

เพ็ตรีไซเคิล/ในลอน 6/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต: สมบัติทางกายภาพและสัณฐานวิทยา

นางสาวนันทน์ลิน ชูทอง



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RECYCLED PET/NYLON 6/MONTMORILLONITE NANOCOMPOSITES: PHYSICAL AND
MORPHOLOGICAL PROPERTIES

Miss Nannalin Chutong



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

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เพ็ทรีไซเคิล/ไนลอน 6/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต: สมบัติทางกายภาพและสัณฐานวิทยา
โดย	นางสาวนันท์นลิน ชูทอง
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โปธิยะราช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมหิทธิสุทธิ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.อำนาจ ลาภเกษมสุข)

นันทน์ลิน ชูทอง : เพ็ทรีไซเคิล/ไนลอน 6/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต: สมบัติทางกายภาพ และ สัณฐานวิทยา (RECYCLED PET/NYLON 6/MONTMORILLONITE NANOCOMPOSITES: PHYSICAL AND MORPHOLOGICAL PROPERTIES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร, 85 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ ขวดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต (เพ็ต) ที่ผ่านการบริโภคนแล้วได้ถูกนำมารีไซเคิลด้วยการผสมกับไนลอน 6 และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ทั้งนี้เพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ซึ่งพอลิเมอร์ผสมและนาโนคอมพอสิตได้ถูกเตรียมโดยการผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่และขึ้นรูปด้วยการฉีดแบบ จากพอลิเมอร์ผสมเพ็ทรีไซเคิล/ไนลอน 6 ทุกอัตราส่วนที่ผ่านการประเมินพบว่า พอลิเมอร์ผสม 70/30 เพ็ทรีไซเคิล/ไนลอน 6 มีความทนแรงกระแทกสูงที่สุด และมีสมบัติด้านแรงดึง (ความทนแรงดึง, ยั่งสัมมอดูลัส และการยืดตัว ณ จุดขาด) และความทนแรงดัดโค้งที่ยอมรับได้ หากแต่มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเพ็ทรีไซเคิลล้วน ซึ่งพอลิเมอร์ผสมนี้ได้ถูกนำไปเตรียมนาโนคอมพอสิตด้วยมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรปริมาณต่างๆ (1, 3 และ 5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อเรซินร้อยละ) จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่า เพ็ทรีไซเคิล/ไนลอน 6/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีโครงสร้างแบบแยกออก โดย 70/30/1 เพ็ทรีไซเคิล/ไนลอน 6/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตมีความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง ยั่งสัมมอดูลัส และการยืดตัว ณ จุดขาดสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 70/30 เพ็ทรีไซเคิล/ไนลอน 6 ล้วน ดังนั้น การใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในปริมาณเพียงเล็กน้อยในนาโนคอมพอสิต สามารถปรับปรุงความแข็งแรงและความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมได้ ขณะที่ 70/30/5 เพ็ทรีไซเคิล/ไนลอน 6/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตมีเสถียรภาพทางความร้อนมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 70/30 เพ็ทรีไซเคิล/ไนลอน 6 ล้วน

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5772027923 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: RECYCLED PET / ORGANO-MODIFIED MONTMORILLONITE (OMMT) / MECHANICAL PROPERTIES

NANNALIN CHUTONG: RECYCLED PET/NYLON 6/MONTMORILLONITE NANOCOMPOSITES: PHYSICAL AND MORPHOLOGICAL PROPERTIES. ADVISOR: PROF. PATTARAPAN PRASASSARAKICH, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. SAOWAROJ CHAUYJULJIT, 85 pp.

In this research, post-consumer poly(ethylene terephthalate) (PET) bottles were recycled by inclusion of Nylon 6 and organo-modified montmorillonite (OMMT) for environmental conservation. The blends and nanocomposites were prepared by melt mixing on a twin screw extruder and followed by an injection molding. Among the recycled PET (RPET)/Nylon 6 blends evaluated, the 70/30 RPET/Nylon 6 blend exhibited the highest impact strength with acceptable tensile properties (tensile strength, Young's modulus and elongation at break) and flexural strength, but a lower thermal stability compared to those of the neat RPET. This blend was further filled with three loadings of OMMT (1, 3 and 5 parts by weight per hundred parts of resin). The XRD and TEM analyses revealed the formation of an exfoliated structure in all the investigated RPET/Nylon 6/ OMMT nanocomposites. The 70/30/1 RPET/Nylon 6/OMMT nanocomposites provided the highest impact and tensile strength, Young's modulus and elongation at break, but a lower flexural strength compared to those of the neat 70/30 RPET/Nylon 6 blend, suggesting that the addition of OMMT even at a very low loading was able to improve the strength and toughness of the blends. While the 70/30/5 RPET/Nylon 6/OMMT nanocomposites exhibited the highest thermal stability compared to that of the neat 70/30 RPET/Nylon 6 blend.

Field of Study: Petrochemistry and
Polymer Science

Academic Year: 2015

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและความเอื้อเฟื้อในด้านวัสดุ อุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงคำแนะนำทางวิชาการจากผู้เชี่ยวชาญและผู้ทรงคุณวุฒิหลายท่าน ข้าพเจ้าจึงขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานองค์กรที่เกี่ยวข้อง ดังรายนามต่อไปนี้

ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ การแก้ไขปัญหา ในการทำวิทยานิพนธ์ และสนับสนุนในทุกด้านตั้งแต่เริ่มงานวิจัยจนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช ผู้ให้การสนับสนุนเรื่องวัสดุในการทำงานวิจัย อาจารย์ ดร.อำนวยการ ลากเกษมสุข จากภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และ ดร.พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์ จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือในการทดสอบ และช่วยเหลือในการทดสอบตัวอย่าง

บริษัท อุเบะ เคมิคอลส์ (เอเชีย) จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย นอกจากนี้ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ปฏิบัติงาน สนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือในการทดลอง พร้อมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ

ท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และเพื่อนที่ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุน และให้กำลังใจในการทำงานวิจัย อีกทั้งคณาจารย์ทุกท่านผู้ให้ความรู้และคำแนะนำแก่ผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly(ethylene terephthalate), PET).....	3
2.1.1 การนำพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตไปใช้ประโยชน์	4
2.2 การรีไซเคิลพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต.....	5
2.2.1 กระบวนการรีไซเคิลพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต	5
2.3 ไนลอน 6 (Nylon 6)	6
2.3.1 การใช้งานของไนลอน 6.....	7
2.4 พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend)	7
2.4.1 กลไกความเข้ากันได้.....	8
2.4.2 สมบัติและสัณฐานวิทยา.....	8
2.4.3 หลักการของการผสม	9
2.4.4 เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการแปรรูป.....	10
2.5 สารเติมแต่ง.....	11
2.5.1 หลักการผสมสารเติมแต่งในพอลิเมอร์	11
2.6 มอนต์มอริลโลไนต์	12

2.6.1	ประโยชน์ของมอนต์มอริลโลไนต์.....	13
2.7	นาโนคอมพอสิต (Nanocomposites)	14
2.7.1	โครงสร้างของนาโนคอมพอสิต.....	14
2.7.2	เทคนิคการเตรียมนาโนคอมพอสิต	16
2.7.3	การวิเคราะห์นาโนคอมพอสิต	17
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย	20
3.1	วัตถุประสงค์.....	20
3.2	เครื่องมือที่ใช้ผสมและขึ้นรูปขึ้นทดสอบ	20
3.3	เครื่องมือวิเคราะห์	20
3.4	แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง.....	22
3.5	การทดลอง.....	23
3.5.1	การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง RPET/Nylon 6	23
3.5.2	การเตรียมนาโนคอมพอสิต	24
3.5.3	การขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ.....	24
3.6	การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ.....	25
3.6.1	วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์แทรนส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	25
3.6.2	ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	26
3.6.3	ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	26
3.6.4	ตรวจสอบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน	27
3.6.5	ทดสอบสมบัติด้านแรงดึง (Tensile properties)	27
3.6.6	ทดสอบความทนแรงกระแทก (Impact strength).....	29
3.6.7	การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (Flexural strength).....	30

3.6.8. วิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี.....	31
3.6.9. วิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ).....	32
3.6.10. วิเคราะห์ดรรชนีการหลอมไหล	32
3.6.11. ทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอและอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต	33
3.6.12. วิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต.....	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	35
4.1 ลักษณะของชิ้นงาน RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6.....	35
4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR	35
4.3 สมบัติเชิงกลของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6	37
4.3.1 สมบัติด้านแรงดึงและความทนแรงกระแทก.....	38
4.3.2 ความทนแรงดัดโค้ง	39
4.4 สัณฐานวิทยาของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6.....	40
4.5 สมบัติทางความร้อนของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6	41
4.5.1 ดรรชนีการหลอมไหล.....	41
4.5.2 พฤติกรรมการเกิดผลึก	42
4.5.3 เสถียรภาพทางความร้อน	43
4.5.4 อุณหภูมิการโค้งงอและอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต	45
4.6 ลักษณะชิ้นงานของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT	46
4.7 การวิเคราะห์นาโนคอมพอสิตด้วยเทคนิค XRD และ TEM.....	47
4.8 สมบัติเชิงกลของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT	49
4.8.1 สมบัติด้านแรงดึงและความทนแรงกระแทก.....	50
4.8.2 ความทนแรงดัดโค้ง	52

4.9	สัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT	53
4.10	สมบัติทางความร้อนของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT	56
4.10.1	ดรรชนีการหลอมไหล.....	56
4.10.2	พฤติกรรมเกิดการเกิดผลึก.....	57
4.10.3	เสถียรภาพทางความร้อน.....	59
4.10.4	อุณหภูมิการโค้งงอและอุณหภูมิก่อนตัวไวแคต	61
4.11	สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical analysis).....	62
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	65
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	65
5.2	ข้อเสนอแนะ	66
	รายการอ้างอิง.....	67
	ภาคผนวก ก เทอร์โมแกรมทางความร้อนจากเทคนิค DSC.....	71
	ภาคผนวก ข เทอร์โมแกรมทางความร้อนจากเทคนิค TGA	74
	ภาคผนวก ค สมบัติเชิงกล.....	77
	ภาคผนวก ง XRD ดิฟแฟรกโทแกรม.....	82
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	85

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 สมบัติของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตทางการค้า	4
ตารางที่ 2.2 สมบัติของไนลอน 6 ทางการค้า	7
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างของสารตัวเติมประเภทต่างๆ.....	12
ตารางที่ 2.4 สมบัติของมอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรชนิดต่างๆ.....	13
ตารางที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีและขนาดของอนุภาคของเลเยอร์ซิลิเกตตระกูล 2:1 ฟิโลซิลิเกต.....	15
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม	23
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของนาโนคอมพอสิต	24
ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6.....	37
ตารางที่ 4.2 ธรรมชาติการหลอมไหลของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ	41
ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์การเกิดผลึกของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6.....	43
ตารางที่ 4.4 เสถียรภาพทางความร้อนของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6.....	44
ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการโค้งงอและอุณหภูมิตัวอ่อนตัวไว้แคตของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ	46
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ OMMT และนาโนคอมพอสิตด้วยเทคนิค XRD	48
ตารางที่ 4.7 สมบัติเชิงกลของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT.....	50
ตารางที่ 4.8 ธรรมชาติการหลอมไหลของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT.....	56
ตารางที่ 4.9 พารามิเตอร์การเกิดผลึกของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT.....	58
ตารางที่ 4.10 เสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT	59

ตารางที่ 4.11 อุณหภูมิการโค้งงอและอุณหภูมิการอ่อนตัวไวแคตของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT	61
---	----



สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต	3
รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต	4
รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไนลอน 6.....	6
รูปที่ 2.4 ลักษณะการผสมแบบ (a) dispersive mixing และ (b) distributive mixing	10
รูปที่ 2.5 Cationic modifiers ของเคลย์ (a) Cloisite30B, (b) Cloisite15A และ (c) Cloisite10A โดย T=tallow (~65% C18, ~30% C16, ~5% C14).....	13
รูปที่ 2.6 การกระจายตัวของเคลย์ในพอลิเมอร์	16
รูปที่ 2.7 กราฟที่ได้จากเทคนิค XRD (ซ้าย) และสัณฐานวิทยาที่ได้จากเทคนิค TEM (ขวา).....	17
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง	22
รูปที่ 3.2 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่.....	23
รูปที่ 3.3 เครื่องฉีดแบบ	25
รูปที่ 3.4 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์.....	25
รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	26
รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	26
รูปที่ 3.7 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์.....	27
รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล.....	28
รูปที่ 3.9 ขนาดของชิ้นทดสอบดัมเบลตามมาตรฐาน ASTM D638 ประเภท 1.....	28
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบความทนแรงดึง	28
รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก	29
รูปที่ 3.12 ขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256.....	29
รูปที่ 3.13 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด.....	29
รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้ง	30

รูปที่ 3.15 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบความทนแรงดัดโค้ง	30
รูปที่ 3.16 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์	31
รูปที่ 3.17 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA)	32
รูปที่ 3.18 เครื่องวัดดัชนีการหลอมไหล (MFI).....	32
รูปที่ 3.19 เครื่องทดสอบอุณหภูมิในการอ่อนตัวของพลาสติก	33
รูปที่ 3.20 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต.....	34
รูปที่ 4.1 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	35
รูปที่ 4.2 FT-IR สเปกตรัมของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ ...	36
รูปที่ 4.3 FT-IR สเปกตรัมของ OMMT.....	37
รูปที่ 4.4 สมบัติด้านแรงดึงและความทนแรงกระแทกของ RPET และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	39
รูปที่ 4.5 ความทนแรงดัดโค้งของ RPET และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ	39
รูปที่ 4.6 สันฐานวิทยาของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ	40
รูปที่ 4.7 ดรรชนีการหลอมไหลของ RPET และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	41
รูปที่ 4.8 DSC เทอร์โมแกรมของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ จากการให้ความร้อนครั้งที่ 2.....	43
รูปที่ 4.9 TGA เทอร์โมแกรมของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	44
รูปที่ 4.10 DTG เทอร์โมแกรมของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	45
รูปที่ 4.11 อุณหภูมิอ่อนตัวของพลาสติกแบบ HDT (ซ้าย) และ VST (ขวา) ของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6.....	45

รูปที่ 4.12	ชั้นทดสอบรูปดัมเบลล์ของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT และ Nylon 6/OMMT (OMMT 1, 3 และ 5 phr).....	46
รูปที่ 4.13	ชั้นทดสอบรูปดัมเบลล์ของนาโนคอมพอสิต 70/30/x (wt%/wt%/phr) RPET/Nylon 6/OMMT (x = 1, 3 และ 5 phr).....	47
รูปที่ 4.14	XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของ (a) OMMT และนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT โดย (b) x = 1, (c) x = 3 and (d) x = 5	48
รูปที่ 4.15	สัณฐานวิทยาที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค TEM ของนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT เมื่อ x เท่ากับ (a) 1 phr, (b) 3 phr และ (c) 5 phr.....	49
รูปที่ 4.16	สมบัติด้านแรงดึงและความทนแรงกระแทกของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT (x = 0, 1, 3 และ 5 phr)	52
รูปที่ 4.17	ความทนแรงดัดโค้งของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT (x = 0, 1, 3 และ 5 phr).....	53
รูปที่ 4.18	สัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT ที่อัตราส่วนต่างๆ	54
รูปที่ 4.19	สัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอสิต Nylon 6/OMMT ที่อัตราส่วนต่างๆ	55
รูปที่ 4.20	สัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอสิต RPET/Nylon 6/OMMT ที่อัตราส่วนต่างๆ	55
รูปที่ 4.21	ดรรชนีการหลอมไหลของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT (x = 0, 1, 3 และ 5 phr).....	57
รูปที่ 4.22	DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 และนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT (x = 0, 1, 3 และ 5 phr) จากการให้ความร้อนครั้งที่ 2.....	58
รูปที่ 4.23	TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT (x = 0, 1, 3 และ 5 phr).....	60
รูปที่ 4.24	DTG เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT (x = 0, 1, 3 และ 5 phr).....	60
รูปที่ 4.25	อุณหภูมิอ่อนตัวของพลาสติก HDT (ซ้าย) และ VST (ขวา) ของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT (x = 0, 1, 3 และ 5 phr).....	62
รูปที่ 4.26	มอดุลัสของ RPET, Nylon 6, พอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 และนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT (x = 1, 3 และ 5 phr)	63

รูปที่ 4.27 แทนเจนต์สูญเสีของ RPET, Nylon 6, พอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 และ
นาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT (x = 1, 3 และ 5 phr) 63



บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันพลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ งานด้านบรรจุภัณฑ์ และเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ ทั้งในบ้านเรือน สำนักงาน และอุตสาหกรรม จึงมีผลให้ปริมาณการใช้พลาสติกเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาที่ตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้จากขยะพลาสติกที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อม และได้กลายเป็นมลพิษที่รุนแรงต่อสิ่งแวดล้อมดังที่ได้ทราบกันดีอยู่แล้ว ซึ่งก็ได้มีการรณรงค์และส่งเสริมให้มีการแยกประเภทขยะต่างๆ จากพลาสติกใช้แล้วกันอย่างจริงจังและต่อเนื่อง โดยเฉพาะขยะจากขวดบรรจุน้ำดื่มและน้ำอัดลม ซึ่งมักถูกใช้เพียงครั้งเดียวแล้วทิ้ง โดยส่วนใหญ่ผลิตจากพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือพีที (poly(ethylene terephthalate), PET) ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเตอร์ชนิดอิมิตัวที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงแก้ว (T_g) อยู่ในช่วง 67–80 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ประมาณ 265 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากพีทีเป็นพลาสติกที่มีสมบัติเด่นด้านความใส น้ำหนักเบา ทนทานต่อสารเคมี การสกัดกันแก๊ส และราคาถูก จึงนิยมนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แก่ ฟิล์ม เส้นใย และบรรจุภัณฑ์ อย่างไรก็ตาม พีทีเป็นพลาสติกที่มีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมสูง ดังนั้นจึงเป็นเรื่องยากที่จะถูกทำให้ย่อยสลายทางชีวภาพ ซึ่งการกำจัดขยะพีทีด้วยวิธีการรีไซเคิลจึงเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจจากทางอุตสาหกรรม โดยกระบวนการรีไซเคิลพีทีที่นิยมใช้ คือ กระบวนการรีไซเคิลเชิงกลและกระบวนการทางเคมี ซึ่งกระบวนการรีไซเคิลเชิงกลเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมมากกว่า เพราะเป็นกระบวนการที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ต้นทุนการดำเนินการต่ำ แต่เนื่องจากกระบวนการรีไซเคิลเชิงกลต้องใช้ความร้อนและแรงเฉือนในกระบวนการ จึงอาจมีผลทำให้ความยาวของสายโซ่และน้ำหนักโมเลกุลของพีทีลดลง สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนลดต่ำลงกว่าพีทีที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการแปรรูป ซึ่งจากสมบัติต่างๆ ที่เสียไประหว่างกระบวนการรีไซเคิลอาจทดแทนได้ด้วยการนำพีทีรีไซเคิล (recycled PET) มาผสมกับพลาสติกประเภทอื่น และ/หรือการใส่สารตัวเติม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติหลากหลาย

โดยงานวิจัยนี้ได้ทดลองนำพีทีรีไซเคิลมาผสมกับไนลอน 6 (Nylon 6) ให้ได้อัตราส่วนที่เหมาะสมก่อนนำไปเตรียมเป็นนาโนคอมพอสิตด้วยมอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) ทั้งนี้เพื่อเปลี่ยนพีทีรีไซเคิลให้เป็นพลาสติกเชิงวิศวกรรม (engineering plastic) ที่มีสมรรถนะการใช้งานเพิ่มขึ้น โดยไนลอน 6 จัดเป็นเทอร์โมพลาสติกเชิงวิศวกรรมที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความแข็งแรง น้ำหนักเบา ขึ้นรูปง่าย มีช่วงอุณหภูมิการใช้งานกว้าง เหนียว ไม่เสีรูปร่าง ทนต่อการขีดถู ติดไฟได้ยาก และทนต่อสารเคมี น้ำมัน และสภาพดินฟ้าอากาศ เป็นต้น

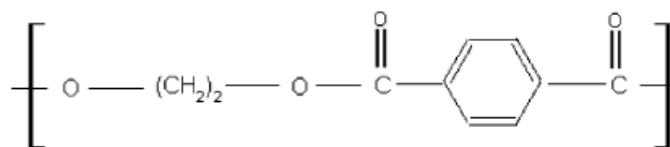
และมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้วประมาณ 47 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 220 องศาเซลเซียส การใช้งานในลอน 6 นอกจากในอุตสาหกรรมสิ่งทอแล้ว ยังสามารถใช้งานในด้านอื่นๆ เช่น ชิ้นส่วนเครื่องจักร อุปกรณ์ และเครื่องมือแทนการใช้โลหะ ส่วนมอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดินเหนียวที่มีอนุภาคระดับนาโนเมตรที่ถูกนำมาใช้เสริมแรงพลาสติกประเภทต่างๆ อย่างแพร่หลาย และได้รับความสนใจจากนักวิจัยจำนวนมากจากทั่วโลกตลอดมา โดยมอนต์มอริลโลไนต์มีโครงสร้างผลึกเป็นแผ่นหรือชั้นของสารประกอบซิลิเกตซ้อนกัน (layered silicates) การใช้มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณเพียงเล็กน้อย (ไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก) สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ได้ดี ซึ่งแตกต่างจากการใช้สารเสริมแรงอนินทรีย์ที่มีอนุภาคระดับไมโครเมตรที่ต้องใช้ในปริมาณมากจึงจะแสดงประสิทธิภาพการเสริมแรง ดังนั้น การใช้มอนต์มอริลโลไนต์จึงไม่มีผลกระทบต่อทั้งความหนาแน่นและน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางหรือทางเลือกในการรีไซเคิลพีทีซีแล้วเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน และสามารถพัฒนาสู่อุตสาหกรรม ซึ่งนอกจากจะช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับพีทีซีแล้ว ยังลดปริมาณการใช้เม็ดพลาสติกใหม่ ลดการใช้พลังงาน ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มากกว่าร้อยละ 30 ช่วยลดต้นทุนการผลิต และลดปัญหาสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly(ethylene terephthalate), PET) [1-6]

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือพีที เป็นพอลิเมอร์เชิงวิศวกรรมที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความใส เสถียรภาพทางความร้อนสูง และทนทานสารเคมี เป็นต้น การนำไปใช้งานส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรม สิ่งทอ พลาสติก และบรรจุภัณฑ์ขวด โครงสร้างหน่วยซ้ำทางเคมีของพีทีแสดงในรูป 2.1 โดยสายโซ่พอลิเมอร์ของพีทีมีความยืดหยุ่นต่ำประกอบด้วยหมู่เอทิลีนและพาราฟีนิลีน (*p*-phenylene) พีทีมีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (T_g) อยู่ในช่วง 69–115 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการหลอมเหลวประมาณ (T_m) 255–265 องศาเซลเซียส



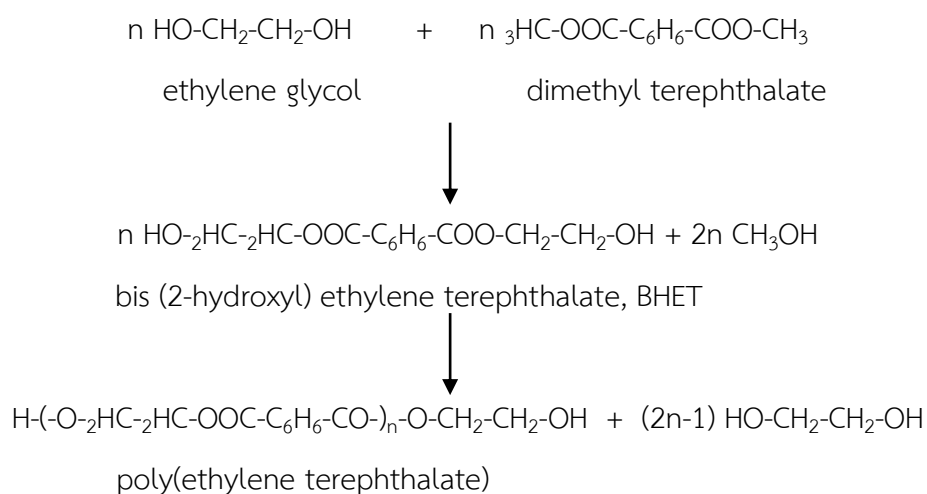
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต [1]

วิธีการสังเคราะห์พีทีนิยมกระทำผ่านปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol, EG) และไดเมทิลเทเรฟทาเลต (dimethyl terephthalate, DMT) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (trans-esterification) จากสารตั้งต้นไดเมทิลเทเรฟทาเลตและเอทิลีนไกลคอลจะได้สารบิสไฮดรอกซิลเอทิลีนเทเรฟทาเลต (bis(2-hydroxy)ethylene terephthalate, BHET) เป็นผลิตภัณฑ์หลัก

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการให้ความร้อนกับสารผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนที่ 1 คือ BHET โดยเพิ่มอุณหภูมิให้สูงถึง 270–285 องศาเซลเซียส และลดความดันในขณะเดียวกัน สาร BHET จะเกิดปฏิกิริยาควบแน่นและได้เป็นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

สมบัติของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตทางการค้าแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต [1, 5]

ตารางที่ 2.1 สมบัติของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตทางการค้า [3]

Property	Value (unit)
Weight-average MW	30,000-80,000 (g/mol)
Density	1.41 (g/cm ³)
Glass transition temperature	69–115 (°C)
Melting temperature	265 (°C)
Young's modulus	1700 (MPa)
Yield strain	4 (%)
Impact strength	90 (J/m)

2.1.1 การนำพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตไปใช้ประโยชน์ [1, 7]

- ขวดบรรจุภัณฑ์
- อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
- ผลิตภัณฑ์ทางยานยนต์
- เครื่องใช้ในครัวเรือน
- อุปกรณ์กีฬา

- ฟิล์ม
- อุตสาหกรรมสิ่งทอ

2.2 การรีไซเคิลพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต [1, 8]

อุตสาหกรรมการรีไซเคิลพีทีเกิดขึ้นจากการที่มีปัญหาการจัดการขยะ ทั้งนี้เนื่องจากพีทีมีอัตราการย่อยสลายตามธรรมชาติที่ช้ามากและไม่สามารถย่อยสลายได้ในสภาวะปกติ ขยะพีทีเป็นขยะพลาสติกที่นำมารีไซเคิลได้หลายครั้ง วัตถุประสงค์หลักมาจากขบวนการบำบัดที่ผ่านการคัดแยกและรีไซเคิลทางกายภาพด้วยกระบวนการรีเคลมเมชัน (reclamation process) เมื่อได้ขยะพีทีที่อยู่ในรูปเกล็ดพลาสติกต้องนำไปผ่านกระบวนการทำความสะอาดและกำจัดสิ่งเจือปน เพราะสิ่งเจือปนต่างๆ มีผลต่อการเสื่อมลงของสมบัติเชิงกลและสมบัติทางเคมีของพีที ตัวอย่างสิ่งเจือปนที่มีในพีที ดังนี้

- การเจือปนของกรด เช่น กรดไฮโดรคลอริก เกิดขึ้นจากการมีพีวีซี (PVC) เจือปน โดยกรดจะเป็นเหมือนตัวเร่งปฏิกิริยาการตัดสายโซ่ (chain scission) ในกระบวนการหลอมผสม
- การเจือปนของน้ำ มีผลให้น้ำหนักโมเลกุลของพีทีรีไซเคิลลดลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (hydrolysis reaction)
- การเจือปนจากสารให้สี เช่น สีจากฉลากหรือสีจากขบวนการบำบัด
- การเจือปนของอะซีทัลดีไฮด์ (acetaldehyde) พบในพีที และพีทีรีไซเคิลเนื่องจากเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาแตกสลายทางความร้อน (degradation reaction)
- สารเจือปนอื่นๆ เช่น น้ำมัน, สารชะล้าง เป็นต้น สารเจือปนเหล่านี้เป็นอันตรายต่อสุขภาพได้หากยังหลงเหลืออยู่ในพีทีรีไซเคิล

2.2.1 กระบวนการรีไซเคิลพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต [1, 8]

กระบวนการรีไซเคิลพีทีมีวิธีหลักๆ 2 วิธี คือ การรีไซเคิลทางเคมีและการรีไซเคิลเชิงกล

กระบวนการรีไซเคิลทางเคมี เป็นการเกิดปฏิกิริยาย่อยสลาย (depolymerization) เพื่อให้ได้เป็นมอนอเมอร์ (monomer) หรือปฏิกิริยาย่อยสลายบางส่วน (partial depolymerization) จะได้โอลิโกเมอร์ (oligomer) ตัวอย่างปฏิกิริยาในกระบวนการรีไซเคิลทางเคมี คือ

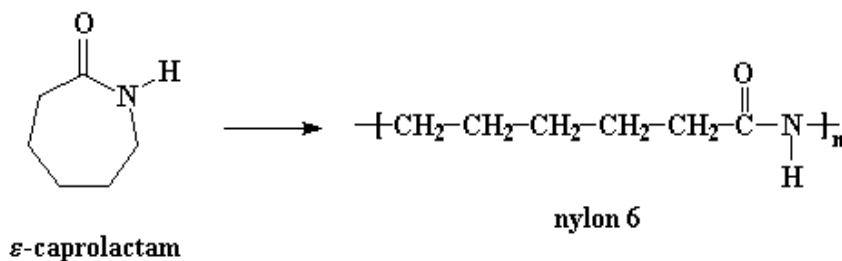
- ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (hydrolysis reaction)
- ปฏิกิริยาเมทานอลิซิส (methanolysis reaction)

- ปฏิกิริยาไกลโคไลซิส (glycolysis reaction)

กระบวนการรีไซเคิลเชิงกล เป็นกระบวนการที่ใช้การหลอมผสมและมีการกำจัดสิ่งเจือปนด้วยการคัดแยก การล้าง และการอบไล่ความชื้น เกล็ดพลาสติกของพีอีรีไซเคิลจะผ่านการอัดรีด (extrusion) เพื่อให้ได้เป็นเม็ดพลาสติก อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการมีสิ่งเจือปนดังกล่าวข้างต้นหรือผลจากการแตกสลายทางความร้อนเป็นผลให้พีอีรีไซเคิลมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำ ข้อดีของกระบวนการรีไซเคิลเชิงกล คือ เป็นวิธีที่ง่าย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูง อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของกระบวนการนี้ คือ การลดลงของน้ำหนักโมเลกุลและความหนืด โดยแบ่งวิธีรีไซเคิลเชิงกลเป็น 2 วิธี คือ กระบวนการรีเคลมเมชัน (reclamation process) เป็นกระบวนการที่มีการคัดแยกขยะพลาสติกตามชนิดของพอลิเมอร์ มีการกำจัดสิ่งเจือปน ล้าง และลดขนาดก่อนเข้าสู่กระบวนการอัดรีด และกระบวนการคอมมิงเกิล (commingled processing) ขยะพลาสติกจะถูกรวบรวมในสภาพขยะผสมเข้าสู่กระบวนการผลิตโดยไม่ผ่านการคัดแยกตามประเภทของพลาสติก กระบวนการนี้จึงมักมีสิ่งเจือปนมากกว่า

2.3 ไนลอน 6 (Nylon 6) [5, 9, 10]

ไนลอน 6 มีสมบัติที่ดีหลายประการ ได้แก่ ขึ้นรูปได้ง่าย มีความทนแรงกระแทกสูง มีความเหนียวยืดหยุ่น ทนทานต่อการสึกหรอ ทนน้ำมัน และไม่นำไฟฟ้า มี T_g อยู่ในช่วง 69–115 องศาเซลเซียส และ T_m อยู่ในช่วง 255–265 องศาเซลเซียส โครงสร้างของไนลอน 6 ประกอบด้วยหน่วยซ้ำของพอลิเอไมด์ที่สายโซ่คาร์บอนมีจำนวนคาร์บอนเท่ากับ 6 โดยหมู่เอไมด์ (-CO-NH-) ในสายโซ่ไนลอน 6 สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ มีความเป็นผลึกสูง สังเคราะห์ได้จากมอนอเมอร์ที่เป็นวง (cyclic) ได้แก่ แคโพรแลทแอม (caprolactam) ผ่านปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบเปิดวงแหวน (ring opening polymerization) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 การสังเคราะห์อาจเป็นแบบเบช (batch) หรือแบบต่อเนื่อง (continuous) สมบัติของไนลอน 6 ทางการค้าแสดงในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไนลอน 6 [10]

ตารางที่ 2.2 สมบัติของไนลอน 6 ทางการค้า [5]

Property	Value (unit)
Weight-average MW	< 10,000 (g/mol)
Density	1.08 (g/cm ³)
Tensile strength	75.8 (MPa)
Elongation at break	100-200 (%)
Impact strength	80.1-160.2 (J/m)
Heat distortion temperature	60 (°C)

2.3.1 การใช้งานของไนลอน 6 [9, 10]

ไนลอน 6 สามารถนำไปใช้งานในหลายๆ ด้าน ได้แก่

- อุตสาหกรรมสิ่งทอ เช่น เครื่องนุ่งห่ม
- อุปกรณ์กีฬา เช่น ตาข่ายไม้แบดมินตัน
- อุปกรณ์ทางไฟฟ้า เช่น สายเคเบิล
- ของเล่นและของใช้อื่นๆ

2.4 พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) [11-13]

การนำพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันที่มีสมบัติต่างกันมาผสมกันเพื่อให้มีสมบัติตามที่ต้องการนำไปใช้งานเป็นการทำให้ได้พอลิเมอร์ผสม ในการผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากันต้องคำนึงถึงความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์นั้นๆ ทั้งนี้เพราะสมบัติของพอลิเมอร์ผสมขึ้นกับโครงสร้างของพอลิเมอร์ สภาพขั้ว พฤติกรรมการไหล การกระจายตัว และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ เป็นต้น การผลิตพอลิเมอร์ผสมมีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ขึ้นมา คือ สามารถปรับปรุงสมบัติได้ตามต้องการโดยเลือกจากชนิดของพอลิเมอร์และอัตราส่วนที่เหมาะสม มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าการสังเคราะห์ มีระยะเวลาในการผลิตที่รวดเร็ว และลดต้นทุนในการผลิต เช่น การผสมเม็ดพลาสติกบริสุทธิ์กับพลาสติกที่นำกลับมาใช้ใหม่ทั้งแบบที่ใช้เศษพลาสติกบดและพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว

2.4.1 กลไกความเข้ากันได้ [11-14]

การผสมพอลิเมอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การผสมแบบเกิดปฏิกิริยาเคมี (reactive blending) เป็นการผสมพอลิเมอร์ที่มีการเกิดพันธะทางเคมีระหว่างหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ และการผสมแบบไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี (non-reactive blending) เป็นการผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากันด้วยการใช้แรงเฉือนจากเครื่องจักร เช่น เครื่องอัดรีด ทำให้พอลิเมอร์เกิดการกระจายตัวได้ดีมากขึ้น จุดประสงค์ของการผสมพอลิเมอร์เข้าด้วยกัน คือ ทำให้พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด เข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยพอลิเมอร์แต่ละชนิดจะหลอมเหลวเข้าสู่แต่ละส่วนกันอย่างสมบูรณ์เกิดเป็นเฟสเดียวกัน เรียกว่า การผสมที่เข้ากัน (miscible) ซึ่งจะแสดงลักษณะที่เหมือนเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียว (homopolymer) แต่หากพอลิเมอร์ผสมยังคงแสดงลักษณะของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน จะเป็นการผสมแบบไม่เข้ากัน (immiscible) การที่พอลิเมอร์ไม่สามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้นั้นทำให้เกิดเฟสที่แตกต่างกัน ส่วนที่เป็นองค์ประกอบย่อยจะแยกตัวออกจากส่วนที่เป็นองค์ประกอบหลัก ทำให้เกิดเฟสที่ไม่ต่อเนื่องกัน ดังนั้น สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมจึงขึ้นกับขนาดของเฟสย่อย รูปร่าง และการกระจายตัวของเฟสย่อย อีกทั้งพฤติกรรมการไหลในระหว่างกระบวนการผสมก็ส่งผลต่อสมบัติของชิ้นงานที่ขึ้นรูปอีกด้วย

อย่างไรก็ตาม การทำพอลิเมอร์ผสมอาจมีผลต่อการลดลงของสมบัติเชิงกลอันเนื่องจากการมีแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัส (interfacial adhesion) ต่ำ ซึ่งการปรับปรุงเพื่อให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติที่ดีขึ้น จึงต้องพิจารณาด้านการปรับปรุงแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสรวมถึงสัณฐานวิทยาของผิวสัมผัส เนื่องจากมีความสำคัญต่อการถ่ายโอนความเค้น (stress transfer)

2.4.2 สมบัติและสัณฐานวิทยา [12, 13]

ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบและสัดส่วนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในพอลิเมอร์ผสมจะมีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากความแตกต่างของสมบัติ ลักษณะเฉพาะตัว พฤติกรรมการไหล และการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของแต่ละองค์ประกอบในพอลิเมอร์ผสม ในระบบการผสมที่พอลิเมอร์สามารถเข้ากันได้สมบูรณ์ (การผสมที่เข้ากัน) จะแสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เป็นเฟสเดียว คือ เหมือนเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียว ส่วนในระบบการผสมที่มีความเข้ากันได้บางส่วนนั้นอนุภาคของเฟสกระจาย (dispersed phase) จะกระจายอยู่ในเฟสหลักหรือเมทริกซ์ (matrix) และมีแรงดึงดูดระหว่างเฟส หากระบบการผสมมีความเข้ากันน้อยหรือไม่เข้ากันจะเห็นเฟสกระจายขนาดใหญ่กระจายอยู่ในเฟสหลักโดยไม่มีแรงดึงดูดหรือมีอย่างอ่อนๆ ระหว่างเฟส

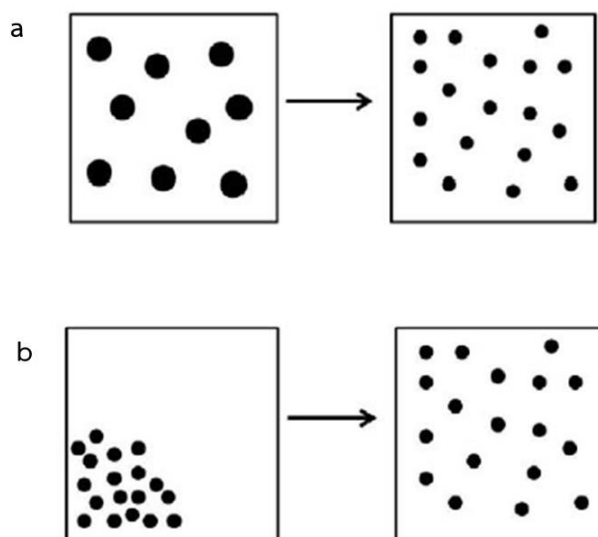
การผสมพอลิเมอร์แต่ละชนิดเข้าด้วยกันส่วนใหญ่จะมีความไม่เข้ากัน โดยส่วนของเฟสหลักคือ พอลิเมอร์ที่มีปริมาณมากกว่า และเฟสกระจายคือ พอลิเมอร์ที่มีปริมาณน้อยกว่า โดยลักษณะของเฟสกระจายอาจมีรูปร่างเป็นทรงกลม เส้นใย หรือแผ่น ขึ้นกับชนิดและภาวะในการขึ้นรูป การเพิ่มปริมาณของเฟสกระจายในพอลิเมอร์ผสมจะส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันเองของเฟสกระจาย และหากปริมาณของเฟสกระจายยังเพิ่มขึ้นอีก จะทำให้เกิดการกลับเฟสเปลี่ยนเป็นเฟสหลักในพอลิเมอร์ผสม

2.4.3 หลักการของการผสม [12]

ในการผสมพอลิเมอร์เป็นการทำให้ของผสมมีพื้นที่ผิว (surface area) เพิ่มขึ้น โดยจะเกิดการเคลื่อนที่ของมวล (mass transfer) ทำให้องค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมเปลี่ยนแปลงขนาดในช่วงเวลาที่ทำกรผสม วิธีการผสมและการเลือกใช้เครื่องมือที่เหมาะสมในการผสมพอลิเมอร์ รวมทั้งสารเติมแต่งมีผลต่อระดับการกระจายตัวของสารเติมแต่ง (degree of dispersion) จะส่งผลต่อพฤติกรรมการไหล (rheology) ของพอลิเมอร์ โดยสามารถแบ่งระบบของการผสมได้ดังนี้

- ระบบของแข็ง-ของแข็ง (solid-solid mixing system) (รูปที่ 2.4) ซึ่งการผสมระบบนี้อาจทำให้อุณหภูมิกระจายแยกออกจากกันโดยไม่มี การลดขนาดอนุภาค (distributive mixing) หรือทำให้อุณหภูมิกระจายที่เกาะกลุ่มกันลดขนาดลง (dispersive mixing) ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของเครื่องผสม สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการผสมระบบของแข็ง-ของแข็ง คือ ขนาดอนุภาค (particle size) การกระจายขนาดอนุภาค (particle size distribution) รูปร่างของอนุภาค (particle shape) ความหนาแน่น (bulk density) การยึดติดระหว่างผิว (interfacial adhesion) ความมีขั้ว (polarity) และความบริสุทธิ์

- ระบบของแข็ง-ของเหลว (solid-liquid mixing system) เป็นระบบที่มีของแข็งกระจายอยู่ในของเหลว ตัวอย่างเช่น การผสมสารตัวเติมในพอลิเมอร์หลอมเหลว โดยเป็นการให้ความร้อนเพื่อให้พอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลวแล้วมีผลทำให้อุณหภูมิของสารตัวเติมถูกปกคลุมด้วยพอลิเมอร์ชนิดนั้นในระหว่างกระบวนการผลิตด้วยเครื่องอัดรีดในการผสม



รูปที่ 2.4 ลักษณะการผสมแบบ (a) dispersive mixing และ (b) distributive mixing [12]

- ระบบของเหลว-ของเหลว (liquid-liquid mixing system) เป็นการผสมพอลิเมอร์มากกว่าสองชนิดเข้าด้วยกันโดยการหลอมผสม โดยเพื่อให้เกิดการผสมแบบไม่มีการลดขนาดของอนุภาค จะต้องทำให้ของเหลวที่ผสมเกิดการแยกออกจากกัน แล้วทำให้เกิดการจัดเรียงตัวในทิศทางใหม่ๆ โดยมีการให้แรงเค้นเฉือนและแรงดัดที่สูงและสม่ำเสมอ ส่วนการผสมแบบที่มีการลดขนาดของอนุภาคที่เกาะกลุ่มกันอยู่ ส่วนใหญ่เป็นการทำพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากพอลิเมอร์หลอมเหลวทั้ง 2 เฟส ไม่สามารถเข้ากันได้ หรืออาจเข้ากันได้เพียงบางส่วน

2.4.4 เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการแปรรูป [8]

เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปพอลิเมอร์ให้เป็นผลิตภัณฑ์เพื่อนำไปทดสอบหรือใช้งาน มีหลายวิธี ได้แก่ การอัดรีด (extrusion) และการฉีดแบบ (injection molding)

การอัดรีด เป็นกระบวนการที่อัดรีดพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านหัวตายที่มีขนาดและรูปร่างที่ต้องการ สามารถใช้ในการผสมพอลิเมอร์หรือผสมพอลิเมอร์กับสารเติมแต่ง โดยพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ออกจากหัวตายจะถูกทำให้เย็นและแข็งตัวด้วยการหล่อเย็น ส่วนใหญ่เครื่องอัดรีดแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ เครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยว (single screw extruder) และเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (twin screw extruder)

การฉีดแบบ เป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในการขึ้นรูปพลาสติก โดยเริ่มจากการป้อนเม็ดพลาสติกเข้าไปในเครื่อง จากนั้นให้ความร้อนจนพอลิเมอร์หลอมเหลวและไหลได้ สกรูจึงเคลื่อนที่เพื่อฉีดพอลิเมอร์ หลอมเหลวไปยังแม่แบบเพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานตามต้องการ

2.5 สารเติมแต่ง (Additives) [12, 14-16]

การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ให้เป็นไปตามความต้องการ สามารถใช้วิธีการเตรียมพอลิเมอร์ผสม แต่ส่วนใหญ่ในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกจะเป็นการผสมพอลิเมอร์กับสารเติมแต่งเพื่อผลิตเป็นมาสเตอร์แบตช์ (masterbatch) ที่มีสารเติมแต่งผสมในปริมาณความเข้มข้นสูง เรียกว่า การทำคอมพาวนด์ (compounding) จากนั้นจึงนำมาสเตอร์แบตช์ไปผสมกับเม็ดพลาสติกบริสุทธิ์ในอัตราส่วนที่ทำให้เจือจางลง เพื่อใช้ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์

สารเติมแต่งช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน โดยสารตัวเติมและสารเสริมแรง (filler and reinforcing filler) เป็นสารเติมแต่งในการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ มีเป้าหมายในการปรับปรุงความแข็งตึง (stiffness) เป็นการเพิ่มค่ายังสัมมอดูลัสและอุณหภูมิการโค้งงอของพลาสติก (heat deflection temperature) เรียกสารตัวเติมเหล่านี้ว่า active filler นอกจากนี้ ยังมีสารตัวเติมราคาถูกที่มีการใช้เพื่อลดปริมาณการใช้พลาสติก และเพื่อลดต้นทุนการผลิต เรียกว่า inactive filler ปัจจุบันได้มีการเติมอนุภาคที่มีขนาดระดับนาโนเมตร เช่น นาโนเคลย์ (nanoclay) ทำให้ได้วัสดุนาโนคอมโพสิต (nanocomposite) ที่มีจุดเด่นด้านความแข็งแรง การสกัดกั้นการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซ รวมถึงการหน่วงไฟ ในการผสมพอลิเมอร์และสารเติมแต่งจะมีความต้องการผสมเพื่อให้ได้เป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด และต้องคำนึงถึงการจัดการกับสารเติมแต่งในระหว่างกระบวนการผลิต เนื่องจากสารเติมแต่งส่วนใหญ่มีอนุภาคขนาดเล็ก ทำให้การจัดการเป็นไปได้โดยยากและอาจเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน

2.5.1 หลักการผสมสารเติมแต่งในพอลิเมอร์ [12, 14-16]

การผสมพอลิเมอร์กับสารเติมแต่งในกระบวนการผลิตมีได้หลายวิธี โดยขึ้นกับลักษณะของวัตถุดิบ กรณีที่ทำการผสมสารเติมแต่งที่เป็นอนุภาคของแข็งกับเม็ดพลาสติกหรือผงพลาสติก จะเป็นการผสมในระบบของแข็ง-ของแข็ง จากนั้นเมื่อให้ความร้อนจนพอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลว จะทำให้อนุภาคของสารเติมแต่งเกิดการเปียกผิวอย่างสมบูรณ์ด้วยพอลิเมอร์ เป็นการผสมในระบบของแข็ง-ของเหลว ซึ่ง

เป็นวิธีการที่นิยมใช้ในกระบวนการผลิต เนื่องจากพอลิเมอร์ที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นเทอร์โมพลาสติกที่สามารถหลอมได้โดยใช้เครื่องอัดรีดทั้งแบบเกลียวเดี่ยวและเกลียวคู่ ส่วนกรณีการผสมพอลิเมอร์มากกว่า 2 ชนิด โดยการหลอมผสมจะเป็นการผสมในระบบของเหลว-ของเหลว ตัวอย่างสารตัวเติมประเภทต่างๆ ที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างของสารตัวเติมประเภทต่างๆ [15]

Chemical Family	Examples
Inorganics oxides	Glass (fibers, spheres, hollow spheres, flakes), MgO, SiO ₂ , Sb ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃
Hydroxides	Al(OH) ₃ , Mg(OH) ₂
Salts	CaCO ₃ , BaSO ₄ , CaSO ₄ , phosphates
Silicates	Talc, mica, kaolin, wollastonite, montmorillonite, nanoclays, feldspar, asbestos
Metals	Boron, steel
Organics carbon, graphite	Carbon fibers, graphite fibers and flakes, carbon nanotubes, carbon black
Natural polymers	Cellulose fibers, wood flour and fibers, flax, cotton, sisal, starch
Synthetic polymers	Polyamide, polyester, aramid, polyvinyl alcohol fibers

2.6 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonites) [17-19]

มอนต์มอริลโลไนต์ เป็นแร่ดินเหนียวที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติมีโครงสร้างเป็นผลึกหรือแผ่นหรือชั้นของสารประกอบซิลิเกตซ้อนกัน มีสูตรโมเลกุล $M_x(Al_{4-x}Mg_x)Si_8O_{20}(OH)_4$ มีค่า aspect ratio สูง นิยมนำไปใช้เสริมแรงในวัสดุพอลิเมอร์ พื้นผิวของเลเยอร์ซิลิเกต (layered silicate) จะมีประจุลบ โดยแต่ละชั้นสามารถยึดกันด้วยประจุบวกของโซเดียมไอออน (Na⁺) และแคลเซียมไอออน (Ca⁺) เป็นต้น ทำหน้าที่ยึดชั้นของซิลิเกตไว้ด้วยกัน และเนื่องจากแร่ชนิดนี้มีโครงสร้างที่ซ้อนกันอย่างมีระเบียบทำให้ยากต่อการผสมกับพอลิเมอร์ จึงต้องทำการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งวิธีการที่นิยมใช้ดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ คือ การทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุ โดยใช้สารอินทรีย์ที่มีประจุบวก เช่น quaternary ammonium

salt หรือ phosphonium salt เพื่อให้เกิดการแทนที่ประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นของซิลิเกต ทำให้ได้มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรหรือออร์แกโนเคลย์ (organoclay) สมบัติของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 และโครงสร้างของสารดัดแปรดังแสดงในรูปที่ 2.5

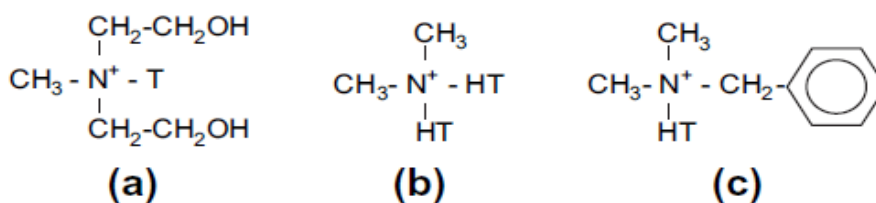
ตารางที่ 2.4 สมบัติของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรชนิดต่างๆ [19]

Characteristics	Cloisite 10A	Cloisite 15A	Cloisite 30B
Organic Modifier	2MBHT ^a	2M2HT ^b	MT2EtOH ^c
CEC (meq/100g clay)	125	125	90
Moisture (%)	<2	<2	<2
Weight loss on ignition (%)	39	43	30
Density (g/cc)	1.90	1.66	1.98
Particle size (μm , 50% less than)	13.67	5.88	13.68

^aDimethyl, benzyl, hydrogenated tallow, quaternary ammonium

^bDimethyl, dehydrogenated tallow, quaternary ammonium

^cMethyl, tallow, bis-2-hydroxyethyl, quaternary ammonium



รูปที่ 2.5 Cationic modifiers ของเคลย์ (a) Cloisite30B, (b) Cloisite15A และ (c) Cloisite10A โดย T=tallow (~65% C18, ~30% C16, ~5% C14) [2]

2.6.1 ประโยชน์ของมอนต์มอริลโลไนต์ [17-19]

- เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุพอลิเมอร์
- เพิ่มความสามารถในการเป็นฉนวนที่ดีป้องกันการลามไฟได้
- สกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำ
- ทนทานต่อสารเคมี

2.7 นาโนคอมพอสิต (Nanocomposites) [15-19]

คอมพอสิต (composites) คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างที่ต่างกันผสมกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป โดยคอมพอสิตประกอบด้วยส่วนที่เป็นวัสดุหลักหรือเมทริกซ์และวัสดุที่เป็นเฟสกระจายหรือเฟสเสริมแรง (reinforced phase) อยู่ในเมทริกซ์ โดยถ้าปริมาณ ขนาด รูปร่าง ลักษณะการกระจายตัว หรือการจัดเรียงตัวของเฟสกระจายแตกต่างกัน จะส่งผลถึงสมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิตนั้น ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของคอมพอสิตได้เป็น 3 ประเภท ตามลักษณะของสารตัวเติม คือ

- คอมพอสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค (particle-reinforced composites) เป็นคอมพอสิตที่มีอนุภาคของวัสดุกระจายตัวอยู่ โดยอนุภาคเสริมแรงมีรูปร่างหลายแบบ เช่น แผ่นบาง (flake), ทรงกลม (particle) หรือเม็ดขนาดใหญ่ (filler)

- คอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (fiber-reinforced composites) เส้นใยสามารถใช้ในการเสริมแรงได้เนื่องจากมีอัตราส่วนของความยาวและขนาดเส้นรอบวง (length/diameter ratio) ที่สูง เช่น ฝ้าย (เส้นใยจากธรรมชาติ) และพอลิเอสเตอร์ (เส้นใยสังเคราะห์) เป็นต้น

- คอมพอสิตเสริมแรงด้วยโครงสร้าง (structural composites) โดยแบ่งเป็นคอมพอสิตแบบชั้นและคอมพอสิตแผ่นประกอบแซนด์วิช

พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต คือ วัสดุคอมพอสิตที่อนุภาคภายในพอลิเมอร์มีมิติอย่างน้อย 1 มิติ ที่มีขนาดระดับนาโนเมตร กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของอนุภาคตามจำนวนมิติที่มีขนาดระดับนาโนเมตรออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

- isodimensional nanoparticle คือ อนุภาคที่มีขนาดทั้ง 3 มิติอยู่ในระดับนาโนเมตร เช่น ซิลิกา และไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นต้น

- nanotubes หรือ whiskers คือ อนุภาคที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรอยู่ 2 มิติ ส่วนอีกด้านมีโครงสร้างที่ยาวกว่า เช่น คาร์บอนนาโนทิวบ์ (carbon nanotubes) เป็นต้น

- sheet คือ อนุภาคที่มีขนาดระดับนาโนเมตรอยู่ 1 มิติ โดยความหนาอยู่ในระดับนาโนเมตร ส่วนความกว้างและยาวอาจมากถึง 100–1000 นาโนเมตร เช่น มอนต์มอริลโลไนต์ เป็นต้น

2.7.1 โครงสร้างของนาโนคอมพอสิต [17, 18]

โครงสร้างของนาโนคอมพอสิตขึ้นกับองค์ประกอบที่เลือกใช้และวิธีในการเตรียม ส่วนใหญ่อนุภาคที่ใช้จะเป็นเคลย์ประเภทเลเยอร์ซิลิเกตในตระกูล 2:1 ฟิลโลซิลิเกต (phyllosilicates) ภายใน

โครงสร้างประกอบด้วยชั้นทรงสี่หน้า (tetrahedral sheet) ของซิลิกาประกบกันอยู่ โดยภายในเป็นชั้นทรงแปดหน้า (octahedral sheet) ของอะลูมินาหรือแมงกานีส ความหนาของชั้นประมาณ 1 นาโนเมตร และขนาดพื้นผิว (lateral dimension) ตั้งแต่ 30 นาโนเมตร ถึงหลายไมครอนหรือใหญ่กว่านั้นในแต่ละชั้นของแผ่นซิลิกาที่ซ้อนกันยึดเหนี่ยวด้วยแรงแวนเดอวาลส์ (van der Waals) เรียกว่า interlayer หรือ gallery บริเวณพื้นผิวของแต่ละชั้นมีประจุลบ จึงมีแมกนีเซียม อะลูมิเนียม โซเดียม แคลเซียม หรือธาตุอื่นๆ ที่มีประจุบวกมาแทรกอยู่บริเวณช่องว่างระหว่างชั้นผลึก ด้วยเหตุที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นของซิลิกาเป็นแรงที่อ่อนดั่งนั้น การสอดแทรก (intercalation) ของโมเลกุลเล็กๆ ระหว่างชั้นจึงเกิดขึ้นได้ ตัวอย่างของโครงสร้างทางเคมีและขนาดของอนุภาคของเลเยอร์ซิลิเกตในตระกูล 2:1 พิโลซิลิเกต ดังแสดงในตารางที่ 2.5

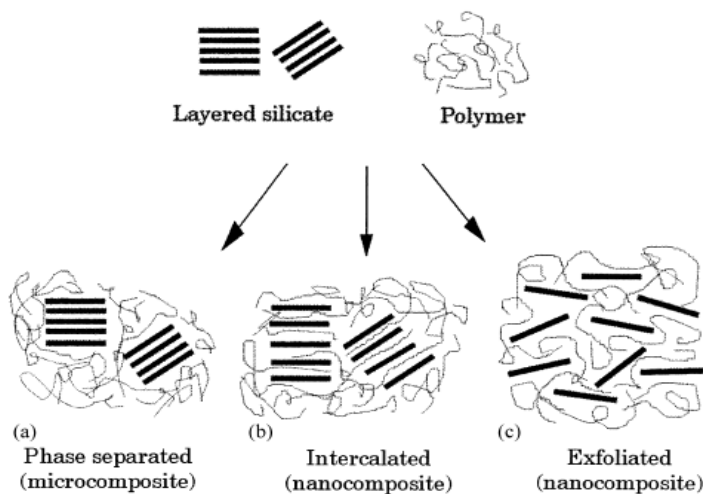
ตารางที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีและขนาดของอนุภาคของเลเยอร์ซิลิเกตตระกูล 2:1 พิโลซิลิเกต [17]

Layered silicate	สูตรโมเลกุล	ขนาดอนุภาค (nm)
Montmorillonite	$M_x(Al_{4-x}Mg_x)Si_8O_{20}(OH)_4$	218
Hectorite	$M_x(Mg_{6-x}Li_x)Si_8O_{20}(OH)_5$	46
Saponite	$M_xMg_6(Si_{8-x}Al_x)Si_8O_{20}(OH)_6$	165

M คือ monovalent cation, x คือ degree of isomorphous substitution (ระหว่าง 0.5 และ 1.3)

ในกลุ่มของเลเยอร์ซิลิเกตที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม คือ เคลย์ (clay) โดยนาโนคอมพอสิตของเคลย์แบ่งเป็น 3 ชนิด ตามลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคเคลย์ในพอลิเมอร์ (รูปที่ 2.6) ได้แก่

1. Phase separated (microcomposite) เป็นคอมพอสิตที่สายโซ่พอลิเมอร์ไม่สามารถเข้าไปสอดแทรกระหว่างเลเยอร์ซิลิเกตได้ เกิดการแยกกันของเฟสพอลิเมอร์และอนุภาคเคลย์ โดยสมบัติของคอมพอสิตยังคงเหมือนพอลิเมอร์ตั้งต้น
2. Intercalated (nanocomposite) เป็นนาโนคอมพอสิตที่สายโซ่พอลิเมอร์สามารถสอดแทรกเข้าไประหว่างเลเยอร์ซิลิเกตได้อย่างน้อย 1 สายโซ่ ทำให้เกิดระยะห่างระหว่างเลเยอร์ซิลิเกตมากขึ้น แต่ยังคงความเป็นระเบียบของชั้นที่ซ้อนกันอยู่
3. Exfoliated (nanocomposite) เป็นนาโนคอมพอสิตที่สายโซ่พอลิเมอร์เข้าไปทำให้เลเยอร์ซิลิเกตเกิดการแยกออกจากกันอย่างสมบูรณ์ จะเห็นอนุภาคเคลย์กระจายอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์



รูปที่ 2.6 การกระจายตัวของเคลย์ในพอลิเมอร์ [17]

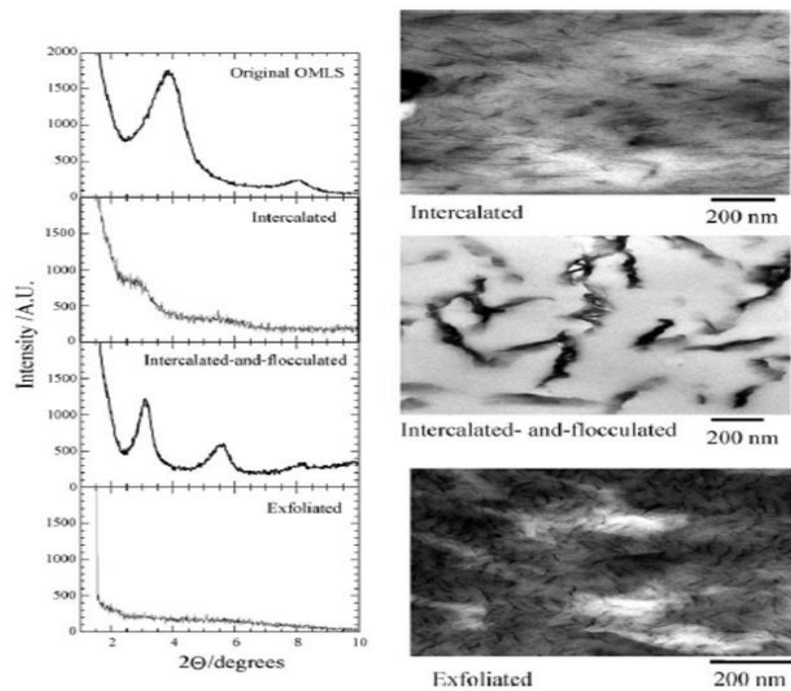
2.7.2 เทคนิคการเตรียมนาโนคอมพอสิต [17, 18]

กระบวนการเตรียมนาโนคอมพอสิต มีเทคนิคที่สำคัญในการเตรียม ดังนี้

- Exfoliation-adsorption เป็นวิธีที่ชั้นเลเยอร์ซิลิเกตเกิดการแยกกันโดยใช้สารละลายที่มีพอลิเมอร์ละลายอยู่แต่เนื่องจากเลเยอร์ซิลิเกตมีแรงดึงดูดระหว่างชั้นที่ไม่แข็งแรงทำให้ง่ายต่อการกระจายตัวในตัวทำละลาย พอลิเมอร์จะถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของแผ่นและเมื่อตัวทำละลายระเหยออกไป ทำให้ได้นาโนคอมพอสิตที่มีเลเยอร์ซิลิเกตกระจายตัวอยู่ในเฟส
- In situ intercalative polymerization เป็นเทคนิคที่ทำให้เลเยอร์ซิลิเกตบวมตัวในสารละลายของมอนอเมอร์ทำให้พอลิเมอร์เกิดขึ้นระหว่างชั้นของเลเยอร์ซิลิเกต การพอลิเมไรเซชันเกิดขึ้นได้โดยการใช้ความร้อนหรือการใช้รังสีในการกระตุ้น
- Melt intercalation เลเยอร์ซิลิเกตถูกผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ในภาวะหลอมเหลว หากพื้นผิวของเลเยอร์ซิลิเกตมีความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ จะทำให้พอลิเมอร์สามารถเข้าไปแทรกระหว่างชั้นของเลเยอร์ซิลิเกตได้ เกิดการสอดแทรก (intercalated) หรือเกิดการแยกออก (exfoliated) ของชั้นเลเยอร์ซิลิเกต เป็นเทคนิคที่ไม่ต้องใช้ตัวทำละลาย
- Template synthesis เป็นเทคนิคที่นำเลเยอร์ซิลิเกตไปทำให้เกิดการบวมตัวในสารละลายของพอลิเมอร์และทำให้พอลิเมอร์เกิดการเติบโตเป็นผลึกอยู่ที่ระหว่างเลเยอร์

2.7.3 การวิเคราะห์นาโนคอมพอสิต [17, 18]

เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างของนาโนคอมพอสิต คือ เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-Ray diffractometer, XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) โดยเทคนิค XRD ใช้ในการตรวจสอบการสอดแทรกของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เข้าไประหว่างชั้นของเลเยอร์ซิลิเกต โดยพิจารณาจากค่า d (ระยะห่างระหว่างชั้นของเลเยอร์ซิลิเกต) ของนาโนคอมพอสิตที่มีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับซิลิเกตบริสุทธิ์ แสดงว่าพอลิเมอร์สามารถสอดแทรกเข้าไประหว่างชั้นของเลเยอร์ซิลิเกตได้ ส่วนการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านจะใช้ในการพิสูจน์สัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอสิตเพื่อตรวจสอบลักษณะโครงสร้างที่เกิดขึ้น ดังแสดงตัวอย่างผลที่ได้จากการตรวจสอบในรูปแบบที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กราฟที่ได้จากเทคนิค XRD (ซ้าย) และสัณฐานวิทยาที่ได้จากเทคนิค TEM (ขวา) [18]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Cho และคณะ [20] ได้ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตของไนลอน 6 และสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ คือ เส้นใยแก้ว มอนต์มอริลโลไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ด้วยวิธีการหลอมผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดทั้งแบบเกลียวเดี่ยวและเกลียวคู่ โดยเปรียบเทียบผลของการหลอมผสมภายใต้ภาวะต่างกันต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการไหล และการกระจายตัวของสารตัวเติมเสริมแรงในพอลิเมอร์ จากผลการทดลอง พบว่า การผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่มีประสิทธิภาพในการผสมที่ดีกว่า และผลของสัญญาณวิทยาแสดงให้เห็นว่ามอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรสามารถกระจายตัวในไนลอน 6 ได้ดี ส่งผลให้นาโนคอมพอสิตของไนลอน 6 และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมีสมบัติเชิงกลสูง แต่มีอุณหภูมิหลอมเหลวลดลง

Pegorretti และคณะ [21] ศึกษาการเตรียมนาโนคอมพอสิตของเพ็ทรีไซเคิลกับมอนต์มอริลโลไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในปริมาณร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแบบหลอมผสมจากการทดลอง พบว่า การกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในเพ็ทรีไซเคิลดีกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ไม่ดัดแปร และจากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า ทั้งมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรและไม่ดัดแปรมีผลทำให้ยังสัมมอดูลัส ของนาโนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความทนแรงดึงลดลงตามปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่เพิ่มขึ้น

Kusmono และคณะ [22] ได้ศึกษาการเตรียมนาโนคอมพอสิตของพอลิเมอร์ผสมไนลอน 6/พอลิโพรพิลีน (70:30) เสริมแรงด้วยมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร โดยใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิก แอนไฮไดรด์ (PP-g-MA) เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ด้วยวิธีการหลอมผสมและขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยกระบวนการฉีดแบบ จากการทดลอง พบว่า นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มีโครงสร้างเป็นทั้งแบบสอดแทรกและแบบแยกแผ่น ซึ่งมีผลทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใส่ PP-g-MA เข้าไปในนาโนคอมพอสิต พบว่า ได้โครงสร้างแบบแยกแผ่นเพียงอย่างเดียว ซึ่งทำให้นาโนคอมพอสิตมีความทนแรงดึง ความทนแรงกระแทก และความเหนียวเพิ่มขึ้นอีกด้วย

Novello และคณะ [23] ศึกษาการเตรียมคอมพอสิตของพอลิเมอร์ผสมเพ็ทรีไซเคิล/พอลิเอไมด์ 66 เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วสั้น (short glass fiber) โดยการหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ และขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ เพื่อเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนระหว่างเพ็ทรีไซเคิล/พอลิเอไมด์ 66 (75:25, 50:50 และ 25:75) และผลของการใส่เส้นใยแก้วสั้น 30 ส่วน โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม 100 ส่วนซึ่งผลของสัญญาณวิทยาแสดงให้เห็นว่าเส้นใยแก้วสั้นมีการกระจายตัวที่ดีใน

พอลิเมอร์เมทริกซ์ และการเติมเส้นใยแก้วเส้นมีผลทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นมากกว่าพอลิเมอร์ผสมพีอีรีไซเคิล/พอลิเอไมด์ 66 ที่ทุกอัตราส่วน

Calcagno และคณะ [24] ได้ศึกษาผลของการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ต่อสัณฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/พีอี พบว่า การเติมมอนต์มอริลโลไนต์ลงในพอลิเมอร์ผสมมีผลทำให้นาโนคอมพอสิตของพอลิโพรพิลีน/พีอีมีโครงสร้างแบบแทรกสอด แต่สมบัติเชิงกลต่ำลง เนื่องจากมีแรงยึดระหว่างเฟสต่ำ จึงได้เติมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม ทำให้การยึดเกาะระหว่างเฟสดีขึ้น ส่งผลให้นาโนคอมพอสิตของพอลิโพรพิลีน/พีอีมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

Chuayjuljit และคณะ [25] ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพีอีรีไซเคิลด้วยพอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรพทาเลต หรือพีแบต (poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) โดยเตรียมพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50 และ 0/100 โดยน้ำหนัก และศึกษาผลของโวลลาสโทไนต์ในคอมพอสิตของพีอีรีไซเคิล/พีแบต/โวลลาสโทไนต์ จากการทดลอง พบว่า การเติมพีแบตทำให้พีอีรีไซเคิลมีการยึดตัว ณ จุดขาดสูงขึ้น และการเติมโวลลาสโทไนต์มีผลทำให้พอลิเมอร์คอมพอสิตมีความทนแรงดึงและเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบ

1. เกล็ดพีอีทีไซเคิล (RPET flakes) ที่ได้จากการบดขวดพลาสติก
2. เม็ดพลาสติกพอลิเอไมด์ 6 หรือไนลอน 6 (polyamide-6 หรือ Nylon 6)เกรด 1013B จากบริษัท UBE Chemical (Asia) Company
3. มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร (organo-modified montmorillonite, OMMT, Cloisite 30B) ที่ดัดแปรด้วย bis-(2-hydroxyethyl) methyl hydrogenated tallow ammonium จากบริษัท Southern Clay Product, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2 เครื่องมือที่ใช้ผสมและขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

1. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (twin screw extruder) รุ่น Thermo prism บริษัท LabTech Engineering (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
2. เครื่องฉีดแบบ (injection molding machine) รุ่น Battenfield BA 250 CDC ขนาด 40 ตัน (ศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม ฝ่ายพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน)

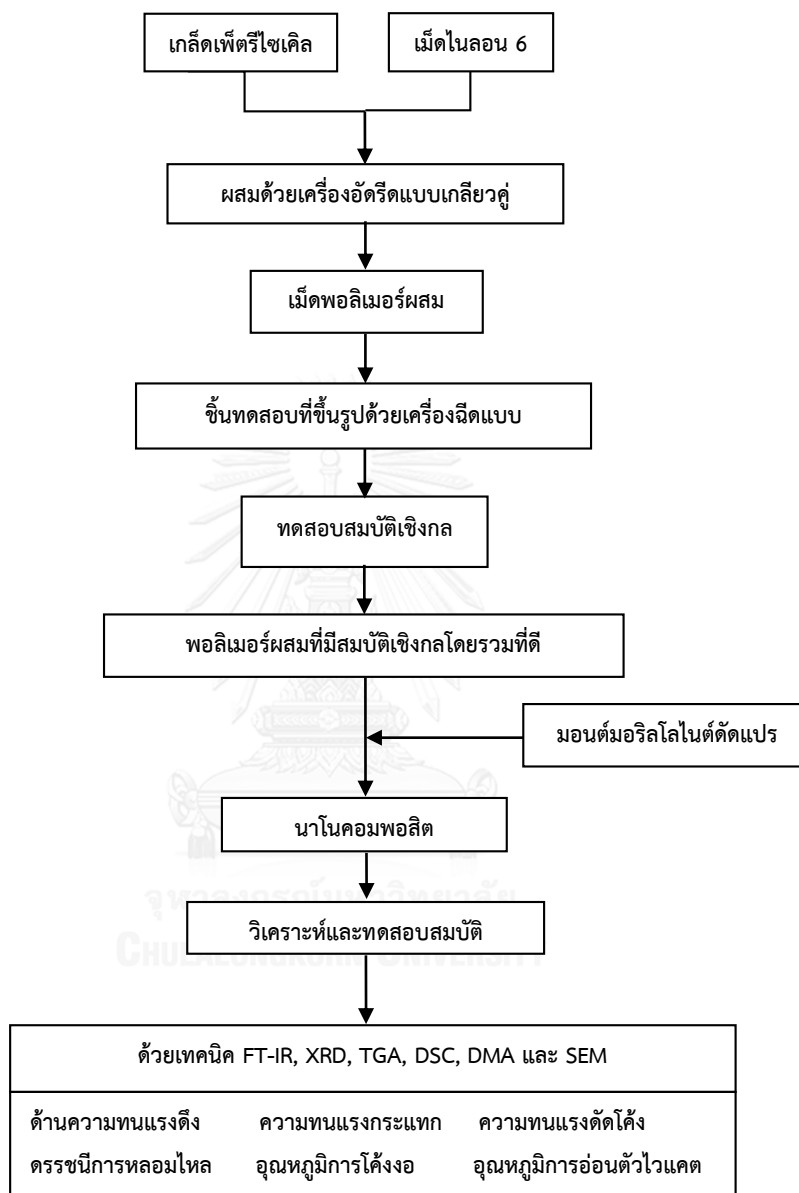
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์

1. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) รุ่น Nicolet 6700 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น JEOL JSM-6480LV (คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) รุ่น Philips TECNAI 20 (ศูนย์กล้องจุลทรรศน์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา)

4. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-Ray diffractometer, XRD) รุ่น BRUKER AXS Diffrac-tometer D8 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
5. เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล(universal testing machine)รุ่น LLOYD LR 10kplus(ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)
6. เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (impact testing machine) รุ่น GOTECH GT-7045-MD (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
7. เครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (flexural testing machine) ด้วยเครื่องยูนิเวอร์แซลรุ่น LLOYD LR500(ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
8. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) รุ่น Mettler Toledo DSC 1 STAR^e System (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
9. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (thermogravimetric analyzer, TGA) รุ่น Mettler Toledo TGA/SDTA 851^e (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
10. เครื่องทดสอบดรรชนีไหลมไหล (melt flow indexer) รุ่น Kayeness 7053 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
11. เครื่องทดสอบหาอุณหภูมิการโค้งงอของพลาสติก (heat deflection temperature, HDT tester) และเครื่องทดสอบหาอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต (vicat softening temperature, VST tester) รุ่น CEAST 6911 (ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)
12. เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical analyzer, DMA) รุ่น DMA 242 E Artemis (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.4 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง

แผนภูมิขั้นตอนการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

3.5 การทดลอง

3.5.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง RPET/Nylon 6

นำเกล็ด RPET ขนาดประมาณ 1×1 เซนติเมตร ที่ล้างทำความสะอาดและตากให้แห้ง และเม็ด Nylon 6 มาอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นผสม RPET กับ Nylon 6 ในอัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (รูปที่ 3.2) โดยใช้ความเร็วรอบเกลียวหมุน 60 รอบ/นาที ความเร็วรอบในการตัดเม็ด 12 รอบ/นาที เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร และอุณหภูมิในการผสม (องศาเซลเซียส) เป็นดังนี้

อุณหภูมิ (die) 260/265/260/257/255/255/250/245/230/210/200 (feed zone)

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม

องค์ประกอบ	1	2	3	4	5	6	7
RPET (wt%)	100	-	90	80	70	60	50
Nylon 6 (wt%)	-	100	10	20	30	40	50



รูปที่ 3.2 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่

โดยพอลิเมอร์ผสมได้ถูกอัดรีดผ่านหัวตายในลักษณะเป็นเส้น (extrudate) ผ่านลงไปใต้น้ำ จากนั้นนำไปตัดเม็ด (pelletized) และอบไล่ความชื้นอีกครั้งที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำเม็ดพลาสติกไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ

3.5.2 การเตรียมนาโนคอมพอสิต

การเตรียมนาโนคอมพอสิตของเพ็ทรีไซเคิล/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร (RPET/OMMT), ไนลอน 6/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร (Nylon 6/OMMT) และเพ็ทรีไซเคิล/ไนลอน 6/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร (RPET/Nylon 6/OMMT) เริ่มจากการนำเกล็ด RPET เม็ด Nylon 6 และผง OMMT มาอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ก่อนนำไปผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (รูปที่ 3.2) ด้วยอัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยใช้ความเร็วรอบเกลียวหมุน 60 รอบ/นาที ความเร็วรอบตัดเม็ด 12 รอบ/นาที และเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร มีอุณหภูมิในการผสม (องศาเซลเซียส) ดังนี้

อุณหภูมิ (die) 260/265/260/257/255/255/250/245/230/210/200 (feed zone)

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของนาโนคอมพอสิต

องค์ประกอบ	8	9	10	11	12	13	14	15	16
RPET (wt%)	100	100	100	-	-	-	70	70	70
Nylon 6 (wt%)	-	-	-	100	100	100	30	30	30
OMMT (phr)	1	3	5	1	3	5	1	3	5

โดยพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตถูกอัดรีดผ่านหัวตายผ่านลงไปใต้น้ำ จากนั้นนำไปตัดเม็ดและอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำเม็ดพลาสติกที่ได้ไปขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดแบบ

3.5.3 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ

นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมและนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้จากข้อ 3.5.1 และ 3.5.2 ตามลำดับ ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ไปขึ้นรูปเป็นขึ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ (รูปที่ 3.3) โดยใช้ความเร็วรอบเกลียวหมุน 160 รอบ/นาที เวลาในการหล่อเย็นประมาณ 15 วินาที และอุณหภูมิในการขึ้นรูป (องศาเซลเซียส) ดังนี้

อุณหภูมิ (die) 270/260/250/240 (feed zone)



รูปที่ 3.3 เครื่องฉีดยาแบบ

3.6 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

3.6.1 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมและนาโนคอมพอสิตจากบริเวณพื้นผิวของชั้นทดสอบด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ โดยวิเคราะห์ด้วยโหมด attenuated total reflectance (ATR) (รูปที่ 3.4) ในช่วงความยาวคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ ความละเอียดในการเก็บข้อมูล (resolution) 64 cm^{-1}



รูปที่ 3.4 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์

3.6.2 ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ตรวจสอบสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมและนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการทดสอบด้านความทนแรงดึงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 3.5) โดยนำชิ้นงานเคลือบด้วยทอง และใช้ความต่างศักย์เท่ากับ 15 kV กำลังขยาย 2,000 เท่า



รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.6.3 ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอสิตเพื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างและการจัดเรียงตัวของอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (รูปที่ 3.6) ความต่างศักย์ที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 120 kV ในการเตรียมชิ้นงานใช้เครื่อง ultramicrotome ตัดชิ้นงานให้มีความบางประมาณ 120–200 นาโนเมตร



รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

3.6.4. ตรวจสอบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

วิเคราะห์ระยะห่างระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรบริสุทธิ์ และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในนาโนคอมพอสิตด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (รูปที่ 3.7) โดยใช้รังสี Cu-K α ความยาวคลื่นเท่ากับ 0.154 nm ทดสอบในช่วง 2θ เท่ากับ 1° - 10° อัตราเร็วในการสแกนเท่ากับ 0.5 องศา/นาที การคำนวณหาค่า d หรือ ระยะห่างระหว่างชั้นมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการแบรกก์ (Bragg Equation) [26] ดังสมการที่ (3.1)

$$\lambda = 2d_{001}\sin\theta \quad (3.1)$$

โดย d คือ ระยะห่างระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร

θ คือ มุมตกกระทบของรังสีเอกซ์

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์



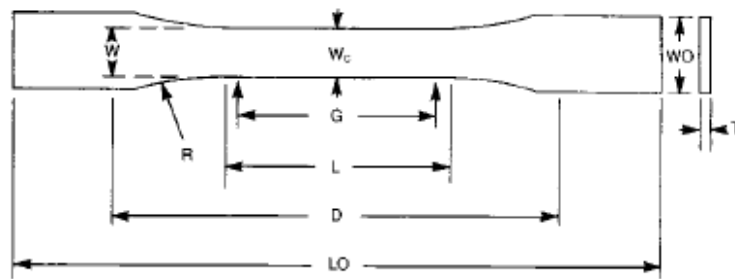
รูปที่ 3.7 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์

3.6.5. ทดสอบสมบัติด้านแรงดึง (Tensile properties)

การทดสอบด้านแรงดึงประกอบด้วย ความทนแรงดึง (tensile strength), ยังส์มอดุลัส (Young's modulus) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (รูปที่ 3.8) ตามมาตรฐาน ASTM D638 ประเภท 1 กับชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ (รูปที่ 3.9 และ 3.10) โดยทดสอบที่อุณหภูมิห้องด้วยอัตราเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตร/นาที โดยใช้ load cell ขนาด 10 กิโลนิวตัน



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล



รูปที่ 3.9 ขนาดของชิ้นทดสอบตีเบลตามมาตรฐาน ASTM D638 ประเภท 1



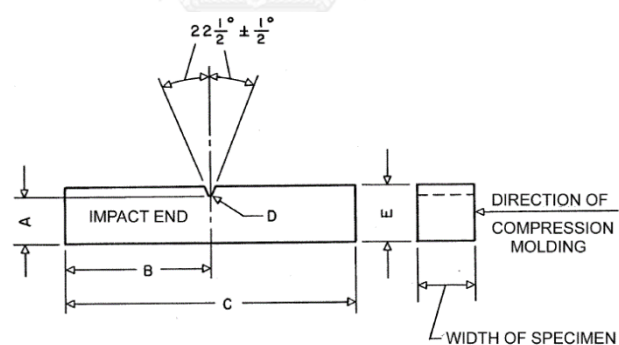
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบความทนแรงดึง

3.6.6. ทดสอบความทนแรงกระแทก (Impact strength)

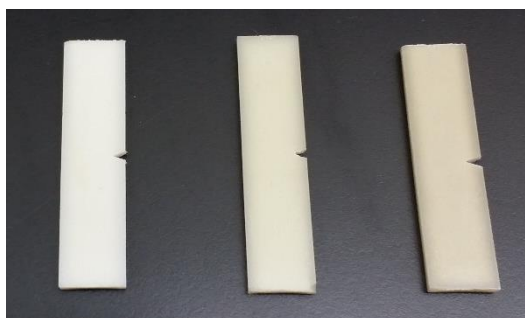
การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกแบบไอซอดด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (รูปที่ 3.11) ตามมาตรฐาน ASTM D256 ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้หัวค้อนขนาด 1 จูล ในการทดสอบ ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด และบากชิ้นงานเป็นรูปตัววี (รูปที่ 3.12 และ 3.13)



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก



รูปที่ 3.12 ขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256



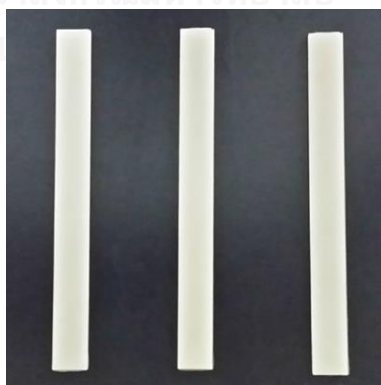
รูปที่ 3.13 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด

3.6.7. การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (Flexural strength)

การทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้งแบบ three point bending ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (รูปที่ 3.14) ตามมาตรฐาน ASTM D790 ชิ้นงานแบบ rectangular (รูปที่ 3.15) โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ load cell ขนาด 2,500 นิวตัน อัตราเร็วในการกด 1.37 มิลลิเมตร/นาที ระยะห่างระหว่างหัวกด 50 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้ง



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบความทนแรงดัดโค้ง

3.6.8. วิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

การวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและนาโนคอมพอสิตด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (รูปที่ 3.16) ช่วงอุณหภูมิในการทดสอบ 30 ถึง 300 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที โดยในการทดสอบจะทำการเป็น 3 ขั้นตอน คือ การเพิ่มความร้อนครั้งที่ 1 (first heating scan) การลดอุณหภูมิ (cooling scan) และการเพิ่มความร้อนครั้งที่ 2 (second heating scan) โดยคงอุณหภูมิในแต่ละขั้นตอนเป็นเวลา 5 นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน

เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อน ทำให้ทราบอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g), อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c), อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m), เอนทัลปีการหลอมเหลวผลึก (melting enthalpy, ΔH_m) และปริมาณการเกิดผลึก (degree of crystallinity, χ_c) โดยสามารถคำนวณหาปริมาณการเกิดผลึกได้จากสมการที่ (3.2)

$$\chi_c (\%) = [\Delta H_m / \Delta H_{m}^{\circ}] / w \times 100 \quad (3.2)$$

โดย ΔH_m คือ เอนทัลปีการหลอมเหลวผลึกของพีดีรีไซเคิล

ΔH_{m}° คือ เอนทัลปีของพีดีรีไซเคิลที่เกิดผลึก 100% (มีค่า 120 จูล/กรัม) [27]

w คือ อัตราส่วนของพีดีรีไซเคิลในพอลิเมอร์ผสมและนาโนคอมพอสิต



รูปที่ 3.16 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

3.6.9. วิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)

วิเคราะห์หาเสถียรทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและนาโนคอมพอสิตด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (รูปที่ 3.17) โดยทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน (อัตราการไหลของแก๊ส 20 มิลลิลิตร/นาที)



รูปที่ 3.17 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA)

3.6.10. วิเคราะห์ดรรชนีการหลอมไหล

วิเคราะห์ดรรชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมและนาโนคอมพอสิตด้วยเครื่องวัดดรรชนีการหลอมไหล (รูปที่ 3.18) ตามมาตรฐาน ASTM D1238 โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม คำนวณน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ได้ต่อเวลา 10 นาที และบันทึกผลในหน่วยกรัม/10 นาที



รูปที่ 3.18 เครื่องวัดดรรชนีการหลอมไหล (MFI)

3.6.11. ทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอและอุณหภูมิการอ่อนตัวไวแคต

วิเคราะห์อุณหภูมิการโค้งงอและอุณหภูมิการอ่อนตัวไวแคตด้วยเครื่องทดสอบอุณหภูมิลดของพลาสติก (รูปที่ 3.19) โดยการทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอ (HDT) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D648 และอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต (VST) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D1525 ใช้ความร้อนในการทดสอบจากอ่างน้ำมันซิลิโคน จากนั้นบันทึกค่าอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลง

การทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนเป็นการหาค่าอุณหภูมิที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบโค้งงอเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวรลงไปที่ตำแหน่ง 0.25 มิลลิเมตร จากตำแหน่งเดิมเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและมีแรงกด โดยใช้อัตราการเพิ่มความร้อน 2 องศาเซลเซียส/นาที ความยาว span 100 มิลลิเมตร น้ำหนักต่อพื้นที่ที่ใช้กดชิ้นงาน 1.82 MPa โดยชิ้นงานเป็นรูปแบบ rectangular (ขนาดชิ้นงานเท่ากับการทดสอบความแรงดัดโค้ง)

การทดสอบอุณหภูมิลดตัวไวแคตเป็นการประเมินความสามารถของชิ้นงานในการรักษาสมบัติพื้นผิวได้ที่อุณหภูมิสูงและได้รับแรงกด โดยหาค่าอุณหภูมิที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบยุบลงไปทีละระยะ 1 มิลลิเมตร ณ จุดที่มีการให้น้ำหนักกด 5 กิโลกรัม โดยใช้อัตราการเพิ่มความร้อน 120 องศาเซลเซียส/นาที ขนาดชิ้นงานที่ทดสอบ 10 × 10 × 3 มิลลิเมตร (กว้าง × ยาว × หนา)



รูปที่ 3.19 เครื่องทดสอบอุณหภูมิลดตัวของพลาสติก

3.6.12. วิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล เช่น โมดูลัสสะสม (storage modulus) และ $\tan \delta$ (ที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ และเวลา เป็นสมบัติเชิงกลของวัสดุภายใต้การให้แรงเป็นช่วง โดยจะวิเคราะห์สมบัติของพอลิเมอร์ผสมและนาโนคอมพอสิตด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (รูปที่ 3.20)

โดยทดสอบชิ้นงานด้วยโหมต single-cantilever bending ขนาดของชิ้นงานเท่ากับ $10 \times 40 \times 3$ มิลลิเมตร (กว้าง \times ยาว \times หนา) อุณหภูมิในการทดสอบ 25 ถึง 170 องศาเซลเซียส อัตราในการเพิ่มความร้อน 2 องศาเซลเซียส/นาที และความถี่ 1 เฮิรตซ์



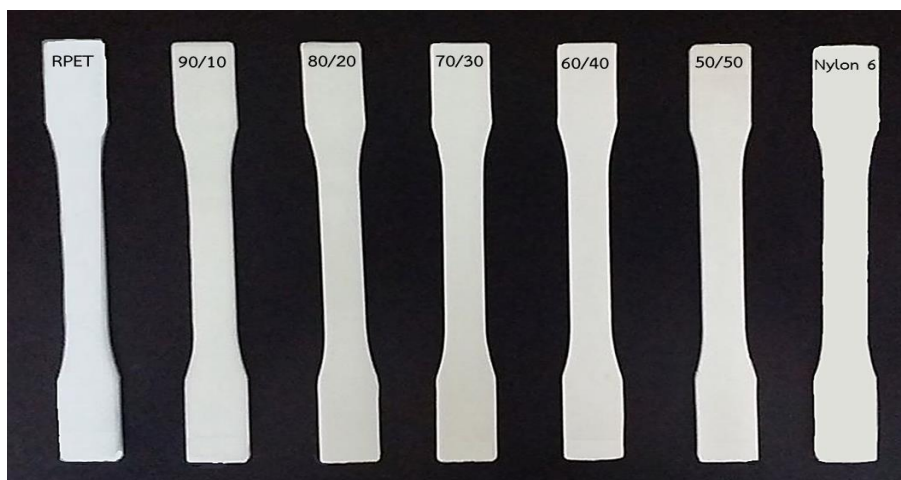
รูปที่ 3.20 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะของชิ้นงาน RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะชิ้นงานของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ

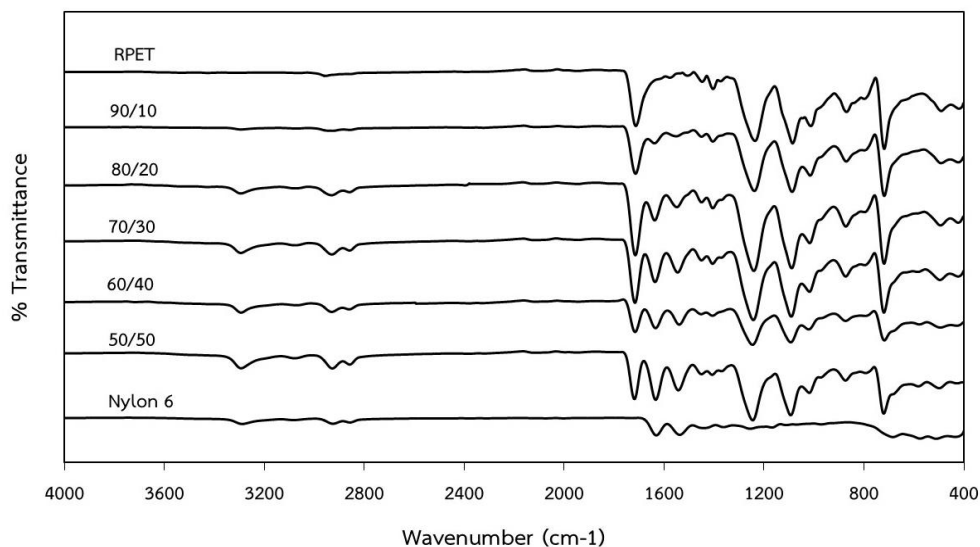


รูปที่ 4.1 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูป พบว่า ชิ้นทดสอบของ RPET มีสีฟ้าอ่อนและใสมากกว่า ขณะที่ Nylon 6 มีสีขาวขุ่น เมื่อเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ชิ้นงานมีความขาวมากขึ้นตามปริมาณของ Nylon 6 ที่เพิ่มขึ้น

4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR

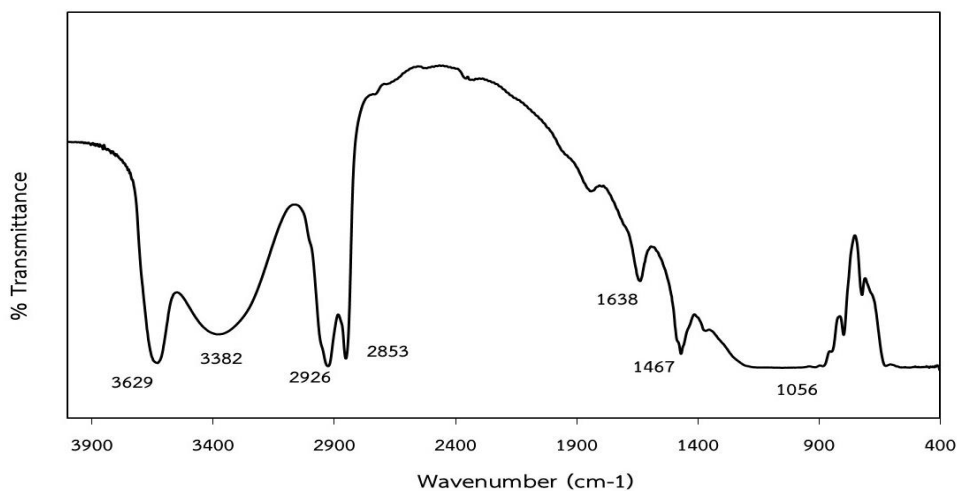
รูปที่ 4.2 แสดง FT-IR สเปกตรัมของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6



รูปที่ 4.2 FT-IR สเปกตรัมของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.2 พบว่า FT-IR สเปกตรัมของ RPET แสดงพีกเอกลักษณ์ที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 2955 cm^{-1} (C-H stretching ของส่วนแอโรมาติกและแอลิฟาติก), 1713 cm^{-1} (C=O stretching), 1578 , 1505 และ 1452 cm^{-1} (การสั่นของวงแหวนแอโรมาติก), 1408 และ 1340 cm^{-1} (-CH₂ bending), 1236 และ 1088 cm^{-1} (C-O stretching) และ 871 cm^{-1} (C-C stretching) ขณะที่ Nylon 6 แสดงพีกเอกลักษณ์ที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 3292 cm^{-1} (N-H stretching), 2925 และ 2855 cm^{-1} (C-H stretching), 1634 และ 1538 cm^{-1} (C=O stretching), 1460 และ 1434 cm^{-1} (-CH₂ bending), 1366 cm^{-1} (C-N stretching) และ $1200\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ (C-N stretching) เมื่อพิจารณาพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 จะพบพีกเอกลักษณ์ของพอลิเมอร์ทั้งสองปรากฏใน FTIR สเปกตรัม คล้ายกับของแต่ละพอลิเมอร์

รูปที่ 4.3 แสดง FT-IR สเปกตรัมของ OMMT ซึ่งพบพีกสำคัญที่ความยาวคลื่น 3629 cm^{-1} (O-H stretching ของหมู่ไฮดรอกซิล), 3382 cm^{-1} (N-H stretching), 2926 และ 2853 cm^{-1} (C-H stretching), 1638 cm^{-1} (-OH bending), 1467 cm^{-1} (-CH₂ bending) และ 1056 cm^{-1} (Si-O stretching ใน OMMT)



รูปที่ 4.3 FT-IR สเปกตรัมของ OMMT

4.3 สมบัติเชิงกลของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบของความทนแรงกระแทก, สมบัติด้านแรงดึง (ความทนแรงดึง, ยืดสัมพัทธ์ และการยืดตัว ณ จุดขาด) และความทนแรงดัดโค้งของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6

ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6

RPET/Nylon 6 (wt%/wt%)	Impact strength (J/m)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural strength (N/mm ²)
100/0	26.4 ± 2.0	22.1 ± 4.0	4500.0 ± 179.4	1.7 ± 0.2	58.6 ± 1.3
0/100	61.6 ± 4.4	60.2 ± 4.1	1569.3 ± 217.3	210.3 ± 65.0	38.7 ± 0.4
90/10	19.7 ± 1.4	23.8 ± 3.6	3585.5 ± 210.4	1.8 ± 0.4	53.1 ± 2.1
80/20	22.6 ± 2.7	27.3 ± 6.7	2564.7 ± 198.5	2.0 ± 0.7	49.0 ± 1.0
70/30	32.9 ± 3.4	33.9 ± 3.2	2324.9 ± 87.6	2.6 ± 0.3	47.2 ± 0.9
60/40	32.2 ± 5.2	43.2 ± 6.8	2228.7 ± 128.3	2.9 ± 0.4	44.3 ± 1.6
50/50	22.0 ± 1.9	49.3 ± 2.2	2084.2 ± 41.8	3.8 ± 0.4	41.1 ± 1.2

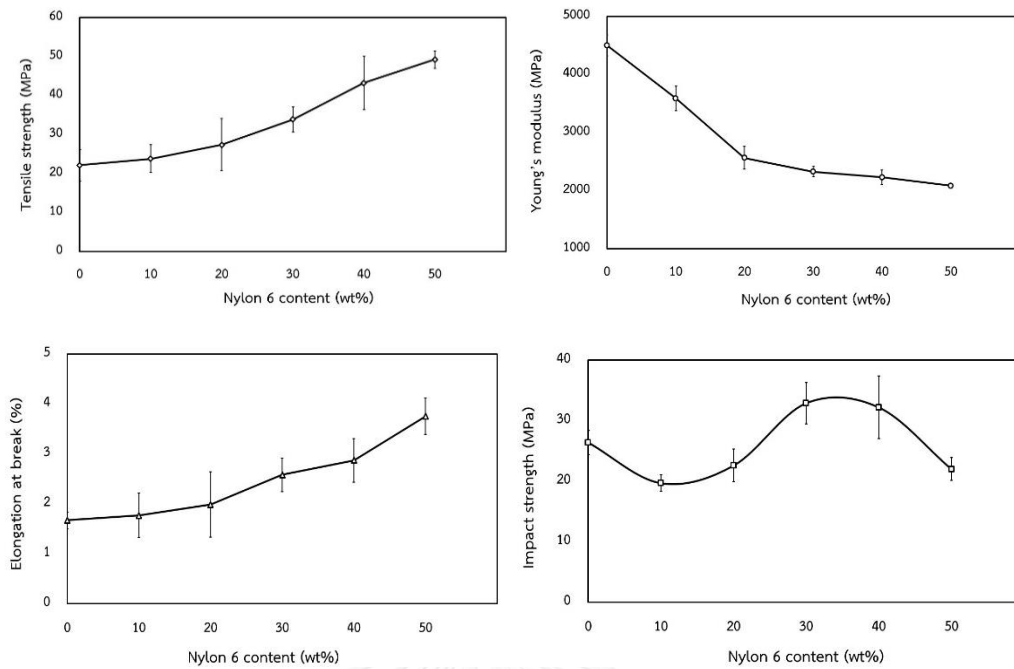
4.3.1 สมบัติด้านแรงดึงและความทนแรงกระแทก

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.4 พบว่า ความทนแรงดึงของ RPET และ Nylon 6 มีค่าเท่ากับ 22.1 และ 60.2 MPa ตามลำดับ และเมื่อเติม Nylon 6 ใน RPET มีผลทำให้ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วน (23.8–49.3 MPa) มีค่าสูงกว่าของ RPET ล้วน และมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ Nylon 6 ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก Nylon 6 มีความทนแรงดึงสูงกว่า RPET มาก โดยความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ Nylon 6 ปริมาณ 10 และ 20 wt% และเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อใส่ Nylon 6 ปริมาณ 30–50 wt%

ค่ายังสัมมอดูลัสของ RPET และ Nylon 6 มีค่าเท่ากับ 4500 และ 1569.3 MPa ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อเติม Nylon 6 ใน RPET จึงมีผลทำให้ยังสัมมอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วน (1569.3–3585.5 MPa) มีค่าต่ำกว่าของ RPET ล้วน โดยมีค่าลดลงตามปริมาณของ Nylon 6 ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก Nylon 6 มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับแรงง่ายกว่า ค่ายังสัมมอดูลัสจึงต่ำกว่า RPET มาก

การยืดตัว ณ จุดขาดของ RPET และ Nylon 6 มีค่าเท่ากับ 1.7 และ 210.3% ตามลำดับ ซึ่งกล่าวได้ว่า RPET เป็นวัสดุที่เปราะ ขณะที่ Nylon 6 มีความยืดหยุ่นและความเหนียวมากกว่า RPET อย่างเห็นได้ชัด ดังนั้น เมื่อใส่ Nylon 6 ใน RPET จึงมีผลทำให้การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วน (1.8–3.8%) มีค่ามากกว่าของ RPET ล้วน โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ Nylon 6 และเพิ่มขึ้น 5.9–123.5%

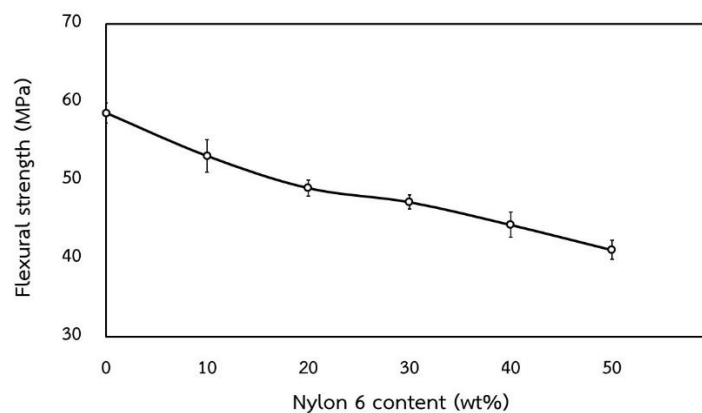
เมื่อพิจารณาความทนแรงกระแทกของ RPET และ Nylon 6 มีค่าเท่ากับ 26.4 และ 61.6 J/m ตามลำดับ และเมื่อเติม Nylon 6 ในอัตราส่วน 10 และ 20 wt% ใน RPET มีผลทำให้ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม (19.7 และ 22.6 J/m ตามลำดับ) มีค่าต่ำกว่าของ RPET ล้วน ทั้งนี้เนื่องจาก Nylon 6 มีปริมาณน้อยในเมทริกซ์ของ RPET ทำให้มีแรงยึดเกาะระหว่างผิวต่ำ ดังนั้น จึงทำให้มีการส่งผ่านแรงกระแทกระหว่างพอลิเมอร์ได้น้อย อย่างไรก็ตาม การเติม Nylon 6 ในปริมาณ 30 และ 40 wt% มีผลทำให้ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม (32.9 และ 32.2 J/m ตามลำดับ) มีค่าสูงกว่าของ RPET ล้วน เนื่องจาก Nylon 6 สามารถกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ของ RPET มีแรงยึดเกาะระหว่างผิวที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้การส่งผ่านแรงกระแทกระหว่างพอลิเมอร์เกิดได้มากขึ้น แต่การเพิ่มปริมาณของ Nylon 6 เป็น 50 wt% กลับส่งผลให้ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม (22 J/m) มีค่าต่ำกว่าของ RPET ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากมีการกลับเฟส Nylon 6 เกิดการเกาะกลุ่มกัน ทำให้ลดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองและอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวลดลง และผลจากความทนแรงกระแทกดังกล่าว จึงได้เลือกพอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 ไปใช้เตรียมนาโนคอมพอสิตกับ OMMT ในปริมาณ 1, 3 และ 5 phr ต่อไป



รูปที่ 4.4 สมบัติด้านแรงดึงและความทนแรงกระแทกของ RPET และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ

4.3.2 ความทนแรงดัดโค้ง

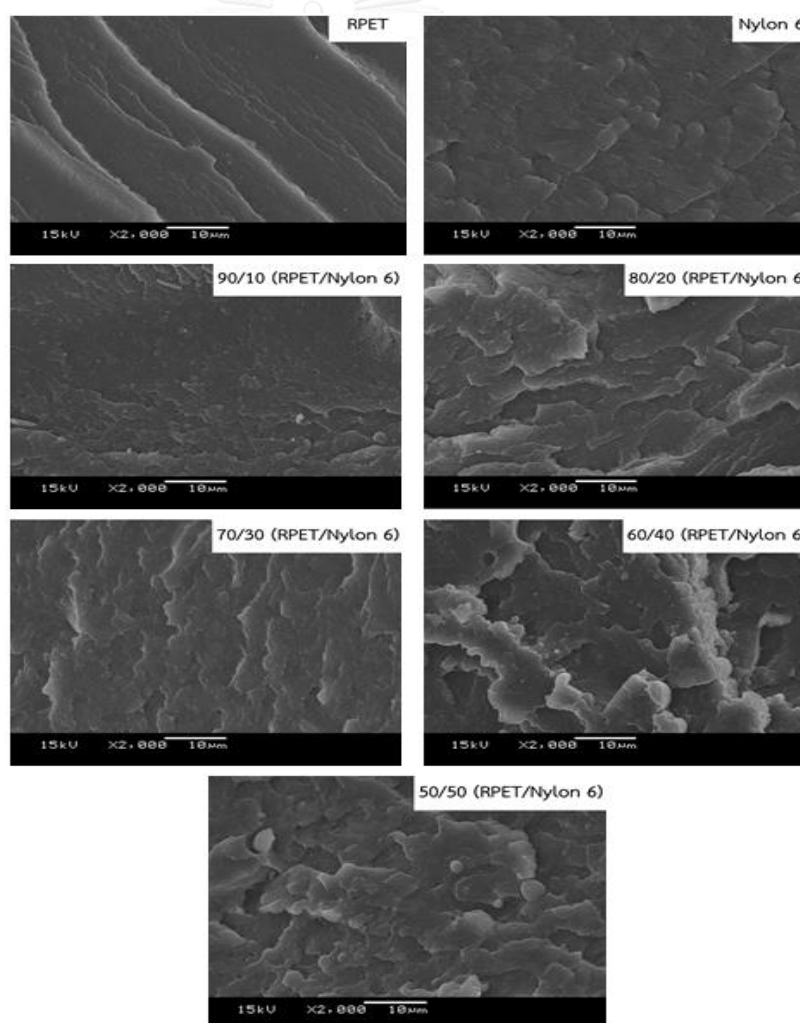
จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.5 พบว่า ความทนแรงดัดโค้งของ RPET และ Nylon 6 มีค่าเท่ากับ 58.6 และ 38.7 N/mm² ตามลำดับ ดังนั้น การเติม Nylon 6 ที่มีความยืดหยุ่นสูงใน RPET จึงมีผลทำให้ ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ RPET ล้วน โดยมีค่าลดลงตามปริมาณของ Nylon 6 ที่เพิ่มขึ้น นั่นคือ ชิ้นงานสามารถโค้งงอได้มากขึ้นเมื่อได้รับแรงกด



รูปที่ 4.5 ความทนแรงดัดโค้งของ RPET และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ

4.4 สัณฐานวิทยาของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6

รูปที่ 4.6 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภายใต้กำลังขยาย 2,000 เท่า พบว่า พื้นผิวรอยแตกของ RPET มีลักษณะที่เรียบและมีริ้วบางๆ ซึ่งแสดงถึงวัสดุที่สามารถรับแรงได้น้อยกว่า และมีความแข็งเปราะ ขณะที่ Nylon 6 มีพื้นผิวรอยแตกที่หยาบมากกว่า ซึ่งแสดงลักษณะของวัสดุที่มีความเหนียว และเมื่อผสม Nylon 6 กับ RPET พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีพื้นผิวรอยแตกที่หยาบและขรุขระมากขึ้น แสดงว่าพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 มีความเหนียวมากขึ้นเมื่อเทียบกับ RPET ล้วน ทั้งนี้เนื่องจาก Nylon 6 ได้เข้าไปเพิ่มความเหนียวให้กับ RPET อย่างไรก็ตาม แต่พบการแยกเฟสเมื่อใส่ Nylon 6 ปริมาณมาก (40 และ 50 wt%) เนื่องจากการเกาะกลุ่มของ Nylon 6



รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ

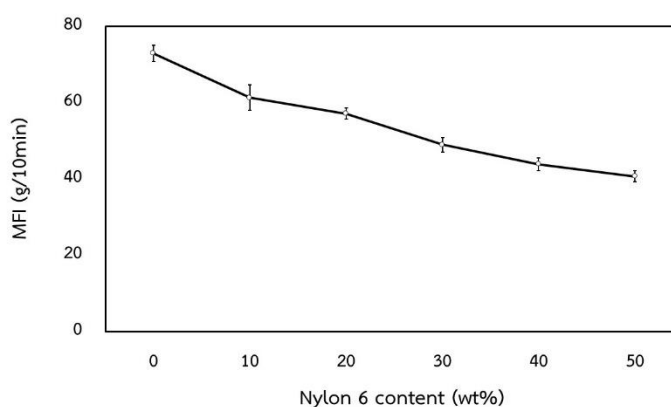
4.5 สมบัติทางความร้อนของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6

4.5.1 ดรรชนีการหลอมไหล

ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.7 แสดงค่าดรรชนีการหลอมไหลของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยใช้น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม และอุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส พบว่า RPET และ Nylon 6 มีค่าดรรชนีการหลอมไหลประมาณ 72.9 และ 42.6 กรัม/10 นาที ตามลำดับ และเมื่อเติม Nylon 6 ใน RPET มีผลทำให้ดรรชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ลดลงตามปริมาณของ Nylon 6 ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อ Nylon 6 หลอมเหลวจะมีความหนืดสูงกว่าและไหลยากกว่า จึงไปขัดขวางการไหลของ RPET หลอมเหลว จึงทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความหนืดสูงขึ้น (ดรรชนีการหลอมไหลลดลง)

ตารางที่ 4.2 ดรรชนีการหลอมไหลของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ

RPET/Nylon 6 (wt%/wt%)	MFI (g/10min)
100/0	72.9 ± 2.1
0/100	42.6 ± 1.1
90/10	61.3 ± 3.3
80/20	57.1 ± 1.8
70/30	49.0 ± 1.8
60/40	43.9 ± 1.7
50/50	40.7 ± 1.4



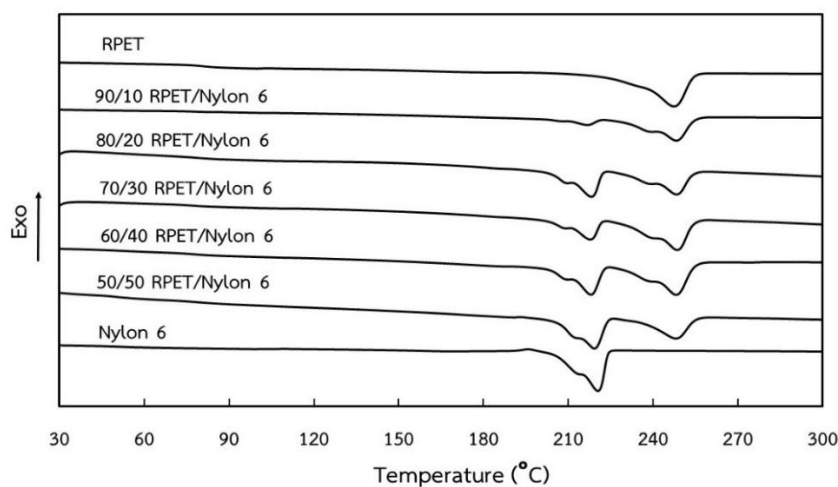
รูปที่ 4.7 ดรรชนีการหลอมไหลของ RPET และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ

4.5.2 พฤติกรรมการเกิดผลึก

การศึกษาพฤติกรรมการเกิดผลึกของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ หาได้จาก DSC เทอร์โมแกรม ซึ่งอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) หาได้จากขั้นการทำให้เย็น (cooling scan) ส่วนอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) และเอนทาลปีการหลอมเหลว (ΔH_m) หาได้จากขั้นการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (second heating scan) นอกจากนี้ ปริมาณการเกิดผลึก (X_c) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 ในบทที่ 3

จากตารางที่ 4.3 พบว่า T_c ของ RPET และ Nylon 6 มีค่าเท่ากับ 207.6 และ 165.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้พอลิเมอร์สามารถเกิดผลึกจากพอลิเมอร์หลอมเหลวในขั้นการทำให้เย็นด้วยอัตราการเย็นตัว 10 องศาเซลเซียส/นาทีก และเมื่อใส่ Nylon 6 ใน RPET มีผลทำให้ T_c ของ RPET ลดลง 4.5–10.2 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงว่า RPET เกิดผลึกช้าลง เนื่องจากถูกขัดขวางการจัดเรียงตัวด้วยโมเลกุลของ Nylon 6 ในขณะที่ T_c ของ Nylon 6 สูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของ Nylon 6 ในพอลิเมอร์ผสมเคลื่อนตัวมาจัดเรียงตัวได้ง่ายขึ้น

จาก DSC เทอร์โมแกรมที่ได้จากขั้นการให้ความร้อนครั้งที่ 2 พบว่า T_m ของ RPET และ Nylon 6 มีค่าเท่ากับ 247.7 และ 219.0 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ทั้ง RPET และ Nylon 6 ในพอลิเมอร์ผสมต่างมี T_m 2 ตำแหน่ง โดย RPET มี T_{m1} อยู่ในช่วง 238.8–230.4 องศาเซลเซียส และมี T_{m2} อยู่ในช่วง 248.0–248.5 องศาเซลเซียส ในขณะที่ Nylon 6 มี T_{m1} อยู่ในช่วง 207–210.7 องศาเซลเซียส และมี T_{m2} อยู่ในช่วง 216.9–218.4 องศาเซลเซียส โดย T_{m1} เป็นอุณหภูมิหลอมเหลวของผลึกที่มีหลายขนาด ขณะที่ T_{m2} เป็นอุณหภูมิหลอมเหลวของผลึกที่เกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ อย่างไรก็ตาม พบว่า T_{m2} ของแต่ละพอลิเมอร์ในพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าไม่แตกต่างจาก T_m ของพอลิเมอร์ล้วนมากนัก ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่า T_m จะเห็นว่า RPET และ Nylon 6 มีความไม่เข้ากัน นอกจากนี้ ปริมาณการเกิดผลึกของ RPET และ Nylon 6 มีค่าเท่ากับ 43.5 และ 30 % ตามลำดับ โดยปริมาณการเกิดผลึกของทั้ง RPET และ Nylon 6 ในพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากโมเลกุลของ Nylon 6 เข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่ RPET ขณะที่โมเลกุลของ RPET ก็เข้าไปรบกวนการเกิดผลึกของ Nylon 6 เช่นกัน การเกิดผลึกของ RPET และ Nylon 6 ในพอลิเมอร์ผสมจึงลดลง



รูปที่ 4.8 DSC เทอร์โมแกรมของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ จากการให้ความร้อนครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์การเกิดผลึกของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6

Sample	RPET				Nylon 6				
	T_c (°C)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	$\chi_{c,RPET}$ (%)	T_c (°C)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	$\chi_{c,Nylon6}$ (%)	
RPET	207.6	247.7	52.2	43.5	–	–	–	–	
Nylon 6	–	–	–	–	165.8	219.0	57.2	30.0	
RPET/Nylon 6 (wt%/wt%)									
90/10	199.5	238.8, 248.1	29.5	27.3	183.8	207.0, 216.9	4.6	24.1	
80/20	197.4	238.0, 248.0	22.8	23.8	185.7	208.8, 218.1	10.0	26.2	
70/30	201.3	238.6, 248.5	24.9	29.6	184.9	208.2, 217.8	12.0	21.0	
60/40	198.4	237.4, 248.3	23.4	32.5	185.5	208.6, 218.4	15.9	20.9	
50/50	203.1	230.4, 248.1	17.8	29.7	188.6	210.7, 217.2	27.9	29.3	

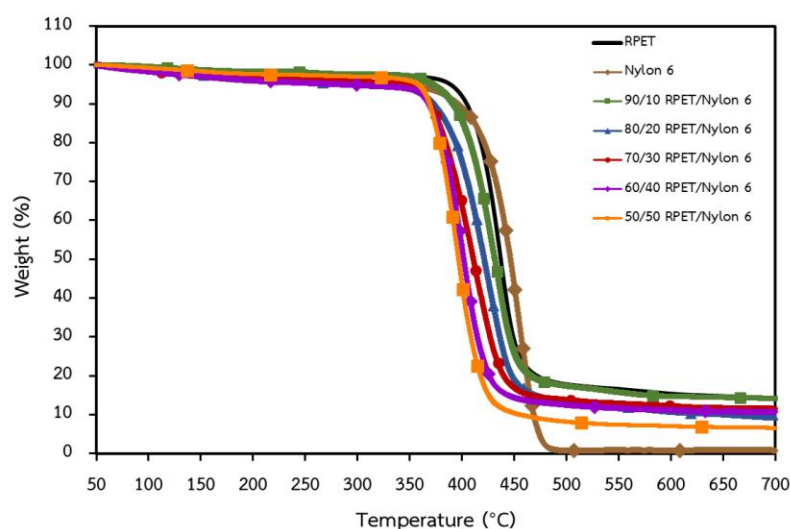
4.5.3 เสถียรภาพทางความร้อน

ตารางที่ 4.4 แสดงเสถียรภาพทางความร้อนของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่ได้จาก TGA และ DTG เทอร์โมแกรม (รูปที่ 4.9 และ 4.10) ในเทอมของอุณหภูมิเริ่มการสลายตัว (T_{onset}), อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว ($T_{end\ set}$), อุณหภูมิการสลายตัว 50% ($T_{50\%}$) และอุณหภูมิสลายตัวสูงสุด (T_{max}) พบว่า RPET และ Nylon 6 เกิดการสลายตัวในขั้นตอนเดียว (one-step

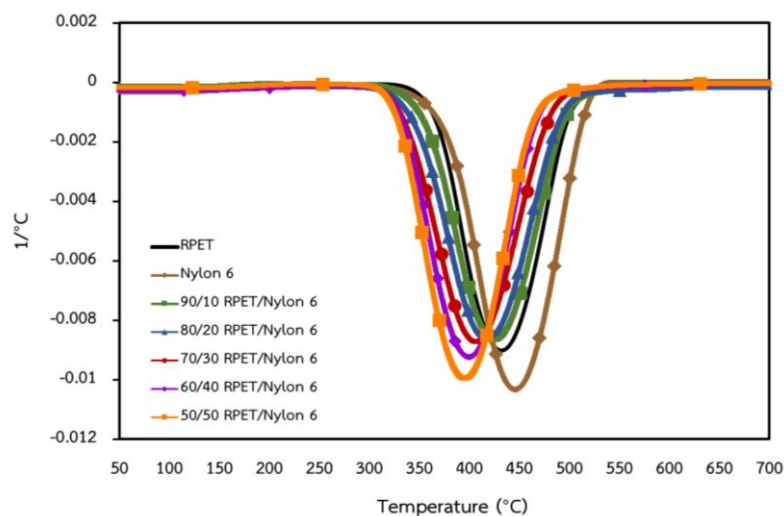
decomposition) โดย RPET มี T_{onset} , $T_{end set}$, $T_{50\%}$ และ T_{max} เท่ากับ 413.5, 451.8, 433.5 และ 437.1 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และ Nylon 6 มี T_{onset} , $T_{end set}$, $T_{50\%}$ และ T_{max} เท่ากับ 419.0, 446.3, 442.3 และ 448.3 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในส่วนของพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 พบว่า การเติม Nylon 6 ในเมทริกซ์ของ RPET มีผลทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมลดลงทั้ง T_{onset} , $T_{end set}$, $T_{50\%}$ และ T_{max} ตามปริมาณของ Nylon 6 ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ทั้งสอง และการมีแรงยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์ที่ต่ำ จึงมีผลทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง

ตารางที่ 4.4 เสถียรภาพทางความร้อนของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6

RPET/Nylon 6 (wt%/wt%)	T_{onset} (°C)	$T_{50\%}$ (°C)	$T_{end set}$ (°C)	T_{max} (°C)
100/0	413.5	433.5	451.8	437.1
0/100	419.0	442.3	446.3	448.3
90/10	402.5	427.8	453.3	435.2
80/20	391.8	420.9	450.0	429.6
70/30	377.5	408.0	437.3	411.0
60/40	376.7	399.5	422.1	398.9
50/50	372.7	395.4	418.3	396.3



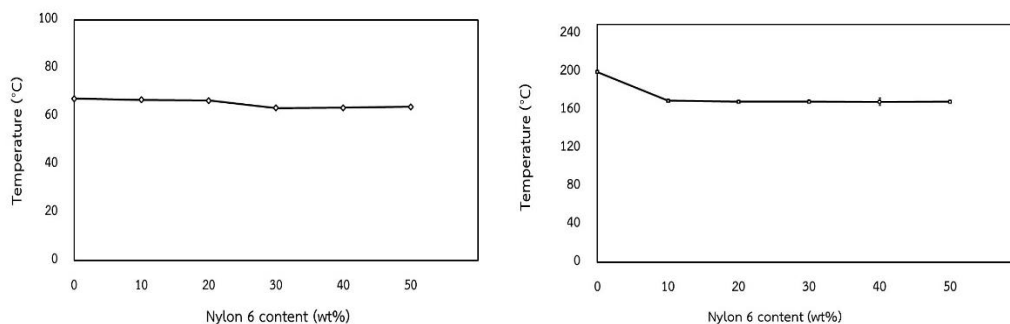
รูปที่ 4.9 TGA เทอร์โมแกรมของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.10 DTG เทอร์โมแกรมของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ

4.5.4 อุณหภูมิการโค้งงอและอุณหภูมิละลายตัวไวแคต

รูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.5 แสดงค่าอุณหภูมิการโค้งงอ (HDT) และอุณหภูมิละลายตัวไวแคต (VST) ของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 พบว่า RPET มี HDT และ VST เท่ากับ 67.4 และ 200.0 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ขณะที่ Nylon 6 มี HDT และ VST เท่ากับ 62.6 และ 170.9 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งการใส่ Nylon 6 เข้าไปใน RPET มีผลทำให้ HDT และ VST ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ RPET แสดงให้เห็นว่า พอลิเมอร์ผสมมีการเปลี่ยนรูปได้ง่ายขึ้นเมื่อได้รับทั้งความร้อนและแรงกด อีกทั้งพื้นผิวชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมมีความนิ่มมากขึ้น เนื่องจาก Nylon 6 มีความยืดหยุ่นสูงและไม่มีความเข้ากันกับ RPET ทำให้มีแรงยึดติดระหว่างพอลิเมอร์ต่ำ จึงรับแรงกดได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเดิม ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมิที่ได้จาก HDT และ VST มีค่าที่ไม่เท่ากัน เนื่องมาจากลักษณะการทดสอบที่ต่างกัน เพื่อพิจารณาการรับแรงของวัสดุในลักษณะที่ต่างกัน โดย HDT มีการให้แรงกดผ่านหัวกด ขณะที่ VST มีการให้แรงกดแบบหัวเข็มจิ้มไปที่พื้นผิวชิ้นงาน



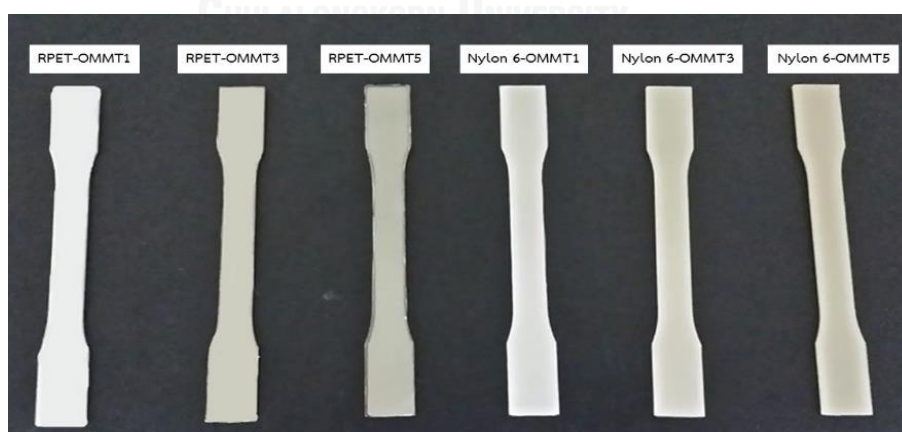
รูปที่ 4.11 อุณหภูมิละลายตัวของพลาสติกแบบ HDT (ซ้าย) และ VST (ขวา)

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการโค้งงอและอุณหภูมิตัวไวแคตของ RPET, Nylon 6 และ พอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ

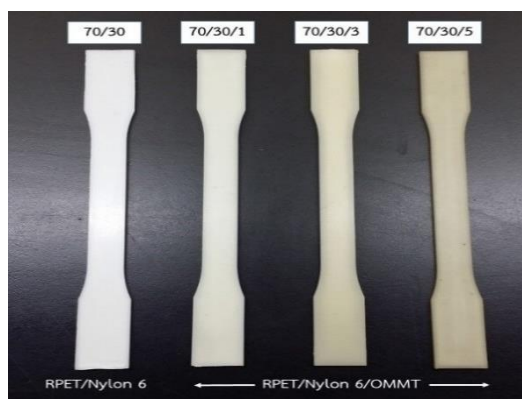
RPET/Nylon 6 (wt%/wt%)	HDT (°C)	VST (°C)
100/0	67.4 ± 1.1	200.0 ± 0.2
0/100	62.6 ± 0.8	170.9 ± 0.4
90/10	66.9 ± 0.8	169.9 ± 0.5
80/20	66.5 ± 0.3	168.9 ± 0.1
70/30	63.5 ± 0.6	169.0 ± 1.9
60/40	63.6 ± 0.4	168.7 ± 3.8
50/50	64.0 ± 0.7	168.9 ± 0.2

4.6 ลักษณะชิ้นงานของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT

รูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงลักษณะชิ้นงานของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ พบว่า ชิ้นทดสอบของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT มีสีน้ำตาลปนเหลือง และมีสีเข้มขึ้นตามปริมาณการเติม OMMT ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.12 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT และ Nylon 6/OMMT (OMMT 1, 3 และ 5 phr)



รูปที่ 4.13 ชั้นทดสอบรูปดัมเบลล์ของนาโนคอมพอสิต 70/30/x (wt%/wt%/phr) RPET/Nylon 6/OMMT (x = 1, 3 และ 5 phr)

4.7 การวิเคราะห์นาโนคอมพอสิตด้วยเทคนิค XRD และ TEM

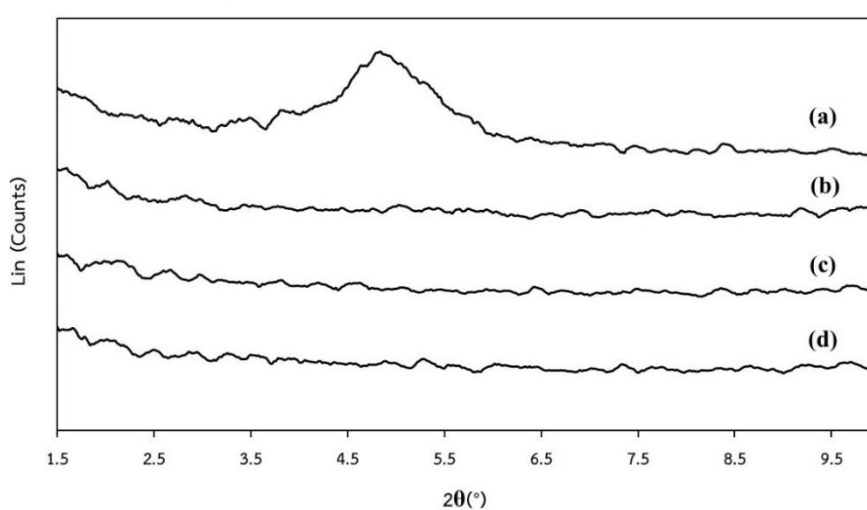
การวิเคราะห์นาโนคอมพอสิตด้วยเทคนิค XRD สามารถหาโครงสร้างของนาโนคอมพอสิต และลักษณะการกระจายตัวของ OMMT ในนาโนคอมพอสิต ซึ่งตารางที่ 4.6 แสดงค่า 2θ , d_{001} (ระยะห่างระหว่างชั้นของ OMMT ในระนาบ 001) และโครงสร้างของนาโนคอมพอสิตที่ได้จาก XRD ดิฟแฟร็กโทแกรม โดย XRD ดิฟแฟร็กโทแกรมของ OMMT ทางการค้า (Cloisite 30B) แสดงไว้ในรูปที่ 4.14 ที่มี $2\theta = 4.8^\circ$ และจากสมการ Bragg (สมการที่ 3.1 ในบทที่ 3) สามารถหาค่า d_{001} ของ OMMT ได้เท่ากับ 18.4 \AA และจากตาราง พบว่า นาโนคอมพอสิตของ RPET/OMMT และ Nylon 6/OMMT ที่ใส่ OMMT ปริมาณ 5 phr เท่านั้นที่มีพิกปรากฏใน XRD ดิฟแฟร็กโทแกรมที่ $2\theta = 2.7^\circ$ และ 3.5° ตามลำดับ แสดงถึงการมีโครงสร้างแบบ intercalate เนื่องจาก d_{001} มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 32.7 และ 25.2 \AA ตามลำดับ ส่วนที่ใส่ OMMT ปริมาณ 1 และ 3 phr มีโครงสร้างแบบ exfoliate เนื่องจากไม่ปรากฏพิกใน XRD ดิฟแฟร็กโทแกรม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการใส่ OMMT ในปริมาณมาก (5 phr) อาจทำให้ OMMT กระจายตัวไม่สม่ำเสมอและยังเกิดการเกาะกลุ่ม ซึ่งไม่สามารถทำให้ชั้นซิลิเกตแยกออกได้ เพียงแต่ทำให้ชั้นซิลิเกตห่างกันมากขึ้นเท่านั้น

ส่วน XRD ดิฟแฟร็กโทแกรมของนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT ในรูปที่ 4.14 ก็ไม่ปรากฏพิกของ d_{001} ในทุกอัตราส่วนของการเติม OMMT ซึ่งอาจสรุปได้ว่ามีโครงสร้างแบบ exfoliate โดยทั้ง RPET และ Nylon 6 เสริมให้นาโนคอมพอสิตเกิดโครงสร้างแบบ exfoliate ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่าง OMMT และพอลิเมอร์ให้มากขึ้น โดยสามารถยืนยันการเกิดโครงสร้างแบบ exfoliate ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM

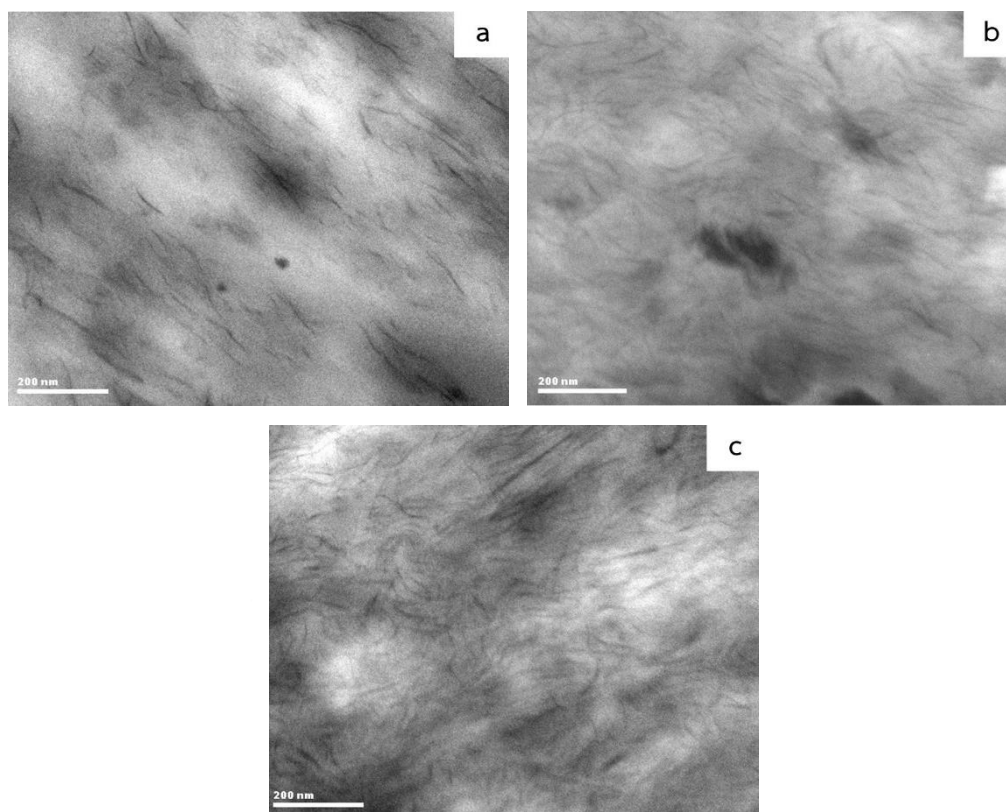
รูปที่ 4.15 แสดงสัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT ที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค TEM ภายใต้กำลังขยาย 71,000 เท่า ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่า OMMT สามารถกระจายตัวอยู่ในรูปแบบ exfoliate ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD อย่างไรก็ตามอาจมีโครงสร้างแบบ intercalate ปะปนอยู่ด้วย

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ OMMT และนาโนคอมพอสิตด้วยเทคนิค XRD

Sample	2θ (°)	d_{001} (Å)	โครงสร้างของนาโนคอมพอสิต
OMMT	4.8	18.4	–
100/1 RPET/OMMT	–	–	exfoliated
100/3 RPET/OMMT	–	–	exfoliated
100/5 RPET/OMMT	2.7	32.7	intercalated
100/1 Nylon 6/OMMT	–	–	exfoliated
100/3 Nylon 6/OMMT	–	–	exfoliated
100/5 Nylon 6/OMMT	3.5	25.2	intercalated
70/30/1 (RPET/Nylon 6/OMMT)	–	–	exfoliated
70/30/3 (RPET/Nylon 6/OMMT)	–	–	exfoliated
70/30/5 (RPET/Nylon 6/OMMT)	–	–	exfoliated



รูปที่ 4.14 XRD ดิฟแฟร็กโทแกรมของ (a) OMMT และนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT โดย (b) $x = 1$, (c) $x = 3$ and (d) $x = 5$



รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยาที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค TEM ของนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT เมื่อ x เท่ากับ (a) 1 phr, (b) 3 phr และ (c) 5 phr

4.8 สมบัติเชิงกลของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบความทนแรงกระแทก, สมบัติด้านแรงดึง (ความทนแรงดึง, ยืดสัมพัทธ์ และการยืดตัว ณ จุดขาด) และความทนแรงดัดโค้งของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT

ตารางที่ 4.7 สมบัติเชิงกลของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT

RPET/Nylon 6/OMMT (wt%/wt%/phr)	Impact strength (J/m)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural strength (N/mm ²)
100/0/0	26.4 ± 2.0	22.1 ± 4.0	4500.0 ± 179.4	1.7 ± 0.2	58.6 ± 1.3
0/100/0	61.6 ± 4.4	60.2 ± 4.1	1569.3 ± 217.3	210.3 ± 65	38.7 ± 0.4
100/0/1	11.5 ± 0.5	29.4 ± 2.5	2408.7 ± 136.1	1.5 ± 0.2	67.6 ± 1.6
100/0/3	9.6 ± 0.3	30.7 ± 3.3	2497.0 ± 98.4	1.6 ± 0.2	72.7 ± 1.7
100/0/5	6.7 ± 0.5	24.7 ± 1.5	2424.8 ± 122.2	1.2 ± 0.1	63.1 ± 1.6
0/100/1	23.7 ± 1.9	60.3 ± 2.0	2207.6 ± 53.7	19.8 ± 2.6	57.1 ± 2.8
0/100/3	19.7 ± 2.3	61.3 ± 1.8	2262.7 ± 161.0	18.1 ± 2.3	62.1 ± 0.5
0/100/5	18.2 ± 1.3	65.0 ± 2.3	2425.8 ± 207.3	5.7 ± 0.9	73.9 ± 2.1
70/30/0	32.9 ± 3.4	33.9 ± 3.2	2324.9 ± 87.6	2.6 ± 0.3	47.2 ± 0.9
70/30/1	34.7 ± 3.1	37.5 ± 3.2	2361.0 ± 78.1	2.7 ± 0.2	54.0 ± 1.9
70/30/3	20.6 ± 2.8	30.7 ± 1.7	2209.9 ± 120.5	2.5 ± 0.4	47.8 ± 1.4
70/30/5	14.7 ± 1.4	22.3 ± 2.2	2193.3 ± 79.3	2.0 ± 0.7	36.6 ± 1.8

4.8.1 สมบัติด้านแรงดึงและความทนแรงกระแทก

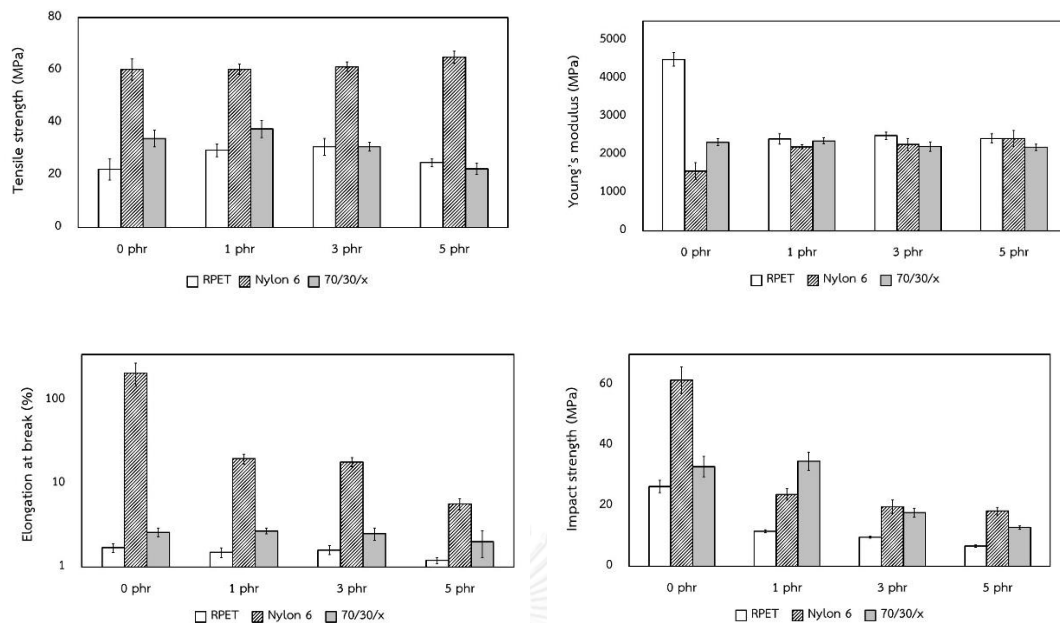
จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.16 พบว่า ความทนแรงดึงของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับความทนแรงดึงของ RPET ล้วน โดยมีค่ามากที่สุดเมื่อใส่ OMMT ปริมาณ 3 phr เนื่องจากส่งผ่านความเค้นได้ดี และความทนแรงดึงของนาโนคอมพอสิต Nylon 6/OMMT ก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกันตามปริมาณของ OMMT ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับความทนแรงดึงของ Nylon 6 ล้วน มีค่ามากที่สุดเมื่อใส่ OMMT ปริมาณ 5 phr จากความทนแรงดึงของนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT พบว่า นาโนคอมพอสิตที่ใส่ OMMT ปริมาณ 1 phr มีความทนแรงดึงมากกว่าของพอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 ประมาณ 10.6% อย่างไรก็ตาม การใส่ OMMT ปริมาณ 3 และ 5 phr ในนาโนคอมพอสิต มีผลทำให้ความทนแรงดึงของนาโนคอมพอสิตลดลง

เมื่อพิจารณาอย่างสัมพัทธ์ของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT มีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับยังสัมพัทธ์ของ RPET ล้วน ทั้งนี้เนื่องจาก RPET เป็นวัสดุที่แข็งเปราะอยู่แล้ว ดังนั้น การใส่ OMMT ซึ่งมีความแข็งดึงจะไม่มีผลช่วยปรับปรุงยังสัมพัทธ์ของนาโนคอมพอสิต และในส่วนยังสัมพัทธ์ของ

นาโนคอมพอสิต Nylon 6/OMMT มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับยังสัมมอดูลัสของ Nylon 6 ล้วน โดยมีค่ามากที่สุดเมื่อใส่ OMMT ปริมาณ 5 phr ทั้งนี้เนื่องจาก Nylon 6 มีความยืดหยุ่นมากกว่า RPET ดังนั้น การใส่ OMMT จึงสามารถปรับปรุงยังสัมมอดูลัสของนาโนคอมพอสิตได้ สำหรับค่ายังสัมมอดูลัสของนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT แสดงให้เห็นว่า นาโนคอมพอสิตที่ใส่ OMMT ปริมาณ 1 phr มียังสัมมอดูลัสมากกว่าของพอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 เล็กน้อยเท่านั้น ขณะที่ การใส่ OMMT ปริมาณ 3 และ 5 phr มีผลทำให้ยังสัมมอดูลัสลดลง

การยึดตัว ณ จุดขาดของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT พบว่า มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบกับการยึดตัว ณ จุดขาดของ RPET ล้วน จึงยังคงเป็นวัสดุที่แข็งแรงอยู่ เนื่องจาก OMMT มีความแข็งตึง จึงไม่ช่วยปรับปรุงการยึดตัว ณ จุดขาดของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT ส่วนการยึดตัว ณ จุดขาดของนาโนคอมพอสิต Nylon 6/OMMT ก็มีค่าลดลงเช่นเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับการยึดตัว ณ จุดขาดของ Nylon 6 ล้วน เนื่องจากความแข็งตึงของ OMMT การยึดตัว ณ จุดขาดของนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT แสดงให้เห็นว่า นาโนคอมพอสิตที่ใส่ OMMT ปริมาณ 1 phr มีค่าการยึดตัว ณ จุดขาดสูงที่สุด และมีค่ามากกว่าของพอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 เล็กน้อย แต่มีค่ามากกว่าของ RPET ล้วนประมาณ 58.8% ในขณะที่ใส่ OMMT ปริมาณ 3 และ 5 phr มีผลทำให้การยึดตัว ณ จุดขาดของนาโนคอมพอสิตลดลง นั่นคือพลาสติกมีความยืดหยุ่นลดลง อย่างไรก็ตาม นาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT ทุกอัตราส่วนมีการยึดตัว ณ จุดขาดมากกว่าของ RPET ล้วน

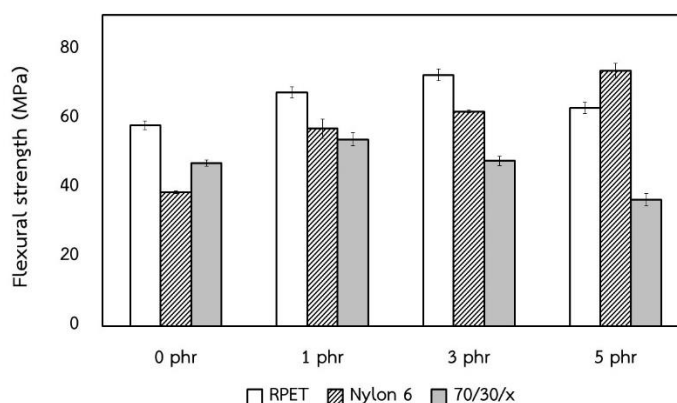
ความทนแรงกระแทกของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT จะเห็นว่า มีค่าลดลงตามปริมาณของ OMMT ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับความทนแรงกระแทกของ RPET ล้วน และความทนแรงกระแทกของนาโนคอมพอสิต Nylon 6/OMMT ก็มีแนวโน้มลดลงเช่นกันตามปริมาณของ OMMT ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับความทนแรงกระแทกของ Nylon 6 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจาก OMMT มีความแข็งตึงสูง จึงสามารถขัดขวางการเคลื่อนไหวของพอลิเมอร์ และถ้าเติม OMMT ในปริมาณมากอาจเกิดการเกาะกลุ่มกันและทำให้แรงยึดติดระหว่างเฟสลดลง จึงทำให้การส่งผ่านแรงกระแทกไม่ดี สำหรับความทนแรงกระแทกของนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT พบว่า นาโนคอมพอสิต ที่ใส่ OMMT ปริมาณ 1 phr มีความทนแรงกระแทกมากกว่าของพอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 ประมาณ 5.5% อย่างไรก็ตาม การใส่ OMMT ปริมาณ 3 และ 5 phr มีผลทำให้ความทนแรงกระแทกของนาโนคอมพอสิตลดลง



รูปที่ 4.16 สมบัติด้านแรงดึงและความทนแรงกระแทกของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT ($x = 0, 1, 3$ และ 5 phr)

4.8.2 ความทนแรงดัดโค้ง

จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.17 พบว่า ความทนแรงดัดโค้งของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT และ Nylon 6/ OMMT ทุกอัตราส่วนมีค่าสูงกว่าความทนแรงดัดโค้งของ RPET และ Nylon 6 ตามลำดับ เนื่องจาก OMMT ที่มีความแข็งตึงขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ จึงทำให้นาโนคอมพอสิตมีความทนแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณของ OMMT ในนาโนคอมพอสิต พิจารณาความทนแรงดัดโค้งของนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT จะเห็นว่า ความทนแรงดัดโค้งของนาโนคอมพอสิตที่ใส่ OMMT ปริมาณ 1 phr มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณ OMMT ทำให้ความทนแรงดัดโค้งของนาโนคอมพอสิตลดลง นั่นคือ OMMT มีผลทำให้ชิ้นงานมีการโค้งงอได้ลดลงเมื่อได้รับแรงกด



รูปที่ 4.17 ความทนแรงดัดโค้งของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT (x = 0, 1, 3 และ 5 phr)

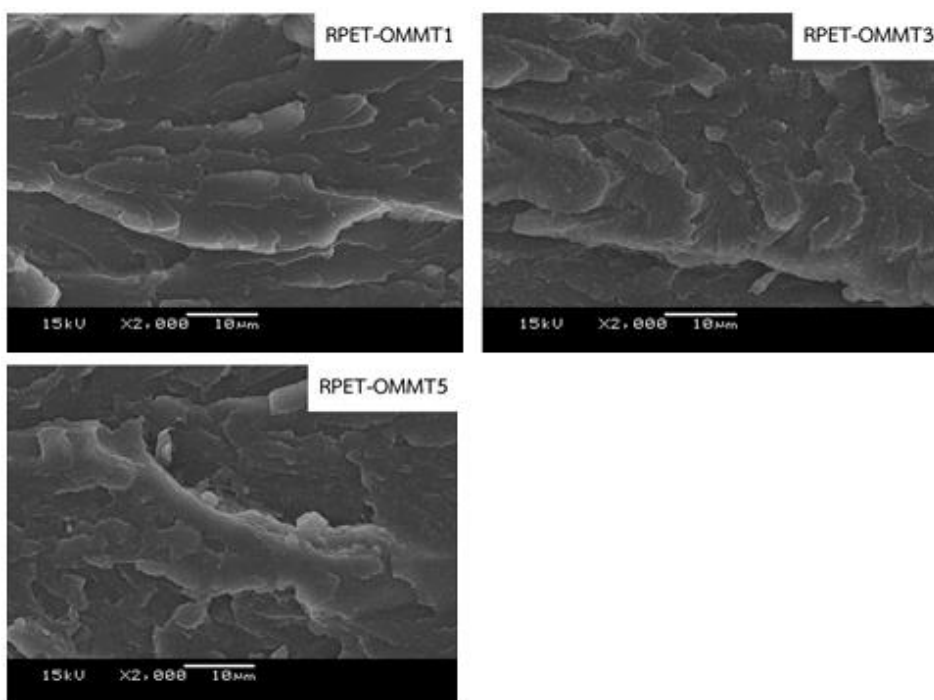
ทั้งนี้เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลทั้งหมดของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT จะเห็นว่า OMMT มีความเข้ากันได้กับ Nylon 6 มากกว่า RPET ทำให้สมบัติเชิงกลของนาโนคอมพอสิต Nylon 6/OMMT ดีขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการเติม OMMT เนื่องจาก OMMT เป็นสารเสริมแรงที่มีขั้วสูง จึงมีความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ที่มีขั้วสูง โดย Nylon 6 มีความเป็นขั้วที่มากกว่า RPET จึงส่งผลให้การเติม OMMT มีผลต่อ Nylon 6 มากกว่า RPET และเมื่อสังเกตจากสมบัติเชิงกลของนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT พบว่า การเติม OMMT ที่มากขึ้นมีผลทำให้สมบัติเชิงกลต่ำลง อาจเนื่องมาจาก OMMT มีความเข้ากันได้กับ Nylon 6 ซึ่งเป็นเฟสกระจายใน RPET มากกว่า ทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณ OMMT เฟสกระจายจะไปรวมกับ OMMT มากกว่าเมทริกซ์ RPET ทำให้เกิดการแยกเฟสในนาโนคอมพอสิต สมบัติเชิงกลจึงต่ำลง

4.9 สัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT

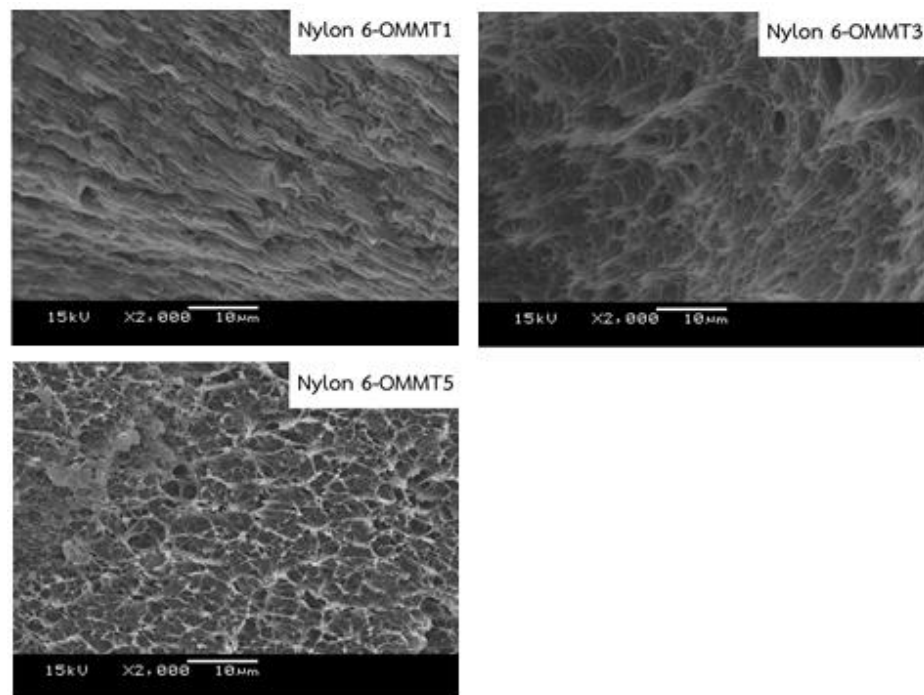
รูปที่ 4.18–4.20 แสดงสัณฐานวิทยานาโนคอมพอสิตที่ผ่านการทำทดสอบสมบัติด้านแรงดึงของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT ที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM ภายใต้กำลังขยาย 2,000 เท่า พบว่า สัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT และ Nylon 6/OMMT ตามลำดับ จะเห็นลักษณะรอยแตกที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเมทริกซ์ที่เป็น RPET มีความแข็งและเปราะมากกว่า Nylon 6 จึงมองเห็นพื้นผิวรอยแตกของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT ที่ค่อนข้างเรียบ ขณะที่พื้นผิวรอยแตกของนาโนคอมพอสิต Nylon 6/OMMT มีลักษณะที่เป็นเหมือนเนื้อพลาสติกถูกดึงขึ้นก่อนที่จะขาดจากกันเมื่อได้รับแรงดึง อย่างไรก็ตาม

พื้นผิวรอยแตกของนาโนคอมพอสิต Nylon 6/ OMMT ที่ใส่ OMMT ปริมาณ 5 phr ยังปรากฏรูปร่าง
มากกระจายอยู่ทั่วไป ซึ่งเกิดจาก OMMT ที่เกาะกลุ่มกันถูกดึงออกมา

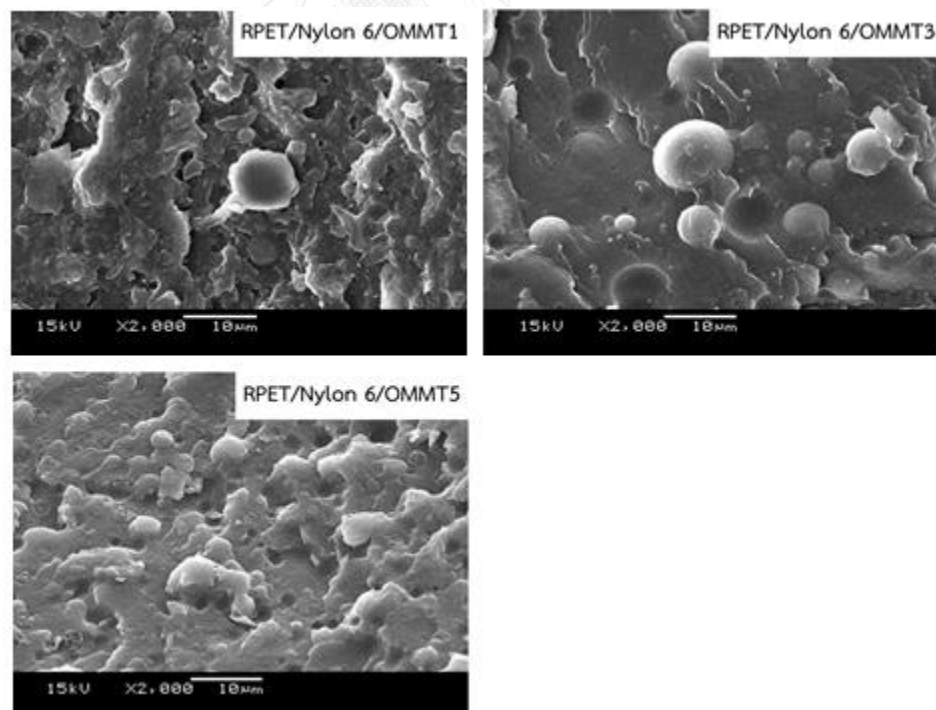
จากรูปที่ 4.20 แสดงถึงความไม่เข้ากันระหว่าง RPET และ Nylon 6 โดยสังเกตเห็นเฟสทรงกลม
ของ Nylon 6 กระจายอยู่บนพื้นผิวรอยแตกของนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT
ทั้งนี้เนื่องจากการใส่ OMMT ในพอลิเมอร์ผสมมีผลทำให้ความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น ดังนั้น
จึงเป็นการยากที่ Nylon 6 ซึ่งเป็นเฟสกระจาย (dispersed phase) ที่มีความเหนียวมากกว่าจะเข้า
รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกับ RPET ที่มีความเหนียวต่ำกว่า นอกจากนี้ ยังเห็นรูปร่างมากที่เกิดจากการที่
Nylon 6 ถูกดึงออกมาเมื่อได้รับแรงดึง เนื่องจากมีแรงยึดเกาะระหว่าง RPET และ Nylon 6 ที่ต่ำ



รูปที่ 4.18 สัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอสิต Nylon 6/OMMT ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.20 สัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอสิต RPET/Nylon 6/OMMT ที่อัตราส่วนต่างๆ

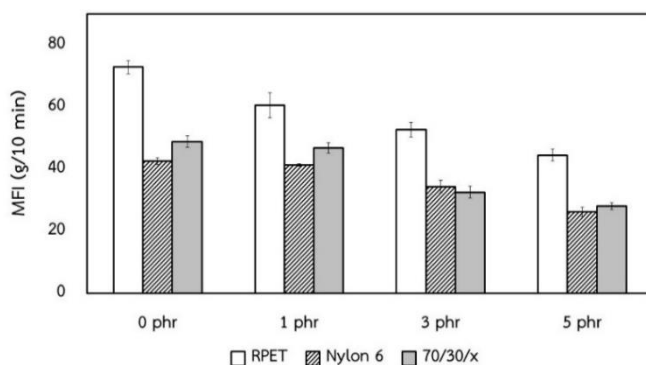
4.10 สมบัติทางความร้อนของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT

4.10.1 ตรีรชนีการหลอมไหล

ตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.21 แสดงตรีรชนีการหลอมไหลของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT โดยใช้น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม ที่ 260 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าตรีรชนีการหลอมไหลของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT มีค่าลดลงตามปริมาณ OMMT ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับของ RPET ล้วน และของนาโนคอมพอสิต Nylon 6/ OMMT ก็มีค่าลดลงตามปริมาณ OMMT ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับของ Nylon 6 ล้วน และในทำนองเดียวกัน ตรีรชนีการหลอมไหลของนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT มีค่าลดลงตามปริมาณ OMMT ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับของพอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 ทั้งนี้เนื่องจาก OMMT ชัดขวางการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์เมทริกซ์ จึงทำให้ความหนืดของนาโนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้น (ตรีรชนีการหลอมไหลลดลง)

ตารางที่ 4.8 ตรีรชนีการหลอมไหลของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT

RPET/Nylon 6/OMMT (wt%/wt%/phr)	MFI (g/10min)
100/0/0	72.9 ± 2.1
0/100/0	42.6 ± 1.1
100/0/1	60.6 ± 4.0
100/0/3	52.8 ± 2.4
100/0/5	44.5 ± 1.9
0/100/1	41.4 ± 0.3
0/100/3	34.4 ± 2.1
0/100/5	26.3 ± 1.5
70/30/0	49.0 ± 1.8
70/30/1	46.9 ± 1.6
70/30/3	32.6 ± 1.9
70/30/5	28.2 ± 1.0



รูปที่ 4.21 दररชนีการหลอมไหลของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT ($x = 0, 1, 3$ และ 5 phr)

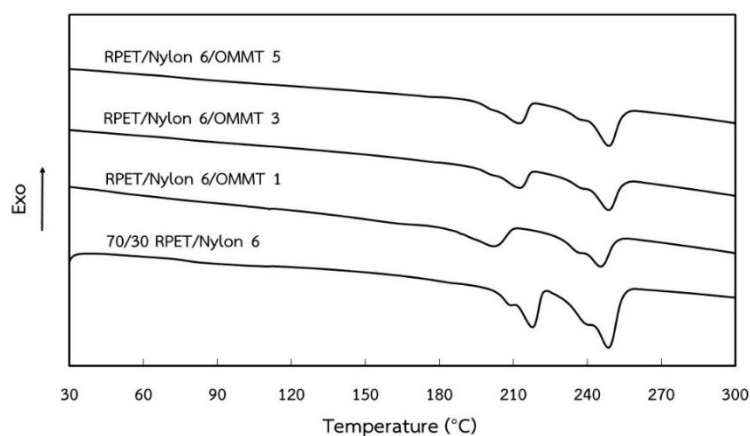
4.10.2 พฤติกรรมการเกิดผลึก

ตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.22 แสดงพฤติกรรมการเกิดผลึกของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT ที่หาได้จาก DSC เทอร์โมแกรม ซึ่งได้แก่ T_c , T_m , ΔH_m และ χ_c พบว่า T_c ของ RPET ในนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT มีแนวโน้มลดลง ซึ่งแสดงว่า RPET เกิดผลึกช้าลงเมื่อเปรียบเทียบกับ RPET ล้วน โดย OMMT ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก และยังขัดขวางการจัดเรียงโมเลกุลของ RPET อีกด้วย ในขณะที่ T_c ของ Nylon 6 มีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงว่า Nylon 6 มีอัตราการเกิดผลึกเร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ Nylon 6 ล้วน นอกจากนี้ T_c ของ RPET ในนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT มีค่าไม่แตกต่างจากของพอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 อย่างไรก็ตาม T_c ของ Nylon 6 ในนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT กลับมีแนวโน้มลดลง แสดงว่า OMMT ที่ชอบเฟสของ Nylon 6 มากกว่า จะไปขัดขวางการจัดเรียงโมเลกุลของ RPET ในนาโนคอมพอสิต

สำหรับ T_m ของทั้ง RPET และ Nylon 6 พบว่า ในนาโนคอมพอสิตมี T_m 2 ตำแหน่ง โดย T_m ของ RPET ในนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT และ T_m ของ Nylon 6 ในนาโนคอมพอสิต Nylon 6/OMMT มีค่าไม่แตกต่างกันกับพอลิเมอร์ล้วน สำหรับ T_m ของนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT มีค่าไม่แตกต่างกันเมื่อเพิ่มปริมาณของ OMMT แสดงว่า OMMT ไม่มีผลต่อ T_m ของทั้ง RPET และ Nylon 6 ในนาโนคอมพอสิต นอกจากนี้ ปริมาณการเกิดผลึกของ RPET ในนาโนคอมพอสิตมีค่าลดลง แสดงว่า OMMT ขัดขวางการจัดเรียงตัวของ RPET ขณะที่ Nylon 6 ในนาโนคอมพอสิตมีปริมาณการเกิดผลึกไม่แตกต่างกัน สำหรับปริมาณการเกิดผลึกของ RPET และ Nylon 6 ในนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT พบว่า มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าการเติม OMMT ไม่มีผลต่อพฤติกรรมการเกิดผลึกในนาโนคอมพอสิต

ตารางที่ 4.9 พารามิเตอร์การเกิดผลึกของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT

Sample	RPET				Nylon 6			
	T_c (°C)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	$\chi_{c,RPET}$ (%)	T_c (°C)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	$\chi_{c,Nylon6}$ (%)
RPET/OMMT								
100/0	207.6	247.7	52.2	43.5	–	–	–	–
100/1	205.6	240.4, 250.4	41.3	34.4	–	–	–	–
100/3	201.4	238.1, 249.1	43.9	36.6	–	–	–	–
100/5	204.0	240.0, 248.8	39.4	32.8	–	–	–	–
Nylon 6/OMMT								
100/0	–	–	–	–	165.8	219.0	57.2	30.0
100/1	–	–	–	–	184.5	212.1, 220.2	58.0	30.4
100/3	–	–	–	–	182.5	211.6, 220.0	51.9	27.2
100/5	–	–	–	–	180.8	211.6, 220.7	47.8	25.1
RPET/Nylon 6/OMMT (wt%/wt%/phr)								
70/30/0	201.3	238.6, 248.5	24.9	29.6	184.9	208.2, 217.8	12.0	21.0
70/30/1	203.5	236.3, 248.7	25.0	29.8	167.8	200.8, 212.4	14.4	25.2
70/30/3	201.5	237.0, 248.5	24.5	29.2	177.5	200.9, 212.4	13.6	23.8
70/30/5	200.1	236.8, 249.0	26.0	31.0	181.8	200.5, 215.7	16.6	29.0



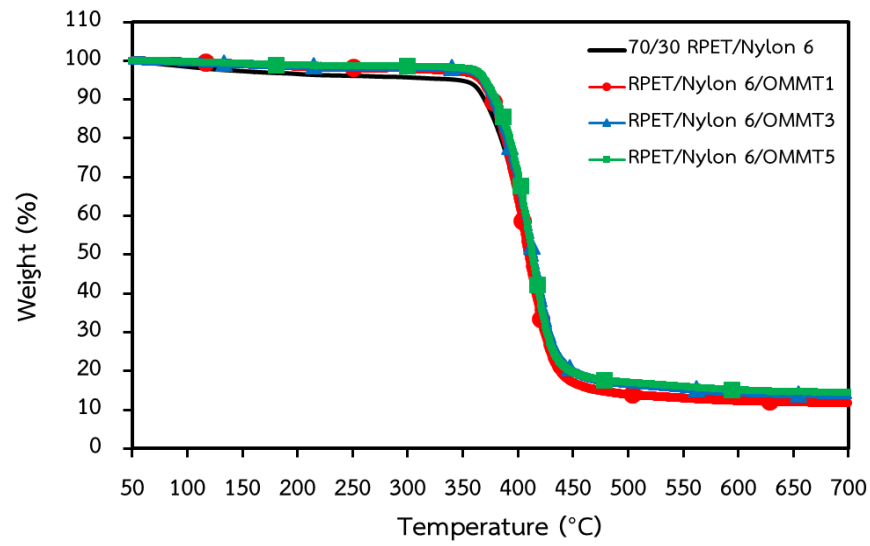
รูปที่ 4.22 DSC เทอร์โมแกรมของของพอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 และนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT (x = 0, 1, 3 และ 5 phr) จากการให้ความร้อนครั้งที่ 2

4.10.3 เสถียรภาพทางความร้อน

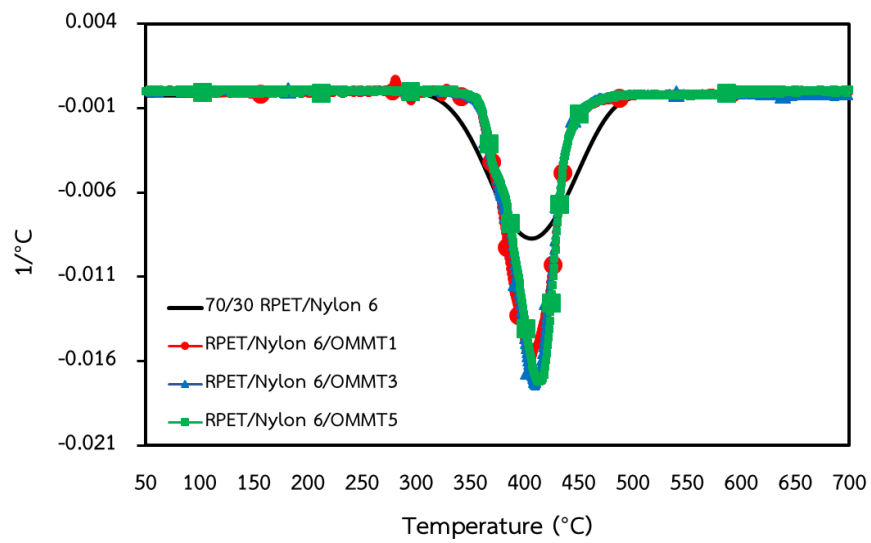
ตารางที่ 4.10 แสดงเสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT ที่ได้จาก TGA และ DTG เทอร์โมแกรม ในเทอมของ T_{onset} , $T_{end\ set}$, $T_{50\%}$ และ T_{max} แสดงให้เห็นว่าเสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT ทุกอัตราส่วนมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับของ RPET ล้วน แต่เสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมพอสิต Nylon 6/OMMT มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับของ Nylon 6 ล้วน โดยทั้ง T_{onset} , $T_{end\ set}$, $T_{50\%}$ และ T_{max} ของนาโนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่า OMMT มีความเข้ากันได้กับ Nylon 6 มากกว่า RPET และจากตารางที่ 4.10 รูปที่ 4.23 และ 4.24 ซึ่งแสดง TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT พบว่า นาโนคอมพอสิตมี T_{onset} และ $T_{50\%}$ เพิ่มขึ้น ในขณะที่ $T_{end\ set}$ และ T_{max} ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับของพอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 ซึ่งแสดงว่า OMMT ทำให้นาโนคอมพอสิตเริ่มสลายตัวช้าลง หากแต่สิ้นสุดการสลายตัวได้เร็วขึ้น

ตารางที่ 4.10 เสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT

RPET/Nylon 6/OMMT (wt%/wt%/phr)	T_{onset} (°C)	$T_{50\%}$ (°C)	$T_{end\ set}$ (°C)	T_{max} (°C)
100/0/0	413.5	433.5	451.8	437.1
100/0/1	413.7	434.4	454.1	438.6
100/0/3	410.7	432.4	451.8	436.4
100/0/5	415.0	434.5	454.1	437.6
0/100/0	419.0	442.3	446.3	448.3
0/100/1	425.6	447.0	470.5	455.1
0/100/3	425.0	444.4	465.6	452.9
0/100/5	423.1	442.6	463.6	450.3
70/30/0	377.5	408.0	437.3	411.0
70/30/1	380.3	409.1	430.7	406.2
70/30/3	383.1	410.8	438.9	409.5
70/30/5	385.7	413.3	431.9	413.2



รูปที่ 4.23 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT
(x = 0, 1, 3 และ 5 phr)



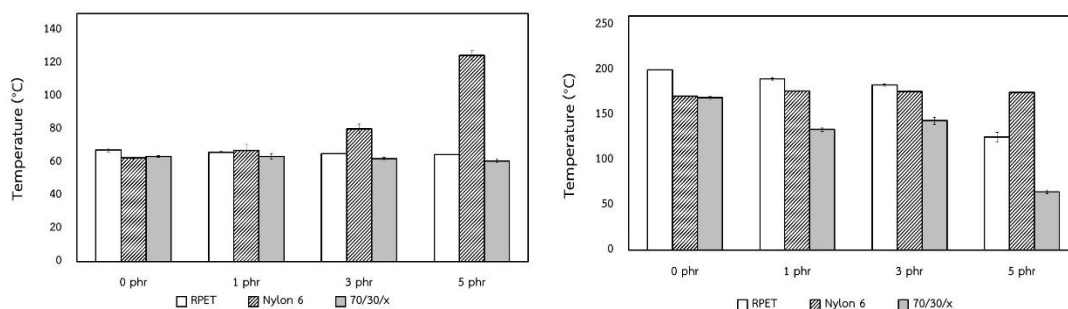
รูปที่ 4.24 เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT
(x = 0, 1, 3 และ 5 phr)

4.10.4 อุณหภูมิการโค้งงอและอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต

ตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.25 แสดงค่า HDT และ VST ของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT พบว่า ทั้ง HDT และ VST ของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT ทุกอัตราส่วนมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ RPET ล้วน แต่ HDT และ VST ของนาโนคอมพอสิต Nylon 6/OMMT มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับของ Nylon 6 ล้วน ซึ่งผลที่ได้เป็นไปในทำนองเดียวกับการหาเสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมพอสิต Nylon 6/OMMT นั่นคือ OMMT ชอบอยู่กับเฟสของ Nylon 6 มากกว่า RPET อย่างไรก็ตาม ทั้งอุณหภูมิ HDT และ VST ของนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT มีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับของพอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 เนื่องจาก OMMT มีการยึดเกาะกับเมทริกซ์ได้ไม่ดี จึงทำให้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น วัสดุที่ได้รับแรงกดจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างได้ง่ายขึ้น ทั้งนี้มีความเข้ากันได้ระหว่าง OMMT และ Nylon 6 มากกว่า RPET ทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณ OMMT ในนาโนคอมพอสิต จะเกิดการแยกเฟสมากขึ้นระหว่าง RPET และ Nylon 6 เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น พื้นผิวชิ้นงานที่ได้รับแรงกดโดนบริเวณที่ OMMT กระจายตัวอยู่ อุณหภูมิอ่อนตัวของพลาสติกจะมีค่าไม่ลดลงมากนัก แต่หากชิ้นงานที่ได้รับแรงกดโดนบริเวณที่มีการแยกเฟสของพอลิเมอร์ จะทำให้รับแรงได้ลดลงอย่างเห็นได้ชัด และมีการเปลี่ยนรูปร่างได้ง่ายขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลง

ตารางที่ 4.11 อุณหภูมิการโค้งงอและอุณหภูมิการอ่อนตัวไวแคตของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT

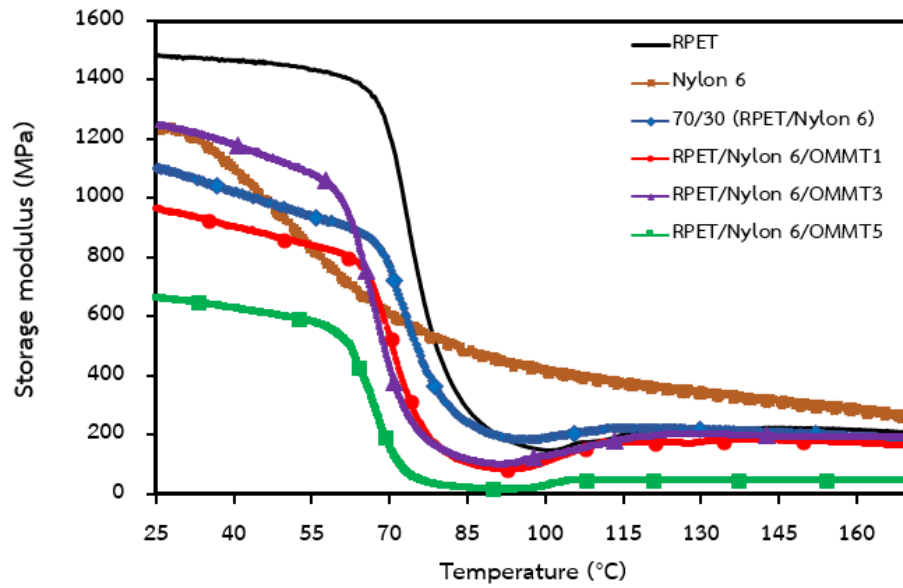
RPET/Nylon 6/OMMT (wt%/wt%/phr)	HDT (°C)	VST (°C)
100/0/0	67.4 ± 1.1	200.0 ± 0.2
100/0/1	66.2 ± 0.3	189.9 ± 1.3
100/0/3	65.1 ± 0.0	183.1 ± 1.1
100/0/5	64.7 ± 0.0	125.4 ± 5.5
0/100/0	62.6 ± 0.8	170.9 ± 0.4
0/100/1	67.1 ± 3.7	176.4 ± 0.1
0/100/3	80.3 ± 3.0	176.1 ± 0.8
0/100/5	124.7 ± 2.9	175.1 ± 0.3
70/30/0	63.5 ± 0.6	169.0 ± 1.9
70/30/1	63.6 ± 1.7	133.6 ± 1.9
70/30/3	62.3 ± 0.8	143.5 ± 3.8
70/30/5	60.9 ± 1.3	64.4 ± 2.0



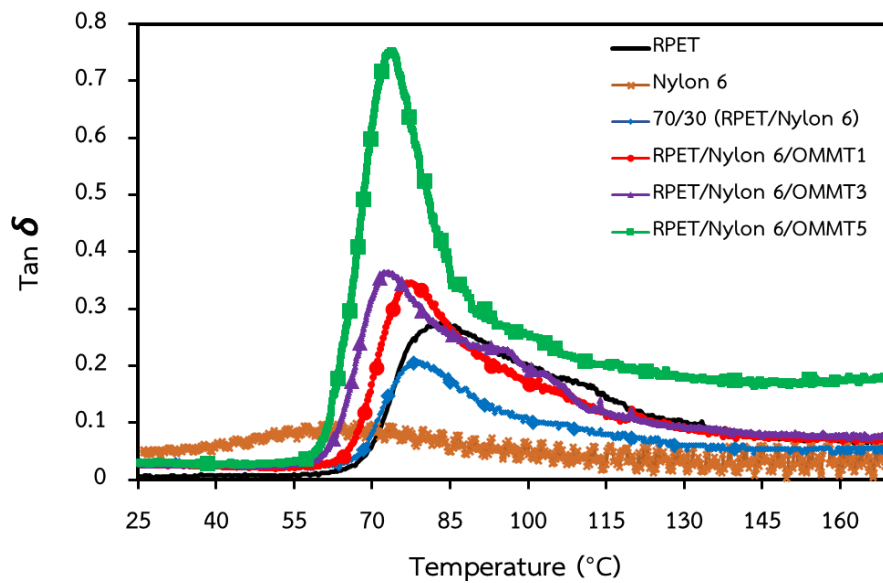
รูปที่ 4.25 อุณหภูมิอ่อนตัวของพลาสติก HDT (ซ้าย) และ VST (ขวา) ของนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT ($x = 0, 1, 3$ และ 5 phr)

4.11 สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical analysis)

สมบัติเชิงกลพลวัตของ RPET, Nylon 6, พอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 และนาโนคอมพอสิต RPET/Nylon 6/OMMT ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMA ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 175 องศาเซลเซียส ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.26 และ 4.27 ในเทอมของมอดูลัสสะสม (storage modulus, E') และแทนเจนต์สูญเสีย (loss tangent, $\tan \delta$) เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ จากความสัมพันธ์ของมอดูลัสสะสมและอุณหภูมิภายใต้ภาวะของการให้แรงและความถี่อย่างสม่ำเสมอ จะเห็นการลดลงของมอดูลัสสะสมเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 100–175 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่า ที่ 25 องศาเซลเซียส RPET มีมอดูลัสสะสมประมาณ 1,500 MPa ในขณะที่ Nylon 6 มีมอดูลัสสะสมประมาณ 1,240 MPa ทำให้มอดูลัสสะสมของพอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 มีค่าลดลงเหลือประมาณ 1,100 MPa โดยเมื่อการสั่นของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งงานเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายจากแรงที่กระทำ จึงทำให้มอดูลัสสะสมลดลง เมื่อพิจารณานาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT พบว่า การเติม OMMT ปริมาณ 3 phr ทำให้มอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้นเป็น 1,250 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 เนื่องจาก OMMT ขัดขวางการจัดเรียงตัวของ RPET อย่างไรก็ตาม การเติม OMMT ปริมาณ 1 และ 5 phr พบว่า นาโนคอมพอสิตมีมอดูลัสสะสมลดลงเหลือประมาณ 950 MPa และ 660 MPa ตามลำดับ



รูปที่ 4.26 มอดุลัสสะสมของ RPET, Nylon 6, พอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 และนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT (x = 1, 3 และ 5 phr)



รูปที่ 4.27 แทนเจนต์สูญเสียของ RPET, Nylon6, พอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 และนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT (x = 1, 3 และ 5 phr)

ความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ และอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 4.27 ซึ่งพิกของ $\tan \delta$ แสดง T_g ของ RPET ที่อุณหภูมิประมาณ 85 องศาเซลเซียส และของ Nylon 6 ที่ประมาณ 65 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็น α -transition ในส่วนของพอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 จะเห็นพิกสูงสุดปรากฏแค่เพียงพิกเดียวที่อุณหภูมิประมาณ 79 องศาเซลเซียส ภายใต้ภาวะของการทดสอบ และจากพิกของ $\tan \delta$ ของนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT พบว่า การเติม OMMT มีผลทำให้ค่า T_g ของนาโนคอมพอสิตลดลงเล็กน้อยตามปริมาณของ OMMT ที่เพิ่มขึ้น (77, 74 และ 73.8 องศาเซลเซียส เมื่อใส่ OMMT ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับ) ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ free volume ภายในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนไหวได้มากขึ้น

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาความสูงของพิก $\tan \delta$ พบว่า มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมความเป็นวิสโคอิลาสติกของพอลิเมอร์ โดย RPET มีค่า $\tan \delta$ ประมาณ 0.27 และ Nylon 6 มีค่าประมาณ 0.10 ซึ่งการที่ Nylon 6 มีค่า $\tan \delta$ ต่ำกว่า ได้แสดงพฤติกรรมของความเป็นอิลาสติก (elastic) คือ วัสดุที่เกิดการเปลี่ยนรูปเมื่อได้รับแรงกระทำและสามารถกลับคืนรูปเดิมได้เมื่อนำแรงที่กระทำออกไป ขณะที่ RPET มีพฤติกรรมแบบ viscous คือ เมื่อมีการให้แรงกระทำต่อวัสดุแล้วทำให้เกิดการเสียรูปและไม่สามารถคืนรูปกลับแบบเดิมได้เมื่อนำแรงที่กระทำออกไป ในส่วนของพอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 พบว่า มีค่า $\tan \delta$ ประมาณ 0.21 ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ RPET แสดงว่าวัสดุมีแนวโน้มของพฤติกรรมอิลาสติกมากขึ้น สำหรับนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT ที่มีการเติม OMMT ในอัตราส่วนต่างกัน พบว่า ความสูงของ $\tan \delta$ เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ OMMT ที่เพิ่มขึ้น (0.35, 0.37 และ 0.74 เมื่อเติม OMMT ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr ตามลำดับ) ซึ่งแสดงว่านาโนคอมพอสิตนี้มีความแข็งตึงมากขึ้น และแสดงพฤติกรรมแบบ viscous มากขึ้นเมื่อเติม OMMT จึงทำให้มีความสามารถในการรับแรงลดลง [28, 29]

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการเตรียมพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 และนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT และ RPET/Nylon 6/OMMT ด้วยวิธีการหลอมผสมและขึ้นรูปด้วยการฉีดแบบ เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การเติม Nylon 6 ใน RPET ในสัดส่วนต่างๆ มีผลทำให้ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน 70/30 RPET/Nylon 6 มีค่าสูงที่สุด และมีสมบัติด้านแรงดึง (ความทนแรงดึง, ยังสัมมอดูลัส และการยืดตัว ณ จุดขาด) และความทนแรงดัดโค้งที่เหมาะสม จึงเลือกพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วนนี้ใช้เตรียมนาโนคอมพอสิตกับ OMMT ในปริมาณ 1, 3 และ 5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อเรซินร้อยละ
2. นาโนคอมพอสิต RPET/OMMT มีความทนแรงกระแทกลดลงตามปริมาณ OMMT ที่เพิ่มขึ้น แต่มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นของสมบัติด้านแรงดึง (ความทนแรงดึง, ยังสัมมอดูลัส และการยืดตัว ณ จุดขาด) และความทนแรงดัดโค้ง นาโนคอมพอสิต Nylon 6/OMMT มีความทนแรงกระแทก และการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง ขณะที่ความทนแรงดึง, ยังสัมมอดูลัส และความทนแรงดัดโค้งมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ OMMT ที่เพิ่มขึ้น ในการเตรียมนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT พบว่า นาโนคอมพอสิต 70/30/1 RPET/Nylon 6/OMMT มีสมบัติเชิงกลด้านแรงดึง ความทนแรงกระแทก และความทนแรงดัดโค้งสูงที่สุดเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 ล้วน
3. เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ทุกอัตราส่วนมีค่าลดลงตามปริมาณของ Nylon 6 ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ RPET ล้วน
4. การเติม OMMT ในพอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 ทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT ได้รับการปรับปรุง โดยอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวและอุณหภูมิสลายตัวร้อยละ 50 มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ OMMT ที่มากขึ้น

5. อุณหภูมิการโค้งงอและอุณหภูมิก่อนตัวไวแคตของพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 มีค่าลดลงทุกอัตราส่วนเมื่อเทียบกับ RPET และการเติม OMMT ในพอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 ทำให้อุณหภูมิการโค้งงอและอุณหภูมิก่อนตัวไวแคตของนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/ OMMT มีแนวโน้มที่ลดลง
6. จากการศึกษาสมบัติเชิงกลพลวัตของนาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/ OMMT พบว่า OMMT ปริมาณ 3 phr มีผลในการเพิ่มมอดุลัสสะสมของนาโนคอมพอสิต เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6 เมื่อพิจารณาค่า T_g ที่ได้จากกราฟ $\tan \delta$ จะเห็นว่ามอดมอร์โลไนต์ตัดแปรทำให้ T_g ของนาโนคอมพอสิตมีค่าลดลงในทุกอัตราส่วนการเติม OMMT
7. จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านพบว่านาโนคอมพอสิต 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT ทุกอัตราส่วนมีโครงสร้างแบบ exfoliate

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการใช้สารต่อสายโซ่ (chain extenders) เพื่อให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ยาวขึ้น
2. ศึกษาการใช้สารเสริมแรงชนิดอื่นที่มีความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ผสม
3. ศึกษาการใช้พอลิเมอร์ชนิดอื่นในการผสมกับเพ็ทรีไซเคิล
4. ศึกษาวิธีการขึ้นรูปแบบอื่นๆ เช่น การทำฟิล์ม
5. ศึกษาการใช้สารพลาสติกไซเซอร์ (plasticizers) เพื่อเพิ่มความอ่อนตัวให้กับพลาสติก

รายการอ้างอิง

- [1] Awaja, F. and Pavel, D. Recycling of PET. *European Polymer Journal*. 2005; 41: 1453–1477.
- [2] Calcagno, C.I.W., Mariani, C.M., Teixeira, S.R. and Mauler, R.S. The effect of organic modifier of the clay on morphology and crystallization properties of PET nanocomposites. *Polymer*. 2007; 48: 966–974.
- [3] Mark, H.F., Bikales, N.M., Overberger, C.G. and Mengers, G. *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*. New York: John Wiley and Sons; 1985. 720 p.
- [4] เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร. สมบัติของพอลิเมอร์. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2555.
- [5] ชัยวัฒน์ เจนวนิชย์. เคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์; 2527.
- [6] Caldicott, R.J. The basics of stretch blow molding PET Containers. *Plastic Engineering*. 1999; 35: 8-35.
- [7] 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*. 2007; 104: 2602–2607.
- [8] ลักษณะ รักศักดิ์ศรี. การปรับปรุงสมบัติของเพ็ทรีไซเคิลด้วยพอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โคเทเรฟทาเลตและโพลีสไตรีนไนด์. *คณะวิทยาศาสตร์: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*; 2556.
- [9] อุดมศักดิ์ พาลี. ผลของอัตราส่วนผสมต่อการดูดซึมน้ำ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างไนลอน 6 และพอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์. *คณะวิทยาศาสตร์: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*; 2544.
- [10] Polymer Science Learning Center. Nylons [2016, May 19]. Available from: <http://pslc.ws/macrog/nylon.htm>.
- [11] Kozlowski, M. Structure and mechanical properties of heterogeneous polymer blends. *Journal of Applied Polymer Science*. 1995; 55: 1375–1383.
- [12] ปาเจรา พัฒนถาบุตร. เอกสารประกอบการสอนวิชาสารเติมแต่งพลาสติก. นครปฐม: ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร; 2554.

- [13] สมจิตต์ ตั้งชัยวัฒนา. พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend) [2016, April 25]. Available from: http://www.dss.go.th/images/st-article/cp_5_2548_polymer_blend.pdf.
- [14] Seymour, R.B. and Mark, H.F. Application of polymer. New York: Plenum Press; 1991.
- [15] Xanthos, M. Functional Fillers for Plastics. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.; 2005.
- [16] วนาลี ต้นศิริ. การดัดแปรพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตด้วยเทคนิคการอัดรีดแบบรีแอกทีฟ เพื่อใช้เป็นสารคู่ควบสำหรับออร์แกนอเคลย์/พอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิต. คณะวิทยาศาสตร์: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2554.
- [17] Alexandre, M. and Dubois, P. Polymer-layered silicate nanocomposite: preparation, properties and uses of new class of materials. Material Science and Engineering. 2000; 28: 1–63.
- [18] Ray, S.S. and Okamoto, M. Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing. Progress in Polymer Science. 2003; 28: 1539–1641.
- [19] Yelkovan, S., Yilmaz, D. and Aksoy, K. A study of organo-modified clay type on PET-clay based nanocomposites properties. Usak University Journal of Material Sciences. 2014; 1: 33–46.
- [20] Cho, J.W. and Paul, D.R. Nylon 6 nanocomposites by melt compounding. Polymer. 2001; 42: 1083–1094.
- [21] Pegoretti, A., Kolarik, J., Peroni, C. and Migliaresi, C. Recycled poly(ethylene terephthalate)/layered silicate nanocomposites: morphology and tensile mechanical properties. Polymer. 2004; 45: 2751–2759.
- [22] Kusmono, Mohd Ishak, Z.A., Chow, W.S., Takeichi, T. and Rochmadi. Enhancement of properties of PA6/PP nanocomposites via organic modification and compatibilization. Express Polymer Letters. 2008; 2: 655–664.
- [23] Novello, M.V., Carreira, L.G. and Canto, L.B. Post-consumer polyethylene terephthalate and polyamide 66 blends and corresponding short glass fiber reinforced composites. Materials Research. 2014; 17: 1285–1294.
- [24] Calcagno, C.I.W., Mariani, C.M., Teixeira, S.R. and Mauler, R.S. The role of the MMT on the morphological and mechanical properties of the PP/PET blends. Composites Science and Technology. 2008; 68: 2193–2200.

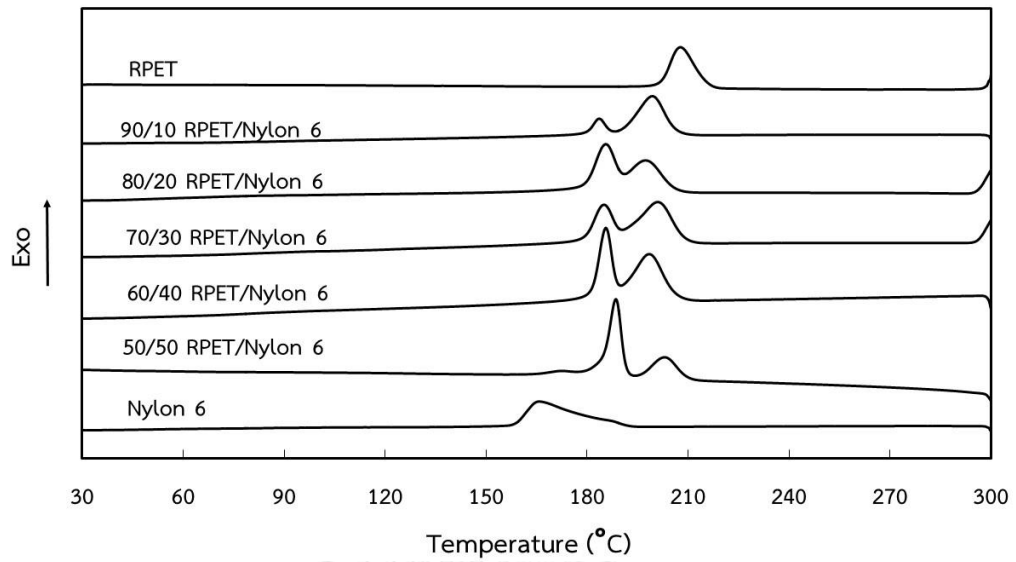
- [25] Chuayjuljit, S., Chaiwutthinan, P., Raksaksri, L. and Boonmahitthisud, A. Effects of poly(butylene adipate-co-terephthalate) and ultrafined wollastonite on the physical properties and crystallization of recycled poly(ethylene terephthalate) [2015, October 10]. Available from: <http://onlinelibrary.wiley.com/wol1/doi/10.1002/vnl.21489/full>.
- [26] Wang, Y., Gao, J., Ma, Y. and Agarwal, U.S. Study on mechanical properties, thermal stability and crystallization behavior of PET/MMT nanocomposites. *Composites* 2006; 37: 399–407.
- [27] 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 and Science*. 2011; 51: 1023–1032.
- [28] Serhatkulu, T., Erman, B., Bahar, I. and Fakirov, S. Dynamic mechanical study of amorphous phases in poly(ethylene terephthalate)/nylon-6 blends. *Polymer*. 1994; 36: 2371–2377.
- [29] อนุรักษ์จันท์ หงส์ศรีพันธ์. การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Dynamic Mechanical Analysis สำหรับวิศวกรรมพลาสติก. นครปฐม: ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร; 2549.



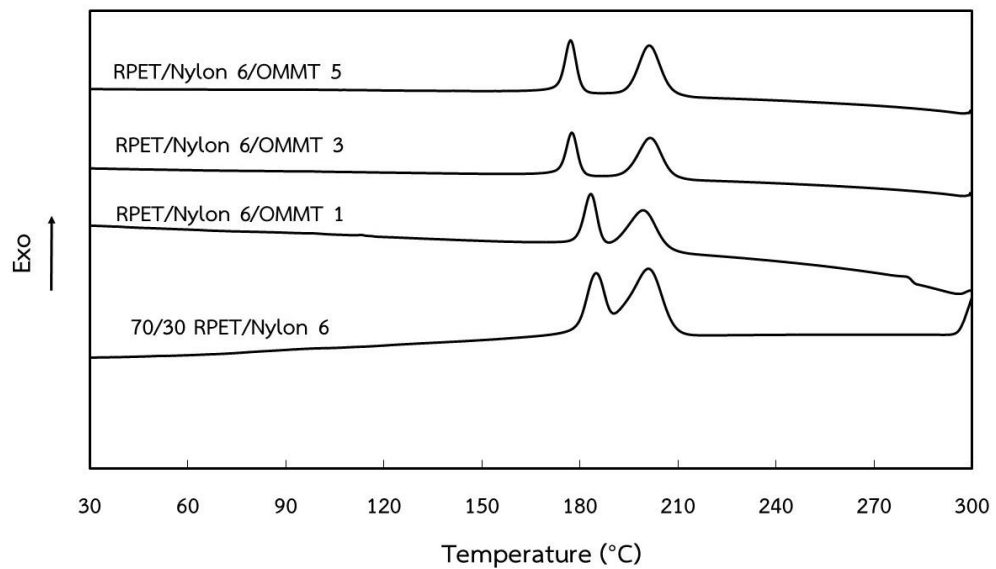
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

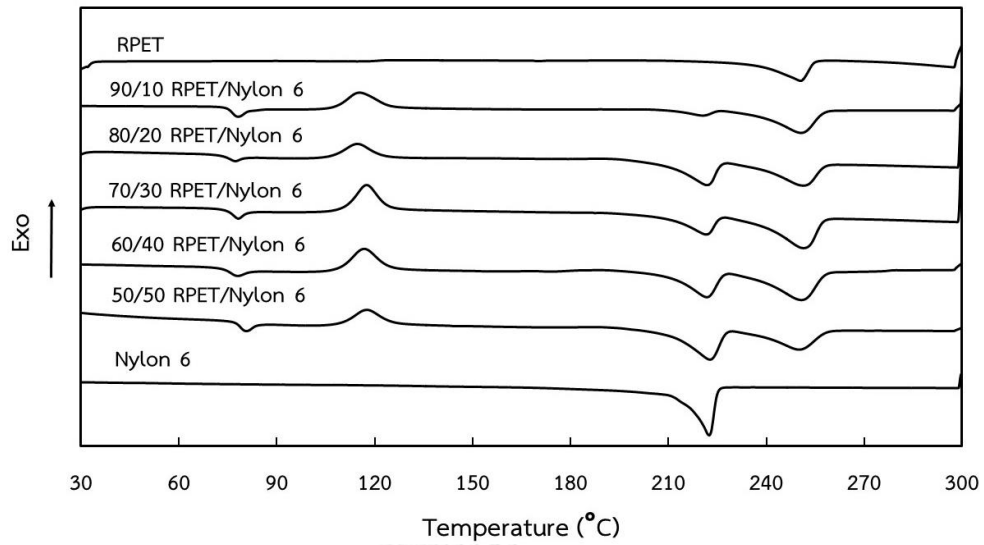
ภาคผนวก ก
เทอร์โมแกรมทางความร้อนจากเทคนิค DSC



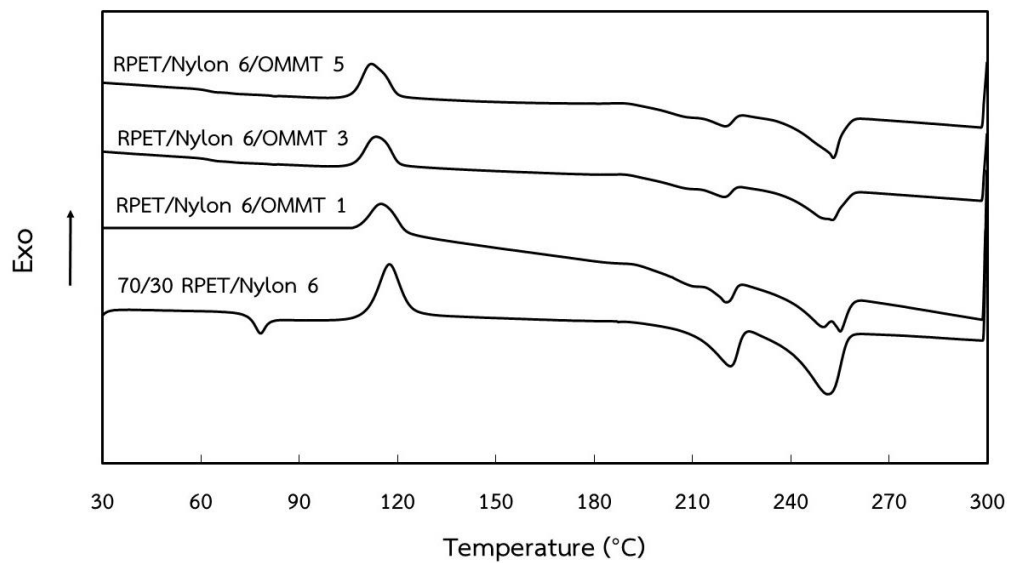
รูปที่ ก-1 DSC เทอร์โมแกรมของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ จาก cooling scan



รูปที่ ก-2 DSC เทอร์โมแกรมนาโนคอมพอสิต 70/30/x (RPET/Nylon 6/OMMT) (x = 0, 1, 3 และ 5 phr) จาก cooling scan



รูปที่ ก-3 DSC เทอร์โมแกรมของ RPET, Nylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ จาก first heating scan

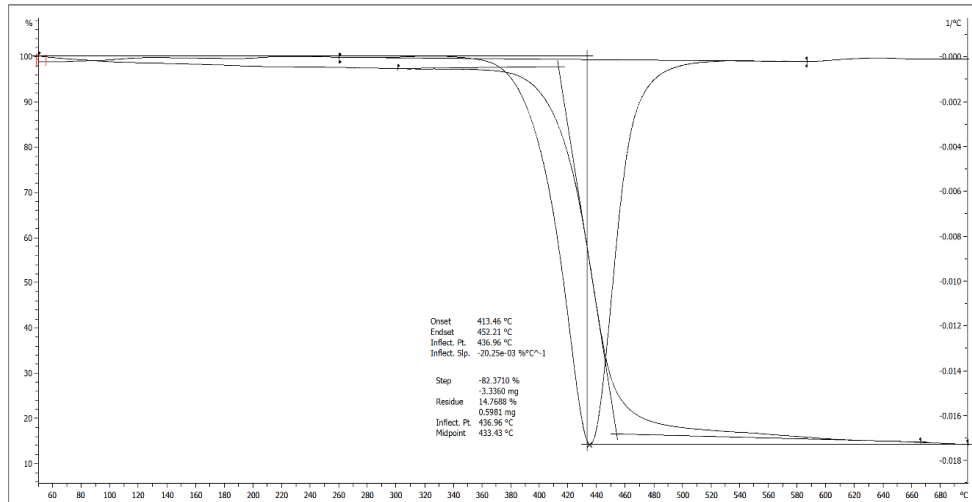


รูปที่ ก-4 DSC เทอร์โมแกรมนาโนคอมพอสิต 70/30/x (RPET/Nylon 6/OMMT) (x = 0, 1, 3 และ 5 phr) จาก first heating scan

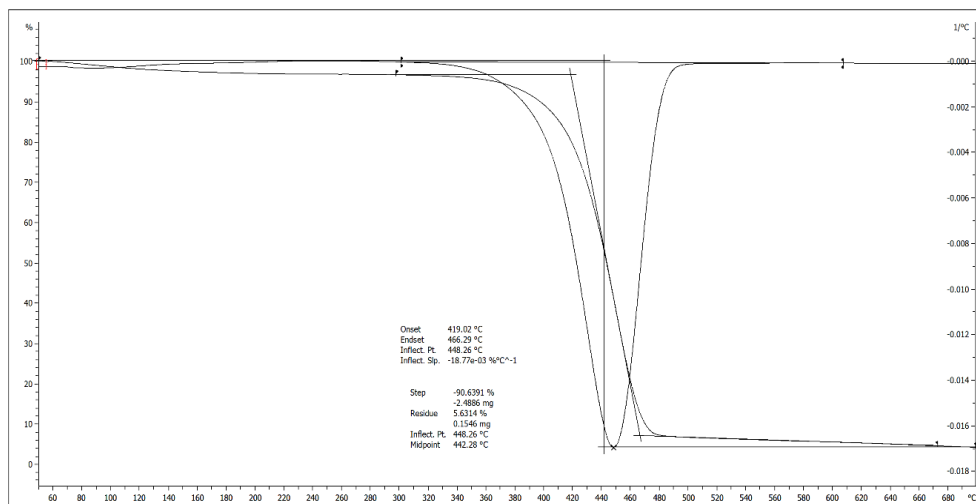
ตารางที่ ก-1 พารามิเตอร์การเกิดผลึกของ RPET, Nylon 6, พอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 อัตราส่วนต่างๆ และนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT 70/30/x (RPET/Nylon 6/OMMT) (x = 0, 1, 3 และ 5 phr) ในการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (first heating scan)

RPET/Nylon 6/OMMT (wt%/wt%/phr)	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_m	
			RPET (°C)	Nylon 6 (°C)
100/0/0	–	–	247.4	–
0/100/0	–	–	–	218.6
90/10/0	75.4	115.3	250.7	220.7
80/20/0	73.9	114.9	251.3	221.8
70/30/0	74.8	117.4	251.4	221.5
60/40/0	73.9	116.7	250.8	221.7
50/50/0	76.7	117.5	250.0	222.7
100/0/1	75.3	110.7	253.8	–
100/0/3	72.3	114.3	251.6	–
100/0/5	72.0	112.7	252.6	–
0/100/1	81.6	–	–	222.2
0/100/3	78.8	–	–	222.4
0/100/5	67.5	–	–	222.2
70/30/1	67.3	115.1	255.4	209.3, 220.6
70/30/3	63.7	113.5	252.7	207.2, 219.9
70/30/5	62.7	112.0	253.0	207.6, 220.2

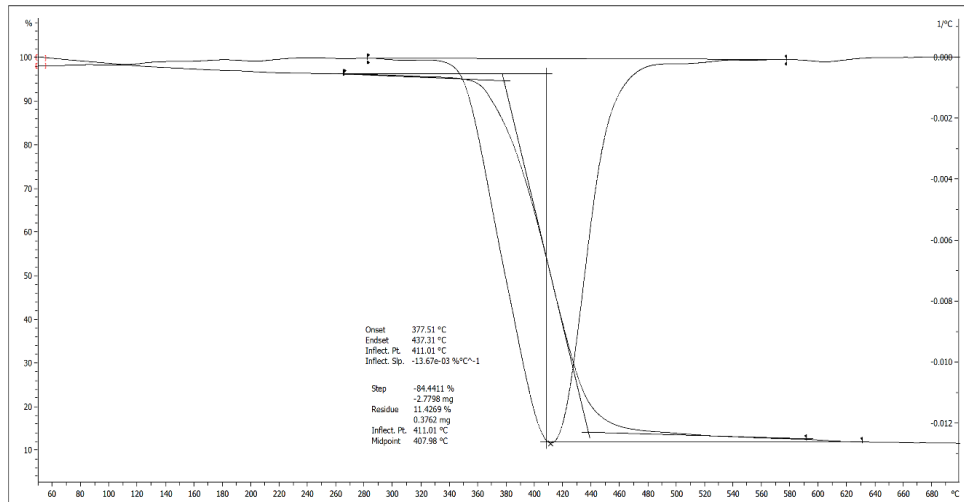
ภาคผนวก ข
เทอร์โมแกรมทางความร้อนจากเทคนิค TGA



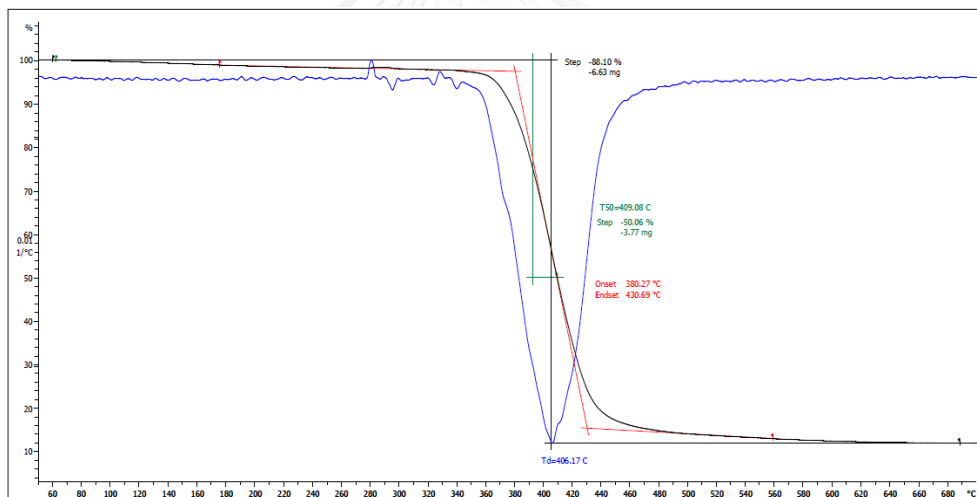
รูปที่ ข-1 TGA เทอร์โมแกรมของ RPET



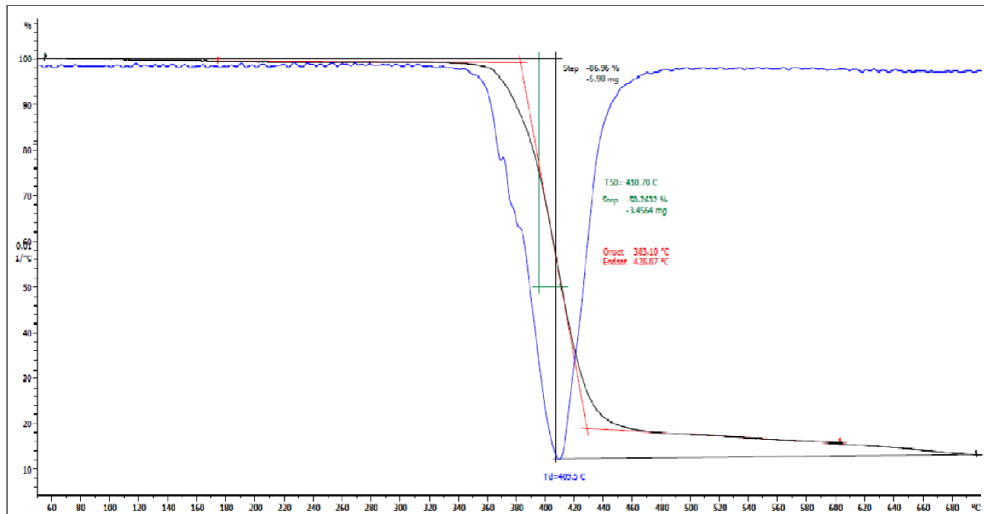
รูปที่ ข-2 TGA เทอร์โมแกรมของ Nylon 6



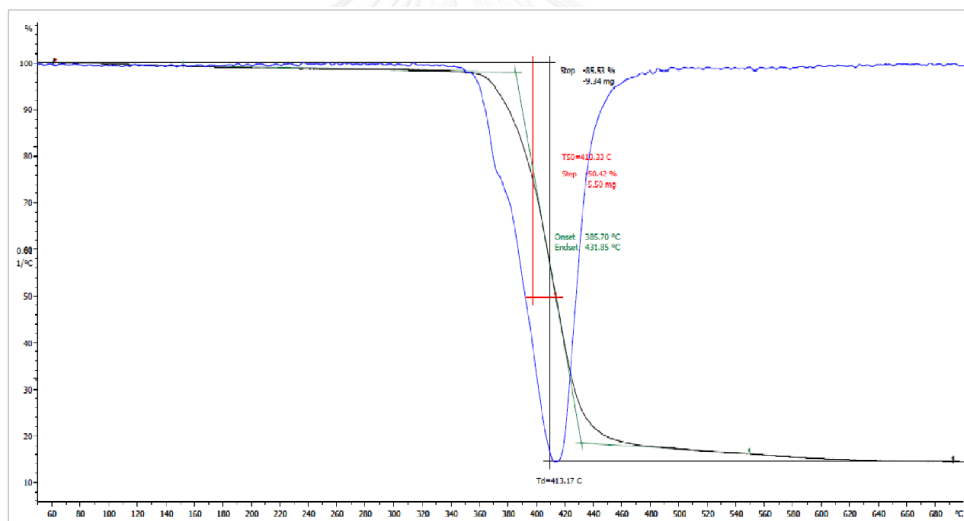
รูปที่ ข-3 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 70/30 RPET/Nylon 6



รูปที่ ข-4 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต RPET/Nylon 6/OMMT 1



รูปที่ ข-5 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต RPET/Nylon 6/OMMT 3



รูปที่ ข-6 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต RPET/Nylon 6/OMMT 5

ภาคผนวก ค

สมบัติเชิงกล

ตารางที่ ค-1 สมบัติเชิงกลด้านแรงดึงของ RPET, Nylon 6, พอลิเมอร์ผสม RPET/Nylon 6 อัตราส่วนต่างๆ และนาโนคอมพอสิต RPET/OMMT, Nylon 6/OMMT 70/30/x RPET/Nylon 6/OMMT (x = 0, 1, 3 และ 5 phr)

RPET/Nylon 6/OMMT (wt%/wt%/phr)	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
100/0/0	4456.5	17.9	1.9
	4263.7	22.2	1.5
	4534.8	23.2	1.8
	4481.6	19.1	1.5
	4763.7	28.2	1.7
ค่าเฉลี่ย	4500.1	22.1	1.7
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	179.4	4.0	0.2
0/100/0	1480.1	62.4	256.8
	1277.5	53.2	200.2
	1594.8	63.1	103.1
	1620.8	60.4	227.7
	1873.4	62.0	263.7
ค่าเฉลี่ย	1569.3	60.2	210.3
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	217.3	4.1	65.0
90/10/0	3546.1	30.0	2.3
	3484.8	21.1	2.1
	3315.7	23.0	1.7
	3725.1	21.6	1.2
	3855.9	23.0	1.5
ค่าเฉลี่ย	3585.5	23.8	1.8
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	210.4	3.6	0.4

RPET/Nylon 6/OMMT (wt%/wt%/phr)	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
	2421.7	33.8	2.0
	2772.7	35.0	2.9
80/20/0	2791.2	20.3	1.2
	2410.4	25.6	1.6
	2427.5	22.1	2.1
ค่าเฉลี่ย	2564.7	27.3	2.0
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	198.5	6.7	0.7
	2300.5	32.3	2.5
	2212.0	30.3	2.1
70/30/0	2343.2	33.4	2.8
	2313.9	34.4	3.0
	2454.9	39.0	2.4
ค่าเฉลี่ย	2324.9	33.9	2.6
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	87.6	3.2	0.3
	2148.2	31.1	2.2
	2391.9	44.4	2.8
60/40/0	2129.9	46.9	3.2
	2343.7	46.6	2.9
	2129.9	46.9	3.2
ค่าเฉลี่ย	2228.7	43.2	2.9
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	128.3	6.8	0.4
	2129.9	46.9	3.2
	2075.9	48.4	3.7
50/50/0	2023.1	48.3	3.7
	2116.2	49.9	3.9
	2076.0	52.8	4.2
ค่าเฉลี่ย	2084.2	49.3	3.8
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	41.8	2.2	0.4

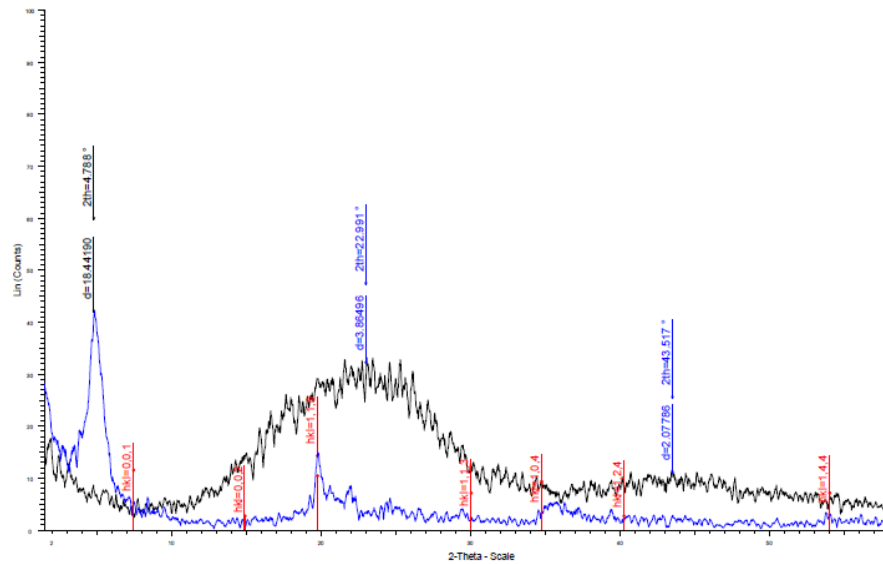
RPET/Nylon 6/OMMT (wt%/wt%/phr)	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
	2429.7	26.4	1.5
	2600.6	27.1	1.3
100/0/1	2456.8	31.1	1.7
	2262.7	30.4	1.5
	2293.6	32.0	1.6
ค่าเฉลี่ย	2408.7	29.4	1.5
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	136.1	2.5	0.2
	2512.7	29.2	1.5
	2619.5	34.6	1.8
100/0/3	2556.3	26.8	1.4
	2383.7	33.6	1.7
	2412.8	29.3	1.4
ค่าเฉลี่ย	2497.0	30.7	1.6
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	98.4	3.3	0.2
	2253.2	24.6	1.1
	2594.5	24.4	1.2
100/0/5	2396.2	24.3	1.1
	2431.4	27.2	1.3
	2448.7	23.0	1.1
ค่าเฉลี่ย	2424.8	24.7	1.2
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	122.2	1.5	0.1
	2280.4	60.3	20.2
	2225.9	62.0	17.0
0/100/1	2194.3	62.0	23.1
	2205.6	60.1	21.5
	2131.9	59.2	17.4
ค่าเฉลี่ย	2207.6	60.3	19.8
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	53.7	2.0	2.6

RPET/Nylon 6/OMMT (wt%/wt%/phr)	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
	2371.4	60.1	18.9
	2389.8	61.0	17.4
0/100/3	2377.5	60.6	16.7
	2110.8	64.5	21.8
	2064.0	60.1	15.9
ค่าเฉลี่ย	2262.7	61.3	18.1
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	161.0	1.8	2.3
	2560.3	64.8	5.0
	2283.0	63.4	5.0
0/100/5	2669.6	63.9	5.2
	2156.1	63.8	6.6
	2460.1	69.0	6.7
ค่าเฉลี่ย	2425.8	65.0	5.7
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	207.3	2.3	0.9
	2402.6	38.2	2.7
	2418.0	40.9	2.7
70/30/1	2243.4	32.5	2.9
	2422.5	39.6	2.5
	2318.2	36.4	2.7
ค่าเฉลี่ย	2361.0	37.5	2.7
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	78.1	3.2	0.1
	2212.0	30.3	2.1
	2303.1	29.8	3.0
70/30/3	2148.2	31.1	2.2
	2343.2	33.4	2.8
	2043.1	29.1	2.6
ค่าเฉลี่ย	2209.9	30.7	2.5
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	120.5	1.7	0.4

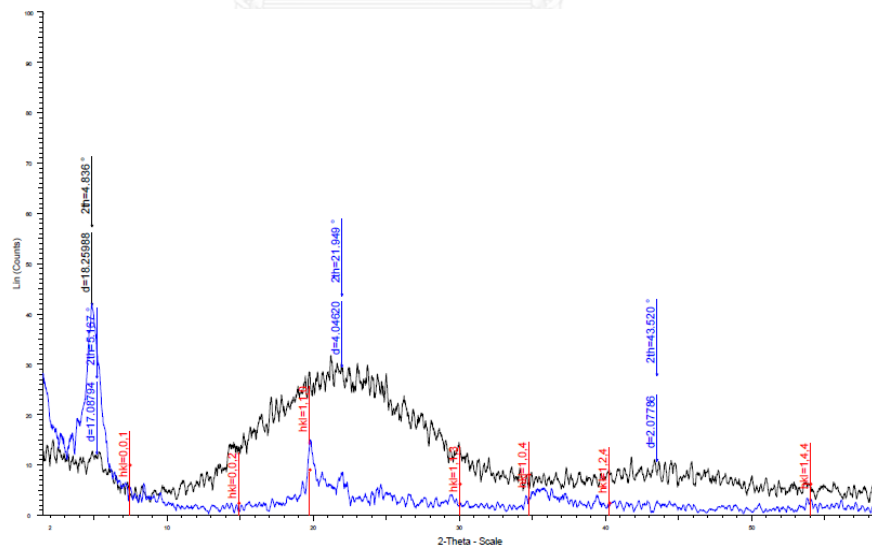
RPET/Nylon 6/OMMT (wt%/wt%/phr)	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
	2222.3	20.0	1.3
	2158.2	20.2	3.0
70/30/5	2319.0	22.6	1.4
	2140.8	23.2	2.3
	2126.3	25.2	2.0
ค่าเฉลี่ย	2193.3	22.3	2.0
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	79.3	2.2	0.7



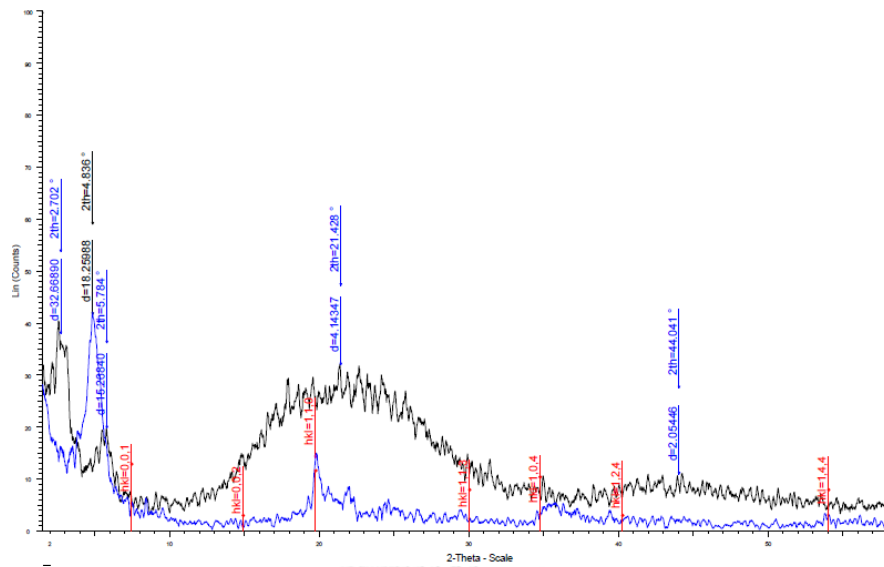
ภาคผนวก ง
XRD ดิฟแฟรกโทแกรม



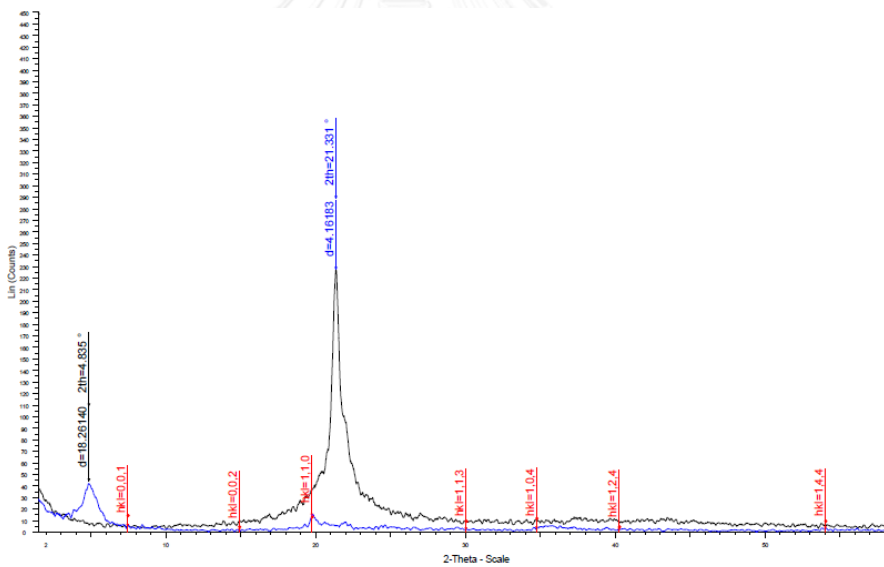
รูปที่ ง-1 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของ 100/1 RPET/OMMT (กราฟเส้นสีดำ)



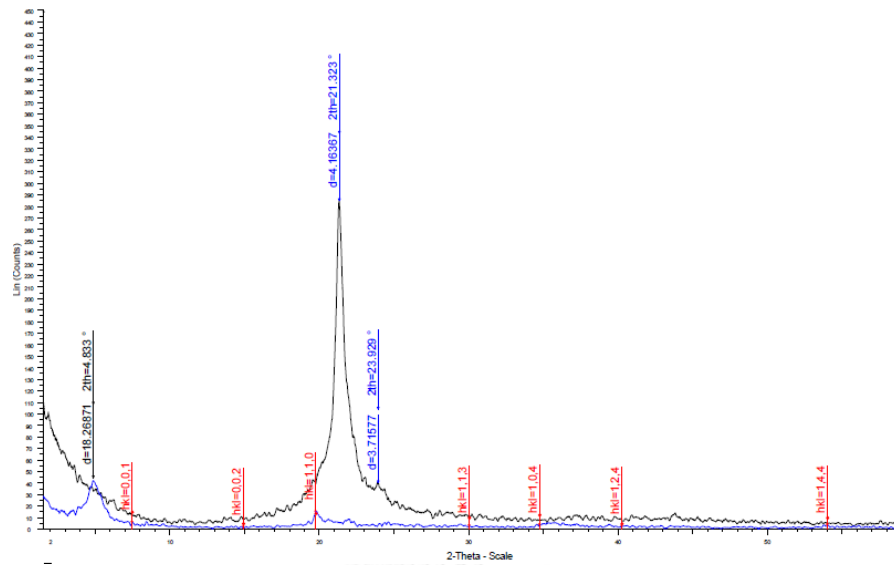
รูปที่ ง-2 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของ 100/3 RPET/OMMT (กราฟเส้นสีดำ)



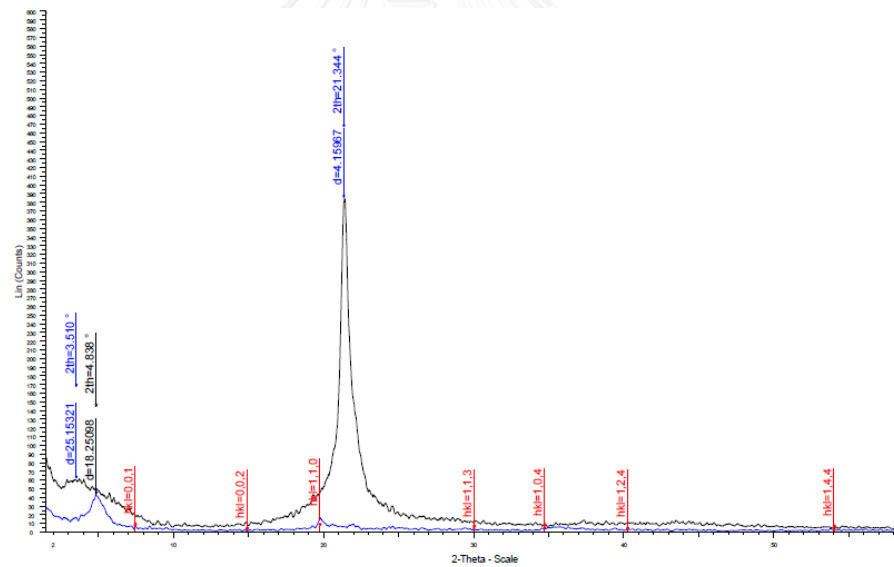
รูปที่ ง-3 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของ 100/5 RPET/OMMT (กราฟเส้นสีดำ)



รูปที่ ง-4 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของ 100/1 Nylon 6/OMMT (กราฟเส้นสีดำ)



รูปที่ ง-5 XRD ดิฟแฟร็กโทแกรมของ 100/3 Nylon 6/OMMT (กราฟเส้นสีดำ)



รูปที่ ง-6 XRD ดิฟแฟร็กโทแกรมของ 100/5 Nylon 6/OMMT (กราฟเส้นสีดำ)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนันทน์ลิน ชูทอง เกิดเมื่อวันที่ 25 เมษายน พ.ศ. 2535 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ในปีการศึกษา 2556 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557

