

ผลของเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์และโวลลาสไทน์ต่อสมบัติของไนลอน 6



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF ETHYLENE-OCTENE COPOLYMER AND WOLLASTONITE ON PROPERTIES OF
NYLON 6



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 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์และโพลลาสโไทนด์ต่อสมบัติของไนลอน 6
โดย	น.ส.บุษยา วิลาวรรณ
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมณีพิสุทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กาวี ศรีกุลกิจ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมณีพิสุทธิ์)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ทิณชีระนันท์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)	

6172404523 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: Nylon 6, Ethylene-octene copolymer, Ethylene-octene copolymer grafted maleic anhydride, Wollastonite

Butsaya Wilawan : EFFECT OF ETHYLENE-OCTENE COPOLYMER AND WOLLASTONITE ON PROPERTIES OF NYLON 6. Advisor: Asst. Prof. ANYAPORN BOONMAHITTHISUD, Ph.D.

In this work, blends of polyamide 6 (PA6) with ethylene-octene copolymer (EOC) and EOC grafted maleic anhydride (EOC-g-MA) were prepared by a melting process using a twin screw extruder and injection molding machine for comparative studying the physical, mechanical, thermal and morphological properties. The impact strength (IS) at 23°C and -30°C of all the PA6/EOC blends was lower than that of the pure PA6 and decreased with increasing EOC content due to their incompatibility. Meanwhile, all the PA6/EOC-g-MA blends exhibited higher IS than the pure PA6. The increase in the IS, especially at high EOC-g-MA contents suggested a high interfacial adhesion between PA6 and EOC-g-MA via hydrogen bonding between the amide and anhydride groups that enhanced the EOC-g-MA particle dispersion in the PA6 matrix as evidenced by scanning electron microscopy images. Moreover, all the blends showed a decrease in the melt flow rate (MFR), specific gravity, tensile properties, flexural properties, rockwell hardness, heat distortion temperature (HDT), degree of crystallinity ($%X_c$), storage modulus and mold shrinkage resistance due to elastomeric behaviors of EOC in the blends. However, all the properties of PA6/EOC-g-MA blends exhibited higher than those of PA6/EOC blends due to the stronger interfacial adhesion. According to a good combination of the mechanical properties, the 85/15 (%wt/%wt) PA6/EOC-g-MA blend was selected for preparing composites with wollastonite (WT) at 10, 20 and 30 phr. The results showed that the specific gravity, Young's modulus, flexural modulus, HDT, storage modulus, mold shrinkage resistance and melt dipping resistance were found to be increased, while the IS at 23°C and -30°C, tensile and flexural strength, elongation at break were decreased due to the low interfacial adhesion between WT and the polymer matrix.

Field of Study: Petrochemistry and Polymer Science Student's Signature

Academic Year: 2020 Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์เป็นเพราะได้รับคำแนะนำด้านวิชาการ ความเอื้อเฟื้อเพื่อเครื่องมือ วัสดุดิบและสถานที่ทำงานวิจัย อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือ และการแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่าง ๆ อย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายนามดังนี้

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมหิทธิสุทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในการทำวิจัยอย่างดียิ่งตลอดการทำงานวิจัยนี้ รวมถึงการแนะนำแนวทางการจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

2. รองศาสตราจารย์ ดร.ภาวิ ศรีกุลกิจ ที่สละเวลามาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

3. รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา หิญาชีระนันท์ ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบ

4. รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

5. บริษัท อุเบะเคมีคอลส์ (เอเชีย) จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบ และเครื่องมือทดสอบต่าง ๆ

6. บริษัท ดาว เคมีคอล ประเทศไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และเพื่อน ๆ ที่สนับสนุนให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ ในระหว่างการทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

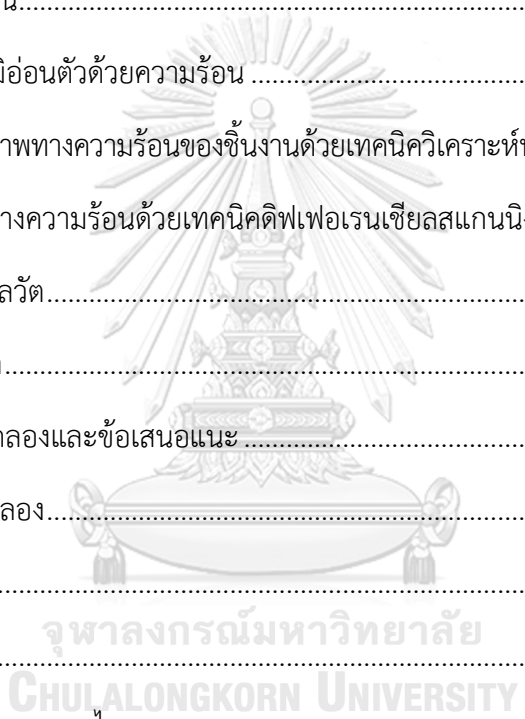
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์.....	4
2.1 ไนลอน 6 (nylon 6) หรือ พอลิเอไมด์ 6 (polyamide 6)	4
2.2 พอลิเมอร์ผสม (polymer blends).....	5
2.2.1 ประเภทของพอลิเมอร์ผสม.....	6
2.2.1.1 การผสมพอลิเมอร์ที่ผสมเข้ากันได้.....	6
2.2.1.2 การผสมพอลิเมอร์ที่เข้ากันได้บางส่วน.....	6
2.2.1.3 การผสมพอลิเมอร์ที่ไม่ผสมเข้ากันได้.....	6
2.2.2 วิธีการผสมเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้.....	6
2.2.2.1 การผสมเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์.....	6
2.2.2.2 การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์.....	7
2.2.2.3 การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา.....	7
2.2.2.4 การทำให้เกิดปฏิกิริยากาฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมโรไลเซชันในระหว่างผสม... 7	7

2.3	เอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์ (ethylene-octene copolymer, EOC).....	8
2.4	เอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (ethylene-octene copolymer graft maleic anhydride, EOC-g-MA).....	9
2.5	วัสดุคอมพอสิต (composite materials)	9
2.5.1	วัสดุคอมพอสิตที่ใช้พอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ (polymer matrix composite, PMC)	11
2.5.1.1	เมทริกซ์เทอร์โมเซตติง (thermosetting matrix)	11
2.5.1.2	เมทริกซ์เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic matrix).....	11
2.5.2	วัสดุคอมพอสิตที่ใช้โลหะเป็นเมทริกซ์ (metal matrix composite, MMC).....	12
2.5.3	วัสดุคอมพอสิตที่ใช้เซรามิกเป็นเมทริกซ์ (ceramic matrix composite, CMC).....	12
2.6	สารตัวเติมและสารเสริมแรง (filler and reinforcing fillers).....	14
2.7	โวลลาสโทไนต์ (wollastonite).....	14
2.8	การผสมพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการอัดรีดประเภทสกรูคู่ (twin screw extruder).....	16
2.9	การขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ (injection molding)	18
2.10	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	22
3.1	วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	22
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ	22
3.3	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ	23
3.4	วิธีการเตรียมพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต	23
3.4.1	ขั้นตอนการทดลอง.....	23
3.4.2	เตรียมพอลิเมอร์ผสมของไนลอน 6/เอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์ และไนลอน 6/เอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	24
3.4.3	เตรียมคอมพอสิตของไนลอน 6/เอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์/โวลลาสโทไนต์.....	25
3.5	การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ (injection molding).....	26

3.6 การทดสอบสมบัติ.....	26
3.6.1 การตรวจสอบสัมมูลานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	26
3.6.2 การทดสอบดรรชนีการหลอมไหล.....	27
3.6.3 การทดสอบความถ่วงจำเพาะ	27
3.6.4 การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก.....	28
3.6.5 การทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง	29
3.6.6 การทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง.....	30
3.6.7 การทดสอบความแข็งแบบรีอคเวลล์.....	31
3.6.8 การทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อน.....	31
3.6.9 การทดสอบการหดตัว (mold shrinkage).....	32
3.7 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิควิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน	33
3.8 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี	33
3.9 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงพลวัต.....	34
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	35
4.1 ลักษณะชิ้นงานทดสอบ.....	35
4.2 สัมมูลานวิทยา.....	36
4.3 ดรรชนีการหลอมไหล	38
4.4 ความถ่วงจำเพาะ	40
4.5 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ	41
4.5.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA.....	43
4.5.1.1 ความทนแรงกระแทก	43
4.5.1.2 สมบัติความทนแรงดึง	44
4.5.1.3 สมบัติความทนแรงดัดโค้ง	46
4.5.1.4 ความแข็งแบบรีอคเวลล์.....	48

4.5.2 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิต PA6/EOC-g-MA/WT	48
4.5.2.1 ความทนแรงกระแทก	48
4.5.2.2 สมบัติความทนแรงดึง	49
4.5.2.3 สมบัติความทนแรงดัดโค้ง	51
4.5.2.4 ความแข็งแบบรีอควาลล์	52
4.6 การหดตัวในแม่แบบ	53
4.7 สมบัติความร้อน	55
4.6.1 อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อน	57
4.6.2 เสถียรภาพทางความร้อนของชิ้นงานด้วยเทคนิควิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน	58
4.6.3 สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี	59
4.8 สมบัติเชิงกลพลวัต	62
4.9 การหลอมหยด	65
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	67
5.1 สรุปผลการทดลอง	67
5.2 ข้อเสนอแนะ	68
บรรณานุกรม	69
ภาคผนวก ก ดรรรชนีการหลอมไหล	73
ภาคผนวก ข ความถ่วงจำเพาะ	74
ภาคผนวก ค สมบัติเชิงกล	75
ภาคผนวก ง อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อน	83
ภาคผนวก จ เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA	84
ประวัติผู้เขียน	90



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของไนลอน 6	4
รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาของกระบวนการเกิดไนลอน 6	5
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์	9
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์	9
รูปที่ 2.5 การจำแนกประเภทของวัสดุคอมพอสิตตามชนิดของเมทริกซ์และลักษณะของสารเสริมแรง	10
รูปที่ 2.6 อนุภาครูปเข็มของโพลลาสโตนต์	15
รูปที่ 2.7 แสดงส่วนประกอบของเครื่องอัดรีด	16
รูปที่ 2.8 ลักษณะการหมุนของเกลียวหนอนคู่	18
รูปที่ 2.9 แสดงส่วนประกอบของเครื่องฉีดแบบ	19
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง	24
รูปที่ 3.2 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่	25
รูปที่ 3.3 เครื่องฉีดแบบ	26
รูปที่ 3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	27
รูปที่ 3.5 เครื่องวัดดรรชนีการลอมไหล	27
รูปที่ 3.6 เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ	28
รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก	28
รูปที่ 3.8 เครื่องบาคชิ้นงาน	29
รูปที่ 3.9 ชั้นทดสอบแรงดึง	29
รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง	30
รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบด้านความทนแรงดัดโค้ง	30
รูปที่ 3.12 ชั้นทดสอบแรงดัดโค้ง	31

รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบความแข็งแบบรีอคเวลล์	31
รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อน	32
รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์ดิจิตอล.....	32
รูปที่ 3.16 ชิ้นงานทดสอบการหดตัว	32
รูปที่ 3.17 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA)	33
รูปที่ 3.18 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี (DSC).....	34
รูปที่ 3.19 การทดสอบโหมตคานยัน	34
รูปที่ 3.20 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงพลวัต (DMA).....	34
รูปที่ 4.1 ชิ้นงานทดสอบของ (a) PA6, (b-e) พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC ที่อัตราส่วน 95/5, 90/10, 85/15 และ 80/20 ตามลำดับ และ (f-i) พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC-g-MA ที่อัตราส่วน 95/5, 90/10, 85/15 และ 80/20 ตามลำดับ	35
รูปที่ 4.2 ชิ้นงานทดสอบของ (a) PA6, (b) พอลิเมอร์ผสม 85/15 PA6/EOC และ (c-d) 85/15 PA6/EOC คอมพอสิตด้วย WT ปริมาณ 10, 20 และ 30 phr ตามลำดับ	35
รูปที่ 4.3 สัณฐานวิทยาของ (a) PA6, (b-e) พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC ที่อัตราส่วน 95/5, 90/10, 85/15 และ 80/20 ตามลำดับ และ (f-i) พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC-g-MA ที่อัตราส่วน 95/5, 90/10, 85/15 และ 80/20 ตามลำดับ ภายใต้กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	36
รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของ (a) WT และ (b-d) คอมพอสิตของ 85/15 PA6/EOC-g-MA ด้วย WT ปริมาณ 10, 20 และ 30 phr ตามลำดับ ภายใต้กำลังขยาย 1,000 เท่า	37
รูปที่ 4.5 ดรรชนีการหลอมไหลของ PA6 พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่องค์ประกอบต่าง ๆ.....	39
รูปที่ 4.6 ดรรชนีการหลอมไหลของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr.....	39
รูปที่ 4.7 ความถ่วงจำเพาะของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่องค์ประกอบต่าง ๆ.....	40
รูปที่ 4.8 ความถ่วงจำเพาะของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr.....	41

รูปที่ 4.9	ความทนแรงกระแทกที่อุณหภูมิ (a) 23 องศาเซลเซียส และ (b) -30 องศาเซลเซียส ของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่องค์ประกอบต่าง ๆ	43
รูปที่ 4.10	ความทนแรงดึงของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่องค์ประกอบต่าง ๆ	44
รูปที่ 4.11	การยืดตัว ณ จุดขาดของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่องค์ประกอบต่าง ๆ.....	45
รูปที่ 4.12	ยังสัมมอดูลัสของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่ องค์ประกอบต่าง ๆ.....	46
รูปที่ 4.13	ความทนแรงดัดโค้งของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่ องค์ประกอบต่าง ๆ	47
รูปที่ 4.14	ความทนแรงดัดโค้งของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่ องค์ประกอบต่าง ๆ	47
รูปที่ 4.15	ความแข็งแบบบรีคเวลล์ของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่องค์ประกอบต่าง ๆ.....	48
รูปที่ 4.16	ความทนแรงกระแทกที่อุณหภูมิ (a) 23 องศาเซลเซียส และ (b) -30 องศาเซลเซียส ของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr.....	49
รูปที่ 4.17	ความทนแรงดึงของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr.....	50
รูปที่ 4.18	การยืดตัว ณ จุดขาดของ ของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr	50
รูปที่ 4.19	ยังสัมมอดูลัสของ ของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr.....	51
รูปที่ 4.20	ความทนแรงดัดโค้งของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr.....	51
รูปที่ 4.21	ความทนแรงดัดโค้งของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr.....	52

รูปที่ 4.22	ความแข็งแบบรีอเคเวลล์ของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr.....	53
รูปที่ 4.23	การหดตัว (a) การหดตัวในทิศทางแนวการไหล (MD), (b) การหดตัวในทิศทางขวางการไหล (TD) ของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่องค์ประกอบต่าง ๆ	54
รูปที่ 4.24	การหดตัว (a) การหดตัวในทิศทางแนวการไหล (MD), (b) การหดตัวในทิศทางขวางการไหล (TD) ของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr.....	55
รูปที่ 4.25	อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่องค์ประกอบต่าง ๆ	57
รูปที่ 4.26	ความถ่วงจำเพาะของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr.....	58
รูปที่ 4.27	DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่องค์ประกอบต่าง ๆ	59
รูปที่ 4.28	DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ PA6 และ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr.....	60
รูปที่ 4.29	DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัวของ PA6 และพอลิเมอร์ผสมของ PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ	60
รูปที่ 4.30	DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัวของ PA6 และ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr.....	61
รูปที่ 4.31	สมบัติเชิงกลพลวัตมอดุลัสสะสม (E') ของ PA6 และพอลิเมอร์ผสมของ PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ	63
รูปที่ 4.32	สมบัติเชิงกลพลแทนเจนต์สัญญาณสูญเสีย (tan delta) ของ PA6 และพอลิเมอร์ผสมของ PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ	63
รูปที่ 4.33	สมบัติเชิงกลพลวัตมอดุลัสสะสม (E') ของ PA6 และ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr.....	64

- รูปที่ 4.34 สมบัติเชิงกลพลแทนเจนต์สูญเสีย ($\tan \delta$) ของ PA6 และ 85/15/x
PA6/EOC-g-MAWT คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr..... 65
- รูปที่ 4.35 ชิ้นงานหลังทดสอบการหลอมหยดของ PA6 และ 85/15/x PA6/EOC-g-MAWT
คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr..... 66



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมและอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต.....	25
ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมและอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต (ต่อ)	26
ตารางที่ 4.1 ดรรชนีการหลอมไหลและความถ่วงจำเพาะขององค์ประกอบต่าง ๆ	38
ตารางที่ 4.2 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ.....	42
ตารางที่ 4.3 สมบัติทางความร้อน	56
ตารางที่ 4.4 สมบัติเชิงกลพลวัต.....	62



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไนลอน 6 (nylon 6) เป็นหนึ่งในพลาสติกวิศวกรรมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมรถยนต์ พบว่ามีการนำไนลอน 6 ไปผลิตเป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดี เสถียรภาพทางความร้อนที่ดี (ทนความร้อนได้ดีในระยะยาวในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 80–180 องศาเซลเซียส) และทนต่อรอยขีดข่วนได้ดี โดยเฉพาะชิ้นส่วนในห้องเครื่องยนต์ เช่น ฝาครอบห้องเครื่อง (engine cover) หรือในส่วนที่ได้รับแรงสั่นสะเทือน ๆ เช่น ปกของเข็มขัดนิรภัย (seatbelt buckle) ถึงแม้ว่าไนลอน 6 จะมีสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีดังที่กล่าวมา หากแต่มีข้อเสียในเรื่องของความทนแรงกระแทกต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) ของไนลอน 6 มีค่าค่อนข้างสูงประมาณ 50–60 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อนำไนลอน 6 ไปทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่มีความโค้งงอ หรือการนำไปใช้งานที่มีการหักงอหรือพบพบว่าชิ้นงานเกิดการแตกหักได้ง่ายเป็นอุปสรรคต่อการใช้งาน นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อชิ้นงานไนลอน 6 เกิดความเสียหายเมื่อได้รับแรงกระแทกส่งผลให้ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานจะเป็นแบบเปราะ (brittle fracture) [1] และมีอัตราการขยายวงกว้างของรอยแตก (crack propagation rate) อย่างรวดเร็ว เป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งในการออกแบบและนำไปใช้งาน โดยการปรับปรุงความเหนียวและความทนแรงกระแทกของไนลอน 6 สามารถทำได้โดยการเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมกับพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่น ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ยุ่งยากซับซ้อนและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในระดับอุตสาหกรรม

เมทัลโลซีนอีลาสโตเมอร์ (metallocene elastomers) หรือพอลิโอเลฟินส์อีลาสโตเมอร์ (polyolefin elastomers) จัดเป็นโคพอลิเมอร์ของเอทิลีนกับอัลฟาโอเลฟินส์อื่น ๆ เช่น บิวทีนหรือออกทีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเมทัลโลซีนในการเกิดพอลิเมอร์ของเอทิลีนกับพอลิเมอร์ร่วม (บิวทีนหรือออกทีน) ดังนั้น โครงสร้างของพอลิโอเลฟินส์อีลาสโตเมอร์จึงประกอบไปด้วยสายโซ่หลักที่เป็นพอลิเอทิลีนและมีเอทิลีนออกทีนหรือเอทิลีนบิวทีนเป็นบล็อกคอปอลิเมอร์มาต่อ เมื่อมีช่องว่างระหว่างสายโซ่มากเนื่องจากขนาดของออกทีนที่เข้ามาเชื่อมต่อ ดังนั้นช่องว่างภายในโครงสร้างจึงเป็นตัวกำหนดลักษณะความยืดหยุ่น ด้วยเหตุนี้ทำให้พอลิโอเลฟินส์อีลาสโตเมอร์สามารถช่วยปรับปรุงความ

ทนแรงกระแทกได้ เอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์ (ethylene-octene copolymer, EOC) เป็นหนึ่งในพอลิโอเลฟินส์ออลาสโตเมอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัทดาวดูปองท์ ซึ่งมีการกระจายตัวที่ดีในพอลิเมอร์ผสมเมื่อนำมาผสมด้วยกระบวนการอัดรีดเนื่องจากมีอัตราการไหล (melt mass flow rate, MFR) สูงและมีรูปแบบของการอัดเป็นเม็ดพลาสติกจึงง่ายต่อขั้นตอนการผสมก่อนนำไปเข้ากระบวนการขึ้นรูป [2]

อย่างไรก็ตามการผสมพอลิเมอร์ทั้งชนิดให้เป็นเนื้อเดียวกันสามารถทำได้ยากเนื่องจากสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกัน ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไม่เป็นไปตามที่ต้องการ ดังนั้นจึงมีการนำพอลิเมอร์มาทำการปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันเพื่อให้ง่ายต่อการนำมาใช้เตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (ethylene-octene copolymer grafted maleic anhydride, EOC-g-MA) นิยมใช้ในการนำมาผสมกับไนลอน เนื่องจากกลุ่มอะมิโนของไนลอนสามารถเกิดปฏิกิริยากับแอนไฮไดรด์ได้ง่าย [3]

อย่างไรก็ตามการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ต้องการความแข็งแรงสูง ปัจจุบันพบว่าเส้นใยแก้ว (glass fiber) ถูกนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล เสถียรภาพทางความร้อน และความคงทนต่อการเปลี่ยนรูป (shrinkage) โดยในอุตสาหกรรมยานยนต์พบว่านิยมนำไนลอน 6 มาผสมกับเส้นใยแก้วเพื่อผลิตชิ้นส่วนที่สัมผัสกับความร้อน หากแต่ความแข็งแรงของเส้นใยแก้วส่งผลต่อผิวของสกรูที่ใช้ในการผสมและในกระบวนการฉีดพลาสติก ทำให้เกิดการกัดกร่อนกับผิวของสกรู นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับความเป็นพิษของเส้นใยแก้วต่อปอดและระบบทางเดินหายใจ พบว่าเส้นใยแก้วอาจก่อให้เกิดโรคมะเร็งปอด, เยื่อหุ้มปอด, เยื่อหุ้มช่องท้องและมะเร็งอื่น ๆ [4] ดังนั้นการหาวัสดุเสริมแรงอื่น ๆ มาทดแทนเส้นใยแก้วจึงได้รับความสนใจมากขึ้น โดยในงานวิจัยนี้สนใจนำวอลลาสโทไนต์ (wollastonite) ซึ่งเป็นแร่อนินทรีย์ที่มีส่วนประกอบของแคลเซียมและซิลิกอนออกไซด์ (CaSiO_3) มีลักษณะอนุภาคเป็นรูปเข็มที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (aspect ratio) สูง [5] คล้ายคลึงกับเส้นใยแก้ว มาใช้ทดแทนเส้นใยแก้วเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์ โดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์และเครื่องจักร

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะทำการปรับปรุงสมบัติของไนลอน 6 ด้วยการใช้เตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมกับเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์ และเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์ กราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ นอกจากนี้ยังทำการเตรียมเป็นคอมพอสิตกับวอลลาสโทไนต์ ซึ่งเป็นสารตัว

เติมอินทรีที่มีอนุภาครูปเข็ม มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงและมีราคาถูก เพื่อใช้ทดแทนเส้นใยแก้วสำหรับปรับปรุงสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางความร้อนของผลิตภัณฑ์

1.2 วัตถุประสงค์

1. เตรียมพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตด้วยไนลอน 6, เอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์, เอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์และโพลลาสโทไนต์ ที่อัตราส่วนต่าง ๆ และขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลพลวัต และสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตที่เตรียมได้

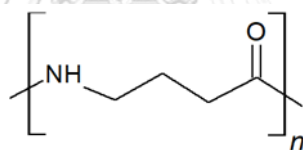


บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 ไนลอน 6 (nylon 6) หรือ พอลิเอไมด์ 6 (polyamide 6)

ไนลอนเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์พวกพอลิเอไมด์ที่มีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.1 เป็นเทอร์โมพลาสติกกึ่งผลึก (semi-crystalline) ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลที่ดี ทนต่ออุณหภูมิสูง และมีความต้านทานไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถนำไปขึ้นรูปด้วยเทคนิคต่าง ๆ รวมถึงกระบวนการฉีด (injection molding) การเป่า (blow) การขึ้นรูปแบบหมุน (rotational molding) และการอัดรีด (extrusion) นับเป็นพลาสติกวิศวกรรมที่มีประสิทธิภาพสูงและถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมยานยนต์ การเติบโตที่ผ่านมาจากไนลอนในอุตสาหกรรมยานยนต์ พบการนำไนลอนไปผลิตเป็นชิ้นส่วนทดแทนโลหะ (เหล็กต่าง ๆ และโลหะผสมอลูมิเนียมและแมกนีเซียม) และพลาสติกที่มีราคาแพงรวมถึงเทอร์โมเซตต่าง ๆ



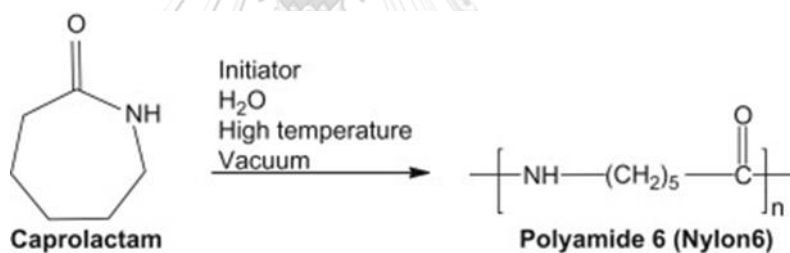
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของไนลอน 6

การสังเคราะห์ไนลอน เริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1929 โดย วอลเลซ เอช คาโรเทอร์ (Wallace H. Carothers) นักเคมี ชาวอเมริกัน ซึ่งเป็นนักวิจัยของบริษัทดูปองต์ ได้พยายามสังเคราะห์และศึกษาสมบัติของพอลิเอไมด์และพอลิเอสเทอร์หลายชนิดควบคู่กันไป พบว่าในบรรดาพอลิเมอร์ที่เตรียมขึ้นในขณะนั้น ไนลอน 6, 6 มีสมบัติที่ดีและมีความเป็นไปได้มากที่สุดที่จะนำไปผลิตในเชิงการค้า จึงได้มุ่งพัฒนาจนถึงขั้นผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ในปี 1938 และได้รับการเผยแพร่อย่างกว้างขวางในสหรัฐอเมริกา ก่อนสงครามโลกครั้งที่ 2 [6]

ผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากไนลอน 6, 6 ได้รับความนิยมตั้งแต่ผลิตมาจนกระทั่งปัจจุบัน จากความสำเร็จนี้ ได้มีการค้นคว้าวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการอื่น ๆ ทั่วโลก เพื่อสังเคราะห์พอลิเอไมด์อื่น ๆ เพื่อแข่งขันกับไนลอน 6, 6 ซึ่งประสบความสำเร็จเช่นกัน คือการสังเคราะห์ไนลอน 6 และสามารถทำ

เป็นผลิตภัณฑ์วางตลาดได้ในปี ค.ศ. 1940 โดย พอล ชแลค (Pual Schlack) ซึ่งทำงานให้กับบริษัท I.G. Farbenindustrie ของเยอรมัน [7]

ไนลอน 6 สามารถสังเคราะห์ได้จากการนำเอา cyclohexanone ไปทำปฏิกิริยากับ NH_2OH ตามด้วยปฏิกิริยากับ H_2SO_4 ก็จะได้สารประกอบที่เรียกว่า caprolactam จากนั้นนำ caprolactam นี้ไปทำปฏิกิริยา hydrolysis (ใช้น้ำทำให้โมเลกุลแตกออก) ก็จะได้สารประกอบ 6-aminohexanoic acid ที่ตัวโมเลกุลนั้นมีหมู่ $-\text{COOH}$ อยู่ที่ปลายสายโซ่ด้านหนึ่ง และหมู่ $-\text{NH}_2$ อยู่ที่ปลายสายโซ่อีกด้านหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ดังนั้นตัวโมเลกุล 6-aminohexanoic acid เองสามารถเกิดการเชื่อมต่อโมเลกุลเข้าด้วยกันกลายเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ได้ด้วยการที่มันเอาหมู่ $-\text{COOH}$ ของโมเลกุลหนึ่งไปเชื่อมต่อกับหมู่ $-\text{NH}_2$ ของอีกโมเลกุลหนึ่งโดยมีการคายโมเลกุล H_2O ออกมา ได้พอลิเมอร์ที่มีชื่อว่า Nylon 6 โดยเลข 6 เพียงตัวเดียวในที่นี้หมายถึงมีการใช้โมโนเมอร์เพียงตัวเดียวที่มีจำนวนอะตอม C 6 อะตอม



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาของกระบวนการเกิดไนลอน 6 [7]

2.2 พอลิเมอร์ผสม (polymer blends)

พอลิเมอร์ผสมคือ การนำพอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมกัน เพื่อช่วยในการปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงสมบัติของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ขึ้นมา ซึ่งในปัจจุบันการผลิตพอลิเมอร์ผสมกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมมีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ขึ้นมา แต่การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ที่ต่างชนิดกันนั้น เป็นไปได้ยาก ดังนั้นพอลิเมอร์ที่ได้จึงมักพบในรูปแบบที่พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งจะกระจายอยู่ในเนื้อหรือเมทริกซ์ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งการกระจายตัวดังกล่าวต้องเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ มิฉะนั้นจะก่อให้เกิดข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ และส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมต่ำกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ได้ [8]

2.2.1 ประเภทของพอลิเมอร์ผสม

2.2.1.1 การผสมพอลิเมอร์ที่ผสมเข้ากันได้

(miscible of polymer blend)

การผสมประเภทนี้สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อพอลิเมอร์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันในระดับโมเลกุลเกิดเป็นพอลิเมอร์ชนิดใหม่และมีสมบัติผสมผสานของพอลิเมอร์ที่นำมาผสม โดยสมบัติต่าง ๆ จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการผสม ความเข้ากันได้ในลักษณะนี้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์สูง ในรูปแบบพันธะไฮโดรเจน หรือเกิดผลึกร่วมกัน เป็นต้น เช่น PPO/PS และ PBT/PET

2.2.1.2 การผสมพอลิเมอร์ที่เข้ากันได้บางส่วน

(partially miscible of polymer blend)

การผสมของพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ แต่จะเกิดการแยกเฟส โดยมีพอลิเมอร์ที่ใช้ปริมาณมากกว่าเป็นเฟสต่อเนื่อง (continuous matrix phase) และแสดงสมบัติเด่นกว่าพอลิเมอร์ที่มีปริมาณน้อยกว่าเป็นเฟสกระจาย (dispersed phase) ถ้าเฟสทั้งสองกระจายอย่างดีและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันดี จะส่งผลให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น

2.2.1.3 การผสมพอลิเมอร์ที่ไม่ผสมเข้ากันได้

(immiscible of polymer blends)

การผสมของพอลิเมอร์ที่ผสมไม่เข้ากันจะตรงกันข้ามกับการผสมพอลิเมอร์ที่เข้ากันได้ คือจะไม่เกิดการผสมที่ระดับโมเลกุล ซึ่งจะเกิดสัญญาณวิทยาที่แตกต่างกันในระดับไมโครหรือระดับนาโน เช่น PET/PP ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีสมบัติที่ด้อย เนื่องจากเกิดการแยกเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิดอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างต่ำ สมบัติเชิงกลแย่ และทำให้ตัวทำละลายแพร่เข้าไปได้ง่าย

2.2.2 วิธีการผสมเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้

เทคนิคที่ใช้ในการผสมเพื่อเพิ่มความความสามารถในการเข้ากันได้ และทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติตามที่ต้องการมีหลายเทคนิค ดังนี้

2.2.2.1 การผสมเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์

(thermodynamic miscibility)

ความสามารถในการเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกซ์ หลักการนี้ขึ้นอยู่กับสมดุลระหว่างเอนทัลปีและเอนโทรปีของการผสมที่มีต่อพลังงานเสรีของการผสม (free energy of mixing) การเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสมแสดงได้ดังสมการ

$$\Delta G_m = \Delta H_m - T\Delta S_m$$

โดยที่ ΔG_m = การเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสม

ΔH_m = การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการผสม

ΔS_m = การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการผสม

T = อุณหภูมิ (K)

2.2.2.2 การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์

(addition of block or graft copolymers)

การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมในการผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ โดยโคพอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมที่จะไปอยู่ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ซึ่งโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการผสม

2.2.2.3 การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา

(addition of functional/reactive polymers)

การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยในการผสม บางครั้งเป็นการนำพอลิเมอร์มาทำการผสมดัดแปลงให้มีหมู่ฟังก์ชัน หรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวต้องสามารถเกิดปฏิกิริยา หรือมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล กับพอลิเมอร์ชนิดที่สองได้ ซึ่งกระบวนการดัดแปลงพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์หรือโดยผ่านกระบวนการอัดรีด เช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่กราฟต์บนสายโซ่ของพอลิเอเลฟินส์ โดยที่หมู่คาร์บอกซิลิกของมาเลอิกแอนไฮไดรด์มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับหมู่อะมิโนของพอลิเอไมด์ได้

2.2.2.4 การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ไรเซชันในระหว่างผสม

(in-situ grafting polymerization)

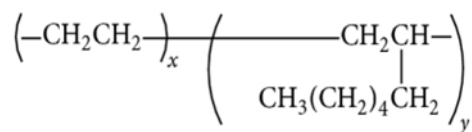
การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ไรเซชันในระหว่าง การผสม หรือ reactive blending เป็นวิธีใหม่ที่ใช้ในการผสมเพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ อีกชนิดหนึ่งได้ โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยผสม แม้ว่าในบางครั้งการผสมแบบไม่ต่อเนื่องสามารถ นำมาใช้ผสมแบบ reactive blending ได้ แต่การใช้กระบวนการผสมแบบต่อเนื่อง เช่นการอัดรีดแบบ สกรูเดี่ยว (single-screw extruder) และการอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin-screw extruder) ก็ได้รับความ นิยมเช่นกัน เพราะสามารถควบคุมอุณหภูมิและการดำเนินไปของปฏิกิริยาได้ดีกว่า [9]

2.3 เอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์ (ethylene-octene copolymer, EOC)

เอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์ ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.3 ถูกใช้เป็นตัว ปรับปรุงความทนแรงกระแทก (impact modifiers) ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัทดาวเคมีคอล (Dow Chemical Company) จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเมทาโลซีน (metallocene catalyst) ปัจจุบันเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น เพราะสามารถควบคุมระดับของ สายโซ่กิ่งตามสายโซ่โมเลกุลหลักได้ โดยมีการกระจายตัวของออกทีนในสายโซ่หลักอย่างสม่ำเสมอ รวมทั้งมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลและองค์ประกอบที่แคบ ซึ่งมีผลทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติ ด้านการไหล (rheology) เช่น พฤติกรรมแรงเฉือนลด (shear thinning) และความสามารถใน การขึ้นรูปแบบหลอมเหลว (melt processability) นอกจากนี้ เอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์ยังอยู่ ในลักษณะเป็นเม็ดซึ่งช่วยให้ขนส่งได้สะดวกและผสมได้ง่าย [2]

สมบัติของเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของโอเลฟินส์ที่ใส่เข้าไปเมื่อ ปริมาณโอเลฟินส์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้โคพอลิเมอร์เปลี่ยนจากของแข็งที่มีโครงสร้างแบบกิ่งผลึกที่แข็ง ดิ่งไปเป็นออสโตเมอร์แบบอสัณฐานที่มีความนิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ สมบัติของเอทิลีน-ออกทีนโค พอลิเมอร์ยังขึ้นอยู่กับขนาด และความยาวของส่วนที่เป็นโซ่กิ่งอีกด้วย

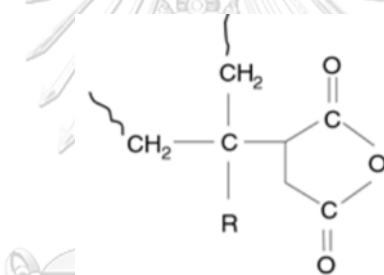
เอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์เป็นสารที่มีความสมดุลระหว่างความแข็งตึง และความเหนียว ทำให้เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการความทนแรงกระแทกสูง การที่เอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์ยังมี สมบัติการไหลที่ดี ทำให้สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานบาง ๆ ได้ดี เป็นการช่วยประหยัดวัตถุดิบ และลด ต้นทุนการผลิต



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์ [2]

2.4 เอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (ethylene-octene copolymer graft maleic anhydride, EOC-g-MA)

เอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.4 เป็นการนำเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์มาปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันโดยการกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เพื่อให้เกิดพันธะเคมีระหว่างพอลิเมอร์ที่ต่างชนิดให้ยึดเกาะกันได้ดีขึ้น สามารถปรับปรุงโครงสร้างของพอลิเมอร์ผสมให้สามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดียิ่งขึ้นไปด้วย



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ [3]

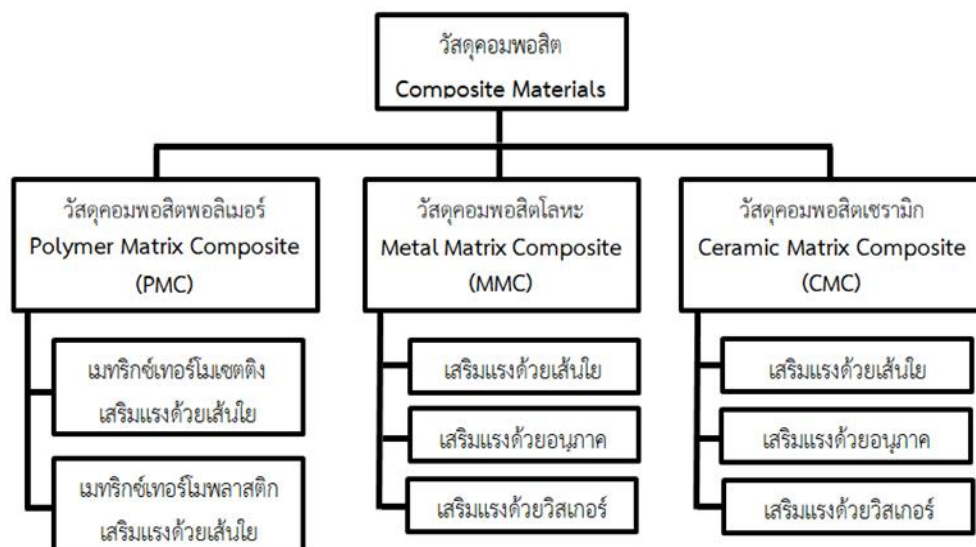
การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างไนลอน 6 กับเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์แม้ว่าช่วยในการปรับปรุงสมบัติความทนแรงกระแทก หากแต่ความเป็นพอลิเมอร์ออสโตเมอร์ของเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์นั้นส่งผลให้สมบัติทางกลและสมบัติความร้อนบางอย่างมีค่าลดต่ำลง ดังนั้นการจะปรับปรุงสมบัติดังกล่าวสามารถทำได้โดยการเตรียมเป็นคอมพอสิตกับสารเสริมแรง

2.5 วัสดุคอมพอสิต (composite materials)

วัสดุคอมพอสิต หมายถึง วัสดุซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมารวมกัน โดยที่องค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันและจะต้องไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งอาจเกิดจากการผสมหรือสร้างพันธะ กรณีเกิดการผสมมารวมกันระหว่างวัสดุ องค์ประกอบจะอยู่ในระดับที่สามารถมองเห็นได้ เช่น คอนกรีต และกรณีที่เกิดจากการสร้างพันธะ องค์ประกอบจะอยู่ในระดับ

โมเลกุลถ้าเป็นหลักเรียกว่า “อัลลอย” ถ้าเป็นพลาสติกเรียกว่า “พอลิเมอร์คอมพอสิต” โดยจะประกอบด้วยสารเสริมแรง (reinforce phase) ซึ่งอาจอยู่ในรูปของอนุภาค เส้นใย หรือเป็นสารตัวเติม ซึ่งเป็นเฟสกระจาย (dispersed phase) กระจายตัวในวัสดุที่เป็นเนื้อหลักและเป็นเฟสต่อเนื่อง เรียกว่า เมทริกซ์ (matrix) ที่อาจเป็นโลหะ เซรามิก หรือ พอลิเมอร์ ตัวเสริมแรงช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลโดยรวมให้ดีขึ้น

เมทริกซ์เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญในวัสดุเชิงประกอบ ทำหน้าที่เชื่อมประสานหรือยึดเกาะกับสารเสริมแรงที่เป็นเส้นใยหรืออนุภาค ปกป้องสารเสริมแรงจากรอยขีดข่วน ส่องผ่านแรงหรือความเค้นระหว่างสารเสริมแรง โดยทั่วไปแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ วัสดุคอมพอสิตที่ใช้พอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ (polymer matrix composite, PMC) วัสดุคอมพอสิตที่ใช้โลหะเป็นเมทริกซ์ (metal matrix composite, MMC) และวัสดุคอมพอสิตที่ใช้เซรามิกเป็นเมทริกซ์ (ceramic matrix composite, CMC) และยังสามารถแบ่งย่อยต่อไปได้อีกตามสารเสริมแรง ได้แก่ อนุภาค (particle) เส้นใย (fiber) และวิสเกอร์ (whisker) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การจำแนกประเภทของวัสดุคอมพอสิตตามชนิดของเมทริกซ์และลักษณะของสารเสริมแรง

2.5.1 วัสดุคอมพอสิตที่ใช้พอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ (polymer matrix composite, PMC)

พอลิเมอร์เป็นสารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างเป็นหน่วยซ้ำเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ ทำให้มีความแข็งแรงไม่สูงนัก มีความหนาแน่นต่ำ การเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ทำได้โดยการเติมเส้นใยเสริมแรงลงในพอลิเมอร์ให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยเส้นใยที่ใช้เสริมแรงสำหรับพอลิเมอร์มักเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง เพื่อทำหน้าที่รับและกระจายแรง โดยที่วัสดุคอมพอสิตจะมีความแข็งแรงสูงที่สุดตามแนวการเรียงตัวของเส้นใย ซึ่งทำให้เมทริกซ์พอลิเมอร์สามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้นโดยไม่เปลี่ยนรูปร่าง แต่สำหรับระยะยืดสูงสุดนั้นพบว่าวัสดุคอมพอสิตจะสามารถยืดได้ไม่เกินระยะยืดสูงสุดของเส้นใยเสริมแรง วัสดุคอมพอสิตจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทำให้ความแข็งแรงจำเพาะ (specific strength) สูงขึ้น สามารถนำมาใช้งานสำหรับโครงสร้างบางชนิดที่ต้องการรับแรงที่ไม่สูงมาก เช่น เฟอร์นิเจอร์ต่าง ๆ

สำหรับเมทริกซ์พอลิเมอร์ยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.5.1.1 เมทริกซ์เทอร์โมเซตติง (thermosetting matrix)

เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบร่างแห มีสมบัติแข็งเปราะ เมื่อเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุล หรือทำการบ่มแล้วจะเกิดการคงรูปไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก กระบวนการขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตสำหรับเมทริกซ์เทอร์โมเซตติง จะทำการผสมสารเสริมแรงเข้ากับมอนอเมอร์ในแม่พิมพ์ ก่อนจะเกิดปฏิกิริยาเคมีเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างแบบร่างแห ซึ่งหลังปฏิกิริยาสิ้นสุดจะเกิดการคงรูปและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก เช่น พอกซีเรซิน

2.5.1.2 เมทริกซ์เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic matrix)

เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเส้นหรือแบบกิ่ง สามารถหลอมเหลวได้เมื่อได้รับความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature) มีสมบัติเหนียวและทนทานต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตที่เมทริกซ์เป็นเทอร์โมพลาสติก จะใช้หลักการให้ความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลวและขึ้นรูปก่อนที่จะทำให้เย็นตัวลงเพื่อให้เกิดการคงรูป โดยหลังจากที่คงรูปแล้วถ้าให้ความร้อนอีกครั้งก็จะสามารถหลอมและขึ้นรูปได้อีกครั้ง เช่น ไนลอน

2.5.2 วัสดุคอมพอสิตที่ใช้โลหะเป็นเมทริกซ์ (metal matrix composite, MMC)

เพื่อพัฒนาและปรับปรุงความสามารถในการทนต่อความล้าของโลหะให้ดีขึ้น โดยเฉพาะอะลูมิเนียมและไททานเนียม ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอวกาศยาน โดยนำสารเสริมแรงที่มีความสามารถในการทนความร้อนสูง เช่น เซรามิก ซิลิกอนคาร์ไบด์ อะลูมินา มาเพิ่มความทนทานต่อความล้า และเพิ่มอายุการใช้งานให้ยาวนานขึ้น ความหนาแน่นและสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (coefficient temperature expansion, CTE) ลดลง แต่ต้นทุนในการผลิตสูงมาก ส่งผลให้ MMC มีราคาแพง จึงทำให้มีการใช้งานไม่กว้างขวางนัก

2.5.3 วัสดุคอมพอสิตที่ใช้เซรามิกเป็นเมทริกซ์ (ceramic matrix composite, CMC)

เซรามิกมีวัสดุที่มีความทนทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ไม่นำความร้อน ทนต่อการกัดกร่อน และอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่ำ จึงมีการนำมาใช้ในงานที่มีอุณหภูมิการใช้งานสูง แต่ข้อจำกัดของเซรามิกคือ เปราะและแตกง่าย เพื่อปรับปรุงให้เซรามิกมีความเหนียวและทนทานมากขึ้น จึงมีการนำสารเสริมแรงที่อยู่ในรูปอนุภาค เส้นใย หรือวิสเกอร์ เช่น ซิลิกา ซิลิกอนคาร์ไบด์ อะลูมินา และคาร์บอน เป็นต้น เซรามิกที่ใช้ ได้แก่ ลิเทียมอะลูมินซิลิเกต อะลูมินา และซิลิกอนไนไตรด์ เป็นต้น เนื่องจากต้นทุนการผลิตที่สูงมาก จึงส่งผลให้มีการใช้งานไม่กว้างขวางนัก [10]

สารเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิตสามารถแบ่งออกตามลักษณะได้ ดังนี้

1. อนุภาค (particulate)

ประกอบด้วยเฟสต่อเนื่องซึ่งเป็นเฟสส่วนใหญ่ของระบบ และเฟสของตัวเติมซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคเป็นเฟสที่ไม่ต่อเนื่อง โดยอนุภาคจะมีมิติของรูปร่างที่แตกต่างกันไม่มากนัก ซึ่งมีสมบัติต่าง ๆ ขึ้นกับสมบัติของอนุภาค ซึ่งได้แก่

- ขนาดของอนุภาคและการกระจายขนาดอนุภาค โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าในเมทริกซ์ชนิดเดียวกันจะให้สมบัติต่าง ๆ เช่น ความทนแรงดึง โมดูลัส และความแข็งสูง ส่วนอนุภาคที่ใหญ่กลับทำให้ความแข็งแรงลดลง

- รูปร่างของอนุภาค โดยรูปร่างมีผลกับสมบัติต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น อนุภาคเคลลินที่มีลักษณะเป็นแผ่น มีแนวโน้มของการจัดเรียงตัวในระหว่างกระบวนการผลิต นอกจากนี้ ยังมีอนุภาคที่มีรูปร่างแบบอื่น ๆ อีก ได้แก่ อนุภาคทรงกลม และแท่ง เป็นต้น

- ธรรมชาติทางเคมีของพื้นผิว สำหรับอนุภาคของแร่ มักมีหมู่มีซัลฟอนพื้นผิว เช่น หมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งทำให้เปียกน้ำได้ง่าย แต่ไม่เกาะติดพอลิเมอร์ การปรับปรุงให้อนุภาคสามารถยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดี จำเป็นต้องปรับแต่งหรือตัดแปรพื้นผิวเสียก่อน เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต อาจถูกปรับแต่งด้วยกรดสเตียริกเพื่อให้หมู่ของกรดยึดติดกับอนุภาค ในขณะที่สายโซ่แอลิฟาติกเข้าร่วมกับพอลิเมอร์

2. เส้นใย (fiber)

โดยเส้นใยเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (aspect ratio) มากกว่า 100 ขึ้นไป มีทั้งเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ฝ้าย และไหม เป็นต้น และเส้นใยที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น พอลิเอทิลีน และพอลิเอสเตอร์ เป็นต้น ซึ่งช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความทนแรงกระแทก ความแกร่ง และความเหนียวของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งเส้นใยอินทรีย์ เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยแอสเบสตอส และเส้นใยโพลลาสโตนต์ เป็นต้น ซึ่งใช้ได้กับทั้งเทอร์โมพลาสติก และเทอร์โมเซตพลาสติก

3. วิสเกอร์ (whisker)

เป็นลักษณะของเส้นใยที่มีขนาดเล็กมากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในหน่วยไมโครเมตร และมีความยาวเพียงไม่กี่ลิเมตร ซึ่งอาจเกิดจากการก่อตัวของผลึกเดี่ยว (elongate single crystal) มีความแข็งแรงสูง เช่น วิสเกอร์ซิลิกอนคาร์ไบด์ [11]

วัสดุที่ผลิตจากพอลิเมอร์เพื่อใช้ในทางการค้า ส่วนใหญ่เป็นวัสดุคอมพอสิตเนื่องจากมีสารเสริมแรงและพอลิเมอร์เมทริกซ์ให้เลือกหลายชนิด จึงทำให้สามารถนำมาผลิตเป็นวัสดุคอมพอสิตได้มากมาย เนื่องจากมีข้อดีเหนือกว่าหลายประการ เช่น เพิ่มความแข็งแรง ความคงรูปร่าง ความเหนียว ความทนแรงกระแทก อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการบิดตัว ลดการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำ ปรับปรุงสมบัติด้านไฟฟ้า ลดต้นทุนการผลิต ยืดอายุการใช้งาน และอื่น ๆ

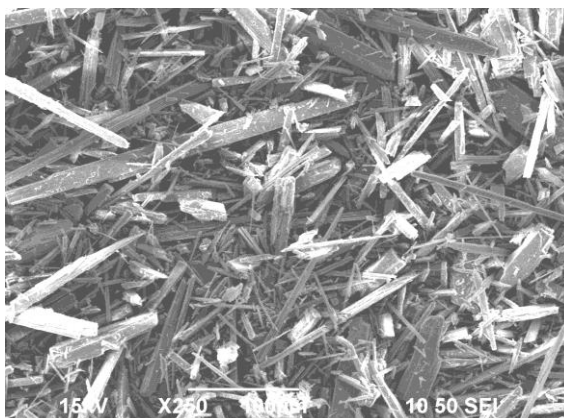
2.6 สารตัวเติมและสารเสริมแรง (filler and reinforcing fillers)

สารตัวเติมและสารเสริมแรงที่ใช้ในพอลิเมอร์ มีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนหรือเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล สารเพิ่มเนื้อเป็นสารตัวเติมที่มีราคาถูก ใช้ในการเพิ่มจำนวนให้แก้ววัสดุ และลดปริมาณสารอื่นที่มีราคาแพงลง ซึ่งบางครั้งสารตัวเติมที่ใส่ลงไปอาจจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนต่อความร้อนให้แก้ววัสดุได้อีกด้วย สารเสริมแรงที่นิยมใส่ลงในไนลอน 6 เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดียิ่งขึ้น เช่น สมบัติความทนต่อแรงดึง อุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน และการหดตัว ได้แก่ ทัลคัม (talcum) และเส้นใยแก้ว (glass fiber) โดยปริมาณที่ใช้สูงสุดไม่เกินร้อยละ 50

ผลของสารเสริมแรงที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (aspect ratio) ของสารตัวเติม ขนาด และการกระจายตัวของอนุภาค การเตรียมพื้นผิว การกระจายตัวของสารตัวเติม โดยที่พื้นที่ผิวของสารตัวเติมจะมีผลต่อการยึดติดกับพอลิเมอร์ ส่วนขนาด รูปร่าง และชนิดของสารตัวเติม จะมีผลต่อการกระจายตัว และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์ ในขณะที่ อัตราการไหล การเตรียมพื้นผิวของสารตัวเติม ลักษณะของเครื่องมือที่ใช้ในการผสม ภาวะที่ใช้ในการผสม ขนาดอนุภาคของสารตัวเติม และความเป็นรูปแบบเดียวกันของสารตัวเติม จะมีผลต่อระดับการกระจายตัวของสารตัวเติมในพอลิเมอร์ [12]

2.7 โวลลาสโทไนต์ (wollastonite)

โวลลาสโทไนต์มาจากชื่อของ William Hyde Wollaston (1766-1828) นักเคมีชาวอังกฤษ ผู้ทำการค้นพบ มีสูตรเคมีคือ CaSiO_3 มีปริมาณ SiO_2 51% CaO 48% โวลลาสโทไนต์ เป็นแร่ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติสามารถเกิดได้ทั่วโลก มีค่าความถ่วงจำเพาะที่ 2.8–3.1 มีความแข็ง 4.5–5 ใน Moh's scale [4] และมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ 1540 องศาเซลเซียส โวลลาสโทไนต์ที่พบในธรรมชาติ จะมีสีขาว มีอนุภาคเป็นรูปเข็ม (acicular or needle-like structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 อนุภาครูปเข็มของโวลลาสโทไนต์

โวลลาสโทไนต์ที่พบในธรรมชาติมักมีสารปนเปื้อนประเภทไอออนของโลหะ เช่น อะลูมินา เหล็ก แมกนีเซียม โพแทสเซียม และโซเดียมปนอยู่ นอกจากนี้ โวลลาสโทไนต์มักเกิดร่วมกับแร่แคลไซต์คาร์เนต และไดออปไซด์ ซึ่งจะถูกกำจัดออกไปในทางกระบวนการผลิต การเกิดโวลลาสโทไนต์นั้นสามารถเกิดได้ทั่วไปบนผืนโลก โดยจะเกิดแทรกอยู่ในพวกหินอัคนี พบได้มากที่ประเทศโรมาเนีย อิตาลี นอร์เวย์ ฟินแลนด์ เยอรมัน อเมริกา สเปน จีน แคนาดา และเม็กซิโก

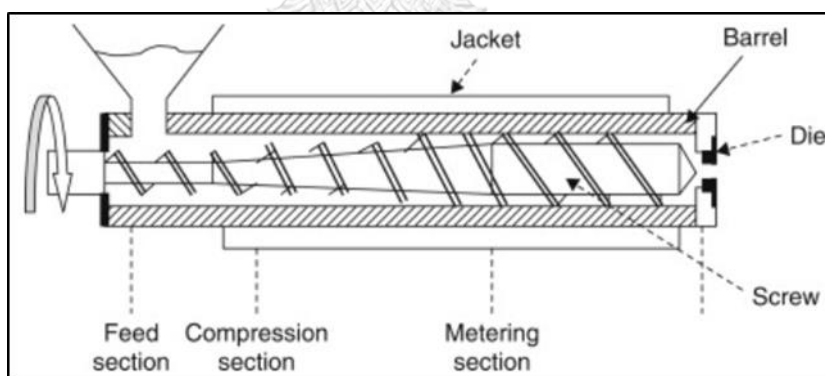
โวลลาสโทไนต์ถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมเซรามิกและการเคลือบผิว ปัจจุบันได้มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก เนื่องจากโวลลาสโทไนต์ มีสมบัติเป็นสารตัวเติมที่มีราคาถูกสำหรับพอลิเมอร์ สมบัติโดยทั่วไป คือ ดูดซับความชื้นต่ำ มีสีขาวไปจนถึงสีเหลืองน้ำตาล มีความต้านทานไฟฟ้าได้ดีเยี่ยม มีสมบัติการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ และมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง ใช้งานสามารถใช้ได้ทั้งกับเทอร์โมพลาสติก เทอร์โมเซตพลาสติกและอีลาสโตเมอร์

ปัจจุบันได้มีการนำโวลลาสโทไนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมพลาสติก โดยการนำโวลลาสโทไนต์ชนิดที่มี aspect ratio สูง (10–20) มาใช้เป็นสารเสริมแรงแทนการใช้เส้นใยแอสเบสตอส (asbestos) อย่างกว้างขวางทั้งในอุตสาหกรรมเทอร์โมพลาสติก และเทอร์โมเซตพลาสติก เพื่อปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์พลาสติกโดยอาศัยสมบัติของแร่อนินทรีย์ในการเพิ่มสมบัติเชิงกล เสถียรภาพทางความร้อน และความคงรูป เป็นต้น นอกจากนี้ การใช้โวลลาสโทไนต์ที่มีอนุภาคละเอียดมาก ๆ จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความต้านทานการขีดขูด และความทนแรงกระแทกสูงกว่าวัสดุอื่น ๆ รวมทั้งโวลลาสโทไนต์ยังมีราคาถูกมากเมื่อเทียบกับสารอนินทรีย์บางชนิด [13]

2.8 การผสมพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการอัดรีดประเภทสกรูคู่ (twin screw extruder)

เครื่องอัดรีดสกรูคู่ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางสำหรับการผสม (mixing) การคอมปาวด์ (compound) หรือการทำปฏิกิริยาของของพอลิเมอร์ เนื่องจากมีกระบวนการการทำงานที่มีความต่อเนื่อง ใช้งานได้หลากหลาย และช่วยให้การผสมมีประสิทธิภาพ

หลักของการรีดพลาสติกคือการเม็ดพลาสติกที่ถูกป้อนเข้ามาในเครื่องรีด (extruder) ถูกอัด หลอมและผสมในระหว่างสกรู (screw) และกระบอกของเครื่องรีด (barrel) ทั้งนี้โดยอาศัยความแตกต่างของความเสียดทานที่เกิดขึ้นในพลาสติกหลอมเหลวที่อยู่ระหว่างผิวของเกลียวหนอนและกระบอกทำให้เกิดพลังงานที่ได้จากแรงเสียดทานช่วยในการหลอมและการผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันแล้วจึงถูกอัดผ่านหัวตาย (die) ซึ่งเป็นส่วนที่ถูกยึดติดกับส่วนปลายของกระบอกต่อจากแผ่นเบรกเกอร์และตะแกรงกรอง (perforated breaker plate) ที่จำเป็นต้องใช้เนื่องจากเป็นตัวกรองเศษโลหะที่อาจปนเปื้อนหรือพลาสติกที่ยังหลอมเหลวไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ยังเป็นการก่อให้เกิดความดันพอเพียงในการรีดพลาสติกหลอมเหลวผ่านหัวตายด้วย เครื่องอัดรีดโดยแบ่งหน้าที่ของส่วนต่าง ๆ เป็น 3 ส่วน แสดงดังรูปที่ 2.7 คือ



รูปที่ 2.7 แสดงส่วนประกอบของเครื่องอัดรีด [14]

1. ส่วนป้อนส่งสาร (feeding section) ในบริเวณนี้สกรูจะมีสันสกรู (flight) ที่มีความลึกมากที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนอื่น ๆ เพื่อใช้ในการรองรับเม็ดพลาสติกและสารเติมแต่งที่ถูกป้อนเข้ามาจากช่องใส่ (hopper) ซึ่งในบริเวณนี้เม็ดพลาสติกส่วนใหญ่จะยังคงอยู่ในสถานะของแข็งในตอนแรกที่เริ่มเข้าสู่กระบวนการ เมื่อสกรูหมุนเพื่อพาเม็ดพลาสติกไปบริเวณส่วนถัดไป ความร้อนจาก

เครื่องและความร้อนที่เกิดจากความเสียดทานในส่วนนี้จะทำให้เม็ดพลาสติกและสารเติมแต่งเกิดการหลอมตัว

2. ส่วนกดอัด (compression or transition section) สันสกรูในบริเวณนี้จะมี ความลึกลงลงเป็นเส้นตรงจากส่วนป้อนส่งสารไปจนถึงส่วนส่งรีด เพื่อทำให้เกิดแรงบีบอัดทำให้เม็ดพลาสติกและสารเติมแต่งเกิดการหลอมเหลวผสมเข้ากันและความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานจะส่งผลให้เกิดแรงเฉือน ทำให้เม็ดพลาสติกและสารเติมแต่งเกิดการผสมที่สมบูรณ์ วัสดุในบริเวณนี้จะถูกเปลี่ยนจากสถานะของแข็งไปเป็นพอลิเมอร์หลอมเหลว

3. ส่วนส่งรีด (metering section) ในบริเวณนี้ สันสกรูจะมีความตื้นมากที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนอื่น ๆ พอลิเมอร์หลอมเหลวจากส่วนกดอัดจะถูกลำเลียงมาที่บริเวณนี้เพื่อส่งเข้าหัวอัดรีดเป็นชิ้นงานต่อไป

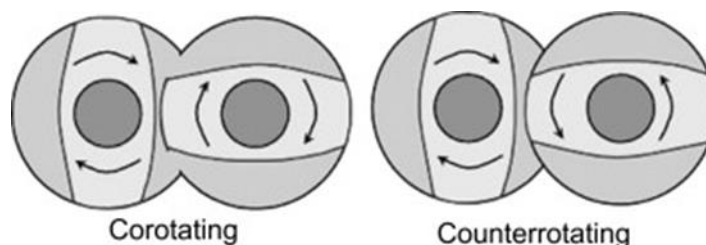
เครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่พัฒนาขึ้นมาโดยภายในกระบอกกลวงมีสกรู 2 อันวางขนานกันตามแนวนอน ช่วยให้การลำเลียงและผสมวัตถุดิบเข้ากันได้ดีกว่าเครื่องอัดรีดชนิดสกรูเดี่ยว เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการหมุนของสกรูคู่สูงกว่า

โดยลักษณะการหมุนของเกลียวหนอนคู่มีสองแบบ ได้แก่

1. การหมุนในทิศทางเดียวกัน (co-rotating screw) มีทิศทางการหมุนดังแสดงในรูปที่ 2.8 ทุก ๆ รอบของการหมุนของเกลียวหนอนคู่แบบหมุนไปทางเดียวกันจะส่งพลาสติกเหลวจากร่องของสกรูตัวหนึ่งไปยังร่องของสกรูอีกตัวหนึ่ง ซึ่งกลไกในการส่งพลาสติกและแรงลากจูง (drag force) เทียบได้กับตัวเกลียวหนอนเดี่ยว แต่จะมีการเฉือน (shear element) กับส่วนที่ทำหน้าที่นวดผสม (kneading element) รวมอยู่ด้วย เกลียวหนอนคู่แบบนี้จึงนิยมนำมาใช้ในงานทำเม็ดผสม (compounding)

2. การหมุนสวนทางกัน (counterrotating screw) มีทิศทางการหมุนดังแสดงในรูปที่ 2.8 หลักการของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่หมุนสวนทางกันนั้นกลไกการทำงานต่างกับสกรูคู่แบบหมุนทางเดียวกัน กล่าวคือ สกรูแต่ละส่วนจะปรับสภาพเป็นห้องปิด (closed chamber) ทำหน้าที่ลำเลียงพลาสติกจากกรวยเติม (hopper) ไปยังปลายสกรูโดยไม่มีการส่งผ่านให้กับห้องใกล้เคียง โดย

หลักการนี้ไม่จำเป็นต้องใช้แรงลากจูง (drag forces) ซึ่งมีผลทำให้การเฉือนต่ำและความร้อนเกิดขึ้นจากการเฉือนน้อย ด้วยเหตุนี้จึงนิยมนำมาใช้ในงานผลิตท่อและโพรไฟล์ (profile) ที่ทำจาก PVC [15]



รูปที่ 2.8 ลักษณะการหมุนของเกลียวหนอนคู่ [15]

เนื่องจากการใช้งานเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่โดยทั่วไปนิยมใช้เพื่อการคอมปาวด์หรือการผสมให้เกิดปฏิกิริยาในสกรู (reductive blending) ดังนั้นจึงมีการออกแบบสกรูได้หลากหลายเพื่อประสิทธิภาพในการผสมที่ดีขึ้น โดยในสกรูแท่งเดียวกันอาจมีการเพิ่มอุปกรณ์ช่วงการผสม เช่น kneading block หรือการใช้ระยะของสันสกรู (pitch) ที่ไม่คงที่

2.9 การขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ (injection molding)

การขึ้นรูปพลาสติกด้วยกระบวนการฉีดแบบเป็นที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากมีความรวดเร็วในกระบวนการผลิต ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้หลายลักษณะขึ้นอยู่กับการออกแบบแม่พิมพ์ อีกทั้งยังมีขั้นตอนการผลิตไม่ซับซ้อน ผลิตภัณฑ์ประมาณร้อยละ 60 ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ

กระบวนการฉีดแบบเป็นกระบวนการฉีดพลาสติกหลอมเข้าสู่แม่แบบด้วยความดันสูง โดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนของชุดฉีด (injection unit) และส่วนของชุดแม่พิมพ์ (clamping unit) ดังแสดงในรูปที่ 2.9

ขั้นตอนที่มีการรักษาความดันในการฉีดเพื่อผลักดันพลาสติกหลอมเข้าไปซดเซยส่วนที่หดตัว เรียกว่า การฉีดแช่อัด (holding pressure phase) ขั้นตอนนี้จะสิ้นสุดเมื่อไม่สามารถผลักดันพลาสติกหลอมเข้าไปได้อีก นั่นคือ เมื่อพลาสติกในกรวยนำฉีดแข็งตัว เรียกจุดสิ้นสุดขั้นตอนนี้ว่าจุดดัน (scaling point) ความดันและเวลาที่ใช้ในขั้นการฉีดแช่อัดจะมีผลต่อความบกพร่องของชิ้นงาน คือ ถ้าใช้ความดันและเวลาในการฉีดแช่อัดน้อยเกินไป จะทำให้พลาสติกหลอมเข้าไปซดเซยไม่เพียงพอจะเกิดการหดตัวของชิ้นงาน

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Gribben และคณะ [17] ศึกษาความเข้ากันได้ของการผสมไนลอน 6 กับเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์ โดยทำการเติมเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์ ร้อยละ 0, 5, 10, 25, 50, 75 และ 100 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ และทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดแบบ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์ ส่งผลให้ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation) สูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณมากกว่าร้อยละ 25 จะส่งผลให้ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง สอดคล้องกับความทนแรงกระแทกที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์ จนถึงที่ปริมาณร้อยละ 25 แสดงให้เห็นว่าปริมาณที่เหมาะสม (optimum) ของการเติมเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์อยู่ในช่วงร้อยละ 10 ถึง 25

Wahit และคณะ [18] ศึกษาผลของเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์ ต่อสมบัติทางสัณฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลของไนลอน 6/พอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต โดยทำการเติมเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ผสมลงในไนลอน 6/พอลิโพรพิลีนที่มีปริมาณคงที่ในอัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนักด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ และทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดแบบ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์ส่งผลให้ความทนแรงดึง (tensile strength) และความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) ลดลง ในขณะที่ความเหนียวจากการดัดโค้งได้รับการปรับปรุงเพิ่มขึ้นอย่างมาก และปริมาณของเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์ร้อยละ 10 ถึง 20 มีสามารถปรับปรุงความทนแรงดึง ความทนแรงดัดโค้งและความเหนียวได้อย่างเหมาะสม

Szu-Hin และคณะ [19] ศึกษาผลของอีลาสโตเมอร์นาโนคอมพอสิตต่อการแตกหักแบบดัดโค้งของไนลอน 6/ออร์กาโนเคลย์ โดยของผสมทั้งหมดถูกเตรียมโดยการหลอมรวมในด้วยเครื่องอัดรีด

แบบเกลียวคู่ ตามด้วยการขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดแบบ พบว่าพอลิเอทิลีน-ออกทีนอิลาสโตเมอร์ที่กราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride grafted polyethylene-octene elastomer) ช่วยปรับปรุงสมบัติด้านการแตกหักแบบตัดโค้งอย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่การเพิ่มปริมาณของออร์กาโนเคลย์ช่วยเพิ่มความแข็งแรงแบบตัดโค้งและส่งผลให้ความเหนียวลดลง

Ajaykumar และคณะ [20] ศึกษาผลของโวลลาสโทไนต์ต่อสมบัติทางกายภาพของไนลอน 6 โดยการเติมโวลลาสโทไนต์ร้อยละ 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ จากนั้นทำการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องฉีดแบบ พบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณของโวลลาสโทไนต์ส่งผลให้มอดูลัสแรงดัดโค้ง (flexural modulus), ความทนแรงดึง, ความทนแรงกระแทก, ความแข็ง (hardness) และความต้านทานการขัดถู (abrasion resistance) ได้รับการปรับปรุงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเหมาะแก่การนำไปทำมอเตอร์ไฟฟ้า, เกียร์, ตัวเรือนเครื่องมือไฟฟ้า ฯลฯ แทนที่เส้นใยแก้วซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์

Unal และคณะ [21] ศึกษาผลของสารตัวเติมและปริมาณของสารตัวเติมต่อสมบัติเชิงกลของไนลอน 6 โดยทำการเติมสารตัวเติมร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ผสมลงในไนลอน 6 โดยปรับเปลี่ยนชนิดของตัวเติมได้แก่ โวลลาสโทไนต์, ททรายแก้ว (glass beads) และดินเคโออิน (kaolin) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ จากนั้นทำการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องฉีดแบบ พบว่าโวลลาสโทไนต์ที่มีรูปร่างอนุภาคเป็นรูปเข็มสามารถปรับปรุงความทนแรงดึงและมอดูลัสได้ดีที่สุด นอกจากนี้ปริมาณของโวลลาสโทไนต์ที่เหมาะสมคือร้อยละ 10 ถึง 15 โดยน้ำหนัก

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

3.1.1 ไนลอน 6 (nylon 6, PA6 1013B) ความหนาแน่น 1.14 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท อุเบเคมิคอลส์ (เอเชีย) จำกัด (มหาชน) (UBE Chemicals (Asia) Public Company Limited)

3.1.2 เอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์ (ethylene-octene copolymer, EOC ENGAGE™ 8450) ความหนาแน่น 0.90 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร, ดรรชนีการไหล 3 กรัม/10นาที่ (190 องศาเซลเซียส, 2.16 กิโลกรัม) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ดาว เคมิคอล ประเทศไทย จำกัด (DOW Chemical Thailand Limited)

3.1.3 เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (ethylene-octene copolymer grafted maleic anhydride, EOC-g-MA Fusabond N493) ความหนาแน่น 0.87 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร, ดรรชนีการไหล 1.6 กรัม/10นาที่ (190 องศาเซลเซียส, 2.16 กิโลกรัม) จากบริษัท ครีเอทีฟ อินโนเวชัน จำกัด (Creative Innovation Limited)

3.1.4 ผงวอลลาสโทไนต์ (wollastonite, WT) ขนาด 2000-2500 mesh, aspect ratio 1:18 จาก Shenyang Huakuang Trading Co., Ltd

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

3.2.1 เครื่องอัดรีบบแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) ของ NINGBO รุ่น TSJ-35A
ประเทศจีน

3.2.2 เครื่องฉีดแบบ (injection molding machine) ของ Sumitomo รุ่น SE-100DUZ
ประเทศญี่ปุ่น

3.2.3 ตู้อบสูญญากาศ (vacuum oven) ของ YAMATO รุ่น D63 ประเทศญี่ปุ่น

3.2.4 เครื่องบากชิ้นงาน (notching tool) ของ TOYOSEIKI รุ่น A-4E ประเทศญี่ปุ่น

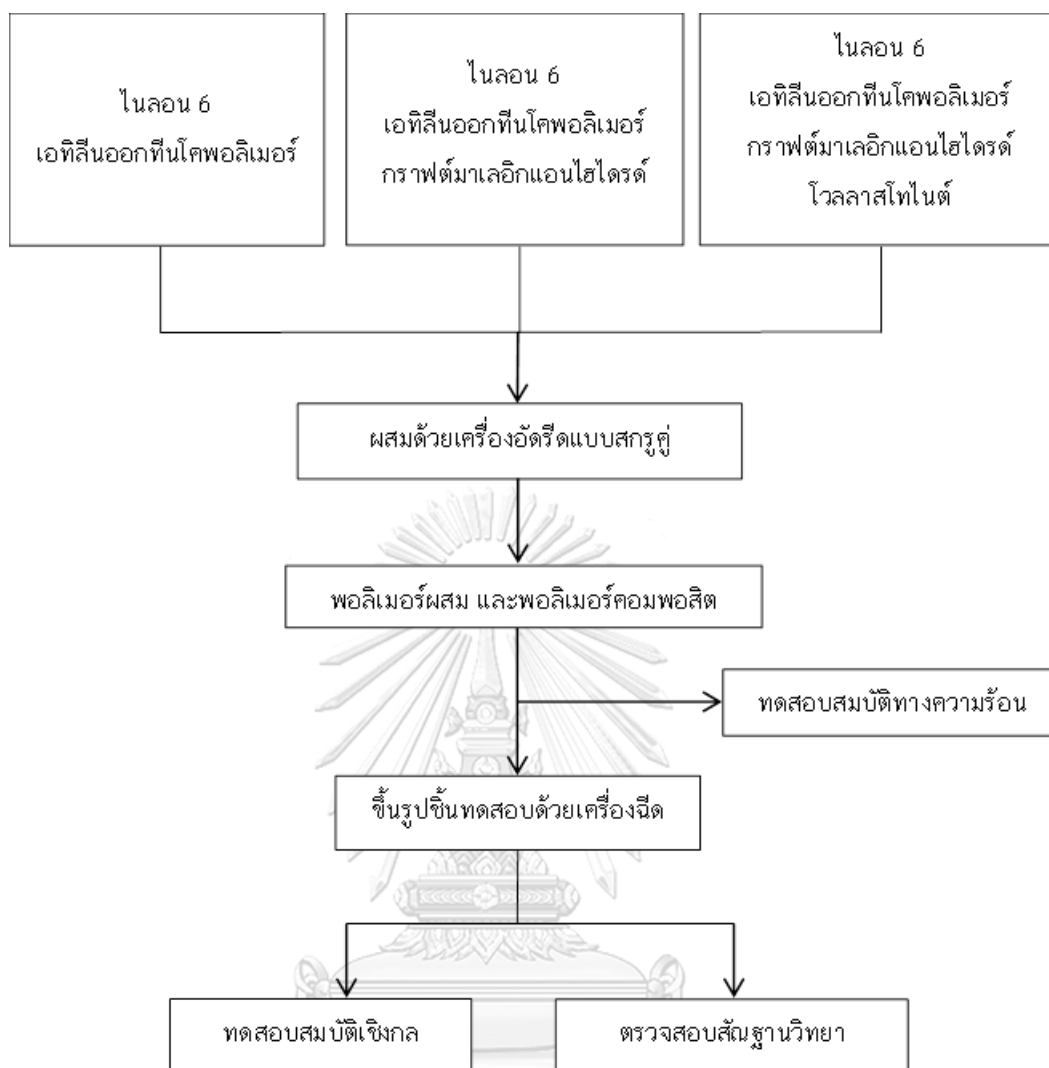
3.2.5 เครื่องผสมเม็ดพลาสติกแบบเหวี่ยงข้าง (double cone mixer) ของ BOSCO รุ่นBDH
ประเทศไทย

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

- 3.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ของ Jeol รุ่น JSM6390 ประเทศญี่ปุ่น
- 3.3.2 เครื่องวัดดัชนีการหลอมไหล (melt flow indexer, MFI) ของ TOYOSEIKI รุ่น F-W01 ประเทศญี่ปุ่น
- 3.3.3 เครื่องวัดความหนาแน่น (analytical balance with density kit) ของ Mettler Toledo รุ่น XS205DU ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.3.4 เครื่องทดสอบความทนกระแทกแบบไอซอด (izod impact tester) ของ Zwick/Roell รุ่น HIT25P ประเทศเยอรมันนี
- 3.3.5 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine) ของ INSTRON รุ่น 5567 ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.3.6 เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ (rockwell hardness) MITUTOYO รุ่น HR-522 ประเทศญี่ปุ่น
- 3.3.7 เครื่องทดสอบอุณหภูมิการเสียรูปด้วยความร้อน (heat distortion temperature, HDT) ของ TOYOSEIKI รุ่น 6M-2 ประเทศญี่ปุ่น
- 3.3.8 กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (digital microscope) ของ KEYENCE รุ่น VHM100 ประเทศญี่ปุ่น
- 3.3.9 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermo gravimetric analysis, TGA) ของ Mettler Toledo รุ่น TGA/DSC 1 STARe System ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.3.10 เครื่องวัดสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี (differential scanning calorimetry, DSC) ของ Perkin Elmer รุ่น Diamond ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.3.11 เครื่องสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงพลวัต (dynamic mechanical analyzer, DMA) ของ Perkin Elmer รุ่น DMA8000 ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.4 วิธีการเตรียมพอลิเมอร์ผสมและคอมพอลิไซด์

- 3.4.1 ขั้นตอนการทดลอง
ขั้นตอนการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.2 เตรียมพอลิเมอร์ผสมของโนลอน 6/เอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์ และโนลอน 6/เอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรต์

นำเม็ดพลาสติกโนลอน 6 และเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์มาชั่งน้ำหนักเพื่อทำการผสมในอัตราส่วนตามตารางที่ 3.1 ใส่ลงในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ ทำการปิดปากถุงให้สนิทด้วยเครื่องซีลปากถุง นำใส่ลงในเครื่องผสมเม็ดพลาสติกแบบเหวี่ยงข้างเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำมาผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (รูปที่ 3.2) โดยใช้ข้อมูลหมุมในการผสมของไซนต่าง ๆ ดังนี้ 230, 230, 230, 240, 240, 240, 230, 230 และ 220 ทำการอัดรีดผ่านหัวตายรูปวงกลมโดยใช้ความเร็วรอบสกรู 220 รอบ/นาที แล้วทำการตัดเม็ด เพื่อใช้ขั้นรูปขึ้นงานทดสอบต่อไป



รูปที่ 3.2 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

3.4.3 เตรียมคอมพอลิเมอร์ของไนลอน 6/เอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์/โวลลาสโทไนต์

นำเม็ดพลาสติกไนลอน 6 เอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และโวลลาสโทไนต์มาชั่งน้ำหนักเพื่อทำการผสมในอัตราส่วนตามตารางที่ 3.1 ใส่ลงในถุงอะลูมิเนียมพอยล์ ทำการปิดปากถุงให้สนิทด้วยเครื่องซีลปากถุง นำใส่ลงในเครื่องผสมเม็ดพลาสติกแบบเหวี่ยงข้างเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำมาผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยใช้อุณหภูมิในการผสมของโซนต่าง ๆ ดังนี้ 230, 230, 230, 240, 240, 240, 230, 230 และ 220 ทำการอัดรีดผ่านหัวตายรูปวงกลมโดยใช้ความเร็วรอบสกรู 220 รอบ/นาที แล้วทำการตัดเม็ดเพื่อใช้ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบต่อไป

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมและอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอลิเมอร์

sample	nylon 6	ethylene-octene copolymer	ethylene-octene copolymer	wollastonite
PA6	100	-	-	-
PA6/EOC 5	95	5	-	-
PA6/EOC 10	90	10	-	-
PA6/EOC 15	85	15	-	-
PA6/EOC 20	80	20	-	-
PA6/EOC-g-MA 5	95	-	5	-
PA6/EOC-g-MA 10	90	-	10	-
PA6/EOC-g-MA 15	85	-	15	-
PA6/EOC-g-MA 20	80	-	20	-

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมและอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต (ต่อ)

sample	nylon 6	ethylene-octene copolymer	ethylene-octene copolymer	wollastonite
PA6/EOC-g-MA/WT 10	85	-	15	10
PA6/EOC-g-MA/WT 20	85	-	15	20
PA6/EOC-g-MA/WT 30	85	-	15	30

3.5 การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ (injection molding)

นำเม็ดพลาสติกพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.2 และ 3.4.3 ไปทำการอบไล่ความชื้นด้วยตู้อบสูญญากาศ (vacuum Oven) ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ (รูปที่ 3.3) โดยใช้ อุณหภูมิในการหลอมที่ 250 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ 80 องศาเซลเซียส ความดัน 100 เมกะปาสคัล และความเร็วรอบสกรูที่ 120 ความเร็วในการฉีดขึ้นรูป 200 มิลลิเมตร/วินาที (mm/sec) จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบไปควบคุมสภาวะที่อุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 50 ± 10 เปอร์เซ็นต์เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.3 เครื่องฉีดแบบ

3.6 การทดสอบสมบัติ

3.6.1 การตรวจสอบสัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ตรวจสอบสัญญาณวิทยาบริเวณแตกหักของชิ้นทดสอบจากการทดสอบความทนแรงกระแทกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 3.4) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า กำลังไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ โดยทำการเคลือบทองบริเวณพื้นผิวรอยแตกก่อนทำการตรวจสอบ



รูปที่ 3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.6.2 การทดสอบดัชนีการหลอมไหล

ทดสอบค่าดัชนีการหลอมไหลของเม็ดพลาสติกตามมาตรฐาน ISO 1133-1:2011 (procedure A) ด้วยเครื่องวัดดัชนีการหลอมไหล (รูปที่ 3.5) โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบเท่ากับ 230 องศาเซลเซียส และกดด้วยน้ำหนัก 2.16 กิโลกรัม บันทึกผลการทดลองในหน่วย กรัม/10 นาที



รูปที่ 3.5 เครื่องวัดดัชนีการหลอมไหล

3.6.3 การทดสอบความถ่วงจำเพาะ

ทดสอบความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ISO 1183-1 (method A) ด้วยเครื่องวัดความหนาแน่นแบบแทนที่น้ำ (รูปที่ 3.6) โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาด 40x10x4 มิลลิเมตร และใช้ภาวะในการทดสอบที่ 23 ± 2 องศาเซลเซียส โดยทำการทดสอบทั้งหมด 5 ชิ้นต่อการทดสอบและรายงานค่าเฉลี่ยในหน่วยของกรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ

3.6.4 การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก

ทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกตามมาตรฐาน ISO 180 ด้วยเครื่องทดสอบความทนกระแทกแบบไอซอด (Izod) (รูปที่ 3.7) โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาด 80x10x4 มิลลิเมตร ที่ทำการบาก (notch) ด้วยเครื่องบากชิ้นงาน (รูปที่ 3.8) ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง 23 ± 2 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิต่ำ -30 ± 2 องศาเซลเซียส พลังงานของค้อนเหวี่ยงที่ 2.75 จูล โดยทำการทดสอบทั้งหมด 5 ชิ้นต่อการทดสอบและรายงานค่าเฉลี่ยในหน่วยกิโลจูล/ตารางเมตร



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก



รูปที่ 3.8 เครื่องบากชิ้นงาน

3.6.5 การทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง

ทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงเพื่อหาความทนแรงดึง ยังสัมมอดูลัสและการยืดตัว ณ จุดขาด ตามมาตรฐาน ISO 527-1,2 โดยใช้ชิ้นทดสอบมีขนาดคล้ายรูปดัมเบล (รูปที่ 3.9) ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (รูปที่ 3.10) โดยใช้ load cell ขนาด 10 กิโลนิวตัน ระยะเวลายาวเกจ (gauge length) 50 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างที่หนีบ 115 มิลลิเมตร ใช้อัตราเร็วในการดึงที่ 50 มิลลิเมตร/นาที สำหรับการทดสอบความทนแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาด ความเร็วในการดึงที่ 1 มิลลิเมตร/นาทีสำหรับการทดสอบยังสัมมอดูลัส ภายใต้อุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 50 ± 10 เปอร์เซ็นต์ ทำการวัดขนาดความกว้างและความหนาของชิ้นทดสอบ ด้วยเครื่องดิจิตอลไมโครมิเตอร์ ที่มีความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร โดยทำการทดสอบทั้งหมด 5 ชิ้น ต่อการทดสอบและรายงานค่าเฉลี่ยในหน่วยเมกะปาลกาลสำหรับความทนต่อแรงดึง และยังมอดูลัสหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์สำหรับการยืดตัว ณ จุดขาด



รูปที่ 3.9 ชิ้นทดสอบแรงดึง



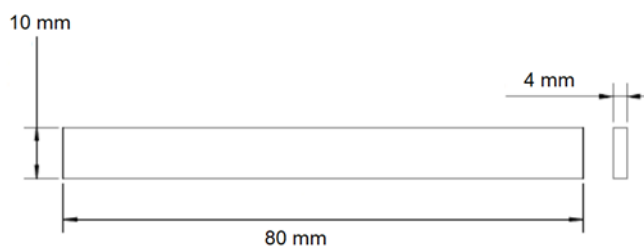
รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง

3.6.6 การทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง

ทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้งตามมาตรฐาน ISO 178 ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (รูปที่ 3.11) โดยใช้ load cell ขนาด 2 กิโลนิวตัน อัตราเร็วในการกด 2 มิลลิเมตร/นาที ระยะป่า (span) 64 มิลลิเมตร ชิ้นทดสอบมีขนาดคล้ายบาร์ (รูปที่ 3.12) ภายใต้อุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 50 ± 10 เปอร์เซ็นต์ ทำการวัดขนาดความกว้างและความหนาของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องดิจิตอลไมโครมิเตอร์ ที่มีความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร โดยทำการทดสอบทั้งหมด 5 ชิ้นต่อการทดสอบและรายงานค่าเฉลี่ยในหน่วยเมกะปาลกาล



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบด้านความทนแรงดัดโค้ง



รูปที่ 3.12 ชิ้นทดสอบแรงดัดโค้ง

3.6.7 การทดสอบความแข็งแบบรีอคเวลล์

การทดสอบความแข็งแบบรีอคเวลล์ตามมาตรฐาน ISO 2039 R-scale ด้วยเครื่องวัดความแข็งยี่ห้อ (รูปที่ 3.13) โดยจะทำการกดด้วยลูกบอลเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร ด้วยน้ำหนักหลัก (major Load) 60 กิโลกรัมแรง เป็นเวลา 15 วินาที และน้ำหนักรอง (minor Load) 10 กิโลกรัมแรง เป็นเวลา 15 วินาที ภายใต้อุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 50 ± 10 เปอร์เซ็นต์ โดยทำการทดสอบทั้งหมด 5 ชิ้นต่อการทดสอบ



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบความแข็งแบบรีอคเวลล์

3.6.8 การทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อน

ทดสอบอุณหภูมิดัดโค้งด้วยความร้อนตามมาตรฐาน ISO 75 ด้วยเครื่องทดสอบอุณหภูมิการอ่อนตัว (รูปที่ 3.14) อุณหภูมิเริ่มต้นในการทดสอบที่ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อนที่ 120 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง โดยใช้แรงกดที่ 1.80 เมกกะปาสคาล ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ชิ้นต่อการทดสอบ และรายงานค่าเฉลี่ยในหน่วยองศาเซลเซียส



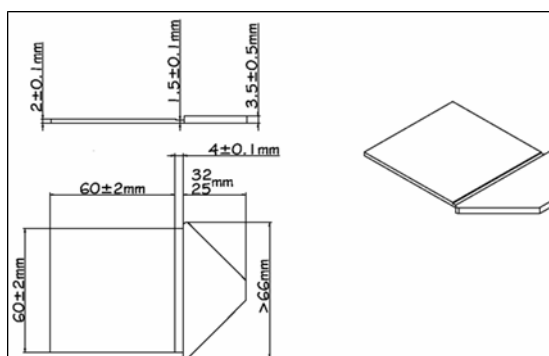
รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อน

3.6.9 การทดสอบการหดตัว (mold shrinkage)

ทดสอบการหดตัวตามมาตรฐาน ISO 294-4 ด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (รูปที่ 3.15) ภายใต้อุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 50 ± 10 เปอร์เซ็นต์ โดยทำการทดสอบทั้งหมด 5 ชิ้นต่อการทดสอบ โดยทำการทดสอบทั้งด้านแนวขนานเครื่อง (machine direction : MD) และด้านแนวขวางเครื่อง (transverse machine direction : TD) รายงานค่าเฉลี่ยในหน่วยเปอร์เซ็นต์ โดยชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะตามรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล



รูปที่ 3.16 ชิ้นงานทดสอบการหดตัว

3.7 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิควิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน

วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนตามมาตรฐาน ISO 11358 ด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA) (รูปที่ 3.17) โดยใช้ชิ้นทดสอบที่มีน้ำหนักอย่างน้อย 10 มิลลิกรัม บรรจุในรูชิเบิลอะลูมินา โดยใช้อุณหภูมิของการวิเคราะห์จาก 50 ถึง 550 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส/นาที และคงอุณหภูมิไว้ที่ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก 550 ถึง 850 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส/นาที ให้คงอุณหภูมิไว้ที่ 850 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที ทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน (Nitrogen) ด้วยอัตราการไหลผ่าน (gas flow rate) เท่ากับ 200 มิลลิลิตร/นาที โดยเทอร์โมแกรมที่ได้แสดงน้ำหนักที่สูญเสียไป (weight loss) เมื่อเม็ดชิ้นทดสอบได้รับความร้อน รวมทั้งปริมาณเถ้า (char) ที่เหลือ



รูปที่ 3.17 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA)

3.8 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนตามมาตรฐาน ISO 11357 ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) (รูปที่ 3.18) โดยใช้สภาวะการวิเคราะห์เริ่มจากอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ถึง 280 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อน 20 องศาเซลเซียส/นาที คงอุณหภูมิไว้ที่ 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการลดอุณหภูมิลงไปที่ 30 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที คงอุณหภูมิไว้ที่ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 280 องศาเซลเซียสด้วยอัตราการเพิ่มความร้อนเดิม ทำการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน



รูปที่ 3.18 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี (DSC)

3.9 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงพลวัต

วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนตามมาตรฐาน ISO 6721 โดยใช้โหมดคานยื่น (dual cantilever mode) (รูปที่ 3.19) ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงพลวัต (DMA) (รูปที่ 3.20) ชิ้นงานทดสอบมีขนาด 50x10x4 มิลลิเมตร โดยใช้ช่วงอุณหภูมิของการวิเคราะห์จาก -100 ถึง 150 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 5 องศาเซลเซียส/นาที ความถี่ 1 เฮิรตซ์



รูปที่ 3.19 การทดสอบโหมดคานยื่น



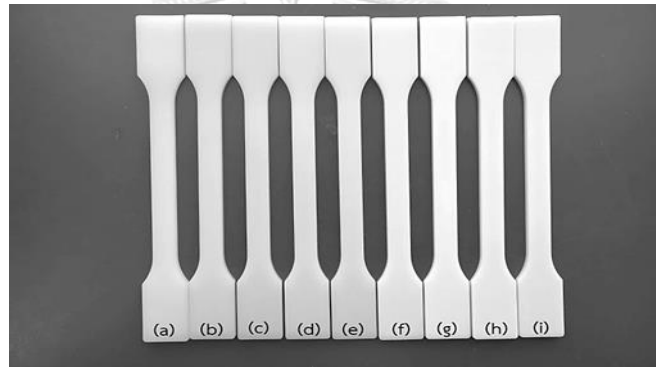
รูปที่ 3.20 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงพลวัต (DMA)

บทที่ 4

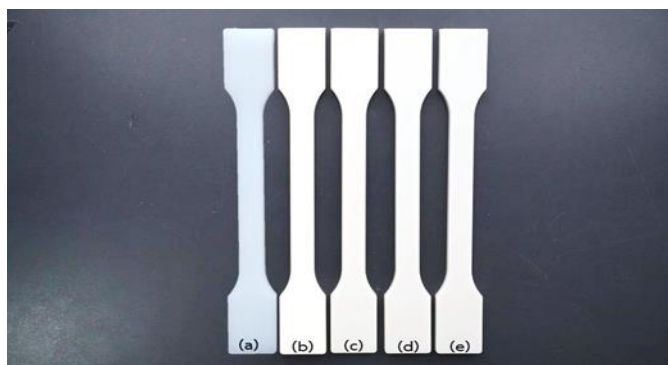
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะชิ้นงานทดสอบ

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะชิ้นงานทดสอบของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่อัตราส่วน 95/5, 90/10, 85/15 และ 80/20 wt%/wt% และรูปที่ 4.2 แสดงลักษณะชิ้นงานทดสอบของ 85/15 PA6/EOC-g-MA คอมพอสิตด้วยโวลลาสโทไนต์ (WT) ปริมาณ 10, 20 และ 30 phr ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ



รูปที่ 4.1 ชิ้นงานทดสอบของ (a) PA6, (b-e) พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC ที่อัตราส่วน 95/5, 90/10, 85/15 และ 80/20 ตามลำดับ และ (f-i) พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC-g-MA ที่อัตราส่วน 95/5, 90/10, 85/15 และ 80/20 ตามลำดับ

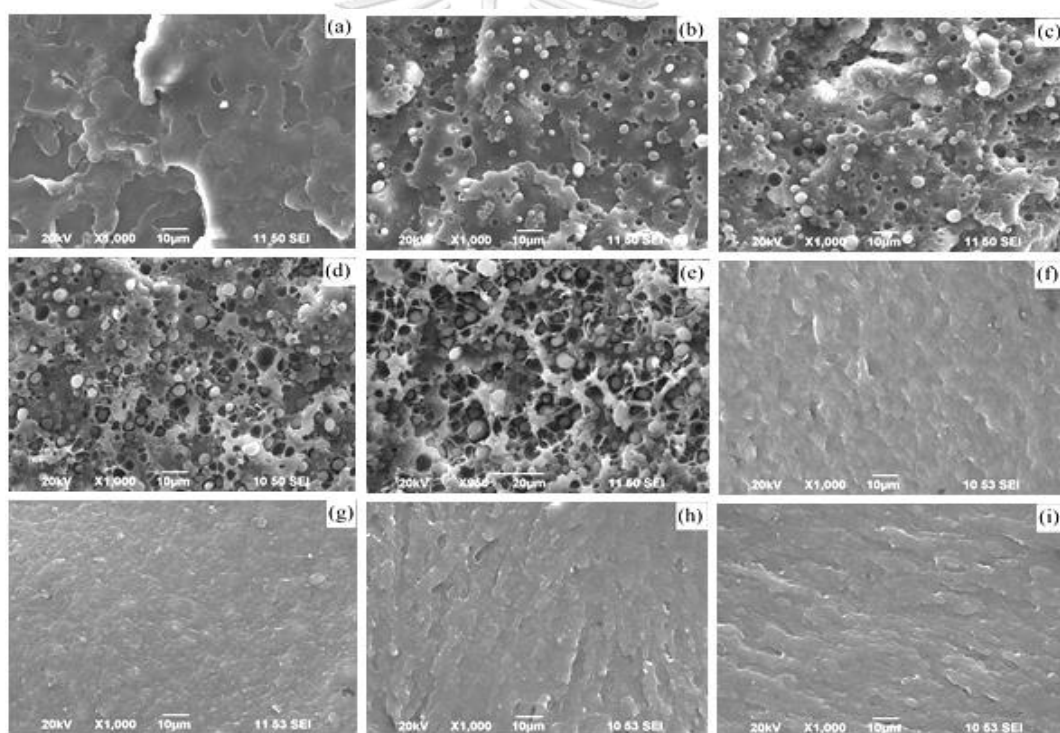


รูปที่ 4.2 ชิ้นงานทดสอบของ (a) PA6, (b) พอลิเมอร์ผสม 85/15 PA6/EOC และ (c-d) 85/15 PA6/EOC คอมพอสิตด้วย WT ปริมาณ 10, 20 และ 30 phr ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.1 พบว่า ชิ้นงานทดสอบ PA6 มีสีขาวค่อนข้างโปร่งแสง และเมื่อผสม PA6 กับ EOC หรือ EOC-g-MA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า ชิ้นงานทดสอบมีสีขาวเจดเหลืองและทึบแสง ในขณะที่เติม WT เข้าไปในพอลิเมอร์ผสม 85/15 PA6/EOC-g-MA ปริมาณต่าง ๆ พบว่า ชิ้นงานทดสอบมีสีขาวเจดเทาและทึบแสง (รูปที่ 4.2(c-d))

4.2 สัณฐานวิทยา

รูปที่ 4.3 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทกของ PA6, พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ภายใต้กำลังขยาย 1,000 เท่า



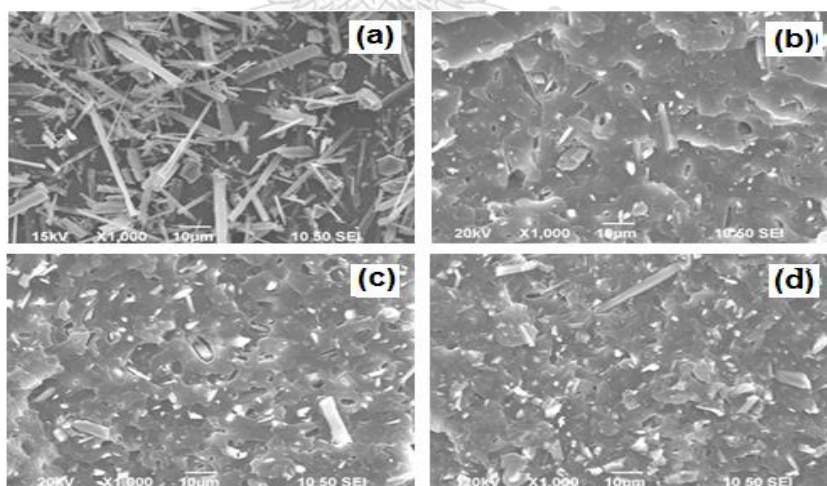
รูปที่ 4.3 สัณฐานวิทยาของ (a) PA6, (b-e) พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC ที่อัตราส่วน 95/5, 90/10, 85/15 และ 80/20 ตามลำดับ และ (f-i) พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC-g-MA ที่อัตราส่วน 95/5, 90/10, 85/15 และ 80/20 ตามลำดับ ภายใต้กำลังขยาย 1,000 เท่า

จากรูปที่ 4.3(a) พบว่า PA6 มีพื้นผิวรอยแตกหักที่ค่อนข้างเรียบและมีคลื่นเล็กน้อย แสดงถึงการแตกหักของวัสดุที่มีความเปราะ ส่วนรูปที่ 4.3(b-e) แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

PA6/EOC ที่อัตราส่วนต่าง ๆ กัน ซึ่งมีลักษณะแตกต่างจากของ PA6 อย่างเห็นได้ชัด โดยปรากฏอนุภาคทรงกลม (spherical droplet) ของ EOC รวมทั้งช่องว่าง รู และโพรงที่เกิดจากอนุภาคของ EOC ที่ถูกดึงออกมาจากเมทริกซ์ของ PA6 กระจายอยู่ทั่วไป โดยขนาดของอนุภาค EOC และช่องว่างเหล่านี้มีขนาดใหญ่ขึ้นตามปริมาณของ EOC ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงความไม่เข้ารวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน (immiscibility) ของพอลิเมอร์ผสมเหล่านี้ รวมทั้งการมีแรงยึดระหว่างผิว (Interfacial adhesion) ของ PA6 และ EOC ที่ไม่ดี

รูปที่ 4.3(f-i) แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC-g-MA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ กัน พบว่า ไม่ปรากฏอนุภาคของ PA6/EOC-g-MA บนพื้นผิวรอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบ หากแต่ฝัง (embedded) อยู่ในเมทริกซ์ของ PA6 และมีอนุภาคแบบยืดตัว (elongate) เนื่องจากการมีแรงยึดระหว่างผิวของ PA6 และ EOC-g-MA ผ่านพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่เอไมด์ของ PA6 และหมู่แอมไฮโดรคิลของ EOC-g-MA [22]

รูปที่ 4.4 แสดงสัณฐานวิทยาของอนุภาค WT และคอมพอสิตของ 85/15 PA6/EOC-g-MA ด้วย WT ปริมาณ 10, 20 และ 30 phr ภายใต้กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของ (a) WT และ (b-d) คอมพอสิตของ 85/15 PA6/EOC-g-MA ด้วย WT ปริมาณ 10, 20 และ 30 phr ตามลำดับ ภายใต้กำลังขยาย 1,000 เท่า

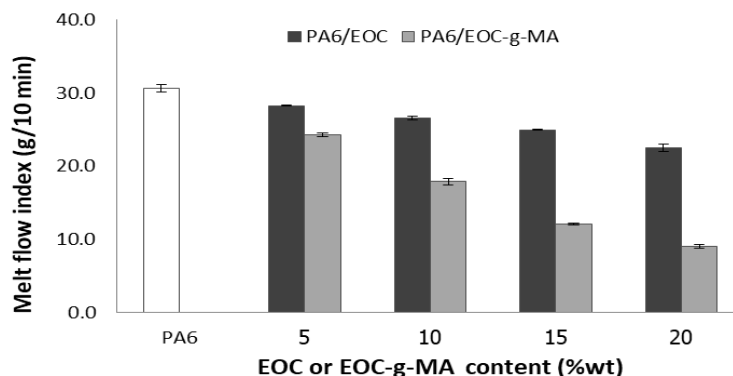
รูปที่ 4.4(a) แสดงอนุภาครูปเข็มของ WT (มี aspect ratio เท่ากับ 1:18) ส่วนรูปที่ 4.4 (b-d) แสดงสัณฐานวิทยาของ 85/15 PA6/EOC-g-MA คอมพอสิตด้วย WT ปริมาณ 10, 20 และ 30 phr ตามลำดับ พบว่า อนุภาคของ WT กระจายตัวได้ดีและฝังอยู่ในเมทริกซ์ของ PA6 โดยพบเห็นส่วนปลาย (tip) ของอนุภาค WT เป็นจุดสีขาว ซึ่งอาจเป็นส่วนปลายของอนุภาคที่แตกหักจากการได้รับแรงกระแทกเนื่องจากความแข็งของอนุภาค แสดงว่าอนุภาคของ WT มีการจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักร (machine direction) ภายในชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ

4.3 ดรรชนีการหลอมไหล

ดรรชนีการหลอมไหล (melt flow index, MFI) ตามมาตรฐาน ISO 1133 ขององค์ประกอบต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และ รูปที่ 4.5 และ 4.6

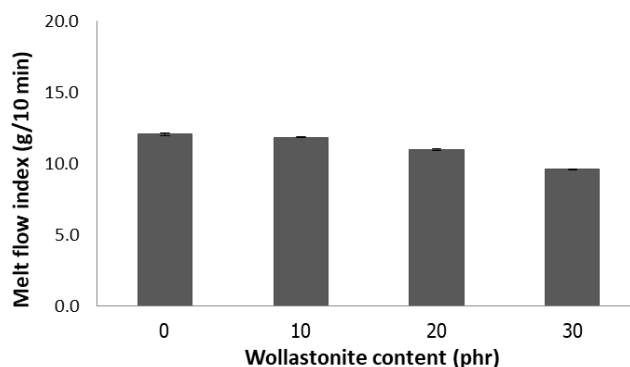
ตารางที่ 4.1 ดรรชนีการหลอมไหลและความถ่วงจำเพาะขององค์ประกอบต่าง ๆ

Sample	Melt flow index (g/10 min)	Specific gravity
PA6	30.7	1.13
95/5 PA6/EOC	28.2	1.11
90/10 PA6/EOC	26.5	1.10
85/15 PA6/EOC	24.9	1.08
80/20 PA6/EOC	22.5	1.07
95/5 PA6/EOC-g-MA	24.3	1.11
90/10 PA6/EOC-g-MA	22.5	1.09
85/15 PA6/EOC-g-MA	17.8	1.07
80/20 PA6/EOC-g-MA	12.0	1.06
85/15/10 PA6/EOC-g-MA/WT	11.8	1.14
85/15/20 PA6/EOC-g-MA/WT	10.9	1.19
85/15/30 PA6/EOC-g-MA/WT	9.6	1.25



รูปที่ 4.5 ธรรมชาติการหลอมไหลของ PA6 พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่องค์ประกอบต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.5 พบว่า MFI ของ PA6 ที่ได้จากการทดสอบ มีค่าเท่ากับ 30.7 กรัม/10 นาที ซึ่งเมื่อนำ PA6 มาผสมกับ EOC และ EOC-g-MA พบว่า พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA มี MFI ลดลงตามปริมาณ EOC และ EOC-g-MA ที่เพิ่มขึ้น โดยพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC มี MFI อยู่ในช่วง 22.5-28.2 กรัม/10 นาที และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC-g-MA มี MFI อยู่ในช่วง 9.0-24.5 กรัม/10 นาที เนื่องจาก EOC และ EOC-g-MA เป็นเทอร์โมอีลาสโตเมอร์ที่มีค่าธรรมชาติการหลอมไหลต่ำ เท่ากับ 1.6-3 กรัม/10 นาที (ค่าได้จากเอกสารรายละเอียดสินค้า) หากแต่พบว่าพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC-g-MA มี MFI ต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ใส่ EOC และ EOC-g-MA ปริมาณเท่า ๆ กัน เนื่องจาก PA6 และ EOC-g-MA สามารถเกิดอันตรกิริยาที่ดีจากหมู่อะมิโนของไนลอนที่ทำปฏิกิริยากับแอนไฮไดรด์ จึงเหนี่ยวนำทำให้พอลิเมอร์ผสมเคลื่อนไหลได้ยากขึ้น

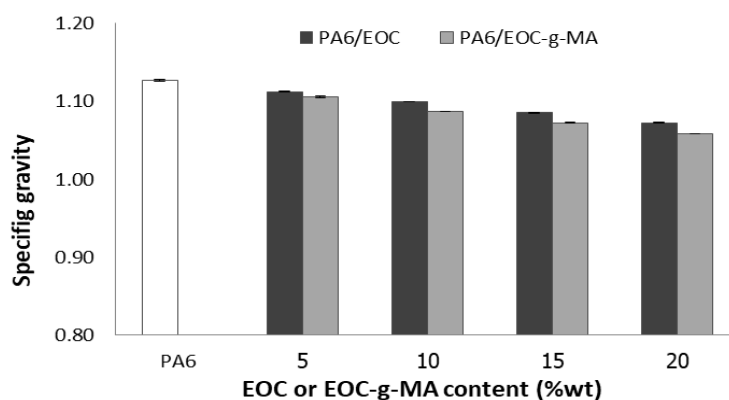


รูปที่ 4.6 ธรรมชาติการหลอมไหลของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.6 พบว่า MFI ของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิต ทุกอัตราส่วนมีค่าลดลงเล็กน้อยตามปริมาณ WT ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ MFI ของพอลิเมอร์ผสมล้วน ทั้งนี้อาจเนื่องจากอนุภาคที่แข็งตึงของ WT ขัดขวางการไหลของพอลิเมอร์เมทริกซ์ อย่างไรก็ตาม การลดลงของ MFI ของทั้งพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิตไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดแบบในงานวิจัยนี้

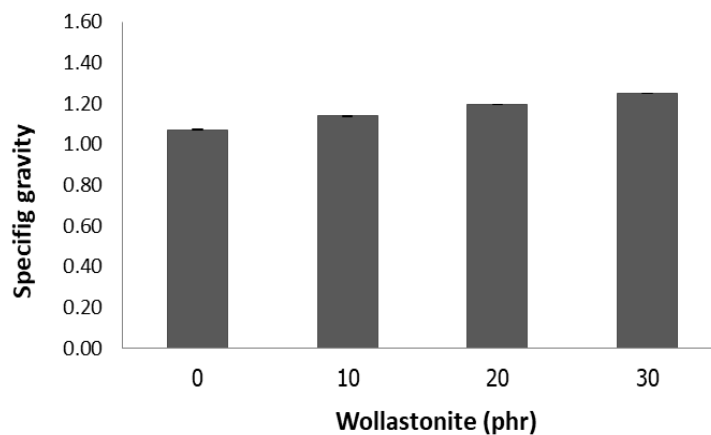
4.4 ความถ่วงจำเพาะ

ตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ตามมาตรฐาน ISO 1183 ของ PA6, พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA และ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ปริมาณ 10, 20 และ 30 phr



รูปที่ 4.7 ความถ่วงจำเพาะของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่องค์ประกอบต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.7 พบว่า ความถ่วงจำเพาะของ PA6 มีค่าเท่ากับ 1.13 เมื่อนำมาผสมกับ EOC และ EOC-g-MA ส่งผลให้ความถ่วงจำเพาะของพอลิเมอร์ผสมทั้งสองมีค่าลดลงเล็กน้อย (1.07–1.11) ตามปริมาณของ EOC และ EOC-g-MA ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก EOC และ EOC-g-MA มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า PA6 (0.90 และ 0.87 ตามลำดับ, ค่าได้จากเอกสารรายละเอียดสินค้า)



รูปที่ 4.8 ความถ่วงจำเพาะของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.8 พบว่า การเติม WT ในพอลิเมอร์ผสม 85/15 PA6/EOC-g-MA ส่งผลให้ความถ่วงจำเพาะของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นที่ละเล็กละน้อย และมีค่าอยู่ในช่วง 1.14–1.25 ทั้งนี้เนื่องจาก WT เป็นสารอนินทรีย์ที่มีความถ่วงจำเพาะสูง คือ 2.9 (ค่าได้จากเอกสารรายละเอียดสินค้า) จึงส่งผลให้ความถ่วงจำเพาะของคอมพอสิตทุกองค์ประกอบมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณ WT ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจส่งผลต่อน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ถ้าใส่ในปริมาณมาก

4.5 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ

ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.9–4.22 แสดงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบในเทอมของความทนแรงกระแทก (impact strength, IS), ความทนแรงดึง (tensile strength, TS), การยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break, EB), ยังส์มอดุลัส (Young's modulus, E), ความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength, FS), มอดุลัสการดัดโค้ง (flexural modulus, FM) และความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell hardness)

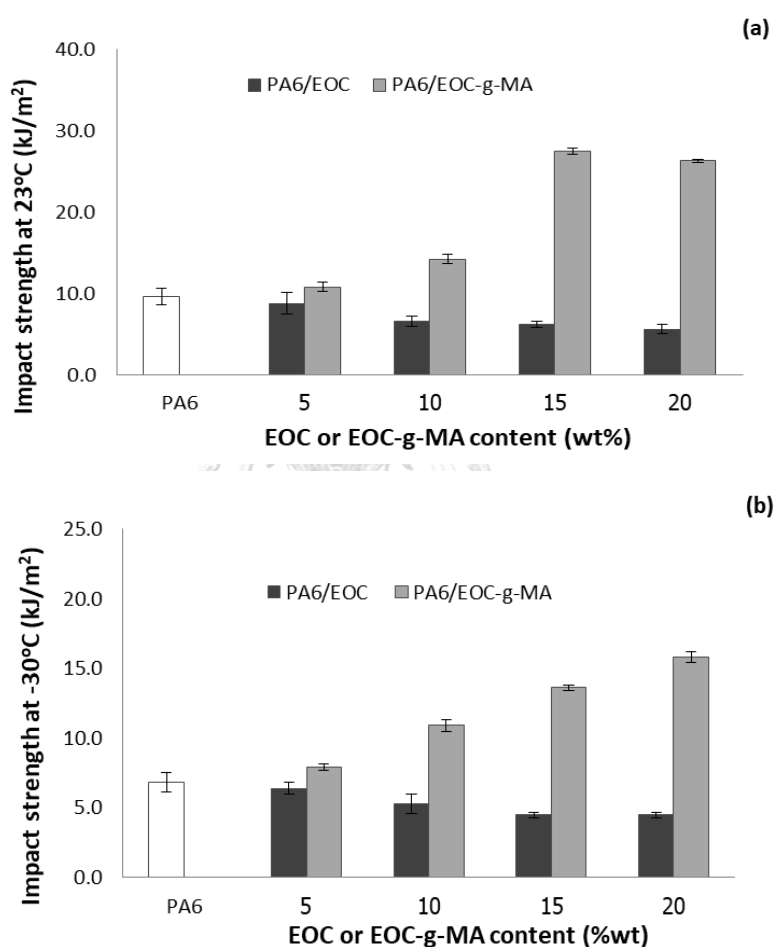
ตารางที่ 4.2 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ

Sample	IS at 23°C (kJ/m ²)	IS at -30°C (kJ/m ²)	TS (MPa)	EB (%)	E (MPa)	FS (MPa)	FM (MPa)	Rockwell hardness
PA6	9.5±1.0	8.8±0.7	79.5±0.7	27.2±6.6	2898±14	107.9±0.6	2597±39	119.6±0.2
95/5 PA6/EOC	8.8±1.3	6.4±0.4	71.7±0.1	8.8±1.6	2792±54	98.3±0.7	2355±27	117.5±0.2
90/10 PA6/EOC	6.6±0.6	5.2±0.7	65±0.1	11.8±0.5	2626±66	87.5±0.4	2205±21	114.6±0.5
85/15 PA6/EOC	6.6±0.4	4.5±0.2	59.3±0.2	10.5±0.5	2340±51	77.3±0.7	2036±24	111.7±0.5
80/20 PA6/EOC	5.7±0.6	4.5±0.2	55.0±0.1	10.4±1.2	2196±29	68.7±0.7	1897±15	108.9±0.3
95/5 PA6/EOC-g-MA	10.9±0.6	7.9±0.2	73.1±0.4	14.9±5.3	2835±48	101.8±0.2	2457±39	116.9±0.2
90/10 PA6/EOC-g-MA	14.3±0.6	10.9±0.4	65.4±0.2	21.8±4.8	2711±57	91.9±0.6	2218±15	114.1±0.4
85/15 PA6/EOC-g-MA	27.5±0.4	13.6±0.2	58.7±0.2	25.9±9.5	2482±82	80.0±0.5	1955±10	110.9±0.5
80/20 PA6/EOC-g-MA	26.3±0.2	15.8±0.4	52.4±0.1	26.5±4.0	2326±60	71.8±0.2	1755±18	107.9±0.5
85/15/10 PA6/EOC-g-MA/WT	15.6±0.4	11.2±0.6	53.7±0.2	13.8±3.4	2418±37	74.3±0.5	1911±21	110.5±0.2
85/15/20 PA6/EOC-g-MA/WT	12.7±0.5	10.0±1.3	52.7±0.4	16.2±3.5	2770±17	76.9±0.2	2164±11	110.5±0.2
85/15/30 PA6/EOC-g-MA/WT	11.1±1.0	9.9±0.5	54.1±0.2	15.3±2.6	3228±24	81.9±0.3	2585±35	110.6±0.2

4.5.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA

4.5.1.1 ความทนแรงกระแทก

ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบความทนแรงกระแทกตามมาตรฐาน ISO 180 ของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่อุณหภูมิ 23 และ -30 องศาเซลเซียส



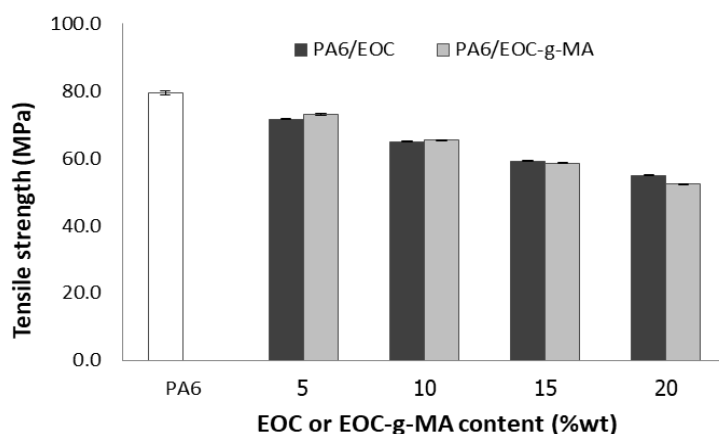
รูปที่ 4.9 ความทนแรงกระแทกที่อุณหภูมิ (a) 23 องศาเซลเซียส และ (b) -30 องศาเซลเซียส ของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่องค์ประกอบต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.9 พบว่า PA6 มีความทนแรงกระแทกค่อนข้างต่ำ (9.5 และ 8.8 kJ/m² ที่อุณหภูมิ 23 และ -30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) ซึ่งแสดงถึงการเป็นพลาสติกที่มีความแข็งเปราะ เนื่องจาก PA6 มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) ค่อนข้างสูง (~ 50 องศาเซลเซียส) ในขณะที่ความทนแรงกระแทกของ EOC และ EOC-g-MA ไม่

สามารถหาได้ภายใต้ภาวะการทดสอบนี้ เนื่องจากชิ้นงานทดสอบไม่เกิดการแตกหัก ซึ่งเป็นสมบัติของพลาสติกที่มีความเหนียวและยืดหยุ่นสูง เนื่องจาก EOC มีค่า T_g ต่ำมาก (~ -40 องศาเซลเซียส) และเมื่อเติม EOC ใน PA6 พบว่า ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC ทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำไม่ได้รับการปรับปรุงทั้ง ๆ ที่ EOC มีความยืดหยุ่นสูงกว่า PA6 หากแต่กลับมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณ EOC ที่เพิ่มขึ้น (5.7–8.8 และ 4.5–6.4 kJ/m^2 ที่อุณหภูมิ 23 และ -30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) เนื่องจากมีแรงยึดเกาะระหว่างผิวของ PA6 และ EOC ต่ำ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงทำให้มีการส่งผ่านความเค้น (stress transfer) ได้ไม่ดี แต่เมื่อเติม EOC-g-MA ใน PA6 พบว่า ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC-g-MA ทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำได้รับการปรับปรุงอย่างเห็นได้ชัด (10.9–27.5 และ 7.9–15.8 kJ/m^2 ที่อุณหภูมิ 23 และ -30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) เนื่องจากมีแรงยึดเกาะระหว่างผิวที่ดีระหว่าง EOC-g-MA ที่มีความยืดหยุ่นสูง และ PA6 ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงทำให้สามารถส่งผ่านความเค้นที่เกิดจากแรงกระแทกในชิ้นงานทดสอบได้ดี

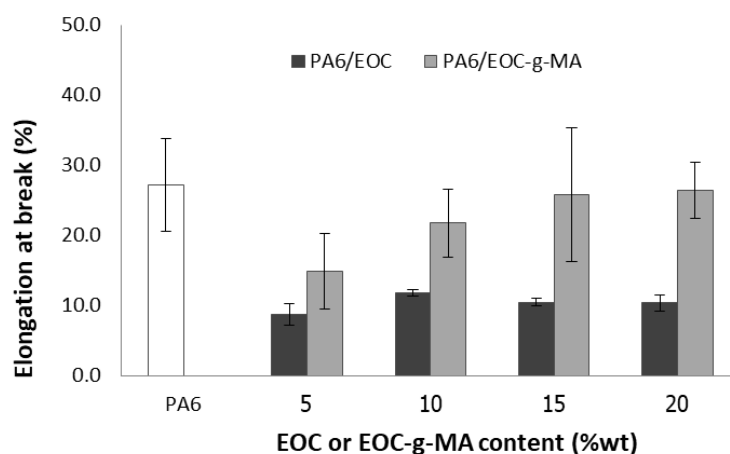
4.5.1.2 สมบัติความทนแรงดึง

ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.10–4.12 แสดงผลสมบัติความทนแรงดึง (ความทนแรงดึง, การยืดตัว ณ จุดขาด และยังสัมพันธ์) ตามมาตรฐาน ISO 527 ของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA



รูปที่ 4.10 ความทนแรงดึงของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่องค์ประกอบต่าง ๆ

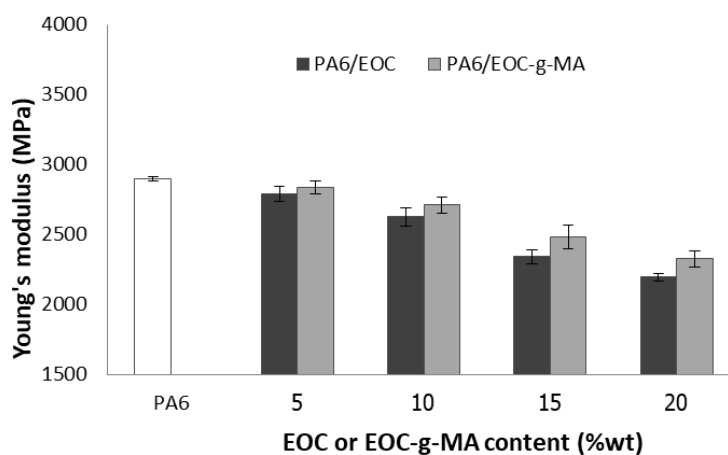
จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.10 พบว่า PA6 มีความทนแรงดึงเท่ากับ 79.5 MPa ซึ่งเมื่อเติม EOC และ EOC-g-MA ใน PA6 มีผลทำให้ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC (55–71.7 MPa) และ PA6/EOC-G-MA (52.4–73.1 MPa) ทุกองค์ประกอบมีค่าต่ำกว่าของ PA6 และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ EOC และ EOC-g-MA ที่เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความเป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ของ EOC และ EOC-g-MA ที่มีความทนแรงดึงต่ำกว่า PA6 มาก เมื่อเพิ่มปริมาณ EOC และ EOC-g-MA ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาจากเฟสของ PA6 เป็นเฟสที่มีการกระจายตัวของ EOC และ EOC-g-MA [17] การอย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC-g-MA มีความทนแรงดึงสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC เมื่อพิจารณาปริมาณการใส่ EOC และ EOC-g-MA ในลำดับเดียวกัน เนื่องจากการมีอันตรกิริยาที่ดีระหว่าง PA6 และ EOC-g-MA ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 4.11 การยืดตัว ณ จุดขาดของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่องค์ประกอบต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.11 พบว่า PA6 มีการยืดตัว ณ จุดขาด 27.2% ซึ่งเมื่อเติม EOC และ EOC-g-MA ใน PA6 มีผลทำให้การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC (8.8–10.4%) และ PA6/EOC-g-MA (14.9–26.5%) ทุกองค์ประกอบมีค่าต่ำกว่าของ PA6 แสดงว่าการใส่ EOC และ EOC-g-MA ไม่มีผลปรับปรุงการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม ทั้ง ๆ ที่มีการยืดตัว ณ จุดขาดสูงกว่า PA6 มาก เนื่องจาก EOC และ EOC-g-MA ไม่เข้าร่วมตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับ PA6 ทำให้เมทริกซ์ของ PA6 มีความไม่ต่อเนื่อง นอกจากนี้ EOC ไม่มีแรงยึดเกาะระหว่างผิวของ PA6

ทำให้มีช่องว่างระหว่างผิวของอนุภาค EOC และ PA6 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีการยึดตัว ณ จุดขาดลดลง หากแต่มีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อปริมาณ EOC เพิ่มขึ้น ในขณะที่การยึดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ใส่ EOC-g-MA ปริมาณเดียวกับที่ใส่ EOC มีค่ามากกว่า เนื่องจากมีแรงยึดเกาะระหว่างผิวของ EOC-g-MA และ PA6 ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

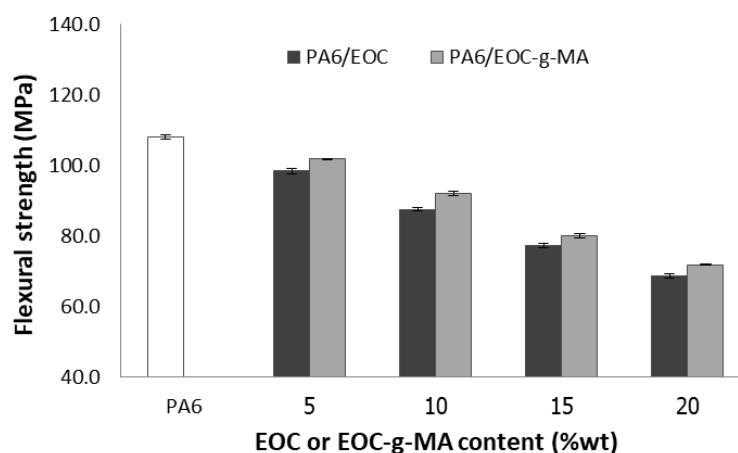


รูปที่ 4.12 ยังสัมมอดูลัสของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่องค์ประกอบต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.12 พบว่า PA6 มียังสัมมอดูลัสเท่ากับ 2898 MPa ซึ่งเมื่อเติม EOC และ EOC-g-MA ใน PA6 มีผลทำให้ยังสัมมอดูลัสของพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC (2196–2792 MPa) และ PA6/EOC-G-MA (2326–2835 MPa) ทุกองค์ประกอบมีค่าต่ำกว่าของ PA6 และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของ EOC และ EOC-g-MA ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความเป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ของ EOC และ EOC-g-MA ที่มียังสัมมอดูลัสต่ำกว่า PA6 อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC-g-MA มียังสัมมอดูลัสสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC เมื่อพิจารณาปริมาณการใส่ EOC และ EOC-g-MA ในลำดับเดียวกัน เนื่องจากการมีอันตรกิริยาที่ติระหว่าง PA6 และ EOC-g-MA ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

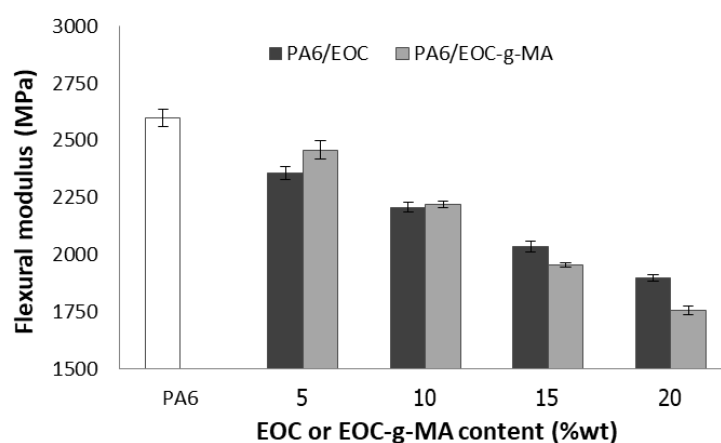
4.5.1.3 สมบัติความทนแรงดัดโค้ง

ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.13–4.14 แสดงผลสมบัติด้านความทนแรงดัดโค้ง (ความทนแรงดัดโค้ง และมอดูลัสการดัดโค้ง) ตามมาตรฐาน ISO 178 ของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA



รูปที่ 4.13 ความทนแรงดัดโค้งของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่องค์ประกอบต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.13 พบว่า ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่า PA6 ล้วน (107.9 MPa) อยู่ในช่วง 98.3–68.7 MPa และ 101.8–71.8 MPa ตามลำดับ เนื่องจากความทนแรงดัดโค้งที่ต่ำของ EOC และ EOC-g-MA หากแต่การเติม EOC-g-MA ส่งผลให้มีความทนแรงดัดโค้งสูงกว่าการเติม EOC เนื่องจากการมีอันตรกิริยาที่ดีระหว่าง PA6 และ EOC-g-MA ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น



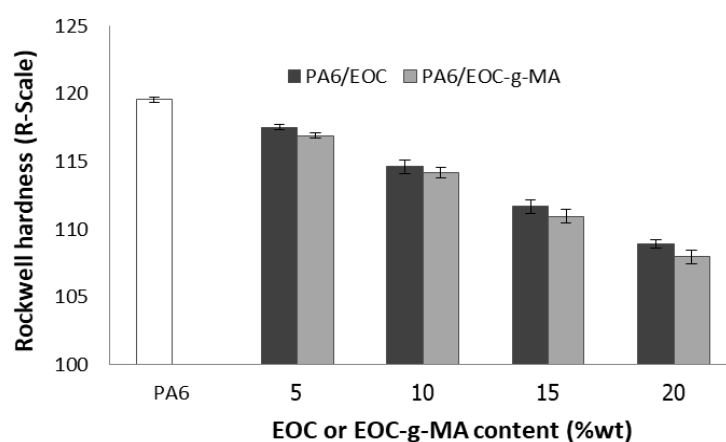
รูปที่ 4.14 ความทนแรงดัดโค้งของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่องค์ประกอบต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.14 พบว่า โมดูลัสการดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่า PA6 ล้วน (2597 MPa) อยู่ในช่วง 2355–1897 MPa และ 2457–1755 MPa

ตามลำดับ เนื่องจากมอดูลัสการดัดโค้งที่ต่ำของ EOC และ EOC-g-MA หากแต่การเติม EOC-g-MA ส่งผลให้มีความทนแรงดัดโค้งสูงกว่าการเติม EOC เนื่องจากการมีอันตรกิริยาที่ติระหว่าง PA6 และ EOC-g-MA ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

4.5.1.4 ความแข็งแบบรีอคเวลล์

ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.15 แสดงผลสมบัติความแข็งแบบรีอคเวลล์ตามมาตรฐาน ISO 2039 ของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA



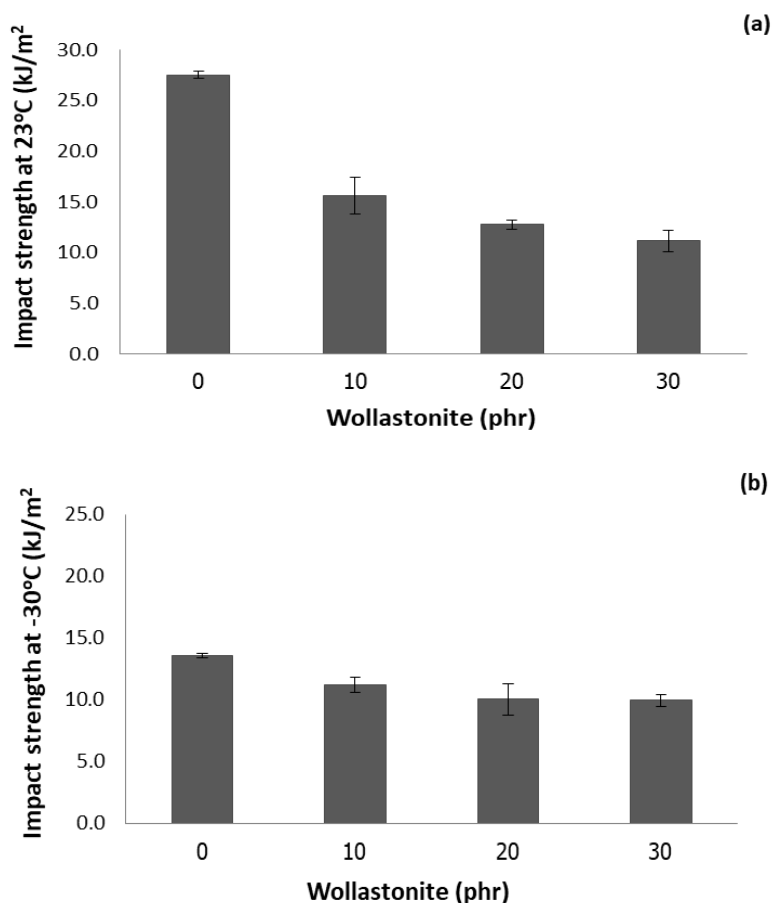
รูปที่ 4.15 ความแข็งแบบรีอคเวลล์ของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่องค์ประกอบต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.13 พบว่าความแข็งแบบรีอคเวลล์ของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่า PA6 ล้วน (119.6) อยู่ในช่วง 117.5–108.9 และ 116.9–107.9 ตามลำดับ เนื่องจากความเป็นเทอร์โมอิลาสโตเมอร์ของ EOC และ EOC-g-MA หากแต่การเติม EOC-g-MA ส่งผลให้มีความแข็งแบบรีอคเวลล์ต่ำกว่าการเติม EOC เนื่องจากการมีอันตรกิริยาที่ติระหว่าง PA6 และ EOC-g-MA จึงเห็นยวนำให้เกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสมลดลง ส่งผลให้พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น

4.5.2 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิต PA6/EOC-g-MA/WT

4.5.2.1 ความทนแรงกระแทก

ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.16 แสดงผลการทดสอบความทนแรงกระแทกตามมาตรฐาน ISO 180 ของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ปริมาณ 10, 20 และ 30 phr ที่อุณหภูมิ 23 และ -30 องศาเซลเซียส

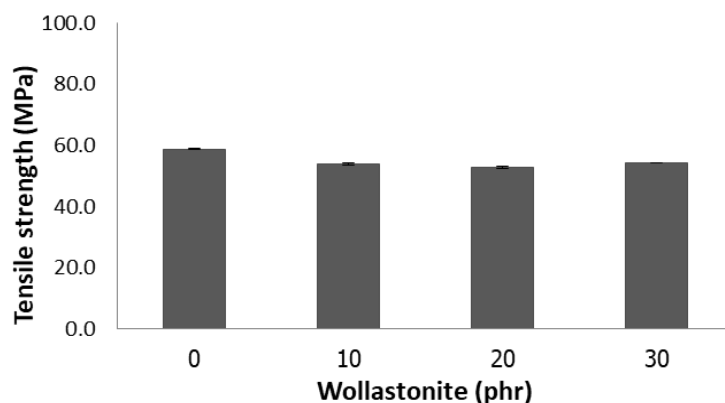


รูปที่ 4.16 ความทนแรงกระแทกที่อุณหภูมิ (a) 23 องศาเซลเซียส และ (b) -30 องศาเซลเซียส ของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.16 พบว่า ค่าความทนแรงกระแทกคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม 85/15 PA6/EOC-g-MA อยู่ในช่วง 15.6–11.1 kJ/m² เนื่องจากอนุภาคของ WT มีความแข็งตึง (stiffness) สูง จึงขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ อีกทั้งการมีอันตรกิริยาระหว่าง WT และเมทริกซ์ต่ำ จึงทำให้ความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตมีค่าลดลง หากแต่ยังมีค่าสูงกว่า PA6 ล้วน (9.5 kJ/m²)

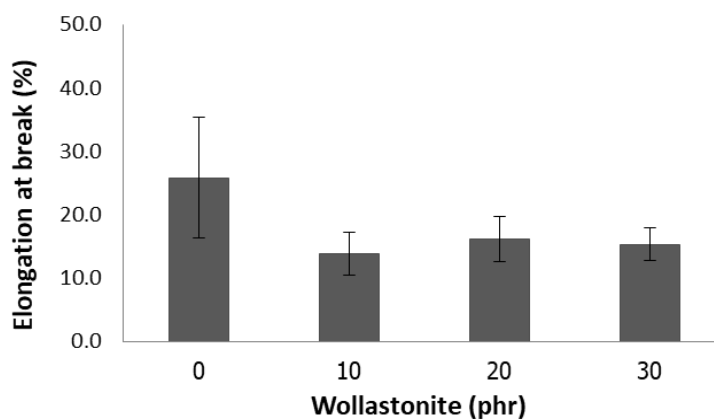
4.5.2.2 สมบัติความทนแรงดึง

ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.17–4.19 แสดงผลสมบัติความทนแรงดึง (ความทนแรงดึง, การยืดตัว ณ จุดขาด และยังสัมมอดุลัส) ตามมาตรฐาน ISO 527 ของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ปริมาณ 10, 20 และ 30 phr



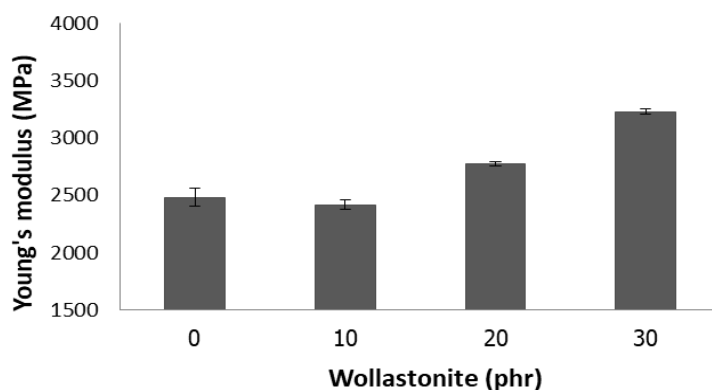
รูปที่ 4.17 ความทนแรงดึงของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.17 พบว่า ความทนแรงดึงของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ PA6 ล้วน (79.5 MPa) และพอลิเมอร์ผสม 85/15 PA6/EOC-g-MA เนื่องจาก การมีอันตรกิริยาระหว่าง WT และเมทริกซ์ต่ำ ทำให้เกิดการส่งผ่านแรงที่ไม่ดี ส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงของคอมพอสิตลดต่ำลง



รูปที่ 4.18 การยืดตัว ณ จุดขาดของ ของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.18 พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ PA6 ล้วน (27.2%) และพอลิเมอร์ผสม 85/15 PA6/EOC-g-MA เนื่องจากอนุภาคของ WT ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ อีกทั้งการมีอันตรกิริยาระหว่าง WT และเมทริกซ์ต่ำ ทำให้การยืดตัวมีค่าลดต่ำลง

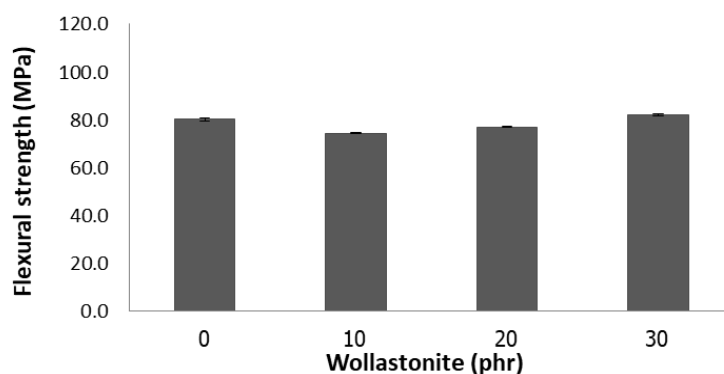


รูปที่ 4.19 ยังสัมมอดูลัสของ ของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.19 พบว่า ยังสัมมอดูลัสของคอมพอสิตมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ ผสม 85/15 PA6/EOC-g-MA เนื่องจากความแข็งดึงของ WT ไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่ พอลิเมอร์ โดยพบว่าการเติม WT ที่ปริมาณมากกว่า 20 phr ส่งผลให้คอมพอสิตมียังสัมมอดูลัส เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด อาจเนื่องจากมีปริมาณมากเพียงพอให้เกิดการกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ และ ที่การเติม WT 30 phr พบว่ามียังสัมมอดูลัสสูงที่สุดและสูงกว่า PA6 ล้วน

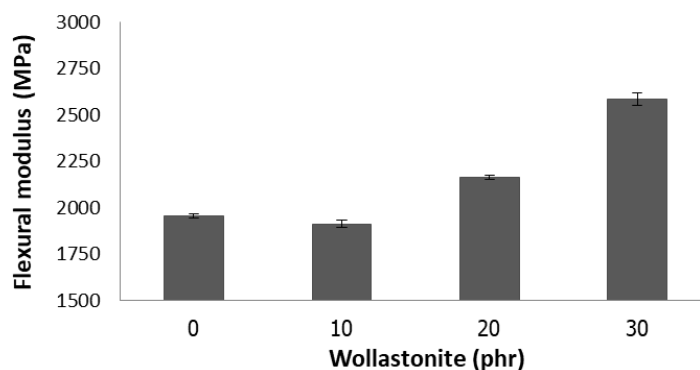
4.5.2.3 สมบัติความทนแรงดัดโค้ง

ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.20-4.21 แสดงผลสมบัติความทนแรงดัดโค้ง (ความ ทนแรงดัดโค้ง และมอดูลัสแรงดัดโค้ง) ตามมาตรฐาน ISO 178 ของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอม พอสิตด้วย WT ปริมาณ 10, 20 และ 30 phr



รูปที่ 4.20 ความทนแรงดัดโค้งของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.20 พบว่า ความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ PA6 ล้วน (107.9 MPa) และมีค่าใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสม 85/15 PA6/EOC-g-MA เนื่องจากการมีอันตรกิริยาระหว่าง WT และเมทริกซ์ต่ำ ทำให้เกิดการส่งผ่านแรงที่ไม่ดี ส่งผลให้ค่าความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิตลดลง

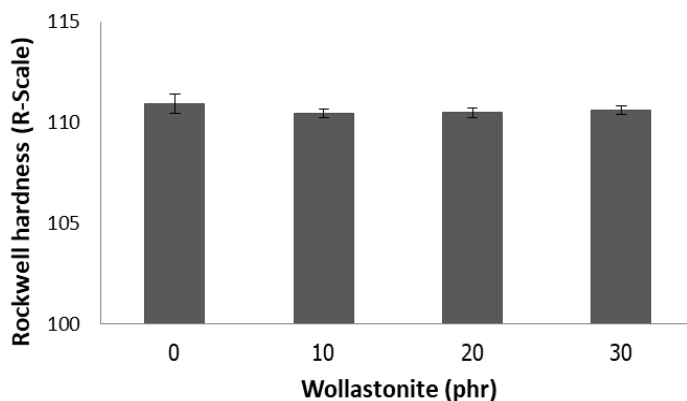


รูปที่ 4.21 ความทนแรงดัดโค้งของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.21 พบว่า มอดุลัสการดัดโค้งของคอมพอสิตมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม 85/15 PA6/EOC-g-MA เนื่องจากความแข็งดิ่งของ WT ไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยพบว่าการเติม WT ที่ปริมาณมากกว่า 20 phr ส่งผลให้คอมพอสิตมีมอดุลัสการดัดโค้งเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด อาจเนื่องจากมีปริมาณมากเพียงพอให้เกิดการกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ และที่การเติม WT 30 phr พบว่ามีมอดุลัสการดัดโค้งสูงที่สุด

4.5.2.4 ความแข็งแบบรีอคเวลล์

ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.22 แสดงผลสมบัติความแข็งแบบรีอคเวลล์ตามมาตรฐาน ISO 2039 ของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ปริมาณ 10, 20 และ 30 phr

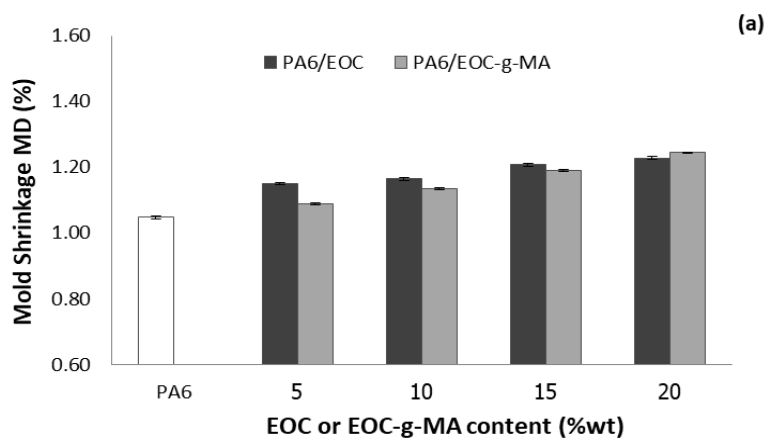


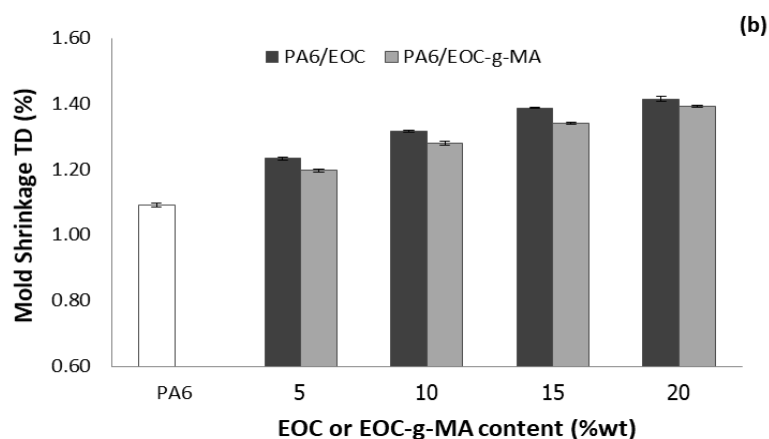
รูปที่ 4.22 ความแข็งแบบร็อกเวลล์ของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.22 พบว่า ความแข็งแบบร็อกเวลล์ของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ PA6 ล้วน (119.6) และพอลิเมอร์ผสม 85/15 PA6/EOC-g-MA เนื่องจากการมีอันตรกิริยาระหว่าง WT และเมทริกซ์ต่ำ อีกทั้งยังมีการกระจายตัวของ WT อยู่ด้านในของชิ้นทดสอบมากกว่าที่ผิวของชิ้นทดสอบ

4.6 การหดตัวในแม่แบบ

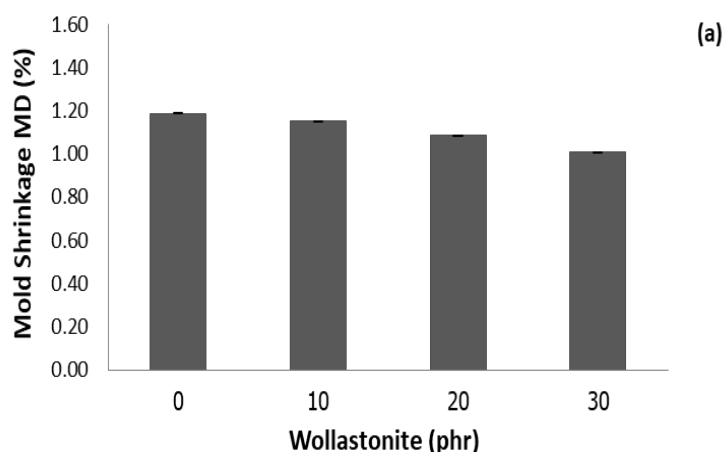
รูปที่ 4.23-4.24 แสดงสมบัติการหดตัวในแม่แบบ (mold shrinkage) ในทิศทางตามแนวการไหล และทิศทางขวางการไหล ตามมาตรฐาน ISO 294-4 ของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA

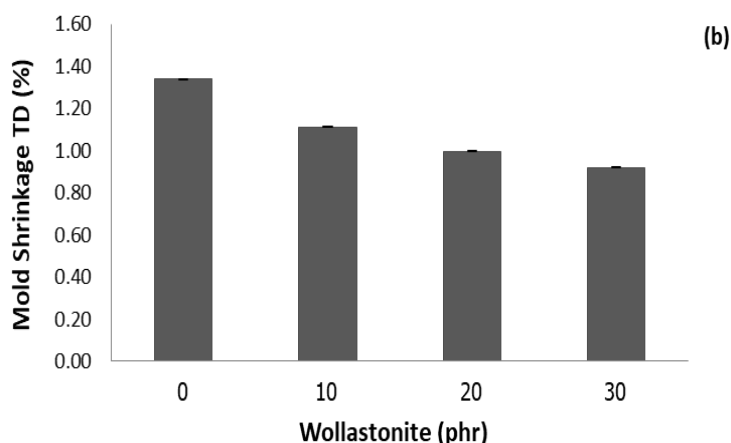




รูปที่ 4.23 การหดตัว (a) การหดตัวในทิศทางแนวการไหล (MD), (b) การหดตัวในทิศทางขวางการไหล (TD) ของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่องค์ประกอบต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.23(a-b) พบว่า พอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าการหดตัวสูงกว่า PA6 ล้วน เนื่องจากสมบัติความเป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ของ EOC และ EOC-g-MA มีความเป็นอสัณฐานที่มีการยืดตัวและหดตัวสูง เมื่อนำมาเติมลงใน PA6 ซึ่งมีความเป็นผลึก มีผลให้ค่าความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมลดลง ส่งผลให้ค่าการหดตัวเพิ่มขึ้นทั้งในทิศทางแนวการไหล และทิศทางขวางการไหล





รูปที่ 4.24 การหดตัว (a) การหดตัวในทิศทางแนวการไหล (MD), (b) การหดตัวในทิศทางขวางการไหล (TD) ของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ที่ ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr

จากรูปที่ 4.24(a-b) พบว่า สารตัวเติม WT ช่วยปรับปรุงสมบัติการหดตัวของคอมพอสิต เมื่อเทียบกับ PA6 ล้วน และพอลิเมอร์ผสม โดยมีค่าการหดตัวต่ำสุดเมื่อเติม WT ปริมาณ 30 phr ทั้งทิศทางแนวการไหล (1.01%) และทิศทางขวางการไหล (0.92%) เมื่อเทียบกับ PA6 ล้วน (ทิศทางการไหล 1.05% และ ทิศทางขวางการไหล 1.09%) เนื่องมาจากอนุภาคของ WT ช่วยขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ จึงช่วยลดการหดตัวของคอมพอสิตได้

4.7 สมบัติความร้อน

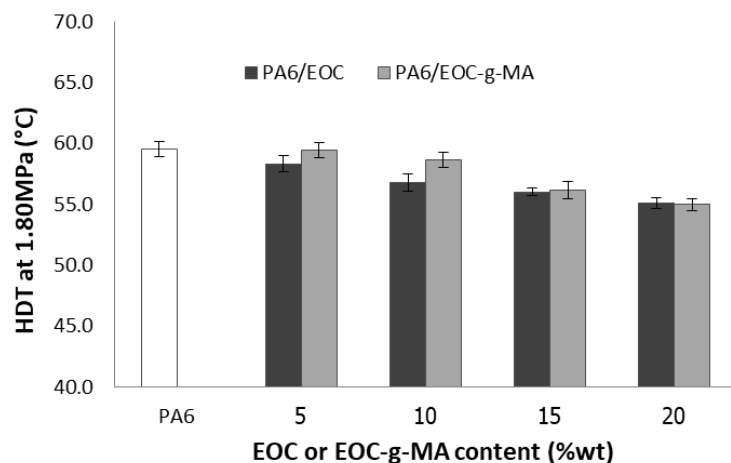
ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.25-4.30 แสดงสมบัติทางความร้อนในเทอมของ อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อน (heat deflection temperature, HDT), อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (T_{onset}), อุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด (T_{max}), อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว ($T_{end\ set}$), ปริมาณเถ้า (char), อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c), เอนทัลปีการเกิดผลึกเย็น (cool crystallization enthalpy, ΔH_c), อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m), เอนทัลปีการหลอมเหลว (melting enthalpy, ΔH_m) และระดับความเป็นผลึก (degree of crystallinity, X_c)

ตารางที่ 4.3 สมบัติทางความร้อน

Sample	HDT (°C)	TGA				DSC									
		T_{onset} (°C)	$T_{end\ set}$ (°C)	T_{max} (°C)	Char (%)	PA6					EOC				
						T_c (°C)	ΔH_c (J/g)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	%X _c	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	
PA6	59.5±0.6	446.4	493.8	473.8	-	185.0	-68.6	219.9	52.9	52.8	-	-	-	-	
PA6/EOC 5	58.3±0.7	445.4	494.2	473.2	-	187.7	-68.4	219.9	52.0	52.3	85.3	-0.7	99.4	0.5	
PA6/EOC 10	56.8±0.7	447.2	494.2	473.7	-	188.0	-61.4	219.3	50.5	48.6	85.9	-2.9	99.8	1.4	
PA6/EOC 15	56.0±0.3	448.0	495.8	475.0	-	187.3	-57.0	219.9	47.9	45.6	85.6	-5.0	100.1	3.8	
PA6/EOC 20	55.1±0.5	448.2	495.6	475.3	-	187.3	-54.2	219.3	40.1	41.0	85.9	-7.5	99.7	4.6	
PA6/EOC-g-MA 5	59.4±0.6	446.1	493.5	472.7	-	184.7	-68.0	219.6	55.2	53.6	-	-	-	-	
PA6/EOC-g-MA 10	58.6±0.6	447.5	494.5	474.0	-	183.9	-64.1	219.2	51.0	50.1	-	-	-	-	
PA6/EOC-g-MA 15	56.2±0.7	448.2	494.9	474.3	-	182.6	-59.5	219.9	43.8	44.9	-	-	-	-	
PA6/EOC-g-MA 20	55.0±0.5	449.2	495.4	474.7	-	182.9	-55.8	219.3	48.3	45.3	-	-	-	-	
PA6/EOC-g-MA/W 0	56.2±0.7	448.2	494.9	474.3	-	182.6	-59.5	219.9	43.8	44.9	-	-	-	-	
PA6/EOC-g-MA/W 10	56.6±0.3	448.2	491.0	470.9	9.4	186.3	-59.1	219.5	42.8	44.3	-	-	-	-	
PA6/EOC-g-MA/W 20	58.5±0.5	446.5	488.1	467.9	16.6	187.3	-49.4	219.0	38.9	38.4	-	-	-	-	
PA6/EOC-g-MA/W 30	61.6±0.7	444.7	486.7	466.0	22.4	187.3	-50.8	219.0	38.4	38.8	-	-	-	-	

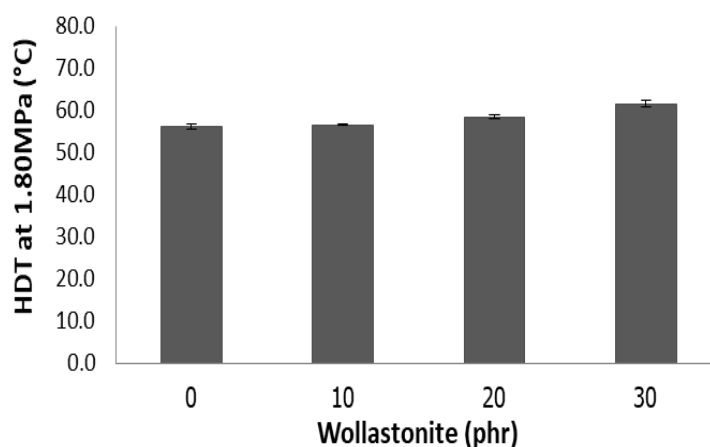
4.6.1 อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อน

ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.25–4.26 แสดงอุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อน (heat deflection temperature, HDT) ตามมาตรฐาน ISO 75 ของ PA6, พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA และ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอลิเตดด้วย WT ปริมาณ 10, 20 และ 30 phr



รูปที่ 4.25 อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่องค์ประกอบต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.25 พบว่า อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่า PA6 (59.5 องศาเซลเซียส) และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ EOC และ EOC-g-MA เพิ่มขึ้น อยู่ในช่วง 58.3–55.1 องศาเซลเซียส และ 59.4–55.0 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากสมบัติความเป็นเทอร์โมอิลาสโตเมอร์ของ EOC และ EOC-g-MA ที่มีความยืดหยุ่นและอ่อนตัวสูง หากแต่การเติม EOC-g-MA ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีอุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนสูงกว่าการเติม EOC เนื่องจากการมีอันตรกิริยาที่ดีระหว่าง PA6 และ EOC-g-MA ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 4.26 ความถ่วงจำเพาะของ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตต์ด้วย WT ที่ ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr

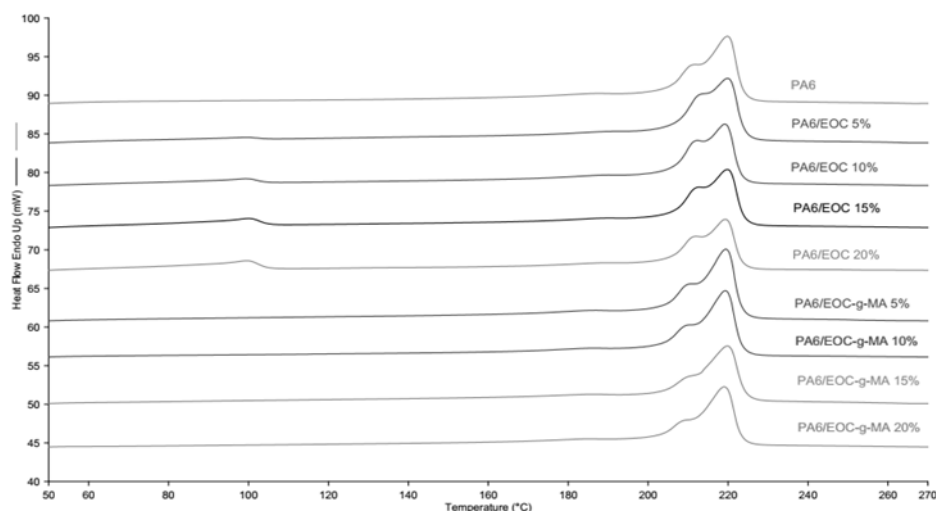
จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.26 พบว่า การเติม WT ช่วยในการปรับปรุงอุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อน โดยได้รับการปรับปรุงสูงสุดสำหรับการเติม WT ปริมาณ 30 phr (61.6 องศาเซลเซียส) เมื่อเทียบกับ PA6 ล้วน (59.5 องศาเซลเซียส) และพอลิเมอร์ผสม 85/15 PA6/EOC-g-MA (56.2 องศาเซลเซียส) เนื่องจากความแข็งดึงของ WT ไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ จึงช่วยปรับปรุงให้คอมพอสิตต์มีความทนต่อการอ่อนตัวด้วยความร้อนสูงขึ้น

4.6.2 เสถียรภาพทางความร้อนของชิ้นงานด้วยเทคนิควิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน

จากตารางที่ 4.3 พบว่า PA6 มี T_{onset} ที่ 446.4 องศาเซลเซียส และ T_{max} ที่ 473.8 องศาเซลเซียส และ $T_{end set}$ ที่ 493.8 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเติม EOC และ EOC-g-MA พบว่า เสถียรภาพทางความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่มีนัยสำคัญ และไม่พบปริมาณถ่าน (char) เหลืออยู่ เมื่อจบการทดสอบที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสในบรรยากาศไนโตรเจนแสดงว่าพอลิเมอร์ผสมเกิดการสลายตัวทางความร้อนได้สมบูรณ์ สำหรับคอมพอสิตต์พบว่าเมื่อทำการเติม WT ส่งผลให้ เสถียรภาพทางความร้อนลดลง เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาที่ไม่ดีส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่าง WT และเมทริกซ์ ทำให้ความร้อนสามารถแพร่เข้าได้ง่าย ส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิตต์มีค่าลดต่ำลง นอกจากนี้ยังพบว่า WT ไม่มีการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิและบรรยากาศที่ใช้ในการทดสอบ โดยพบปริมาณถ่านเพิ่มขึ้นตามปริมาณ WT ที่เพิ่มขึ้น

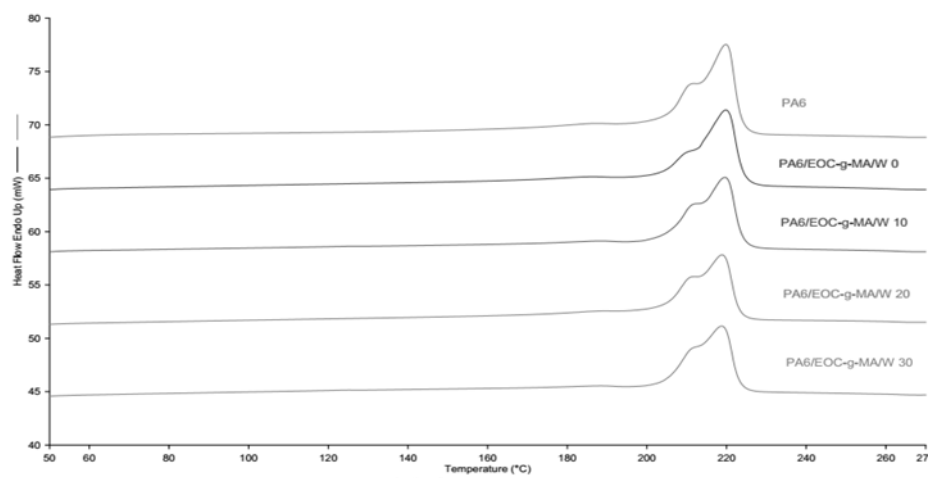
4.6.3 สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.27–4.28 แสดง DSC เทอร์โมแกรมของ PA6, พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA และ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ปริมาณ 10, 20 และ 30 phr ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง



รูปที่ 4.27 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ PA6 และพอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่องค์ประกอบต่าง ๆ

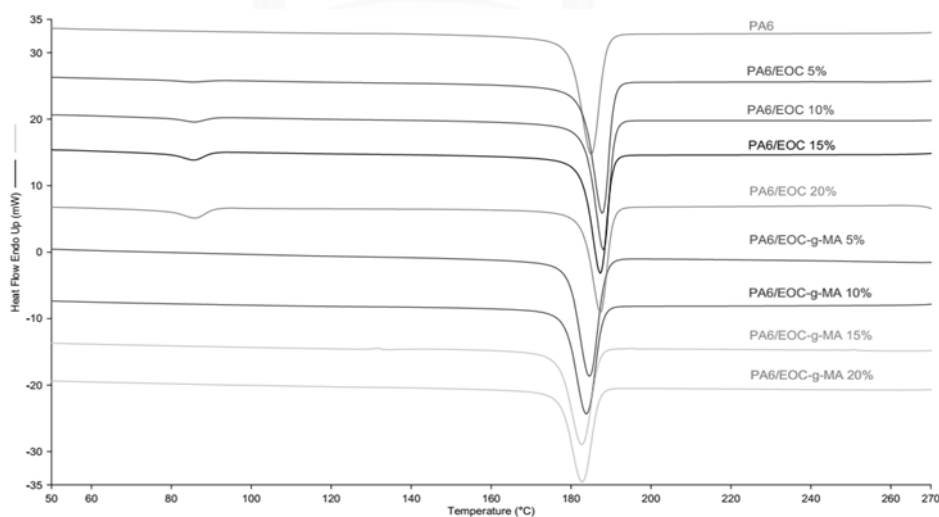
จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.27 พบว่า PA6 ปรากฏพิก T_m สองค่า ที่ 210 และ 220 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอนุกรมผลอมผลึกแกรมมา (γ) เฟสและแอลฟา (α) ของ PA6 ตามลำดับ [23] เมื่อนำมาผสมกับ EOC พบว่าปรากฏพิก T_m อยู่ 2 ช่วงคือ 99.4–100.1 องศาเซลเซียส สำหรับ EOC และ 219.3–219.9 องศาเซลเซียส สำหรับ PA6 แสดงให้เห็นถึงความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ในขณะที่เมื่อทำการเติม EOC-g-MA จะปรากฏพิก T_m ของ PA6 เท่านั้น ไม่พบพิก T_m ของ EOC-g-MA จึงอาจเป็นหลักฐานแสดงให้เห็นถึงการเกิดอันตรกิริยาที่ดีของพอลิเมอร์ผสม โดยที่ค่า T_m ของ PA6 มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.28 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ PA6 และ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอลิเมอร์ด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr

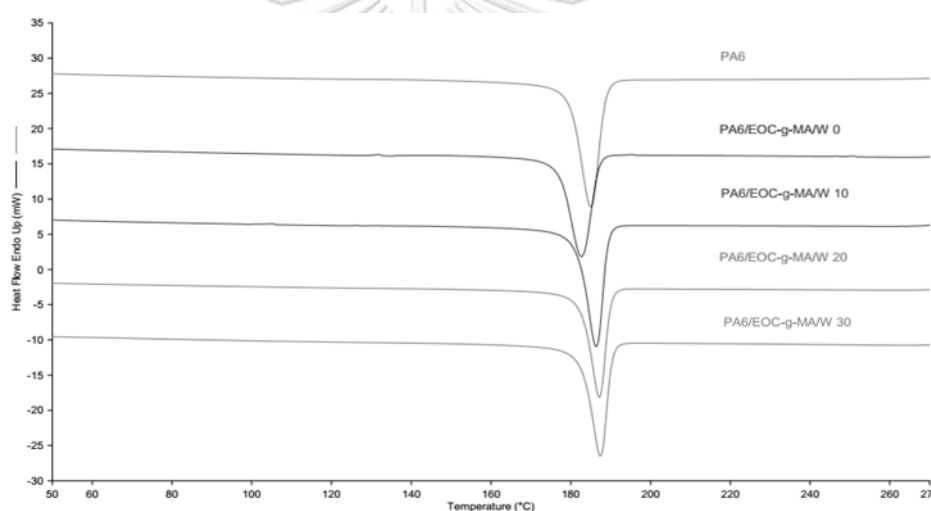
จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.28 พบว่า การเติม WT ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง T_m ของพอลิเมอร์ผสม โดยพบว่าคอมพอลิเมอร์มีค่า T_m อยู่ในช่วง 219.0–219.9 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วง T_m ของ PA6

ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.29–4.30 แสดง DSC เทอร์โมแกรมของ PA6, พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA และ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอลิเมอร์ด้วย WT ปริมาณ 10, 20 และ 30 phr ในขั้นตอนการเย็นตัว



รูปที่ 4.29 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัวของ PA6 และพอลิเมอร์ผสมของ PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.29 พบว่า PA6 มี T_c ที่ 185.0 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาผสมกับ EOC พบว่ามี T_c ปรากฏอยู่ 2 ช่วงอุณหภูมิ คือ 85.3–85.9 องศาเซลเซียส สำหรับ EOC และ 187.3–188.0 องศาเซลเซียส สำหรับ PA6 แสดงให้เห็นถึงความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ในขณะที่การเติม EOC-g-MA จะปรากฏแค่ T_c ของ PA6 เท่านั้น แสดงให้เห็นถึงการเกิดอันตรกิริยาที่ดีของพอลิเมอร์ผสม โดยที่ค่า T_c มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ EOC-g-MA ขึ้น อาจเนื่องมาจากการก่อตัวของโคพอลิเมอร์ EOC-g-PA6 ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่าง PA6 และ EOC-g-MA ซึ่งขัดขวางการตกผลึกของ PA6 [22] ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณ $\%X_c$ ที่ลดลง ตามปริมาณของ EOC และ EOC-g-MA ที่เพิ่มขึ้น จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง



รูปที่ 4.30 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัวของ PA6 และ 85/15x PA6/EOC-g-MAWT คอมพอลิเมอร์ด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.30 พบว่า เมื่อเติมสารตัวเติม WT ลงในพอลิเมอร์ผสม ส่งผลให้ค่า T_c มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 186.3–187.3 องศาเซลเซียส เนื่องการเกิดอันตรกิริยาที่ดีระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลให้เกิดปริมาตรอิสระ (free volume) ภายในเมทริกซ์ จึงทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวผลึกได้เร็วขึ้น หากแต่ WT สามารถเกิดการขัดขวางสายโซ่ จึงทำให้มีผลึกต่ำ เมื่อ

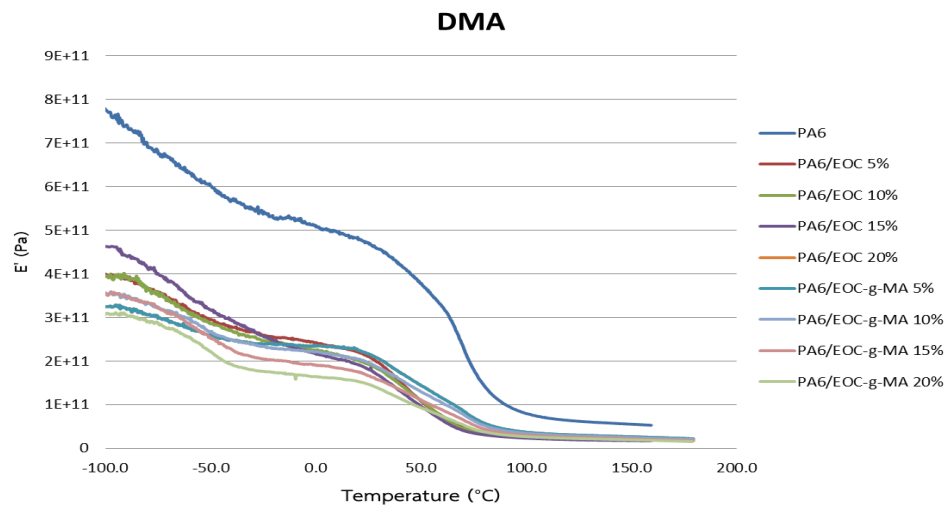
เปรียบเทียบกับ PA6 ล้วน และ 85/15 PA6/EOC-g-MA ซึ่งช่วยลดระยะเวลาในการฉีดขึ้นรูป (cycle time) ได้ เนื่องจากคอมพอสิตมีความสามารถสามารถในการเย็นตัวที่อุณหภูมิสูง

4.8 สมบัติเชิงกลพลวัต

ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.31–4.32 แสดงสมบัติเชิงกลพลวัตของ PA6, พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA และ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอสิตด้วย WT ปริมาณ 10, 20 และ 30 phr ในเทอมของมอดูลัสสะสม (storage modulus, E') และ T_g จากแทนเจนต์สูญเสีย (loss tangent, $\tan \delta$)

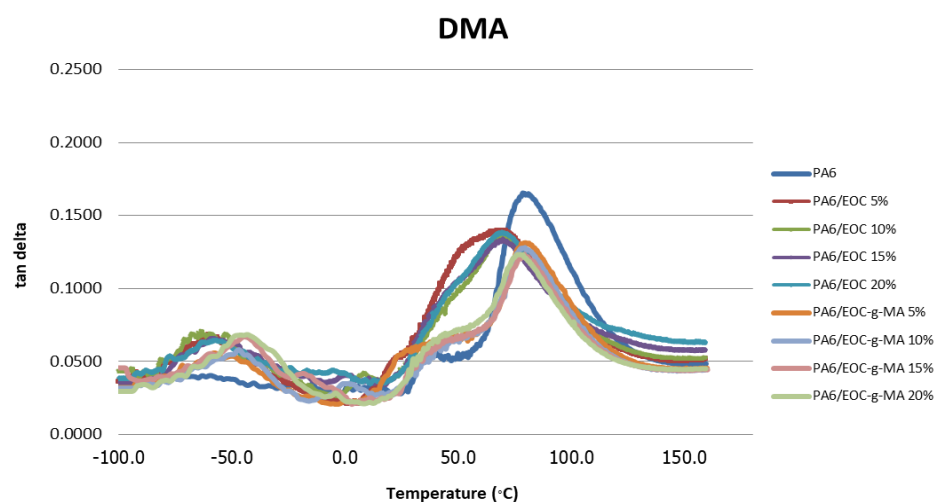
ตารางที่ 4.4 สมบัติเชิงกลพลวัต

sample	T_g of EOC (°C)	T_g of PA6 (°C)	Modulus at 78°C (Pa)
PA6	-	78.1	15.5×10^{10}
Polymer Blends			
PA6/EOC 5	-63.1	68.3	4.0×10^{10}
PA6/EOC 10	-64.7	69.7	3.6×10^{10}
PA6/EOC 15	-62.2	69.7	3.2×10^{10}
PA6/EOC 20	-62.6	68.3	3.0×10^{10}
PA6/EOC-g-MA 5	-56.7	78.7	6.1×10^{10}
PA6/EOC-g-MA 10	-53.6	77.3	5.6×10^{10}
PA6/EOC-g-MA 15	-50.2	78.3	4.8×10^{10}
PA6/EOC-g-MA 20	-51.4	75.7	4.0×10^{10}
Polymer Composites			
PA6/EOC-g-MA/W 0	-50.2	78.3	4.8×10^{10}
PA6/EOC-g-MA/W 10	-48.8	79.5	6.2×10^{10}
PA6/EOC-g-MA/W 20	-48.0	79.8	7.4×10^{10}
PA6/EOC-g-MA/W 30	-48.1	79.2	8.4×10^{10}



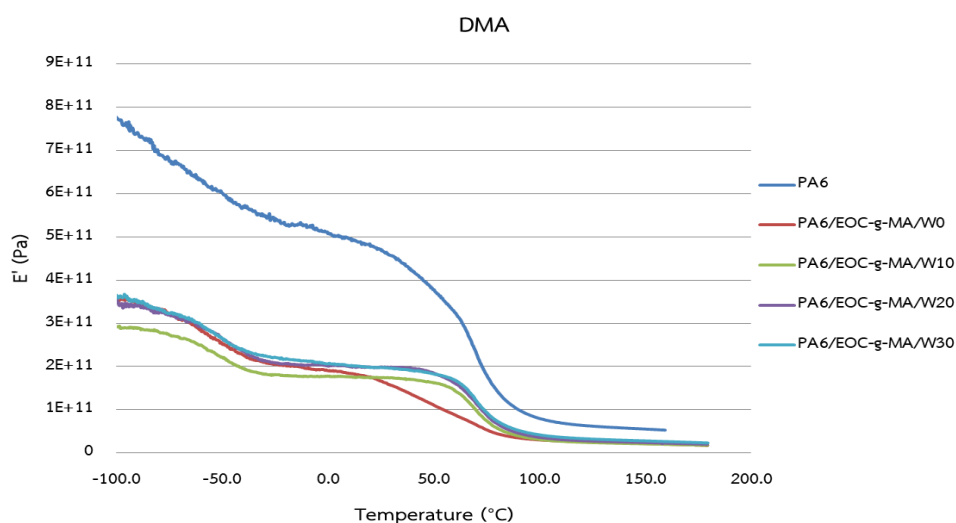
รูปที่ 4.31 สมบัติเชิงกลพลวัตมอดูลัสสะสม (E') ของ PA6 และพอลิเมอร์ผสมของ PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.31 พบว่า E' ที่ 78 องศาเซลเซียส ของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่า PA6 (15.5×10^{10} ปาสคาล) และมีแนวโน้มลดต่ำลง อยู่ในช่วง 4.0×10^{10} – 3.0×10^{10} ปาสคาล และ 6.1×10^{10} – 4.0×10^{10} ปาสคาล ตามลำดับ เนื่องจากความเป็นเทอร์โมอิลาสโตเมอร์ของ EOC และ EOC-g-MA หากแต่การเติม EOC-g-MA ส่งผลให้ E' มีค่าสูงกว่าการเติม EOC เนื่องจากการมีอันตรกิริยาที่ีระหว่าง PA6 และ EOC-g-MA



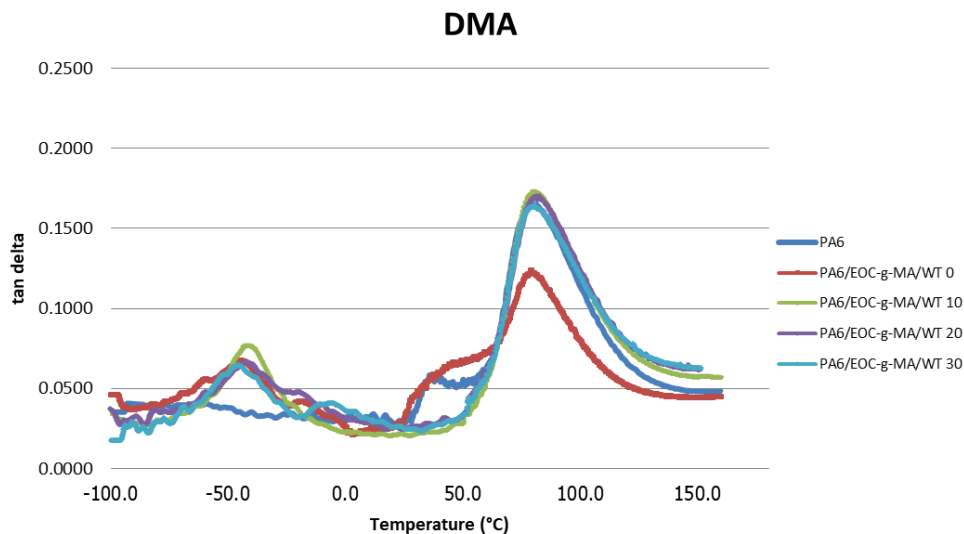
รูปที่ 4.32 สมบัติเชิงกลพลแทนเจนต์สูญเสีย ($\tan \delta$) ของ PA6 และพอลิเมอร์ผสมของ PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.32 พบว่าค่า T_g พอลิเมอร์ผสมแสดงค่า T_g ออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงของ EOC (-62 องศาเซลเซียส) และ PA6 (69 องศาเซลเซียส) และมีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับการเพิ่มของปริมาณ EOC เนื่องจากความไม่เข้ากันระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ผสม ในขณะที่การเติม EOC-g-MA แสดงค่า T_g ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเข้าหา PA6 เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาที่ตีระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 4.33 สมบัติเชิงกลพลวัตมอดูลัสสะสม (E') ของ PA6 และ 85/15/x PA6/EOC-g-MAWT คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.33(a) พบว่า E' ของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม (4.8×10^{10} ปาสคาล) อยู่ในช่วง 6.2×10^{10} – 8.4×10^{10} ปาสคาล เนื่องจากความแข็งดึงของสารตัวเติม WT หากแต่ยังมีค่าต่ำกว่า PA6 ล้วน (15.5×10^{10} ปาสคาล) เนื่องการเกิดอันตรกิริยาที่ต่ำระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลให้เกิดปริมาตรอิสระ (free volume) ภายในเมทริกซ์ จึงทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 4.34 สมบัติเชิงกลพลแทนเจนต์สูญเสีย (tan delta) ของ PA6 และ 85/15/x PA6/EOC-g-MAWT คอมพอลิเมอร์ด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.34 พบว่า การเติม WT ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง T_g ของ PA6 หากแต่มีผลให้ T_g ของ EOC-g-MA มีค่าสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ 85/15 PA6/EOC-g-MA เนื่องจากความแข็งตึงของ WT แต่ไม่ขึ้นกับปริมาณที่เพิ่มขึ้น

4.9 การหลอมหยด

รูปที่ 4.35 แสดงลักษณะขึ้นทดสอบที่ทำการทดสอบการหลอมหยด (melt dipping) ของ PA6 และ 85/15/x PA6/EOC-g-MA/WT คอมพอลิเมอร์ด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr



รูปที่ 4.35 ชิ้นงานหลังทดสอบการหลอมหายของ PA6 และ 85/15/x PA6/EOC-g-MAWT คอมพอสิตด้วย WT ที่ปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 phr

จากรูปที่ 4.35 พบว่า PA6 เมื่อติดไฟแล้วเป็นเวลา 10 วินาทีจะเกิดการหลอมหายแต่ช้ากว่าพอลิเมอร์ผสม หากแต่เมื่อทำการเติม WT เข้าไปในพอลิเมอร์ผสมพบว่าระดับการหลอมหายจะลดลง และเมื่อเติมปริมาณ WT ไปปริมาณ 30 phr พบว่าการหลอมหายลดต่ำสุด และเมื่อครบเวลา 10 วินาทีไฟที่ติดสามารถดับได้เอง และพบฝ้าสีดำปกคลุมที่พื้นผิวของชิ้นทดสอบ แสดงให้เห็นว่า WT สามารถปรับปรุงการหลอมหาย ซึ่งสอดคล้องกับการนำ WT ไปปรับปรุงประสิทธิภาพให้กับสารเคลือบสำหรับสารท่อนไฟ โดยพบว่าการเติม WT ช่วยต่อต้านการเกิดออกซิเดชันของแก้ว จึงสามารถช่วยลดการลามไฟ [24]

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของไนลอน 6 (PA6) ด้วยการเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมกับ เอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์ (EOC) และพอลิเมอร์ผสมกับเอทิลีน-ออกทีนโคพอลิเมอร์กราฟต์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (EOC-g-MA) เพื่อนำไปเตรียมเป็นคอมพอสิตกับโพลีเอทิลีน (WT) ด้วย เครื่องอัดรีดสกรูคู่ ตามด้วยเครื่องฉีดแบบ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. พอลิเมอร์ผสมมีดรชนีการไหลลดลงเมื่อปริมาณ EOC หรือ EOC-g-MA เพิ่มขึ้น และเมื่อเติม WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 85/15 PA6/EOC-g-MA ทำให้คอมพอสิตมีค่าดรชนีการไหลลดลง แต่ไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูป

2. พอลิเมอร์ผสมมีค่าความถ่วงจำเพาะลดลงเมื่อปริมาณ EOC หรือ EOC-g-MA เพิ่มขึ้น และเมื่อเติม WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 85/15 PA6/EOC-g-MA ทำให้คอมพอสิตมีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย การควบคุมค่าความถ่วงจำเพาะให้มีค่าลดลง มีประโยชน์ในอุตสาหกรรมยานยนต์เป็นอย่างมาก เนื่องจากการนำวัสดุน้ำหนักเบาเข้ามาผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ส่งผลให้น้ำหนักของรถลดลงได้ ช่วยให้การใช้พลังงานต่อระยะทางมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

3. การเติม EOC และ EOC-g-MA ทำให้ความทนแรงดึง ยังสัมพันธ์ การยืดตัว ณ จุดขาด ความทนแรงดัดโค้ง โมดูลัสการดัดโค้ง ความแข็งแบบบรีคเวลล์ และการอ่อนตัวด้วยความร้อน ลดต่ำลง อย่างไรก็ตามการเติม EOC-g-MA ลงใน PA6 สามารถปรับปรุงสมบัติความทนแรงกระแทกทั้งที่ อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำ โดยมีค่าสูงสุดสำหรับการเติมปริมาณ EOC-g-MA ที่ 15 %wt ในขณะที่ EOC ไม่สามารถปรับปรุงความทนแรงกระแทกได้ จึงนำอัตราส่วนผสมนี้ไปทำการเตรียมคอมพอสิตกับ WT ที่ 10, 20 และ 30 phr ต่อไป

4. การเติม WT ทำให้คอมพอสิตมียังสัมพันธ์ โมดูลัสการดัดโค้ง และอุณหภูมิการอ่อนตัว สูงขึ้น หากแต่ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด ความแข็งแบบบรีคเวลล์ ไม่ได้รับการปรับปรุง เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 85/15 PA6/EOC-g-MA อย่างไรก็ตามความทนแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับ PA6

5. การเติม EOC และ EOC-g-MA ทำให้การหดตัวเพิ่มสูงขึ้น หากแต่เมื่อเติม WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 85/15 PA6/EOC-g-MA ส่งผลให้ค่าการหดตัวลดต่ำลง และต่ำกว่า PA6

6. การเติม EOC ลงใน PA6 ไม่พบความเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิการเกิดผลึกในขณะเย็นตัว ในขณะที่การเติม EOC-g-MA มีผลให้อุณหภูมิการเกิดผลึกขณะเย็นตัว และปริมาณผลึกมีค่าลดลง ในขณะที่อุณหภูมิหลอมเหลวไม่เปลี่ยนแปลง สำหรับคอมพอสิตพบว่า อุณหภูมิการเกิดผลึกขณะเย็นตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณผลึกมีค่าลดลง แต่อุณหภูมิการหลอมเหลวมีค่าคงที่

7. พอลิเมอร์ผสมมีเสถียรภาพความร้อนเพิ่มขึ้นตามปริมาณ EOC หรือ EOC-g-MA ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่การเติม WT ในพอลิเมอร์ผสม 85/15 PA6/EOC-g-MA ส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนลดต่ำลง

8. การเติม EOC และ EOC-g-MA ลงใน PA6 ทำให้มอดูลัสสะสมของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงจาก PA6 ในขณะที่ EOC ไม่มีผลในการเปลี่ยนแปลง T_g แต่การเติม EOC-g-MA ส่งผลให้ T_g ของ EOC-g-MA เพิ่มขึ้น และเมื่อใส่ WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 85/15 PA6/EOC-g-MA ทำให้มอดูลัสสะสม และ T_g ของคอมพอสิตเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับค่า Young's Modulus และมอดูลัสตัดโค้ง

9. การเติม WT ลงใน 85/15 PA6/EOC-g-MA สามารถช่วยลดการหลอมหยดของพอลิเมอร์ผสม และ PA6

10. พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC-g-MA มีความทนแรงกระแทกที่ดี มีน้ำหนักเบา เหมาะสมในการนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนที่ต้องได้รับการหักงอ เช่น คลิปและตัวยึดสายไฟ

11. คอมพอสิต PA6/EOC-g-MA/WT เหมาะสำหรับการนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนในห้องโดยสาร ในส่วนที่ได้รับการสัมผัสและชิ้นส่วนที่ฉีดขึ้นรูปร่วมกับวัสดุอื่น เนื่องจากมีสมบัติโดยรวมที่ดี มีผิวสัมผัสที่เรียบเนียนและลดรอยขีดข่วน มีการหดตัวที่ต่ำ เช่น ปลอกเข็มขัดนิรภัย สวิตช์ควบคุมระบบไฟ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรดัดแปลงพื้นผิวของ WT ด้วยสารคู่ควบ (coupling agent) เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมและเมทริกซ์พอลิเมอร์

2. ควรทดลองขั้นตอนการผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ เพื่อศึกษาวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการผสมเพื่อให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการใช้งานจริง

บรรณานุกรม

- [1] D. P. Russell, and P. W. R. Beaumont, "Structure and properties of injection-moulded nylon-6," *Journal of Materials Science*, vol. 15, pp. 216–221, 1980.
- [2] P. Svoboda, R. Theravalappil, D. Svobodova, P. Mokrejs, K. Kolomaznik, K. Mori, T. Ougizawa, and T. Inoue, "Elastic properties of polypropylene/ethylene–octene copolymer blends," *Polymer Testing*, vol. 29, pp. 742-748, 2010.
- [3] J. K. Fink, *Reactive polymers: fundamentals and applications: A Concise Guide to Industrial Polymers*, Third ed., 2018.
- [4] J. A. Merchant, "Human epidemiology: a review of fiber type and characteristics in the development of malignant and nonmalignant disease.," *Environ Health Perspect*, vol. 88, pp. 287–293, 1990.
- [5] S. M. Bulatovic, "Chapter 30 - Wollastonite," *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice*, pp. 77-89, 2015.
- [6] E. N. Peters, "Engineering Thermoplastics—Materials, Properties, Trends," pp. 3-26, 2017.
- [7] R. B. Seymour, and G. S. Kirshenbaum, "High Performance Polymers: Their Origin and Development," *Proceedings of the Symposium on the History of High Performance Polymers at the American Chemical Society Meeting held in New York, April 15–18*, pp. 17-55, 1986.
- [8] J. Mishra, S. K. Tiwari, M. M. Abolhasani, S. Azimi, and G. C. Nayak, "Fundamental of polymer blends and its thermodynamics," *Micro and Nano Fibrillar Composites (MFCs and NFCs) from Polymer Blends*, pp. 27-55, 2017.
- [9] M. N. Subramanian, "Polymer Blends and Composites: Chemistry and Technology," pp. 169-201, 2017.
- [10] S. M. Sapuan, "Composite Materials: Concurrent Engineering Approach," pp. 57-93, 2017.
- [11] ท. กীরตเสวี, ฉ. วีระนิตติสกุล, and อ. เล่าห์บุตรี, "ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ," *วิศวกรรมสาร มก.*, pp. 18-32, 2009.
- [12] B. Erwin, T. A. Osswald, and N. Rudolph, "Additives, Fillers, and Fibers," *Plastics*

- Handbook. The Resource for Plastics Engineers*, pp. 579-624, 2018.
- [13] R. Rothon, and C. DeArmitt, "Chapter 8 - Fillers (Including Fiber Reinforcements)," *Brydson's Plastics Materials*, pp. 169-204, 2017.
- [14] B. Zeki, "Extrusion," *Food Process Engineering and Technology*, pp. 333-350, 2009.
- [15] F. G. J. Harold, R. W. J. John, and M. M. I. Eldridge, "Chapter 11 - Twin Screw Extruder Equipment," *Extrusion-The-Definitive-Processing-Guide-and-Handbook*, pp. 125-148, 2014.
- [16] J.-F. Agassant, P. Avenas, P. J. Carreau, B. Vergnes, and V. Vincent, "Chapter 6 - Twin-Screw Extrusion and Applications. ," *Polymer Processing Principles and Modelling*, pp. 433-519, 2017.
- [17] F. Gribben, M. G. McNally, A. H. Clarke, W. R. Murphy, and T. McNally, "The effect of compatibilisation for blends of nylon 6 or polybutylene Terephthalate (PBT) with metallocene linear low-density polyethylenes.," *Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing*, vol. 12, pp. 77-99, 2004.
- [18] M. U. Wahit, A. Hassan, Z. A. Mohd Ishak, and A. Abu Bakar, "The effect of polyethylene-octene elastomer on the morphological and mechanical properties of polyamide 6/polypropylene nanocomposites.," *Polymers & Polymer Composites* vol. 13, pp. 795-805, 2005.
- [19] S. H. Lim, A. Dasari, Z. Z. Yu, Y. W. Mai, S. Liu, and M. S. Yong, "Fracture toughness of nylon 6/organoclay/elastomer nanocomposites.," *Composites Science and Technology*, vol. 67, pp. 2914-2923, 2007.
- [20] A. Amin, and I. O. Bhaskar, "Effect of untreated wollastonite on mechanical properties of nylon 6.," *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, vol. 3, pp. 4714-4718, 2015.
- [21] H. Unal, A. Mimaroglu, and M. Alkan, "Mechanical properties and morphology of nylon-6 hybrid composites.," *Polymer International* vol. 63, pp. 56-60, 2004.
- [22] X. Lin, Y. Liu, X. Chen, Y. Wu, L. Cui, L. Mao, W. Zheng, and M. Lin, "Reactive Compatibilization of Polyamide 6/Olefin Block Copolymer Blends: Phase Morphology, Rheological Behavior, Thermal Behavior, and Mechanical Properties," *Materials (Basel)*, vol. 13, pp. 1146, 2020.
- [23] S. Anongnat, T. Mongkol, and T. Wiwut, "Mechanical and Gas Barrier Properties

of Nylon 6/Clay Nanocomposite Blown Films.,” *Engineering Journal* vol. 16, pp. 93-105, 2012.

- [24] M. Zia-ul-Mustafa, F. Ahmad, P. S. M. Megat-Yusoff, and H. Aziz, “The Effect of Particle Size of Wollastonite Filler on Thermal Performance of Intumescent Fire Retardant Coating,” *Advanced Materials Research*, vol. 970, pp. 328-331, 2014.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
ดรชนีการหลอมไหล

ตารางที่ ก-1 ดรชนีการหลอมไหลของ PA6, พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA และ 85/15 PA6/EOC-g-MA คอมพอสิตด้วย WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

sample/specimen no.	Melt flow index (g/10min)				
	1	2	3	Average	SD
PA6	31.1	30.8	30.1	30.7	0.50
PA6/EOC 5	28.3	28.2	28.2	28.2	0.07
PA6/EOC 10	26.3	26.6	26.7	26.5	0.22
PA6/EOC 15	24.8	24.9	25.0	24.9	0.08
PA6/EOC 20	22.3	23.1	22.1	22.5	0.51
PA6/EOC-g-MA 5	24.6	24.1	24.1	24.3	0.26
PA6/EOC-g-MA 10	17.5	17.7	18.3	17.8	0.41
PA6/EOC-g-MA 15	12.1	12.1	11.9	12.0	0.12
PA6/EOC-g-MA 20	8.7	9.2	9.2	9.0	0.26
PA6/EOC-g-MA W0	12.1	12.1	11.9	12.0	0.12
PA6/EOC-g-MA W10	11.8	11.8	11.8	11.8	0.03
PA6/EOC-g-MA W20	10.9	11.0	11.1	11.0	0.06
PA6/EOC-g-MA W30	9.6	9.6	9.6	9.6	0.03

ภาคผนวก ค

สมบัติเชิงกล

ตารางที่ ค-1 ความทนแรงกระแทกที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียสของ PA6, พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA และ 85/15 PA6/EOC-g-MA คอมพอสิตด้วย WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

sample/specimen no.	Izod impact strength at 23°C (kJ/m ²)						
	1	2	3	4	5	Average	SD
PA6	10.1	9.7	12.1	6.5	9.8	9.6	2.00
PA6/EOC 5	7.7	8.9	7.9	8.7	10.9	8.8	1.28
PA6/EOC 10	6.9	6.0	6.0	7.2	7.2	6.6	0.62
PA6/EOC 15	6.9	6.4	5.8	6.1	6.2	6.3	0.42
PA6/EOC 20	6.7	5.5	5.3	5.5	5.1	5.7	0.63
PA6/EOC-g-MA 5	11.3	10.2	10.8	11.5	10.4	10.9	0.57
PA6/EOC-g-MA 10	15.1	13.9	14.4	13.6	14.2	14.3	0.57
PA6/EOC-g-MA 15	27.7	27.5	27.1	27.9	27.3	27.5	0.35
PA6/EOC-g-MA 20	26.6	26.1	26.1	26.3	26.4	26.3	0.22
PA6/EOC-g-MA W0	27.70	27.50	27.10	27.90	27.30	27.50	0.35
PA6/EOC-g-MA W10	14.4	18.2	13.7	15.1	16.7	15.6	1.82
PA6/EOC-g-MA W20	12.5	13.4	12.6	12.9	12.2	12.7	0.45
PA6/EOC-g-MA W30	11.9	11.1	11.4	9.4	11.8	11.1	1.02

ภาคผนวก ค

สมบัติเชิงกล

ตารางที่ ค-2 ความทนแรงกระแทกที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียสของ PA6, พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA และ 85/15 PA6/EOC-g-MA คอมพอสิตด้วย WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

sample/specimen no.	Izod impact strength at -30°C (kJ/m ²)						
	1	2	3	4	5	Average	SD
PA6	7.3	5.7	6.9	6.9	7.4	6.8	0.70
PA6/EOC 5	6.7	6.1	5.9	6.8	6.5	6.4	0.40
PA6/EOC 10	4.7	5.0	4.7	6.2	5.6	5.2	0.70
PA6/EOC 15	4.5	4.3	4.3	4.5	4.7	4.5	0.10
PA6/EOC 20	4.2	4.7	4.4	4.4	4.7	4.5	0.20
PA6/EOC-g-MA 5	8.2	7.8	7.8	8.0	7.7	7.9	0.20
PA6/EOC-g-MA 10	10.9	11.5	10.6	11.0	10.5	10.9	0.40
PA6/EOC-g-MA 15	13.6	13.7	13.6	13.3	13.8	13.6	0.20
PA6/EOC-g-MA 20	15.9	15.3	15.7	15.6	16.4	15.8	0.40
PA6/EOC-g-MA W0	13.6	13.7	13.6	13.3	13.8	13.6	0.20
PA6/EOC-g-MA W10	12.0	10.8	10.9	11.8	10.6	11.2	0.60
PA6/EOC-g-MA W20	9.9	9.9	9.5	12.2	8.7	10.0	1.30
PA6/EOC-g-MA W30	9.7	10.0	9.4	10.8	9.8	9.9	0.50

ภาคผนวก ค

สมบัติเชิงกล

ตารางที่ ค-3 ความทนแรงดึงของ PA6, พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA และ 85/15 PA6/EOC-g-MA คอมพอสิตด้วย WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

sample/specimen no.	Tensile strength (MPa)						
	1	2	3	4	5	Average	SD
PA6	79.0	77.7	79.6	78.9	78.9	78.8	0.7
PA6/EOC 5	71.7	71.7	71.8	71.7	71.6	71.7	0.07
PA6/EOC 10	64.9	65	65.1	65.1	65	65	0.08
PA6/EOC 15	59.2	59.1	59.2	59.5	59.5	59.3	0.17
PA6/EOC 20	54.9	55	55.2	55.1	55	55	0.09
PA6/EOC-g-MA 5	73.2	72.6	72.8	73.5	73.4	73.1	0.41
PA6/EOC-g-MA 10	65.2	65.5	65.6	65.3	65.5	65.4	0.18
PA6/EOC-g-MA 15	58.7	58.4	58.7	58.7	58.9	58.7	0.19
PA6/EOC-g-MA 20	52.5	52.5	52.3	52.4	52.6	52.4	0.14
PA6/EOC-g-MA W0	58.7	58.4	58.7	58.7	58.9	58.7	0.19
PA6/EOC-g-MA W10	53.9	53.3	53.7	53.8	53.7	53.7	0.25
PA6/EOC-g-MA W20	52.6	52.1	53	52.7	53	52.7	0.36
PA6/EOC-g-MA W30	53.9	54.1	54.3	54.1	54.1	54.1	0.15

ภาคผนวก ค

สมบัติเชิงกล

ตารางที่ ค-4 การยืดตัว ณ จุดขาดของ PA6, พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA และ 85/15 PA6/EOC-g-MA คอมพอสิตด้วย WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

sample/specimen no.	Elongation at break (%)						
	1	2	3	4	5	Average	SD
PA6	25.3	36.4	23.9	19.5	30.9	27.2	6.55
PA6/EOC 5	11.2	9.2	7.8	7.3	8.3	8.8	1.55
PA6/EOC 10	11.6	11.1	12.3	11.9	12.3	11.8	0.48
PA6/EOC 15	10	11	9.9	10.5	11	10.5	0.53
PA6/EOC 20	10.5	10.1	11.2	8.5	11.5	10.4	1.2
PA6/EOC-g-MA 5	12.8	17.4	23.1	10.3	11.1	14.9	5.35
PA6/EOC-g-MA 10	15.6	25.8	25.1	24.8	17.5	21.8	4.81
PA6/EOC-g-MA 15	22.2	20.3	22.8	21.2	42.8	25.9	9.53
PA6/EOC-g-MA 20	20.1	28.5	25.1	28.7	30	26.5	3.99
PA6/EOC-g-MA W0	22.2	20.3	22.8	21.2	42.8	25.9	9.53
PA6/EOC-g-MA W10	13.6	19.4	13.3	12.6	10.2	13.8	3.39
PA6/EOC-g-MA W20	15.7	10.7	20.2	16.7	17.7	16.2	3.49
PA6/EOC-g-MA W30	15.8	13.3	12.6	19.1	15.8	15.3	2.58

ภาคผนวก ค

สมบัติเชิงกล

ตารางที่ ค-5 ยังสัมมอดูลัสของ PA6, พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA และ 85/15 PA6/EOC-g-MA คอมพอสิตด้วย WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

sample/specimen no.	Young's modulus (MPa)						
	1	2	3	4	5	Average	SD
PA6	2896	2879	2913	2909	2891	2898	14.0
PA6/EOC 5	2789	2876	2803	2740	2750	2792	54.0
PA6/EOC 10	2672	2565	2664	2545	2686	2626	66.0
PA6/EOC 15	2299	2426	2328	2308	2339	2340	50.8
PA6/EOC 20	2226	2227	2173	2173	2178	2196	28.5
PA6/EOC-g-MA 5	2895	2792	2841	2866	2782	2835	48.2
PA6/EOC-g-MA 10	2724	2661	2772	2644	2756	2711	56.7
PA6/EOC-g-MA 15	2580	2426	2458	2445	2601	2502	82.2
PA6/EOC-g-MA 20	2324	2357	2346	2377	2224	2326	59.9
PA6/EOC-g-MA W0	2580	2426	2458	2445	2601	2502	82.2
PA6/EOC-g-MA W10	2482	2402	2398	2415	2391	2418	37.3
PA6/EOC-g-MA W20	2762	2779	2772	2792	2746	2770	17.2
PA6/EOC-g-MA W30	3261	3201	3242	3216	3219	3228	23.7

ภาคผนวก ค

สมบัติเชิงกล

ตารางที่ ค-6 ความทนแรงดัดโค้งของ PA6, พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA และ 85/15 PA6/EOC-g-MA คอมพอสิตด้วย WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

sample/specimen no.	Flexural strength (MPa)						
	1	2	3	4	5	Average	SD
PA6	107.5	107.8	107.8	108.9	107.3	107.9	0.62
PA6/EOC 5	98.9	99.0	98.5	97.9	97.4	98.3	0.67
PA6/EOC 10	88.0	87.7	87.3	87.4	87.1	87.5	0.35
PA6/EOC 15	78.0	77.6	77.6	77.2	76.1	77.3	0.71
PA6/EOC 20	69.4	69.0	68.8	68.5	67.6	68.7	0.67
PA6/EOC-g-MA 5	101.6	101.7	102.0	102.0	101.7	101.8	0.21
PA6/EOC-g-MA 10	91.9	92.3	92.4	92.1	90.9	91.9	0.57
PA6/EOC-g-MA 15	79.7	80.8	80.2	79.8	79.7	80.0	0.50
PA6/EOC-g-MA 20	71.9	71.9	71.7	71.6	72.1	71.8	0.22
PA6/EOC-g-MA W0	79.7	80.8	80.2	79.8	79.7	80.0	0.50
PA6/EOC-g-MA W10	74.1	74.0	74.7	74.5	74.3	74.3	0.31
PA6/EOC-g-MA W20	76.7	77.1	77.0	76.7	76.8	76.9	0.20
PA6/EOC-g-MA W30	81.5	81.9	82.4	81.7	81.8	81.9	0.32

ภาคผนวก ค

สมบัติเชิงกล

ตารางที่ ค-7 มอดุลัสแรงดัดโค้งของ PA6, พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA และ 85/15 PA6/EOC-g-MA คอมพอสิตด้วย WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

sample/specimen no.	Flexural modulus (MPa)						
	1	2	3	4	5	Average	SD
PA6	2573	2550	2639	2589	2635	2597	39.0
PA6/EOC 5	2325	2329	2386	2374	2364	2355	27.3
PA6/EOC 10	2177	2195	2230	2218	2205	2205	20.5
PA6/EOC 15	2060	2036	2033	2052	1999	2036	23.6
PA6/EOC 20	1907	1891	1895	1916	1876	1897	15.3
PA6/EOC-g-MA 5	2436	2468	2484	2495	2400	2457	38.7
PA6/EOC-g-MA 10	2220	2201	2229	2234	2204	2217	14.7
PA6/EOC-g-MA 15	1958	1957	1964	1938	1958	1955	9.8
PA6/EOC-g-MA 20	1773	1738	1773	1738	1751	1755	17.7
PA6/EOC-g-MA W0	1958	1957	1964	1938	1958	1955	9.8
PA6/EOC-g-MA W10	1913	1893	1944	1895	1911	1911	20.5
PA6/EOC-g-MA W20	2148	2179	2165	2164	2163	2164	10.8
PA6/EOC-g-MA W30	2567	2585	2643	2552	2580	2585	34.8

ภาคผนวก ค

สมบัติเชิงกล

ตารางที่ ค-8 ความแข็งแบบร็อคเวลล์ของ PA6, พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA และ 85/15 PA6/EOC-g-MA คอมพอสิตด้วย WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

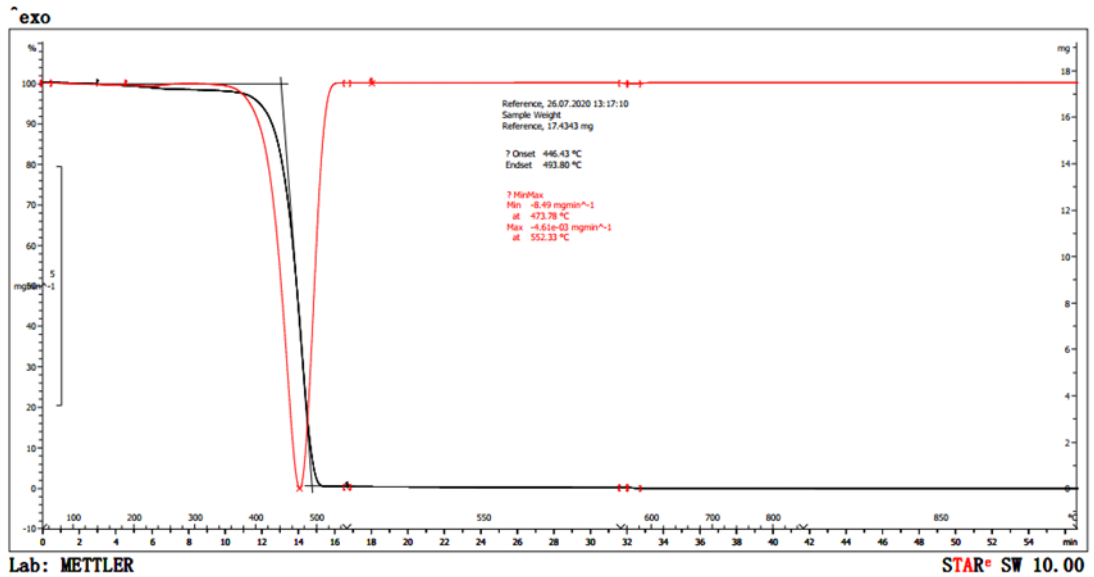
sample/specimen no.	Rockwell hardness (R-scale)						
	1	2	3	4	5	Average	SD
PA6	119.7	119.4	119.5	119.5	119.9	119.6	0.22
PA6/EOC 5	117.4	117.9	117.5	117.4	117.5	117.5	0.20
PA6/EOC 10	114.2	114.9	114.1	115.0	114.9	114.6	0.45
PA6/EOC 15	112.6	111.3	111.8	111.4	111.3	111.7	0.54
PA6/EOC 20	108.9	108.9	109.2	109.0	108.5	108.9	0.26
PA6/EOC-g-MA 5	116.9	116.7	117.3	116.9	116.7	116.9	0.24
PA6/EOC-g-MA 10	114.0	114.0	114.0	113.9	114.8	114.1	0.37
PA6/EOC-g-MA 15	111.6	110.7	111.1	110.4	111.0	110.9	0.46
PA6/EOC-g-MA 20	108.2	107.4	108.3	108.5	107.5	107.9	0.51
PA6/EOC-g-MA W0	111.6	110.7	111.1	110.4	111.0	110.9	0.46
PA6/EOC-g-MA W10	111.4	111.7	111.5	111.1	111.7	111.5	0.23
PA6/EOC-g-MA W20	111.7	111.2	111.4	111.7	111.5	111.5	0.23
PA6/EOC-g-MA W30	111.6	111.5	111.9	111.4	111.8	111.6	0.22

ภาคผนวก ง
อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อน

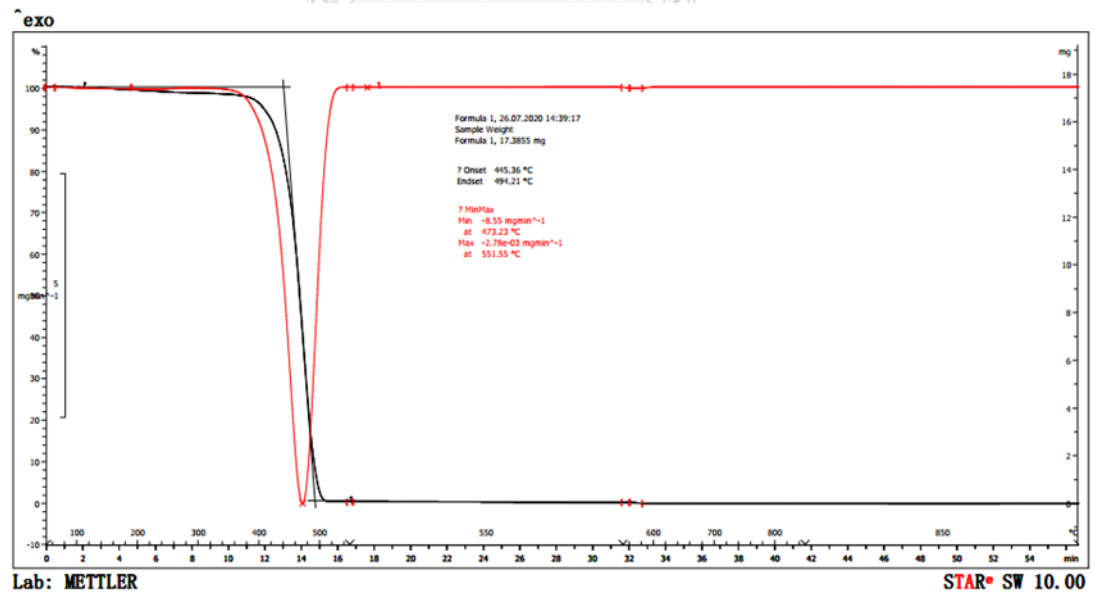
ตารางที่ ง-1 อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนของ PA6, พอลิเมอร์ผสม PA6/EOC และ PA6/EOC-g-MA และ 85/15 PA6/EOC-g-MA คอมพอสิตด้วย WT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

sample/specimen no.	Heat deflection temperature (°C)						
	1	2	3	4	5	Average	SD
PA6	59.1	60.1	58.7	60.1	59.6	59.5	0.62
PA6/EOC 5	58.2	57.4	59.1	58.1	58.9	58.3	0.68
PA6/EOC 10	57.7	56.0	56.2	57.2	57.0	56.8	0.71
PA6/EOC 15	55.9	55.8	56.5	55.7	56.1	56.0	0.32
PA6/EOC 20	54.6	55.0	55.3	54.8	55.8	55.1	0.47
PA6/EOC-g-MA 5	60.0	59.6	58.5	59.1	59.9	59.4	0.62
PA6/EOC-g-MA 10	59.1	58.4	59.2	58.8	57.7	58.6	0.61
PA6/EOC-g-MA 15	57.2	55.6	56.4	56.2	55.4	56.2	0.71
PA6/EOC-g-MA 20	54.7	54.8	55.9	54.8	54.7	55.0	0.52
PA6/EOC-g-MA W0	57.2	55.6	56.4	56.2	55.4	56.2	0.71
PA6/EOC-g-MA W10	56.5	56.4	57.0	56.7	56.4	56.6	0.25
PA6/EOC-g-MA W20	58.0	58.2	59.1	58.2	59.0	58.5	0.51
PA6/EOC-g-MA W30	62.2	60.5	61.8	62.0	61.5	61.6	0.67

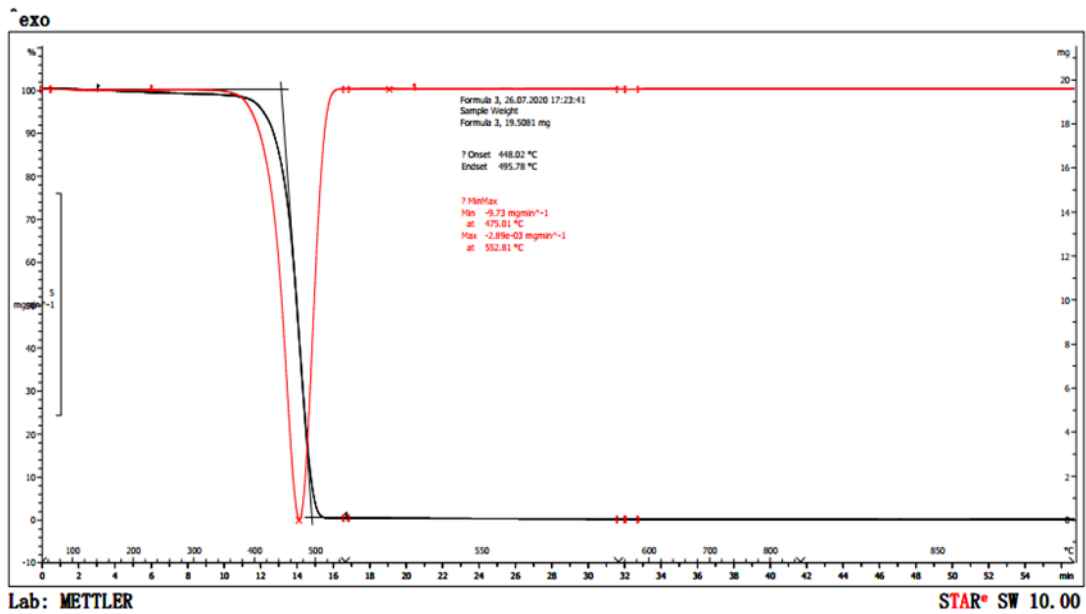
ภาคผนวก จ
เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA



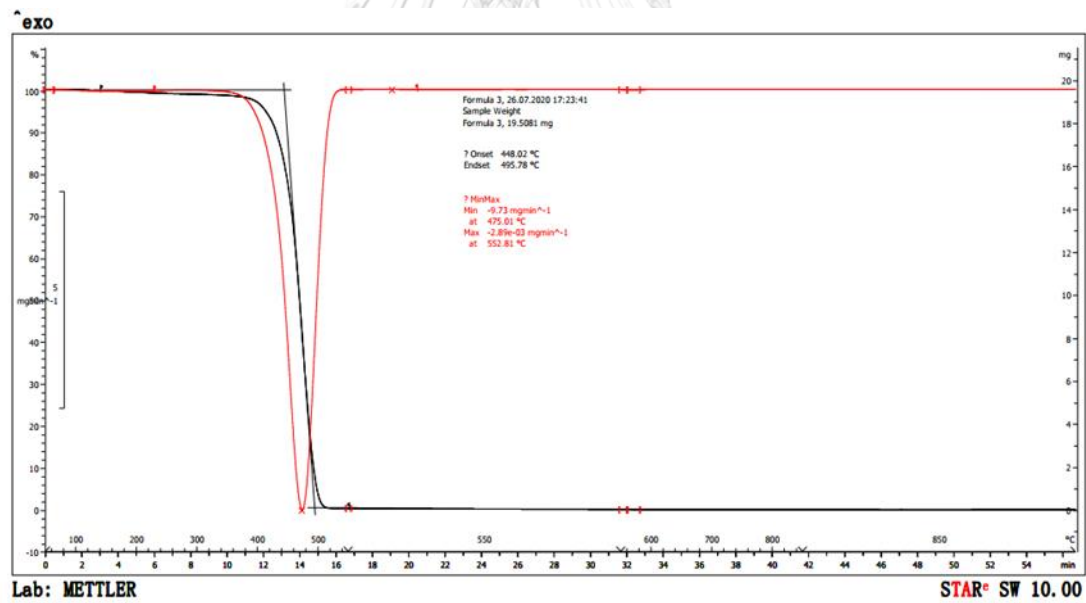
รูปที่ จ-1 TGA เทอร์โมแกรมของ PA6



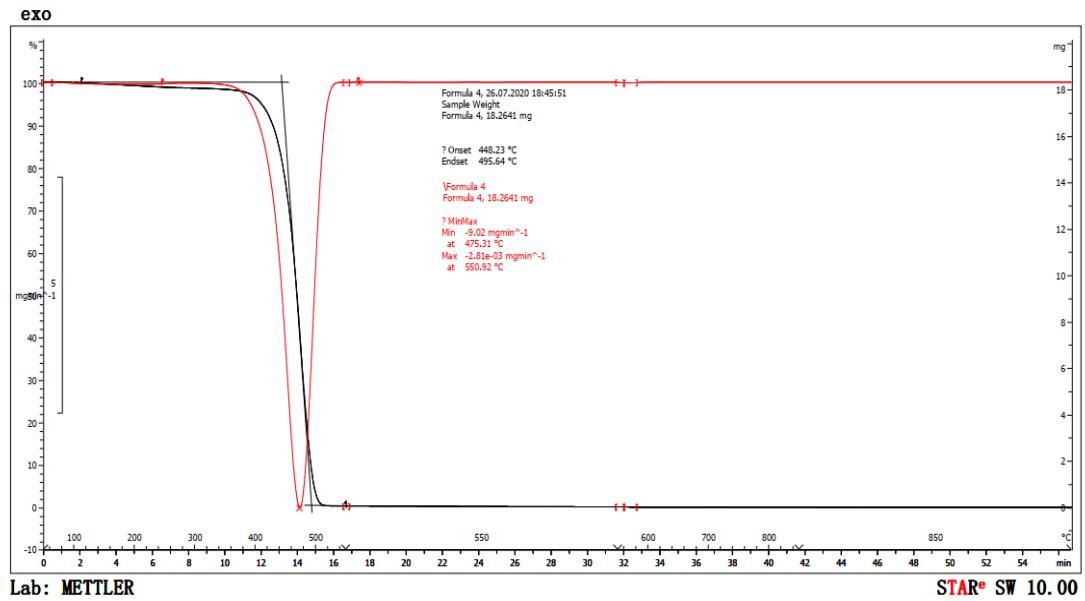
รูปที่ จ-2 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 95/5 PA6/EOC



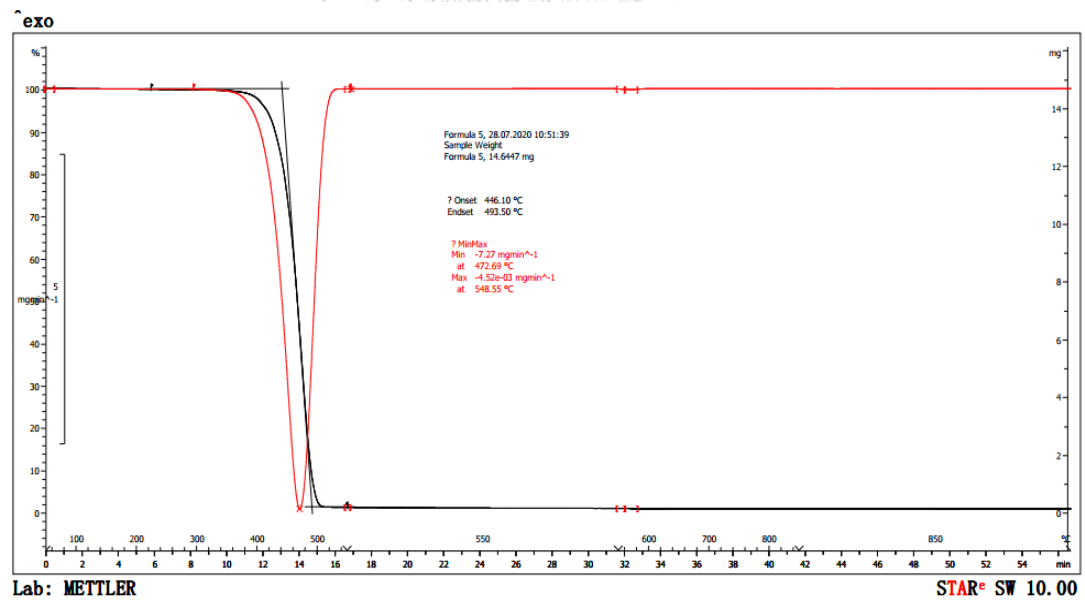
รูปที่ จ-3 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 90/10 PA6/EOC



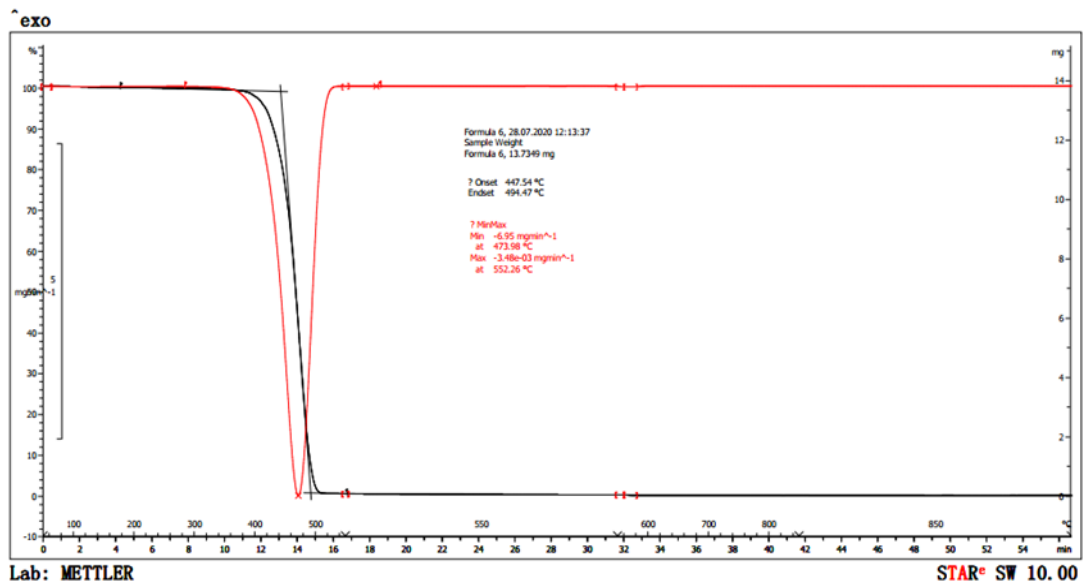
รูปที่ จ-4 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 85/15 PA6/EOC



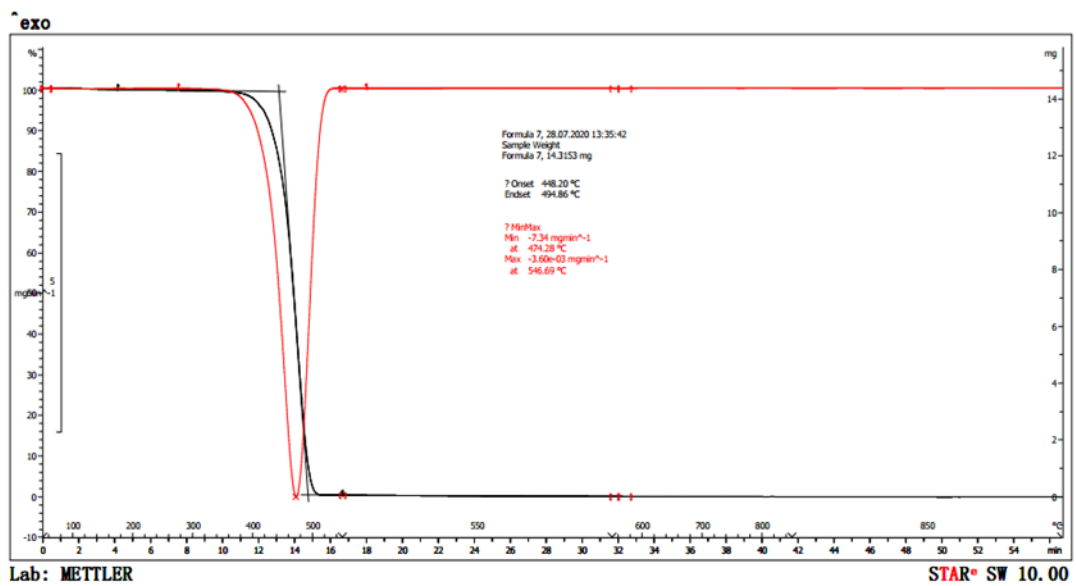
รูปที่ จ-5 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 80/20 PA6/EOC



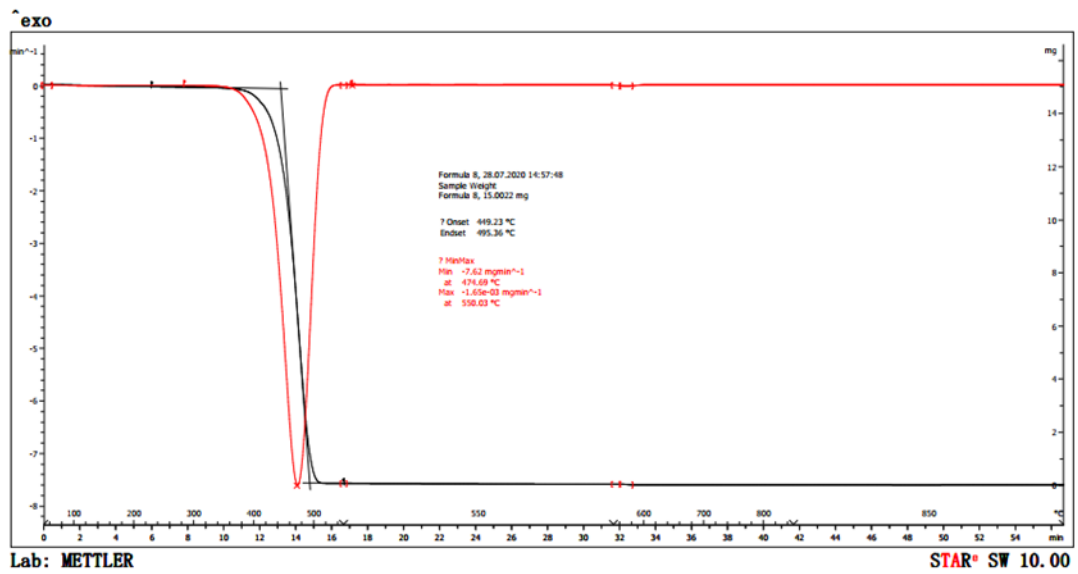
รูปที่ จ-6 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 95/5 PA6/EOC-g-MA



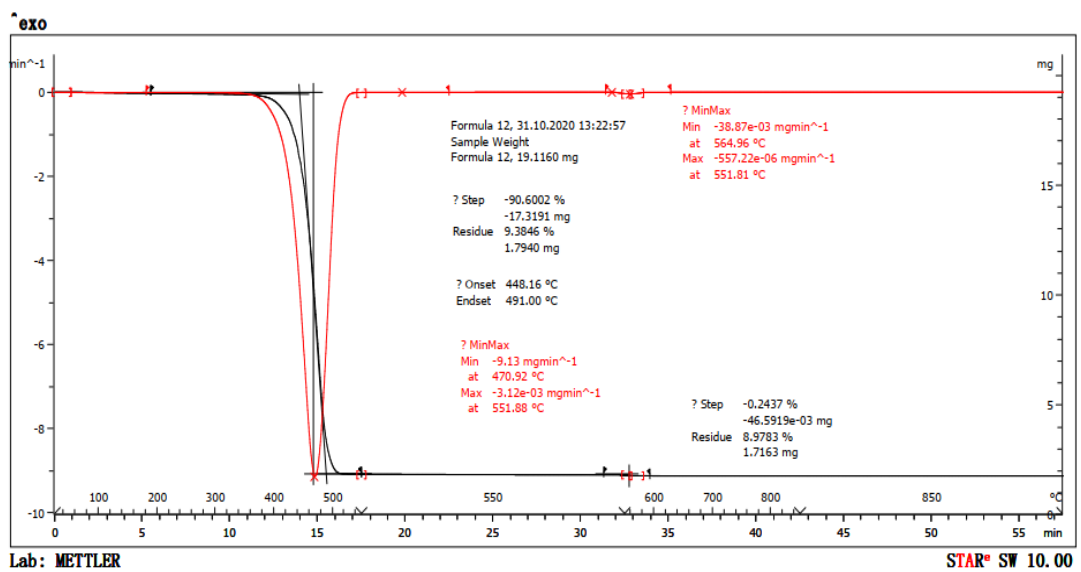
รูปที่ จ-7 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 90/10 PA6/EOC-g-MA



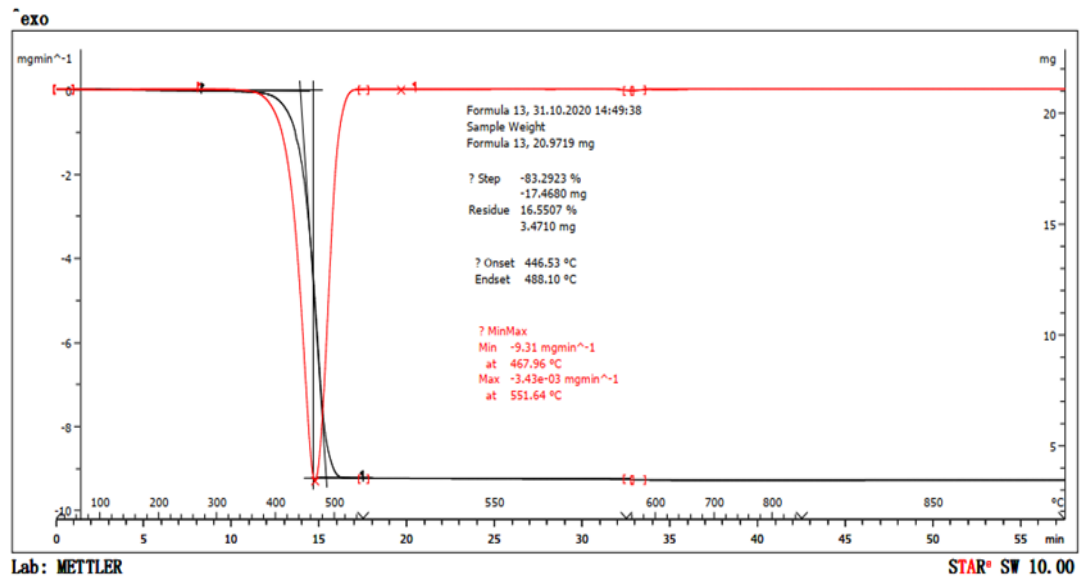
รูปที่ จ-8 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 85/15 PA6/EOC-g-MA



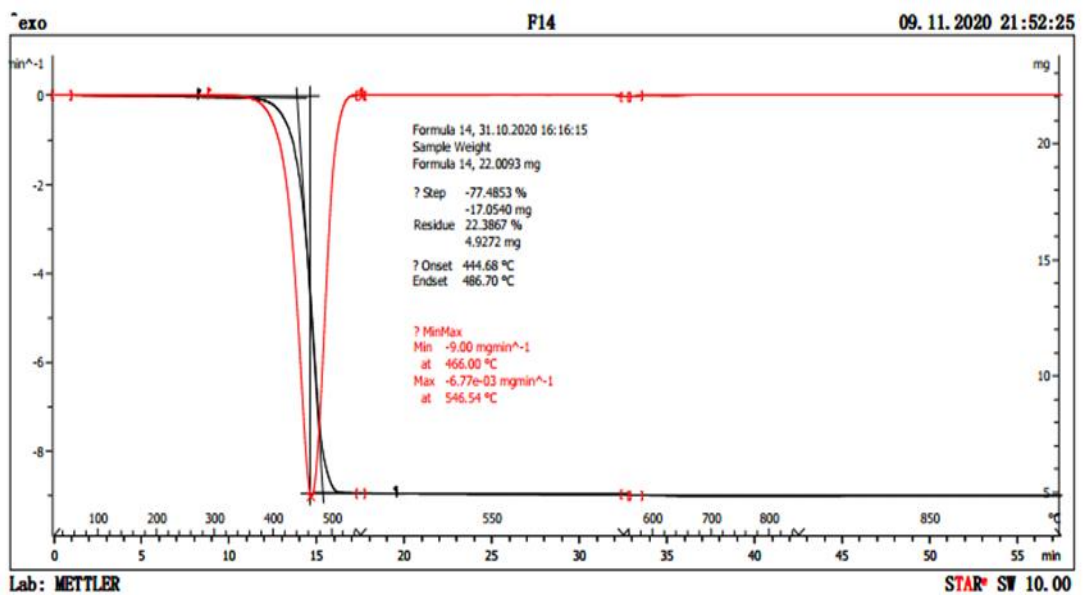
รูปที่ จ-9 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 80/20 PA6/EOC-g-MA



รูปที่ จ-10 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 85/15 PA6/EOC-g-MA คอมพอสิต WT 10 phr



รูปที่ จ-11 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 85/15 PA6/EOC-g-MA คอมพอสิต WT 20 phr



รูปที่ จ-13 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 85/15 PA6/EOC-g-MA คอมพอสิต WT 30 phr

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	บุษยา วิลาวรรณ
วัน เดือน ปี เกิด	25 เมษายน 2528
สถานที่เกิด	จันทบุรี ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	ทล.บ (เทคโนโลยีเคมี) มหาวิทยาลัยบูรพา
ที่อยู่ปัจจุบัน	39/74 หมู่บ้านนิชาวิลล์ ซ.อุดมสุข ถ.วัดโหนดหิน-เขาไผ่ ต.ทับมา อ.เมือง จ. ระยอง 21000



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY