

คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิดรีไซเคิล/เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์/โพลลาสโพนต์เติม
ด้วยสารขยายสายโซ่



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPOSITES OF RECYCLED POLYLACTIC ACID/THERMOPLASTIC POLYETHER-
ESTER/WOLLASTONITE FILLED WITH CHAIN EXTENDER



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Petrochemistry and Polymer Science
Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิดรีไซเคิล/เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์/โพลลาสโตนัดเดิมด้วยสารขยายสายโซ่
โดย	นายสุรพันธ์ หงสุรพันธ์
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมทิทธิสุทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมทิทธิสุทธิ์)

..... กรรมการ
(ดร.อรทัย บุญดำเนิน)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร)

สุรพันธ์ หงสุรพันธ์ : คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิดรีไซเคิล/เทอร์มอพลาสติกพอลิ
อีเทอร์-เอสเทอร์/โพลลาสโตนต์เติมด้วยสารขยายสายโซ่ . (COMPOSITES OF
RECYCLED POLYLACTIC ACID/THERMOPLASTIC POLYETHER-
ESTER/WOLLASTONITE FILLED WITH CHAIN EXTENDER) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ.
ดร.อัญญาพร บุญมทิทธิสุทธิ

ในงานวิจัยนี้ คอมพอสิตของพอลิแล็กติกรีไซเคิล/เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-
เอสเทอร์/โพลลาสโตนต์ได้ถูกพัฒนาด้วยการเติมสารขยายสายโซ่จังก์ว โดยชั้นแรกพอลิเมอร์ผสม
พอลิแล็กติกแอซิดรีไซเคิล/เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์ที่อัตราส่วน 80/20 ถูกผสมด้วย
สารขยายสายโซ่จังก์วที่อัตราส่วนต่าง ๆ (0.5-2 ส่วนโดยน้ำหนักต่อเรซินผสมร้อยละ) เพื่อ
วิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ธรรมชาติเชิงกล สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน
พบว่า การเติมสารขยายสายโซ่จังก์ว ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ความเข้ากันได้ระหว่าง
พอลิเมอร์ผสม และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น ขณะที่เสถียรภาพทางความร้อนมีค่า
ลดลง โดย 80/20 พอลิแล็กติกแอซิดรีไซเคิล/เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์ที่เติมสาร
ขยายสายโซ่จังก์วที่ปริมาณ 1.5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อเรซินผสมร้อยละมีความทนแรงกระแทก
และการยืดตัว ณ จุดขาดสูงสุด จึงถูกเลือกไปเตรียมคอมพอสิตกับโพลลาสโตนต์ที่ปริมาณ 5, 10,
15 และ 20 ส่วนโดยน้ำหนักต่อเรซินผสมร้อยละ พบว่า คอมพอสิตได้รับการปรับปรุง
ยังสัมมอดูลัส ความทนแรงดัดโค้ง มอดูลัสการดัดโค้ง เสถียรภาพทางความร้อน และการหลอมหยุด
ขณะที่ความทนแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาด มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ 80/20
พอลิแล็กติกแอซิดรีไซเคิล/เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์ที่เติมสารขยายสายโซ่จังก์วที่
ปริมาณ 1.5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อเรซินผสมร้อยละอย่างไรก็ตาม คอมพอสิตที่เติมโพลลาสโตนต์ที่
ปริมาณ 20 ส่วนโดยน้ำหนักต่อเรซินผสมร้อยละมีสมบัติที่ดีที่สุด

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิ ลายมือชื่อนิสิต

เมอร์

ปีการศึกษา 2564 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6370214523 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: recycled poly(lactic acid), R-PLA, thermoplastic poly(ether-ester),
TPEE, wollastonite, Joncryl

Suraphan Hongsuraphan : COMPOSITES OF RECYCLED POLYLACTIC
ACID/THERMOPLASTIC POLYETHER-ESTER/WOLLASTONITE FILLED WITH
CHAIN EXTENDER. Advisor: Asst. Prof. ANYAPORN BOONMAHITTHISUD, Ph.D.

In this research, composites of recycled poly(lactic acid) (R-PLA)/thermoplastic poly(ether-ester (TPEE)/wollastonite (WT) were developed with Joncryl chain extender. The R-PLA/TPEE at the ratio of 80/20 was first melted with various contents of Joncryl (0.5–2 parts per hundred of resins, phr) to analyze in terms of average molecular weight, melt flow rate, mechanical properties and thermal properties. The addition of Joncryl chain extender tended to enhance the average molecular weight, the compatibility of the polymer blend and mechanical properties, but at the expense of reduction of the thermal stability of the blend. Among the R-PLA/TPEE blend filled with Joncryl chain extender, the 80/20/1.5 ratio of the R-PLA/TPEE/Joncryl blend exhibited the optimal impact strength and elongation at break. This blend was chosen to prepare composites with WT at 5, 10, 15 and 20 phr. The Young's modulus, flexural strength, flexural modulus, thermal stability and melt dipping of the composites were then improved, while tensile strength and elongation at break were decreased as compared with the 80/20/1.5 ratio of the R-PLA/TPEE/Joncryl blend. However, the composite containing 20 WT had the optimum properties.

Field of Study: Petrochemistry and
Polymer Science

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์อย่างสมบูรณ์ได้ เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำทางวิชาการ ตลอดจนความเอื้อเฟื้อในด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ และสถานที่ในการทำงานวิจัยจากท่านผู้ทรงคุณวุฒิหลายท่าน ข้าพเจ้าจึงขอกราบขอบพระคุณคุณอาจารย์ บุคคล และหน่วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังรายนามต่อไปนี้

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัญญพร บุญมทิตธิสุทธิ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้แนะนำแนวทางการดำเนินงาน ให้คำแนะนำและคำปรึกษาทางวิชาการ รวมทั้งการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

2. รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. อรทัย บุญดำเนิน และรองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร กรรมการสอบภายในและภายนอก ในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาให้คำแนะนำและคำปรึกษา ตลอดจนตรวจสอบความถูกต้องในการจัดทำวิทยานิพนธ์

3. บริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน) สาขา สุขสวัสดิ์ ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือ และสถานที่ในการทำงานวิจัย

4. ศูนย์นวัตกรรมด้านการออกแบบและวิศวกรรมเพื่อการผลิต บัณฑิตวิทยาลัย วิศวกรรมศาสตรนานาชาติสิรินธรไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการทำงานวิจัย

5. เจ้าหน้าที่ภาควิชาวัสดุศาสตร์ และภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการทำงานวิจัย

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ มารดา และขอขอบคุณ รุ่นพี่และเพื่อน ๆ หลักสูตรปิโตรเคมี และวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์และภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้กำลังใจ คำปรึกษา และการสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

สุรพันธ์ หงสุรพันธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ.....	3
2.1.1 กระบวนการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพ.....	3
2.2 พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA)	4
2.2.1 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด	5
2.2.2 ข้อดีและข้อเสียของพอลิแล็กติกแอซิด	7
2.3 การรีไซเคิลพลาสติก	8
2.4 เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์	10
2.4.1 สมบัติของเทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์.....	10
2.5 สารขยายสายโซ่.....	12
2.6 ไวลลาสโทไนต์ (Wollastonite).....	13
2.6.1 สมบัติของไวลลาสโทไนต์.....	13

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	16
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	16
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	16
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ.....	16
3.4 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง	19
3.5 ขั้นตอนการทดลอง.....	20
3.5.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต	20
3.6 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบ.....	22
3.7 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต.....	23
3.7.1 วิเคราะห์หาค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (GPC).....	23
3.7.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR).....	23
3.7.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโกปี (NMR).....	24
3.7.4 วิเคราะห์ดรรชนีการหลอมไหล (MFI)	25
3.7.5 การทดสอบความทนแรงกระแทก (impact strength).....	25
3.7.6 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง (tensile properties).....	26
3.7.7 การทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength).....	28
3.7.8 การทดสอบสมบัติความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell hardness).....	28
3.7.9 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	29
3.7.10 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC)	29
3.7.11 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA).....	31
3.7.12 การทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อน (HDT).....	31
3.7.13 การทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อน (VST).....	32
3.7.14 การทดสอบการหลอมหยด	32

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	33
4.1 ลักษณะขึ้นทดสอบ	33
4.2 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย	35
4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของชิ้นงานทดสอบ	36
4.4 การวิเคราะห์การเกิดอันตรกิริยา.....	38
4.5 ดรรชนีการหลอมไหล (MFI).....	43
4.6 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ.....	44
4.6.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl.....	45
4.6.2 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิต R-PLA/TPEE/Joncryl/WT.....	51
4.7 สัณฐานวิทยา (morphology).....	57
4.8 สมบัติทางความร้อนของชิ้นทดสอบ	61
4.8.1 พฤติกรรมการเกิดผลึก (crystallinity behavior)	61
4.8.2 เสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability)	65
4.8.3 อุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อน (heat distortion temperature)	69
4.8.4 อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อน (vicat softening temperature).....	72
4.9 การหลอมหยุด.....	74
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	76
5.1 สรุปผลการทดลอง	76
5.2 ข้อเสนอแนะ	79
บรรณานุกรม.....	80
ประวัติผู้เขียน.....	110

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม.....	20
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของคอมพอลิเมอร์.....	21
ตารางที่ 4.1 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และ พอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl.....	35
ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งเลขคลื่นและหมู่ฟังก์ชันของ R-PLA และ TPEE ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR... 37	37
ตารางที่ 4.3 ตำแหน่งเลขคลื่นและหมู่ฟังก์ชันของ R-PLA, TPEE และ WT ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR.....	38
ตารางที่ 4.4 แสดงตำแหน่งพีกและความเข้มพีกที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค ¹ H-NMR ของ R-PLA และ TPEE	42
ตารางที่ 4.5 สมบัติเชิงกลของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl ที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....	45
ตารางที่ 4.6 สมบัติเชิงกลของคอมพอลิเมอร์ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ด้วย WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....	51
ตารางที่ 4.7 พฤติกรรมการเกิดผลึกของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE, พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl และ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอลิเมอร์.....	61
ตารางที่ 4.8 เสถียรภาพทางความร้อนของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE, พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl และ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอลิเมอร์.....	65
ตารางที่ 4.9 อุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl ที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....	69
ตารางที่ 4.10 อุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของคอมพอลิเมอร์ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ด้วย WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ	71
ตารางที่ 4.11 อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl ที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....	72

ตารางที่ 4.12 อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนของคอมพอสิต 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl
ด้วย WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ..... 73



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ PLA.....	5
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ TPEE	10
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของ Joncryl.....	12
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	19
รูปที่ 3.2 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่.....	21
รูปที่ 3.3 เครื่องฉีดแบบ.....	22
รูปที่ 3.4 เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง	23
รูปที่ 3.5 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์.....	24
รูปที่ 3.6 เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี.....	24
รูปที่ 3.7 เครื่องวัดดรรชนีการลอมไพล์.....	25
รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก.....	26
รูปที่ 3.9 ชั้นทดสอบความทนแรงกระแทก.....	26
รูปที่ 3.10 ขนาดของชั้นทดสอบสมบัติความทนแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 ประเภทที่ 1....	27
รูปที่ 3.11 ชั้นทดสอบสมบัติความทนแรงดึง.....	27
รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล.....	27
รูปที่ 3.13 ชั้นทดสอบความทนแรงดัดโค้ง.....	28
รูปที่ 3.14 การทดสอบความแข็งแบบรีอคเวลล์.....	29
รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	29
รูปที่ 3.16 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อนและเครื่องดีฟเพอเรนเซียสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์. 31	31
รูปที่ 3.17 เครื่องทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนและอุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อน.....	32

รูปที่ 4.1 ชั้นทดสอบ (a) R-PLA, (b) TPEE, (c) พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE (80/20) และ พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE ที่เติมด้วย Joncryl ที่อัตราส่วน (w/w/phr) (d) 80/20/0.5, (e) 80/20/1, (f) 80/20/1.5 และ (g) 80/20/2.....	33
รูปที่ 4.2 ชั้นทดสอบของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิตในปริมาณ WT: (a) 5, (b) 10, (c) 15 และ (d) 20 phr.....	34
รูปที่ 4.3 FT-IR สเปกตรัมของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl.....	36
รูปที่ 4.4 FT-IR สเปกตรัมของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต.....	37
รูปที่ 4.5 ¹ H-NMR สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE.....	40
รูปที่ 4.6 ¹ H-NMR สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl.....	40
รูปที่ 4.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง R-PLA กับสารขยายสายโซ่ Joncryl.....	41
รูปที่ 4.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง TPEE กับสารขยายสายโซ่ Joncryl.....	41
รูปที่ 4.9 โครงสร้างทางเคมีของ R-PLA-Joncryl-TPEE โคพอลิเมอร์.....	41
รูปที่ 4.10 ดรรชนีการลอมไพล์ของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และ พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl.....	43
รูปที่ 4.11 ดรรชนีการลอมไพล์ของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต.....	43
รูปที่ 4.12 ความทนแรงกระแทกของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และ พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl.....	45
รูปที่ 4.13 สมบัติความทนแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ย้งสัมมอดูลัส, (c) การยืดตัว ณ จุดขาดของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl..	47
รูปที่ 4.14 สมบัติความทนแรงดัดโค้ง: (a) ความทนแรงดัดโค้ง, (b) มอดูลัสการดัดโค้งของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl.....	49
รูปที่ 4.15 ความแข็งแบบรีออคเวลล์ของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และ พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl.....	50
รูปที่ 4.16 ความทนแรงกระแทกของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต.....	52

รูปที่ 4.17 สมบัติความทนแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยั่งส์มอดุลัส, (c) การยืดตัว ณ จุดขาดของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต.....	53
รูปที่ 4.18 สมบัติความทนแรงดัดโค้ง: (a) ความทนแรงดัดโค้ง, (b) มอดุลัสการดัดโค้งของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต.....	55
รูปที่ 4.19 ความแข็งแบบรีอเคลลส์ของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต.....	56
รูปที่ 4.20 สันฐานวิทยาของ (a) R-PLA, (b) TPEE, พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE ที่อัตราส่วน (c) 80/20 และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl ที่อัตราส่วน (d) 80/20/0.5, (e) 80/20/1, (f) 80/20/1.5 และ (g) 80/20/2 ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	58
รูปที่ 4.21 สันฐานวิทยาของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิตที่ปริมาณ WT: (a) 0, (b) 5, (c) 10, (d) 15 และ (e) 20 phr ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	60
รูปที่ 4.22 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl.....	62
รูปที่ 4.23 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต.....	64
รูปที่ 4.24 (a) TGA และ (b) DTG เทอร์โมแกรมของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl.....	66
รูปที่ 4.25 (a) TGA และ (b) DTG เทอร์โมแกรมของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต...	68
รูปที่ 4.26 อุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl.....	70
รูปที่ 4.27 อุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต.....	71
รูปที่ 4.28 อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl.....	72
รูปที่ 4.29 อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต.....	74
รูปที่ 4.30 ชิ้นงานหลังทดสอบการหลอมหยดของ (a) R-PLA, (b) พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE, (c) พอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl และ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ (d) 5, (e) 10, (f) 15 และ (g) 20 phr.....	75

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เนื่องจากสถานการณ์ปัญหาเรื่องสิ่งแวดล้อมที่มีเพิ่มมากขึ้น ทำให้มนุษย์หันมาให้ความสำคัญกับการลดการใช้พลาสติกประเภทครั้งเดียว (single use plastics) รวมถึงการแสวงหาวัสดุทางชีวภาพเข้ามาใช้ทดแทน จะเห็นได้ว่าพลาสติกชีวภาพเข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านบรรจุภัณฑ์อาหารและอุปกรณ์การแพทย์ จึงทำให้พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) ได้รับความสนใจอย่างมากในการใช้งานเป็นวัสดุชีวภาพทางเลือกเนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดเป็นวัสดุที่ไม่ตกค้างในธรรมชาติ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพและไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต พอลิแล็กติกแอซิดสามารถย่อยสลายกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติภายหลังการใช้งาน เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดผลิตจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น ข้าวโพด อ้อย และมันสำปะหลัง เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้ทดแทนพอลิเมอร์ที่ผลิตจากปิโตรเลียมได้อีกด้วย ซึ่งพอลิแล็กติกแอซิดเป็นพลาสติกที่มีความแข็งแรง ใส และความสามารถในการซึมผ่านที่ดีใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตและพอลิสไตรีน ทำให้ปริมาณการใช้งานของพอลิแล็กติกแอซิดสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจส่งผลต่อการสะสมของปริมาณขยะที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้พอลิแล็กติกแอซิดยังมีการย่อยสลายได้ยาก กล่าวคือต้องมีอุณหภูมิสูงพร้อมกับมีความชื้นสัมพัทธ์สูง ค่า pH ประมาณ 8.5 และมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม ซึ่งถือเป็นภาวะที่ทำให้การย่อยสลายทางชีวภาพมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเทียบกับภาวะในธรรมชาติทั่วไป ดังนั้นจึงสนใจจะแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการนำพอลิแล็กติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการผลิตแล้วมาเข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่หรือเรียกว่ากระบวนการรีไซเคิลซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานน้อย ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของพอลิเมอร์เดิมน้อยมาก อย่างไรก็ตามพอลิแล็กติกแอซิดสามารถเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนระหว่างกระบวนการขึ้นรูป โดยความร้อนจะเข้าไปทำลายสายโซ่โมเลกุลของพอลิแล็กติกแอซิดรีไซเคิลให้ขาดออกแบบอิสระ ทำให้ความยาวของสายโซ่โมเลกุลสั้นลงและมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง ส่งผลให้พอลิแล็กติกแอซิดรีไซเคิลมีสมบัติความทนแรงกระแทกต่ำและความเปราะเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ ดังนั้นการผสมพอลิแล็กติกแอซิดรีไซเคิลด้วยพอลิเมอร์ที่มีความเหนียวและยืดหยุ่น จึงเป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดรีไซเคิลที่ไม่ยุ่งยากและราคาถูก โดยในงานวิจัยนี้สนใจที่จะทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดรีไซเคิลด้วยการทำเป็นพอลิเมอร์ผสมกับเทอร์โมพลาสติก

พอลิอีเทอร์-เอสเทอร์ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกล ความยืดหยุ่นและความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี จึงเหมาะสำหรับการปรับปรุงสมบัติความเหนียวของพอลิแล็กติกแอซิด โดยทั่วไปเทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ อุปกรณ์ทางไฟฟ้าและชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการนำพอลิเมอร์ผสมไปเติมสารขยายสายโซ่ (chain extender) เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมหรือขยายสายโซ่ของพอลิเมอร์และช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับเทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์ โดยในงานวิจัยนี้ใช้สารขยายสายโซ่ Joncryl (styrene-acrylic multi-functional oligomeric chain extender, ADR) เป็นสารขยายสายโซ่ เนื่องจากสารขยายสายโซ่ Joncryl มีความเป็นพิษน้อย ไม่ระเหย และเป็นตัวเชื่อมประสานที่ดี

นอกจากนี้พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้จะถูกนำไปเตรียมเป็นคอมพอสิตกับโวลลาสโทไนต์ (wollastonite, WT) เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพที่สูญเสียไปของพอลิเมอร์ผสม โวลลาสโทไนต์เป็นแร่แคลเซียมซิลิเกต (calcium silicate, CaSiO_3) ที่มีโครงสร้างผลึกรูปเข็ม (needle-like) ที่ถูกนำไปใช้เป็นสารเสริมแรงในพลาสติกหลายประเภท เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน และพอลิไวนิลคลอไรด์ เป็นต้น เนื่องจากมีความทนทานสารเคมี เสถียรภาพทางความร้อนสูง มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ มีระดับความขรุขระและความแข็งแรงสูง ไม่มีพิษและราคาถูก

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์จากพอลิแล็กติกแอซิดรีไซเคิลให้มีสมบัติเชิงกลและความร้อนดีขึ้น โดยผสมพอลิแล็กติกแอซิดรีไซเคิล/เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์กับสารขยายสายโซ่ Joncryl อีกทั้งยังทำการเติมโวลลาสโทไนต์ เพื่อปรับปรุงสมบัติของคอมพอสิตที่เตรียมได้ หากงานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จจะเป็นการยืดอายุการใช้งานของคอมพอสิตและการนำมามวนกลับมาใช้ใหม่

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เตรียมคอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิดรีไซเคิล/เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์/โวลลาสโทไนต์เติมด้วยสารขยายสายโซ่ที่อัตราส่วนต่าง ๆ
2. ศึกษาผลของสารขยายสายโซ่และโวลลาสโทไนต์ต่อสมบัติกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตที่เตรียมได้

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ [1, 2]

พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพเป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้โดยการกระทำของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีในช่วงเวลาที่กำหนดและได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบง่าย ๆ ขนาดเล็กที่พบทั่วไปในธรรมชาติ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน และชีวมวลของจุลินทรีย์ โดยส่วนใหญ่จะย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 6 เดือน (180 วัน) ในสภาวะที่เหมาะสมเท่านั้น เช่น การจัดการด้วยจุลินทรีย์แบบเฉพาะ อุณหภูมิ ความชื้น และปริมาณออกซิเจนที่เหมาะสมเท่านั้น พลาสติกกลุ่มนี้ ได้แก่ พลาสติกสลายตัวได้ทางชีวภาพ (compostable plastic) ซึ่งหมายถึง พลาสติกที่ทำมาจากพืช เช่น ข้าวโพด อ้อย และมันสำปะหลัง ทำให้สามารถสลายตัวเป็นแร่ธาตุและสารประกอบในธรรมชาติหรือที่เรารู้จักกันในนามปุ๋ยหมัก โดยจะสามารถสลายตัวได้ดีในสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม ในการหมักปุ๋ยระดับอุตสาหกรรมหรือเครื่องหมักปุ๋ยจากเศษอินทรีย์ โดยทั่วไประบบทำปุ๋ยหมักแบบอุตสาหกรรมจะใช้ความร้อน 55–60 องศาเซลเซียส หากหมักแบบครัวเรือนต้องใช้เวลานานขึ้น ซึ่งหากทิ้งพลาสติกชนิดนี้ไว้ในสภาพแวดล้อมทั่วไปก็จะไม่สามารถย่อยสลายได้

2.1.1 กระบวนการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพ [3]

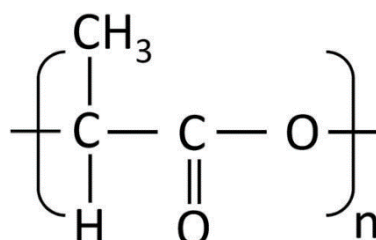
กระบวนการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพ เริ่มจากการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์และปัจจัยภายนอกที่ส่งผลให้พลาสติกชีวภาพแตกออกเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อย (biodegradation) หลังจากนั้นจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์ออกมาออกเซลล์เพื่อย่อยสลายพอลิเมอร์ของพลาสติกชีวภาพ (depolymerisation) กลายเป็นโมเลกุลเล็ก ๆ ซึ่งโมเลกุลที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายเหล่านี้จะถูกซึมผ่านเข้าไปในเซลล์ของจุลินทรีย์ผ่านทางเยื่อหุ้มเซลล์และส่งเข้าสู่กระบวนการสันดาป (assimilation) เพื่อนำไปใช้ในการสร้างพลังงานและมวลชีวภาพ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าพลาสติกที่ถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะถูกย่อยสลายได้ภายในระยะเวลาที่เร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ทั้งปัจจัยภายนอกและปัจจัยด้านสมบัติทางเคมีและกายภาพของพลาสติกแต่ละประเภท ยกตัวอย่างเช่น หากมีการนำพลาสติกที่ถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพไปฝังดินหรือทิ้งลงในระบบฝังกลบขยะ ปัจจัยภายนอกที่จะส่งผลต่ออัตราการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นหรือปริมาณน้ำในดิน การถ่ายเทอากาศในดิน ปริมาณธาตุอาหารในดินที่จะมีส่วนช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินบริเวณนั้น ลักษณะของเนื้อดิน รวมไปถึง

ชนิดของจุลินทรีย์ในดิน ส่วนปัจจัยด้านสมบัติทางเคมีและกายภาพที่แตกต่างกันไปพลาสติก แต่ละประเภทก็ส่งผลต่ออัตราการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพเช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น พลาสติกชีวภาพที่มีน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) ของสายพอลิเมอร์ที่แตกต่างกันก็จะใช้เวลาในการย่อยสลายแตกต่างกันไปด้วย ถึงแม้ว่าอัตราการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพจะถูกควบคุมโดยปัจจัยมากมาย แต่พลาสติกกลุ่มนี้ก็มีแนวโน้มที่จะย่อยสลายได้ภายในระยะเวลาที่รวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกสังเคราะห์ที่ย่อยสลายได้ยากมากโดยอาจจะใช้ระยะเวลายาวนานนับร้อยปีในการย่อยสลาย หรือพลาสติกสังเคราะห์บางชนิดที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เลย ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นพลาสติกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่ก่อให้เกิดการสะสมของขยะพลาสติก ตัวอย่างเช่น พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (poly(butylene succinate), PBS) พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลต (poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) และพอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้สนใจพอลิแล็กติกแอซิด เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดเป็นพลาสติกชีวภาพที่นิยมในปัจจุบัน สามารถสลายตัวได้และผลิตจากวัตถุดิบที่สามารถสร้างทดแทนใหม่ได้

2.2 พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) [4]

พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) เป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดหนึ่งที่ได้จากการสังเคราะห์ชีวมวล จัดเป็นพอลิเมอร์ประเภทพอลิเอสเทอร์แบบเส้น (linear aliphatic polyester) ที่มีโครงสร้างแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งในการผลิตพอลิแล็กติกแอซิดจะเริ่มจากการนำกรดแล็กติก (lactic acid) ที่ได้จากกระบวนการหมักแป้ง ซึ่งมาจากพืชที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด อ้อย และมันสำปะหลัง มาผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้มีลักษณะเป็นวงแหวนเรียกว่าแล็กไทด์ (lactide) หลังจากนั้นนำมากลั่นในระบบสุญญากาศเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้อยู่ในรูปของพอลิเมอร์ของแล็กไทด์ที่เป็นสายยาวขึ้น เรียกว่าพอลิแล็กติกแอซิด โดยการกำหนดความยาวของสายพอลิเมอร์ให้ได้ตามที่ต้องการจะเป็นสิ่งที่ทำให้สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดเปลี่ยนไปตามลักษณะการใช้งาน ทั้งนี้พอลิแล็กติกแอซิดสามารถนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้เช่นเดียวกับเม็ดพลาสติกที่ถูกผลิตมาจากปิโตรเลียม พอลิแล็กติกแอซิดสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ค่อนข้างหลากหลาย ได้แก่ ด้านการแพทย์ เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อ (biocompatible) และสามารถดูดซึม (bioresorbable) ได้โดยระบบชีวภาพ (biological system) ในร่างกาย จึงทำให้เป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงเหมาะสำหรับงานทางการแพทย์ ด้านการเกษตร เช่น ภาชนะปลูกพืช วัสดุห่อหุ้มและปลดปล่อยยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช เป็นต้น ด้านบรรจุภัณฑ์ เช่น บรรจุภัณฑ์

ที่ใช้แล้วทิ้ง ภาชนะบรรจุอาหาร ขวดน้ำ ถุงพลาสติก กล่องโฟม ฟิล์มสำหรับหีบห่อ เม็ดโฟมกันกระแทก ตัวเคลือบภาชนะกระดาษ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ PLA [5]

2.2.1 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด

ความบริสุทธิ์เชิงแสง (optical purity) ของพอลิแล็กติกแอซิดส่งผลอย่างมากต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว (barrier properties) พอลิแล็กติกแอซิดที่มีสัดส่วนของแอลไอโซเมอร์ (L-isomer) สูงกว่าร้อยละ 90 มีแนวโน้มเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (semicrystalline polymer) ในขณะที่พอลิเมอร์ที่มีดีไอโซเมอร์ (D-isomer) ในองค์ประกอบเพิ่มขึ้นจะมีความบริสุทธิ์เชิงแสงต่ำและมีแนวโน้มเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีรูปร่างแน่นอน (amorphous) นอกจากนี้ อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) และระดับความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนของแอลไอโซเมอร์ที่ลดลงด้วย โดยสัดส่วนของไอโซเมอร์ที่แตกต่างกันในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้พอลิแล็กติกแอซิดที่สังเคราะห์ขึ้นมีสมบัติได้หลากหลายจึงสามารถปรับให้รองรับกับความต้องการใช้งานได้กว้างขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่ผลิตมาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่น พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (poly(ethylene terephthalate), PET) และพอลิสไตรีน (polystyrene, PS) โดยพอลิแล็กติกแอซิดมีความใสและมีสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซที่ใกล้เคียงกัน

2.2.1.1 สมบัติการละลาย

การละลายของพอลิแล็กติกแอซิดขึ้นอยู่กับสัดส่วนของหน่วยที่เป็นองค์ประกอบในสายโซ่พอลิเมอร์และระดับความเป็นผลึก (degree of crystallinity) ไม่ละลายในน้ำ แอลกอฮอล์ (alcohol) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีหมู่แทนที่ เช่น เฮกเซน (hexane) และเฮปเทน (heptane) โดยตัวทำละลายที่ดีสำหรับพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสงสูง (poly(L-lactic

acid), PLLA) ได้แก่ ตัวทำละลายอินทรีย์กลุ่มสารละลายอินทรีย์ประเภทคลอรีเนต (chlorinated) ฟลูออรีเนต (fluorinated) ไดออกเซน (dioxane) ไดออกโซเลน (dioxolane) และฟิวแรน (furan)

2.2.1.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล

พอลิแล็กติกแอซิดมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.25 หากไม่ผ่านการดึงยึด (unoriented PLA) มีความเปราะมากแต่มีความคงรูป (stiffness) และความแข็งแรง (strength) สูง เมื่อนำไปผ่านการดึงยึด (oriented) จะมีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแต่ดีกว่าพอลิสไตรีนที่ผ่านการดึงยึด (oriented PS) ยังสัมพันธ์กับและมอดุลัสแรงดัดโค้ง (Young's modulus and flexural modulus) ของพอลิแล็กติกแอซิดมีค่าสูงกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) พอลิพรอพิลีน (polypropylene, PP) และพอลิสไตรีน แต่ความทนแรงกระแทก (impact strength) และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) มีค่าต่ำกว่าพอลิเมออร์ชนิดอื่น ๆ

2.2.1.3 สมบัติทางความร้อน

พอลิแล็กติกแอซิดมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วและอุณหภูมิหลอมเหลวค่อนข้างสูงกว่าเทอร์มอพลาสติกทั่วไป โดยอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วมีค่าขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและอัตราส่วนระหว่างอีแนนทิโอเมอร์ โดยพบว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักโมเลกุลการผสมแอลอีแนนทิโอเมอร์เข้ากับดีอีแนนทิโอเมอร์ ทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วมีแนวโน้มลดลง เมื่ออัตราส่วนระหว่างแอลและดีใกล้เคียงกันมากขึ้น เช่น อัตราส่วนระหว่างแอลต่อดีเป็น 50:50 อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วมีแนวโน้มลดลงมากที่สุด อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิแล็กติกแอซิดขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์เชิงแสงของพอลิเมออร์ด้วย โดยอุณหภูมิหลอมเหลวสูงสุดที่พบในพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสง (ทั้ง PLLA และ PDLA) มีค่าประมาณ 180 องศาเซลเซียสและมีค่าเอนทัลปี 40–50 จูลต่อกรัม อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมออร์มีค่าลดลงหากในโครงสร้างมีปริมาณของดีแล็กไทด์ (D-lactide) เป็นองค์ประกอบเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิหลอมเหลวลดลงได้มากถึง 50 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิแล็กติกแอซิด เมื่อใช้ปริมาณมีโซแล็กไทด์ (meso-lactide) เพิ่มขึ้นในการสังเคราะห์พอลิเมออร์ โดยทั่วไปอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิแล็กติกแอซิด มีค่าอยู่ในช่วง 130–160 องศาเซลเซียสและมีการลดลงของอุณหภูมิหลอมเหลวเนื่องจากผลของมีโซแล็กไทด์ที่มีความสำคัญทำให้ให้ชั้นรูปง่ายขึ้นและลดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน

2.2.1.4 สมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว

สมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซและของเหลวของพอลิแล็กติกแอซิดมีค่าใกล้เคียงกับพอลิเมออร์ทั่วไปที่ใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ เช่น พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและพอลิสไตรีน ค่าสัมประสิทธิ์

การยอมให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซออกซิเจน (O₂) และก๊าซไนโตรเจน (N₂) ผ่านได้ของ พอลิแล็กติกแอซิดมีค่าน้อยกว่าพอลิสไตรีน แต่สูงกว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ส่วนการยอมให้ ใอน้ำซึมผ่านมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้พอลิแล็กติกแอซิดยังมีสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของกลิ่น ได้ดี โดยพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของสารประกอบอินทรีย์

2.2.2 ข้อดีและข้อเสียของพอลิแล็กติกแอซิด

พอลิแล็กติกแอซิดมีจุดเด่นหลายประการ ตัวอย่างเช่น มีฐานวัตถุดิบที่มาจากผลผลิตทางการเกษตร มีความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และมีอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในระดับสูงพอสมควร เป็นต้น นอกจากนี้พอลิแล็กติกแอซิดยังมีจุดด้อยเช่นกัน กล่าวคือ ลักษณะแข็งและค่อนข้างเปราะ ทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานบางอย่าง เช่น พิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการการยืดตัว ดังนั้นในการใช้งานจึงนิยมเติมสารพลาสติกไซเซอร์ลงไป ในสูตรพอลิแล็กติกแอซิดคอมพาวนด์ (PLA compound) และ/หรือผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีความเหนียวและการยืดตัวที่ดีกว่า เช่น พอลิคาโพรแลคโตน (polycaprolactone) เทอร์มอพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (thermoplastic elastomer) เป็นต้น มีสมบัติไม่ทนความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าหากไม่ทำการ อบอุ่นความชื้นก่อนนำไปขึ้นรูปอาจเกิดการเสื่อมสภาพในระหว่างกระบวนการผลิตผ่านกลไกแบบ ไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และกลไกแบบตัดสายโซ่ (chain scission) ดังนั้นในการใช้งานจึงควรอบ เม็ดพอลิแล็กติกแอซิดให้แห้งปราศจากความชื้นเสียก่อน ซึ่งโดยทั่วไปปริมาณ ความชื้น (water content) ที่อยู่ในพอลิแล็กติกแอซิดควรจะมีระดับน้อยกว่า 500 ppm เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหา การเสื่อมสภาพทางความร้อน มีค่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์ในสภาวะหลอมที่ต่ำ (melt strength) ทำให้มีปัญหาในการนำไปผลิตขึ้นรูปโดยกระบวนการบางอย่าง เช่น กระบวนการอัดรีดและเป่าขึ้นรูป เป็นฟิล์ม (extrusion blown film process) เป็นต้น นอกจากนี้พอลิแล็กติกแอซิดมีการย่อยสลายที่ ยาก เนื่องจากต้องมีการควบคุมอุณหภูมิและสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายทางชีวภาพ

จากข้อจำกัดในการใช้งานดังกล่าว จะเห็นได้ว่าพอลิแล็กติกแอซิดมีลักษณะแข็งและค่อนข้าง เปราะ ไม่ทนความร้อน จึงไม่นิยมนำพอลิแล็กติกแอซิดเพียงชนิดเดียวมาใช้ทำเป็นผลิตภัณฑ์และ การแก้ไขปัญหาเบื้องต้นมักจะนิยมนำพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีความเหนียวและความยืดหยุ่นสูงมาผสม และใช้งานร่วมกับพอลิแล็กติกแอซิด แต่สิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง คือความเข้ากันได้ระหว่าง พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่จะนำมาปรับปรุงสมบัติ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจ ที่จะนำเทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์มาผสมเพื่อใช้ในการปรับปรุงความเปราะของ พอลิแล็กติกแอซิดรีไซเคิล

2.3 การรีไซเคิลพลาสติก [6–8]

พลาสติกเป็นวัสดุที่เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของเราเป็นอย่างมากและมีแนวโน้มการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นเพราะใช้ทดแทนทรัพยากรธรรมชาติ เช่น ไม้และเหล็กได้เป็นอย่างดี ราคาถูกและมีน้ำหนักเบาสามารถผลิตให้มีสมบัติต่าง ๆ ตามที่ต้องการ ทำให้พลาสติกได้รับการยอมรับอย่างรวดเร็วและมีปริมาณการใช้งานเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ส่งผลให้เกิดขยะพลาสติกในปริมาณสูงมากขึ้น ดังนั้นการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่หรือการรีไซเคิลจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เพราะนอกจากจะช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกแล้วยังเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าอีกด้วย ทำให้การรีไซเคิลพลาสติกมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแบ่งเป็น 4 ประเภทหลัก คือ การรีไซเคิลแบบปฐมภูมิ (primary recycling) การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิ (secondary recycling) การรีไซเคิลแบบตติยภูมิ (tertiary recycling) และการรีไซเคิลแบบจตุภูมิ (quaternary recycling)

2.3.1 การรีไซเคิลแบบปฐมภูมิ เป็นการนำขวดหรือเศษพลาสติกที่เป็นประเภทเดียวกันและไม่มีสิ่งปนเปื้อนที่เกิดในกระบวนการผลิตหรือขึ้นรูปกลับมาใช้ซ้ำภายในโรงงาน โดยสามารถนำมาใช้ซ้ำทั้งหมดหรือเติมผสมกับเม็ดใหม่ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

2.3.2 การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิ เป็นการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาทำความสะอาด หลอมและขึ้นรูปกลับไปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกอีกครั้ง การรีไซเคิลแบบทุติยภูมินี้ยังสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 3 ประเภท คือ

2.3.2.1 การรีไซเคิลเชิงกล (mechanical recycling) เป็นเทคนิคที่ง่ายและนิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบัน โดยการเก็บพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาตัดแยกตามประเภทและสีมาล้างทำความสะอาดก่อนนำมาบดเป็นชิ้นเล็ก ๆ และหลอมเป็นเม็ดพลาสติกเกรดสองหรือเม็ดพลาสติกรีไซเคิลเพื่อนำกลับไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่หรือนำมาผสมกับเม็ดใหม่เพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการก่อนนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยคุณภาพของเม็ดพลาสติกรีไซเคิลนี้จะเป็นตัวกำหนดการนำไปใช้งานและปริมาณการผสมที่ต้องการ ปัญหาในกระบวนการรีไซเคิลพลาสติก คือ หลังจากผ่านกระบวนการรีไซเคิลในแต่ละครั้งพลาสติกจะมีคุณภาพต่ำลงเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการขาดของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ในเกิดประโยชน์สูงสุดและมีราคาถูกลงเรื่อย ๆ จนบางครั้งไม่คุ้มต่อการลงทุน สาเหตุที่สำคัญเนื่องมาจากมีการปนเปื้อนของสิ่งสกปรก ฉลากเล็ก ๆ หรือเศษกาวทำให้เม็ดพลาสติกรีไซเคิลมีสีเข้มขึ้นหรือมีความใสลดลง นอกจากนี้ความชื้นในพลาสติกและความร้อนที่ใช้ในการหลอมพลาสติกยังเป็นปัจจัยสำคัญ ที่ทำให้เกิดการสลายตัวหรือเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ใช้ทำพลาสติกทำให้เม็ดพลาสติกรีไซเคิล มีสีเหลืองและมีสมบัติเชิงกลลดลงด้วย

2.3.2.2 การปรับปรุงโดยวิธีทางเคมี (chemical modification) เนื่องจากเม็ดพลาสติกรีไซเคิลมีข้อจำกัดในด้านสมบัติการขึ้นรูปและการใช้งาน ดังนั้นการปรับปรุงโดยวิธีการทางเคมีจะช่วยลดข้อจำกัดดังกล่าวหรือทำให้เม็ดรีไซเคิลมีลักษณะใกล้เคียงกับเม็ดใหม่ได้ การปรับปรุงนี้สามารถใช้ได้กับทั้งพลาสติกชนิดเดียวหรือพลาสติกผสม ถ้าเป็นพลาสติกชนิดเดียวก็จะใช้การเติมสารเคมีหรือใช้วิธีการผ่านด้วยรังสี แต่ถ้าเป็นพลาสติกผสมมักใช้สารช่วยในการผสมให้เข้ากันที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่า ตัวประสาน (compatibilizer)

2.3.2.3 การหลอมอัดรีดร่วมและการฉีดร่วม (co-extrusion and co-injection molding) เป็นอีกเทคนิคหนึ่งของการรีไซเคิลแบบทุติยภูมิซึ่งเหมาะสำหรับใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้น ๆ เหมือนแซนด์วิช โดยที่ผิวหน้าเป็นชั้นที่ผลิตจากพลาสติกใหม่ซึ่งมีความต้านทานต่อแรงดึงสูง ป้องกันการขีดข่วนได้ดีและมีสีสม่ำเสมอ ส่วนชั้นกลางเป็นชั้นของพลาสติกรีไซเคิล

2.3.3 การรีไซเคิลแบบตติยภูมิ เป็นการรีไซเคิลที่ใช้สารเคมีหรือความร้อนเพื่อทำลายพันธะไฮโดรคาร์บอนของพลาสติกที่ใช้งานแล้ว การรีไซเคิลแบบตติยภูมิแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.3.3.1 การรีไซเคิลทางเคมี (chemical recycling) เป็นกระบวนการที่ทำให้โครงสร้างสายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการขาดหรือแตกออกได้มอนอเมอร์ (monomer) หรือโอลิโกเมอร์ (oligomer) เป็นผลิตภัณฑ์เมื่อนำมาทำให้บริสุทธิ์โดยการกลั่นและตกผลึกได้เป็นสารตั้งต้นที่มีคุณภาพสูงซึ่งสามารถนำไปใช้ผลิตเป็นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตได้ใหม่

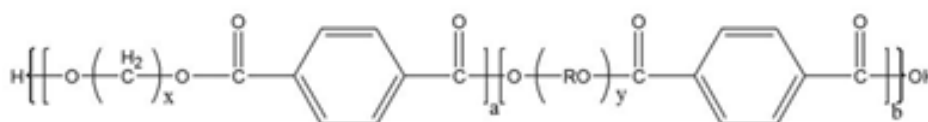
2.3.3.2 การรีไซเคิลทางความร้อน (thermolysis) สามารถเกิดการแตกหรือขาดได้โดยใช้ความร้อน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี คือ แบบไม่ใช้ออกซิเจน (pyrolysis) แบบใช้ออกซิเจน (gasification) และการเติมไฮโดรเจน (hydrogenation)

2.3.4 การรีไซเคิลแบบจตุภูมิ พลาสติกสามารถนำมาเผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน โดยการเผาไหม้ของพลาสติกให้ค่าความร้อนใกล้เคียงกับถ่านหิน (23 MJ/kg) ช่วยในการเผาไหม้ส่วนที่เป็นขยะเปียก ทำให้ลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ในการเผาขยะ

ในงานวิจัยนี้ได้นำพอลิแล็กติกแอซิดมาเข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่ หรือที่เรียกว่ากระบวนการรีไซเคิลเชิงกล ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก และไม่ทำลายโครงสร้างภายในของพอลิเมอร์ และเนื่องจากพอลิแล็กติกรีไซเคิลมีสมบัติความทนแรงกระแทกต่ำและความเปราะเพิ่มมากขึ้น จึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงสมบัติพอลิแล็กติกรีไซเคิลด้วยการเติมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงและอ่อนนุ่มคล้ายยาง

2.4 เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์ [9–11]

เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์ (thermoplastic poly(ether-ester), TPEE) สามารถสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างไดเมทิลเทเรฟทาเลต (dimethyl terephthalate, DMT) และพอลิเตตระเมทิลีน อีเทอร์ไกลคอล (poly(tetramethylene ether glycol), PTMEG) เป็นบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยส่วนที่แข็งของพอลิเอสเทอร์และส่วนที่อ่อนเป็นของพอลิอีเทอร์ โดยโครงสร้างแสดงในรูปที่ 2.2 ส่วนพอลิเมอร์ที่อ่อนนุ่มและพอลิเอสเทอร์ที่ไม่ผ่านการตกผลึกจะสร้างเฟสแบบอสัณฐาน ส่วนที่แข็งของพอลิเอสเทอร์ตกผลึกบางส่วนเพื่อก่อผลึกไมโครโดเมนซึ่งทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมขวาง เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์มีความยืดหยุ่นของยางและความแข็งแรง ส่วนที่อ่อนนุ่มให้ความยืดหยุ่นเหมือนยาง ส่วนที่แข็งจะให้สมบัติเหมือนพลาสติก



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ TPEE [12]

2.4.1 สมบัติของเทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์

2.4.1.1 สมบัติเชิงกล

เนื่องจากความแข็งของเทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์มีค่าอยู่ระหว่าง 30–82D ซึ่งมีค่าความแข็งอยู่ระหว่างยางและพลาสติก เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์มอพลาสติกอีลาสโตเมอร์อื่น ๆ พบว่าค่ามอดูลัสของเทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์จะสูงกว่าเทอร์มอพลาสติกอีลาสโตเมอร์ชนิดอื่นที่มีความแข็งเดียวกันภายใต้สภาวะความเครียดต่ำ มีความต้านทานแรงดึงสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน (thermoplastic polyurethanes, TPU) ค่ามอดูลัสของการบีบอัดและมอดูลัสแรงดึงของเทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์มีค่าสูงมาก จึงเหมาะสำหรับการทำคานหรือชิ้นส่วนแรงบิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหมาะสำหรับการทำชิ้นส่วนที่ทนอุณหภูมิสูง นอกจากนี้เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์ยังมีความทนทานต่อความล้าที่ดี จึงทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานเกี่ยวกับระบบเกียร์ของรถยนต์และยังสามารถใช้กับข้อต่อและสายพานได้อีกด้วย

2.4.1.2 สมบัติทางความร้อน

เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์มีความต้านทานความร้อนที่ดี ทำให้สามารถทนความร้อนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 10 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 110–140 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 160–180 องศาเซลเซียส พบว่าเทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์มีการสูญเสียน้ำหนักเพียง 0.05% และ 0.1% ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิการใช้งานของเทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์นั้นสูงมาก และยังมีการสูญเสียประสิทธิภาพของสมบัติเชิงกลที่ต่ำ นอกจากนี้เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์ยังมีความต้านทานต่ออุณหภูมิต่ำที่ดีมาก กล่าวคืออุณหภูมิที่ทำให้เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์เกิดการแตกหักต่ำกว่า -70 องศาเซลเซียส จึงส่งผลให้เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์มีช่วงอุณหภูมิการทำงานที่กว้างและสามารถใช้ได้ที่อุณหภูมิระหว่าง -70–200 องศาเซลเซียส

2.4.1.3 การทนต่อสารเคมี

เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์มีความทนต่อน้ำมันที่ดีมากและทนต่อสารเคมีประเภทมีขั้ว ตัวอย่างเช่น กรด เบส สารประเภทเอมีนไกลคอล (amine glycols) เป็นต้น แต่ไม่สามารถใช้ร่วมกับสารไฮโดรคาร์บอนฮาโลเจน (halogen) และฟีนอล (phenol) ยกเว้นสารประเภทฟร็อน (freon) ความสามารถในการทนต่อสารเคมีเพิ่มขึ้นตามความแข็งที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์ยังสามารถต้านทานการบวมและต้านทานการซึมผ่านของตัวทำละลายอินทรีย์เชื้อเพลิงและก๊าซที่ต้ออีกด้วย

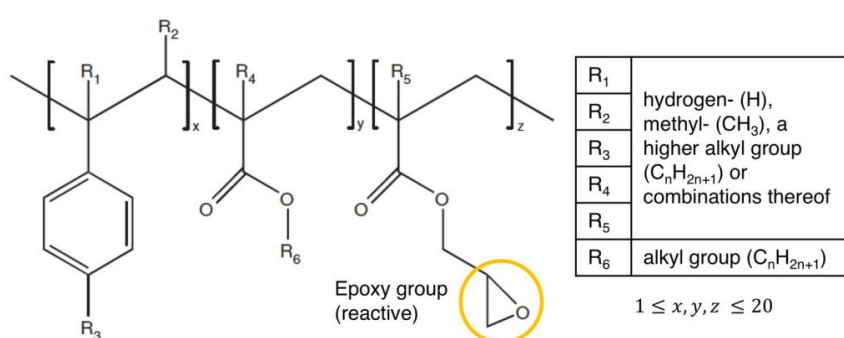
2.4.1.4 การทนสภาพแวดล้อม

เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์มีความเสถียรทางเคมีที่ดีภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ เช่น การทนต่อแสงแดด ซึ่งอีลาสโตเมอร์ส่วนใหญ่จะมีเกิดการเสื่อมสภาพเกิดขึ้นภายใต้แสงยูวี (UV) ดังนั้นจึงทำให้เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์สามารถใช้งานกลางแจ้งได้ดีมาก

เนื่องจากพอลิเอทิลีนแอกซิไดซ์และเทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์มีความเข้ากันได้ยาก ในงานวิจัยนี้จึงสนใจนำสารขยายสายโซ่ (chain extender) ไปเติมลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนแอกซิไดซ์และเทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมหรือขยายสายโซ่ของพอลิเมอร์และช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสอง

2.5 สารขยายสายโซ่ [13, 14]

สารขยายสายโซ่ Joncryl เป็นสารขยายสายโซ่ที่นิยมมากในปัจจุบัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมหรือขยายสายโซ่ของพอลิเมอร์และช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ (ester functional group) ไม่ว่าจะเป็นเม็ดบริสุทธิ์ (virgin) เม็ดรีไซเคิลที่เหลือทิ้งจากกระบวนการ (post-industrial recycled) หรือเม็ดรีไซเคิลที่เหลือทิ้งจากการบริโภค (post-consumer recycled) ตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (poly(ethylene terephthalate), PET) พอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลต (poly(butylene terephthalate), PBT) พอลิเอไมด์ (polyamides, PA) เทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน (thermoplastic polyurethanes, TPU) พอลิออกซีเมทิลีน (polyoxymethylene, POM) และพอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) เป็นต้น และมีโครงสร้างแสดงในรูป 2.3 โดยหมู่อีพอกซี (epoxy groups, R-O-R') จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups, -OH) และคาร์บอกซิล (carboxyl groups, -COOH) ที่ปลายสายโซ่ของพอลิเมอร์พอลิแล็กติกแอซิดและสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลของสายโซ่พอลิเอสเทอร์และสายโซ่ของพอลิอีเทอร์หลังจากผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสและสลายตัวแบบอิสระของเทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์ ซึ่งทำให้น้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นและเกิดโครงสร้างเป็นแบบกิ่งหรือแบบเชื่อมขวางระหว่างการผสมขณะหลอมเหลว นอกจากนี้สารขยายสายโซ่ Joncryl ยังมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น ความเป็นพิษน้อย ไม่ระเหย และเป็นตัวเชื่อมประสานที่ดี เป็นต้น และเหมาะกับกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีด (injection molding) และแบบอัดรีด (extrusion)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของ Joncryl [14]

ในงานวิจัยนี้ได้นำพอลิเมอร์ผสมจากพอลิแล็กติกแอซิดรีไซเคิล/เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์และสารขยายสายโซ่ Joncryl ไปเตรียมเป็นคอมพอสิตกับโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพที่สูญเสียไปของพอลิเมอร์ผสม

2.6 โวลลาสโทไนต์ (Wollastonite) [15, 16]

โวลลาสโทไนต์เป็นแร่โลหะสีขาวที่สามารถพบได้ทั่วไปตามธรรมชาติ และมีชื่อเรียกทางเคมีว่าแคลเซียมเมตาซิลิเกต (CaSiO_3) และเป็นแร่สีขาวบริสุทธิ์ที่มีลักษณะจุลภาคเป็นผลึกทรงเรียวยาวแหลมคล้ายเข็ม (acicular) โดยตัวแร่จะมีสัมผัสที่พิเศษตรงที่มีความลื่นไหลต่ำ และมักจะมีอัตราความบริสุทธิ์ของแร่แตกต่างกันไป ในบางครั้งแร่อาจจะมีค่าความบริสุทธิ์มากจนไม่จำเป็นต้องนำไปผ่านกระบวนการใด ๆ เพื่อคัดกรองสิ่งเจือปน ในขณะที่บางครั้งต้องผ่านกระบวนการขจัดสิ่งเจือปนกว่า 80% ที่มักจะประกอบไปด้วยแร้โกเมน (garnet) ไดออปไซด์ (diopside) หินปูนและโดโลไมต์ โดยใช้วิธีการต่าง ๆ ทั้งแยกด้วยแม่เหล็ก กระบวนการลอยแร่ หรือกระทั่งการแยกด้วยสายตา เป็นต้น

โวลลาสโทไนต์ชนิดผงมีประโยชน์มากมาย ซึ่งเป็นสารช่วยหล่อแคลเซียมออกไซด์ในการผลิตน้ำยาเคลือบหรือเครื่องปั้นต่าง ๆ การจะได้สารแคลเซียมออกไซด์มานั้นโดยปกติแล้วจำเป็นต้องใช้ผงชอล์กเป็นส่วนผสม ซึ่งจะปล่อยก๊าซที่เกิดจากปฏิกิริยาย่อยสลายออกมาเป็นจำนวนมาก ทำให้ต้องนำผลิตภัณฑ์ไปเผาไฟอ่อนอีกครั้งเพื่อกำจัดฟองอากาศในดิน โวลลาสโทไนต์ยังมีซิลิกาเป็นส่วนผสมโดยธรรมชาติ ทำให้ผู้ผลิตสามารถลดการใช้ผงซิลิกาดิบลงได้อีกด้วย โดยสาร SiO_2 และ CaO ในโวลลาสโทไนต์ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อกันได้ค่อนข้างง่าย ทำให้โวลลาสโทไนต์ถูกใช้อย่างกว้างขวางในฐานะสารช่วยหล่อในสินค้าอุตสาหกรรมที่ต้องใช้ความร้อนสูงหรือฉนวนนำกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมพลาสติก จะใช้โวลลาสโทไนต์ในการปรับปรุงค่าความทนทานขององค์ประกอบในเนื้อพลาสติก เนื่องจากโวลลาสโทไนต์มีลักษณะเป็นผลึกรูปเข็ม นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงเรื่องการเป็นฉนวนไฟฟ้า มีความทนไฟดีขึ้น และช่วยเรื่องขนาดของชิ้นงานให้ไม่ผันแปรมากเกินไป สำหรับโวลลาสโทไนต์ที่เป็นเกรดที่มีขนาดอนุภาคละเอียดมากจะช่วยปรับปรุงเรื่องความทนทานต่อการขีดขีดและการกระแทกได้ดี

2.6.1 สมบัติของโวลลาสโทไนต์

ลักษณะเฉพาะของโวลลาสโทไนต์ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์ผสมคือ มีสีขาว การดูดซึมน้ำต่ำ มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ นอกจากนี้ยังมีลักษณะอื่น ๆ อีก เช่น ความแข็งสูง ความเป็นด่างสูงและสามารถแยกออกจากกันได้โดยกรดอนินทรีย์ (mineral acid) โวลลาสโทไนต์มีมอดูลัสประมาณ 30,000 เมกะปาสคาล (MPa) ซึ่งใกล้เคียงกับแร่ซิลิเกตอื่น ๆ

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zaman และคณะ [17] ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมจากพอลิแล็กติกแอซิด/เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์ ที่อัตราส่วน 95/5, 90/10, 85/15, 80/20 และ 70/30 โดยนำนักจากการศึกษาสมบัติเชิงความร้อน พบว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของพอลิแล็กติกแอซิดไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเติมเทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์ลงไป แสดงว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและเทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์ไม่สามารถเข้ากันได้ ความทนแรงดึงและยังสัมมอดูลัสมีค่าลดลงเล็กน้อย แต่การยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนของเทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์เพิ่มขึ้น โดยพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์ที่อัตราส่วน 70/30 มีการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นร้อยละ 245 ในขณะที่ความทนแรงดึงมีค่าลดลงเหลือ 29 เมกะปาสคาล เมื่อเทียบกับพอลิแล็กติกบริสุทธิ์และจากการตรวจสอบสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าโครงสร้างพอลิเมอร์ผสมเกิดการแยกชั้นกันระหว่างอนุภาคของเทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์กับพอลิแล็กติกแอซิด ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน จากนั้นทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 80/20 กับสารขยายสายโซ่เมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต (methylene diphenyl diisocyanate, MDI) พบว่า การยืด ณ จุดขาดและความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนตเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงยึดติดระหว่างพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น

Sisi และคณะ [12] ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมจากพอลิแล็กติกแอซิด/เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์ที่อัตราส่วน 80/20 โดยนำนัก และทำการเติมสารขยายสายโซ่ Joncryl ที่ปริมาณ 0–1.2 phr พบว่าสารขยายสายโซ่ Joncryl เข้าทำปฏิกิริยาการขยายสายโซ่หรือเข้าเชื่อมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและเทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์ภายใต้กระบวนการผสมแบบหลอมเหลว ซึ่งทำให้เกิด PLA–Joncryl–TPEE โคพอลิเมอร์ ส่งผลทำให้พอลิเมอร์ผสมได้รับการปรับปรุงความเข้ากันได้ ความเหนียวลดลง เมื่อปริมาณของสารขยายสายโซ่ Joncryl เพิ่มมากขึ้นและจากการตรวจสอบสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า แรงยึดติดระหว่างพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของสารขยายสายโซ่ Joncryl เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ได้นำพอลิเมอร์ดังกล่าวไปทำการขึ้นรูปกระบวนการเป่ารีด พบว่าสารขยายสายโซ่ Joncryl ยังทำให้พอลิเมอร์ผสมมีเสถียรภาพในกระบวนการเป่าและสมบัติความทนแรงดึงของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น

Chaiwutthinan และคณะ [18] ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมจากพอลิแล็กติกแอซิด/เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์ โดยมีอัตราส่วนของเทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์ร้อยละ 5–30 โดยนำนัก พบว่าความทนแรงกระแทกและการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่ค่ายังสัมมอดูลัสและความทนแรงดึงมีค่าลดลง และพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน 70/30 ส่งผลให้

มีความทนแรงกระแทกและการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเป็น 3.21 และ 10.62 เท่าเมื่อเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ และจากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าพอลิเมอร์ผสมแสดงพื้นผิวการแตกหักเป็นการแตกแบบเหนียวและอนุภาคของเทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์ขนาดเล็กกระจายอยู่บนพอลิแล็กติกแอซิด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมไม่สามารถเข้ากันได้ดี หลังจากนั้นเตรียมคอมพอสิตระหว่างพอลิแล็กติกแอซิด/เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์/เบนโทไนท์ โดยมีปริมาณ 1–5 phr พบว่าความทนแรงกระแทก ยังสัมพันธ์ ความทนแรงดึงและเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลงและคอมพอสิตที่ปริมาณเบนโทไนท์ 1 phr มีโครงสร้างแบบเอ็กซีโฟลิเอต (exfoliated structure) ส่งผลให้มีความทนแรงกระแทก การยืดตัว ณ จุดขาด และความทนแรงดึงสูงที่สุด

Chaiwutthinan และคณะ [19] ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้ว/พอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลต โดยมีอัตราส่วนของพอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลต ร้อยละ 10–50 โดยน้ำหนัก ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้ว/พอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลตไม่สามารถเข้ากันได้ดี เนื่องจากพอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลตกระจายอยู่บนพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเมื่อปริมาณพอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความทนแรงกระแทกและยังสัมพันธ์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความทนแรงดึงและการยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง โดยพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้ว/พอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลตอัตราส่วน 60/40 เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นทำการเตรียมคอมพอสิตระหว่างพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้ว/พอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลต/โพลลาสโตน โดยมีปริมาณ 10–40 phr พบว่าการเติมโพลลาสโตนที่ปริมาณ 30 phr ส่งผลให้คอมพอสิตมีความทนแรงกระแทกและยังสัมพันธ์เพิ่มขึ้น แต่ความทนแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลงเล็กน้อย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 เม็ดพอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) เกรด 2003D จากบริษัท บีซี โพลีเมอร์ มาร์เก็ตติ้ง จำกัด

3.1.2 เม็ดเทอร์มอพลาสติกพอลิเอเทอร์-เอสเทอร์ (thermoplastic poly(ether-ester), TPEE) เกรด 7246 จากบริษัท โกลบอล คอนเน็คชั่นส์ จำกัด (มหาชน)

3.1.3 สารขยายสายโซ่ Joncryl (chain extender, Joncryl) เกรด ADR-4468 จากบริษัท เคมี อินโนเวชั่น จำกัด

3.1.4 ผงโวลลาสโทไนต์ (wollastonite, WT) ขนาด 2000–2500 mesh, aspect ratio 1:18 จากบริษัท Shenyang Huakuang Trading Co., Ltd

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) ของ XINDA รุ่น SHJ-20 ประเทศจีน จากศูนย์นวัตกรรมด้านการออกแบบและวิศวกรรมเพื่อการผลิต บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ นานาชาติสิรินธรไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

3.2.2 เครื่องฉีดแบบ (injection molding machine) ของ NESSEI รุ่น PS40E5ASE ประเทศญี่ปุ่น จากศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม ฝ่ายพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

3.2.3 ตู้อบสูญญากาศ (vacuum oven) ของ France Etuves รุ่น XU058 ประเทศฝรั่งเศส จากศูนย์นวัตกรรมด้านการออกแบบและวิศวกรรมเพื่อการผลิต บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ นานาชาติสิรินธรไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

3.3 เครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

3.3.1 เครื่องทดสอบเจลเพอร์มิเอชันโครมาโตกราฟี (gel permeation chromatography, GPC) ของบริษัท Agilent Technologies (Thailand) Co., LTD. จำกัด รุ่น 1260GPC/SEC MDS จากสำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

3.3.2 เครื่องฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) ของบริษัท Thermo Fisher Scientific รุ่น Nicolet 6700-FT-IR จากภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.3 เครื่องโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรมิเตอร์ (proton nuclear magnetic resonance spectrometer, $^1\text{H-NMR}$) ของบริษัท Bruker Corporation รุ่น Avance Neo 500 MHz จากสำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

3.3.4 เครื่องทดสอบดรรชนีการหลอมไหล (melt flow index, MFI) ของบริษัท Karg Industrietechnik รุ่น 14-01003 จากศูนย์นวัตกรรมด้านการออกแบบและวิศวกรรมเพื่อการผลิตบัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธรไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

3.3.5 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (impact tester) ของบริษัท Gotech รุ่น GT-7045-MD จากภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.6 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine) ของบริษัท Tinius Olsen รุ่น M250 จากภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.7 เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ (rockwell hardness) ของบริษัท DUROMETER รุ่น OS-1 จากศูนย์นวัตกรรมด้านการออกแบบและวิศวกรรมเพื่อการผลิตบัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธรไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

3.3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ของบริษัท JOEL solution for Innovation รุ่น JSM-6480LV จากคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

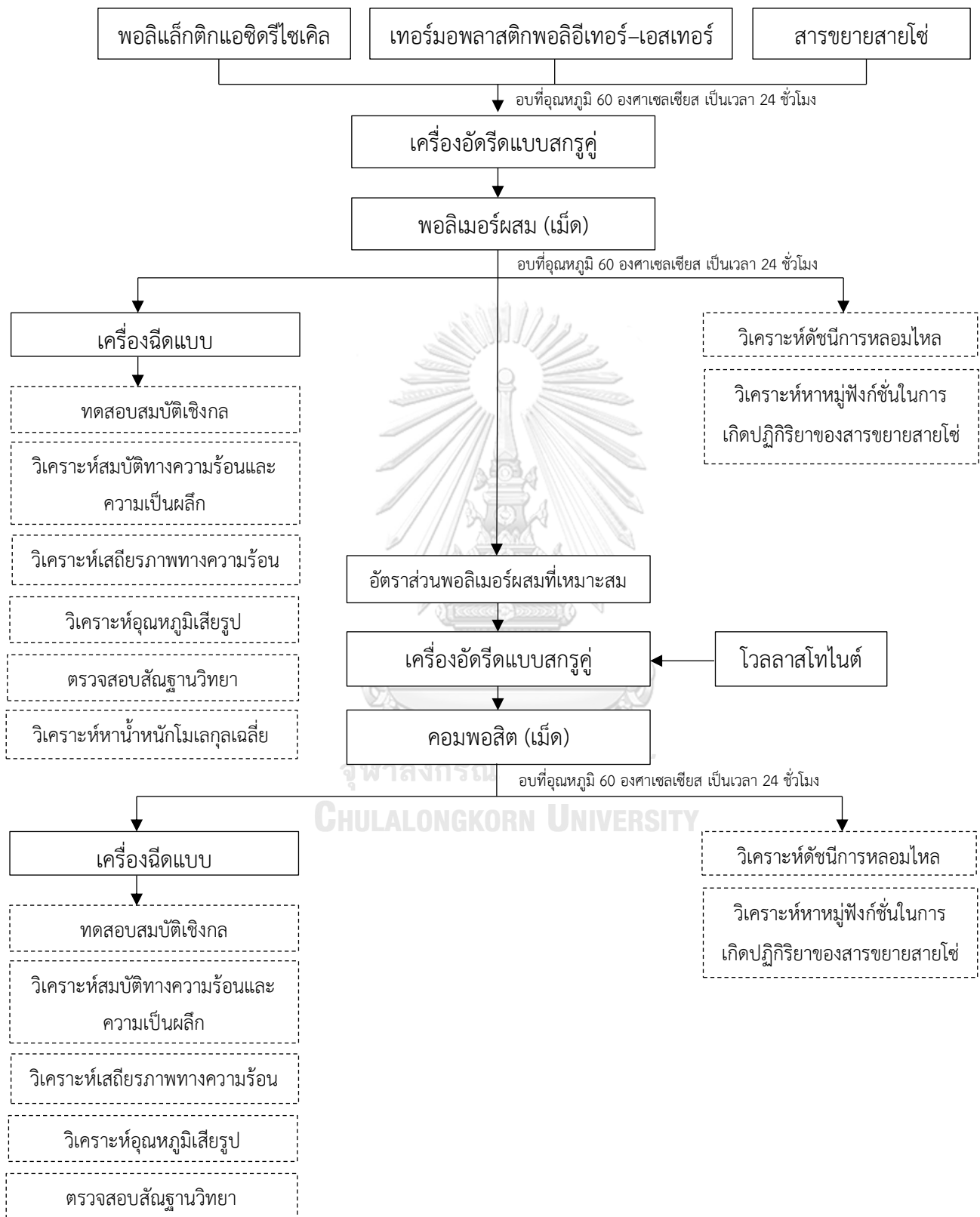
3.3.9 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) ของบริษัท Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA 3⁺ STAR^c System จากศูนย์นวัตกรรมด้านการออกแบบและวิศวกรรมเพื่อการผลิต บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธรไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

3.3.10 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน, ทีจีเอ (thermogravimetric analyzer, TGA) ของบริษัท Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA 3⁺ STAR^c System จากศูนย์นวัตกรรมด้านการออกแบบและวิศวกรรมเพื่อการผลิต บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธรไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

3.3.11 เครื่องทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนและอุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อน (HDT vicat tester) ของบริษัท Siam Intercorp (Thailand) รุ่น C-HV6x-000 จากภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



3.4 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

3.5 ขั้นตอนการทดลอง

3.5.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต

การเตรียมขึ้นทดสอบของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดรีไซเคิล/เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์/สารขยายสายโซ่ Joncryl เริ่มจากการนำเม็ดพอลิแล็กติกแอซิดรีไซเคิลเทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์ และสารขยายสายโซ่ Joncryl มาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปชั่งน้ำหนักและผสมตามอัตราส่วน ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยกระบวนการผสมแบบหลอมเหลว (melt mixing) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (รูปที่ 3.2) โดยใช้ภาวะดังนี้

อุณหภูมิ: โซนที่ 1 : 130 องศาเซลเซียส
 โซนที่ 2 : 175 องศาเซลเซียส
 โซนที่ 3 : 180 องศาเซลเซียส
 โซนที่ 4-5 : 185 องศาเซลเซียส
 โซนที่ 6 : 180 องศาเซลเซียส

ความเร็วรอบสกรู : 250 รอบ/นาที

ความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู (L/D) : 44

การหล่อเย็น (cooling) เส้นพลาสติก : ผ่านการหล่อเย็นด้วยระบบน้ำเย็น (cooling water)

ความเร็วรอบตัด : 10 รอบ/นาที

ระยะที่ตัด : 3.0 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม

สูตร (R-PLA/TPEE/Joncryl)	R-PLA (%wt)	TPEE (%wt)	Joncryl (phr)
100/0/0	100	0	0
0/100/0	0	100	0
80/20/0	80	20	0
80/20/0.5	80	20	0.5
80/20/1	80	20	1
80/20/1.5	80	20	1.5
80/20/2	80	20	2

พอลิเมอร์ผสมที่ได้จะถูกอัดรีดผ่านหัวอัดรีด (die) แล้วถูกตัดเป็นเม็ด (pelletized) ก่อนนำไปอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ



รูปที่ 3.2 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

นอกจากนี้ได้ทำการเตรียมชิ้นทดสอบของคอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิดรีไซเคิล/เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์/สารขยายสายโซ่ Joncryl/โพลลาสโตนต์ เริ่มจากการนำเม็ดพอลิแล็กติกแอซิดรีไซเคิล เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์ สารขยายสายโซ่ Joncryl และโพลลาสโตนต์ มาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปชั่งน้ำหนักและผสมตามอัตราส่วน ดังแสดงใน ตารางที่ 3.2 โดยกระบวนการผสมแบบหลอมเหลว (melt mixing) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยใช้ภาวะดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของคอมพอสิต

สูตร (R-PLA/TPEE/Joncryl/WT)	R-PLA (%wt)	TPEE (%wt)	Joncryl (phr)	WT (phr)
80/20/1.5/5	80	20	1.5	5
80/20/1.5/10	80	20	1.5	10
80/20/1.5/15	80	20	1.5	15
80/20/1.5/20	80	20	1.5	20

คอมพอสิตที่ได้จะถูกอัดรีดผ่านหัวดายแล้วตัดเป็นเม็ด ก่อนนำไปอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ

3.6 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตที่เตรียมได้จากหัวข้อ 3.5.1 ไปอบไล่ความชื้นอีกครั้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ (รูปที่ 3.3) โดยใช้ภาวะดังนี้

อุณหภูมิ:	โซนที่ 1 : 165 องศาเซลเซียส
	โซนที่ 2 : 228 องศาเซลเซียส
	โซนที่ 3 : 230 องศาเซลเซียส
	โซนที่ 4 : 200 องศาเซลเซียส
ความดันในการฉีด:	โซนที่ 1 : 120 บาร์
	โซนที่ 2 : 140 บาร์
	โซนที่ 3 : 140 บาร์
	โซนที่ 4 : 140 บาร์
	โซนที่ 5 : 140 บาร์
ความดันในการย่ำ:	โซนที่ 1 : 90 บาร์
	โซนที่ 2 : 95 บาร์
	โซนที่ 3 : 90 บาร์
เวลาในการหล่อเย็น:	25.00 วินาที

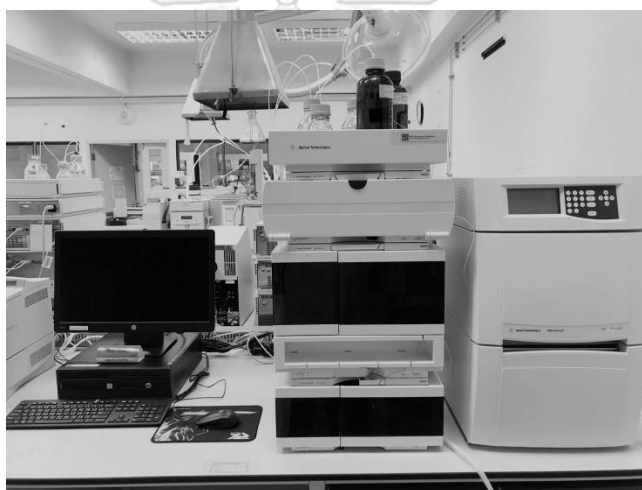


รูปที่ 3.3 เครื่องฉีดแบบ

3.7 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต

3.7.1 วิเคราะห์หาค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (GPC)

วิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของพอลิเมอร์ผสม ด้วยเครื่องเจลเพอร์มีเอชันโครมาโตกราฟี (รูปที่ 3.4) โดยใช้ Tetrahydrofuran (THF) เป็นตัวทำละลายขึ้นทดสอบ โดยพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านกระบวนการฉีดจะถูกตัดให้ได้ขนาด 3–5 มิลลิกรัม แช่ในสารละลาย THF ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สารละลายที่ได้ถูกฉีดเข้าในเครื่อง GPC ที่อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที โดยค่า M_n และ M_w จะได้จากการเทียบกราฟโดยใช้พอลิสไตรีนเป็นค่าอ้างอิงและพิจารณาอัตราส่วนระหว่างค่า M_w กับ M_n จะได้ค่า polydispersity index (PDI) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความกว้างของกราฟ



รูปที่ 3.4 เครื่องโครมาโตกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง

3.7.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR)

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตด้วยเครื่องฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (รูปที่ 3.5) โดยใช้โหมด attenuated total reflectance (ATR) ระหว่างช่วงเลขคลื่น (wavenumber) $400-4000\text{ cm}^{-1}$ โดยนำชิ้นงานมาตัดเป็นชิ้นมีขนาดประมาณ 2×3 เซนติเมตร เพื่อให้แสงอินฟราเรดส่องผ่านได้



รูปที่ 3.5 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์

3.7.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (NMR)

วิเคราะห์หาการเกิดอันตรกิริยาของสารขยายสายโซ่ Joncryl ในพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (รูปที่ 3.6) นำชิ้นทดสอบประมาณ 0.1 กรัม ละลายใน CDCl_3 ประมาณ 0.4 มิลลิลิตร ถ่ายลงในหลอด NMR ขนาด 5 มิลลิเมตร นำไปตรวจวัดด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ โดยใช้สัญญาณของ CDCl_3 ที่ 7.3 ppm เป็น chemical shift reference โดยทำการตรวจวัดสัญญาณและหาพื้นที่ใต้สัญญาณ ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ



รูปที่ 3.6 เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี

3.7.4 วิเคราะห์ดรรชนีการหลอมไหล (MFI)

ทำการทดสอบหาค่าดรรชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต ด้วยเครื่องทดสอบดรรชนีการหลอมไหล (รูปที่ 3.7) โดยใช้สภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส ด้วยน้ำหนัก 2.16 กิโลกรัม จากนั้นคำนวณและบันทึกผลในหน่วย กรัม/10 นาทีตามมาตรฐาน ASTM D1238



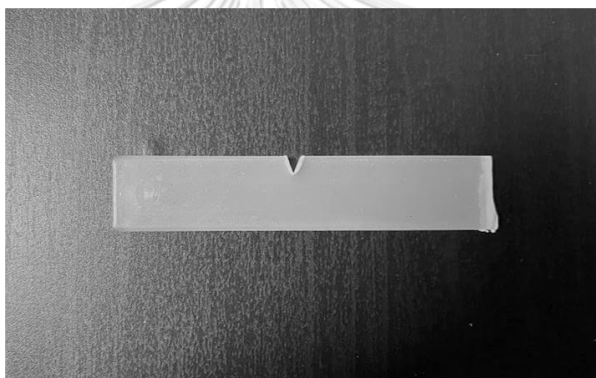
รูปที่ 3.7 เครื่องวัดดรรชนีการหลอมไหล

3.7.5 การทดสอบความทนแรงกระแทก (impact strength)

ทำการทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตแบบไอซอด (Izod impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D256 ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (รูปที่ 3.8) โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาด $63.5 \times 12.7 \times 3.2$ มิลลิเมตร (กว้าง \times ยาว \times หนา) และทำรอยบากเป็นรูปตัววี (V-notch) (รูปที่ 3.9) ด้วยเครื่องบากชิ้นงานแล้วทำการทดสอบโดยใช้น้ำหนักค้อน 2.75 จูล



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก

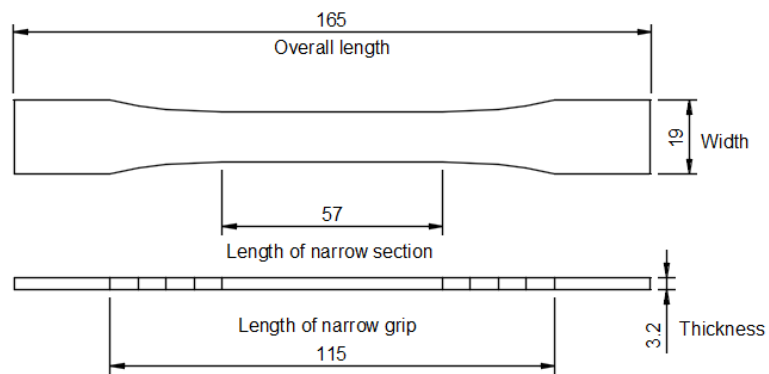


รูปที่ 3.9 ชิ้นทดสอบความทนแรงกระแทก

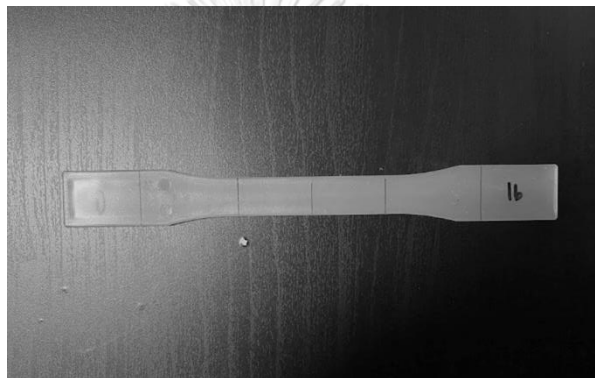
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.7.6 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง (tensile properties)

ทำการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต ตามมาตรฐาน ASTM D638 ประเภทที่ 1 (รูปที่ 3.10) โดยเตรียมชิ้นตัวอย่างทดสอบจากกระบวนการฉีดแบบด้วยเครื่องฉีดแบบ (รูปที่ 3.11) และทดสอบสมบัติความทนแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (รูปที่ 3.12) เพื่อหาค่าความทนแรงดึง (tensile strength, TS) ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus, E) และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break, EB) โดยมีระยะดึง (gauge length) เท่ากับ 115 มิลลิเมตร ขนาด load cell เท่ากับ 5 กิโลนิวตัน และดึงด้วยอัตราเร็วคงที่เท่ากับ 5 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 3.10 ขนาดของชิ้นทดสอบสมบัติความทนแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 ประเภทที่ 1



รูปที่ 3.11 ชิ้นทดสอบสมบัติความทนแรงดึง



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล

3.7.7 การทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength)

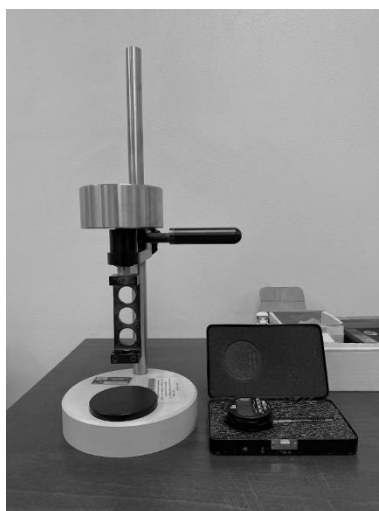
ทำการทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตแบบแรงกระทำ 3 จุด (three point bending) ตามมาตรฐาน ASTM D790 ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (รูปที่ 3.12) โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาด 12.7 x 127 x 3.3 มิลลิเมตร (กว้าง x ยาว x หนา) (รูปที่ 3.13) โดยมีระยะห่างระหว่างจุดรองรับ (span length) เท่ากับ 50 มิลลิเมตร ขนาด load cell เท่ากับ 5 กิโลนิวตันและให้แรงด้วยอัตราเร็วคงที่เท่ากับ 1.40 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 3.13 ชิ้นทดสอบความทนแรงดัดโค้ง

3.7.8 การทดสอบสมบัติความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell hardness)

ทำการทดสอบสมบัติความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Shore D) ของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยเตรียมชิ้นทดสอบรูปสี่เหลี่ยมขนาด 12.7 x 127 x 3.3 มิลลิเมตร (กว้าง x ยาว x หนา) ในการทดสอบนี้จะใช้หัวกดแบบ Shore D (รูปที่ 3.14) ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ โดยจะสุ่มกดทั่วชิ้นงาน 5 จุดต่อชิ้นทดสอบและใช้ชิ้นทดสอบเงื่อนไขละ 5 ชิ้น



รูปที่ 3.14 การทดสอบความแข็งแบบรีอคเวลล์

3.7.9 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ตรวจสอบสัณฐานวิทยาบริเวณแตกหักของชิ้นทดสอบจากการทดสอบความทนแรงกระแทกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 3.15) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า กำลังไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ โดยทำการเคลือบทองบริเวณพื้นผิวรอยแตกก่อนทำการตรวจสอบ



รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.7.10 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC)

วิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (รูปที่ 3.16) ทำได้โดยใส่เม็ดชิ้นทดสอบประมาณ 5-10 มิลลิกรัม ในจานอะลูมิเนียมแล้วปิดผนึกด้วยฝาอะลูมิเนียมที่เจาะรู จากนั้นจึงทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน โดยภาวะที่ใช้ในการทดสอบแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 เริ่มต้นการทดสอบที่อุณหภูมิ -60 องศาเซลเซียส

ขั้นที่ 2 เพิ่มอุณหภูมิจาก -60 ถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส และคงสภาวะไว้อีก 3 นาที

ขั้นที่ 3 ลดอุณหภูมิจาก 200 ไป -60 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส และคงสภาวะไว้อีก 3 นาที

ขั้นที่ 4 เพิ่มอุณหภูมิ จาก -60 ถึง 200 องศาเซลเซียสด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส

ทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยวิเคราะห์หาอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g), อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m), อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization temperature, T_{cc}), เอนทัลปีการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization enthalpy, ΔH_{cc}), เอนทัลปีการหลอมเหลว (melting enthalpy, ΔH_m) และระดับการเกิดผลึก (degree of crystallization, X_c) จากเทอร์โมแกรม (thermogram) ที่ได้ และคำนวณหา X_c ได้จากสมการที่ 3.1

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc} \times 100}{w \times \Delta H_m^0}$$

โดย	ΔH_m	คือเอนทัลปีการหลอมเหลว
	ΔH_{cc}	คือเอนทัลปีการเกิดผลึกเย็น
	ΔH_m^0	คือเอนทัลปีการหลอมเหลวของพอลิเล็กติกแอซิดที่เกิดผลึก $100\% = 93.7 \text{ J/g}$ [20]
	w	คือสัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเล็กติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต



รูปที่ 3.16 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อนและเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

3.7.11 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA)

วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (รูปที่ 3.16) ผลที่ได้จากการทดสอบ คือ อุณหภูมิการสลายตัว (degradation temperature) และปริมาณเถ้า (%char) ทำโดยการนำชิ้นงานหนักประมาณ 5–10 มิลลิกรัม ใส่ลงภาชนะที่ทำจากอะลูมินา ทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 25–800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล (gas flow rate) 60 มิลลิเมตร/นาที และอัตราการให้ความร้อน (heating rate) 10 องศาเซลเซียส/นาที

3.7.12 การทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อน (HDT)

ทำการทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต ตามมาตรฐาน ASTM D648 วิธี B ด้วยเครื่องทดสอบอุณหภูมิการอ่อนตัว (รูปที่ 3.17) โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาด 12.7 x 127 x 3.3 มิลลิเมตร (กว้าง x ยาว x หนา) อุณหภูมิเริ่มต้นในการทดสอบที่ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อนที่ 120 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง ใช้น้ำมันซิลิโคนเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน โดยใช้แรงกดที่ 1.82 เมกกะปาสคาล ความยาว Span เท่ากับ 100 มิลลิเมตร ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ชิ้นต่อการทดสอบ เพื่อหาอุณหภูมิที่ทำให้วัสดุโค้งงอลงไปที่ตำแหน่ง 0.25 มิลลิเมตร และรายงานค่าเฉลี่ยในหน่วยองศาเซลเซียส



รูปที่ 3.17 เครื่องทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนและอุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อน

3.7.13 การทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อน (VST)

ทำการทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต ตามมาตรฐาน ASTM D1525 Rate A ด้วยเครื่องทดสอบอุณหภูมิการอ่อนตัว (รูปที่ 3.17) โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาด $10 \times 10 \times 3.3$ มิลลิเมตร (กว้าง \times ยาว \times หนา) อัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อนที่ 50 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง ใช้น้ำมันซิลิโคนเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิเริ่มต้นในการทดสอบที่ 25 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงสุดในการทดสอบเป็น 200 องศาเซลเซียส และใช้แรงกดที่ 10 นิวตัน ทำการทดสอบทั้งหมด 3 ชั้นต่อการทดสอบ และรายงานค่าเฉลี่ยในหน่วยองศาเซลเซียส

3.7.14 การทดสอบการหลอมหยด

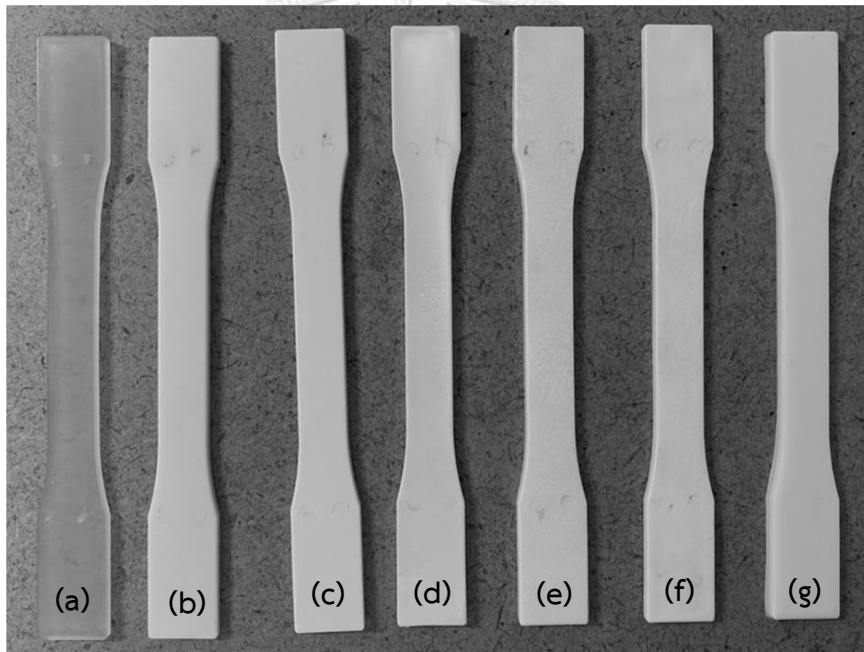
ทำการทดสอบการหลอมหยดของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตด้วยความร้อนจากเปลวไฟ โดยใช้ชิ้นงานทดสอบขนาด $12.7 \times 127 \times 3.3$ มิลลิเมตร (กว้าง \times ยาว \times หนา) และให้ความร้อนกับชิ้นทดสอบจนเกิดการติดไฟ หลังจากนั้นจับเวลา 10 วินาที สังเกตการหลอมหยดของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตแต่ละชนิด ทำการทดสอบทั้งหมด 3 ชั้นต่อการทดสอบ

บทที่ 4

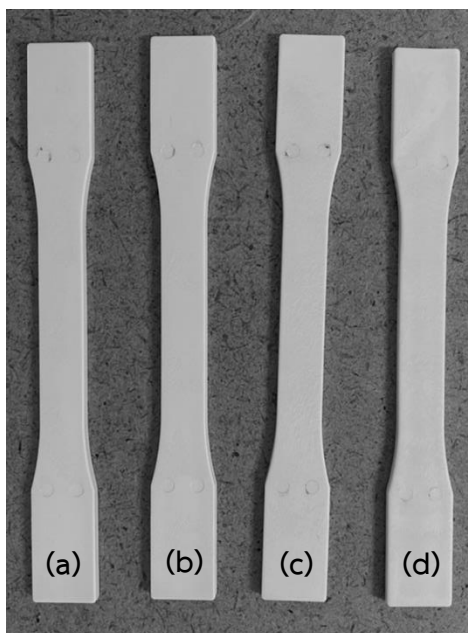
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะชิ้นทดสอบ

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะชิ้นทดสอบของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE (80/20), และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE ที่เติมด้วย Joncryl ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (80/20/0.5, 80/20/1, 80/20/1.5, และ 80/20/2) ขณะที่รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะชิ้นทดสอบของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิตที่เติมด้วยโวลลาสโทไนต์ (WT) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (80/20/1.5/5, 80/20/1.5/10, 80/20/1.5/15, และ 80/20/1.5/20) ซึ่งขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ



รูปที่ 4.1 ชิ้นทดสอบ (a) R-PLA, (b) TPEE, (c) พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE (80/20) และ พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE ที่เติมด้วย Joncryl ที่อัตราส่วน (w/w/phr) (d) 80/20/0.5, (e) 80/20/1, (f) 80/20/1.5 และ (g) 80/20/2



รูปที่ 4.2 ชิ้นทดสอบของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิตในปริมาณ WT: (a) 5, (b) 10, (c) 15 และ (d) 20 phr

จากรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 พบว่า R-PLA (รูปที่ 4.1(a)) มีสีเหลืองคล้ำ โปร่งแสง ขณะที่ TPEE (รูปที่ 4.1(b)) มีสีขาวขุ่น ทึบแสง ซึ่งเมื่อนำ R-PLA ไปผสมกับ TPEE พบว่า ชิ้นทดสอบของพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE (รูปที่ 4.1(c)) มีสีเหลืองปนขาว ทึบแสง และเมื่อนำพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE ไปผสมกับ Joncryl พบว่า ชิ้นทดสอบของพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl (รูปที่ 4.1(d-g)) มีสีขาว ทึบแสง และเมื่อนำพอลิเมอร์ผสมตามอัตราส่วนที่เลือกไว้ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ไปผสมกับ WT ในปริมาณต่าง ๆ พบว่า ชิ้นทดสอบมีสีขาวเฉดเทาและทึบแสงตามปริมาณของ WT ที่เพิ่มขึ้น

4.2 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl

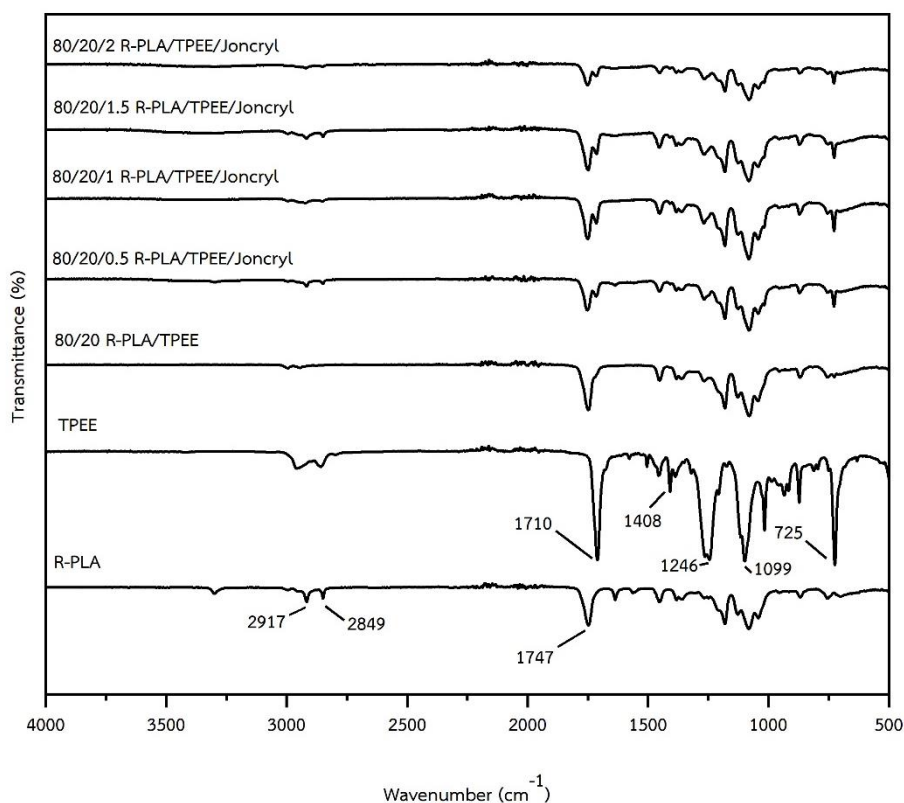
ตารางที่ 4.1 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และ พอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl

Sample	Number average molecular weight (M_n), g/mol	Weight average molecular weight (M_w), g/mol	Polydispersity (PDI)
PLA	116,503	207,050	1.8
R-PLA	82,706	146,491	1.8
80/20 R-PLA/TPEE	61,591	106,605	1.7
80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl	120,758	351,713	2.9

จากตารางที่ 4.1 พบว่า PLA มี M_n เท่ากับ 116,503 g/mol, M_w เท่ากับ 207,050 g/mol และ PDI เท่ากับ 1.8 เมื่อทำการอัดรีด PLA ซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ส่งผลทำให้ R-PLA มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยลดลง กล่าวคือ มี M_n เท่ากับ 82,706 g/mol, M_w เท่ากับ 146,491 g/mol และ PDI เท่ากับ 1.8 เนื่องจาก PLA สามารถเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนระหว่างกระบวนการขึ้นรูป โดยความร้อนจะเข้าไปทำลายสายโซ่โมเลกุลของ R-PLA ให้ขาดออกแบบอิสระ ทำให้ความยาวของสายโซ่โมเลกุลสั้นลงและมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง เมื่อทำการเติม TPEE ที่ปริมาณ 20 wt% มีผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE มีค่าต่ำกว่า R-PLA ล้วน ซึ่งมี M_n เท่ากับ 61,591 g/mol, M_w เท่ากับ 106,605 g/mol และ PDI เท่ากับ 1.7 เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยที่ต่ำของ TPEE [12] อย่างไรก็ตามเมื่อใส่สารขยายสายโซ่ Joncryl ที่ปริมาณ 1.5 phr ลงไปในพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE พบว่า มีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งมี M_n เท่ากับ 120,758 g/mol, M_w เท่ากับ 351,713 g/mol เนื่องจากสารขยายสายโซ่ Joncryl เข้าไปทำอันตรกิริยาที่ตีระหว่าง R-PLA และ TPEE ใน ส่วน ของ ค่า PDI ที่ เพิ่มขึ้น ของ พอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl เมื่อเปรียบเทียบกับ PLA, R-PLA และ 80/20 R-PLA/TPEE ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.9 เนื่องจาก Joncryl เข้าไปทำปฏิกิริยาขยายสายโซ่ระหว่าง R-PLA และ TPEE จึงทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีความยาวที่ไม่เท่ากัน

4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของชิ้นงานทดสอบ

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ โดย FT-IR สเปกตรัมแสดงดังรูปที่ 4.3



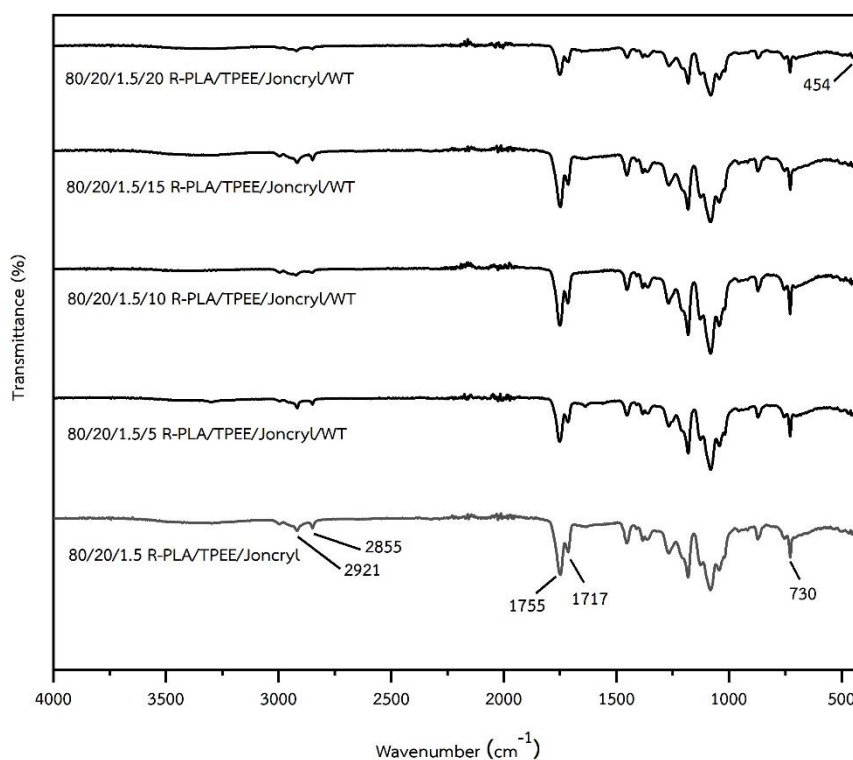
รูปที่ 4.3 FT-IR สเปกตรัมของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl

รูปที่ 4.3 พบว่า R-PLA มีพีกเอกลักษณ์ที่เลขคลื่น 2917 , 2849 และ 1747 cm^{-1} และ TPEE มีพีกเอกลักษณ์ที่เลขคลื่น 2960 , 2858 , 1710 , 1408 , 1246 , 1099 และ 725 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีกเอกลักษณ์ของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 เมื่อทำการเติม TPEE ปริมาณ 20 wt% พบว่ามีพีกเอกลักษณ์ของ R-PLA ขณะที่พีกเอกลักษณ์ของ TPEE ไม่ชัดเจนซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณของ TPEE อาจไม่เพียงพอ หากแต่พบว่าเมื่อใส่สารขยายสายโซ่ Joncryl ลงไปในพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE จะทำให้พบพีกเอกลักษณ์ของ R-PLA และ TPEE อย่างชัดเจน เนื่องจากสารขยายสายโซ่ Joncryl เข้าไปทำอันตรกิริยาที่ีระหว่าง R-PLA และ TPEE ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งเลขคลื่นและหมู่ฟังก์ชันของ R-PLA และ TPEE ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR

หมู่ฟังก์ชัน	เลขคลื่น (cm^{-1})
C-H rotation	725
O-C-C stretching	1099
C-C-O stretching	1246
Aromatic ring stretching	1408
C=C stretching	1710
C=O stretching	1747
C-H stretching of CH_3	2849, 2917

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอลิเมอร์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ โดย FT-IR สเปกตรัมแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 FT-IR สเปกตรัมของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอลิเมอร์

รูปที่ 4.4 พบว่าพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl มีพีกเอกลักษณ์ที่เลขคลื่น 2921, 2855, 1755, 1717 และ 730 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีกเอกลักษณ์ของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 เมื่อทำการเติม WT ปริมาณ 5–15 phr ไม่พบพีกเอกลักษณ์ของ WT ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณ WT ที่ใส่ลงไปในพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl อาจไม่เพียงพอ แต่เมื่อทำการเติม WT ปริมาณ 20 phr พบพีกเอกลักษณ์ที่เลขคลื่น 454 ซึ่งเป็นพีกเอกลักษณ์ของ WT แสดงให้เห็นว่ามีการใส่ WT ลงในพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณมากเพียงพอ

ตารางที่ 4.3 ตำแหน่งเลขคลื่นและหมู่ฟังก์ชันของ R-PLA, TPEE และ WT ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR

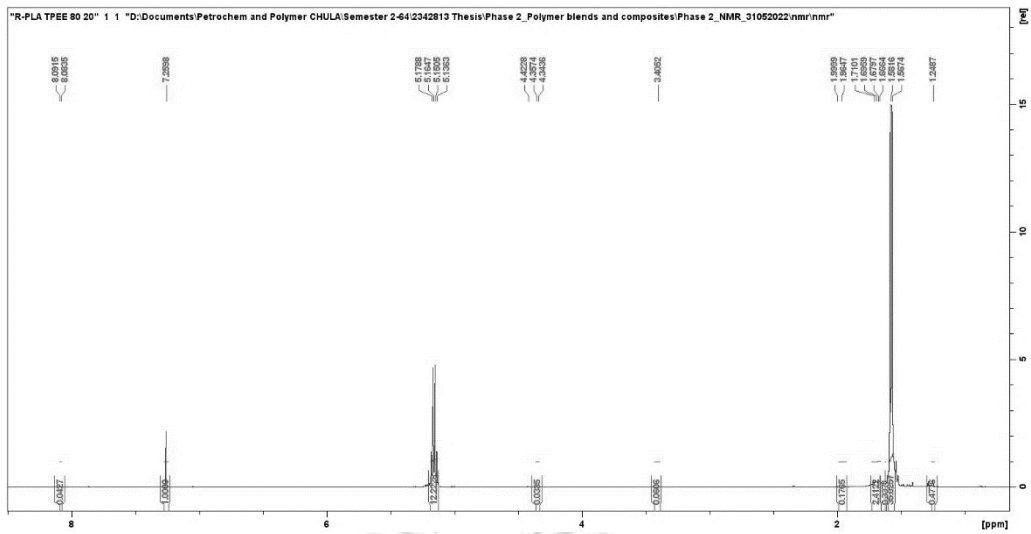
หมู่ฟังก์ชัน	เลขคลื่น (cm^{-1})
Si-O flexural and Ca-O stretching	454
C-H rotation	730
C=C stretching	1717
C=O stretching	1755
C-H stretching of CH_3	2849, 2917

4.4 การวิเคราะห์การเกิดอันตรกิริยา

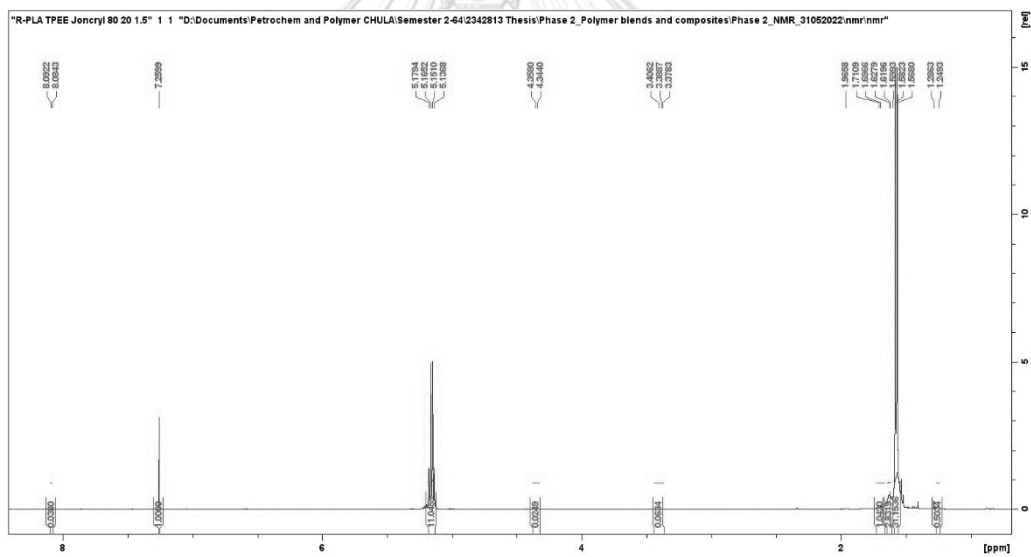
เมื่อพิจารณาค่า chemical shift ของโปรตอนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของ R-PLA และ TPEE ในพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ ดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 พบว่ามีพีกที่สำคัญของ R-PLA ปรากฏอยู่ 2 ตำแหน่ง โดยพบพีกที่ตำแหน่ง 5.1363–5.1788 และ 1.5674–1.5816 ppm ซึ่งแสดงถึงโปรตอนในโมเลกุลของ $-\text{CH}-$ ในสายโซ่หลัก โดยปรากฏเป็น 4 พีกย่อย และโปรตอนในโมเลกุลของ $-\text{CH}_3$ ในหมู่เมทิล (methyl) โดยปรากฏเป็น 2 พีกย่อย [21] นอกจากนี้ยังพบพีกที่สำคัญของ TPEE ปรากฏอยู่ 5 ตำแหน่ง ได้แก่ ที่ตำแหน่ง 8.0835–8.0915, 4.3436–4.4228, 3.4052, 1.6664–1.999, และ 1.2487 ppm ซึ่งแสดงถึงโปรตอนในโมเลกุลของวงแหวนอะโรมาติก (aromatic ring) ในสายโซ่หลัก โดยปรากฏเป็น 2 พีกย่อย, โปรตอนในโมเลกุลของหมู่เมทิลีน (methylene group) ที่อยู่ติดกับหมู่เอสเทอร์ (ester group) โดยปรากฏเป็น 3 พีกย่อย, แอลิฟาติกโปรตอนบนคาร์บอนที่ติดกับออกซิเจนในองค์ประกอบของพอลิเอเทอร์ โดยปรากฏเป็น 1 พีกย่อย, แอลิฟาติกโปรตอนบนคาร์บอนในองค์ประกอบของ 1,4-บิวทานิไดออล (1,4-butanediol) และโปรตอนในโมเลกุลของหมู่เมทิลีนในองค์ประกอบของ 1,4-บิวทานิไดออล โดยปรากฏเป็น 1

พิกย่อย [22] หากแต่พบว่าเมื่อเติมสารขยายสายโซ่ Joncryl ลงไปในพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE ที่ ปริมาณ 1.5 phr พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพิกที่เกิดจากโปรตอนของ R-PLA จำนวน 2 ตำแหน่ง กล่าวคือ จาก 1.5816–1.5674 เป็น 1.5623–1.5680 และ 5.1363–5.1788 เป็น 5.1368–5.1794 นอกจากนี้ยังพบการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพิกที่เกิดจากโปรตอนของ TPEE จำนวน 5 ตำแหน่ง กล่าวคือ จาก 8.0835–8.0915 เป็น 8.0843–8.0922, 4.3436–4.4228 เป็น 4.3440–4.3580, 3.4052 เป็น 3.3783–3.4062, 1.6664–1.999 เป็น 1.5993–1.9658 และ 1.2487 เป็น 1.2493–1.2863 แสดงถึงความเข้ากันได้บางส่วนระหว่าง R-PLA และ TPEE ดังแสดงรูปที่ 4.6 โดย หมู่อีพอกซีของสารขยายสายโซ่ Joncryl จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอกซิลที่ปลายสายโซ่ของพอลิเมอร์พอลิแล็กติกแอซิดไตรไซเคิลและสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลของสายโซ่พอลิเอสเทอร์และสายโซ่ของพอลิอีเทอร์ [12] ดังแสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8

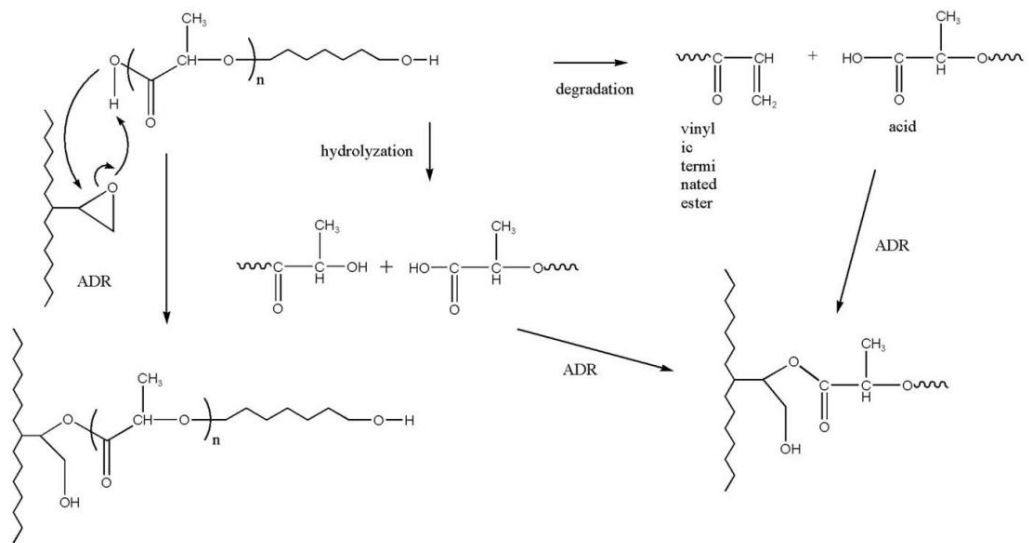
เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนความเข้มพิกของ R-PLA และ TPEE ดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 พบว่า ที่ตำแหน่ง R-PLA 1 : R-PLA 2 : TPEE 1 : TPEE 2 : TPEE 3 : TPEE 4: TPEE 5 ในพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE มีสัดส่วนความเข้มพิก เป็น 12.2228 : 35.0257 : 0.0427 : 0.0335 : 0.0606 : 0.1765, 2.4122 : 0.4776 และเมื่อทำการเติมสารขยายสายโซ่ Joncryl ลงในพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE ที่ปริมาณ 1.5 phr ดังรูปที่ 4.6 พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วน เป็น 11.0459 : 31.1536 : 0.0380 : 0.0249 : 0.0634 : 1.0420, 2.8319 : 0.5034 ซึ่งแสดงถึงจำนวนโปรตอนที่ลดลงของ $-CH-$ ในสายโซ่หลักของ R-PLA และ $-CH_2-$ ในหมู่เมทิลีนของ TPEE และซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าการเติมสารขยายสายโซ่ Joncryl ลงในพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE อาจเกิด R-PLA-Joncryl-TPEE โคพอลิเมอร์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.9



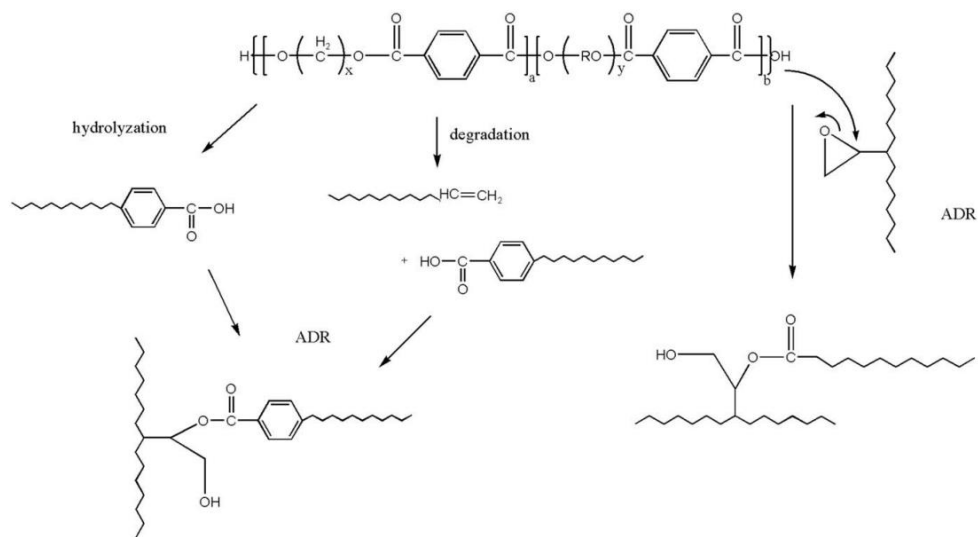
รูปที่ 4.5 $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE



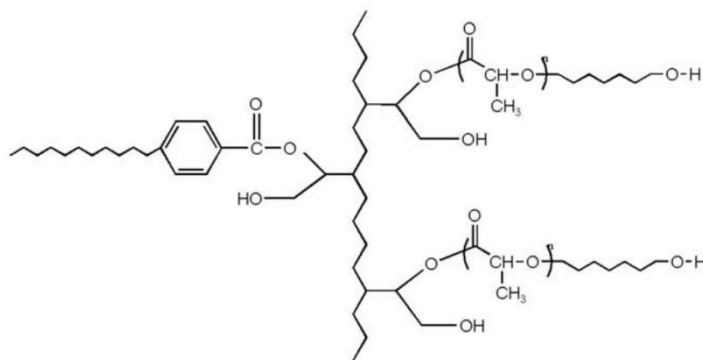
รูปที่ 4.6 $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl



รูปที่ 4.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง R-PLA กับสารขยายสายโซ่ Joncryl [12]



รูปที่ 4.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง TPEE กับสารขยายสายโซ่ Joncryl [12]



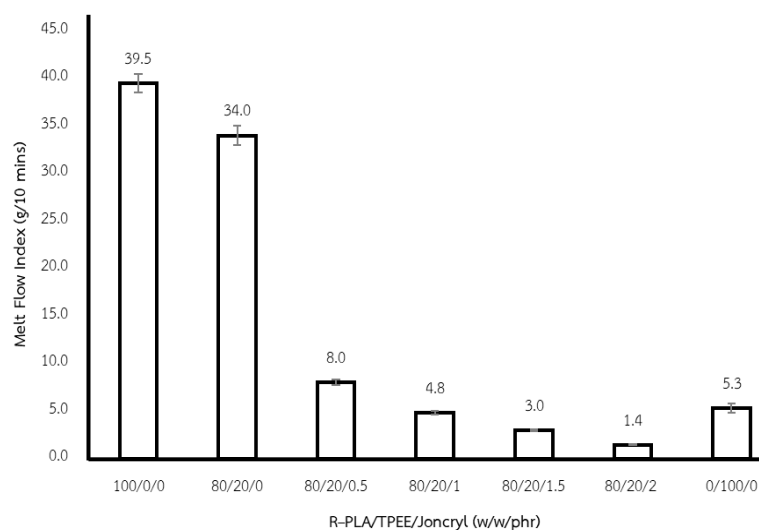
รูปที่ 4.9 โครงสร้างทางเคมีของ R-PLA-Joncryl-TPEE โคพอลิเมอร์ [12]

ตารางที่ 4.4 แสดงตำแหน่งพีคและความเข้มพีคที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ ของ R-PLA และ TPEE

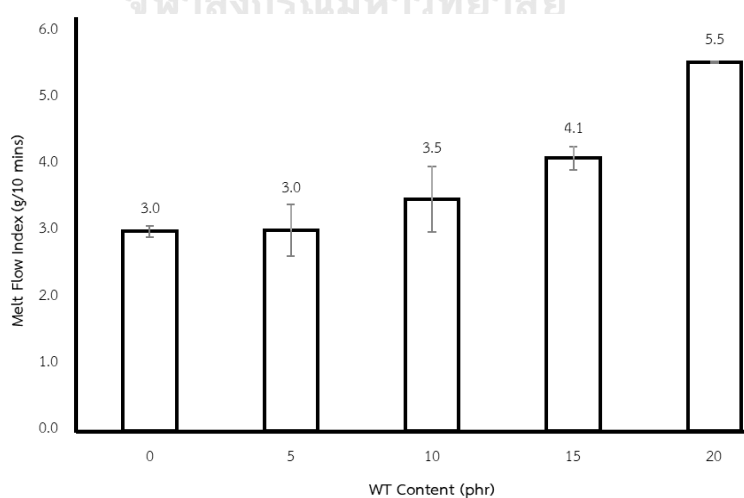
$^1\text{H-Position}$	Proton resonance	80/20		80/20/1.5			
		R-PLA/TPEE		R-PLA/TPEE/Joncryl			
		Chemical shift (ppm)	Intensity	Chemical shift (ppm)	Intensity		
R-PLA 1	-CH- in main chain	5.1788	12.2228	5.1794	11.0459		
		5.1647		5.1652			
		5.1505		5.1510			
		5.1363		5.1368			
R-PLA 2	-CH ₃ in methyl	1.5816	35.0257	1.5823	31.1536		
		1.5674		1.5680			
TPEE 1	Aromatic protons	8.0915	0.0427	8.0922	0.0380		
		8.0835		8.0843			
TPEE 2	-OOC-CH ₂ -	4.4228	0.0335	4.3580	0.0249		
		4.3574		4.3440			
		4.3436					
TPEE 3	-CH ₂ -O-CH ₂ -	3.4052	0.0606	3.4062	0.0634		
				3.3887			
				3.3783			
TPEE 4	Aliphatic protons from the residue of 1,4-butandiol	1.9999	2.4122,	1.9658	2.8319,		
		1.9647		0.1765		1.7109	1.0420
		1.7101				1.6966	
		1.6959				1.6279	
		1.6797				1.6196	
TPEE 5	-(CH ₂) ₂ -CH ₂ -OH	1.2487	0.4776	1.2863	0.5034		
				1.2493			

4.5 ดรรชนีการหลอมไหล (MFI)

รูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงผลการทดสอบดรรชนีการหลอมไหลตามมาตรฐาน ASTM D1238 เมื่อใช้น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัมและอุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส ของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE, พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl และ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต



รูปที่ 4.10 ดรรชนีการหลอมไหลของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และ พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl



รูปที่ 4.11 ดรรชนีการหลอมไหลของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต

จากรูปที่ 4.10 พบว่า ธรรมชาติการหลอมไหลของ R-PLA และ TPEE มีค่าเท่ากับ 39.5 และ 5.3 กรัม/10 นาที ตามลำดับ หรืออาจกล่าวได้ว่า R-PLA สามารถไหลได้ง่ายกว่า TPEE ดังนั้น การผสม TPEE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง ทำให้ R-PLA มีค่าธรรมชาติการหลอมไหลมีค่าลดลง ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 34.0 กรัม/10 นาที เนื่องจาก TPEE เป็นเทอร์มอพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่มีค่าธรรมชาติการหลอมไหลต่ำและโมเลกุลของ TPEE ค่อนข้างใหญ่ จึงเหนียวนำทำให้พอลิเมอร์ไหลตัวได้ช้าลง หากแต่พบว่าเมื่อใส่สารขยายสายโซ่ Joncryl ลงไปในพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE จะทำให้ค่าธรรมชาติการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด และมีค่าอยู่ในช่วง 1.4–8.0 กรัม/10 นาที ดังแสดงรูปที่ 4.11 เนื่องจาก R-PLA, TPEE และ Joncryl สามารถเกิดอันตรกิริยาที่ติดตั้งที่กล่าวไปแล้วข้างต้น จึงเหนียวนำทำให้พอลิเมอร์ผสมเคลื่อนไหลได้ยากขึ้น นอกจากนี้ พบว่า คอมพอสิตของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ด้วย WT มีค่าธรรมชาติการหลอมไหลมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าอยู่ในช่วง 3.0–5.5 กรัม/10 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl เนื่องจากลักษณะรูปเข็มและผลของการหล่อลื่นของสารตัวเติมอนินทรีย์บนสายโซ่พอลิเมอร์จึงเหนียวนำทำให้พอลิเมอร์ผสมเคลื่อนไหลได้ง่ายขึ้น

4.6 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ

ตารางที่ 4.5 แสดงสมบัติเชิงกลของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ในเทอมของความทนแรงกระแทก (IS), ความทนแรงดึง (TS), ยิงส์มอดูลัส (E), การยืดตัว ณ จุดขาด (EB), ความทนแรงดัดโค้ง (FS), มอดูลัสการดัดโค้ง (FM) และความแข็ง (hardness)

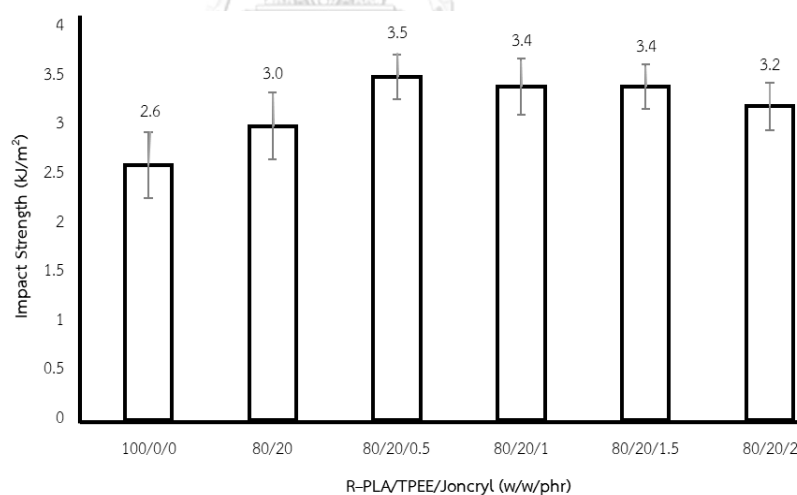
ตารางที่ 4.5 สมบัติเชิงกลของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

Sample	IS (kJ/m ²)	TS (MPa)	E (MPa)	EB (%)	FS (MPa)	FM (MPa)	Hardness
R-PLA	2.6 ± 0.3	72.3 ± 1.4	1939.7 ± 18.0	6.3 ± 0.8	110.8 ± 1.0	4648.7 ± 33.8	82.3 ± 0.5
TPEE	Not broken	37.4 ± 1.4	442.9 ± 22.1	Not broken	29.9 ± 1.3	831.4 ± 34.2	68.6 ± 0.3
R-PLA/TPEE (w/w)							
80/20	3.0 ± 0.3	50.2 ± 2.0	1470.5 ± 26.5	7.0 ± 0.2	77.0 ± 1.9	3714.7 ± 116.8	78.9 ± 0.6
R-PLA/TPEE/Joncryl (w/w/phr)							
80/20/0.5	3.5 ± 0.2	61.4 ± 1.0	1624.9 ± 13.9	9.2 ± 1.2	98.4 ± 2.0	3658.7 ± 92.4	79.0 ± 0.7
80/20/1	3.4 ± 0.3	65.0 ± 1.6	1590.4 ± 25.5	11.6 ± 1.9	96.8 ± 1.6	3554.4 ± 63.3	78.6 ± 1.1
80/20/1.5	3.4 ± 0.2	66.2 ± 1.3	1620.8 ± 8.0	11.2 ± 1.0	98.4 ± 0.6	3586.3 ± 19.1	79.7 ± 0.9
80/20/2	3.2 ± 0.2	63.1 ± 2.0	1569.6 ± 7.5	9.2 ± 0.6	94.8 ± 0.8	3441.4 ± 45.1	79.3 ± 0.7

4.6.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl

4.6.1.1 ความทนแรงกระแทก (impact strength, IS)

รูปที่ 4.12 แสดงความทนแรงกระแทกของ R-PLA, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl ที่อัตราส่วนต่าง ๆ



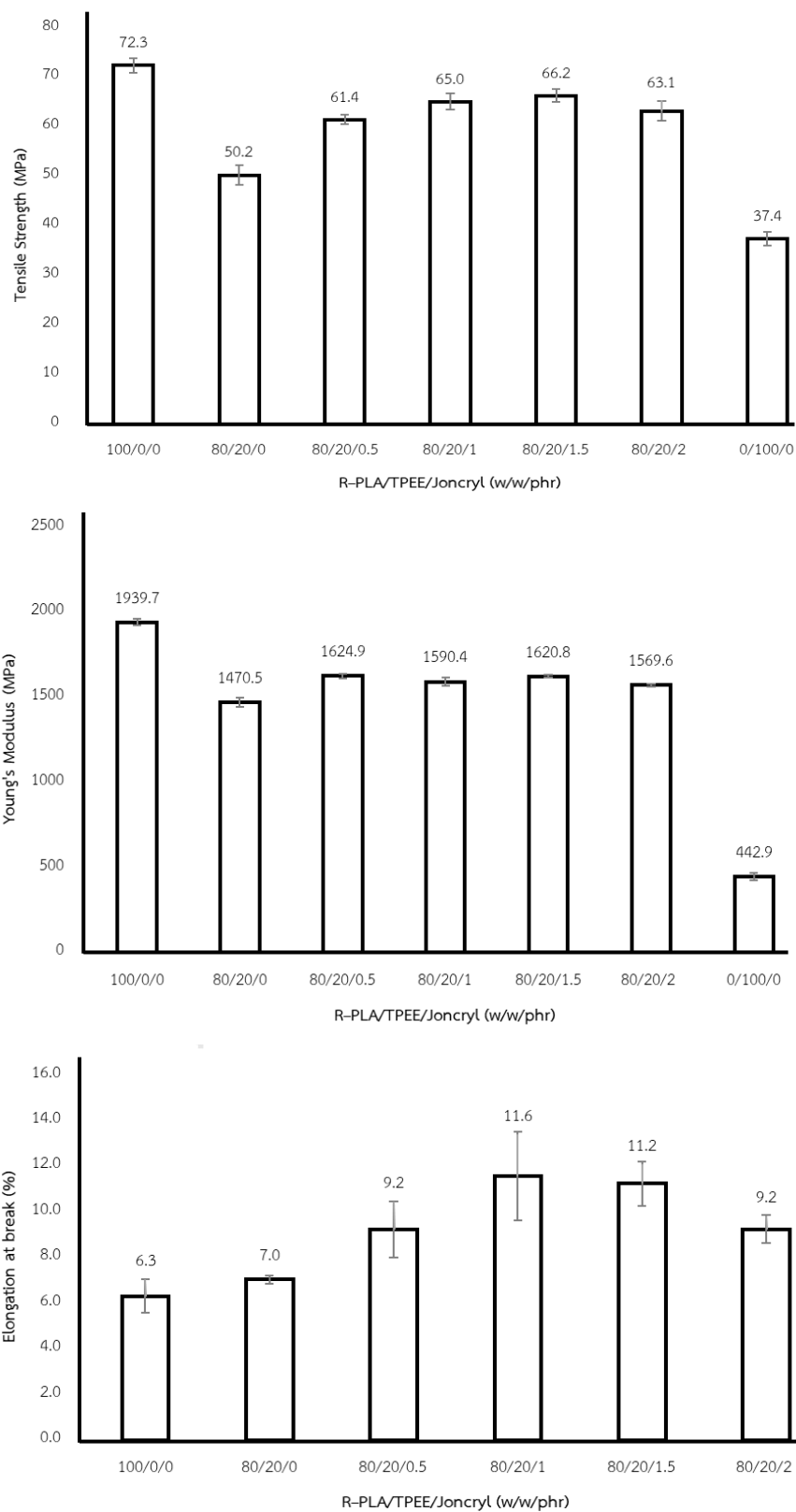
รูปที่ 4.12 ความทนแรงกระแทกของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.12 พบว่า R-PLA มีค่าทนแรงกระแทกค่อนข้างต่ำ (2.6 kJ/m²) ซึ่งแสดงถึงพลาสติกที่มีลักษณะแข็งเปราะ เนื่องจาก R-PLA มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) ค่อนข้างสูง (≈ 57 องศาเซลเซียส) ขณะที่ขึ้นทดสอบ

TPEE ไม่สามารถหาความทนแรงกระแทกภายใต้ภาวะการทดสอบนี้ เนื่องจากชิ้นงานทดสอบไม่เกิดการแตกหัก ซึ่งแสดงถึงสมบัติของพลาสติกที่เหนียว เนื่องจาก TPEE มีค่า T_g ค่อนข้างต่ำ (≈ 25 องศาเซลเซียส) และเมื่อใส่ TPEE ใน R-PLA พบว่า พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE มีความทนแรงกระแทกสูงขึ้น โดยมีค่าอยู่ที่ 3.0 kJ/m^2 เมื่อทำการเติม TPEE ปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าการเติม TPEE ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงลงใน R-PLA สามารถช่วยปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE ได้ แต่ยังไม่ดีเท่าที่ควร หากแต่พบว่าเมื่อใส่สารขยายสายโซ่ Joncryl ใน TPEE และ R-PLA พบว่า พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl มีความทนแรงกระแทกสูงขึ้นตามปริมาณสารขยายสายโซ่ Joncryl ที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยมีค่าอยู่ในช่วง $3.2\text{--}3.5 \text{ kJ/m}^2$ เมื่อทำการเติมสารขยายสายโซ่ Joncryl ปริมาณ 0.5–1.5 phr แสดงให้เห็นว่าการเติมสารขยายสายโซ่ Joncryl ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมหรือขยายสายโซ่ของพอลิเมอร์และช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง R-PLA กับ TPEE แต่เมื่อทำการเติมสารขยายสายโซ่ Joncryl ปริมาณ 2 phr พบว่า พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl มีความทนแรงกระแทกต่ำลง เนื่องมาจากสารขยายสายโซ่ Joncryl เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีและเกิดการเกาะกลุ่มกันในพอลิเมอร์ผสม

4.6.1.2 สมบัติความทนแรงดึง (tensile properties)

รูปที่ 4.13 แสดงสมบัติความทนแรงดึง (ความทนแรงดึง ยั่งสัมมอดูลัส และการยืดตัว ณ จุดขาด) ของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

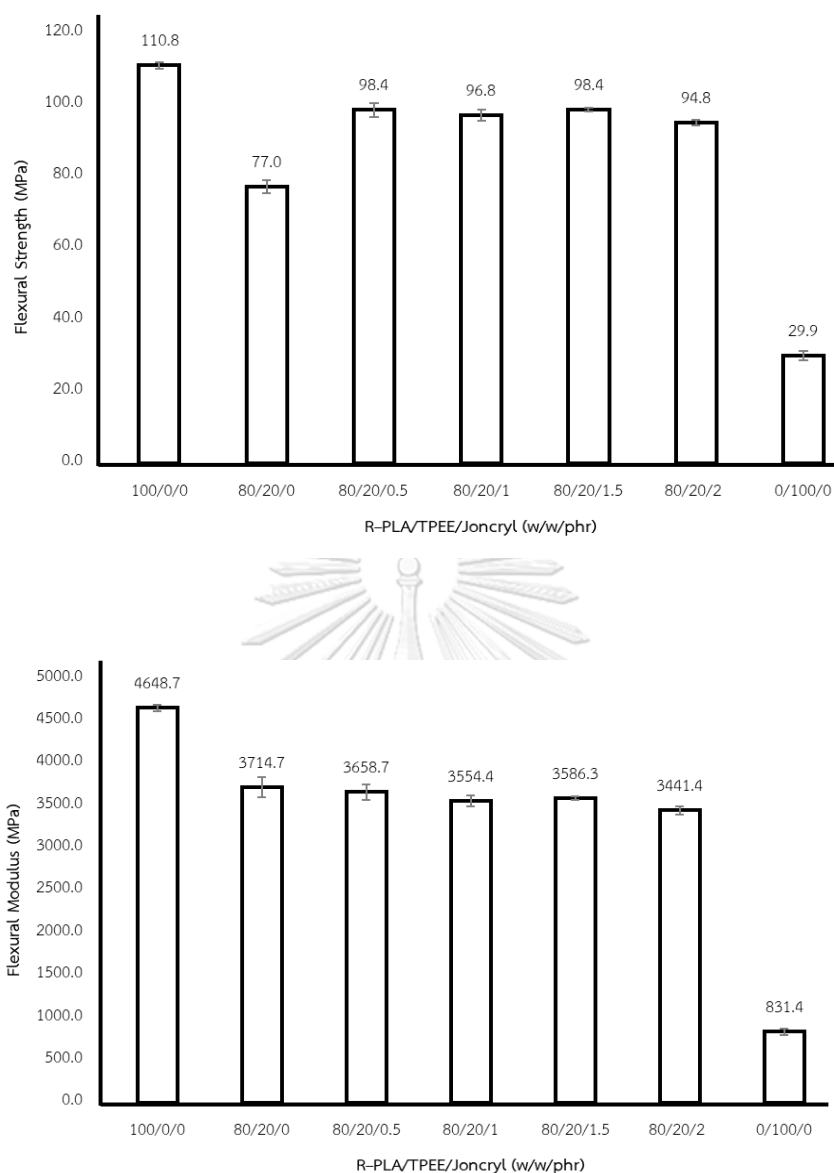


รูปที่ 4.13 สมบัติความทนแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยั่งส์มอดุลัส, (c) การยืดตัว ณ จุดขาดของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.13(a-c) พบว่า R-PLA มีความทนแรงดึง ยังสัมพันธ์ และการยืดตัว ณ จุดขาด เท่ากับ 72.3 MPa, 1939.7 MPa และ 6.3% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการเติม TPEE ที่ปริมาณ 20 wt% มีผลทำให้ความทนแรงดึงและยังสัมพันธ์ของพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE มีค่าต่ำกว่า R-PLA ล้วน ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 50.2 MPa และ 1470.5 MPa ตามลำดับ เนื่องจากความทนแรงดึงและยังสัมพันธ์ที่ต่ำของ TPEE (37.4 และ 442.9 MPa) แต่การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.0% เนื่องจากการยืดตัว ณ จุดขาดที่สูงมาก ของ TPEE (Not Broken) หากแต่พบว่าเมื่อใส่สารขยายสายโซ่ Joncryl ลงไปในพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE จะทำให้ความทนแรงดึง ยังสัมพันธ์และการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อปริมาณสารขยายสายโซ่ Joncryl เพิ่มขึ้น โดยมีค่าความทนแรงดึง ยังสัมพันธ์และการยืดตัว ณ จุดขาด อยู่ในช่วง 61.4–66.2 MPa, 1590.4–1624.9 MPa และ 9.2–11.6% ตามลำดับ และเพิ่มมากที่สุดที่ปริมาณ Joncryl 1.5 phr เนื่องจากสารขยายสายโซ่ Joncryl เข้าไปทำอันตรกิริยาที่ดีระหว่าง R-PLA และ TPEE ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว หากแต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารขยายสายโซ่ Joncryl มากขึ้น ส่งผลให้ความทนแรงดึง ยังสัมพันธ์และการยืดตัว ณ จุดขาดต่ำลง เนื่องมาจากสารขยายสายโซ่ Joncryl อาจเกิดโครงสร้างแบบร่างแห (crosslink structure)

4.6.1.3 สมบัติความทนแรงดัดโค้ง (flexural properties)

รูปที่ 4.14 แสดงความทนแรงดัดโค้งของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl ที่อัตราส่วนต่าง ๆ



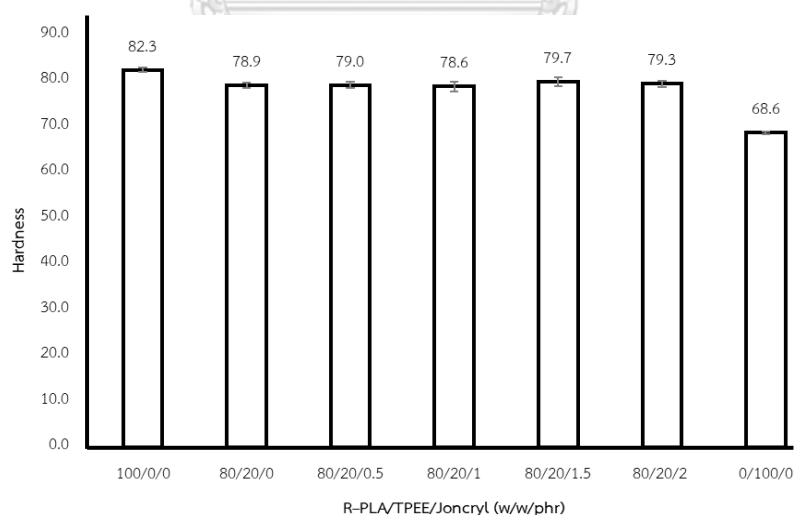
รูปที่ 4.14 สมบัติความทนแรงดัดโค้ง: (a) ความทนแรงดัดโค้ง, (b) มอดูลัสการดัดโค้งของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.14(a-b) พบว่า R-PLA มีความทนแรงดัดโค้งและมอดูลัสการดัดโค้งเท่ากับ 110.8 MPa และ 4648.7 MPa ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการเติม TPEE ที่ปริมาณ 20 wt% มีผลทำให้ความทนแรงดัดโค้งและมอดูลัสการดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE มีค่าต่ำกว่า R-PLA ล้วน ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 77 MPa และ 3714.7 MPa ตามลำดับ เนื่องจากความทนแรงดัดโค้งและมอดูลัสการดัดโค้งที่ต่ำของ TPEE (29.9 MPa และ 831.4 MPa) จึง

เป็นเหตุผลที่ทำให้พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE สามารถตัดโค้งได้ง่าย เนื่องจาก TPEE เป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง หากแต่พบว่าเมื่อใส่สารขยายสายโซ่ Joncryl ลงไปในพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE จะทำให้ความทนแรงดัดโค้งมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อปริมาณสารขยายสายโซ่ Joncryl เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 96.8–98.4 MPa และเพิ่มมากที่สุดที่ปริมาณสารขยายสายโซ่ Joncryl 1.5 phr เนื่องจากสารขยายสายโซ่ Joncryl เข้าไปทำอันตรกิริยาที่ตีระหว่าง R-PLA และ TPEE ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว หากแต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารขยายสายโซ่ Joncryl มากขึ้น ส่งผลให้ความทนแรงดัดโค้งต่ำลง เนื่องจากสารขยายสายโซ่ Joncryl อาจเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีและเกิดการเกาะกลุ่มกันในพอลิเมอร์ผสม แต่เมื่อพิจารณา modulus การดัดโค้ง พบว่า modulus การดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับผลการทดสอบยัง modulus และการยืดตัว ณ จุดขาดในการทดสอบความทนแรงดึง และความทนแรงกระแทกที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

4.5.1.4 ความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell hardness)

ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.15 แสดงผลสมบัติความแข็งแบบร็อกเวลล์ตามมาตรฐาน ASTM D2240 ของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl ที่อัตราส่วนต่าง ๆ



รูปที่ 4.15 ความแข็งแบบร็อกเวลล์ของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.15 R-PLA มีความแข็งแบบรีดิวซ์เท่ากับ 82.3 ซึ่งเมื่อทำการเติม TPEE ที่ปริมาณ 20 wt% และสารขยายสายโซ่ Joncryl ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าความแข็งแบบรีดิวซ์ของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่า R-PLA ล้วน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 78.6–79.7 เนื่องจากความแข็งแบบรีดิวซ์ที่ต่ำของ TPEE (68.6) ส่งผลให้พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl ข้างต้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกเลือกพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด ไปเตรียมเป็นคอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 5, 10, 15 และ 20 phr

ตารางที่ 4.6 แสดงสมบัติเชิงกลของคอมพอสิต 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ด้วย WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ในเทอมของความทนแรงกระแทก (IS), ความทนแรงดึง (TS), ยั่งสัมมอดูลัส (E), การยืดตัว ณ จุดขาด (EB), ความทนแรงดัดโค้ง (FS), มอดูลัสการดัดโค้ง (FM) และความแข็ง (hardness)

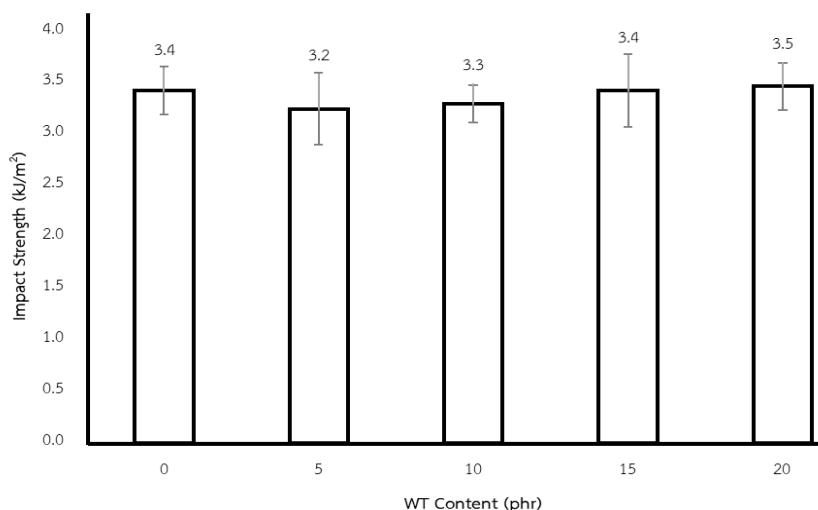
ตารางที่ 4.6 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิต 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ด้วย WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

Sample	IS (kJ/m ²)	TS (MPa)	E (MPa)	EB (%)	FS (MPa)	FM (MPa)	Hardness
R-PLA/TPEE/Joncryl/WT (w/w/phr/phr)							
80/20/1.5/0	3.4 ± 0.2	66.2 ± 1.3	1620.8 ± 8.0	11.2 ± 1.0	98.4 ± 0.6	3586.3 ± 19.1	79.7 ± 0.9
80/20/1.5/5	3.2 ± 0.4	61.5 ± 1.1	1676.1 ± 19.3	11.3 ± 1.1	87.6 ± 1.6	3446.7 ± 67.2	78.3 ± 1.4
80/20/1.5/10	3.3 ± 0.2	58.7 ± 1.8	1712.6 ± 11.7	9.8 ± 1.2	88.6 ± 1.1	3523.3 ± 58.8	76.6 ± 1.2
80/20/1.5/15	3.4 ± 0.4	61.0 ± 1.9	1844.7 ± 14.5	8.2 ± 0.8	94.6 ± 1.5	4036.1 ± 104.1	76.9 ± 2.0
80/20/1.5/20	3.5 ± 0.2	58.2 ± 2.4	2004.1 ± 86.0	7.6 ± 1.5	100.1 ± 2.0	4638.4 ± 131.6	78.2 ± 1.4

4.6.2 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิต R-PLA/TPEE/Joncryl/WT

4.6.2.1 ความทนแรงกระแทก (impact strength, IS)

รูปที่ 4.16 แสดงความทนแรงกระแทกของคอมพอสิต 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ด้วย WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

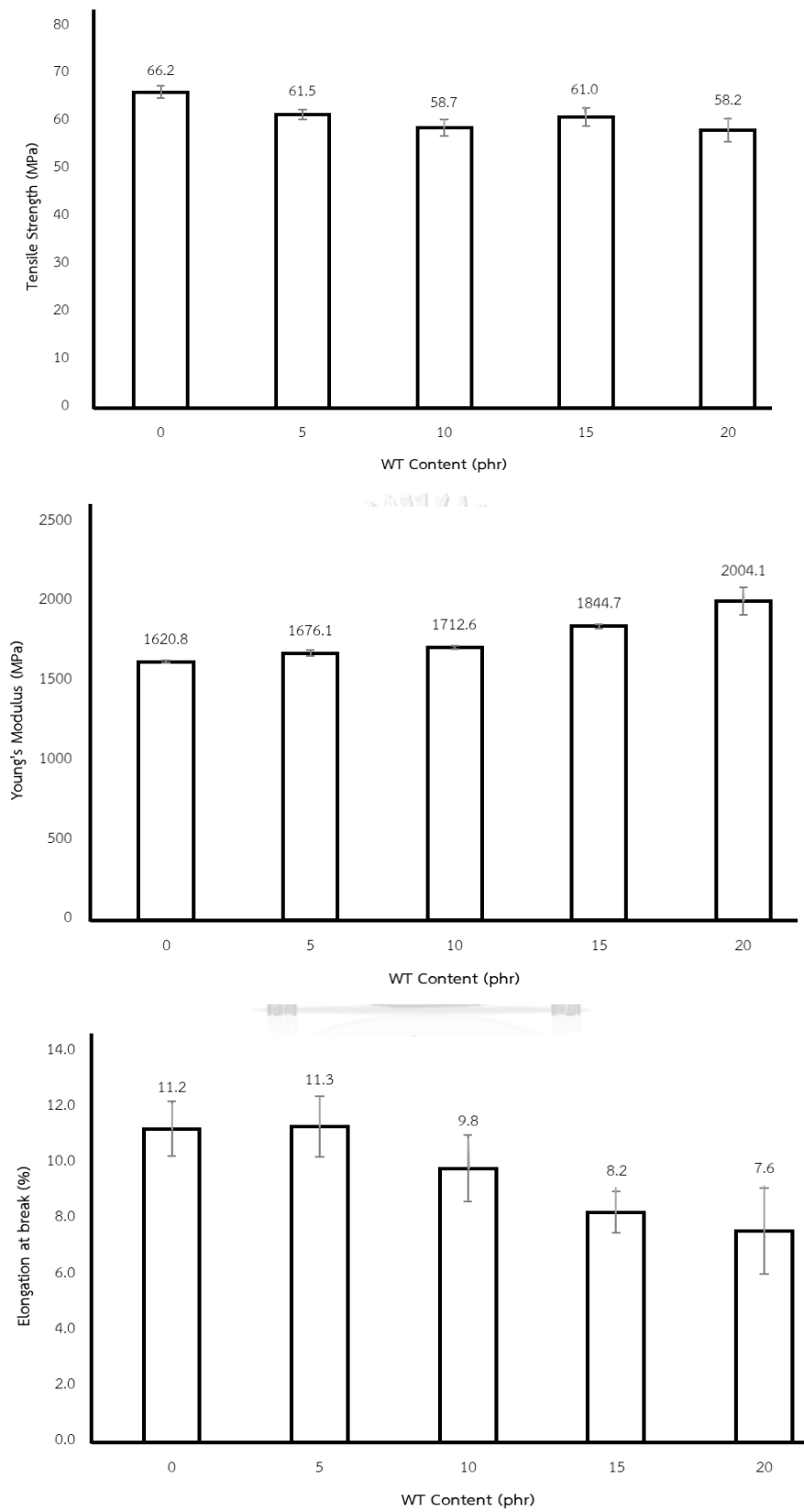


รูปที่ 4.16 ความทนแรงกระแทกของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.16 พอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl มีความทนแรงกระแทกเท่ากับ 3.4 kJ/m² และเมื่อทำการเติม WT ที่ปริมาณ 5–20 phr พบว่า ความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ พอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ล้วน เนื่องจากอนุภาค WT มีความแข็งตึง (stiffness) สูง จึงขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ หากแต่ยังมีค่าสูงกว่า R-PLA ล้วน (2.6 kJ/m²)

4.6.2.2 สมบัติความทนแรงดึง (tensile properties)

รูปที่ 4.17 แสดงสมบัติความทนแรงดึง (ความทนแรงดึง ยังสัมมอดูลัส และการยืดตัว ณ จุดขาด) ของคอมพอสิต 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ด้วย WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ



รูปที่ 4.17 สมบัติความทนแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยั่งส์มอดุลัส, (c) การยืดตัว ณ จุดขาดของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต

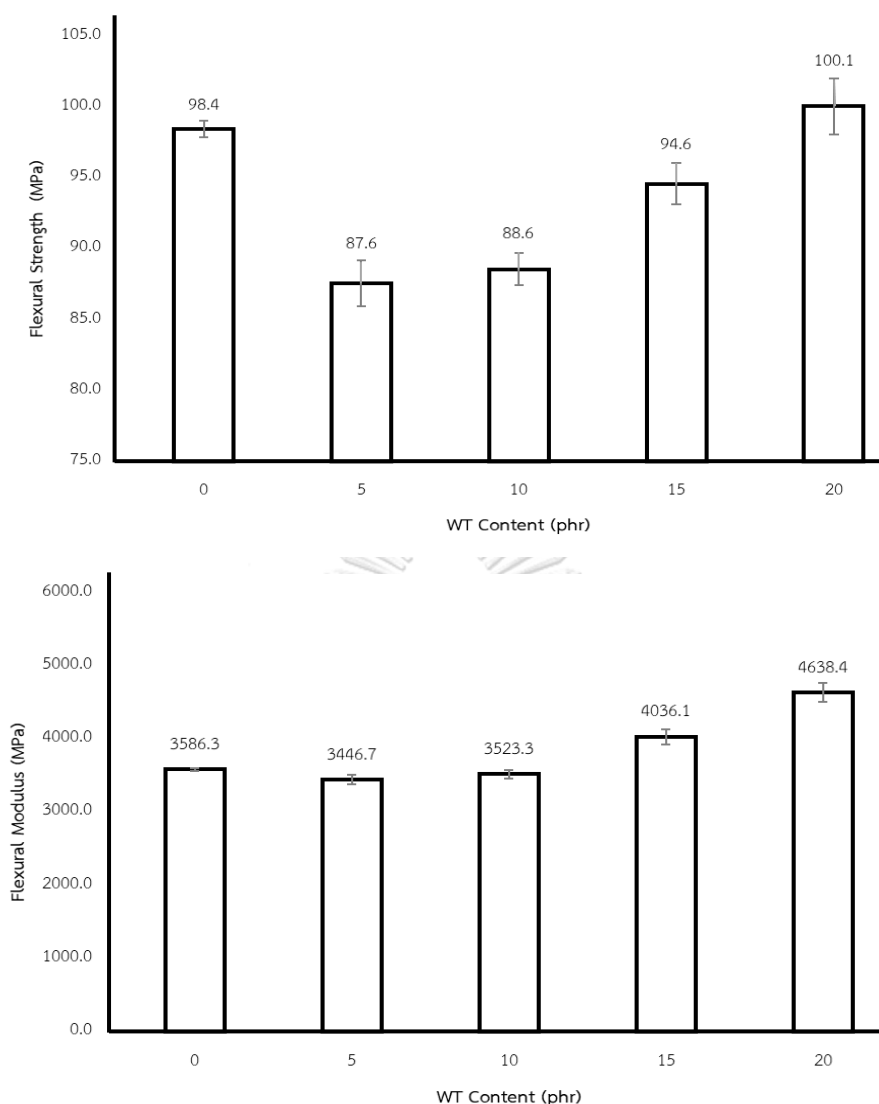
จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.17(a) พบว่า พอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl มีความทนแรงดึงเท่ากับ 66.2 MPa และเมื่อทำการเติม WT ที่ปริมาณ 5–20 phr ส่งผลให้ความทนแรงดึงของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าลดลงต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ล้วน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 58.2–61.5 MPa เนื่องจากอนุภาค WT เป็นสารอนินทรีย์ที่มีความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ไม่ดี จึงทำให้การส่งผ่านแรงได้ไม่ดีและเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ผสม ทำให้ความทนแรงดึงของคอมพอสิตมีค่าลดลงเล็กน้อย

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.17(b) พบว่า พอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl มียังสัมมอดูลัสเท่ากับ 1620.8 MPa และเมื่อทำการเติม WT ที่ปริมาณ 5–20 phr ส่งผลให้ยังสัมมอดูลัสของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ล้วน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1676.1–2004.1 MPa เนื่องจากความแข็งดึงของ WT ขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ผสม โดยยังสัมมอดูลัสของคอมพอสิตได้รับการปรับปรุงสูงสุด เมื่อเติม WT ที่ปริมาณ 20 phr (2004.1 MPa)

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.17(c) พบว่า พอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl มีการยืดตัว ณ จุดขาดเท่ากับ 11.2% และเมื่อทำการเติม WT ที่ปริมาณ 5–20 phr ส่งผลให้การยืดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ล้วน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 7.6–11.3% เนื่องจากความแข็งดึงของ WT ขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ผสม อีกทั้งมีอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์ต่ำ อย่างไรก็ตาม การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลงตามปริมาณ WT ที่เพิ่มขึ้น โดยการยืดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตต่ำสุด เมื่อเติม WT ที่ปริมาณ 20 phr (7.6%) ทั้งนี้เนื่องจากเกิดช่องว่างระหว่างสารตัวเติม WT กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่เกิดจากความไม่เข้ากัน

4.6.1.3 สมบัติความทนแรงดัดโค้ง (flexural properties)

รูปที่ 4.18 แสดงความทนแรงดัดโค้งของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิตด้วย WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ



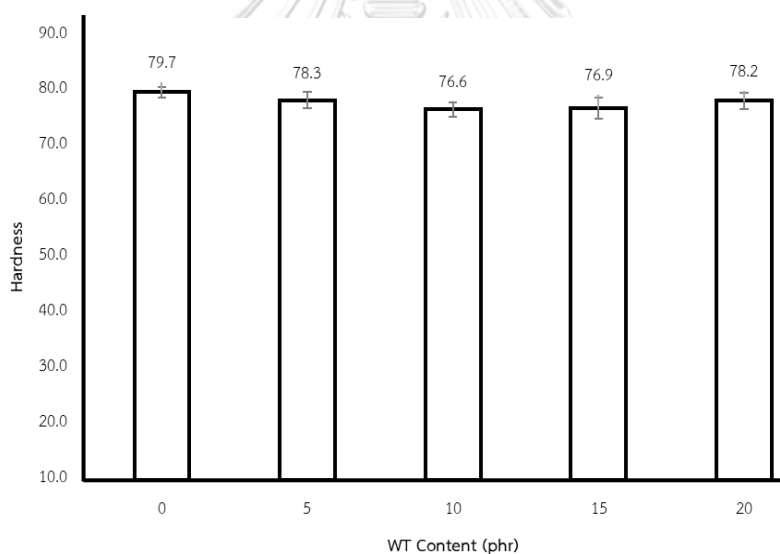
รูปที่ 4.18 สมบัติความทนแรงดัดโค้ง: (a) ความทนแรงดัดโค้ง, (b) โมดูลัสการดัดโค้งของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.18(a) พบว่า พอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl มีความทนแรงดัดโค้งเท่ากับ 98.4 MPa ซึ่งเมื่อทำการเติม WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ มีผลทำให้ความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิตอัตราส่วน 5–15 phr มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ล้วน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 87.6–94.6 MPa ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณ WT ไม่เพียงพอให้เกิดการเสริมแรงขึ้น หากแต่ปริมาณ WT เพิ่มขึ้นเป็น 20 phr ส่งผลให้ความทนแรงดัดโค้งมีการเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นถึงการเกิดอันตรกิริยาที่ไม่ดีระหว่างสารตัวเติมกับพอลิเมอร์ผสมและเมื่อใส่ในปริมาณที่มากขึ้น จะส่งผลให้ความแข็งแรงตึงมากจึงทำให้ทนแรงดัดโค้งได้มาก

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.18(b) พบว่า พอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl มีมอดูลัสการดัดโค้งเท่ากับ 3586.3 MPa ซึ่งเมื่อทำการเติม WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ มีผลทำให้มอดูลัสการดัดโค้งของคอมพอสิตอัตราส่วน 5–10 phr มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ล้วน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 3446.7–3523.3 MPa ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณ WT ไม่เพียงพอให้เกิดการเสริมแรงขึ้น หากแต่ปริมาณ WT เพิ่มขึ้นเป็น 15–20 phr ส่งผลให้มอดูลัสการดัดโค้งมีการเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นถึงการเกิดอันตรกิริยาที่ไม่ดีระหว่างสารตัวเติมกับพอลิเมอร์ผสมและเมื่อใส่ในปริมาณที่มากขึ้น จะส่งผลให้ความแข็งแรงตึงมากจึงทำให้ทนแรงดัดโค้งได้มาก

4.6.1.4 ความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell hardness)

ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.19 แสดงผลสมบัติความแข็งแบบร็อคเวลล์ตามมาตรฐาน ASTM D2240 ของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิตด้วย WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ



รูปที่ 4.19 ความแข็งแบบร็อคเวลล์ของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต

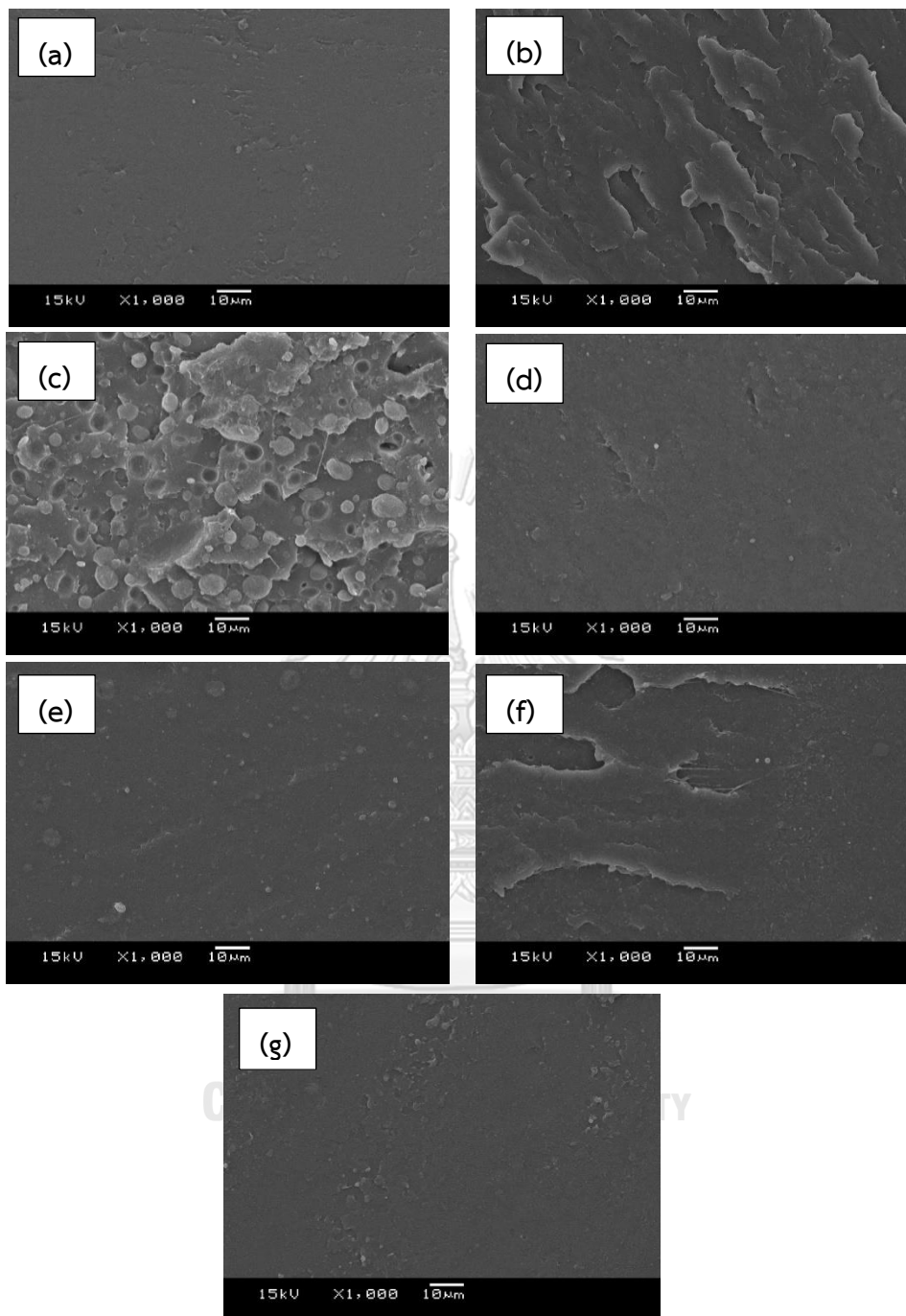
จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.19 พอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl มีความแข็งแบบร็อคเวลล์เท่ากับ 79.7 ซึ่งเมื่อทำการเติม WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า ความแข็งแบบร็อคเวลล์ของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากโพลีเอสเทอร์ถูกฝังอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 76.6–78.3 หากแต่การทดสอบ

ความแข็งแบบรีอคเวิลล์เป็นการทดสอบบนพื้นผิวของชิ้นงาน จึงส่งผลให้ความแข็งของคอมพอสิตเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ

4.7 สัณฐานวิทยา (morphology)

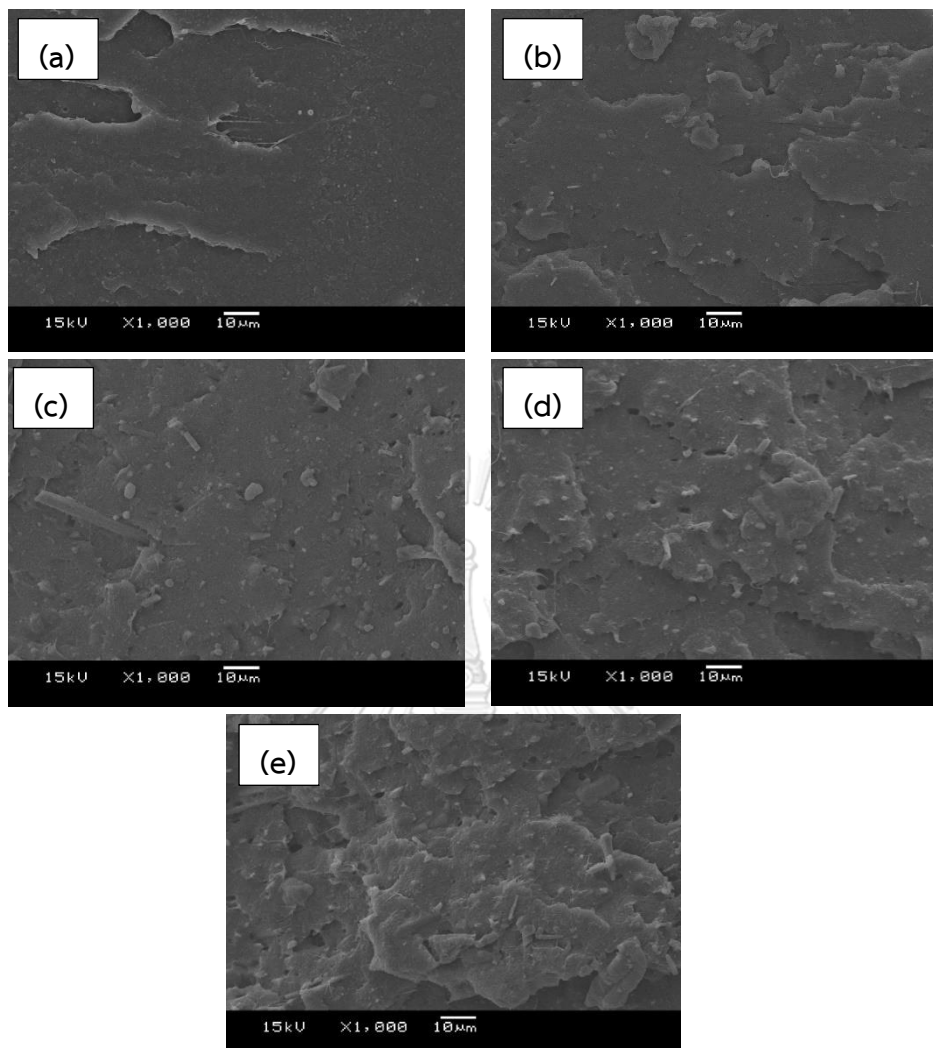
รูปที่ 4.20 และ 4.21 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทกของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE, พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl และ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต ซึ่งตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภายใต้กำลังขยาย 1,000 เท่า





รูปที่ 4.20 สัณฐานวิทยาของ (a) R-PLA, (b) TPEE, พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE ที่อัตราส่วน (c) 80/20 และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl ที่อัตราส่วน (d) 80/20/0.5, (e) 80/20/1, (f) 80/20/1.5 และ (g) 80/20/2 ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

จากรูปที่ 4.20(a) พบว่า R-PLA มีพื้นผิวรอยแตกหักค่อนข้างเรียบ ซึ่งเป็นลักษณะของวัสดุที่มีความแข็งแรง ขณะที่ TPEE มีพื้นผิวรอยแตกหักขรุขระเป็นคลื่นกระจายทั่วไปบนพื้นผิว (รูปที่ 4.20(b)) ซึ่งแสดงถึงวัสดุที่มีความเหนียวและยืดหยุ่น และเมื่อเติม TPEE ลงใน R-PLA ที่ปริมาณ TPEE ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่า พื้นผิวบริเวณรอยแตกหักมีลักษณะหยาบมาก ซึ่งเกิดการแยกวัฏภาคระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง กล่าวคือ TPEE ที่มีอนุภาคเป็นทรงกลม (droplet) กระจายตัวสม่ำเสมอในเมทริกซ์ของ R-PLA นอกจากนี้ พบว่า อนุภาคของ TPEE และหลุม (hole) ที่เกิดจากอนุภาค TPEE ถูกดึงออกมา (pull out) ขณะทดสอบความทนแรงกระแทกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการเกาะกลุ่ม (aggregation) ของ TPEE ซึ่งแสดงถึงความไม่เข้ากันระหว่างพอลิเมอร์ผสม อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเติมสารขยายสายโซ่ Joncryl ใน TPEE และ R-PLA ที่ปริมาณ 0.5–1.5 phr พบว่า พื้นผิวบริเวณรอยแตกมีลักษณะเรียบ (รูปที่ 4.20(c-f)) แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้มากขึ้น (compatible) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ปริมาณสารขยายสายโซ่ Joncryl 1.5 phr พบว่า มีลักษณะของเส้นที่ยืดออก แสดงให้เห็นถึงความยืดหยุ่นระหว่างพอลิเมอร์ผสม ซึ่งส่งผลให้ความทนแรงกระแทกและการยืดตัว ณ จุดขาด สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน นอกจากนี้ปริมาณสารขยายสายโซ่ Joncryl 2 phr พบว่า มีลักษณะเกาะกลุ่ม (aggregation) ของสารขยายสายโซ่ Joncryl ซึ่งส่งผลให้ความทนแรงกระแทกและการยืดตัว ณ จุดขาด ลดลงเล็กน้อย จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมข้างต้น มีความสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl ที่ได้กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 4.21 สัณฐานวิทยาของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิตที่ปริมาณ WT: (a) 0, (b) 5, (c) 10, (d) 15 และ (e) 20 phr ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

จากรูปที่ 4.21 พบว่า การเติม WT ที่ปริมาณ 5 phr (รูปที่ 4.21(a)) พบว่า มีปริมาณของ WT กระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์น้อยมาก ส่งผลให้ไม่เกิดการเสริมแรงจากตัวเติมอินทรีย์ แต่เมื่อเติม WT ที่ปริมาณ 10–20 phr (รูปที่ 4.21(b–e)) พบว่า มีปริมาณของ WT กระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์เพิ่มขึ้นตามปริมาณ WT ที่เพิ่มขึ้นและเกิดช่องว่างจากการหลุดออกของ WT บางส่วนระหว่างทำการทดสอบความทนแรงกระแทก ซึ่งสอดคล้องกับผลสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตที่ได้กล่าวมาข้างต้น

4.8 สมบัติทางความร้อนของชั้นทดสอบ

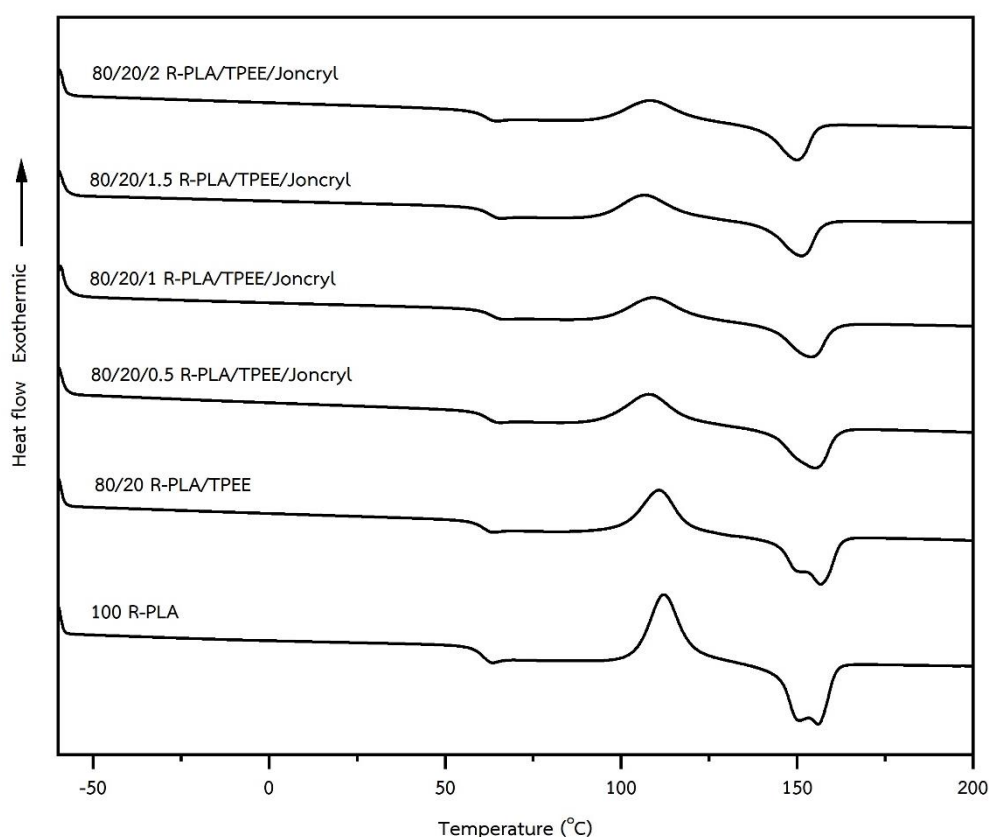
4.8.1 พฤติกรรมการเกิดผลึก (crystallinity behavior)

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดผลึกของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE, พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl และ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต ด้วยเทคนิค DSC ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.7 ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g), อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m), อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c), อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization temperature, T_{cc}), เอนทัลปีการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization enthalpy, ΔH_{cc}) และเอนทัลปีการหลอมเหลว (melting enthalpy, ΔH_m) ที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง (second heating scan) จากนั้นคำนวณหาระดับการเกิดผลึก (degree of crystallization, X_c) จากสมการที่ 3.1 ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้อัตราการให้ความร้อน/เย็นเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส/นาที

ตารางที่ 4.7 พฤติกรรมการเกิดผลึกของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE, พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl และ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต

Sample	PLA					
	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	ΔH_{cc} (J/g)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)
R-PLA	60.0	112.2	31.8	150.7, 156.0	31.0	0.9
R-PLA/TPEE (w/w)						
80/20	60.1	110.8	24.4	153.3, 156.7	23.8	0.8
R-PLA/TPEE/Joncryl (w/w/phr)						
80/20/0.5	61.5	107.8	20.2	155.0	21.9	2.3
80/20/1	62.7	109.7	16.4	154.0	17.3	1.2
80/20/1.5	61.7	106.5	16.8	151.3	16.6	0.3
80/20/2	60.5	108.5	15.3	150.0	15.8	0.7
R-PLA/TPEE/Joncryl/WT (w/w/phr/phr)						
80/20/1.5/5	62.7	104.3	10.2	151.5	12.4	2.9
80/20/1.5/10	62.2	106.7	11.3	151.8	13.2	2.5
80/20/1.5/15	63.2	108.5	11.7	153.5	11.5	0.3
80/20/1.5/20	64.0	109.3	10.3	154.5	10.2	0.1

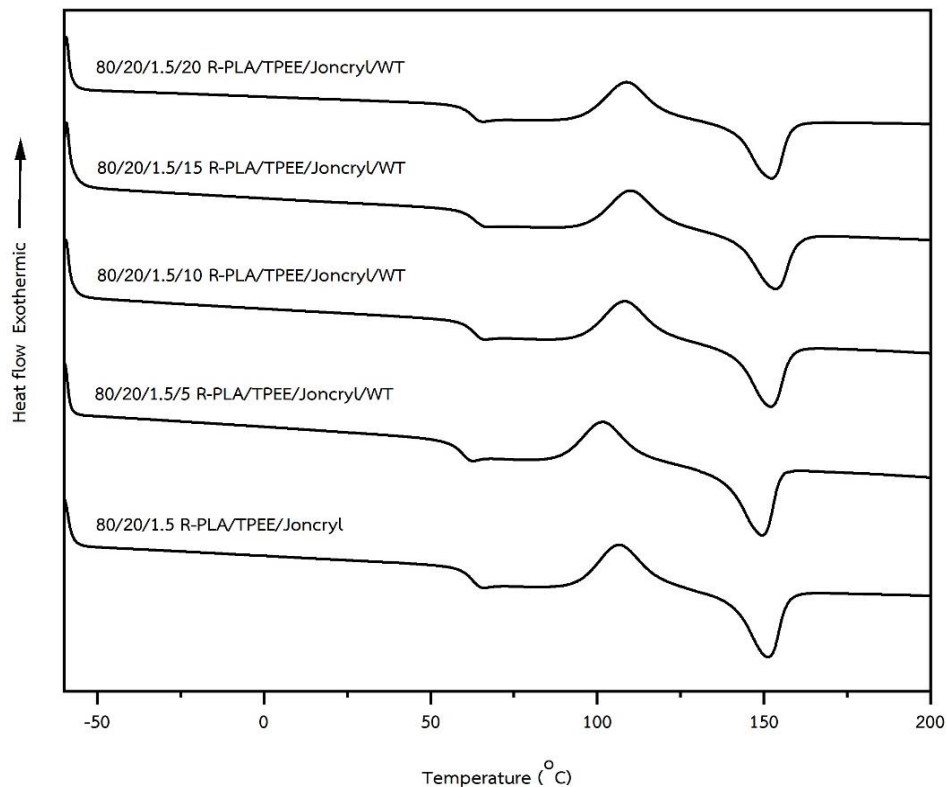
รูปที่ 4.22 และ 4.23 แสดง DSC เทอร์โมแกรมของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE, พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl และ 80/20/1.5R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง



รูปที่ 4.22 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl

จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.22 พบว่า R-PLA มี T_g เท่ากับ 60.0 องศาเซลเซียส และเมื่อผสม TPEE ที่ปริมาณ 20 wt% กับ R-PLA พบว่า ปรากฏ T_g ของ R-PLA ในพอลิเมอร์ผสม มีค่าเท่ากับ 60.1 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE ไม่มีความเข้ากันได้ (immiscible blends) หากแต่พบว่าเมื่อใส่สารขยายสายโซ่ Joncryl ใน TPEE และ R-PLA พบว่า ปรากฏ T_g ของ R-PLA ในทุกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นจาก R-PLA ล้วน ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 60.5–62.7 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าสายโซ่โมเลกุลของ R-PLA เคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของ

สมบัติเชิงกลที่ได้กล่าวมาข้างต้น เมื่อพิจารณา ΔH_{cc} พบว่า R-PLA มี T_{cc} และ ΔH_{cc} เท่ากับ 112.2 องศาเซลเซียสและ 31.8 จูลต่อกรัม ตามลำดับ และเมื่อผสม TPEE ที่ปริมาณ 20 wt% กับ R-PLA พบว่า ปรากฏ T_{cc} และ ΔH_{cc} ของ R-PLA มีค่าลดลง 110.8 องศาเซลเซียสและ 24.8 จูลต่อกรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเติม TPEE ลงใน R-PLA ทำให้ R-PLA ในพอลิเมอร์ผสมเกิดผลึก ในขณะที่หลอมเหลวได้เร็วขึ้น หากแต่พบว่าเมื่อใส่สารขยายสายโซ่ Joncryl ใน TPEE และ R-PLA พบว่า ปรากฏ ΔH_{cc} ของ R-PLA ในทุกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ Joncryl เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 15.3–20.2 จูลต่อกรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเติมสารขยายสายโซ่ Joncryl ลงใน TPEE และ R-PLA ทำให้ R-PLA เกิดสายโซ่โมเลกุลแบบกิ่งที่แตกแขนงและไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจลดความสามารถในการตกผลึกแบบเย็นที่จำเป็นต่อการเติบโตของผลึก [12] เมื่อพิจารณา T_m ของ R-PLA และ พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE พบว่า T_m ของ R-PLA ปรากฏพิก 2 ตำแหน่ง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 150.7–156.0 และ 153.3–156.7 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากว่า R-PLA เกิดผลึกที่ไม่สมบูรณ์และเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ จากนั้นผลึกที่หลอมเหลวสามารถเกิดผลึกใหม่ (recrystallization) ที่มีโครงสร้างสมบูรณ์กว่าและหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงกว่า [23] นอกจากนี้ T_m ของ R-PLA ในพอลิเมอร์ผสม พบว่า มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ R-PLA ล้วน เนื่องจากสารขยายสายโซ่ Joncryl ไปขัดขวางการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลอย่างสมบูรณ์ของ R-PLA ซึ่งสอดคล้องกับค่า X_c ที่มีค่าลดลงเมื่อปริมาณ Joncryl เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.23 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต

จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.23 พบว่า คอมพอสิตของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ที่เติมด้วย WT ปรากฏ T_g ของ PLA ซึ่งอยู่ในช่วง 62.7–64.0 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณา T_{cc} และ ΔH_{cc} ของ R-PLA ในทุกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมมีค่าแปรผกผันกัน กล่าวคือ T_{cc} จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ WT เพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ΔH_{cc} จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ WT เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเติม WT ลงไปในพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ไม่ได้เป็นสารก่อผลึกและยังเป็นการขัดขวางการจัดเรียงสายโซ่โพลิเมอร์อย่างสมบูรณ์ของ R-PLA [18] ซึ่งสอดคล้องกับค่า X_c ที่มีค่าลดลงเมื่อปริมาณ WT เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า T_m ของ R-PLA ในคอมพอสิต พบว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงแบบมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5R-PLA/TPEE/Joncryl ล้วน

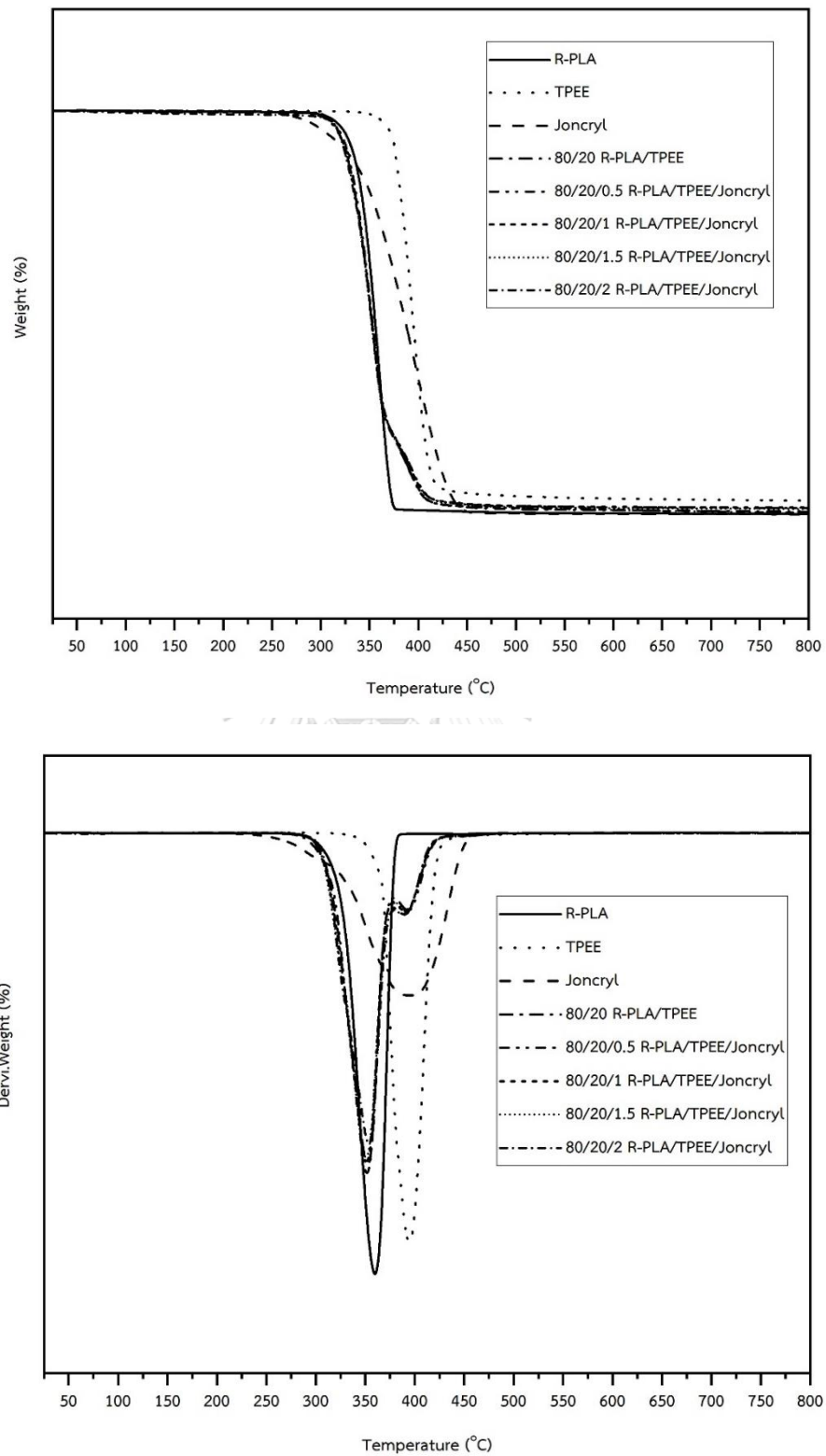
4.8.2 เสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability)

ผลการวิเคราะห์หาเสถียรภาพทางความร้อนของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE, พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl และ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิเริ่มสลายตัว (T_{onset}), อุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด (T_{max}), อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว (T_{endset}) และปริมาณเถ้า (char) ที่เหลืออยู่ ณ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.8 เสถียรภาพทางความร้อนของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE, พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl และ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต

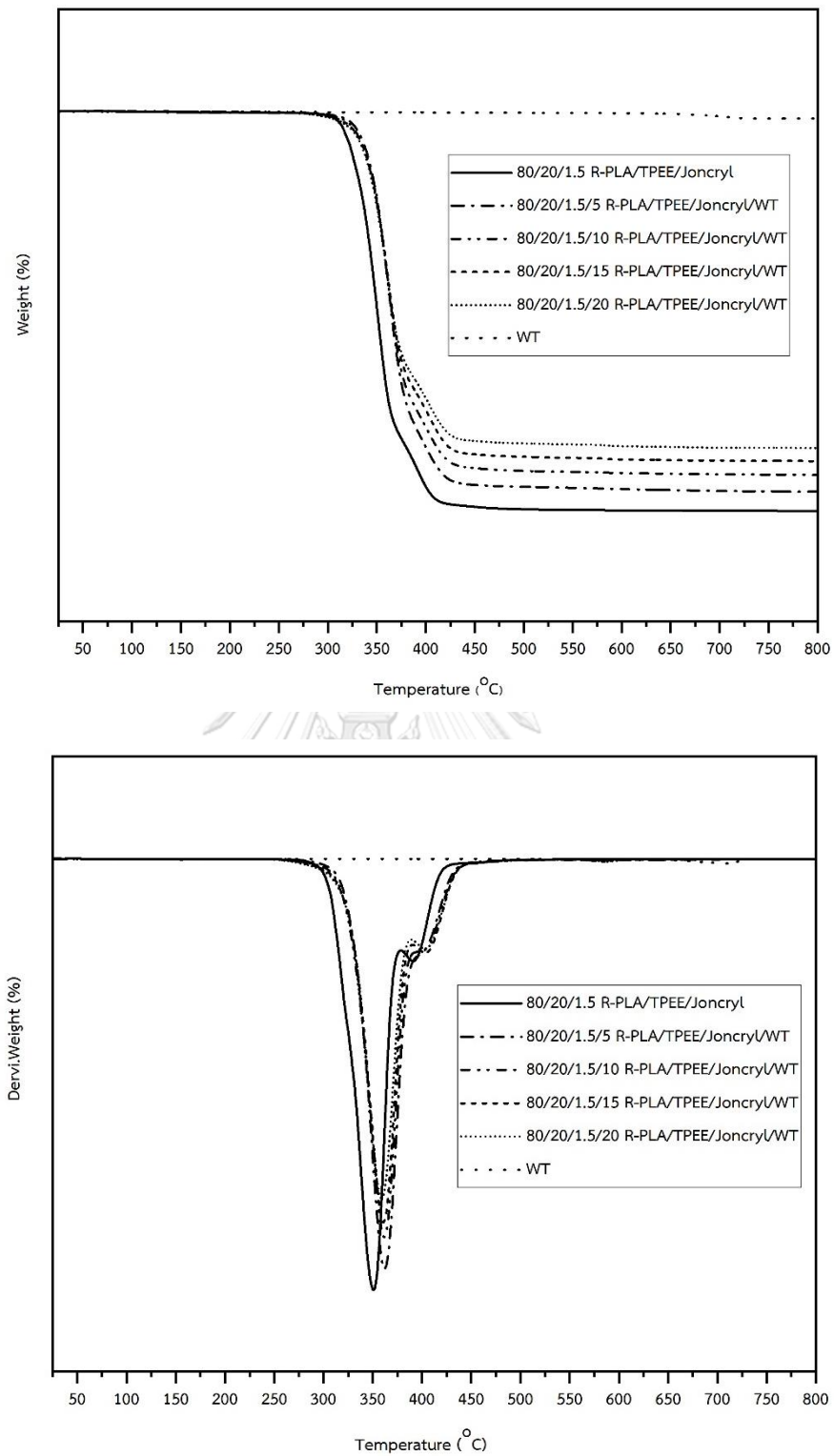
Sample	First Step			Second Step			%Char
	T_{onset} (°C)	T_{max} (°C)	T_{endset} (°C)	T_{onset} (°C)	T_{max} (°C)	T_{endset} (°C)	
R-PLA	338.8	360.2	371.4	–	–	–	1.7
TPEE	–	–	–	376.0	394.7	409.6	6.0
Joncryl	339.2	384.6	431.3	–	–	–	1.0
R-PLA/TPEE (w/w)							
80/20	329.8	353.8	362.3	385.8	390.3	405.2	2.6
R-PLA/TPEE/Joncryl (w/w/phr)							
80/20/0.5	330.8	352.3	362.4	385.8	395.3	408.5	3.3
80/20/1	329.3	350.8	362.0	384.9	391.8	406.8	3.3
80/20/1.5	328.3	348.7	362.3	384.4	392.2	407.6	3.0
80/20/2	330.6	353.0	362.8	381.4	388.7	406.3	2.7
R-PLA/TPEE/Joncryl/WT (w/w/phr/phr)							
80/20/1.5/5	337.1	357.6	379.6	–	–	–	8.4
80/20/1.5/10	340.3	362.6	384.6	–	–	–	12.2
80/20/1.5/15	340.1	362.1	384.0	–	–	–	15.8
80/20/1.5/20	338.1	360.7	383.3	–	–	–	19.0

จากรูปที่ 4.24 และ 4.25 แสดง TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE, พอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl และ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิตด้วย WT ในอัตราส่วนต่าง ๆ ตามลำดับ



รูปที่ 4.24 (a) TGA และ (b) DTG เทอร์โมแกรมของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl

จากตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.24 พบว่า R-PLA มีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 339.6–371.1 องศาเซลเซียสและมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่ 360.2 องศาเซลเซียส ขณะที่ TPEE มีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 376.0–409.6 องศาเซลเซียสและมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่ 394.7 องศาเซลเซียส และสารขยายสายโซ่ Joncryl มีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 339.2–431.3 องศาเซลเซียสและมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่ 384.6 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า TPEE มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่า R-PLA และสารขยายสายโซ่ Joncryl และเมื่อผสม TPEE ที่ปริมาณ 20 wt% กับ R-PLA พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัว 2 ชั้น โดยชั้นแรกเป็นการสลายตัวของ R-PLA และชั้นที่สองเป็นการสลายตัวของ TPEE อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE มีค่าต่ำกว่า R-PLA ซึ่งอาจเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ต่ำและความไม่เข้ากันของ R-PLA และ TPEE ในพอลิเมอร์ผสมจึงทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE ไม่ได้รับการปรับปรุง ยิ่งไปกว่านั้นอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมชั้นที่สองมีค่ามากกว่า TPEE เมื่อทำการเติม TPEE ที่ปริมาณ 20 wt% ซึ่งอาจเกิดจากเถ้าของ TPEE ที่เกิดจากการสลายตัวสามารถปกป้องพื้นผิวของพอลิเมอร์ไม่ให้ความร้อนแพร่หรือซึมผ่านเข้าถึง นอกจากนี้ พบว่า R-PLA มีปริมาณเถ้าเล็กน้อย ประมาณ 1.7% ส่วน TPEE มีปริมาณเถ้ามากกว่า คือ ประมาณ 6.0% จึงทำให้พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE มีปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ TPEE หากแต่พบว่าเมื่อใส่สารขยายสายโซ่ Joncryl ใน TPEE และ R-PLA พบว่า อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE เมื่อปริมาณสารขยายสายโซ่ Joncryl เพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดของพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl มีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE เนื่องจากสารขยายสายโซ่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมหรือขยายสายโซ่ระหว่าง R-PLA และ TPEE ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารขยายสายโซ่ Joncryl ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.25 (a) TGA และ (b) DTG เทอร์โมแกรมของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต

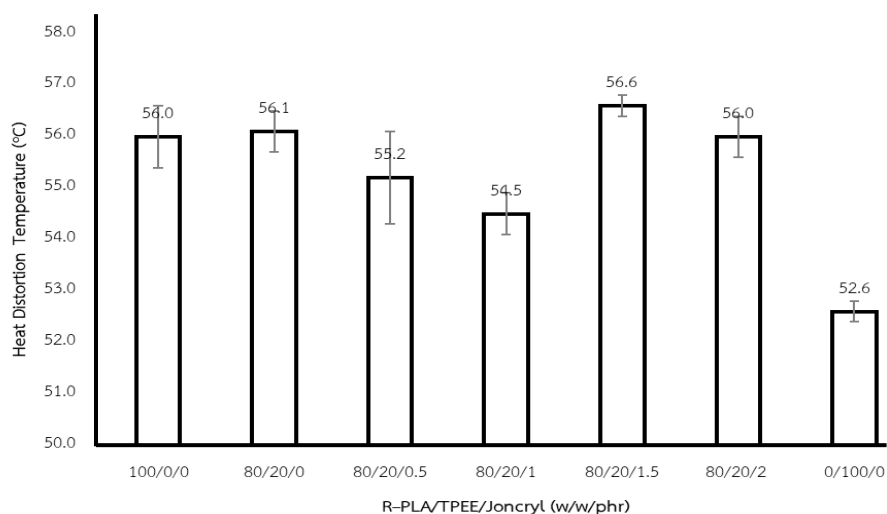
จากตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.25 พบว่า พอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ด้วย WT มีการสลายตัว 2 ชั้น เช่นเดียวกับพอลิเมอร์ผสม โดยชั้นแรกเป็นการสลายตัวของ R-PLA และชั้นที่สองเป็นการสลายตัวของ TPEE ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม แสดงให้เห็นว่าคอมพอสิตมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่าพอลิเมอร์ผสม ทั้งนี้เนื่องจาก WT สามารถดูดซับความร้อนและสลายตัวเป็นเถ้าปกคลุมชั้นทดสอบไม่ให้ความร้อนแพร่ผ่านไปถึง [18] โดยจะเห็นได้จากปริมาณเถ้าของคอมพอสิตเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณ WT ที่เพิ่มขึ้น

4.8.3 อุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อน (heat distortion temperature)

ตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.26 แสดงอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ตารางที่ 4.9 อุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

Sample	Heat Distortion Temperature (°C)
R-PLA	56.0 ± 0.6
TPEE	52.6 ± 0.2
R-PLA/TPEE (w/w)	
80/20	56.1 ± 0.4
R-PLA/TPEE/Joncryl (w/w/phr)	
80/20/0.5	55.2 ± 0.9
80/20/1	54.5 ± 0.4
80/20/1.5	56.6 ± 0.2
80/20/2	56.0 ± 0.4



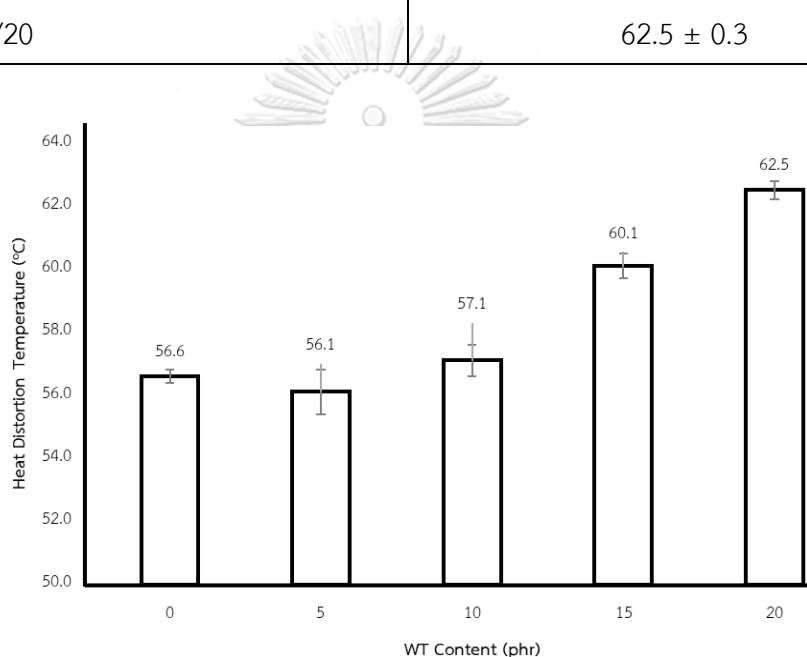
รูปที่ 4.26 อุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของ R-PLA, TPEE, โพลีเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และโพลีเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl

จากตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.26 พบว่า อุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของ โพลีเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอยู่ในช่วง 54.5–56.6 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า TPEE และสารขยายสายโซ่ Joncryl ไม่มีผลต่ออุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของ R-PLA ถึงแม้ว่า TPEE มีอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนต่ำมาก นอกจากนี้สารขยายสายโซ่ Joncryl อาจทำให้เกิดเป็นโครงสร้างแบบกิ่งและแตกแขนงจำนวนมาก จึงทำให้อุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของโพลีเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับความทนแรงดัดโค้งและมอดุลัสของแรงดัดโค้ง

ตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.27 แสดงอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของ คอมพอสิต 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ด้วย WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ตารางที่ 4.10 อุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของคอมพอสิต 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ด้วย WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

Sample	Heat Distortion Temperature (°C)
R-PLA/TPEE/Joncryl/WT (w/w/phr/phr)	
80/20/1.5/0	56.6 ± 0.2
80/20/1.5/5	56.1 ± 0.7
80/20/1.5/10	57.1 ± 0.5
80/20/1.5/15	60.1 ± 0.4
80/20/1.5/20	62.5 ± 0.3



รูปที่ 4.27 อุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต

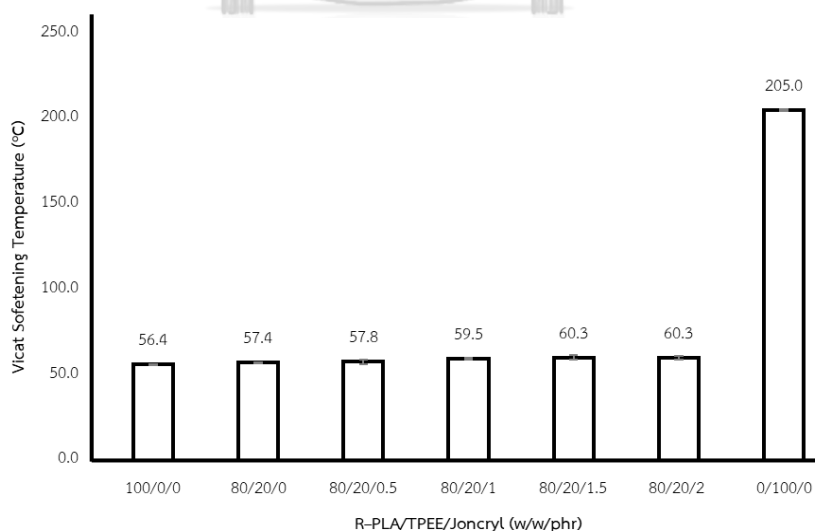
จากตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.27 พบว่า อุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ WT ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการเติม WT ช่วยในการปรับปรุงอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อน โดยได้รับการปรับปรุงสูงสุดสำหรับการเติม WT ปริมาณ 20 phr (62.6 องศาเซลเซียส) เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ล้วน (56.6 องศาเซลเซียส) เนื่องจากความแข็งตึงของ WT ไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ จึงช่วยปรับปรุงให้คอมพอสิตมีความทนต่อการโค้งงอเนื่องจากความร้อนสูงขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงการทนความร้อนของคอมพอสิตอีกด้วย

4.8.4 อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อน (vicat softening temperature)

ตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.28 แสดงอุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ตารางที่ 4.11 อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

Sample	Vicat Softening Temperature (°C)
R-PLA	56.4 ± 0.2
TPEE	205.0 ± 0.5
R-PLA/TPEE (w/w)	
80/20	57.4 ± 0.2
R-PLA/TPEE/Joncryl (w/w/phr)	
80/20/0.5	57.8 ± 1.2
80/20/1	59.5 ± 0.5
80/20/1.5	60.3 ± 1.4
80/20/2	60.3 ± 1.0



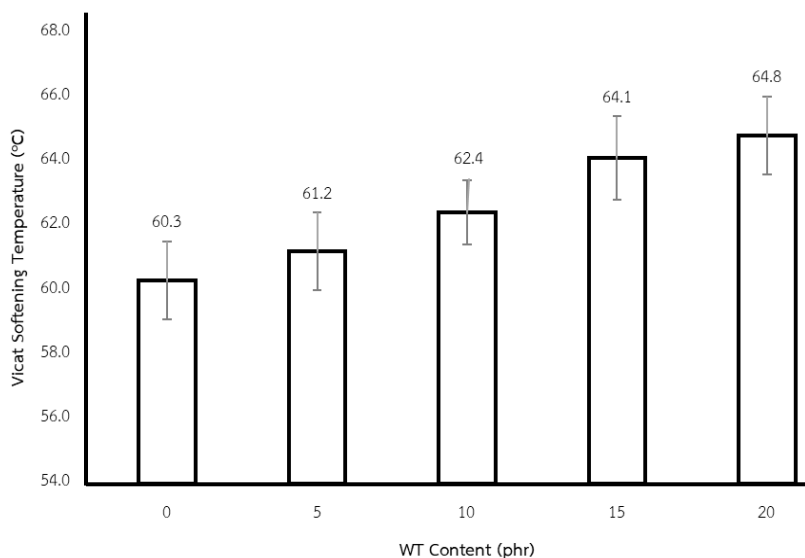
รูปที่ 4.28 อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl

จากตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.28 พบว่า R-PLA และ TPEE มีอุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนเท่ากับ 56.4 และ 205.0 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนของ TPEE มีค่าสูงกว่า R-PLA ล้วน ซึ่งเมื่อทำการเติม TPEE ที่ปริมาณ 20 wt% มีผลทำให้อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE มีค่าสูงกว่า R-PLA ล้วน ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 57.4 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนที่สูงมากของ TPEE หากแต่พบว่าเมื่อใส่สารขยายสายโซ่ Joncryl ลงไปในพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE จะทำให้อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อปริมาณสารขยายสายโซ่ Joncryl เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 57.8–60.3 องศาเซลเซียส เนื่องจากสารขยายสายโซ่ Joncryl เข้าไปทำอันตรกิริยาที่ดีระหว่าง R-PLA และ TPEE ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.29 แสดงอุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนของคอมพอสิต 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ด้วย WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ตารางที่ 4.12 อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนของคอมพอสิต 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ด้วย WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

Sample	Vicat Softening Temperature (°C)
R-PLA/TPEE/Joncryl/WT (w/w/phr/phr)	
80/20/1.5/0	60.3 ± 1.2
80/20/1.5/5	61.2 ± 1.2
80/20/1.5/10	62.4 ± 1.0
80/20/1.5/15	64.1 ± 1.3
80/20/1.5/20	64.8 ± 1.2

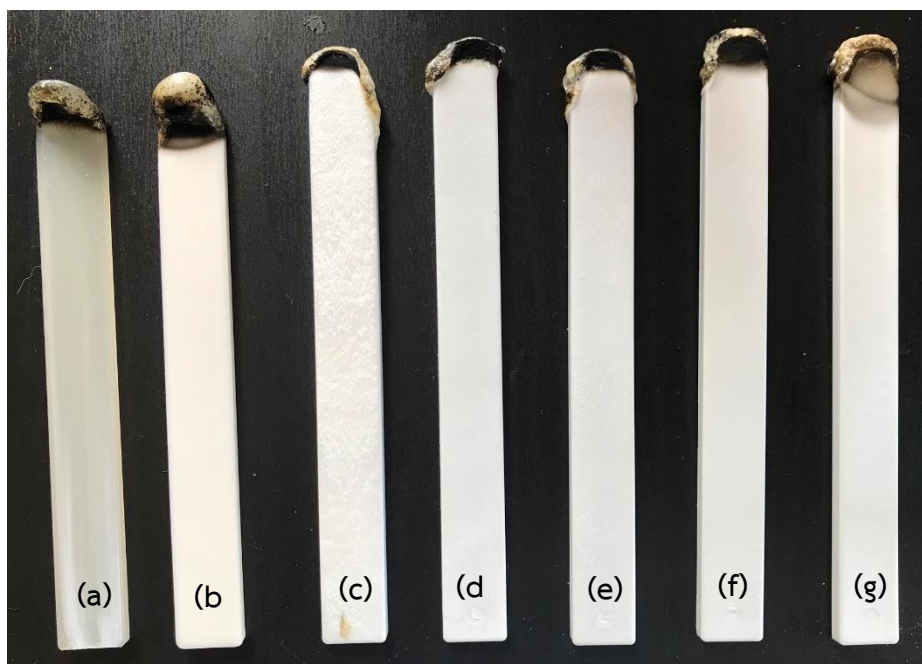


รูปที่ 4.29 อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต

จากตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.29 พบว่า อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ WT ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการเติม WT ช่วยในการปรับปรุงอุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อน โดยได้รับการปรับปรุงสูงสุดสำหรับการเติม WT ปริมาณ 20 phr (64.8 องศาเซลเซียส) เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ล้วน (60.3 องศาเซลเซียส) เนื่องจากความแข็งตึงของ WT ไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ จึงช่วยปรับปรุงให้คอมพอสิตมีความทนต่อการโค้งงอเนื่องจากความร้อนสูงขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงการทนความร้อนของคอมพอสิตอีกด้วย

4.9 การหลอมหยด

รูปที่ 4.30 แสดงลักษณะขึ้นทดสอบที่ทำการทดสอบการหลอมหยด (melt dipping) ของ R-PLA, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl และ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 5, 10, 15 และ 20 phr



รูปที่ 4.30 ชิ้นงานหลังทดสอบการหลอมหายของ (a) R-PLA, (b) พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE, (c) พอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl และ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ (d) 5, (e) 10, (f) 15 และ (g) 20 phr

จากรูปที่ 4.30 พบว่า R-PLA เมื่อติดไฟแล้วเป็นเวลา 10 วินาทีจะเกิดการหลอมหายแต่ช้ากว่าพอลิเมอร์ผสม เนื่องจาก TPEE มีองค์ประกอบของ soft segment ที่ทำให้ติดไฟได้ง่าย หากแต่เมื่อทำการเติม WT เข้าไปในพอลิเมอร์ผสมพบว่าระดับการหลอมหายจะลดลง และเมื่อเติมปริมาณ WT ไปปริมาณ 20 phr พบว่าการหลอมหายลดต่ำสุด และเมื่อครบเวลา 10 วินาทีไฟที่ติดสามารถดับได้เอง และพบฝ้าสีดำปกคลุมที่พื้นผิวของชิ้นทดสอบ แสดงให้เห็นว่า WT สามารถปรับปรุงการหลอมหาย ซึ่งสอดคล้องกับการนำ WT ไปปรับปรุงประสิทธิภาพให้กับสารเคลือบสำหรับสารหน่วงไฟ โดยพบว่าการเติม WT ช่วยต่อต้านการเกิดออกซิเดชันของฝ้าจึงสามารถช่วยลดการลามไฟ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณฝ้าที่เหลืออยู่ในผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยาและการวิเคราะห์หาอันตรกิริยาของพอลิแล็กติกแอซิดรีไซเคิล (R-PLA) ด้วยการเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมกับเทอร์โมพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์และสารขยายสายโซ่ Joncryl และคอมพอสิตของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl กับโพลลาสโทไนต์ (WT) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ตามด้วยเครื่องฉีดแบบ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE พบว่าการเติม TPEE ที่ปริมาณ 20 wt% ลงใน R-PLA ทำให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามจำนวน น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามน้ำหนักและดรชขนี้การกระจายตัวของพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE มีค่าลดลงเนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของ TPEE มีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามเมื่อใส่สารขยายสายโซ่ Joncryl ที่ปริมาณ 1.5 phr ลงไป ในพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE พบว่า มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าสารขยายสายโซ่ Joncryl เข้าไปทำอันตรกิริยาที่ตีระหว่าง R-PLA และ TPEE

2. จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต พบว่า การเติม TPEE ปริมาณ 20 wt% ลงใน R-PLA มีพีกเอกลักษณ์ของ R-PLA หากแต่พบพีกเอกลักษณ์ของ TPEE ไม่ชัดเจนอาจเนื่องจากปริมาณของ TPEE ไม่เพียงพอเกิดสัญญาณ และเมื่อเติมสารขยายสายโซ่ Joncryl ลงไปในพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE พบว่า มีพีกเอกลักษณ์ของ R-PLA และ TPEE อย่างชัดเจน เนื่องจากสารขยายสายโซ่ Joncryl เข้าไปทำอันตรกิริยาที่ตีระหว่าง R-PLA และ TPEE นอกจากนี้การเติม WT ปริมาณ 20 phr พบพีกเอกลักษณ์ที่เลขคลื่น 454 ซึ่งเป็นพีกเอกลักษณ์ของ WT แสดงให้เห็นว่ามีการใส่ WT ลงในพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณมากเพียงพอ นอกจากนี้การวิเคราะห์การเกิดอันตรกิริยาของสารขยายสายโซ่ Joncryl ของพอลิเมอร์ผสม พบว่า มีพีกที่สำคัญของ R-PLA ปรากฏอยู่ 2 ตำแหน่งและมีพีกที่สำคัญของ TPEE ปรากฏอยู่ 5 ตำแหน่ง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีองค์ประกอบของสาร 2 สารผสมกันอยู่ และเมื่อเติมสารขยายสายโซ่ Joncryl ลงไปในพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพีกที่เกิดจากโปรตอนของ R-PLA และ TPEE แสดงถึงความเข้ากันได้บางส่วนระหว่าง R-PLA และ TPEE นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนความเข้มพีกของ R-PLA และ TPEE พบว่าการเติมสารขยายสายโซ่ Joncryl ลงไปในพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE มีการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนโปรตอนของ R-PLA และ TPEE ซึ่งมีความ

เป็นไปได้ว่าการเติมสารขยายสายโซ่ Joncryl ลงในพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE อาจเกิด R-PLA-Joncryl-TPEE โคพอลิเมอร์ได้

3. จากการทดสอบดรรชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต พบว่า พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE มีดรรชนีการหลอมไหลลดลงเมื่อทำการเติม TPEE ที่ปริมาณ 20 wt% เนื่องจาก TPEE เป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มี ค่าดรรชนีการหลอมไหลต่ำและมีโครงสร้างขนาดใหญ่ และเมื่อเติมสารขยายสายโซ่ Joncryl ลงไปในพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE พบว่า ค่าดรรชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl มีค่าลดลงเมื่อปริมาณสารขยายสายโซ่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารขยายสายโซ่ Joncryl เข้าไปทำอันตรกิริยาที่ติระหว่าง R-PLA และ TPEE นอกจากนี้เมื่อเติมสารตัวเติมด้วย WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ทำให้คอมพอสิตมีดรรชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้น เพราะว่า WT มีลักษณะรูปเข็มและผลของการหล่อลื่นของสารตัวเติมอินทรีย์บนสายโซ่พอลิเมอร์

4. จากการทดสอบความทนแรงดึง ความทนแรงกระแทก ความทนแรงดัดโค้ง และความแข็งแบบรีออคเวลล์ของพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl พบว่า การเติม TPEE ที่ปริมาณ 20 wt% ลงใน R-PLA ทำให้ความทนแรงดึง ยังสัมผดูลัส ความทนแรงดัดโค้ง มอดูลัสการดัดโค้ง และความแข็งของพอลิเมอร์ผสมลดลง แต่ความทนแรงกระแทกและการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมกลับสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ R-PLA แสดงให้เห็นว่า TPEE ช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความเปราะของ R-PLA แต่ยังไม่ดีเท่าที่ควร และเมื่อเติมสารขยายสายโซ่ Joncryl ลงไปในพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE ทำให้ความทนแรงดึง ยังสัมผดูลัส ความทนแรงดัดโค้ง ความทนแรงกระแทกและการยืดตัว ณ จุดขาดและความแข็งของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น แต่มอดูลัสการดัดโค้งมีค่าลดลง เมื่อปริมาณสารขยายสายโซ่ Joncryl เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเติมสารขยายสายโซ่ Joncryl ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมหรือขยายสายโซ่ของพอลิเมอร์และช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง R-PLA กับ TPEE โดยเฉพาะพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด จึงนำไปเตรียมเป็นคอมพอสิตกับ WT ที่ปริมาณ 5, 10, 15 และ 20 phr

5. จากการทดสอบความทนแรงดึง ความทนแรงกระแทก ความทนแรงดัดโค้ง และความแข็งแบบรีออคเวลล์ของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต พบว่า คอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่ายังสัมผดูลัส ความทนแรงดัดโค้ง และมอดูลัสการดัดโค้งที่สูงขึ้น แต่ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl นอกจากนี้การเติม WT ที่ปริมาณ 20 phr แสดงสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับ R-PLA ดังนั้นการเติม WT ที่ปริมาณ 20 phr มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด

6. จากการตรวจสอบด้านสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต พบว่า การเติม TPEE ที่ปริมาณ 20 wt% ลงใน R-PLA มีพื้นผิวบริเวณรอยแตกหักมีลักษณะหยาบมาก ซึ่งเกิดการแยกตัวระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง แสดงถึงความไม่เข้ากันระหว่างพอลิเมอร์ผสม และเมื่อเติมสารขยายสายโซ่ Joncryl ลงไปในพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE พบว่า พื้นผิวบริเวณรอยแตกมีลักษณะเรียบ แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ (miscible blend) นอกจากนี้การเติม WT ที่ปริมาณ 10–20 phr แสดงให้เห็นว่ามีปริมาณของ WT กระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์เพิ่มขึ้นตามปริมาณ WT ที่เพิ่มขึ้นและเกิดช่องว่างจากการหลุดออกของ WT บางส่วน

7. จากการตรวจสอบการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต พบว่า การเติม TPEE ที่ปริมาณ 20 wt% ลงใน R-PLA ทำให้ R-PLA ในพอลิเมอร์ผสมเกิดผลึกในขณะหลอมเหลวได้เร็วขึ้น และเมื่อเติมสารขยายสายโซ่ Joncryl ลงไปในพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE พบว่า การเติมสารขยายสายโซ่ Joncryl ลงใน TPEE และ R-PLA ทำให้ R-PLA เกิดสายโซ่โมเลกุลแบบกิ่งที่แตกแขนงและไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจลดความสามารถในการตกผลึกแบบเยนที่จำเป็นต่อการเติบโตของผลึก นอกจากนี้การเติม WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl ไม่ได้เป็นสารก่อผลึก และยังเป็นการขัดขวางการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลอย่างสมบูรณ์ของ R-PLA

8. จากการตรวจสอบเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีเสถียรภาพทางความร้อนลดลงจาก R-PLA และเมื่อเติม WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl พบว่า เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิตได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้น

9. จากการตรวจสอบอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อทำการเติม WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl พบว่าการเติม WT ช่วยในการปรับปรุงอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อน เนื่องจากความแข็งตึงของ WT ไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์

10. จากการตรวจสอบการหลอมหยดของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต พบว่า การเติม WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl สามารถช่วยลดการหลอมหยดของพอลิเมอร์ผสมและ R-PLA ล้วน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทดลองดัดแปรพื้นผิวของ WT ด้วยสารคู่ควบ (coupling agent) เพื่อปรับปรุงการยึดเกาะในพอลิเมอร์เมทริกซ์
2. ศึกษาวิธีการขึ้นรูปแบบอื่น เช่น การเป่าฟิล์ม เพื่อศึกษาถึงกระบวนการขึ้นรูปที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต
3. ศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตเพิ่มเติม
4. ศึกษาการใช้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีความยืดหยุ่นสูงชนิดอื่น ๆ และสารตัวเติมแบบอินทรีย์ เพื่อทำให้เกิดการเป็นพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตแบบชีวภาพอย่างสมบูรณ์

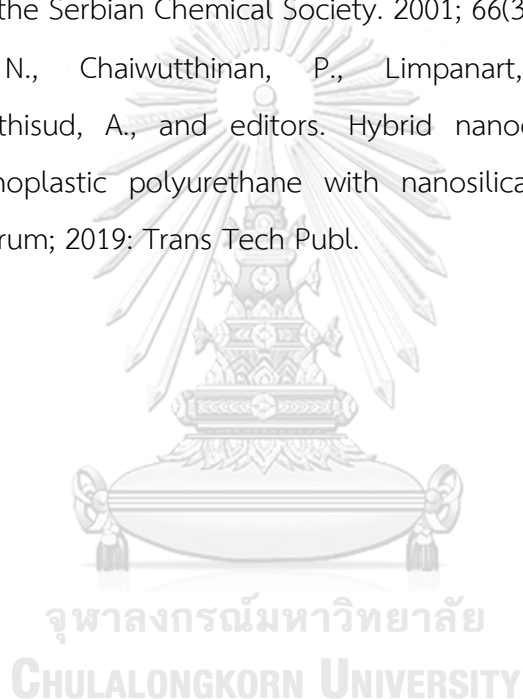


บรรณานุกรม

- [1] Flury, M., and Narayan, R. Biodegradable plastic as an integral part of the solution to plastic waste pollution of the environment. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2021; 30: 100490.
- [2] Moore, G., and Saunders, S. *Advances in biodegradable polymers*: iSmithers Rapra Publishing; 1998.
- [3] Shah, A.A., Hasan, F., Hameed, A., and Ahmed, S. Biological degradation of plastics: a comprehensive review. *Biotechnology advances*. 2008; 26(3): 246–65.
- [4] Lertworasirikul, A., and et al. Development of Polylactic Acid Film for New Wave Plastic Industry. *Polymer Preprints, Japan 58th SPSJ Annual Meeting*; 2009: The Society of Polymer Science, Japan.
- [5] Galindo, S., and Ureña-Núñez, F. Enhanced surface hydrophobicity of poly (lactic acid) by Co60 gamma ray irradiation. *Revista mexicana de fisica*. 2018; 64(1) :1–7.
- [6] Burillo, G., Clough, R.L., Czvikovszky, T., Guven, O., Le Moel, A., Liu, W., and et al. Polymer recycling: potential application of radiation technology. *Radiation Physics and Chemistry*. 2002; 64(1): 41–51.
- [7] Chanda, M. Chemical aspects of polymer recycling. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2021; 4(3): 133–50.
- [8] Shen, L., and Worrell, E. Plastic recycling. *Handbook of recycling*: Elsevier; 2014. p. 179–90.
- [9] Broza, G., and Schulte, K. Melt processing and filler/matrix interphase in carbon nanotube reinforced poly (ether–ester) thermoplastic elastomer. *Polymer Engineering & Science*. 2008; 48(10): 2033–8.
- [10] Lee, T.Y., Lee, C.H., Cho, S, Lee, D.H., and Yoon, K.B. Enhancement of physical properties of thermoplastic polyether–ester elastomer by reactive extrusion with chain extender. *Polymer bulletin*. 2011; 66(7): 979–90.
- [11] Zhu, L.L., and Wegner, G. The morphology of semicrystalline segmented poly

- (ether–ester) thermoplastic elastomers. *Die Makromolekulare Chemie: Macromolecular Chemistry and Physics*. 1981; 182(12): 3625–38.
- [12] Wang, S., Pang, S., Xu, N., Pan, L., and Lin, Q. In situ compatibilization of polylactide/thermoplastic polyester elastomer blends using a multifunctional epoxide compound as a processing agent. *Journal of Applied Polymer Science*. 2016; 133(20).
- [13] Frenz, V., Scherzer, D., Villalobos M., Awojulu A., Edison M., Van Der Meer R., and editors. Multifunctional polymers as chain extenders and compatibilizers for polycondensates and biopolymers. *Tech Pap Reg Tech Conf Soc Plast Eng*; 2008: Citeseer.
- [14] Standau, T., Nofar, M., Dörr, D., Ruckdäschel, H., and Altstädt, V. A review on multifunctional epoxy–based Joncryl[®] ADR chain extended thermoplastics. *Polymer Reviews*. 2022; 62(2): 296–350.
- [15] Chaiwutthinan, P., Chuayjuljit, S., Srasomsub, S., and Boonmahitthisud, A. Composites of poly (lactic acid)/poly (butylene adipate–co–terephthalate) blend with wood fiber and wollastonite: Physical properties, morphology, and biodegradability. *Journal of Applied Polymer Science*. 2019; 136(21): 47543.
- [16] Chuayjuljit, S., Chaiwutthinan, P., Raksakri, L., and Boonmahitthisud, A. Effects of poly (butylene adipate–co–terephthalate) and ultrafined wollastonite on the physical properties and crystallization of recycled poly (ethylene terephthalate). *Journal of Vinyl and Additive Technology*. 2017; 23(2): 106–16.
- [17] Zaman, H.U., Song, J.C., Park, L.S., Kang, I.K., Park, S.Y., Kwak, G., and et al. Poly (lactic acid) blends with desired end–use properties by addition of thermoplastic polyester elastomer and MDI. *Polymer bulletin*. 2011; 67(1): 187–98.
- [18] Chaiwutthinan, P., Phutfak, N., and Larpkasemsuk, A. Effects of thermoplastic poly (ether–ester) elastomer and bentonite nanoclay on properties of poly (lactic acid). *Journal of Applied Polymer Science*. 2021; 138(20): 50443.
- [19] Chaiwutthinan, P., Riyaphan, T., Simpraditpan, A., and Larpkasemsuk, A. Influence of poly (butylene terephthalate) and wollastonite on properties of

- recycled poly (ethylene terephthalate) preforms. *Journal of Metals, Materials and Minerals*. 2020; 30(1).
- [20] Ray, S.S. *Environmentally friendly polymer nanocomposites: types, processing and properties*: Elsevier; 2013.
- [21] ชลธิชา จินดา. การเตรียมฟิล์ม PBS/PLA ที่ขึ้นรูปโดยการเป่าฟิล์มสำหรับใช้เป็นแอคทีฟฟิล์ม: มหาวิทยาลัย ศิลปากร; 2013.
- [22] Aleksandrović, V., and Đonlagić, J. Synthesis and characterization of thermoplastic copolyester elastomers modified with fumaric moieties. *Journal of the Serbian Chemical Society*. 2001; 66(3): 139–52.
- [23] Palawat, N., Chaiwutthinan, P., Limpanart, S., Larpkasemsuk, A., Boonmahitthisud, A., and editors. Hybrid nanocomposites of poly (lactic acid)/thermoplastic polyurethane with nanosilica/montmorillonite. *Materials Science Forum*; 2019: Trans Tech Publ.

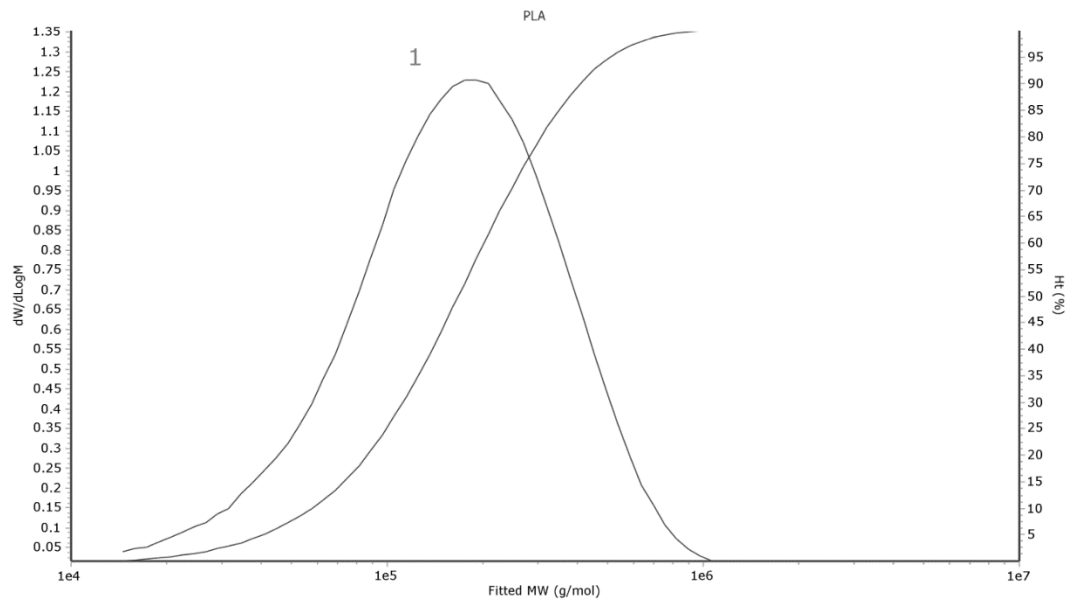




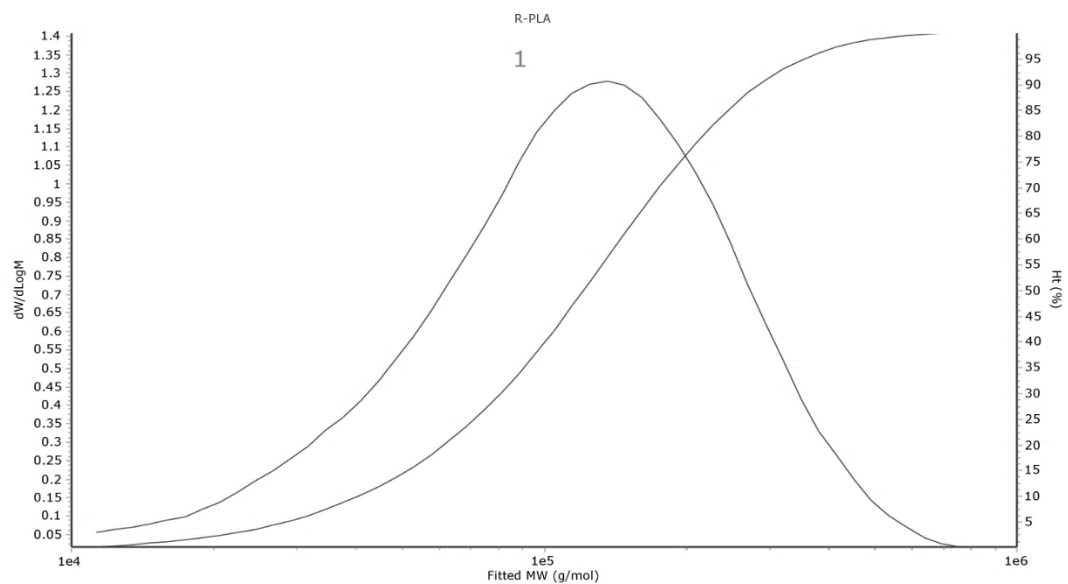
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

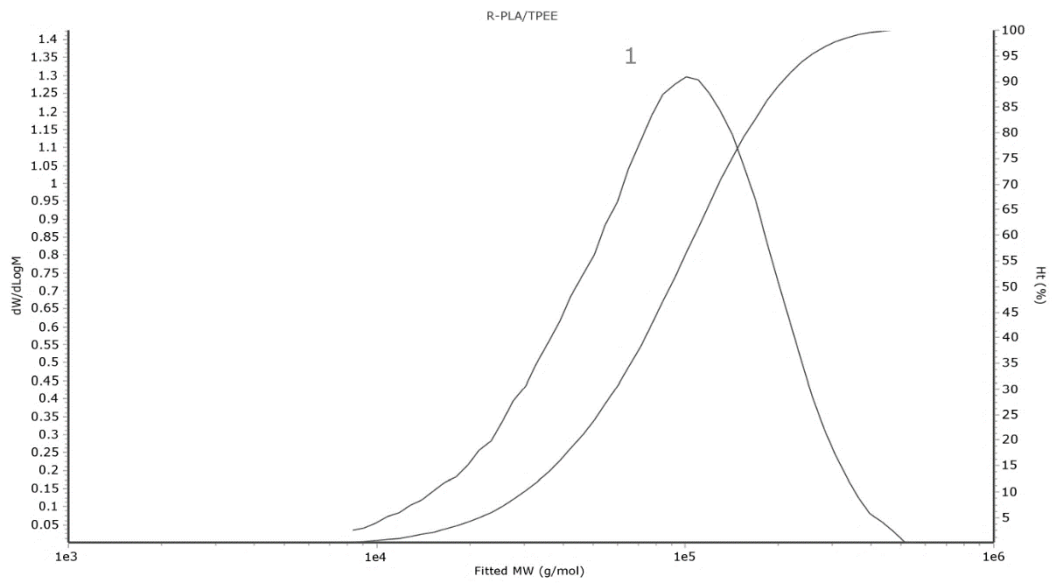
ภาคผนวก ก
กราฟการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย



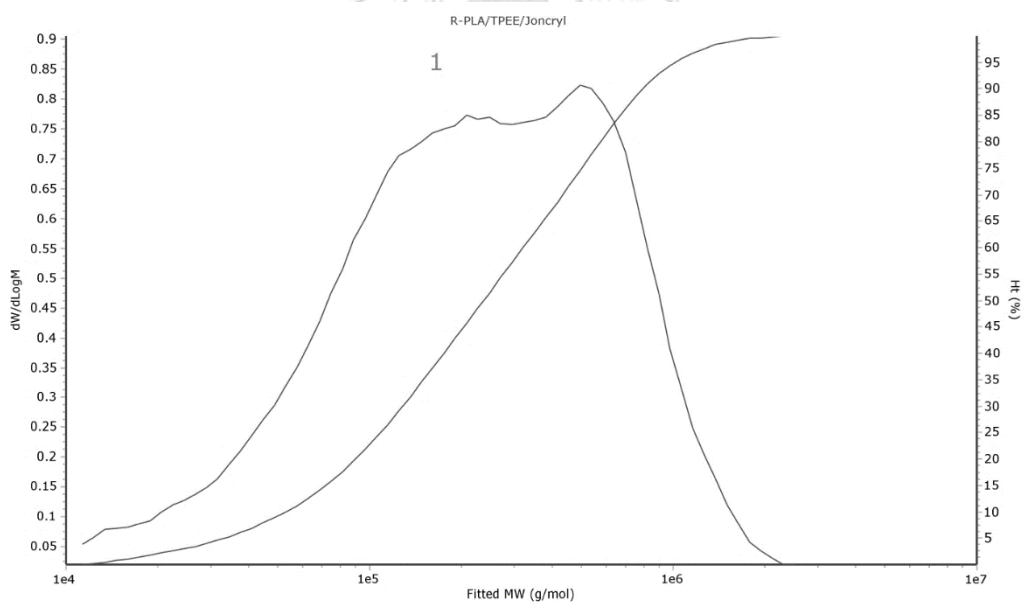
รูปที่ ก-1 กราฟการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของ PLA



รูปที่ ก-2 กราฟการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของ R-PLA



รูปที่ ก-3 กราฟการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE



รูปที่ ก-4 กราฟการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5
R-PLA/TPEE/Joncryl

ภาคผนวก ข

สมบัติเชิงกล

ตารางที่ ข-1 สมบัติเชิงกลของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl

Sample	IS (kJ/m ²)	TS (MPa)	E (MPa)	EB (%)	FS (MPa)	FM (MPa)	Hardness
R-PLA	2.40	71.29	1928.95	5.62	109.99	4621.99	82.14
	3.17	72.51	1929.21	7.07	110.43	4693.50	81.98
	2.81	73.29	1954.62	6.09	110.75	4614.49	82.32
	2.13	73.91	1922.58	5.60	112.50	4673.42	82.44
	2.17	70.45	1963.13	7.13	110.24	4639.91	82.42
	3.01	-	-	-	-	-	-
	2.53	-	-	-	-	-	-
	2.49	-	-	-	-	-	-
	2.54	-	-	-	-	-	-
	2.33	-	-	-	-	-	-
Avg.	2.6	72.3	1939.7	6.3	110.8	4648.7	82.3
SD.	0.3	1.4	18.0	0.8	1.0	33.8	0.5
TPEE	-	35.80	401.62	350.15	31.21	875.87	68.62
	-	36.36	445.20	357.20	29.27	814.23	68.50
	-	37.02	444.00	362.56	30.38	843.16	68.64
	-	37.74	459.21	364.00	29.96	834.82	68.46
	-	39.87	464.26	357.70	31.16	866.88	68.56
	-	-	-	-	27.01	757.15	-
	-	-	-	-	30.05	831.64	-
	-	-	-	-	30.98	858.63	-
	-	-	-	-	29.83	823.27	-
	-	-	-	-	29.16	808.63	-
Avg.	-	37.4	442.9	358.3	29.9	831.4	68.6
SD.	-	1.4	22.1	4.9	1.2	34.2	0.3
R-PLA/TPEE (w/w)							
80/20	3.14	49.66	1463.84	6.89	74.88	3614.70	78.44
	3.26	51.70	1445.20	7.24	79.67	3725.82	79.22
	3.48	50.68	1501.22	7.10	77.70	3861.64	78.94
	3.01	47.04	1495.50	6.81	75.52	3788.65	79.24
	2.56	51.81	1446.75	7.13	77.10	3582.72	78.70
	2.98	-	-	-	-	-	-
	3.12	-	-	-	-	-	-
	2.35	-	-	-	-	-	-

	2.64	-	-	-	-	-	-
	2.98	-	-	-	-	-	-
Avg.	3.0	50.2	1470.5	7.0	77.0	3714.7	78.9
SD.	0.3	2.0	26.5	0.2	1.9	116.8	0.6
R-PLA/TPEE/Joncryl (w/w/phr)							
80/20/0.5	3.30	63.08	1635.47	10.94	97.99	3645.87	78.52
	3.51	60.97	1631.55	9.77	100.36	3774.31	79.64
	3.25	61.27	1612.24	8.21	100.07	3684.57	79.20
	3.26	60.50	1607.61	7.93	97.92	3670.79	78.94
	3.60	61.40	1637.45	9.21	95.46	3517.87	78.52
	3.89	-	-	-	-	-	-
	3.49	-	-	-	-	-	-
	3.82	-	-	-	-	-	-
	3.36	-	-	-	-	-	-
	3.25	-	-	-	-	-	-
Avg.	3.5	61.4	1624.9	9.2	98.4	3658.7	79.0
SD.	0.2	1.0	13.9	1.2	2.0	92.4	0.7
80/20/1	3.46	66.22	1550.44	11.37	96.94	3531.89	79.84
	3.61	63.33	1585.39	9.06	96.74	3520.06	78.04
	3.61	66.08	1619.58	14.46	94.26	3480.03	78.40
	2.84	66.10	1599.12	11.21	97.94	3630.82	78.56
	3.23	63.10	1597.41	11.68	98.16	3609.09	78.38
	3.45	-	-	-	-	-	-
	3.76	-	-	-	-	-	-
	3.72	-	-	-	-	-	-
	3.08	-	-	-	-	-	-
	3.37	-	-	-	-	-	-
Avg.	3.4	65.0	1590.4	11.6	96.8	3554.4	78.6
SD.	0.3	1.6	25.5	1.9	1.6	63.3	1.1
80/20/1.5	3.23	67.15	1610.12	11.25	98.54	3595.80	79.68
	3.43	67.56	1625.16	12.14	98.39	3579.61	79.48
	3.22	65.09	1615.08	10.12	99.09	3613.32	79.18
	3.29	66.70	1629.56	12.25	98.68	3580.15	79.52
	3.88	64.56	1624.21	10.41	97.51	3562.80	80.70
	3.77	-	-	-	-	-	-
	3.41	-	-	-	-	-	-
	3.34	-	-	-	-	-	-
	3.25	-	-	-	-	-	-
	3.35	-	-	-	-	-	-
Avg.	3.4	66.2	1620.8	11.2	98.4	3586.3	79.7
SD.	0.2	1.3	8.0	1.0	0.6	19.1	0.9

80/20/2	3.51	64.84	1580.66	9.35	95.07	3453.34	79.74
	2.86	60.07	1565.75	9.49	95.45	3508.70	78.90
	3.43	63.67	1563.59	8.36	93.69	3385.51	79.42
	3.18	64.57	1564.04	10.01	94.32	3403.53	78.68
	2.97	62.34	1573.93	8.96	95.34	3475.94	79.54
	3.20	-	-	-	-	-	-
	3.06	-	-	-	-	-	-
	3.00	-	-	-	-	-	-
	3.58	-	-	-	-	-	-
	3.32	-	-	-	-	-	-
Avg.	3.2	63.1	1569.6	9.2	94.8	3441.4	79.3
SD.	0.2	2.0	7.5	0.6	0.8	45.1	0.7



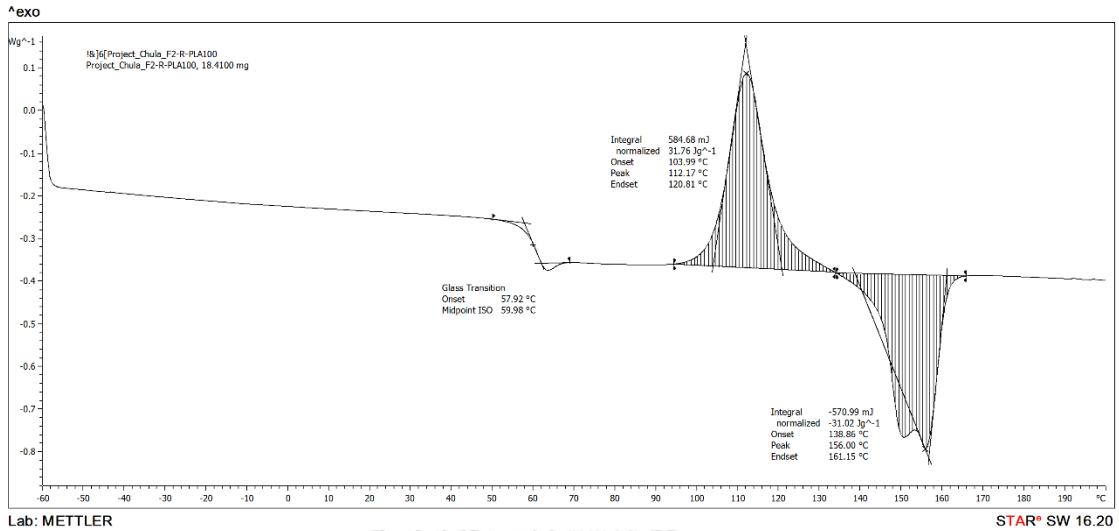
ตารางที่ ข-2 สมบัติเชิงกลของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิตด้วย WT

Sample	IS (kJ/m ²)	TS (MPa)	E (MPa)	EB (%)	FS (MPa)	FM (MPa)	Hardness
R-PLA/TPEE/Joncryl/WT (w/w/phr/phr)							
80/20/1.5/5	3.00	61.71	1683.29	11.01	85.59	3368.16	79.22
	3.24	60.11	1676.60	11.76	87.94	3467.32	77.48
	2.42	62.31	1672.39	10.52	88.16	3478.15	79.00
	3.24	62.73	1700.77	12.97	86.55	3388.82	79.28
	3.45	60.64	1647.52	10.26	89.78	3530.98	76.58
	3.55	-	-	-	-	-	-
	3.61	-	-	-	-	-	-
	3.05	-	-	-	-	-	-
	3.42	-	-	-	-	-	-
	3.42	-	-	-	-	-	-
Avg.	3.2	61.5	1676.1	11.3	87.6	3446.7	78.3
SD.	0.4	1.1	19.3	1.1	1.6	67.1	1.4
80/20/1.5/10	3.22	60.75	1720.03	10.36	87.51	3464.38	76.20
	3.44	59.85	1701.76	11.38	87.53	3464.12	77.50
	3.45	57.09	1728.93	8.68	88.34	3526.97	76.78
	3.07	59.20	1709.01	10.10	89.39	3567.38	76.74
	3.17	56.73	1703.01	8.52	90.06	3593.39	75.76
	2.99	-	-	-	-	-	-
	3.38	-	-	-	-	-	-
	3.38	-	-	-	-	-	-
	3.21	-	-	-	-	-	-
	3.54	-	-	-	-	-	-
Avg.	3.3	58.7	1712.5	9.8	88.6	3523.2	76.6
SD.	0.2	1.7	11.7	1.2	1.1	58.8	1.2
80/20/1.5/15	3.15	61.10	1863.52	7.76	96.95	4168.77	79.08
	3.25	60.61	1830.77	7.43	94.52	4047.89	76.64
	3.85	58.20	1833.93	8.52	92.98	3878.44	75.30
	3.54	63.40	1856.66	8.11	94.56	4060.57	76.82
	3.00	61.89	1838.51	9.36	93.93	4024.70	76.48
	3.06	-	-	-	-	-	-
	4.03	-	-	-	-	-	-
	3.46	-	-	-	-	-	-
	3.70	-	-	-	-	-	-
	3.17	-	-	-	-	-	-
Avg.	3.4	61.0	1844.7	8.2	94.6	4036.1	76.9
SD.	0.4	1.9	14.5	0.7	1.5	104.1	1.9

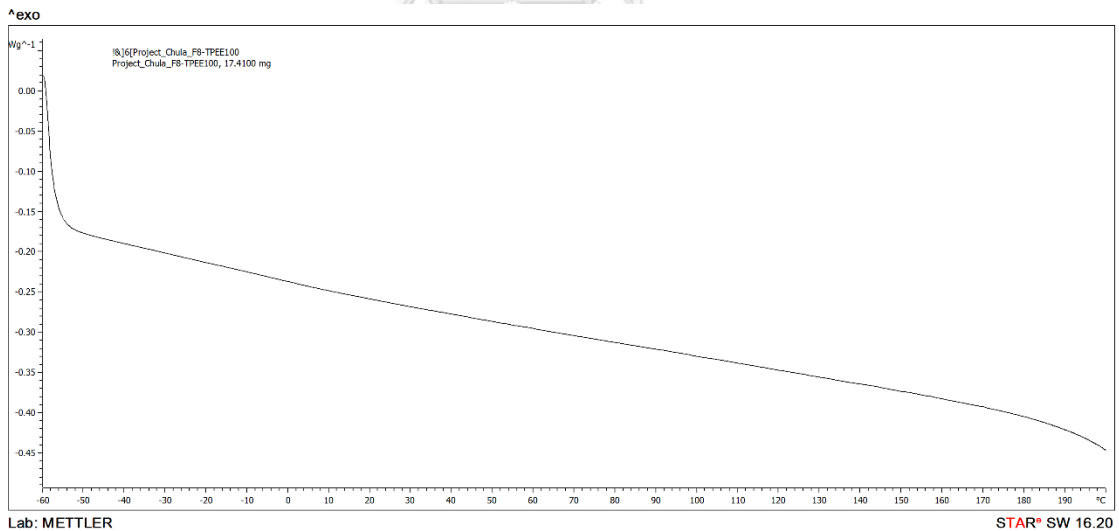
80/20/1.5/20	3.25	59.01	2030.99	8.59	98.67	4488.18	78.50
	3.33	56.95	1893.45	6.15	99.06	4528.74	79.54
	3.70	56.61	2114.63	8.26	98.36	4657.77	77.20
	3.77	62.03	2035.55	5.71	101.25	4706.63	79.00
	3.34	56.30	1945.62	9.16	102.93	4810.55	76.58
	3.40	-	-	-	-	-	-
	3.57	-	-	-	-	-	-
	3.47	-	-	-	-	-	-
	3.06	-	-	-	-	-	-
	3.74	-	-	-	-	-	-
Avg.	3.5	58.2	2004.1	7.6	100.1	4638.4	78.2
SD.	0.2	2.4	86.0	1.5	2.0	131.6	1.4



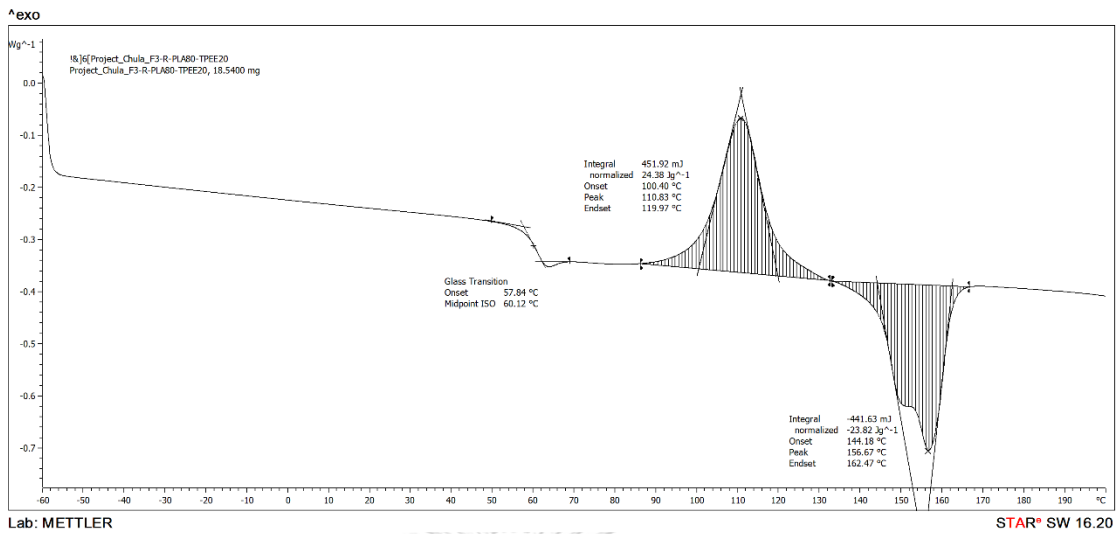
ภาคผนวก ค
เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DSC



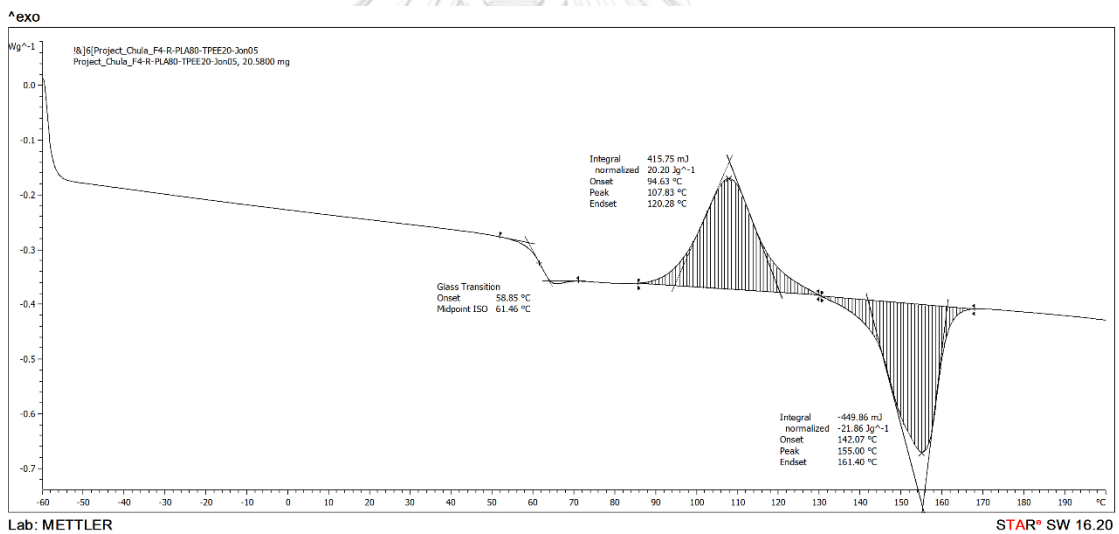
รูปที่ ค-1 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของ R-PLA



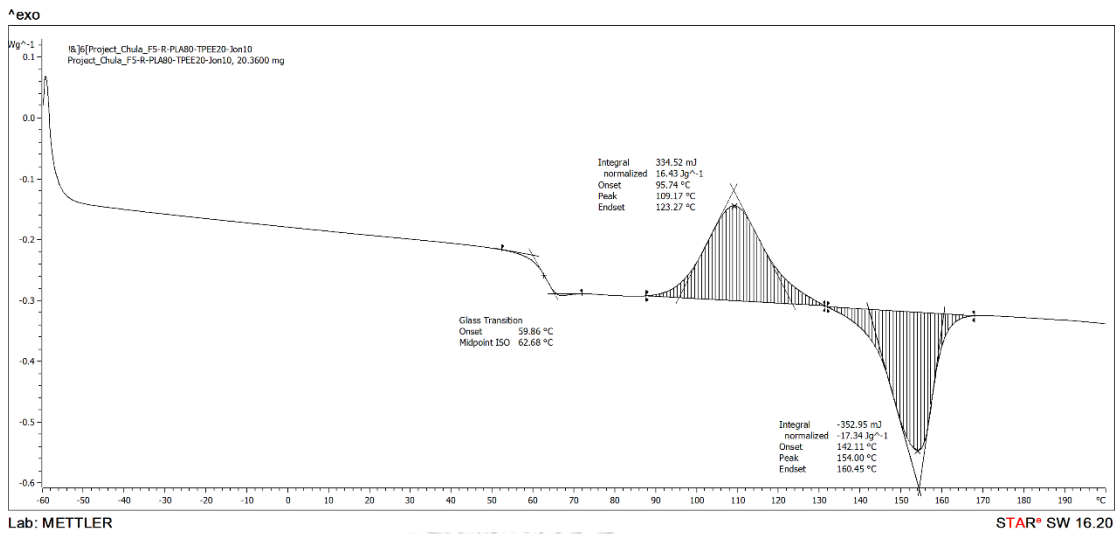
รูปที่ ค-2 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของ TPEE



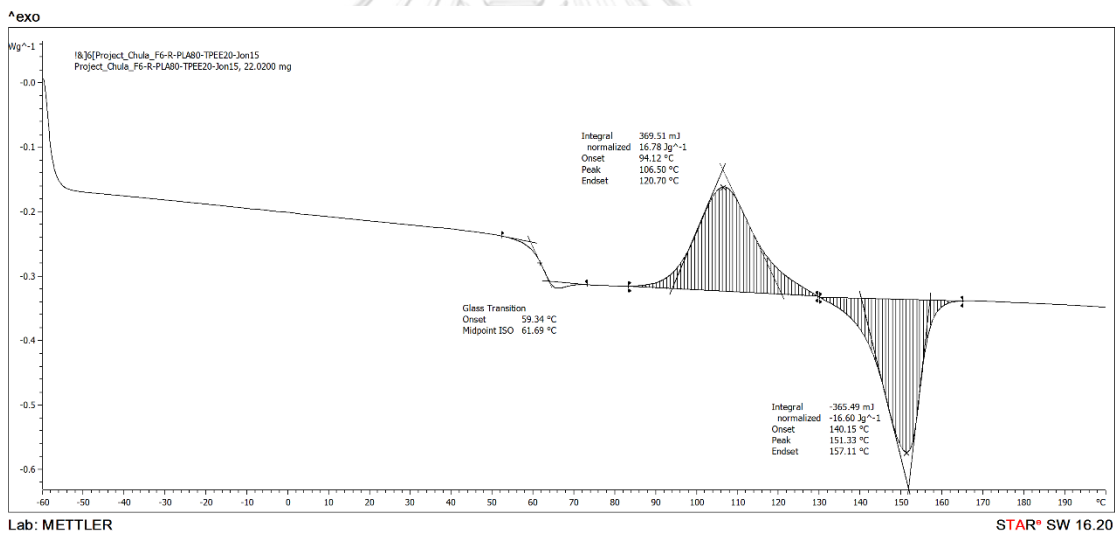
รูปที่ ค-3 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE



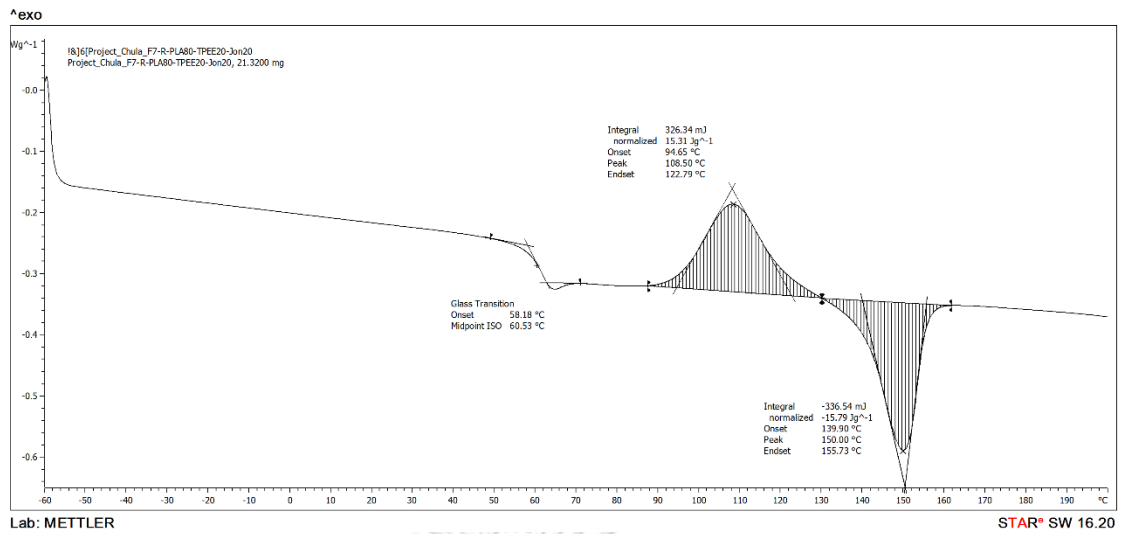
รูปที่ ค-4 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของพอลิเมอร์ผสม 80/20/0.5 R-PLA/TPEE/Joncryl



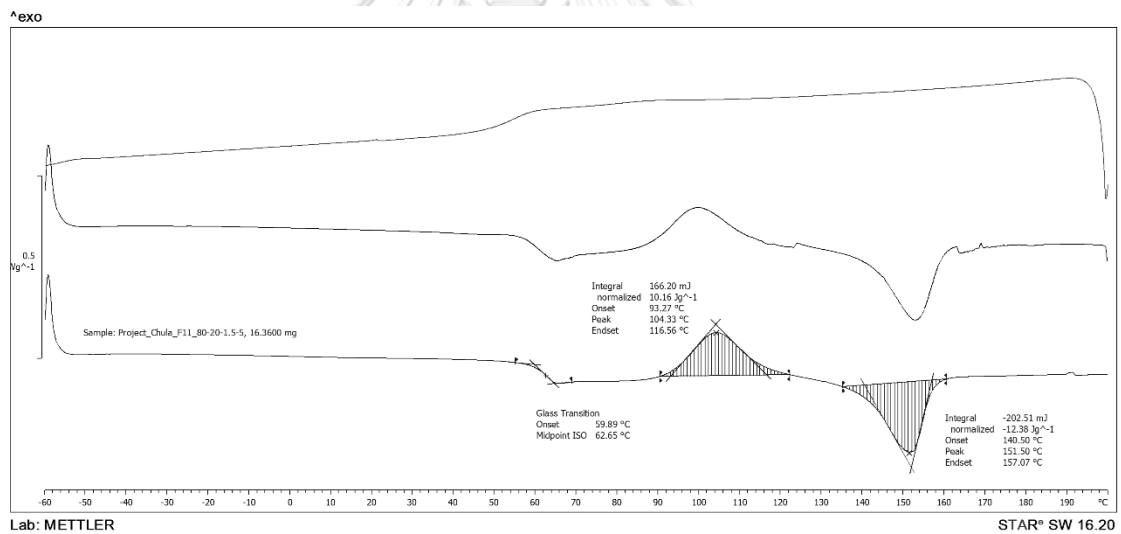
รูปที่ ค-5 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของพอลิเมอร์ผสม 80/20/1
R-PLA/TPEE/Joncryl



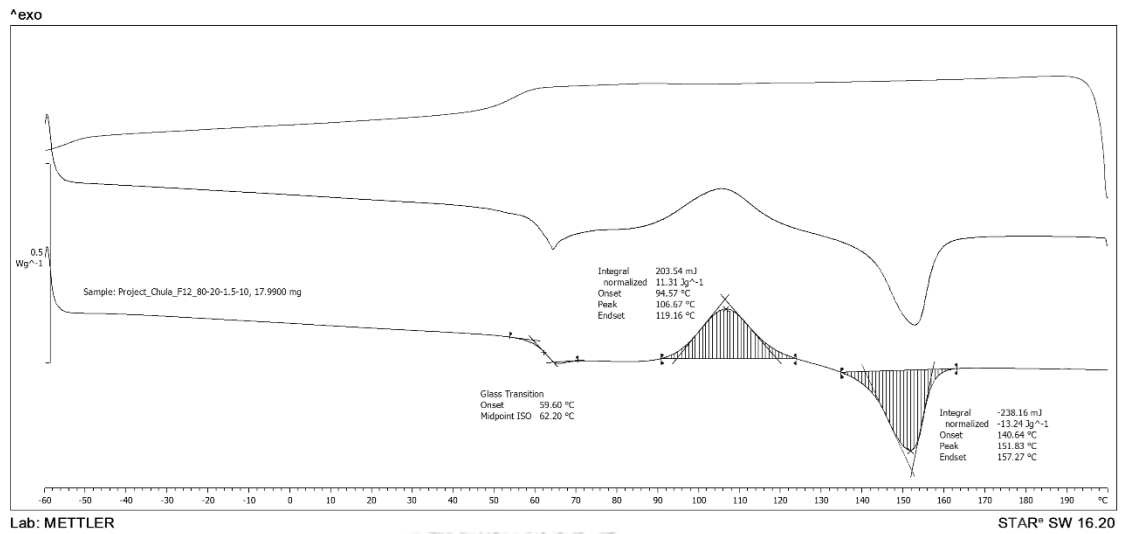
รูปที่ ค-6 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5
R-PLA/TPEE/Joncryl



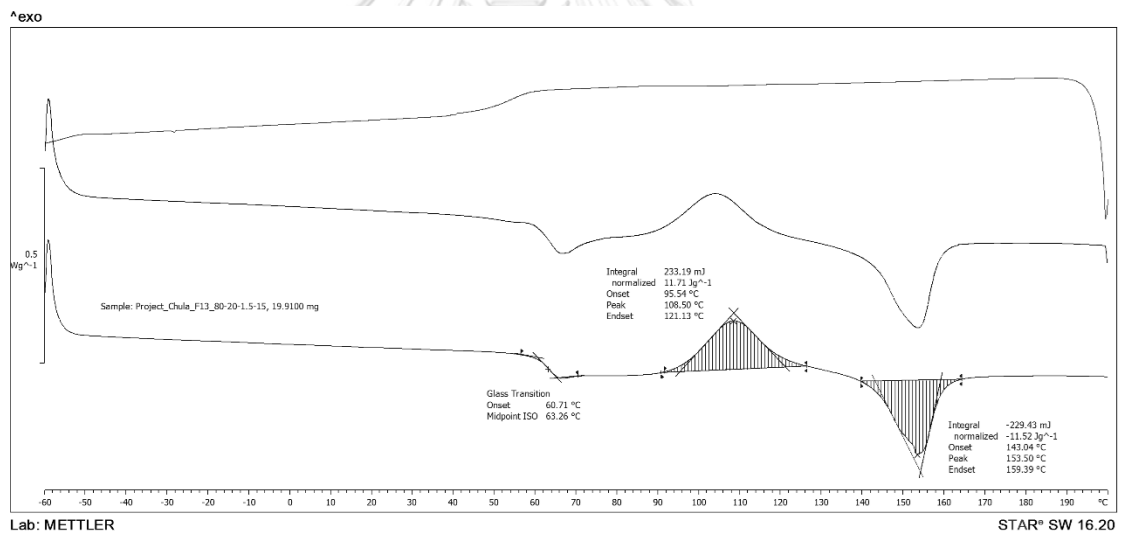
รูปที่ ค-7 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของพอลิเมอร์ผสม 80/20/2
R-PLA/TPEE/Joncryl



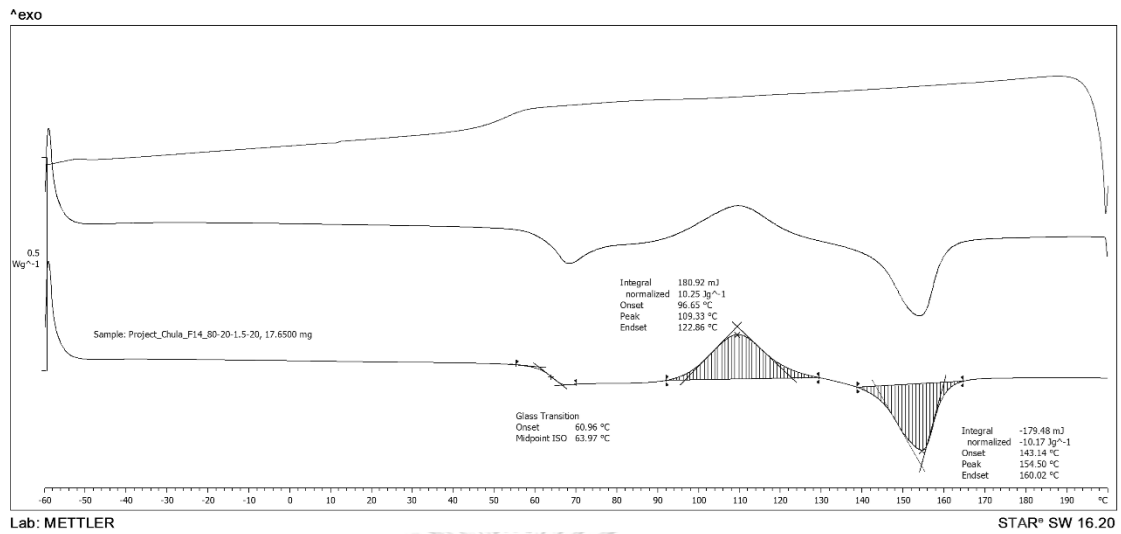
รูปที่ ค-8 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของคอมพอสิต 80/20/1.5/5
R-PLA/TPEE/Joncryl/WT



รูปที่ ค-9 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของคอมพอลิเมอร์ 80/20/1.5/10 R-PLA/TPEE/Joncry/WT



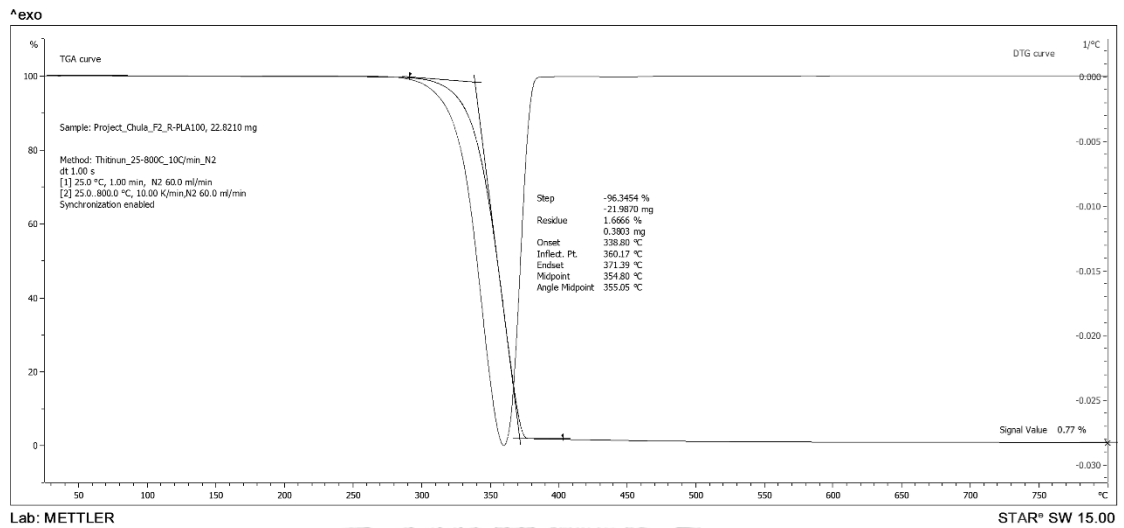
รูปที่ ค-10 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของคอมพอลิเมอร์ 80/20/1.5/15 R-PLA/TPEE/Joncry/WT



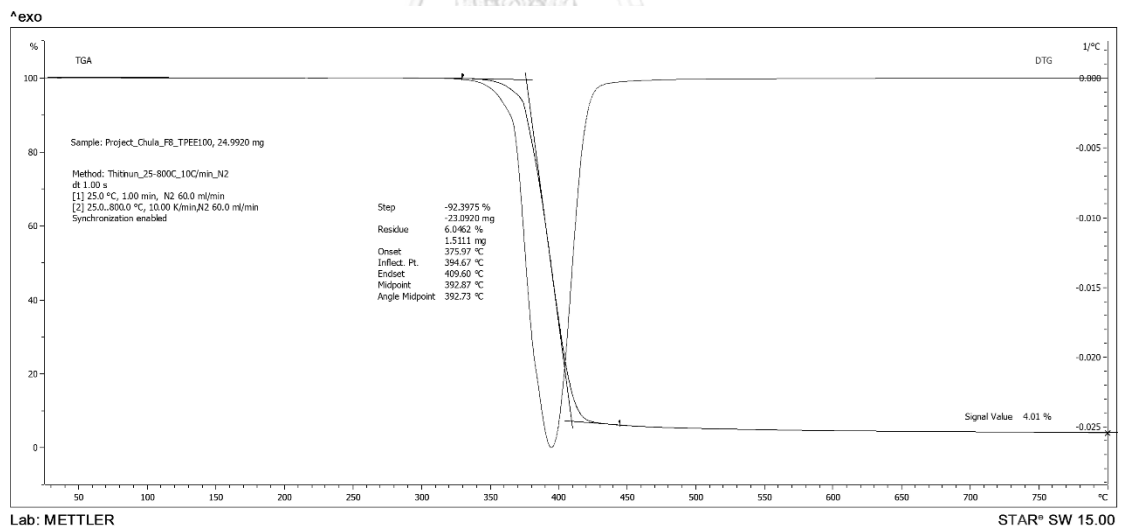
รูปที่ ค-11 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของคอมพอสิต 80/20/1.5/20 R-PLA/TPEE/Joncry/WT



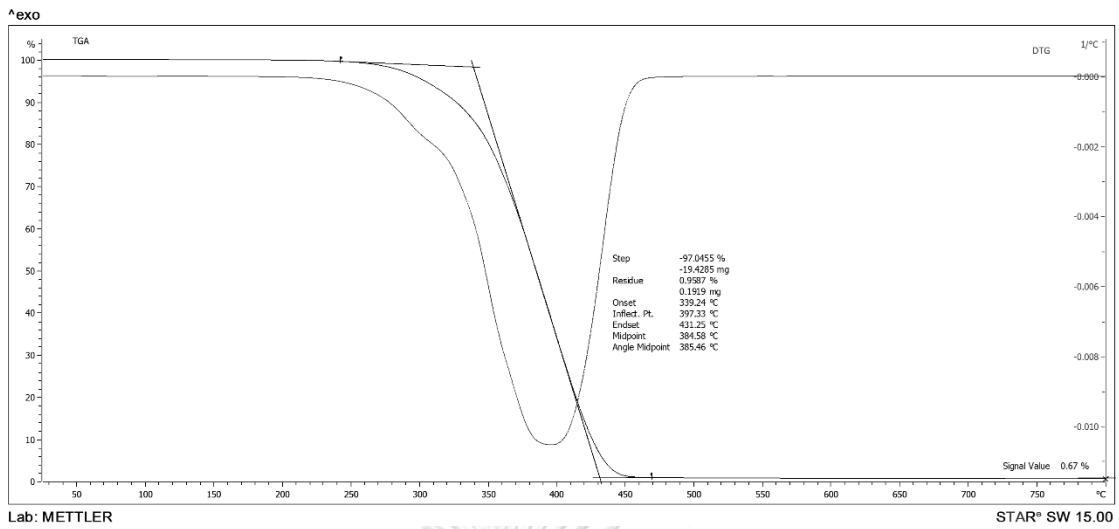
ภาคผนวก ง
เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA



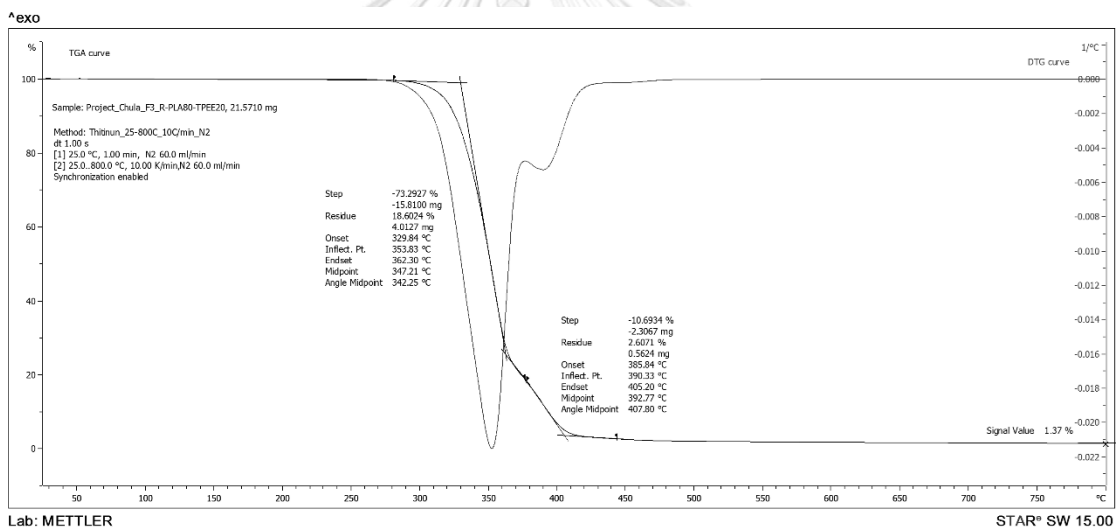
รูปที่ ง-1 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ R-PLA



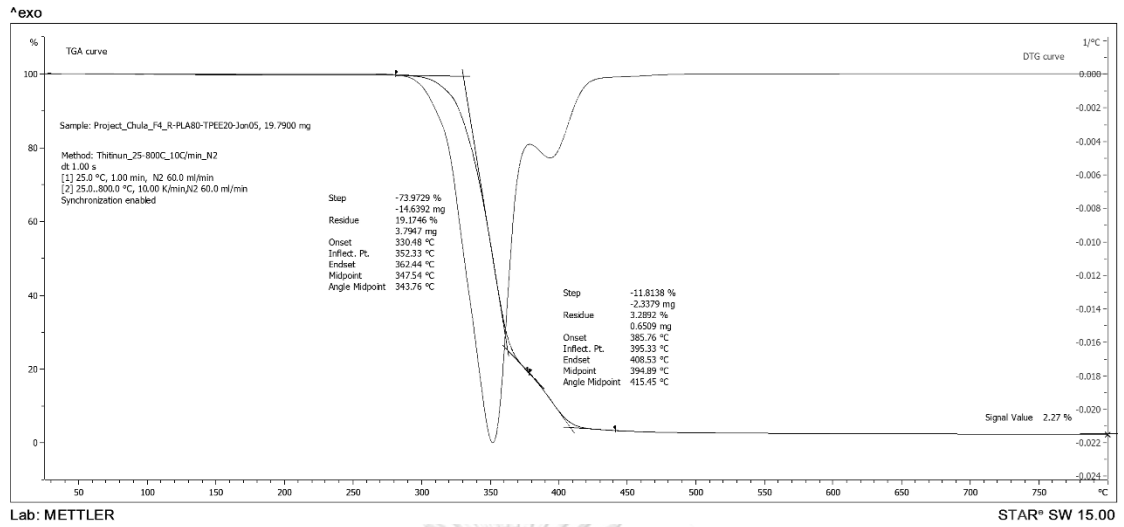
รูปที่ ง-2 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ TPEE



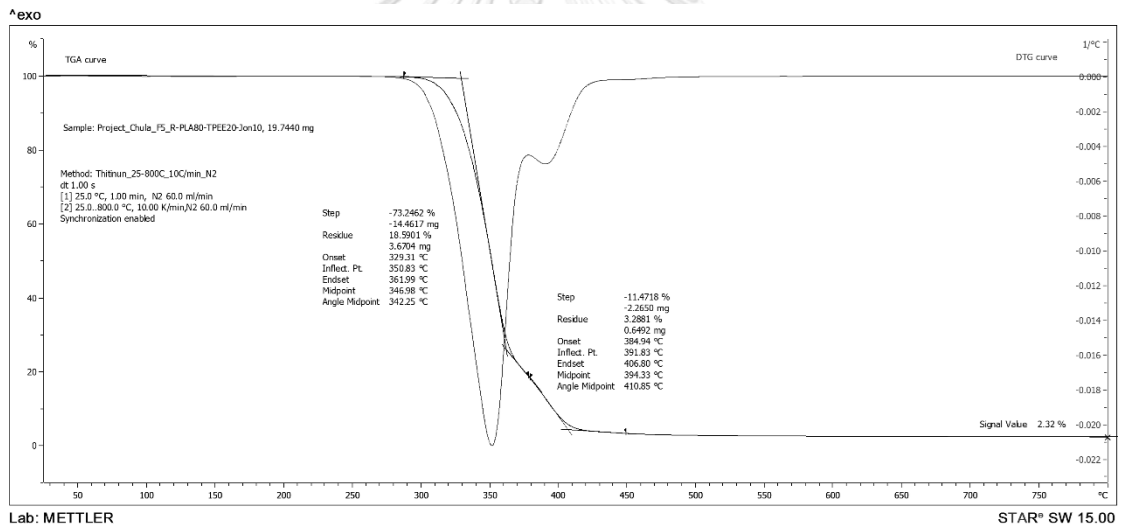
รูปที่ ง-3 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ Joncryl



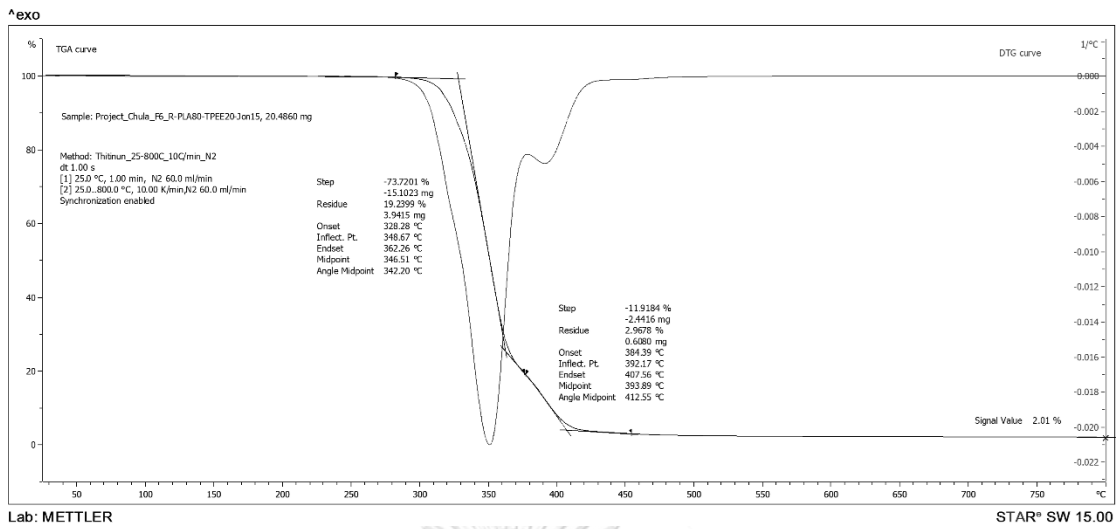
รูปที่ ง-4 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE



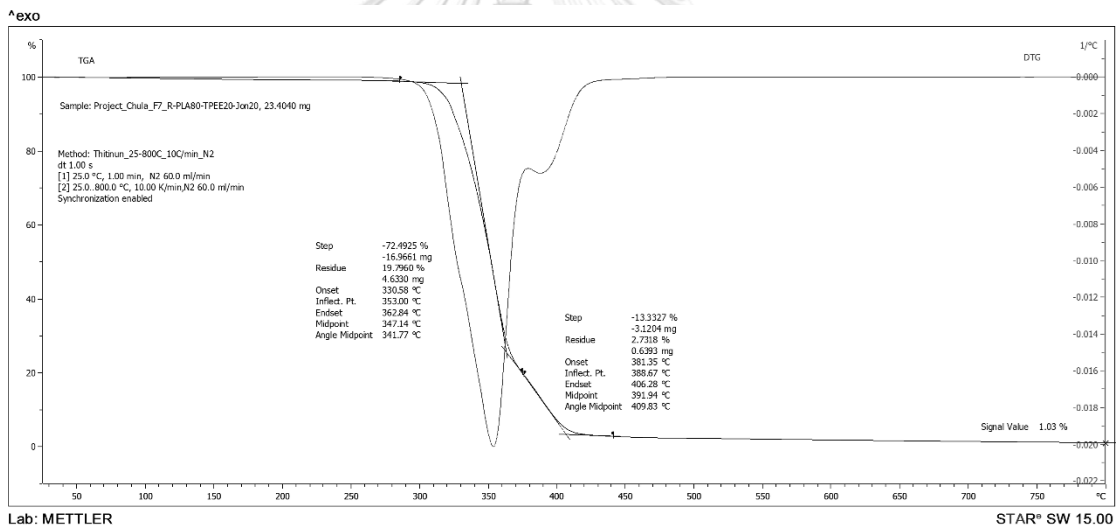
รูปที่ ๕-5 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 80/20/0.5 R-PLA/TPEE/Joncryl



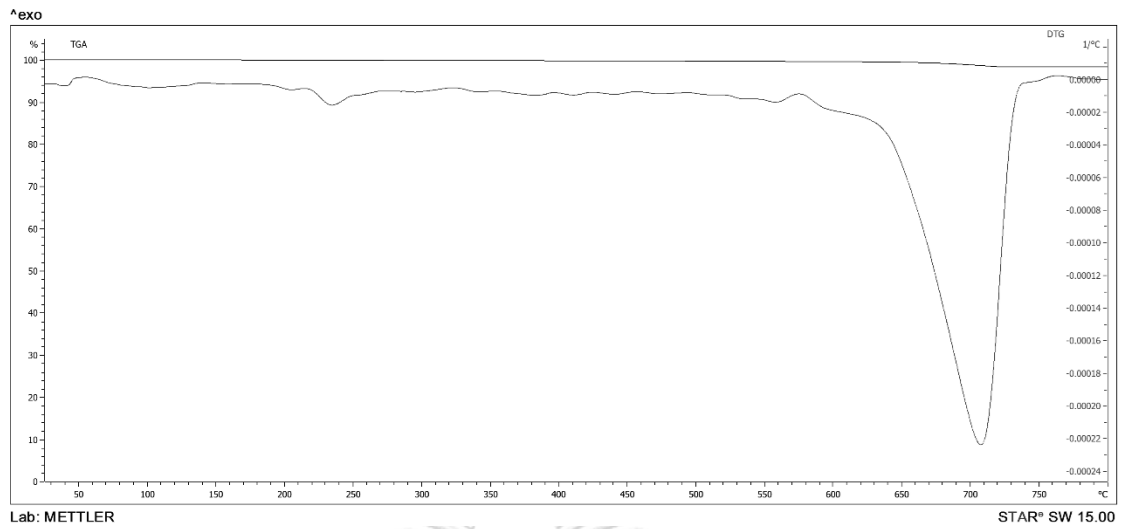
รูปที่ ๕-6 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 80/20/1 R-PLA/TPEE/Joncryl



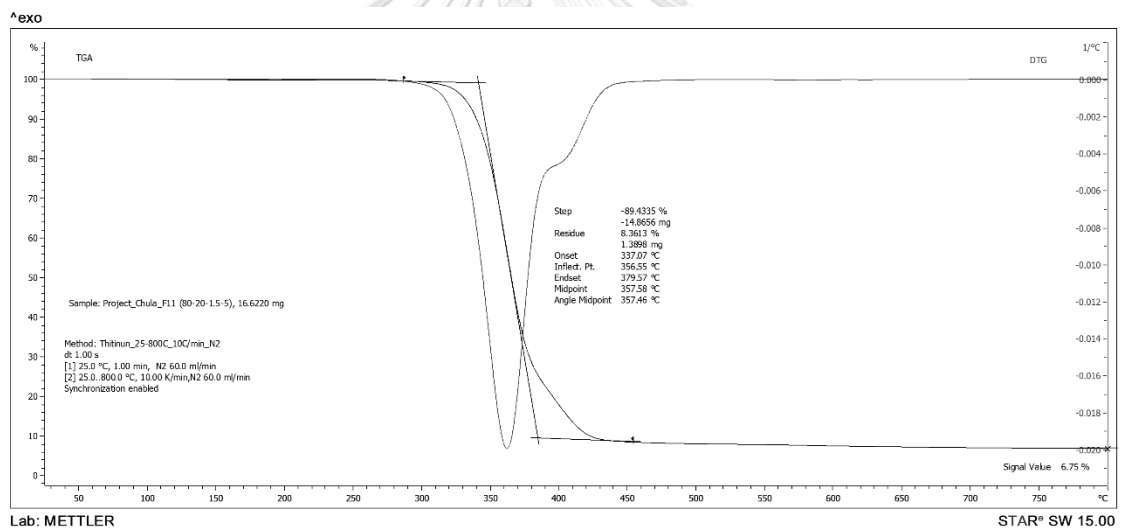
รูปที่ ๖-7 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl



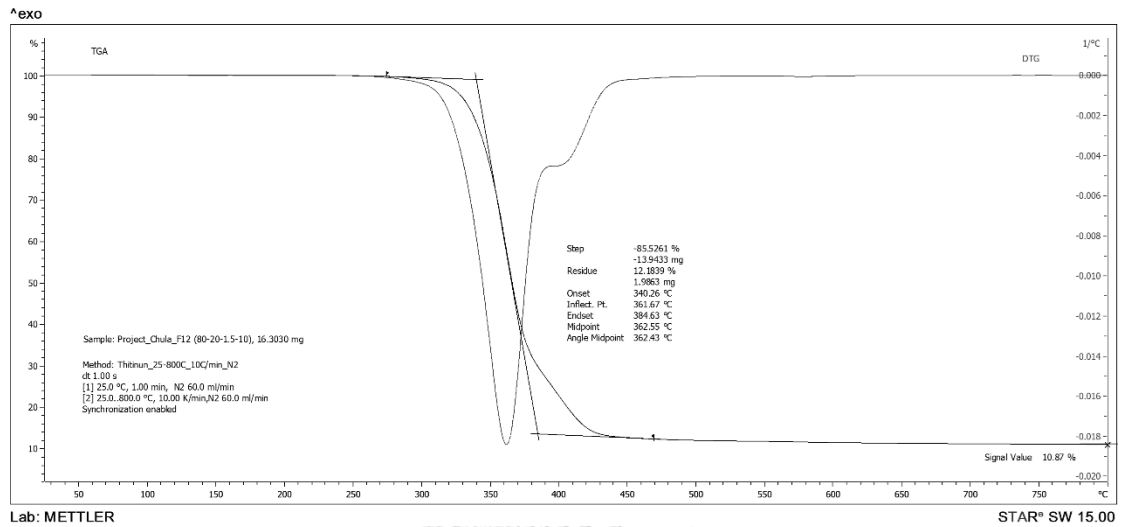
รูปที่ ๖-8 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 80/20/2 R-PLA/TPEE/Joncryl



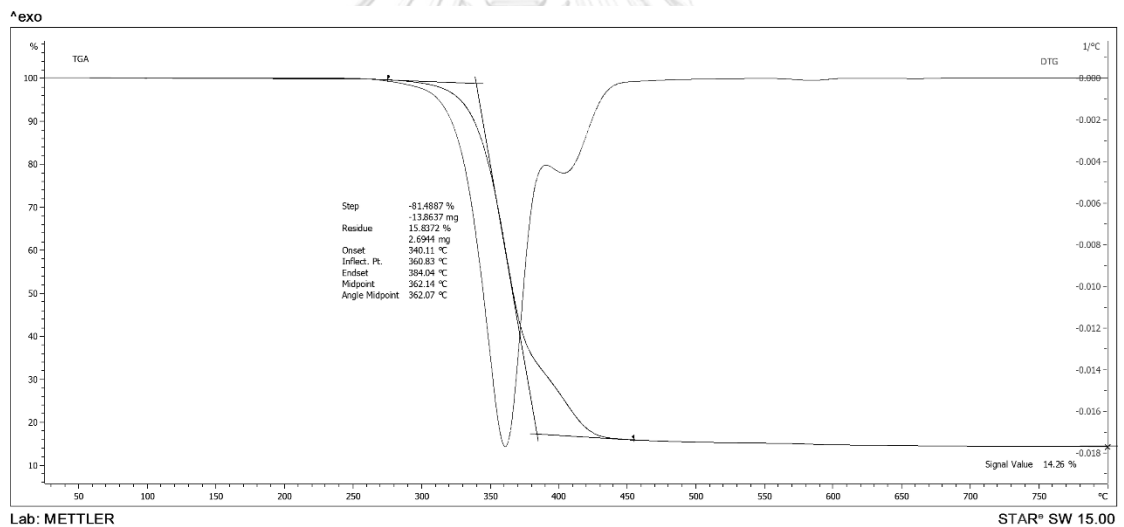
รูปที่ ง-9 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ Wollastonite



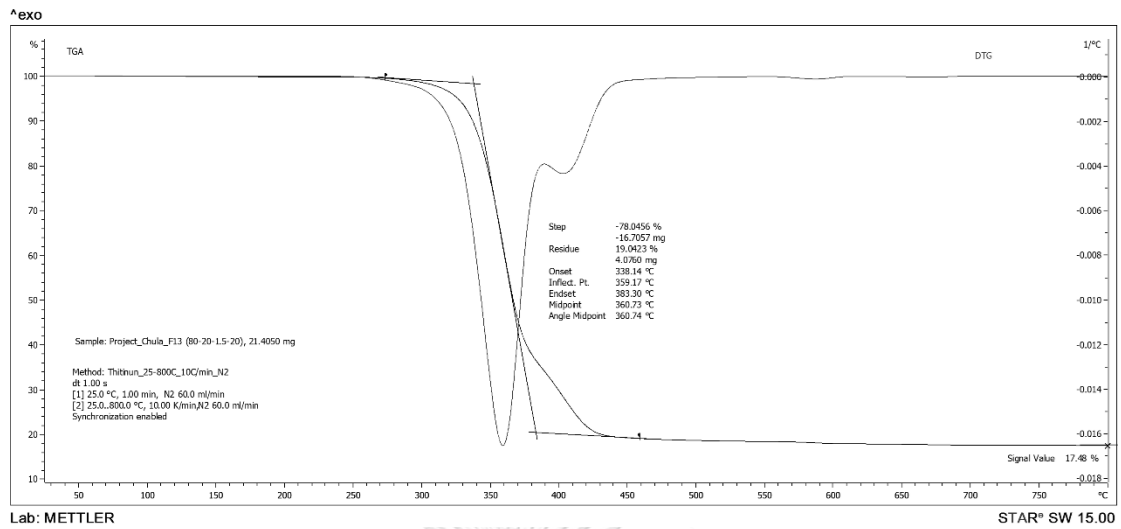
รูปที่ ง-10 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิต 80/20/1.5/5 R-PLA/TPEE/Joncryl/WT



รูปที่ ง-11 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิต 80/20/1.5/10
R-PLA/TPEE/Joncry/WT



รูปที่ ง-12 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิต 80/20/1.5/15
R-PLA/TPEE/Joncry/WT



รูปที่ ง-13 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิต 80/20/1.5/20

R-PLA/TPEE/Joncry/WT

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก จ
อุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อน

ตารางที่ จ-1 อุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl

Sample	Heat Distortion Temperature (°C)
R-PLA	55.4
	56.5
	56.1
Avg.	56.0
SD.	0.6
TPEE	52.8
	52.4
	52.6
Avg.	52.6
SD.	0.2
R-PLA/TPEE (w/w)	
80/20	56.5
	56.1
	55.7
Avg.	56.1
SD.	0.4
R-PLA/TPEE/Joncryl (w/w/phr)	
80/20/0.5	54.8
	56.3
	54.6
Avg.	55.2
SD.	0.9
80/20/1	54.5
	54.8

	54.1
Avg.	54.5
SD.	0.4
80/20/1.5	56.4
	56.6
	56.8
Avg.	56.6
SD.	0.2
80/20/2	56.3
	56.2
	55.5
Avg.	56.0
SD.	0.4



ตารางที่ จ-2 อุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต

Sample	Heat Distortion Temperature (°C)
R-PLA/TPEE/Joncryl/WT (w/w/phr/phr)	
80/20/1.5/5	55.5
	56.0
	56.8
Avg.	56.1
SD.	0.7
80/20/1.5/10	57.2
	57.5
	56.6
Avg.	57.1
SD.	0.5
80/20/1.5/15	59.9
	60.6
	59.9
Avg.	60.1
SD.	0.4
80/20/1.5/20	62.5
	62.7
	62.2
Avg.	62.5
SD.	0.3

ภาคผนวก ฉ
อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อน

ตารางที่ ฉ-1 อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนของ R-PLA, TPEE, พอลิเมอร์ผสม 80/20 R-PLA/TPEE และพอลิเมอร์ผสม R-PLA/TPEE/Joncryl

Sample	Vicat Softening Temperature (°C)
R-PLA	56.2
	56.5
	56.5
Avg.	56.4
SD.	0.2
TPEE	205.9
	205.0
	205.6
Avg.	205.5
SD.	0.5
R-PLA/TPEE (w/w)	
80/20	57.7
	57.2
	57.3
Avg.	57.4
SD.	0.2
R-PLA/TPEE/Joncryl (w/w/phr)	
80/20/0.5	56.8
	59.2
	57.4
Avg.	57.8
SD.	1.2
80/20/1	60.0
	59.1

	59.5
Avg.	59.5
SD.	0.5
80/20/1.5	59.3
	59.7
	61.9
Avg.	60.3
SD.	1.4
80/20/2	60.5
	59.3
	61.2
Avg.	60.3
SD.	1.0

ตารางที่ ๑-2 อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนของ 80/20/1.5 R-PLA/TPEE/Joncryl คอมพอสิต

Sample	Vicat Softening Temperature (°C)
R-PLA/TPEE/Joncryl/WT (w/w/phr/phr)	
80/20/1.5/5	60.6
	62.6
	60.5
Avg.	61.2
SD.	1.2
80/20/1.5/10	63.3
	61.3
	62.7
Avg.	62.4
SD.	1.0
80/20/1.5/15	63.9
	62.9
	65.4
Avg.	64.1
SD.	1.3
80/20/1.5/20	63.6
	66.0
	64.8
Avg.	64.8
SD.	1.2

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สุรพันธ์ หงสุรพันธ์
วัน เดือน ปี เกิด	21 กรกฎาคม 2538
สถานที่เกิด	สมุทรสาคร
วุฒิการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี (เกียรตินิยมอันดับ 2) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2561 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ปีการศึกษา 2563 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2564
ที่อยู่ปัจจุบัน	36 หมู่บ้านกานดา คลาสสิก วิลล์ แขวงบางบอน เขตบางบอน กรุงเทพมหานคร 10150