



การศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิคาร์โพรแลกโตนโดยใช้
น้ำมันพืชเป็นสารเชื่อมประสาน

โดย

นายณานที ธรรมปัญญา



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกกับพอลิคาร์โพรแลค
โตนโดยใช้น้ำมันพืชเป็นสารเชื่อมประสาน



โดย
นายณานที ธรรมปัญญา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

A STUDY ON PROPERTIES OF THERMOPLASTIC STARCH
(TPS)/POLYCAPROLACTONE (PCL) BLEND COMPATIBILIZED BY VEGETABLE OIL



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 2019
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ การศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช
กับพอลิคาร์โพรแลคโตนโดยใช้น้ำมันพืชเป็นสารเชื่อมประสาน
โดย น่านนที ธรรมปัญญา
สาขาวิชา วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา
มหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เลิศวิจิตรจรัส

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

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

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร.อำนาจ สีหัตถตระกูล)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ จตุรพิริย์)

59402206 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

นาย น่านนที ธรรมปัญญา: การศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติก สตาร์ทซ์กับพอลิคาร์โพรแลคโตนโดยใช้น้ำมันพืชเป็นสารเชื่อมประสาน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เลิศวิจิตรจรัส

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ thermoplastic starch (TPS) โดยการทำพอลิเมอร์ผสมกับ polycaprolactone (PCL) TPS และ PCL จะถูกปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีโดย grafting ด้วย maleic anhydride (MA) ผลที่ได้จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR และ $^1\text{H-NMR}$ สามารถยืนยันได้ว่า MA ได้เกิดการ grafting ติดอยู่บนสายโซ่หลักของทั้ง TPS และ PCL เกิดเป็น TPS-g-MA และ PCL-g-MA เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและลดการดูดซับความชื้นของพอลิเมอร์ผสม epoxidized oil (EO) ถูกใช้เป็นสารเชื่อมประสานระหว่างเฟสของ TPS-g-MA และ PCL-g-MA EO เตรียมได้จากการนำน้ำมันลินสีด (linseed oil) หรือ น้ำมันปาล์ม (palm oil) มาทำปฏิกิริยากับ formic acid และ hydrogen peroxide จากผลการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมพบว่าเฟส PCL-g-MA มีการกระจายตัวอยู่ใน TPS-g-MA ซึ่งเป็นเฟสหลัก อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณ PCL-g-MA เพิ่มสูงขึ้นเฟสกระจายตัวของพอลิเมอร์ผสมจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อปริมาณของ PCL-g-MA เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ค่า elongation at break, tensile strength และ impact strength ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันลินสีดอีพอกไซด์ในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเพื่อเป็นสารเชื่อมประสานจะมีสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้นและมีการดูดซับความชื้นที่น้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ทำการเติมน้ำมันลินสีดอีพอกไซด์ การใช้น้ำมันปาล์มอีพอกไซด์เป็นสารเชื่อมประสานจะทำให้พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มีการดูดซับความชื้นที่ต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ น้ำมันลินสีดอีพอกไซด์เป็นสารเชื่อมประสาน

59402206 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Keyword : Thermoplastic starch (TPS) Polycaprolactone (PCL) Epoxidized oil (EO)

MR. NANNTHEE THAMPANYA : A STUDY ON PROPERTIES OF THERMOPLASTIC STARCH (TPS)/POLYCAPROLACTONE (PCL) BLEND COMPATIBILIZED BY VEGETABLE OIL

THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR WANCHAI LERDWIJITJARUD, Ph.D.

The primary purpose of this research is to improve the mechanical properties of thermoplastic starch (TPS) by blending with polycaprolactone (PCL). TPS and PCL were chemically modified by grafting with maleic anhydride (MA). Results from FTIR and ¹H-NMR confirmed that MA was grafted on backbone chain of TPS and PCL to give TPS-g-MA and PCL-g-MA. In order to improve the mechanical properties and reduce the moisture absorption of polymer blend, epoxidized oil (EO) was used as a compatibilizer between TPS-g-MA and PCL-g-MA phase. EO was prepared by the chemical reaction between linseed oil or palm oil with formic acid and hydrogen peroxide. The results from morphological investigation of polymer blend revealed that the PCL-g-MA phase dispersed in TPS-g-MA matrix. However, the enlargement of dispersed phase was observed when the amount of PCL-g-MA in polymer blend increased. Elongation at break, tensile strength, and impact strength of polymer blend increased with increasing PCL-g-MA content. Polymer blend compatibilized with 10% w/w epoxidized linseed oil revealed the enhancement in mechanical properties and the reduction in moisture absorption comparing with the uncompatibilized polymer blend. The use of epoxidized palm oil as a compatibilizer of polymer blend resulted in the polymer blend with lower moisture absorption comparing with that compatibilized with epoxidized linseed oil.

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เลิศวิจิตรจรัส และ อาจารย์ ดร. อำนาจ สิทธิตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ในการสละเวลาให้คำปรึกษาและคอยชี้แนะแนวทางการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนอบรมสั่งสอนและช่วยแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อติศักดิ์ จตุรพิริย์ ที่สละเวลามาเป็นประธานและคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์นี้ ตลอดจนให้คำแนะนำในการนำไปปรับใช้และแก้ไขงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผ่านลุล่วงไปได้ และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่อบรมสั่งสอนและให้วิชาความรู้ที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณบุคลากรทุกท่านของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำงานวิจัยและเครื่องมือทดสอบ ขอขอบคุณคุณพินิจ เจียนระลึก ในการให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการติดต่อขอยืมอุปกรณ์ ขอขอบคุณคุณไพโรจน์ ตั้งศุภธวัช ในการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

ขอบคุณเพื่อนปอโททุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและคอยเป็นกำลังใจให้กันเสมอ และขอบคุณพี่ ๆ และน้อง ๆ ปอโททุกคนสำหรับมิตรภาพที่ดีที่มีให้กันมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ส่งเสียเลี้ยงดู อบรม สั่งสอนและคอยเป็นกำลังใจที่สำคัญในเรื่องต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านการเรียน การดำเนินชีวิต ตลอดจนการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์นี้ให้ผ่านลุล่วงไปได้ด้วยดี

น่านนที ธรรมปัญญา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ (Introduction).....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 แป้ง (starch).....	5
2.2 Polycaprolactone (PCL).....	7
2.3 Vegetable oil.....	10
2.4 พอลิเมอร์เบลนด์.....	11
2.5 กระบวนการปรับปรุงความเข้ากันได้ (compatibilization methods).....	12
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	22
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้.....	22

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ	23
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์เอกลักษณ์และทดสอบสมบัติต่าง ๆ	23
3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย	24
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลงานวิจัย.....	29
4.1 การเตรียม และ การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ thermoplastic starch graft maleic anhydride (TPS-g-MA)	30
4.2 การเตรียม และการพิสูจน์เอกลักษณ์ polycaprolactone graft maleic anhydride (PCL-g-MA).....	32
4.3 การเตรียม และการพิสูจน์เอกลักษณ์ของ epoxidized linseed oil (ELO).....	35
4.4 การเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมประสานระหว่าง TPS-g-MA, PCL-g-MA และ Epoxidized oil (EO).....	38
4.5 การศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์	40
4.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์เบลนด์.....	44
4.7 การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์	48
4.8 การศึกษาสมบัติการดูดซับความชื้นของพอลิเมอร์เบลนด์.....	63
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	69
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดสอบ moisture content ของพอลิเมอร์เบลนด์	101
รายการอ้างอิง	116
ประวัติผู้เขียน.....	122

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของ amylose และ amylopectin	6
ตารางที่ 2.2 ชื่อทางการค้า (trade name) ของ PCL	7
ตารางที่ 2.3 สมบัติโดยทั่วไปของ PCL	9
ตารางที่ 2.4 สมบัติเชิงกลของ nanofiber polymer blend ระหว่าง PLA และ PCL	9
ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ ในน้ำมันพืชแต่ละชนิด	11
ตารางที่ 2.6 สภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ ELO แบบต่าง ๆ และเปอร์เซ็นต์การเกิดปฏิกิริยา epoxidation	20
ตารางที่ 2.7 สมบัติเชิงกลของ TPS, PCL37, PCL50, TPS/PCL blend	21
ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิจัย	26
ตารางที่ 4.1 ค่าสมบัติเชิงกลของ TPS-g-MA และพอลิเมอร์เบลนด์	50
ตารางที่ 4.2 ค่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่มีการผสม ELO และพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการผสม ELO 5% โดยน้ำหนัก	52
ตารางที่ 4.3 ค่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการผสม ELO 5% โดยน้ำหนัก และพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการผสม ELO 10% โดยน้ำหนัก.....	56

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ (a) amylose, (b) amylopectin	5
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ PCL	7
รูปที่ 2.3 วิธีการ polymerization ของ PCL ในรูปแบบต่าง ๆ	8
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ triglyceride	10
รูปที่ 2.5 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างส่วนของ fatty acid ใน soy bean oil กับ สารประกอบ per- acid โดยใช้ amberlite เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	10
รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาการดัดแปลงโครงสร้างทางเคมีของ starch โดยใช้ MA และ DMSO	14
รูปที่ 2.7 ผลการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ของ (a) starch, (b) starch-g-MA	14
รูปที่ 2.8 ผลการทดสอบ FTIR ของ starch และ modified starch ที่ใช้ปริมาณ MA แตกต่างกัน	15
รูปที่ 2.9 ผลการทดสอบ FTIR ระหว่าง starch และ modified starch	16
รูปที่ 2.10 กลไกของการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง PCL, maleic anhydride (MA) และ glycidyl methacrylate (GMA)	17
รูปที่ 2.11 ผลการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ของ PCL และ modified PCL	18
รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยาการเกิดการ grafting ของ MA บน PCL	19
รูปที่ 2.13 tensile strength ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PCL/RSF (จุดทึบ) PCL-g-MA (0.51% โดย น้ำหนัก)/RSF (จุดกึ่งทึบกึ่งโปร่ง) และ PCL-g-MA (1.02% โดยน้ำหนัก)/RSF (จุดโปร่ง)	19
รูปที่ 2.14 ผลการทดสอบ FTIR ของ (a) linseed oil (b) epoxidized linseed oil	20
รูปที่ 2.15 ผลการทดสอบ water contact angle ของตัวอย่าง TPS ที่มีปริมาณการเติม ESO แตกต่างกัน	21
รูปที่ 4.2 FTIR spectrum ของ TPS และ TPS-g-MA	30
รูปที่ 4.1 สมการเคมีแสดงการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง TPS และ MA	30
รูปที่ 4.3 $^1\text{H-NMR}$ spectra ของ TPS เปรียบเทียบกับ TPS-g-MA	31
รูปที่ 4.4 สมการเคมีแสดงการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง TPS และ MA	32

รูปที่ 4.5 FTIR spectrum ของ PCL และ PCL-g-MA.....	33
รูปที่ 4.6 ¹ H-NMR Spectra ของ PCL เปรียบเทียบกับ PCL-g-MA.....	34
รูปที่ 4.7 สมการเคมีแสดงการเกิดสารประกอบ per-acid และปฏิกิริยาเคมีระหว่าง per-acid กับ linseed oil.....	35
รูปที่ 4.8 FTIR spectrum ของ LO และ ELO.....	36
รูปที่ 4.9 ¹ H-NMR Spectra ของ LO เปรียบเทียบกับ ELO.....	37
รูปที่ 4.10 สมการเคมีที่อาจเกิดขึ้นได้ระหว่าง PCL-g-MA กับ glycerol	38
รูปที่ 4.11 การเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของ TPS-g-MA และ PCL-g-MA โดย EO	39
รูปที่ 4.12 สัณฐานวิทยาของ (a) native starch, (b) TPS-g-MA และ (c) PCL-g-MA	40
รูปที่ 4.13 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS-g-MA และ PCL-g-MA ที่สัดส่วนการผสม (a) 90/10, (b) 80/20 และ (c) 70/30.....	41
รูปที่ 4.14 สัณฐานวิทยาของ (a) พอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่มีการผสม EO (b) ผสม ELO 5% โดยน้ำหนัก (c) ผสม EPO 5% โดยน้ำหนัก (d) ผสม ELO 10% โดยน้ำหนัก และ (e) ผสม EPO 10% โดยน้ำหนัก.....	43
รูปที่ 4.15 XRD pattern ของ TPS เปรียบเทียบกับ TPS-g-MA	44
รูปที่ 4.16 XRD pattern ของ PCL เปรียบเทียบกับ PCL-g-MA.....	45
รูปที่ 4.17 XRD pattern ของ TPS-g-MA และพอลิเมอร์เบลนด์ที่สัดส่วนการผสม 10 %PCL, 20 %PCL และ 30 %PCL.....	46
รูปที่ 4.18 XRD pattern ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่ผสม EO (30PCL), ผสม ELO 5% โดยน้ำหนัก (30PCL-L5) และผสม EPO 5% โดยน้ำหนัก (30PCL-P5).....	47
รูปที่ 4.19 stress-strain curve ของ TPS-g-MA และพอลิเมอร์เบลนด์ ในสัดส่วนการผสมต่าง ๆ .	48
รูปที่ 4.20 แผนภูมิแสดงค่า (a) elongation at break (b) tensile strength (c) Young's modulus และ (d) impact strength ของ TPS-g-MA และพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม PCL-g-MA ลงไป 10% (10PCL), 20% (20PCL) และ 30% (30PCL).....	50
รูปที่ 4.21 stress-strain curve ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการผสม ELO 5% โดยน้ำหนัก.....	51

รูปที่ 4.36 กราฟการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน pure TPS-g-MA, pure PCL-g-MA และพอลิเมอร์
 เบลนด์ที่มีการเติม PCL-g-MA ลงไป 10% (10PCL), 20% (20PCL) และ 30% (30PCL) 64

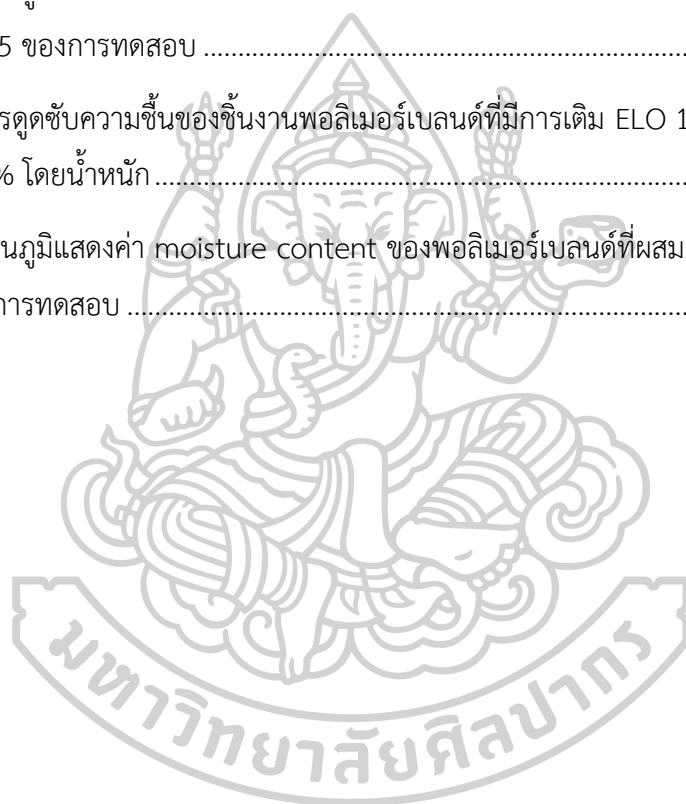
รูปที่ 4.37 แผนภูมิแสดงค่า moisture content ของ TPS-g-MA, PCL-g-MA และพอลิเมอร์เบลนด์
 ที่สูตรการผสมต่าง ๆ ณ วันที่ 15 ของการทดสอบ..... 64

รูปที่ 4.38 กราฟการดูดซับความชื้นของ (a) ชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่มีการเติม ELO และเติม
 ELO 5% โดยน้ำหนัก และ (b) ชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม ELO 5 และ 10% โดยน้ำหนัก..... 66

รูปที่ 4.39 แผนภูมิแสดงค่า moisture content ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสมปริมาณ ELO แตกต่าง
 กัน ณ วันที่ 15 ของการทดสอบ 66

รูปที่ 4.40 การดูดซับความชื้นของชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม ELO 10% โดยน้ำหนัก และ
 เติม EPO 10% โดยน้ำหนัก 67

รูปที่ 4.41 แผนภูมิแสดงค่า moisture content ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม EO ต่างชนิดกัน ณ
 วันที่ 15 ของการทดสอบ 68



บทที่ 1

บทนำ (Introduction)

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีตจนถึงปัจจุบันผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ใช้งานทั่วไป เช่น polyethylene (PE), polypropylene (PP), polyvinyl chloride (PVC) ก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมคือเมื่อพลาสติกเหล่านั้นกลายเป็นขยะทำให้ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้จึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามมา เช่น มลพิษทางดิน มลพิษทางน้ำ เป็นต้น ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีแนวคิดที่จะนำพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastic) มาใช้แทนพลาสติกที่กล่าวไปข้างต้น ซึ่งในปัจจุบันนี้ biodegradable plastic เป็นพลาสติกที่ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากสามารถผลิตได้จากผลผลิตทางการเกษตรเช่น มันสำปะหลัง ข้าวโพด และอื่น ๆ

แป้ง (starch) เป็นสารประเภท polysaccharide ที่พบมากในพืชอีกทั้งยังเป็นวัสดุที่มีราคาถูก แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่สำคัญ 2 ชนิดคือ amylose กับ amylopectin ส่วนของ amylose โครงสร้างทางเคมีจะเป็นสายโซ่โมเลกุลที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงซึ่งแต่ละหน่วยย่อยของแป้งจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ 1-4 α -glycosidic linkage ส่วน amylopectin มีโครงสร้างทางเคมีที่เป็นสายโซ่โมเลกุลที่มีลักษณะเป็นกิ่งซึ่งแต่ละหน่วยย่อยกลูโคสของแป้งจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ 1-4 α -glycosidic linkage และ 1-6 α -glycosidic linkage [1] แต่อย่างไรก็ตามแป้งไม่สามารถนำมาผลิตเป็นพลาสติกได้โดยตรงเนื่องจากภายในโครงสร้างของแป้งมี hydroxyl group (-OH) อยู่เป็นจำนวนมากทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่สูง ส่งผลทำให้พลังงานที่ใช้ทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งมีค่าที่สูงกว่าพลังงานที่ใช้ทำลายแรงยึดเหนี่ยวในสายโซ่หลัก พบว่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการหลอมเหลว (T_m) ของแป้งอยู่ที่ 220-240 °C และอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการสลายตัวของแป้งอยู่ที่ 220 °C [2] จากอุณหภูมิทั้งสองจะสังเกตได้ว่าแป้งจะเกิดการสลายตัวก่อนที่จะเกิดการหลอมและไหลได้ ดังนั้นการทำให้แป้งสามารถทำการขึ้นรูปเป็นพลาสติกต้องมีการเติมสารเคมีจำพวก พลาสติไซเซอร์ (plasticizer) เช่น น้ำ หรือ กลีเซอรอล (glycerol) โดยที่สารเหล่านี้จะเข้าไปช่วยลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้ง เมื่อ hydrogen bonding ระหว่างสายโซ่ลดต่ำลงทำให้สามารถขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคหลอมขึ้นรูป (melted process) ได้ [3] และจะเรียกผลิตภัณฑ์นั้นว่า thermoplastic starch (TPS) ข้อดีของ TPS คือเป็น biopolymer ที่ผลิตได้จากวัสดุทางธรรมชาติที่สามารถสร้างขึ้นมาทดแทนได้ตลอดเวลา (renewable) ราคาถูก (low cost) และมีความสามารถในการย่อยสลายตัวทางชีวภาพได้ (biodegradable) [4] แต่ข้อเสียของ TPS คือชิ้นงาน TPS มีความเปราะ แตกหักง่าย [5]

กระบวนการหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยมในการลดความเปราะของ TPS คือ การทำเป็นพอลิเมอร์ผสม (polymer blend) งานวิจัยจำนวนหนึ่งได้มีการนำเอา TPS มาผสม กับ พอลิเมอร์ ที่มีความยืดหยุ่นที่สูงเช่น polycaprolactone (PCL) ซึ่ง PCL เป็น linear polyester ที่สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยา ring opening ของ ϵ -caprolactone PCL จัดเป็น semi-crystalline polymer และมี melting temperature ค่อนข้างต่ำอยู่ที่ 60 °C [2] ปัจจุบัน PCL ได้รับความสนใจนำไปใช้งานด้าน biomedical material เช่นการนำไปผลิตเป็น scaffolds ในงาน tissue engineering [6] สมบัติที่โดดเด่นของ PCL คือมีความยืดหยุ่นที่สูง (flexibility), เป็น hydrophobic polymer และมีความสามารถในการย่อยสลายตัวทางชีวภาพ (biodegradable) [7]

TPS ที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงมีความเป็น hydrophilic ที่สูงทำให้เมื่อนำไปใช้งานในสภาวะที่มีความชื้นสูงจะส่งผลให้สูญเสียความแข็งแรงเชิงกลไป ดังนั้นจึงได้มีงานวิจัยที่นำเอา TPS มาผสมกับน้ำมันพืช เช่น palm oil, linseed oil, castor oil แต่เนื่องจากความเป็นขี้ที่แตกต่างกันของ TPS กับ น้ำมันพืชทำให้ต้องมีการปรับปรุงสมบัติทางเคมีของน้ำมันพืชให้มีความเป็นขี้ที่ใกล้เคียงกับ TPS ก่อนซึ่งกระบวนการที่นิยมทำคือการทำ epoxidation ซึ่ง epoxidized oil (EO) เป็นน้ำมันพืชชนิดหนึ่งที่มี oxirane ring เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างทางเคมีซึ่ง EO ได้มาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างส่วนของ unsaturated fatty acid ในน้ำมันพืชกับ per-acid [8] EO สามารถนำไปใช้งานเป็น plasticizer หรือ สาร antioxidant ให้กับพลาสติกจำพวก PVC นอกจากนี้ EO อาจจะนำเอาไปใช้เป็น intermediate ในการสังเคราะห์สารขั้นต่อไป EO มี oxirane ring เป็นองค์ประกอบทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยา hydrolysis, acylation, ethoxylation, propoxylation, hydroxylation, hydrogenation และ carbonation อีกทั้ง EO ยังสามารถใช้ในการผลิตสารจำพวก adhesive หรือ coating agent [9]

ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงสมบัติของ thermoplastic starch (TPS) เพื่อให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานมากยิ่งขึ้นโดยข้อจำกัดที่สำคัญของ TPS คือความเปราะ แตกหักง่าย ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะใช้ polycaprolactone (PCL) ซึ่งเป็นพลาสติกที่มีความยืดหยุ่นเข้ามาผสมกับ TPS แต่เนื่องจาก TPS เป็น hydrophilic polymer ในขณะที่ PCL เป็น hydrophobic polymer ดังนั้นเพื่อให้พอลิเมอร์ทั้งสองมีความเข้ากันได้เพิ่มมากขึ้นทางผู้วิจัยจึงนำวิธีการปรับแต่งโครงสร้างทางเคมีของ TPS และ PCL ด้วย maleic anhydride (MA) เข้าช่วยและมีการใช้ epoxidized oil (EO) มาเป็นตัวเชื่อมประสาน (compatibilizer) ระหว่าง TPS และ PCL ที่ถูกปรับแต่งโครงสร้างทางเคมีแล้ว อีกทั้งประโยชน์ของ epoxidized oil (EO) อีกประการหนึ่งคือ EO จะแทรกตัวเข้าไปอยู่ในโมเลกุลของ TPS ทำให้ TPS มีความว่องไวต่อความชื้นที่ลดต่ำลง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาการเตรียม thermoplastic starch graft maleic anhydride (TPS-g-MA), polycaprolactone graft maleic anhydride (PCL-g-MA) และ epoxidized vegetable oil (EO)
- 1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณ PCL-g-MA ที่มีผลต่อสมบัติทางสัณฐานวิทยา ลักษณะโครงสร้างทางผลึก สมบัติเชิงกล และสมบัติการต้านทานความชื้นของพอลิเมอร์ผสม
- 1.2.3 ศึกษาอิทธิพลของชนิด EO ที่มีผลต่อสมบัติทางสัณฐานวิทยา ลักษณะโครงสร้างทางผลึก และสมบัติการต้านทานความชื้นของพอลิเมอร์ผสม
- 1.2.4 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณ EO ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

starch ที่นำมาใช้เพื่อขึ้นรูปเป็น TPS จะเตรียมโดยใช้ แป้งมันสำปะหลัง โดยที่มีปริมาณของ glycerol ที่ใช้เป็น plasticizer ของ starch ใช้ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก polycaprolactone (PCL) ที่นำมาผ่านการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีจะใช้ PCL ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 80,000 g/mol น้ำมันพืชที่นำมาใช้เตรียม epoxidized oil มี 2 ชนิดได้แก่ palm oil และ linseed oil การศึกษาสมบัติเชิงกลของ thermoplastic starch (TPS) และพอลิเมอร์เบลนด์ จะทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน micro tensile ตามมาตรฐาน ASTM D 638 type V และชิ้นงาน impact testing มาตรฐาน ASTM D-256 อีกทั้งการศึกษาพฤติกรรมการดูดความชื้นของ thermoplastic starch (TPS) และพอลิเมอร์เบลนด์ จะทำการศึกษาที่ความชื้นสัมพัทธ์ 54% เป็นเวลา 15 วัน

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 ออกแบบวิธีการทดลอง และวางแผนการทดลอง
- 1.4.3 จัดหาอุปกรณ์และสารเคมี
- 1.4.4 ดำเนินงานวิจัย
 - 1.4.4.1 ทำการเตรียม thermoplastic starch (TPS) ที่ผ่านการปรับปรุงทางเคมี โดยใช้ maleic anhydride (MA)
 - 1.4.4.2 ทำการเตรียม polycaprolactone (PCL) ที่ผ่านการปรับปรุงทางเคมี โดยใช้ maleic anhydride (MA)
 - 1.4.4.3 ทำการสังเคราะห์ epoxidized oil (EO) โดยใช้ palm oil และ linseed oil มาทำปฏิกิริยากับ carboxylic acid และ peroxide

1.4.4.4 ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารจากข้อ 1.4.4.1 ถึง 1.4.4.3 โดยใช้เทคนิค Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) และ nuclear magnetic resonance spectroscopy (^1H NMR)

1.4.4.5 ทำการขึ้นรูป พอลิเมอร์เบลนด์ โดยนำเอาสารจากข้อ 1.4.4.1 ถึง 1.4.4.3 มาผสมกันในสัดส่วนต่างๆ

1.4.4.6 ทดสอบสมบัติของ พอลิเมอร์ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางสัณฐานวิทยา ลักษณะโครงสร้างทางผลึก และสมบัติด้านความทนทานต่อความชื้น

1.4.5 วิเคราะห์ผลงานวิจัยที่ได้

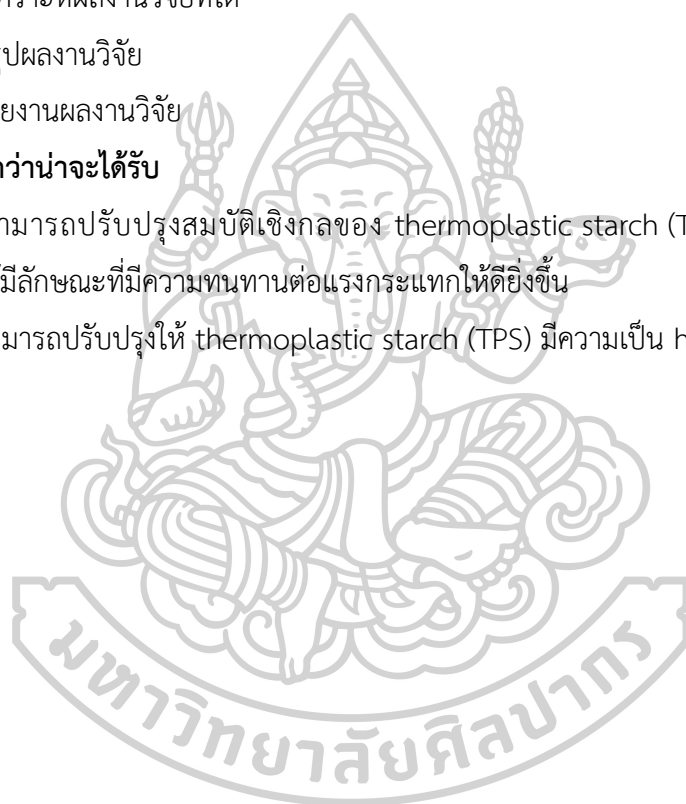
1.4.6 สรุปผลงานวิจัย

1.4.7 รายงานผลงานวิจัย

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ thermoplastic starch (TPS) ที่มีลักษณะเปราะ แตกหักง่ายให้มีลักษณะที่มีความทนทานต่อแรงกระแทกให้ดียิ่งขึ้น

1.5.2 สามารถปรับปรุงให้ thermoplastic starch (TPS) มีความเป็น hydrophilic ที่น้อยลง

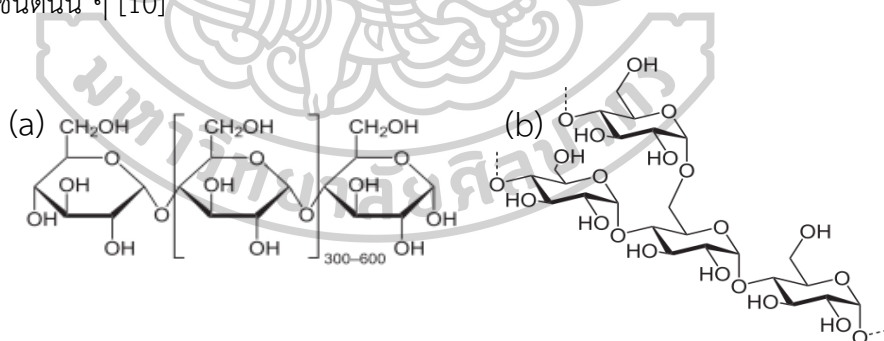


บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แป้ง (starch)

แป้ง (starch) เป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืช พบทั้งในเมล็ด ผล ราก ลำต้น และใบของพืช โดยแป้งจัดเป็นพอลิเมอร์ประเภทพอลิแซคคาไรด์ที่เกิดจากโมเลกุลของกลูโคสมาเชื่อมต่อกันจำนวนมาก โดยจะมีสูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ และหน่วยพื้นฐานเป็น anhydroglucose unit ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -glycosidic linkage [10] บริเวณคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้งจะมี anomeric carbon (C1) ซึ่งว่างอยู่ไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่น ๆ ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของแป้งจะมีด้านปลาย ที่มีคุณสมบัติรีดิวซ์ (reducing end) นั่นคือ แป้งหนึ่งโมเลกุลจะมีตำแหน่ง reducing end 1 ตำแหน่ง [11] โดยทั่วไปแล้วแป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้งซึ่งมีขนาดขนาด 1-100 ไมครอน องค์ประกอบหลักที่สำคัญของแป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิดคือ amylose ซึ่งมีลักษณะของสายโซ่โมเลกุลของกลูโคสเชื่อมกันเป็นเส้นตรงไม่มีการแตกกิ่งออกไป และอีกชนิดหนึ่งคือ amylopectin ซึ่งมีลักษณะสายโซ่โมเลกุลของกลูโคสเชื่อมกันและมีการแตกเป็นกิ่ง [12] ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของทั้ง amylose และ amylopectin สามารถแสดงได้ดัง รูปที่ 2.1 ตามลำดับ โดยทั่วไปแล้วสมบัติทางกายภาพของแป้งชนิดต่าง ๆ นั้นจะถูกกำหนดจากสัดส่วน amylose และ amylopectin ที่อยู่ในแป้งชนิดนั้น ๆ [10]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ (a) amylose, (b) amylopectin [12]

ตารางที่ 2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของ amylose และ amylopectin [10]

amylose	amylopectin
1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะ α -1,4	1. โมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 และมี การแตกกิ่งด้วยพันธะ α -1,6
2. ประกอบด้วยกลูโคส 200-6000 หน่วย	2. แต่ละกิ่งมีกลูโคส 20-25 หน่วย
3. ละลายน้ำได้น้อยกว่า	3. ละลายน้ำได้ดีกว่า
4. เมื่อต้มในน้ำจะมีความข้นหนืดน้อย	4. ข้นหนืดมากและใส
5. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	5. ให้สีม่วงแดงหรือสีน้ำตาลแดงกับสารละลายไอโอดีน
6. ต้มแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็งได้	6. ไม่จับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง

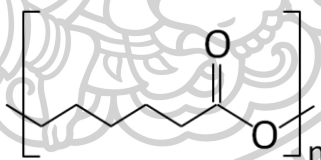
การนำ starch มาทำการผสมกับสารประเภท plasticizer เช่น น้ำ หรือ glycerol ในสภาวะที่มีความร้อนและแรงเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในเครื่อง internal mixer จะเป็นการทำให้ส่วนที่เป็นผลึกหรือกิ่งผลึกถูกทำให้กลายเป็นเจล (gelatinize) หรือถูกทำลาย (destructurize) ทำให้ได้สิ่งที่เรียกว่า thermoplastic starch (TPS) [13]

ข้อดีของ TPS คือ มีสมบัติทั้งเป็น bio-based และ biodegradable [14] แต่เนื่องจากภายในสายโซ่โมเลกุลของแป้งประกอบด้วย hydroxyl group (-OH) อยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้ TPS มีข้อเสียอยู่บางประการเช่นการมีลักษณะที่เปราะแตกหักง่าย เนื่องมาจากการมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่สูง [11] การปรับปรุงความเปราะของ TPS สามารถทำได้หลากหลายกระบวนการซึ่งกระบวนการที่นิยมทำได้แก่การทำ พอลิเมอร์เบลนด์ โดยผสมระหว่าง TPS กับ พอลิเมอร์ ที่มีความยืดหยุ่นสูง อาทิเช่น งานวิจัยของ González และคณะ [15] ได้นำเอา TPS ไปทำ พอลิเมอร์เบลนด์ กับ waxy starch nanocrystals (WSNC) พบว่า WSNC ช่วยทำให้ค่า impact strength เพิ่มสูงขึ้น ในงานวิจัยของ Rodriguez-Gonzalez และคณะ [16] ได้มีการทำ พอลิเมอร์เบลนด์ ระหว่าง TPS กับ high performance LDPE พบว่า ค่า elongation at break ของ พอลิเมอร์เบลนด์ มีค่าที่มากกว่า pure TPS

อีกหนึ่งปัญหาที่สำคัญของ TPS คือการมีความว่องไวต่อความชื้นที่สูง [12] ดังนั้นในการปรับปรุงสมบัติการต้านทานต่อความชื้นของแป้งให้ดียิ่งขึ้น มีอยู่หลากหลายวิธีเช่นการทำ modification โดยการเปลี่ยน hydroxyl group ให้กลายเป็นหมู่ฟังก์ชันอื่นที่ไม่ว่องไวต่อความชื้น ซึ่งจากงานวิจัยของ Da Róz และคณะ [17] ได้มีการทำการใช้ ascorbic acid และ citric acid มาทำการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของ TPS ในระหว่างกระบวนการ melt blending ซึ่งจากผลการทดสอบการดูดซับความชื้นของชิ้นงานพบว่า TPS ที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมี จะมีการดูดซับความชื้นที่ต่ำลง หรืออีกวิธีที่นิยมทำในการปรับปรุงความต้านทานการดูดซับความชื้นของ TPS ได้แก่ การผสมสารจำพวก hydrophobic กับ TPS เข้าด้วยกัน ซึ่งจากงานวิจัยของ Ferri และคณะ [18] ได้มีการผสมพอลิเมอร์เบเลนส์ระหว่าง PLA/TPS เข้ากับ maleinized linseed oil (MLO) ซึ่งจากผลการทดสอบของ water contact angle ของชิ้นงานที่เป็นการผสมระหว่าง TPS/MLO พบว่ามีค่า contact angle ที่สูงกว่าชิ้นงาน TPS

2.2 Polycaprolactone (PCL)

polycaprolactone (PCL) หรือ (1,7)-polyoxepan-2-one จัดเป็น semi crystalline polymer ประเภท aliphatic polyester ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของ PCL สามารถแสดงดังรูป 2.2

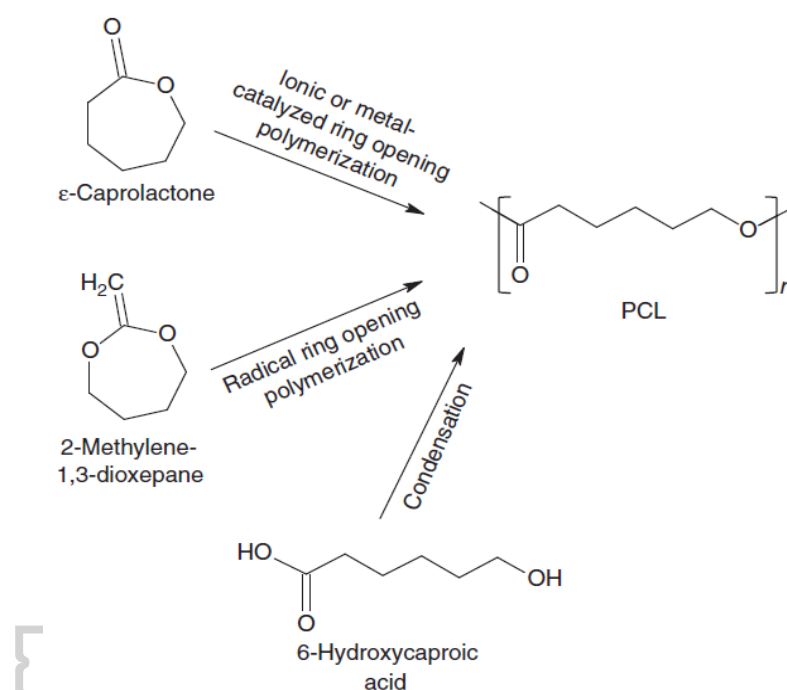


รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ PCL [3]

ตารางที่ 2.2 ชื่อทางการค้า (trade name) ของ PCL [19]

บริษัท	Trade name
The dow chemical.	Tone™
Perstorp Polyols, Inc.	CAPA®
Chemtura.	Vibrathane®
Orfit Industries NV.	Orflight®
Daicel chemical industries	Celgreen PH และ Placcel®
Ethicon Inc (USA)	Monocryl™

โดยทั่วไปแล้ว PCL สามารถสังเคราะห์ได้จาก monomer ผ่านกระบวนการ metal catalyzed ring-opening polymerization (ROP) ของ cyclic monomer ϵ -caprolactone [19] หรือ จากงานวิจัยของ Natta และคณะ [20] ได้ทำการสังเคราะห์ PCL ผ่านกระบวนการ radical ring-opening polymerization (RROP) ของ 2-methylene-1,3-dioxepane (MDO) รวมถึง งานวิจัยของ Grobelny และคณะ [21] ที่ทำการสังเคราะห์ PCL ผ่านกระบวนการ condensation polymerization ของ 6-hydroxycaproic acid



รูปที่ 2.3 วิธีการ polymerization ของ PCL ในรูปแบบต่าง ๆ [20]

ตารางที่ 2.3 สมบัติโดยทั่วไปของ PCL [2, 21]

สมบัติ	ค่า
Number average molecular weight (\bar{M}_n)	530-630000
Density ($\rho/g\text{ cm}^{-3}$)	1.071-1.200
Glass transition temperature ($^{\circ}\text{C}$)	-65 ถึง -60
Melting temperature ($^{\circ}\text{C}$)	56-65
Decomposition temperature ($^{\circ}\text{C}$)	350
Inherent viscosity ($\eta_{inh}/\text{cm}^3\text{ g}^{-1}$)	100-130
Inherent viscosity ($\eta/\text{cm}^3\text{ g}^{-1}$)	0.9
Tensile strength (MPa)	4-785
Young's modulus (GPa)	0.21-0.44
Elongation at break (%)	20-1000

จากสมบัติเชิงกลที่แสดงในตารางที่ 2.3 พบว่า PCL เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติที่โดดเด่นคือ มีความยืดหยุ่นที่สูง (high flexibility) ซึ่งจากงานวิจัยของ Gupta และคณะ [22] ได้ทำการขึ้นรูป nanofiber พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA และ PCL ซึ่งจากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 พบว่า เมื่อปริมาณของ PCL ในสัดส่วนการผสมพอลิเมอร์เบลนด์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า elongation at break ของพอลิเมอร์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตาม จากสมบัติดังกล่าวทำให้ PCL ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมอย่างหลากหลาย เช่น การนำไปใช้เพื่อปรับปรุงความเปราะของวัสดุให้ดียิ่งขึ้น [23]

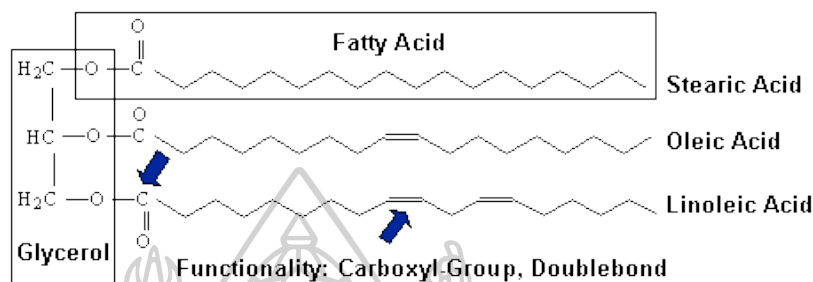
ตารางที่ 2.4 สมบัติเชิงกลของ nanofiber polymer blend ระหว่าง PLA และ PCL [22]

Sample	Tensile Stress at		
	Modulus (MPa) \pm SD	Maximum Load (MPa) \pm SD	Elongation at Break (%) \pm SD
PLA	22.23 \pm 2.01	4.13 \pm 0.11	28.67 \pm 4.51
PLA ₈₀ PCL ₂₀	19.51 \pm 1.78	1.64 \pm 0.21	66 \pm 6.56
PLA ₆₀ PCL ₄₀	16.14 \pm 2.12	1.60 \pm 0.2	83.33 \pm 10.07
PLA ₄₀ PCL ₆₀	12.5 \pm 2.45	1.42 \pm 0.22	102 \pm 10.54
PLA ₂₀ PCL ₈₀	6.33 \pm 1.18	1.58 \pm 0.22	135 \pm 7.94
PCL	3.90 \pm 0.62	2.42 \pm 0.24	214.67 \pm 11.5

นอกจากสมบัติด้านความยืดหยุ่นแล้ว PCL ยังมีลักษณะที่เป็น hydrophobic polymer การมีอุณหภูมิในการหลอมขึ้นรูปที่ต่ำ (melt temperature) และเป็นพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายตัวทางธรรมชาติ (biodegradability) [21]

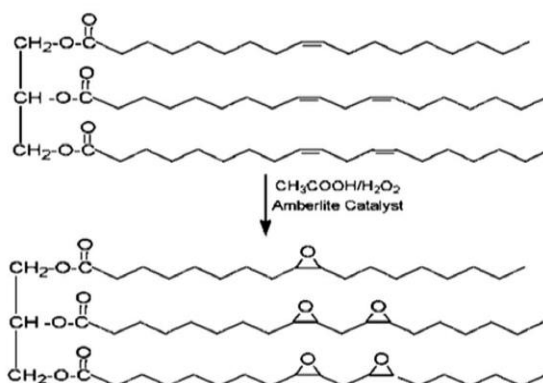
2.3 Vegetable oil

vegetable oil เป็นสารจำพวก triglyceride ที่สามารถสกัดได้จากพืชโดยมีลักษณะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง ภายในโมเลกุลของ vegetable oil จะประกอบด้วยโมเลกุลของ glycerol ต่อเชื่อมอยู่กับโมเลกุลของ กรดไขมัน (fatty acid) 3 โมเลกุลดังแสดงใน รูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ triglyceride [8]

โดยที่โมเลกุลของกรดไขมัน (fatty acid) สามารถเป็นได้ทั้งชนิดอิ่มตัว (saturated) หรือชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated) กรดไขมันชนิดอิ่มตัวภายในโครงสร้างทางเคมีจะประกอบด้วยพันธะเดี่ยว (single bond) ที่เชื่อมระหว่างคาร์บอนอะตอม ในขณะที่กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวภายในโครงสร้างทางเคมีจะประกอบด้วยพันธะเดี่ยว (single bond) และพันธะคู่ (double bond) ที่เชื่อมระหว่างคาร์บอนอะตอม ตำแหน่งที่เป็นจุดไม่อิ่มตัวในโครงสร้างของกรดไขมันคือตำแหน่งของพันธะคู่ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ขึ้นได้ จึงมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาของกรดไขมันเช่นงานวิจัยของ Adhvaryu และคณะ [24] ทำการสังเคราะห์ epoxidized soybean oil (ESO) โดยการทำให้ปฏิกิริยาระหว่าง soy bean oil (SO) และสารประกอบ per-acid โดยแสดงไว้ในรูปที่ 2.5 จากผลการทดลองจะพบว่า ESO ที่สังเคราะห์ได้สามารถใช้เป็นสารจำพวก lubricant ที่ใช้งานได้ในสภาวะอุณหภูมิสูงได้



รูปที่ 2.5 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างส่วนของ fatty acid ใน soy bean oil กับ สารประกอบ per-acid โดยใช้ amberlite เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [24]

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ ในน้ำมันพืชแต่ละชนิด [25]

	Double bonds	Fatty acid composition (%)					Iodine value (mg/100 g)
		C 16:0	C 18:0	C 18:1	C 18:2	C 18:3	
Castor	3.0	2.0	1.0	7.0	3.0	0.5	81–91
Corn	4.5	10.9	2.0	25.4	59.6	1.2	118–128
Linseed	6.6	6.0	4.0	22.0	16.0	52.0	>177
Olive	2.8	9.0	2.7	80.3	6.3	0.7	76–88
Palm	1.7	44.4	4.1	39.3	10.0	0.4	50–55
Soybean	4.6	10.6	4.0	23.3	53.7	7.6	123–139
Rapeseed	3.8	3.8	1.2	18.5	14.5	11.0	100–115
Sunflower	4.7	7.0	4.5	18.7	67.5	0.8	125–140
Canola	3.9	4.0	1.8	60.9	21.0	8.8	100–115
Cottonseed	3.9	21.6	2.6	18.6	54.4	0.7	98–118
Peanut	3.4	11.1	2.4	46.7	32.0	-	84–100

^a From 2003 to 2004. MMT, million metric tons.

2.4 พอลิเมอร์เบลนด์

พอลิเมอร์เบลนด์ คือการนำ พอลิเมอร์ ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาทำการผสมกันโดยใช้กระบวนการต่าง ๆ เช่น กระบวนการขึ้นรูปด้วยแรงเฉือนและความร้อน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วพอลิเมอร์เบลนด์ สามารถจำแนกได้เป็น 2 จำพวกใหญ่ ๆ คือ miscible blend และ immiscible blend [26] โดยที่ลักษณะของ miscible blend คือพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันไม่สามารถระบุลักษณะของ ภูมิภาคโดยใช้เทคนิคทางสัณฐานวิทยาได้ ส่วน immiscible blend นั้นจะสามารถระบุลักษณะของ ภูมิภาคของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกันได้โดยเทคนิคทางสัณฐานวิทยา [27, 28] โดยส่วนมากแล้วพอลิเมอร์เบลนด์จะเป็นแบบ immiscible blend ซึ่งทำให้สมบัติของ พอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแต่ละ phase, ความหนืดของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน และกระบวนการในการขึ้นรูปที่ใช้ [29]

การระบุว่าพอลิเมอร์เบลนด์เกิดการผสมแบบใดสามารถอธิบายได้โดยใช้สมการทาง thermodynamic ของการผสม [30, 31] ดังแสดงด้านล่างนี้

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T\Delta S_{\text{mix}} \quad (1)$$

โดยที่ ΔG_{mix} = การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการผสม (energy of mixing)

ΔH_{mix} = การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการผสม (enthalpy of mixing)

ΔS_{mix} = การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการผสม (entropy of mixing)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature)

จากสมการของการผสมจะพบว่าถ้าหาก ΔG_{mix} มีค่าเป็นลบจะเกิดการผสมแบบ miscible blend และถ้า ΔG_{mix} มีค่าเป็นบวกจะเกิดการผสมแบบ immiscible blend โดยส่วนมากแล้ว การผสมพอลิเมอร์ซึ่งเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ๆ เข้าด้วยกันมักจะทำให้ค่าของ ΔS_{mix} มีค่าน้อยมาก ๆ เนื่องจากจำนวนในการจัดเรียงตัวในรูปแบบต่าง ๆ ในลักษณะที่โมเลกุลเป็นสายโซ่นั้นมีจำนวนน้อยส่งผลทำให้ความไม่เป็นระเบียบมีค่าน้อยตามไปด้วย ดังนั้นเมื่อพจน์หลังของสมการดังกล่าวมีค่าน้อยมาก ๆ จึงทำให้ ΔG_{mix} มีค่าเป็นบวกเสมอ แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์เบลนด์ส่วนมากมักเกิดลักษณะการผสมแบบ immiscible blend [29]

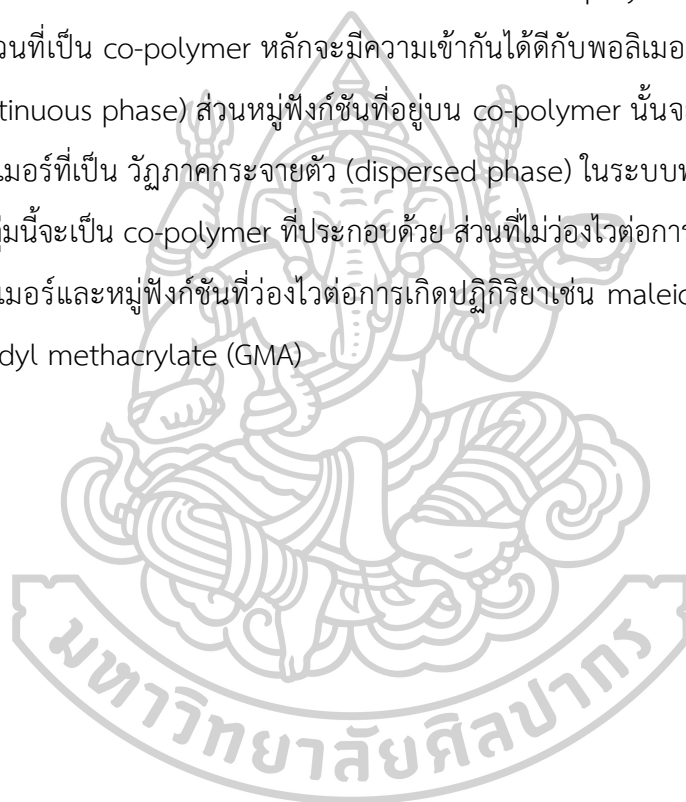
2.5 กระบวนการปรับปรุงความเข้ากันได้ (compatibilization methods)

กระบวนการปรับปรุงความเข้ากันได้ (compatibilization methods) คือการที่ทำให้พอลิเมอร์เบลนด์มีความสามารถในการผสม (miscibility) ให้ดียิ่งขึ้นโดยใช้สารที่เรียกว่า สารเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer) เติมลงในพอลิเมอร์เบลนด์ในระหว่างกระบวนการผสมโดยหน้าที่ของ compatibilizer จะมีอยู่ 3 เป้าหมายหลัก ได้แก่ [32]

1. เข้าไปปรับปรุง interfacial tension ระหว่าง ภูมิภาคของพอลิเมอร์ทั้งสองให้ดียิ่งขึ้น
2. ทำให้การเกิดลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์มีความเสถียรมากขึ้น
3. เพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างภูมิภาค ในสภาวะที่พอลิเมอร์เบลนด์แข็งตัวแล้ว ทำให้ความเค้น (stress) ที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานเกิดการถ่ายโอนได้อย่างสะดวกยิ่งขึ้น

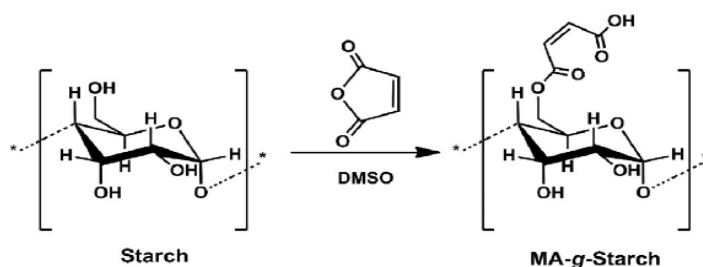
โดย compatibilization methods สามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธีการ [33] ได้แก่

1. การเติมส่วนผสมที่สามารถเข้าไปในระบบการผสม เช่น co-solvent ของพอลิเมอร์ทั้งสอง
2. การเติม co-polymer ส่วนหนึ่งของโครงสร้าง miscible blend ให้ phase หนึ่ง และอีก ส่วนหนึ่งของโครงสร้าง miscible blend ในอีก phase หนึ่งของพอลิเมอร์เบลนด์หลักการ คล้ายกับการสร้างสะพานเชื่อมให้แต่ละวัฏภาคเชื่อมถึงกัน
3. การเติมสารที่ทำให้หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์เบลนด์ทั้งสองชนิดสามารถเกิดปฏิกิริยากับ สาร นั้นได้โดยส่วนมากแล้วสารจำพวกนี้จะมีลักษณะเป็น co-polymer โดยจะมีลักษณะพิเศษ คือส่วนที่เป็น co-polymer หลักจะมีความเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ที่เป็น วัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) ส่วนหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บน co-polymer นั้นจะสามารถเข้ากันได้ดีกับ พอลิเมอร์ที่เป็น วัฏภาคกระจายตัว (dispersed phase) ในระบบพอลิเมอร์เบลนด์ ซึ่งสาร ในกลุ่มนี้จะเป็น co-polymer ที่ประกอบด้วย ส่วนที่ไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาซึ่งได้แก่ตัว พอลิเมอร์และหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเช่น maleic anhydride (MA) และ glycidyl methacrylate (GMA)



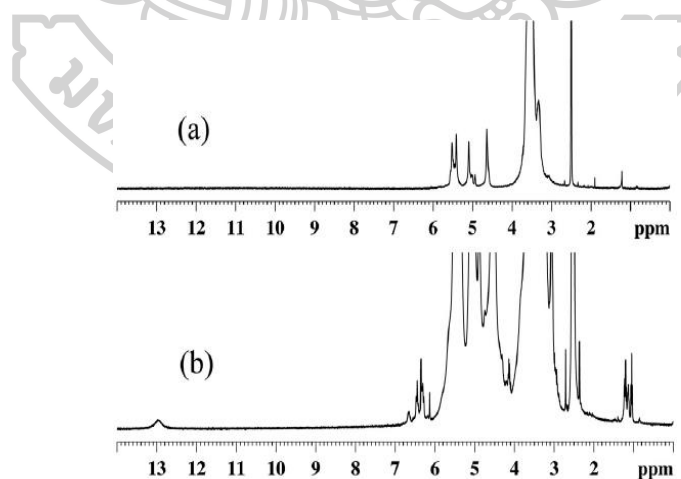
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yang และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง thermoplastic starch (TPS) และ polylactic acid (PLA) โดยทำการดัดแปลงโครงสร้างทางเคมีของ starch ด้วย maleic anhydride (MA) และ dimethyl sulfoxide (DMSO) ซึ่งทางผู้วิจัยได้เสนอปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นแสดงใน รูปที่ 2.6



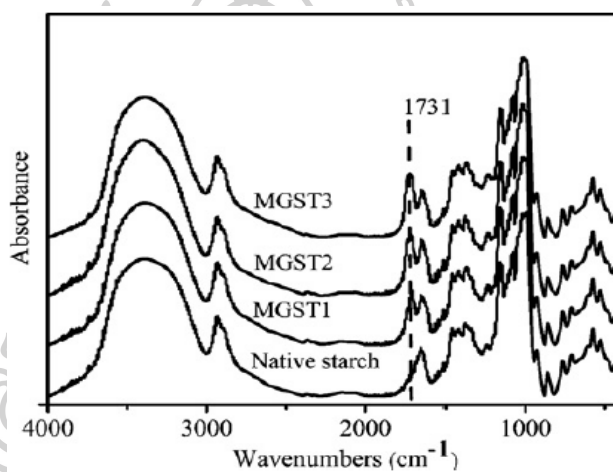
รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาการดัดแปลงโครงสร้างทางเคมีของ starch โดยใช้ MA และ DMSO [4]

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารผลิตภัณฑ์ที่ใช้เทคนิค $^1\text{H-NMR}$ แสดงใน รูปที่ 2.7 จะพบว่า starch ที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับ MA จะพบ peak $^1\text{H-NMR}$ signal เกิดขึ้นใหม่ที่ตำแหน่ง 13 ppm ซึ่งแสดงถึงโปรตอนของ carboxyl group ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของ starch และมี peak เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 6.1-6.6 ppm ซึ่งแสดงถึง proton ที่ติดอยู่กับ double bond ของ MA ซึ่งเป็นสิ่งยืนยันว่า MA เกิดการ graft ติดบนโครงสร้างทางเคมีของ starch



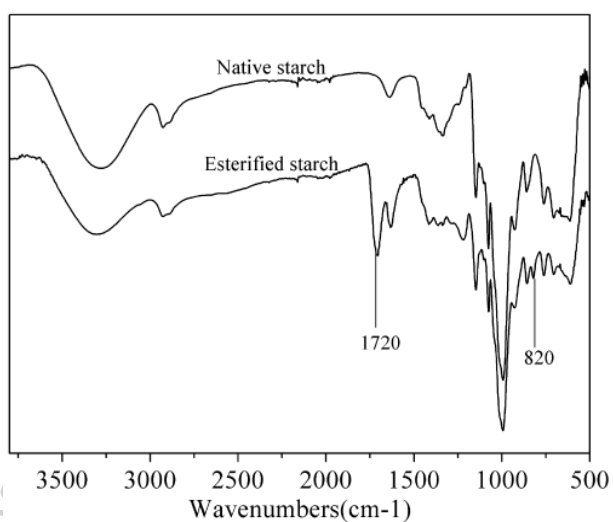
รูปที่ 2.7 ผลการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ของ (a) starch, (b) starch-g-MA [4]

จากงานวิจัยของ Xiong และคณะ [34] ได้รายงานผลศึกษาการผสมระหว่าง PLA และ modified TPS โดยมีการใช้ epoxidized soybean oil เป็น plasticizer เริ่มจากการศึกษาการ modified starch โดยใช้ maleic anhydride (MA) ปริมาณตั้งแต่ 2.6-8.0 กรัมทำปฏิกิริยากับ starch ใช้ตัวกลางในการทำปฏิกิริยาก็คือสารผสมระหว่าง di-methylacetamide (DMAc) และ toluene จากผลการทดสอบ FTIR ของผลิตภัณฑ์ซึ่งแสดงใน รูปที่ 2.8 พบว่า starch จะไม่มีการเกิด peak ของ carbonyl group (C=O) ขึ้นที่ตำแหน่ง 1731 cm^{-1} ในขณะที่ modified starch จะพบ peak ของ C=O ขึ้นที่ตำแหน่ง 1731 cm^{-1} และพบว่าค่า intensity เพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณของ MA เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงระดับของการแทนที่ (degrees of substitution, DS) hydroxyl group ภายในโครงสร้างของ starch ที่เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.8 ผลการทดสอบ FTIR ของ starch และ modified starch ที่ใช้ปริมาณ MA ต่างกัน [34]

จากงานวิจัยของ Yingfeng และคณะ [35] ได้รายงานผลการศึกษาการสังเคราะห์ modified starch จาก starch โดยทำปฏิกิริยากับ MA ในสภาวะแห้ง จากผลการทดสอบ FTIR ดังแสดงใน รูปที่ 2.9 พบว่า modified starch มีการเกิด peak การดูดกลืนแสงใหม่ที่ 1720 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึง peak C=O stretching ของ functional group ประเภท ester อีกทั้งยังมีการเกิด peak ใหม่ที่ 820 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึง butyl absorption peak จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง hydroxyl group (-OH) กับ maleic anhydride (MA)



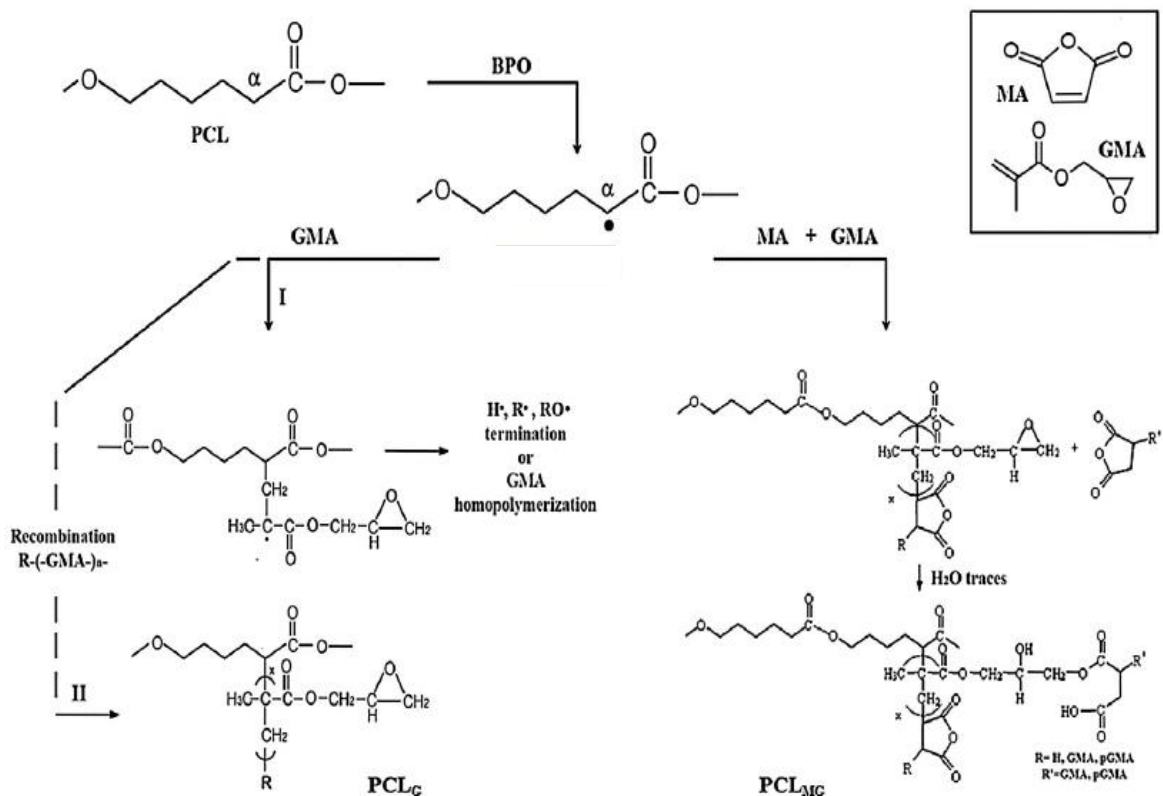
รูปที่ 2.9 ผลการทดสอบ FTIR ระหว่าง starch และ modified starch [35]



จากงานวิจัยของ Rodrigo และคณะ [36] การศึกษาแนวทางการเพิ่ม interfacial adhesion ระหว่าง TPS และ PCL โดยทำการดัดแปลงโครงสร้างทางเคมีของ PCL โดยใช้ maleic anhydride (MA) และ glycidyl methacrylate (GMA) ทำปฏิกิริยากับ PCL โดยใช้การผสมแบบ melt blending ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีสามารถแสดงใน รูปที่ 2.10

แนวทางแรก เริ่มจากการสร้าง radical ขึ้นมาในโครงสร้าง PCL โดยใช้ benzoyl peroxide (BPO) หลังจากนั้นให้ทำปฏิกิริยากับ GMA เพียงอย่างเดียวจะทำให้ PCL ที่ได้มีโครงสร้างที่มี oxirane ring เกิดขึ้นในโครงสร้างเรียกว่า PCL_G

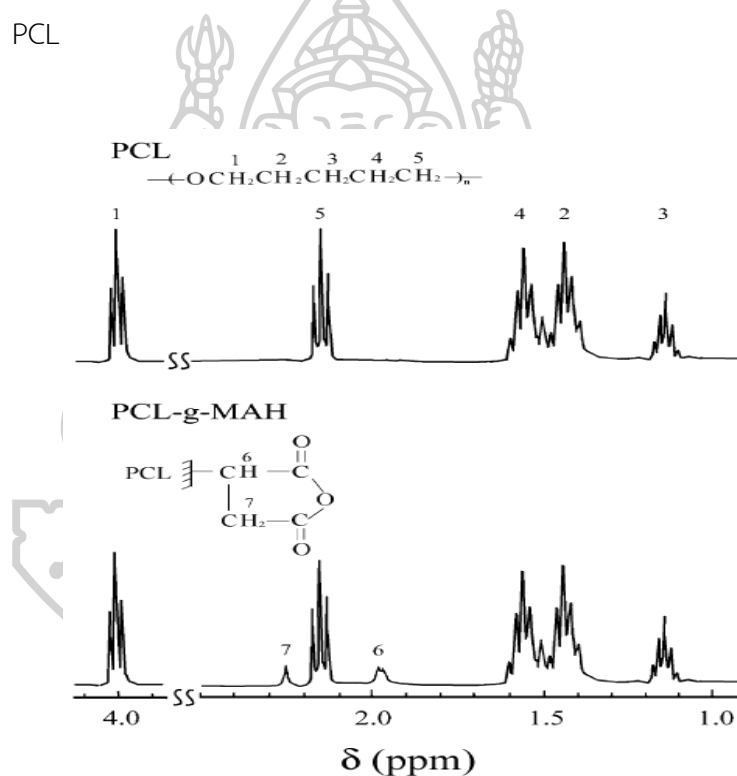
แนวทางที่สอง เริ่มจากการสร้าง radical ขึ้นมาในโครงสร้างของ PCL โดยใช้ benzoyl peroxide (BPO) หลังจากนั้นให้ทำปฏิกิริยากับทั้ง MA และ GMA จะทำให้ PCL ที่ได้มีโครงสร้างที่มี MA graft ติดอยู่บนสายโซ่โมเลกุลของ PCL เรียกว่า PCL_{MG}



รูปที่ 2.10 กลไกของการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง PCL, maleic anhydride (MA) และ glycidyl methacrylate (GMA) [36]

โดยพบว่าค่า water vapour transmission rate (WVTR) ของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS และ PCL unmodified มีค่าเท่ากับ $16.5 \text{ g/m}^2 \text{ day bar}$ ในขณะที่แผ่นฟิล์ม TPS ที่ผสมกับ PCL modified มีค่าเท่ากับ $6.9 \text{ g/m}^2 \text{ day bar}$ เนื่องมาจาก interfacial adhesion ระหว่าง TPS และ PCL ที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ค่าของ water vapour transmission rate (WVTR) มีค่าที่ลดต่ำลง

Wu [7] ได้ทำการดัดแปลงหมู่โครงสร้างของ PCL โดยใช้ maleic anhydride (MA) ด้วยวิธีการ melt blending จากผลการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ แสดงใน รูปที่ 2.11 พบว่า modified PCL จะมี peak สัญญาณ proton เกิดขึ้นใหม่ที่ตำแหน่ง 1.8-2.0 ppm และที่ตำแหน่ง 2.2-2.4 ppm ซึ่งทางผู้วิจัยได้อธิบายว่าเป็น peak ของ proton ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของ MA ที่ graft ติดอยู่บนสายโซ่โมเลกุลของ PCL



รูปที่ 2.11 ผลการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ของ PCL และ modified PCL [7]

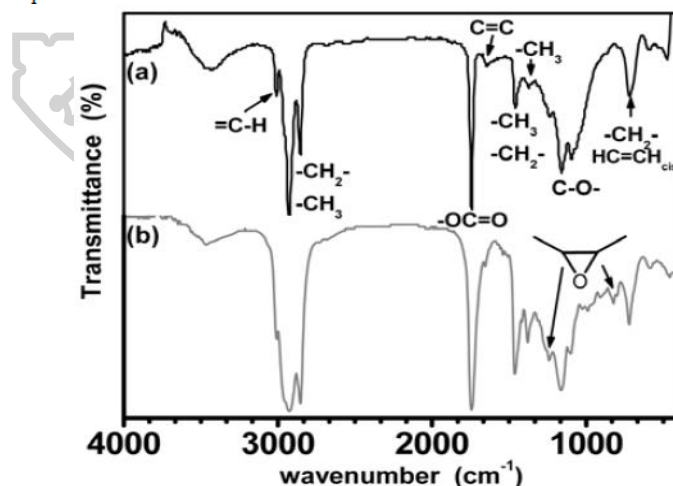
Viguera และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระดับการเกิดปฏิกิริยา epoxidation ของ linseed oil โดยทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ ปริมาณ peroxide และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองดังแสดงใน ตารางที่ 2.6 โดยพบว่าที่อุณหภูมิในช่วง 44-46 °C ปริมาณ peroxide เท่ากับ 1.2 กรัม และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.3 กรัมจะทำให้ได้ epoxidized oil ที่มี % ของ epoxide group สูงที่สุด จากผลการทดสอบ FTIR ในรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นถึงการเกิด peak การดูดกลืนใหม่ที่ 1250 cm^{-1} แสดงถึง C-O-C stretching ของ epoxide group และ ที่ 830 cm^{-1} แสดงถึง C-O-C bending ของ epoxide group เมื่อเปรียบเทียบกับ linseed oil ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา epoxidation พบว่าไม่มี peak เอกลักษณ์เกิดขึ้นที่ 1250 cm^{-1} และ 830 cm^{-1}

ตารางที่ 2.6 สภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ ELO แบบต่าง ๆ และเปอร์เซ็นต์การเกิดปฏิกิริยา epoxidation [8]

Sample	Synthesis			H ¹ NMR characterization		
	Epoxide	Temperature (°C)	Peroxide (g)	Lipase B (g)	Epoxidation percentage	Number of epoxy groups per molecule
LO	-	-	-	-	0	0
ELO_1		44-46	0.70 ^a	0.10	8	0.5
ELO_2		48-50	1.2 ^b	0.14	20	1.3
ELO_3		44-46	1.2 ^b	0.14	35	1.9
ELO_4		40-42	0.8 ^{ba}	0.14	40	2.5
ELO_5		44-46	1.0 ^a	0.14	47	3.0
ELO_6		44-46	1.2 ^b	0.30	54	3.4

^a Peroxide aqueous solution at 50%

^b Peroxide aqueous solution at 30%



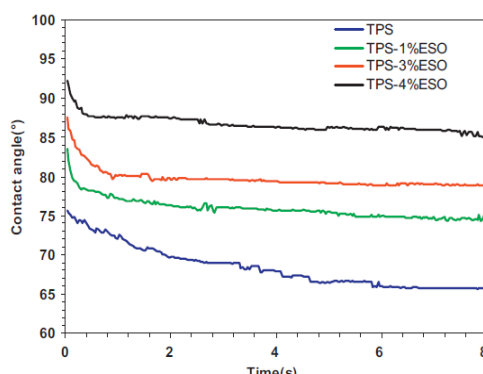
รูปที่ 2.14 ผลการทดสอบ FTIR ของ (a) linseed oil (b) epoxidized linseed oil [8]

Mahieu และ คณะ [1] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลของการผสมระหว่าง PCL และ TPS โดยใช้ PCL ที่น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยแตกต่างกัน 2 ชนิดคือ 37,000 g/mol (PCL37) และ 50,000 g/mol (PCL50) จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมในตารางที่ 2.7 พบว่า TPS ปกติมีค่า elongation at break อยู่ที่ 150% ส่วน PCL37 และ PCL50 มีค่า elongation at break อยู่ที่ 900% และ 1500% ตามลำดับ เมื่อทำการผสมเป็นพอลิเมอร์เบลนด์ พบว่าค่า elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์กลับมีค่าลดลงซึ่งทางผู้วิจัยอธิบายเกี่ยวกับลักษณะของ TPS ว่ามีลักษณะเป็น hydrophilic ในขณะที่ PCL มีลักษณะเป็น hydrophobic ทำให้เกิดการผสมที่ไม่ดีขึ้น ดังนั้นเมื่อผสม PCL ลงไปจึงเกิดการรวมกันเป็นกลุ่มมากกว่าที่จะกระจายตัวอยู่ใน TPS matrix ส่งผลทำให้ค่า elongation at break ลดต่ำลง

ตารางที่ 2.7 สมบัติเชิงกลของ TPS, PCL37, PCL50, TPS/PCL blend [1]

	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
TPS	2.0±0.1	150±9
TPS/PCL37	2.3±0.1	24±2
TPS/PCL50	5.0±0.4	56±5
PCL37	23±3	900±90
PCL50	46±3	1500±90

Ramzi และ คณะ [38] ทำการศึกษาการผสมพอลิเมอร์แบบ reactive blending ระหว่าง TPS และ epoxidized soybean oil (ESO) จากผลการทดสอบ water contact angle ในรูปที่ 2.15 พบว่าเมื่อมีปริมาณของ ESO ที่ผสมลงใน TPS เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ค่า contact angle มีค่าเพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นถึงว่า TPS มีความเป็น hydrophobic ที่เพิ่มมากขึ้น ทางผู้วิจัยได้อธิบายว่า ESO มีองค์ประกอบที่มีจำนวนของคาร์บอนอะตอมในสายโซ่โมเลกุลที่ค่อนข้างยาวดังนั้นเมื่อเข้าไปผสมกับ TPS จึงป้องกันการดูดซับน้ำของ TPS



รูปที่ 2.15 ผลการทดสอบ water contact angle ของตัวอย่าง TPS ที่มีปริมาณการเติม ESO ต่าง

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้

- 3.1.1 แป้งมันสำปะหลัง (cassava starch) เกรด food grade จาก บริษัท Siam Modified Starch Co. Ltd.
- 3.1.2 พอล리카รโพรแลคโตน (polycaprolactone, PCL) มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (\bar{M}_n) เท่ากับ 80,000 g/mol จาก บริษัท Solvay Interlox Pty Ltd
- 3.1.3 น้ำมันลินสีด (linseed oil) เกรด refined จาก บริษัท Winsor & Newton
- 3.1.4 น้ำมันปาล์ม (palm oil) เกรด food grade จาก บริษัท ลำสูง (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)
- 3.1.5 Maleic anhydride (MA) เกรด AR grade ความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ จาก บริษัท ACROS ORGANICS
- 3.1.6 Dicumyl peroxide เกรด AR grade ความบริสุทธิ์ 98 เปอร์เซ็นต์ จาก บริษัท Merck Ltd.
- 3.1.7 Formic acid เกรด AR grade ความบริสุทธิ์ 90 เปอร์เซ็นต์ จาก บริษัท Ajax finechem Pty Ltd
- 3.1.8 Hydrogen peroxide เกรด AR grade ความบริสุทธิ์ 30 เปอร์เซ็นต์ จาก บริษัท Chem-supply Pty Ltd
- 3.1.9 Sulfuric acid เกรด AR grade ความบริสุทธิ์ 98 เปอร์เซ็นต์ จาก บริษัท คิว เคมีคอล จำกัด (Qchemical Co. Ltd)
- 3.1.10 Magnesium nitrate hexahydrate เกรด AR grade ความบริสุทธิ์ 99.5 เปอร์เซ็นต์ จาก บริษัท คิว เคมีคอล จำกัด (Qchemical Co.,Ltd)
- 3.1.11 Glycerol เกรด AR grade ความบริสุทธิ์ 99.5 เปอร์เซ็นต์ จาก บริษัท คิว เคมีคอล จำกัด (Qchemical Co. Ltd)
- 3.1.12 Toluene เกรด AR grade ความบริสุทธิ์ 98 เปอร์เซ็นต์ จาก บริษัท คิว เคมีคอล จำกัด (Qchemical Co. Ltd)

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

- 3.2.1 เครื่องผสมภายในแบบปิด (internal mixer) รุ่น 815803 จากบริษัท Brabender Technologie GmbH & co. KG ประเทศเยอรมัน
- 3.2.2 เครื่องกดอัดขึ้นรูป (compression molding) รุ่น LP20-B จากบริษัท Labtech Engineering co.ltd ประเทศไทย
- 3.2.3 เครื่องบด (grinder) รุ่น 2035 จากบริษัท Bosco Engineering co. Ltd ประเทศไทย

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์เอกลักษณ์และทดสอบสมบัติต่าง ๆ

- 3.3.1 Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) รุ่น vertex 70 จากบริษัท bruker optik gmbh ประเทศเยอรมัน
- 3.3.2 Nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR) รุ่น AVANCE III HD จากบริษัท bruker optik gmbh ประเทศเยอรมัน
- 3.3.3 Scanning electron microscope (SEM) รุ่น MIRA3 จากบริษัท TESCAN ORSAY HOLDING ประเทศเช็กโกสโลวาเกีย
- 3.3.4 X-ray diffractometer (XRD) รุ่น XRD-6100 จากบริษัท Shimadzu co. Ltd ประเทศ ญี่ปุ่น
- 3.3.5 Universal testing machine (UTM) รุ่น 5969 จากบริษัท Instron ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.3.6 Impact testing machine รุ่น CEAST 9050 จากบริษัท Instron ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การเตรียม thermoplastic starch graft maleic anhydride (TPS-g-MA)

เตรียมแป้งมันสำปะหลังซึ่งใส่ภาชนะปิดจำนวน 50 กรัม นำไปอบในตู้อบสุญญากาศ (vacuum oven) ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น ทำการเติม glycerol ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก และ maleic anhydride ปริมาณ 1 phr คลุกให้แป้ง glycerol และ maleic anhydride ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นนำมาทำ melt blending โดยใช้เครื่อง internal mixer ที่อุณหภูมิ 160 °C และ rotor speed 60 rpm เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมได้มาบดให้มีขนาดเล็กโดยใช้เครื่องบด (grinder) เพื่อเตรียมสำหรับการนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์ และ ผสมเป็นพอลิเมอร์เบลนด์ต่อไป

3.4.2 การเตรียม polycaprolactone graft maleic anhydride (PCL-g-MA)

เตรียม PCL ซึ่งใส่ภาชนะปิดจำนวน 50 กรัม นำไปอบในตู้อบสุญญากาศ (vacuum oven) ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น นำเม็ด PCL ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นมาทำ melt blending โดยใช้เครื่อง internal mixer พร้อมกับ maleic anhydride (MA) ปริมาณ 5 phr และ dicumyl peroxide (DCP) ปริมาณ 1 phr ที่อุณหภูมิ 160 °C และ rotor speed 40 rpm เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำ PCL ที่ผสมได้มาบดให้มีขนาดเล็กโดยใช้เครื่องบด (grinder) เพื่อเตรียมสำหรับการนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์ และ ผสมเป็นพอลิเมอร์เบลนด์ต่อไป

3.4.3 การเตรียม epoxidized oil (EO)

เตรียมน้ำมันปาล์มหรือน้ำมันลินสีดจำนวน 400 กรัม, toluene 200 กรัม, formic acid 47.2 กรัม, sulfuric acid 2 กรัม ใส่ลงไป ในขวด 3 คอ ที่มีการต่อกับชุดคอนเดนเซอร์ ทำการให้ความร้อนจนสารในขวด 3 คอ มีอุณหภูมิ 60 °C ทำการต่อ dropper funnel เข้ากับขวด 3 คอ พร้อมทั้งค่อย ๆ หยด hydrogen peroxide ปริมาณ 334.8 กรัม ลงไปในสารผสม อย่างช้า ๆ เมื่อทำการหยดเสร็จเรียบร้อยแล้วให้ทำการจับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาต่อไปอีก 6 ชั่วโมง สารที่สังเคราะห์ได้จะมีลักษณะเป็นของเหลว 2 ชั้น ลอยแยกออกจากกันซึ่งชั้นบนคือชั้นของน้ำมันพืชที่ผ่านการ epoxidized ได้ส่วนชั้นล่างคือชั้นของน้ำที่มีอยู่ในระบบ นำของเหลวใส่กรวยแยกแล้วไขเอาชั้นน้ำทิ้งออกไป หลังจากนั้นทำการเติมน้ำอุ่นลงไป ในกรวยแยกแล้วเขย่า ทิ้งไว้ให้สารเกิดการแยกชั้นกันอีกครั้ง หลังจากนั้นไขเอาชั้นน้ำทิ้งไปเหมือนเดิมทำซ้ำจนกว่าชั้น

น้ำมันพืชจะมี pH เท่ากับ 7 หลังจากชั้นน้ำมันพืชมีสถานะเป็นกลางแล้วให้ทำการเทใส่ขวดภาชนะที่ใช้บรรจุเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการนำไปผสมกับพอลิเมอร์เบลนด์ต่อไป

3.4.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ TPS-g-MA, PCL-g-MA และ EO

การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR ของ TPS-g-MA เริ่มจากนำ TPS-g-MA ที่เตรียมได้มาบดพร้อมกับผสม KBr ในสัดส่วน 1 ต่อ 9 ส่วน จะได้เป็น pellet ของ KBr หลังจากนั้นนำ pellet ดังกล่าวไปพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เทคนิค FTIR, resolution 4 cm^{-1} , ช่วง wave number ตั้งแต่ 400 ถึง 4000 cm^{-1} การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค $^1\text{H NMR}$ เริ่มจากนำ TPS-g-MA ที่เตรียมได้มาละลายในตัวทำละลายคือ DMSO- d_6 ในหลอดทดสอบ NMR หลังจากนั้นนำหลอด NMR ดังกล่าวไปพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เทคนิค $^1\text{H NMR}$ ความถี่ในการทดสอบ 300 MHz และ ช่วง chemical shift ในการทดสอบตั้งแต่ $0-13\text{ ppm}$

การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR ของ PCL-g-MA เริ่มจากนำ PCL-g-MA ที่เตรียมได้ละลายใน chloroform (CHCl_3) หลังจากนั้นนำสารละลายดังกล่าวหยดลงบน pellet ของ KBr นำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่ $60\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อระเหย chloroform ออก นำ pellet ดังกล่าวไปพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เทคนิค FTIR, resolution 4 cm^{-1} , ช่วง wave number ตั้งแต่ 400 ถึง 4000 cm^{-1} การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค $^1\text{H NMR}$ เริ่มจากนำ PCL-g-MA ที่เตรียมได้มาละลายในตัวทำละลายคือ CDCl_3 ในหลอดทดสอบ NMR หลังจากนั้นนำ หลอด NMR ดังกล่าวไปพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เทคนิค $^1\text{H NMR}$ ความถี่ในการทดสอบ 300 MHz และช่วง chemical shift ในการทดสอบตั้งแต่ $0-13\text{ ppm}$

การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR ของ EO เริ่มจากนำ EO ที่เตรียมได้หยดลงบน pellet ของ KBr หลังจากนั้นนำ pellet ดังกล่าวไปพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เทคนิค FTIR, resolution 4 cm^{-1} , ช่วง wave number ตั้งแต่ 400 ถึง 4000 cm^{-1} การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค $^1\text{H NMR}$ เริ่มจากนำ EO ที่เตรียมได้มาละลายในตัวทำละลายคือ CDCl_3 ในหลอดทดสอบ NMR หลังจากนั้นนำหลอด NMR ดังกล่าวไปพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เทคนิค $^1\text{H NMR}$ ความถี่ในการทดสอบ 300 MHz และช่วง chemical shift ในการทดสอบตั้งแต่ $0-13\text{ ppm}$

3.4.5 ขั้นตอนการเตรียม พอลิเมอร์เบลนด์

นำ TPS-g-MA และ PCL-g-MA มาผสมในสัดส่วนต่าง ๆ ในถุงพลาสติก เพื่อเป็นการ premix หลังจากนั้นทำการผสมในเครื่อง internal mixer พร้อมกับ epoxidized oil ในปริมาณต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 160 °C และ rotor speed 40 rpm เป็นเวลา 10 นาที โดยสัดส่วนการผสมต่าง ๆ จะแสดงใน ตารางที่ 3.1 นำพอลิเมอร์เบลนด์ที่เตรียมได้จากเครื่อง internal mixer ไปเข้าเครื่องบด (grinder) เพื่อให้มีขนาดที่เล็กลงสามารถใส่ในแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ได้ หลังจากนั้นนำพอลิเมอร์เบลนด์ที่บดให้มีขนาดเล็กแล้วไปขึ้นรูปต่อในเครื่อง compression molding ใช้สภาวะอุณหภูมิที่ 160 °C, เวลาในการ pre-heat 10 นาที, เวลาในการ pressing and venting 1 นาที, เวลาในการ full pressing 1 นาที และ เวลาในการ cooling 5 วินาที

ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิจัย

สัญลักษณ์	TPS-g-MA (% โดยน้ำหนัก)	PCL-g-MA (% โดยน้ำหนัก)	Compatibilizer (% โดยน้ำหนัก)	
			ELO	EPO
TPS-g-MA	100	0	0	0
TPS-g-MA-L5	100	0	5	0
10PCL	90	10	0	0
20PCL	80	20	0	0
30PCL	70	30	0	0
10PCL-L5	90	10	5	0
20PCL-L5	80	20	5	0
30PCL-L5	70	30	5	0
10PCL-L10	90	10	10	0
20PCL-L10	80	20	10	0
30PCL-L10	70	30	10	0

ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิจัย (ต่อ)

สัญลักษณ์	TPS-g-MA (% โดยน้ำหนัก)	PCL-g-MA (% โดยน้ำหนัก)	Compatibilizer (% โดยน้ำหนัก)	
			ELO	EPO
10PCL-P5	90	10	0	5
20PCL-P5	80	20	0	5
30PCL-P5	70	30	0	5
10PCL-P10	90	10	0	10
20PCL-P10	80	20	0	10
30PCL-P10	70	30	0	10

3.4.6 การศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์

นำชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ที่เตรียมได้มาหักในทิศทางหน้าตัดของชิ้นงานภายใต้สภาวะเย็นยิ่งยวดโดยใช้ไนโตรเจนเหลว (cryogenic fracture) จากนั้นนำชิ้นงานไปทำการเคลือบด้วย platinum ด้วยเครื่อง sputter เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสะสมของสนามไฟฟ้าสถิตบนชิ้นงานขณะทดสอบ นำชิ้นงานไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM โดยใช้ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 kV

3.4.7 การศึกษาโครงสร้างทางผลึกของพอลิเมอร์เบลนด์

นำพอลิเมอร์เบลนด์ตัดให้มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยมีด้านกว้าง 1 นิ้ว ยาว 3 นิ้ว นำชิ้นงานไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีเป็น Cu anode, ช่วงในการ scan 2 theta ตั้งแต่ 10 ถึง 30 องศา และ ความเร็วในการ scan คือ 2 องศา / นาที

3.4.8 การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์

นำชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จากการขึ้นรูปแบบ compression molding ซึ่งมีลักษณะเป็น micro tensile ตามมาตรฐาน ASTM D-638 type V ทำการทดสอบการดึงยึดด้วย universal testing machine (UTM) ด้วยอัตราเร็วในการดึง 10 mm/min และใช้ load cell ขนาด 5 kN ทำการบันทึกค่า Young's modulus, maximum tensile strength และ % elongation at break จากนั้นนำข้อมูลมาทำการหาค่าเฉลี่ย และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.4.9 การทดสอบความสามารถในการทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์เบลนด์

ชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จากการขึ้นรูปแบบ compression molding ซึ่งชิ้นงานเหล่านั้นจะมีลักษณะตามมาตรฐาน ASTM D-256 ทำการทดสอบด้วย impact testing machine โหมด Izod และ ใช้ค้อนที่มีน้ำหนัก 1 J ทำการบันทึกค่า impact strength จากนั้นนำข้อมูลมาทำการหาค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.4.10 การศึกษาสมบัติการดูดซับความชื้นของพอลิเมอร์เบลนด์

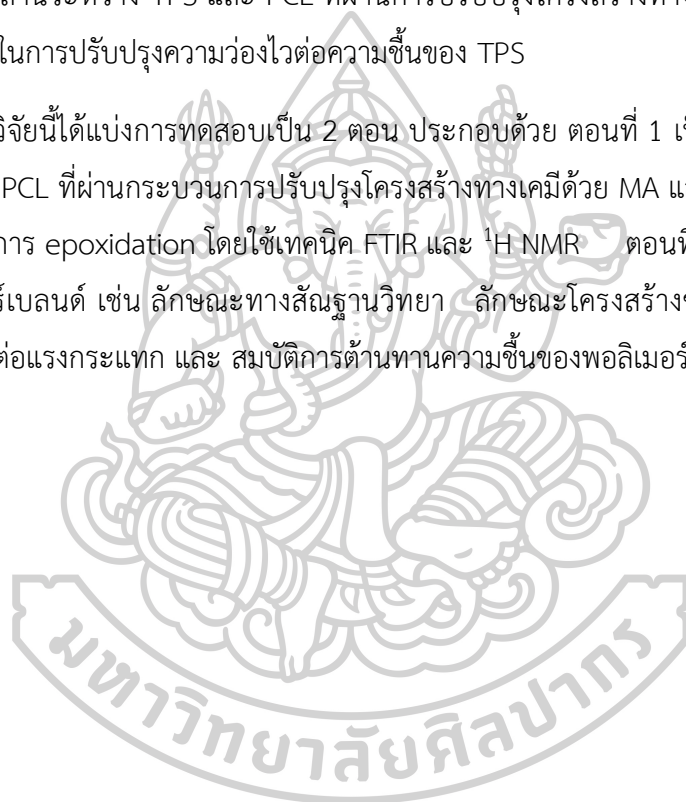
นำ magnesium nitrate hexahydrate ละลายน้ำจนเกิดเป็นสารละลายที่อิ่มตัวใน desiccator ที่อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเท่ากับ 25 °C หลังจากนั้นนำตะแกรงให้ลอยอยู่เหนือสารละลายที่อิ่มตัว นำชิ้นพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีลักษณะตามมาตรฐาน ASTM D-256 วางลงบนตะแกรงที่เตรียมไว้ ปิดฝา desiccator ให้เรียบร้อย และทำการชั่งน้ำหนักของพอลิเมอร์เบลนด์ที่เปลี่ยนแปลงไปทุกๆ 1 วัน เป็นเวลา 15 วัน

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลงานวิจัย

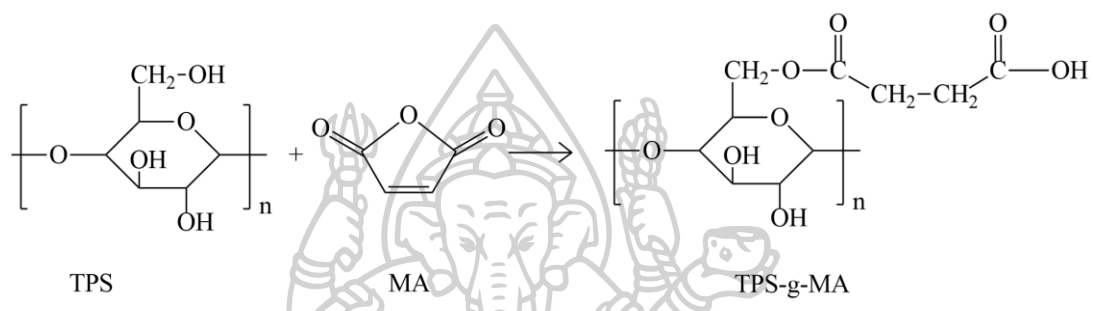
ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติความว่องไวต่อความชื้นของ thermoplastic starch (TPS) โดยทำการผสมกับ polycaprolactone (PCL) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง เนื่องจากความมีขั้วที่แตกต่างกันของ TPS และ PCL ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของ TPS และ PCL โดยใช้ maleic anhydride (MA) เพื่อปรับปรุงความมีขั้วให้ พอลิเมอร์ ทั้งสองชนิดมีขั้วใกล้เคียงกัน ในงานวิจัยนี้มีการใช้ epoxidized oil (EO) เป็นสารเชื่อมประสานระหว่าง TPS และ PCL ที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมี อีกทั้ง EO ยังมีความสามารถในการปรับปรุงความว่องไวต่อความชื้นของ TPS

โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดสอบเป็น 2 ตอน ประกอบด้วย ตอนที่ 1 เป็นการพิสูจน์เอกลักษณ์ของ TPS กับ PCL ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีด้วย MA และน้ำมันพืชที่สังเคราะห์ผ่านกระบวนการ epoxidation โดยใช้เทคนิค FTIR และ $^1\text{H NMR}$ ตอนที่ 2 เป็นการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ เช่น ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ลักษณะโครงสร้างของผลึก สมบัติเชิงกล ความทนทานต่อแรงกระแทก และ สมบัติการต้านทานความชื้นของพอลิเมอร์เบลนด์

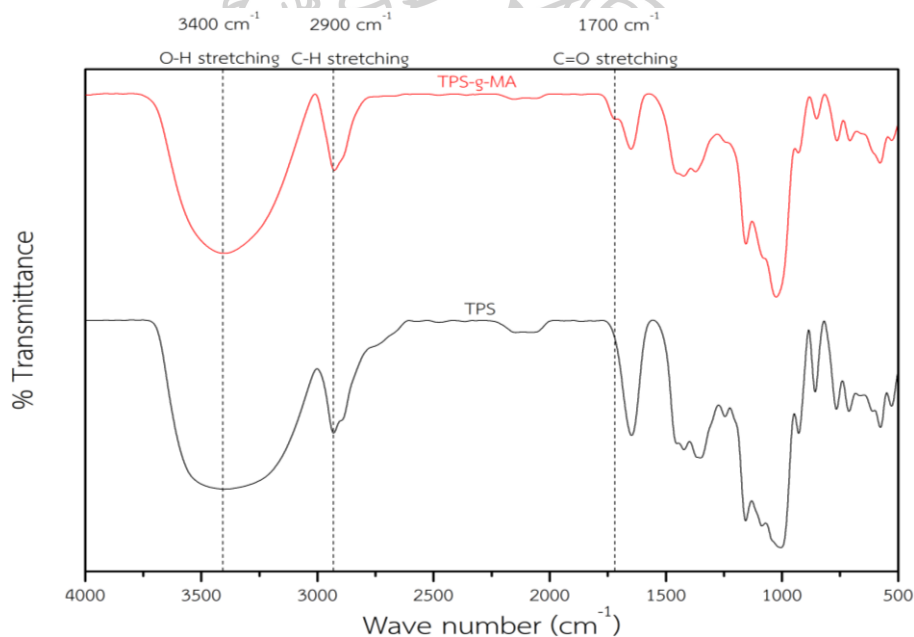


4.1 การเตรียม และการพิสูจน์เอกลักษณ์ของ thermoplastic starch graft maleic anhydride (TPS-g-MA)

TPS-g-MA สามารถเตรียมได้จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง TPS ซึ่งได้จากการนำเอาแป้งมันสำปะหลังมาผสมกับ glycerol ซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ทำให้ผลึกของแป้งแตกออก และช่วยลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังลงกับ maleic anhydride (MA) โดยมีการให้ความร้อนในเครื่อง internal mixer ซึ่งปฏิกิริยาของสารทั้งสองชนิดสามารถแสดงใน รูปที่ 4.1 โดย TPS จะมี hydroxyl group ซึ่งเป็นตำแหน่งที่สามารถเกิดปฏิกิริยา esterification กับ MA ได้



รูปที่ 4.2 สมการเคมีแสดงการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง TPS และ MA

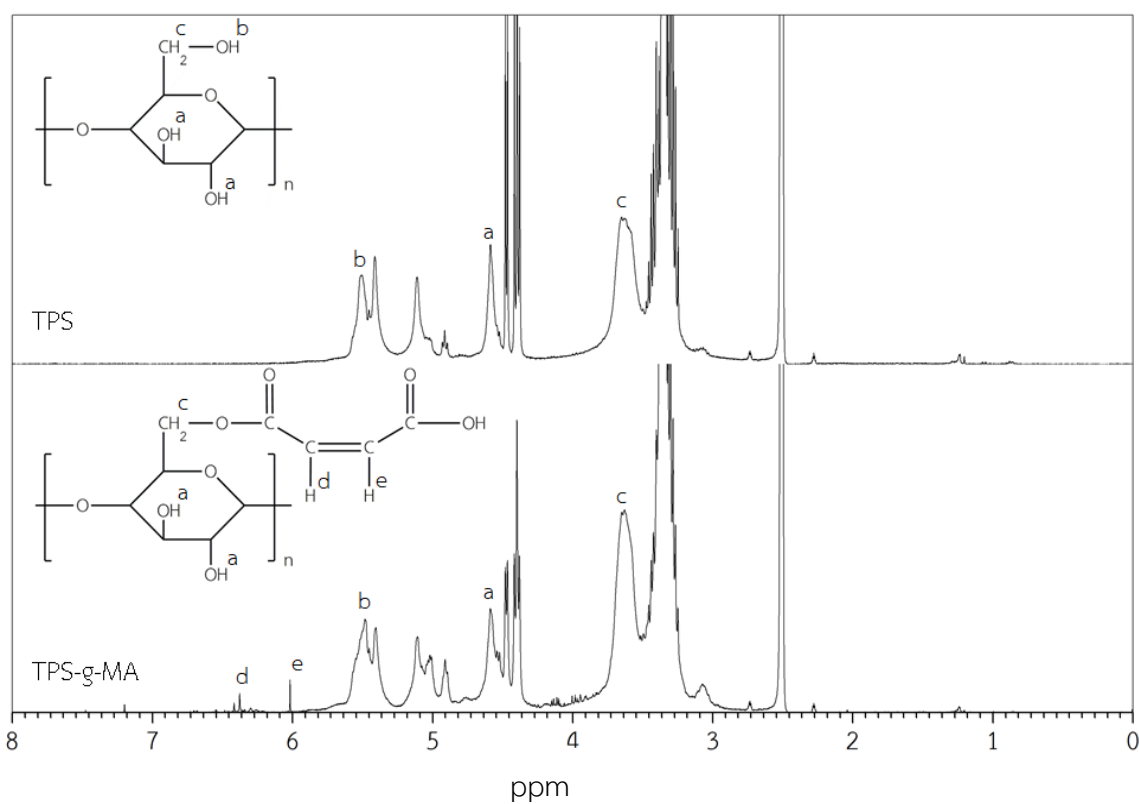


รูปที่ 4.1 FTIR spectrum ของ TPS และ TPS-g-MA

จากผลการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR ของ TPS และ TPS-g-MA แสดงใน รูปที่ 4.2 พอลิเมอร์ทั้งสองจะพบ peak เอกลักษณ์ของ O-H stretching ที่ wave number 3400 cm^{-1} และ peak เอกลักษณ์ของ C-H stretching ที่ wave number 2900 cm^{-1} แต่จะแตกต่างกันที่ TPS-g-MA จะมี

peak เอกลักษณะใหม่เกิดขึ้นมาที่ wave number 1700 cm^{-1} เมื่อผู้วิจัยทำการศึกษาค้นคว้า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า peak เอกลักษณะดังกล่าวนี้คือ C=O ที่อยู่ในโครงสร้าง maleic anhydride แสดงให้เห็นว่า maleic anhydride เกิดการ graft ติดลงบนสายโซ่โมเลกุลของ TPS [39]

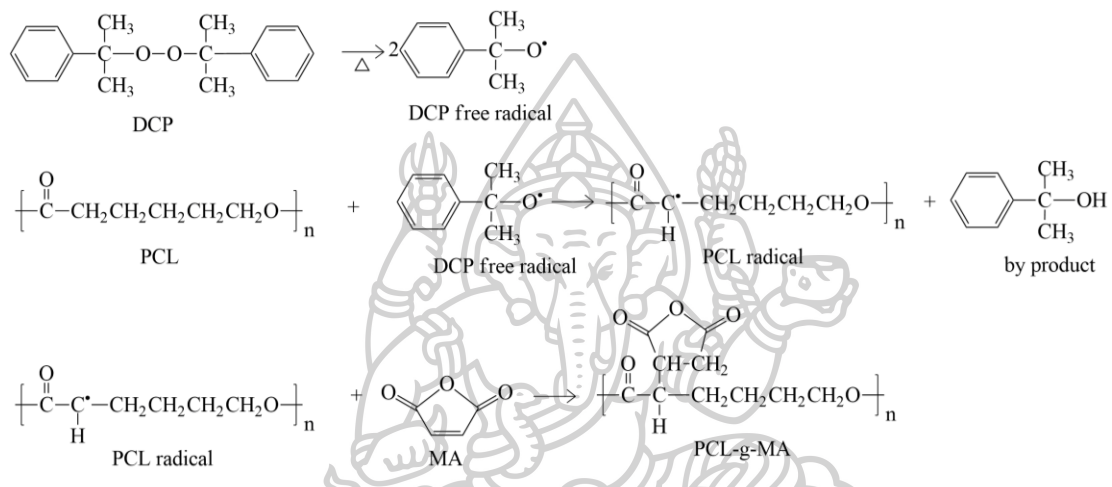
จากผลการทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ ของ TPS-g-MA ดังแสดงใน รูปที่ 4.3 พบว่า TPS-g-MA มีสัญญาณ chemical shift ขึ้นที่ 3.3 ppm และที่ 2.5 ppm แสดงถึง proton ที่อยู่ในตัวทำละลายคือ DMSO-d₆ อีกทั้งสัญญาณ chemical shift ที่ 4.7 ppm (ตำแหน่ง a) และ 5.5 ppm (ตำแหน่ง b) แสดงถึง proton ในสายโซ่โมเลกุลของ TPS-g-MA และสัญญาณ chemical shift ที่ 3.6 ppm (ตำแหน่ง c) แสดงถึง proton ที่เกาะอยู่กับ hydroxyl group (OH group) ของ TPS-g-MA โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Mahieu และคณะ [1] อย่างไรก็ตามความแตกต่างระหว่าง TPS และ TPS-g-MA คือ สัญญาณ chemical shift ที่ 6.0 ppm (ตำแหน่ง e) และที่ 6.4 ppm (ตำแหน่ง d) ซึ่งแสดงถึง proton ที่ติดอยู่กับพันธะคู่ ใน anhydride group โดยอ้างอิงงานวิจัยของ Yang และคณะ [4] แสดงให้เห็นว่า maleic anhydride เกิดการ graft ติดลงบนสายโซ่โมเลกุลของ TPS



รูปที่ 4.3 $^1\text{H-NMR}$ spectra ของ TPS เปรียบเทียบกับ TPS-g-MA

4.2 การเตรียม และการพิสูจน์เอกลักษณ์ polycaprolactone graft maleic anhydride (PCL-g-MA)

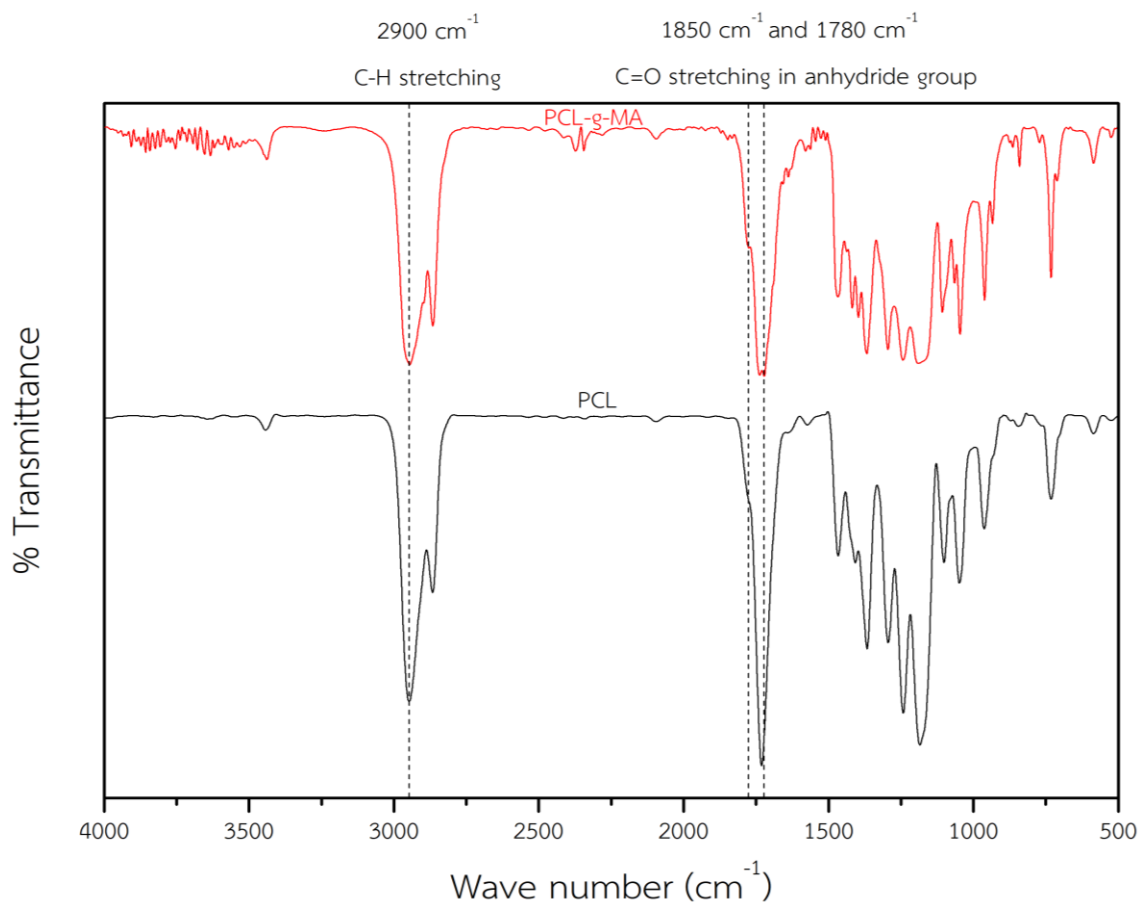
PCL-g-MA สามารถเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง PCL, maleic anhydride (MA) และ dicumyl peroxide (DCP) โดยมีการให้ความร้อนในเครื่อง internal mixer โดยขั้นแรก DCP จะทำให้เกิด free radical ขึ้นบนสายโซ่โพลีเอสเตอร์ของ PCL หลังจาก MA จะเกิดปฏิกิริยา grafting ลงบนสายโซ่ของ PCL ที่มี free radical อยู่ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาเคมีสามารถแสดงได้ใน รูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 สมการเคมีแสดงการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง TPS และ MA

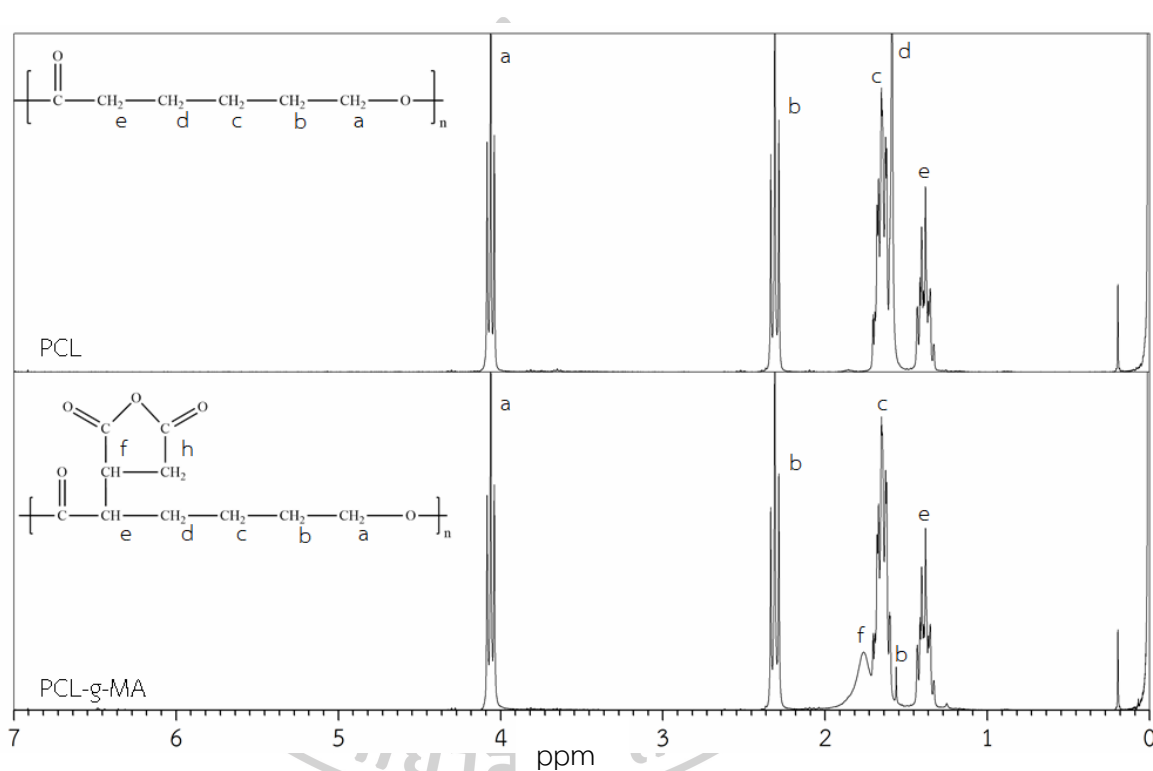


จากผลการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR ของ PCL และ PCL-g-MA แสดงใน รูปที่ 4.5 พอลิเมอร์ทั้งสองจะพบ peak เอกลักษณะของ C-H stretching ที่ wave number 2900 cm^{-1} และพบ peak เอกลักษณะของ C=O stretching ที่ wave number 1720 cm^{-1} แต่จะแตกต่างกันที่ PCL-g-MA จะมี peak เอกลักษณะใหม่เกิด ที่ wave number 1780 cm^{-1} และ 1850 cm^{-1} เมื่อผู้วิจัยทำการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า peak เอกลักษณะดังกล่าวนี้คือ anhydride carboxyl groups แสดงให้เห็นว่า maleic anhydride เกิดการ graft ติดลงบนสายโซ่โมเลกุลของ PCL [37]



รูปที่ 4.5 FTIR spectrum ของ PCL และ PCL-g-MA

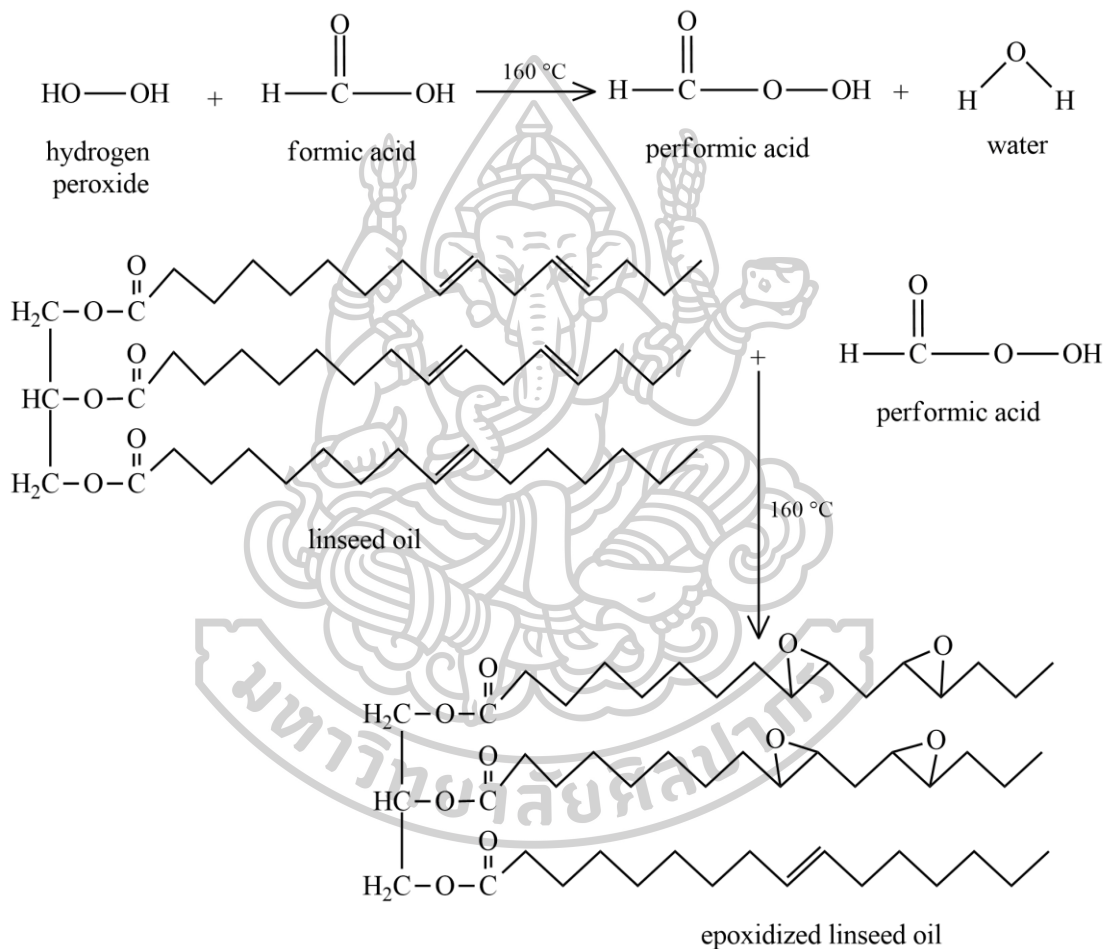
จากผลการทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ ของ PCL-g-MA แสดงใน รูปที่ 4.6 พบว่า PCL-g-MA มีสัญญาณ chemical shift ขึ้นที่ 4.06 (ตำแหน่ง a), 2.30 (ตำแหน่ง b), 1.70 (ตำแหน่ง c), 1.60 (ตำแหน่ง d) และ 1.38 (ตำแหน่ง e) ตามลำดับเป็นการแสดงถึง hydrogen atom ที่อยู่ในสายโซ่โมเลกุลของ PCL ซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของ Wu และคณะ [34] อย่างไรก็ตามความแตกต่างระหว่าง PCL และ PCL-g-MA คือ สัญญาณ chemical shift ที่ 1.76 ppm (ตำแหน่ง f) และ ที่ 1.56 ppm (ตำแหน่ง h) ซึ่งแสดงถึง proton ที่ติดอยู่กับ carbon atom ใน anhydride group แสดงให้เห็นว่า maleic anhydride เกิดการ graft ติดลงบนสายโซ่โมเลกุลของ PCL



รูปที่ 4.6 $^1\text{H-NMR}$ Spectra ของ PCL เปรียบเทียบกับ PCL-g-MA

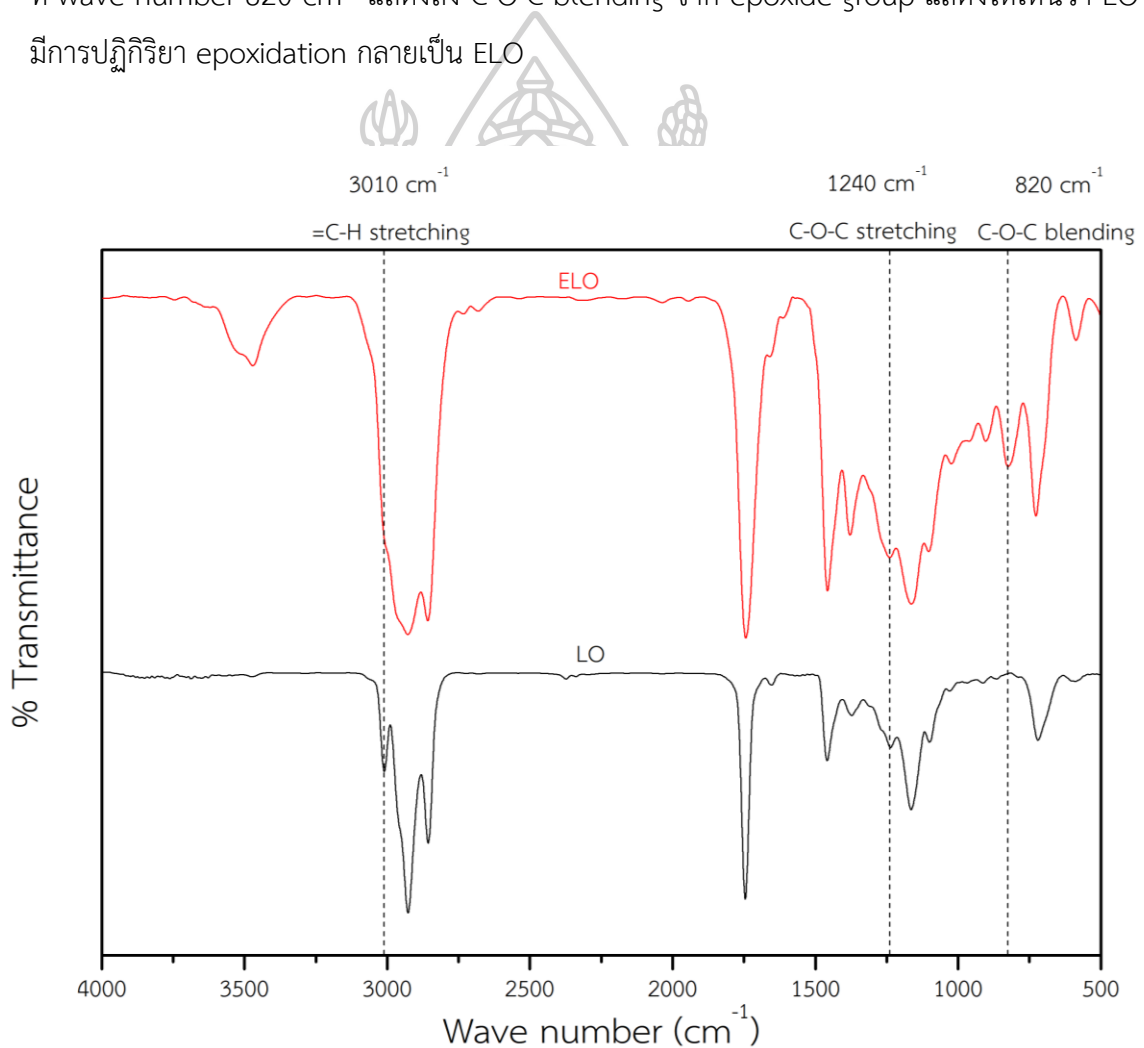
4.3 การเตรียม และการพิสูจน์เอกลักษณ์ของ epoxidized linseed oil (ELO)

Epoxidized linseed oil (ELO) สามารถเตรียมได้จากการนำ linseed oil (LO) มาทำปฏิกิริยากับสารประกอบ per-acid ซึ่งเป็นสารที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง hydrogen peroxide กับ formic acid โดยที่สามารถประกอบ per-acid จะเกิดปฏิกิริยา epoxidation กับพันธะคู่ของ linseed oil ทำให้พันธะคู่กลายเป็น epoxide group ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาเคมีสามารถแสดงได้ใน รูปที่ 4.7



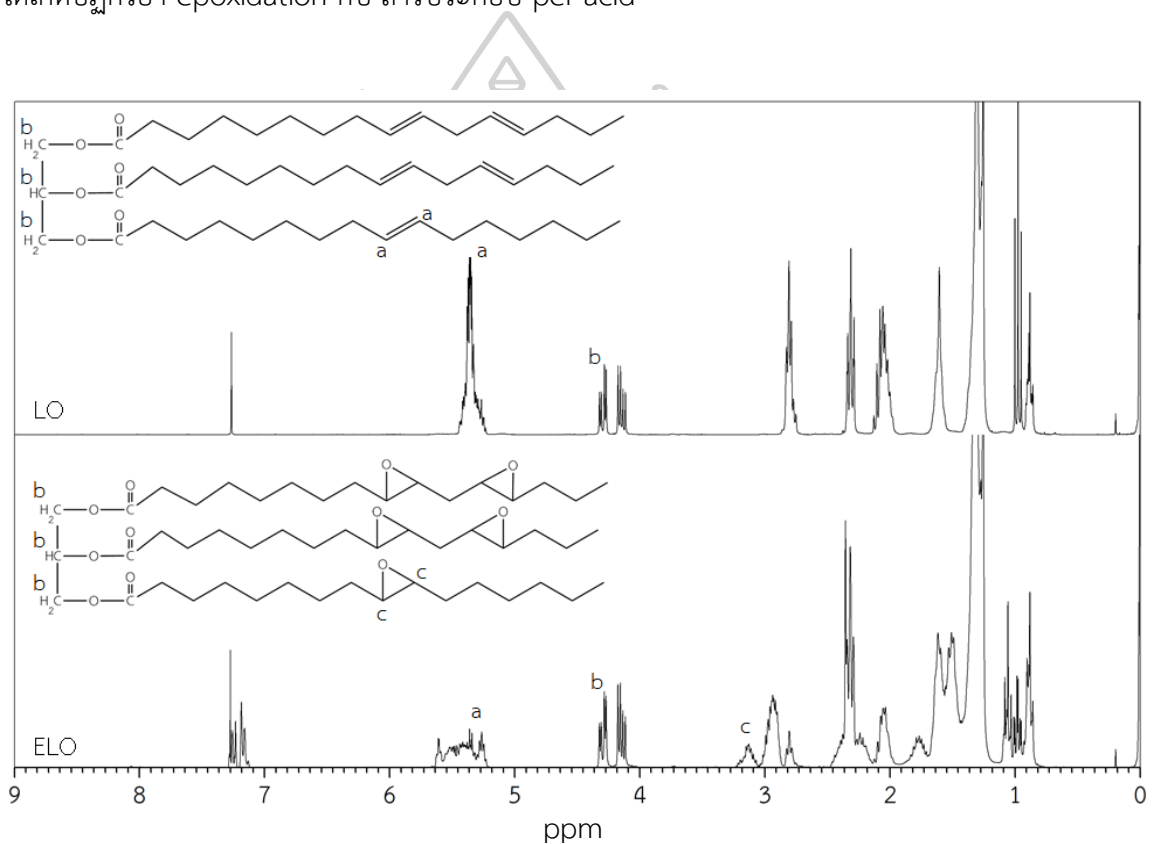
รูปที่ 4.7 สมการเคมีแสดงการเกิดสารประกอบ per-acid และปฏิกิริยาเคมีระหว่าง per-acid กับ linseed oil

จากผลการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR ของ linseed oil (LO) และ epoxidized linseed oil (ELO) แสดงใน รูปที่ 4.8 LO จะพบ peak เอกลักษณะของ C-H stretching ที่ wave number 2900 cm^{-1} , peak เอกลักษณะของ =C-H stretching ที่ wave number 3010 cm^{-1} ในส่วนของ ELO peak เอกลักษณะ =C-H stretching ที่ wave number 3010 cm^{-1} ได้หายไป และมี peak เอกลักษณะใหม่เกิดขึ้นมาสองบริเวณคือ ที่ wave number 1240 cm^{-1} และ 820 cm^{-1} เมื่อผู้วิจัยทำการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งเป็งานวิจัยของ Téllez และคณะ[40] พบว่า peak เอกลักษณะที่ wave number 1240 cm^{-1} แสดงถึง C-O-C stretching และ peak เอกลักษณะที่ wave number 820 cm^{-1} แสดงถึง C-O-C blending จาก epoxide group แสดงให้เห็นว่า LO มีการปฏิกิริยา epoxidation กลายเป็น ELO



รูปที่ 4.8 FTIR spectrum ของ LO และ ELO

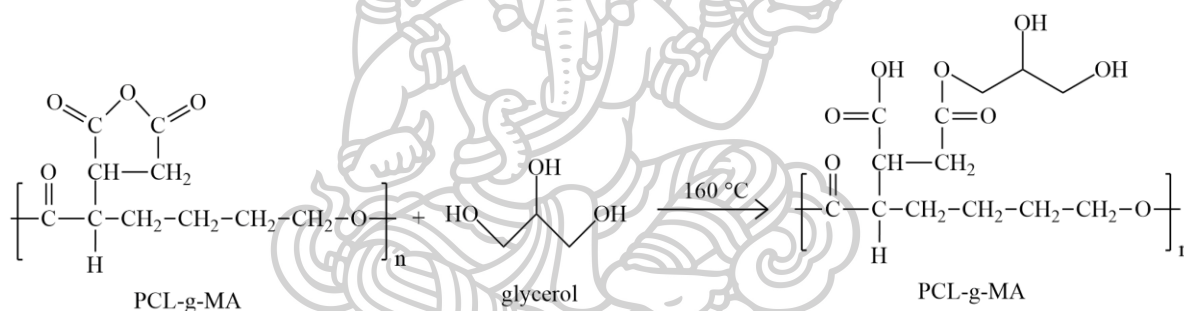
จากผลการทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ ของ ELO ดังแสดงใน รูปที่ 4.9 พบว่า ELO นั้นมีสัญญาณ chemical shift ที่ 5.2 ถึง 5.5 (ตำแหน่ง a) แสดงให้เห็นถึง hydrogen atom ที่อยู่ติดกับพันธะคู่ใน ELO ซึ่งเกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยา epoxidation ที่ไม่สมบูรณ์ อีกทั้งสัญญาณ chemical shift ที่ 4.4 ppm จะแสดงให้เห็นถึง hydrogen atom ของ glycerol ใน triglycerides ซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของ Kim และ Sharma [41] อย่างไรก็ตามความแตกต่างระหว่าง LO และ ELO คือ สัญญาณ chemical shift ที่ 2.97 ถึง 3.13 ppm (ตำแหน่ง c) ซึ่งแสดงถึง proton ที่ติดอยู่กับ epoxide group โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Viguera และคณะ [8] แสดงให้เห็นว่า LO ได้เกิดปฏิกิริยา epoxidation กับ สารประกอบ per-acid



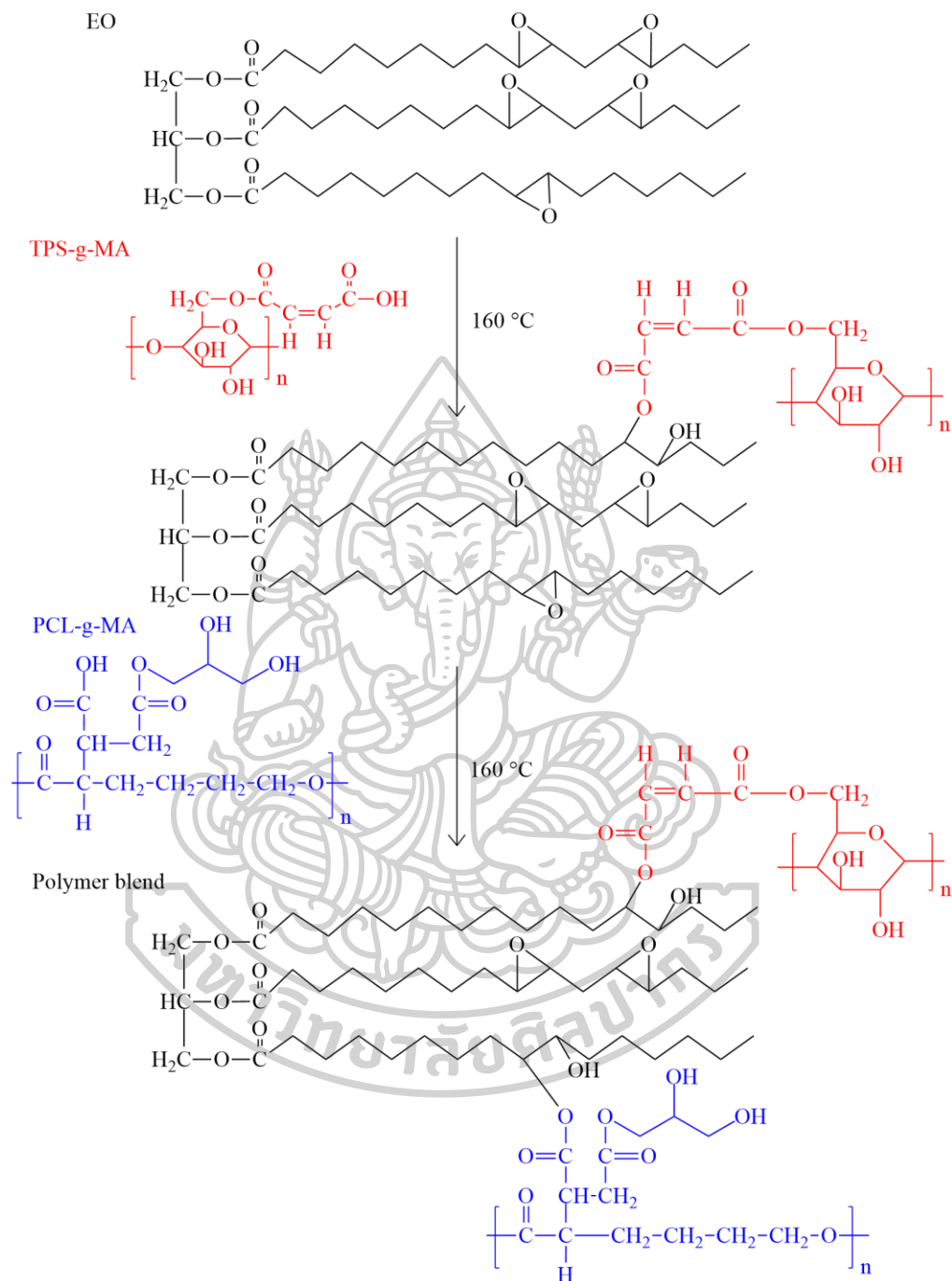
รูปที่ 4.9 $^1\text{H-NMR}$ Spectra ของ LO เปรียบเทียบกับ ELO

4.4 การเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมประสานระหว่าง TPS-g-MA, PCL-g-MA และ Epoxidized oil (EO)

การเกิดการเชื่อมขวางโมเลกุลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS-g-MA และ PCL-g-MA โดย EO ทางผู้วิจัยได้เสนอแนวทางการปฏิกิริยาเคมีดังนี้ ขั้นตอนแรกจะเป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง anhydride group ที่อยู่บนโครงสร้างของ PCL-g-MA กับ hydroxyl group ของ glycerol ดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดย จะให้ anhydride group ที่มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวน 5 เหลี่ยมเกิดการเปิดออกโดยทำให้ anhydride group ที่อยู่บนโครงสร้างของ PCL-g-MA กลายเป็น carboxylic acid group ขั้นตอนที่สองเป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง TPS-g-MA หรือ PCL-g-MA กับ EO เนื่องจาก ทั้ง TPS-g-MA และ PCL-g-MA จะมี carboxylic acid group อยู่บนโครงสร้างทางเคมีจึงสามารถเกิดปฏิกิริยากับ epoxide group ที่อยู่บนโครงสร้างของ EO ได้ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาแสดงไว้ในรูปที่ 4.11 ในหน้าถัดไป



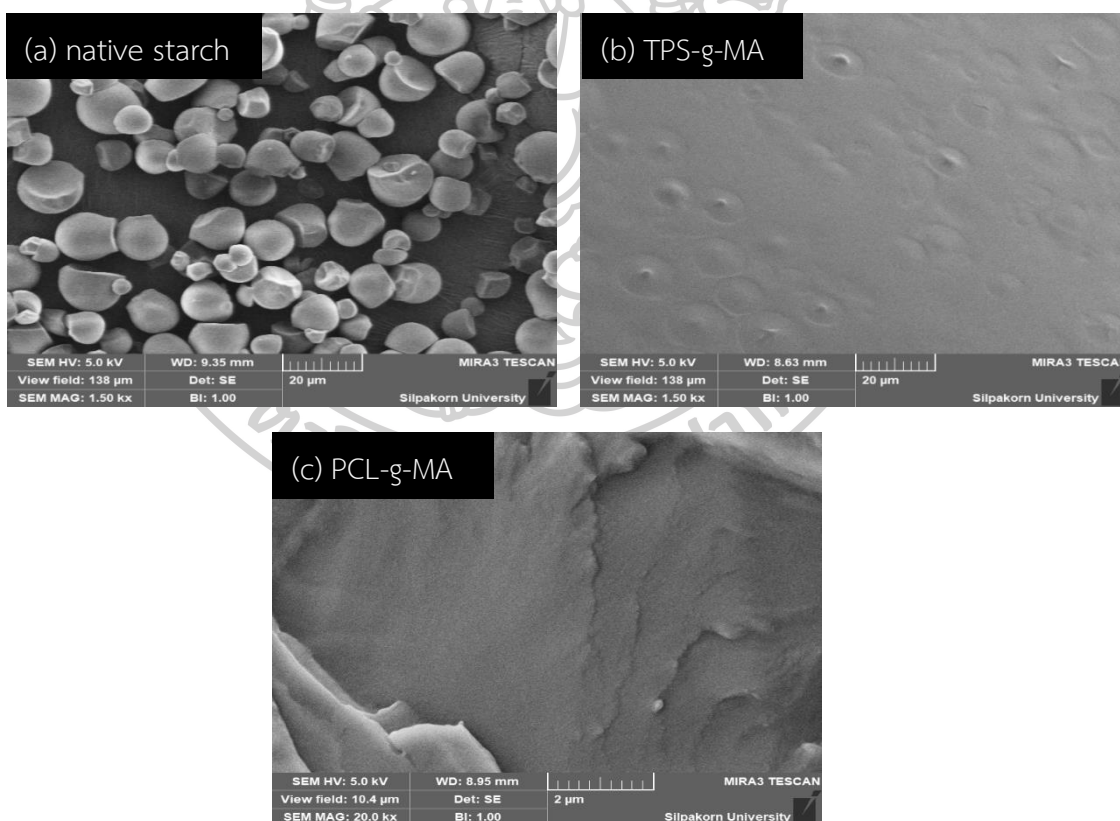
รูปที่ 4.10 สมการเคมีที่อาจเกิดขึ้นได้ระหว่าง PCL-g-MA กับ glycerol



รูปที่ 4.11 การเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของ TPS-g-MA และ PCL-g-MA โดย EO

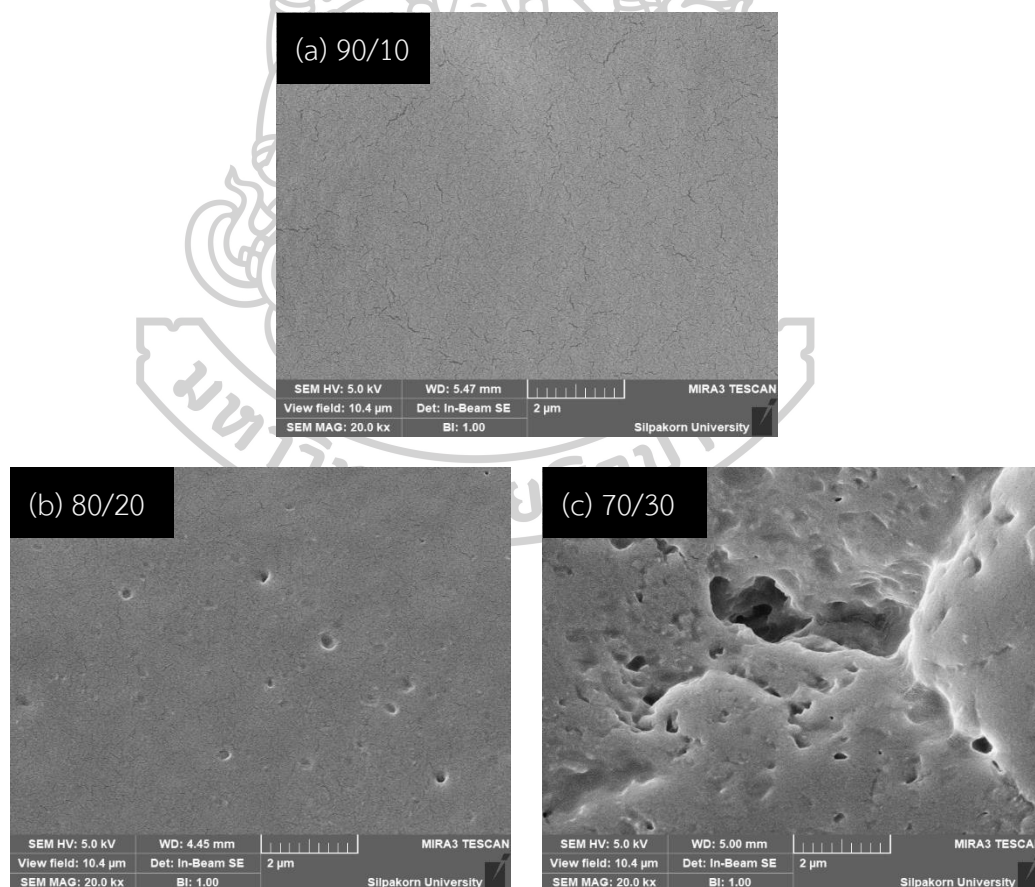
4.5 การศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์

รูปที่ 4.12a แสดงลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของอนุภาค starch ก่อนผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยความร้อนและแรงเค้นเฉือน ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า จากผลการทดสอบพบว่าลักษณะของอนุภาค starch ก่อนผ่านกระบวนการขึ้นรูปนั้นมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมและเหลี่ยมอีกทั้งยังมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบเนียน เมื่อทำการเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.12b ซึ่งจะแสดงลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของ TPS-g-MA ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่าเม็ดแป้งที่มีลักษณะเป็นทรงกลมนั้นได้หายไปแต่เกิดเป็นวิฎฐภาคที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันขึ้นมา แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของ starch ที่ผ่านการผสมกับ glycerol ซึ่งเป็น plasticizer เมื่อได้รับแรงเค้นเฉือน และความร้อน จะเกิดกระบวนการที่เรียกว่า gelatinization ทำให้เกิดการแตกออกของผลึกแป้งแล้วจึงเกิดการไหลเหมือนกับพลาสติกทั่วไปได้ [42] จากรูปที่ 4.12c ซึ่งจะแสดงลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของ PCL-g-MA ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่าโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของ PCL-g-MA มีลักษณะที่ราบเรียบเป็นเนื้อเดียวกัน และมีความต่อเนื่อง



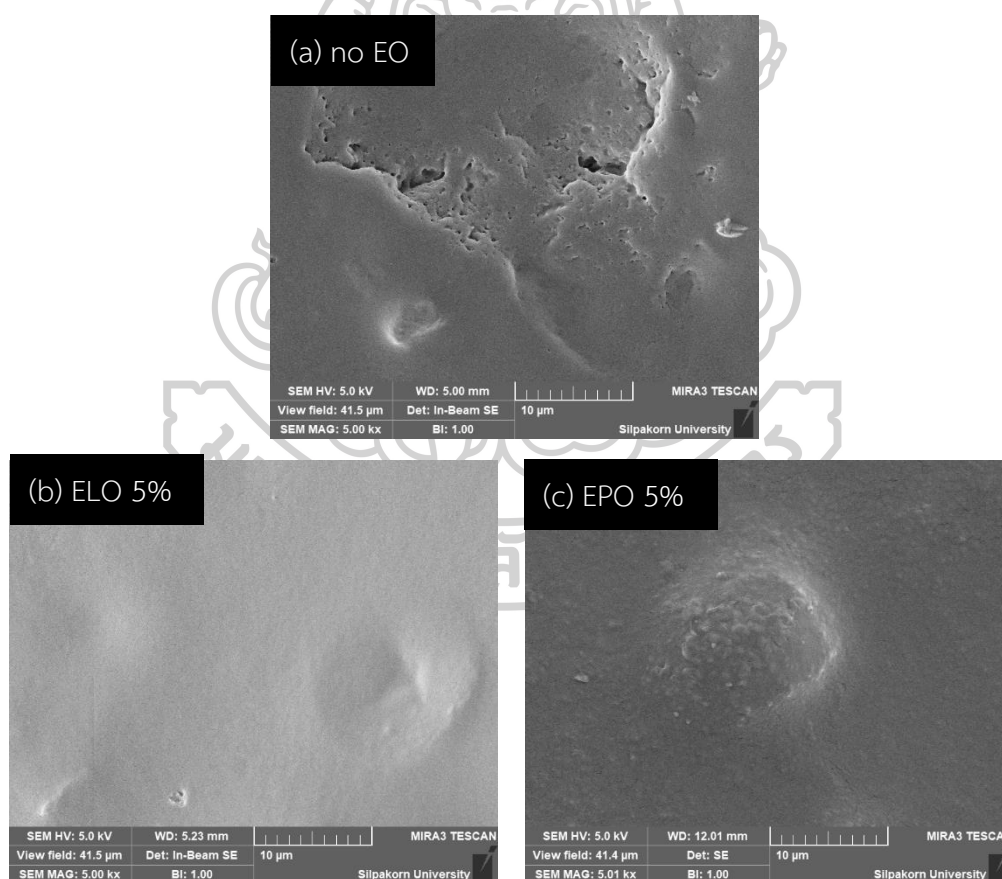
รูปที่ 4.12 สัณฐานวิทยาของ (a) native starch, (b) TPS-g-MA และ (c) PCL-g-MA

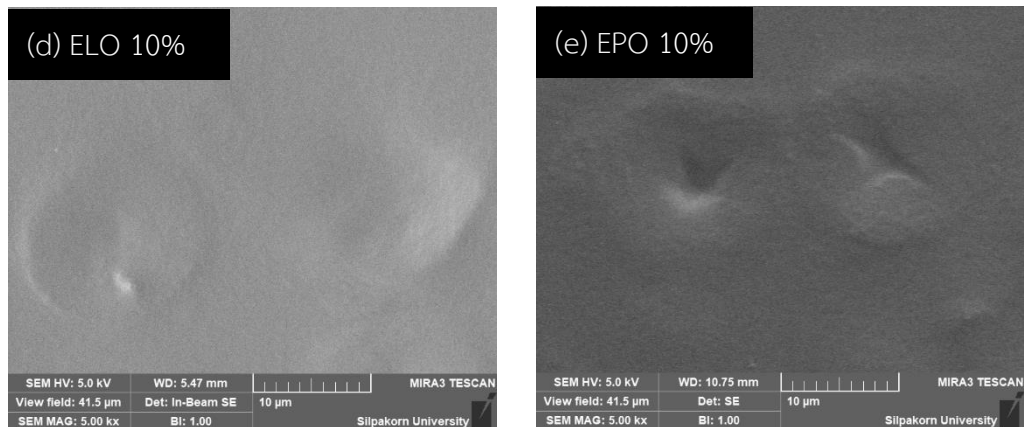
การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS-g-MA และ PCL-g-MA ณ บริเวณภาคตัดขวางที่เป็นรอยแตกจากเทคนิค cryogenic fracture เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของ PCL-g-MA ซึ่งเป็น วัสดุภาครอง โดยพอลิเมอร์เบลนด์จะผ่านการ aging ด้วย chloroform เพื่อกำจัดวัสดุภาครองของ PCL-g-MA ออกไป รูปที่ 4.13 (a-c) แสดงลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS-g-MA และ PCL-g-MA ที่อัตราส่วนการผสม 90/10, 80/20 และ 70/30 ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า พบว่าที่อัตราส่วนการผสมที่ 90/10 ลักษณะการกระจายตัวของ PCL-g-MA ไม่ค่อยชัดเจนซึ่งทางผู้ทำงานวิจัยคาดว่าปริมาณของ PCL-g-MA ที่ผสมกับ TPS-g-MA มีปริมาณที่น้อยเกินไป อัตราส่วนการผสมที่ 80/20 และ 70/30 จะพบว่า PCL-g-MA จะมีลักษณะเป็น droplet กระจายตัวอยู่ใน TPS-g-MA ซึ่งเป็นวัสดุภาคหลัก และจะพบว่าเมื่อปริมาณของ PCL-g-MA ในระบบการผสมเพิ่มมากขึ้น PCL-g-MA จะเกิดการรวมกลุ่มกันเป็นก้อนขึ้นภายใน TPS-g-MA โดยการเปรียบเทียบระหว่างรูป 4.13 ซึ่งเป็นอัตราส่วนการผสมที่ 80/20 กับ รูปที่ 4.13c ซึ่งเป็นอัตราส่วนการผสมที่ 70/30



รูปที่ 4.13 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS-g-MA และ PCL-g-MA ที่อัตราส่วนการผสม (a) 90/10, (b) 80/20 และ (c) 70/30

เพื่อศึกษาอิทธิพลของ epoxidized oil (EO) ที่ส่งผลกระทบต่อสัณฐานวิทยาของ พอลิเมอร์ เบลนด์ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ศึกษาสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ของพอลิเมอร์ เบลนด์ อัตราส่วนการผสม 80/20 ที่มีการผสม EO ปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก โดยจะทำการเปรียบเทียบกับ สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ เบลนด์อัตราส่วนการผสม 80/20 ที่ไม่มีการผสม EO จากรูปที่ 4.14 พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ เบลนด์ที่มีการผสม EO มีความคลุมเครือไม่ชัดเจนเมื่อ เปรียบเทียบกับสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ เบลนด์ไม่ผสม EO ซึ่งเหตุผลนั้นทางผู้วิจัยคิดว่า เนื่องมาจาก EO ที่ผสมเข้าไปในพอลิเมอร์ เบลนด์นั้นมีลักษณะเป็นของเหลวที่ไหลได้ดีเมื่อได้รับความ ร้อน ดังนั้นเมื่อชิ้นงานพอลิเมอร์ เบลนด์ได้รับความร้อนจากลำแสงอิเล็กตรอนที่เกิดในการทดสอบ SEM อนุภาคของ EO จึงเกิดการไหลเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างของ PCL-g-MA ที่เกิดจากการ aging ด้วย chloroform



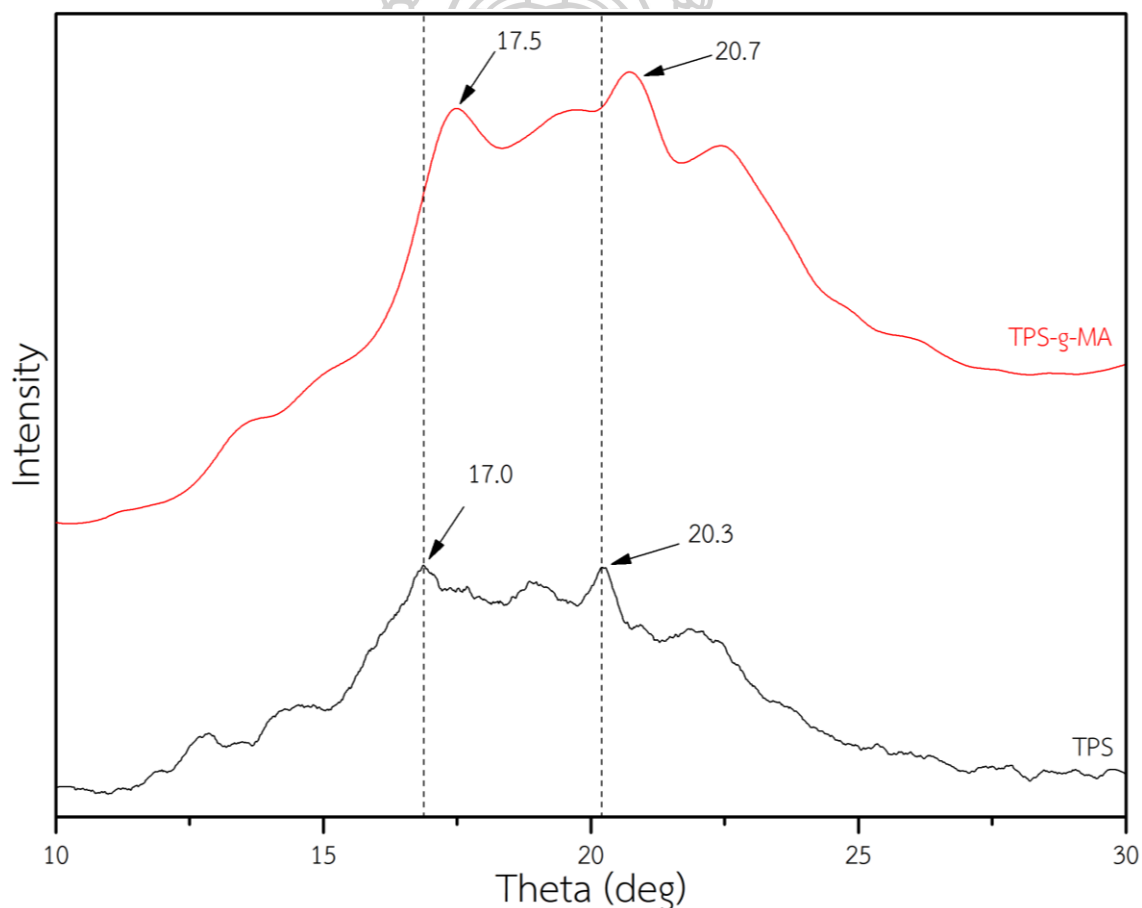


รูปที่ 4.14 สัณฐานวิทยาของ (a) พอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่มีการผสม EO (b) ผสม ELO 5% โดยน้ำหนัก (c) ผสม EPO 5% โดยน้ำหนัก (d) ผสม ELO 10% โดยน้ำหนัก และ (e) ผสม EPO 10% โดยน้ำหนัก



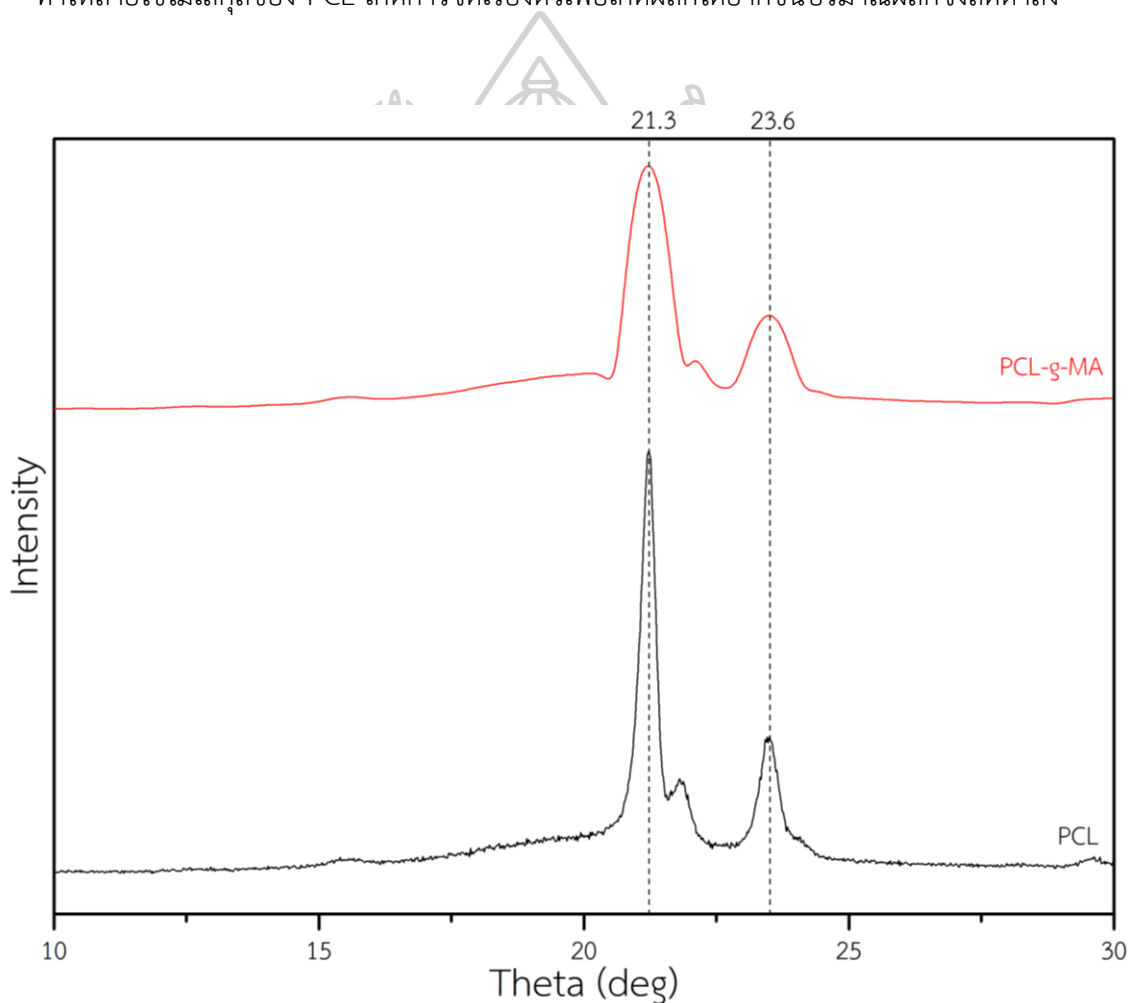
4.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์เบลนด์

การศึกษาโครงสร้างผลึก (XRD pattern) ของ TPS สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 โดยพบว่า TPS มี diffraction peak ที่มุม 2θ เท่ากับ 17.0 และ 20.3 ซึ่งจากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าที่ตำแหน่ง 17.0 จะหมายถึงผลึกแบบ V-type [43] และที่ตำแหน่ง 20.3 จะหมายถึงผลึกแบบ A-type [44] เมื่อเปรียบเทียบกับ XRD pattern ของ TPS-g-MA พบว่า diffraction peak ที่มุม 2θ เท่ากับ 17.0 มีการเลื่อนตำแหน่งเป็น 17.5 และที่ตำแหน่ง 20.3 มีการเลื่อนตำแหน่งเป็น 20.7 ซึ่งจากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งเป็นงานวิจัยของ MinHo และคณะ [45] ทางผู้วิจัยคิดว่าการเลื่อนตำแหน่งของ peak เกิดขึ้นเนื่องมาจากการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชัน anhydride group บนโครงสร้างของ TPS-g-MA การเกิดผลึกของ TPS เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้น XRD pattern จึงเกิดการเลื่อนตำแหน่งของ diffraction peak



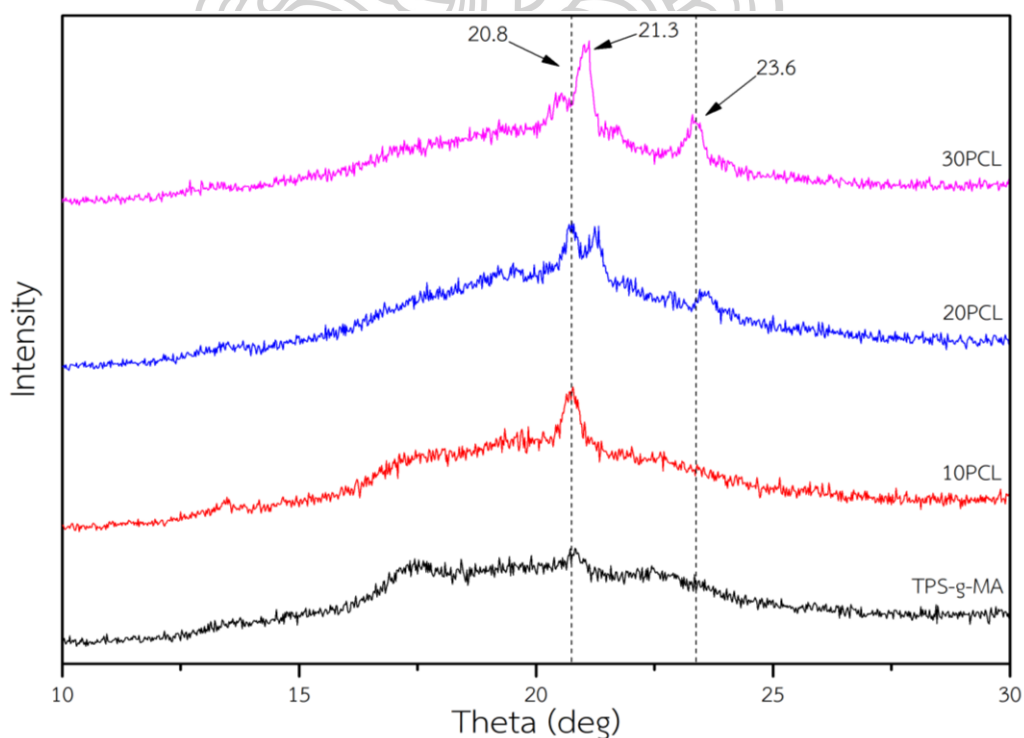
รูปที่ 4.15 XRD pattern ของ TPS เปรียบเทียบกับ TPS-g-MA

การศึกษาโครงสร้างผลึก (XRD pattern) ของ PCL สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.16 โดยพบว่า สำหรับ XRD pattern ของ PCL นั้นมี diffraction peak ที่มุม 2θ เท่ากับ 21.3 และที่ 23.6 ซึ่งจาก ค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าตำแหน่ง เท่ากับ 21.3 หมายถึงระนาบผลึก (100) และตำแหน่ง เท่ากับ 23.6 หมายถึงระนาบผลึก (200) [46] เมื่อเปรียบเทียบกับ XRD pattern ของ PCL-g-MA พบว่า diffraction peak ของการเกิดผลึกทั้งสองแบบของ PCL ยังขึ้นที่มุม 2θ เดิมแต่เมื่อดูจากค่า intensity จะพบว่ากราฟของ PCL-g-MA มี intensity ที่ต่ำกว่า PCL แสดงให้เห็นว่า PCL-g-MA มีผลึกที่น้อยกว่า PCL ซึ่งทางผู้วิจัยคิดว่าเนื่องจาก anhydride group ที่อยู่บนโครงสร้างของ PCL ทำให้สายโซ่โมเลกุลของ PCL เกิดการจัดเรียงตัวเพื่อเกิดผลึกได้ยากขึ้นปริมาณผลึกจึงลดต่ำลง



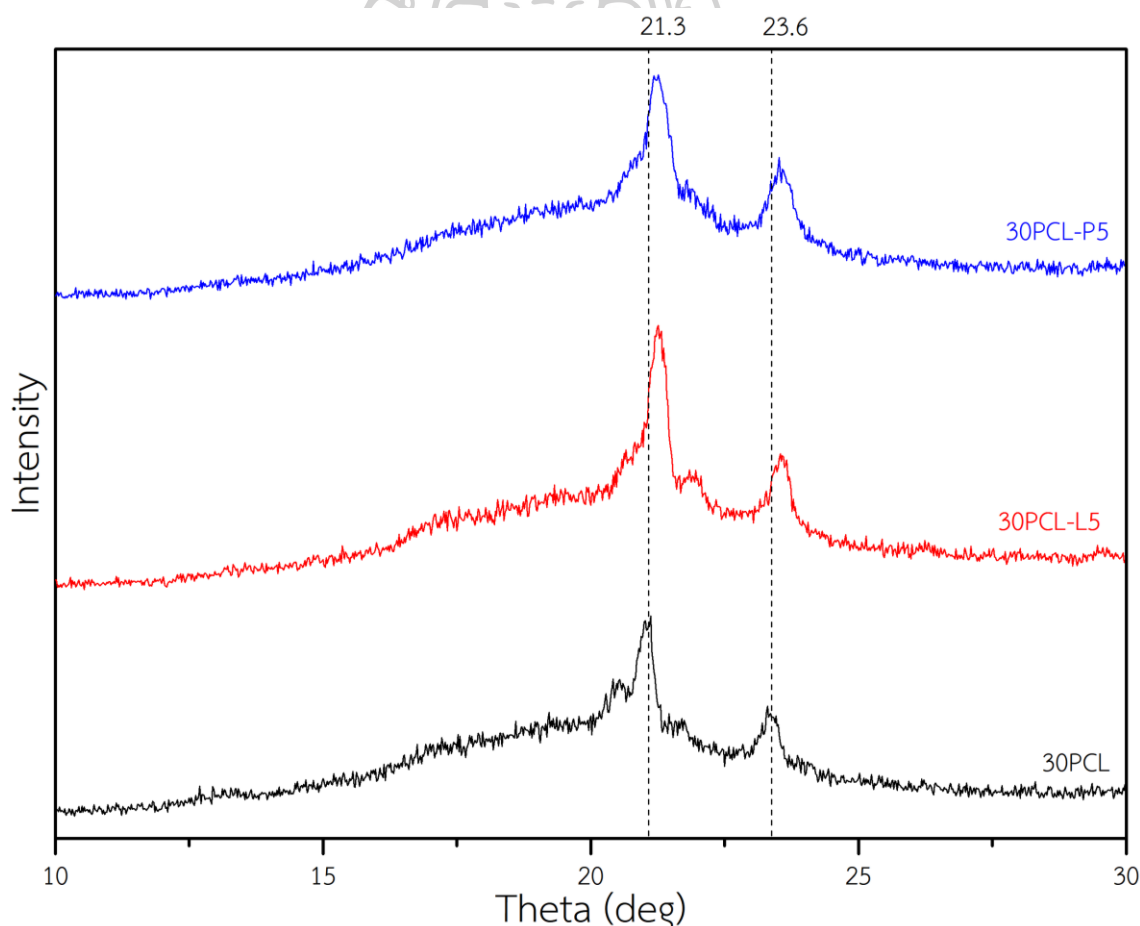
รูปที่ 4.16 XRD pattern ของ PCL เปรียบเทียบกับ PCL-g-MA

การศึกษาโครงสร้างผลึก (XRD pattern) ของพอลิเมอร์เบลนด์จะแสดงใน รูปที่ 4.17 พบว่า XRD pattern ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการผสม PCL-g-MA 10 เปอร์เซ็นต์(10PCL) เมื่อเปรียบเทียบกับ XRD pattern ของ TPS-g-MA จะพบว่า diffraction peak ที่มุม 2θ เท่ากับ 20.8 มี intensity ที่สูงกว่า ที่ตำแหน่ง diffraction peak ที่มุม 2θ เท่ากับ 20.8 จะแสดงถึงผลึกแบบ A type ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของ TPS-g-MA แสดงให้เห็นว่า PCL-g-MA ที่เติมเข้าไป 10 เปอร์เซ็นต์ เข้าไปช่วยให้ TPS-g-MA สามารถเกิดผลึกได้ดียิ่งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบ XRD pattern ของสูตรที่มีการเติม PCL-g-MA ลงไป 20 เปอร์เซ็นต์ (20PCL) และ 30 เปอร์เซ็นต์ (30PCL) กับสูตรที่มีการเติม PCL-g-MA ลงไป 10 เปอร์เซ็นต์ (10PCL) พบว่า มีการเกิด diffraction peak ใหม่ที่มุม 2θ เท่ากับ 21.3 และ 23.6 ซึ่งที่ตำแหน่ง diffraction peak นั้นจะแสดงถึงผลึกของ PCL-g-MA แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณของ PCL-g-MA ขึ้นเป็น 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับไม่มีส่วนช่วยให้ TPS-g-MA เกิดผลึกได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งหากพิจารณาจากรูป SEM ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนการผสมที่ 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จะพบว่า PCL-g-MA ได้มีการกระจายตัวอยู่ใน TPS-g-MA แสดงให้เห็นถึงการแยกเฟสที่ชัดเจนระหว่าง TPS-g-MA กับ PCL-g-MA ดังนั้นจึงทำให้ XRD pattern ของสูตรที่มีการเติม PCL-g-MA ลงไป 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับจึงมีการเกิด peak ของผลึกแยกกันชัดเจนระหว่าง TPS-g-MA กับ PCL-g-MA



รูปที่ 4.17 XRD pattern ของ TPS-g-MA และพอลิเมอร์เบลนด์ที่ สัดส่วนการผสม 10 %PCL, 20 %PCL และ 30 %PCL

เพื่อศึกษาอิทธิพลของ epoxidized oil (EO) ที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างผลึก (XRD pattern) ของพอลิเมอร์เบลนด์ดั่งนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ศึกษา XRD pattern ของพอลิเมอร์เบลนด์อัตราส่วนการผสมที่มี TPS-g-MA อยู่ 70 เปอร์เซ็นต์ และมี PCL-g-MA อยู่ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยทำการผสม EO ปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบกับ XRD pattern ของพอลิเมอร์เบลนด์อัตราส่วนการผสม 70/30 ที่ไม่มีการผสม EO จากรูปที่ 4.18 พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่ผสม EO จะมี diffraction peak ที่มุม 2θ เท่ากับ 21.3 และ 23.6 ซึ่งจะแสดงถึงผลึกของวัสดุภาค PCL-g-MA ที่อยู่ในพอลิเมอร์เบลนด์ เมื่อเปรียบเทียบพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการผสม EO พบว่า diffraction peak ที่มุม 2θ เท่ากับ 21.3 และ 23.6 เกิดการเลื่อนตำแหน่งซึ่งทางผู้วิจัยคิดว่าอาจเนื่องมาจากโมเลกุลของ EO ที่แทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์ของพอลิเมอร์เบลนด์ทำให้ PCL-g-MA มีการเกิดผลึกที่แตกต่างไปจากเดิม เมื่อเปรียบเทียบค่า intensity พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม ELO มีค่า intensity ที่สูงกว่า พอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม EPO แสดงถึงการมีผลึกในโครงสร้างที่มากกว่า



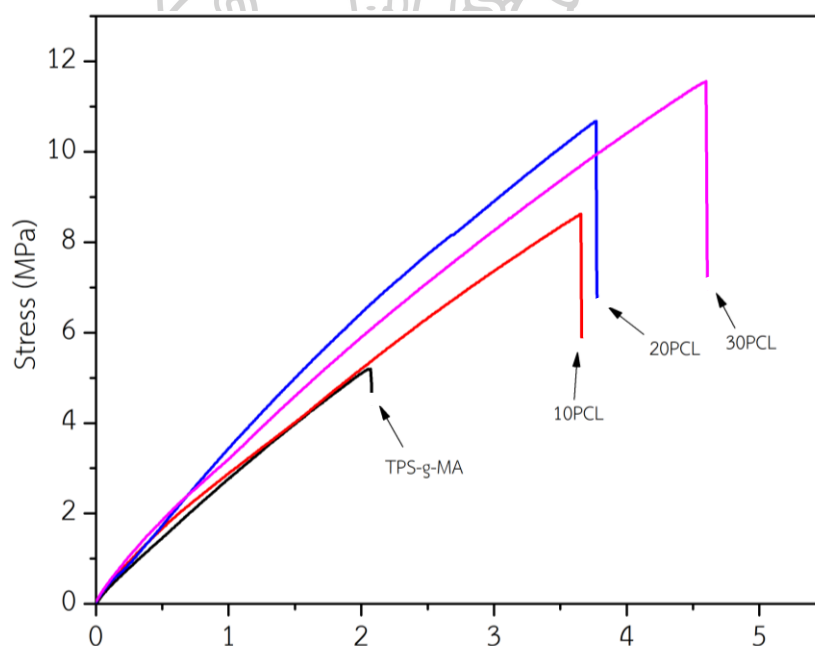
รูปที่ 4.18 XRD pattern ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่ผสม EO (30PCL), ผสม ELO 5% โดยน้ำหนัก (30PCL-L5) และผสม EPO 5% โดยน้ำหนัก (30PCL-P5)

4.7 การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์โดยใช้ universal testing machine (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM D-638 Type V อัตราเร็วในการดึง 10 mm/min และใช้ load cell ขนาด 5 kN จากการทดสอบความสามารถในการทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์เบลนด์ด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact testing) ตามมาตรฐาน ASTM D-256 โดยใช้ mode ในการทดสอบคือ Izod และใช้ค้อนที่มีน้ำหนัก 1 J

4.7.1 การศึกษาอิทธิพลของ PCL-g-MA ที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของ TPS-g-MA

ผู้วิจัยได้เลือกข้อมูลของชิ้นงานบางตัวอย่างมาแสดงเป็น stress-strain curve ในรูปที่ 4.19 โดยพบว่า TPS-g-MA และพอลิเมอร์เบลนด์ในสัดส่วนต่าง ๆ เมื่อได้รับแรงดึงยืดถึงจุด ๆ หนึ่งจะเกิดการแตกหักแบบเปราะเหมือนกัน ส่วนที่แตกต่างจากกันของ TPS-g-MA และพอลิเมอร์เบลนด์คือ ชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์จะมีความสามารถในการทนแรงดึงยืด และความสามารถในการยืดออกเมื่อได้รับแรงดึงที่สูงกว่า TPS-g-MA โดยที่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของ PCL-g-MA ที่ผสมลงไป



รูปที่ 4.19 stress-strain curve ของ TPS-g-MA และพอลิเมอร์เบลนด์

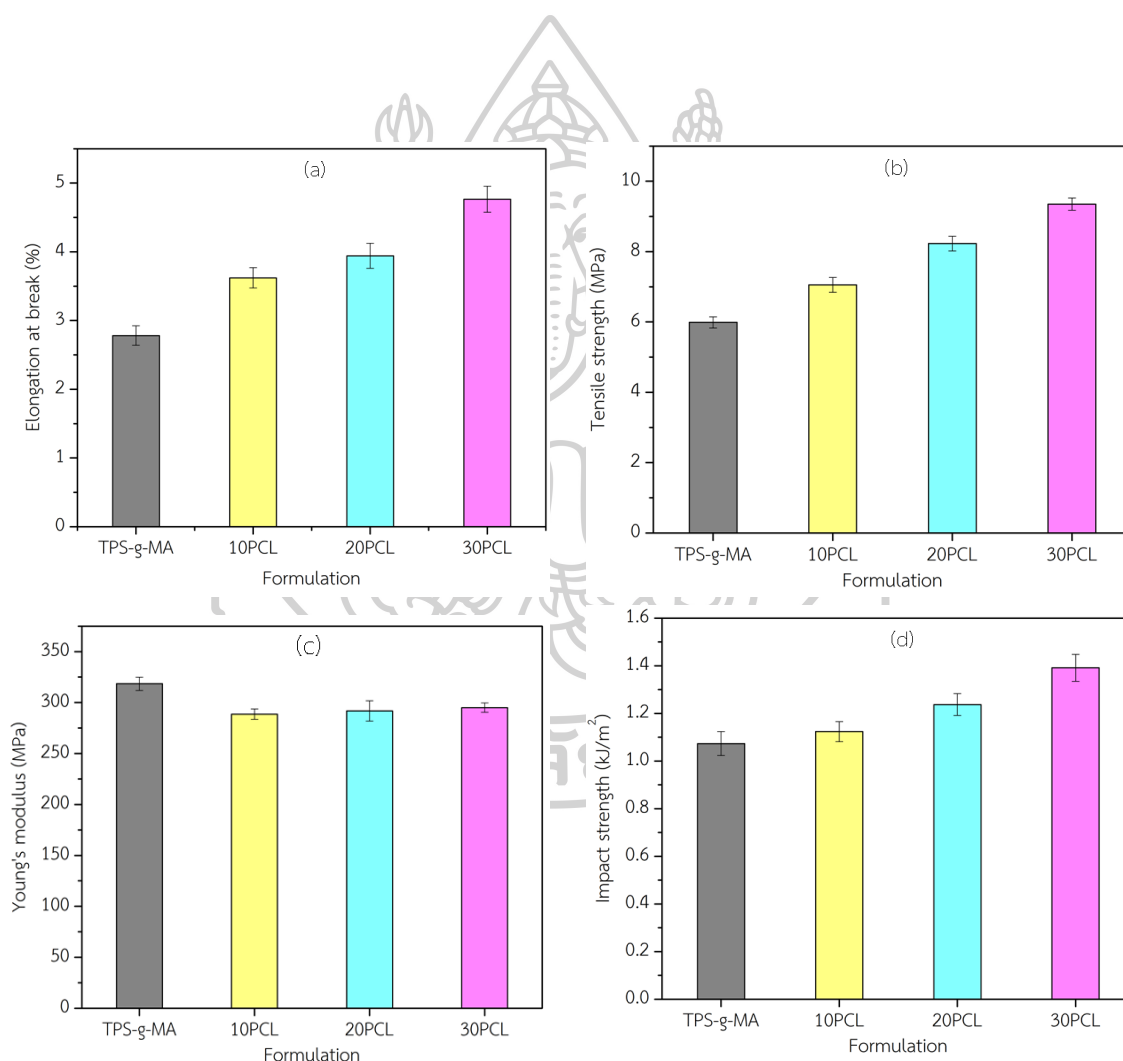
ในสัดส่วนการผสมต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.20 a พบว่า elongation at break ของ pure TPS-g-MA มีค่าเท่ากับ 2.78% และเมื่อมีการเติม PCL-g-MA ลงไป 10% (10PCL), 20% (20PCL) และ 30% (PCL) พบว่าค่า elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเป็น 3.62%, 3.94% และ 4.76% ตามลำดับดังแสดงในรูป 4.20 a ซึ่งการที่พอลิเมอร์เบลนด์มีค่า

elongation at break ที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นเนื่องมาจาก PCL เป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นที่สูงเมื่อนำมาผสมกับ TPS-g-MA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ประเภทเปราะแตกหักง่าย ดังนั้นเมื่อ PCL-g-MA เข้าไปกระจายตัวอยู่ใน TPS-g-MA ซึ่งเป็น วัสดุภาคหลักส่งผลทำให้เมื่อชิ้นงานได้รับแรงจากทดสอบ ณ จุด ๆ หนึ่งวัสดุภาคที่เป็น TPS-g-MA จะเกิดการฉีกขาดเกิดขึ้นในโครงสร้างของพอลิเมอร์เบลนด์แต่วัสดุภาคที่เป็น PCL-g-MA ที่กระจายตัวยังคงสามารถเกิดการยืดต่อไปได้อีกเมื่อได้รับแรงดึง ดังนั้นจึงทำให้ค่า elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าสูงขึ้น จากผลการทดสอบดังแสดงใน ตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.20 b พบว่า tensile strength ของ pure TPS-g-MA มีค่าเท่ากับ 5.9 MPa และเมื่อพิจารณาถึงข้อมูลจากผู้ผลิต PCL ในตารางที่ 2.3 จะพบว่า tensile strength ของ PCL จะมีค่าอยู่ในช่วง 4 ถึง 785 MPa ดังนั้นเมื่อมีการเติม PCL-g-MA ลงไป 10% (10PCL), 20% (20PCL) และ 30% (PCL) พบว่าค่า tensile strength ของพอลิเมอร์เบลนด์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เป็น 7.0 MPa, 8.2 MPa และ 9.3 MPa ตามลำดับ ซึ่งการที่พอลิเมอร์เบลนด์มีค่า tensile strength ที่เพิ่มสูงขึ้นนั้น เนื่องมาจากปริมาณผลึกที่เพิ่มสูงขึ้นโดยหากเปรียบเทียบข้อมูล XRD pattern ของพอลิเมอร์เบลนด์กับ pure TPS-g-MA พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์มีปริมาณผลึกที่สูงกว่า pure TPS-g-MA ซึ่งส่วนที่เป็นผลึกในพอลิเมอร์เบลนด์จะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์เบลนด์ได้ จากผลการทดสอบดังแสดงใน ตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.20 c พบว่า Young's modulus ของ TPS-g-MA เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ พบว่า Young's modulus มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องมาจาก PCL-g-MA มีลักษณะที่เหนียวคล้ายยาง ดังนั้นเมื่อเข้าไปผสมอยู่ใน TPS-g-MA จะส่งผลให้ชิ้นงานมีความต้านทานต่อการเสียรูปที่ลดต่ำลง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลของการเพิ่มปริมาณ PCL-g-MA พบว่า ปริมาณที่เติมไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญกับค่า Young's modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์ จากผลการทดสอบดังแสดงใน ตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.20 d ซึ่งแสดงค่า impact strength ของชิ้นงานพบว่า TPS-g-MA และชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์เมื่อการเติม PCL-g-MA เข้าไปในระบบการผสม 10% (10PCL), 20% (20PCL) และ 30% (30PCL) จะทำให้ค่า impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามลำดับ ซึ่งเป็นสาเหตุมาจาก PCL-g-MA ที่เข้าไปกระจายตัวอยู่ใน TPS-g-MA เมื่อชิ้นงานได้รับแรงกระแทกจะเกิดการส่งผ่านแรงผ่านส่วนที่เป็น PCL-g-MA ซึ่งเป็นส่วนที่มีความเหนียวอยู่ ทำให้ TPS-g-MA สามารถทนต่อแรงกระแทกได้ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.1 ค่าสมบัติเชิงกลของ TPS-g-MA และพอลิเมอร์เบลนด์

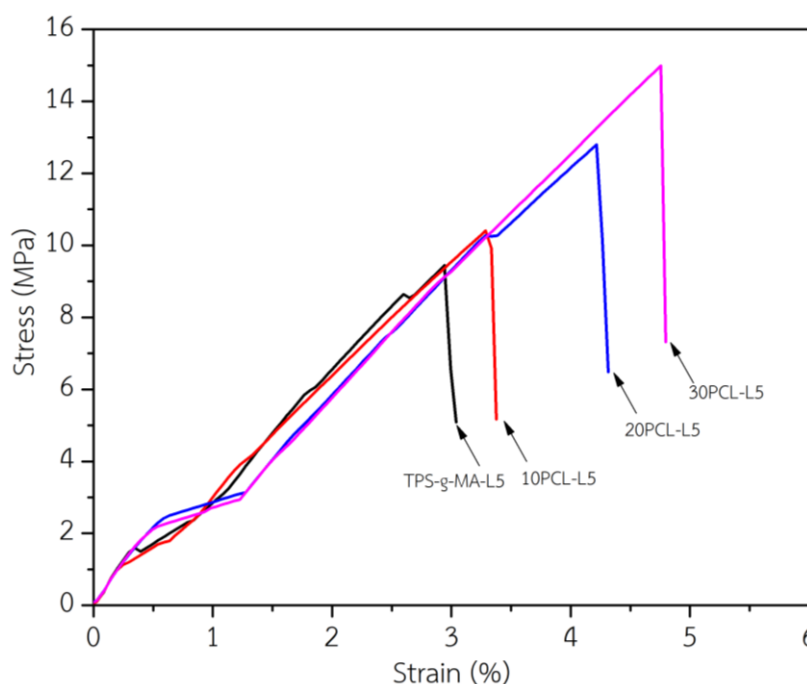
Formulation	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Impact strength (kJ/m ²)
TPS-g-MA	318±6.47 ^a	5.9±0.16 ^a	2.7±0.14 ^a	1.07±0.05 ^a
10PCL	288±5.08 ^b	7.0±0.21 ^b	3.6±0.15 ^b	1.12±0.04 ^a
20PCL	291±9.92 ^b	8.2±0.21 ^c	3.9±0.18 ^c	1.24±0.05 ^b
30PCL	295±4.57 ^b	9.3±0.17 ^d	4.7±0.19 ^d	1.39±0.06 ^c



รูปที่ 4.20 แผนภูมิแสดงค่า (a) elongation at break (b) tensile strength (c) Young's modulus และ (d) impact strength ของ TPS-g-MA และพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม PCL-g-MA ลงไป 10% (10PCL), 20% (20PCL) และ 30% (30PCL)

4.7.2 การศึกษาอิทธิพลของน้ำมันพืชที่ผ่านกระบวนการ epoxidized ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์

ผู้วิจัยได้เลือกข้อมูลของชิ้นงานบางตัวอย่างมาแสดงเป็น stress-strain curve ในรูปที่ 4.21 โดยพบว่า การผสม ELO 5% โดยน้ำหนัก ลงไปในพอลิเมอร์เบลนด์ยังคงทำให้พอลิเมอร์เบลนด์มีลักษณะการแตกหักที่เป็นเปราะอยู่ ซึ่งสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อผสม ELO จะสามารถดูได้จากตารางที่ 4.2 ซึ่งจะอธิบายไว้ในส่วนถัดไป



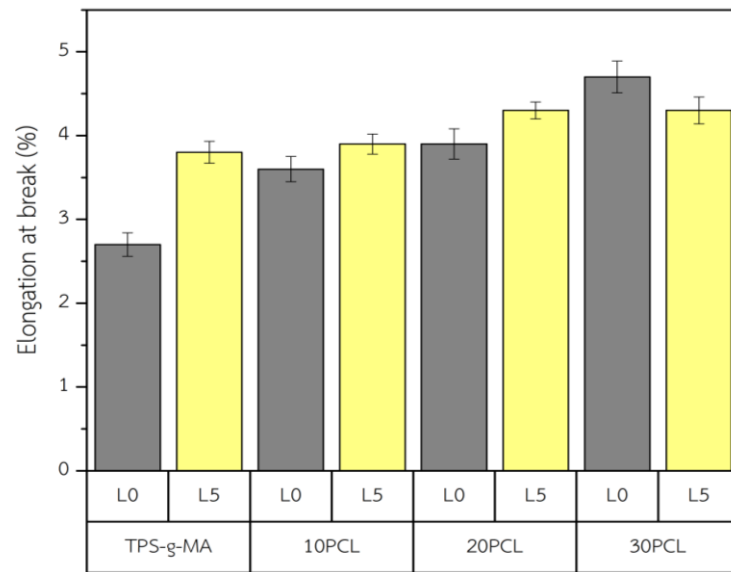
รูปที่ 4.21 stress-strain curve ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการผสม ELO 5% โดยน้ำหนัก

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการผสม epoxidized linseed oil (ELO) ลงไป 5% โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่มีการผสม ELO จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.22 พบว่าสูตรการผสม TPS-g-MA-L5, 10PCL-L5 และ 20 PCL-L5 มีการเพิ่มขึ้นของค่าอย่างมีนัยสำคัญ elongation at break คิดเป็น 40.7, 8.3 และ 10.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับสูตรการผสม เมื่อเปรียบค่า Young's modulus ใน ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.23 พบว่า การผสม ELO ทำให้ค่า Young's modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์มีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญคิดเป็น 26.1, 29.5, 31.6 และ 26.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับสูตรการผสม เมื่อเปรียบเทียบค่าของ tensile strength ในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.24 การผสม ELO ทำให้ค่า tensile strength ของพอลิเมอร์เบลนด์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในทุกอัตราส่วนการผสมซึ่งคิดเป็น 76.3, 51.4, 42.7 และ 22.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับสูตรการผสม เช่นเดียวกับ impact strength ใน ตารางที่ 4.2

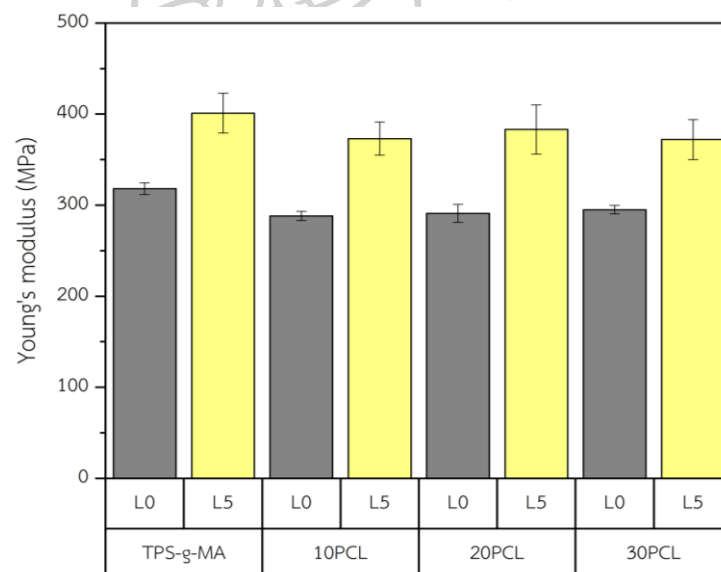
และรูปที่ 4.25 พบว่ามีค่าที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทุกอัตราส่วนการผสมเมื่อมีการผสม ELO ลงไปซึ่งคิดเป็น 21.5, 25.0, 29.0 และ 22.3 ตามลำดับสูตรการผสม จากการเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลแสดงให้เห็นว่า ELO ที่ผสมลงไปทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่าง TPS-g-MA ซึ่งเป็นวัสดุภาคหลัก และ PCL-g-MA ซึ่งเป็นวัสดุรองโดยจะเข้าไปทำให้อุณหภูมิของ PCL-g-MA เกิดการกระจายตัว ใน TPS-g-MA ได้ดี และลดการเกาะกลุ่มกันของ PCL-g-MA ซึ่งการที่ PCL-g-MA มีขนาดที่เล็กและกระจายตัวได้ดีจะส่งผลทำให้เมื่อชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ได้รับแรง การส่งผ่านแรงจะเกิดขึ้นอย่างทั่วถึง และสม่ำเสมอภายในชิ้นงานจึงทำให้ค่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ มีค่าที่เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 4.2 ค่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่มีส่วนผสม ELO และพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการผสม ELO 5% โดยน้ำหนัก

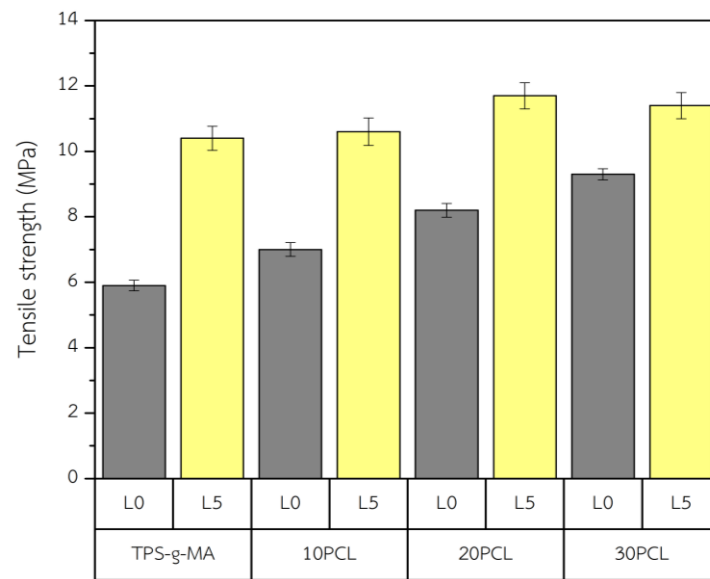
Formulation	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Impact strength (kJ/m ²)
TPS-g-MA	318±6.47 ^a	5.9±0.16 ^a	2.7±0.14 ^a	1.07±0.05 ^a
TPS-g-MA-L5	401±21.89 ^b	10.4±0.37 ^b	3.8±0.13 ^b	1.30±0.05 ^b
10PCL	288±5.08 ^a	7.0±0.21 ^a	3.6±0.15 ^a	1.12±0.04 ^a
10PCL-L5	373±18.25 ^b	10.6±0.42 ^b	3.9±0.12 ^b	1.40±0.06 ^b
20PCL	291±9.92 ^a	8.2±0.21 ^a	3.9±0.18 ^a	1.24±0.05 ^a
20PCL-L5	383±26.93 ^b	11.7±0.40 ^b	4.3±0.10 ^b	1.60±0.05 ^b
30PCL	295±4.57 ^a	9.3±0.17 ^a	4.7±0.19 ^a	1.39±0.06 ^a
30PCL-L5	372±21.87 ^b	11.4±0.40 ^b	4.3±0.16 ^b	1.70±0.08 ^b



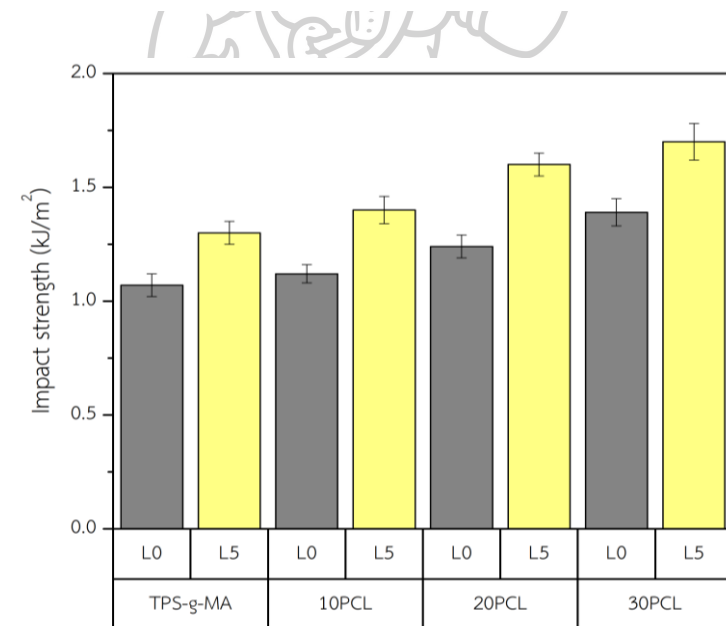
รูปที่ 4.23 แผนภูมิแสดงค่า elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ไม่ผสม ELO เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม ELO 5% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.22 แผนภูมิแสดงค่า Young's modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์ไม่ผสม ELO เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม ELO 5% โดยน้ำหนัก



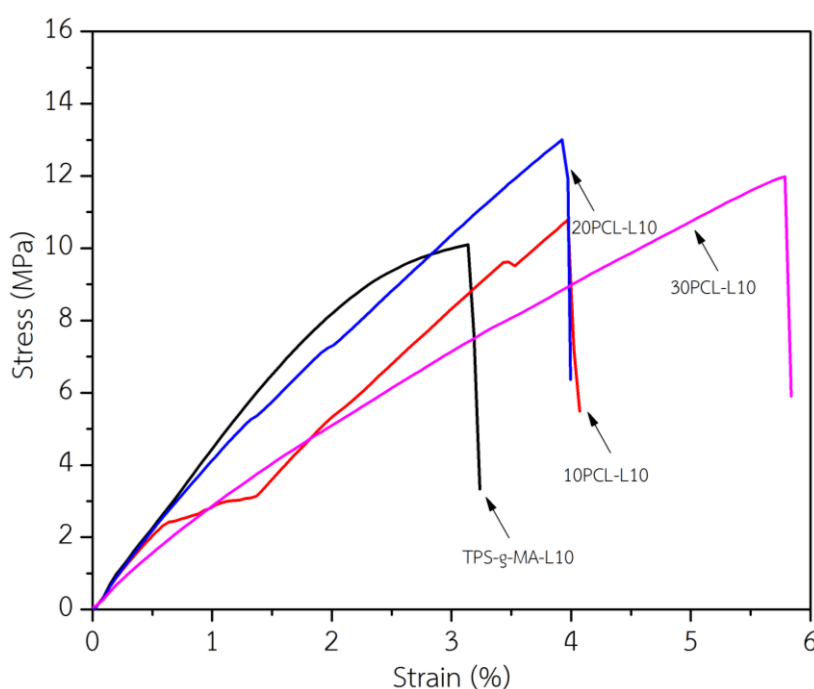
รูปที่ 4.25 แผนภูมิแสดงค่า tensile strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ไม่ผสม ELO เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม ELO 5% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.24 แผนภูมิแสดงค่า impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ไม่ผสม ELO เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม ELO 5% โดยน้ำหนัก

4.7.3 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำมันพืชที่ผ่านกระบวนการ epoxidized ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์

ผู้วิจัยได้เลือกข้อมูลของชิ้นงานบางตัวอย่างมาแสดงเป็น stress-strain curve ในรูปที่ 4.26 โดยพบว่า การเพิ่มปริมาณ ELO ที่ผสมกับพอลิเมอร์เบลนด์ยังคงทำให้พอลิเมอร์เบลนด์มีลักษณะการแตกหักที่เป็นเปราะอยู่ ซึ่งสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเพิ่มปริมาณ ELO จะสามารถดูได้จากตารางที่ 4.3 ซึ่งจะอธิบายไว้ในส่วนถัดไป



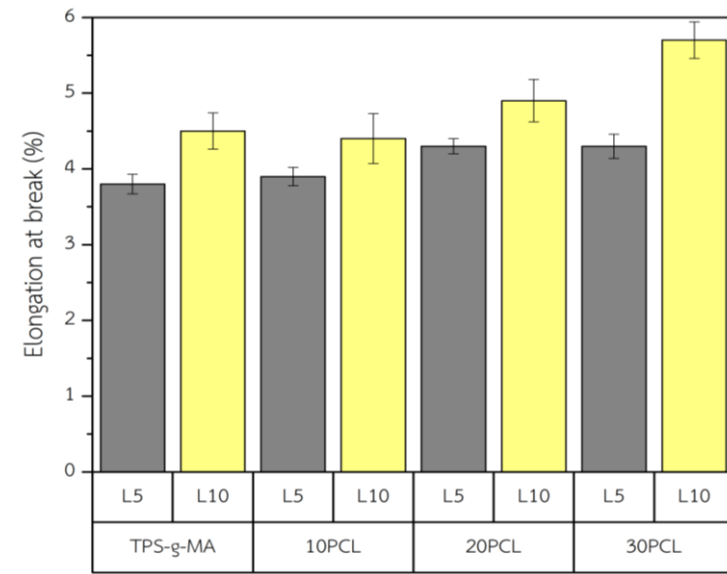
รูปที่ 4.26 stress-strain curve ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการผสม ELO 10% โดยน้ำหนัก

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ของสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม ELO ดังแสดงตารางที่ 4.3 จะพบว่า การเติม ELO ลงไป 10% โดยน้ำหนักจะทำให้ค่า elongation at break ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ในแต่ละสัดส่วนการเพิ่มผสมเพิ่มขึ้นจากเดิมอย่างมีนัยสำคัญ 18.4, 12.8, 14.0 และ 32.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับสูตรการผสม และทำให้ค่า impact strength ดังแสดงในรูปที่ 4.30 เพิ่มขึ้นจากเดิมอย่างมีนัยสำคัญ 9.2, 10.0, 39.4 และ 123.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับสูตรการผสม ในขณะที่ค่าของ tensile strength ดังแสดงในรูปที่ 4.29 เมื่อทำการตรวจสอบแล้วไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนของค่า Young's modulus ดังแสดงในรูปที่ 4.28 เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม ELO ลงไป 5% โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญคิดเป็น 6.5, 7.8, 15.9 และ 16.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับสูตรการผสม แสดงให้เห็นว่า ELO นอกจากจะทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานระหว่างพอลิเมอร์เบลนด์แล้วยังประพฤติตัวเป็น plasticizer ให้กับพอลิเมอร์เบลนด์โดยจะทำหน้าที่เข้าไปลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ

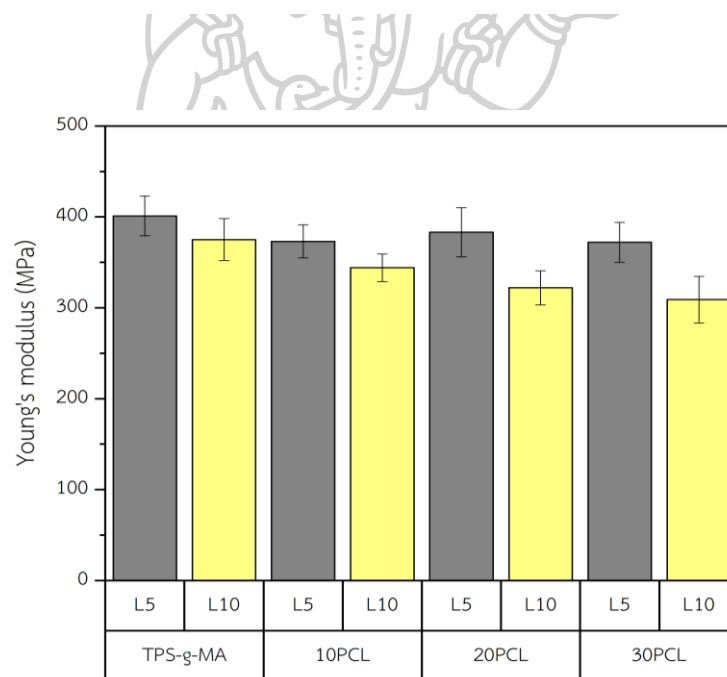
พอลิเมอร์เบลนด์ลงทำให้ชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์มีความยืดหยุ่นที่เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น ค่า elongation at break และ impact strength จึงเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากชิ้นงานที่มีความยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้นทำให้สูญเสียความสามารถในการต้านทานการเสีรูปร่างไปจึงส่งผลทำให้ค่าของ Young's modulus มีค่าที่ลดต่ำลง

ตารางที่ 4.3 ค่าสมบัติเชิงของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการผสม ELO 5% โดยน้ำหนัก และพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการผสม ELO 10% โดยน้ำหนัก

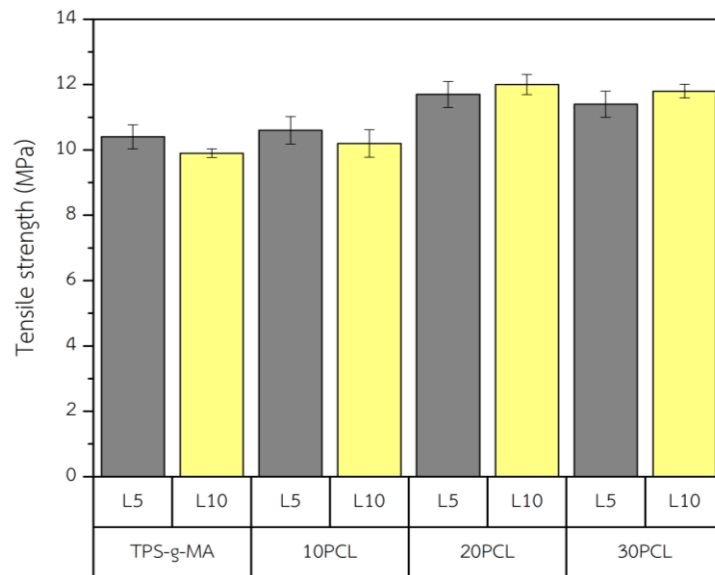
Formulation	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Impact strength (kJ/m ²)
TPS-g-MA-L5	401±21.89 ^a	10.4±0.37 ^a	3.8±0.13 ^a	1.30±0.05 ^a
TPS-g-MA-L10	375±22.98 ^b	9.9±0.13 ^a	4.5±0.24 ^b	1.42±0.06 ^b
10PCL-L5	373±18.25 ^a	10.6±0.42 ^a	3.9±0.12 ^a	1.40±0.06 ^a
10PCL-L10	344±15.07 ^b	10.2±0.42 ^a	4.4±0.33 ^b	1.54±0.09 ^b
20PCL-L5	383±26.93 ^a	11.7±0.40 ^a	4.3±0.10 ^a	1.60±0.05 ^a
20PCL-L10	322±18.82 ^b	12.0±0.31 ^a	4.9±0.28 ^b	2.23±0.06 ^b
30PCL-L5	372±21.87 ^a	11.4±0.40 ^a	4.3±0.16 ^a	1.70±0.08 ^a
30PCL-L10	309±25.56 ^b	11.8±0.21 ^a	5.7±0.24 ^b	3.80±0.09 ^b



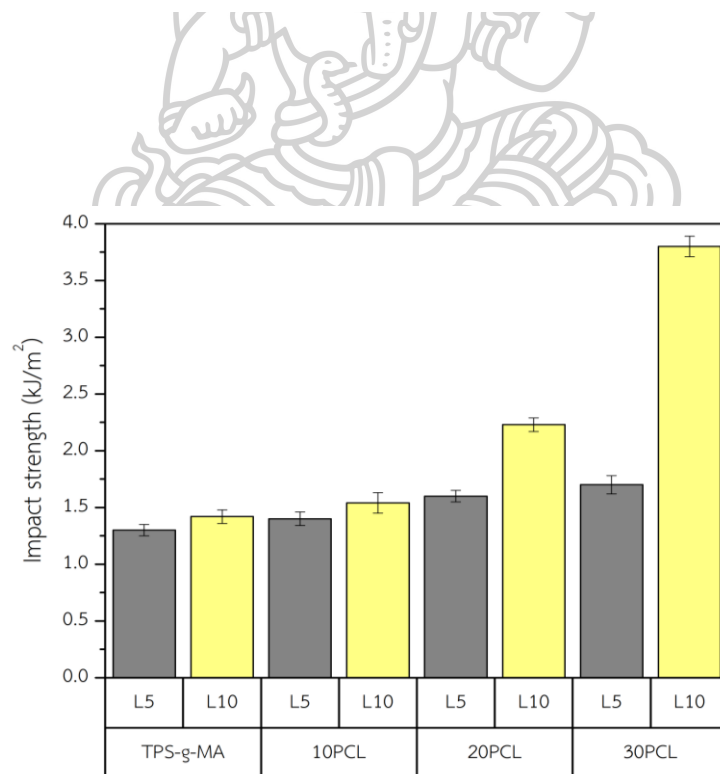
รูปที่ 4.27 แผนภูมิแสดงค่า elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม ELO 5% โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม ELO 10% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.28 แผนภูมิแสดงค่า Young's modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม ELO 5% โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม ELO 10% โดยน้ำหนัก



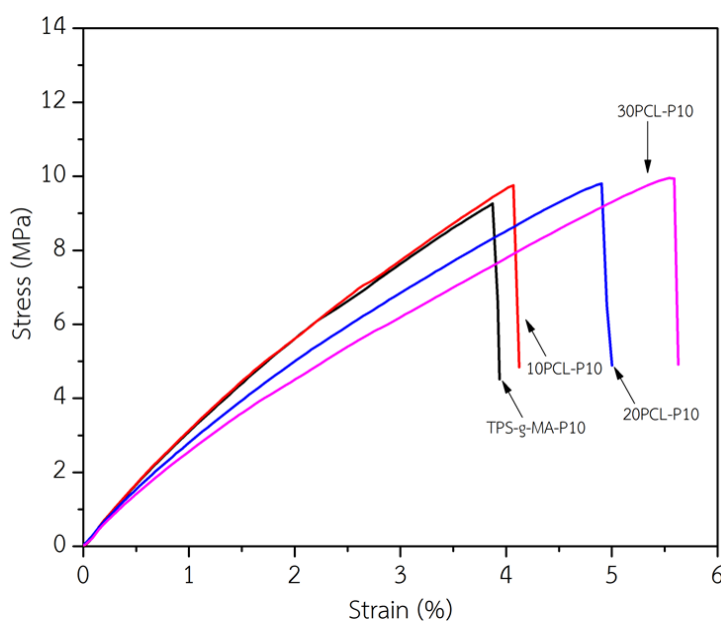
รูปที่ 4.29 แผนภูมิแสดงค่า tensile strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม ELO 5% โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม ELO 10% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.30 แผนภูมิแสดงค่า impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม ELO 5% โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม ELO 10% โดยน้ำหนัก

4.7.4 การศึกษาอิทธิพลของชนิดน้ำมันพืชที่ผ่านกระบวนการ epoxidized ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์

ผู้วิจัยได้เลือกข้อมูลของชิ้นงานบางตัวอย่างมาแสดงเป็น stress-strain curve ในรูปที่ 4.31 โดยพบว่าการเปลี่ยนชนิดของ EO ที่ผสมกับพอลิเมอร์เบลนด์จาก ELO เป็น EPO ที่ปริมาณเท่าเดิม ยังคงทำให้พอลิเมอร์เบลนด์มีลักษณะการแตกหักที่เป็นเปราะอยู่เหมือนเดิม ซึ่งสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปลี่ยนชนิด EO จะสามารถดูได้จาก ตารางที่ 4.4 ซึ่งจะอธิบายไว้ในส่วนถัดไป



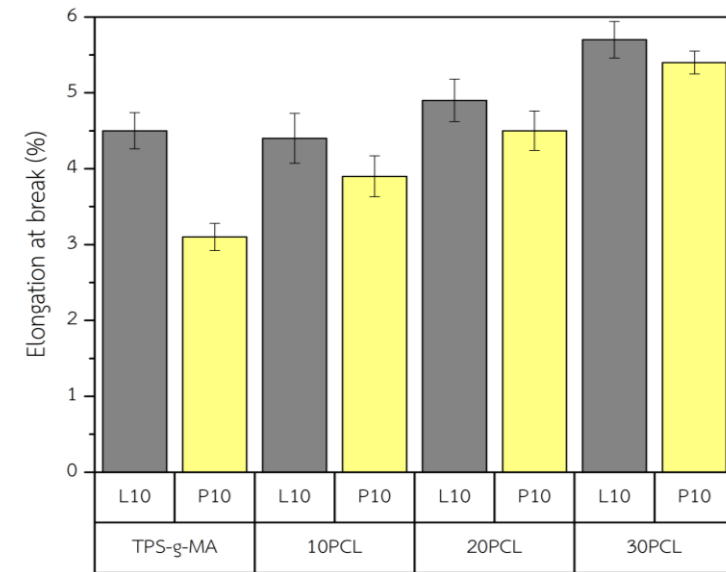
รูปที่ 4.31 stress-strain curve ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการผสม EPO 10% โดยน้ำหนัก

เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลใน ตารางที่ 4.4 พบว่าการเปลี่ยนชนิดของน้ำมันพืชจาก ELO เป็น EPO ที่ปริมาณเท่ากันทำให้ค่าของสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ลดต่ำลงโดยพบว่าค่า elongation at break มีการลดต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญคิดเป็น 31.0, 11.3, 8.1 และ 5.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับสูตรการผสม ค่า Young's modulus มีการลดต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญคิดเป็น 16.8, 17.1, 14.9 และ 31.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับสูตรการผสม ค่า tensile strength มีการลดต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญคิดเป็น 11.1, 9.8, 14.1 และ 8.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับสูตรการผสม และ ค่า impact strength มีการลดต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญคิดเป็น 12.6, 27.2, 17.4 และ 15.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับสูตรการผสม จากงานวิจัย Adhvaryu และคณะดังแสดงในตารางที่ 2.5 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า double bond ของน้ำมันพืชแต่ละชนิดจะพบว่า linseed oil จะมีปริมาณ double bond 6.6 ใน ขณะที่ palm oil จะมีปริมาณ double bond อยู่ที่ 1.7 เมื่อน้ำมันพืชทั้งสองผ่านปฏิกิริยา epoxidation ปริมาณ epoxide group ของ palm oil จะมีปริมาณที่น้อยกว่า linseed oil เนื่องจากปฏิกิริยา epoxidation จะเกิดที่ตำแหน่ง double bond ในโครงสร้างของ

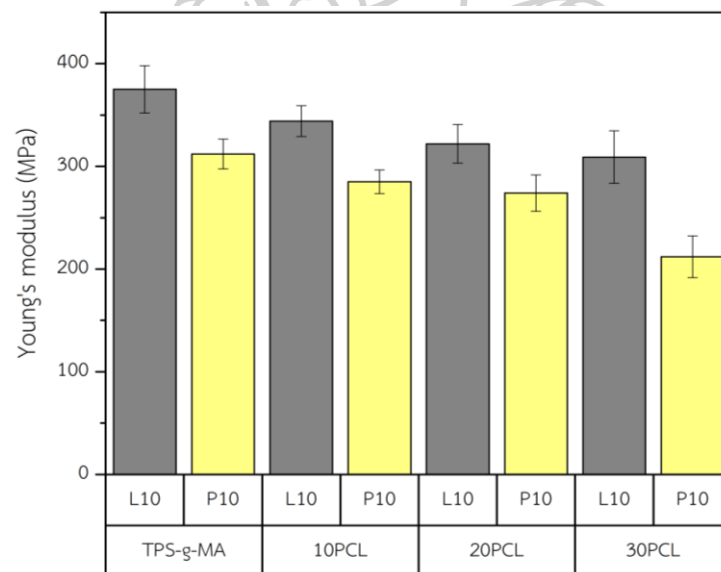
น้ำมันพืช ซึ่งการที่สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม EPO มีค่าที่ต่ำกว่า ELO ทางผู้วิจัยคิดว่าเนื่องจาก EPO นั้นมีปริมาณ epoxide group ที่น้อยกว่า ELO ซึ่งทำให้การเชื่อมประสานระหว่าง TPS-g-MA และ PCL-g-MA เกิดขึ้นได้น้อยเนื่องจาก epoxide group จะเป็นจุดที่ทำให้เกิดการเชื่อมประสานระหว่าง TPS-g-MA และ PCL-g-MA ดังนั้นค่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม EPO จึงต่ำกว่า ELO

ตารางที่ 4.4 ค่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการผสม ELO 10% โดยน้ำหนัก และพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการผสม EPO 10% โดยน้ำหนัก

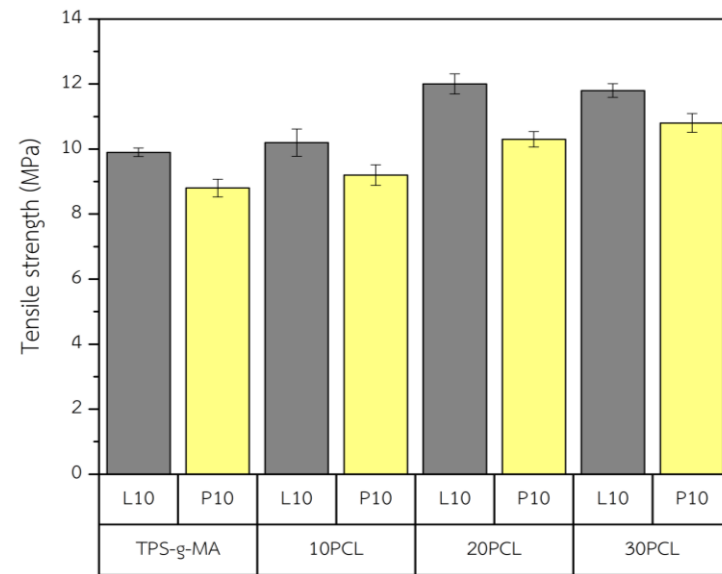
Formulation	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Impact strength (kJ/m ²)
TPS-g-MA-L10	375±22.98 ^a	9.9±0.13 ^a	4.5±0.24 ^a	1.42±0.06 ^a
TPS-g-MA-P10	312±14.57 ^b	8.8±0.27 ^b	3.1±0.18 ^b	1.24±0.04 ^b
10PCL-L10	344±15.07 ^a	10.2±0.42 ^a	4.4±0.33 ^a	1.54±0.09 ^a
10PCL-P10	285±11.35 ^b	9.2±0.32 ^b	3.9±0.27 ^b	1.12±0.05 ^b
20PCL-L10	322±18.82 ^a	12.0±0.31 ^a	4.9±0.28 ^a	2.23±0.06 ^a
20PCL-P10	274±17.69 ^b	10.3±0.24 ^b	4.5±0.26 ^b	1.84±0.06 ^b
30PCL-L10	309±25.56 ^a	11.8±0.21 ^a	5.7±0.24 ^a	3.80±0.09 ^a
30PCL-P10	212±20.36 ^b	10.8±0.29 ^b	5.4±0.15 ^b	3.22±0.12 ^b



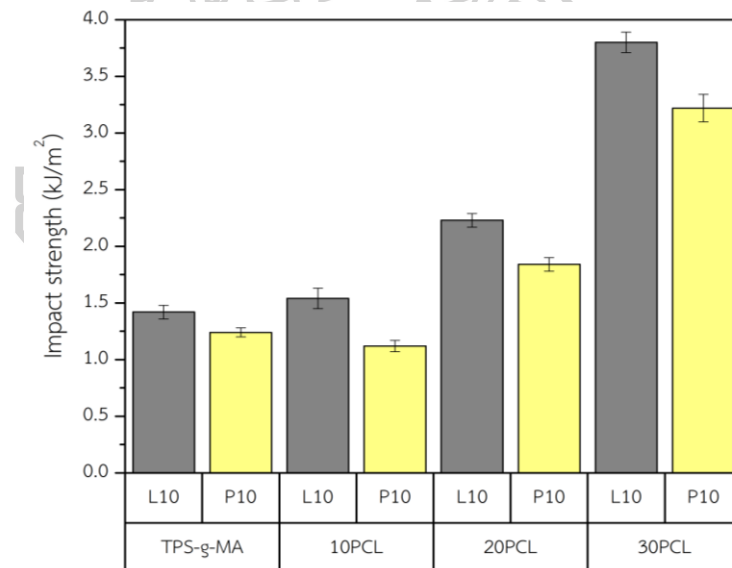
รูปที่ 4.32 แผนภูมิแสดงค่า elongation at break ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม ELO 10% โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม EPO 10% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.33 แผนภูมิแสดงค่า Young's modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม ELO 10% โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม EPO 10% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.34 แผนภูมิแสดงค่า tensile strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม ELO 10% โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม EPO 10% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.35 แผนภูมิแสดงค่า impact strength ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม ELO 10% โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม EPO 10% โดยน้ำหนัก

4.8 การศึกษาสมบัติการดูดซับความชื้นของพอลิเมอร์เบลนด์

การศึกษาสมบัติการดูดซับความชื้นของพอลิเมอร์เบลนด์ที่เป็นชิ้นงานที่ขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM D-256 ซึ่งเป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบ impact testing โดยทำการทดสอบภายใต้ ความชื้นสัมพัทธ์ 54% เป็นเวลา 15 วัน สารที่จะใช้เพื่อให้เกิดการอิมมัตวที่สภาวะดังกล่าวคือ magnesium nitrate hexahydrate ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) ซึ่งจะพิจารณาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปเพื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์โดยสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นได้ดังนี้

$$\% \text{ moisture absorption} = \frac{W_t - W_0}{W_t} \quad (2)$$

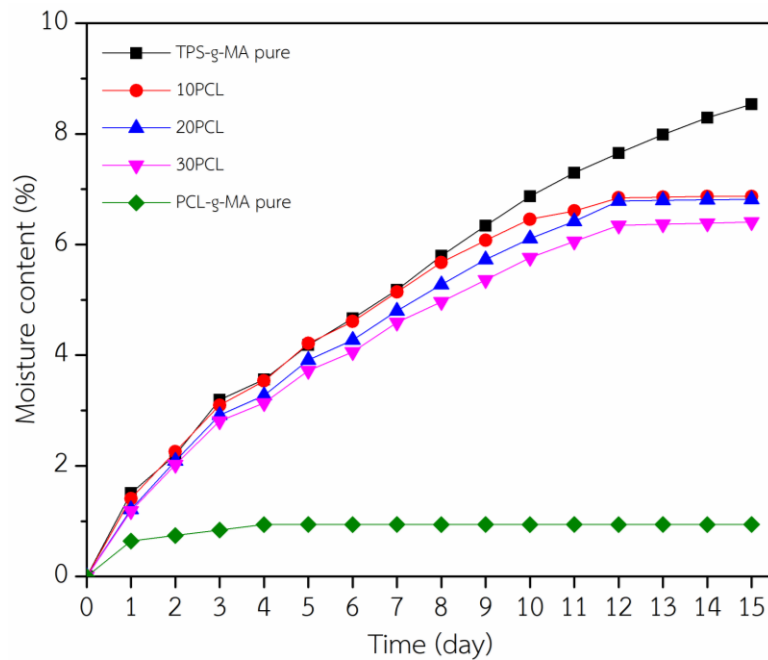
โดยที่ W_t คือ น้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ที่ระยะเวลาใด ๆ

W_0 คือ น้ำหนักเริ่มต้นของชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์

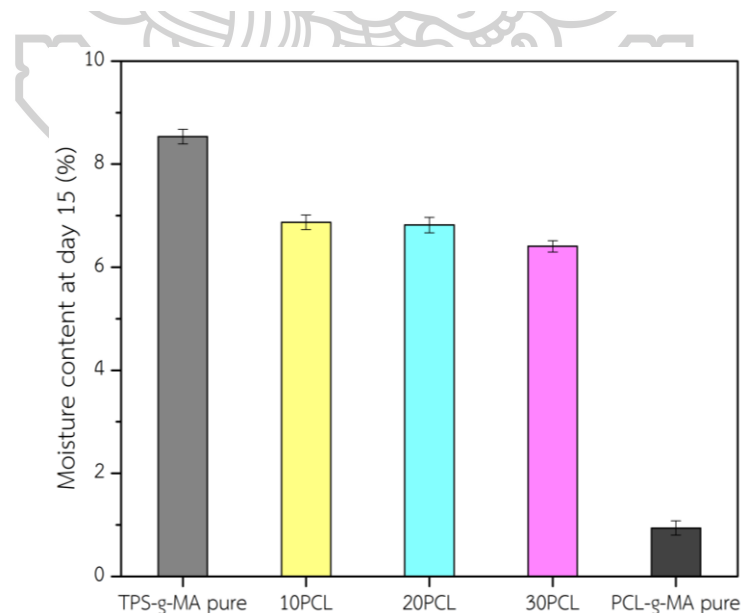
4.8.1 การศึกษาอิทธิพลของ PCL-g-MA ที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติการดูดซับความชื้นของ TPS-g-MA

จาก รูปที่ 4.36 พบว่า pure TPS-g-MA จะมีค่า moisture content ที่สูงที่สุดอีกทั้งยังมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นต่อไปเรื่อย ๆ เนื่องจากภายในโครงสร้างของ TPS-g-MA จะประกอบด้วย anhydride group และ hydroxyl group ซึ่งเป็นหมู่ที่มีความ hydrophilic สูงทำให้ความชื้นสามารถดูดซับลงบนผิวของ TPS-g-MA ได้ง่าย ในขณะที่ PCL-g-MA พบว่าค่า moisture content ของ PCL-g-MA ยังคงมีค่าต่ำ เนื่องจากโดยธรรมชาติของ PCL เป็นพอลิเมอร์ประเภท hydrophobic ความชื้นจึงเกิดการดูดซับที่ผิวของ PCL-g-MA ได้น้อย เมื่อผสม PCL-g-MA ลงไปใน TPS-g-MA ปริมาณ 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนัก หากเปรียบเทียบเส้นกราฟของพอลิเมอร์เบลนด์ในช่วงวันที่ 1 ถึง 4 ของการทดสอบจะพบว่าค่าความชื้นของกราฟมีค่าที่ไม่แตกต่างกันแสดงให้เห็นถึงว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วนการผสมต่าง ๆ มีอัตราการดูดซับความชื้นที่เท่ากันอยู่ แต่ในช่วงตั้งแต่วันที่ 4 ถึง 12 ของการทดสอบจะพบว่าค่าของกราฟพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการผสม PCL-g-MA 10% โดยน้ำหนัก จะมีค่าสูงที่สุด และจะมีค่าที่ลดต่ำลงมาตามปริมาณของ PCL-g-MA ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณของ PCL-g-MA จะทำให้อัตราการดูดซับความชื้นของพอลิเมอร์เบลนด์ลดต่ำลงเนื่องจากความเป็น hydrophobic ของ PCL-g-MA และหากเปรียบเทียบการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับความชื้นพบว่าพอลิเมอร์เบลนด์จะมีการเข้าสู่สมดุลการดูดซับความชื้นตั้งแต่วันที่ 12 ของการทดสอบ

ในขณะที่ TPS-g-MA จะไม่มีการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับความชื้น ซึ่งทางผู้วิจัยคิดว่า การที่ พอลิเมอร์เบลนด์ มีการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับความชื้นเป็นผลมาจากการกระจายตัวของ PCL-g-MA ใน พอลิเมอร์เบลนด์



รูปที่ 4.36 กราฟการดูดซับความชื้นของชิ้นงาน pure TPS-g-MA, pure PCL-g-MA และพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม PCL-g-MA ลงไป 10% (10PCL), 20% (20PCL) และ 30% (30PCL)

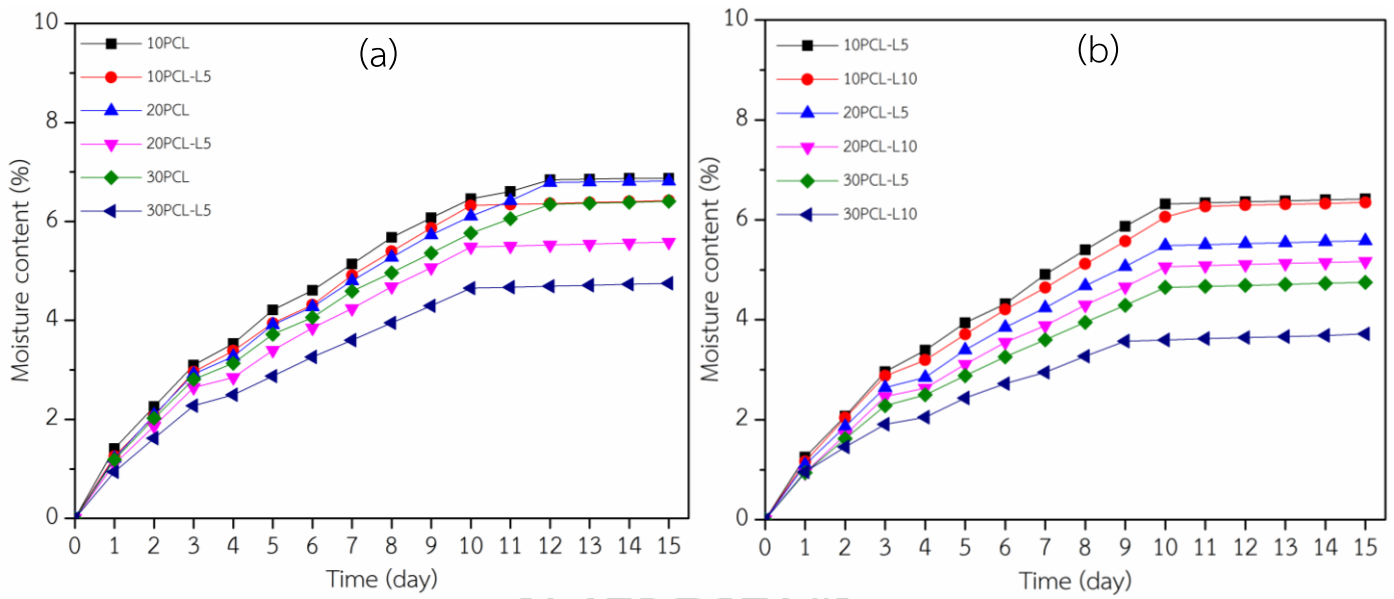


รูปที่ 4.37 แผนภูมิแสดงค่า moisture content ของ TPS-g-MA, PCL-g-MA และพอลิเมอร์เบลนด์ ที่สูตรการผสมต่าง ๆ ณ วันที่ 15 ของการทดสอบ

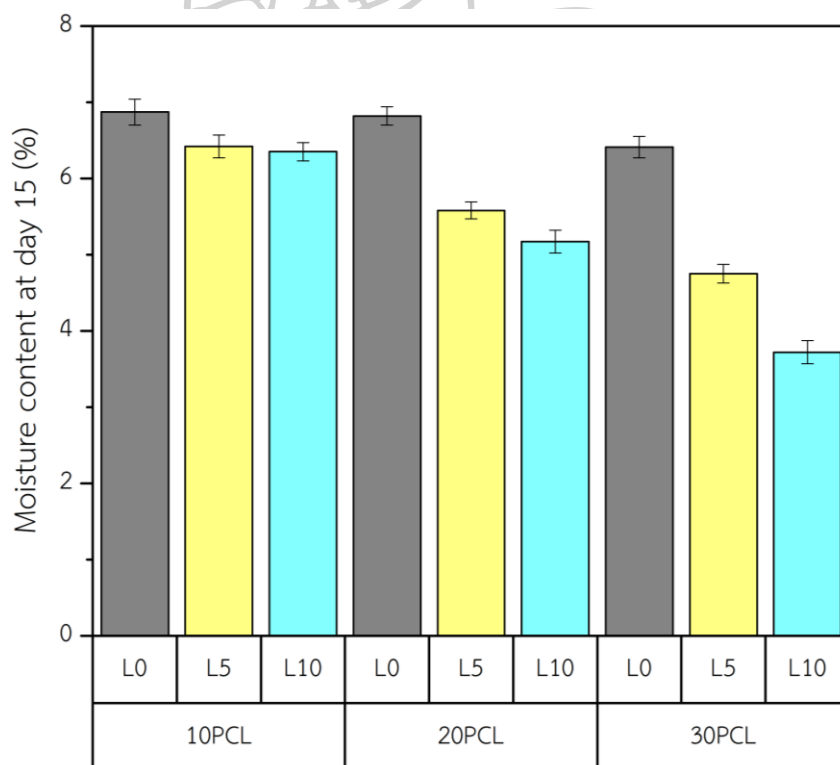
4.8.2 การศึกษาอิทธิพลปริมาณ ELO ที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติการดูดซับความชื้นของ พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS-g-MA และ PCL-g-MA

จาก รูปที่ 4.38 a และรูปที่ 4.39 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์เบลนด์ที่อัตราส่วน การผสมเดียวกันจะพบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม ELO ลงไป 5% โดยน้ำหนัก จะมีค่า moisture content ที่น้อยกว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่มีการเติม ELO อีกทั้งการเติม ELO ลงไปในพอลิเมอร์เบลนด์ยังทำให้ชิ้นงานเกิดความอึดตัวต่อความชื้นได้เร็วกว่าโดยสามารถ สังเกตได้จากเส้นกราฟของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม ELO จะมีลักษณะเส้นกราฟคองที่ ตั้งแต่วันที่ 10 ของการทดสอบ ซึ่งจะแตกต่างกับ เส้นกราฟของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่มีการ เติม ELO ที่ลักษณะเส้นกราฟเริ่มคองที่ในวันที่ 12 ของการทดสอบ เนื่องจากโมเลกุล ของ ELO ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานทำให้วัฏภาคของ PCL-g-MA มีความเป็น hydrophobic เกิดการกระจายตัวได้ดี ทำให้ลดโอกาสการเกิด hydrogen bond ระหว่าง ความชื้นที่ปกคลุมชิ้นงาน กับ TPS-g-MA ซึ่งเป็น วัฏภาคหลัก และมีความเป็น hydrophilic ที่สูงได้

จาก รูปที่ 4.38 b และรูปที่ 4.39 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า moisture content ของ พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีสูตรการผสม 10PCL พบว่าการเพิ่มปริมาณ ELO ที่ผสมจาก 5% เป็น 10% โดยน้ำหนักค่าของ moisture content ลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากที่สูตรการ ผสม 10PCL ปริมาณของ TPS-g-MA ซึ่งเป็นส่วนที่มีความเป็น hydrophilic สูง มีสัดส่วนที่ มากทำให้ ELO ที่ผสมอยู่ เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เบลนด์ได้ไม่ ทั่วถึงทำให้มีความชื้นบางส่วนสามารถเกิด hydrogen bonding กับ TPS-g-MA ได้ ใน ส่วนของสูตรการผสม 20PCL และ 30PCL พบว่าการเพิ่มปริมาณ ELO ที่ผสมจาก 5% เป็น 10% โดยน้ำหนักจะทำให้การแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เบลนด์มีมาก ขึ้นทำให้พอลิเมอร์เบลนด์มีโอกาสเกิด hydrogen bonding กับความชื้นได้น้อยลงดังนั้น moisture content จึงมีค่าลดต่ำลง



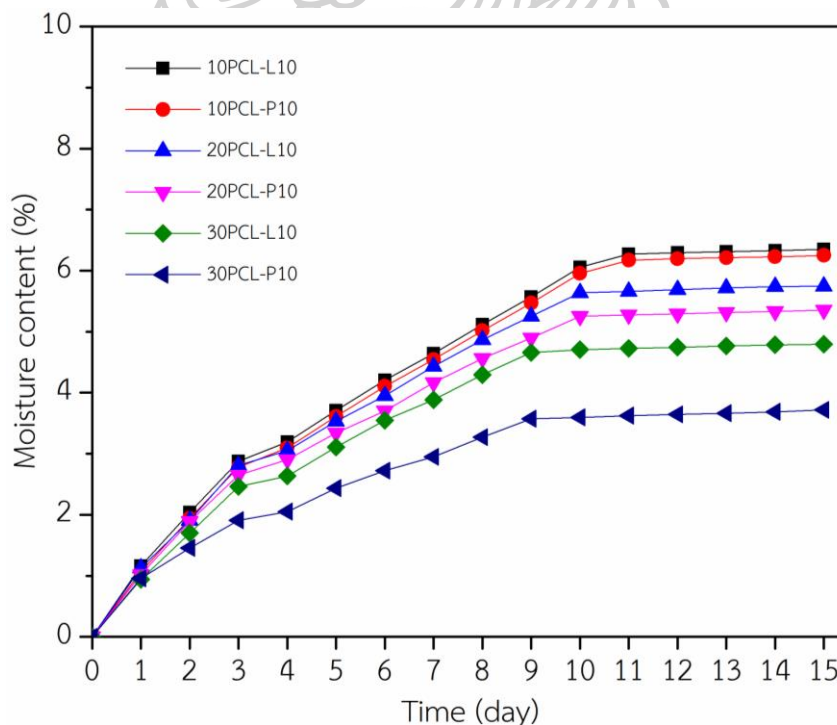
รูปที่ 4.38 กราฟการดูดซับความชื้นของ (a) ชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่มีการเติม ELO และเติม ELO 5% โดยน้ำหนัก และ (b) ชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม ELO 5 และ 10% โดยน้ำหนัก



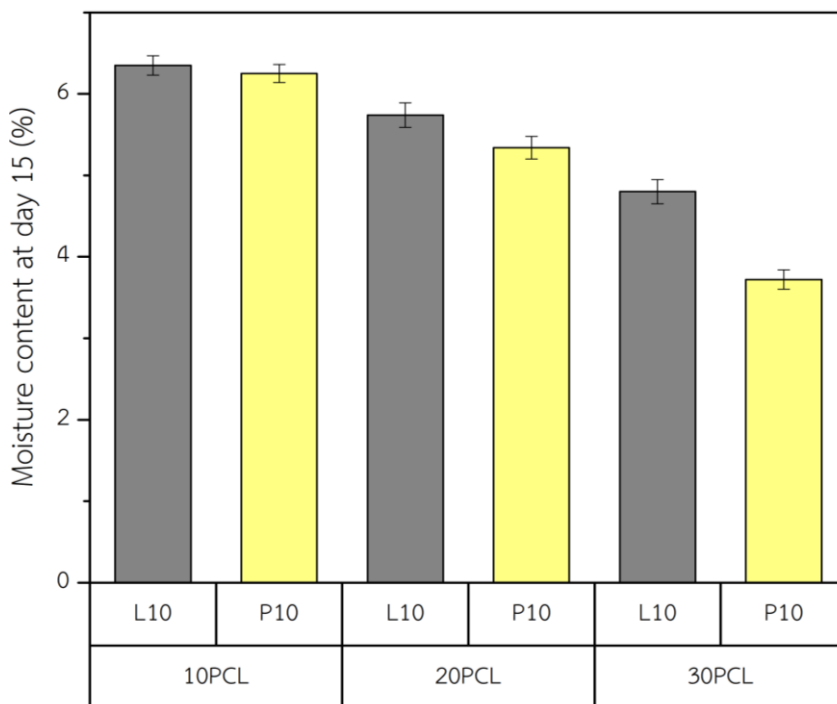
รูปที่ 4.39 แผนภูมิแสดงค่า moisture content ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสมปริมาณ ELO ต่างกัน ณ วันที่ 15 ของการทดสอบ

4.8.4 การศึกษาอิทธิพลของชนิด EO ที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติการดูดซับความชื้นของ พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS-g-MA และ PCL-g-MA

ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบอิทธิพลของชนิด EO ที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติการดูดซับความชื้นของพอลิเมอร์เบลนด์โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันลินสีด (linseed oil) และน้ำมันปาล์ม (palm oil) ซึ่งความแตกต่างของน้ำมันพืชทั้ง 2 ชนิด คือ ปริมาณพันธะคู่ (double bond) ที่มีอยู่ในน้ำมันพืชแต่ละชนิด โดยจาก ตารางที่ 2.5 จะพบว่า น้ำมันปาล์ม (palm oil) จะมีปริมาณพันธะคู่ (double bond) อยู่ที่ 1.7 ในขณะที่ น้ำมันลินสีด (linseed oil) จะปริมาณพันธะคู่ (double bond) อยู่ที่ 6.6 เมื่อน้ำมันพืชทั้ง 2 ชนิด เกิดปฏิกิริยา epoxidation จะทำให้ พันธะคู่ (double bond) กลายเป็น epoxide group ทำให้ ELO มีความเป็นขั้วที่มากกว่า EPO จาก รูปที่ 4.40 และรูปที่ 4.41 จะพบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม ELO ลงไป 10% โดยน้ำหนัก จะมีค่า moisture content ที่มากกว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม EPO ลงไป 10% โดยน้ำหนัก เนื่องจาก ELO ที่มีขั้วสูงกว่า EPO ดังนั้นเมื่อแทรกอยู่ในสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เบลนด์จะทำให้มีโอกาสเกิด hydrogen bonding กับความชื้นได้ส่งผลทำให้ชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ดูดซับความชื้นได้มากกว่า



รูปที่ 4.40 การดูดซับความชื้นของชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม ELO 10% โดยน้ำหนัก และเติม EPO 10% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.41 แผนภูมิแสดงค่า moisture content ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม EO ต่างชนิดกัน ณ วันที่ 15 ของการทดสอบ



บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

ในส่วนแรกของงานวิจัยจะเป็นการทำ chemical modification กับ TPS และ PCL โดยการใช้ maleic anhydride (MA) กระทำในลักษณะ melt blending ซึ่งจากผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วย FTIR และ ¹H-NMR สามารถยืนยันได้ว่า MA ได้เกิดการ grafting ติดอยู่บนโครงสร้างของทั้ง TPS และ PCL ได้ อีกทั้งการสังเคราะห์น้ำมันพืชที่ผ่านการ epoxidized โดยมีการใช้น้ำมันพืช 2 ชนิด คือ น้ำมันปาล์ม (palm oil) กับ น้ำมันลินสีด (linseed oil) ทำปฏิกิริยากับสารประกอบ peracid ซึ่งจากผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วย FTIR และ ¹H-NMR สามารถยืนยันได้ว่า พันธะคู่ (double bond) ภายในโครงสร้างของน้ำมันพืชได้เปลี่ยนกลายเป็น epoxide group

จากผลการทดสอบด้วยเทคนิค SEM กับชิ้นงานพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS-g-MA และ PCL-g-MA ณ บริเวณภาคตัดขวางที่เป็นรอยแตกจากเทคนิค cryogenic fracture พบว่า PCL-g-MA ซึ่งเป็นวัสดุภาครองมีการกระจายตัวอยู่ใน TPS-g-MA ซึ่งเป็นวัสดุหลัก และเมื่อปริมาณของ PCL-g-MA ในการผสมเพิ่มสูงขึ้นจะพบว่า PCL-g-MA จะเกิดการรวมกลุ่มกันขึ้น จากหลักฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม EO พบว่ามีความไม่ชัดเจนของรูปร่างจากเทคนิค SEM เนื่องจาก EO ที่เป็นของเหลวเกิดการไหลเข้าไปเติมเต็มรูพรุนที่เกิดขึ้นจากการ aging ภายในวัสดุของ TPS-g-MA

จากผลการทดสอบด้วยเทคนิค XRD พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีสัดส่วนการผสม 10PCL พบว่า PCL-g-MA ทำให้ TPS-g-MA เกิดการตกผลึกได้ดียิ่งขึ้น และพบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการผสม EO ลงไปจะทำให้ลักษณะผลึกมีความแตกต่างกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่ได้ผสม EO

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ยังไม่มีการเติม epoxidized linseed oil (ELO) พบว่าเมื่อปริมาณของ PCL-g-MA ในสัดส่วนการผสมเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ค่า elongation at break, tensile strength และ impact strength มีค่าที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก PCL-g-MA เป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่น และความสามารถในการทนต่อแรงดึงยึดที่สูง เมื่อกระจายตัวอยู่ใน TPS-g-MA จึงทำให้ค่าสมบัติเชิงกลดั่งที่กล่าวมาข้างต้นเพิ่มสูงขึ้น แต่ค่า Young's modulus ของพอลิเมอร์เบลนด์กลับมีค่าที่ลดต่ำลงเนื่องจากลักษณะที่เหนียวคล้ายยางของ PCL-g-MA เมื่อกระจายตัวอยู่ใน TPS-g-MA จะทำให้ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปของพอลิเมอร์เบลนด์ลดต่ำลง

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม epoxidized linseed oil (ELO) ลงไป 5% โดยน้ำหนักเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่เติม ELO พบว่าค่าของสมบัติเชิงกลต่าง ๆ เช่น elongation at break, Young's modulus, tensile strength และ impact strength มีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นแสดงให้เห็นว่า ELO ที่เติมลงไปประพฤติตัวเป็นสารเชื่อมประสานระหว่าง TPS-g-MA และ PCL-g-MA ทำให้วัฏภาคของพอลิเมอร์ทั้ง 2 เกิดการยึดติดกันที่ดียิ่งขึ้น จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม epoxidized linseed oil (ELO) ลงไป 10% โดยน้ำหนักเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่เติม ELO ลงไป 5% โดยน้ำหนัก จะพบว่าค่าการเพิ่มปริมาณของ ELO ในการผสมจะทำให้ค่า elongation at break และ impact strength มีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องมาจากการประพฤติตัวเป็นสาร plasticizer ของ ELO แต่จะทำให้ค่า Young's modulus ลดต่ำลง จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์เปรียบเทียบชนิดของ EO ที่ผสมพบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการผสม ELO มีสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการผสม EPO

จากผลการศึกษาสมบัติการดูดซับความชื้นของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ยังไม่มีการเติม epoxidized oil พบว่า PCL-g-MA มีสมบัติเป็น hydrophobic ดังนั้นเมื่อปริมาณ PCL-g-MA เพิ่มมากขึ้นค่า moisture content จึงลดต่ำลง เมื่อมีการผสม ELO ลงไปในพอลิเมอร์เบลนด์ปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก และ 10% โดยน้ำหนักพบว่าค่า moisture content ของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าลดต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่มีการเติม ELO แสดงให้เห็นว่า ELO เกิดการแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เบลนด์ทำให้ลดโอกาสการเกิด hydrogen bond ระหว่างความชื้นที่ปกคลุมชิ้นงาน กับ TPS-g-MA ซึ่งเป็น วัฏภาคหลัก และมีความเป็น hydrophilic ที่สูงได้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง ELO กับ EPO ที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติการดูดซับความชื้นของพอลิเมอร์เบลนด์เมื่อทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะพบว่า ELO มีค่าที่สูงกว่า EPO จึงมีโอกาสที่จะเกิด hydrogen bonding กับความชื้นได้มากกว่าทำให้ค่า moisture content ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสมกับ ELO จึงมีค่าที่สูงกว่า moisture content ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสมกับ EPO

5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัย

พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS-g-MA และ PCL-g-MA ที่มีการผสม EO ต่างชนิดกันเพื่อการนำไปใช้งานนั้นขึ้นอยู่กับ application ที่ต้องการนำไปใช้งานหากต้องการใช้งานที่เน้นสมบัติเชิงกลของวัสดุเป็นหลักพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม ELO จะมีความเหมาะสมมากกว่า ในทางตรงกันข้ามหากต้องการใช้งานที่เน้นการป้องกันความชื้นของวัสดุเป็นหลักพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผสม EPO จะมีความเหมาะสมมากกว่า

เนื่องจากทั้ง TPS, PCL และน้ำมันพืช วัสดุทั้งสามชนิดเป็นวัสดุที่สามารถเกิดการย่อยสลายตัวเองตามธรรมชาติได้แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้มีการปรับปรุงสมบัติทางเคมีของวัสดุทั้งสามชนิดดังนั้นจึงควรมีการทดสอบการย่อยสลายตัวเองตามธรรมชาติของวัสดุทั้งสามเพื่อที่สามารถยืนยันได้ว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่เกิดขึ้นนั้นมีความสามารถในการย่อยสลายตัวเองตามธรรมชาติได้จริง





ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดสอบ moisture content ของพอลิเมอร์เบส

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการทดสอบ moisture content ของ TPS-g-MA

วันที่	น้ำหนักชิ้นที่ (กรัม)			ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้ง (กรัม)	$w_t - w_0$	$(w_t - w_0) / w_t$	$((w_t - w_0) / w_t) * 100$
	1	2	3				
0	3.43	3.39	3.40	3.41	0.00	0.00	0.00
1	3.48	3.45	3.45	3.46	0.05	0.02	1.51
2	3.51	3.47	3.48	3.48	0.08	0.02	2.20
3	3.54	3.50	3.51	3.52	0.11	0.03	3.19
4	3.56	3.52	3.53	3.53	0.13	0.04	3.56
5	3.58	3.54	3.55	3.56	0.15	0.04	4.19
6	3.60	3.56	3.57	3.57	0.17	0.05	4.66
7	3.62	3.58	3.59	3.59	0.19	0.05	5.18
8	3.64	3.60	3.61	3.62	0.21	0.06	5.80
9	3.66	3.62	3.63	3.64	0.23	0.06	6.34
10	3.68	3.64	3.65	3.66	0.25	0.07	6.87
11	3.70	3.66	3.67	3.68	0.27	0.07	7.30
12	3.71	3.68	3.68	3.69	0.28	0.08	7.66
13	3.73	3.69	3.69	3.70	0.30	0.08	7.99
14	3.74	3.70	3.71	3.72	0.31	0.08	8.29
15	3.75	3.71	3.71	3.73	0.32	0.09	8.53

w_0 คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่เวลาเริ่มต้น

w_t คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่ผ่านมาแล้ว t วัน

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลการทดสอบ moisture content ของพอลิเมอร์เบสระหว่าง TPS-g-MA กับ PCL-g-MA ในอัตราส่วน 90 ต่อ 10 103

วันที่	น้ำหนักขึ้นที่ (กรัม)			ค่าเฉลี่ยน้ำหนักขึ้นที่ (กรัม)	$w_t - w_0$	$(w_t - w_0) / w_t$	$((w_t - w_0) / w_t) * 100$
	1	2	3				
0	3.29	3.32	3.33	3.31	0.00	0.00	0.00
1	3.34	3.37	3.38	3.36	0.05	0.01	1.41
2	3.37	3.39	3.41	3.39	0.08	0.02	2.26
3	3.40	3.42	3.44	3.42	0.11	0.03	3.09
4	3.42	3.44	3.45	3.44	0.12	0.04	3.53
5	3.44	3.46	3.48	3.46	0.15	0.04	4.21
6	3.45	3.48	3.49	3.47	0.16	0.05	4.61
7	3.47	3.50	3.51	3.49	0.18	0.05	5.14
8	3.49	3.51	3.53	3.51	0.20	0.06	5.68
9	3.51	3.53	3.55	3.53	0.22	0.06	6.07
10	3.52	3.55	3.56	3.54	0.23	0.06	6.46
11	3.54	3.56	3.57	3.55	0.24	0.07	6.61
12	3.55	3.57	3.58	3.56	0.24	0.07	6.85
13	3.55	3.57	3.57	3.57	0.24	0.07	6.71
14	3.55	3.58	3.58	3.57	0.25	0.07	6.92
15	3.57	3.59	3.59	3.58	0.25	0.07	7.06

W_0 คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่เวลาเริ่มต้น

W_t คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่ผ่านมาแล้ว t วัน

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลการทดสอบ moisture content ของพอลิเมอร์เบลอนด์ระหว่าง TPS-g-MA กับ PCL-g-MA ในอัตราส่วน 80 ต่อ 20 104

วันที่	น้ำหนักขึ้นที่ (กรัม)			ค่าเฉลี่ยน้ำหนักขึ้นที่ (กรัม)	$w_t - w_0$	$(w_t - w_0) / w_t$	$((w_t - w_0) / w_t) * 100$
	1	2	3				
0	3.43	3.39	3.40	3.41	0.00	0.00	0.00
1	3.48	3.45	3.45	3.46	0.05	0.02	1.51
2	3.51	3.47	3.48	3.48	0.08	0.02	2.20
3	3.54	3.50	3.51	3.52	0.11	0.03	3.19
4	3.56	3.52	3.53	3.53	0.13	0.04	3.56
5	3.58	3.54	3.55	3.56	0.15	0.04	4.19
6	3.60	3.56	3.57	3.57	0.17	0.05	4.66
7	3.62	3.58	3.59	3.59	0.19	0.05	5.18
8	3.64	3.60	3.61	3.62	0.21	0.06	5.80
9	3.66	3.62	3.63	3.64	0.23	0.06	6.34
10	3.68	3.64	3.65	3.66	0.25	0.07	6.87
11	3.70	3.66	3.67	3.68	0.27	0.07	7.30
12	3.71	3.68	3.68	3.69	0.28	0.08	7.66
13	3.73	3.69	3.69	3.70	0.30	0.08	7.99
14	3.74	3.70	3.71	3.72	0.31	0.08	8.29
15	3.75	3.71	3.71	3.73	0.32	0.09	8.53

W_0 คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่เวลาเริ่มต้น

W_t คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่ผ่านมาแล้ว t วัน

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลการทดสอบ moisture content ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS-g-MA กับ PCL-g-MA ในอัตราส่วน 70 ต่อ 30 105

วันที่	น้ำหนักชิ้นที่ (กรัม)			ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้ง (กรัม)	$w_t - w_0$	$(w_t - w_0) / w_t$	$((w_t - w_0) / w_t) * 100$
	1	2	3				
0	3.43	3.39	3.40	3.41	0.00	0.00	0.00
1	3.48	3.45	3.45	3.46	0.05	0.02	1.51
2	3.51	3.47	3.48	3.48	0.08	0.02	2.20
3	3.54	3.50	3.51	3.52	0.11	0.03	3.19
4	3.56	3.52	3.53	3.53	0.13	0.04	3.56
5	3.58	3.54	3.55	3.56	0.15	0.04	4.19
6	3.60	3.56	3.57	3.57	0.17	0.05	4.66
7	3.62	3.58	3.59	3.59	0.19	0.05	5.18
8	3.64	3.60	3.61	3.62	0.21	0.06	5.80
9	3.66	3.62	3.63	3.64	0.23	0.06	6.34
10	3.68	3.64	3.65	3.66	0.25	0.07	6.87
11	3.70	3.66	3.67	3.68	0.27	0.07	7.30
12	3.71	3.68	3.68	3.69	0.28	0.08	7.66
13	3.73	3.69	3.69	3.70	0.30	0.08	7.99
14	3.74	3.70	3.71	3.72	0.31	0.08	8.29
15	3.75	3.71	3.71	3.73	0.32	0.09	8.53

W_0 คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่เวลาเริ่มต้น

W_t คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่ผ่านมาแล้ว t วัน

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลการทดสอบ moisture content ของ PCL-g-MA

วันที่	น้ำหนักขึ้นที่ (กรัม)			ค่าเฉลี่ยน้ำหนักขึ้นที่ (กรัม)	w_t-w_0	$(w_t-w_0)/w_t$	$((w_t-w_0)/w_t)*100$
	1	2	3				
0	3.43	3.39	3.40	3.41	0.00	0.00	0.00
1	3.48	3.45	3.45	3.46	0.05	0.02	1.51
2	3.51	3.47	3.48	3.48	0.08	0.02	2.20
3	3.54	3.50	3.51	3.52	0.11	0.03	3.19
4	3.56	3.52	3.53	3.53	0.13	0.04	3.56
5	3.58	3.54	3.55	3.56	0.15	0.04	4.19
6	3.60	3.56	3.57	3.57	0.17	0.05	4.66
7	3.62	3.58	3.59	3.59	0.19	0.05	5.18
8	3.64	3.60	3.61	3.62	0.21	0.06	5.80
9	3.66	3.62	3.63	3.64	0.23	0.06	6.34
10	3.68	3.64	3.65	3.66	0.25	0.07	6.87
11	3.70	3.66	3.67	3.68	0.27	0.07	7.30
12	3.71	3.68	3.68	3.69	0.28	0.08	7.66
13	3.73	3.69	3.69	3.70	0.30	0.08	7.99
14	3.74	3.70	3.71	3.72	0.31	0.08	8.29
15	3.75	3.71	3.71	3.73	0.32	0.09	8.53

W_0 คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่เวลาเริ่มต้น

W_t คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่ผ่านมาแล้ว t วัน

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลการทดสอบ moisture content ของพอลิเมอร์เบสระหว่าง TPS-g-MA กับ PCL-g-MA ในอัตราส่วน 90 ต่อ 10 ที่เติม ELO 5% โดยน้ำหนัก

วันที่	น้ำหนักขึ้นที่ (กรัม)			ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้ง (กรัม)	$w_t - w_0$	$(w_t - w_0) / w_t$	$((w_t - w_0) / w_t) * 100$
	1	2	3				
0	3.43	3.39	3.40	3.41	0.00	0.00	0.00
1	3.48	3.45	3.45	3.46	0.05	0.02	1.51
2	3.51	3.47	3.48	3.48	0.08	0.02	2.20
3	3.54	3.50	3.51	3.52	0.11	0.03	3.19
4	3.56	3.52	3.53	3.53	0.13	0.04	3.56
5	3.58	3.54	3.55	3.56	0.15	0.04	4.19
6	3.60	3.56	3.57	3.57	0.17	0.05	4.66
7	3.62	3.58	3.59	3.59	0.19	0.05	5.18
8	3.64	3.60	3.61	3.62	0.21	0.06	5.80
9	3.66	3.62	3.63	3.64	0.23	0.06	6.34
10	3.68	3.64	3.65	3.66	0.25	0.07	6.87
11	3.70	3.66	3.67	3.68	0.27	0.07	7.30
12	3.71	3.68	3.68	3.69	0.28	0.08	7.66
13	3.73	3.69	3.69	3.70	0.30	0.08	7.99
14	3.74	3.70	3.71	3.72	0.31	0.08	8.29
15	3.75	3.71	3.71	3.73	0.32	0.09	8.53

W_0 คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่เวลาเริ่มต้น

W_t คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่ผ่านมาแล้ว t วัน

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลการทดสอบ moisture content ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS-g-MA กับ PCL-g-MA ในอัตราส่วน 80 ต่อ 20 ที่เติม ELO 5% โดยน้ำหนัก

วันที่	น้ำหนักขึ้นที่ (กรัม)			ค่าเฉลี่ยน้ำหนักขึ้นที่ (กรัม)	$w_t - w_0$	$(w_t - w_0) / w_t$	$((w_t - w_0) / w_t) * 100$
	1	2	3				
0	3.43	3.39	3.40	3.41	0.00	0.00	0.00
1	3.48	3.45	3.45	3.46	0.05	0.02	1.51
2	3.51	3.47	3.48	3.48	0.08	0.02	2.20
3	3.54	3.50	3.51	3.52	0.11	0.03	3.19
4	3.56	3.52	3.53	3.53	0.13	0.04	3.56
5	3.58	3.54	3.55	3.56	0.15	0.04	4.19
6	3.60	3.56	3.57	3.57	0.17	0.05	4.66
7	3.62	3.58	3.59	3.59	0.19	0.05	5.18
8	3.64	3.60	3.61	3.62	0.21	0.06	5.80
9	3.66	3.62	3.63	3.64	0.23	0.06	6.34
10	3.68	3.64	3.65	3.66	0.25	0.07	6.87
11	3.70	3.66	3.67	3.68	0.27	0.07	7.30
12	3.71	3.68	3.68	3.69	0.28	0.08	7.66
13	3.73	3.69	3.69	3.70	0.30	0.08	7.99
14	3.74	3.70	3.71	3.72	0.31	0.08	8.29
15	3.75	3.71	3.71	3.73	0.32	0.09	8.53

W_0 คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่เวลาเริ่มต้น

W_t คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่ผ่านมาแล้ว t วัน

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลการทดสอบ moisture content ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS-g-MA กับ PCL-g-MA ในอัตราส่วน 70 ต่อ 30 ที่เติม ELO 5% โดยน้ำหนัก

วันที่	น้ำหนักขึ้นที่ (กรัม)			ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้ง (กรัม)	$w_t - w_0$	$(w_t - w_0) / w_t$	$((w_t - w_0) / w_t) * 100$
	1	2	3				
0	3.43	3.39	3.40	3.41	0.00	0.00	0.00
1	3.48	3.45	3.45	3.46	0.05	0.02	1.51
2	3.51	3.47	3.48	3.48	0.08	0.02	2.20
3	3.54	3.50	3.51	3.52	0.11	0.03	3.19
4	3.56	3.52	3.53	3.53	0.13	0.04	3.56
5	3.58	3.54	3.55	3.56	0.15	0.04	4.19
6	3.60	3.56	3.57	3.57	0.17	0.05	4.66
7	3.62	3.58	3.59	3.59	0.19	0.05	5.18
8	3.64	3.60	3.61	3.62	0.21	0.06	5.80
9	3.66	3.62	3.63	3.64	0.23	0.06	6.34
10	3.68	3.64	3.65	3.66	0.25	0.07	6.87
11	3.70	3.66	3.67	3.68	0.27	0.07	7.30
12	3.71	3.68	3.68	3.69	0.28	0.08	7.66
13	3.73	3.69	3.69	3.70	0.30	0.08	7.99
14	3.74	3.70	3.71	3.72	0.31	0.08	8.29
15	3.75	3.71	3.71	3.73	0.32	0.09	8.53

W_0 คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่เวลาเริ่มต้น

W_t คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่ผ่านมาแล้ว t วัน

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลการทดสอบ moisture content ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS-g-MA กับ PCL-g-MA ในอัตราส่วน 90 ต่อ 10 ที่เติม ELO 10% โดยน้ำหนัก

วันที่	น้ำหนักชิ้นที่ (กรัม)			ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้ง (กรัม)	$w_t - w_0$	$(w_t - w_0) / w_t$	$((w_t - w_0) / w_t) * 100$
	1	2	3				
0	3.43	3.39	3.40	3.41	0.00	0.00	0.00
1	3.48	3.45	3.45	3.46	0.05	0.02	1.51
2	3.51	3.47	3.48	3.48	0.08	0.02	2.20
3	3.54	3.50	3.51	3.52	0.11	0.03	3.19
4	3.56	3.52	3.53	3.53	0.13	0.04	3.56
5	3.58	3.54	3.55	3.56	0.15	0.04	4.19
6	3.60	3.56	3.57	3.57	0.17	0.05	4.66
7	3.62	3.58	3.59	3.59	0.19	0.05	5.18
8	3.64	3.60	3.61	3.62	0.21	0.06	5.80
9	3.66	3.62	3.63	3.64	0.23	0.06	6.34
10	3.68	3.64	3.65	3.66	0.25	0.07	6.87
11	3.70	3.66	3.67	3.68	0.27	0.07	7.30
12	3.71	3.68	3.68	3.69	0.28	0.08	7.66
13	3.73	3.69	3.69	3.70	0.30	0.08	7.99
14	3.74	3.70	3.71	3.72	0.31	0.08	8.29
15	3.75	3.71	3.71	3.73	0.32	0.09	8.53

W_0 คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่เวลาเริ่มต้น

W_t คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่ผ่านมาแล้ว t วัน

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลการทดสอบ moisture content ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS-g-MA กับ PCL-g-MA ในอัตราส่วน 80 ต่อ 20 ที่เติม ELO 10% โดยน้ำหนัก 111

วันที่	น้ำหนักขึ้นที่ (กรัม)			ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้ง (กรัม)	w_t-w_0	$(w_t-w_0)/w_t$	$((w_t-w_0)/w_t)*100$
	1	2	3				
0	3.43	3.39	3.40	3.41	0.00	0.00	0.00
1	3.48	3.45	3.45	3.46	0.05	0.02	1.51
2	3.51	3.47	3.48	3.48	0.08	0.02	2.20
3	3.54	3.50	3.51	3.52	0.11	0.03	3.19
4	3.56	3.52	3.53	3.53	0.13	0.04	3.56
5	3.58	3.54	3.55	3.56	0.15	0.04	4.19
6	3.60	3.56	3.57	3.57	0.17	0.05	4.66
7	3.62	3.58	3.59	3.59	0.19	0.05	5.18
8	3.64	3.60	3.61	3.62	0.21	0.06	5.80
9	3.66	3.62	3.63	3.64	0.23	0.06	6.34
10	3.68	3.64	3.65	3.66	0.25	0.07	6.87
11	3.70	3.66	3.67	3.68	0.27	0.07	7.30
12	3.71	3.68	3.68	3.69	0.28	0.08	7.66
13	3.73	3.69	3.69	3.70	0.30	0.08	7.99
14	3.74	3.70	3.71	3.72	0.31	0.08	8.29
15	3.75	3.71	3.71	3.73	0.32	0.09	8.53

W_0 คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่เวลาเริ่มต้น

W_t คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ ที่ผ่านมาแล้ว t วัน

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลการทดสอบ moisture content ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS-g-MA กับ PCL-g-MA ในอัตราส่วน 70 ต่อ 30 ที่เติม ELO 10% โดยน้ำหนัก 112

วันที่	น้ำหนักชิ้นที่ (กรัม)			ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้ง (กรัม)	w_t-w_0	$(w_t-w_0)/w_t$	$((w_t-w_0)/w_t)*100$
	1	2	3				
0	3.43	3.39	3.40	3.41	0.00	0.00	0.00
1	3.48	3.45	3.45	3.46	0.05	0.02	1.51
2	3.51	3.47	3.48	3.48	0.08	0.02	2.20
3	3.54	3.50	3.51	3.52	0.11	0.03	3.19
4	3.56	3.52	3.53	3.53	0.13	0.04	3.56
5	3.58	3.54	3.55	3.56	0.15	0.04	4.19
6	3.60	3.56	3.57	3.57	0.17	0.05	4.66
7	3.62	3.58	3.59	3.59	0.19	0.05	5.18
8	3.64	3.60	3.61	3.62	0.21	0.06	5.80
9	3.66	3.62	3.63	3.64	0.23	0.06	6.34
10	3.68	3.64	3.65	3.66	0.25	0.07	6.87
11	3.70	3.66	3.67	3.68	0.27	0.07	7.30
12	3.71	3.68	3.68	3.69	0.28	0.08	7.66
13	3.73	3.69	3.69	3.70	0.30	0.08	7.99
14	3.74	3.70	3.71	3.72	0.31	0.08	8.29
15	3.75	3.71	3.71	3.73	0.32	0.09	8.53

W_0 คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่เวลาเริ่มต้น

W_t คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่ผ่านมาแล้ว t วัน

ตารางที่ ก.12 ข้อมูลการทดสอบ moisture content ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS-g-MA กับ PCL-g-MA ในอัตราส่วน 90 ต่อ 10 ที่เติม EPO 10% โดยน้ำหนัก 113

วันที่	น้ำหนักชิ้นที่ (กรัม)			ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้ง (กรัม)	$w_t - w_0$	$(w_t - w_0) / w_t$	$((w_t - w_0) / w_t) * 100$
	1	2	3				
0	3.43	3.39	3.40	3.41	0.00	0.00	0.00
1	3.48	3.45	3.45	3.46	0.05	0.02	1.51
2	3.51	3.47	3.48	3.48	0.08	0.02	2.20
3	3.54	3.50	3.51	3.52	0.11	0.03	3.19
4	3.56	3.52	3.53	3.53	0.13	0.04	3.56
5	3.58	3.54	3.55	3.56	0.15	0.04	4.19
6	3.60	3.56	3.57	3.57	0.17	0.05	4.66
7	3.62	3.58	3.59	3.59	0.19	0.05	5.18
8	3.64	3.60	3.61	3.62	0.21	0.06	5.80
9	3.66	3.62	3.63	3.64	0.23	0.06	6.34
10	3.68	3.64	3.65	3.66	0.25	0.07	6.87
11	3.70	3.66	3.67	3.68	0.27	0.07	7.30
12	3.71	3.68	3.68	3.69	0.28	0.08	7.66
13	3.73	3.69	3.69	3.70	0.30	0.08	7.99
14	3.74	3.70	3.71	3.72	0.31	0.08	8.29
15	3.75	3.71	3.71	3.73	0.32	0.09	8.53

W_0 คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่เวลาเริ่มต้น

W_t คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่ผ่านมาแล้ว t วัน

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลการทดสอบ moisture content ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS-g-MA กับ PCL-g-MA ในอัตราส่วน 80 ต่อ 20 ที่เติม EPO 10% โดยน้ำหนัก 114

วันที่	น้ำหนักขึ้นที่ (กรัม)			ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้ง (กรัม)	$w_t - w_0$	$(w_t - w_0) / w_t$	$((w_t - w_0) / w_t) * 100$
	1	2	3				
0	3.43	3.39	3.40	3.41	0.00	0.00	0.00
1	3.48	3.45	3.45	3.46	0.05	0.02	1.51
2	3.51	3.47	3.48	3.48	0.08	0.02	2.20
3	3.54	3.50	3.51	3.52	0.11	0.03	3.19
4	3.56	3.52	3.53	3.53	0.13	0.04	3.56
5	3.58	3.54	3.55	3.56	0.15	0.04	4.19
6	3.60	3.56	3.57	3.57	0.17	0.05	4.66
7	3.62	3.58	3.59	3.59	0.19	0.05	5.18
8	3.64	3.60	3.61	3.62	0.21	0.06	5.80
9	3.66	3.62	3.63	3.64	0.23	0.06	6.34
10	3.68	3.64	3.65	3.66	0.25	0.07	6.87
11	3.70	3.66	3.67	3.68	0.27	0.07	7.30
12	3.71	3.68	3.68	3.69	0.28	0.08	7.66
13	3.73	3.69	3.69	3.70	0.30	0.08	7.99
14	3.74	3.70	3.71	3.72	0.31	0.08	8.29
15	3.75	3.71	3.71	3.73	0.32	0.09	8.53

W_0 คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่เวลาเริ่มต้น

W_t คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่ผ่านมาแล้ว t วัน

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลการทดสอบ moisture content ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS-g-MA กับ PCL-g-MA ในอัตราส่วน 70 ต่อ 30 ที่เติม EPO 10% โดยน้ำหนัก 115

วันที่	น้ำหนักขึ้นที่ (กรัม)			ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้ง (กรัม)	$w_t - w_0$	$(w_t - w_0) / w_t$	$((w_t - w_0) / w_t) * 100$
	1	2	3				
0	3.43	3.39	3.40	3.41	0.00	0.00	0.00
1	3.48	3.45	3.45	3.46	0.05	0.02	1.51
2	3.51	3.47	3.48	3.48	0.08	0.02	2.20
3	3.54	3.50	3.51	3.52	0.11	0.03	3.19
4	3.56	3.52	3.53	3.53	0.13	0.04	3.56
5	3.58	3.54	3.55	3.56	0.15	0.04	4.19
6	3.60	3.56	3.57	3.57	0.17	0.05	4.66
7	3.62	3.58	3.59	3.59	0.19	0.05	5.18
8	3.64	3.60	3.61	3.62	0.21	0.06	5.80
9	3.66	3.62	3.63	3.64	0.23	0.06	6.34
10	3.68	3.64	3.65	3.66	0.25	0.07	6.87
11	3.70	3.66	3.67	3.68	0.27	0.07	7.30
12	3.71	3.68	3.68	3.69	0.28	0.08	7.66
13	3.73	3.69	3.69	3.70	0.30	0.08	7.99
14	3.74	3.70	3.71	3.72	0.31	0.08	8.29
15	3.75	3.71	3.71	3.73	0.32	0.09	8.53

w_0 คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่เวลาเริ่มต้น

w_t คือน้ำหนักของชิ้นงานพอลิเมอร์ที่ผ่านมาแล้ว t วัน

รายการอ้างอิง

1. Alexandre Mahieu, Caroline Terrié, Albert Agoulon, Nicole Leblanc, and Boulos Youssef, *Thermoplastic starch and poly(ϵ -caprolactone) blends: morphology and mechanical properties as a function of relative humidity*. **Journal of Polymer Research**, 2013. 20(9): p. 229.
2. Pierre Sarazin, Gang Li, William J. Orts, and Basil D. Favis, *Binary and ternary blends of polylactide, polycaprolactone and thermoplastic starch*. **Polymer**, 2008. 49(2): p. 599-609.
3. Kittisak Jantanasakulwong, Noppol Leksawasdi, Phisit Seesuriyachan, Somchai Wongsuriyasak, Charin Techapun, and Toshiaki Ougizawa, *Reactive blending of thermoplastic starch, epoxidized natural rubber and chitosan*. **European Polymer Journal**, 2016. 84: p. 292-299.
4. Yong Yang, Zhaobin Tang, Zhu Xiong, and Jin Zhu, *Preparation and characterization of thermoplastic starches and their blends with poly(lactic acid)*. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2015. 77: p. 273-279.
5. Rodrigo Ortega-Toro, Iris Morey, Pau Talens, and Amparo Chiralt, *Active bilayer films of thermoplastic starch and polycaprolactone obtained by compression molding*. **Carbohydrate Polymers**, 2015. 127: p. 282-290.
6. Fethma M. Nor, Denni Kurniawan, Young-Kwon Seo, Jung-Keug Park, Ho Yong Lee, and Joong Yeon Lim, *Polycaprolactone–starch blends with corn-based coupling agent: physical properties and in vitro analysis*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: **Journal of Engineering in Medicine**, 2012. 226(9): p. 693-698.
7. Chin-San Wu, *Physical properties and biodegradability of maleated-polycaprolactone/starch composite*. **Polymer Degradation and Stability**, 2003. 80(1): p. 127-134.
8. Girón L. Téllez, Enrique V. Santiago, and Susana H. López, *Characterization of linseed oil epoxidized at different percentages*. **Journal of Molecular**

- Structure**, 2009. 22: p. 05-10.
9. Yesmine Fourati, Ramzi Bel Hassen, Gülay Bayramoğlu, and Sami Boufi, *A one step route synthesis of polyurethane network from epoxidized rapeseed oil*. **Progress in Organic Coatings**, 2017. 105: p. 48-55.
 10. Chayapa Weerapoprasit and Jutarat Prachayawarakorn, *Characterization and properties of biodegradable thermoplastic grafted starch films by different contents of methacrylic acid*. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2019. 123: p. 657-663.
 11. Wenxi Cheng, *Preparation and properties of lignocellulosic fiber/CaCO₃/thermoplastic starch composites*. **Carbohydrate Polymers**, 2019. 211: p. 204-208.
 12. Fatemeh Kahvand and Mohammad Fasihi, *Plasticizing and anti-plasticizing effects of polyvinyl alcohol in blend with thermoplastic starch*. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2019. 140: p. 775-781.
 13. Laura Genovese, Franco Dominici, Matteo Gigli, Ilaria Armentano, Nadia Lotti, Elena Fortunati, Valentina Siracusa, Luigi Torre, and Andrea Munari, *Processing, thermo-mechanical characterization and gas permeability of thermoplastic starch/poly(butylene trans-1,4-cyclohexanedicarboxylate) blends*. **Polymer Degradation and Stability**, 2018. 157: p. 100-107.
 14. Bishwabhusana Palai, Manoranjan Biswal, Smita Mohanty, and Sanjay Kumar Nayak, *In situ reactive compatibilization of polylactic acid (PLA) and thermoplastic starch (TPS) blends; synthesis and evaluation of extrusion blown films thereof*. **Industrial Crops and Products**, 2019. 141: p. 111748.
 15. Kizkitza González, Leire Iturriaga, Alba González, Arantxa Eceiza, and Nagore Gabilondo, *Improving mechanical and barrier properties of thermoplastic starch and polysaccharide nanocrystals nanocomposites*. **European Polymer Journal**, 2020. 123: p. 109415.
 16. Francisco J. Rodriguez-Gonzalez, Bruce. A. Ramsay, and Basil. D. Favis, *High performance LDPE/thermoplastic starch blends: a sustainable alternative to pure polyethylene*. **Polymer**, 2003. 44(5): p. 1517-1526.
 17. Alessandra L. Da Róz, Márcia D. Zambon, Antonio A. S. Curvelo, and Antonio J.

- F. Carvalho, *Thermoplastic starch modified during melt processing with organic acids: The effect of molar mass on thermal and mechanical properties. Industrial Crops and Products*, 2011. 33(1): p. 152-157.
18. José M. Ferri, Daniel Garcia-Garcia, Lourdes Sánchez-Nacher, Ocfegi Fenollar, and Rafael Balart, *The effect of maleinized linseed oil (MLO) on mechanical performance of poly(lactic acid)-thermoplastic starch (PLA-TPS) blends. Carbohydrate Polymers*, 2016. 147: p. 60-68.
19. Katarzyna Gorna and Sylwester Gogolewski, *In vitro degradation of novel medical biodegradable aliphatic polyurethanes based on ϵ -caprolactone and Pluronic® with various hydrophilicities. Polymer Degradation and Stability*, 2002. 75(1): p. 113-122.
20. Frank J. van Natta, Julian W. Hill, and Wallace H. Carothers, *Studies of Polymerization and Ring Formation. XXIII.1 ϵ -Caprolactone and its Polymers. Journal of the American Chemical Society*, 1934. 56(2): p. 455-457.
21. Zbigniew Grobelny, Sylwia Golba, and Justyna Jurek-Suliga, *Mechanism of ϵ -caprolactone polymerization in the presence of alkali metal salts: investigation of initiation course and determination of polymers structure by MALDI-TOF mass spectrometry. Polymer Bulletin*, 2019. 76(7): p. 3501-3515.
22. Kamal Gupta, Namrata Pal, Pradeep Mishra, Pradeep Srivastava, Sujata Mohanty, and Pralay Maiti, *5-Fluorouracil-loaded poly(lactic acid)-poly(caprolactone) hybrid scaffold: Potential chemotherapeutic implant. Journal of biomedical materials research. Part A*, 2014. 102.
23. Ruby Dwivedi, Sumit Kumar, Rahul Pandey, Aman Mahajan, Deepti Nandana, Dharendra S. Katti, and Divya Mehrotra, *Polycaprolactone as biomaterial for bone scaffolds: Review of literature. Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, 2020. 10(1): p. 381-388.
24. Atanu Adhvaryu and Sevim Z. Erhan, *Epoxidized soybean oil as a potential source of high-temperature lubricants. Industrial Crops and Products*, 2002. 15(3): p. 247-254.
25. Arianti N. Annisa and Widayat Widayat, *A Review of Bio-lubricant Production*

- from Vegetable Oils Using Esterification Transesterification Process. MATEC Web Conf.*, 2018. 156: p. 06007.
26. Magdalena Jabłońska, Stephan Reißaus, Sven Henning, Matthias Menzel, Angelika Hähnel, Jessica Klehm, Ulrike Hirsch, and Andreas Heilmann, *From the surface to the bulk: A comparison of methods for the microanalysis of an immiscible polymer blend. Micron*, 2019. 124: p. 102685.
 27. Mostafa Vamegh, Mahmoud Ameri, and Seyed Farhad Chavoshian Naeni, *Performance evaluation of fatigue resistance of asphalt mixtures modified by SBR/PP polymer blends and SBS. Construction and Building Materials*, 2019. 209: p. 202-214.
 28. Leire Sangroniz, Martin van Drongelen, Ruth Cardinaels, Antxon Santamaria, Gerrit W. M. Peters, and Alejandro J. Müller, *Effect of shear rate and pressure on the crystallization of PP nanocomposites and PP/PET polymer blend nanocomposites. Polymer*, 2020. 186: p. 121950.
 29. Leszek A. Utracki, *Introduction to Polymer Blends*, in **Polymer Blends Handbook**, L. A. Utracki, Editor. 2003, Springer Netherlands: Dordrecht. p. 1-122.
 30. Fysol Ibna Abbas, G. M. Bhuiyan, and Md Riad Kasem, *A study of thermodynamics of mixing for Al_{1-x}Sn_x liquid binary alloy. Journal of Non-Crystalline Solids*, 2018. 481: p. 391-396.
 31. Piera Casarino, Silvia Vicini, and Enrico Pedemonte, *Thermodynamics of polymer mixtures: study on the mixing process of the poly(styrene)/poly(vinylmethylether) system. Thermochemica Acta*, 2001. 372(1): p. 59-66.
 32. Johannes Karl Fink, *Chapter 16 - Compatibilization*, in **Reactive Polymers Fundamentals and Applications (Second Edition)**, Johannes Karl Fink, Editor. 2013, William Andrew Publishing: Oxford. p. 373-409.
 33. Adam R. Ajitha and Sabu Thomas, *Chapter 1 - Introduction: Polymer blends, thermodynamics, miscibility, phase separation, and compatibilization*, in **Compatibilization of Polymer Blends**, Ajitha A.R and Sabu Thomas, Editors. 2020, Elsevier. p. 1-29.

34. Zhu Xiong, Yong Yang, Jianxiang Feng, Xiaomin Zhang, Chuanzhi Zhang, Zhaobin Tang, and Jin Zhu, *Preparation and characterization of poly(lactic acid)/starch composites toughened with epoxidized soybean oil*. **Carbohydrate Polymers**, 2013. 92(1): p. 810-816.
35. Yingfeng Zuo, Jiyong Gu, Long Yang, Zhibang Qiao, Haiyan Tan, and Yanhua Zhang, *Synthesis and characterization of maleic anhydride esterified corn starch by the dry method*. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2013. 62: p. 241-247.
36. Rodrigo Ortega-Toro, Gabriella Santagata, Giovanna Gomez d' Ayala, Pierfrancesco Cerruti, Pau Talens Oliag, M. Amparo Chiralt Boix, and Mario Malinconico, *Enhancement of interfacial adhesion between starch and grafted poly(ϵ -caprolactone)*. **Carbohydrate Polymers**, 2016. 147: p. 16-27.
37. Chin-San Wu and Hsin-Tzu Liao, *Polycaprolactone-Based Green Renewable Ecomposites Made from Rice Straw Fiber: Characterization and Assessment of Mechanical and Thermal Properties*. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 2012. 51(8): p. 3329-3337.
38. Ramzi Belhassen, Fabiola Vilaseca, Pere Mutjé, and Sami Boufi, *Thermoplasticized starch modified by reactive blending with epoxidized soybean oil*. **Industrial Crops and Products**, 2014. 53: p. 261-267.
39. Jean-Marie Raquez, Yogaraj Nabar, Ramani Narayan, and Philippe Dubois, *Preparation and characterization of maleated thermoplastic starch-based nanocomposites*. **Journal of Applied Polymer Science**, 2011. 122(1): p. 639-647.
40. Joo Ran Kim and Suraj Sharma, *The development and comparison of bio-thermoset plastics from epoxidized plant oils*. **Industrial Crops and Products**, 2012. 36(1): p. 485-499.
41. Yachuan Zhang, Curtis Rempel, and Derek McLaren, *Chapter 16 - Thermoplastic Starch*, in **Innovations in Food Packaging (Second Edition)**, Jung H. Han, Editor. 2014, Academic Press: San Diego. p. 391-412.
42. Lucas Guz, Lucía Famá, Roberto J. Candal, and Silvia Goyanes, *Size effect of*

ZnO nanorods on physicochemical properties of plasticized starch composites. Carbohydrate Polymers, 2017. 157: p. 1611-1619.

43. Jean-Marie Raquez, Yogaraj Nabar, Ramani Narayan, and Philippe Dubois, *In situ compatibilization of maleated thermoplastic starch/polyester melt-blends by reactive extrusion. Polymer Engineering & Science*, 2008. 48: p. 1747-1754.
44. Min-Kyeong Song, Mi-Yeon Lee, Jun-Ho Seo, Min-Ho Kim, and Shi-Young Yang, *Synthesis of High Crystalline Al-Doped ZnO Nanopowders from Al₂O₃ and ZnO by Radio-Frequency Thermal Plasma. Journal of Nanomaterials*, 2015: p. 1-6.
45. Mandula Borjigin, Chris Eskridge, Rohina Niamat, Bryan Strouse, Pawel Bialk, and Eric B. Kmiec, *Electrospun fiber membranes enable proliferation of genetically modified cells. International journal of nanomedicine*, 2013. 8: p. 855-864.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	น่านนที ธรรมปัญญา
วัน เดือน ปี เกิด	04 มกราคม 2537
สถานที่เกิด	จังหวัดน่าน
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (ปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์)
ที่อยู่ปัจจุบัน	187 หมู่4 ต.เมืองพาน อ.พาน จ.เชียงราย 57120
ผลงานตีพิมพ์	Nanntee Thampanya, Wanchai Lerdwijitjarud, and Amnard Sittattrakul Reactive Blending between Maleated Thermoplastic Starch and Maleated Polycaprolactone: Study on Morphology and Mechanical Properties
รางวัลที่ได้รับ	ทุนการศึกษาและทุนนักศึกษาผู้ช่วยสอน จากภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ใน ปีพ.ศ. 2559-2561

