

การปรับปรุงสมบัติของไนลอน 6 รีไซเคิลด้วยเทอร์โมพลาสติกพอลิ(อีเทอร์-เอสเทอร์)
อีลาสโตเมอร์และโพลีเอสเตอร์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PROPERTY IMPROVEMENT OF RECYCLED NYLON 6 BY THERMOPLASTIC POLY(ETHER-
ESTER) ELASTOMER AND WOLLASTONITE



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

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงสมบัติของไนลอน 6 รีไซเคิลด้วยเทอร์โมพลาสติกพอลิ(อีเทอร์-เอสเทอร์)อีลาสโตเมอร์และโพลลาสโทไนต์
โดย	น.ส.คุณัญญา จันทร์ฉาย
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมหิทธิสุทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(ศาสตราจารย์ ดร.นพิตา วิทยุธีระนันท์)	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
.....	
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมหิทธิสุทธิ์)	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
.....	
(ดร.พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์)	กรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด)	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)	

คุณัญญา จันทร์ฉาย : การปรับปรุงสมบัติของไนลอน 6 รีไซเคิลด้วยเทอร์โมพลาสติกพอลิ(อีเทอร์-เอสเตอร์)อีลาสโตเมอร์และโวลลาสโทไนต์. (PROPERTY IMPROVEMENT OF RECYCLED NYLON 6 BY THERMOPLASTIC POLY(ETHER-ESTER) ELASTOMER AND WOLLASTONITE) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.อัญญาพร บุญมทิทธิสุทธิ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.พศวรรณ์ ชัยวุฒินันท์

งานวิจัยนี้ พอลิเมอร์ผสมของไนลอน 6 รีไซเคิล/เทอร์โมพลาสติกพอลิ (อีเทอร์-เอสเตอร์) อีลาสโตเมอร์หรือไฮทริล ได้ถูกเตรียมด้วยกระบวนการผสมแบบหลอมเหลวโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่และขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลสมบัติทางความร้อน และลักษณะสัญญาณวิทยาของชิ้นงาน ผลการศึกษาพบว่า การเติมไฮทริลในไนลอน 6 รีไซเคิล ส่งผลให้ความทนแรงและการยึดตัว ณ จุดขาด ของไนลอน 6 รีไซเคิล ได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้น เนื่องจากไฮทริลเป็นพอลิเมอร์ยืดหยุ่นและสามารถกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอในพอลิเมอร์เมทริกซ์ของไนลอน 6 รีไซเคิล หากแต่ทำให้สมบัติเชิงกล เช่น ความทนแรงดึง, ยั่งส์มอดุลัส, ความทนแรงดัดโค้ง, มอดุลัสการดัดโค้ง และเสถียรภาพทางความร้อนลดต่ำลง จึงปรับปรุงสมบัติที่สูญเสียไปโดยเลือกพอลิเมอร์ผสมไนลอน 6 รีไซเคิล/ไฮทริล ที่อัตราส่วน 70/30 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีค่าความทนแรงกระแทกสูงที่สุด ไปเตรียมเป็นพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยโวลลาสโทไนต์ ปริมาณ 10, 20, และ 30 ส่วนต่อเรซิน 100 ส่วน ผลการวิจัยพบว่า การเติมโวลลาสโทไนต์สามารถช่วยปรับปรุงค่าความทนแรงดึง, ยั่งส์มอดุลัส, ความทนแรงดัดโค้ง, มอดุลัสการดัดโค้ง, เสถียรภาพทางความร้อน, อุณหภูมิการเสียรูปด้วยความร้อน และมอดุลัสสะสมของพอลิเมอร์คอมพอสิตให้เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมโวลลาสโทไนต์ในพอลิเมอร์ผสมยังสามารถช่วยลดการหลอมหยดและลดการลามไฟของพอลิเมอร์คอมพอสิตอีกด้วย หากแต่ไม่สามารถปรับปรุงความทนแรงกระแทก และการยึดตัว ณ จุดขาด ได้ เนื่องจากโวลลาสโทไนต์เป็นวัสดุที่มีความแข็งตึงสูง จึงส่งผลให้ไปขัดขวางการเคลื่อนไหวสายโซ่ของโมเลกุล

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิ ลายมือชื่อนิสิต

เมอร์

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6172165523 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: RECYCLED NYLON 6 THERMOPLASTIC POLY(ETHER-ESTER)
ELASTOMER WOLLASTONITE COMPOSITES

Khunanya Janchai : PROPERTY IMPROVEMENT OF RECYCLED NYLON 6 BY
THERMOPLASTIC POLY(ETHER-ESTER) ELASTOMER AND WOLLASTONITE .

Advisor: Asst. Prof. Dr. ANYAPORN BOONMAHITTHISUD Co-advisor: Dr.
Phasawat Chaiwutthinan

In this study, polymer blends of the recycled nylon 6 with thermoplastic poly (ether-ester) elastomer or Hytrel were prepared by melt mixing process using a twin-screw extruder and injection machine for comparative studying the mechanical, thermal, and morphological properties. The results showed that the impact strength and elongation at break of the recycled nylon 6 blends were improved by the addition of Hytrel due to the well-dispersed Hytrel in the blend materials providing the softening and flexibility properties. In contrast, the tensile strength, Young's modulus, flexural strength, flexural modulus, and thermal stability of the blends were decreased. Then, the recycled nylon 6/Hytrel blend at 70/30 (%wt/%wt) was selected to prepare the composites with wollastonite at 10, 20, and 30 parts per hundred of resins (phr). Interestingly, the incorporation of wollastonite in the blend enhanced the inferior properties compositions, including tensile strength, Young's modulus, flexural strength, flexural modulus, thermal stability, heat deflection temperature, and storage modulus. Moreover, the addition of wollastonite into the blend showed strong reduction of the melt dripping and flame rate of the composites during combustion, but could not improve the impact strength and elongation at break due to the high stiffness characteristic of wollastonite resulting in hindering the chain movement.

Field of Study: Petrochemistry and
Polymer Science

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์ เป็นเพราะได้รับคำแนะนำ ด้านวิชาการ ความเอื้อเฟื้อวัตถุดิบ เครื่องมือและสถานที่ทำงานวิจัย อีกทั้งได้รับความช่วยเหลือ และการแนะแนวในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิด้านต่าง ๆ อย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมหิทธิสุทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ และคำปรึกษาตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในงานวิจัยอย่างดียิ่งตลอดการทำงานวิจัยนี้ รวมถึงการแนะนำแนวทางการจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

2. ดร.พศวรรษน์ ชัยวุฒินันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษา ตลอดจนความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบต่าง ๆ สถานที่ทำงานวิจัย

3. คุณสัญญา แก้วเกตุ เจ้าหน้าที่ จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้เครื่องฉีดแบบขึ้นงาน

4. ศาสตราจารย์ ดร. นพิตา หิฎฐิระนันท์ ที่สละเวลามาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

5. รองศาสตราจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

6. รองศาสตราจารย์ ดร.เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

7. Professor Dr. Masayuki Yamaguchi จาก Japan Advanced Institute of Science and Technology ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษา ตลอดจนความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบต่าง ๆ ที่ให้งานวิจัย

8. บริษัท อุเบะเคมีคอลส์ (เอเชีย) จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบ ในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และเพื่อน ๆ ที่สนับสนุนให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือ ต่าง ๆ ในการทำงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คุณัญญา จันทร์ฉาย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	13
1.2 วัตถุประสงค์	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
2.1 ไนลอน 6 (nylon 6) หรือพอลิเอไมด์ (polyamide 6).....	16
2.2 การรีไซเคิลพอลิเมอร์ (polymer recycling).....	17
2.3 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (thermoplastic elastomer, TPE).....	19
2.4 เทอร์โมพลาสติกพอลิ (อีเทอร์-เอสเทอร์) อีลาสโตเมอร์ (thermoplastic poly(ether-ester) elastomer).....	20
2.5 พอลิเมอร์ผสม (polymer blends).....	21
2.6 วัสดุคอมพอสิต (composite materials).....	23
2.7 สารตัวเติมและสารเสริมแรง (filler and reinforcing fillers)	25
2.8 โวลลาสโทไนต์ (wollastonite)	25
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	29

3.1	วัตถุดิบและสารเคมี.....	29
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	30
3.3	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และการทดสอบ.....	31
3.4	วิธีการเตรียมพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต.....	32
3.5	การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ (injection molding).....	34
3.6	การทดสอบสมบัติ.....	35
3.6.1	การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	35
3.6.2	การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก	36
3.6.3	การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง.....	36
3.6.4	การทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง	37
3.6.5	การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิควิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน 38	
3.6.6	การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี... 39	
3.6.7	การทดสอบอุณหภูมิการเสีรูปร่างด้วยความร้อน	40
3.6.8	การทดสอบอุณหภูมิการอ่อนตัวไวแคต.....	40
3.6.9	การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงพลวัตี.....	41
3.6.10	การทดสอบหลอมหยด	41
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	42
4.1	การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	42
4.2	สมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ.....	43
4.2.1	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมไนลอน 6 รีไซเคิล/ไฮทรีล	44
4.2.1.1	ความทนแรงกระแทก.....	44
4.2.1.2	ความทนแรงดึง	45
4.2.1.3	ยังส์มอดุลัส	46
4.2.1.4	การยืดตัว ณ จุดขาด	47

4.2.1.5 สมบัติความทนแรงดัดโค้ง.....	47
4.2.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมไนลอน 6 รีไซเคิล/ไฮทรีล และพอลิเมอร์คอมพอสิต .	48
4.2.2.1 ความทนแรงกระแทก.....	49
4.2.2.2 สมบัติความทนแรงดึง.....	50
4.2.2.3 ย้งส์มอดุลัส	51
4.2.2.4 การยืดตัว ณ จุดขาด	52
4.2.2.5 สมบัติความทนแรงดัดโค้ง.....	53
4.3 สมบัติทางความร้อน.....	54
4.3.1 เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิควิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน	54
4.3.2 สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีพีเพอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี.....	55
4.4 การทดสอบอุณหภูมิการเสีรूपด้วยความร้อน.....	58
4.5 สมบัติเชิงกลพลวัต	60
4.6 การหลอมหยด	62
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	64
5.1 สรุปผลการทดลอง	64
5.2 ข้อเสนอแนะ	65
บรรณานุกรม.....	66
ภาคผนวก.....	69
ภาคผนวก ก	70
ภาคผนวก ข	76
ภาคผนวก ค	77
ภาคผนวก ง.....	79
ประวัติผู้เขียน	81

สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของไนลอน 6	16
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์	19
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิ (อีเทอร์-เอสเทอร์) อีลาสโตเมอร์	21
รูปที่ 2.4 อนุภาครูปเข็มของโพลลาสโตนีต	26
รูปที่ 2.5 โครงสร้างพื้นผิวของโพลลาสโตนีต	27
รูปที่ 3.1 ไนลอน 6 รีไซเคิล	29
รูปที่ 3.2 เทอร์โมพลาสติกพอลิ (อีเทอร์-เอสเทอร์) อีลาสโตเมอร์	30
รูปที่ 3.3 ผงโพลลาสโตนีต	30
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทดลอง	32
รูปที่ 3.5 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่	33
รูปที่ 3.6 เครื่องฉีดแบบ	35
รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	35
รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก	36
รูปที่ 3.9 ชั้นทดสอบแรงดึง	37
รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง	37
รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดัดโค้ง	38
รูปที่ 3.12 ชั้นทดสอบแรงดัดโค้ง	38
รูปที่ 3.13 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน	39
รูปที่ 3.14 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนิงคาลอริเมทรี	40
รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบอุณหภูมิการเสีรูปร่างด้วยความร้อน	40
รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงพลวัต	41

รูปที่ 4.1	สัณฐานวิทยาของ (a) Re-N6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H ที่อัตราส่วน (b) 90/10, (c) 80/20, (d) 70/30, (e) 60/40, และ (f) 50/50 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า.....	42
รูปที่ 4.2	สัณฐานวิทยาของ (a) WT, พอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ที่อัตราส่วน	43
รูปที่ 4.3	ความทนแรงกระทำของ Re-N6 และพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H ด้วยไฮทรีลที่ปริมาณต่าง ๆ.....	45
รูปที่ 4.4	ความทนแรงดึงของ Re-N6 และพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H ด้วยไฮทรีลที่ปริมาณต่าง ๆ....	46
รูปที่ 4.5	ยังสัมมอดูลัสของ Re-N6 และพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H ด้วยไฮทรีลที่ปริมาณต่าง ๆ.....	46
รูปที่ 4.6	การยืดตัว ณ จุดขาดของ Re-N6 และพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H ด้วยไฮทรีลที่ปริมาณต่าง ๆ	47
รูปที่ 4.7	ทนแรงดัดโค้งของ Re-N6 และพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H ด้วยไฮทรีลที่ปริมาณต่าง ๆ.....	48
รูปที่ 4.8	มอดูลัสการดัดโค้งของ Re-N6 และพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H ด้วยไฮทรีลที่ปริมาณต่าง ๆ	48
รูปที่ 4.9	ความทนแรงกระทำของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ.....	50
รูปที่ 4.10	ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต	51
รูปที่ 4.11	สัณฐานวิทยาของผลึกรูปเข็มของโพลลาสโตนด์ ภายใต้กำลังขยาย 1,000 เท่า	51
รูปที่ 4.12	ยังสัมมอดูลัสของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ	52
รูปที่ 4.13	การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ.....	52
รูปที่ 4.14	ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ.....	53
รูปที่ 4.15	มอดูลัสการดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ.....	54
รูปที่ 4.16	กราฟ TGA ของ Re-N6, ไฮทรีล, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30, และ พอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ	55

รูปที่ 4.17 กราฟ DSC ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของ Re-N6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30, และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ 57

รูปที่ 4.18 กราฟ DSC ในขั้นตอนการให้ความเย็นของ Re-N6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30, และพอลิเมอร์คอมพอสิต R-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ..... 58

รูปที่ 4.19 อุณหภูมิการเสีรูบด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ..... 59

รูปที่ 4.20 อุณหภูมิการอ่อนตัวไวแคตของ Re-N6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ 60

รูปที่ 4.21 สมบัติเชิงกลพลวัตมอดูลัสสะสมของ Re-N6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ 61

รูปที่ 4.22 สมบัติเชิงกลพลวัตแทนเจนต์สูญเสีย (tan delta) ของ R-N6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ..... 62

รูปที่ 4.23 ชิ้นงานหลังการทดสอบการลอมหายดของ N-R6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ 62

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ลักษณะที่แตกต่างกันของพอลิเมอร์ผสม	22
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของโพลลาสไทน์ด	26
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมและอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิต	34
ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของชิ้นทดสอบของ Re-N6 และพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H.....	44
ตารางที่ 4.2 สมบัติเชิงกลของชิ้นทดสอบของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT	49
ตารางที่ 4.3 ค่า $T_{on\ set}$, $T_{end\ set}$, T_{max} และ char ของ Re-N6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30, และพอลิเมอร์คอมพอสิต R-N6/H/WT	54
ตารางที่ 4.4 ค่า T_m , ΔH_m , T_c , ΔH_c และ X_c ของ R-N6, ไฮทรีล, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30, และพอลิเมอร์คอมพอสิต R-N6/H/WT	56
ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการเสีรูปด้วยความร้อนและอุณหภูมิการอ่อนตัวไวแคตของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H และพอลิเมอร์คอมพอสิต	58
ตารางที่ 4.6 ค่า T_g และค่ามอดุลัสสะสมของ Re-N6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT.....	60

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

จากอัตราจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้องการสินค้าและบริการเกิดการขยายตัวมากขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อให้เกิดการใช้ทรัพยากรทั้งที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติและการสังเคราะห์ขึ้นมาเป็นจำนวนมาก เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของประชากร จึงก่อให้เกิดภาวะการขาดแคลนทรัพยากรและปัญหามลภาวะอันเนื่องมาจากขยะ โดยเฉพาะขยะจากพลาสติกที่มีสัดส่วนมากถึงร้อยละ 12 ของปริมาณขยะทั้งหมดที่มีอยู่ประมาณปีละ 2 ล้านตันและมีเพียง 500,000 ตันเท่านั้นที่มีการนำกลับมารีไซเคิลอย่างถูกต้อง ซึ่งคิดเป็นเพียง 1 ใน 4 ของขยะพลาสติกทั้งหมดเท่านั้น ส่วนอีก 1.5 ล้านตัน [1] เป็นของเสียที่รอการกำจัด โดยหากทำการกำจัดไม่ถูกวิธีหรือกำจัดได้ไม่ทันจะส่งผลให้เกิดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมตามมา ซึ่งแนวทางในการแก้ปัญหาดังกล่าว คือ การบริหารจัดการขยะให้มีประสิทธิภาพมีการคัดแยกขยะและทิ้งให้ถูกที่ รวมถึงการพัฒนาเทคโนโลยีพลาสติกให้ตอบโจทย์สิ่งแวดล้อมตั้งแต่ต้นทาง โดยปัจจุบันภาครัฐและภาคธุรกิจได้ผลักดันและมุ่งเน้นการสร้างระบบเศรษฐกิจแบบใหม่ โดยจากเดิมเป็นเศรษฐกิจเส้นตรง (linear economy) ซึ่งเป็นระบบนำมาเพื่อผลิตและจบด้วยการทิ้ง ให้เป็นเศรษฐกิจแบบหมุนเวียน (circular economy) ด้วยการนำวัตถุดิบที่ผ่านการผลิตและบริโภคแล้ว เข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่ และการผลิตพลาสติกเพื่อความยั่งยืน โดยมีเป้าหมายเดียวกัน คือ การพัฒนาพลาสติกในอนาคตที่ต้องยั่งยืนและมีประสิทธิภาพทั้งด้านการใช้พลังงานและการใช้ทรัพยากร โดยปรับเปลี่ยนตั้งแต่แนวคิดการออกแบบตั้งแต่ต้นทาง วิธีการผลิตใหม่ ๆ การรณรงค์ให้ผู้บริโภคใช้ซ้ำ รวมไปถึงการจัดการหลังการใช้และการรีไซเคิล โดยอาศัยหลักการจากเศรษฐกิจหมุนเวียนนวัตกรรมพลาสติกเพื่อความยั่งยืน ได้แก่ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้สามารถรีไซเคิลได้ง่ายขึ้น เพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุเพื่อลดทรัพยากรการผลิต นำขยะกลับมาเป็นวัตถุดิบไม่ว่าจะเป็นการรีไซเคิลด้วยกระบวนการทางกลหรือทางเคมี และเลือกใช้พลาสติกชีวภาพเพื่อเป็นวัตถุดิบทางเลือก [2, 3] ด้วยวิกฤตการณ์ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและพลังงาน ภาครัฐจึงได้ผลักดันและเน้นความสำคัญของเศรษฐกิจหมุนเวียนเป็นหนึ่งในเป้าหมายที่สำคัญของแผนเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน ซึ่งเป็นพื้นฐานในการพัฒนาประเทศในยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี และแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2560-2564) โดยเศรษฐกิจหมุนเวียนจะมุ่งเน้นการจัดการของเสียจากการผลิตและบริโภค ด้วยการนำวัตถุดิบที่ผ่านการผลิตและบริโภคแล้วเข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่ หรือที่เรียกว่ากระบวนการรีไซเคิล

ไนลอน 6 เป็นหนึ่งในพลาสติกวิศวกรรมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ และบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น [4, 5] เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง แม้จะอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง และมีความเหนียว แม้อุณหภูมิต่ำไม่เสีรูปร่างง่าย เหมาะกับงานรับแรงมาก ๆ ทนทานต่อการกัดกร่อนและการเสียดสี ตลอดจนทนต่อสารเคมีต่าง ๆ [6] ดังนั้นความต้องการทั่วโลกสำหรับการใช้ไนลอน 6 จึงมีปริมาณมากและเพิ่มสูงขึ้นในทุก ๆ ปี หากแต่ไนลอน 6 ไม่สามารถย่อยสลายได้หรือใช้เวลาในการย่อยสลายเป็นเวลานาน จึงส่งผลให้เกิดขยะจากไนลอน 6 ในปริมาณมาก ดังนั้นเพื่อการพัฒนาเศรษฐกิจแบบหมุนเวียนและการผลิตพลาสติกเพื่อความยั่งยืน ในงานวิจัยนี้สนใจนำไนลอน 6 รีไซเคิลมาปรับปรุงสมบัติ เนื่องจากไนลอน 6 รีไซเคิลมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนลดลงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับไนลอน 6 ที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการรีไซเคิลจากการสลายตัวทางความร้อนและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการรีไซเคิล โดยแนวทางของการปรับปรุงสมบัติของไนลอน 6 รีไซเคิล ได้แก่ การนำพอลิเมอร์ต่างชนิดมาเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมและเสริมแรงพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ด้วยสารเสริมแรงอนินทรีย์ ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตามการเลือกพอลิเมอร์หรือสารเสริมแรงอนินทรีย์ที่จะนำมาใช้ผสมกับไนลอน 6 รีไซเคิลควรคำนึงถึงสมบัติและความเข้ากันได้เป็นสิ่งสำคัญ งานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะเตรียมพอลิเมอร์ผสมของไนลอน 6 รีไซเคิลด้วยเทอร์โมพลาสติกพอลิ (อีเทอร์-เอสเทอร์) อีลาสโตเมอร์ (thermoplastic poly(ether-ester) elastomer) หรือมีชื่อทางการค้าว่า ไฮทริล (Hytrel) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นคล้ายยาง แต่สามารถขึ้นรูปได้เหมือนพลาสติก มีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความทนแรงกระแทกสูง [7] จากนั้นทำการปรับปรุงสมบัติบางประการที่สูญเสียไปของพอลิเมอร์ผสมด้วยการเตรียมเป็นคอมพอสิตกับโวลลาสโทไนต์ (wollastonite) ซึ่งเป็นสารเสริมแรงอนินทรีย์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติประเภทแคลเซียมซิลิเกต (calcium silicate, CaSiO_3) โดยมีลักษณะผลึกเป็นรูปเข็ม มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (aspect ratio) สูง หากแต่ไม่มีอันตรายเหมือนเส้นใยอนินทรีย์อื่น ๆ เช่น แอสเบสทอสและเส้นใยแก้ว เป็นต้น มีสมบัติเด่นด้านความแข็งแรง มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ อัตราการดูดซึมน้ำต่ำ และไม่เป็นพิษต่อสุขภาพของมนุษย์ [8] จากโครงสร้างพื้นผิวของโวลลาสโทไนต์ ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของไนลอน 6 ซึ่งจะส่งผลให้คอมพอสิตมีสมบัติเชิงกลในเรื่องความแข็งแรงที่ดี [9] ซึ่งหากงานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จจะช่วยส่งเสริมการใช้งานไนลอน 6 ให้เกิดการหมุนเวียนอย่างยั่งยืน

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาผลของปริมาณของเทอร์โมพลาสติกพอลิ (อีเทอร์-เอสเทอร์) อีลาสโตเมอร์และ โวลลาสโทไนต์ต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลพลวัตและ สัณฐานวิทยาของไนลอน 6 รีไซเคิล/เทอร์โมพลาสติกพอลิ (อีเทอร์-เอสเทอร์) อีลาสโตเมอร์/ โวลลาสโทไนต์คอมพอสิตที่เตรียมได้



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไนลอน 6 (nylon 6) หรือพอลิเอไมด์ (polyamide 6)

ไนลอนเป็นกลุ่มพอลิเมอร์สังเคราะห์จำพวกพอลิเอไมด์เชิงเส้นมีโครงสร้างทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เป็นพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลที่ดี เนื่องจากไนลอนมีแรงกระทำระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ (intermolecular force) เป็นพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงระหว่างไฮโดรเจนที่เกิดพันธะกับไนโตรเจนบนสายโซ่พอลิเมอร์สายหนึ่งกับออกซิเจนของหมู่คาร์บอนิลบนสายโซ่พอลิเมอร์อีกสายหนึ่ง พันธะไฮโดรเจนนี้ทำให้ไนลอนเกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ [10] จึงส่งผลให้มีความแข็งแรงและเหนียว ไม่เสียรูปทรงง่าย เหมาะกับงานรับแรงมาก ๆ นอกจากนี้ไนลอนยังทนทานต่อการกัดกร่อน และการเสียดสี ตลอดจนทนต่อสารเคมีต่าง ๆ สามารถนำมาขึ้นรูปด้วยเทคนิคที่หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการอัดรีด (extrusion) การฉีดแบบ (injection molding) การเป่า (blow) และการขึ้นรูปแบบหมุน (rotational molding) ไนลอนจึงนับเป็นพลาสติกวิศวกรรมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ และบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น



ในปี 1929 ไนลอน (nylon) ควบคู่กับพอลิเอสเทอร์ ได้ถูกคิดค้น พยายามสังเคราะห์และพัฒนาขึ้นโดย วอลเลซ ฮูม คาร์โรเทอร์ (Wallace Hume Carothers) ซึ่งเป็นนักเคมีบริษัทดูปองต์ (Du Pont) ประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่าในบรรดาพอลิเมอร์ที่เตรียม ณ ขณะนั้น ไนลอน 6, 6 มีสมบัติที่ดีและเป็นไปได้มากที่สุด ที่จะนำไปผลิตในเชิงการค้า จึงได้พัฒนาจนกระทั่งนำมาผลิตเชิงพาณิชย์ในปี ค.ศ. 1938 ผลิตภัณฑ์แรกที่ทำจากไนลอน 6, 6 คือ ถู้น่อง วางขายครั้งแรกในปี ค.ศ. 1939 ได้รับความนิยมนานเนื่องจากมีความสวยงามคล้ายไหมแต่มีความทนทานสูงกว่า ซึ่งเผยแพร่อย่างกว้างขวางในสหรัฐอเมริกา ก่อนสงครามโลกครั้งที่ 2 จนกระทั่งหลังสงครามโลกครั้งที่ 2

เริ่มขึ้น ไนลอนได้ถูกนำไปใช้ผลิตอุปกรณ์เพื่อใช้ทางการทหาร เช่น ร่มชูชีพ เต็นท์ คอร์ดไนลอนสำหรับ ยางเครื่องบิน และเชือกสำหรับลากเครื่องร่อน เป็นต้น

ผลิตภัณฑ์พอลิเอไมด์อื่น ๆ ต่อมาที่มีการสังเคราะห์และพัฒนาเพื่อแข่งขันกับไนลอน 6, 6 ซึ่งได้รับผลสำเร็จเช่นกัน คือการสังเคราะห์และพัฒนาไนลอน 6 จนสามารถทำเป็นผลิตภัณฑ์และได้วางขายในตลาด ในปี ค.ศ. 1940 บริษัทที่วางขายผลิตภัณฑ์ของไนลอน 6 คือ I.G. Farbenindustrie ของเยอรมัน [4]

ไนลอนสามารถสังเคราะห์ผ่านกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบเปิดวง (ring opening polymerization) ของคาโพรแล็กแทม (caprolactam) โดยทำให้วงคาโพรแล็กแทมแตกออกตรงพันธะระหว่างหมู่คาร์บอนิล (C=O) กับหมู่เอมิโน (NH) เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างโมเลกุลเข้าด้วยกันกลายเป็นไนลอน 6 [11]

2.2 การรีไซเคิลพอลิเมอร์ (polymer recycling)

พลาสติกเป็นวัสดุที่เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมากและมีแนวโน้มการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เกิดขยะพลาสติกในปริมาณที่สูงมากขึ้นตามไปด้วย เพื่อเป็นการกำจัดขยะจากการผลิตและการบริโภค รวมถึงการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า จึงนำพลาสติกมาเข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่ หรือเรียกว่ากระบวนการรีไซเคิล [12-16] การพัฒนาทางเทคโนโลยีทำให้การรีไซเคิลพลาสติกมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

2.2.1 การรีไซเคิลแบบปฐมภูมิ (primary recycling)

เป็นการนำพลาสติกประเภทเดียวกัน ไม่มีสิ่งปนเปื้อน นำมาหมุนเวียนกลับมาใช้ซ้ำ หรือมีการผสมกับเม็ดใหม่

2.2.2 การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิ (secondary recycling)

เป็นการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาล้างทำความสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก บด หลอมและขึ้นรูปใหม่กลับเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกใหม่อีกครั้ง โดยการรีไซเคิลแบบทุติยภูมิสามารถแบ่งย่อยได้อีกหลายเทคนิค คือ

2.2.2.1 การรีไซเคิลเชิงกล (mechanical recycling)

การรีไซเคิลเชิงกลเป็นเทคนิคที่ง่ายและนิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบัน เป็นการนำพลาสติกมาผ่านกระบวนการคัดแยก ล้างทำความสะอาด ก่อนนำมาบดเป็นชิ้นเล็ก ๆ และทำการหลอมเป็นเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลเพื่อนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ หรืออาจมีการผสมเม็ดใหม่เพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์

2.2.2.2 การปรับปรุงโดยวิธีทางเคมี (chemical modification)

การรีไซเคิลพลาสติกโดยการปรับปรุงทางเคมีเป็นวิธีที่ช่วยลดข้อจำกัดในด้านสมบัติการขึ้นรูปและการใช้งาน หรือทำให้เม็ดรีไซเคิลมีลักษณะใกล้เคียงกับเม็ดใหม่ รวมถึงการเติมสารเคมีเพื่อปรับปรุงคุณภาพ

2.2.2.3 การหลอมอัดรีดร่วมและการฉีดร่วม (coextrusion and coinjection molding)

เป็นวิธีการรีไซเคิลที่เหมาะสมกับการผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นชั้น ผิวด้านหน้าเป็นชั้นที่ผลิตจากเม็ดพลาสติกใหม่ที่มีความต้านทานต่อแรงดึงสูง ป้องกันการขีดข่วน ส่วนชั้นกลางจะเป็นใช้เม็ดพลาสติกรีไซเคิล

2.2.3 การรีไซเคิลแบบตติยภูมิ (tertiary recycling)

เป็นการทำให้พลาสติกกลับมาไปอยู่ในรูปของวัสดุตั้งต้น โดยใช้กระบวนการทางเคมี เช่น การใช้ปฏิกิริยาดีโพลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) หรือปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิเมอร์ทำให้เป็นมอนอเมอร์ (monomer) หรือ โอลิโกเมอร์ (oligomer) ที่มีความบริสุทธิ์ จากนั้นนำมอนอเมอร์ดังกล่าว มาผ่านกระบวนการรีโพลิเมอร์ไรเซชัน (repolymerization) อีกครั้ง โดยมอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์ที่ถูกสร้างขึ้นใหม่นี้จะถูกนำไปผลิตเป็นพลาสติกใหม่หรือนำไปผสมกับวัสดุบริสุทธิ์ต่อไป ทั้งนี้กระบวนการรีไซเคิลดังกล่าวต้องใช้กระบวนการอีกหลายขั้นตอน นอกเหนือจากการล้างทำความสะอาดเพื่อให้มอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์มีความบริสุทธิ์ เช่น ไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เมทาโนไลซิส (methanolysis) ไกลโคไลซิส (glycolysis) การกลั่น (distillation) และการตกผลึก (crystallization) เป็นต้น

2.2.4 การรีไซเคิลแบบจตุภูมิ (quaternary recycling)

เป็นการนำพลาสติกมาเผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนโดยการให้ค่าความร้อนที่ใกล้เคียงกับถ่านหิน (23 เมกะจูล/กิโลกรัม) ซึ่งเป็นการช่วยในการเผาไหม้ส่วนที่เป็นขยะเปียกเป็นการลดเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ในการเผาขยะ

ในงานวิจัยนี้สนใจนำไนลอน 6 รีไซเคิลมาใช้ในการศึกษา อย่างไรก็ตามหลังจากผ่านกระบวนการรีไซเคิลแต่ละครั้งพลาสติกจะมีคุณภาพต่ำลง ไม่สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เนื่องจากความชื้นและความร้อนที่ใช้ในการกระบวนการหลอมเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการสลายตัวหรือการขาดของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการรีไซเคิล จึงมีแนวทางการปรับปรุงสมบัติของไนลอน 6 รีไซเคิลด้วยการนำมาเตรียมเป็น พอลิเมอร์ผสมกับพอลิเมอร์ที่ยืดหยุ่น ในงานวิจัยนี้สนใจนำเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (thermoplastic elastomer, TPE) ชนิดเทอร์โมพลาสติก

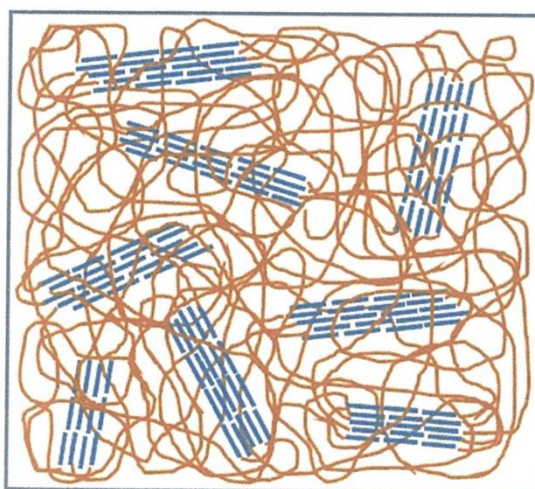
พอลิ (อีเทอร์-เอสเตอร์) อีลาสโตเมอร์ (thermoplastic poly(ether-ester) elastomer) หรือมีชื่อทางการค้าว่า ไฮทรีล (Hytrel) มาผสมกับไนลอน 6 รีไซเคิล

2.3 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (thermoplastic elastomer, TPE)

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เป็นวัสดุคล้ายยางที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิใช้งานสามารถแปรรูปได้โดยใช้กระบวนการแปรรูปพลาสติกทั่วไป เช่น ด้วยเครื่องฉีดแบบ (injection molding machine) เครื่องเป่า (blow molding machine) และเครื่องอัดรีด (extruder) เป็นต้น เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีโครงสร้างที่สำคัญ 2 ส่วน คือ

(1) ส่วนแข็ง (hard segment) เป็นส่วนที่มีความเป็นผลึกในโครงสร้าง ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรง แก้วใส สามารถหลอมและไหลได้ และเมื่อเย็นตัวจะกลับสู่สภาพของแข็งอีกครั้ง

(2) ส่วนอ่อน (soft segment) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่แสดงสมบัติด้านความยืดหยุ่น และอีลาสติก เช่น มีความสามารถในการต้านทานการหักงอ ยืดและสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ เป็นต้น



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ [17]

2.3.1 การจำแนกประเภทเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ [18]

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์โดยทั่วไปสามารถจำแนกโดยอาศัยเทคนิคการเตรียมออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทบล็อกโคพอลิเมอร์ (block copolymer) และเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากการผสมอีลาสโตเมอร์กับเทอร์โมพลาสติก

2.3.1.1 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ประเภทบล็อกโคพอลิเมอร์

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ประเภทนี้จะมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ยาว ในสายโซ่ จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนแข็ง (hard segment) สายโซ่โมเลกุลมีการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนจะมีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) สูง และส่วนอ่อน (soft segment) สายโซ่โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวแบบอสัณฐานมีสมบัติเป็นอีลาสติกมีความยืดหยุ่น สามารถหักงอได้ง่าย มีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วต่ำ โดยสมบัติทั่วไปของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ประเภทบล็อกโคพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของมอนอเมอร์ที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์ และสัดส่วนของส่วนแข็งและส่วนอ่อนที่อยู่ในสายโซ่โมเลกุล เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ประเภทบล็อกโคพอลิเมอร์ ได้แก่

(1) บล็อกโคพอลิเมอร์ของสไตรีน (styrenic thermoplastic elastomer, S-TPEs) โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยพอลิสไตรีนเป็นส่วนแข็งและพอลิไดอินที่เป็นส่วนอ่อน เทอร์โมพลาสติกชนิดที่มีพอลิไดอินต่างกัน แบ่งได้เป็น Styrene-Isoprene-Styrene (SIS) Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) Styrene-Ethylene-Butylene-Styrene (SEBS)

(2) เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (thermoplastic polyurethanes, TPUs) โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยพันธะยูรีเทนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างไดไอโซไซยาเนตและสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และส่วนอ่อนเป็นพันธะเคมีของพอลิเอสเตอร์หรือพอลิอีเทอร์

2.4 เทอร์โมพลาสติกพอลิ (อีเทอร์-เอสเทอร์) อีลาสโตเมอร์ (thermoplastic poly(ether-ester) elastomer)

โครงสร้างประกอบด้วยสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีวงแหวน (aromatic polyester) คือ พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต เป็นองค์ประกอบที่เป็นส่วนแข็ง (hard segment) มีความเป็นผลึกในโครงสร้าง ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุ และส่วนอ่อน (soft segment) ประกอบด้วยสายโซ่พอลิอีเทอร์ที่ไม่มีวงแหวน (aliphatic polyether) คือ พอลิเทระเมทิลีนไกลคอล มีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.3 ทำหน้าที่แสดงสมบัติด้านความยืดหยุ่น จึงทำให้เทอร์โมพลาสติกชนิดนี้จัดเป็นวัสดุเชิงวิศวกรรม ที่มีความแข็งแรงสูง เหนียว ยืดหยุ่น ด้านทานต่อการหักงอ ทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจนและโอโซนสูง ทนต่อน้ำมันและตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีวงแหวนเป็นองค์ประกอบ และมีช่วงอุณหภูมิการใช้งานที่กว้าง ส่งผลให้มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย [19] โดยจากโครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิ (อีเทอร์-เอสเทอร์) อีลาสโตเมอร์ มีหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นขั้ว เช่นเดียวกับไนลอน 6 ทำให้สามารถเกิดพันธะทางเคมีระหว่างกันได้ ส่งผลให้พอลิเมอร์มีความเข้ากันได้ [17]

(continuous matrix phase) และแสดงสมบัติที่เด่นกว่าพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนน้อยซึ่งเป็นเฟสกระจาย (dispersed phase) โดยสมบัติของพอลิเมอร์ผสมจะดีขึ้นหากเฟสทั้งสองมีการกระจายอย่างดีและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกัน

2.5.1.3 พอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันไม่ได้ (immiscible of polymer blend)

พอลิเมอร์ที่ผสมเข้ากันไม่ได้ เกิดการแยกเฟสของพอลิเมอร์อย่างชัดเจน เป็นผลมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสต่ำ มีช่องว่างหรือปริมาตรอิสระมาก ส่งผลทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในลักษณะนี้มีสมบัติที่ด้อย และตัวทำละลายสามารถแพร่เข้าไปได้ง่าย โดยลักษณะที่แตกต่างกันของพอลิเมอร์ผสมสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1 [21]

ตารางที่ 2.1 ลักษณะที่แตกต่างกันของพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้ อย่างสมบูรณ์	พอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้ บางส่วน	พอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันไม่ได้
<ul style="list-style-type: none"> - มีความเป็นเนื้อเดียวกัน - สมบัติเชิงกลอยู่ระหว่างพอลิเมอร์ที่นำมาผสม - $\Delta G < 0$ - มี T_g ค่าเดียว 	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดการแยกเฟสบางส่วน - สมบัติเชิงกลขึ้นอยู่กับพอลิเมอร์ที่มีปริมาณมากกว่า - $\Delta G > 0$ - มี T_g 2 ค่า โดยค่าอยู่ระหว่าง T_g ของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด ที่นำมาผสม 	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดการแยกเฟสอย่างสมบูรณ์ - แรงกระทำระหว่างเฟสไม่ดี ส่งผลให้สมบัติเชิงกลด้อยลง - $\Delta G > 0$ - มี T_g 2 ค่า ที่ตำแหน่ง T_g ของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด

ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างไนลอน 6 รีไซเคิลกับเทอร์โมพลาสติกพอลิ (อีเทอร์-เอสเตอร์) อีลาสโตเมอร์ แม้จะช่วยในการปรับปรุงสมบัติด้านการทนแรงกระแทก (impact strength) หากแต่ความเป็นพอลิเมอร์ที่ยืดหยุ่นของเทอร์โมพลาสติกพอลิ (อีเทอร์-เอสเตอร์) อีลาสโตเมอร์นั้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนบางประการของวัสดุลดต่ำลง ในงานวิจัยได้ทำการปรับปรุงสมบัติที่สูญเสียไปดังกล่าว ของพอลิเมอร์ผสมด้วยการเตรียมเป็นพอลิเมอร์คอมพอสิตกับสารเสริมแรง คือ โวลลาสโทไนต์ (wollastonite)

2.6 วัสดุคอมพอสิต (composite materials)

เป็นวัสดุซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมของสารตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ที่องค์ประกอบทางกายภาพ และทางเคมีแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง และจะต้องไม่ละลายเข้าด้วยกัน ทำให้สมบัติของวัสดุที่เกิดขึ้น มีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 2 กระบวนการ คือ

(1) เกิดจากการผสมกันระหว่างวัสดุ องค์ประกอบอยู่ในระดับที่สามารถมองเห็นได้ เช่น คอนกรีต เป็นการผสมระหว่าง ซีเมนต์ ทราย หิน และน้ำ

(2) เกิดจากการสร้างพันธะ องค์ประกอบอยู่ในระดับโมเลกุล ถ้าเป็นเหล็ก จะเรียกว่า อัลลอย ถ้าเป็นพลาสติกจะเรียกว่า พอลิเมอร์คอมพอสิต

วัสดุคอมพอสิตประกอบด้วย เมทริกซ์ (matrix) คือ โครงสร้างหลักที่มีปริมาณมากในวัสดุคอมพอสิตโดยทั่วไปจะทำหน้าที่เป็นส่วนประกอบหลัก อาจเป็นโลหะ เซรามิก หรือ พอลิเมอร์ และ สารเสริมแรง (reinforcement) อาจอยู่ในรูปของอนุภาค เส้นใย หรือ สารตัวเติม ซึ่งเป็น เฟสกระจาย (dispersed phase) [22, 23]

2.6.1 ประเภทของวัสดุคอมพอสิต

วัสดุคอมพอสิตสามารถจำแนกตามชนิดของวัสดุที่เป็นเมทริกซ์ออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ วัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์ (polymer matrix composite, PMC) วัสดุคอมพอสิตโลหะ (metal matrix composite, MMC) และวัสดุคอมพอสิตเซรามิก (ceramic matrix composite, CMC) วัสดุคอมพอสิตเซรามิก (metal matrix composite) และสามารถจำแนกย่อยต่อไปได้อีกตาม ลักษณะของสารเสริมแรง ได้แก่ อนุภาค (particle) เส้นใย (fiber) และวิกเกอร์ (whisker) [24]

2.6.1.1 วัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์ (polymer matrix composite)

วัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์ จะมีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์การเสริมแรงให้พอลิเมอร์ ทำได้โดยการเติมเส้นใยเสริมแรงลงในพอลิเมอร์ให้เกิดเป็นวัสดุคอมพอสิตที่มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยเส้นใยที่ใช้เสริมแรงพอลิเมอร์มักมีความแข็งแรงสูง เพื่อทำหน้าที่ในการรับและกระจายแรง โดยวัสดุคอมพอสิตจะมีความแข็งแรงสูงสุดตามแนวการเรียงตัวของเส้นใย และสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต จะมีสมบัติที่มาจากสมบัติของเมทริกซ์พอลิเมอร์และสมบัติของเส้นใยเสริมแรง สารเสริมแรงในรูปอนุภาคมีส่วนเสริมความแข็งแรงได้ไม่ดีเท่ารูปเส้นใย เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของสารเสริมแรงส่งผลต่อการกระจายแรง จึงนิยมเรียกสารเสริมแรงในรูปของอนุภาคว่า สารตัวเติม (filler)

สำหรับเมทริกซ์ของพอลิเมอร์สามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

(1) เมทริกซ์เทอร์โมเซตติง (thermosetting matrix) โดยเทอร์โมเซตติงเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นร่างแห และมีสมบัติแข็งเปราะ มีพันธะเชื่อมโยงภายในโครงสร้างโมเลกุล จึงส่งผลให้พอลิเมอร์กลุ่มนี้ไม่สามารถนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ได้ กระบวนการขึ้นรูปของวัสดุคอมพอสิตสำหรับเมทริกซ์เทอร์โมเซตติง จะทำการผสมสารเสริมแรงเข้าไปกับมอนอเมอร์ในแม่พิมพ์ ก่อนหลังปฏิกิริยาลิ้นสุดจะเกิดการคงรูปและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก เช่น อีพอกซีเรซิน

(2) เมทริกซ์เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic matrix) โดยเทอร์โมพลาสติกเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีโครงสร้างแบบเส้นหรือแบบกิ่ง สามารถหลอมเหลวได้เมื่อได้รับความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลว มีสมบัติเหนียวและทนทานต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการขึ้นรูปของวัสดุคอมพอสิตสำหรับเมทริกซ์เทอร์โมพลาสติก จะใช้หลักการให้ความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลวและขึ้นรูปก่อนที่จะทำให้เย็นตัวลงเพื่อให้เกิดการคงรูป โดยหลังจากที่คงรูปแล้ว ถ้าให้ความร้อนอีกครั้งก็สามารถหลอมและขึ้นรูปใหม่ได้

2.6.1.2 วัสดุคอมพอสิตโลหะ (metal matrix composite)

วัสดุคอมพอสิตโลหะ จะมีโลหะเป็นเมทริกซ์และมีเส้นใยที่ทำจากแก้วและอนุภาคที่ทำจากเซรามิกเป็นวัสดุเสริมแรง ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงความสามารถในการทนต่อความล้าของโลหะให้ดีขึ้น โดยเฉพาะอะลูมิเนียมและไทเทเนียม ซึ่งเป็นเมทริกซ์โลหะในอุตสาหกรรมอวกาศ โดยใช้สารเสริมแรงที่มีความแข็งแรงสูงและสามารถทนความร้อนสูง เช่น เซรามิกซิลิกอนคาร์ไบด์ อะลูมินา เนื่องจากโลหะต้องใช้อุณหภูมิสูงมากในการขึ้นรูปการเสริมแรงเป็นการทำให้เมทริกซ์โลหะ มีความทนทานต่อความล้า ด้านทานการสึกหรอ และเพิ่มอายุการใช้งานให้ยาวนานมากขึ้น แต่เนื่องจากวัสดุคอมพอสิตชนิดนี้มีต้นทุนการผลิตที่สูงมาก จึงส่งผลให้การใช้งานไม่กว้างขวางมากนัก

2.6.1.3 วัสดุคอมพอสิตเซรามิก (ceramic matrix composite)

วัสดุคอมพอสิตเซรามิก จะมีเซรามิกเป็นเมทริกซ์และมีสารเสริมแรงที่อยู่ในรูปอนุภาค เส้นใย หรือวิสเกอร์ เช่น ซิลิกา ซิลิกอนคาร์ไบด์ อะลูมินา และคาร์บอน เป็นต้น เนื่องจากข้อดีของเซรามิกมีความเปราะและแตกหักง่าย เมื่อเกิดรอยแตกแล้วไม่สามารถซ่อมได้โดยง่าย การเสริมแรงให้กับเมทริกซ์เซรามิกเป็นการปรับปรุงเพื่อให้วัสดุคอมพอสิตมีความเหนียวและทนทานมากขึ้น สารเสริมแรงจะเข้าไปขวางการแพร่ของรอยแตกที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน แต่เนื่องจากต้นทุนการผลิตที่สูงมาก จึงส่งผลให้มีการใช้งานไม่กว้างขวางนัก

2.7 สารตัวเติมและสารเสริมแรง (filler and reinforcing fillers)

สารตัวเติมและสารเสริมแรงที่ใช้ในพอลิเมอร์ มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มเนื้อให้กับพอลิเมอร์หรือลดปริมาณของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิต กล่าวอีกอย่างหนึ่งคือการเพิ่มสารที่ไม่ทำให้สมบัติของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลง แต่ลดปริมาณของพอลิเมอร์ที่เป็นวัตถุดิบที่มีราคาแพง ซึ่งการลดต้นทุนหรือเพื่อปรับปรุงและ/หรือทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติจำเพาะต่าง ๆ ดีขึ้น เช่น สมบัติเชิงกล ความทนความร้อนและการทนไฟ เป็นต้น สารตัวเติมในอุตสาหกรรมมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด โดยแบ่งเป็นสารอนินทรีย์ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ทัลค์ โวลลาสโทไนต์ เป็นต้น และสารอินทรีย์ เช่น ผงไม้ ถ่านกัมมันต์ และซีลิ่ง เป็นต้น สารเสริมแรงที่นิยมใส่ลงในโพลีเอทิลีน 6 เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดียิ่งขึ้น เช่น สมบัติความทนต่อแรงดึง อุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน และการหดตัว ได้แก่ ทัลค์ โวลลาสโทไนต์ และเส้นใยแก้ว [25]

2.7.1 การเลือกใช้สารตัวเติมมีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์เมทริกซ์ ควรคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

2.7.1.1 รูปร่างของอนุภาคสารตัวเติม โดยสารตัวเติมแต่ละชนิดมีรูปร่างที่ต่างกันออกไป เช่น ทรงกลม ทรงกระบอก เข็ม และเส้นใย เป็นต้น ซึ่งสารตัวเติมที่มีรูปร่างต่างกันจะส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ เมทริกซ์ที่ต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น อนุภาคของโวลลาสโทไนต์ที่มีลักษณะเป็นผลึกรูปเข็ม มี aspect ratio สูง ช่วยเสริมแรงให้ผลิตภัณฑ์และยังทำให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติ anisotropic

2.7.1.2 ขนาดของอนุภาคสารตัวเติม ยิ่งขนาดอนุภาคละเอียดยิ่งทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงสูง โดยทั่วไปควรมีขนาดน้อยกว่า 40 ไมโครเมตร

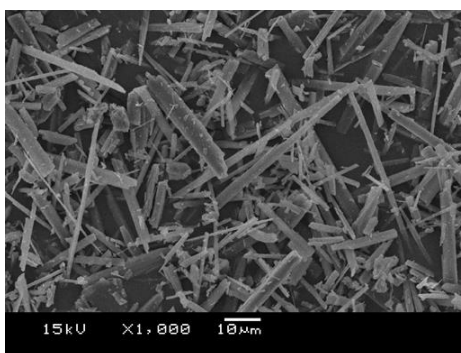
2.7.1.3 การกระจายขนาดอนุภาคสารตัวเติม การกระจายขนาดของอนุภาคจะมีผลอย่างมากกับสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เมทริกซ์หากสารตัวเติมสามารถกระจายตัวได้ดี จะส่งผลให้พอลิเมอร์เมทริกซ์มีสมบัติที่ดีกว่าสารตัวเติมที่มีการเกาะกลุ่มกัน

2.7.1.4 พื้นที่ผิว หากพื้นที่ผิวระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติมมีแนวโน้มการยึดเกาะกันที่ดีจะส่งผลให้พอลิเมอร์เมทริกซ์มีสมบัติที่ดี

2.8 โวลลาสโทไนต์ (wollastonite)

โวลลาสโทไนต์เป็นแร่ซิลิเกต (metasilicate, CaSiO_3) ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ถูกค้นพบโดยนักเคมีชาวอังกฤษชื่อ William Hyde Wollaston โวลลาสโทไนต์มีลักษณะเป็นแท่ง อนุภาคเป็น

รูปเข็ม (acicular or needle-like structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 มีความถ่วงจำเพาะ 2.8-3.1 ความแข็ง 4.5-5 ใน Moh's scale และมีอุณหภูมิหลอมเหลว 1540 องศาเซลเซียส โดยโวลลาสโทไนต์ ที่บริสุทธิ์จะมีสีขาว สันเคราะห์ได้จากการกระบวนการให้ความร้อนและความดัน (hydrothermal) ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นหินปูนเป็นโวลลาสโทไนต์และคาร์บอนไดออกไซด์ มีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.2 [26, 27]

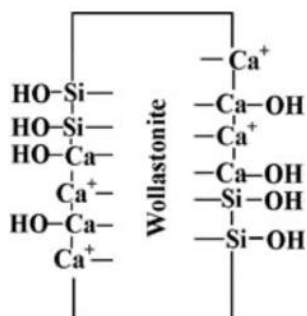


รูปที่ 2.4 อนุภาครูปเข็มของโวลลาสโทไนต์

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของโวลลาสโทไนต์

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%)
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	52.3%
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	44.7%
สนิมเหล็ก (Fe_2O_3)	0.2%
อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	0.4%
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.3%

จากโครงสร้างพื้นผิวของโวลลาสโทไนต์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ดังแสดงโครงสร้างพื้นผิวในรูปที่ 2.5 สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำ 6 ซึ่งจะส่งผลให้คอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลในเรื่องความแข็งแรงที่ดี [9]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างพื้นผิวของโวลลาสโทไนต์ [28]

โวลลาสโทไนต์ถูกนำมาใช้ในทางอุตสาหกรรมมากในช่วงปี ค.ศ. 1950 ทั้งอุตสาหกรรมเซรามิก การเคลือบผิว สี และโลหะ ในปัจจุบันมีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมพลาสติก โดยนำโวลลาสโทไนต์ชนิดที่มี aspect ratio สูง (10-20) มาใช้เป็นสารตัวเติมทดแทนการใช้เส้นใยแอสเบสตอส (asbestos) เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล ลดต้นทุนการผลิตและลดอันตรายจากการใช้ใยหิน ในปริมาณสูง ๆ นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงความเป็นฉนวนไฟฟ้า เพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนและความคงรูป เป็นต้น สำหรับการใส่โวลลาสโทไนต์ที่มีอนุภาคละเอียดมาก ๆ จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความต้านทานการขีดขูด และความทนแรงกระแทกสูงกว่าวัสดุอื่น ๆ โดยพลาสติกที่นิยมใช้กับโวลลาสโทไนต์ คือ ไนลอน และพอลิเอสเตอร์ [29]

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Pravin และคณะ [30] ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมของพอลิไวนิลคลอไรด์/ไฮทริล ที่อัตราส่วน 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดแบบ (compression molding) พบว่าเมื่อผสมไฮทริลลงในพอลิไวนิลคลอไรด์ ส่งผลให้การยึดติด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มมากขึ้น หากแต่ความทนแรงดึงและยังสัมมอดูลัส มีค่าลดลง เมื่อเทียบกับพอลิ(ไวนิลคลอไรด์) ที่ไม่ผสมไฮทริล จากนั้นทำการเติมนาโนอะลูมินาลงในพอลิเมอร์ผสม พบว่าสมบัติความทนแรงดึงและยังสัมมอดูลัสได้รับการปรับปรุง

Bhagwan และคณะ [31] ศึกษาสมบัติเชิงกลและพฤติกรรมการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสมของพอลิเอไมด์ 6/ไฮทริลด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ จากนั้นทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดแบบ พบว่าการเติมไฮทริลลงในพอลิเอไมด์ 6 ส่งผลให้การยึดติด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมได้รับการปรับปรุง หากแต่ความทนแรงดึงมีค่าลดลง จากนั้นทำการเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงในพอลิเมอร์ผสม พบว่าความทนแรงดึงและความแกร่งได้รับการปรับปรุง นอกจากนี้ พบว่าการใส่สาร

ตัวเติมทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) และปริมาณการเป็นผลึก (crystallinity, X_c) เพิ่มสูงขึ้นด้วย

Unal และคณะ [32] ศึกษาผลของสารตัวเติมและปริมาณของสารตัวเติมต่อสมบัติเชิงกลของไนลอน 6 โดยเปรียบเทียบชนิดของสารตัวเติม ได้แก่ ดินเคลลิน (kaolin), ทัลค์ (talc), ทราายแก้ว (glass beads) และโวลลาสโทไนต์ ที่ปริมาณร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ จากนั้นทำการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องฉีดแบบ พบว่าโวลลาสโทไนต์ที่มีรูปร่างอนุภาคเป็นรูปเข็มสามารถปรับปรุงความทนแรงดึงและมอดุลัสได้ดีที่สุดและปริมาณของโวลลาสโทไนต์ที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 10 และ 15 โดยน้ำหนัก

Amin และคณะ [33] ศึกษาผลของโวลลาสโทไนต์ต่อสมบัติเชิงกลของไนลอน 6 โดยผสมโวลลาสโทไนต์ร้อยละ 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ จากนั้นทำการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องฉีดแบบ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของโวลลาสโทไนต์ส่งผลให้มอดุลัสแรงดัดโค้ง, ความทนแรงดึง, ความทนแรงกระแทก, ความแข็ง และความต้านทานการขีดถู ได้รับการปรับปรุงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเหมาะแก่การนำไปทำมอเตอร์ไฟฟ้า, เกียร์ และตัวเรือนเครื่องมือไฟฟ้า

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุดิบและสารเคมี

3.1.1 ไนลอน 6 รีไซเคิล (recycled nylon 6)

ไนลอน 6 รีไซเคิล ธรรมชาติการไหล 16.03 กรัม/10 นาที (190 องศาเซลเซียส, 2.16 กิโลกรัม) จากบริษัท สหกิจไนลอนพลาสติก จำกัด (SAHAKITNYLON PLASTIC CO., LTD.)



รูปที่ 3.1 ไนลอน 6 รีไซเคิล

3.1.2 เทอร์โมพลาสติกพอลิ (อีเทอร์-เอสเทอร์) อีลาสโตเมอร์ (thermoplastic poly(ether-ester) elastomer

เทอร์โมพลาสติกพอลิ (อีเทอร์-เอสเทอร์) อีลาสโตเมอร์ (thermoplastic poly(ether-ester) elastomer ชื่อทางการค้า Hytrel เกรด 7246 ธรรมชาติการไหล 12.5 กรัม/10 นาที โดยรายละเอียดผลิตภัณฑ์ (data sheet) แสดงไว้ในภาคผนวกที่ ง จากบริษัท โกลบอลคอนเน็คชั่นส์ จำกัด (มหาชน) (Global Connections Public CO., LTD)



รูปที่ 3.2 เทอร์โมพลาสติกพอลิ (อีเทอร์-เอสเทอร์) อีลาสโตเมอร์

3.1.3 ผงไวลลาสโทไนต์ (wollastonite, WT)

ผงไวลลาสโทไนต์ขนาด 5-8 ไมครอน ความหนาแน่น 2.7 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง 1:18 จากบริษัท SHENYANG HUAKUANG Trading CO., LTD)



รูปที่ 3.3 ผงไวลลาสโทไนต์

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

3.2.1 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) มีอัตราส่วนความยาวของสกรู/เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู เท่ากับ 32 ชนิดสกรูคู่หมุนทิศทางเดียวกัน (co-rotating) ของบริษัท Labtech Engineering รุ่น LTE-20-32

3.2.2 เครื่องฉีดแบบ (injection molding machine) ของบริษัท FANUC รุ่น S-2000i 100B

3.2.3 ตู้อบสุญญากาศ (vacuum oven) ของบริษัท MATSUI (ASIA) รุ่น plas-aid MJ3-50A

3.2.4 เครื่องบากชิ้นงาน (notching tool) ของบริษัท Tinius Olsen รุ่น 899

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และการทดสอบ

3.3.1 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) ของบริษัท JEOL รุ่น 6480 LV (คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.3.2 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact tester) ของบริษัท CEAST รุ่น IMP-MP-03 (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, ปทุมธานี)

3.3.3 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine) ของบริษัท Tinius Olsen รุ่น 5ST (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.3.4 เครื่องทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetric analyzer, TGA) ของบริษัท Mettler Toledo รุ่น TGA/DSC 3+ (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.3.5 เครื่องวัดสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี (difference scanning calorimetry, DSC) ของบริษัท PerkinElmer รุ่น DSC 8500 (Japan Advanced Institute of Science and Technology)

3.3.6 เครื่องทดสอบอุณหภูมิการเสียรูปด้วยความร้อน (heat distortion temperature, HDT) ของ Instron รุ่น CEAST HV3: 6911 (กรมวิทยาศาสตร์บริการ)

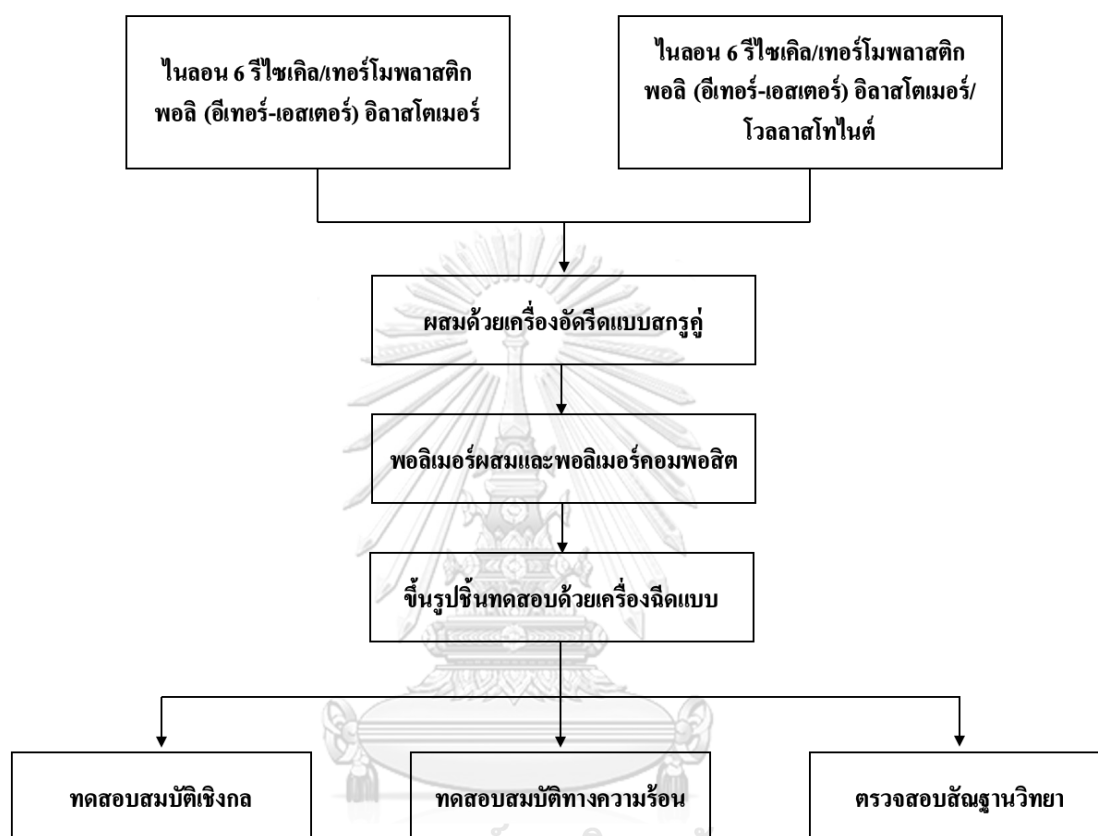
3.3.7 เครื่องทดสอบอุณหภูมิการอ่อนตัวไวแคต (vicat softening temperature) ของบริษัท Instron รุ่น CEAST HV3: 6911 (กรมวิทยาศาสตร์บริการ)

3.3.8 เครื่องวัดสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงพลวัต (dynamic mechanical analyzer, DMA) ของบริษัท UBM รุ่น Rheogel-E4000 (Japan Advanced Institute of Science and Technology)

3.4 วิธีการเตรียมพอลิเมอร์ผสมและคอมพอลิิต

3.4.1 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมของไนลอน 6 รีไซเคิล/เทอร์โมพลาสติกพอลิ (อีเทอร์-เอสเตอร์) อีลาสโตเมอร์

นำเม็ดพลาสติกไนลอน 6 รีไซเคิลและเทอร์โมพลาสติกพอลิ (อีเทอร์-เอสเตอร์) อีลาสโตเมอร์ไปอบเพื่อไล่ความชื้นในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงและอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ตามลำดับ จากนั้นนำส่วนผสมที่อบแล้วมาผสมด้วยวิธีผสมแบบแห้ง (dry blending) โดยชั่งน้ำหนักเม็ดพลาสติกไนลอน 6 รีไซเคิลและเทอร์โมพลาสติกพอลิ(อีเทอร์-เอสเตอร์) อีลาสโตเมอร์ ตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.1

หลังจากนั้นนำส่วนผสมป้อนเข้าสู่เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (รูปที่ 3.5) เพื่อทำการผสมแบบหลอมเหลว (melt blending) โดยใช้ความเร็วรอบสกรู 50 รอบ/นาที และตั้งค่าอุณหภูมิ

บาริลของโชนต่าง ๆ ให้คงที่ ดังนี้ 205, 225, 225, 225, 225, 225, 225 และ 210 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์หลอมเหลว ถูกอัดรีดออกมาเป็นเส้น extrudate และถูกตัดเป็นเม็ดทรงกระบอกเพื่อใช้ในการขึ้นรูปต่อไป



รูปที่ 3.5 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

3.4.3 การเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตของไนลอน 6 รีไซเคิล/เทอร์โมพลาสติกพอลิ (อีเทอร์-เอสเตอร์) อีลาสโตเมอร์/โพลีเอสเตอร์

นำเม็ดพลาสติกไนลอน 6 รีไซเคิล/เทอร์โมพลาสติกพอลิ (อีเทอร์-เอสเตอร์) อีลาสโตเมอร์และโพลีเอสเตอร์ไปอบเพื่อไล่ความชื้นในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงตามลำดับ จากนั้นนำส่วนผสมที่อบแล้วมาผสมแบบแห้ง โดยชั่งน้ำหนักเม็ดพลาสติกไนลอน 6 รีไซเคิลและเทอร์โมพลาสติกพอลิ (อีเทอร์-เอสเตอร์) อีลาสโตเมอร์และโพลีเอสเตอร์ ตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.1

หลังจากนั้นนำส่วนผสมไปป้อนเข้าสู่เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (รูปที่ 3.5) เพื่อทำการผสมแบบหลอมเหลว (melt blending) โดยใช้ความเร็วรอบสกรู 50 รอบ/นาที และตั้งค่าอุณหภูมิบาริลของโชนต่าง ๆ ให้คงที่ ดังนี้ 205, 225, 225, 225, 225, 225, 225 และ 210 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์หลอมเหลวถูกอัดรีดออกมาเป็นเส้น extrudate และถูกตัดเป็นเม็ดทรงกระบอกเพื่อใช้ในการขึ้นรูปต่อไป

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมและอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิต

ตัวอย่าง	ไนลอน 6 รีไซเคิล	เทอร์โมพลาสติก พอลิ (อีเทอร์-เอสเตอร์) อีลาสโตเมอร์	โพลีเอทิลีน
Re-N6	100	-	-
Re-N6/H 90/10	90	10	-
Re-N6/H 80/20	80	20	-
Re-N6/H 70/30	70	30	-
Re-N6/H 60/40	60	40	-
Re-N6/H 50/50	50	50	-
Re-N6/H/WT 70/30/10	70	30	10
Re-N6/H/WT 70/30/20	70	30	20
Re-N6/H/WT 70/30/30	70	30	30

3.5 การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ (injection molding)

นำเม็ดพลาสติกพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.2 และ 3.4.3 ไปอบไล่ความชื้นในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ (รูปที่ 3.6) โดยใช้อุณหภูมิในการหลอมที่ 245 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ 80 องศาเซลเซียส ความดัน 118 เมกะปาสคาล ความเร็วในการฉีดขึ้นรูป 200 มิลลิเมตร/วินาที จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ



รูปที่ 3.6 เครื่องฉีดยาแบบ

3.6 การทดสอบสมบัติ

3.6.1 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ตรวจสอบสัณฐานวิทยาบริเวณแตกหักของชิ้นทดสอบความทนแรงกระแทกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 3.7) ที่กำลังขยาย 500, 1000, และ 3000 เท่า กำลังไฟฟ้า 15 กิโลวัตต์ โดยทำการเคลือบทองคำบริเวณพื้นผิวรอยแตกก่อนทำการทดสอบ เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้าให้กับชิ้นงานและป้องกันการสะสมอิเล็กตรอนบนผิวชิ้นทดสอบ



รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.6.2 การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก

ทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก จะทดสอบแบบ Izod ตามมาตรฐาน ASTM D 256 โดยชิ้นงานทดสอบขนาด 63.5 x 12.7 มิลลิเมตร ความหนา 3.2 มิลลิเมตร และทำการบาก (notch) โดยหลังทำการบากวางชิ้นงานไว้ในสภาวะที่ทดสอบ 24 ชั่วโมงเพื่อลดความเครียดภายในชิ้นงาน แล้วจึงทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก (รูปที่ 3.8) ใช้พลังงานของค้อนเหวี่ยง 2.75 จูล ทำการทดสอบทั้งหมด 8 ชิ้นต่อการทดสอบและรายงานค่าเฉลี่ยในหน่วยกิโลจูล/ตารางเมตร โดยคำนวณค่าความทนแรงกระแทกจากสมการที่ 3.1

$$\text{Impact strength (kJ/m}^2\text{)} = \frac{\text{Energy (kJ)}}{\text{Area (m}^2\text{)}} \quad (3.1)$$

โดยที่ Energy คือ พลังงานที่ทำให้วัสดุแตกหัก (kJ)

Area คือ พื้นที่หน้าตัดบริเวณรอยบาก (m²)



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก

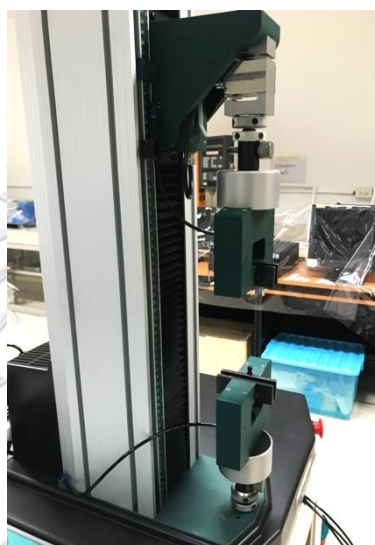
3.6.3 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง

ทดสอบสมบัติด้านการทนแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D 638 โดยใช้ชิ้นงานทดสอบมีรูปร่างคล้ายรูปดัมเบล (รูปที่ 3.9) มีความหนา 3.2 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (รูปที่ 3.10) ขนาด load cell 10 กิโลนิวตัน ระยะความยาวเกจ (gauge length) 50 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างที่จับยึด 115 มิลลิเมตร ใช้อัตราเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตร โดยทำการ

ทดสอบทั้งหมด 8 ชิ้นต่อการทดสอบและรายงานค่าเฉลี่ยในหน่วยเมกะปาสคาลสำหรับความทนต่อแรงดึงและยังสัมมอดูลัส หน่วยเป็นร้อยละสำหรับการยืดตัว



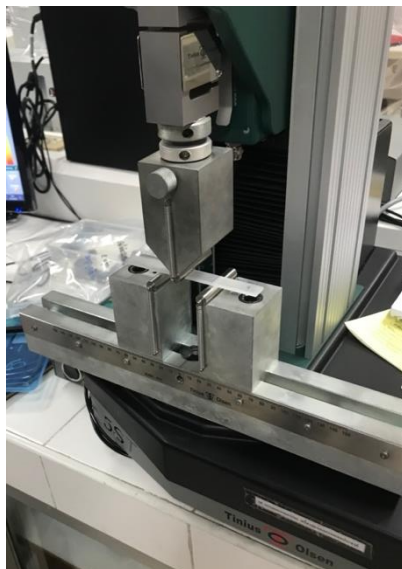
รูปที่ 3.9 ชิ้นทดสอบแรงดึง



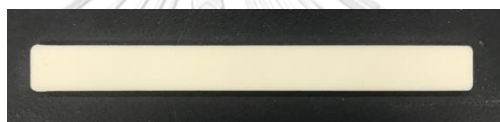
รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง

3.6.4 การทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง

ทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้งตามมาตรฐาน ASTM D 790 ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (รูปที่ 3.11) โดยชิ้นงานทดสอบเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 127 x 12.7 มิลลิเมตร ความหนา 3 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.12) ขนาด load cell 10 กิโลนิวตัน ที่อุณหภูมิห้อง อัตราเร็วในการกด 2 มิลลิเมตร/นาที ระยะจุดรองรับ (support span length) 48 มิลลิเมตร เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดัดโค้ง (flexural strength) และค่ามอดูลัสแรงดัดโค้ง (flexural modulus)



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดัดโค้ง



รูปที่ 3.12 ชิ้นทดสอบแรงดัดโค้ง

3.6.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิควิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน

วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA) (รูปที่ 3.13) โดยตัวอย่างที่ทดสอบมีน้ำหนัก 5-10 มิลลิกรัม บรรจุในครุซีเบิลอะลูมิเนียม ใช้อุณหภูมิการวิเคราะห์ 50-700 องศาเซลเซียส ภายในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล (gas flow rate) 40 องศาเซลเซียส/นาทีก และอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียส/นาทีก ผลที่ได้จากการทดสอบ คือ อุณหภูมิการสลายตัว (degradation temperature) และปริมาณเถ้า (residue)



รูปที่ 3.13 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA)

3.6.6 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี

วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี (DSC) (รูปที่ 3.14) โดยการวิเคราะห์เริ่มจากอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสถึง 260 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที คงอุณหภูมิไว้ที่ 260 องศาเซลเซียส 1 นาที จากนั้นทำการลดอุณหภูมิไปที่ -75 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส/นาที คงอุณหภูมิไว้ที่ -75 องศาเซลเซียส 1 นาที จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 260 องศาเซลเซียสด้วยอัตราการเพิ่มความร้อนเดิม วิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน ผลที่ได้จากการทดสอบคือ อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c), อุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature, T_m), เอนทัลปีการหลอมเหลว (melting enthalpy, ΔH_m) และปริมาณการเกิดผลึก (degree of crystallinity, X_c) โดยคำนวณได้ปริมาณการเกิดผลึกได้จากสมการ 3.2

$$\text{Degree of crystallinity (\%)} = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times \frac{1}{W} \times 100 \quad (3.2)$$

โดยที่ ΔH_m คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมผลึกของชิ้นงานต่อหนึ่งหน่วย (J/g)

ΔH_m^0 คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหลอมผลึกของพอลิเมอร์ที่มีผลึกที่ 100 % ของ N6 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 230 J/g

W คือ สัดส่วนโดยน้ำหนัก (weight fraction) ของ R-N6 ในชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.14 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาโลริเมทรี (DSC)

3.6.7 การทดสอบอุณหภูมิการเสีรูปด้วยความร้อน

การทดสอบอุณหภูมิการเสีรูปด้วยความร้อน (HDT) (รูปที่ 3.15) ตามมาตรฐาน ASTM D 648-07 method B โดยชิ้นงานทดสอบเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 127 × 12.7 มิลลิเมตร ความหนา 3.2 มิลลิเมตร โดยให้แรงเค้นชิ้นงาน 1.82 เมกะปาสคาล ใช้น้ำมันซิลิโกลเป็นของเหลวในการถ่ายเทความร้อน ให้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเท่ากับ 2 ± 0.2 องศาเซลเซียส/นาที เพื่อหาค่าอุณหภูมิที่ทำชิ้นทดสอบโค้งงอเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวรลงไปที่ตำแหน่ง 0.25 มิลลิเมตร จากตำแหน่งเดิมเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและมีแรงกด



รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบอุณหภูมิการเสีรูปด้วยความร้อน

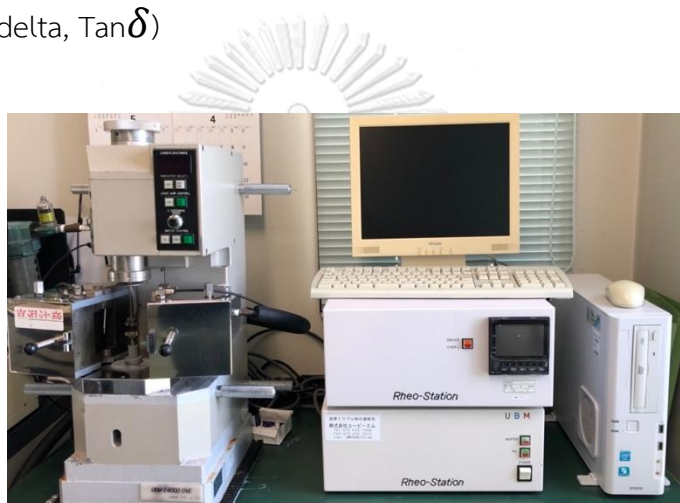
3.6.8 การทดสอบอุณหภูมิการอ่อนตัวไวแคต

การทดสอบอุณหภูมิการอ่อนตัวไวแคต (รูปที่ 3.15) ตามมาตรฐาน ASTM D 1525-17 โดยชิ้นงานทดสอบเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 127 × 12.7 มิลลิเมตร ความหนา 3.2 มิลลิเมตร โดยการทดสอบเข็มปลายแบนจะถูกล้างสัมผัสกับชิ้นทดสอบ ซึ่งจุ่มในอ่างน้ำมันถ่ายเท

ความร้อน โหลดที่ใช้มีขนาด 10 นิวตัน จากนั้นให้ความร้อนกับชิ้นงานทดสอบกับเข็มที่อุณหภูมิ 102 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิที่เข็มเจาะเข้าไปที่ความลึก 1 มิลลิเมตร

3.6.9 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงพลวัต

วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงพลวัต (รูปที่ 3.16) โดยใช้ช่วงอุณหภูมิการวิเคราะห์จาก -100 ถึง 150 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 2 องศาเซลเซียส/นาที ความถี่ 1 เฮิรตซ์ โดยใช้ไนโตรเจนเหลวช่วยลดอุณหภูมิ ผลที่ได้จากการทดสอบคือ ค่ามอดุลัสสะสม (storage modulus, E'), มอดุลัสสูญเสีย (loss modulus, E''), และ แทนเจนต์เดลต้า (Tangent delta, $\tan\delta$)



รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงพลวัต (DMA)

3.6.10 การทดสอบการลอมหาย

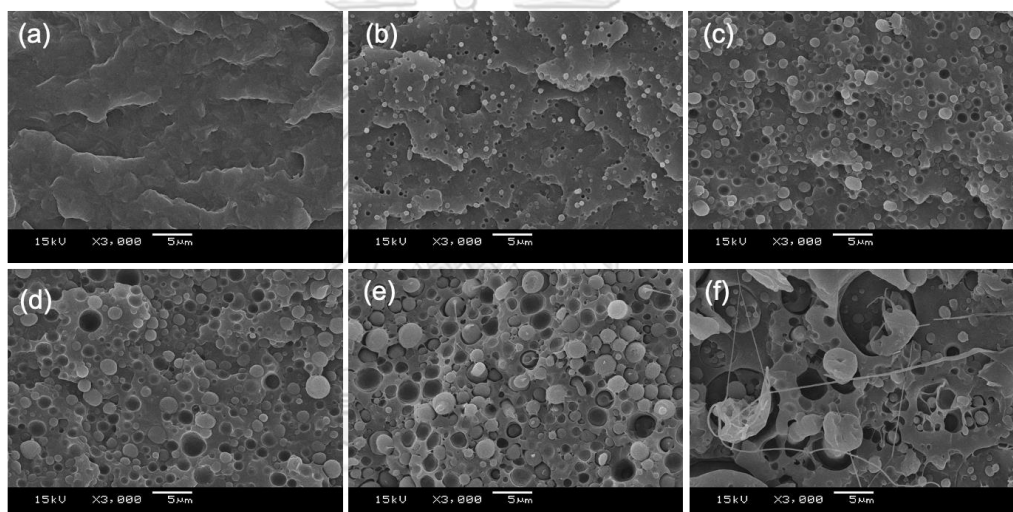
การทดสอบการลอมหาย ชิ้นงานทดสอบเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 127 × 12.7 มิลลิเมตร ความหนา 3.2 มิลลิเมตร โดยทำการทดสอบในแนวตั้ง จุดไฟ 2 ครั้ง บันทึกระยะเวลาที่ชิ้นงานเกิดตีไฟ (มีเปลวไฟ) และระยะเวลาที่ชิ้นงานเกิดการดับได้เอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

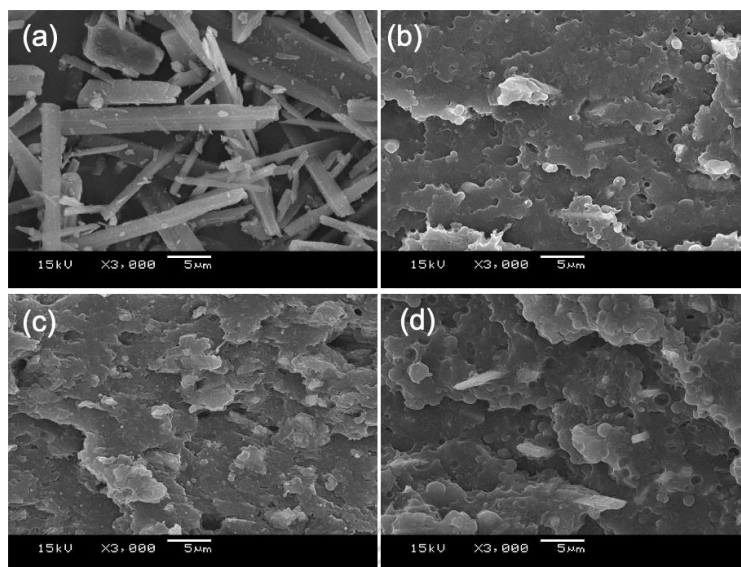
4.1 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทกของ Re-N6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H ที่อัตราส่วนต่าง ๆ และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณ 10, 20, และ 30 phr ตามลำดับ จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภายใต้กำลังขยาย 3000 เท่า



รูปที่ 4.1 สัณฐานวิทยาของ (a) Re-N6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H ที่อัตราส่วน (b) 90/10, (c) 80/20, (d) 70/30, (e) 60/40, และ (f) 50/50 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

จากรูปที่ 4.1 (a) พบว่า พื้นผิวรอยแตกของ Re-N6 มีลักษณะเรียบและมีริ้วบาง ๆ ซึ่งแสดงถึงวัสดุที่มีความแข็งเปราะ [34] ขณะที่รูปที่ 4.1 (b-e) แสดงถึงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ปรากฏอนุภาคทรงกลม (spherical droplet) ของไฮทริลซึ่งมีการกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอ ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ของ Re-N6 ยกเว้นที่ใส่ปริมาณร้อยละ 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งเห็นการเกาะกลุ่มกัน ของไฮทริลจนมีขนาดใหญ่ขึ้น สอดคล้องกับผลของค่าทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมดังที่กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 4.2 สัณฐานวิทยาของ (a) WT, พอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ที่อัตราส่วน b) 70/30/10, (c) 70/30/20, และ (d) 70/30/30ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

จากรูปที่ 4.2 (a) แสดงอนุภาคผลึกรูปเข็มของ WT (มี aspect ratio 1:18) ส่วนรูปที่ 4.2 (b-d) แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณ 10, 20, และ 30 phr ตามลำดับ พบว่า อนุภาคของ WT กระจายและฝังตัวได้ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ของ Re-N6 พบเพียงหลุมขนาดเล็กที่เกิดจาก WT ถูกดึงให้หลุดออก (pull out) ขณะการทดสอบ เนื่องจากพอลิเมอร์เมทริกซ์และ WT มีแรงยึดเกาะระหว่างผิวที่ดี ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการทนแรงดึงและทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมพอสิตดังที่กล่าวมาแล้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ

ตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.3-4.8 แสดงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบในเทอมของความทนแรงกระแทก (impact strength), ความทนแรงดึง (tensile strength), ยั่งสัมมอดูลัส (Young's modulus), การยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break), ความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength), และมอดูลัสการดัดโค้ง (flexural modulus) ของ Re-N6 และพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H

ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของชั้นทดสอบของ Re-N6 และพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H

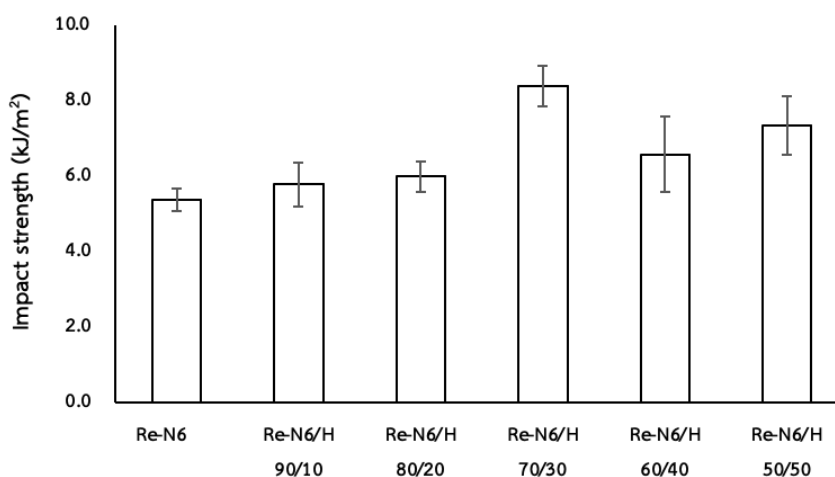
Sample	impact strength (kJ/m ²)	tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	elongation at break (%)	flexural strength (MPa)	flexural modulus (MPa)
Re-N6	5.4±0.3	68.1±0.6	1397±43.7	113.5±8.7	105.7±0.5	1002±5.0
Re-N6/H 90/10	5.8±0.6	60.5±1.1	1280±65.4	116.9±3.1	96.6±1.0	903.4±9.8
Re-N6/H 80/20	6.0±0.4	55.7±0.4	1169± 51.4	128.6±5.4	86.6±0.6	792.9±5.7
Re-N6/H 70/30	8.4±0.5	52.5±0.8	1055±66.0	123.6±5.1	81.1±1.0	735.9±11.7
Re-N6/H 60/40	6.6±1.0	52.0±0.8	1013±62.9	105.0±4.9	87.3±0.3	769.0±4.7
Re-N6/H 50/50	7.4±0.8	45.3±0.6	860.6±79.2	102.1±4.5	75.5±0.6	696.7±5.5

4.2.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมไนลอน 6 รีไซเคิล/ไฮทรีล

4.2.1.1 ความทนแรงกระแทก

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.3 พบว่า ความทนแรงกระแทกของ Re-N6 มีค่าเท่ากับ 5.4 kJ/m² ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจาก Re-N6 เป็นพลาสติกที่มีพฤติกรรมแข็งเปราะ เนื่องจาก N6 มีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) ค่อนข้างสูง (ประมาณ 50 องศาเซลเซียส) อีกทั้งมีการผ่านการรีไซเคิลมาแล้วจึงส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกลดต่ำลง และเมื่อเติมไฮทรีลใน Re-N6 ในปริมาณร้อยละ 10, 20, 30, 40, และ 50 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นและสูงกว่า Re-N6 (5.8, 6.0, 8.4, 6.6, และ 7.4 kJ/m² ตามลำดับ) ทั้งนี้เนื่องจากไฮทรีล เป็นพอลิเมอร์ยืดหยุ่นและสามารถกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอในพอลิเมอร์เมทริกซ์ของ Re-N6 จึงช่วยทำให้การส่งผ่านความเค้น (stress transfer) จาก Re-N6 ไปยังไฮทรีลเกิดขึ้นได้ดี ทำให้ไฮทรีลสามารถดูดซับพลังงานจากแรงกระแทกระหว่างการทดสอบได้เพิ่มขึ้น โดยพบว่า พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H ที่อัตราส่วน 70/30 มีค่าทนแรงกระแทกสูงสุด (8.4 kJ/m) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของไฮทรีลถึงร้อยละ 40 และ 50

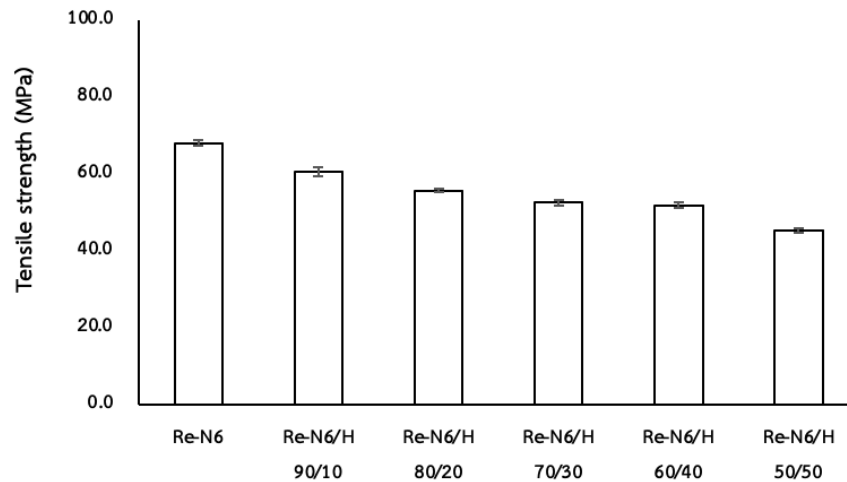
โดยน้ำหนัก พบว่า ค่าทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมลดลง อาจเป็นผลมาจากไฮทริลมีการเกาะกลุ่มกัน



รูปที่ 4.3 ความทนแรงกระแทกของ Re-N6 และพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H ด้วยไฮทริล ที่ปริมาณต่าง ๆ

4.2.1.2 ความทนแรงดึง

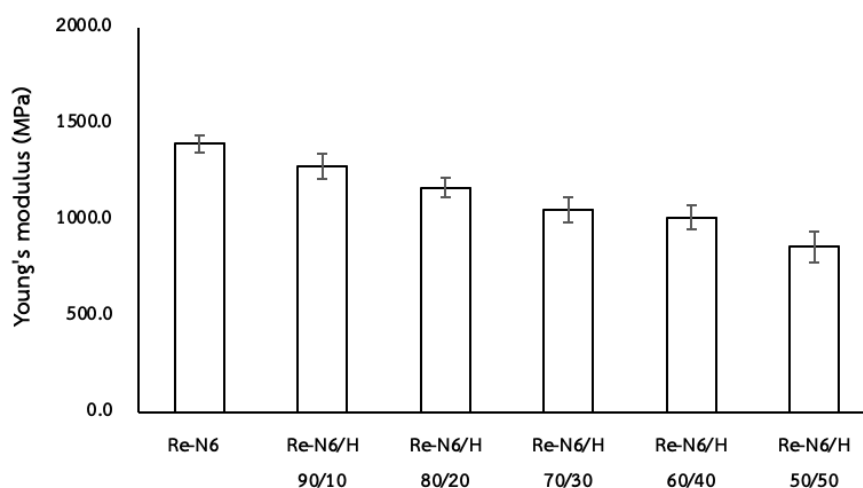
จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.4 พบว่า ความทนแรงดึงของ Re-N6 มีค่าเท่ากับ 68.1 MPa ซึ่งเมื่อเติมไฮทริลใน Re-N6 มีผลทำให้ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตรามีค่าต่ำกว่าของ Re-N6 และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของไฮทริลที่เพิ่มมากขึ้น (60.5, 55.7, 52.5, 52.0, และ 45.3 MPa ตามลำดับ) ทั้งนี้เนื่องจากไฮทริลมีค่าความทนแรงดึงต่ำกว่า N-R6 (ประมาณ 50 MPa) อ้างอิงจากรายละเอียดผลิตภัณฑ์ในภาคผนวก ง จึงส่งผลให้ความแข็งแรงต่อการดึงของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H มีค่าลดต่ำลง



รูปที่ 4.4 ความทนแรงดึงของ Re-N6 และพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H ด้วยไฮทริลที่ปริมาณต่าง ๆ

4.2.1.3 ยังส์มอดุลัส

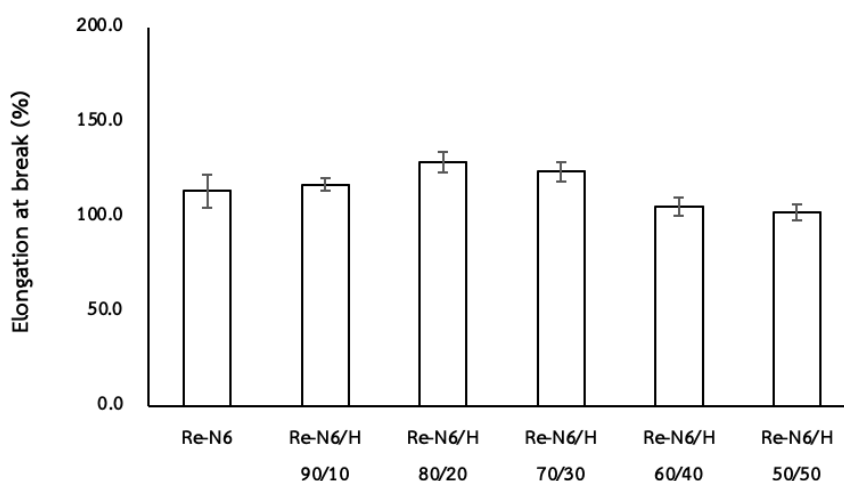
จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.5 พบว่า ยังส์มอดุลัสของ Re-N6 มีค่าเท่ากับ 1397 MPa แต่เมื่อเติมไฮทริลใน Re-N6 พบว่า ค่ายังส์มอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมลดลงตามปริมาณไฮทริลที่เพิ่มมากขึ้น (1280, 1169, 1055, 1013, และ 860.6 MPa ตามลำดับ) เนื่องจากไฮทริลเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงและมีค่ามอดุลัสที่ต่ำ (ประมาณ 525 MPa) อ้างอิงจากรายละเอียดผลิตภัณฑ์ในภาคผนวก ง



รูปที่ 4.5 ยังส์มอดุลัสของ Re-N6 และพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H ด้วยไฮทริลที่ปริมาณต่าง ๆ

4.2.1.4 การยืดตัว ณ จุดขาด

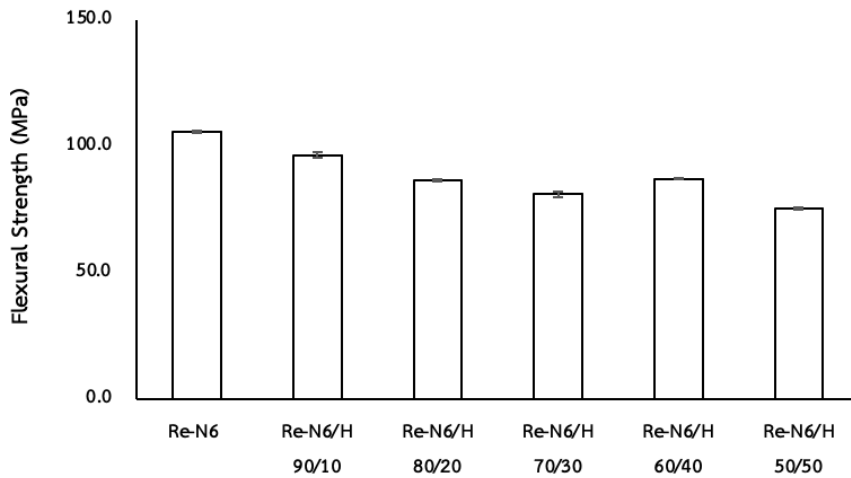
จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.6 พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเติมไฮทริลใน Re-N6 เนื่องจากไฮทริลจัดเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น มีความสามารถในการยืด, และคืนรูปได้ดี ดังนั้นเมื่อผสมไฮทริลใน Re-N6 เป็นการทำให้สายโซ่โมเลกุลของ Re-N6 เคลื่อนไหวได้ง่าย โดยพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H ที่อัตราส่วน 80/20 มีค่าการยืดตัว ณ จุดขาด สูงสุด (ร้อยละ 128.6) มีค่าเพิ่มจาก Re-N6 ประมาณ ร้อยละ 13 แต่เมื่อปริมาณของการผสมไฮทริลเพิ่มขึ้นร้อยละ 40, และ 50 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมลดลงอาจเนื่องมาจากการแยกวัฏภาคของ Re-N6 และไฮทริล



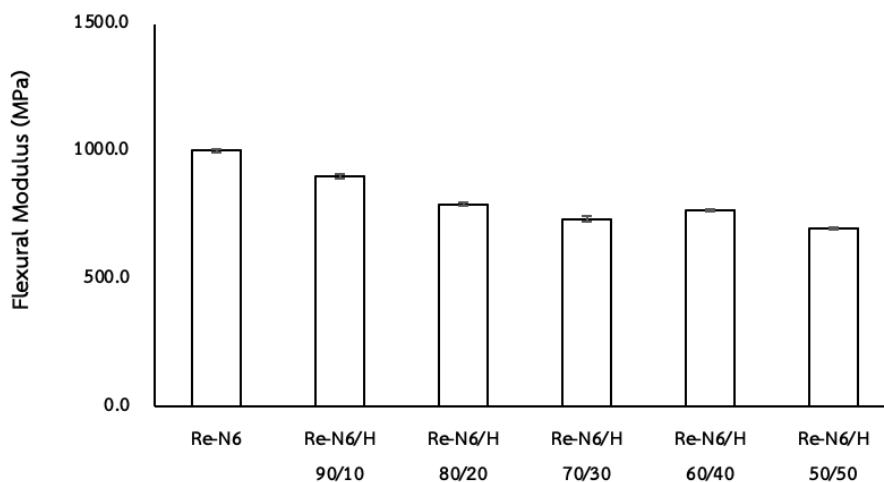
รูปที่ 4.6 การยืดตัว ณ จุดขาดของ Re-N6 และพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H ด้วยไฮทริลที่ปริมาณต่าง ๆ

4.2.1.5 สมบัติความทนแรงดัดโค้ง

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.7-4.8 แสดงสมบัติด้านความทนแรงดัดโค้ง (ความทนแรงดัดโค้งและมอดูลัสการดัดโค้ง) ของ Re-N6 และพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H พบว่าความทนแรงดัดโค้งและมอดูลัสการดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่า Re-N6 (105.7 และ 1002 MPa) อยู่ในช่วงระหว่าง 75.5-96.6 และ 696.7-903.4 MPa เนื่องมาจากความทนแรงดัดโค้งและมอดูลัสดัดโค้งที่ต่ำของไฮทริล ซึ่งผลมีแนวโน้มเหมือนกับค่าความทนแรงดึงและยังมอดูลัสของพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 4.7 ทนแรงดัดโค้งของ Re-N6 และพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H ด้วยไฮทรีลที่ปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.8 โมดูลัสการดัดโค้งของ Re-N6 และพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H ด้วยไฮทรีลที่ปริมาณต่าง ๆ

4.2.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมไนลอน 6 รีไซเคิล/ไฮทรีล และพอลิเมอร์คอมพอสิต

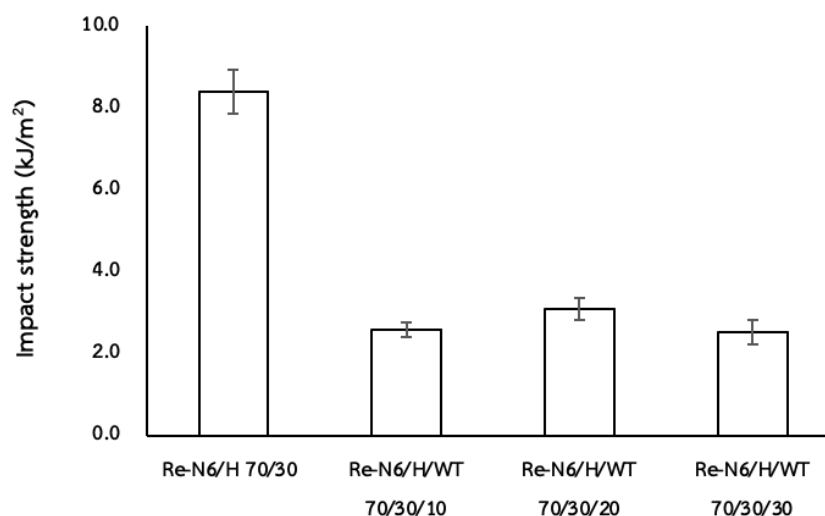
จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H พบว่าหลังเติมไฮทรีลใน Re-N6 ช่วยปรับปรุงค่าทนแรงกระแทกและการยืดตัว ณ จุดขาด ของ Re-N6 หากแต่สมบัติเชิงกลอื่น ๆ เช่น ความทนความทนแรงดึง ยังสัมพันธ์ ความทนแรงดัดโค้งและโมดูลัสดัดโค้งลดต่ำลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลที่สูญเสียไปโดยเลือกพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H ที่อัตราส่วน 70/30 เพื่อเตรียมเป็นพอลิเมอร์คอมพอสิตกับโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) และศึกษาผลของการเติมโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) 10, 20, และ 30 phr ต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิตต่อไป

ตารางที่ 4.2 สมบัติเชิงกลของชั้นทดสอบของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT

Sample	impact strength (kJ/m ²)	tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	elongation at break (%)	flexural strength (MPa)	flexural modulus (MPa)
Re-N6/H 70/30	8.4±0.5	52.5±0.8	1055±66.0	123.6±5.1	81.1±1.0	735.9±11.7
Re-N6/H/WT 70/30/10	2.6±0.2	62.5±0.5	1308±84.8	6.9±0.4	98.80.6	928.3±9.1
Re-N6/H/WT 70/30/20	3.1±0.3	65.2±0.5	1409±88.4	5.5±0.1	102.30.3	985.1±10.5
Re-N6/H/WT 70/30/30	2.5±0.3	69.5±0.2	1422±122.7	5.4±0.3	106.6±0.3	1081±46.4

4.2.2.1 ความทนแรงกระแทก

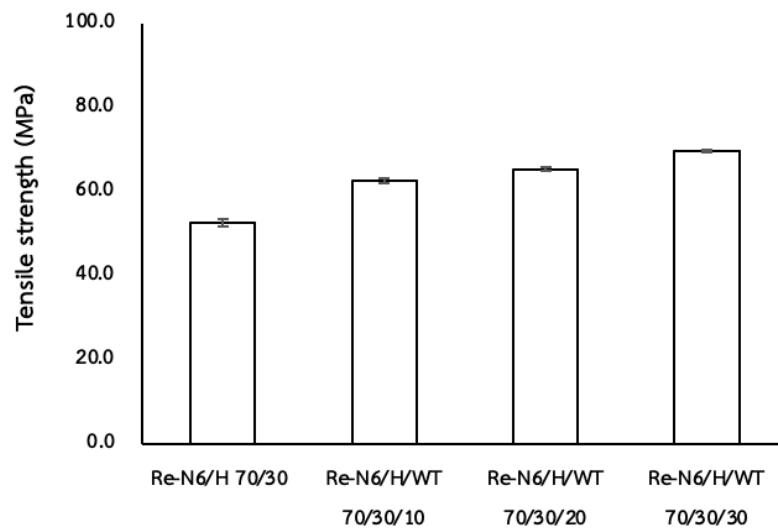
จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.9 พบว่า ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ทุก ๆ อัตราส่วน มีค่าลดลง (2.6, 3.1, และ 2.5 kJ/m²) เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 (8.4 kJ/m²) เนื่องจาก WT เป็นวัสดุที่มีความแข็งตึง (stiffness) สูง จึงส่งผลให้ไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุล จึงทำให้ความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตมีค่าลดลง



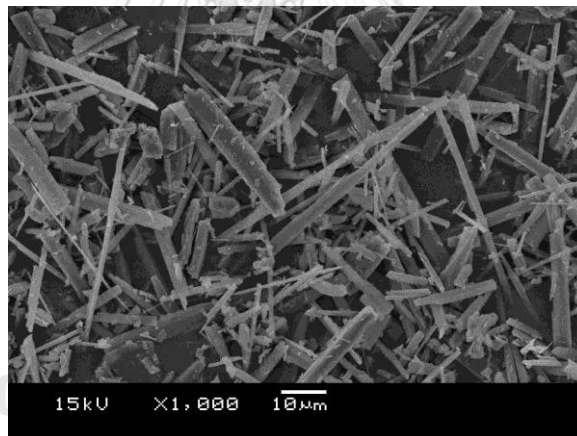
รูปที่ 4.9 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ

4.2.2.2 สมบัติความทนแรงดึง

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตทุก ๆ อัตราส่วน มีค่าความทนแรงดึงสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม (52.5 MPa) ประมาณร้อยละ 19.0-32.4 โดยมีค่าสูงที่สุดประมาณ 69.5 MPa เนื่องจากการส่งผ่านแรงจากพอลิเมอร์ผสมไปยัง WT ซึ่งมีโครงสร้างเป็นผลึกรูปเข็มที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาก (5-8 ไมครอน) และมี aspect ratio สูง ดังแสดงในรูปที่ 4.11 รวมทั้ง WT สามารถกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอในพอลิเมอร์ผสม จึงส่งผลให้ค่าความทนแรงดึง พอลิเมอร์คอมพอสิตมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ WT ที่เติมเข้าไป ดังนั้น WT จึงสามารถใช้เป็นสารเสริมแรงเพื่อเพิ่มความทนแรงดึงของผลิตภัณฑ์ได้เมื่อใส่ในปริมาณที่เหมาะสม



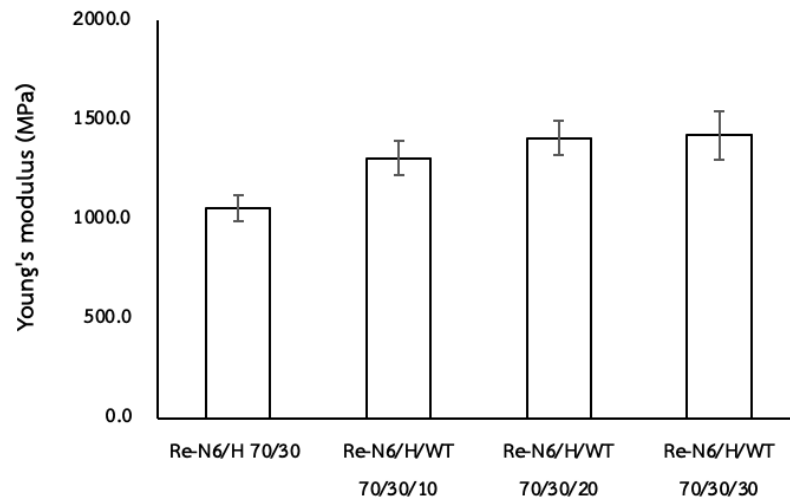
รูปที่ 4.10 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.11 สัณฐานวิทยาของผลึกรูปเข็มของโพลลาสโตนต์ ภายใต้กำลังขยาย 1,000 เท่า

4.4.2.3 ยังส์มอดุลัส

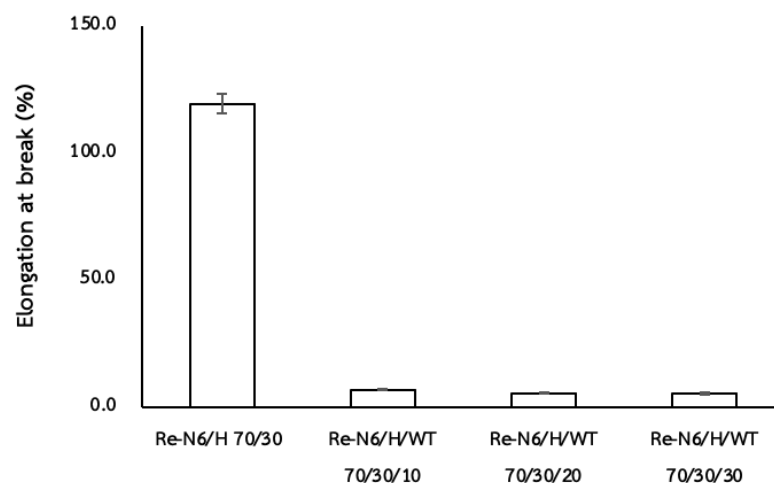
จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.12 พบว่า ยังส์มอดุลัสของพอลิเมอร์คอมพอสิต (1308-1422 MPa) มีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 โดยมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 23.9-34.7 เนื่องจากความแข็งดึงของ WT ไปขัดขวางการเคลื่อนไหวสายโซ่ของพอลิเมอร์และการกระจายตัวที่ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลทำให้ค่ายังส์มอดุลัสของพอลิเมอร์คอมพอสิตเพิ่มสูงขึ้นและเพิ่มตามปริมาณ WT ที่เติมเข้าไป



รูปที่ 4.12 ยิงส้อมอดูลัสของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ

4.2.2.4 การยืดตัว ณ จุดขาด

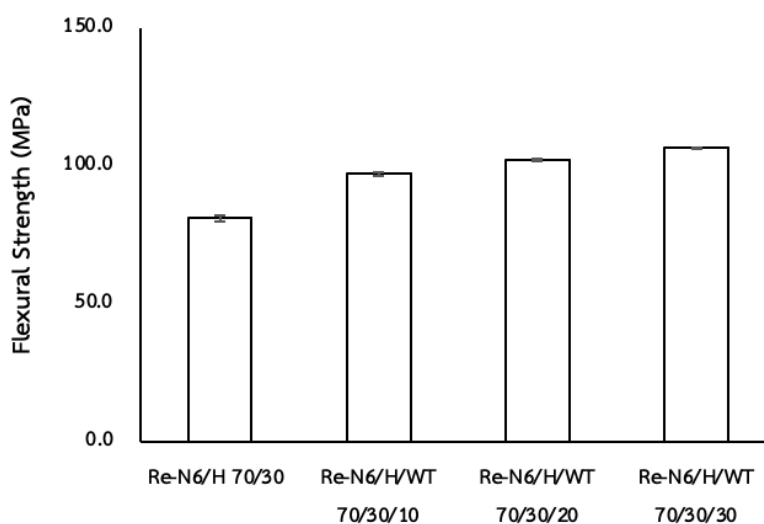
จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.13 พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมพอสิตทุก ๆ อัตราส่วน มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 เนื่องจาก WT เป็นสารตัวเติมที่มีความแข็งตึง ดังนั้นจึงมีการเข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์จึงส่งผลทำให้การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมพอสิตมีค่าลดลง



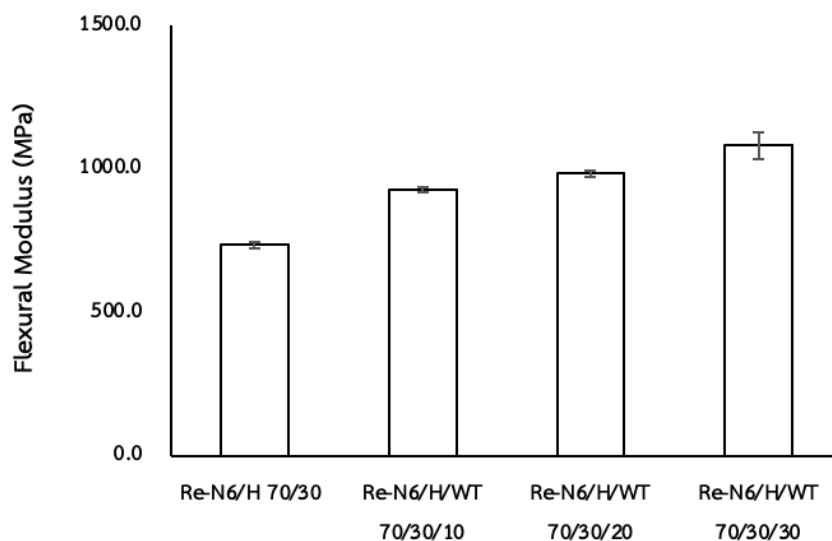
รูปที่ 4.13 การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ

4.2.2.5 สมบัติความทนแรงดัดโค้ง

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.14-4.15 แสดงสมบัติด้านความทนแรงดัดโค้ง (ความทนแรงดัดโค้งและมอดูลัสการดัดโค้ง) ของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณ 10, 20, และ 30 phr พบว่าความทนแรงดัดโค้งและมอดูลัสการดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมพอสิตทุก ๆ อัตราส่วน มีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม (81.1 และ 735.9 MPa) อยู่ในช่วงระหว่าง 98.8-106.6 และ 928.3-1081 MPa โดยการเติม WT ที่ปริมาณ 30 phr พบว่า มีค่าความทนแรงดัดโค้งและมอดูลัสการดัดโค้งสูงที่สุด เนื่องจากการมีอันตรกิริยาระหว่าง WT กับเมทริกซ์สูง [9] ทำให้เกิดจากส่งผ่านแรงได้ดี ซึ่งผลมีแนวโน้มเหมือนกับค่าความทนแรงดึงและยังมอดูลัสของพอลิเมอร์คอมพอสิตดังที่กล่าวมา



รูปที่ 4.14 ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.15 มอดูลัสการดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ

4.3 สมบัติทางความร้อน

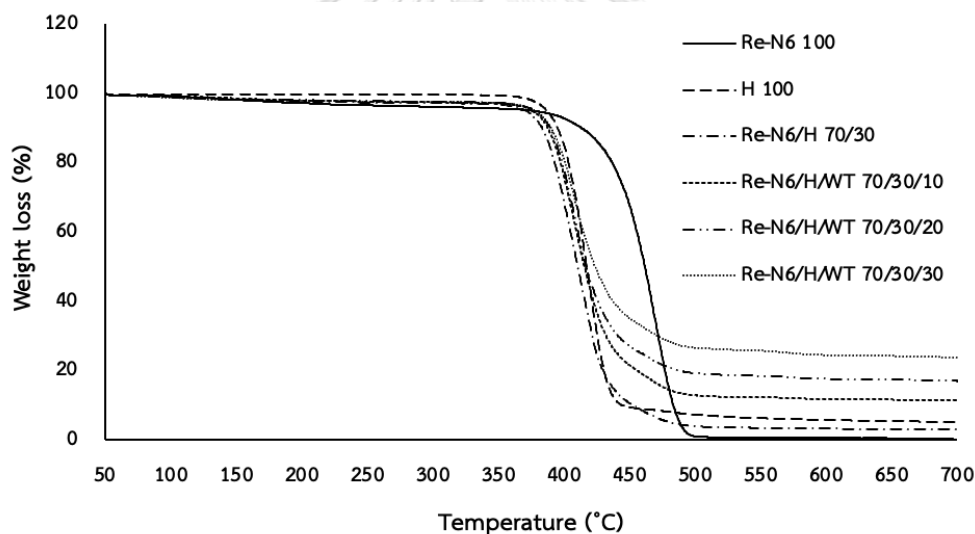
4.3.1 เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิควิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน

ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.16 แสดงสมบัติทางความร้อนในเทอมของอุณหภูมิการเริ่มสลายตัว ($T_{on\ set}$), อุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด (T_{max}), อุณหภูมิการสิ้นสุดสลายตัว ($T_{end\ set}$), และปริมาณเถ้า (char) ของ R-N6, ไฮทรีล, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30, และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณ 10, 20, และ 30 phr

ตารางที่ 4.3 ค่า $T_{on\ set}$, $T_{end\ set}$, T_{max} , และ char ของ Re-N6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30, และพอลิเมอร์คอมพอสิต R-N6/H/WT

Sample	T_{onset} (°C)	$T_{end\ set}$ (°C)	T_{max} (°C)	Char (%)
Re-N6	439.9	486.6	461.4	0.6
Re-N6/H 70/30	358.7	435.5	409.6	3.2
Re-N6/H/WT 70/30/10	388.3	437.3	412.6	11.8
Re-N6/H/WT 70/30/20	389.6	434.2	412.0	17.7
Re-N6/H/WT 70/30/30	390.2	437.2	413.6	24.5

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.16 พบว่า Re-N6 มีค่า $T_{on\ set}$ ที่ 439.9 องศาเซลเซียส $T_{end\ set}$ ที่ 486.6 องศาเซลเซียส, และ T_{max} ที่ 461.4 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเติมไฮทรีล พบว่าเสถียรภาพทางความร้อนพอลิเมอร์ผสมลดต่ำลง เนื่องจากไฮทรีลมีค่าเสถียรภาพทางความร้อนที่ต่ำ ($T_{on\ set}$, $T_{end\ set}$, และ T_{max} ประมาณ 398, 434, และ 414 ตามลำดับ จึงส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมลดต่ำลงมาก อีกทั้งชิ้นงานทดสอบของพอลิเมอร์ผสมได้รับความร้อนสองรอบจากกระบวนการผลิต สำหรับพอลิเมอร์คอมพอสิตพบว่าเมื่อทำการเติม WT ส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม โดยเพิ่มขึ้นตามปริมาณ WT ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก WT เป็นสารอนินทรีย์ที่มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง อีกทั้ง เมื่อเกิดการเผาไหม้จะเกิดเป็นเถ้ามาปกคลุมพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ทำให้ความร้อนไม่ถูกส่งผ่านเข้าไป โดยพบปริมาณของเถ้าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ WT ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่านอกจาก WT จะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลแล้ว WT ยังสามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้กับพอลิเมอร์คอมพอสิตอีกด้วย



รูปที่ 4.16 กราฟ TGA ของ Re-N6, ไฮทรีล, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30, และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WWT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ

4.3.2 สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

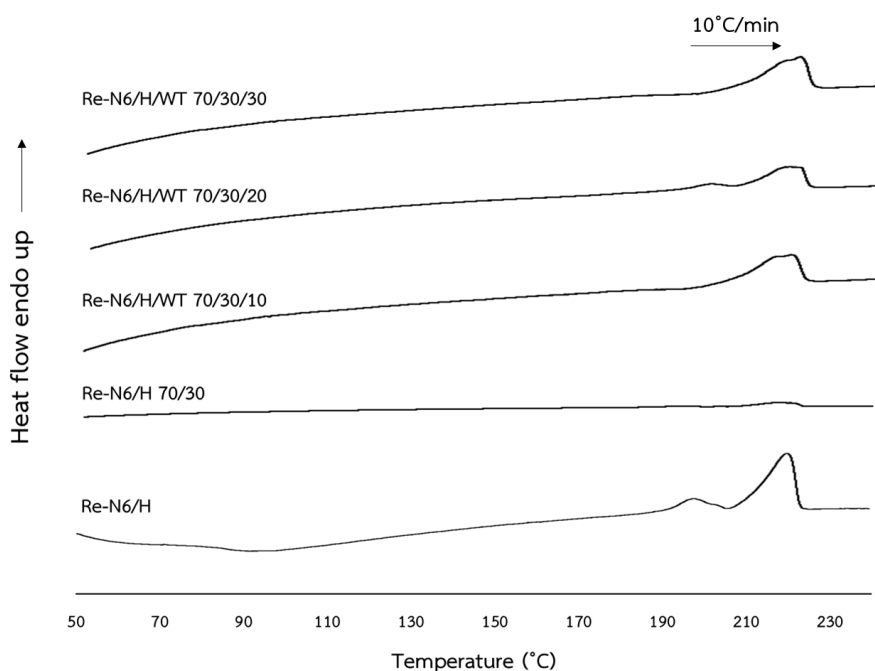
ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.17-4.19 แสดงสมบัติทางความร้อนในเทอมของอุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m), เอนทัลปีการหลอมเหลว (melting crystallization enthalpy, ΔH_m), อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c), เอนทัลปีการเกิดผลึก (crystallization enthalpy), และระดับความเป็นผลึก (degree of crystallinity, X_c) ของ Re-N6,

ไฮทรีล, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30, และ พอลิเมอร์คอมพอสิต R-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณ 10, 20, และ 30 phr ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 และในขั้นตอนการเย็นตัว

ตารางที่ 4.4 ค่า T_m , ΔH_m , T_c , ΔH_c และ X_c ของ R-N6, ไฮทรีล, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30, และพอลิเมอร์คอมพอสิต R-N6/H/WT

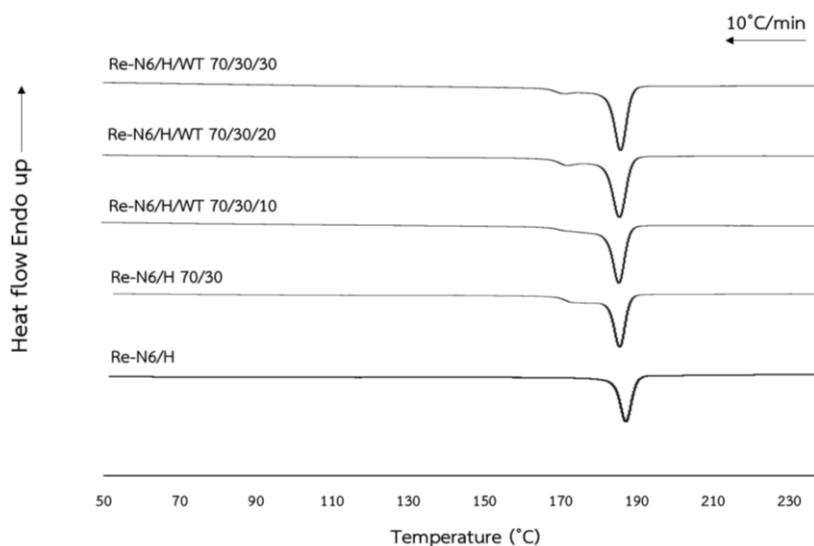
Sample	2 nd Heating scan			Cooling scan	
	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)
Re-N6	198.7, 220.3	43.5	18.9	188.3	-61.7
Re-N6/H 70/30	219.3	40.6	25.2	186.7	-52.1
Re-N6/H/WT 70/30/10	219.6	43.4	30.0	186.1	-48.3
Re-N6/H/WT 70/30/20	220.3	36.7	28.6	185.3	-36.2
Re-N6/H/WT 70/30/30	219.1	32.0	27.8	186.4	-42.9

ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.17 พบว่า Re-N6 มีค่า T_m เกิดขึ้น 2 ตำแหน่งคือ ที่อุณหภูมิ 198.7 และ 219.9 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดจากการหลอมเหลวของผลึกที่มีความสมบูรณ์แตกต่างกัน โดยที่อุณหภูมิต่ำคือ ผลึกที่มีความสมบูรณ์น้อยกว่า ส่วนผลึกที่มีโครงสร้างสมบูรณ์มากกว่าจะเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง เมื่อเติมไฮทรีลใน Re-N6 พบว่า ปรากฏพีก T_m เพียง 1 ช่วง ที่อุณหภูมิ 219.3 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าต่ำกว่า Re-N6 เพียงเล็กน้อย ส่วนการเติม WT นั้นพบว่า ไม่มีผลต่อค่า T_m ของพอลิเมอร์คอมพอสิต โดย T_m อยู่ในช่วง 219.1-220.3 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วง T_m ของ Re-N6



รูปที่ 4.17 กราฟ DSC ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของ Re-N6, โพลีเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30, และโพลีเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ

ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.18 พบว่า Re-N6 มีค่า T_c ที่อุณหภูมิ 188.3 องศาเซลเซียส เมื่อเติมไฮทริล พบว่า ปรากฏที่ T_c ที่อุณหภูมิ 186.7 องศาเซลเซียส มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ Re-N6 ในขณะที่การเติม WT ที่ปริมาณ 10, 20, และ 30 phr ปรากฏที่ T_c ที่อุณหภูมิ 186.1, 185.3, และ 186.4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เมื่อพิจารณา X_c ของโพลีเมอร์ผสม พบว่า การเติมไฮทริลมีผลทำให้ X_c มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากทำให้สายโซ่เคลื่อนไหวได้ง่าย ในขณะที่การเติม WT ทำให้ X_c ของโพลีเมอร์คอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน สอดคล้องกับสมบัติเชิงกลของโพลีเมอร์คอมพอสิตดังกล่าวมาแล้ว โดยค่า X_c มากที่สุดคือ ร้อยละ 30 เมื่อเติม WT ในปริมาณ 10 phr และมีแนวโน้มต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณ WT อาจเนื่องมาจากปริมาณที่มากเกินไปของ WT ซึ่งทำให้ขัดขวางการเกิดผลึกของ Re-N6



รูปที่ 4.18 กราฟ DSC ในขั้นตอนการให้ความเย็นของ Re-N6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30, และพอลิเมอร์คอมพอสิต R-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ

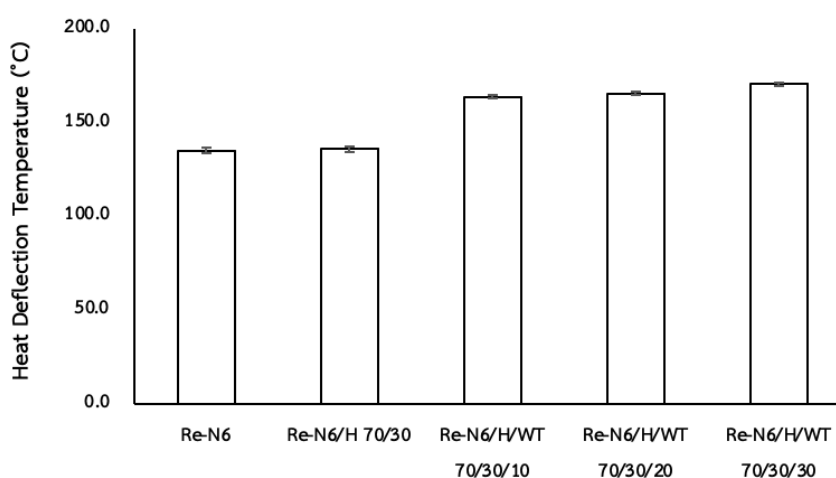
4.4 การทดสอบอุณหภูมิการเสียรูปด้วยความร้อน

ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.19-4.20 แสดงอุณหภูมิการเสียรูปด้วยความร้อน (heat deflection temperature, HDT) และ อุณหภูมิการอ่อนตัวไวแคต (Vicat softening Temperature) ของ Re-N6, พอลิเมอร์ผสม R-N6/H 70/30, และ พอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณ 10, 20, และ 30 phr

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการเสียรูปด้วยความร้อนและอุณหภูมิการอ่อนตัวไวแคตของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H และพอลิเมอร์คอมพอสิต

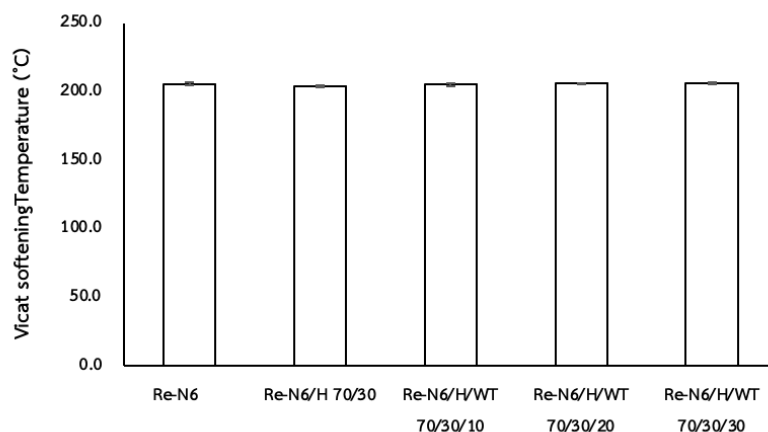
Sample	Heat Deflection Temperature (°C)	Vicat softening Temperature (°C)
Re-N6	134.9±0.5	205.8±0.2
Re-N6/H 70/30	135.9±1.4	203.8±0.3
Re-N6/H/WT 70/30/10	163.7±0.3	205.5±0.5
Re-N6/H/WT 70/30/20	165.4±0.3	206.2±0.1
Re-N6/H/WT 70/30/30	170.4±0.5	206.7±0.6

ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.19 พบว่า อุณหภูมิการเสีรูปด้วยความร้อนของ Re-N6 เท่ากับ 134.9 องศาเซลเซียส เมื่อเติมไฮทริล ลงใน Re-N6 อุณหภูมิการเสีรูปด้วยความร้อนเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ส่วนการเติม WT มีผลให้อุณหภูมิการเสีรูปด้วยความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น มีค่าอยู่ในช่วง 163.7-170.4 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากความแข็งตึงและเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีของ WT จึงทำให้พอลิเมอร์คอมพอสิตสามารถทนอุณหภูมิได้สูงขึ้นก่อนจะเกิดการอ่อนตัว และมีสมบัติทางความร้อนที่ดีขึ้น



รูปที่ 4.19 อุณหภูมิการเสีรูปด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ

ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.20 พบว่า อุณหภูมิการอ่อนตัวไวเคตของ Re-N6 เท่ากับ 205.8 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิต พบว่าอุณหภูมิการอ่อนตัวไวเคตมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ



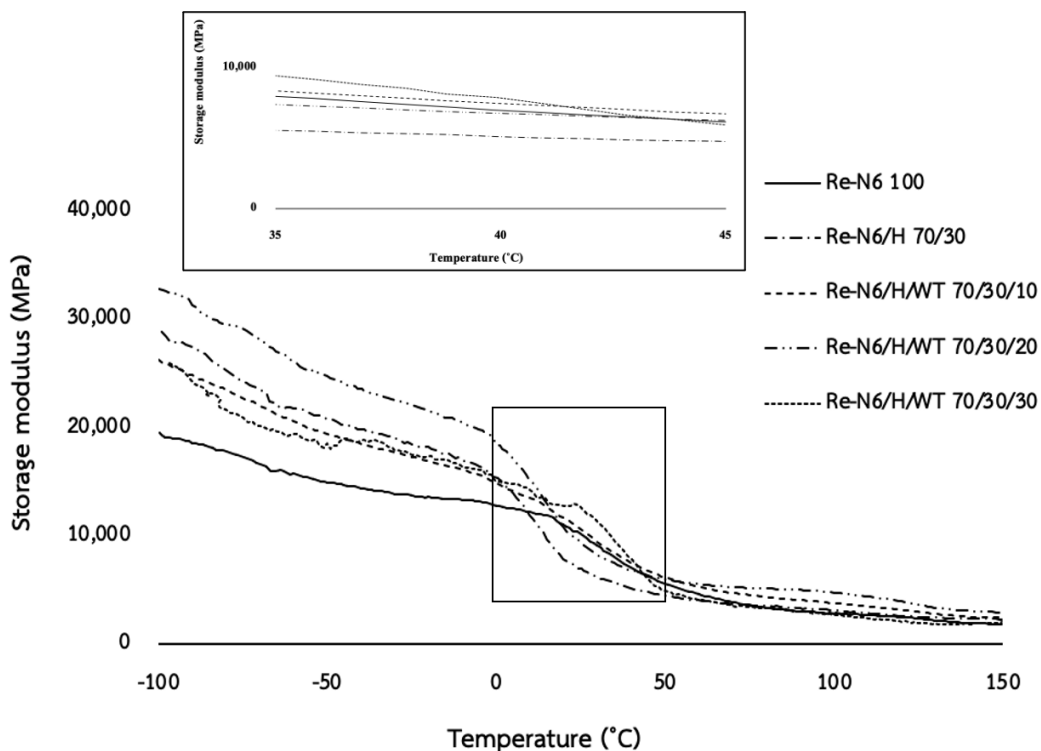
รูปที่ 4.20 อุณหภูมิการอ่อนตัวไวด์แคตของ Re-N6, โพลีเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และโพลีเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ

4.5 สมบัติเชิงกลพลวัต

ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.21-4.22 แสดงสมบัติเชิงกลพลวัตของ Re-N6, โพลีเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30, และโพลีเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณ 10, 20, และ 30 phr ในเทอมของมอดุลัสสะสม (storage modulus, E') และ T_g จากแทนเจนต์สูญเสีย (loss tangent, $\tan \delta$)

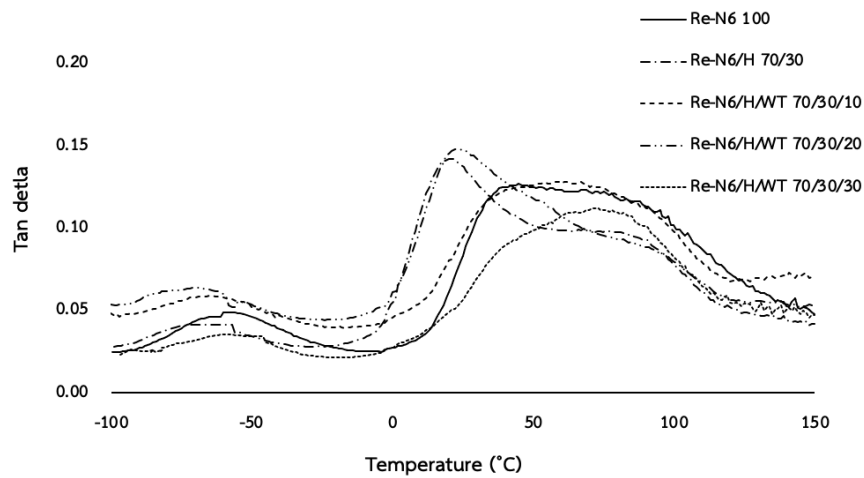
ตารางที่ 4.6 ค่า T_g และค่ามอดุลัสสะสมของ Re-N6, โพลีเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และโพลีเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT

Sample	T_g of Hytrel (°C)	T_g of R-N6 (°C)	Modulus at 40 °C (MPa)
Re-N6	-	40.0	6.8×10^3
Re-N6/H 70/30	-71.1	17.8	5.0×10^3
Re-N6/H/WT 70/30/10	-66.3	32.9	7.3×10^3
Re-N6/H/WT 70/30/20	-70.1	23.9	6.3×10^3
Re-N6/H/WT 70/30/30	-55.2	38.8	7.4×10^3



รูปที่ 4.21 สมบัติเชิงกลพลวัตมอดูลัสสะสมของ Re-N6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ

ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.21 พบว่า ค่ามอดูลัสสะสม ที่ 40 องศาเซลเซียส ของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 มีค่า 5.0×10^3 MPa ซึ่งต่ำกว่า Re-N6 (6.8×10^3 MPa) เนื่องจากสมบัติของไฮทริลที่มีความยืดหยุ่น ช่วยให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนไหวได้มากขึ้น แสดงให้เห็นว่า เมื่อชิ้นงานได้รับแรง จะมีความสามารถในการคืนรูปได้ดี เกิดจากการกระจายตัวและมีอันตรกิริยาที่ดี ซึ่งทำให้ความต้านทานต่อการเสียรูปของวัสดุหรือความแข็งดิ่งลดลง ซึ่งสอดคล้องกับยังสัมพันธ์จากการทดสอบสมบัติความทนแรงดิ่งในส่วนของพอลิเมอร์คอมพอสิต พบว่า การเติม WT ทำให้ค่ามอดูลัสสะสมของพอลิเมอร์คอมพอสิตทุก ๆ อัตราส่วน (6.3×10^3 - 7.4×10^3 MPa) มีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากความแข็งดิ่งของ WT และการขัดขวางการเคลื่อนไหวสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์

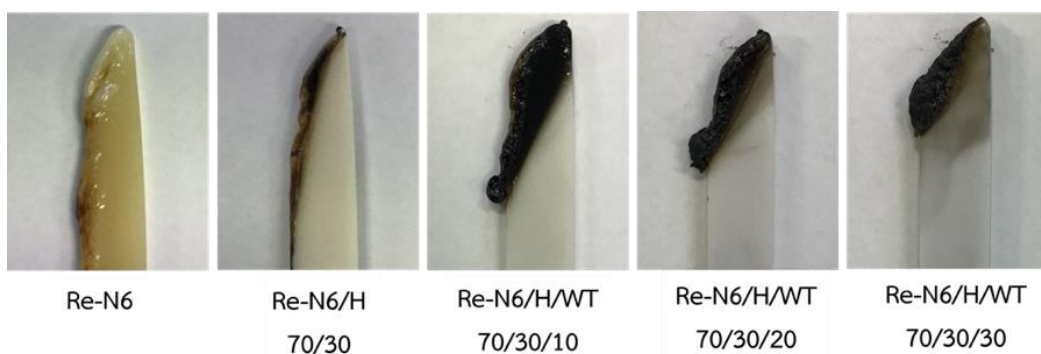


รูปที่ 4.22 สมบัติเชิงกลพลวัตแทนเจนต์สูญเสีย (tan delta) ของ R-N6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ

ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.22 พบว่า พอลิเมอร์ผสม ค่า T_g เกิดขึ้น 2 ตำแหน่ง แบ่งเป็นช่วงของไฮทรีล (-71.1 องศาเซลเซียส) และ Re-N6 (17.8 องศาเซลเซียส) โดยการเติมไฮทรีลลงใน Re-N6 ทำให้ T_g ของ Re-N6 ลดต่ำลง หากแต่การเติม WT ในพอลิเมอร์ผสมส่งผลให้ T_g ของ Re-N6 มีค่าสูงขึ้น ซึ่งมีผลสอดคล้องกับมอดูลัสสะสมตั้งที่กล่าวมาแล้ว

4.6 การหลอมหยด

รูปที่ 4.23 แสดงลักษณะชิ้นงานทดสอบการหลอมหยด (melt dipping) ของ Re-N6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณ 10, 20, และ 30 phr



รูปที่ 4.23 ชิ้นงานหลังการทดสอบการหลอมหยดของ N-R6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ด้วย WT ปริมาณต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.23 พบว่า Re-N6 เกิดการหลอมหยดของส่วนที่เผาไหม้ เมื่อติดไฟแล้วเป็นเวลา 8 วินาที ในขณะที่เมื่อเติมไฮทรีลใน Re-N6 การหลอมหยดเกิดขึ้นเร็วมาก ซึ่งสอดคล้องกับเสถียรภาพทางความร้อนที่ลดลงของพอลิเมอร์ผสมเมื่อเติมไฮทรีลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA หากแต่เมื่อเติม WT ปริมาณ 10 และ 20 phr ชิ้นงานสามารถติดไฟ และดับไฟได้เองเมื่อครบเวลา 10 วินาที การหลอมหยดในส่วนที่เผาไหม้ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ Re-N6 และพอลิเมอร์ผสม อย่างไรก็ตาม พบว่าเมื่อเติม WT ปริมาณ 30 phr ชิ้นงานทดสอบติดไฟได้ยากขึ้นและเกิดการหลอมหยดต่ำ ซึ่งแสดงว่า WT มีส่วนช่วยด้านการติดไฟและการหลอมหยดเมื่อใส่ในปริมาณที่มากขึ้น อาจเนื่องมาจากเมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วของ WT สามารถเคลื่อนที่ออกมาปกคลุมบริเวณผิวของชิ้นงานที่เกิดการเผาไหม้และรวมตัวกันเป็นชั้นเคลือบบนผิวหน้าของชิ้นงานที่เกิดการเผาไหม้ ทำให้เชื้อเพลิงหรือวัสดุไม่ได้สัมผัสกับออกซิเจนภายนอก



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของ Re-N6 ด้วยการเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมกับเทอร์โมพลาสติกพอลิ (อีเทอร์-เอสเทอร์) อีลาสโตเมอร์ (ไฮทริล) เพื่อนำไปเตรียมเป็นคอมพอสิตกับโวลลาสโทไนต์ (WT) ด้วยกระบวนการอัดรีดแบบสกรูคู่และฉีดแบบสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาบริเวณผิวรอยแตกของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า พื้นผิวรอยแตกของ Re-N6 แสดงถึงวัสดุที่มีความแข็งเปราะ ในขณะที่ในพอลิเมอร์ผสมพอนุภาคทรงกลม (spherical droplet) ของไฮทริลซึ่งมีการกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอในพอลิเมอร์เมทริกซ์ของ Re-N6 สามารถยืนยันได้ว่าไฮทริลสามารถเพิ่มความเหนียวให้กับ Re-N6 ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม สำหรับพอลิเมอร์คอมพอสิต WT กระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอ รวมทั้งพบเพียงหลุมขนาดเล็กของ WT ที่เกิดขณะทดสอบเท่านั้น เนื่องมาจากมีแรงยึดเกาะระหว่างผิวของ WT กับพอลิเมอร์ที่ดี ส่งผลให้ช่วยปรับปรุงค่าความทนแรงดึง, ยังสัมมอดูลัส, ความทนแรงดัดโค้ง, และมอดูลัสการดัดโค้ง ของพอลิเมอร์คอมพอสิต

5.1.2 จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่ใส่ไฮทริล ปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก หรือ Re-N6/H 70/30 สมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด ซึ่งมีค่าทนแรงกระแทกสูงกว่า Re-N6 และพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วนอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม การเติมไฮทริลทำให้สมบัติเชิงกล เช่น ความทนแรงดึง, ยังสัมมอดูลัส, ความทนแรงดัดโค้ง, และมอดูลัสการดัดโค้งลดต่ำลง งานวิจัยนี้จึงปรับปรุงสมบัติที่สูญเสียไป โดยเลือกพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H 70/30 ไปเตรียมเป็นพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วย WT ปริมาณ 10, 20, และ 30 phr

5.1.3 การเติม WT สามารถช่วยปรับปรุงค่าความทนแรงดึง, ยังสัมมอดูลัส, ความทนแรงดัดโค้ง, และมอดูลัสการดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมพอสิต โดยพบว่าให้ค่าที่ดีที่สุด เมื่อเติม WT ปริมาณ 30 phr หรือ Re-N6/H/WT 70/30/30 หากแต่ไม่สามารถปรับปรุงความทนแรงกระแทกและการยึดตัว ณ จุดขาด ได้

5.1.4 จากการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่า การเติมไฮทริลส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีเสถียรภาพทางความร้อนลดต่ำลง ในขณะที่การเติม WT เสถียรภาพทาง

ความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม นอกจากนี้ถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ยังช่วยเรื่องการลามไฟของผลิตภัณฑ์อีกด้วย จึงสามารถสรุปได้ว่านอกจาก WT จะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลแล้ว WT ยังสามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนอีกด้วย

5.1.5 จากการทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนและพฤติกรรมการเกิดผลึกด้วยเทคนิค DSC พบว่า การเติมไฮทริลไม่มีผลต่อเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิการเกิดผลึก หากแต่ WT มีผลทำให้ระดับการเกิดผลึกของพอลิเมอร์คอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุด ที่ปริมาณ WT 10 phr

5.1.6 จากการทดสอบอุณหภูมิการเสีรูปร่างด้วยความร้อน พบว่า WT สามารถปรับปรุงความสามารถของการทนอุณหภูมิได้สูงขึ้นก่อนจะเกิดการอ่อนตัวของพอลิเมอร์คอมพอสิตได้ประมาณ 28-35 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบการทนต่อความดัดโค้ง สำหรับการทดสอบอุณหภูมิการอ่อนตัวไวแคต พบว่า การเติมไฮทริลและ WT ไม่มีผลต่อเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิการอ่อนตัวไวแคต เนื่องจากการทดสอบความอ่อนตัวที่พื้นผิวของวัสดุ จึงส่งผลให้ไม่เห็นความแตกต่างของอุณหภูมิ

5.1.7 จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต พบว่า การเติมไฮทริลใน Re-N6 ทำให้มอดุลัสสะสมและค่า T_g ของพอลิเมอร์มีค่าลดลง หากแต่การเติม WT ลงในพอลิเมอร์ผสม ทำให้มอดุลัสสะสมและค่า T_g ของพอลิเมอร์คอมพอสิตมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อเติม WT ที่ปริมาณ 30 phr ซึ่งสอดคล้องกับค่ายังสมอดุลัสและมอดุลัสดัดโค้ง

5.1.8 การเติม WT ที่ปริมาณ 30 phr ในพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H สามารถช่วยลดการหลอมหยดและลดการลามไฟของพอลิเมอร์ผสมได้ดีที่สุด

5.1.9 พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H มีความทนแรงกระแทกและยืดหยุ่นสูง เหมาะสมสำหรับใช้ในงานที่ต้องรับแรงกระแทก เช่น ล้อยางรถวีลแชร์

5.1.10 พอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT เหมาะสำหรับการนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนในห้องเครื่องของรถยนต์ส่วนที่มีการสัมผัสกับความร้อน เนื่องจากมีเสถียรภาพทางร้อนที่ดี รวมทั้งมีการหลอมหยดและการลามไฟต่ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทดลองเลือกพอลิเมอร์ผสม Re-N6/H ที่อัตราส่วน 90/10 เนื่องจากผลของค่าความทนแรงกระแทกไม่แตกต่างจากที่อัตราส่วน 70/30 มากนัก เพื่อเป็นการช่วยลดต้นทุนของวัสดุ

บรรณานุกรม

- [1] กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม. 7 ประเภทพลาสติกใช้แล้วควรแยกก่อนทิ้ง เพราะเอาไปรีไซเคิลต่อได้. **2562**. <https://scpdatacenter.deqp.go.th/newsdetail.php?id=718>
- [2] Ragaert, K.; Delva, L.; Van, G. K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste management* **2017**, *69*, 24-58.
- [3] Vollmer, I.; Jenks, M. J.; Roelands, M. C.; White, R. J.; Van, H. T.; De, W. P.; Van, D. L. G. P.; Meirer, F.; Keurentjes, J. T.; Weckhuysen, B. M. Beyond mechanical recycling: Giving new life to plastic waste. *Angewandte Chemie International Edition* **2020**, *59* (36), 15402-15423.
- [4] Matthies, P.; Seydl, W. F. History and Development of Nylon 6. *High Performance Polymers: Their Origin and Development*; Dordrecht, **1986**.
- [5] Wong, J. F.; Chan, J. X.; Hassan, A. B.; Mohamad, Z. B.; Othman, N. B. Thermal and flammability properties of wollastonite-filled thermoplastic composites: a review. *Journal of Materials Science* **2021**, *56* (15), 8911-8950.
- [6] McKeen, L. W. *The effect of creep and other time related factors on plastics and elastomers*; Elsevier, **2009**.
- [7] Sreekanth, M.; Joseph, S.; Mhaske, S.; Mahanwar, P.; Bambole, V. Effects of mica and fly ash concentration on the properties of polyester thermoplastic elastomer composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* **2011**, *24* (3), 317-331.
- [8] Tiggemann, H. M.; Tomacheski, D.; Celso, F.; Ribeiro, V. F.; Nachtigall, S. M. B. Use of wollastonite in a thermoplastic elastomer composition. *Polymer Testing* **2013**, *32*, 1373-1378.
- [9] Chan, J. X.; Wong, J. F.; Hassan, A.; Mohamad, Z.; Othman, N. Mechanical properties of wollastonite reinforced thermoplastic composites: A review. *Polymer Composites* **2019**, *41* (2), 395-429.
- [10] Kobayashi, S. M. I. K. *Encyclopedia of polymeric nanomaterials*; Springer, **2015**.
- [11] Deopura, B. L., Alagirusamy, R., Joshi, M., Gupta, B. *Polyesters and Polyamides*; Woodhead Publishing, **2008**.
- [12] Merrington, A. Recycling of plastics. *Applied plastics engineering handbook*;

Elsevier, **2017**.

[13] Hopewell, J.; Dvorak, R.; Kosior, E. Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **2009**, *364* (1526), 2115-2126.

[14] Sanchez, F. A. C.; Lanza, S.; Boudaoud, H.; Hoppe, S.; Camargo, M. Polymer Recycling and Additive Manufacturing in an Open Source context: Optimization of processes and methods. *Annual international solid freeform fabrication symposium* **2015**, 1591-1600.

[15] Nishida, H. Development of materials and technologies for control of polymer recycling. *Polymer journal* **2011**, *43* (5), 435-447.

[16] Chanda, M. Chemical aspects of polymer recycling. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* **2021**, *4* (3), 133-150.

[17] Scholz, G.; Gehringer, M. Thermoplastic Elastomers. *Thermoplastic Elastomers*; De Gruyter, **2021**.

[18] Fakirov, S. *Handbook of condensation thermoplastic elastomers*; John Wiley & Sons, **2006**.

[19] Drobny, J. G. *Handbook of thermoplastic elastomers*; Elsevier, **2014**.

[20] Subramanian, M. N. *Polymer blends and composites: chemistry and technology*; John Wiley & Sons, **2017**.

[21] Robeson, L. M. Polymer blends. *A Comprehensive review* **2007**, 641.

[22] Kulshreshtha, A. K.; Vasile, C. *Handbook of polymer blends and composites*; iSmithers Rapra Publishing, **2002**.

[23] Clyne, T. W.; Hull, D. *An introduction to composite materials*; Cambridge university press, **2019**.

[24] Hollaway, L. *Handbook of polymer composites for engineers*; Woodhead publishing, **1994**.

[25] Murphy, J. *The reinforced plastics handbook*; Elsevier, **1998**.

[26] Virta, R. L.; Revette, D. Wollastonite. *Mining Engineering* **2006**, *58* (6), 61-62.

[27] Kotsis, I.; Balogh, A. Synthesis of wollastonite. *Ceramics International* **1989**, *15* (2), 79-85.

[28] Ding, H.; Lu, S.; Du, G. Surface modification of wollastonite by the mechano-

activated method and its properties. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials* **2011**, 18 (1), 83-88.

[29] Rotheron, R.; DeArmitt, C. Fillers (Including Fiber Reinforcements). *Brydson's Plastics Materials*, **2017**, 169-204.

[30] Kadam, P.; Kute, R.; Mhaske, S. Effect of nano-alumina concentration on the properties of poly(vinyl chloride)/thermoplastic polyester elastomer blend system. *Iranian Polymer Journal* **2013**, 22 (8), 549-560.

[31] Jogi, B. F.; Sawant, M.; Brahmkar, P. K.; Ratna, D.; Tarhekar, M. C. Study of Mechanical and Crystalline Behavior of Polyamide 6/Hytrel/Carbon Nanotubes (CNT) based Polymer Composites. *Procedia Materials Science* **2014**, 6, 805-811.

[32] Unal, H.; Mimaroglu, A.; Alkan, M. Mechanical properties and morphology of nylon-6 hybrid composites. *Polymer International* **2004**, 53 (1), 56-60.

[33] Amin, A. S.; Oza, B. Effect of Untreated Wollastonite on Mechanical Properties of Nylon6. **2015**.

[34] Jape, S. P.; Deshpande, V. D. Investigation into the morphology, crystallization and melting behaviour of nylon 6,6/LCP blends. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* **2019**, 136 (3), 1103-1116.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

สมบัติเชิงกล

ตารางที่ ก.1 ความทนแรงกระแทกของ Re-N6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H, และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

Sample/ specimen no.	Izod impact strength (kJ/m ²)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	Avg	SD
Re-N6	5.6	5.3	5.0	5.7	5.0	6.0	5.3	5.3	5.4	0.3
Re-N6/H 90/10	5.6	6.2	5.0	5.6	6.8	6.0	5.3	5.6	5.8	0.6
Re-N6/H 80/20	6.0	6.2	5.8	6.6	6.0	6.2	5.9	6.1	6.0	0.4
Re-N6/H 70/30	9.0	8.4	8.3	8.8	9.0	8.4	7.9	7.4	8.4	0.5
Re-N6/H 60/40	7.4	6.6	7.1	6.6	8.1	5.0	5.0	6.8	6.6	1.0
Re-N6/H 50/50	7.8	8.2	7.8	6.5	8.4	7.1	6.5	6.5	7.4	0.8
Re-N6/H/WT 70/30/10	2.5	2.4	2.8	2.8	2.8	2.5	2.5	2.5	2.6	0.2
Re-N6/H/WT 70/30/20	3.1	2.8	3.4	3.4	2.8	3.1	2.8	3.1	3.1	0.3
Re-N6/H/WT 70/30/30	2.8	2.8	2.2	2.2	2.8	2.8	2.2	2.5	2.5	0.3

ตารางที่ ก.2 ความทนแรงดึงของ Re-N6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H, และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

Sample/ specimen no.	Tensile strength (MPa)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	Avg	SD
Re-N6	67.1	67.3	68.2	68.6	68.3	68.5	67.9	68.9	68.1	0.6
Re-N6/H 90/10	58.7	60.1	60.2	60.5	61.9	60.4	62.3	60.6	60.6	1.1
Re-N6/H 80/20	55.7	55.9	56.2	55.0	55.8	55.3	55.8	56.0	55.7	0.4
Re-N6/H 70/30	52.9	52.7	53.0	53.0	52.9	52.7	52.6	50.6	52.6	0.8
Re-N6/H 60/40	52.3	52.3	52.2	52.1	50.4	52.2	52.7	51.2	51.9	0.8
Re-N6/H 50/50	44.1	45.7	45.8	45.5	45.5	45.4	44.7	45.9	45.3	0.6
Re-N6/H/WT 70/30/10	60.7	62.5	62.2	62.4	62.8	63.6	62.7	63.3	62.5	0.5
Re-N6/H/WT 70/30/20	65.2	65.4	64.4	66.0	65.1	65.4	65.7	65.1	65.3	0.5
Re-N6/H/WT 70/30/30	69.5	69.3	69.1	69.4	69.9	69.3	69.8	69.2	69.5	0.3

ตารางที่ ก.3 ยั่งส์มอดุลัส ของ Re-N6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H, และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

Sample/ specimen no.	Young's modulus (M)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	Avg	SD
Re-N6	1420	1399	1413	1317	1419	1341	1427	1439	1397	43.7
Re-N6/H 90/10	1256	1131	1300	1314	1336	1280	1325	1299	1280	65.4
Re-N6/H 80/20	1182	1190	1190	1183	1042	1184	1186	1194	1169	51.5
Re-N6/H 70/30	1096	1082	968.5	1094	1105	934.0	1096	1063	1055	66.0
Re-N6/H 60/40	1035	1037	1028	1035	1037	1028	1044	857.9	1013	62.9
Re-N6/H 50/50	918.7	770.4	783.0	907.9	919.3	924.6	744.4	916.5	860.6	79.2
Re- N6/H/WT 70/30/10	1343	1357	1213	1349	1348	1361	1356	1133	1308	84.7
Re- N6/H/WT 70/30/20	1454	1478	1243	1459	1288	1451	1442	1462	1409	88.4
Re- N6/H/WT 70/30/30	1309	1315	1311	1524	1554	1267	1540	1555	1422	122.7

ตารางที่ ก.4 การยืดตัว ณ จุดขาด ของ Re-N6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H, และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

Sample/ specimen no.	Elongation at break (%)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	Avg	SD
Re-N6	105.7	112.8	112.8	122.3	96.7	116.6	121.5	119.2	113.5	8.7
Re-N6/H 90/10	116.0	114.0	112.6	122.3	116.9	115.9	119.0	118.3	116.9	3.1
Re-N6/H 80/20	140.5	128.8	125.0	130.7	125.7	122.6	127.0	128.8	128.6	5.4
Re-N6/H 70/30	123.6	122.8	132.8	128.3	123.7	116.6	121.5	119.2	123.6	5.1
Re-N6/H 60/40	98.3	106.1	109.8	108.5	112.5	101.1	102.0	102.0	105.0	4.9
Re-N6/H 50/50	100.1	110.7	96.9	99.9	98.7	104.2	106.0	100.7	102.1	4.5
Re-N6/H/WT 70/30/10	6.2	7.3	6.8	6.7	7.6	7.2	6.4	6.7	6.9	0.4
Re-N6/H/WT 70/30/20	5.6	5.3	5.5	5.4	5.5	5.7	5.6	5.5	5.5	0.1
Re-N6/H/WT 70/30/30	5.9	5.1	5.6	5.3	5.5	6.0	5.4	4.9	5.5	0.3

ตารางที่ ก.5 ความทนแรงดัดโค้ง ของ Re-N6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H, และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

Sample/ specimen no.	Flexural strength (MPa)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	Avg	SD
Re-N6	105.3	105.6	106.0	106.6	106.1	105.5	105.2	105.2	105.7	0.5
Re-N6/H 90/10	96.2	98.3	96.4	95.7	96.2	94.9	97.3	97.24	96.6	1.0
Re-N6/H 80/20	86.0	87.2	87.0	86.3	87.4	86.4	86.4	85.8	86.6	0.6
Re-N6/H 70/30	82.1	81.6	81.0	80.0	81.9	79.6	80.1	81.9	81.1	1.0
Re-N6/H 60/40	87.1	87.8	87.3	86.7	87.4	87.3	87.2	87.1	87.3	0.3
Re-N6/H 50/50	75.3	75.4	74.4	75.4	75.94	75.5	75.2	76.5	75.5	0.6
Re- N6/H/WT 70/30/10	99.5	99.3	98.5	97.9	98.4	98.4	98.6	99.8	98.8	0.6
Re- N6/H/WT 70/30/20	101.6	102.3	102.6	102.66	102.1	102.3	102.05	102.41	102.3	0.3
Re- N6/H/WT 70/30/30	106.9	106.4	106.0	106.81	106.1	106.6	106.79	106.75	106.6	0.3

ตารางที่ ก.6 มอดุลัสการดัดโค้งของ Re-N6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H, และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

Sample/ specimen no.	Flexural modulus (MPa)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	Avg	SD
Re-N6	997.1	1001	1004	1011	1008	1004	999.4	997.8	1002	5.0
Re-N6/H 90/10	893.5	916.5	907.3	900.4	903.2	887.7	903.8	915.1	903.4	9.8
Re-N6/H 80/20	784.7	797.7	796.4	787.2	801.0	794.8	793.7	788.2	792.9	5.7
Re-N6/H 70/30	750.2	743.7	734.0	720.4	745.6	718.2	732.8	742.7	735.9	11.8
Re-N6/H 60/40	771.2	776.9	766.5	765.7	771.9	770.9	766.9	761.9	769.0	4.7
Re-N6/H 50/50	695.6	697.7	688.8	695.0	700.5	696.4	692.1	707.1	696.7	5.5
Re- N6/H/WT 70/30/10	935.3	924.8	944.3	916.8	928.3	933.9	919.1	923.7	928.3	9.2
Re- N6/H/WT 70/30/20	983.8	984.2	988.7	989.5	972.9	976.3	978.8	1006	985.1	10.5
Re- N6/H/WT 70/30/30	1041	1074	1053	1073	1080	1188	1094	1048	1081	46.5

ภาคผนวก ข

อุณหภูมิการเสียรูปด้วยความร้อนและอุณหภูมิการอ่อนตัวไวแคต

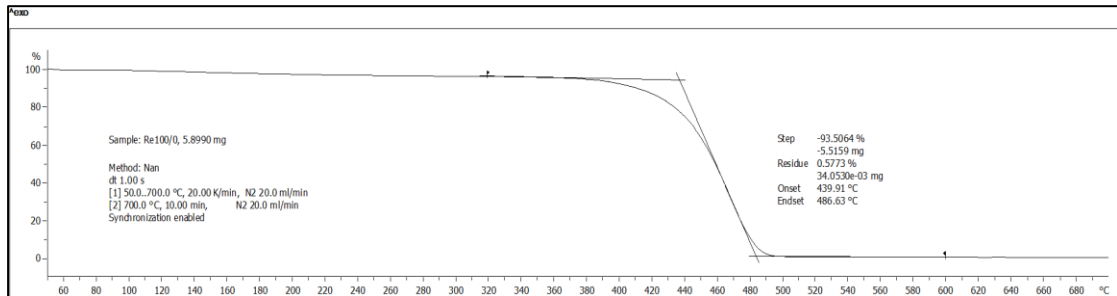
ตารางที่ ข.1 อุณหภูมิการเสียรูปด้วยความร้อนของ Re-N6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H, และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

Sample/ specimen no.	Heat Deflection Temperature (°C)						
	1	2	3	4	5	Avg	SD
Re-N6 100	134.6	134.8	134.7	135.7	134.6	134.9	0.5
Re-N6/H 70/30	136.5	135.9	135.9	135.5	135.7	135.9	0.4
Re-N6/H/WT 70/30/10	163.2	163.8	163.9	163.8	163.9	163.7	0.3
Re-N6/H/WT 70/30/20	165.4	165.5	165.3	165.9	165.0	165.4	0.3
Re-N6/H/WT 70/30/30	169.9	170.8	170.8	169.8	170.8	170.4	0.5

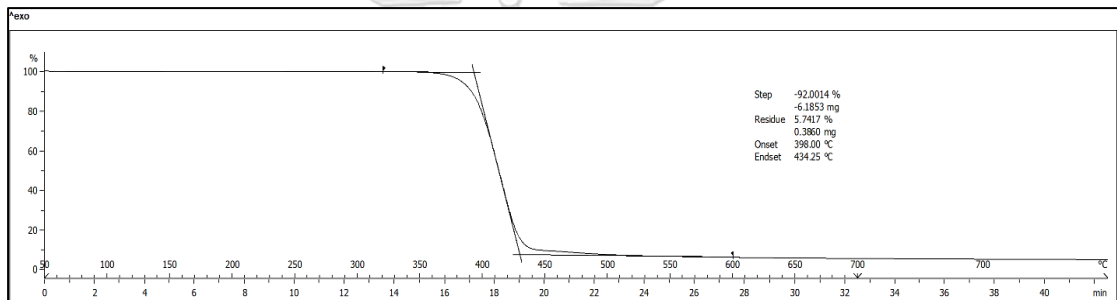
ตารางที่ ข.2 อุณหภูมิการอ่อนตัวไวแคตของ Re-N6, พอลิเมอร์ผสม Re-N6/H, และพอลิเมอร์คอมพอสิต Re-N6/H/WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

Sample/ specimen no.	Vicat softening Temperature (°C)						
	1	2	3	4	5	Avg	SD
Re-N6 100	205.7	205.9	205.6	205.9	206.0	205.8	0.2
Re-N6/H 70/30	203.3	204.1	204.0	203.8	203.8	203.8	0.3
Re-N6/H/WT 70/30/10	205.3	206.3	205.5	205.1	205.5	205.5	0.5
Re-N6/H/WT 70/30/20	206.0	206.2	206.3	206.4	206.2	206.2	0.1
Re-N6/H/WT 70/30/30	206.7	206.5	207.8	206.4	206.2	206.7	0.6

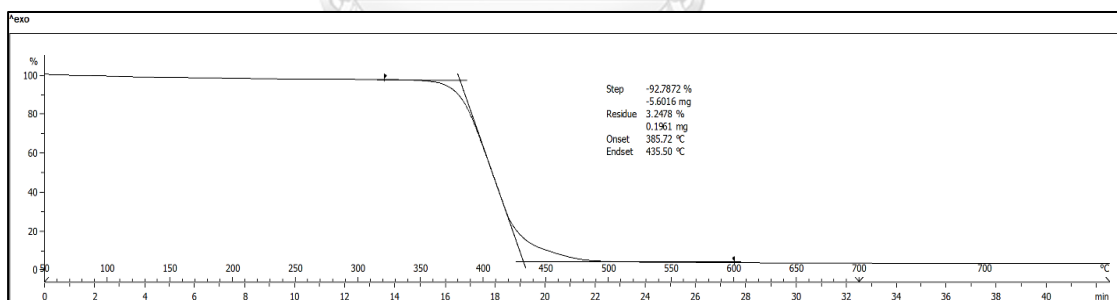
ภาคผนวก ค
เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA



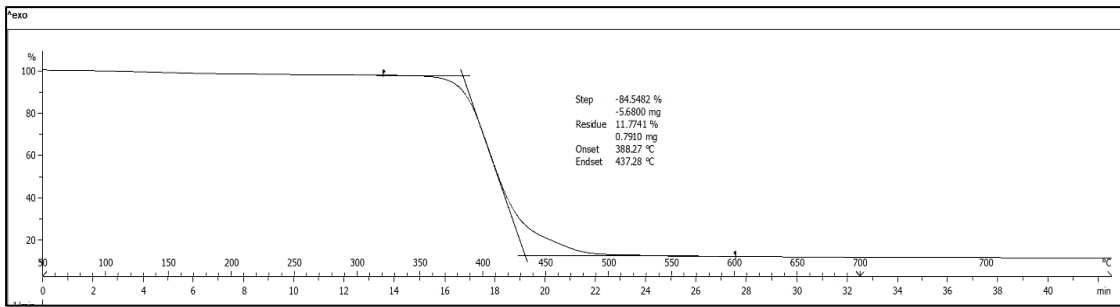
รูปที่ ค.1 TGA เทอร์โมแกรมของ Re-N6



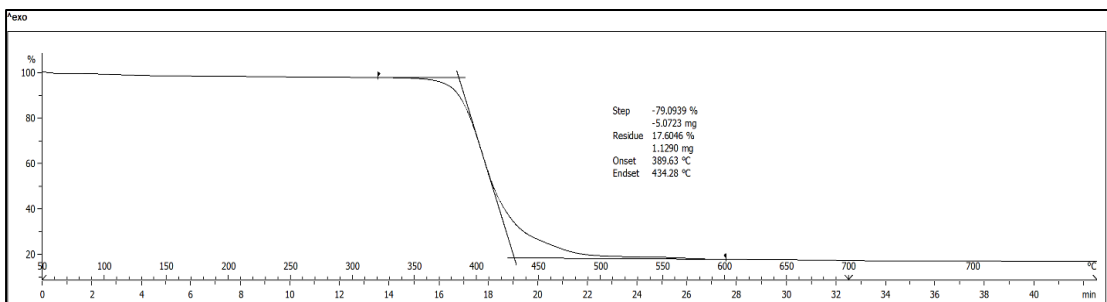
รูปที่ ค.2 TGA เทอร์โมแกรมของไฮทรีล



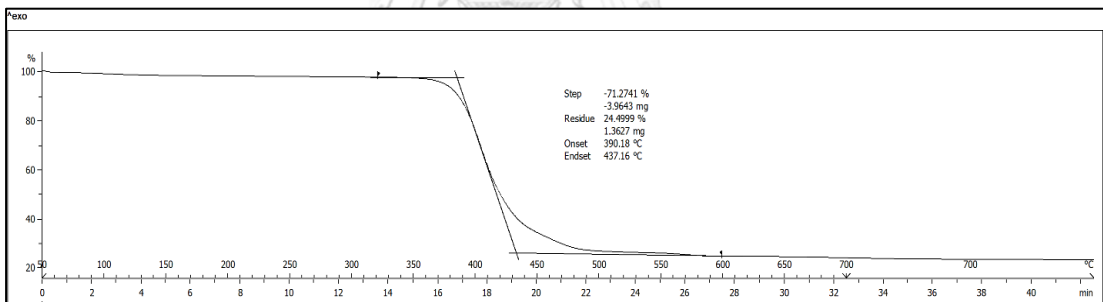
รูปที่ ค.3 TGA เทอร์โมแกรมของ R-N6/H 70/30



รูปที่ ค.4 TGA เทอร์โมแกรมของ R-N6/H/WT 70/30/10



รูปที่ ค.5 รูปที่ ค-5 TGA เทอร์โมแกรมของ R-N6/H/WT 70/30/20



รูปที่ ค.6 รูปที่ ค-6 TGA เทอร์โมแกรมของ R-N6/H/WT 70/30/30

ภาคผนวก ง
เอกสารข้อมูลของผลิตภัณฑ์

PRODUCT INFORMATION

DuPont™ Hytrel® 7246
THERMOPLASTIC POLYESTER ELASTOMER

Product Information

Common features of Hytrel® thermoplastic polyester elastomer include mechanical and physical properties such as exceptional toughness and resilience, high resistance to creep, impact and flex fatigue, flexibility at low temperatures and good retention of properties at elevated temperatures. In addition, it resists many industrial chemicals, oils and solvents. Special grades include heat stabilised, flame retardant, food contact compliant, blow molding and extrusion grades. Concentrates offered include black pigments, UV protection additives, heat stabilisers, and flame retardants.

Hytrel® thermoplastic polyester elastomer is plasticiser free.

The good melt stability of Hytrel® thermoplastic polyester elastomer normally enables the recycling of properly handled production waste. If recycling is not possible, DuPont recommends, as the preferred option, incineration with energy recovery (-24 kJ/g of base polymer) in appropriately equipped installations. For disposal, local regulations have to be observed.

Hytrel® thermoplastic polyester elastomer typically is used in demanding applications in the automotive, fluid power, electrical/electronic, consumer goods, appliance and power tool, sporting goods, furniture, industrial and off-road transportation/equipment industry.

Hytrel® 7246 is a high modulus grade with nominal hardness of 72D. It contains non-discoloring stabilizer. It can be processed by many conventional thermoplastic processing techniques like injection molding and extrusion.

Typical applications:

Tubing, wire and cable jackets, gears and sprockets, oil field parts.

General information	Value	Unit	Test Standard
Resin Identification	TPC-ET	-	ISO 1043
Part Marking Code	>TPC-ET<	-	ISO 11469
Rheological properties	Value	Unit	Test Standard
Melt volume-flow rate	12	cm ³ /10min	ISO 1133
Temperature	240	°C	ISO 1133
Load	2.16	kg	ISO 1133
Melt mass-flow rate	12.5	g/10min	ISO 1133
Melt mass-flow rate, Temperature	240	°C	ISO 1133
Melt mass-flow rate, Load	2.16	kg	ISO 1133
Moulding shrinkage, parallel	1.6	%	ISO 294-4, 2577
Moulding shrinkage, normal	1.6	%	ISO 294-4, 2577
Mechanical properties (TPE)	Value	Unit	Test Standard
Tensile Modulus	525	MPa	ISO 527-1/-2
Yield stress	26	MPa	ISO 527-1/-2
Yield strain	26	%	ISO 527-1/-2
Stress at 5% strain	14	MPa	ISO 527-1/-2
Stress at 10% strain	23	MPa	ISO 527-1/-2
Stress at 50% strain	24	MPa	ISO 527-1/-2
Stress at break	50	MPa	ISO 527-1/-2
Strain at break	>300	%	ISO 527-1/-2
Nominal strain at break	530	%	ISO 527-1/-2
Tear strength, parallel	182	kN/m	ISO 34-1
Tear strength, normal	172	kN/m	ISO 34-1
Abrasion resistance	100	mm ³	ISO 4649
Shore D hardness, max	68	-	ISO 868
Shore D hardness, 15s	64	-	ISO 868
Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
Flexural Modulus	550	MPa	ISO 178
Tensile creep modulus			ISO 899-1
1h	360	MPa	
1000h	310	MPa	

Revised: 2015-02-16

Page: 1 of 15

To find out more, visit [DuPont Performance Polymers](#) or contact nearest DuPont location.

North America

Tel: +1 302 999-4592

Toll-Free (USA): 800 441-0575

Asia Pacific

Tel: +81 3 5521 8600

Europe/Middle East/Africa

Tel: +41 22 717 51 11



Copyright 2014 DuPont. The DuPont Oval Logo is a trademark or registered trademark of E.I. du Pont de Nemours and Company or its affiliates. All rights reserved.

DuPont™ Hytrel® 7246

THERMOPLASTIC POLYESTER ELASTOMER

Charpy notched impact strength			ISO 179/1eA
23 °C	36	kJ/m ²	
-30 °C	8	kJ/m ²	
-40 °C	7	kJ/m ²	
Tensile notched impact strength, 23 °C	300	kJ/m ²	ISO 8256/1
Brittleness temperature	-97	°C	ISO 974
Izod notched impact strength			ISO 180/1A
23 °C	38	kJ/m ²	
-40 °C	7	kJ/m ²	
Thermal properties	Value	Unit	Test Standard
Melting temperature, 10 °C/min	218	°C	ISO 11357-1/-3
Glass transition temperature, 10 °C/min	25	°C	ISO 11357-1/-2
Temp. of deflection under load			ISO 75-1/-2
1.8 MPa	50	°C	
0.45 MPa	100	°C	
Vicat softening temperature			ISO 306
50 °C/h, 50N	140	°C	
50 °C/h, 10N	205	°C	
Coeff. of linear therm. expansion, parallel	200	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Coeff. of linear therm. expansion, normal	200	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Thermal conductivity of melt	0.15	W/(m K)	-
Spec. heat capacity of melt	2150	J/(kg K)	-
Eff. thermal diffusivity	5.44E-8	m ² /s	-
RTI, electrical, 1.5mm	85	°C	UL 746B
RTI, impact, 1.5mm	85	°C	UL 746B
RTI, strength, 1.5mm	75	°C	UL 746B
Flammability	Value	Unit	Test Standard
Burning Behav. at 1.5mm nom. thicken.	HB	class	IEC 60695-11-10
Thickness tested	1.5	mm	IEC 60695-11-10
UL recognition	UL	-	UL 94
Oxygen index	23	%	ISO 4589-1/-2
Electrical properties	Value	Unit	Test Standard
Relative permittivity			IEC 60250
100Hz	4	-	
1MHz	3.5	-	
Dissipation factor			IEC 60250
100Hz	160	E-4	
1MHz	300	E-4	
Volume resistivity	2E10	Ohm*m	IEC 60093
Surface resistivity	>1E15	Ohm	IEC 60093
Electric strength	20	kV/mm	IEC 60243-1
Comparative tracking index	600	-	IEC 60112
Other properties	Value	Unit	Test Standard
Humidity absorption, 2mm	0.2	%	Sim. to ISO 62
Water absorption, 2mm	0.6	%	Sim. to ISO 62
Density	1260	kg/m ³	ISO 1183
Density of melt	1110	kg/m ³	-
Water Absorption, Immersion 24h	0.3	%	ASTM D 570
VDA Properties	Value	Unit	Test Standard
Emission of organic compounds	334	µgC/g	VDA 277
Injection	Value	Unit	Test Standard
Drying Recommended	yes	-	-
Drying Temperature	110	°C	-
Drying Time, Dehumidified Dryer	2 - 3	h	-
Processing Moisture Content	≤0.08	%	-
Melt Temperature Optimum	245	°C	-

Revised: 2015-02-16

Page: 2 of 15

To find out more, visit [DuPont Performance Polymers](#) or contact nearest DuPont location.**North America**

Tel: +1 302 999-4592

Toll-Free (USA): 800 441-0575

Asia Pacific

Tel: +81 3 5521 8600

Europe/Middle East/Africa

Tel: +41 22 717 51 11



Copyright 2014 DuPont. The DuPont Oval Logo is a trademark or registered trademark of E.I. du Pont de Nemours and Company or its affiliates. All rights reserved.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	คุณัญญา จันทร์ฉาย
วัน เดือน ปี เกิด	6 กรกฎาคม 2533
สถานที่เกิด	นครปฐม ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วท.บ. เคมีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ที่อยู่ปัจจุบัน	88 หมู่ 1 ต. หนองชุมพลเหนือ อ. เขาย้อย จ. เพชรบุรี 76140
ผลงานตีพิมพ์	1) Khunanya Janchai, Takumitsu Kida, Takahiro Inoue, Shohei Iwasaki, Masayuki Yamaguchi, “Crystallization Behavior under Flow Field for Isotactic Polypropylene Containing a Fibrous Nucleating Agent”, Polymer Journal, Vol. 54, pp 367–375, 2022 2) Khunanya Janchai, Anyaporn Boonmahitthisud, Phasawat Chaiwuttinan, Saowaroj Chuayjuljit, Intatch Hongrattanavichit, “Property Improvement of Recycled Nylon 6 by Thermoplastic Poly(Ether-Ester) Elastomer and Wollastonite”, Materials Science Forum, Vol. 1053, pp 47–51, 2022 3) Takumitsu Kida, Takeyoshi Kimura, Ayaka Eno, Khunanya Janchai, Masayuki Yamaguchi, Yasuhiko Otsuki, Tokutaro Kimura, Tomoaki Mizukawa, Tomoya Murakami, Kazuki Hato, Tomoya Okawa, “Effect of Ultra-High-Molecular-Weight Molecular Chains on the Morphology, Crystallization, and Mechanical Properties of Polypropylene”, Polymers, Vol. 13, pp 4222, 2021