

ผลของสารขยายสายโซ่ต่อสมบัติของคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่นำมาใช้ใหม่/เทอร์มอ
พลาสติกพอลิยูรีเทน/ผงไม้



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF CHAIN EXTENDER ON PROPERTIES OF RECYCLED POLYETHYLENE
TEREPHTHALATE/THERMOPLASTIC POLYURETHANE/WOOD FLOUR COMPOSITES



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	ผลของสารขยายสายโซ่ต่อสมบัติของคอมพอลิเมอร์พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตที่นำมาใช้ใหม่/เทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน/ผงไม้
โดย	น.ส.วรรณพร เรืองเมือง
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมณีพิทธิสุทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมณีพิทธิสุทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

วรรณพร เรื่องเมือง : ผลของสารขยายสายโซ่ต่อสมบัติของคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทเรฟ
 แทเลตที่นำมาใช้ใหม่/เทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน/ผงไม้. (EFFECT OF CHAIN
 EXTENDER ON PROPERTIES OF RECYCLED POLYETHYLENE
 TEREPHTHALATE/THERMOPLASTIC POLYURETHANE/WOOD FLOUR
 COMPOSITES) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.อัญญาพร บุญมทิทธิสุทธิ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม :
 ดร.พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางความร้อนของ
 พอลิเอทิลีนเทเรฟแทเลตที่นำมาใช้ใหม่ ด้วยการเติมเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทนซึ่งเป็นพอลิเมอร์
 ที่มีความยืดหยุ่นสูง และผงไม้ ซึ่งเป็นสารตัวเติมอินทรีย์ และทำการปรับปรุงความเข้ากันได้ของ
 คอมพอสิตโดยการเติมสารขยายสายโซ่เมทิลีนไดฟีนิลไดโอดีโอโซไซยานเนต โดยขั้นแรกได้ทำการผสม
 พอลิเอทิลีนเทเรฟแทเลตที่นำมาใช้ใหม่แบบหลอมเหลวกับเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน 3
 อัตราส่วน (ร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนัก) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ก่อนตัดเป็นเม็ด ตามด้วย
 การฉีดแบบ จากการทดสอบ พบว่า ความทนแรงกระแทก การยึดตัว ณ จุดขาด และความทน
 แรงดัดโค้งมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่ ความทนแรงดึง ยังสัมผอดุลัส และสมบัติทางความร้อนลดลง
 โดย 70/30 พอลิเอทิลีนเทเรฟแทเลตที่นำมาใช้ใหม่/เทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน มีความทนแรง
 กระแทก และการยึดตัว ณ จุดขาด สูงสุด จึงถูกเลือกเพื่อนำไปเตรียมไม้คอมพอสิตกับผงไม้ที่
 ปริมาณ 10, 20, และ 30 ส่วนต่อน้ำหนักเรซินผสมร้อยละ โดยคอมพอสิตได้ถูกเตรียมด้วย
 กระบวนการเดียวกันกับที่กล่าวมาข้างต้น จากการทดสอบ พบว่ายังสัมผอดุลัส และความทนแรง
 ดัดโค้งได้รับการปรับปรุง ขณะที่ความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง การยึดตัว ณ จุดขาด และ
 สมบัติทางความร้อนลดลง โดย 70/30/10 พอลิเอทิลีนเทเรฟแทเลตที่นำมาใช้ใหม่/เทอร์มอ
 พลาสติกพอลิยูรีเทน/ผงไม้ มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม จึงถูกเลือกเพื่อนำไปผสมกับเมทิลีนไดฟีนิล
 ไดโอดีโอโซไซยานเนต ที่ปริมาณร้อยละ 0.5 และ 1 โดยน้ำหนัก เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ และเป็น
 สารขยายสายโซ่ของพอลิเมอร์เมทริกซ์และผงไม้ จากการทดสอบ พบว่า การเติมเมทิลีนไดฟีนิล
 ไดโอดีโอโซไซยานเนตสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตได้

สาขาวิชา ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิ ลายมือชื่อนิสิต

เมอร์

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6270098023 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD:

Wannaporn Ruangmuang : EFFECT OF CHAIN EXTENDER ON PROPERTIES OF RECYCLED POLYETHYLENE TEREPHTHALATE/THERMOPLASTIC POLYURETHANE/WOOD FLOUR COMPOSITES. Advisor: Asst. Prof. ANYAPORN BOONMAHITTHISUD Co-advisor: Phasawat Chaiwutthinan

This study aimed to improve the mechanical properties and thermal stability of recycled poly(ethylene terephthalate) (r-PET) by including of thermoplastic polyurethane (TPU), a very flexible polymer and wood flour (WF), an organic filler. Furthermore, the compatibility of composites was enhanced by adding methylene diphenyl diisocyanate chain extender (MDI). r-PET was firstly melt compounded with three loadings of TPU (10–30 wt%) on a twin screw extruder. The extrudates were pelletized and followed by injection molding. The impact strength, elongation at break and flexural strength were found to be enhanced, but at the expense of reduction of the tensile strength, Young's modulus and thermal properties caused by the addition of TPU into r-PET. Among the r-PET/TPU blends, 70/30 r-PET/TPU exhibited the optimal impact strength and elongation at break. This blend ratio was chosen to prepare wood-composites with WF at 10, 20, and 30 parts per hundred of resin (phr). The composites were also prepared by the process as above. The Young's modulus and flexural strength of the composites were then found to be enhanced, while impact strength, tensile strength, elongation at break and thermal properties were decreased. However, 70/30/10 r-PET/TPU/WF exhibited the appropriated properties. This composite ratio was selected to fill with MDI at 0.5 and 1 wt% in order to improve the compatibility and the chain extender of polymer matrix and WF. The results showed that the incorporation of MDI could improve the mechanical properties of the composites.

Field of Study:	Petrochemistry and Polymer Science	Student's Signature
Academic Year:	2021	Advisor's Signature
		Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ เนื่องจากการช่วยเหลือ และ คำแนะนำทางวิชาการ ตลอดจนความเอื้อเฟื้อในด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ และสถานที่ในการทำงานวิจัย จากผู้ทรงคุณวุฒิหลายท่าน ผู้วิจัยจึงใคร่ขอบพระคุณบุคคล และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังนี้

รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมทิทธิสุขุทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำ คอยให้ความรู้ คอยสนับสนุนความรู้ ตลอดจนช่วยสนับสนุนเงินทุนในการทำงานวิจัยอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

อีกหนึ่งบุคคลที่มีบทบาทที่สำคัญไม่แพ้กันคือ ดร. พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำต่างๆ ตลอดจนคอยให้ความรู้และสอนจนเกิดทักษะ คอยสนับสนุนเงินทุนในการทดสอบชิ้นงาน และอำนวยความสะดวกต่างๆ ในด้านอุปกรณ์และสถานที่ใน การทำงานวิจัยอย่างดียิ่ง

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือ และเอื้อเฟื้อเพื่อดำเนินวัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือในการทดสอบต่างๆ รวมไปถึงสถานที่ในการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และเพื่อนๆ ที่ให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือ ในด้านต่างๆ ในระหว่างการทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วรรณพร เรืองเมือง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย	2
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์.....	4
2.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (poly(ethylene terephthalate), PET).....	4
2.1.1 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต	4
2.1.2 สมบัติของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต.....	5
2.1.3 การนำไปใช้งานของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต.....	5
2.2 กระบวนการรีไซเคิล (recycling process).....	5
2.2.1 กระบวนการรีไซเคิลทางกายภาพ (physical recycling).....	6
2.2.2 กระบวนการรีไซเคิลทางเคมี (chemical recycling).....	7
2.3 กระบวนการย่อยสลายของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (degradation process).....	8
2.3.1 การย่อยสลายตัวด้วยไฮโดรไลติก (hydrolytic degradation)	8
2.3.2 การสลายตัวด้วยความร้อน (thermal degradation)	8
2.4 เทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน (thermoplastic polyurethane, TPU).....	9

2.4.1 การสังเคราะห์เทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน	9
2.4.2 สมบัติของเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน.....	10
2.4.3 การนำไปใช้งานของเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน.....	10
2.5 สารตัวเติม (filler).....	10
2.5.1 สารเติมแต่งที่นิยมใช้กันในอุตสาหกรรม	11
2.5.2 ประเภทของสารตัวเติม.....	11
2.5.3 สมบัติทั่วไปของสารตัวเติม	11
2.5.4 ปัจจัยของสารตัวเติมที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์เมทริกซ์.....	12
2.6 ผงไม้ (wood flour, WF)	12
2.6.1 การผลิตผงไม้.....	13
2.6.2 องค์ประกอบทางเคมีของผงไม้.....	14
2.7 สารขยายสารโซ่ (chain extender)	15
2.7.1 สมบัติของเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยานต.....	15
2.7.2 อันตรกิริยาของเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยานต.....	16
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	19
3.1 สารเคมีและวัสดุดิบ.....	19
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมชิ้นทดสอบ.....	19
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของชิ้นงาน.....	19
3.4 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง	21
3.5 ขั้นตอนการทดลอง	22
3.5.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU, คอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วยผงไม้ และ คอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	22
3.6 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบ.....	23

3.6.1 การขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU, คอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วยผงไม้ และ คอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	23
3.7 การทดสอบและวิเคราะห์สมบัติ	25
3.7.1 เครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหล (เอ็มเอฟไอ) (melt flow Index, MFI)	25
3.7.2 การทดสอบความทนแรงกระแทก (impact strength).....	26
3.7.3 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง (tensile properties)	26
3.7.4 การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength).....	28
3.7.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM).....	28
3.7.6 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลแคลอริเมทรี (DSC).....	29
3.7.7 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (TGA).....	30
3.7.8 เครื่องทดสอบฟูเรียร์แทรנסฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, ATR-FTIR).....	31
3.7.9 เครื่องทดสอบนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (nuclear magnetic resonance spectroscopy, NMR)	32
3.7.10 การทดสอบความหนืด (intrinsic viscosity, IV).....	33
บทที่ 4	35
4.1 ลักษณะชิ้นงานทดสอบ	35
4.2 ดรรชนีการหลอมไหล (MFI).....	37
4.3 สมบัติทางกล (mechanical properties)	39
4.3.1 ความทนแรงกระแทก (impact strength).....	40
4.3.2 สมบัติความทนแรงดึง (tensile properties).....	43
4.3.3 ความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength)	48
4.4 สัณฐานวิทยา (morphology)	51

4.5 สมบัติทางความร้อน (thermal properties).....	53
4.6 เสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability).....	59
4.7 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (functionality).....	65
4.8 วิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล (molecular structures).....	68
4.9 ความหนืด (intrinsic viscosity, IV).....	71
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	72
5.1 สรุปผลการทดลอง	72
5.2 ข้อเสนอแนะ	73
บรรณานุกรม.....	74
ภาคผนวก ก ดรรชนีการหลอมไหล	78
ภาคผนวก ข สมบัติทางกล.....	82
ภาคผนวก ค เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DSC	86
ภาคผนวก ง เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA.....	92
ภาคผนวก จ ความหนืด	98
ประวัติผู้เขียน.....	99

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ขนาดผงไม้ในหน่วยเมซตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกาเทียบกับหน่วยไมโครเมตร	13
ตารางที่ 2.2	ขนาดผงไม้ในหน่วยเมซตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกาเทียบกับหน่วยไมโครเมตร (ต่อ)	14
ตารางที่ 3.1	อัตราส่วนผสมพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU, คอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF และคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ	23
ตารางที่ 3.2	อุณหภูมิในการขึ้นรูปขึ้นทดสอบของพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU, คอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วยผงไม้ และคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ	24
ตารางที่ 4.1	สมบัติทางกลของ TPU, r-PET, พอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU, คอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF และคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ	40
ตารางที่ 4.2	สมบัติทางความร้อนของ TPU, r-PET, พอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU, คอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF และคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ.	54
ตารางที่ 4.3	เสถียรภาพทางความร้อนของ TPU, r-PET, WF และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	59
ตารางที่ 4.4	เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF และคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ	60

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ PET.....	4
รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ PET	4
รูปที่ 2.3 การย่อยสลายตัวด้วยไฮโดรไลติกของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต.....	8
รูปที่ 2.4 การสลายตัวด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต	8
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน.....	9
รูปที่ 2.6 การสังเคราะห์เทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน.....	10
รูปที่ 2.7 สันฐานวิทยาของผงไม้.....	13
รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส	14
รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของเมทิลินไดฟีนิลไดไอโซไซยานาต.....	15
รูปที่ 2.10 ปฏิกริยาระหว่างเมทิลินไดฟีนิลไดไอโซไซยานาตกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต	16
รูปที่ 2.11 ปฏิกริยาระหว่างเมทิลินไดฟีนิลไดไอโซไซยานาตกับเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน.....	16
รูปที่ 3.1 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง	21
รูปที่ 3.2 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่.....	22
รูปที่ 3.3 เครื่องฉีดแบบ.....	24
รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหล (MFI).....	25
รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกของชิ้นงาน	26
รูปที่ 3.6 ชิ้นทดสอบความทนแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D256.....	26
รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์เซล.....	27
รูปที่ 3.8 ขนาดชิ้นทดสอบและชิ้นทดสอบสมบัติด้านแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 ประเภทที่ 1	27
รูปที่ 3.9 ชิ้นทดสอบสมบัติด้านแรงดัดโค้งตามมาตรฐาน ASTM D790	28
รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	28

รูปที่ 3.11 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์.....	30
รูปที่ 3.12 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ).....	31
รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคป (FTIR).....	32
รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโคป (NMR).....	33
รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบอัมเปอร์ไหลดวิสโคมิเตอร์	34
รูปที่ 4.1 ขึ้นทดสอบของ (a) TPU, (b) PET และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วน (c) 90/10, (d) 80/20 และ (e) 70/30.....	35
รูปที่ 4.2 ขึ้นทดสอบของคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน WF: (a) 10, (b) 20 และ (c) 30 phr.....	36
รูปที่ 4.3 ขึ้นทดสอบของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF 70/30/10 ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน MDI: (a) 0.5 และ (b) 1 wt%	36
รูปที่ 4.4 ธรรมชาติการหลอมไหลของ TPU, r-PET และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วนต่าง ๆ	37
รูปที่ 4.5 ธรรมชาติการหลอมไหลของคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วนต่าง ๆ... 38	38
รูปที่ 4.6 ธรรมชาติการหลอมไหลของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่าง ๆ	38
รูปที่ 4.7 ความทนแรงกระแทกของ TPU, r-PET และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วนต่าง ๆ	41
รูปที่ 4.8 ความทนแรงกระแทกของคอมพอสิต r-PET/TPU 70/30 ด้วย WF ที่อัตราส่วนต่าง ๆ... 42	42
รูปที่ 4.9 ความทนแรงกระแทกของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่าง ๆ	43
รูปที่ 4.10 สมบัติความทนแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยืดสัมพัทธ์ และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาด ของ TPU, r-PET และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วนต่าง ๆ	44
รูปที่ 4.11 สมบัติความทนแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยืดสัมพัทธ์ และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาด ของคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วนต่าง ๆ	46

รูปที่ 4.12 สมบัติความทนแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ย้งสัมมอดูลัส และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาด ของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	47
รูปที่ 4.13 ความทนแรงดัดโค้งของ TPU, r-PET และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	49
รูปที่ 4.14 ความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	49
รูปที่ 4.15 ความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	50
รูปที่ 4.16 สันฐานวิทยาของ WF ที่กำลังขยาย 100 เท่า.....	51
รูปที่ 4.17 สันฐานวิทยาของ (a) r-PET และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วน (b) 90/10, (c) 80/20 และ (d) 70/30 ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	51
รูปที่ 4.18 สันฐานวิทยาของคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน (a) 10 phr, (b) 20 phr และ (c) 30 phr ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	52
รูปที่ 4.19 สันฐานวิทยาของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน (a) 0.5 และ (b) 1 wt% ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	53
รูปที่ 4.20 สมบัติทางความร้อน: (a) ขั้นตอนการให้ความร้อนในครั้งที่ 2 และ (b) ขั้นตอนการเย็นตัวของ TPU, r-PET และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	55
รูปที่ 4.21 สมบัติทางความร้อน: (a) ขั้นตอนการให้ความร้อนในครั้งที่ 2 และ (b) ขั้นตอนการเย็นตัวของคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	57
รูปที่ 4.22 สมบัติทางความร้อน: (a) ขั้นตอนการให้ความร้อนในครั้งที่ 2 และ (b) ขั้นตอนการเย็นตัวของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	58
รูปที่ 4.23 (a) TGA เทอร์โมแกรม (b) DTG เทอร์โมแกรมของ TPU, r-PET และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	61
รูปที่ 4.24 (a) TGA เทอร์โมแกรม (b) DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	62
รูปที่ 4.25 (a) TGA เทอร์โมแกรม (b) DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	64

รูปที่ 4.26 สเปกตรัม ATR–FTIR ของ TPU, r–PET และพอลิเมอร์ผสม r–PET/TPU ที่อัตราส่วน ต่างๆ.....	65
รูปที่ 4.27 สเปกตรัม ATR–FTIR ของคอมพอสิต 70/30 r–PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วนต่างๆ.	66
รูปที่ 4.28 สเปกตรัม ATR–FTIR ของคอมพอสิต 70/30/10 r–PET/TPU/WF ที่เติม MDI อัตราส่วน 0.5 และ 1 wt%.....	67
รูปที่ 4.29 สเปกตรัม ^{13}C NMR ของ r–PET.....	68
รูปที่ 4.30 สเปกตรัม ^{13}C NMR ของพอลิเมอร์ผสม 70/30 r–PET/TPU.....	69
รูปที่ 4.31 สเปกตรัม ^{13}C NMR ของคอมพอสิต 70/30/10 r–PET/TPU/WF.....	69
รูปที่ 4.32 สเปกตรัม ^{13}C NMR ของคอมพอสิต 70/30/10/1 r–PET/TPU/WF/MDI.....	70
รูปที่ 4.33 ความหนืดของ r–PET, พอลิเมอร์ผสม 70/30 r–PET/TPU, คอมพอสิต 70/30/10 r– PET/TPU/WF ด้วย WF และคอมพอสิต 70/30/10/1 r–PET/TPU/WF/MDI ที่เติม MDI.....	71

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันพลาสติกได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์เพิ่มมากขึ้นดังนั้น ความต้องการในการใช้งานพลาสติกจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติก จำพวกบรรจุภัณฑ์อาหารและขวดเครื่องดื่ม โดยมากทำมาจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือพีอีที (poly(ethylene terephthalate), PET) ซึ่งเป็นเทอร์มอพลาสติกพอลิเอสเทอร์ (thermoplastic polyester) ชนิดหนึ่ง เนื่องจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีสมบัติเด่น ด้านความใส ดูดซับน้ำได้น้อย ป้องกันการซึมผ่านของแก๊สได้ดี และทนทานต่อสารเคมีหากแต่บรรจุภัณฑ์อาหารและขวดเครื่องดื่ม เหล่านี้ส่วนใหญ่ใช้แล้วทิ้ง ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้น เพื่อเป็นการ ลดปริมาณขยะและมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงนำบรรจุภัณฑ์อาหารและขวดเครื่องดื่มประเภท พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมาเข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่หรือที่เรียกว่ากระบวนการรีไซเคิล ซึ่งเป็น กระบวนการที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากนัก โดยนำพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต มาบดและอาศัยเพียงความร้อน เพื่อทำให้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเกิดการหลอมและนำไปขึ้นรูปเป็น ผลิตภัณฑ์ได้ใหม่ [1] อีกทั้งปริมาณพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่รวบรวมจากบรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้ว มีประมาณ 20 ล้านตันต่อปี [2] ซึ่งมีมากเพียงพอที่ทำให้การรีไซเคิลพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต มีความสำคัญในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งนอกจากเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ที่นำมาใช้ใหม่แล้วยังช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ลดการใช้พลังงาน และเป็น การใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าอีกด้วย อย่างไรก็ตามขั้นตอนการทำพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่นำมาใช้ ใหม่อาจส่งผลให้สมบัติทางกายภาพของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่นำมาใช้ใหม่ลดลง เนื่องจากเกิด แรงเค้นเชิงกลเข้าไปทำลายสายโซ่โมเลกุลพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่นำมาใช้ใหม่ให้ขาดออก ทำให้ ความยาวสายโซ่โมเลกุลสั้นลง และมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง ดังนั้นการผสมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ นำมาใช้ใหม่ด้วยพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นจึงเป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ที่นำมาใช้ใหม่วิธีการหนึ่งที่ไม่ยุ่งยากและราคาถูก ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าได้มีการผสม พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่นำมาใช้ใหม่กับพอลิเมอร์ที่มีความเหนียวและความยืดหยุ่นมากกว่า ได้แก่ พอลิคาร์บอเนต (polycarbonate, PC) และเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน (thermoplastic polyurethane, TPU)

งานวิจัยนี้จะทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่นำมาใช้ใหม่ด้วยการทำเป็น พอลิเมอร์ผสมกับเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงและมีสมบัติ เชิงกลที่ดีจึงเหมาะสมสำหรับใช้ปรับปรุงสมบัติความเหนียวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่นำมาใช้

ใหม่ โดยเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทนมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น โฟม สารเคลือบ เส้นใย อุปกรณ์ชิ้นส่วนรถยนต์ และวัสดุชีวการแพทย์ โดยสมบัติของเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทนจะมีความยืดหยุ่นคล้ายยาง และเนื่องจากความเป็นเทอร์มอพลาสติก จึงทำให้เทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทนสามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปเทอร์มอพลาสติกทั่วไปได้ เช่น การอัดรีด (extrusion) การเป่าแบบ (blow molding) การฉีดแบบ (injection molding) และการอัดแบบ (compression molding) เป็นต้น นอกจากนี้เทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทนยังมีสมบัติเด่นหลายประการ ได้แก่ มีความทนแรงดึง แรงฉีกขาด และการขัดถู ความต้านทานน้ำมันและตัวทำละลายสูง อีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำได้ดี เป็นต้น

จากนั้นพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้จะถูกนำไปเตรียมเป็นคอมพอสิตกับผงไม้ (wood flour, WF) เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพที่สูญเสียไปของพอลิเมอร์ผสม โดยผงไม้เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีส่วนประกอบหลักเป็นเซลลูโลส ซึ่งได้จากเศษขี้เลื่อยหรือเศษไม้ เหลือทิ้งจากโรงงานไม้ที่ได้นำไปผ่านการบดให้เป็นผงที่มีอนุภาคขนาดเล็ก โดยผงไม้เป็นสารตัวเติมที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมพลาสติกเนื่องจากมีราคาถูก ความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา หาได้ง่าย และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สามารถนำมาเตรียมเป็นผลิตภัณฑ์ไม้พลาสติกคอมพอสิต (wood-plastic composites, WPCs) ซึ่งถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ในงานก่อสร้างยานยนต์ และฉนวนกันเสียงได้อีกด้วย นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังสนใจที่จะทำการเติมสารขยายสายโซ่ (chain extender) ลงในคอมพอสิตที่เตรียมได้เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมหรือขยายสายโซ่ของพอลิเมอร์ และช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างคอมพอสิต เพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติของคอมพอสิตที่เตรียมได้ให้มีสมบัติที่ดี โดยในงานวิจัยนี้ใช้เมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยานเนต (methylene diphenyl diisocyanate, MDI) เป็นสารขยายสายโซ่

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์จากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่นำมาใช้ใหม่ให้มี สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดยผสมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่นำมาใช้ใหม่กับเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทนและผงไม้ อีกทั้งยังทำการศึกษาการเติมสารขยายสายโซ่ เมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยานเนตเพื่อปรับปรุงสมบัติของคอมพอสิตที่เตรียมได้ หากงานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จจะเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งให้ สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้เพิ่มมากขึ้น และมีส่วนร่วมในการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมให้กับสังคม

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมคอมพอสิตของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่นำมาใช้ใหม่/เทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน/ผงไม้โดยใช้เมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยานเนตเป็นสารขยายสายโซ่

2. ศึกษาผลของสารขยายสายโซ่ต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล สัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน เสถียรภาพทางความร้อน หมู่ฟังก์ชัน โครงสร้างโมเลกุล และความหนืดของคอมพอลิเมอร์ที่เตรียมได้

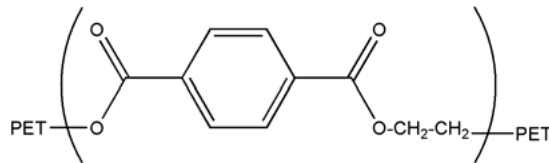


บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (poly(ethylene terephthalate), PET) [3]

เป็นเทอร์มอพลาสติกพอลิเอสเทอร์ (thermoplastic polyester) ชนิดหนึ่งโดยมีลักษณะโครงสร้างทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.1

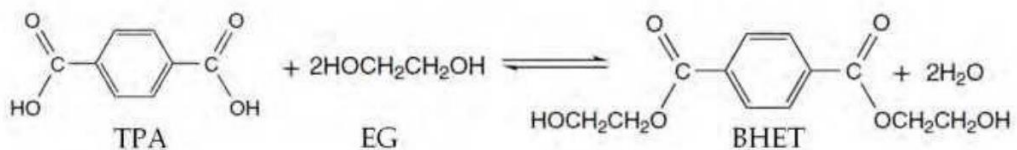


รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ PET [4]

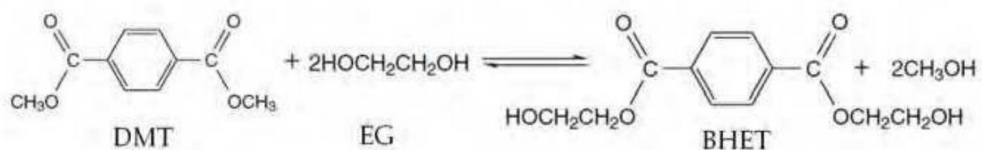
2.1.1 การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต [5]

สามารถสังเคราะห์ได้โดยการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (esterification) ระหว่างกรดเทเรฟทาเลอิก (terephthalic acid) และเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) หรือการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (transesterification) ระหว่างเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) และไดเมทิลเทเรฟทาเลต (dimethyl terephthalate) ขั้นตอนการสังเคราะห์ PET มีด้วยกัน 2 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.2

ขั้นที่ 1 ปฏิกิริยา esterification ระหว่าง terephthalic acid และ ethylene glycol



ขั้นที่ 2 ปฏิกิริยา transesterification ระหว่าง dimethyl terephthalate และ ethylene glycol



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ PET [5]

2.1.2 สมบัติของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต [4]

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight, MW) ประมาณ 192 กรัม/โมล มีความหนาแน่น (density) 141 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยทั่วไปพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) ประมาณ 69–115 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) ประมาณ 265 องศาเซลเซียส นอกจากนี้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีความโปร่งใส มีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่นเดียวกับเทอร์มอพลาสติกทั่วไป โดยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีความเหนียว ทนทานต่อแรงกระแทก สามารถนำมาขึ้นรูปได้หลากหลายและนำมารีไซเคิลได้ง่าย โดยสมบัติเด่นของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีหลายประการดังนี้ มีความโปร่งใส น้ำหนักเบา ดูดซับน้ำได้น้อย ป้องกันการซึมผ่านของแก๊สได้ดี และทนทานต่อสารเคมี

2.1.3 การนำไปใช้งานของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต [6]

- บรรจุภัณฑ์อาหาร
- ขวดเครื่องดื่ม
- ฟิล์มถนอมอาหาร
- เส้นใยสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์
- ชิ้นส่วนยานยนต์

หากแต่บรรจุภัณฑ์อาหารและขวดเครื่องดื่มเหล่านี้ส่วนใหญ่ใช้แล้วทิ้ง ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

2.2 กระบวนการรีไซเคิล (recycling process) [7]

กระบวนการรีไซเคิล เป็นกระบวนการนำของเสียหรือวัสดุที่ใช้แล้วมาผ่านกระบวนการแปรรูปหรือปรับปรุงคุณภาพ เพื่อให้วัสดุนั้นกลับมามีคุณภาพเทียบเท่าหรือใกล้เคียงของเดิม หรือให้ได้วัตถุดิบใหม่ หรือผลิตภัณฑ์ใหม่ ดังนั้นเพื่อเป็นการลดปริมาณขยะและมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงนำบรรจุภัณฑ์อาหารและขวดเครื่องดื่มประเภทพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมาเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิล ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากนัก โดยกระบวนการรีไซเคิลพลาสติกสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือกระบวนการรีไซเคิลทางกายภาพ และกระบวนการรีไซเคิลทางเคมี

2.2.1 กระบวนการรีไซเคิลทางกายภาพ (physical recycling) [7]

กระบวนการรีไซเคิลทางกายภาพเป็นกระบวนการนำพอลิเมอร์มาผ่านกระบวนการตัด บด และเขื่อนเพื่อให้มีขนาดเล็กลง โดยอาศัยเพียงความร้อน เพื่อให้พอลิเมอร์เกิดการหลอม และนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ใหม่ ซึ่งกระบวนการรีไซเคิลทางกายภาพของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีวิธีการดังนี้

1. การกำจัดสิ่งปนเปื้อน (contamination removal) แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1.1 การคัดแยกประเภทพลาสติก (sorting process) การแยกขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ออกจากพลาสติกประเภทอื่นๆ เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride, PVC) หรือ พอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง เนื่องจากหากเกิดการปนเปื้อนจากวัสดุอื่น จะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตอย่างมาก

1.2 การบด (grinding) หลังจากการคัดแยกประเภทแล้วจะถูกบดให้เป็นเกล็ด เพื่อนำไปแปรรูปใหม่ได้ง่าย

1.3 การล้าง (washing) เกล็ดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตจะถูกล้างหลังจากการบดโดยการล้างมี 2 วิธี ดังนี้

1.3.1 การล้างด้วยน้ำ (aqueous washing) ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน

– ขั้นตอนที่หนึ่ง ล้างด้วยน้ำร้อนกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ ผงซักฟอกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

– ขั้นตอนที่สอง ล้างด้วยน้ำเย็น

1.3.2 การล้างด้วยตัวทำละลาย (solvent washing) ล้างเกล็ดพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตด้วยเตตระคลอโรเอทิลีน (tetrachloroethylene, TCE)

2. การอบแห้ง (drying) ถือเป็นกระบวนการสำคัญในการรีไซเคิลพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต เป็นการลดความชื้นของเกล็ดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ซึ่งจะช่วยลดการสลายตัวด้วยไฮโดรไลติก (hydrolytic degradation) จะส่งผลให้เกิดการหลอมที่ตีส่วนใหญ่ใช้อุณหภูมิ 140–170 องศาเซลเซียส สามารถทำได้โดยการใช้เครื่องอบแห้ง

3. กระบวนการหลอม (melt processing) เกล็ดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสามารถนำมาแปรรูปให้เป็นเม็ดโดยกระบวนการอัดรีด (extrusion) ปกติ

2.2.2 กระบวนการรีไซเคิลทางเคมี (chemical recycling) [8]

กระบวนการนี้สามารถใช้ร่วมกับการรีไซเคิลทางกายภาพได้ การรีไซเคิลทางเคมีเป็นกระบวนการการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ โดยพอลิเมอร์จะถูกเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเป็นมอนอเมอร์ (monomer) หรือสลายพอลิเมอร์บางส่วนไปเป็นโอลิโกเมอร์ (oligomer) ผ่านปฏิกิริยาเคมี ซึ่งมอนอเมอร์สามารถใช้สำหรับเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) ต่อไป เพื่อทำซ้ำผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์เดิมหรือที่เกี่ยวข้อง วิธีนี้สามารถเปลี่ยนวัสดุพลาสติกให้เป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงเหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุป้อน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. กระบวนการรีไซเคิลแบบเปียก (wet process) คือกระบวนการรีไซเคิลโดยอาศัยสารเคมีซึ่งทำหน้าที่เป็นสารย่อยสลาย (degrading agent) โดยแบ่งกระบวนการตามชนิดของสารย่อยสลาย ดังนี้

1.1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เป็นวิธีการรีไซเคิลที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาของพอลิเมอร์กับน้ำในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด ด่าง หรือเป็นกลาง ซึ่งนำไปสู่การดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) ทั้งหมดเป็นโมโนเมอร์ ข้อเสียของวิธีการไฮโดรไลซิสคือใช้อุณหภูมิสูง และใช้แรงกดดันเป็นเวลานาน เป็นวิธีที่ไม่นิยมใช้เพราะมีค่าใช้จ่ายสูง

1.2 กระบวนการไกลโคไลซิส (glycolysis) เป็นวิธีการรีไซเคิลที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาของพอลิเมอร์กับเอทิลีนไกลคอล ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาไกลโคไลซิสจะแตกต่างกันไปตามสถานะของอุณหภูมิและการเร่งปฏิกิริยา

1.3 กระบวนการเมทานอลิซิส (methanolysis) เป็นวิธีการรีไซเคิลที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาของพอลิเมอร์กับเมทานอลภายใต้อุณหภูมิและแรงกด

2. กระบวนการรีไซเคิลแบบแห้ง (dry process) หรือเรียกว่ากระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) เป็นวิธีการรีไซเคิลโดยอาศัยความร้อน ทำให้สารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่เกิดการแตกตัวเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลงภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน

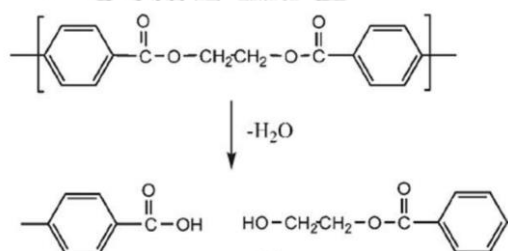
ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยนี้จึงเลือกกระบวนการรีไซเคิลทางกายภาพ โดยนำพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมาบดและอาศัยเพียงความร้อน เพื่อทำให้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเกิดการหลอม และนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ใหม่ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ง่ายและไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากนัก

2.3 กระบวนการย่อยสลายของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (degradation process) [9]

การรีไซเคิลพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่นำมาใช้ใหม่อาจส่งผลให้สมบัติทางกายภาพของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่นำมาใช้ใหม่ลดลง เนื่องจากเกิดแรงเฉือนเชิงกลเข้าไปทำลายสายโซ่โมเลกุลพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่นำมาใช้ใหม่ให้ขาดออกทำให้ความยาวสายโซ่โมเลกุลสั้นลง และมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง กระบวนการย่อยสลายพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.3.1 การย่อยสลายตัวด้วยไฮโดรไลติก (hydrolytic degradation) [9]

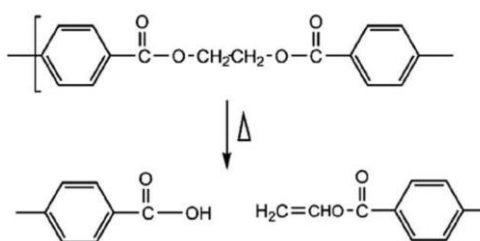
ปฏิกิริยาไฮโดรไลติกเป็นปฏิกิริยาการย่อยสลายพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตด้วยความชื้นและสารปนเปื้อน ส่งผลให้เกิดการตัดสายโซ่ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่คือ คาร์บอกซิลิกแอซิด (carboxylic acid) และไฮดรอกซิลเอสเทอร์ (hydroxyl ester) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การย่อยสลายตัวด้วยไฮโดรไลติกของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต [9]

2.3.2 การสลายตัวด้วยความร้อน (thermal degradation)

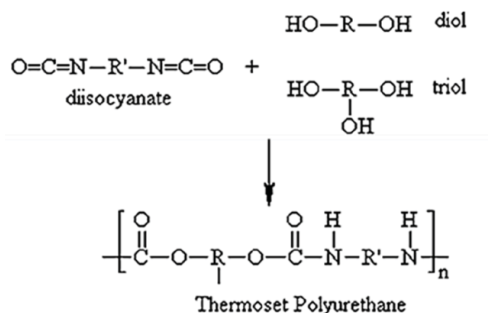
ปฏิกิริยาการสลายพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตด้วยความร้อนส่งผลให้เกิดการตัดสายโซ่พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่คือ คาร์บอกซิลิก (carboxylic) และไวนิลเอสเทอร์ (vinyl esters) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การสลายตัวด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต [9]

โดยการสลายตัวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตส่งผลต่อสมบัติเชิงกลเป็นอย่างมาก โดยการตัดสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตให้สั้นลงทำให้น้ำหนักโมเลกุลต่ำ พอลิเมอร์จึงมี

2. ปฏิกิริยาการสังเคราะห์เทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทนระหว่างไดไอโซไซนาเนต และพอลิออล



รูปที่ 2.6 การสังเคราะห์เทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน [11]

2.4.2 สมบัติของเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน [12]

เทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน มีความหนาแน่น 1.23 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร มีอุณหภูมิการหลอมเหลว 80 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว 5 องศาเซลเซียส มีสมบัติเด่นหลายประการดังนี้ มีความทนแรงดึง แรงฉีกขาด และการขัดถู มีความต้านทานน้ำมัน และตัวทำละลายสูง มีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำได้ดี สามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปเทอร์มอพลาสติกทั่วไปได้ เช่น การอัดรีด (extrusion) การเป่าแบบ (blow molding) การฉีดแบบ (injection molding) และการอัดแบบ (compression molding) เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทนเกรด Avalon 95 ae ซึ่งมีความแข็ง 95 Shore A และ 46 Shore D

2.4.3 การนำไปใช้งานของเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน [13]

1. ใช้ทำเป็นชิ้นส่วนยานยนต์
2. ใช้ทำพื้นรองเท้า
3. ใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใส่สารตัวเติมเพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมให้มีสมบัติที่ดีขึ้น และช่วยลดต้นทุนในการผลิตลงได้

2.5 สารตัวเติม (filler) [14]

สารตัวเติม หมายถึง สารที่เติมเพื่อต้องการวัตถุประสงค์บางอย่าง เช่น เพื่อปรับปรุงสมบัติจำเพาะของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติความทนไฟ เป็นต้น หรือ

เพื่อลดต้นทุนในการผลิตหรือเพิ่มเนื้อให้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ และช่วยในกระบวนการผลิตหรือกระบวนการขึ้นรูปให้ดีขึ้น

2.5.1 สารเติมแต่งที่นิยมใช้กันในอุตสาหกรรม [12]

สารเติมแต่งที่นิยมใช้กันในอุตสาหกรรมมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด โดยแบ่งออกเป็น สารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ ดังนี้

1. สารอนินทรีย์ ได้แก่ อลูมิเนียมซิลิเกต แคลเซียมคาร์บอเนต และโวลาสโทไนต์ เป็นต้น
2. สารอินทรีย์ ได้แก่ ผงไม้ ชี้เถ้า แกลบ และซีลี้อย เป็นต้น

2.5.2 ประเภทของสารตัวเติม [15]

สารตัวเติมแบ่งตามหน้าที่ได้เป็น 3 ชนิดคือ

1. สารตัวเติมพวกเสริมความแข็งแรง (reinforcing filler) เป็นสารตัวเติมที่ใส่เข้าไปในพอลิเมอร์เมทริกซ์เพื่อช่วยให้พอลิเมอร์เมทริกซ์มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น คือ มีความต้านทานต่อแรงดึง การสึกหรอ และการฉีกขาดสูง เป็นต้น สารพวกนี้ได้แก่ เขม่าดำ (carbon black) และซิลิกา (silica) เป็นต้น
2. สารตัวเติมพวกกึ่งเสริมความแข็งแรง (semi-reinforcing filler) เป็นสารตัวเติมประเภทที่ใส่เข้าไปในพอลิเมอร์เมทริกซ์เพื่อช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ เช่น อลูมิเนียมซิลิเกต (aluminum silicate), แคลเซียมซิลิเกต (calcium silicate) และคาโอลิน (kaolin) เป็นต้น
3. สารตัวเติมพวกช่วยลดต้นทุนการผลิต (extender filler) เป็นสารที่ใส่ลงไปเพื่อจุดประสงค์ในการลดต้นทุนแต่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้วย โดยจะช่วยให้สมบัติความทนแรงดึง สมบัติเชิงกลอื่นๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงไป และทำให้กระบวนการผลิตยากหรือง่ายขึ้น สารพวกนี้ได้แก่ ไชนาเคลย์ (china clays), แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate), แบไรท์ (barites) และแป้งทัลคัม (talcum) เป็นต้น

2.5.3 สมบัติทั่วไปของสารตัวเติม [15]

1. ไม่เป็นพิษ ไม่ทำให้เกิดรสหรือกลิ่น
2. ไม่เกิดการคายสี (bleeding) หรือเป็นฝ้า (blooming)
3. ไม่ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์เสียไป
4. เสถียรภายใต้กระบวนการผลิต การขึ้นรูป และการใช้งาน

5. ราคาถูก

2.5.4 ปัจจัยของสารตัวเติมที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์เมทริกซ์ [16]

การเลือกใช้สารตัวเติมต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. รูปร่างของอนุภาคสารตัวเติม โดยสารตัวเติมแต่ละชนิดมีรูปร่างแตกต่างกันไป เช่น ทรงกลม ทรงกระบอก เข็ม เส้นใย เป็นต้น ซึ่งสารตัวเติมที่มีรูปร่างแตกต่างกันก็จะส่งผลกระทบต่อสมบัติของพอลิเมอร์เมทริกซ์

2. การกระจายขนาดอนุภาค โดยการกระจายขนาดอนุภาค ส่งผลอย่างมากต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เมทริกซ์ หากสารตัวเติมสามารถกระจายตัวได้ดี และสม่ำเสมอทั่วพอลิเมอร์เมทริกซ์ จะส่งผลให้พอลิเมอร์เมทริกซ์มีสมบัติที่ดีกว่าสารตัวเติมที่เกาะกลุ่มกัน

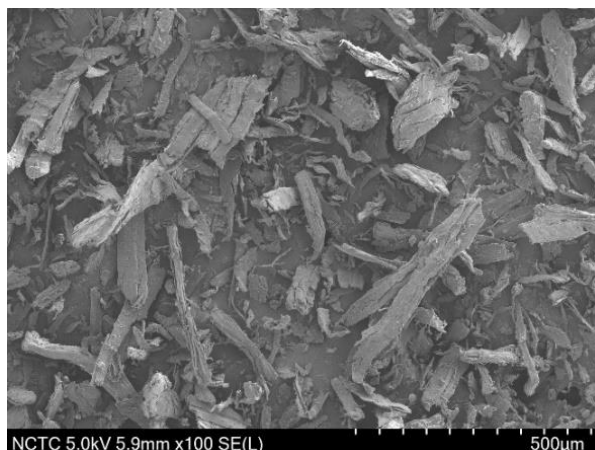
3. พื้นที่ผิว โดยการยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์ และสารตัวเติมจะเกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ผิวของสารตัวเติม ดังนั้นถ้าพื้นที่ผิวมีแนวโน้มยึดเกาะกันได้ดีกับสารตัวเติมจะส่งผลให้พอลิเมอร์เมทริกซ์มีสมบัติที่ดีขึ้น

4. องค์ประกอบทางเคมี เป็นสมบัติที่สำคัญอีกอย่างที่จะส่งผลต่อความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ และยังส่งผลกระทบต่อกระบวนการขึ้นรูปของคอมพอสิต

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารตัวเติมชนิดผงไม้ (wood flour) เนื่องจากไม่เป็นพิษ และมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (hydroxyl, -OH) ที่สามารถเข้าทำอันตรกิริยากับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทนได้

2.6 ผงไม้ (wood flour, WF) [17]

โดยผงไม้ได้จากเศษไม้เลื่อยหรือเศษไม้เหลือทิ้งจากโรงงานไม้ที่ได้นำไปผ่านการบดให้เป็นผงที่มีอนุภาคขนาดเล็ก โดยมีขนาดอนุภาคประมาณ 70–50 ไมครอน โดยผงไม้ถูกนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์อย่างแพร่หลาย เนื่องจาก มีราคาถูก ความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา หาได้ง่าย สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ไม่ทำความเสียหายกับเครื่องจักรในระหว่างกระบวนการผลิต ซึ่งยังช่วยลดการหดตัวและเพิ่มความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาเตรียมเป็นผลิตภัณฑ์ไม้พลาสติกคอมพอสิต (wood-plastic composites, WPCs) ที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ในงานก่อสร้างยานยนต์ และฉนวนกันเสียงได้อีกด้วย โดยมีลักษณะพื้นฐานวิทยาเป็นแบบแท่งไฟเบอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สัณฐานวิทยาของผงไม้

2.6.1 การผลิตผงไม้ [17]

ขั้นตอนหลักในการผลิตผงไม้ ได้แก่

1. การลดขนาดและการคัดแยกอนุภาค โดยจะทำการลดขนาดอนุภาคของผงไม้ด้วยอุปกรณ์อย่างเช่น เครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (hammer mill), หรือเครื่องย่อยไม้ (chipper) มาบดไม้ให้เป็นผง และมีอนุภาคขนาดเล็กลง การทำให้เป็นผงนั้นทำให้เกิดอนุภาคที่ประกอบไปด้วยกลุ่มเส้นใยและเศษเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 2.7 อนุภาคเหล่านี้มักมีอัตราส่วนกว้าง-ยาว (aspect ratio) เพียง 1-5 เท่านั้น อัตราส่วนกว้าง-ยาวเหล่านี้ช่วยให้บอกขนาดของอนุภาคของผงไม้ได้

2. เมื่อผงไม้ถูกทำให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงแล้วจะถูกนำมาคัดแยกขนาดโดยใช้เครื่อง篩 หรือ หมุน และคัดแยกผ่านตะแกรงกรอง ส่วนทั่วไปแล้วมักบอกขนาดอนุภาคของผงไม้เป็น เมช (mesh) ขนาดของผงไม้ตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา (US standard) สามารถนำมาเทียบกับหน่วยไมโครเมตร ส่วนใหญ่สารตัวเติมผงไม้ที่ใช้ในเทอร์มอพลาสติกอยู่ในช่วงขนาด 180-425 ไมโครเมตร (80-40 US standard (mesh)) ผงซึ่งไม้ที่ละเอียดมากอาจมีราคาสูงกว่า และมีความหนืดมากกว่า ผงไม้ที่หยาบกว่า ผงไม้โดยทั่วไปแล้วจะมีลักษณะขนาดที่สม่ำเสมอและเรียบเนียนกว่า แต่หากบดละเอียดเกินไปจะทำให้เสียใยยาวกลายเป็นฝุ่นไม้ทำให้ไม่เหลือเส้นใยยาวอีกต่อไป

ตารางที่ 2.1 ขนาดผงไม้ในหน่วยเมชตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกาเทียบกับหน่วยไมโครเมตร

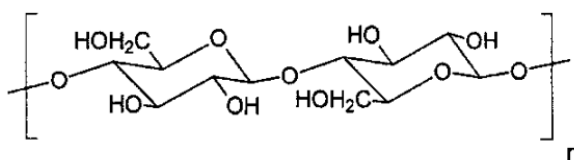
US standard (mesh)	Particle diameter (μm)
20	850
25	710
30	600
35	500

ตารางที่ 2.2 ขนาดผงไม้ในหน่วยเมชตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกาเทียบกับหน่วยไมโครเมตร (ต่อ)

US standard (mesh)	Particle diameter (μm)
40	425
45	355
50	300
60	250
70	212
80	180
100	150
120	125
140	106
170	90
200	75
230	63
270	53
325	45
400	38

2.6.2 องค์ประกอบทางเคมีของผงไม้ [17]

ผงไม้เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีส่วนประกอบหลัก คือ เซลลูโลส (cellulose) ดังแสดงในรูปที่ 2.8, เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) ซึ่งจะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล โดยจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) เป็นโครงสร้างสามมิติ



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [15]

1. เซลลูโลส (cellulose) เป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุดในเนื้อไม้ และเป็นส่วนที่ทำให้เกิดความแข็งแรงและความคงตัวของโครงสร้างของไม้ เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นตรง มีความเป็นผลึกสูงร้อยละ 60–90 โดยน้ำหนัก

2. เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) เป็นพอลิเมอร์สายโซ่กิ่งซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลที่มีจำนวนคาร์บอน 5 และ 6 อะตอม ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลส แต่ยังคงมีส่วนประกอบหลักของโครงสร้างของไม้

3. ลิกนิน (lignin) เป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous) แบบเชื่อมขวางที่มีโครงสร้างซับซ้อนมีความเป็นขั้วน้อยกว่าเซลลูโลส ทำหน้าที่เป็นตัวยึดภายในระหว่างเส้นใยเซลลูโลส

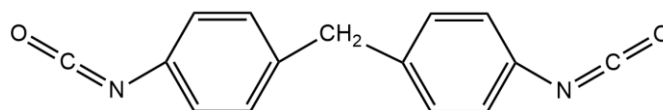
4. ส่วนประกอบอินทรีย์เพิ่มเติม ที่เรียกว่า สารแทรก (extractives) ประกอบไปด้วยสารจำพวก น้ำมันหอมระเหย (volatile oil), กรดเรซิน (resin acid) กรดไขมันอิสระ (fatty acid) และสารประกอบฟีนอลิก (phenolic compounds) เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้มีผลต่อความทนทนและการผุพังของไม้

ซึ่งผงไม้ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีชื่อทางการค้าว่า Lignocel เกรด C120 ซึ่งเป็นผงไม้สนที่มีขนาดอนุภาค 70–150 ไมโครเมตร มีความหนาแน่น 100–135 กรัม/ลิตร โดยมีองค์ประกอบเป็นเซลลูโลสร้อยละ 41.0 , เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 27.5 , ลิกนินร้อยละ 28.1 และสารแทรกร้อยละ 3.4

ในงานวิจัยนี้สนใจที่จะทำการเติมสารขยายสายโซ่ (chain extender) ลงในคอมพอสิตที่เตรียมได้ เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมหรือขยายสายโซ่ของพอลิเมอร์ และช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างคอมพอสิตเพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติของคอมพอสิตที่เตรียมได้ให้มีสมบัติที่ดี

2.7 สารขยายสายโซ่ (chain extender) [18]

สารขยายสายโซ่ คือ สารที่ช่วยยึดต่อสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ และสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์กับสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์อื่น เนื่องจากการเชื่อมโยงนั้นจึงส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุล และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยในงานวิจัยนี้ใช้เมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต (methylene diphenyl diisocyanate, MDI) เป็นสารขยายสายโซ่ ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต [18]

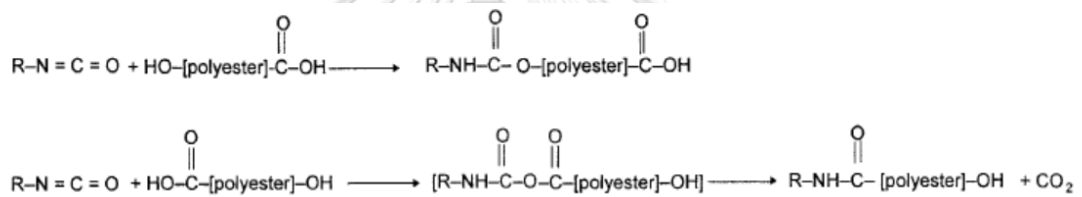
2.7.1 สมบัติของเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต [19]

เมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนตเป็นไดไอโซไซยาเนตที่มีโครงสร้างแบบวงอะโรมาติก ประกอบด้วยไอโซเมอร์สำคัญสามแบบได้แก่ 2,2'-MDI, 2,4'-MDI และ 4,4'-MDI เมทิลีน

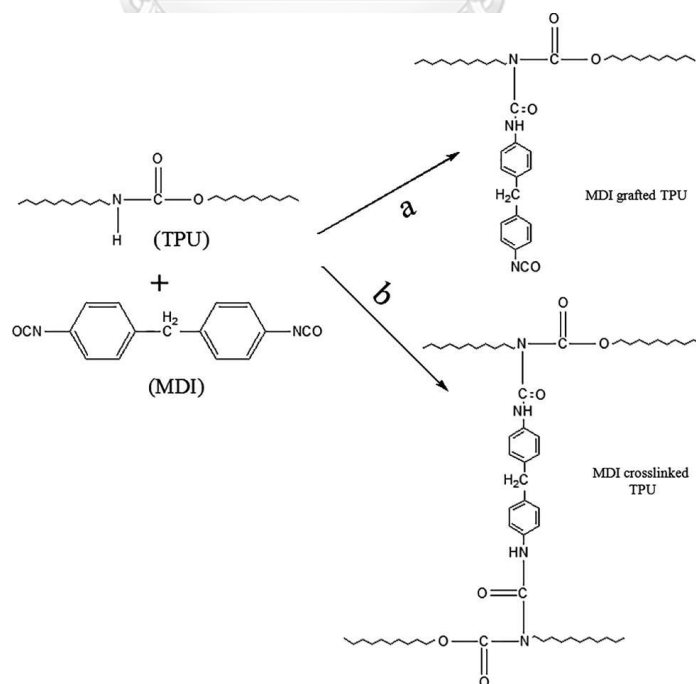
ไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนตสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน ซึ่งทำปฏิกิริยากับพอลิโออล (polyol) ได้พอลิยูรีเทน ซึ่งเมทิลินไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนตถูกผลิตขึ้นมากที่สุดในตลาดโลก สูงถึงร้อยละ 61.3 ใน พ.ศ. 2543 โดยมีน้ำหนักโมเลกุลที่ 250.2 กรัม/โมล, ความหนาแน่น 1.18 กรัม/มิลลิลิตร มีจุดเดือดที่ประมาณ 200 องศาเซลเซียส/5 มิลลิเมตรปรอท และมีอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ 42–45 องศาเซลเซียส

2.7.2 อันตรกิริยาของเมทิลินไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต [20] [21]

โดยหมู่ฟังก์ชันไอโซไซยาเนต (isocyanate functional groups, $-NCO$) ของเมทิลินไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนตจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups, $-OH$) และคาร์บอกซิล (carboxyl groups, $-COOH$) ที่ปลายสายโซ่ของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตที่นำมาใช้ใหม่ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.10 และสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ยูรีเทน (urethane groups, $-NHCOO$) ในเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาระหว่างเมทิลินไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนตกับพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต [20]



รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาระหว่างเมทิลินไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนตกับเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน [21]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Huang และคณะ [22] ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมจากพอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลต (polybutylene terephthalate, PBT)/เทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทนที่อัตราส่วน 0/100, 5/95, 10/90, 15/85, 20/80 และ 30/70 โดยน้ำหนัก พบว่าการเติมเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทนลงในพอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลตส่งผลให้ความหนืด ความเป็นผลึก ความทนแรงดึง และความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง หากแต่ช่วยปรับปรุงความ ทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม โดยมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 368.18 เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมล้วน

Chaiwutthinan และคณะ [23] ได้เตรียมไม้พลาสติกคอมพอสิตจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล/พอลิ(บิวทิลีนแอดิ เพท-โค-เทเรฟทาเลต) ที่อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนักด้วยผงไม้ปริมาณร้อยละ 5-30 โดยน้ำหนัก พบว่าการเติมผงไม้ในปริมาณที่เหมาะสมส่งผลให้คอมพอสิตได้รับการปรับปรุง ความทนแรงดึง โมดูลัสของยังส์ ความทนแรงดัดโค้ง ความเป็นผลึก และความสามารถในการดูดซึมน้ำขณะที่ความทนแรงกระแทก การยึดตัว ณ จุดขาด และเสถียรภาพทางความร้อนมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมล้วน

Tang และคณะ [24] ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต/พอลิคาร์บอเนตที่อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนักและใช้สารขยายสายโซ่ชนิดเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนตที่ปริมาณร้อยละ 0-1.1 โดยน้ำหนัก พบว่าเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนตสามารถช่วยเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลและปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ผสมผ่านการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไอโซไซยาเนต (-NCO) ในเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนตกับหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่บริเวณปลายสายโซ่พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและพอลิคาร์บอเนต ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมได้รับการปรับปรุงความหนืด ขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วและอุณหภูมิการตกผลึกเพิ่มสูงขึ้น โดยความทนแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 407.5 สำหรับพอลิเมอร์ผสมที่มีเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนตปริมาณร้อยละ 0.9 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมล้วน

Zhao และคณะ [25] ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิด/เทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทนที่อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนัก ซึ่งใช้สารขยายสายโซ่ชนิดเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนตที่ปริมาณร้อยละ 0, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2 และ 1.6 โดยน้ำหนัก พบว่าเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนตปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง พอลิเมอร์ผสมผ่านการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไอโซไซยาเนต (-NCO) ในเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนตกับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในพอลิแล็กติกแอซิด และหมู่ยูรีเทน (-NHCOO) ในเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน ซึ่งการเกิดอันตรกิริยากับหมู่ยูรีเทนทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทนกับเมทิลีน

ไดฟีนิลไดไอโซไซยานาต ส่งผลให้ความทนแรงดึง ความทนแรงกระแทก และการยึดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น

Bi และคณะ [26] ได้เตรียมคอมพอสิตของเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทนด้วยผงไม้ที่ปริมาณร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก พบว่าการเติมผงไม้ลงในเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทนส่งผลให้คอมพอสิตมีความทนแรงดึงและการยึดตัว ณ จุดขาดลดลง เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทนและผงไม้ไม่ดี จึงทำการปรับปรุงสมบัติของคอมพอสิตด้วยสารตัดแปรหลายชนิด ได้แก่ EPDM-g-MAH, POE-g-MAH, PEG 6000, ไคโตซาน และเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยานาต พบว่าเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยานาตสามารถช่วยปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทนและผงไม้ได้ผ่านการ เกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไอโซไซยานาต (-NCO) ของเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยานาตกับหมู่ยูรีเทน (-NHCOO) ของเทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทน และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของผงไม้ส่งผลให้ความทนแรงดึงของคอมพอสิตได้รับการปรับปรุง



บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 สารเคมีและวัตถุดิบ

1. พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือพีอีทีที่ผ่านการใช้งานแล้ว (recycle poly(ethylene terephthalate, r-PET) ที่ถูกย่อยให้อยู่ในรูปเกล็ดพลาสติก จากบริษัท ไทยพลาสติกรีไซเคิล ประเทศไทย

2. เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (thermoplastic polyurethane, TPU) เกรด Avalon® 95 AE จากบริษัท Huntsman Polymers ประเทศไทย

3. ผงไม้สนเกรด Lignocel C120 ขนาดอนุภาค 70–150 ไมครอน จากบริษัท JRS ประเทศเยอรมนี

4. เมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต (methylene diphenyl diisocyanate, MDI) จากบริษัท Sigma–Aldrich ประเทศไทย

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมชิ้นทดสอบ

1. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (twin screw extruder) รุ่น Scientific LW–100 จากบริษัท Lab Tech Engineering (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ) ความยาวท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง L/D 32 เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร

2. เครื่องฉีดแบบ (injection molding machine) รุ่น Nissei PS40E5ASE ขนาด 40 ตัน จากบริษัท Nissei Plastic Industrial (ศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรมฝ่ายพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน)

3. เครื่องฉีดแบบ (injection molding machine) รุ่น BA 250 CDC ขนาด 40 ตัน จากบริษัท Wittmann Battenfeld (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

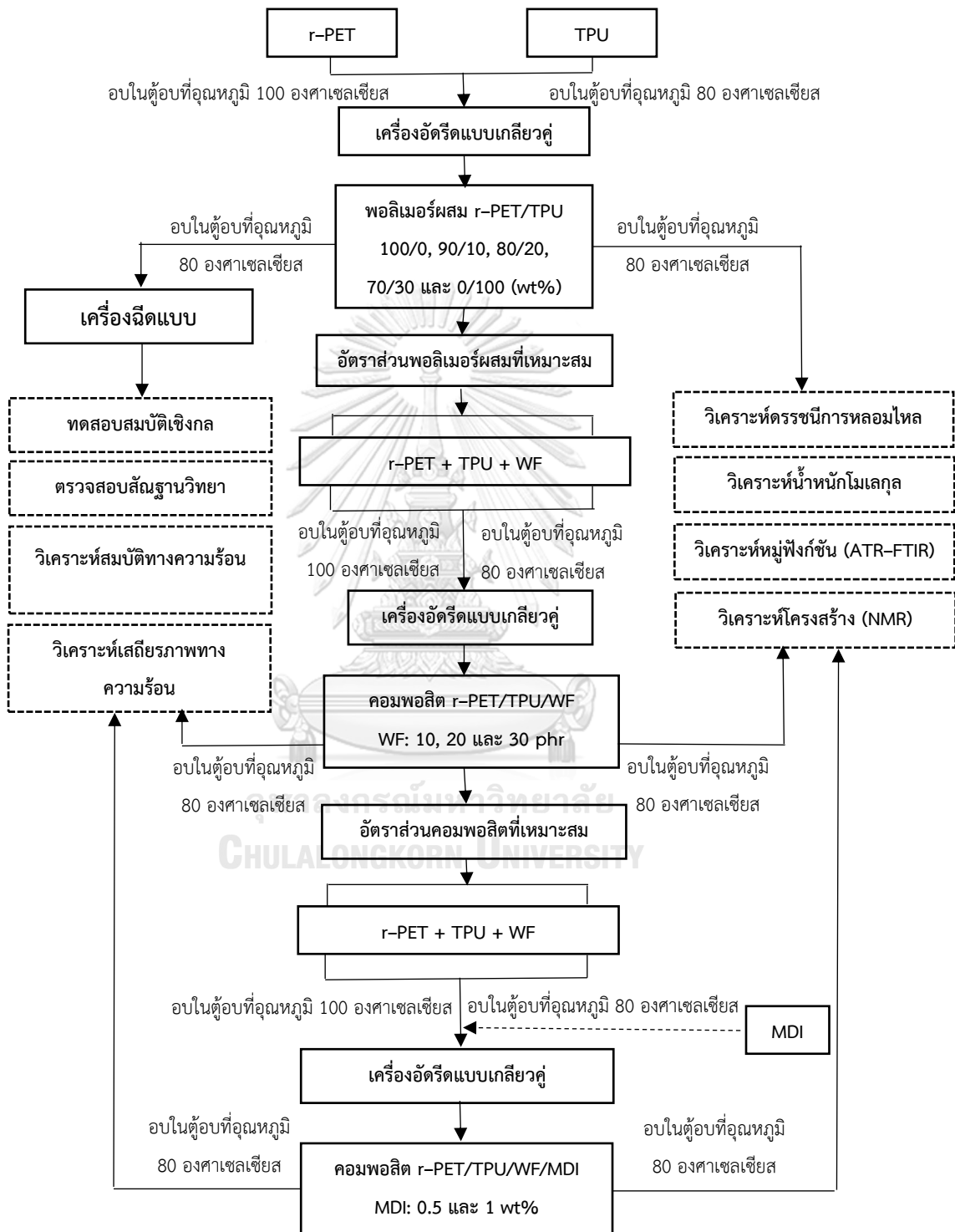
1. เครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหล (melt flow index, MFI) รุ่น MFI–PPL–01 (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

2. เครื่องทดสอบสมบัติทนแรงกระแทก (impact testing machine) รุ่น Gotech GT–7045–MD (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3. เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine) รุ่น Tinius Olsen 5ST (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น SU5000 จากบริษัท Hitachi (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)
5. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimetry, DSC) รุ่น Toledo DSC 1 STAR^e System จากบริษัท Mettler (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
6. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (thermogravimetric analyzer, TGA) รุ่น Toledo TGA/DSC 3⁺ STAR^e System จากบริษัท Mettler (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
7. เครื่องทดสอบฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคป (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR) รุ่น จากบริษัท Mettler (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
8. เครื่องทดสอบนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโคป (nuclear magnetic resonance spectroscopy, NMR) รุ่น Bruker MSL400 (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
9. เครื่องวัดความหนืด (ubbelohde viscometer) รุ่น CANNON 1B L610 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.4 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง

แผนภูมิขั้นตอนการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง

3.5 ขั้นตอนการทดลอง

3.5.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU, คอมพอลสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วยผงไม้ และคอมพอลสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ

1. นำเม็ด r-PET และเม็ด TPU อบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการผสม r-PET และ TPU ในอัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

2. นำเม็ด r-PET, เม็ด TPU และผงไม้ อบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส, 80 องศาเซลเซียส และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ นำ r-PET และ TPU ที่อัตราส่วนที่มีสมบัติที่เหมาะสมคือ 70/30 r-PET/TPU ไปผสมกับผงไม้ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 ส่วนในร้อยส่วนของเรซิน (parts per hundred of resin, phr) โดยมีอัตราส่วนการผสม ดังแสดงในตารางที่ 3.1

3. นำเม็ด r-PET, เม็ด TPU และผงไม้ อบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส, 80 องศาเซลเซียส และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ นำ r-PET, TPU และผงไม้ ตามอัตราส่วนที่มีสมบัติที่เหมาะสมคือ 70/30/10 r-PET/TPU/WF นำมาผสมกับ MDI โดยมีอัตราส่วนการผสม ดังแสดงในตารางที่ 3.1

4. นำมาผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (รูปที่ 3.2) โดยใช้ความเร็วรอบสกรูหมุน 60–80 รอบต่อนาที, อุณหภูมิ 250/255/255/250/250/245/235/230 องศาเซลเซียส, ความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู L/D 32, เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร และความเร็วรอบตัด 9–11 รอบ/นาที

5. พอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU, คอมพอลสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วยผงไม้ และคอมพอลสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI จะถูกอัดรีดผ่านหัวตาย (die) แล้วถูกตัดเป็นเม็ด (pelletized) ก่อนนำไปอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ



รูปที่ 3.2 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU, คอมพอลิเมอร์ 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF และคอมพอลิเมอร์ 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ

องค์ประกอบ	r-PET	TPU	WF	MDI
TPU	0	100	0	0
r-PET	100	0	0	0
90/10 r-PET/TPU (wt%/wt%)	90	10	0	0
80/20 r-PET/TPU (wt%/wt%)	80	20	0	0
70/30 r-PET/TPU (wt%/wt%)	70	30	0	0
70/30/10 r-PET/TPU/WF (wt%/wt%/phr)	70	30	10	0
70/30/20 r-PET/TPU/WF (wt%/wt%/phr)	70	30	20	0
70/30/30 r-PET/TPU/WF (wt%/wt%/phr)	70	30	30	0
70/30/10/0.5 r-PET/TPU/WF/MDI (wt%/wt%/phr/wt%)	70	30	10	0.5
70/30/10/1 r-PET/TPU/WF/MDI (wt%/wt%/phr/wt%)	70	30	10	1

3.6 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

3.6.1 การขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU, คอมพอลิเมอร์ 70/30 r-PET/TPU ด้วยผงไม้ และคอมพอลิเมอร์ 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ

นำเม็ดพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU, คอมพอลิเมอร์ 70/30 r-PET/TPU ด้วยผงไม้ และคอมพอลิเมอร์ 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่เตรียมได้ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และนำไปขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ (รูปที่ 3.3) โดยมีอุณหภูมิในการขึ้นรูปขึ้นทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.3 เครื่องฉีดแบบ

ตารางที่ 3.2 อุณหภูมิในการขึ้นรูปชิ้นทดสอบของพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU, คอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วยผงไม้ และคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ

ตัวอย่าง	หัวฉีด	Zone 1 (องศาเซลเซียส)	Zone 2 (องศาเซลเซียส)	Zone 3 (องศาเซลเซียส)
r-PET/TPU (wt%/wt%)				
TPU	220	200	210	185
r-PET	260	255	245	180
90/10	230	245	245	225
80/20	230	245	245	225
70/30	230	245	245	225
r-PET/TPU/WF (wt%/wt%/phr)				
70/30/10	230	230	220	225
70/30/20	230	230	220	225
70/30/30	230	230	220	225
r-PET/TPU/WF/MDI (wt%/wt%/phr/wt%)				
70/30/10/0.5	235	235	230	175
70/30/10/1	235	235	230	175

3.7 การทดสอบและวิเคราะห์สมบัติ

3.7.1 เครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหล (เอ็มเอฟไอ) (melt flow Index, MFI)

เป็นเทคนิคที่ใช้ทดสอบสมบัติการไหลตัวของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต ด้วยเครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหล (รูปที่ 3.4) ตามมาตรฐาน ASTM D1238 การทดสอบนี้จะหลอมเหลวพอลิเมอร์ผสม และคอมพอสิตในกระบอกทดสอบ (cylinder) ด้วยอุณหภูมิที่กำหนดแล้วใช้น้ำหนักกดตามค่าที่กำหนดตกลงบนแท่งกด (piston) โดยให้แท่งกดกระทำกับพลาสติกเหลวที่อยู่ในกระบอกทดสอบ ซึ่งพลาสติกเหลวจะไหลผ่านหัวดายน์ออกมา หลังจากนั้นก็นำพลาสติกที่ไหลออกมาไปชั่งน้ำหนักเทียบกับเวลา 10 นาที จะได้ค่าของ MFI ของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต ซึ่งมีหน่วยเป็น กรัม/10 นาที

ก่อนทำการวิเคราะห์ต้องนำเม็ดพอลิเมอร์ผสม และเม็ดคอมพอสิตมาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยมีสภาวะที่ใช้ในการทดลองดังนี้

- | | | |
|---|------|--------------|
| - อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง | 260 | องศาเซลเซียส |
| - ตั้มน้ำหนัก | 2.16 | กิโลกรัม |
| - เวลาที่พอลิเมอร์ไหลผ่านหัวดายน์ (cut of time) | 10 | นาที |



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหล (MFI)

3.7.2 การทดสอบความทนแรงกระแทก (impact strength)

เป็นการศึกษาความทนแรงกระแทกของชิ้นงานตามแนวแรงด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (รูปที่ 3.5) ด้วยวิธี notched Izod impact ทั้งพอลิเมอร์ผสม และคอมพอสิตถูกเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และใช้ค้อนน้ำหนัก 2.75 จูล ในการทดสอบ โดยมีขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ดังนี้ ความยาว 63 มิลลิเมตร ความกว้าง 12 มิลลิเมตร ความหนา 3 มิลลิเมตร พร้อมทั้งบากที่จุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ (รูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกของชิ้นงาน



รูปที่ 3.6 ชิ้นทดสอบความทนแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D256

3.7.3 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง (tensile properties)

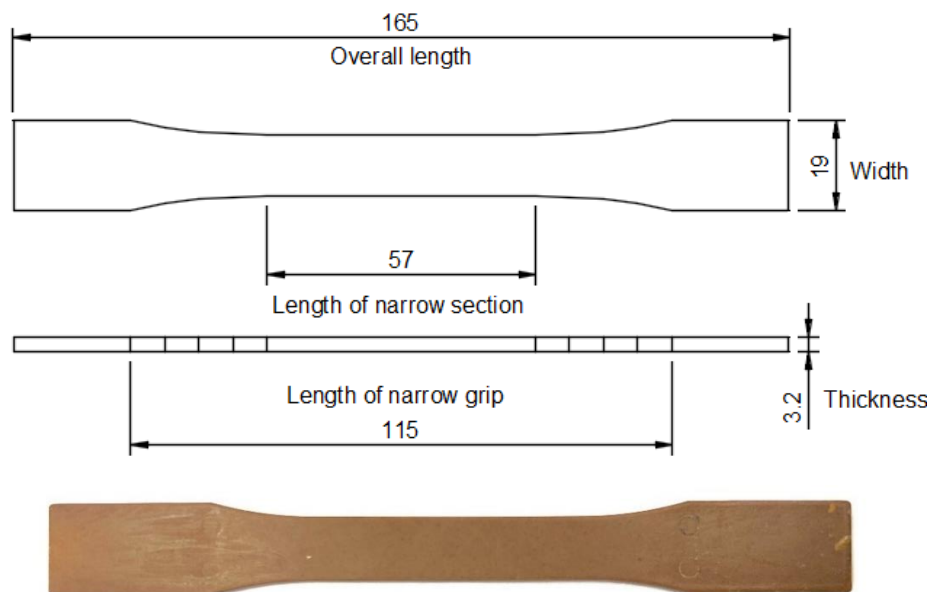
ทดสอบสมบัติความทนแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (รูปที่ 3.7) เพื่อหาค่าความทนแรงดึง (tensile strength) ยังส์มอดุลัส (Young's modulus) และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) ของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต ซึ่งชิ้นทดสอบที่เตรียมมีลักษณะ

เป็นดัมเบลล์ ตามมาตรฐาน ASTM D638 ประเภทที่ 1 (รูปที่ 3.8) โดยมีสภาวะที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้

- อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
- ใช้ความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตร/นาที
- น้ำหนักที่ใช้ดึงขึ้นทดสอบ 5 กิโลนิวตัน



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล



รูปที่ 3.8 ขนาดชิ้นทดสอบและชิ้นทดสอบสมบัติด้านแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 ประเภทที่ 1

3.7.4 การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength)

เพื่อศึกษาความสามารถในการทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตแบบแรงกระทำสามจุด (three-point bending) (รูปที่ 3.9) โดยมีขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790 ดังนี้ ความยาว 133 มิลลิเมตร ความกว้าง 13 มิลลิเมตร ความหนา 3 มิลลิเมตร โดยมีสภาวะที่ใช้ในการทดลองดังนี้

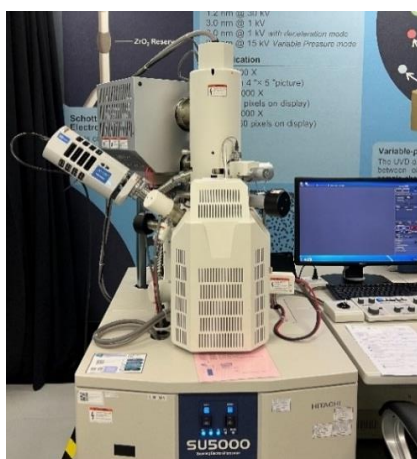
- น้ำหนักหัวกด (load cell) 5 กิโลนิวตัน
- ความกว้างของสแปน (span length) 40 มิลลิเมตร
- ความเร็วในการกด 5 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 3.9 ชิ้นทดสอบสมบัติด้านแรงดัดโค้งตามมาตรฐาน ASTM D790

3.7.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

เป็นเทคนิคที่ใช้ตรวจสอบสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 3.10) โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทก โดยจะทำการส่องบริเวณผิวหน้าของชิ้นงานที่เกิดการแตกหัก ชิ้นงานที่จะทำการทดสอบจะถูกตัดเป็นชิ้นสี่เหลี่ยม และทำการอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยชิ้นงานจะผ่านการเคลือบผิวด้วยทองคำก่อนนำไปส่องที่กำลังขยาย 100, 1,000 และ 10,00 เท่า



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.7.6 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลแคลอริเมทรี (DSC)

วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต ด้วยเครื่องวิเคราะห์ดิฟเฟอเรนเชียลแคลอริมิเตอร์ (รูปที่ 3.11) ซึ่งเป็นเครื่องมือทดสอบวัสดุโดยการวัดค่าพลังงานความร้อน และอุณหภูมิของสารตัวอย่าง ซึ่งนำมาเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน

ก่อนทำการวิเคราะห์นำชิ้นทดสอบที่ผ่านการฉีดแบบของพอลิเมอร์ผสม และคอมพอสิต มาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ นำมาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นเป็นเวลา 8 ชั่วโมง และเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นเพื่อรอให้เย็น โดยมีสภาวะที่ใช้ในการทดสอบดังนี้

- เริ่มต้นการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 300 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที แล้วคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 10 นาที
- ลดอุณหภูมิจาก 300 องศาเซลเซียส จนถึง -60 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส/นาที แล้วคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 10 นาที
- เพิ่มอุณหภูมิอีกครั้งจาก -60 องศาเซลเซียส จนถึง 300 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการดูดความร้อน (endothermic) และการคายความร้อน (exothermic) ทำได้โดยนำเทอร์โมแกรม (thermogram) ที่ได้จาก DSC ไปวิเคราะห์หาอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g), อุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature, T_m) และเอนทัลปีหลอมเหลว (melting enthalpy, ΔH_m) ที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง (second heating scan) และอุณหภูมิเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) และเอนทัลปีเกิดผลึก (crystallization enthalpy, ΔH_c) ที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัว (cooling scan) จากนั้นคำนวณหาระดับความเป็นผลึก (degree of crystallinity, X_c) ได้จากสมการที่ 3.1 [23]

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_m}{w \times \Delta H_m^\circ} \times 100 \quad (3.1)$$

โดย ΔH_m คือ เอนทัลปีการหลอมเหลว

ΔH°_m คือ เอนทัลปีการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่เกิดผลึก 100% เท่ากับ 120 จูล/กรัม (J/g)

W คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตในพอลิเมอร์ผสมและคอมพอลิต



รูปที่ 3.11 เครื่องดีฟเอนเซียนเซียนแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

3.7.7 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (TGA)

วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอลิต ด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (รูปที่ 3.12) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน โดยการวิเคราะห์จากน้ำหนักของสารที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง โดยน้ำหนักของสารที่เปลี่ยนแปลงไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหยหรือการสลายตัว โดยเทอร์โมแกรมที่ได้แสดงน้ำหนักที่สูญเสียไป (weight loss) เมื่อเมดชันทดสอบได้รับความร้อนรวมทั้งปริมาณเถ้าที่เหลือ (%char)

ก่อนทำการวิเคราะห์น้ำหนักขึ้นทดสอบที่ผ่านการฉีดแบบของพอลิเมอร์ผสมหรือคอมพอลิต มาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ และนำมาอบอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นเป็นเวลา 8 ชั่วโมง และเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นเพื่อรอให้เย็น ซึ่งน้ำหนักที่ใช้ในการวิเคราะห์ต่อครั้งประมาณ 4-5 มิลลิกรัม โดยมีสภาวะที่ใช้ในการทดลองดังนี้

- อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 30-600 องศาเซลเซียส

- อัตราเร็วในการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที
- อัตราการไหลของไนโตรเจน 30 มิลลิลิตร/นาที



รูปที่ 3.12 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)

3.7.8 เครื่องทดสอบฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, ATR-FTIR)

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต ด้วยเครื่องทดสอบฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (รูปที่ 3.13) ซึ่งเป็นเทคนิคกระตุ้นสารด้วยพลังงานช่วงแสงอินฟราเรด (middle infrared region) ประมาณ $4000-500\text{ cm}^{-1}$ เมื่อแสงอินฟราเรดที่ความยาวคลื่นต่างๆ ผ่านสู่สารพันธะเคมีในโมเลกุลของสารจะดูดกลืนพลังงานที่ค่าความยาวคลื่นหนึ่ง ซึ่งจะคำนวณพลังงานของแต่ละความยาวคลื่นและแปรผลออกมาเป็นสเปกตรัม เนื่องจากสารแต่ละชนิดให้สเปกตรัมที่มีลักษณะเฉพาะ สามารถนำมาเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารในฐานข้อมูล เพื่อใช้ในการพิสูจน์ และบ่งชี้ชนิดของสารตัวอย่างได้

ก่อนทำการวิเคราะห์ต้องนำเม็ดพอลิเมอร์ผสม และเม็ดคอมพอสิตมาอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคป (FTIR)

3.7.9 เครื่องทดสอบนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโคป (nuclear magnetic resonance spectroscopy, NMR)

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตด้วยเครื่องทดสอบนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโคป (รูปที่ 3.14) โดยเครื่อง NMR จะส่งสัญญาณคลื่นวิทยุทุกความถี่ในช่วงที่สนใจเข้าไปยังตัวอย่างที่วิเคราะห์ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสปินของนิวเคลียสของสารหรือเรียกสภาวะดังกล่าวว่าสถานะถูกกระตุ้น (excited state) จากนั้นนิวเคลียสจะกลับสู่สถานะพื้น (ground state) โดยการคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นที่ซ้อนกัน ซึ่งเราสามารถแยกออกเป็นความถี่ต่างๆ ที่มีความแรงของสัญญาณแตกต่างกันได้ ผลที่ได้จากการบวนการดังกล่าวคือสเปกตรัม NMR ซึ่งมีลักษณะเป็นพีค โดยมีแกนนอน (x-axis) เป็นค่า chemical shift (δ) มีหน่วยเป็น ppm โดยใช้สภาวะการทดลองดังนี้ [27]

- ทดสอบที่ 400 MHz ที่ความละเอียดสูง
- ใช้โพรบ (CP/MAS probe) ขนาด 4 มิลลิเมตร
- ความถี่ในการหมุนเหวี่ยง (spinning frequency) คือ 9 kHz
- ความเร็วในการหมุนเหวี่ยง (rotor speed) คือ 4.6 kHz
- ความเข้มของสนามคลื่นความถี่วิทยุ (radiofrequency field strengths) คือ 78 kHz



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโคป (NMR)

3.7.10 การทดสอบความหนืด (intrinsic viscosity, IV)

เป็นเทคนิคที่ใช้ทดสอบสมบัติความหนืดของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต ด้วยเครื่องทดสอบอับเบอร์โพลดิวิสโคมิเตอร์ (ubbelohde viscometer) (รูปที่ 3.15) ตามมาตรฐาน ASTM D4603-03 โดยจะวัดค่าความหนืดภายใต้สภาวะการไหลของพอลิเมอร์ที่ถูกละลายเป็นของเหลว ซึ่งจะวัดจากเวลาที่พอลิเมอร์เหลวไหลผ่านระหว่างเส้นที่ทำเครื่องหมายไว้บริเวณกระเปราะของอับเบอร์โพลดิวิสโคมิเตอร์ ซึ่งค่าความหนืดที่ได้จากการทดสอบจะสามารถบ่งบอกถึงน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตได้ โดยมีวิธีที่ใช้ทดสอบดังนี้ [28]

- ก่อนการทดสอบนำเม็ดพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตที่จะทำการทดสอบไปอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
- ชั่งเม็ดพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตที่ 250 มิลลิกรัม ละลายด้วยฟีนอล/เตตระคลอโรอีเทน (phenol/tetrachloroethane) ที่อัตราส่วน 60/40 vt% ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- เมื่อพอลิเมอร์ละลายหมด นำสารละลายพอลิเมอร์เหลวที่ได้ไปทดสอบความหนืดด้วยอับเบอร์โพลดิวิสโคมิเตอร์

ซึ่งสามารถคำนวณค่าความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์เหลว ได้จากสมการที่ 3.2 [28]

$$\eta = 0.25 (\eta_{r-1} + 3 \ln \eta_r)/C \quad 3.2$$

- โดย η_r = ความหนืดสัมพัทธ์ (relative viscosity) = t/t_0
- t = ค่าเฉลี่ยเวลาการไหลของพอลิเมอร์เหลว (average solution flow, time)
- t_0 = ค่าเฉลี่ยเวลาการไหลของตัวทำละลาย (average solvent flow, time)
- C = ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ในสารละลาย กรัม/เดซิลิตร (g/dL)



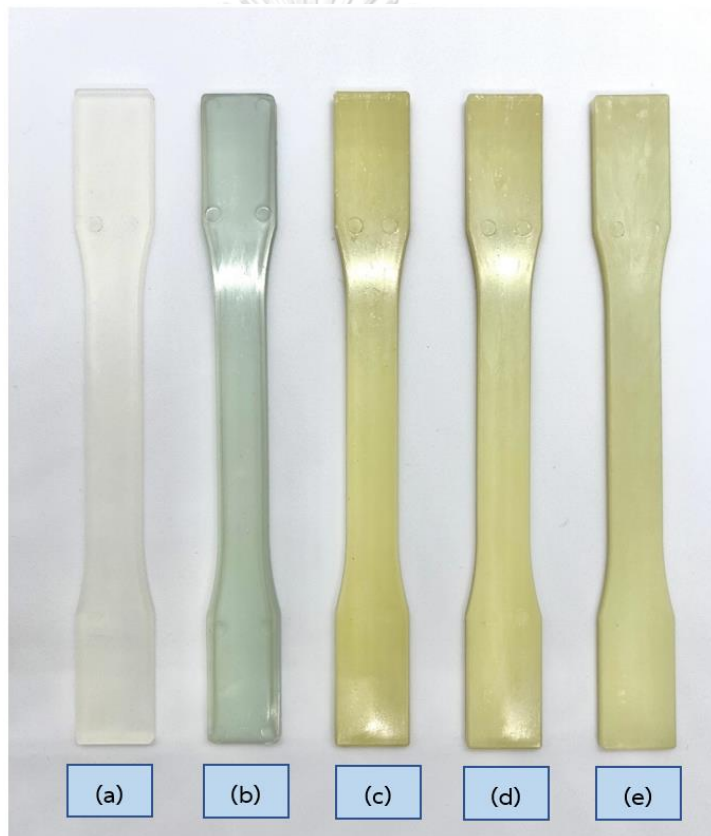
รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบออปเบอร์โหลตวิสโคมิเตอร์

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะชิ้นงานทดสอบ

จากรูปที่ 4.1, รูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 แสดงลักษณะของชิ้นทดสอบ TPU, r-PET, พอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 และคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วยผงไม้ (WF) ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr และคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติมสารขยายสายโซ่ (chain extender, CE) ชนิดเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยานาต (methylene diphenyl diisocyanate, MDI) ที่อัตราส่วน 0.5 และ 1 wt% ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ชิ้นทดสอบของ (a) TPU, (b) PET และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วน (c) 90/10, (d) 80/20 และ (e) 70/30



รูปที่ 4.2 ชิ้นทดสอบของคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน WF: (a) 10, (b) 20 และ (c) 30 phr



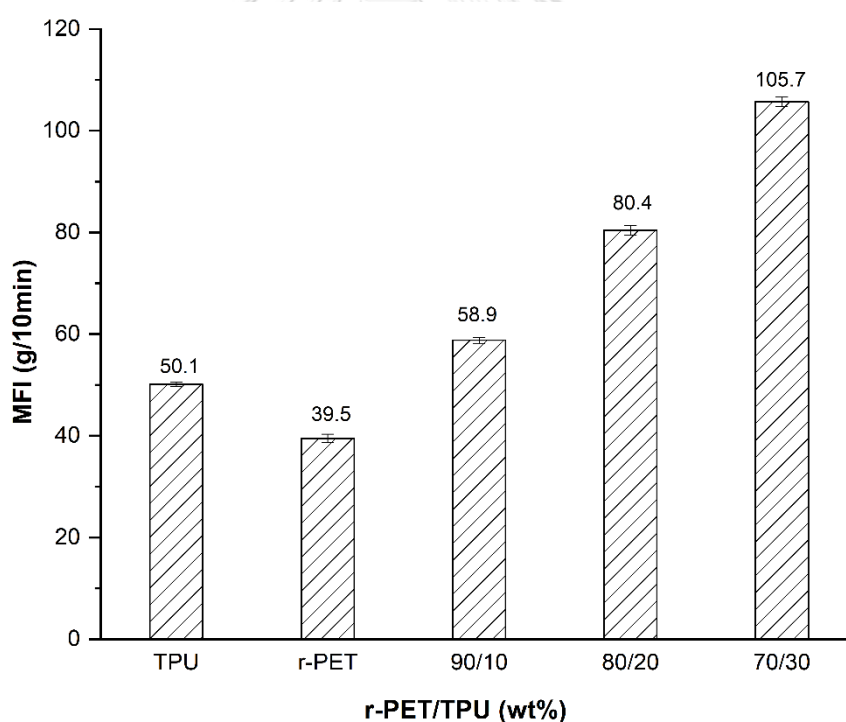
รูปที่ 4.3 ชิ้นทดสอบของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF 70/30/10 ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน MDI: (a) 0.5 และ (b) 1 wt%

จากรูปที่ 4.1, รูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 พบว่า ชิ้นทดสอบ TPU (รูปที่ 4.1(a)) มีลักษณะโปร่งแสง ขณะที่ชิ้นทดสอบ r-PET (รูปที่ 4.1(b)) มีลักษณะสีขาวออกฟ้าและทึบแสง ซึ่งเมื่อผสม r-PET

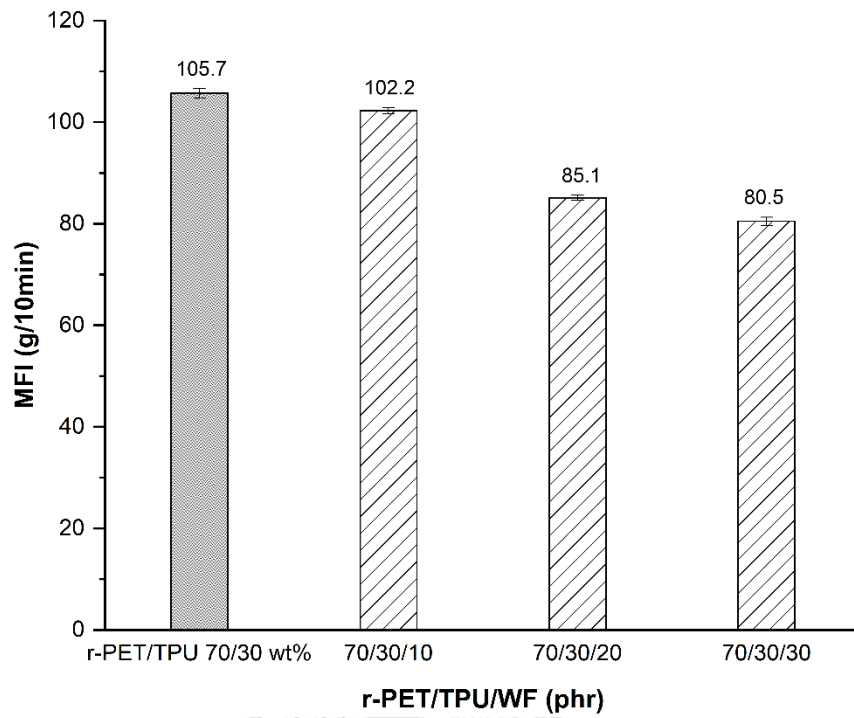
กับ TPU พบว่าชั้นทดสอบของพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU (รูปที่ 4.1(c-e)) มีสีเขียวยาวออกเหลือง และจะมีเฉดสีที่เข้มขึ้นตามปริมาณของ TPU ที่เพิ่มขึ้น และที่บดแสง เมื่อนำพอลิเมอร์ผสมตามอัตราส่วนที่เลือกไว้ 70/30 r-PET/TPU ไปผสมกับสารตัวเติม WF ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr (รูปที่ 4.2(a-c)) พบว่า ชั้นทดสอบคอมพอสิตมีสีน้ำตาลคล้ายไม้โดยจะมีเฉดสีเข้มขึ้นตามปริมาณของ WF ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มองค์ประกอบ MDI ในคอมพอสิต พบว่า ชั้นทดสอบมีสีน้ำตาลคล้ายไม้ (รูปที่ 4.3(a-b))

4.2 ดรรชนีการหลอมไหล (MFI)

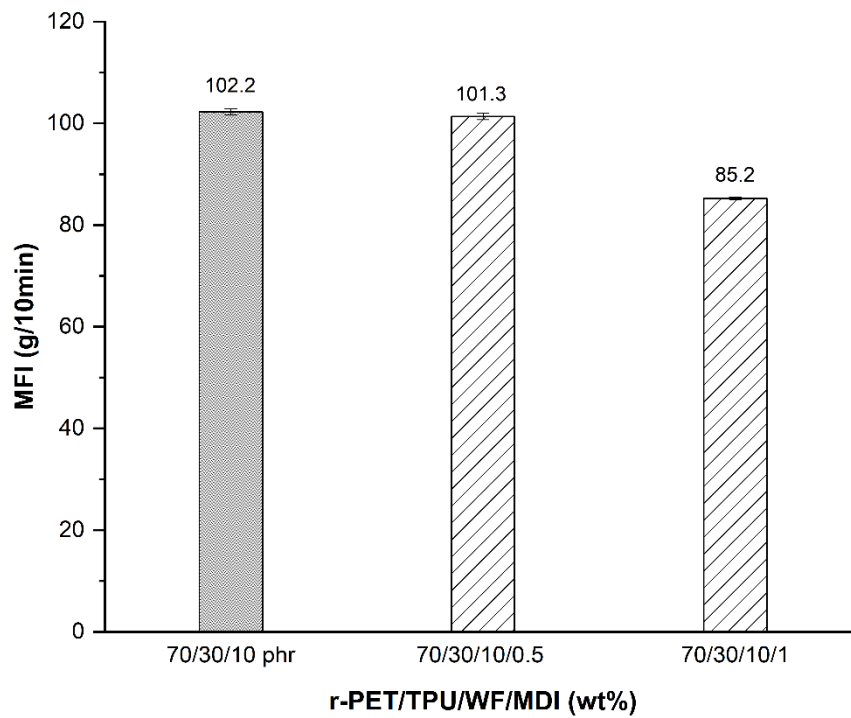
จากรูปที่ 4.4, รูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบหาดรรชนีการหลอมไหลตามมาตรฐาน ASTM D1238 โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบที่ 260 องศาเซลเซียส และใช้น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม ของ TPU, r-PET, พอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 และคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr และคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 และ 1 wt% ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 ดรรชนีการหลอมไหลของ TPU, r-PET และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.5 ดรรชนีการหลอมไหลของคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.6 ดรรชนีการหลอมไหลของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.4 พบว่า ธรรมชาติการหลอมไหลของ TPU และ r-PET มีค่าเท่ากับ 50.1 และ 39.8 กรัม/10 นาที ตามลำดับ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า TPU สามารถไหลได้ง่ายกว่า r-PET ดังนั้นการผสม TPU ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถไหลได้ง่ายกว่า r-PET มีผลทำให้ธรรมชาติการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยจะมีค่าอยู่ในช่วง 58.7–106.4 กรัม/10 นาที ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าพอลิเมอร์ผสมมีความหนืดลดลง โดย TPU ที่กระจายตัวอยู่ใน r-PET อาจทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ (polymeric plasticizer) ช่วยให้พอลิเมอร์ผสมสามารถไหลได้ง่ายขึ้น

จากรูปที่ 4.5 พบว่า ธรรมชาติการหลอมไหลของคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr มีธรรมชาติการหลอมไหลที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม 70/30 r-PET/TPU เนื่องจากคอมพอสิตมีความหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากอนุภาคของ WF มีขนาดใหญ่และมีพื้นผิวที่ขรุขระ จึงไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ในคอมพอสิต จึงทำให้ธรรมชาติการหลอมไหลของคอมพอสิตลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม โดยธรรมชาติการหลอมไหลจะลดลงตามปริมาณของ WF ที่เพิ่มมากขึ้น

จากรูปที่ 4.6 พบว่า คอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 และ 1 wt% มีธรรมชาติการหลอมไหลต่ำกว่าคอมพอสิต เนื่องจากการเติม MDI ซึ่งเป็นสารช่วยขยายสายโซ่จะไปช่วยต่อสายโซ่ของพอลิเมอร์เมทริกซ์ทำให้น้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น และอาจทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม (compatibilizer) ให้กับคอมพอสิต จึงส่งผลให้ค่าความหนืดมีค่าลดลงตามปริมาณของ MDI ที่เพิ่มมากขึ้น

4.3 สมบัติทางกล (mechanical properties)

สมบัติทางกลของ TPU, r-PET, พอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 และคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr และคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 และ 1 wt% ตามลำดับ ในเทอมของความทนแรงกระแทก (impact strength), ความทนแรงดึง (tensile strength), ยังส์มอดุลัส (Young's modulus), การยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) และความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.1

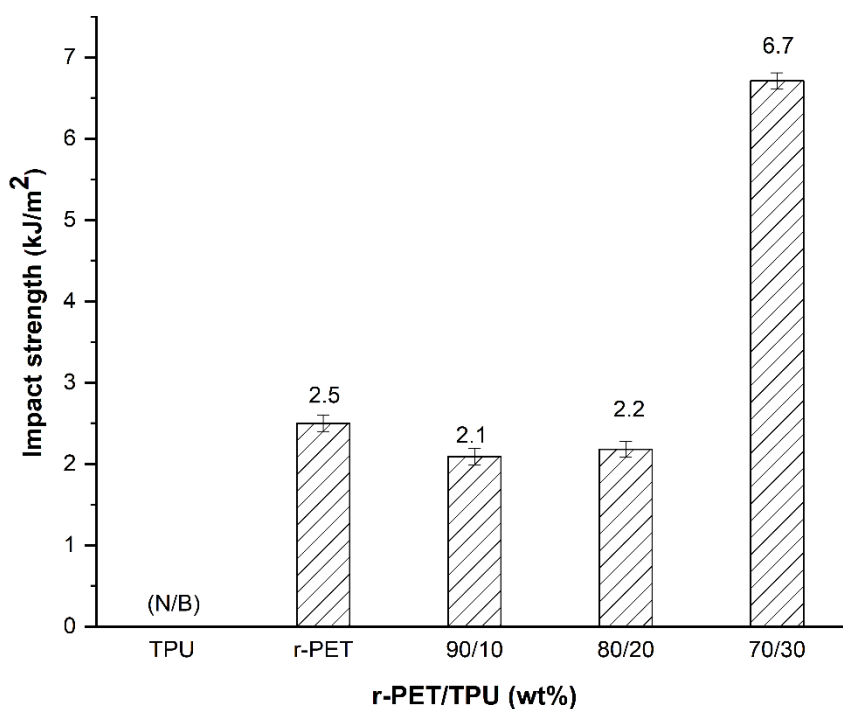
ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกลของ TPU, r-PET, พอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU, คอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF และคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ

Sample	Impact strength (kJ/m ²)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural strength (MPa)
TPU	(N/B)*	4.5±0.1	31.3±0.5	40.0±0.5	(N/B)*
r-PET	2.5±0.0	55.0±0.4	1043.4±14.0	2.4±0.1	60.5±0.7
r-PET/TPU (wt%/wt%)					
90/10	2.1±0.1	65.2±0.4	1328.4±7.4	4.6±0.0	68.7±0.2
80/20	2.2±0.1	61.1±0.2	1034.8±7.8	5.5±0.1	61.1±0.2
70/30	6.7±0.0	39.4±0.4	910.1±4.7	10.6±0.2	40.9±0.4
r-PET/TPU/WF (wt%/wt%/phr)					
70/30/10	1.7±0.0	32.1±0.4	1046.3±3.0	4.1±0.1	48.2±0.3
70/30/20	1.4±0.0	31.3±0.2	1110.0±6.4	3.1±0.0	46.3±0.5
70/30/30	1.2±0.0	29.3±0.3	1214.7±1.3	2.6±0.1	45.4±0.3
r-PET/TPU/WF/MDI (wt%/wt%/phr/wt%)					
70/30/10/0.5%	2.0±0.0	34.3±0.2	1022.2±39.5	3.8±0.1	56.3±0.4
70/30/10/1%	3.2±0.0	39.4±0.4	1066.0±72.0	4.0±0.4	59.2±0.4

*หมายเหตุ ชิ้นทดสอบไม่เกิดการแตกหัก

4.3.1 ความทนแรงกระแทก (impact strength)

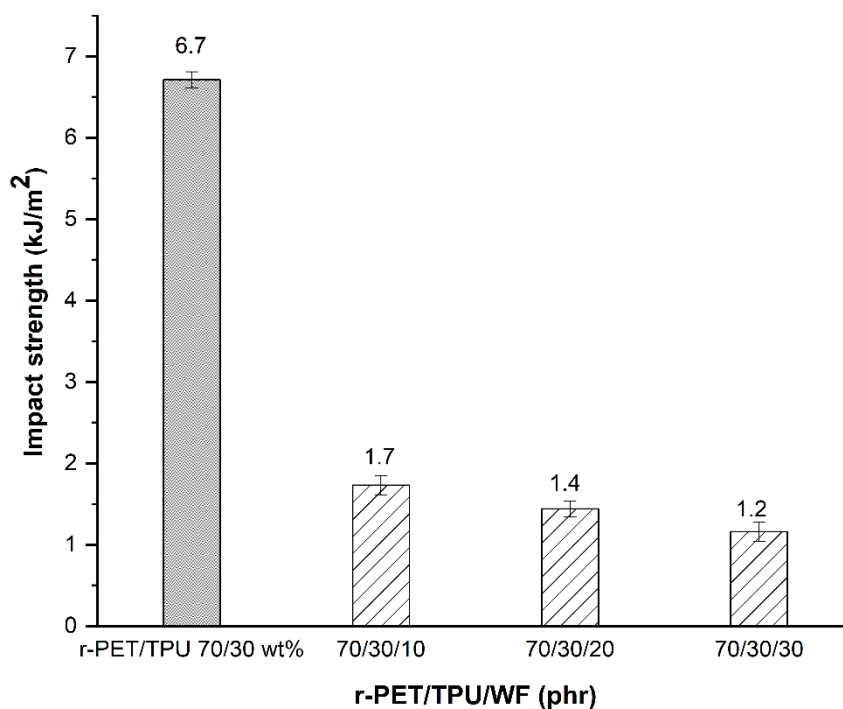
รูปที่ 4.7, รูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 แสดงค่าความทนแรงกระแทกของ TPU, r-PET, พอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 และคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr และคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติมสารขยายสายโซ่ (chain extender, CE) ชนิดเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยานต (methylene diphenyl diisocyanate, MDI) ที่อัตราส่วน 0.5 และ 1 wt% ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ความทนแรงกระแทกของ TPU, r-PET และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.7 พบว่า r-PET มีค่าความทนแรงกระแทกที่ค่อนข้างต่ำ (2.5 kJ/m²) ซึ่งเป็นคุณลักษณะของพลาสติกที่มีความแข็งเปราะ เนื่องจาก r-PET มีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) ค่อนข้างสูง (ประมาณ 79.5 องศาเซลเซียส) และได้ผ่านกระบวนการใช้งานมาแล้วจึงอาจทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ (degradation) ส่งผลให้ความทนแรงกระแทกค่อนข้างต่ำ ในขณะที่ขึ้นทดสอบ TPU ไม่สามารถหาความทนแรงกระแทกภายใต้สภาวะการทดสอบนี้ได้ เนื่องจากขึ้นทดสอบไม่เกิดการแตกหัก ซึ่งแสดงถึงสมบัติของพลาสติกที่มีความเหนียว และเนื่องจาก TPU มีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วต่ำ (ประมาณ 5.6 องศาเซลเซียส) ดังนั้นเมื่อผสม TPU ใน r-PET พบว่าพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วน 10 และ 20 wt% มีความทนแรงกระแทกลดลง เนื่องจากอัตราส่วน TPU ที่ผสมอยู่ในปริมาณที่น้อย จึงไม่ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมได้รับการปรับปรุงเท่าที่ควร เมื่อปริมาณ TPU เพิ่มขึ้นเป็น 30 wt% พบว่า พอลิเมอร์ผสมได้รับการปรับปรุง ซึ่งมีความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นจาก 2.5 kJ/m² เป็น 6.7 kJ/m² แสดงให้เห็นว่าการเติม TPU สามารถช่วยปรับปรุงความเหนียวให้กับ r-PET ได้

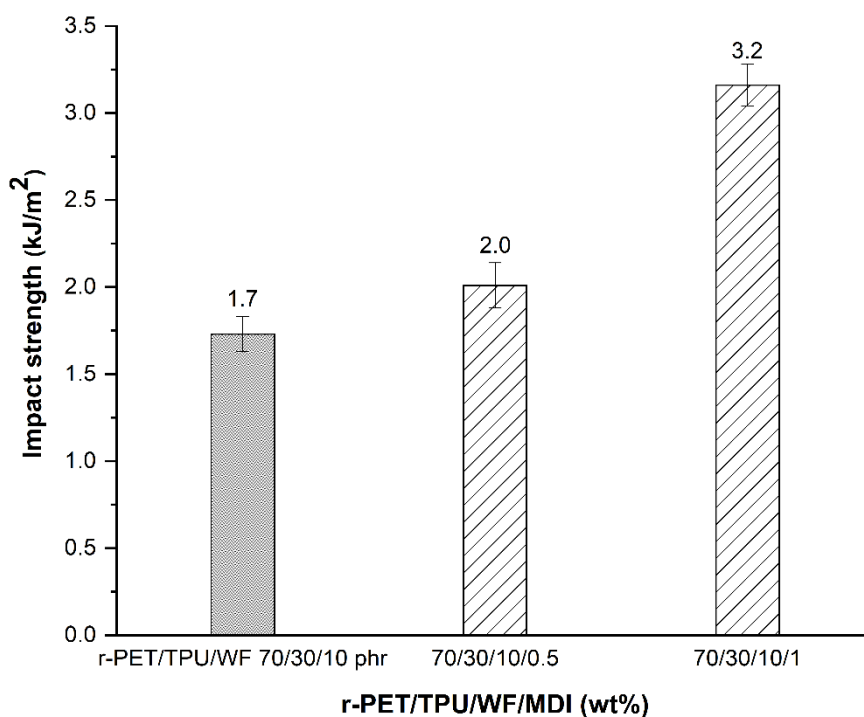
ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงเลือกพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วน 70/30 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีความทนแรงกระแทกสูงที่สุด นำไปเตรียมเป็นคอมพอสิตกับ WF ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr



รูปที่ 4.8 ความทนแรงกระแทกของคอมพอสิต r-PET/TPU 70/30 ด้วย WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.8 พบว่า ความทนแรงกระแทกของคอมพอสิต r-PET/TPU 70/30 ด้วย WF ทุกอัตราส่วนมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU 70/30 เนื่องจากอนุภาคของ WF มีความแข็งตึง (stiffness) สูง ทำให้ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ อีกทั้งอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์ และ WF ไม่ดีเท่าที่ควร จึงทำให้การส่งผ่านแรงระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์กับ WF ไม่ดี จึงส่งผลให้ความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตจาก WF มีค่าลดลงตามปริมาณของ WF ที่เพิ่มมากขึ้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกคอมพอสิต r-PET/TPU 70/30 ด้วย WF ที่อัตราส่วน 10 phr ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม นำไปเตรียมเป็นคอมพอสิตที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 และ 1 wt%

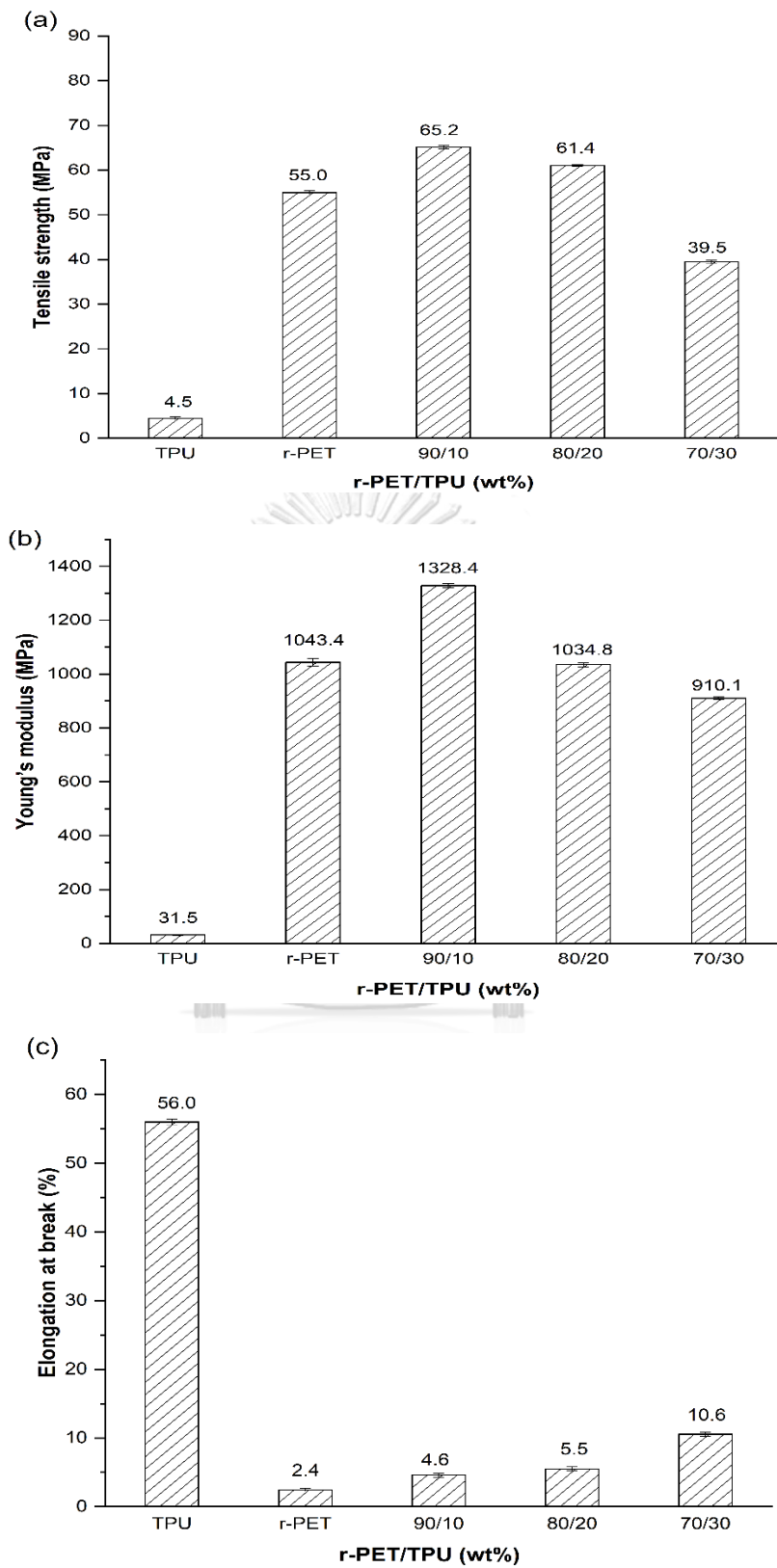


รูปที่ 4.9 ความทนแรงกระแทกของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.9 พบว่า ความทนแรงกระแทกของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 และ 1 wt% เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF โดยเพิ่มขึ้นจาก 1.7 kJ/m² เป็น 2.0 kJ/m² และ 3.2 kJ/m² ตามลำดับ เนื่องจาก MDI อาจทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม (compatibilizer) ให้กับคอมพอสิต ทำให้อันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์ และ WF ดีขึ้น จึงส่งผลให้การส่งผ่านแรงระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์กับ WF ดีขึ้น ความทนแรงกระแทกจึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ MDI ที่เพิ่มมากขึ้น

4.3.2 สมบัติความทนแรงดึง (tensile properties)

รูปที่ 4.10, รูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 แสดงสมบัติความทนแรงดึง (ความทนแรงดึง, ย้งสัมพันธ์ และ การยืดตัว ณ จุดขาด) ของ TPU, r-PET, พอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 และคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr และคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 และ 1 wt% ตามลำดับ

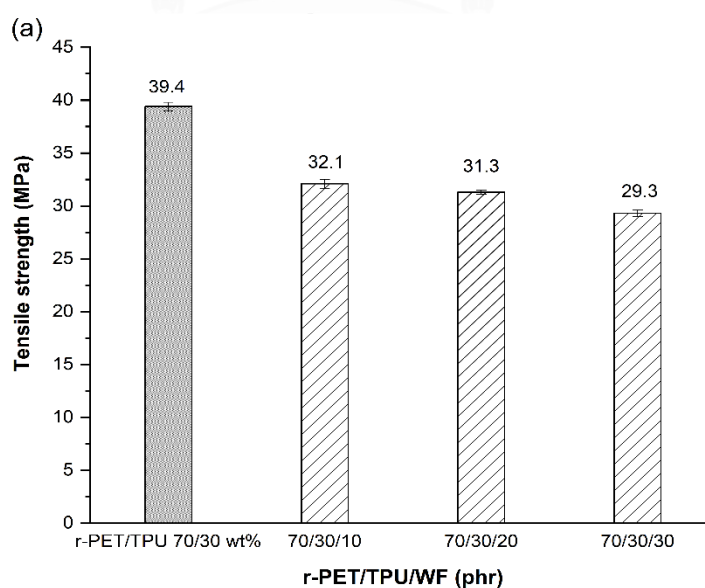


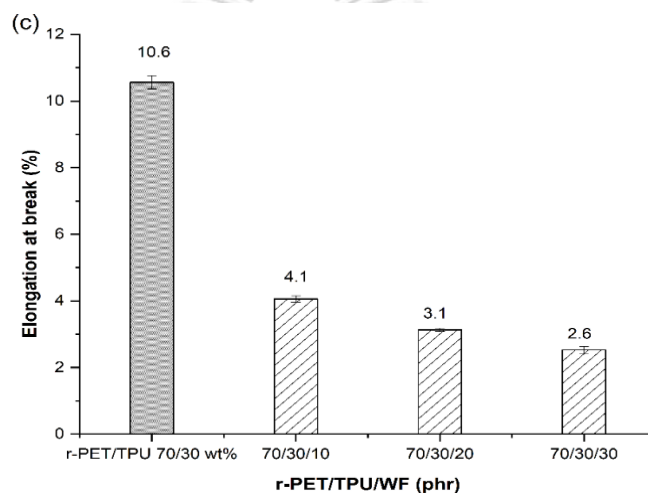
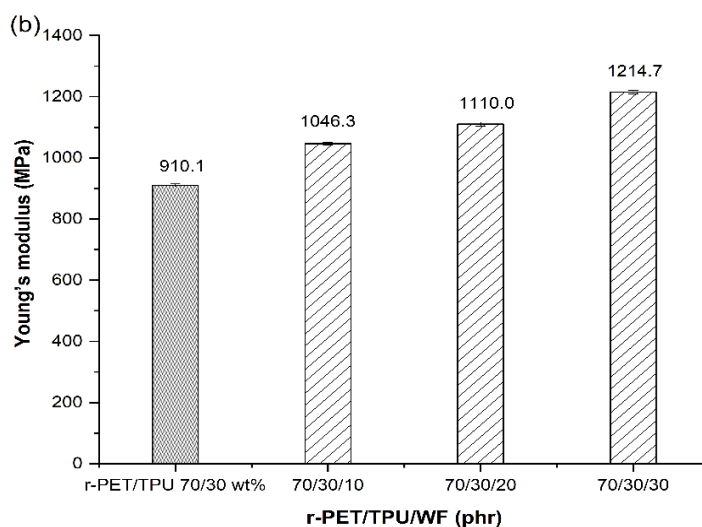
รูปที่ 4.10 สมบัติความทนแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยังส์มอดุลัส และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาด ของ TPU, r-PET และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.10(a) พบว่า ความทนแรงดึงของ TPU และ r-PET มีค่า 4.5 และ 55.0 MPa ตามลำดับ เมื่อเติม TPU ส่งผลให้ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน TPU 10 wt% และ 20 wt% เพิ่มขึ้นเป็น 65.2 MPa และ 61.1 MPa ตามลำดับ เนื่องจากมีปริมาณ TPU ที่สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึงได้ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ TPU ที่อัตราส่วน 30 wt% (39.4 MPa) พบว่าความทนแรงดึงลดลง เนื่องจากปริมาณ TPU ที่เยอะเกินไป ประกอบกับสมบัติของ TPU ที่มีความทนแรงดึงค่อนข้างต่ำ จึงส่งผลทำให้ความทนแรงดึงลดลงตามปริมาณ TPU ที่เพิ่มมากขึ้น

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.10(b) พบว่า ยังสัมมอดูลัสของ TPU และ r-PET มีค่า 31.5 และ 1043.4 MPa ตามลำดับ เมื่อเติม TPU ส่งผลให้ยังสัมมอดูลัสเพิ่มขึ้น โดยมีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วน 90/10 r-PET/TPU (1328.4 MPa) และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ TPU เพิ่มขึ้น (ลดลง 12.5% ที่อัตราส่วน TPU 30 wt%) เนื่องจาก TPU มียังสัมมอดูลัสที่ต่ำ และความเข้ากันได้ดีระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์ แต่เมื่อปริมาณ TPU มากขึ้นจึงทำให้ความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์ลดลง ส่งผลให้ยังสัมมอดูลัสลดลงตามปริมาณ TPU ที่เพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.10(c) พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาด ของ TPU และ r-PET มีค่า 56.0 % และ 2.4% ตามลำดับ เมื่อเติม TPU ส่งผลให้การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และมีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วน 70/30 r-PET/TPU (10.6%) เนื่องจาก TPU มีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดที่สูง จึงทำให้เมื่อผสม TPU ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง จึงช่วยปรับปรุงสมบัติการยืดตัวของ r-PET ได้



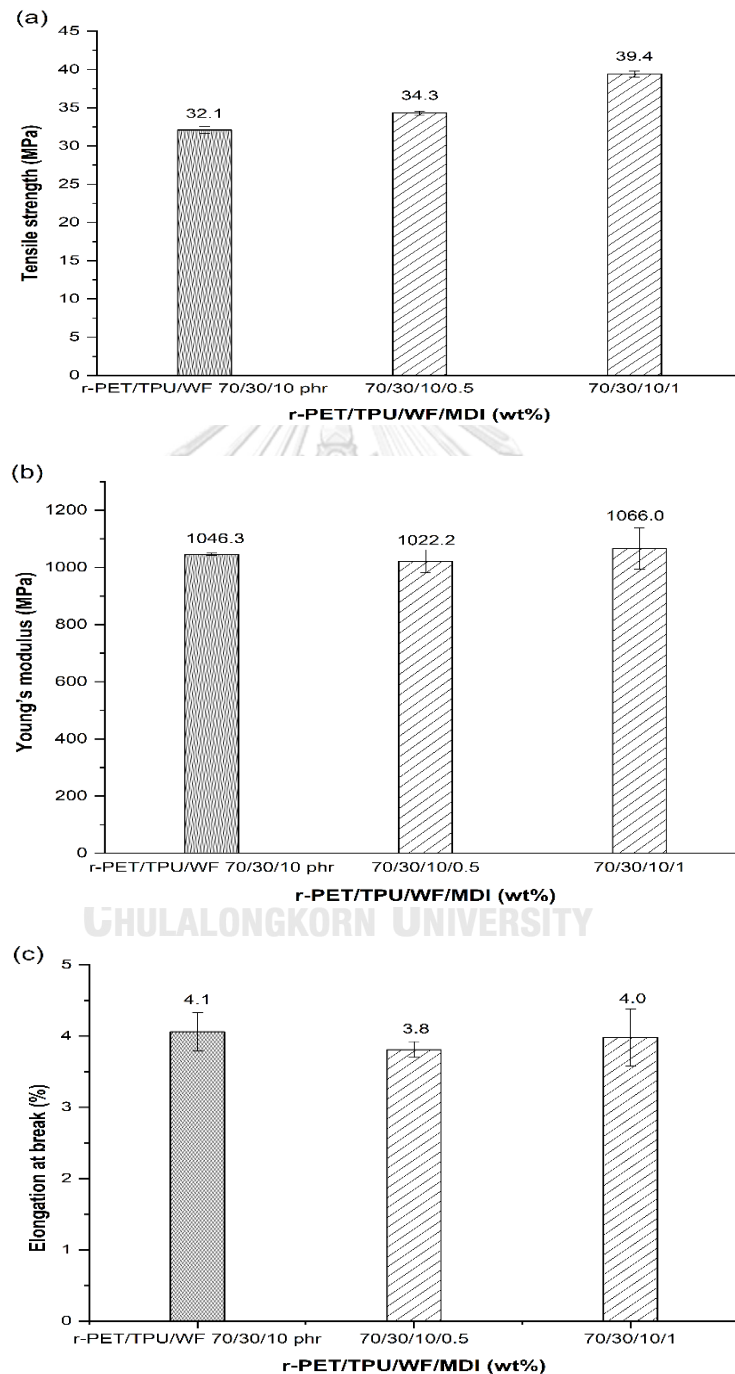


รูปที่ 4.11 สมบัติความทนแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยังส์มอดุลัส และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาด ของคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.11(a) พบว่า ความทนแรงดึงของคอมพอสิตมีค่าลดลงจากพอลิเมอร์ผสม 70/30 r-PET/TPU (39.4 MPa) เมื่อใส่ WF ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr และลดลงมากที่สุดที่ปริมาณ WF 30 phr (29.3 MPa) ทั้งนี้เนื่องจากความเข้ากันได้ไม่ดีระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์ และ WF จึงทำการเกิดการส่งผ่านแรงได้ไม่ดี ส่งผลให้ความทนแรงดึงมีค่าลดลง

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.11(b) พบว่า ยังส์มอดุลัสของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นจากพอลิเมอร์ผสม 70/30 r-PET/TPU (910.1 MPa) เมื่อใส่ WF ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr และมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ WF ที่เพิ่มขึ้น โดยยังส์มอดุลัสของคอมพอสิตได้รับการปรับปรุงสูงสุดที่อัตราส่วน 70/30/30 r-PET/TPU/WF (1214.7 MPa) ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งตัวของสารตัวเติม WF ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.11(c) พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาด ของคอมพอสิตทุกอัตราส่วน มีค่าลดลง และต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม 70/30 r-PET/TPU (10.6%) ซึ่งจะลดลงมากที่สุดที่อัตราส่วน 70/30/30 r-PET/TPU/WF (2.6%) ทั้งนี้เนื่องจาก WF มีความแข็งตึงสูง จึงขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ อีกทั้งอันตรกิริยาระหว่าง WF และพอลิเมอร์เมทริกซ์ต่ำ



รูปที่ 4.12 สมบัติความทนแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยั่งส์มอดุลัส และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาด ของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ

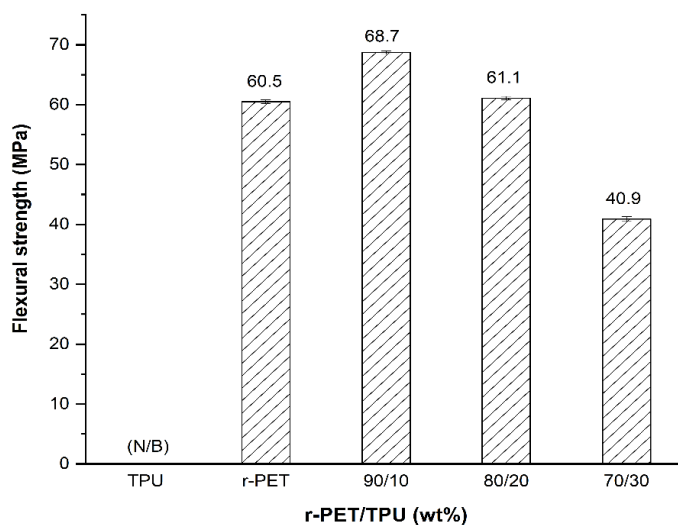
จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.12(a) พบว่า ความทนแรงดึงของคอมพอสิตที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 และ 1 wt% มีค่าเพิ่มขึ้น และสูงกว่าคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/10 r-PET/TPU/WF (32.1 MPa) โดยความทนแรงดึงจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อเติม MDI 1 wt% (39.4 MPa) ทั้งนี้เนื่องจาก MDI สามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์ และ WF ดีขึ้น จึงทำให้การส่งผ่านแรงระหว่างเมทริกซ์กับ WF ดีขึ้น อีกทั้งไปช่วยขยายสายโซ่ให้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ จึงส่งผลให้ความทนแรงดึงของคอมพอสิตจึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ MDI ที่เพิ่มมากขึ้น

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.12(b) พบว่า ยังสัมมอดูลัสของคอมพอสิตที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 wt% มีค่าลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ (1022.2 MPa) เมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/10 r-PET/TPU/WF (1046.3 MPa) หากแต่เมื่อเติมสารช่วยขยายสายโซ่ MDI ที่อัตราส่วน 0.5 wt% พบว่ายังสัมมอดูลัสเพิ่มขึ้น (1066.0 MPa) เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์ และ WF ได้รับการปรับปรุงทำให้การส่งผ่านแรงดีขึ้น ยังสัมมอดูลัสของคอมพอสิตที่เติมสารช่วยขยายสายโซ่ MDI จึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ MDI ที่เพิ่มมากขึ้น

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.12(c) พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาด ของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 wt% และ 1 wt% มีค่าลดลงทุกอัตราส่วน และลดลงต่ำกว่าคอมพอสิตจาก WF ที่อัตราส่วน 70/30/10 r-PET/TPU/WF (4.1%) หากแต่การยืดตัว ณ จุดขาด จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ MDI โดยจะมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วน 70/30/10/1 r-PET/TPU/WF/MDI (4.0%) เนื่องมาจาก MDI ไปช่วยต่อขยายสายโซ่ให้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เมทริกซ์เกิดการเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ส่งผลทำให้การยืดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตที่เติม MDI มีค่าลดลง

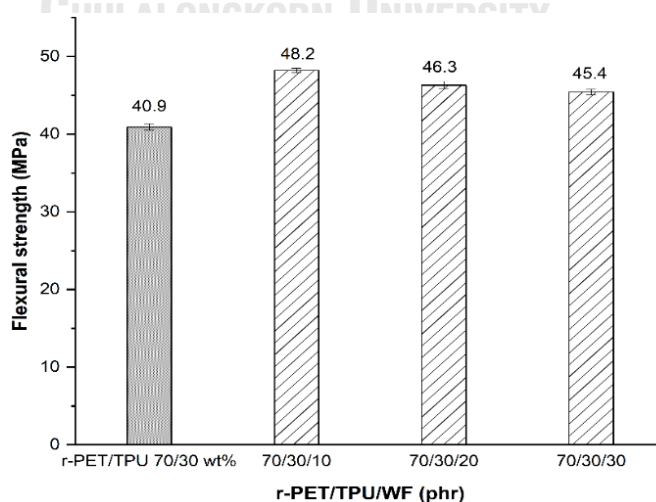
4.3.3 ความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength)

จากรูปที่ 4.13, รูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 แสดงความทนแรงดัดโค้งของ TPU, r-PET, พอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 และคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr และคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 และ 1 wt% ตามลำดับ



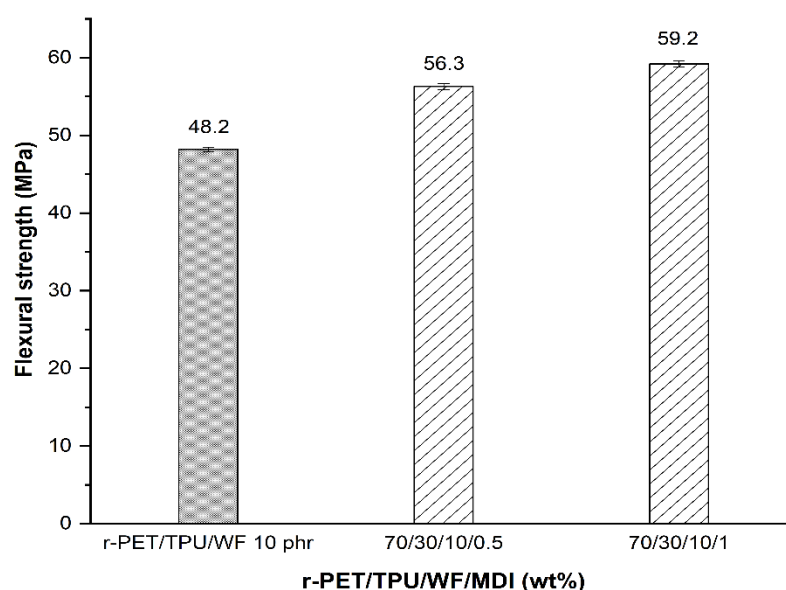
รูปที่ 4.13 ความทนแรงดัดโค้งของ TPU, r-PET และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.13 พบว่า TPU มาสามารถหาความทนแรงดัดโค้งได้ในสภาวะการทดสอบนี้ได้ ทั้งนี้เนื่องจาก TPU เป็นวัสดุที่มีความเหนียว และมีความยืดหยุ่นที่ดี ในขณะที่ r-PET มีค่าความทนแรงดัดโค้งที่ 60.5 MPa และเมื่อทำการเติม TPU ที่อัตราส่วน 10 wt% และ 20 wt% ลงใน r-PET พบว่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากมีปริมาณ TPU ที่สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติความทนแรงดัดโค้งได้ หากแต่เมื่อเติม TPU ที่อัตราส่วน 30 wt% พบว่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก TPU ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง และมีความอ่อนนิ่ม เมื่อผสมกับ r-PET จึงทำให้พอลิเมอร์ผสมสามารถดัดโค้งได้ง่ายขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดสอบยังส้อมดูลีส และการยึดตัว ณ จุดขาด ในการทดสอบความทนแรงดึง และความทนแรงกระแทกที่กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 4.14 ความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

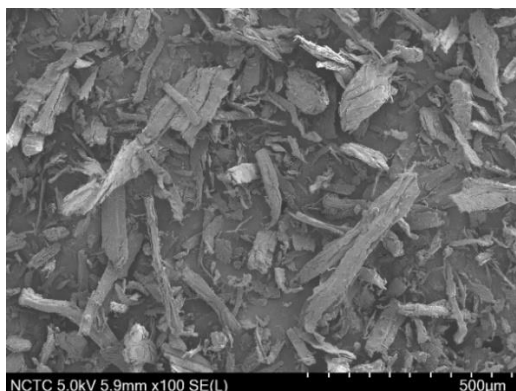
จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.14 พบว่า ความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิตทุกอัตราส่วน มีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม 70/30 r-PET/TPU (40.9 MPa) และสูงสุดเมื่อเติม WF ที่ปริมาณ 10 phr (48.2 MPa) และจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ WF ที่ 20 phr (46.3 MPa) และ 30 phr (45.4 MPa) ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งตึง และอนุภาคขนาดใหญ่ของ WF จึงทำให้เมื่อปริมาณ WF เพิ่มขึ้น ความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์และ WF ไม่ดี จึงเกิดการแยกเฟสทำให้การกระจายแรงไม่ดีเท่าที่ควร จึงส่งผลให้คอมพอสิตมีความทนแรงดัดโค้งลดลงตามปริมาณของ WF ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.15 ความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.15 พบว่า ความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิตที่เติม MDI ทุกอัตราส่วนมีค่าสูงกว่าคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/10 r-PET/TPU/WF (48.2 MPa) และมีค่าสูงสุดเมื่อเติม MDI ที่อัตราส่วน 1 wt% (59.2 MPa) ทั้งนี้เนื่องจากการเติม MDI สามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยประสานดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

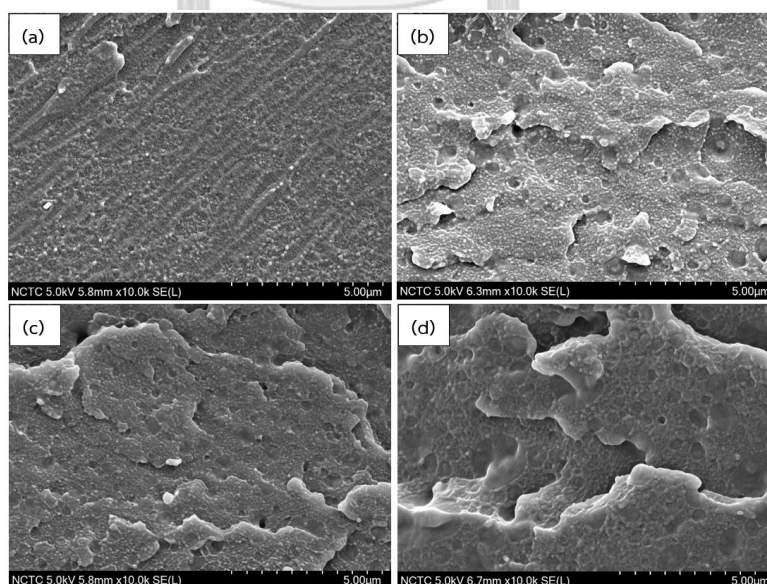
4.4 สัณฐานวิทยา (morphology)



รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของ WF ที่กำลังขยาย 100 เท่า

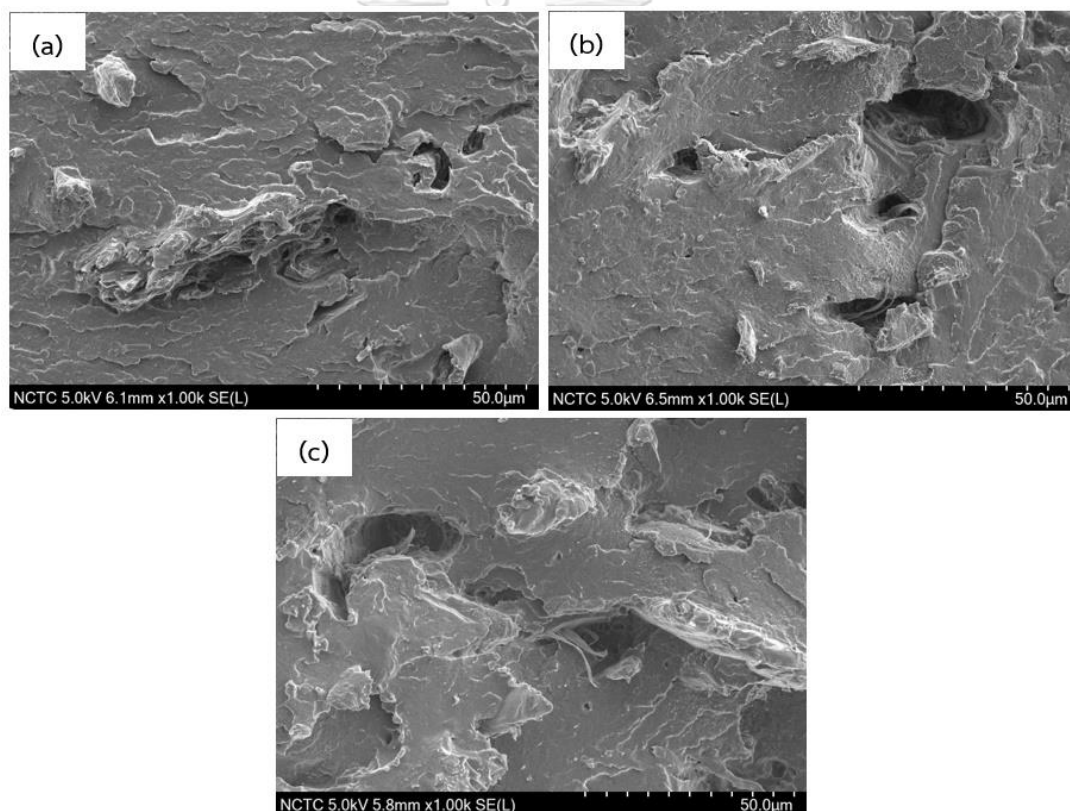
จากรูปที่ 4.16 แสดงสัณฐานวิทยาของ WF ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้กำลังขยาย 100 เท่า พบว่าอนุภาค WF มีขนาดใหญ่และมีพื้นผิวขรุขระ ซึ่งเป็นผนังไม้สนที่มีขนาดอนุภาค 70–150 ไมโครเมตร และมีความหนาแน่น 100–135 กรัม/ลิตร

จากรูปที่ 4.17, รูปที่ 4.18 และ รูปที่ 4.19 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักจากการทดสอบความทนแรงกระแทกของ r-PET, พอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU, คอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr และคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 wt% และ 1 wt% ตามลำดับ ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้กำลังขยาย 10,000 เท่า และ 1,000 เท่า



รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยาของ (a) r-PET และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วน (b) 90/10, (c) 80/20 และ (d) 70/30 ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

จากรูปที่ 4.17(a) พบว่า r-PET ที่มีพื้นผิวที่เรียบแสดงถึงวัสดุที่มีความแข็งและเปราะ ในขณะที่ไม่สามารถตรวจสอบสัณฐานวิทยาของ TPU ได้ เนื่องจาก TPU เป็นวัสดุที่มีความเหนียว จึงไม่เกิดการแตกหักหลังจากการทดสอบความทนแรงกระแทก อย่างไรก็ตามเมื่อผสม TPU ใน r-PET ที่ปริมาณ 10 wt% (รูปที่ 4.17(b)) พบว่า พื้นผิวบริเวณรอยแตกหักค่อนข้างเรียบและเป็นคลื่นเล็กๆ กระจายอยู่บางส่วน และเมื่อเพิ่มปริมาณ TPU เป็น 20 wt% และ 30 wt% (รูปที่ 4.17(c) และ (รูปที่ 4.17(d)) ตามลำดับ พบว่า พื้นผิวบริเวณรอยแตกหักมีลักษณะเป็นคลื่นที่ใหญ่ขึ้น และมีปริมาณมากขึ้น นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นอนุภาคของ TPU มีลักษณะเป็นหยด (droplet) แทรกตัว และกระจายตัวอยู่ในอนุภาคของ r-PET แสดงให้เห็นว่า TPU สามารถเข้ากันได้กับ r-PET จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมข้างต้นสามารถบ่งบอกได้ว่า TPU สามารถเพิ่มความเหนียวให้กับ r-PET ได้ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติทางกลที่ได้กล่าวมาข้างต้น

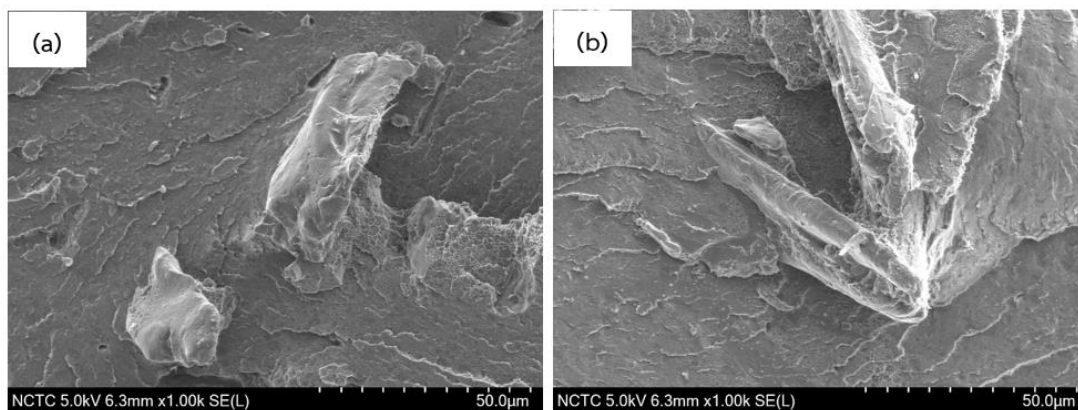


รูปที่ 4.18 สัณฐานวิทยาของคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน

(a) 10 phr, (b) 20 phr และ (c) 30 phr ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

จากรูปที่ 4.18 พบว่า เมื่อผสม WF กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ทำให้เกิดช่องว่างบริเวณพื้นผิวระหว่างพอลิเมอร์กับอนุภาคสารตัวเติม WF ที่เกิดจากการหลุดออกของ WF ซึ่งแสดงถึงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสที่ไม่ดีระหว่างสารตัวเติม WF กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งแสดงให้เห็นช่องว่าง

ขนาดใหญ่มากขึ้นเมื่อปริมาณ WF เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลไม่ได้รับการปรับปรุงดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน (a) 0.5 และ (b) 1 wt% ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

จากรูปที่ 4.19 พบว่า เมื่อผสมสารช่วยขยายสายโซ่ MDI กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ สามารถสังเกตได้ว่าพื้นผิวของคอมพอสิตมีลักษณะที่เรียบขึ้น และจะเห็นได้ว่า WF มีการฝังตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ และไม่ปรากฏช่องว่างระหว่าง WF กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ แสดงให้เห็นว่า MDI สามารถเป็นตัวช่วยประสาน ส่งผลให้อัตราการระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์ และ WF ดีขึ้น ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลได้รับการปรับปรุงดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

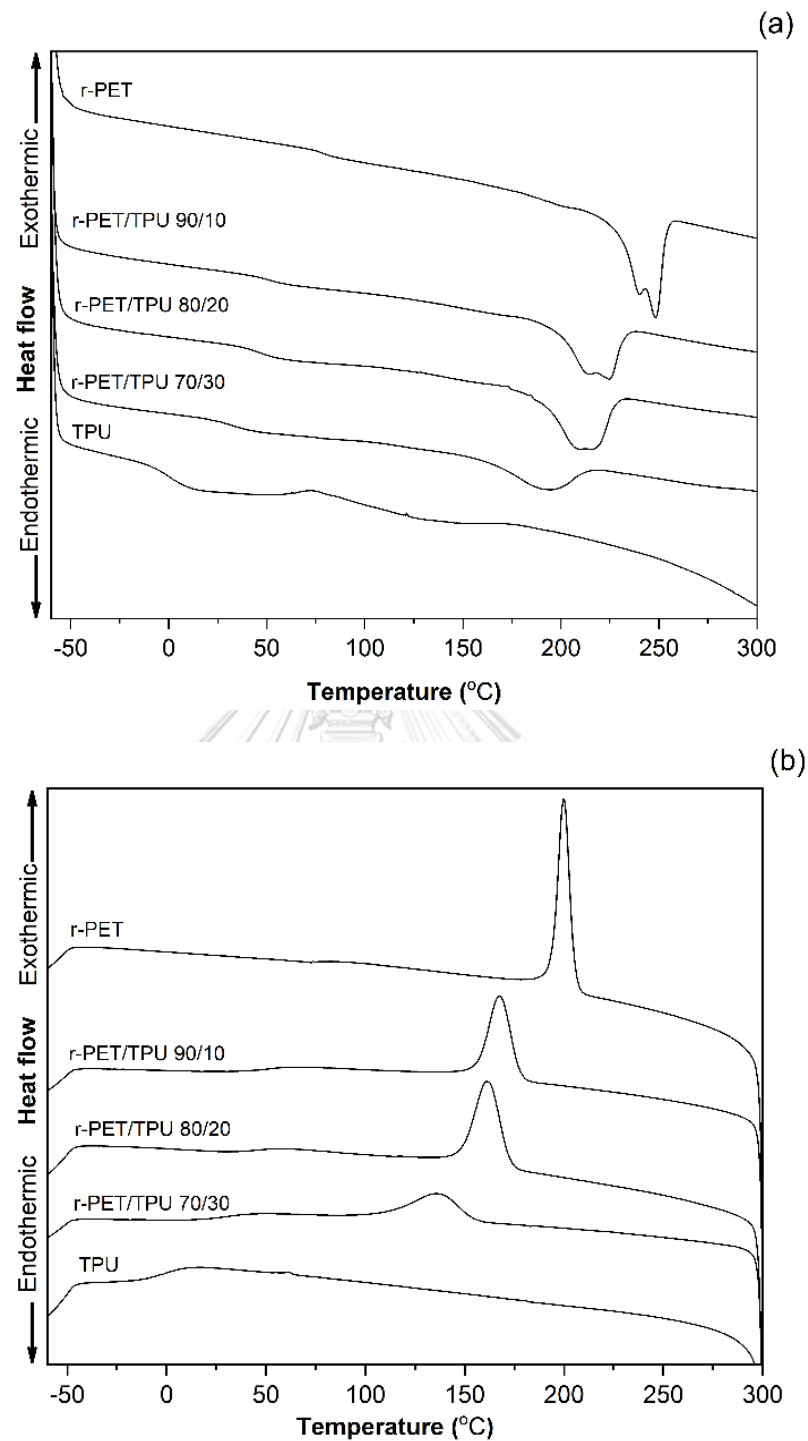
4.5 สมบัติทางความร้อน (thermal properties)

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของ TPU, r-PET, พอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 และคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr และคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 และ 1 wt% ตามลำดับ ด้วยเทคนิค DSC ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.2 ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g), อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) และเอนทัลปีการหลอมเหลว (melting enthalpy, ΔH_m) ที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง (second heating scan) และอุณหภูมิเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) และเอนทัลปีเกิดผลึกเย็น (cold crystallization enthalpy, ΔH_c) ที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัว (cooling scan) จากนั้นคำนวณหาระดับความเป็นผลึก (degree of crystallinity, X_c) จากสมการ 3.1 ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้อัตราการให้ความร้อน/เย็นเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส/นาที

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางความร้อนของ TPU, r-PET, พอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU, คอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF และคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ

Sample	Second heating scan					Cooling scan		
	T_{g1} (°C)	T_{g2} (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	ΔH_m (Jg ⁻¹)	T_c (°C)	ΔH_c (Jg ⁻¹)	X_c (%)
TPU	5.6	–	83.8	–	–	–	–	–
r-PET	79.9	–	234.3	243.7	38.3	205.6	40.8	31.9
r-PET/TPU (wt%/wt%)								
90/10	54.6	–	204.6	218.2	31.2	177.8	31.7	28.9
80/20	46.3	–	199.8	213.9	26.8	175.9	38.3	27.9
70/30	40.1	–	164.4	–	17.7	154.4	17.8	21.1
r-PET/TPU/WF (wt%/wt%/phr)								
70/30/10	4.6	58.8	219.4	230.5	26.5	194.4	27.3	31.5
70/30/20	12.1	62.6	216.6	230.4	23.3	193.8	25.8	27.8
70/30/30	17.5	65.4	216.3	229.5	21.5	193.2	22.5	25.6
r-PET/TPU/WF/MDI (wt%/wt%/phr/wt%)								
70/30/10/0.5	27.2	70.7	217.5	231.1	14.8	193.9	28.0	17.6
70/30/10/1	32.9	87.3	218.2	231.6	25.8	194.0	29.8	30.7

จากรูปที่ 4.20, รูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 แสดง DSC เทอร์โมแกรมของ TPU, r-PET, พอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU, คอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr และคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 และ 1 wt% ตามลำดับ ในขั้นตอนการให้ความร้อนในครั้งที่ 2 (a) และขั้นตอนการเย็นตัว (b) โดยจะแสดงค่าไว้ในตารางที่ 4.2



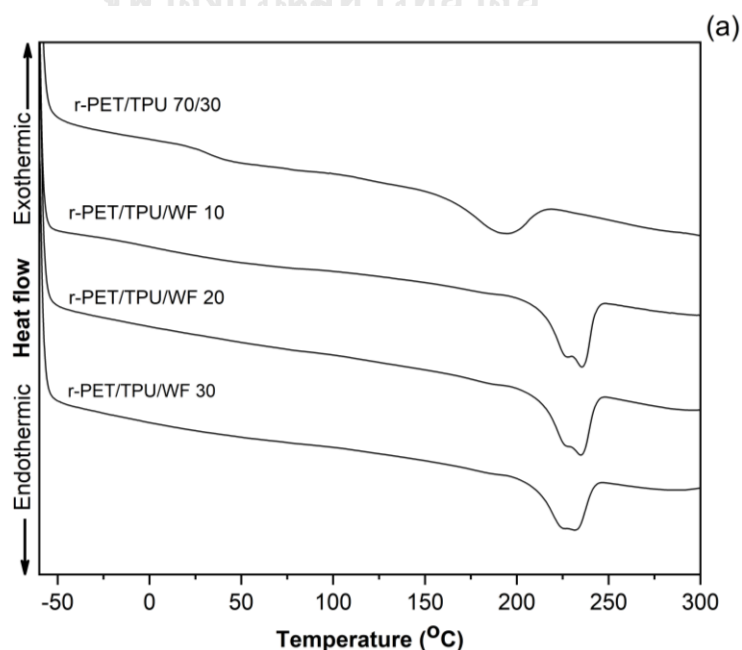
รูปที่ 4.20 สมบัติทางความร้อน: (a) ขั้นตอนการให้ความร้อนในครั้งที่ 2 และ (b) ขั้นตอนการเย็นตัวของ TPU, r-PET และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วนต่างๆ

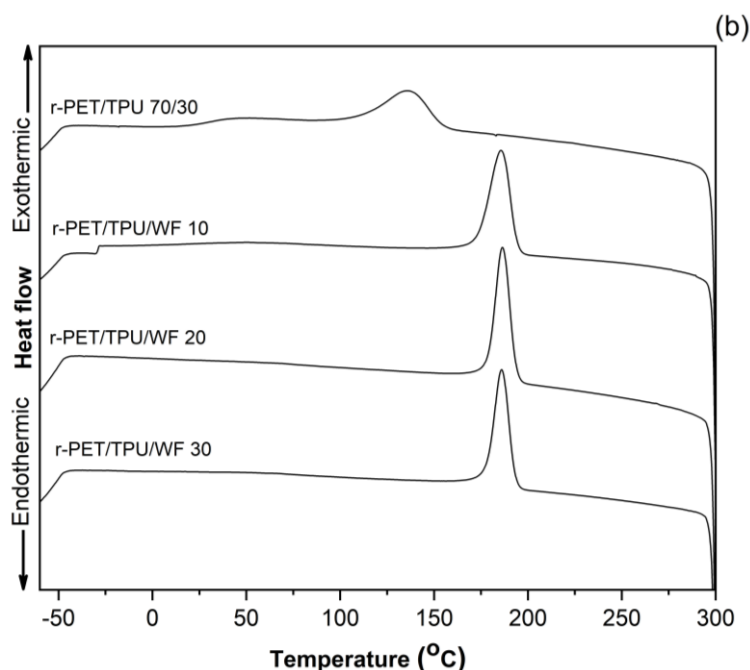
จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.20(a) แสดงผลที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนในครั้งที่ 2 พบว่า TPU มี T_g และ T_m เท่ากับ 5.6 และ 83.8 องศาเซลเซียส

ตามลำดับ ขณะที่ r-PET มี T_g เท่ากับ 79.9 องศาเซลเซียส และมี T_{m1} และ T_{m2} เท่ากับ 234.3 องศาเซลเซียส และ 243.7 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และเมื่อผสม r-PET กับ TPU พบว่าพอลิเมอร์ผสมพบค่า T_g เพียงค่าเดียว ซึ่งสามารถพิสูจน์ให้เห็นถึงความสามารถเข้ากันได้ของ r-PET และ TPU อย่างไรก็ตาม T_g ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงตามปริมาณของ TPU ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่าการที่ TPU มี T_g ที่ต่ำ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า r-PET และพอลิเมอร์ผสมแสดงค่าการดูดกลืนความร้อนแบบสองขั้นที่ดูดความร้อน T_{m1} สอดคล้องกับการหลอมผลึกที่ไม่สมบูรณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนการเย็นตัว ในขณะที่พิก T_{m2} สอดคล้องกับการหลอมผลึกที่จัดโครงสร้างใหม่ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนการให้ความร้อนในครั้งที่ 2 อย่างไรก็ตามการผสม TPU ใน r-PET ส่งผลให้ค่า T_{m1} และ T_{m2} ของ r-PET ลดลง นอกจากนี้พบว่าไม่ปรากฏพิกการหลอมผลึกแบบสองขั้นในพอลิเมอร์ผสม 70/30 r-PET/TPU ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของ TPU ไปจำกัดการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุล r-PET ซึ่งได้รับการยืนยันโดยการคำนวณค่า X_c จากสมการที่ 3.1 พบว่า X_c ของ r-PET ในพอลิเมอร์ผสมลดลงตามปริมาณ TPU ที่เพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.20(b) แสดงผลที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัว พบว่า ไม่ปรากฏ T_c ของ TPU เนื่องจากอัตราการเกิดผลึกของ TPU ช้ามาก อีกทั้งการให้อัตราเร็วในการเย็นตัวค่อนข้างสูง (10 องศาเซลเซียสต่อนาที) จึงทำให้โมเลกุลของ TPU มีเวลาไม่มากพอที่จะจัดเรียงตัวเป็นผลึก ในส่วนของ r-PET มี T_c เท่ากับ 205.6 องศาเซลเซียส เมื่อผสม r-PET กับ TPU ทำให้ T_c ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ TPU เพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่า r-PET ใช้เวลาในการตกผลึกนานขึ้น เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของ TPU ไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของ r-PET ในพอลิเมอร์ผสม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

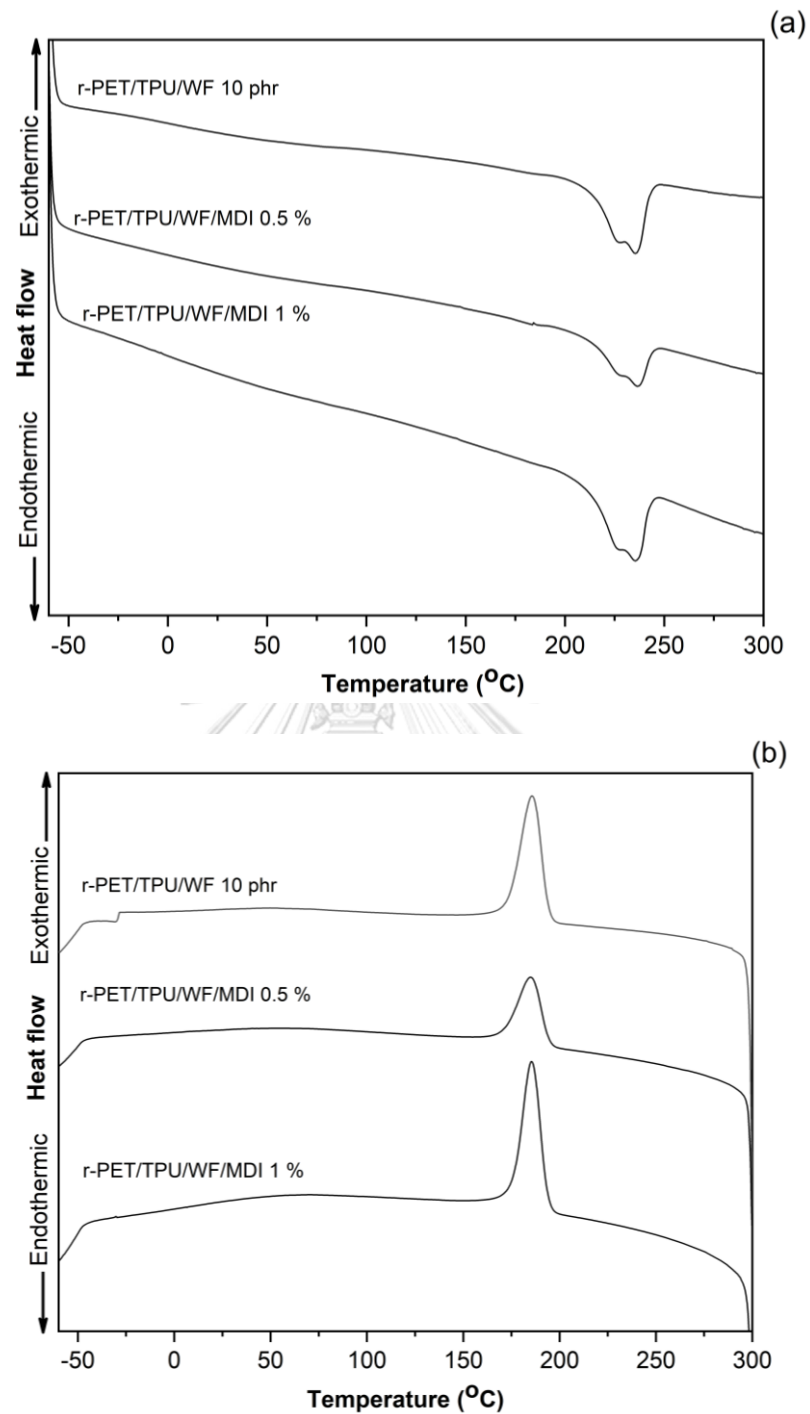




รูปที่ 4.21 สมบัติทางความร้อน: (a) ขั้นตอนการให้ความร้อนในครั้งที่ 2 และ (b) ขั้นตอนการเย็นตัวของคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.21(a) แสดงผลที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนในครั้งที่ 2 พบว่าคอมพอสิต r-PET/TPU/WF ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr พบค่า T_g สองค่า และเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ WF แสดงถึงความเข้ากันได้ไม่ดีระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์ และ WF ซึ่งจะสังเกตได้ว่าการผสม WF ในพอลิเมอร์เมทริกซ์จะปรากฏฟีกการหลอมผลึกแบบสองขั้น และมีค่าลดลงตามปริมาณ WF ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่า X_c ของ r-PET มีค่าลดลง (31.5%, 27.8% และ 25.6% ตามลำดับ) เนื่องจากอนุภาค WF ที่มีขนาดใหญ่ และมีความแข็งตึงมากจึงขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลทำให้การจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์เมทริกซ์ในคอมพอสิตยากขึ้น

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.21(b) แสดงผลที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัว พบว่า T_c ของ r-PET ในคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr มีอุณหภูมิที่สูงกว่าพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU 70/30 wt% (154.4 องศาเซลเซียส) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคอมพอสิตสามารถเกิดผลึกได้เร็วขึ้น เนื่องจากการเติม WF ลงไปจะส่งเสริมการเกิดผลึกได้มากขึ้น แต่เมื่อเติมในปริมาณที่มากขึ้นจะส่งผลให้ความเป็นผลึกลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจาก WF ไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของ r-PET ในการเกิดผลึก ซึ่งสามารถยืนยันได้จากค่า X_c



รูปที่ 4.22 สมบัติทางความร้อน: (a) ขั้นตอนการให้ความร้อนในครั้งที่ 2 และ (b) ขั้นตอนการเย็นตัวของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.22(a) แสดงผลที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนในครั้งที่ 2 พบว่า T_g ของ r-PET ในคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 และ 1 wt% พบค่า T_g สองค่า และมีค่าที่เพิ่มขึ้นมากกว่าคอมพอสิต 70/30/10

r-PET/TPU/WF (58.8 องศาเซลเซียส) นอกจากนี้ยังพบว่า การเติม MDI ในพอลิเมอร์เมทริกซ์จะปรากฏพีการหลอมผลึกแบบสองขั้น โดยมีค่า T_{m1} , T_{m2} ลดลงเล็กน้อยอย่างไม่มีความสำคัญ อย่างไรก็ตาม X_c ของคอมพอสิตลดลง หากแต่มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ MDI เนื่องจาก MDI สามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยขยายสายโซ่จึงไปช่วยต่อสายโซ่พอลิเมอร์เมทริกซ์ให้ยาวขึ้น ทำให้การจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์เมทริกซ์ในคอมพอสิตจึงยากขึ้น ส่งผลให้ค่า X_c ของคอมพอสิตจึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณ MDI ที่เพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.22(b) แสดงผลที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัว พบว่า T_c ของ r-PET ในคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 wt% และ 1 wt% มีอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปไม่ต่างจากคอมพอสิตจากผงไม่มากนัก หากแต่เพิ่มขึ้นตามปริมาณ MDI แสดงให้เห็นว่า MDI ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยประสานส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์ และ WF ดีขึ้น

4.6 เสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability)

ผลการวิเคราะห์หาเสถียรภาพทางความร้อนของ TPU, r-PET และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU, คอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr และคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 และ 1 wt% ตามลำดับด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 ซึ่งประกอบไปด้วยอุณหภูมิเริ่มสลายตัว (T_{onset}), อุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด (T_{max}), อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว (T_{endset}) และปริมาณเถ้าที่เหลืออยู่ (%char)

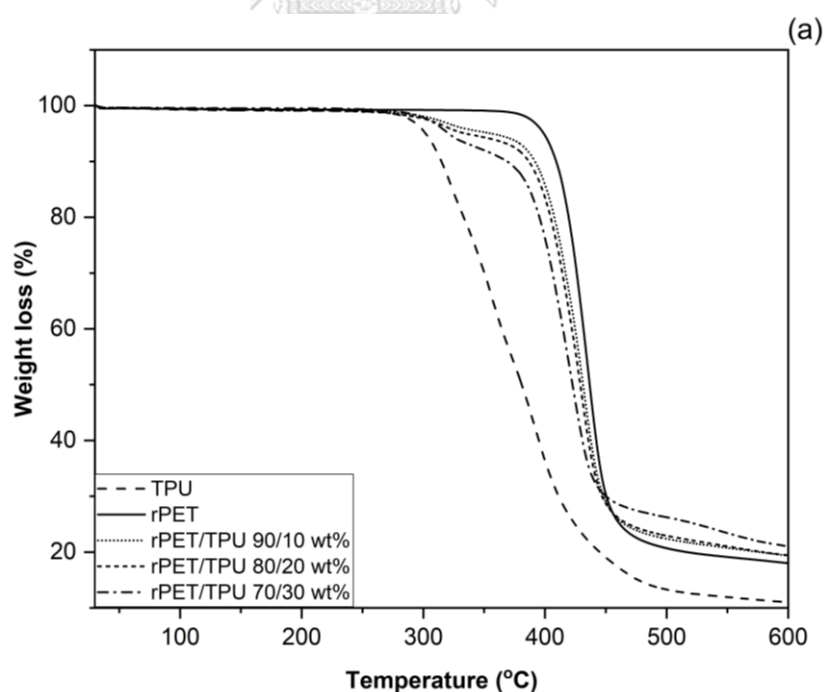
ตารางที่ 4.3 เสถียรภาพทางความร้อนของ TPU, r-PET, WF และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วนต่างๆ

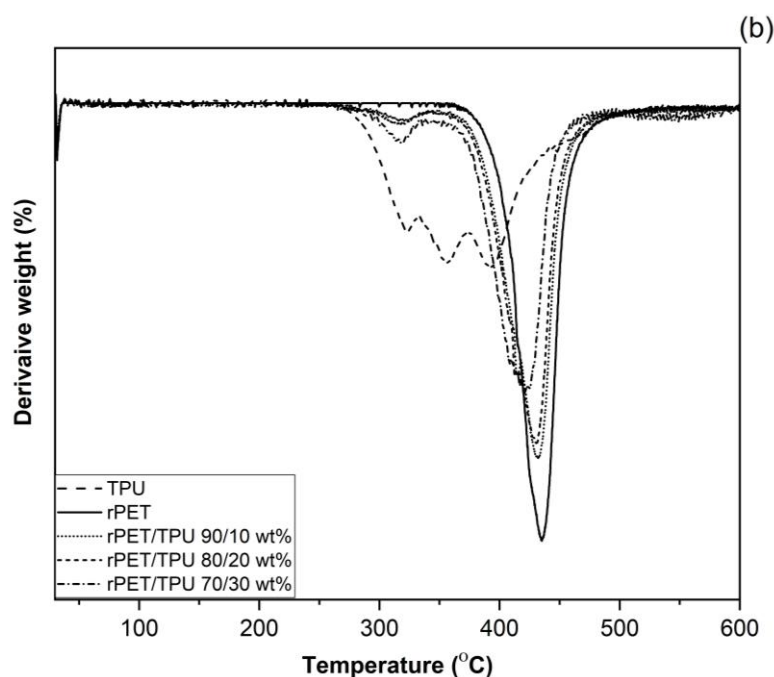
Sample	T_{onset1} (°C)	$T_{endset1}$ (°C)	T_{max1} (°C)	T_{max2} (°C)	T_{max3} (°C)	Char (%)
TPU	323.7	414.2	325.4	358.4	394.6	25.5
r-PET	415.0	452.1	437.9	-	-	21.4
WF	315.8	379.5	366.9	-	-	24.2
r-PET/TPU (wt%/wt%)						
90/10	406.9	448.4	322.0	434.3	-	20.6
80/20	404.9	445.6	318.6	432.6	-	21.7
70/30	395.7	440.6	316.8	424.8	-	27.2

ตารางที่ 4.4 เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอลิเมอร์ 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF และคอมพอลิเมอร์ 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ

Sample	T_{onset1} (°C)	T_{endset1} (°C)	T_{max1} (°C)	T_{max2} (°C)	T_{max3} (°C)	Char (%)
r-PET/TPU/WF (wt%/wt%/phr)						
70/30/10	402.5	442.7	321.9	356.9	426.3	30.3
70/30/20	384.7	441.7	313.9	355.7	423.4	30.6
70/30/30	372.3	441.0	321.9	354.9	420.6	32.8
r-PET/TPU/WF/MDI (wt%/wt%/phr/wt%)						
70/30/10/0.5	389.1	441.6	314.6	356.3	424.4	26.8
70/30/10/1	390.6	442.1	316.1	358.0	425.8	26.1

จากรูปที่ 4.23, รูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25 แสดง TGA เทอร์โมแกรม (a) และ DTG เทอร์โมแกรม (b) ของ TPU, r-PET, พอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU, คอมพอลิเมอร์ 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr และคอมพอลิเมอร์ 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 และ 1 wt% ตามลำดับ

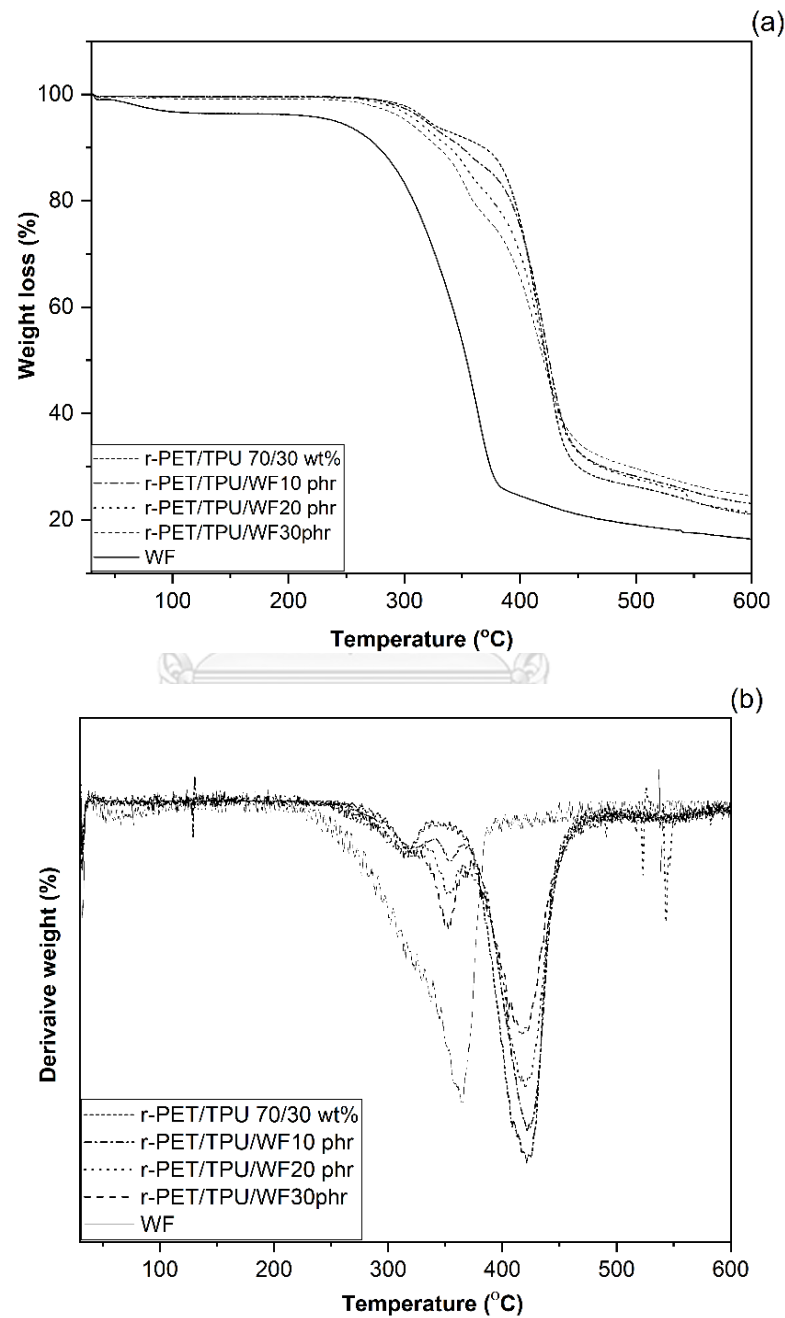




รูปที่ 4.23 (a) TGA เทอร์โมแกรม (b) DTG เทอร์โมแกรมของ TPU, r-PET และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วนต่างๆ

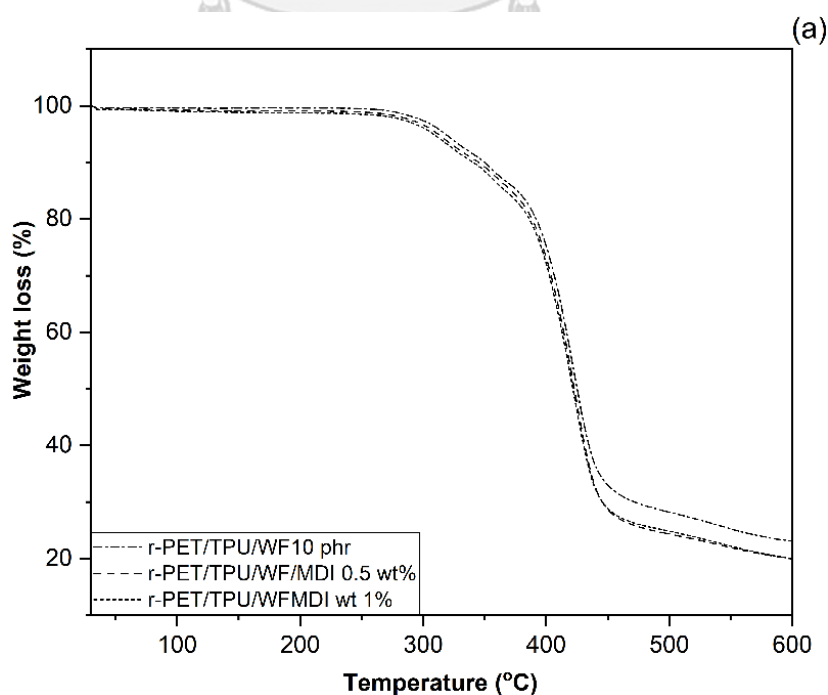
จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.23(a) และ (b) พบว่า TPU มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 323.7–414.2 องศาเซลเซียส โดยมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด 3 ชั้น โดยชั้นที่ 1 เป็นการสลายตัวของหมู่ไดไอโซไซยาเนต (diisocyanates group) ในส่วนของสายโซ่ที่แข็ง (hard segment) ที่ 325.4 องศาเซลเซียส สำหรับชั้นที่ 2 เป็นการสลายตัวของหมู่พอลิออล (polyol groups) ในส่วนของสายโซ่ที่นิ่ม (soft segment) ที่ประมาณ 358.4 องศาเซลเซียส และชั้นที่ 3 เป็นการสลายตัวของปริมาณถ่าน (char) ที่ประมาณ 394.6 องศาเซลเซียส ในขณะที่ r-PET มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 415.0–452.1 องศาเซลเซียส โดยมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด 1 ชั้น เป็นการสลายตัวของพอลิเมอร์ในสายโซ่หลักที่ประมาณ 437.9 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า r-PET มีเสถียรภาพทางความร้อนมากกว่า TPU เมื่อผสม r-PET กับ TPU พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด 2 ชั้น โดยชั้นที่ 1 เป็นการสลายตัวของ TPU และชั้นที่ 2 เป็นการสลายตัวของ r-PET โดยพอลิเมอร์ผสม 90/10 r-PET/TPU มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 406.9–448.4 องศาเซลเซียส โดยมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดในชั้นที่ 1 อยู่ที่ประมาณ 322.0 องศาเซลเซียส และชั้นที่ 2 ประมาณ 434.3 องศาเซลเซียส สำหรับพอลิเมอร์ผสม 80/20 r-PET/TPU มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 404.9–445.6 องศาเซลเซียส โดยมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดในชั้นที่ 1 อยู่ที่ประมาณ 318.6 องศาเซลเซียส และชั้นที่ 2 ประมาณ 432.6 องศาเซลเซียส และสำหรับพอลิเมอร์ผสม 70/30 r-PET/TPU มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ

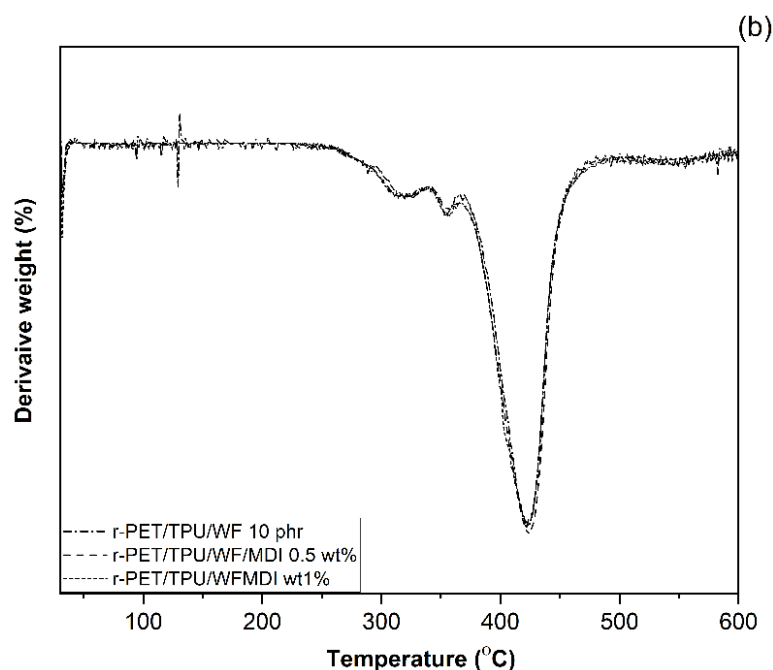
395.7–440.6 องศาเซลเซียส โดยมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดในขั้นที่ 1 อยู่ที่ประมาณ 316.8 องศาเซลเซียส และขั้นที่ 2 ประมาณ 424.8 องศาเซลเซียส และยังพบว่าอุณหภูมิการสลายตัว และอุณหภูมิสลายสูงสุดตัวของพอลิเมอร์ผสมลดลงตามปริมาณของ TPU ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าพอลิเมอร์ผสมมีเสถียรภาพทางความร้อนลดลง อย่างไรก็ตามปริมาณเถ้าขาร์ของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณ TPU ซึ่งเกิดจากเถ้าขาร์ที่ไม่สลายตัวของพอลิเมอร์เมทริกซ์



รูปที่ 4.24 (a) TGA เทอร์โมแกรม (b) DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.24(a) และ (b) พบว่า WF มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 315.8–379.5 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่ 366.9 องศาเซลเซียส และเมื่อผสม WF ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr ในพอลิเมอร์ผสม 70/30 r-PET/TPU พบว่าคอมพอลิเมอร์มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด 3 ชั้น โดยชั้นที่ 1 เป็นการสลายตัวของ TPU สำหรับชั้นที่ 2 เป็นการสลายตัวของ WF และสำหรับชั้นที่ 3 เป็นการสลายตัวของ r-PET โดยคอมพอลิเมอร์ 70/30/10 r-PET/TPU/WF มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 402.5–442.7 องศาเซลเซียส โดยมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดในชั้นที่ 1 อยู่ที่ประมาณ 321.9 องศาเซลเซียส สำหรับชั้นที่ 2 ประมาณ 356.9 องศาเซลเซียส และชั้นที่ 3 ประมาณ 426.3 องศาเซลเซียส ส่วนคอมพอลิเมอร์ 70/30/20 r-PET/TPU/WF มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 384.7–441.7 องศาเซลเซียส โดยมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดในชั้นที่ 1 อยู่ที่ประมาณ 313.9 องศาเซลเซียส สำหรับชั้นที่ 2 ประมาณ 355.7 องศาเซลเซียส และชั้นที่ 3 ประมาณ 423.4 องศาเซลเซียส และส่วนคอมพอลิเมอร์ 70/30/30 r-PET/TPU/WF มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 372.3–441.0 องศาเซลเซียส โดยมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดในชั้นที่ 1 อยู่ที่ประมาณ 312.9 องศาเซลเซียส สำหรับชั้นที่ 2 ประมาณ 354.9 องศาเซลเซียส และชั้นที่ 3 ประมาณ 420.6 องศาเซลเซียส และพบว่าคอมพอลิเมอร์มีอุณหภูมิการสลายตัว และมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม 70/30 r-PET/TPU เนื่องจาก WF มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์เมทริกซ์ และพบว่าคอมพอลิเมอร์ทุกอัตราส่วนมีปริมาณเถ้าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม 70/30 r-PET/TPU ซึ่งเกิดจากเถ้าคาร์บอนที่ไม่สลายตัวของพอลิเมอร์เมทริกซ์และผงไม้



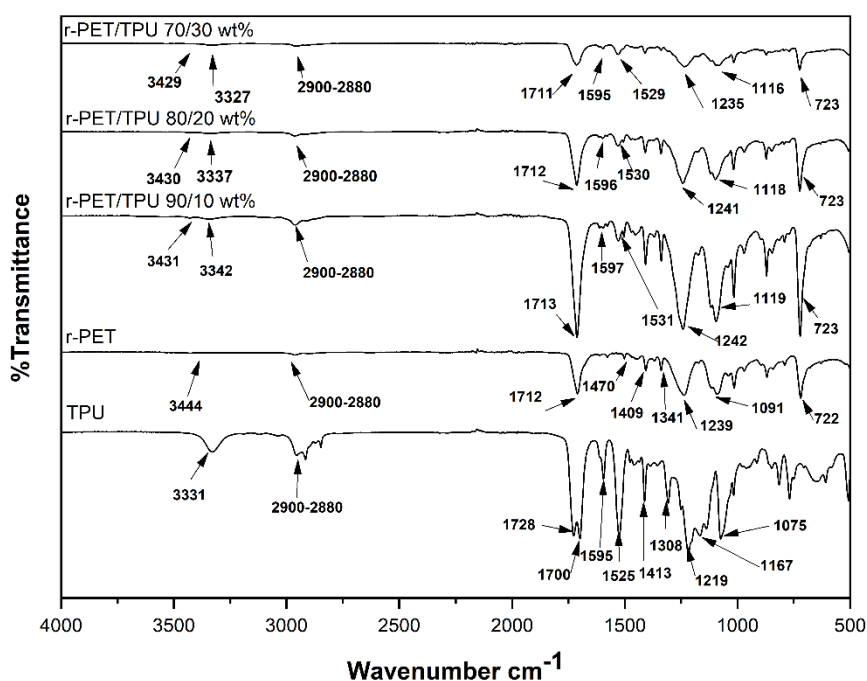


รูปที่ 4.25 (a) TGA เทอร์โมแกรม (b) DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.25(a) และ (b) พบว่า คอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 และ 1 wt% มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด 3 ชั้น โดยชั้นที่ 1 เป็นการสลายตัวของ TPU สำหรับชั้นที่ 2 เป็นการสลายตัวของ WF และสำหรับชั้นที่ 3 เป็นการสลายตัวของ r-PET โดยคอมพอสิตที่เติม MDI 0.5 wt% มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 389.1–441.6 องศาเซลเซียส โดยมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดในชั้นที่ 1 อยู่ที่ประมาณ 314.6 องศาเซลเซียส สำหรับชั้นที่ 2 ประมาณ 356.3 องศาเซลเซียส และชั้นที่ 3 ประมาณ 424.4 องศาเซลเซียส ส่วนคอมพอสิต MDI 1 wt% มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 390.6–442.1 องศาเซลเซียส โดยมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดในชั้นที่ 1 อยู่ที่ประมาณ 316.1 องศาเซลเซียส สำหรับชั้นที่ 2 ประมาณ 358.0 องศาเซลเซียส และชั้นที่ 3 ประมาณ 425.8 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามอุณหภูมิการสลายตัว และอุณหภูมิสลายตัวสูงสุดลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจาก MDI ช่วยทำให้อันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์ และ WF ดีขึ้น จึงทำให้เกิดการสลายตัวที่ต่อเนื่อง จึงทำให้อุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดมีค่าต่ำกว่าคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF นอกจากนี้พบว่าปริมาณเถ้าขารของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่าคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF เนื่องจาก MDI ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมสานจึงทำให้พอลิเมอร์เมทริกซ์ และผงไม้เข้ากันได้ดีการสลายตัวจึงเกิดได้มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณเถ้าขารลดลง

4.7 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (functionality)

จากรูปที่ 4.26, รูปที่ 4.27 และรูปที่ 4.28 แสดงผลการวิเคราะห์สเปกตรัม ATR-FTIR และค่าความยาวคลื่นของแต่ละหมู่ฟังก์ชันของ TPU, r-PET, พอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU, คอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr และคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 และ 1 wt% โดยจะวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีในช่วงความยาวคลื่นประมาณ $4,000-500\text{ cm}^{-1}$



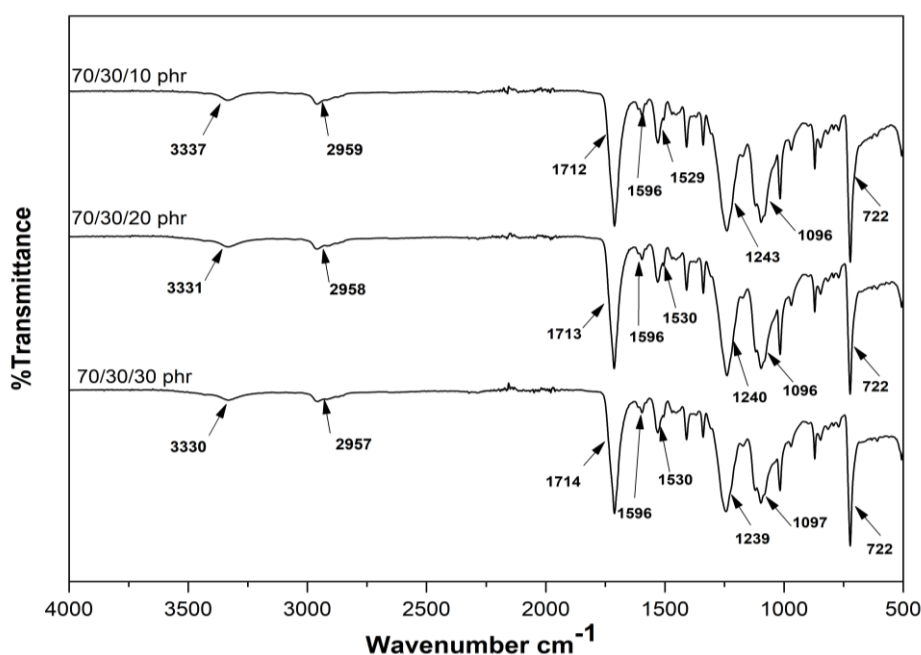
รูปที่ 4.26 สเปกตรัม ATR-FTIR ของ TPU, r-PET และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัม ATR-FTIR ของ TPU ปรากฏพีกของ N-H stretching ที่ 3331 cm^{-1} และปรากฏพีกการดัดกลืนของ CH_2 และ CH_3 stretching ที่ $2930-2869\text{ cm}^{-1}$ และที่ 1728 cm^{-1} ตามลำดับ ซึ่งจะปรากฏพีกของ C=O (carbonyl group) stretching ที่ 1700 cm^{-1} นอกจากนี้ยังพบว่าจะปรากฏพีกสำคัญคือ N-H bending ที่ 1525 cm^{-1} และ aromatic C-C stretching ที่ 1595 cm^{-1} ตามลำดับ ซึ่งจะปรากฏพีก C=N stretching ที่ 1308 cm^{-1} นอกจากนี้ยังปรากฏ -NH ที่ 1167 cm^{-1} และพีกของ C-O-C stretching ที่ 1075 cm^{-1}

จากรูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัม ATR-FTIR ของ r-PET ปรากฏพีกของไฮดรอกซิล (OH group) ที่ 3444 cm^{-1} และปรากฏพีกของ C-H, Symmetrical stretching ที่ $2900-2880$

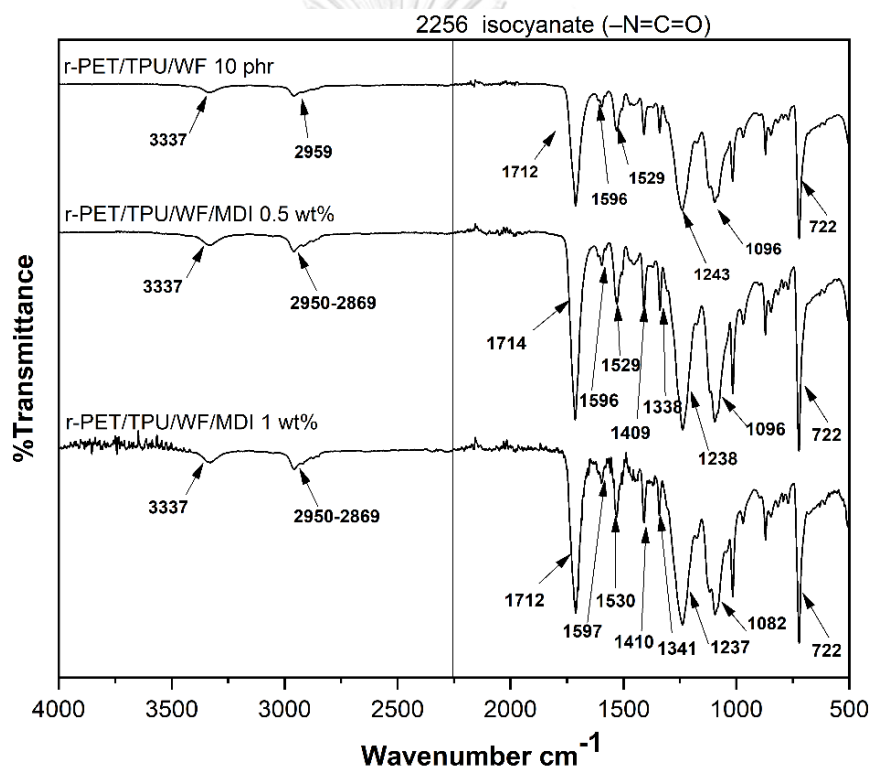
cm^{-1} ซึ่งจะปรากฏ C=O stretching ของหมู่คาร์บอกซิล (carboxylic) ที่ 1712 cm^{-1} โดยจะปรากฏพีกที่สำคัญของ C–O stretching ซึ่งเกิดการเปลี่ยนรูป (deformation) ของหมู่ไฮดรอกซิล (OH group), bending และการสั่นของสายโซ่ ethylene glycol ที่ 1470 cm^{-1} , 1409 cm^{-1} และ 1340 cm^{-1} ตามลำดับ และพบว่าจะปรากฏพีกของหมู่ Terephthalate ($\text{OOC}_6\text{H}_4\text{COO}$) ที่ 1239 cm^{-1} นอกจากนี้ยังปรากฏพีกของหมู่ methylene (CH_2) ที่ 1091 cm^{-1} และพีกของหมู่เอสเทอร์ (ester) และวงเบนซีน (benzene rings) ที่ 722 cm^{-1} ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.26 พบว่า ผลการวิเคราะห์สเปกตรัม ATR-FTIR ของพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr ปรากฏพีกของ N–H stretching ในสเปกตรัม TPU และพีกไฮดรอกซิล (OH group) ในสเปกตรัม r-PET ที่ประมาณ $3429\text{--}3431 \text{ cm}^{-1}$ และ $3342\text{--}3327 \text{ cm}^{-1}$ ตามลำดับ จะสังเกตเห็นได้ว่าความเข้มของพีกเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ TPU ที่เพิ่มขึ้น และจะพบว่า จะปรากฏพีกของคาร์บอนิล C=O stretching ที่ $1711\text{--}1713 \text{ cm}^{-1}$ จะสังเกตเห็นได้ว่าความเข้มของพีกลดลงตามปริมาณของ r-PET ที่ลดลง อย่างไรก็ตามจะปรากฏพีกของ N–H bending และ aromatic C–C stretching ที่ $1595\text{--}1597 \text{ cm}^{-1}$ บ่งชี้ได้ว่าพอลิเมอร์ผสมมี TPU ผสมอยู่ โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าความเข้มของพีกจะลดลงเมื่อปริมาณ TPU เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเกิดอัตราปฏิกิริยาระหว่างหมู่ยูรีเทนใน TPU กับหมู่คาร์บอกซิลิกใน r-PET นอกจากนี้ยังพบว่า พีกของหมู่ terephthalate ($\text{OOC}_6\text{H}_4\text{COO}$) ที่ $1242\text{--}1235 \text{ cm}^{-1}$ ในพอลิเมอร์ผสมมีความเข้มลดลงตามปริมาณของ r-PET ที่ลดลง จึงสามารถบ่งชี้ได้ว่า r-PET กับ TPU สามารถเข้ากันได้



รูปที่ 4.27 สเปกตรัม ATR-FTIR ของคอมพอลิเมอร์ 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.27 พบว่า ผลการวิเคราะห์สเปกตรัม ATR-FTIR ของคอมพอลิเมอร์ 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน 10-30 phr ปรากฏการเกิด N-H stretching ที่ $3330-3337\text{ cm}^{-1}$ ดังเช่นที่พบใน TPU หากแต่มีปริมาณความเข้มของพีกที่ลดลงตามปริมาณของ WF เพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะหมู่ N-H stretching ใน TPU เกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลใน WF นอกจากนี้ยังพบว่า พีกหมู่ไฮดรอกซิล -OH group ที่ $3445-3447\text{ cm}^{-1}$ และพีกของ C=O (carbonyl group) stretching ที่ $1712-1714\text{ cm}^{-1}$ มีความเข้มของพีกที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณ WF เนื่องจากโครงสร้างของเซลลูโลส (cellulose) ประกอบไปด้วยโมเลกุลของกลูโคส (glucose) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นหมู่ฟังก์ชันหลักมาเรียงต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) จึงส่งผลให้พีก C=O (carbonyl group) stretching เพิ่มขึ้นตามปริมาณ WF ที่เพิ่มมากขึ้น



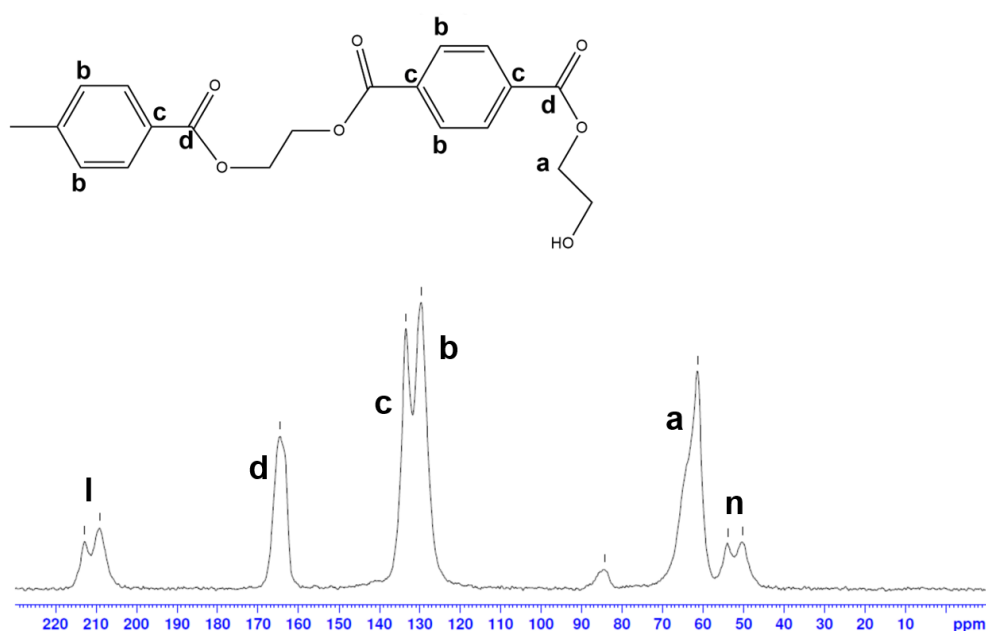
รูปที่ 4.28 สเปกตรัม ATR-FTIR ของคอมพอลิเมอร์ 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI อัตราส่วน 0.5 และ 1 wt%

จากรูปที่ 4.28 พบว่า ผลจากการวิเคราะห์สเปกตรัม ATR-FTIR ของคอมพอลิเมอร์ 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 wt% และ 1 wt% ปรากฏการเกิดพีกของหมู่ไอโซไซยาเนต (isocyanate group, $-N=C=O$) ของคอมพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน MDI 1 wt% ที่ 2256 cm^{-1} เนื่องจากโครงสร้างของ MDI ประกอบไปด้วยหมู่ไอโซไซยาเนต หากแต่ไม่พบในคอมพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน MDI 0.5 wt% เนื่องจากมีอัตราส่วน MDI ที่น้อยเกินไป จึงทำให้ MDI

เกิดอันตรกิริยาของกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ทั้งหมด นอกจากนี้ยังปรากฏพีคของหมู่เอไมด์ (amide group, $-\text{NH}-\text{CO}-$) ที่ $1529-1530\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่าการเติม MDI สามารถเกิดอันตรกิริยาในคอมพอสิตได้

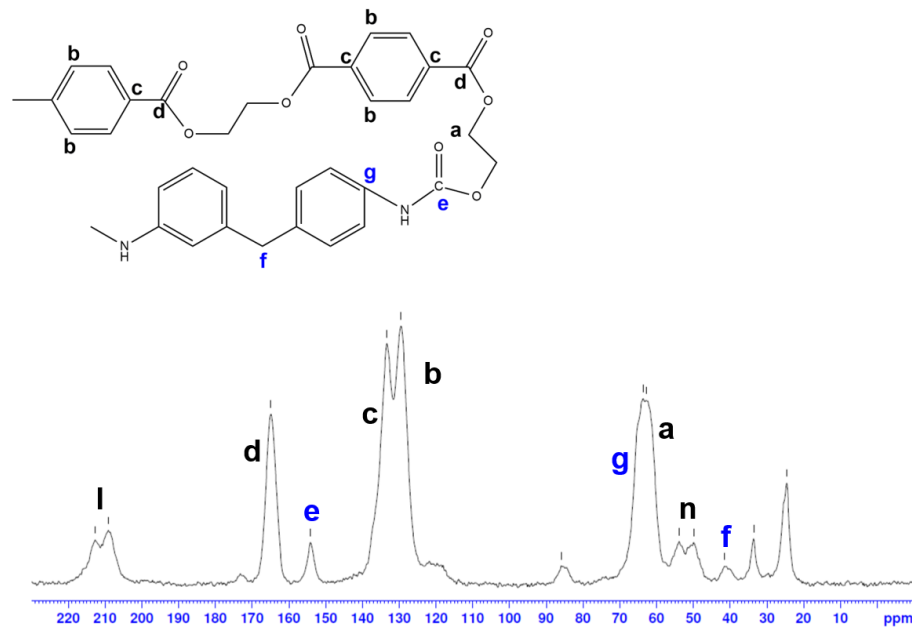
4.8 วิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล (molecular structures)

จากรูปที่ 4.29, รูปที่ 4.30, รูปที่ 4.31 และรูปที่ 4.32 แสดงสเปกตรัม ^{13}C NMR ของ r-PET, พอลิเมอร์ผสม 70/30 r-PET/TPU, คอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU/WF ด้วย WF ที่อัตราส่วน 10 phr และคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI 1 wt% ตามลำดับ โดยใช้เครื่องทดสอบนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปีทดสอบที่ 400 MHz



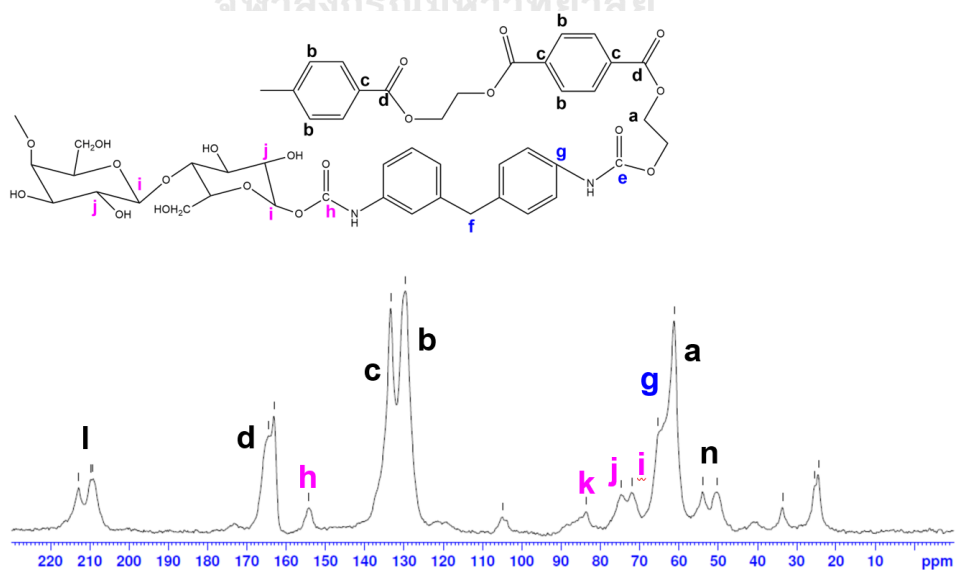
รูปที่ 4.29 สเปกตรัม ^{13}C NMR ของ r-PET

จากรูปที่ 4.29 พบว่า สเปกตรัม ^{13}C NMR ของ r-PET ปรากฏ 6 สัญญาณ บ่งชี้ว่าพบสัญญาณคาร์บอนในหมู่เมทิลีน (methylene group) และหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ที่ตำแหน่ง n เท่ากับ 53.9 และ 50.3 ppm ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบสัญญาณคาร์บอนในหมู่คีโตที่ตำแหน่ง l เท่ากับ 212.8 และ 209.1 ppm ซึ่งเกิดจากสายโซ่ที่ถูกตัดของ r-PET และจะพบสัญญาณคาร์บอนในหมู่เมทิลีนที่ใกล้กับหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl, $-\text{COO}-$) ที่ตำแหน่ง a เท่ากับ 61.3 ppm และพบสัญญาณคาร์บอนในวงอะโรมาติกที่ต่อกับไฮโดรเจน และหมู่คาร์บอกซิลที่ตำแหน่ง b และ c เท่ากับ 129.6 และ 133.4 ppm ที่ตำแหน่ง b และ c ตามลำดับ และยังพบสัญญาณคาร์บอนในหมู่คาร์บอกซิลที่ตำแหน่ง d เท่ากับ 164.5 ppm



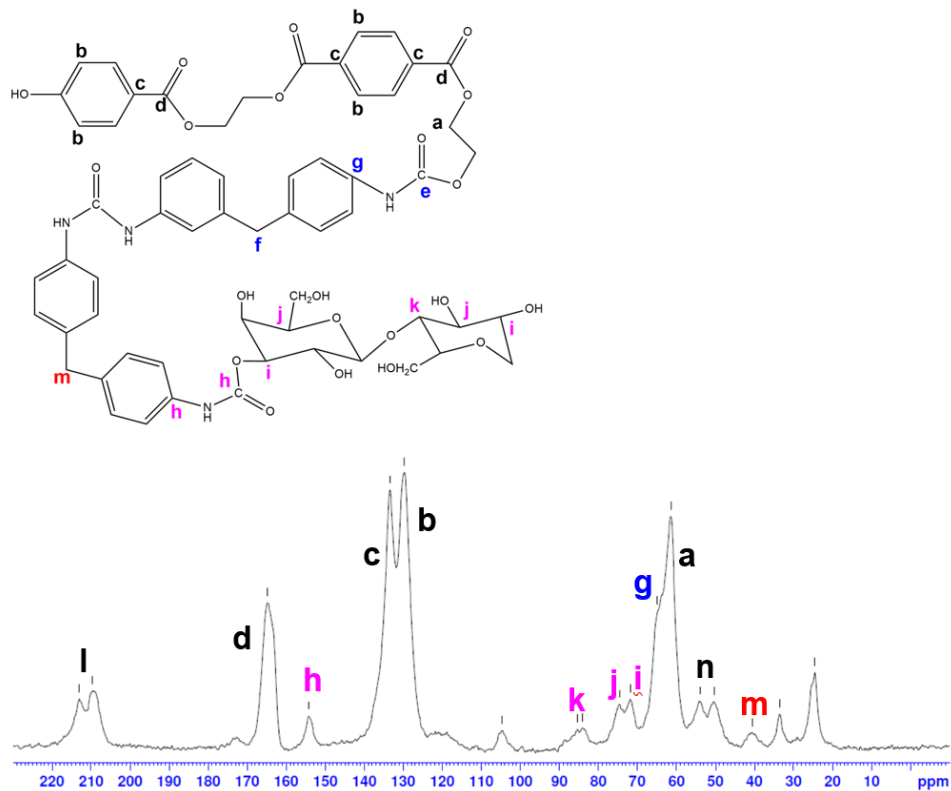
รูปที่ 4.30 สเปกตรัม ^{13}C NMR ของพอลิเมอร์ผสม 70/30 r-PET/TPU

จากรูปที่ 4.30 พบว่า เมื่อผสม TPU ปราบกฏสเปกตรัม ^{13}C NMR ที่สำคัญเพิ่มเติม โดยพบสัญญาณคาร์บอนในหมู่เมทิลเท่ากับ 24.5 และ 33.5 ppm นอกจากนี้ พบสัญญาณคาร์บอนในหมู่อะลิฟาติก (aliphatic) ที่ตำแหน่ง f เท่ากับ 41.3 ppm และยังพบสัญญาณคาร์บอนในหมู่เอไมด์ (amide) ที่ตำแหน่ง e เท่ากับ 154.1 ppm และสัญญาณคาร์บอนในวงอะโรมาติกที่ต่อกับหมู่ไอโซไซยาเนตที่ตำแหน่ง g เท่ากับ 63.6 ppm เพิ่มเติมจากสเปกตรัม ^{13}C NMR ของ r-PET ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่ามี TPU อยู่ภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 4.31 สเปกตรัม ^{13}C NMR ของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF

จากรูปที่ 4.31 พบว่า เมื่อเติม WF ปราบกฏสเปกตรัม ^{13}C NMR ที่สำคัญเพิ่มเติม โดยพบสัญญาณคาร์บอนที่เกิดอันตรกิริยากับหมู่เอไมด์ที่ตำแหน่ง h เท่ากับ 163.1 ppm และพบคาร์บอนในหมู่เมทอกซี (methoxyl groups, OMe) ซึ่งเป็นส่วนประกอบภายในโครงสร้างของลิกนินที่ตำแหน่ง i และ j เท่ากับ 72.1 และ 74.7 และพบสัญญาณคาร์บอนในฟีนอลิกอะโรมาติก (phenolic) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และสัญญาณคาร์บอนในหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) ที่ตำแหน่ง k เท่ากับ 65.3 เพิ่มเติมจากสเปกตรัม ^{13}C NMR ของพอลิเมอร์ผสม 70/30 r-PET ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่ามี WF ผสมอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์

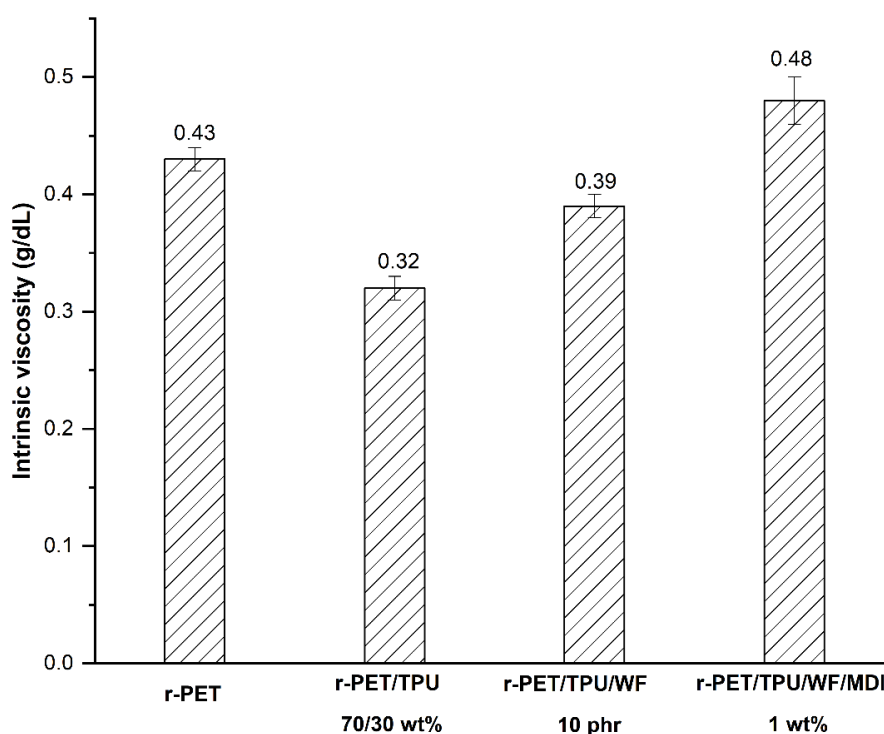


รูปที่ 4.32 สเปกตรัม ^{13}C NMR ของคอมพอสิต 70/30/10/1 r-PET/TPU/WF/MDI

จากรูปที่ 4.32 พบว่า เมื่อเติม MDI ปราบกฏสเปกตรัม ^{13}C NMR ที่สำคัญเพิ่มเติม โดยพบสัญญาณคาร์บอนที่สูงขึ้นในหมู่เมทิลเท่ากับ 24.4 ppm อีกทั้งยังพบสัญญาณคาร์บอนของหมู่ไดไอโซไซยาเนตซึ่งเป็นส่วนประกอบของ MDI ที่ตำแหน่ง m เท่ากับ 40.5 ppm ซึ่งอาจเกิดจากการซ้อนทับ (overlapping) ของสัญญาณคาร์บอนในหมู่เมทิลกับคาร์บอนในโครงสร้างอะโรมาติก และยังพบสัญญาณคาร์บอนในวงอะโรมาติกเท่ากับ 129.7 และ 133.4 เพิ่มสูงขึ้น และพบสัญญาณคาร์บอนในหมู่ไอโซไซยาเนตสูงขึ้นเท่ากับ 154.2 ppm เพิ่มเติมจากสเปกตรัม ^{13}C NMR ของ r-PET ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถบ่งชี้ได้ว่ามี MDI ผสมอยู่ และเกิดอันตรกิริยากับพอลิเมอร์เมทริกซ์

4.9 ความหนืด (intrinsic viscosity, IV)

จากรูปที่ 4.33 แสดงผลการทดสอบวัดค่าความหนืดของ r-PET, พอลิเมอร์ผสม 70/30 r-PET/TPU, คอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU/WF ด้วย WF ที่อัตราส่วน 10 phr และคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI 1 wt% ตามมาตรฐาน ASTM D4603-3 โดยใช้เครื่องวัดความหนืด (ubbelohde viscometer) ในการทดสอบ



รูปที่ 4.33 ความหนืดของ r-PET, พอลิเมอร์ผสม 70/30 r-PET/TPU, คอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ด้วย WF และคอมพอสิต 70/30/10/1 r-PET/TPU/WF/MDI ที่เติม MDI

จากรูปที่ 4.33 พบว่า ความหนืดของ r-PET มีค่าเท่ากับ 0.43 กรัม/เดซิลิตร เมื่อทำการผสม TPU ในอัตราส่วน r-PET/TPU 70/30 wt% พบว่า ความหนืดมีค่าลดลงที่ 0.32 กรัม/เดซิลิตร และเมื่อผสม WF ในอัตราส่วน 10 phr พบว่าความหนืดของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.39 กรัม/เดซิลิตร และเมื่อเติม MDI 1 wt% ค่าความหนืดของคอมพอสิตเพิ่มขึ้นที่ 0.48 กรัม/เดซิลิตร และมีค่าความหนืดที่สูงกว่า r-PET ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า WF และ MDI สามารถช่วยเพิ่มความหนืดให้กับพอลิเมอร์ ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าการเติม MDI สามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยขยายสายโซ่ให้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลให้มีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่นำมาใช้ใหม่ (r-PET) ด้วยการเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) คอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr และคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 wt% และ 1 wt% ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ และขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. พอลิเมอร์ผสมมีดรรชนีการหลอมไหลมากขึ้นตามปริมาณ TPU ที่มากขึ้น และเมื่อเติมสารตัวเติม WF ลงในพอลิเมอร์ผสม 70/30 r-PET/TPU ทำให้คอมพอสิตมีดรรชนีการหลอมไหลลดลง โดยเฉพาะเมื่อเติม MDI ลงในคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ทำให้คอมพอสิตมีดรรชนีการหลอมไหลลดลง เนื่องจาก MDI ช่วยเพิ่มความหนืด และเป็นตัวช่วยผสมให้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ และ WF

2. การเติม TPU ลงใน r-PET ทำให้ความทนแรงดึง ยังสัมพันธ์ของพอลิเมอร์ผสมลดลง แต่ความทนแรงกระแทก การยืดตัว ณ จุดขาด และความทนแรงดัดโค้งสูงขึ้นทุกอัตราส่วนเมื่อเปรียบเทียบกับ r-PET แสดงให้เห็นว่า TPU ช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความเปราะที่เกิดจากการผ่านการใช้งานมาแล้วของ r-PET โดยเฉพาะพอลิเมอร์ผสม 70/30 r-PET/TPU ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีความทนแรงกระแทกสูงที่สุด จึงนำไปเตรียมเป็นคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr

3. คอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr ทุกอัตราส่วน มีค่ายังสัมพันธ์เพิ่มขึ้นเมื่อผสม WF แต่ความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 70/30 r-PET/TPU อย่างไรก็ตามยังสัมพันธ์ และการยืดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ทุกอัตราส่วนยังคงมีค่าสูงกว่า r-PET โดยคอมพอสิตด้วย WF ที่อัตราส่วน 10 phr มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด จึงนำไปเตรียมเป็นคอมพอสิต r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 และ 1 wt%

4. คอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 และ 1 wt% ทุกอัตราส่วนมีค่าความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง ยังสัมพันธ์ ความทนแรงดัดโค้ง มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF อย่างไรก็ตามการยืดตัว ณ จุดขาด

ของคอมพอสิตลดลงเล็กน้อย จึงสามารถบ่งบอกได้ว่าการเติม MDI สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้กับคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ได้

5. การเติม TPU ลงใน r-PET ในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ r-PET ในพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วน มีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก และระดับความเป็นผลึกที่ลดลง นอกจากนี้ในคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 phr ทุกอัตราส่วน พบว่ามีอุณหภูมิหลอมเหลว และอุณหภูมิการเกิดผลึกที่สูงขึ้น หากแต่มีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว และระดับความเป็นผลึกที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 70/30 r-PET/TPU ในส่วนของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 และ 1 wt% พบว่ามีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึกไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF

6. การเติม TPU ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีเสถียรภาพทางความร้อนลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการใส่สารตัวเติม WF ลงในพอลิเมอร์ผสม 70/30 r-PET/TPU ทำให้มีเสถียรภาพทางความร้อนลดลง และเมื่อเติม MDI ในคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ทำให้เสถียรภาพทางความร้อนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

7. พอลิเมอร์ผสมมีความหนืดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ r-PET เมื่อเติม WF พบว่าความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้น และจะเพิ่มสูงสุดในคอมพอสิตที่เติม MDI อัตราส่วน 1 wt%

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทดลองโดยใช้สารช่วยขยายสายโซ่ในอัตราส่วนที่มากขึ้น เพื่อช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ และสมบัติทางกลให้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้มากยิ่งขึ้น
2. ควรตัดแปรพื้นผิวของ WF ด้วยสารคู่ควบ (coupling agent) เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติม และพอลิเมอร์เมทริกซ์
3. ควรทดลองกับสารช่วยขยายสายโซ่ชนิดอื่นที่มีหมู่ฟังก์ชันในการทำอันตรกิริยาที่หลากหลาย
4. ควรเพิ่มสูตรการเตรียมคอมพอสิตโดยทำการเติม MDI เพียงอย่างเดียว เพื่ออาจส่งผลให้คอมพอสิตที่ได้มีสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนที่ดีกว่าการเติม WF ลงไปด้วย

บรรณานุกรม

- [1] Dominici, F., Sarasini, F., Luzi, F., Torre, L. and Puglia, D. Thermomechanical and Morphological Properties of Poly(ethylene terephthalate)/Anhydrous Calcium Terephthalate Nanocomposites. Polymers (Basel) 12(2) (2020): 1-15.
- [2] Yao, Z., Zhang, X., Ge, Z., Jin, Z., Han, J. and Pan, X. Mix Proportion Design and Mechanical Properties of Recycled PET Concrete. Journal of Testing and Evaluation 43(2) (2015): 344-352.
- [3] Jankauskaite, V. Recycled Poly(ethylene Terephthalate) Waste for Different Application Solutions. Environmental Research, Engineering and Management 72(1) (2016): 5-7.
- [4] Virginija, J., Gintaras, M. and Ramunas, L. Poly(ethylene terephthalate) Waste Recycling and Application Possibilities: a Review. Materials science 14 (2008): 119-127.
- [5] Adel, E., Khmais, Z., Omar, H. and Abdelaziz, L. Processing and Characterization of Recycled Poly(ethylene terephthalate) Polymer Engineering Science (2020): 1-22.
- [6] Awaja, F. and Pavel, D. Recycling of PET. European Polymer Journal 41(7) (2005): 1453-1477.
- [7] Srithep, Y., Javadi, A., Pilla, S., Turng, L.S., Gong, S., Clemons, C. and Peng, J. Processing and Characterization of Recycled Poly(ethylene terephthalate) Blends with Chain Extenders, Thermoplastic Elastomer, and/or Poly(butylene adipate-co-terephthalate). Polymer Engineering & Science 51(6) (2011): 1023-1032.
- [8] Grigore, M. Methods of Recycling, Properties and Applications of Recycled Thermoplastic Polymers. Recycling 2(4) (2017): 1-11.
- [9] Wu, W.J., Sun, X. L., Chen, Q. and Qian, Q. Recycled Poly(Ethylene Terephthalate) from Waste Textiles with Improved Thermal and Rheological Properties by Chain Extension. Polymers (Basel) 14(3) (2022): 1-15.
- [10] Lu, Q.W. and Macosko, C.W. Comparing the Compatibility of Various

- Functionalized Polypropylenes with Thermoplastic Polyurethane (TPU). Polymer 45(6) (2004): 1981-1991.
- [11] ปัทมาพร พ่วงงามพันธ์. การสังเคราะห์พอลิยูรีเทนที่มี Diacetylene Unit โดยมีพอลิเอธิลีน เทอแรพเทอแรตพอลิออลเป็นสารขยายสายโซ่. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชา วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2557.
- [12] Şen, F., Madakbaş, S., Baştürk, E. and Kahraman, M.V. Morphology and Mechanical Properties of Thermoplastic Polyurethane/Colemanite Composites. Polymer Korea 41(6) (2017): 1019-1026.
- [13] Akindoyo, J.O., Beg, M. D. H., Ghazali, S., Islam, M. R., Jeyaratnam, N. and Yuvaraj, A. R. Polyurethane Types, Synthesis and Applications – a Review. RSC Advances 6(115) (2016): 114453-114482.
- [14] หงวนไธสง. การเตรียมคอมพอสิตของพอลิโพรพิลีน/ทัลก์/แมกนีเซียมออกไซด์/ซิลิเกต. ภาควิชา วัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย., 2552.
- [15] Pajtašová, M., Mičicová, Z., Ondrušová, D., Pecušová, B., Feriancová, A., Raník, L. and Domčeková, S. Study of Properties of Fillers Based on Natural Bentonite and their Effect on the Rubber Compounds. Procedia Engineering 177 (2017): 470-475.
- [16] Olaitan, S.A., Azeez, T.O., Atuanya, C.U., Onukwuli, O.D. Officha, M.C. and Menkiti M.C. Effect of Mahogany Filler on Mechanical Properties of Reinforced Polyethylene Matrix Natural and Applied Sciences 4 (2013): 1-9.
- [17] Clemons, C.M. and Caufield, D.F. Wood Flour Functional Fillers for Plastics. Wiley-VCH, 2005.
- [18] Pan, H., Li, Z. Yang, J., Li, X., Ai, X., Hao, Y., Zhang, H. and Dong, L. The Effect of MDI on the Structure and Mechanical Properties of Poly(lactic acid) and Poly(butylene adipate-co-butylene terephthalate) Blends. RSC Advances 8(9) (2018): 4610-4623.
- [19] Daniel, J.Y. and Charles, R.F. Characterizing Polymeric Methylene Diphenyl Diisocyanate Reactions with Wood: 2. Nano-Indentation. Wood Adhesives 8 (2009): 366-373.
- [20] Torres, N., Robin, J.J. and Boutevin, B. Chemical Modification of Virginand

- Recycled Poly(ethylene terephthalate) by Adding of Chain Extenders during Processing. Journal of Applied Polymer Science 79 (2001): 816–1824.
- [21] Dutta, J., Chatterjee, Tuhin., Ramachandran, P. and Naskar, K. Exploring the Influence of Methylene Diphenyl Diisocyanate as a Modifier for Ethylene Vinyl Acetate/Thermoplastic Polyurethane Blends. Polymer-Plastics Technology and Engineering 57(16) (2017): 1642-1656.
- [22] Huang, J., Lu, X., Zhang, G. and Qu, J. Study on the Rheological, Thermal and Mechanical Properties of Thermoplastic Polyurethane/Poly(butylene terephthalate) Blends. Polymer Testing 36 (2014): 69-74.
- [23] Chaiwutthinan, P., Pimpong, A., Larpkemsuk, A., Chuayjuljit, S. and Boonmahitthisud, A. Wood Plastic Composites Based on Recycled Poly(ethylene terephthalate) and Poly(butylene adipate-co-terephthalate). Journal of Metals, Materials and Minerals 29 (2019): 87-97.
- [24] Tang, X., Guo, W., Yin, G., Li, B. and Wu, C. Reactive Extrusion of Recycled Poly(ethylene terephthalate) with Polycarbonate by Addition of Chain Extender. Journal of Applied Polymer Science 104(4) (2007): 2602-2607.
- [25] Pantani, R. and Turng, L.S. Manufacturing of Advanced Biodegradable Polymeric Components. Journal of Applied Polymer Science 132(48) (2015): 1-3.
- [26] Bi, H., Ren, Zechun., Guo, Rui., Xu, M. and Song, Y. Fabrication of Flexible Wood Flour/Thermoplastic Polyurethane Elastomer Composites Using Fused Deposition Molding. Industrial Crops and Products 122 (2018): 76-84.
- [27] Gabriëlse, W., Angad Gaur, H., Feyen, F. C. and Veeman, W. S. ¹³C Solid-State NMR Study of Differently Processed Poly (ethylene terephthalate) Yarns. American chemical society 27 (1994): 5811-5820.
- [28] Alvarado, C., Fresia B., Marieke, T., Thoden, V.V. and Eggo, U. Effect of Recycled Content and rPET Quality on the Properties of PET Bottles, Part I: Optical and Mechanical Properties. Packaging Technology and Science 33(9) (2020): 347-357.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
 วรรณกรรมการหลอมไหล

ตาราง ก-1 วรรณกรรมการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วนต่างๆ

r-PET/TPU (wt%)	MFI (g/10 min)
TPU	50.11
	50.21
	50.00
Avg.	50.11
SD.	0.09
Virgin PET	32.42
	32.39
	32.23
Avg.	32.35
SD.	0.10
r-PET	39.87
	39.87
	39.76
Avg.	39.84
SD.	0.06
90/10	58.24
	58.49
	59.38
Avg.	58.72
SD.	0.49
80/20	79.74
	79.03
	79.28
Avg.	79.35
SD.	0.36

ตาราง ก-1 ดรรชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วนต่างๆ (ต่อ)

r-PET/TPU (wt%)	MFI (g/10 min)
70/30	106.34
	106.60
	106.36
Avg.	106.44
SD.	0.15



ตาราง ก-2 ดรรชนีการหลอมไหลของคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

r-PET/TPU/WF (phr)	MFI (g/10 min)
70/30/10	102.78
	102.04
	102.86
Avg.	102.56
SD.	0.46
70/30/20	84.83
	84.57
	85.38
Avg.	84.79
SD.	0.51
70/30/30	80.00
	80.05
	80.43
Avg.	80.16
SD.	0.23

ตาราง ก-2 ดรรชนีการหลอมไหลของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ

r-PET/TPU/WF/MDI (wt%)	MFI (g/10 min)
70/30/10/0.5	100.90
	100.95
	101.14
Avg.	101.00
SD.	0.10
70/30/10/1	85.48
	84.76
	85.48
Avg.	85.24
SD.	0.34

ภาคผนวก ข

สมบัติทางกล

ตาราง ข-1 สมบัติทางกลของ TPU, PET, r-PET และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วนต่างๆ

Sample	Impact strength (kJ/m ²)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural strength (MPa)
TPU	–	4.52	31.76	55.11	–
	–	4.54	31.30	55.85	–
	–	4.50	30.35	55.76	–
	–	4.54	30.88	56.74	–
	–	4.46	32.24	56.58	–
Avg.	–	4.51	31.31	56.0	–
SD.	–	0.1	0.5	0.5	–
PET	3.11	81.22	1661.84	6.22	88.89
	3.11	81.30	1668.06	6.22	88.28
	3.12	81.02	1660.59	6.09	88.96
	3.12	81.08	1663.47	6.31	88.29
	3.21	81.26	1660.17	6.01	88.54
Avg.	3.134	81.18	1662.82	6.19	88.59
SD.	0.04	0.12	3.20	0.09	0.32
r-PET	2.51	54.468	1052.712	2.361	60.57
	2.50	55.279	1053.246	2.309	60.59
	2.53	54.763	1034.289	2.374	60.43
	2.47	54.549	1053.701	2.424	60.49
	2.49	55.427	1023.095	2.675	60.43
Avg.	2.50	54.96	1043.41	2.43	60.50
SD.	0.02	0.39	14.01	0.14	0.07

ตาราง ข-1 สมบัติทางกลของ PET, r-PET และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วนต่างๆ (ต่อ)

Sample	Impact strength (kJ/m ²)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural strength (MPa)
90/10	2.09	64.87	1315.66	4.61	68.67
	2.09	64.82	1331.58	4.59	68.75
	2.07	65.54	1333.59	4.61	68.90
	2.09	65.56	1328.53	4.65	68.79
	2.10	64.98	1332.47	4.69	68.37
Avg.	2.09	65.15	1328.37	4.63	68.69
SD.	0.01	0.37	7.35	0.04	0.20
80/20	2.18	60.95	1030.44	5.56	60.83
	2.17	61.38	1037.63	5.48	60.81
	2.18	60.91	1044.03	5.42	61.22
	2.19	61.08	1038.26	5.56	61.23
	2.18	60.99	1023.76	5.47	61.27
Avg.	2.18	61.06	1034.83	5.50	61.07
SD.	0.01	0.19	7.84	0.06	0.23
70/30	6.72	39.56	911.43	10.51	41.32
	6.66	38.74	905.12	10.84	40.93
	6.73	39.53	912.52	10.58	40.34
	6.69	39.78	905.64	10.30	40.80
	6.74	39.61	915.10	10.57	40.88
Avg.	6.71	39.44	910.14	10.56	40.85
SD.	0.03	0.40	4.67	0.19	0.35

ตาราง ข-2 สมบัติทางกลของคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

Sample	Impact strength (kJ/m ²)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural strength (MPa)
r-PET/TPU/WF (phr)					
70/30/10	1.73	32.20	1049.39	3.98	48.00
	1.71	31.61	1045.57	4.14	48.59
	1.72	32.54	1045.49	4.01	48.26
	1.74	32.28	1048.84	4.18	47.79
	1.74	31.93	1041.99	4.16	48.22
Avg.	1.73	32.11	1046.26	4.09	48.17
SD.	0.01	0.36	2.99	0.09	0.30
70/30/20	1.44	31.10	1110.09	3.12	46.39
	1.43	31.50	1106.77	3.09	45.61
	1.43	31.24	1100.95	3.16	46.09
	1.44	31.21	1116.12	3.17	46.51
	1.44	31.21	1115.96	3.14	46.08
Avg.	1.44	31.25	1109.98	3.13	46.28
SD.	0.01	0.15	6.43	0.03	0.46
70/30/30	1.16	29.17	1215.50	2.59	45.55
	1.16	29.32	1216.36	2.58	44.94
	1.18	29.20	1213.79	2.54	45.54
	1.11	29.74	1213.23	2.54	45.21
	1.17	29.12	1214.43	2.54	45.59
Avg.	1.16	29.31	1214.66	2.56	45.37
SD.	0.03	0.25	1.27	0.025	0.28

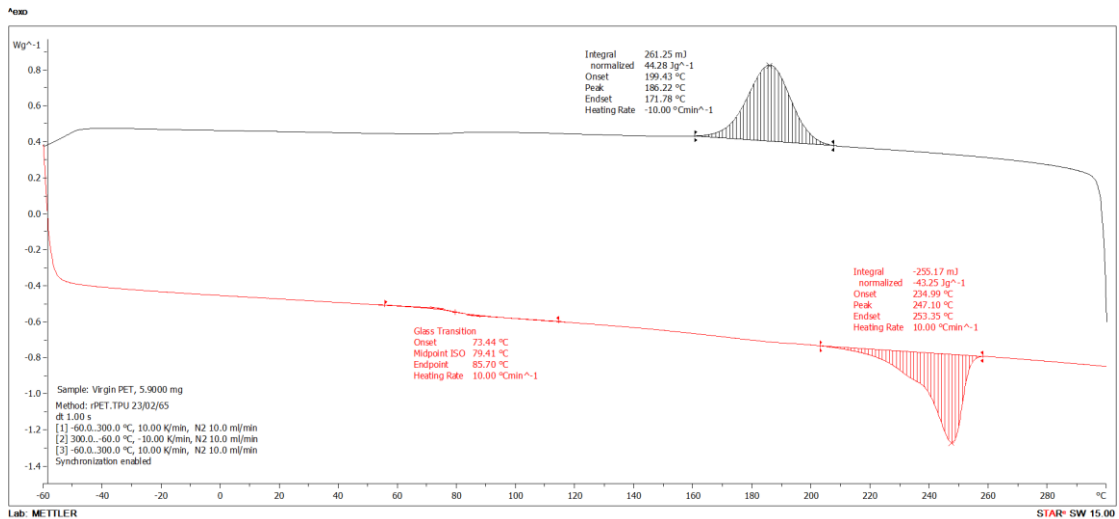
ตาราง ข-3 สมบัติทางกลของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ

Sample	Impact strength (kJ/m ²)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural strength (MPa)
r-PET/TPU/WF/MDI (wt%)					
70/30/10/0.5	1.98	34.66	1064.70	3.72	56.03
	1.99	34.40	1008.11	3.94	56.79
	2.02	34.36	1056.79	3.71	56.27
	2.05	34.02	1013.60	3.78	55.93
	2.00	34.25	967.65	3.92	56.46
Avg.	2.01	34.34	1022.17	3.81	56.26
SD.	0.03	0.23	39.53	0.11	0.38
70/30/10/1	3.17	39.83	1098.50	4.43	58.24
	3.10	39.09	1124.26	3.99	59.02
	3.18	39.34	975.31	3.68	58.69
	3.19	39.67	1002.47	4.30	59.54
	3.11	39.05	1129.56	3.49	59.49
Avg.	3.16	39.40	1066.02	3.98	59.18
SD.	0.04	0.35	72.02	0.40	0.40

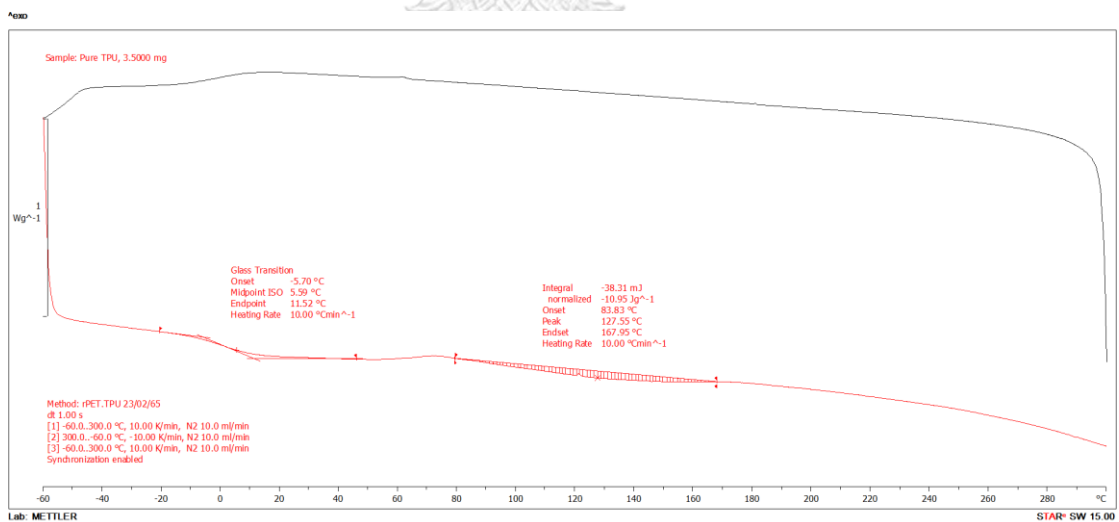
ภาคผนวก ค

เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DSC

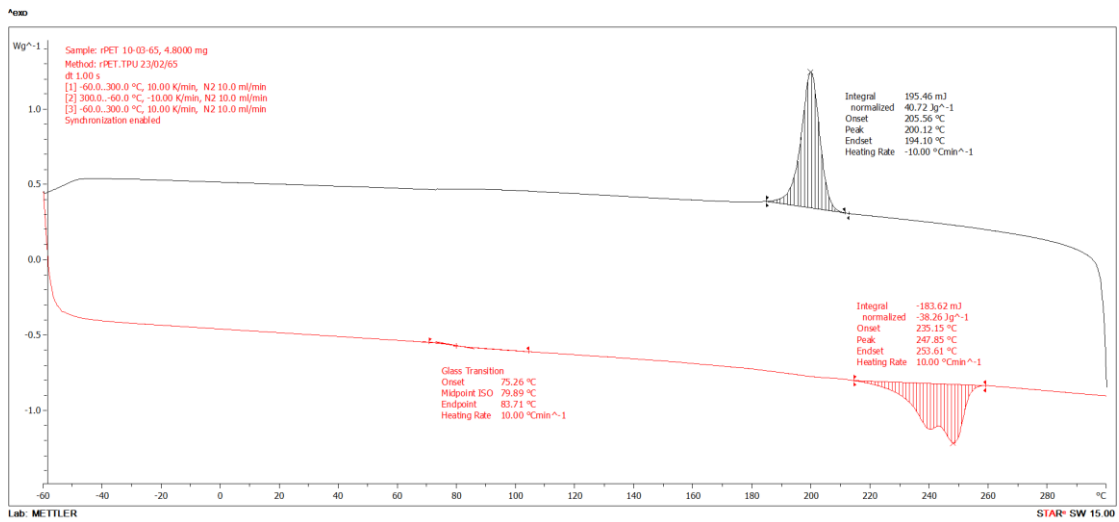
รูปที่ ค(1-6) แสดงเทอร์โมแกรมจากเทคนิค DSC ของ PET, TPU, r-PET และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วนต่างๆ



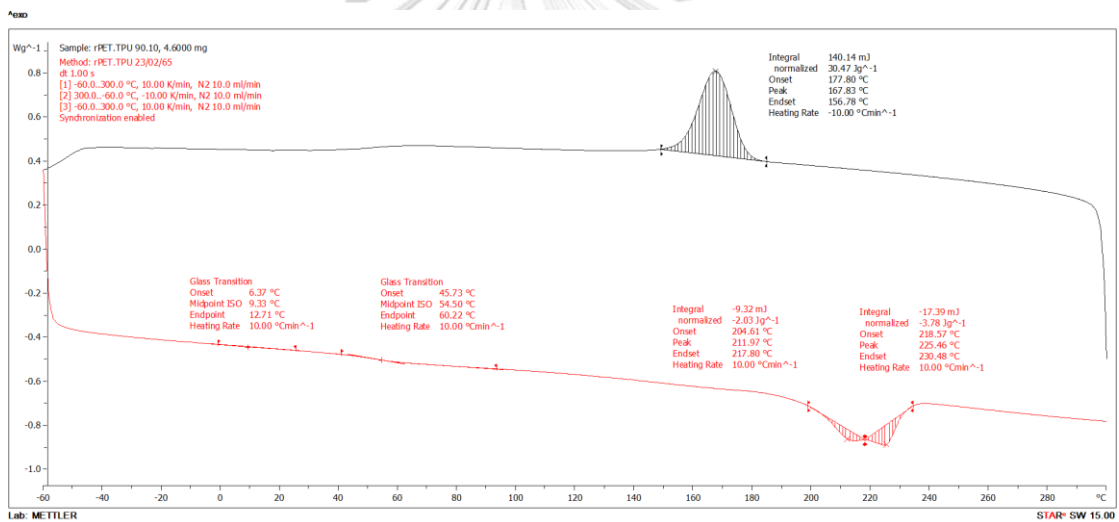
รูปที่ ค-1 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง และขั้นตอนการให้ความเย็นของ PET



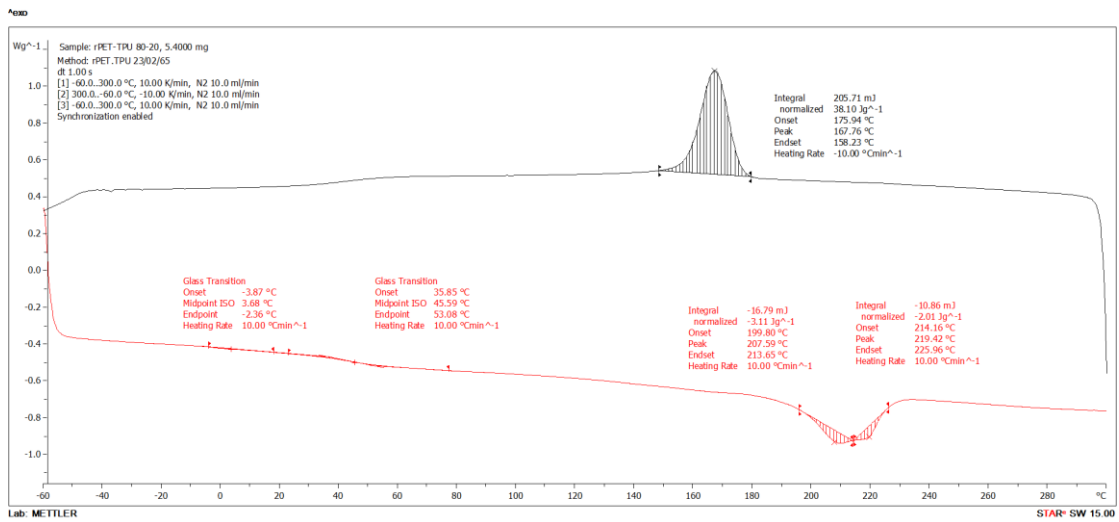
รูปที่ ค-2 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง และขั้นตอนการให้ความเย็นของ TPU



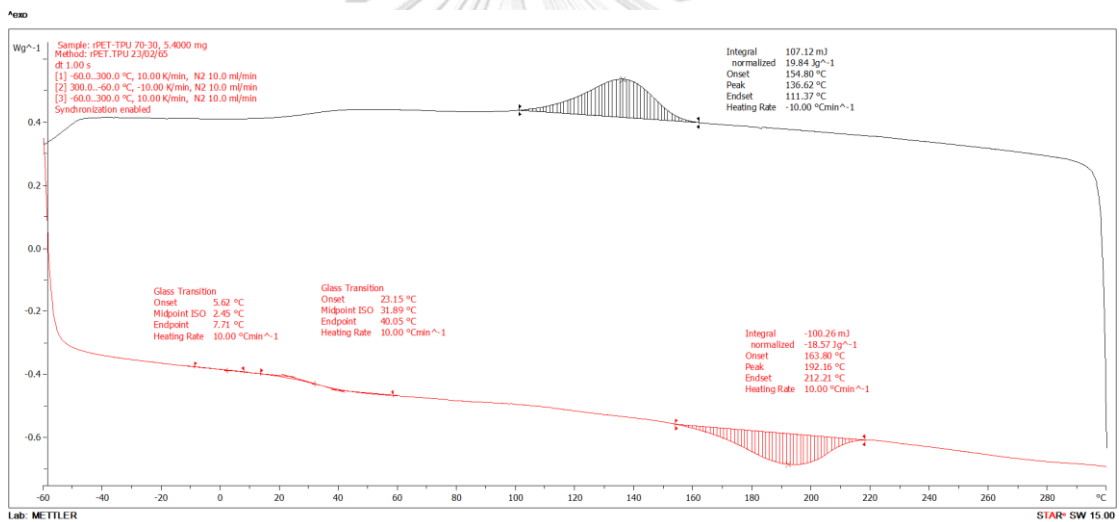
รูปที่ ค-3 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง และขั้นตอนการให้ความเย็นของ r-PET



รูปที่ ค-4 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง และขั้นตอนการให้ความเย็นของ พอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 90/10 r-PET/TPU

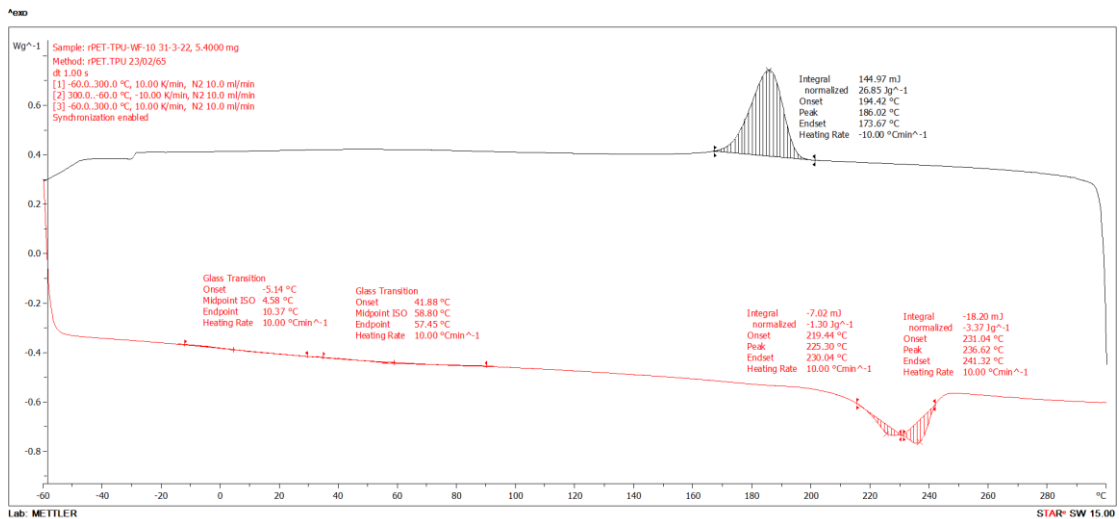


รูปที่ ค-5 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง และขั้นตอนการให้ความเย็นของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 80/20 r-PET/TPU

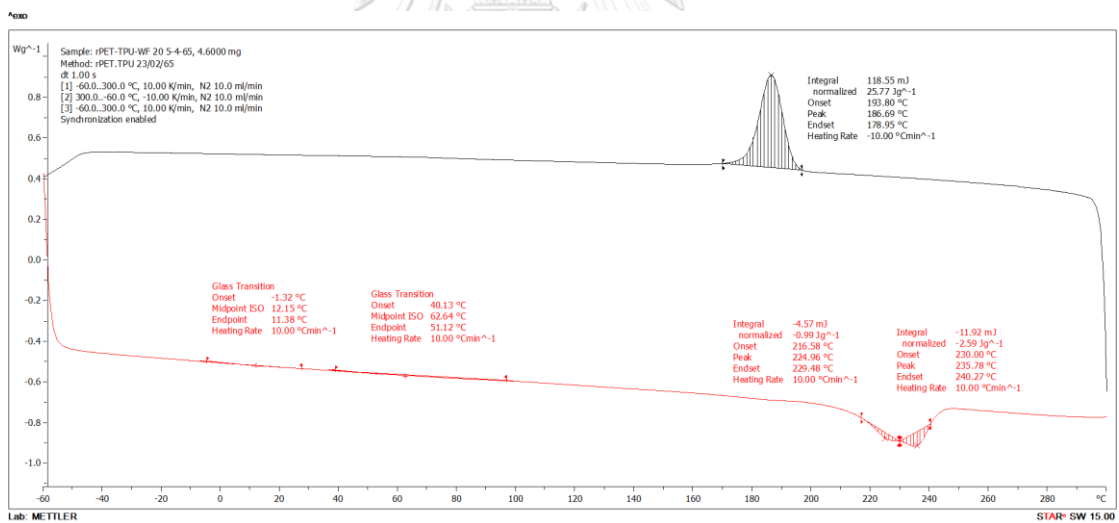


รูปที่ ค-6 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง และขั้นตอนการให้ความเย็นของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 70/30 r-PET/TPU

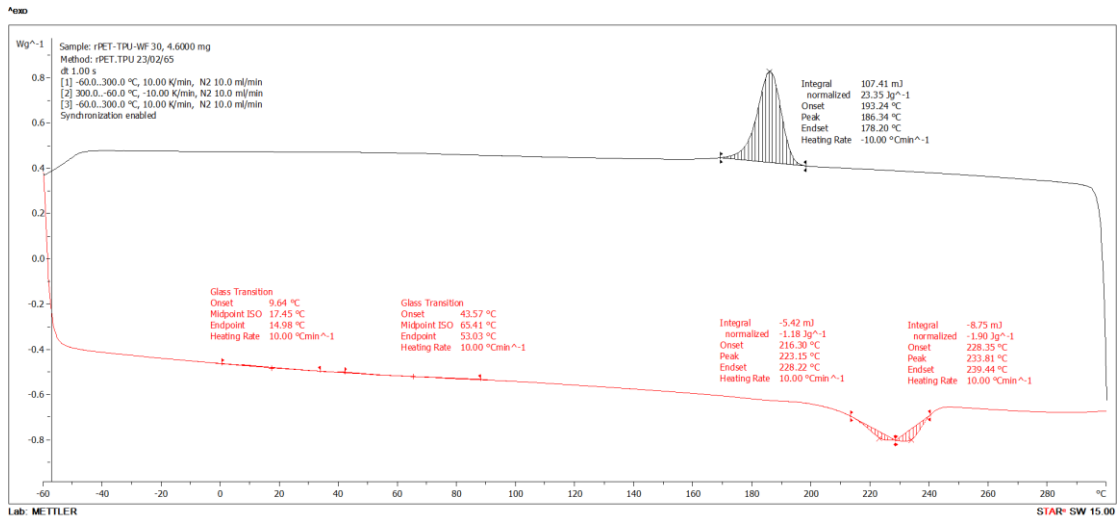
รูปที่ ค(7-9) แสดงเทอร์โมแกรมจากเทคนิค DSC ของคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ ค-7 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง และขั้นตอนการให้ความเย็นของคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน 10 phr

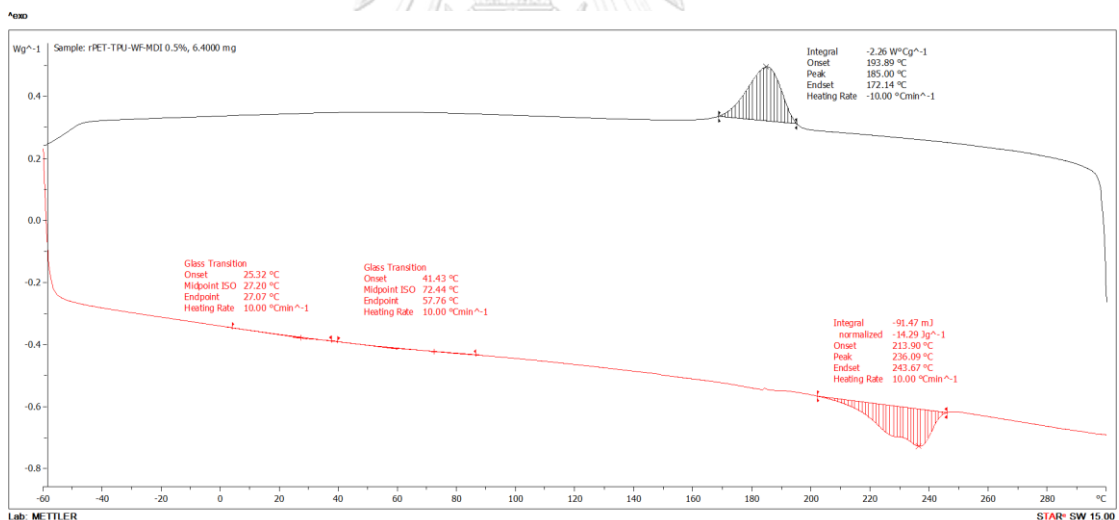


รูปที่ ค-8 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง และขั้นตอนการให้ความเย็นของคอมพอสิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน 20 phr

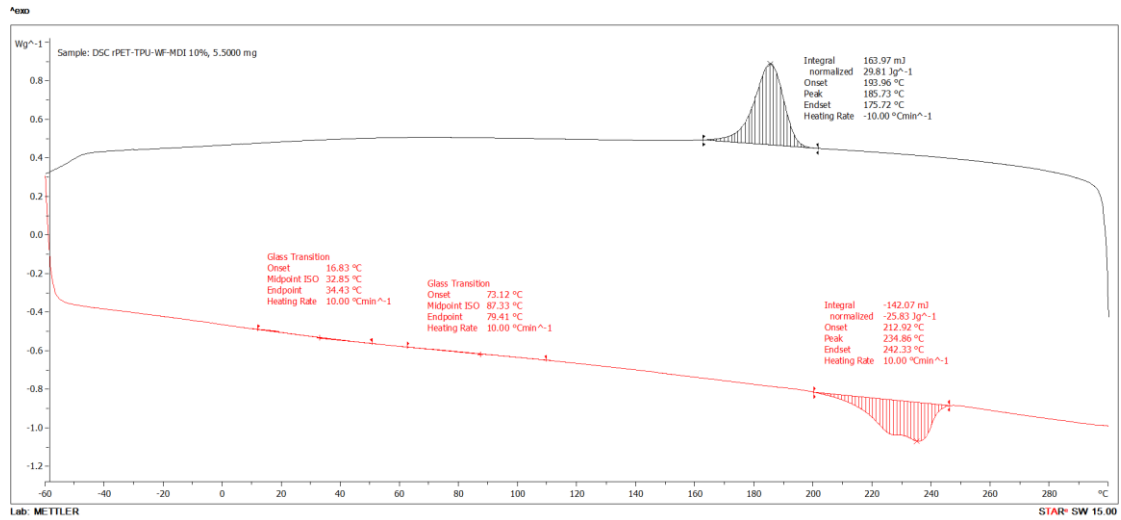


รูปที่ ค-9 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง และขั้นตอนการให้ความเย็นของ 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วน 30 phr

รูปที่ ค(10-11) เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DSC ของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU ที่เติม MDI ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ ค-10 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง และขั้นตอนการให้ความเย็นของคอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 0.5 wt%

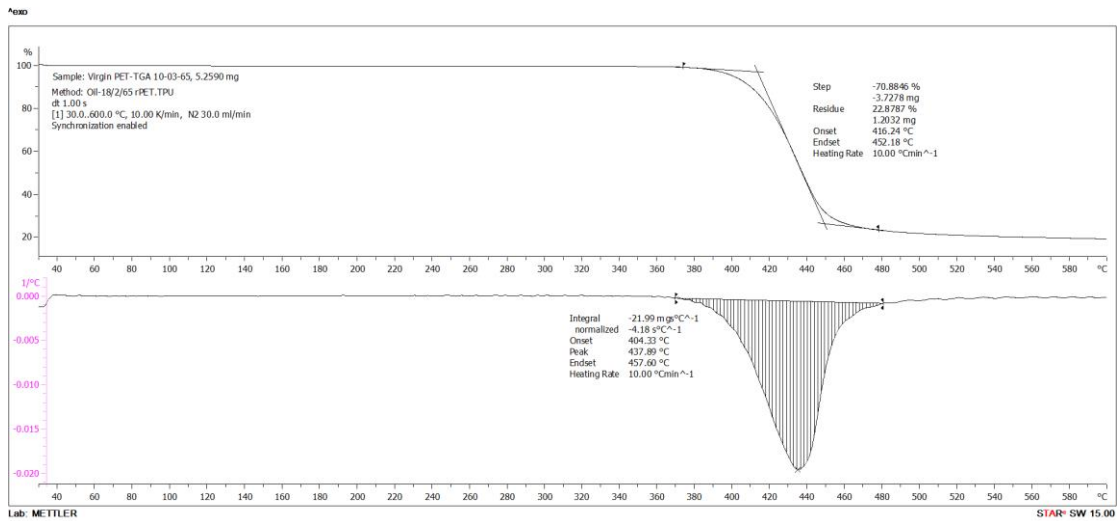


รูปที่ ค-11 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง และขั้นตอนการให้ความเย็นของคอมพอลิเมอร์ 70/30/10 r-PET/TPU ที่เติม MDI ที่อัตราส่วน 1 wt%

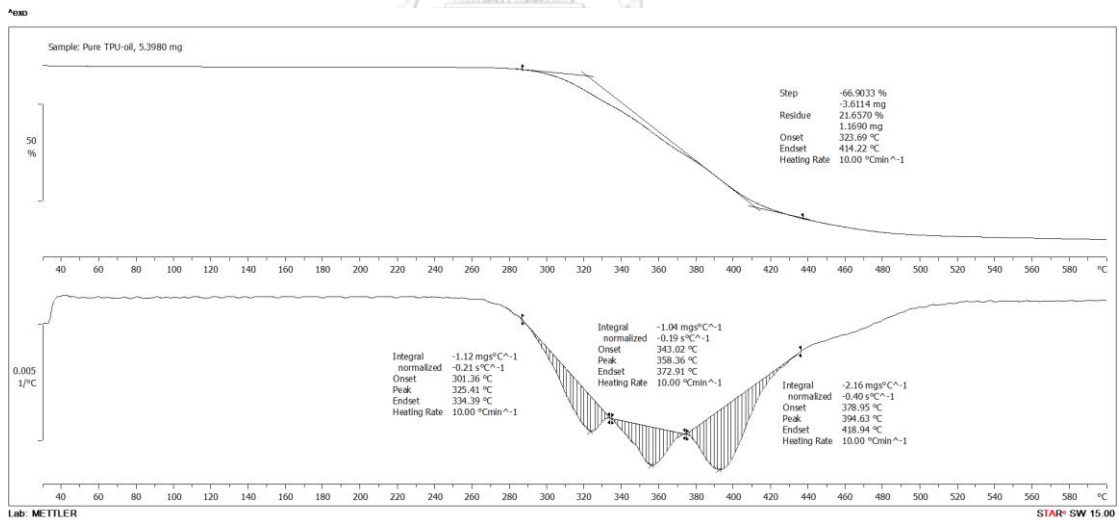


ภาคผนวก ง
เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA

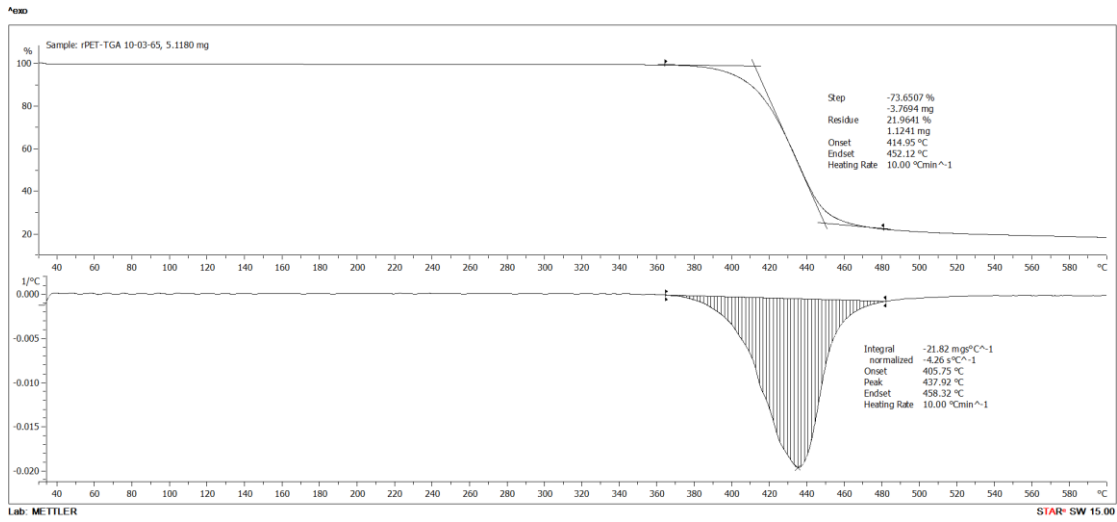
รูปที่ ง(1-6) แสดงเทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA ของ PET, TPU, r-PET และพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วนต่างๆ



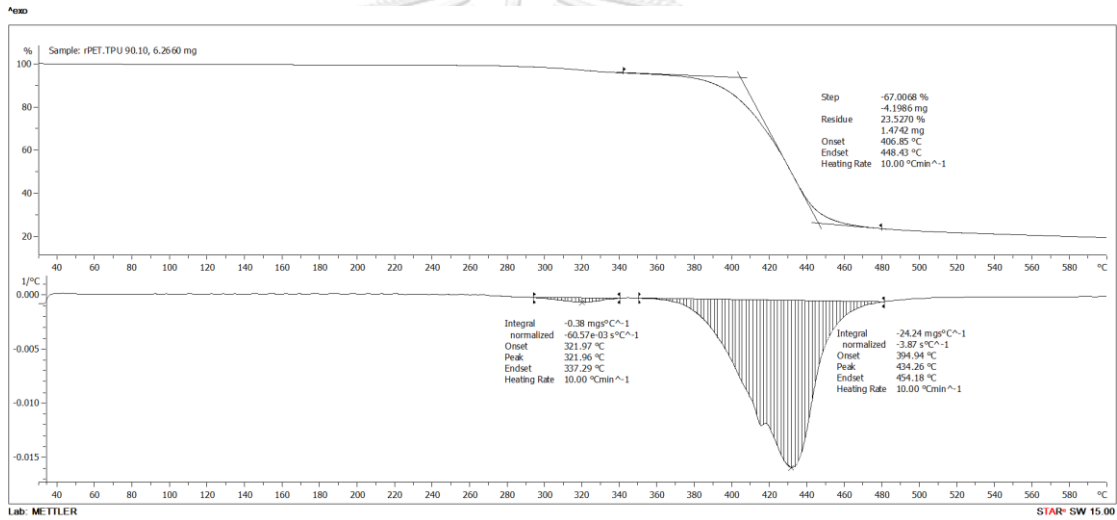
รูปที่ ง-1 TGA เทอร์โมแกรมของ PET



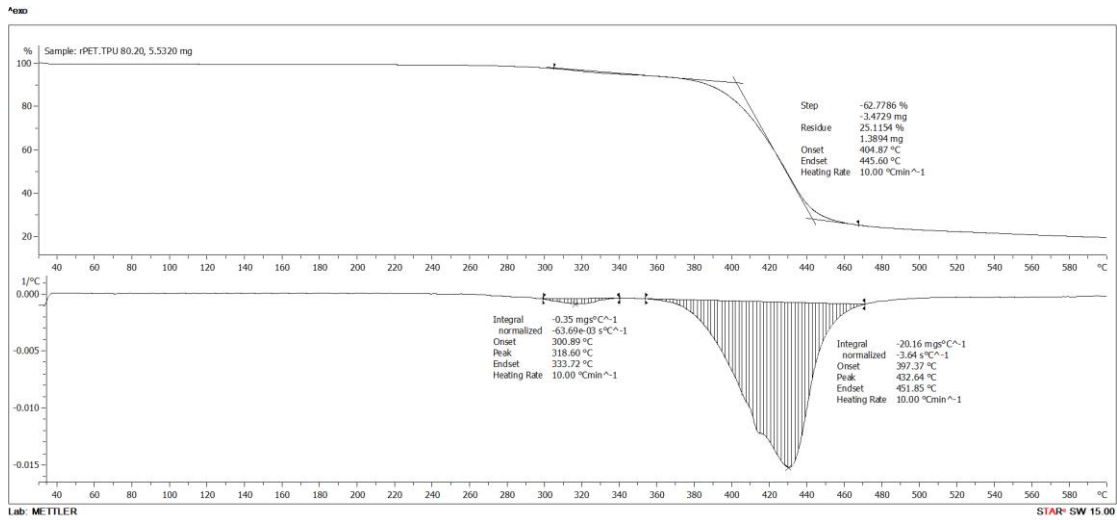
รูปที่ ง-2 TGA เทอร์โมแกรมของ TPU



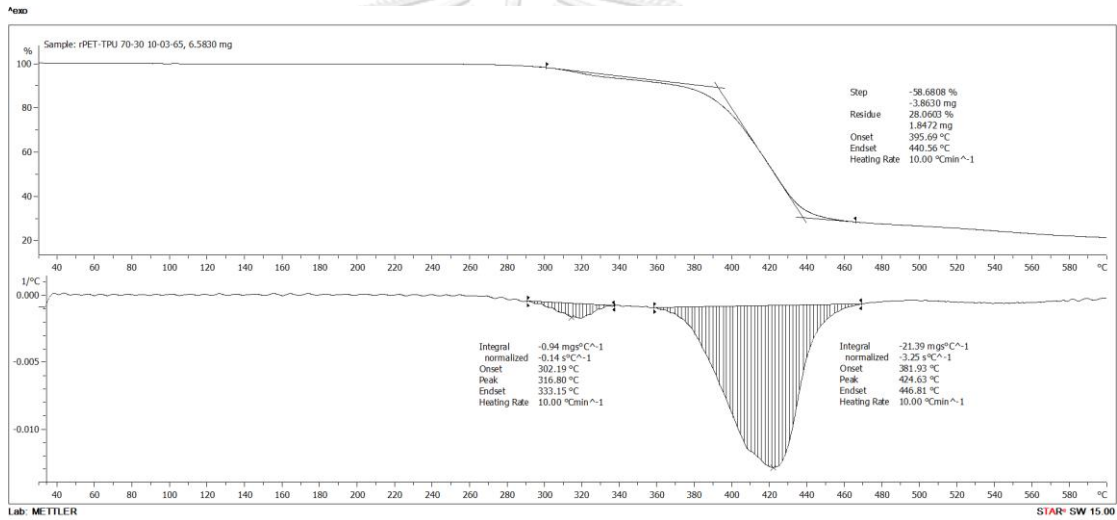
รูปที่ ง-3 TGA เทอร์โมแกรมของ r-PET



รูปที่ ง-4 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วน 90/10 wt%

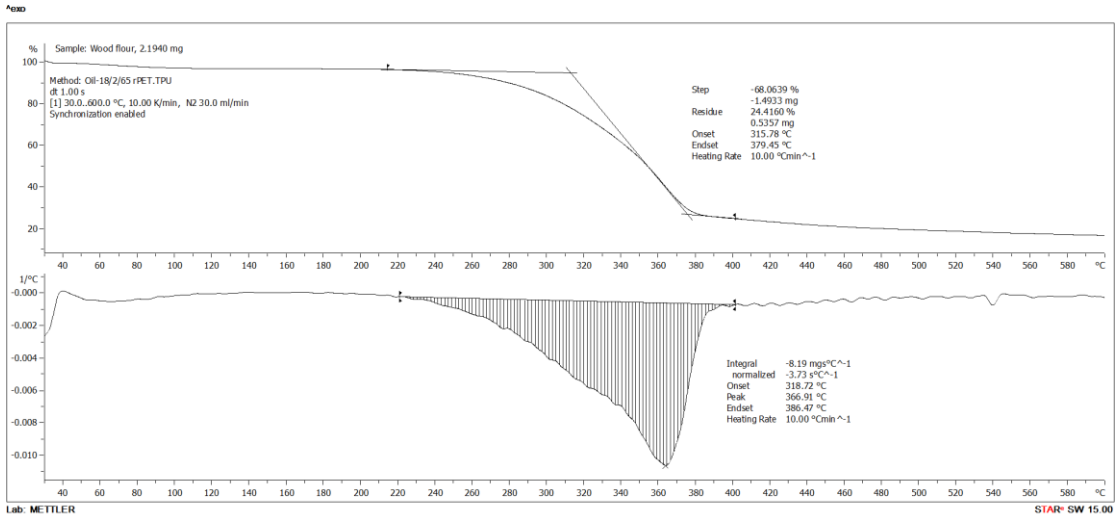


รูปที่ ง-5 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วน 80/20 wt%

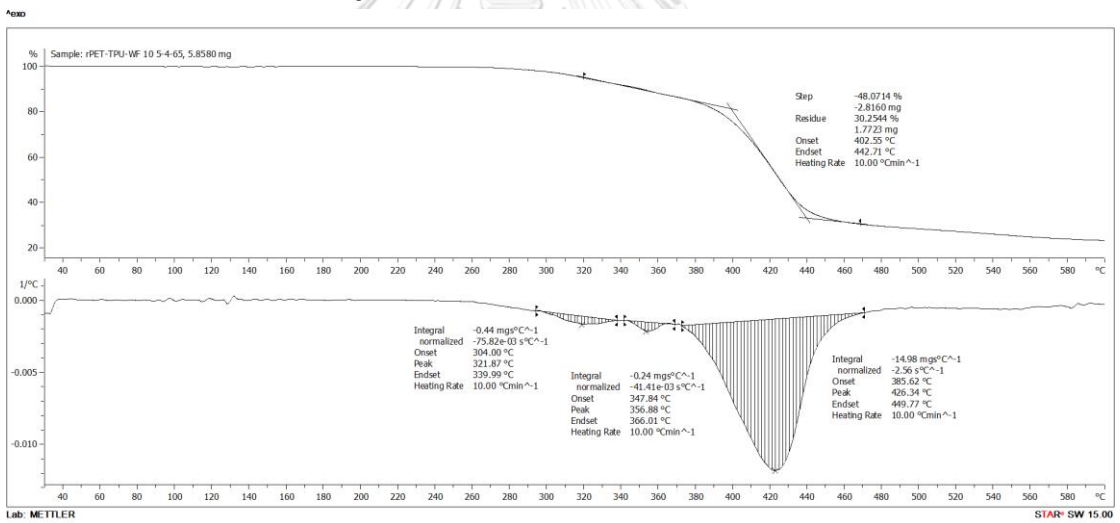


รูปที่ ง-6 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU ที่อัตราส่วน 70/30 wt%

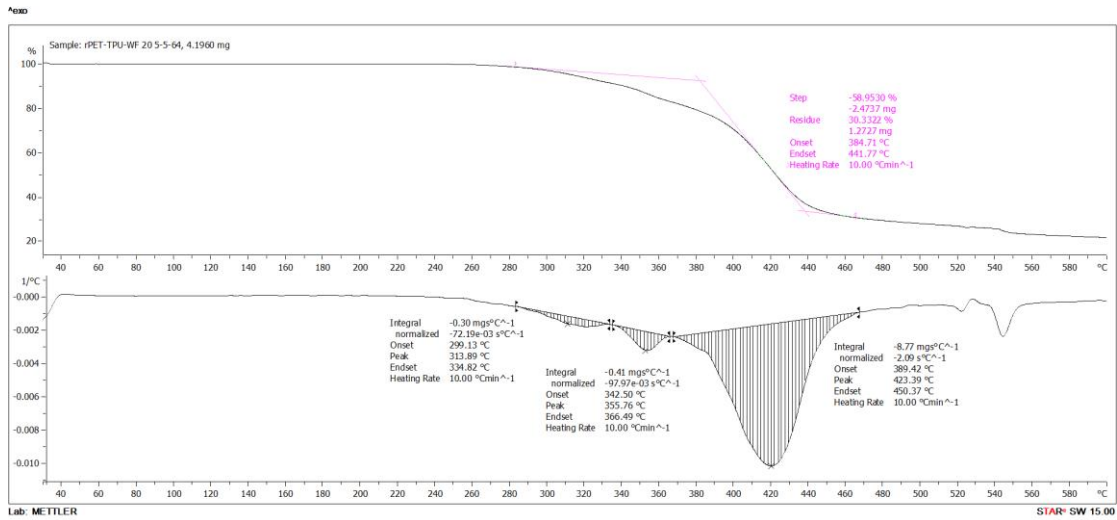
รูปที่ ง(7-10) แสดงเทอร์โมแกรมจากเทคนิค DSC ของ WF และคอมพอลิิต 70/30 r-PET/TPU ด้วย WF ที่อัตราส่วนต่างๆ



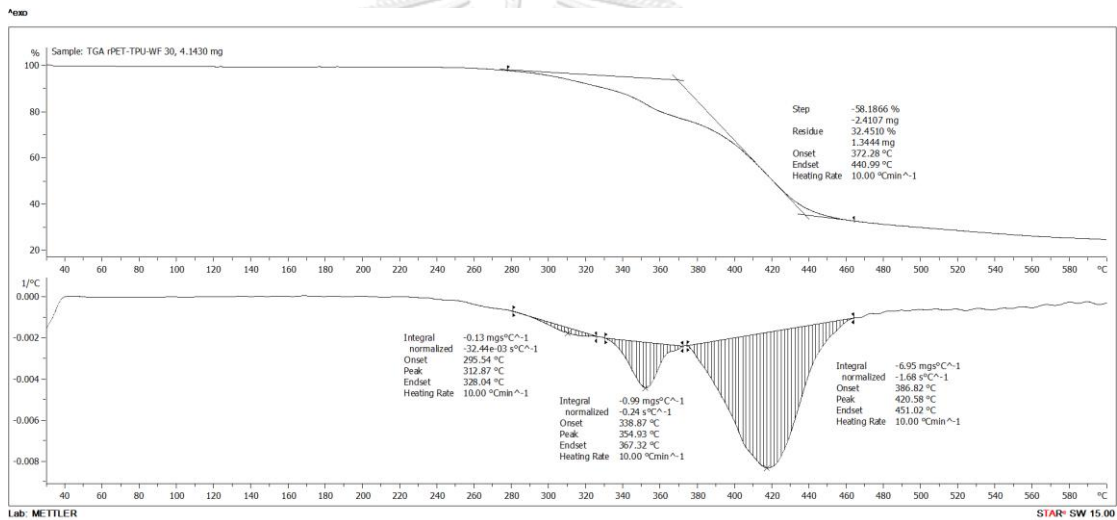
รูปที่ ง-7 TGA เทอร์โมแกรมของ WF



รูปที่ ง-8 TGA เทอร์โมแกรมของคอมพอลิิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF



รูปที่ ง-9 TGA เทอร์โมแกรมของคอมพอสิต 70/30/20 r-PET/TPU/WF



รูปที่ ง-10 TGA เทอร์โมแกรมของคอมพอสิต 70/30/30 r-PET/TPU/WF

ภาคผนวก จ

ความหนืด

ตาราง จ-1 ความหนืดของ r-PET, พอลิเมอร์ผสม r-PET/TPU, คอมพอสิต 70/30/10 r-PET/TPU/WF และคอมพอสิต 70/30/10/1 r-PET/TPU/WF/MDI

Sample	IV (g/dL)
r-PET	0.43
	0.42
	0.43
Avg.	0.43
SD.	0.01
70/30 r-PET/TPU	0.31
	0.32
	0.31
Avg.	0.32
SD.	0.01
70/30/10 r-PET/TPU/WF	0.39
	0.39
	0.37
Avg.	0.39
SD.	0.01
70/30/10/1 r-PET/TPU/MDI	0.49
	0.49
	0.45
Avg.	0.48
SD.	0.02

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาววรรณพร เรืองเมือง
วัน เดือน ปี เกิด	10 เมษายน 2537
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานครฯ
วุฒิการศึกษา	วท.บ. วิทยาศาสตร์บัณฑิต
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 10 หมู่ 9 ตำบลบางกระสั้น อำเภอบางปะอิน จังหวัด พระนครศรีอยุธยา 13160



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY