

การเตรียมและสมบัติของพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/โพลลาสโตนต์คอมพอสิต

นางสาวหฤทัย ไวยัญญา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION AND PROPERTIES OF POLYPROPYLENE/
ETHYLENE OCTENE COPOLYMER/WOLLASTONITE COMPOSITES

Miss Harutsai Waipunya

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

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมและสมบัติของพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีน โคพอลิเมอร์/โพลลาสโพนต์คอมพอลิเมอร์
โดย	นางสาวหฤทัย ไวยัญญา
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษา แสงวัฒนาโรจน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ อรุณา สรวารี)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ชัยวัฒน์ นรگانต์กร)

หยุดภัย ไวปัญญา : การเตรียมและสมบัติของพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/
โวลลาสโทไนต์คอมพอสิต. (PREPARATION AND PROPERTIES OF POLYPROPYLENE/
ETHYLENE OCTENE COPOLYMER/WOLLASTONITE COMPOSITES) อ. ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร, 79 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่มีปริมาณออกทีนร้อยละ 24 และโวลลาสโทไนต์
ที่มีขนาดอนุภาค 1200 เมช ถูกนำมาใช้เตรียมพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/
โวลลาสโทไนต์คอมพอสิต โดยการผสมพอลิโพรพิลีนกับเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ (ปริมาณ
20 และ 30% โดยน้ำหนัก) และโวลลาสโทไนต์ (ปริมาณ 10, 20 และ 30 ส่วนต่อเรซิน 100
ส่วน) แบบหลอมเหลวด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ เส้นพลาสติกที่ออกจากเครื่องอัดรีดได้ถูกตัดให้
เป็นเม็ดก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยการฉีดแบบ จากการศึกษาผลของเอทิลีนออกทีน
โคพอลิเมอร์และโวลลาสโทไนต์ต่อสมบัติด้านความทนแรงดึง ความทนแรงดัดโค้ง ความทน
แรงกระแทก สมบัติเชิงกลพลวัต ความสามารถในการลุกไหม้ และสมบัติทางความร้อน พบว่า
ความทนแรงดึงและแรงดัดโค้ง ยังสัมพันธ์ มอดุลัส มอดุลัสแรงดัดโค้ง และมอดุลัสสะสม มีค่าลดลง
เมื่อใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นเข้าไป อย่างไรก็ตาม การใส่โวลลาสโทไนต์
มีผลทำให้สมบัติเหล่านี้ได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้น นอกจากนี้ การยืดตัว ณ จุดขาด ความทนแรง
กระแทก และการเกิดชาร์มีค่าเพิ่มขึ้นในทุกอัตราส่วนผสมเมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ และ
จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี และสมบัติเชิงกลพลวัตพบว่า
ดิกิริของการเกิดผลึก และอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วมีค่าลดลงเมื่อใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์
และโวลลาสโทไนต์ นอกจากนี้ อุณหภูมิเริ่มสลายตัว และอุณหภูมิมสลายตัวร้อยละ 50 ที่ได้จาก
การวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) และดัชนีออกซิเจนจำกัดไม่ได้มีการปรับปรุงจาก
การใส่ทั้งเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ หรือโวลลาสโทไนต์

ภาควิชา.....วัสดุศาสตร์.....ลายมือชื่อ.....
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา..2553.....

##5272610223: MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS : POLYPROPYLENE / ETHYLENE OCTENE COPOLYMER / WOLLASTONITE

HARUTSAI WAIPUNYA : PREPARATION AND PROPERTIES OF POLYPROPYLENE/
ETHYLENE OCTENE COPOLYMER/ WOLLASTONITE COMPOSITES.

ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR SAOWAROJ CHUAYJULJIT, 79 pp.

In this study, ethylene octene copolymer (EOC) with 24 wt% octene and wollastonite with particle size of 1200 mesh were employed to prepare polypropylene (PP)/EOC/wollastonite composites. PP was melt mixed with various loadings of EOC (20 and 30 wt %) and wollastonite (10, 20 and 30 parts per hundred resin) using twin screw extruder. The extrudates were pelletized and then injection molded into test specimens. The effects of EOC and wollastonite on the tensile properties, flexural strength, impact strength, dynamic mechanical properties, flammability and thermal properties were investigated. Deterioration in tensile and flexural strength, Young's modulus, flexural modulus and storage modulus with the inclusion of elastomeric EOC has been observed. However, these properties were improved with the addition of wollastonite. It is also found that the elongation at break, impact strength and char formation were increased in all of the compositions as compared to the neat PP. DSC and DMA analysis revealed a decrease in the degree of crystallinity and glass transition temperature, respectively with the incorporation of EOC and wollastonite. Moreover, the values of the onset and 50% degradation temperatures obtained from TGA thermograms and limiting oxygen index were not improved by either EOC or wollastonite.

Department : Materials Science Student's Signature

Field of Study : Applied Polymer Science and Textile Technology Advisor's Signature

Academic Year : 2010.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้อย่างสมบูรณ์นั้นเป็นเพราะได้รับคำแนะนำทางวิชาการ ความเอื้อเฟื้อในด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ และสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือและแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆ เป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องซึ่งมีรายชื่อดังนี้

1. รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคำแนะนำ การแก้ไขปัญหา และให้การสนับสนุนงานวิจัยเป็นอย่างดี ทั้งยังช่วยกรุณาตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษา แสงวัฒนาโรจน์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ อรุษา สรวารี และรองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โภธิยะราช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
3. ดร. ชัยวัฒน์ นรگانต์กร ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี ให้คำแนะนำด้านวิชาการ และการวิจัย ตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
4. ศูนย์ด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง (Center for Petroleum Petrochemical and Advanced Materials) ที่ให้ทุนสนับสนุนด้านการศึกษาและงานวิจัย
5. บริษัท เอชเอ็มซี โพลีเมอส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบ และทุนสนับสนุนด้านการศึกษาและงานวิจัย
6. บริษัท เคมีคอล อินโนเวชั่น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบ สารเคมี เครื่องมือ และสถานที่ในการทำวิจัย
7. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือ และสถานที่ในการทำวิจัย
8. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกระหว่างการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่ชาย และพี่ๆ เพื่อนๆ ที่ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จตามที่มุ่งหวังไว้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 พอลิโพรพิลีน.....	3
2.2 เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์.....	7
2.3 สารตัวเติมและสารเสริมแรง.....	9
2.4 ไวลลาสโทไนต์.....	10
2.5 วัสดุคอมพอสิต.....	13
2.6 การขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ.....	16
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
3. วิธีดำเนินการวิจัย.....	19
3.1 วัสดุดิบ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	19
3.1.1 วัสดุดิบ.....	19
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นทดสอบ.....	19
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	19
3.2 วิธีการเตรียมและขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	20
3.2.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	20
3.2.2 การผสมพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	21
3.2.3 การขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	22

บทที่	หน้า
3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	22
3.3.1 ทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง.....	22
3.3.2 ทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง.....	24
3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	25
3.5 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	26
3.5.1 ทดสอบด้วยเทคนิคดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี.....	26
3.5.2 ทดสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)...	27
3.6 ทดสอบหาความสามารถในการลุกไหม้ของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	28
3.7 ตรวจสอบพื้นฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	28
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	30
4.1 ลักษณะพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	30
4.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	30
4.2.1 สมบัติด้านความทนแรงดึง.....	30
4.2.2 สมบัติด้านความทนแรงดัดโค้ง.....	32
4.2.3 สมบัติความทนแรงกระแทก.....	32
4.3 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	33
4.4 ผลการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	37
4.4.1 ทดสอบด้วยเทคนิคดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี.....	37
4.4.2 ทดสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)...	38
4.5 ผลการทดสอบหาค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด.....	39
4.6 พื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมพอสิต.....	40
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	43
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	43
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	44
รายการอ้างอิง.....	45
ภาคผนวก.....	48
ภาคผนวก ก.....	49
ภาคผนวก ข.....	51
ภาคผนวก ค.....	53

ภาคผนวก ง.....	54
ภาคผนวก จ.....	55
ภาคผนวก ฉ.....	64
ภาคผนวก ช.....	69
ภาคผนวก ซ.....	75
ภาคผนวก ฌ.....	76
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	80

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ส่วนผสมที่ใช้เตรียมพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	21
3.2	ขนาดขึ้นทดสอบสมบัติความทนแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I.....	23
4.1	สมบัติด้านความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	31
4.2	สมบัติด้านความทนแรงดัดโค้งของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	32
4.3	ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	33
4.4	อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้วของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	35
4.5	สมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนิงแคลอริเมทรี.....	37
4.6	สมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค การวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ).....	38
4.7	ค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	39

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ปฏิกิริยาของกระบวนการเกิดพอลิไพโรฟิลีน.....	4
2.2	ไอโซเทกติกพอลิไพโรฟิลีน.....	5
2.3	ซินดีโอเทกติกพอลิไพโรฟิลีน.....	5
2.4	อะเทกติกพอลิไพโรฟิลีน.....	6
2.5	โครงสร้างของโพลลาสโทไนต์.....	10
2.6	โครงสร้างผลึกรูปเข็มของโพลลาสโทไนต์.....	11
3.1	ขั้นตอนการทดลอง.....	20
3.2	เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่.....	21
3.3	เครื่องฉีดแบบ.....	22
3.4	เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (LLOYD LR 100K).....	23
3.5	ขึ้นทดสอบความทนแรงดึง.....	23
3.6	เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (LLOYD 500).....	24
3.7	เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบ Charpy (Gotech GT-7045).....	25
3.8	เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (Mettler Toledo, DMA 861°).....	25
3.9	เครื่องดีพีเพอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Perkin-Elmer, DSC 7).....	27
3.10	เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (Mettler Toledo, TGA/SDTA 851°).....	27
3.11	เครื่องวัดดัชนีออกซิเจนจำกัด (Stanton Redcroft).....	28
3.12	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Jeol, JSM 5800 LV).....	29
4.1	พอลิไพโรฟิลีนคอมพอสิต.....	30
4.2	มอดูลัสสะสมของพอลิไพโรฟิลีนคอมพอสิต.....	34
4.3	แทนเจนต์สูญเสียของพอลิไพโรฟิลีนคอมพอสิต.....	35
4.4	ฐานฐานวิทยาของโพลลาสโทไนต์ที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	40
4.5	ฐานฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิไพโรฟิลีนบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมพอลิไพโรฟิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	40
4.6	ฐานฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิไพโรฟิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/โพลลาสโทไนต์คอมพอสิตที่กำลังขยาย 2000 เท่า.....	41

บทที่ 1

บทนำ

การปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์โดยการเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสม (polymer blends) หรือพอลิเมอร์คอมพอสิต (polymer composites) อย่างใดอย่างหนึ่ง อาจทำให้สมบัติบางอย่างได้รับการปรับปรุง และสมบัติบางอย่างอาจลดลง ตัวอย่างเช่น การเตรียมพอลิเมอร์ผสมของพอลิโพรพิลีนและยางเอทิลีนโพรพิลีน (ethylene propylene rubber, EPR) หรือยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (ethylene propylene diene rubber, EPDM) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบันนี้เพื่อเพิ่มความเหนียว (toughness) และความทนแรงกระแทก (impact strength) ของพอลิโพรพิลีน แต่อาจมีผลทำให้ชิ้นงานมีเสถียรภาพทางขนาด (dimensional stability) และความแข็งตึง (stiffness) ลดลง หรือการเตรียมคอมพอสิตของพอลิโพรพิลีน และสารอนินทรีย์ เช่น ทัลค์ (talc) โวลลาสโทไนต์ (wollastonite) และแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) เป็นต้น โดยมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญ คือ ลดต้นทุนการผลิต และปรับปรุงสมบัติ เช่น เพิ่มความแข็งตึง ลดการหดตัวของชิ้นงาน และเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน เป็นต้น แต่อาจมีผลทำให้ความทนแรงดึง (tensile strength) และความทนแรงกระแทกของชิ้นงานลดลง ทั้งนี้ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิด ปริมาณ ขนาด และรูปร่างของสารตัวเติม (fillers) รวมทั้งความเข้ากันได้ของสารตัวเติมและพอลิเมอร์ ซึ่งการเตรียมคอมพอสิตของพอลิเมอร์ผสมอาจช่วยปรับสมดุลของสมบัติต่างๆ ที่ต้องการ รวมทั้งช่วยลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย

พอลิโพรพิลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกพอลิโอเลฟินส์ชนิดหนึ่งที่ถูกนำไปใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีสมบัติเด่นหลายประการ ได้แก่ น้ำหนักเบา มีความต้านทานสารเคมีและความชื้นดีเยี่ยม มีความแข็งตึง ขึ้นรูปง่าย และราคาถูก เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การนำพอลิโพรพิลีนไปใช้งานในทางวิศวกรรมยังมีข้อจำกัดที่สำคัญ คือ พอลิโพรพิลีนมีความทนแรงกระแทกค่อนข้างต่ำ ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำๆ ทั้งยังเกิดการหดตัวมากในระหว่างและภายหลังการขึ้นรูป ซึ่งปัจจุบันงานวิจัยต่างๆ จำนวนมากได้มุ่งไปที่การใช้เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ (ethylene octene copolymer, EOC) ในการลดหรือแก้ไขปัญหาดังกล่าวเหล่านี้ โดยเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์เป็นตัวดัดแปรแรงกระแทก (impact modifiers) ชนิดใหม่ที่ได้ถูกพัฒนาโดยบริษัทดาวเคมีคอล (Dow Chemical Company) จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเมทาโลซีน (metallocene catalyst) ซึ่งโคพอลิเมอร์เหล่านี้จะสามารถควบคุมระดับของสายโซ่กิ่งตามความยาวของสายโซ่หลักได้ โดยมีการกระจายของออกทีนในสายโซ่หลักอย่างสม่ำเสมอ รวมทั้งมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลที่แคบ ซึ่งจะ

มีผลทำให้สามารถปรับปรุงความสามารถในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการแบบหลอมเหลว (melt processability) โดยจะกระจายตัวได้ดีกว่า และยังผสมเข้ากับพอลิโพรพิลีนได้เร็วกว่าการใช้ยางเอทิลีนโพรพิลีนหรือยางเอทิลีนโพรพิลีนได้อื่นอีกด้วย นอกจากนี้ ความเหนียวและความทนแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำจะได้รับการปรับปรุงถ้าหากเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอในเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีน โดยปริมาณออกทีนในโคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้แรงตึงระหว่างผิว (interfacial tension) ในระบบของพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ต่ำลง ซึ่งโคพอลิเมอร์ที่มีปริมาณออกทีนมากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะมีสมบัติเป็นอิลาสโตเมอร์ได้ดี เนื่องจากหมู่เฮกเซนที่อยู่ด้านข้างจะลดความสามารถในการเกิดผลึก และเพิ่มความยืดหยุ่นของโคพอลิเมอร์ จากความคล้ายกันทางเคมี และสามารถขึ้นรูปได้ง่าย จึงทำให้เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ถูกนำไปใช้งานมากขึ้นในการเพิ่มความเหนียวให้กับพอลิโอเลฟินส์ชนิดต่างๆ เช่น พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีน เป็นต้น ซึ่งเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นของบริษัทดาวเคมีคอล มีชื่อทางการค้าว่า “Engage 8200” ที่มีดัชนีการหลอมไหล (melt flow index) ประมาณ 5 กรัม/10 นาที มีปริมาณออกทีนร้อยละ 24 โดยน้ำหนัก และมีความหนาแน่น 0.87 กรัม/ลบ.ซม.

อย่างไรก็ตาม การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ในพอลิโพรพิลีนอาจมีผลทำให้ความแข็งตึงมอดุลัสแรงดัดโค้ง (flexural modulus) และเสถียรภาพทางขนาดของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้น จึงได้มีการใส่สารตัวเติมอนินทรีย์เพื่อปรับสมดุลระหว่างความทนแรงกระแทกและความแข็งตึงของชิ้นงาน โดยสารอนินทรีย์ที่มีในธรรมชาติและราคาถูก มีให้เลือกใช้หลายชนิด ได้แก่ ทัลค์ ซิลิกา (silica) เบนโทไนต์ (bentonite) แคลเซียมคาร์บอเนต แอสเบสทอส (asbestos) และโวลลาสโทไนต์ เป็นต้น โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โวลลาสโทไนต์ซึ่งเป็นแร่แคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3) ที่ประกอบด้วย CaO ร้อยละ 48.28 และ SiO_2 ร้อยละ 51.72 ที่เกิดจากการเกาะกลุ่มของผลึกรูปเข็ม (needle-shaped crystal) โดยมีความถ่วงจำเพาะ 2.9 และความแข็ง 4.5 (Moh's hardness) ปัจจุบันได้มีการนำโวลลาสโทไนต์ประเภทที่มี aspect ratio สูง (10-20) มาใช้เป็นสารเสริมแรงแทนการใช้เส้นใยแอสเบสทอสอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเทอร์โมพลาสติก และเทอร์โมเซตพลาสติกเพื่อปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์โดยอาศัยสมบัติของแร่อนินทรีย์ร่วมกับสมบัติของพอลิเมอร์ในการเพิ่มสมบัติเชิงกล เสถียรภาพทางความร้อน และเสถียรภาพทางขนาด เป็นต้น นอกจากนี้ การใช้โวลลาสโทไนต์ที่มีอนุภาคละเอียดมากๆ จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความต้านทานการขีดข่วน และความทนแรงกระแทกสูงกว่าวัสดุอื่นๆ รวมทั้งโวลลาสโทไนต์ยังมีราคาถูกเมื่อเทียบกับสารอนินทรีย์บางชนิด

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) [1-7]

พอลิโพรพิลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่งที่ถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ทั้งยังสามารถขึ้นรูปได้หลายวิธี ทำให้พอลิโพรพิลีนมีอัตราการเติบโตทางด้านการตลาดสูงถึงร้อยละ 6-7 ต่อปี เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีราคาไม่แพง และมีสมบัติที่ดี เหมาะกับการนำไปใช้งานในหลายๆ ด้าน พอลิโพรพิลีนมีความหนาแน่นน้อยที่สุดในบรรดาเทอร์โมพลาสติกทั้งหลาย ทำให้มีอัตราส่วนของความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง และยังมีความแข็งแรงมากกว่าพอลิโอเลฟินส์ชนิดอื่น นอกจากนี้ พอลิโพรพิลีนยังมีจุดหลอมเหลวสูง สามารถทนความร้อนได้ดี อย่างไรก็ตาม พอลิโพรพิลีนจะเปราะที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิต่ำๆ

พอลิโพรพิลีนสามารถทนต่อสารเคมีได้ยอดเยี่ยม สามารถทนตัวทำละลายอินทรีย์ส่วนใหญ่ได้ดี ยกเว้นสารออกซิไดซ์ที่มีความรุนแรงมาก และจะถูกทำให้อ่อนตัวได้เมื่อสัมผัสกับตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน และพอลิโพรพิลีนยังสามารถทนต่อความล้า (fatigue) ได้ดี เหมาะกับการใช้งานในส่วนที่เป็นบานพับ นอกจากนี้ พอลิโพรพิลีนยังมีความใสมากกว่าพอลิโอเลฟินส์ชนิดอื่นๆ

พอลิโพรพิลีนมีดัชนีการหลอมไหล (melt flow index) อยู่ในช่วงกว้าง จึงทำให้สามารถนำมารีไซเคิลได้ง่าย และสามารถขึ้นรูปได้ทุกวิธีไม่ว่าจะเป็นการฉีดแบบ การเป่าแบบ การอัดรีด การเป่า หรือการหล่อฟิล์ม และเทอร์โมฟอร์ม เป็นต้น

พอลิโพรพิลีนต่างชนิดกันจะมีสมบัติที่แตกต่างกัน และเหมาะกับการใช้งานที่หลากหลาย เช่น เส้นใย พิล์ม และชิ้นงานที่ได้จากการฉีดแบบใช้สำหรับงานด้านรถยนต์ บรรจุภัณฑ์ที่มีความแข็งแรง เครื่องใช้ทั่วไป เครื่องมือทางการแพทย์ บรรจุภัณฑ์อาหาร และผลิตภัณฑ์อื่นๆ พอลิโพรพิลีนสามารถนำมาใช้แทนแก้ว โลหะ หรือพลาสติกวิศวกรรมอื่นๆ เช่น พอลิคาร์บอเนต พอลิสไตรีน และไนลอน เป็นต้น ส่วนพอลิโพรพิลีนชนิดที่มีดัชนีการหลอมไหลสูงสามารถนำมาใช้ทำอุปกรณ์เครื่องใช้ภายในบ้านที่มีขนาดใหญ่ และพอลิโพรพิลีนที่มีความอ่อนตัวสูงจะถูกนำมาใช้แทนพอลิไวนิลคลอไรด์ในการทำถุงใส่ยา สายยาง และอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงพยาบาล เป็นต้น

การสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนเพื่อประโยชน์ในทางการค้าเริ่มจากการที่ Natta จากประเทศอิตาลีได้ศึกษาของ Ziegler ซึ่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับความดัน และความร้อนต่ำๆ ในการเตรียมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง มาใช้เตรียมพอลิโพรพิลีนจากแก๊สโพรพิลีน (C_3H_6) และในปี ค.ศ.1954 Natta ประสบความสำเร็จในการเตรียมพอลิโพรพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีโครงสร้างเป็นแบบไอโซแทกติก ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์-แนตตา (Ziegler-Natta catalyst) ซึ่งได้เริ่มผลิตในเชิงการค้าตั้งแต่ปี ค.ศ.1957 เป็นต้นมา

พอลิโพรพิลีนเตรียมได้จากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบรวมตัวของโพรพิลีนมอนอเมอร์ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมอยู่ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.1

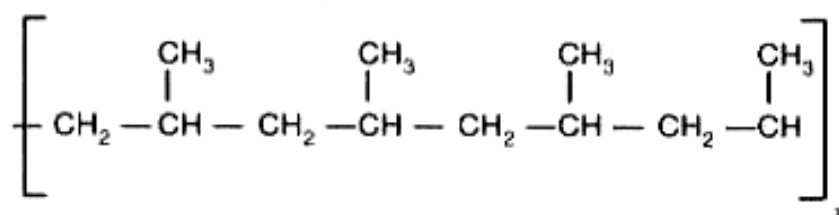


รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาของกระบวนการเกิดพอลิโพรพิลีน [2]

พอลิโพรพิลีนที่เตรียมจากตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์-แนตตาจะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 60,000 ถึง 200,000 โดยมีความหนาแน่นประมาณ 0.905 กรัม/ลบ.ซม. อีกทั้งยังมีความเป็นผลึกสูง จึงทำให้พอลิโพรพิลีนมีสมบัติเชิงกลดีมาก เช่น เหนียว แข็งแกร่ง และมีความทนแรงดึงสูง อีกทั้งยังมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าพอลิเอทิลีน จึงทนความร้อนได้ดีกว่า นอกจากนี้ ความเป็นผลึกยังช่วยสกัดกั้นการซึมผ่านของไขมันและน้ำมันได้ดี ใสน้ำและออกซิเจนซึมผ่านได้น้อย สามารถทนกรดและเบสได้ดี ขึ้นรูปง่าย และมีราคาถูก แต่พอลิโพรพิลีนยังมีข้อจำกัดในการใช้งานบางอย่าง เช่น เปราะและแตกง่ายที่อุณหภูมิต่ำ เจือยต่อปฏิกิริยาเคมี ไม่ชอบน้ำ ติดสียาก และมีเสถียรภาพต่อความร้อน แสง และตัวออกซิไดซ์ต่ำกว่าพอลิเอทิลีน เพราะสายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยไฮโดรเจนอะตอมที่เกิดพันธะกับคาร์บอนองศา 3 (tertiary carbon atom) ดังนั้น ก่อนนำพอลิโพรพิลีนไปใช้งานต้องมีการเติมสารแอนติออกซิแดนต์ และอัลตราไวโอเล็ตสเทบิไลเซอร์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของชิ้นงานที่ผลิตจากพอลิโพรพิลีน

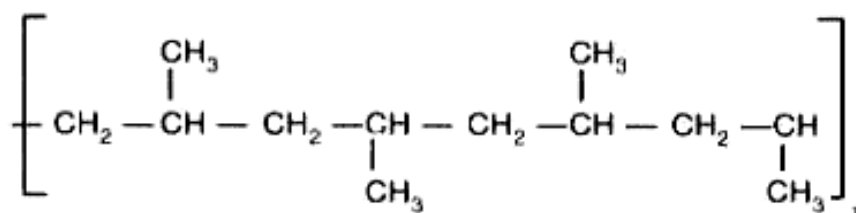
พอลิโพรพิลีนสามารถแบ่งตามการจัดเรียงตัวได้ 3 ประเภท [3] ดังนี้

1. ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (Isotactic polypropylene) โดยหมู่เมทิลที่เกาะอยู่กับสายโซ่มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันตลอดทั้งสายโซ่ ทำให้การจัดเรียงตัวแบบนี้มีความเป็นระเบียบมากที่สุด พอลิโพรพิลีนชนิดนี้จึงมีความเป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากมีโครงสร้างที่เป็นระเบียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



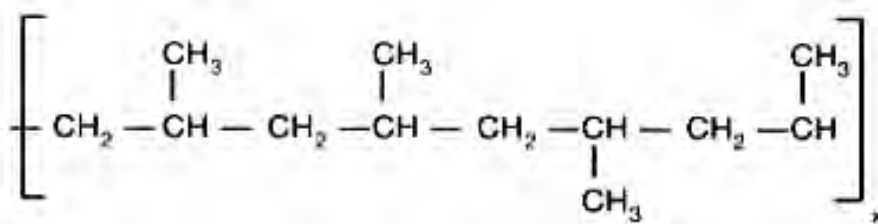
รูปที่ 2.2 ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน [3]

2. ซินดีโอแทกติกพอลิโพรพิลีน (Syndiotactic polypropylene) โดยหมู่เมทิลที่เกาะอยู่กับสายโซ่จะสลับกันคนละข้างของสายโซ่พอลิเมอร์อย่างเป็นระเบียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ซินดีโอแทกติกพอลิโพรพิลีน [3]

3. อะแทกติกพอลิโพรพิลีน (Atactic polypropylene) โดยหมู่เมทิลที่เกาะกับสายโซ่จะไม่เฉพาะเจาะจงอยู่ข้างใดข้างหนึ่ง หรือสลับกันทั้งสาย แต่อยู่แบบสุ่มไปตามสายโซ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 จากการวางตัวของหมู่เมทิลนี้ จะทำให้พอลิเมอร์ที่ได้มีความไม่เป็นระเบียบ และมีความเป็นผลึกน้อย หรือมีความเป็นอสัณฐานมากกว่า จึงมีลักษณะคล้ายยางที่ไม่แข็งแรงและไม่เหมาะกับการใช้งาน



รูปที่ 2.4 อะเทกติกพอลิโพรพิลีน [3]

ไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนมีโครงสร้างเชิงเส้นตรงโดยตลอด ปราศจากกิ่งก้านสาขา และไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไปที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนมีความเป็นผลึกสูง ต่างจากอะเทกติกพอลิโพรพิลีนที่ละลายในตัวทำละลายหลายชนิด ซึ่งการละลายของไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนจะเกิดขึ้นได้เฉพาะที่อุณหภูมิสูง (130 ถึง 170 องศาเซลเซียส) ในตัวทำละลายฮาโลเจนเตตระไฮโดรฟูแรน อะโรแมติก ไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนทนกรด และเบสได้ดี ทั้งยังเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีทั่วไป อย่างไรก็ตาม เสถียรภาพของพอลิโพรพิลีนต่อความร้อน แสง และตัวออกซิไดซ์จะน้อยกว่าพอลิเอทิลีนเพราะมีไฮโดรเจนอะตอมที่ต่ออยู่กับคาร์บอนของคา 3 (tertiary carbon) ดังนั้น ก่อนนำไอโซเทกติกพอลิโพรพิลีนไปใช้งานต้องมีการเติมสารแอนติออกซิแดนท์ และอัลตราไวโอเล็ตสแตบิไลเซอร์ [4]

พอลิโพรพิลีนมีความหนาแน่น 0.90 กรัม/ลบ.ซม. มีสมบัติที่ดี ได้แก่ มีความทนทาน สารเคมีดีเยี่ยม มีความทนแรงดึงสูง มีความทนความร้อนสูง มีจุดหลอมเหลวสูง มีความทนต่อไขมันและน้ำมันได้ดี เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ข้อเสียที่สำคัญของพอลิโพรพิลีน คือ มีความเปราะที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากผลึกของพอลิโพรพิลีนมีขนาดใหญ่ จึงมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะค่อนข้างแข็งเปราะ และไม่เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ [2,3,5]

การใช้งานของพอลิโพรพิลีนสามารถแบ่งตามประเภทของการขึ้นรูปได้ดังนี้

1. งานฉีดขึ้นรูป เช่น ถัง กะละมัง ตะกร้า ของเด็กเล่น เฟอร์นิเจอร์ เครื่องใช้ทางการแพทย์ และภาชนะบรรจุทั่วไป เป็นต้น
2. แผ่นฟิล์ม ใช้ทำฟิล์มใส ถุงร้อน ถุงเย็น ซองใส่เนื้อสัตว์ ฟิล์มห่อหุ้มบรรจุอาหารที่ไม่ต้องการให้ออกซิเจนซึมผ่าน

3. งานเป่า ทำผลิตภัณฑ์ที่นำมาใช้งานเช่นเดียวกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง แต่จะมีความทนทานสูงกว่า เช่น ขวด ถัง หรือภาชนะที่ต้องการความทนทานต่อสารเคมีมากกว่า พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

4. งานสิ่งทอ ทำเส้นใย กระสอบสาน เข็มอก แห และอวน เป็นต้น

Babu และคณะ [6] ได้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนด้วยการผสมกับยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (ethylene propylene diene rubber, EPDM) นอกจากนี้ Lehmann และคณะ [7] ได้ปรับปรุงความเหนียวของพอลิโพรพิลีนโดยการผสมพอลิโพรพิลีนกับนาโนซิลิกากราฟต์ด้วยพอลิเอทิลอะคริเลต [poly(ethyl acrylate), PEA] และยาง EPDM พบว่า การเติมนาโนซิลิกากราฟต์ PEA ไม่เพียงพอกที่จะทำให้พอลิโพรพิลีนมีความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น แต่การใส่ยาง EPDM ร่วมกับนาโนซิลิกาจะช่วยเสริมให้ความทนแรงกระแทกของนาโนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ยังคงความทนแรงดึงของผลิตภัณฑ์ไว้ได้

2.2 เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ (Ethylene octane copolymer, EOC) [8-13]

เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ได้ถูกใช้เป็นตัวดัดแปรความทนแรงกระแทก (impact modifiers) ชนิดใหม่ซึ่งถูกพัฒนาโดยบริษัทดาวเคมีคอล (Dow Chemical Company) จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเมทาโลซีน (metallocene catalyst) ปัจจุบันเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น เพราะสามารถควบคุมระดับของสายโซ่ที่กิ่งตามความยาวของสายโซ่โมเลกุลหลักได้ โดยมีการกระจายของออกทีนในสายโซ่หลักอย่างสม่ำเสมอ รวมทั้งมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลและองค์ประกอบที่แคบ ซึ่งมีผลทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติด้านการไหล (rheology) เช่น พฤติกรรมแรงเฉือนลด (shear thinning) และความสามารถในการขึ้นรูปแบบหลอมเหลว (melt processability) โดยจะมีกระจายตัวได้ดีกว่า และยังผสมเข้ากับพอลิโพรพิลีนได้เร็วกว่าการใช้ยางเอทิลีนโพรพิลีน (ethylene propylene rubber, EPR) หรือยาง EPDM [8] ซึ่งสมบัติด้านความเหนียว และความทนแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำจะได้รับการปรับปรุงถ้าหากเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอในเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีน นอกจากนี้ Carriere และ Silvis [9] ได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณออกทีนในโคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้แรงตึงระหว่างผิว (interfacial tension) ในระบบของพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ต่ำลง ซึ่งโคพอลิเมอร์ที่มีปริมาณออกทีนมากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะมีสมบัติเป็นอีลาสโตเมอร์ได้ดี ทั้งนี้เนื่องจากหมู่เฮกเซนที่ห้อยอยู่ด้านข้างจะลดความสามารถในการเกิดผลึก และเพิ่มความยืดหยุ่นของโคพอลิเมอร์ จากการมีความคล้ายกัน

ทางเคมี และสามารถขึ้นรูปได้ง่าย จึงทำให้เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ถูกนำไปใช้งานเพิ่มมากขึ้น ในการเพิ่มความเหนียวให้กับพอลิโอเลฟินส์ชนิดต่างๆ เช่น พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีน เป็นต้น [10] นอกจากนี้ เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ยังอยู่ในลักษณะเป็นเม็ดซึ่งช่วยให้ขนส่งได้สะดวก และผสมได้ง่าย

สมบัติของเอทิลีนออกทีนออกทีนโคพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของโอเลฟินส์ที่ใส่เข้าไป เมื่อปริมาณโอเลฟินส์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้โคพอลิเมอร์เปลี่ยนจากของแข็งที่มีโครงสร้างแบบกิ่งผลึกที่แข็งตึงไปเป็นอิลาสโตเมอร์แบบอสัณฐานที่มีความนิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ สมบัติของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ยังขึ้นอยู่กับขนาด และความยาวของส่วนที่เป็นโซ่กิ่งอีกด้วย

เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ทั่วไปจะมีสมบัติการไหลที่ดีเยี่ยม ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางในงานทั่วไปของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ ทั้งยังสามารถใช้เป็นสารปรับปรุงสมบัติความทนแรงกระแทกในพอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีน โดยเฉพาะในงานที่ต้องการให้พลาสติกมีสมบัติการไหลที่ดี นอกจากนี้ เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ยังสามารถรับสารเติมแต่งได้ในปริมาณสูง มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี และเมื่อเกิดการเชื่อมขวางแล้วจะสามารถทนต่อความร้อนแรงกด หรือสภาพอากาศได้ดีเยี่ยม สามารถนำมาใช้ในการหุ้มสายไฟหรือสายเคเบิลได้

Adhikari และคณะ [11] ได้ศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิค atomic force microscopy (AFM) พบว่า เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์สามารถกระจายตัวในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงได้ดี

Silva และคณะ [12] ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหล สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีพฤติกรรมการไหลแบบนิวตันเนียน (Newtonian flow) เมื่ออัตราเฉือน (shear rate) อยู่ในช่วง $27-2700 \text{ s}^{-1}$ สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์เท่ากับ 5% โดยน้ำหนัก และจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน พบว่า การผสมเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ไม่มีผลต่อพฤติกรรมการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์

เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์เป็นสารที่มีความสมดุลระหว่างความแข็งตึง และความเหนียว ทำให้เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการความทนแรงกระแทกสูง การที่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ยังมีสมบัติการไหลที่ดี ทำให้สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานต่างๆ ได้ดี เป็นการช่วยประหยัดวัตถุดิบ และลดต้นทุนการผลิต

เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีสมบัติการหลอมไหลที่ไม่ค่อยดี ทำให้ไม่สามารถใช้สารตัดแปรที่มีความหนืดสูงได้ เช่น ยาง EPDM แต่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์มีสมบัติการหลอมไหลที่ดี จึงเหมาะกับการนำมาใช้งานเป็นสารตัดแปรความทนแรงกระแทกให้กับพอลิโพรพิลีน เนื่องจากจะทำให้ของผสมที่ได้สามารถขึ้นรูปได้ง่าย [6]

เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นของบริษัทดาวเคมีคอล ที่มีชื่อทางการค้าว่า “Engage 8200” มีดัชนีการหลอมไหลเท่ากับ 5.0 กรัม/10 นาที มีปริมาณออกทีนร้อยละ 24 โดยน้ำหนัก มีความหนาแน่น 0.87 กรัม/ลบ.ซม. ซึ่งถูกผลิตด้วยเทคนิค INSITE™ [13]

2.3 สารตัวเติมและสารเสริมแรง (Fillers and Reinforcing Fillers)

สารตัวเติมและสารเสริมแรงที่ใช้ในพอลิโพรพิลีน มีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนหรือเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล สารเพิ่มเนื้อเป็นสารตัวเติมที่มีราคาถูก ใช้ในการเพิ่มจำนวนให้กับวัสดุ และลดปริมาณสารอื่นที่มีราคาแพงลง ซึ่งบางครั้งสารตัวเติมที่ใส่ลงไปอาจจะช่วยเพิ่มความแข็งตึงและความทนต่อความร้อนให้กับวัสดุได้อีกด้วย ส่วนสารเสริมแรงจะถูกใส่ลงในพอลิโพรพิลีนเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดียิ่งขึ้น เช่น สมบัติด้านความทนแรงดึง อุณหภูมิโก่งตัวด้วยความร้อน และมอดุลัสยืดหยุ่น สารเสริมแรง ได้แก่ สารเสริมแรงที่มีลักษณะเป็นเส้นใย ไมกา ไวลลาสโทไนต์ และเส้นใยแก้ว จะทำให้พอลิโพรพิลีนมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น สามารถนำมาใช้แทนพลาสติกวิศวกรรมที่มีราคาแพงได้ สารตัวเติมและสารเสริมแรงที่นิยมนำมาใช้ในพอลิโพรพิลีน ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ทัลค์ ไมกา แบไรต์ ลูกแก้ว เส้นใยคาร์บอน และเส้นใยแก้ว โดยปริมาณที่ใช้จะสูงที่สุดไม่เกินร้อยละ 50

สารเสริมแรงบางชนิดสามารถเกิดพันธะทางเคมีกับพอลิเมอร์ได้ ซึ่งจะทำให้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น มีการเคลื่อนที่ของสายโซ่น้อยลง เกิดการจัดเรียงตัวที่บริเวณพื้นผิวของสารตัวเติมมากขึ้น มีผลทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้น้อยลง มีความแข็งตึง ความแข็งแรง และอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้วเพิ่มขึ้น

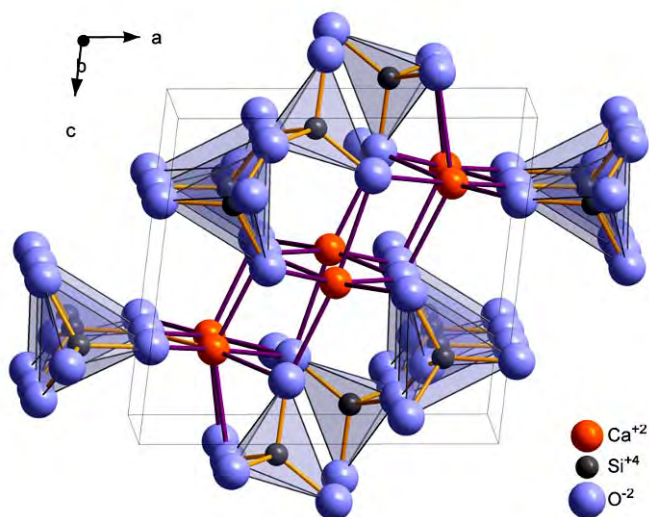
ผลของสารเสริมแรงที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของสารตัวเติม ขนาด และกระจายขนาดของอนุภาค การเตรียมพื้นผิว การกระจายตัวของสารตัวเติม โดยที่พื้นที่ผิวของสารตัวเติมจะมีผลต่อการยึดติดกับพอลิเมอร์ ส่วนขนาด รูปร่าง และชนิดของสารตัวเติม จะมีผลต่อการกระจายตัว และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารตัวเติม และพอลิเมอร์ อัตราการไหล การเตรียมพื้นผิวของสารตัวเติม ลักษณะของเครื่องมือที่ใช้ในการผสม ภาวะที่

ใช้ในการผสม ขนาดอนุภาคของสารตัวเติม และความเป็นรูปแบบเดียวกันของสารตัวเติม จะมีผลต่อระดับการกระจายตัวของสารตัวเติมในพอลิเมอร์

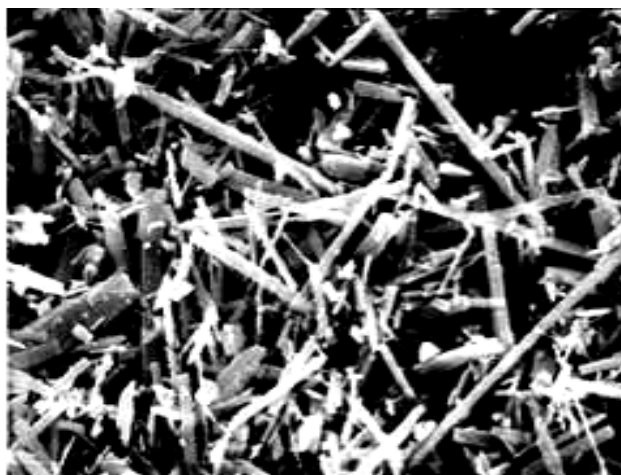
การขัดถูที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตจะทำให้เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตเกิดความเสียหายสมบัติด้านการขัดถูของตัวเติมจะขึ้นอยู่กับความหยาบของพื้นผิวอนุภาค และค่าความแข็งของสารตัวเติม โดยที่ความสามารถในการขัดถูของสารตัวเติมจะลดน้อยลงที่สุด เมื่อสารตัวเติมมีขนาดอนุภาค 325 เมช และค่าความแข็งของทัลค์ เคอลิน และแคลเซียมคาร์บอเนต จะมีน้อยกว่า โวลลาสโทไนต์ ซิลิกา และเฟลด์สปาร์

2.4 โวลลาสโทไนต์ (Wollastonite) [14-18]

โวลลาสโทไนต์เป็นแร่ประเภทแคลเซียมซิลิเกตที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ซึ่งประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 48.28 และซิลิกา (SiO_2) ร้อยละ 51.72 โดยมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.5 โวลลาสโทไนต์ที่พบในธรรมชาติจะมีสีขาว ซึ่งเกิดจากการเกาะกลุ่มของผลึกรูปเข็ม (needle-shaped crystal) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (aspect ratio) อยู่ในช่วง 3-20 มีความถ่วงจำเพาะ 2.9 มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 9.9 และความแข็ง 4.5 (Moh's hardness) [14]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของโวลลาสโทไนต์ [15]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึกรูปเข็มของโวลลาสโทไนต์ [16]

โวลลาสโทไนต์ที่พบในธรรมชาติมักมีสารปนเปื้อนประเภทไอออนของโลหะ เช่น อะลูมินา เหล็ก แมกนีเซียม โปแทสเซียม และโซเดียมปนอยู่ นอกจากนี้ โวลลาสโทไนต์มักเกิดร่วมกับแร่แคลไซต์ การ์เน็ต และไดออปไซด์ ซึ่งจะถูกกำจัดออกไปในระหว่างกระบวนการผลิต การเกิดโวลลาสโทไนต์นั้นสามารถเกิดได้ทั่วไปบนผืนโลก โดยจะเกิดแทรกอยู่ในพวกหินอัคนี พบได้มากที่ประเทศโรมาเนีย อิตาลี นอร์เวย์ ฟินแลนด์ เยอรมัน อเมริกา สเปน จีน แคนาดา และเม็กซิโก

โวลลาสโทไนต์เป็นสารตัวเดิมที่มีการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากช่วยเพิ่มสมรรถนะให้กับผลิตภัณฑ์หลายๆ ชนิด ทั้งในด้านอุตสาหกรรมพลาสติก สีและสารเคลือบผิว วัสดุก่อสร้าง อุปกรณ์ขัดถู เซรามิก และการถลุงแร่

ปัจจุบันได้มีการนำโวลลาสโทไนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมพลาสติก โดยการนำโวลลาสโทไนต์ชนิดที่มี aspect ratio สูง (10-20) มาใช้เป็นสารเสริมแรงแทนการใช้เส้นใยแอสเบสตอส (asbestos) อย่างกว้างขวางทั้งในอุตสาหกรรมเทอร์โมพลาสติก และเทอร์โมเซตพลาสติก เพื่อปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์พลาสติกโดยอาศัยสมบัติของแร่อนินทรีย์ในการเพิ่มสมบัติเชิงกล เสถียรภาพทางความร้อน และความคงรูป เป็นต้น นอกจากนี้ การใช้โวลลาสโทไนต์ที่มีอนุภาคละเอียดมากๆ จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความต้านทานการขีดขูด และความทนแรงกระแทกสูงกว่าวัสดุอื่นๆ รวมทั้งโวลลาสโทไนต์ยังมีราคาถูกมากเมื่อเทียบกับสารอนินทรีย์บางชนิด

โวลลาสโทไนต์นิยมนำมาใช้เตรียมวัสดุคอมพอสิต เนื่องจากโวลลาสโทไนต์มีลักษณะเป็นผลึกรูปเข็ม นอกจากนี้ ยังช่วยปรับปรุงสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้า ความทนความร้อน และทำให้พลาสติกมีความเสถียรภาพทางขนาดมากขึ้น โวลลาสโทไนต์ที่มีขนาดอนุภาคละเอียดมากๆ จะช่วย

ปรับปรุงเรื่องความทนทานต่อการขีดข่วนและการกระแทกได้ดี นอกจากนี้ การปรับสภาพพื้นผิวของโวลลาสโทไนต์ด้วยสารเคลือบที่มีชนิดและความเข้มข้นเหมาะสม จะทำให้โวลลาสโทไนต์เกิดหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์มากขึ้น ทั้งยังช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกล และทำให้โวลลาสโทไนต์สามารถกระจายตัวได้ดีมากขึ้นอีกด้วย

นอกจากนี้ โวลลาสโทไนต์ยังถูกนำมาใช้แทนแร่ใยหินในวัสดุก่อสร้างที่ทนไฟได้ โดยสามารถปรับปรุงความทนแรงดัดโค้ง และความทนแรงกระแทกให้กับวัสดุ นอกจากนี้จะนำมาใช้ในวัสดุที่ต้องการการทนไฟสูงแล้ว ยังสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย ทั้งในแผ่นโครงสร้าง ทั้งภายในและภายนอก กระเบื้องหลังคา ฉนวนในรูปแบบต่างๆ แผงควบคุมไฟ และวัสดุติดผนังรอบอาคาร

สำหรับสีและสารเคลือบผิว อนุภาคที่ละเอียดของโวลลาสโทไนต์ช่วยทำให้การทาสีมีความราบเรียบมากขึ้น และช่วยให้สีที่ทาที่มีความหนาสมาเสมอ นอกจากนี้ การที่ผลึกของโวลลาสโทไนต์มีลักษณะเป็นรูปเข็มทำให้เกิดการสานกันเป็นร่างแหที่แข็งแรง ซึ่งจะช่วยปรับปรุงความเหนียว และความคงทนของสารเคลือบผิว ช่วยป้องกันเรื่องคราบ รอยขีดข่วน สิ่งสกปรกและอากาศที่แปรปรวน นอกจากนี้ยังช่วยให้สีมีความขาว และสว่างขึ้น จึงช่วยลดปริมาณการใช้สี และเนื่องจากโวลลาสโทไนต์ไม่ค่อยดูดซึมน้ำมันเข้าไปในอนุภาค ทำให้ลดปริมาณสารยึดที่ต้อต้องใช้ลงไป เป็นการลดต้นทุนลงได้

เนื่องจากโวลลาสโทไนต์มีสมบัติละลายน้ำได้ต่ำมาก และมีค่าการจุดติดไฟต่ำ ดังนั้น จึงมีการเติมโวลลาสโทไนต์ลงไปในการเชื่อมและหลอมเหล็ก เพื่อช่วยดูดซับอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) นอกจากนี้ การเติมโวลลาสโทไนต์ยังช่วยทำให้คุณสมบัติการหลอมต่ำลง

โวลลาสโทไนต์สามารถนำมาใช้ได้ทั้งในเนื้อดิน และในสีเคลือบของเซรามิก โลหะเคลือบ และพริต เป็นแหล่งให้แคลเซียมออกไซด์ในเคลือบซึ่งจะช่วยปรับปรุงค่าความแข็งแรงของเคลือบ เนื่องจากโวลลาสโทไนต์มีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด (Limiting Oxygen Index) ต่ำมาก ดังนั้น การใช้งานในเคลือบจะทำให้ผิวเคลือบมีความเรียบกว่าการใช้แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และทำให้มีรูเข็มลดลง สามารถใช้เป็นตัวช่วยหลอมได้ถ้าใส่ในปริมาณไม่สูงนัก แต่ถ้าใส่ปริมาณมากจะตกผลึกเป็น $CaSiO_3$ ทำให้ผิวเคลือบด้าน เนียน สวยงาม และทำให้เกิดความต้านทานการขีดข่วนได้ดี

ในอุตสาหกรรมผ้าเบรก โพลลาสโตนต์จะถูกนำมาใช้เป็นสารเสริมแรง เนื่องจากสมบัติด้านการคงรูปที่ดี และไม่เป็นพิษ ไม่มีอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม โดยมาใช้แทนใยหิน และเส้นใยสังเคราะห์อื่น ๆ ในการทำวัสดุประเภทที่ไม่มีแร่ใยหินในผ้าเบรก และกระดาดาย [17]

2.5 วัสดุคอมพอสิต (Composite Materials) [18,19]

วัสดุคอมพอสิต หมายถึง วัสดุซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมารวมกัน โดยมีเฟสที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 เฟส (phase) ขึ้นไป และสามารถจำแนกความแตกต่างระหว่างเฟสได้แม้ในระดับจุลภาค (microscopic) โดยทั่วไปองค์ประกอบหนึ่งมักจะทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงให้กับอีกองค์ประกอบหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นสารยึด หรือเมทริกซ์

เมทริกซ์เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญในวัสดุเชิงประกอบ ทำหน้าที่เชื่อมประสานหรือยึดเกาะกับสารเสริมแรงที่เป็นเส้นใยหรืออนุภาค ปกป้องสารเสริมแรงจากรอยขีดข่วน ส่งผ่านแรงหรือความเค้นระหว่างสารเสริมแรง โดยทั่วไปแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

1. วัสดุคอมพอสิตที่ใช้พอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ ซึ่งมีการพัฒนาเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากสามารถสร้างเป็นชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ มีรูปร่างซับซ้อน นำไปใช้งานได้สะดวก บำรุงรักษาง่าย ซึ่งพอลิเมอร์ที่ใช้อาจเป็นได้ทั้งเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตพลาสติก ได้แก่ อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีนโคพอลิเมอร์ ไนลอน พอลิอะซีทัล พอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว อัลคิลเรซิน อีพอกซีเรซิน และฟีนอลิกเรซิน เป็นต้น

2. วัสดุคอมพอสิตที่ใช้โลหะเป็นเมทริกซ์ มักใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่าพอลิเมอร์ แต่มีน้ำหนักมากและราคาแพง จึงมีการใช้งานไม่กว้างขวางนัก วัสดุคอมพอสิตกลุ่มนี้จะประกอบด้วยโลหะอัลลอยด์เสริมแรงด้วยเส้นใย หรืออนุภาค เช่น ทังสเตน ส่วนโลหะอัลลอยด์ที่ใช้ ได้แก่ อะลูมิเนียมอัลลอยด์ แมกนีเซียมอัลลอยด์ และทองแดง เป็นต้น

3. วัสดุคอมพอสิตที่ใช้เซรามิกเป็นเมทริกซ์ ที่ถูกเสริมแรงด้วยเส้นใยหรืออนุภาค เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ เซรามิกที่ใช้ ได้แก่ ลิเทียมอะลูมินซิลิเกต อะลูมินา และซิลิกอนไนไตรด์ เป็นต้น

สารเสริมแรงทำหน้าที่เสริมแรงหรือรับแรงจากเมทริกซ์ เมื่อวัสดุคอมพอสิตได้รับแรงกระทำ ไม่ว่าจะเป็นแรงดึง แรงอัด หรือแรงเฉือน ทำให้วัสดุดังกล่าวสามารถทนแรงเหล่านั้นได้ดีกว่าวัสดุที่ไม่ใส่สารเสริมแรง ซึ่งวัสดุคอมพอสิตสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท ตามชนิดของสารเสริมแรงได้ดังนี้

1. วัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยตัวเติมชนิดเป็นอนุภาค (particulate-filled composite) ประกอบด้วยเฟสต่อเนื่องซึ่งเป็นเฟสส่วนใหญ่ของระบบ และเฟสของตัวเติมซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคเป็นเฟสที่ไม่ต่อเนื่อง โดยอนุภาคจะมีมิติของรูปทรงที่แตกต่างกันไม่มากนัก ซึ่งมีสมบัติต่างๆ ขึ้นกับสมบัติของอนุภาค ซึ่งได้แก่

- ขนาดของอนุภาคและการกระจายขนาดอนุภาค โดยอนุภาคที่ละเอียดกว่าในเมทริกซ์ชนิดเดียวกันจะให้สมบัติต่างๆ เช่น ความทนแรงดึง มอดุลัส และความแข็งสูง ส่วนอนุภาคที่ยากกลับทำให้ความแข็งแรงลดลง

- รูปร่างของอนุภาค โดยรูปร่างมีผลกับสมบัติต่างๆ ตัวอย่างเช่น อนุภาคเคาลินที่มีลักษณะเป็นแผ่น มีแนวโน้มของการจัดเรียงตัวในระหว่างกระบวนการผลิต นอกจากนี้ยังมีอนุภาคที่มีรูปร่างแบบอื่นๆ อีก ได้แก่ อนุภาคทรงกลม และแท่ง เป็นต้น

- ธรรมชาติทางเคมีของพื้นผิว สำหรับอนุภาคของแร่ มักมีหมู่มีขั้วบนพื้นผิว เช่น หมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งทำให้เปียกน้ำได้ง่าย แต่ไม่เกาะติดพอลิเมอร์ การปรับปรุงให้อนุภาคสามารถยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดี จำเป็นต้องปรับแต่งหรือดัดแปรพื้นผิวเสียก่อน เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต อาจถูกปรับแต่งด้วยกรดสเตียริกเพื่อให้หมู่ของกรดยึดติดกับอนุภาค ในขณะที่สายโซ่อะลิแฟติก เข้าร่วมกับพอลิเมอร์

2. วัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยตัวเติมชนิดเป็นเส้นใย (fiber filled composite) โดยเส้นใยเป็นวัสดุที่มีความยาวมากกว่าพื้นที่หน้าตัดอย่างมาก มีทั้งเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ฝ้าย และไหม เป็นต้น และเส้นใยที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น พอลิเอทิลีน และพอลิเอสเทอร์ เป็นต้น ซึ่งช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความทนแรงกระแทก ความแกร่ง และความเหนียวของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งเส้นใยอนินทรีย์ เช่น เส้นใยแก้ว และเส้นใยแอสเบสตอส เป็นต้น ซึ่งใช้ได้กับทั้งเทอร์โมพลาสติก และเทอร์โมเซตพลาสติก

วัสดุที่ผลิตจากพอลิเมอร์เพื่อใช้ในทางการค้า ส่วนใหญ่เป็นวัสดุคอมพอสิตเนื่องจากมีสารเสริมแรงและพอลิเมอร์เมทริกซ์ให้เลือกหลายชนิด จึงทำให้สามารถนำมาผลิตเป็นวัสดุคอมพอสิตได้มากมาย เนื่องจากมีข้อดีเหนือกว่าหลายประการ เช่น

- เพิ่มความแข็งแรง ความแข็งแกร่ง และคงรูปร่างได้ดีกว่า
- เพิ่มความเหนียว และความทนแรงกระแทก
- ทำให้อุณหภูมิการบิดตัวสูงขึ้น

- ลดการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำ
- ปรับปรุงสมบัติด้านไฟฟ้า
- ลดต้นทุนการผลิต
- ยืดอายุการใช้งาน
- ลดการหดตัวหรือขยายตัวเนื่องจากความร้อน
- ฯลฯ

วัสดุคอมพอสิตชนิดหนึ่งๆ อาจมีทั้งข้อดีบางประการ และขณะเดียวกันอาจมีข้อเสียด้วย ดังนั้น ในการใช้งานต้องพิจารณาทั้งข้อดี และข้อเสียของวัสดุแต่ละชนิด ข้อเสียของวัสดุคอมพอสิต เช่น ความเหนียวเพิ่มขึ้น การขึ้นรูปยาก และอาจทำให้สมบัติเชิงกล และทางฟิสิกส์บางประการลดลง เป็นต้น สมบัติของวัสดุคอมพอสิตขึ้นอยู่กับสมบัติของส่วนประกอบต่างๆ เช่น ลักษณะของตัวเติม ลักษณะพื้นฐานวิทยาของระบบ และลักษณะผิวสัมผัสระหว่างเฟสที่แตกต่างกัน เป็นต้น

ปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และตัวเติม มี 4 แบบ คือ

1. อนุภาคเดี่ยวและอนุภาคที่รวมตัวเป็นกลุ่มของตัวเติมอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์โดยไม่เกิดปฏิกิริยาใดๆ ลักษณะตัวเติมจะทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์ลดลง
2. อนุภาคของตัวเติมกระจายอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ โดยพอลิเมอร์จะเคลือบที่ผิวของตัวเติม พอลิเมอร์ผสมตัวเติมลักษณะนี้จะมีค่าความทนแรงดึงเพิ่มเล็กน้อย และการยืดตัวลดลง ซึ่งเป็นลักษณะการผสมตัวเติมเพื่อลดต้นทุนในการผลิต
3. เกิดการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์และผิวของอนุภาคตัวเติม ทำให้ความแข็งแรงของวัสดุประกอบเพิ่มขึ้น ซึ่งกรณีนี้ตัวเติมจะมีลักษณะเป็นวัสดุเสริมแรง
4. เกิดพันธะทางเคมีระหว่างพอลิเมอร์และผิวของอนุภาคตัวเติมทำให้ความแข็งแรงของวัสดุคอมพอสิตเพิ่มขึ้นซึ่งในกรณีนี้ตัวเติมจะมีลักษณะเป็นวัสดุเสริมแรง

2.6 การขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ (Injection Molding) [19]

การขึ้นรูปพลาสติกด้วยการฉีดแบบเป็นกระบวนการขึ้นรูปที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากมีความรวดเร็วในการผลิต ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายลักษณะ อีกทั้งยังมีขั้นตอนการผลิตไม่ซับซ้อน ผลิตภัณฑ์ประมาณร้อยละ 60 ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีน้ำหนักอยู่ในช่วงประมาณ 5 กรัม ถึง 90 กิโลกรัม

กระบวนการฉีดแบบเริ่มจากการเติมเม็ดพลาสติกที่จะทำการฉีดในช่องใส่ (hopper) เม็ดพลาสติกจะถูกหลอม และผสมกันด้วยการหมุนของสกรู จากนั้นพลาสติกหลอมจะถูกผลักดันไปที่ด้านหน้าของสกรู และชุดเปิดปิดแม่แบบเคลื่อนที่เข้าหากันเพื่อปิดแม่แบบด้วยแรงกดแม่แบบ (clamping force) ที่มากพอที่จะกดแม่แบบด้วยแรงขับเคลื่อนจากไฮดรอลิก (hydraulic) ทำให้หัวฉีดเปิดออก แล้วจึงฉีดอัดพลาสติกหลอมที่สะสมอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของสกรูในชุดหลอม ด้วยการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของสกรู ลักษณะเหมือนกับลูกสูบในกระบอกฉีดยา เมื่อสกรูเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเพื่อจะทำการฉีด ทำให้เกิดความดันขึ้นกับพลาสติกหลอมซึ่งจะผลักดันการไหลกลับ (back flow valve) มาด้านหลังป้องกันไม่ให้พลาสติกหลอมไหลสวนทางกัน

เมื่อพลาสติกถูกฉีดเข้าไปในแม่แบบก็จะเริ่มแข็งตัว เป็นผลมาจากน้ำหล่อเย็นในแม่แบบ ดังนั้น การฉีดจึงต้องทำการฉีดอย่างรวดเร็ว เพื่อให้พลาสติกไหลเข้าเต็มแม่แบบจนเต็ม แล้วต้องรักษาความดันในการฉีด เพื่อผลักดันพลาสติกหลอมชุดใหม่เข้าไปในแม่แบบ เนื่องจากเหตุผลที่ว่า เมื่อพลาสติกสัมผัสกับแม่แบบจะเริ่มแข็งตัว จากด้านนอกเข้าสู่ด้านในของชิ้นงาน ดังนั้น ด้านในของชิ้นงานยังคงไหลได้ในขณะที่ด้านนอกแข็งตัวแล้ว และเมื่อด้านในของชิ้นงานแข็งตัวก็จะหดตัว เป็นผลให้ชิ้นงานเกิดการยุบตัว (sink mark) ซึ่งพลาสติกหลอมชุดใหม่จะเข้าไปชดเชยส่วนที่หดตัว แต่พลาสติกหลอมจะไม่สามารถเข้าไปชดเชยได้จนกว่าพลาสติกบริเวณกรวยนำฉีด (sprue cone) จะแข็งตัว ดังนั้น การออกแบบแม่แบบจึงมักออกแบบให้กรวยนำฉีดอยู่ในบริเวณที่หนาที่สุดของแม่แบบ เพื่อป้องกันไม่ให้พลาสติกแข็งตัวเร็วเกินไป

ขั้นตอนที่มีการรักษาความดันในการฉีดเพื่อผลักดันพลาสติกหลอมเข้าไปชดเชยส่วนที่หดตัว เรียกว่า การฉีดแช่อัด (holding pressure phase) ขั้นตอนนี้จะสิ้นสุดก็เมื่อไม่สามารถผลักดันพลาสติกหลอมเข้าไปได้อีก นั่นคือ เมื่อพลาสติกในกรวยนำฉีดแข็งตัว เรียกจุดสิ้นสุดขั้นตอนนี้ว่า จุดดัน (scaling point)

ความดันและเวลาที่ใช้ในชั้นการฉีดแห้งอัดจะมีผลต่อความบกพร่องของชิ้นงาน คือ ถ้าใช้ความดันและเวลาที่ใช้ในการฉีดแห้งอัดน้อยเกินไป จะทำให้พลาสติกหลอมเข้าไปซดเซยไม่เพียงพอ จะเกิดการหดตัวของชิ้นงาน แต่ถ้าใช้ความดันในการฉีดแห้งอัดมากเกินไปอาจทำให้แม่แบบเสียหายได้ โดยเฉพาะในการขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนด้วยการฉีดแบบจะต้องใช้ความดันในการฉีดสูง เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมักเกิดการบวมตัว ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างมีความเป็นผลึกค่อนข้างสูงนั่นเอง

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mohanty และ Nayak [8] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลพลวัต พฤติกรรมทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ซึ่งขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบ ผลจากการวิจัยแสดงให้เห็นว่าความทนแรงดึงและความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงตามปริมาณของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ความทนแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกอัตราส่วนผสม และเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก โดยเพิ่มขึ้นร้อยละ 380 เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ และจากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคป พบว่า พอลิเมอร์ผสมประกอบด้วย 2 เฟสของหยดเล็กๆ ของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์กระจายตัวสม่ำเสมอในเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีน และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี พบว่า อุณหภูมิหลอมเหลวของชิ้นงานมีค่าลดลงเมื่อใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ในพอลิโพรพิลีน และการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตแสดงพีกผ่อนคลาย (relaxation peak) ที่แตกต่างกันของอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (T_g) ของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และของพอลิโพรพิลีน ตามลำดับ ซึ่งยืนยันถึงการมีโครงสร้าง 2 เฟส

Babu และคณะ [6] ได้ทำการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมของพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน และของพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ การที่พอลิโพรพิลีนทั้ง 2 ชนิด (ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนและเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์) มีความแตกต่างของโครงสร้างโมเลกุล จึงมีผลทำให้ทั้งสมบัติเชิงกล พฤติกรรมทางความร้อน และสัณฐานวิทยาแตกต่างกัน โดยพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ได้แสดงสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนเหนือกว่าพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน ทั้งนี้อาจเนื่องจากการเกิดผลึกเล็กๆ และการมีอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวที่ดีกว่าของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์กับ

พอลิไพโรฟิลีน นอกจากนี้ เติลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ทางการค้ามีลักษณะเป็นเม็ด (pellets) จึงทำให้ผสมเข้ากับพอลิไพโรฟิลีนได้ง่ายกว่าอีกด้วย

Zhang และคณะ [20] ได้ศึกษาผลของการใช้ซอร์บิทอลเป็นสารก่อผลึก (nucleating agent) ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเติลีนออกทีนโคพอลิเมอร์และพอลิไพโรฟิลีน โดยเติลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ซึ่งมีสมบัติเป็นยางได้เพิ่มความเหนียวของพอลิไพโรฟิลีน และทำให้ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่จะให้ความทนแรงดึงและมอดุลัสดัดโค้งลดลง ซึ่งการใส่สารก่อผลึกประเภทซอร์บิทอลในพอลิเมอร์ผสม พบว่า ความเหนียวและความแข็งดึงของชิ้นงานเพิ่มขึ้นไปพร้อมกัน ซึ่งแสดงถึงสมดุลของสมบัติทั้งสองจากการใส่เติลีนออกทีนโคพอลิเมอร์และซอร์บิทอล

Meng และ Dou [21] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิไพโรฟิลีน/โพลีเอทิลีนไนไตรคอมพอสิต ซึ่งแสดงผลการทดสอบเป็นไปตามที่คาดไว้ กล่าวคือ ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานที่มีรอยบากจากการทดสอบแบบ Izod และความทนแรงดึงมีค่าลดลงตามปริมาณของโพลีเอทิลีนไนไตรที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ ยังมอดุลัสซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่แสดงถึงความแข็งดึงของวัสดุพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของโพลีเอทิลีนไนไตรที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผลของความแข็งดึงของผลึกที่เพิ่มขึ้นของโพลีเอทิลีนไนไตร นอกจากนี้ ผลของการวิเคราะห์คอมพอสิตด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี พบว่า ปรากฏพีคของการหลอมเหลว 2 แห่ง ที่อุณหภูมิประมาณ 150 และ 162 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิหลอมเหลวของบีตาและแอลฟาไอโซแทกติกพอลิไพโรฟิลีนตามลำดับ ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่าโพลีเอทิลีนไนไตรสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดบีตาพอลิไพโรฟิลีนได้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.1.1 วัสดุ

1. พอลิโพรพิลีน (HP500N) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เอ็ชเอ็มซี โปลิเมอร์ จำกัด (HMC Polymers Co., Ltd)
2. เอทีเอ็นออกทีนโคพอลิเมอร์ (Engage™ 8200) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เคมีคอลอินโนเวชัน จำกัด (Chemical Innovation Co., Ltd.)
3. โวลลาสโทไนต์ (XYNFW-XA 1200 mesh) จากบริษัท แปซิฟิก คอมมา เทรดดิ้ง จำกัด (Pacific Comma Trading Co., Ltd.)

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นทดสอบ

1. เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) รุ่น Thermo prism
2. เครื่องฉีดแบบ (injection molding machine) รุ่น Toshiba machine EC 130S (บริษัท เคมีคอล อินโนเวชัน จำกัด)

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของ Jeol รุ่น JSM 5800 LV
2. เครื่องวิเคราะห์ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) ของ Perkin-Elmer รุ่น DSC 7
3. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (Thermogravimetric Analyzer, TGA) ของ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA 851°
4. เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic Mechanical Analyzer, DMA) ของ Mettler Toledo รุ่น DMA 861°
5. เครื่องวัดดัชนีออกซิเจนจำกัด (Limiting Oxygen Indexer, LOI) รุ่น Stanton Redcroft

6. เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine) ของ LLOYD รุ่น LR100K

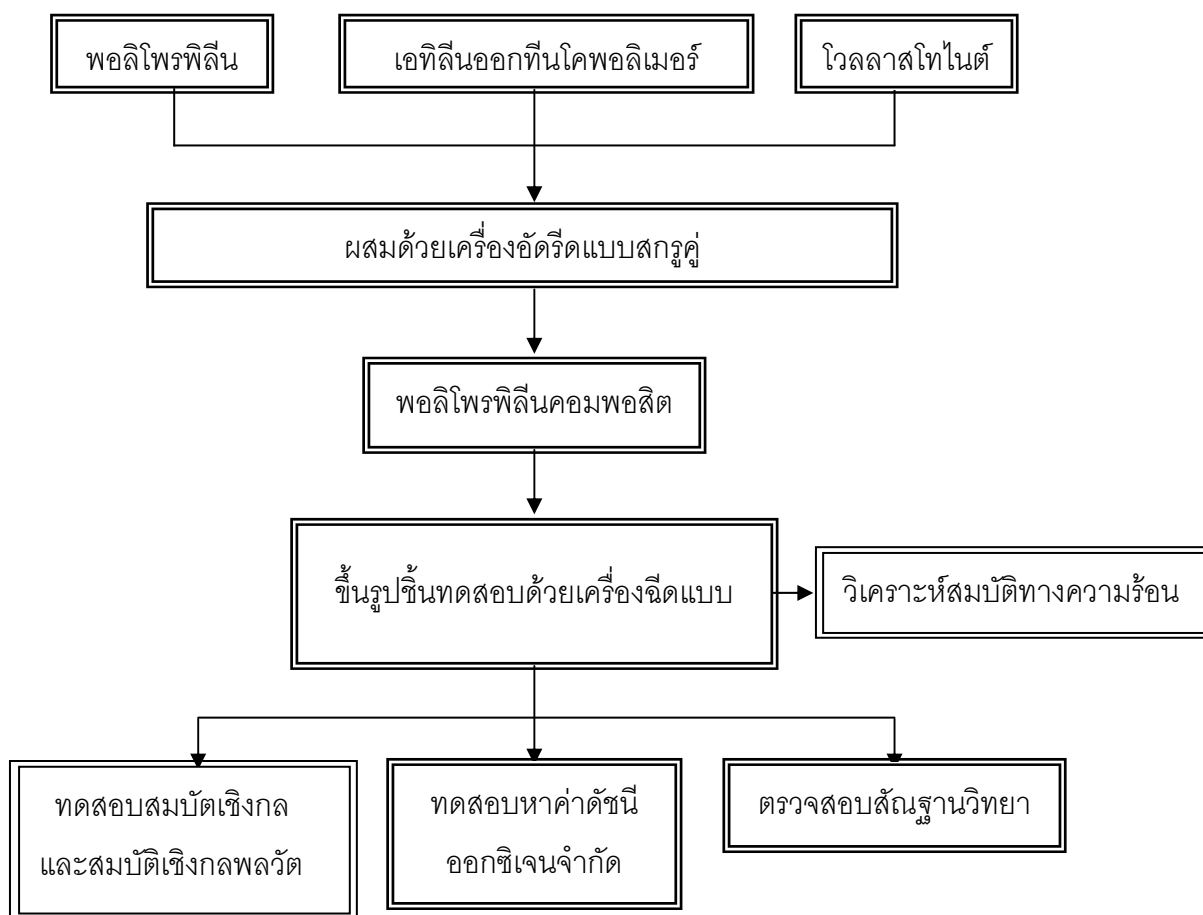
7. เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine) ของ LLOYD รุ่น 500

8. เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (Impact Tester) แบบ Charpy ยี่ห้อ Gotech รุ่น GT-7045

3.2 วิธีการเตรียมและขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

3.2.1 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.2 การผสมพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

นำพอลิโพรพิลีน เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และโพลลาสโตนมาผสมตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.1 ทำการเขย่าให้เข้ากัน แล้วนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปผ่านเข้าเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (รูปที่ 3.2) โดยใช้อุณหภูมิในการผสมของโซนต่างๆ ดังนี้ 220, 210, 210, 200 และ 190 องศาเซลเซียส ทำการอัดรีดผ่านหัวตายรูปวงกลม โดยให้ความเร็วรอบสกรู 40 รอบต่อนาที แล้วทำการตัดเม็ดเพื่อใช้ขึ้นรูปชิ้นทดสอบต่อไป



รูปที่ 3.2 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Thermo prism)

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมที่ใช้เตรียมพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

อัตราส่วนผสม	ปริมาณสารที่ใส่โดยน้ำหนัก (กรัม)		
	พอลิโพรพิลีน	เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์	โพลลาสโตน
100/0/0	100	-	-
80/20/0	80	20	-
80/20/10	80	20	10
80/20/20	80	20	20
80/20/30	80	20	30
70/30/0	70	30	-
70/30/10	70	30	10
70/30/20	70	30	20
70/30/30	70	30	30

3.2.3 การขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

นำเม็ดพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.1 ไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ (รูปที่ 3.3) โดยใช้อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และความดัน 50 เมกะปาสคัล



รูปที่ 3.3 เครื่องฉีดแบบ (Toshiba machine EC 130S)

3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

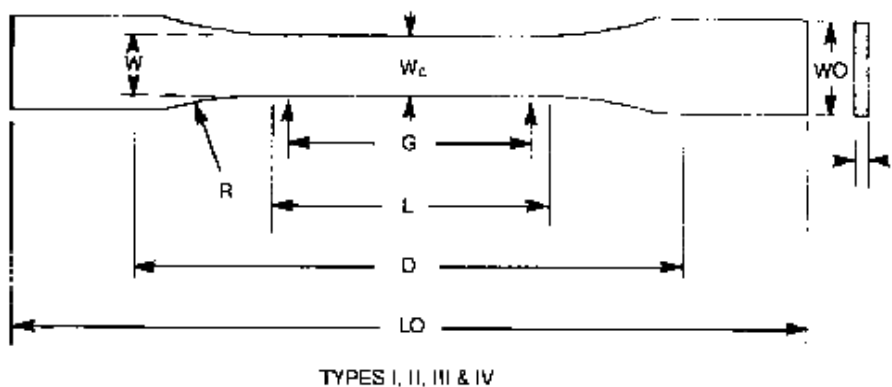
3.3.1 ทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง

ทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (LLOYD LR 100K) (รูปที่ 3.4) โดยใช้ชิ้นทดสอบที่มีรูปร่าง และขนาด ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และตารางที่ 3.2 ภายใต้ภาวะในการทดสอบดังนี้

อุณหภูมิ	25	องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	50	เปอร์เซ็นต์
น้ำหนักที่ใช้ทดสอบ	10	กิโลนิวตัน
ความเร็วในการทดสอบ	50	มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (LLOYD LR 100K)



รูปที่ 3.5 ชิ้นทดสอบความทนแรงดึง

ตารางที่ 3.2 ขนาดชิ้นทดสอบสมบัติความทนแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I

มิติ (มิลลิเมตร)		ความคลาดเคลื่อน
W-Width of narrow section	13	±0.5
L-Length of narrow section	57	±0.5
WO-Width over-all, min	19	+6.4
LO-Length over-all, min	165	no max
G-Gage length	50	±0.25
D-Distance between grips	115	±5
R-radius of fillet	76	±1

3.3.2 ทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง

ทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดัดโค้งตามมาตรฐาน ASTM D790 ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (LLOYD 500) (รูปที่ 3.6) โดยใช้ภาวะในการทดสอบดังนี้

อุณหภูมิ	25	องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	50	เปอร์เซ็นต์
น้ำหนักที่ใช้ทดสอบ	2500	นิวตัน
ความเร็วในการทดสอบ	10	มิลลิเมตร/นาที
ระยะ span	50	มิลลิเมตร



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (LLOYD 500)

3.3.3 ทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก

ทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D6110 ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy) ยี่ห้อ Gotech รุ่น GT-7045 (รูปที่ 3.7) โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาด 63x13x3 มิลลิเมตร ที่มีรอยบาก (notch) ภายใต้ภาวะในการทดสอบดังนี้

อุณหภูมิ	25	องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	50	เปอร์เซ็นต์
น้ำหนักของค้อนเหวี่ยง	1.357	กิโลกรัม
ค่าพลังงานการกระแทกสูงสุด	100	กิโลกรัม-เซนติเมตร



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบ Charpy (Gotech GT-7045)

3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

ทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตของ Mettler Toledo รุ่น DMA 861° (รูปที่ 3.8) ในโหมดแรงเฉือน (shear mode) โดยตัดชิ้นทดสอบให้มีขนาด 5x5x2 มิลลิเมตร และใช้ช่วงอุณหภูมิของการวิเคราะห์จาก -80 ถึง 100 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 3 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน



รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (Mettler Toledo, DMA 861°)

3.5 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

3.5.1 ทดสอบด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

ตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ของ Perkin-Elmer รุ่น DSC 7 (รูปที่ 3.9) โดยตัดชิ้นทดสอบพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตเป็นแผ่นวงกลมที่มีน้ำหนักประมาณ 5 มิลลิกรัม บรรจุใส่ใน DSC Pan ซึ่งน้ำหนักแน่นจนแล้วปิดฝานี้ จากนั้นจึงทำการทดสอบโดยตั้งภาวะการทดสอบดังนี้

1. เพิ่มความร้อนจากอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนถึง 200 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส/นาที
2. ให้อุณหภูมิคงที่ที่ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที
3. ลดความร้อนจากอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จนถึง 80 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการลดอุณหภูมิเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส/นาที
4. ให้อุณหภูมิคงที่ที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที
5. เพิ่มความร้อนจากอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนถึง 200 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส/นาที

ทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน เพื่อตรวจสอบหาอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) โดยวิเคราะห์จากพิกการเกิดผลึก และดีกรีของความเป็นผลึก (degrees of crystallinity, X_c) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times 100$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \Delta H_f &= \text{เอนทัลปีของพอลิโพรพิลีนตัวอย่าง} \\ \Delta H_f^0 &= \text{เอนทัลปีของพอลิโพรพิลีนที่มีการเกิดผลึก 100\%} \end{aligned}$$

โดยในที่นี้ให้ ΔH_f^0 มีค่าเท่ากับ 209 จูลต่อกรัม

ในกรณีที่มีปริมาณพอลิโพรพิลีนร้อยละ 80 จะมีเอนทัลปีของพอลิโพรพิลีน

$$\Delta H_f^0 = 209 - \frac{209 \times 20}{100} = 167.2 \text{ จูลต่อกรัม}$$



รูปที่ 3.9 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Perkin-Elmer, DSC 7)

3.5.2 ทดสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)

วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) ของ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA 851° (รูปที่ 3.10) โดยนำชิ้นทดสอบหนักประมาณ 10 มิลลิกรัม บรรจุในครุซีเบิลอะลูมินา โดยใช้ช่วงอุณหภูมิการวิเคราะห์จาก 50 ถึง 800 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส/นาที และวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนด้วยอัตราการไหลผ่านเท่ากับ 20 มิลลิลิตร/นาที



รูปที่ 3.10 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (Mettler Toledo, TGA/SDTA 851°)

3.6 ทดสอบหาความสามารถในการลุกไหม้ของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

ตรวจสอบหาความสามารถในการลุกไหม้ของวัสดุจากค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดตามมาตรฐาน ASTM D2863 ด้วยเครื่องวัดดัชนีออกซิเจนจำกัด รุ่น Stanton Redcroft (รูปที่ 3.11) โดยตัดชิ้นทดสอบให้มีขนาด 100x6.5x3 มิลลิเมตร แล้วบันทึกค่าปริมาณร้อยละของออกซิเจนต่ำที่สุดที่ใช้ในการลุกไหม้ในแนวตั้งอย่างต่อเนื่อง ในภาวะบรรยากาศผสมระหว่างออกซิเจนและไนโตรเจน



รูปที่ 3.11 เครื่องวัดดัชนีออกซิเจนจำกัด (Stanton Redcroft)

3.7 ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

ทำการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ Jeol รุ่น JSM 5800 LV (รูปที่ 3.12) เพื่อศึกษาการกระจายตัวของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และโพลลาสไทโรนตีในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ โดยนำชิ้นทดสอบไปแช่ในไนโตรเจนเหลว จากนั้นจึงทำให้เกิดรอยแตก แล้วนำเอาชิ้นงานมายึดติดบนแท่นวางชิ้นงาน ทำการเคลือบผิวด้วยทอง เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้าให้แก่ชิ้นตัวอย่าง และเพื่อป้องกันการเกิดประจุอิเล็กตรอนบนพื้นผิวของตัวอย่าง แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 2000 และ 5000 เท่า



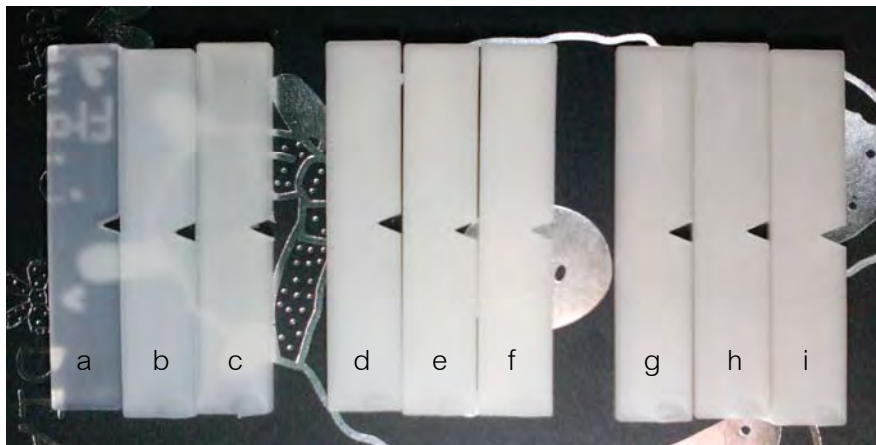
รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Jeol, JSM 5800 LV)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

จากการนำเอาพอลิโพรพิลีน เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และโพลลาสโตนต์มาผสมในอัตราส่วนต่างๆ กัน แล้วนำไปอัดรีดผ่านหัวดายรูปวงกลม และขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ จะได้ชิ้นทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 พอลิโพรพิลีนคอมพอสิต (a) 100/0/0 (b) 80/20/0 (c) 70/30/0 (d) 80/20/10 (e) 80/20/20 (f) 80/20/30 (g) 70/30/10 (h) 70/30/20 (i) 70/30/30

จากรูปแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์มีลักษณะใสและโปร่งแสง และเมื่อเติมเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ลงไปเป็นปริมาณ 20 และ 30% พบว่า ชิ้นงานเริ่มมีความขุ่น และเมื่อเติมโพลลาสโตนต์เข้าไปยิ่งทำให้ชิ้นงานมีความขุ่นและทึบแสงมากขึ้นตามปริมาณโพลลาสโตนต์ที่เพิ่มขึ้น

4.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

4.2.1 สมบัติด้านความทนแรงดึง

ผลการทดสอบหาค่าความทนแรงดึง ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (% elongation at break) ของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติด้านความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

องค์ประกอบ (PP/EOC/Wollastonite)	ความทนแรงดึง (MPa)	ยังส์มอดุลัส (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)
100/0/0	38	371	351
80/20/0	29	290	731
80/20/10	28	303	588
80/20/20	27	387	421
80/20/30	26	405	377
70/30/0	27	243	812
70/30/10	26	265	750
70/30/20	24	270	731
70/30/30	22	296	727

จากตารางที่ 4.1 พบว่า การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ปริมาณ 20 และ 30% โดยน้ำหนัก ในพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้ชิ้นงานมีความทนแรงดึงและยังส์มอดุลัสลดลงตามปริมาณเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดตามปริมาณเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายยาง จึงทำให้เสถียรภาพทางขนาดของผลิตภัณฑ์ลดลงและสามารถยืดตัวได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อใส่โวลลาสโทไนต์ปริมาณ 10, 20 และ 30 ส่วน ในเรซิน 100 ส่วน (phr) มีผลทำให้พอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่ได้มีความทนแรงดึงลดลงเล็กน้อย ขณะที่ยังส์มอดุลัสกลับมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในอัตราส่วน 80/20 ของพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่มีค่ายังส์มอดุลัสสูงกว่าของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์เมื่อใส่โวลลาสโทไนต์ในปริมาณ 20 และ 30 phr ส่วนเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตกลับมีค่าลดลงตามปริมาณของโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามที่คาดไว้ ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของโวลลาสโทไนต์มีความแข็งตึง (stiffness) และมอดุลัสสูงกว่าพอลิเมอร์เมทริกซ์ อย่างไรก็ตาม พอลิโพรพิลีนคอมพอสิตในทุกอัตราส่วนก็ยังมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด สูงกว่าพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ ดังนั้น การใส่โวลลาสโทไนต์ในปริมาณที่เหมาะสมอาจช่วยปรับปรุงเสถียรภาพทางขนาดของพอลิโพรพิลีนโดยไม่ได้ทำให้สมบัติความยืดหยุ่นลดลงไปมากนัก

4.2.2 สมบัติด้านความทนแรงดัดโค้ง

ผลการทดสอบหาค่าความทนแรงดัดโค้งและมอดุลัสแรงดัดโค้ง (flexural modulus) ของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM D790 แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สมบัติด้านความทนแรงดัดโค้งของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

องค์ประกอบ (PP/EOC/Wollastonite)	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	มอดุลัสแรงดัดโค้ง (MPa)
100/0/0	34	832
80/20/0	23	517
80/20/10	23	535
80/20/20	25	605
80/20/30	27	645
70/30/0	18	408
70/30/10	18	414
70/30/20	19	427
70/30/30	22	465

ตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าการใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ในพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้ความทนแรงดัดโค้งและมอดุลัสแรงดัดโค้งลดลงตามปริมาณของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่ใส่เข้าไปในพอลิโพรพิลีนมีความยืดหยุ่นสูง จึงทำให้ชิ้นงานโค้งงอได้ง่ายขึ้นเมื่อถูกกด ซึ่งเมื่อใส่โวลลาสโทไนต์ปริมาณ 10, 20 และ 30 phr ชิ้นงานกลับมีความทนแรงดัดโค้งและมอดุลัสแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นตามปริมาณโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น แต่ยังคงมีค่าต่ำกว่าของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ สาเหตุที่ทำให้ชิ้นงานมีความทนแรงดัดโค้งและมอดุลัสแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นก็ด้วยเหตุผลเดียวกับที่ได้กล่าวมาแล้วว่าอนุภาคของโวลลาสโทไนต์มีความแข็งตั้ง

4.2.3 สมบัติความทนแรงกระแทก

ผลการทดสอบหาค่าความทนแรงกระแทกแบบชาร์ปีที่มีรอยบาก (notched-Charpy impact strength) ของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM D6110 แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

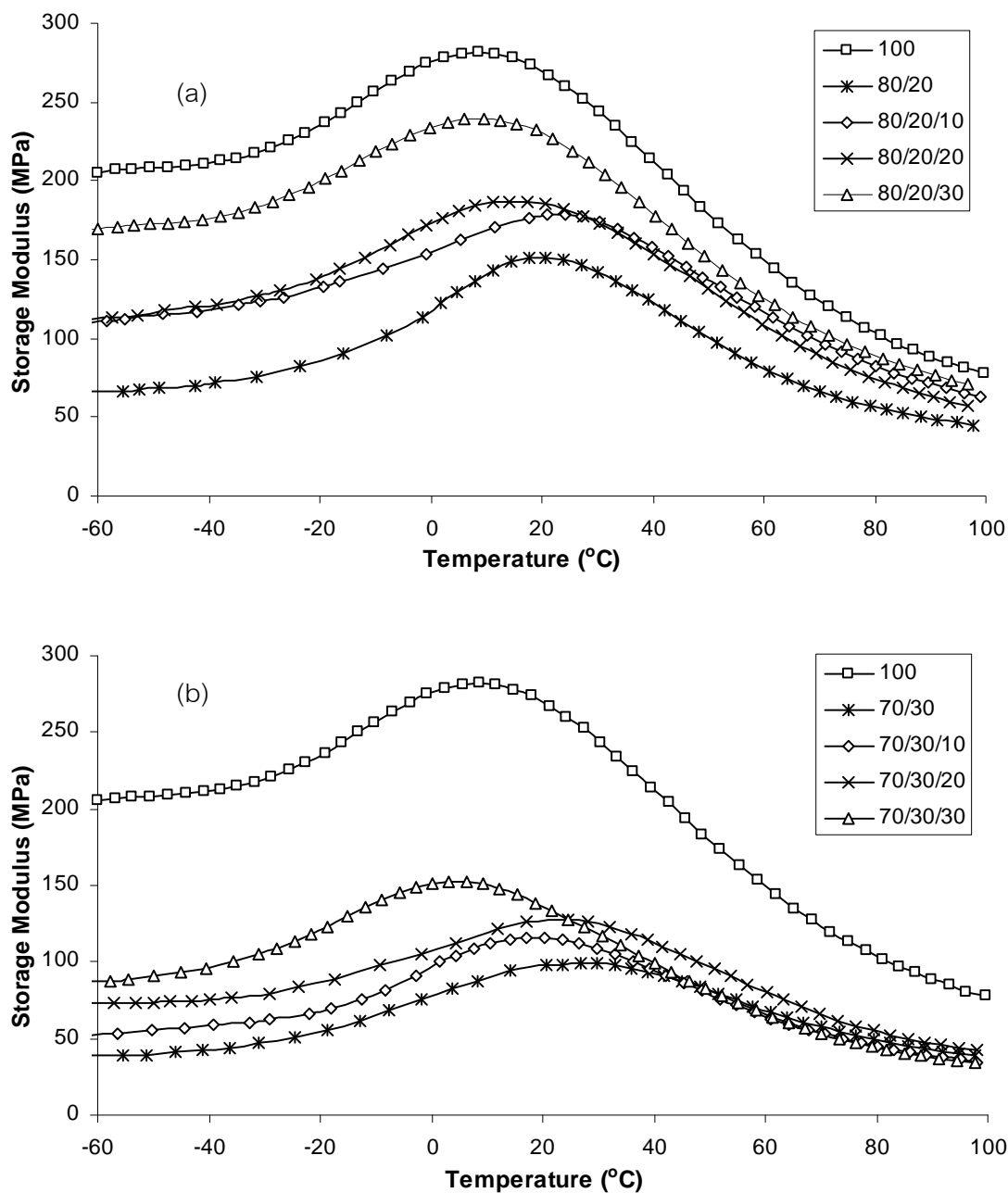
ตารางที่ 4.3 ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

องค์ประกอบ (PP/EOC/Wollastonite)	ความทนแรงกระแทก (kg-cm/cm ²)
100/0/0	96
80/20/0	180
80/20/10	193
80/20/20	239
80/20/30	257
70/30/0	215
70/30/10	227
70/30/20	246
70/30/30	260

ตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าการใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ในพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์เป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงจึงสามารถดูดซับพลังงานของแรงกระแทกได้ดี จึงทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงกระแทกสูงกว่าพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ และเมื่อใส่โวลลาสโทไนต์เพิ่มเข้าไปอีก พบว่า ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตได้รับการปรับปรุง โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้นในพอลิเมอร์ผสมทั้งสองอัตราส่วน ทั้งนี้อาจเนื่องจากอนุภาคผลึกรูปเข็มของโวลลาสโทไนต์สามารถส่งผ่านความเค้น (stress transfer) ที่เกิดจากแรงกระแทกได้ดี และการที่ชิ้นงานมีความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ทำให้อาจกล่าวได้ว่าโวลลาสโทไนต์มีการกระจายตัวที่ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของชิ้นงาน

4.3 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

การทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตภายใต้โหมดแรงเฉือน ภายในช่วงอุณหภูมิ -80 ถึง 100 องศาเซลเซียส แสดงค่ามอดุลัสสะสม (storage modulus, E') (รูปที่ 4.2) และแทนเจนต์สูญเสีย (loss tangent, $\tan \delta$) (รูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.4) เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ



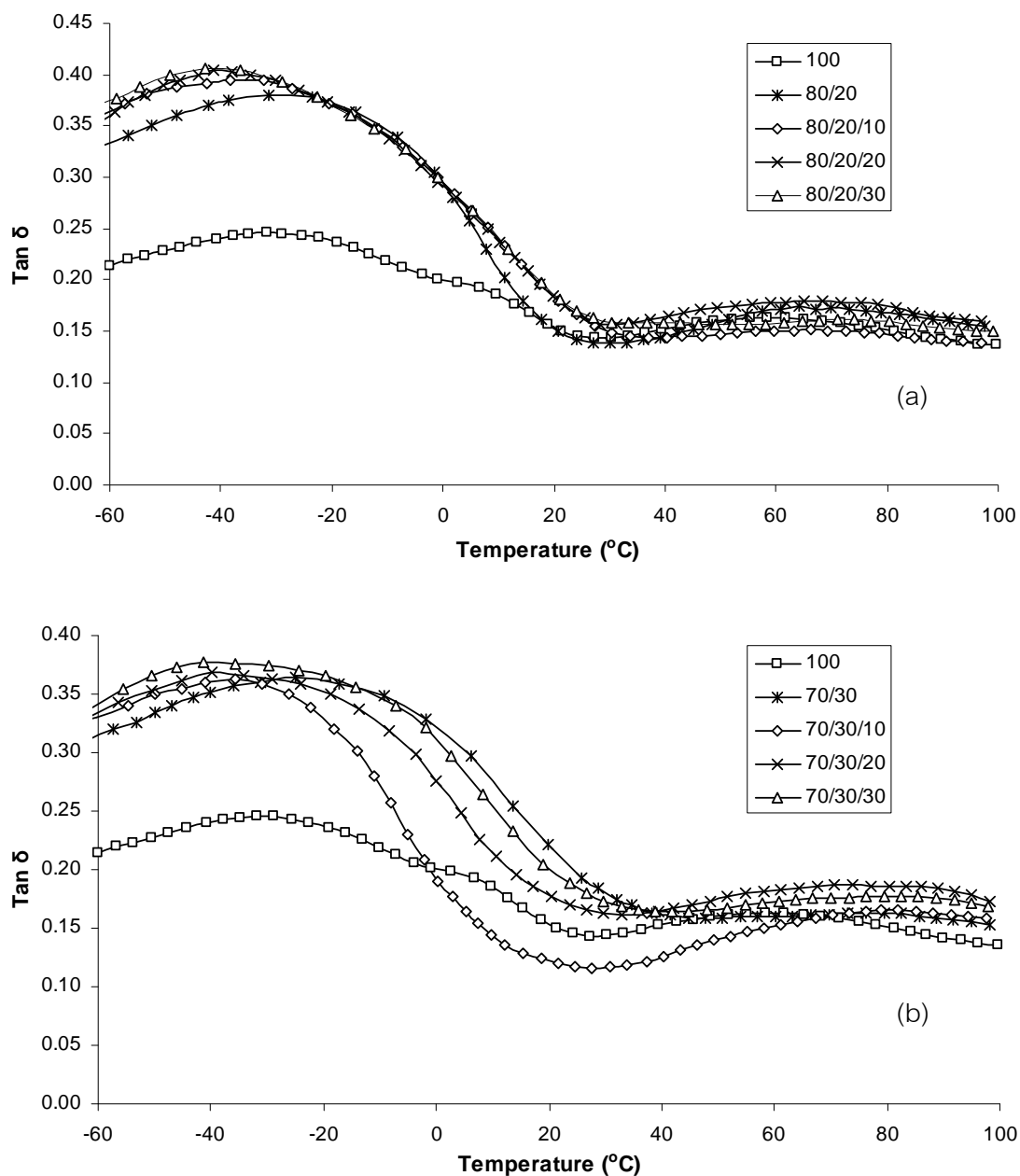
รูปที่ 4.2 มอดุลัสสะสมของพอลิโพรพิลีนคอมพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน

(a) 80/20 ของพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์

(b) 70/30 ของพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์

จากรูปที่ 4.2 พบว่า การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ปริมาณ 20 และ 30% โดยน้ำหนัก ในพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้ชิ้นงานมีมอดุลัสสะสมลดลงตามปริมาณเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ ที่เพิ่มขึ้นตลอดอุณหภูมิที่ทำการทดลอง อย่างไรก็ตาม การใส่โวลลาสโทไนต์ปริมาณ 10, 20 และ 30 phr มีผลทำให้มอดุลัสสะสมของพอลิโพรพิลีนคอมพอลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ

โวลลาสไทน์ที่เพิ่มขึ้นตลอดช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลอง แต่มอดุลัสสะสมของทุกอัตราส่วนยังมีค่าต่ำกว่าของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับค่า Young's Modulus ก็ด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 4.3 แทนเจนต์สูญเสียของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน

(a) 80/20 ของพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนไดโพลีเมอ์

(b) 70/30 ของพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนไดโพลีเมอ์

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

องค์ประกอบ (PP/EOC/Wollastonite)	T_{γ} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{β} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{α} ($^{\circ}\text{C}$)
100/0/0	-32	5.6	59
80/20/0	-	-31	64
80/20/10	-	-38	66
80/20/20	-	-41	68
80/20/30	-	-43	71
70/30/0	-	-35	79
70/30/10	-	-36	82
70/30/20	-	-40	83
70/30/30	-	-41	85

จากรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 พบว่า พอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์แสดงพีกแทนเจนต์สูงสุดเสีย 3 แห่ง คือที่ -32 (T_{γ}), 5.6 (T_{β}) และ 59 (T_{α}) องศาเซลเซียส โดย T_{β} คือ อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของส่วนที่เป็นออสตรูเนียนในเมทริกซ์ ขณะที่ T_{α} สัมพันธ์กับกลไกการเลื่อนโมเลกุลในเฟสที่เป็นผลึกเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเข้าใกล้อุณหภูมิลอมเหลว ส่วน T_{γ} นั้นเนื่องมาจากการเคลื่อนไหวของหมู่สายโซ่เล็กๆ เช่น เมทิล (methyl) และเมทิลีน (methylene) [8] ซึ่งการใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงเข้าไปในพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของพอลิโพรพิลีนลดลงเข้าใกล้อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ (-53 องศาเซลเซียส) และมีแนวโน้มลดลงมากขึ้นตามปริมาณเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีนลดลง ในทำนองเดียวกัน การใส่โวลลาสโทไนต์มีผลทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของพอลิโพรพิลีนลดลง แต่ทำให้ T_{α} มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น เพราะอนุภาคของโวลลาสโทไนต์เข้าไปขัดขวางกลไกการเลื่อนโมเลกุลในเฟสที่เป็นผลึกเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

4.4 ผลการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

4.4.1 ทดสอบด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรีของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตเพื่อศึกษาอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) และดีกรีของความเป็นผลึก (X_c) ซึ่งผลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่ตรวจสอบด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

องค์ประกอบ (PP/EOC/Wollastonite)	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	อุณหภูมิการเกิดผลึก (°C)	ดีกรีของความเป็นผลึก (%)
100/0/0	161	109	43
80/20/0	160	109	42
80/20/10	161	113	40
80/20/20	160	112	36
80/20/30	161	112	33
70/30/0	161	109	37
70/30/10	161	113	37
70/30/20	160	113	37
70/30/30	160	111	35

จากตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าการใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์และโวลลาสโทไนต์ในพอลิโพรพิลีนไม่มีผลทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิโพรพิลีนเปลี่ยนแปลงไป ส่วนอุณหภูมิการเกิดผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อใส่โวลลาสโทไนต์เข้าไป ซึ่งอาจเป็นเพราะโวลลาสโทไนต์บางส่วนทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกและช่วยให้พอลิโพรพิลีนเกิดผลึกได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตาม ปริมาณผลึกของพอลิโพรพิลีนลดลงเล็กน้อยจากการใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ซึ่งมีความเป็นอสัณฐานเข้าไป ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Babu และคณะ [6]

4.4.2 ทดสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)

ผลการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 50 ถึง 800 องศาเซลเซียส เพื่อหาเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิไพโรฟิลีนคอมพอสิต แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 ซึ่งแสดงอุณหภูมิเริ่มการสลายตัว (T_{onset}) อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว ($T_{end\ set}$) อุณหภูมิการสลายตัว 50% ($T_{50\%}$) และปริมาณชาร์ (char) ที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางความร้อนของพอลิไพโรฟิลีนคอมพอสิตที่ตรวจสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)

องค์ประกอบ (PP/EOC/Wollastonite)	T_{onset} (°C)	$T_{end\ set}$ (°C)	$T_{50\%}$ (°C)	Char (%)
100/0/0	446	483	467	0
80/20/0	448	485	467	0.1
80/20/10	449	481	467	4.5
80/20/20	449	481	468	11.7
80/20/30	449	481	469	16.8
70/30/0	449	482	467	0.2
70/30/10	450	482	469	5.9
70/30/20	450	482	469	12.3
70/30/30	449	482	470	18.2

ตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าการใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์และโวลลาสโทไนต์เข้าไปในพอลิไพโรฟิลีนมีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิไพโรฟิลีนเล็กน้อย แต่มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณโวลลาสโทไนต์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การใส่โวลลาสโทไนต์มีผลทำให้เกิดชาร์เพิ่มขึ้นตามปริมาณโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งชาร์ที่เกิดขึ้นอาจช่วยหน่วงการลุกไหม้ได้เนื่องจากป้องกันออกซิเจนเข้าถึงบริเวณที่เกิดการลุกไหม้

4.5 ผลการทดสอบหาค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด

ค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด หรือ LOI ของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตถูกตรวจสอบตามมาตรฐาน ASTM D2863 ซึ่งเป็นปริมาณร้อยละของออกซิเจนต่ำสุดในภาวะบรรยากาศผสมระหว่างออกซิเจนและไนโตรเจนที่ทำให้วัสดุสามารถลุกไหม้ในแนวตั้งอย่างต่อเนื่อง ซึ่งค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดของชิ้นงานแสดงไว้ในตารางที่ 4.7

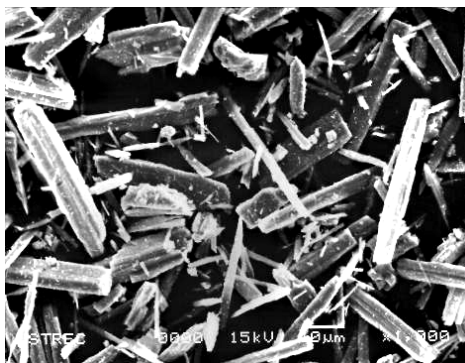
ตารางที่ 4.7 ค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

องค์ประกอบ (PP/EOC/Wollastonite)	ค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด
100/0/0	19.1
80/20/0	19.2
80/20/10	19.7
80/20/20	20.3
80/20/30	20.5
70/30/0	19.9
70/30/10	20.1
70/30/20	20.4
70/30/30	20.7

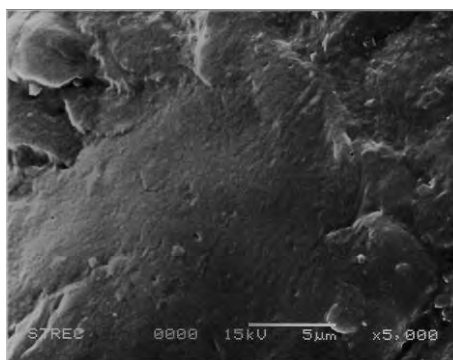
ตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าการเติมทั้งเอทิลีนออกทินโคพอลิเมอร์และโวลลาสโทไนต์เข้าไปในพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้ค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยผลของโวลลาสโทไนต์ในการช่วยหน่วงไฟไม่ปรากฏให้เห็นเนื่องจากความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีนลดลง ทำให้มีการจัดเรียงตัวอย่างหลวมๆ การลุกไหม้จึงเกิดได้เร็ว อย่างไรก็ตาม ถ้าการลุกไหม้ของพอลิเมอร์คอมพอสิตทำให้เกิดชาร์บอนผิวของผลิตภัณฑ์ ก็อาจมีผลช่วยหน่วงการลุกไหม้ดังเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น นอกจากนี้ จากค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดที่วัดได้แสดงให้เห็นว่า พอลิโพรพิลีนคอมพอสิตยังไม่ปลอดภัยจากการลุกไหม้ ซึ่งควรต้องมีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดมากกว่า 21 จึงจะเหมาะกับการใช้งานภายในอาคาร [23,24]

4.6 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมพอสิต

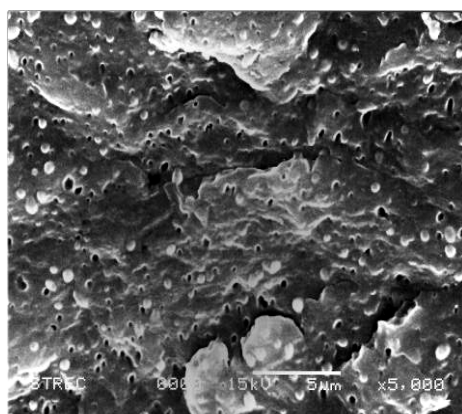
ภาพสัณฐานวิทยาของโพลลาสโตนีต์และบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.6-4.8



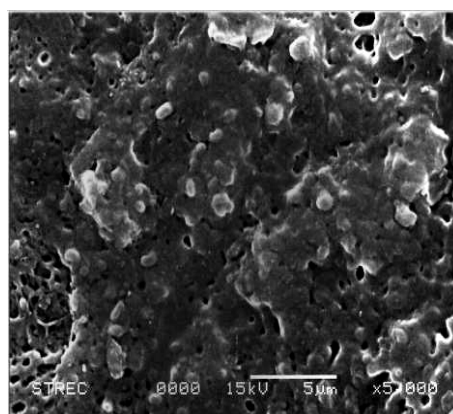
รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของโพลลาสโตนีต์ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



100PP/0EOC

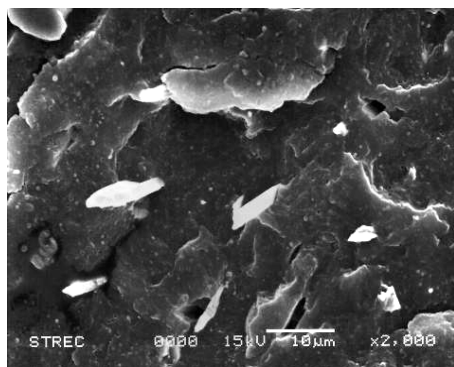


80PP/20EOC

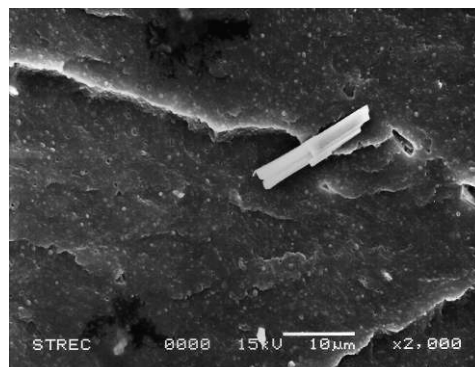


70PP/30EOC

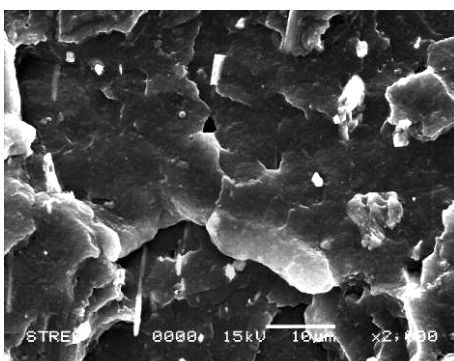
รูปที่ 4.5 สัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ ที่กำลังขยาย 5000 เท่า



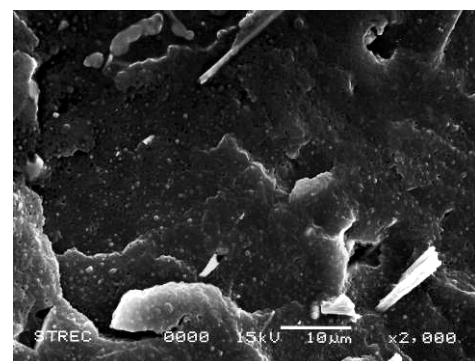
80PP/20EOC/10Wol



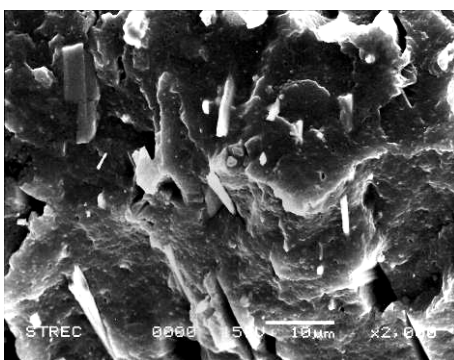
70PP/30EOC/10Wol



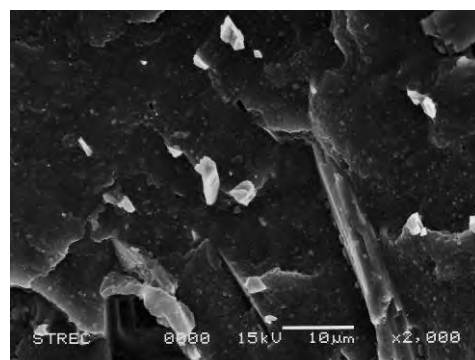
80PP/20EOC/20Wol



70PP/30EOC/20Wol



80PP/20EOC/30Wol



70PP/30EOC/30Wol

รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/โพลลาสไทน์คอมพอสิต ที่กำลังขยาย 2000 เท่า

รูปที่ 4.4 แสดงสัณฐานวิทยาของผลึกรูปเข็มของโพลลาสไทน์ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ซึ่งหากกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ จะสามารถเสริมแรงและช่วยส่งผ่านความเค้นภายในชิ้นงานได้ ทำให้ชิ้นงานมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

รูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์มีพื้นผิวรอยแตกหักที่ค่อนข้างเรียบ ซึ่งเป็นลักษณะพื้นผิวของวัสดุที่เปราะ ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมแสดงอนุภาคของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์กระจายอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีนอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ ยังพบเห็นรูขนาดเล็กที่เกิดจากการหลุดออกของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์กระจายอยู่ในพอลิเมอร์ผสม อย่างไรก็ตาม พื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมมีความหยาบมากกว่าของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งแสดงถึงรอยแตกหักของวัสดุที่มีความยืดหยุ่น

รูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นอนุภาคของเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์และอนุภาครูปเข็มของโวลลาสโทไนต์กระจายตัวอยู่ทั่วไปในเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีน โดยมีการกระจายตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารที่ใส่เข้าไป ซึ่งจะเห็นส่วนปลายของอนุภาคโวลลาสโทไนต์เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากการจัดเรียงอนุภาคไปตามแนวของเครื่องฉีดแบบ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาศมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัญญาณวิทยาของพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/โพลลาสโตนีคอมพอลิตที่อัตราส่วนต่างๆ กัน สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 จากการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง พบว่า การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ในพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้ความทนแรงดึง และยังมีมอดุลัสมีค่าลดลง ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และการใส่โพลลาสโตนีเข้าไปในพอลิเมอร์ผสมทำให้พอลิโพรพิลีนคอมพอลิตที่ได้มีมอดุลัสเพิ่มขึ้นโดยไม่ได้ทำให้ความยืดหยุ่นเสียไปมากนัก

5.1.2 จากการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดัดโค้ง พบว่า การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ในพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้ความทนแรงดัดโค้งและมอดุลัสแรงดัดโค้งมีค่าลดลง ซึ่งการใส่โพลลาสโตนีเข้าไปในพอลิเมอร์ผสมมีผลทำให้พอลิโพรพิลีนคอมพอลิตมีความทนแรงดัดโค้งและมอดุลัสแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น แต่ยังมีค่าต่ำกว่าของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์

5.1.3 จากการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทก พบว่า การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ในพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และการใส่โพลลาสโตนีในพอลิเมอร์ผสมมีผลทำให้ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนคอมพอลิตมีค่าเพิ่มขึ้น

5.1.4 จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต พบว่า การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ในพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้มอดุลัสสะสมของพอลิโพรพิลีนคอมพอลิตมีค่าลดลงตามปริมาณเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การใส่โพลลาสโตนีในพอลิเมอร์ผสมกลับมีผลทำให้มอดุลัสสะสมของพอลิเมอร์คอมพอลิตมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์และโพลลาสโตนีมีผลทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของพอลิโพรพิลีนลดลง

5.1.5 จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนิงแคลอริมิทรี พบว่า การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์และโพลีโพรพิลีนในโพลีโพรพิลีนไม่มีผลทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวของโพลีโพรพิลีนเปลี่ยนแปลง และอุณหภูมิการเกิดผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อใส่โพลีโพรพิลีนเข้าไป นอกจากนี้ ปริมาณผลึกของโพลีโพรพิลีนลดลงเล็กน้อยเมื่อใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์เข้าไป และลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อใส่โพลีโพรพิลีนในโพลีเมอร์ผสม

5.1.6 จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) พบว่า การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์และโพลีโพรพิลีนในโพลีโพรพิลีนมีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิการสลายตัวของโพลีโพรพิลีนเล็กน้อย โดยอุณหภูมิการสลายตัวมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณโพลีโพรพิลีนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การใส่โพลีโพรพิลีนในโพลีโพรพิลีนมีผลทำให้เกิดชาร์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

5.1.7 จากการทดสอบหาค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด พบว่า การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และโพลีโพรพิลีนในโพลีโพรพิลีนมีผลทำให้ค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดของชิ้นงานเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ

5.1.8 จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่า ทั้งเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์และโพลีโพรพิลีนสามารถกระจายตัวได้ดีในโพลีโพรพิลีนเมทริกซ์

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ทดลองใช้โพลีโพรพิลีนในการปรับปรุงสมบัติของโพลีเมอร์ชนิดอื่น

5.2.2 ทดลองใช้สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร

5.2.3 ทดลองใช้สารตัวเติมประเภทอื่นร่วมด้วยเพื่อเสริมสมบัติที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุง

รายการอ้างอิง

- [1] Maier C. and Calafut T. Polypropylene: The Definitive User's Guide and Databook. United States of America: Plastics Design Library, 1998.
- [2] Frank P.T.J. and Eindhoven V.D.B. Crystallization of Isotactic Polypropylene: The Influence of Stereo-defects. Netherlands: Technische Universiteit Eindhoven, 2002.
- [3] อาจารย์ อัครดิลลฤทธิ. ผลของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยซอร์บิทอลต่อการเกิดผลึกและความทนแรงกระทำของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [4] James L.W. and David D.C. Polyolefins: Processing, Structure Development and Properties. Germany: Hanser Publishers, 2005.
- [5] Svoboda P., Svodovoda S., Slobodian P. and Wahit M.U. Crystallization Kinetics of Polypropylene/Ethylene-Octene Copolymer Blends. Polymer Testing 28 (2009): 215-222.
- [6] Babu R.R., Singha N.K. and Naskar K. Interrelationships of Morphology, Thermal and Mechanical Properties in Uncrosslinked and Dynamically Crosslinked PP/EOC and PP/EPDM Blends. Express Polymer Letters 4 (2010): 197-209.
- [7] Lehmann B., Friedrich K., Chun L.W. Ming Q.Z. and Min Z.R. Improvement of Notch Toughness of Low Nano-SiO₂ Filled Propylene Composites. Journal of Materials Science Letters 22 (2003): 1027-1030.
- [8] Mohanty S. and Nayak S.K. Dynamic-Mechanical and Thermal Characterization of Polypropylene/Ethylene-Octene Copolymer Blend. Journal of Applied Polymer Science 104 (2007): 3137-3144.
- [9] Carriere C.J. and Silvis H.C. The Effects of Short-Chain Branching and Comonomer Type on the Interfacial Tension of Polypropylene-Polyolefin Elastomer Blends. Journal of Applied Polymer Science 66 (1997): 1175-1181.

- [10] Guimaraes, M.J.O.C., Coutinho F.M.B., Rocha M.C.G., Farah M. and Bretas R.E.S. Effect of Molecular Weight and Long Chain Branching of Metallocene Elastomers on the Properties of High Density Polyethylene Blends. Polymer Testing 22 (2003): 843-847.
- [11] Adhikari R., Godehardt R., Lebek W. and Michler G.H. Blends of High Density Polyethylene and Ethylene/1-Octene Copolymers: Structure and Properties. Journal of Applied Polymer Science 103 (2007): 1887-1893.
- [12] Silva A.L.N.D. Rocha M.C.G., Coutinho F.M.B. and Bretas R. Rheological, Mechanical, Thermal, and Morphological Properties of Polypropylene/Ethylene-Octene Copolymer Blends. Journal of Applied Polymer Science 75 (2000): 692-704.
- [13] Technical Information. ENGAGE 8200 Polyolefin Elastomer. Los Angeles: The Dow Chemical Company, 2008.
- [14] Luyt A.S., Dramicanin M.D., Antic Z. and Djokovic V. Morphology, Mechanical and Thermal Properties of Composites of Polypropylene and Nanostructured Wollastonite Filler. Polymer Testing 28 (2009): 348-356.
- [15] Wikimedia commons. Wollastonite-cell. (online). Available from: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wollastonite-cell.png?uselang=fr>, (2011, April).
- [16] Peter A.C. Wollastonite A Versatile Functional Filler. (online). Available from: http://www.rtvanderbilt.com/awards_6.htm, (2011, April).
- [17] The European Specialty Minerals Association (Member of IMA-Europe). Wollastonite fact sheet. (online). Available from: http://www.ima-eu.org/fileadmin/downloads/minerals/Wollastonite_fact_sheet.pdf, (2011, April).
- [18] วุฒิ ลีลายุทธเลิศ. การเตรียมวัสดุเชิงประกอบจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและเกาลิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [19] พิไลลักษณ์ พิทยอภิพล และภคณมน หงวนไธสง. การเตรียมคอมพอสิตของพอลิโพรพิลีน/ทัลก์/แมกนีเซียมออกไซด์ซีลเฟต. รายงานโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

- [20] Zhang X., Xie F., Pen Z., Zhang Y., Zhang Y. and Zhou W. Effect of Nucleating Agent on the Structure and Properties of Polypropylene/Poly(ethylene-octene) Blends. European Polymer Journal 38 (2002): 1-6.
- [21] Meng M.R. and Dou Q. Effect of Pimelic Acid on the Crystallization, Morphology and Mechanical Properties of Polypropylene/Wollastonite Composites. Materials Science and Engineering A 492 (2008): 177-184.
- [22] Soudais Y., Moga L., Blazek J. and Lemort F. Coupled DTA-TGA-FT-IR Investigation of Pyrolytic Decomposition of EVA, PVC and Cellulose. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 78 (2007): 46-57.
- [23] Ramesan, M. T. Thermogravimetric Analysis, Flammability and Oil Resistance Properties in Natural Rubber and Dichlorocabene Modified Styrene Butadiene Rubber Blends. Reactive & Functional Polymers 59 (2004): 267-274.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ลักษณะชิ้นงานพอลิพรพิลีนคอมพอสิต

1. วัสดุดิบที่ใช้ในงานวิจัย



รูป ก-1 พอลิพรพิลีน (HP500N)

รูป ก-2 เททิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์
(Engage™ 8200)

รูป ก-3 โพลีพรพิลีนผง (XYNFW-XA 1200 mesh)

2. โพลีเมอร์ผสมที่ได้จากการอัดรีดผ่านหัวดายรูปวงกลม

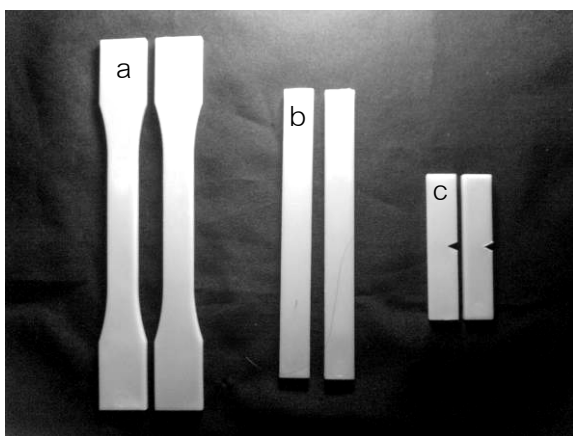


รูป ก-4 โพลีโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีน
โคโพลีเมอร์ที่ได้จากการอัดรีดผ่าน
หัวดายรูปวงกลม



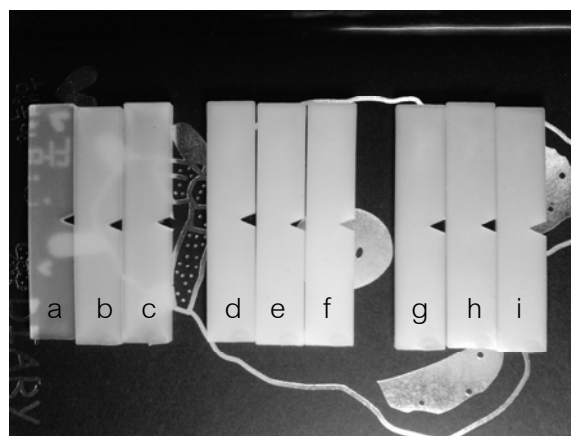
รูป ก-5 โพลีโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีน
โคโพลีเมอร์/โวลลาสโทไนต์คอมพอสิตที่ได้
จากการอัดรีดผ่านหัวดายรูปวงกลม

3. ชิ้นงานโพลีโพรพิลีนคอมพอสิตที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดแบบ



รูป ก-6 ชิ้นทดสอบที่ได้จากการขึ้นรูป
ด้วยเครื่องฉีดแบบ

- (a) ชิ้นทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง
(b) ชิ้นทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดัดโค้ง
(c) ชิ้นทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทก



รูป ก-7 ชิ้นงานโพลีโพรพิลีนคอมพอสิต

- (a) 100/0/0 (b) 80/20/0 (c) 70/30/0
(d) 80/20/10 (e) 80/20/20 (f) 80/20/30
(g) 70/30/10 (h) 70/30/20 (i) 70/30/30

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงดึง

ตาราง ข-1 ค่าความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

PP/EOC/WoI	Tensile strength (MPa)					X	SD
	1	2	3	4	5		
100/0/0	37	38	38	39	38	38	0.5
80/20/0	29	28	28	30	29	29	0.8
80/20/10	26	27	27	28	28	28	0.6
80/20/20	27	28	27	26	26	27	0.6
80/20/30	26	26	26	26	26	26	0.1
70/30/0	26	26	28	26	28	27	1.1
70/30/10	27	26	27	26	26	26	0.2
70/30/20	24	24	24	24	25	24	0.2
70/30/30	23	22	23	22	22	22	0.4

ตาราง ข-2 ค่า Young's modulus ของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

PP/EOC/WoI	Young's modulus (MPa)					X	SD
	1	2	3	4	5		
100/0/0	367	368	362	383	373	371	8.0
80/20/0	292	277	284	304	295	290	10.5
80/20/10	310	315	305	290	296	303	10.1
80/20/20	380	387	385	394	389	387	5.4
80/20/30	398	397	417	399	413	405	9.6
70/30/0	242	236	246	253	239	243	6.7
70/30/10	270	262	256	259	280	265	9.7
70/30/20	271	254	286	262	279	270	12.9
70/30/30	273	302	296	296	312	296	14.1

ตาราง ข-3 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

PP/EOC/WoI	Elongation at break (%)					X	SD
	1	2	3	4	5		
100/0/0	341	342	387	341	344	351	20.2
80/20/0	735	712	727	742	739	731	12.3
80/20/10	634	587	633	562	525	588	47.0
80/20/20	474	475	417	342	399	421	55.9
80/20/30	368	395	350	383	389	377	18.0
70/30/0	671	752	847	865	926	812	100.8
70/30/10	744	730	780	742	756	750	18.9
70/30/20	704	744	797	701	710	731	40.7
70/30/30	715	725	707	770	721	727	24.5

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง

ตาราง ค-1 ค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

PP/EOC/Wol	Flexural strength (MPa)					X	SD
	1	2	3	4	5		
100/0/0	34	34	34	34	34	34	0.3
80/20/0	23	23	24	23	24	23	0.3
80/20/10	23	23	23	23	22	23	0.2
80/20/20	25	26	25	25	25	25	0.4
80/20/30	28	28	27	27	28	27	0.3
70/30/0	19	17	17	17	18	18	0.7
70/30/10	19	18	18	18	19	18	0.2
70/30/20	19	19	19	19	19	19	0.1
70/30/30	22	22	21	22	22	22	0.4

ตาราง ค-2 ค่ามอดุลัสดัดโค้งของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

PP/EOC/Wol	Flexural modulus (MPa)					X	SD
	1	2	3	4	5		
100/0/0	832	845	816	816	849	832	15.5
80/20/0	522	504	514	476	569	517	33.9
80/20/10	540	543	543	540	508	535	15.0
80/20/20	614	614	602	602	591	605	9.8
80/20/30	668	654	617	654	630	645	20.4
70/30/0	405	404	426	389	414	408	13.6
70/30/10	418	427	411	409	407	414	7.9
70/30/20	412	427	412	445	438	427	15.0
70/30/30	463	463	473	465	463	465	4.4

ภาคผนวก ง

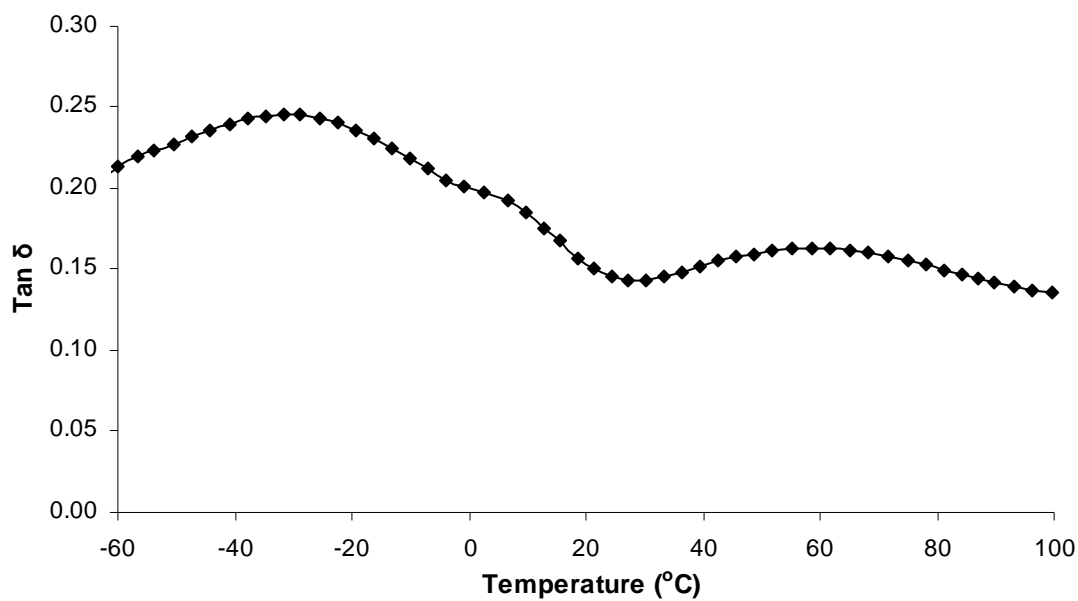
ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก

ตาราง ง-1 ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

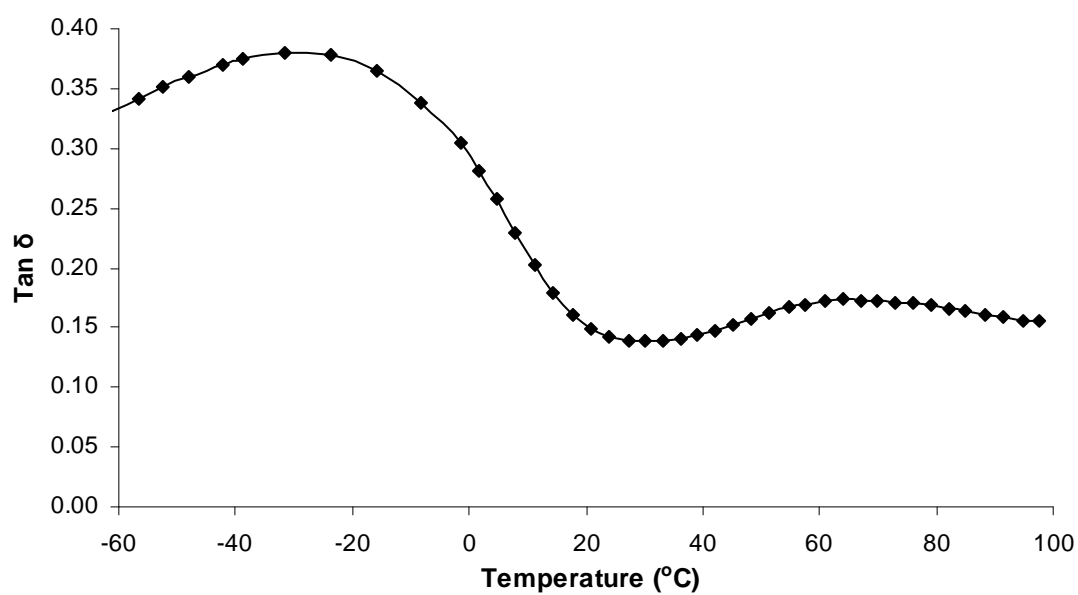
PP/EOC/WoI	Impact strength (kg-cm/cm ²)					X	SD
	1	2	3	4	5		
100/0/0	115	76	108	86	93	96	15.9
80/20/0	192	184	188	180	157	180	13.7
80/20/10	192	204	200	184	188	193	8.1
80/20/20	234	231	227	249	253	239	11.7
80/20/30	257	234	260	246	285	257	19.1
70/30/0	204	206	207	229	227	215	12.3
70/30/10	227	211	249	215	234	227	15.3
70/30/20	264	231	242	253	238	246	13.2
70/30/30	242	253	249	285	268	260	17.3

ภาคผนวก จ

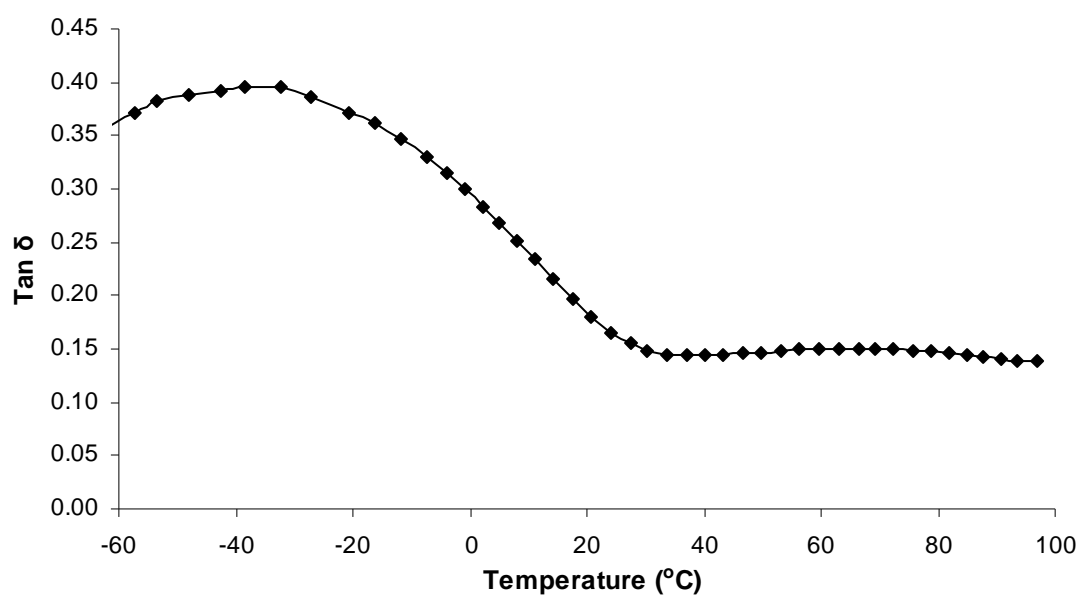
ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตด้วยเทคนิค DMA

1. แทนเจนต์สูญเสีย (loss tangent, $\tan \delta$) ของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

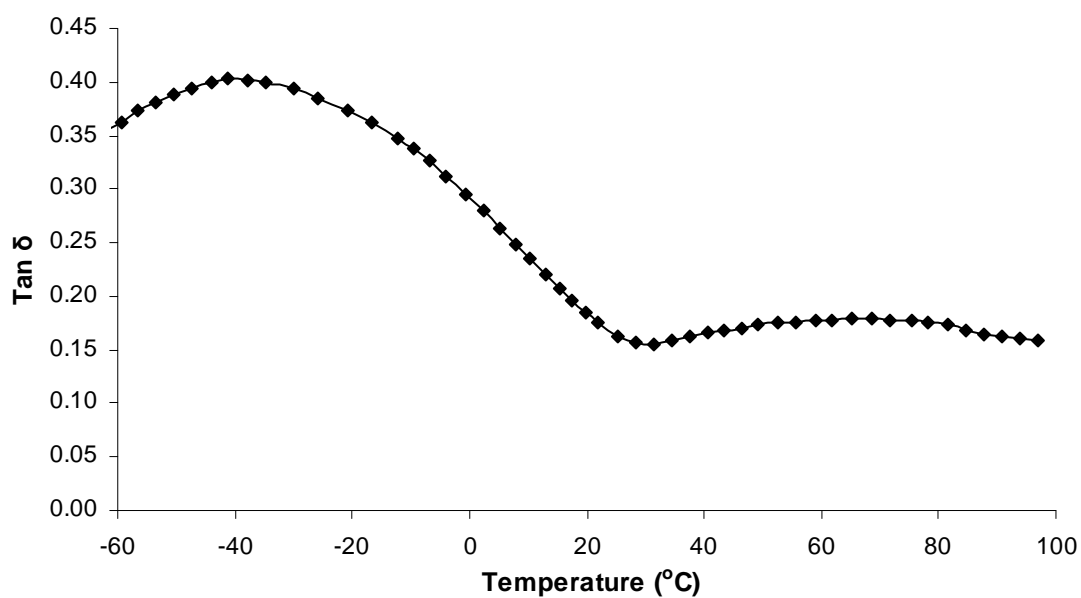
รูป จ-1 แทนเจนต์สูญเสียของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 100/0/0



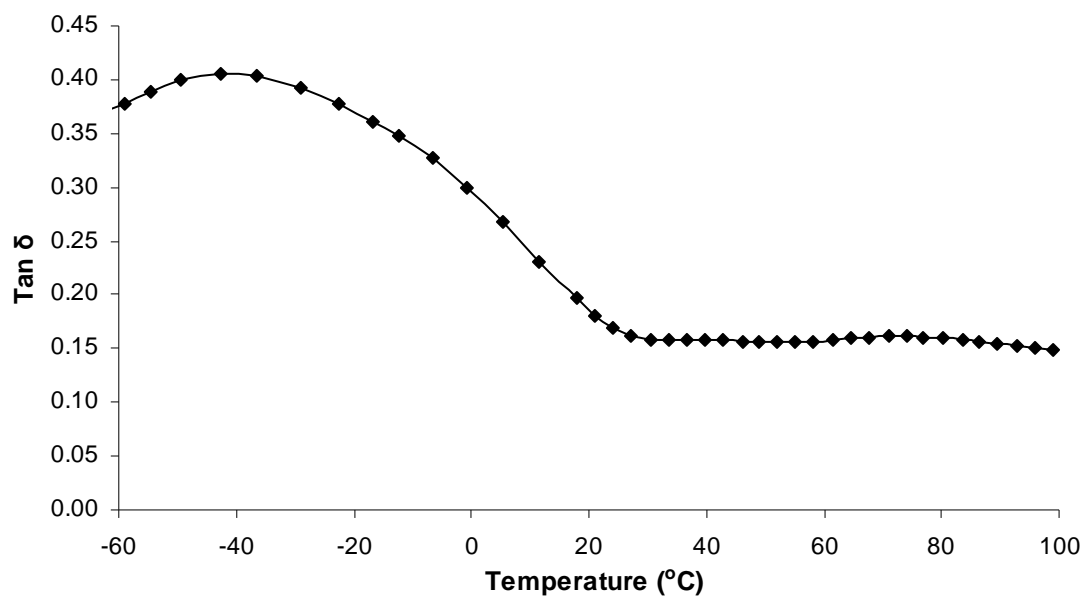
รูป จ-2 แทนเจนต์สูญเสียของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/0



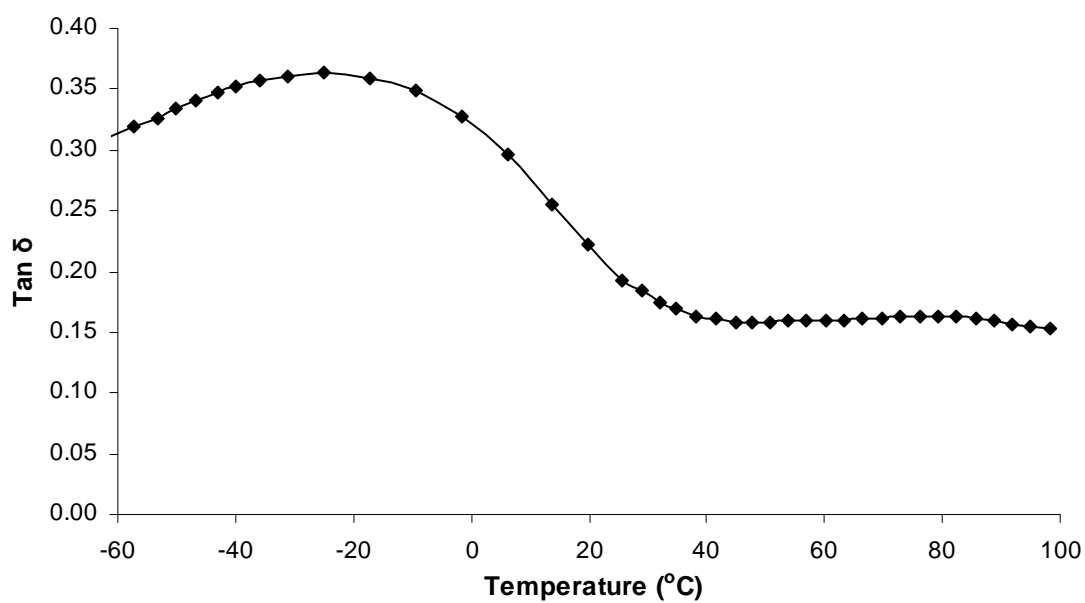
รูป ๑-3 แทนเจนต์สูญเสียของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/10



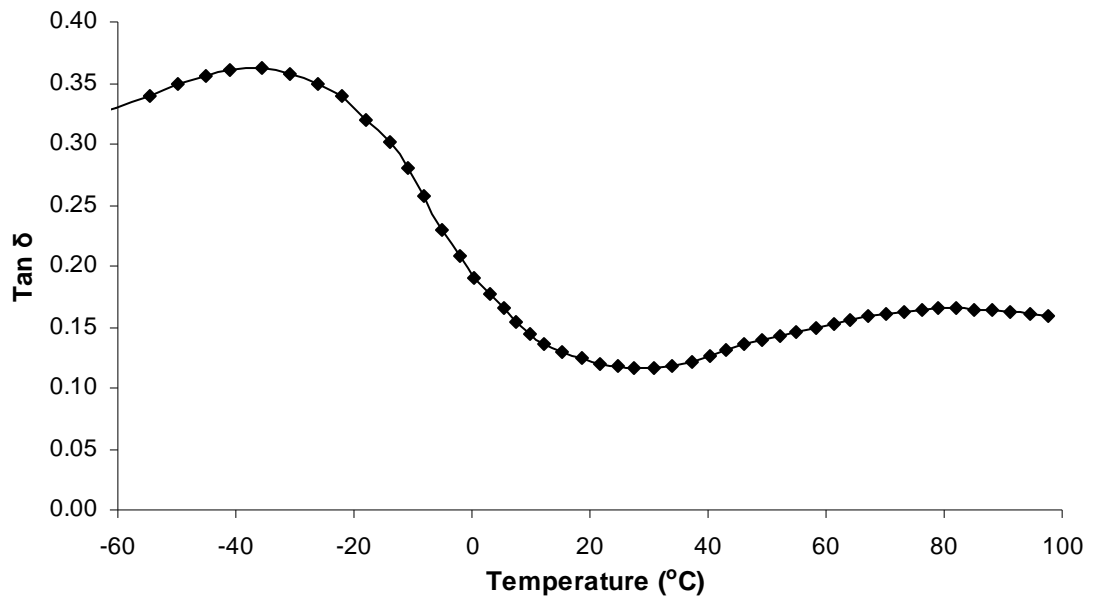
รูป ๑-4 แทนเจนต์สูญเสียของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/20



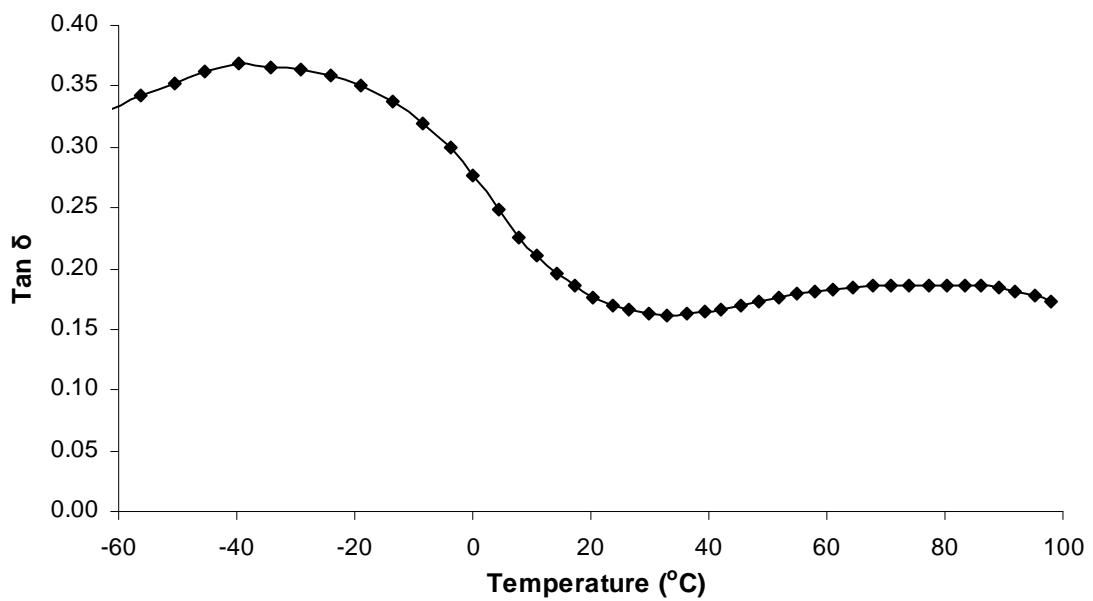
รูป ๑-5 แทนเจนต์สูญเสียของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/30



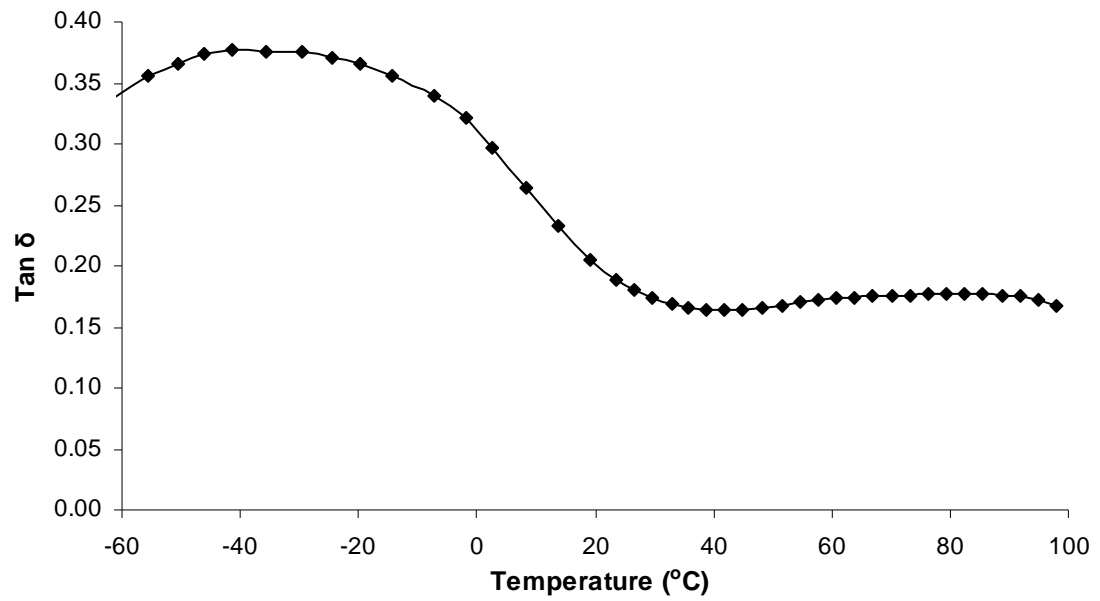
รูป ๑-6 แทนเจนต์สูญเสียของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/0



รูป จ-7 แทนเจนต์สูญเสียของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/10

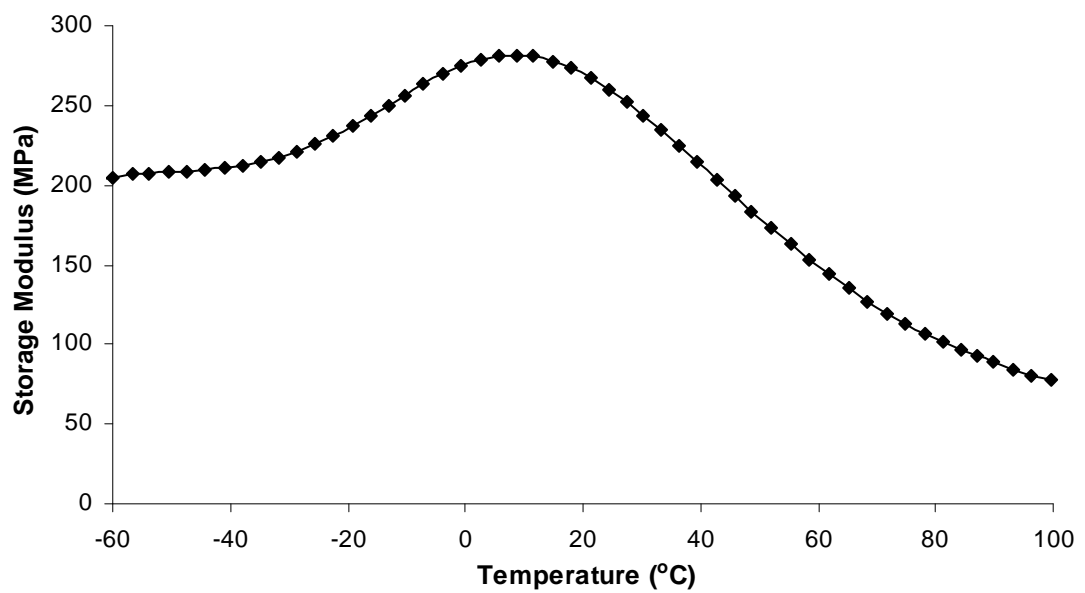


รูป จ-8 แทนเจนต์สูญเสียของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/20

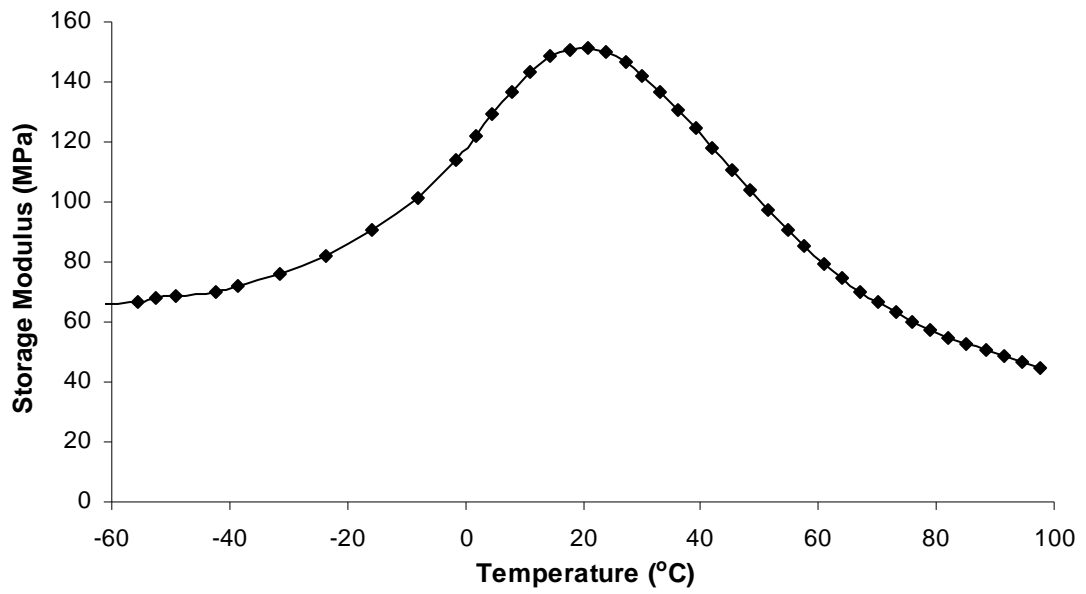


รูป ๑-๙ แทนเจนต์สูญเสียของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/30

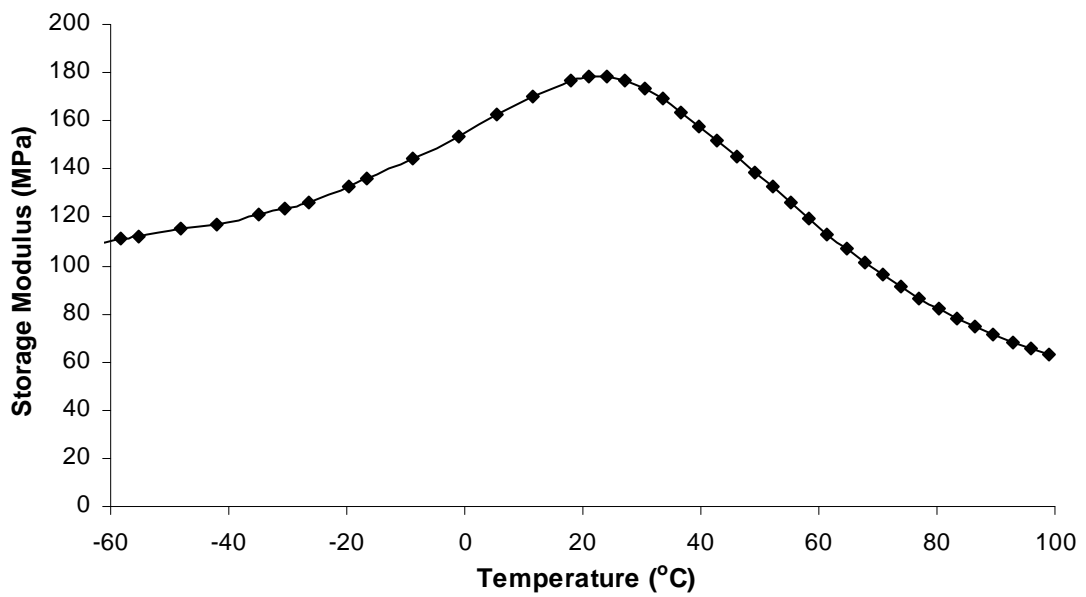
2. มอดุลัสสะสม (storage modulus, E') ของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต



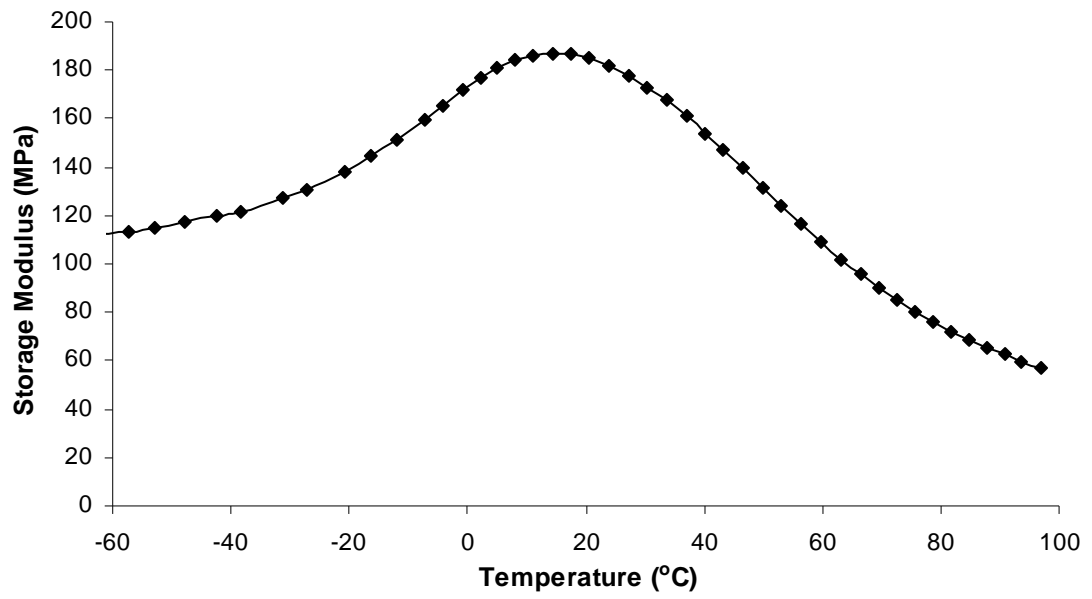
รูป ๑-10 มอดุลัสสะสมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 100/0/0



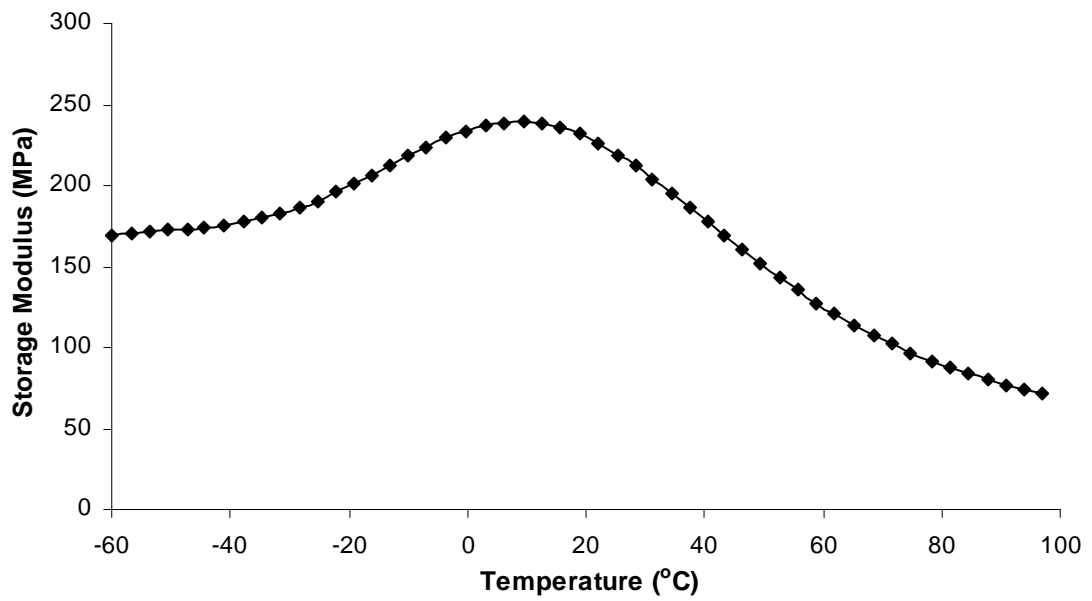
รูป จ-11 มอดุลัสสะสมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/0



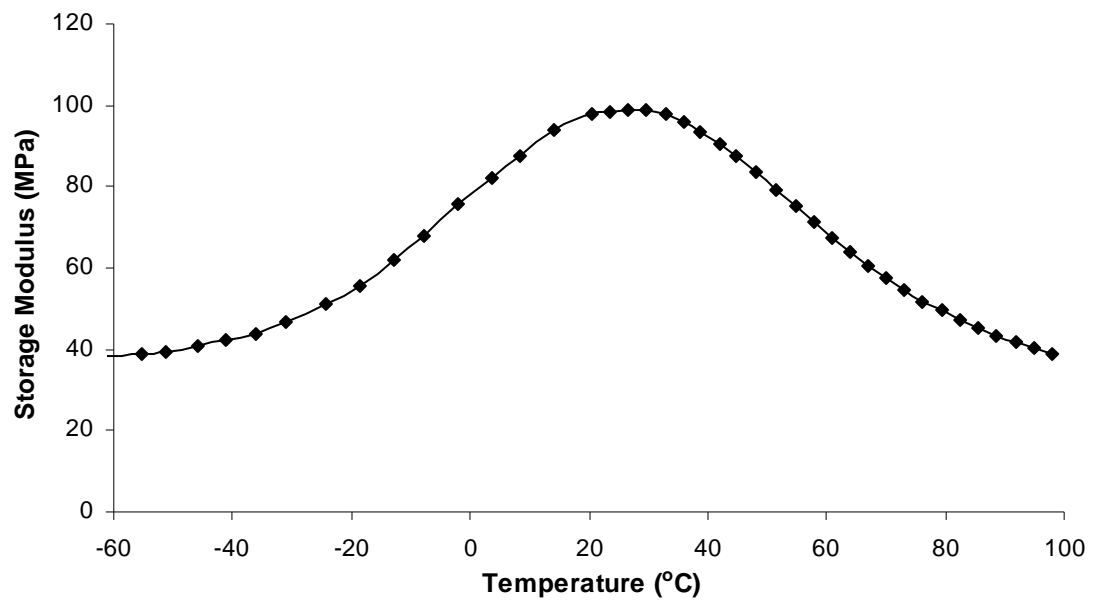
รูป จ-12 มอดุลัสสะสมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/10



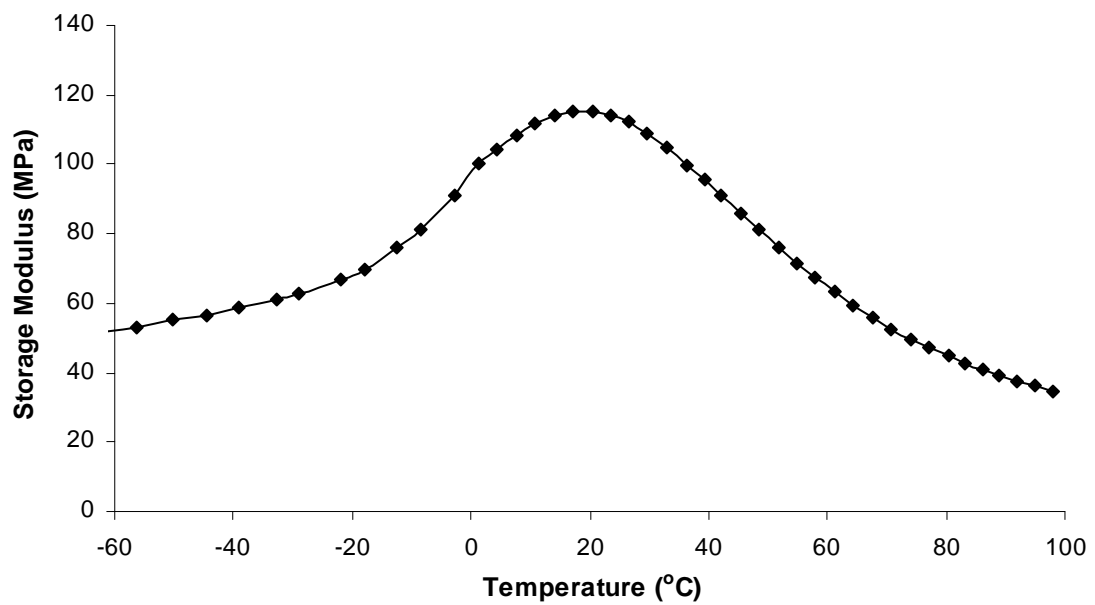
รูป จ-13 มอดุลัสสะสมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/20



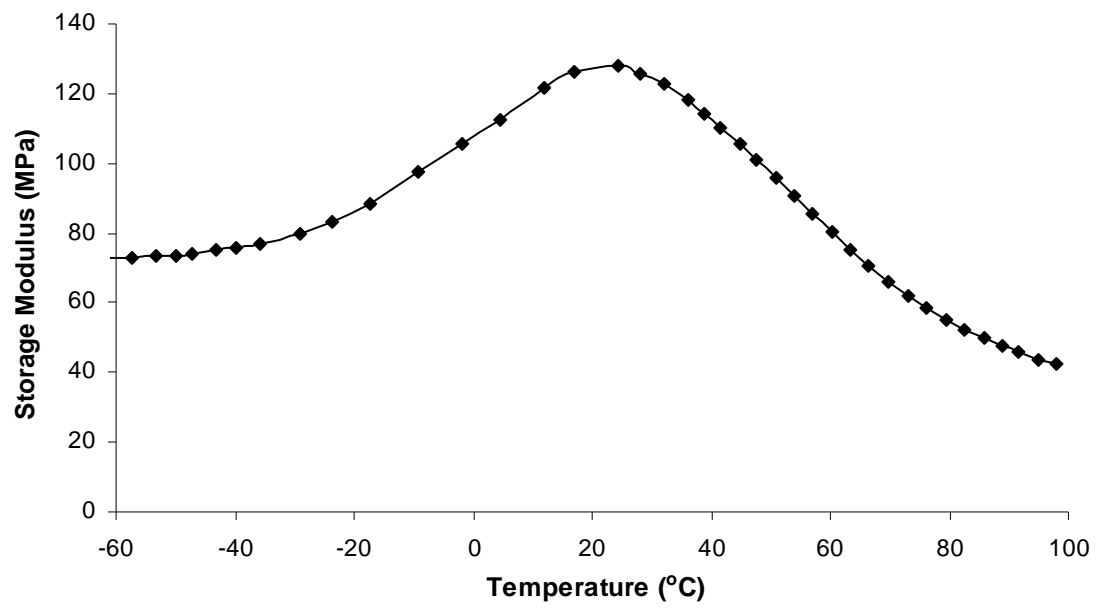
รูป จ-14 มอดุลัสสะสมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/30



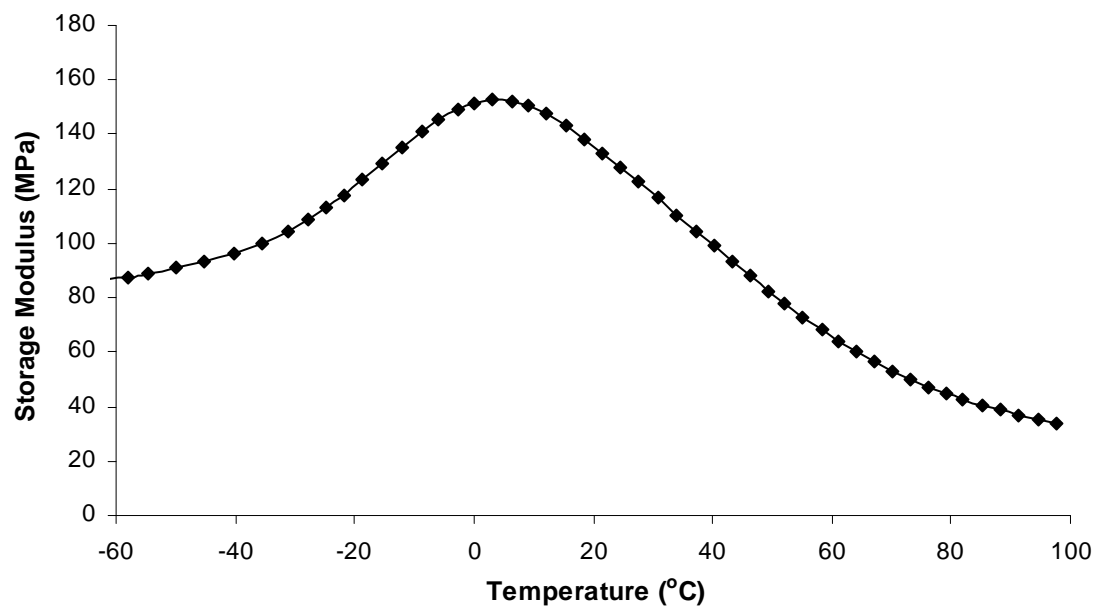
รูป จ-15 มอดุลัสสะสมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/0



รูป จ-16 มอดุลัสสะสมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/10



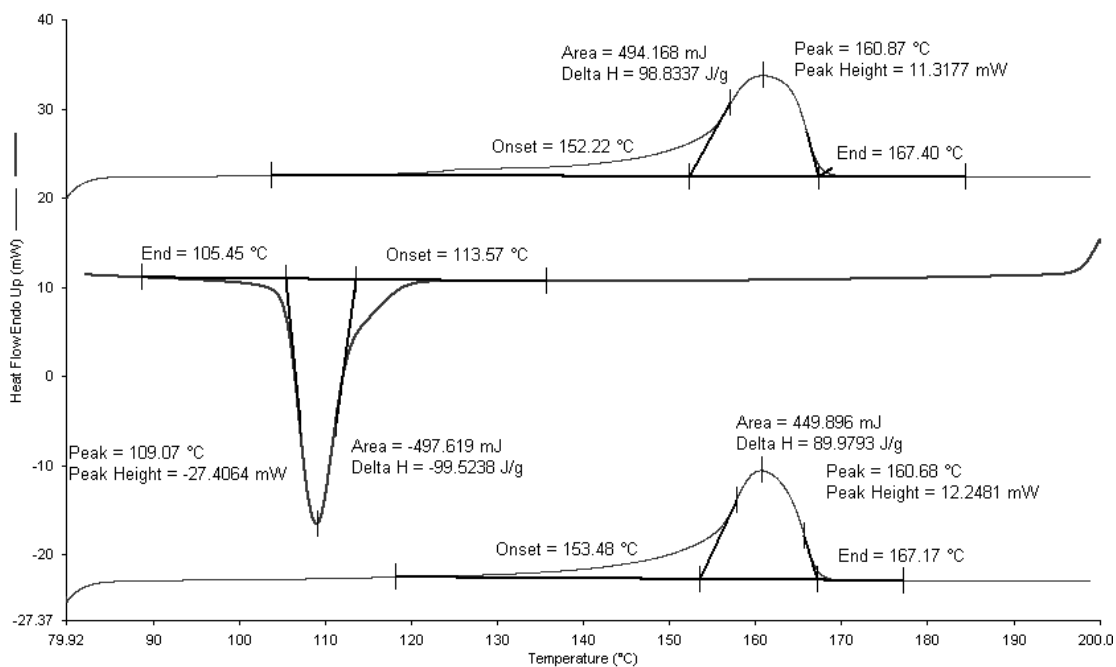
รูป จ-17 มอดุลัสสะสมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/20



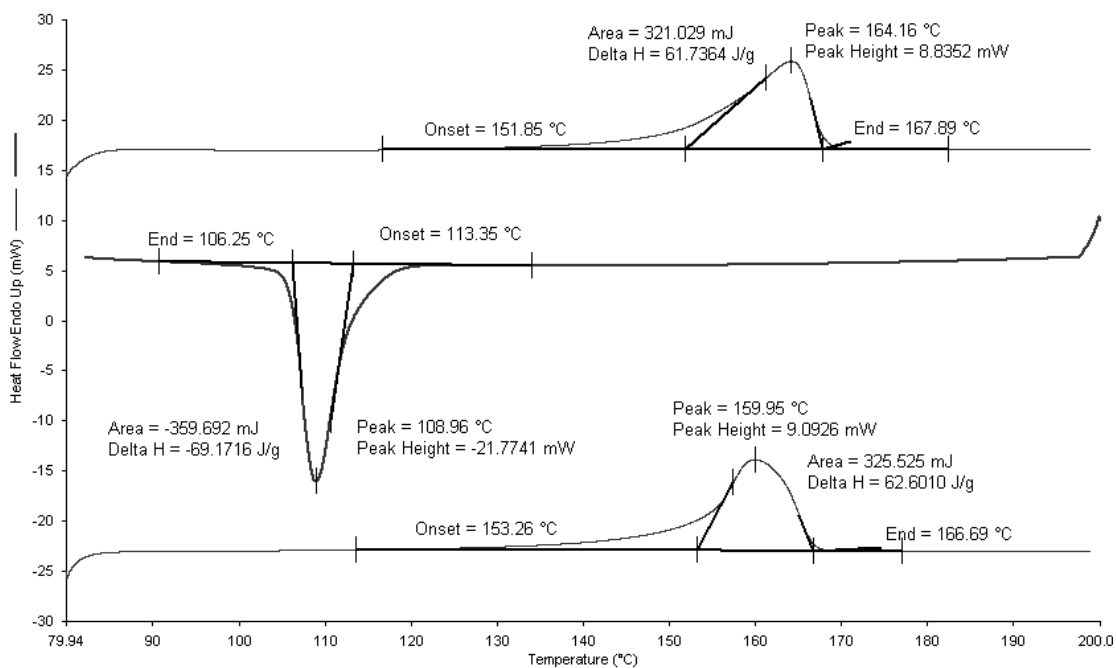
รูป จ-18 มอดุลัสสะสมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/30

ภาคผนวก จ

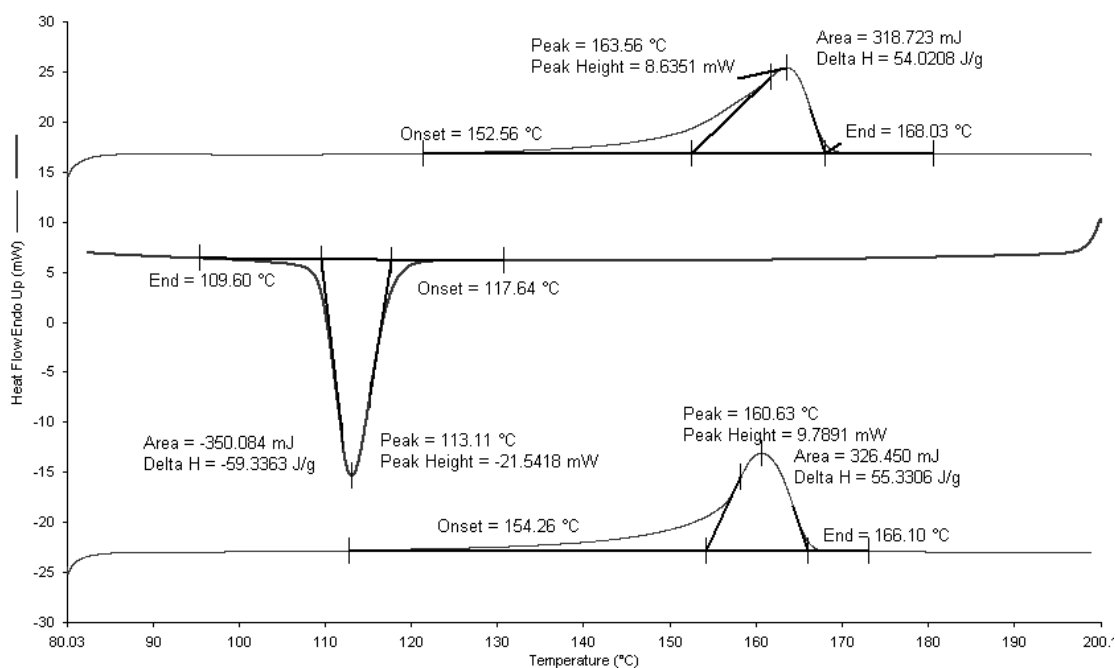
ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC



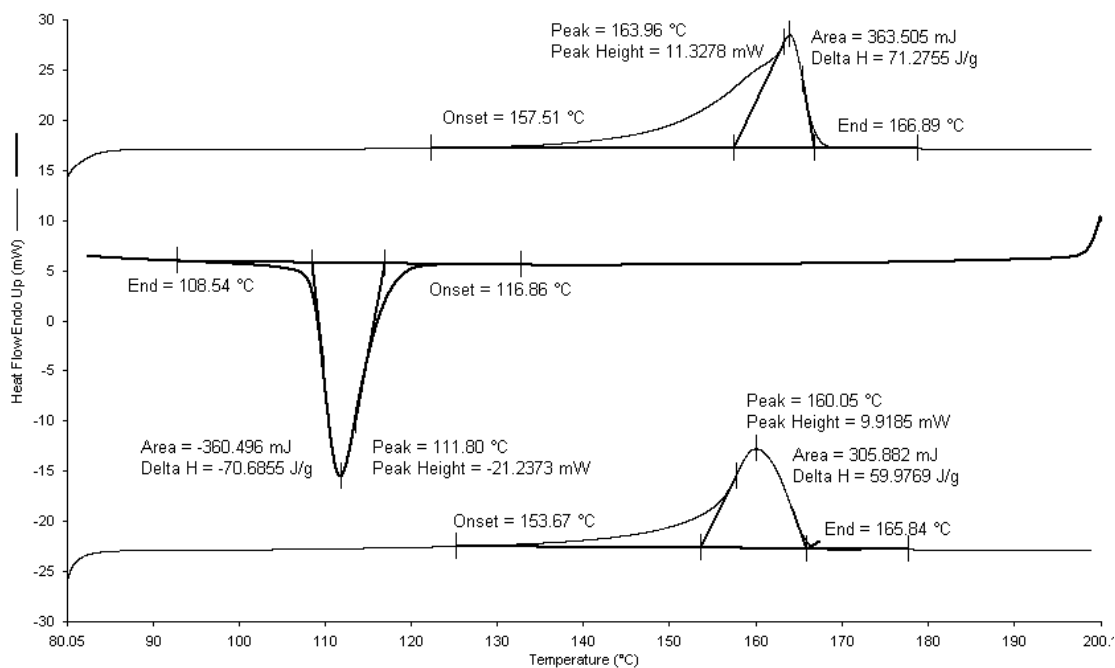
รูป จ-1 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 100/0/0



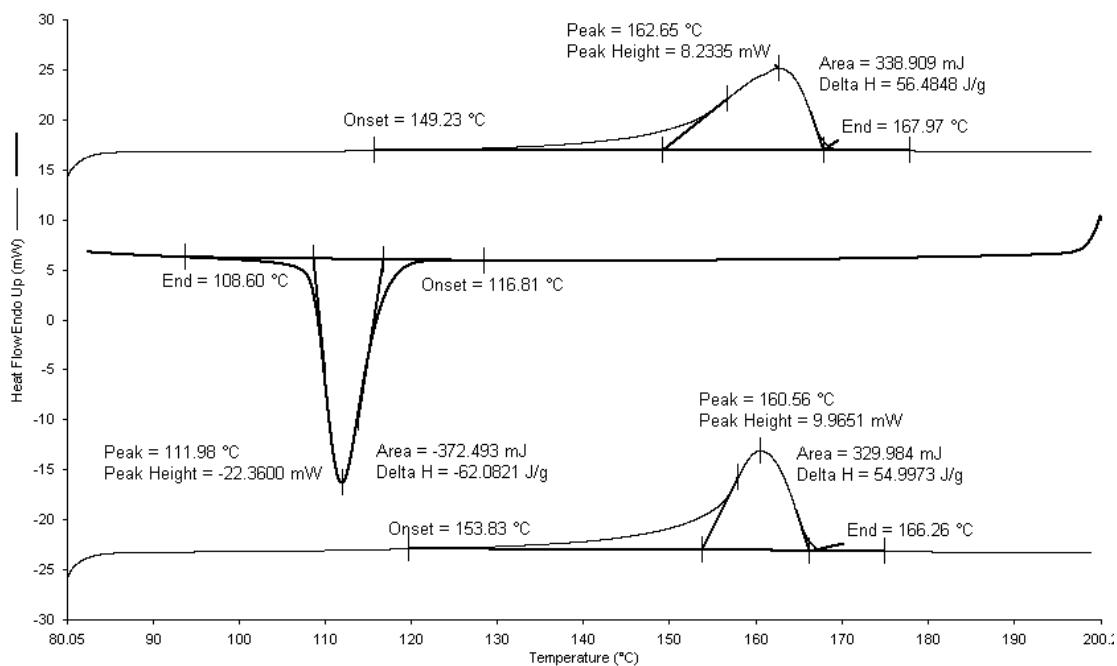
รูป จ-2 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 80/20/0



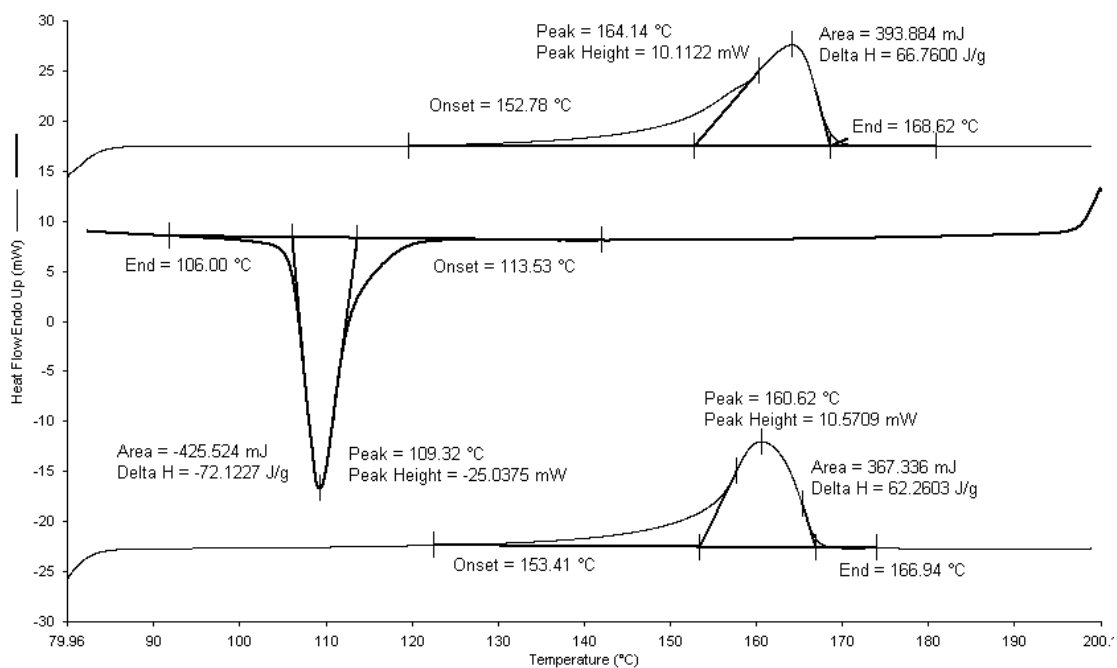
รูป จ-3 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/10



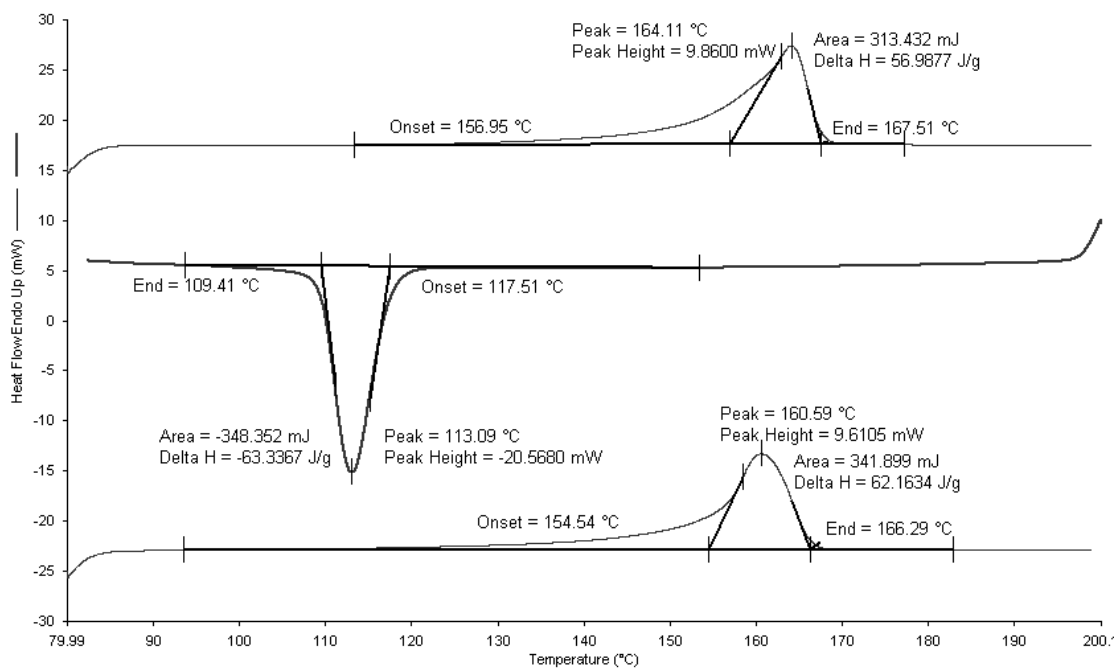
รูป จ-4 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/20



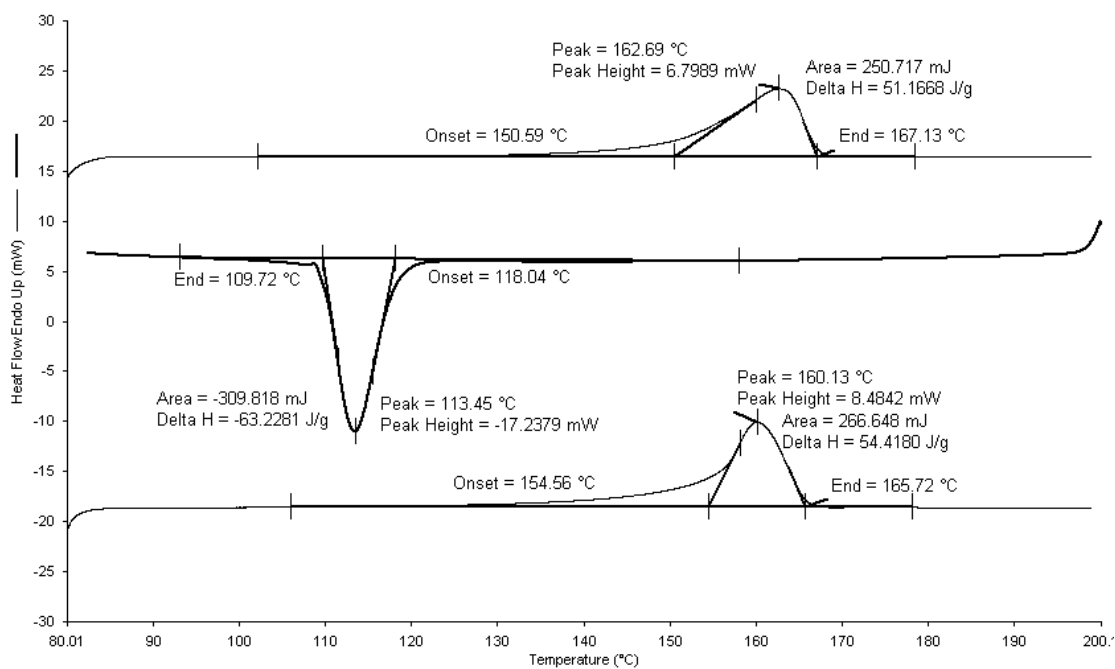
รูป จ-5 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/30



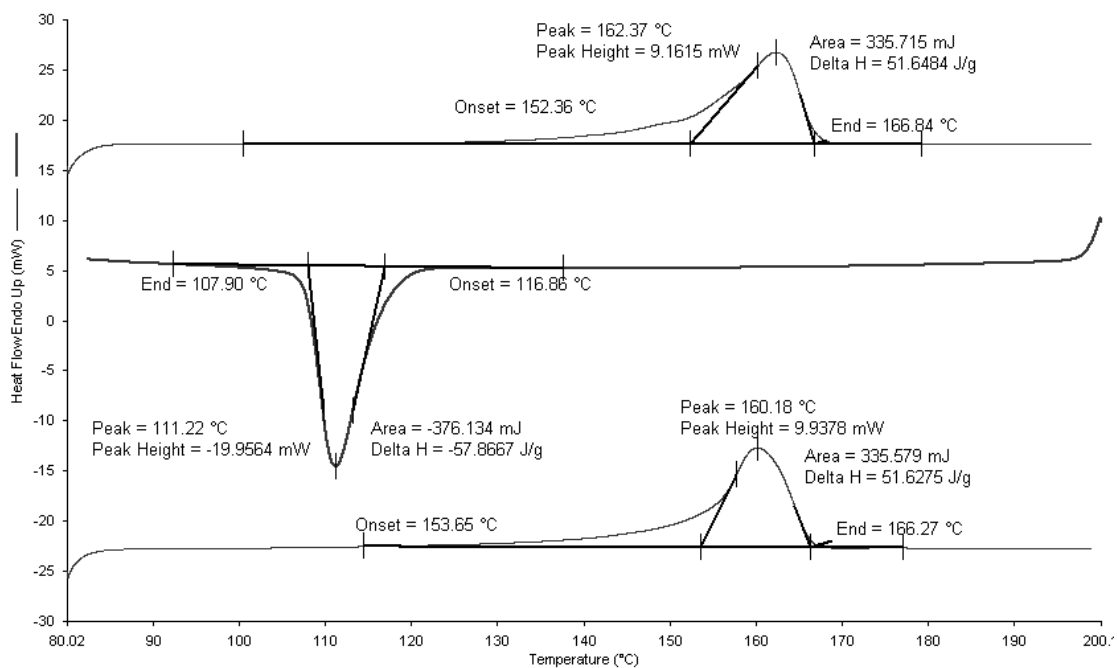
รูป จ-6 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/0



รูป จ-7 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/10



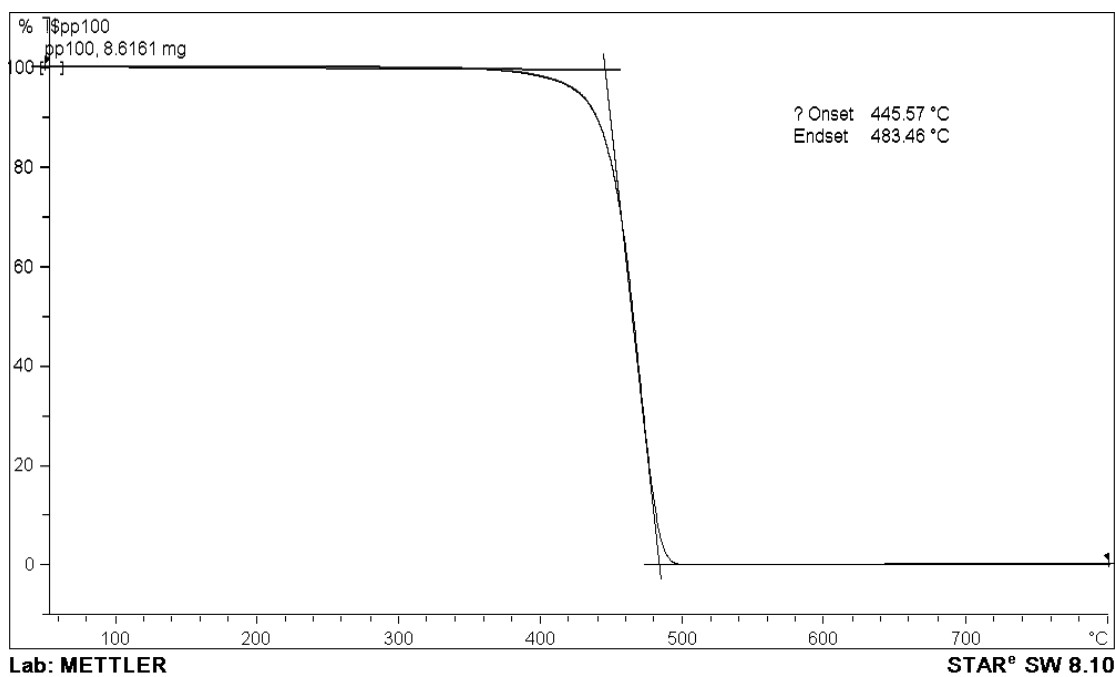
รูป จ-8 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/20



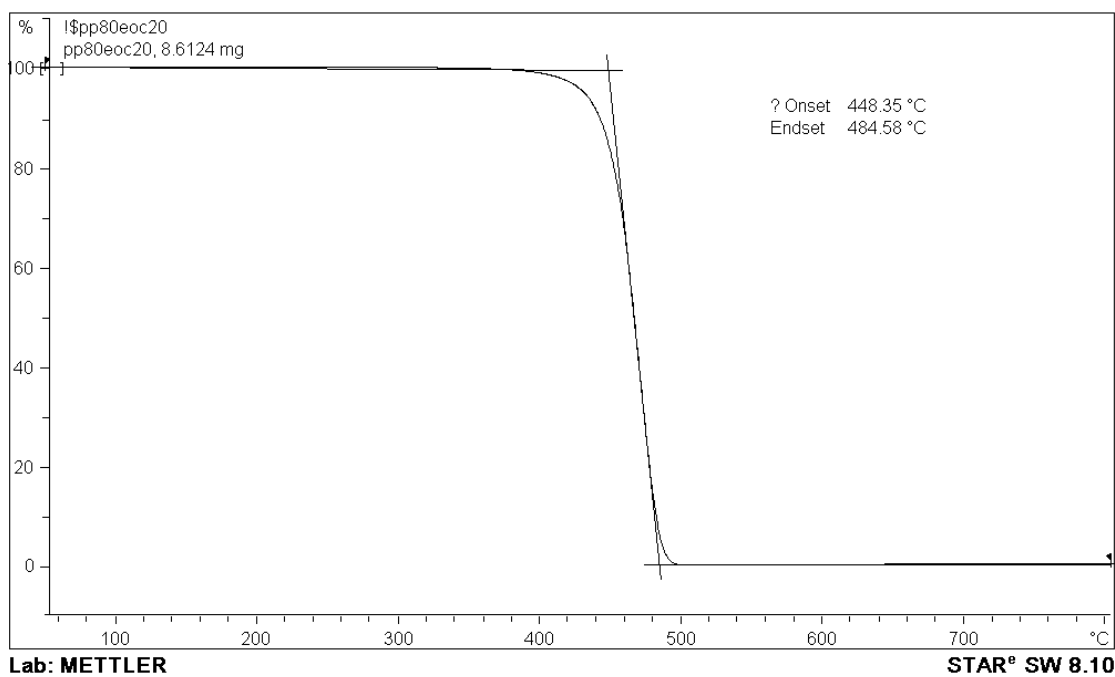
รูป จ-9 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/30

ภาคผนวก ข

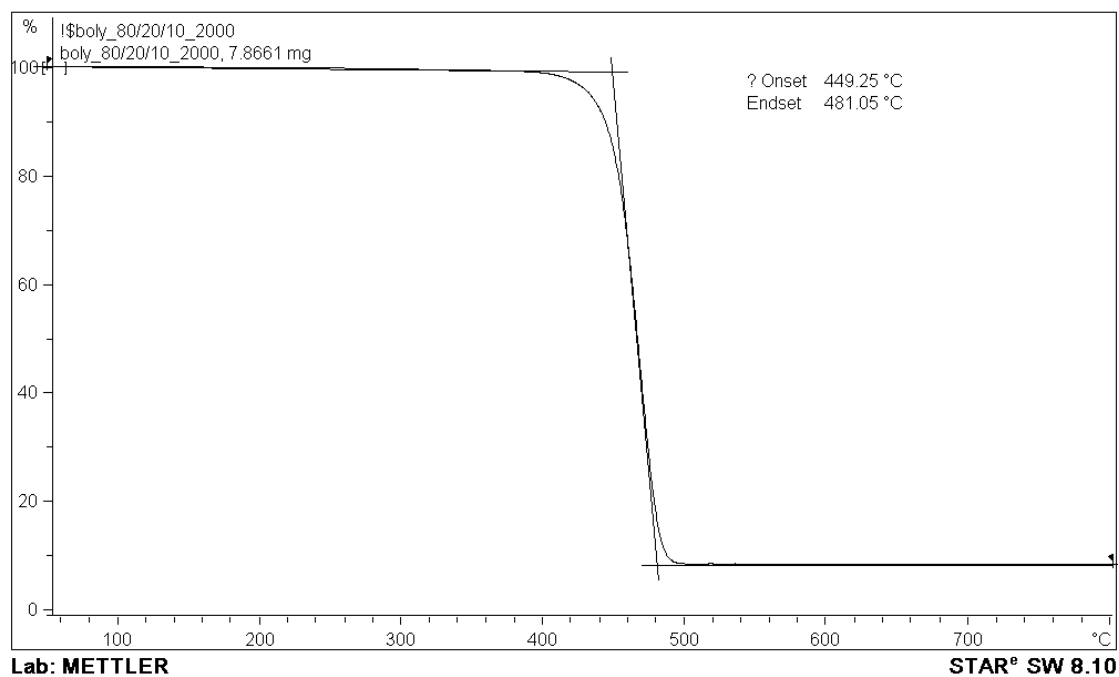
ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA



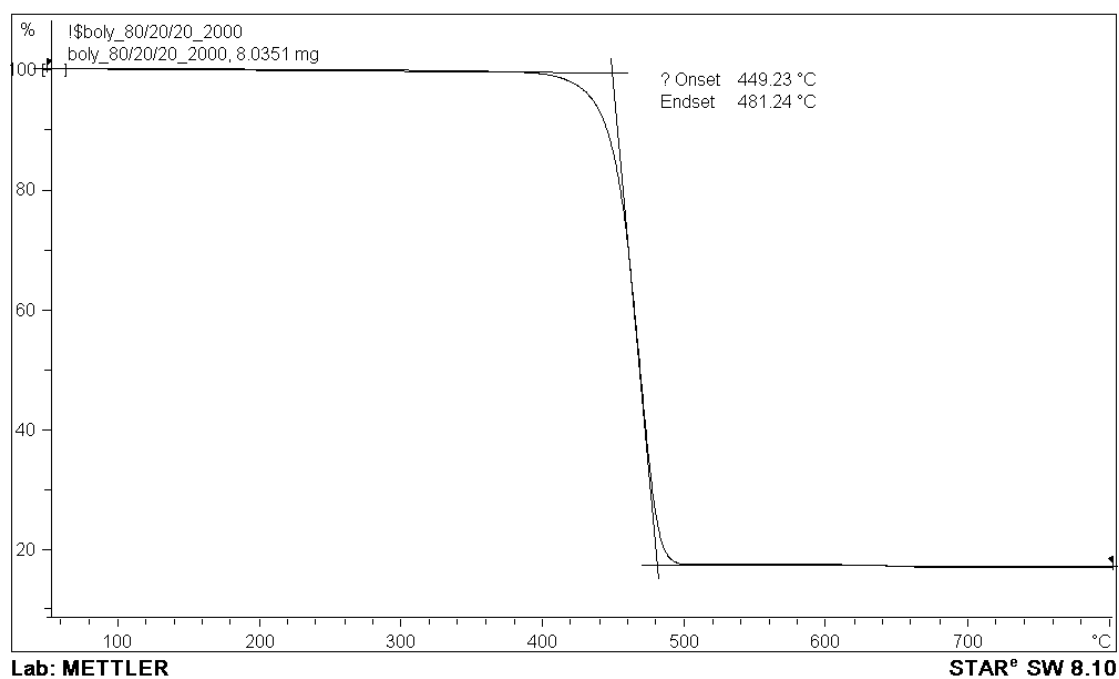
รูป ข-1 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิไพร์ฟีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 100/0/0



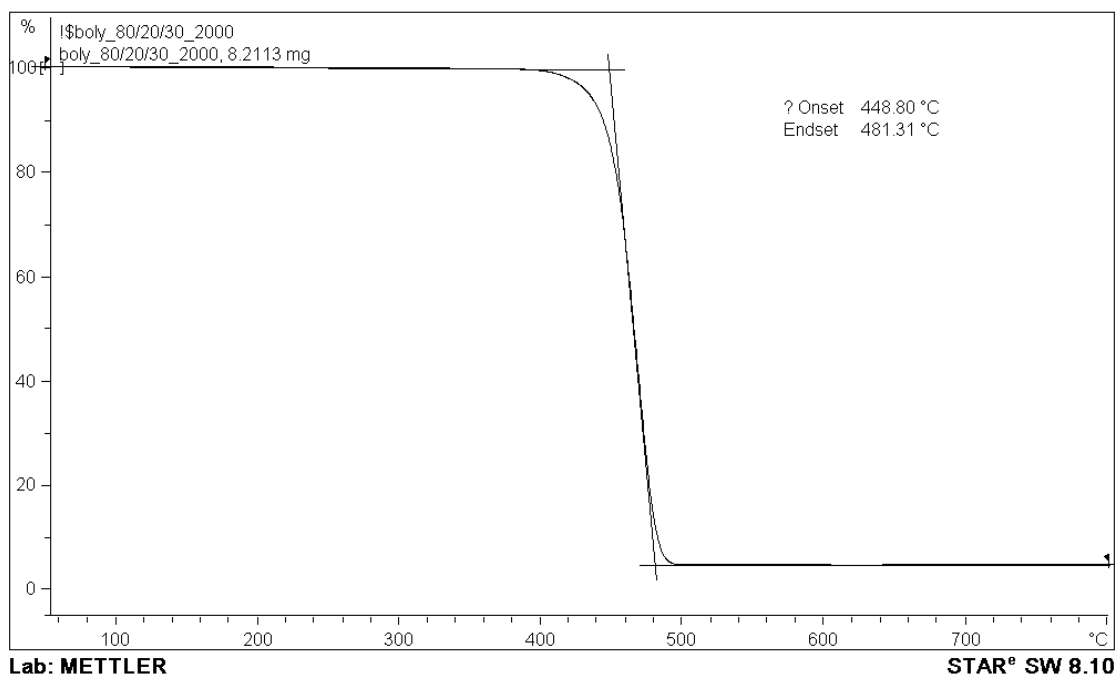
รูป ข-2 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิไพร์ฟีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/0



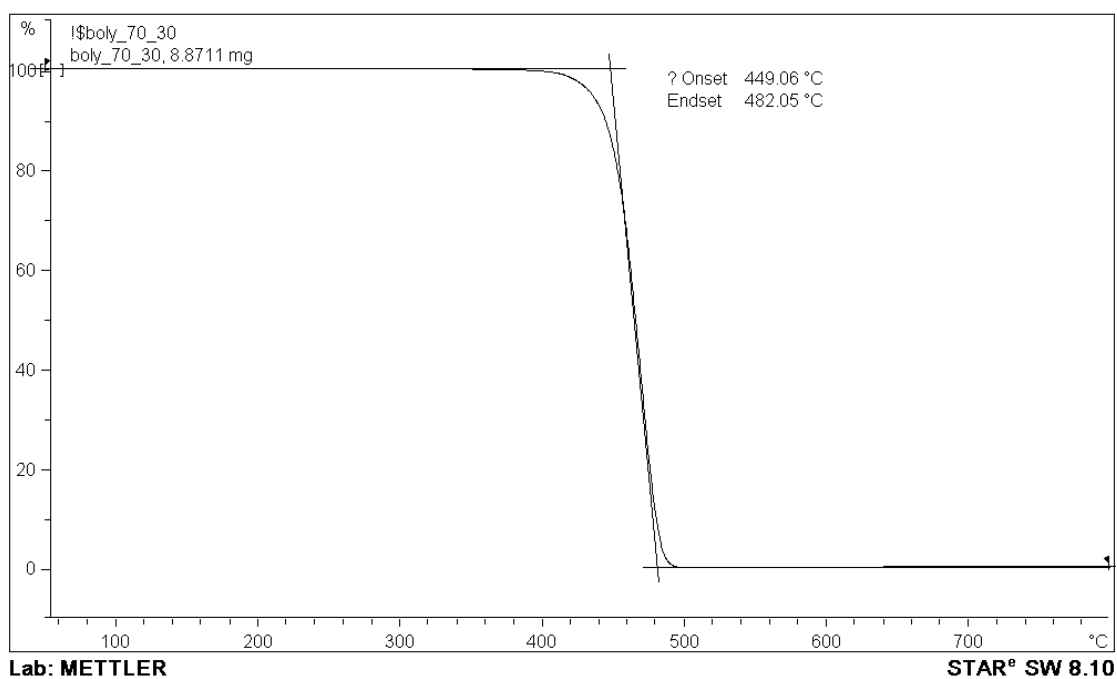
รูป ข-3 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/10



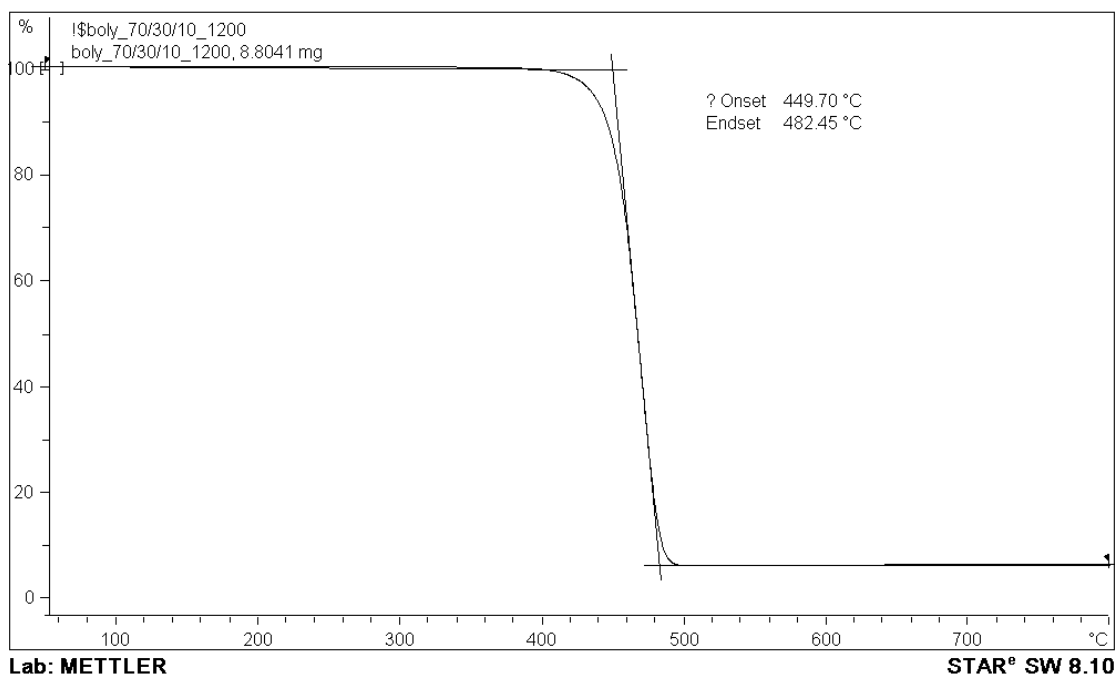
รูป ข-4 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/20



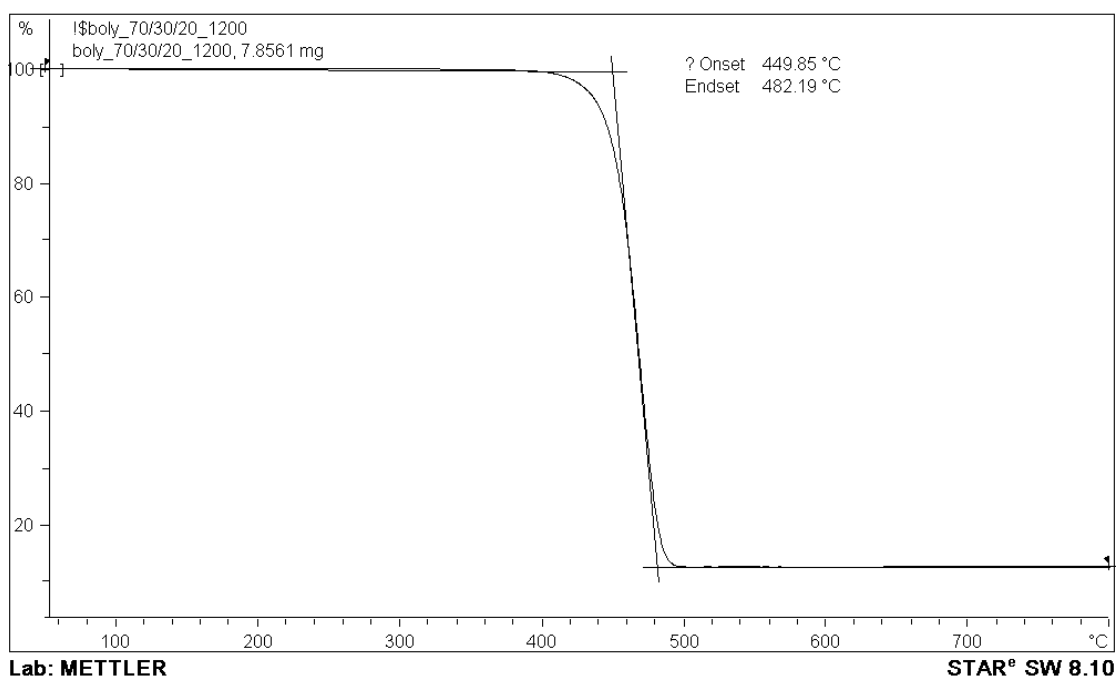
รูป ข-5 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/30



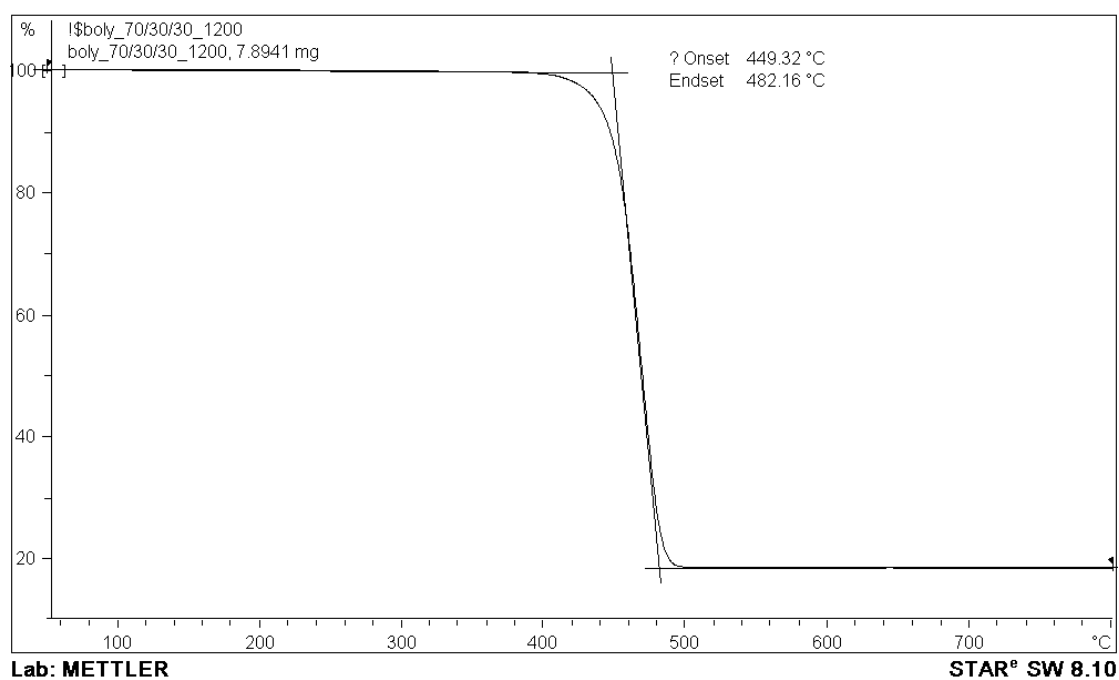
รูป ข-6 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/0



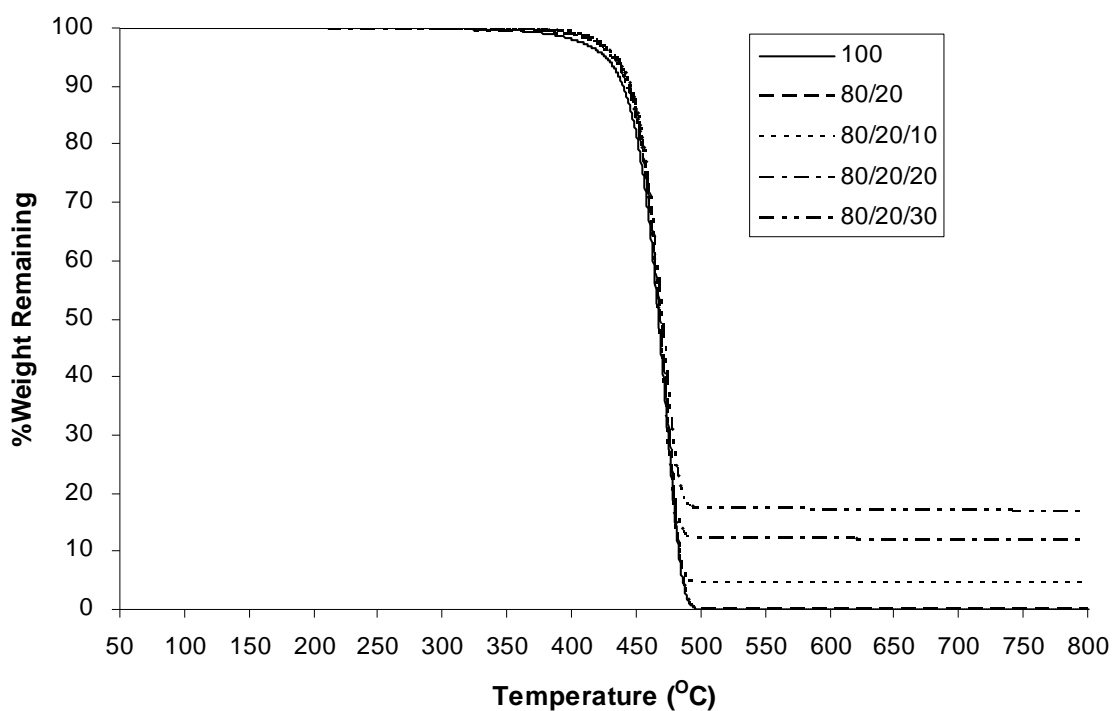
รูป ข-7 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/10



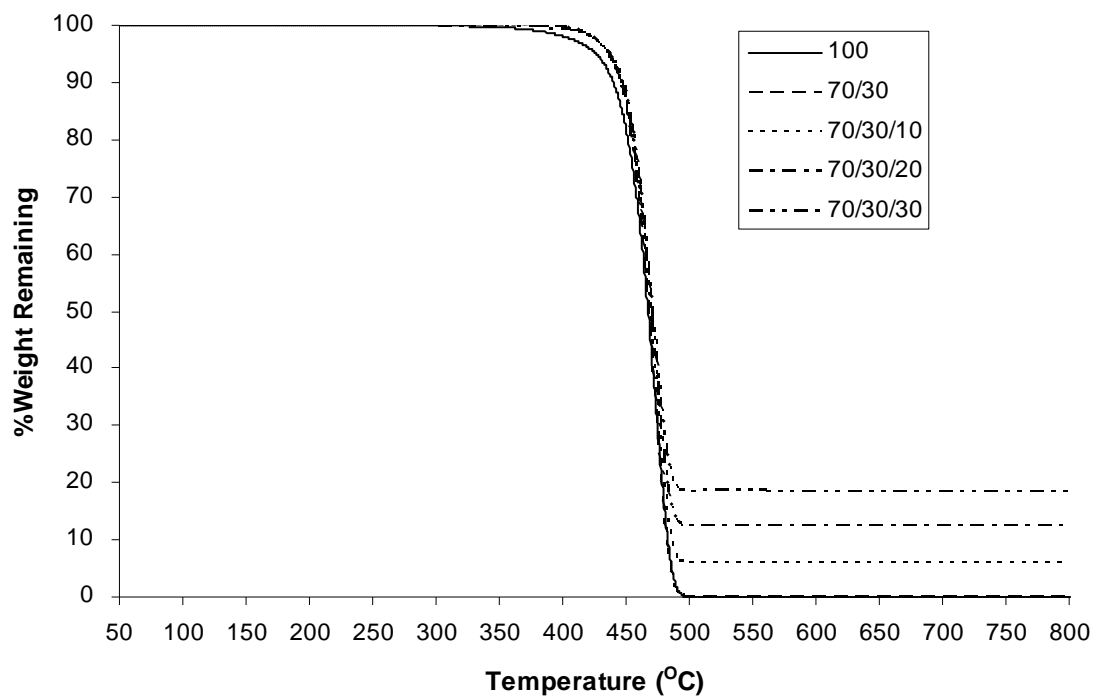
รูป ข-8 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/20



รูป ข-9 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/30



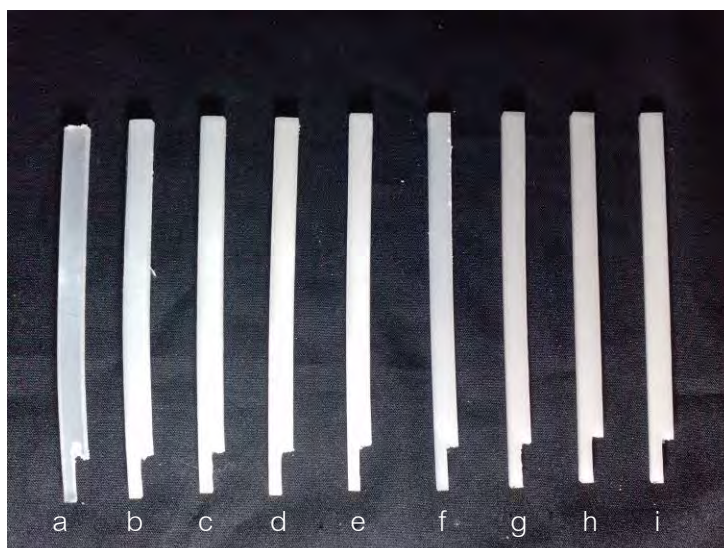
รูป ข-10 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20 ของพอลิโพรพิลีน/เฮทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์



รูป ข-11 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิไพร์ฟีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30 ของพอลิไพร์ฟีน/เฮทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์

ภาคผนวก ซ

รูปชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบหาค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด



รูป ซ-1 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตก่อนนำไปทดสอบหาค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด

(a) 100/0/0 (b) 80/20/0 (c) 80/20/10 (d) 80/20/20 (e) 80/20/30

(f) 70/30/0 (g) 70/30/10 (h) 70/30/20 (i) 70/30/30



รูป ซ-2 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตหลังนำไปทดสอบหาค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด

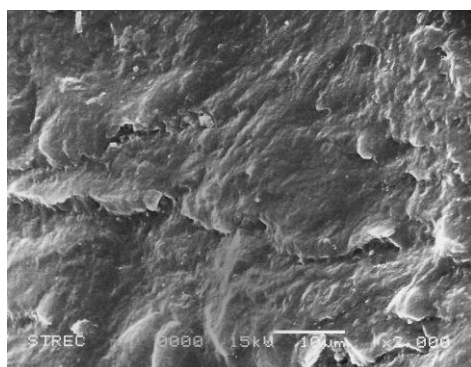
(a) 100/0/0 (b) 80/20/0 (c) 80/20/10 (d) 80/20/20 (e) 80/20/30

(f) 70/30/0 (g) 70/30/10 (h) 70/30/20 (i) 70/30/30

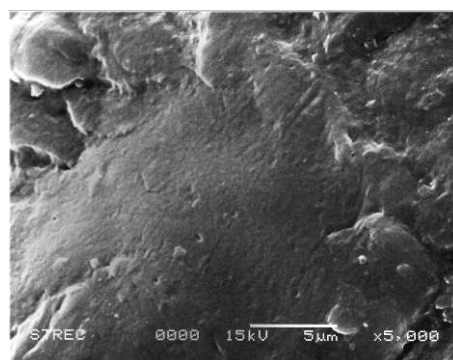
ภาคผนวก ฉ

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

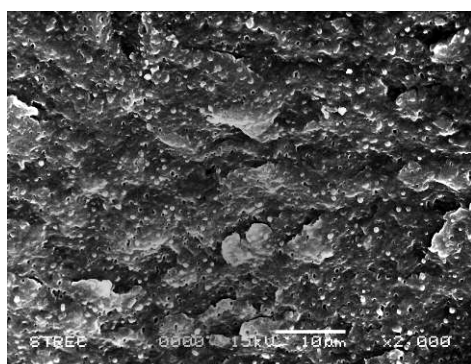
1. ภาพถ่ายชิ้นงานพอลิพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์



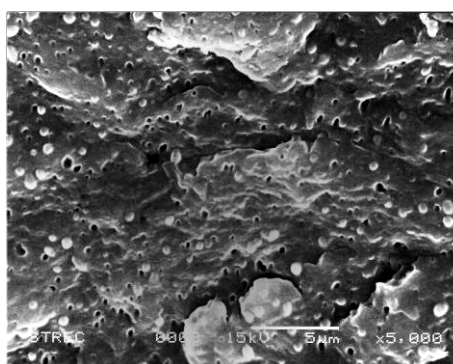
รูป ฉ-1 ภาพถ่ายของ PP100
ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



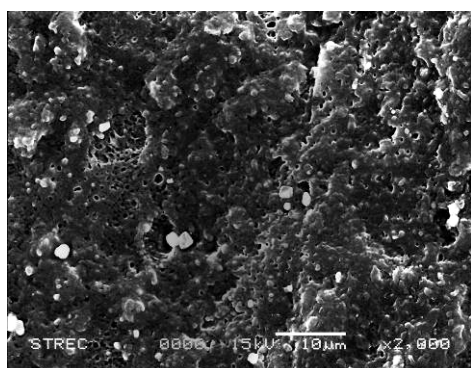
รูป ฉ-2 ภาพถ่ายของ PP100
ที่กำลังขยาย 5000 เท่า



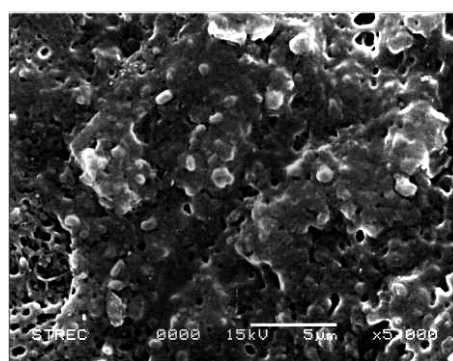
รูป ฉ-3 ภาพถ่ายของ PP80/EOC20
ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



รูป ฉ-4 ภาพถ่ายของ PP80/EOC20
ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

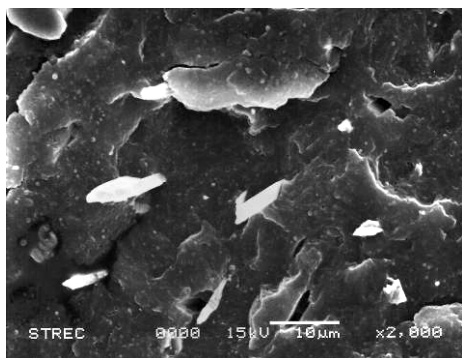


รูป ฉ-5 ภาพถ่ายของ PP70/EOC30
ที่กำลังขยาย 2000 เท่า

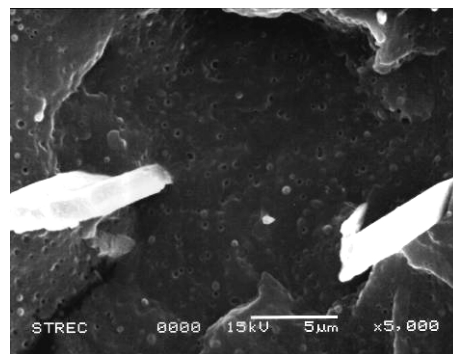


รูป ฉ-6 ภาพถ่ายของ PP70/EOC30
ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

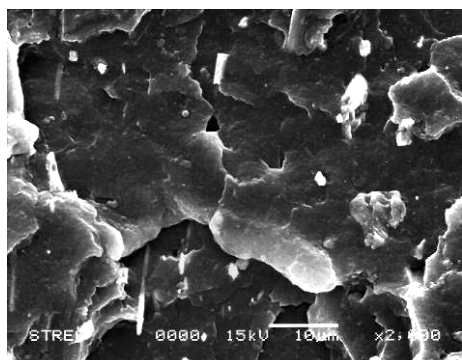
2. ภาพถ่ายชิ้นงานพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต



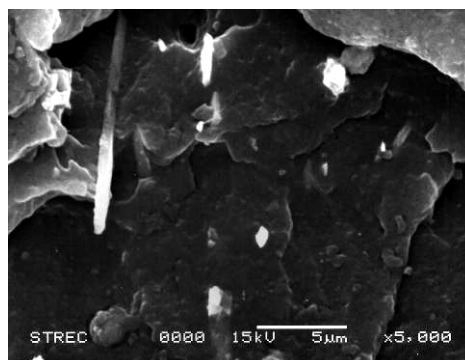
รูป ฅ-7 ภาพถ่ายของ PP80/EOC20/Wol10
ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



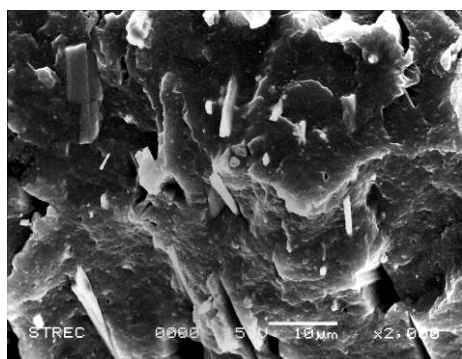
รูป ฅ-8 ภาพถ่ายของ PP80/EOC20/Wol10
ที่กำลังขยาย 5000 เท่า



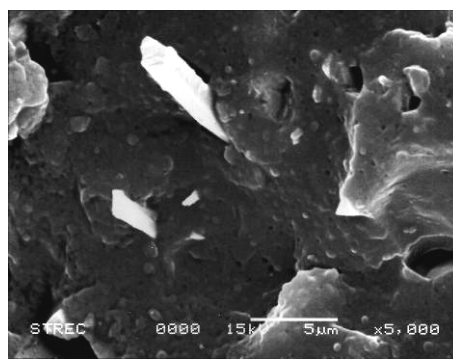
รูป ฅ-9 ภาพถ่ายของ PP80/EOC20/Wol20
ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



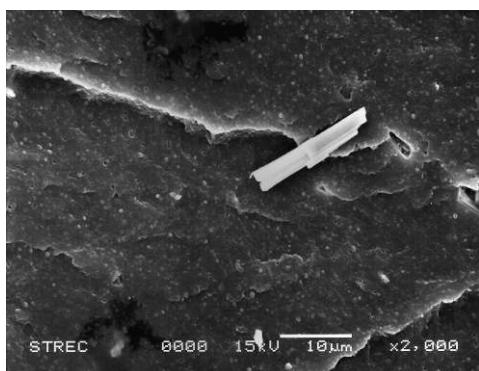
รูป ฅ-10 ภาพถ่ายของ PP80/EOC20/Wol20
ที่กำลังขยาย 5000 เท่า



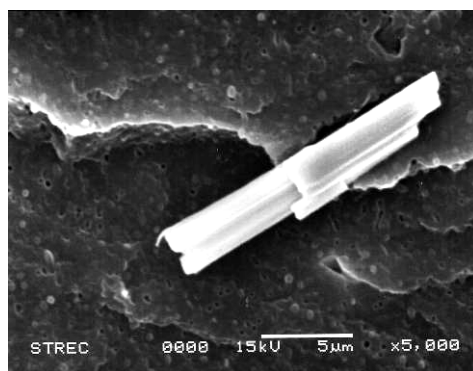
รูป ฅ-11 ภาพถ่ายของ PP80/EOC20/Wol30
ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



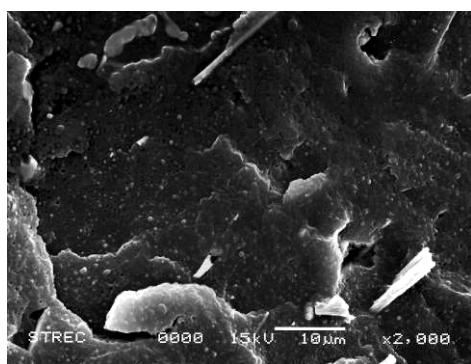
รูป ฅ-12 ภาพถ่ายของ PP80/EOC20/Wol30
ที่กำลังขยาย 5000 เท่า



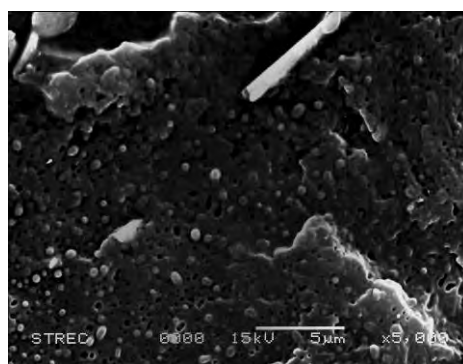
รูป ฅ-13 ภาพถ่ายของ PP70/EOC30/Wol10
ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



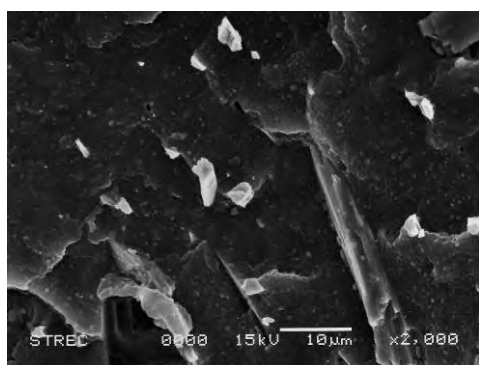
รูป ฅ-14 ภาพถ่ายของ PP70/EOC30/Wol10
ที่กำลังขยาย 5000 เท่า



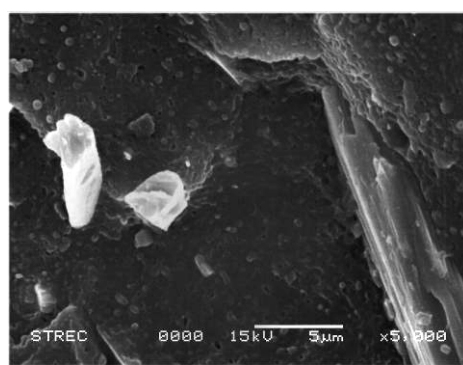
รูป ฅ-15 ภาพถ่ายของ PP70/EOC30/Wol20
ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



รูป ฅ-16 ภาพถ่ายของ PP70/EOC30/Wol20
ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

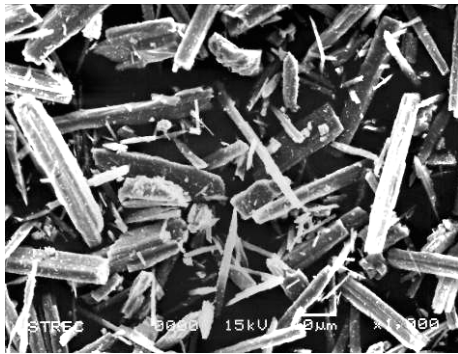


รูป ฅ-17 ภาพถ่ายของ PP70/EOC30/Wol30
ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



รูป ฅ-18 ภาพถ่ายของ PP70/EOC30/Wol30
ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

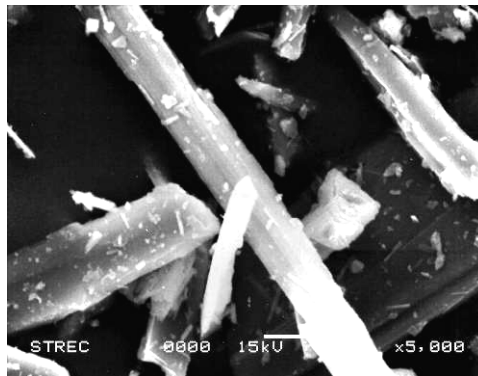
3. ภาพถ่ายรูปร่างของโพลลอสไทน์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูป ฅ-19 ภาพถ่ายโพลลอสไทน์
ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูป ฅ-20 ภาพถ่ายโพลลอสไทน์
ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



รูป ฅ-21 ภาพถ่ายโพลลอสไทน์
ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวหฤทัย ไวปัญญา เกิดเมื่อวันที่ 16 ธันวาคม พ.ศ. 2529 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาพอลิเมอร์และสิ่งทอ จากภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2552 หลังจากนั้น เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาคต้นในปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายของปีการศึกษา 2553 รวมระยะเวลาในการศึกษา 2 ปี