

การเตรียมและสมบัติของพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โพลลาสโทไนต์คอมพอสิต

นายฐิติสร กาญจนมยุร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2554  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

PREPARATION AND PROPERTIES OF POLYPROPYLENE/ETHYLENE PROPYLENE DIENE  
RUBBER/WOLLASTONITE COMPOSITES

Mr. Thatisorn Kanjanamayul

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University



ฐิติสร กาญจนมยุร : การเตรียมและสมบัติของพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/  
โวลลาสโทไนต์คอมพอสิต. (PREPARATION AND PROPERTIES OF POLYPROPYLENE/  
ETHYLENE PROPYLENE DIENE RUBBER/WOLLASTONITE COMPOSITES)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.เสาวรจณี ช่วยจุลจิตร, 92 หน้า.

คอมพอสิตของพอลิเมออร์ผสมพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (80/20 และ 70/30) และโวลลาสโทไนต์ (10, 20 และ 30 ส่วนต่อเรซิน 100 ส่วน) ทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารช่วยผสมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (5 ส่วนต่อเรซิน 100 ส่วน) ถูกเตรียมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และเครื่องฉีดแบบ ผลของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โวลลาสโทไนต์ และพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ต่อสมบัติด้านความทนแรงดึง ความทนแรงดัดโค้ง ความทนแรงกระแทก สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตได้ถูกตรวจสอบผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า การยืดตัว ณ จุดขาด ความทนแรงกระแทก และเสถียรภาพทางความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่ความทนแรงดึง ยังสัมผัลด ความทนแรงดัดโค้ง และด็กีรของความเป็ผลึกมีค่าลดลงตามปริมาณของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ยังสัมผัลด ความทนแรงดัดโค้ง ความทนแรงกระแทก และเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โวลลาสโทไนต์คอมพอสิตถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นเนื่องจากโวลลาสโทไนต์มีความแข็งดึง อัตราส่วนยาวต่อกว้าง และเสถียรภาพทางความร้อนสูง อย่างไรก็ตาม ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และด็กีรของความเป็ผลึกมีค่าลดลงตามปริมาณของโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ พบว่า การเติมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์สามารถปรับปรุงความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด ความทนแรงดัดโค้ง และเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิตได้อีกด้วย ทั้งนี้เพราะอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวของโวลลาสโทไนต์และพอลิเมออร์เมทริกซ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เข้าไปเพิ่มความเข้ากันได้ของคอมพอสิต ซึ่งสังเกตได้จากภาพสัณฐานวิทยาที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ภาควิชา.....วัสดุศาสตร์.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมออร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2554.....

# #5372427923:MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS : PP / EPDM / WOLLASTONITE / COMPOSITES

THATISORN KANJANAMAYUL : PREPARATION AND PROPERTIES OF POLYPROPYLENE/  
ETHYLENE PROPYLENE DIENE RUBBER/WOLLASTONITE

COMPOSITES ADVISOR : ASSOC. PROF. SAOWAROJ CHUAYJULJIT, 92pp.

Composites of polypropylene (PP)/ethylene propylene diene rubber (EPDM) blends (80/20 and 70/30 PP/EPDM) and three loadings of wollastonite (10, 20 and 30 phr) with and without PP-graft-maleic anhydride (PP-g-MA) (5 phr) as compatibilizer were prepared by using a twin screw extruder and an injection molding machine. The effects of EPDM, wollastonite and PP-g-MA on the tensile properties, flexural strength, impact strength, thermal properties and morphology of the resulting composites were investigated. The results showed that the elongation at break, impact strength and thermal stability increased, whilst the tensile strength, Young's modulus, flexural strength and degree of crystallinity decreased with increasing EPDM loadings. Moreover, the improvement of the Young's modulus, flexural strength, impact strength and thermal stability of PP/EPDM/ wollastonite composites is due to the high stiffness, aspect ratio and thermal stability of the wollastonite. However, the tensile strength, elongation at break and degree of crystallinity decreased with increasing wollastonite loadings. It was also found that the addition of PP-g-MA has positive effects on the tensile strength, elongation at break, flexural strength and thermal stability of the composites. This may be due to the enhancement of interfacial interaction between wollastonite and polymer matrix with the presence of PP-g-MA that increases the compatibility of the composites, as can be observed from SEM images.

Department : Materials Science

Student's Signature .....

Field of Study : Applied Polymer Science and textile Technology

Advisor's Signature .....

Academic Year : 2011

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์เป็นเพราะได้รับคำแนะนำด้านวิชาการ ความเอื้อเฟื้อเครื่องมือ วัสดุดิบและสถานที่ทำงานวิจัย อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือ และการแนะแนวในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆ อย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายนามดังนี้

1. รองศาสตราจารย์ เสาวรจณี ช่วยจุลจิตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้ คำปรึกษาแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคำแนะนำ การแก้ไขปัญหา และการสนับสนุนงานวิจัยเป็นอย่างดี และกรุณาตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุษา แสงวัฒนาโรจน์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ อรุษา สรวารี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำด้านวิชาการและกรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

3. ดร. ชัยวัฒน์ นรگانต์กร ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี ให้คำแนะนำด้านวิชาการและการวิจัย ตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

4. บริษัท เอ็ช เอ็ม ซี โปลิเมอร์ จำกัด ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย

5. บริษัท เคมีคัล อินโนเวชัน ที่เอื้อเฟื้อวัสดุดิบ สารเคมีสำหรับใช้ในงานวิจัย และเอื้อเฟื้อเครื่องมือในการทำงานวิจัย

6. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกระหว่างการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ที่ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จตามที่มุ่งหวังไว้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
 บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. วารสารปริทรรศน์.....	4
2.1 วัสดุคอมพอสิต.....	4
2.2 พอลิโพรพิลีน.....	7
2.3 ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน.....	11
2.4 สารตัวเติมและสารเสริมแรง.....	18
2.5. โวลลาสโทไนต์.....	21
2.6 พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	26
2.7 การขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ.....	28
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
3. วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
3.1 วัตถุประสงค์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	32
3.1.1 วัตถุประสงค์.....	32
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นทดสอบ.....	32
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	32
3.2 วิธีการเตรียมและขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	33
3.2.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	33
3.2.2 การผสมพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	34
3.2.3 การขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	35
3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	36

3.3.1 ทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง.....	36
3.3.2 ทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง.....	37
3.3.3 ทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก.....	38
3.4 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	39
3.4.1 ทดสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน(ทีจีเอ)..	39
3.4.2 ทดสอบด้วยเทคนิคดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี.....	39
3.5 ตรวจสอบพื้นฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	41
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	42
4.1 ลักษณะพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	42
4.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	43
4.2.1 สมบัติด้านความทนแรงดึง.....	43
4.2.2 สมบัติด้านความทนแรงดัดโค้ง.....	46
4.2.3 สมบัติความทนแรงกระแทก.....	48
4.3 ผลการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	50
4.3.1 ทดสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)...	50
4.3.2 ทดสอบด้วยเทคนิคดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี.....	51
4.4 พื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมพอสิต.....	53
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	58
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	58
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	59
รายการอ้างอิง.....	60
ภาคผนวก.....	64
ภาคผนวก ก.....	65
ภาคผนวก ข.....	68
ภาคผนวก ค.....	71
ภาคผนวก ง.....	72
ภาคผนวก จ.....	73
ภาคผนวก ฉ.....	81
ภาคผนวก ช.....	89
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	92



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การใช้สารตัวเติมที่ได้จากแร่ธาตุในอุตสาหกรรมพลาสติก .....	20
2.2	สมบัติทางกายภาพของโพลีเอทิลีน.....	25
2.3	การใช้โพลีเอทิลีนในอุตสาหกรรมพลาสติก.....	26
2.4	สมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	27
3.1	ส่วนผสมที่ใช้เตรียมพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	34
3.2	ขนาดชั้นทดสอบสมบัติความทนแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I.....	37
4.1	สมบัติด้านความทนแรงดึง (ความทนแรงดึง ยังสัมมอดูลัส และการยืดตัว ณ จุดขาด) ของชั้นทดสอบที่มีองค์ประกอบต่างๆกัน.....	43
4.2	ทนแรงดัดโค้งของชั้นทดสอบที่มีองค์ประกอบต่างๆ กัน.....	46
4.3	ความทนแรงกระแทกของชั้นทดสอบที่มีองค์ประกอบต่างๆ กัน.....	48
4.4	สมบัติทางความร้อน (อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก และระดับความเป็นผลึก) ของชั้นทดสอบที่มีองค์ประกอบต่างๆ กัน ซึ่งตรวจสอบด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี.....	50
4.5	สมบัติทางความร้อน (อุณหภูมิเริ่มสลายตัว อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว อุณหภูมิ สลายตัวร้อยละ 50 และปริมาณชาร์) ของชั้นทดสอบที่มีองค์ประกอบต่างๆ กัน ตรวจสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)..	51

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ปฏิกิริยาของกระบวนการเกิดพอลิโพรพิลีน.....	8
2.2	ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน.....	8
2.3	ซินดีโอแทกติกพอลิโพรพิลีน.....	9
2.4	อะแทกติกพอลิโพรพิลีน.....	9
2.5	สูตรโครงสร้างของยาง EPDM.....	11
2.6	สูตรโครงสร้างของ diene ที่มีอยู่ในยาง EPDM.....	12
2.7	รูปร่างของอนุภาคสารตัวเติม.....	19
2.8	โครงสร้างของโวลลาสโทไนต์.....	22
2.9	โครงสร้างผลึกรูปเข็มของโวลลาสโทไนต์.....	22
2.10	โครงสร้างทางเคมีของพอลิโพรพิลีน.....	26
2.11	สังเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเบนซีน.....	27
2.12	การสังเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของบิวทีน.....	27
2.13	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	28
3.1	ขั้นตอนการทดลอง.....	33
3.2	เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่.....	34
3.3	เครื่องฉีดแบบ.....	35
3.4	เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (LLOYD LR 100K).....	36
3.5	ขั้นตอนทดสอบความทนแรงดึง.....	36
3.6	เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (LLOYD 500).....	37
3.7	เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบ IZOD (Dynisco SIMATIC-OP7).....	38
3.8	เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (Mettler Toledo, TGA/SDTA 851°).....	39
3.9	เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Perkin-Elmer, DSC 7).....	40
3.10	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Jeol, JSM 5800 LV).....	41
4.1	พอลิโพรพิลีนคอมพอสิต.....	42
4.2	สมบัติด้านความทนแรงดึง (ความทนแรงดึง ยังสัมพัทธ์ และการยืดตัว ณ จุดขาด) ของชั้นทดสอบที่มีองค์ประกอบต่างๆ แทนเจนด์สูญเสียของพอลิโพรพิลีน	

	คอมพอสิต.....	45
4.3	ความทนแรงดัดโค้งของชั้นทดสอบที่มีองค์ประกอบต่างๆ กัน.....	47
4.4	ความทนแรงกระแทกของชั้นทดสอบที่มีองค์ประกอบต่างๆ กัน.....	49
4.5	สัณฐานวิทยาของโวลลาสโทไนต์ที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	53
4.6	สัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์และพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอินที่กำลังขยาย 2000 เท่า.....	54
4.7	สัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอิน/โวลลาสโทไนต์คอมพอสิตที่ใส่และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (80/20)ที่กำลังขยาย 2000 เท่า.....	55
4.8	สัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอิน/โวลลาสโทไนต์คอมพอสิตที่ใส่และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์(70/30)ที่กำลังขยาย 2000 เท่า.....	56

## บทที่ 1

### บทนำ

พอลิโพรพิลีนเป็นพลาสติกเชิงพาณิชย์ที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางทั้งเครื่องใช้ภายในบ้านบรรจุภัณฑ์ และอุปกรณ์รถยนต์ เนื่องจากมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา ความทนทานสารเคมีและความขึ้นดีเยี่ยม มีความแข็งตึง ขึ้นรูปง่าย และราคาถูก เป็นต้น อย่างไรก็ตาม พอลิโพรพิลีนยังมีข้อจำกัดในการใช้งานที่สำคัญ คือ มีความทนแรงกระแทกต่ำโดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งการปรับปรุงความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนด้วยการใส่วัสดุคล้ายยางจะสามารถขยายการใช้งานเชิงวิศวกรรมของพอลิโพรพิลีนให้เพิ่มมากขึ้น โดยงานวิจัยนี้ ทดลองใส่ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนเป็นสารตัดแปรความทนแรงกระแทกให้กับพอลิโพรพิลีน ทั้งนี้เนื่องจากความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสอง นอกจากนี้ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนยังมีความอิมิตัวสูงกว่ายางไดอีนชนิดอื่นๆ จึงมีความทนทานสภาวะแวดล้อมขณะใช้งานได้ดี หากแต่การใส่ยางเพื่อปรับปรุงความทนแรงกระแทกจะส่งผลให้ความแข็งตึง และความแข็งแรงของพอลิโพรพิลีนลดลง ซึ่งการใส่สารตัวเติมอินทรีย์ พบว่า จะสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลบางอย่างของพอลิเมอร์ ได้แก่ ความแข็งตึง ความแข็งแรง ความแข็ง และความทนทานการขีดถู เป็นต้น รวมทั้งช่วยลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย ทั้งนี้ขึ้นกับขนาด รูปร่าง ปริมาณ การกระจายตัว และอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวของสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทดลองใส่โพลลาสโทไนต์ซึ่งเป็นสารประกอบแคลเซียมซิติลิกेटที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูปเข็มและมีอนุภาคขนาด 1200 เมช ร่วมกับการใส่ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนเพื่อปรับสมดุลระหว่างความเหนียวหรือทนแรงกระแทกกับความแข็งตึงของพอลิโพรพิลีน โดยจะทำการเตรียมคอมพอสิตทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารคู่ควบประเภทพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ แล้วทำการตรวจสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตที่เตรียมได้

พอลิโพรพิลีนเป็นพลาสติกเชิงการค้าที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยมีอัตราการเติบโตทางด้านการตลาดสูงถึงร้อยละ 6-7 ต่อปี พอลิโพรพิลีนมีความหนาแน่นน้อยที่สุดในบรรดาเทอร์โมพลาสติกทั้งหลาย จึงทำให้มีอัตราส่วนของความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง มีความแข็งมากกว่าพอลิโอเลฟินส์ชนิดอื่น ความเป็นผลึกจะช่วยสกัดกั้นการซึมผ่านของไขมันและน้ำมันได้ดี ใอน้ำและออกซิเจนซึมผ่านได้น้อย มีจุดหลอมเหลวสูง สามารถทนความร้อนและสารเคมีได้ดี และถูกทำให้อ่อนตัวได้เมื่อสัมผัสกับตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน นอกจากนี้ ยังสามารถทนต่อความล้า (fatigue) ได้ดี มีดัชนีการไหล (melt flow index) อยู่ในช่วงกว้าง สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และมีราคาถูก จึงทำให้พอลิโพรพิลีนมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น เครื่องใช้ในบ้านและสำนักงาน บรรจุภัณฑ์

เครื่องมือทางการแพทย์ และอุปกรณ์ภายในรถยนต์ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การนำพอลิโพรพิลีนไปใช้งานในทางวิศวกรรมจะมีข้อจำกัดที่สำคัญ คือ พอลิโพรพิลีนมีความทนแรงกระแทกค่อนข้างต่ำ โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ และมีการหดตัวสูงระหว่างและภายหลังการขึ้นรูป ทั้งนี้เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วและความเป็นผลึกสูง ความพยายามในการแก้ไขปัญหานี้ คือ การใส่วัสดุคล้ายยางให้ทำหน้าที่เป็นตัวดัดแปรความทนแรงกระแทก (impact modifiers) ในพอลิโพรพิลีน ซึ่งได้แก่ ยางเอทิลีนโพรพิลีน (EPR) ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) สไตรีนเอทิลีนบิวทิลีน สไตรีนโคพอลิเมอร์ (SEBS) และเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ (EOC) เป็นต้น หากแต่การใส่ยางเพื่อปรับปรุงความเหนียวและความทนแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำจะส่งผลให้ความแข็งตึง และความแข็งแรงของพอลิโพรพิลีนลดลง ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาจำนวนมาก แสดงให้เห็นว่าการใส่สารตัวเติมอินทรีย์ต่างๆ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ทัลค์ ไมกา ซิลิกา และโพลลาสโทไนต์ เป็นต้น เข้าไปในพอลิเมอร์ผสมของพอลิโพรพิลีน/ยาง พบว่า สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลบางอย่างของพอลิเมอร์ เช่น ความแข็งตึง ความแข็งแรง ความแข็ง และความทนทานการขีดถู เป็นต้น รวมทั้งช่วยลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย ซึ่งผลของการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ขึ้นกับขนาด รูปร่าง ปริมาณ โครงสร้าง การกระจายตัว และอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวของสารตัวเติมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ดังนั้น การใส่สารตัวเติมที่มีความแข็งเกร็ง (rigid) และยางในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ หรือการเตรียมคอมพอสิตของพอลิเมอร์ผสมอาจช่วยปรับสมดุลของสมบัติต่างๆ ที่ต้องการให้มีความเหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการปรับปรุงความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนด้วยยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองมีโครงสร้างทางเคมีคล้ายคลึงกัน จึงทำให้มีความเข้ากันได้ในระดับหนึ่ง นอกจากนี้ โมเลกุลของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนยังมีความอิมมิตัวสูงกว่ายางไดอีนชนิดอื่นๆ จึงทำให้มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากแสงแดด ออกซิเจน โอโซน ความร้อน และสารเคมีในขณะใช้งานได้เป็นอย่างดี และเพื่อเป็นการปรับสมดุลของความเหนียวหรือความทนแรงกระแทกกับความแข็งตึงของพอลิโพรพิลีนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงได้ทดลองนำโพลลาสโทไนต์ซึ่งเป็นสารตัวเติมอินทรีย์ที่เกิดอยู่ในธรรมชาติเป็นจำนวนมาก ราคาถูก มีจำหน่ายในท้องตลาด และมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมาใช้ร่วมกับยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิโพรพิลีน โดย โพลลาสโทไนต์เป็นแร่ประเภทแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{CaSiO}_3$ ) ที่ประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ประมาณร้อยละ 48.3 และซิลิกาประมาณร้อยละ 51.7 ซึ่งเกิดจากการเกาะกลุ่มของผลึกรูปเข็ม (needle-shaped crystal) มีอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้าง (aspect ratio) อยู่ในช่วง 10-20 มีความถ่วงจำเพาะ 2.9 มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 9.9 และความแข็ง 4.5 (Moh's hardness) พบได้หลายบริเวณในเทือกเขาหินปูนและหินอ่อนเขตอำเภอโคกสำโรง อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี เช่น บริเวณเขาทับควาย เขาสระพราน

นาค เขาผาแดง เขาพระงาม และเขาสามยอด เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการนำโวลลาสโทไนต์ประเภท ที่มี aspect ratio สูง (10-20) มาใช้เป็นสารเสริมแรงแทนการใช้เส้นใยแอสเบสตอส (asbestos) ในอุตสาหกรรมเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตพลาสติกเพื่อปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ โดยอาศัยสมบัติของแร่อนินทรีย์ร่วมกับสมบัติของพอลิเมอร์ในการเพิ่มสมบัติเชิงกล เสถียรภาพทาง ความร้อน และความคงรูป เป็นต้น นอกจากนี้ การเลือกใช้โวลลาสโทไนต์เกรดที่มีขนาดอนุภาค ละเอียดมากๆ จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความทนแรงดึง มอดุลัสแรงดัดโค้ง (flexural modulus) ความ ต้านทานการขูดขีด และความทนแรงกระแทกสูงกว่าวัสดุอื่นๆ

อย่างไรก็ตาม การใช้สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคละเอียดมากๆ เป็นจำนวนมากอาจทำให้ สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ลดลง เนื่องจากการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน (agglomeration) โดยเฉพาะ สารตัวเติมที่มีสภาพขั้วบนพื้นผิว ซึ่งการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของสารตัวเติมจะเพิ่มการ จับตัวเป็นกลุ่มก้อนที่ไม่สามารถทำลายได้ และยังคงรวมตัวกันถึงแม้จะได้รับแรงเฉือนสูงจาก กระบวนการขึ้นรูปก็ตาม ซึ่งแนวทางแก้ไขปัญหานี้ ได้แก่ การใส่สารเพิ่มเข้ากันได้ (compatibilizer) หรือสารคู่ควบ (coupling agent) เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้หรืออันตรกิริยา ระหว่างวัสดุภาค

การใช้พอลิไพโรฟิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จะช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างพอลิไพโรฟิลีน และโวลลาสโทไนต์ ซึ่งพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีมอดุลัสและความคงขนาดเพิ่มขึ้นเนื่องจากความ แข็งตั้งของพอลิไพโรฟิลีน แล้วใช้สารตัวเติมอนินทรีย์ที่สามารถเข้ารวมตัวกับพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ได้มาเสริมการปรับปรุงทั้งสมบัติของผลิตภัณฑ์ โดยสารตัวเติมอนินทรีย์ที่ใช้ควรมีราคาถูก เพราะ วัตถุประสงค์หลักของการใช้สารตัวเติมอนินทรีย์ในการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิต ได้แก่ ลด ต้นทุนการผลิต และเพิ่มความคงรูป อย่างไรก็ตาม การใส่สารตัวเติมอนินทรีย์ในปริมาณสูงอาจมี ผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นจนไม่เหมาะกับการใช้งานในหลายๆ ด้าน

## บทที่ 2

### วารสารปริทรรศน์

#### 2.1 วัสดุคอมพอสิต (Composite Materials) [1,2]

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 อะคริลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีนโคพอลิเมอร์ ไนลอน พอลิอะซีทัล พอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว อัลคิเดเรซิน 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 ลิเทียมอะลูมิเนียมซิลิเกต 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 และความแข็งแรงสูง ส่วนอนุภาคที่หยาบกลับทำให้ความแข็งแรงลดลง
- รูปร่างของอนุภาค โดยรูปร่างมีผลกับสมบัติต่างๆ ตัวอย่างเช่น อนุภาคเคลือบที่มีลักษณะเป็นแผ่น มีแนวโน้มของการจัดเรียงตัวในระหว่างกระบวนการผลิต นอกจากนี้ยังมีอนุภาคที่มีรูปร่างแบบอื่นๆ อีก ได้แก่ อนุภาคทรงกลม และแท่ง เป็นต้น
- ธรรมชาติทางเคมีของพื้นผิว สำหรับอนุภาคของแร่ มักมีหมู่มีซั่วนบนพื้นผิว เช่น หมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งทำให้เปียกน้ำได้ง่าย แต่ไม่เกาะติดพอลิเมอร์ การปรับปรุงให้อนุภาคสามารถยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดี จำเป็นต้องปรับแต่งหรือดัดแปรพื้นผิวเสียก่อน เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต อาจถูกปรับแต่งด้วยกรดสเตียริกเพื่อให้หมู่ของกรดยึดติดกับอนุภาค ในขณะที่สายโซ่อะลิแฟติก เข้ารวมกับพอลิเมอร์

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

วัสดุที่ผลิตจากพอลิเมอร์เพื่อใช้ในทางการค้า ส่วนใหญ่เป็นวัสดุคอมพอสิตเนื่องจากมีสารเสริมแรงและพอลิเมอร์เมทริกซ์ให้เลือกหลายชนิด จึงทำให้สามารถนำมาผลิตเป็นวัสดุคอมพอสิตได้มากมาย เนื่องจากมีข้อดีเหนือกว่าหลายประการ เช่น

- เพิ่มความแข็งแรง ความแข็งแรง และคงรูปร่างได้ดีกว่า
- เพิ่มความเหนียว และความทนแรงกระแทก
- ทำให้อุณหภูมิการบิดตัวสูงขึ้น
- ลดการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำ
- ปรับปรุงสมบัติด้านไฟฟ้า
- ลดต้นทุนการผลิต
- ยืดอายุการใช้งาน



- ลดการหดตัวหรือขยายตัวเนื่องจากความร้อน
- ฯลฯ

วัสดุคอมพอสิตชนิดหนึ่งๆ อาจมีทั้งข้อดีบางประการ และขณะเดียวกันอาจมีข้อเสียด้วย ดังนั้น ในการใช้งานต้องพิจารณาทั้งข้อดี และข้อเสียของวัสดุแต่ละชนิด ข้อเสียของวัสดุคอมพอสิต เช่น ความหนืดเพิ่มขึ้น การขึ้นรูปยาก และอาจทำให้สมบัติเชิงกล และทางฟิสิกส์บางประการลดลง เป็นต้น สมบัติของวัสดุคอมพอสิตขึ้นอยู่กับสมบัติของส่วนประกอบต่างๆ เช่น ลักษณะของตัวเติม ลักษณะสัณฐานวิทยาของระบบ และลักษณะผิวสัมผัสระหว่างเฟสที่แตกต่างกัน เป็นต้น

ปฏิกริยาระหว่างพอลิเมอร์และตัวเติม มี 4 แบบ คือ

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

## 2.2 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) [3-9,30]

พอลิโพรพิลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่งที่ถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ทั้งยังสามารถขึ้นรูปได้หลายวิธี ทำให้พอลิโพรพิลีนมีอัตราการเติบโตทางการตลาดสูงถึงร้อยละ 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

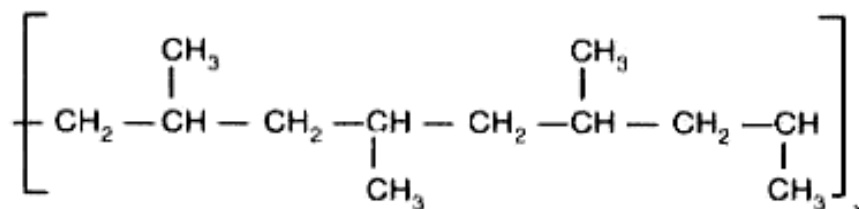
พอลิโพรพิลีนมีดัชนีการหลอมไหล (melt flow index) อยู่ในช่วงกว้าง จึงทำให้สามารถนำมารีไซเคิลได้ง่าย และสามารถขึ้นรูปได้ทุกวิธีไม่ว่าจะเป็นการฉีดแบบ การเป่าแบบ การอัดรีด การเป่า หรือการหล่อฟิล์ม และเทอร์โมฟอรั่ม เป็นต้น

พอลิโพรพิลีนต่างชนิดกันจะมีสมบัติที่แตกต่างกัน และเหมาะกับการใช้งานที่หลากหลาย เช่น เส้นใย ฟิล์ม และชิ้นงานที่ได้จากการฉีดแบบใช้สำหรับงานด้านรถยนต์ บรรจุภัณฑ์ที่มีความแข็งแรง เครื่องใช้ทั่วไป เครื่องมือทางการแพทย์ บรรจุภัณฑ์อาหาร และผลิตภัณฑ์อื่นๆ พอลิโพรพิลีนสามารถนำมาใช้แทนแก้ว โลหะ หรือพลาสติกวิศวกรรมอื่นๆ เช่น พอลิคาร์บอนเนต 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-นัตตา (Ziegler-Natta catalyst) ซึ่งได้เริ่มผลิตในเชิงการค้าตั้งแต่ปี ค.ศ.1957 เป็นต้นมา

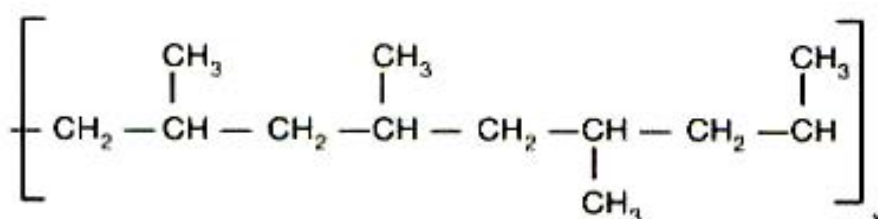


2. ซินดิโอแทกติกพอลิโพรพิลีน (Syndiotactic polypropylene) โดยหมู่เมทิลที่เกาะอยู่กับสายโซ่จะสลับกันคนละข้างของสายโซ่พอลิเมอร์อย่างเป็นระเบียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ซินดิโอแทกติกพอลิโพรพิลีน [30]

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



รูปที่ 2.4 อะแทกติกพอลิโพรพิลีน [30]

ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีโครงสร้างเชิงเส้นตรงโดยตลอด ปราศจากกิ่งก้านสาขา และไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไปที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีความเป็นผลึกสูง ต่างจากอะแทกติกพอลิโพรพิลีนที่ละลายในตัวทำละลายหลายชนิด ซึ่งการละลายของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนจะเกิดขึ้นได้เฉพาะที่อุณหภูมิสูง (130 ถึง 170 องศาเซลเซียส) ในตัวทำละลายฮาโลเจนเตตระไฮโดรฟูแรน ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนทนกรด และเบสได้ดี ทั้งยังเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีทั่วไป อย่างไรก็ตาม เสถียรภาพของพอลิโพรพิลีนต่อความร้อน แสง และตัวออกซิไดซ์จะน้อยกว่าพอลิเอทิลีนเพราะมีไฮโดรเจนอะตอมที่ต่ออยู่กับคาร์บอนองศา 3 (tertiary carbon) ดังนั้น ก่อนนำไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนไปใช้งานต้องมีการเติมสารแอนติออกซิแดนท์ และอัลตราไวโอเล็ตสแตบิไลเซอร์

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]

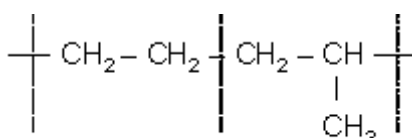
การใช้งานของพอลิโพรพิลีนสามารถแบ่งตามประเภทของการขึ้นรูปได้ดังนี้

1. งานฉีดขึ้นรูป เช่น ถัง กะละมัง ตะกร้า ของเด็กเล่น เฟอร์นิเจอร์ เครื่องใช้ทางการแพทย์ และภาชนะบรรจุทั่วไป เป็นต้น
2. แผ่นฟิล์ม ใช้ทำฟิล์มใส ถุงร้อน ถุงเย็น ซองใส่เสื้อยืด ฟิล์มห่อหุ้มบรรจุอาหารที่ไม่ต้องการให้ออกซิเจนซึมผ่าน
3. งานเป่า ทำผลิตภัณฑ์ที่นำมาใช้งานเช่นเดียวกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง แต่จะมีความทนทานสูงกว่า เช่น ขวด ถัง หรือภาชนะที่ต้องการความทนทานต่อสารเคมีมากกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง
4. งานสิ่งทอ ทำเส้นใย กระสอบสาน เข็มก แห และอวน เป็นต้น

## 2.3 ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (Ethylene-Propylene Diene Rubber, EPDM) [10,31-32]

### โครงสร้างและสมบัติของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM)

พอลิเอทิลีน (PE) และพอลิโพรพิลีน (PP) มีสมบัติเป็นพลาสติกที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสอง สามารถตกผลึกได้ง่าย แต่หากทำการป้องกันการตกผลึกของพอลิเอทิลีน โดยการเติมมอนอเมอร์อีกชนิดหนึ่งลงไป ในระหว่างกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน ก็จะได้พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีโครงสร้างของโมเลกุลแบบอสัณฐาน และมีสมบัติความเป็นยางที่มีความยืดหยุ่นสูง



Ethylene unit    Propylene unit

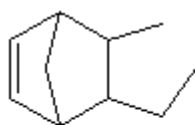
รูป 2.5 สูตรโครงสร้างของยาง EPDM [32]

ยางเอทิลีน/โพรพิลีน (EPM) เป็นโคพอลิเมอร์ของเอทิลีนและโพรพิลีน ซึ่งสังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์-เนตตา (Ziegler-Natta Catalysts) จะได้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน และมีสมบัติเป็นยางเรียกว่ายาง EPM เนื่องจากโมเลกุลของยางชนิดนี้ไม่มีส่วนที่ไม่อิ่มตัว ดังนั้น ยางชนิดนี้มีความทนทานต่อกาเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจาก แสงแดด ออกซิเจน ความร้อน โอโซน และสารเคมี อย่างไรก็ตาม ข้อเสียคือ ไม่สามารถใช้กำมะถันในการคงรูปได้ เพราะไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล การทำให้ยางคงรูปจึงต้องใช้เพอร์ออกไซด์เท่านั้น ปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาชนิดใหม่ โดยการเติมมอนอเมอร์ตัวที่สาม คือ ไดอีนลงไปเล็กน้อย ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้ยางที่ได้มีส่วนที่ไม่อิ่มตัว อยู่ในสายโมเลกุล ยางจึงสามารถคงรูปได้ด้วยกำมะถัน และเรียกกยางชนิดนี้ว่ายาง EPDM

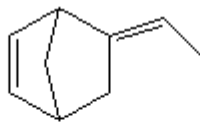
เนื่องจากไดอีนที่เติมลงไปไม่ได้ไปแทรกอยู่ที่สายโซ่หลักของโมเลกุล แต่จะเกาะอยู่กับสายโซ่หลักเป็นลักษณะกิ่งก้านสาขา แม้ว่าตำแหน่งพันธะคู่จะเกิดการแตกตัวอันเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ เช่น แสงแดด ออกซิเจน โอโซน ฯลฯ แต่สายโซ่หลักก็ยังคงเหมือนเดิมหรือได้รับผลกระทบน้อยมาก ด้วยเหตุนี้ยาง EPDM จึงมีสมบัติเด่นในด้านการทนทานต่อความร้อน แสงแดด ออกซิเจน และโอโซนได้เป็นอย่างดี

## ประเภทของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM)

ยาง EPDM แต่ละประเภทแตกต่างกันที่สัดส่วนของเอทิลีนและโพรพิลีน รวมถึงปริมาณของไดอีน โดยทั่วไป ยางชนิดนี้มีเอทิลีนอยู่ในช่วง 45-85% โมล หรือ 40-80% โดยน้ำหนัก แต่ประเภทที่มีขายกัน โดยทั่วไปจะมีปริมาณเอทิลีนอยู่ประมาณ 50-70% โมลและมีปริมาณของไดอีนอยู่ในช่วง 3-11% โมล แม้ว่าไดอีนที่ใช้กันอย่างกว้างขวางจะมีอยู่ 3 ชนิด คือ dicyclopentadiene (DCPD), ethylidene norbornene (ENB) และ trans-1,4-hexadiene (1,4 HD) แต่ชนิดที่ใช้กันมากที่สุด ได้แก่ ENB เนื่องจากจะทำให้โมเลกุลของยางว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันหรือปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถันสูงที่สุด แม้ว่าการใช้ 1,4 HD จะทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาการคงรูปได้ช้ากว่า ENB แต่สมบัติบางประการของยางจะดีกว่า เช่น ความทนทานต่อความร้อน รวมถึงการบดผสม และการขึ้นรูปยางก็จะทำได้ง่ายกว่าเนื่องจากโมเลกุลของยางมี โครงสร้างเป็นเส้นตรง (linear molecules) ส่วนการใช้ DCPD จะทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาการคงรูปได้ช้าที่สุด



Dicyclopentadiene  
(DCPD)



Ethylene Norbornene  
(ENB)



Trans-1,4-Hexadiene  
(HX หรือ 1,4 HD)

รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของ diene ที่มีอยู่ในยาง EPDM [32]

สัดส่วนของเอทิลีนและโพรพิลีนในยางก็มีผลกระทบต่อสมบัติของยาง กล่าวคือ ยางที่มีปริมาณเอทิลีนสูงจะมีความแข็งแรงในสภาพที่ยังไม่คงรูปสูง แต่เมื่อปริมาณของเอทิลีนลดลง ยางจะนิ่มและยืดหยุ่นมากขึ้น นอกจากนี้จะมีการแบ่งประเภทตามชนิดและปริมาณของไดอีน และสัดส่วนของเอทิลีนและโพรพิลีนแล้ว ยังมีการแบ่งประเภทยาง EPDM ตามความหนืด อีกด้วย โดยทั่วไป สามารถแบ่งยางตามค่าความหนืดนี้ได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. ยางประเภทที่ความหนืดต่ำถึงปานกลาง (low-medium viscosity) โดยมีค่าความหนืด ML(1+4) @100 C อยู่ในช่วง 25 ถึง 60
2. ยางประเภทที่ความหนืดปานกลางถึงสูง (medium-high viscosity) โดยมีค่าความหนืด ML(1+4) @125 C อยู่ในช่วง 60 ถึง 100

3. ยางประเภทที่มีความหนืดสูงมาก (very high viscosity) โดยมีค่าความหนืด ML(1+4) @125 C อยู่ในช่วง 100 ถึง 200

ยางประเภทที่มีความหนืดต่ำแม้ว่าจะสามารถนำไปแปรรูปได้ง่าย แต่ยางจะมีความสามารถรับสารตัวเติมได้ในปริมาณปานกลางเท่านั้น จึงเหมาะกับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีราคาถูก

### **สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM)**

ยาง EPM และ EPDM มีความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้องค่อนข้างต่ำกว่ายางชนิดอื่นประมาณ 0.86-0.87 g/cm<sup>3</sup> และมีค่าของอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วประมาณ -60 °C

#### **ความยืดหยุ่น (elasticity)**

ยาง EPDM มีความยืดหยุ่นสูงกว่ายางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ แต่ยังต่ำกว่ายางธรรมชาติ

#### **ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength)**

เนื่องจากการจัดเรียงตัวของมอนอเมอร์ในสายโซ่โมเลกุลเป็นแบบไม่มีความสม่ำเสมอ ทำให้ได้พอลิเมอร์แบบอสัณฐาน ยางชนิดนี้จึงไม่สามารถตกผลึกได้ ส่งผลให้ยางมีค่าความทนทานต่อแรงดึงค่อนข้างต่ำและต้องอาศัยการเติมสารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย โดยค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางที่ได้รับการเสริมแรงจะสูงหรือต่ำมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารตัวเติมที่ใช้

#### **ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength)**

เมื่อได้รับการเสริมแรงด้วยสารตัวเติมที่เหมาะสม ยาง EPDM จะมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดสูง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงๆ ยางชนิดนี้จะมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ

#### **Compression set**

ยาง EPDM มีค่า Compression set ต่ำมาก โดยเฉพาะในยางประเภทที่มี ENB ในปริมาณที่สูงและได้รับการคงรูปด้วยระบบเพอร์ออกไซด์หรืออาจคงรูปด้วยระบบ กำมะถันที่มีการใช้ตั้งเร่งปฏิกิริยาที่ความว่องไวสูงๆ แต่ว่าค่า Compression set ของยางที่คงรูปด้วยระบบเพอร์ออกไซด์จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่ค่า Compression set ของยางที่คงรูปด้วยระบบกำมะถันจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น



### สมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties)

ยาง EPDM มีสมบัติเชิงพลวัตที่ดีมากและมีความทนทานต่อความล้าสูง โดยเฉพาะในยางที่ได้รับการคงรูปด้วยระบบกำมะถันซึ่งมีสมบัติเชิงพลวัตใกล้เคียงกับยาง SBR

### ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (aging properties)

ยาง EPDM มีพันธะคู่ในโมเลกุลน้อยมาก ดังนั้น ยางชนิดนี้จึงทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาพอากาศ ออกซิเจน โอโซน แสงแดด และความชื้นได้ดีเป็นอย่างดี ซึ่งดีกว่ายาง SBR และ NBR แต่ดีน้อยกว่ายางซิลิโคนนอกจากนี้ ยาง EPDM ยังทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากสารเคมี กรด และด่างได้ดีอีกด้วย ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณไดอินที่มีอยู่ในโมเลกุล ยาง EPDM ประเภทที่มีไดอินต่ำจะมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพสูง (จึงไม่จำเป็นต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ) แต่ว่ายางประเภทที่มีไดอินค่อนข้างสูงอาจจำเป็นต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจนและแสงแดดลงไปด้วย อย่างไรก็ตาม ยางชนิดนี้ทุกประเภทมีความทนทานต่อโอโซนดีมาก จึงไม่จำเป็นต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antiozonants) ลงไป ส่วนระบบการคงรูปก็มีผลกระทบโดยตรงต่อความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความชื้นและโอโซนของยาง เพราะยางที่คงรูปด้วยระบบเพอร์ออกไซด์จะมีความทนทานต่อความชื้นและโอโซนสูงกว่ายางที่คงรูปด้วยกำมะถัน

### ความทนทานต่อน้ำมันและสารเคมี (oil and chemical resistance)

จากลักษณะโครงสร้างของโมเลกุล จะเห็นว่ายาง EPM และ EPDM เป็นยางไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางจึงไม่ทนต่อน้ำมันหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วเช่นเดียวกับยางธรรมชาติและยาง SBR แต่จะทนต่อตัวทำละลายที่มีขั้วได้ดี ยางชนิดนี้จึงทนต่อกรด ด่าง ออกกอลฮอลล์ น้ำ น้ำมันไฮดรอลิก และตัวทำละลายที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบได้เป็นอย่างดี มีความทนทานต่อน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ได้ปานกลาง แต่ไม่ทนต่อตัวทำละลายที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบกรดอินทรีย์เข้มข้น ตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรง (aliphatic hydrocarbon solvents) และตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนวงแหวน (aromatic hydrocarbon solvents) เป็นต้น

### ความเป็นฉนวน (insulation)

จะเห็นว่ายางชนิดนี้มีค่าความต้านไฟฟ้าจำเพาะสูงมาก ดังนั้นยางจึงมีความฉนวนสูงและยังสามารถรักษาสมบัติความเป็นฉนวนได้ดีแม้ที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ ยางชนิดนี้ยังดูดซึมน้ำได้

น้อยมาก จึงเหมาะสำหรับใช้ในการผลิตยางหุ้มสายเคเบิลในกรณีที่สายเคเบิลนั้นต้องสัมผัสกับน้ำ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยาง EPM กับยาง EPDM พบว่ายาง EPM มีความเป็นฉนวนสูงกว่ายาง EPDM เล็กน้อย

### การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature flexibility)

ยาง EPDM มีสมบัติด้านการหักงอที่อุณหภูมิต่ำได้ดีใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ

### อุณหภูมิของการใช้งาน (service temperature)

ยาง EPDM ที่ได้รับการคงรูปด้วยกำมะถันจะมีอุณหภูมิสูงสุดในการใช้งานต่ำกว่ายางที่ได้รับการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์ โดยทั่วไป ยาง EPDM สามารถนำไปใช้ได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่  $-40^{\circ}\text{C}$  ถึง  $150^{\circ}\text{C}$  ปกติยางจะทนต่ออุณหภูมิที่  $165^{\circ}\text{C}$  ได้นาน 1 เดือน หรือที่  $125^{\circ}\text{C}$  ได้นาน 1 ปี และที่  $100^{\circ}\text{C}$  ได้นาน 5 ปี ทั้งนี้สมบัติความทนทานต่อความร้อนของยางยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ ด้วยเช่นการเลือกใช้ชนิดของสารป้องกันเสื่อมสภาพและปริมาณของไดอินในยาง เป็นต้น

### การปรับปรุงสมบัติของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอิน (EPDM)

ยาง EPDM สามารถคงรูปได้โดยใช้เพอร์ออกไซด์หรือใช้กำมะถันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสูง อย่างไรก็ตาม หากต้องการคงรูปยางโดยใช้ระบบเพอร์ออกไซด์ ยาง EPDM ที่ใช้เป็นประเภทที่มีสัดส่วนของพอลิเอทิลีนสูง เพราะหมู่เมทิลในพอลิโพรพิลีนจะไปขัดขวางการเชื่อมโยงด้วยเพอร์ออกไซด์ ในทางตรงข้าม มันจะทำให้เกิดการตัดสายโซ่ของโมเลกุลแทน ดังนั้นยางประเภทที่เหมาะสมสำหรับการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์จึงมีปริมาณพอลิเอทิลีนสูงกว่า 50% โมล นอกจากนี้ ชนิดของไดอินในโมเลกุลก็มีผลกระทบต่ออัตราเร็วในการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์เช่นกัน เพราะยาง DCP-EPDM จะมีอัตราเร็วในการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์สูงกว่ายาง ENB-EPDM แม้ว่ายางชนิดนี้จะมีอัตราเร็วในการคงรูปด้วยกำมะถันต่ำกว่าก็ตาม

การคงรูปยาง EPM หรือยาง EPDM ด้วยเพอร์ออกไซด์จำเป็นต้องมีการเติมสารกระตุ้นลงไปด้วยเล็กน้อยเพื่อเพิ่ม ความหนาแน่นของการเชื่อมโยง โดยสารกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการแตกตัวของ เพอร์ออกไซด์ จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องต่างๆมากมาย สารกระตุ้นที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ กำมะถัน สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกตัวให้กำมะถัน อะโครเลต และควิโนน เป็นต้น

สำหรับการคงรูปด้วยระบบกำมะถันปริมาณของกำมะถันและสารตัวเร่งที่ใช้จะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของไดอีนที่มีอยู่ในโมเลกุล สำหรับยาง ENB-EPDM ส่วนใหญ่แล้ว นอกจากจะใช้กำมะถัน หรือสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกตัวให้กำมะถัน ประมาณ 0.2 ถึง 2.0 phr นอกจากนี้หากต้องการให้ยางเกิดการคงรูปได้เร็วและมีระดับการคงรูปสูงก็ไม่ควรใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงตัวเดียว แต่ควรใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาหลายตัวร่วมกัน ได้แก่ กลุ่มไฮอะไซด์ กลุ่มไฮยูเรม และกลุ่มไดไฮโอคาร์บาเมต ปัญหาที่มักพบในยาง EPDM คือ ปัญหาเรื่องการบวมมาที่พื้นผิวของสารตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆซึ่งหากเกิดปัญหาเรื่องการบวมและทำการปรับลดปริมาณของสารตัวเร่งปฏิกิริยานั้นๆ ให้อยู่ในระดับที่ก่อให้เกิดปัญหา

โดยทั่วไปยาง EDPM มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพดีอยู่แล้วจึงไม่จำเป็นต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลงไป อย่างไรก็ตามในกรณีที่ใช้ยางที่มีปริมาณไดอีนสูงๆ และต้องการให้ยางคงรูปที่ได้มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพสูงมากๆ ก็สามารถเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่เป็นอนุพันธ์ในรูปของเอมีนลงไปได้

นอกจากสารตัวเสริมแรงที่ใช้กันโดยทั่วไปแล้ว ในบางครั้งการใช้ calcined clay หรือ  $\text{CaCO}_3$  เป็น สารตัวเติมก็ก่อให้เกิดผลดีหลายประการ กล่าวคือ นอกจากจะช่วยลดต้นทุนการผลิตแล้ว ยังช่วยปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปของยางคอมพาวนด์อีกด้วย สารตัวเติมทั้งสองชนิดดังกล่าวสามารถกระจายตั้งในยางได้ง่าย ราคาถูก และไม่มีผลต่อการคงรูปของยาง นอกจากนี้ calcined clay ยังช่วยให้ยางคงรูปที่ได้มีการดูดซึมน้ำต่ำซึ่งเป็นสมบัติที่จำเป็นสำหรับการทำปลอกหุ้มสายเคเบิลอีกด้วย ส่วน hard clay ไม่นิยมนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางชนิดนี้ เพราะแม้ว่าสารตัวเติมชนิดนี้จะช่วยเสริมแรงในยาง แต่ว่ามันจะทำให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูปของยางลดลง

ยาง EPDM ประเภทที่มีสัดส่วนของเอทิลีนสูงสามารถตกผลึกได้น้อย จึงส่งผลให้ยางมีความแข็งแรงในสภาพที่ไม่คงรูปสูง สามารถเติมน้ำมันและสารตัวเติมได้มาก ซึ่งในบางครั้งอาจเติมสารตัวเติมได้มากถึง 2 เท่าของปริมาณยางที่ใช้ (200phr) จึงนับว่าเป็นจุดเด่นของยางชนิดนี้ อย่างไรก็ตามยางประเภทที่มีปริมาณเอทิลีนสูงก็มีข้อเสียคือการบดผสมยางที่อุณหภูมิต่ำจะทำได้ยากและสมบัติของยางที่อุณหภูมิต่ำจะไม่ดี เพราะเมื่ออุณหภูมิต่ำลง อัตราการตกผลึกของยางก็จะเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ยางสูญเสียความยืดหยุ่นไปอย่างรวดเร็ว สำหรับกรณีที่ต้องการทำการผสมยางสูตรที่มีปริมาณสารตัวเติมสูงๆก็ควรใช้เทคนิคการผสมแบบกลับด้าน (upside-downmixing technique)

## การปรับปรุงสมบัติของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ

ยาง EDPM สามารถนำไปผสมกับยางชนิดอื่นๆ ได้อย่างหลากหลาย ส่วนใหญ่แล้วมักนำยาง EDPM ไปผสมกับยางไดอีน เช่น ยางธรรมชาติ IR SBR BR และ NBR โดยใช้ยาง EDPM ประมาณ 30% โดยน้ำหนักเพื่อปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากโอโซนของยางไดอีน อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับยางไดอีน ยาง EDPM มีพันธะคู่อยู่น้อยและคงรูปได้ช้ากว่า ดังนั้น การนำยางไดอีนมาผสมกับยาง EDPM จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงการคงรูปด้วยไม่เช่นนั้นยางอาจเกิดการแยกเฟสหรือยางผสมที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ไม่น่าพอใจ โดยทั่วไป ยาง EDPM ที่ใช้ในการผสมควรเป็นยาง ENB-EDPM ประเภทที่มีปริมาณ ENB สูง เพราะทำให้ยางคงรูปได้เร็ว และควรใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาคงรูปสูงหรืออาจใช้เพอร์ออกไซด์ในการคงรูป การนำยาง EDPM มาผสมกับยาง NBR จะทำให้ได้ยางผสมที่สามารถทนน้ำมันและทนต่อสภาพอากาศได้ดี ซึ่งสามารถไปใช้แทนยาง CR ได้

ยาง EPDM อาจถูกเติมน้ำมันเข้าไปในกระบวนการผลิตได้ปริมาณค่อนข้างมาก (15-100%) เพื่อทำเป็น oil-extended EPDM และน้ำมันที่เหมาะสมได้แก่ น้ำมันแนฟทีนิกที่มีความหนืดปานกลาง นอกจากนี้ยังสามารถทำยาง EPDM ให้มีสีตามความต้องการได้โดยเติมสารสี (pigments) และถ้าต้องการการเสริมแรงก็อาจใส่คาร์บอนแบล็ก หรืออนอนแบล็ก (nonblack) เข้าไป ซึ่งมีผลทำให้ยางมีความต้านทานการขาดฉีกมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบกับยาง EPDM กับยางไดอีนชนิดอื่นๆ พบว่า ยาง EPDM มีความอึดตัวมากกว่า ดังนั้นจึงต้องปรับสูตรสารประกอบยางใหม่เพื่อให้เกิดการวัลคาไนซ์เร็วขึ้น การใช้ยาง EPDM ร่วมกับยางไดอีนชนิดอื่นๆ แต่การใช้สูตรสารประกอบของยาง EPDM อาจทำให้เกิดการบ่มเกินขนาดกับยางไดอีนที่ผสมเข้าไปในทางกลับกัน ถ้าใช้สูตรสารประกอบของยาง SBR หรือยาง NBR จะมีผลทำให้ยาง EPDM ถูกบ่มไม่เต็มที่ อย่างไรก็ตาม การนำยางมาผสมกันยังเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อที่จะได้ยางที่มีสมบัติเฉพาะหลายๆอย่างรวมกัน ซึ่งไม่อาจมีได้ครบในยางชนิดใดชนิดหนึ่ง เช่น การผสมยาง NBR ซึ่งมีความต้านทานน้ำมันกับยาง EPDM :ซึ่งมีความต้านทานโอโซน อัตราการบ่มยาง EPDM และยาง NBR สามารถปรับให้สมดุลได้โดยใช้สารเร่งวัลคาไนซ์แบบห่วงโซ่เข้าไปในสูตรสารประกอบยาง หรืออาจปรับปรุงโดยการเพิ่มความไม่อึดตัวเข้าไปในยาง EPDM ด้วยการเพิ่มปริมาณไดอีนจาก 4-5 % ไปเป็น 10 %

ยาง EPM หรือยาง EDPM ประเภทที่มีปริมาณไดอีนต่ำ สามารถนำไปผสมกับพอลิเมอร์ที่ไม่มีพันธะคู่ได้ เช่น การผสมยางยาง EDPM กับพอลิไอโอเลฟิน เช่น พอลิโพรพิลีน ได้เป็นยาง

เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic elastomer, TPE) ซึ่ง TPE ที่ได้นี้จะมีสมบัติคล้ายยางแต่จะมีกระบวนการขึ้นรูปเหมือนพลาสติกและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ (recycle) ได้

### การใช้งาน

ยาง EDPM ส่วนมากนิยมใช้ในการผลิตยางขึ้นส่วนรถยนต์ เช่น ยางขอบหน้าต่าง ยางขอบประตู แก้มยางรถยนต์ ท่อยางของหม้อน้ำรถยนต์ (radiator hose) เป็นต้น ยาง EDPM ยังถูกใช้ในการผลิตท่อยางของเครื่องซักผ้า สายพานลำเลียง แผ่นยางกันน้ำ แผ่นยางมุงหลังคา ฉนวนหุ้มสายเคเบิลโดยเฉพาะที่มีความต่างศักย์สูงๆ และใช้ในการผสมกับพลาสติกเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของพลาสติก เช่น เพิ่มความเหนียวและความต้านทานต่อแรงกระแทก (impact resistance) เป็นต้น

## 2.4 สารตัวเติมและสารเสริมแรง (Fillers and Reinforcing Fillers)

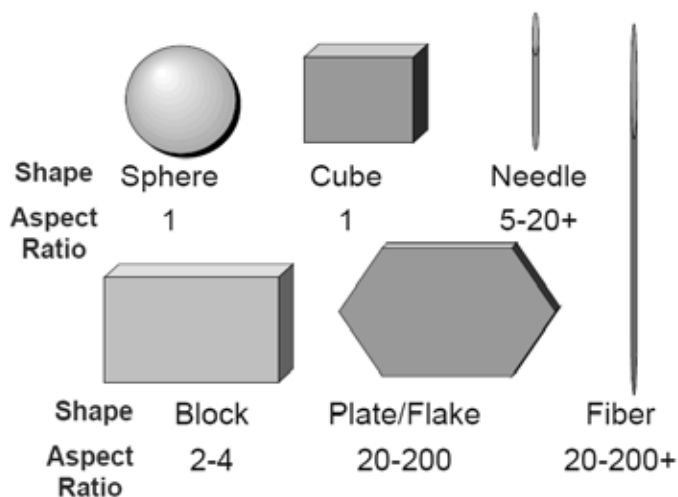
สารตัวเติม หมายถึง สารที่ใส่ลงไปในพอลิเมอร์เพื่อลดต้นทุนในการผลิตหรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ สารตัวเติมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมีหลายชนิด ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เช่น โพลลาสไทน์ ทัลก์ แคลเซียมคาร์บอเนต แก้ว ไมกา และเยื่อไม้ เป็นต้น ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1. สารตัวเติมชนิดไม่ทำปฏิกิริยา (inert filler) หรือสารเพิ่มเนื้อ (extender) ใช้สำหรับลดต้นทุนการผลิต สมบัติที่เปลี่ยนแปลงในเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารตัวเติมชนิดนี้มีหลายประการ เช่น ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น มอดุลัสการยืดตัว ความต้านการกดทับ ความต้านแรงบิดโค้งเพิ่มขึ้น ลดการหดตัว ความแข็งเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการบิดตัว (heat deflection temperature) เพิ่มขึ้น และลดต้นทุนการผลิต เป็นต้น

2. สารตัวเติมชนิดเสริมแรง (reinforcing filler) เป็นสารตัวเติมชนิดที่สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติของพลาสติกผสมให้ดีขึ้นได้ สมบัติที่เปลี่ยนแปลงในเทอร์โมพลาสติกเมื่อผสมตัวเติมชนิดเสริมแรง มีหลายประการ เช่น ความทนแรงดึง ความต้านแรงกดทับ มอดุลัส และการยืดตัวเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการบิดตัวเพิ่มขึ้น ลดการหดตัว เป็นต้น

การนำสารตัวเติมไปใช้งานในอุตสาหกรรมพลาสติกต้องพิจารณาสมบัติที่สำคัญหลายประการเช่น

- ลักษณะอนุภาค (particle shape) อนุภาคของสารตัวเต็มมีรูปร่างต่างๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ได้แก่ ทรงกลม (sphere) ทรงเหลี่ยมลูกบาศก์ (cube) บล็อก (block) แผ่นหรือเกล็ด (plate or flake) เส้นใย (fiber) แบบเข็มหรือแท่ง (needle or acicular) โดยมีค่าอัตราส่วนความยาวต่อความหนาของอนุภาค (aspect ratio) แตกต่างกันไปซึ่งจะมีอิทธิพลต่อสมบัติของวัสดุคอมพอสิตมาก



รูปที่ 2.7 รูปร่างของอนุภาคสารตัวเต็ม

- การกระจายขนาดอนุภาค (particle size distribution) มีอิทธิพลต่อสมบัติของพลาสติก สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน จะวัดโดยใช้ตะแกรงร่อน ถ้ามีอนุภาคขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน จะวัดโดยวิธีการตกตะกอน

- พื้นที่ผิว (surface areas) เนื่องจากการยึดเกาะระหว่าง 2 วัสดุ คือ พอลิเมอร์ และสารตัวเต็มจะเกิดขึ้นที่ผิว ดังนั้น หากพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจะทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตสูงขึ้นด้วย ซึ่งสามารถวัดพื้นที่ผิวได้โดยใช้หลักการดูดซับแก๊สไนโตรเจน ตามวิธีบลูว์นอร์-เอ็มเม็ท-เทลเลอร์ (BET)

- การจัดเรียงตัวของอนุภาค (particle packing) เป็นความสามารถในการจัดเรียงของอนุภาคในวัสดุคอมพอสิต โดยจะพิจารณาในรูปของสัดส่วนการรวมตัว (packing fraction) ซึ่งได้แก่ ปริมาตรทั้งหมดที่สารตัวเต็มใช้ในการจัดเรียงตัวในปริมาตรของพอลิเมอร์เมื่อปริมาณสารตัวเต็มที่ใช้สูงสุด ดังนั้น สารตัวเต็มที่มีค่าสัดส่วนการรวมตัวสูงแสดงว่ามีพอลิเมอร์แทรกอยู่ระหว่างอนุภาคของสารตัวเต็มมาก การสัมผัสกันของอนุภาคต่ำ ซึ่งทำให้วัสดุคอมพอสิตมีสมบัติเชิงกลดี

- ส่วนประกอบทางเคมี (chemical composition) เป็นสมบัติที่สำคัญและมีอิทธิพลต่อสมบัติของวัสดุคอมพอสิตที่ทำการขึ้นรูป

สารตัวเติมที่ได้จากแร่ธาตุ (mineral fillers) ในธรรมชาติ ส่วนใหญ่จะมีรูปร่างของอนุภาคแบบเดี่ยว แต่มีบางชนิด เช่น ทัลค์ เคาลิน โดยทั่วไปมีรูปร่างอนุภาคเป็นแบบแผ่นแต่จะมีรูปร่างอนุภาคแบบอื่นปะปนอยู่ด้วย ขึ้นอยู่กับแหล่งวัตถุดิบและกระบวนการผลิต [20]

ผลของการใช้สารตัวเติมที่ได้จากแร่ธาตุขึ้นอยู่กับ

- รูปร่างของอนุภาค (shape)
- ขนาดของอนุภาค (size)
- พื้นที่ผิวของอนุภาค (surface area)
- ความเข้ากันได้ของอนุภาคสารตัวเติมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์

ตาราง 2.1 การใช้สารตัวเติมที่ได้จากแร่ธาตุในอุตสาหกรรมพลาสติก

สารตัวเติมจากแร่ธาตุ	พอลิเมอร์	หมายเหตุ
แบไรต์ (Barytes)	PU	ช่วยเพิ่มความถ่วงจำเพาะ
แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate)	PVC, ABS, fluoroplastics, polyolefins, PP, PS, epoxy, phenolic, TPE, PU	เป็นสารตัวเติมที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย
เฟลด์สปาร์ (Feldspar)	PVC, acrylic, PP, PS, epoxy	ทนทานต่อสภาพอากาศและสารเคมี
เคาลิน (Kaolin)	TPE, nylon, polyolefins, PU, PVC	ใช้งานมากที่สุดในการทำสายไฟ และสายเคเบิล
ไมกา (Mica)	PP, ABS, fluoroplastics, nylon, PC, TPE, polyolefins, thermosets	มีเสถียรภาพทางรูปร่าง ช่วยในการเสริมแรงได้

สารเสริมแรงบางชนิดสามารถเกิดพันธะทางเคมีกับพอลิเมอร์ได้ ซึ่งจะช่วยให้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น มีการเคลื่อนที่ของสายโซ่น้อยลง เกิดการจัดเรียงตัวที่บริเวณพื้นผิวของสารตัวเติมมากขึ้น

มีผลทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้น้อยลง มีความแข็งตึง ความแข็งแรง และอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วเพิ่มขึ้น

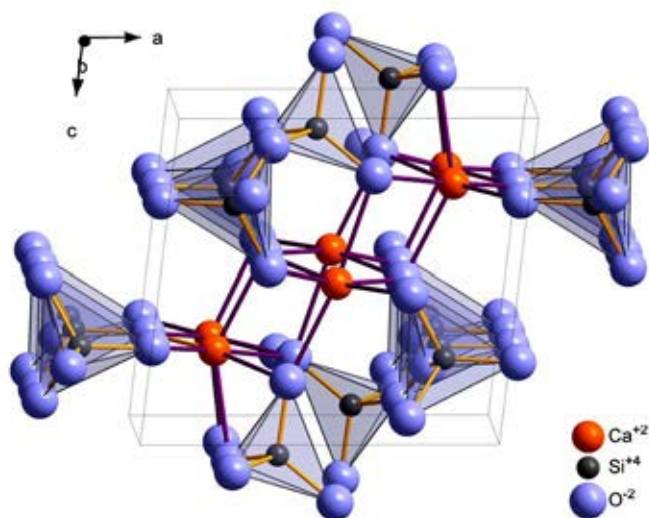
ผลของสารเสริมแรงที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของสารตัวเติม ขนาด และกระจายขนาดของอนุภาค การเตรียมพื้นผิว การกระจายตัวของสารตัวเติม โดยที่พื้นที่ผิวของสารตัวเติมจะมีผลต่อการยึดติดกับพอลิเมอร์ ส่วนขนาด รูปร่าง และชนิดของสารตัวเติม จะมีผลต่อการกระจายตัว และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารตัวเติม และพอลิเมอร์ อัตราการไหล การเตรียมพื้นผิวของสารตัวเติม ลักษณะของเครื่องมือที่ใช้ในการผสม ภาวะที่ใช้ในการผสม ขนาดอนุภาคของสารตัวเติม และความเป็นรูปแบบเดียวกันของสารตัวเติม จะมีผลต่อระดับการกระจายตัวของสารตัวเติมในพอลิเมอร์

การขัดถูที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตจะทำให้เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตเกิดความเสียหาย สมบัติด้านการขัดถูของตัวเติมจะขึ้นอยู่กับความหยาบของพื้นผิวอนุภาค และค่าความแข็งของสารตัวเติม โดยที่ความสามารถในการขัดถูของสารตัวเติมจะลดน้อยลงที่สุด เมื่อสารตัวเติมมีขนาดอนุภาค 325 เมช และค่าความแข็งของทัลค์ เคาลิน และแคลเซียมคาร์บอเนต จะน้อยกว่าโวลลาสโทไนต์ ซิลิกา และเฟลด์สปาร์

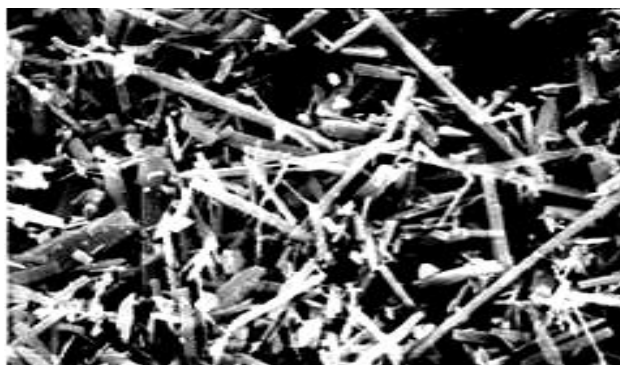
## 2.4 โวลลาสโทไนต์ (Wollastonite) [11,13-24]

โวลลาสโทไนต์เป็นแร่ประเภทแคลเซียมซิลิเกตที่เกิดในธรรมชาติ ซึ่งประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 48.28 และซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) ร้อยละ 51.72 โดยมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.8 โวลลาสโทไนต์ที่พบในธรรมชาติจะมีสีขาว ซึ่งเกิดจากการเกาะกลุ่มของผลึกรูปเข็ม (needle-shaped crystal) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (aspect ratio) อยู่ในช่วง 3-20 มีความถ่วงจำเพาะ 2.9 มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 9.9 และความแข็ง 4.5 (Moh's hardness) [24]





รูปที่ 2.8 โครงสร้างของไวลลาสไทต์ [22]



รูปที่ 2.9 โครงสร้างผลึกรูปเข็มของไวลลาสไทต์ [22]

ไวลลาสไทต์ที่พบในธรรมชาติมักมีสารปนเปื้อนประเภทไอออนของโลหะ เช่น อะลูมินา เหล็ก แมกนีเซียม โปแทสเซียม และโซเดียมปนอยู่ นอกจากนี้ ไวลลาสไทต์มักเกิดร่วมกับแร่แคลไซต์ การันเนต และไดออปไซด์ ซึ่งจะถูกกำจัดออกไปในระหว่างกระบวนการผลิต การเกิดไวลลาสไทต์นั้นสามารถเกิดได้ทั่วไปบนผืนโลก โดยจะเกิดแทรกอยู่ในพวกหินอัคนี พบได้มากที่ประเทศโรมาเนีย อิตาลี นอร์เวย์ ฟินแลนด์ เยอรมัน อเมริกา สเปน จีน แคนาดา และเม็กซิโก

ไวลลาสไทต์เป็นสารตัวเดิมที่มีการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากช่วยเพิ่มสมรรถนะให้กับผลิตภัณฑ์หลายๆ ชนิด ทั้งในด้านอุตสาหกรรมพลาสติก สีและสารเคลือบผิว วัสดุก่อสร้าง อุปกรณ์ขัดถู เซรามิก และการถลุงแร่

ปัจจุบันได้มีการนำไวลลาสไทต์มาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมพลาสติกโดยการนำไวลลาสไทต์ชนิดที่มี aspect ratio สูง (10-20) มาใช้เป็นสารเสริมแรงแทนการ

ใช้เส้นใยแอสเบสทอส (asbestos) อย่างกว้างขวางทั้งในอุตสาหกรรมเทอร์โมพลาสติก และเทอร์โมเซตพลาสติก เพื่อปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์พลาสติกโดยอาศัยสมบัติของแร่อนินทรีย์ในการเพิ่มสมบัติเชิงกล เสถียรภาพทางความร้อน และความคงรูป เป็นต้น นอกจากนี้ การใช้โวลลาสโทไนต์ที่มีอนุภาคละเอียดมากๆ จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความต้านทานการขีดขูด และความทนแรงกระแทกสูงกว่าวัสดุอื่นๆ รวมทั้งโวลลาสโทไนต์ยังมีราคาถูกมากเมื่อเทียบกับสารอนินทรีย์บางชนิด

โวลลาสโทไนต์นิยมนำมาใช้เตรียมวัสดุคอมพอสิต เนื่องจากโวลลาสโทไนต์มีลักษณะเป็นผลึกรูปเข็ม นอกจากนี้ ยังช่วยปรับปรุงสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้า ความทนความร้อน และทำให้พลาสติกมีความเสถียรภาพทางขนาดมากขึ้น โวลลาสโทไนต์ที่มีขนาดอนุภาคละเอียดมากจะช่วยปรับปรุงเรื่องความทนทานต่อการขีดขูดและการกระแทกได้ดี นอกจากนี้ การปรับสภาพพื้นผิวของโวลลาสโทไนต์ด้วยสารเคลือบที่มีชนิดและความเข้มข้นเหมาะสม จะทำให้โวลลาสโทไนต์เกิดหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์มากขึ้น ทั้งยังช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกล และทำให้โวลลาสโทไนต์สามารถกระจายตัวได้ดีมากขึ้นอีกด้วย

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

สำหรับสีและสารเคลือบผิว อนุภาคที่ละเอียดของโวลลาสโทไนต์ช่วยทำให้การทาสีมีความราบเรียบมากขึ้น และช่วยให้สีที่ทามีความหนาสม่ำเสมอ นอกจากนี้ การที่ผลึกของโวลลาสโทไนต์มีลักษณะเป็นรูปเข็มทำให้เกิดการสานกันเป็นร่างแหที่แข็งแรง ซึ่งจะช่วยปรับปรุงความเหนียว และความคงทนของสารเคลือบผิว ช่วยป้องกันเรื่องคราบ รอยขีดขูด สิ่งสกปรกและอากาศที่แปรปรวน นอกจากนี้ยังช่วยให้สีมีความขาว และสว่างขึ้น จึงช่วยลดปริมาณการใช้สี และเนื่องจากโวลลาสโทไนต์ไม่ค่อยดูดซึมน้ำมันเข้าไปในอนุภาค ทำให้ลดปริมาณสารยึดที่ต้องใช้ลงไป เป็นการลดต้นทุนลงได้

เนื่องจากโวลลาสโทไนต์มีสมบัติละลายน้ำได้ต่ำมาก และมีค่าการจุดติดไฟต่ำ ดังนั้น จึงมีการเติมโวลลาสโทไนต์ลงไปในการเชื่อมและหลอมเหล็ก เพื่อช่วยดูดซับอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) นอกจากนี้ การเติมโวลลาสโทไนต์ยังช่วยทำให้อุณหภูมิการหลอมต่ำลง

โวลลาสโทไนต์สามารถนำมาใช้ได้ทั้งในเนื้อดิน และในสีเคลือบของเซรามิก โลหะเคลือบ และพริต เป็นแหล่งให้แคลเซียมออกไซด์ในเคลือบซึ่งจะช่วยปรับปรุงค่าความแข็งแรงของเคลือบ

เนื่องจากโวลลาสโทไนต์มีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด (Limiting Oxygen Index) ต่ำมาก ดังนั้น การใช้งานในเคลือบจะทำให้ผิวเคลือบมีความเรียบกว่าการใช้แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) และทำให้มีรูเข็มลดลง สามารถใช้เป็นตัวช่วยหลอมได้ถ้าใส่ในปริมาณไม่สูงนัก แต่ถ้าใส่ปริมาณมากจะตกผลึกเป็น  $\text{CaSiO}_3$  ทำให้ผิวเคลือบด้าน เนียน สวยงาม และทำให้เกิดความต้านทานการขีดขีดได้ดี

ในอุตสาหกรรมผ้าเบรก โวลลาสโทไนต์จะถูกนำมาใช้เป็นสารเสริมแรง เนื่องจากสมบัติด้านการคงรูปที่ดี และไม่เป็นพิษ ไม่มีอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม โดยมาใช้แทนใยหิน และเส้นใยสังเคราะห์อื่น ๆ ในการทำวัสดุประเภทที่ไม่มีแร่ใยหินในผ้าเบรก และกระดาษทราย

โวลลาสโทไนต์ถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมเซรามิกและการเคลือบผิว ปัจจุบันได้มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก เนื่องจากโวลลาสโทไนต์ มีสมบัติเป็นสารคู่ควบและเป็นสารตัวเติมที่มีราคาถูกสำหรับพอลิเมอร์ สมบัติโดยทั่วไป คือ ดูดซึมความชื้นต่ำ มีสีขาวไปจนถึงสีเหลืองน้ำตาล มีความต้านทานไฟฟ้าได้ดีเยี่ยม มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ และมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง การใช้งานสามารถใช้ได้ทั้งกับเทอร์โมพลาสติก เทอร์โมเซตพลาสติก และอีลาสโตเมอร์

โวลลาสโทไนต์สามารถนำมาใช้งานแทนแร่ใยหิน เนื่องจากโวลลาสโทไนต์มี aspect ratio สูง (อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างหรือความหนา) ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จากการที่โวลลาสโทไนต์มีอนุภาคเป็นผลึกรูปเข็มทำให้มีสมบัติที่ดีในด้านความแข็งแรง ความหยุ่นตัว และความสม่ำเสมอของขนาดผลิตภัณฑ์

ตาราง 2.2 สมบัติทางกายภาพของโพลลาสโตน [24]

Appearance	White
Morphology	Acicular
Molecular Weight	116
Specific Gravity	2.9
Refractive Index	1.63
pH	9.9
Water Solubility (g/100cc)	0.0095
Density (lbs./cu.ft.)	181
Bulking Value (gal./lbs.)	0.0413
Mohs Hardness	4.5
Coefficient of Expansion (mm/mm/°C)	$6.5 \times 10^{-6}$
Melting Point (°C) - theoretical	1540

การนำโพลลาสโตนมาใช้งานในอุตสาหกรรมพลาสติกจะช่วยปรับปรุงความทนทานของพอลิเมอร์คอมพอสิต เนื่องจากการที่โพลลาสโตนมีอนุภาคเป็นรูปเข็ม นอกจากนี้ โพลลาสโตนยังช่วยเพิ่มสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้า ด้านทานการตีไฟ การใช้โพลลาสโตนประเภทที่มีอนุภาคละเอียดมากๆ จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความต้านทานการขีดขูด และความทนแรงกระแทกสูงกว่าการใช้วัสดุอื่นๆ

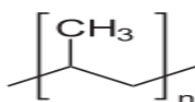
ตารางที่ 2.3 การใช้โพลีเอสเตอร์ในอุตสาหกรรมพลาสติก [22]

การใช้งาน	สมบัติ
Molded/plated nylon	เพิ่มความแข็งแรงและช่วยลดต้นทุนการผลิต
Friction products	ทดแทนการใช้แร่ใยหิน ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล เพิ่มความแข็งแรง และความต้านทานความร้อน
Molded epoxy	การขยายตัวทางความร้อนต่ำ และมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี
Automotive undercoat	มีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดี
Molded phenolics	เพื่อลดต้นทุน เพิ่มความแข็งแรง และสมบัติทางไฟฟ้า
Electrical motor commutators	เพื่อสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี และลดต้นทุนการผลิต
Molded rubber	มีสมบัติเชิงกลที่ดีและความต้านทานสารเคมี
Polyester sanitary fixtures	ให้ลักษณะพื้นผิวที่สวยงาม และความแข็งแรง

## 2.6 พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์

### 2.6.1 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene)

พอลิโพรพิลีนเตรียมจากแก๊สโพรพิลีนด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบโคออร์ดิเนชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์-นัตตา (Ziegler-Natta Catalyst) ในการเตรียมพอลิโพรพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีโครงสร้างแบบไอโซแทกติกสูงถึง 95-99% รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างทางเคมีของพอลิโพรพิลีน



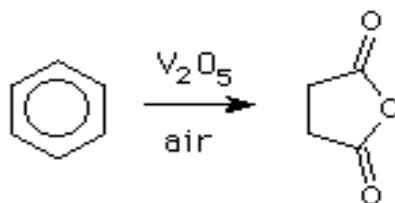
รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของพอลิโพรพิลีน

ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีโครงสร้างเชิงเส้นตรงโดยตลอดปราศจากสาขาโซ่กิ่ง มีความเป็นผลึกสูง มีจุดหลอมตัว 165 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นเพียง 0.905 กรัม/ซม<sup>3</sup> และเนื่องจากมีความเป็นผลึกสูงทำให้พอลิเมอร์นี้มีสมบัติเชิงกลที่ดีมาก เหนียว แข็งแกร่ง อุดมภูมิหลอมตัวสูงกว่าพอลิเอทิลีน ทำให้พอลิโพรพิลีนเหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า ยังคงรักษาความแข็งแรงและรูปทรงไว้ได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 140 องศาเซลเซียส พอลิโพรพิลีนไม่ละลาย

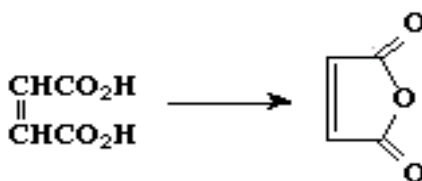
ได้ในตัวทำละลายใดๆ ณ อุณหภูมิห้อง แต่ละลายในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนและคลอริเนเตดไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียส สามารถทนกรดและเบสได้ดี รวมทั้งเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีทั่วไป

### 2.6.2 มาเลอิกแอนไฮไดรด์

มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารอินทรีย์ มีสูตรเคมี  $C_2H_2(CO)_2O$  สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเบนซีน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 นอกจากนี้ ยังสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของบิวทีน [13] ดังแสดงในรูปที่ 2.12 สมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์แสดงไว้ในตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.11 การสังเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเบนซีน [2]

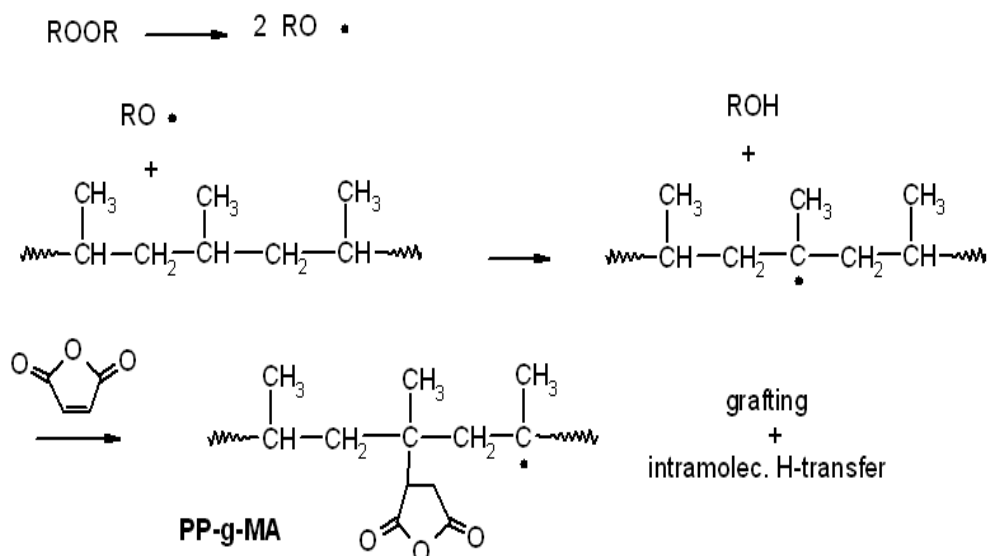


รูปที่ 2.12 การสังเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของบิวทีน [5]

ตาราง 2.4 สมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ [5]

Molar mass	98.06 g/mol
Appearance	White crystals
Density	1.48 g/cm <sup>3</sup>
Melting point	52.8 °C

การสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ สามารถทำได้หลายกระบวนการ ทั้งกระบวนการแบบสารละลายและกระบวนการแบบหลอมเหลว โดยกระบวนการแบบหลอมเหลวสามารถใช้เครื่องมือในการผสมได้หลายประเภท เช่น เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว และเครื่องอัดรีดสกรูคู่ เป็นต้น ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์แสดงไว้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ [5]

## 2.8 การขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ (Injection Molding) [12]

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 ทำให้เกิดความดันขึ้นกับพลาสติกหลอมซึ่งจะผลักวงแหวนกันการไหลกลับ (back flow valve) มาด้านหลังป้องกันไม่ให้พลาสติกหลอมไหลสวนทางกัน

เมื่อพลาสติกถูกฉีดเข้าไปในแม่แบบก็จะเริ่มแข็งตัว เป็นผลมาจากน้ำหล่อเย็นในแม่แบบ ดังนั้น การฉีดจึงต้องทำการฉีดอย่างรวดเร็ว เพื่อให้พลาสติกไหลเข้าเต็มแม่แบบจนเต็ม แล้วต้องรักษาความดันในการฉีด เพื่อผลักดันพลาสติกหลอมชุดใหม่เข้าไปในแม่แบบ เนื่องจากเหตุผลที่ว่าเมื่อพลาสติกสัมผัสกับแม่แบบจะเริ่มแข็งตัว จากด้านนอกเข้าสู่ด้านในของชิ้นงาน ดังนั้น ด้านใน

ของชิ้นงานยังคงไหลได้ในขณะที่ด้านนอกแข็งตัวแล้ว และเมื่อด้านในของชิ้นงานแข็งตัวก็จะหดตัว เป็นผลให้ชิ้นงานเกิดการยุบตัว (sink mark) ซึ่งพลาสติกหลอมชุดใหม่จะเข้าไปซดเซยส่วนที่หดตัว แต่พลาสติกหลอมจะไม่สามารถเข้าไปซดเซยได้จนกว่าพลาสติกบริเวณกรวยนำฉีด (sprue cone) จะแข็งตัว ดังนั้น การออกแบบแม่แบบจึงมักออกแบบให้กรวยนำฉีดอยู่ในบริเวณที่หนาที่สุดของแม่แบบ เพื่อป้องกันไม่ให้พลาสติกแข็งตัวเร็วเกินไป

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

ความดันและเวลาที่ใช้ในขั้นการฉีดแช่อัดจะมีผลต่อความบกพร่องของชิ้นงาน คือ ถ้าใช้ความดันและเวลาที่ใช้ในขั้นการฉีดแช่อัดน้อยเกินไป จะทำให้พลาสติกหลอมเข้าไปซดเซยไม่เพียงพอ จะเกิดการหดตัวของชิ้นงาน แต่ถ้าใช้ความดันในการฉีดแช่อัดมากเกินไปอาจทำให้แม่แบบเสียหายได้ โดยเฉพาะในการขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนด้วยการฉีดแบบจะต้องใช้ความดันในการฉีดสูง เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมักเกิดการยุบตัว ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างมีความเป็นผลึกค่อนข้างสูงนั่นเอง



## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wang และคณะ [26] ศึกษาสมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิเมออร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน โดยการผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนในปริมาณร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดแบบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส พบว่า พอลิเมออร์ผสมมีความทนแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนที่เพิ่มขึ้น โดยเพิ่มสูงสุดที่ปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักเพราะว่าวัสดุที่เป็นยางสามารถกระจายตัวได้ดีในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ และเมื่อปริมาณยางเพิ่มมากขึ้นความทนแรงกระแทกของชิ้นงานมีค่าลดลงเนื่องจากยางเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน ในขณะที่ปริมาณยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ยังไม่เพียงพอที่จะเพิ่มความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีน และปริมาณยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก จะทำให้อุณหภูมิเกิดการเกาะกลุ่มขนาดใหญ่ ส่งผลให้ความทนแรงกระแทกของพอลิเมออร์ผสมลดลง

Meng และ Duo [27] ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีน/โพลีเอทิลีนเทฟทาลอเนตคอมพอสิต โดยทำการผสมโพลีเอทิลีนเทฟทาลอเนตในปริมาณร้อยละ 1, 2.5, 5, 7.5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส แล้วขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดแบบที่อุณหภูมิ 205 องศาเซลเซียส ภายหลังจากทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน พบว่า ผลการทดสอบเป็นไปตามที่คาดไว้ กล่าวคือ ชิ้นงานมีความทนแรงกระแทกและความทนแรงดึงลดลงตามปริมาณโพลีเอทิลีนเทฟทาลอเนตที่เพิ่มขึ้น เพราะแรงยึดเกาะและความเข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรพิลีนกับโพลีเอทิลีนเทฟทาลอเนตต่ำ อย่างไรก็ตาม ยังสัมผัสคุณสมบัติของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณโพลีเอทิลีนเทฟทาลอเนตที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโพลีเอทิลีนเทฟทาลอเนตเป็นสารตัวเติมอนินทรีย์ที่มีความแข็งสูง และจากลักษณะพื้นฐานวิทยาพบว่า เมื่อใส่โพลีเอทิลีนเทฟทาลอเนตปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พื้นผิวรอยแตกหักของชิ้นงานมีลักษณะขรุขระ ซึ่งเป็นลักษณะของความอ่อนเหนียว (ductile) ส่วนชิ้นงานที่ใส่โพลีเอทิลีนเทฟทาลอเนตปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่า พื้นผิวรอยแตกหักมีลักษณะเรียบซึ่งแสดงถึงความเปราะ (brittle) ของชิ้นงาน นอกจากนี้ผลของการวิเคราะห์คอมพอสิตด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี พบว่า ปรากฏพีคของการหลอมเหลว 2 แห่ง ที่อุณหภูมิประมาณ 150 และ 162 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิหลอมเหลวของปีตาและแอลฟาไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ( $\beta$ -iPP และ  $\alpha$ -iPP) ตามลำดับ ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่าโพลีเอทิลีนเทฟทาลอเนตสามารถเหนียวนาให้เกิดปีตาพอลิโพรพิลีนได้

Singh และคณะ [28] ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีน/ยางซิลิโคน/โพลีเอทิลีนไทไบต์ คอมพอสิต โดยทำการผสมยางซิลิโคนที่อัตราร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และโพลีเอทิลีนไทไบต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส และขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดแบบ 190 องศาเซลเซียส หลังจากทดสอบสมบัติทางเชิงกล พบว่า ความทนแรงกระแทกและแรงดึงมีค่าสูงสุดที่ปริมาณยางซิลิโคนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และโพลีเอทิลีนไทไบต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตาม ความทนแรงดัดโค้งมีค่าสูงสุดที่ปริมาณยางซิลิโคนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และโพลีเอทิลีนไทไบต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

Yang และคณะ [29] ศึกษาโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีน ไดอีน/ซิลิกาคอมพอสิต โดยการนำไปผสมเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่อุณหภูมิ 140-210 องศาเซลเซียส และขึ้นรูปด้วยการฉีดแบบที่อุณหภูมิ 180-210 องศาเซลเซียส หลังจากทดสอบสมบัติทางเชิงกลของคอมพอสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับซิลิกาที่อัตราส่วน 1, 2, 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนัก พบว่า มีความทนแรงกระแทกมีค่าลดลงตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความแข็งตัวของอนุภาคซิลิกา อย่างไรก็ตาม ความทนแรงดึงและทนแรงดัดโค้งมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะซิลิกาทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนที่อัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่า ความทนแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนที่เพิ่มขึ้น แต่ความทนแรงดึงและความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลง ในขณะที่สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตระหว่างพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/ซิลิกา พบว่าความทนแรงกระแทกที่ปริมาณยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักและปริมาณซิลิกาอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักมีค่าสูงสุด

Bikaris และคณะ [25] ศึกษาผลของการใช้สารควบพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ต่อสมบัติของพอลิโพรพิลีน/ซิลิกาคอมพอสิต โดยทำการผสมซิลิกาที่อัตราส่วนร้อยละ 1, 2.5, 5, 7.5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก และพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่อัตราส่วน 1, 2.5 และ 5 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส ตามด้วยการขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดแบบที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส หลังจากการทดสอบสมบัติทางเชิงกลพบว่า ความทนแรงดึง และยังมีสมบัติมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณซิลิการ้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าสูงที่สุด หลังจากนั้นค่าลดลงเนื่องจากการเกาะเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เกิดจุดบกพร่อง และที่ปริมาณพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จะมีค่าสูงสุด เพราะว่าหมู่มาเลอิกแอนไฮไดรด์ช่วยให้ซิลิกาเกิดการกระจายตัวและไม่จับตัวเป็นกลุ่มก้อน และเพิ่มแรงดึงผิว อย่างไรก็ตาม ความทนแรงกระแทกมีค่าลดลง ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งดึงเพิ่มขึ้น และเมื่อได้รับแรงกระแทกชิ้นงานจะเกิดการแตกได้ง่าย



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

##### 3.1.1 วัสดุ

1. พอลิพรอพิลีน (EL-Pro P702J) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) (SCG Co., Ltd) มีดัชนีหลอมไหล 12 กรัม/10 นาที
2. ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (Nordel 4770) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เคมีคอลอินโนเวชั่น จำกัด (Chemical Innovation Co., Ltd.)
3. โพลลาสโตน (XYNFW-XA 1200 mesh) จากบริษัท แปซิฟิก คอมมา เทรดดิ้ง จำกัด (Pacific Comma Trading Co., Ltd.)
4. พอลิพรอพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Fusabond 512d) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เคมีคอลอินโนเวชั่น จำกัด (Chemical Innovation Co., Ltd.) มีดัชนีหลอมไหล 115 กรัม/10 นาที ความหนาแน่น 0.95 กรัม/มิลลิลิตร

##### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นทดสอบ

1. เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) รุ่น LabTech type LE25-30C
2. เครื่องฉีดแบบ (injection molding machine) รุ่น Toshiba machine EC 130S (บริษัท เคมีคอล อินโนเวชั่น จำกัด)

##### 3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของ Jeol รุ่น JSM 5800 LV
2. เครื่องวิเคราะห์หีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) ของ Perkin-Elmer รุ่น DSC 7
3. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (Thermogravimetric Analyzer, TGA) ของ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA 851°

4. เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine) ของ LLOYD รุ่น LR100K
5. เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine) ของ LLOYD รุ่น 500
6. 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 ยางเอทีลีนโพรพิลีนไดอีน และโพลลาสโตนีต์มาผสมตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.1 ทำการเขย่าให้เข้ากัน แล้วนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปผ่านเข้าเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (รูปที่ 3.2) โดยใช้อุณหภูมิในการผสมของโซนต่างๆ ดังนี้ 220, 210, 210, 200 และ 190 องศาเซลเซียส ทำการอัดรีดผ่านหัวตายรูปวงกลม โดยใช้ความเร็วรอบสกรู 40 รอบต่อนาที แล้วทำการตัดเม็ดเพื่อใช้ขึ้นรูปชิ้นทดสอบต่อไป



รูปที่ 3.2 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (LabTech type LE25-30C)

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมที่ใช้เตรียมพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

อัตราส่วนผสม	ปริมาณสารที่ใส่โดยน้ำหนัก (กรัม)			
	พอลิโพรพิลีน	ยางเอทีลีนโพรพิลีนไดอีน	โพลลาสโตนีต์	พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์
100	100	-	-	-
80/20	80	20	-	-
80/20/10	80	20	10	-
80/20/20	80	20	20	-
80/20/30	80	20	30	-
80/20/10/5	80	20	10	5
80/20/20/5	80	20	20	5
80/20/30/5	80	20	30	5
70/30	70	30	-	-
70/30/10	70	30	10	-

อัตราส่วนผสม	ปริมาณสารที่ใส่โดยน้ำหนัก (กรัม)			
	พอลิโพรพิลีน	ยางเอทิลีน โพรพิลีนไดอีน	โวลลาสโทไนต์	พอลิโพรพิลีนกราฟต์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์
70/30/30	70	30	30	-
70/30/10/5	70	30	10	5
70/30/20/5	70	30	20	5
70/30/30/5	70	30	30	5

### 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

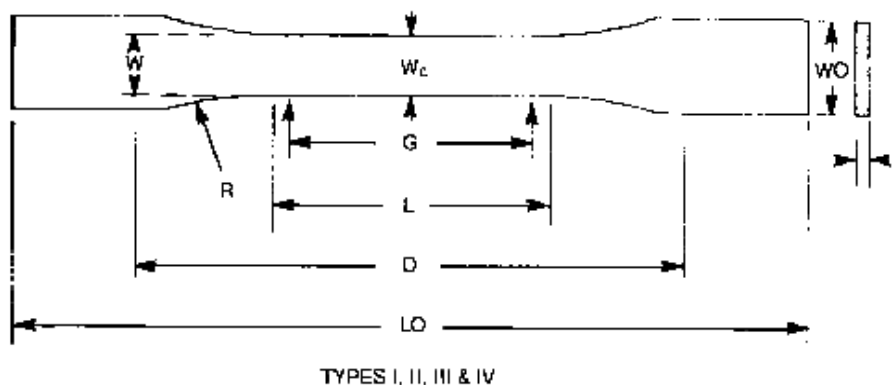
#### 3.3.1 ทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง

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 ขนาดขึ้นทดสอบสมบัติความทนแรงดึงตามมาตรฐาน 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 ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod) ยี่ห้อ Dynisco รุ่น SIMATIC-OP7 (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 Izod ยี่ห้อ Dynisco รุ่น SIMATIC-OP7

### 3.4 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

#### 3.4.1 ทดสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)

วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) ของ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA 851° (รูปที่ 3.8) โดยนำชิ้นทดสอบหนักประมาณ 10 มิลลิกรัม บรรจุในครุชีเบิลอะลูมินา โดยใช้ช่วงอุณหภูมิการวิเคราะห์จาก 50 ถึง 800 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส/นาที และวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนด้วยอัตราการไหลผ่านเท่ากับ 20 มิลลิลิตร/นาที



รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (Mettler Toledo, TGA/SDTA 851°)

#### 3.4.2 ทดสอบด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี

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. ให้อุณหภูมิตั้งที่ 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,  $T_c$ ) โดยวิเคราะห์จากพีคการเกิดผลึก และดีกรีของความเป็นผลึก (degrees of crystallinity,  $X_c$ ) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

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

เมื่อ  $\Delta H_f$  = เอนทัลปีของพอลิโพรพิลีนตัวอย่าง  
 $\Delta H_f^0$  = เอนทัลปีของพอลิโพรพิลีนที่มีการเกิดผลึก 100%

โดยในที่นี้ให้  $\Delta H_f^0$  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 ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

ทำการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ Jeol รุ่น JSM 5800 LV (รูปที่ 3.10) เพื่อศึกษาการกระจายตัวของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน และโพลลาสโทไนต์ในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ โดยนำชิ้นทดสอบไปแช่ในไนโตรเจนเหลว จากนั้นจึงทำให้เกิดรอยแตก แล้วนำเอาชิ้นงานมายึดติดบนแท่นวางชิ้นงาน ทำการเคลือบผิวด้วยทอง เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้าให้แก่ชิ้นตัวอย่าง และเพื่อป้องกันการเกิดประจุอิเล็กตรอนบนพื้นผิวของตัวอย่าง แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 2000



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Jeol, JSM 5800 LV)

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ลักษณะพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

จากการผสมเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีน ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน โวลลาสโทไนต์ที่มีขนาดอนุภาค 1200 เมช ในอัตราส่วนต่างๆ ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ แล้วขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบจะได้ชิ้นทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ชิ้นทดสอบพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โวลลาสโทไนต์คอมพอสิตทั้งที่ใส่และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่อัตราส่วน  
(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 และ (i) 70/30/30 (j) 80/20/10/5  
(k) 80/20/20/5 (l) 80/20/30/5 (m) 70/30/10/5 (n) 70/30/20/5 (o) 70/30/30/5

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าชิ้นทดสอบของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์มีลักษณะค่อนข้างโปร่งแสง ซึ่งเมื่อเติมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนปริมาณร้อยละ 20 และ 30 พบว่าความโปร่งแสงของชิ้นทดสอบลดลงและเริ่มขุ่นขาว และเมื่อเติมโวลลาสโทไนต์เข้าไป ชิ้นทดสอบมีความขุ่นขาวและทึบแสงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเติมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 5 phr พบว่าชิ้นทดสอบมีลักษณะมันวาวขึ้นเล็กน้อย

## 4.2 สมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โพลลาสโตนต์คอมพอสิต

### 4.2.1 สมบัติด้านความทนแรงดึง

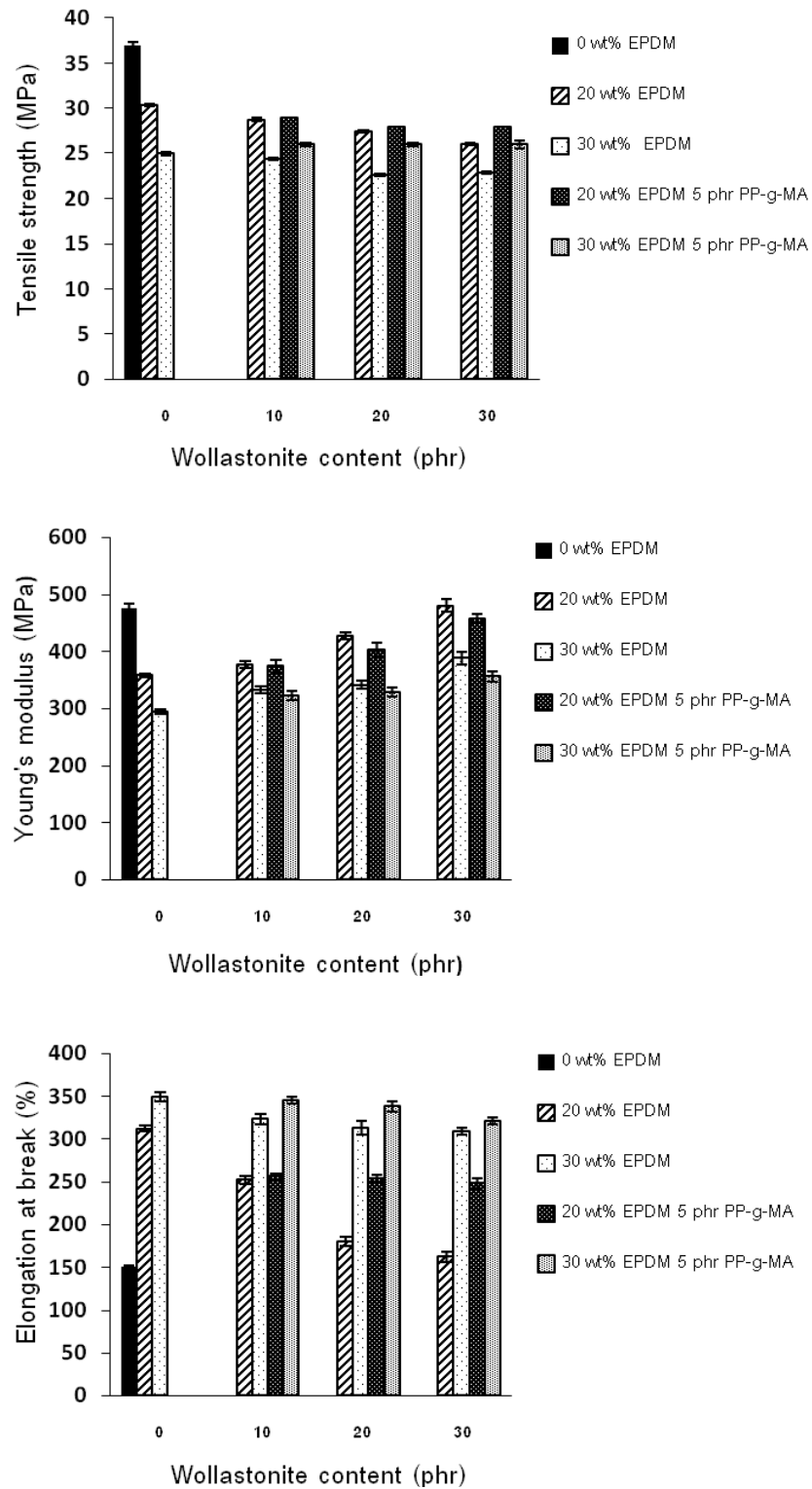
ผลการทดสอบหาค่าความทนแรงดึง ยั่งส์มอดุลัส และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอรัสมพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน และพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โพลลาสโตนต์คอมพอสิตทั้งที่ไม่ใส่และใส่สารช่วยผสมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อพอลิเมอรัสม 100 ส่วน (phr) ตามมาตรฐาน ASTM D790 แสดงไว้ในตารางที่ 4.

**ตารางที่ 4.1** สมบัติด้านความทนแรงดึง (ความทนแรงดึง ยั่งส์มอดุลัส และการยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบที่มีองค์ประกอบต่างๆ กัน)

องค์ประกอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	ยั่งส์มอดุลัส (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)
Pure PP	37	475	150
80/20 PP/EPDM	30	358	312
80/20/10 PP/EPDM/Wol	28	376	252
80/20/20 PP/EPDM/Wol	27	426	180
80/20/30 PP/EPDM/Wol	26	441	162
80/20/10/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	29	374	256
80/20/20/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	28	403	254
80/20/30/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	28	458	248
<b>70/30 PP/EPDM</b>	<b>25</b>	<b>294</b>	<b>349</b>
70/30/10 PP/EPDM/Wol	25	333	323
70/30/20 PP/EPDM/Wol	24	341	313
70/30/30 PP/EPDM/Wol	22	388	309
70/30/10/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	26	323	345
70/30/20/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	26	328	338
70/30/30/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	26	356	321

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 37 MPa ซึ่งเมื่อผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก เข้าไปในพอลิโพรพิลีน พบว่า ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงตามปริมาณของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนที่เพิ่มขึ้น โดยลดเหลือ 30 และ 25 MPa ตามลำดับ ส่วนยังสัมมอดูลัสของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 475 MPa ซึ่งการผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนเข้าไปในพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้ยังสัมมอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงตามปริมาณของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนที่เพิ่มขึ้น โดยลดเหลือ 358 และ 294 MPa ตามลำดับ ขณะที่ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 150 ซึ่งเมื่อผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนเข้าไปในพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนที่เพิ่มขึ้น โดยเพิ่มเป็นร้อยละ 312 และ 349 ตามลำดับ เพราะยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมีความแข็งแรงน้อยกว่า แต่มีความยืดหยุ่นมากกว่าพอลิโพรพิลีน จึงมีผลทำให้ความทนแรงดึงและความแข็งดึงของพอลิเมอร์ผสมลดลง และสามารถยืดตัวได้มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้น พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้จึงมีเสถียรภาพทางขนาด (dimensional stability) ลดลง ซึ่งการใส่โวลลาสโทไนต์ปริมาณ 10, 20 และ 30 phr เข้าไปในพอลิเมอร์ผสมของพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนทุกอัตราส่วนมีผลทำให้ความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โวลลาสโทไนต์คอมพอสิตที่เตรียมได้มีค่าลดลงเล็กน้อยตามปริมาณของโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ยังสัมมอดูลัสกลับมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผลึกของโวลลาสโทไนต์มีพื้นฐานวิทยาศาสตร์เป็นรูปเข็มที่มีความแข็งดึงสูง จึงขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม ยังสัมมอดูลัสของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เตรียมได้มีค่าต่ำกว่าของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ ส่วนร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมพอสิตมีค่าลดลงตามปริมาณของโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามที่คาดไว้ ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของโวลลาสโทไนต์มีความแข็งแรงดึงและมอดูลัสสูงกว่าพอลิเมอร์เมทริกซ์ อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์คอมพอสิตของทุกอัตราส่วนมีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดสูงกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ค่อนข้างมาก ดังนั้น การใส่โวลลาสโทไนต์ในปริมาณที่เหมาะสมอาจช่วยปรับปรุงเสถียรภาพทางขนาดของพอลิเมอร์ผสมโดยไม่ทำให้ความยืดหยุ่นของชิ้นทดสอบลดลงมากนัก นอกจากนี้ การใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 5 phr ในพอลิเมอร์คอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีผลทำให้สมบัติด้านความทนแรงดึงได้รับการปรับปรุงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์และมีอัตราส่วนของพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โวลลาสโทไนต์เท่ากัน เนื่องจากพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม ซึ่งมีผลทำให้อนุภาคของโวลลาสโทไนต์สามารถกระจายตัวได้สม่ำเสมอในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์





รูปที่ 4.2 สมบัติด้านความทนแรงดึง (ความทนแรงดึง ยืดสัมพัทธ์ และการยืดตัว ณ จุดขาด) ของชิ้นทดสอบที่มีองค์ประกอบต่างๆ กัน

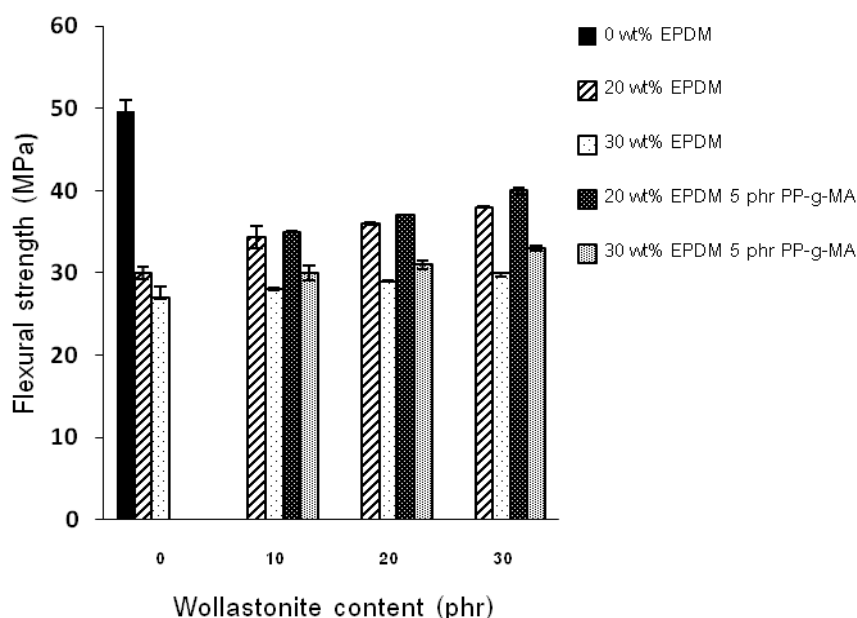
#### 4.2.2 ความทนแรงดัดโค้ง

ผลการทดสอบหาค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน และพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โพลลาสโโนด์คอมพอลิเมอร์ ทั้งที่ไม่ใส่และใส่สารช่วยผสมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 5 phr ตามมาตรฐาน ASTM D790 แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความทนแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบที่มีองค์ประกอบต่างๆ กัน

องค์ประกอบ	ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)
Pure PP	49
80/20 PP/EPDM	30
80/20/10 PP/EPDM/Wol	34
80/20/20 PP/EPDM/Wol	36
80/20/30 PP/EPDM/Wol	38
80/20/10/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	35
80/20/20/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	37
80/20/30/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	40
70/30 PP/EPDM	27
70/30/10 PP/EPDM/Wol	28
70/30/20 PP/EPDM/Wol	29
70/30/30 PP/EPDM/Wol	30
70/30/10/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	30
70/30/20/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	31
70/30/30/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	33

จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์เท่ากับ 49 MPa ซึ่งเมื่อผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนปริมาณร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก เข้าไปในพอลิโพรพิลีนพบว่า ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงตามปริมาณของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนที่เพิ่มขึ้น โดยลดเหลือ 35 และ 27 MPa ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนที่ใส่เข้าไปมีความยืดหยุ่นมากกว่าพอลิโพรพิลีน จึงทำให้ขึ้นทดสอบโค้งงอได้ง่ายเมื่อถูกกด ซึ่งเมื่อใส่โวลลาสโทไนต์ปริมาณ 10, 20 และ 30 phr เข้าไปในพอลิเมอร์ผสมของพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนทุกอัตราส่วน พบว่า มีผลทำให้ความทนแรงดัดโค้งของพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โวลลาสโทไนต์คอมพอสิตที่เตรียมได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น เพราะอนุภาคของโวลลาสโทไนต์มีความแข็งสูงดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้น เมื่อขึ้นทดสอบได้รับแรงกดจึงมีความต้านทานแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น ส่วนการใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ปริมาณ 5 phr ในพอลิเมอร์คอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีผลทำให้ความทนแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์และมีอัตราส่วนของพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โวลลาสโทไนต์เท่ากัน เนื่องจากพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม ซึ่งมีผลทำให้อนุภาคของโวลลาสโทไนต์สามารถกระจายตัวได้สม่ำเสมอในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์



รูปที่ 4.3 ความทนแรงดัดโค้งของขึ้นทดสอบที่มีองค์ประกอบต่างๆ กัน

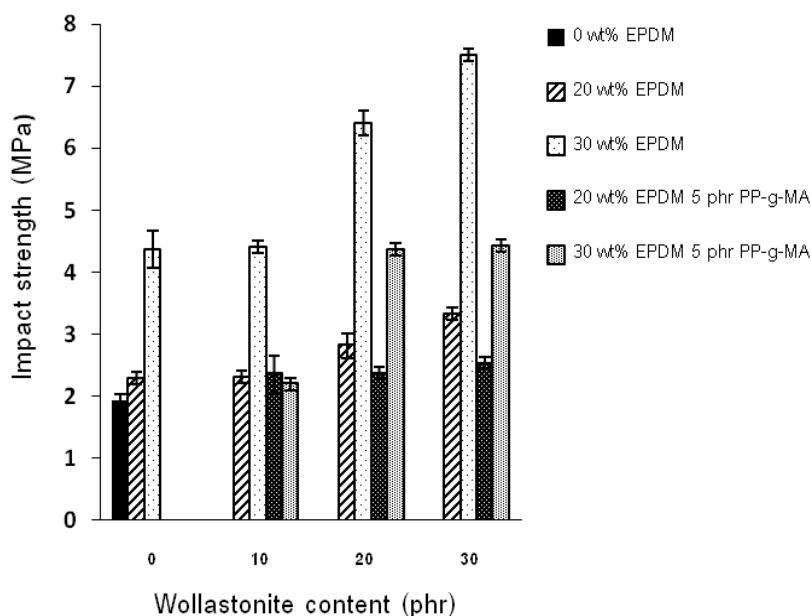
#### 4.2.3 สมบัติความทนแรงกระแทก

ผลการทดสอบหาค่าความทนแรงกระแทกแบบชาร์ปีที่มีรอยบาก (notched-Izod impact strength) ของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน และพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โพลลาสโตนีคคอมพอสิตทั้งที่ไม่ใส่และใส่สารช่วยผสมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 5 phr ตามมาตรฐาน ASTM D6110 แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความทนแรงกระแทกของชิ้นทดสอบที่มีองค์ประกอบต่างๆ กัน

องค์ประกอบ	ความทนแรงกระแทก (KJ/m <sup>2</sup> )
Pure PP	1.94
80/20 PP/EPDM	2.29
80/20/10 PP/EPDM/Wol	2.31
80/20/20 PP/EPDM/Wol	2.82
80/20/30 PP/EPDM/Wol	3.33
80/20/10/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	2.36
80/20/20/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	2.37
80/20/30/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	2.53
70/30 PP/EPDM	4.37
70/30/10 PP/EPDM/Wol	4.41
70/30/20 PP/EPDM/Wol	6.41
70/30/30 PP/EPDM/Wol	7.50
70/30/10/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	2.8
70/30/20/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	4.37
70/30/30/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	4.43

จากตารางที่ 4.3 แสดงค่าความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์เท่ากับ  $1.94 \text{ KJ/m}^2$  ซึ่งเมื่อผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนปริมาณร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก เข้าไปในพอลิโพรพิลีนพบว่า ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนที่เพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นเป็น  $2.29$  และ  $4.37 \text{ KJ/m}^2$  ตามลำดับ เนื่องจากยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนที่ใส่เข้าไปเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นมากกว่าพอลิโพรพิลีน จึงสามารถดูดกลืนพลังงานของแรงกระแทกได้ดี ซึ่งมีผลทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงกระแทกสูงกว่าพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ และเมื่อใส่โวลลาสโทไนต์ปริมาณ 10, 20 และ 30 phr ในพอลิเมอร์ผสมทั้งสองอัตราส่วนพบว่า ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โวลลาสโทไนต์คอมพอสิตได้รับการปรับปรุง โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคผลึกรูปเข็มของโวลลาสโทไนต์สามารถส่งผ่านความเค้น (stress transfer) ที่เกิดจากแรงกระแทกได้ดี ดังจะเห็นได้จากพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โวลลาสโทไนต์คอมพอสิตที่มีอัตราส่วน 70/30/30 มีค่าความทนแรงกระแทกสูงที่สุด คือ  $7.50 \text{ KJ/m}^2$  อย่างไรก็ตาม การใส่พอลิโพรพิลีน กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 5 phr เข้าไปในพอลิเมอร์คอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีผลทำให้ความทนแรงกระแทกลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ไม่ใส่พอลิโพรพิลีน กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และมีอัตราส่วนของพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โวลลาสโทไนต์เท่ากัน เนื่องจากพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งตึงสูง จึงทำให้พอลิเมอร์คอมพอสิตทนแรงกระแทกได้น้อยลง



รูปที่ 4.4 ความทนแรงกระแทกของชิ้นทดสอบที่มีองค์ประกอบต่างๆ กัน

### 4.3 สมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โพลลาสโตนคอมพอสิต

#### 4.3.1 ทดสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)

ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) ของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน และพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โพลลาสโตนคอมพอสิตทั้งที่ไม่ใส่และใส่สารช่วยผสมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 5 phr ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 50 ถึง 800 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาอุณหภูมิเริ่มสลายตัว ( $T_{onset}$ ) อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว ( $T_{endset}$ ) อุณหภูมิสลายตัวร้อยละ 50 ( $T_{50\%}$ ) และปริมาณชาร์ (% char) แสดงไว้ในตารางที่ 4.4

#### ตารางที่ 4.4 สมบัติทางความร้อน (อุณหภูมิเริ่มสลายตัว อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว อุณหภูมิ

สลายตัวร้อยละ 50 และปริมาณชาร์ของชิ้นทดสอบที่มีองค์ประกอบต่างๆ กัน ซึ่งตรวจสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)

องค์ประกอบ	$T_{onset}$ (°C)	$T_{end set}$ (°C)	$T_{50\%}$ (°C)	Char (%)
Pure PP	449	482	467	0
80/20 PP/EPDM	451	483	467	0.1
80/20/10 PP/EPDM/Wol	452	484	467	8.5
80/20/20 PP/EPDM/Wol	454	485	468	14.3
80/20/30 PP/EPDM/Wol	455	485	469	23.5
80/20/10/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	452	483	468	6.6
80/20/20/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	453	483	472	14.5
80/20/30/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	458	485	475	18.6
70/30 PP/EPDM	450	485	467	0.2
70/30/10 PP/EPDM/Wol	451	484	484	8.8
70/30/20 PP/EPDM/Wol	455	484	484	14.4
70/30/30 PP/EPDM/Wol	455	485	485	19.2

องค์ประกอบ	T <sub>onset</sub> (°C)	T <sub>end set</sub> (°C)	T <sub>50%</sub> (°C)	Char (%)
70/30/10/5 PP/EPDM/WoI/PP-g-MA	459	486	472	7.2
70/30/20/5 PP/EPDM/WoI/PP-g-MA	459	486	472	15.3
70/30/30/5 PP/EPDM/WoI/PP-g-MA	459	487	479	20.5

ตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าการใส่ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน โวลลาสโทไนต์ รวมทั้งสารช่วยผสมโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มีผลทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของชิ้นทดสอบที่เตรียมได้เพิ่มขึ้น โดยสังเกตได้จากอุณหภูมิเริ่มสลายตัว อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว อุณหภูมิสลายตัวร้อยละ 50 และปริมาณChar ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณChar ที่เพิ่มขึ้นอาจช่วยหน่วงการลุกลามของผลิตภัณฑ์ได้เนื่องจากป้องกันออกซิเจนเข้าถึงเนื้อพลาสติกบริเวณที่เกิดการลุกลาม

#### 4.3.2 ตรวจสอบด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรีของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน และพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โวลลาสโทไนต์คอมพอสิตทั้งที่ไม่ใส่และใส่สารช่วยผสมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 5 phr เพื่อศึกษาอุณหภูมิหลอมเหลว (T<sub>m</sub>) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T<sub>c</sub>) และระดับความเป็นผลึก (X<sub>c</sub>) แสดงไว้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางความร้อน (อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก และระดับความเป็นผลึก) ของชิ้นทดสอบที่มีองค์ประกอบต่างๆ กัน ซึ่งตรวจสอบด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

องค์ประกอบ	อุณหภูมิ หลอมเหลว (°C)	อุณหภูมิ การเกิดผลึก (°C)	ระดับความ เป็นผลึก (%)
Pure PP	160	123	45.2
80/20 PP/EPDM	159	122	44.8
80/20/10 PP/EPDM/WoI	158	123	34.7
80/20/20 PP/EPDM/WoI	159	121	26.8

องค์ประกอบ	อุณหภูมิ หลอมเหลว (°C)	อุณหภูมิ การเกิดผลึก (°C)	ระดับความ เป็นผลึก (%)
80/20/30 PP/EPDM/Wol	159	122	28.4
80/20/10/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	160	121	22.4
80/20/20/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	158	114	24.8
80/20/30/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	157	114	19.1
<b>70/30 PP/EPDM</b>	<b>158</b>	<b>122</b>	<b>44.5</b>
70/30/10 PP/EPDM/Wol	159	122	32.0
70/30/20 PP/EPDM/Wol	159	120	24.2
70/30/30 PP/EPDM/Wol	158	120	21.8
70/30/10/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	161	117	15.0
70/30/20/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	157	112	20.6
70/30/30/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA	158	115	34.8

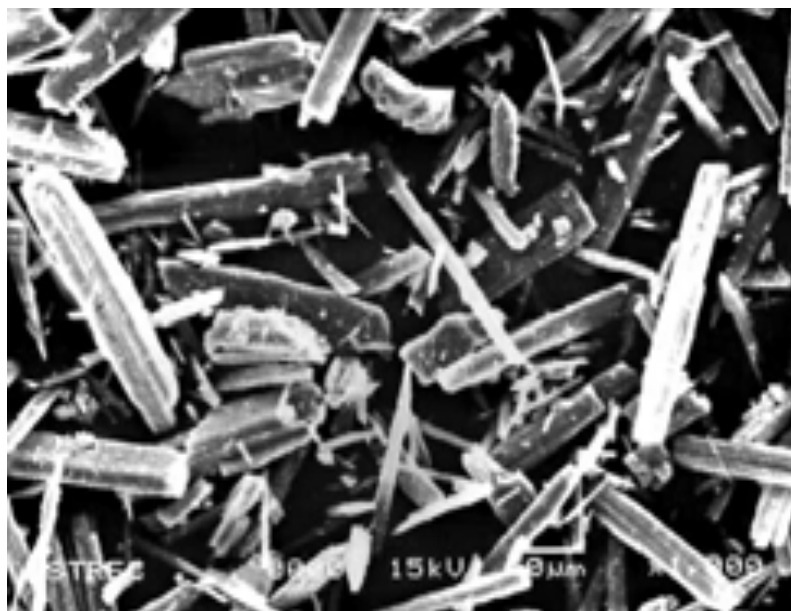
จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 160 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนปริมาณร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก เข้าไปในพอลิโพรพิลีนพบว่า อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างไม่มีนัยสำคัญ โดยลดลงเหลือ 158 และ 159 องศาเซลเซียส ตามลำดับ นอกจากนี้ การใส่โวลลาสโทไนต์ปริมาณต่างๆ กัน และพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 5 phr มีผลทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวของคอมพอสิตที่เตรียมได้เปลี่ยนแปลงไปอย่างไม่มีนัยสำคัญ เช่นเดียวกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 157-161 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิการเกิดผลึกและระดับความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีน บริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 123 องศาเซลเซียส และร้อยละ 23.2 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน โวลลาสโทไนต์ และพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เข้าไปในพอลิโพรพิลีน พบว่า ทั้งพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตที่เตรียมได้มีอุณหภูมิการเกิดผลึกและระดับความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากทั้งยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน โวลลาสโทไนต์ และพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิโพรพิลีน จึงทำให้ความสามารถในการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนลดลง



#### 4.4 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมพอสิต

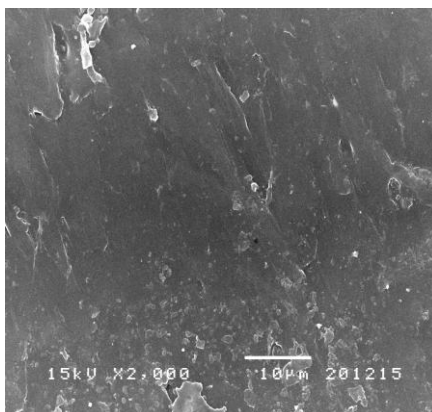
รูปที่ 4.5 แสดงสัณฐานวิทยาของผลึกโพลลาสโตนที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้กำลังขยาย 1000 เท่า

รูปที่ 4.6-4.8 แสดงสัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน และพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โพลลาสโตนคอมพอสิตทั้งที่ไม่ใส่และใส่สารช่วยผสมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ปริมาณ 5 phr ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้กำลังขยาย 2000 เท่า

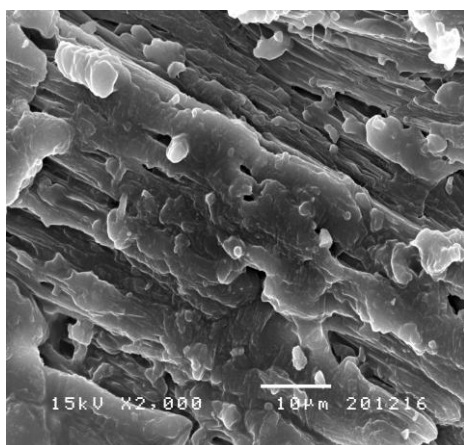


รูปที่ 4.5 สัณฐานวิทยาของผลึกโพลลาสโตนที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้กำลังขยาย 1000 เท่า

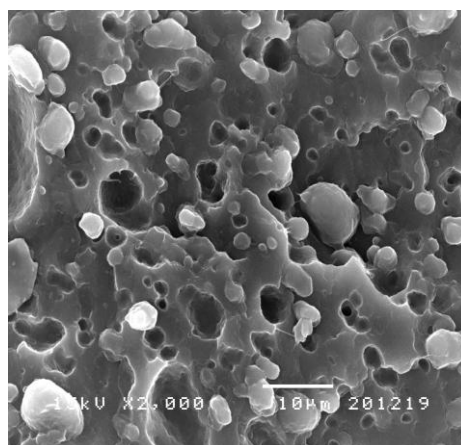
รูปที่ 4.5 แสดงสัณฐานวิทยาของผลึกรูปเข็มของโพลลาสโตนภายใต้กำลังขยาย 1000 เท่า ซึ่งหากกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ จะสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยช่วยส่งผ่านความเค้นภายในขึ้นทดสอบได้



(a) Pure PP



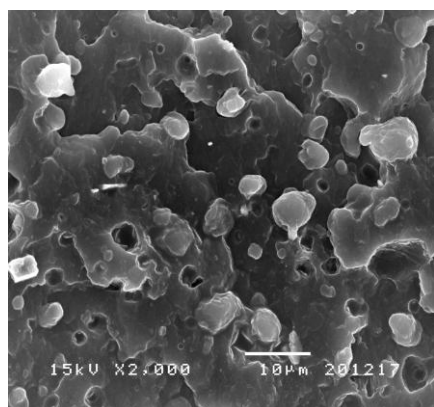
(b) 80/20 PP/EPDM



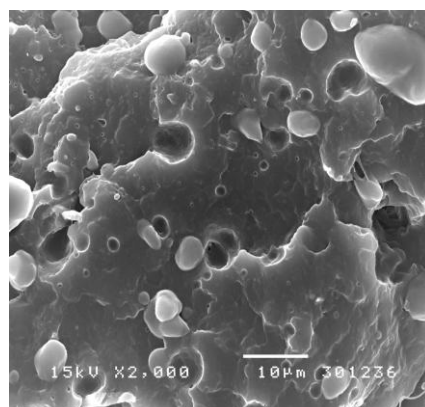
(c) 70/30 PP/EPDM

**รูปที่ 4.6** สัณฐานวิทยาพื้นผิวรอยแตกหักของ (a) พอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ (b) พอลิเมอร์ผสม 80/20 PP/EPDM และ (c) พอลิเมอร์ผสม 70/30 PP/EPDM ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้กำลังขยาย 2000 เท่า

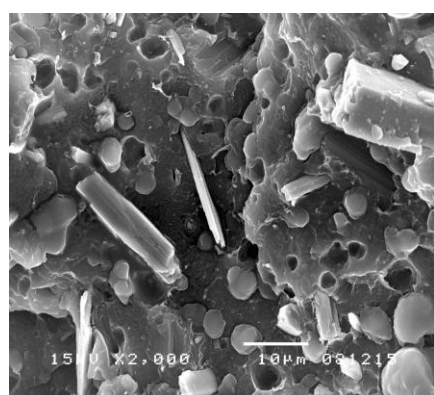
รูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์มีพื้นผิวรอยแตกหักที่ค่อนข้างเรียบ ซึ่งเป็นลักษณะพื้นผิวของวัสดุที่แข็งและเปราะ ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมแสดงอนุภาคของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนกระจายอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีน ซึ่งยางผสมพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนในอัตราส่วน 70/30 แสดงให้เห็นรูพรุนขนาดใหญ่และปริมาณมากกว่ายางผสมที่อัตราส่วน 80/20 โดยรูพรุนเหล่านี้เกิดจากการหลุดออกของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนจากพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ เมื่อนำชิ้นทดสอบไปหักในไนโตรเจนเหลว ซึ่งแสดงถึงการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวของพอลิโพรพิลีนและยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนที่ไม่แข็งแรงเมื่อปริมาณของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม พื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมจะมีความหยาบมากกว่าพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งแสดงถึงรอยแตกหักของวัสดุที่มีความยืดหยุ่น



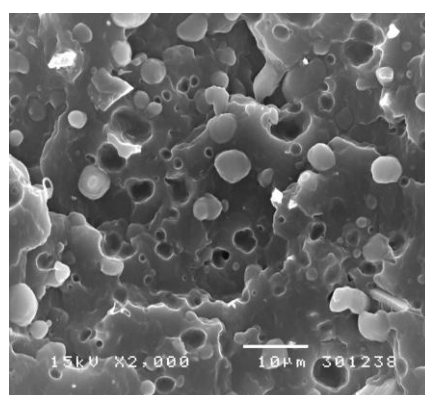
(a) 80/20/10 PP/EPDM/Wol



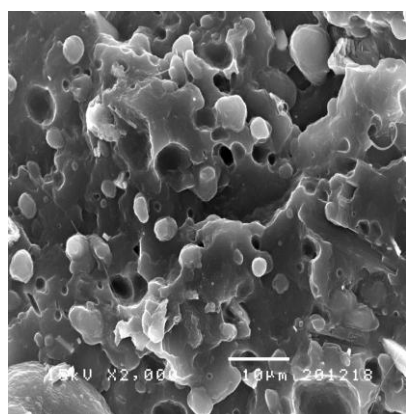
(b) 80/20/10/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA



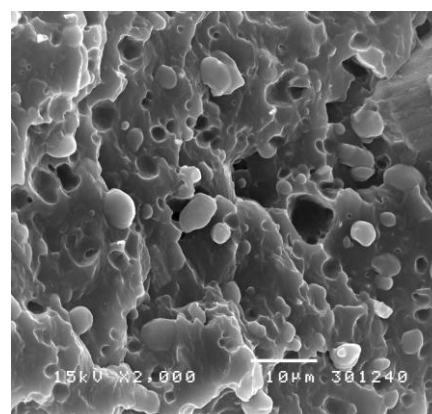
(c) 80/20/20 PP/EPDM/Wol



(d) 80/20/20/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA



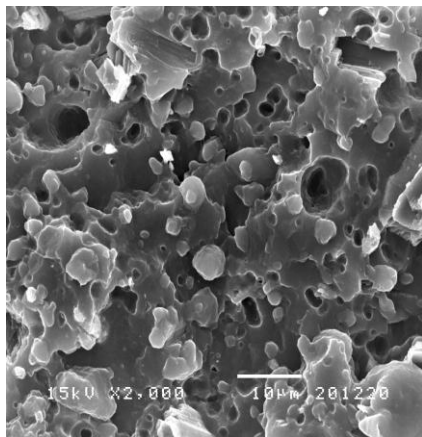
(e) 80/20/30 PP/EPDM/Wol



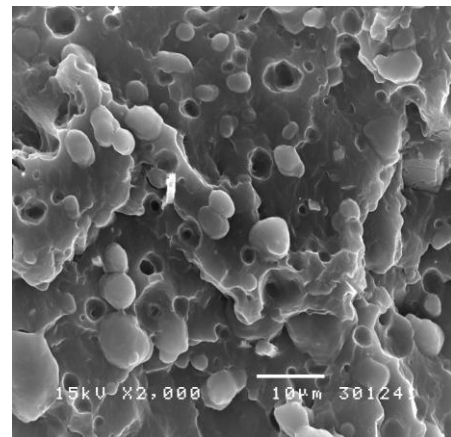
(f) 80/20/30/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA

**รูปที่ 4.7** สัณฐานวิทยาพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โวลลาสโทไนต์

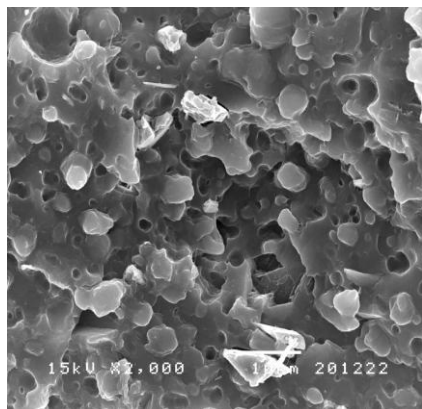
คอมพอสิต: (a) 80/20/10 PP/EPDM/Wol, (b) 80/20/10/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA, (c) 80/20/20 PP/EPDM/Wol, (d) 80/20/20/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA, (e) 80/20/30 PP/EPDM/Wol และ (f) 80/20/30/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้กำลังขยาย 2000 เท่า



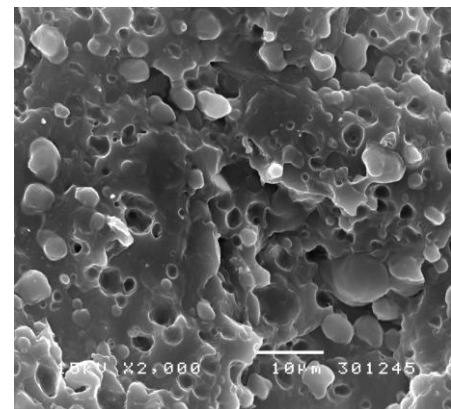
(a) 70/30/10 PP/EPDM/Wol



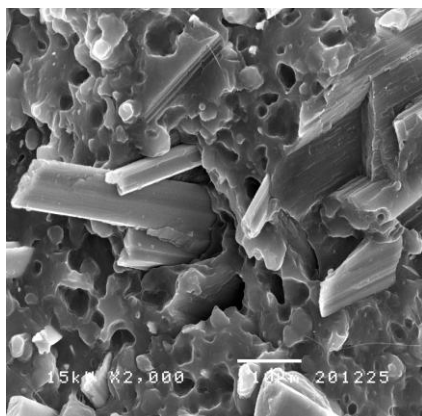
(b) 70/30/10/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA



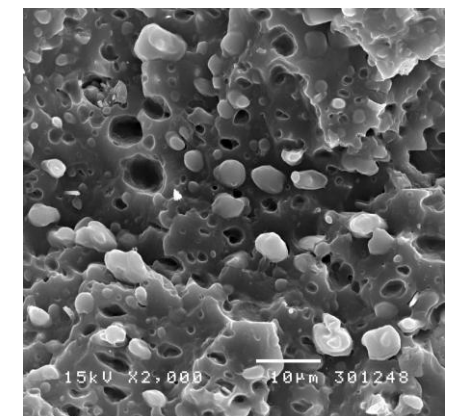
(c) 70/30/20 PP/EPDM/Wol



(d) 70/30/20/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA



(e) 70/30/30 PP/EPDM/Wol



(f) 70/30/30/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA

**รูปที่ 4.8** สัณฐานวิทยาพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โกลาสไฟเบอร์คอมพอสิต: (a) 70/30/10 PP/EPDM/Wol, (b) 70/30/10/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA, (c) 70/30/20 PP/EPDM/Wol, (d) 70/30/20/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA, (e) 70/30/30 PP/EPDM/Wol และ (f) 70/30/30/5 PP/EPDM/Wol/PP-g-MA ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้กำลังขยาย 2000 เท่า

รูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โวลลาสโทไนต์คอมพอสิตที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ทั้งที่ไม่ใส่และใส่สารช่วยผสมพอลิโพรพิลีนกราฟต์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 5 phr ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้กำลังขยาย 2000 เท่า โดยคอมพอสิตที่ไม่ใส่สารช่วยผสมแสดงให้เห็นรูพรุนจำนวนมากและลึกกว่าคอมพอสิตที่ใส่สารช่วยผสม ซึ่งเกิดจากการหลุดของโวลลาสโทไนต์ออกจากพอลิเมอร์เมทริกซ์ เนื่องจากไม่มีแรงยึดเกาะระหว่างผิว หากแต่เมื่อใส่สารช่วยผสมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เข้าไปในพอลิเมอร์คอมพอสิต พบว่า ปริมาณ ขนาด และความลึกของรูพรุนลดลงมากเนื่องจากแรงยึดเกาะระหว่างพื้นผิวของโวลลาสโทไนต์และพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้โวลลาสโทไนต์ยังมีการจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักรของเครื่องฉีดแบบ จึงทำให้ไม่เห็นอนุภาคของโวลลาสโทไนต์กระจายอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์มากนัก หากแต่จะเห็นส่วนปลายของโวลลาสโทไนต์ เพราะพื้นผิวรอยแตกหักอยู่ในแนวตั้งฉากกับการจัดเรียงตัวของโวลลาสโทไนต์ในทิศทางทดสอบ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โวลลาสโทไนต์คอมพอสิต ทั้งที่ใส่และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 จากการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง พบว่าการใส่ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนในพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้ความทนแรงดึง และย้งสัมมอดูลัสมีค่าลดลง ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และการใส่โวลลาสโทไนต์เข้าไปในพอลิเมอร์ผสมทำให้พอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่ได้พบว่า ย้งสัมมอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความทนแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีค่าลดลง เมื่อใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ พบว่า ความทนแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าย้งสัมมอดูลัสมีค่าลดลง

5.1.2 จากการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดัดโค้ง พบว่าการใส่ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนในพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้ความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลง ซึ่งการใส่โวลลาสโทไนต์เข้าไปในพอลิเมอร์ผสมมีผลทำให้พอลิโพรพิลีนคอมพอสิตมีความทนแรงดัดโค้งและมอดูลัสแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ยังมีค่าต่ำกว่าของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ ส่วนการใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ พบว่า ความทนแรงดัดโค้งได้รับการปรับปรุง

5.1.3 จากการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทก พบว่า การใส่ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนในพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และการใส่โวลลาสโทไนต์ในพอลิเมอร์ผสมมีผลทำให้ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนการใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ พบว่า ความทนแรงกระแทกมีค่าลดลง

5.1.4 จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) พบว่า การใส่ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนและโวลลาสโทไนต์ในพอลิโพรพิลีนมีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนเล็กน้อย โดยอุณหภูมิการสลายตัวมีแนวโน้ม

สูงขึ้นเมื่อปริมาณโวลลาสโทไนต์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การใส่โวลลาสโทไนต์มีผลทำให้เกิดซาร์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ส่วนการใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ พบว่า ได้รับการปรับปรุง

5.1.5 จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนิงแคลอริมิทรี พบว่า เมื่อผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนปริมาณร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก เข้าไปในพอลิโพรพิลีนพบว่า อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างไม่มีนัยสำคัญ การใส่โวลลาสโทไนต์ปริมาณต่างๆ กัน และพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 5 phr มีผลทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวของคอมพอสิตที่เตรียมได้เปลี่ยนแปลงไปอย่างไม่มีนัยสำคัญ ส่วนอุณหภูมิการเกิดผลึกและดัชนีของความเป็นผลึกเมื่อผสมยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน โวลลาสโทไนต์ และพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เข้าไปในพอลิโพรพิลีน พบว่า ทั้งพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตที่เตรียมได้มีอุณหภูมิการเกิดผลึกและระดับความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลง

5.1.6 จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่า ทั้งยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนและโวลลาสโทไนต์ ที่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์สามารถกระจายตัวได้ดีกว่าที่ไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ทดลองใช้โวลลาสโทไนต์ในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ชนิดอื่น

5.2.2 ทดลองใช้สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร

## รายการอ้างอิง

- [1] W.J. Cantwell and J. Morton, The impact resistance of composite materials, Composites, 22 (1991):347–362.
- [2] H.A. Rijdsdijk, M. Contant and A.A.J.M. Peijs, Continuous-glass-fibre-reinforced polypropylene composites: I. Influence of maleic-anhydride-modified polypropylene on mechanical properties, Composites Science and Technology, 48 (1993):161-172.
- [3] M. Arroyo', R. Zitzumbo and F. Avalos, Composites based on PP/EPDM blends and aramid short fibres. Morphology/behaviour relationship, Polymer, 41 (2000): 6351- 6359.
- [4] P. Svoboda, D. Svobodova, P. Slobodian, T. Ougizawa and T. Inoue, Crystallization kinetics of polypropylene/ethylene- octene copolymer blends, Polymer Testing, 28 (2009): 215-222.
- [5] M. Denac, I. Smit and V. Musil, Polypropylene/talc/SEBS (SEBS-g-MA) composites. Part 1. Structure, Composites: Part A, 36 (2005): 1094-1101.
- [6] P. Svoboda, D. Svobodova, P. Slobodian, T. Ougizawa and T. Inoue, Transmission electron microscopy study of phase morphology in polypropylene/ethylene-octane copolymer blends, European Polymer Journal, 45 (2009): 1485-1492.
- [7] Y. Liu and M. Kontopoulou, The structure and physical properties of polypropylene and thermoplastic olefin nanocomposites containing nanosilica, Polymer, 47 (2006):7731-7739.
- [8] H. Azizi and J. Faghihi, An investigation on the mechanical and dynamic rheological properties of single and hybrid filler/polypropylene composites based on talc and calciumcarbonate, Polymer Composites, 30 (2009) : 1743-1748.
- [9] O. Balkan and H. Demirer, Mechanical properties of glass bead- and wollastonite-filled isotactic polypropylene composites modified with thermoplastic elastomers, Polymer Composites, 31 (2010): 1285-1308.



- [10]I. Svab, V. Musil, A. Pustak and I. Smit, Wollastonite-reinforced polypropylene composites modified with novel metallocene EPR copolymers. II. Mechanical properties and adhesion, Polymer Composites, 30 (2009): 1091-1097.
- [11] James L.W. and David D.C. Polyolefins: Processing, Structure Development and Properties. Germany: Hanser Publishers, 2005.
- [12]. รัชณา ศิริสุข, กระบวนการผลิตพอลิเมอร์, ในเอกสารประกอบการเรียนการสอน วิชา 2311326. กรุงเทพมหานคร ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [13] Babu R.R., Singha N.K. and Naskar K. Interrelationships of Morphology, Thermal and Mechanical Properties in Uncrosslinked and Dynamically Crosslink PP/EOC and PP/EPDM Blends, Express Polymer Letters, 4 (2010): 197-209.
- [14] Lehmann B., Friedrich K., Chun L.W. Ming Q.Z. and Min Z.R, Improvement of Notch Toughness of Low Nano-SiO<sub>2</sub> Filled Propylene Composites, Journal of Materials Science Letters, 22 (2003): 1027-1030.
- [15] Mohanty S. and Nayak S.K., Dynamic-Mechanical and Thermal Characterization o Polypropylene/Ethylene-Octene Copolymer Blend,Journal of Applied Polymer Science, 104 (2007): 3137-3144.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.

- [19] 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.
- [20] Technical Information. Nordel 4770 Polyolefin Elastomer. Los Angeles: The Dow Chemical Company, 2008.
- [21] 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.
- [22] Wikimedia commons. Wollastonite-cell. (online). Available from: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wollastonite-cell.png?uselang=fr>, (2011, April).
- [23] Peter A.C. Wollastonite A Versatile Functional Filler. (online). Available from: [http://www.rtvanderbilt.com/awards\\_6.htm](http://www.rtvanderbilt.com/awards_6.htm), (2011, April).
- [24] The European Specialty Minerals Association (Member of IMAEurope) Wollastonitefactsheet.(online).Availablefrom:[http://www.imaeu.org/fileadmin/downloads/minerals/Wollastonite\\_factsheet.pdf](http://www.imaeu.org/fileadmin/downloads/minerals/Wollastonite_factsheet.pdf), (2011, April).
- [25] D.N. Bikiaris, A. Vassiliou, E. Pavlidou and G.P. Karayannidis, Compatibilisation effect of PP-g-MA copolymer on iPP/SiO<sub>2</sub> nanocomposites prepared by melt mixing,European Polymer Journal, 41 (2005): 1965–1978.
- [26] Y. Wang, Q. Zhang, B. Na, R. Du, Q. Fu and K. Shen, Dependence of impact strength on the fracture propagation direction in dynamic packing injection molded PP/EPDM blends, Polymer, 44 (2003): 4261–4271.
- [27] M.R. Meng and Q. Dou, Effect of pimelic acid on the crystallization, morphology and mechanical properties of polypropylene/wollastonite composites, Materials Science and Engineering A, 492 (2008): 177-184.
- [28] U.P. Singh, B.K. Biswas and B.C. Ray, Evaluation of mechanical properties of polypropylene filled with wollastonite and silicon rubber, Materials Science and Engineering A, 501 (2009): 94–98.

- [29] H. Yang, Q. Zhang, M. Guo, C. Wang, R. Du and Q. Fu, Study on the phase structures and toughening mechanism in PP/EPDM/SiO<sub>2</sub> ternary composites, *Polymer*, 47(2003): 2106–2115.
- [30] อาจารย์ อัครดิลลภฤทธิ. ผลของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยซอร์บิทอลต่อการเกิดผลึกและความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [31] เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร. เทคโนโลยียาง. ในเอกสารประกอบการเรียนการสอน เทคโนโลยียาง, กรุงเทพมหานคร ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [32] OKNATION. Ethylene Propylene diene rubber. (online). Available from: <http://www.oknation.net/blog/obbie-tt/2010/08/22/entry-1>, (2012, April)

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

## ลักษณะชิ้นงานพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

## 1. วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย



รูป ก-1 พอลิโพรพิลีน (EL-Pro P702J)



รูป ก-2 ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน(Nordel 4770)



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

รูป ก-4 พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิก-  
แอนไฮไดรด์ (Fusabond 512d)

## 2. พอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการอัดรีดผ่านหัวตายรูปวงกลม



รูป ก-5 พอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน  
ที่ได้จากการอัดรีดผ่านหัวตายรูปวงกลม

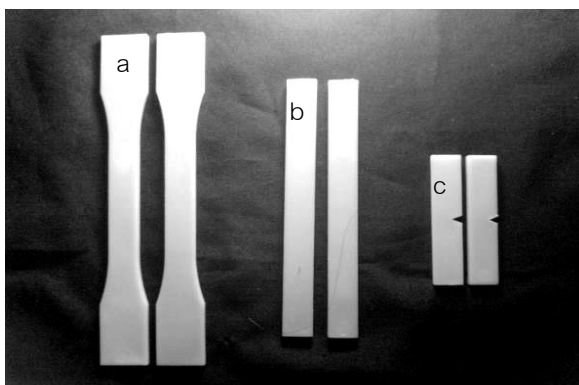


รูป ก-6 พอลิโพรพิลีน//ยางเอทิลีนโพรพิลีน-  
ไดอีน/โพลลาสโตนต์คอมพอสิตที่ได้  
จากการอัดรีดผ่านหัวตายรูปวงกลม



รูป ก-7 พอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน  
/โพลลาสโตนต์/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิก-  
แอนไฮไดรด์คอมพอสิตที่ได้จากการอัดรีดผ่าน  
หัวตายรูปวงกลม

### 3. ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดแบบ



รูป ก-8 ชิ้นทดสอบที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดแบบ

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



รูป ก-9 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

- (a) 100 (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
- (j) 80/20/10/5 (k) 80/20/20/5 (l) 80/20/30/5
- (m) 70/30/10/5 (n) 70/30/20/5 (o) 70/30/30/5

## ภาคผนวก ข

## ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงดึง

ตาราง ข-1 ค่าความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

PP/EPDM/WoI/ PP-g-MA	Tensile strength (MPa)					X	SD
	1	2	3	4	5		
100/0/0	37	38	37	37	36	37	0.7
80/20/0	31	30	29	30	30	30	0.7
80/20/10	28	29	30	27	26	28	1.6
80/20/20	26	27	27	28	27	27	0.7
80/20/30	25	26	25	24	30	26	2.3
80/20/10/5	29	28	30	29	29	29	0.7
80/20/20/5	27	28	28	28	29	28	0.7
80/20/30/5	27	28	27	29	29	28	1
70/30/0	26	24	25	25	25	25	0.7
70/30/10	24	25	26	25	25	25	0.7
70/30/20	25	26	25	24	20	24	2.3
70/30/30	21	22	22	22	23	22	0.7
70/30/10/5	25	27	26	26	26	26	0.7
70/30/20/5	25	25	26	27	27	26	1
70/30/30/5	25	24	27	26	28	26	1.6



ตาราง ข-2 ค่ายังส์มอดุลัสของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

PP/EPDM/Wol/ PP-g-MA	Young's modulus (MPa)					X	SD
	1	2	3	4	5		
100/0/0	474	480	460	485	476	<b>475</b>	9.38
80/20/0	355	356	355	360	364	<b>358</b>	3.93
80/20/10	375	376	377	375	377	376	1
80/20/20	421	429	442	392	446	426	21.48
80/20/30	448	445	446	449	417	441	13.50
80/20/10/5	359	378	376	370	387	374	10.36
80/20/20/5	412	410	415	388	390	403	12.92
80/20/30/5	444	456	459	465	466	458	8.86
70/30/0	289	292	285	312	292	<b>294</b>	10.46
70/30/10	322	345	330	335	333	333	8.33
70/30/20	351	340	331	348	335	341	8.45
70/30/30	390	388	389	385	388	388	1.87
70/30/10/5	331	327	315	328	314	323	7.9
70/30/20/5	318	334	328	326	334	328	6.63
70/30/30/5	348	356	370	368	338	356	5.78

ตาราง ข-3 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

PP/EPDM/Wol/ PP-g-MA	Elongation at break (%)					X	SD
	1	2	3	4	5		
100/0/0	152	148	156	147	147	150	3.93
80/20/0	311	312	305	312	320	312	5.33
80/20/10	252	247	249	255	257	252	4.12
80/20/20	173	175	176	185	191	180	7.68
80/20/30	168	166	172	157	159	167	6.26
80/20/10/5	248	252	260	262	258	256	5.83
80/20/20/5	258	255	248	260	249	254	5.33
80/20/30/5	242	245	253	256	244	248	6.12
70/30/0	356	353	367	339	330	349	14.57
70/30/10	312	335	324	331	313	323	10.36
70/30/20	314	315	307	320	309	313	5.14
70/30/30	299	304	306	302	334	309	14.21
70/30/10/5	358	364	342	331	330	345	15.49
70/30/20/5	329	343	326	341	351	338	10.34
70/30/30/5	318	317	319	325	326	321	11.45

## ภาคผนวก ค

## ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง

ตาราง ค-1 ค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

PP/EPDM/Wo/ PP-g-MA	Flexural strength (MPa)					X	SD
	1	2	3	4	5		
100/0/0	47	52	50	49	47	49	2.12
80/20/0	29	29	32	31	29	30	1.41
80/20/10	32	33	36	35	34	34	1.58
80/20/20	34	37	36	35	38	36	1.58
80/20/30	38	38	38	40	38	38	0.89
80/20/10/5	36	34	35	33	37	35	1.58
80/20/20/5	36	34	38	37	40	37	2.23
80/20/30/5	39	41	42	38	40	40	1.58
70/30/0	29	28	27	28	23	27	2.34
70/30/10	30	31	28	29	22	28	3.53
70/30/20	29	30	27	28	31	29	1.58
70/30/30	29	28	30	32	31	30	1.58
70/30/10/5	33	29	28	27	33	30	2.82
70/30/20/5	31	32	31	28	33	31	1.87
70/30/30/5	31	33	34	32	35	33	1.75

## ภาคผนวก ง

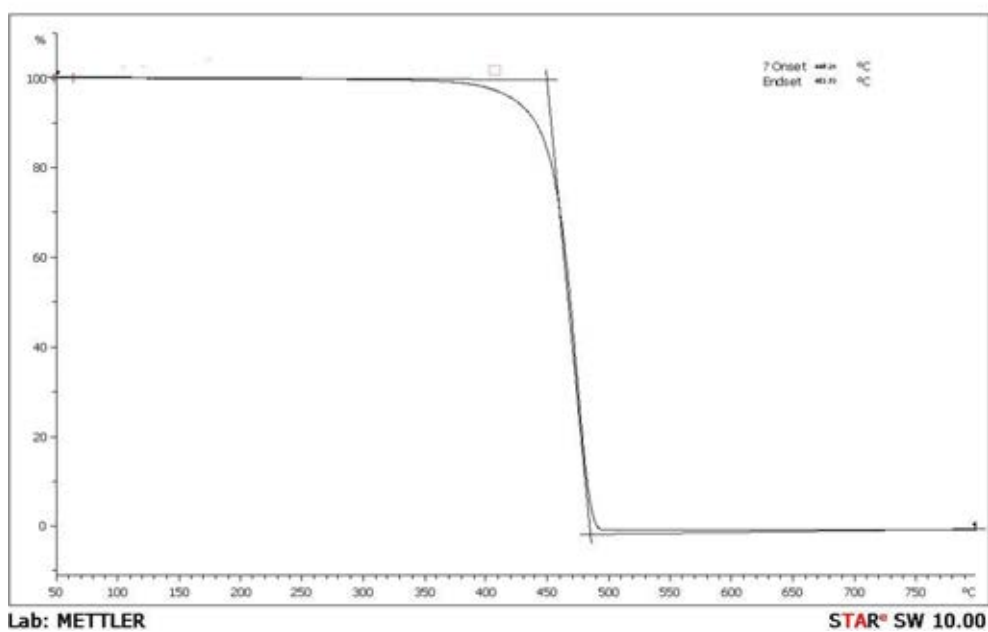
## ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก

ตาราง ง-1 ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

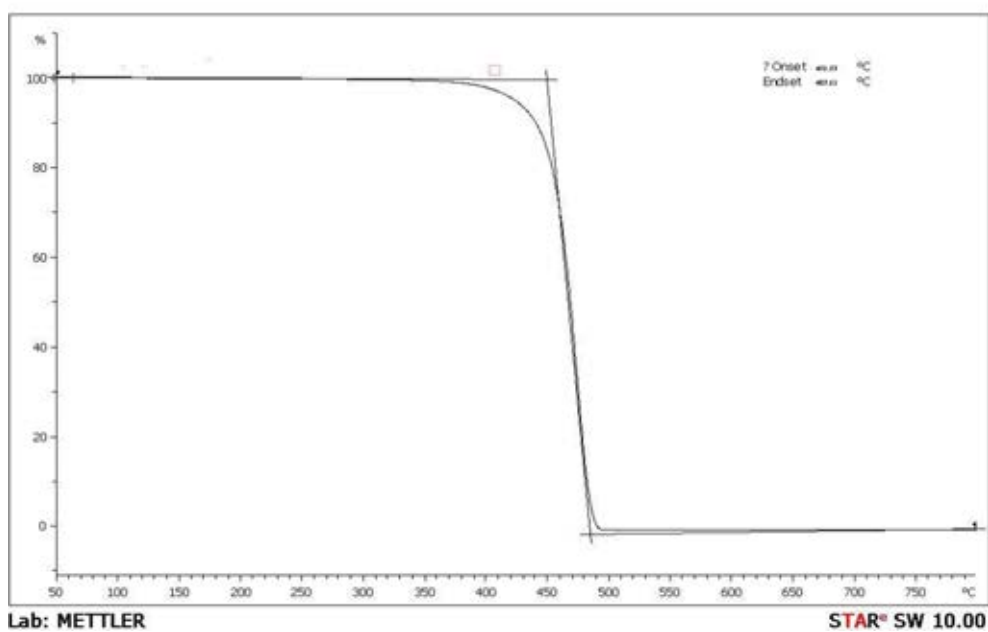
PP/EPDM/Wol	Impact strength (kJ/m <sup>2</sup> )					X	SD
	1	2	3	4	5		
100/0/0	1.99	2.07	1.98	1.70	1.98	1.94	0.14
80/20/0	2.04	2.01	2.03	2.79	2.53	2.29	0.35
80/20/10	2.28	2.41	2.04	2.34	2.46	2.31	0.16
80/20/20	2.82	2.97	2.87	2.67	2.72	2.82	0.11
80/20/30	3.39	3.52	3.24	3.24	3.25	3.33	0.12
80/20/10/5	2.24	2.44	2.86	2.10	2.17	2.36	0.30
80/20/20/5	2.35	2.24	2.41	2.35	2.47	2.37	0.08
80/20/30/5	2.38	2.60	2.72	2.51	2.43	2.53	0.13
70/30/0	4.3	4.13	4.2	4.99	4.23	4.37	0.35
70/30/10	4.56	4.30	4.10	4.55	4.45	4.41	0.19
70/30/20	6.38	6.15	6.61	6.60	6.30	6.41	0.19
70/30/30	7.56	7.84	7.27	7.30	7.50	7.50	0.23
70/30/10/5	2.80	2.87	3.06	2.81	2.62	2.80	0.15
70/30/20/5	4.32	4.21	4.16	4.55	4.58	4.37	0.19
70/30/30/5	4.18	4.65	4.30	4.40	4.59	4.43	0.19

## ภาคผนวก จ

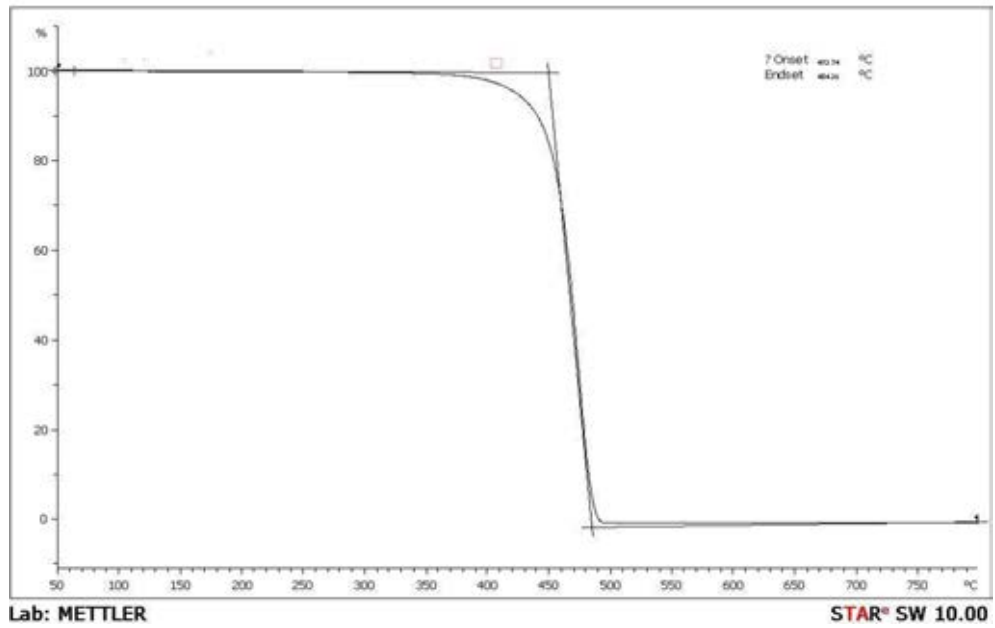
## ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA



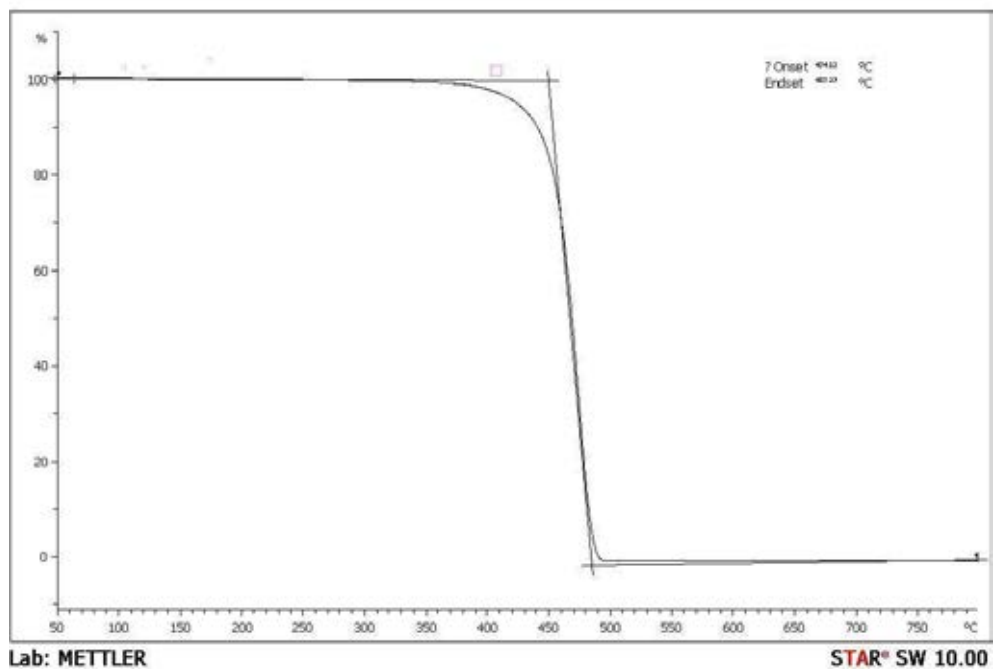
รูป จ-1 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 100/0/0



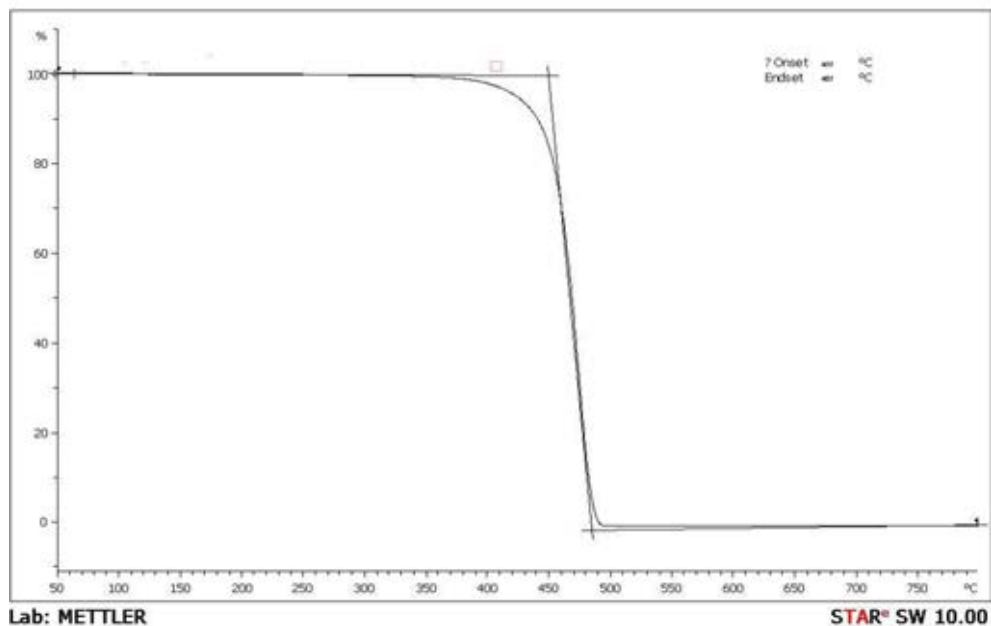
รูป จ-2 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/0



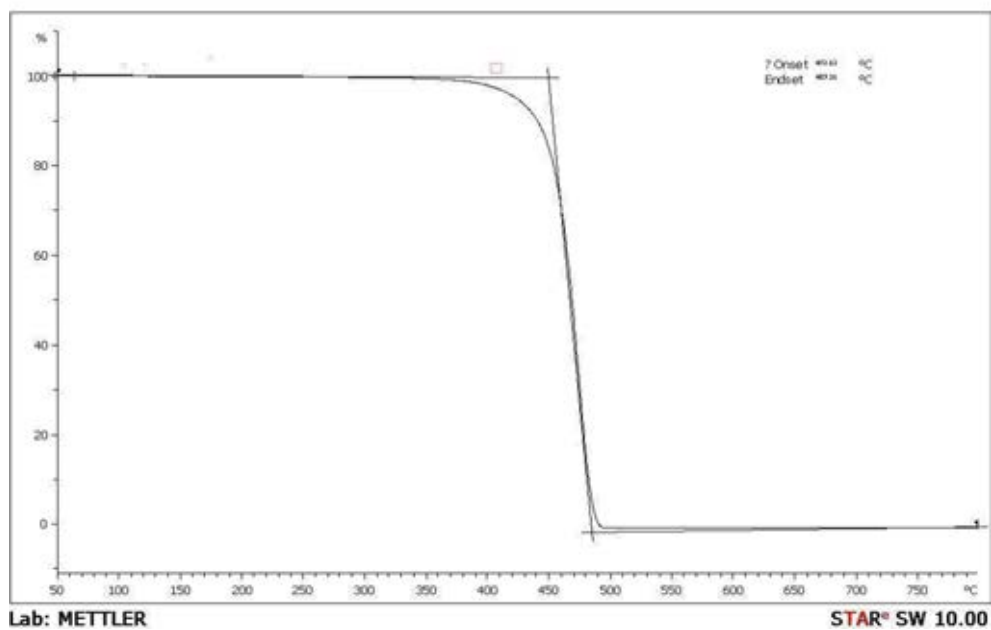
รูป จ-3 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/10



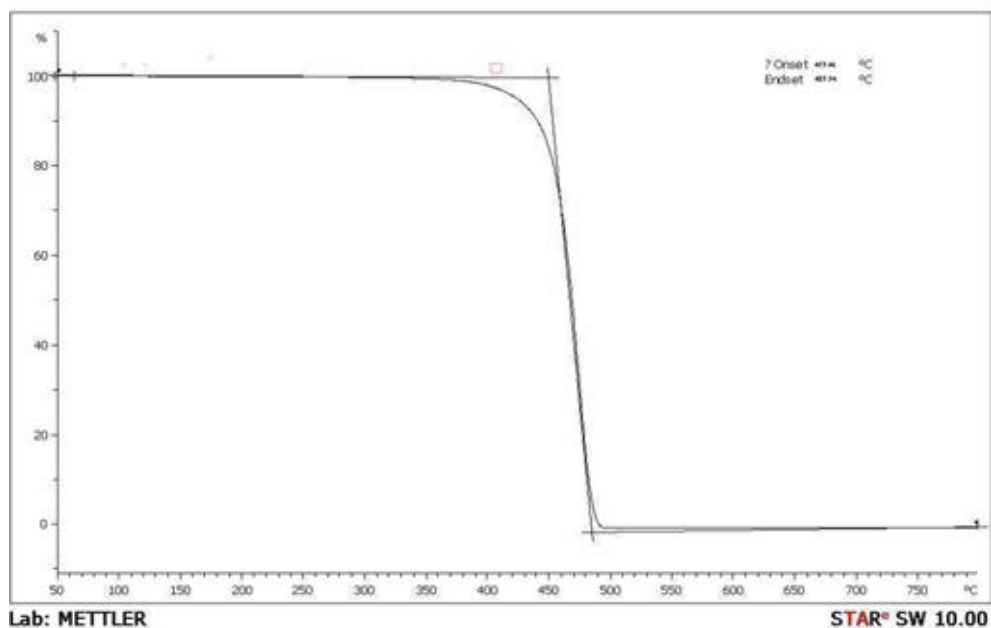
รูป จ-4 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/20



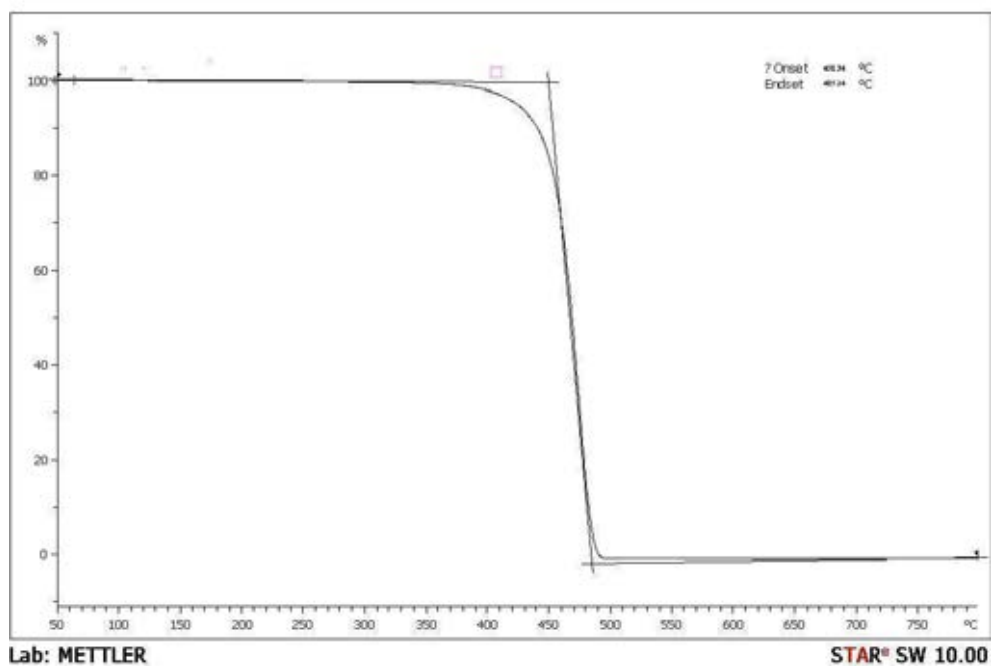
รูป จ-5 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/30



รูป จ-6 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/10/5

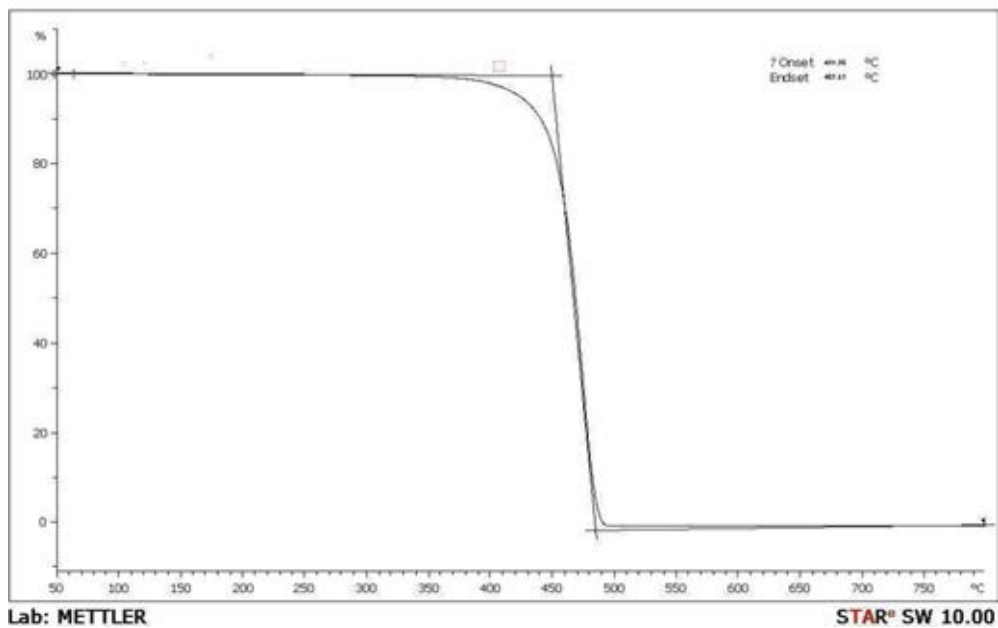


รูป จ-7 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิไพร์ฟีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/20/5

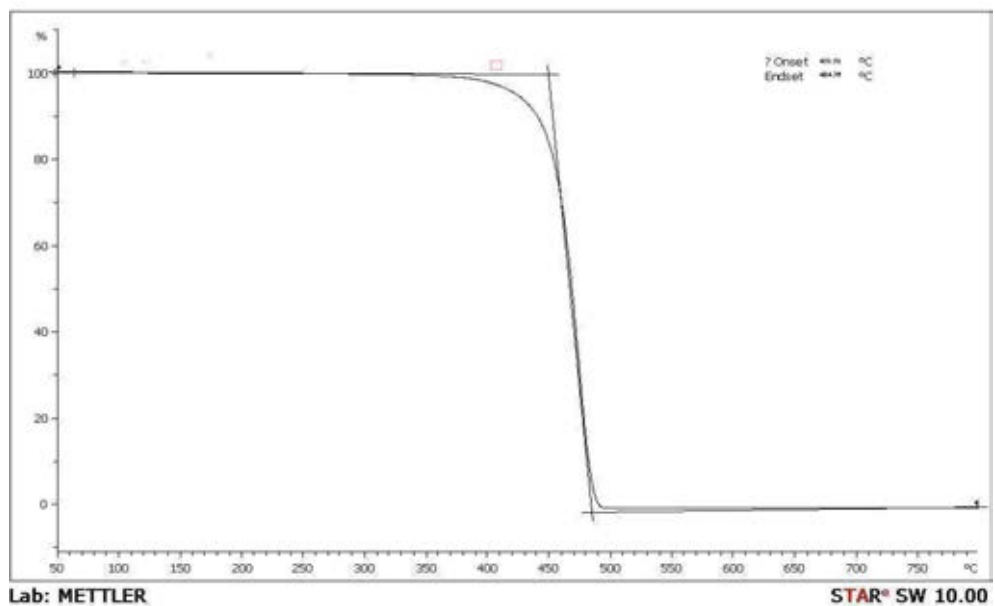


รูป จ-8 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิไพร์ฟีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/30/5

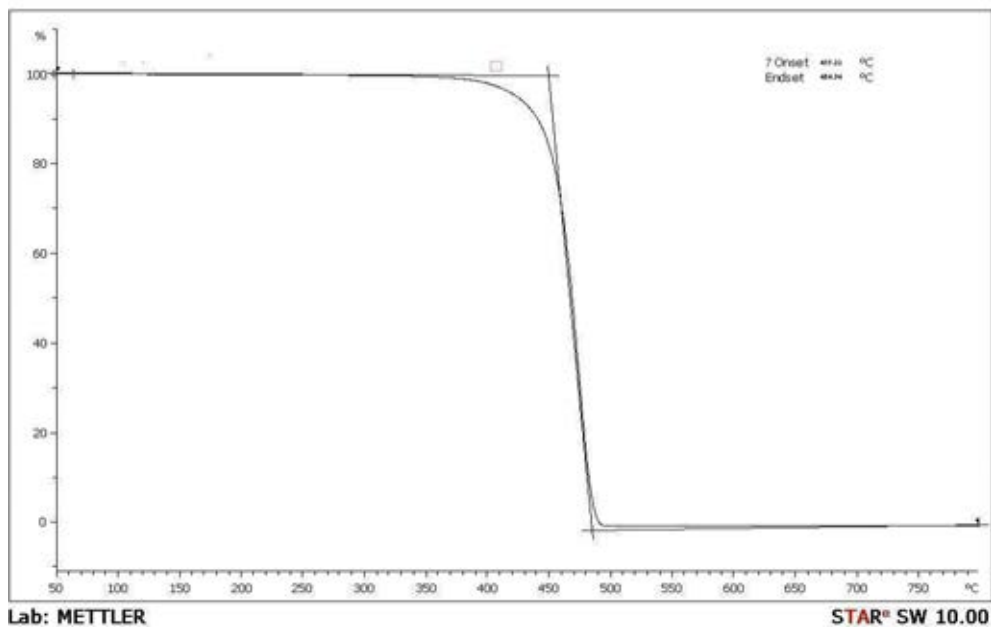




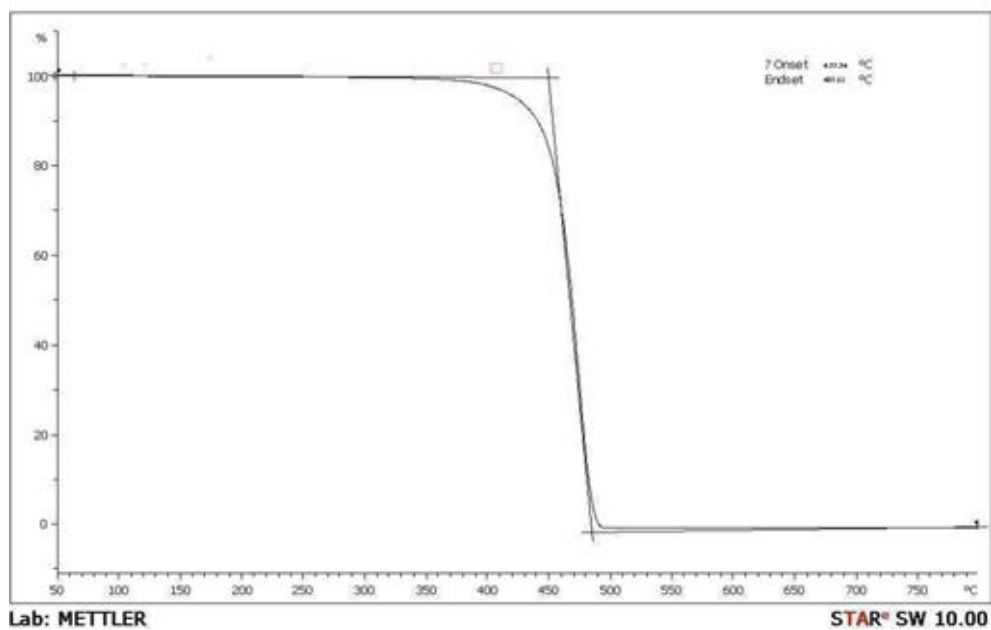
รูป จ-9 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิไพร์ฟีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/0



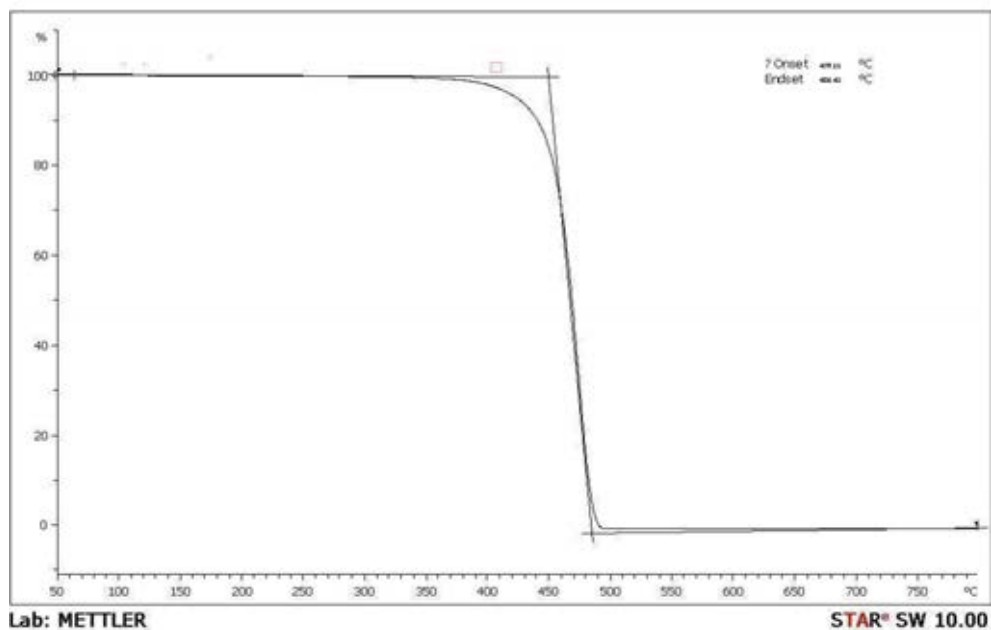
รูป จ-10 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิไพร์ฟีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/10



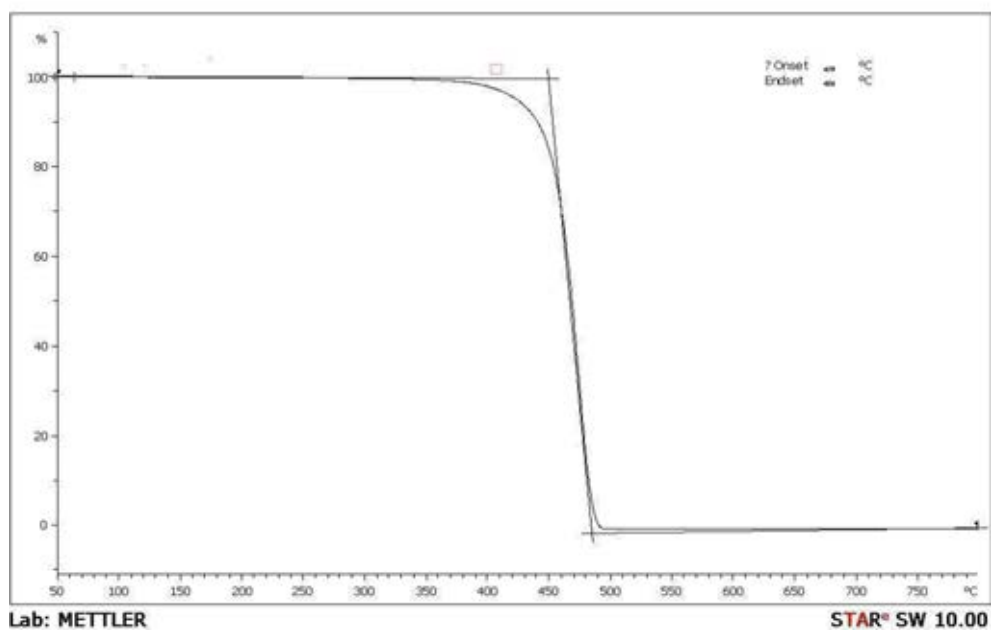
รูป จ-11 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิไพร์ฟีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/20



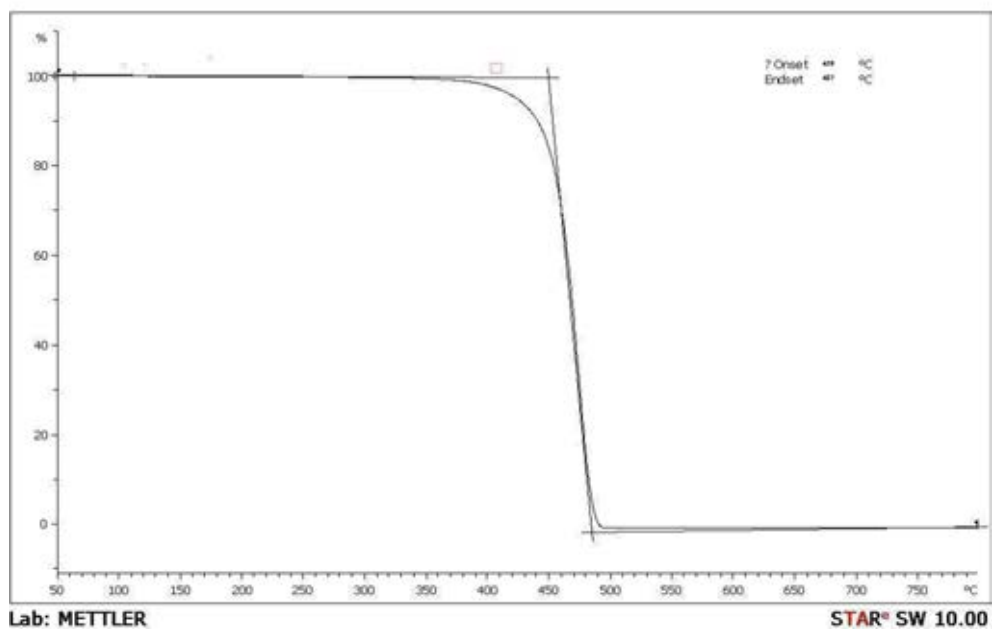
รูป จ-12 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิไพร์ฟีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/30



รูป จ-13 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/10/5



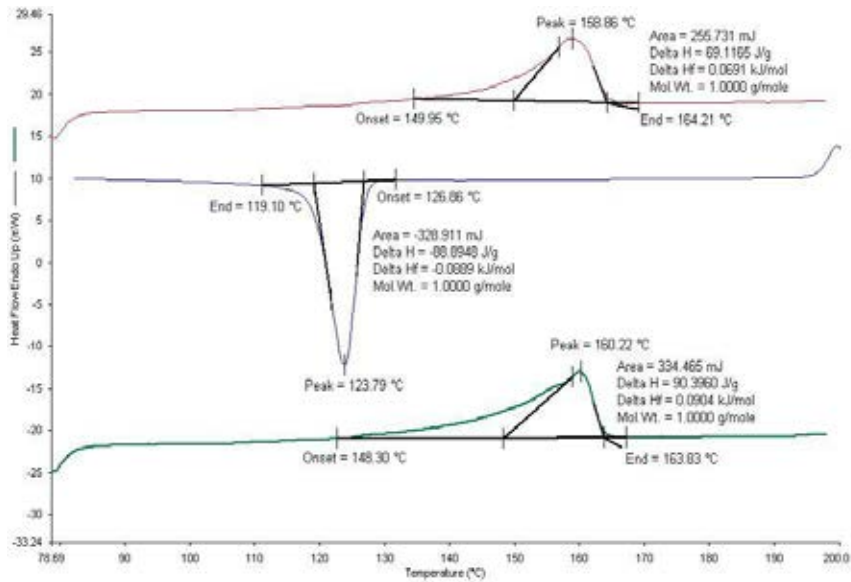
รูป จ-14 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/20/5



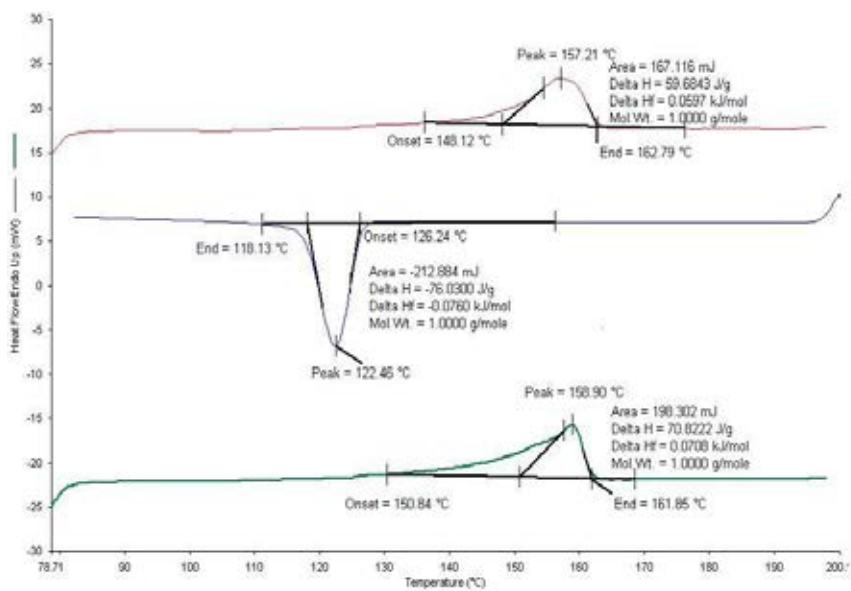
รูป จ-15 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/30/5

## ภาคผนวก จ

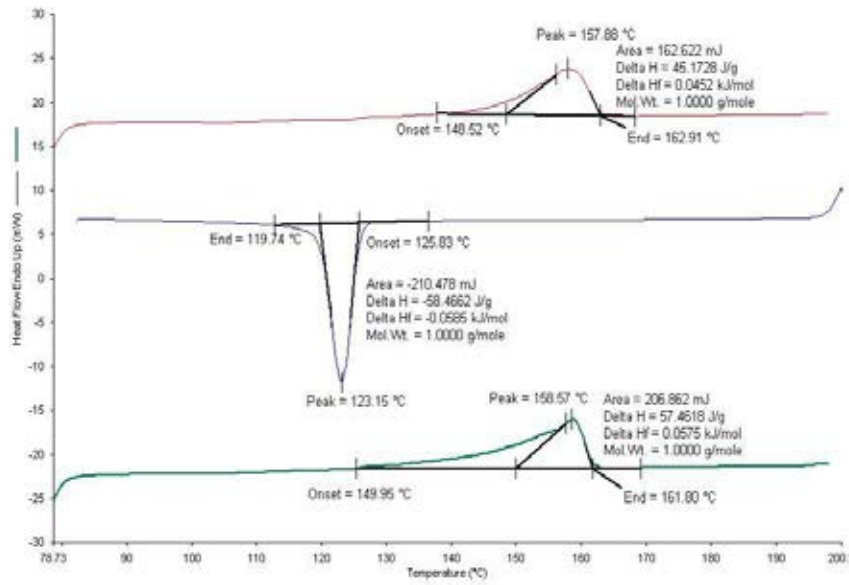
## ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC



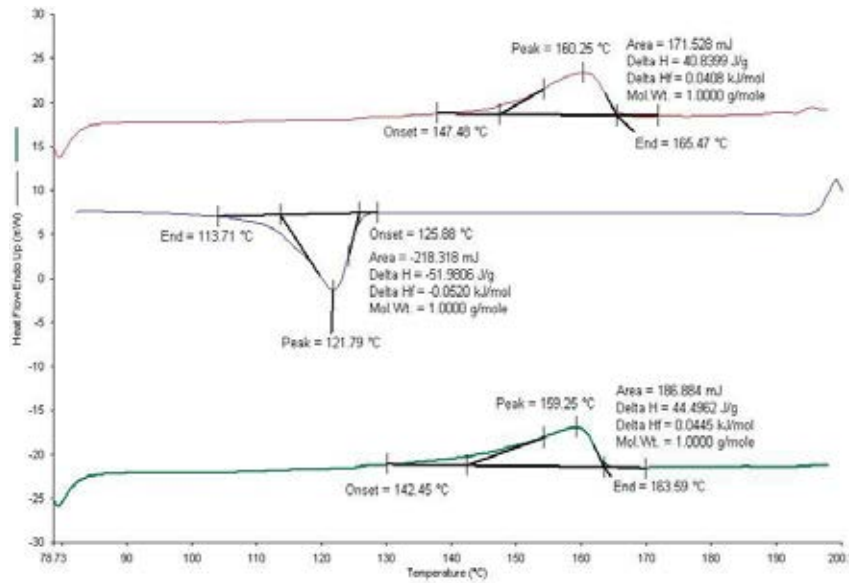
รูป จ-1 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิไพรีนคอมพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 100/0/0



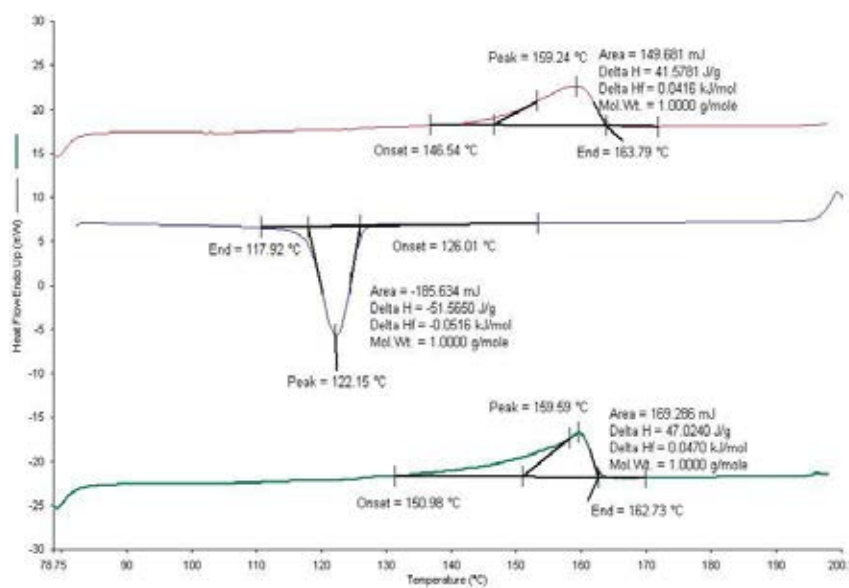
รูป จ-2 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิไพรีนคอมพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 80/20/0



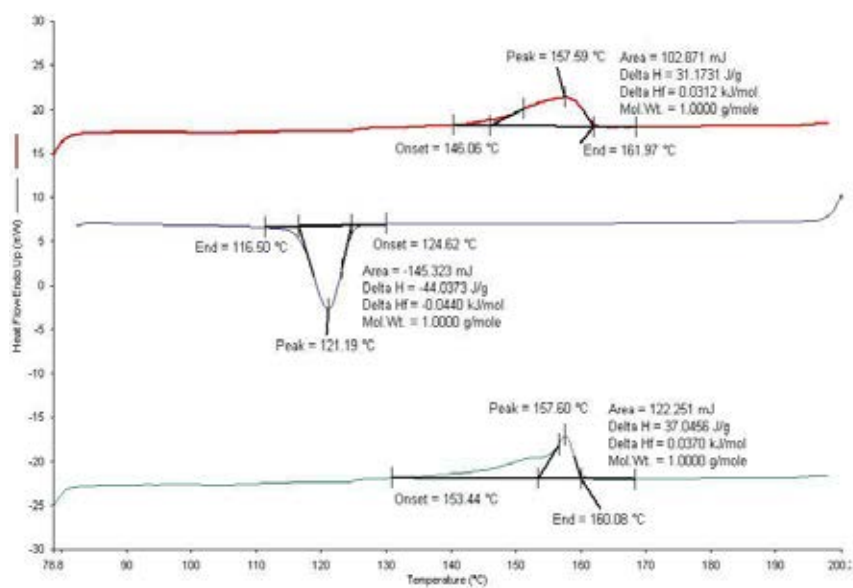
รูป จ-3 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/10



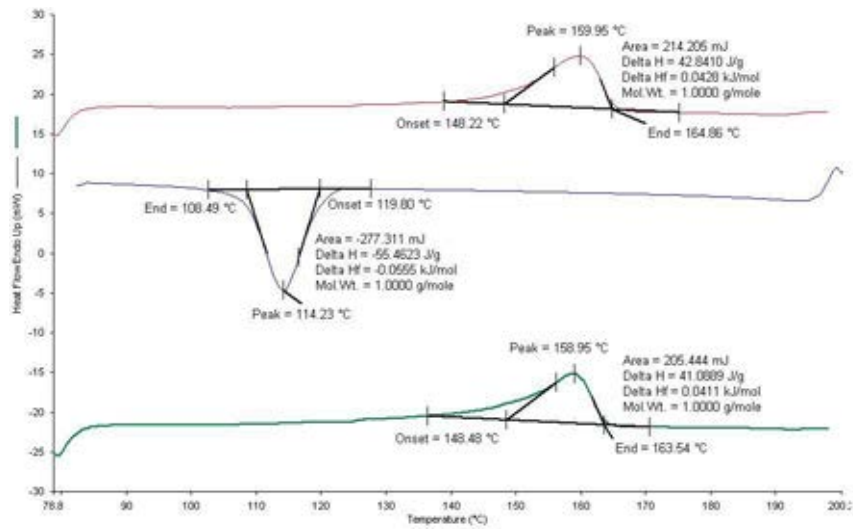
รูป จ-4 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/20



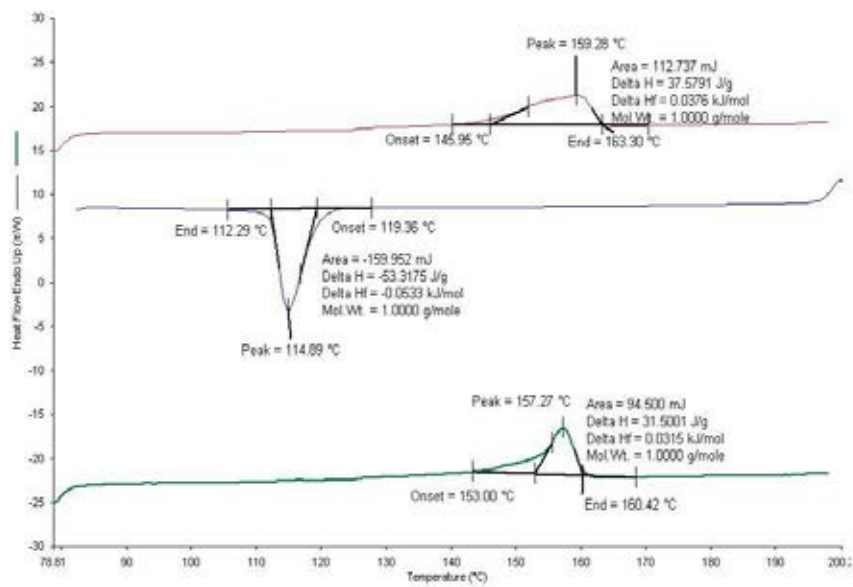
รูป จ-5 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/30



รูป จ-6 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/10/5

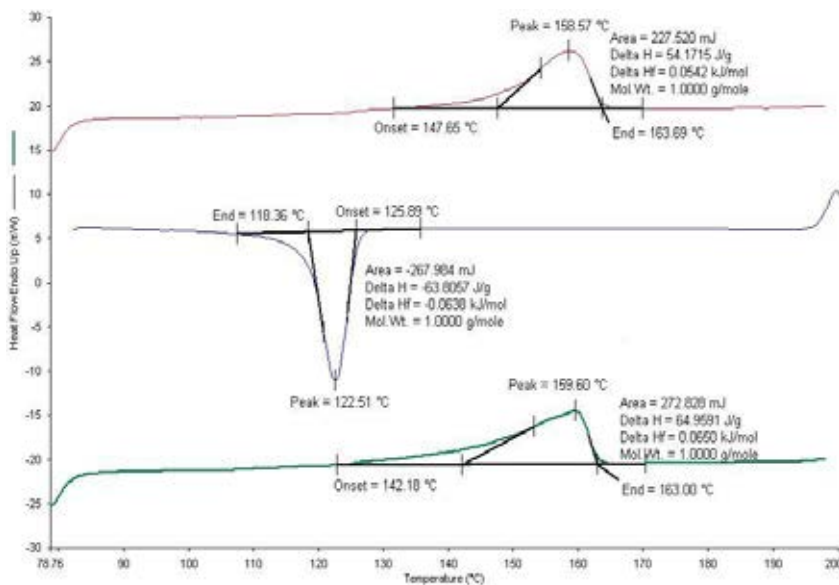


รูป จ-7 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิไพร์พิดีนคอมพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 80/20/20/5

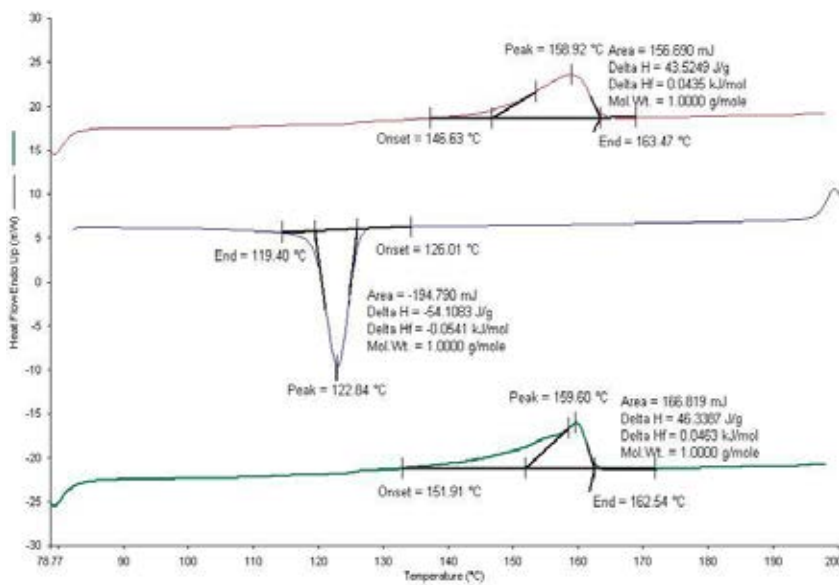


รูป จ-8 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิไพร์พิดีนคอมพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 80/20/30/5

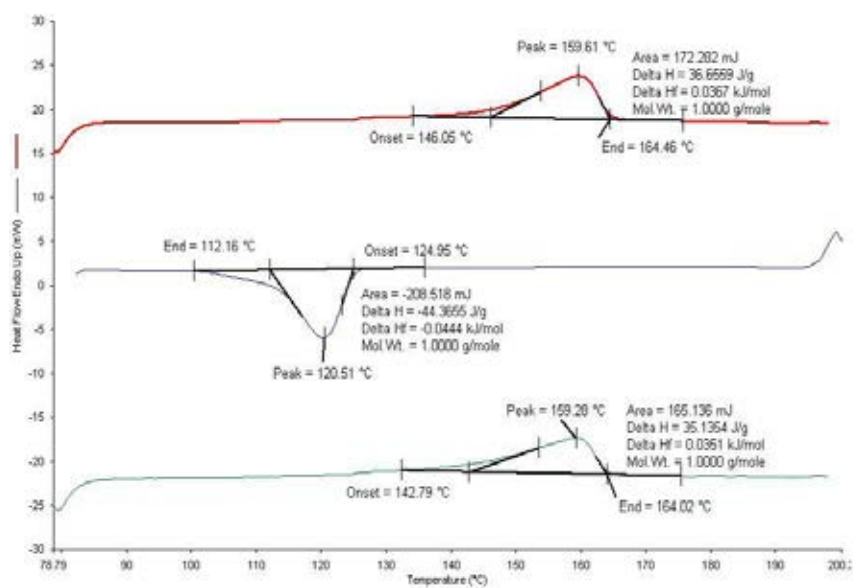




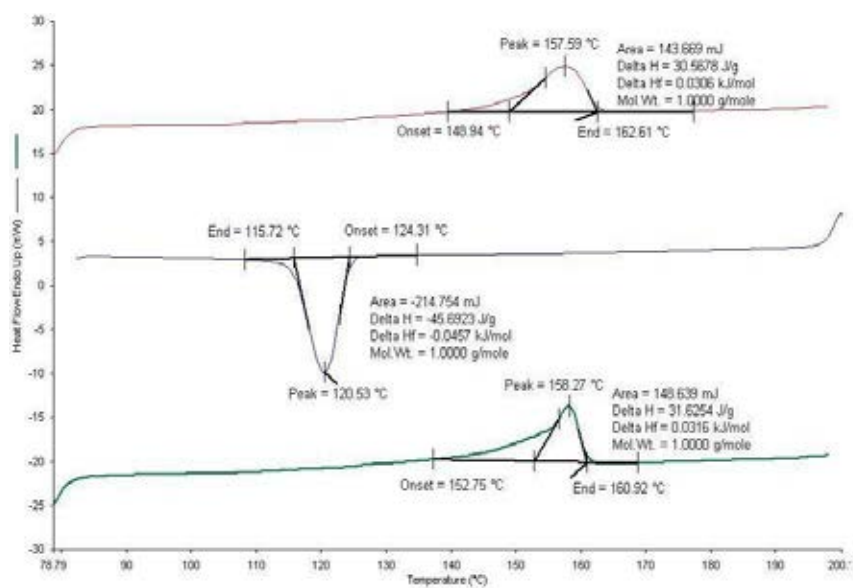
รูป ฉ-9 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/0



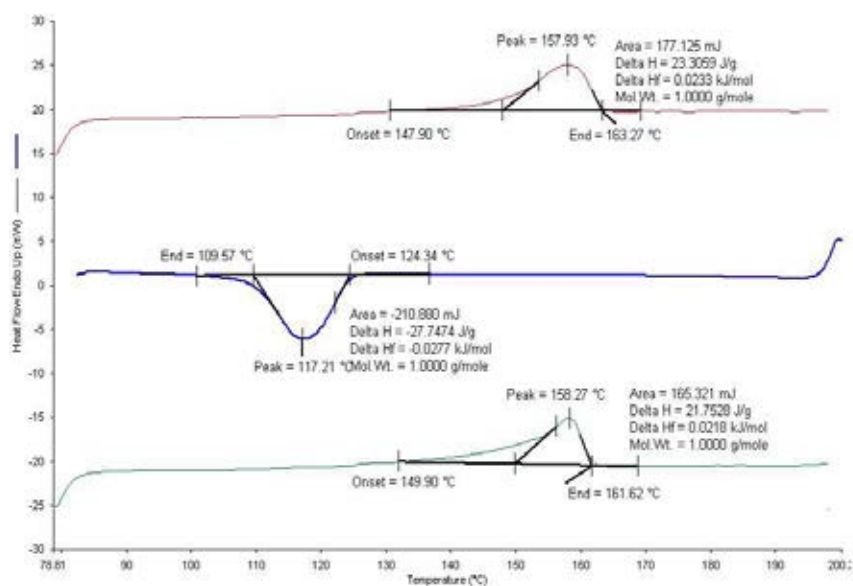
รูป ฉ-10 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/10



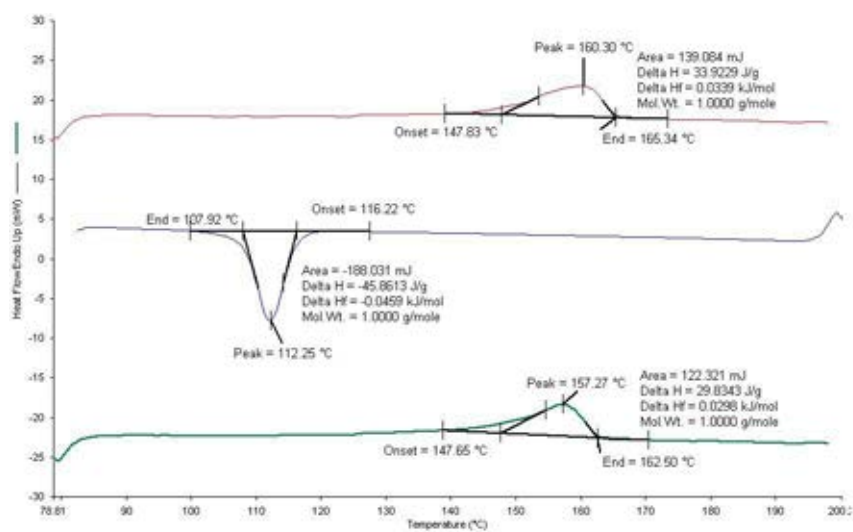
รูป จ-11 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/20



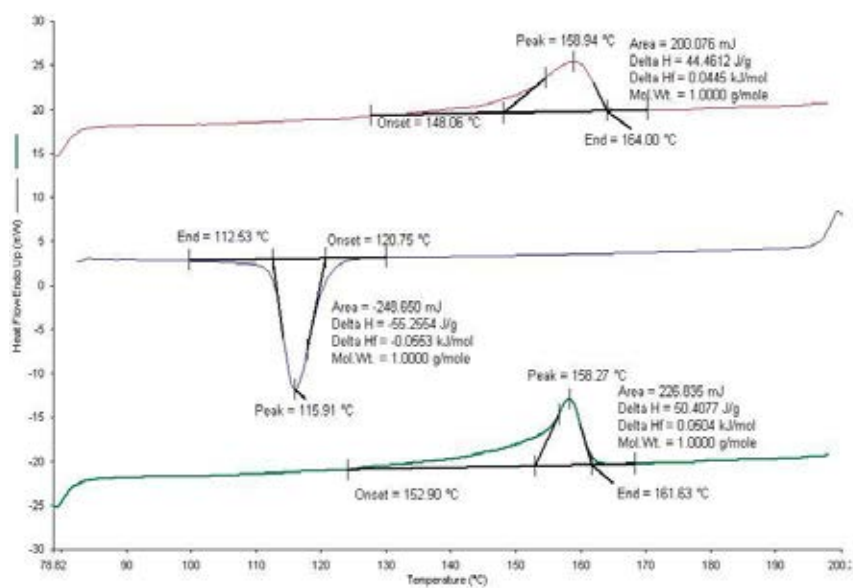
รูป จ-12 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/30



รูป จ-13 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิไพร์ฟิไลน์คอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/10/5



รูป จ-14 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิไพร์ฟิไลน์คอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/20/5

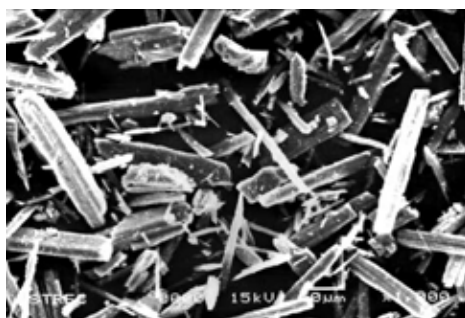


รูป จ-15 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/30/5

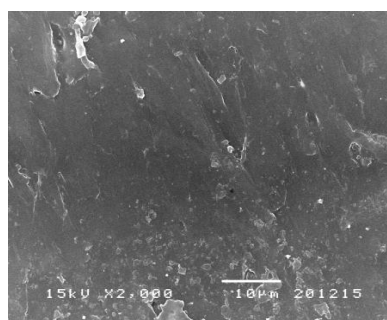
## ภาคผนวก ช

### ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

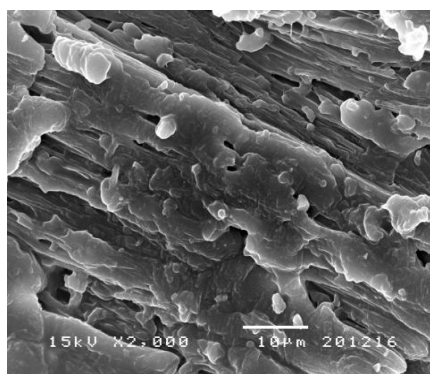
ภาพสัณฐานวิทยาของโพลลาสโทไนต์และบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4-4.7



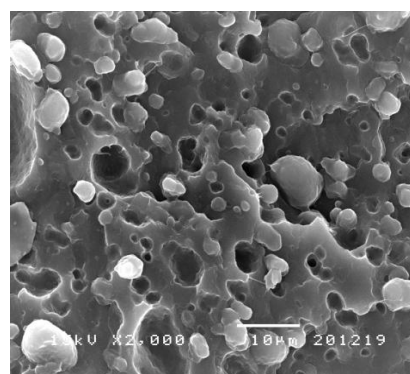
รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของโพลลาสโทไนต์ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



100PP/0EPDM

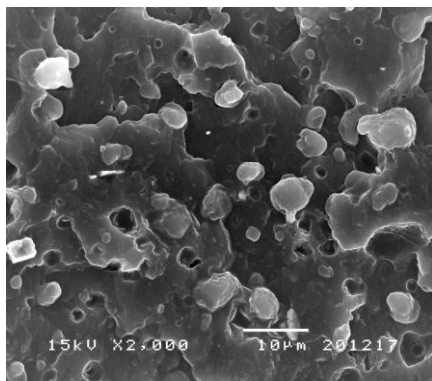


80PP/20EPDM

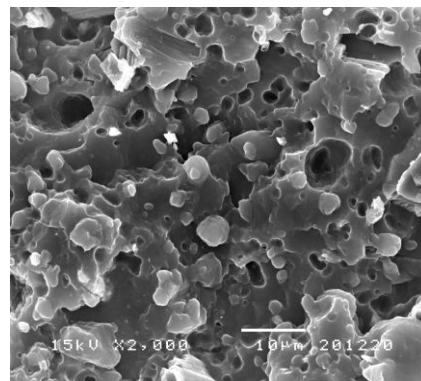


70PP/30EPDM

รูปที่ 4.5 สัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์และพอลิเมอรั่มผสมพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนที่กำลังขยาย 2000 เท่า



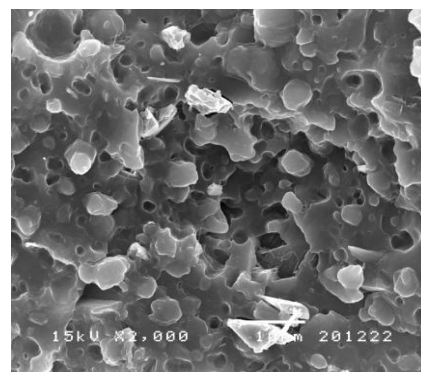
80PP/20EPDM/10WoI



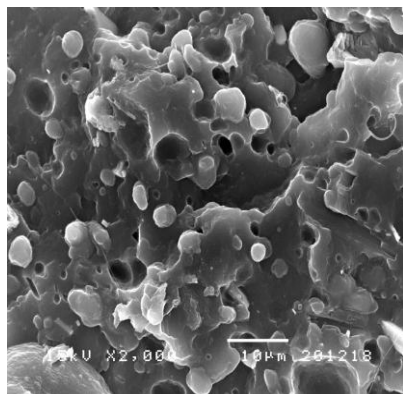
70PP/30EPDM/10WoI



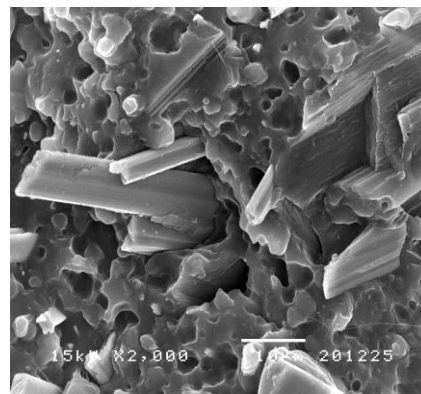
80PP/20EPDM/20WoI



70PP/30EPDM/20WoI

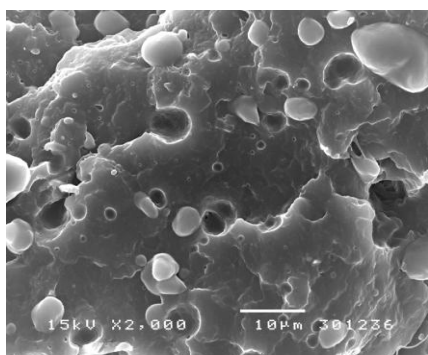


80PP/20EPDM/30WoI

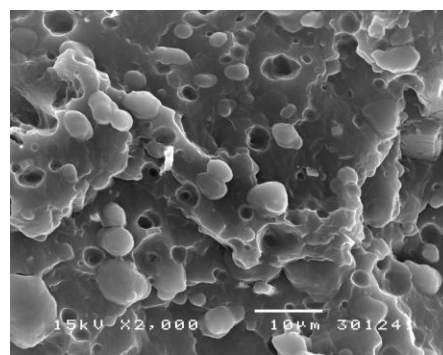


70PP/30EPDM/30WoI

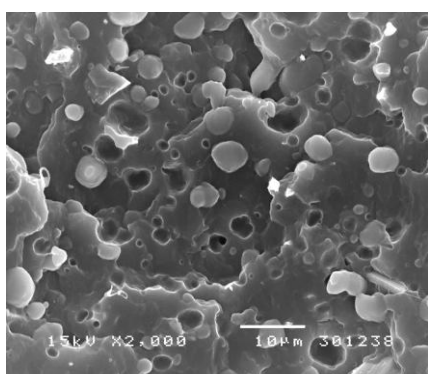
รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/  
โกลลาสโทไนต์คอมพอสิต ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



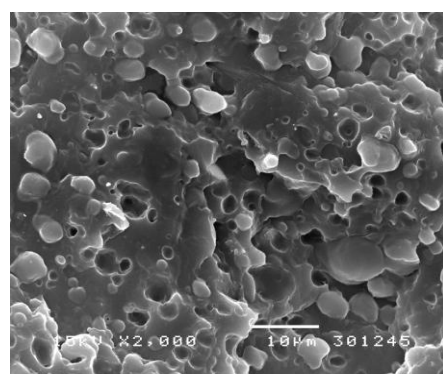
80PP/20EPDM/10Wol/5MA



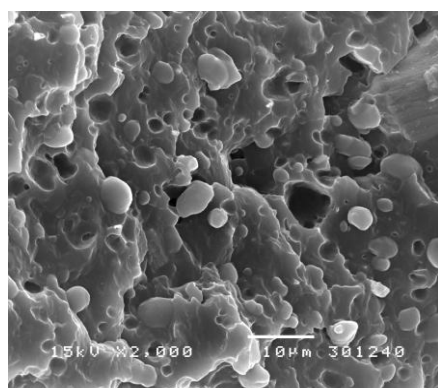
70PP/30EPDM/10Wol/5MA



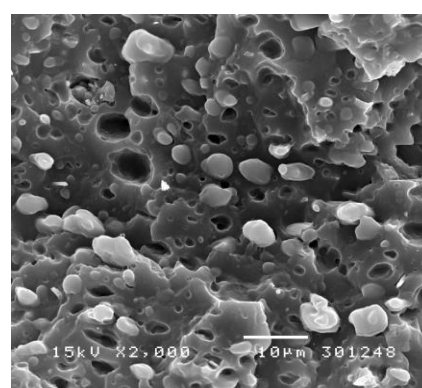
80PP/20EPDM/20Wol/5MA



70PP/30EPDM/20Wol/5MA



80PP/20EPDM/30Wol/5MA



70PP/30EPDM/30Wol/5MA

รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิโพรพิลีน/ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน/โวลลาสโทไนต์/พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์คอมพอสิต ที่กำลังขยาย 2000 เท่า

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายฐิติสร กาญจนมยุร เกิดเมื่อวันที่ 26 ตุลาคม พ.ศ. 2530 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาพอลิเมอร์และสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2553 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2554



