



อิทธิพลของการเติมน้ำมันลินสีดและอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด ที่มีต่อการดูดความชื้นและสมบัติเชิงกล
ของแป้งเทอร์โมพลาสติก



โดย
นายณัฐชนน ยะตา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

อิทธิพลของการเติมน้ำมันลินสีดและอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด ที่มีต่อการดูดความชื้นและ
สมบัติเชิงกลของแป้งเทอร์โมพลาสติก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

INFLUENCE OF LINSEED OIL AND ITS DERIVATIVE ON MOISTURE ABSORPTION
AND MECHANICAL PROPERTIES OF THERMOPLASTIC STARCH



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 2018

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ อธิพลของการเติมน้ำมันลินสีดและอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด ที่มี
ต่อการดูดความชื้นและสมบัติเชิงกลของแป้งเทอร์โมพลาสติก
โดย ญัฐชนน ยะตา
สาขาวิชา วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา
มหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เลิศวิจิตรจรัส

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ญัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)

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

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อติศักดิ์ จตุรพิริย์)

58402205 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : แป้งเทอร์โมพลาสติก, น้ำมันลินสีด, โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด, น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์, โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์, การดูดความชื้น

นาย ญัฐชนน ยะตา: อิทธิพลของการเติมน้ำมันลินสีดและอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด ที่มีต่อการดูดความชื้นและสมบัติเชิงกลของแป้งเทอร์โมพลาสติก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เลิศวิจิตรจรัส

แป้งเทอร์โมพลาสติก (TPS) เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากวัตถุดิบทางชีวภาพและสามารถถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้แทนพอลิเมอร์ที่ได้จากวัตถุดิบทางปิโตรเลียมหลายชนิด แต่อย่างไรก็ตามข้อด้อยที่สำคัญประการหนึ่งของ TPS คือความว่องไวต่อความชื้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของน้ำมันลินสีด (LO) และอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดที่มีต่อการดูดความชื้นและสมบัติเชิงกลของ TPS เนื่องจากคาดว่าความไม่ชอบน้ำของ LO และอนุพันธ์ของ LO จะสามารถลดความว่องไวต่อความชื้นของ TPS ได้ โดยการศึกษาจะถูกแบ่งเป็นสองส่วน ในส่วนแรก LO, โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด (MLO), น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ (ELO) หรือ โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ (EMLO) จะถูกเติมลงไประหว่างการเตรียม TPS ที่อัตราส่วน 1, 3, 5 และ 7 % โดยน้ำหนัก จากการทดสอบพบว่า TPS ที่มี LO หรืออนุพันธ์ของ LO อยู่จะเกิดการดูดความชื้นน้อยกว่า TPS ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง โดยการดูดความชื้นจะยิ่งน้อยลงเมื่อเติมสารเติมแต่งในปริมาณที่มากขึ้น การเติม ELO และ EMLO ที่ปริมาณ 1 % โดยน้ำหนัก จะทำให้ค่าแรงเค้นการดึงสูงสุด และค่ามอดูลัสการดึงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามค่าแรงเค้นการดึงสูงสุดและค่ามอดูลัสการดึงของทุกตัวอย่างจะลดลงตามปริมาณการเติมสารเติมแต่ง เนื่องจากการรวมกลุ่มกันของสารเติมแต่งและการขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างแป้งกับกลีเซอรอล สังเกตได้จากผลการทดสอบ SEM TGA และ XRD ในส่วนที่สองศึกษาการเคลือบผิวขึ้นงาน TPS ด้วย LO, MLO, ELO และ EMLO จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า TPS ที่เคลือบผิวจะมีการดูดความชื้นต่ำกว่า TPS ที่ไม่เคลือบผิว แต่การเคลือบผิวไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลจากการทดสอบ XRD ชี้ให้เห็นว่าการคืนผลึก (retrogradation) ของ TPS จะลดลงเมื่อเคลือบผิวขึ้นงานด้วย LO, MLO, ELO และ EMLO โดยการเคลือบผิวด้วย ELO จะช่วยลดการดูดความชื้นและการคืนผลึกของ TPS ได้ดีที่สุด และภายหลังจากการดูดความชื้นของ TPS พบว่าความชื้นที่แพร่กระจายเข้าไปภายในชิ้นงานจะประพฤติตัวเป็นพลาสติกไฮเซอรัลอีกชนิดหนึ่ง

58402205 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Keyword : Thermoplastic starch, Linseed oil, Mono-glyceride linseed oil, Epoxidized linseed oil, Mono-glyceride epoxidized linseed oil, Moisture absorption

MR. NATCHANON YATA : INFLUENCE OF LINSEED OIL AND ITS DERIVATIVE ON MOISTURE ABSORPTION AND MECHANICAL PROPERTIES OF THERMOPLASTIC STARCH
THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR WANCHAI LERDWIJITJARUD, Ph.D.

Thermoplastic starch (TPS) is a bio-based and biodegradable polymer that has tendency to replace many petroleum-based polymers. However, one of the important weakness of TPS is moisture sensitivity. This research aims to study the effect of linseed oil (LO) and its derivatives on moisture absorption and mechanical properties of TPS. Because of the hydrophobicity of LO and its derivatives are expected to reduce the moisture sensitivity of TPS. The study was divided into two parts. In the first part, linseed oil (LO), mono-glyceride LO (MLO), epoxidized LO (ELO) or epoxidized MLO (EMLO) was added during TPS preparation at 1, 3, 5 and 7 wt.%. TPS incorporating with LO or its derivatives illustrated the lower moisture absorption than neat TPS. The higher additive content, the lower moisture absorption. The addition of ELO and EMLO at 1 wt.% in TPS led to increase in tensile strength (TS) and tensile modulus (TM). However, TS and TM of all sample decreased with increasing additives content due to the incorporation of additives and the interruption of glycerol-starch interaction which could be observed from the results of SEM, TGA and XRD. In the second part, the surface of TPS specimens was coated with LO, MLO, ELO or EMLO. The results showed that coated TPS had lower moisture absorption than uncoated TPS but there were no significant differences in mechanical properties. XRD analysis indicated that the retrogradation of TPS were reduced by coating with LO, MLO, ELO or EMLO. TPS coating with ELO was the best for reducing of moisture absorption and retrogradation. The diffused moisture within TPS after moisture absorption acted as another plasticizer.

กิตติกรรมประกาศ

การทำงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงมาได้ ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยช่วยเหลือให้คำแนะนำ และชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานวิจัยเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์ ผู้เป็นประธานกรรมการในการตรวจวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ จตุรพิริย์ ผู้เป็นคณะกรรมการในการตรวจวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลามาตรวจสอบข้อบกพร่องต่าง ๆ ในงานวิจัย รวมถึงการให้คำแนะนำสำหรับการแก้ไขข้อบกพร่องดังกล่าว ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น ที่ให้ความอนุเคราะห์ crucible pan สำหรับการใช้เป็น pan อ้างอิงในการทดสอบ TGA ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดศิริ เหมศรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องบดสารสำหรับบดแป้งเทอร์โมพลาสติกก่อนนำไปขึ้นรูป

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร สำหรับการสนับสนุนด้านต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นห้องปฏิบัติการเครื่องมือวิจัย รวมถึงทุนสนับสนุนงานวิจัยและทุนการศึกษา ตลอดระยะเวลาการศึกษาและการดำเนินงานวิจัยที่ผ่านมา และขอขอบคุณคุณอาจารย์ในภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน และถ่ายทอดความรู้ต่าง ๆ แก่ผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ผู้วิจัยได้ศึกษาอยู่ ณ สถาบันการศึกษาแห่งนี้

ขอขอบคุณ นักวิทยาศาสตร์ คุณพินิจ เจียนระลึก วิศวกร คุณไพโรจน์ ตั้งศุภรวัช และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุทุกท่านที่คอยช่วยเหลือในการจัดเตรียมอุปกรณ์สารเคมี รวมถึงงานเอกสารต่าง ๆ ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้ดำเนินมาได้ด้วยความสะดวกเรียบร้อย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ คุณพ่อปรีชา ยะตา คุณแม่อรพรรณ ยะตา และครอบครัวทุกคนที่ให้การสนับสนุนทางการศึกษา และคอยเป็นกำลังใจให้เต็มที่เสมอมา

ณัฐชนน ยะตา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 กรอบแนวความคิดงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษาและข้อจำกัดของงานวิจัย.....	4
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแป้ง.....	6
2.2 โครงสร้างและสมบัติของเม็ดแป้ง.....	8
2.3 แป้งมันสำปะหลัง.....	10
2.4 การเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติก.....	12
2.5 การปรับปรุงสมบัติความว่องไวต่อความชื้นของแป้งเทอร์โมพลาสติก.....	14
2.6 น้ำมันลินสีด (linseed oil หรือ flaxseed oil).....	14
2.7 การเตรียมน้ำมันให้เป็นอนุพันธ์ประเภทต่าง ๆ.....	15

2.7.1 การเตรียมอนุพันธ์ของน้ำมันประเภทโมโนกลีเซอไรด์ (mono-glyceride).....	16
2.7.2 การเตรียมอนุพันธ์ของน้ำมันประเภทอีพอกไซด์ (epoxidize).....	16
2.7.3 การเตรียมอนุพันธ์ของน้ำมันประเภทโมโนกลีเซอไรด์อีพอกไซด์ (epoxidized mono-glyceride).....	18
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	25
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติกและอนุพันธ์ของน้ำมัน	25
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติก	26
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบและพิสูจน์เอกลักษณ์	26
3.4 วิธีการวิจัย	27
3.4.1 การเตรียมอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด	27
3.4.1.1 การเตรียมอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดประเภทโมโนกลีเซอไรด์ (mono-glyceride linseed oil : MLO)	27
3.4.1.2 การเตรียมอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดประเภทอีพอกไซด์ (epoxidized linseed oil : ELO)	28
3.4.1.3 การเตรียมอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดประเภทโมโนกลีเซอไรด์อีพอกไซด์ (epoxidized mono-glyceride linseed oil : EMLO).....	28
3.4.2 การเตรียมชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติก	28
3.4.3 การเคลือบผิวชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติก	29
3.4.4 การทดสอบและพิสูจน์เอกลักษณ์	30
3.4.4.1 การพิสูจน์โครงสร้างทางเคมีของอนุพันธ์น้ำมันลินสีดที่สังเคราะห์ได้	30
3.4.4.2 การทดสอบสมบัติด้านต่าง ๆ ของชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติก	30
3.4.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ	32
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	34
4.1 การพิสูจน์โครงสร้างทางเคมีของน้ำมันลินสีดและอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด	34

4.1.1 การวิเคราะห์ด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) และ Raman spectroscopy (Raman)	34
4.1.2 การวิเคราะห์ด้วย Nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR).....	42
4.2 การศึกษาการเชื่อมขวางโมเลกุลของน้ำมันลินสีดและอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด	47
4.3 การศึกษาสมบัติของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด....	50
4.3.1 การศึกษาลักษณะสัญญาณวิทยา	50
4.3.2 การศึกษาสมบัติการรับแรงดึงก่อนและหลังการดูดความชื้น	57
4.3.3 การศึกษาสมบัติการรับแรงกระแทกก่อนและหลังการดูดความชื้น.....	62
4.3.4 การศึกษาสมบัติการดูดความชื้น.....	65
4.3.5 การศึกษาความเป็นผลึกของแป้งเทอร์โมพลาสติก.....	69
4.3.6 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของแป้งเทอร์โมพลาสติก.....	74
4.4 การศึกษาสมบัติของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด 80	
4.4.1 การศึกษาสมบัติการรับแรงดึงก่อนและหลังการดูดความชื้น	80
4.4.2 การศึกษาสมบัติการรับแรงกระแทกก่อนและหลังการดูดความชื้น.....	84
4.4.3 การศึกษาสมบัติการดูดความชื้น.....	86
4.4.4 การศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชัน.....	87
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	91
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	91
5.2 ข้อเสนอแนะ	93
ภาคผนวก.....	94
ภาคผนวก ก. ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ	95
ภาคผนวก ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาการเติมน้ำมันลินสีดและอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด ..	96
ภาคผนวก ก.2 ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาการเคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีดและอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด	99

ภาคผนวก ข. การคำนวณ.....	103
ภาคผนวก ข.1 การหาน้ำหนักของสารที่ต้องเติมใส่ห้องผสมในเครื่องผสมภายใน (Internal mixer)	104
ภาคผนวก ข.2 การคำนวณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของหมู่เอพิออกไซด์จากกราฟ NMR.....	105
ภาคผนวก ข.3 การคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้น	105
ภาคผนวก ข.4 การคำนวณปริมาณความเป็นผลึก.....	106
ภาคผนวก ค. การนำเสนอผลงานวิจัย	107
ภาคผนวก ค.1 การประชุมวิชาการ The 8th International Graduate Study Conference 2018	108
รายการอ้างอิง	116
ประวัติผู้เขียน.....	120



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ปริมาณองค์ประกอบต่าง ๆ ที่พบในแป้งแต่ละชนิด	8
ตารางที่ 2.2 ปริมาณกรดไขมันในน้ำมันลินสีด.....	15
ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วน $A_{C=C}/A_{C=O}$ และอัตราส่วน $A_{C-O}/A_{C=O}$ ของสารเคลือบที่เป็นกรดไขมันชนิดต่าง ๆ กัน.....	20
ตารางที่ 2.4 ผลการทดสอบการละลายน้ำ การซึมผ่านของไอน้ำ มุมสัมผัสน้ำ และการซึมผ่านของน้ำมัน	21
ตารางที่ 2.5 ผลของกรดไขมันที่ระดับความไม่อิ่มตัวต่างกันต่อค่า complexing index.....	24
ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคต่าง ๆ ใน Raman spectra ของน้ำมันลินสีด (LO) และ โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด (MLO).....	37
ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคต่าง ๆ ใน FTIR และ Raman spectra ของน้ำมันลินสีด (LO) และ น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ (ELO).....	38
ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคต่าง ๆ ใน FTIR และ Raman spectra ของโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด (MLO) และโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ (EMLO)	40
ตารางที่ 4.4 รูปแบบโปรตอนใน $^1\text{H-NMR}$ spectra ของน้ำมันลินสีด.....	43
ตารางที่ 4.5 รูปแบบโปรตอนใน $^1\text{H-NMR}$ spectra ของโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดในช่วง chemical shift 3.5-4.5 ppm	45
ตารางที่ 4.6 รูปแบบโปรตอนที่อยู่ใกล้เคียงกับหมู่อีพอกไซด์ใน $^1\text{H-NMR}$ spectra ของน้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์	46
ตารางที่ 4.7 อัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคต่าง ๆ ใน Raman spectra ของน้ำมันลินสีดและอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดทั้งก่อนและหลังสัมผัสอากาศเป็นเวลา 14 วัน.....	50
ตารางที่ 4.8 ความหมายของอักษรย่อที่แสดงแทนสูตรผสมต่างๆ.....	51
ตารางที่ 4.9 การดูดัชนีความชื้นของชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกที่ความชื้นสัมพัทธ์ 54 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 24 วัน.....	67

ตารางที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมสารเติมแต่งชนิดและปริมาณ
ต่าง ๆ..... 74

ตารางที่ 4.11 ความเป็นผลึกของชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เคลือบและเคลือบผิวตามเวลา ... 87



สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน	6
ภาพที่ 2.2 ลักษณะของเม็ดแป้งที่กำลังขยาย 1500 เท่า ของพืชชนิดต่าง ๆ โดย A มาจาก potato, B มาจาก rice, C มาจาก wheat, D มาจาก mung bean, E มาจาก corn, F มาจาก waxy corn, G มาจาก tapioca, H มาจาก shoti และ I มาจาก leaf starch	7
ภาพที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างของเม็ดแป้ง	8
ภาพที่ 2.4 การจัดเรียงตัวเป็นผลึกแบบ A และ B ของโมเลกุลแป้ง.....	9
ภาพที่ 2.5 ปฏิกิริยา saponification ของไตรกลีเซอไรด์	15
ภาพที่ 2.6 ปฏิกิริยา esterification ของกลีเซอรอลกับกรดไขมัน.....	17
ภาพที่ 2.7 ปฏิกิริยา epoxidation ของน้ำมันไตรกลีเซอไรด์	18
ภาพที่ 2.8 ปฏิกิริยา epoxidation ของน้ำมันโมนอกลิเซอไรด์.....	19
ภาพที่ 2.9 สมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม octenylsuccinated/native sweet potato starch	22
ภาพที่ 2.10 สมบัติเชิงกลของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติม epoxidized soybean oil.....	23
ภาพที่ 2.11 microstructure ของฟิล์มผสมระหว่างแป้งมันฝรั่งหวานกับกรดไขมันชนิดต่าง ๆ	24
ภาพที่ 4.1 FTIR และ Raman spectra ของน้ำมันลินสีด	34
ภาพที่ 4.2 โครงสร้างทางเคมีของสารตั้งต้นและอนุพันธ์ต่าง ๆ ของน้ำมันลินสีด	35
ภาพที่ 4.3 Spectra ของน้ำมันลินสีด (LO) และโมนอกลิเซอไรด์น้ำมันลินสีด (MLO) (a) FTIR spectra และ (b) Raman spectra	36
ภาพที่ 4.4 Spectra ของน้ำมันลินสีด (LO) และน้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ (ELO) (a) FTIR spectra และ (b) Raman spectra	39
ภาพที่ 4.5 Spectra ของโมนอกลิเซอไรด์น้ำมันลินสีด (MLO) และโมนอกลิเซอไรด์น้ำมันลินสีด อีพ็อกซิไดซ์ (EMLO) ; (a) FTIR spectra และ (b) Raman spectra	41
ภาพที่ 4.6 ¹ H-NMR spectra ของน้ำมันลินสีด.....	42

ภาพที่ 4.7 $^1\text{H-NMR}$ spectra ของโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด.....	44
ภาพที่ 4.8 $^1\text{H-NMR}$ spectra ในช่วง chemical shift 3.5 – 4.5 ppm ของน้ำมันลินสีด (LO) เทียบกับโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด (MLO)	44
ภาพที่ 4.9 $^1\text{H-NMR}$ spectra ของน้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์.....	46
ภาพที่ 4.10 $^1\text{H-NMR}$ spectra ของโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์	47
ภาพที่ 4.11 Raman spectra ของน้ำมันลินสีดและน้ำมันลินสีดที่สัมผัสอากาศ 14 วัน.....	48
ภาพที่ 4.12 Raman spectra ของโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด และโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดที่สัมผัสอากาศ 14 วัน.....	48
ภาพที่ 4.13 Raman spectra ของน้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ และน้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ที่สัมผัสอากาศ 14 วัน	49
ภาพที่ 4.14 Raman spectra ของโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ และโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ที่สัมผัสอากาศ 14 วัน.....	49
ภาพที่ 4.15 รูป SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมสารเติมแต่ง.....	51
ภาพที่ 4.16 รูป SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมน้ำมันลินสีด	52
ภาพที่ 4.17 รูป SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า ของแป้งเทอร์โมพลาสติก ที่เติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด	52
ภาพที่ 4.18 รูป SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมน้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์	53
ภาพที่ 4.19 รูป SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า ของแป้งเทอร์โมพลาสติก ที่เติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์.....	53
ภาพที่ 4.20 รูป SEM ที่กำลังขยาย 1500 เท่า ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมสารเติมแต่ง.....	54
ภาพที่ 4.21 รูป SEM ที่กำลังขยาย 1500 เท่า ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมน้ำมันลินสีด	55
ภาพที่ 4.22 รูป SEM ที่กำลังขยาย 1500 เท่า ของแป้งเทอร์โมพลาสติก ที่เติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด	55
ภาพที่ 4.23 รูป SEM ที่กำลังขยาย 1500 เท่า ของแป้งเทอร์โมพลาสติก ที่เติมน้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์	56

ภาพที่ 4.24 รูป SEM ที่กำลังขยาย 1500 เท่า ของแป้งเทอร์โมพลาสติก ที่เติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมัน ลินสีดอีพ็อกซีไดซ์.....	56
ภาพที่ 4.25 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมและเติมสารเติมแต่ง ก่อนการดูดความชื้น (a) คือ Modulus (b) คือ Tensile strength และ (c) คือ % Elongation at break.....	59
ภาพที่ 4.26 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมและเติมสารเติมแต่ง หลังการดูดความชื้น ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 54 % เป็นเวลา 24 วัน (a) คือ Modulus (b) คือ Tensile strength และ (c) คือ % Elongation at break.....	61
ภาพที่ 4.27 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงกระทำของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมและเติม สารเติมแต่ง (a) ก่อนการดูดความชื้น และ (b) หลังการดูดความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 54 % เป็น เวลา 24 วัน.....	63
ภาพที่ 4.28 การดูดความชื้นของชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงกระทำที่ความชื้นสัมพัทธ์ 54% เป็นเวลา 24 วัน.....	69
ภาพที่ 4.29 ผลการทดสอบ XRD ของแป้งดิบ (starch) และแป้งเทอร์โมพลาสติก (TPS30).....	70
ภาพที่ 4.30 ผลการทดสอบ XRD ของแป้งเทอร์โมพลาสติก (TPS30) และแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติม น้ำมันลินสีด (TPS30_LO).....	72
ภาพที่ 4.31 ผลการทดสอบ XRD ของแป้งเทอร์โมพลาสติก (TPS30) และแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติม โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด (TPS30_MLO).....	72
ภาพที่ 4.32 ผลการทดสอบ XRD ของแป้งเทอร์โมพลาสติก (TPS30) และแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติม น้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไดซ์ (TPS30_ELO).....	73
ภาพที่ 4.33 ผลการทดสอบ XRD ของแป้งเทอร์โมพลาสติก (TPS30) และแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติม โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไดซ์ (TPS30_EMLO).....	73
ภาพที่ 4.34 Thermogram ของแป้งดิบ (Starch), กลีเซอรอล (Glycerol) และแป้งเทอร์โม พลาสติก (TPS30) โดย (a) คือ TGA และ (b) คือ DTG	75
ภาพที่ 4.35 TGA thermogram ของแป้งดิบ (starch), แป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติม (TPS30) และ เติมน้ำมันลินสีดปริมาณต่าง ๆ (TPS30_x%LO)	76

ภาพที่ 4.36 TGA thermogram ของแป้งดิบ (starch), แป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติม (TPS30) และเติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดปริมาณต่าง ๆ (TPS30_x%MLO).....	77
ภาพที่ 4.37 TGA thermogram ของแป้งดิบ (starch), แป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติม (TPS30) และเติมน้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ปริมาณต่าง ๆ (TPS30_x%ELO).....	77
ภาพที่ 4.38 TGA thermogram ของแป้งดิบ (starch), แป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติม (TPS30) และเติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ปริมาณต่าง ๆ (TPS30_x%EMLLO)	78
ภาพที่ 4.39 TGA thermogram ของแป้งดิบ (starch), แป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติม (TPS30) และเติมสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก	79
ภาพที่ 4.40 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เคลือบและเคลือบผิว ก่อนการดูดความชื้น (a) คือ Modulus (b) คือ Tensile strength และ (c) คือ % Elongation at break.....	81
ภาพที่ 4.41 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เคลือบและเคลือบผิว หลังการดูดความชื้น ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 54 % เป็นเวลา 24 วัน (a) คือ Modulus (b) คือ Tensile strength และ (c) คือ % Elongation at break.....	83
ภาพที่ 4.42 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทกของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบและไม่เคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด (a) ก่อนการดูดความชื้น และ (b) หลังการดูดความชื้น ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 54 % เป็นเวลา 24 วัน.....	85
ภาพที่ 4.43 % moisture absorption ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เคลือบและเคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 54 % เป็นเวลา 9 วัน.....	86
ภาพที่ 4.44 ผลการทดสอบ XRD ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เวลาต่าง ๆ.....	88
ภาพที่ 4.45 ผลการทดสอบ XRD ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีดที่เวลาต่าง ๆ	89
ภาพที่ 4.46 ผลการทดสอบ XRD ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบผิวด้วย โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดที่เวลาต่าง ๆ	89
ภาพที่ 4.47 ผลการทดสอบ XRD ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบผิวด้วย น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ที่เวลาต่าง ๆ.....	90

ภาพที่ 4.48 ผลการทดสอบ XRD ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบผิวด้วย โมนาไกลีเซอไรด์น้ำมัน
ลินสีดอีพ็อกซีไดซ์ที่เวลาต่าง ๆ..... 90



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง

พอลิเมอร์จากธรรมชาติกำลังเป็นที่สนใจและศึกษาวิจัยกันอย่างกว้างขวาง ในการนำมาใช้แทนวัสดุพอลิเมอร์แบบเก่าที่ผลิตจากวัตถุดิบทางปิโตรเลียม เนื่องจากภาวะการณ์ในปัจจุบันมีการใช้งานผลิตภัณฑ์จากวัสดุพอลิเมอร์กันอย่างแพร่หลายในเกือบทุก ๆ กิจกรรมของชีวิตประจำวัน ซึ่งนั่นแสดงถึงปริมาณความต้องการในการใช้ทรัพยากรที่มากขึ้น ซึ่งสวนทางกันกับปริมาณทรัพยากรหรือวัตถุดิบทางปิโตรเลียมที่มีอยู่อย่างจำกัด และไม่สามารถหาทดแทนใหม่ได้ในระยะเวลาอันสั้นเมื่อเทียบกับอัตราการใช้งาน ตามกฎอุปสงค์และอุปทานเมื่อความต้องการซื้อมีมากขึ้นแต่ทรัพยากรกลับมีปริมาณลดลงและมีแนวโน้มที่จะเกิดการขาดแคลน จึงส่งผลให้ต้นทุนราคาวัตถุดิบจากแหล่งทรัพยากรดังกล่าวมีค่าสูงขึ้น ประกอบกับวัสดุพอลิเมอร์ที่ผลิตจากวัตถุดิบทางปิโตรเลียมส่วนใหญ่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ก่อให้เกิดเป็นขยะซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพราะในบางประเทศซึ่งรวมถึงประเทศไทยเองยังไม่มีระบบการจัดการกับขยะที่ดีพอ โดยจากการตรวจสอบสถานที่กำจัดขยะขององค์การปกครองท้องถิ่นทั่วประเทศจำนวน 7,777 แห่งพบว่ามากกว่า 95% [1] ที่ยังขาดประสิทธิภาพในการจัดการกับขยะได้อย่างถูกต้อง ทำให้ขยะเหล่านี้เถือตลอดและแพร่กระจายกลับสู่สิ่งแวดล้อมอีกครั้งโดยเฉพาะในทะเล ประเทศไทยมีขยะในทะเลเป็นอันดับ 6 ของโลก [2] โดยมีปริมาณกว่า 11.47 ล้านตันซึ่ง 80% นั้นมาจากบนบก และกว่าครึ่งเป็นขยะพลาสติก [3] อันเป็นสาเหตุให้สัตว์ทะเล 5-10 % [4] พิการและเสียชีวิตจากการกินขยะพลาสติกดังกล่าว ด้วยเหตุนี้เองที่ทำให้พอลิเมอร์จากธรรมชาติก้าวเข้ามามีบทบาทมากยิ่งขึ้น เพราะเป็นวัสดุที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ในระยะเวลาอันสั้น อีกทั้งยังสามารถถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ในระยะเวลาอันรวดเร็วอีกด้วย

แป้งและเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ทางธรรมชาติที่มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนพอลิเมอร์จากวัตถุดิบทางปิโตรเลียม เนื่องจากมีปริมาณมากตามธรรมชาติ สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ในระยะเวลาอันสั้นและยังถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยหากพิจารณาโครงสร้างทางเคมีจะพบว่าทั้งแป้งและเซลลูโลสต่างก็มีมอนอเมอร์เป็นโมเลกุลกลูโคสเช่นเดียวกัน แตกต่างกันที่การเชื่อมต่อของมอนอเมอร์แต่ละหน่วย โดยแป้งจะเชื่อมหน่วยเข้ากันด้วยพันธะ α -1,4-glycosidic linkages โครงสร้างมีลักษณะเป็นเกลียว จึงมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลต่ำกว่าของเซลลูโลสซึ่งเชื่อมหน่วยเข้ากันด้วยพันธะ β -1,4-glycosidic linkages ซึ่งโครงสร้างมีลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรง

สายโซ่โมเลกุลของเซลลูโลสจึงจัดเรียงตัวกันแน่นมาก โดยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลหากมีค่าสูงมาก ๆ นั้น จะส่งผลให้การขึ้นรูปด้วยกระบวนการต่าง ๆ เป็นไปได้ยาก เนื่องจากการให้ความร้อนจะทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการสลายตัวก่อนที่จะหลอมและไหลได้ ดังนั้นแป้งจึงมีความสามารถในการขึ้นรูปสูงกว่าเซลลูโลส โดยแป้งนั้นสามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการต่าง ๆ ได้ [5, 6] หลังจากผ่านการปรับสภาพของแป้งให้ได้เป็นแป้งเทอร์โมพลาสติกแล้ว เช่นการผสมแป้งกับพลาสติกไซเซออร์ เป็นต้น

แป้งเทอร์โมพลาสติกที่ขึ้นรูปแล้วจะมีสมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกับวัสดุพอลิเมอร์จากวัตถุดิบทางปิโตรเลียม ทั้งยังมีข้อได้เปรียบกว่าคือความสามารถในการถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยสมบัติเด่นอย่างหนึ่งของแป้งเทอร์โมพลาสติกคือการบวมตัวในน้ำ หรือกระทั่งสามารถละลายในน้ำได้ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม [7] เนื่องจากโมเลกุลของแป้งมีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งง่ายต่อการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำ ทำให้น้ำสามารถแทรกซึมเข้าไประหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งจนสายโซ่โมเลกุลของแป้งห่างหรือกระทั่งแยกออกจากกันได้ ซึ่งส่งผลให้แป้งเทอร์โมพลาสติกนั้นสามารถถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพในเวลาที่รวดเร็วมาก แต่อย่างไรก็ตามในแง่ของการใช้งานแป้งเทอร์โมพลาสติกก็จะมีปัญหาในเรื่องความว่องไวต่อความชื้นเช่นกัน เพราะการที่แป้งเทอร์โมพลาสติกว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับน้ำหรือความชื้นเช่นนี้ ทำให้การใช้งานแป้งเทอร์โมพลาสติกมีข้อจำกัดในเรื่องของสภาพแวดล้อมด้วย เพราะเมื่อแป้งเทอร์โมพลาสติกเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของน้ำซึ่งเป็นเหมือนพลาสติกไซเซออร์แล้วจะทำให้สมบัติเชิงกลของแป้งเทอร์โมพลาสติกต่ำลงไป กล่าวคือแป้งเทอร์โมพลาสติกจะสูญเสียความแข็งแรงหรือความสามารถที่จะใช้งานได้ตามที่ออกแบบไว้ งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาผลของการเติมและผลของการเคลือบผิวชิ้นงานของแป้งเทอร์โมพลาสติก ด้วยน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด เนื่องจากสารดังกล่าวมีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) สูง จึงคาดว่าจะสามารถลดความว่องไวต่อความชื้นของแป้งเทอร์โมพลาสติกลงได้ อีกทั้งกรดไขมันในน้ำมันลินสีดส่วนใหญ่ประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวจำพวกกรดโอเลอิก (oleic acid), กรดไลโนเลอิก (linoleic acid) และกรดไลโนเลนิก (linolenic acid) อยู่รวมกันกว่า 88.97 % [8] ซึ่งพันธะคู่ในกรดไขมันเหล่านี้สามารถเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วเชื่อมกันเป็นฟิล์มเคลือบที่บริเวณผิวของชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติก ทำให้เกิดเป็นชั้นป้องกันความชื้นได้อีกด้วย [6]

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมแม่เทอโรโมพลาสติก ที่ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ และใช้น้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดเป็นสารเติมแต่ง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและสมบัติการดูดความชื้นของแม่เทอโรโมพลาสติกที่เติมน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดที่ปริมาณต่าง ๆ กับแม่เทอโรโมพลาสติกที่ไม่เติมสารเติมแต่ง
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลของการเคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดต่อสมบัติต่าง ๆ ของแม่เทอโรโมพลาสติก

1.3 กรอบแนวความคิดงานวิจัย

แม่เทอโรโมพลาสติกเป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการนำมาใช้งานแทนวัสดุพอลิเมอร์แบบเก่าที่ผลิตจากวัตถุดิบทางปิโตรเลียม แต่มีข้อด้อยที่สำคัญคือความว่องไวต่อความชื้น เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของแม่จะมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นส่วนประกอบค่อนข้างมาก ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลเหล่านี้สามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของน้ำได้ดี และเมื่อโมเลกุลของน้ำถูกดูดซับเข้ามาภายในชิ้นงานจะประพฤติตัวเป็นพลาสติกไซเซออร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของแม่ลดลง กล่าวคือชิ้นงานแม่เทอโรโมพลาสติกที่ดูดซับความชื้นจะนิ่มลง เป็นผลให้สมบัติเชิงกลของแม่เทอโรโมพลาสติกลดลง จึงเป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งสำหรับการใช้งานในพื้นที่บริเวณที่มีความชื้นสูง งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาผลของการเติมสารเติมแต่งที่มีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) สูง คือน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดจำพวกโมโนกลีเซอไรด์ (mono-glyceride), อีพอกซิไดซ์ (epoxidized) และ โมโนกลีเซอไรด์อีพอกซิไดซ์ (epoxidized mono-glyceride) ขณะเตรียมแม่เทอโรโมพลาสติก เนื่องจากน้ำมันลินสีดและอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดดังกล่าว มีส่วนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวประกอบอยู่ในโครงสร้าง ซึ่งส่วนดังกล่าวนี้เป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ จึงสามารถเป็นตัวป้องกันความชื้นภายในชิ้นงานแม่เทอโรโมพลาสติกได้ นอกจากนี้แล้วยังศึกษาการเคลือบผิวชิ้นงานแม่เทอโรโมพลาสติกด้วยน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดดังกล่าวมาข้างต้นด้วย เนื่องจากคาดว่า การเคลือบผิวจะไม่ส่งผลต่อโครงสร้างภายในและสมบัติเชิงกลมากเท่ากับการผสมเข้าไปในชิ้นงาน

1.4 ขอบเขตของการศึกษาและข้อจำกัดของงานวิจัย

1.4.1 ขอบเขตการศึกษา

- 1) ศึกษาสมบัติความว่องไวต่อความชื้นและสมบัติเชิงกลของแป้งเทอร์โมพลาสติก เมื่อเติมน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด ที่ปริมาณ 1 - 7 % โดยน้ำหนัก
- 2) ศึกษาสมบัติความว่องไวต่อความชื้นและสมบัติเชิงกลของแป้งเทอร์โมพลาสติก เมื่อเคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด
- 3) อนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดที่จะเตรียมเป็นอนุพันธ์ประเภทโมโนกลีเซอไรด์ (mono-glyceride), อีพ็อกซิไดซ์ (epoxidized), และโมโนกลีเซอไรด์อีพ็อกซิไดซ์ (epoxidized monoglyceride)

1.4.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

- 1) เตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติกโดยใช้ starch จากแป้งมันสำปะหลัง และใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์
- 2) ทดสอบการดูดความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 54 % โดยควบคุมด้วยการใช้สารละลายอิ่มตัวของ $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ออกแบบวิธีการทดลองและวางแผนการทดลอง

1.5.3 จัดหาสารเคมีและอุปกรณ์

1.5.4 ดำเนินงานวิจัยตามแผน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 ศึกษาการเตรียมอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดประเภทต่าง ๆ พร้อมทั้งทดสอบยืนยันโครงสร้างทางเคมี

ส่วนที่ 2 ศึกษาผลของการเติมน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด

- 1) คลุกผสมแป้งที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วกับกลีเซอรอลและน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดปริมาณต่าง ๆ
- 2) ผสมเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติกด้วยเครื่องผสมภายใน
- 3) ขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกล

- 4) ทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ลักษณะสัญญาณวิทยา
ความเป็นผลึก และสมบัติการดูดความชื้นของชิ้นงาน

ส่วนที่ 3 ศึกษาผลของการเคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด

- 1) คลุกผสมแป้งที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วกับกลีเซอรอล
- 2) ผสมเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติกด้วยเครื่องผสมภายใน
- 3) ชิ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกล
- 4) เคลือบผิวชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติก
- 5) ทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติการดูดความชื้น และสมบัติการเกิด
รีโทรเกรเดชันของชิ้นงาน

1.5.5 วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย

1.5.6 จัดทำรายงานและนำเสนอผลงานวิจัย

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.6.1 สามารถเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติกที่มีความทนทานต่อความชื้นมากขึ้นได้ โดยการเติมหรือ
การเคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด
- 1.6.2 ทราบถึงอิทธิพลและผลของปริมาณการเติมน้ำมันลินสีดที่มีต่อสมบัติความว่องไวต่อความชื้น
และสมบัติเชิงกลของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้
- 1.6.3 ทราบถึงอิทธิพลและผลของปริมาณการเติมอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดที่มีต่อสมบัติความว่องไว
ต่อความชื้นและสมบัติเชิงกลของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้

บทที่ 2

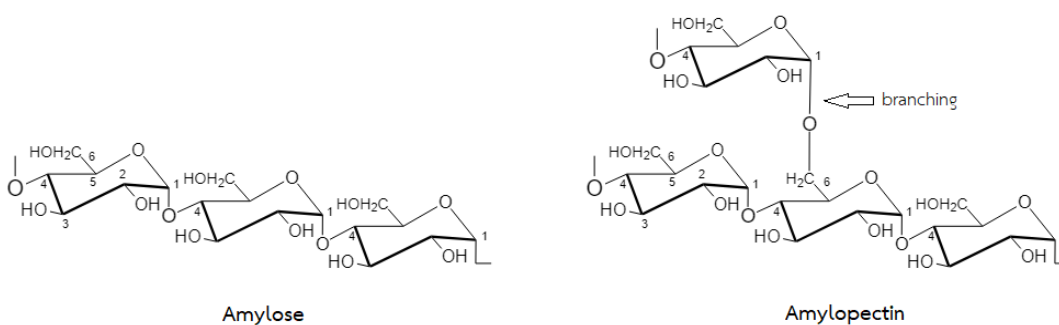
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแป้ง

แป้งเป็น homo-polymer ทางธรรมชาติที่มีมากชนิดหนึ่ง มักสะสมอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น ลำต้น ใบ ผล ราก หรือเมล็ด แล้วแต่ว่าพืชชนิดนั้น ๆ จะใช้ส่วนใดเป็นแหล่งเก็บสะสมสารอาหาร แป้งมีโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีสูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ ซึ่งมีมอนอเมอร์หรือหน่วยซ้ำเป็นโมเลกุลของ กลูโคส โดยจะแบ่งตามขนาดและการจัดเรียงตัวของโมเลกุลได้เป็น 2 ชนิดคือ อะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพคติน (amylopectin)

อะไมโลส (amylose)

เป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรง (มีอัตราส่วนระหว่างจำนวนพันธะที่เชื่อมต่อหน่วยซ้ำในสายโซ่หลักต่อจำนวนพันธะที่เชื่อมต่อหน่วยซ้ำกับกิ่งเป็น 99 ต่อ 1 [9]) โครงสร้างมีหน่วยซ้ำเป็นกลูโคสที่เชื่อมกันด้วยพันธะ alpha-1,4-glycosidic linkage ดังภาพที่ 2.1 ซึ่งโมเลกุลดังกล่าวสามารถรวมตัวกับไอโอดีนและสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ เช่น สารลดแรงตึงผิว และกรดไขมัน กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนซึ่งไม่ละลายน้ำได้ โดยอะไมโลสที่ทำปฏิกิริยากับ ไอโอดีนจะมีลักษณะเฉพาะคือให้สีน้ำเงินออกมา ดังนั้นจึงสามารถใช้ไอโอดีนในการตรวจสอบหาแป้ง ซึ่งมีอะไมโลสเป็นส่วนประกอบอยู่ได้



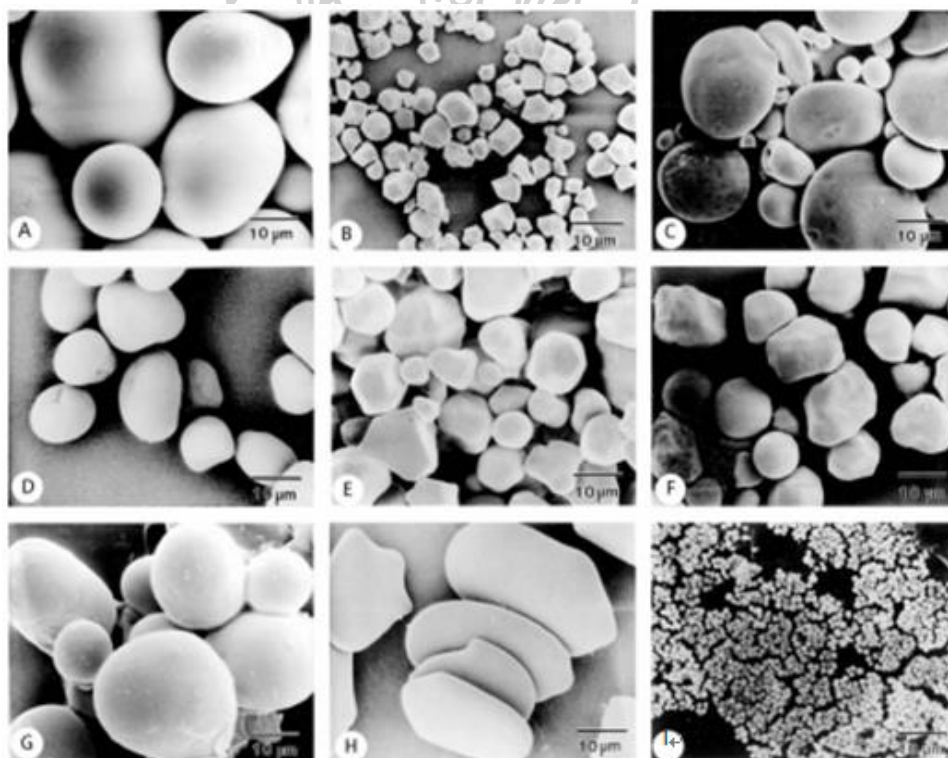
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน

อะไมโลเพคติน (amylopectin)

เป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีลักษณะเป็นโซ่กิ่ง โดยสายโซ่หลักและกิ่งจะมีลักษณะเหมือนกันกับอะไมโลสคือ เป็นโมเลกุลกลูโคสที่เชื่อมกันด้วยพันธะ alpha-1,4-glycosidic linkage แต่บริเวณส่วนที่เชื่อมสายโซ่หลักกับกิ่งอยู่ด้วยกันนั้น จะเชื่อมกันด้วยพันธะ alpha-1,6-glycosidic linkage ดัง

ภาพที่ 2.1 โดยที่โซ่กิ่งจะมีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วงประมาณ 10-60 หน่วยทำให้ขนาดโมเลกุลรวมใหญ่กว่าอะไมโลสที่มีลักษณะเป็นโซ่ตรง [6]

แป้ง เป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ แต่ก็อาจจะมีสิ่งเจือปนอื่นอยู่ปริมาณเล็กน้อยเช่น โปรตีน ไขมัน หรือเกลือแร่ต่าง ๆ ซึ่งแป้งที่ยังคงมีสิ่งเจือปนอื่นเหลืออยู่นั้นจะเรียกว่า ฟลาว์ (flour) แต่หากสิ่งเจือปนดังกล่าวถูกสกัดออกไปจนเหลือเพียงแป้งที่มีความบริสุทธิ์สูงจะเรียกว่า สตาร์ช (starch) ซึ่งมักจะถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในรูปของสารเคมีสำหรับการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ โดยแป้งประเภทนี้หากยังไม่ถูกดัดแปลงปรับปรุงใด ๆ จะถูกเรียกว่าแป้งดิบ (native starch) แต่หากถูกปรับปรุงเปลี่ยนรูปแล้วจะเรียกว่า แป้งดัดแปลง (modified starch) [10] ปกติแล้วแป้งจะรวมตัวกันอยู่ในรูปของเม็ดแป้ง (starch granule) ซึ่งเม็ดแป้งของพืชแต่ละชนิดก็จะมีสัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 เช่นเดียวกันกับรูปร่างและขนาดของเม็ดแป้งแต่ละชนิดก็จะมีเอกลักษณ์เฉพาะตัวต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.2 นั่นจึงทำให้แป้งแต่ละชนิดมีสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันออกไปด้วย



ภาพที่ 2.2 ลักษณะของเม็ดแป้งที่กำลังขยาย 1500 เท่า ของพืชชนิดต่าง ๆ

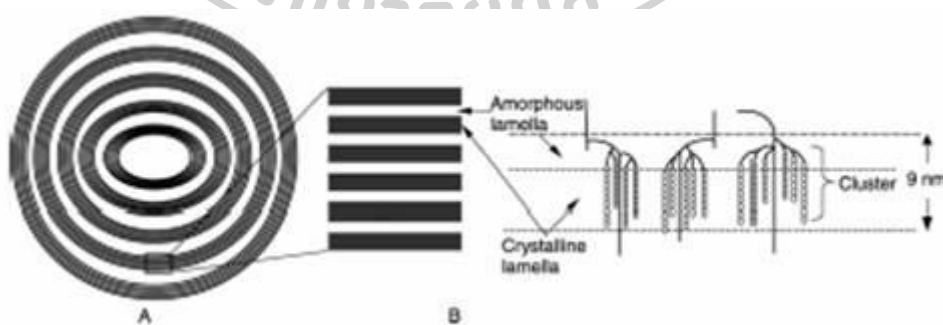
โดย A มาจาก potato, B มาจาก rice, C มาจาก wheat, D มาจาก mung bean, E มาจาก corn, F มาจาก waxy corn, G มาจาก tapioca, H มาจาก shoti และ I มาจาก leaf starch [11]

ตารางที่ 2.1 ปริมาณองค์ประกอบต่าง ๆ ที่พบในแป้งแต่ละชนิด [6]

ชนิดของแป้ง	อะไมโลส		อะไมโลเพคติน	
	ปริมาณ (%)	ขนาดโมเลกุล	ปริมาณ (%)	ขนาดโมเลกุล
แป้งสาลี	28	1,300	72	4,800
แป้งข้าวโพด	28	930	72	8,200
แป้งข้าวเจ้า	17	-	83	-
แป้งมันฝรั่ง	21	4,900	79	9,800
แป้งข้าวเหนียว	0-2	-	98-100	18,500
แป้งมันสำปะหลัง	17	2,600	83	-

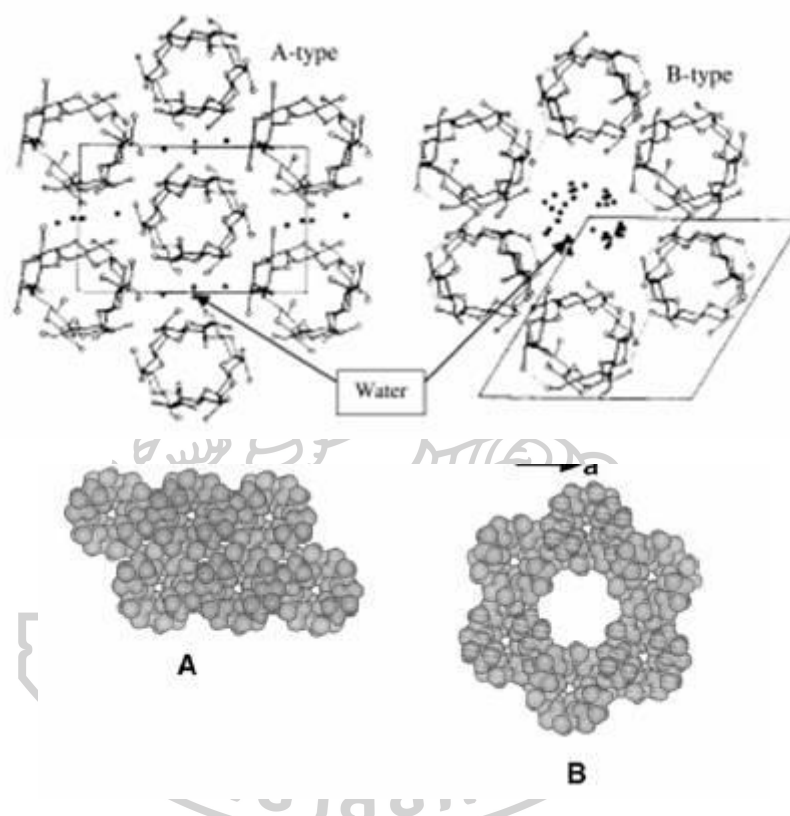
2.2 โครงสร้างและสมบัติของเม็ดแป้ง

เม็ดแป้งมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) อันเกิดขึ้นจากการจัดเรียงตัวกันของสายโซ่โมเลกุลอะไมโลเพคตินเป็นชั้น ๆ ตามแนวรัศมี ซึ่งมีลักษณะอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม จึงเรียกรการจัดเรียงตัวในลักษณะดังกล่าวว่าคลัสเตอร์ (clusters) และในแต่ละคลัสเตอร์จะมีขนาดประมาณ 9 nm แบ่งเป็นส่วนหัวและส่วนหาง โดยส่วนหัวจะเป็นบริเวณจุดที่แตกสายโซ่กิ่งออกมา ทำให้บริเวณดังกล่าวมีพื้นที่ว่างหรือมีการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ (amorphous lamellar) และส่วนหางจะเป็นบริเวณที่สายโซ่กิ่งของอะไมโลเพคตินมีการจัดเรียงตัวกันในลักษณะเป็นเกลียวคู่ที่เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ (crystalline lamellar) ดังแสดงในภาพที่ 2.3 [11]



ภาพที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างของเม็ดแป้ง [12]

โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งสามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ตามลักษณะการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ โดยหากอยู่ในสภาวะที่มีปริมาณน้ำต่ำ และมีการจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น จะจัดเป็นผลึกรูปแบบ A ซึ่งมักพบในเม็ดแป้งจากธัญพืชต่าง ๆ แต่หากอยู่ในสภาวะที่มีปริมาณน้ำสูง และมีการจัดเรียงตัวกันหลวม ๆ จะจัดเป็นผลึกรูปแบบ B ซึ่งมักพบในเม็ดแป้งจากพืชหัว (ภาพที่ 2.4) แต่หากเม็ดแป้งมีการจัดเรียงตัวทั้งรูปแบบ A และรูปแบบ B รวมกัน จะจัดเป็นผลึกรูปแบบ C ซึ่งมักจะพบในเม็ดแป้งจากพืชตระกูลถั่ว [11]



ภาพที่ 2.4 การจัดเรียงตัวเป็นผลึกแบบ A และ B ของโมเลกุลแป้ง [12]

การเกิดเจลาตินไนเซชัน (gelatinization)

ในสภาวะปกติแป้งไม่สามารถละลายในน้ำเย็นได้ เพราะโมเลกุลของน้ำจะไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปในส่วนที่เป็นผลึกของเม็ดแป้งได้ เนื่องจากโมเลกุลของแป้งบริเวณดังกล่าวมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันสูงมาก แต่ยังสามารถแพร่เข้าไปยังส่วนที่เป็นอสัณฐานซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระอยู่ได้ ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้งบริเวณนั้นอ่อนลง เม็ดแป้งจึงเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ (เนื่องจากโมเลกุลมีการเกี่ยวพันกันเป็นร่างแหทำให้เกิดการยึดหยุ่นได้อย่างจำกัด) ในขั้นนี้ ความหนืดจะเพิ่มขึ้นอย่างไม่ชัดเจนมากนัก แต่หากให้ความร้อนเพิ่มมากขึ้นพันธะไฮโดรเจนระหว่าง

สายโซ่โมเลกุลของแป้งจะอ่อนลง ทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแพร่เข้าไปยังส่วนผลึกได้ ส่งผลให้เกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็วจนเป็นการพองตัวแบบไม่ผันกลับ มีผลทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากปริมาณของโมเลกุลน้ำอิสระที่อยู่รอบ ๆ เม็ดแป้งลดลงจากการพองตัวของเม็ดแป้ง ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้เรียกว่าการเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization) หรือจะกล่าวอีกอย่างคือการเกิดเจลาตินในเซชันเป็นการทำลายโครงสร้างผลึกภายในเม็ดแป้งภายใต้การให้ความร้อนและอยู่ในสภาวะที่มีน้ำอยู่อย่างเพียงพอ ทำให้เกิดการคลายตัวหรือพองตัวของเม็ดแป้ง [9]

การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation)

หลังจากที่แป้งผ่านกระบวนการเกิดเจลาตินในเซชันแล้วหากทำการลดอุณหภูมิลง ในขณะนั้นโมเลกุลของอะไมโลสที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกันจะค่อย ๆ เคลื่อนที่เข้าหากันอีกครั้งจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่แล้วเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติอันใหม่ขึ้นมา ความหนืดคงตัวจะมากยิ่งขึ้น ซึ่งหากน้ำแป้งมีความเข้มข้นต่ำการจัดเรียงตัวของโมเลกุลดังกล่าวจะทำให้เกิดเป็นตะกอนหรือผลึกสีขาวขุ่นขึ้น แต่หากน้ำแป้งมีความเข้มข้นสูงขณะที่โมเลกุลเคลื่อนเข้ามาหากันในระหว่างการจัดเรียงตัวจะโอบและกักเก็บน้ำมาด้วย ทำให้เกิดลักษณะเหมือนเป็นเจลเหนียวคล้ายฟิล์มขึ้น เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ว่าการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัว โดยการคืนตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ อย่าง เช่น ชนิดของแป้ง ความเข้มข้น กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการลดอุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรดเบส และปริมาณของสารประกอบทางเคมีต่าง ๆ ในแป้งด้วย [9, 12]

2.3 แป้งมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังเป็นพืชที่เก็บสะสมแป้งไว้บริเวณราก (หัวมัน) มีถิ่นกำเนิดในแถบเขตร้อน โดยมีชื่อสามัญเรียกขานหลายชื่อเช่น Cassava, Tapioca หรือ Manioc แล้วแต่ท้องถิ่นและภาษา แต่มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Manihot esculenta* Crantz ซึ่งมันสำปะหลังนั้นถูกยกย่องและเรียกขานว่าเป็นพืชมหัศจรรย์ โดยองค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ หรือ FAO ยอมรับให้เป็นพืชแห่งศตวรรษที่ 21 ในฐานะวัตถุดิบที่ส่งเสริมความมั่นคงทางอาหารและพลังงานอย่างยั่งยืน เนื่องจากเป็นวัตถุดิบทางธรรมชาติที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ในระยะเวลาสั้น ๆ ทั้งยังสามารถใช้ประโยชน์ได้จากทุก ๆ ส่วน ไม่ว่าจะเป็นราก (หัวมัน) ลำต้น จนกระทั่งใบก็สามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์หรือใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้มากมาย เช่น อาหาร เคมีภัณฑ์ และบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น ดังนั้นโอกาสและความเป็นไปได้ในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับมันสำปะหลังจึงเรียกได้ว่าไม่มีขีดจำกัดเลยทีเดียว

[13] โดยเฉพาะกระแสนิยมในปัจจุบันที่ผู้คนตระหนักถึงปัญหาทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม ทำให้ผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติหรือผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเป็นที่นิยมมากขึ้น หนึ่งในนั้นคือบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากแป้ง ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ส่งผลให้ไม่เกิดเป็นขยะสะสมในสิ่งแวดล้อม

การเตรียมแป้งมันสำปะหลัง

กระบวนการการผลิตแป้งมันสำปะหลังมีขั้นตอนและรายละเอียดแตกต่างกันไปแล้วแต่โรงงานอุตสาหกรรม แต่สามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ๆ ได้ดังนี้ [14]

1. การทำความสะอาดและการเตรียมหัวมันสำปะหลัง (Washing and preparation)

หัวมันสำปะหลังจะถูกใส่ลงในตะแกรงร่อน เพื่อแยกเอาหิน ดิน หรือทรายออกจากหัวมัน ก่อนจะถูกส่งเข้าเครื่องล้างเพื่อให้น้ำชะเอาสิ่งสกปรกต่าง ๆ ออกอีกครั้ง

2. การบดหัวมันสำปะหลัง (Raspings)

หัวมันที่สะอาดแล้วจะถูกขูดเปลือก จากนั้นจะถูกนำเข้าสู่เครื่องสับให้มีขนาดเล็กประมาณ 1-2 นิ้ว ก่อนจะเข้าเครื่องบดเพื่อให้มีขนาดเล็กละเอียดยิ่งขึ้น จากนั้นมันบดที่ได้จะถูกเติมน้ำแล้วนำส่งเข้าสู่เครื่องสกัดเพื่อแยกแป้งออกจากเส้นใยเซลลูโลส โดยการสกัดมักจะแบ่งเป็นหลาย ๆ ชุดเพื่อให้ได้อนุภาคที่ละเอียดประมาณ 90 mesh ในขั้นนี้มักจะเติมน้ำกำมะถันลงไปด้วยเพื่อยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์บางชนิดที่จะเปลี่ยนให้โมเลกุลของแป้งเป็นกรดแลคติก

3. การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำแป้ง (Separation)

น้ำแป้งที่แยกออกมาจากกากมันสำปะหลังแล้วจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกน้ำแป้งออกจากกากมันสำปะหลังให้หมด และทำให้น้ำแป้งเข้มข้นด้วย

4. การทำแห้ง (Drying)

น้ำแป้งปราศจากกากมันสำปะหลังที่ได้จะถูกนำมาปั่นเหวี่ยงอีกครั้งด้วยความเร็วสูงเพื่อให้แป้งแห้งและแยกตัวออกมาจากน้ำ จากนั้นแป้งเปียกที่ได้จะถูกส่งเข้าสู่ท่อลมไอร้อนที่มีอุณหภูมิประมาณ 200 °C ความแรงของลมที่เป่าด้วยความดันสูงจะพาแป้งขึ้นไปตามท่อจนกระทั่งตกลงมาในไซโคลนเย็นเพื่อลดอุณหภูมิของแป้งลง ก่อนจะนำไปผ่านตะแกรงร่อนเพื่อคัดอนุภาคให้มีขนาดสม่ำเสมอ แล้วจึงส่งใส่บรรจุภัณฑ์ [14]

2.4 การเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติก

แป้งแม้จะมีลักษณะโครงสร้างเหมือนกับพอลิเมอร์แบบเทอร์โมพลาสติกทั่วไป แต่กลับแสดงสมบัติของพอลิเมอร์แบบเทอร์โมเซต เนื่องจากในแต่ละหน่วยซ้ำที่เป็นโมเลกุลของกลูโคสนั้นประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ถึง 3 หมู่ ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลนี้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันเองกับโมเลกุลหรือสายโซ่พอลิเมอร์ที่อยู่ข้างเคียงได้ จึงทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินมีค่าสูงมาก ส่งผลให้ต้องใช้พลังงานในปริมาณสูงมากในการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลนี้ ซึ่งพลังงานที่จะทำลายแรงยึดเหนี่ยวดังกล่าวมีค่าสูงกว่าพลังงานที่จะทำลายพันธะในสายโซ่หลักของโมเลกุลพอลิเมอร์ ดังนั้นเมื่อมีการให้ความร้อนกับแป้งมากขึ้นเรื่อย ๆ จะทำให้เกิดการสลายตัวของโมเลกุลแป้งก่อนที่จะเกิดการหลอมและไหลได้ เพราะฉะนั้นการจะเตรียมแป้งให้เป็นพอลิเมอร์แบบเทอร์โมพลาสติกจึงจำเป็นต้องปรับสภาพหรือลดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลลงก่อน โดยวิธีหนึ่งที่นิยมกันมากคือ การเติมสารพลาสติกไซเซอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันซึ่งสามารถแย่งเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินได้ เป็นผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกันเองของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินต่ำลง โมเลกุลจึงสามารถเคลื่อนผ่านกันได้ง่ายขึ้น เกิดการหลอมและไหลได้เมื่อได้รับความร้อน

พลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) ของแป้ง

ลักษณะทั่วไปของพลาสติกไซเซอร์คือเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก และต้องมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงกับโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินเป็นส่วนประกอบอยู่ในโครงสร้าง เช่น หมู่ไฮดรอกซิล หรือ หมู่เอไมด์ เป็นต้น โดยประสิทธิภาพของพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ในการนำมาเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติกสามารถวัดได้จากความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของพลาสติกไซเซอร์กับโมเลกุลแป้ง โดยถ้าพันธะยิ่งแข็งแรงก็แสดงว่าสารชนิดนั้นมีศักยภาพสำหรับเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ของแป้งเทอร์โมพลาสติกสูง ซึ่งจะมีผลช่วยต่อการป้องกันการเกิดปรากฏการณ์รีโทรเกรดชันได้ดีอีกด้วย [10]

กลีเซอรอล เป็นพลาสติกไซเซอร์ที่นิยมนำมาใช้ในการเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก ราคาไม่แพง และยังมีความปลอดภัยสูงกว่าพลาสติกไซเซอร์ชนิดอื่น ๆ อย่างเช่น ซอร์บิทอล ยูเรีย หรือ เอทิลีนไกลคอล [9] แต่กลีเซอรอลเองก็มีข้อดีสำหรับการเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติกเช่นกันคือ การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของกลีเซอรอลกับโมเลกุลของแป้งไม่มีความแข็งแรงมากนัก ดังนั้นเมื่อเก็บหรือใช้งานผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปจากแป้งเทอร์โม-

พลาสติกในสภาวะแวดล้อมที่มีปริมาณความชื้นสูง จะทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งสามารถกลับมาเกิดผลึกกันใหม่อีกครั้งได้

สมบัติทั่วไปของแป้งเทอร์โมพลาสติก

สมบัติเชิงกลของแป้งเทอร์โมพลาสติกจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ปัจจัยด้านวัตถุดิบหรือชนิดของแป้งที่นำมาใช้เตรียม ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้วว่าแป้งแต่ละชนิดจะมีลักษณะโครงสร้างของเม็ดแป้ง และปริมาณของส่วนประกอบอย่างอะไมโลสและอะไมโลเพคตินแตกต่างกัน ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของแป้งเทอร์โมพลาสติก โดยจากการศึกษารายงานการวิจัยของผู้อื่นก่อนหน้า พบว่าหากใช้แป้งมันฝรั่งที่มีสัดส่วนของอะไมโลสสูง ๆ ในการเตรียมเป็นแป้งเทอร์โมพลาสติก จะส่งผลให้แป้งเทอร์โมพลาสติกที่ได้มีความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่าแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ใช้แป้งมันฝรั่งที่มีสัดส่วนของอะไมโลสต่ำกว่าในการเตรียม นอกจากนี้แล้วสมบัติของแป้งเทอร์โมพลาสติกยังขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซออร์ที่ใช้ด้วย โดยการเติมพลาสติกไซเซออร์ในปริมาณที่สูงขึ้นจะทำให้ความทนทานต่อการเสีรูบจากแรงดึงมีค่าต่ำลง แต่จะทำให้ความต้านทานต่อแรงกระแทกและความสามารถในการยึดตัวของวัสดุเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามสมบัติของแป้งเทอร์โมพลาสติกยังขึ้นอยู่กับปัจจัยในเรื่องของกระบวนการและสภาวะที่ใช้ในการผสมขึ้นรูป การใส่สารตัวเติมหรือสารเสริมแรง รวมทั้งการเก็บรักษาหรือใช้งานในสภาวะที่มีอุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ กันด้วย [10]

สมบัติที่โดดเด่นที่สุดของแป้งเทอร์โมพลาสติกเมื่อเทียบกับพลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบทางปิโตรเลียมคือ ความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพอย่างสมบูรณ์ในระยะเวลาอันสั้น แต่ก็มีสมบัติที่สำคัญอีกประการที่ถือเป็นข้อดีของแป้งเทอร์โมพลาสติก นั่นก็คือความว่องไวต่อความชื้น อันเนื่องมาจากโครงสร้างของแป้งเทอร์โมพลาสติกมีหมู่ไฮดรอกซิลถึง 3 หมู่ ต่อ 1 หน่วยซ้ำ ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลนั้นสามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของน้ำได้ดี ซึ่งน้ำนั้นเมื่อถูกดูดซับเข้าไปในเนื้อแป้งเทอร์โมพลาสติกแล้วจะทำหน้าที่เสมือนเป็นพลาสติกไซเซออร์อีกชนิดหนึ่ง ส่งผลทำให้แป้งเทอร์โมพลาสติกมีความอ่อนตัวสูงขึ้น ความทนทานต่อการเสีรูบต่ำลง [15]

2.5 การปรับปรุงสมบัติความว่องไวต่อความชื้นของแป้งเทอร์โมพลาสติก

การปรับปรุงหรือลดความว่องไวต่อความชื้นของแป้งเทอร์โมพลาสติก สามารถทำได้ด้วยกันหลายวิธีเช่น การปรับเปลี่ยนหมู่โครงสร้างทางเคมีของแป้ง หรือก็คือการเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งบางตำแหน่งให้เป็นหมู่ที่ไม่ว่องไวต่อความชื้น เรียกกระบวนการนี้ว่า hydrophobization ซึ่งแป้งที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวมาจะเรียกว่า hydrophobic starch หรือ modified starch โดยตัวอย่างการเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันที่เป็นที่นิยมได้แก่ acetylated starch และ esterified starch เป็นต้น [10, 16] อีกวิธีที่จะปรับลดความว่องไวต่อความชื้นคือการผสมแป้งเทอร์โมพลาสติกกับพอลิเมอร์อื่นที่ไม่ดูดความชื้นหรือดูดความชื้นน้อยกว่าเช่น คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (carboxymethyl cellulose) หรือการเติมกรดไขมันเช่น stearic acid, palmitic acid, oleic acid หรือ beeswax ลงไป [16] ก็เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเช่นกัน เพราะกรดไขมันมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของแป้งได้ ทั้งยังมีส่วนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนสายยาวที่ไม่ชอบน้ำอยู่ด้วยจึงมีความสามารถที่จะลดการดูดความชื้นของแป้งลงได้

2.6 น้ำมันลินสีด (linseed oil หรือ flaxseed oil)

ลินสีด จัดเป็นพืชน้ำมันที่สำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่ง มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Linum usitatissimum* สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งในรูปของเส้นใยที่ได้จากส่วนของลำต้น และรูปของน้ำมันที่สกัดมาจากส่วนของเมล็ด ซึ่งโดยทั่วไปแล้วนั้นเมล็ดลินสีดจะมีปริมาณน้ำมันอยู่ประมาณ 35-45% และจัดเป็นพืชน้ำมันหลักที่มีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวอย่างกรดไลโนเลนิก (linolenic acid) ที่มีคุณสมบัติคือว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นส่วนประกอบอยู่เป็นปริมาณมาก ซึ่งจะส่งผลให้น้ำมันลินสีดมีคุณสมบัติในการทำแห้งได้เร็ว จึงมักจะเรียกกันว่าน้ำมันชักแห้ง (drying oil) เหมาะที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเช่น การทำสีย้อม (paints) สีเคลือบเงา (varnish) น้ำยาเคลือบไม้ หมึกพิมพ์ผ้าพลาสติก หรือน้ำยาฟอกหนัง เป็นต้น [17]

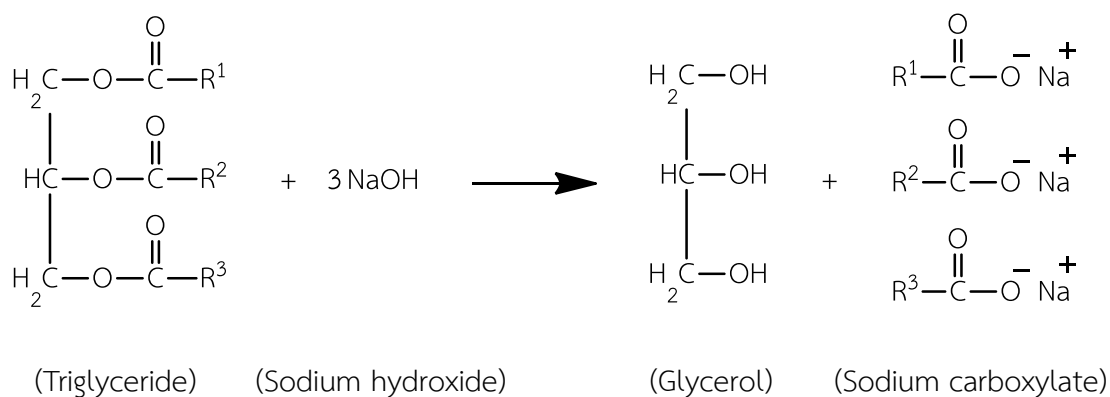
น้ำมันลินสีดเป็นไตรกลีเซอไรด์ซึ่งประกอบด้วยกรดไขมัน 3 โมเลกุล ที่มีทั้งกรดไขมันอิ่มตัว และกรดไขมันไม่อิ่มตัว แต่จากการทดสอบแล้ว มีรายงานออกมาว่าน้ำมันลินสีดประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นส่วนใหญ่ถึงกว่า 87% และมีกรดไลโนเลนิก (linolenic acid) อยู่มากถึง 53% โดยชนิดและปริมาณของกรดไขมันที่พบในน้ำมันลินสีดอย่างละเอียดแสดงดังตารางที่ 2.2 [8]

ตารางที่ 2.2 ปริมาณกรดไขมันในน้ำมันลินสีด [8]

ชนิดของกรดไขมัน	จำนวนคาร์บอน:พันธะคู่	ปริมาณ (%)
กรดปาล์มมิติก (Palmitic acid)	16:0	6.58
กรดสเตียริก (Stearic acid)	18:0	4.43
กรดโอเลอิก (Oleic acid)	18:1	18.51
กรดไลโนเลอิก (Linoleic acid)	18:2	17.25
กรดไลโนเลนิก (Linolenic acid)	18:3	53.21

2.7 การเตรียมน้ำมันให้เป็นอนุพันธ์ประเภทต่าง ๆ

น้ำมันเกิดจากการรวมตัวกันของสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ (triglycerides) ซึ่งโครงสร้างโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์จะแบ่งองค์ประกอบเป็นสองส่วนคือ ส่วนของกรดไขมัน และส่วนกลีเซอรอล โดยไตรกลีเซอไรด์เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยา esterification ระหว่างกรดไขมัน 3 โมเลกุลกับกลีเซอรอล 1 โมเลกุล ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้สามารถแยกออกจากกันได้อีกครั้งด้วยการทำปฏิกิริยา saponification โดยใช้ด่างในการทำปฏิกิริยาดังภาพที่ 2.5 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาคือ กลีเซอรอล และโซเดียมคาร์บอกซิเลต ซึ่งหากนำเอาโซเดียมคาร์บอกซิเลตไปทำปฏิกิริยาต่อกับกรดก็จะได้เป็นกรดไขมันออกมา



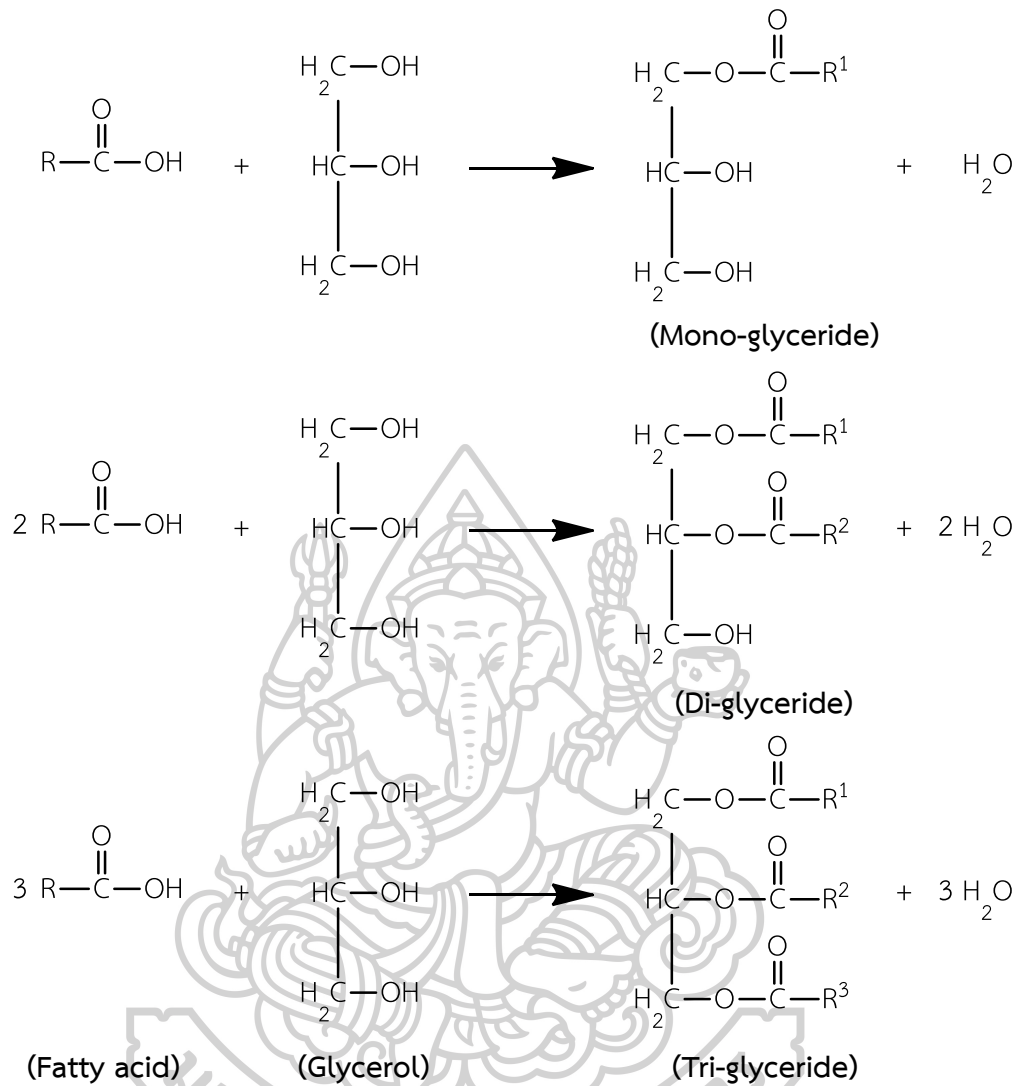
ภาพที่ 2.5 ปฏิกิริยา saponification ของไตรกลีเซอไรด์

2.7.1 การเตรียมอนุพันธ์ของน้ำมันประเภทโมโนกลีเซอไรด์ (mono-glyceride)

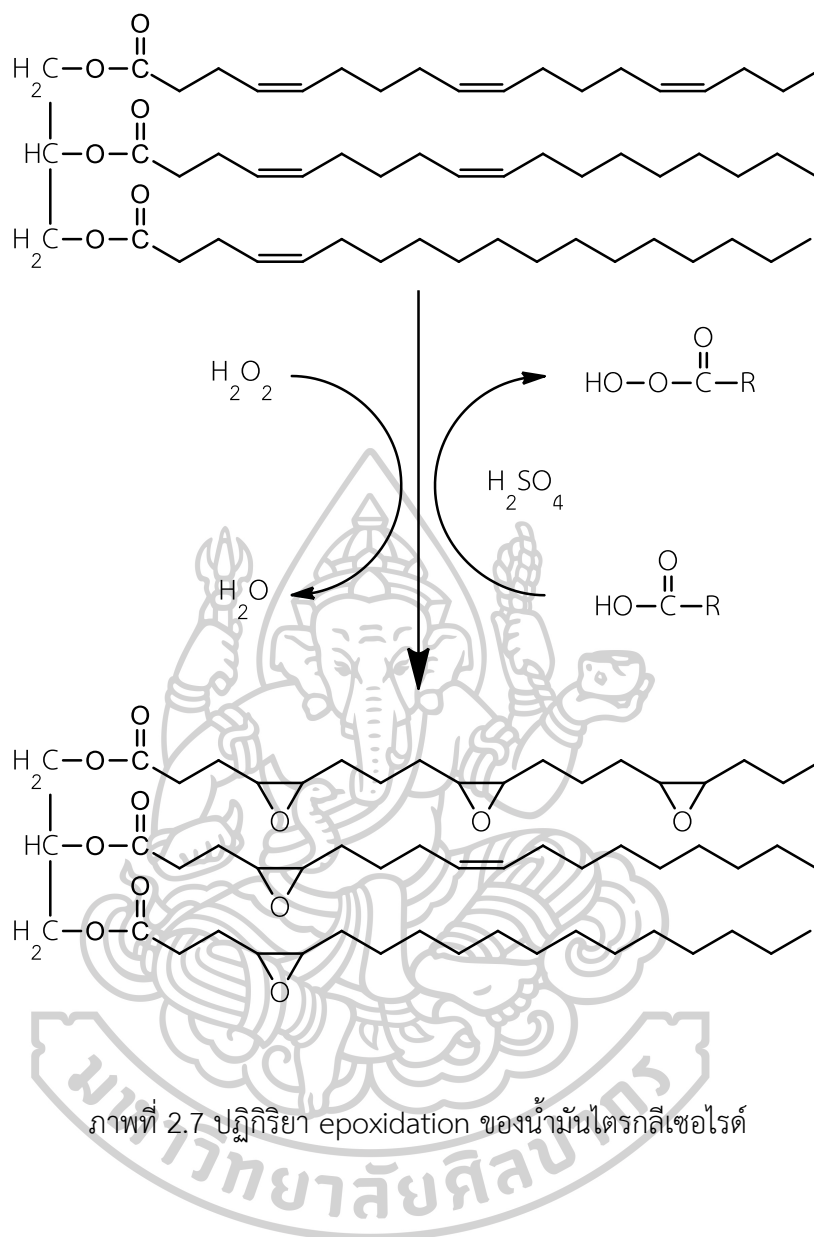
อนุพันธ์ของน้ำมันประเภทโมโนกลีเซอไรด์จะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นกรดไขมันและส่วนที่เป็นกลีเซอรอลเช่นเดียวกับน้ำมันซึ่งเป็นไตรกลีเซอไรด์ แต่แตกต่างกันตรงที่อัตราส่วนของกรดไขมันและกลีเซอรอล โดยโมโนกลีเซอไรด์ของน้ำมันจะมีส่วนที่เป็นกรดไขมันต่อส่วนของกลีเซอรอลในอัตรา 1 ต่อ 1 โมล ดังนั้นในการเตรียมโมโนกลีเซอไรด์ของน้ำมันนั้นจึงสามารถเตรียมได้สองแบบคือ การทำปฏิกิริยา transesterification เพื่อดึงหรือขจัดส่วนที่เป็นกรดไขมันออกจากน้ำมันที่เป็นไตรกลีเซอไรด์สองส่วน ให้เหลือเพียง 1 ส่วนเท่านั้นที่เกิดพันธะอยู่กับกลีเซอรอล แต่วิธีนี้ค่อนข้างยุ่งยากและใช้สภาวะที่ค่อนข้างรุนแรง เมื่อเทียบกับแบบที่สองซึ่งเตรียมได้จากการแยกเอากรดไขมันออกจากน้ำมันทั้งหมดก่อนแล้วจึงนำเอากรดไขมันนั้นมาทำปฏิกิริยา esterification โดยตรงกับกลีเซอรอลอีกครั้งโดยบังคับให้เกิดปฏิกิริยากันแบบ 1 ต่อ 1 โมล (mono-glyceride) หรือ 2 ต่อ 1 โมล ในกรณีที่ต้องการไดกลีเซอไรด์ (di-glyceride) ดังภาพที่ 2.6

2.7.2 การเตรียมอนุพันธ์ของน้ำมันประเภทอีพอกไซด์ (epoxidize)

น้ำมันที่มีความไม่อิ่มตัวสูง เช่นน้ำมันลินสีดจะเอื้อต่อการปรับปรุงหรือดัดแปลงโครงสร้างเนื่องจากบริเวณที่เป็นหมู่พันธะคู่เหล่านี้นิว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งการดัดแปลงน้ำมันที่พบเห็นโดยมากคือการเปลี่ยนน้ำมันให้เป็นน้ำมันอีพอกไซด์ เนื่องจากหมู่อีพอกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางกันเองได้ทำให้สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ อีกทั้งหมู่อีพอกไซด์นี้ยังสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลได้ดีอีกด้วย โดยน้ำมันลินสีดอีพอกไซด์สามารถเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (epoxidation) ด้วยสารเคมีดังภาพที่ 2.7

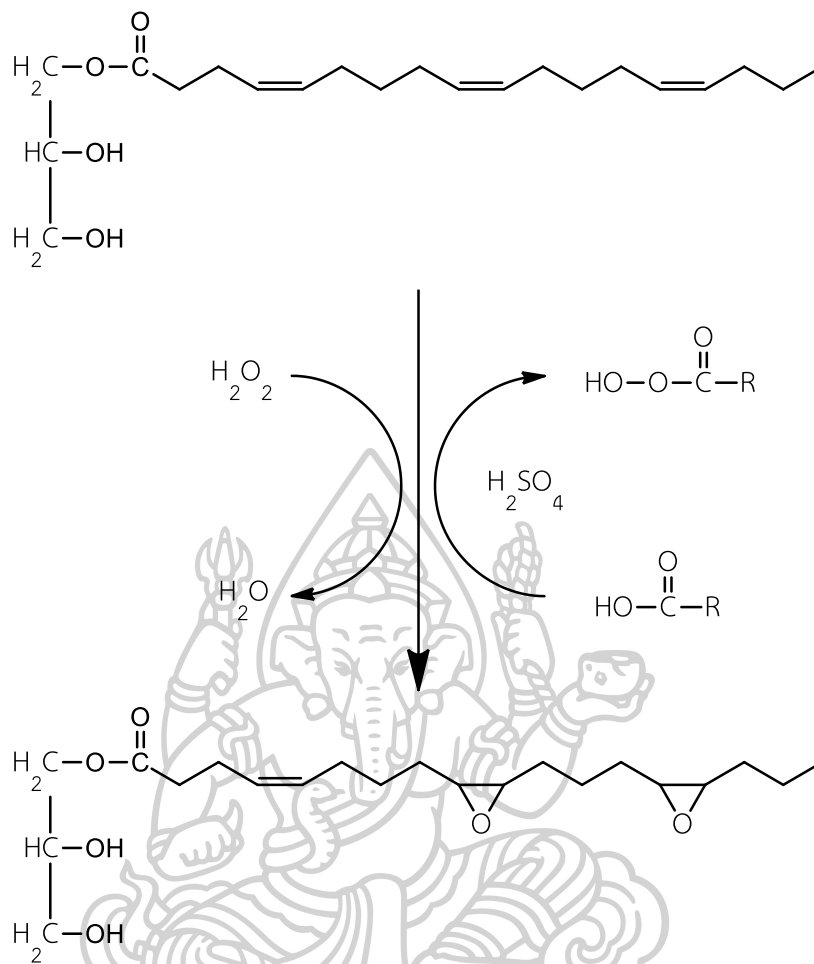


ภาพที่ 2.6 ปฏิกิริยา esterification ของกลีเซอรอลกับกรดไขมัน



2.7.3 การเตรียมอนุพันธ์ของน้ำมันประเภทโมโนกลีเซอไรด์อีพอกไซด์ (epoxidized mono-glyceride)

อนุพันธ์ของน้ำมันประเภทโมโนกลีเซอไรด์อีพอกไซด์สามารถเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (epoxidation) ของน้ำมันโมโนกลีเซอไรด์เพื่อเปลี่ยนพันธะคู่ (C=C) ในโครงสร้างโมเลกุลเป็นหมู่อีพอกไซด์ (C-O-C) เช่นเดียวกันกับการเตรียมน้ำมันอีพอกไซด์ปกติดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ปฏิกิริยา epoxidation ของน้ำมันโมโนกลีเซอไรด์



2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปิยะวิทย์ สดสุชาติ [6] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติการดูดความชื้นของแป้งเทออร์โมพลาสติกด้วยการเคลือบด้วยกรดไขมันหรืออนุพันธ์ของโคโคซานลงบนผิวของชิ้นงานด้วยวิธี solution dipping และจากการเก็บไว้ในสภาวะแวดล้อมซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์ 53% เป็นเวลา 15 วัน เพื่อทดสอบการดูดความชื้นพบว่าแป้งเทออร์โมพลาสติกที่เคลือบด้วยกรดไขมันหรืออนุพันธ์ของโคโคซาน จะมีความว่องไวต่อความชื้นลดลง หรือกล่าวคือมีการดูดความชื้นน้อยลงเมื่อเทียบกับแป้งเทออร์โมพลาสติกที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว โดยเฉพาะอย่างยิ่งแป้งเทออร์โมพลาสติกที่เคลือบผิวด้วยกรดไขมันจากน้ำมันคาโนล่าห์ ซึ่งสามารถลดการดูดความชื้นลงได้กว่า 73% เมื่อเทียบกับแป้งเทออร์โมพลาสติกที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว ซึ่งอาจเนื่องมาจากโครงสร้างของกรดไขมันจากน้ำมันคาโนล่าห์นั้นเป็นกรดไขมันแบบไม่อิ่มตัว ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยา oxy-polymerization ที่ตำแหน่งพันธะคู่ของกรดไขมันดังกล่าวได้ ส่งผลให้หมู่ไฮโดรคาร์บอนสายยาวของกรดไขมันเชื่อมกันเป็นฟิล์มที่แข็งแรง จึงเป็นผลทำให้ความชื้นซึมผ่านได้ยาก การดูดความชื้นของชิ้นงานจึงลดลงมากกว่า ยืนยันได้จากการศึกษาเชิงปริมาณของการเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันของกรดไขมันด้วยเทคนิค FTIR ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัวมีอัตราส่วนของ $A_{C=C}/A_{C=O}$ ลดลง แต่ $A_{C=O}/A_{C=O}$ จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาของพันธะคู่ในกรดไขมันไม่อิ่มตัวกับออกซิเจนในอากาศ แล้วเกิดการเชื่อมขวางกันระหว่างสายโซ่ของกรดไขมัน

ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วน $A_{C=C}/A_{C=O}$ และอัตราส่วน $A_{C=O}/A_{C=O}$ ของสารเคลือบที่เป็นกรดไขมันชนิดต่าง ๆ กัน [6]

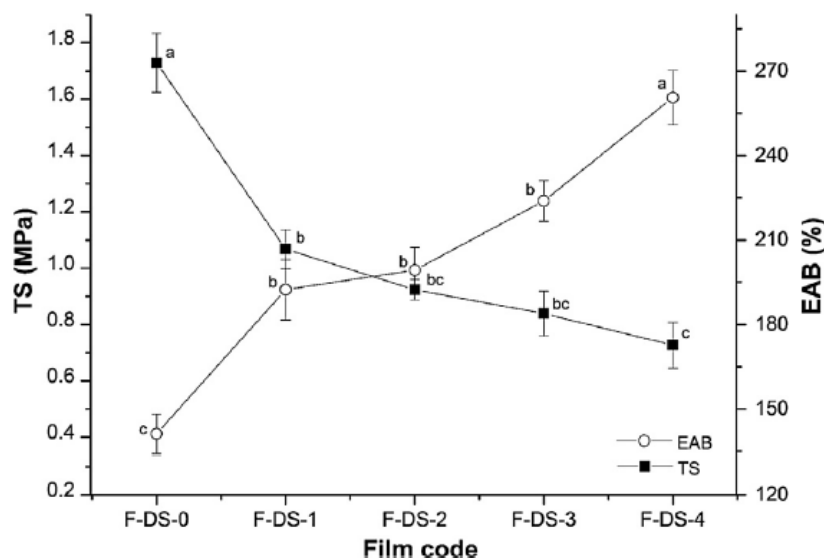
ชนิดของกรดไขมัน	อัตราส่วน $A_{C=C}/A_{C=O}$			อัตราส่วน $A_{C=O}/A_{C=O}$		
	วันที่ 1	วันที่ 7	วันที่ 15	วันที่ 1	วันที่ 7	วันที่ 15
กรดสเตียริก	N/A	N/A	N/A	0.26	0.26	0.26
กรดโอเลอิก	N/A	N/A	N/A	0.09	0.09	0.10
กรดไขมันจากน้ำมันดอกทานตะวัน	0.09	0.07	0.05	0.09	0.10	0.11
กรดไขมันจากน้ำมันดอกคาโนล่าห์	0.22	0.19	0.08	0.02	0.03	0.04

Jing Li และคณะ [16] ศึกษาผลของการทำ octenylsuccination ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและการปรับปรุงสมบัติความว่องไวต่อความชื้นของฟิล์มยืดที่เตรียมจากแป้งมันฝรั่งหวาน โดยนำแป้งมันฝรั่งมาทำปฏิกิริยากับ 2-octenyl succinic anhydride ให้ได้เป็น octenylsuccinated sweet potato starch (OSS) ที่มีระดับการแทนที่ (degree of substitution) ต่าง ๆ กัน คือ 0.0134, 0.0236, 0.0325 และ 0.0425 โดยใช้ชื่อย่อชิ้นงานเป็น FDS1, FDS2, FDS3 และ FDS4 ตามลำดับ จากนั้นนำมาผสมขึ้นรูปเป็นฟิล์มกับแป้งดิบหรือ native starch ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลการศึกษามัธยมศึกษาสมบัติการดูดความชื้นของฟิล์มที่เตรียมได้จากการละลายน้ำ, อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ, มุมสัมผัสน้ำ (contact angle) และการซึมผ่านของน้ำมัน แสดงในตารางที่ 2.4 พบว่าเมื่อระดับการแทนที่ของ octenylsuccinate สูงขึ้น ค่าการละลายน้ำ และการซึมผ่านของไอน้ำจะมีค่าลดลง แต่การซึมผ่านของน้ำมันและมุมสัมผัสน้ำมีค่าสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่เตรียมได้มีความเป็น hydrophobic สูงขึ้นเมื่อระดับการแทนที่สูงขึ้น ซึ่งอาจเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของส่วนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนสายยาวที่ไม่ชอบน้ำบริเวณปลายสายข้างหนึ่งของ octenylsuccinate ตามระดับการแทนที่นั่นเองจึงทำให้ฟิล์มที่ได้มีสมบัติป้องกันน้ำและความชื้นสูงขึ้น

ตารางที่ 2.4 ผลการทดสอบการละลายน้ำ การซึมผ่านของไอน้ำ มุมสัมผัสน้ำ และการซึมผ่านของน้ำมัน [17]

Film code	Water solubility (%)	Water vapor permeability (g/s.m.Pa) $\times 10^{-11}$	Contact angle (°)	Oil permeability (g.mm/m ² .d)
FDS0	19.99±0.84	7.18±0.065	63.78±1.26	0.053±0.012
FDS1	19.72±0.62	6.50±0.008	70.69±3.07	0.099±0.011
FDS2	18.67±0.85	6.27±0.018	79.37±1.56	0.122±0.013
FDS3	17.28±0.08	5.76±0.017	83.10±1.14	0.136±0.017
FDS4	15.25±0.81	5.69±0.074	91.59±2.36	0.149±0.010

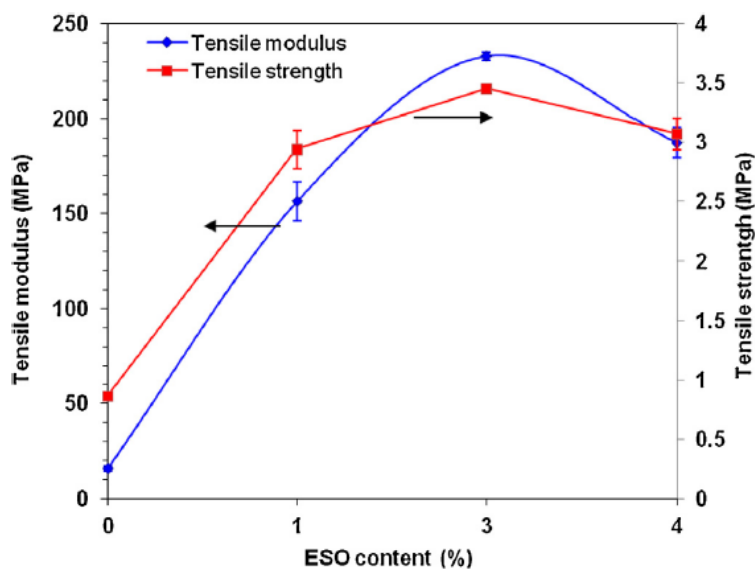
สำหรับสมบัติเชิงกลพบว่าค่า tensile strength จะมีค่าลดลงเมื่อระดับการแทนที่สูงขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับค่า elongation at break ดังแสดงในภาพที่ 2.9 โดยทั่วไปแล้วค่า tensile strength จะขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุล นั้นแสดงให้เห็นว่า octenylsuccinate ที่เติมลงไปบน starch จะทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของแป้งต่ำลงสายโซ่สามารถเคลื่อนผ่านกันได้ง่ายขึ้น



ภาพที่ 2.9 สมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม octenylsuccinated/native sweet potato starch [17]

Ramzi Belhassen และคณะ [18] ศึกษาการปรับปรุงแป้งเทอร์โมพลาสติกด้วยกระบวนการ melt reactive blending กับ epoxidized soybean oil ในเครื่องผสมภายใน พบว่าการเติม epoxidized soybean oil มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า Young's modulus และ tensile strength ค่อนข้างมาก เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางกันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งกับวงแหวน epoxide ของ epoxidized soybean oil ในระหว่างการผสม ทำให้สายโซ่โมเลกุลยึดเกาะกันแน่นและแข็งแรงมากขึ้น โดยอัตราส่วนการเติม epoxidized soybean oil ที่ 3% โดยน้ำหนักจะให้ค่า Young's modulus และ tensile strength สูงที่สุด หากเติมในปริมาณมากกว่านี้จะทำให้ค่าทั้งสองลดลง (ภาพที่ 2.10) ซึ่งนั่นอาจเนื่องมาจากการเชื่อมขวางกันของสายโซ่ในปริมาณมากขึ้น ทำให้สายโซ่เคลื่อนผ่านกันได้ยากขึ้น ความหนืดมีค่าสูงมากขึ้น เมื่อเจอแรงเฉือนขณะผสมจึงอาจเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นสูงมากจนไปทำลายหรือทำให้เกิดการแตกออกของสายโซ่โมเลกุล จึงเป็นเหตุให้

สมบัติเชิงกลลดลง และจากการศึกษาการดูดซับความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 40% พบว่าการเติม epoxidized soybean oil จะทำให้แป้งเทอร์โมพลาสติกมีความเป็น hydrophobic สูงขึ้น



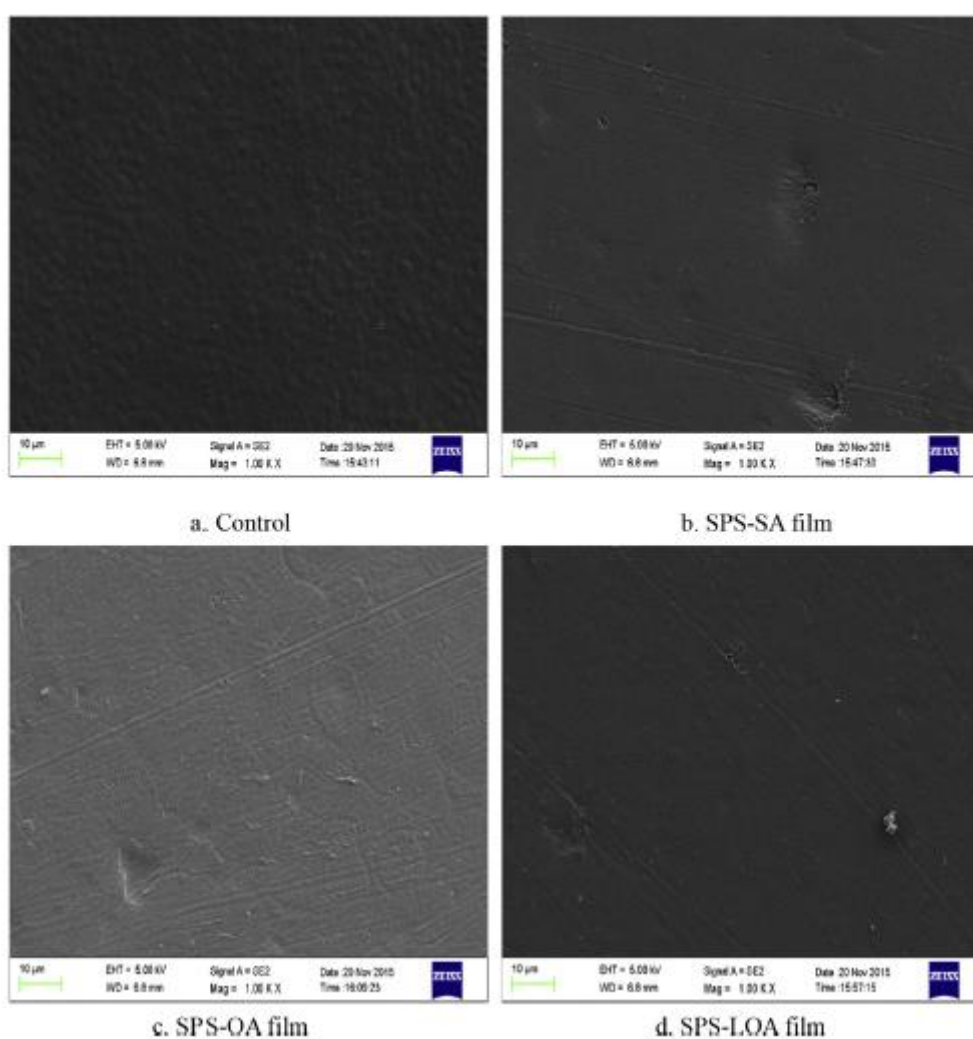
ภาพที่ 2.10 สมบัติเชิงกลของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติม epoxidized soybean oil [19]

Vanessa Dias Alves และคณะ [19] ได้ศึกษาผลของปริมาณกลีเซอรอลและอะไมโลส ที่มีต่อสมบัติของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง พบว่าการเติมอะไมโลสในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น แข็งแรงขึ้น อีกทั้งการซึมผ่านของไอน้ำก็ยังลดลงด้วย แต่การเติมกลีเซอรอลในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้การซึมผ่านของไอน้ำ และการยืดออกของฟิล์มสูงขึ้น สวนทางกับค่า stress at break, Young's modulus และ puncture strength ที่จะมีค่าลดลง

Pengfei Liu และคณะ [20] ศึกษาผลของกรดไขมันที่มีระดับความไม่อิ่มตัวต่าง ๆ กัน ที่มีต่อสมบัติของฟิล์มจากแป้งมันฝรั่งหวาน โดยกรดไขมันที่ใช้ได้แก่ กรดสเตียริก (C18:0) กรดโอเลอิก (C18:1) และกรดไลโนลิก (C18:2) ซึ่งผลจากการทดสอบคุณสมบัติของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ แสดงดังภาพที่ 2.11 จะพบว่าผิวของแผ่นฟิล์มจะมีความเรียบมากยิ่งขึ้นเมื่อเติมกรดไขมันลงไป และจากการทดสอบสมบัติเชิงกลจะพบว่าฟิล์มที่เติมกรดไขมันไม่อิ่มตัวจะให้ค่า tensile strength สูงกว่าฟิล์มที่เติมกรดไขมันไม่อิ่มตัว ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโมเลกุลของกรดไขมันไม่อิ่มตัวสามารถเกิดพันธะที่แข็งแรงกับโมเลกุลอะไมโลสมากกว่าเมื่อเทียบกับกรดไขมันไม่อิ่มตัว ยืนยันได้จากผลการทดสอบหาค่า complexing index ด้วยเทคนิค UV-VIS spectroscopy ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ผลของกรดไขมันที่ระดับความไม่อิมิตัวต่างกันต่อค่า complexing index [21]

Type of composites	Complexing index (%)
SPS-SA (stearic acid)	21.23 (0.56)
SPS-OA (oleic acid)	14.23 (0.44)
SPS-LOA (linoleic acid)	1.15 (0.29)



ภาพที่ 2.11 microstructure ของฟิล์มผสมระหว่างแป้งมันฝรั่งหวานกับกรดไขมันชนิดต่าง ๆ [21]

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติกและอนุพันธ์ของน้ำมัน

1. แป้งมันสำปะหลัง (Tapioca starch) บริษัท Siam Quality Starch Co.,Ltd. ประเทศไทย
2. น้ำมันลินสีด (Linseed oil) เกรด Refined บริษัท Winsor & Newton สหราชอาณาจักร
3. กลีเซอรอล (Glycerol) บริษัท UNIVAR ประเทศออสเตรเลีย
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide ; NaOH) บริษัท UNIVAR ประเทศออสเตรเลีย
5. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid ; HCl) บริษัท QRèC ประเทศนิวซีแลนด์
6. กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid ; H_3PO_4) บริษัท EMSURE ประเทศเยอรมนี
7. ปีโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum ether) บริษัท QRèC ประเทศนิวซีแลนด์
8. โซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัส (Sodium sulphate anhydrous ; Na_2SO_4) บริษัท QRèC ประเทศนิวซีแลนด์
9. โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate ; $NaHCO_3$) บริษัท UNIVAR ประเทศออสเตรเลีย
10. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid ; H_2SO_4) บริษัท QRèC ประเทศนิวซีแลนด์
11. กรดฟอร์มิก (Formic acid ; CH_2O_2) บริษัท UNIVAR ประเทศออสเตรเลีย
12. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% (Hydrogen peroxide ; H_2O_2) บริษัท QRèC ประเทศนิวซีแลนด์
13. แมกนีเซียมไนเตรตเฮกซะไฮเดรต (Magnesium nitrate hexahydrate ; $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) บริษัท QRèC ประเทศนิวซีแลนด์

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานแบ่งเทอร์โมพลาสติก

1. ตู้อบสูญญากาศ (Vacuum oven) รุ่น VO200 จากบริษัท Memmert ประเทศเยอรมนี
2. เครื่องบดสาร (Grinder) รุ่น RT04 จากบริษัท Mill Powder Tech ประเทศไต้หวัน
3. เครื่องผสมภายใน (Internal mixer) รุ่น Plasti-Corder บริษัท Brabender ประเทศเยอรมนี
4. เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด (Compression molding) รุ่น FOR LP-5-50 บริษัท Labtech Engineering ประเทศไทย

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบและพิสูจน์เอกลักษณ์

1. เครื่องฟูริเยร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transforms infrared spectrometer ; FTIR) รุ่น Vertex 70 บริษัท Bruker ประเทศเยอรมนี
2. เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman spectrometer) รุ่น Senterra บริษัท Bruker ประเทศเยอรมนี
3. เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (Nuclear Magnetic Resonance spectrometer ; NMR) รุ่น AVANCE III HD บริษัท Bruker ประเทศเยอรมนี
4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope ; SEM) รุ่น TM3030 บริษัท HITACHI High-Technologies Corporation ประเทศญี่ปุ่น
5. เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลทั่วไป (Universal testing machine ; UTM) รุ่น 5969 บริษัท Instron Engineering Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา
6. เครื่องทดสอบการกระแทก (Impact tester) รุ่น CEAST9050 บริษัท Instron Engineering Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา
7. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารจากความร้อน (Thermogravimetric analyzer ; TGA) รุ่น TGA/DCS1 บริษัท Mettler Toledo ประเทศสหรัฐอเมริกา
8. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer ; XRD) รุ่น MAXima_X XRD-7000 บริษัท Shimadzu Corporation ประเทศญี่ปุ่น

3.4 วิธีการวิจัย

3.4.1 การเตรียมอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด

3.4.1.1 การเตรียมอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดประเภทโมโนกลีเซอไรด์ (mono-glyceride linseed oil : MLO)

ตอนที่ 1 การเตรียมกรดไขมันจากน้ำมันลินสีด

การเตรียมกรดไขมันของน้ำมันลินสีดดัดแปลงจากงานวิจัยของฐิติมน [21] โดยเริ่มด้วยการนำน้ำมันลินสีดมาใส่ขวดก้นกลมพร้อมให้ความร้อนและกวนด้วย magnetic stirrer จนกระทั่งอุณหภูมิถึง 90 °C จากนั้นเติมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 1 M ให้ได้ปริมาณ NaOH 0.1358 กรัม/น้ำมันลินสีด 1 กรัม [22] รอปฏิกิริยา 90 นาที จากนั้นเทสารใส่กรวยแยกสาร พร้อมเติมน้ำอุ่นลงไปกลั่นแยกด้วยเล็กน้อย แล้วรอให้สารละลายแยกชั้นกัน จากนั้นจึงไซสารละลายชั้นล่างทิ้งไป และใช้น้ำอุ่นกลั่นล้างสารที่เหลืออยู่อีกประมาณ 2-3 ครั้ง โดยใช้น้ำล้างชั้นล่างทิ้ง ก็จะได้เป็นชั้นของสบู่สีขาวออกมา หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักของสบู่ที่ได้แล้วนำมาให้ความร้อนและกวนด้วย magnetic stirrer จนกระทั่งอุณหภูมิถึง 90 °C อีกครั้ง แล้วจึงเติมสารละลายกรด HCl ความเข้มข้น 1 M ให้ทำปฏิกิริยากับสบู่ (Sodium carboxylates) ด้วยอัตราส่วน 1 : 1 โมล เป็นเวลา 90 นาที จากนั้นเทสารใส่กรวยแยกสาร และไซสารละลายชั้นล่างทิ้งไป ก็จะได้กรดไขมันออกมา

ตอนที่ 2 การทำปฏิกิริยา Esterification

การทำปฏิกิริยา Esterification ของกรดไขมันและกลีเซอรอลดัดแปลงจากงานวิจัยของ Choudhury [23] โดยนำกรดไขมันที่ได้ในตอนที่ 1 มาใส่ในขวดก้นกลม 3 คอ พร้อมกับเติมไฮเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 % โดยน้ำหนัก เพื่อเร่งปฏิกิริยา จากนั้นให้ความร้อนโดยกวนสารตลอดเวลาด้วย magnetic stirrer ภายใต้สภาวะไนโตรเจน จนกระทั่งสารมีอุณหภูมิ 180 °C แล้วจึงเติมกลีเซอรอลที่อุ่นให้ความร้อนรอไว้แล้วลงไปปริมาณ 1 โมลของกรดไขมัน ต่อ 3 โมลของกลีเซอรอล (กลีเซอรอลเกินพอ) แล้วรอให้ปฏิกิริยาดำเนินไป 6 ชั่วโมง จากนั้นจึงหยุดปฏิกิริยาโดยนำเอาขวดไปจุ่มแช่ในอ่างน้ำเย็นจนกระทั่งสารละลายมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงเติมกรด Phosphoric 85% ลงไปเพื่อกำจัด alkali catalyst จากนั้นนำสารที่ได้ละลายใน Petroleum ether แล้วล้างกลีเซอรอลที่ไม่ทำปฏิกิริยาออกด้วยสารละลาย Sodium sulphate ความเข้มข้น 20% ในน้ำ โดยใช้กรวยแยก และขจัดกรดไขมันที่ไม่ทำปฏิกิริยาออกด้วยสารละลายของ Sodium bicarbonate ความเข้มข้น 10% ในน้ำ โดยล้างประมาณ 2-3 ครั้ง แล้วจึงล้างด้วยสารละลาย

Sodium sulphate ความเข้มข้น 20% อีกครั้งเพื่อขจัดไขสบู่ที่อาจเกิดขึ้น แล้วเติม Sodium sulphate anhydrous ลงไปในสารละลายเพื่อกำจัดความชื้นหรือน้ำล้างที่ยังคงหลงเหลืออยู่ สุกด้วยกรองด้วยกระดาษกรองแล้วนำสารละลายที่เหลือไปกลั่นภายใต้สภาวะสุญญากาศเพื่อแยกเอา Petroleum ether ที่เป็นตัวทำละลายออก ก็จะได้โมโนกลีเซอไรด์ของน้ำมันลินสีด (MLO) ออกมา

3.4.1.2 การเตรียมอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดประเภทอีพอกซีไดซ์ (epoxidized linseed oil : ELO)

วิธีการเตรียมน้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ดัดแปลงจากงานวิจัยของ Saithai [24] เริ่มด้วยการนำขวด 3 คอขนาด 500 มิลลิลิตร มาเติมน้ำมันลินสีดปริมาณ 100 กรัม, Toluene ปริมาณ 50 กรัม, Sulfuric acid 98% ปริมาณ 0.5 มิลลิลิตร และ Formic acid 90% ปริมาณ 12 กรัม จากนั้นนำไปให้ความร้อนจนกระทั่งอุณหภูมิถึง 60 °C แล้วค่อย ๆ หยด Hydrogen peroxide ที่แช่เย็นไว้ปริมาณ 84 กรัมด้วย dropping funnel เมื่อเริ่มหยดแล้วจับเวลาให้ปฏิกิริยาดำเนินไปจนครบ 6 ชั่วโมง โดยขณะหยด Hydrogen peroxide จะสังเกตเห็นว่าสารละลายจะค่อย ๆ เปลี่ยนสีจากสีม่วงดำเป็นสีเหลืองขุ่น เมื่อครบ 6 ชั่วโมงแล้วเทสารใส่กรวยแยกแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำล้างมีค่าเป็นกลาง จากนั้นนำสารละลายที่เหลือไปกลั่นภายใต้สภาวะสุญญากาศเพื่อแยกเอา Toluene ที่เป็นตัวทำละลายออก ก็จะได้น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ (ELO) ออกมา

3.4.1.3 การเตรียมอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดประเภทโมโนกลีเซอไรด์อีพอกซีไดซ์ (epoxidized mono-glyceride linseed oil : EMLO)

โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ (EMLO) สามารถเตรียมได้ด้วยกระบวนการเช่นเดียวกันกับการเตรียมน้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ (ELO) ในหัวข้อ 3.4.1.2 เพียงเปลี่ยนมาใช้โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด (MLO) ที่เตรียมได้จากหัวข้อ 3.4.1.1 เป็นสารตั้งต้นแทนการใช้น้ำมันลินสีด

3.4.2 การเตรียมชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติก

ตอนที่ 1 การคลุกส่วนผสม (pre-mixing)

นำแป้งดิบ (Tapioca starch) ไปอบไล่ความชื้นด้วยเครื่องอบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำแป้งที่แห้งแล้วไปคลุกผสมกับกลีเซอรอลภายในขวดเขย่าที่ทำจากพลาสติก PP ในอัตราส่วน แป้ง 70 % / กลีเซอรอล 30 % โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งเติมสารเติมแต่ง (น้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด) เพิ่มลงไปปริมาณ 1, 3, 5 หรือ 7 % โดยน้ำหนัก จากนั้น

ทำการเขย่าคลุกผสมให้เข้ากัน เป็นเวลาประมาณ 30 นาทีเพื่อให้ส่วนผสมต่าง ๆ กระจายตัวอย่างทั่วถึง จากนั้นเทใส่ถุงซิปลาสติก LDPE แล้วเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ที่มีความชื้นต่ำ ประมาณ 12 ชั่วโมง

ตอนที่ 2 การผสมภายใต้ความร้อนและแรงเฉือน

นำส่วนผสมจากตอนที่ 1 ไปผสมด้วยเครื่องผสมภายใน (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 140 °C ด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 8 นาที ก็จะได้แป้งเทอร์โมพลาสติกออกมาในลักษณะที่เป็นชิ้นขนาดใหญ่ จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดเพื่อลดขนาดให้มีขนาดเล็กลงเพื่อให้ง่ายต่อการจัดเก็บและการขึ้นรูปต่อไป

ตอนที่ 3 การขึ้นรูปชิ้นงาน

นำแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้ไปอบไล่ความชื้นภายใต้สภาวะสูญญากาศอีกครั้งที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลาประมาณ 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบกดอัดที่อุณหภูมิ 160 °C ความดัน 85 bar โดยใช้เวลา 15 นาทีในการขึ้นรูป และใช้แม่พิมพ์ (mold) ที่มีลักษณะเป็นรูปชิ้นงาน micro-tensile หรือแม่พิมพ์ที่เป็นรูปชิ้นงาน impact แล้วแต่การทดสอบ หลังจากขึ้นรูปเสร็จแล้วชิ้นงานที่ได้จะถูกนำไปอบอีกครั้งด้วยเครื่องอบแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นชิ้นงานจะถูกใส่ไว้ในถุงซิปลาสติก และเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์เป็นเวลาอย่างน้อย 48 ชั่วโมงก่อนการนำไปทดสอบด้วยวิธีต่าง ๆ

3.4.3 การเคลือบผิวชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติก

แป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งซึ่งเตรียมได้จากหัวข้อ 3.4.2 จะถูกนำเอามาจุ่มในน้ำมันลินสีด โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ หรือ โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ เพื่อเคลือบผิวของชิ้นงานด้วยสารต่าง ๆ ดังกล่าว โดยจะทำการจุ่ม 3 ครั้ง ครั้งละประมาณ 2-3 วินาที แล้วหนีบชิ้นงานไว้ด้วยคลิปหนีบผ้า จากนั้นนำไปแขวนไว้ในเดซิเคเตอร์ที่มี silica gel อยู่ภายในเพื่อให้สารเคลือบส่วนเกินหยดออกจากผิวของชิ้นงานและเพื่อให้สารเคลือบเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนกลายเป็นแผ่นฟิล์มเคลือบผิว โดยใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง จึงจะนำไปทดสอบด้วยวิธีต่าง ๆ ต่อไปนี้

3.4.4 การทดสอบและพิสูจน์เอกลักษณ์

3.4.4.1 การพิสูจน์โครงสร้างทางเคมีของอนุพันธ์น้ำมันลินสีดที่สังเคราะห์ได้

1. การทดสอบด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)
นำน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดที่สังเคราะห์ได้มาหยดลงบนแผ่นประกบที่เป็นผลึก KBr เมื่อประกบสารแล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่อง FTIR [Vertex 70, Bruker, Germany] ในช่วงเลขคลื่นตั้งแต่ 400 cm^{-1} ถึง 4000 cm^{-1} จำนวนการสแกน 32 ครั้งโดยใช้ความละเอียดในการทดสอบที่ 4 cm^{-1}
2. การทดสอบด้วยเทคนิค Raman spectroscopy (Raman)
นำน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดที่สังเคราะห์ได้มาป้ายลงบนกระจกเคลือบผิวปริมาณเล็กน้อย จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Raman spectrometer [Senterra, Bruker, Germany] ในช่วงเลขคลื่นตั้งแต่ 50 cm^{-1} ถึง 4450 cm^{-1} โดยใช้แสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 532 nm
3. การทดสอบด้วยเทคนิค Nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR)
นำน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดที่สังเคราะห์ได้มาละลายใน Deuterated chloroform (1 หยดของน้ำมัน / 1 มิลลิลิตรของตัวทำละลาย) จากนั้นนำมาใส่หลอดทดสอบของเครื่อง Nuclear magnetic resonance spectrometer [AVANCE III HD, Bruker, Germany] โดยให้ระดับความสูงของสารละลายในหลอดทดสอบอยู่ที่ประมาณ 4 เซนติเมตร และใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 300 MHz ในการทดสอบ

3.4.4.2 การทดสอบสมบัติด้านต่าง ๆ ของชิ้นงานแปงเทอร์โมพลาสติก

1. การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วย Scanning electron microscopy (SEM)
เพื่อทดสอบการกระจายตัวและความเข้ากันได้ของแปงเทอร์โมพลาสติกกับสารเติมแต่ง ทำได้โดยการนำชิ้นงานมาห่อด้วยกระดาษฟรอย จากนั้นนำไปแช่ไว้ในไนโตรเจนเหลว (liquid N_2) เป็นเวลาประมาณ 30 นาที แล้วจึงนำเอาชิ้นงานดังกล่าวออกมาหักโดยใช้สิ่วและค้อนทุบลงบนชิ้นงาน เมื่อได้เศษชิ้นงานที่หักครึ่งและมีผิวเรียบแล้ว นำไปติดบนแผ่น stub ด้วยเทปคาร์บอน แล้วนำไปเคลือบทองคำด้วยเครื่อง sputter coater 108 เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นจึงเอาไปส่องด้วยเครื่อง SEM [TM3030, HITACHI, Japan] ด้วยแรงดัน (voltage) 15 kV ที่กำลังขยาย 200 และ 1500 เท่า

2. การศึกษาสมบัติการดูดความชื้น

นำชิ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 13 x 63 x 3 มิลลิเมตร (กว้าง x ยาว x หนา) ตัวอย่างละ 3-5 ชิ้นงานมาชั่งน้ำหนัก แล้วนำมาเก็บรักษาไว้โดยให้สัมผัสกับอากาศในเดซิเคเตอร์ที่ภายในมีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ประมาณ 54 %RH ซึ่งควบคุมด้วยสารละลายอิมิตัวของ $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานทุก ๆ 24 ชั่วโมงจนกระทั่งน้ำหนักของชิ้นงานคงที่ โดยค่าน้ำหนักที่ชั่งสามารถนำมาแทนในสมการด้านล่างเพื่อหาค่า % การดูดความชื้น (% moisture absorption) ของชิ้นงานได้

$$\% \text{ การดูดความชื้น} = \left(\frac{\text{น้ำหนักชิ้นงานหลังดูดความชื้น} - \text{น้ำหนักชิ้นงานเริ่มต้น}}{\text{น้ำหนักชิ้นงานเริ่มต้น}} \right) \times 100$$

3. การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง

นำชิ้นงาน micro tensile มาวัดขนาดความกว้าง และความหนาของชิ้นงานด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ พร้อมหาเป็นค่าเฉลี่ยจากการวัดสามตำแหน่ง (ตัวอย่างละ 10 ชิ้น สำหรับชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการดูดความชื้น และ 3-5 ชิ้นสำหรับชิ้นงานที่ผ่านการดูดความชื้นแล้ว) จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) [5969, INSTRON, America] ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D638 โดยใช้ load cell ขนาด 5 kN ด้วยอัตราเร็วในการดึง 1 mm/min

4. การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก

นำชิ้นงาน impact มาวัดขนาดความกว้าง และความหนาของชิ้นงานด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ที่บริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน ตัวอย่างละ 5 ชิ้นงานสำหรับชิ้นงานทั้งก่อนและหลังการดูดความชื้น จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Impact tester [CEAST9050, INSTRON, America] ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D256 โดยใช้ load ขนาด 1 J

5. การทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน

นำวัสดุที่ตัดแบ่งมาจากชิ้นงาน micro tensile หรือชิ้นงาน impact ประมาณ 7-10 มิลลิกรัม มาทดสอบด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) [TGA/DCS1, Mettler Toledo, America] ภายใต้สภาวะไนโตรเจน ตั้งแต่อุณหภูมิ 50-600 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 °C ต่อนาที โดยจะแบ่งเป็นสามขั้นการทดสอบดังนี้

ขั้นที่ 1 ให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิคงที่ที่ 50 °C เป็นเวลา 1 นาที

ขั้นที่ 2 ให้ความร้อนโดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 50 °C ถึง 600 °C

ขั้นที่ 3 ให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิคงที่ที่ 600 °C เป็นเวลา 1 นาที

6. การทดสอบความเป็นผลึก

นำชิ้นงาน impact ที่สมบูรณ์มาทดสอบด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) [MAXima_X XRD-7000, Shimadzu, Japan] ที่มีแหล่งกำเนิดแสง X-ray คือ Copper K α ความยาวคลื่น 1.5418 Å ที่แรงดัน (voltage) 30 kV และศึกษาการกวาดมุม 2 θ ตั้งแต่ 10 ถึง 30 องศา ด้วยความเร็ว 2 องศา/นาที ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสามารถนำมาคำนวณหาค่าปริมาณความเป็นผลึกได้จากสมการ

$$\%X_c = \frac{A_c}{A_c + A_a} \times 100$$

โดย %X_c คือ ร้อยละความเป็นผลึก

A_c คือ พื้นที่ใต้กราฟส่วนที่เป็นผลึก

A_a คือ พื้นที่ใต้กราฟส่วนที่ไม่เป็นผลึก

หมายเหตุ : การศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) จะตัดชิ้นงาน impact ความยาวประมาณ 2 เซนติเมตร สำหรับใส่ในตัวจับยึดชิ้นงาน (sample holder) ของเครื่อง XRD โดยจะเก็บชิ้นงานไว้ในเดซีเคเตอร์ที่ภายในมีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ประมาณ 54 %RH ซึ่งควบคุมด้วยสารละลายอิมิตัวของ Mg(NO₃)₂·6H₂O และนำชิ้นงานดังกล่าวออกมาทดสอบในวันที่ 0, 3, 7, 14, 21 และ 30 วัน

3.4.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงยืดและสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทก รวมถึงสมบัติการดูดความชื้น จะทำการทดสอบชิ้นงานจำนวนหลายชิ้นงานต่อหนึ่งตัวอย่างทำให้มีการกระจายตัวของข้อมูลการทดสอบ จึงต้องทำการจัดกลุ่มของข้อมูลตามวิธีการทางสถิติเพื่อความสะดวกและแม่นยำในการเปรียบเทียบผลการทดลองของแต่ละตัวอย่าง โดยในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ข้อมูลด้วย One way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ความผันผวนของการเปรียบเทียบ 5%) ด้วยวิธีการแยกและจัดกลุ่มข้อมูลของ Tukey โดยกลุ่มข้อมูลต่าง ๆ จะปรากฏบนกราฟหรือตารางผลการทดสอบ ในรูปของตัวอักษรภาษาอังกฤษทำค่าเฉลี่ยของข้อมูล หรือเป็นตัวอักษรภาษาอังกฤษ

อยู่เหนือแท่งกราฟในผลการทดลอง ซึ่งหากมีข้อมูลชุดใดอยู่ในกลุ่มตัวอักษรเดียวกันแสดงว่าข้อมูลดังกล่าวเหล่านั้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

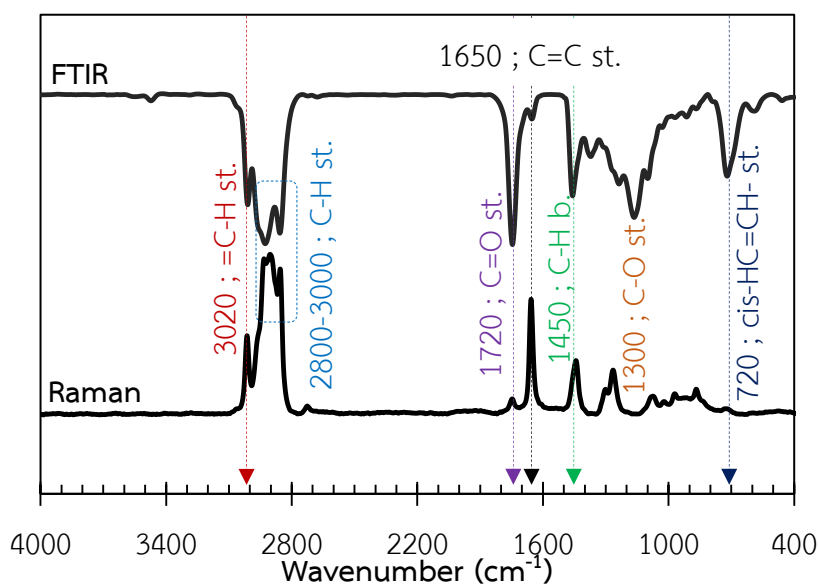
4.1 การพิสูจน์โครงสร้างทางเคมีของน้ำมันลินสีดและอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด

4.1.1 การวิเคราะห์ด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) และ Raman spectroscopy (Raman)

ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของน้ำมันลินสีดและอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด จะใช้ FTIR spectroscopy และ Raman spectroscopy ประกอบกันเนื่องจากการอ่านค่าพลังงานของคลื่นแสงที่เปลี่ยนแปลงไปใน Raman spectroscopy จะสัมพันธ์กับพลังงานในการสั่นของพันธะ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับพลังงานที่ถูกดูดกลืนและเกิดเรโซแนนซ์ใน FTIR spectroscopy ดังนั้น Raman spectra จึงมีลักษณะที่คล้ายคลึงหรือเป็นส่วนเติมเต็มซึ่งกันและกันกับ FTIR spectra กล่าวคือ บางพีคที่ไม่ปรากฏหรือปรากฏอย่างไม่ชัดเจนใน FTIR spectra อาจปรากฏใน Raman spectra ได้ชัดเจนกว่า [25]

- น้ำมันลินสีด (linseed oil : LO)

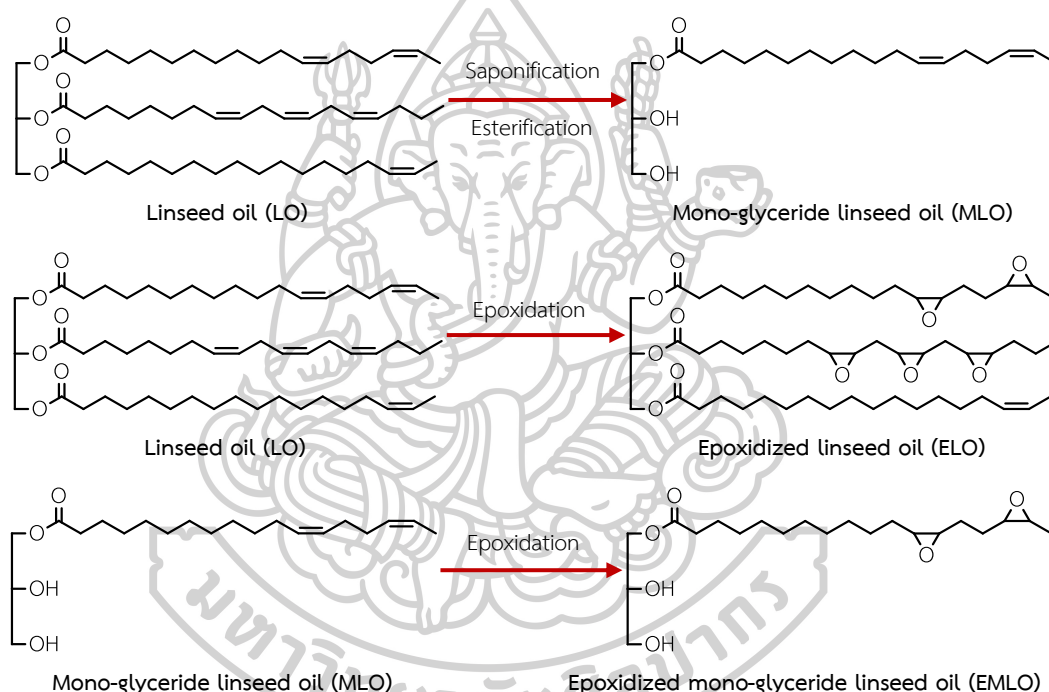
น้ำมันลินสีดเป็นสารประกอบประเภทไตรกลีเซอไรด์ (tri-glyceride) ที่มีความไม่อิ่มตัวสูง และสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายเนื่องจากพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุลมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา จึงสามารถนำมาเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลได้อย่างหลากหลาย โดย FTIR และ Raman spectra ของน้ำมันลินสีดจะแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 FTIR และ Raman spectra ของน้ำมันลินสีด

จากภาพที่ 4.1 พีคเอกลักษณะของน้ำมันลินสีดที่สำคัญใน FTIR และ Raman spectra ได้แก่

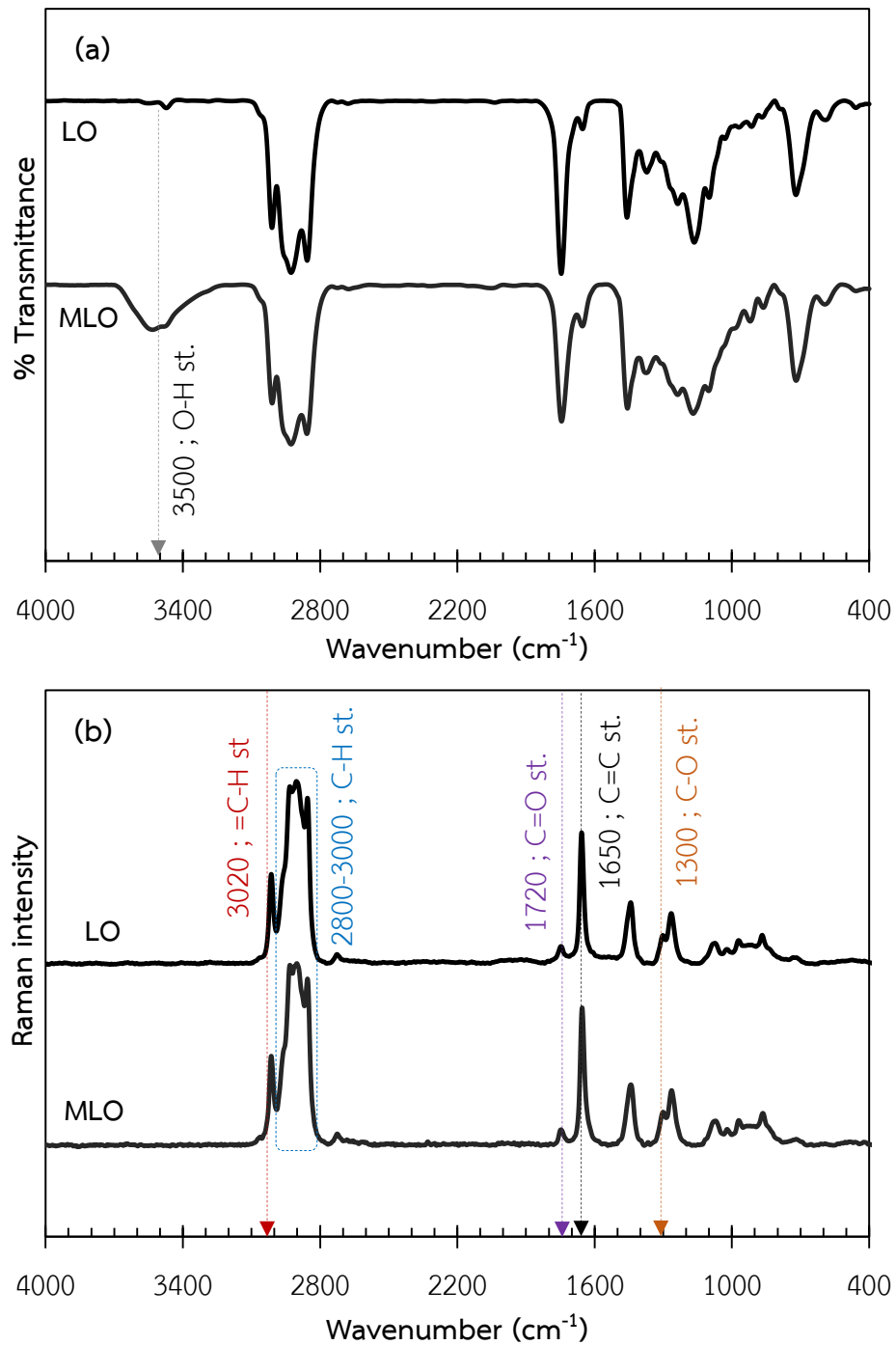
=C-H stretching	ที่เลขคลื่นประมาณ 3020 cm^{-1}
C-H stretching	ที่เลขคลื่นประมาณ $3000 - 2800\text{ cm}^{-1}$
C=O stretching	ที่เลขคลื่นประมาณ 1720 cm^{-1}
C=C stretching	ที่เลขคลื่นประมาณ 1650 cm^{-1}
C-H bending	ที่เลขคลื่นประมาณ $1500, 1450\text{ cm}^{-1}$
C-O stretching	ที่เลขคลื่นประมาณ $1300 - 1100\text{ cm}^{-1}$
Cis-HC=CH- stretching	ที่เลขคลื่นประมาณ 720 cm^{-1}



ภาพที่ 4.2 โครงสร้างทางเคมีของสารตั้งต้นและอนุพันธ์ต่าง ๆ ของน้ำมันลินสีด

- โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด (mono-glyceride linseed oil : MLO)

โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดที่เตรียมได้จากการแยกโมเลกุลของกลีเซอรอล และโมเลกุลของกรดไขมันออกจากกัน จากนั้นจึงนำเอากรดไขมันมาทำปฏิกิริยากับกลีเซอรอลอีกครั้ง โดยควบคุมให้เกิดปฏิกิริยากันแบบ 1 : 1 ดังนั้นโครงสร้างโมเลกุลโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดจึงมีหมู่ไฮดรอกซิลของกลีเซอรอลเหลืออยู่ภายในโครงสร้าง แต่หมู่ฟังก์ชันดังกล่าวนี้จะไม่ปรากฏในโมเลกุลของน้ำมันลินสีดที่เป็นไตรกลีเซอไรด์ พิจารณาโครงสร้างทางเคมีได้จากภาพที่ 4.2 พิจารณา FTIR และ Raman spectra ของน้ำมันลินสีดเปรียบเทียบกับโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดได้จากภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 Spectra ของน้ำมันลินสีด (LO) และโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด (MLO)

(a) FTIR spectra และ (b) Raman spectra

จากภาพที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าพีคเอกลักษณ์ต่าง ๆ ของน้ำมันลินสีดและโมนอกลิเซอไรด์น้ำมันลินสีดใน FTIR และ Raman spectra จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันมาก เนื่องจากการเตรียมโมนอกลิเซอไรด์น้ำมันลินสีดนั้น จะเป็นเพียงการลดสัดส่วนระหว่างโมเลกุลของกลีเซอรอลและกรดไขมันลงเท่านั้น (ไตรกลีเซอไรด์มีส่วนระหว่างกลีเซอรอลต่อกรดไขมันเป็น 1 : 3) ดังนั้นพีคที่แสดงเอกลักษณ์ต่าง ๆ ของน้ำมันลินสีดและโมนอกลิเซอไรด์น้ำมันลินสีดจึงยังคงเหมือนเดิม แตกต่างเพียงโมนอกลิเซอไรด์น้ำมันลินสีด จะมีพีคปรากฏขึ้นที่เลขคลื่นประมาณ 3500 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงพันธะ O-H หรือหมู่ไฮดรอกซิลที่เหลือว่างอยู่ของส่วนกลีเซอรอลในโมเลกุลโมนอกลิเซอไรด์น้ำมันลินสีด ดังแสดงในภาพที่ 4.3 (a) แต่ทั้งนี้ด้วย Raman spectroscopy นั้นไม่ปรากฏพีคดังกล่าวขึ้น ในภาพที่ 4.3 (b) ดังนั้นจึงต้องดูความแตกต่างของอัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคของหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างน้ำมันลินสีดและโมนอกลิเซอไรด์น้ำมันลินสีด ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคต่าง ๆ ใน Raman spectra ของน้ำมันลินสีด (LO) และโมนอกลิเซอไรด์น้ำมันลินสีด (MLO)

Bond	Peak area ratio	
	LO	MLO
C-H/C-O	38.0	28.7
C=C/C-O	4.8	4.5
=C-H/C-O	2.3	1.6
C=O/C-O	0.6	0.4

จากตารางที่ 4.1 เมื่อเปลี่ยนน้ำมันลินสีดเป็นโมนอกลิเซอไรด์น้ำมันลินสีดจะพบว่าอัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคของ C-H/C-O C=C/C-O =C-H/C-O และ C=O/C-O จะลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสายโซ่โมเลกุลส่วนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนสายยาวลดลง เนื่องมาจากการเตรียมโมนอกลิเซอไรด์น้ำมันลินสีดจะควบคุมให้กรดไขมันเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับกลีเซอรอลแบบ 1 : 1 ดังนั้นส่วนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวของโมนอกลิเซอไรด์น้ำมันลินสีดจะมีน้อยกว่าในน้ำมันลินสีด จากผลต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเตรียมโมนอกลิเซอไรด์น้ำมันลินสีดจากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลและกรดไขมัน (direct esterification) ประสบผลสำเร็จ

- น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ (Epoxidized linseed oil : ELO)

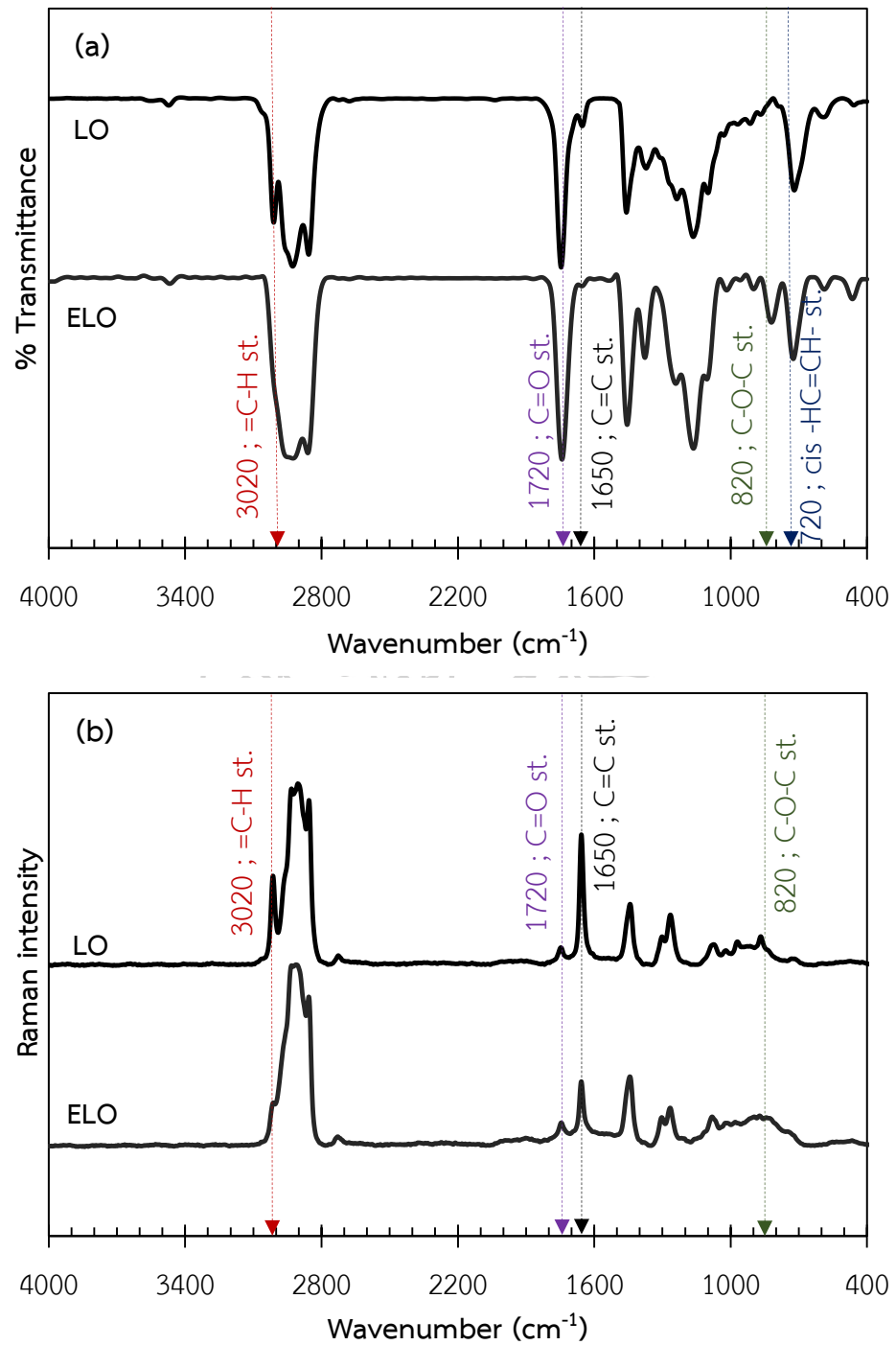
น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์เตรียมจากการทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันของน้ำมันลินสีด เพื่อเปลี่ยนพันธะคู่ (C=C) ในโมเลกุลของน้ำมันลินสีดเป็นหมู่อีพอกไซด์ (แสดงโครงสร้างทางเคมีในภาพที่ 4.2) เพื่อให้ น้ำมันลินสีดมีความเป็นขี้เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันลินสีดจะลดลง ดังแสดงในภาพที่ 4.4 ซึ่งเป็น FTIR และ Raman spectra ของน้ำมันลินสีดเปรียบเทียบกับน้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์

จากภาพที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าพีคที่เลขคลื่นประมาณ 3010 1650 และ 720 cm^{-1} ของน้ำมันลินสีด ซึ่งแสดงถึงพันธะ =C-H C=C และ cis-CH=CH ตามลำดับ จะมีค่าลดลงเมื่อทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันเป็นน้ำมันอีพอกซีไดซ์ เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่ในกรดไขมันไม่อิ่มตัวในโมเลกุลของน้ำมันลินสีดไปเป็นหมู่อีพอกไซด์ ซึ่งสังเกตได้จากพีคที่ปรากฏขึ้นบริเวณเลขคลื่นประมาณ 820 cm^{-1} ของน้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ อันแสดงถึงพันธะ C-O-C ที่เกิดขึ้น [26] โดยสามารถพิจารณาผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณได้จากตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคต่าง ๆ ใน FTIR และ Raman spectra ของน้ำมันลินสีด (LO) และน้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ (ELO)

Bond	Peak area ratio			
	FTIR		Raman	
	LO	ELO	LO	ELO
cis-HC=CH-/C=O	0.8	0.3	-	-
C=C/C=O	0.1	0.0	8.1	3.2
=C-H/C=O	0.2	0.1	3.9	0.5
C-O-C/C=O	0.0	0.1	0.0	0.3

จากตารางที่ 4.2 พบว่าอัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคของพันธะ cis-HC=CH-/C=O C=C/C=O และ =C-H/C=O จะมีค่าลดลง เมื่อเปลี่ยนน้ำมันลินสีดเป็นน้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ ในทางกลับกันจะพบว่าอัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคของพันธะ C-O-C/C=O มีค่าเพิ่มขึ้น จึงยืนยันได้ว่าการเปลี่ยนพันธะคู่ (C=C) ในโครงสร้างโมเลกุลเป็นหมู่อีพอกไซด์ (C-O-C) จากปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันประสบผลสำเร็จ



ภาพที่ 4.4 Spectra ของน้ำมันลินสีด (LO) และน้ำมันลินสีดอีพอกไซด์ (ELO)

(a) FTIR spectra และ (b) Raman spectra

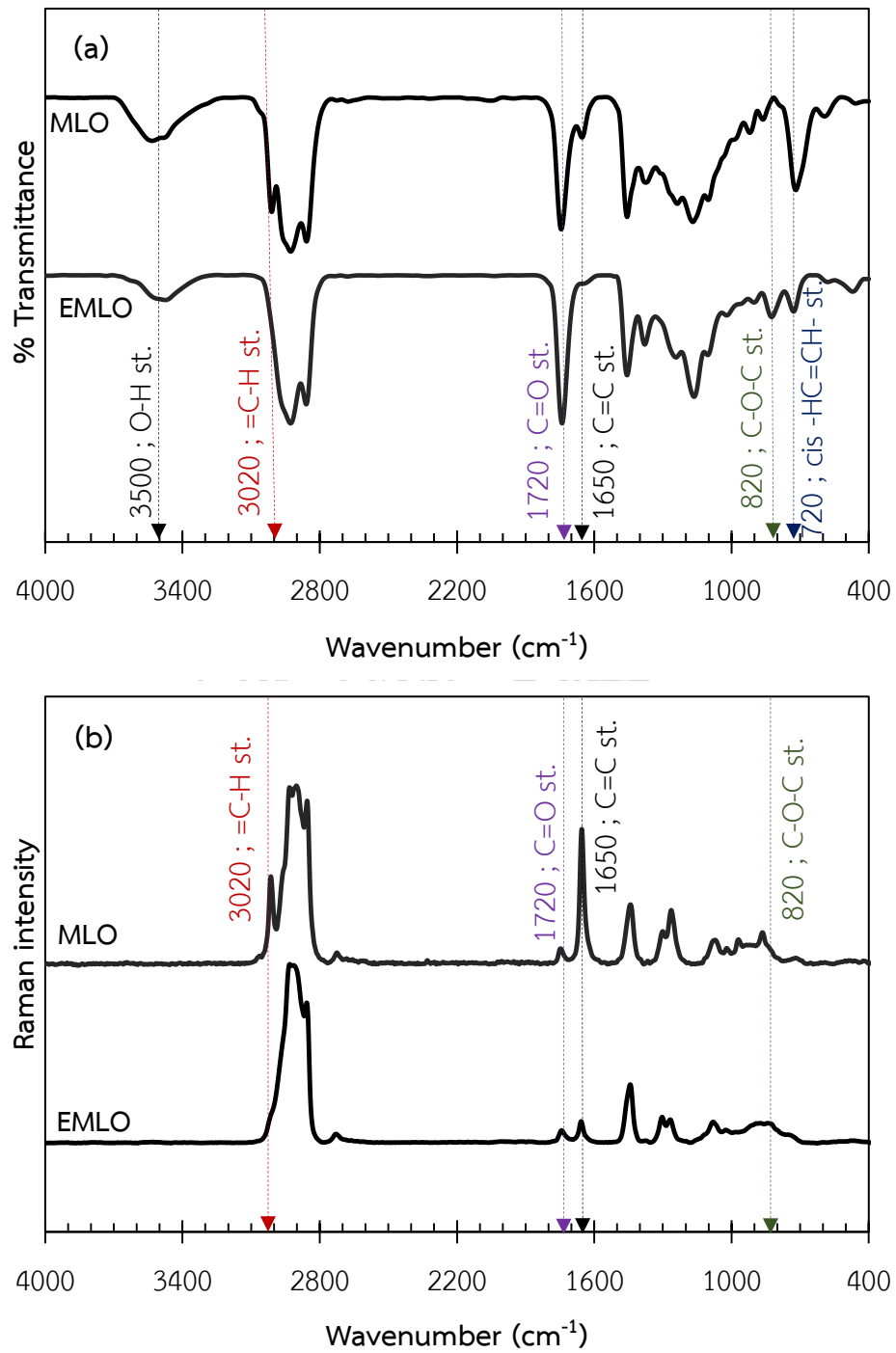
- โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกไซด์ (Epoxidized mono-glyceride linseed oil : EMLO)

โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกไซด์ เตรียมจากการทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันของ โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด (MLO) เพื่อเปลี่ยนพันธะคู่ (C=C) ในโครงสร้างโมเลกุลเป็นหมู่อีพอกไซด์ (C-O-C) เช่นเดียวกับการเตรียมน้ำมันลินสีดอีพอกไซด์ (แสดงโครงสร้างทางเคมีในภาพที่ 4.2) โดยสามารถยืนยันผลการสังเคราะห์ได้จาก FTIR และ Raman spectra ในภาพที่ 4.5 และการวิเคราะห์เชิงปริมาณจากอัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคต่าง ๆ ใน FTIR และ Raman spectra ตารางที่ 4.3

จากภาพที่ 4.5 จะเห็นว่าพีคที่แสดงถึงพันธะคู่ ไม่ว่าจะเป็น =C-H ที่เลขคลื่นประมาณ 3010 cm^{-1} , C=C ที่เลขคลื่นประมาณ 1650 cm^{-1} และ cis-HC=CH- ที่เลขคลื่นประมาณ 720 cm^{-1} จะมีค่าลดลง แต่จะมีพีคเกิดขึ้นใหม่ที่เลขคลื่นประมาณ 820 cm^{-1} ซึ่งเป็นเอกลักษณ์ของพันธะ C-O-C ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน โดยหากพิจารณาในเชิงปริมาณจากอัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคต่าง ๆ ในตารางที่ 4.3 จะพบว่าอัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคของพันธะ cis-HC=CH-/C=O C=C/C=O และ =C-H/C=O จะมีค่าลดลง แต่อัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคของพันธะ C-O-C/C=O จะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำเร็จในการเตรียมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกไซด์จากโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด ด้วยกระบวนการอีพอกซิเดชัน

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคต่าง ๆ ใน FTIR และ Raman spectra ของโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด (MLO) และโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกไซด์ (EMLO)

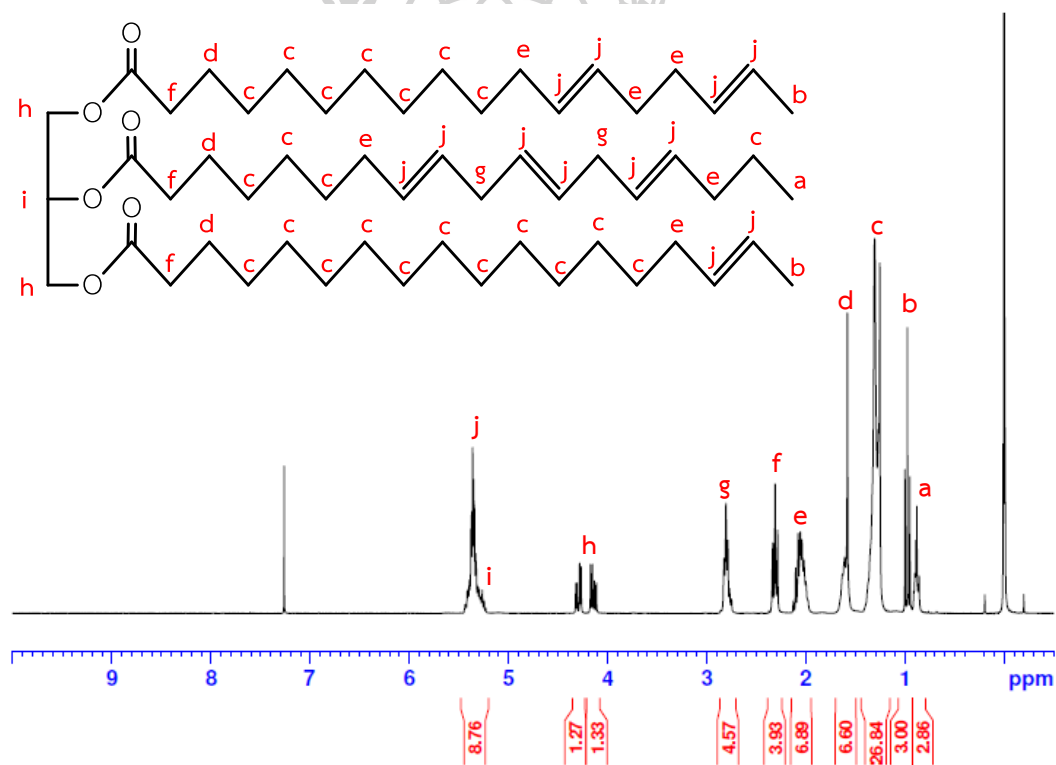
Bond	Peak area ratio			
	FTIR		Raman	
	MLO	EMLO	MLO	EMLO
cis-HC=CH-/C=O	1.0	0.2	-	-
C=C/C=O	0.08	0.0	10.3	1.8
=C-H/C=O	0.2	0.0	3.7	0.1
C-O-C/C=O	0.0	0.1	0.1	0.4



ภาพที่ 4.5 Spectra ของโมนอกลิเซอโรตน้ำมันลินสีด (MLO) และโมนอกลิเซอโรตน้ำมันลินสีด อีพ็อกไซด์ (EMLO) ; (a) FTIR spectra และ (b) Raman spectra

4.1.2 การวิเคราะห์ด้วย Nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR)

NMR spectroscopy เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของสาร โดยอาศัยการวัดค่าระดับพลังงานที่แตกต่างกันของนิวเคลียสของธาตุที่มีสมบัติทางแม่เหล็ก (^1H , ^{13}C , ^{31}P , ^{195}Pt และ ^{103}Rh) ในตำแหน่งต่าง ๆ ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กและพลังงานกระตุ้นจากคลื่นวิทยุ เมื่อนิวเคลียสได้รับพลังงาน จะเปลี่ยนระดับพลังงานไปขึ้นที่สูงขึ้น เรียกว่าการเกิดเรโซแนนซ์ (resonance) จากนั้นจะคายพลังงานออกมาและลดไปสู่ระดับพลังงานต่ำลง [27] ซึ่งการตอบสนองของนิวเคลียสที่มีสภาพแวดล้อม (อะตอมของธาตุที่อยู่ติดกัน) ต่างกันจะไม่เหมือนกัน ดังนั้นจึงสามารถบ่งบอกหรือแยกแยะโครงสร้างทางเคมีของสารได้ โดย ^1H -NMR spectra ของน้ำมันลินสีดและอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดจะแสดงในภาพที่ 4.6 – ภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.6 ^1H -NMR spectra ของน้ำมันลินสีด

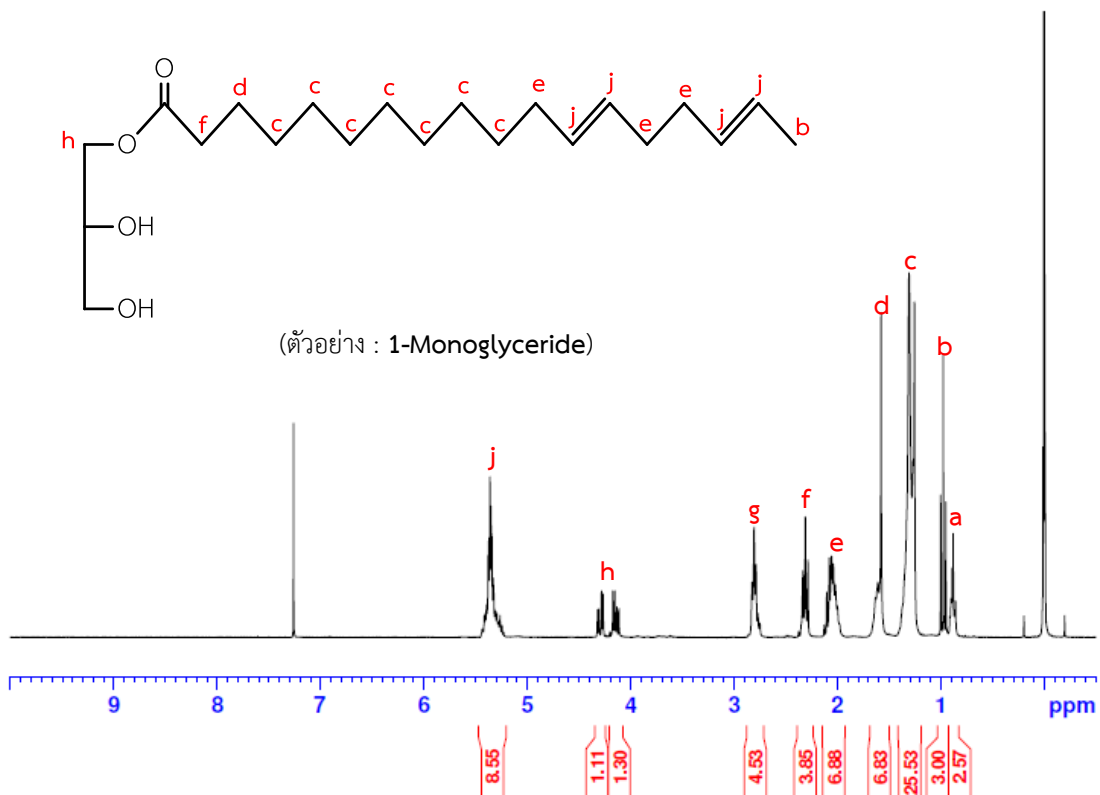
จากภาพที่ 4.6 ซึ่งแสดง $^1\text{H-NMR}$ spectra ของน้ำมันลินสีดจะพบพีคแสดงรูปแบบของโปรตอนอยู่ 10 รูปแบบดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 รูปแบบโปรตอนใน $^1\text{H-NMR}$ spectra ของน้ำมันลินสีด

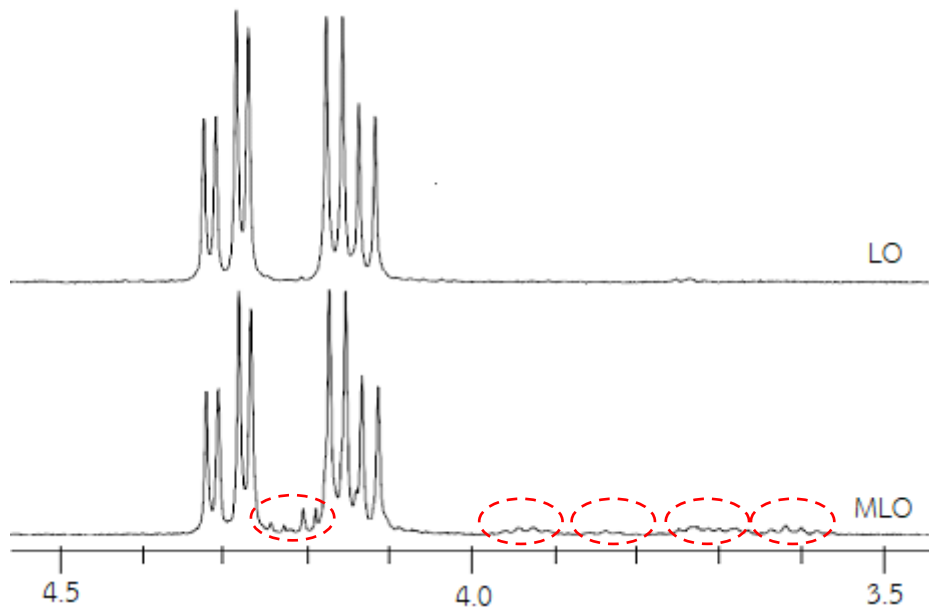
Signal	Chemical shift (ppm)	Type of protons [28]
a	0.86	$-\text{CH}_3$
b	0.97	$-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_3$
c	1.00 – 1.30	$-(\text{CH}_2)-$
d	1.61	$-\text{OCO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$
e	2.00 – 2.10	$-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-$
f	2.28 – 2.34	$-\text{OCO}-\text{CH}_2-$
g	2.77	$=\text{HC}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-$
h	4.11 – 4.32	$\text{ROCH}_2-\text{CH}(\text{OR}')-\text{CH}_2\text{OR}''$
i	5.26	$\text{ROCH}_2-\text{CH}(\text{OR}')-\text{CH}_2\text{OR}''$
j	5.29 – 5.41	$-\text{CH}=\text{CH}-$

- โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด

พิจารณาอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดประเภทโมโนกลีเซอไรด์ ในภาพที่ 4.7 จะพบว่า $^1\text{H-NMR}$ spectra ของโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดมีลักษณะคล้ายคลึงกับ $^1\text{H-NMR}$ spectra ของน้ำมันลินสีด (ภาพที่ 4.6) มาก เนื่องจากการเตรียมโมโนกลีเซอไรด์เป็นเพียงการลดสัดส่วนระหว่างกรดไขมันและกลีเซอรอลลงเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการศึกษารายละเอียดในช่วง chemical shift ประมาณ 3.5 - 4.5 ppm เปรียบเทียบระหว่างน้ำมันลินสีดและโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดในภาพที่ 4.8 จะพบว่า $^1\text{H-NMR}$ spectra ของโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดจะมีพีคเล็ก ๆ เกิดขึ้นในช่วง chemical shift ตั้งแต่ 3.6 - 4.2 ppm ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของหมู่ไฮดรอกซิลในโมโนกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์ [29] โดยรูปแบบโปรตอนในช่วง chemical shift ดังกล่าวแสดงในตารางที่ 4.5



ภาพที่ 4.7 ¹H-NMR spectra ของโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด



ภาพที่ 4.8 ¹H-NMR spectra ในช่วง chemical shift 3.5 – 4.5 ppm ของน้ำมันลินสีด (LO) เทียบกับโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด (MLO)

ตารางที่ 4.5 รูปแบบโปรตอนใน $^1\text{H-NMR}$ spectra ของโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดในช่วง chemical shift 3.5-4.5 ppm

Chemical shift (ppm)	Type of protons [29]	Compound [29]
3.65	$\text{ROCH}_2\text{-CHOH-CH}_2\text{OH}$	Glyceryl gr. in 1-MG
3.73	$\text{ROCH}_2\text{-CH(OR')-CH}_2\text{OH}$	Glyceryl gr. in 1,2-DG
3.84	$\text{HOCH}_2\text{-CH(OR)-CH}_2\text{OH}$	Glyceryl gr. in 2-MG
3.94	$\text{ROCH}_2\text{-CHOH-CH}_2\text{OH}$	Glyceryl gr. in 1-MG
4.05 - 4.21	$\text{ROCH}_2\text{-CHOH-CH}_2\text{OR}'$	Glyceryl gr. in 1,3-DG
4.18	$\text{ROCH}_2\text{-CHOH-CH}_2\text{OH}$	Glyceryl gr. in 1-MG

หมายเหตุ : MG คือ Mono-Glyceride และ DG คือ Di-Glyceride

- น้ำมันลินสีดอีพอกไซด์

พิจารณา $^1\text{H-NMR}$ spectra อนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดประเภทอีพอกไซด์ในภาพที่ 4.9 จะพบว่าสัญญาณ b, e, g และ j ซึ่งแสดงถึงโปรตอนที่อยู่ใกล้เคียงกับพันธะคู่ในส่วนของกรดไขมันจะมีความเข้มของสัญญาณลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับ $^1\text{H-NMR}$ spectra ของน้ำมันลินสีดในภาพที่ 4.6 ทั้งนี้เป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนกับพันธะคู่ในน้ำมันลินสีด ซึ่งเปลี่ยนให้พันธะคู่กลายเป็นหมู่อีพอกไซด์ ดังนั้น $^1\text{H-NMR}$ spectra ในภาพที่ 4.9 จึงพบว่ามีสัญญาณ k, l, m และ n อันแสดงถึงโปรตอนที่อยู่ใกล้เคียงกับหมู่อีพอกไซด์เกิดขึ้น (รูปแบบโปรตอนของสัญญาณดังกล่าวแสดงในตารางที่ 4.6) โดยจากการคำนวณตามสมการที่ 4.1 จะพบว่าพันธะคู่ในน้ำมันลินสีดจะถูกเปลี่ยนเป็นหมู่อีพอกไซด์ประมาณ 91% หลังทำปฏิกิริยาอีพอกไซด์ชัน

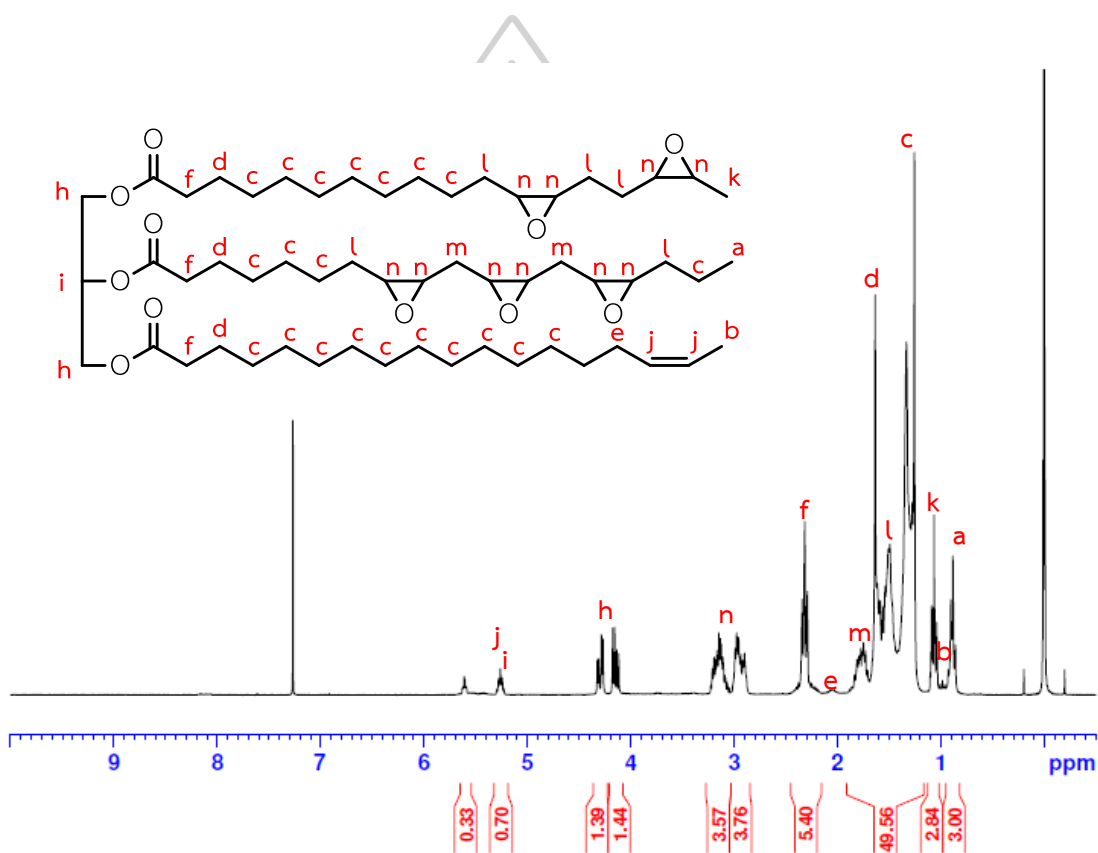
$$\% \text{ Epoxide content} = \frac{A_{2.85-3.23}}{A_{5.29-5.41} + A_{2.85-3.23}} \times 100 \quad (\text{สมการที่ 4.1})$$

โดยที่ $A_{2.85-3.23}$ คือ พื้นที่ใต้พีคใน $^1\text{H-NMR}$ spectra ซึ่งแสดงถึงหมู่อีพอกไซด์ ($-\text{CH}(\text{O})\text{CH}-$)

$A_{5.29-5.41}$ คือ พื้นที่ใต้พีคใน $^1\text{H-NMR}$ spectra ซึ่งแสดงถึงหมู่พันธะคู่ ($-\text{CH}=\text{CH}-$)

ตารางที่ 4.6 รูปแบบโปรตอนที่อยู่ใกล้เคียงกับหมู่เอพ็อกไซด์ใน $^1\text{H-NMR}$ spectra ของน้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์

Signal	Chemical shift (ppm)	Type of protons
k	1.07	$-\text{CH}(\text{O})\text{CH}-\text{CH}_3$
l	1.43	$-\text{CH}(\text{O})\text{CH}-\text{CH}_2-$
m	1.76	$-\text{CH}(\text{O})\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{O})\text{CH}-$
n	2.85 – 3.23	$-\text{CH}(\text{O})\text{CH}-$

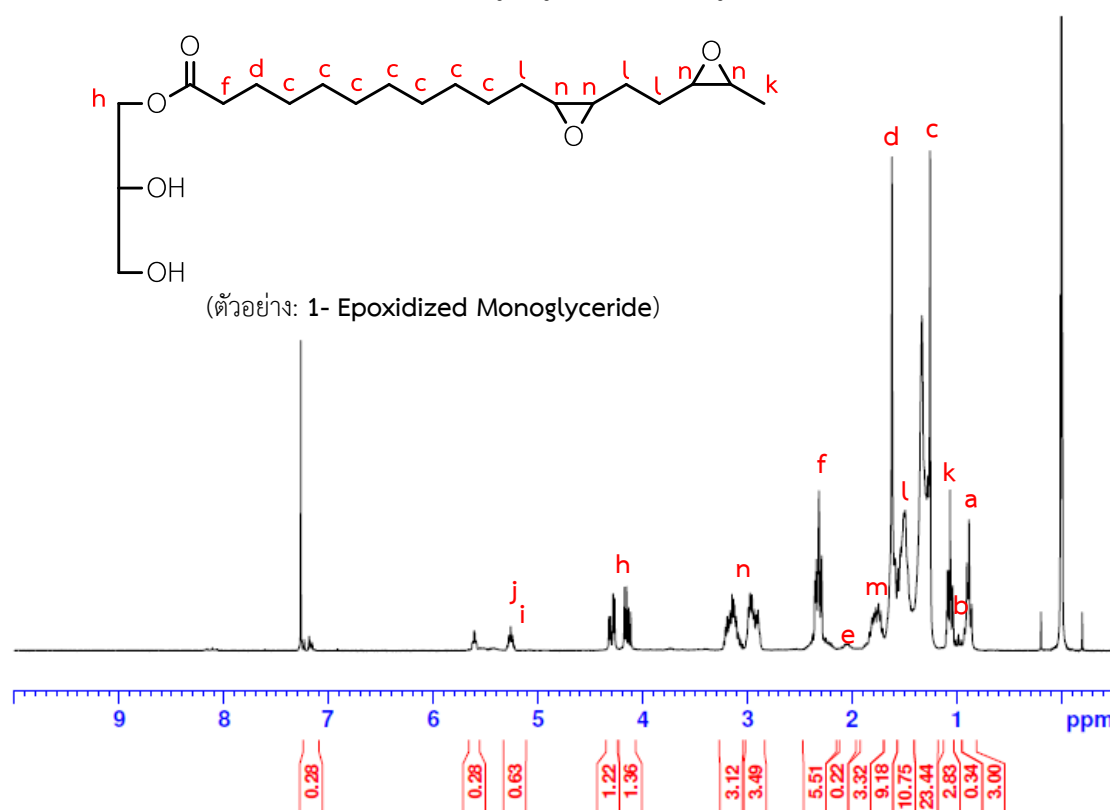


ภาพที่ 4.9 $^1\text{H-NMR}$ spectra ของน้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์

- โมนอกลิเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์

โมนอกลิเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์สามารถเตรียมได้เช่นเดียวกับน้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ เพียงเปลี่ยนสารตั้งต้นจากน้ำมันลินสีดมาใช้โมนอกลิเซอไรด์น้ำมันลินสีด ดังนั้นเมื่อพิจารณา $^1\text{H-NMR}$ spectra ของโมนอกลิเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ในภาพที่ 4.10 จะมีลักษณะ

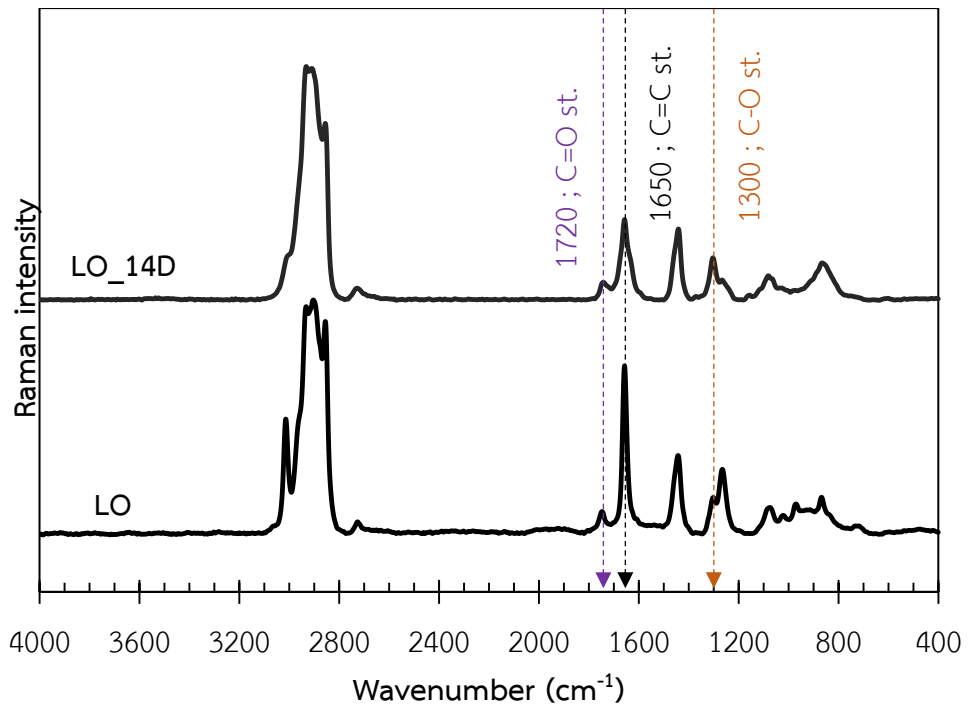
คล้ายคลึงกันกับภาพที่ 4.9 นั่นคือสัญญาณที่แสดงถึงโปรตอนซึ่งอยู่ใกล้เคียงกับพันธะคู่จะลดลง และจะมีสัญญาณใหม่ที่แสดงถึงโปรตอนซึ่งอยู่ใกล้เคียงกับหมู่เอพอกไซด์เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ $^1\text{H-NMR}$ spectra ของโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด (ภาพที่ 4.8) ซึ่งจากการคำนวณตามสมการที่ 4.1 จะพบว่าประมาณ 90 % โดยโมลของพันธะคู่จะถูกเปลี่ยนเป็นหมู่เอพอกไซด์



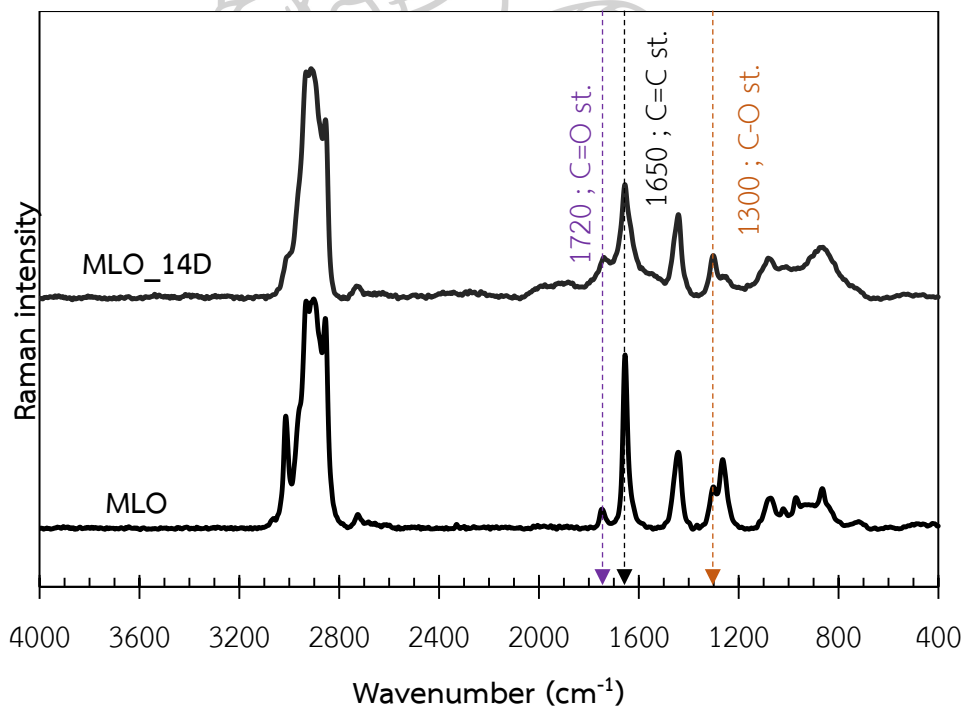
ภาพที่ 4.10 $^1\text{H-NMR}$ spectra ของโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดเอพอกไซด์

4.2 การศึกษาการเชื่อมขวางโมเลกุลของน้ำมันลินสีดและอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด

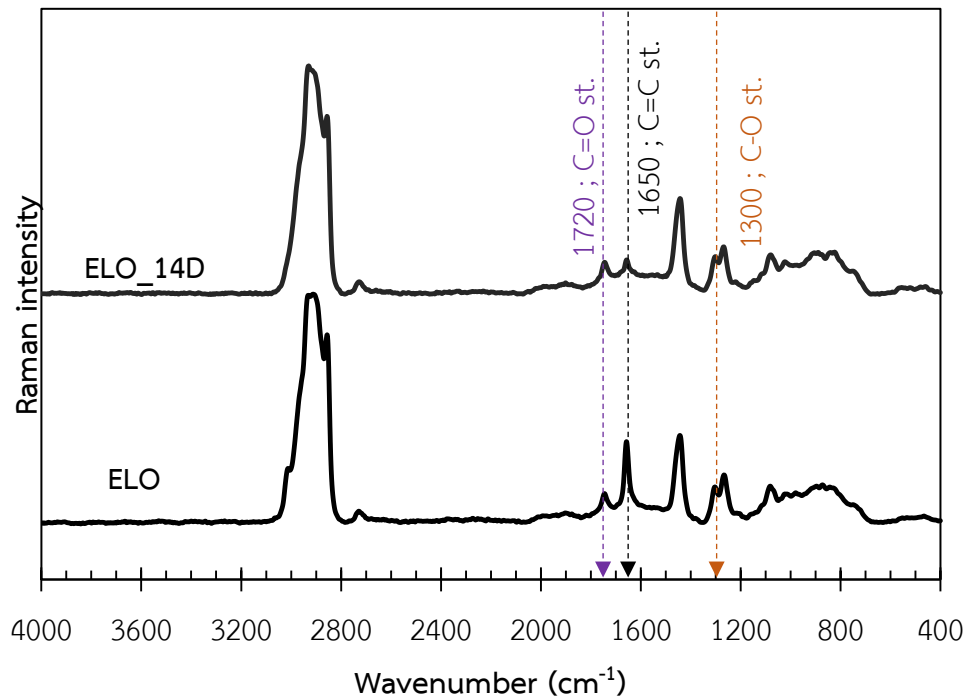
น้ำมันพืช (ไตรกลีเซอไรด์) ที่มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นส่วนประกอบปริมาณมากเช่น น้ำมันลินสีด มักจะเกิดกลิ่นเหม็นหืนและมีความเหนียวข้นมากขึ้นกระทั่งกลายเป็นเจลหรือฟิล์มได้เมื่อสัมผัสกับอากาศเป็นเวลานาน เนื่องจากบริเวณตำแหน่งพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัว มีความไม่เสถียรและง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศ ทำให้เกิดสารบางอย่างที่ส่งกลิ่นเหม็น เช่น แอลดีไฮด์ และคีโตน เป็นต้น [30] ทั้งยังทำให้เกิดการเชื่อมขวางกันระหว่างสายโซ่โมเลกุลของกรดไขมันไม่อิ่มตัวทั้งในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ [31, 32] โดยภาพที่ 4.11 – ภาพที่ 4.14 แสดง Raman spectra ของน้ำมันลินสีดและอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดทั้งก่อนและหลังสัมผัสกับอากาศเป็นเวลา 14 วัน



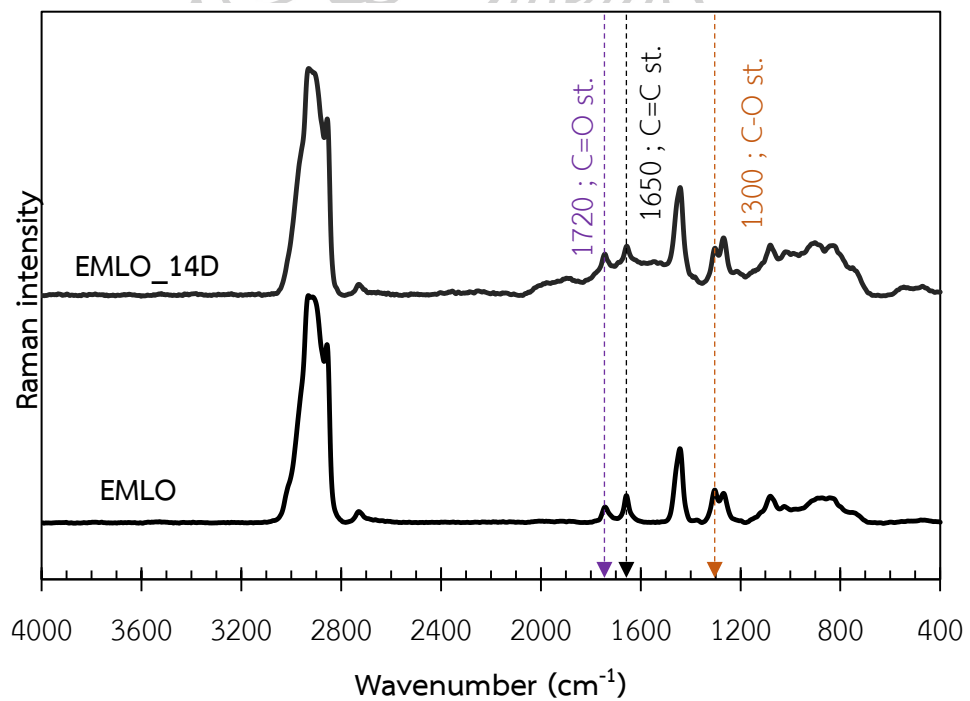
ภาพที่ 4.11 Raman spectra ของน้ำมันลินสีดและน้ำมันลินสีดที่สัมผัสอากาศ 14 วัน



ภาพที่ 4.12 Raman spectra ของโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด
และโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดที่สัมผัสอากาศ 14 วัน



ภาพที่ 4.13 Raman spectra ของน้ำมันลินสีดอีพอกซีไคซ์
และน้ำมันลินสีดอีพอกซีไคซ์ที่สัมผัสอากาศ 14 วัน



ภาพที่ 4.14 Raman spectra ของโมนอกลิเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกซีไคซ์
และโมนอกลิเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกซีไคซ์ที่สัมผัสอากาศ 14 วัน

จากภาพที่ 4.11 จะพบว่าหลังสัมผัสอากาศเป็นเวลา 14 วัน น้ำมันลินสีดจะมีโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย โดยจะเห็นว่าความเข้มพีด Raman ที่เลขคลื่นประมาณ 1650 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงหมู่ C=C มีค่าลดลง แต่ความเข้มพีด Raman ที่เลขคลื่นประมาณ 1300 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงหมู่ C-O จะมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวในน้ำมันลินสีดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศแล้วเกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลกันขึ้น [6] เช่นเดียวกันกับภาพที่ 4.12 - ภาพที่ 4.14 ซึ่งเป็นผลจากการทดสอบโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ และโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามในภาพที่ 4.13 และ ภาพที่ 4.14 จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้ยาก เนื่องจากปริมาณพันธะคู่ในโครงสร้างของน้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ และโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์เหลืออยู่เพียงประมาณ 10 % เท่านั้น (ผลจากการทดสอบ NMR หัวข้อ 4.1.2) ดังนั้นจึงต้องเปรียบเทียบเชิงปริมาณจากสัดส่วนพื้นที่ใต้พีดดังแสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าหมู่พันธะคู่ที่เหลืออยู่ในโครงสร้างของน้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ และโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ก็สามารถเกิดการเชื่อมขวางสายโซ่โมเลกุลได้เช่นกัน

ตารางที่ 4.7 อัตราส่วนพื้นที่ใต้พีดต่าง ๆ ใน Raman spectra ของน้ำมันลินสีดและอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดทั้งก่อนและหลังสัมผัสอากาศเป็นเวลา 14 วัน

Time (day)	C=C/C=O ratio				C-O/C=O ratio			
	LO	MLO	ELO	EMLO	LO	MLO	ELO	EMLO
0	11.7	10.7	3.1	1.9	0.8	0.8	0.7	1.1
14	8.1	9.4	0.7	1.1	2.2	2.3	0.9	1.2

4.3 การศึกษาสมบัติของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด

4.3.1 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา

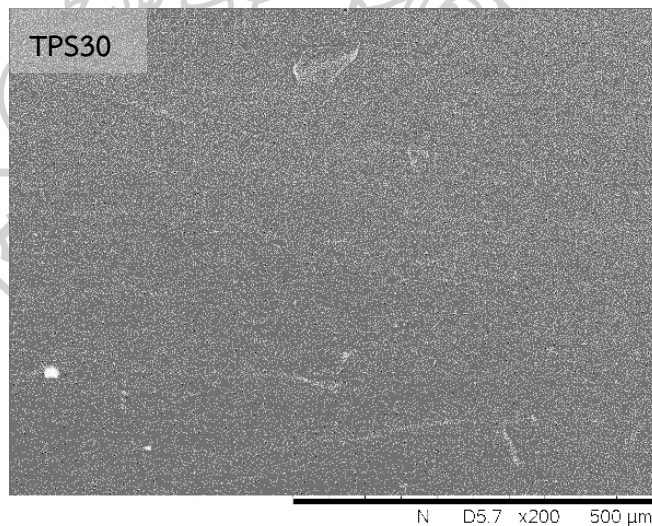
การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติกจะศึกษาบริเวณผิวรอยแตกของชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติกตามแนวขวางด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) เพื่อดูความเข้ากันของแป้งเทอร์โมพลาสติกและสารเติมแต่งต่างๆที่เติมลงไป ดังแสดงในภาพที่ 4.15 - ภาพที่ 4.19 ซึ่งเป็นภาพจาก SEM ของแป้งเทอร์โมพลาสติก และแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมน้ำมันลินสีด โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ และ โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ โดยอักษรย่อภายในภาพจะแทนสูตรผสมต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ความหมายของอักษรย่อที่แสดงแทนสูตรผสมต่างๆ

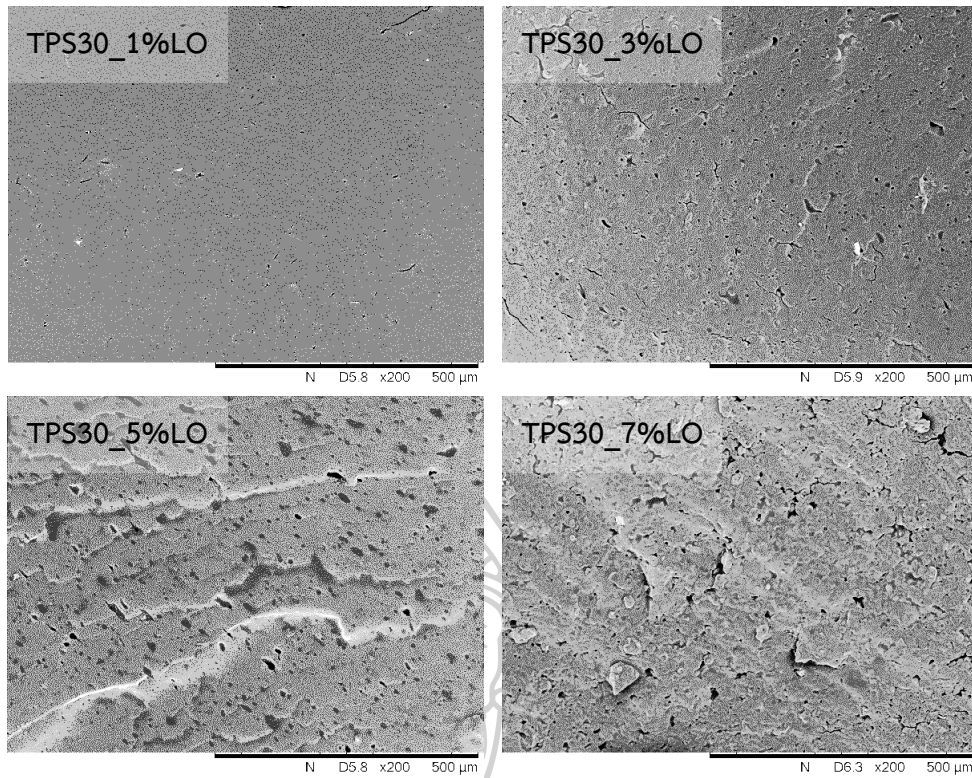
สูตรผสม	อักษรย่อ
แป้งเทอร์โมพลาสติก	TPS30
แป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมน้ำมันลินสีด	TPS30_x%LO
แป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด	TPS30_x%MLO
แป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมน้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไดซ์	TPS30_x%ELO
แป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไดซ์	TPS30_x%EMLO

หมายเหตุ x คือ ปริมาณสารเติมแต่งที่เติมลงไป แป้งเทอร์โมพลาสติก

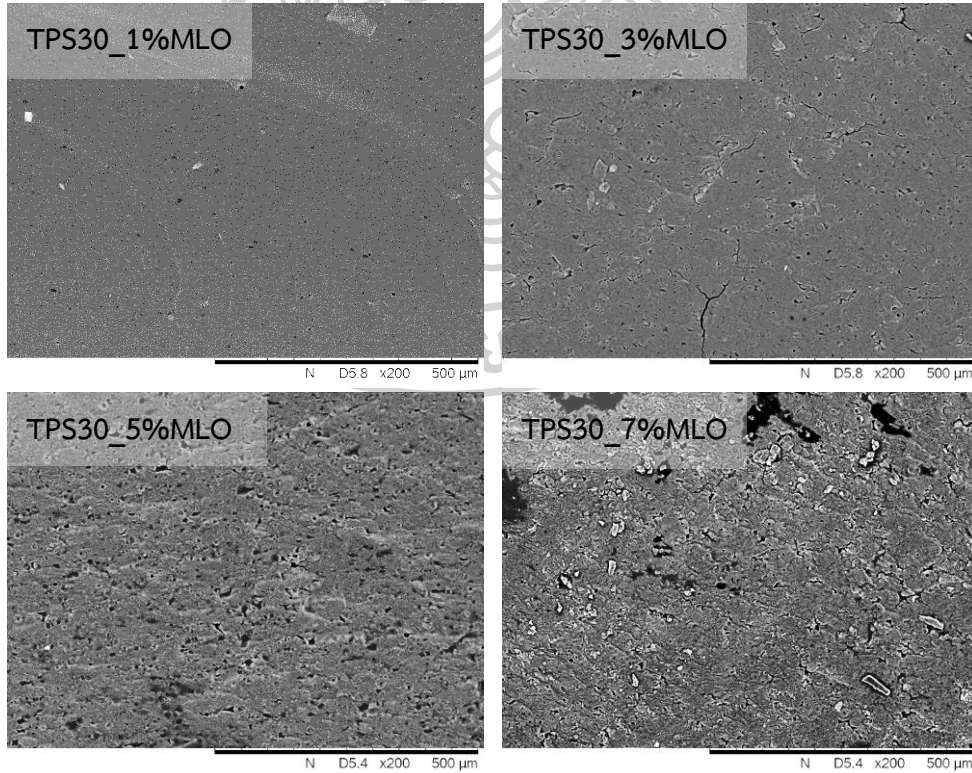
จากภาพที่ 4.15 จะพบว่าลักษณะบริเวณผิวรอยแตกของชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมสารเติมแต่ง (TPS30) จะมีพื้นผิวค่อนข้างเรียบ เนื่องจากในระหว่างกระบวนการหลอมผสมนั้น ความร้อน และแรงเฉือน จะทำให้กลีเซอรอลซึ่งเป็นพลาสติกไฮเซอ์เกิดการแทรกซึมเข้าไปภายในเม็ดแป้งได้ จึงส่งผลให้แรงดึงดูดระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งลดต่ำลง แป้งเทอร์โมพลาสติกที่ได้จึงมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นเนื่องจากเม็ดแป้งถูกทำลายลงนั่นเอง



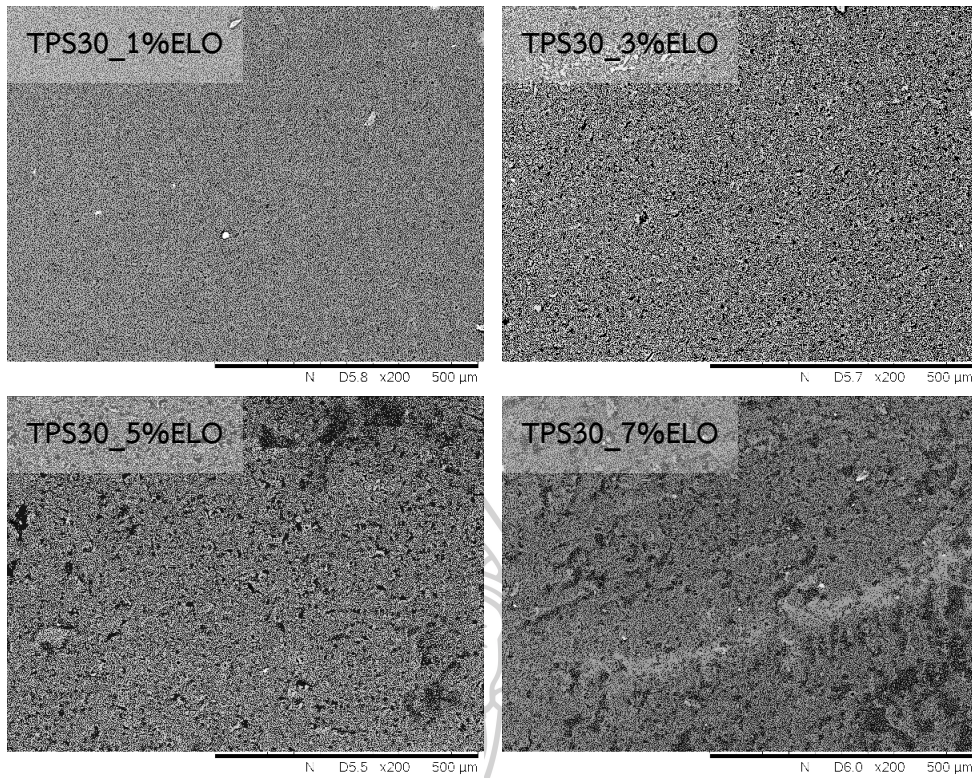
ภาพที่ 4.15 รูป SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมสารเติมแต่ง



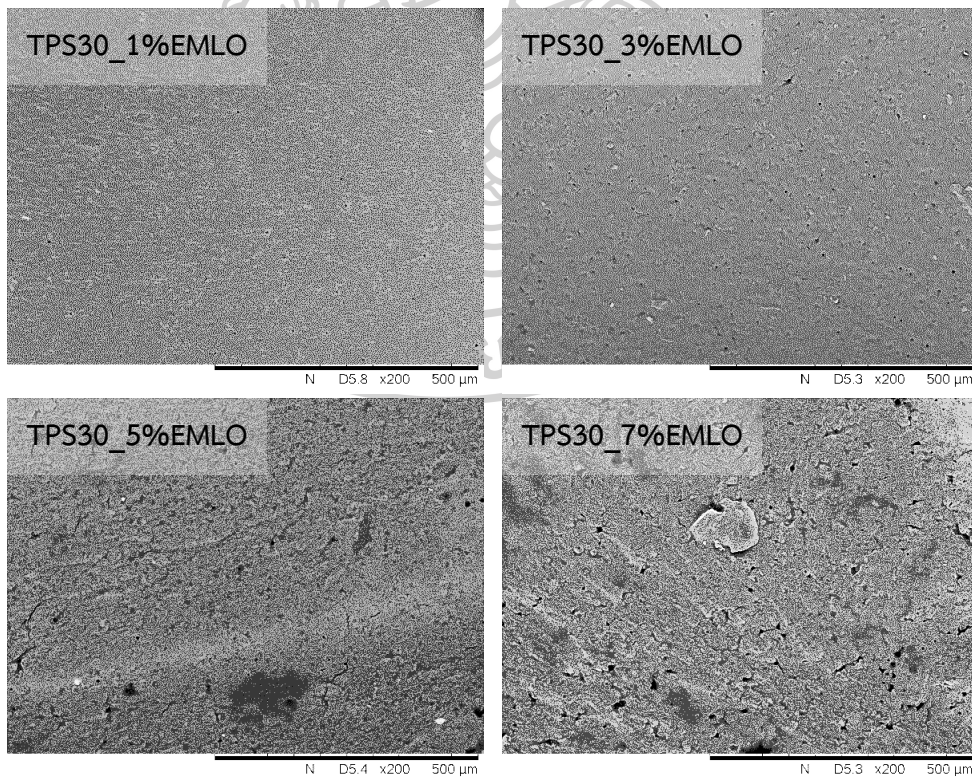
ภาพที่ 4.16 รูป SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมน้ำมันลินสีด



ภาพที่ 4.17 รูป SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า ของแป้งเทอร์โมพลาสติก
ที่เติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด

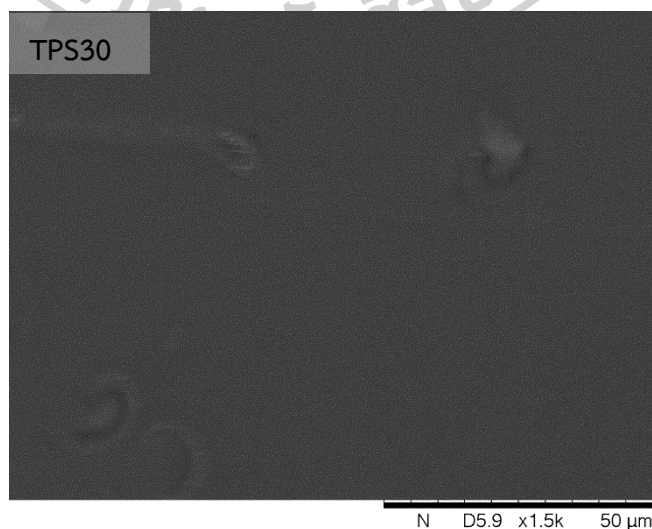


ภาพที่ 4.18 รูป SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมน้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไดซ์

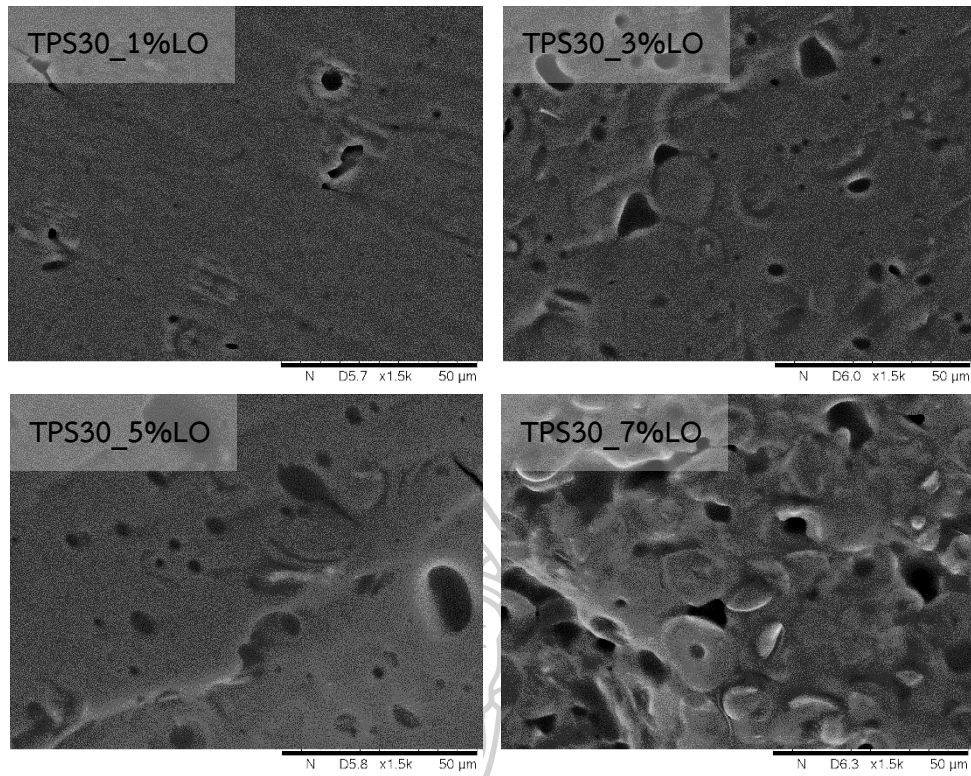


ภาพที่ 4.19 รูป SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า ของแป้งเทอร์โมพลาสติก
ที่เติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไดซ์

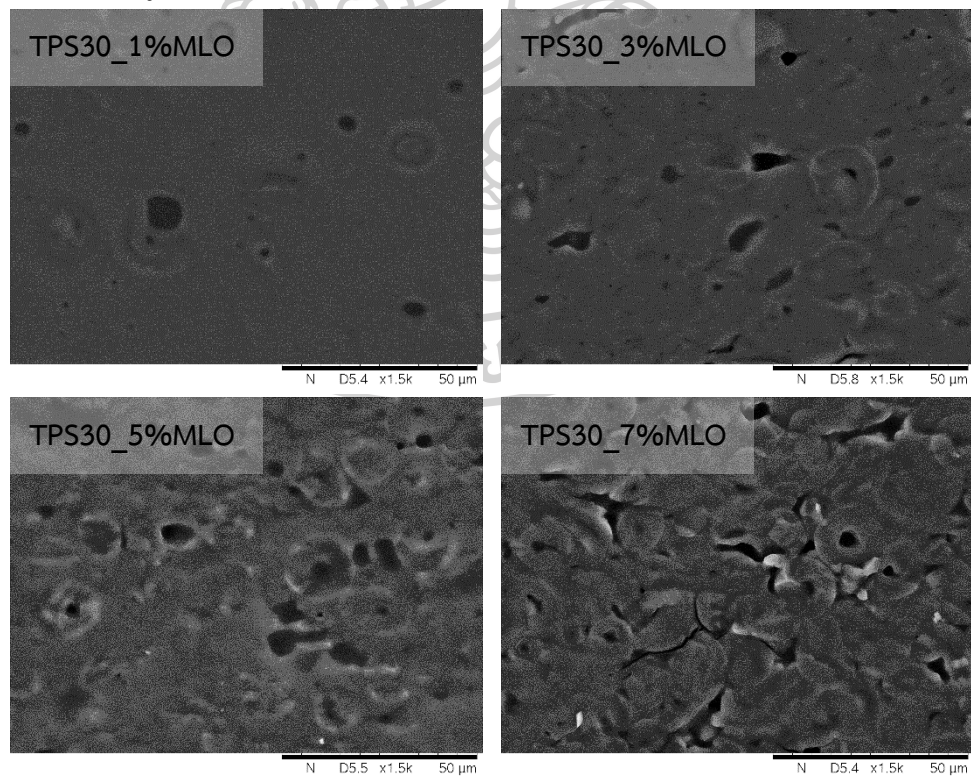
เมื่อพิจารณาผลของการเติมสารเติมแต่ง จากรูป SEM ในภาพที่ 4.16 - ภาพที่ 4.19 จะพบว่าการเติมสารเติมแต่งจะทำให้เกิดรูพรุนขึ้นภายในชิ้นงาน ไม่ว่าจะเป็นการเติมน้ำมันลินสีด โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ หรือ โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ก็ตาม โดยรูพรุนดังกล่าวจะมีมากขึ้น เมื่อเติมสารเติมแต่งในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้คาดว่ารูพรุนดังกล่าวอาจเกิดจากการรวมกลุ่มกันเองของสารเติมแต่ง เนื่องจากสารเติมแต่งที่เติมลงไปจะมีความเป็นขี้ที่น้อยกว่าแป้งและกลีเซอรอล ดังนั้นในกระบวนการผสมและขึ้นรูป สารเติมแต่งเหล่านี้จึงมีโอกาสแพร่มารวมกลุ่มกันเป็นหยดได้ง่าย [33, 34] ซึ่งหยดของสารเติมแต่งเหล่านี้ จะมีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง แต่ขณะที่แช่ในไนโตรเจนเหลวอุณหภูมิจะต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของสารเติมแต่งต่างๆ เหล่านี้ ทำให้หยดของสารเติมแต่งนั้นแข็งตัว และอาจหลุดออกจากชิ้นงานขณะทำการหักชิ้นงานนั่นเอง อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่เติมสารเติมแต่งดังกล่าวในสภาวะปกติ จะมีหยดของสารเติมแต่งอยู่ภายในชิ้นงาน ซึ่งหยดของเหลวนี้มีความหนาแน่นที่น้อยกว่าเนื้อแป้งเทอร์โมพลาสติก ดังนั้นชิ้นงานในสภาวะปกติก็เสมือนมีรูพรุนอยู่ภายในชิ้นงานเช่นเดียวกัน ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของแป้งเทอร์โมพลาสติก (หัวข้อ 4.3.2) นอกจากนี้ที่กำลังขยาย 1500 เท่าของการทดสอบ SEM จะพบว่ามีเม็ดแป้งบางส่วนหลงเหลืออยู่ในเนื้อแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมสารเติมแต่ง ซึ่งจะพบมากขึ้นในแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมสารเติมแต่ง และจะแปรผันตามปริมาณสารเติมแต่งที่เติมลงไปดังแสดงในภาพที่ 4.20 - ภาพที่ 4.24 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสารเติมแต่งที่เติมลงไปนั้นแทรกตัวและขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างพลาสติกไซเซอร์และสายโซ่โมเลกุลของแป้ง ทำให้พลาสติกไซเซอร์แทรกเข้าไปทำลายเม็ดแป้งได้ยากขึ้นจึงเหลือเป็นเม็ดแป้งอยู่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณผลึกของแป้งเทอร์โมพลาสติกจากการทดสอบ XRD ในหัวข้อ 4.3.3



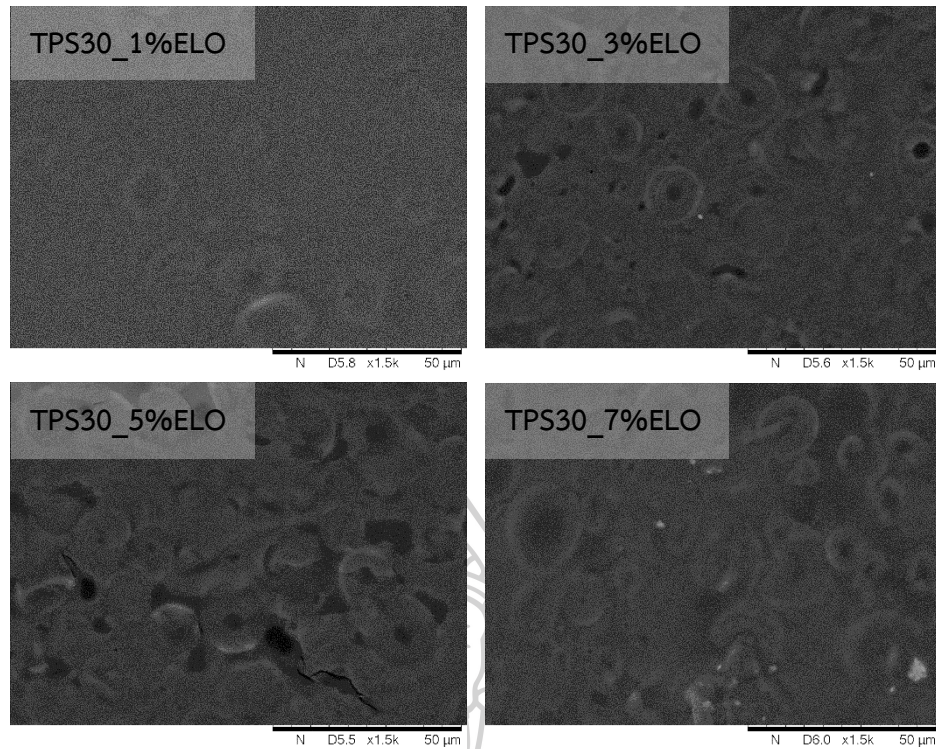
ภาพที่ 4.20 รูป SEM ที่กำลังขยาย 1500 เท่า ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมสารเติมแต่ง



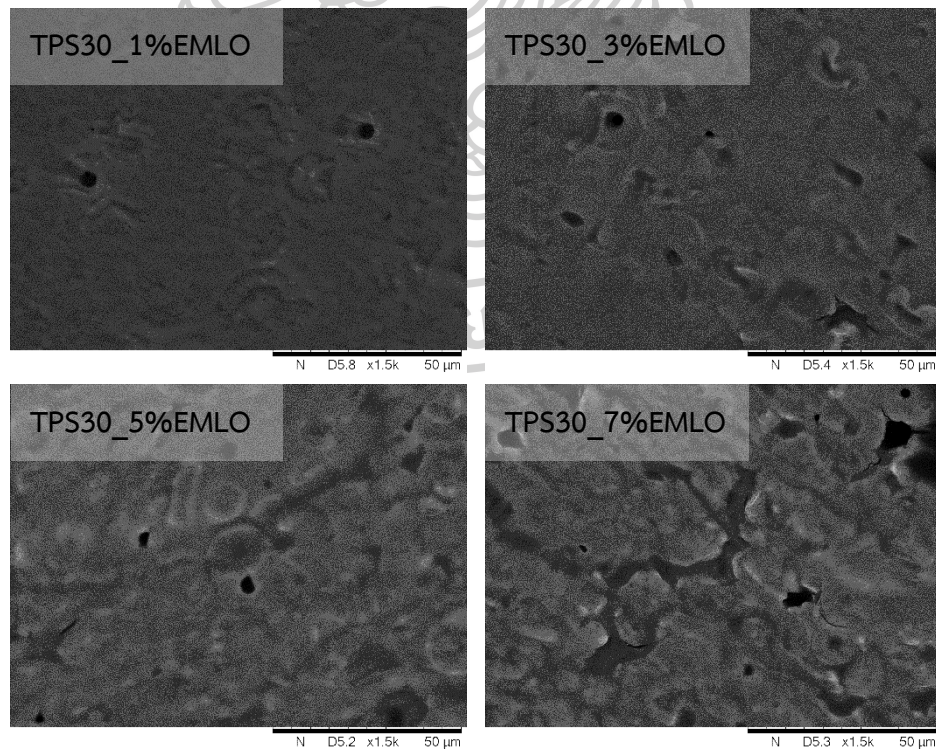
ภาพที่ 4.21 รูป SEM ที่กำลังขยาย 1500 เท่า ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมน้ำมันลินseed



ภาพที่ 4.22 รูป SEM ที่กำลังขยาย 1500 เท่า ของแป้งเทอร์โมพลาสติก
ที่เติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินseed



ภาพที่ 4.23 รูป SEM ที่กำลังขยาย 1500 เท่า ของแป้งเทอร์โมพลาสติก
ที่เติมน้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไคซ์



ภาพที่ 4.24 รูป SEM ที่กำลังขยาย 1500 เท่า ของแป้งเทอร์โมพลาสติก
ที่เติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไคซ์

4.3.2 การศึกษาสมบัติการรับแรงดึงก่อนและหลังการดูดความชื้น

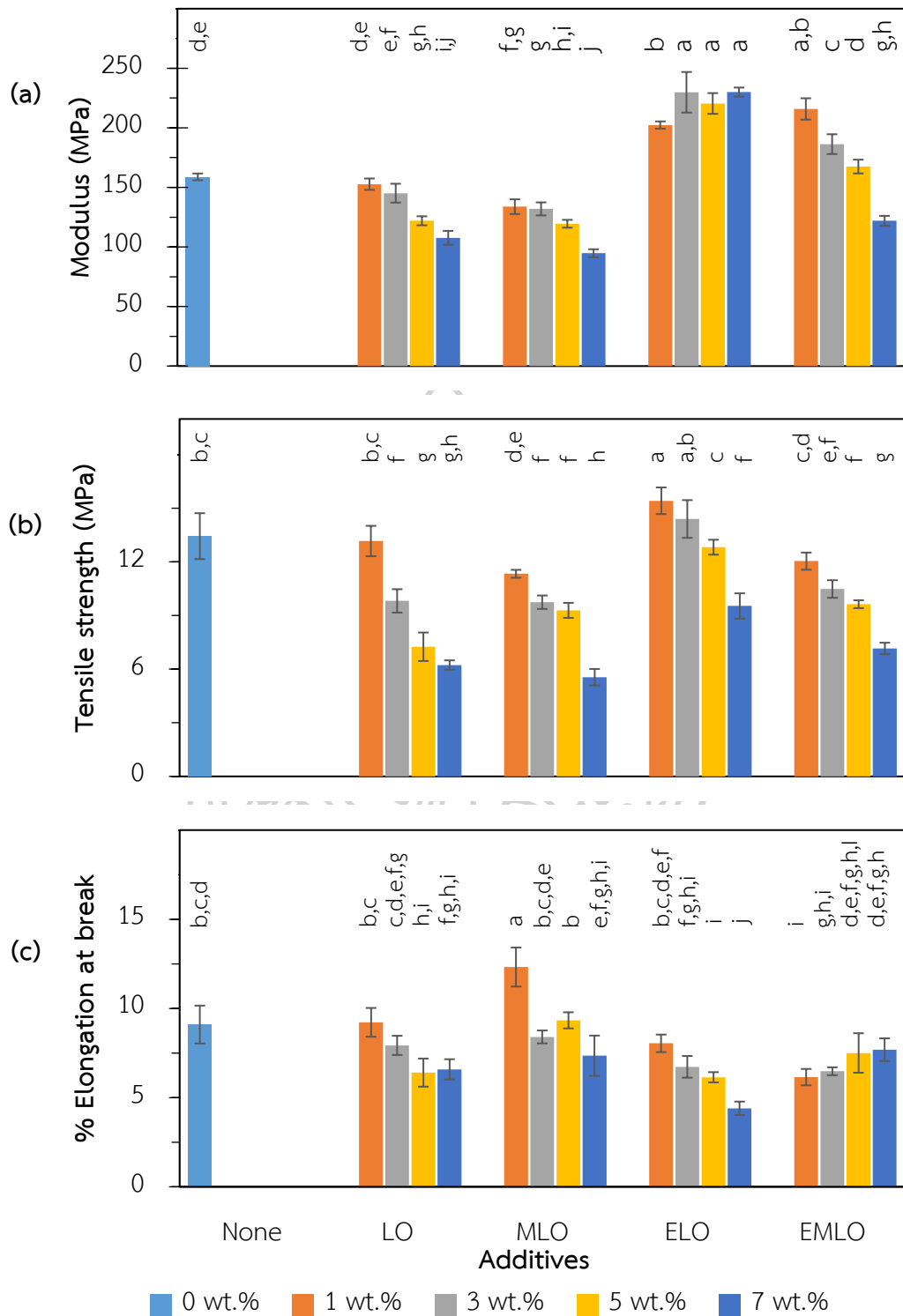
แป้งมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ภายในโครงสร้างเป็นจำนวนมาก ทำให้มีพันธะไฮโดรเจนยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูง ดังนั้นสมบัติเชิงกลของแป้งเทอร์โมพลาสติกจึงมักมีความแข็งเปราะ แต่ทั้งนี้ก็จะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของพลาสติกไฮเซออร์ที่เติมลงไป งานวิจัยนี้จะเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติกโดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไฮเซออร์ปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก ซึ่งสมบัติการรับแรงดึงของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมและไม่เติมสารเติมแต่งก่อนการดูดความชื้นแสดงในภาพที่ 4.25

พิจารณากราฟแสดงค่า modulus และ tensile strength ในภาพที่ 4.25 (a) และ (b) จะพบว่าที่ปริมาณการเติมต่ำ ๆ (1 % โดยน้ำหนัก) การเติมน้ำมันลินสีดอีพอกไซด์ (ELO) จะทำให้ค่าดังกล่าวทั้งสองเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากหมู่ไอพอกไซด์ในโมเลกุลของน้ำมันลินสีดอีพอกไซด์เกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลแป้ง ทำให้เกิดการเชื่อมขวางสายโซ่โมเลกุลในชิ้นงาน จึงจำเป็นต้องใช้แรงมากขึ้นในการจะทำให้สายโซ่โมเลกุลหลุดหรือขาดออกจากกัน นอกจากนี้การเชื่อมขวางโมเลกุลยังส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลขยับและเคลื่อนที่ได้ลำบาก ซึ่งเป็นเหตุทำให้ค่า % elongation at break ของชิ้นงานลดลง [19] สังเกตได้จากกราฟแสดงค่า % elongation at break ในภาพที่ 4.25 (c) สำหรับการเติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกไซด์ (EMLO) พบว่าจะทำให้ค่า modulus สูงขึ้นเช่นเดียวกับการเติมน้ำมันลินสีดอีพอกไซด์เนื่องจากภายในโมเลกุลมีหมู่ไอพอกไซด์เหมือนกัน แต่การเติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกไซด์กลับไม่ส่งผลต่อค่า tensile strength มากนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่โมเลกุลของโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกไซด์มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่จึงทำให้สามารถลดแรงดึงดูระหว่างโมเลกุลของแป้งลงได้ กล่าวคือโมเลกุลโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกไซด์ประพฤติตัวเป็นพลาสติกไฮเซออร์ชนิดหนึ่ง ดังนั้นจึงมีโมเลกุลของแป้งบางส่วนที่สามารถขยับหรือเคลื่อนที่ได้ ต่อมาพิจารณาการเติมน้ำมันลินสีดจะพบว่าที่ปริมาณต่ำ (1 % โดยน้ำหนัก) การเติมน้ำมันลินสีด (LO) จะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติการรับแรงดึงเลยซึ่งอาจเนื่องมาจากการที่น้ำมันลินสีดมีความเป็นขี้ผึ้งที่แตกต่างจากแป้งเทอร์โมพลาสติกค่อนข้างมาก จึงเกิดอันตรกิริยากับแป้งเทอร์โมพลาสติกได้น้อยมาก ดังนั้นที่ปริมาณการเติมต่ำ ๆ จึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าใด ๆ แตกต่างกับการเติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด (MLO) ซึ่งจะพบว่าทำให้ค่า modulus และ tensile strength ต่ำลง แต่ % elongation at break เพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดมีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไฮเซออร์ได้

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของปริมาณการเติมจะพบว่าการเพิ่มปริมาณสารเติมแต่ง ไม่ว่าจะเป็นน้ำมันลินสีดอีพอกไซด์ โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกไซด์ น้ำมันลินสีด หรือ โมโน-

กลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด มีแนวโน้มที่จะทำให้ค่า modulus ค่า tensile strength และค่า % elongation at break ลดลงตามปริมาณการเติม ที่เป็นเช่นนี้คาดว่าอาจจะเป็นผลร่วมกันระหว่างความแตกต่างกันของสภาพผิวซึ่งทำให้อันตรกิริยาของโมเลกุลแข็งลดลง (ระหว่างโมเลกุลแข็ง และระหว่างโมเลกุลแข็งกับโมเลกุลกลีเซอรอล) [34, 36] และการรวมกลุ่มกันของสารเติมแต่ง [35] ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้จากภาพผลการทดสอบ SEM ในหัวข้อ 4.3.1 ซึ่งจะพบรูพรุนภายในชิ้นงานมากขึ้นเมื่อเติมสารเติมแต่งในปริมาณที่มากขึ้น





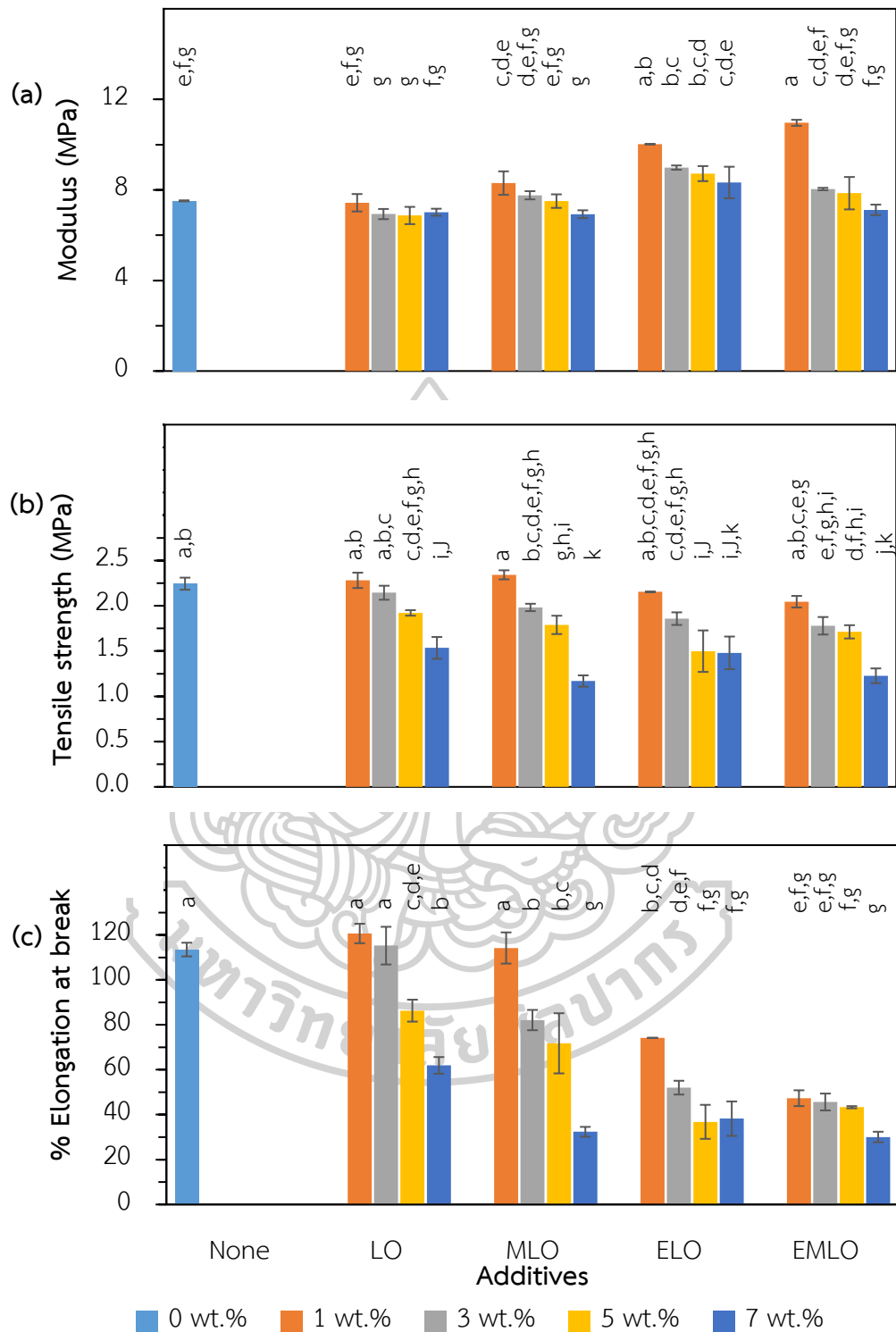
ภาพที่ 4.25 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมและเติมสารเติมแต่ง ก่อนการดูดความชื้น

(a) คือ Modulus (b) คือ Tensile strength และ (c) คือ % Elongation at break

น้ำหรือความชื้นนั้นสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งได้ดี ดังนั้นภายหลังจากการดูดความชื้นของแป้งเทอร์โมพลาสติกก็ทำให้แป้งเทอร์โมพลาสติกมีความอ่อนนิ่มมากยิ่งขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำจะทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ช่วยลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของโมเลกุลแป้งลง ทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถขยับและเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้น โดยสมบัติการรับแรงดึงยึดของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมและเติมสารเติมแต่งต่าง ๆ หลังดูดความชื้นที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 54 % เป็นเวลา 24 วัน แสดงในภาพที่ 4.26

พิจารณาค่า modulus และ tensile strength ของชิ้นงานต่าง ๆ หลังผ่านการดูดความชื้นในภาพที่ 4.26 (a) และ (b) ตามลำดับ พบว่าแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมสารเติมแต่งต่าง ๆ นั้นจะมีค่า modulus และ tensile strength ที่ใกล้เคียงกันกับแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมสารเติมแต่ง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสารเติมแต่งที่เติมลงไปนั้น ไม่สามารถเคลือบครอบคลุมชิ้นงานได้ทั้งหมด ดังนั้นแม้ว่าจะช่วยลดการดูดความชื้นของแป้งเทอร์โมพลาสติกได้บางส่วน แต่เนื้อแป้งเทอร์โมพลาสติกหลักยังคงสามารถดูดความชื้นได้อยู่ และด้วยความเป็นเนื้อวัสดุหลักนี้เองทำให้ความชื้นกระจายทั่วทั้งชิ้นงานเช่นเดียวกับกับแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมสารเติมแต่งใด ๆ ค่า modulus และ tensile strength ที่ได้จึงไม่แตกต่างกันกับแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมสารเติมแต่ง ยกเว้นการเติมน้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไดซ์ (ELO) และโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไดซ์ (EMLO) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางกับโมเลกุลของแป้งได้ ดังนั้นโมเลกุลจึงมีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้มีค่า modulus สูงกว่าสูตรอื่น ๆ

พิจารณาค่า % elongation at break ภาพที่ 4.26 (c) พบว่าที่ปริมาณการเติมสารเติมแต่ง 1 % โดยน้ำหนัก น้ำมันลินสีด และโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันกับแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมสารเติมแต่ง แตกต่างกับการเติมน้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไดซ์และโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไดซ์ซึ่งจะมีค่าที่น้อยกว่าแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมสารเติมแต่ง ซึ่งเป็นผลมาจากการเชื่อมขวางโมเลกุลแป้ง ทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ผ่านกันได้ยาก ความสามารถในการดึงยึดจึงลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมสารเติมแต่ง พบว่าค่า % elongation at break ของชิ้นงานมีแนวโน้มที่จะลดลงตามปริมาณการเติมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการรวมกลุ่มกันของสารเติมแต่ง ดังแสดงในภาพ SEM ซึ่งการรวมกลุ่มกันของสารเติมแต่งมีผลทำให้เกิดจุดศูนย์รวมแรงเค้นได้ เนื่องจากสารเติมแต่งทุกชนิดที่เติมมีความหนาแน่นน้อยกว่าเนื้อแป้งเทอร์โมพลาสติก จึงเปรียบเสมือนมีรูพรุนอยู่ภายในชิ้นงาน เป็นผลทำให้ความสามารถในการดึงยึดลดลง



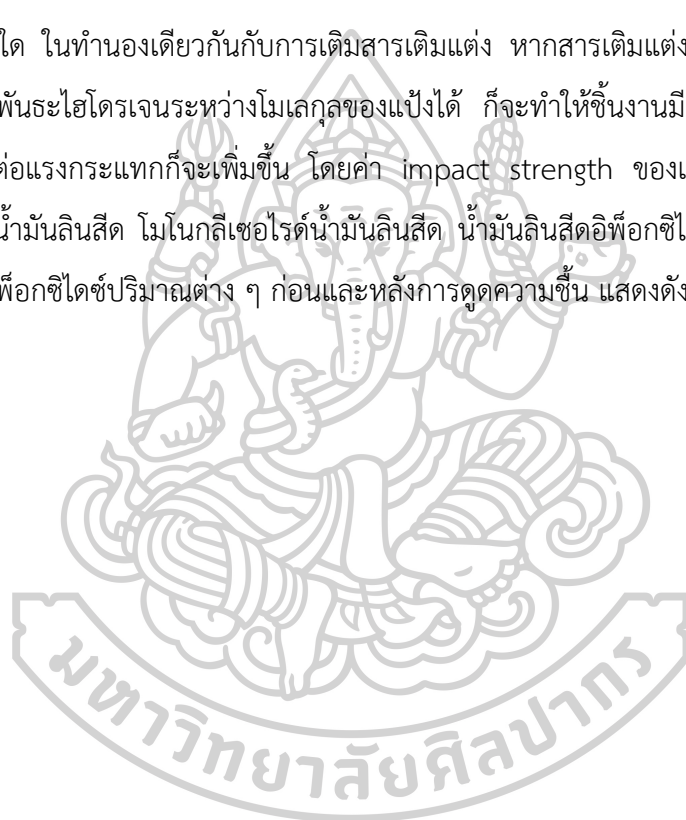
ภาพที่ 4.26 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมและเติมสารเติมแต่ง หลังการดูดความชื้น ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 54 % เป็นเวลา 24 วัน

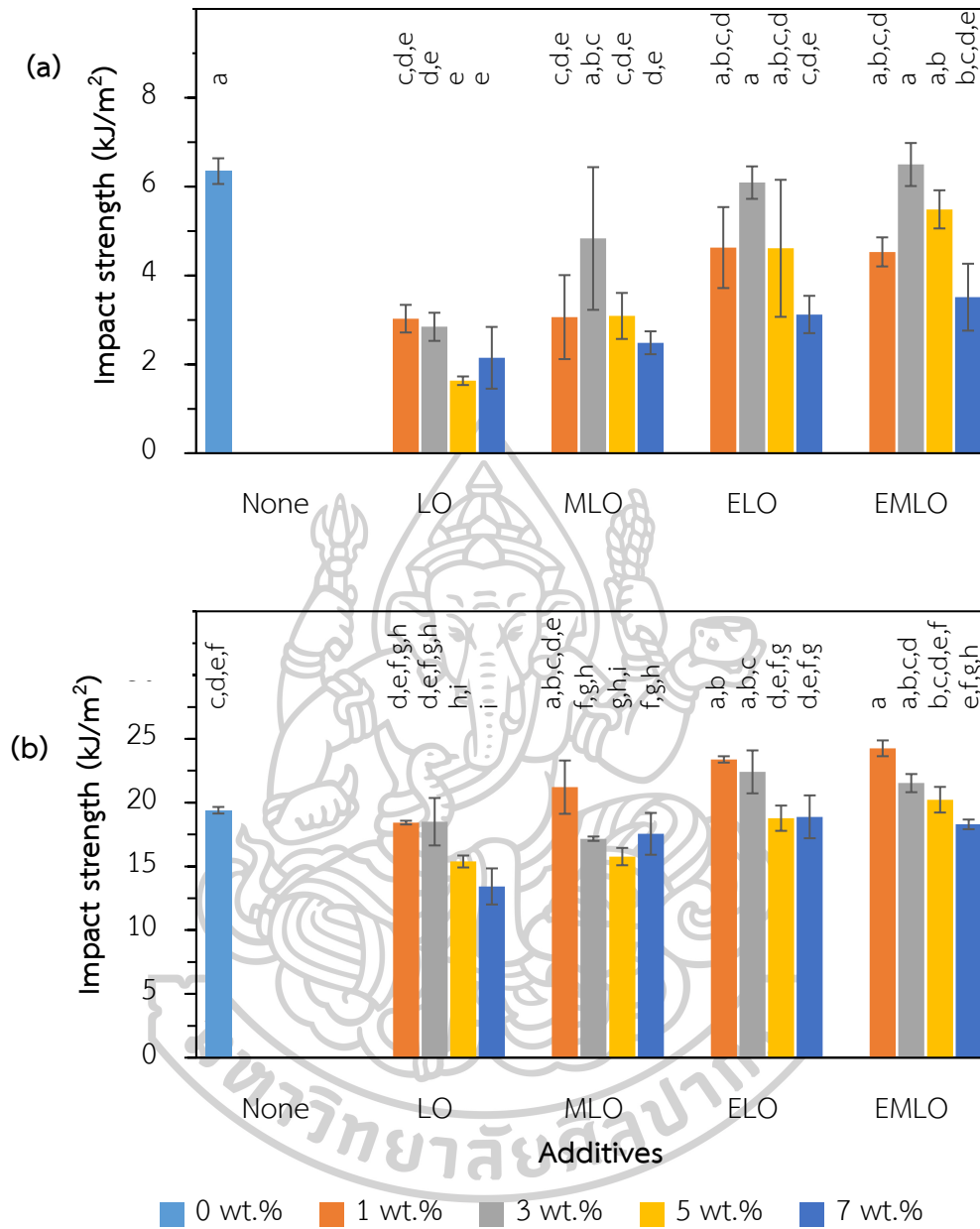
(a) คือ Modulus (b) คือ Tensile strength และ (c) คือ % Elongation at break

4.3.3 การศึกษาสมบัติการรับแรงกระแทกก่อนและหลังการดูดความชื้น

ความทนทานต่อแรงกระแทกคือความสามารถในการรับแรงที่เกิดขึ้นอย่างฉับพลัน โดยชิ้นงานจะเปลี่ยนแปลงแรงกระทำดังกล่าวเป็นพลังงานในการยับหรือเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล หรือจะกล่าวอีกนัยหนึ่งคือความทนทานต่อแรงกระแทกของวัสดุจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของโมเลกุลว่าสามารถยับหรือเคลื่อนที่ได้มากน้อยเพียงใด

สมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกของแป้งเทอร์โมพลาสติกจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ที่เติม ว่ามีความสามารถในการลดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้งได้มากน้อยเพียงใด ในทำนองเดียวกันกับการเติมสารเติมแต่ง หากสารเติมแต่งที่เติมลงไปมีส่วนช่วยลดแรงดึงดูดของพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้งได้ ก็จะทำให้ชิ้นงานมีความนิ่มมากขึ้น สมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกก็จะเพิ่มขึ้น โดยค่า impact strength ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมและเติม น้ำมันลินสีด โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด น้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไดซ์ หรือโมโนกลีเซอไรด์ น้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไดซ์ปริมาณต่าง ๆ ก่อนและหลังการดูดความชื้น แสดงดังภาพที่ 4.27





ภาพที่ 4.27 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทกของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมและเติมสารเติมแต่ง (a) ก่อนการดูดความชื้น และ (b) หลังการดูดความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 54 % เป็นเวลา 24 วัน

พิจารณาค่า impact strength ของชิ้นงานแปงเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมและเติมสารเติมแต่ง ก่อนการดูดความชื้นในภาพที่ 4.27 (a) จะพบว่าแปงเทอร์โมพลาสติกที่เติมสารเติมแต่งต่าง ๆ นั้น จะมีค่า impact strength ที่น้อยกว่า หรือมีแนวโน้มที่จะมีค่าน้อยกว่าแปงเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมสารเติมแต่ง และมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อเติมสารเติมแต่งในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการรวมกลุ่มกันของสารเติมแต่ง ดังปรากฏแล้วในภาพผลของการทดสอบ SEM ในหัวข้อ 4.3.1 โดยจะเห็นว่า การรวมกลุ่มกันของสารเติมแต่งจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติม ซึ่งการรวมกลุ่มกันของสารเติมแต่งเหล่านี้เปรียบเสมือนการมีจุดบกพร่องภายในชิ้นงาน กล่าวคือบริเวณที่มีการรวมกลุ่มกันของสารเติมแต่งจะกลายเป็นจุดศูนย์รวมแรง ดังนั้นเมื่อชิ้นงานได้รับแรงกระทำอย่างฉับพลัน พลังงานที่เกิดขึ้นจะถูกรวมศูนย์ไว้ในบริเวณที่เกิดการรวมกลุ่มกัน ทำให้เกิดการรอยแตกร้าวไปบริเวณข้างเคียงอื่น ๆ ที่มีการรวมกลุ่มเช่นเดียวกัน เป็นเหตุให้เกิดการเสียรูปของชิ้นงานได้ง่ายขึ้นหากเติมสารเติมแต่งในปริมาณที่มากขึ้น ดังนั้นค่า impact strength จึงมีค่าต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมสารเติมแต่ง และจากผลการจัดกลุ่มข้อมูลทางสถิติจะพบว่าค่า impact strength ของแปงเทอร์โมพลาสติกที่เติมสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก (มีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ) แต่มีแนวโน้มว่าแปงเทอร์โมพลาสติกที่เติมน้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไคซ์ (ELO) และที่เติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไคซ์ (EMLO) จะมีค่า impact strength ที่มากกว่าแปงเทอร์โมพลาสติกที่เติมน้ำมันลินสีด (LO) และที่เติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด (MLO) ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากโมเลกุลของน้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไคซ์และโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไคซ์มีหมู่อีพ็อกไซด์เป็นส่วนประกอบ ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาและเชื่อมขวางกันกับโมเลกุลของแปงได้ดี ส่งผลให้เกิดการรวมกลุ่มกันน้อยกว่าน้ำมันลินสีดและโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด ซึ่งเกิดแรงยึดเหนี่ยวอ่อน ๆ กับโมเลกุลแปงเท่านั้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการเติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดและโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไคซ์ พบว่ามีแนวโน้มที่จะมีค่า impact strength ที่มากกว่า เมื่อเทียบกับการเติมน้ำมันลินสีดและน้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไคซ์ตามลำดับ ซึ่งคาดว่าเป็นผลจากหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดและโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไคซ์ ที่ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ทำให้สายโซ่โมเลกุลของแปงสามารถยับและเคลื่อนไหวได้มากกว่า

พิจารณาค่า impact strength ของแปงเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมและเติมสารเติมแต่งต่าง ๆ หลังผ่านการดูดซับความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 54% เป็นเวลา 24 วัน ในภาพที่ 4.27 (b) พบว่าหลังจากดูดซับความชื้นแล้วชิ้นงานแปงเทอร์โมพลาสติก ทั้งที่ไม่เติมและเติมสารเติมแต่งจะมีค่า impact strength ที่สูงขึ้น เนื่องจากความชื้นหรือน้ำสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลแปงได้

จึงทำหน้าที่เสมือนเป็นพลาสติกไซเซอรอีกชนิดหนึ่งในชิ้นงาน ทำให้โมเลกุลของแป้งสามารถยับและเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น จึงสามารถรับแรงกระแทกได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของปริมาณการเติมสารเติมแต่ง ยังคงพบว่ามีแนวโน้มที่ค่า impact strength จะลดลงตามปริมาณการเติมที่มากขึ้นเช่นเดียวกับผลของชิ้นงานก่อนการดูดซับ แต่ก็จะไม่ลดลงแตกต่างจากกันมากนัก เนื่องจากผลของความชื้นที่เข้าไปเป็นพลาสติกไซเซอรนั้นมีผลมากกว่าการรวมกลุ่มกันของสารเติมแต่ง ดังนั้นค่าที่ออกมาจึงใกล้เคียงกัน สังเกตได้จากผลการจัดกลุ่มข้อมูลทางสถิติ

4.3.4 การศึกษาสมบัติการดูดความชื้น

แป้งมีกลูโคสเป็นหน่วยย่อยหรือหน่วยซ้ำ ซึ่งโมเลกุลของกลูโคสนั้นมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) เป็นส่วนประกอบอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลจากพันธะไฮโดรเจนค่อนข้างสูง ส่งผลให้แป้งทางธรรมชาติไม่สามารถหลอมหรือเตรียมเป็นแป้งเทอร์โมพลาสติกได้โดยตรง เนื่องจากแรงจากพันธะไฮโดรเจนดังกล่าวมีค่าที่สูงเกินกว่าพลังงานที่ต้องใช้ในการหลอมขึ้นรูป กล่าวคือหากจะเอาชนะพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งนั้น อาจจะต้องใช้พลังงานที่มากกว่าพลังงานที่จะทำให้โมเลกุลของแป้งเกิดการสลายตัว นั่นคือโมเลกุลของแป้งจะสลายตัวก่อนที่จะทำลายพันธะไฮโดรเจนนี้ได้ ดังนั้นในการเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติกจึงจำเป็นต้องเติมสารพลาสติกไซเซอรลงไปเพื่อลดแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งลง ซึ่งพลาสติกไซเซอรที่ดีควรมีความสามารถในการเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของแป้งได้ดีกว่าการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้ง โดยในงานวิจัยนี้ใช้กลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร ซึ่งในหนึ่งโมเลกุลของกลีเซอรอลเองมีหมู่ไฮดรอกซิลประกอบอยู่ถึง 3 ตำแหน่ง จึงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสายโซ่โมเลกุลของแป้งได้ดี แต่อย่างไรก็ตามแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้ก็จะมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่เป็นจำนวนมากทั้งจากสายโซ่โมเลกุลของแป้งเองหรือจากโมเลกุลของกลีเซอรอลเองก็ตาม ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลที่มีอยู่อย่างมกเหล่านี้มีความว่องไวต่อการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำหรือความชื้นในอากาศอย่างมาก โดยโมเลกุลของน้ำที่ถูกแป้งเทอร์โมพลาสติกดูดซึมเข้าไปนั้นจะประพฤติตัวเป็นพลาสติกไซเซอรชนิดหนึ่ง ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของแป้งเทอร์โมพลาสติก จึงต้องมีการศึกษาการดูดความชื้นของแป้งเทอร์โมพลาสติก โดยผลจากการทดสอบการดูดความชื้นของชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมและไม่เติมสารเติมแต่งต่าง ๆ ของชิ้นงานที่ใช้สำหรับการทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก ภายใต้สภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่ 54% เป็นเวลา 24 วัน แสดงผลดังตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.28

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบการดูดความชื้นของแป้งเทอร์โมพลาสติก และแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมน้ำมันลินสีด โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ หรือ โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ จากตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.28 พบว่าการเติมน้ำมันลินสีด โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด และน้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ในการเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติกมีแนวโน้มที่จะทำให้แป้งเทอร์โมพลาสติกดูดความชื้นได้น้อยลงเมื่อเติมในปริมาณที่มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าการเติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์จะไม่ส่งผลต่อการลดลงของการดูดความชื้นของชิ้นงาน



ตารางที่ 4.9 การดูดซับความชื้นของชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกที่ความชื้นสัมพัทธ์ 54 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 24 วัน

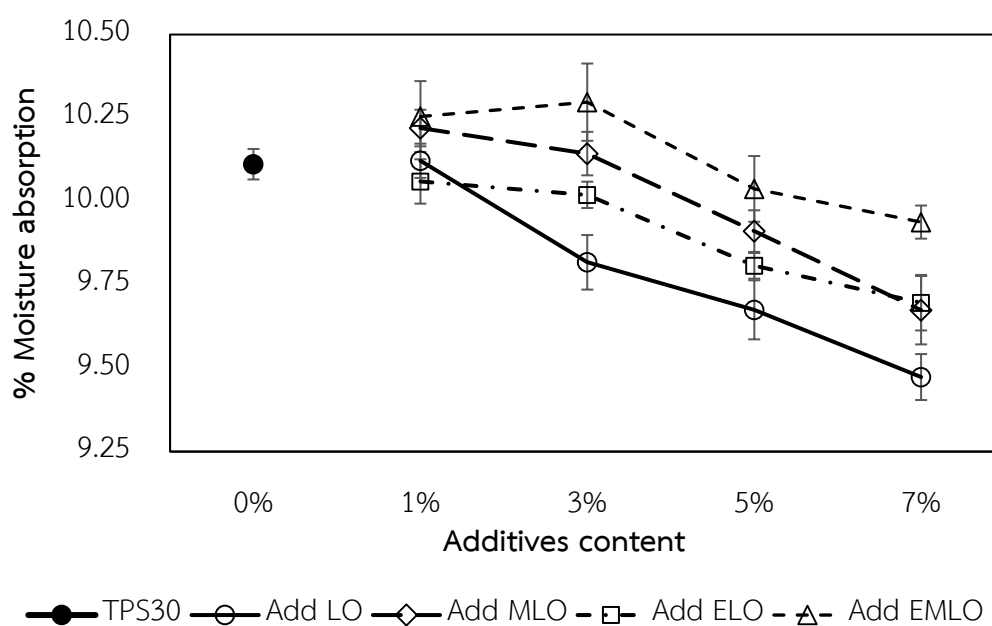
Additives	0 wt. %	1 wt. %	3 wt. %	5 wt. %	7 wt. %
LO	10.10±0.05 ^{c,d,e}	10.14±0.05 ^{b,c,d}	9.84±0.08 ^{f,g,h}	9.70±0.08 ^h	9.51±0.07 ⁱ
MLO	10.10±0.05 ^{c,d,e}	10.24±0.06 ^{a,b,c}	10.20±0.06 ^{a,b,c}	9.96±0.06 ^{e,f}	9.72±0.09 ^h
ELO	10.10±0.05 ^{c,d,e}	10.10±0.06 ^{c,d,e}	10.10±0.04 ^{c,d,e}	9.89±0.03 ^{f,g}	9.76±0.08 ^{g,h}
EMLO	10.10±0.05 ^{c,d,e}	10.31±0.10 ^{a,b}	10.36±0.12 ^a	10.12±0.11 ^{c,d,e}	9.99±0.05 ^{d,e,f}

หมายเหตุ อักษรตัวยกในตาราง คือ การจัดกลุ่มข้อมูลทางสถิติด้วย one-way ANOVA ด้วยวิธีของ Tukey ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

จากผลการทดสอบการดูดความชื้นพบว่าชิ้นงานที่เติมน้ำมันลินสีดมีแนวโน้มที่จะเกิดการดูดความชื้นได้ต่ำที่สุด รองลงมาคือการเติมน้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไดซ์ และโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากน้ำมันลินสีดนั้นเป็นโมเลกุลซึ่งมีขั้วต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสารเติมแต่งอื่น โดยโมเลกุลของน้ำมันลินสีดนั้นประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวถึง 3 สายโซ่ ซึ่งไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวนี้เป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ จึงเป็นตัวกันความชื้นที่ค่อนข้างดี รองลงมาคือน้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไดซ์ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว 3 สายโซ่เช่นเดียวกัน แต่พันธะคู่บนไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวจะถูกเปลี่ยนเป็นหมู่อีพ็อกไซด์ ทำให้โมเลกุลมีความเป็นขั้วมากยิ่งขึ้น แต่ทั้งนี้หมู่อีพ็อกไซด์บางส่วนสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในแป้งเทอร์โมพลาสติกได้ จึงทำให้เกิดการเชื่อมขวางกันของสายโซ่โมเลกุล ซึ่งส่งผลให้โมเลกุลของน้ำแทรกเข้าไปได้ยากยิ่งขึ้น การดูดความชื้นจึงลดลง สำหรับการเติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดจะพบว่าที่ปริมาณการเติม 1 และ 3 % โดยน้ำหนัก จะมีการดูดความชื้นใกล้เคียงกับแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมสารเติมแต่ง แต่จะเห็นความแตกต่างเมื่อเติมปริมาณตั้งแต่ 5 % โดยน้ำหนักขึ้นไป ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากโมเลกุลของโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่อีกสองหมู่ ซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลน้ำได้ ดังนั้นจึงมีผลที่หักล้างกันกับไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว 1 ตำแหน่งที่เหลือซึ่งไม่ชอบน้ำนั่นเอง แต่เมื่อเติมในปริมาณที่มากขึ้น ผลของไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวซึ่งไม่ชอบน้ำมีมากขึ้นจึงสามารถลดการดูดความชื้นลงได้บางส่วน สำหรับการเติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไดซ์พบว่าที่ปริมาณการเติม 1 และ 3 % โดยน้ำหนัก จะดูดความชื้นมากกว่าแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมสารเติมแต่ง และจะเริ่มลดลงเมื่อเติมในปริมาณตั้งแต่ 5 % โดยน้ำหนักขึ้นไป แต่ก็ไม่ได้ลดลงน้อยกว่าแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมสารเติมแต่ง ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากโมเลกุลของโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไดซ์นั้นมีทั้งหมู่ไฮดรอกซิล และหมู่อีพ็อกไซด์เป็นส่วนประกอบในโครงสร้างจึงทำให้มีความเป็นขั้วที่ค่อนข้างสูง และในการเติมปริมาณน้อย ๆ นั้น ยังเกิดการเชื่อมขวางกันได้ไม่มากพอที่จะลดการแทรกเข้าของโมเลกุลน้ำได้ ดังนั้นที่ปริมาณการเติม 1 และ 3 % โดยน้ำหนัก จึงจะเห็นว่ามีการดูดความชื้นที่มากกว่าแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมสารเติมแต่ง แต่เมื่อเติมในปริมาณที่มากขึ้น (5 และ 7 % โดยน้ำหนัก) การเชื่อมขวางกันเกิดมากขึ้น ทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกเข้าไปได้ยากขึ้นก็จะส่งผลให้การดูดความชื้นของชิ้นงานลดลงได้

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของสารเติมแต่งในการลดการดูดความชื้นของแป้งเทอร์โมพลาสติก พบว่าสารเติมแต่งต่างๆที่ใช้นั้นสามารถลดการดูดความชื้นของแป้งเทอร์โมพลาสติกได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยสารเติมแต่งที่สามารถลดการดูดความชื้นได้ดีที่สุดอย่างน้ำมันลินสีด ก็สามารถลดลง

ได้เพียงประมาณ 5.8 % เท่านั้น ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นผลมาจากการที่สารเติมแต่งไปขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลกลีเซอรอลและโมเลกุลแป้ง (สังเกตได้จากผลการทดสอบ SEM ซึ่งจะเห็นเม็ดแป้งเหลืออยู่ในชิ้นงานมากขึ้นตามปริมาณการเติมสารเติมแต่ง) ทำให้มีกลีเซอรอลที่เป็นอิสระอยู่ภายในชิ้นงาน โดยกลีเซอรอลเหล่านี้สามารถดูดความชื้นได้ดี จึงเป็นเหตุให้การเติมสารเติมแต่งไม่สามารถลดการดูดความชื้นได้ดีเท่าที่ควร เนื่องจากส่งผลกระทบต่อสองด้านซึ่งสวนทางกันเอง

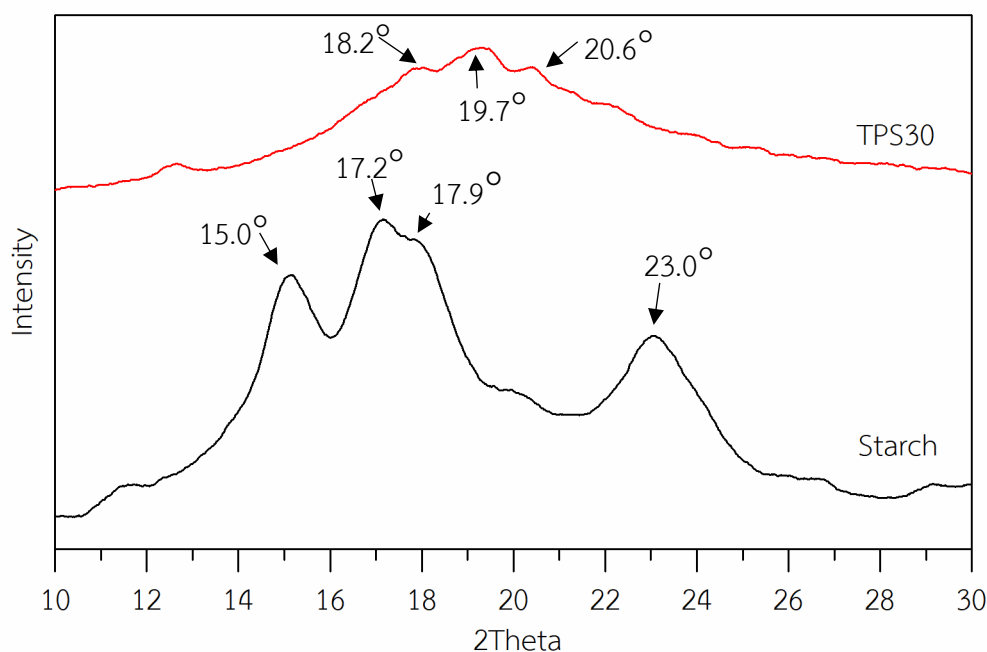


ภาพที่ 4.28 การดูดความชื้นของชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกที่ความชื้นสัมพัทธ์ 54% เป็นเวลา 24 วัน

4.3.5 การศึกษาความเป็นผลึกของแป้งเทอร์โมพลาสติก

แป้งดิบจากธรรมชาติ (native starch) มักจะมีความเป็นผลึกสูง เนื่องจากโมเลกุลของแป้งมีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลข้างเคียงได้อยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นตามธรรมชาติแล้วโมเลกุลของแป้งจะแพ็คกันในลักษณะเป็นเม็ดแป้ง ทำให้มีความเป็นผลึกสูง ทั้งนี้ความเป็นผลึกของแป้งดิบนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณโมเลกุลสายโซ่ตรง (อะไมโลส : amylose) และโมเลกุลสายโซ่กิ่ง (อะไมโลเพคติน : amylopectin) ที่เป็นส่วนประกอบของแป้ง โดยหากแป้งมีอัตราส่วนของอะไมโลสเป็นส่วนประกอบมากกว่าอะไมโลเพคตินจะทำให้แป้งดังกล่าวมีความเป็นผลึกสูง เนื่องจากสายโซ่ตรงของอะไมโลสสามารถแพ็คตัวกันเป็นผลึกได้ง่าย แต่ความเกะกะของสายโซ่กิ่งของอะไมโลเพคตินนั้นจะขัดขวางการแพ็คตัวกัน และทำให้เกิดปริมาตรอิสระขึ้น (free volume) ใน

งานวิจัยนี้ใช้แป้งมันสำปะหลังในการเตรียมเป็นแป้งเทอร์โมพลาสติก โดยผลการทดสอบความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD เปรียบเทียบระหว่างแป้งดิบและแป้งเทอร์โมพลาสติกจะแสดงดังภาพที่ 4.29

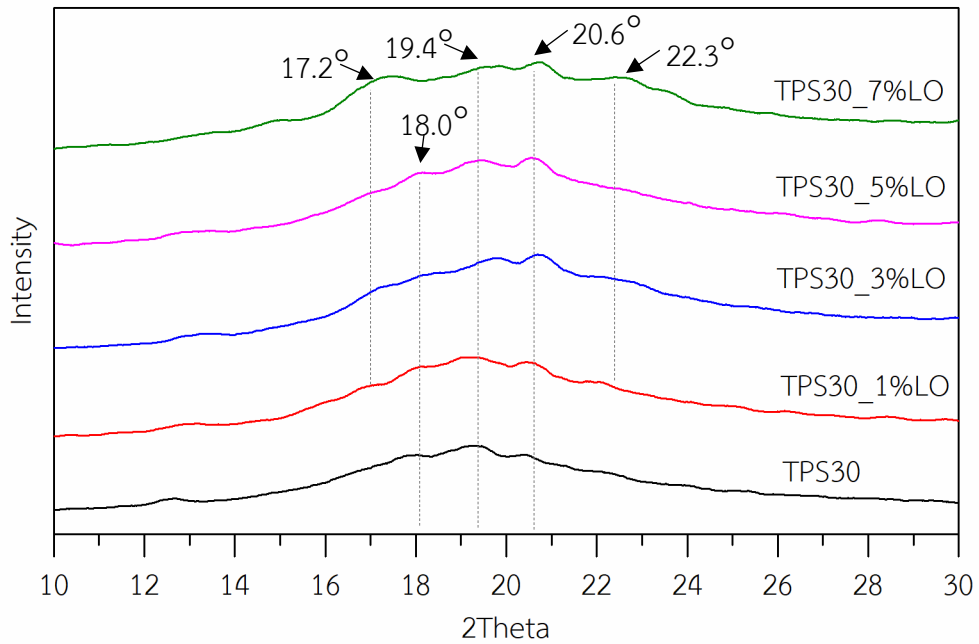


ภาพที่ 4.29 ผลการทดสอบ XRD ของแป้งดิบ (starch) และแป้งเทอร์โมพลาสติก (TPS30)

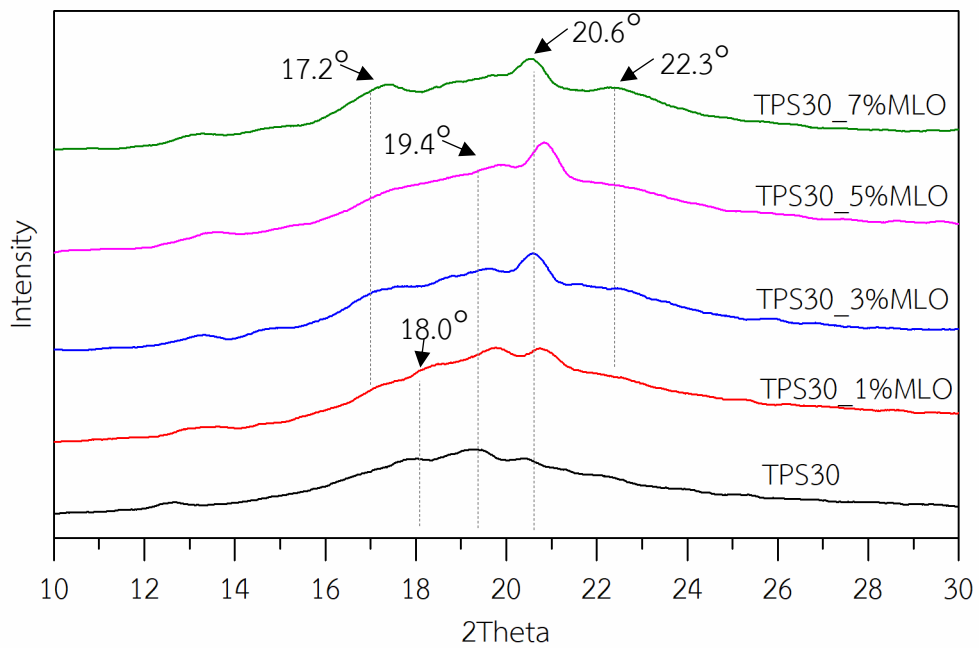
จากภาพที่ 4.29 เปรียบเทียบกราฟ XRD ระหว่างแป้งดิบและแป้งเทอร์โมพลาสติกจะพบว่าแป้งดิบนั้นจะปรากฏพีคซึ่งแสดงถึงระนาบโมเลกุลที่แพ็คตัวกันเป็นผลึกอย่างชัดเจนที่มุม 2theta ประมาณ 15.0°, 17.2°, 17.9° และ 23.0° ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกรูปแบบ C (มีทั้งแบบ A และ B ผสมกัน) [35] สำหรับแป้งเทอร์โมพลาสติกจะปรากฏพีคเล็ก ๆ ที่พอสังเกตเห็นได้ที่ตำแหน่งมุม 2theta ประมาณ 18.2°, 19.7° และ 20.6° แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลึกไปเป็นรูปแบบ B (2theta = 18.2° ; เกิดจากการจัดเรียงตัวของแป้งที่เป็นเกลียวคู่แบบหลวม ๆ และมีโมเลกุลน้ำแทรกอยู่ระหว่างเกลียวที่เกิดการจัดเรียงตัว) และรูปแบบ V (2theta = 19.7°, 20.6° ; เกิดจากการจัดเรียงตัวของแป้งที่เป็นเกลียวเดี่ยวซึ่งเกิด complex กับโมเลกุลกลีเซอรอลหรือไขมัน [36]) นอกจากนี้เมื่อทำการคำนวณปริมาณความเป็นผลึกจากพื้นที่ใต้กราฟแล้วจะพบว่าแป้งดิบจะมีความเป็นผลึกอยู่ประมาณ 25.06 % แตกต่างกับแป้งเทอร์โมพลาสติกที่มีความเป็นผลึกอยู่เพียงประมาณ 3.49 % เท่านั้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากในการเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติกในงานวิจัยนี้จะเติมกลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งโมเลกุลของกลีเซอรอลจะมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ถึง 3 ตำแหน่งจึงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งได้ ดังนั้นในระหว่างกระบวนการผสมเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติก ความร้อนและแรงเฉือนจะทำให้กลีเซอรอลแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุล

ของแข็ง ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์ของแข็งด้วยกันเองอ่อนลง ส่งผลให้เม็ดแข็งถูกทำลาย เป็นเหตุให้ความเป็นผลึกลดลง

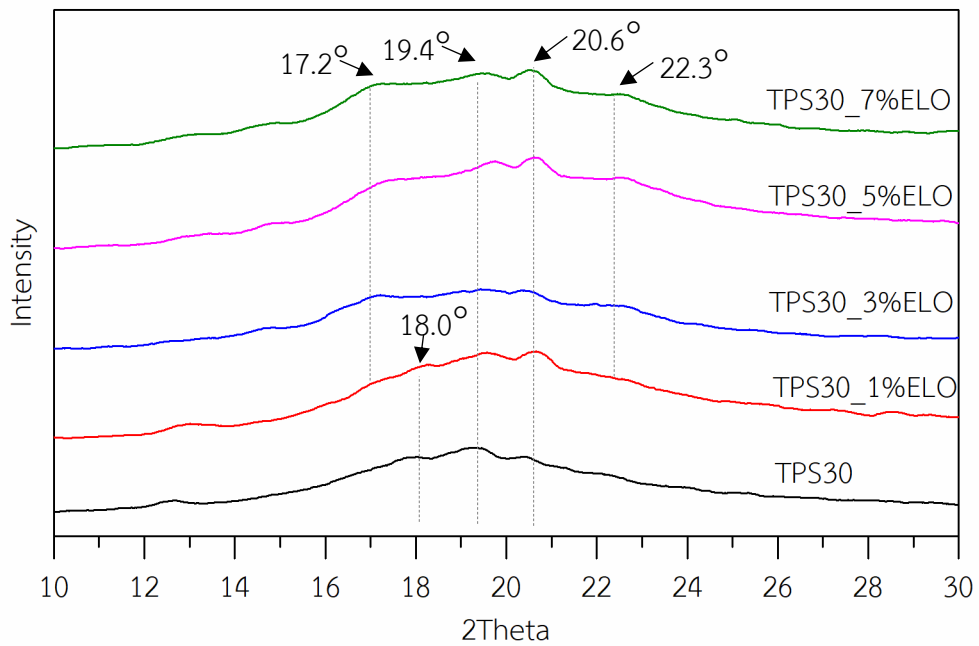
พิจารณาผลของการเติมสารเติมแต่งในภาพที่ 4.30 – ภาพที่ 4.33 จะพบว่า การเติมสารเติมแต่งต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นน้ำมันลินสีด โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ หรือ โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ จะมีรูปแบบผลึกเป็นแบบ V มากขึ้นเมื่อเติมสารเติมแต่งในปริมาณที่มากขึ้น สังเกตได้จากที่ตำแหน่งมุม 2θ ประมาณ 18° จะมีความเข้มลดลงและเริ่มหายไปเมื่อสารเติมแต่งเพิ่มขึ้น และปรากฏพีคใหม่ที่ตำแหน่งมุม 2θ ประมาณ 17° และ 22° ซึ่งแสดงถึงรูปแบบผลึก V ซึ่งจะปรากฏชัดขึ้นเมื่อสารเติมแต่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปริมาณความเป็นผลึกของชิ้นงานแข็งเทอร์โมพลาสติกที่เติมสารเติมแต่งต่าง ๆ ในตารางที่ 4.10 พบว่าความเป็นผลึกจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเติมสารเติมแต่งในปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสารเติมแต่งที่เติมลงไปนั้นเข้าไปแทรกและขัดขวางการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโพลีเมอร์ของโกลีเซอรอลและโพลีเมอร์ของแข็ง (ความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนระหว่างแข็งและพลาสติกไฮเซอรอลดูได้จากผลการทดสอบ TGA ในหัวข้อ 4.3.6) ทำให้การแตกออกของเม็ดแข็งลดลง (พิสูจน์ได้จากภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1500 เท่า ในหัวข้อ 4.3.1) ความเป็นผลึกของแข็งเทอร์โมพลาสติกที่เติมสารเติมแต่งจึงมากกว่าแข็งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมสารเติมแต่ง และเมื่อเปรียบเทียบสารเติมแต่งแต่ละชนิด พบว่าการเติมน้ำมันลินสีดจะมีแนวโน้มที่จะทำให้ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นน้อยที่สุด อันดับต่อมาคือ โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ และโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ ตามลำดับ ทั้งนี้คาดว่าอาจเนื่องมาจากการที่น้ำมันลินสีดนั้นมีอันตรกิริยากับโพลีเมอร์ของแข็งและโกลีเซอรอลต่ำมากจึงไม่ส่งผลต่อความเป็นผลึกมากนัก ส่วนโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดนั้นมีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโกลีเซอรอลและแข็งได้จึงส่งผลมากกว่าน้ำมันลินสีด สำหรับน้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์และโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์นั้นมีหมู่อีพ็อกไซด์ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในสายโซ่โพลีเมอร์ของแข็งได้ จึงคาดว่าอาจเกิดการเชื่อมขวางโพลีเมอร์ที่บริเวณผิวรอบนอกของเม็ดแข็ง ซึ่งส่งผลให้โพลีเมอร์ของโกลีเซอรอลแทรกตัวเข้าไปภายในได้ยากขึ้น ปริมาณความเป็นผลึกจึงเหลืออยู่ไม่มาก



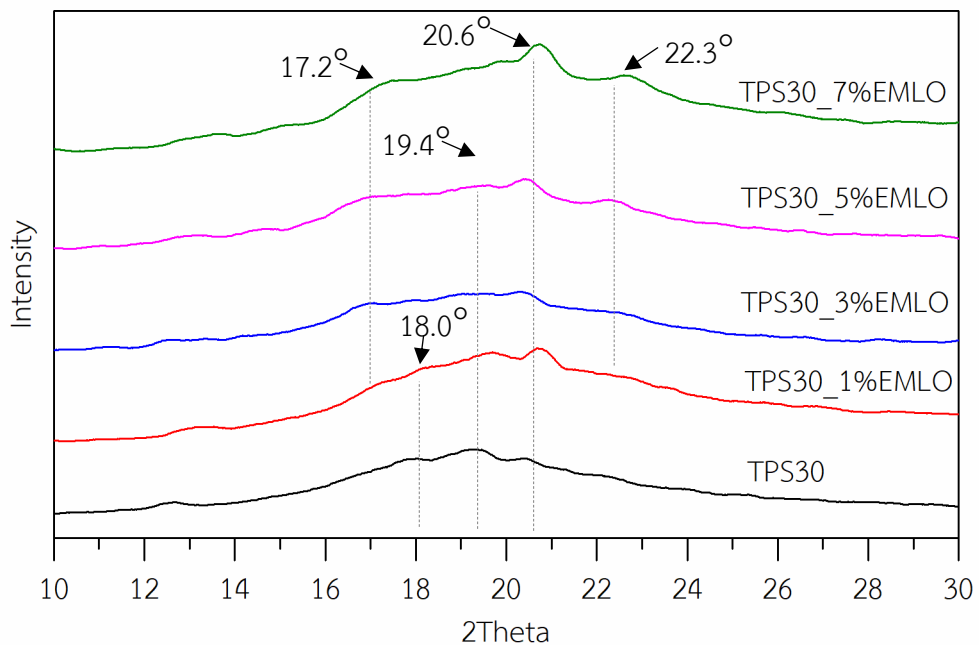
ภาพที่ 4.30 ผลการทดสอบ XRD ของแป้งเทอร์โมพลาสติก (TPS30) และแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมน้ำมันลินseed (TPS30_LO)



ภาพที่ 4.31 ผลการทดสอบ XRD ของแป้งเทอร์โมพลาสติก (TPS30) และแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินseed (TPS30_MLO)



ภาพที่ 4.32 ผลการทดสอบ XRD ของแป้งเทอร์โมพลาสติก (TPS30) และแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมน้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ (TPS30_ELO)



ภาพที่ 4.33 ผลการทดสอบ XRD ของแป้งเทอร์โมพลาสติก (TPS30) และแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ (TPS30_EMLO)

ตารางที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมสารเติมแต่งชนิดและปริมาณต่าง ๆ

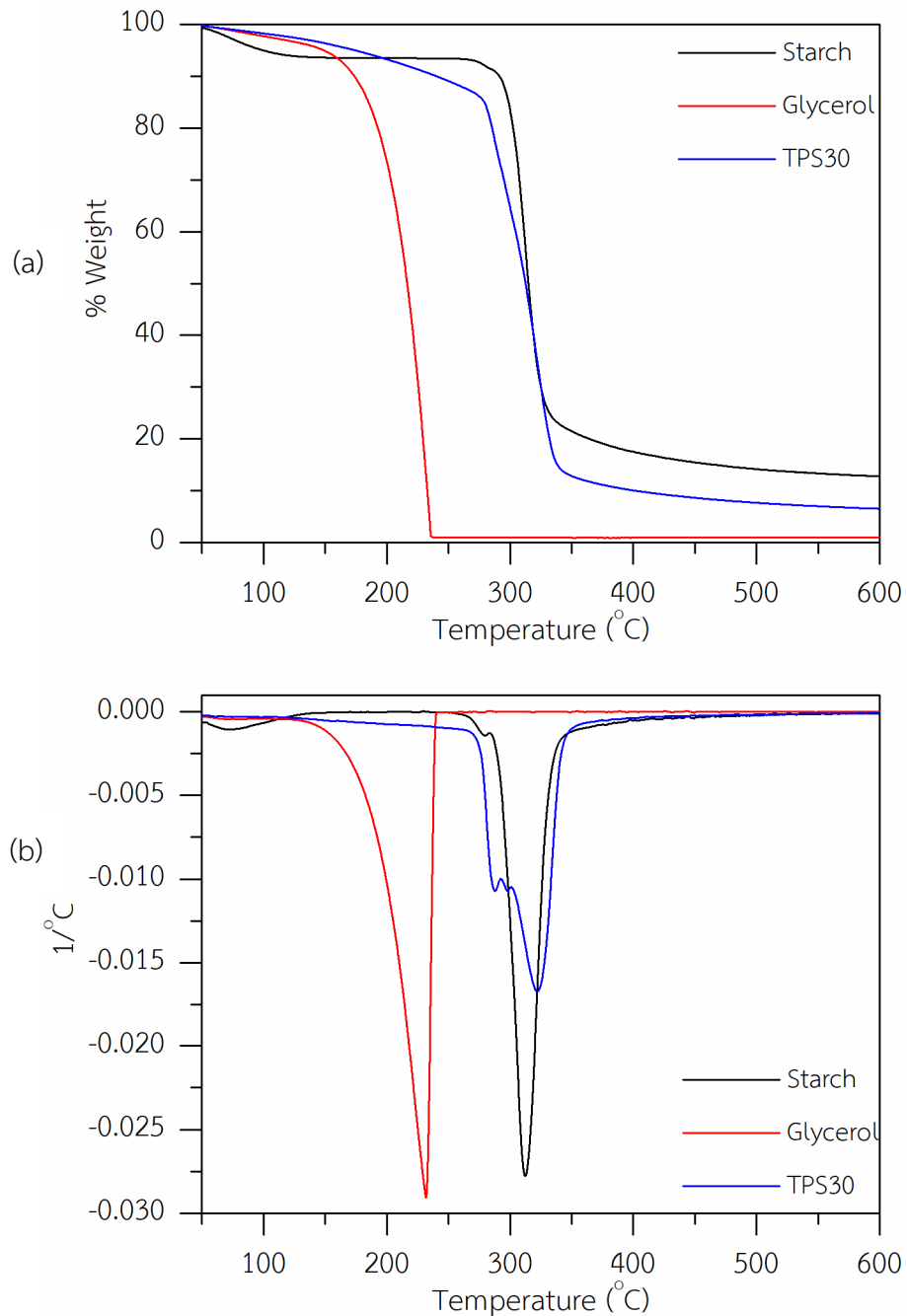
Additive content	% Crystallinity			
	LO	MLO	ELO	EMLO
0%	3.49	3.49	3.49	3.49
1%	4.05	4.68	4.76	5.31
3%	4.37	6.75	7.26	7.78
5%	5.34	7.85	7.83	8.94
7%	7.62	8.83	8.57	9.12

4.3.6 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของแป้งเทอร์โมพลาสติก

โครงสร้างโมเลกุลของแป้งที่เติมไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งเกิดพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงมากส่งผลให้ต้องใช้พลังงานที่สูงมากในการสลายพันธะดังกล่าวเพื่อหลอมแป้ง ซึ่งพลังงานที่ว่าเป็นพลังงานที่สูงกว่าพลังงานการสลายตัวของแป้ง ดังนั้นในการเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติกจึงมักจะผสมสารพลาสติกไซเซอร์ลงไปเพื่อลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของแป้งลง เพื่อที่จะสามารถหลอมและเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติกได้ ในงานวิจัยนี้ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ โดยการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของกลีเซอรอล แป้งดิบ และแป้งเทอร์โมพลาสติกด้วยเทคนิค TGA จะแสดงดังภาพที่ 4.34

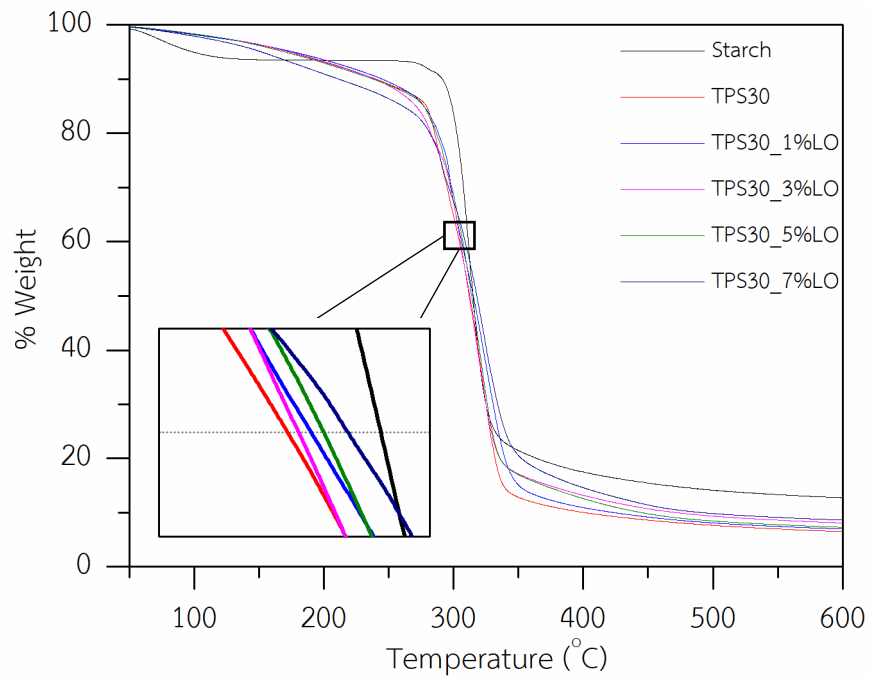
พิจารณาการสลายตัวของแป้งดิบ (starch), กลีเซอรอล (glycerol) และแป้งเทอร์โมพลาสติก (TPS30) ในภาพที่ 4.34 จะพบว่ากลีเซอรอลที่เป็นสารโมเลกุลขนาดเล็กจะสลายตัวเพียงหนึ่งขั้นเท่านั้นที่อุณหภูมิประมาณ 200°C แตกต่างจากแป้งดิบ (starch) ที่พบว่าเกิดการสลายตัวถึงสองขั้น โดยขั้นแรกจะสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 100°C ซึ่งเป็นการระเหยของความชื้นที่อยู่ภายในแป้งดิบ และจะสลายตัวอีกครั้งที่อุณหภูมิประมาณ 310°C ซึ่งเป็นการสลายตัวของสายโซ่โมเลกุลแป้ง แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับ การสลายตัวของแป้งเทอร์โมพลาสติก จะพบว่าแป้งเทอร์โมพลาสติกเกิดการสลายตัวเร็วกว่าแป้งดิบ ซึ่งอาจเนื่องมาจากการสลายตัวของโมเลกุลกลีเซอรอลซึ่งเป็นสารโมเลกุลเล็ก สังเกตได้จากกราฟ DTG ในภาพที่ 4.34 (b) ซึ่งจะเห็นว่าขั้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติกจะเกิดการสลายตัวครั้งแรกที่อุณหภูมิก่อน 300 °C นอกจากนี้การที่มีโมเลกุลของกลีเซอรอลแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของแป้ง ทำให้โมเลกุลของแป้งถูกแยกออกจากกัน ส่งผลให้

ความร้อนเข้าไปทำลายโครงสร้างโมเลกุลได้ง่ายขึ้น จึงสลายตัวได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับแป้งดิบที่โมเลกุลถูกแพ็คและยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง ทั้งยังส่งผลให้แป้งเทอร์โมพลาสติกมีขี้เถ้าเหลืออยู่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับแป้งดิบอีกด้วย

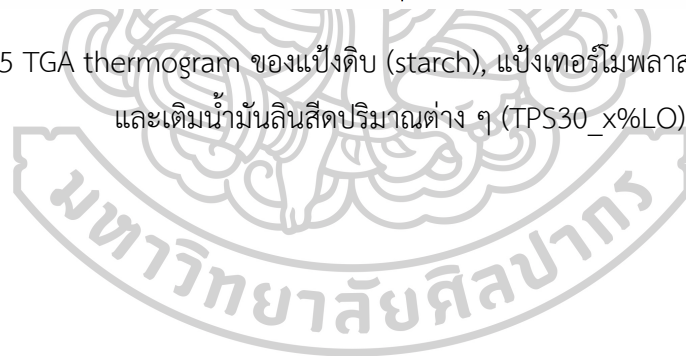


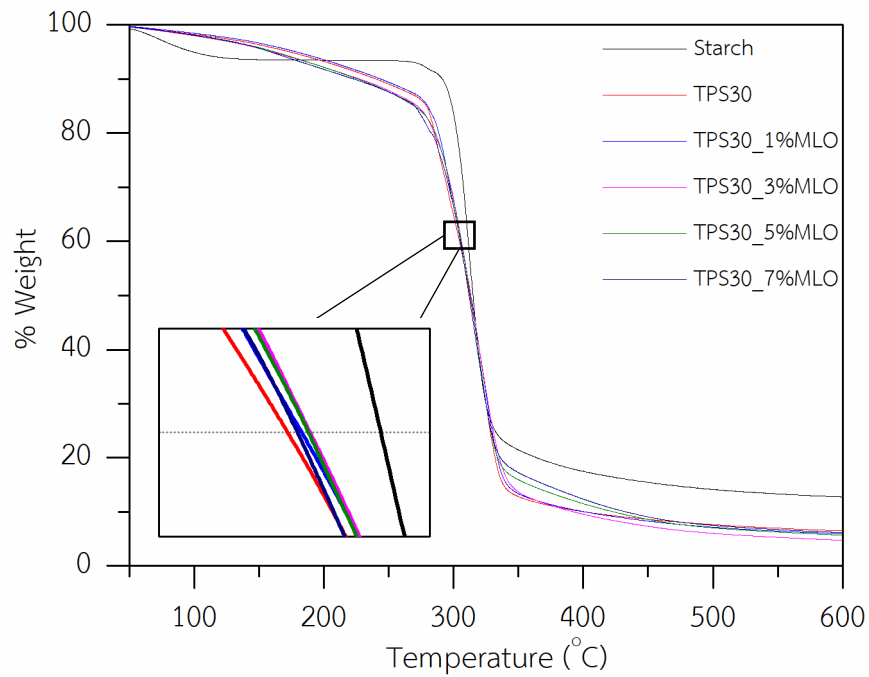
ภาพที่ 4.34 Thermogram ของแป้งดิบ (Starch), กลีเซอรอล (Glycerol) และแป้งเทอร์โมพลาสติก (TPS30) โดย (a) คือ TGA และ (b) คือ DTG

พิจารณาการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนระหว่างแป้งและกลีเซอรอลเมื่อเติมสารเติมแต่ง โดยพิจารณาที่อุณหภูมิการสลายตัวของแป้งดิบที่ 310°C ซึ่งตรงกับ % น้ำหนักที่เหลืออยู่ประมาณ 60 % [10] แสดงผลดังภาพที่ 4.35 - ภาพที่ 4.38

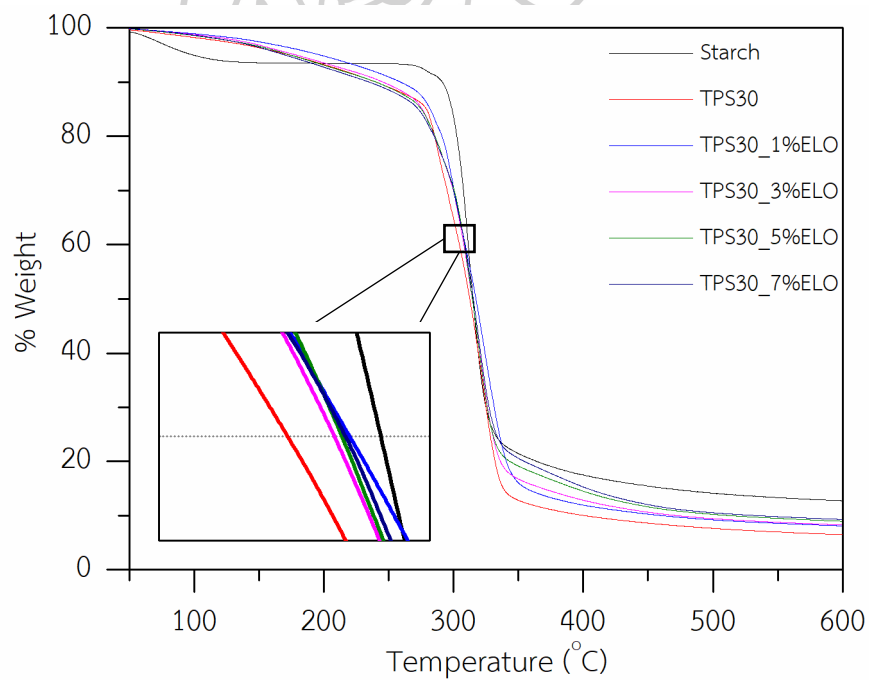


ภาพที่ 4.35 TGA thermogram ของแป้งดิบ (starch), แป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติม (TPS30) และเติมน้ำมันลินสีดปริมาณต่าง ๆ (TPS30_x%LO)

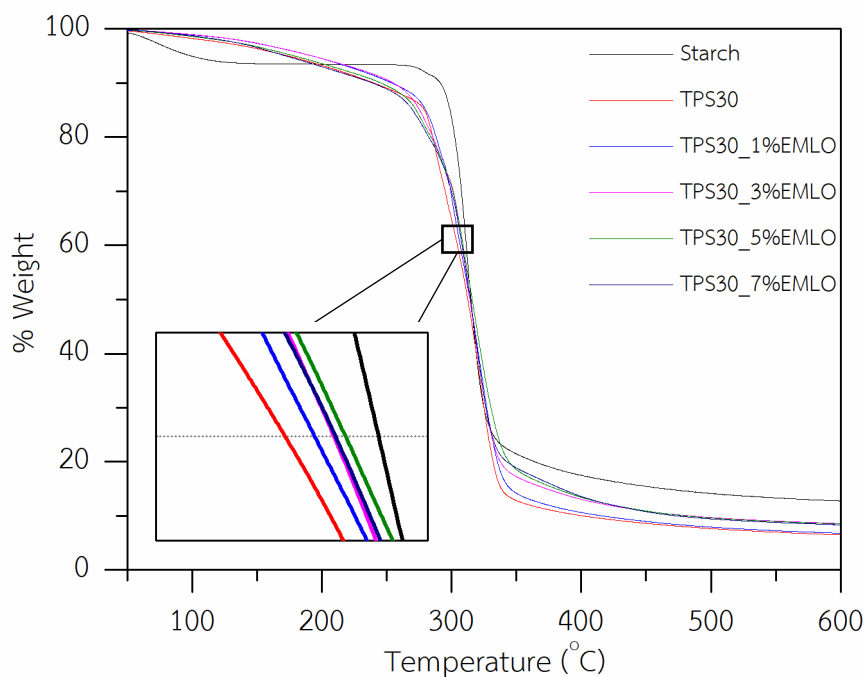




ภาพที่ 4.36 TGA thermogram ของแป้งดิบ (starch), แป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติม (TPS30) และเติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดปริมาณต่าง ๆ (TPS30_x%MLO)

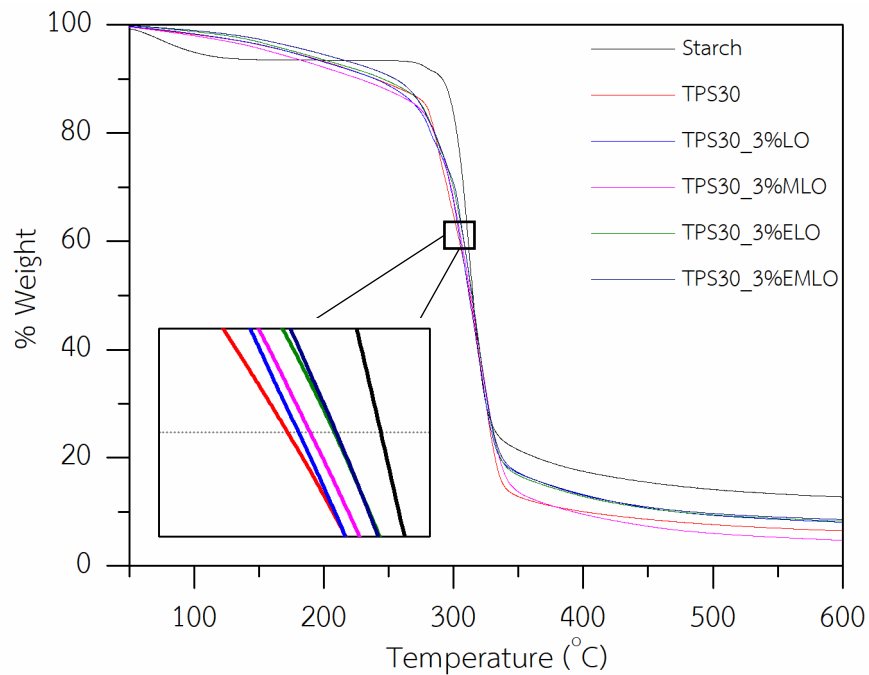


ภาพที่ 4.37 TGA thermogram ของแป้งดิบ (starch), แป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติม (TPS30) และเติมน้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ปริมาณต่าง ๆ (TPS30_x%ELO)



ภาพที่ 4.38 TGA thermogram ของแป้งดิบ (starch), แป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติม (TPS30) และเติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ปริมาณต่าง ๆ (TPS30_x%EMLO)

จากภาพที่ 4.35 - ภาพที่ 4.38 พบว่าแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมสารเติมแต่งต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นน้ำมันลินสีด โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ และโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซิไดซ์ ล้วนแล้วแต่สลายตัวช้ากว่าแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมสารเติมแต่งใด ๆ แต่ยิ่งเร็วกว่าแป้งดิบ แสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนระหว่างกลีเซอรอลและแป้งลดลงเมื่อเติมสารเติมแต่ง ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลแป้งเกิดอันตรกิริยาต่อกันมากขึ้น โดยสังเกตได้จากผลการทดสอบความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD ซึ่งจะพบว่าความเป็นผลึกจะเพิ่มขึ้น เมื่อเติมสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ ทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมสารเติมแต่งกลับมาใกล้เคียงกับแป้งดิบ และยังพบว่าปรากฏการณ์ดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะชัดเจนมากขึ้นเมื่อเติมสารเติมแต่งต่าง ๆ ในปริมาณที่มากขึ้นด้วย นอกจากนี้ผลของชนิดสารเติมแต่ง สามารถพิจารณาความแตกต่างได้จากภาพที่ 4.39 ซึ่งแสดง TGA thermogram ของแป้งดิบเปรียบเทียบกับแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมและเติมสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.39 TGA thermogram ของแป้งดิบ (starch), แป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติม (TPS30) และเติมสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก

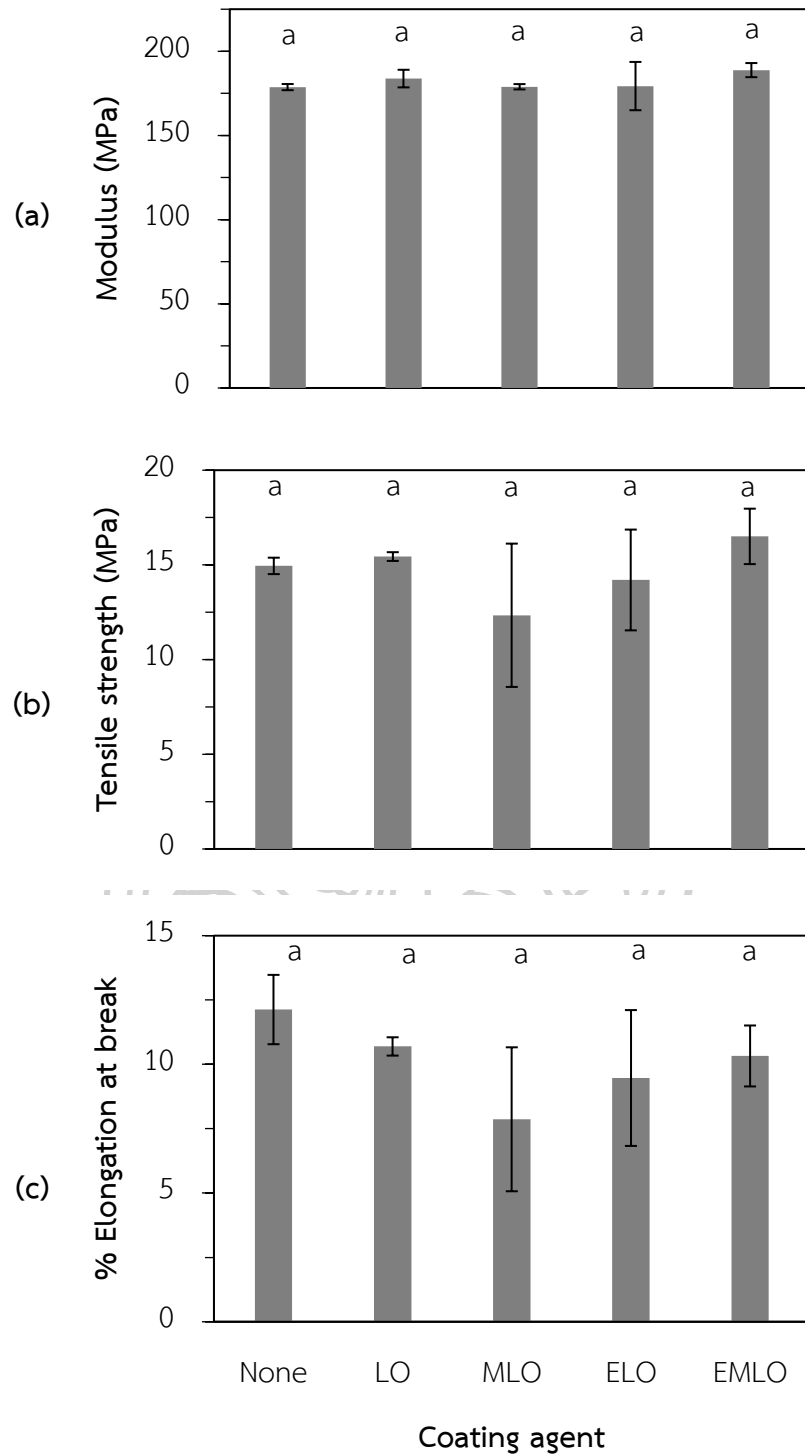
เมื่อเปรียบเทียบ TGA thermogram ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก พบว่าแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมน้ำมันลินสีดจะเกิดการสลายตัวเร็วที่สุด เมื่อเทียบกับการเติมสารเติมแต่งชนิดอื่น ๆ โดยจะเห็นว่าแตกต่างจากแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมสารเติมแต่งไม่มากนัก ต่อมาคือแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด น้ำมันลินสีด อีพ็อกซีไดซ์ และโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไดซ์ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกันกับค่าความเป็นผลึกที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบการเติมสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ จากผลการทดสอบด้วยเทคนิค XRD

4.4 การศึกษาสมบัติของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด

จากการศึกษาผลของการเติมน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดลงไปแป้งเทอร์โมพลาสติก ในงานวิจัยนี้พบว่าจะทำให้การดูดความชื้นของแป้งเทอร์โมพลาสติกลดลง (หัวข้อ 4.3.2) แต่อย่างไรก็ตามการเติมน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของแป้งเทอร์โมพลาสติกเช่นกัน เนื่องจากสารเติมแต่งที่เติมลงไปขณะผสมจะไปแทรกอยู่ภายในเนื้อชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติก ทำให้โครงสร้างภายในชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกล ดังแสดงในผลการทดสอบหัวข้อ 4.3.2 ดังนั้นการเคลือบผิวชิ้นงานจึงเป็นอีกวิธีที่นิยมสำหรับการปรับปรุงสมบัติการดูดความชื้นของแป้งเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างภายในของเนื้อแป้งเทอร์โมพลาสติก

4.4.1 การศึกษาสมบัติการรับแรงดึงก่อนและหลังการดูดความชื้น

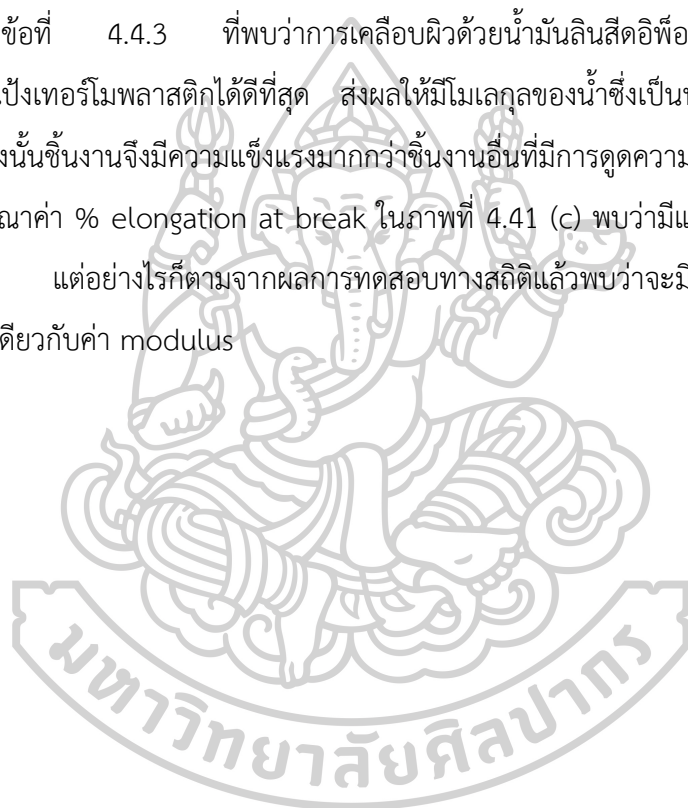
อย่างที่กล่าวในข้างต้นแล้วว่าการเคลือบผิวชิ้นงานจะไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างภายในของเนื้อแป้งเทอร์โมพลาสติก ดังนั้นสมบัติความทนทานต่อแรงดึงของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบและไม่เคลือบผิวชิ้นงานด้วยน้ำมันลินสีด หรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดก่อนการดูดความชื้นจะมีค่าไม่ต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.40 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า tensile strength, tensile modulus และ % elongation at break ของชิ้นงานที่ไม่เคลือบและเคลือบผิวจะมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ นอกจากนี้ผลในลักษณะดังกล่าวยังเกิดขึ้นกับสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกในหัวข้อ 4.4.2 ด้วย

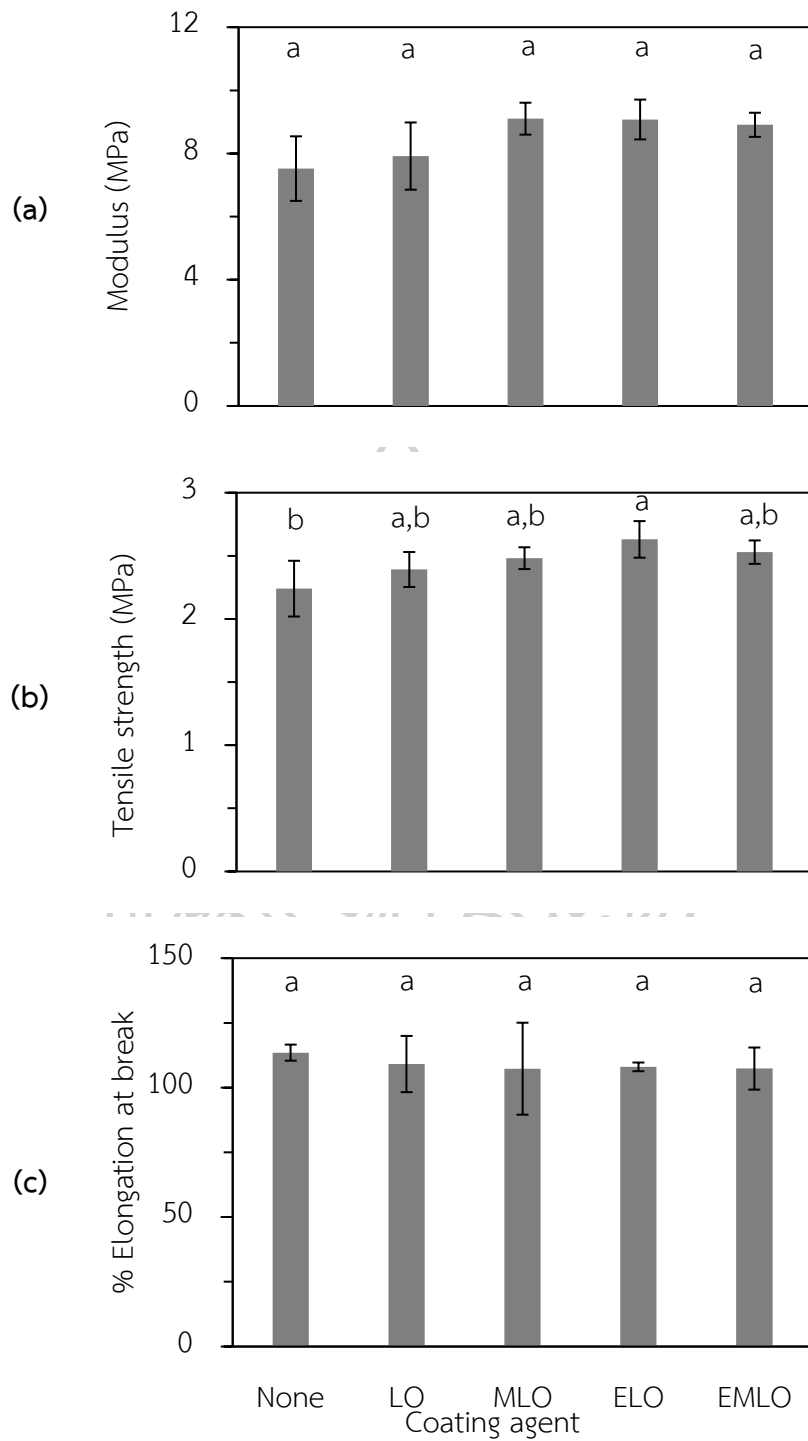


ภาพที่ 4.40 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เคลือบและเคลือบผิว ก่อนการดูดความชื้น

(a) คือ Modulus (b) คือ Tensile strength และ (c) คือ % Elongation at break

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีดและอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดหลังการดูดความชื้นในภาพที่ 4.41 จะพบว่าแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบผิวมีแนวโน้มที่จะทำให้ค่า modulus (ภาพที่ 4.41 (a)) และ tensile strength (ภาพที่ 4.41 (b)) สูงกว่าแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เคลือบผิวเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามจากการทดสอบด้วยวิธีการทางสถิติจะพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ยกเว้นแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไดซ์ (ELO) ที่จะมีค่า tensile strength มากกว่าแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เคลือบผิวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสัมพันธ์กับผลการทดสอบการดูดความชื้นในหัวข้อที่ 4.4.3 ที่พบว่า การเคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไดซ์จะช่วยลดการดูดความชื้นของแป้งเทอร์โมพลาสติกได้ดีที่สุด ส่งผลให้มีโมเลกุลของน้ำซึ่งเป็นพลาสติกไฮเซอรินในชิ้นงานน้อยลง ดังนั้นชิ้นงานจึงมีความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงานอื่นที่มีการดูดความชื้นในปริมาณที่มากกว่า และเมื่อพิจารณาค่า % elongation at break ในภาพที่ 4.41 (c) พบว่ามีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อทำการเคลือบผิว แต่อย่างไรก็ตามจากการทดสอบทางสถิติแล้วพบว่าจะมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญเช่นเดียวกับค่า modulus



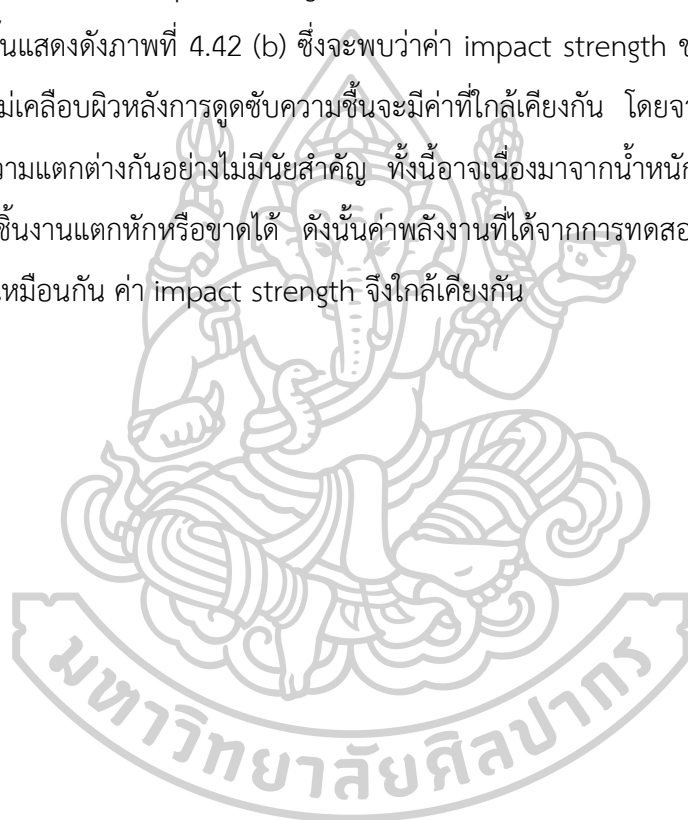


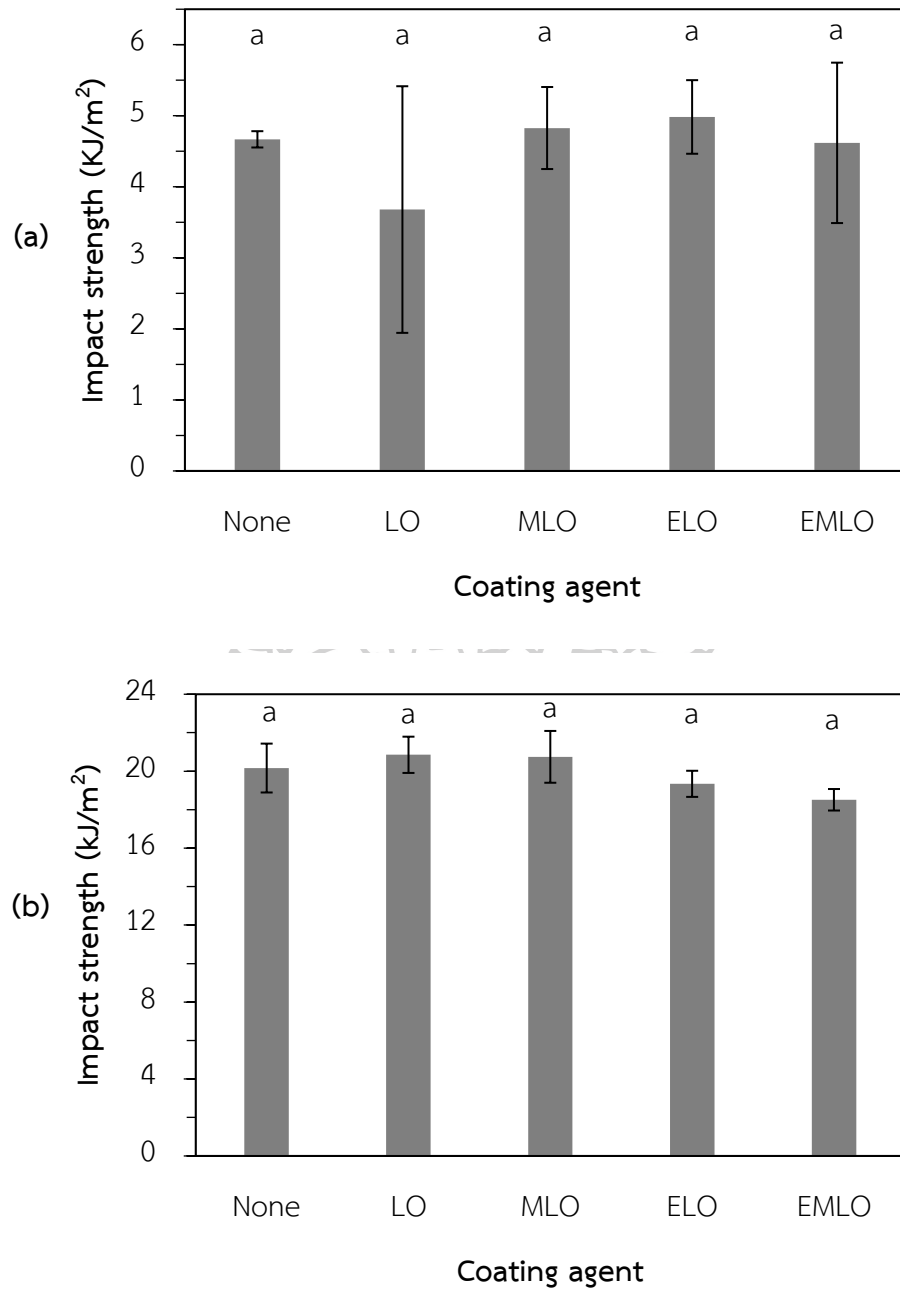
ภาพที่ 4.41 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของแผ่นเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เคลือบและเคลือบผิว
 หลังการดูดความชื้น ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 54 % เป็นเวลา 24 วัน

(a) คือ Modulus (b) คือ Tensile strength และ (c) คือ % Elongation at break

4.4.2 การศึกษาสมบัติการรับแรงกระแทกก่อนและหลังการดูดความชื้น

สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เคลือบและเคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดก่อนการดูดความชื้น จะเป็นในทำนองเดียวกันกับสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงก่อนการดูดความชื้น คือจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญดังแสดงในภาพที่ 4.42 (a) และเมื่อพิจารณาสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทกหลังดูดความชื้นจะพบว่าชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติกเมื่อดูดความชื้นแล้วจะนิ่มขึ้นทำให้สามารถรับแรงกระแทกได้มากขึ้น โดยค่า impact strength ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เคลือบและเคลือบผิวหลังการดูดความชื้นแสดงดังภาพที่ 4.42 (b) ซึ่งจะพบว่าค่า impact strength ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบและไม่เคลือบผิวหลังการดูดซับความชื้นจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยจากการวิเคราะห์ทางสถิติแล้วพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากน้ำหนักของค้อนที่ใช้ทดสอบไม่สามารถทำให้ชิ้นงานแตกหักหรือขาดได้ ดังนั้นค่าพลังงานที่ได้จากการทดสอบจึงเป็นค่าพลังงานที่สูงที่สุดของค้อนเหมือนกัน ค่า impact strength จึงใกล้เคียงกัน

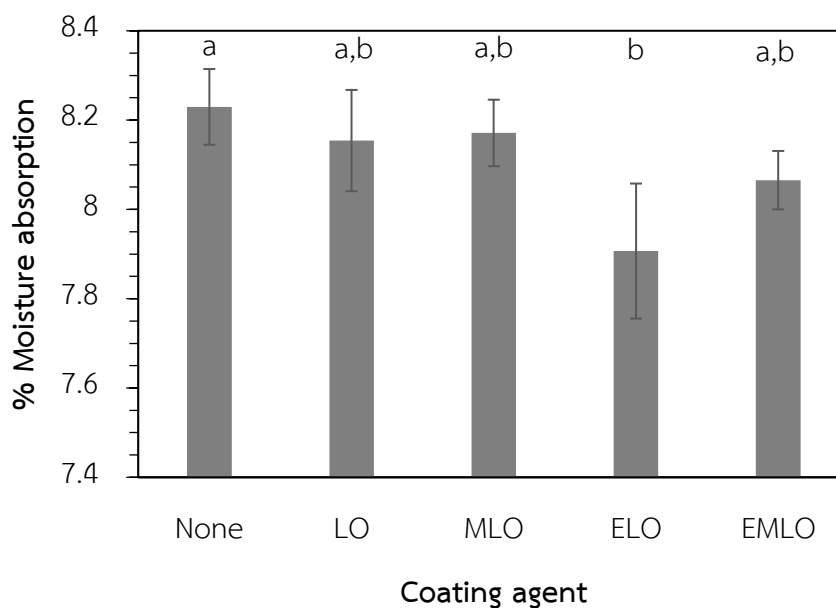




ภาพที่ 4.42 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทกของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบและไม่เคลือบ
 ผิดด้วยน้ำมันลินสีดหรือน้ำมันลินสีด
 (a) ก่อนการดูดความชื้น และ (b) หลังการดูดความชื้น ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 54 % เป็นเวลา 24 วัน

4.4.3 การศึกษาสมบัติการดูดความชื้น

การทดสอบสมบัติการดูดความชื้นของชิ้นงานแปงเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดจะทดสอบภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 54 % โดยผลทดสอบการดูดความชื้นแสดงดังภาพที่ 4.43



ภาพที่ 4.43 % moisture absorption ของแปงเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เคลือบและเคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 54 % เป็นเวลา 9 วัน

จากภาพที่ 4.43 จะพบว่าแปงเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบน้ำมันลินสีด (LO) และโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด (MLO) จะมีค่าการดูดความชื้นใกล้เคียงกับแปงเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เคลือบผิว (TPS30) ส่วนแปงเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ (EMLO) และน้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ (ELO) มีแนวโน้มที่จะมีค่าการดูดความชื้นที่ต่ำกว่าแปงเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เคลือบผิว ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากน้ำมันลินสีดและโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดมีขั้วต่ำกว่าผิวแปงเทอร์โมพลาสติกและยังมีความหนืดต่ำจึงทำให้ยึดเกาะอยู่บนผิวชิ้นงานได้น้อย แตกต่างจากโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ และน้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ ที่มีความเป็นขั้วสูงกว่าและยังมีความหนืดสูงกว่าจึงทำให้ติดผิวชิ้นงานแปงเทอร์โมพลาสติกได้ดีกว่าส่งผลให้ความชื้นเข้าไปภายในได้น้อยกว่า แต่อย่างไรก็ตามด้วยความที่โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ และน้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์มีหมู่พันธะคู่ (C=C) เหลืออยู่น้อยมากทำให้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้น้อยจึง

ทำให้สารทั้งสองแห้งช้าและไม่เกิดเป็นฟิล์มเคลือบบนผิวชิ้นงาน ส่งผลให้ผิวชิ้นงานมีความมันและเปื่อยชุ่มสารดังกล่าว (ข้อมูลน้ำหนักของสารเคลือบที่ติดผิว และลักษณะของการเปื่อยผิวของสารเคลือบแสดงไว้ในภาคผนวก ก.2 ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาการศึกษาการเคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีดและอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด)

4.4.4 การศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชัน

แป้งเทอร์โมพลาสติกมักมีความเป็นผลึกต่ำเนื่องจากการมีอยู่ของพลาสติกไซเซออร์จะลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โม่เลกุลของแป้งลง แต่อย่างไรก็ตามหากอันตรกิริยาระหว่างพลาสติกไซเซออร์กับโม่เลกุลของแป้งไม่แข็งแรงพอก็มีโอกาสที่พลาสติกไซเซออร์จะแยกตัวออกมา ส่งผลให้โม่เลกุลของแป้งเคลื่อนที่ชิดกันมากขึ้นและเกิดผลึกขึ้นมาใหม่ได้ โดยผลจากการเก็บชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เคลือบและเคลือบผิวไว้ภายใต้สภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 54 % และทดสอบความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD ตามเวลาที่เก็บชิ้นงาน 0, 3, 7, 14, 21 และ 30 วัน จะแสดงในตารางที่ 4.11

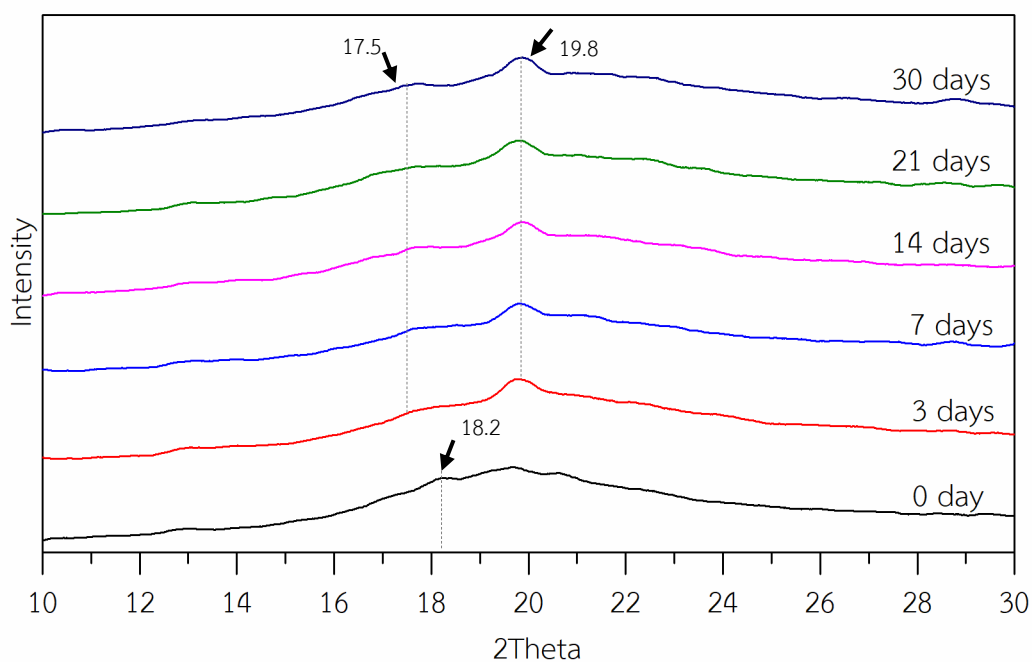
ตารางที่ 4.11 ความเป็นผลึกของชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เคลือบและเคลือบผิวตามเวลา

Time (days)	%Crystallinity				
	TPS30	LO coated	MLO coated	ELO coated	EMLO coated
0	3.03	3.00	3.15	3.01	3.10
3	4.51	4.27	4.43	3.54	3.61
7	5.06	4.68	4.83	3.81	3.96
14	5.87	5.41	5.37	4.56	4.59
21	6.43	5.77	5.90	5.23	5.36
30	6.30	5.65	5.90	5.16	5.21

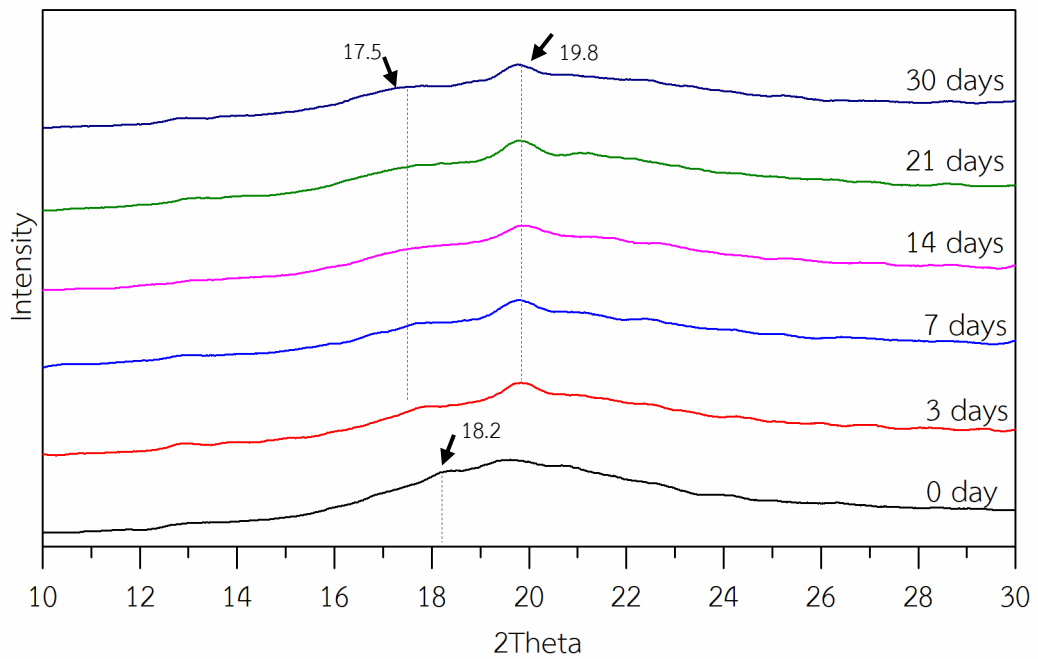
จากตารางที่ 4.11 จะพบว่าความเป็นผลึกของชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เคลือบและเคลือบผิวจะมีปริมาณความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป แสดงให้เห็นว่าพันธะไฮโดรเจนระหว่างโม่เลกุลแป้งกับกลีเซอรอลที่เป็นพลาสติกไซเซออร์ไม่แข็งแรงมากนัก [10] เมื่อเวลาผ่านไปโม่เลกุลของกลีเซอรอลจะแยกตัวออกมาจากการถูกกระตุ้นด้วยความชื้นที่แพร่เข้าไปในชิ้นงาน ส่งผลให้โม่เลกุลของแป้งสามารถเคลื่อนที่มาจัดเรียงตัวกันเป็นผลึกใหม่ได้ และจากการเปรียบเทียบผลของการเคลือบผิวจะเห็นว่าชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบผิวจะมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเป็นผลึกต่ำกว่าแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เคลือบผิว โดยสารเคลือบผิวที่ทำให้ปริมาณความเป็นผลึกเกิดการ

เปลี่ยนแปลงเรียงลำดับจากน้อยไปมาก ได้แก่ น้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไดซ์ โมนอกลิเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไดซ์ น้ำมันลินสีด โมนอกลิเซอไรด์น้ำมันลินสีด ซึ่งสัมพันธ์กับ % การดูดความชื้นของชิ้นงาน ตัวอย่างจากผลการทดสอบในหัวข้อ 4.4.3

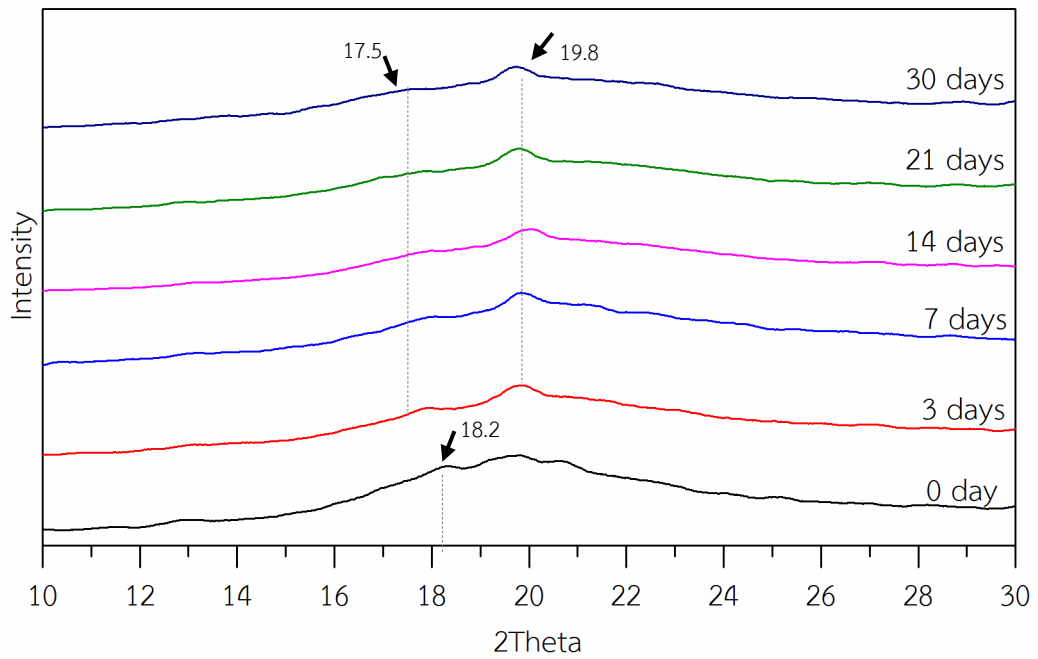
นอกจากนี้แล้วเมื่อพิจารณารูปแบบผลึกของชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติกจากผลการทดสอบด้วยเทคนิค XRD ที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.44 – ภาพที่ 4.48 จะพบว่ารูปแบบผลึกของแป้งเทอร์โมพลาสติกจะมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยจากเดิมที่ปรากฏพิกที่ตำแหน่งมุม 2θ ประมาณ 18.2° ซึ่งเป็นลักษณะผลึกรูปแบบ B ที่เกิดจากการจัดเรียงตัวกันแบบหลวม ๆ ของโมเลกุลแป้งที่เป็นเกลียวคู่ โดยมีพลาสติกไซเซอร์และโมเลกุลน้ำแทรกอยู่เล็กน้อย ต่อมาเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นจะสังเกตเห็นพิกที่ตำแหน่งดังกล่าวหายไปและปรากฏพิกที่ตำแหน่ง 2θ ประมาณ 17.5° และ 19.8° ขึ้นมาแทน โดยพิกตำแหน่งดังกล่าวทั้งสองจะเห็นการเปลี่ยนแปลงชัดเจนขึ้นตามเวลา ซึ่งแสดงถึงลักษณะผลึกรูปแบบ V ที่เกิดจากการมีโมเลกุลของน้ำปริมาณมากแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของแป้งที่เป็นช่องว่าง [37] และเนื่องจากการเคลือบผิวไม่ได้ส่งผลต่อโครงสร้างใด ๆ ภายในชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติกจึงทำให้รูปแบบผลึกของชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เคลือบและเคลือบผิวเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกัน แตกต่างกันเพียงปริมาณความเป็นผลึกซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณการดูดความชื้นของชิ้นงานเท่านั้น



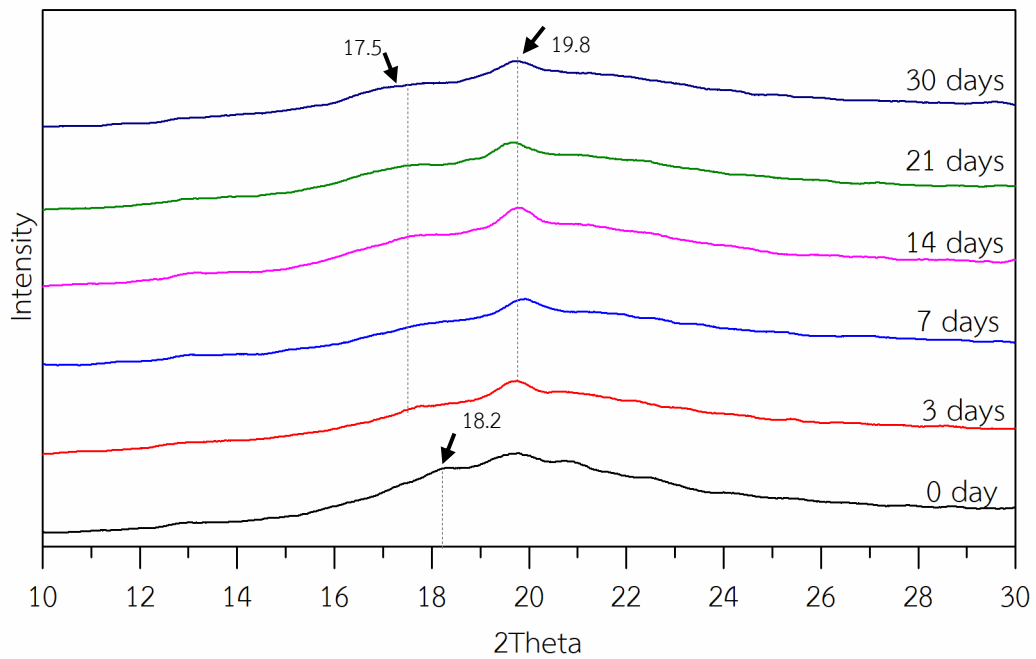
ภาพที่ 4.44 ผลการทดสอบ XRD ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เวลาต่าง ๆ



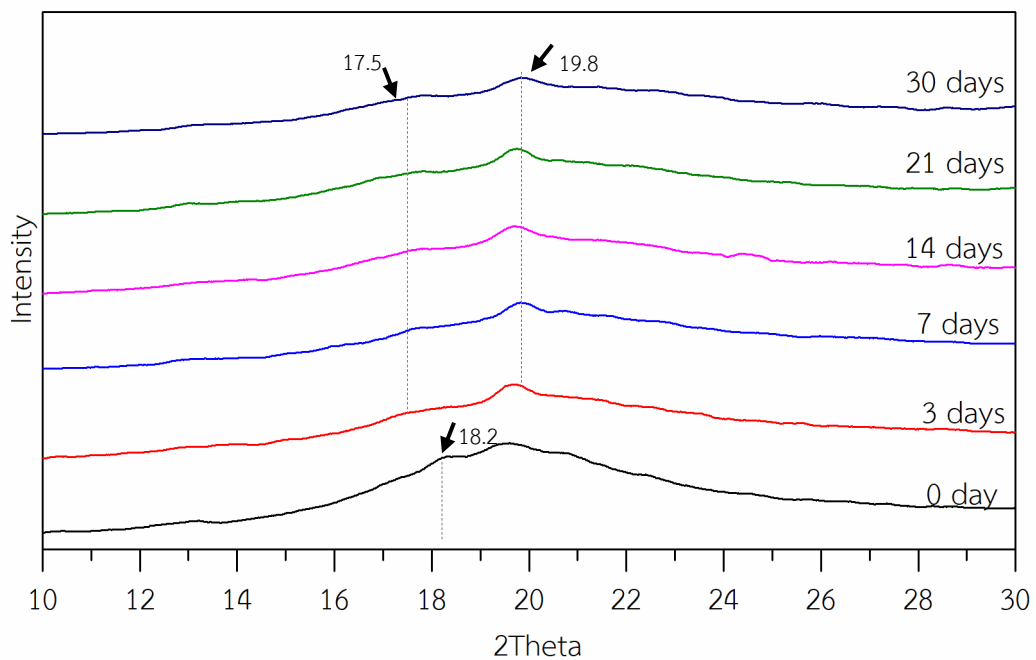
ภาพที่ 4.45 ผลการทดสอบ XRD ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีดที่เวลาต่าง ๆ



ภาพที่ 4.46 ผลการทดสอบ XRD ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบผิวด้วย
โมโนกลีเซอไรต์น้ำมันลินสีดที่เวลาต่าง ๆ



ภาพที่ 4.47 ผลการทดสอบ XRD ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบผิวด้วย
น้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไคซ์ที่เวลาต่าง ๆ



ภาพที่ 4.48 ผลการทดสอบ XRD ของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบผิวด้วย
โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกซีไคซ์ที่เวลาต่าง ๆ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาอิทธิพลของน้ำมันลินสีดและอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดที่มีต่อการดูดความชื้นและสมบัติเชิงกลของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ โดยจะแบ่งงานวิจัยออกเป็นสองส่วนได้แก่ การศึกษาผลของการเติม และการศึกษาผลของการเคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีดและอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด

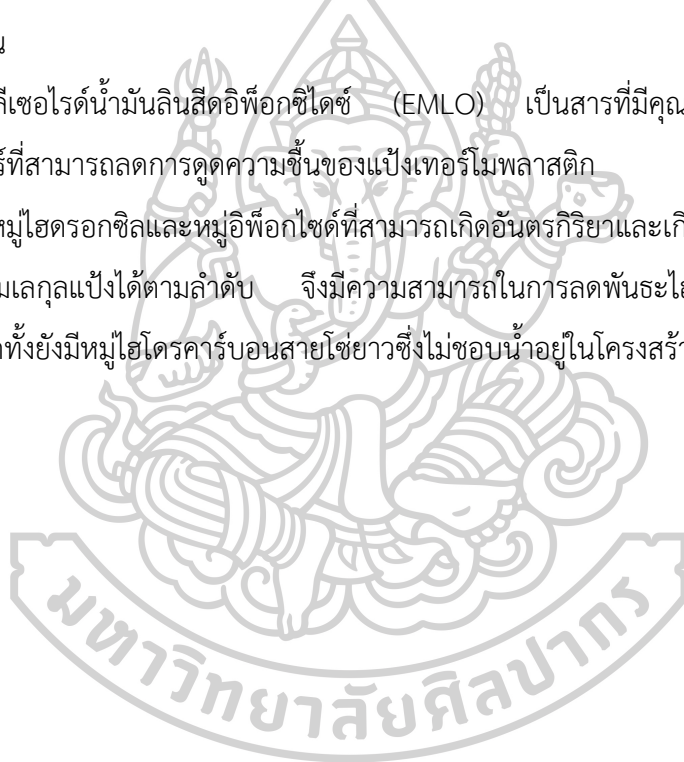
จากการศึกษาผลของการเติมพบว่า การเติมน้ำมันลินสีด โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ หรือโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์มีแนวโน้มที่จะทำให้แป้งเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้ดูดความชื้นลดลงตามปริมาณการเติม โดยการเติมน้ำมันลินสีดจะส่งผลให้การดูดความชื้นลดต่ำที่สุด รองลงมาได้แก่ น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด และโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามการเติมสารเติมแต่งต่าง ๆ ดังกล่าวส่งผลให้สมบัติเชิงกลของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้เปลี่ยนแปลงไป โดยจากการทดสอบการรับแรงดึงพบว่าที่ปริมาณการเติม 1 % โดยน้ำหนัก การเติมน้ำมันลินสีดและโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติการรับแรงดึงมากนัก แต่สำหรับการเติมน้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์และโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์จะทำให้แป้งเทอร์โมพลาสติกมีค่า tensile strength และ tensile modulus สูงขึ้นเนื่องจากการเชื่อมขวางโมเลกุลระหว่างหมู่อีพอกไซด์กับหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลแป้ง ซึ่งส่งผลให้ค่า % elongation at break ลดต่ำลงด้วย อย่างไรก็ตามค่า tensile strength, tensile modulus และ % elongation at break จะลดลงเมื่อเติมสารเติมแต่งต่าง ๆ ในปริมาณมากขึ้น อันเกิดจากการรวมกลุ่มกันของสารเติมแต่งซึ่งพิสูจน์ได้จากรูปทรงที่ปรากฏในภาพ SEM เมื่อเติมสารเติมแต่งต่าง ๆ ในปริมาณที่มากขึ้น โดยผลในลักษณะดังกล่าวจะเกิดขึ้นเช่นเดียวกับการทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก นอกจากนี้พบว่าภายหลังจากการดูดความชื้น สมบัติเชิงกลของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมหรือไม่เติมสารเติมแต่งจะมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้การเติมสารเติมแต่งดังกล่าว จะทำให้ค่าความเป็นผลึกมากกว่าเมื่อเทียบกับแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมสารเติมแต่ง ซึ่งเป็นผลจากการที่สารเติมแต่งขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างกลีเซอรอลกับโมเลกุลแป้งทำให้ยังคงเหลือเม็ดแป้งอยู่ในแป้งเทอร์โมพลาสติก พิสูจน์ได้จากภาพ SEM ซึ่งจะปรากฏเม็ดแป้งมากขึ้นเมื่อเติมสารเติมแต่งต่าง ๆ ในปริมาณที่มากขึ้น และผลการทดสอบ TGA ยืนยันว่าชิ้นงานที่เติมสารเติมแต่งจะมีเสถียรภาพทางความร้อนเข้าใกล้กับแป้งดิบ

จากการศึกษาผลของการเคลือบผิวพบว่า การเคลือบผิวชิ้นงานแปงเทอร์โมพลาสติกด้วย น้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ต่าง ๆ ของน้ำมันลินสีดมีส่วนช่วยลดการดูดความชื้นของแปงเทอร์โมพลาสติกลงได้ โดยการเคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีดอีพอกซีไคซ์จะลดการดูดความชื้นได้ดีที่สุด รองลงมาคือโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกซีไคซ์ น้ำมันลินสีด และโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม การเคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีดอีพอกซีไคซ์ และโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกซีไคซ์ จะทำให้ผิวของชิ้นงานแปงเทอร์โมพลาสติกเปื่อยกลืน เนื่องจากสารดังกล่าวมีพันธะคู่เหลืออยู่น้อยมากจึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากับอากาศและแห้งกลายเป็นแผ่นฟิล์มได้เหมือนกับน้ำมันลินสีดและโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีด จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า การเคลือบผิวชิ้นงานแปงเทอร์โมพลาสติกจะไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของแปงเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากการเคลือบผิวไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างภายในของแปงเทอร์โมพลาสติก สังเกตได้จากการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงและสมบัติการรับแรงกระแทกของชิ้นงานแปงเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เคลือบและเคลือบผิว อย่างไรก็ตาม หลังจากการดูดความชื้นพบว่า ชิ้นงานแปงเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบผิวมีแนวโน้มที่จะมีค่า tensile modulus และ tensile strength มากกว่าชิ้นงานที่ไม่เคลือบผิว โดยเฉพาะการใช้ น้ำมันลินสีดอีพอกซีไคซ์เป็นสารเคลือบผิว นอกจากนี้ยังพบว่า การเคลือบผิวชิ้นงานแปงเทอร์โมพลาสติกด้วยน้ำมันลินสีดหรืออนุพันธ์ต่าง ๆ ของน้ำมันลินสีด มีส่วนช่วยให้การเกิดริ้วรอยแตกของแปงเทอร์โมพลาสติกลดลง โดยการเคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีดอีพอกซีไคซ์จะทำให้การเกิดริ้วรอยแตกต่ำที่สุด รองลงมาคือโมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพอกซีไคซ์ น้ำมันลินสีด และ โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดตามลำดับ ซึ่งสัมพันธ์กับสมบัติการดูดความชื้นของชิ้นงานแปงเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบผิวด้วยสารต่าง ๆ ดังกล่าว

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาค่าการเติมสารเติมแต่งต่างๆลงในแป้งเทอร์โมพลาสติกพบว่า EMLO นอกจากจะทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่งแล้ว ยังมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับพลาสติกไซเซออร์ คือสามารถลดแรงดึงดูระหว่างโมเลกุลของแป้งลงได้ ส่งผลให้ในระบบมีสารที่ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซออร์อยู่ 2 ชนิด ซึ่งมีผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลและการดูดความชื้นของแป้งเทอร์โมพลาสติกด้วย ดังนั้นจึงควรควบคุมปริมาณพลาสติกไซเซออร์รวมในระบบให้มีปริมาณคงที่เท่ากัน เช่นแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เติมสารเติมแต่งมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก หากเติม EMLO ซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซออร์ได้ ลงไปปริมาณ 7 % โดยน้ำหนัก ควรลดปริมาณกลีเซอรอลลงเหลือเพียง 23 % โดยน้ำหนักเป็นต้น

โมโนกลีเซอไรด์น้ำมันลินสีดอีพ็อกไซด์ (EMLO) เป็นสารที่มีคุณสมบัติเหมาะแก่การเป็นพลาสติกไซเซออร์ที่สามารถลดการดูดความชื้นของแป้งเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากภายในโมเลกุลประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่อีพอกไซด์ที่สามารถเกิดอันตรกิริยาและเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งได้ตามลำดับ จึงมีความสามารถในการลดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้งได้ อีกทั้งยังมีหมู่ไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวซึ่งไม่ชอบน้ำอยู่ในโครงสร้างอีกด้วย







ภาคผนวก ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาการเติมน้ำมันลินสีดและอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด

1.1 ข้อมูลจากการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

ตารางผนวก ก.1-1 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นงานแปงเทอร์โมพลาสติกที่เติมสารเติมแต่งต่าง ๆ ก่อนการดูดความชื้น

Additives content	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break
TPS30			
0 wt.%	158.83 ± 2.84	13.44 ± 1.28	9.10 ± 1.06
TPS30_LO			
1 wt.%	152.71 ± 4.77	13.17 ± 0.85	9.22 ± 0.81
3 wt.%	145.14 ± 7.92	9.82 ± 0.66	7.93 ± 0.54
5 wt.%	121.97 ± 3.78	7.25 ± 0.80	6.40 ± 0.79
7 wt.%	107.65 ± 5.86	6.23 ± 0.26	6.58 ± 0.57
TPS30_MLO			
1 wt.%	133.81 ± 6.18	11.34 ± 0.22	12.32 ± 1.09
3 wt.%	131.95 ± 5.48	9.75 ± 0.38	8.40 ± 0.36
5 wt.%	119.48 ± 3.30	9.29 ± 0.42	9.33 ± 0.45
7 wt.%	94.71 ± 3.37	5.55 ± 0.46	7.35 ± 1.13
TPS30_ELO			
1 wt.%	202.34 ± 3.05	15.42 ± 0.75	8.04 ± 0.49
3 wt.%	229.84 ± 17.04	14.41 ± 1.06	6.73 ± 0.61
5 wt.%	220.44 ± 8.70	12.83 ± 0.42	6.14 ± 0.29
7 wt.%	230.04 ± 3.77	9.54 ± 0.71	4.40 ± 0.38
TPS30_EMLO			
1 wt.%	215.83±8.98	12.05 ± 0.48	6.15 ± 0.46
3 wt.%	186.30±8.31	10.49 ± 0.49	6.48 ± 0.22
5 wt.%	167.51±5.76	9.64 ± 0.22	7.50 ± 1.11
7 wt.%	121.95±4.16	7.16 ± 0.32	5.68 ± 0.64

*ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของค่า Average ± SD.

ตารางผนวก ก.1-2 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นงานแปงเทอร์โมพลาสติกที่เติมสารเติมแต่งต่าง ๆ หลังการดูดความชื้นที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 54 % เป็นเวลา 24 วัน

Additives content	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break
TPS30			
0 wt.%	7.52 ± 0.02	2.24 ± 0.07	113.51 ± 3.04
TPS30_LO			
1 wt.%	7.43 ± 0.39	2.28 ± 0.08	120.67 ± 4.33
3 wt.%	6.93 ± 0.22	2.14 ± 0.08	115.25 ± 8.40
5 wt.%	6.87 ± 0.38	1.92 ± 0.03	86.31 ± 4.89
7 wt.%	7.02 ± 0.15	1.53 ± 0.12	61.94 ± 3.72
TPS30_MLO			
1 wt.%	8.30 ± 0.52	2.34 ± 0.05	114.20 ± 6.94
3 wt.%	7.76 ± 0.18	1.98 ± 0.04	82.11 ± 4.52
5 wt.%	7.51 ± 0.30	1.79 ± 0.10	71.76 ± 13.40
7 wt.%	6.93 ± 0.17	1.17 ± 0.06	32.37 ± 2.19
TPS30_ELO			
1 wt.%	10.02 ± 0.00	2.15 ± 0.00	74.18 ± 0.00
3 wt.%	8.99 ± 0.09	1.86 ± 0.07	52.03 ± 3.07
5 wt.%	8.72 ± 0.33	1.50 ± 0.23	36.80 ± 7.57
7 wt.%	8.33 ± 0.70	1.48 ± 0.18	38.23 ± 7.65
TPS30_EMLO			
1 wt.%	10.96 ± 0.13	2.04 ± 0.06	47.33 ± 3.52
3 wt.%	8.04 ± 0.05	1.78 ± 0.10	45.64 ± 3.75
5 wt.%	7.86 ± 0.72	1.71 ± 0.07	43.31 ± 0.48
7 wt.%	7.12 ± 0.23	1.23 ± 0.08	30.05 ± 2.34

*ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของค่า Average ± SD.

1.2 ข้อมูลจากการทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก

ตารางผนวก ก.1-3 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทกของชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เติมสารเติมแต่งต่าง ๆ ก่อนและหลังการดูดความชื้นที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 54 % เป็นเวลา 24 วัน

Additive content	Impact strength (kJ/m ²)	
	Before moisture absorption	After moisture absorption
TPS30		
0 wt.%	6.35 ± 0.29	19.40 ± 0.26
TPS30_LO		
1 wt.%	3.03 ± 0.31	18.43 ± 0.15
3 wt.%	2.84 ± 0.32	18.50 ± 1.86
5 wt.%	1.63 ± 0.10	15.38 ± 0.47
7 wt.%	2.15 ± 0.70	13.43 ± 1.41
TPS30_MLO		
1 wt.%	3.06 ± 0.95	21.21 ± 2.09
3 wt.%	4.83 ± 1.61	17.17 ± 0.17
5 wt.%	3.09 ± 0.52	15.77 ± 0.68
7 wt.%	2.49 ± 0.26	17.55 ± 1.64
TPS30_ELO		
1 wt.%	4.63 ± 0.91	23.39 ± 0.25
3 wt.%	6.09 ± 0.37	22.41 ± 1.68
5 wt.%	4.61 ± 1.54	18.78 ± 0.99
7 wt.%	3.12 ± 0.42	18.89 ± 1.68
TPS30_EMLO		
1 wt.%	4.53 ± 0.33	24.26 ± 0.62
3 wt.%	6.50 ± 0.48	21.53 ± 0.71
5 wt.%	5.49 ± 0.43	20.23 ± 1.01
7 wt.%	3.51 ± 0.75	18.29 ± 0.38

*ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของค่า Average ± SD.

ภาคผนวก ก.2 ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาการเคลือบผิวด้วยน้ำมันลินสีดและอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด

ก.2.1 ข้อมูลการเคลือบผิวแป้งเทอร์โมพลาสติกด้วยน้ำมันลินสีดและอนุพันธ์ของน้ำมันลินสีด

การเคลือบผิวจะทำโดยการนำเอาชิ้นงานจุ่มลงในสารเคลือบ 3 ครั้ง ครั้งละประมาณ 2-3 วินาที จากนั้นจึงนำออกมาหนึบและแขวนทิ้งไว้ในเดซีเคเตอร์ที่มีซิลิกาเจลคอยควบคุมความชื้นภายในเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยน้ำหนักของสารเคลือบที่ติดบนชิ้นงานดูได้จากตารางผนวก ก.2-1

ตารางผนวก ก.2-1 ค่าน้ำหนักโดยเฉลี่ยของชิ้นงานก่อน-หลังการเคลือบ และน้ำหนักโดยเฉลี่ยของสารเคลือบบนผิวชิ้นงาน

สารเคลือบ	น้ำหนักชิ้นงานก่อนเคลือบ	น้ำหนักชิ้นงานหลังเคลือบ	น้ำหนักสารเคลือบ
LO	3.5856 g.	3.5951 g.	0.0096 g.
MLO	3.5856 g.	3.5948 g.	0.0092 g.
ELO	3.5856 g.	3.6435 g.	0.0579 g.
EMLO	3.5856 g.	3.6226 g.	0.0370 g.



ก.2.2 ข้อมูลจากการทดสอบสมบัติการดูดความชื้น

ตารางผนวก ก.2-2 ผลการทดสอบการดูดความชื้นของแผ่นเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบผิวด้วยน้ำมัน
ลินสีดหรืออนุพันธ์ของน้ำมันลินสีดที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 54 % เป็นเวลา 9 วัน

Times (days)	% Moisture absorption				
	TPS30	LO coated	MLO coated	ELO coated	EMLO coated
0	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
1	1.93 ± 0.04	1.98 ± 0.04	1.98 ± 0.02	1.91 ± 0.02	1.99 ± 0.09
2	3.19 ± 0.06	3.28 ± 0.10	3.30 ± 0.06	3.17 ± 0.04	3.32 ± 0.12
3	4.02 ± 0.07	4.13 ± 0.12	4.14 ± 0.08	3.98 ± 0.08	4.16 ± 0.16
4	4.86 ± 0.08	4.99 ± 0.14	4.97 ± 0.10	4.79 ± 0.12	5.00 ± 0.21
5	5.70 ± 0.10	5.84 ± 0.17	5.80 ± 0.12	5.60 ± 0.17	5.84 ± 0.27
6	6.72 ± 0.11	6.78 ± 0.16	6.78 ± 0.12	6.56 ± 0.16	6.79 ± 0.26
7	7.35 ± 0.12	7.35 ± 0.21	7.34 ± 0.11	7.10 ± 0.14	7.27 ± 0.12
8	7.85 ± 0.11	7.81 ± 0.17	7.81 ± 0.11	7.56 ± 0.14	7.73 ± 0.11
9	8.23 ± 0.08	8.15 ± 0.11	8.17 ± 0.07	7.91 ± 0.15	8.07 ± 0.07

*ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของค่า Average ± SD.

ก.2.3 ข้อมูลจากการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

ตารางผนวก ก.2-3 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบผิวด้วยสารต่าง ๆ ก่อนการดูดความชื้น

Coating agent	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break
None (TPS30)	178.73 ± 1.83	14.95 ± 0.43	12.13 ± 1.35
LO	183.79 ± 5.23	15.44 ± 0.23	10.70 ± 0.36
MLO	178.93 ± 1.59	12.34 ± 3.78	7.87 ± 2.80
ELO	179.34 ± 14.34	14.20 ± 2.66	9.47 ± 2.64
EMLO	188.83 ± 4.19	16.51 ± 1.46	10.33 ± 1.18

*ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของค่า Average ± SD.

ตารางผนวก ก.2-4 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบผิวด้วยสารต่าง ๆ หลังการดูดความชื้นที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 54 % เป็นเวลา 24 วัน

Coating agent	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break
None (TPS30)	7.52 ± 1.02	2.24 ± 0.22	113.51 ± 3.11
LO	7.92 ± 1.06	2.39 ± 0.14	109.11 ± 10.86
MLO	9.10 ± 0.51	2.48 ± 0.09	107.31 ± 17.77
ELO	9.08 ± 0.63	2.63 ± 0.14	108.02 ± 1.69
EMLO	8.91 ± 0.38	2.53 ± 0.09	107.36 ± 8.13

*ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของค่า Average ± SD.

ก.2.4 ข้อมูลจากการทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก

ตารางผนวก ก.2-5 ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทกของชิ้นงานแบ่งเทอร์โมพลาสติกที่เคลือบผิวด้วยสารต่าง ๆ ก่อนและหลังการดูดความชื้นที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 54 % เป็นเวลา 24 วัน

Coating agent	Impact strength (KJ/m ²)	
	Before moisture absorption	After moisture absorption
No (TPS30)	4.67 ± 0.11	20.16 ± 1.27
LO	3.68 ± 1.74	20.85 ± 0.94
MLO	4.83 ± 0.58	20.75 ± 1.35
ELO	4.98 ± 0.52	19.34 ± 0.68
EMLO	4.62 ± 1.13	18.51 ± 0.56

*ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของค่า Average ± SD.





ภาคผนวก ข.1 การหาน้ำหนักของสารที่ต้องเติมใส่ห้องผสมในเครื่องผสมภายใน (Internal mixer)

เพื่อควบคุมให้ปริมาณความหนาแน่นของสารภายในห้องผสมคงที่ จำเป็นจะต้องคำนวณหาน้ำหนักของสารที่จะทำการเติมใส่ห้องผสม โดยในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้สารที่เติมลงไปมีปริมาตรเป็น 75 % ของปริมาตรห้องผสม ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณสารต่าง ๆ ที่ต้องเติมได้เป็นขั้นตอนดังนี้

- 1 คำนวณความหนาแน่นโดยรวมของสารทั้งหมดที่จะเติม

$$\text{Density}_{\text{Total}} = (\text{Weight ratio}_S \times \text{Density}_S) + (\text{Weight ratio}_G \times \text{Density}_G)$$

$$\text{Starch (S)} : \text{Density } 1.4600 \text{ g/cm}^3 : 70 \text{ weight \%}$$

$$\text{Glycerol (G)} : \text{Density } 1.2570 \text{ g/cm}^3 : 30 \text{ weight \%}$$

$$\text{Density}_{\text{Total}} = (0.7 \times 1.4600) + (0.3 \times 1.2570) = 1.3991 \text{ g/cm}^3$$

- 2 คำนวณน้ำหนักของสารทั้งหมดที่จะเติมในเครื่อง

$$\text{Weight}_{\text{Total}} = \text{Volume}_{\text{Chamber}} \times \text{Ratio} \times \text{Density}_{\text{Total}}$$

$$\text{Chamber volume with Roller blades} : 50 \text{ cm}^3$$

$$\text{Weight}_{\text{Total}} = 50 \times 0.75 \times 1.3991 = 52.4663 \text{ g.}$$

- 3 คำนวณน้ำหนักของสารแต่ละชนิด

$$\text{Weight}_S = \text{Weight ratio}_S \times \text{Weight}_{\text{Total}}$$

$$\text{Weight}_{\text{Starch}} = 0.7 \times 52.4663 = 36.7264 \text{ g.}$$

$$\text{Weight}_{\text{Glycerol}} = 0.3 \times 52.4663 = 15.7399 \text{ g.}$$

- 4 กรณีเติมสารเติมแต่งจำเป็นต้องหาน้ำหนักของแป้งและกลีเซอรอลใหม่

$$\text{Volume}_{\text{Chamber}} \times \text{Ratio} = \frac{\text{Weight}_{(S+G)}}{\text{Density}_{\text{Total}(S,G)}} + \frac{\text{Weight ratio}_A \times \text{Weight}_{(S+G)}}{\text{Density}_A}$$

$$\text{เช่น เติม Linseed oil} : \text{Density } 0.9172 \text{ g/cm}^3 : 1 \text{ Weight \%}$$

$$50 \times 0.75 = \frac{\text{Weight}_{(S+G)}}{1.3991} + \frac{0.01 \times \text{Weight}_{(S+G)}}{0.9172}$$

$$\text{Weight}_{(S+G)} = 51.68 \text{ g.}$$

$$\text{Weight}_{\text{Starch}} = 0.7 \times 51.68 = 36.1760 \text{ g.}$$

$$\text{Weight}_{\text{Glycerol}} = 0.3 \times 51.68 = 15.5040 \text{ g.}$$

$$\text{Weight}_{\text{Linseed oil}} = 0.01 \times 51.68 = 0.5168 \text{ g.}$$

ภาคผนวก ข.2 การคำนวณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของหมู่เอพอกไซด์จากกราฟ NMR

ในการหา % โดยโมลของหมู่เอพอกไซด์ที่เปลี่ยนมาจากหมู่พันธะคู่สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\% \text{ Epoxide content} = \frac{A_{2.85-3.23}}{A_{5.29-5.41} + A_{2.85-3.23}} \times 100$$

โดยที่ $A_{2.85-3.23}$ คือ พื้นที่ใต้พีคใน $^1\text{H-NMR}$ spectra ซึ่งแสดงถึงหมู่เอพอกไซด์ ($-\text{CH}(\text{O})\text{CH}-$)

$A_{5.29-5.41}$ คือ พื้นที่ใต้พีคใน $^1\text{H-NMR}$ spectra ซึ่งแสดงถึงหมู่พันธะคู่ ($-\text{CH}=\text{CH}-$)

เช่น $^1\text{H-NMR}$ spectra ของน้ำมันลินสีดอีพอกไซด์ (ELO) ในภาพที่ 4.9 จะมี

$$A_{2.85-3.23} = 3.57 + 3.76 = 7.33$$

$$A_{5.29-5.41} = 0.70$$

$$\% \text{ Epoxide content} = \frac{7.33}{0.70 + 7.33} \times 100 = 91.28 \%$$

ภาคผนวก ข.3 การคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้น

ในการหาค่า % การดูดความชื้นสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\% \text{ การดูดความชื้น} = \left(\frac{\text{น้ำหนักชิ้นงานหลังดูดความชื้น} - \text{น้ำหนักชิ้นงานเริ่มต้น}}{\text{น้ำหนักชิ้นงานเริ่มต้น}} \right) \times 100$$

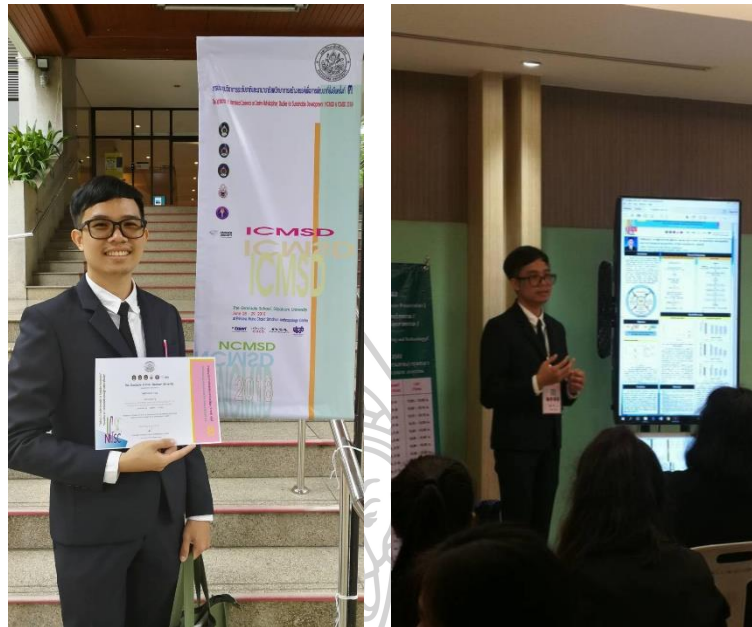
เช่น ชิ้นงานแป้งเทอร์โมพลาสติก เริ่มต้นน้ำหนัก = 3.6862 กรัม และเมื่อผ่านการดูดความชื้น

เป็นเวลา 9 วัน น้ำหนัก = 3.9863 กรัม

$$\% \text{ การดูดความชื้น} = \left(\frac{3.9863 - 3.6862}{3.6862} \right) \times 100 = 8.1412 \%$$



ภาคผนวก ค.1 การประชุมวิชาการ The 8th International Graduate Study Conference 2018



"Thailand 4.0 Creative Innovation for Sustainable Development"
"ประเทศไทย 4.0 นวัตกรรมสร้างสรรค์สู่การพัฒนาที่ยั่งยืน"

The Graduate School, Silpakorn University
presents this certificate to
Natchanon Yata
for participating
(The 8th National and International Graduate Study Conference (NGSC&IGSC 2018)
"Thailand 4.0 Creative Innovation for Sustainable Development"
presented by **poster** on title

Influence of linseed oil and its mono-glyceride on moisture absorption
and mechanical properties of thermoplastic starch

Given this on June 28, 2018

(Associate Professor Panjai Tantatsanawong, Ph.D.)
Dean of Graduate School, Silpakorn University

การนำเสนอวิทยานิพนธ์
(The 8th National and International Graduate Study Conference (NGSC&IGSC 2018))
อรุณี ศรีรัตน์

บันทึกงานประชุม (Proceeding)

Influence of linseed oil and its mono-glyceride on moisture absorption and mechanical properties of thermoplastic starch

Author: Natchanon Yata and Wanchai Lerdwijitjarud

Program: Polymer Science and Engineering **Institute:** Silpakom University

Abstract

Thermoplastic starch (TPS) is a bio-based and biodegradable polymer that can be adjusted for various properties. Therefore, thermoplastic starch has tendency to replace many petroleum-based polymers. However, one of the important weakness of thermoplastic starch is moisture sensitivity. This paper aims to study the effect of linseed oil (LO) and its mono-glyceride (MLO) with different concentrations on moisture absorption and tensile properties of thermoplastic starch. MLO was successfully synthesized by direct esterification reaction between glycerol and fatty acids of LO by using NaOH as a catalyst. FTIR technique was used to characterize the chemical structure of the prepared MLO. TPS sample was fabricated by melt mixing and compression molding processes. TPS incorporating with LO or MLO illustrated the lower moisture absorption than that of neat TPS. When compared with neat TPS, the addition of 7 wt% of LO and MLO into TPS can decrease the moisture adsorption value by approximately 12% and 9% respectively. However, the hydrophobicity of LO and MLO leads to decrease in tensile strength, tensile modulus, and elongation at break of oil-filled TPS. This phenomena may due to the influence of the different polarity between LO or MLO and starch molecule.

Key Words: Thermoplastic starch, Linseed oil, Mono-glyceride

Introduction

Polymers from nature are widely studied to replace the synthetic polymer materials produced from petroleum resources. Due to the current situation, almost every activity in daily life have to use plastic. This implies a greater demand for resources, but petroleum resources are unrenewable. Moreover, most of petroleum-based polymers are non-biodegradable polymer, which may create a problem about the waste and the environmental pollution. From these reasons, polymers from natural are becoming more interested, because they made from renewable resources and most of them are biodegradable.

Starch is a natural polymer that has a potential to be used as substitutes for petroleum-based polymers. It is cheap and biodegradable. Starch is usually prepared to be thermoplastic starch (TPS) by mixing with a common plasticizer. The mechanical properties of TPS can be adjusted by varying amount and type of plasticizer. However, one of the major weakness of TPS is a moisture sensitivity. The molecular structure of starch and the most widely used plasticizer, i.e. glycerol, contain the hydroxyl group, which can easily form hydrogen bonding with the molecules of water. Water molecules can also act as plasticizers leading to reduce the mechanical properties of TPS.

This research studies the effect of the addition of linseed oil (LO) and mono-glyceride of linseed oil (MLO) on moisture adsorption and mechanical properties of TPS. Triglyceride molecule contain both hydrophilic and hydrophobic

parts. The hydrophilic part can interact with starch molecule, whereas the hydrophobic part can prevent the penetration of water molecule into TPS. The fatty acids in LO consist mainly of unsaturated fatty acids such as oleic acid, linoleic acid and linolenic acid [Popa et al., 2012]. These double bonds in the fatty acids can also reacted with oxygen and forming to the film coating on the surface of TPS, which likely to affect moisture absorption and mechanical properties.

Objectives

- 1) To study the preparation of mono-glyceride of linseed oil
- 2) To study the effect of linseed oil and its mono-glyceride on moisture absorption of thermoplastic starch
- 3) To study the effect of linseed oil and its mono-glyceride on tensile properties of thermoplastic starch

Research Methodology

Materials

TPS was prepared by used the native cassava starch (Siam Quality Starch, Thailand) as a main component and glycerol (UNIVAR, Australia) as a plasticizer. Refined linseed oil (Winsor & Newton, UK) was used as additive. Analytical reagent grade of sodium hydroxide (UNIVAR, Australia) and hydrochloric acid (QReC, New Zealand) were used for preparation of fatty acid. Phosphoric acid (EMSURE, Germany), petroleum ether (QReC, New Zealand), sodium sulphate anhydrous (QReC, New Zealand) and sodium bicarbonate (UNIVAR, Australia) were used for the purification process of MLO.

Preparation of mono-glyceride

Preparation of fatty acid from linseed oil

The saponification reaction of linseed oil was done in three-necked round bottomed flask. to separate fatty acid soap and glycerol from. The reaction flask contained linseed oil was heated to 90 °C. Sodium hydroxide was then poured into the reaction flask. The amount of sodium hydroxide was based on the saponification number of linseed oil (0.1358 g of NaOH/g of Oil) [Certified Lye™, 2018]. The reaction was discontinued after 90 minutes and then the reaction mixture was poured into separation flask. The upper-layer soap was kept and subsequently washed by warm water for 2-3 times. Received soap was heated to 90 °C in the new three-necked round bottomed flask. Then the 1.0 M hydrochloric acid solution was poured into the reaction flask by a molar ratio of 1:1 with the soap. After 90 minutes, the reaction was discontinued. The fatty acid was received after washing with water in separation flask for removing excess HCl [Chadarat et al., 2009].

Preparation of mono-glyceride of linseed oil (MLO) by esterification of fatty acid and glycerol

Fatty acid from linseed oil and 0.1% sodium hydroxide catalyst were added to three-necked round bottomed flask. Then the flask was heated to 180 °C (controlled with thermostat) and stir with magnetic stirrer. Preheated glycerol was poured into the reaction flask by the molar ratio between fatty acid and glycerol was

1:3. The reaction was carried out under nitrogen atmosphere for 6 hours. For purification, NaOH catalyst was eliminated by using phosphoric acid. Subsequently, the solution was dissolved in petroleum ether and washed unreacted glycerol by 20% solution of sodium sulphate in water. The free fatty acid of LO was also removed by washing with small portions of sodium bicarbonate solution. The residue soap was eliminated by washing with sodium sulphate solution. Anhydrous sodium sulphate was used to remove water molecule from the solution. Finally, the purified MLO was obtained by evaporating petroleum ether under vacuum oven [Choudhury, 1962].

Preparation of TPS with and without additives

Cassava starch was dried at 80 °C under vacuum oven for 24 hours. Then starch was premixed with glycerol and additives (LO or MLO if required) at a weight proportion of 70/30/1-7 in polypropylene bottle and then stored in LDPE bag for not less than 12 hours. Afterwards, the premixed was added in the internal mixer (Brabender, Germany) with two counter-rotating roller blade at 140 °C and 100 rpm for 8 minutes. After mixing in the internal mixer, the sample was crushed by grinder. Crushed TPS was compressed to obtain specimens that followed to ASTM D638 standard type V for tensile testing by hot-plate hydraulic press (Labtech Engineering, Thailand) at 160 °C.

Characterizations

FTIR spectrometer (Bruker Vertex 70, Germany) was used to confirm the chemical structures of LO and MLO. The infrared spectra were collected with a resolution of 4 cm⁻¹ and averaging 32 scans in 4000-400 cm⁻¹ wave number range.

Specimens of each TPS formula that obtained by compression molding were placed in the controlled environment desiccator at 50 % relative humidity (RH) and measured the weight every 24 hours. Three data of moisture absorption in each TPS formula were averaged. Moisture absorption was determined by

$$\text{Moisture absorption} = \frac{w - w_0}{w_0} \times 100$$

where w_0 is the weight of sample before placed in desiccator.

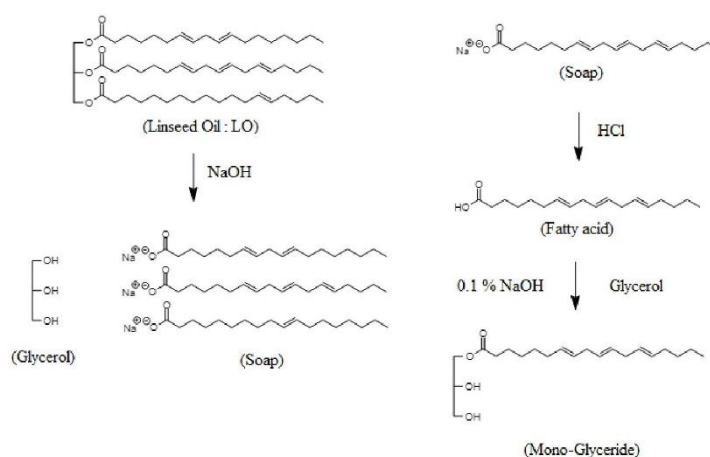
w is the weight of sample after placed in desiccator at times.

Tensile strength, tensile modulus, and elongation at break of TPS specimens were measured by universal testing machine (Instron 3300, USA) equipped with a load cell of 5 kN. The specimens were dried at 60 °C for 24 hours by hot air oven and after that stored in desiccator for not less than 40 hours before testing. The rate of elongation was 1 mm/min. The results were averaged over at least 10 specimens of each TPS formula.

Results/ Discussion

Characterization of linseed oil and mono-glyceride from LO

The chemical reactions for preparing MLO are represented in scheme 1. The FTIR spectra of LO and MLO are illustrated in Fig. 1. The spectrum of LO and MLO are almost identical in every wave number. The characteristic absorption band at 3009 cm^{-1} corresponding to the alkene (cis = C-H) stretching vibrations, at 2926 cm^{-1} and 2857 cm^{-1} corresponding to the asymmetric and symmetric stretches of methylene ($-\text{CH}_2$) group respectively. Highest absorption band at 1744 cm^{-1} was assigned to ester C=O stretching vibrations. The band at 1456 cm^{-1} and 1374 cm^{-1} corresponding to scissoring CH_2 and symmetric CH_3 deformation modes, respectively. The band at 1238 cm^{-1} and 1162 cm^{-1} corresponding to C-O stretching vibrations and C-O stretching bond. Finally the band at 720 cm^{-1} corresponding to -cis $\text{CH}=\text{CH}-$ [Lewinska et al., 2015]. The only difference is absorption band about 3500 cm^{-1} , which present to O-H group in the structure. FTIR spectra of MLO has a peak at wave number 3532 cm^{-1} but its none in LO that demonstrate success in synthesis mono-glyceride of linseed oil with direct esterification method. The free fatty acid is not presented in the synthesized MLO, since the absorbance peak at about 1710 cm^{-1} corresponding to carboxylic C=O stretching vibrations was not observed.



Scheme 1 Flow chart for preparation of mono-glyceride

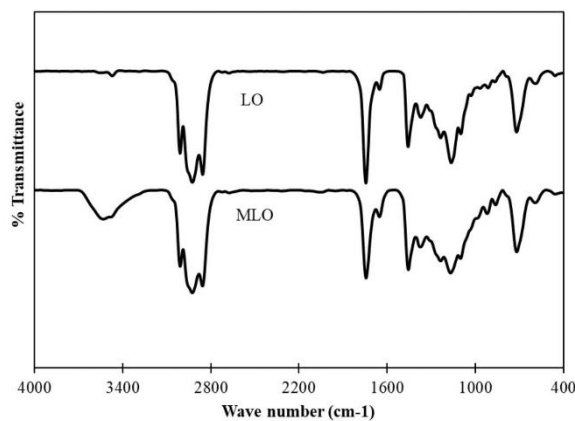


Fig. 1 FTIR spectra of LO and MLO

Moisture absorption

The moisture absorption of all studied TPS specimens increased with time and reached a relatively constant value around 15 days. Steady-state moisture absorption of TPS with and without additives are shown in Fig. 2. The moisture absorption of LO-added TPS is lower than that of neat TPS decreases and it monotonically decreases with LO concentration in the specimen. The same phenomenon also occurs with the addition of MLO. These results may be due to the hydrophobic hydrocarbon chain of LO and MLO increasing the hydrophobicity of TPS. The interaction between TPS and water is thus reduced. Similar results have been reported by Ghasemlou and coworkers [Ghasemlou et al., 2013], and Song and coworkers [Song et al., 2018].

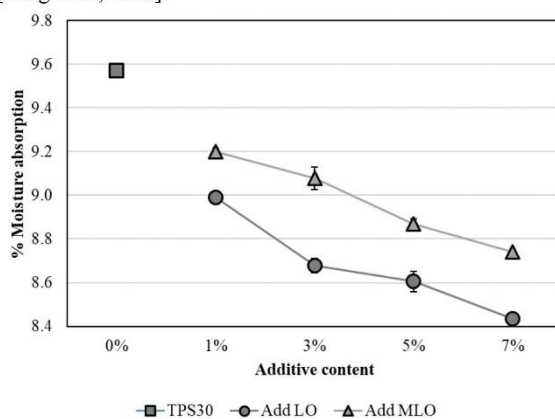


Fig. 2 Steady-state moisture absorption of TPS with and without additives

The moisture absorption of LO-added TPS is less than that of MLO-added TPS at all concentration. This probably due to MLO molecule has two hydroxyl groups and just one hydrophobic hydrocarbon chain, whereas LO molecule has three hydrophobic hydrocarbon chain and three ester groups. Therefore, the incorporation of LO, i.e. a higher hydrophobic molecule, into TPS shows less moisture sensitivity. When compared with neat TPS, the addition of 7 wt% of LO and MLO into TPS can decrease the moisture adsorption value by 11.9% and 8.7% respectively.

Mechanical properties

Tensile properties of TPS with and without additives are shown in Fig. 3. When LO is added into TPS, the tensile modulus, tensile strength, and elongation at break decrease with increasing LO content. This phenomenon probably due to the difference of a polarity between linseed oil and starch which make heterogeneous morphology. In addition, LO is in a form of liquid at room temperature which will be present in the form of low-viscosity droplets dispersed in TPS matrix [Song et al., 2018]. For that reason, the morphology of LO-added TPS is similar to a porous material containing a liquid in a hole, so resulting in a decrease of tensile strength, tensile modulus and elongation at break.

The same result is obtained in TPS with MLO addition. The structure of MLO molecule has two polar hydroxyl groups and one non-polar hydrocarbon chain, thus MLO will behave like a surfactant. Song and coworkers [Song et al., (2018)] also found that the tensile strength and elongation at break decreased by incorporation of Tween surfactant into corn and wheat starch film.

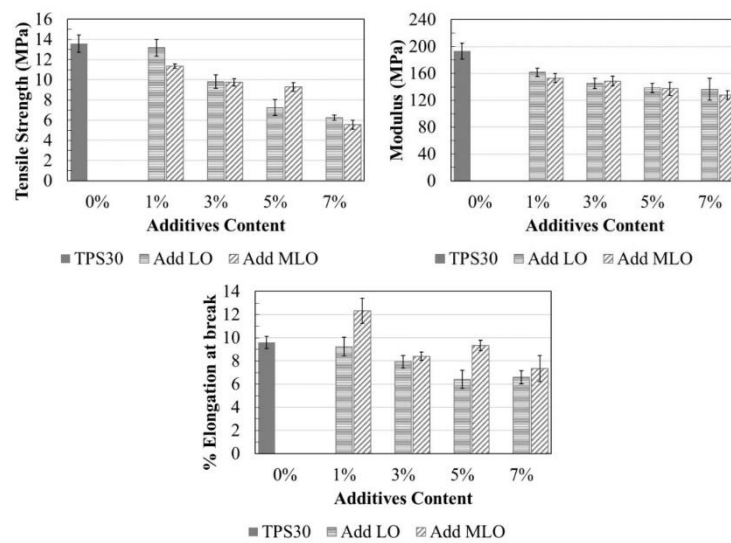


Fig. 3 Tensile properties of TPS with and without additives

Conclusion

The mono-glyceride of linseed oil could be prepared with direct esterification method by using 0.1% sodium hydroxide as a catalyst. The moisture absorption of TPS decreased when increasing amount of added LO or MLO due to the increment of the hydrophobicity of TPS. However, LO and MLO have a different polarity with starch molecule. The tensile modulus, tensile strength, and elongation at break of LO-added TPS and MLO-added TPS, therefore, are lower than those of neat TPS.

Recommendations

Although the incorporation of LO or MLO into TPS could reduce the moisture absorption, the mechanical properties of TPS with oil additive also decreased. This may due to the difference in polarity of starch molecule and LO or MLO molecule. In order to improve the compatibility between starch and LO or MLO, the polarity mismatch should be alleviated. For example, the epoxidation of LO can increase the polarity of LO. The polarity of this epoxidized vegetable oil will be closed to starch molecule, which may lead to the increment of the mechanical properties.

References

- Popa, Viorela-Mirela., Alexandra Gruia, Diana-Nicoleta Raba, Delia Dumbrava, Camelia Moldovan, Despina Bordean, and Constantin Mateescu. (2012). "Fatty acids composition and oil characteristics of linseed (*Linum Usitatissimum* L.) from Romania." **Journal of Agroalimentary Processes and Technologies** 18, 2: 136-140
- Certified Lye™. (2018). **Chart of Saponification Values for Making Soap**. Accessed April 25. Available from <http://www.certified-lye.com/lye-soap.html>
- Chadarat, Thitimon., Sutham Sukmanee, and Pakamas Chetpattananondh. (2009). "Preparation of Free Fatty Acid from Palm Oil Wastewater for Methyl Ester Production". **7th Conference on Engineering**, 103-107. Prince of Songkla University
- Choudhury, Rangreen Basu Roy. (1962). "The Preparation and Purification of Monoglycerides. II. Direct Esterification of Fatty Acids With Glycerol". **Journal of the American Oil Chemists' Society** 39: 345-347
- Lewinska, Anna., Jacek Zebrowski, Magdalena Duda, Anna Gorka, and Maciej Wnuk. (2015). "Fatty Acid Profile and Biological Activities of Linseed and Rapeseed Oils". **Molecules** 20: 22872–22880
- Ghasemlou, Mehran., Nahal Aliheidari, Ronak Fahmi, Saeedeh Shojaee-Aliabadi, Behnam Keshavarz, Marlene J. Cran, and Ramin Khaksar. (2013). "Physical, mechanical and barrier properties of corn starch films incorporated with plant essential oils." **Carbohydrate Polymers**.98: 1117– 1126
- Song, Xiaoyong., Guanjie Zuo, and Fusheng Chen. (2018) "Effect of essential oil and surfactant on the physical and antimicrobial properties of corn and wheat starch films." **International Journal of Biological Macromolecules** 107: 1302–1309

รายการอ้างอิง

- [1] กรมควบคุมมลพิษกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2559). แผนแม่บทการบริหารจัดการขยะมูลฝอยของประเทศ (พ.ศ. 2559 – 2564). กรุงเทพฯ แอคทีฟพรีนท
- [2] Jenna R. Jambeck, Roland Geyer, Chris Wilcox, Theodore R. Siegler, Miriam Perryman, Anthony Andrady, Ramani Narayan and Kara Lavender Law. (2015). "Plastic waste inputs from land into the ocean." **SCIENCE** 347, 6223: 768-771.
- [3] School Team. สถานะการณ์ปัญหาขยะในประเทศไทย. เข้าถึงเมื่อ 2 กุมภาพันธ์ 2562. เข้าถึงได้จาก <https://www.schoolofchangemakers.com/knowledge/11678>
- [4] Thai PBS. ชีวิตสัตว์ทะเลพิการ เหยื่อขยะพลาสติก. เข้าถึงเมื่อ 6 กุมภาพันธ์ 2562. เข้าถึงได้จาก <https://news.thaipbs.or.th/content/272607>
- [5] นัฐพร สุรพัฒน์. (2549). "อิทธิพลของ clay ที่มีต่อสมบัติทางกลและความว่องไวต่อความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช." สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [6] ปิยะวิทย์ สดสุขชาติ. (2552). "การปรับปรุงสมบัติการดูดความชื้นของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งโดยใช้อนุพันธ์ของโคโคซานและกรดไขมัน." สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [7] Eton Udeme Offiong, Sanni Lateef Ayodele. (2016). "Preparation and Characterization of Thermoplastic Starch from Sweet Potato." **International Journal of Scientific & Engineering Research** 7, 5: 438-443.
- [8] Popa Viorica-Mirela, Gruia Alexandra, Raba Diana-Nicoleta, Dumbrava Delia-Gabriela, Moldovan Camelia, Bordean Despina-Maria and Mateescu Constantin. (2012). "Fatty acids composition and oil characteristics of linseed (*Linum Usitatissimum* L.) from Romania." **Journal of Agroalimentary Processes and Technologies** 18, 2: 136-140.
- [9] ภูวนัฐ วศุทธิ์ชานนพันธ์. (2551). "อิทธิพลของการเติมยางธรรมชาติและยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปรที่มีต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง." สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [10] พงศ์พล เอกบุตร. (2552). "การใช้ Diglycerol, Pentaerythritol และอนุพันธ์ในการเป็นสาร Plasticizer ของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง." สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.

- [11] ดุษฎี อดุภาพ. เคมีและสมบัติของแป้ง. เข้าถึงเมื่อ 18 กรกฎาคม 2559. เข้าถึงได้จาก https://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chapter2_3.html
- [12] กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2543). เทคโนโลยีของแป้ง. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [13] วชิรวิทย์ เลิศบำรุงชัย. มันสำปะหลัง. เข้าถึงเมื่อ 19 มกราคม 2562. เข้าถึงได้จาก <http://www.nationtv.tv/main/content/378635617/>
- [14] รื่นรมย์ เลิศลัทธกรณ์. กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง. เข้าถึงเมื่อ 19 มกราคม 2562. เข้าถึงได้จาก <http://www.thailandtapiocastarch.net/technology-detail/4/3/>
- [15] Teixeira E. M., Da Róz A. L., Carvalho A. J. F. and Curvelo A. A. S. (2007). "The effect of glycerol/sugar/water and sugar/water mixtures on the plasticization of thermoplastic cassava starch." **Carbohydrate Polymers** 69, 4: 619-624.
- [16] Li Jing, Ye Fayin, Liu Jia and Zhao Guohua. (2015). "Effects of octenylsuccination on physical, mechanical and moisture-proof properties of stretchable sweet potato starch film." **Food Hydrocolloids** 46, 226-232.
- [17] น้ำมันลินสีด. เข้าถึงเมื่อ 19 มกราคม 2562. เข้าถึงได้จาก <https://ilfar.com/category/redmos/>
- [18] Belhassen Ramzi, Vilaseca Fabiola, Mutjé Pere and Boufi Sami. (2014). "Thermoplasticized starch modified by reactive blending with epoxidized soybean oil." **Industrial Crops and Products** 53, 261-267.
- [19] Alves Vanessa Dias, Mali Suzana, Belêia Adelaide and Grossmann Maria Victória E. (2007). "Effect of glycerol and amylose enrichment on cassava starch film properties." **Journal of Food Engineering** 78, 3: 941-946.
- [20] Liu Pengfei, Sun Shenglin, Hou Hanxue and Dong Haizhou. (2016). "Effects of fatty acids with different degree of unsaturation on properties of sweet potato starch-based films." **Food Hydrocolloids** 61, 351-357.
- [21] จิตติมน ชะดาร์ตัน, สุธรรม สุขมณี and ผกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์. การเตรียมกรดไขมันอิสระจากบ่อน้ำเสียโรงงานปาล์มเพื่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์. Accessed Available from <http://www.ie.psu.ac.th/index2/index.php/proceedings>
- [22] Certified Lye. **Chart of Saponification Values for Making Soap**. เข้าถึงเมื่อ 19 มกราคม 2562. เข้าถึงได้จาก <http://www.certified-lye.com/lye-soap.html>
- [23] R. Basu Roy Choudhury. (1962). "The Preparation and Purification of

Monoglycerides II. Direct Esterification of Fatty Acids With Glycerol." **Journal of the American Oil Chemists' Society** 39, 345-347.

[24] P. Saithai, J. Lecomte, E. Dubreucq and V. Tanrattanakul. (2013). "Effects of different epoxidation methods of soybean oil on the characteristics of acrylated epoxidized soybean oil-co-poly(methyl methacrylate) copolymer." **Express Polymer Letters** 7, 11: 910-924.

[25] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. เอกสารประกอบการสอน วิชา MTT656 Polymer Characterization and Analysis. คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

[26] G. López Téllez, E. Viguera-Santiago and S. Hernández-López. **Characterization of linseed oil epoxidized at different percentages**. Accessed Available from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94216148002>

[27] ชนวิทย์ โพธิ์ศรี. (2540). "นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโคปี." **MTEC** 6, 67-70.

[28] Nieva-Echevarria B., Goicoechea E., Manzanos M. J. and Guillen M. D. (2015). "Usefulness of (1)H NMR in assessing the extent of lipid digestion." **Food Chem** 179, 182-90.

[29] Bárbara Nieva-Echevarria, Encarnación Goicoechea, María J. Manzanos and María D. Guillén. (2014). "A method based on 1H NMR spectral data useful to evaluate the hydrolysis level in complex lipid mixtures." **Food Research International** 66, 379-387.

[30] มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ไขมันและน้ำมัน. เข้าถึงเมื่อ 28 มีนาคม 2562. เข้าถึงได้จาก <https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic8/fat.html>

[31] Massimo Lazzari, Oscar Chiantore. (1999). "Drying and oxidative degradation of linseed oil." **Polymer Degradation and Stability** 65, 303-313.

[32] Vit Stava, Milan Erben, David Vesely and Petr Kalenda. (2007). "Properties of metallocene complexes during the oxidative crosslinking of air drying coatings." **Journal of Physics and Chemistry of Solids** 68, 5-6: 799-802.

[33] Ghasemlou M., Aliheidari N., Fahmi R., Shojaee-Aliabadi S., Keshavarz B., Cran M. J. and Khaksar R. (2013). "Physical, mechanical and barrier properties of corn starch films incorporated with plant essential oils." **Carbohydr Polym** 98, 1: 1117-26.

[34] X. Song, G. Zuo and F. Chen. (2018). "Effect of essential oil and surfactant on the physical and antimicrobial properties of corn and wheat starch films." **Int J Biol**

Macromol 107, Pt A: 1302-1309.

[35] Maria Guadalupe Lomeli Ramirez, Graciela I. Bolzon de. Muniz, Kestur G. Satyanarayana, Valcineide Tanobe and Setsuo Iwakiri. (2010). "Preparation and characterization of biodegradable composites based on brazilian cassava starch, corn starch and green coconut fibers." **Revista Materia** 15, 330-337.

[36] Elisangela Corradini, Antonio Jose Felix de Carvalho, Antonio Aprigio da Silva Curvelo, Jose Augusto Marcondes Agnelli and Luiz Henrique Capparelli Mattoso. (2007). "Preparation and Characterization of Thermoplastic Starch/Zein Blends." **Materials Research** 10, 3: 227-231.

[37] ใบตาเฮ ไพโรจน์. (2555). "การปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งโดยใช้อนุพันธ์ของเอไมด์." สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัฐชนน ยะตา
วัน เดือน ปี เกิด	9 ตุลาคม 2535
สถานที่เกิด	พะเยา
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) ปีโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	111 หมู่ 3 ต.แม่ใส อ.เมือง จ.พะเยา
ผลงานตีพิมพ์	Natchanon Yata and Wanchai Lerdwijitjarud "Influence of linseed oil and its mono-glyceride on moisture absorption and mechanical properties of thermoplastic starch." Proceeding in the 8th National and International Graduate Study Conference, Bangkok, Thailand, June 28-29, 2018
รางวัลที่ได้รับ	ทุนการศึกษาและทุนนักศึกษาผู้ช่วยสอน จากภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ใน ปีพ.ศ. 2558-2560

