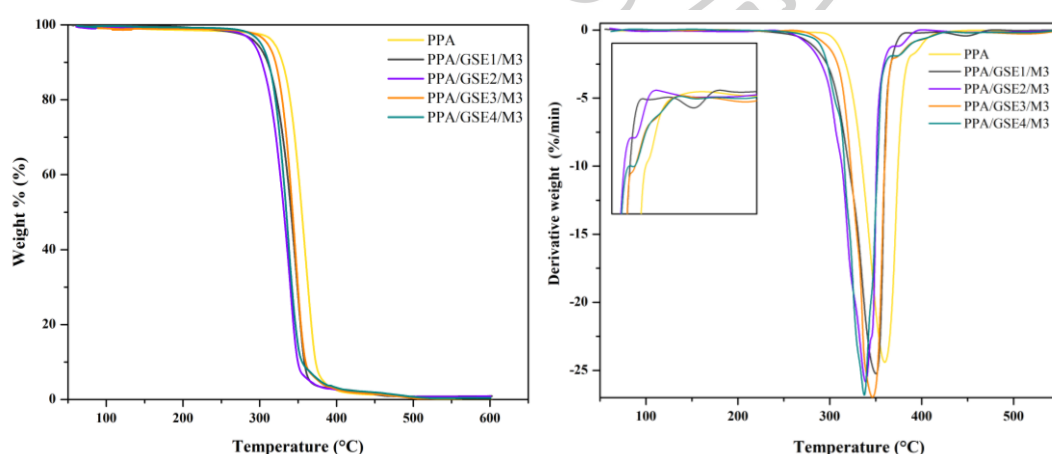
การศึกษาการเติมน้ำมันเมล็ดองุ่น (GSE) ในฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่มี การเติม PLA-g-MA เมื่อช่วยเก็บกักน้ำมันในฟิล์มให้เสถียรมากยิ่งขึ้น พบว่าการมี GSE ในฟิล์มผสมแสดง โครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 4.37 ซึ่ง PPA แสดงพิกที่เป็นเอกลักษณ์ดังกล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.2.1 ซึ่งจากงานวิจัยของ Locilento D.A. และคณะ [32] พบว่าสารสกัดจากเมล็ดองุ่น (GSE) จะ แสดงพิกที่เป็นเอกลักษณ์สำคัญขององค์ประกอบฟีนอลิกได้แก่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่ตำแหน่ง  $3300\text{ cm}^{-1}$ , หมู่  $\text{-C=C-O}$  ของวงแหวน Heterocyclic ที่ตำแหน่งตำแหน่ง  $1604$  และ  $1520\text{ cm}^{-1}$  และหมู่ Phenol และอีเทอร์ ที่  $1104\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งจากรูปที่ 4.37(ข) จะสังเกตเห็นได้ว่าการเติม GSE ส่งผลให้พิก ที่บริเวณ  $1126\text{ cm}^{-1}$  มีความเข้มมากขึ้น แสดงถึงการมีอยู่หมู่ฟีนอลที่เพิ่มขึ้นในฟิล์มผสม



รูปที่ 4.37 แสดงโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มผสม PPA ที่เติม GSE 1, 2, 3 และ 4 phr ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก

#### 4.4.2. ผลของการศึกษาเสถียรทางความร้อนของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่ ปริมาณ GSE ที่แตกต่างกันที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA)

การศึกษากการเติม GSE ที่ 1, 2, 3 และ 4 phr ในฟิล์มผสม PPA ที่มี PLA-g-MA 3% ในการ ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้สำหรับ GSE ในฟิล์ม PPA พบว่าพฤติกรรมการสลายตัวทาง ความร้อนเป็นดังแสดงในรูปที่ 4.38 และตารางที่ 4.8 โดยที่ GSE 1, 2, 3 และ 4 phr แสดง เสถียรภาพทางความร้อนของ PPA ที่ลดลงเป็น 349, 341, 348°C และ 338°C ตามลำดับ เนื่องจาก GSE สามารถประพடுத்தัวเป็นพลาสติกไซเซอรัสส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนไหวได้ดี และสลายตัวได้ ง่ายขึ้น และเมื่อพิจารณาพฤติกรรมของ GSE แต่ละสัดส่วน พบว่าที่ GSE 1 phr จะพบการสลายตัว ของ GSE แยกออกมาเกิดที่ตำแหน่ง 447°C ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าที่ปริมาณ GSE ต่ำๆ GSE อาจเกิด อันตรกิริยากับ ADR และ PLA-g-MA ที่มากเกินไปแล้วแยกเฟสจาก PLA และสำหรับที่ GSE 2 phr จะไม่พบพีคของ GSE เช่นเดียวกับที่ GSE 1 phr แต่พบเป็นการสลายตัวที่ขึ้นตอนถัดจาก PPA จึง กล่าวได้ว่า GSE กระจายตัวในเมทริกซ์ได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งเมื่อเพิ่ม GSE เป็น 3 และ 4 phr พบว่า พฤติกรรมการสลายตัวมีลักษณะคล้ายกัน แสดงให้เห็นว่า GSE สามารถเกิดอันตรกิริยากับ PLA-g- MA แล้วเข้ากันได้ดีกับ PPA มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณ GSE จะพบว่า เมื่อปริมาณ GSE สูงขึ้น ส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนของ PPA ลดลง จากผลของการที่สายโซ่ พอลิเมอร์เคลื่อนไหวได้ง่าย โดยเห็นอิทธิพลที่ชัดเจนที่สุดที่ GSE 4 phr



รูปที่ 4.38 แสดงพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มผสม PPA ที่เติม GSE 1, 2, 3 และ 4 phr ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก

**ตารางที่ 4.8** แสดงสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม PPA/PLA-g-MA3 ที่ GSE ปริมาณแตกต่างกัน

Sample	T <sub>onset</sub> (°C)	T <sub>d1</sub> (°C)	T <sub>d2</sub> (°C)
PPA	336.52	360.59	-
PPA/GSE1/M3	322.16	349.46	447.06
PPA/GSE2/M3	314.03	341.10	-
PPA/GSE3/M3	325.29	347.94	-
PPA/GSE4/M3	316.79	337.98	-

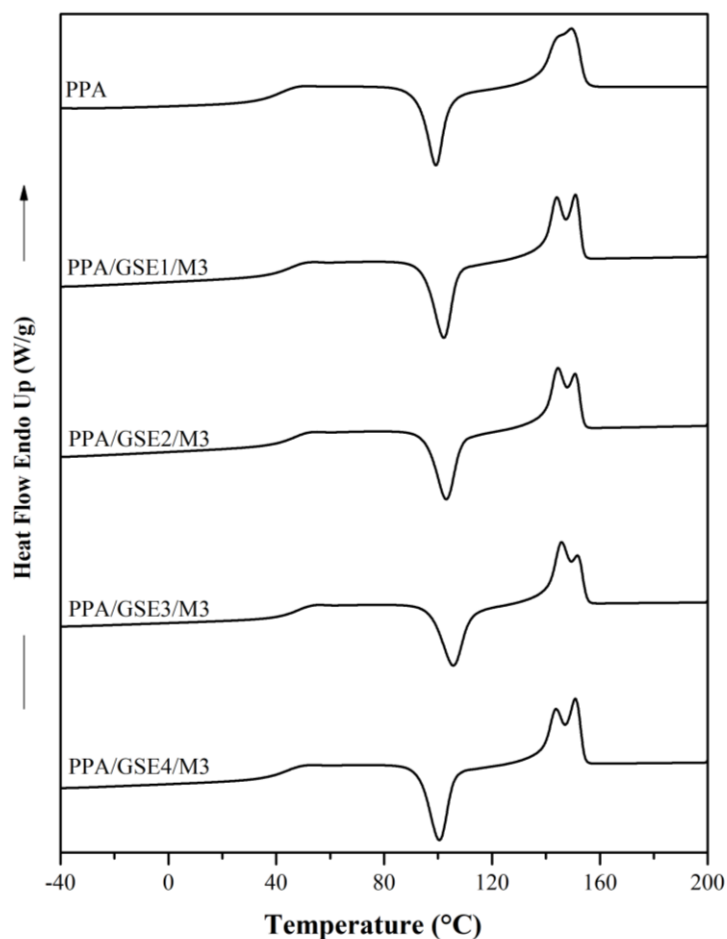
#### 4.4.3. ผลของการศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่ ปริมาณ GSE ที่แตกต่างกันที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)

สมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม PPA/PLA-g-MA3 ที่เติม GSE 1, 2, 3 และ 4 phr แสดงสมบัติทางความร้อนได้แก่อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T<sub>g</sub>), อุณหภูมิการตกผลึกขณะให้ความร้อน (Cold crystallization, T<sub>cc</sub>), อุณหภูมิการหลอมผลึก (Melting temperature, T<sub>m</sub>) และปริมาณผลึก (X<sub>c</sub>) ในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.39 พบว่าการเติม GSE ไม่ส่งผลต่อ T<sub>g</sub> และ T<sub>m</sub> อย่างมีนัยสำคัญ แต่พบว่า T<sub>cc</sub> มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นที่ 3-6°C เมื่อเพิ่ม GSE จาก 1-3 phr และปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น 3-5% เมื่อปริมาณ GSE เพิ่มขึ้น 1-3 phr แสดงให้เห็นว่าการเติม GSE ส่งผลให้ความเป็นผลึกของ PPA เพิ่มขึ้น โดย GSE เหนี่ยวนำให้เกิดผลึกเป็นชั้นที่จัดเรียงตัวเข้าหากันอย่างไม่สมบูรณ์ หรือผลึกในรูปแบบที่ไม่สมบูรณ์ ( $\alpha'$ -form) เกิดขึ้น ซึ่งปรากฏเป็นพีคการหลอมผลึกที่อุณหภูมิต่ำเกิดขึ้นที่การเติม GSE 1-3 phr และในอีกด้านหนึ่งการเติม GSE 4 phr ส่งผลให้ T<sub>g</sub> และปริมาณผลึกลดลง เมื่อเทียบกับ GSE ที่สัดส่วนอื่นๆ เนื่องจากการกระจายตัวของ GSE ที่มีโครงสร้างเกาะเกาะ ทำให้สายโซ่ PLA จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบได้น้อยลง ซึ่งพบว่าที่การเติม GSE 4 phr ส่งผลให้ T<sub>m</sub> มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอันตรกิริยาของ PLA-g-MA ต่อ GSE และสายโซ่ PLA ทำให้ต้องใช้พลังงานในการหลอมผลึกสูงขึ้น



ตารางที่ 4.9 แสดงสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม PPA/PLA-g-MA3 ที่ GSE ปริมาณแตกต่างกัน

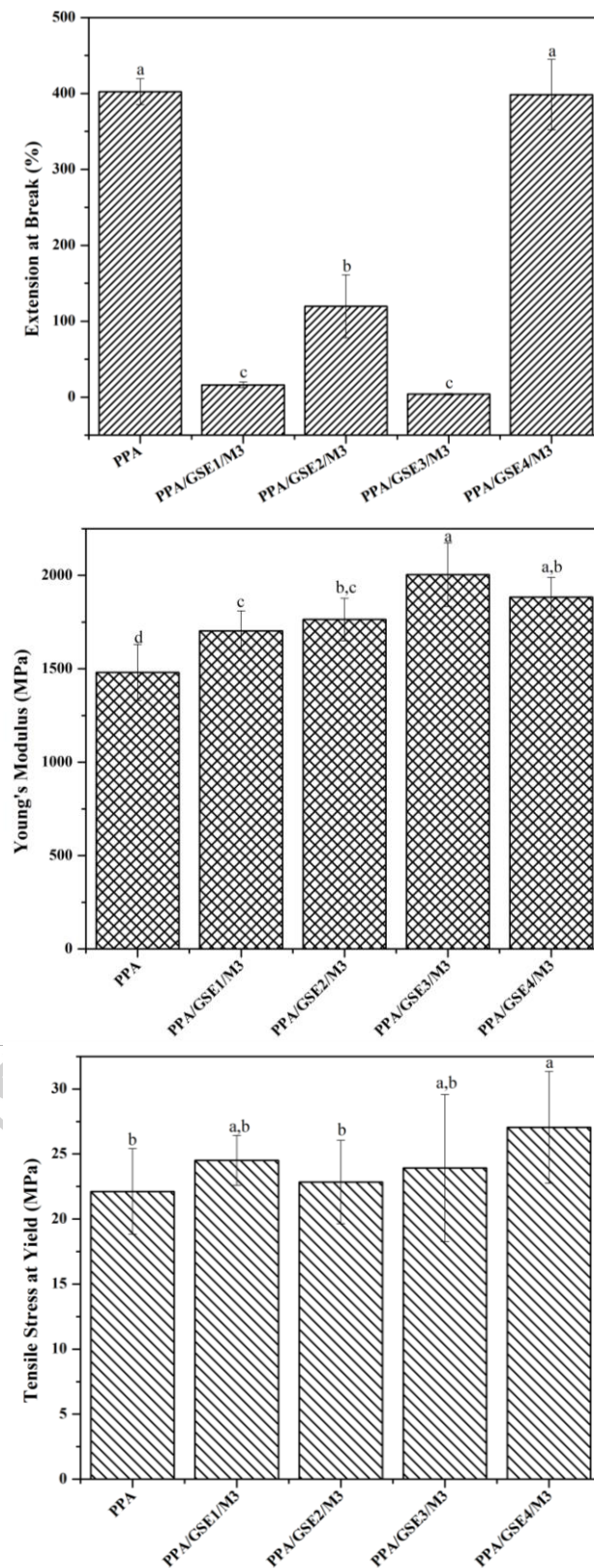
Sample	$T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m,\alpha}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m,\alpha'}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{cc}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta H_m$ (J/g)	$\Delta H_{cc}$ (J/g)	$X_c$ (%)
PPA	45.12	149.52	145.87	99.19	23.46	22.21	1.48
PPA/GSE1/M3	43.97	150.94	144.28	102.03	27.24	23.44	4.5
PPA/GSE2/M3	45.08	151.12	144.45	103.19	28.49	23.68	5.7
PPA/GSE3/M3	46.42	152.13	145.77	105.69	26.05	20.82	6.2
PPA/GSE4/M3	42.20	154.38	144.31	100.53	26.31	23.14	3.76



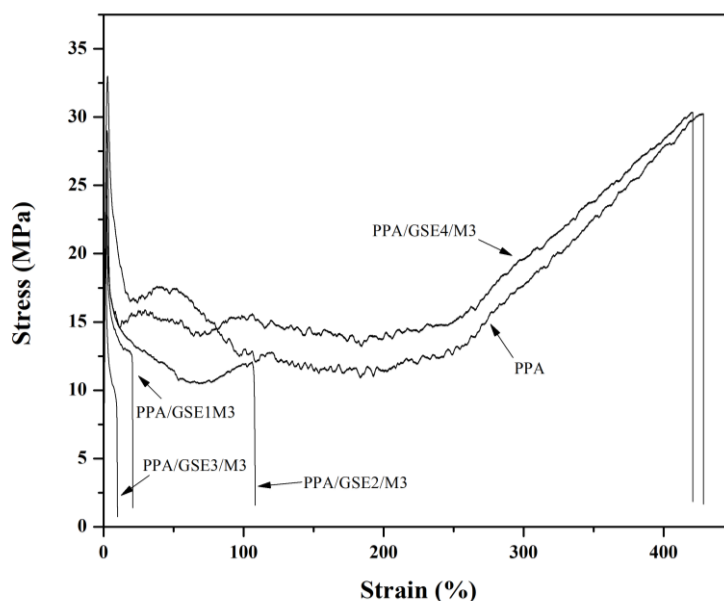
รูปที่ 4.39 แสดง DSC Thermogram ของฟิล์มผสม PPA ที่เติม GSE 1, 2, 3 และ 4 phr ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก

#### 4.4.4. ผลของการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่ปริมาณ GSE ที่แตกต่างกันที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก

สมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม PPA ที่ปริมาณ GSE ที่แตกต่างกันที่ 1, 2, 3 และ 4 phr ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก แสดงในรูปที่ 4.40 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของฟิล์มในรูปที่ 4.41 จากผลการทดสอบพบว่า การเติม GSE ที่ 1-3 phr ส่งผลให้ฟิล์มผสมเปราะลง เมื่อเทียบกับ PPA โดยทั่วไปนั้น GSE สามารถประพฤติตัวเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ได้ที่ปริมาณของ GSE ต่ำๆ และสามารถทำให้ความยืดหยุ่นของฟิล์มเพิ่มขึ้นได้ แต่จากผลการทดสอบดังกล่าวพบว่าที่ GSE ปริมาณที่ไม่สูงมาก (1-3 phr) แสดงพฤติกรรมการขาดแบบเปราะ เนื่องจากเป็นผลของเติม PLA-g-MA ซึ่ง สามารถเกิดปฏิกิริยากับ ADR เป็นผลให้ PEG เกิดปฏิกิริยากับ ADR ได้น้อยลง แล้ว PLA กับ PEG จึงไม่สามารถเข้ากันได้ ฟิล์มผสมจึงแสดงพฤติกรรมการขาดแบบเปราะ โดยที่ GSE 2 phr แสดงค่า Extension at break ที่ประมาณ 117% ซึ่งสูงกว่าการเติม GSE ที่ 1 และ 3 phr ซึ่ง แสดงค่า Extension at break ที่ประมาณ 5-10% โดยพบว่าการเติม GSE 4 phr ส่งผลให้ค่า Extension at break สูงเทียบเท่ากับ PPA แสดงถึงการไม่สูญเสียความยืดหยุ่นของ PPA เนื่องจากการเกาะกลุ่มกันของ PEG ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่การเติม GSE 4 phr ทำให้ GSE สามารถกระจายตัวได้ดีที่สุด จากการเติม PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก เนื่องจากพฤติกรรมดังกล่าวจึงส่งผลให้การเติม GSE แสดงค่ามอดูลัสที่สูงกว่า PPA ในทุกสัดส่วนของ GSE เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่าง ADR กับ PLA-g-MA ทำให้ฟิล์มสามารถทนทานแรงดึงยึดได้มากยิ่งขึ้น สำหรับฟิล์ม PPA ผสม PLA-g-MA 3% โดย น้ำหนัก และเติม GSE 4 phr การเพิ่มขึ้นของมอดูลัสเป็นผลมาจากอันตรกิริยาเนื่องจาก PLA-g-MA กับสายโซ่ PLA ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ผ่านกันได้ยากขึ้น จึงเห็นว่าความแข็งแรงของฟิล์ม PPA/GSE4/PLA-g-MA3 เพิ่มขึ้น ซึ่งในผลของ Tensile Stress at Yield ไม่แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญมากนัก ซึ่งแสดงให้เห็นชัดเจนในรูปที่ 4.37 ซึ่งเห็นว่าที่การเติม GSE 4 phr พบการขาดแบบเหนียว (Ductile) ที่ปรากฏพฤติกรรม Strain hardening เช่นเดียวกับ PPA และที่ GSE 2 phr แสดงการเสียรูปแบบยืดหยุ่นที่น้อยกว่าที่ GSE 4 phr แต่สูงกว่าที่ GSE 1 และ 3 phr จึงกล่าวได้ว่าที่ GSE 2 phr PLA-g-MA แย้งเกิดปฏิกิริยากับ ADR น้อยลง ซึ่งจากการทดสอบที่ กล่าวมาความแข็งแรงของฟิล์มที่ขึ้นจากการเติม GSE นั้นสอดคล้องกับปริมาณผลึกที่เพิ่มขึ้นเมื่อเติม GSE ดังแสดงในการทดสอบสมบัติทางความร้อน และอันตรกิริยาของ PLA-g-MA ใน PPA/GSE4 ที่ ซึ่งแสดงใน FTIR และ  $T_m$  ที่เพิ่มสูงขึ้น สามารถยืนยันได้ด้วยสมบัติเชิงกลที่ดีของฟิล์มผสม



รูปที่ 4.40 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม PPA ที่เติม GSE 1, 2, 3 และ 4 phr ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก

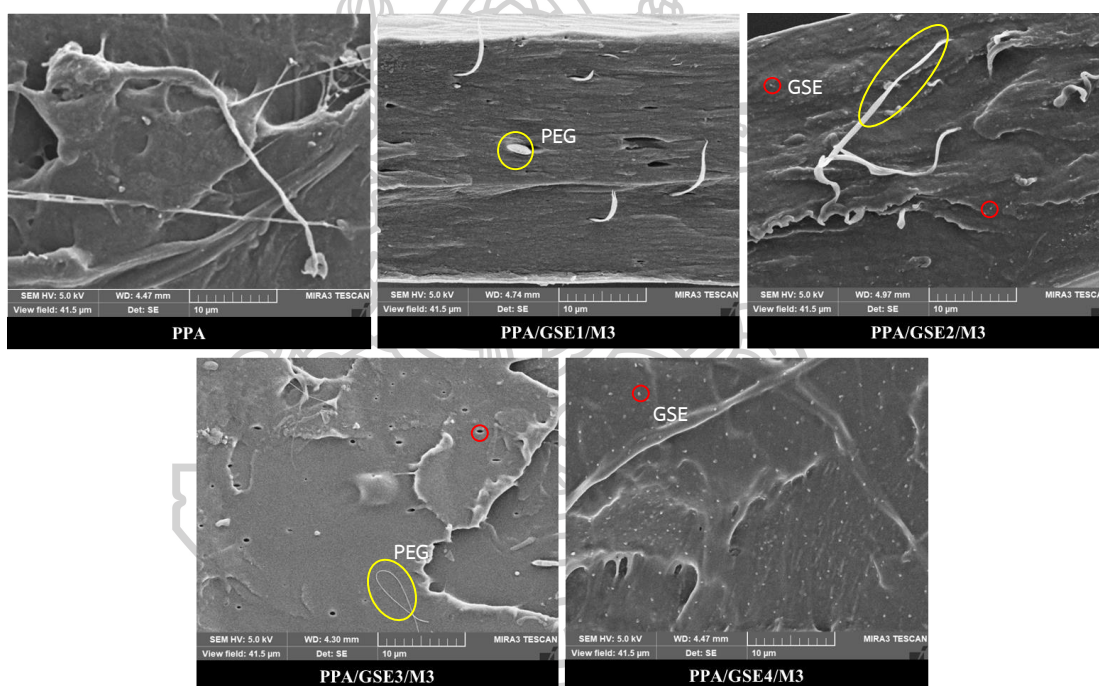


รูปที่ 4.41 แสดงแผนภาพ Stress-Strain ของฟิล์มผสม PPA ที่เติม GSE 1, 2, 3 และ 4 phr ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก

#### 4.4.5. ผลของการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่ปริมาณ GSE ที่แตกต่างกันที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม PPA/PLA-g-MA3 ที่ปริมาณ GSE ต่างกัน ชิ้นงานที่ถูกดึงยืดทุกอย่าง ถูกนำมาศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยขาดและแสดงผลดังรูปที่ 4.42 จะพบว่าการขาดของ PPA แสดงการขาดแบบเหนียว (Ductile) ที่ซึ่งแสดงพื้นผิวในลักษณะของเฟสเดียว ไม่แสดงให้เห็นถึงเฟสของ PEG ที่แยกออกมา จึงกล่าวได้ว่าฟิล์มผสม PPA แสดงลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน และเมื่อเติม GSE 1 phr แสดงลักษณะการขาดแบบเปราะ และพบไฟบริลที่ยื่นออกจากเนื้อฟิล์ม ซึ่งไฟบริลส่วนนี้แสดงถึงส่วนที่ยืดของ PEG แสดงให้เห็นว่า PEG แยกเฟสออกจาก PLA และไม่สังเกตเห็นน้ำมัน GSE ในฟิล์ม เนื่องจากปริมาณ GSE ที่น้อย ในส่วนของ GSE 2 phr แสดงพื้นผิวที่ขรุขระมากขึ้น และเห็นริ้วที่แสดงถึงการขาดแบบเหนียว (Ductile) มากขึ้นเมื่อและสามารถสังเกตเห็นได้ถึงเฟสของ GSE (ในวงกลมสีแดง) ที่กระจายตัวได้ดี แต่อย่างไรก็ตามที่ GSE 2 phr ยังคงแสดงให้เห็นถึงไฟบริลที่ยื่นออกจากฟิล์ม แสดงให้เห็นว่ามี PEG บางส่วนที่แยกเฟสออกจาก PLA ฟิล์มจึงเปราะลง แต่จะสังเกตเห็นได้ว่าที่รอยการยืดออกของไฟบริล ไฟบริลยังคงมีการยึดติดที่ผิว ต่างจาก GSE 1 phr ซึ่งไฟบริลยืดออกจากช่องว่างแสดงถึงการยึดติดกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ไม่ดี จึงส่งผลให้ฟิล์มผสม PPA/PLA-g-MA3 ที่ GSE 2 phr มีความ

ยึดหยุ่นมากกว่าที่ GSE 1 phr และเมื่อเพิ่ม GSE เป็น 3 phr ไม่พบไฟบริลของ PEG เกิดขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PEG ไม่แยกเฟสออกจาก PLA แต่พบลักษณะของ GSE ที่เกิดการรวมตัวอยู่ในฟิล์มผสม จึงเห็นว่าผิวการขาดของฟิล์มเป็นแบบเรียบ ซึ่งแสดงถึงการขาดแบบเปราะ ซึ่งเมื่อปริมาณ GSE เพิ่มเป็น 4 phr แสดงพื้นผิวที่ขรุขระซึ่งแสดงถึงการขาดแบบเหนียว และไม่แสดงให้เห็นถึงการแยกเฟสของ PEG และแสดงลักษณะเป็นพอลิเมอร์แบบเนื้อเดียวเช่นเดียวกับ PPA ยิ่งไปกว่านั้นยังพบเฟสของ GSE กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในฟิล์ม และยึดติดอยู่กับเนื้อพอลิเมอร์ไม่ระเหยหลุดออก ขณะทดสอบ แสดงให้เห็นว่า PLA-g-MA สามารถยึดเกาะกับ GSE และกักเก็บ GSE ไว้ได้อย่างเสถียรและเกิดการกระจายตัวที่ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้

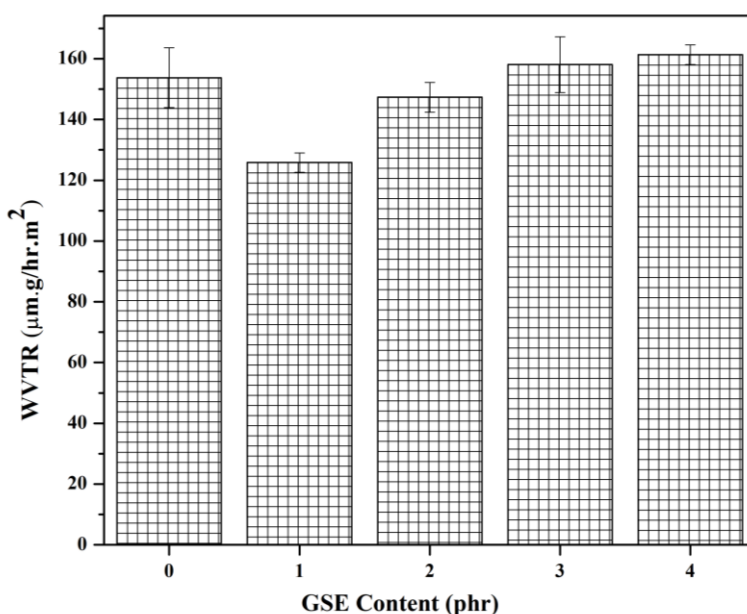


รูปที่ 4.42 แสดงภาพ Scanning electron microscope (SEM) ของผิวการขาดของฟิล์มผสม PPA ที่เติม GSE 1, 2, 3 และ 4 phr ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก



#### 4.4.6. ผลการศึกษาการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่ปริมาณ GSE ที่แตกต่างกันที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก

อิทธิพลของการเติม GSE ที่ 1, 2, 3 และ 4 phr ในฟิล์มผสม PPA/PLA-g-MA3 ส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ดังแสดงในรูปที่ 4.43 พบว่าการเติม GSE ปริมาณ 2-4 phr ไม่ส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มผสม PPA แต่ที่ GSE 1 phr มีค่า WVTR ลดลงต่ำกว่า PPA และ GSE ที่สัดส่วนอื่นๆ ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับการทดสอบ TGA ซึ่งพบว่าการเติม GSE ที่ 1 phr ส่งผลให้ GSE แยกเฟสจาก PPA และ PLA-g-MA ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาพอดี้กับ GSE 1 phr ทำให้ PLA-g-MA ส่วนที่เหลือแย่งทำปฏิกิริยากับ ADR จึงทำให้ PEG เกิดการเกาะกลุ่มกันส่งผลให้ความชอบน้ำของพอลิเมอร์ผสมลดลง และเมื่อปริมาณ GSE เพิ่มมากขึ้น ทำให้ PLA-g-MA ทำปฏิกิริยากับ GSE ได้พอดี้มากขึ้น จึงส่งผลให้ PLA-g-MA ส่งผลต่อการจับกลุ่มของ PEG น้อยลง ความชอบน้ำของฟิล์มจึงเพิ่มขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกับ PPA



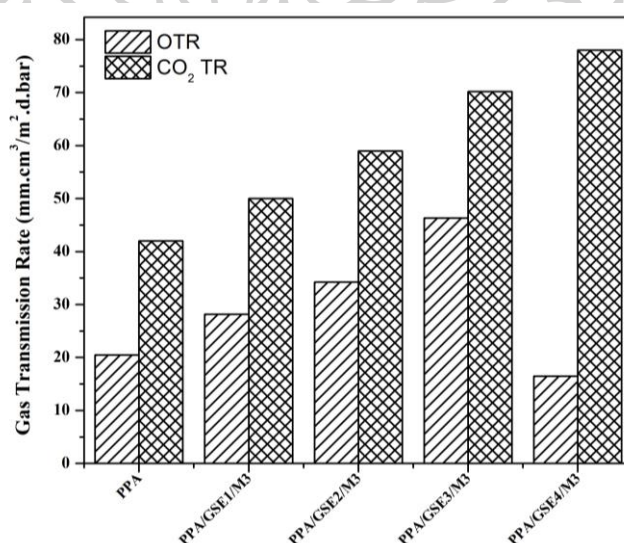
รูปที่ 4.43 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของฟิล์มผสม PPA ที่เติม GSE 1, 2, 3 และ 4 phr ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก

#### 4.4.7. ผลการศึกษาการซึมผ่านของแก๊สของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่ปริมาณ GSE ที่แตกต่างกันที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก



สำหรับการศึกษาอิทธิพลของปริมาณ GSE ใน PPA/PLA-g-MA3 ต่อสมบัติการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (OTR) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>TR) พบว่าอิทธิพลของ GSE ส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านของแก๊สดังแสดงในรูป 4.44 พบว่าเมื่อปริมาณ GSE เพิ่มขึ้นจาก 1-3 phr ค่า OTR มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับ PPA ซึ่งเป็นผลมาจากช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างผลึกทรงกลม (Spherulite) เนื่องจากการรวมตัวกันของ PEG ดังนั้นปริมาณผลึกที่เพิ่มขึ้นจากการทดสอบ DSC (ตารางที่ 4.9) จึงเป็นผลึกที่ไม่สามารถจัดเรียงตัวเข้าหากันได้ดี ดังนั้นจึงเกิดช่องว่างระหว่างผลึกทรงกลม (Spherulite) นี้ โดยลักษณะการหลอมผลึกที่แสดงในรูปที่ 4.39 แสดงให้เห็นว่าผลึกในรูปแบบที่ไม่สมบูรณ์แบบ ( $\alpha'$  form) มีปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ GSE จาก 1-3 phr ด้วยโครงสร้างของผลึกที่ความเป็นระเบียบต่ำนี้ จึงส่งผลให้ช่องว่างระหว่างผลึกเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า OTR มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ GSE แต่พบว่าเมื่อเพิ่ม GSE เป็น 4 phr ค่า OTR ลดลงอย่างมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า GSE 4 phr นั้นเหมาะสมกับ PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก มากที่สุด ส่งผลให้ GSE กระจายตัวได้ดี และเกิดอันตรกิริยากับ PPA ได้ จึงส่งผลให้เส้นทางในการเคลื่อนที่ซับซ้อนมากขึ้น อีกทั้ง GSE ที่มีคุณสมบัติในการต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ จึงสามารถป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนได้ด้วยวิธีการทางเคมี จึงส่งผลให้ OTR ลดลงอย่างมาก

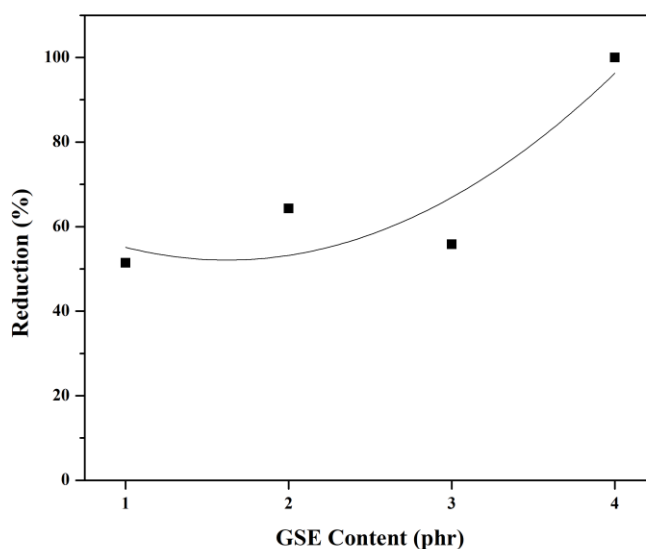
ในการศึกษาอัตราการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า CO<sub>2</sub>TR เพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณ GSE เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากผลทางเคมีของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับหมู่เอเทอร์ใน GSE จึงพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ GSE แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จึงเคลื่อนที่ผ่านได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.44 แสดงอัตราการซึมผ่านของแก๊สของฟิล์มผสม PPA ที่เติม GSE 1, 2, 3 และ 4 phr ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก

#### 4.4.8. ผลของการศึกษาการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิด *Pseudomonas aeruginosa* ด้วยมาตรฐาน JIS-Z 2801 ของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่ปริมาณ GSE ที่แตกต่างกันที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก

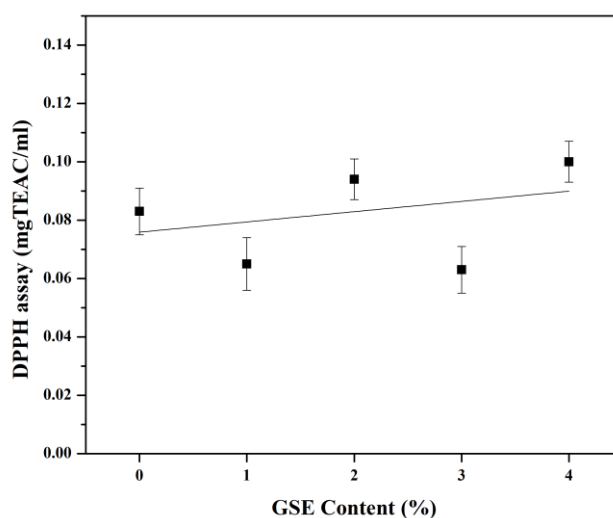
การศึกษาอิทธิพลของปริมาณ GSE ต่อประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรียของฟิล์ม PPA/PLA-g-MA3 แสดงผลการทดสอบในรูปที่ 4.45 พบว่าที่ปริมาณ GSE 1-3 phr แสดงประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรียที่ค่อนข้างต่ำในช่วง 51-64% ซึ่งที่ GSE 1, 2 และ 3 phr แสดงประสิทธิภาพของการต้านเชื้อแบคทีเรียที่ใกล้เคียงกัน โดยพบว่าการเติม GSE ที่ปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรียที่ดีที่สุดนั้นพบที่ปริมาณ GSE 4 phr ซึ่งแสดงประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียสูงถึง 99.99% ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า GSE จะมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเมื่อเพิ่มปริมาณ GSE เป็น 4 phr แสดงให้เห็นว่าการที่เติม GSE ต่ำกว่า 4 phr ส่งผลให้ GSE ยังมีปริมาณไม่มากพอที่จะสามารถแสดงประสิทธิภาพออกมาได้



รูปที่ 4.45 แสดงประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *Pseudomonas aeruginosa* ของฟิล์มผสม PPA ที่เติม GSE 1, 2, 3 และ 4 phr ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก

#### 4.4.9. ผลของการศึกษาการต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH Assay ของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่ปริมาณ GSE ที่แตกต่างกันที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก

น้ำมันสกัดจากเมล็ดองุ่น (GSE) ประกอบด้วยสารประกอบฟีนอลิกคือ Oligomeric proanthocyanidin complexes (OPCs) (ดังรูปที่ 2.5) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดังแสดงในรูปที่ 4.35 ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นอีกปัจจัยหนึ่งในการเสถียรภาพของผักและผลไม้ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับแก๊สออกซิเจนในอากาศจะส่งผลให้ผิวหรือเนื้อของผักและผลไม้เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ดังนั้นในการศึกษาการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH Assay จึงถูกดำเนินการเพื่อศึกษาการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟิล์มผสม โดยได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.46 ซึ่งแนวโน้มที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะเดียวกันกับประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรีย เนื่องจากเป็นผลมาจากการเติม GSE ในฟิล์มผสม ดังนั้นผลของการเข้ากันได้จึงเป็นปัจจัยต่อการแสดงประสิทธิภาพของ GSE นอกจากนี้ยังพบว่า PLA/PEG10/ADR1.25 (PPA) ที่ไม่มีการเติม GSE นั้นมีประสิทธิภาพในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันเช่นกัน ซึ่งเป็นผลมาจากหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของ PEG ซึ่งแตกต่างจากประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรีย เนื่องจากการทดสอบ DPPH เป็นการทดสอบในรูปแบบของสารละลาย ดังนั้นหมู่ไฮดรอกซิลของ PEG จึงสามารถแสดงการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ แต่การทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย นั้น เป็นการทดสอบกับผิวฟิล์มและอาศัยการแพร่ออกมาของสารต้านเชื้อแบคทีเรีย GSE



รูปที่ 4.46 แสดงประสิทธิภาพการต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟิล์มผสม PPA ที่เติม GSE 1, 2, 3 และ 4 phr ที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก

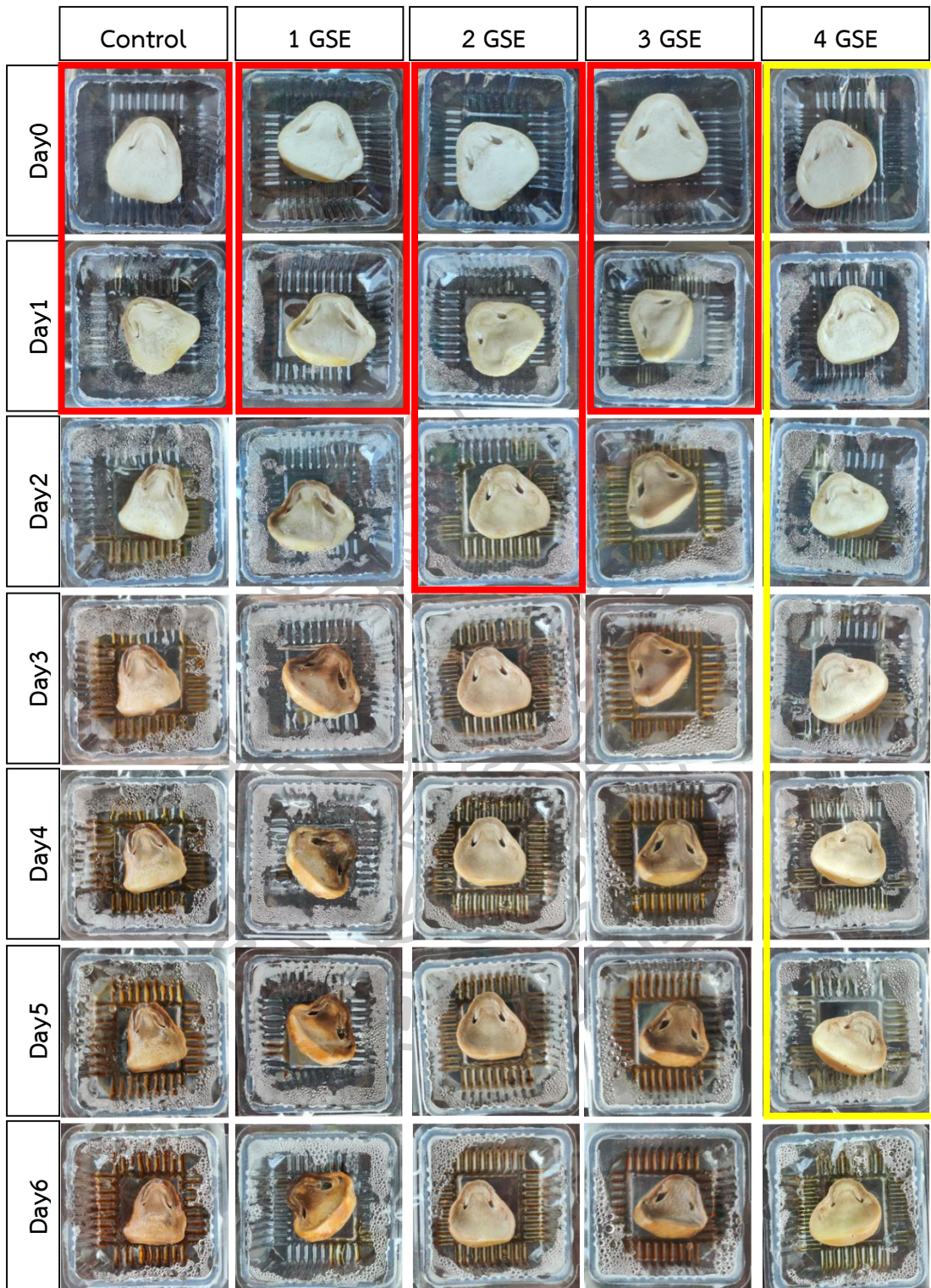
ดังนั้น PPA จึงไม่สามารถแสดงประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียได้ แต่อย่างไรก็ตามที่ GSE 4 phr นั้นยังคงแสดงประสิทธิภาพการต้านปฏิริยาออกซิเดชันได้ดีที่สุด ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันกับการต้านเชื้อแบคทีเรีย

#### 4.4.10. ผลของการเก็บรักษาเห็ดฟางที่อุณหภูมิ 20°C ของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25

(PPA) ที่ปริมาณ GSE ที่แตกต่างกันที่มี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก

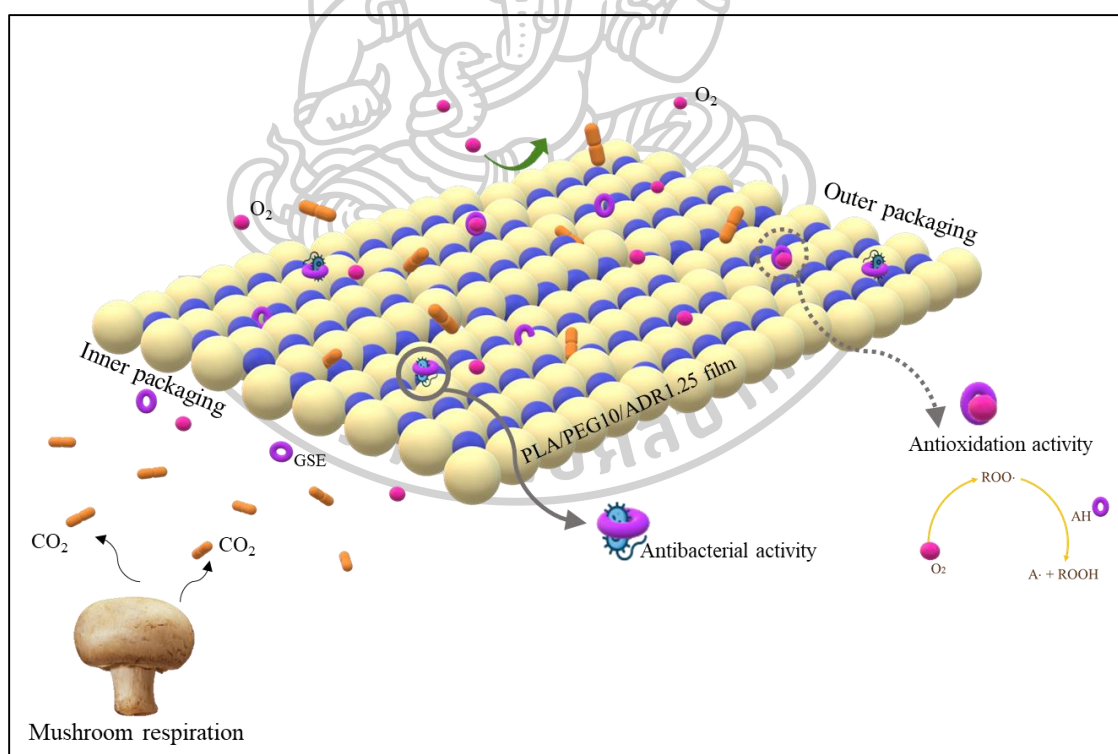
การศึกษาการยืดอายุเห็ดจะต้องคำนึงถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการเน่าเสียของเห็ด ซึ่งประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลักคือ อัตราการหายใจที่สูงของเห็ด การเน่าเสียเนื่องจากเชื้อแบคทีเรีย การคล้ำเสียของเห็ด ดังนั้นในการศึกษาการเตรียมฟิล์มบรรจุภัณฑ์เห็ดจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยดังกล่าว โดยการศึกษาการเติมสารต้านเชื้อแบคทีเรียและปฏิริยาออกซิเดชันคือน้ำมันสกัดเมล็ดองุ่น (GSE) ในฟิล์มผสม PPA ซึ่งพบว่าอิทธิพลของปริมาณ GSE ที่ 1, 2, 3 และ 4 phr ส่งผลต่อการเก็บรักษาเห็ดดังแสดงในรูปที่ 4.47 ซึ่งทำการศึกษารักษาเห็ด โดยบรรจุเห็ดฟางในภาดพลาสติกและปิดปากด้วยฟิล์มผสมที่เตรียมได้ จากการทดสอบพบว่าฟิล์ม PPA (Control) และฟิล์ม PPA/PLA-g-MA3 ที่เติม GSE 1 และ 3 phr เห็ดฟางเริ่มเสียสภาพในวันที่ 2 ซึ่งเหตุผลสำหรับ PPA ได้กล่าวถึงเอาไว้แล้วในตอนที่ 4.2.2 และสำหรับที่ GSE 1 และ 3 phr แสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพการต้านปฏิริยาออกซิเดชันและเชื้อแบคทีเรียที่ต่ำดังแสดงก่อนหน้านี้ ส่งผลให้ที่ปริมาณ GSE ดังกล่าว เห็ดเกิดสีคล้ำเนื่องจากปฏิริยาออกซิเดชันได้เร็วขึ้น และยังพบว่าที่ GSE 3 phr เห็ดเกิดการคายน้ำที่ค่อนข้างมาก เป็นผลมาจากอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนที่สูง ส่งผลให้เห็ดมีอัตราการหายใจสูงและคายน้ำออกมามาก ซึ่งเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ส่งผลให้เห็ดเสียสภาพได้เร็วขึ้น ในอีกด้านหนึ่งที่มีการเติม GSE 2 และ 4 phr แสดงให้เห็นว่าเห็ดมีสีคล้ำช้ากว่าที่สัดส่วนอื่นๆ เป็นผลมาจากที่ปริมาณ GSE ดังกล่าว GSE สามารถแสดงประสิทธิภาพในการป้องกันการเกิดปฏิริยาออกซิเดชันได้ดี และพบว่าที่ GSE 2 phr มีการเสียน้ำที่มากกว่าที่ 1 และ 4 phr เนื่องจากมีอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนที่สูง ทำให้เห็ดหายใจมากขึ้นและคายน้ำออกมามาก โดยที่การเติม GSE 4 phr แสดงผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยเห็ดเริ่มมีสีคล้ำในวันที่ 6 และเริ่มมีการคายน้ำมากในวันที่ 4 ซึ่งเป็นผลมาจากที่การเติม GSE 4 phr มีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียและปฏิริยาออกซิเดชันที่สูงที่สุด อีกทั้งยังป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนได้ดีและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถซึมผ่านได้มาก จึงช่วยให้อัตราการหายใจของเห็ดลดลงได้ ส่งผลให้เห็ดเสียสภาพช้าลง แต่อย่างไรก็ตามความชื้นที่เกิดขึ้นในบรรจุภัณฑ์ส่งผลให้รสสัมผัสของเห็ดเปลี่ยนไป หากความชื้นในบรรจุภัณฑ์สามารถระบายออกได้ดี การยืดอายุเห็ดนั้นก็ดำเนินการได้อย่างสมบูรณ์





รูปที่ 4.47 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเห็ดฟางที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 20°C ในระยะเวลา 6 วัน

จากการทดสอบในตอนๆ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4 พบว่าการเตรียมฟิล์มผสมเพื่อใช้สำหรับการยืดอายุเห็ดสามารถยืดอายุเห็ดฟางได้ถึง 5 วัน ที่การใช้ฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 ที่มี การเติม GSE 4 phr และ PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก ที่มีการทำงานดังแสดงในรูปที่ 4.48 โดย PEG จะ กระจายตัวเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ที่ช่วยให้ฟิล์มผสม PLA/PEG มีความยืดหยุ่น โดยมี ADR ที่ช่วยให้ PEG กระจายตัวและเข้ากันได้ดีกับ PLA อีกทั้ง PEG ยังส่งผลให้ฟิล์มผสม PLA/PEG มีความสามารถ ในการเลือกผ่านแก๊สโดยยอมให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการหายใจของเห็ดซึมผ่านออกจาก บรรจุภัณฑ์ได้ และป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนเข้าสู่บรรจุภัณฑ์ ทำให้อัตราการหายใจของ เห็ดลดลงแล้วช่วยให้เห็ดเน่าเสียช้าลง ยิ่งไปกว่านั้นการเติม GSE ยังช่วยกำจัดแก๊สออกซิเจนและเชื้อ แบคทีเรียที่จะสัมผัสกับผิวของเห็ด ทำให้ลดการทำร้ายผิวเห็ดเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและเชื้อ แบคทีเรีย ทำให้เห็ดมีการเน่าเสียช้าลงและผิวเห็ดเกิดการเสียหายจากการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล น้อยลง โดยมี PLA-g-MA ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้และช่วยให้ GSE กระจายตัวได้ดีในฟิล์มผสม GSE จึงสามารถแสดงประสิทธิภาพออกมาได้ดีที่สุด



รูปที่ 4.48 แสดงภาพจำลองการทำงานของฟิล์มผสม PLA/PEG10/ADR1.25 ที่เติม GSE 4 phr และ PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 การศึกษาการเตรียมฟิล์มผสม PLA/PEG ที่เติม ADR

จากการศึกษาอิทธิพลของ PEG ต่อ PLA พบว่าการเติม PEG ไม่ส่งผลต่อโครงสร้างทางเคมีของ PLA แต่พบว่า PEG สามารถประพฤติตัวเป็นพลาสติกไฮเซอรัต่อ PLA ได้ ทำให้สายโซ่ PLA สามารถเคลื่อนไหวเพื่อจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบได้ดีและปริมาณผลึกสูงขึ้นไป PEG มากขึ้น และยังพบว่าที่ PEG 20 และ 30% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ฟิล์มผสมประพฤติตัวแบบฟิล์มยืดหยุ่นด้วยค่า Extension at break ที่สูงขึ้นกว่า 20 เท่า แต่ก็ส่งผลให้ความแข็งแรงของฟิล์มผสมลดลงอย่างมาก เช่นเดียวกัน อีกทั้งเกิดการแยกเฟสของ PLA และ PEG ที่ปริมาณ PEG สูงๆ อีกด้วย ดังนั้นจึงได้ดำเนินการศึกษาการเติมสารขยายสายโซ่ ADR ในฟิล์ม PLA/PEG10 ซึ่งมีลักษณะเป็นฟิล์มเปราะ พบว่าเมื่อเติม ADR ในปริมาณที่เหมาะสมที่ 1.25 phr ส่งผลให้ PLA และ PEG เข้ากันได้ดีมากขึ้น โดยพบอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ PLA และ PEG เกิดขึ้น จากการปรับปรุงสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสม การสั้นของหมู่ฟังก์ชันในสายโซ่ PLA ที่เปลี่ยนแปลงไป และการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ PEG สามารถส่งอิทธิพลต่อ PLA ได้มากขึ้น และพบว่าฟิล์ม PLA/PEG10/ADR1.25 ประพฤติตัวเป็นฟิล์มยืดหยุ่นเทียบเท่ากับการเติม PEG ที่ 20% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ความเข้ากันได้ระหว่างสายโซ่ PLA และ PEG ยังส่งผลให้ฟิล์มผสมมีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและช่วยให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เคลื่อนที่ผ่านได้มากขึ้นอีกด้วย

#### 5.2 การศึกษาการเติม PLA-g-MA ในฟิล์มผสม PLA/PEG/ADR เพื่อทำหน้าที่กักเก็บ GSE

ในการศึกษาการเติม PLA-g-MA เพื่อกักเก็บ GSE ในฟิล์มผสมด้วยการให้มาเลอิก แอนไฮไดรด์ (MA) จับกับ GSE และกระจายตัวในฟิล์มผสมได้ พบว่าการเติม GSE โดยไม่เติม PLA-g-MA ส่งผลให้ GSE เกาะกลุ่มแล้วทำให้สมบัติเชิงกล สมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียและปฏิกิริยาออกซิเดชัน แย่ลง และในการเติม PLA-g-MA ที่ปริมาณสูงเกินไปที่ 6-12% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ PLA-g-MA ไปแย่งเกิดปฏิกิริยากับ ADR แล้วทำให้ PEG และ GSE แยกเฟสออกจากเมทริกซ์แล้วเกิดการเกาะกลุ่มกัน ดังแสดงในภาพ SEM จึงแสดงให้เห็นว่าการเติม PLA-g-MA ที่มากเกินไปจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม การซึมผ่านของแก๊ส และการต้านเชื้อแบคทีเรียและปฏิกิริยาออกซิเดชันแย่งลงอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามที่ PLA-g-MA ที่ 3% โดยน้ำหนัก นั้นเป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อ GSE 4 phr ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมบัติเชิงกล การซึมผ่านของแก๊ส และการต้านเชื้อแบคทีเรียและปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มีค่าสูงขึ้น และให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการยืดอายุเห็ดฟางได้ถึง 5 วัน

### 5.3 การศึกษาการเติม GSE ในฟิล์มผสม PLA/PEG/ADR ที่มี PLA-g-MA คงที่

เมื่อทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณ GSE ที่เติมในฟิล์มผสมและมี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก ทำหน้าที่รองรับ GSE ในฟิล์ม พบว่าการเติม GSE ที่ต่ำกว่า 4 phr ส่งผลให้ GSE ไม่สามารถแสดงประสิทธิภาพออกมาได้ อีกทั้งยังเกิดการรวมกลุ่มและไม่กระจายตัวได้ดีในฟิล์ม ทำให้ฟิล์มผสมที่เติม GSE 1-3 phr เปราะลง และมีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียและปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ต่ำอีกด้วย แสดงให้เห็นว่าฟิล์มผสมที่เติม GSE 4 phr และ PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก เป็นสัดส่วนที่ส่งผลให้ GSE แสดงประสิทธิภาพได้ดีที่สุด ทั้งในส่วนของ การประพดีตัวเป็นฟิล์มยึดหยุ่น และการยึดอายุเห็ด เนื่องจากมีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ดี อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียถึง 99.99% จึงทำให้เห็นว่าฟิล์มผสมที่สัดส่วนดังกล่าวสามารถยึดอายุเห็ดได้นานที่สุด 5 วัน

แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่าสามารถเตรียมฟิล์มผสมของ PLA/PEG10/ADR1.25 ให้เป็นฟิล์มยึดหยุ่นและฟิล์มเลือกผ่าน สามารถยึดอายุเห็ดได้ด้วยการเติม GSE 4 phr โดยมี PLA-g-MA 3% โดยน้ำหนัก เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้

### 5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1 การใช้สารขยายสายโซ่ชนิด ADR ถึงแม้จะแสดงให้เห็นว่าสามารถเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PEG ได้ แต่อย่างไรก็ตามความแข็งแรงของฟิล์มก็ยังคงลดลง ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาต่อถึงปริมาณของ ADR ที่เหมาะสม หรือสารขยายสายโซ่ชนิดอื่นที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีมากขึ้น

5.4.2 ในการเตรียมมาสเตอร์แบทช์ของ GSE, PLA-g-MA และ PLA/PEG/ADR แล้วได้เป็นฟิล์มมาสเตอร์แบทช์ ซึ่งจะถูกตัดเป็นขนาดเล็ก แล้วนำไปผสมกับพอลิเมอร์หลักในขั้นตอนของการขึ้นรูปชิ้นงานฟิล์มทันที ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมไหลออกมาได้ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากชิ้นฟิล์มมาสเตอร์แบทช์ที่ส่งผลให้เม็ดพลาสติกเหนียวและเกาะกัน และเคลื่อนที่ในสกรูได้ไม่ดี จึงทำให้ได้ฟิล์มที่มีความหนาไม่สม่ำเสมอ และหนาเกินกว่าที่ควรจะเป็น ดังนั้นในการศึกษาต่อไปควรจะแก้ปัญหาดังกล่าว โดยอาจจะผ่านการผสมด้วยวิธีอื่นก่อนที่จะนำมาขึ้นรูป

5.4.3 การทดสอบการยึดอายุเห็ด เมื่อนำบรรจุภัณฑ์เข้าสู่ในครั้งแรกการเปลี่ยนอุณหภูมิจะทำให้เกิดไอน้ำในภาชนะ และในการหายใจของเห็ดจะทำให้เกิดการคายน้ำซึ่งส่งผลต่อรสสัมผัสของเห็ด ดังนั้นจึงควรมีวิธีการกำจัดน้ำออกจากภาชนะ เพื่อให้สามารถเก็บรักษาเห็ดได้ดียิ่งขึ้น





1. ข้อมูลการทดสอบสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ Water vapor transmission rate (WVTR)

ตารางที่ ก.1 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PLA

Sample	Time (hr)	Weight (g)		
		1	2	3
PLA	0	87.9683	90.8018	82.1543
	1	87.9714	90.8063	82.1581
	3	87.9779	90.8135	82.1648
	6	87.9881	90.8248	82.1754
	8	88.0034	90.8427	82.1858
	24	88.0531	90.9023	82.2523
	48	88.1299	90.997	82.3327
	72	88.2014	91.0836	82.4091
	96	88.2622	91.1591	82.4738
	120	88.3206	91.2282	82.5415



ตารางที่ ก.2 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PLA/PEG5

Sample	Time (hr)	Weight (g)		
		1	2	3
PLA/PEG5	0	92.5871	93.0053	89.0053
	1	92.5895	93.0079	89.0079
	3	92.5936	93.0118	89.0118
	6	92.6	93.0176	89.0176
	8	92.6119	93.0295	89.0295
	24	92.6471	93.0837	89.0837
	48	92.7024	93.1722	89.1722
	72	92.7523	93.2558	89.2558
	96	92.7935	93.3269	89.3269
	120	92.8332	93.3948	89.3948



ตารางที่ ก.3 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PLA/PEG10

Sample	Time (hr)	Weight (g)		
		1	2	3
PLA/PEG10	0	91.6361	93.1404	88.1404
	1	91.6408	93.144	88.144
	3	91.649	93.1511	88.1511
	6	91.6623	93.162	88.162
	8	91.6835	93.1796	88.1796
	24	91.7534	93.2375	88.2375
	48	0.2276	0.1893	0.2095
	72	0.3262	0.2745	0.2914
	96	0.408	0.348	0.3762
	120	0.4836	0.4172	0.4513

ตารางที่ ก.4 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PLA/PEG20

Sample	Time (hr)	Weight (g)		
		1	2	3
PLA/PEG20	0	91.3473	92.2633	87.3473
	1	91.3525	92.2689	87.3525
	3	91.3611	92.2785	87.3611
	6	91.3752	92.2916	87.3752
	8	91.3973	92.315	87.3973
	24	91.4685	92.3954	87.4685
	48	91.5777	92.527	87.5777
	72	91.6777	92.6419	87.6777
	96	91.7602	92.7334	87.7602
	120	91.838	92.8201	87.838

ตารางที่ ก.5 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PLA/PEG30

Sample	Time (hr)	Weight (g)		
		1	2	3
PLA/PEG30	0	92.4991	89.4991	91.4991
	1	92.5043	89.5043	91.5043
	3	92.5107	89.5107	91.5107
	6	92.5201	89.5201	91.5201
	8	92.536	89.536	91.536
	24	92.5895	89.5895	91.5895
	48	92.671	89.671	91.671
	72	92.7472	89.7472	91.7472
	96	92.8094	89.8094	91.8094
	120	92.868	89.868	91.868

ตารางที่ ก.6 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PLA/PEG10/ADR1.00

Sample	Time (hr)	Weight (g)		
		1	2	3
PLA/PEG10/A1.00	0	95.2791	90.8966	93.8966
	1	95.2859	90.904	93.904
	3	95.2961	90.9164	93.9164
	6	95.3123	90.9359	93.9359
	8	95.3364	90.9642	93.9642
	24	95.4146	91.0564	94.0564
	48	95.5292	91.1904	94.1904
	72	95.6323	91.3081	94.3081
	96	95.7166	91.401	94.401
	120	95.7939	91.486	94.486

ตารางที่ ก.7 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PLA/PEG10/ADR1.25

Sample	Time (hr)	Weight (g)		
		1	2	3
PLA/PEG10/A1.25	0	94.2832	87.1815	92.2832
	1	94.2888	87.1884	92.2888
	3	94.2999	87.2015	92.2999
	6	94.3161	87.2218	92.3161
	8	94.3407	87.2535	92.3407
	24	94.4221	87.3659	92.4221
	48	94.5401	87.494	92.5401
	72	94.648	87.6042	92.648
	96	94.7339	87.6899	92.7339
	120	94.8147	87.7694	92.8147

ตารางที่ ก.8 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PLA/PEG10/ADR1.50

Sample	Time (hr)	Weight (g)		
		1	2	3
PLA/PEG10/A1.50	0	95.9087	83.8928	87.8928
	1	95.9141	83.898	87.898
	3	95.9233	83.9082	87.9082
	6	95.9376	83.9232	87.9232
	8	95.9601	83.9464	87.9464
	24	96.0318	84.0215	88.0215
	48	96.1381	84.1355	88.1355
	72	96.2362	84.2359	88.2359
	96	96.315	84.3147	88.3147
	120	96.3915	84.3905	88.3905

ตารางที่ ก.9 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PPA/GSE4/M0

Sample	Time (hr)	Weight (g)		
		1	2	3
PPA/GSE4/M0	0	93.4525	86.1855	91.1855
	1	93.4578	86.1937	91.1937
	3	93.4696	86.2073	91.2073
	6	93.4873	86.2284	91.2284
	8	93.5117	86.259	91.259
	24	93.5968	86.3618	91.3618
	48	93.728	86.5179	91.5179
	72	93.8388	86.6487	91.6487
	96	93.9326	86.7593	91.7593
	120	94.0183	86.8599	91.8599

ตารางที่ ก.10 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PPA/GSE4/M3

Sample	Time (hr)	Weight (g)		
		1	2	3
PPA/GSE4/M3	0	94.2048	93.2048	96.2048
	1	94.2109	93.2109	96.2109
	3	94.2231	93.2231	96.2231
	6	94.2417	93.2417	96.2417
	8	94.2687	93.2687	96.2687
	24	94.3571	93.3571	96.3571
	48	94.4946	93.4946	96.4946
	72	94.6134	93.6134	96.6134
	96	94.7126	93.7126	96.7126
	120	94.8034	93.8034	96.8034

ตารางที่ ก.11 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PPA/GSE4/M6

Sample	Time (hr)	Weight (g)		
		1	2	3
PPA/GSE4/M6	0	96.2048	83.7186	85.7186
	1	96.2109	83.7251	85.7251
	3	96.2231	83.7369	85.7369
	6	96.2417	83.7555	85.7555
	8	96.2687	83.7815	85.7815
	24	96.3571	83.8701	85.8701
	48	96.4946	84.0044	86.0044
	72	96.6134	84.1179	86.1179
	96	96.7126	84.212	86.212
	120	96.8034	84.2978	86.2978

ตารางที่ ก.12 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PPA/GSE4/M9

Sample	Time (hr)	Weight (g)		
		1	2	3
PPA/GSE4/M9	0	94.1887	86.0791	89.0791
	1	94.1914	86.0817	89.0817
	3	94.1967	86.0866	89.0866
	6	94.2048	86.0951	89.0951
	8	94.2165	86.1071	89.1071
	24	94.2561	86.148	89.148
	48	94.3181	86.2122	89.2122
	72	94.3732	86.2687	89.2687
	96	94.4215	86.318	89.318
	120	94.4666	86.3647	89.3647

ตารางที่ ก.13 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PPA/GSE4/M12

Sample	Time (hr)	Weight (g)		
		1	2	3
PPA/GSE4/M12	0	92.0196	85.1119	89.0196
	1	92.0213	85.1145	89.0213
	3	92.024	85.1178	89.024
	6	92.0288	85.1234	89.0288
	8	92.0354	85.1313	89.0354
	24	92.0593	85.1603	89.0593
	48	92.1007	85.2088	89.1007
	72	92.138	85.2532	89.138
	96	92.1707	85.2926	89.1707
	120	92.2016	85.3297	89.2016

ตารางที่ ก.14 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PPA/GSE1/M3

Sample	Time (hr)	Weight (g)		
		1	2	3
PPA/GSE1/M3	0	91.689	87.6634	90.6634
	1	91.6935	87.6677	90.6677
	3	91.703	87.6774	90.6774
	6	91.7174	87.6918	90.6918
	8	91.7391	87.7133	90.7133
	24	91.8076	87.7834	90.7834
	48	91.9099	87.8884	90.8884
	72	91.9986	87.9808	90.9808
	96	92.0696	88.0561	91.0561
	120	92.1362	88.1268	91.1268



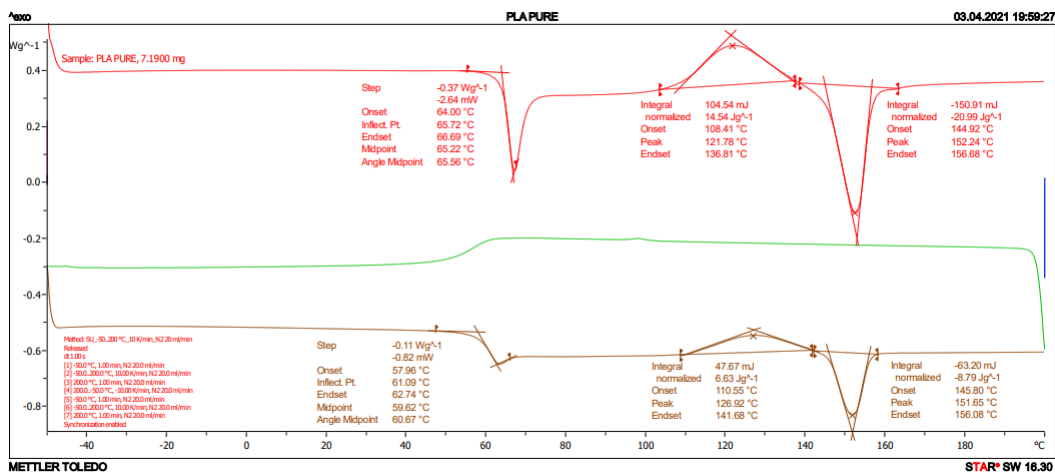
ตารางที่ ก.15 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PPA/GSE2/M3

Sample	Time (hr)	Weight (g)		
		1	2	3
PPA/GSE2/M3	0	92.0017	94.0017	91.0017
	1	92.0066	94.0066	91.0066
	3	92.0162	94.0162	91.0162
	6	92.0319	94.0319	91.0319
	8	92.0552	94.0552	91.0552
	24	92.1354	94.1354	91.1354
	48	92.2631	94.2631	91.2631
	72	92.3702	94.3702	91.3702
	96	92.4601	94.4601	91.4601
	120	92.5432	94.5432	91.5432

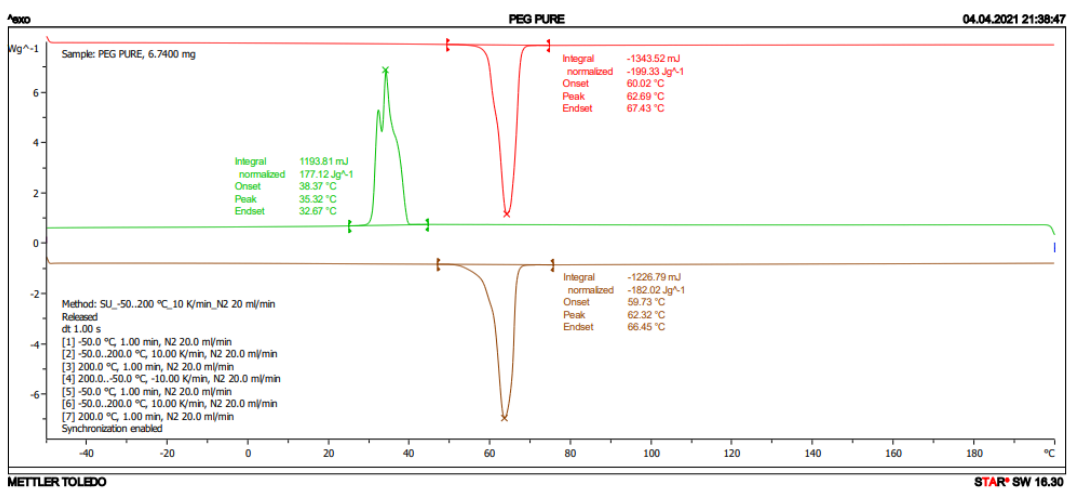
ตารางที่ ก.16 แสดงน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำของ PPA/GSE3/M3

Sample	Time (hr)	Weight (g)		
		1	2	3
PPA/GSE3/M3	0	93.7716	86.2251	89.2251
	1	93.7732	86.2264	89.2264
	3	93.7771	86.231	89.231
	6	93.7837	86.2377	89.2377
	8	93.7939	86.2471	89.2471
	24	93.8393	86.2792	89.2792
	48	93.9141	86.3327	89.3327
	72	93.9846	86.3809	89.3809
	96	94.0482	86.4246	89.4246
	120	94.1077	86.4654	89.4654

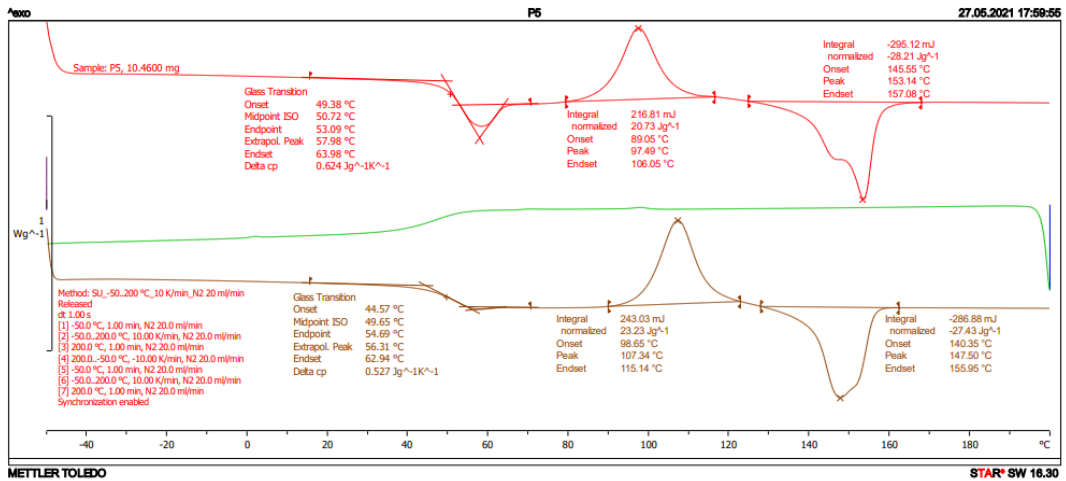
2. ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสมด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)



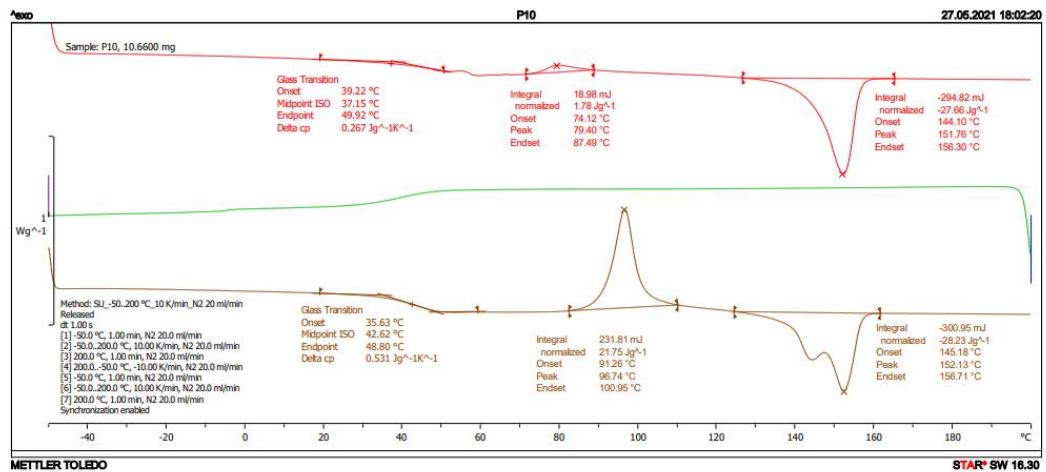
รูปที่ ก.1 แสดง DSC Thermogram ของ PLA



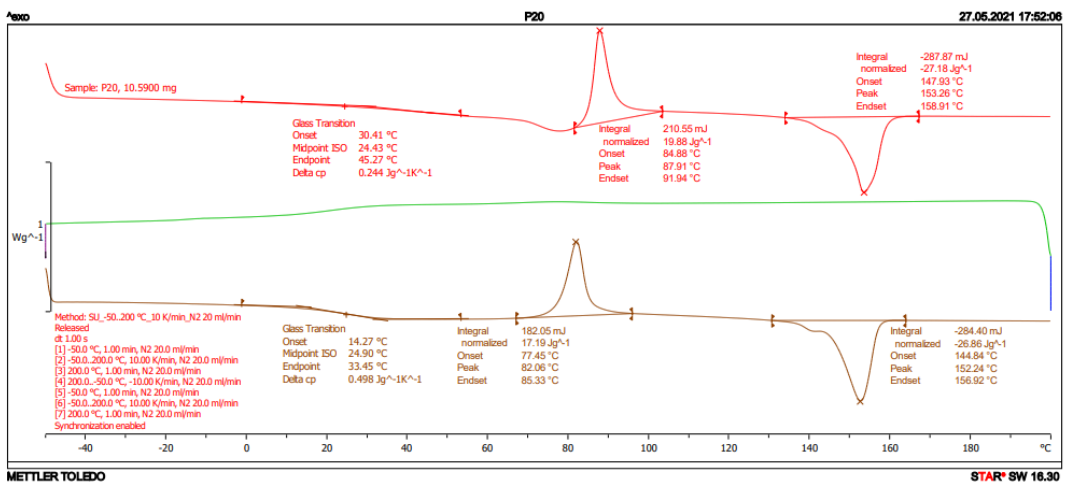
รูปที่ ก.2 แสดง DSC Thermogram ของ PEG



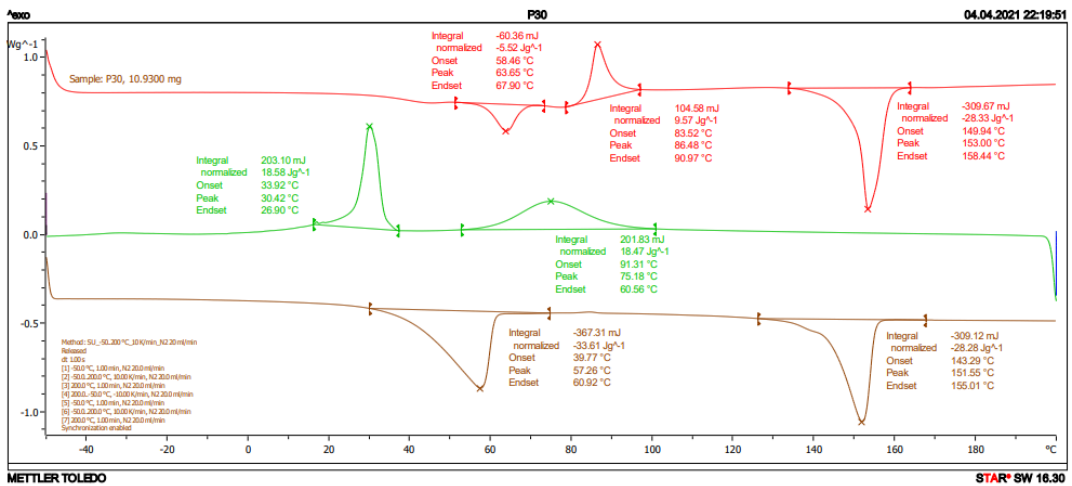
รูปที่ ก.3 แสดง DSC Thermogram ของ PLA/PEG5



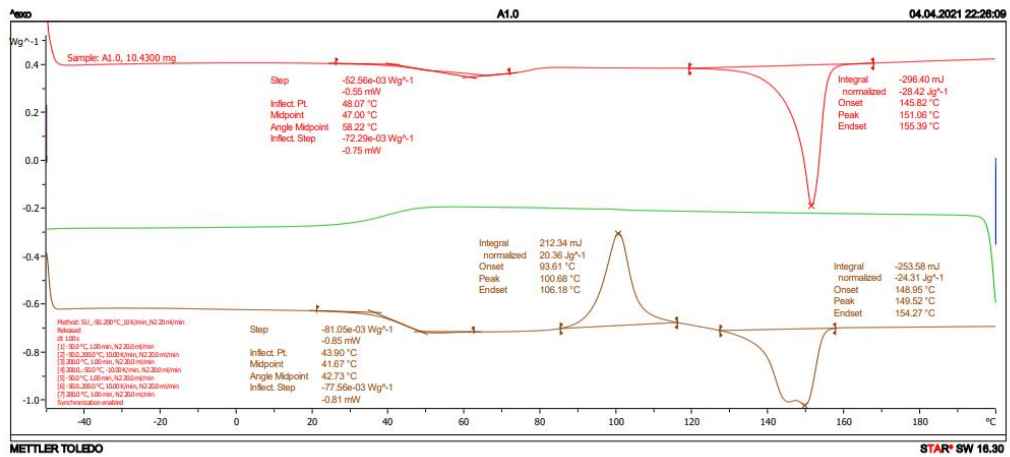
รูปที่ ก.4 แสดง DSC Thermogram ของ PLA/PEG10



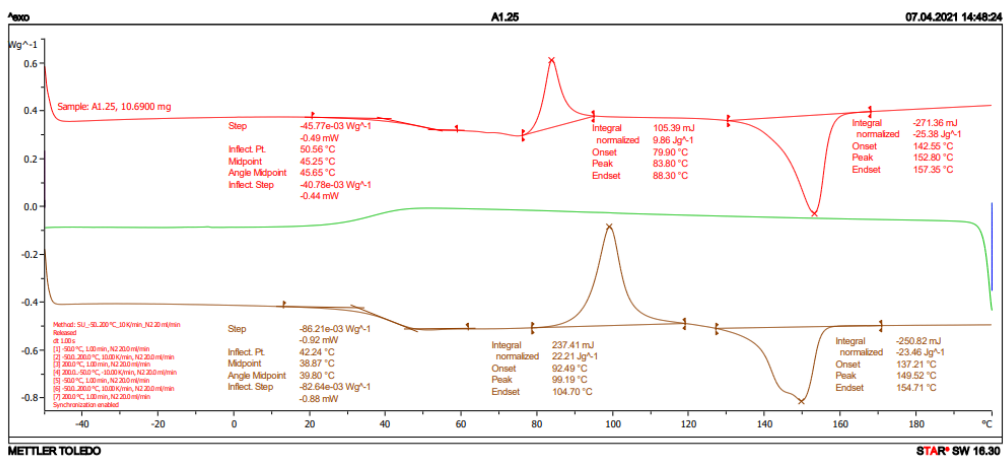
รูปที่ ก.5 แสดง DSC Thermogram ของ PLA/PEG20



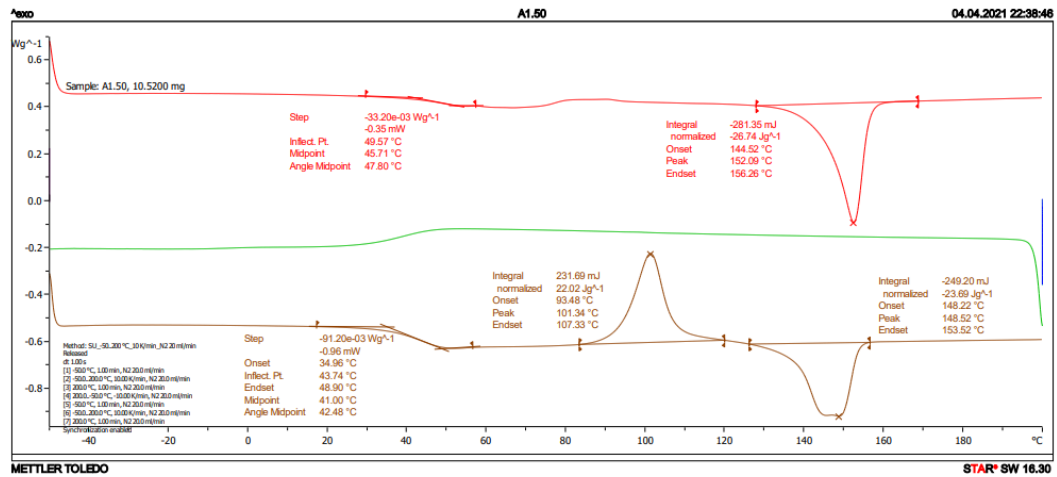
รูปที่ ก.6 แสดง DSC Thermogram ของ PLA/PEG30



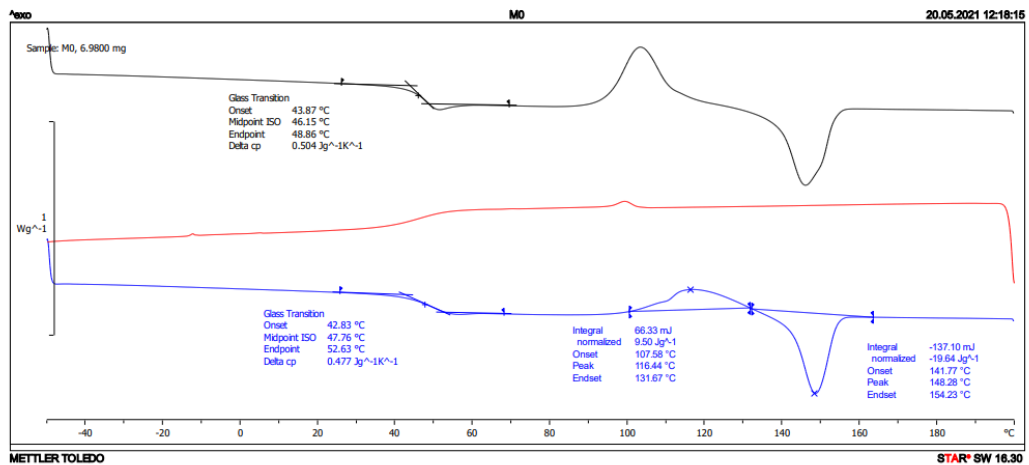
รูปที่ ก.7 แสดง DSC Thermogram ของ PLA/PEG10/ADR1.00



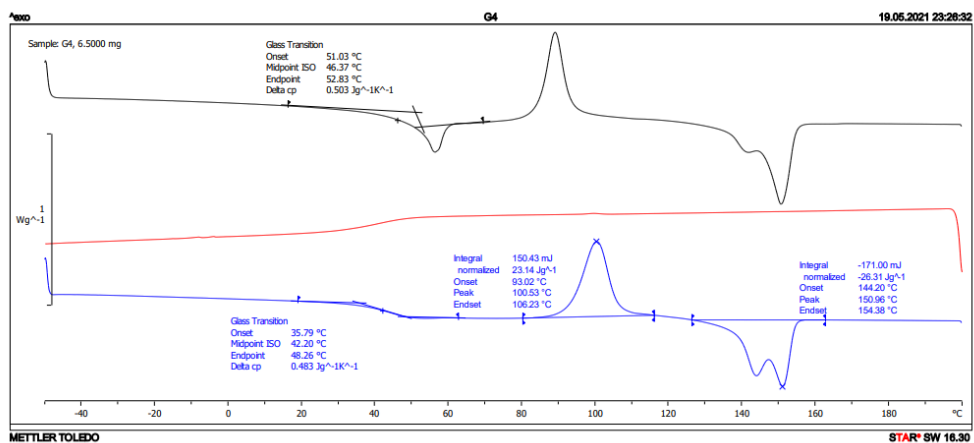
รูปที่ ก.8 แสดง DSC Thermogram ของ PLA/PEG10/ADR1.25



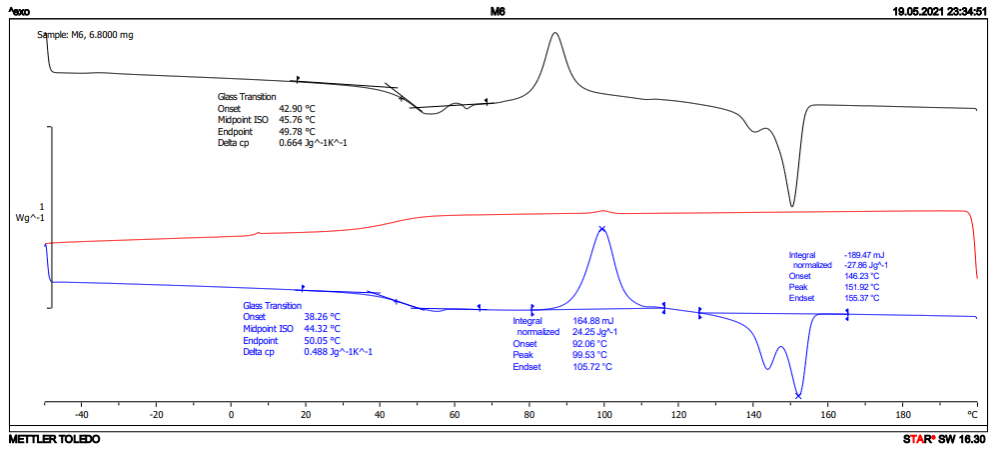
รูปที่ ก.9 แสดง DSC Thermogram ของ PLA/PEG10/ADR1.50



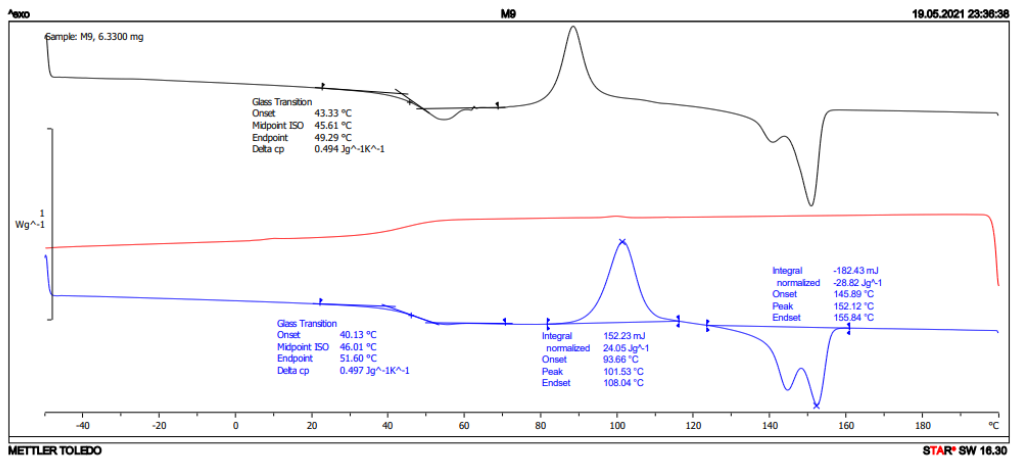
รูปที่ ก.10 แสดง DSC Thermogram ของ PPA/GSE4/M0



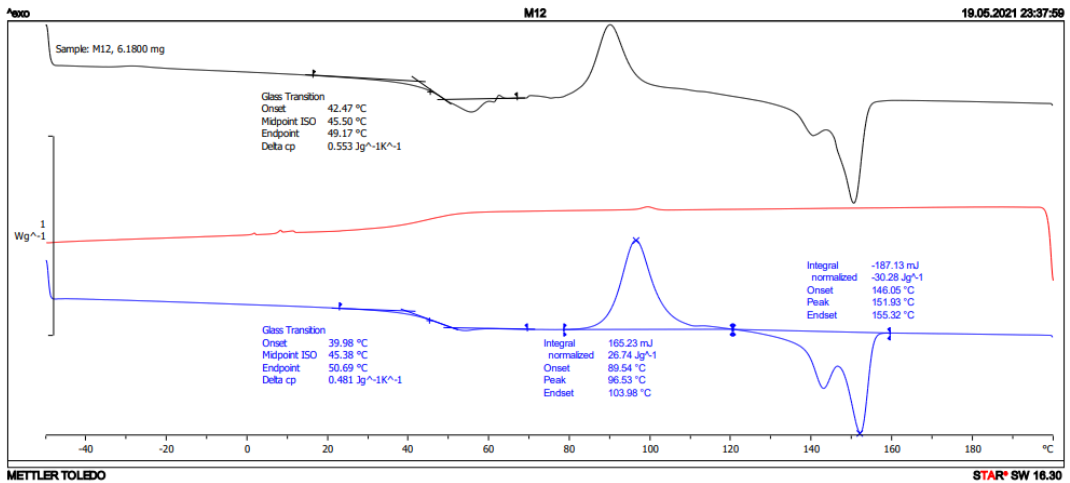
รูปที่ ก.11 แสดง DSC Thermogram ของ PPA/GSE4/M3



รูปที่ ก.12 แสดง DSC Thermogram ของ PPA/GSE4/M6

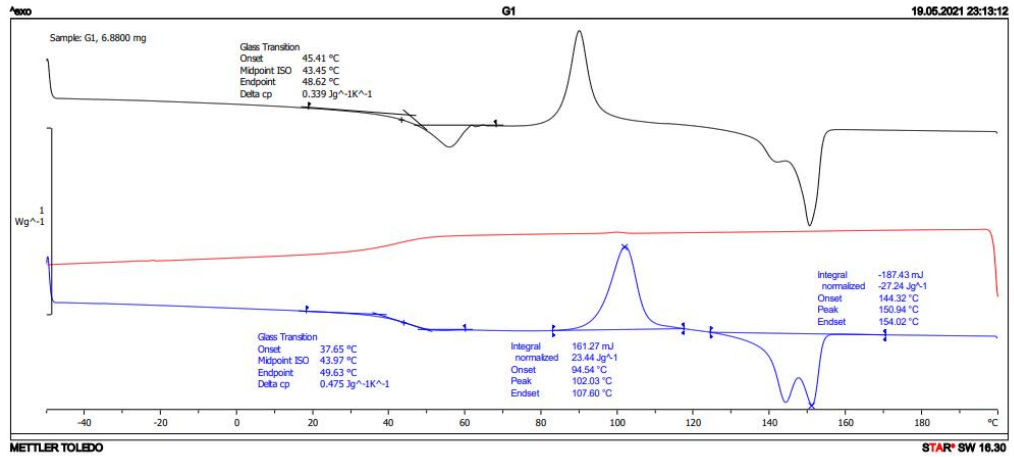


รูปที่ ก.13 แสดง DSC Thermogram ของ PPA/GSE4/M9

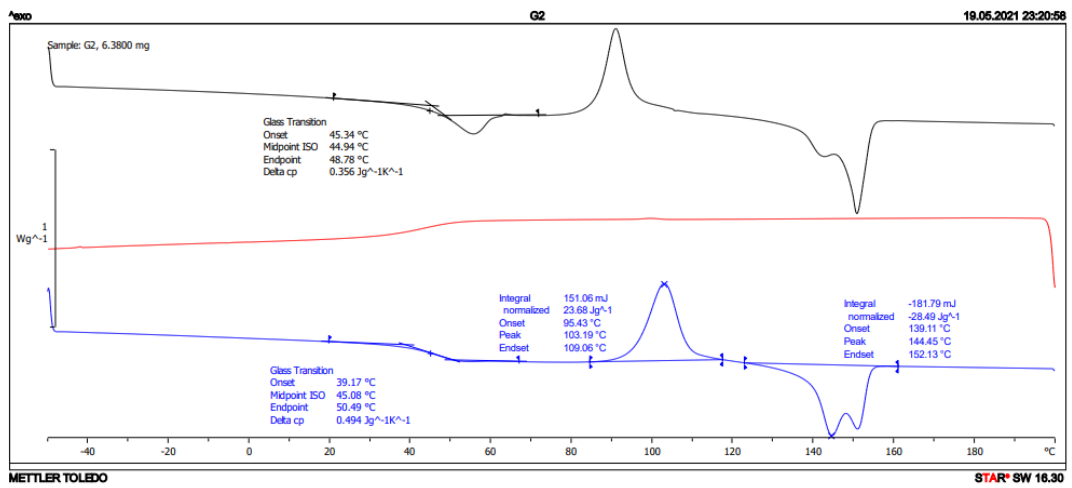


รูปที่ ก.14 แสดง DSC Thermogram ของ PPA/GSE4/M12

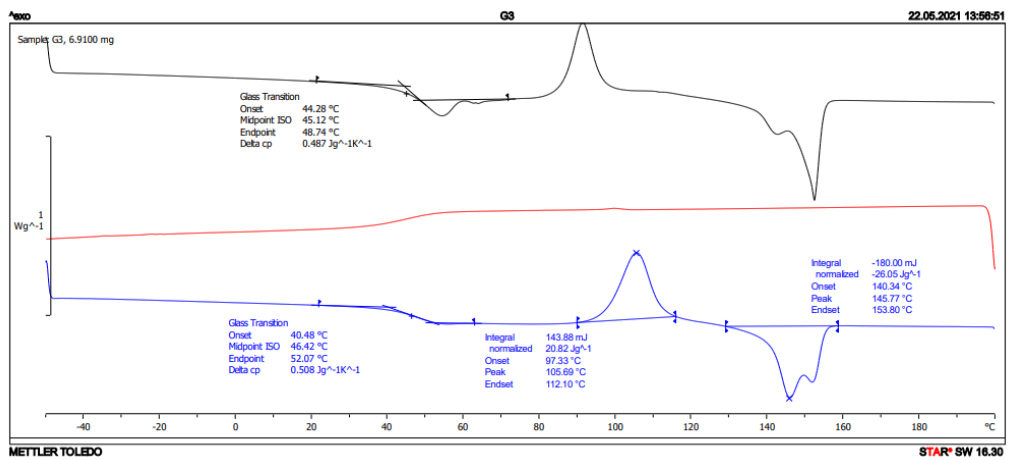




รูปที่ ก.15 แสดง DSC Thermogram ของ PPA/GSE1/M3

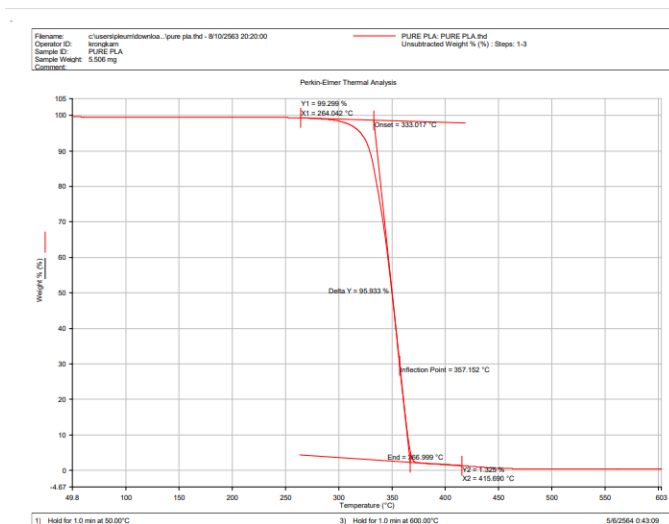


รูปที่ ก.16 แสดง DSC Thermogram ของ PPA/GSE2/M3

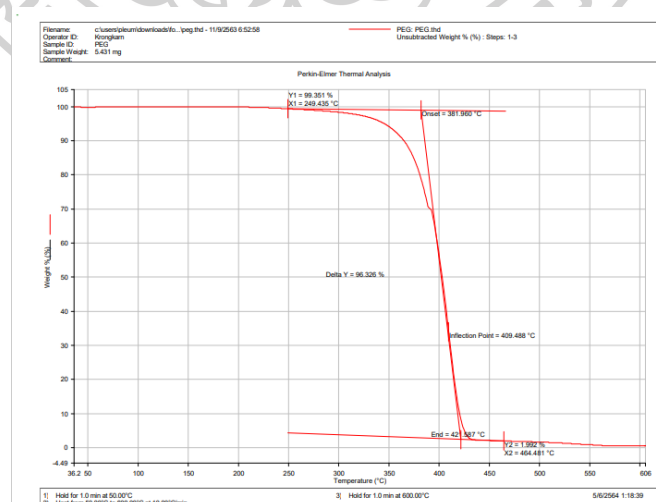


รูปที่ ก.17 แสดง DSC Thermogram ของ PPA/GSE3/M3

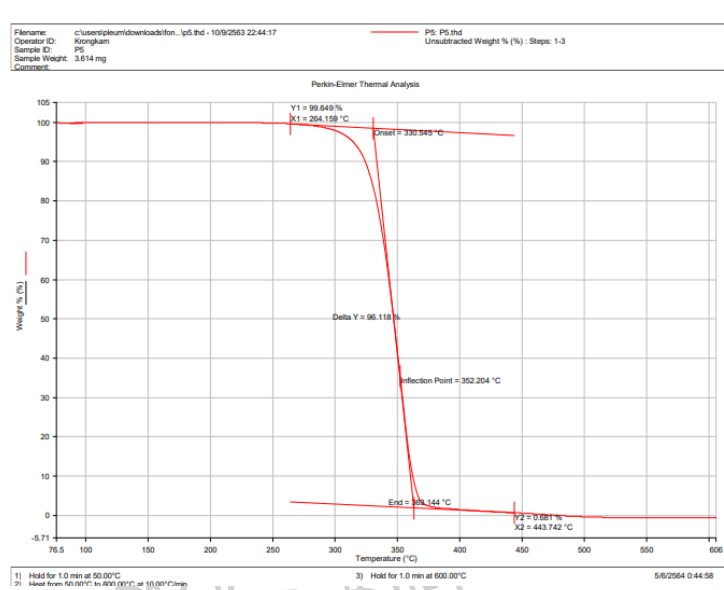
### 3. ผลของเสถียรภาพทางความร้อนที่ได้จากการทดสอบ Thermal gravimetric analysis TGA



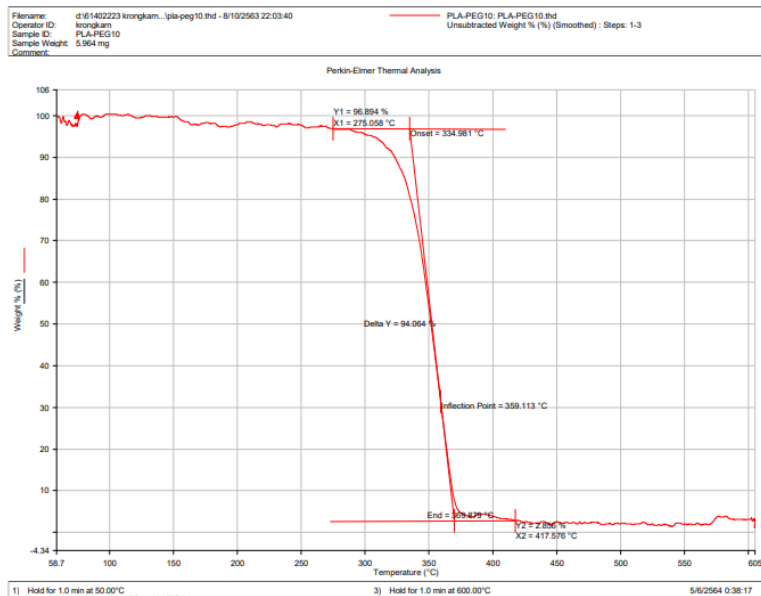
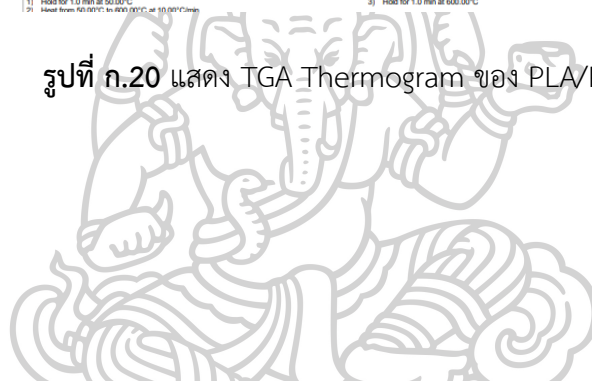
รูปที่ ก.18 แสดง TGA Thermogram ของ PLA



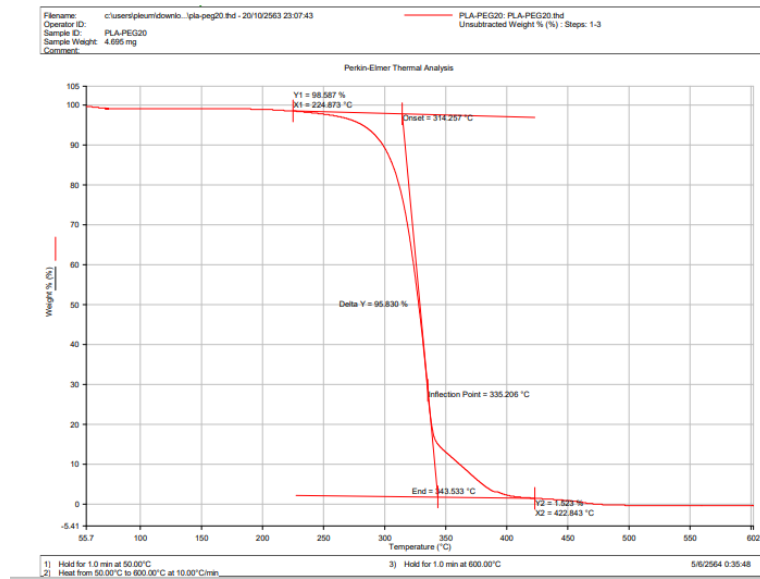
รูปที่ ก.19 แสดง TGA Thermogram ของ PEG



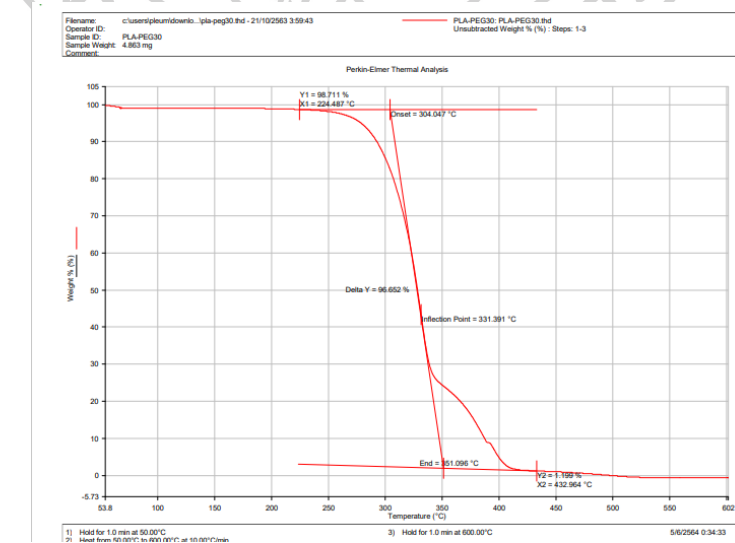
รูปที่ ก.20 แสดง TGA Thermogram ของ PLA/PEG5



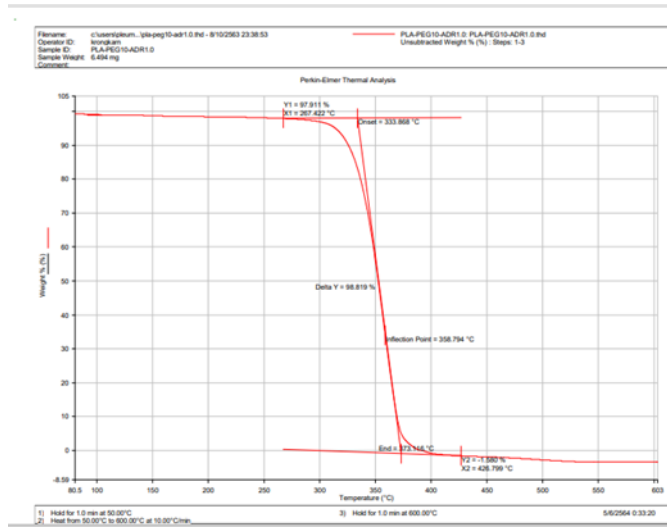
รูปที่ ก.21 แสดง TGA Thermogram ของ PLA/PEG10



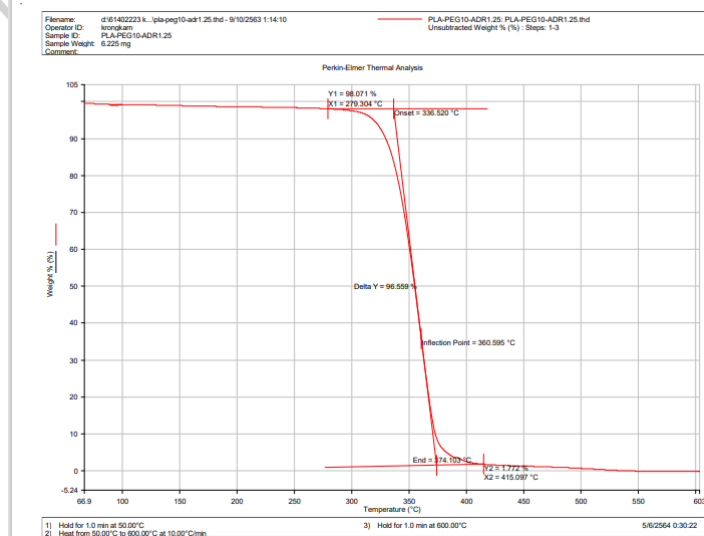
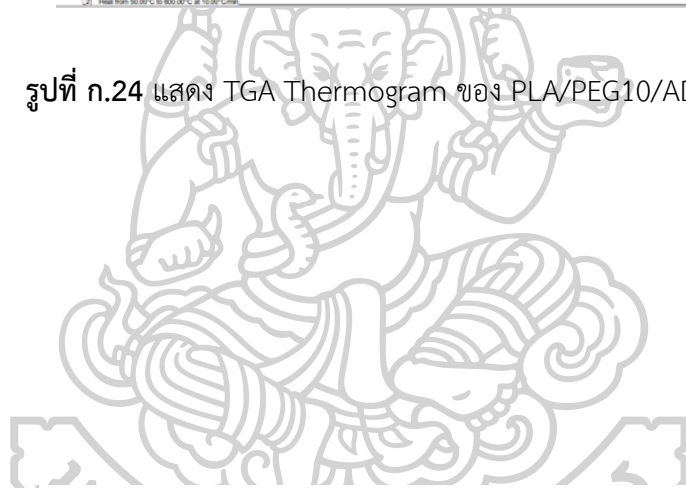
รูปที่ ก.22 แสดง TGA Thermogram ของ PLA/PEG20



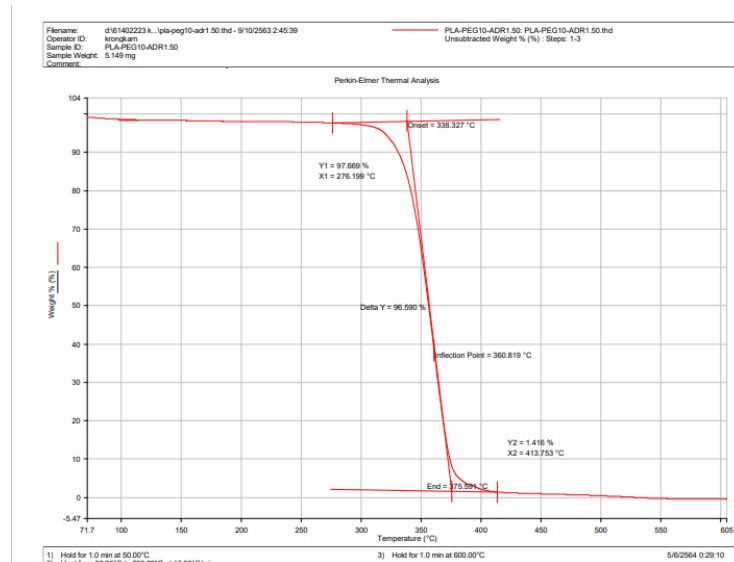
รูปที่ ก.23 แสดง TGA Thermogram ของ PLA/PEG30



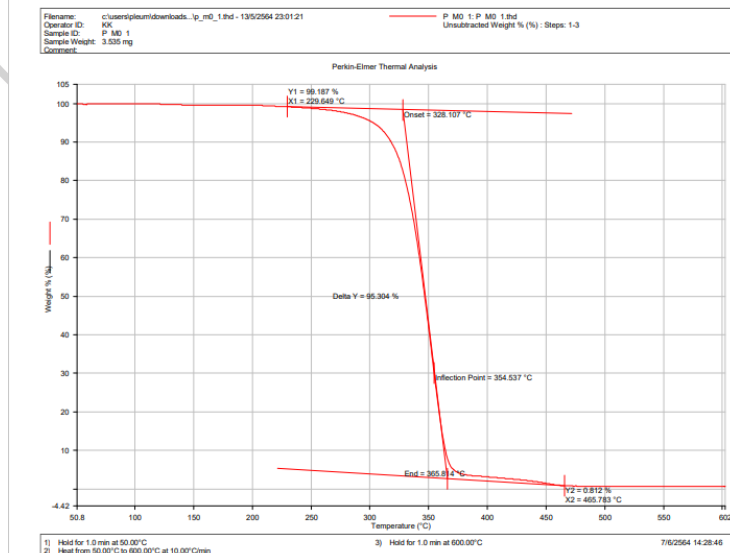
รูปที่ ก.24 แสดง TGA Thermogram ของ PLA/PEG10/ADR1.00



รูปที่ ก.25 แสดง TGA Thermogram ของ PLA/PEG10/ADR1.25

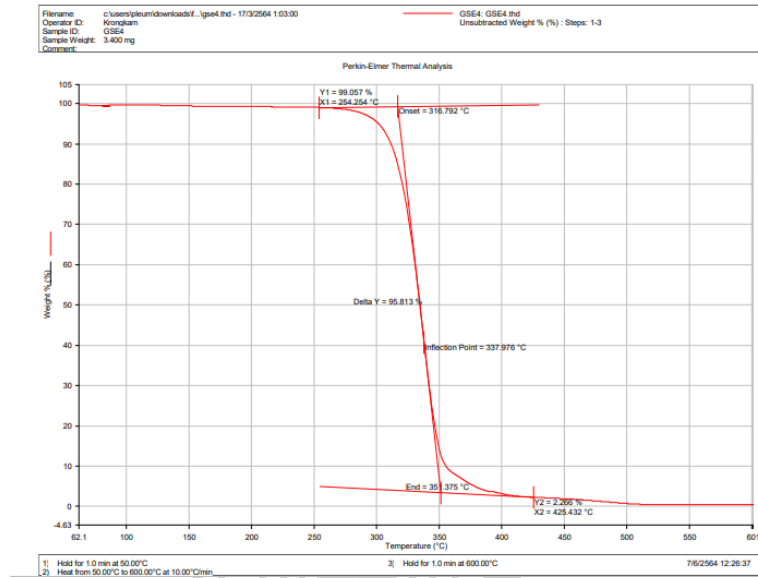


รูปที่ ก.26 แสดง TGA Thermogram ของ PLA/PEG10/ADR1.50

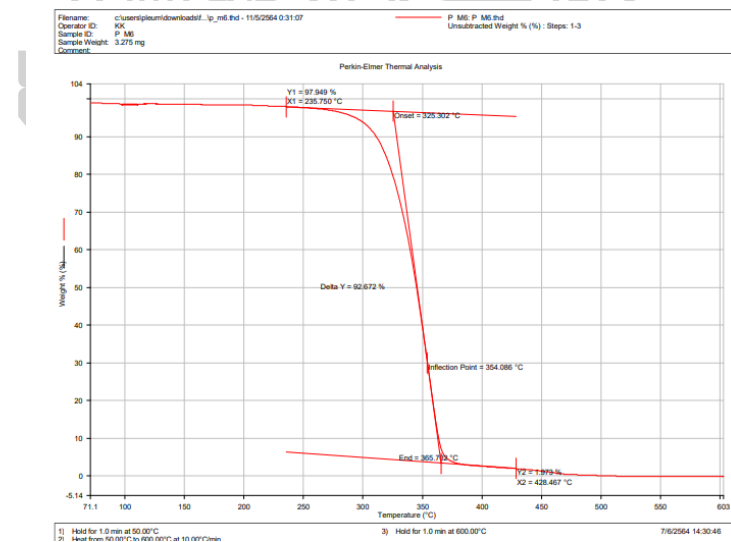


รูปที่ ก.27 แสดง TGA Thermogram ของ PPA/GSE4/M0

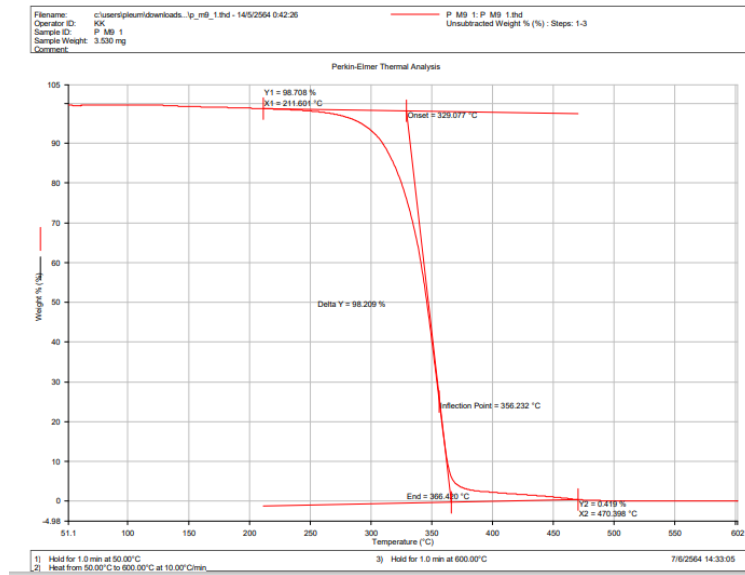




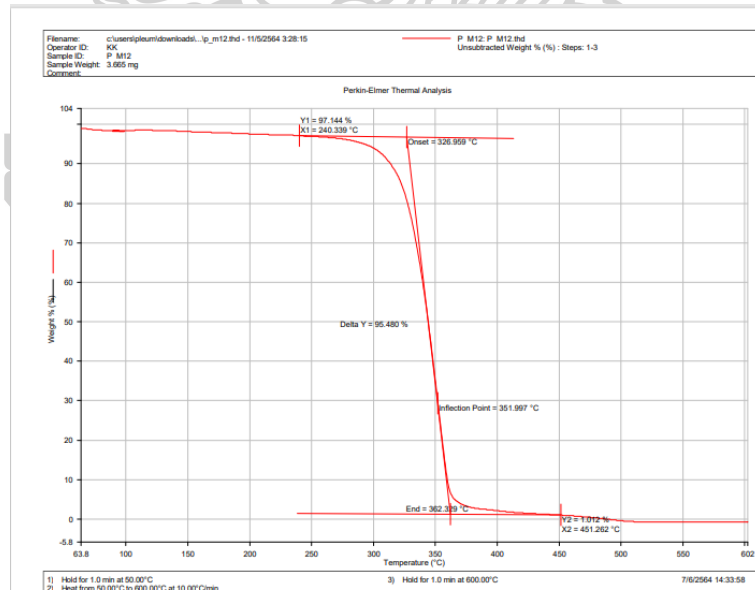
รูปที่ ก.28 แสดง TGA Thermogram ของ PPA/GSE4/M3



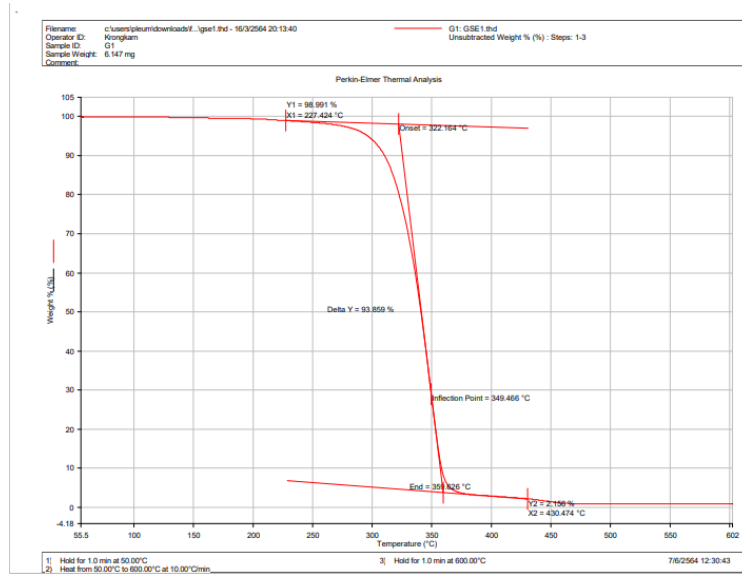
รูปที่ ก.29 แสดง TGA Thermogram ของ PPA/GSE4/M6



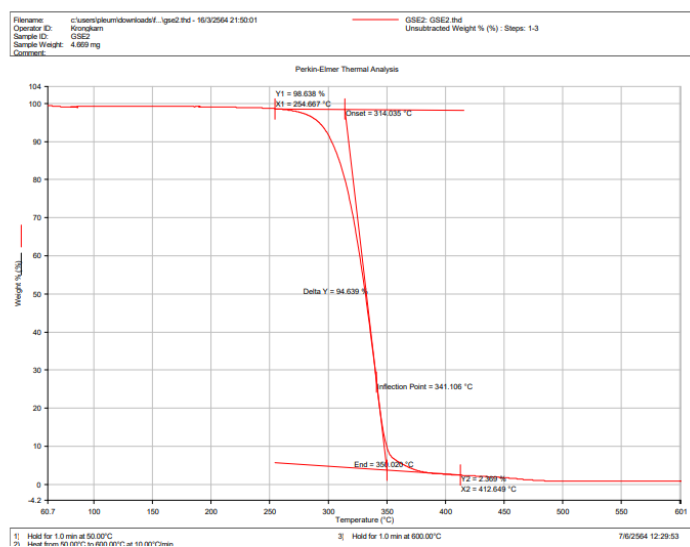
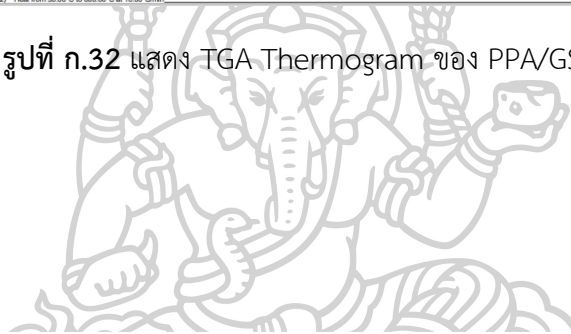
รูปที่ ก.30 แสดง TGA Thermogram ของ PPA/GSE4/M9



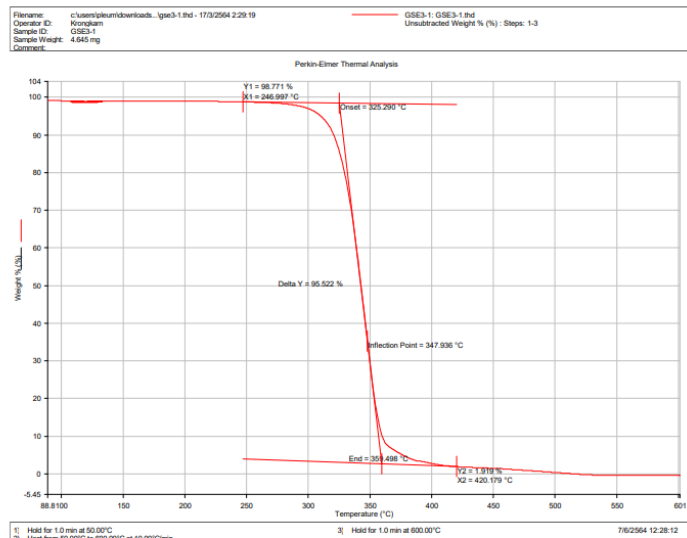
รูปที่ ก.31 แสดง TGA Thermogram ของ PPA/GSE4/M12



รูปที่ ก.32 แสดง TGA Thermogram ของ PPA/GSE1/M3



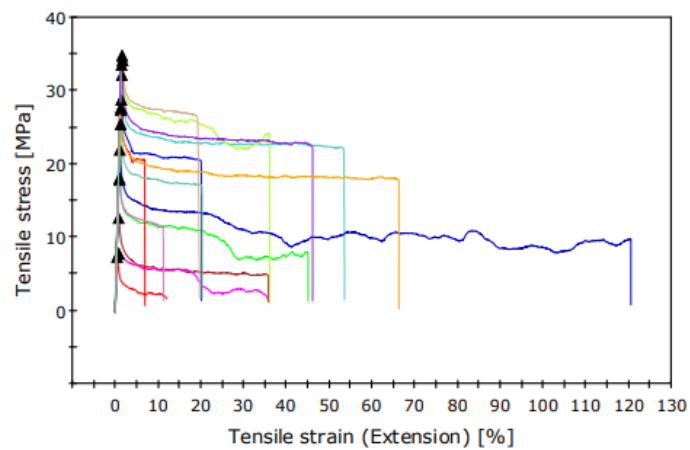
รูปที่ ก.33 แสดง TGA Thermogram ของ PPA/GSE2/M3



รูปที่ ก.34 แสดง TGA Thermogram ของ PPA/GSE3/M3

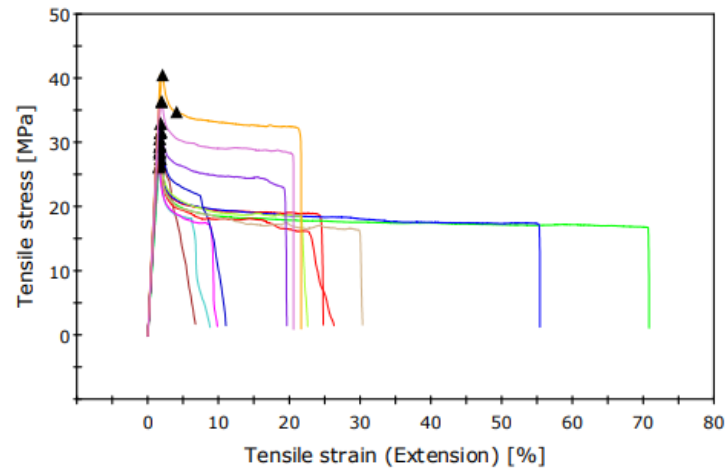
4. สมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม

ASTM D 882-02: Stress-strain curve (Specimen 1 to 14)

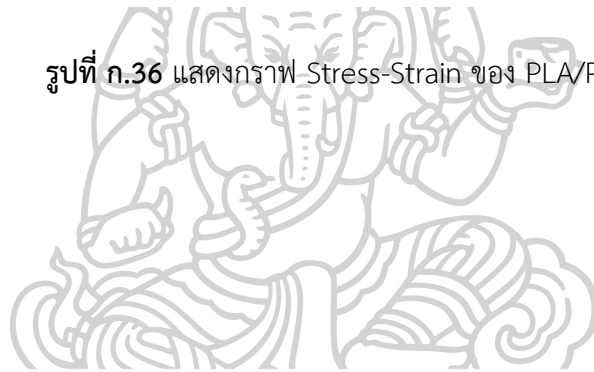


รูปที่ ก.35 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PLA

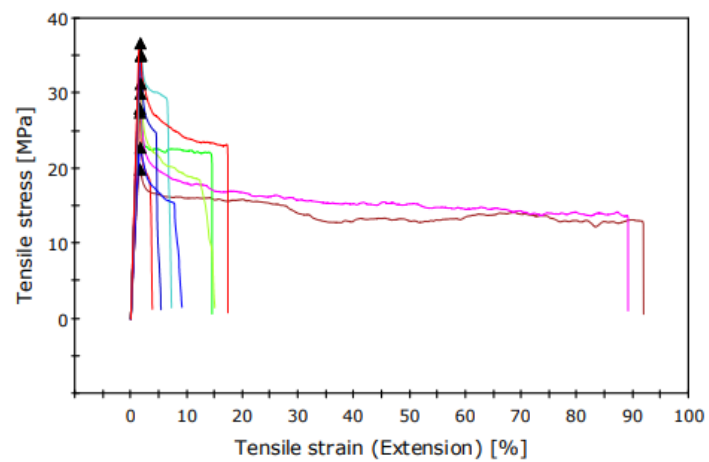
ASTM D 882-02: Stress-strain curve (Specimen 2 to 15)



รูปที่ ก.36 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PLA/PEG5

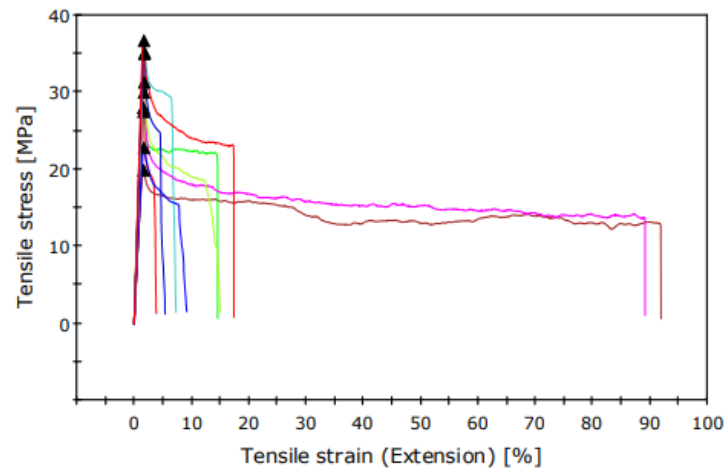


ASTM D 882-02: Stress-strain curve (Specimen 1 to 9)



รูปที่ ก.37 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PLA/PEG5

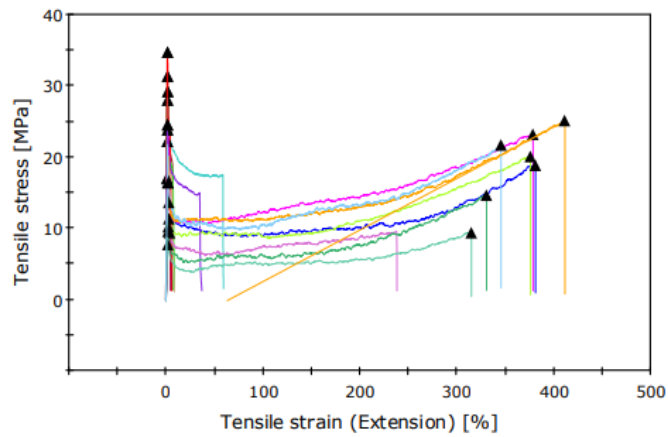
ASTM D 882-02: Stress-strain curve (Specimen 1 to 9)



รูปที่ ก.38 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PLA/PEG10



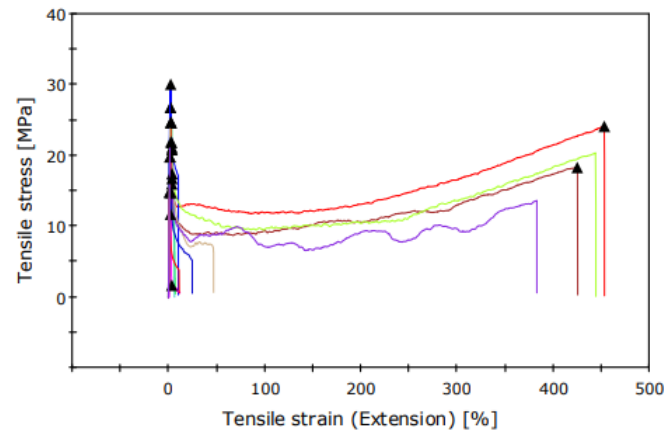
ASTM D 882-02: Stress-strain curve (Specimen 1 to 16)



รูปที่ ก.39 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PLA/PEG20



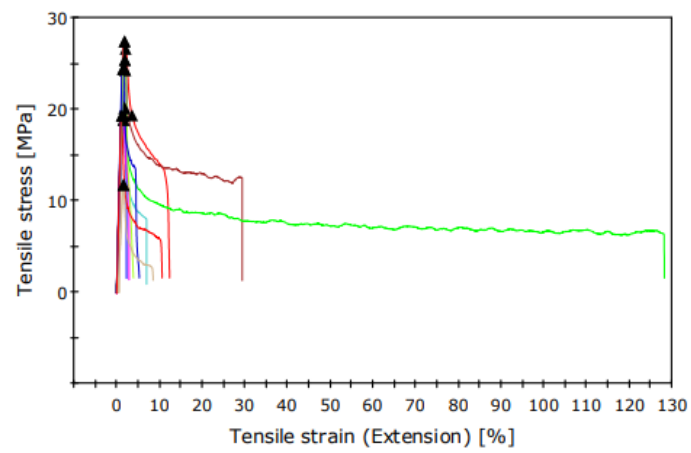
ASTM D 882-02: Stress-strain curve (Specimen 1 to 11)



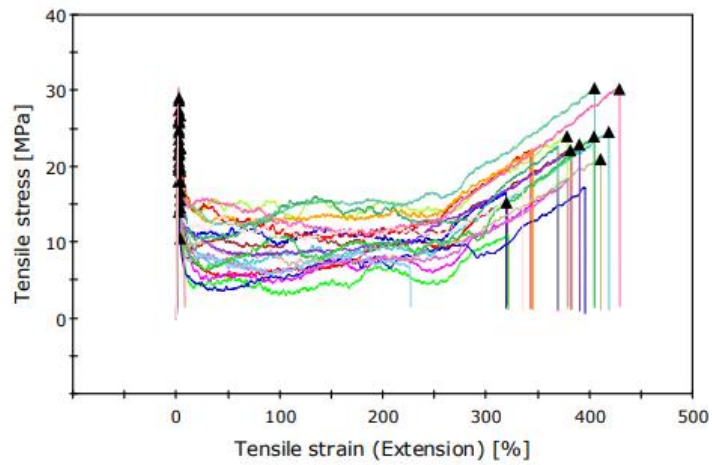
รูปที่ ก.40 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PLA/PEG30



ASTM D 882-02: Stress-strain curve (Specimen 1 to 10)

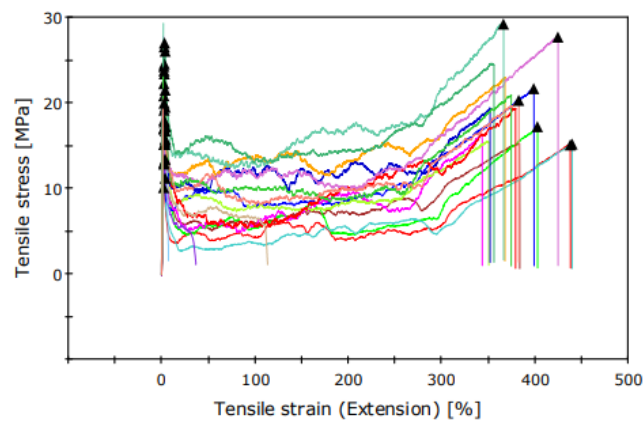


รูปที่ ก.41 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PLA/PEG10/ADR1.00



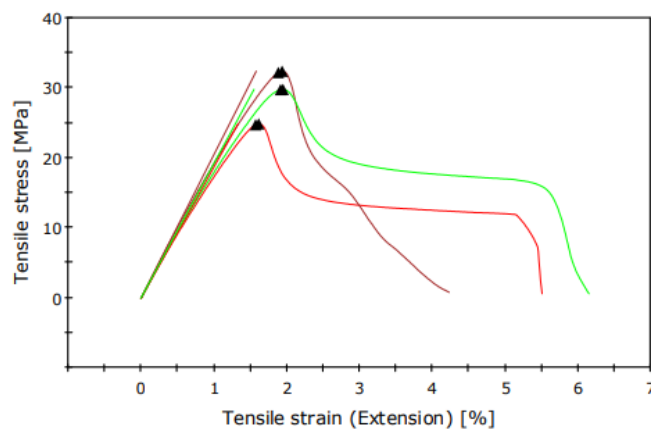
รูปที่ ก.42 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PLA/PEG10/ADR1.25

ASTM D 882-02: Stress-strain curve (Specimen 1 to 18)



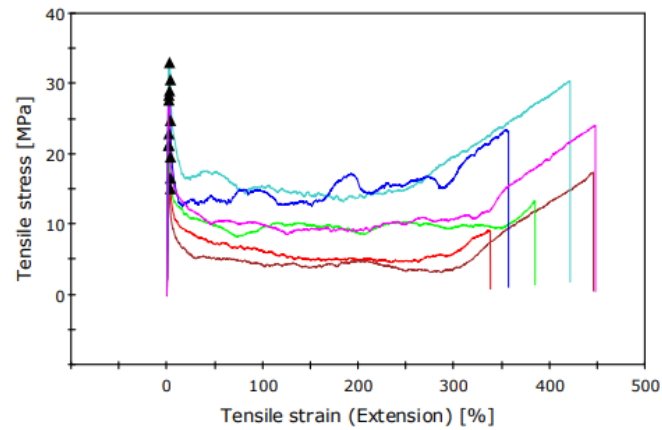
รูปที่ ก.43 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PLA/PEG10/ADR1.50

ASTM D 882-02: Stress-strain curve (Specimen 1 to 3)



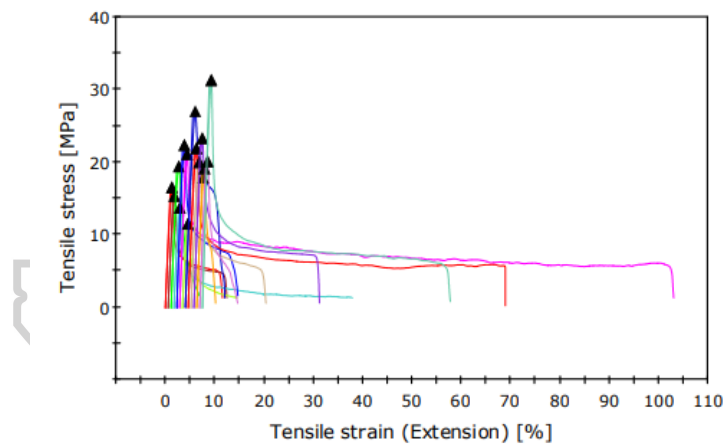
รูปที่ ก.44 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PPA/GSE4/M0

ASTM D 882-02: Stress-strain curve (Specimen 9 to 26)



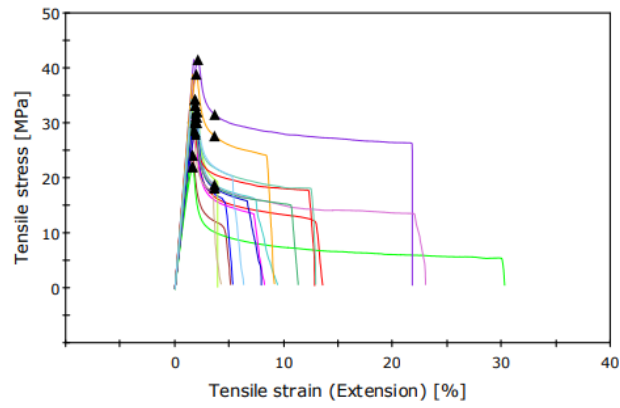
รูปที่ ก.45 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PPA/GSE4/M3

ASTM D 882-02: Stress-strain curve (Specimen 1 to 14)



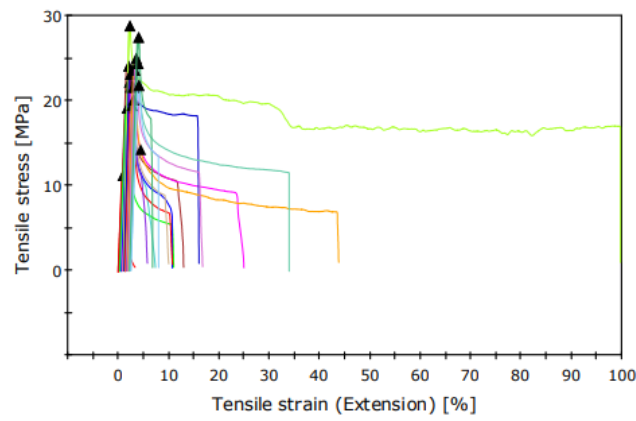
รูปที่ ก.46 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PPA/GSE4/M6

ASTM D 882-02: Stress-strain curve (Specimen 1 to 16)



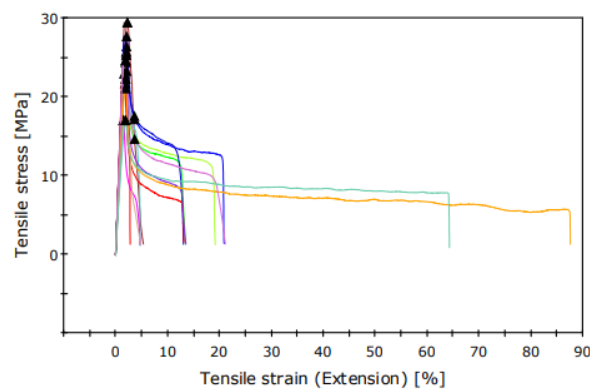
รูปที่ ก.47 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PPA/GSE4/M9

ASTM D 882-02: Stress-strain curve (Specimen 1 to 16)

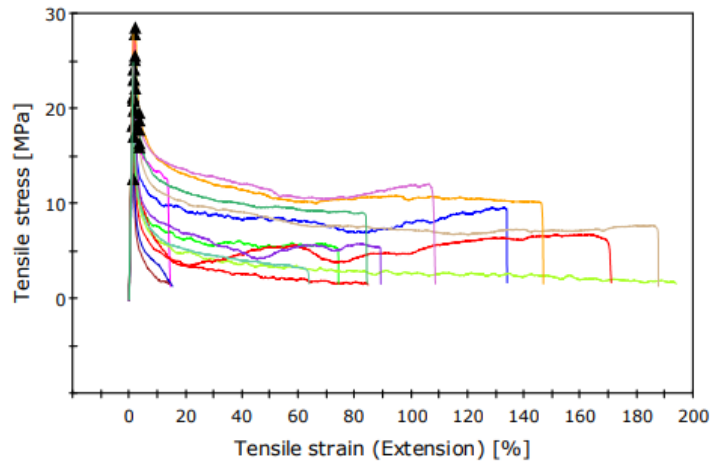


รูปที่ ก.48 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PPA/GSE4/M12

ASTM D 882-02: Stress-strain curve (Specimen 1 to 14)

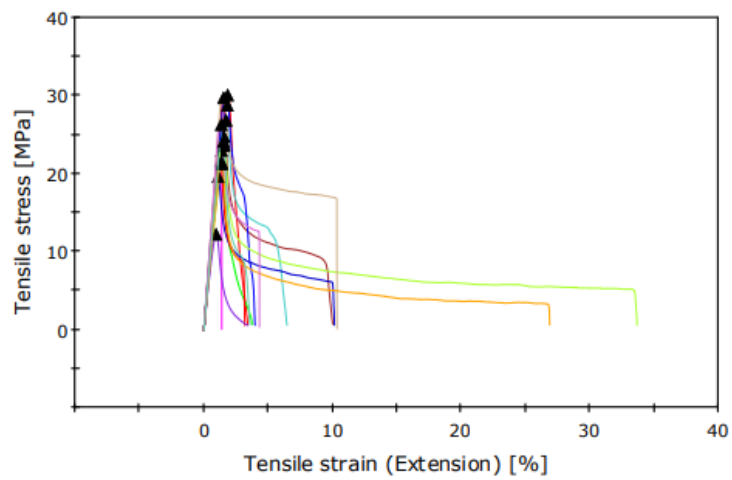


รูปที่ ก.49 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PPA/GSE1/M3



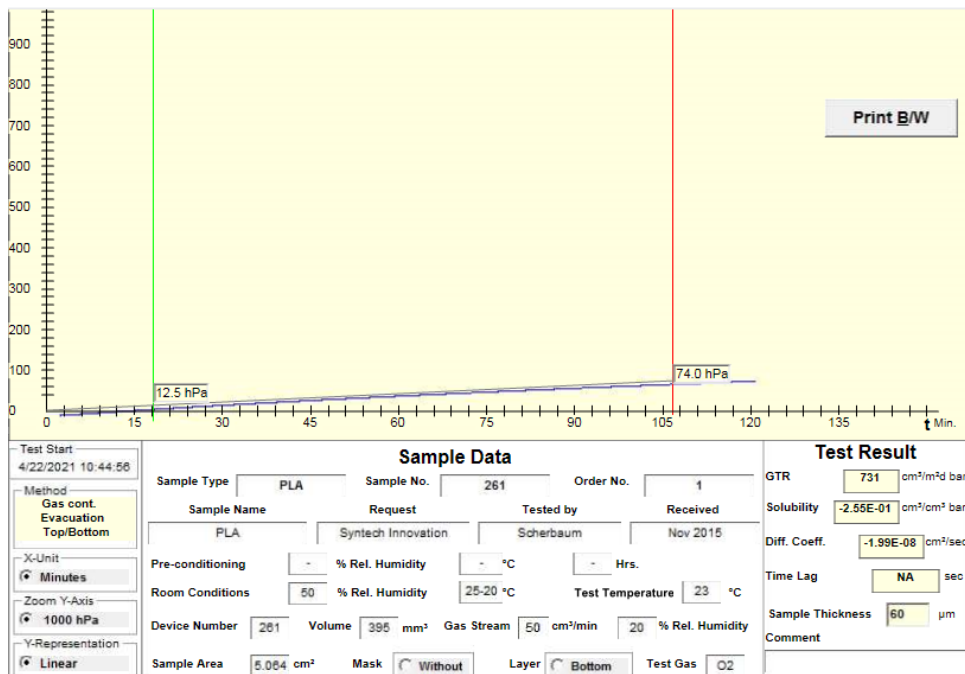
รูปที่ ก.50 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PPA/GSE2/M3

ASTM D 882-02: Stress-strain curve (Specimen 1 to 14)

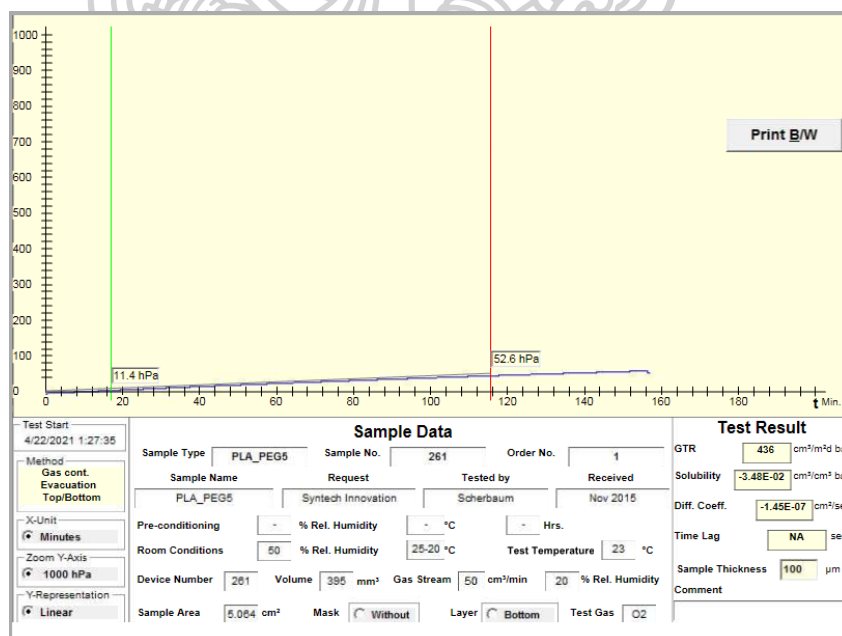


รูปที่ ก.51 แสดงกราฟ Stress-Strain ของ PPA/GSE3/M3

## 5. ผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน

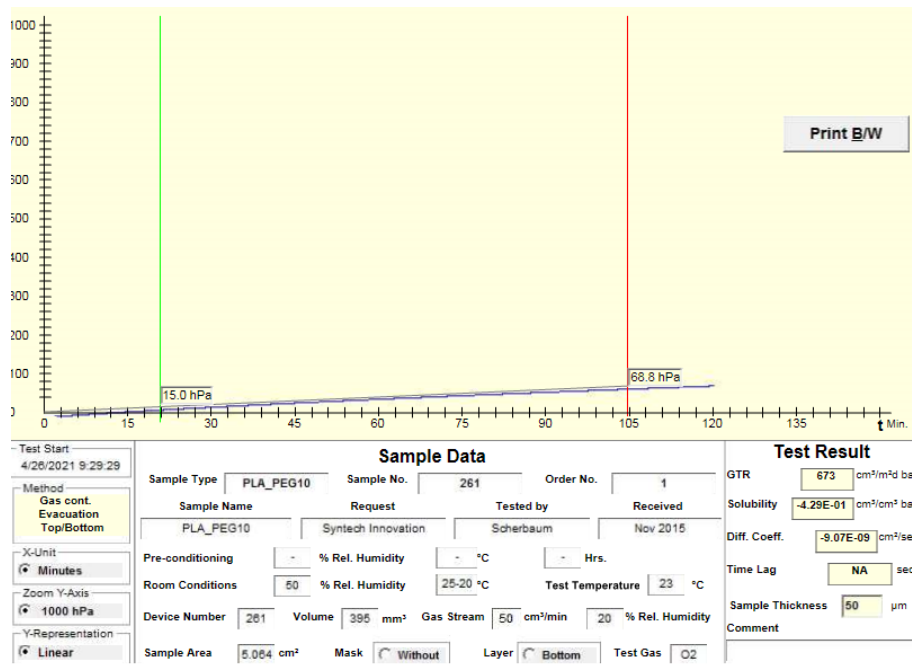


รูปที่ ก.52 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PLA

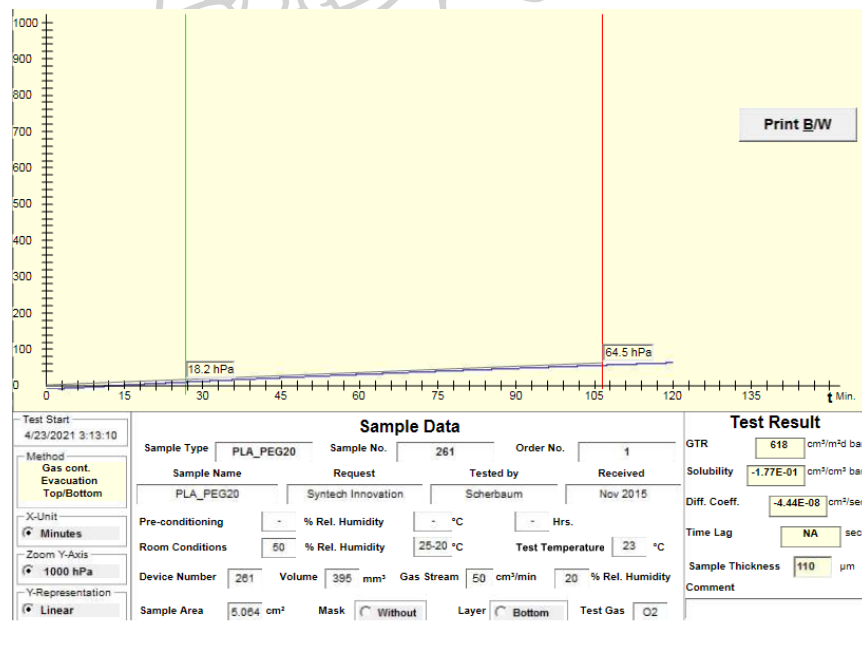


รูปที่ ก.53 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PLA/PEG5

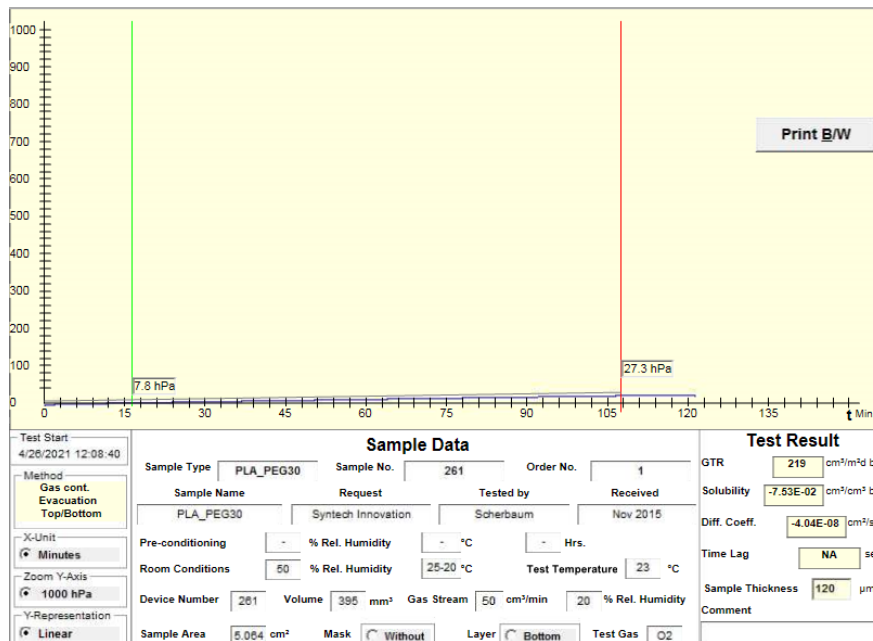




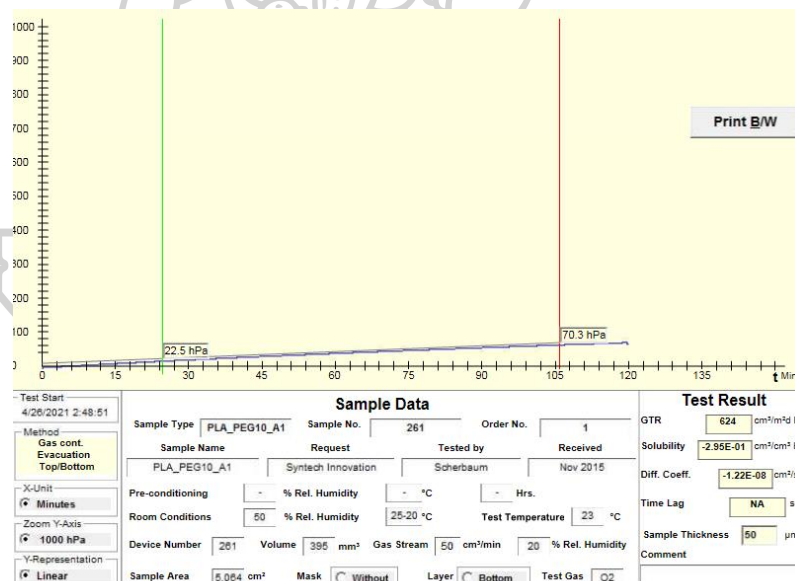
รูปที่ ก.54 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PLA/PEG10



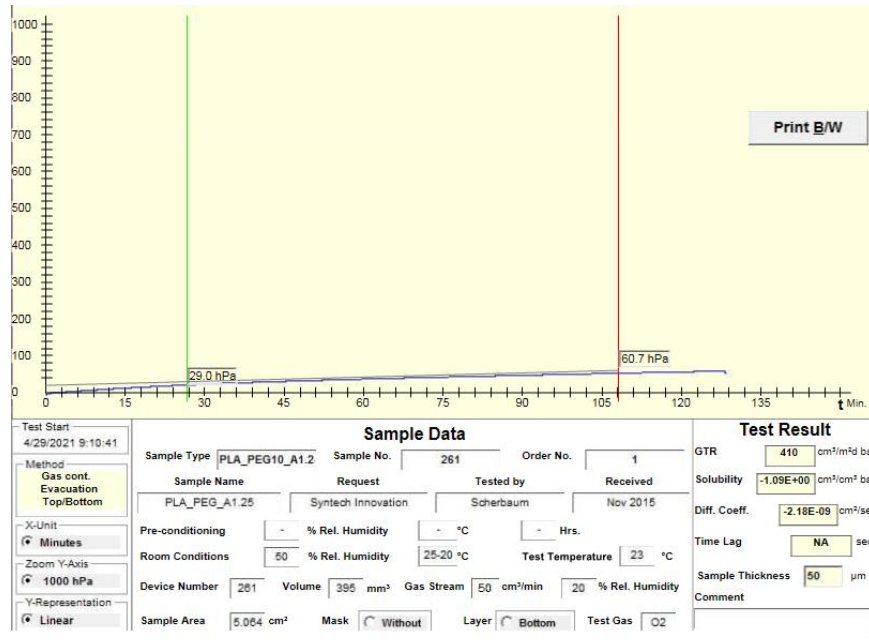
รูปที่ ก.55 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PLA/PEG20



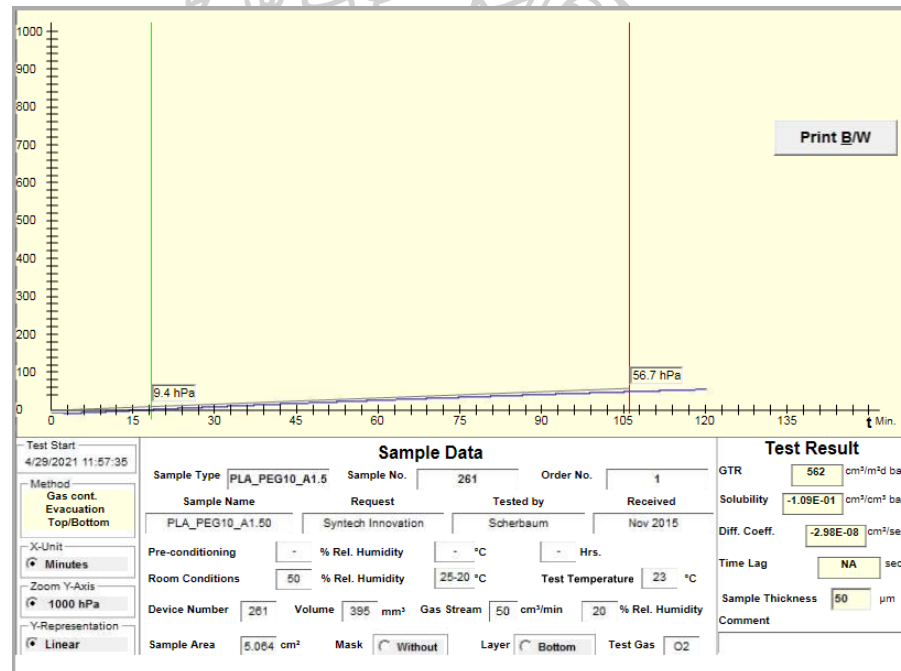
รูปที่ ก.56 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PLA/PEG30



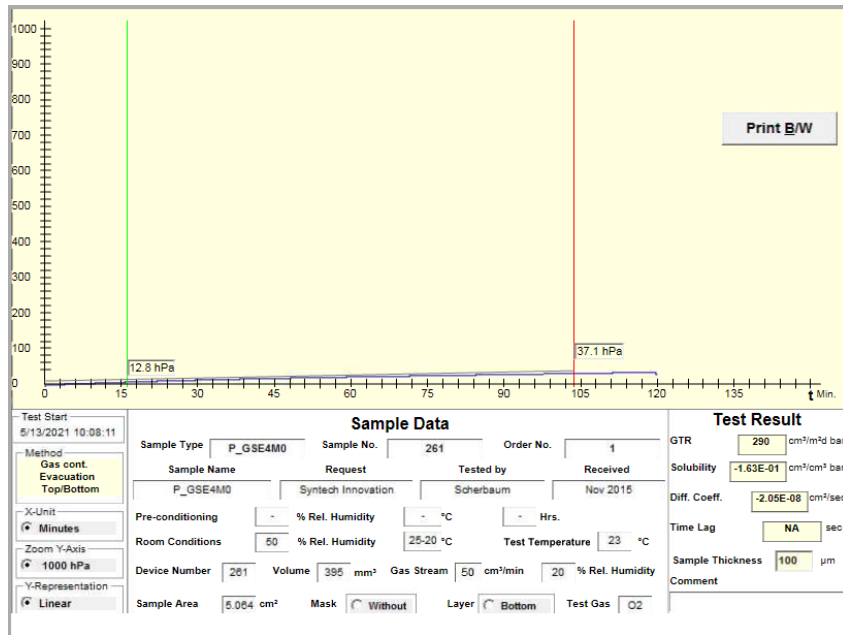
รูปที่ ก.57 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PLA/PEG10/ADR1.00



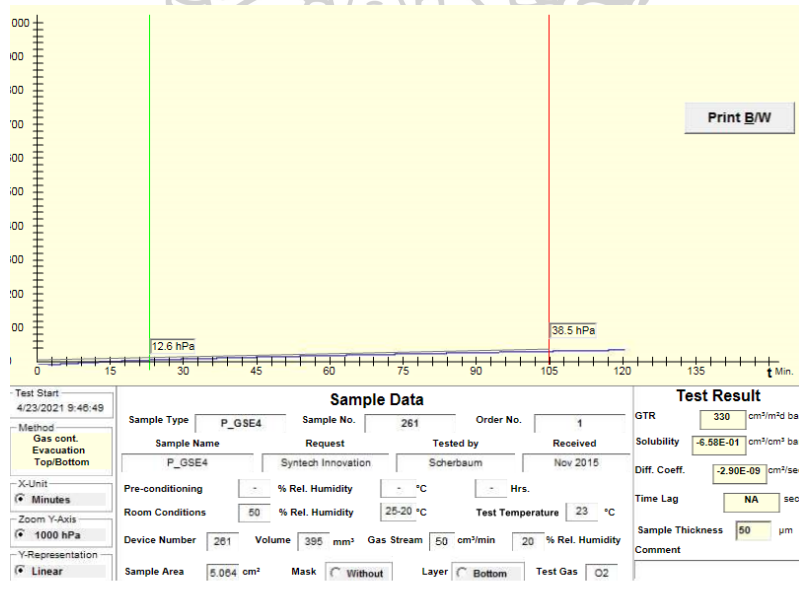
รูปที่ ก.58 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PLA/PEG10/ADR1.25



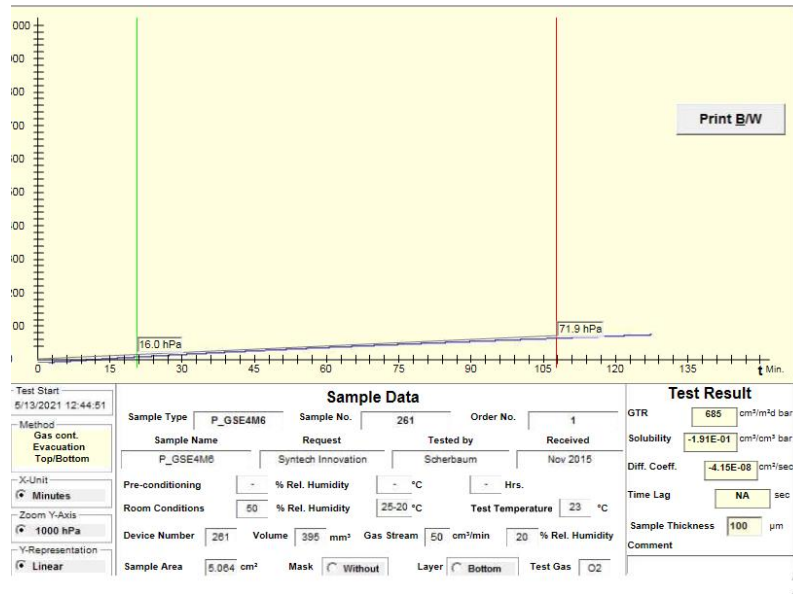
รูปที่ ก.59 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PLA/PEG10/ADR1.50



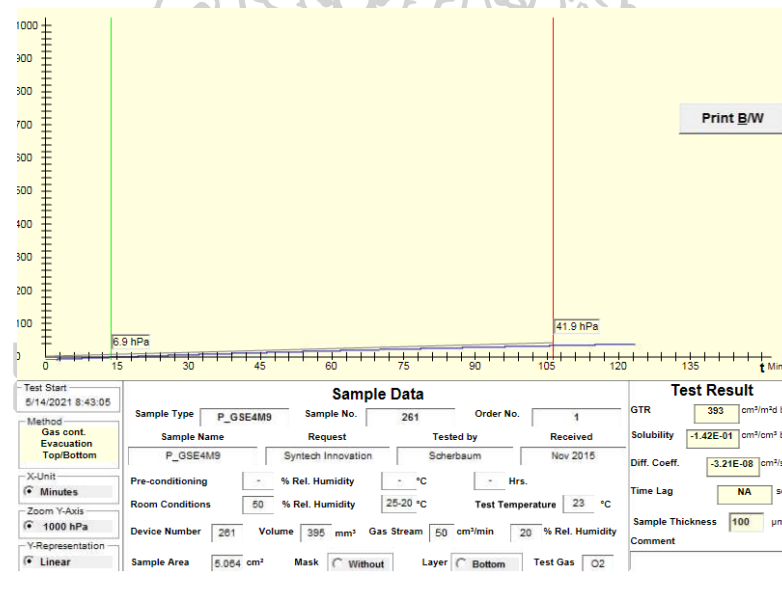
รูปที่ ก.60 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PPA/GSE4/M0



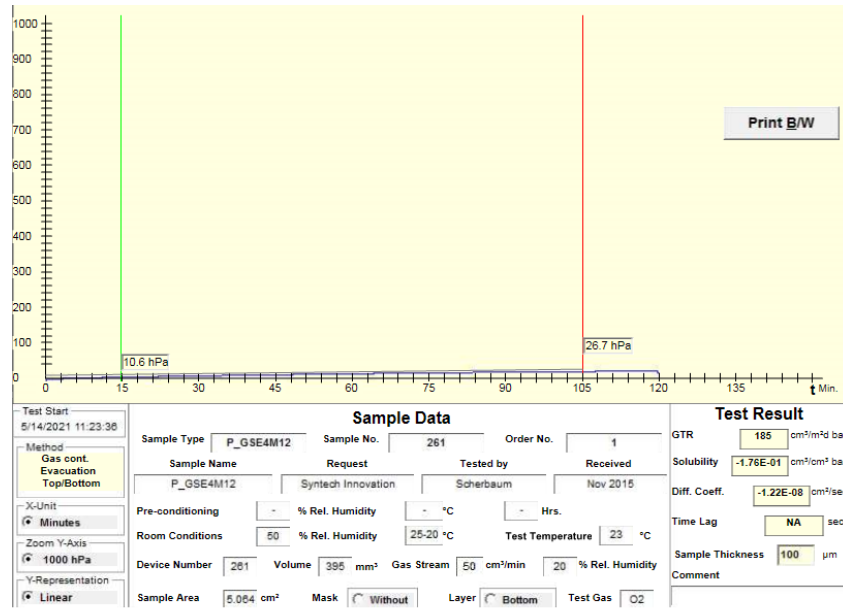
รูปที่ ก.61 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PPA/GSE4/M3



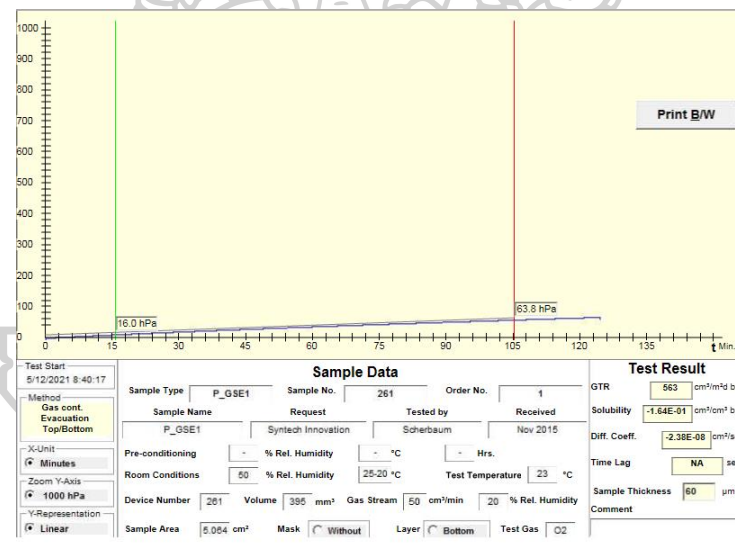
รูปที่ ก.62 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PPA/GSE4/M6



รูปที่ ก.63 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PPA/GSE4/M9

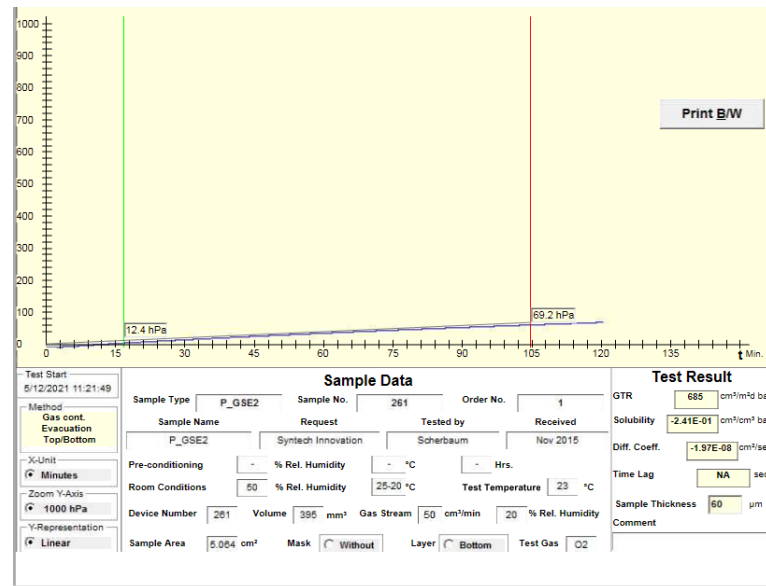


รูปที่ ก.64 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PPA/GSE4/M12

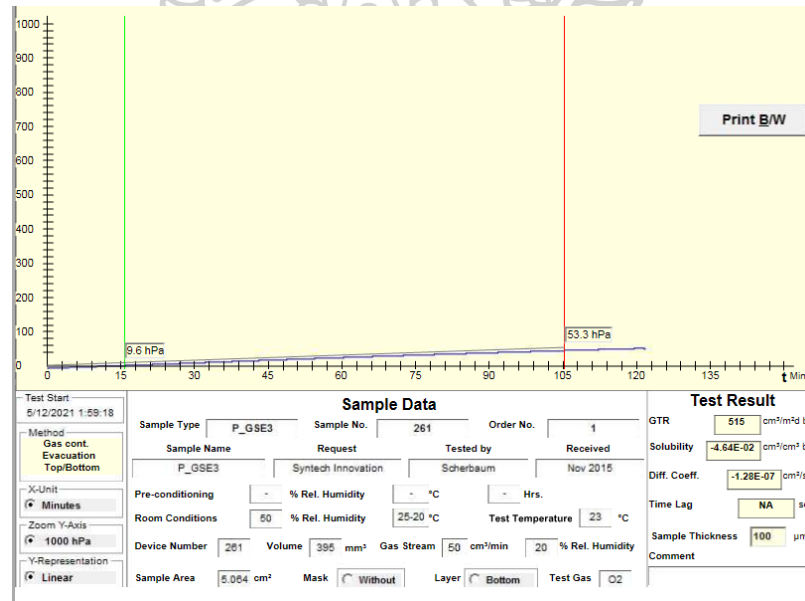


รูปที่ ก.65 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PPA/GSE1/M3



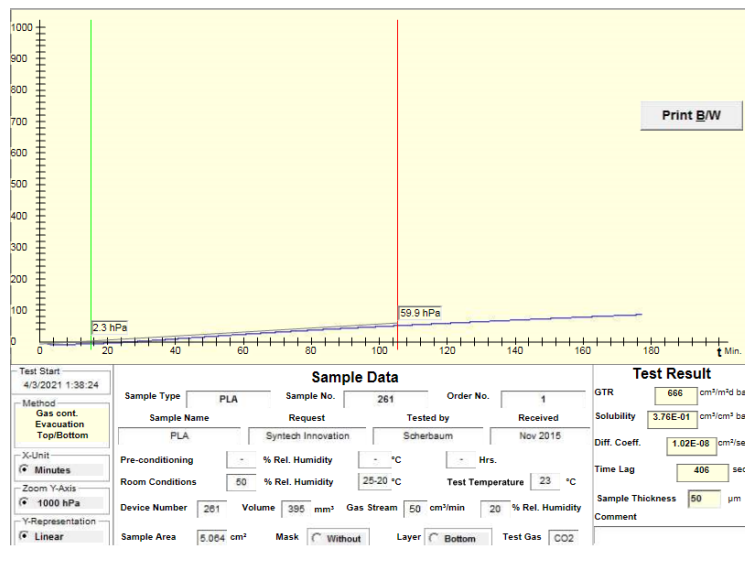


รูปที่ ก.66 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PPA/GSE2/M3

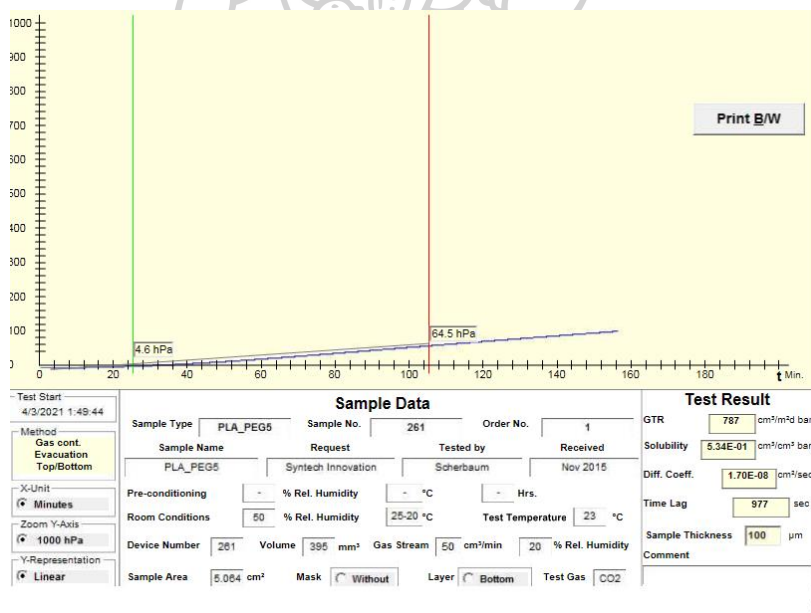


รูปที่ ก.67 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของ PPA/GSE3/M3

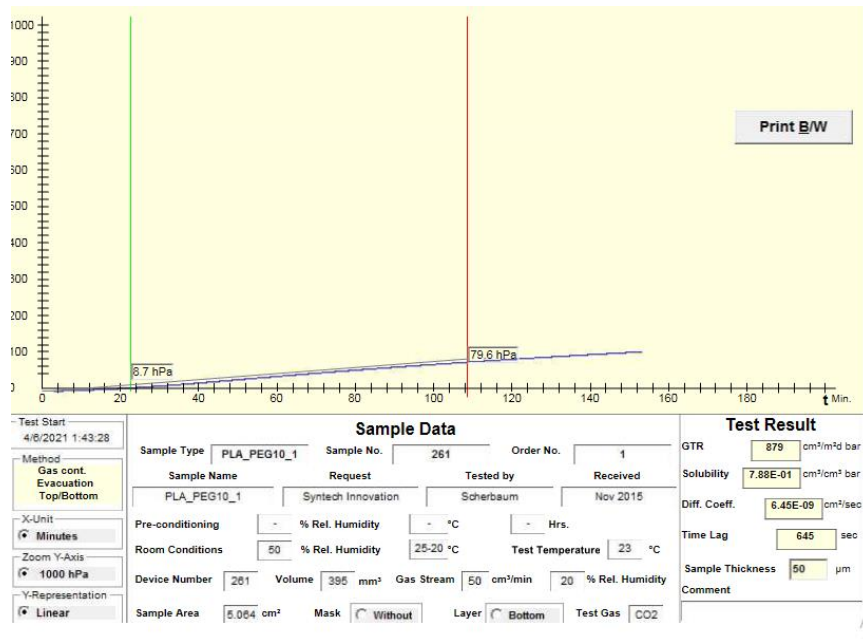
6. ผลการทดสอบการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



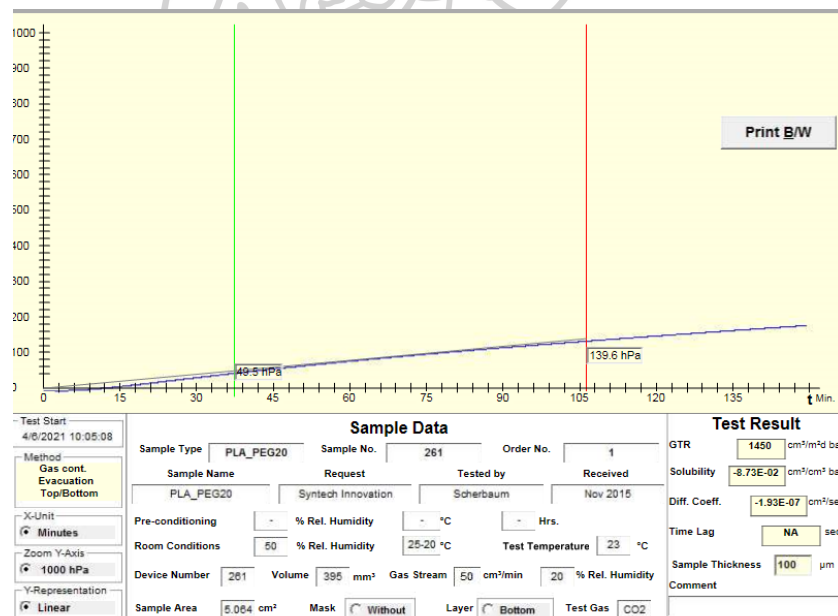
รูปที่ ก.68 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PLA



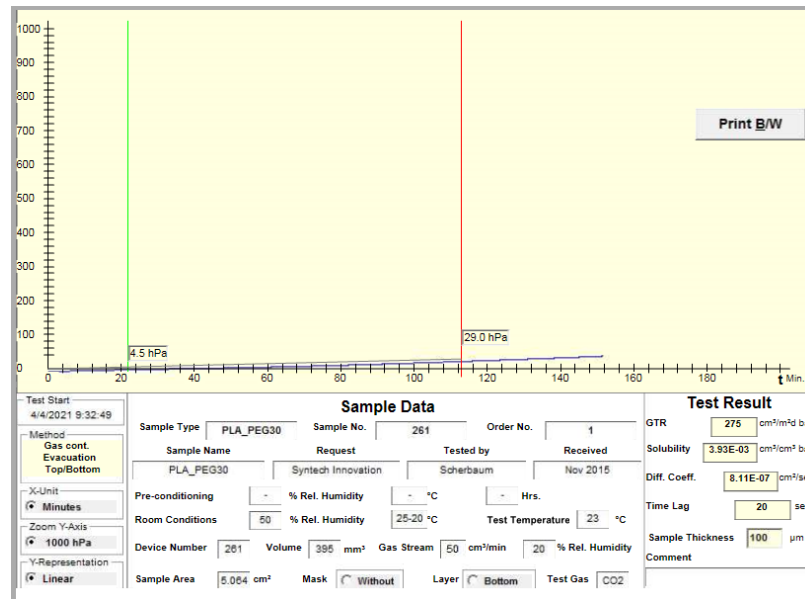
รูปที่ ก.69 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PLA/PEG5



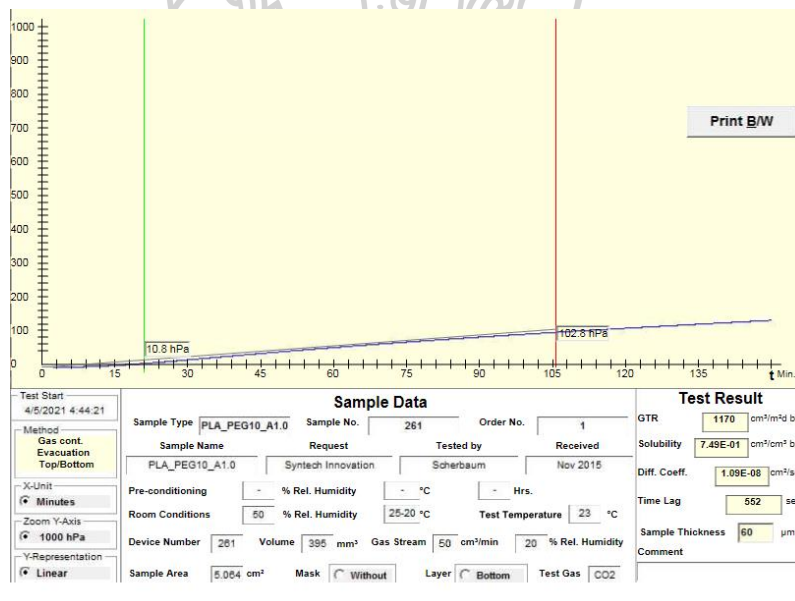
รูปที่ ก.70 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PLA/PEG10



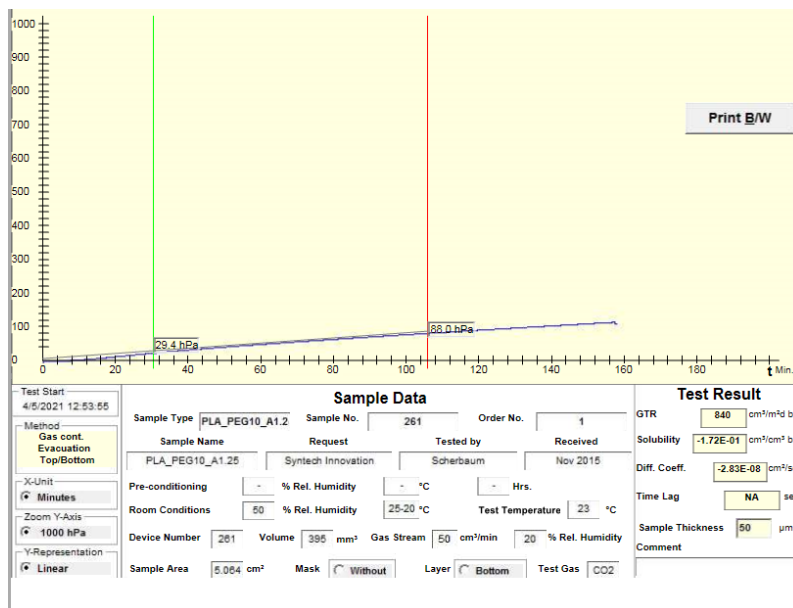
รูปที่ ก.71 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PLA/PEG20



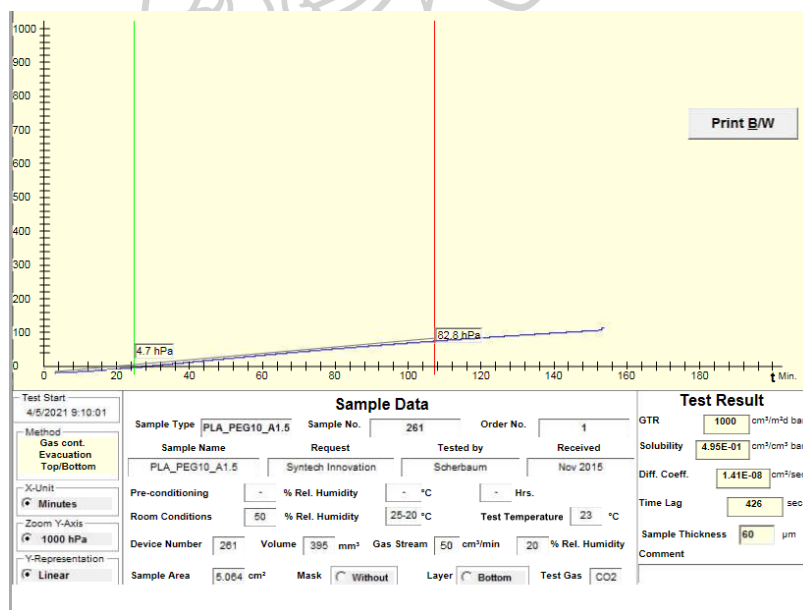
รูปที่ ก.72 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PLA/PEG30



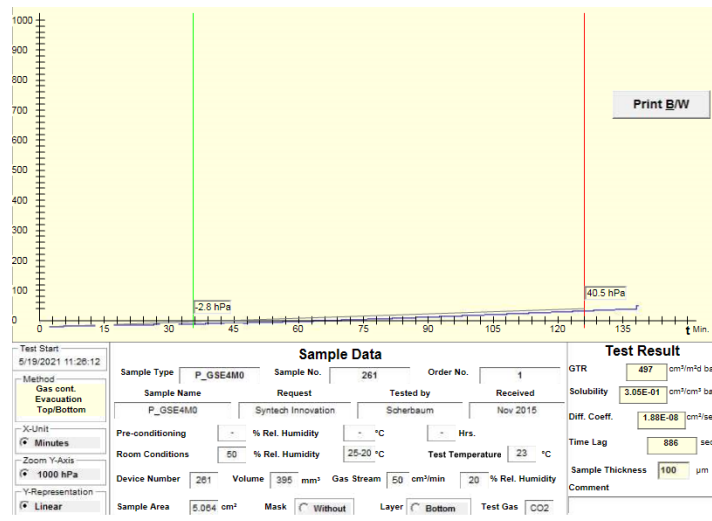
รูปที่ ก.73 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PLA/PEG10/ADR1.00



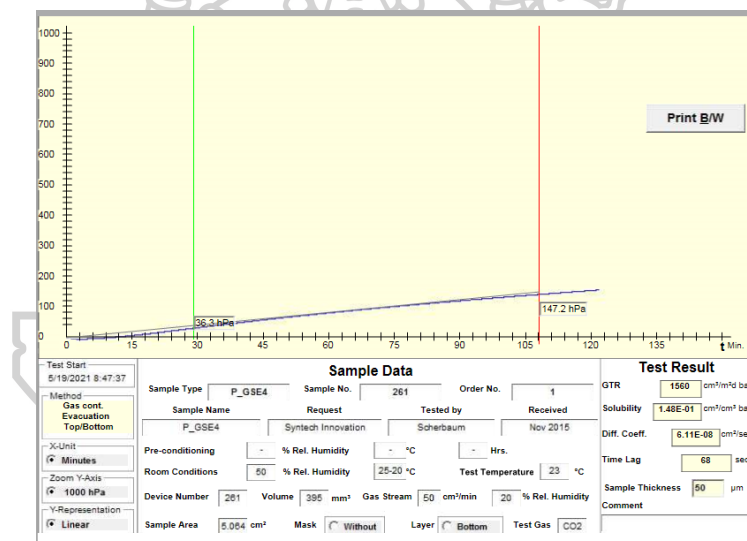
รูปที่ ก.74 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PLA/PEG10/ADR1.25



รูปที่ ก.75 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PLA/PEG10/ADR1.50

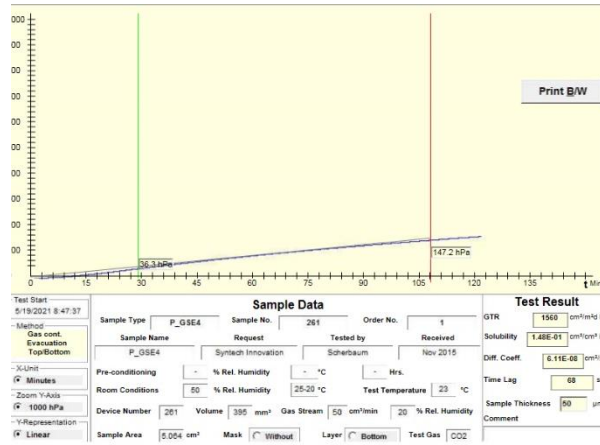


รูปที่ ก.76 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PPA/GSE4/M0

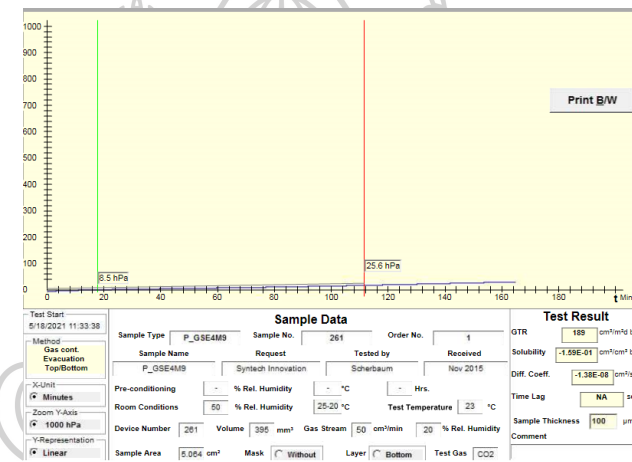


รูปที่ ก.77 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PPA/GSE4/M3

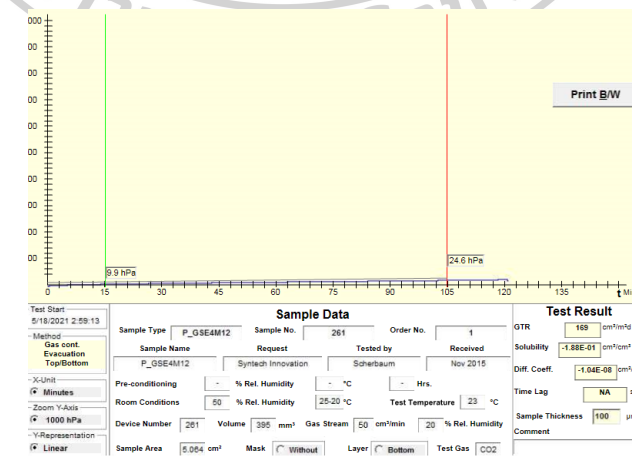




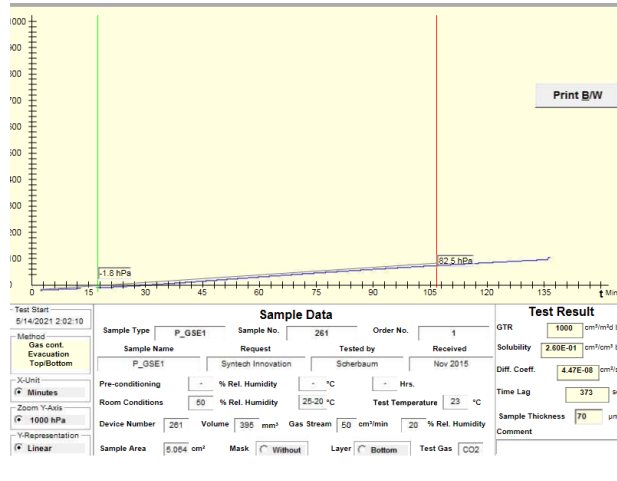
รูปที่ ก.78 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PPA/GSE4/M6



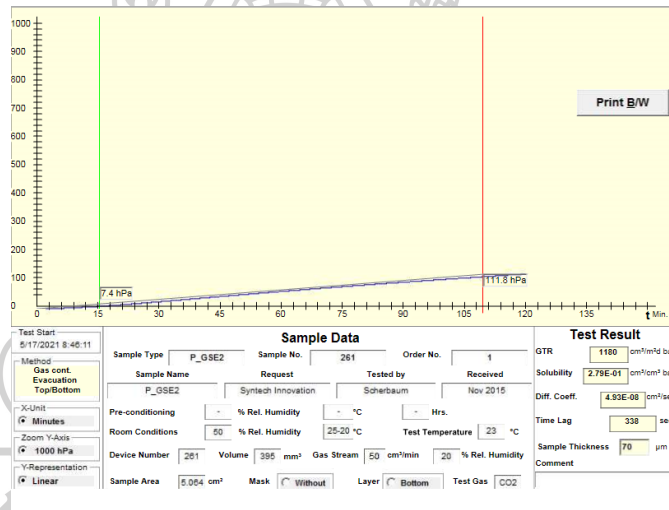
รูปที่ ก.79 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PPA/GSE4/M9



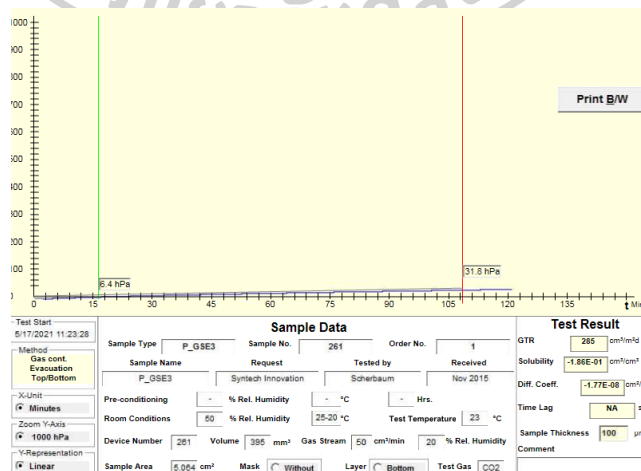
รูปที่ ก.80 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PPA/GSE4/M12



รูปที่ ก.81 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PPA/GSE1/M3



รูปที่ ก.82 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PPA/GSE2/M3



รูปที่ ก.83 แสดงกราฟการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ PPA/GSE3/M3

## 7. ผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธี JIS Z 2801 ณ สถาบันวิจัยนาโนเทค

ผลทดสอบ :	
เชื้อแบคทีเรีย	
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	
ตัวอย่างควบคุมการทดสอบ: แผ่นฟิล์มโพลีเอสเตอร์	
ปริมาณเชื้อ (CFU/cm <sup>2</sup> )	1.73 x 10 <sup>5</sup>
ตัวอย่าง 1. Control (ตัวอย่างควบคุม)	
ปริมาณเชื้อ (CFU/cm <sup>2</sup> )	5.27 x 10 <sup>5</sup>
ตัวอย่าง 2. With Antibact agent	
ปริมาณเชื้อ (CFU/cm <sup>2</sup> )	≤ 10
Antimicrobial activity	4.93
% Reduction	99.99
<b>หมายเหตุ:</b>	
CFU/ml = จำนวนโคโลนีต่อมิลลิเมตร	
CFU/cm <sup>2</sup> = จำนวนโคโลนีต่อตารางเซนติเมตร	
ตัวอย่างจะมีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเมื่อมีค่าประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ (Antimicrobial activity value, R) มากกว่าหรือเท่ากับ 2	
- ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียคำนวณได้จากสูตรดังต่อไปนี้:	
$R = \text{Log} (B/C)$	
เมื่อ R คือ ค่าประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (antibacterial activity)	
B คือ ค่าเฉลี่ยของจำนวนโคโลนีของตัวอย่างควบคุมหลังจากบ่มไปแล้ว 24 ชั่วโมง	
C คือ ค่าเฉลี่ยของจำนวนโคโลนีของตัวอย่างทดสอบหลังจากบ่มไปแล้ว 24 ชั่วโมง	
- ร้อยละการลดลงของเชื้อที่มีชีวิต (% Reduction) คำนวณจาก	
$[(\text{CFUตัวอย่างควบคุม} - \text{CFUตัวอย่างทดสอบ}) / \text{CFUตัวอย่างควบคุม}] \times 100$	
UD: ไม่สามารถแปลผลได้ เนื่องจากตัวอย่างทดสอบมีปริมาณเชื้อมากกว่าตัวอย่างกลุ่มควบคุม	
ทดสอบโดยศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ	

## ข้อสงวนสิทธิ์

การรับรองผลการตรวจสอบเกิดจากการตรวจสอบเฉพาะตัวอย่างชิ้นงานที่อยู่ภายใต้สภาวะและเครื่องมือที่กำหนดเท่านั้น ไม่สามารถขยายผลสรุปการตรวจสอบที่นอกเหนือจากที่ระบุไว้ได้ ทั้งนี้ ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติขอสงวนสิทธิ์ที่จะไม่รับผิดชอบต่อความเสียหายใดๆ ที่อาจเกิดขึ้นในการนำข้อมูลนี้ไปใช้ทั้งทางตรงและทางอ้อม ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติไม่ใช่นายงานที่มีอำนาจในการรับรองผลการตรวจสอบใดๆ และห้ามนำชื่อของศูนย์ฯ หรือสัญลักษณ์ (โลโก้) ของศูนย์ฯ ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดหรือเพื่อวัตถุประสงค์อื่นใด เว้นแต่จะได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากผู้อำนวยการศูนย์ฯ แล้วเท่านั้น

รูปที่ ก.84 แสดงผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียของ PPA/GSE4/M3

ผลทดสอบ :

เชื้อแบคทีเรีย

*Pseudomonas aeruginosa*

ตัวอย่างควบคุมการทดสอบ: แผ่นฟิล์มโพลีเอสเตอร์

ปริมาณเชื้อ (CFU/cm<sup>2</sup>)9.69 × 10<sup>4</sup>

ตัวอย่าง 1. Control (ตัวอย่างควบคุม)

ปริมาณเชื้อ (CFU/cm<sup>2</sup>)4.92 × 10<sup>5</sup>

ตัวอย่าง 2. T1

ปริมาณเชื้อ (CFU/cm<sup>2</sup>)2.39 × 10<sup>5</sup>

Antimicrobial activity

0.31

% Reduction

51.41

ตัวอย่าง 3. T2

ปริมาณเชื้อ (CFU/cm<sup>2</sup>)1.76 × 10<sup>5</sup>

Antimicrobial activity

0.45

% Reduction

64.32

ตัวอย่าง 4. T3

ปริมาณเชื้อ (CFU/cm<sup>2</sup>)2.18 × 10<sup>5</sup>

Antimicrobial activity

0.35

% Reduction



55.81

ทดสอบโดยศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ

ข้อสงวนสิทธิ์

การรับรองผลการตรวจสอบเกิดจากการตรวจสอบเฉพาะตัวอย่างชิ้นงานที่อยู่ภายใต้สภาวะและเครื่องมือที่กำหนดเท่านั้น ไม่สามารถขยายผลสรุปการตรวจสอบที่นอกเหนือจากที่ระบุไว้ได้ ทั้งนี้ ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติขอสงวนสิทธิ์ที่จะไม่รับผิดชอบต่อความเสียหายใดๆ ที่อาจเกิดขึ้นในการนำข้อมูลนี้ไปใช้ทั้งทางตรงและทางอ้อม ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติไม่ใช่งานที่มีอำนาจในการรับรองผลการตรวจสอบใดๆ และห้ามนำชื่อของศูนย์ฯ หรือสัญลักษณ์ (โลโก้) ของศูนย์ฯ ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใด เว้นแต่จะได้รับการอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากผู้อำนวยการศูนย์ฯ แล้วเท่านั้น

รูปที่ ก.85 แสดงผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียของ PPA/M3/GSE1-3 phr

 รายงานผลการทดสอบของประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย 		
ผลทดสอบ :		
เชื้อแบคทีเรีย		
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>		
ตัวอย่างควบคุมการทดสอบ: แผ่นฟิล์มโพลีเอสเตอร์		
ปริมาณเชื้อ (CFU/cm <sup>2</sup> )	2.73 x 10 <sup>5</sup>	
ตัวอย่าง 1. Control (ตัวอย่างควบคุม)		
ปริมาณเชื้อ (CFU/cm <sup>2</sup> )	8.29 x 10 <sup>5</sup>	
ตัวอย่าง 2. M0		
ปริมาณเชื้อ (CFU/cm <sup>2</sup> )	8.14 x 10 <sup>5</sup>	
Antimicrobial activity	1.16	
% Reduction	1.81	
ตัวอย่าง 3. M6		
ปริมาณเชื้อ (CFU/cm <sup>2</sup> )	4.51 x 10 <sup>5</sup>	
Antimicrobial activity	0.26	
% Reduction	45.60	
ตัวอย่าง 4. M9		
ปริมาณเชื้อ (CFU/cm <sup>2</sup> )	5.27 x 10 <sup>5</sup>	
Antimicrobial activity	0.20	
% Reduction	36.79	
ตัวอย่าง 5. M12		
ปริมาณเชื้อ (CFU/cm <sup>2</sup> )	6.48 x 10 <sup>5</sup>	
Antimicrobial activity	0.10	
% Reduction	21.83	
<b>ทดสอบโดยศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ</b>		
<b>ข้อสงวนสิทธิ์</b> การรับรองผลการตรวจสอบเกิดจากการตรวจสอบเฉพาะตัวอย่างชิ้นงานที่อยู่ภายใต้สภาวะและเครื่องมือที่กำหนดเท่านั้น ไม่สามารถขยายผลสรุปการตรวจสอบที่นอกเหนือจากที่ระบุไว้ได้ ทั้งนี้ ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติขอสงวนสิทธิ์ที่จะไม่รับผิดชอบต่อความเสียหายใดๆ ที่อาจเกิดขึ้นในการนำข้อมูลนี้ไปใช้ทั้งทางตรงและทางอ้อม ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติไม่ใช่งานที่มีอำนาจในการรับรองผลการตรวจสอบใดๆ และห้ามนำชื่อของศูนย์ฯ หรือสัญลักษณ์ (โลโก้) ของศูนย์ฯ ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดหรือเพื่อวัตถุประสงค์อื่นใด เว้นแต่จะได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากผู้อำนวยการศูนย์ฯ แล้วเท่านั้น		
F-NIN-NCH-017 Rev.0	NCH-U0056/AM64-064	Page 2/3

รูปที่ ก.86 แสดงผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียของ PPA/GSE4/PLA-g-MA 0, 6, 9 และ 12 โดยน้ำหนัก

## 8. การทดสอบ Antioxidation activity



ศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ (Center of Excellence in Natural Products Innovation)  
อาคารปฏิบัติการ 6 (S6) มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง 333 ม.1 ต.ท่าสูด อ.เมือง จ.เชียงราย 57100  
โทร 053-917552 โทรสาร 053-917548 e-mail: cenpi@mfu.ac.th

FM-RE-01

เลขที่รายงาน 64/013  
วันที่ออกผล 21/05/64  
แผ่น : 1/1

## แบบฟอร์มรายงานผลการทดสอบ (TEST REPORT)

ชื่อหน่วยงาน / ผู้ส่งตัวอย่างที่ระบุในใบรายงานผล (Company name for test report).....นางสาวดวงฉาน นาวรุ่งนอก.....  
.....ภาควิชาวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร.....  
ที่อยู่ในใบรายงานผล (Address for test report).....ภาควิชาวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม.....  
.....มหาวิทยาลัยศิลปากร อ.เมือง จ.นครปฐม 73000.....  
Tel:.....094-9526122.....Fax:..... E-mail:.....krongkam.f@gmail.com.....

เลขที่รับงาน (Received no.)...64/013....

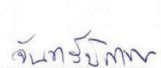
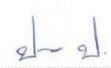

Sample*	DPPH assay (mgTEAC/ml)
1	ND
2	0.100 ± 0.007
3	0.037 ± 0.004
4	0.083 ± 0.008
5	0.021 ± 0.004
6	0.094 ± 0.007
7	0.057 ± 0.010
8	0.065 ± 0.009
9	0.063 ± 0.008

\* มีการเปลี่ยนแปลงชื่อตัวอย่าง

หมายเหตุ: แสดงผลเป็น Mean ± S.D.

ND = Not detected

TEAC = Trolox equivalent antioxidant capacity

ผู้ทดสอบ/Tested by	ผู้ตรวจสอบ/Checked by	ผู้อนุมัติ/Approved by
 (นางสาวจันทนา รุ่งนง) (นางสาวจันทนา รุ่งนง นิมก้าเหน็ด) นักวิทยาศาสตร์ วันที่ 19/05/64	 (นางสาวปริญญาพร ปรากฏเมธิกุล) นักวิจัย วันที่ 20/05/64	 (อาจารย์ ดร. นิตยา วุฒิชัย) (อาจารย์ ดร. นิตยา วุฒิชัย ฐิติปราโมทย์) รักษาการแทน หัวหน้าศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ วันที่ 21/05/64
<b>หมายเหตุ:</b> รายงานฉบับนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ได้รับการทดสอบเท่านั้น ในกรณีนำข้อมูลการทดสอบไปเพื่อจุดประสงค์ใดๆ ก็ตาม ศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง จะไม่รับผิดชอบต่อความเสียหายที่เกิดขึ้น ห้ามสำเนาหรือเผยแพร่ผลการทดสอบเพียงบางส่วน ยกเว้นทำทั้งฉบับ และห้ามนำผลการทดสอบไปโฆษณาโดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง		

รูปที่ ก.87 แสดงผลทดสอบการ Antioxidant ของฟิล์มผสมที่เติม GSE และ PLA-g-MA





1. การคำนวณปริมาณผลึก ( $X_c$ ) ในพอลิเมอร์ผสม

สามารถคำนวณได้จากสมการ 
$$X_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\phi \times \Delta H_m^0}$$

โดย  $\Delta H_m$  คือปริมาณความร้อนที่ PLA ใช้ในการหลอมผลึก (J/g)

$\Delta H_{cc}$  คือปริมาณความร้อนที่ใช้ในการก่อผลึกในกระบวนการ Cold crystallization (J/g)

$\Delta H_m^0$  คือปริมาณความร้อนที่ PLA ใช้ในการหลอมผลึกทั้ง 100% มีค่า 93.6 J/g

$\phi$  คืออัตราส่วนโดยมวลของ PLA ในพอลิเมอร์ผสม





เข้าร่วมงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ The 5th International Conference on Smart Materials and Nanotechnology ณ สวอนนงนุช พัทยา เมื่อวันที่ 1-4 ธันวาคม 2563 โดยนำเสนอในรูปแบบ Oral ในหัวข้อ “Preparation and Characterization of Ductile Poly(lactic acid)/Poly(ethylene glycol) Blended Film Incorporated with Chain Extender via Cast Film Extrusion” และบทความวิจัยได้ตีพิมพ์ในวารสารออนไลน์ SmartMat@2020 Conference E-Proceedings





## Preparation and Characterization of Ductile Poly(lactic acid)/Poly(ethylene glycol) Blended Film Incorporated with Chain Extender via Cast Film Extrusion

Krongkarn Bumrungrnok<sup>1</sup>, Poomsub Threepopnatkul<sup>1,\*</sup>

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

\*Email: threepopnatkul\_p@su.ac.th

**Abstract.** Poly(lactic acid) (PLA) is a smart biodegradable material but lack of flexibility and difficult to control the melt blending process due to its low melt strength. Poly(ethylene glycol) (PEG) was incorporated with PLA to act as plasticizer in small content (less than 20%wt). Moreover, the presence of a chain extender (Joncryl ADR 4468) as reactive compatibilizer was performed to improve compatibility between PLA and PEG blended films. PLA/PEG with and without ADR blended films were prepared via cast film extrusion with various PEG content at 0, 5, 10 and 20% by weight. The mechanical, morphological and thermal properties of blended films were compared with neat PLA. The very ductile behavior of PLA/PEG blended film was observed when PEG content reached at 10% by weight with 447% of elongation at break. The addition of ADR at 1.25% by weight on PLA with 10% by weight of PEG revealed that the elongation at break and modulus were slightly increased. The morphology of PLA/PEG with ADR blended films showed more ductile deformation and homogeneous phase compared to PLA/PEG without ADR blended films. Thermal stability of PLA was decreased with PEG incorporation on the other hand the addition of ADR on PLA/PEG blended film reveals the increasing of thermal stability of PLA. In conclusion PLA/PEG blended films can be the flexible packaging with small content of PEG.

**Keywords:** Poly(lactic acid), Poly(ethylene glycol), Chain extender, Ductile film, Biodegradable.

### Introduction

The plastic waste problem in last decade causes the improvement of biodegradable material was occurred [1]. Poly(lactic acid) is one of the most popular biodegradable polymer because it has many advantages such as excellent mechanical properties and good clarity. PLA is a rigid material and lacks of toughness. Therefore it could not be used as a flexible packaging. The improvement of flexibility of PLA was observed via many researchers as blending with flexible polymers such as poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) [1], poly( $\epsilon$ -capro-lactone) (PCL) [2] or poly(butylene succinate) (PBS) [3] or incorporated with plasticizer as poly(ethylene glycol) (PEG) [4]. In this research, flexibility of PLA would be developed for flexible packaging films by the incorporated with plasticizer. PEG is the good choice to lose minimum content of PLA matrix. PEG is a biodegradable polymer that has excellent efficiency to act as plasticizer because of low molecular weight and solubility. However, the plasticizing effect of PEG would be illustrated at high content of PEG (higher than 20%wt). Park B.S. et, al. [5] studied the blending of PLA and PEG by twin screw extruder. They found that the elongation at break of PLA/PEG was reached to 390% at PEG 20%wt with strongly decrease of modulus. Ozdemir E et, al. [4] prepared PLA/PEG blended via twin screw compounding and found that at PEG 20%wt elongation at break is only worth 43.1%. In many researches, PLA/PEG blended was prepared with batch to batch process not continuous process like extrusion process. This is because melting point of PLA and PEG are so different (melting temperature of PLA and PEG are about 150°C and 60°C respectively). PEG melted earlier than PLA led to PEG poorly dispersed in PLA matrix. Moreover, agglomeration of PEG was appeared at feed zone while extrusion process was performed. In this research, it is





focused on improvement the flexibility of PLA via adding the low content of PEG and study premixed method of PLA and PEG to improve the dispersion of PEG in PLA matrix.

However, PLA and PEG are immiscible blended so chain extender was used as compatibilizer via reactive blending. Joncryl ADR is multifunctional group agent that would interact with end chain of PLA and PEG therefore PLA and PEG chain were bonded together with ADR. Park B.S. et, al. [5] found that the used of chain extender MDI increase mechanical properties of PLA/PEG blended film indicating that PLA and PEG chain was connected with chain extender. However, MDI has many toxic with its vapor so in this research will choose the chain extender as ADR instead of MDI.

## **Experimental**

### **Materials**

Poly(lactic acid) (PLA grade 2003D) was purchased from Nature Works LLC. with MFR 6 g/10 min at 210°C. Poly(ethylene glycol) with Mw 8000 g/mol was obtained from Merck, Sigma-Aldrich product. Chain extender (Joncryl ADR 4468) was supplied from BASF Corporation with epoxy equivalent weight 310 g/mol.

### **Experimental**

**Preparation of blended films** PLA and PEG with various content of PEG at 5, 10 and 20%wt and PLA/PEG 10%wt with ADR 1.25 phr were premixed via solution casting method. First PLA and PEG were dried in vacuum oven at 40°C for 12 hours. Master batch of PLA/PEG and PLA/PEG/ADR were prepared with ratio of PLA:PEG at 1:1. PLA and PEG were dissolved in dichloromethane in other beaker then each solution was mixed together for 5 hours. These solutions were casted on to glass plate and left them dried overnight and cut in to small piece close to PLA pellet size. Finally master batch of PLA/PEG and PLA/PEG/ADR were observed.

Master batch films were combined with PLA matrix to get the films with composition as mention before via cast film extrusion at 170-190°C with screw speed 40 rpm then thin film were obtained with thickness about 70 µm.

**Characterization of blended films** These blended films were characterized with 4 techniques. Mechanical properties were taken with tensile testing according to ASTM D882-07 standard test by Intron UTM. These blended films were prepared with rectangular specimen with area size 1x7 in<sup>2</sup>. Scanning electron microscopy (SEM) (Tescan, Mira3, Czech Republic) was performed on tensile fractured and cryo-fracture surfaces of these blended films. All the surfaces were coated with a thin layer of gold. Chemical functional group was investigated with FT-IR spectrometer in transmission mode with 60 scan in range of 500-4000 cm<sup>-1</sup>. Thermal analysis was analyzed on thermal gravimetric analysis (TGA) (Perkin Elmer TGA-7, USA) to measure thermal stability of blended films at 50-600°C with heating rate of 10°C/min under N<sub>2</sub> purging.

## **Results and discussion**

### **Mechanical properties**

These blended films were measured tensile properties with tension mode in rate of tension force at 12.5 mm/min in machine direction. The results of all composition of blended films were shown in Figure 1 and Table 1. It's clearly seen that PLA is a brittle material with high modulus indicating that PLA is an excellent rigid material. The plasticizing effect of PEG in PLA was occurred at PEG 10%wt that represent the strongly increasing of elongation at break from 2.43% to 447.18%. This result demonstrate that PEG act as plasticizer via permeate between PLA chain and increase free volume content in the matrix. Therefore PLA chain could slip easily when obtain the tension force [6].



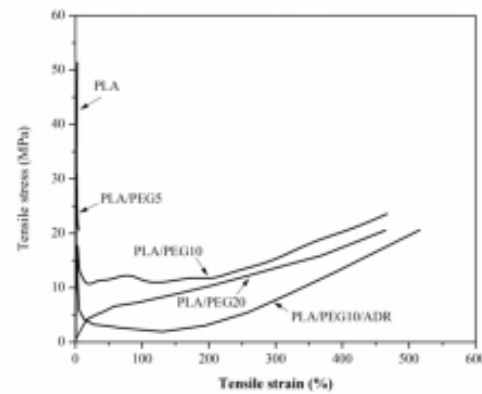
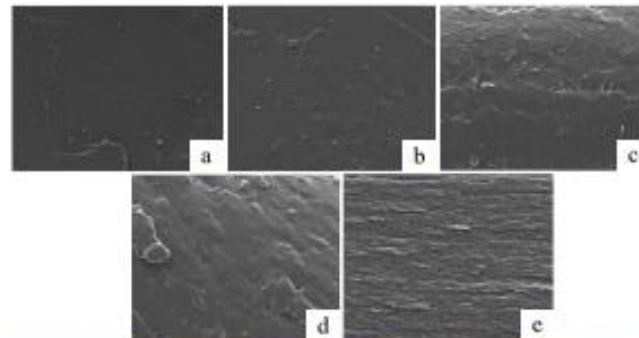


Figure 1. Stress-strain curve of PLA/PEG blended films at different content of PEG.

Table 1 Mechanical properties of PLA/PEG blended films

Sample	%Elongation at break	Modulus (MPa)	Tensile stress at break
PLA	2.43±0.20	2690.03±79.17	37.97±1.98
PLA/PEG5	4.33±1.63	2023.84±77.21	25.68±4.36
PLA/PEG10	447.18±11.78	1146.42±59.32	23.72±3.64
PLA/PEG10/ADR	515.63±10.46	1315.20±20.56	20.59±5.66
PLA/PEG20	392.71±22.38	113.06±10.89	21.95±2.10

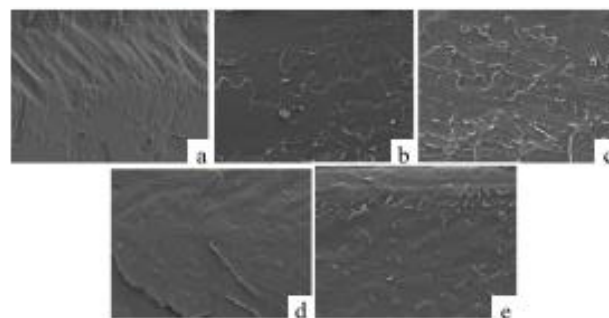
Young's Modulus as shown in Table 1 could be confirmed this argument with decreasing of modulus at higher PEG content. Furthermore, the addition of PEG at 10 to 20%wt also presented the strain hardening behavior as well. This illustrates the easy slipping causes PLA chain can rearrange and packing together follow the tension force where the deformation behavior of PLA with high content of PEG at 20% by weight represent to soft and tough material. Although the incorporated of ADR to act as compatibilizer didn't show strongly effect but it revealed slightly enhancement of elongation at break and modulus and modification of deformation behavior. This is indicating that some interaction between PLA and PEG chain was occurred so movement of polymer chain becomes more difficult to slip and rearrange follow the tension force. It can be seen that PLA/PEG10/ADR took more time to rearrange its chain follow the tension force. Therefore, the strain hardening behavior was appeared at low tensile stress compare to PLA/PEG without ADR. These cause higher modulus and elongation at break of PLA/PEG10/ADR than the once of PLA/PEG10. Low content of PEG (5%wt) lead to decrease the modulus of blended film. However, the elongation at break of film was not increase because at low content of PEG (5%wt). The interaction between PLA and PEG chains has not enough for good dispersion of PEG in PLA matrix. However, the preparation method of these blended films in this work has been successful for improvement of PLA toughness with low PEG content at 10%wt.



**Figure 2.** SEM micrographs of tensile fracture surface of PLA/PEG at different content of PEG (a) 0% (b) 5% (c) 10% (d) 20%wt and (e) PLA/PEG10/ADR

#### Morphology of blended films

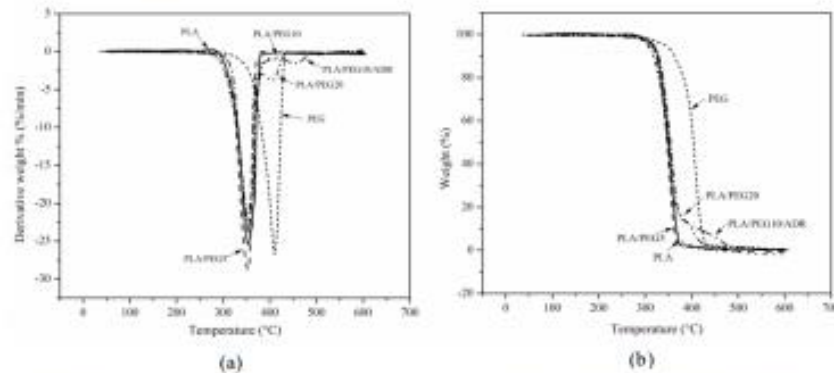
The cross-section surfaces of tension deformation of blended films are shown in Figure 2. The brittle fracture surface is observed in smooth surface in figure 2a and 2b that belong to PLA and PLA/PEG 5%wt respectively. It is confirmed to tensile results that PLA and PLA/PEG 5%wt are brittle materials figure 2c and 2d show more rough surface of PLA incorporated with PEG at 10%wt and 20%wt respectively. The deformation behaviors of these compositions are tough materials. Figure. 2e shows the fracture surface PLA/PEG with chain extender (ADR) is rougher. Moreover, layered surface is found which indicating that ADR effected to rearrangement and packing of PLA chain [7]. The confirmation is presented with figure 3 that belongs to cryo-fracture surfaces of blended films. Figure. 3b and 3d represent of PLA/PEG5 and PLA/PEG20 respectively. A little changed has appeared on PLA/PEG5 however the smooth surface according to brittle material still remains. Phase separation of PLA and PEG on PLA/PEG20 was appeared with large strips that separated from the matrix. Rough surface all over the area of PLA/PEG10 illustrated the good dispersion of PEG and tough behavior. Moreover, the effect of ADR as seen in Figure. 3e reveals more homogeneous phase of blended film than the one of PLA/PEG10 without ADR which corresponds to mechanical properties. The interaction of PLA and PEG was occurred causes the enhancement of compatibility of PLA and PEG.



**Figure 3.** SEM micrographs of cryo-fracture surfaces of PLA/PEG at different content of PEG (a) 0% (b) 5% (c) 10% (d) 20%wt and (e) PLA/PEG10/ADR

### Thermal stability

Figure 4 shows the thermal stability of PLA/PEG blended films. Thermal stability of PEG is higher than the one of PLA. Degradation temperature of PLA and PEG were at 358 and 410°C respectively. PLA incorporated with PEG 5%wt had no significant effect to thermal stability of PLA as well as mechanical properties results.



**Figure 4.** TGA thermogram (a) derivative weight% and (b) weight loss of PLA/PEG blended films

The addition of PEG at 10%wt and 20%wt indicate two steps degradation of PLA/PEG blends. First and second degradation step belongs to PLA and PEG respectively. PLA incorporated with PEG as the plasticizer show lower onset degradation temperature. This result might be caused by polymer chain can move easier. In contrast, incorporation of ADR as the chain extender shows higher onset degradation temperature than other blends. This verifies that the interaction between chain of PLA and PEG was occurred thus PEG has induced PLA to degrade at higher temperature compare to pure PLA and other blends.

### FT-IR spectra

The chemical functional groups of blends films were determined with FT-IR spectroscopy as seen in figure 5. The characteristic absorption bands of PLA appeared at wavenumber of 1075  $\text{cm}^{-1}$  and 1751  $\text{cm}^{-1}$  that illustrate the stretching of C-O-C and C=O respectively [8]. The wavenumber at 2885  $\text{cm}^{-1}$  and 1107  $\text{cm}^{-1}$  represent the characteristic absorption bands of PEG that reveal to -CH stretching vibration and C-O-C stretching vibration respectively [8]. This is confirmed to the mechanical properties results that ADR induce only some weak interaction between PLA and PEG chain therefore strongly interaction or new chemical bonding didn't appear on FT-IR spectra.



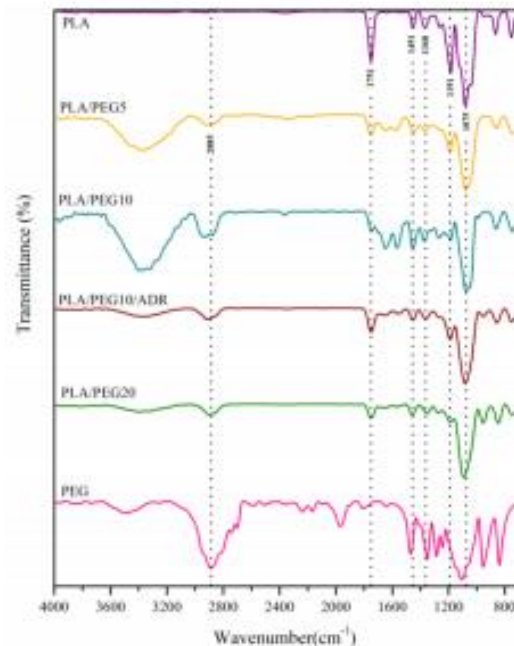


Figure 5 FT-IR spectra of PLA/PEG blended films at different PEG content

### Conclusion

Modification of PLA toughness to produce the flexible packaging via PEG was observed with cast film extrusion. Pre-mixing with solution method can solve the problem of different melting point of PLA and PEG so PEG could disperse well in PLA matrix. It guarantees with the enhancement of elongation at break to 447% at low PEG content (10%wt). This indicated that good distribution of PEG causes plasticizing effect was occurred with no need to add high PEG content which modulus would strongly decrease. The addition of chain extender ADR as compatibilizer didn't present strongly effect on FT-IR spectra. However, SEM micrograph, mechanical properties and TGA thermogram results reveal that ADR has induced the modification of PLA/PEG chain. Hence the elongation at break, modulus and thermal stability of PLA blended films were increased furthermore homogeneous phase of blended films also appear on SEM micrograph as well. In summary PLA/PEG film can be prepared with continuous process with extrusion method and obtained ductile PLA film with low PEG content of 10%wt.

### Acknowledgment

This research was financial supported by the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University and National Research and Innovation Information System: NRIIS), Thailand.



## References

- [1] Arruda, L.C., et al., Influence of chain extender on mechanical, thermal and morphological properties of blown films of PLA/PBAT blends. *Polymer Testing*, 2015. 43: p. 27-37.
- [2] Qin, Y., et al., Effect of PLA/PCL/cinnamaldehyde antimicrobial packaging on physicochemical and microbial quality of button mushroom (*Agaricus bisporus*). *Postharvest biology and technology*, 2015. 99: p. 73-79.
- [3] 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(3): p. 125-131.
- [4] Ozdemir, E. and J. Hacaloglu, Characterizations of PLA-PEG blends involving organically modified montmorillonite. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2017. 127: p. 343-349.
- [5] Park, B.S., et al., PLA/chain-extended PEG blends with improved ductility. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012. 123(4): p. 2360-2367.
- [6] Li, D., et al., Preparation of plasticized poly (lactic acid) and its influence on the properties of composite materials. *PLoS One*, 2018. 13(3): p. e0193520.
- [7] Ghalia, M.A. and Y. Dahman, Investigating the effect of multi-functional chain extenders on PLA/PEG copolymer properties. *International journal of biological macromolecules*, 2017. 95: p. 494-504.
- [8] Saha, D., et al., Preparation and characterization of poly (lactic acid)/poly (ethylene oxide) blend film: effects of poly (ethylene oxide) and poly (ethylene glycol) on the properties. *Polymer International*, 2019. 68(1): p. 164-172.

## รายการอ้างอิง

1. คมชัดลึก. ตลาดเห็ดขยายตัว. 2560 10 มิถุนายน 2019]; เข้าถึงได้จาก:<http://www.komchadluek.net/news/agricultural/257068>.
2. Wrona, M., K. Bentayeb, and C.J.F.C. Nerin, A novel active packaging for extending the shelf-life of fresh mushrooms (*Agaricus bisporus*). 2015. 54: p. 200-207.
3. Ortenzi, M.A., et al., Evaluation of crystallinity and gas barrier properties of films obtained from PLA nanocomposites synthesized via “in situ” polymerization of l-lactide with silane-modified nanosilica and montmorillonite. 2015. 66: p. 478-491.
4. THAIPUBLICA. EIC วิเคราะห์ความท้าทายและโอกาสของผู้ประกอบการภายใต้มาตรการลดใช้พลาสติก. 2019 10 มิถุนายน 2019]; เข้าถึงได้จาก :<https://thaipublica.org/2019/04/eic-plastic-waste/>.
5. Han, L., et al., Evaluation of biodegradable film packaging to improve the shelf-life of *Boletus edulis* wild edible mushrooms. 2015. 29: p. 288-294.
6. Ozdemir, E., J.J.J.o.a. Hacaloglu, and a. pyrolysis, Characterizations of PLA-PEG blends involving organically modified montmorillonite. 2017. 127: p. 343-349.
7. Park, B.S., et al., PLA/chain-extended PEG blends with improved ductility. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012. 123(4): p. 2360-2367.
8. Qin, Y., et al., Effect of PLA/PCL/cinnamaldehyde antimicrobial packaging on physicochemical and microbial quality of button mushroom (*Agaricus bisporus*). 2015. 99: p. 73-79.
9. Sogut, E., A.C.J.F.P. Seydim, and S. Life, The effects of Chitosan and grape seed extract-based edible films on the quality of vacuum packaged chicken breast fillets. 2018. 18: p. 13-20.
10. POLYMER. พลาสติก PLA (Polylactic acid). 10 มิถุนายน 2019]; เข้าถึงได้จาก: <https://enchemcom1po.wordpress.com/pla-polylactic-acid/>.
11. กระทรวงอุตสาหกรรม, ส. พลาสติกที่สลายตัวได้ทางชีวภาพ: Polylactic acid (PLA). 2018 10 มิถุนายน 2019]; เข้าถึงได้จาก : <http://www.ocsb.go.th/upload/bioindustry>

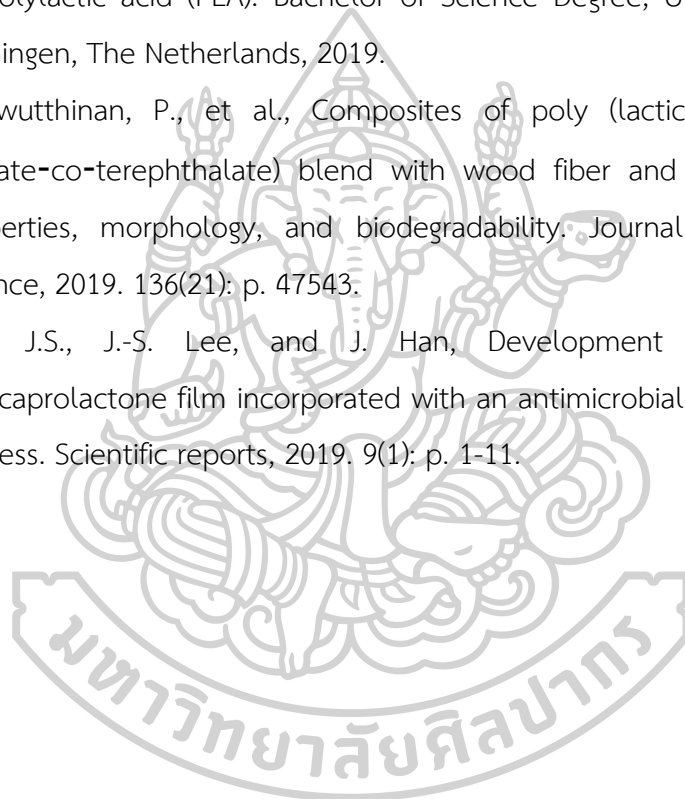


/fileupload/9757-9874.pdf.

12. Natureworks. Ingeo Biopolymer 2003D Technical Data Sheet. 10 มิถุนายน 2019]; เข้าถึงได้จาก: <https://drive.google.com/drive/folders/>.
13. มหาวิทยาลัยมหิดล, ห.ค. โพลีเอธิลีนไกลคอล 2010 10 มิถุนายน 2019]; เข้าถึงได้จาก: [https://www.pharmacy.mahidol.ac.th/dic/QA\\_full.php?id=2234](https://www.pharmacy.mahidol.ac.th/dic/QA_full.php?id=2234).
14. มหาวิทยาลัยสวนดุสิต, ฐ.ค. Ethylene glycol. 2015 10 มิถุนายน 2019]; เข้าถึงได้จาก: <http://ohs.sci.dusit.ac.th/wp/?p=310>.
15. Karkhanis, S.S. and L.M. Matuana, Extrusion blown films of poly (lactic acid) chain-extended with food grade multifunctional epoxies. *Polymer Engineering & Science*, 2019. 59(11): p. 2211-2219.
16. ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, ศ.ด.น.ร. Grape seed extract สารสกัดจากเมล็ดองุ่น. 1 July 2019]; เข้าถึงได้จาก: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2120/grape-seed-extract>.
17. Beauty, N.H.a. GRAPE SEED EXTRACT ราซินีแห่งสารต้านอนุมูลอิสระและชะลอความแก่. 2013 1 กรกฎาคม 2019]; เข้าถึงได้จาก: <http://nycvitamin.blogspot.com/2013/10/grape-seed-extract.html>.
18. Wissal Dhifi, S.B., Sabrine Jazi, Nada Bahloul and Wissem Mnif, Essential Oils' Chemical Characterization and Investigation of Some Biological Activities: A Critical Review. *Medicines*, 2016. 3(4).
19. Murthy, N.T.V., V. Agrahari, and H. Chauhan, Polyphenols against infectious diseases: Controlled release nano-formulations. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2021. 161: p. 66-79.
20. Hwang, S.W., et al., Grafting of maleic anhydride on poly (L-lactic acid). Effects on physical and mechanical properties. *Polymer Testing*, 2012. 31(2): p. 333-344.
21. Navarro, M.J., F.J. Gea, and A.J. González, Identification, incidence and control of bacterial blotch disease in mushroom crops by management of environmental conditions. *Scientia Horticulturae*, 2018. 229: p. 10-18.
22. Ghasemi, S., et al., Response of *Pseudomonas tolaasii*, the causal agent of mushroom brown blotch disease to the volatile compounds produced by endofungal bacteria. *BioControl*, 2021: p. 1-12.

23. Group, E.C. WHAT IS PSEUDOMONAS AERUGINOSA? [เข้าถึงเมื่อ 2021 30]; เข้าถึงได้  
จ ก ก : <https://www.ehagroup.com/resources/pathogens/pseudomonas-aeruginosa/>.
24. Ghalia, M.A. and Y. Dahman, Investigating the effect of multi-functional chain extenders on PLA/PEG copolymer properties. *International journal of biological macromolecules*, 2017. 95: p. 494-504.
25. Park, B.S., et al., PLA/chain-extended PEG blends with improved ductility. 2012. 123(4): p. 2360-2367.
26. Heydari-Majd, M., et al., A new active nanocomposite film based on PLA/ZnO nanoparticle/essential oils for the preservation of refrigerated *Otolithes ruber* fillets. 2019. 19: p. 94-103.
27. Chieng, B.W., et al. Effects of graphene nanoplatelets on poly (lactic acid)/poly (ethylene glycol) polymer nanocomposites. in *Advanced Materials Research*. 2014. Trans Tech Publ.
28. 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.
29. Farid, T., V. Herrera, and O. Kristiina. Investigation of crystalline structure of plasticized poly (lactic acid)/Banana nanofibers composites. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. IOP Publishing.
30. Hsieh, Y.-T., et al., Crystal polymorphism of polylactide and its composites by X-ray diffraction study. *Polymer Journal*, 2020. 52(7): p. 755-763.
31. Li, X., et al., The morphological, mechanical, rheological, and thermal properties of PLA/PBAT blown films with chain extender. *Polymers for Advanced Technologies*, 2018. 29(6): p. 1706-1717.
32. Lociento, D.A., et al., Biocompatible and biodegradable electrospun nanofibrous membranes loaded with grape seed extract for wound dressing application. *Journal of Nanomaterials*, 2019. 2019.
33. Lee, B.-S., Effect of specific interaction of CO<sub>2</sub> with poly (ethylene glycol) on phase behavior. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 2018. 28: p. 228-234.

34. de Souza, A.G., E.d.C.D. Nunes, and D. dos Santos Rosa, Understanding the effect of chain extender on poly (butylene adipate-co-terephthalate) structure. *Iranian Polymer Journal*, 2019. 28(12): p. 1035-1044.
35. Walha, F., et al., Rheological, morphological and mechanical studies of sustainably sourced polymer blends based on poly (lactic acid) and polyamide 11. *Polymers*, 2016. 8(3): p. 61.
36. Khan, M., Influence of chain extender on the rheological and thermal properties of polylactic acid (PLA). Bachelor of Science Degree, University of Groningen, Groningen, The Netherlands, 2019.
37. Chaiwutthinan, P., et al., Composites of poly (lactic acid)/poly (butylene adipate-co-terephthalate) blend with wood fiber and wollastonite: Physical properties, morphology, and biodegradability. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019. 136(21): p. 47543.
38. Lyu, J.S., J.-S. Lee, and J. Han, Development of a biodegradable polycaprolactone film incorporated with an antimicrobial agent via an extrusion process. *Scientific reports*, 2019. 9(1): p. 1-11.





## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กรองกาญจน์ บำรุงนอก
วัน เดือน ปี เกิด	16 ตุลาคม 2538
สถานที่เกิด	จ.สมุทรปราการ
วุฒิการศึกษา	พ.ศ.2557-2560 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) ปีโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	120/1996 ม.2 ต.ท้ายบ้านใหม่ อ.เมือง จ.สมุทรปราการ 10270
ผลงานตีพิมพ์	Krongkarn Bumrungnok, Poonsub Threepopnatkul "Preparation and Characterization of Ductile Poly(lactic acid)/Poly(ethylene glycol) Blended Film Incorporated with Chain Extender via Cast Film Extrusion " The 5th International Conference on Smart Materials and Nanotechnology, Nongnooch Gargen, Pattaya, Thailand 1-4 December, 2020
รางวัลที่ได้รับ	พ.ศ. 2561-2562 ได้รับทุนการศึกษาและทุนนักศึกษาผู้ช่วยสอน จาก ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2563-2564 ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

