



การปรับปรุงความเหนียวและความทนแรงกระแทก
ของพอลิแลกติกแอซิดโดยการใช้น้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่าน
การตัดแปรและเส้นใยธรรมชาติ

Improvement of Toughness and Impact Resistance
of Polylactic acid by Using Modified Soybean Oil
and Natural Fibers

กัลทิมา เชาวชาญชัยกุล
วัลลภ หาญณรงค์ชัย

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ ๒๕๕๙
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงความเหนียวและความต้านทานแรงกระทำของพอลิแลกติกแอซิดด้วยการเติมน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการตัดแปรและเส้นใยปาล์ม รายละเอียดของงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ ส่วนแรกเป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมในการตัดแปรน้ำมันถั่วเหลืองด้วยกระบวนการโอโซนไลซิส ส่วนที่สองและส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาการผลของปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรและเส้นใยปาล์มที่มีต่อสมบัติของพอลิแลกติกแอซิด ตามลำดับ สำหรับการตัดแปรน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยาถูกปรับเปลี่ยนจาก 0 ถึง 3 ชั่วโมง และการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโมเลกุลของน้ำมันถั่วเหลืองถูกตรวจสอบโดยนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (NMR) และฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมมากที่สุดในการทำปฏิกิริยาโอโซนไลซิส คือ 2 ชั่วโมง โดยการพิจารณาจากการลดลงของพันธะคู่ระหว่างอะตอมของคาร์บอน และการเพิ่มขึ้นของหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร สำหรับผลของปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่มีต่อสมบัติทางกลถูกประเมินจากการทดสอบแรงดึงและแรงกระทำ ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ถูกใช้สำหรับการวิเคราะห์ทางความร้อนและทางสัณฐานวิทยา จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การยืดตัว ณ จุดขาด และความทนต่อแรงกระทำของพอลิแลกติกแอซิดที่ผ่านการตัดแปรด้วยน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรมีค่าเพิ่มขึ้น 89 และ 25 % เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแลกติกแอซิดที่ไม่ผ่านการตัดแปร ตามลำดับ น้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรทำหน้าที่เป็นสารพลาสติไซเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับพอลิแลกติกแอซิดโดยการพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการแตกหักจากแบบเปราะเป็นแบบเหนียว มีการกระจายตัวของหยดน้ำมันที่ดี และมีการลดลงของค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วด้วยการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร การเติมเส้นใยปาล์มช่วยปรับปรุงความทนต่อแรงกระทำให้กับพอลิแลกติกแอซิดที่ถูกตัดแปร ความแข็งแรงระหว่างเฟสที่แข็งแรงระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและเส้นใยปาล์มได้ชี้ว่าน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรทำหน้าที่เป็นทั้งสารคู่ควบสำหรับพอลิแลกติกแอซิดและเส้นใยธรรมชาติและเป็นพลาสติไซเซอร์สำหรับพอลิแลกติกแอซิด สำหรับการทดสอบเคลื่อนย้ายของสาร พบว่า ปริมาณของโลหะหนักที่ถูกปลดปล่อย และปริมาณของสารที่เคลื่อนย้ายออกจากชิ้นงานพอลิแลกติกแอซิด และวัสดุผสมพอลิแลกติกแอซิดที่ถูกตัดแปรและเส้นใยปาล์มอยู่ภายใต้เกณฑ์ที่กำหนดตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 295

คำสำคัญ: พอลิแลกติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลือง/เส้นใยธรรมชาติ/สมบัติทางกล/พลาสติไซเซอร์

Abstract

This research work was to study the improvement of toughness and impact resistance of polylactic acid (PLA) with modified soybean oil (MSBO) and palm fiber (PF). The detail of this work was divided into three parts. The first was to find the suitable condition for modification of soybean oil with ozonolysis. The second and last parts were to study the effects of MSBO and PF contents on the properties of PLA, respectively. For oil modification, the reaction times were varied from 0 to 3 hours and the chemical changes in molecules of soybean oil were investigated by Nuclear magnetic resonance (NMR) and Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopies. The result suggested that the most suitable condition for ozonolysis reaction was 2 hours considering the decrease in double bond between carbon atoms and the increase in hydroxyl group into molecular structure of MSBO. For the effect of MSBO content on mechanical properties, it was evaluated by tensile and impact testing. Differential scanning calorimeter (DSC) and scanning electron microscope (SEM) were used for thermal and morphology analyses. The result showed that elongation at break and impact strength of modified PLA by MSBO increased about 89 and 25 % compared to those of neat PLA, respectively. MSBO act as the efficient plasticizer for PLA considering the conversion of fracture behavior from brittle to ductile, good dispersions of MSBO droplets in PLA and the decrease of glass transition temperature (T_g) with addition of MSBO. The addition of PF improved the impact strength of modified PLA. Strong interfacial bonding between PLA and PF indicated MSBO being both coupling agent for PLA and natural fiber and plasticizer for PLA. For migration test, it was found that contents of released heavy metal and migrated chemical from specimens of PLA and PLA/PF composite were under the criteria according to Notification of the Ministry of Public Health (No. 295) B.E. 2548.

Keywords: Polylactic acid/Soybean oil/Natural fiber/Mechanical properties/Plasticizer

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ภายใต้ทุนงบประมาณรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ และอุปกรณ์การทดสอบ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.สุรพล บุญดวง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำหรับการให้ความช่วยเหลือทั้งทางด้านเทคนิคและอุปกรณ์การให้กำเนิดไอโซน

คณะวิจัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
บัญชีตาราง	ฉ
บัญชีรูป	ช
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 พอลิแลกติกแอซิด	5
2.2 พลาสติกไซเซอร์	9
2.3 การดัดแปรน้ำมันพืชด้วยกระบวนการโอโซนไลซิส	11
2.4 เส้นใยธรรมชาติ	11
2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	13
3. วิธีดำเนินการวิจัย	16
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	16
3.2 แผนการดำเนินงานวิจัย	17
3.3 วิธีการทดลอง	19
4. ผลการทดลองและอภิปรายผล	33
4.1 ผลการศึกษาการดัดแปรน้ำมันถั่วเหลืองด้วยกระบวนการโอโซนไลซิส	33
4.2 ผลการศึกษาหาปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติ PLA	42
4.3 ผลการศึกษาผลของปริมาณเส้นใยปาล์มที่มีผลต่อสมบัติของ PLA และการลดต้นทุน	47

	หน้า
5. สรุปและวิเคราะห์ผล	54
5.1 การศึกษาการตัดแปรน้ำมันถั่วเหลืองด้วยกระบวนการโอโซนไลซิส	54
5.2 การศึกษาหาปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติ PLA	54
5.3 การศึกษาผลของปริมาณเส้นใยปาล์มที่มีผลต่อสมบัติของ PLA และการลดต้นทุน	55
เอกสารอ้างอิง	56
ประวัตินักวิจัย	58



บัญชีตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แผนงานกิจกรรมที่เสนอในข้อเสนอโครงการ และผลการดำเนินงาน	2-3
2	ผลการทดสอบเนื้อพลาสติก และทดสอบการเคลื่อนย้ายของสารในเนื้อพลาสติกตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 295 พ.ศ. 2548	53



บัญชีรูป

รูปที่	หน้า
1	5
2	6
3	8
4	11
5	12
6	12
7	13
8	16
9	17
10	18
11	20
12	20
13	21
14	22
15	22
16	23
17	23
18	24
19	25
20	25
21	26
22	26
23	27

รูปที่	หน้า
24	28
25	28
26	29
27	29
28	30
29	31
30	33-35
31	36-38
32	39-41
33	42
34	43
35	44
36	45
37	46
38	47
39	48
40	49

รูปที่	หน้า
41 การยึดเกาะระหว่างระหว่าง PLA และผิวของเส้นใยพอลิเมอร์น้ำมัน	49
42 การกระจายตัวของเส้นใยพอลิเมอร์น้ำมันในวัสดุผสม PLA ที่มีปริมาณเส้นใยพอลิเมอร์น้ำมัน 7.5 %โดยน้ำหนัก	50
43 ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของ PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่ 10 % และมีการปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใยพอลิเมอร์	50
44 ผลของปริมาณเส้นใยพอลิเมอร์ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงกระทำของ PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่ 10 % โดยน้ำหนักของ PLA	51
45 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่ 10 % และมีการปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใยพอลิเมอร์	52



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันพลาสติกชีวภาพถือว่าเป็นกลุ่มพลาสติกที่มีความสำคัญเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานทางด้านบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากปริมาณขยะบรรจุภัณฑ์มีแนวโน้มเพิ่มปริมาณมากขึ้นในทุกๆ ปี [1] ประกอบกับบรรจุภัณฑ์ส่วนใหญ่มักทำมาจากพลาสติกซึ่งย่อยสลายได้ยาก จึงทำให้ต้องใช้งบประมาณจำนวนมากในการจัดการกับขยะดังกล่าว รวมถึงการสร้างปัญหาทางมลภาวะ และต้องใช้พื้นที่ในการฝังกลบ พอลิแลกติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) เป็นหนึ่งในพลาสติกชีวภาพที่ได้รับความสนใจมากขึ้น ในการนำมาผลิตเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์ทดแทนการใช้พลาสติกทางการค้า (commodity plastics) เนื่องจาก PLA เป็นทั้งพลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) และพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางธรรมชาติ (Biodegradable plastic) นอกจากนี้ PLA ยังเป็นพลาสติกชีวภาพที่มีความแข็งแรง และมีความคงรูปร่างสูง [2] และเป็นพลาสติกชีวภาพที่มีการผลิตขายในเชิงการค้าอย่างกว้างขวาง แต่อย่างไรก็ตาม PLA ยังคงมีข้อเสียในเรื่องของความเปราะ ความทนต่อแรงกระแทกต่ำ และราคาสูงกว่าพลาสติกทางการค้า ซึ่งข้อเสียดังกล่าวเป็นอุปสรรคที่สำคัญต่อการนำ PLA มาใช้ในการผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ จึงทำให้การนำ PLA มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ยังคงไม่ได้รับความนิยมเท่าที่ควร งานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา PLA จึงมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงสมบัติความเหนียว และความทนต่อแรงกระแทกของ PLA โดยการเติมสารพลาสติกไซเซอร์ [3-5] หรือการเติมอนุภาคของยาง [6-7] และการนำเส้นใยธรรมชาติ หรือสารเสริมแรงอื่นๆ มาใช้เพื่อลดต้นทุนและเสริมแรง [5-6, 8-9] สำหรับจุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้เป็นเช่นเดียวกับงานวิจัยอื่นๆ คือ ต้องการปรับปรุงสมบัติของ PLA และลดต้นทุนการผลิต แต่ในส่วนกรอบแนวคิดของงานวิจัยนี้มีความแตกต่างจากงานวิจัยอื่นๆ คือ ต้องการปรับปรุงความเหนียวของ PLA โดยการใช้สารพลาสติกไซเซอร์ที่ทำมาจากวัสดุธรรมชาติ และมีโครงสร้างทางเคมีที่สามารถเข้ากับ PLA ได้ และมีหมู่ฟังก์ชันที่เข้ากันได้กับเส้นใยธรรมชาติด้วย เพื่อทำหน้าที่เป็นทั้งพลาสติกไซเซอร์ และสารคู่ควบระหว่าง PLA และเส้นใยธรรมชาติ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกนำน้ำมันถั่วเหลืองซึ่งสามารถผลิตได้ในประเทศไทยมาทำการดัดแปรโครงสร้างทางเคมีด้วยกระบวนการโอโซนไลซิส (ozonolysis) ซึ่งจะให้น้ำมันถั่วเหลืองเกิดหมู่เอสเทอร์ (ester group) เพิ่มขึ้น และเกิดหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ขึ้น ซึ่งช่วยเสริมความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปร และทำหน้าที่เป็นสารคู่ควบระหว่าง PLA และเส้นใยธรรมชาติ ตามลำดับ สำหรับการลดต้นทุน งานวิจัยนี้เลือกใช้เส้นใยปาล์มน้ำมันมาทำการศึกษาทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มเนื้อ เนื่องจากเส้นใยปาล์มเป็นเศษวัสดุเหลือใช้ที่มีมากในประเทศไทย นอกจากนี้เส้นใยปาล์มยังเป็นเส้นใยที่มีความเหนียวสูง และภายในโครงสร้างเส้นใยปาล์มมีปริมาณรูพรุนสูง [10] ซึ่งอาจมีส่วนช่วยในการปรับปรุงแรงกระแทกของ PLA

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับปรุงความเหนียวและความทนแรงกระแทกของ PLA โดยการเลือกใช้น้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการตัดแปรโครงสร้างทางเคมีเพื่อทำหน้าที่เป็นทั้งพลาสติกไซเซออร์ และสารคู่ควบระหว่าง PLA และเส้นใยธรรมชาติ และเลือกใช้เส้นใยปาล์มเป็นสารเพิ่มเนื้อเพื่อลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงความทนแรงกระแทก โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณของน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการตัดแปร และปริมาณของเส้นใยปาล์ม และทำการประเมินผลด้วยการทดสอบสมบัติทางกล ทางความร้อน การแพร่ของสารจากภาชนะ และสัณฐานวิทยาของ PLA พร้อมทั้งทำการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเพื่อเป็นประโยชน์ต่อไปในเชิงพาณิชย์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อปรับปรุงความเหนียว ความทนแรงกระแทก และลดต้นทุนการผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากพอลิแลกติกแอซิด
- 1.2.2 เพื่อเสริมสร้างศักยภาพ และความยั่งยืนให้กับอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพปลายน้ำ
- 1.2.3 เพื่อหาสูตรส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิด น้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร และเส้นใยปาล์มที่สามารถนำไปผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์

ตารางที่ 1 แผนงานกิจกรรมที่เสนอในข้อเสนอโครงการ และผลการดำเนินงาน

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน	คิดเป็น
1. จัดเตรียมวัตถุดิบ และสารเคมี	<ul style="list-style-type: none"> ได้วัตถุดิบ และสารเคมีที่ต้องใช้ในการวิจัย พร้อมดำเนินการวิจัย 	<ul style="list-style-type: none"> ได้วัตถุดิบ และสารเคมีที่ต้องใช้ในการวิจัย พร้อมดำเนินการวิจัย 	100%
2. ทำการจัดสร้างแม่พิมพ์	<ul style="list-style-type: none"> ได้แม่พิมพ์สำหรับใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน 	<ul style="list-style-type: none"> เนื่องจากหน่วยงานที่ไปดำเนินการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ มีแม่พิมพ์ขนาดตามที่ต้องการ จึงไม่ได้ดำเนินการงานในส่วนนี้ 	100%
3. ทำการศึกษาการตัดแปรน้ำมันถั่วเหลือง	<ul style="list-style-type: none"> ได้น้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปขึ้นรูปชิ้นงาน PLA มากที่สุด 	<ul style="list-style-type: none"> ได้สถานะในการเตรียมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปขึ้นรูปชิ้นงาน PLA มากที่สุด 	100%

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน	คิดเป็น
4. การศึกษาหาปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติของ PLA	<ul style="list-style-type: none"> ได้สูตร PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรสูตรที่ดีที่สุด ที่ทำให้ความเหนียวของ PLA สูงขึ้น 	<ul style="list-style-type: none"> ได้สูตร PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรสูตรที่ดีที่สุด ที่ทำให้ความเหนียวของ PLA สูงขึ้น 	100%
5. ทำการศึกษาผลของปริมาณเส้นใยปาล์มที่มีผลต่อสมบัติของ PLA	<ul style="list-style-type: none"> ได้สูตร PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร และเส้นใยปาล์มสูตรที่ดีที่สุด ที่ทำให้ PLA มีความเหนียวและความทนแรงกระแทกที่สูงขึ้น 	<ul style="list-style-type: none"> ได้สูตร PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร และเส้นใยปาล์มสูตรที่ดีที่สุด ที่ทำให้ PLA มีความเหนียวและความทนแรงกระแทกที่สูงขึ้น 	100%
6. ทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง	<ul style="list-style-type: none"> ได้ผลการวิเคราะห์ผลของการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร และเส้นใยปาล์มที่มีต่อการปรับปรุงสมบัติของ PLA 	<ul style="list-style-type: none"> ได้ผลการวิเคราะห์ผลของการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร และเส้นใยปาล์มที่มีต่อการปรับปรุงสมบัติของ PLA 	100%
7. สรุปผลและรายงานผลการดำเนินงาน	<ul style="list-style-type: none"> สรุปผลการทดลอง และจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์ 	<ul style="list-style-type: none"> ได้ข้อสรุปผลการทดลอง และรายงานฉบับสมบูรณ์ 	100%

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 วัตถุประสงค์หลักที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย พอลิแลกติกแอซิด, น้ำมันถั่วเหลือง, เส้นใยปาล์ม

1.3.2 วิธีการตัดแปรน้ำมันถั่วเหลือง คือ การตัดแปรด้วยกระบวนการไอโซโนไลซิส

1.3.3 เครื่องมือที่ใช้การผสมและขึ้นรูปชิ้นงาน คือ เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ และเครื่องอัดด้วยความดัน

1.3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ ปริมาณของน้ำมันถั่วเหลืองที่ตัดแปร และปริมาณเส้นใยปาล์ม

1.3.5 สมบัติที่ทำการทดสอบ มีดังนี้

- สมบัติทางกล ตามมาตรฐาน ASTM
- สมบัติทางความร้อน

- สันฐานวิทยา
- การแพร่ของสารจากภาษาณะ

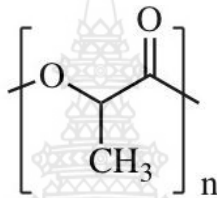
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี – การพัฒนาแนวทางการปรับปรุงสมบัติทางกลของบรรจุภัณฑ์จากพอลิแลกติกแอซิดโดยการใช้วัสดุธรรมชาติ ควบคู่ไปกับการเสริมสร้างความรู้ให้กับนักวิจัยไทยในการพัฒนาศักยภาพของพอลิแลกติกแอซิดในประเทศให้สามารถนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์
- 1.4.2 ด้านสิ่งแวดล้อม – การปรับปรุงสมบัติและลดต้นทุนของพอลิแลกติกแอซิดโดยการใช้วัสดุจากธรรมชาติส่งเสริมให้เกิดการใช้พอลิแลกติกแอซิดเป็นบรรจุภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์จึงมีส่วนช่วยลดปริมาณขยะ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
- 1.4.3 ด้านอุตสาหกรรมและพาณิชย์ – การนำองค์ความรู้จากงานวิจัยมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพปลายน้ำ
- 1.4.4 ด้านวิชาการ – ภายหลังจากเสร็จสิ้นโครงการวิจัย จะนำผลงานวิจัยไปเผยแพร่ในรูปแบบของการตีพิมพ์บทความในวารสารวิชาการ และ/หรือการประชุมวิชาการ
- 1.4.5 หน่วยงานที่นำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ – กลุ่มอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพปลายน้ำ และ/หรือกลุ่มอุตสาหกรรมผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติก

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิแลคติกแอซิด

พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีการทางชีวภาพ หรือด้วยวิธีการฝังดิน โดยจัดอยู่ในตระกูลของพอลิเอสเทอร์แบบสายโซ่ตรง (Aliphatic polyester) การสังเคราะห์ PLA โดยปกติถูกสังเคราะห์มาจากกรดแอลฟาไฮดรอกซี (α -hydroxy acids) ซึ่งประกอบด้วย กรดพอลิไกลโคลิค (Polyglycolic acid) หรือ กรดพอลิแมนดีลิก (Polymandelic acid) [11] สูตรโครงสร้างทางเคมีของ PLA เป็นดังรูปที่ 1



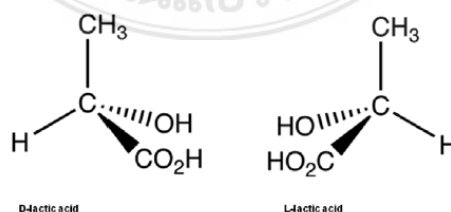
รูปที่ 1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ PLA [11]

PLA เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-crystalline polymer) ที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วอยู่ในช่วง 55-59 องศาเซลเซียส และมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 174-184 องศาเซลเซียส PLA มีค่าความแข็งแรงทางกลและค่ามอดุลัสสูง และมีความสามารถในการขึ้นรูปได้ดี [2] PLA สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่เกิดขึ้นได้ใหม่ตามธรรมชาติ (renewable resource) เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย เป็นต้น โดย PLA สามารถนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ และทางด้านการแพทย์ PLA สามารถถูกขึ้นรูปได้ง่ายด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบพลาสติกทั่วไปโดยสามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานตามแบบแม่พิมพ์ ฟิล์ม หรือเส้นใย PLA เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ไม่กี่ชนิดที่มีโครงสร้างสเตอริโอเคมีคัลที่สามารถถูกตัดแปรได้ง่ายโดยการพอลิเมอไรเซชันของอัตราส่วนผสมระหว่างแอล และ ดี-ไอโซเมอร์ (L และ D-isomers) ที่ถูกควบคุมให้กลายเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง PLA สามารถย่อยสลายได้โดยการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพันธะเอสเทอร์ และไม่จำเป็นต้องมีเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการสลายตัวของ PLA ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของชิ้นงาน อัตราส่วนของไอโซเมอร์ และอุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส PLA สามารถเกิดการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิมากกว่า 200 องศาเซลเซียส โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ปฏิกิริยาการสร้างแลคไทด์ (Lactide) การขาดของสายโซ่ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) และการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริเคชัน (Esterification reaction) ระหว่างสายโซ่ และภายในสายโซ่เดียวกัน การเสื่อมสภาพของ PLA ขึ้นอยู่กับ เวลา อุณหภูมิ สารปนเปื้อน และความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับ

อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป PLA อยู่ที่ช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 185-190 องศาเซลเซียส ณ ช่วงอุณหภูมิดังกล่าว PLA จะเกิดปฏิกิริยาการเปิดออกของซิป (unzipping) และการขาดของสายโซ่ (Chain scission) นำไปสู่การสูญเสียน้ำหนักโมเลกุลซึ่งเป็นการเสื่อมสภาพทางความร้อนของ PLA ดังนั้น PLA จึงมีช่วงอุณหภูมิการขึ้นรูปที่แคบ วิธีการปรับปรุงความสามารถในการขึ้นรูปของ PLA ที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ การปรับลดจุดหลอมเหลวให้ลดลงโดยการทำให้เกิดแลคไต์ดีอีนแนนซีโอเมอร์ (Lactide enantiomers) จำนวนเล็กน้อยภายในโครงสร้างโดยมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม การลดลงของจุดหลอมเหลวเกิดขึ้นพร้อมกับการลดลงของปริมาณผลึก และอัตราการเกิดผลึก [11] PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีสมบัติที่คล้ายคลึงกับพอลิไตรีน คือ เป็นเทอร์โมพลาสติกที่ใสไม่มีสี มีความมันเงา และคงรูปร่าง PLA มีอายุการใช้งานที่เหมาะสมกับการนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบใช้ครั้งเดียว และเมื่อถูกกำจัดทิ้งอย่างเหมาะสมจะเกิดการไฮโดรไลซิสไปเป็นสารธรรมชาติที่ไม่อันตราย PLA สามารถเกิดผลึกได้ในสภาวะที่ทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างช้าๆ หรือทำการบ่ม ณ ที่อุณหภูมิสูงกว่า T_g หรือการทำให้เกิดผลึกโดยการดัดยัด [11]

การสังเคราะห์ PLA

PLA ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาจากกรดแลคติก (Lactic acid) หรือกรดอัลฟาไฮดรอกซี กรดแลคติกสามารถถูกผลิตขึ้นจากการหมักสารคาร์โบไฮเดรต หรือการสังเคราะห์ทางเคมี ปัจจุบันวิธีการหมักได้รับความนิยมมากกว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี การหมักจะทำการเปลี่ยนจากน้ำตาลหรือแป้งให้กลายเป็นกรดแลคติกโดยใช้แบคทีเรีย [12-13] กรดแลคติกมีชื่อทางเคมี คือ 2-ไฮดรอกซีโพรพionate (2-Hydroxy propionic acid) เป็นโครงสร้างรูปแบบหนึ่งของกรดอัลฟาไฮดรอกซี กรดแลคติกมีไอโซเมอร์ 2 รูปแบบ คือ แบบดี และแบบแอล ดังรูปที่ 2 โดยทั้งแบบดี และแอลไอแนนซีโอเมอร์ (enantiomers) มีความว่องไวต่อแสงแตกต่างกัน กล่าวคือ มีสูตรเคมีที่เหมือนกันแต่มีการจัดเรียงตัวในสามมิติแตกต่างกันและบิตระนาบแสงโพลาไรซ์ในทิศทางที่แตกต่างกัน ในธรรมชาติส่วนใหญ่พบในรูปแบบแอล-ไอโซเมอร์ หรือพบในรูปแบบของผสมระหว่างแอล- และดี-ไอโซเมอร์ เรียกว่า ของผสมราซิมิก (Racemic mixture, อัตราส่วน = 1:1 เขียนแทนด้วย DL) หรือสารประกอบมีโซ (meso-compound) ซึ่งไม่มีสมบัติบิตระนาบแสงโพลาไรซ์ PLA ที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสงที่ดี ถูกผลิตได้จากการหมักสารคาร์โบไฮเดรตให้กลายเป็นกรดแลคติกโดยการหมัก [14]



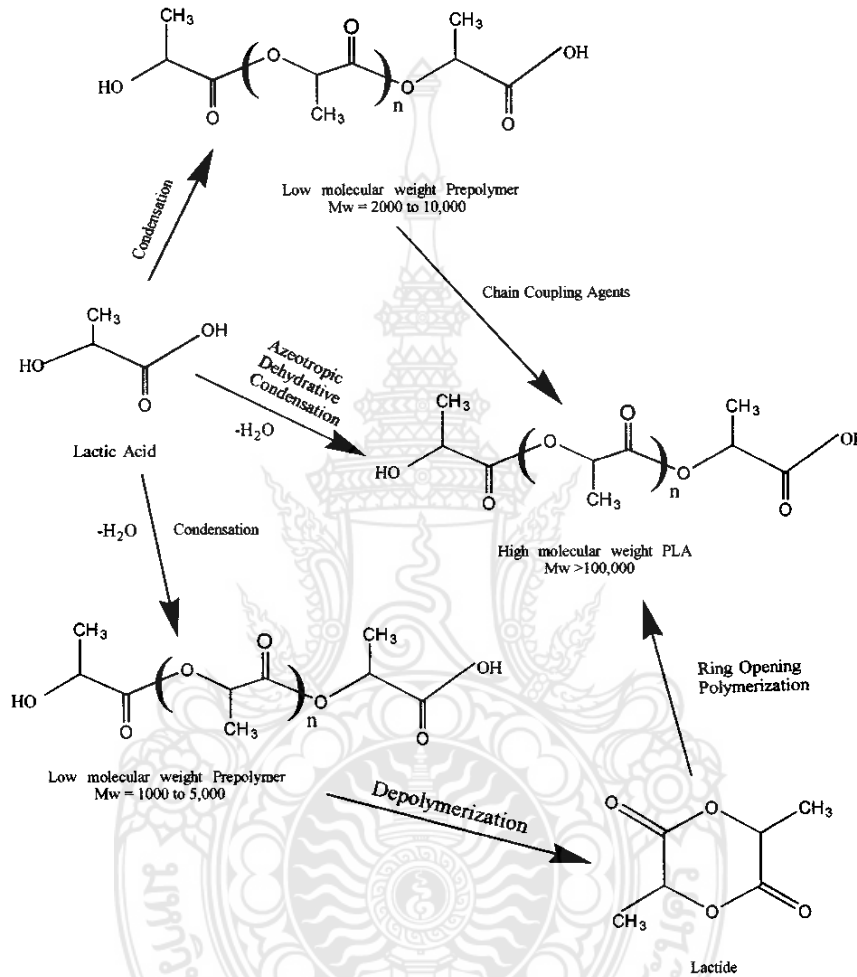
รูปที่ 2 โครงสร้างของกรดแลคติก รูปแบบดี- และแอล-ไอโซเมอร์ [14]

การสังเคราะห์กรดแลกติกให้กลายเป็นพอลิแลกติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงสามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน 2 วิธีที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3 วิธีที่หนึ่ง คือ การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นโดยตรง กรดแลกติกจะถูกสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาการควบแน่นจนกระทั่งได้เป็นพอลิเมอร์สมบัติคล้ายแก้วที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งมีเสถียรภาพต่ำไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ดังนั้นการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำทำได้โดยการใช้สารคู่ควบ (coupling agent) สาเหตุที่ทำให้พอลิเมอร์ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเนื่องมาจากการมีอยู่ของน้ำ สารปนเปื้อน และการมีหมู่ที่มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาต่ำ ส่วนวิธีที่สองสำหรับการสังเคราะห์ PLA คือ การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเกิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และทำให้เกิดเป็นแลกไทด์ที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น จากนั้นทำให้แลกไทด์เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบการเปิดวง (Ring opening polymerization) เกิดเป็น PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูง ($M_w > 100,000$) วิธีสร้างแลกไทด์เป็นวิธีการเดียวเท่านั้นที่ทำให้ได้ PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและความบริสุทธิ์สูงจนกระทั่งบริษัท Mitsui Toatsu Chemical ได้คิดค้นกระบวนการสังเคราะห์ PLA ในทางการค้า โดยการใช้กรดแลกติกและตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านกระบวนการควบแน่น และการกำจัดน้ำออก (dehydration) ภายใต้สภาวะลดความดันจนกระทั่งได้ PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยมากกว่า 300,000 [11] เนื่องจากกรดแลกติกมี 2 ไอโซเมอร์สายโซ่หลักของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ส่วนใหญ่อาจประกอบขึ้นจากโมโนเมอร์ชนิดแอล-ไอโซเมอร์เกือบทั้งหมด (พอลิแอล-แลกติกแอซิด (PLLA)) หรือประกอบขึ้นจาก โมโนเมอร์ที่เป็นของผสมราซิมิก (พอลิดี-แอล-แลกติกแอซิด (PDLLA)) ในปัจจุบันการผลิตดี-ไอโซเมอร์ของกรดแลกติกที่บริสุทธิ์นั้นทำได้ยาก ดังนั้นการผลิต PLA ที่มีสายโซ่หลักประกอบไปด้วยโมโนเมอร์ชนิด ดี หรือพอลิดี-แลกติกแอซิด (PDLA) ในเชิงพาณิชย์จึงยังไม่เกิดขึ้น พอลิแลกติกแอซิดมีโครงสร้างผลึก 3 รูปแบบ ได้แก่ แอลฟา (α) เบตา (β) และแกมมา (γ) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอีแนนซีโอเมอร์แอล หรือดี,แอล โครงสร้างแบบแอลฟาเป็นโครงสร้างที่เสถียรที่สุด สามารถหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 185 องศาเซลเซียส ในขณะที่โครงสร้างเบต้าหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส [14]

สมบัติของ PLA [14]

ความบริสุทธิ์เชิงแสง (Optical purity) ของ PLA มีผลอย่างมากต่อสมบัติทางกล ทางความร้อน และสมบัติความต้านทานการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว (Barrier properties) PLA ที่มีสัดส่วนของแอล-ไอโซเมอร์สูงกว่าร้อยละ 90 มีแนวโน้มเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก ในขณะที่พอลิเมอร์ที่มีดี-ไอโซเมอร์ในองค์ประกอบเพิ่มขึ้น มีความบริสุทธิ์เชิงแสงต่ำลง และมีแนวโน้มเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous polymer) นอกจากนี้ อุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และระดับความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนของแอล-ไอโซเมอร์ที่ลดลงด้วย สัดส่วนของไอโซเมอร์ที่ต่างกันในสาย

โซ่พอลิเมอร์ทำให้ PLA ที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นมีสมบัติได้หลากหลาย ดังนั้นในการสังเคราะห์จึงสามารถปรับโครงสร้างของ PLA ให้สามารถรองรับความต้องการของการนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ PLA กับพอลิเมอร์ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่น พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) และ พอลิสไตรีน (PS) พบว่า มีความใส และมีสมบัติทางกายภาพ ทางกล และความต้านทานการซึมผ่านของก๊าซใกล้เคียงกัน



รูปที่ 3 กระบวนการสังเคราะห์ PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง [11]

➤ สมบัติด้านการละลาย

ความสามารถในการละลายของ PLA ขึ้นอยู่กับ สัดส่วนของไอโซเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบในสายโซ่พอลิเมอร์ และระดับความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) PLA ไม่ละลายในน้ำ แอลกอฮอล์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีหมู่แทนที่ เช่น เฮกเซน (Hexane) และเฮปเทน (Heptane) ตัวทำละลายที่ดีสำหรับ PLA กรณี PLA ที่มีความบริสุทธิ์ทางแสงสูง (Poly(L-lactic acid), PLLA) สามารถละลายได้ดี

ในตัวทำละลายอินทรีย์กลุ่มคลอริเนตและฟลูออริเนต (Chlorinated or fluorinated organic solvents) ไดออกเซน (Dioxane) ไดออกโซเลน (Dioxolane) และฟูเรน (Furane) ส่วนราซิมีคพอลิแลคติกแอซิด (Poly(rac-lactic acid)) นอกจากจะละลายได้ดีในกลุ่มตัวทำละลายข้างต้นแล้วยังสามารถละลายได้ดีในอะซิโตน (Acetone) ไพริดีน (Pyridine) เอทิลแลกเตต (Ethyl lactate) เอทิลอะซิเตต (Ethyl acetate) เตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran) ไซลีน (Xylene) ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethylsulfoxide) เอ็น,เอ็น-ไดเมทิลฟอร์มามิด (N,N- dimethylformamide) และเมทิลเอทิลคีโตน (Methyl ethyl ketone)

➤ สมบัติทางกายภาพและทางกล

PLA มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.25 PLA ที่ไม่ผ่านการดึงยืดมีความเปราะมากแต่มีความคงรูปและความแข็งแรงสูง เมื่อนำ PLA ไปผ่านการดึงยืดจะมีสมบัติใกล้เคียงกับ PET แต่ดีกว่า PS ที่ผ่านการดึงยืด มอดูลัสความต้านทานแรงดึงและแรงดัด (Tensile and flexural moduli) ของ PLA มีค่าสูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิโพรพิลีน (PP) และ PS แต่ความทนต่อแรงกระแทก (Izod impact strength) และการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) มีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ

➤ สมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว

ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และไนโตรเจนผ่านได้ของ PLA มีค่าน้อยกว่า PS แต่สูงกว่า PET ส่วนการยอมให้น้ำซึมผ่านมีค่าใกล้เคียงกันกับ PS และ PET นอกจากนี้ PLA ยังมีสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของกลิ่นได้ดี โดยพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของสารประกอบอินทรีย์ เช่น เอทิลอะซิเตต และ ดี-ไลโมนีน (D-limonene) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับ PET

2.2 พลาสติไซเซอร์ [15]

พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอินทรีย์ชนิดเฉื่อย (inert organic compounds) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จุดเดือดสูง และความดันไอต่ำ พลาสติไซเซอร์ถูกใช้เป็นสารเติมแต่งในพลาสติก เพื่อทำหน้าที่ปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ โดยการเพิ่มความสามารถในการยืดหยุ่น ลดความต้านทานแรงดึง และทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลง พลาสติไซเซอร์ที่ดีต้องสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ ความสามารถในการเข้ากันได้ของพลาสติไซเซอร์และพอลิเมอร์ ขึ้นอยู่กับ สภาพขั้ว ความสามารถในการละลาย รูปร่างของโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของพลาสติไซเซอร์ และความคล้ายคลึงกันของโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์และพลาสติไซเซอร์ ส่วนอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการคงทนของพลาสติไซเซอร์ คือความต้านทานการแพร่ผ่านของพลาสติไซเซอร์มาที่ผิวชิ้นงาน ดังนั้นพลาสติไซเซอร์ที่ดีควรจะต้องมีจุดเดือดสูงและความดันไอต่ำเพื่อป้องกันการสูญเสียพลาสติไซเซอร์ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป อัตราการแพร่ผ่านของพลาสติไซเซอร์มาที่ผิวชิ้นงานต่ำมีส่วนช่วยในการรักษาสมบัติที่เกิดขึ้นจากการเติมพลาสติไซเซอร์ และหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนของพลาสติไซเซอร์กับสิ่งที่ชิ้นงานที่มีการเติม

พลาสติกไฮเซอรไปสัมผัสเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบทางสุขภาพและสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ความคงทนของพลาสติกไฮเซอร ขึ้นอยู่กับ ขนาดโมเลกุลของพลาสติกไฮเซอร โมเลกุลของพลาสติกไฮเซอรยังมีขนาดใหญ่ยิ่งทำให้พลาสติกไฮเซอรมีความคงทนอยู่ในชิ้นงานสูง พลาสติกไฮเซอรมีอิทธิพลต่อกระบวนการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ คือ การเปลี่ยนแปลงความหนืด อัตราการกระจายตัวของสารเพิ่มเนื้อ ลักษณะของการไหล ปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในการขึ้นรูป และการเกิดความร้อน พลาสติกไฮเซอรที่ดีต้องมีความว่องไวต่อรังสียูวีต่ำ มีเสถียรภาพในช่วงอุณหภูมิกว้าง และมีราคาไม่แพง ประสิทธิภาพของพลาสติกไฮเซอรสามารถถูกอธิบายได้จากปริมาณของพลาสติกไฮเซอรที่เติมเพื่อทำให้ได้สมบัติทางกลที่ต้องการ

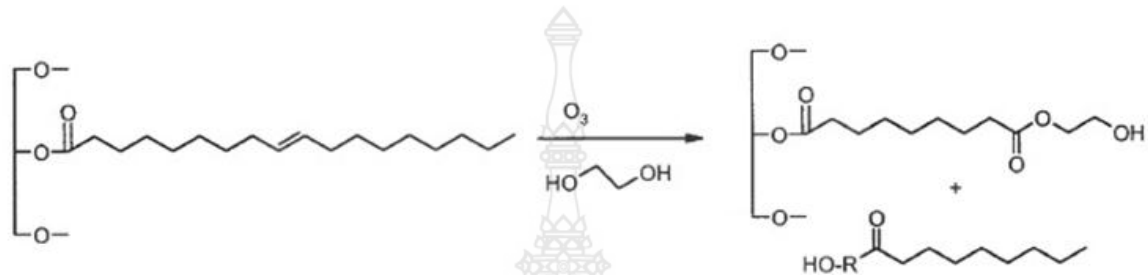
กลไกการทำงานของพลาสติกไฮเซอร [15]

กลไกการทำงานของพลาสติกไฮเซอร สามารถถูกอธิบายด้วยทฤษฎีที่หลากหลาย ดังนี้

1. ทฤษฎีการทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricity theory) ถูกเสนอโดย Kilpatrick และคณะ ซึ่งได้อธิบายว่าพลาสติกไฮเซอรทำหน้าที่ลดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์มีผลทำให้ความแข็งแรงแรง (rigidity) ของพอลิเมอร์ลดลง ขณะที่ให้ความร้อนโมเลกุลของพลาสติกไฮเซอรจะแทรกตัวอยู่ที่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งมีผลทำให้แรงดึงดูดระหว่างสายโซ่ลดลง พอลิเมอร์จึงมีความอ่อนตัวและยืดหยุ่นมากขึ้น
2. ทฤษฎีเจล (Gel theory) ถูกพัฒนาขึ้นโดย Aiken และคณะ พลาสติกไฮเซอรจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์อยู่ห่างกันมากขึ้นและขัดขวางแรงกระทำระหว่างกันของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์มากขึ้น ดังนั้นจึงลดความแข็งแรงแรงของโครงสร้างเจลของพอลิเมอร์ลง ทำให้โครงสร้างเจลของพอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นมากยิ่งขึ้น
3. ทฤษฎีช่องว่างอิสระ (Free volume theory) ได้ถือว่าการมีอยู่ของพลาสติกไฮเซอรมีส่วนช่วยทำให้ช่องว่างอิสระเพิ่มขึ้นและอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของพอลิเมอร์มีค่าลดลง ช่องว่างอิสระคือการวัดช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์ เมื่อช่องว่างอิสระเพิ่มขึ้นมีผลทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์เกิดได้ง่ายขึ้น ดังนั้นบางส่วนของสายโซ่พอลิเมอร์จึงสามารถเกิดการเคลื่อนที่ได้ และเกิดการหมุนตัวภายในสายโซ่ได้ง่ายขึ้น ทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดต่ำลง
4. ทฤษฎีกลไกทางกล (Mechanistic theory) ทฤษฎีนี้ได้อธิบายไว้ว่าพลาสติกไฮเซอรไม่สามารถอยู่กับพอลิเมอร์ได้อย่างถาวร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของพลาสติกไฮเซอร ณ ปริมาณพลาสติกไฮเซอรน้อยๆ แรงกระทำระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติกไฮเซอรมีมากกว่าแรงกระทำระหว่างพอลิเมอร์ และแรงกระทำระหว่างพลาสติกไฮเซอรด้วยกันเอง ส่วนกรณีปริมาณพลาสติกไฮเซอรปริมาณมาก แรงกระทำระหว่าง พลาสติกไฮเซอรมีค่าโดดเด่นที่สุด

2.3 การตัดแปรน้ำมันพืชด้วยกระบวนการโอโซนไลซิส

การตัดแปรน้ำมันพืชด้วยกระบวนการโอโซนไลซิสเพื่อทำให้โครงสร้างของกรดไขมันเกิดหมู่ไฮดรอกซิลขึ้นโดยการใช้โอโซนในการทำให้พันธะคู่ของคาร์บอนในกรดไขมันเกิดการแตกพันธะ และทำปฏิกิริยากับเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) ส่งผลทำให้เกิดหมู่เอสเทอร์ และหมู่ไฮดรอกซิลขึ้นบนโครงสร้างของกรดไขมัน **รูปที่ 4** แสดงตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาของกรดโอเลอิก (oleic acid) กับโอโซนและเอทิลีนไกลคอล



รูปที่ 4 ปฏิกิริยาโอโซนไลซิสของกรดโอเลอิกกับโอโซนและเอทิลีนไกลคอลโดยการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [16]

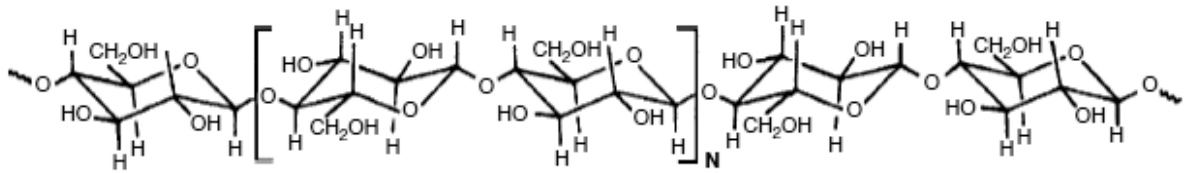
2.4 เส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติจัดว่าเป็นวัสดุผสม (composite) ประเภทพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ซึ่งประกอบด้วย เซลลูโลส (cellulose) ลิกนิน (lignin) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) สารสกัดและเถ้า โดยเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นส่วนของโครงสร้าง เฮมิเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นส่วนของเมทริกซ์แทรกอยู่ระหว่างไมโครไฟบริลของเซลลูโลส (cellulose microfibrils) ส่วนลิกนินนั้นถือเป็นส่วนของเปลือกด้านนอกทำให้ผนังเซลล์มีความแข็งแรง

องค์ประกอบของเส้นใยธรรมชาติ [17-20]

1. เซลลูโลส (Cellulose)

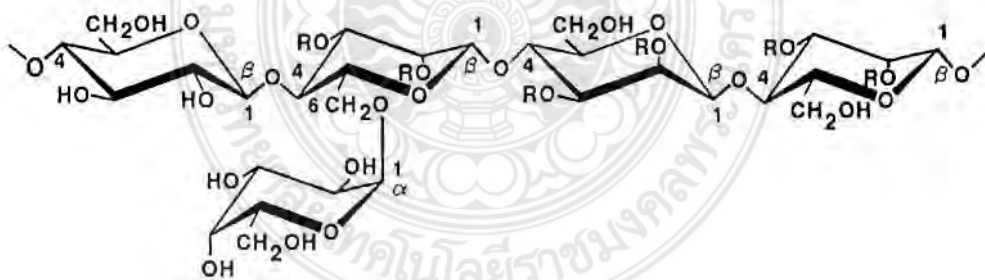
องค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ไม้ คือ เซลลูโลส โดยมีอยู่ประมาณ 40-50 % ในไม้แห้ง เซลลูโลสเป็นพอลิโอสแซคาไรด์ (homopolysaccharide) เชิงเส้นตรง ประกอบด้วยหน่วยของ β -D-glucopyranose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ 1,4- β -glucosidic bonds ดังแสดงใน**รูปที่ 5** เนื่องจากเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นเส้นตรงและมีแรงดึงดูดระหว่างกันทั้งภายในและภายนอกที่แข็งแรงด้วยพันธะไฮโดรเจนทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูง การรวมตัวเป็นกลุ่มของโมเลกุลเซลลูโลสเกิดเป็นไมโครไฟบริล (microfibrils) และไมโครไฟบริลรวมตัวกันเป็นไฟบริล (fibril) และในท้ายที่สุดได้เป็นเส้นใยเซลลูโลส โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเส้นใยและพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงของเซลลูโลสส่งผลทำให้เซลลูโลสมีสมบัติความทนแรงดึงที่แข็งแรงและทนต่อตัวทำละลายได้ดี



รูปที่ 5 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [20]

2. เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสจัดอยู่ในกลุ่มของเฮเทอโรโพลิแซคคาไรด์ (heteropolysaccharides) แบบออสัณฐาน มีลักษณะโครงสร้างแบบกิ่ง เฮมิเซลลูโลสมีอยู่ในไม้แห้งประมาณ 20-30 % เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วย ส่วนของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิดเชื่อมต่อกัน เฮมิเซลลูโลสสามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายด้วยกรดได้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น D-glucose, D-galactose, D-xylose, L-arabose เป็นต้น ความแตกต่างระหว่างเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสมีอยู่ด้วยกัน 3 ประการ ประการแรก คือ เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิดแต่เซลลูโลสมีเพียง 1,4- β -D-glucopyranose เชื่อมต่อกันเท่านั้น ประการที่สอง คือ ภายในโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสมีส่วนที่เป็นกิ่งก้านในขณะที่เซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นเส้นตรง ส่วนประการที่สาม คือ อนุกรมการเกิดพอลิเมอร์ของเซลลูโลสโดยธรรมชาติแล้วมีค่ามากกว่าเฮมิเซลลูโลสประมาณ 10 ถึง 100 เท่า เฮมิเซลลูโลสส่วนมากมีอนุกรมการเกิดพอลิเมอร์ประมาณ 200 เท่านั้น ไม้สามารถมีเฮมิเซลลูโลสที่มีส่วนประกอบในโครงสร้างที่แตกต่างกันได้ เช่น ไม้เนื้ออ่อนมีเฮมิเซลลูโลส ชนิด galactoglucomannans อยู่ประมาณ 20 % และมี Arabinoglucuronoxylan ประมาณ 5-10 % เป็นต้น รูปที่ 6 เป็นตัวอย่างของโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส



รูปที่ 6 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส [17]

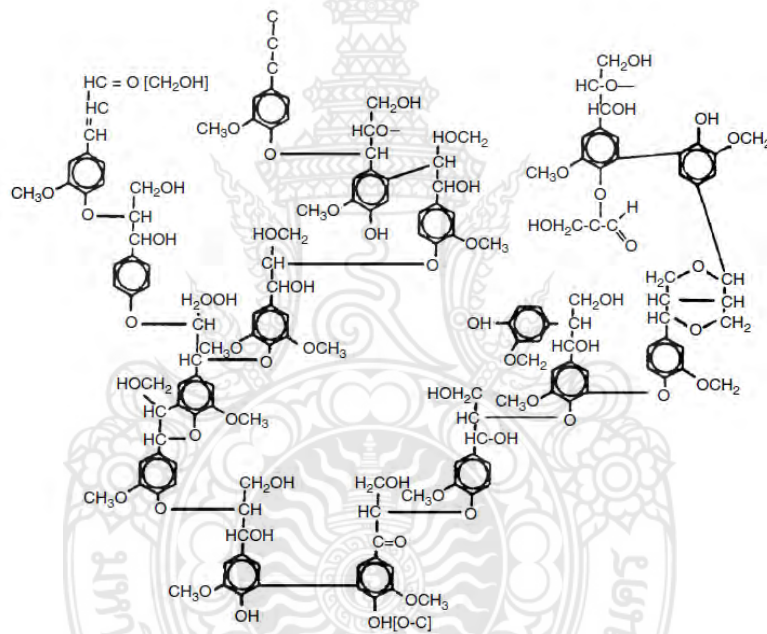
3. ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์เชิงซ้อน แบบอสัณฐาน ซึ่งมีโครงสร้างที่มีความซับซ้อนค่อนข้างมากและมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ภายในโครงสร้างประกอบด้วยส่วนของอะลิฟาติก (aliphatic) และอะโรมาติก

(aromatic) โมโนเมอร์ของลิกนิน คือ ฟีนิลโพรเพน (phenylpropane) สมบัติเชิงกลของลิกนินมีค่าต่ำกว่าของเซลลูโลส ลิกนินมีอยู่ในไม้แห้งประมาณ 18-30 % โดยน้ำหนัก โดยส่วนใหญ่ไม่มีลิกนินอยู่ที่ชั้นผิวของผนังเซลล์ เนื่องจากไม้มีปริมาณของลิกนินอยู่มากกว่าเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่นๆ ที่มาจากพืชจึงทำให้ไม้มีความแข็งแรงสูง ลิกนินสามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์ลิกเนส (lignase) หรือลิกนินเนส (ligninase) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สำคัญในรา โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน ดังแสดงในรูปที่ 7

4. สารสกัดและเถ้า (Extractives and Ash)

ปริมาณสารสกัดมีอยู่ในไม้ประมาณ 5-20 % โดยน้ำหนัก ประกอบด้วยสารอินทรีย์หลากหลายชนิดสารสกัดมีผลต่อสมบัติต่างๆ ของไม้ เช่น สี กลิ่น ความต้านทานต่อการเน่าเปื่อย เป็นต้น ส่วนเถ้ามีอยู่ประมาณ 0.2-2 % โดยน้ำหนัก องค์ประกอบหลักของเถ้าในไม้ คือ แคลเซียม โพแทสเซียม และปริมาณเล็กน้อยของธาตุแมกนีเซียม โซเดียม แมงกานีส และเหล็ก



รูปที่ 7 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน [18]

2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Nampitch, T. และ Magaraphan, R. (2010) [21] ได้ทำการศึกษาผลของการนำยาง ENR มาฉายรังสีก่อนการนำไปผสมกับ PLA ในอัตราส่วน PLA: ยางENR คือ 90:10 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณรังสีเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้ค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะรังสีทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (crosslink density) ในเฟสของยาง ENR เพิ่มมากขึ้น แต่มีผลทำให้เสถียรภาพทางความร้อนลดลง เนื่องจากรังสีมีผลทำให้ยาง ENR เกิดการขาดของสายโซ่ซึ่งเกิดการสลายตัวได้ง่าย

Zhang, C. และคณะ (2011) [7] ได้ทำการปรับปรุงความเหนียวของ PLA โดยการเติมยางธรรมชาติที่ผ่านการให้ความร้อนและแรงเฉือนด้วยเครื่องผสมแบบระบบปิด (internal mixer) โดยได้มีการปรับเปลี่ยนเวลาในการให้ความร้อนและแรงเฉือน 0, 5 และ 10 นาที และมีการปรับเปลี่ยนปริมาณของยางธรรมชาติที่ 0, 1, 3, 5 และ 10 %โดยน้ำหนัก จากงานวิจัย พบว่า กรณี PLA ที่มีการเติมยางธรรมชาติที่ผ่านการให้ความร้อนและแรงเฉือน 10 นาที ปริมาณ 3 %โดยน้ำหนักสามารถปรับปรุงการยึดตัว ณ จุดขาดและความเหนียวได้สูงที่สุด และมีการลดลงของค่าความต้านทานแรงดึงเล็กน้อย ทั้งนี้เป็นเพราะการให้ความร้อนและแรงเฉือนกับยางมีผลทำให้ยางมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง และเกิดหมู่คาร์บอนิล (C=O) และหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ขึ้นซึ่งสามารถเกิดแรงกระทำกับหมู่เอสเทอร์ใน PLA จึงเสริมการยึดเกาะระหว่างเฟส

Boonfaung, P. และคณะ (2011) [3] ได้ทำการพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์ PLA โดยการปรับเปลี่ยนชนิด และปริมาณของพลาสติกไซเซออร์ พบว่า การเติมพลาสติกไซเซออร์มีผลทำให้คุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลง และถ้าเติมพลาสติกไซเซออร์ 5 %โดยน้ำหนักขึ้นไปพบว่าการแยกเฟสของพลาสติกไซเซออร์พอลิพรอพิลีนไกลคอล (Polypropylene glycol, PPG) เป็นพลาสติกไซเซออร์ที่ดีกว่าพอลิเอทิลีนไกลคอล-แรน-พรอพิลีนไกลคอล (Poly(ethylene glycol-ran-propylene glycol, PEPG), ไดออกทิลฟทาเลท (Diocetyl phthalate, DOP), ไตรบิวทิลซิเตรท (Tributyl citrate, TBC) และกรดอะดิพิค (Adipic acid) โดยพิจารณาจากสมบัติความต้านทานแรงดึง

Giita Silverajah, V.S. และคณะ (2012) [4] ได้ทำการศึกษาผลของการเติมน้ำมันปาล์มที่ผ่านการอีพอกไซด์ (Epoxidized palm olein, EPO) ที่มีต่อสมบัติ PLA พบว่า การเติม EPO มีส่วนช่วยทำให้คุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลง ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น และพบว่า PLA ที่มีการเติม EPO มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่ากรณีที่ไม่เติม นอกจากนี้ยังพบว่า การเติม EPO 1 %โดยน้ำหนักสามารถปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึง แรงดัด และแรงกระแทก

Ashabi, L. และคณะ (2013) [5] ได้ทำการศึกษาผลของการเติมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) และนาโนเคลย์ พบว่า LLDPE ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซออร์ที่มีประสิทธิภาพโดยมีส่วนช่วยทำให้บางส่วนของสายโซ่ PLA เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ทำให้อัตราการเกิดผลึกของ PLA เกิดได้เพิ่มมากขึ้น ขณะที่นาโนเคลย์ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) ที่ดี จึงทำหน้าที่ช่วยเสริมกับ LLDPE ในการเพิ่มการเกิดผลึกของ PLA

Bitinis, N. และคณะ (2012) [6] ได้ทำการศึกษากลไกการเสีรูปของ PLA ที่มีการเติมยางธรรมชาติและนาโนเคลย์ (nanoclays) จากการศึกษา พบว่า การเติมยางธรรมชาติมีส่วนทำให้การแตกหักของ PLA เปลี่ยนแปลงจากการแตกหักแบบเปราะไปเป็นการแตกหักแบบเหนียว ในขณะที่การเติมนาโนเคลย์ทำหน้าที่ขัดขวางการเกิดช่องว่าง (cavities) ระหว่าง PLA และเฟสของยาง โดยนาโนเคลย์ทำหน้าที่เป็นตำแหน่งเริ่มต้นของการเกิดรอยร้าว (craze nucleation sites) ณ ความเข้มข้นของนาโนเคลย์ 1 %

โดยน้ำหนัก รอยร้าวถูกสร้างขึ้นและพัฒนากลายเป็นช่องว่างเล็กที่มีความเสถียรซึ่งสามารถทำให้การแผ่ขยายและจัดเรียงตัวไปตามแนวการดึงยืด เพอร์เซ็นต์การยืดตัวของพอลิเมอร์ผสมจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

Csizmadia, R. และคณะ (2013) [8] ได้แสดงให้เห็นการเติมผงไม้ลงใน PLA มีผลทำให้สมบัติทางกลลดลง ทั้งนี้ไม่ใช่เป็นผลมาจากการยึดเกาะระหว่างกัน แต่เป็นผลมาจากการเสียรูปเนื่องจากการแตกหักของอนุภาคไม้ ดังนั้นการปรับปรุงผิวไม้ด้วยการเคลือบผิวด้วยฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) มีผลทำให้สมบัติความต้านทานแรงดึงของวัสดุผสมระหว่าง PLA และผงไม้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น

Mohd Sis, A.L. และคณะ (2013) [9] พบว่าการปรับปรุงผิวเส้นใยปอแก้วด้วย 3-อะมิโนพรอพิลไตรเมทอกซีไซเลน ((3-aminopropyl)trimethoxysilane, APTMS) มีส่วนช่วยในการปรับปรุงความต้านแรงดึง แรงดัด และแรงกระแทกของวัสดุผสมที่มี PLA/PBAT อัตราส่วน 90:10 %โดยน้ำหนัก เป็นเมทริกซ์ ทั้งนี้เป็นเพราะ APTMS ช่วยปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างเฟสของเส้นใยและเมทริกซ์

Wahit, M.U. และคณะ (2105) [22] ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงความเหนียวของ PLA โดยการเติมยาง ENR-50 ในปริมาณที่แตกต่างกัน จากงานวิจัยพบว่า การปรับปรุงความเหนียวของ PLA สามารถเกิดขึ้นเมื่อเติมยาง ENR-50 ปริมาณตั้งแต่ 20 %โดยน้ำหนักขึ้นไป ในขณะที่การเติมยาง ENR-50 มีผลทำให้ค่าความมอดูลัสและความทนต่อแรงดึง และแรงดัดลดลงทันทีที่มีการเติมยาง ENR-50



บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

โครงการวิจัยนี้สามารถแบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ คือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดัดแปรน้ำมันถั่วเหลืองด้วยกระบวนการโอโซนไลซิส ส่วนที่สองเป็นการศึกษาหาปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติ PLA และส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาผลของปริมาณเส้นใยปาล์มที่มีผลต่อสมบัติของ PLA และการลดต้นทุน

3.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.1.1 เม็ด PLA เกรด 4043D สำหรับผลิตฟิล์มแบบจัดเรียงตัว 2 ทิศทาง (Biaxially oriented films) จากบริษัท Nature Works LLC (USA)
- 3.1.2 น้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านกระบวนการแยกยางเหนียว (Degummed soybean oil) จากบริษัท ธนากรผลิตภัณฑ์น้ำมันพืช จำกัด
- 3.1.3 เส้นใยปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการปรับปรุงแรงกระแทก และลดต้นทุนการผลิต มีลักษณะเส้นใยเป็นดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ลักษณะของเส้นใยปาล์มน้ำมันที่ใช้ในงานวิจัย

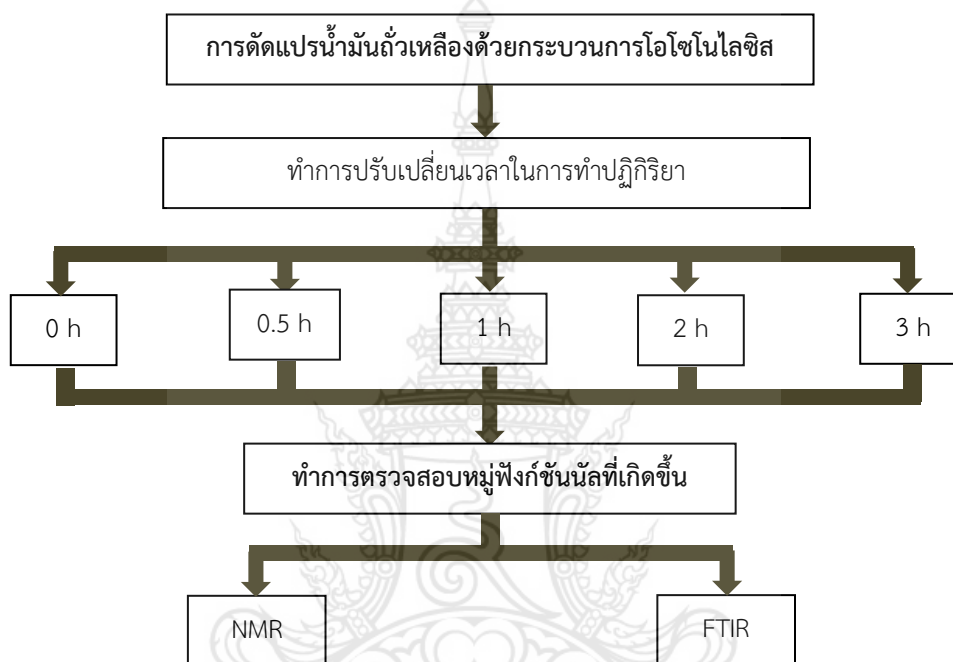
- 3.1.4 เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol) จากบริษัท Ajax Finechem Pty จำกัด ใช้สำหรับการทำปฏิกิริยากับน้ำมันถั่วเหลืองในการดัดแปรด้วยกระบวนการโอโซนไลซิส
- 3.1.5 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3) จากบริษัท Ajax Finechem Pty จำกัด ถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนการดัดแปรน้ำมันถั่วเหลืองด้วยกระบวนการโอโซนไลซิส

3.2 แผนการดำเนินการวิจัย

แผนการดำเนินการวิจัย แบ่งงานออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

3.2.1 การศึกษาการดัดแปรน้ำมันถั่วเหลืองด้วยกระบวนการโอโซนไลซิส

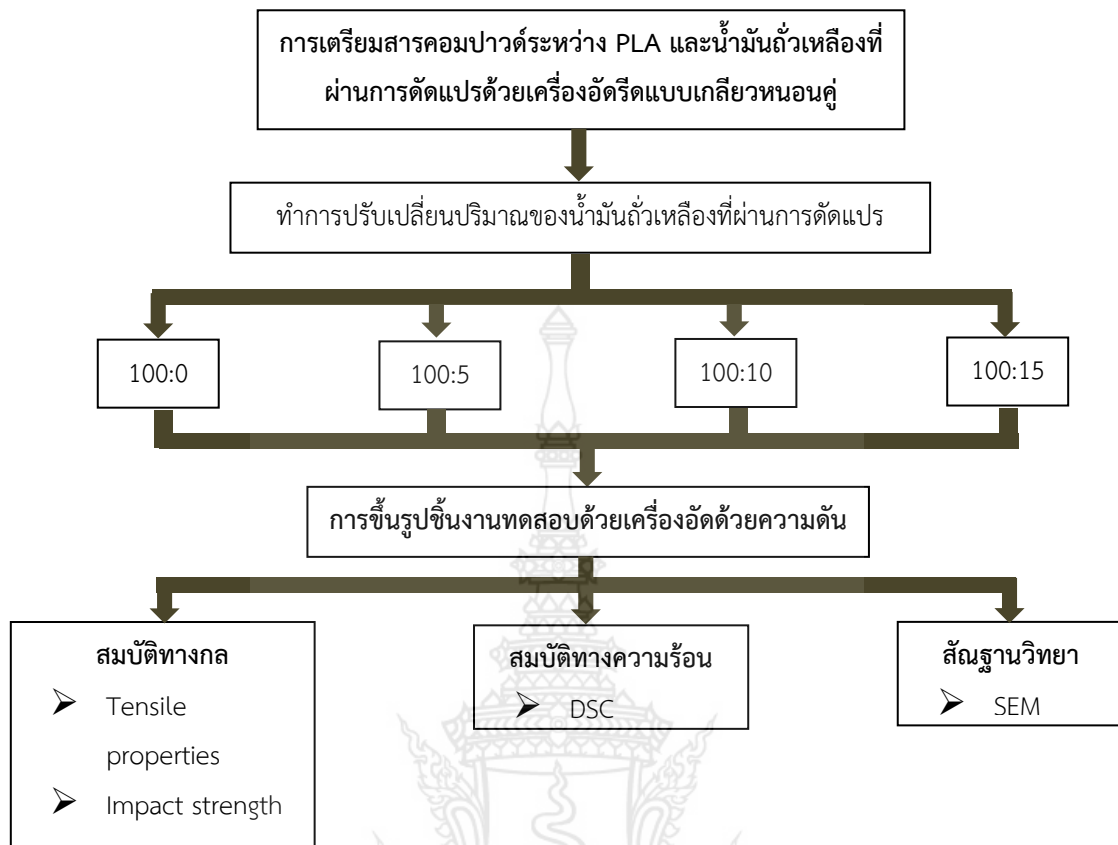
ทำการดัดแปรน้ำมันถั่วเหลืองด้วยกระบวนการโอโซนไลซิส โดยทำการปรับเปลี่ยนเวลาในการทำปฏิกิริยา ตั้งแต่ 0 – 3 ชั่วโมง และทำการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันนัลที่เกิดขึ้น โดยมีรายละเอียดพอสังเขป ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แผนการดำเนินการการศึกษาการดัดแปรน้ำมันถั่วเหลืองด้วยกระบวนการโอโซนไลซิส

3.2.2 การศึกษาหาปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติ PLA

นำน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรในสภาวะการทำปฏิกิริยาที่ดีที่สุดมาทำการเตรียมสารคอมพาวด์กับ PLA โดยทำการเตรียมสารคอมพาวด์ PLA และน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปร ตั้งแต่ 0 – 15 %โดยน้ำหนักของ PLA และทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดด้วยความดัน (Compression machine) จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบสมบัติทางกล ทางความร้อน และตรวจสอบทางสัณฐานวิทยา โดยมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 แผนการดำเนินการการศึกษาหาปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติ PLA

3.2.3 การศึกษาผลของปริมาณเส้นใยปาล์มที่มีผลต่อสมบัติของ PLA และการลดต้นทุน

นำสูตร PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรสูตรที่ดีที่สุดจากหัวข้อ 3.2.2 มาทำการศึกษาผลของปริมาณเส้นใยปาล์ม โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใยปาล์ม 0-7.5 %โดยน้ำหนักของ PLA เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง PLA และเส้นใยปาล์ม ทำเตรียมชิ้นงานทดสอบและทดสอบสมบัติ ดังรายละเอียดที่ระบุไว้ในหัวข้อ 3.2.2 และเมื่อได้สูตรส่วนผสมที่ดีที่สุดแล้วจึงนำมาทดสอบสมบัติการแพร่ของสารในภาชนะ (migration test) ต่อไป

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 วิธีการศึกษาการตัดแปรรูปน้ำมันถั่วเหลืองด้วยกระบวนการโอโซนไลซิส

ขั้นตอนการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรรูปด้วยกระบวนการโอโซนไลซิส มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

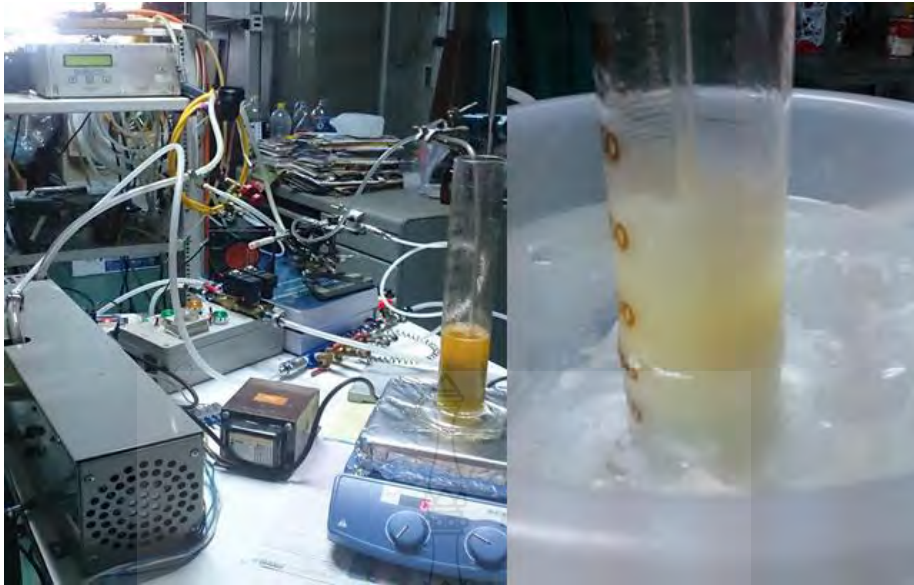
ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาโอโซนไลซิส

1. ทำการชั่งน้ำหนักน้ำมันถั่วเหลือง 100 กรัม เอทิลีนไกลคอล 75 กรัม และแคลเซียมคาร์บอเนต 10 กรัม ด้วยเครื่องชั่งแบบดิจิตอล ทศนิยม 2 ตำแหน่ง
2. ทำการผสมน้ำมันถั่วเหลือง เอทิลีนไกลคอล และแคลเซียมคาร์บอเนตในกระบอกตวงขนาด 500 cm^3
3. ทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์การปล่อยโอโซน ดังแสดงในรูปที่ 11
4. ทำการกวนของผสมในข้อที่ 2 ด้วยแท่งกวนแม่เหล็ก (magnetic stirrer) ตลอดเวลาจนสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาโอโซนไลซิส
5. เริ่มต้นทำปฏิกิริยาโอโซนไลซิส โดยการเติมโอโซนในของผสม และทำการควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 25 องศาเซลเซียส และทำการปรับเปลี่ยนเวลาในการทำปฏิกิริยา ตั้งแต่ 0 – 3 ชั่วโมง
6. เมื่อสิ้นสุดการทำปฏิกิริยา นำน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการตัดแปรรูปด้วยกระบวนการโอโซนไลซิสมาทำการทำการล้างเอทิลีนไกลคอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาออก โดยการล้างด้วยน้ำกลั่น ปริมาณ 250 มิลลิลิตร ทำการล้างทั้งหมด 5 ครั้ง และทำการกรองแคลเซียมคาร์บอเนตออกจากน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรรูปด้วยกระดาษกรอง

ขั้นตอนการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันนัล

- การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier-transform Infrared (FTIR) Spectroscopy

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันนัลของน้ำมันถั่วเหลืองที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังการตัดแปรรูปด้วยกระบวนการโอโซนไลซิสด้วยเทคนิค FTIR ดำเนินการโดยการนำน้ำมันมาตรวจสอบด้วยเครื่อง FT-IR spectrometer รุ่น Spectrum One ของบริษัท Perkin Elmer จำกัด ดังรูปที่ 12 โดยทำวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสง (%Transmittance) ในช่วงเลขคลื่น $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 11 การติดตั้งชุดอุปกรณ์การปล่อยไอโซน



รูปที่ 12 เครื่อง FT-IR spectrometer รุ่น Spectrum One ของบริษัท Perkin Elmer จำกัด

➤ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Nuclear magnetic resonance (NMR) Spectroscopy

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของน้ำมันถั่วเหลืองที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังการดัดแปรด้วยเครื่อง Fourier Transform Nuclear Magnetic Resonance (FT-NMR) Spectrometer รุ่น Inova500 MHz ของบริษัท Varian ดังรูปที่ 13 โดยการนำน้ำมันถั่วเหลืองมาทำการละลายด้วย deuterated chloroform (CDCl_3) จากนั้นนำมาทำการวัดในรูปของสเปกตรัม ^1H และ ^{13}C ณ อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 13 เครื่อง Fourier Transform Nuclear Magnetic Resonance (FT-NMR) Spectrometer รุ่น Inova500 MHz ของบริษัท Varian

ทำการเลือกเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาไอโซโนไลซิสของน้ำมันถั่วเหลือง โดยการพิจารณาจากพันธะ C=C ที่ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาที่ตำแหน่งดังกล่าว และปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยา รวมถึงพันธะ C-O และ C=O ที่เพิ่มปริมาณขึ้น

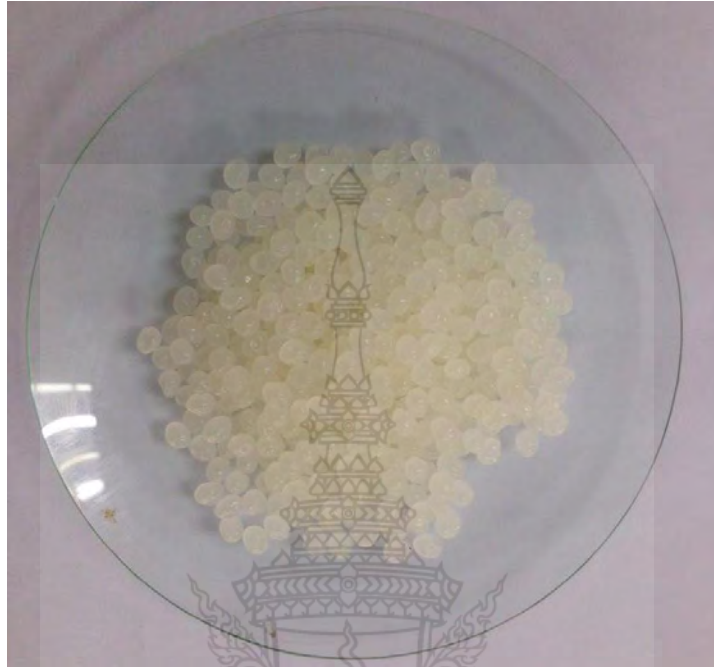
3.3.2 วิธีการศึกษาหาปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติ PLA

สำหรับวิธีการศึกษาหาปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติ PLA มีทั้งหมด 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนการเตรียมสารคอมพาวด์ระหว่าง PLA และน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการตัดแปรด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่

1. นำเม็ด PLA ดังรูปที่ 14 ไปทำการไล่ความชื้นในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
2. นำน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการตัดแปรด้วยสภาวะการทำปฏิกิริยาที่ดีที่สุด ดังรูปที่ 15 มาผสมกับเม็ด PLA ที่ผ่านอบไล่ความชื้นแล้ว โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่ 0, 5, 10 และ 15 % โดยน้ำหนักของ PLA
3. นำของผสมจากข้อที่ 2 มาทำการเตรียมสารคอมพาวด์ โดยการนำของผสมมาผ่านกระบวนการผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ จากบริษัท Enmach จำกัด ดังรูปที่ 16 อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปจากตำแหน่งป้อนเม็ดถึงหัวขึ้นรูป คือ 80, 120, 140, 150, 150 และ 160 องศาเซลเซียส

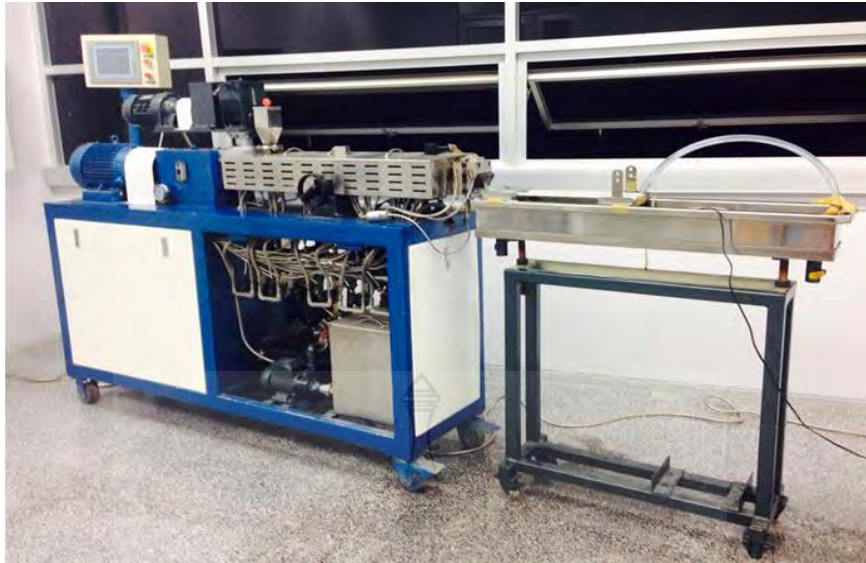
และใช้ความเร็วรอบสกรู 85 รอบ/นาที ภายหลังจากชิ้นงานที่ผ่านการอัดรีด (Extrudate) ผ่านหัวขึ้นรูป ถูกทำให้เย็นตัวด้วยระบบรางน้ำหล่อเย็น ดังรูปที่ 17 และทำการตัดเป็นเม็ดของสารคอมพาวด์ ดังรูปที่ 18



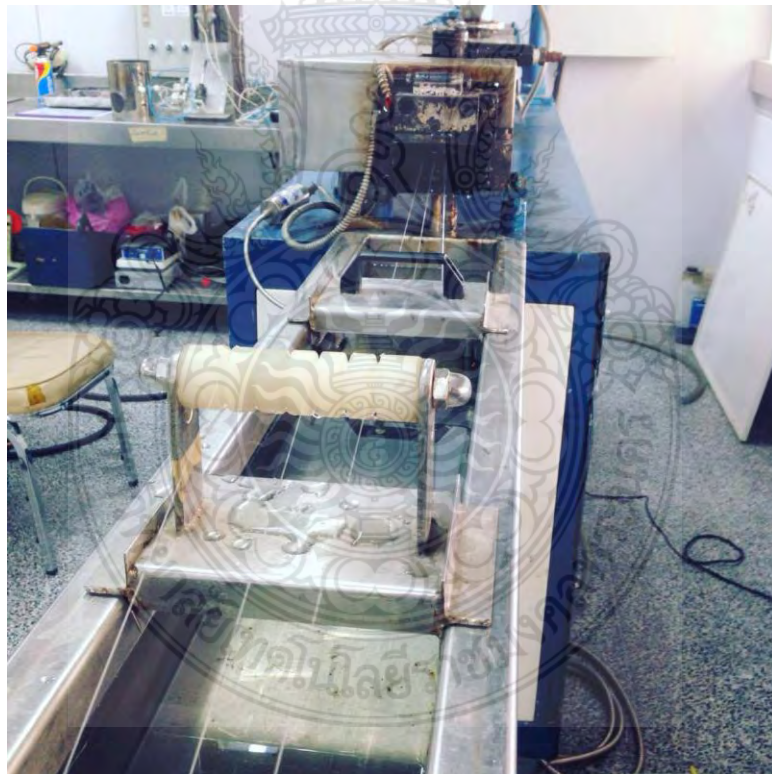
รูปที่ 14 เม็ด PLA เกรด 4043D จากบริษัท Nature Works LLC



รูปที่ 15 น้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการตัดแปรด้วยกระบวนการโอโซนไลซิส



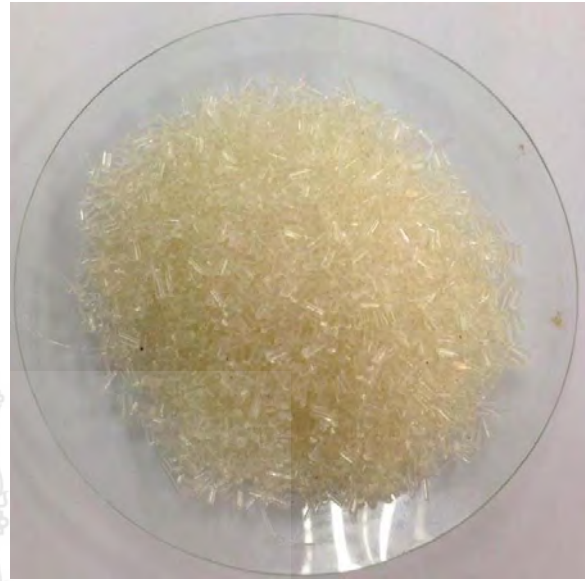
รูปที่ 16 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนอนคู่ของบริษัท Enmach จำกัด



รูปที่ 17 ระบบรางน้ำหล่อเย็นชิ้นงานอัดรีด



(ก)



(ข)

รูปที่ 18 เม็ดที่ได้จากการผ่านเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่

(ก) เม็ด PLA

(ข) เม็ดของสารคอมปาวด์ระหว่าง PLA และน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรที่ 5 % โดยน้ำหนักของ PLA

ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดด้วยความดัน

1. นำเม็ดของสารคอมปาวด์ระหว่าง PLA และน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรที่ได้จากหัวข้อที่แล้วมาทำการอบไล่ความชื้นในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
2. จากนั้นนำเม็ดของสารคอมปาวด์มาทำการอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึง และชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก ด้วยเครื่องอัดด้วยความดัน ยี่ห้อ Comotech รุ่น QC-601T ดังรูปที่ 19 และลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง และแรงกระแทก เป็นดังแสดงในรูปที่ 20 และ 21 ตามลำดับ สำหรับสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป มีรายละเอียดเป็นดังนี้
 - อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบแรงดึง และแรงกระแทก คือ 170 และ 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
 - ขั้นตอนการอุ่นให้ความร้อน (preheat) ใส่สารคอมปาวด์ในแม่พิมพ์ทำการอุ่นให้ความร้อนแก่เม็ดคอมปาวด์จนกระทั่งอุณหภูมิได้ตามที่ตั้งไว้ จากนั้นทำการอุ่นเม็ดคอมปาวด์ เป็นเวลา 6 นาที
 - ขั้นตอนการอัดด้วยความดัน (compress) ทำการปิดแม่พิมพ์ ด้วยความดัน 500 psi ดังแสดงในรูปที่ 22 เป็นเวลา 4 นาที

ขั้นตอนการหล่อเย็น (cooling) ทำการหล่อเย็นชิ้นงานเป็นเวลา 4 นาที ด้วยน้ำหล่อเย็น หลังจากนั้นทำการแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์



รูปที่ 19 เครื่องอัดด้วยความดัน ยี่ห้อ Comotech รุ่น QC-601T



รูปที่ 20 แม่พิมพ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง



รูปที่ 21 แม่พิมพ์สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก



รูปที่ 22 ขั้นตอนการอัดให้ความดัน

ขั้นตอนการทดสอบสมบัติของชิ้นงาน PLA ผสมกับน้ำมันถั่วเหลือง

➤ สมบัติทางกล

การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile testing)

นำชิ้นงาน PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรปริมาณต่างๆ กันที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดด้วยความดันมาทำการทดสอบความต้านทานแรงดึงด้วยเครื่อง Comotech Universal Testing รุ่น QC-S06M1-204 ของบริษัท Comotech ประเทศไต้หวัน ดังรูปที่ 23 ทำการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D638 [23] ชิ้นงานทดสอบมีรูปทรงแบบดรัมเบล แบบ Type I ดังแสดงในรูปที่ 24 ความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่หัวจับชิ้นงาน 5 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในการทดสอบความต้านทานแรงดึงในแต่ละสูตรใช้ชิ้นงานทดสอบ จำนวนทั้งหมด 7 ชิ้นงานทดสอบ และทำการรายงานผลการทดสอบ ประกอบด้วย ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึง (Tensile modulus) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile stress) และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break)



รูปที่ 23 เครื่อง Comotech Universal Testing รุ่น QC-S06M1-ของบริษัท Comotech ประเทศไต้หวัน



รูปที่ 24 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง

การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก (Impact testing)

นำชิ้นงาน PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรปริมาณต่างๆ ที่ได้มาจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดด้วยความดัน ที่มีขนาดชิ้นงาน 13 x 64 x 3 มิลลิเมตร³ มาทำรอยบาก (notch) ด้วยเครื่องทำรอยบาก ดังรูปที่ 25 จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทำรอยบากแล้ว ดังรูปที่ 26 มาทำการวัดความกว้าง และความหนาของชิ้นงานบริเวณรอยบาก หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาทำการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกด้วยวิธีการทดสอบ แบบ Izod อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D256 [24] ทำการทดสอบด้วยเครื่อง CEAST® Resil Impactor รุ่น 6967 ของบริษัท CCSI ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังแสดงในรูปที่ 27 หลังจากนั้นทำการรายงานผลความต้านทานแรงกระแทก โดยการรายงานเป็นค่าพลังงานที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักต่อพื้นที่หน้าตัดบริเวณรอยบาก ในการทดสอบแต่ละสูตรใช้ชิ้นงานทดสอบ จำนวนทั้งหมด 7 ชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 25 เครื่องทำรอยบาก สำหรับเตรียมชิ้นงานทดสอบความทนแรงกระแทก



รูปที่ 26 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงกระแทก



รูปที่ 27 เครื่อง CEAST® Resil Impactor รุ่น 6967 ของบริษัท CCSI ประเทศสหรัฐอเมริกา

➤ สมบัติทางความร้อน

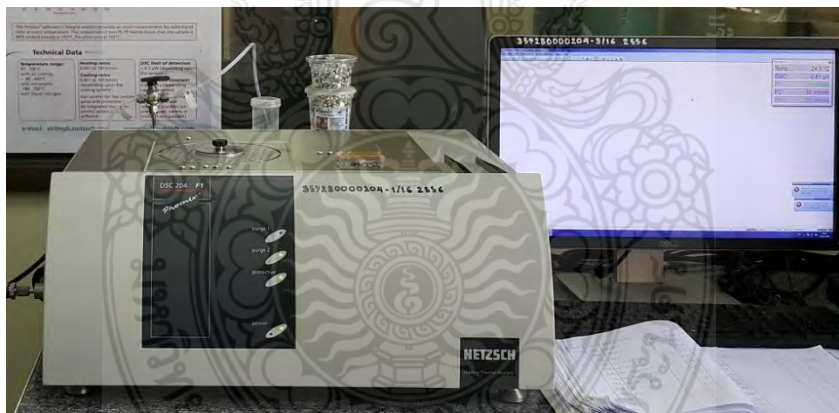
การทดสอบด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry

ทำการวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึก (Crystallization temperature) จุดหลอมเหลว (Melting temperature) และ ปริมาณผลึกของ PLA ในชิ้นงาน PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรปริมาณต่างๆ กัน ทำการประเมิน ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter รุ่น DSC-204F1 ของบริษัท NETZSCH ประเทศเยอรมัน ดังรูปที่ 28 ทำการทดสอบภายใต้สภาวะไนโตรเจน ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ คือ 30-200 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก (Percentage crystallinity, X_c) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$X_c = \frac{H_m}{H_m^o} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ H_m คือ ค่าเอนทัลปีในการหลอมเหลว (Melting enthalpy) ของชิ้นงานทดสอบ

H_m^o คือ ค่าเอนทัลปีในการหลอมเหลว สำหรับกรณี PLA ที่มีปริมาณผลึก 100 % ซึ่งมีค่าเท่ากับ 97.2 J/g [25]



รูปที่ 28 เครื่อง Differential scanning calorimeter รุ่น DSC-204F1 ของบริษัท NETZSCH

➤ สัณฐานวิทยา

การวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของ PLA และน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหัก และความเข้ากันได้ของ PLA และน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร โดยทำการวิเคราะห์จากรอยแตกหักของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงกระแทก การเตรียมชิ้นงานก่อนการ

ทดสอบต้องนำชิ้นงานมาทำการเคลือบด้วยทองคำด้วยวิธีการ sputtering หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แบบ Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-7610F ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังรูปที่ 29 ที่ความต่างศักย์ 5 kv



รูปที่ 29 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แบบ FE-SEM ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-7610F

3.3.3 วิธีการศึกษาผลของปริมาณเส้นใยปาล์มที่มีผลต่อสมบัติของ PLA และการลดต้นทุน

สำหรับวิธีการศึกษาผลของปริมาณเส้นใยปาล์มที่มีผลต่อสมบัติของ PLA และการลดต้นทุนมีทั้งหมด 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนการเตรียมสารคอมพาวด์ระหว่าง PLA น้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร และเส้นใยปาล์มน้ำมันที่ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่

สำหรับขั้นตอนการเตรียมสารคอมพาวด์ระหว่าง PLA น้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร และเส้นใยปาล์มน้ำมัน มีวิธีการเตรียมเช่นเดียวกับที่ระบุไว้ในหัวข้อที่ 3.3.2 ก่อนการนำเส้นใยปาล์มน้ำมันมาผสมสารคอมพาวด์ เส้นใยปาล์มน้ำมันจะต้องผ่านกระบวนการอบไล่ความชื้น โดยการนำไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ และในการเตรียมสารคอมพาวด์ได้มีการปรับเปลี่ยนปริมาณของเส้นใยปาล์มน้ำมัน ดังนี้ 0.0, 2.5, 5.0 และ 7.5 %โดยน้ำหนักของ PLA ส่วนปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่เติมลงใน PLA คือ 10 %โดยน้ำหนักของ PLA ซึ่งเป็นปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่เหมาะสมมากที่สุด ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์ผลการทดลองในส่วนการศึกษาหาปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติ PLA

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบของวัสดุผสม PLA น้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร และเส้นใยปาล์มน้ำมัน
ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบของวัสดุผสม PLA น้ำมันถั่วเหลือง และเส้นใยปาล์มน้ำมันมี
รายละเอียดเช่นเดียวกับที่ระบุไว้ในหัวข้อที่ 3.3.2

ขั้นตอนการทดสอบสมบัติของชิ้นงานวัสดุผสม PLA น้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร และเส้นใยปาล์มน้ำมัน

ในขั้นตอนการทดสอบสมบัตินี้มีรายละเอียดเช่นเดียวกับที่ระบุไว้ในหัวข้อที่ 3.3.2 นอกจากนี้เมื่อ
ได้ข้อสรุปเกี่ยวกับสูตรที่ดีที่สุดแล้วนั้น สูตรดังกล่าวจะถูกเลือกนำมาทดสอบการเคลื่อนย้ายของสาร
(migration test) ตามมาตรฐานการทดสอบบรรจุภัณฑ์ ที่เป็นไปตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่
295 พ.ศ. 2548 โดยใช้ตัวทำละลาย 4 ชนิด ทำหน้าที่เป็นตัวแทนอาหาร มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

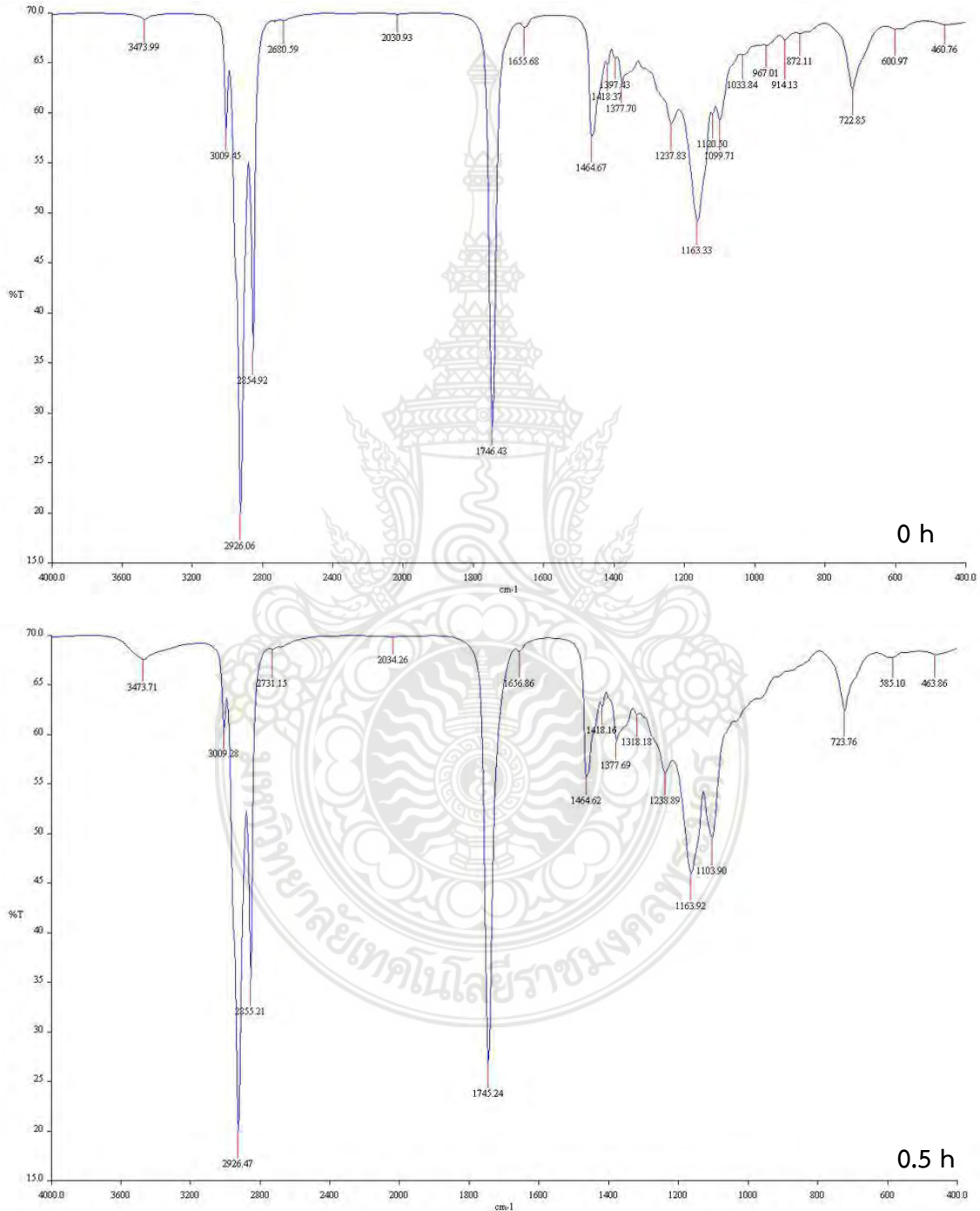
- น้ำกลั่น แทนอาหารที่มีค่าความเป็นกรด-เบส มากกว่า 5
- กรดอะซิติก (acetic acid) ความเข้มข้น 4 % แทนอาหารที่มีค่าความเป็นกรด-เบส ไม่เกิน 5
- เอทานอล (ethanol) ความเข้มข้น 20 % แทนอาหารที่มีแอลกอฮอล์
- เฮปแทน (n-heptane) แทนอาหารที่มีไขมัน หรือน้ำมัน



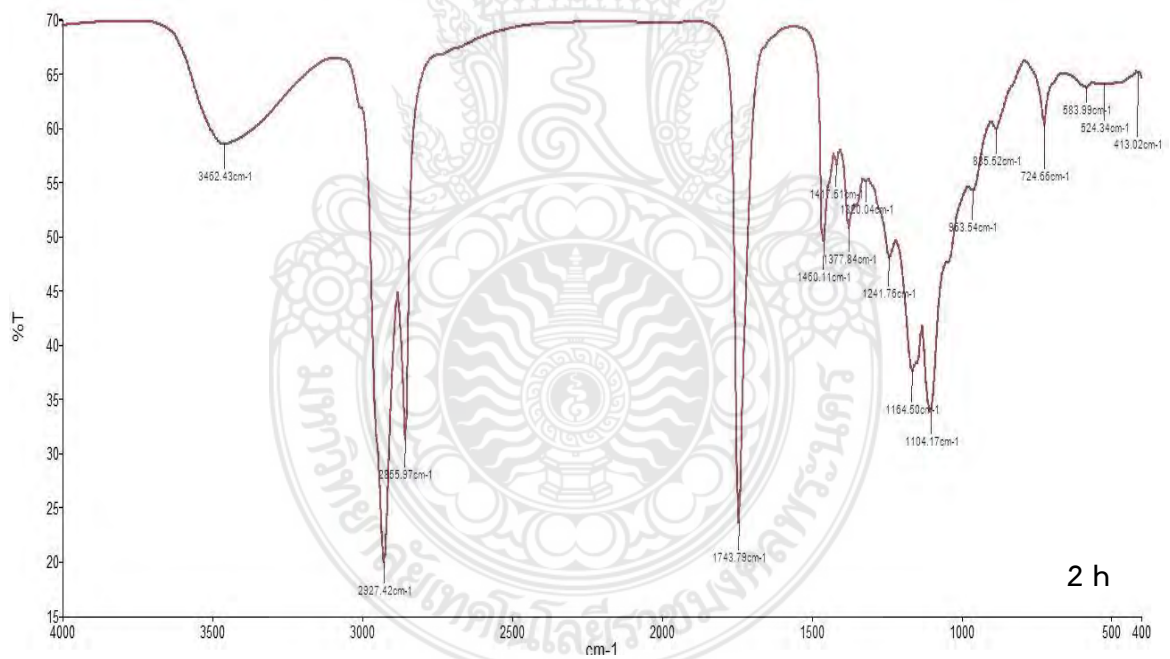
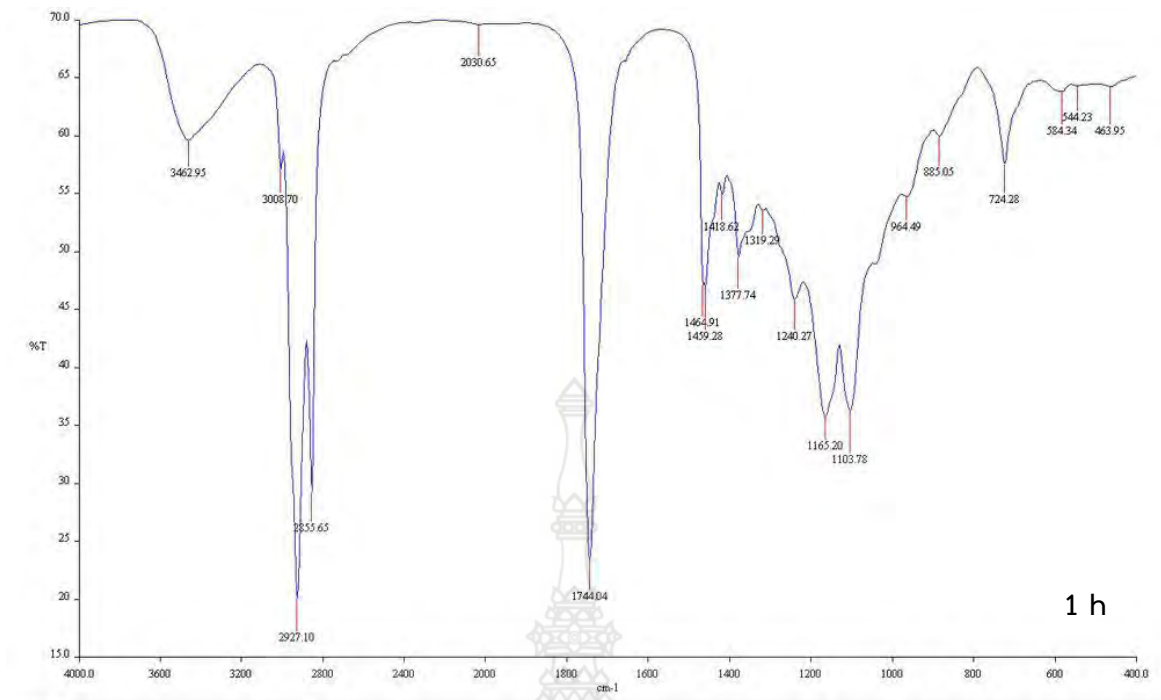
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลการศึกษาการดัดแปรน้ำมันถั่วเหลืองด้วยกระบวนการไอโซโนไลซิส

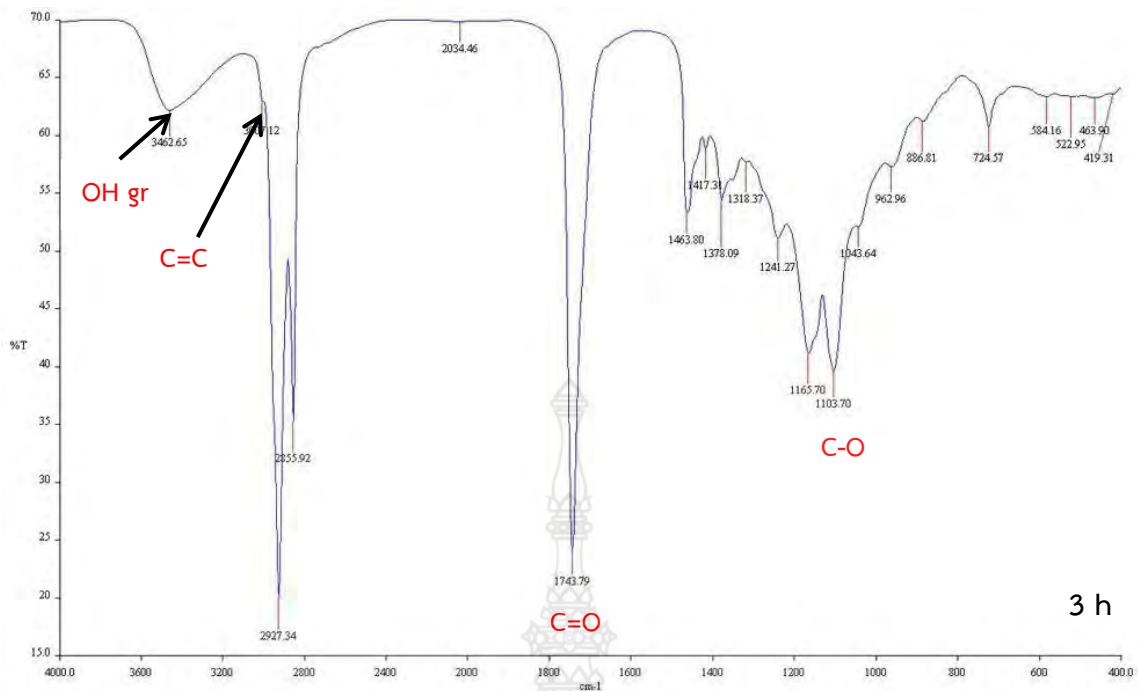
การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงไปในน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการดัดด้วยกระบวนการไอโซโนไลซิสด้วยเทคนิค FTIR เป็นดังแสดงในรูปที่ 30



รูปที่ 30 กราฟสเปกตรัม FTIR ของน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปร ณ เวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน (มีต่อ)



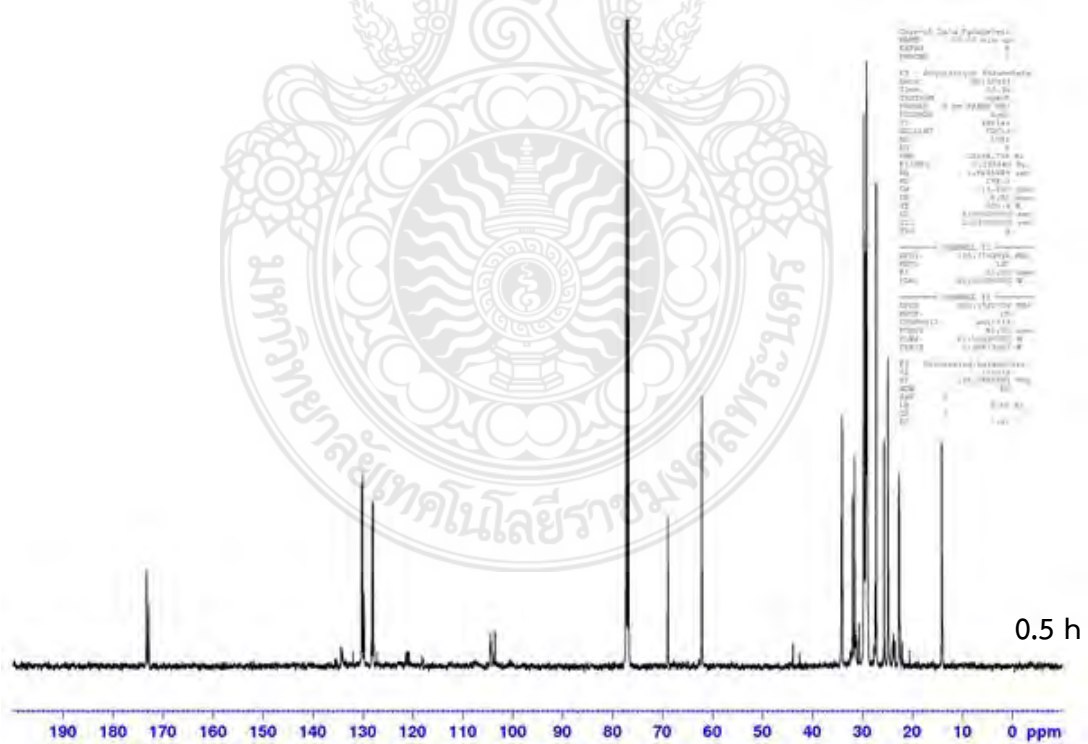
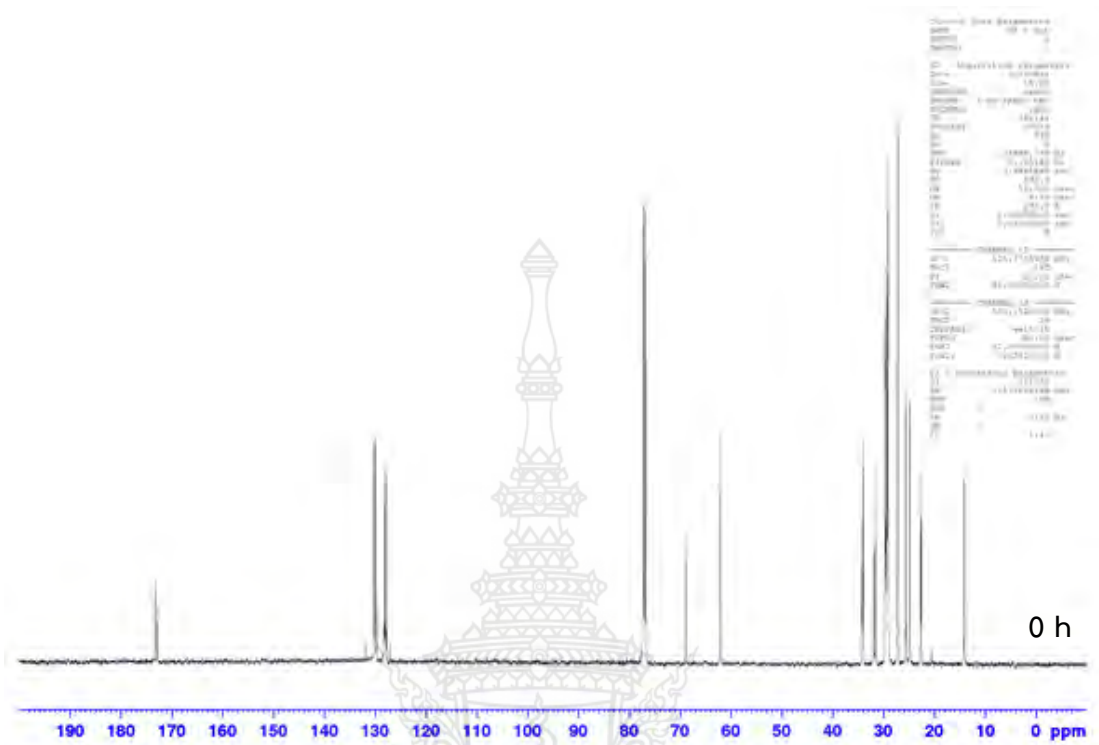
รูปที่ 30 กราฟสเปกตรัม FTIR ของน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปร ณ เวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน (มีต่อ)



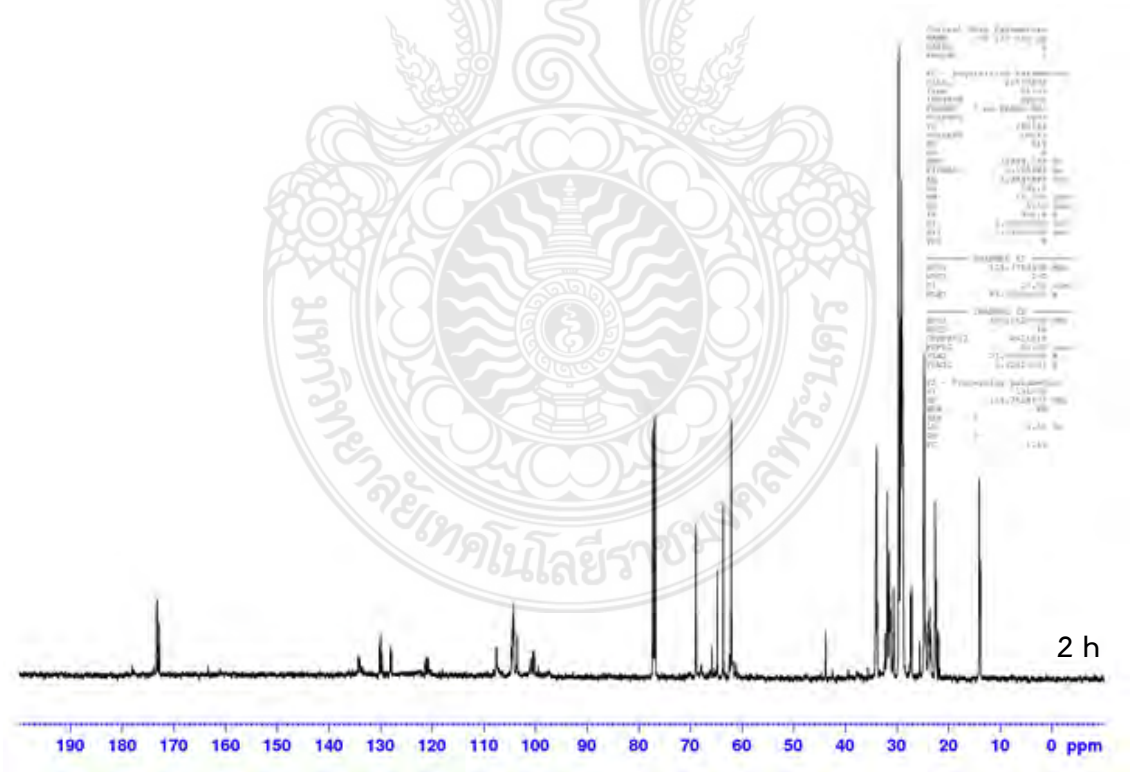
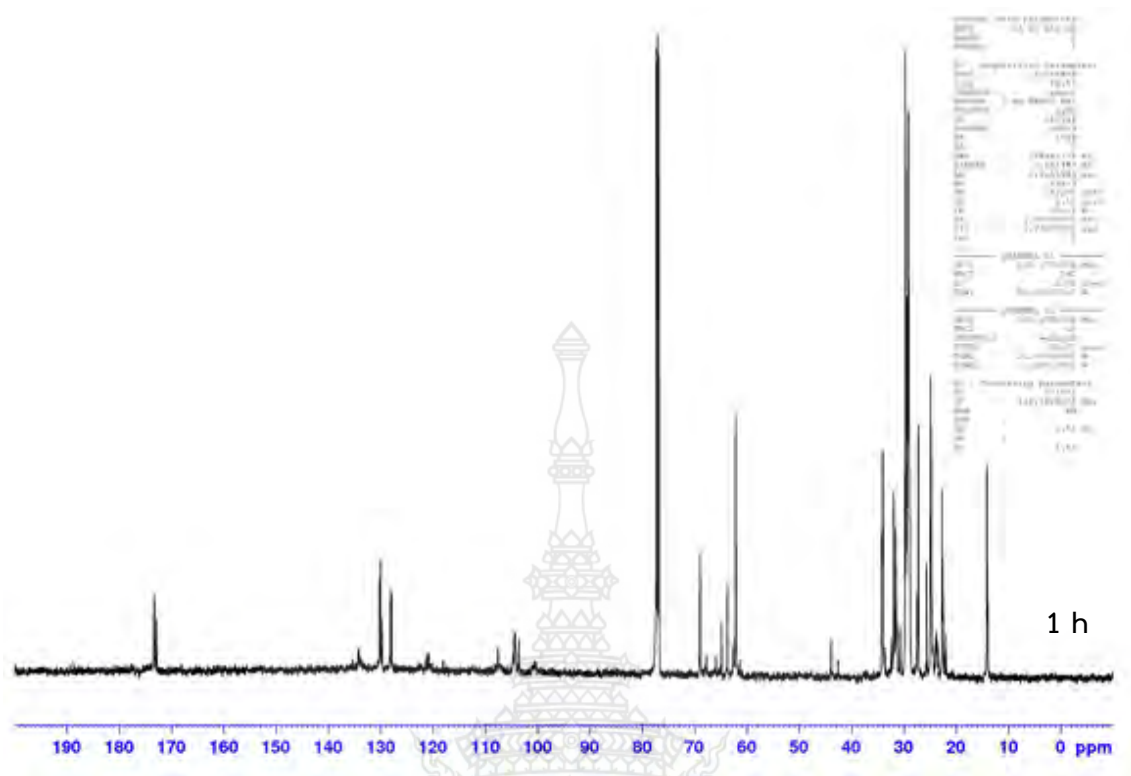
รูปที่ 30 กราฟสเปกตรัม FTIR ของน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปร ณ เวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน

รูปที่ 30 เป็นกราฟแสดงสเปกตรัม FTIR ของน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการดัดแปรด้วยกระบวนการโอโซนโนไลซิส โดยมีการปรับเปลี่ยนเวลาในการทำปฏิกิริยา หรือเวลาในการปล่อยโอโซนเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำมันถั่วเหลือง ที่ 0, 0.5, 1, 2 และ 3 ชั่วโมง จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อโอโซนเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำมันถั่วเหลืองมีผลทำให้เกิดพีคใหม่ขึ้น ณ ช่วงเลขคลื่น 3462 cm⁻¹ ซึ่งเป็นพีคที่แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิลของสารประกอบแอลกอฮอล์ ซึ่งผลที่ได้มีสอดคล้องกับปฏิกิริยาโอโซนโนไลซิสที่อยู่ในรูปที่ 4 ผลของการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลทำให้ความเข้มของพีคที่ 3462 cm⁻¹ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นของความเข้มพีคที่ช่วงเลขคลื่น 1103 cm⁻¹ ซึ่งเป็นพีคของ C-O stretching เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ส่วนพีคที่ 1743 cm⁻¹ ซึ่งเป็นพีคของ C=O มีแนวโน้มกว้างขึ้น เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของ C-O และ C=O เป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยาโอโซนโนไลซิสทำให้เกิดหมู่เอสเทอร์ (-COO-) เพิ่มมากขึ้น และพบว่าพีคที่ 3009 และ 1655 cm⁻¹ ซึ่งเป็นพีคของ C=C เริ่มหายไปเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 2 และ 3 ชั่วโมง ทั้งนี้เพราะการทำปฏิกิริยาโอโซนโนไลซิสจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งพันธะคู่ของคาร์บอนจึงทำให้ปริมาณของ C=C ลดปริมาณลง เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ชี้ว่าการดัดแปรน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้เวลา 2 และ 3 ชั่วโมงให้ผลไม่แตกต่างกันมากนัก

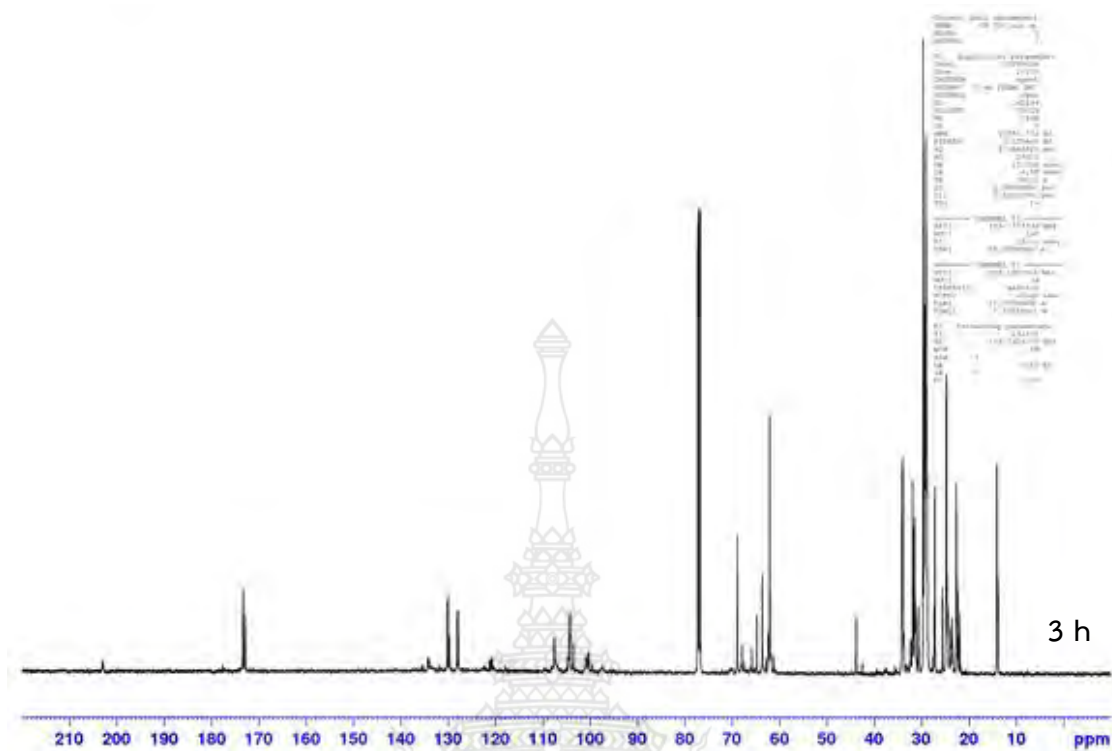
สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค NMR ซึ่งทำการตรวจสอบในรูปของสเปกตรัม ^1H และ ^{13}C ดังแสดงในรูปที่ 31 และ 32 ตามลำดับ



รูปที่ 31 กราฟ ^{13}C NMR ของน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร ณ เวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน (มีต่อ)

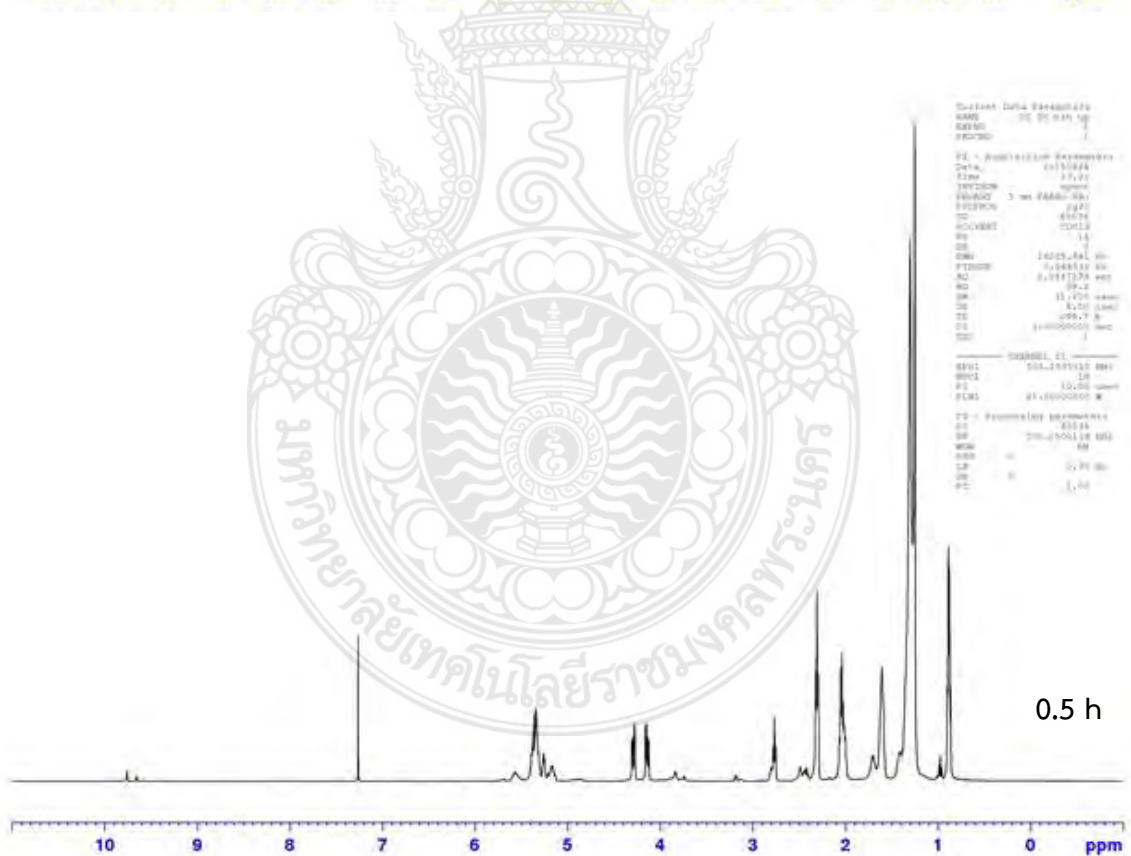
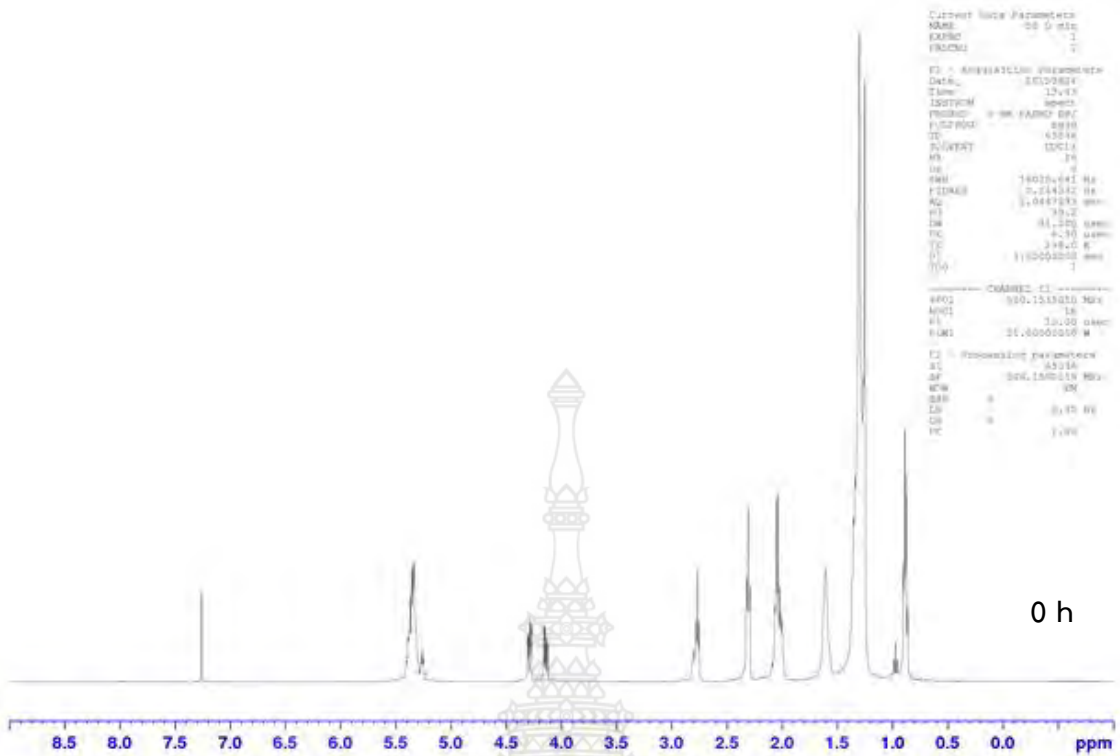


รูปที่ 31 กราฟ ^{13}C NMR ของน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร ณ เวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน (มีต่อ)

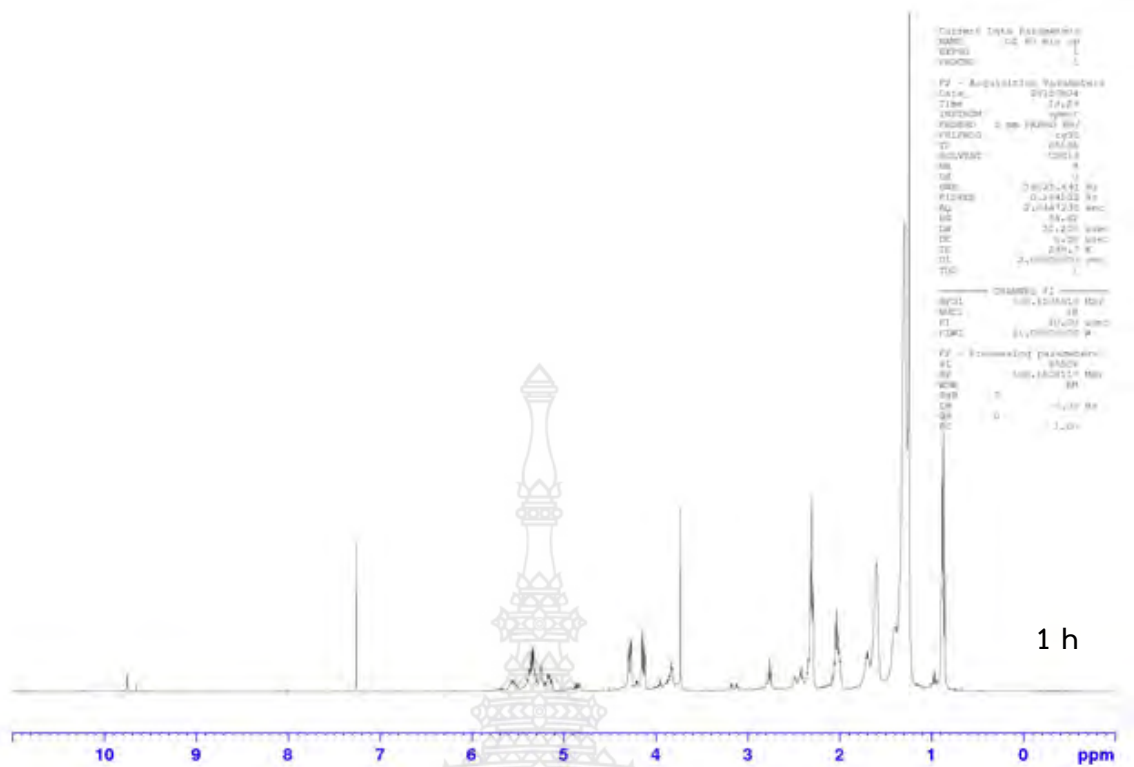


รูปที่ 31 กราฟ ^{13}C NMR ของน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปร ณ เวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน

รูปที่ 31 แสดงกราฟ ^{13}C NMR ของน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการทำปฏิกิริยาโอโซนไลซิสกับโอโซน ณ เวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน จากกราฟสามารถสังเกตพบว่า พันธะคู่ของคาร์บอน ($\text{C}=\text{C}$) ที่ 130 ppm ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาโอโซนไลซิส มีแนวโน้มลดลง เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น แต่พบว่ากรณีการทำปฏิกิริยาที่ 2 และ 3 ชั่วโมง ความเข้มพีคไม่แตกต่างกันมากนัก สำหรับพีคของคาร์บอนที่ตำแหน่งคาร์บอนิลเอสเทอร์ (carbonyl ester, $-\text{COO}-$) ที่ 173 ppm มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และจากการทำปฏิกิริยาโอโซนไลซิสทำให้เกิดพีคใหม่ขึ้นที่ 62-68 ppm ซึ่งเป็นพีคที่แสดงถึงคาร์บอนที่ตำแหน่งเอทิลีนออกไซด์ (ethylene oxide) โดยสามารถสังเกตเห็นเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 1 ชั่วโมงขึ้นไป พีคใหม่นี้เกิดขึ้นนี้เกิดจากการที่คาร์บอนตรงตำแหน่งพันธะคู่ในน้ำมันเกิดการแตกพันธะและสร้างพันธะกับเอทิลีนไกลคอล



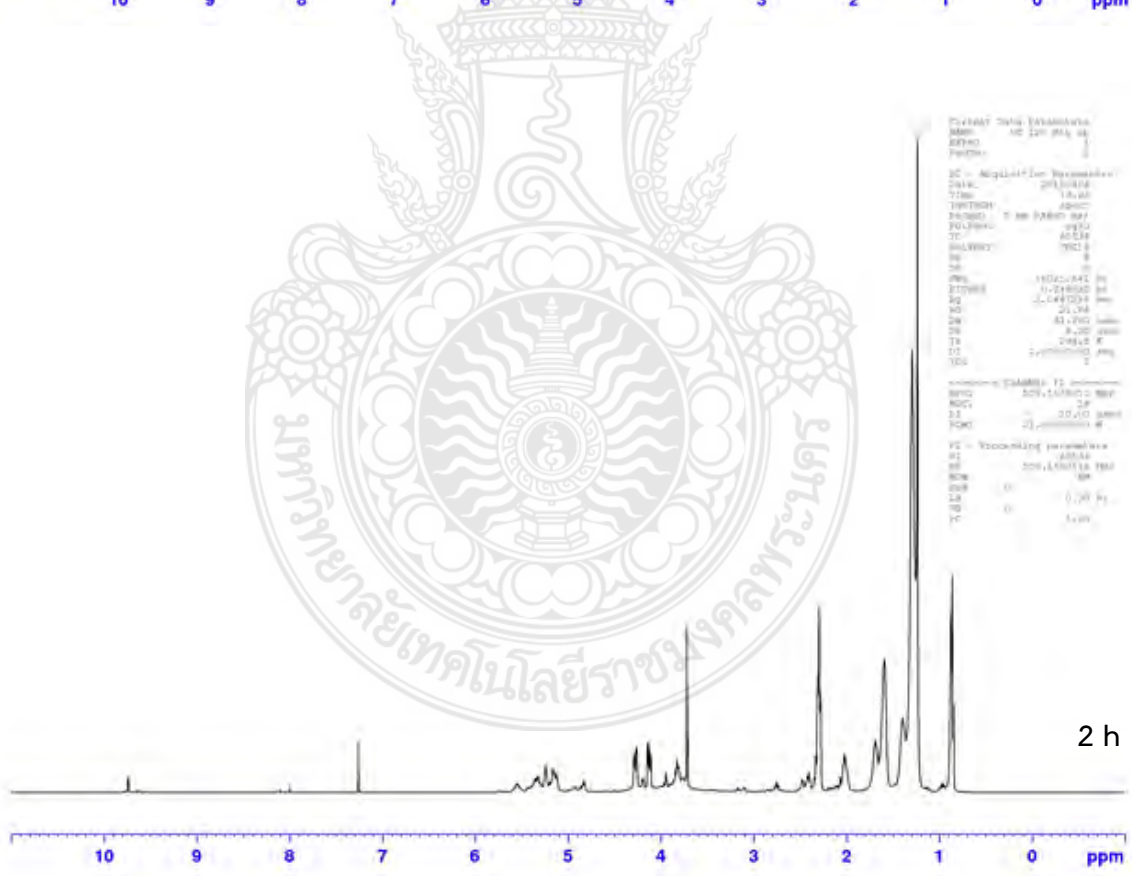
รูปที่ 32 กราฟ ^1H NMR ของน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปร ณ เวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน (มีต่อ)



```

Current Data Parameters
NAME: 12_01_01_01
EXPNO: 1
PROCNO: 1
F2 - Acquisition Parameters
Date_   20120604
Time    17.29
INSTRUM spect
PROBHD  5 mm HNP1H BBO
PULPROG zgpg30
TD       65536
SOLVENT  DMSO
NS       8
DS       4
SWH      13022.441 Hz
FIDRES   0.148102 Hz
AQ        2.0447230 sec
RG        31.24
WDW      EM
SSB       0
LB        30.420 Hz
GB        0
PC        2.0000000 sec
TD0       2.0000000 sec
TDC       1
===== CHANNEL f1 =====
NUC1     1H
P1        12.00 nsec
PL1       0.00 dB
PCPD      2.0000000 sec
===== CHANNEL f2 =====
NAME: 12_01_01_01_01
EXPNO: 1
PROCNO: 1
F2 - Acquisition Parameters
Date_   20120604
Time    17.29
INSTRUM spect
PROBHD  5 mm HNP1H BBO
PULPROG zgpg30
TD       65536
SOLVENT  DMSO
NS       8
DS       4
SWH      13022.441 Hz
FIDRES   0.148102 Hz
AQ        2.0447230 sec
RG        31.24
WDW      EM
SSB       0
LB        30.420 Hz
GB        0
PC        2.0000000 sec
TD0       2.0000000 sec
TDC       1
===== CHANNEL f1 =====
NUC1     1H
P1        12.00 nsec
PL1       0.00 dB
PCPD      2.0000000 sec
===== CHANNEL f2 =====
NAME: 12_01_01_01_01
EXPNO: 1
PROCNO: 1
F2 - Acquisition Parameters
Date_   20120604
Time    17.29
INSTRUM spect
PROBHD  5 mm HNP1H BBO
PULPROG zgpg30
TD       65536
SOLVENT  DMSO
NS       8
DS       4
SWH      13022.441 Hz
FIDRES   0.148102 Hz
AQ        2.0447230 sec
RG        31.24
WDW      EM
SSB       0
LB        30.420 Hz
GB        0
PC        2.0000000 sec
TD0       2.0000000 sec
TDC       1

```

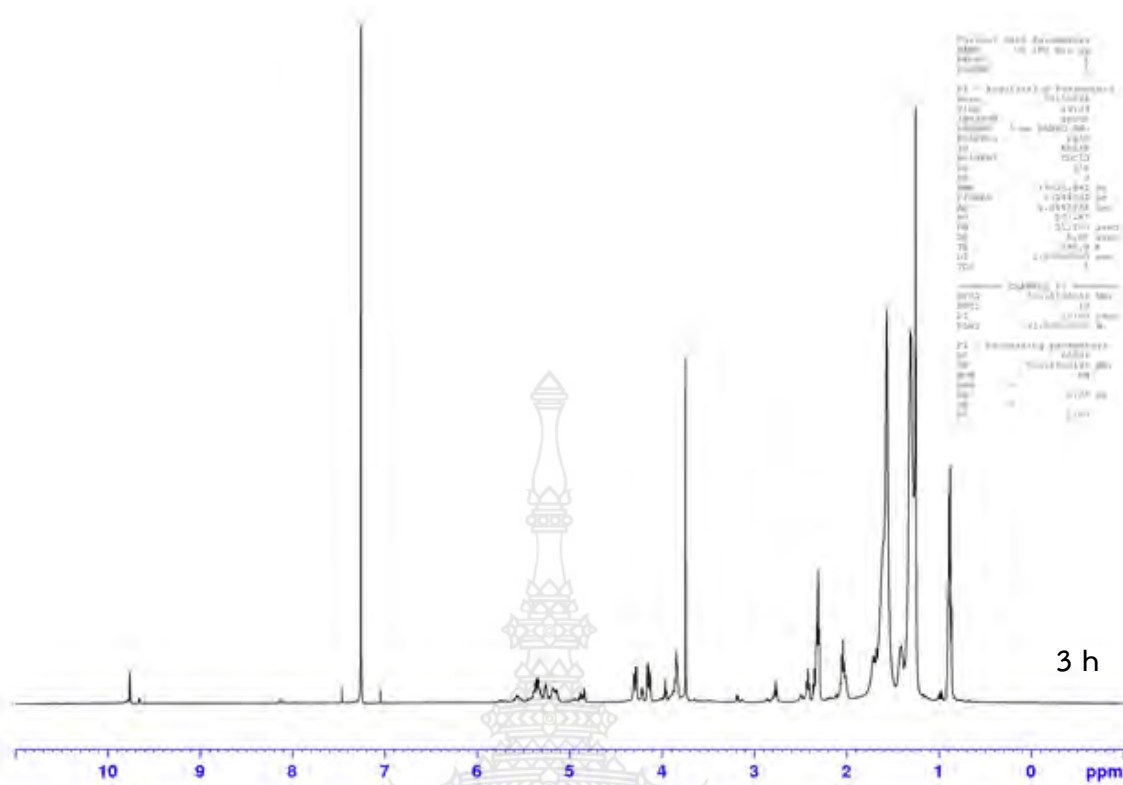


```

Current Data Parameters
NAME: 12_01_01_01
EXPNO: 1
PROCNO: 1
F2 - Acquisition Parameters
Date_   20120604
Time    17.29
INSTRUM spect
PROBHD  5 mm HNP1H BBO
PULPROG zgpg30
TD       65536
SOLVENT  DMSO
NS       8
DS       4
SWH      13022.441 Hz
FIDRES   0.148102 Hz
AQ        2.0447230 sec
RG        31.24
WDW      EM
SSB       0
LB        30.420 Hz
GB        0
PC        2.0000000 sec
TD0       2.0000000 sec
TDC       1
===== CHANNEL f1 =====
NUC1     1H
P1        12.00 nsec
PL1       0.00 dB
PCPD      2.0000000 sec
===== CHANNEL f2 =====
NAME: 12_01_01_01_01
EXPNO: 1
PROCNO: 1
F2 - Acquisition Parameters
Date_   20120604
Time    17.29
INSTRUM spect
PROBHD  5 mm HNP1H BBO
PULPROG zgpg30
TD       65536
SOLVENT  DMSO
NS       8
DS       4
SWH      13022.441 Hz
FIDRES   0.148102 Hz
AQ        2.0447230 sec
RG        31.24
WDW      EM
SSB       0
LB        30.420 Hz
GB        0
PC        2.0000000 sec
TD0       2.0000000 sec
TDC       1
===== CHANNEL f1 =====
NUC1     1H
P1        12.00 nsec
PL1       0.00 dB
PCPD      2.0000000 sec
===== CHANNEL f2 =====
NAME: 12_01_01_01_01
EXPNO: 1
PROCNO: 1
F2 - Acquisition Parameters
Date_   20120604
Time    17.29
INSTRUM spect
PROBHD  5 mm HNP1H BBO
PULPROG zgpg30
TD       65536
SOLVENT  DMSO
NS       8
DS       4
SWH      13022.441 Hz
FIDRES   0.148102 Hz
AQ        2.0447230 sec
RG        31.24
WDW      EM
SSB       0
LB        30.420 Hz
GB        0
PC        2.0000000 sec
TD0       2.0000000 sec
TDC       1

```

รูปที่ 32 กราฟ ¹H NMR ของน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปร ณ เวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน (มีต่อ)

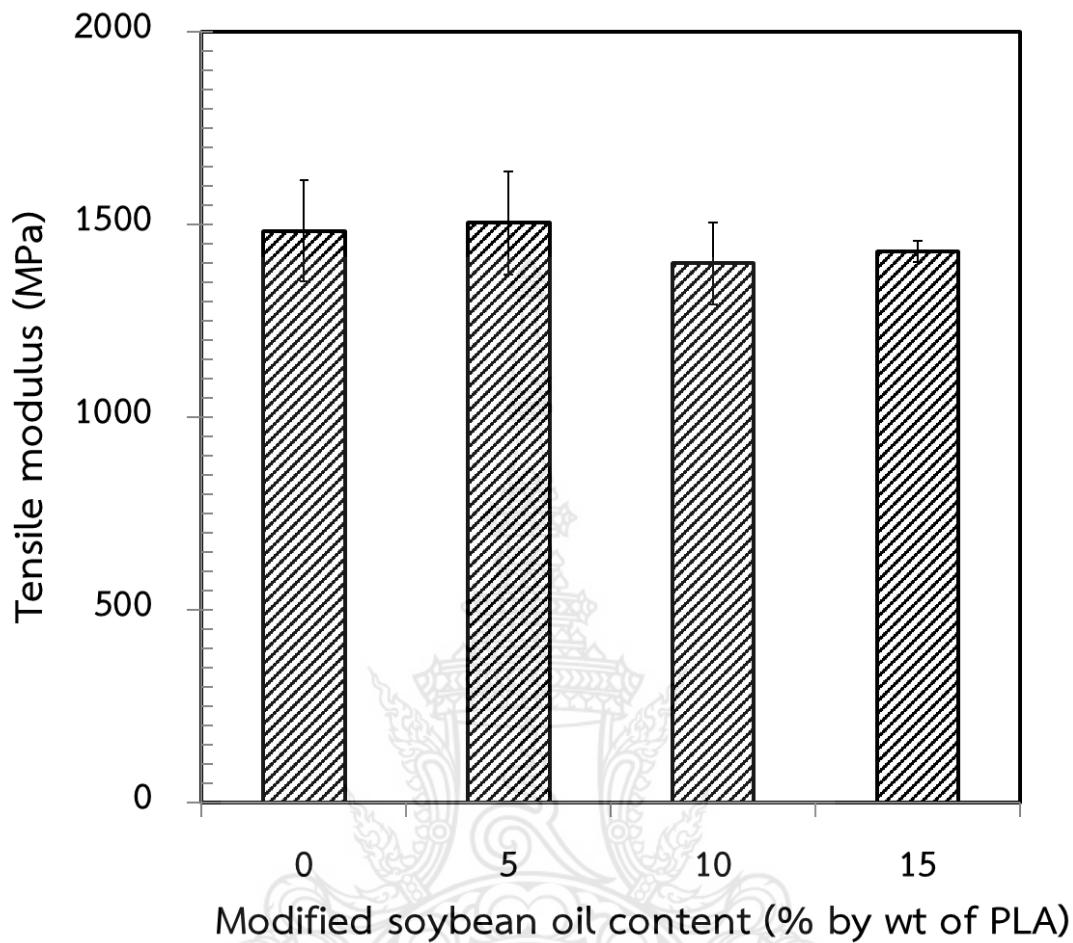


รูปที่ 32 กราฟ ^1H NMR ของน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปร ณ เวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน

จากรูปที่ 32 แสดงกราฟ ^1H NMR ของน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรที่ผ่านการทำปฏิกิริยาไฮโซโนไลซิส ที่ 0, 0.5, 1, 2 และ 3 ชั่วโมง พบว่า การทำปฏิกิริยาไฮโซโนไลซิสทำให้เกิดพีคใหม่ขึ้นที่ 2.5 และ 3.7-3.9 ppm ซึ่งเป็นพีคของไฮโดรเจนในแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นการยืนยันผลว่าในการทำปฏิกิริยาไฮโซโนไลซิสทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิลขึ้นในโครงสร้างของน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการดัดแปร ส่วนผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อความเข้มพีคของกราฟสเปกตรัม ^1H NMR ยังไม่สามารถสังเกตเห็นผลได้ชัดเจนมากนัก

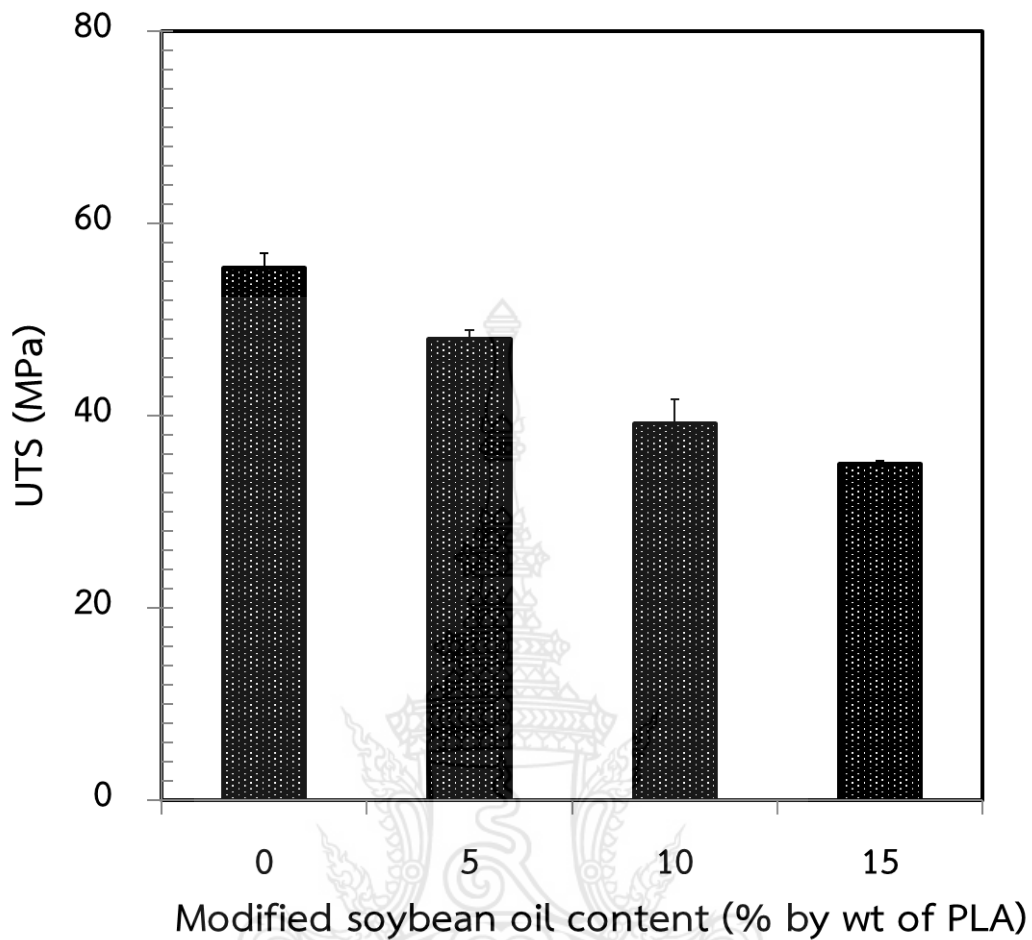
เมื่อทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากเทคนิค FTIR และ NMR เพื่อเลือกเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโซโนไลซิสที่ดีที่สุดในการนำมาเตรียมน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรเพื่อใช้ในการปรับปรุงสมบัติของ PLA ควรเป็นสูตรน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรที่ทำให้ได้หมู่ไฮดรอกซิลที่มากที่สุด และในขณะเดียวกันทำให้เกิดหมู่เอสเทอร์เพิ่มขึ้นด้วย เพื่อช่วยทำให้ PLA และน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรสามารถเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาการลดลงของพันธะคู่ของคาร์บอน และการเกิดหมู่ไฮดรอกซิลขึ้นในโครงสร้างน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรจากผลที่ได้จากเทคนิค FTIR และ ^{13}C NMR พบว่า เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 2 และ 3 ชั่วโมง ให้ผลที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโซโนไลซิสที่ดีที่สุดที่ควรเลือกมาใช้ในการเตรียมน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปร คือ 2 ชั่วโมง เนื่องจากให้ผลไม่แตกต่างจากกรณีเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 3 ชั่วโมง

4.2 ผลการศึกษาหาปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติ PLA



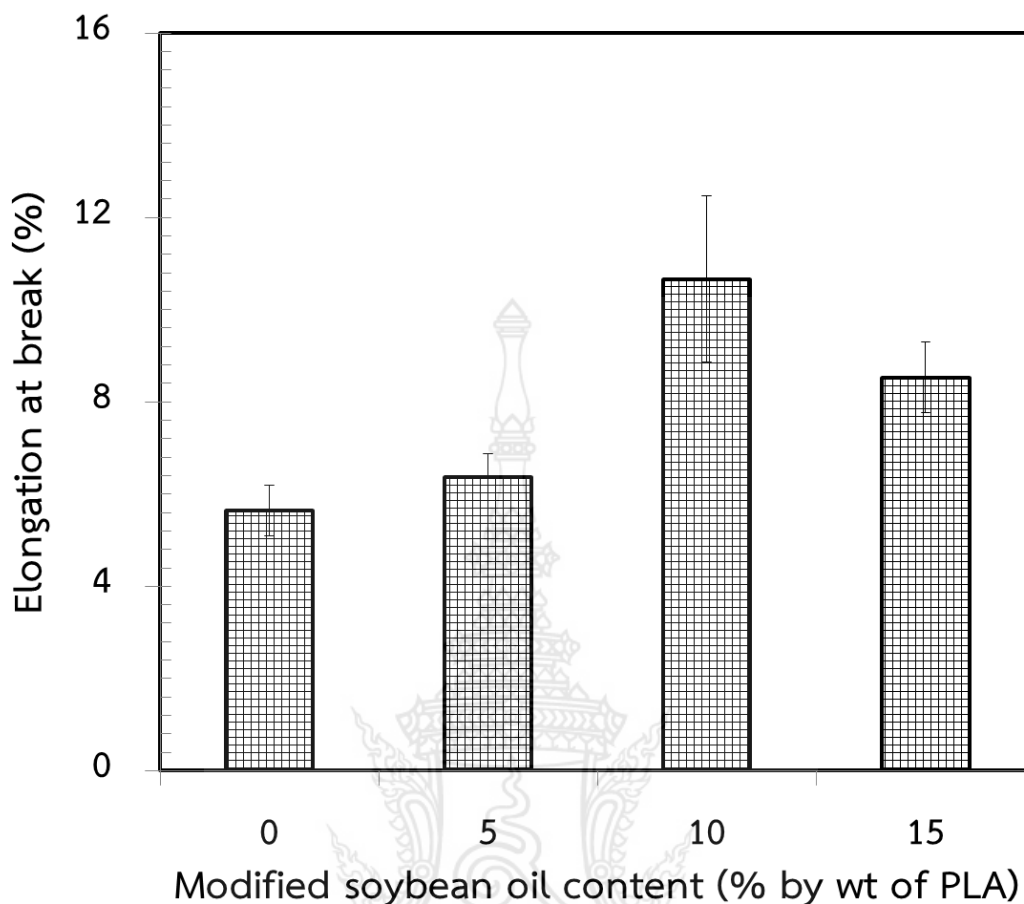
รูปที่ 33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงและปริมาณของน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรด้วยกระบวนการโอโซโนไลซิสที่ 2 ชั่วโมง

รูปที่ 33 แสดงค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเพิ่มปริมาณของน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปร จากกราฟพบว่า ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปร ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงเริ่มลดลง เมื่อปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรมากกว่า 10 %โดยน้ำหนักของ PLA



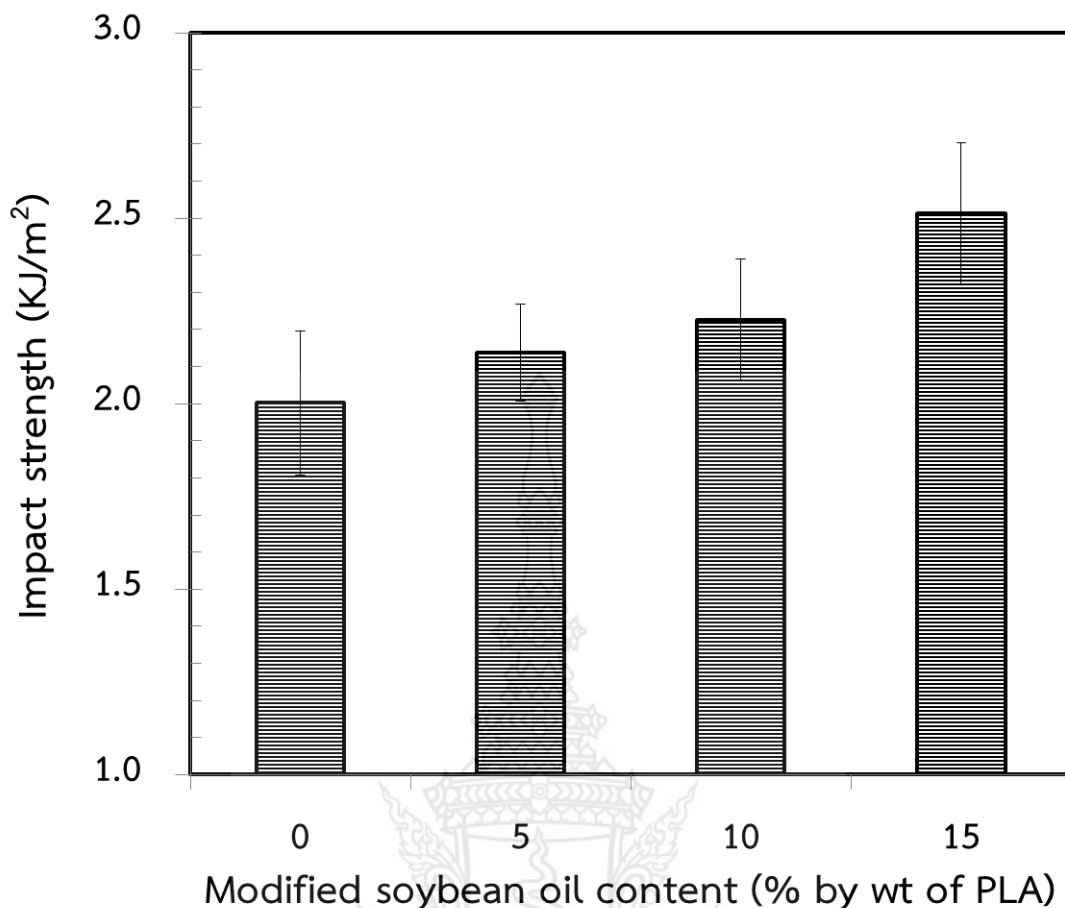
รูปที่ 34 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของ PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการตัดแปรด้วยกระบวนการโอโซนไลซิสที่ 2 ชั่วโมง ปริมาณต่างๆ กัน

รูปที่ 34 แสดงผลของปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของ PLA จากกราฟพบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของ PLA มีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรทำหน้าที่เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ โดยน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรเข้าแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่ของ PLA ทำให้ช่องว่างระหว่างสายโซ่ หรือปริมาตรช่องว่าง (Free volume) เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้แรงดึงดูระหว่างสายโซ่ของ PLA ลดลง การเคลื่อนที่ของสายโซ่จึงเกิดได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 35 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของ PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการดัดแปรด้วยกระบวนการไอโซโนไลซิสที่ 2 ชั่วโมง ปริมาณต่างๆ กัน

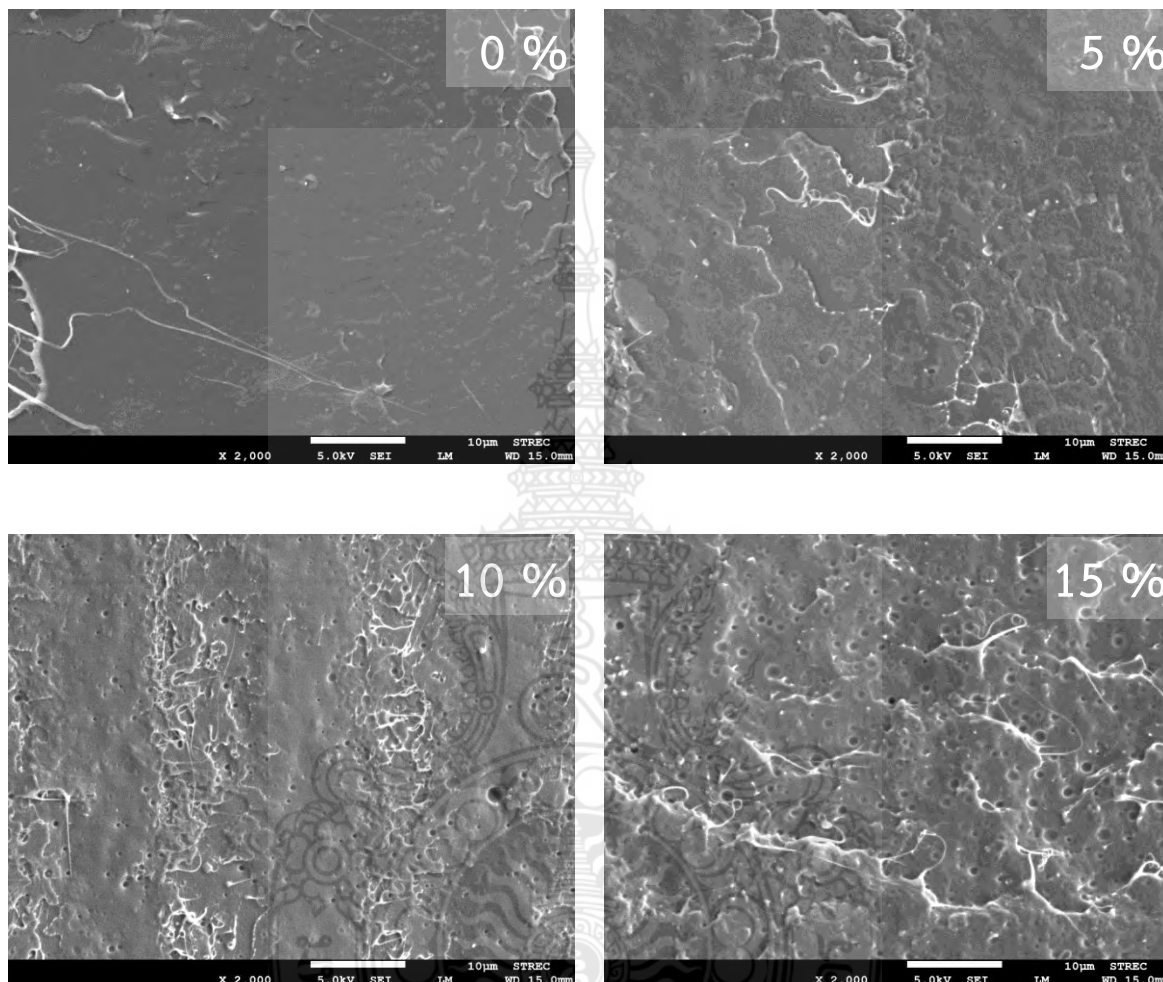
รูปที่ 35 แสดงค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของ PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองปริมาณต่างๆ จากกราฟพบว่า การเติมน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรลงใน PLA มีผลทำให้ PLA เกิดการยืดตัวได้มากขึ้น เมื่อมีปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรมากกว่า 5 %โดยน้ำหนักของ PLA และจากพิจารณาสูตรที่มีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดมากที่สุด คือ สูตรที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปร 10 %โดยน้ำหนักของ PLA โดยมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาด มากกว่ากรณี PLA ที่ปราศจากการเติมน้ำมันถั่วเหลือง ประมาณ 89 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 36 ค่าความต้านทานแรงกระแทกของ PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการดัดแปรด้วยกระบวนการโอโซโนไลซิสที่ 2 ชั่วโมง ปริมาณต่างๆ กัน

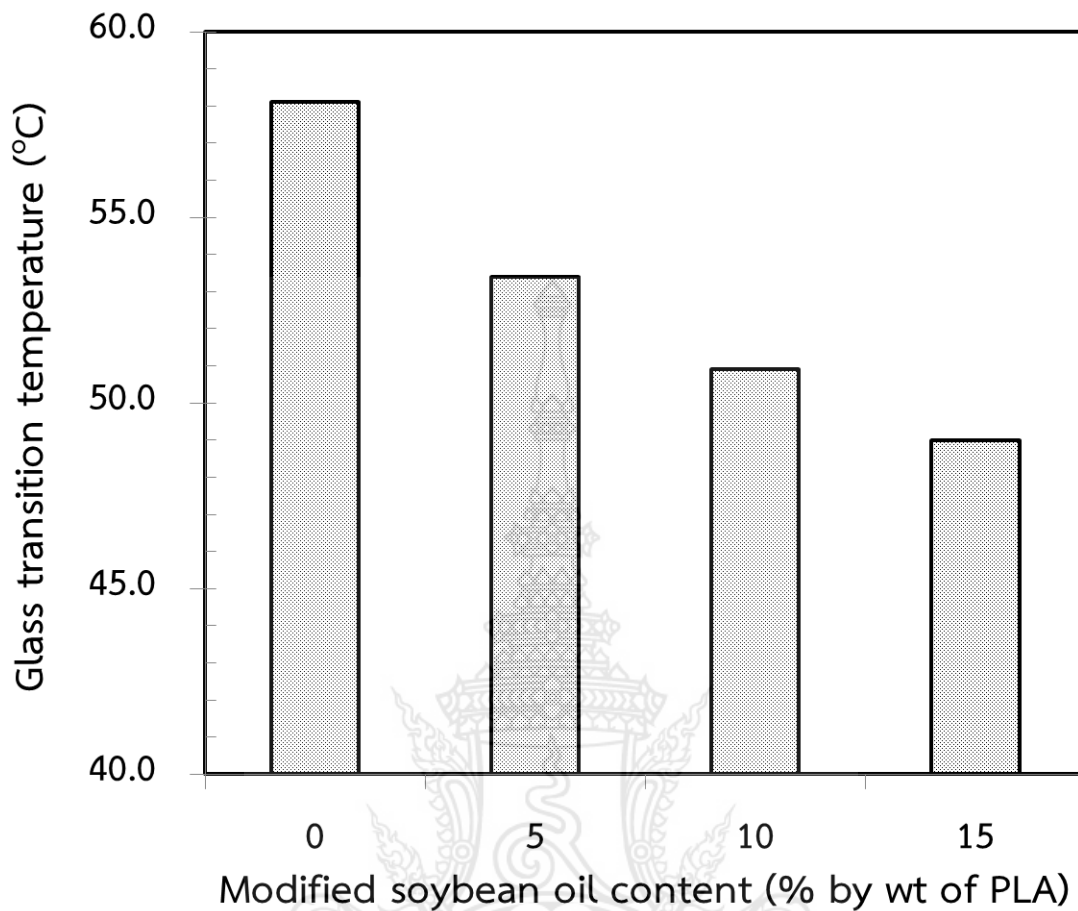
รูปที่ 36 แสดงค่าความต้านทานแรงกระแทกของ PLA ที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปร จากกราฟพบว่า ค่าความต้านทานแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณของน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรเพิ่มมากขึ้น โดยพบการเพิ่มของค่าความต้านทานแรงกระแทกสูงที่สุดสำหรับกรณี PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรปริมาณ 15 %โดยน้ำหนักของ PLA โดยมีค่าความต้านทานแรงกระแทกมากกว่ากรณี PLA ที่ปราศจากการเติม ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคำอธิบายเกี่ยวกับผลการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานแรงกระแทกสามารถอธิบายได้จากภาพถ่ายบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังรูปที่ 37 จากภาพพบว่า ชิ้นงาน PLA ที่ไม่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรมีพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะ ในขณะที่การเติมน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรมีส่วนช่วยทำให้ชิ้นงานมีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น พฤติกรรมการแตกหักที่พบมีลักษณะการแตกหักแบบเหนียว นอกจากนี้ยังพบว่า หยอดของน้ำมันกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน ยิ่งปริมาณน้ำมันมากขึ้นยิ่งทำให้สังเกตเห็นหยดของน้ำมันชัดเจนมากยิ่งขึ้น และพบว่าน้ำมันสามารถกระจายตัวได้ดีใน PLA เนื่องจากหยด

น้ำมันมีขนาดเล็กมาก (ขนาดไม่เกิน 1-2 ไมครอน) และขนาดของหยดน้ำมันมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้แสดงน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการตัดแปรให้มีหมู่ไฮดรอกซิล และเพิ่มปริมาณหมู่เอสเทอร์มีส่วนช่วยทำให้ น้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรสามารถเข้ากันกับ PLA ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 37 ภาพโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรปริมาณต่างๆ กัน ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

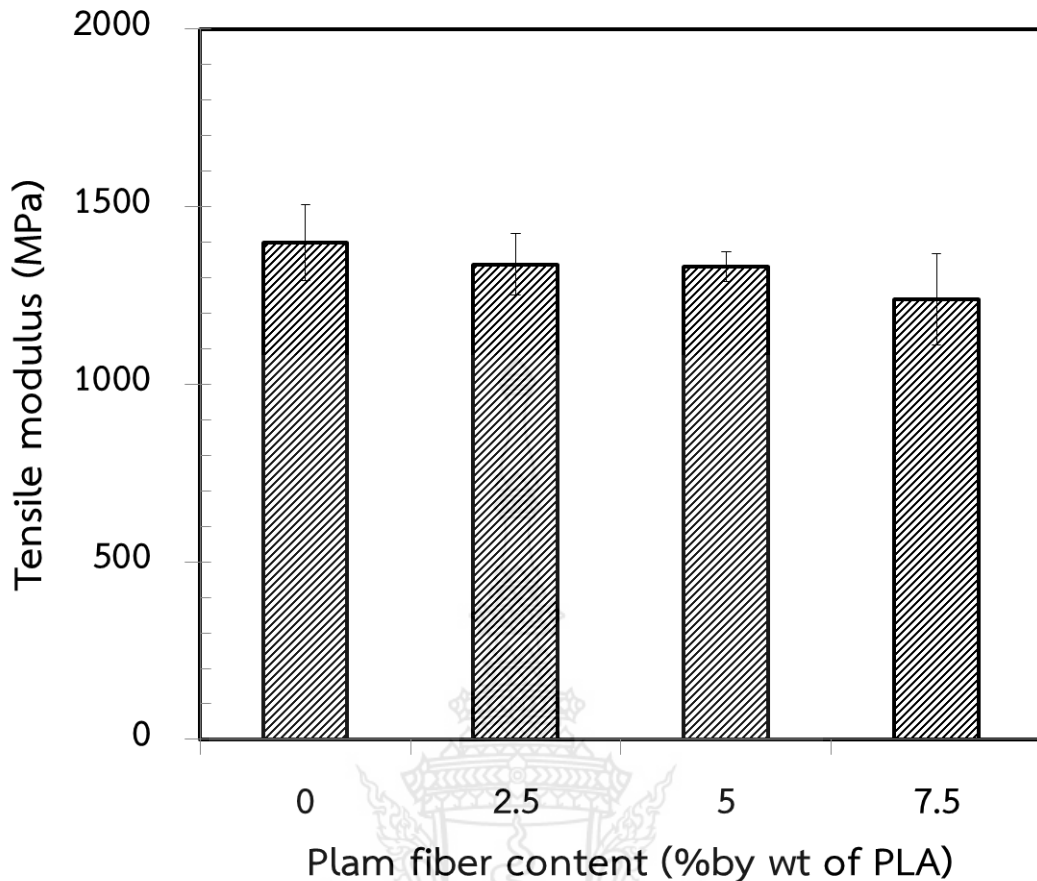
รูปที่ 38 แสดงค่าอุณหภูมิกการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรด้วยกระบวนการโอโซนไลซิส พบว่า การเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรมีส่วนช่วยทำให้อุณหภูมิกการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ PLA ลดลงอย่างชัดเจน ดังนั้นน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรจึงทำหน้าที่เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ให้กับ PLA ผลดังกล่าวช่วยสนับสนุนคำอธิบายของสมบัติทางกล



รูปที่ 38 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปร ปริมาณต่างๆ กัน

4.3 ผลการศึกษาผลของปริมาณเส้นใยปาล์มที่มีผลต่อสมบัติของ PLA และการลดต้นทุน

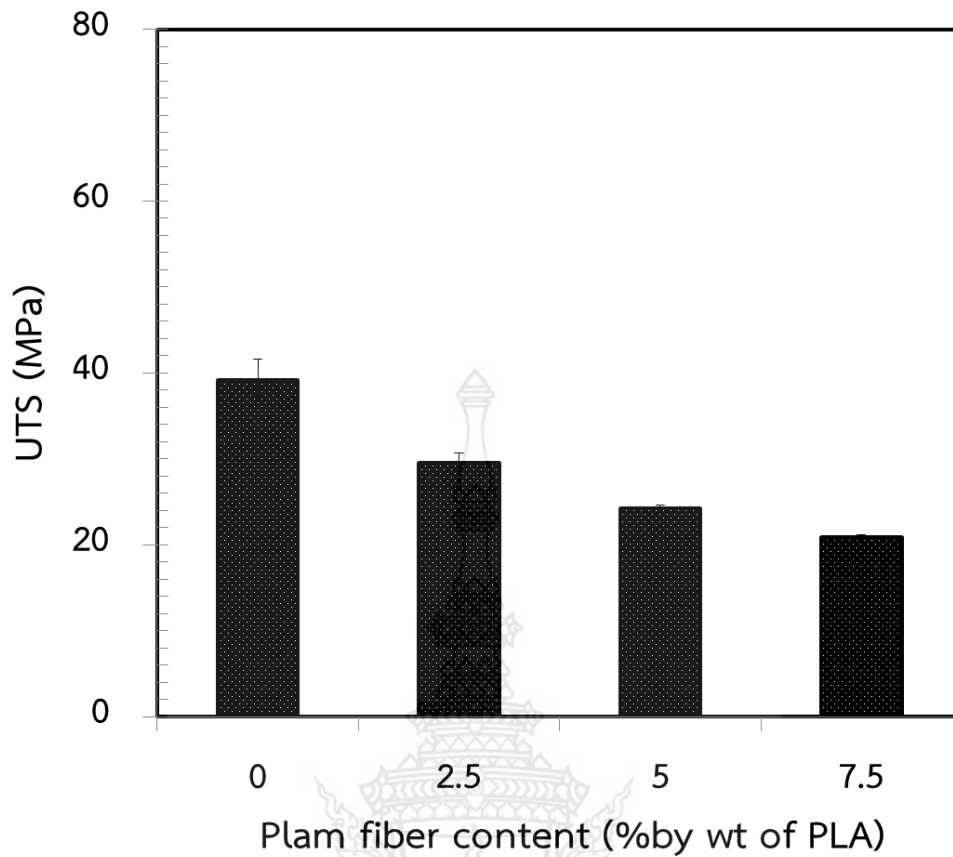
สำหรับการเลือกสูตรของ PLA และน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรที่เหมาะสมสำหรับนำมาทำการศึกษาค้นคว้าของปริมาณเส้นใยปาล์มที่มีต่อสมบัติของ PLA และการลดต้นทุน ทางคณะวิจัยเลือกสูตรที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปร ปริมาณ 10 %โดยน้ำหนักของ PLA มาทำการศึกษา ทั้งนี้เพราะปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปร 10 %โดยน้ำหนักของ PLA มีส่วนช่วยในการปรับค่าความสามารถในการยึดตัว ณ จุดขาดได้อย่างชัดเจนที่สุด ถึงแม้ค่าความต้านทานแรงกระทำของกรณีการเติมน้ำมันถั่วเหลือง 15 %โดยน้ำหนักของ PLA มีค่ามากกว่าก็ตาม แต่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดต่ำกว่ากรณีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปร 10 %โดยน้ำหนักของ PLA และทางคณะผู้วิจัยคาดหวังว่าการเติมเส้นใยปาล์มจะมีส่วนช่วยในการปรับปรุงความต้านทานแรงกระทำให้กับ PLA



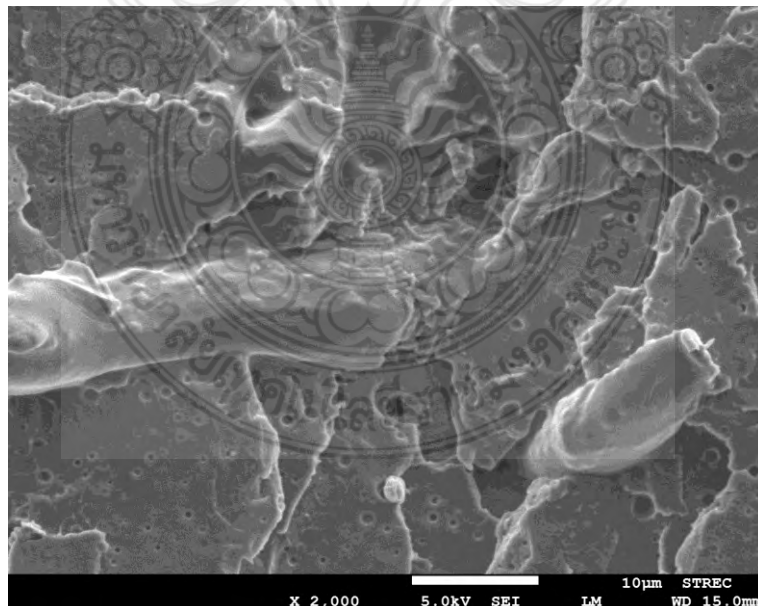
รูปที่ 39 ผลของปริมาณเส้นใยปาล์มที่มีต่อค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงของ PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่ 10 %โดยน้ำหนักของ PLA

รูปที่ 39 แสดงผลของการเติมเส้นใยปาล์มที่มีต่อค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึง พบว่า การเติมเส้นใยปาล์มใน PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่ 10 %โดยน้ำหนักของ PLA ไม่มีผลทำให้ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงเปลี่ยนแปลงมากนัก

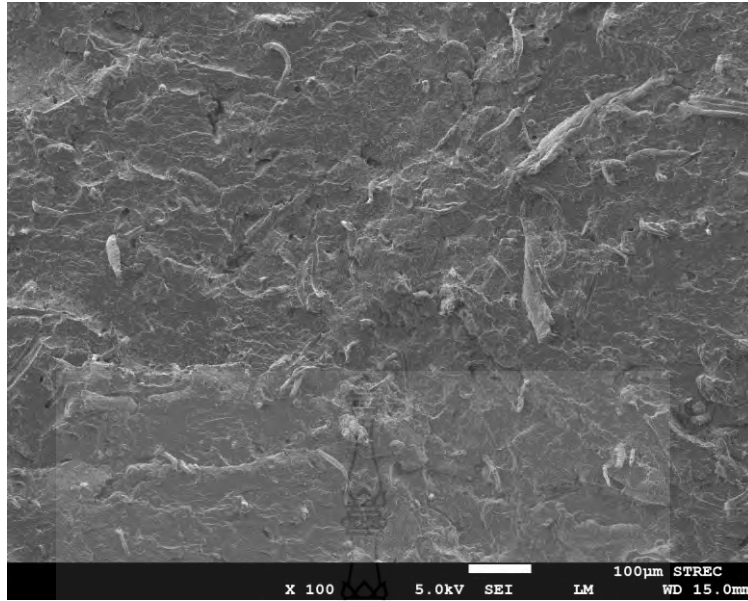
รูปที่ 40 แสดงผลของการเติมเส้นใยปาล์มที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของ PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่ 10 %โดยน้ำหนัก จากกราฟพบว่า การเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันมีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากเส้นใยปาล์มอาจมีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำกว่า PLA การลดลงของค่าความต้านทานแรงดึงไม่ได้มีสาเหตุมาจากแรงยึดเกาะระหว่างเฟสที่มีค่าต่ำ เพราะจากรูปที่ 41 และ 42 แสดงให้เห็นว่า PLA สามารถยึดเกาะกับเส้นใยปาล์มได้เป็นอย่างดี และเส้นใยปาล์มสามารถกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ PLA ตามลำดับ การกระจายตัวของเส้นใยปาล์มที่ดี และการยึดเกาะระหว่างเฟสที่แข็งแรงเป็นผลมาจากน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรซึ่งมีหมู่เอสเทอร์ และหมู่ไฮดรอกซิลช่วยทำหน้าที่เป็นสารคู่ควบระหว่าง PLA และเส้นใยปาล์มน้ำมัน



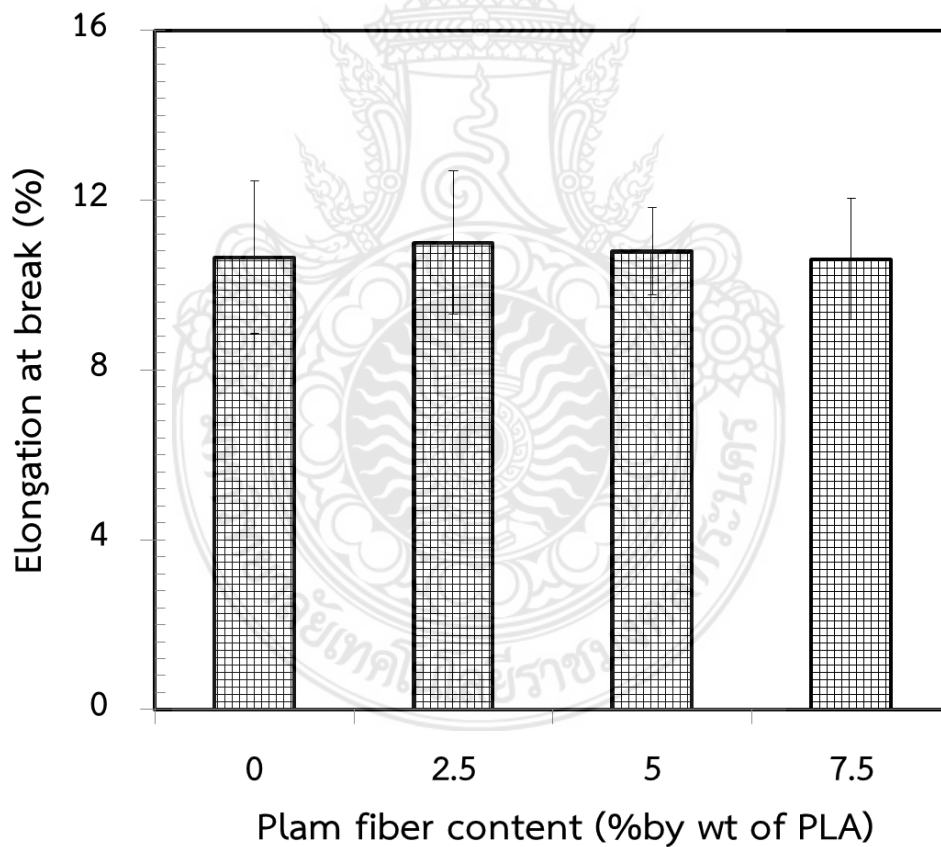
รูปที่ 40 ผลของการเติมเส้นใยปาล์มที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของ PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรที่ 10 %โดยน้ำหนัก



รูปที่ 41 การยึดเกาะระหว่างระหว่าง PLA และผิวของเส้นใยปาล์มน้ำมัน

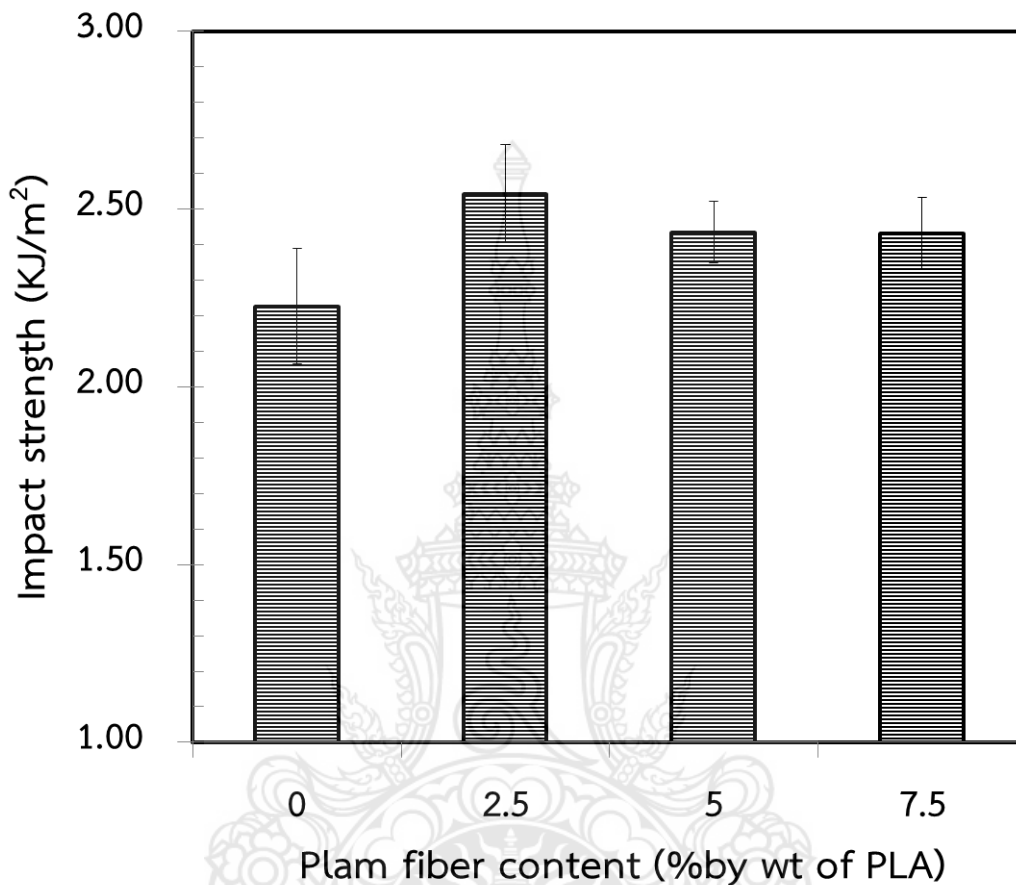


รูปที่ 42 การกระจายตัวของเส้นใยพาล์มน้ำมันในวัสดุผสม PLA ที่มีปริมาณเส้นใยพาล์มน้ำมัน 7.5 % โดยน้ำหนัก



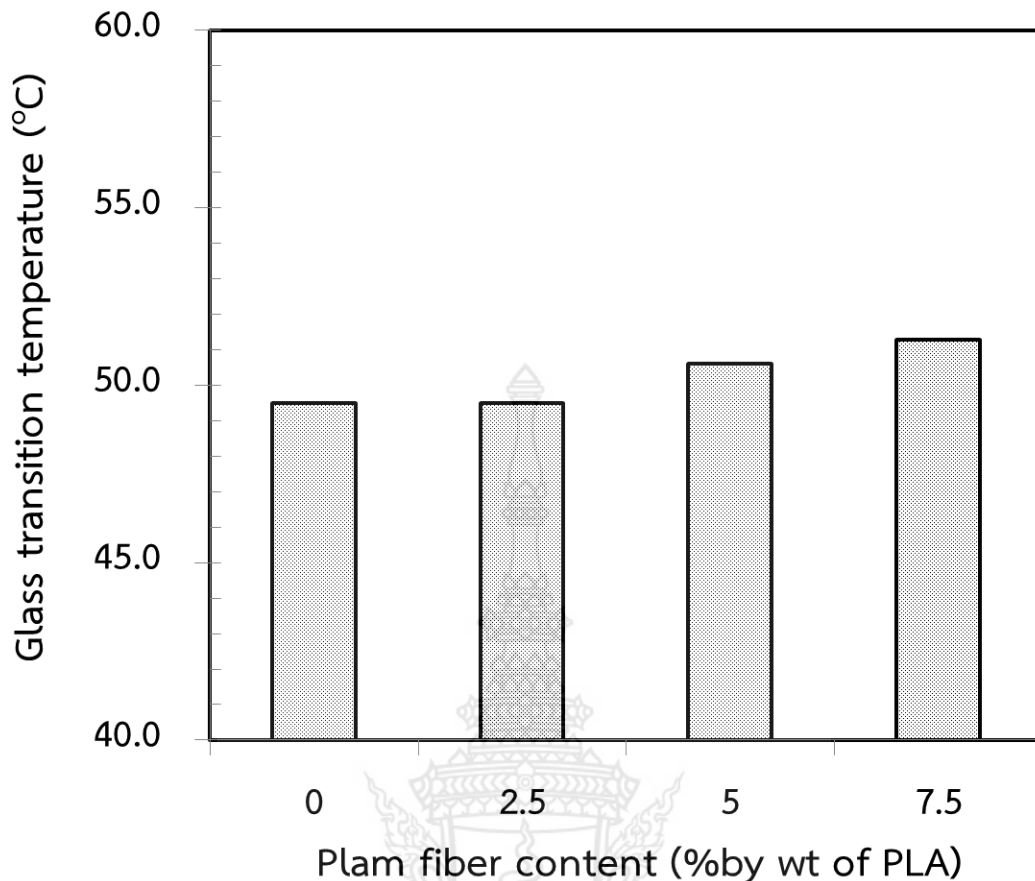
รูปที่ 43 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของ PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่ 10 % และมีการปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใยพาล์ม

รูปที่ 43 แสดงค่าการยึดตัว ณ จุดขาดของวัสดุผสม PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปร 10 % โดยน้ำหนัก และมีการเติมเส้นใยปาล์มปริมาณต่างๆ กัน จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณเส้นใยปาล์มไม่มีผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาดเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 44 ผลของปริมาณเส้นใยปาล์มที่มีต่อค่าความต้านทานแรงกระแทกของ PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปรที่ 10 % โดยน้ำหนักของ PLA

รูปที่ 44 แสดงผลของการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันที่มีต่อค่าความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุผสม PLA จากผลการทดลองพบว่า การเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันมีส่วนช่วยในการปรับปรุงความต้านทานต่อแรงกระแทก แต่ผลของการเพิ่มปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานแรงกระแทกไม่มากนัก การมีอยู่ของเส้นใยปาล์มช่วยดูดซับพลังงานในขณะได้รับแรงกระแทก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเส้นใยปาล์มเป็นเส้นใยที่มีความเหนียว



รูปที่ 45 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่ 10 % และมีการปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใยปาล์ม

รูปที่ 45 แสดงผลของการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันที่มีต่อค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ PLA ในวัสดุผสม จากผลการทดลองพบว่า การมีอยู่ของเส้นใยปาล์มน้ำมันในวัสดุผสม PLA มีผลทำให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเพิ่มสูงขึ้น ผลดังกล่าวนี้ช่วยสนับสนุนคำอธิบายที่ว่า PLA และเส้นใยปาล์มมีการยึดเกาะระหว่างเฟสที่ดีจึงทำให้สายโซ่ PLA เกิดการขยับตัวได้ยากมากขึ้น

จากผลการทดลองทั้งหมดข้างต้น ทางคณะวิจัยได้ทำการเลือกชิ้นงานวัสดุผสมสูตรที่เส้นใยปาล์ม 2.5 % โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นสูตรที่มีผลการทดลองในภาพรวมดีที่สุดมาทำการตรวจปริมาณของโลหะหนักและการเคลื่อนย้ายสารที่มีในชิ้นงาน โดยทำการทดสอบแช่ในของเหลวที่ทำหน้าที่เป็นตัวแทนอาหาร ตามเกณฑ์ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 295 พ.ศ. 2548 โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบกับชิ้นงาน PLA ผลการทดลองเป็นดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งพบว่า ปริมาณของโลหะหนักในเนื้อพลาสติก และปริมาณสารที่เคลื่อนย้ายออกจากชิ้นงานของ PLA และวัสดุผสม PLA และเส้นใยปาล์ม เมื่อทดสอบแช่ในของเหลว 4 ชนิด ที่ทำหน้าที่เป็นตัวแทนอาหาร มีปริมาณต่ำกว่าปริมาณสารสูงสุดที่ให้มีได้ ตามเกณฑ์ของประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 295 ดังนั้นทั้ง PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร และวัสดุผสมระหว่าง

PLA น้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร และเส้นใยปาล์มน้ำมันจึงสามารถนำมาใช้ในการผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารได้

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบเนื้อพลาสติก และทดสอบการเคลื่อนย้ายของสารในเนื้อพลาสติกตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 295 พ.ศ. 2548

รายการทดสอบ	ผลการทดลอง		ปริมาณสารสูงสุดที่ให้มีได้ ตามเกณฑ์ของประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 295* (พ.ศ. 2548)
	PLA	วัสดุผสมระหว่าง PLA น้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร และเส้นใยปาล์มน้ำมัน	
การทดสอบเนื้อพลาสติก			
- ตะกั่ว (mg/kg)	<1.400	1.530	100
- แคดเมียม (mg/kg)	-	-	100
การทดสอบการเคลื่อนย้ายสารในเนื้อพลาสติกเมื่อนำชิ้นงานมาทดสอบแช่ในของเหลวที่เป็นตัวแทนอาหาร ดังต่อไปนี้			
- สารตกค้างที่ระเหยในน้ำ (mg/dm ³)	0.00	0.00	30
- สารตกค้างที่ระเหยในกรดอะซิติก ความเข้มข้นร้อยละ 4 (mg/dm ³)	3.75	4.00	30
- สารตกค้างที่ระเหยในแอลกอฮอล์ ความเข้มข้นร้อยละ 20 (mg/dm ³)	4.50	3.50	30
- สารตกค้างที่ระเหยในนอร์มัลเฮปเทน (mg/dm ³)	5.00	3.50	30

หมายเหตุ * ตามเกณฑ์ของภาชนะบรรจุอาหารที่ทำจากพอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลต

บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผล

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรด้วยกระบวนการโอโซนไลซิสเพื่อนำน้ำมันดังกล่าวมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติด้านความเหนียวของ PLA ส่วนที่สองเป็นนำน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรสูตรที่เหมาะสมมาทำการศึกษาผลของปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่มีต่อสมบัติของ PLA และส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาผลของการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันลงในสูตร PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรเพื่อปรับปรุงความทนแรงกระแทก และทำการทดสอบการเคลื่อนย้ายของสารในเนื้อชิ้นงานเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมในการนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร

5.1 การศึกษาการตัดแปรน้ำมันถั่วเหลืองด้วยกระบวนการโอโซนไลซิส

งานวิจัยในส่วนนี้ได้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการตัดแปรน้ำมันถั่วเหลืองด้วยกระบวนการโอโซนไลซิส โดยทำการปรับเปลี่ยนเวลาในการทำปฏิกิริยา ตั้งแต่ 0 – 3 ชั่วโมง จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR และ NMR พบว่า เวลาที่ในการทำปฏิกิริยาที่ 2 และ 3 ชั่วโมง ให้ผลการทดลองที่ไม่แตกต่างกันมากนัก และให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด คือ ทำให้พันธะคู่ของคาร์บอนลดลงมากที่สุด และเกิดหมู่ไฮดรอกซิลมากที่สุด ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงเลือกเวลาในการทำปฏิกิริยาโอโซนไลซิสที่ 2 ชั่วโมงมาใช้ในการเตรียมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรเพื่อนำมาศึกษาการปรับปรุงสมบัติของ PLA สำหรับงานในส่วนที่ 2 ต่อไป

5.2 การศึกษาหาปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติ PLA

งานวิจัยในส่วนนี้ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรที่มีต่อสมบัติ PLA โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร 0, 5, 10, 15 %โดยน้ำหนักของ PLA และทำการประเมินสมบัติทางกล โดยการทดสอบแรงดึง และแรงกระแทก ทำการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยการใช้เทคนิค DSC และทำตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- สมบัติทางกล พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร ค่ามอดูลัสความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในขณะที่ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ประมาณ 37 เปอร์เซ็นต์ ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าสูงสุดสำหรับกรณีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร 10 %โดยน้ำหนักของ PLA มีค่าเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 89 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่าความต้านทานแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์

- สมบัติทางความร้อน พบว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร ทั้งนี้ชี้ว่าน้ำมันถั่วเหลืองทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ให้กับ PLA จึงทำให้ PLA เกิดการยึดตัวได้ง่ายขึ้น และมีความเหนียวเพิ่มสูงขึ้น
- ลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่า การเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรมีผลทำให้ PLA มีพฤติกรรมการแตกหักเปลี่ยนแปลงไปจากการแตกหักแบบเปราะเปลี่ยนไปเป็นการแตกหักแบบเหนียว ทั้งนี้เป็นเพราะน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านตัดแปรทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่เข้ากันได้กับ PLA มากขึ้น จึงทำให้น้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรการกระจายตัวเป็นหยดน้ำมันขนาดเล็กมากได้อย่างทั่วถึงทั้งชิ้นงาน

5.3 การศึกษาผลของปริมาณเส้นใยปาล์มที่มีผลต่อสมบัติของ PLA และการลดต้นทุน

งานวิจัยในส่วนนี้ได้เลือกสูตรการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรสูตรที่ดีที่สุดมาทำการศึกษาการปรับปรุงความเหนียว และลดต้นทุนโดยการศึกษาผลของการเติมเส้นใยปาล์ม โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใยปาล์ม 0 – 7.5 % โดยน้ำหนัก และทำการประเมินสมบัติทางกล ทางความร้อน และทางสัณฐานวิทยาเช่นเดียวกับการวิจัยในส่วนที่ 2 และทำการทดสอบการเคลื่อนย้ายของสารออกจากชิ้นงานวัสดุผสมจากการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- สมบัติทางกล พบว่า การเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันมีผลทำให้วัสดุผสมมีค่าความต้านแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้น แต่มีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดลดลง แต่ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึง และการยึดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมัน
- สมบัติทางความร้อน พบว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมัน
- ลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่า เส้นใยปาล์มน้ำมันมีการกระจายได้ดี และมีการยึดเกาะระหว่างเฟสที่แข็งแรงระหว่าง PLA และเส้นใยปาล์มน้ำมัน ทั้งนี้เป็นเพราะน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการตัดแปรมีหมู่เอสเทอร์ และหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เข้ากันได้กับ PLA และเส้นใยปาล์มตามลำดับ น้ำมันถั่วเหลืองตัดแปรจึงทำหน้าที่เป็นสารคู่ควบให้กับ PLA และเส้นใยปาล์มน้ำมัน
- การทดสอบการเคลื่อนย้ายของสาร พบว่า ปริมาณของโลหะหนักในเนื้อของพลาสติก และปริมาณของสารที่เคลื่อนย้ายออกจากชิ้นงาน PLA และวัสดุผสม PLA และเส้นใยปาล์มน้ำมันที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร เมื่อทดสอบแช่ในของเหลวที่ทำหน้าที่เป็นตัวแทนอาหารอยู่ภายใต้เกณฑ์ที่กำหนดตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 295 ดังนั้นทั้ง PLA ที่มีการเติมน้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร และวัสดุผสมระหว่าง PLA น้ำมันถั่วเหลืองตัดแปร และเส้นใยปาล์มน้ำมันจึงสามารถนำมาใช้ในการผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารได้

เอกสารอ้างอิง

1. <http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/pubs/msw2009-fs.pdf>
2. Auras, R., Lim, L. T., Selke, S. E. M. and Tsuji, H., 2010, **Poly(Lactic Acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications**, John Wiley & Sons, Inc.
3. Boonfaung, P., Wasutchanon, P. and Somwangthanaroj, A., 2011, “Development of Packaging Film from Bioplastic Polylactic Acid (PLA) with Plasticizers”, **PACCON2011 (Pure and Applied Chemistry International Conference 2011)**, Bangkok, Thailand, pp. 621-624.
4. Giita Silverajah, V.S., Ibrahim, N.A., Zainuddin, N., Wan Yunus, W.M.Z. and Hassan, H.A., 2012, “Mechanical, Thermal and Morphological Properties of Poly(lactic acid)/Epoxidized Palm Olein Blend”, **Molecules**, Vol. 17, pp. 11729-11747.
5. Ašhabi, L., Jafari, S.H., Khonakdar, H.A., Hüssler, L., Wagenknecht, U. and Heinrich, G., 2013, “Non-isothermal Crystallization Behavior of PLA/LLDPE/nanoclay Hybrid: Synergistic Role of LLDPE and Clay”, **Thermochimica Acta**, Vol. 565, pp. 102-113.
6. Bitinis, N., Sanz, A., Nogales, A., Verdejo, R., Lapez-Manchado, M.A. and Ezquerro, T.A., 2012, “Deformation Mechanisms in Polylactic Acid/Natural Rubber/Organoclay Bionanocomposites as Revealed by Synchrotron X-ray Scattering”, **Soft Matter**, Vol. 8, pp. 8990-8997.
7. Zhang, C., Huang, Y., Luo, C., Jiang, L. and Dan, Y., 2011, “Enhanced Ductility of Polylactide Materials: Reactive Blending with Pre-hot Sheared Natural Rubber”, **Journal of Polymer Research**, Vol. 20, pp. 1-9.
8. Csizmadia, R., Faludi, G., Renner, K., Móczó, J., Pukánszky, B., 2013, “PLA/Wood Biocomposites: Improving Composite Strength by Chemical Treatment of the Fibers”, **Composites: Part A**, Vol. 53, pp. 46-53.
9. Mohd Sis, A.L., Ibrahim, N.A., Wan Yunus, W.M.Z., 2013, “Effect of (3-aminopropyl)trimethoxysilane on Mechanical Properties of PLA/PBAT Blend Reinforced Kenaf Fiber”, **Iran Polymer Journal**, Vol. 22, pp. 101-108.
10. Shinoj, S., Visvanathan, R., Panigrahi, S., Kochubabu, M., 2011, “Oil Palm Fiber (OPF) and its Composites: A Review”, **Industrial Crops and Products**, Vol. 33, pp.7-22.

11. Garlotta, D., 2001, "A Literature Review of Poly(Lactic Acid)", **Journal of Polymers and the Environment**, Vol. 9, pp. 63-84.
12. Adsul, M. G., Varmab, A. J. and Gokhale, D. V., 2007, "Lactic Acid Production from Waste Sugarcane Bagasse Derived Cellulose", **Green Chemistry**, Vol. 9, pp. 58-62.
13. Gupta, B., Revagade, N. and Hilborn, J., 2007, "Poly(lactic acid) Fiber: An Overview" **Progress in Polymer Science**, Vol. 34, pp. 455-482.
14. อมรรรัตน์ เลิศวรสิริกุล, 2554, "พอลิแลกติกแอซิด : พอลิเอสเทอร์จากทรัพยากรที่สร้างทดแทนใหม่ได้", **วิศวกรรมสาร**, ฉบับที่ 77, หน้า 99-110.
15. Luqman, M., 2012, **Recent Advances in Plasticizers**, Intech, Croatia, pp. 141-144.
16. Tran, P., Graiver, D. and Narayan, R., 2005, "Ozone-Mediated Polyol Synthesis from Soybean Oil", **Journal of the American Oil Chemists' Society**, Vol. 82, pp. 653-659.
17. Sjöström, E., 1993, **Wood Chemistry Fundamentals and Application**, 2nd ed., Academic Press, INC., New York, pp. 55-89.
18. Blezzki, A.K. and Gassan, J., 1999, "Composites Reinforced with Cellulose based Fibres", **Progress in Polymer Science**, Vol. 24, pp. 221-274.
19. Kirk and Othmer, 1998, **Encyclopedia of Chemical Technology**, Vol. 25, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., pp. 627-647.
20. Rowell, R.M., 2005, **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**, Chapter 3, CRC Press, Danvers, pp. 1-12.
21. Nampitch, T. and Magaraphan, R., 2010, "The Properties of Polymer Blends between Poly(lactic) Acid and Epoxidized Natural Rubber Irradiated in the Rubber Phase", **Proceedings of the 17th IAPRI World Conference on Packaging**, China.
22. Wahit, M.U., Hassan, A., Ibrahim, A.N., Zawawi, N.A. and Kunasegeran, K., 2105, "Mechanical, Thermal and Chemical Resistance of Epoxidized Natural Rubber Toughened Polylactic Acid Blends", **Sains Malaysiana**, Vol. 44, pp. 1615-1623.
23. ASTM D638, 2014, **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**.
24. ASTM D256, 2003, **Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics**.
25. Vasanthan, N., Ly, O., 2009, "Effect of microstructure on hydrolytic degradation studies of poly (l-lactic acid) by FTIR spectroscopy and differential scanning calorimetry", **Polymer Degradation and Stability**, Vol. 94, pp. 1364-1372.

ประวัตินักวิจัย

หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ - นามสกุล

(ภาษาไทย) กัลทิมา เชาว์ชาญชัยกุล
(ภาษาอังกฤษ) Kantima Chaochanchaikul

2. ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

3. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง
เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์ 02 836 3000
E-mail : kantima.c@rmutp.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

วท.บ. (วัสดุศาสตร์)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วศ.ม. (เทคโนโลยีวัสดุ)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปร.ด. (เทคโนโลยีวัสดุ)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

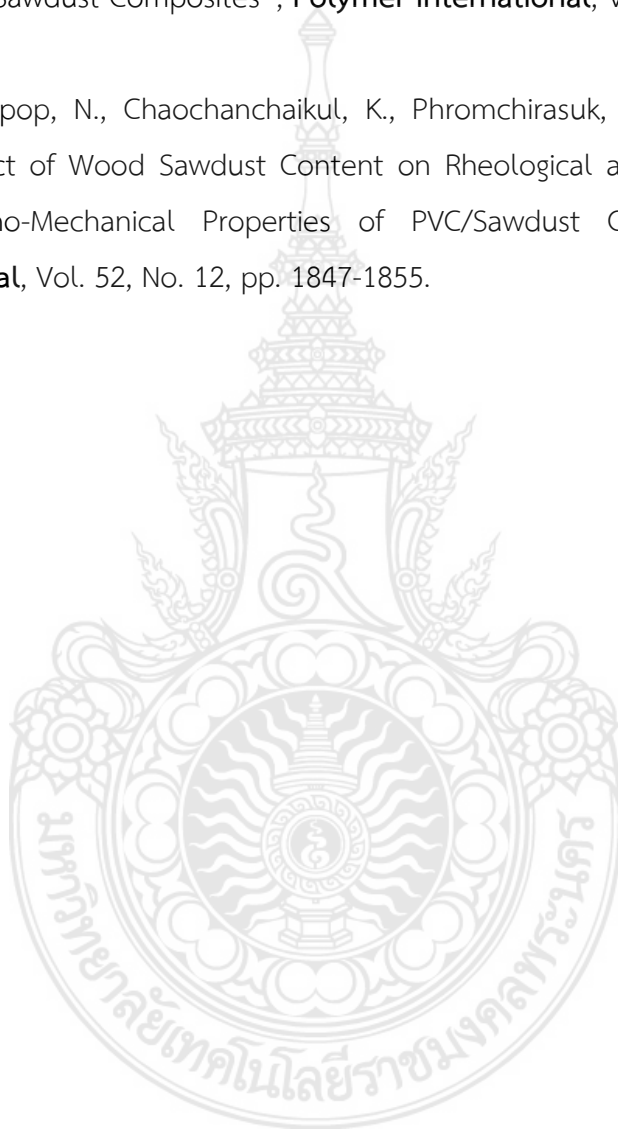
Polymer Composites
Wood/Natural Fiber Plastic Composites
Polymer Degradation

6. ประสบการณ์งานวิจัย

1. Tomyangkul, S., Pongmuksuwan, P., Harnnarongchai, W. and Chaochanchaikul K., 2016, "Enhancing Sound Absorption Properties of Open-cell Natural Rubber Foams with Treated Bagasse and Oil Palm Fibers", **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, Vol. 35, pp. 672-681.
2. Harnnarongchai, W. and Chaochanchaikul, K., 2015, "Effect of Blowing Agent on Cell Morphology and Acoustic Absorption of Natural Rubber Foam", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 25-29.
3. Chaochanchaikul, K. and Harnnarongchai, W., 2015 "Influence of Multifunctional Monomers on Gamma Irradiated Polylactic Acid", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 59-62.
4. Chaochanchaikul, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2013, "Photodegradation and UV Penetration Profiles of PVC Compound and Wood/PVC Composites under UV Weathering", **Express Polymer Letters**, Vol. 7, No. 2, pp. 146-160.
5. Chaochanchaikul, K., Jayaraman, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2012, "Influence of Lignin Content on Photodegradation in Wood/HDPE Composites under UV Weathering", **BioResources**, Vol. 7, No. 1, pp. 38-55.
6. Chaochanchaikul, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2011, "Structural and Thermal Stabilizations of PVC and Wood/PVC Composites by Metal Sterates and Organotin", **BioResources**, Vol. 6, No. 3, pp. 3115-3131.
7. Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2011, "Stabilizations of Molecular Structures and Mechanical Properties of PVC and Wood/PVC Composites by Tinuvin and TiO₂ Stabilizers", **Polymer Engineering and Science**, Vol. 51, No. 6, pp. 1354-1365.
8. Pattamasattayasonti, N., Chaochanchaikul, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2010, "Effects of UV-Weathering Aging and CeO₂ Based Coating Layer on Mechanical and Structural Changes in Wood/PVC Composites", **Journal of Vinyl & Additive Technology**, Vol. 17, No. 1, pp. 9-16.
9. Pulngern, T., Choocheepsakul, S., Padyenchean, C., Rosarpitak, V., Prapruit, W., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2010, "Effects of Cross-section Design

- and Loading Direction on Creep and Fatigue Properties of Wood/PVC Composite Beams”, **Journal of Vinyl & Additive Technology**, Vol. 16, No. 1, pp. 42-49.
10. Sombatsompop, N., Prapruit, W., Chaochanchaikul, K., Pulngern, T. and Rosarpitak, V., 2010, “Effect of Cross-section Design and Testing Conditions on Flexural Properties of Wood/PVC Composite Beams”, **Journal of Vinyl & Additive Technology**, Vol. 16, No. 1, pp. 33-41.
 11. Chaochanchaikul, K., Kositchaiyong, A., and Sombatsompop, N., 2009, “Blending Techniques Affecting Mechanical and Morphological Properties of Fly Ash/LDPE and CaCO₃/LDPE Composites”, **Polymers & Polymer Composites**, Vol. 17, No. 5, pp. 281-290.
 12. Sombatsompop, N., Taptim, K., Chaochanchaikul, K., Thongpin, C. and Rosarpitak, V., 2008, “Improvement of Structural and Thermal Stabilities of PVC and Wood/PVC Composites by Pb and Zn Stearates, and Zeolite”, **Journal of Macromolecular Science. Part A: Pure and Applied Chemistry**, Vol. 45, No. 7, pp. 534-541.
 13. Tungjitpornkull, S., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2007, “Mechanical Characterization of E-Chopped Strand Glass Fiber Reinforced Wood/PVC Composites”, **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, Vol. 20, No. 6, pp. 535-550.
 14. Chotirat, L., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2007, “On Adhesion Mechanisms and Interfacial Strength in ABS/Wood Sawdust Composites”, **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Vol. 27, No. 8, pp. 669-678.
 15. Sombatsompop, N., Uawongsuwan, P. and Chaochanchaikul, K., 2007, “Effect of Molecular Structure on Extrudate Swell Behavior for Different Thermoplastic Melts in an Electro-magnetized Die”, **Polymer Engineering and Science**, Vol. 47, No. 3, pp. 270-280.
 16. Prachayawarakorn, J., Kumsri, J., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2006, “Effects of Compatibilizer Type and Rubber-Wood Sawdust Content on the Mechanical, Morphological and Thermal Properties of PVC/LDPE Blend”, **Journal of Applied Polymer Science**, Vol.102, No. 1, pp. 598-606.

17. Sombatsompop, N. and Chaochanchaikul, K., 2005, "Average Mixing Torque, Tensile and Impact Properties and Thermal Stability of PVC/Sawdust Composites with Different Silane Coupling Agents", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 96, No. 1, pp. 213-221.
18. Sombatsompop, N. and Chaochanchaikul, K., 2004, "Effect of Moisture Content on Mechanical Properties, Thermal and Structural Stability, and Extrudate Texture of PVC/Wood Sawdust Composites", **Polymer International**, Vol. 53, No. 9, pp. 1210-1218.
19. Sombatsompop, N., Chaochanchaikul, K., Phromchirasuk, C. and Thongsang, S., 2003, "Effect of Wood Sawdust Content on Rheological and Structural Changes, and Thermo-Mechanical Properties of PVC/Sawdust Composites", **Polymer International**, Vol. 52, No. 12, pp. 1847-1855.



ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล

(ภาษาไทย) วัลลภ หาญณรงค์ชัย
(ภาษาอังกฤษ) Wanlop Harnnarongchai

2. ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและเทคโนโลยีการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

3. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก

คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง
เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์ 02 5874335
E-mail : wanloph@kmutnb.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

วศ.บ.(วิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วศ.ม. (เทคโนโลยีวัสดุ)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปร.ด. (เทคโนโลยีวัสดุ)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Polymer Composites
Polymer Processing and Rheology

6. ประสบการณ์งานวิจัย

1. Tomyangkul, S., Pongmuksuwan, P., Harnnarongchai, W. and Chaochanchaikul K., 2016, “Enhancing Sound Absorption Properties of Open-cell Natural Rubber Foams with Treated Bagasse and Oil Palm Fibers”, **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, Vol. 35, pp. 672-681.

2. Harnnarongchai, W. and Chaochanchaikul, K., 2015, "Effect of Blowing Agent on Cell Morphology and Acoustic Absorption of Natural Rubber Foam", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 25-29.
3. Chaochanchaikul, K. and Harnnarongchai, W., 2015 "Influence of Multifunctional Monomers on Gamma Irradiated Polylactic Acid", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 59-62.
4. Makkam, S. and Harnnarongchai, W., 2014, "Rheological and Mechanical Properties of Recycled PET Modified by Reactive Extrusion", **Energy Procedia**, Vol. 56, pp. 547-553.
5. Harnnarongchai, W., Kaschta, J., Schubert, D., and Sombatsompop, N., 2012, "Shear and Elongational Flow Properties of Peroxide Modified Wood/LDPE Composite Melts", **Polymer Composites**, Vol. 33, No. 11, pp. 2084-2094.
6. Kraiyaded, W., Wimolmala, E., Harnnarongchai, W., Sitticharoen, W., Intawong, N-T and Sombatsompop, N., 2012, "Die Rotating Technique for Sharkskin Minimization in Highly Viscous Wood/PP Composites Melt in Extrusion Die", **Polymer Testing**, Vol. 125, No. 3, pp. 2312-2321.
7. Sitticharoen, W., Harnnarongchai, W., Intawong, N-T and Sombatsompop, N., 2012, "Melt Strength, Local Velocity and Elongational Viscosity Profiles of LDPE Filament Affected by Die Design and Process Conditions", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 124, No. 5, pp. 3751-3764.
8. Harnnarongchai, W., Sitticharoen, W., Intawong, N-T and Sombatsompop, N., 2011, "Mechanical Strength of Molten and Solidified LLDPE/LDPE Blend and Wood/LDPE Composite under Tensile Deformations", **Journal of Vinyl & Additive Technology**, Vol. 17, No. 3, pp. 164-176.
9. Harnnarongchai, W., Intawong, N-T and Sombatsompop, N., 2011, "Effect of Roller Speed, Die Temperature, Volumetric Flow Rate and Multiple Extrusions on Mechanical Strength of Molten and Solidified LDPE under Tensile Deformation", **Journal of Macromolecular Science Part B : Physic.**, Vol. 50, No. 6, pp. 1074-1086.