

พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลืองมาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลัง

นายนพจ เคียงกิติวรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

POLYMER COMPOSITE OF POLY(LACTIC ACID)/SOYBEAN OIL MALEATE GRAFTED
CASSAVA STARCH

Mr. Nopparut Kiangkitiwan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile Technology
Department of Materials Science
Faculty of Science
Academic Year 2012
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลือง มาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลัง
โดย	นายณพรุจ เคียงกิติวรรณ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.กาวี ศรีกุลกิจ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษา แสงวัฒนาโรจน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.กาวี ศรีกุลกิจ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว อัจฉรงค์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ไพพรรณ สันติสุข)

นพรุจ เคียงกิติวรณ : พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลือง
 มาลีเอตกราฟต์แบ้งมันสำปะหลัง. (POLYMER COMPOSITE OF POLY(LACTIC
 ACID)/SOYBEAN OIL MALEATE GRAFTED CASSAVA STARCH)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.กาวิ ศรีกุลกิจ, 113 หน้า.

พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายในธรรมชาติ แต่มีข้อจำกัดในการใช้งานคือ มีราคาสูง และมีสมบัติที่ไม่ดีเมื่อเทียบกับพลาสติกที่ได้จากปิโตรเลียม แนวทางแก้ไขอย่างหนึ่งคือการทำพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิดกับแป้ง เนื่องจากแป้งเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีอยู่มาก หาง่าย และมีราคาถูก แต่ทว่าพอลิแล็กติกแอซิดมีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ส่วนแป้งมีความชอบน้ำ (hydrophilic) จึงไม่สามารถเข้ากันได้ ทำให้มีสมบัติเชิงกลที่แย่งลง ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเตรียมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (น้ำมันถั่วเหลือง มาลีเอตกราฟต์แบ้งมันสำปะหลัง) จากการนำน้ำมันถั่วเหลืองมาลีเอตที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการกราฟต์ของน้ำมันถั่วเหลืองกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่สัดส่วนต่างๆ โดยใช้โคคิวมิลเปอร้ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มในการเกิดปฏิกิริยา มาดัดแปรลงบนพื้นผิวของแป้งมันสำปะหลัง จากนั้นนำไปผสมกับพอลิแล็กติกแอซิดโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่แล้วทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดแบบ แล้ววิเคราะห์ความเข้ากันได้ ความเป็นผลึก สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เตรียมได้ ซึ่งพบว่าการผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรลงในพอลิแล็กติกแอซิดไม่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อนและความเป็นผลึกของพอลิเมอร์คอมพอสิต แต่ส่งผลทำให้มีสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดยเฉพาะพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้งสองสัดส่วนที่อัตราส่วน 90:10 และ 80:20 เป็นสูตรที่เข้ากันได้ดี มีสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต
 สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
 ปีการศึกษา 2555

5372432023 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS : POLY(LACTIC ACID)/ STARCH BLEND/ MALEATED SOYBEAN OIL/

SOYBEAN OIL GRAFTED STARCH

NOPPARUT KIANGKITIWAN: POLYMER COMPOSITE OF POLY(LACTIC ACID)/SOYBEAN OIL MALEATE GRAFTED CASSAVA STARCH.

ADVISOR: ASSOC.PROF. KAWEE SRIKULKIT, Ph.D., 113 pp.

Poly(lactic acid), PLA is a biodegradable polymer, but its applications are limited by its high cost and relatively poorer properties when compared to petroleum based plastics. Blending PLA with starch is one of the most promising efforts, because starch is an abundant and cheap biopolymer. However, the challenge is the major problem associated with poor interfacial adhesion between the hydrophilic starch granules and the hydrophobic PLA, leading to poorer mechanical properties. In this research, soybean oil maleate (SOMA) was synthesized by grafting soybean oil with various weight percents of maleic anhydride (MA) using dicumyl peroxide (DCP) as an initiator. Then, SOMA was employed for modifying the surface of cassava starch powder, resulting in SOMA-g-STARCH. The obtained SOMA-g-STARCH was mixed with PLA in various weight ratios using twin-screw extruder, resulting in PLA/SOMA-g-STARCH. Finally, the obtained PLA/SOMA-g-STARCH composites were prepared by a compression molding machines. The compatibility, crystallinity, thermal properties, morphology properties and mechanical properties were characterized and evaluated. The results showed that the addition of modified cassava starch has no effect on the crystallinity and thermal properties of PLA in the composite. In contrast, the compatibility, morphology properties and mechanical properties were improved. Especially, at ratios 90:10 and 80:20 of PLA/SOMA10%-g-STARCH and PLA/SOMA20%-g-STARCH were the best.

Department : Materials Science..... Student's Signature

Field of Study : Applied Polymer Science and Textile Technology. Advisor's Signature

Academic Year : 2012.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ได้อย่างสมบูรณ์เป็นเพราะได้รับความร่วมมือจากบุคคลหลายด้าน ทั้งคำแนะนำทางวิชาการ ความเอื้อเฟื้อทางด้านวัสดุ อุปกรณ์เครื่องมือ และสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคล และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

1. รองศาสตราจารย์ ดร.ภาวี ศรีกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษา และแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคำแนะนำในการแก้ไขปัญหาและสนับสนุนงานวิจัยเป็นอย่างดี และกรุณาในการตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษา แสงวัฒนาโรจน์ ที่สละเวลามาเป็นประธานสอบวิทยานิพนธ์
3. รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว อัจจงค์ และรองศาสตราจารย์ไพพรรณ สันติสุข ที่สละเวลามาเป็นกรรมสอบวิทยานิพนธ์
4. ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
5. สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
6. ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิตจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ทุนมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (AM1027A), ทุนจุฬา 100 ปี/CU-Advance Materials/CU56-AM06 ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับงบประมาณของส่วนงานวิจัย
7. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนและกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	2
2 วารสารปริทรรศน์.....	3
2.1 พอลิแล็กติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA).....	3
2.2 น้ำมันถั่วเหลือง (Soybean oil)	9
2.3 แป้งมันสำปะหลัง.....	13
2.4 มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride)	18
2.5 พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง (Graft copolymer)	19
2.6 พอลิเมอร์ผสม	21
2.7 การผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่	23
2.8 การขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ	24
2.9 เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของวัสดุ.....	26
2.10 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ.....	33
2.11 เครื่องมือวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลและสัณฐานวิทยาของวัสดุ	35
2.12 สมบัติเชิงกล	39
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	42
3 วิธีการทดลอง	45
3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	45
3.2 วัสดุดิบและสารเคมี	46

บทที่	หน้า
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	50
3.4 ขั้นตอนการวิจัย	52
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	64
4.1 วิเคราะห์น้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอต	64
4.1.1 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy: FTIR)	64
4.1.2 วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์ แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Proton nuclear magnetic resonance spectroscopy: ¹ H-NMR)	66
4.1.3 วิเคราะห์ค่ากรดด้วยเทคนิคไตเตรชัน.....	67
4.2 วิเคราะห์น้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลัง.....	68
4.2.1 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy: FTIR)	68
4.2.2 ศึกษาสมบัติทางความร้อนเพื่อดูความเป็นไฮโดรโฟบิกที่เพิ่มขึ้น บนพื้นผิวของแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก แอนาไลซิส (Thermo gravimetric analysis: TGA)	69
4.3 วิเคราะห์พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลือง มาลิเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลัง.....	70
4.3.1 ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติมในพอลิเมอร์ คอมพอสิตด้วยการย้อมติดสีดีสเพิร์ส.....	70
4.3.2 ศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมพอสิตโดยการสังเกตพื้นผิว บริเวณที่แตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy: SEM).....	71

บทที่	หน้า
4.3.3 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก แอนาไลซิส (Thermo gravimetric analysis: TGA)	73
4.3.4 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่ง แคลอริเมทรี (Differential scanning calorimetry: DSC).....	76
4.3.5 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยเทคนิค เอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffraction: XRD)	80
4.3.6 วิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยเทคนิค เจลเพอร์มิเอชันโครมาโทกราฟี (Gel permeation chromatography: GPC)	82
4.3.7 ทดสอบสมบัติด้านแรงดึง (Tensile properties)	84
4.3.8 ทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact strength) .	86
5 สรุปผลการทดลอง	88
5.1 สรุปผลการทดลอง	88
5.2 ข้อเสนอแนะ	88
รายการอ้างอิง.....	89
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	113

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	สมบัติทางกายภาพของพอลิแล็กติกแอซิด 4
ตารางที่ 2.2	ส่วนประกอบของน้ำมันถั่วเหลือง..... 10
ตารางที่ 2.3	สมบัติทางกายภาพของน้ำมันถั่วเหลือง 12
ตารางที่ 2.4	สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน 15
ตารางที่ 2.5	โครงสร้างของอะไมโลเพคติน 27
ตารางที่ 2.6	ช่วงของการดูดกลืนอินฟราเรดสเปกตรัม..... 28
ตารางที่ 3.1	สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดเกรด 2003D..... 46
ตารางที่ 3.2	สมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 48
ตารางที่ 3.3	สมบัติของไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ 49
ตารางที่ 3.4	สมบัติของไซเดียมไฮดรอกไซด์ 49
ตารางที่ 3.5	สมบัติของอะซิโตน..... 50
ตารางที่ 3.6	สูตรการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิต..... 53
ตารางที่ 3.7	อุณหภูมิที่ใช้ในการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ 53
ตารางที่ 3.8	อุณหภูมิ ความดัน และเวลาที่ใช้ในการอัดแบบ 56
ตารางที่ 3.9	ภาวะการทดสอบด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ 59
ตารางที่ 3.10	ภาวะการทดสอบความต้านแรงดึง..... 62
ตารางที่ 4.1	ค่ากรดของน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอต 10% และน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอต 20%..... 68
ตารางที่ 4.2	อุณหภูมิตกผลึก (T_c) พื้นที่ใต้กราฟ T_m และปริมาณความเป็นผลึกของ พอลิเมอร์คอมพอสิตที่สัดส่วนต่างๆ..... 79
ตารางที่ 4.3	เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ออกจากคอลัมน์และน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ คอมพอสิตที่สัดส่วนต่างๆ 84

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แอล-แล็กไทด์ เมโซ-แล็กไทด์ และ ดี-แล็กไทด์.....	5
รูปที่ 2.2 วิธีการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิด.....	6
รูปที่ 2.3 ปฏิกริยาการเกิดไขมันหรือน้ำมัน.....	11
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของน้ำมันถั่วเหลือง	11
รูปที่ 2.5 โครงสร้างอะไมโลส	16
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน.....	16
รูปที่ 2.7 กระบวนการสังเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จากบิวเทน	19
รูปที่ 2.8 กระบวนการสังเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จากเบนซีน	19
รูปที่ 2.9 พอลิเมอรร่วมแบบต่อกิ่ง	19
รูปที่ 2.10 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	20
รูปที่ 2.11 ลักษณะการหมุนของสกรู.....	23
รูปที่ 2.12 ลักษณะความดันที่เกิดขึ้นบนสกรูแบบที่หมุนในทิศทางเดียวกัน	24
รูปที่ 2.13 ลักษณะความดันที่เกิดขึ้นบนสกรูแบบที่หมุนในทิศทางตรงข้ามกัน.....	24
รูปที่ 2.14 เครื่องอัดแบบอัตโนมัติ	25
รูปที่ 2.15 ลักษณะการสั้นของโมเลกุล (ก) การสั้นแบบยืด (ข) การสั้นแบบงอ.....	27
รูปที่ 2.16 ช่วงของ NMR สเปกตรัม.....	32
รูปที่ 2.17 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกราฟที่ทดสอบด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี.....	34
รูปที่ 2.18 การเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ที่มีรูพรุนของโมเลกุลพอลิเมออร์ที่มีขนาดต่างๆ.....	35
รูปที่ 2.19 ตัวอย่างของ GPC โครมาโทแกรมที่เกิดจากการไหลผ่านคอลัมน์ของพอลิเมออร์ที่มีขนาดต่างๆ ภายใต้อัตราการไหล (F) โดยมีแกนนอนเป็น retention time	36
รูปที่ 2.20 ลักษณะ GPC โครมาโทแกรมในแบบต่างๆ (a) resolution ต่ำ (b) resolution ในแง่ของ separation efficiency สูง (c) resolution ในแง่ของ selectivity สูง	37
รูปที่ 2.21 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	38
รูปที่ 2.22 รูปแบบชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638.....	40
รูปที่ 2.23 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก.....	41

รูปที่ 2.24	ปฏิริยาการสังเคราะห์สารช่วยผสมแป้งกราฟต์พอลิแอลแล็กติกแอซิดจากการเปิดวงของแอลแล็กไทด์กับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้ง.....	43
รูปที่ 3.1	สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิแล็กติกแอซิด	46
รูปที่ 3.2	แป้งมันสำปะหลัง.....	47
รูปที่ 3.3	สูตรโครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง	47
รูปที่ 3.4	น้ำมันถั่วเหลือง	47
รูปที่ 3.5	สูตรโครงสร้างทางเคมีของน้ำมันถั่วเหลือง	47
รูปที่ 3.6	สูตรโครงสร้างทางเคมีของมาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	48
รูปที่ 3.7	สูตรโครงสร้างทางเคมีของไดควิมิลเปอร์ออกไซด์	48
รูปที่ 3.8	สูตรโครงสร้างทางเคมีของอะซิโตน.....	49
รูปที่ 3.9	เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่.....	54
รูปที่ 3.10	เครื่องตัดเม็ดพลาสติก.....	54
รูปที่ 3.11	เครื่องอัดแบบ	55
รูปที่ 3.12	แม่พิมพ์สำหรับอัดแบบ.....	55
รูปที่ 3.13	เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	57
รูปที่ 3.14	เครื่องโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี.....	57
รูปที่ 3.15	เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์.....	58
รูปที่ 3.16	เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์	59
รูปที่ 3.17	เครื่องย้อมสีตัวอย่าง	60
รูปที่ 3.18	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	60
รูปที่ 3.19	เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทรมิเตอร์.....	61
รูปที่ 3.20	เครื่องโครมาโทกราฟคอลัมน์ชนิดเจล	61
รูปที่ 3.21	เครื่องทดสอบเนกประสงค์.....	62
รูปที่ 3.22	ขั้นตอนสำหรับทดสอบความต้านแรงดึง.....	62
รูปที่ 3.23	เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด	63
รูปที่ 3.24	ขั้นตอนทดสอบความทนแรงกระแทก	63
รูปที่ 4.1	ปฏิริยาการเตรียมน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอต	65

รูปที่ 4.2	FTIR สเปกตรัมของน้ำมันถั่วเหลือง, น้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอต 10% และน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอต 20%.....	65
รูปที่ 4.3	¹ H-NMR สเปกตรัมของน้ำมันถั่วเหลือง, น้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอต 10% และน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอต 20%.....	67
รูปที่ 4.4	FTIR สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลัง, แป้งมันสำปะหลังดัดแปร 10% และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 20%.....	69
รูปที่ 4.5	TGA เทอร์โมแกรมของแป้งมันสำปะหลัง, แป้งมันสำปะหลังดัดแปร 10% และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 20%.....	70
รูปที่ 4.6	ชิ้นงานที่ถูกย่อยมอดิฟิเคชันของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่สัดส่วนต่างๆ	71
รูปที่ 4.7	ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่สัดส่วนต่างๆ.....	72
รูปที่ 4.8	TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่สัดส่วนต่างๆ โดยที่ a) เปรียบเทียบกับที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10% b) เปรียบเทียบกับที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 20%	74
รูปที่ 4.9	DTG เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่สัดส่วนต่างๆ โดยที่ a) เปรียบเทียบกับที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10% b) เปรียบเทียบกับที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 20%	75
รูปที่ 4.10	DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่สัดส่วนต่างๆ โดยที่ a) เปรียบเทียบกับที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10% b) เปรียบเทียบกับที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 20%	78
รูปที่ 4.11	X-ray ดิฟแฟรกโทแกรมของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่สัดส่วนต่างๆ โดยที่ a) เปรียบเทียบกับที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10% b) เปรียบเทียบกับที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 20%	81
รูปที่ 4.12	GPC โครมาโทแกรมของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่สัดส่วนต่างๆ โดยที่ a) เปรียบเทียบกับที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10% b) เปรียบเทียบกับที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 20%	83
รูปที่ 4.13	Tensile strength ของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่สัดส่วนต่างๆ.....	85
รูปที่ 4.14	Elongation at break ของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่สัดส่วนต่างๆ	86
รูปที่ 4.15	Impact strength ของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่สัดส่วนต่างๆ.....	87

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจของงานวิจัย

ปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน ส่วนหนึ่งมาจากการใช้งานพลาสติกที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และพลาสติกเหล่านั้นไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ จึงทำให้มีปริมาณขยะพลาสติกสูง นอกจากนี้การจัดการกับขยะพลาสติกอย่างไม่เหมาะสม อาทิ การเผาขยะพลาสติก จะทำให้มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกสู่ชั้นบรรยากาศโลก ซึ่งจะทำให้เกิดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก แนวทางในการแก้ไขปัญหาที่น่าสนใจคือการนำพลาสติกย่อยสลายเองได้มาใช้ทดแทนพลาสติกจากปิโตรเลียม ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ 1. พอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ เช่น แป้ง โปรตีน และเซลลูโลส 2. พอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ได้จากมอนอเมอร์ธรรมชาติ เช่น พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) 3. พอลิเมอร์ที่ได้จากการหมักจุลินทรีย์ เช่น พอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต

ปัจจุบันพอลิแล็กติกแอซิดเป็นตัวเลือกหนึ่งที่มีศักยภาพสำหรับทดแทนพลาสติกจากปิโตรเลียม เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายในธรรมชาติ ซึ่งสังเคราะห์จากมอนอเมอร์ธรรมชาติทั้งสิ้น เช่น ข้าวโพด อ้อย มันสำปะหลัง เป็นต้น แต่มีข้อจำกัดในการใช้งาน กล่าวคือ พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน มีปริมาณผลึกต่ำ มีความเปราะ แตกหักได้ง่าย ทำให้มีความพยายามในการปรับปรุงสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดด้วยวิธีต่างๆ เช่น การเติมสารก่อนิเวศลึกลับ การเตรียมพอลิเมอร์ผสมหรือพอลิเมอร์คอมพอสิต โดยใช้ตัวเติมจากธรรมชาติ เช่น แป้ง หรือ เซลลูโลส ซึ่งแป้งเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่มีอยู่มาก หาง่าย และมีราคาถูก จึงเป็นที่นิยมนำมาใช้เป็นตัวเติมในการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิต แต่ความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับตัวเติมจากธรรมชาติยังไม่ดีนัก

เพื่อปรับปรุงความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิแล็กติกแอซิดผสมตัวเติมจากธรรมชาติ การใช้สารช่วยผสม เช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) ไดออกซิลมาลิเอต และเมทิลีนไดฟีนิลไดโซไซยาเนต สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับตัวเติมจากธรรมชาติ อาทิ แป้ง ได้ โดยเฉพาะมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสมที่ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาที่ดี มีความเป็นพิษต่ำ จึงทำให้เกิดงานวิจัยต่างๆ ขึ้นเกี่ยวกับการใช้สารช่วยผสมเพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับแป้ง ประกอบกับมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับกลไกการเกิดปฏิกิริยามาเลอชันของน้ำมันถั่วเหลือง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการกราฟต์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์บนน้ำมันถั่วเหลืองจริง

ในงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิแล็กติกแอซิดกับแป้งมันสำปะหลัง โดยการเตรียมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (น้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลัง) จากการนำน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการกราฟต์ของน้ำมันถั่วเหลืองกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่สัดส่วนต่างๆ โดยใช้ไดคิมิลเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มในการเกิดปฏิกิริยา มาดัดแปรลงบนพื้นผิวของแป้งมันสำปะหลัง จากนั้นนำไปผสมกับพอลิแล็กติกแอซิด โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่แล้วทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดแบบ แล้ววิเคราะห์ความเข้ากันได้ สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เตรียมได้

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เตรียมน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังที่มีสัดส่วนของมาลิเอตต่างๆ กัน
2. ศึกษาความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลัง
3. ศึกษาผลของส่วนของน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตและส่วนของแป้งมันสำปะหลังที่อยู่ในน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลัง

บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์

2.1 พอลิแล็กติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA)

พอลิแล็กติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าพอลิแล็กไทด์ (Polylactide) เป็นพอลิเมอร์ในกลุ่มของอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ ซึ่งในปัจจุบันได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มาจากการใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ทำให้เกิดปัญหาการจัดการกับขยะพลาสติก ซึ่งเป็นพลาสติกที่ได้จากแหล่งปิโตรเลียม สามารถทนต่อการทำลายของจุลินทรีย์ได้ และจุลินทรีย์มีวงจรชีวิตที่สั้น ทำให้โครงสร้างของพลาสติกไม่ถูกทำลาย จึงไม่สามารถย่อยสลายเองได้ตามธรรมชาติ [1] ทำให้มีความสนใจพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายเองได้ตามธรรมชาติจากแหล่งที่สามารถทดแทนใหม่ได้ โดยพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายเองได้ตามธรรมชาติจะต้องย่อยสลายสลายใ้ภายใต้ภาวะที่มีแบคทีเรียให้กลายเป็นแร่ธาตุต่างๆ ซึ่งการใช้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายเองได้ตามธรรมชาติทดแทนพลาสติกจากแหล่งปิโตรเลียมเป็นการแก้ไขปัญหาทางสิ่งแวดล้อมและช่วยพัฒนาเศรษฐกิจอย่างยั่งยืน ซึ่งพอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากสารตั้งต้นธรรมชาติ คือ แล็กติกแอซิด (Lactic acid) ที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรโดยกระบวนการหมักแป้ง เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด เป็นต้น ทำให้พอลิแล็กติกแอซิดสามารถย่อยสลายเองได้ตามธรรมชาติ และสารข้างเคียงที่เกิดขึ้นมีความเป็นพิษต่ำ จึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมากมาหลายศตวรรษ

ในปีคริสต์ศักราช 1845 ได้มีการควบแน่นแล็กไทด์จากพอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำโดย Pelouze ซึ่งได้โพลิเมอร์ของแล็กติกแอซิดที่มีลักษณะเป็นแบบวง โดยรู้จักกันในชื่อว่าแล็กไทด์ ต่อมาในปีคริสต์ศักราช 1894 Bischoff และ Walden ได้ทำการสังเคราะห์พอลิแล็กไทด์มอนอเมอร์ขึ้นมา และถูกพัฒนาต่อมาเรื่อยๆ ถึงแม้พอลิแล็กติกแอซิดจะเป็นที่รู้จักมานานแต่ก็ยังไม่สามารถใช้งานในทางการค้าได้ เนื่องจากพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ในขณะนั้นมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จึงไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้เท่าที่ควร แต่เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการผลิตมอนอเมอร์ในเชิงการค้าจากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรซึ่งนำไปสู่การผลิตพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ในเชิงอุตสาหกรรม สมบัติโดยทั่วไปของพอลิแล็กติกแอซิดได้แสดงในตารางที่ 2.1 [2]

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของพอลิแล็กติกแอซิด [2]

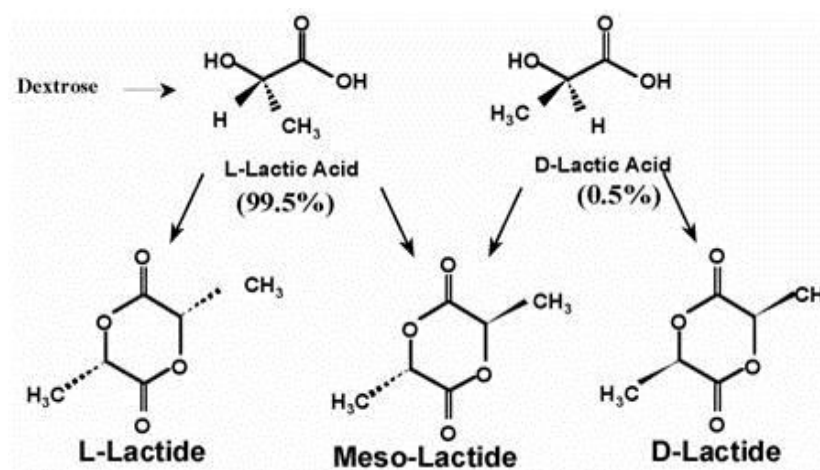
สมบัติ	ปริมาณ
น้ำหนักโมเลกุล (kg/mol)	100-300
อุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (T _g , (°C))	55-70
อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	130-215
พลังงานความร้อนของการหลอมเหลว ΔH_m (J/m)	8.1-93.1
ดีกรีความเป็นผลึก (%)	10-40
พลังงานพื้นผิว (dynes)	38
พารามิเตอร์การละลาย (δ) (J/ml) ^{1/2}	19-20.5
ความหนาแน่น (kg/m ³)	1.25
ดรรชนีการหลอมไหล (MFI) (g/10 min)	2-20
ความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ (fmol m ⁻¹ s ⁻¹ Pa ⁻¹)	4.25 และ 23.2
ความต้านแรงดึง (GPa)	1.9-4.1
ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (%)	100-180
อุณหภูมิการสลายตัว (°C)	500-600

ปัจจุบันพอลิแล็กติกแอซิดส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้งานทางด้านทางการแพทย์และบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดผลิตจากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร จึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ รีไซเคิลได้ สามารถเข้ากันได้กับทางชีวภาพ สามารถเข้าสู่กระบวนการผลิตได้หลายวิธี เหมือนพอลิเมอร์ทางการค้าทั่วไป และทนต่อความร้อนมากกว่าพอลิเมอร์ทางชีวภาพชนิดอื่น ๆ และใช้พลังงานในการผลิตน้อยกว่าพลาสติกจากแหล่งปิโตรเลียม แต่พอลิแล็กติกแอซิดยังมีข้อจำกัดมากมาย เช่น มีความเหนียว (toughness) ต่ำ มีอัตราการสลายตัวช้า มีความไม่ชอบน้ำ และไม่มีหมู่ข้างเคียงที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา จึงทำให้เกิดการปรับปรุงพอลิแล็กติกแอซิดด้วยวิธีต่างๆ [3]

2.1.1 ลักษณะโครงสร้าง

แล็กติกแอซิด (Lactic acid) หรือ 2-hydroxypropionic acid เป็นมอนอเมอร์ที่ได้จากการหมักแป้งที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เช่น มันสำปะหลัง ข้าวโพด อ้อย ด้วย

จุลินทรีย์ แล็กติกแอซิดมีการจัดเรียงตัวด้วยกัน 2 แบบ ซึ่งประกอบไปด้วยไอโซเมอร์ 2 ไอโซเมอร์ด้วยกัน คือ แอล-แล็กติกแอซิด (L-Lactic acid) และ ดี-แล็กติกแอซิด (D-Lactic acid) โดยปกติในธรรมชาติจะพบ แอล-แล็กติกแอซิด มากกว่า พบมากถึง 99.5% และพบ ดี-แล็กติกแอซิด เพียงแค่ 0.5% เท่านั้น ส่วนแล็กไทด์ (Lactide) เป็นวงแหวนไดเมอร์ของแล็กติกแอซิดที่เกิดจากการรวมตัวกันของแล็กติกแอซิด 2 โมเลกุล ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวได้ 3 แบบด้วยกัน แล็กไทด์จึงประกอบไปด้วย 3 ไอโซเมอร์ คือ แอล-แล็กไทด์ (L-Lactide), ดี-แล็กไทด์ (D-Lactide) และเมโส-แล็กไทด์ (Meso-Lactide) โดยแล็กไทด์สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization) ของพอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ได้เป็นของผสมของแล็กไทด์ทั้ง 3 ไอโซเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 [4]



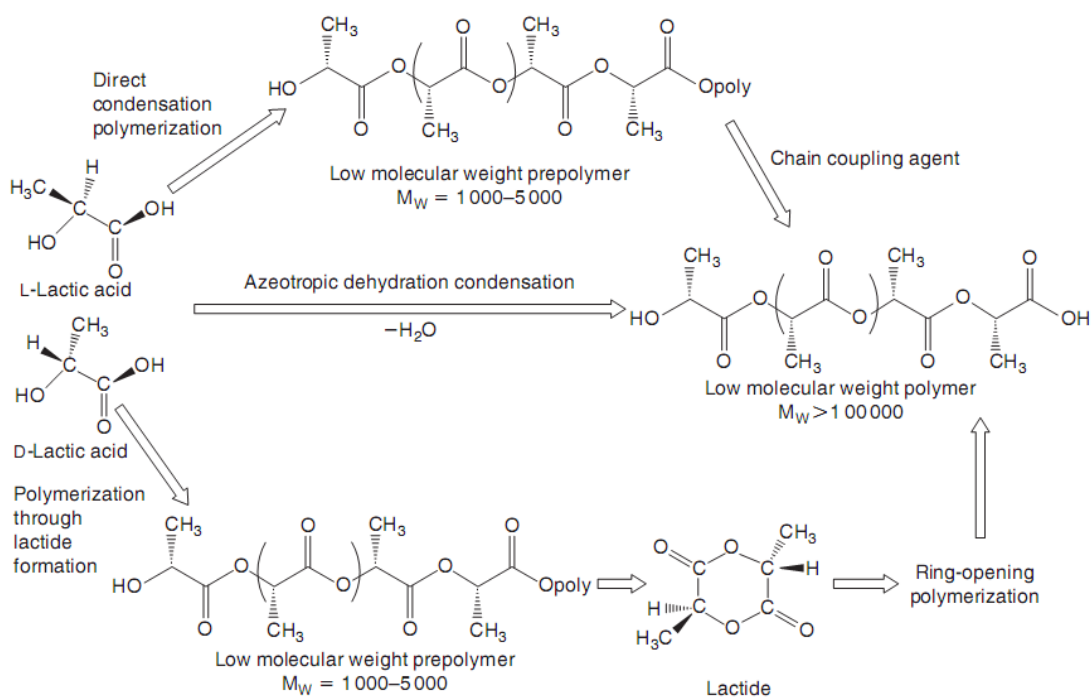
รูปที่ 2.1 แอล-แล็กไทด์ เมโส-แล็กไทด์ และ ดี-แล็กไทด์ [4]

2.1.2 การสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิด

2.1.2.1 การสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบ

ควบแน่น (Direct condensation polymerization) และการใช้สารคู่ควบ

วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด จะใช้แล็กติกแอซิดเป็นสารตั้งต้น และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับลดความดัน ซึ่งวิธีนี้น้ำที่เกิดขึ้นจะแยกออกจากกระบวนการยาก จึงไม่สามารถควบคุมการจัดเรียงตัวของโครงสร้างทางเคมีได้ และเป็นไปได้ยากที่จะได้พอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จึงมีการใช้สารคู่ควบเพื่อให้ได้พอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง แต่การใช้สารคู่ควบเป็นการเพิ่มต้นทุนและความยุ่งยากในการผลิต นอกจากนี้สารคู่ควบส่วนใหญ่ยังทำให้พอลิแล็กติกแอซิดย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากขึ้นด้วย ซึ่งมีปฏิกิริยาการสังเคราะห์ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วิธีการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิด [7]

2.1.2.2 การสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิดจากการควบแน่นแบบอะซีโอโทรปิกดีไฮเดรชัน (Azeotropic dehydration condensation)

การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะได้พอลิแล็กติกแอซิดที่มีสายโซ่ยาวโดยไม่ต้องใช้สารขยายสายโซ่ ทำให้ได้พอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ช่วยในการดึงน้ำออกภายใต้ความดันต่ำ จึงสามารถแก้ปัญหการกำจัดน้ำได้ แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มักมีความเป็นพิษต่อเนื้อเยื่อสูง ฉะนั้นพอลิแล็กติกแอซิดที่สังเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะต้องถูกทำให้บริสุทธิ์ก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งมีปฏิกิริยาการสังเคราะห์ดังรูปที่ 2.2

2.1.2.3 การสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (Ring opening polymerization)

การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถควบคุมโครงสร้างทางเคมีได้ โดยการแตกวงออกของแล็กไทด์ (Cyclic lactide dimer) ด้วยความร้อนและใช้ทินออกโทเอต (Tin octoate) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จึงอาจเรียกพอลิเมอไรท์ที่ได้ว่า พอลิแล็กไทด์ ซึ่งการเปิดวงของแล็กไทด์เป็นวิธีการเดียวที่ทำให้ได้พอลิแล็กติกแอซิดที่มีความบริสุทธิ์และมีน้ำหนักโมเลกุลสูง สามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง นอกจากนี้ยังสามารถสังเคราะห์ผ่านกระบวนการแบบสารละลายแบบเบาว์ (bulk) แบบหลอมเหลวหรือแบบแขวนลอยก็ได้ และทำการสังเคราะห์ผ่านกลไกแบบ

ไอออนิก (แคทไอออน หรือ แอนไอออน) หรือแบบ coordination-insertion ก็ได้ ซึ่งมีปฏิกิริยาการสังเคราะห์ดังรูปที่ 2.2 [4-7]

2.1.3 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด

พอลิแล็กติกแอซิดมีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างได้ทั้งพอลิเมอร์อสัณฐานและพอลิเมอร์กึ่งผลึก ซึ่งขึ้นอยู่กับสเตอริโอไอโซเมอร์ (stereoisomer) และ thermal history โดยพอลิแล็กติกแอซิดที่มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์อสัณฐานจะมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันประมาณ 58°C และมีอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 148°C ส่วนพอลิแล็กติกแอซิดที่มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึกจะมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันประมาณ 62°C และมีอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 151°C ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของพอลิเมอร์ด้วย พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลดี โดยสมบัติเชิงกลจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและสเตอริโอเคมีเคิล (stereochemical) พอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีความแข็งแรง แต่เปราะ จึงไม่นิยมนำไปใช้งานได้มากนัก ส่วนพอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะสามารถนำไปใช้งานได้ เพราะมีความแข็งแรงเชิงกลสูง และนำไปใช้งานได้ดีเทียบเท่าหรือดีกว่าพอลิเมอร์ที่ได้จากแหล่งปิโตรเลียม อีกทั้งยังมีสมบัติการสกัดกั้นการผ่านของกลิ่นได้ดีเทียบเท่ากับพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (PET) จึงสามารถนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารได้ นอกจากนี้พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic polymer) แต่ความไม่ชอบน้ำจะลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลลดลง แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพอลิแล็กติกแอซิดยังคงมีลักษณะทางกายภาพที่แข็งแรง และมีราคาแพงอยู่ จึงมีการปรับปรุงสมบัติ เพิ่มสมบัติอื่นๆ และลดต้นทุนการผลิตของพอลิแล็กติกแอซิดโดยอาจทำการผสมกับพอลิเมอร์ธรรมชาติตัวอื่นๆ เช่น ไคโตซาน (สมบัติต้านเชื้อจุลินทรีย์) แป้ง หรือ เซลลูโลส (ลดต้นทุน) เป็นต้น [8]

2.1.4 การดัดแปรสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด (Modification of poly(lactic acid))

พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรง เปราะ มีระยะยืด ณ จุดขาดน้อยกว่า 10% จึงไม่เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการความเหนียวสูง จึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้คล้ายกับพลาสติกสังเคราะห์ทั่วไป ซึ่งการปรับปรุงสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดมีด้วยกัน 3 วิธี คือ การทำโคพอลิเมอร์เซชัน การพลาสติไซเซชัน และการทำพอลิเมอร์ผสม ซึ่งการปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีเหล่านี้จะช่วยเพิ่มระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิแล็กติกแอซิด แต่ค่าความทนแรงดึงและความต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะลดลง [8]

2.1.4.1 การทำโคพอลิเมอร์ไรเซชัน (Copolymerization)

การทำโคพอลิเมอร์ไรเซชันของแล็กติกแอซิดกับพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดอื่น เช่น โพรตีน แป้ง คาโปรแลคโตน พอลิเอทิลีนไกลคอล เป็นต้น ซึ่งสามารถทำได้ด้วยกันหลายวิธี เช่น การทำโคพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างแล็กติกแอซิดและมอนอเมอร์ชนิดอื่นๆ โดยกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น (Polycondensation copolymerization) ของแล็กติกแอซิดกับมอนอเมอร์ชนิดอื่น ซึ่งทำให้ได้โคพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และกระบวนการโคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวง (ring opening copolymerization) ของแล็กไทด์กับมอนอเมอร์วงแหวน มอนอเมอร์เชิงเส้น หรือเฮตเทอโรไซคลิกมอนอเมอร์ เช่น คาโปรแลคโตน (caprolactone) ก็สามารถใช้เป็นโคมอนอเมอร์กับพอลิแล็กติกแอซิดได้ การเตรียมโคพอลิเมอร์แบบนี้ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เป็นต้น นอกจากนี้การกราฟต์พอลิเมอร์ชนิดอื่นกับพอลิแล็กติกแอซิดก็เป็นอีกวิธีหนึ่ง que เพิ่มสภาพความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น โดยมีสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟต์ดีกว่าการผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นโดยตรง เช่น การกราฟต์แป้งลงบนพอลิแล็กติกแอซิด เป็นต้น กระบวนการโคพอลิเมอร์ไรเซชันทำให้ได้พอลิแล็กติกแอซิดที่มีสมบัติเชิงกลโดยเฉพาะความเหนียวและความสามารถในการขึ้นรูปดีขึ้น [9-10]

2.1.4.2 การพลาสติไซเซชัน (Plasticization)

ปัจจัยที่ทำให้พอลิแล็กติกแอซิดมีความแข็งและเปราะคือปริมาณการเกิดผลึก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของไอโซเมอร์ต่างๆ ของแล็กติกแอซิด วิธีการทำพลาสติไซเซชันจะช่วยให้มีความยืดหยุ่นที่ดีขึ้น แต่ต้องพิจารณาถึงปริมาณความเป็นผลึกของพอลิแล็กติกแอซิด เนื่องจากความเป็นผลึกจะไปลดความสามารถในการเข้ากันได้ของพลาสติไซเซอร์กับพอลิแล็กติกแอซิดทำให้ประสิทธิภาพของพลาสติไซเซอร์ลดลง และเกิดการแยกเฟสขึ้น แต่ถ้าทำให้ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิแล็กติกแอซิดต่ำลง อาจกล่าวได้ว่า พลาสติไซเซอร์และพอลิแล็กติกแอซิดสามารถเข้ากันได้ ซึ่งการปรับปรุงสมบัติความยืดหยุ่นของพอลิแล็กติกแอซิดอาจทำได้โดยการนำพอลิแล็กติกแอซิดไปทำปฏิกิริยากับสารกลุ่มซิเตรต (Citrate) และมาเลเอต (Maleate) จะทำให้ อุณหภูมิกลาสทรานซิชันลดลงและสมบัติเชิงกลดีขึ้น การใช้พลาสติไซเซอร์ชนิดนี้สามารถเติมเข้าไปในพอลิแล็กติกแอซิดได้มากถึง 25%โดยมวล อีกทั้งการใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ พอลิโพรพิลีนไกลคอล และกรดไขมันก็สามารถใช้เป็นพลาสติไซเซอร์ที่เข้ากันได้ดีกับพอลิแล็กติกแอซิดอีกด้วย [10-11]

2.1.4.3 การทำพอลิเมอร์ผสม (Blending)

การปรับปรุงสมบัติด้วยการทำพอลิเมอร์ผสมเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการผสมพอลิเล็กทิกแอซิดกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เช่น การทำพอลิเมอร์ผสมพอลิเล็กทิกแอซิดกับแป้ง การทำพอลิเมอร์ผสมพอลิเล็กทิกแอซิดกับไคโตซาน เป็นต้น ซึ่งกระบวนการนี้จะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น ความเหนียว และสามารถลดต้นทุนการผลิตโดยไม่มีผลต่อความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์และยังสามารถคงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ไว้ได้ พอลิเมอร์ที่นิยมผสมกับพอลิเล็กทิกแอซิด ได้แก่ อีลาสโตเมอร์ แป้ง พอลิเอทิลีนไกลคอล ไตรอะซิติกและไตรบิวทิลซีเตรต และพอลิไฮดรอกซิลแอซิด เป็นต้น แต่การผสมพอลิเล็กทิกแอซิดกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นต่างกับการเติมพลาสติไซเซอร์ลงในพอลิเล็กทิกแอซิด ในกรณีที่พอลิเมอร์ทั้งสองเข้ากันไม่ได้ จะทำให้สมบัติของพอลิเล็กทิกแอซิดต่ำลง ดังนั้น จะต้องพิจารณาความเข้ากันได้และความสามารถในการยึดติดระหว่างพอลิเมอร์ด้วย การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก (Block copolymerization) เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญในการผสม เพื่อช่วยเพิ่มสภาพเข้ากันได้กับพอลิเล็กทิกแอซิด และปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น หรือการปรับปรุงความสามารถในการยึดติดระหว่างเฟสด้วยการทำคอมแพททิไบไรเซชัน (Compatibilization) ด้วยการเติมสารช่วยผสม (Compatibilizer) เข้าไปในพอลิเมอร์ผสม ซึ่งการทำพอลิเมอร์ผสมพอลิเล็กทิกแอซิดและพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ จะทำให้ความแข็งแรงอีลาสติก (Elastic modulus) ความเค้น ณ จุดคราก (Stress at yield) และความเค้น ณ จุดแตกหัก (Stress at break) ลดลง แต่จะทำให้การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) เพิ่มขึ้น [9-11]

2.2 น้ำมันถั่วเหลือง (Soybean oil)

น้ำมันถั่วเหลือง (Soybean oil) คือน้ำมันพืช (Vegetable oil) ที่ใช้ปรุงอาหาร ซึ่งผ่านกระบวนการสกัดน้ำมันดิบจากเมล็ดถั่วเหลือง (Soybean) แล้วเข้าสู่กระบวนการกลั่นด้วยระบบไอน้ำแรงดันสูง เพื่อให้ได้น้ำมันบริสุทธิ์ออกมา สมบัติของน้ำมันถั่วเหลืองจะมีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงกว่าน้ำมันพืชที่ผลิตจากเมล็ดพืชหลายชนิด เช่น น้ำมันมะพร้าว หรือน้ำมันปาล์ม ซึ่งการบริโภคน้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงจะมีผลดีต่อสุขภาพมากกว่าการบริโภคน้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวต่ำ นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตใช้วิธีเติมไนโตรเจนเพื่อรักษาคุณภาพน้ำมันให้คงเดิม แทนการใส่สารกันหืน เพื่อให้ปลอดภัยกับผู้บริโภค น้ำมันถั่วเหลืองที่ดีต้องดูใสสะอาด คว้าแล้วต้องไม่มีตะกอน ทดสอบได้โดยเอาไปแช่ในตู้เย็นช่องธรรมดา ทิ้งไว้ 4-5 ชั่วโมง ถ้าไม่เป็นไขและไม่ขุ่นก็แสดงว่าใช้ได้ น้ำมันถั่วเหลืองเป็นไตรกลีเซอไรด์ที่ประกอบด้วยกรดไขมันไม่

อิมตัว ได้แก่ กรดโอเลอิก (Oleic acid) และกรดไขมันซึ่งมีพันธะคู่มากกว่า 1 ตำแหน่ง (Polyunsaturated fatty acid) โดยเฉพาะกรดไขมันโอเมก้า 6 (Omega-6 fatty acid) ได้แก่ กรดลิโนเลอิก (Linoleic acid) ซึ่งเป็นกรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย (Essential fatty acid) [12-13]

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของน้ำมันถั่วเหลือง [13]

Vegetable oil	Unsat./Sat. ratio	Saturated fatty acid		Monounsaturated fatty acid	Polyunsaturated fatty acid	
		Palmitic acid	Stearic acid	Oleic acid	Linoleic acid ($\omega 6$)	Alpha linolenic acid ($\omega 3$)
Soybean oil	5.7	11	4	24	54	7

2.2.1 ขั้นตอนการผลิตน้ำมันถั่วเหลือง

2.2.1.1 การสกัดน้ำมันดิบจากเมล็ดถั่วเหลือง

2.2.1.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ (Raw material preparation) โดยการบดเมล็ดถั่วเหลืองแล้วนำไปให้ความร้อน รีดเป็นแผ่นเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว จะทำให้การสกัดมีประสิทธิภาพขึ้น

2.2.1.1.2 การสกัดน้ำมัน (Extraction) จะใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายเพื่อสกัดให้น้ำมันในเมล็ดถั่วเหลืองละลายออกมาผสมกับเฮกเซน น้ำมันดิบปนตัวทำละลาย เรียกว่า Miscella

2.2.1.1.3 ระเหยตัวทำละลายออกจากน้ำมันดิบ ด้วยการให้ความร้อนกับ Miscella โดยใช้เครื่องระเหย (Evaporator) และ Striping column เพื่อให้ได้น้ำมันดิบออกมา

2.2.1.1.4 กระบวนการแยกยางเหนียว (Degumming) จะกระทำโดยการเติมน้ำร้อนแล้วใช้เครื่องเหวี่ยง (Centrifuge) เพื่อจะให่ยางเหนียว (Gum) ตกตะกอน แล้วได้น้ำมันดิบที่ตกตะกอนยางเหนียว จะได้กากถั่วเหลืองและกัมเป็นผลพลอยได้ แล้วนำไประเหยเพื่อแยกตัวทำละลายออก (Desolventizer) และนึ่ง (Steaming) ให้สุก ทำให้แห้ง (Dehydration) เพื่อลดความชื้น และปั่นเพื่อเป็นวัตถุดิบโรงงานอาหารสัตว์ หรือผลิตเป็น Lecithin

2.2.1.2 การทำให้บริสุทธิ์ (Refining)

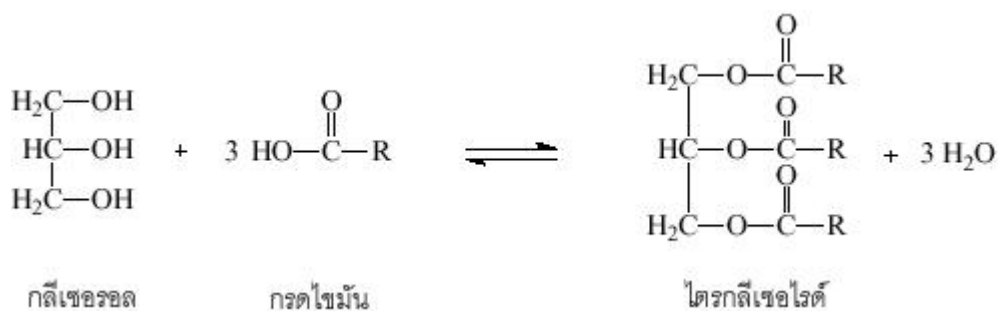
2.2.1.2.1 การทำให้เป็นกลาง (Neutralization) โดยการเติมโซดาไฟ ซึ่งเป็นด่าง เพื่อกำจัดกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid, FFA) ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระ FFA ด้วยปฏิกิริยา Saponification ได้สบู่ และแยกเอาสบู่ ออก

2.2.1.2.2 การฟอกสี (Bleaching) โดยการเติมดินฟอกสี

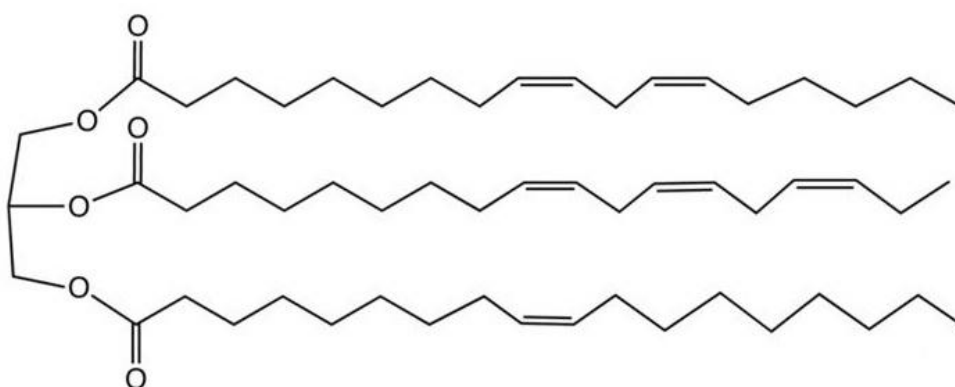
2.2.1.2.3 การกำจัดกลิ่น (Deodorization) โดยการกลั่น (Distillation) ด้วยหอกลั่น เพื่อกลั่นน้ำมันที่อุณหภูมิสูง จะได้น้ำมันถั่วเหลืองบริสุทธิ์เพื่อใช้บริโภค [13]

2.2.2 โครงสร้างของน้ำมันถั่วเหลือง

โครงสร้างของน้ำมันถั่วเหลืองเป็นไตรเอสเทอร์ของกลีเซอรอลและกรดไขมัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งจำนวนคาร์บอนของส่วนไฮโดรเจนที่มาจากกรดไขมันจะเป็นเลขคู่เสมอ เนื่องจากปฏิกิริยาการสังเคราะห์ทางชีวภาพเริ่มจากหน่วยอะซีเตต (CH_3COO^-) โดยมากจะมีจำนวนคาร์บอนเป็น 14, 16 หรือ 18 คาร์บอน ซึ่งมีปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.3 [14]



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาการเกิดไขมันหรือน้ำมัน [14]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของน้ำมันถั่วเหลือง [14]

2.2.3 สมบัติโดยทั่วไปของน้ำมันถั่วเหลือง

น้ำมันถั่วเหลืองมีสถานะเป็นของเหลว เพราะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากกว่าส่วนที่เป็นกรดไขมันอิ่มตัว ซึ่งมีสมบัติดังนี้

2.2.3.1 การนำไฟฟ้า น้ำมันถั่วเหลืองไม่นำไฟฟ้า

2.2.3.2 ความหนาแน่น น้ำมันถั่วเหลืองมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ

2.2.3.3 สี กลิ่น และรส น้ำมันถั่วเหลืองที่บริสุทธิ์จะไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส

2.2.3.4 จุดหลอมเหลว ส่วนใหญ่ น้ำมันถั่วเหลืองจะมีจุดหลอมเหลวเป็นช่วงของอุณหภูมิ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันถั่วเหลืองประกอบไปด้วยกรดไขมันหลายชนิด จุดหลอมเหลวจะต่ำหรือสูงขึ้นอยู่กับจุดหลอมเหลวของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของกลีเซอไรด์ โดยกรดไขมันที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้น จะมีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น และจุดหลอมเหลวของกรดไขมันจะลดลง เมื่อกรดไขมันนั้นมีความไม่อิ่มตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งน้ำมันถั่วเหลืองจะมีช่วงอุณหภูมิของจุดหลอมเหลวดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพของน้ำมันถั่วเหลือง [16]

ชนิดของน้ำมัน	จุดหลอมเหลว (°C)	ความถ่วงจำเพาะ	จุดเกิดควัน (°C)
น้ำมันถั่วเหลือง	-20.0 ถึง -23.0	0.9175	256

2.2.3.5 ความถ่วงจำเพาะ ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันถั่วเหลืองมีค่าน้อยกว่าน้ำ การวัดค่าความถ่วงจำเพาะจะนิยมวัดที่อุณหภูมิ 25°C น้ำมันถั่วเหลืองที่มีความไม่อิ่มตัวเพิ่มขึ้น จะมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงขึ้น ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันถั่วเหลืองแสดงในตารางที่ 2.3

2.2.3.6 จุดเกิดควัน คืออุณหภูมิที่น้ำมันถั่วเหลืองได้รับความร้อนจนเกิดควัน เนื่องจากการสลายตัวของกลีเซอไรด์ ปกติการใช้ น้ำมันถั่วเหลืองในการประกอบอาหารไม่ควรใช้ความร้อนสูงจนเกิดเป็นควัน เพราะจะทำให้กลิ่นและรสชาติของอาหารเสีย นอกจากนี้ยังมีการสันนิษฐานว่าสารที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มในการทำลายสุขภาพของผู้บริโภคด้วย จุดเกิดควันของน้ำมันถั่วเหลืองมีความสัมพันธ์กับปริมาณของกรดไขมันอิสระที่มีในน้ำมัน โดยจุดเกิดควันจะลดลงเมื่อมีกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้น ซึ่งน้ำมันถั่วเหลืองมีจุดเกิดควันดังแสดงในตารางที่ 2.3

2.2.3.7 ความสามารถในการละลาย น้ำมันถั่วเหลืองไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายที่เป็นโมเลกุลโคเวเลนต์ไม่มีขั้ว และตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น เฮกเซน เบนซีน คลอโรฟอร์ม พิโตรเลียมอีเทอร์ อะซิโตน แอลกอฮอล์ และคาร์บอนไดซัลไฟด์ เป็นต้น ซึ่งการสกัด

น้ำมันจากพืชเพื่อการบริโภคในโรงงานอุตสาหกรรมจะนิยมใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายเพื่อกำจัดไขมัน น้ำมันถั่วเหลืองก็เช่นเดียวกัน

2.2.3.8 ความหนืด มีผลต่อการนำไปใช้งานและการขนถ่ายน้ำมัน ความหนืดของน้ำมันถั่วเหลืองจะมีความสัมพันธ์กับขนาดโมเลกุลของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบและความไม่อิ่มตัวของกรดไขมันเช่นเดียวกับจุดหลอมเหลว กล่าวคือ เมื่อมีกรดไขมันที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้น จะมีความหนืดเพิ่มขึ้น และหากกรดไขมันมีความไม่อิ่มตัวเพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนืดของน้ำมันถั่วเหลืองลดลง

2.2.3.9 การเกิดกลิ่น การเก็บน้ำมันถั่วเหลืองไว้นานๆ จะทำให้เสียและเกิดกลิ่นเหม็นหืนด้วยกระบวนการไฮโดรลิซิสและออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศ

2.2.3.10 ไฮโดรจิเนชัน น้ำมันถั่วเหลืองที่ประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวสามารถทำปฏิกิริยารวมตัวกับก๊าซไฮโดรเจนได้ โดยใช้เหล็กเป็นตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยา

2.2.3.11 แอลโลจิเนชัน น้ำมันถั่วเหลืองที่ประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวสามารถเกิดปฏิกิริยากับธาตุแอลโลเจนได้ เช่น คลอรีน โบรมีน ไอโอดีน โดยไม่ต้องอาศัยปัจจัยใดๆ ช่วย

2.2.3.12 สaponification น้ำมันถั่วเหลืองสามารถไฮโดรไลซิสในสารละลายด่าง (KOH หรือ NaOH) ที่อุณหภูมิสูงมาก เกิดเกลือของกรดไขมันและกลีเซอรอล กระบวนการนี้เป็นกระบวนการในอุตสาหกรรมผลิตสบู่ [15-16]

2.3 แป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่ได้จากมันสำปะหลัง ลักษณะของแป้งจะมีสีขาว เนื้อเนียนลื่นเป็นมัน เมื่อทำให้สุกด้วยการกวนกับน้ำไฟอ่อนปานกลาง แป้งจะละลายง่าย สุกง่าย แป้งเหนียวติดภาชนะ หนืดขึ้นเรื่อยๆ ไม่มีการรวมตัวเป็นก้อน เหนียวเป็นใยติดกันหมด เนื้อแป้งใสเป็นเงา พอเย็นแล้วจะติดกันเป็นก้อนเหนียวติดภาชนะ โดยปกติแล้วหัวมันสำปะหลังสดจะมีแป้งเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 20 แป้งมันสำปะหลังที่สกัดจากหัวมันสำปะหลังและไม่มีการเปลี่ยนแปลงจะเรียกว่า แป้งดิบ (Tapioca starch, native starch)

แป้งดิบ คือแป้งที่สกัดเอาเยื่อใยออกแล้วนำไปใช้เป็นอาหารมนุษย์ อาหารทารก และเป็นเครื่องปรุงอาหารหลายชนิด ใช้ทำเปปเปอร์ ทำวุ้นเส้น และใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นตัวทำให้สารติดแน่น คงรูปร่าง ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมชักรีด อุตสาหกรรมทำกระดาษ

แป้งเปียก แอลกอฮอล์ อะซิโตน ยา กลูโคส และแป้งแปรรูป โดยสามารถแบ่งตามลักษณะการผลิตได้เป็น 2 ประเภท คือ

- แป้งดิบหรือแป้งมันสำปะหลังดิบ (Native starch) เป็นแป้งที่ได้จากหัวมันสด ไม่ได้สกัดเอาเยื่อใยออก ทำได้โดยการผ่านกระบวนการแยกกากโปรตีน ฯลฯ แล้วนำหัวมันสดมาปอกเปลือกหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ตากแห้ง ปั่นให้ละเอียดแล้วร่อนด้วยตะแกรงร่อนแป้ง จะได้แป้งดิบที่สามารถนำมาใช้ทำขนมอบชนิดต่างๆ ได้คล้ายแป้งสาลี เช่น นำมาทำเป็นแพนเค้ก เค้ก ขนมปังคุกกี้ พาย และสามารถนำมาทดแทนแป้งสาลี แป้งข้าวเจ้าได้บางส่วนในอาหารบางชนิด

- แป้งมันสำปะหลังแปรรูป (Modify starch) คือแป้งซึ่งได้จากการนำแป้งมันสำปะหลังดิบมาเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีหรือฟิสิกส์เพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลให้เหมาะสมกับการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยปกติการผลิตแป้งมันสำปะหลังแปรรูปใช้อัตราส่วนแป้งดิบ 1 กิโลกรัมต่อแป้งแปรรูป 0.93 กิโลกรัม [17-18]

2.3.1 การผลิตแป้งมันสำปะหลัง

หัวมันสำปะหลังที่ผ่านการล้างและปอกเปลือกที่สะอาดจะถูกลำเลียงโดยสายพานเข้าสู่เครื่องโม้ (Rasper) จะมีมีดโดยใบมีดขนาดใหญ่ในแนวตั้งฉากกับผิวหน้า โดยมีอัตราการหมุนประมาณ 1000 rpm และทำการติดตั้งใบมีดตั้งแต่ 100 ใบขึ้นไป ใบมีดแต่ละใบมีความยาว 30 เซนติเมตร ซึ่งในขั้นตอนนี้จะได้ของเหลวชั้นที่มีส่วนผสมของแป้ง น้ำ กากมัน และสิ่งเจือปนต่างๆ ระหว่างกระบวนการโม้จะมีการจ่ายน้ำจากกระบวนการเพื่อช่วยในการทำงานของเครื่องให้สะดวกยิ่งขึ้น หลังจากนั้นมันสำปะหลังที่บดจนเป็นชิ้นละเอียดจากเครื่องชูดหรือบด ซึ่งมีส่วนประกอบของน้ำแป้ง กาก และเส้นใย จะถูกเติมน้ำก่อนจะนำเข้าสู่เครื่องสกัดแป้ง (Extractor) หน้าที่ของหน่วยสกัดคือการแยกแป้งออกจากเซลลูโลส เครื่องสกัดแป้งจะประกอบไปด้วยตะแกรงและผ้ากรองเป็นส่วนประกอบ หลักการทำงานของเครื่องจะใช้หลักการของแรงหมุนเหวี่ยง (Centrifugal force) โรงงานส่วนใหญ่จะใช้ชุดสกัด 3 ชุด แต่โรงงานขนาดใหญ่อาจใช้ชุดสกัดถึง 4 ชุดต่อเนื่องกัน เพื่อสกัดแป้งออกจากเซลลูโลสให้ได้มากที่สุด เครื่องสกัดแป้งแบ่งตามหน้าที่ตามการกรองออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดสกัดหยาบ (Coarse extractor) และชุดสกัดละเอียด (Fine extractor) น้ำแป้งจะผ่านเข้าสู่ชุดสกัดหยาบก่อน เพื่อแยกกากหยาบออก แล้วจึงเข้าสู่ชุดสกัดละเอียดเพื่อแยกกากอ่อน กากหยาบและกากอ่อนที่ได้จะถูกเหวี่ยงออกทางด้านบนของตะกร้ากรอง แล้วเข้าสู่เครื่องสกัดชุดสกัดกาก (Pulp extractor: เป็นเครื่องสกัดหยาบ ทำหน้าที่สกัดแป้งที่หลุดออกไปกับกาก) และเครื่องอัดกากต่อไป โดยที่เครื่องสกัดหยาบมีตะกร้ากรองเป็นสแตนเลส (Stainless screen) ขนาดรูกรอง 35-40 mesh มีการใช้น้ำหมุนเวียนหรือน้ำดีเพื่อช่วยในการสกัดแป้งออกจากกากหยาบ ส่วน

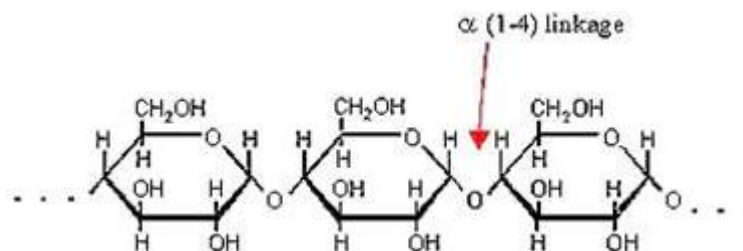
เครื่องสกัดละเอียดตะกร้ากรองเป็นสแตนเลสมีรูกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5 ซม. และใช้ผ้ากรองไนลอนทรงกรวยเหมือนตะกร้ากรองวางด้านบนแล้วยึดด้วยสายรัดโลหะ ผ้ากรองที่ใช้มีขนาดรูกรองสองแบบคือ 100-200 mesh และ 140-200 mesh มีการใช้น้ำกำมะถันช่วยในการสกัดแป้งจากกากอ่อน น้ำกำมะถันช่วยกำจัดสารที่เกิดเมือกที่จะไปอุดตันแผ่นกรอง ป้องกันไม่ให้เกิดการสูญเสียแป้งจากจุลินทรีย์และช่วยฟอกสีแป้งให้ขาว กากมันสำปะหลังจะถูกแยกออกจากน้ำแป้ง เพื่อนำเข้าสู่เครื่องอัดกากและนำไปตากแดดเพื่อนำไปผสมเป็นอาหารสัตว์หรือนำไปผสมกับมันเส้นเพื่อทำมันอัดเม็ด [17-18]

2.3.2 ลักษณะโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลัง

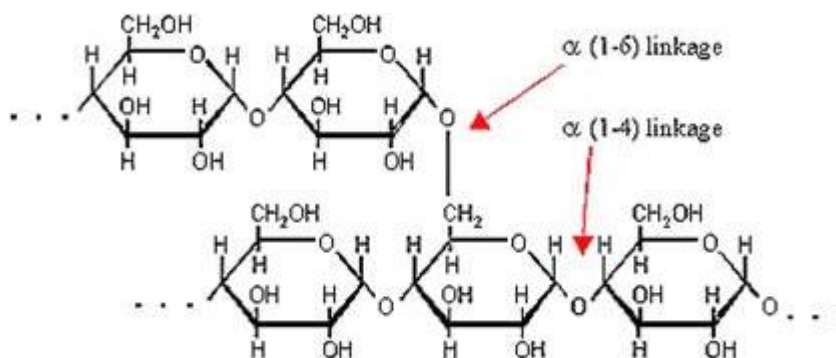
แป้งมันสำปะหลังเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ มีสูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ มีหน่วยพื้นฐานเป็น anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -glycosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้งจะมี anomeric carbon (C_1) ซึ่งว่างอยู่ไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของแป้งจะมีด้านปลายที่มีสมบัติรีดิวซ์ (Reducing end) นั่นคือ แป้งหนึ่งโมเลกุลจะมีตำแหน่ง reducing end 1 ตำแหน่ง โมเลกุลแป้งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ ตามขนาดของโมเลกุลและลักษณะการจัดเรียงตัว คือ อะไมโลส ซึ่งมีขนาดเล็กและมีกิ่งก้านสาขาเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และอะไมโลเพคติน ซึ่งมีขนาดใหญ่และมีกิ่งก้านสาขามากมาย ดังแสดงในรูปที่ 2.6 นอกจากนี้ยังพบโมเลกุลแป้งอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอะไมโลสแต่เล็กกว่าอะไมโลเพคติน เรียกว่า "Intermediate material" แต่พบในปริมาณไม่มากนัก อะไมโลสและอะไมโลเพคตินมีสมบัติที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.4 [19]

ตารางที่ 2.4 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน [19]

อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะ α -1,4	1. โมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 และมีการแตกกิ่งด้วยพันธะ α -1,6
2. ประกอบด้วยกลูโคส 200-6000 หน่วย	2. แต่ละกิ่งมีกลูโคส 20-25 หน่วย
3. ละลายน้ำได้น้อยกว่า	3. ละลายน้ำได้ดีกว่า
4. เมื่อต้มในน้ำจะมีความข้นหนืดน้อย	4. ข้นหนืดมากและใส
5. ให้สีน้ำตาลกับสารละลายไอโอดีน	5. ให้สีม่วงแดงหรือสีน้ำตาลแดงกับสารละลายไอโอดีน
6. ต้มทิ้งไว้จะจับตัวเป็นก้อนและแผ่นแข็ง	6. ไม่จับตัวเป็นก้อนและแผ่นแข็ง



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของอะไมโลส [19]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน [19]

2.3.3 สมบัติของแป้งมันสำปะหลัง

ในบรรดาประเทศที่ปลูกมันสำปะหลังมากๆ เช่น บราซิล ไนจีเรีย อินโดนีเซีย และไทย เป็นต้น ประเทศไทยถือเป็นประเทศเดียวที่ใช้มันสำปะหลังมาผลิตเป็นแป้งมากที่สุด ถือได้ว่าเป็นผู้ผลิตแป้งมันสำปะหลังรายใหญ่ที่สุดของโลก โดยมีกำลังการผลิตมากกว่า 2 ล้านตันต่อปี มีเทคโนโลยีการผลิตแป้งมันสูงที่สุดในบรรดาทุกๆ ประเทศ และได้มีการถ่ายทอดเทคโนโลยีไปสู่ประเทศเพื่อนบ้าน แป้งมันสำปะหลังจึงถือได้ว่าเป็น “แป้งไทย” เป็นแป้งที่มีคุณภาพสูงและราคาถูกที่สุด มีสมบัติที่พิเศษคือ มีความขาวมันวาว เมื่อผสมน้ำและให้ความร้อนจะเหนียวเป็นกาวใส กล่าวได้ว่า แป้งไทย ขาวใส ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่มีสี เหมาะสมมากเมื่อนำมาใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะในอาหารจะไม่มีกลิ่นรสแปลกปลอม นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้ดังนี้

2.3.3.1 อุตสาหกรรมสิ่งทอ

อุตสาหกรรมสิ่งทอนั้นจะต้องใช้แป้งมันสำปะหลังด้วย โดยด้ายที่จะใช้ทอผ้านั้น จะต้องผ่านการชุบแป้งเสียก่อน ด้ายจึงจะลื่นและเรียบไม่มีขน และเป็นตัวหล่อลื่นไม่ให้เห็นด้ายติดกันระหว่างการเคลื่อนที่ของหูกทอผ้า นอกจากนี้ในขั้นตอนการพิมพ์ลายผ้า แป้งจะช่วยทำให้พิมพ์ลายได้สม่ำเสมอ การใช้แป้งมันสำปะหลังในการทอผ้านั้น บางโรงงานยังใช้แป้งเคมี

(modified starch) ที่สั่งเข้ามาจากต่างประเทศ เพราะสมบัติเหมาะสมกว่า แต่อย่างไรก็ตามมีโรงงานในประเทศที่เริ่มผลิตแป้งเคมีจากแป้งมันสำปะหลังขึ้นแล้ว

2.3.3.2 อุตสาหกรรมไม้อัด

แป้งมันสำปะหลังถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมไม้อัด เนื่องจากลักษณะการผลิตไม้อัด คือ การนำไม้มาประกบติดกันโดยใช้กาว ซึ่งแป้งมันก็ถูกนำมาเป็นส่วนผสมในการทำกาว เพราะแป้งมันมีสมบัติเป็นกาวอยู่แล้ว เพื่อให้ไม้อัดติดกันเป็นแผ่นหนาแข็งแรงและทนทาน นอกจากนี้การใช้แป้งเป็นส่วนผสมยังเป็นการลดต้นทุนการผลิตกาว เพราะกาวที่ผลิตได้นั้นใช้แป้งเป็นส่วนผสมถึง 50% และแป้งมันสำปะหลังยังมีสมบัติพิเศษกว่าแป้งประเภทอื่นๆ คือ เนื้อแป้งมีความละเอียด ทำให้ไม่มีการตกตะกอนเมื่อนำมาใช้ผสมทำกาว นอกจากนี้ราคายังถูกกว่าด้วย

2.3.3.3 อุตสาหกรรมกระดาษ

การทำกระดาษนั้นต้องใช้เยื่อกระดาษที่ทำจากไม้ต่างๆ เช่น ไม้สน ไม้ไผ่ ไม้ยูคาลิปตัส เป็นต้น ทำให้เป็นเยื่อเล็กๆ แล้วนำเยื่อกระดาษเหล่านั้นมาเรียงเป็นแผ่น อย่างไรก็ตามแผ่นกระดาษจะไม่เรียบ จะต้องมีการฉาบผิวด้วยกาวจากแป้งทำให้กระดาษเรียบ และยังเข้าไปอยู่ตามรูของใยกระดาษ ช่วยทำให้กระดาษไม่ซีดหมึกเวลาเขียนด้วยน้ำหมึกหรือพิมพ์สี นอกจากนี้ กาวจากแป้งยังช่วยทำให้กระดาษเหนียวยิ่งขึ้น

2.3.3.4 อุตสาหกรรมกาว

แป้งมันมีสมบัติพิเศษ คือ เมื่อถูกความร้อนหรือถูกสารเคมีจะมีความเหนียวและมีสมบัติสามารถรักษาสภาพความเหนียวได้เหมือนเดิมไม่มีการคืนตัว แป้งมันที่จะใช้ทำกาวจะต้องเป็นแป้งบริสุทธิ์ มีความเป็นกรดต่ำ ซึ่งก็คือแป้งประเภทเด็กชทริน กาวเหล่านี้ส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในการผลิตของจดหมาย สติกเกอร์ gummed paper และ gummed tape

2.3.3.5 อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม

สมบัติสำคัญของแป้ง คือ เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรต แต่ยังมีสมบัติอื่นที่ทำให้แป้งมันสำปะหลังเข้ามามีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมอาหาร นั่นก็คือ เป็นตัวช่วยทำให้เกิดความข้นในอาหาร ช่วยให้อาหารเกิดความคงตัว ช่วยให้อาหารเกาะตัวกันดีขึ้น และช่วยในการเสริมแต่ง นอกจากนี้แป้งยังเป็นสิ่งที่หาได้ง่าย และราคาค่อนข้างถูก ใช้ทำเป็นอาหารเด็ก ผลิตภัณฑ์ขนมปัง ขนมหวานสำเร็จรูปได้ขนมพาย อาหารกระป๋อง บะหมี่ เครื่องดื่ม ไอศกรีม แยม ผลไม้กระป๋อง นมเปรี้ยว ไข่กรอก กุนเชียง ซอส และโซดาทำขนม เป็นต้น ซอสต่างๆ เช่น ซอสมะเขือเทศ อาหารกระป๋อง ใช้แป้งเพื่อเพิ่มความเข้มข้น ไม่ให้อาหารหรือซอสตกตะกอน โดยจะใช้แป้งเป็นส่วนผสมประมาณร้อยละ 3 - 4 ของน้ำหนักอาหาร แป้งที่ใช้เป็นแป้งแปรรูปประเภท

cross - linked starch และ hydroxypropylated starch ลูกกวาดใช้แป้งแปรรูปประเภท hydroxypropylated starch เพื่อให้ลูกกวาดมีความแข็ง ไอศกรีม ลักษณะของไอศกรีม คือ การตีแป้งให้เป็นฟองและไม่ต้องการให้ฟองยุบ ดังนั้นจึงต้องเติมแป้งประเภท gum ซึ่งมีสมบัติทำให้อาหารคงสภาพที่ต้องการ

2.3.3.6 วัสดุภัณฑ์ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

นำแป้งมันสำปะหลังมาแปรรูปคล้ายพลาสติก ซึ่งเมื่อเติมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ก็จะทำให้เกิดเป็นสารผสมที่สามารถนำไปทำเป็นวัสดุภัณฑ์เพื่อใช้ทดแทนพลาสติกได้

2.3.3.7 อุตสาหกรรมสารความหวาน

ทำน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส แดร์ริคโตส ซอลบิทอล และใช้แทนน้ำตาลซูโครส ในผลไม้กระป๋อง แยม และอื่น ๆ

2.3.3.8 อุตสาหกรรมกรดมะนาว

ใช้ผลิตกรดมะนาวซึ่งเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม ได้แก่ น้ำอัดลม น้ำผลไม้กระป๋อง เครื่องดื่มชูกำลัง และใช้ในอุตสาหกรรมยา

2.3.3.9 อุตสาหกรรมผงชูรส

เป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตผงชูรส ซึ่งนิยมบริโภคกันทั่วไป

2.3.3.10 ยารักษาโรค

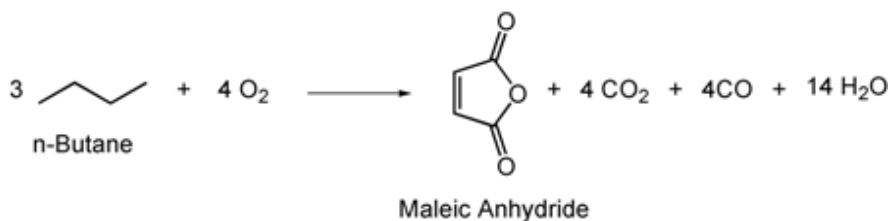
ใช้เป็นตัวเจือจางในยาประเภทแคปซูลและยาเม็ด [20]

2.4 มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride)

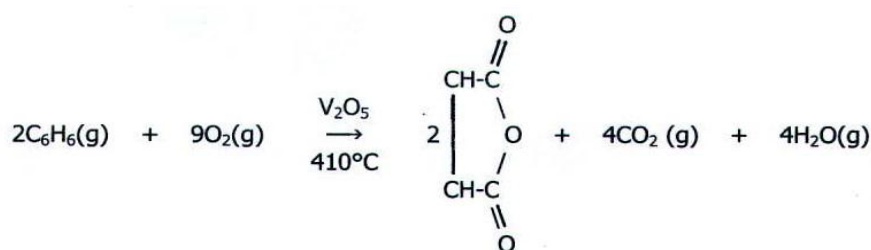
มาเลอิกแอนไฮไดรด์ หรือ *cis*-butenedioic anhydride, toxilic anhydride, dihydro-2,5-dioxofuran (CAS No. 108-31-6) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็น $C_4H_2O_3$ โดยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่บริสุทธิ์จะมีสถานะเป็นของแข็งสีขาว และมักมีกลิ่นฉุนรุนแรง มีจุดเดือดที่ประมาณ $202^{\circ}C$ และมีจุดหลอมเหลวที่ประมาณ $53^{\circ}C$ นิยมใช้เป็นสารดัดแปรในพอลิเมอร์ เช่น การดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ให้มีความชอบน้ำมากขึ้น เป็นต้น [21]

การสังเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ในทางการค้าจะสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ของเบนซีน (Benzene) หรือ บิวเทน (Butane) ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้บิวเทนในการสังเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มากกว่า เพราะเป็นกระบวนการที่ได้ผลิตภัณฑ์ออกมามากกว่า

และเบนซีนมีราคาแพง อย่างไรก็ตามเบนซีนยังคงมีการนำมาใช้ในการสังเคราะห์อยู่ ซึ่งมีสมการการสังเคราะห์ดังรูปที่ 2.7 และ 2.8 [22-23]



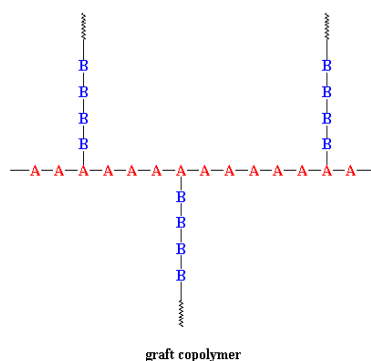
รูปที่ 2.7 กระบวนการสังเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จากบิวเทน [23]



รูปที่ 2.8 กระบวนการสังเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จากเบนซีน [23]

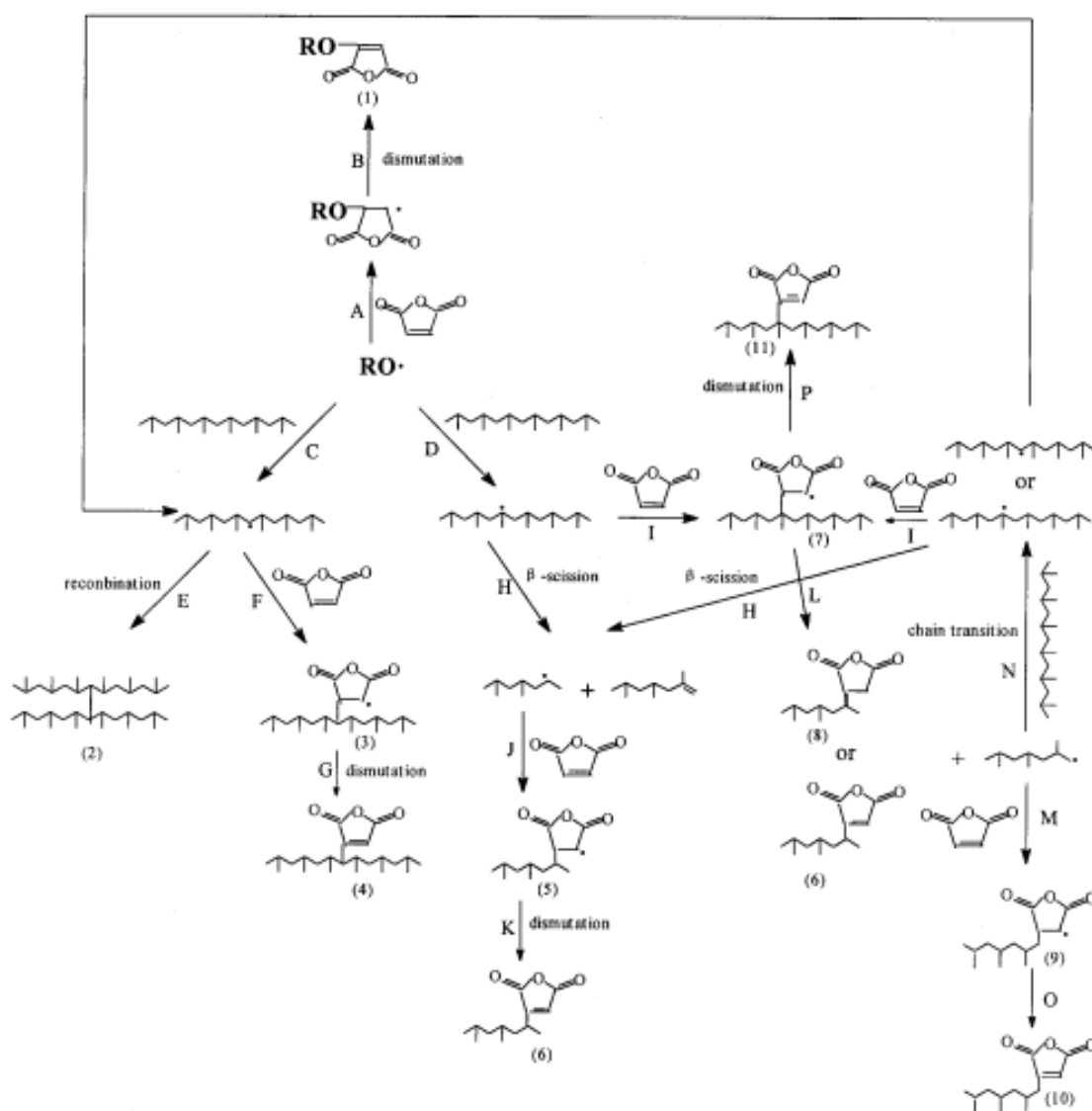
2.5 พอลิเมอร์ร่วมแบบตอกกิ่ง (Graft copolymer)

พอลิเมอร์ร่วมแบบตอกกิ่งหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ คือ โคพอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านสาขา (side chain) ไม่เหมือนกับสายโซ่หลัก (main chain) โดยโครงสร้างเริ่มต้นนั้นมีหน่วยซ้ำๆ กันเป็นสายโซ่ยาวเพียงอย่างเดียว และถูกตอกกิ่งก้านสาขาด้วยพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งกิ่งก้านสาขาที่แยกออกมามีส่วนสำคัญในการจำแนกชนิดของกราฟต์โคพอลิเมอร์ เช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีน มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิแล็กติกแอซิด กิ่งก้านสาขาที่แยกออกมาคือ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เป็นต้น [24]



รูปที่ 2.9 พอลิเมอร์ร่วมแบบตอกกิ่ง [24]

โดยทั่วไปการกราฟต์โคพอลิเมอร์จะสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบฟรีแรดิคัล (Free-radical polymerization) ซึ่งในขั้นริเริ่มปฏิกิริยาอาจใช้การฉายรังสีหรือสารริเริ่มในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดฟรีแรดิคัลขึ้นในสายโซ่ โดยสารริเริ่มที่นิยมใช้กัน เช่น ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide) เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide) เป็นต้น ตัวอย่างการทำกราฟต์โคพอลิเมอร์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์บนพอลิโพรพิลีนโดยผ่านกระบวนการหลอมเหลวในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยใช้ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์เป็นสารริเริ่มในการเกิดปฏิกิริยาในงานวิจัยของ Shi และคณะ [25] ซึ่งแสดงปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ [25]

2.6 พอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสม เป็นการนำพอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมกันในสถานะของไหล เช่น เป็นสารละลาย (Solution) หรือสารหลอมเหลว (Molten) ให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Blending) ซึ่งการทำพอลิเมอร์ผสมเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ โดยพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมารวมกัน แต่การผสมพอลิเมอร์ที่ต่างชนิดกันให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัมนั้นทำได้ยาก จึงมีลักษณะเป็นเพียงของแข็งของพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งกระจายตัวอยู่ในเนื้อหรือเมทริกซ์ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอจะทำให้เกิดจุดบกพร่อง (Defects) ขึ้นได้ ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมแยลง นอกจากนี้สภาพเข้ากันได้ (Compatibility) ของพอลิเมอร์ที่จะนำมาผสมกันก็มีส่วนสำคัญเป็นอย่างมาก บางชนิดอาจเข้ากันได้ดี แต่บางชนิดอาจเข้ากันไม่ได้ [26]

2.6.1 สภาพเข้ากันได้ (Compatibility)

การเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่มักจะต้องใช้สารช่วยผสมหรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างพอลิเมอร์ที่ทำการผสมกันในขณะผสม (In-situ chemical reaction) เพื่อช่วยให้พอลิเมอร์ผสมมีแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสที่ดีขึ้น ซึ่งโดยมากพอลิเมอร์ผสมจะมีสมบัติเชิงกลที่ค่อนข้างต่ำ เพราะแรงดึงดูดระหว่างพื้นผิวสัมผัสต่ำ และมีความเค้นสะสม (Stress concentration) ในเมทริกซ์ จึงจำเป็นต้องมีการช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม และการใช้สารช่วยผสม (Compatibilizer) จะช่วยลดแรงดึงระหว่างพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมในขณะที่ทำการหลอมเหลว ทำให้มีการกระจายตัวที่ดีขึ้น ช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวของพอลิเมอร์ ทำให้มีการกระจายแรงได้ดีขึ้น ช่วยลดอัตราการรวมตัวของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในระหว่างกระบวนการหลอมเหลวและอบอ่อน ทำให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ [26]

2.6.2 วิธีการผสมเพื่อความเข้ากันได้

วิธีการผสมเพื่อความเข้ากันได้สามารถทำได้หลายวิธีขึ้นกับผู้ผลิตจะเลือกดำเนินการโดยพิจารณาจากต้นทุนดังนี้

2.6.2.1 พิจารณาจากสภาพการผสมที่เข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic Miscibility) โดยจะขึ้นอยู่กับความสมดุลของเอนทัลปีและเอนโทรปีของการผสม ซึ่งมีผลต่อค่าพลังงานเสรีของการผสม (Free energy of mixing) ดังสมการ

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

โดยที่ ΔG = การเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานเสรีของการผสม

ΔH = การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการผสม

ΔS = การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการผสม

T = อุณหภูมิ (K)

2.6.2.2 การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ (Addition of block or Graft copolymers)

โดยทั่วไปแล้วการใช้บล็อกโคพอลิเมอร์จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้กราฟต์โคพอลิเมอร์ การใช้โคพอลิเมอร์ที่มีส่วนประกอบของบล็อกที่มีความยาวลดหลั่นลงมา จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าโคพอลิเมอร์ที่มีส่วนประกอบของบล็อกที่มีความยาวเท่าเทียมกัน

2.6.2.3 การเติมพอลิเมอร์ที่หมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาขณะทำการผสม (Addition of functional/Reactive polymers)

การเติมพอลิเมอร์ที่หมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาขณะทำการผสมจะกระทำโดยการนำพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งมาดัดแปรให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือมีส่วนที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวจะต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาหรือมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ โดยการดัดแปรพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์หรือทำในขณะผ่านการอัดรีด เช่น การนำพอลิโพรพิลีนที่ถูกกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์มาผสมกับพอลิเอไมด์ จะเห็นว่าหมู่คาร์บอกซิลิกของมาเลอิกแอนไฮไดรด์จะสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับหมู่เอมีนของพอลิเอไมด์ได้ ซึ่งในที่นี้พอลิโพรพิลีนที่ถูกกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์จะถูกจัดให้เป็นสารช่วยในการผสมซึ่งเป็นที่นิยมมากในทางการค้า อีกทั้งมีราคาไม่แพงนัก

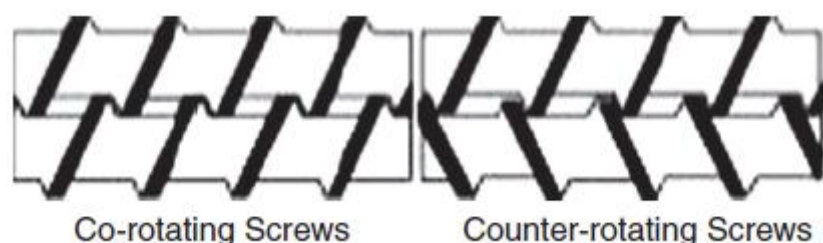
2.6.2.4 การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ไฮเซชันในขณะทำการผสมหรือเรียกว่าการผสมแบบรีแอกทีฟ (Reactive Blending)

เป็นวิธีที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากันได้โดยตรง โดยไม่ต้องเติมสารช่วยผสม กล่าวคือ องค์ประกอบที่จะใช้ในการผสมจะถูกนำมาปรับปรุงเพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ เช่น การผสมพอลิคาร์บอนเนตกับพอลิเอสเทอร์ ซึ่งในบางครั้งการผสมแบบ

ไม่ต่อเนื้อก็สามารถใช้การผสมแบบรีแอกทีฟได้ ส่วนวิธีการผสมที่เป็นแบบต่อเนื่อง เช่น การอัดรีดด้วยสกรูเดี่ยว (Single-screw extruder) และการอัดรีดด้วยสกรูคู่ (Twin-screw extruder) ก็นิยมใช้กันมากเช่นกัน เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและสิ่งที่ไม่ต้องการออกจากการเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่า [26]

2.7 การผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

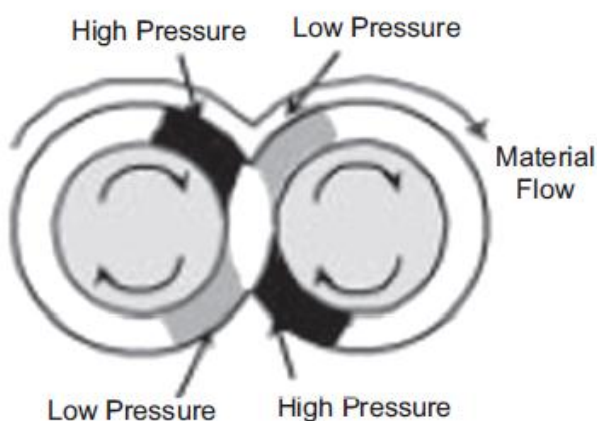
เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-screw extruder) จะประกอบไปด้วยสกรู 2 อัน อยู่ในกระบอกหลอมอันเดียวกัน ซึ่งประเภทของสกรูสามารถแบ่งตามทิศทางการหมุนของสกรูได้ 2 แบบ คือ สกรูที่หมุนไปในทิศทางเดียวกัน กับสกรูที่หมุนไปในทิศทางตรงข้ามกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.11



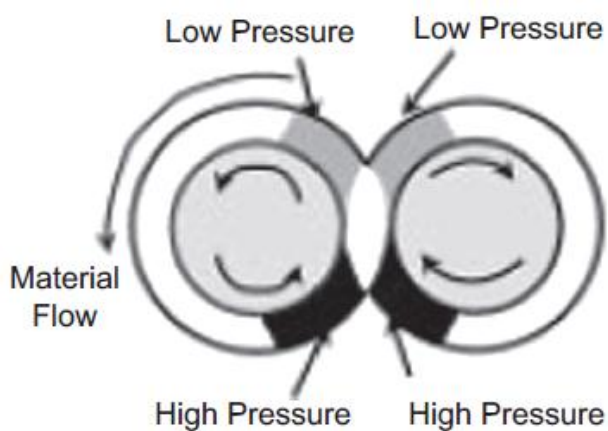
รูปที่ 2.11 ลักษณะการหมุนของสกรู [28]

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งตามการขบกันของสกรูได้ 2 แบบเช่นเดียวกัน คือแบบที่สกรูขบกัน (intermeshing) ซึ่งการหมุนของสกรูหนึ่งจะทำให้อีกสกรูหนึ่งหมุนตามไปด้วย และแบบที่สกรูไม่ขบกัน (non-intermeshing) ซึ่งการหมุนของสกรูแต่ละอันจะไม่เกี่ยวข้องกัน เสมือนเป็นสกรูสองอันอยู่ใกล้กันเท่านั้น ซึ่งสกรูที่ขบกันเองยังสามารถแบ่งได้เป็นแบบที่ flights ของสกรูทั้งสองสบกัน (conjugated screw, tightly intermeshing) และแบบที่ flights ของสกรูทั้งสองไม่สบกัน (non-conjugated screw, closely intermeshing) โดยระดับของการสบกันของสกรู ยิ่งมากยิ่งขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนของพอลิเมอร์หลอมได้สูง แต่ก็ทำให้แนวโน้มของประสิทธิภาพในการผสมลดลงได้ ดังนั้นเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่ใช้เฉพาะในงานผสม การทำคอมพาวด์ (compounding) และการตัดแปรทางเคมีของเทอร์โมพลาสติก (thermoplastics) ต่างๆ มักใช้แบบที่สกรูสบกันที่มีระดับการสบกันน้อย หมุนไปในทิศทางเดียวกัน และมีความเร็วในการหมุนสูง เนื่องจากกระบวนการเหล่านี้ต้องการลักษณะของการผสมเป็นสำคัญ [27] แต่ถ้าต้องการดูประวัติของพลาสติกหรือการทำท่อจะใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่มีการหมุนในทิศทางเดียวกันด้วยความเร็วในการหมุนของสกรูที่ต่ำ ส่วนเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่มีการหมุนในทิศตรงกันข้ามจะใช้

สำหรับการผสมพอลิไวนิลคลอไรด์และระบบเรซินอื่นๆ ซึ่งการใช้งานที่แตกต่างกันนี้เนื่องมาจากทิศทางในการหมุนของสกรูคู่จะทำให้เกิดความดันที่ต่างกันบนสกรู ดังแสดงในรูปที่ 2.12 และ 2.13 [28-29]



รูปที่ 2.12 ลักษณะความดันที่เกิดขึ้นบนสกรูแบบที่หมุนในทิศทางเดียวกัน [29]

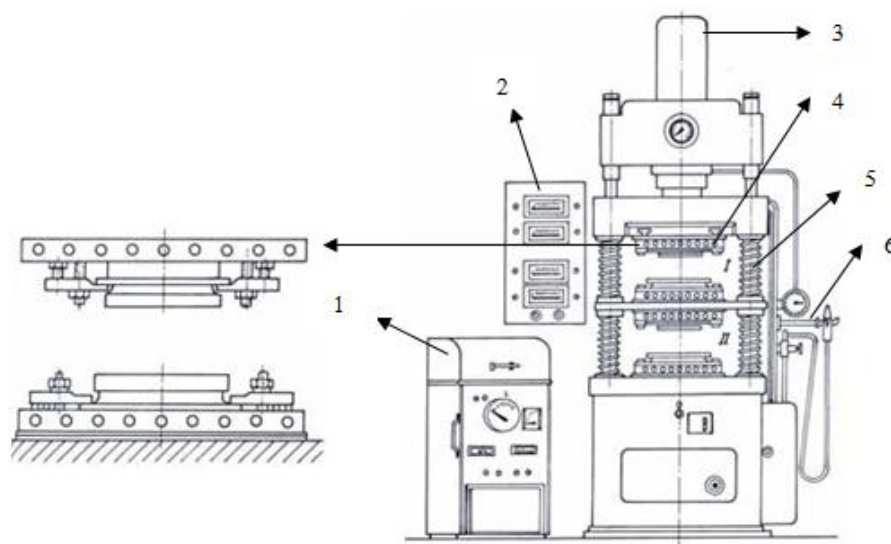


รูปที่ 2.13 ลักษณะความดันที่เกิดขึ้นบนสกรูแบบที่หมุนในทิศทางตรงข้ามกัน [29]

2.8 การขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ

การขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ (Compression molding) คือ การทำงานพลาสติก เช่น ทำเป็นจาน ซาม สวิตช์ไฟ ฯลฯ โดยการเติมพลาสติกลงในแบบปิด แล้วใช้ความดันอัดปิดแม่แบบพร้อมทั้งให้ความร้อน ทำให้พลาสติกไหลเข้าไปแทนที่ช่องว่างในแม่แบบตามรูปทรงของชิ้นงานนั้นๆ ซึ่งพลาสติกที่ผลิตออกมาจำหน่ายส่วนมากจะอยู่ในรูปของผง เม็ด หรือเหลวเป็นแป้งเปียก จึงสามารถนำมาเข้ากระบวนการผลิตโดยงานอัดและอัดฉีดได้ดี แต่ถ้าต้องการผสมสาร

ปรับปรุงคุณภาพจะต้องเข้ากระบวนการเตรียมวัสดุก่อน ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การหลอมเหลว และการผสมโดยเติมของเหลว



รูปที่ 2.14 เครื่องอัดแบบอัตโนมัติ [30]

เครื่องอัดแบบอัตโนมัติที่ใช้ในการอัดขึ้นงานตามรูปที่ 2.14 จะประกอบไปด้วย

1. เครื่องให้ความร้อนพลาสติกแบบไฮฟริควนซี
2. เครื่องมือวัดและควบคุมอุณหภูมิ
3. ปั๊มไฮดรอลิก
4. ซีทเตอร์
5. สปริง
6. หัวเป่าลมอัดเพื่อทำความสะอาดแม่พิมพ์

ซึ่งส่วนประกอบของเครื่องจักรที่ใช้ในการอัด คือ แผ่นเหล็กอัด (Platens) จำนวนสองชุด แผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ อีกแผ่นจะถูกยึดติดกับที่ นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ให้ความร้อน ระบบไฮดรอลิก และอาจมีอุปกรณ์หล่อเย็น สำหรับระบบขับเคลื่อนเข้า เครื่องอัดเข้าส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่แผ่นเหล็กอัดขึ้นลงโดยใช้แรงขับจากไฮดรอลิก แต่มีเครื่องอัดบางชนิดที่เคลื่อนที่โดยใช้แรงลม (Pneumatically operation) นอกจากทำหน้าที่ให้แผ่นเหล็กอัดเคลื่อนที่ขึ้นลงแล้ว ระบบขับเคลื่อนจะทำหน้าที่ในการให้แรงดันในการอัดด้วย ส่วนระบบให้ความร้อนและหล่อเย็น การให้ความร้อนแก่พลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การให้ความร้อนแก่คอมพาวด์ก่อนอัด และการให้ความร้อนแก่เบ้าโดยตรงขณะที่อัด การให้ความร้อนแก่คอมพาวด์ก่อนอัดเป็นการลดระยะเวลาในการอัด เนื่องจากพลาสติกเทอร์โมเซตเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี ดังนั้นการเติมคอมพาวด์ที่เย็นลงไปในเบ้าโดยตรงจะทำให้เสียเวลาในการทำคอมพาวด์ให้มีอุณหภูมิถึงจุดที่ต้องการให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง วิธีการให้ความร้อนแก่คอมพาวด์ก่อนทำการอัดมีหลายวิธี เช่น การใช้ตู้อบชนิดความถี่สูง หรือการ

ให้ความร้อนในเบ้าร้อน เมื่อนำคอมพาวด์เข้าเบ้าแล้ว จะต้องให้ความร้อนแก่เบ้าโดยตรงต่อในขณะทำการอัด ซึ่งระบบที่ให้ความร้อนแก่เบ้าของเครื่องอัดมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ดังนี้

- ระบบไฟฟ้า นิยมใช้กันมากเนื่องจากออกแบบและติดตั้งได้ง่าย และมีความสะดวกในการซ่อมบำรุง

- ระบบไอน้ำ มีข้อดีคือ ให้ความร้อนที่สม่ำเสมอ แต่ให้ความร้อนเกิน 180°C ไม่ได้

- ระบบน้ำร้อนไหลเวียน เป็นเทคนิคใหม่ที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน ทำโดยการใช้การเผาพ่น้ำด้วยเปลวจากก๊าซหุงต้ม แล้วให้ไหลเวียนเพื่อให้ความร้อนแก่เบ้า

นอกจากระบบให้ความร้อนแล้วยังอาจมีระบบหล่อเย็น เพื่อให้ชิ้นงานพลาสติก จากการอัดเบ้าเย็นตัวลง ระบบหล่อเย็นไหลหมุนเวียนเข้าสู่ระบบท่อใกล้ช่องว่างของเบ้า หรืออาจใช้ระบบน้ำร้อนที่สามารถสลับจากการให้ความร้อนเป็นการหล่อเย็นได้ [30]

2.9 เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของวัสดุ

2.9.1 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)

ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบ พิสูจน์ และศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของสาร ซึ่งอาจอยู่ในรูปของแข็งหรือของเหลวก็ได้ โดยโมเลกุลของสารจะดูดกลืนคลื่นรังสีอินฟราเรดแล้วถูกกระตุ้นให้เป็นโมเลกุลที่มีพลังงานสูงกว่าสภาวะพื้น ซึ่งเป็นพลังงานพอที่จะทำให้โมเลกุลเกิดการสั่น (Vibration) หรือการหมุน (Rotation) และเกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะในโมเลกุลได้ ถ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวระหว่างอะตอมที่เกิดพันธะกัน เรียกว่า การยืด (Stretching) ซึ่งมีทั้งแบบสมมาตร (Symmetric stretch) และแบบไม่สมมาตร (Asymmetric stretch) แต่ถ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่าง 2 พันธะ จะเรียกว่า การงอ (Bending) หรือการผิดรูป (Deformation) ซึ่งมี 4 แบบด้วยกัน คือ

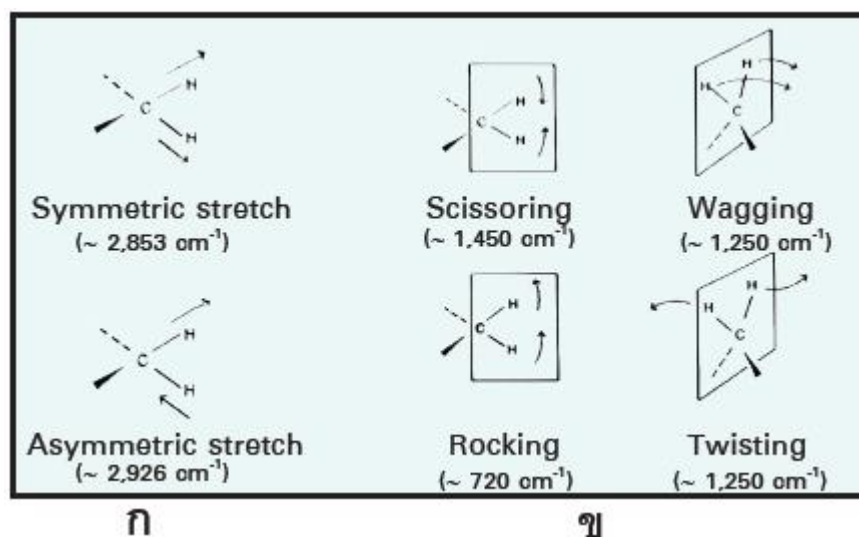
2.9.1.1 Scissoring สองอะตอมที่ต่อกับอะตอมตรงกลางแกว่งไปด้านข้างในระนาบของโมเลกุล

2.9.1.2 Rocking สองอะตอมที่ต่อกับอะตอมตรงกลางเคลื่อนที่เข้าหากันหรือออกจากกันในระนาบของโมเลกุล

2.9.1.3 Wagging สองอะตอมที่ต่อกับอะตอมตรงกลางแกว่งไปข้างหน้าและข้างหลังนอกระนาบของโมเลกุล

2.9.1.4 Twisting สองอะตอมที่ต่อกับอะตอมตรงกลางหมุนรอบพันธะนอก
ระนาบของโมเลกุล [31-32]

ซึ่งลักษณะการสั่นของโมเลกุลที่เกิดขึ้นแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ลักษณะการสั่นของโมเลกุล (ก) การสั่นแบบยืด (ข) การสั่นแบบงอ [31]

จากลักษณะการสั่นหรือการหมุนของพันธะเคมีในโมเลกุลที่กล่าวมาข้างต้นจะ
ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงาน ทำให้โมเลกุลดูดกลืนพลังงานที่ค่าหนึ่ง (ที่ความถี่ในการสั่น
ของโมเลกุลของสารนั้น) ค่าต่างๆ เหล่านี้จะประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ โดยคำนวณพลังงานแต่
ละความยาวคลื่นแล้วแปลผลออกมาเป็นสเปกตรัม ซึ่งสารแต่ละชนิดจะให้สมบัติที่มีลักษณะ
เฉพาะที่แตกต่างกันไป ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสาร
ต่างๆ ได้ ซึ่งช่วงของอินฟราเรดสเปกตรัมแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังแสดงในตารางที่ 2.5 และช่วงของ
อินฟราเรดสเปกตรัมที่นิยมใช้จะแสดงในตารางที่ 2.6 [31-32]

ตารางที่ 2.5 ช่วงของอินฟราเรดสเปกตรัม [31]

ช่วง	ความยาวคลื่น (μm)	เลขคลื่น (cm ⁻¹)	ความถี่ (Hz)
ช่วงใกล้อินฟราเรด	0.78-2.5	12800-4000	3.8×10 ¹⁴ -1.2×10 ¹⁴
ช่วงกลางอินฟราเรด	2.5-50	4000-200	1.2×10 ¹⁴ -6.0×10 ¹²
	2.5-15*	4000-670*	1.2×10 ¹⁴ -2.0×10 ¹³
ช่วงไกลอินฟราเรด	50-1000	200-10	6.0×10 ¹² -3.0×10 ¹¹

*เป็นช่วงที่ใช้มาก เพราะมีความถี่ตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุล

ตารางที่ 2.6 ช่วงของการดูดกลืนอินฟราเรดสเปกตรัม [32]

กลุ่มโครงสร้างเคมี	ช่วงความถี่ (cm^{-1})	หมายเหตุ	
อะลิฟาติก (Aliphatic)			
-CH ₃	1952-2972	การยืดแบบไม่สมมาตรของ C-H	
	2862-2882	การยืดแบบสมมาตรของ C-H	
	1430-1480	การงอแบบไม่สมมาตรของ C-H	
	1370-1380	การงอแบบสมมาตรของ C-H	
-CH ₂ -	2920-2930	การยืดแบบไม่สมมาตรของ C-H	
	2848-2858	การยืดแบบสมมาตรของ C-H	
	1450-1480	การงอของ C-H	
	1150-1350	การบิดของ C-H	
	700-1000	สมดุขของ C-H	
	-CH<	2880-2900	การยืดของ C-H
		-(CH ₂) _n -	720-740
-CH(CH ₃)-	1110-1140		การสั่นบนสายโซ่ -CH ₂ -
-CH=CH-	967	ไวบิลลิชันแบบไม่อิมตัว	
อะโรมาติก (Aromatic)			
-CH	3000-3125	การยืดของ C-H บนวงแหวนอะโรมาติก	
	1650-2000	การงอออกจากระนาบของ CH-	
	1575-2000	การสั่นของวงแหวนอะโรมาติก	
	1520-1480		
	700-800	การงอของวงแหวนอะโรมาติก	
อะลิฟาติก C=C			
-C=CH ₂	3070-3090	การยืดแบบไม่สมมาตรของ C-H	
	2983-3005	การยืดแบบสมมาตรของ C-H	
-CH=CH-(trans)	3010-3040	การยืดของ C-H	
	960-970	การเบี่ยงออกของ C-H	
>C=C<	1615-1670	การยืดของ C=C ที่ไม่คอนจูเกต	

ตารางที่ 2.6 ช่วงของการดูดกลืนอินฟราเรดสเปกตรัม (ต่อ) [32]

กลุ่มโครงสร้างเคมี	ช่วงความถี่ (cm^{-1})	หมายเหตุ
$>\text{C}=\text{C}<$	1600-1590	การยืดของ $\text{C}=\text{C}$ ที่คอนจูเกต
$-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}_2$	955	แอลิลิกไม่เสถียร
$-\text{CH}=\text{CH}_2$	990 และ 908	ไวนิลไม่เสถียร
$>\text{C}=\text{CH}_2$	888	ไวนิลดีนไม่เสถียร
พันธะสาม		
$-\text{C}\equiv\text{CH}_2$	3310-3200	การยืดของ $\text{C}-\text{H}$
$-\text{C}\equiv\text{C}-$	2150-2250	การยืดของ $\text{C}\equiv\text{C}$
$\text{R}-\text{C}\equiv\text{N}$	2260-2240	การยืดของ $\text{C}\equiv\text{N}$
แอลกอฮอล์ O-H		
$-\text{OH}$	3200-3400	การยืดของ O-H (กว้างและแข็งแรง)
$-\text{CO}$	1050-1150	การยืดของ C-O (แข็งแรง)
$-\text{OH}$	1310-1410	การงอของ OH
เอไมด์ (Amides)		
$\text{R}(\text{CO})\text{NH}_2$	3420-3550	การยืดแบบไม่สมมาตรของ C-H
	3450-3320	การยืดแบบสมมาตรของ C-H
	1650-1690	การยืดของหมู่คาร์บอนิล
	1600-1640	การงอของ NH_2
	1605-1420	การยืดของ N-H
$\text{R}(\text{CO})\text{NHR}$	3440	การยืดของ C-N
	1640-1680	การยืดของหมู่คาร์บอนิล
	1530-1570	การงอของ NH_2
	1300-1260	การยืดของ N-H
$\text{R}(\text{CO})\text{NR}_2$	1650	ไม่มีหมู่ N-H
เอสเทอร์ (Esters)		
$-\text{C}=\text{O}$	1735	การยืดของหมู่คาร์บอนิล
$-\text{COC}-$	1185-1275	การยืดของ C-O-C แบบไม่สมมาตร
$-\text{COC}-$	1050-1160	การยืดของ C-O-C แบบสมมาตร

ตารางที่ 2.6 ช่วงของการดูดกลืนอินฟราเรดสเปกตรัม (ต่อ) [32]

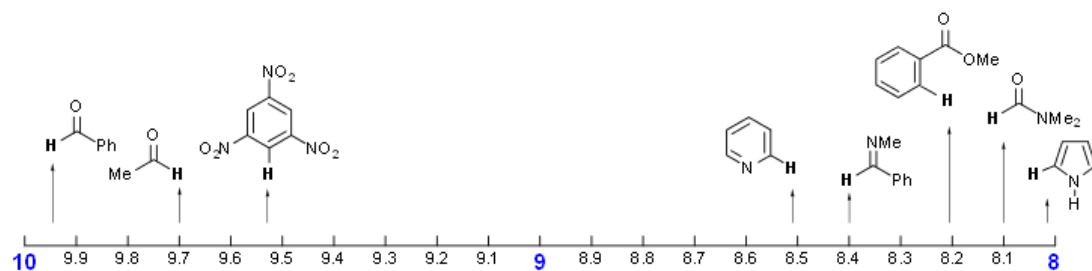
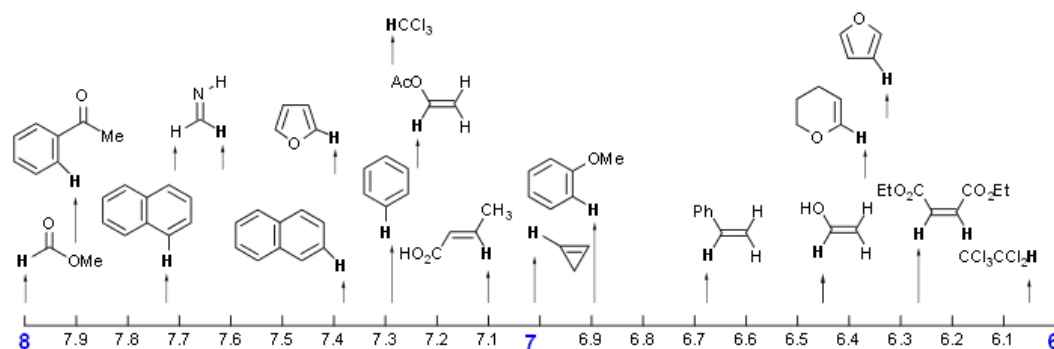
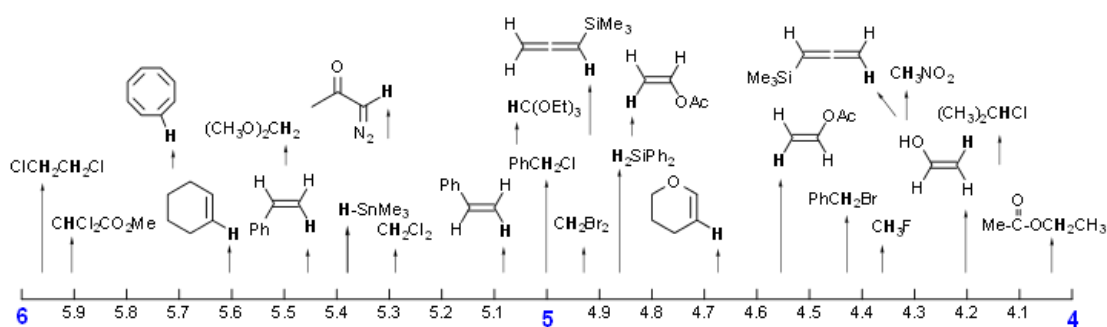
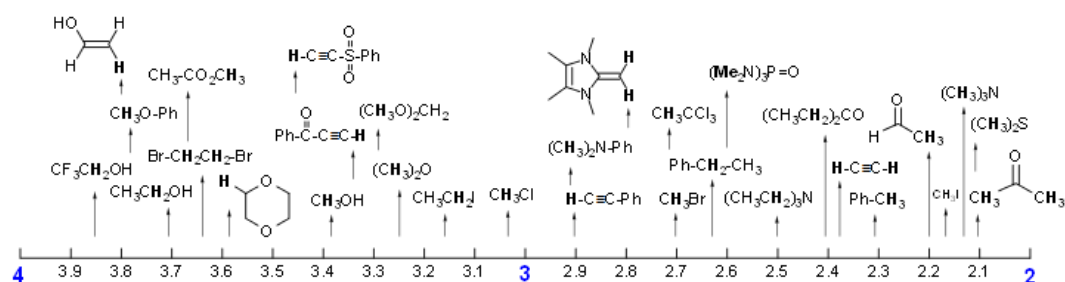
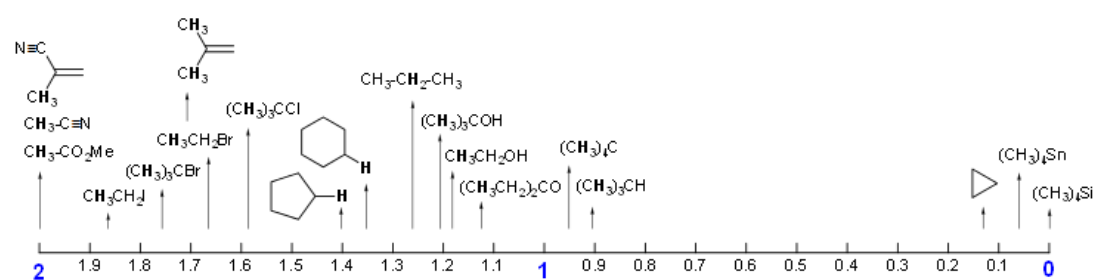
กลุ่มโครงสร้างเคมี	ช่วงความถี่ (cm^{-1})	หมายเหตุ
กรด, เปอร์ออกไซด์ และแอนไฮไดรด์		
-C=O	1750-1765	การยืดของหมู่คาร์บอนิล
-OH	3550	การยืดของ O-H (กว้างและแข็งแรง)
-OH	1420	การงอของ OH
-CO	1250	การยืดของ C-O
OOH	860-900	การงอออกจากระนาบของ -OH
Peroxides	1780-1820	การยืดของแบบไม่สมมาตร -C=O -(CO)OO(CO)-
Anhydrides	1750-1770	การยืดแบบสมมาตรของ -C=O -(CO)OO(CO)-
	820-890	ค่อนข้างมาก (-COOC-)
	1810-1830	การยืดของแบบไม่สมมาตร -C=O -(CO)O(CO)-
	1750-1770	การยืดแบบสมมาตรของ -C=O -(CO)O(CO)-
แอลดีไฮด์ (Aldehydes)		
-C=O แอลิฟาติก	1715-1725	การยืดของหมู่คาร์บอนิล (-C=O)
-C=O แอโรมาติก	1700	การยืดของหมู่คาร์บอนิล (-C=O)
คีโตน (Ketones)		
-C=O แอลิฟาติก	1710-1720	การยืดของหมู่คาร์บอนิล (-C=O)
-C=O แอโรมาติก	1690	การยืดของหมู่คาร์บอนิล (-C=O)
-C(CO)C-	1100	การงอของ -C(CO)C-
อีเทอร์ (Ethers) และ อีพอกไซด์ (Epoxides)		
-COC- แอลิฟาติก	1070-1150	การยืดแบบไม่สมมาตรของ -COC-
-COC- แอโรมาติก	1200-1275	การยืดแบบไม่สมมาตรของ -COC-
แอซีทัล (Acetals)	1020-1075	การยืดแบบสมมาตรของ -COC-
	1116-1103	เอกลักษณ์ของแอซีทัล (-COCOC-)

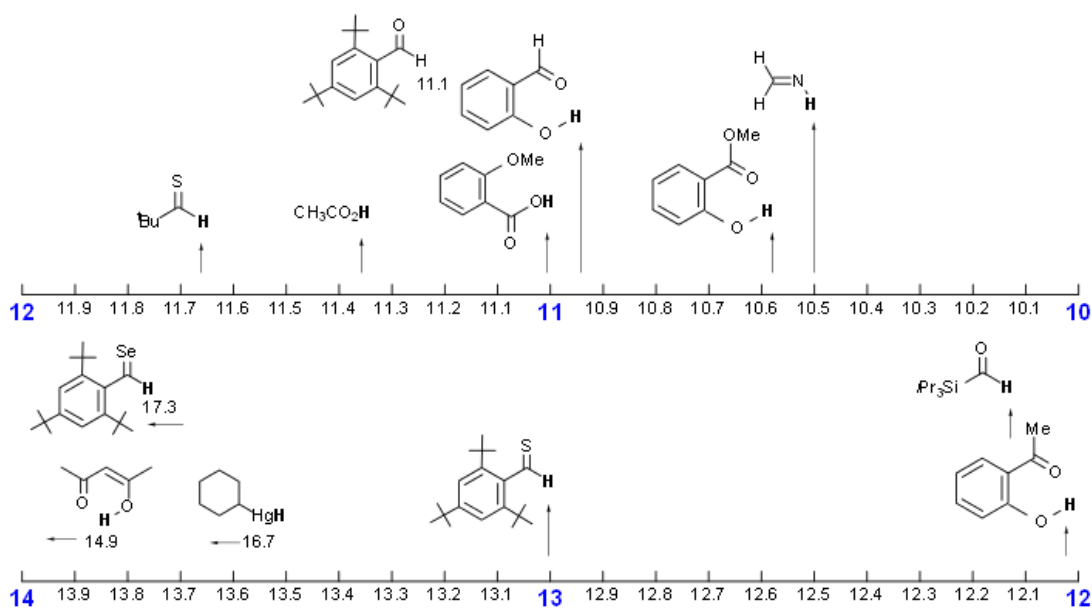
ตารางที่ 2.6 ช่วงของการดูดกลืนอินฟราเรดสเปกตรัม (ต่อ) [32]

กลุ่มโครงสร้างเคมี	ช่วงความถี่ (cm^{-1})	หมายเหตุ
เอมีน (Amines)		
RNH_2	1735	การยืดแบบไม่สมมาตรของ C-H
กลุ่มโครงสร้างเคมี	ช่วงความถี่ (cm^{-1})	หมายเหตุ
RNH_2	3450-3320	การยืดแบบสมมาตรของ C-H
	1560-1640	การงอเข้าระนาบของ NH-
	1030-1230	การยืดของ C-N
	650-900	การงอออกจากระนาบของ -NH (อ่อน)
R_2NH	3310-3450	การยืดของแบบไม่สมมาตร C-H
	1490-1580	การงอออกจากระนาบของ NH- (อ่อน)
	1100-1150	การยืดของ C-N
R_3NH	1030-1230	การยืดของ C-N (2 กลุ่ม)

2.9.2 เครื่องโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Proton nuclear magnetic resonance spectroscopy, $^1\text{H-NMR}$)

นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบโดยการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นวิทยุกับนิวเคลียสที่เกาะอยู่ในตำแหน่งต่างๆ ของโมเลกุลในสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีสมบัติทางสนามแม่เหล็กต่างกัน เนื่องจากมีสภาวะแวดล้อมทางเคมีที่แตกต่างกัน โดยนิวเคลียสที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับสนามแม่เหล็กได้นั้นต้องมีเลขควอนตัมสปิน (Spin quantum number, I) มากกว่า 0 ซึ่งค่า I จะขึ้นอยู่กับเลขอะตอมและเลขมวล โดยที่เลขอะตอมและเลขมวลที่เป็นเลขคู่จะไม่เกิดอันตรกิริยา สเปกตรัมที่ได้จาก NMR สเปกโตรมิเตอร์จะบอกถึงสภาวะแวดล้อมทางเคมีของนิวเคลียสที่ถูกดูดกลืนพลังงานว่าเป็นอย่างไร หรือบอกว่านิวเคลียสนั้นๆ อยู่ที่ตำแหน่งใดในโมเลกุล รวมถึงจำนวนนิวเคลียสที่อยู่ในตำแหน่งต่างๆ ด้วย ซึ่งช่วงของ NMR สเปกตรัมจะแสดงในรูปแบบที่ 2.16 [33-35]





รูปที่ 2.16 ช่วงของ $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัม [35]

2.10 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ

2.10.1 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC)

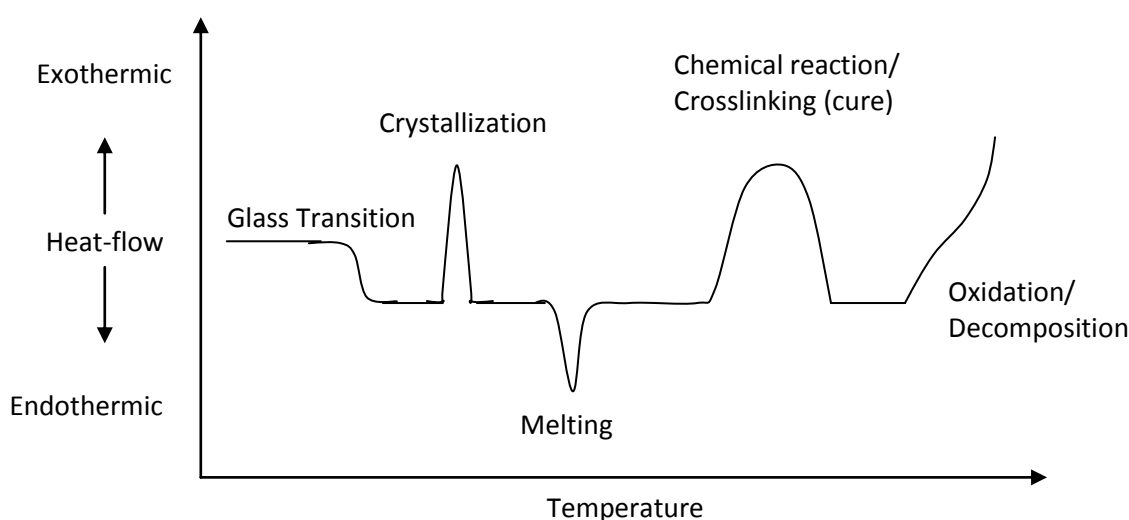
ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี (Differential Scanning Calorimetry, DSC) เป็นเทคนิคที่ใช้วัดความแตกต่างของพลังงานความร้อนที่ให้เข้าไปกับสารตัวอย่างเทียบกับสารอ้างอิง หรือวัดความแตกต่างของการไหลของความร้อน เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิหรือเวลา ซึ่งอุณหภูมิที่ให้กับสารทั้งสองจะถูกกำหนดไว้ ณ บรรยากาศในการทดสอบ โดยการเตรียมสารตัวอย่างในการทดสอบจะใช้สารตัวอย่างประมาณ 10 มิลลิกรัม และใช้อัตราเร็วในการให้ความร้อนประมาณ $20^\circ\text{C}/\text{min}$ ในบรรยากาศไนโตรเจน ซึ่งข้อมูลที่จะได้จากการทำ DSC คือ อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature, T_m), อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (Glass transition temperature, T_g) และปริมาณความเป็นผลึก (Crystallinity) ซึ่งหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\% \chi_c = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_{f_0}} \times 100$$

โดยที่ χ_c = ปริมาณความเป็นผลึก
 ΔH_f = ความแตกต่างของพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวสารตัวอย่าง (J/g)

$$\Delta H_{f_0} = \text{ความแตกต่างของพลังงานความร้อนที่ใช้ในการ
หลอมเหลวสารอ้างอิง (J/g)}$$

โดยความแตกต่างของพลังงานความร้อนของสารตัวอย่างจะหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของ T_m ถ้ามีพื้นที่ใต้กราฟมากแสดงว่ามีปริมาณความเป็นผลึกมาก และความแตกต่างของพลังงานความร้อนของสารอ้างอิงได้จากความแตกต่างของพลังงานความร้อนของพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึก 100% ซึ่งหาได้จากเอกสารอ้างอิง สำหรับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกราฟของค่าพลังงาน (heat flow curve) ที่สามารถพบในผลการทดสอบของพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งๆ จะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในวัสดุทางกายภาพหรือเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.17 [36-37]



รูปที่ 2.17 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกราฟที่ทดสอบด้วยเทคนิค
ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี [36]

2.10.2 เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA)

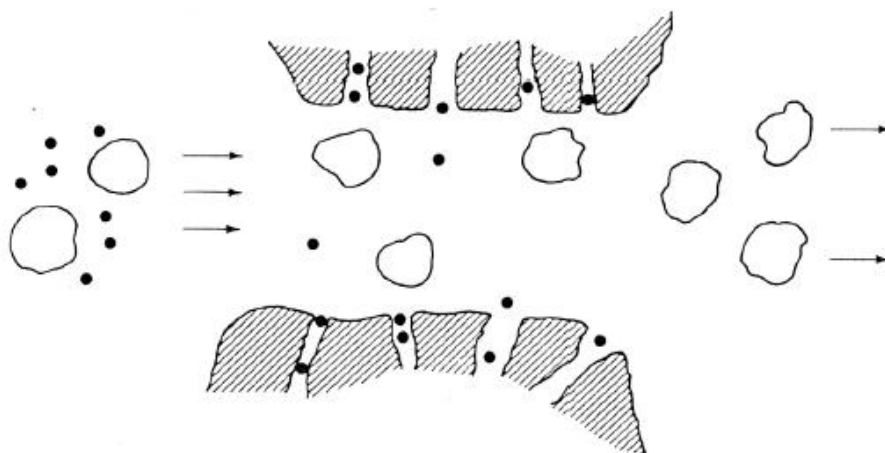
เทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (Thermogravimetric analysis, TGA) เป็นเทคนิคที่ง่ายและเก่าแก่ที่สุดที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงมวลของสารซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ หรือเป็นเทคนิคที่ใช้วัดน้ำหนักของสารกับอุณหภูมิ เวลา บรรยากาศ หรือความดัน โดยจะใช้สารตัวอย่างในการทดสอบประมาณ 5-20 มิลลิกรัม และอัตราเร็วในการให้ความร้อนประมาณ 5-10°C/min ซึ่งเทคนิค TGA สามารถใช้หาอุณหภูมิการสลายตัวของสาร (Decomposition temperature) องค์ประกอบของสาร (Compositional analysis) ความเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) และสามารถค้นหาอายุการใช้งาน (Estimated lifetime predictions) โดยกราฟที่ได้จะเป็น TG curve

ซึ่งอาจเกิดการซ้อนทับกันของกราฟได้ ทั้งนี้สามารถแสดงผลในรูปของ DTG (Derivative thermogravimetric) curve เพื่อแยกกราฟที่เกิดการซ้อนทับกันอยู่ให้เห็นชัดเจนและได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำมากขึ้นได้ [36]

2.11 เครื่องมือวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลและสัณฐานวิทยาของวัสดุ

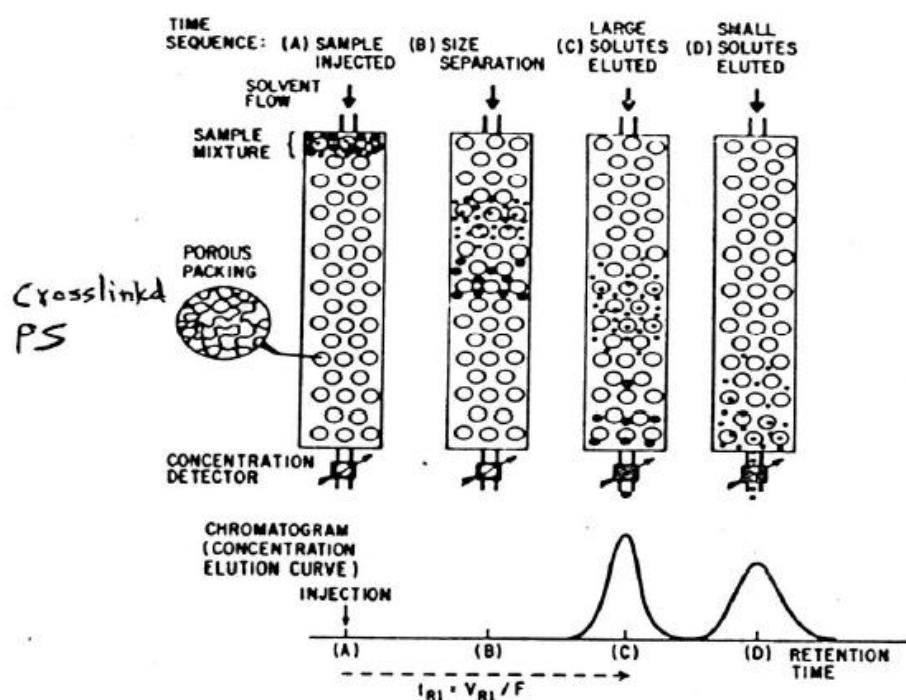
2.11.1 เครื่องโครมาโทกราฟีคอลัมน์ชนิดเจล (Gel permeation chromatography, GPC)

เครื่องโครมาโทกราฟีคอลัมน์ชนิดเจล (Gel permeation chromatography, GPC) เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์โดยอาศัยหลักการพื้นฐานที่ว่า พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกันเมื่ออยู่ในสารละลายจะเกิดการพองตัวของ random coil ที่ให้ขนาดต่างกัน โดยมีสมมติฐานว่า hydrodynamic volume ที่เกิดจากการพองตัวของพอลิเมอร์จะแปรผันตามกับน้ำหนักโมเลกุล และเมื่อทำการฉีดสารละลายพอลิเมอร์ผ่านคอลัมน์ที่ภายในบรรจุสารที่มีลักษณะเป็นรูพรุน เช่น เม็ดอนุภาคโครอสลิงค์พอลิสไตรีนที่มีรูพรุน จะพบว่าพอลิเมอร์ที่มีขนาดของ random coil หรือ hydrodynamic volume ต่างกันก็จะใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์และไหลออกจากคอลัมน์ในเวลาที่ไม่เท่ากัน โดยพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่จะออกมาได้เร็วกว่า เนื่องจากไม่สามารถแทรกเข้าไปตามรูพรุนของสารที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ได้ ในขณะที่พอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กกว่าจะไหลผ่านออกจากคอลัมน์ได้ช้ากว่า เนื่องจากโมเลกุลมีขนาดเล็กพอที่จะแทรกเข้าไปในรูพรุนของสารที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ได้ จึงเสียเวลาในการเดินทางนานขึ้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่า GPC เป็นเทคนิคที่แยกพอลิเมอร์ตามขนาด ดังนั้นบางครั้งจึงอาจเรียกชื่อเทคนิคนี้ว่า Size Exclusion Chromatography (SEC) ก็ได้ [38]



รูปที่ 2.18 การเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ที่มีรูพรุนของโมเลกุลพอลิเมอร์ที่มีขนาดต่างๆ [38]

สารละลายพอลิเมอร์ที่ไหลออกจากคอลัมน์ในช่วงเวลาต่างๆ กัน จึงมีน้ำหนักโมเลกุลไม่เท่ากัน ซึ่งเมื่อทำการวัดปริมาณของสารละลายพอลิเมอร์ที่ไหลออกในช่วงเวลาต่างๆ กัน โดยใช้ detector ชนิดต่างๆ เช่น UV detector หรือ Reflective Index detector (RI) ก็จะสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารกับเวลาที่ไหลออกจากคอลัมน์หรือที่เรียกว่า retention time ได้ ซึ่งกราฟดังกล่าวจะเรียกว่า GPC chromatogram และมีลักษณะดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างของ GPC โครมาโทแกรมที่เกิดจากการไหลผ่านคอลัมน์ของพอลิเมอร์ที่มีขนาดต่างๆ ภายใต้อัตราการไหล (F) โดยมีแกนนอนเป็น retention time [38]

นอกจากนั้นในบางครั้ง ค่า retention time ใน GPC chromatogram อาจถูกนำเสนอแทนที่ด้วยค่า retention volume ก็ได้ ซึ่งค่าทั้งสองสามารถเทียบกลับไปมาได้ โดยอาศัยสมการ

$$T_{Rt} = \frac{V_{Rt}}{F}$$

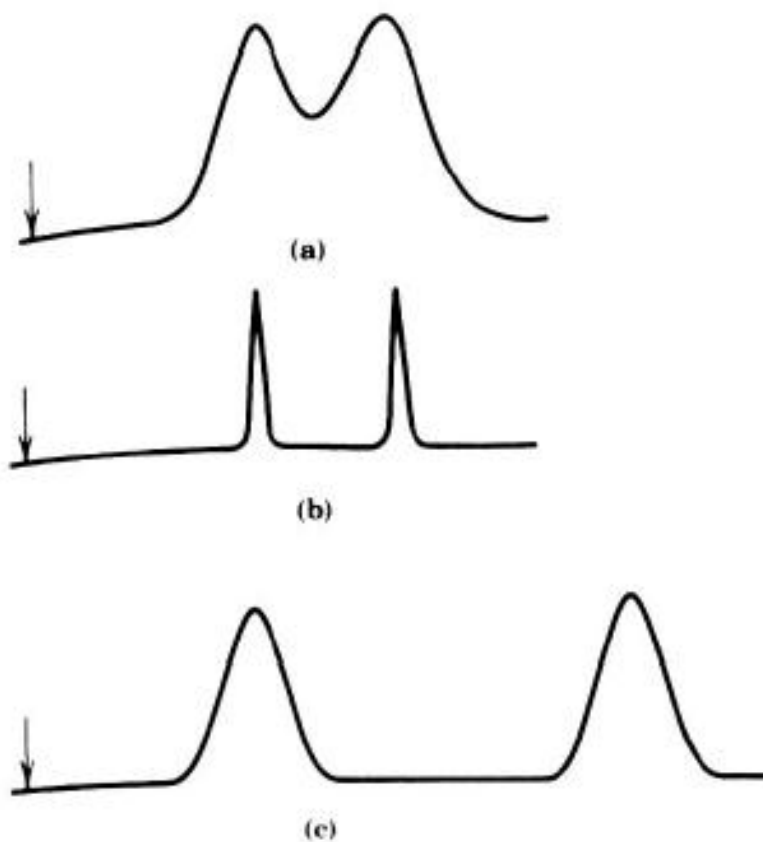
โดยที่ T_{Rt} = Retention Time

V_{Rt} = Retention Volume

F = Flow rate ของสารละลายที่ไหลผ่านคอลัมน์ (ml/min)

โดยทั่วไปแล้วอัตราการไหลที่ใช้จะอยู่ที่ประมาณ 1 ml/min นอกจากนั้นจะสังเกตเห็นได้ว่า GPC chromatogram ที่ได้อาจจะไม่ได้มีลักษณะเป็นพีคเดี่ยวๆ ก็ได้ ขึ้นอยู่กับว่าสารตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ทำการวิเคราะห์นั้นมีความกว้างของการกระจายตัวน้ำหนักโมเลกุลหรือมีค่า polydispersity Index มากแค่ไหน

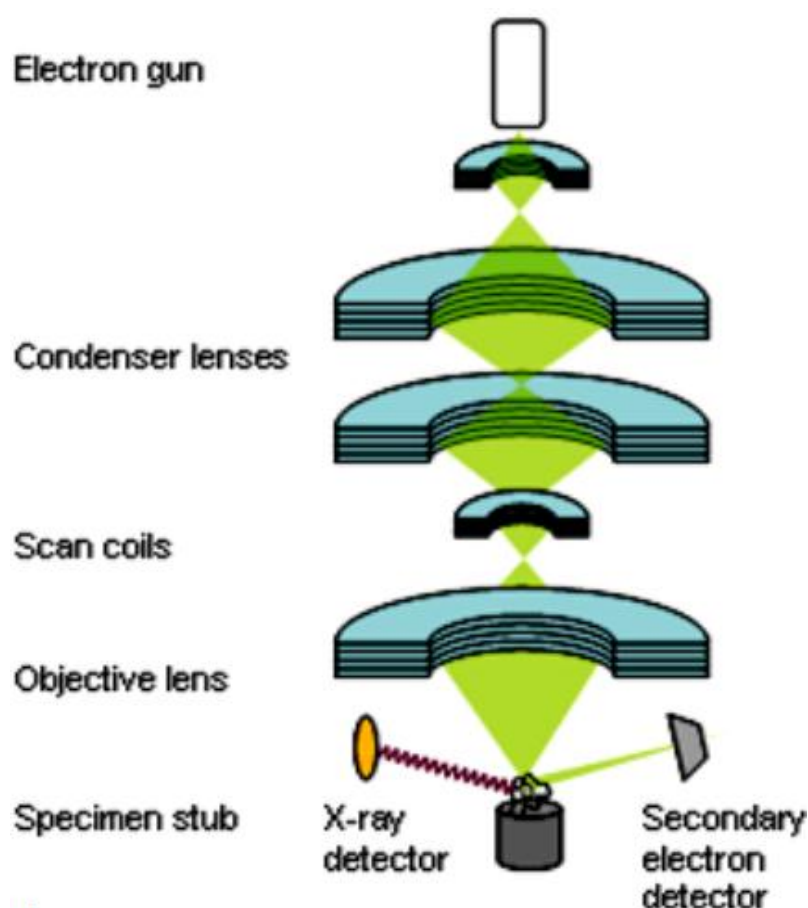
นอกจากนั้นลักษณะของโครมาโทแกรมที่ได้ยังขึ้นอยู่กับสมบัติของคอลัมน์ด้วยว่ามีความสามารถในการแยก (resolution) สารละลายพอลิเมอร์ได้ดีแค่ไหน โดยถ้าคอลัมน์มีระยะทางยาวมากขึ้นและรูพรุนในคอลัมน์มีขนาดที่หลากหลายแตกต่างกันมากขึ้น resolution ก็จะได้ดีขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้าคอลัมน์มี resolution ไม่ดี อาจเห็นพีค 2 พีคผสมเข้าหากันกลายเป็นพีคกว้าง 1 พีคได้ ดังรูปที่ 2.20 นอกจากนั้นวัสดุที่บรรจุในคอลัมน์ก็มีขนาดหลากหลาย ซึ่งหากใช้ porous bead ที่มีขนาดเล็กก็จะบรรจุอนุภาคของสารดังกล่าวได้เยอะ (high packing density) และทำให้ separation efficiency สูง แต่ในขณะเดียวกันถ้าใช้ bead ที่มีขนาดอนุภาคเล็กก็จะทำให้เกิด back pressure ในคอลัมน์สูงขึ้นด้วย [38]



รูปที่ 2.20 ลักษณะ GPC โครมาโทแกรมในแบบต่างๆ (a) resolution ต่ำ (b) resolution ในแง่ของ separation efficiency สูง (c) resolution ในแง่ของ selectivity สูง [38]

2.11.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม โดยมีหลักการคือ กลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกผลิตขึ้นจากปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) แล้วลำเลียงผ่านเลนส์รวมแสง (condenser lens) และกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ลำอิเล็กตรอนจะวิ่งมาผ่านเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) และถูกกราดลงบนพื้นผิวของชิ้นงาน ซึ่งทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) อิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกตรวจวัด และสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิก็จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณที่ปรากฏเป็นภาพบนจอรับภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [39]

ซึ่งภาพที่ได้จะมีลักษณะเป็น 3 มิติ สามารถปรับให้มีกำลังขยายได้สูงถึง 200,000 เท่า ใช้สำหรับศึกษาโครงสร้างบริเวณชั้นผิวของตัวอย่าง สภาพพื้นผิวของตัวอย่างทั้งทางชีวภาพและทางกายภาพ และสามารถใช้ในการคำนวณหาธาตุในเชิงปริมาณได้ [39]

2.12 สมบัติเชิงกล

2.12.1 ความต้านแรงดึง

การทดสอบความต้านแรงดึงมีมาตรฐานการทดสอบตาม ASTM คือ D412 สำหรับวัสดุยาง, D638 สำหรับพลาสติก, D897 สำหรับวัสดุแก้ว, D987 สำหรับวัสดุกระดาษ, D2343 สำหรับเส้นใย และ E8 สำหรับโลหะ ซึ่งสมบัติการต้านแรงดึงเป็นสมบัติเชิงกลที่สำคัญของพลาสติกและวัสดุอื่นๆ ซึ่งสามารถบอกถึงความแข็งแรง สภาพยืดหยุ่น ความแข็ง ความเหนียว และความแข็งดึงได้ เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นทดสอบเทียบกับขนาดของชิ้นทดสอบเริ่มต้น ซึ่งเมื่อมีแรงมากกระทำกับวัสดุไม่ว่าจะอยู่ในลักษณะใดก็ตาม ย่อมทำให้เกิดความเค้น (stress) และ/หรือความเครียด (strain) แก่วัสดุ ซึ่งเป็นการตอบสนองต่อแรงที่มากระทำต่อ

ความเค้น (stress, σ) คือแรงต้านทานภายในของวัสดุที่พยายามต้านทานแรงกระทำที่มาจากภายนอกเพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและรูปร่างต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุที่ได้รับแรงดึง ซึ่งหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

โดยที่ σ = ความเค้น
 F = แรงที่มากระทำ
 A = พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ

ความเครียด (strain, ϵ) เกิดขึ้นเมื่อวัสดุถูกแรงจากภายนอกมากกระทำ แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างตามทิศทางของแนวแรง ซึ่งอาจจะยืดออก (elongate) หรือหดเข้า ดังนั้น ความเครียดจึงหาได้จากอัตราส่วนระหว่างการยืดหรือหดของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความยาวเดิมของวัสดุ ซึ่งหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$\text{หรือ } \% \text{ elongation} = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100$$

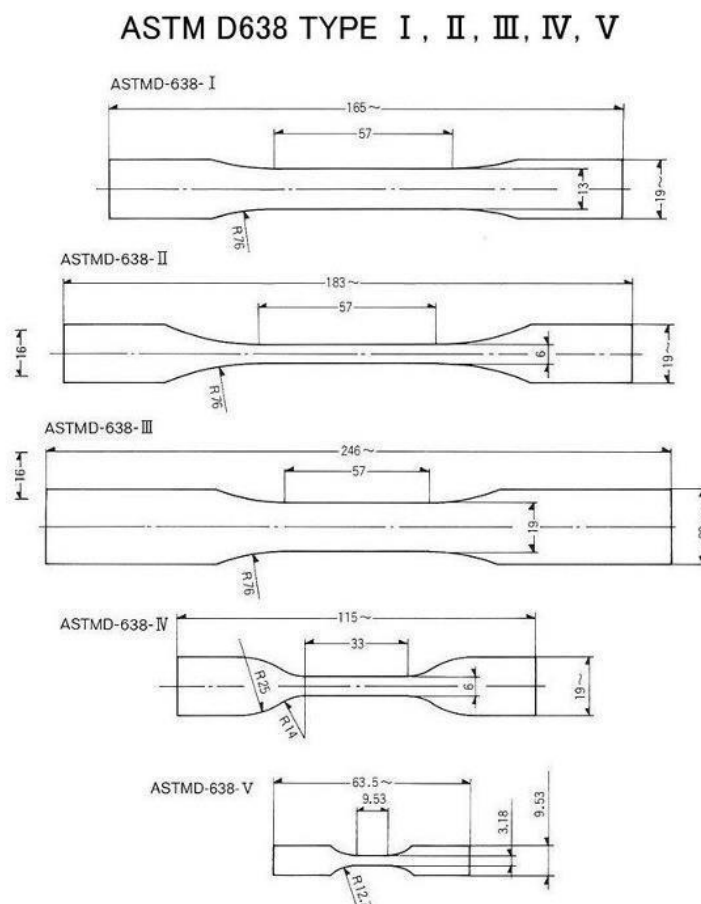
โดยที่ ϵ = ความเครียด
 L_0 = ความยาวเดิม
 L = ความยาวหลังการเปลี่ยนแปลง

มอดูลัสของยัง (Young's modulus, E) หรือมอดูลัสยืดหยุ่น เป็นค่าความแข็งแกร่ง (Stiffness) ของวัสดุที่ต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียด ดังสมการต่อไปนี้

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

โดยที่ E = มอดูลัสของยัง
 σ = ความเค้น
 ε = ความเครียด

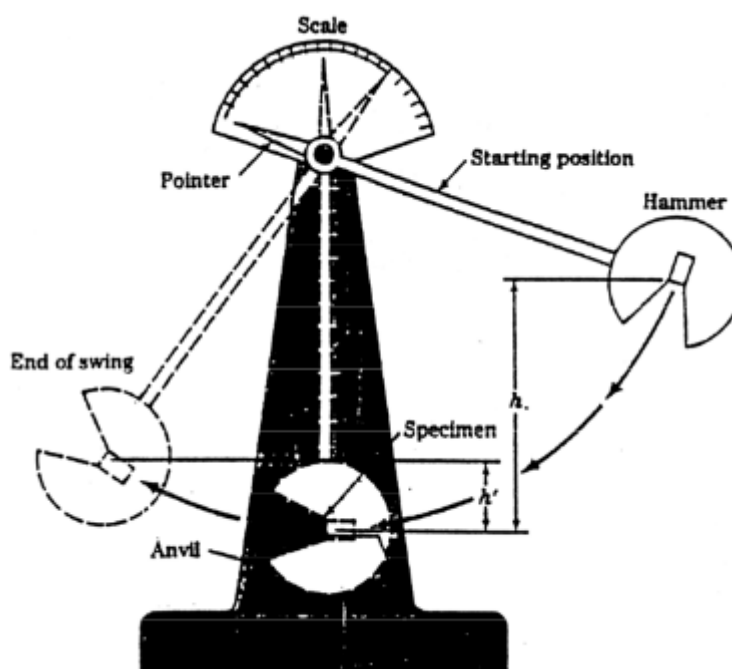
ชิ้นงานทดสอบมีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับมาตรฐานของการทดสอบและประเภทชิ้นงานที่นำมาทดสอบ เช่น ชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.22 [40-42]



รูปที่ 2.22 รูปแบบชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 [43]

2.12.2 ความทนแรงกระแทก

ความทนแรงกระแทก (Impact strength) เป็นความสามารถในการรับแรงกระแทกแบบฉับพลัน โดยพลังงานที่ใช้ทดสอบจะสูญเสียไปจากการกระแทกขึ้นทดสอบ ซึ่งพลังงานที่สูญเสียไปคือค่าพลังงานที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหักหรือค่าความทนแรงกระแทกของวัสดุ ซึ่งวิธีการทดสอบความทนแรงกระแทกมีอยู่สองแบบคือ การทดสอบแบบชาร์ปี และการทดสอบแบบไอซอด



รูปที่ 2.23 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก [44]

2.12.2.1 ความทนแรงกระแทกแบบชาร์ปี

ขึ้นทดสอบจะต้องทำการบากตรงกลางของขึ้นทดสอบไว้ด้านหนึ่ง ซึ่งอาจจะบากเป็นแบบรูกุญแจ (Keyhole notch) เป็นแบบรูปตัวยู (U-shaped notch) หรือเป็นแบบรูปตัววี (V-shape notch) ก็ได้ โดยจะวางขึ้นทดสอบไว้ระหว่างแท่นรองรับชิ้นงาน ซึ่งจะวางให้รอยบากหันไปทางตรงกันข้ามกับการกระแทก ฉะนั้นใบมีดที่ติดอยู่กับลูกตุ้มจะทำการกระแทกเข้าทางด้านหลังของรอยบากของขึ้นทดสอบบริเวณกึ่งกลาง และลูกตุ้มจะต้องเหวี่ยงขึ้นไปแล้วค่อยเหวี่ยงกลับลงมา

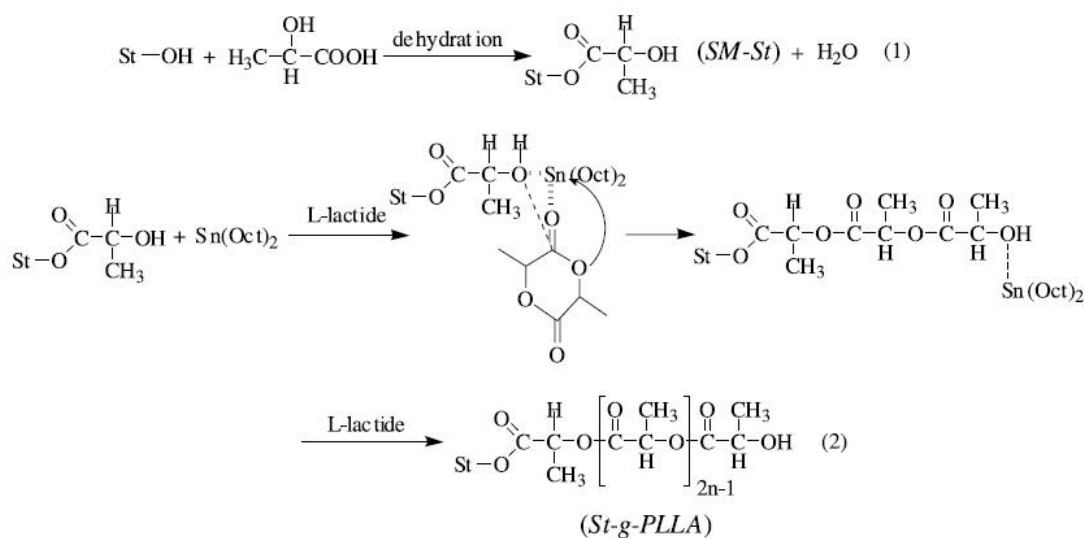
2.12.2.2 ความทนแรงกระแทกแบบไอซอด

สำหรับพอลิเมออร์จะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยการทดสอบจะคล้ายกับแบบชาร์ปี แต่ต่างกันตรงที่การวางชิ้นทดสอบ ซึ่งแบบไอซอดจะหันรอยบากเข้าหาด้านที่จะถูกกระแทก [44-45]

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Li และคณะ [46] ได้ทำการศึกษากลไกของสารก่อผลึกและพลาสติกไซเซออร์ที่มีต่อการเกิดผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดในภาวะอุณหภูมิคงที่และไม่คงที่ โดยใช้ ทัลก์ ไซเดียมสเตียเรต แคลเซียมแล็กเตต เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึก และใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) และอะซีติลไตรเอทิลซิเตรต (ATC) เป็นพลาสติกไซเซออร์ โดยทำการผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับสารก่อนิวเคลียสผลึกและพลาสติกไซเซออร์ในส่วนต่างๆ ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ แล้วตัดให้เป็นเม็ดเพื่อเตรียมขึ้นรูปโดยการฉีดและทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC และ DMTA ทดสอบหาค่าความต้านแรงดึงพบว่า ทัลก์เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกที่มีประสิทธิภาพที่สุด ส่วนแคลเซียมแล็กเตตและไซเดียมสเตียเรตมีผลเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย และเมื่อมีการใช้พลาสติกไซเซออร์ร่วมกับทัลก์ พบว่าทำให้เกิดผลึกได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากพลาสติกไซเซออร์ช่วยให้สายโซ่เคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น จึงสามารถจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ดีขึ้น การใช้พลาสติกไซเซออร์ร่วมกับทัลก์ทำให้มีค่าความต้านทานทางความร้อนสูงขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามพบว่ามีค่าความต้านแรงดึงลดลง และมีค่าการยืดตัวสูงขึ้นเมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ในปริมาณมากขึ้น

Chen และคณะ [47] ได้ทำการศึกษากลไกของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของพอลิเมออร์คอมพอสิตระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับแป้ง โดยทำการสังเคราะห์สารช่วยผสมแป้งกราฟต์พอลิแอลแล็กติกแอซิด (St-g-PLLA) จากปฏิกิริยาการเปิดวงของแอลแล็กไทด์กับแป้งดัดแปรดังรูปที่ 2.22 แล้วทำการผสมพอลิแล็กติกแอซิด แป้ง และสารช่วยผสมโดยใช้เครื่องผสมระบบปิด (internal mixer) ในสัดส่วนต่างๆ ทำการเปรียบเทียบสมบัติความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและแป้งที่มีสารช่วยผสมและที่ไม่มีสารช่วยผสมด้วยเทคนิค SEM พบว่าพอลิเมออร์ผสมที่มีสารช่วยผสมจะมีพื้นผิวที่มีขอบและช่องว่างระหว่างเฟสของพอลิแล็กติกแอซิดกับแป้งที่มีความพร่ามัวขึ้นกว่าพอลิเมออร์ผสมที่ไม่มีสารช่วยผสม และจากการทดสอบการวัดค่าความทนแรงดึงพบว่าสูตรที่มีสารช่วยผสมจะมีค่าความทนแรงดึงสูงกว่า สามารถสรุปได้ว่าการเติมสารช่วยผสมในพอลิเมออร์คอมพอสิตสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลและความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับแป้งได้



รูปที่ 2.24 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์สารช่วยผสมแป้งกราฟต์พอลิแลคติกแอซิด
จากการเปิดวงของแลคติกไทด์กับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้ง [47]

Huneault และคณะ [48] ได้ทำการศึกษาผลของสารช่วยผสมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและความสามารถในการดัดยัดของพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับแป้ง โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ โดยมี 2 ขั้นตอน คือ 1. ทำการผสมพอลิแล็กติกแอซิด แป้ง และกลีเซอรอลในสัดส่วนต่างๆ ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ 2. ทำการผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ด้วยกระบวนการอัดรีด โดยใช้ 2,5-ไดเมทิล-2,5-ได-(เทอเทียรีบิวทิลเปอร์ออกไซด์)-เฮกเซน (L101) เป็นตัวริเริ่มในการเกิดปฏิกิริยา หลังจากนั้นทำการผสม 1 กับ 2 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว แล้วทำการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและความสามารถในการดัดยัดของพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยการทดสอบวัดค่าความต้านแรงดึง และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM พบว่าการเติมสารช่วยผสมมาเลอิกแอนไฮไดรด์และกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ โดยใช้ L101 เป็นตัวริเริ่มในการเกิดปฏิกิริยาในพอลิเมอร์คอมพอสิตไม่ช่วยปรับปรุงความสามารถในการยึดตัวของพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับแป้งแสดงว่าการใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ร่วมกับกลีเซอรอลโดยใช้ L101 เป็นตัวริเริ่มในการเกิดปฏิกิริยาอย่างไม่สามารถทำให้กลีเซอรอลแสดงสมบัติความเป็นพลาสติกไซเซอร์ได้ดีนัก แต่ช่วยให้แป้งมีการกระจายตัวในพอลิเมอร์คอมพอสิตได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ร่วมกับกลีเซอรอลและมี L101 เป็นตัวริเริ่มในการเกิดปฏิกิริยา

Wang และคณะ [49] ได้ทำการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิดกับแป้งด้วยกระบวนการอัดรีดแบบรีแอกทีฟ กล่าวคือ การผสมพอลิแล็กติกแอซิด แป้ง

มาเลอิกแอนไฮโดรด์ ไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) และกลีเซอรอล ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ซึ่ง ไดควิมิลเปอร์ออกไซด์จะทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มในการเกิดปฏิกิริยา โดยทำการเปรียบเทียบระหว่าง พอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีการใช้มาเลอิกแอนไฮโดรด์ร่วมกับไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ กับพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ไม่มีการใช้มาเลอิกแอนไฮโดรด์ร่วมกับไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ พบว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีการใช้มาเลอิกแอนไฮโดรด์ร่วมกับไดควิมิลเปอร์ออกไซด์จะมีค่าความต้านแรงดึง และค่าการยืดตัวที่สูงขึ้นกว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ไม่มีการใช้มาเลอิกแอนไฮโดรด์ร่วมกับไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากการใช้มาเลอิกแอนไฮโดรด์ร่วมกับไดควิมิลเปอร์ออกไซด์จะช่วยทำให้ แป้งมีการยึดติดกับพอลิแล็กติกแอซิดได้ดีกว่าที่ไม่ได้ใช้ และการใช้กลีเซอรอลร่วมด้วยจะช่วยทำให้ แป้งมีการกระจายตัวในพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ยิ่งขึ้น ดังจะเห็นได้จากผลของ SEM ที่พบว่าพื้นผิวของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีการใช้มาเลอิกแอนไฮโดรด์ร่วมกับไดควิมิลเปอร์ออกไซด์และกลีเซอรอลจะมีรอยแตกแยกระหว่างเฟสของพอลิแล็กติกแอซิดกับแป้งน้อยลง จึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้มาเลอิกแอนไฮโดรด์ร่วมกับไดควิมิลเปอร์ออกไซด์และกลีเซอรอลในพอลิเมอร์คอมพอสิตสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลและความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับแป้งได้

Tran และคณะ [50] ได้ทำการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยามาลีเอชันของน้ำมันถั่วเหลืองแบบฟรีแรดิคัลในระบบปิดที่อุณหภูมิและความดัน เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ เนื่องจากการระเหยของมาเลอิกแอนไฮโดรด์ โดยทำการผสมน้ำมันถั่วเหลืองกับมาเลอิกแอนไฮโดรด์ด้วยการให้ความร้อนและกวนตลอดเวลา และใช้ตัวริเริ่มในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชนิด เพื่อเป็นการเปรียบเทียบกันคือ 2,5-บิส(เทอเทียรีบิวทิลเปอร์ออกไซด์)-2,5-ไดเมทิลเฮกเซนเปอร์ออกไซด์ (L101) กับ ได-เทอเทียรี-บิวทิลเปอร์ออกไซด์ แล้วทำการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นของตัวริเริ่มในการเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกัน อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา และพิสจันเอกลักษณะของน้ำมันถั่วเหลืองมาลีเอตที่ได้ด้วยเทคนิค FTIR พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปชนิดและความเข้มข้นของตัวริเริ่มในการเกิดปฏิกิริยาจะไม่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยามาลีเอชันของน้ำมันถั่วเหลือง นอกจากนี้อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาทั้งที่ชนิดและความเข้มข้นของตัวริเริ่มในการเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกันจะไม่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยามาลีเอชันของน้ำมันถั่วเหลืองเช่นกัน และจากการพิสจันเอกลักษณะด้วยเทคนิค FTIR พบว่ามีพีคเอกลักษณะของมาเลอิกแอนไฮโดรด์ปรากฏอยู่บนเส้นกราฟของน้ำมันถั่วเหลืองมาลีเอต นั้นแสดงให้เห็นว่ามีการกราฟต์ของมาเลอิกแอนไฮโดรด์บนน้ำมันถั่วเหลืองจริง

บทที่ 3 วิธีการทดลอง

3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยได้กำหนดไว้ 5 ขั้นตอนหลัก และแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1.1. ค้นคว้าเอกสารและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

3.1.1.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี และสืบค้นรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1.1.2 วางแผนงานของการวิจัย กำหนดขั้นตอน และวิธีการทดลอง

3.1.1.3 จัดหาวัสดุอุปกรณ์และอุปกรณ์การทดลอง

3.1.2 เตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตและชิ้นงานทดสอบ

3.1.2.1 เตรียมน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอต

3.1.2.2 เตรียมน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลัง

3.1.2.3 ผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลัง

ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

3.1.2.4 ขึ้นรูปชิ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดแบบ

3.1.3 วิเคราะห์และทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิต

3.1.3.1 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy)

3.1.3.2 วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Proton nuclear magnetic resonance spectroscopy)

3.1.3.3 วิเคราะห์ค่ากรดด้วยเทคนิคไตเตรชัน

3.1.3.4 ทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมพอสิต

3.1.3.5 ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติมในพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยการย้อมติดสีดีสเพิร์ส

3.1.3.6 ศึกษาสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์คอมพอสิตโดยการสังเกตพื้นผิวบริเวณที่แตกหัก

3.1.3.7 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์คอมพอสิต

3.1.3.8 วิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์คอมพอสิต

3.1.3.9 ทดสอบสมบัติด้านแรงดึง (Tensile properties)

3.1.3.10 ทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact strength)

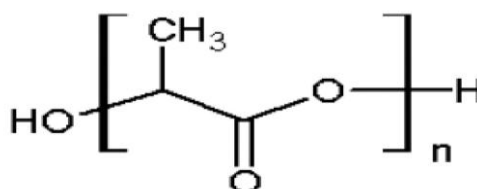
3.1.4 วิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลงานวิจัย

3.1.5 เสนอผลงานวิทยานิพนธ์

3.2 วัตถุประสงค์และสารเคมี

วัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย

3.2.1 พอลิแล็กติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA) ของ NatureWorks ชื่อทางการค้า Ingeo™ เกรด 2003D ชื่อจาก บริษัท พีซี โพลีเมอร์ส มาร์เก็ตติ้ง จำกัด (ประเทศไทย) โดยมีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 3.1 และมีสมบัติดังตารางที่ 3.1 [51]



รูปที่ 3.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิแล็กติกแอซิด [51]

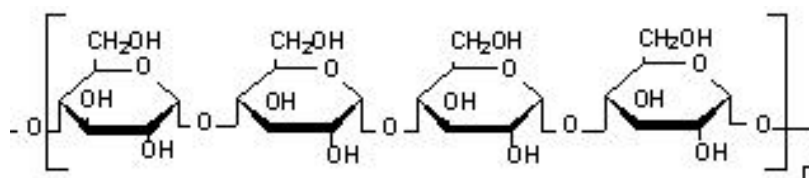
ตารางที่ 3.1 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดเกรด 2003D [51]

สมบัติ	หน่วย	มาตรฐานการทดสอบ	2003D
ความถ่วงจำเพาะ	g/cm ³	ASTM D792	1.24
อัตราการไหลของมวลขณะหลอมเหลว	g/10min	ASTM D1238	6
ความต้านแรงดึง	MPa	ASTM D882	60
ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด	%	ASTM D882	6.0
ความทนแรงกระแทกแบบไอซอด	J/m	ASTM D256	16
อุณหภูมิการคงรูปทางความร้อน	°C	ASTM E2092	55

3.2.2 แป้งมันสำปะหลัง ยี่ห้อ NEW GRADE จัดทำโดย ไทยวาฟูดโปรดักส์ จำกัด (มหาชน) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยมีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 3.3 [52]



รูปที่ 3.2 แป้งมันสำปะหลัง

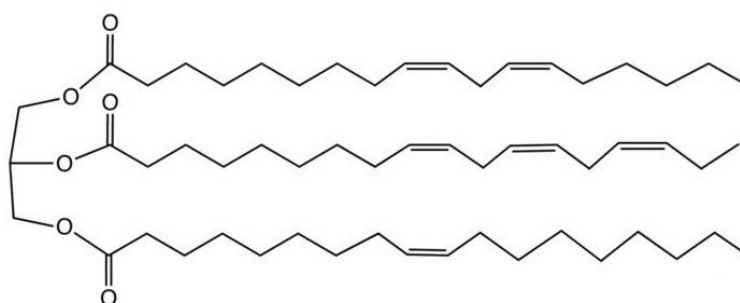


รูปที่ 3.3 สูตรโครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง [52]

3.2.3 น้ำมันถั่วเหลือง ยี่ห้อ กูก จัดทำโดย บริษัท ล็อกซเลย์ เทรดดิง จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยมีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 3.5

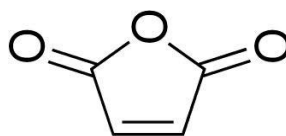


รูปที่ 3.4 น้ำมันถั่วเหลือง



รูปที่ 3.5 สูตรโครงสร้างทางเคมีของน้ำมันถั่วเหลือง [14]

3.2.4 มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, MA) เกรต $\geq 98.0\%$ ซื้จาก บริษัท ฟาโคบิส จำกัด ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 3.6 และมีสมบัติดังตารางที่ 3.2 [53]

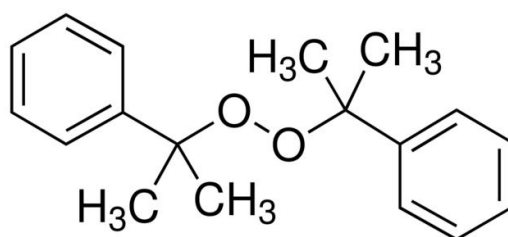


รูปที่ 3.6 สูตรโครงสร้างทางเคมีของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ [53]

ตารางที่ 3.2 สมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ [53]

สมบัติ	หน่วย	MA
น้ำหนักโมเลกุล	AMU	98.06
จุดเดือด	$^{\circ}\text{C}$	202
จุดหลอมเหลว	$^{\circ}\text{C}$	53
ความหนาแน่น	g/ml	1.48
ความบริสุทธิ์	%	≥ 98.0

3.2.5 ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) เกรต 98% ซื้จาก บริษัท ฟาโคบิส จำกัด ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 3.7 และมีสมบัติดังตารางที่ 3.3 [54]



รูปที่ 3.7 สูตรโครงสร้างทางเคมีของไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ [54]

ตารางที่ 3.3 สมบัติของไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ [54]

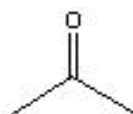
สมบัติ	หน่วย	DCP
น้ำหนักโมเลกุล	g/mol	270.37
จุดวาบไฟ (closed cup)	°C	110
ความดันไอ (38°C)	mmHg	15.4
ลักษณะ	-	flakes
ปริมาณ active oxygen	%wt	~6
ความหนาแน่น (25 °C)	g/ml	1.56
จุดหลอมเหลว	°C	39-41
ความบริสุทธิ์	%	98

3.2.6 โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือชื่อทางการค้า โซดาไฟ คอสติกโซดา (Caustic soda) เกรด AR ซื้อมาจากบริษัท ฟาโคบิส จำกัด โดยมีสมบัติดังตารางที่ 3.4 [55]

ตารางที่ 3.4 สมบัติของโซเดียมไฮดรอกไซด์ [55]

สมบัติ	หน่วย	โซเดียมไฮดรอกไซด์
จุดเดือด	°C	1390
จุดหลอมเหลว	°C	318
ความหนาแน่น	g/ml	2.1
น้ำหนักโมเลกุล	g/mol	39.997
ลักษณะ	-	white solid
ความสามารถในการละลายน้ำ (20°C)	g/100ml	111

3.2.7 อะซิโตน หรือชื่อการค้า Dimethyl Ketone เกรด AR ซื้อมาจากบริษัท ฟาโคบิส จำกัด โดยมีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 3.8 และมีสมบัติดังตารางที่ 3.5 [56]



รูปที่ 3.8 สูตรโครงสร้างทางเคมีของอะซิโตน [56]

ตารางที่ 3.5 สมบัติของอะซีโตน [56]

สมบัติ	หน่วย	อะซีโตน
จุดเดือด	°C	56.5
จุดหลอมเหลว	°C	-95
ความหนาแน่น	g/ml	0.79
น้ำหนักโมเลกุล	g/mol	58.08
จุดวาบไฟ (Closed cup)	°C	-20

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.1 การเตรียมน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตและน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลัง

3.3.1.1 ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 500 มิลลิลิตร พร้อมจุกยาง

3.3.1.2 แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar) ขนาด 50x8 มิลลิเมตร

3.3.1.3 กระจกตวงสาร ขนาด 500 มิลลิลิตร

3.3.1.4 เครื่องชั่งตวงน้ำหนักยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น AB204-S/FACT

(Greifensee, Switzerland)

3.3.1.5 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG HS7

3.3.1.6 ตู้ดูดควัน

3.3.1.7 ปีกเกอร์ขนาด 50, 100, 500 และ 1000 มิลลิลิตร

3.3.1.8 ซ้อนตักสารสแตนเลส เบอร์ 0 ขนาด 30x2 เซนติเมตร

3.3.1.9 ขวดลดความดัน (Suction flask) ขนาด 1000 มิลลิลิตร

3.3.1.10 กระจกกรอง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร

3.3.1.11 ป้อนสุญญากาศ ยี่ห้อ GAST รุ่น DOA-P504-BN ของบริษัท IDEX

Corporation (MICH, U.S.A.)

3.3.1.12 กรวยกระเบื้อง (Buchner funnel) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร

3.3.1.13 จานเพาะเชื้อ (Petri dish) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15x100 มิลลิเมตร

3.3.1.14 ตู้อบสารเคมี ยี่ห้อ Memert รุ่น D-91107 ของบริษัท Memert GmbH + Co. KG (Schwabach, German)

3.3.1.15 โถดูดความชื้น (Dessicator) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 250 มิลลิเมตร

3.3.2 การเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอต กราฟต์แป้งมันสำปะหลัง

3.3.2.1 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-screw extruder) ของบริษัท Thermo PRISM รุ่น TSE-16-TC (New Hampshire, Newington)

3.3.2.2 เครื่องอัดแบบ (Compression molding machine) ของบริษัท Labtech Engineering รุ่น V508-18-CX (Samutprakarn, Thailand)

3.3.3 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิต

3.3.3.1 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) ของบริษัท Thermo Scientific รุ่น Nicolet 6700 (Madison, Wisconsin)

3.3.3.2 เครื่องโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Proton nuclear magnetic resonance spectroscopy, $^1\text{H-NMR}$) ของบริษัท Varian รุ่น ^{UNITY} INOVA 500 (Vernon Hills, Illinois)

3.3.3.3 เครื่องแก้วสำหรับวิเคราะห์ค่าการดูดด้วยเทคนิคไตเตรชัน

3.3.3.4 เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ของบริษัท Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851° (Columbus, Ohio)

3.3.3.5 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) ของบริษัท Netzsch รุ่น 204 F1 Phoenix (Burlington, USA)

3.3.3.6 เครื่องย้อมสีตัวอย่าง (Dyeing machine) ของบริษัท NEWAVE LAB EQUIPMENTS CO., LTD. รุ่น H-24 (Taiwan)

3.3.3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ของบริษัท Joel รุ่น JSM-6480LV (Tokyo, Japan)

3.3.3.8 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD) ของบริษัท Bruker รุ่น X8 APEX (Fremont, California)

3.3.3.9 เครื่องโครมาโทกราฟีคอลัมน์ชนิดเจล (Gel permeation chromatography, GPC) ของบริษัท Shimadzu รุ่น GPC-10A (Kyoto, Japan)

3.3.3.10 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) ของบริษัท Lloyd รุ่น LR 100K (West Sussex, UK)

3.3.3.11 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact tester) ของบริษัท GOTECH (Taichung City, Taiwan)

3.4 ขั้นตอนการวิจัย

3.4.1 การเตรียมน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอต

ทำการเตรียมน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตโดยการผสมน้ำมันถั่วเหลืองกับมาเลอิกแอนไฮไดรต์ในระบบปิด ที่สัดส่วนของมาเลอิกแอนไฮไดรต์ 10% และ 20% โดยน้ำหนักของน้ำมันถั่วเหลือง ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กวนตลอดเวลา และใช้ไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ 10% โดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรต์ เป็นตัวริเริ่มในการเกิดปฏิกิริยา

3.4.2 การเตรียมน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลัง

ทำการเตรียมน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังโดยการผสมน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตทั้งสองสัดส่วนกับแป้งมันสำปะหลังในสัดส่วนของน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอต 50 กรัม ต่อแป้งมันสำปะหลัง 50 กรัม ลงบนจานเพาะเชื้อโดยใช้อะซิโตนช่วยผสม ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 คืน เพื่อให้สารละลายระเหยหมด จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการกราฟต์ติดกันของน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกับแป้งมันสำปะหลัง ทำการล้างแป้งมันสำปะหลังตัดแปร (น้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลัง) ด้วยอะซิโตนเพื่อกำจัดน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตส่วนเกินออก โดยการแช่แป้งมันสำปะหลังตัดแปรในอะซิโตนที่มากเกินพอในระบบปิดเป็นเวลา 1 คืน กรองสารละลายอะซิโตนออก และอบแป้งมันสำปะหลังตัดแปรให้แห้งในตู้อบสารเคมีที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 1 คืน เก็บไว้ในโถดูดความชื้น

3.4.3 การเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลัง

ทำการผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับแป้งมันสำปะหลังตัดแปรในสัดส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 3.6 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ดังรูปที่ 3.9 โดยใช้อุณหภูมิในการผสมตามตารางที่ 3.7 แล้วทำการตัดเส้นพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ได้ด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติกดังรูปที่ 3.10 ด้วยความเร็วรอบสกรู 120 รอบต่อนาที

ตารางที่ 3.6 สูตรการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิต

สูตร	ร้อยละของ MA (เทียบกับน้ำหนักของ น้ำมันถั่วเหลือง)	แป้งมันสำปะหลังดัดแปร [แป้ง (g):Oil (g)]	พอลิเมอร์คอมพอสิต [PLA:แป้งมัน สำปะหลังดัดแปร]
Oil 1	10	50:50	90:10
			80:20
			70:30
			60:40
			50:50
Oil 2	20	50:50	90:10
			80:20
			70:30
			60:40
			50:50
Blank	-	-	PLA90:Starch10
			PLA80: Starch20
			PLA70: Starch30
			PLA60: Starch40
			PLA50: Starch50
PLA 100%	-	-	-

ตารางที่ 3.7 อุณหภูมิที่ใช้ในการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

ภาวะในการอัดรีด	อุณหภูมิในการอัดรีด (°C)
โซนที่ 1 (ติดกับ Hopper)	135
โซนที่ 2	160
โซนที่ 3	170
โซนที่ 4	180
โซนที่ 5	180



รูปที่ 3.9 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่



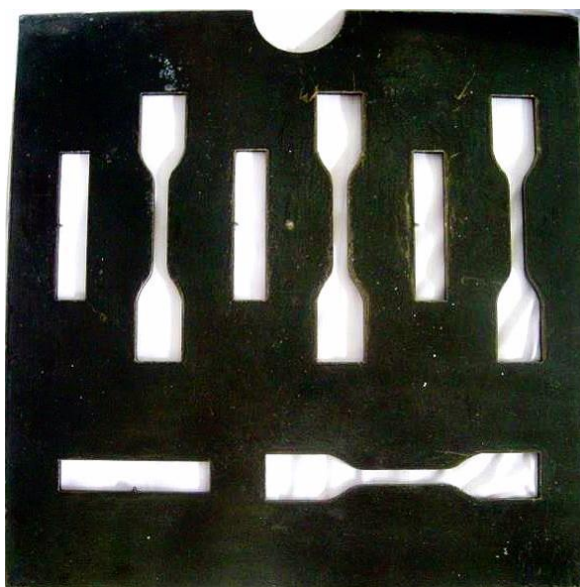
รูปที่ 3.10 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก

3.4.4 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

เม็ดพอลิเมอร์คอมพอสิตทุกสูตรที่เตรียมได้จะถูกนำไปขึ้นรูปเป็นขึ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดแบบดังรูปที่ 3.11 โดยใส่ลงในแม่พิมพ์ดังรูปที่ 3.12 และใช้อุณหภูมิ ความดัน และเวลาในการอัดแบบดังตารางที่ 3.8



รูปที่ 3.11 เครื่องอัดแบบ



รูปที่ 3.12 แม่พิมพ์สำหรับอัดแบบ

ตารางที่ 3.8 อุณหภูมิ ความดัน และเวลาที่ใช้ในการอัดแบบ

สูตร	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (bar)	เวลาที่ใช้ในการอัดแบบ (วินาที)			
			Pre-Heating	Pressing	Venting	Cooling
PLA90:SOMA10%-g- STARCH10	180	50	300	300	0	300
PLA80:SOMA10%-g- STARCH20	180	50	300	300	0	300
PLA70:SOMA10%-g- STARCH30	180	50	300	300	0	300
PLA60:SOMA10%-g- STARCH40	180	50	300	300	0	300
PLA50:SOMA10%-g- STARCH50	190	50	1000	300	0	200
PLA90:SOMA20%-g- STARCH10	180	50	300	200	0	300
PLA80:SOMA20%-g- STARCH20	180	50	300	200	0	300
PLA70:SOMA20%-g- STARCH30	180	50	300	200	0	300
PLA60:SOMA20%-g- STARCH40	180	50	300	200	0	300
PLA50:SOMA20%-g- STARCH50	180	50	300	200	0	300
PLA90: STARCH10	190	50	1000	300	0	200
PLA80: STARCH20	190	50	1000	300	0	200
PLA70: STARCH30	190	50	1000	300	0	200
PLA60: STARCH40	190	50	1000	300	0	200
PLA50: STARCH50	190	50	1000	300	0	200
PLA	180	50	300	200	0	300

3.4.5 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิต

3.4.5.1 วิเคราะห์หาหุ้ฟังก์ชันของน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตและน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier

transform infrared spectroscopy, FTIR) ของบริษัท Thermo Scientific รุ่น Nicolet 6700 (Madison, Wisconsin) ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

3.4.5.2 วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตเครื่องโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Proton nuclear magnetic resonance spectroscopy, $^1\text{H-NMR}$) ของบริษัท Varian รุ่น $^{\text{UNITY}}$ INOVA 500 (Vernon Hills, Illinois) ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เครื่องโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี

3.4.5.3 วิเคราะห์ค่ากรดของน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตด้วยเทคนิคไตเตรชัน โดยการต้มน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอต 1 กรัม ในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร ในระบบปิด ที่อุณหภูมิ 100°C กวนตลอดเวลา เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หยดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน 1 มิลลิลิตร เพื่อใช้เป็นอินดิเคเตอร์ แล้วทำการไตเตรตกับโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 N ตามมาตรฐาน ASTM D180 โดยมีสูตรการคำนวณค่ากรดดังนี้

$$\text{Acid value} = \frac{A \times N \times (\text{M.W. of NaOH})}{W}$$

โดยที่ A = ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้ (ml)

N = ความเข้มข้นของ NaOH (N)

W = น้ำหนักของสารตัวอย่าง (g)

3.4.5.4 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แป็งมันส์ล่าปะหลังเพื่อดูความเป็นไฮโดรโฟบิกที่เพิ่มขึ้นบนพื้นผิวของแป็งมันส์ล่าปะหลัง และวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แป็งมันส์ล่าปะหลังด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ของบริษัท Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851° (Columbus, Ohio) ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์

3.4.5.5 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลืองมาลิตเรกราฟต์แป้งมันสำปะหลัง โดยการวัดค่าอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันและอุณหภูมิการหลอมเหลวด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) ของบริษัท Netzsch รุ่น 204 F1 Phoenix (Burlington, USA) ดังรูปที่ 3.16 และใช้ภาวะการทดสอบดังตารางที่ 3.9



รูปที่ 3.16 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

ตารางที่ 3.9 ภาวะการทดสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

ภาวะการทดสอบ	ช่วงอุณหภูมิ (°C)	อัตราเร็ว (°C/min)
ให้ความร้อน	25 ถึง 250	10
ทำให้เย็นลง	250 ถึง 0	10
ให้ความร้อน	0 ถึง 250	10

3.4.5.6 ศึกษาการกระจายตัวของน้ำมันถั่วเหลืองมาลิตเรกราฟต์แป้งมันสำปะหลังในเนื้อของพอลิแล็กติกแอซิดโดยการย้อมติดสีด้วยสีย้อมดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ 1% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 30 นาที ด้วยเครื่องย้อมสีตัวอย่าง (Dyeing machine) ของบริษัท NEWAVE LAB EQUIPMENTS CO., LTD. รุ่น H-24 (Taiwan) ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 เครื่องย้อมสีตัวอย่าง

3.4.5.7 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและความสามารถในการกระจายตัวของน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังในเนื้อของพอลิแล็กติกแอซิดโดยการสังเกตพื้นผิวบริเวณที่แตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ของบริษัท Joel รุ่น JSM-6480LV (Tokyo, Japan) ดังรูปที่ 3.18 โดยใช้ขั้นตอนทดสอบที่ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทกแล้วมาส่องดูพื้นผิวที่เกิดการแตกหัก โดยจะทำการเคลือบพื้นผิวน้ำตาลบริเวณที่เกิดการแตกหักของชิ้นทดสอบด้วยทอง และทำการส่องดูที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 3.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.4.5.8 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลืองมาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทรมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD) ของบริษัท Bruker รุ่น X8 APEX (Fremont, California) ดังรูปที่ 3.19 โดยใช้ $2\theta = 5^{\circ}$ - 40°



รูปที่ 3.19 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทรมิเตอร์

3.4.5.9 วิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลืองมาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังด้วยเครื่องโครมาโทกราฟคอลลัมน์ชนิดเจล (Gel permeation chromatography, GPC) ของบริษัท Shimadzu รุ่น GPC-10A (Kyoto, Japan)



รูปที่ 3.20 เครื่องโครมาโทกราฟคอลลัมน์ชนิดเจล

3.4.5.10 ทดสอบความต้านแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal testing machine) ของบริษัท Lloyd รุ่น LR 100K (West Sussex, UK) ดังรูปที่ 3.21 เพื่อหาค่า Tensile strength และ Elongation at break โดยใช้ชิ้นทดสอบดังรูปที่ 3.22 และใช้ภาวะการทดสอบดังตารางที่ 3.10 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638



รูปที่ 3.21 เครื่องทดสอบเนกประสงค์

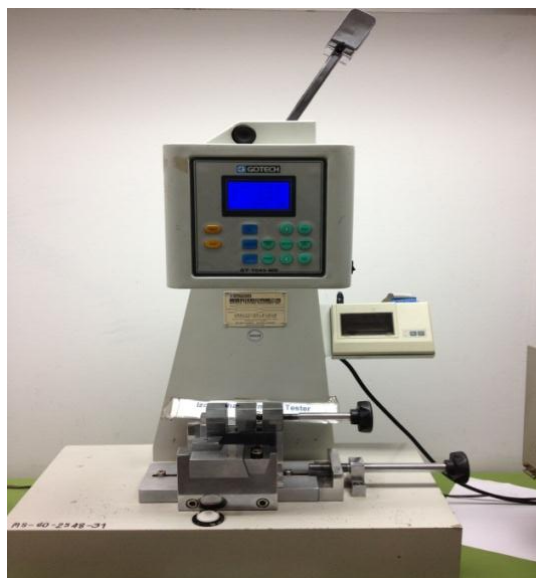


รูปที่ 3.22 ชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบความต้านแรงดึง

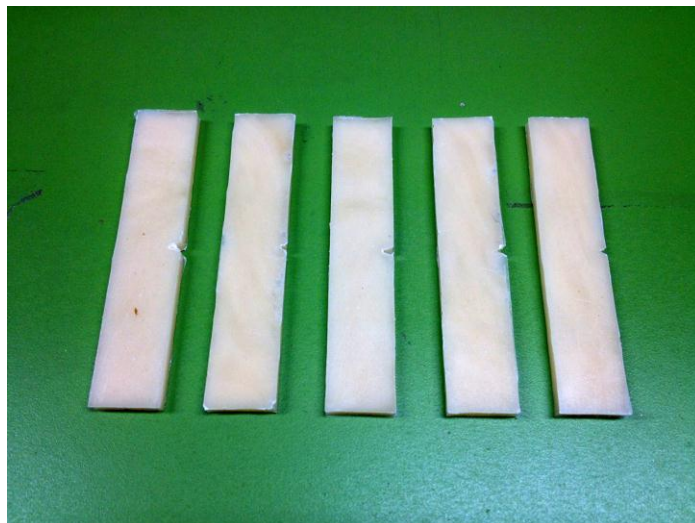
ตารางที่ 3.10 ภาวะการทดสอบความต้านแรงดึง

ภาวะการทดสอบ	แรง/ระยะ/ความเร็ว/เวลา
โหลดเซลล์ (load cell)	10KN
ระยะหัวจับชิ้นทดสอบ	115 mm
ความเร็วในการดึงชิ้นทดสอบ	50 mm/min

3.4.5.11 ทดสอบความทนแรงกระแทกด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact tester) ของบริษัท GOTECH (Taichung City, Taiwan) ดังรูปที่ 3.23 โดยชิ้นทดสอบที่ใช้ทดสอบความทนแรงกระแทกดังรูปที่ 3.24 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256



รูปที่ 3.23 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด



รูปที่ 3.24 ชิ้นทดสอบความทนแรงกระแทก

บทที่ 4

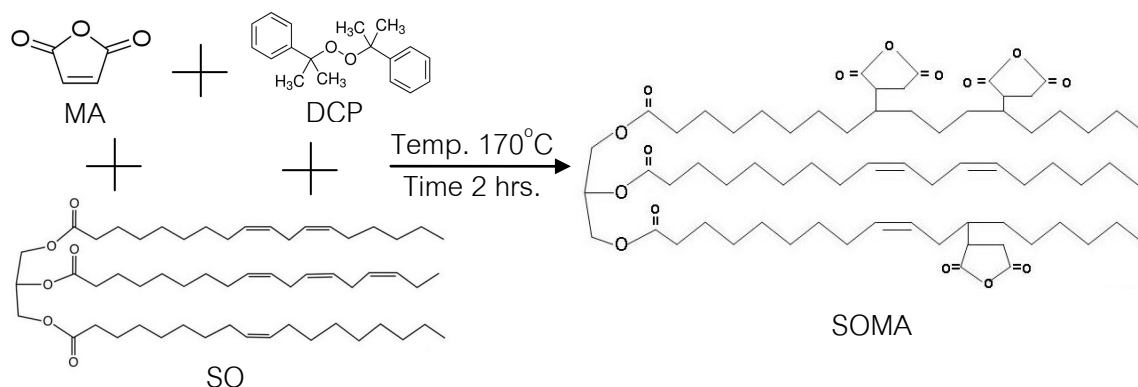
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิด โดยการผสมกับ น้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แบ็งมันสำปะหลัง เพื่อเพิ่มสภาพความเข้ากันได้ระหว่าง พอลิแล็กติกแอซิดกับแบ็งมันสำปะหลัง ซึ่งคาดว่าส่วนของน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตอาจแสดงสมบัติ ความเป็นพลาสติกไซเซอร์ในระดับหนึ่งและเป็นตัวช่วยให้แบ็งมันสำปะหลังเข้ากันได้กับ พอลิแล็กติกแอซิด โดยความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ของน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แบ็ง มันสำปะหลังจะมีสมบัติเข้ากันได้กับความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ของพอลิแล็กติกแอซิด ซึ่ง น้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตสังเคราะห์โดยการผสมน้ำมันถั่วเหลืองกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในระบบปิด ที่สัดส่วนของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10% และ 20% โดยน้ำหนักของน้ำมันถั่วเหลือง จากนั้นทำการ กราฟต์น้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกับแบ็งมันสำปะหลังโดยการผสมน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตทั้งสอง สัดส่วนกับแบ็งมันสำปะหลังในสัดส่วนของน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอต 50 กรัม ต่อแบ็งมันสำปะหลัง 50 กรัม ได้น้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แบ็งมันสำปะหลัง ซึ่งโครงสร้างของน้ำมันถั่วเหลือง มาลิเอต น้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แบ็งมันสำปะหลัง และสมบัติทางความร้อนจะได้รับการ ตรวจสอบ หลังจากนั้นนำน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แบ็งมันสำปะหลังมาผสมกับพอลิแล็กติก แอซิดในสัดส่วนต่างๆ แล้วทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ซึ่งอิทธิพลของปริมาณ แบ็งมันสำปะหลังและปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในแบ็งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีผลต่อพอลิเมอรั คอมพอสิตจะได้รับการตรวจสอบสมบัติทางความร้อน ลักษณะสัญญาณวิทยาและสมบัติเชิงกล ดังแสดงในบทนี้

4.1 วิเคราะห์น้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอต

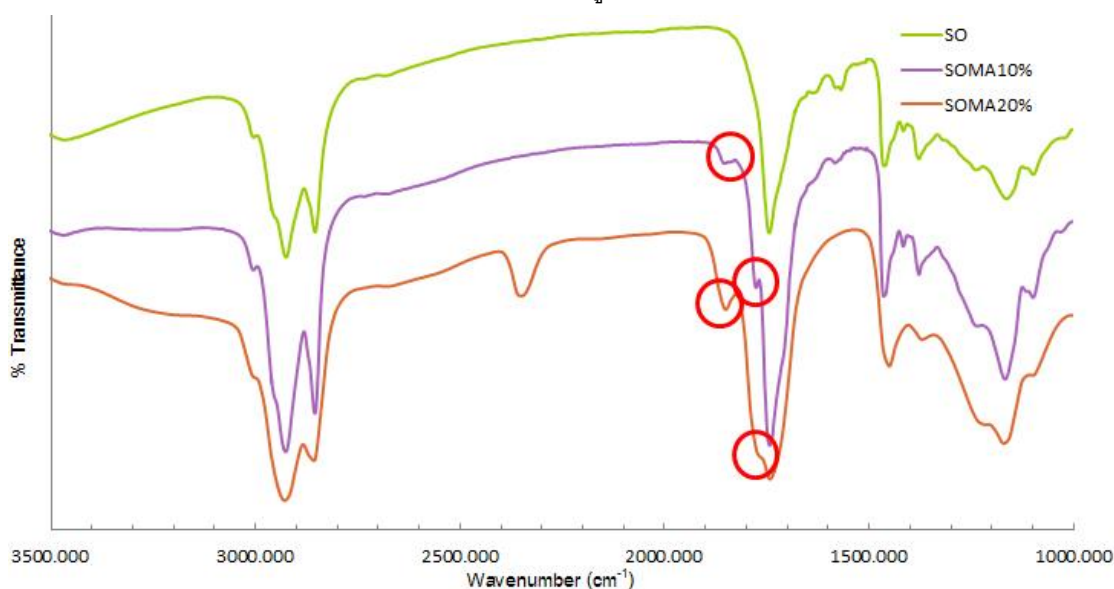
4.1.1 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy: FTIR)

น้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอต (SOMA) ถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยการผสมน้ำมันถั่วเหลือง (SO) กับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) ในระบบปิด ที่สัดส่วนของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10% และ 20% โดย น้ำหนักของน้ำมันถั่วเหลือง ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กวนตลอดเวลา และ ใช้ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) 10% โดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เป็นตัวริเริ่มในการ เกิดปฏิกิริยา ซึ่งมีปฏิกิริยาการเตรียมน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตดังแสดงในรูปที่ 4.1 น้ำมันถั่วเหลือง มาลิเอตที่สังเคราะห์ได้จะถูเก็บไว้ในภาชนะปิดในสถานะตัวทำละลายอะซิโตน



รูปที่ 4.1 ปฏิกิริยาการเตรียมน้ำมันถั่วเหลืองมาเลียด

เมื่อต้องการทดสอบจะนำสารละลายน้ำมันถั่วเหลืองมาเลียดในตัวทำละลายอะซิโตนมาเทลงบนกระดาษฟิวส์ แล้วใช้ช้อนตักสารป้ายบางๆ ด้วยสารละลายน้ำมันถั่วเหลืองมาเลียดในตัวทำละลายอะซิโตนบนโพแทสเซียมโบรไมด์ที่ถูกอัดเป็นแผ่นสำหรับทดสอบ นำไปอบให้แห้งเป็นเวลา 1 คืน เพื่อไล่ตัวทำละลายอะซิโตนออกให้หมด หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) เพื่อตรวจสอบการมีอยู่ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์บนน้ำมันถั่วเหลือง ซึ่งหมู่ฟังก์ชันของมาเลอิกแอนไฮไดรด์บนน้ำมันถั่วเหลืองสามารถวิเคราะห์หาได้จากเทคนิค FTIR ดังแสดงในรูปที่ 4.2

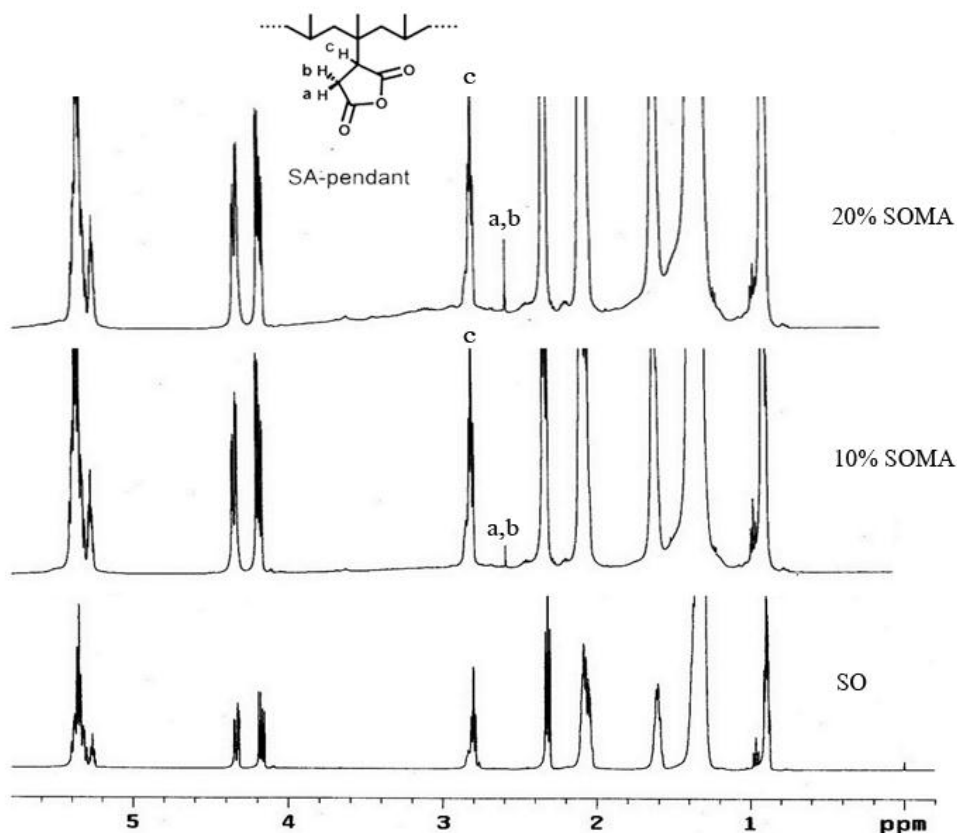


รูปที่ 4.2 FTIR สเปกตรัมของน้ำมันถั่วเหลือง, น้ำมันถั่วเหลืองมาเลียด 10% และน้ำมันถั่วเหลืองมาเลียด 20%

จะเห็นว่าไม่มีพีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดปรากฏที่ประมาณ 1775 cm^{-1} และ 1850 cm^{-1} บนพีคของน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอต (SOMA) แต่ไม่ปรากฏบนพีคของน้ำมันถั่วเหลือง (SO) ซึ่งเป็นพีคเอกลักษณ์ของการยืดแบบสมมาตรและการยืดแบบไม่สมมาตรของ C=O ในมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tran และคณะ [50] แสดงให้เห็นว่ามีหมู่ฟังก์ชันของมาเลอิกแอนไฮไดรด์บนน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตจริง นอกจากนี้ น้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์เพิ่มขึ้นจะปรากฏพีคเอกลักษณ์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ชัดเจนมากขึ้น นั่นคือมีความเข้มของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดมากขึ้น ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่ามีหมู่ฟังก์ชันของมาเลอิกแอนไฮไดรด์บนน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตเพิ่มขึ้นเช่นกัน

4.1.2 วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Proton nuclear magnetic resonance spectroscopy: $^1\text{H-NMR}$)

เมื่อพิจารณาผลของ $^1\text{H-NMR}$ จะเห็นว่าไม่มีพีคเอกลักษณ์ของโปรตอนของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ห้อย (MA-pendant protons) ปรากฏที่ประมาณ 2.60-2.70 ppm ซ้อนทับกัน (a, b) และที่ประมาณ 2.80-2.90 ppm (c) บนพีคของน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอต แต่ไม่ปรากฏบนพีคของน้ำมันถั่วเหลือง ดังรูปที่ 4.3 มีความเป็นไปได้ว่ามีหมู่ฟังก์ชันของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ห้อยบนน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตจริง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Miyauchi และคณะ [57] และสอดคล้องกับโครงสร้างทางเคมีของน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตตามที่คาดการณ์ไว้ในตอนแรก ดังรูปที่ 4.1 นอกจากนี้ น้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์เพิ่มขึ้นจะปรากฏพีคเอกลักษณ์ของโปรตอนของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ห้อยชัดเจนมากขึ้น นั่นคือมีหมู่ฟังก์ชันของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ห้อยบนน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลของ FTIR ก่อนหน้านี้



รูปที่ 4.3 $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของน้ำมันถั่วเหลือง, น้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอต 10% และน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอต 20%

4.1.3 วิเคราะห์ค่ากรดด้วยเทคนิคไตเตรชัน

เพื่อเป็นการยืนยันการมีอยู่จริงของหมู่ฟังก์ชันของมาเลอิกแอนไฮไดรด์และอัตราการกราฟต์ติดของมาเลอิกแอนไฮไดรด์บนน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอต ได้ทำการวิเคราะห์หาค่ากรดของซัคซินิกแอนไฮไดรด์ที่ห้อยบนน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตด้วยเทคนิคไตเตรชัน โดยการต้มน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอต 1 กรัม ในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร ในระบบปิด ที่อุณหภูมิ 100°C กวนตลอดเวลาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หยดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน 1 มิลลิลิตร เพื่อใช้เป็นอินดิเคเตอร์ แล้วทำการไตเตรตกับโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 N ตามมาตรฐาน ASTM D180 โดยมีสูตรการคำนวณค่ากรดดังนี้

$$\text{Acid value} = \frac{A \times N \times (\text{M.W. of NaOH})}{W}$$

โดยที่ A = ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้ (ml)

N = ความเข้มข้นของ NaOH (N)

W = น้ำหนักของสารตัวอย่าง (g)

ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่ากรดของน้ำมันถั่วเหลืองมาเลียด 10% และน้ำมันถั่วเหลืองมาเลียด 20%

Formula	Acid Value
SOMA 10%	18.35
SOMA 20%	54.42

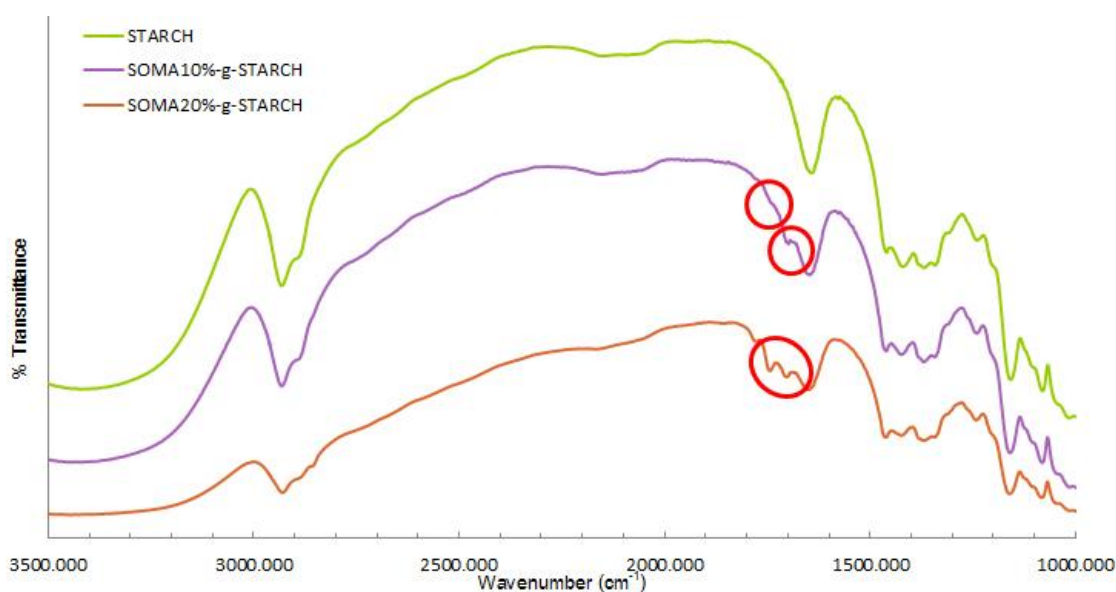
จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าน้ำมันถั่วเหลืองมาเลียดที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลียดแอนไฮไดรด์เพิ่มขึ้นจะมีค่ากรดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของ FTIR และ $^1\text{H-NMR}$ แสดงให้เห็นว่ามีหมู่ฟังก์ชันของมาเลียดแอนไฮไดรด์และอัตราการกราฟต์ติคของมาเลียดแอนไฮไดรด์บนน้ำมันถั่วเหลืองมาเลียดจริง และมีอัตราการกราฟต์ติคของมาเลียดแอนไฮไดรด์บนน้ำมันถั่วเหลืองมาเลียดเพิ่มขึ้นเมื่อมีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลียดแอนไฮไดรด์เพิ่มขึ้น

4.2 วิเคราะห์น้ำมันถั่วเหลืองมาเลียดกราฟต์แป้งมันสำปะหลัง

4.2.1 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy: FTIR)

เมื่อนำน้ำมันถั่วเหลืองมาเลียดทั้งสองสัดส่วนมาผสมกับแป้งมันสำปะหลังในสัดส่วนของน้ำมันถั่วเหลืองมาเลียด 50 กรัม ต่อแป้งมันสำปะหลัง 50 กรัม ลงบนจานเพาะเชื้อโดยใช้อะซิโตนช่วยผสม ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 คืน เพื่อให้สารละลายระเหยหมด จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการกราฟต์ติคกันของน้ำมันถั่วเหลืองมาเลียดกับแป้งมันสำปะหลัง ทำการล้างแป้งมันสำปะหลังด้วยอะซิโตนเพื่อกำจัดน้ำมันถั่วเหลืองมาเลียดส่วนเกินออก โดยการแช่แป้งมันสำปะหลังด้วยอะซิโตนที่มากเกินไปในระบบปิดเป็นเวลา 1 คืน กรองสารละลายอะซิโตนออก และอบแป้งมันสำปะหลังแห้งในตู้อบสารเคมีที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 1 คืน นำผงแป้งมันสำปะหลังมาผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์แล้วทำการอัดเป็นแผ่นสำหรับทดสอบ แล้วทำการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิค FTIR พบว่า มีพีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดปรากฏที่ประมาณ 1775 cm^{-1} และ 1850 cm^{-1} บนพีคของแป้งมันสำปะหลัง แต่ไม่ปรากฏบนพีคของแป้งมันสำปะหลัง ดังแสดงในรูปที่ 4.4

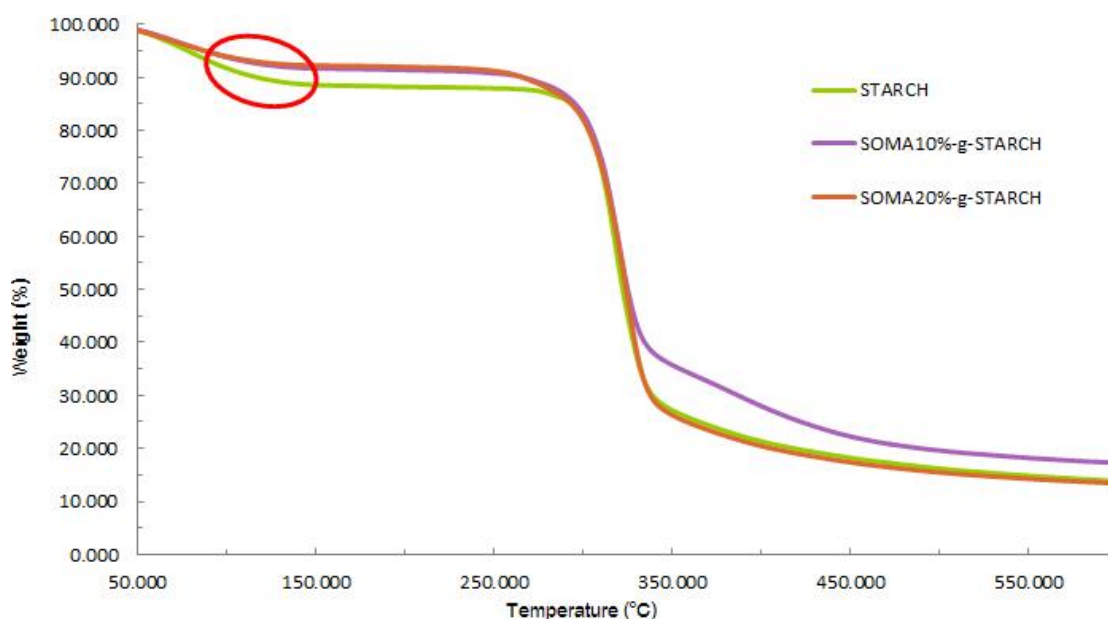
นั่นแสดงให้เห็นว่ามีน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์อยู่บนแป้งมันสำปะหลังจริง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์เพิ่มขึ้นจะปรากฏพีกเอกลักษณ์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ชัดเจนมากขึ้น นั่นคือมีน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์อยู่บนแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 4.4 FTIR สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลัง, แป้งมันสำปะหลังดัดแปร 10% และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 20%

4.2.2 ศึกษาสมบัติทางความร้อนเพื่อดูความเป็นไฮโดรโฟบิกที่เพิ่มขึ้นบนพื้นผิวของแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (Thermo gravimetric analysis: TGA)

เมื่อพิจารณาผลของ TGA พบว่า ที่อุณหภูมิประมาณ 125°C แป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้งสองสัดส่วนจะปรากฏขึ้นของการสลายตัวของน้ำลดลง แสดงให้เห็นว่าแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มากขึ้น นั่นแสดงถึงการมีอยู่จริงของน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตบนแป้งมันสำปะหลัง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 นอกจากนี้ยังพบว่าการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตไม่มีผลต่ออุณหภูมิการสลายตัว กล่าวคือ มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ประมาณ 320°C และมีสารตกค้างเหลืออยู่หลังจากอุณหภูมิที่ประมาณ 400°C เป็นต้นไป ซึ่งเป็นขั้นของการเผาไหม้ของคาร์บอน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shi และคณะ [58]



รูปที่ 4.5 TGA เทอร์โมแกรมของแป้งมันสำปะหลัง, แป้งมันสำปะหลังดัดแปร 10% และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 20%

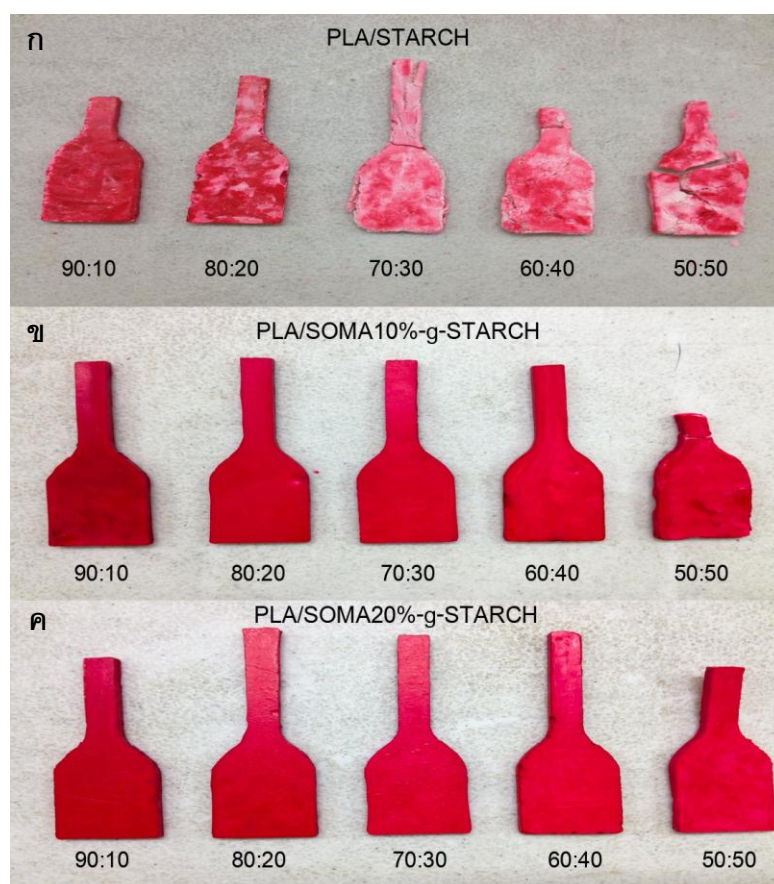
4.3 วิเคราะห์พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลืองมาลีเอต กราฟต์แป้งมันสำปะหลัง

ทำการผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับแป้งมันสำปะหลังดัดแปรในสัดส่วนต่างๆ ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ แล้วทำการตัดเส้นพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ได้ด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก แล้วนำเม็ดพลาสติกที่ได้มาขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดแบบ จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ ต่อไป

4.3.1 ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติมในพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยการย้อมติดสีดิสเพิร์ส

ทำการย้อมติดสีขึ้นทดสอบด้วยสีดิสเพิร์สเข้มข้น 1% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 30 นาที ด้วยเครื่องย้อมสีตัวอย่าง ได้ผลดังรูปที่ 4.6 จากรูปที่ 4.6ข และ 4.6ค จะเห็นว่าสีดิสเพิร์สกระจายตัวได้ดีในชิ้นงานที่ย้อมติดสีของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้งสองสัดส่วน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวที่ดีของน้ำมันถั่วเหลืองมาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังในพอลิแล็กติกแอซิดเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 4.6ก ซึ่งจะเห็นส่วนที่เป็นสีขาวของอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังที่ยังรวมเป็นกลุ่มก้อนกันอยู่ ทั้งนี้เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังไม่สามารถย้อม

ติดสปีดิสเพิร์สได้และการกระจายตัวของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ดีในพอลิแล็กติกแอซิด อันเนื่องมาจากความชอบน้ำ (Hydrophilic) ของแป้งมันสำปะหลัง จึงทำให้แป้งมันสำปะหลัง เข้ากันได้ไม่ดีกับพอลิแล็กติกแอซิด ส่งผลให้ชิ้นงานแตกหักได้ง่าย จากผลการย้อมติดสปีดิสเพิร์ส ของชิ้นงานนี้ แสดงให้เห็นว่าการมีน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอดสามารถช่วยให้แป้งมันสำปะหลัง กระจายตัวได้ดีขึ้นในพอลิแล็กติกแอซิด

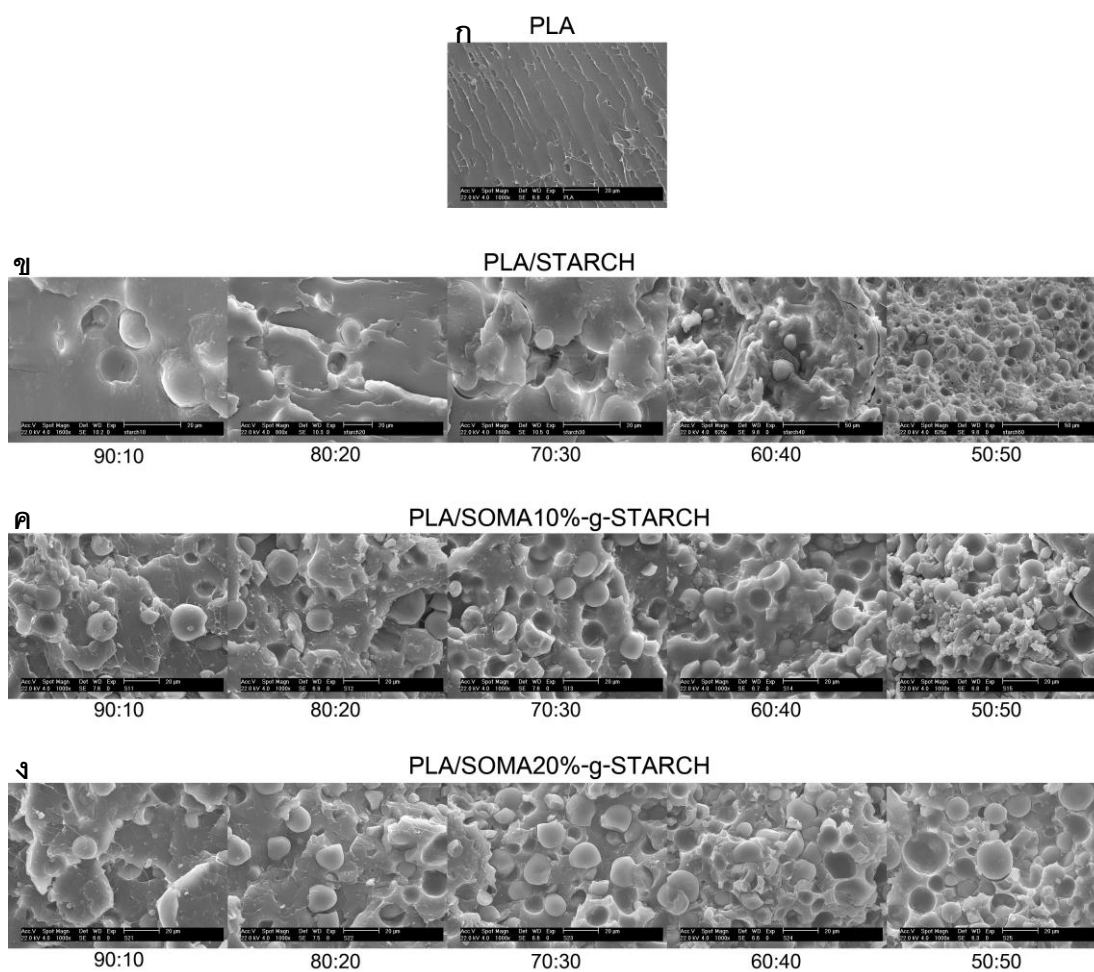


รูปที่ 4.6 ชิ้นงานที่ถูกย้อมติดสปีดิสเพิร์สของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่สัดส่วนต่างๆ

4.3.2 ศึกษาพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมพอสิตโดยการสังเกตพื้นผิวบริเวณที่แตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy: SEM)

จากการศึกษาพื้นฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวที่แตกหักของชิ้นงาน พบว่า พอลิแล็กติกแอซิดที่ทำการผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10% และ 20% (รูปที่ 4.7ค และ 4.7ง) มีปริมาณของอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกระจายตัวในพอลิแล็กติกแอซิดมากกว่าพอลิแล็กติกแอซิดที่ทำการผสมแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว (รูปที่

4.7ข) นั้นแสดงให้เห็นว่าการมีน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตสามารถช่วยให้แป้งมันสำปะหลังกระจายตัวอยู่ในเนื้อของพอลิแล็กติกแอซิดได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของการย้อมติดสีติดสปีร์สตั้งที่กล่าวไว้ก่อนหน้า เมื่อพิจารณาถึงผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าพอลิแล็กติกแอซิดที่ทำการผสมแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียวเมื่อมีปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นจะให้ผลในทำนองเดียวกันคือ อนุภาคของแป้งมันสำปะหลังแทบจะไม่ยึดติดกับพอลิแล็กติกแอซิดเลย แต่เมื่อทำการผสมแป้งมันสำปะหลังตัดแปรที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10% และ 20% ดังแสดงในรูปที่ 4.7ค และ 4.7ง จะให้ผลในทำนองเดียวกันคือ ที่อัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรน้อยๆ (90:10, 80:20, 70:30) อนุภาคของแป้งมันสำปะหลังจะยึดติดกับพอลิแล็กติกแอซิดได้มากขึ้นเมื่อมีปริมาณของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่สัดส่วนต่างๆ

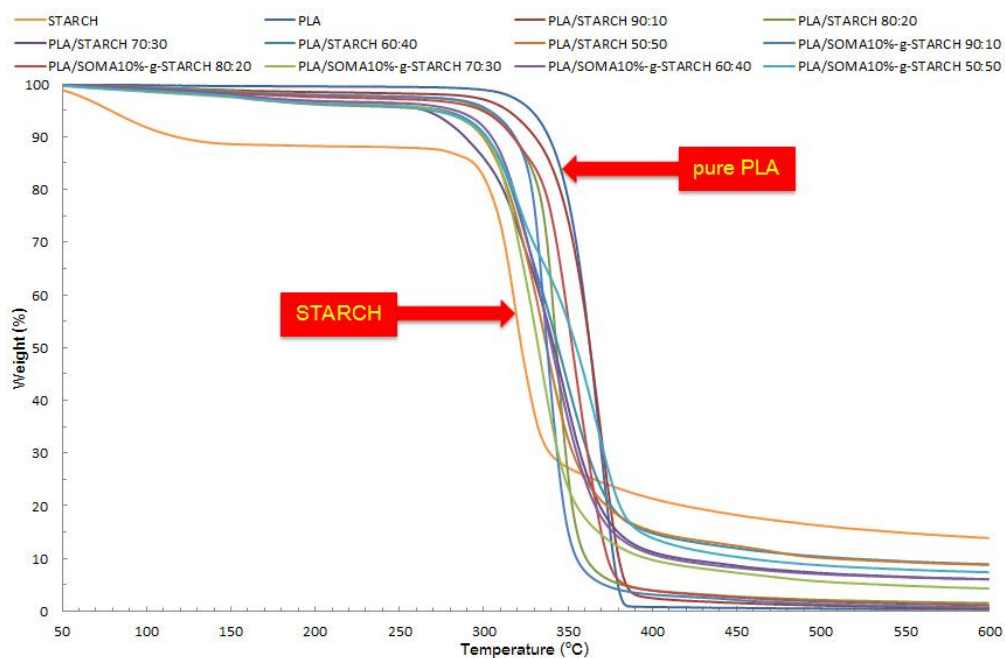
แต่เมื่อมีอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมากๆ (60:40, 50:50) อนุภาคของแป้งมันสำปะหลังจะยึดติดกับพอลิแล็กติกแอซิดได้น้อยลงเมื่อมีปริมาณของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการมีอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังที่มากจนเกินไป ทำให้อนุภาคของแป้งมันสำปะหลังเริ่มจับกลุ่มเป็นก้อนกันเองมากกว่า จึงส่งผลให้การยึดติดกับพอลิแล็กติกแอซิดลดน้อยลง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดที่ทำการผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10% และ 20% ที่อัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรต่างๆ พบว่าให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน

4.3.3 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (Thermo gravimetric analysis: TGA)

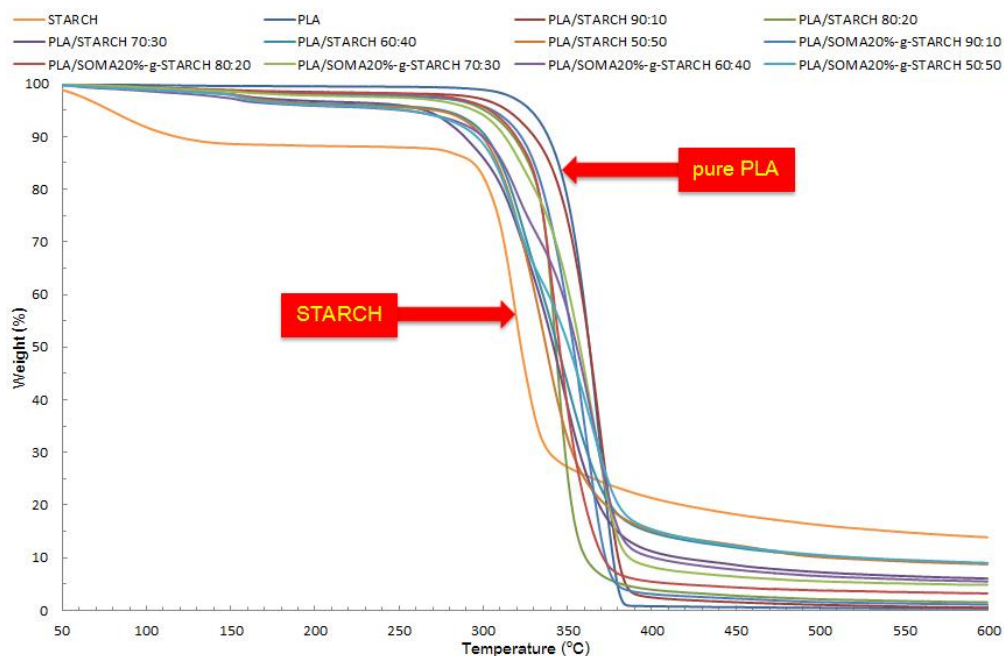
เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ดังแสดงในรูปที่ 4.8 เพื่อตรวจสอบความเข้ากันได้ของพอลิแล็กติกแอซิดกับแป้งมันสำปะหลังดัดแปร พบว่า พอลิแล็กติกแอซิดเมื่อถูกผสมด้วยแป้งมันสำปะหลังทั้งที่ดัดแปรและไม่ดัดแปรจะทำให้มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ลดลง แต่จะมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ระหว่างอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลังและอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิแล็กติกแอซิด คือที่อุณหภูมิประมาณ 320°C – 360°C และพบว่าเมื่อมีปริมาณแป้งมันสำปะหลังทั้งที่ดัดแปรและไม่ดัดแปรเพิ่มขึ้นจะมีสสารตกค้างเหลืออยู่ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงขั้นของการสลายตัวของสารจาก TGA เทอร์โมแกรมเพื่อตรวจสอบความเข้ากันได้ของพอลิแล็กติกแอซิดกับแป้งมันสำปะหลังดัดแปรนั้นไม่สามารถเห็นได้ชัดเจน จึงได้ทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเดอริเวทีฟเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (Derivative thermogravimetric analysis: DTG) เพื่อตรวจสอบถึงขั้นของการสลายตัวของสารอีกครั้งหนึ่ง พบว่า พอลิแล็กติกแอซิดที่ทำการผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10% และ 20% ให้ผลในทำนองเดียวกันเมื่อเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมกับแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว กล่าวคือ ที่อัตราส่วนของพอลิแล็กติกแอซิดต่อแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 50:50, 60:40 และ 70:30 จะมีอุณหภูมิการสลายตัว 2 ขั้น ซึ่งมีความคล้ายกับของพอลิแล็กติกแอซิดผสมแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว คือที่อุณหภูมิประมาณ 319°C และ 366°C ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shi และคณะ [58] ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของแป้งมันสำปะหลังที่มากเกินไปและสัดส่วนของน้ำมันถั่วเหลืองมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่กราฟตีติดมีน้อย จึงทำให้มีความชอบน้ำที่ได้จากส่วนของแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งทำให้เข้ากับพอลิแล็กติกแอซิดได้ไม่ดี และเมื่อมีอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรลดลง (80:20 และ 90:10) จะปรากฏอุณหภูมิ

การสลายตัวเพียง 1 ชั้น แสดงให้เห็นว่าพอลิแล็กติกแอซิดเข้ากันได้กับแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ดังแสดงในรูปที่ 4.9

a)

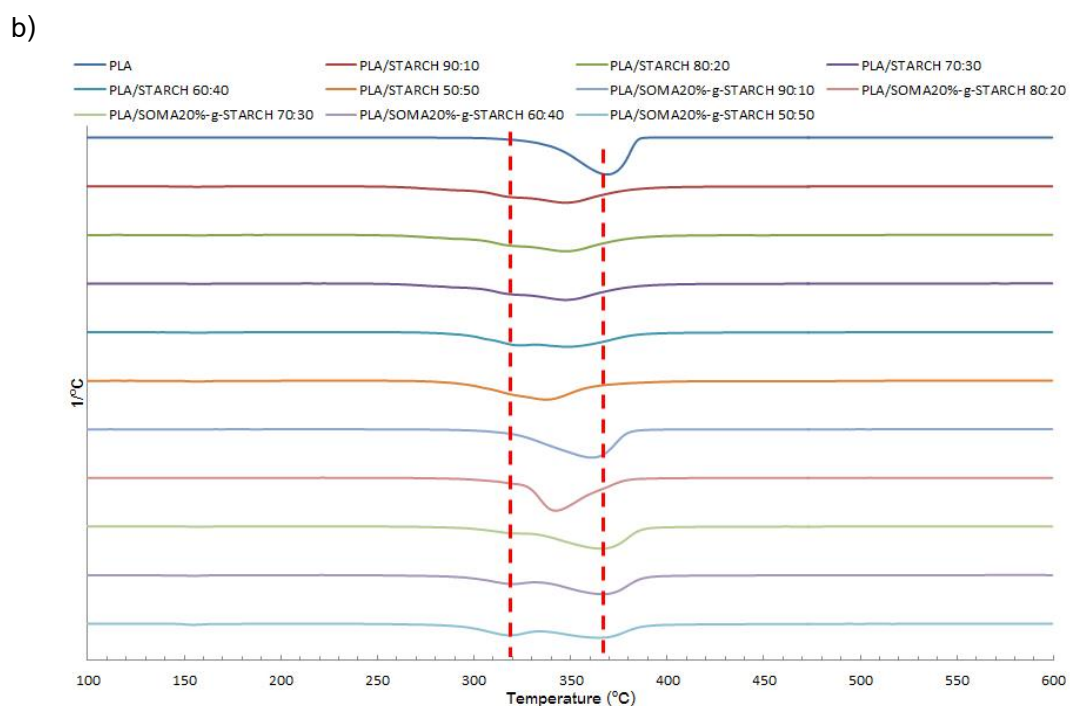
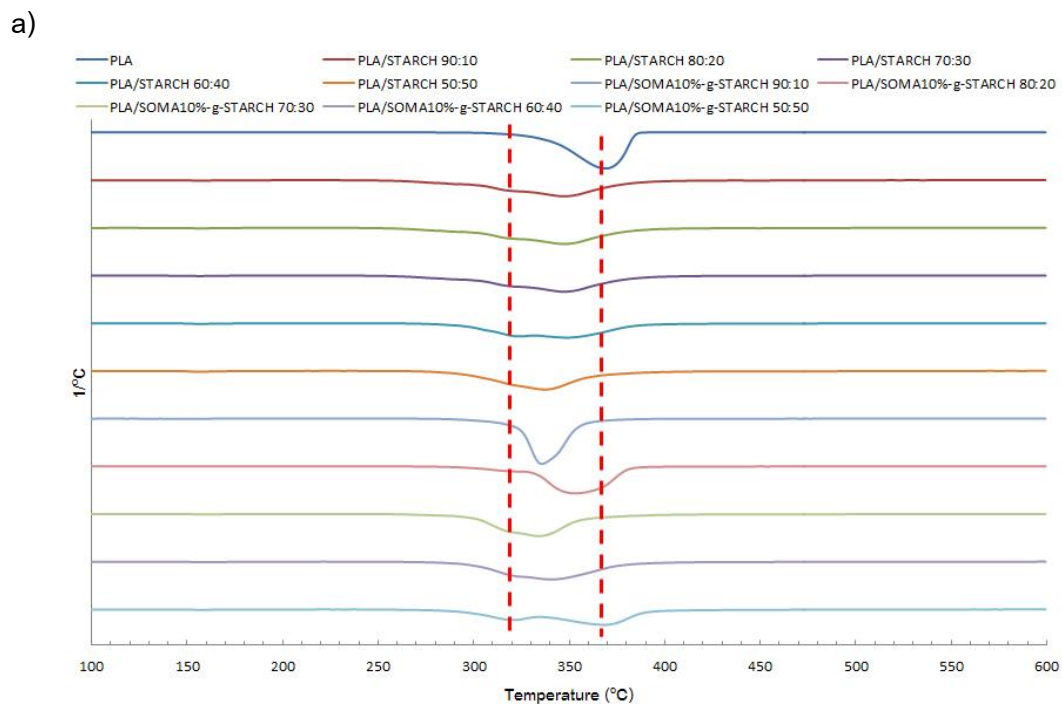


b)



รูปที่ 4.8 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่สัดส่วนต่างๆ โดยที่

- เปรียบเทียบกับที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10%
- เปรียบเทียบกับที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 20%



รูปที่ 4.9 DTG เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่สัดส่วนต่างๆ โดยที่

a) เปรียบเทียบกับที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10%

b) เปรียบเทียบกับที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 20%

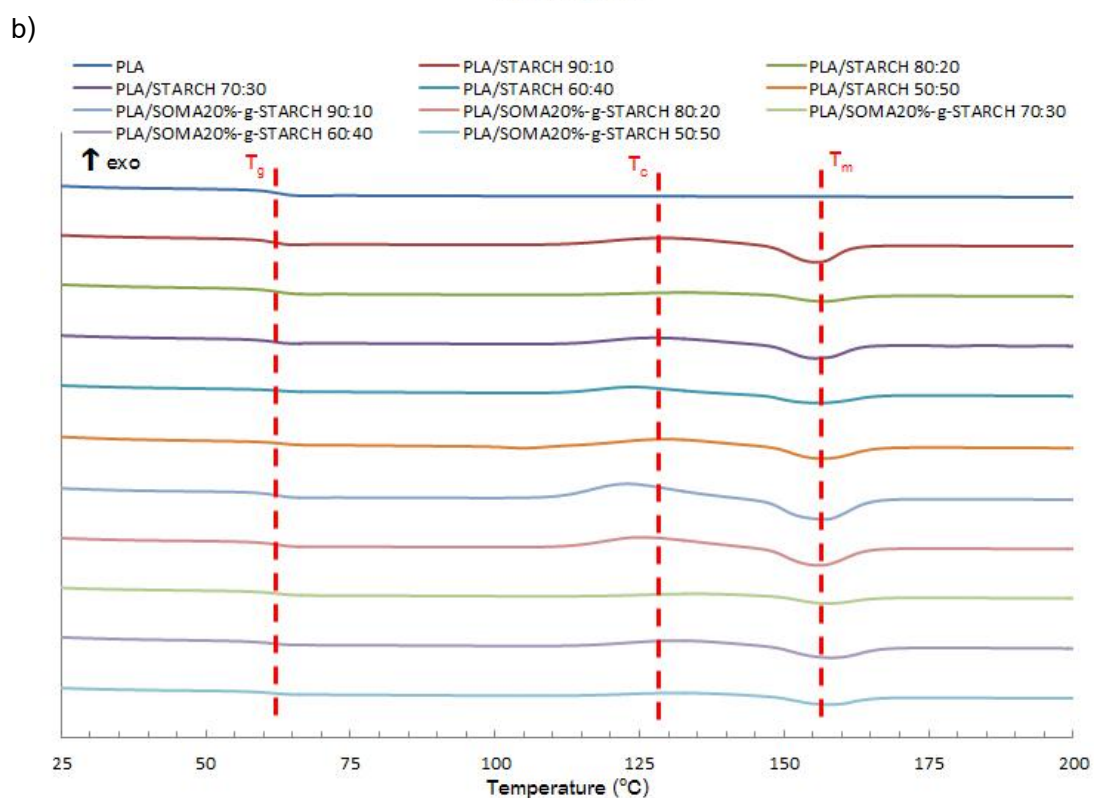
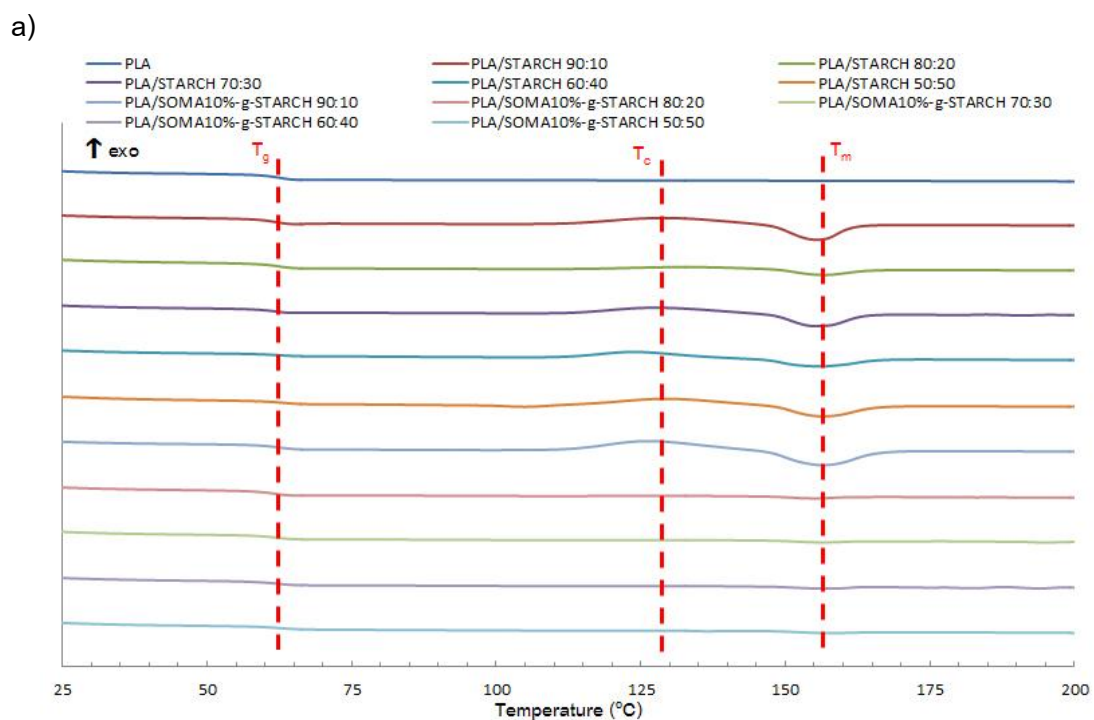
4.3.4 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่ง แคลอริเมทรี (Differential scanning calorimetry: DSC)

เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยเทคนิค DSC พบว่า พอลิแล็กติกแอซิดที่ทำการผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้งสองสัดส่วนจะมีอุณหภูมิกลาส แทรนซิชัน (T_g) และอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ที่ใกล้เคียงกับของพอลิแล็กติกแอซิดที่ทำการผสม แป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว คือที่อุณหภูมิประมาณ 62°C และ 157°C ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jang และคณะ [59] ที่กล่าวไว้ว่าการผสมแป้งลงในพอลิแล็กติก แอซิดจะไม่ส่งผลต่อค่า T_g และ T_m ของพอลิเมอร์ผสมอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 นอกจากนี้ยังพบว่ามีอุณหภูมิตกผลึก (T_c) เกิดขึ้นในพอลิเมอร์คอมพอสิตบางสูตรด้วยซึ่งจะแสดง ไว้ในตารางที่ 4.2 และเมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ใต้กราฟ T_m ซึ่งก็คือค่าความแตกต่างของพลังงาน ความร้อนของสารตัวอย่าง (ΔH_f) เพื่อใช้ในการคำนวณหาปริมาณความเป็นผลึก (χ_c) ของ พอลิแล็กติกแอซิดในพอลิเมอร์คอมพอสิต ค่า ΔH_f จึงต้องถูกหารด้วยเศษส่วนโดยน้ำหนัก (weight fraction) ของพอลิแล็กติกแอซิดในพอลิเมอร์คอมพอสิต (Φ_{PLA}) เสียก่อน ดังสมการ

$$\% \chi_c = \frac{\Delta H_f / \Phi_{PLA}}{\Delta H_{f_0}} \times 100$$

โดยค่าความแตกต่างของพลังงานความร้อนของสารอ้างอิง (ΔH_{f_0}) หาได้จากความแตกต่างของ พลังงานความร้อนของพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความเป็นผลึก 100% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 93.1 J/g [60] ทำให้ได้ปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่สัดส่วนต่างๆ ในตารางที่ 4.2 จะพบว่า พอลิแล็กติกแอซิดที่ใช้ไม่ปรากฏพื้นที่ใต้กราฟ T_m นั้นแสดงให้เห็นว่าพอลิแล็กติกแอซิดมีความ เป็นอสัณฐาน แต่เมื่อทำการผสมกับแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่สัดส่วนต่างๆ พบว่ามีพื้นที่ใต้กราฟ T_m เกิดขึ้น นั้นแสดงให้เห็นว่ามีปริมาณความเป็นผลึกเกิดขึ้น โดยพอลิเมอร์ คอมพอสิตที่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้งที่สัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10% และ 20% เทียบกับพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว พบว่า ที่อัตราส่วนของ แป้งมันสำปะหลังดัดแปร 70:30, 60:40 และ 50:50 แสดงผลในแนวทางเดียวกันคือ พอลิเมอร์ คอมพอสิตที่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปรจะมีปริมาณความเป็นผลึกที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มี แป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียวในอัตราส่วนเดียวกัน เนื่องจากพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ได้มีผลึก ขนาดเล็กและการมีอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่มากเกินไป ซึ่งมีการกระจายตัวที่ไม่ดี ดังแสดงในผลของ DTG ก่อนหน้านี้ จึงทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่ง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jang และคณะ [59] ที่ได้กล่าวไว้ ส่งผลทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีเวลาใน

การจัดเรียงตัวเป็นผลึกน้อย (T_c มีค่าสูงขึ้น) และมีปริมาณความเป็นผลึกที่ต่ำลง และเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรน้อยๆ (90:10 และ 80:20) เทียบกับพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว พบว่า พอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปรจะมีปริมาณความเป็นผลึกที่สูงกว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจาก พอลิเมอร์คอมพอสิตที่ได้มีผลึกขนาดใหญ่และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมีการกระจายตัวที่ดีขึ้นในพอลิแล็กติกแอซิด ซึ่งสอดคล้องกับผลของ DTG ก่อนหน้านี้ และเป็นผลมาจากน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตแสดงสมบัติความเป็นพลาสติกไซเซออร์ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น จึงมีเวลาในการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้มากขึ้น (T_c มีค่าต่ำลง) และมีปริมาณความเป็นผลึกที่สูงขึ้น แต่ที่อัตราส่วน 80:20 กลับพบว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10% มีปริมาณความเป็นผลึกที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว แต่ที่ 20% ยังคงมีปริมาณความเป็นผลึกที่สูงกว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่ 10% มีการกราฟต์ติดกันของน้ำมันถั่วเหลืองกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ต่ำกว่า ซึ่งพิจารณาได้จากค่ากรดที่แสดงในตารางที่ 4.1 จึงส่งผลทำให้ไม่แสดงสมบัติความเป็นพลาสติกไซเซออร์เท่าที่ควร ทำให้มีการกระจายตัวที่ไม่ดีนัก ส่งผลทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีเวลาในการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้น้อยกว่าและมีปริมาณความเป็นผลึกที่ต่ำกว่า ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10% กับ 20% จะให้ผลเช่นเดียวกัน คือ ที่ 20% มีปริมาณความเป็นผลึกที่สูงกว่าที่ 10% ทั้งนี้เพราะเหตุผลเช่นเดียวกัน กล่าวคือ ที่ 10% มีการกราฟต์ติดกันของน้ำมันถั่วเหลืองกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ต่ำกว่า จึงทำให้ไม่แสดงสมบัติความเป็นพลาสติกไซเซออร์เท่าที่ควร ทำให้มีการกระจายตัวที่ไม่ดีเท่า ส่งผลทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีเวลาในการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้น้อยกว่าและมีปริมาณความเป็นผลึกที่ต่ำกว่า



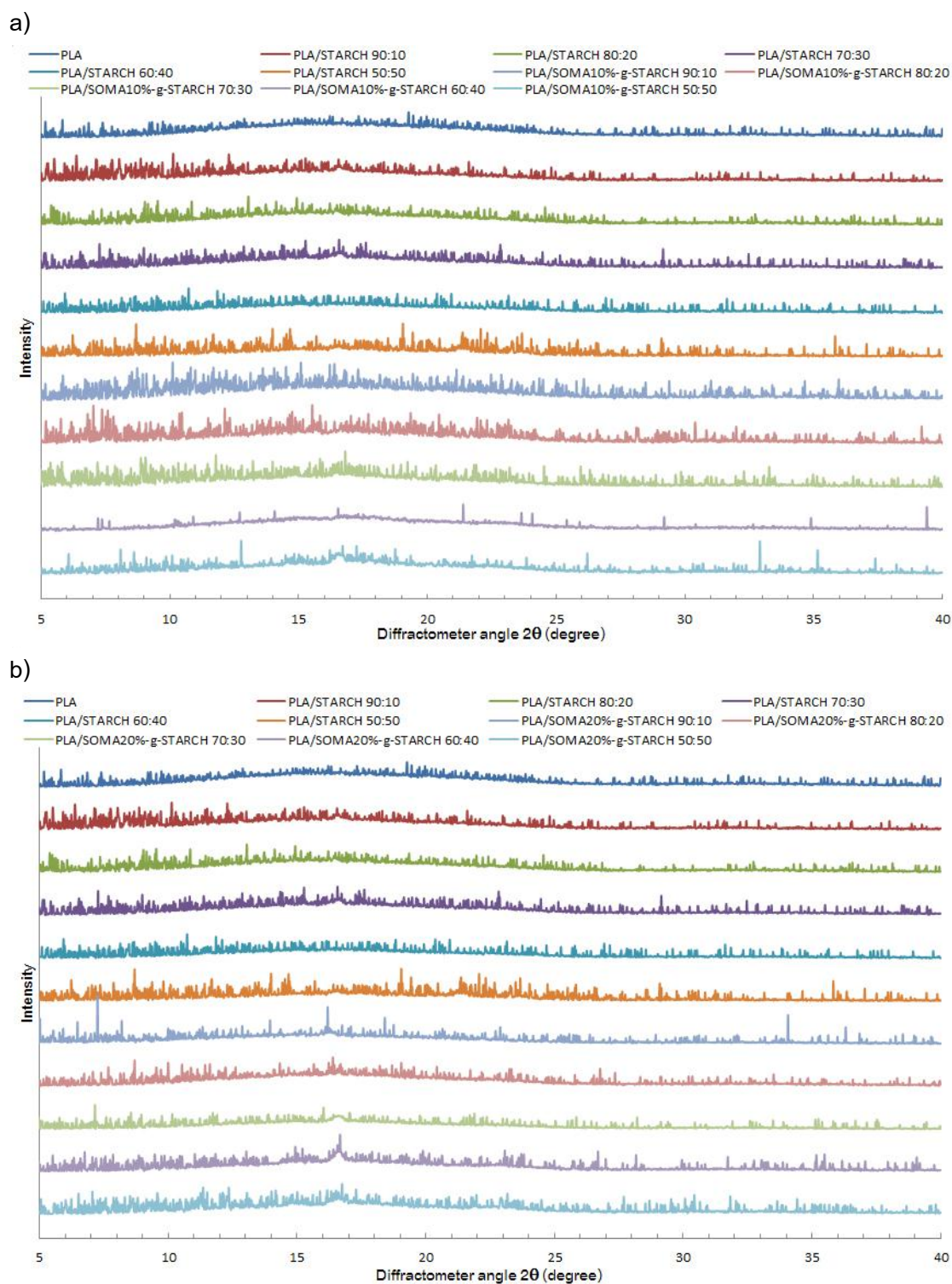
รูปที่ 4.10 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่สัดส่วนต่างๆ โดยที่
 a) เปรียบเทียบกับที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10%
 b) เปรียบเทียบกับที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 20%

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิตกผลึก (T_c) พื้นที่ใต้กราฟ T_m และปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์
คอมพอลิเมอร์ที่สัดส่วนต่างๆ

สูตร	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	พื้นที่ใต้กราฟ T_m (J/g)	ปริมาณความเป็นผลึก (χ_c) (%)
PLA	-	-	-
PLA90: STARCH10	129.20	13.56	16.19
PLA80: STARCH20	132.60	5.074	6.81
PLA70: STARCH30	127.60	11.93	18.30
PLA60: STARCH40	123.80	10.06	18.01
PLA50: STARCH50	129.50	10.76	23.11
PLA90:SOMA10%- g-STARCH10	126.40	17.46	20.84
PLA80:SOMA10%- g-STARCH20	-	1.592	2.14
PLA70:SOMA10%- g-STARCH30	-	1.320	2.03
PLA60:SOMA10%- g-STARCH40	-	1.636	2.93
PLA50:SOMA10%- g-STARCH50	-	1.577	3.38
PLA90:SOMA20%- g-STARCH10	122.90	22.95	27.39
PLA80:SOMA20%- g-STARCH20	125.30	17.21	23.10
PLA70:SOMA20%- g-STARCH30	134.50	5.635	8.65
PLA60:SOMA20%- g-STARCH40	131.40	10.05	17.99
PLA50:SOMA20%- g-STARCH50	130.90	7.019	15.08

4.3.5 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffraction: XRD)

เมื่อพิจารณาโครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน หรือ XRD โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ที่ $2\theta = 5^{\circ}$ - 40° พบว่า พอลิแล็กติกแอซิด, พอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้งที่สัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10% และ 20% ให้ผลในทำนองเดียวกันคือ ปรางภูพีคบอร์ดที่ประมาณ $2\theta = 16.50^{\circ}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า พอลิเมอร์คอมพอสิตที่ได้มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน โดยปริมาณความเป็นผลึกที่เกิดขึ้นที่ตรวจพบในผลของ DSC นั้นเป็นผลึกไม่สมบูรณ์ เนื่องจากแป้งไม่ใช่สารก่อผลึกที่ดี จึงอาจกล่าวได้ว่าการเติมแป้งมันสำปะหลังหรือแป้งมันสำปะหลังดัดแปรลงไปในพอลิแล็กติกแอซิดไม่ได้ทำให้พอลิแล็กติกแอซิดมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น



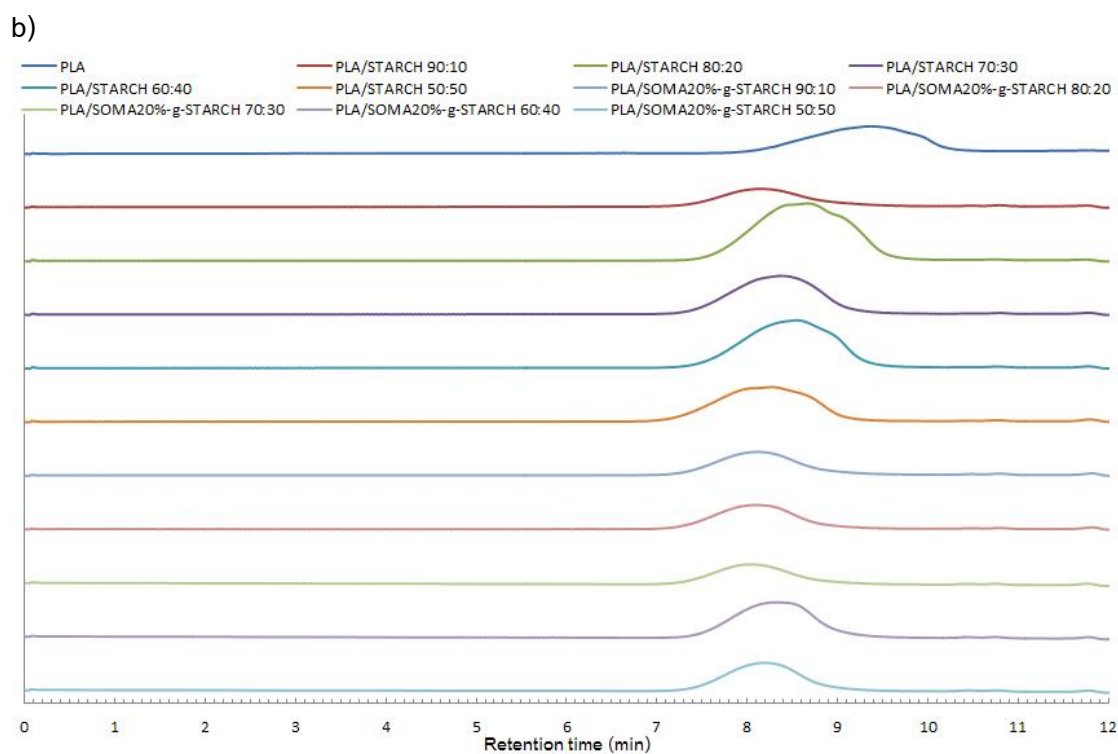
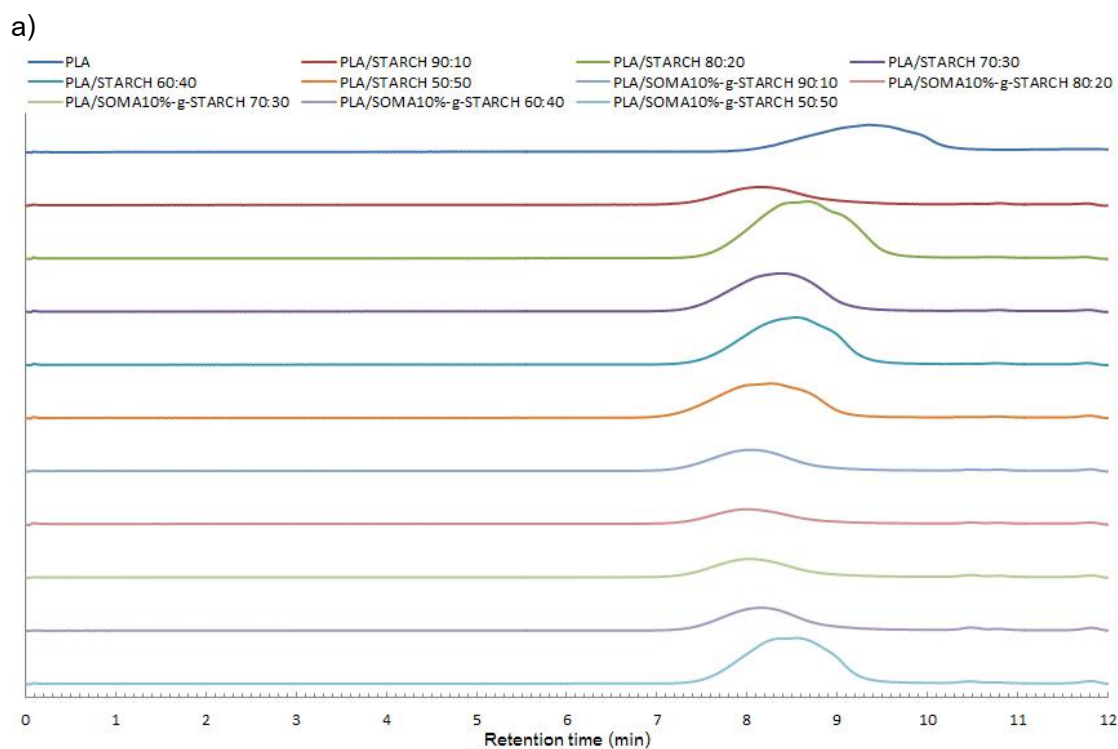
รูปที่ 4.11 X-ray ดิฟแฟรกโทแกรมของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีสัดส่วนต่างๆ โดยที่

a) เปรียบเทียบกับที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10%

b) เปรียบเทียบกับที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 20%

4.3.6 วิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์คอมพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคเจลเพอร์มิเอชันโครมาโทกราฟี (Gel permeation chromatography: GPC)

จากรูปที่ 4.12 แสดงผลของ GPC โครมาโทแกรมของพอลิเมอร์คอมพอลิเมอร์ที่สัดส่วนต่างๆ ซึ่งแสดงเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์คอมพอลิเมอร์ออกจากคอลัมน์ (Retention time) และน้ำหนักโมเลกุล (M_w) ของพอลิเมอร์คอมพอลิเมอร์ไว้ในตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าพอลิเมอร์คอมพอลิเมอร์ที่มีแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียวจะมีแนวโน้มเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ออกจากคอลัมน์ใกล้เคียงกับของพอลิแล็กติกแอซิดและมีน้ำหนักโมเลกุลที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์คอมพอลิเมอร์ที่มีแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียวแทบจะไม่มีส่วนของแป้งมันสำปะหลังติดไปกับเนื้อของพอลิแล็กติกแอซิดเลย ซึ่งสอดคล้องกับผลของ SEM ก่อนหน้านี้ เมื่อพิจารณาที่พอลิเมอร์คอมพอลิเมอร์ที่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้งสองสัดส่วน จะเห็นว่ามีแนวโน้มเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ออกจากคอลัมน์น้อยกว่าพอลิเมอร์คอมพอลิเมอร์ที่มีแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว แสดงว่าพอลิเมอร์คอมพอลิเมอร์ที่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้งสองสัดส่วนมีน้ำหนักโมเลกุลมากขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์คอมพอลิเมอร์ที่มีแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ค่า M_w ก็แสดงผลเช่นนั้น แสดงให้เห็นว่าการมีแป้งมันสำปะหลังดัดแปรจะทำให้มีน้ำหนักโมเลกุลมากขึ้นหรือมีโครงสร้างที่ใหญ่กว่าการมีแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายพอลิเมอร์คอมพอลิเมอร์ที่ได้อาจมีส่วนของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรติดมากับเนื้อของพอลิแล็กติกแอซิด ซึ่งในพอลิเมอร์คอมพอลิเมอร์ที่มีแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียวไม่มี จึงทำให้มีแค่ส่วนของพอลิแล็กติกแอซิดเท่านั้นที่ละลายอยู่ในสารละลาย ทำให้มีโครงสร้างที่มีขนาดเล็กกว่า แต่ที่อัตราส่วน 50:50 ของพอลิเมอร์คอมพอลิเมอร์ที่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้งสองสัดส่วนกลับมีแนวโน้มเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ออกจากคอลัมน์มากกว่าพอลิเมอร์คอมพอลิเมอร์ที่มีแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว แสดงว่าคอมพอลิเมอร์ที่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้งสองสัดส่วนมีน้ำหนักโมเลกุลที่น้อยลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์คอมพอลิเมอร์ที่มีแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ค่า M_w ก็แสดงผลเช่นนั้น นั่นแสดงให้เห็นว่าการมีแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่มากเกินไปและมีการกราฟต์ติดของน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตบนแป้งมันสำปะหลังที่น้อย ทำให้พอลิแล็กติกแอซิดกับแป้งมันสำปะหลังดัดแปรเข้ากันได้ไม่ดีนัก จึงส่งผลทำให้มีโครงสร้างที่เล็กกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลของ DTG ที่ว่าเมื่อมีแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมากเกินไปจะทำให้เข้ากับพอลิแล็กติกแอซิดได้ไม่ดี



รูปที่ 4.12 GPC โคโรมาโทแกรมของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่สัดส่วนต่างๆ โดยที่

a) เปรียบเทียบกับที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10%

b) เปรียบเทียบกับที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 20%

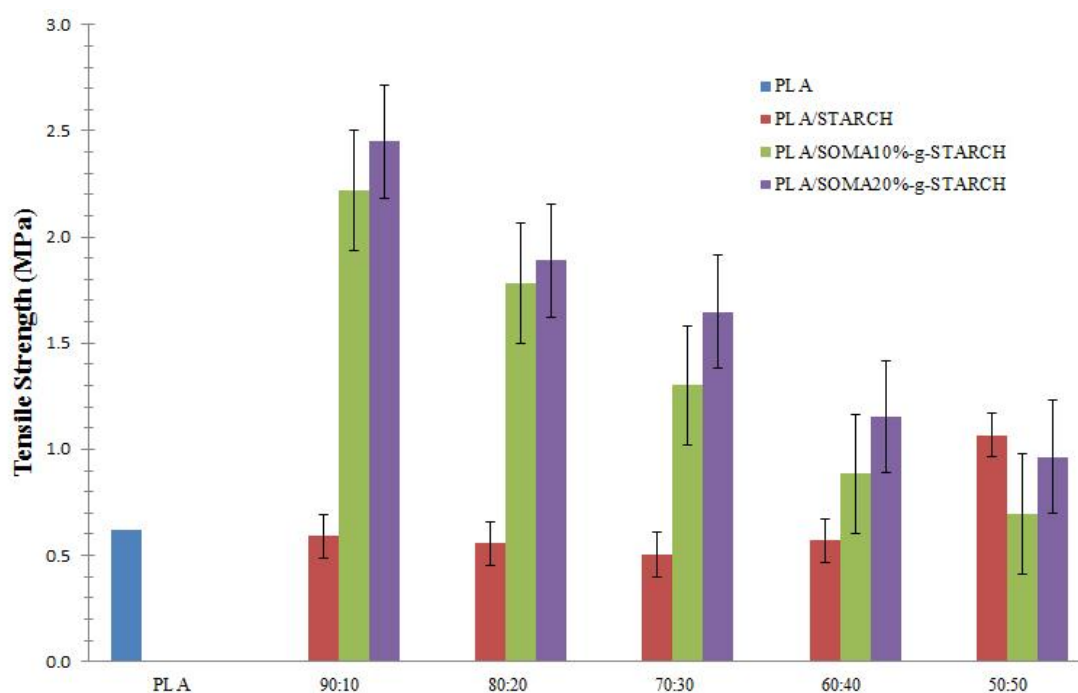
ตารางที่ 4.3 เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ออกจากคอลัมน์และน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์คอมพอลิทีที่สัดส่วนต่างๆ

สูตร	Retention time (นาที)	น้ำหนักโมเลกุล (M_w)
PLA	2.17	80,602
PLA90: STARCH10	2.11	96,510
PLA80: STARCH20	2.32	54,286
PLA70: STARCH30	2.16	82,988
PLA60: STARCH40	2.23	67,703
PLA50: STARCH50	2.08	107,400
PLA90:SOMA10%-g-STARACH10	2.03	116,449
PLA80:SOMA10%-g-STARACH20	2.05	113,254
PLA70:SOMA10%-g-STARACH30	2.13	94,307
PLA60:SOMA10%-g-STARACH40	2.13	94,307
PLA50:SOMA10%-g-STARACH50	2.25	65,888
PLA90:SOMA20%-g-STARACH10	1.98	105,639
PLA80:SOMA20%-g-STARACH20	2.06	111,149
PLA70:SOMA20%-g-STARACH30	2.05	113,258
PLA60:SOMA20%-g-STARACH40	2.17	80,270
PLA50:SOMA20%-g-STARACH50	2.12	95,543

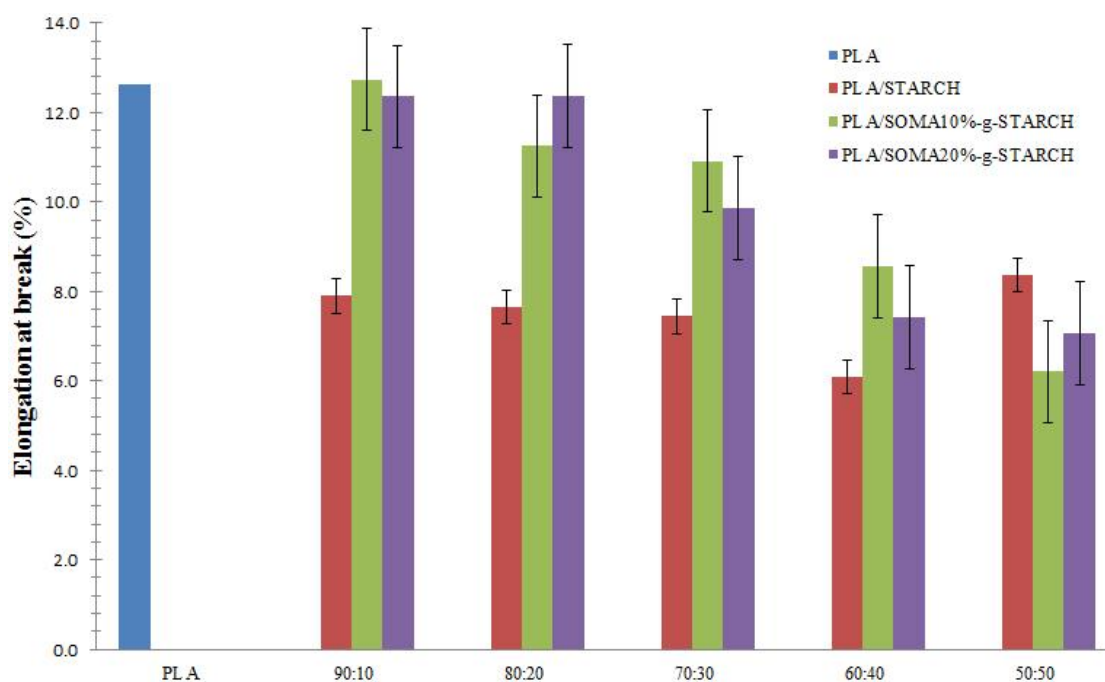
4.3.7 ทดสอบสมบัติด้านแรงดึง (Tensile properties)

เมื่อนำพอลิเมอร์คอมพอลิทีที่สัดส่วนต่างๆ มาทดสอบสมบัติด้านแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14 ซึ่งแสดงผลของความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาด ตามลำดับ จะเห็นว่าให้ผลในแนวทางเดียวกันคือ พอลิเมอร์คอมพอลิทีที่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้งสองสัดส่วนจะมีค่าความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดที่มากกว่าพอลิเมอร์คอมพอลิทีที่มีแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมีการกระจายตัวที่ดีในเนื้อของพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งจะเห็นลักษณะการกระจายตัวได้จากผลของการย้อมติดสีดีสเพิร์สก่อนหน้า ทำให้มีแรงยึดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิแล็กติกแอซิดกับแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่ดี ค่าความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมพอลิทีที่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปรจึง

มากกว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว แต่เมื่อมีอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรเพิ่มขึ้น ค่าความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดจะมีค่าต่ำลง แต่ก็ยังมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว ยกเว้นที่อัตราส่วน 50:50 พอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีแป้งมันสำปะหลังตัดแปรจะมีค่าความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดต่ำกว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากการมีแป้งมันสำปะหลังมากเกินไปและมีการกราฟต์ติดของน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอบบนแป้งมันสำปะหลังที่น้อย ทำให้แรงยึดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิแล็กติกแอซิดกับแป้งมันสำปะหลังตัดแปรมีน้อยลง ส่งผลให้มีการกระจายตัวของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรในเนื้อของพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่แย่งลง ซึ่งสอดคล้องกับผลของ SEM, DTG และ DSC ก่อนหน้านี้ และเมื่อพิจารณาความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิแล็กติกแอซิด จะเห็นว่ามีค่าความต้านแรงดึงที่ต่ำมากและมีระยะยืด ณ จุดขาดที่สูง ซึ่งไม่เป็นไปตามทฤษฎี ทั้งนี้เนื่องจากได้ทดลองใช้สภาวะต่างๆ ในการทดสอบที่โหลดเซลล์ 10KN แต่ไม่สามารถดึงได้ เนื่องจากมีความแข็งดึง (stiffness) มาก จึงต้องใช้โหลดเซลล์ที่ 100KN ถึงจะสามารถดึงจนขาดได้ ดังนั้นไม่สามารถเปรียบเทียบค่าความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิแล็กติกแอซิดในที่นี้ได้ เนื่องจากใช้โหลดเซลล์ไม่เท่ากัน



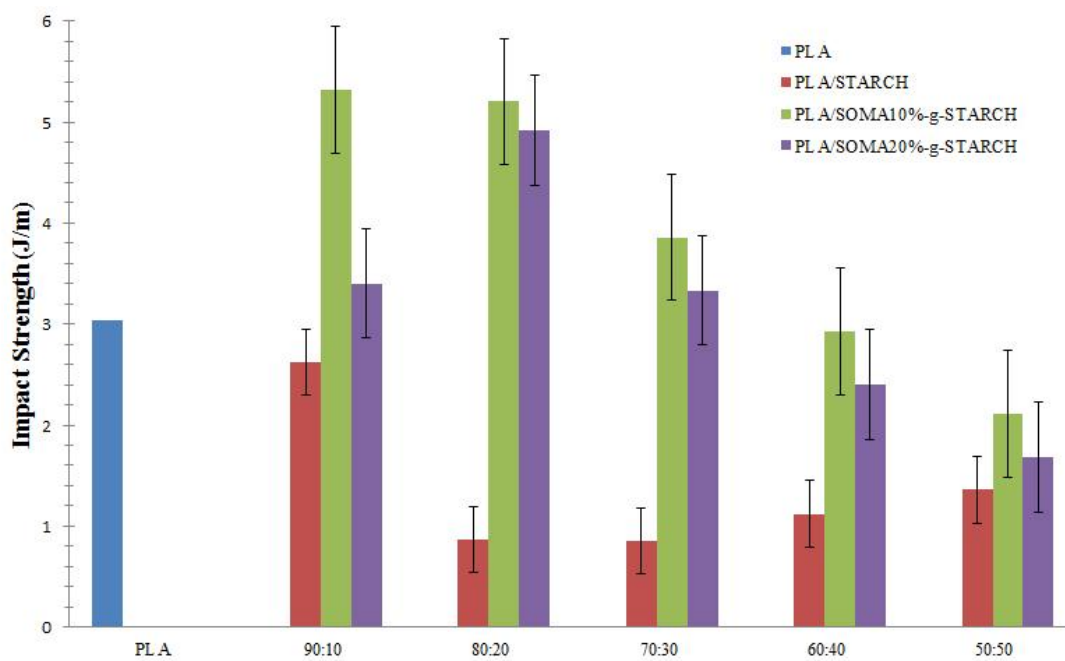
รูปที่ 4.13 Tensile strength ของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่สัดส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.14 Elongation at break ของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่สัดส่วนต่างๆ

4.3.8 ทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact strength)

เมื่อพิจารณาผลของความทนแรงกระแทกแบบไอซอด ในรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าแสดงผลที่คล้ายกับผลของความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาด กล่าวคือ พอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้งสองสัดส่วนจะมีค่าความทนแรงกระแทกที่มากกว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายตัวของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่ดีในเนื้อของพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทำให้มีแรงยึดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิแล็กติกแอซิดกับแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่ดี ส่งผลให้มีการกระจายพลังงานที่ดีขึ้นเมื่อได้รับแรงมากระแทก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรเพิ่มขึ้น ค่าความทนแรงกระแทกจะมีค่าลดลง แต่ก็ยังมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว ซึ่งเหตุผลเช่นเดียวกับผลของความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาด และเมื่อพิจารณาค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้งสองสัดส่วนเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดพบว่า พอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้งสองสัดส่วนมีค่าความทนแรงกระแทกที่สูงกว่าพอลิแล็กติกแอซิด แต่พอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีสัดส่วนของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรสูงๆ (60:40 และ 50:50) จะมีค่าความทนแรงกระแทกที่ต่ำกว่าพอลิแล็กติกแอซิด



รูปที่ 4.15 Impact strength ของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่สัดส่วนต่างๆ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 สามารถเตรียมน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แ่งมันสำปะหลังที่มีสัดส่วนของมาลิเอตต่างๆ กันได้

5.1.2 น้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตกราฟต์แ่งมันสำปะหลังมีความสามารถในการเข้ากันได้กับพอลิแล็กติกแอซิด โดยอาศัยแรงยึดระหว่างผิวสัมผัสของความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ของแ่งมันสำปะหลังตัดแปรกับความไม่ชอบน้ำของพอลิแล็กติกแอซิด

5.1.3 การผสมแ่งมันสำปะหลังตัดแปรลงในพอลิแล็กติกแอซิดไม่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อนและความเป็นผลึกของพอลิเมอร์คอมพอสิต แต่ส่งผลทำให้มีสัดส่วนวิทยาและสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดยเฉพาะพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีแ่งมันสำปะหลังตัดแปรทั้งสองสัดส่วนที่อัตราส่วน 90:10 และ 80:20 เป็นสูตรที่เข้ากันได้ดี มีสัดส่วนวิทยาและสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด ซึ่งคาดว่า การเติมแ่งมันสำปะหลังลงไปผสมกับพอลิแล็กติกแอซิดจะช่วยลดปริมาณการใช้พอลิแล็กติกแอซิดโดยที่ไม่ได้เพิ่มความยุ่งยากในการขึ้นรูปชิ้นงานและเป็นการช่วยลดต้นทุนของพอลิแล็กติกแอซิดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ใช้ น้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ปราศจากสารกันหืนหรือสารเติมแต่งอื่นๆ ซึ่งอาจทำให้มีการกราฟต์ติดของน้ำมันถั่วเหลืองกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ดีขึ้น และศึกษาผลของการสลายตัวของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ได้

5.2.2 ศึกษาชนิดของน้ำมันอื่นที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ได้ และเปรียบเทียบผลของการกราฟต์ติดบนแ่งมันสำปะหลังและพอลิแล็กติกแอซิด

5.2.3 ศึกษาผลของน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตต่อการกราฟต์ติดบนตัวเติมธรรมชาติชนิดอื่น เช่น เซลลูโลส ไคติน ไคโตซาน เป็นต้น กับพอลิแล็กติกแอซิด

รายการอ้างอิง

- [1] Namphoothiri, K. M., Nair, N. R. and John, R. P. An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research. Bioresource Technology 101 (2010): 8493-8501.
- [2] Yu, L. Biodegradable Polymer Blends and Composites from Renewable Resources. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2009.
- [3] Ren, J. Introduction. Biodegradable poly(lactic acid): synthesis, modification, processing and Application, pp. 1-3, Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [4] Ren, J. Lactic acid. Biodegradable poly(lactic acid): synthesis, modification, processing and Application, pp. 3-11, Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [5] Gupta, A. P. and Kurma, V. New emerging trends in synthetic biodegradable polymers-Polylactide: A critique. European polymer journal 43 (2007): 4053-4074.
- [6] Lasprilla, A. J. R., Martinez, G. A. R., Lunelli, B. H., Figueroa, J. E. J., Jardini, A. L. and Filho, R. M. Synthesis and characterization of poly(lactic acid) for use in biomedical field, Brazil: University city "Zeferino Vaz".
- [7] Belgacem, M.N. and Gandini, A. Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources. 1st ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2008.
- [8] Jiang, L. and Zhang, J. Biodegradable and biobased polymer., Applied plastic engineering handbook, pp. 149-150, USA: Elsevier Inc, 2012.
- [9] Ren, J. Modification of PLA. Biodegradable poly(lactic acid): synthesis, modification, processing and Application, pp. 38-104, Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [10] Sodergard, A. and Stolt, M. Properties of lactic acid based polymers and correlation with composition. Progress in polymer science 27 (2002): 1123-1163.
- [11] Anderson, K. S., Schrek, K. M. and Hillmyer, E. M. A. Toughening polylactide. Polymer reviews 48: 85-108, 2008.
- [12] Sanook. น้ำมันถั่วเหลือง. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: <http://guru.sanook.com/pedia/topic/น้ำมันถั่วเหลือง/> [26 มกราคม 2556]

- [13] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนาปนนท์. Soybean oil/น้ำมันถั่วเหลือง. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2851/soybean-oil น้ำมันถั่วเหลือง [26 มกราคม 2556]
- [14] Thaigoodview. ไตรเอซิลกลีเซอรอล. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: www.thaigoodview.com/library/contest2552/type2/science04/28/P_Untitled-25.html [26 มกราคม 2556]
- [15] Thaieditorial. คุณสมบัติของไขมันและน้ำมัน. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: www.thaieditorial.com/คุณสมบัติของไขมันและน้ำมัน/ [26 มกราคม 2556]
- [16] Coursewares. สมบัติทางกายภาพ. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: <http://coursewares.mju.ac.th:81/e-learning50/FT320/035.htm> [26 มกราคม 2556]
- [17] Wikipedia. แป้งมันสำปะหลัง. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: <http://th.wikipedia.org/wiki/แป้งมันสำปะหลัง> [26 มกราคม 2556]
- [18] ศูนย์วิจัยมันสำปะหลังและผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: http://web.sut.ac.th/cassava/index.php?name=10cas_technology&file=readknowledge&id=13 [26 มกราคม 2556]
- [19] สำนักหอสมุดมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. บทที่ 2 เคมีและสมบัติของแป้ง. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter2.html> [26 มกราคม 2556]
- [20] Taradkaset. ประโยชน์ของมันสำปะหลัง. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: <http://blog.taradkaset.com/ประโยชน์ของมันสำปะหลัง-2/> [26 มกราคม 2556]
- [21] Wikipedia. Maleic anhydride. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/Maleic_anhydride [26 มกราคม 2556]
- [22] Ineos. Maleic anhydride. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: <http://www.ineostechnologies.com/77-process.htm> [26 มกราคม 2556]
- [23] Chembook. Chapter 21: predicting reactions. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: <http://www.chembook.co.uk/chap21.htm> [26 มกราคม 2556]
- [24] MacroG.Copolymers. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: <http://pslc.ws/macrog/copoly.htm> [27 มกราคม 2556]

- [25] Shi, D., Yang, J., Yao, Z., Wang, Y., Huang, H., Jing, W., Yin, J. and Costa, G. Functionalization of isotactic polypropylene with maleic anhydride by reactive extrusion: mechanism of melt grafting. Polymer 42 (2001): 5549-5557.
- [26] สมจิตต์ ตั้งชัยวัฒนา กรมวิทยาศาสตร์บริการ. พอลิเมอร์ผสม. [ออนไลน์]. 2548. แหล่งที่มา: http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/cp_5_2548_polymer_blend.pdf
[27 มกราคม 2556]
- [27] รัชนี ศรีสุข. Extrusion Process. เอกสารประกอบการสอนวิชาการกระบวนการผลิตทางพอลิเมอร์, หน้า 12-14: คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [28] Mount, E. M. Extrusion Process. Plastics engineering handbook, pp. 227-266, USA: Elsevier Inc., 2011.
- [29] Michaeli, W. Extrusion. Plastics processing an introduction, pp. 84-96, Germany: Carl Hanser Verlag, 1992.
- [30] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. การอัดขึ้นรูป. [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา: [www.media.rmutt.ac.th/Research/Research-Thesis/งานวิจัย%202554%20\(ปี%2052\)/วิทยานิพนธ์52/118591/6+บทที่%20\(3-31\).doc](http://www.media.rmutt.ac.th/Research/Research-Thesis/งานวิจัย%202554%20(ปี%2052)/วิทยานิพนธ์52/118591/6+บทที่%20(3-31).doc) [28 มกราคม 2556]
- [31] Rubbercenter. Infrared spectroscopy; IR. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: www.rubbercenter.org/informationcenter/file/magazine12.pdf
[28 มกราคม 2556]
- [32] Naranjo, A., Noriega, M. del P., Osswald, T., Roldán-Alzate, A. and Sierra, J. D. Fourier transform infrared spectroscopy. Plastics testing and characterization industrial application, pp. 7-17, USA: Hanser Gardner Publications Inc., 2008.
- [33] Naranjo, A., Noriega, M. del P., Osswald, T., Roldán-Alzate, A. and Sierra, J. D. Magnetic properties. Plastics testing and characterization industrial application, pp. 338-339, USA: Hanser Gardner Publications Inc., 2008.
- [34] มหาวิทยาลัยรามคำแหง. โปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: <http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM328/CM328-11.pdf>
[29 มกราคม 2556]

- [35] Chem.wisc. นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตรัม. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: <http://www.chem.wisc.edu/areas/reich/handouts/chem343-345/345-nmr-handout.pdf> [29 มกราคม 2556]
- [36] ดวงดาว อาจองค์. Thermogravimetric analysis. เอกสารประกอบการสอนวิชาการตรวจสอบและการวิเคราะห์พอลิเมอร์, หน้า 5-17: คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [37] รัชนา ศิริสุข. Thermal analysis for polymer characterization. เอกสารประกอบการสอนวิชาการตรวจสอบพอลิเมอร์, หน้า 5-37: คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [38] คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลพอลิเมอร์. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: [http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/download/MTT-656 Chapter 3 Molecular weight analysis.pdf](http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/download/MTT-656%20Chapter%203%20Molecular%20weight%20analysis.pdf) [30 มกราคม 2556]
- [39] ศูนย์กล้องจุลทรรศน์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. หลักการการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน. [ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา: <http://www.microscopic.center.sci.buu.ac.th/images/website/EM.pdf> [31 มกราคม 2556]
- [40] เสาวรจน์ ชัยจุลจิตร. วิทยาศาสตร์โพลิเมอร์ 1. เอกสารประกอบการสอนวิชาวิทยาศาสตร์โพลิเมอร์ 1, หน้า 75-81: คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [41] Nielsen, L. E. and Landel, R. F. Stress-strain test. Mechanical properties of polymer and composites (2nd ed.), pp. 6-9, USA: Marcel Dekker Inc., 1994.
- [42] มหาวิทยาลัยรามคำแหง. การทดสอบแรงดึง. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: <http://e-book.ram.edu/e-book/m/MY318%2851%29/MY318-6.pdf> [1 กุมภาพันธ์ 2556]
- [43] Odn.ne. ASTM D638. [ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา: [http://www1.odn.ne.jp/aal63880/image/DM_ASTM D638 1 TO 5.jpg](http://www1.odn.ne.jp/aal63880/image/DM_ASTM_D638_1_TO_5.jpg) [1 กุมภาพันธ์ 2556]
- [44] Nielsen, L. E. and Landel, R. F. Impact test. Mechanical properties of polymer and composites (2nd ed.), pp. 307-310, USA: Marcel Dekker Inc., 1994.
- [45] Science and Engineering Café on the net. Calculation of Absorbed Energy on Charpy Impact Test, Izod Impact Strength Test. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา:

- http://www.saecanet.com/calculation_page/000380_000509_Charpy_impact_test.php [1 กุมภาพันธ์ 2556]
- [46] Li, H. and Huneault, M. A. Effect of nucleation and plasticization on the crystallization of poly(lactic acid). *Polymer* 48 (2007): 6855-6866.
- [47] Chen, L., Qiu, X., Xie, Z., Hong, Z., Sun, J., Chen, X. and Jing, X. Poly(l-lactide)/starch blends compatibilized with poly(l-lactide)-g-starch copolymer. *Carbohydrate Polymers* 65 (2006): 75-80.
- [48] Huneault, M. A. and Li, H. Morphology and properties of compatibilized polylactide/thermoplastic starch blends. *Polymer* 48 (2007): 270-280.
- [49] Wang, N., Yu, J. and Ma, X. Preparation and characterization of thermoplastic starch/PLA blends by one-step reactive extrusion. *Polymer International* 24 (2007): 1440-1447.
- [50] Tran, P., Seybold, K., Graiver, D. And Narayan, R. Free radical maleation of soybean oil *via* a single-step process. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 82 (2005): 189-194.
- [51] Natureworks. *Ingeo™ biopolymer 2003D*. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: www.natureworkslc.com/~media/Technical_Resources/Technical_Data_Sheets/TechnicalDataSheet_2003D_FFP-FSW_pdf.pdf [4 กุมภาพันธ์ 2556]
- [52] Learners. *สูตรโครงสร้างแป้ง*. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: http://cdn.learners.in.th/assets/media/files/000/083/300/original_Starch_GOP_Assay_Kit.gif?1285569005 [4 กุมภาพันธ์ 2556]
- [53] ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์. *Maleic anhydride*. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?VID=159> [4 กุมภาพันธ์ 2556]
- [54] Sigmaaldrich. *Dicumyl peroxide*. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/329541?lang=en®ion=TH> [4 กุมภาพันธ์ 2556]
- [55] Wikipedia. *โซดาไฟ*. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: <http://th.wikipedia.org/wiki/โซดาไฟ> [4 กุมภาพันธ์ 2556]

- [56] ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์. Acetone. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?VID=10> [4 กุมภาพันธ์ 2556]
- [57] Miyauchi, K. and Saito, K. High-sensitivity determination of graft ratio of maleic anhydride-grafted polyolefin by anhydride methylation in supercritical methanol followed by ¹H NMR spectroscopy. Polymer 52 (2011): 3519-3521.
- [58] Shi, Q., Chen, C., Gao, L., Jiao, L. Xu, H. and Guo, W. Physical and degradation properties of binary or ternary blends composed of poly(lactic acid), thermoplastic starch and GMA grafted POE. Degradation and Stability 96 (2011): 175-182.
- [59] Jang, W. Y., Shin, B. Y., Lee, T. J. and Narayan, R. Thermal properties and morphology of biodegradable PLA/starch compatibilized blends. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 13 (2007): 457-464.
- [60] Henton, D. E., Gruber, P., Lunt, J. and Randall, J. Polylactic acid technology. Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites 16 (2005): 527-578.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิเคราะห์ค่ากรดด้วยเทคนิคไตเตรชัน

การวิเคราะห์หาค่ากรดของซัคซินิกแอนไฮไดรด์ที่ห้อยบนน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตด้วยเทคนิคไตเตรชัน โดยการต้มน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอต 1 กรัม ในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร ในระบบปิด ที่อุณหภูมิ 100°C กวนตลอดเวลา เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หยดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน 1 มิลลิลิตร เพื่อใช้เป็นอินดิเคเตอร์ แล้วทำการไตเตรตกับโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 N ตามมาตรฐาน ASTM D180 โดยมีสูตรการคำนวณค่ากรดดังนี้

$$\text{Acid value} = \frac{A \times N \times (\text{M.W. of NaOH})}{W}$$

โดยที่ A = ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้ (ml)

N = ความเข้มข้นของ NaOH (N)

W = น้ำหนักของสารตัวอย่าง (g)

- ค่ากรดของน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10%

สูตร	ไตเตรตครั้งที่	ค่ากรด
SOMA 10%	1	19.05
	2	18.87
	3	17.14
	เฉลี่ย	18.35
	SD	1.05

- ค่ากรดของน้ำมันถั่วเหลืองมาลิเอตที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 20%

สูตร	ไตเตรตครั้งที่	ค่ากรด
SOMA 20%	1	55.56
	2	54.37
	3	53.33
	เฉลี่ย	54.42
	SD	1.12

ภาคผนวก ข

สมบัติด้านแรงดึง

ทดสอบความต้านแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) ของบริษัท Lloyd รุ่น LR 100K (West Sussex, UK) โดยใช้โหลดเซลล์ (load cell) 100 กิโลนิวตัน ระยะหัวจับขึ้นทดสอบ 115 มิลลิเมตร และความเร็วในการดึงขึ้นทดสอบ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638

1. ค่าความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิแล็กทิกแอซิด

ชิ้นงานที่	ความต้านแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)
1	0.61	13.61
2	0.63	13.73
3	0.61	13.95
4	0.64	10.74
5	0.60	11.15
เฉลี่ย	0.62	12.64
SD	0.02	1.56

2. ค่าความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอริกคอมพอสิตของพอลิแล็กทิกแอซิด/แป้งมันสำปะหลัง ที่อัตราส่วน 90:10

ชิ้นงานที่	ความต้านแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)
1	0.75	9.55
2	0.70	7.24
3	0.63	9.64
4	0.46	6.54
5	0.41	6.54
เฉลี่ย	0.59	7.90
SD	0.15	1.57

3. ค่าความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติก แอซิด/แป้งมันสำปะหลัง ที่อัตราส่วน 80:20

ชิ้นงานที่	ความต้านแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)
1	0.59	6.93
2	0.43	8.01
3	0.61	8.72
4	0.61	8.13
5	0.54	6.45
เฉลี่ย	0.56	7.65
SD	0.08	0.93

4. ค่าความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติก แอซิด/แป้งมันสำปะหลัง ที่อัตราส่วน 70:30

ชิ้นงานที่	ความต้านแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)
1	0.41	7.22
2	0.83	9.40
3	0.57	7.28
4	0.35	6.10
5	0.36	7.19
เฉลี่ย	0.50	7.44
SD	0.20	1.20

5. ค่าความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติก แอซิด/แป้งมันสำปะหลัง ที่อัตราส่วน 60:40

ชิ้นงานที่	ความต้านแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)
1	0.86	6.65
2	0.42	5.43
3	0.50	6.36
4	0.53	6.54
5	0.55	5.44
เฉลี่ย	0.57	6.08
SD	0.17	0.60

6. ค่าความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติก แอซิด/แป้งมันสำปะหลัง ที่อัตราส่วน 50:50

ชิ้นงานที่	ความต้านแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)
1	1.31	8.08
2	1.19	8.35
3	0.94	9.28
4	0.95	8.06
5	0.95	8.06
เฉลี่ย	1.07	8.37
SD	0.17	0.52

7. ค่าความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลืองมาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10% ที่อัตราส่วน 90:10

ชิ้นงานที่	ความต้านแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)
1	2.25	12.71
2	2.34	13.18
3	2.19	12.87
4	2.21	12.80
5	2.12	12.13
เฉลี่ย	2.22	12.74
SD	0.08	0.39

8. ค่าความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลืองมาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10% ที่อัตราส่วน 80:20

ชิ้นงานที่	ความต้านแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)
1	1.79	11.41
2	1.77	10.41
3	1.78	11.39
4	1.78	11.88
5	1.80	11.16
เฉลี่ย	1.78	11.25
SD	0.01	0.54

9. ค่าความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติก แอซิด/น้ำมันถั่วเหลืองมาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 10% ที่อัตราส่วน 70:30

ชิ้นงานที่	ความต้านแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)
1	1.28	11.67
2	1.34	10.79
3	1.33	10.29
4	1.29	10.82
5	1.27	11.00
เฉลี่ย	1.30	10.91
SD	0.03	0.50

10. ค่าความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติก แอซิด/น้ำมันถั่วเหลืองมาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 10% ที่อัตราส่วน 60:40

ชิ้นงานที่	ความต้านแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)
1	0.86	7.87
2	0.60	8.25
3	0.69	8.90
4	0.75	9.32
5	0.73	8.43
เฉลี่ย	0.69	8.55
SD	0.06	0.57

11. ค่าความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติก แอซิด/น้ำมันถั่วเหลืองมาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 10% ที่อัตราส่วน 50:50

ชิ้นงานที่	ความต้านแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)
1	0.71	5.65
2	0.60	5.81
3	0.69	5.73
4	0.75	6.83
5	0.73	6.99
เฉลี่ย	0.69	6.20
SD	0.06	0.65

12. ค่าความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติก แอซิด/น้ำมันถั่วเหลืองมาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 20% ที่อัตราส่วน 90:10

ชิ้นงานที่	ความต้านแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)
1	2.38	11.84
2	2.30	11.72
3	2.54	12.85
4	2.53	12.73
5	2.49	12.65
เฉลี่ย	2.45	12.36
SD	0.10	0.54

13. ค่าความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติก แอซิด/น้ำมันถั่วเหลืองมาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 20% ที่อัตราส่วน 80:20

ชิ้นงานที่	ความต้านแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)
1	1.91	11.45
2	1.84	12.96
3	1.95	12.04
4	1.81	12.67
5	1.93	12.75
เฉลี่ย	1.89	12.37
SD	0.06	0.62

14. ค่าความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติก แอซิด/น้ำมันถั่วเหลืองมาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 20% ที่อัตราส่วน 70:30

ชิ้นงานที่	ความต้านแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)
1	1.71	8.37
2	1.65	9.65
3	1.61	10.11
4	1.65	11.50
5	1.63	9.71
เฉลี่ย	1.65	9.87
SD	0.04	1.13

15. ค่าความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติก แอซิด/น้ำมันถั่วเหลืองมาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 20% ที่อัตราส่วน 60:40

ชิ้นงานที่	ความต้านแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)
1	7.14	1.15
2	6.61	1.06
3	7.55	1.24
4	8.21	1.10
5	7.62	1.22
เฉลี่ย	7.43	1.15
SD	0.59	0.08

16. ค่าความต้านแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติก แอซิด/น้ำมันถั่วเหลืองมาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 20% ที่อัตราส่วน 50:50

ชิ้นงานที่	ความต้านแรงดึง (MPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)
1	0.98	6.70
2	0.95	7.30
3	0.95	7.64
4	0.98	6.81
5	0.97	6.88
เฉลี่ย	0.96	7.07
SD	0.01	0.39

ภาคผนวก ค

ความทนแรงกระแทกแบบไอซอด

ทดสอบความทนแรงกระแทกด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact tester) ของบริษัท GOTECH (Taichung City, Taiwan) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256

1. ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิแล็กติกแอซิด

ชิ้นงานที่	ความทนแรงกระแทก (J/m)
1	2.25
2	3.46
3	3.36
4	3.46
5	2.66
เฉลี่ย	3.04
SD	0.55

2. ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอริกคอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/แป้งมันสำปะหลัง ที่อัตราส่วน 90:10

ชิ้นงานที่	ความทนแรงกระแทก (J/m)
1	2.50
2	3.61
3	2.67
4	1.68
5	2.64
เฉลี่ย	2.62
SD	0.69

3. ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/แป้งมันสำปะหลัง
ที่อัตราส่วน 80:20

ชิ้นงานที่	ความทนแรงกระแทก (J/m)
1	0.86
2	0.87
3	0.87
4	0.86
5	0.87
เฉลี่ย	0.87
SD	0.01

4. ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/แป้งมันสำปะหลัง
ที่อัตราส่วน 70:30

ชิ้นงานที่	ความทนแรงกระแทก (J/m)
1	0.87
2	0.83
3	0.85
4	0.85
5	0.86
เฉลี่ย	0.85
SD	0.01

5. ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/แป้งมันสำปะหลัง
ที่อัตราส่วน 60:40

ชิ้นงานที่	ความทนแรงกระแทก (J/m)
1	0.80
2	0.86
3	1.70
4	0.88
5	1.36
เฉลี่ย	1.12
SD	0.39

6. ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/แป้งมันสำปะหลัง
ที่อัตราส่วน 50:50

ชิ้นงานที่	ความทนแรงกระแทก (J/m)
1	1.75
2	0.85
3	1.66
4	0.83
5	1.70
เฉลี่ย	1.36
SD	0.47

7. ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลือง มาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10% ที่อัตราส่วน 90:10

ชิ้นงานที่	ความทนแรงกระแทก (J/m)
1	5.08
2	5.21
3	5.08
4	5.24
5	5.98
เฉลี่ย	5.32
SD	0.38

8. ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลือง มาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10% ที่อัตราส่วน 80:20

ชิ้นงานที่	ความทนแรงกระแทก (J/m)
1	5.12
2	4.46
3	5.12
4	5.28
5	6.03
เฉลี่ย	5.20
SD	0.56

9. ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลือง มาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10% ที่อัตราส่วน 70:30

ชิ้นงานที่	ความทนแรงกระแทก (J/m)
1	4.32
2	4.29
3	3.60
4	3.55
5	3.53
เฉลี่ย	3.86
SD	0.41

10. ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลือง มาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10% ที่อัตราส่วน 60:40

ชิ้นงานที่	ความทนแรงกระแทก (J/m)
1	3.40
2	2.58
3	2.65
4	2.60
5	3.40
เฉลี่ย	2.93
SD	0.43

11. ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลือง มาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10% ที่อัตราส่วน 50:50

ชั้นงานที่	ความทนแรงกระแทก (J/m)
1	2.60
2	1.80
3	2.56
4	1.81
5	1.79
เฉลี่ย	2.11
SD	0.43

12. ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลือง มาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 20% ที่อัตราส่วน 90:10

ชั้นงานที่	ความทนแรงกระแทก (J/m)
1	3.36
2	3.47
3	3.36
4	3.33
5	3.50
เฉลี่ย	3.40
SD	0.08

13. ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลือง มาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 20% ที่อัตราส่วน 80:20

ชั้นงานที่	ความทนแรงกระแทก (J/m)
1	5.04
2	4.29
3	5.98
4	5.06
5	4.23
เฉลี่ย	4.92
SD	0.71

14. ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลือง มาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 20% ที่อัตราส่วน 70:30

ชั้นงานที่	ความทนแรงกระแทก (J/m)
1	3.27
2	3.33
3	3.30
4	3.47
5	3.30
เฉลี่ย	3.33
SD	0.08

15. ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลือง มาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 20% ที่อัตราส่วน 60:40

ชิ้นงานที่	ความทนแรงกระแทก (J/m)
1	2.59
2	2.50
3	2.65
4	1.68
5	2.58
เฉลี่ย	2.40
SD	0.41

16. ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลือง มาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 20% ที่อัตราส่วน 50:50

ชิ้นงานที่	ความทนแรงกระแทก (J/m)
1	1.69
2	1.73
3	1.63
4	1.72
5	1.65
เฉลี่ย	1.68
SD	0.04

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนพรุจ เคียงกิติวรรณ เกิดเมื่อวันที่ 10 พฤษภาคม พ.ศ. 2531 ที่ จ.นครปฐม สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2552 หลังจากนั้น เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2553 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2555