

ผลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและโพลลาสโพนัดต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนของพีดีซี  
แล้ว



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF POLY(BUTYLENE SUCCINATE) AND WOLLASTONITE ON MECHANICAL AND  
THERMAL PROPERTIES OF POST CONSUMED-PET

Mr. Konlasad Neeraratmanit



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 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและโพลลาสโไทนด์ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนของพีดีซีแล้ว
โดย	นายกลศาสตร์ นีรนาทมานิต
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. อัญญาพร บุญมหิตินิสุทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวงนิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร. อัญญาพร บุญมหิตินิสุทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ อรุษา สรวารี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร. อำนวย ลาภเกษมสุข)

กลศาสตร์ นีรนาทมานิต : ผลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและโวลลาสโทไนต์ต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อนของพีดีซีแล้ว (EFFECTS OF POLY(BUTYLENE SUCCINATE) AND WOLLASTONITE ON MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF POST CONSUMED-PET) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร. อัญญาพร บุญมทิทธิสุทธิ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร, 96 หน้า.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การปรับปรุงสมบัติเชิงกล เสถียรภาพทางความร้อน และทางกายย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตใช้แล้ว (พีดีซีแล้ว) ด้วยการเติมพอลิ บิวทิลีนซัคซิเนต ซึ่งเป็นแอลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้และมีความ ยืดหยุ่นสูง และโวลลาสโทไนต์ ซึ่งเป็นสารตัวเติมอนินทรีย์ที่มีผลึกรูปเข็ม โดยขั้นแรกได้ทำการผสม พีดีซีแล้วแบบหลอมเหลวกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 5 อัตราส่วน (10-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ด้วย เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ก่อนตัดให้เป็นเม็ด ตามด้วยการเตรียมชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ จากการทดสอบ พบว่า ความทนแรงดึง ความทนแรงกระแทก การยืดตัว ณ จุดขาด ระดับการเกิดผลึก การดูดซึมน้ำและการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่ ยังสัมพันธ์กับความ ทนแรงดัดโค้งและเสถียรภาพทางความร้อนลดลง โดยพอลิเมอร์ผสมพีดีซีแล้ว/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ในอัตราส่วน 60/40 โดยน้ำหนัก มีความทนแรงดึงและกระแทกสูงสุด จึงถูกเลือกเพื่อนำไปเตรียม คอมพอสิตกับโวลลาสโทไนต์ที่ปริมาณ 10, 20, 30 และ 40 ส่วนต่อน้ำหนักเรซินผสมร้อยละ โดย พีดีซีแล้ว/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/โวลลาสโทไนต์คอมพอสิตได้ถูกเตรียมด้วยกระบวนการเดียวกันกับ ที่กล่าวมาข้างต้น จากการทดสอบ พบว่า ความทนแรงดึง, ยังสัมพันธ์และเสถียรภาพทางความร้อน ของคอมพอสิตได้รับการปรับปรุง ขณะที่ การยืดตัว ณ จุดขาด ความทนแรงกระแทกและแรงดัดโค้ง ระดับการเกิดผลึก ความทนไฟและการดูดซึมน้ำลดลง อย่างไรก็ตาม คอมพอสิตที่เติมโวลลาสโทไนต์ ที่ปริมาณ 40 ส่วนต่อน้ำหนักเรซินผสมร้อยละ มีสมบัติที่ดีที่สุด

ภาควิชา วัสดุศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

เทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

ปีการศึกษา 2558

# # 5771914323 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS:

KONLASAD NEERANATMANIT: EFFECTS OF POLY(BUTYLENE SUCCINATE) AND WOLLASTONITE ON MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF POST CONSUMED-PET. ADVISOR: ANYAPORN BOONMAHITTHISUD, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. SAOWAROJ CHAUYJULJIT, 96 pp.

This study aimed to improve the mechanical properties, thermal stability and biodegradability of post consumed-poly(ethylene terephthalate) (p-PET) by incorporation of poly(butylene succinate) (PBS), a very flexible biodegradable aliphatic polyester and wollastonite (WT), a needle-shaped inorganic filler. First, p-PET was melt blended with five loadings of PBS (10-50 wt%) on a twin screw extruder. The extrudates were pelletized and then fabricated into test specimens by an injection molding. The tensile strength (TS), impact strength (IS), elongation at break (EB), degree of crystallinity ( $X_c$ ), water absorption and biodegradability were found to be improved, but at the expense of reduction of the Young's modulus (E), flexural strength (FS) and thermal stability of the blends caused by the addition of PBS into p-PET. Among the p-PET/PBS blends, the 60/40 (wt%/wt%) p-PET/PBS blend exhibited the optimal IS and TS. This blend ratio was further filled with four loadings of wollastonite (10, 20, 30 and 40 parts per hundred resin, phr). The composites of p-PET/PBS filled with various loadings of wollastonite were also prepared by the process as above. The TS, E and thermal stability of the composites were then found to be improved, while EB, IS, FS,  $X_c$ , flammability and water absorption were decreased. However, the composite containing 40 WT had the optimum properties.

Department: Materials Science Student's Signature .....

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

Academic Year: 2015

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ทุกประการ เนื่องจากได้รับความเอื้อเฟื้อด้านข้อมูล วัสดุดิบ เงินทุน วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำการวิจัย รวมถึงคำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และคำปรึกษาทางด้านวิชาการจากผู้ทรงคุณวุฒิหลายท่านที่มีส่วนทำให้งานวิจัยเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ ข้าพเจ้าจึงขอกราบขอบพระคุณคุณคณาจารย์ บุคคล และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังรายนาม ต่อไปนี้ เป็นอย่างสูง

1. อาจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมทิทธิสุทธิ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และรองศาสตราจารย์เสาวรจรรย์ ช่วยจุลจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ที่ได้แนะนำแนวทางการดำเนินงาน ให้คำแนะนำและคำปรึกษาทางวิชาการ รวมทั้งการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

2. รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์อรอุษา สรวารี และ อาจารย์ ดร.อำนาจ ลาภเกษมสุข กรรมการภายในและภายนอกในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาให้คำแนะนำและคำปรึกษา ตลอดจนตรวจสอบความถูกต้องในการจัดทำวิทยานิพนธ์

3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คณศ วังษะระวี ที่กรุณาให้การสนับสนุนทางด้านเครื่องมือในการทำวิจัย

4. เจ้าหน้าที่ภาควิชาวัสดุศาสตร์ และภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการทำงานวิจัย

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และขอขอบคุณ รุ่นพี่และเพื่อนๆ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้กำลังใจ คำปรึกษา และการสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทศาสตร์ความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือเพ็ต (Polyethylene terephthalate, PET).....	3
2.1.1 สมบัติของเพ็ต.....	4
2.1.2 การใช้งานของเพ็ต.....	4
2.2 การรีไซเคิลพลาสติก.....	4
2.2.1 การรีไซเคิลเพ็ตด้วยกระบวนการทางกายภาพ.....	5
2.2.2 การรีไซเคิลเพ็ตด้วยกระบวนการทางเคมี.....	5
2.3 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate, PBS).....	6
2.3.1 สมบัติและการนำไปใช้งานของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต.....	6
2.4 การสลายตัวของพลาสติก.....	7
2.4.1 การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation).....	7

2.4.2 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative Degradation).....	7
2.4.3 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Degradation) .....	7
2.4.4 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) .....	7
2.5 สารตัวเติม (Filler).....	8
2.5.1 สมบัติของสารตัวเติม .....	9
2.6 โวลลาสโทไนต์ (Wollastonite, WT).....	9
2.6.1 สมบัติทางกายภาพของโวลลาสโทไนต์.....	9
2.6.2 การใช้งานโวลลาสโทไนต์.....	10
2.7 วัสดุคอมพอสิต (Composite Materials).....	10
2.8 กระบวนการขึ้นรูปพลาสติก .....	11
2.8.1 เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single screw extruder).....	11
2.8.2 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder).....	11
2.8.3 เครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding) .....	12
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
บทที่ 3 วิธีการทดลอง .....	16
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	16
3.2 เครื่องผสมและเครื่องขึ้นรูปขึ้นทดสอบ.....	16
3.3 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบ .....	16
3.4 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทดลอง.....	17
3.5. การเตรียมพอลิเมอร์ผสม .....	18
3.6 การเตรียมคอมพอสิต.....	19
3.7 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ.....	19
3.8 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ .....	20



3.8.1 การทดสอบความทนแรงกระแทก (impact strength).....	20
3.8.2 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง (tensile properties).....	21
3.8.3 การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength).....	22
3.8.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC) .....	23
3.8.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA).....	24
3.8.6 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	25
3.8.7 การทดสอบการลุกไหม้ (flammability test).....	26
3.8.8 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (water absorption).....	27
3.8.9 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน .....	28
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	29
4.1 ลักษณะขึ้นทดสอบ .....	29
4.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS.....	30
4.2.1 สมบัติด้านแรงดึง (Tensile properties).....	30
4.2.2 ความทนแรงกระแทก (Impact strength, IS).....	32
4.2.3 ความทนแรงดัดโค้ง (Flexural strength, FS).....	33
4.3 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิต p-PET/PBS/WT.....	35
4.3.1 สมบัติด้านแรงดึง (Tensile properties).....	35
4.3.2 ความทนแรงกระแทก (Impact strength, IS).....	37
4.3.3 ความทนแรงดัดโค้ง (Flexural strength, FS).....	38
4.4 สมบัติทางความร้อน.....	39
4.4.1 พฤติกรรมการเกิดผลึก (Crystallinity behavior).....	39
4.4.2 เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) .....	41

4.5 การทดสอบการลามไฟ (Flame rate test).....	43
4.6 สัณฐานวิทยา (Morphology).....	44
4.7 การดูดซึมน้ำ (Water absorption).....	47
4.8 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability).....	48
4.8.1 สมบัติด้านแรงดึงหลังฝังดิน .....	48
4.8.2 สัณฐานวิทยาหลังฝังดิน .....	50
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	53
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	53
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	54
รายการอ้างอิง .....	55
ภาคผนวก ก.....	59
ภาคผนวก ข.....	71
ภาคผนวก ค.....	82
ภาคผนวก ง .....	86
ภาคผนวก จ.....	89
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	96

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	สมบัติของพอลิไวนิลิลีนซัคซิเนต Grade FZ91PD .....	6
ตารางที่ 2.2	ความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ของพลาสติก .....	8
ตารางที่ 2.3	สมบัติทางกายภาพของโพลลาสโไทด์ .....	10
ตารางที่ 3.1	อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม .....	18
ตารางที่ 3.2	อัตราส่วนของคอมพอสิต .....	19
ตารางที่ 4.1	สมบัติด้านแรงดึงของ p-PET, PBS และพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS.....	30
ตารางที่ 4.2	ความทนแรงกระแทกของ p-PET, PBS และพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS.....	32
ตารางที่ 4.3	ความทนแรงดัดโค้งของ p-PET, PBS และพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS .....	34
ตารางที่ 4.4	สมบัติด้านแรงดึงของ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต .....	35
ตารางที่ 4.5	ความทนแรงกระแทกของ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต .....	37
ตารางที่ 4.6	ความทนแรงดัดโค้งของ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต .....	38
ตารางที่ 4.7	พฤติกรรมการเกิดผลึกของ p-PET, PBS และพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS และ ...	40
ตารางที่ 4.8	เสถียรภาพทางความร้อนของ p-PET, PBS และ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต...	42

## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต .....	3
รูปที่ 2.2	โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต .....	6
รูปที่ 2.3	โครงสร้างผลึกของโพลลาสโตนีต .....	9
รูปที่ 2.4	เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว .....	11
รูปที่ 2.5	เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่.....	12
รูปที่ 2.6	เครื่องฉีดพลาสติก.....	13
รูปที่ 2.7	ส่วนต่างๆของเครื่องฉีดแบบ .....	13
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการทดลอง.....	17
รูปที่ 3.2	เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่.....	18
รูปที่ 3.3	เครื่องฉีดแบบ .....	20
รูปที่ 3.4	ขั้นตอนทดสอบความทนแรงกระแทก .....	20
รูปที่ 3.5	เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก .....	21
รูปที่ 3.6	ขั้นตอนทดสอบสมบัติความทนแรงดึง .....	21
รูปที่ 3.7	เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล.....	22
รูปที่ 3.8	ขั้นตอนทดสอบความทนแรงดัดโค้ง.....	22
รูปที่ 3.9	เครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้ง.....	23
รูปที่ 3.10	เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ .....	24
รูปที่ 3.11	เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน.....	25
รูปที่ 3.12	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	25
รูปที่ 3.13	เครื่องทดสอบการเผาไหม้ของพอลิเมอร์.....	26
รูปที่ 3.14	ขั้นตอนสอบการลุกไหม้ไฟ.....	26
รูปที่ 3.15	ขั้นตอนสอบการดูดซึมน้ำ .....	27
รูปที่ 3.16	ขั้นตอนสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน.....	28

รูปที่ 4.1	ชั้นทดสอบของ (a) p-PET, (b) PBS และพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS ที่อัตราส่วน (c) 90/10, (d) 80/20, (e) 70/30, (f) 60/40 และ (g) 50/50 .....	29
รูปที่ 4.2	ชั้นทดสอบของ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิตในปริมาณ WT: (a) 10, (b) 20, (c) 30 และ (d) 40 phr.....	29
รูปที่ 4.3	สมบัติด้านแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ย้งส์มอดุลัส (c) การยืดตัว ณ จุดขาดของ p-PET, PBS และพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS.....	31
รูปที่ 4.4	ความทนแรงกระแทกของ p-PET, PBS และพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS.....	33
รูปที่ 4.5	ความทนแรงดัดโค้งของ p-PET, PBS และพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS.....	34
รูปที่ 4.6	สมบัติด้านแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ย้งส์มอดุลัส (c) การยืดตัว ณ จุดขาดของ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต.....	36
รูปที่ 4.7	ความทนแรงกระแทกของ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต.....	38
รูปที่ 4.8	ความทนแรงดัดโค้งของ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต .....	39
รูปที่ 4.9	อัตราการลามไฟของ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต .....	43
รูปที่ 4.10	ลักษณะชั้นทดสอบของ p-PET, PBS, พอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS และ 60/40 p-PET/PBS/WT คอมพอสิตภายหลังการติดไฟ.....	44
รูปที่ 4.11	สัณฐานวิทยาของ (a) p-PET, (b) PBS และพอลิเมอร์ผสม p-PET /PBS ที่อัตราส่วน (c) 90/10, (d) 80/20, (e) 70/30 (f) 60/40 และ (g) 50/50 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า .....	45
รูปที่ 4.12	สัณฐานวิทยาของ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิตที่ปริมาณ WT: (a) 0, (b) 10, (c) 20 และ (d) 30 phr ที่กำลังขยาย 1000 เท่า .....	46
รูปที่ 4.13	การดูดซึมน้ำของ p-PET, PBS, พอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS และ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต.....	47
รูปที่ 4.14	สมบัติด้านแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ย้งส์มอดุลัส, (c) การยืดตัว ณ จุดขาดของ p-PET, PBS, พอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS และ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิตภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 วัน.....	49

**รูปที่ 4.15** สัณฐานวิทยาของ (a) p-PET, (b) PBS, (c) โพลีเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS และ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิตที่ปริมาณ WT: (d) 10, (e) 20, (f) 30 และ (g) 40 phr ภายหลังจากฝังดินเป็นเวลา 0, 60 และ 120 วัน .....51



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันพลาสติกเป็นวัสดุที่มีความสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์และมีแนวโน้มในการใช้งานที่มากขึ้นเรื่อยๆ ไม่ว่าจะเป็นทางด้านบรรจุภัณฑ์ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือเพ็ต (poly(ethylene terephthalate), PET) ก็เป็นพลาสติกชนิดหนึ่งที่ได้ถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายในการผลิตเส้นใย พิล์ม และบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากสมบัติเด่นด้านความแข็งแรง ความใส ความสามารถในการสกัดกันแก๊ส ราคาถูกและง่ายต่อการขึ้นรูป แต่เนื่องจากเพ็ตมีความทนทานต่อสารเคมี สภาพแวดล้อมและการย่อยสลายทางชีวภาพที่สูงมากทำให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกที่ถูกทิ้งเป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตาม เพ็ตเป็นพลาสติกที่สามารถคัดแยกจากขยะพลาสติกอื่นๆ ได้ง่าย จึงมีวิธีการจัดเก็บและรวบรวมที่ไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากนัก หากแต่ขวดเพ็ตที่ใช้แล้วเหล่านี้ไม่เหมาะที่จะนำกลับไปผลิตเป็นขวดน้ำดื่มหรือเครื่องดื่มอื่น เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความสะอาดและความใสเป็นสำคัญ การนำขวดเพ็ตมารีไซเคิลนั้นนอกจากจะช่วยลดปัญหาขยะพลาสติกได้แล้ว ยังทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนของเพ็ตใช้แล้ว (recycled PET) ลดลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับเพ็ตใหม่ (virgin PET) เนื่องจากความยาวสายโซ่โมเลกุลและน้ำหนักของเพ็ตมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามปริมาณเพ็ตใช้แล้วที่รวบรวมจากขวดเพ็ตใช้แล้วและเศษเพ็ตที่ตกค้างในกระบวนการผลิตมีปริมาณมากพอที่จะทำให้กระบวนการรีไซเคิลเพ็ตมีความสำคัญในทางอุตสาหกรรม ดังนั้น แนวทางการปรับปรุงสมบัติของเพ็ตใช้แล้วได้แก่ การนำพอลิเมอร์ต่างชนิดและ/หรือสารอนินทรีย์มาผสมกับเพ็ตใช้แล้วเพื่อเตรียมพอลิเมอร์ผสมและ/หรือพอลิเมอร์คอมพอสิต ซึ่งเป็นวิธีที่ธรรมดาและสะดวกที่สุด อย่างไรก็ตามการเลือกชนิดของพอลิเมอร์หรือสารอนินทรีย์ควรคำนึงถึงสมบัติและความเข้ากันได้เป็นสำคัญ ซึ่งการควบคุมสัณฐานวิทยาจะมีผลต่อการปรับปรุงทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนของผลิตภัณฑ์ และเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเชิงกลและ/หรือสมบัติเชิงความร้อนที่ดี และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ด้วยการผสมเพ็ตใช้แล้วกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (poly(butylene succinate), PBS) ซึ่งเป็นแอลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ที่สังเคราะห์จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบควบแน่นระหว่าง 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butane diol) และซัคซิินิกแอซิด (succinic acid) ได้พอลิเมอร์กึ่งผลึกที่มีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งสามารถย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradable) ได้อย่างรวดเร็วในดิน และด้วยเอนไซม์ โดยมีสมบัติเชิงกลที่ดีใกล้เคียงพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีน โดยสามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการเดียวกันกับพอลิโอเลฟินส์ทั่วไป และนำไปเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตกับ โวลลาสโทไนต์ (wollastonite,  $\text{CaSiO}_3$ ) ซึ่งเป็นแร่อนินทรีย์ประเภทแคลเซียมซิลิเกต มีอนุภาคขนาดเล็กละเอียดและมีอนุภาครูปเข็ม เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล

เสถียรภาพทางความร้อน ลดการหดตัวและความสามารถในการหลอมหายเมื่อเกิดการตีไฟของผลิตภัณฑ์อีกทั้งยังมีราคาที่ถูกเมื่อเทียบกับสารเสริมแรงชนิดอื่น

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เตรียมพอลิเมอร์ผสมของพีทีซีแล้ว/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และคอมพอสิตของพีทีซีแล้ว/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/โพลีลาสโตนต์ด้วยกระบวนการฉีดแบบ

2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงความร้อน การย่อยสลายทางชีวภาพและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตที่เตรียมได้

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่างของพีทีซีแล้ว/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/โพลีลาสโตนต์ในอัตราส่วนต่างๆด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่และขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยกระบวนการฉีดแบบจากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน สัณฐานวิทยา การตีไฟ และการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เตรียมได้

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้คอมพอสิตของพีทีซีแล้ว/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/โพลีลาสโตนต์ที่มีสมบัติเชิงกลเสถียรภาพทางความร้อนและการย่อยสลายทางชีวภาพที่ดี

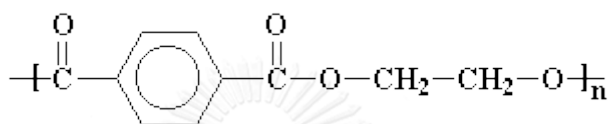


## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือเพ็ต (Polyethylene terephthalate, PET) [1-4]

เพ็ตเป็นเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์ที่มีความแข็งแรง น้ำหนักเบา และมีความใส จึงมีความนิยมในการนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ขวดบรรจุน้ำ พิมพ์บรรจุภัณฑ์ เป็นต้น เพ็ต มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วอยู่ในช่วง 70-80 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 260 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นประมาณ 1.38 g/m ซึ่งหนักกว่าน้ำ โดยมีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.1

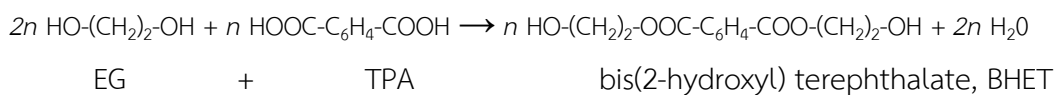


รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

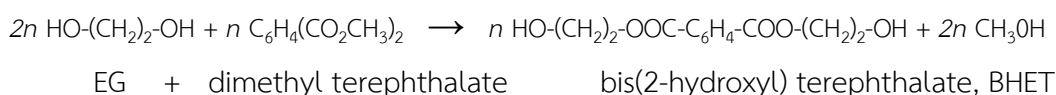
การสังเคราะห์เพ็ตสามารถทำได้โดยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (esterification) ระหว่าง กรดเทเรฟทาเลอิก (terephthalic acid (TPA)) กับ เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol (EG)) โดยมีน้ำเกิดขึ้น หรืออีกหนึ่งวิธี คือการเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ระหว่าง ไดเมทิลเทเรฟทาเลต (dimethyl terephthalate) กับเอทิลีนไกลคอล โดยปัจจุบันนี้นิยมใช้วิธีการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง ไดเมทิลเทเรฟทาเลต กับ เอทิลีนไกลคอล เนื่องจากได้เพ็ตที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า ซึ่งขั้นตอนการสังเคราะห์ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เป็นปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบสารละลาย สามารถเตรียมได้ 2 วิธี ดังสมการต่อไปนี้

**วิธีที่ 1** ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างเอทิลีนไกลคอลกับกรดเทเรฟทาเลอิก

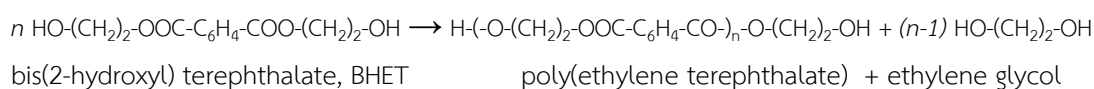


**วิธีที่ 2** ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ระหว่างเอทิลีนไกลคอลและไดเมทิลเทเรฟทาเลต



ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา คือ บิส 2-ไฮดรอกซีเอทิลเทเรฟทาเลต (bis(2-hydroxyethyl) terephthalate) และเมทานอล

ขั้นตอนที่ 2 เป็นปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบหลอมเหลว (melt polymerization) โดยเพิ่มอุณหภูมิจนถึงประมาณ 270-280 องศาเซลเซียส ทำให้เอทิลีนไกลคอลถูกกำจัดออกจากระบบอย่างต่อเนื่องเพื่อป้องกันปฏิกิริยาย้อนกลับ ดังสมการต่อไปนี้



### 2.1.1 สมบัติของพีท

- มีความแข็งแรง ไสและเหนียว
- มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง
- ทนทานต่อสารเคมีและการย่อยสลายทางชีวภาพ
- ความสามารถในการสกัดกั้นแก๊ส
- การผลิตค่อนข้างง่าย
- ราคาถูก

### 2.1.2 การใช้งานของพีท

การใช้งานของพีตนิยมนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ เช่น ขวดน้ำอัดลม ขวดน้ำมัน และผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความใสในการใช้งาน เช่น ฟิล์มสำหรับห่ออาหาร เนื่องจากพีทมีความสามารถที่ดีในการสกัดกั้นแก๊สและจากสมบัติที่ดีและราคาที่ถูกของพีทตามที่กล่าวไป จึงได้มีการนิยมนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลายทำให้เกิดปัญหาขยะตกค้างในสิ่งแวดล้อมมากมาย ส่งผลให้เกิดมลพิษและระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงได้มีการนำขยะเหล่านี้กลับมารีไซเคิลเพื่อใช้งานใหม่ เพื่อลดปัญหาขยะตกค้างและยังสามารถลดต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย วิธีการรีไซเคิลพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสามารถทำได้ทั้งการรีไซเคิลทางกายภาพเนื่องจากสมบัติเทอร์โมพลาสติกของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และการรีไซเคิลทางเคมีโดยอาศัยความสามารถในการทำปฏิกิริยาเคมีกับสารต่างๆ เพื่อทำให้เกิดการย่อยสลายขึ้นได้นั่นเอง

## 2.2 การรีไซเคิลพลาสติก [5, 6]

เนื่องจากในปัจจุบันได้มีการใช้พลาสติกกันเป็นจำนวนมาก ปัญหาขยะพลาสติกตกค้างในระบบนิเวศ จึงเกิดขึ้น ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม การนำขยะพลาสติกมารีไซเคิลจึงได้รับการสนใจ เพื่อลดปัญหาดังกล่าว การรีไซเคิลพลาสติกคือการเก็บรวบรวมขยะพลาสติกที่ผ่านการใช้แล้วมาทำการแปรรูปอีกครั้ง เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ใหม่ การรีไซเคิลพลาสติกแบ่งได้เป็น 4 ประเภทหลักๆ ได้แก่

1. การรีไซเคิลระดับปฐมภูมิ (primary recycling) เป็นการนำขยะหรือพลาสติกที่ผ่านการใช้แล้วที่เป็นประเภทเดียวกันและไม่มีสิ่งเจือปน กลับมาใช้ซ้ำรูปของผลิตภัณฑ์เดิมหรือใกล้เคียงโดยสามารถนำมาใช้ซ้ำทั้งหมดหรือเติมผสมกับเม็ดใหม่

2. การรีไซเคิลระดับทุติยภูมิ (secondary recycling) เป็นการนำขยะหรือพลาสติกที่ผ่านการใช้แล้วมาทำความสะอาด และทำการผลิตให้เป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกอีกครั้งโดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะแตกต่างจากการใช้งานในครั้งแรก เช่น การรีไซเคิลทางกายภาพ (physical recycling) เป็นวิธีที่ง่ายและนิยมใช้มากที่สุด การรีไซเคิลทางกายภาพ เป็นการคัดแยกพลาสติกตามประเภทมาล้างทำความสะอาดก่อนนำมาบดเป็นชิ้นเล็กๆและหลอมเป็นเม็ดพลาสติก เพื่อนำกลับไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่หรือนำมาผสมกับเม็ดใหม่เพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการก่อนนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูป เนื่องจากวิธีการรีไซเคิลทางกายภาพเป็นการหลอมขึ้นรูปใหม่ทำให้โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกที่หลอม ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

3. การรีไซเคิลระดับตติยภูมิ (tertiary recycling) เป็นการนำขยะหรือพลาสติกที่ผ่านการใช้แล้วมาเข้าสู่กระบวนการแปรรูป เพื่อเป็นวัตถุดิบตั้งต้นอีกครั้ง การรีไซเคิลทางเคมี (chemical recycling) เป็นกระบวนการที่ทำให้โครงสร้างสายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการขาดหรือแตกออก ได้มอนอเมอร์ (monomer) หรือโอลิโกเมอร์ (oligomer) และการรีไซเคิลทางความร้อน (thermolysis) แบ่งออกได้เป็น 3 วิธีคือแบบไม่ใช้ออกซิเจน (pyrolysis) แบบใช้ออกซิเจน (gasification) และการเติมไฮโดรเจน (hydrogenation) นอกจากนี้ยังมีการย่อยสลายขยะพลาสติก เช่น ปฏิกริยาไฮโดรลิซิส (hydrolysis) ไกลโคลิซิส (glycolysis) อีกด้วย โดยวิธีการข้างต้นจะทำให้ได้มอนอเมอร์และสารเคมีตั้งต้นซึ่งสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์หรือสารเคมีอื่นๆได้

4. การรีไซเคิลจตุภูมิ (quaternary recycling) เป็นการนำพลาสติกมาเผาเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงทดแทน โดยการเผาไหม้ของพลาสติกให้ค่าความร้อนใกล้เคียงกับถ่านหิน (23 MJ/kg) ข้อดีของการรีไซเคิลวิธีนี้คือไม่ต้องคัดแยกประเภทของขยะพลาสติกก่อนนำมาเผา ซึ่งช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาในการรีไซเคิลได้ อีกทั้งยังช่วยลดขยะออกจากสิ่งแวดล้อมได้ดีกว่าวิธีฝังกลบหรือนำขยะไปถมที่แหล่งน้ำและยังได้พลังงานทดแทนอีกด้วย

### 2.2.1 การรีไซเคิลพีดีด้วยกระบวนการทางกายภาพ

การรีไซเคิลพีดีด้วยกระบวนการทางกายภาพ นั้นควรแยกขยะพลาสติกกับสิ่งเจือปนออกก่อน จากนั้นสามารถนำไปหลอมเพื่อขึ้นรูปใหม่หรือตัดเป็นเม็ดพลาสติกเพื่อนำไปใช้ร่วมกับเม็ดพลาสติกบริสุทธิ์ สามารถนำไปผลิตเป็นเส้นใยพอลิเอสเตอร์หรือผสมกับเส้นใยชนิดอื่น หรือนำไปเป็นสารตัวเติมกับพลาสติกชนิดอื่นได้

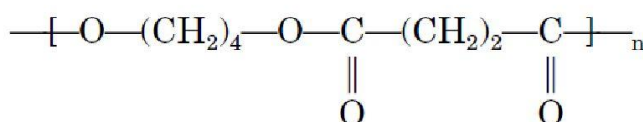
### 2.2.2 การรีไซเคิลพีดีด้วยกระบวนการทางเคมี

การรีไซเคิลพีดีด้วยกระบวนการทางเคมีนั้น ขั้นตอนแรกเริ่มจากการย่อยสลายพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตด้วยกระบวนการทางเคมีเพื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเมอร์หรือสารชนิดอื่นต่อไป ซึ่งวิธีการย่อยสลายพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตทางเคมีนั้น สามารถทำ

ได้หลายวิธีเช่น ไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เมทาโนไลซิส (methanolysis) ไกลโคไลซิส (glycolysis) เป็นต้น

### 2.3 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate, PBS) [7-9]

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นแอลิฟาติกพอลิเอสเตอร์แบบเส้น สังเคราะห์จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบควบแน่นระหว่าง 1,4 บิวเทนไดออล (1,4-butane diol) และซัคซินิกแอซิด (succinic acid) ได้พอลิเมอร์กิ่งผลึกที่มีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างรวดเร็วในดิน และด้วยเอนไซม์ โดยมีสมบัติเชิงกลที่ดีใกล้เคียงพอลิเอทิลีน และพอลิโพรพิลีน มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วประมาณ -30 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 110-120 องศาเซลเซียส โดยสามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการเดียวกับที่ใช้กับพอลิโอเลฟินส์ทั่วไป โดยมีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

#### 2.3.1 สมบัติและการนำไปใช้งานของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นพลาสติกที่มีสีขาวขุ่น มีสมบัติเชิงกลและความยืดหยุ่นสูง ทนความร้อนได้ถึง 200 องศาเซลเซียส และมีความสามารถในการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ทางธรรมชาติ จึงเหมาะจะนำไปใช้แทนที่พีดี พอลิโพรพิลีน พอลิเอทิลีน และพอลิแล็กติกแอซิด สำหรับวัสดุที่ต้องการความยืดหยุ่นและความเหนียว ผลิตภัณฑ์ประเภทใช้ครั้งเดียวทิ้ง ฟิล์มบรรจุอาหาร ฟิล์มคลุมดินสำหรับการเกษตร รวมไปถึงวัสดุที่ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมต่างๆ เช่น ส่วนประกอบและชิ้นส่วนตกแต่งภายในยานพาหนะ

#### ตารางที่ 2.1 สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต Grade FZ91PD

Properties	Test Method	Unit	Grade FZ91PD
Density	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1.26
Melt Flow Index	ISO1133	g/10 min	5
Melting Point	ISO3146	°C	115
Yield Stress	ISO 527-2	MPa	40
Stress as Break	ISO 527-2	MPa	30
Strain at Break	ISO 527-2	%	160

## 2.4 การสลายตัวของพลาสติก [10]

ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้โดยทั่วไป เราสามารถแบ่งกลไกการย่อยสลายของพลาสติกเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ คือ

### 2.4.1 การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation)

เป็นการย่อยสลายโดยแสงเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะกองคอมโพสท์ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีมืด หรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการพิมพ์ด้วยหมึกที่หนามากบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

### 2.4.2 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative Degradation)

เป็นการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติ โดยมีออกซิเจน และความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ

### 2.4.3 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Degradation)

เป็นการย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอนไฮดริค พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์

### 2.4.4 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

เป็นการย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์ โดยจากการย่อยสลายธาตุคาร์บอนในโมเลกุลการใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติกในปัจจุบันมีความนิยมอย่างมาก การเลือกใช้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ช่วยลดปัญหามลภาวะที่เกิดจากขยะพลาสติกตกค้างได้ ซึ่งพลาสติกแต่ละชนิดมีความสามารถและความทนทานต่อการย่อยสลายแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.2

**ตารางที่ 2.2** ความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ของพลาสติก [4]

พอลิเมอร์	การใช้งาน	ความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์
Polyethylene	Packing films, insulation containers	VH
Polypropylene	Packing films	VH
Poly(vinyl chloride)	Packing films foam	VH
Poly(vinylidene chloride)	Packing films of high chemical stability	H
Poly(vinyl acetate)	Packing films, varnish, fabrics	M
Poly(vinyl alcohol)	Packing films	H
Polystyrene	Films, foam	H
Poly(methyl methacrylate)	Plexiglas	H
Polytetrafluoroethylene	Insulation	H
Polytrifluorochloroethylene	Insulation	H
Cellulose acetate	Acetate rayon	H
Polyamides	Fabrics	L
Poly(ethylene terephthalate)	Fabrics	F
Silicone	Coating	H
Phenol formaldehyde	Bakelite	H
Urea formaldehyde	-	H

VH=Very high, H=High, M=Moderate, L=Low, F=Fair

นอกจากการใช้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติแล้ว การนำพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้มาผสมกับพลาสติกที่ย่อยสลายได้ ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหามลภาวะจากขยะพลาสติกได้เช่นกัน

## 2.5 สารตัวเติม (Filler) [11-13]

สารตัวเติมเป็นของแข็งที่ใส่ในพอลิเมอร์ เพื่อลดต้นทุนการผลิต (extender) หรือปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ (reinforcing filler) สารตัวเติมที่ใช้กันทั่วไปมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนิน

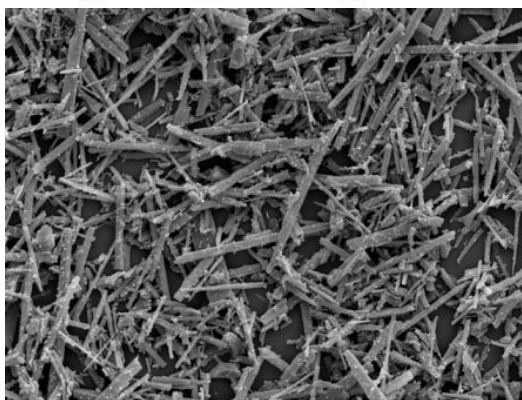
นทรีย์ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate), ผงไม้ (wood flour), ไมกา (mica), เยื่อไม้ (wood pulp), ทัลค์ (talc), แป้ง (starch) และโวลลาสโทไนต์ (wollastonite) เป็นต้น

### 2.5.1 สมบัติของสารตัวเติม

- สะอาด ไม่มีสิ่งเจือปน ไม่เป็นพิษ
- ฉื่อยต่อปฏิกิริยา ไม่ละลาย
- มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี
- กระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ง่าย
- ขนาดอนุภาคสม่ำเสมอ
- ไม่เกิดการสึกหรอจากการขัดสีกับเครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูป
- สมบัติและโครงสร้างไม่เปลี่ยนแปลงขณะขึ้นรูป

### 2.6 โวลลาสโทไนต์ (Wollastonite, WT) [14-17]

โวลลาสโทไนต์เป็นแร่ประเภทแคลเซียมซิลิเกต (metasilicate,  $\text{CaSiO}_3$ ) ที่ได้จากธรรมชาติ มีโครงสร้างผลึกเป็นรูปเข็ม (acicular or needle-like) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โวลลาสโทไนต์ถูกตั้งชื่อตามนักเคมีชาวอังกฤษผู้ค้นพบ คือ W.H. Wollaston โวลลาสโทไนต์บริสุทธิ์มีสีขาวซึ่งเกิดจากการเกาะกลุ่มของผลึก โวลลาสโทไนต์ที่พบในธรรมชาติมักมีสารปนเปื้อนประเภทไอออนของโลหะ เช่น อะลูมินา เหล็ก แมกนีเซียม โพแทสเซียม และโซเดียมปนอยู่ โวลลาสโทไนต์สังเคราะห์ได้จากกระบวนการให้ความร้อนและความดัน (hydrothermal) ซึ่งจะเปลี่ยนหินปูน (limestone) เป็นโวลลาสโทไนต์ และคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของโวลลาสโทไนต์ [16]

#### 2.6.1 สมบัติทางกายภาพของโวลลาสโทไนต์

โวลลาสโทไนต์เป็นแร่แคลเซียมซิลิเกตสีขาวขุ่น ประกอบด้วยด้วยแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ประมาณ 48% และ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ประมาณ 52% มีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.9 ค่า

ความเป็นกรด-ด่าง (pH) 10.0 มีความแข็ง (Moh's Hardness) 4.5 และมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (aspect ratio) อยู่ในช่วง 3-20 ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพของโวลลาสโทไนต์ [14]

Mineral name	Wollastonite
Chemical name	Calcium metasilicate
Chemical formula	CaSiO <sub>3</sub>
Specific gravity	2.80 ~ 2.95
Melting point	1540°C
Mohs scale hardness	4.5 ~ 5.0
pH (10% slurry)	9.5 ~ 10.5
Aspect ratio	3 ~ 20
Refractive index	1.63
Coefficient of thermal expansion	6.5×10 <sup>-6</sup> /°C

## 2.6.2 การใช้งานโวลลาสโทไนต์

โวลลาสโทไนต์ถูกนำมาใช้ในทางอุตสาหกรรมมากในช่วงปี ค.ศ.1950 ทั้งอุตสาหกรรมพลาสติก สี อุปกรณ์ทนการขีดสี เซรามิก และโลหะ แทนแร่ใยหินเนื่องจากมีอันตรายต่อสุขภาพน้อยกว่า ในปัจจุบันเริ่มนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของวัสดุคอมพอสิตเพื่อเสริมแรงพลาสติกเนื่องจากความแข็งของโวลลาสโทไนต์จึงปรับปรุงสมบัติเชิงกล ยังส์มอดูลัส เสถียรภาพทางความร้อน ลดการหดตัวและความสามารถในการหลอมหยดเมื่อเกิดการติดไฟของผลิตภัณฑ์ สามารถใช้ร่วมกับสารปรับปรุงผิวประเภทซีแลน ไททานเนต และเอสเทอร์ เพื่อลดการเกาะตัวกัน ทำให้กระจายตัวในเมทริกซ์ได้ดี นอกจากนี้ การใช้โวลลาสโทไนต์เกรดที่มีอนุภาคละเอียดมากๆ จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความต้านทานการขีดขีด และความทนแรงกระแทกสูงกว่าการใช้วัสดุอื่นๆ

## 2.7 วัสดุคอมพอสิต (Composite Materials) [18]

วัสดุคอมพอสิต หรือวัสดุเชิงประกอบ หมายถึง วัสดุซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 2 ประเภทขึ้นไปมารวมกัน โดยทั่วไปจะมีวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก (matrix) และวัสดุเสริมแรง (reinforcement materials) ที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อหลัก วัสดุเสริมแรงจะช่วยเพิ่มหรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลหรือสมบัติทางความร้อนของวัสดุเนื้อหลัก ให้สูงขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถช่วยในเรื่องการหดตัวและการติดไฟของวัสดุที่เป็นเนื้อหลักได้อีกด้วย ซึ่งวัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะเป็นเส้น ก้อน อนุภาค หรือเกล็ดก็ได้ ปัจจุบันวัสดุคอมพอสิตแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. พอลิเมอร์คอมพอสิต ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่พบเห็นได้ง่ายของคอมพอสิตกลุ่มนี้คือ ผลิตภัณฑ์ที่ทำจาก ไฟเบอร์กลาส ต่าง ๆ พอลิเมอร์คอมพอสิตมีพอลิเมอร์ซึ่งอาจจะเป็นพลาสติก หรือ



ยางเป็นเนื้อหลัก และใช้วัสดุเสริมแรงได้หลายชนิด เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เส้นลวด โลหะ เป็นต้น

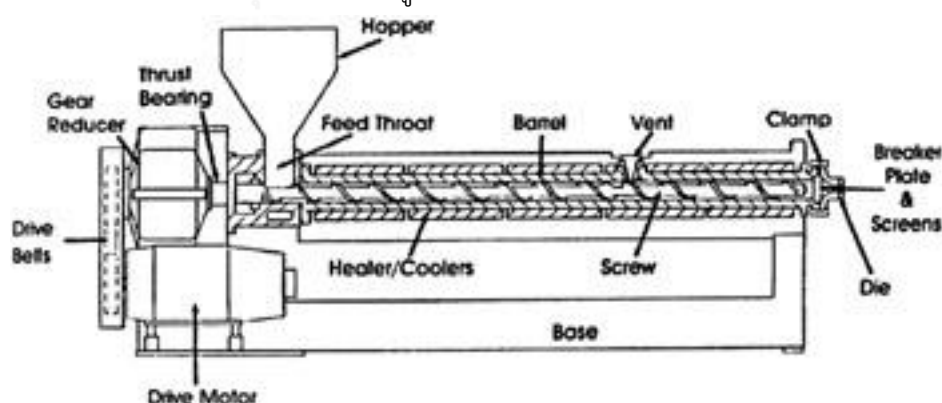
2. เซรามิกคอมพอสิต คอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก (ปูน กรวด ทราย เหล็กเส้น) เป็นตัวแทนที่พบเห็นได้ทั่วไปของวัสดุกลุ่มนี้ ใช้วัสดุเสริมแรงเป็นเส้นใย คอมพอสิตกลุ่มนี้มักนำมาใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง เช่น กังหันใบพัดของเครื่องยนต์ไอพ่น เป็นต้น
3. เมทัลคอมพอสิต คอมพอสิตกลุ่มนี้พบมากในผลิตภัณฑ์กลุ่มอุตสาหกรรมการยานยนต์ เมทัลคอมพอสิตมีโลหะเป็นเนื้อหลัก เช่น อะลูมิเนียม เป็นต้น สำหรับวัสดุเสริมแรงของคอมพอสิตกลุ่มนี้เป็นวัสดุเซรามิกส์ เช่น กลุ่มคาร์ไบด์ กลุ่มไนไตรด์ เป็นต้น

## 2.8 กระบวนการขึ้นรูปพลาสติก [19-22]

การอัดรีดเป็นกระบวนการแปรรูปวัสดุโดยการอัดพลาสติกหลอมไหลผ่านหัวตายที่มีรูปร่างตามต้องการ จัดเป็นกระบวนการแปรรูปแบบต่อเนื่อง และผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่ไม่ใช่ผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายแต่ต้องนำไปเข้ากระบวนการชนิดอื่นต่อ

### 2.8.1 เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single screw extruder)

โดยทั่วไปเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (รูปที่ 2.4) ที่ใช้ในการแปรรูปพลาสติกมักใช้สกรูแบบธรรมดา ซึ่ง ไม่สามารถผสมสารเติมแต่งให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกับพลาสติกได้ เนื่องจากการหมุนของสกรูแบบนี้ไม่ ก่อให้เกิดแรงเฉือนมากพอที่จะทำให้สารเติมแต่งต่างๆ เกิดการกระจายตัวได้ดีถึงระดับโมเลกุล ดังนั้นการใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวในการคอมพาวด์พลาสติกจึงต้องปรับปรุงลักษณะของสกรู โดยการเพิ่มส่วนที่เพิ่มแรงเฉือนของสกรู

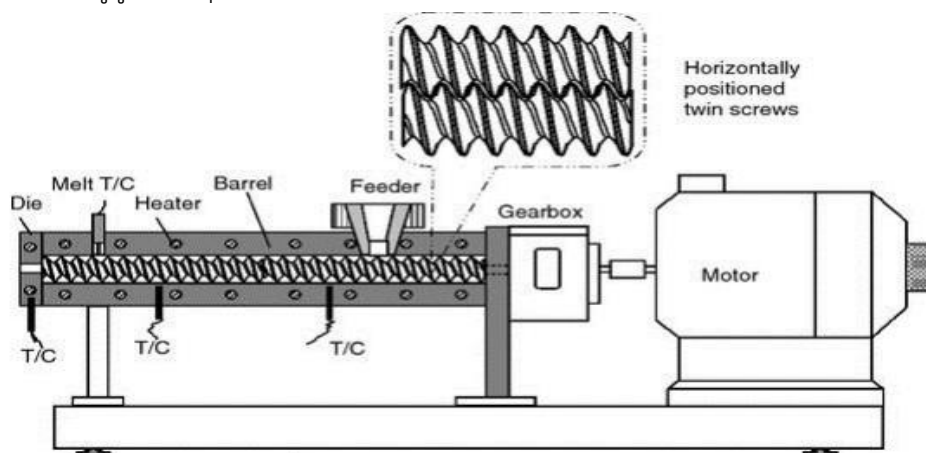


รูปที่ 2.4 เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว [20]

### 2.8.2 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder)

เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (รูปที่ 2.5) มักมีประสิทธิภาพการผสมสูงกว่าเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ทั้งนี้ เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการหมุนของสกรูคู่สูงกว่า โดยลักษณะการหมุนของสกรูคู่

มีสอง แบบ ได้แก่ การหมุนในทิศทางเดียวกัน (co-rotating screw) และการหมุนสวนทางกัน (counter-rotating screw) โดยในการทำคอมปาวด์พลาสติกมักใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่มีลักษณะการหมุน ของสกรูคู่แบบหมุนในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 2.5 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ [19]

### 2.8.3 เครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding)

การแปรรูปพลาสติกโดยวิธีการฉีดนั้นจะทำจากสารพลาสติกที่เป็นเม็ดหรือเป็นผง ซึ่งอาจจะเป็นเทอร์โมพลาสติก เทอร์โมเซตหรืออีลาสโตเมอร์ก็ได้ ปัจจุบันการแปรรูปพลาสติกโดยการฉีดแบบเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย โดยเครื่องฉีดพลาสติก (รูปที่ 2.6) ประกอบด้วยส่วนสำคัญหลาย ๆ ส่วน (รูปที่ 2.7) ได้แก่

1. ชุดฉีด (injection unit) มีหน้าที่ตั้งแต่การรับเม็ดพลาสติกจาก Hopper มาแล้วทำการหลอมเหลว ก่อนที่จะทำการฉีดพลาสติกเหลวเข้าไปในช่องว่าง (cavity) ของแม่พิมพ์ (mold)
2. ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ (clamping unit) Clamp unit เป็นชุดอุปกรณ์มีหน้าที่ในการติดตั้งแม่พิมพ์, เปิด-ปิดแม่พิมพ์และกระทุ้งชิ้นงานที่ฉีดเสร็จแล้วออกจากแม่พิมพ์ โดยเฉพาะการปิดแม่พิมพ์นั้น clamp unit จะต้องมีแรงในการปิดที่สามารถต้านทานแรงดันของพลาสติกเหลวในขั้นตอนการฉีดได้
3. หน่วยควบคุม (control unit) มีหน้าที่ในการควบคุมการทำงานทุกระบบของเครื่องฉีด เช่น การควบคุมอุณหภูมิของกระบอกฉีด (barrel), การควบคุมแรงดันและความเร็วในการฉีด, การควบคุมความเร็วในการเปิด-ปิดแม่พิมพ์, การควบคุมเวลาการทำงานในขั้นตอนต่างๆ ของเครื่องฉีด เป็นต้น
4. แม่แบบ (mold)
  - ขั้นตอนการฉีดพลาสติกเข้าแม่แบบ

ขั้นตอนที่ 1 แม่แบบเลื่อนเข้าปิดยึดกันแน่นป้องกันแม่พิมพ์ถ่างออกเนื่องจากแรงดันการฉีด

ขั้นตอนที่ 2 ชูตฉีดเลื่อนเข้าประกบแม่แบบด้วยแรงกดป้องกันหัวฉีดถอยหลังกลับในช่วงฉีด

ขั้นตอนที่ 3 ฉีดพลาสติกหลอมเข้าแม่แบบ โดยเกลียวจะเคลื่อนที่ตามแนวแกนและมีแหวน  
กันพลาสติกไหลย้อนกลับทำหน้าที่เป็นลูกสูบ

ขั้นตอนที่ 4 ย้ำรักษาความดันป้องกันชิ้นงานยุบ หดตัว

ขั้นตอนที่ 5 แม่แบบฉีดหล่อเย็นและหัวฉีดถอยหลังกลับ

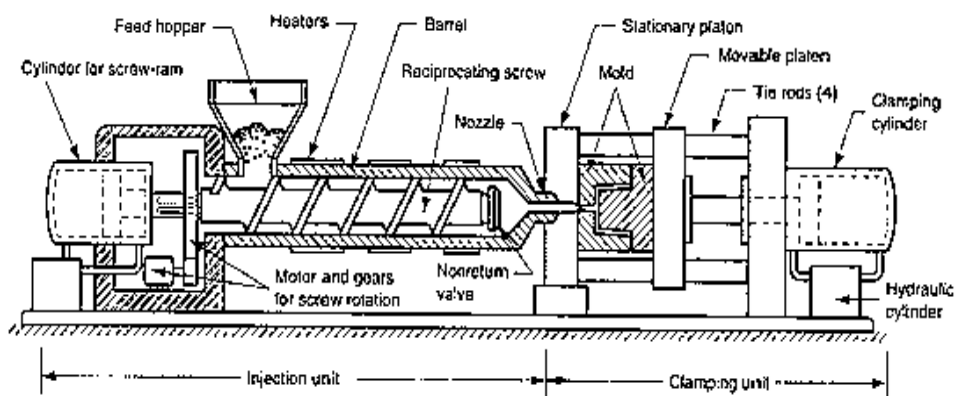
ขั้นตอนที่ 6 เกลียวหมุนเพื่อดึงเม็ดหรือฟองพลาสติกจากกรวยเติมเข้ามาในกระบอกหลอมและ  
เคลื่อนตัวส่งไปยังส่วนหน้าจนได้ปริมาณมากพอที่ช่องว่างด้านหน้าเกลียว  
เตรียมการฉีดครั้งต่อไป

ขั้นตอนที่ 7 แม่แบบเคลื่อนที่เปิดออกหลังหล่อเย็นเสร็จ กระทั่งชิ้นงานออกจากแม่แบบ



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 2.6 เครื่องฉีดพลาสติก [21]



รูปที่ 2.7 ส่วนต่างๆของเครื่องฉีดแบบ [19]

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [23-27]

Threepopnatkula และคณะ [23] ได้ศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมพีต/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 พบว่า ความทนแรงดึงมีค่าลดลงเล็กน้อย และการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นมากตามปริมาณของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เพิ่มขึ้น แสดงว่า พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับพีต นอกจากนี้ การเติมไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ในพอลิเมอร์ผสมส่งผลให้ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาดและระดับการเกิดผลึก (degree of crystallinity) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และยังพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์มีผลในการต้านแบคทีเรียให้กับผลิตภัณฑ์อีกด้วย

Chiellini และคณะ [24] ได้ศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสมพีต/พอลิคาโพรแล็กโตน (polycapro-lactone) ที่อัตราส่วน 85/15 และ 80/20 โดยน้ำหนัก โดยใช้ไพโรเมลลิกแอนไฮไดรด์ (pyromelitic anhydride) ปริมาณร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก เป็นเซนเอ็กซ์เทนเดอร์ (chain extender) ซึ่งการผสมแบบหลอมเหลวทำให้พอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาแทรนส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างพอลิเอสเทอร์ทั้งสอง จึงเป็นการใส่พอลิเอสเทอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (พอลิคาโพรแล็กโตน) เข้าไปในพีตที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งเป็นการเพิ่มความสามารถในการแตกสลายทางชีวภาพให้กับพีต

Aravinthan และคณะ [25] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ผสมพีต/พอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลตที่อัตราส่วน 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60 และ 20:80 พบว่า ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าพอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลตซึ่งเป็นพอลิเอสเทอร์ที่มีความยืดหยุ่นสามารถปรับปรุงความเหนียวของพีตได้ นอกจากนี้ พบว่า อุณหภูมิในการเกิดผลึก (crystallization temperature) ของพีตมีค่าเพิ่มขึ้น

Srithep และคณะ [26] ได้ทดลองใส่อีลาสโตเมอร์ เซนเอ็กซ์เทนเดอร์ และพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต (poly(butylene adipate-co-terephthalate) ในพีตใช้แล้วด้วยการผสมแบบหลอมเหลวและขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ ทั้งนี้เพื่อปรับปรุงความเหนียว ความสามารถในการขึ้นรูป และสมบัติเชิงกลของพีตใช้แล้ว โดยตรวจสอบสมบัติการไหล (rheological property) สมบัติเชิงกล และพฤติกรรมการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสมเหล่านี้ พบว่า สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ได้รับการปรับปรุงเมื่อใส่อีลาสโตเมอร์ เซนเอ็กซ์เทนเดอร์ หรือพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลตในปริมาณที่เหมาะสม และยังเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปอีกด้วย

Deshmukh และคณะ [27] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนของพอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลต (poly(butylene terephthalate) ที่เสริมแรงด้วยโวลลาสโทไนต์ พบว่า พอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลตและโวลลาสโทไนต์มีอันตรกิริยาระหว่างผิวที่ดีโดยไม่ต้องใช้สารช่วยผสมหรือสารคู่ควบ (coupling agent) ซึ่งผลจากการมีอันตรกิริยาระหว่างผิวช่วยให้สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตได้รับการปรับปรุง

และจากการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน พบว่า โพลลาสโพนต์สามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียส (nucleating agent) โดยสังเกตจากระดับการเกิดผลึกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้คอมพอสิตมีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น



### บทที่ 3 วิธีการทดลอง

#### 3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

1. เกล็ดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือพีดีซีแล้ว (post consumed-poly(ethylene terephthalate, p-PET) ที่ใช้แล้ว จากบริษัทเทพพลาสติก
2. เม็ดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (poly(butylene succinate), PBS) เกรด FZ91PD จากบริษัท Mitsubishi Chemical Performance Polymers, Inc.
3. โวลลาสโทไนต์ (wollastonite, WT) เกรด FZ91PD ขนาดอนุภาค 1500 เมช จากบริษัท H&J Mineral Fiber Technology Co., Ltd.,

#### 3.2 เครื่องผสมและเครื่องขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

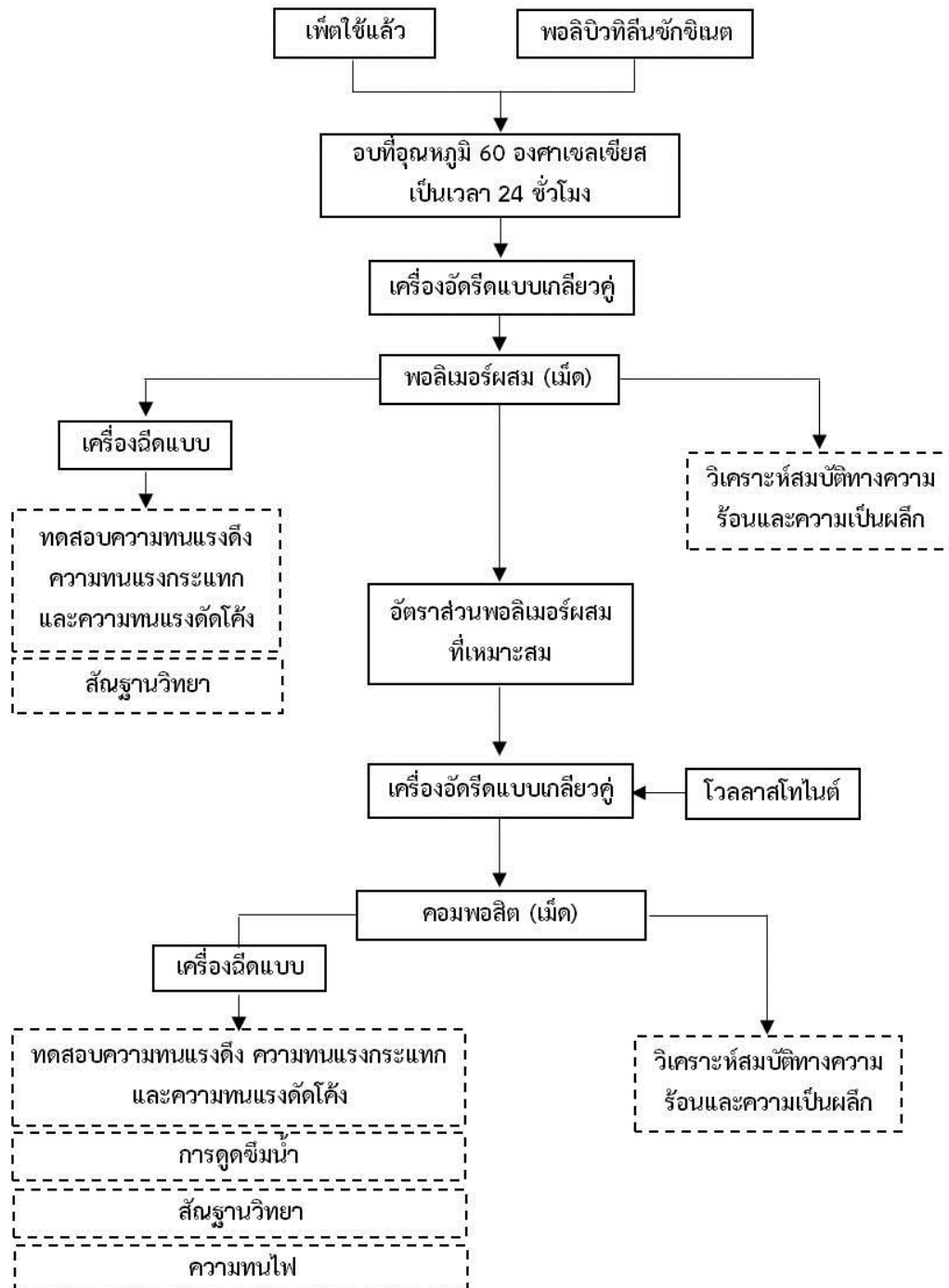
1. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (twin screw extruder) รุ่น LTE-26-40 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
2. เครื่องฉีดแบบ (injection molding machine) รุ่น Battenfeld BA 250 CDC (ศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม ฝ่ายพอลิเมอร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน)

#### 3.3 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบ

1. เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (impact testing machine) รุ่น GT-7045-MD ของบริษัท GOTECH (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
2. เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine) รุ่น LLOYD LR100 K (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
3. เครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (flexural testing machine) รุ่น LLOYD 500 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
4. เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) รุ่น Mettler Toledo DSC 1 Star System (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
5. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetric analyzer, TGA) รุ่น PerkinElmer Pyris 1 TGA (ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น JSM-6480LV ของบริษัท JEOL (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

7. เครื่องทดสอบการลุกลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 รุ่น ATLAS HVUL 2  
(ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.4 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

### 3.5. การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

ทำการอบเพ็ดใช้แล้วและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเตรียมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (รูปที่ 3.2) ตามอัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ภายใต้สภาวะดังนี้

อุณหภูมิ: 245/250/255/255/250/245/240/235/235/230/225 องศาเซลเซียส

ความเร็วรอบสกรูหมุน: 50 รอบ/นาที

ความเร็วรอบตัด: 10 รอบ/นาที

ระยะที่ตัด: 3 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม

สูตร (p-PET/PBS)	p-PET (%wt)	PBS (%wt)
100/0	100	0
90/10	90	10
80/20	80	20
70/30	70	30
60/40	60	40
50/50	50	50
0/100	0	100



รูปที่ 3.2 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่



พอลิเมอร์ผสมที่ได้จะถูกอัดรีดผ่านหัวตาย (die) แล้วถูกตัดเป็นเม็ด (pelletized) ก่อนนำไปอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ

### 3.6 การเตรียมคอมพอลิิต

ทำการอบเพ็ดใช้แล้วและพอลิบิวทิลีนซกซิเนตเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการผสมเพ็ดใช้แล้ว พอลิบิวทิลีนซกซิเนตและโพลลาสโตนิตตามอัตราส่วนต่างๆ ที่แสดงในตารางที่ 3.2 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ ภายใต้สภาวะดังต่อไปนี้

อุณหภูมิ: 245/250/255/255/250/245/240/235/235/230/225 องศาเซลเซียส

ความเร็วรอบสกรูหมุน: 50 รอบ/นาที

ความเร็วรอบตัด: 10 รอบ/นาที

ระยะที่ตัด: 3 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของคอมพอลิิต

สูตร (p-PET/PBS/WT)	p-PET (%wt)	PBS (%wt)	WT (phr)
60/40/10	60	40	10
60/40/20	60	40	20
60/40/30	60	40	30
60/40/40	60	40	40

คอมพอลิิตที่ได้จะถูกอัดรีดผ่านหัวตายแล้วตัดเป็นเม็ด ก่อนนำไปอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ

### 3.7 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมและคอมพอลิิตที่เตรียมได้ในขั้นตอนที่ 3.5 และ 3.6 ไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ (รูปที่ 3.3) โดยใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูป 240-260 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบเกลียวหมุน 160 รอบ/นาที เวลาในการหล่อเย็น 15 วินาที



รูปที่ 3.3 เครื่องฉีดยัดแบบ

### 3.8 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

#### 3.8.1 การทดสอบความทนแรงกระแทก (impact strength)

ทำการทดสอบหาค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตแบบไอซอด (Izod impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยเตรียมชิ้นทดสอบตัวอย่างขนาด  $63.5 \times 12.7 \times 3.3$  มิลลิเมตร (กว้าง X ยาว X หนา) และทำการบากชิ้นตัวอย่างทดสอบเป็นรูปตัววี (V-notch) (รูปที่ 3.4) แล้วทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (รูปที่ 3.5) ภายใต้ภาวะการทดสอบดังนี้

น้ำหนักค้อน: 1 จูล



รูปที่ 3.4 ชิ้นทดสอบความทนแรงกระแทก



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก

### 3.8.2 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง (tensile properties)

ทำการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM D638 ประเภท IV โดยเตรียมชิ้นตัวอย่างทดสอบจากกระบวนการฉีดแบบ ด้วยเครื่องฉีดแบบ (รูปที่ 3.6) และทดสอบสมบัติความทนแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (รูปที่ 3.7) เพื่อหาความทนแรงดึง (tensile strength, TS), ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus, E) และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break, EB)

ภายใต้สภาวะทดสอบดังนี้

ระยะดึง (gauge length): 65 มิลลิเมตร

ขนาด load cell: 10 กิโลนิวตัน

อัตราเร็วคงที่: 50 มิลลิเมตร/นาที ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.6 ชิ้นทดสอบสมบัติความทนแรงดึง



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล

### 3.8.3 การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength)

ทำการทดสอบความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM D790 โดยเตรียมชิ้นตัวอย่างทดสอบรูปสี่เหลี่ยมขนาด  $127 \times 12.7 \times 3.3$  (รูปที่ 3.8) (กว้าง  $\times$  ยาว  $\times$  หนา) แล้วทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (รูปที่ 3.9) เพื่อหาความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength)

ภายใต้สภาวะทดสอบดังนี้

ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ: 50 มิลลิเมตร

น้ำหนักหัวกดที่ใช้: 2500 นิวตัน

ความเร็วการกดขึ้นงานเท่ากับ: 1.40 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 3.8 ชิ้นทดสอบความทนแรงดัดโค้ง



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้ง

### 3.8.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี (DSC)

ทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต โดยการทดสอบจะใช้เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) (รูปที่ 3.10) โดยใช้ชิ้นทดสอบที่มีน้ำหนักประมาณ 3-4 มิลลิกรัม บรรจุใส่ในแพนอลูมิเนียม แล้วปิดฝืน จากนั้นจึงทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ภายใต้สภาวะการทดสอบดังนี้

1. เริ่มต้นการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
2. เพิ่มอุณหภูมิจาก 25 องศาเซลเซียส จนถึง 300 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที แล้วคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 10 นาที
3. ลดอุณหภูมิจาก 200 องศาเซลเซียส จนถึง -50 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส/นาที คงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 10 นาที
4. เพิ่มอุณหภูมิอีกครั้งจาก -50 องศาเซลเซียส จนถึง 300 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที

ทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยวิเคราะห์หาอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature,  $T_g$ ), อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature,  $T_m$ ), อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature,  $T_c$ ) และระดับการเกิดผลึก (degree of crystallization,  $X_c$ ) จากเทอร์โมแกรม (thermogram) ที่ได้ และคำนวณหา  $X_c$  ได้จากสมการที่ 3.1

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_m \times 100}{w \times \Delta H_m^0} \quad (3.1)$$

โดย  $\Delta H_m$  คือ เอนทัลปีการหลอมเหลว

$\Delta H_m^0$  คือ เอนทัลปีการหลอมเหลวของพีดีซีแล้วที่เกิดผลึก 100% = 120 J/g

w คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของพีดีซีแล้วในพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3.10 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

### 3.8.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA)

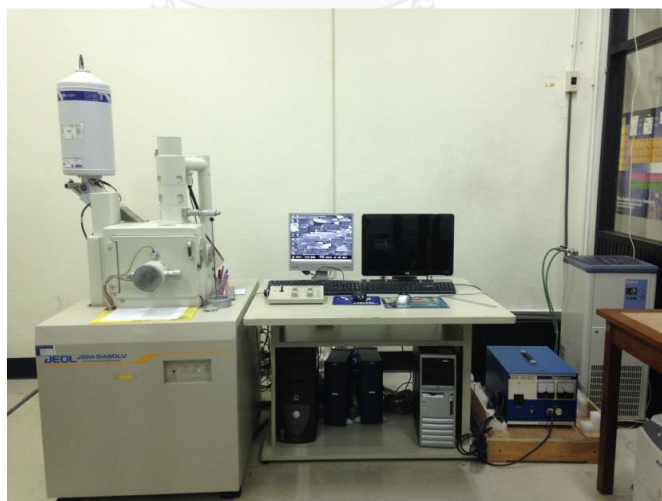
วิเคราะห์น้ำหนักที่สูญหายไปเมื่อขึ้นทดสอบได้รับความร้อน รวมทั้งปริมาณเถ้าที่เหลือของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetric analyzer, TGA) (รูปที่ 3.11) โดยให้ภาวะการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 50-600 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 20 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ด้วยอัตราการไหลของแก๊ส 25 มิลลิลิตร/นาที



รูปที่ 3.11 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน

### 3.8.6 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

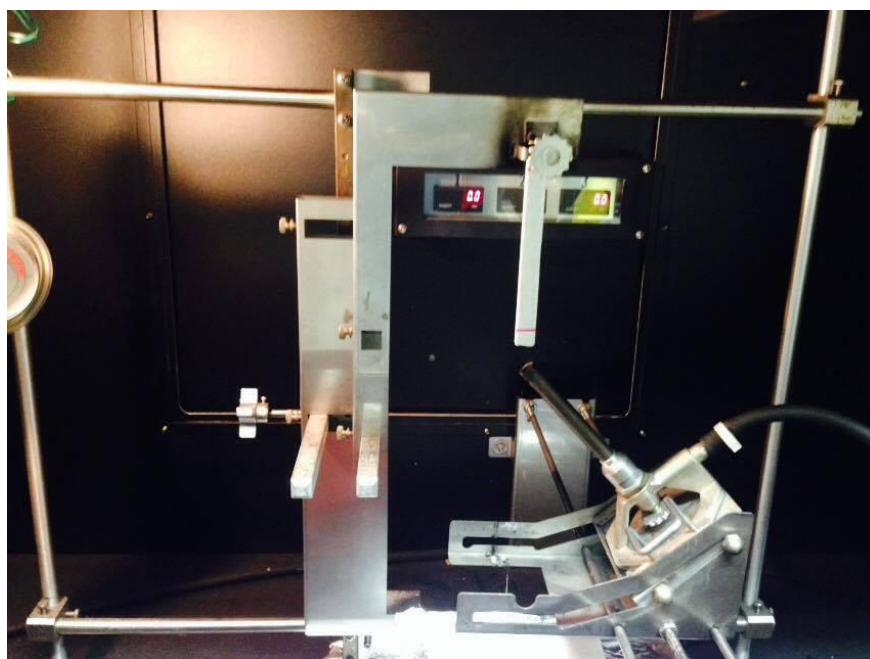
ทำการตรวจสอบสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 3.12) โดยทำการเคลือบทองบนพื้นผิวรอยแตกหักของชิ้นตัวอย่างจากการทดสอบความทนแรงดึงก่อนทำการตรวจสอบและดำเนินการที่ก้ำลึงไฟฟ้า 10 kV ด้วยก้ำลึงขยาย 500 และ 1000 เท่า



รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

### 3.8.7 การทดสอบการลุกลามไฟ (flammability test)

ทำการทดสอบการลุกลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาด  $127 \times 12.7 \times 3.3$  มิลลิเมตร (กว้าง X ยาว X หนา) ด้วยเครื่องทดสอบการเผาไหม้ (รูปที่ 3.13) ในแนวตั้ง จากนั้นจุดไฟเป็นเวลา 10 วินาที โดยใช้ความสูงของเปลวไฟ 20 มิลลิเมตร หลังจากนั้นรอให้ชิ้นทดสอบถูกเผาจนถึงระยะอ้างอิงที่ 1 จับเวลาจนกว่าชิ้นทดสอบจะถูกเผาจนถึงระยะอ้างอิงที่ 2 (รูปที่ 3.14) จากนั้นทำการหาอัตราการลุกลามไฟที่เกิดขึ้นในช่วง 100 มิลลิเมตร



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY  
รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบการเผาไหม้ของพอลิเมอร์



รูปที่ 3.14 ชิ้นทดสอบการลุกลามไฟ



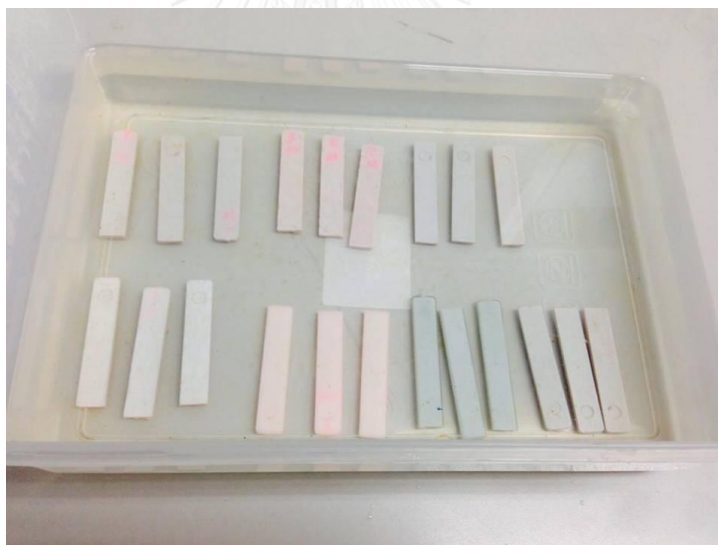
### 3.8.8 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (water absorption)

ทำการทดสอบการดูดซึมน้ำ โดยนำชิ้นทดสอบขนาด  $63.5 \times 12.70 \times 3.3$  มิลลิเมตร (กว้าง  $\times$  ยาว  $\times$  หนา) ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อบันทึกค่าน้ำหนักเริ่มต้นของชิ้นตัวอย่างทดสอบ ( $W_0$ ) หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบไปแช่ลงในน้ำ (รูปที่ 3.15) นำชิ้นทดสอบมาเช็ดให้แห้งและบันทึกค่าน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างทดสอบหลังแช่ในน้ำในแต่ละวัน ( $W_1$ ) และนำค่าน้ำหนักที่ได้มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%water absorption) ตามสมการที่ 3.2

$$\% \text{ water absorption} = \frac{W_1 - W_0 \times 100}{W_0} \quad (3.2)$$

$W_0$  คือ น้ำหนักชิ้นเริ่มต้นของชิ้นตัวอย่างทดสอบ

$W_1$  คือ น้ำหนักตัวอย่างชิ้นทดสอบหลังการดูดซึมน้ำ



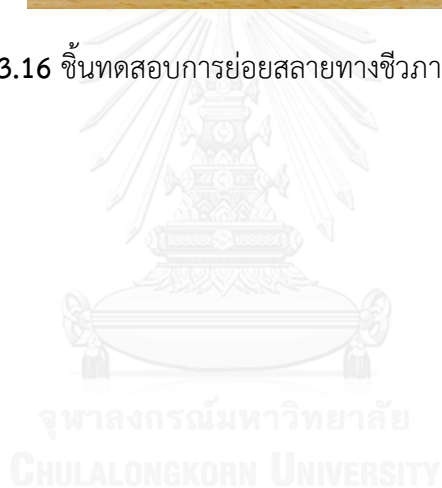
รูปที่ 3.15 ชิ้นทดสอบการดูดซึมน้ำ

### 3.8.9 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน

ทำการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต โดยนำชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ (รูปที่ 3.16) ไปฝังดินที่ระดับความลึกความลึก 20 เซนติเมตร เป็นเวลา 120 วัน และทำการเก็บชิ้นทดสอบทุกๆ 30 วัน แล้วนำมาล้างน้ำ เช็ดให้แห้ง และอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อนำมาทดสอบสมบัติความทนแรงดึงและตรวจสอบสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของชิ้นทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



รูปที่ 3.16 ชิ้นทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน

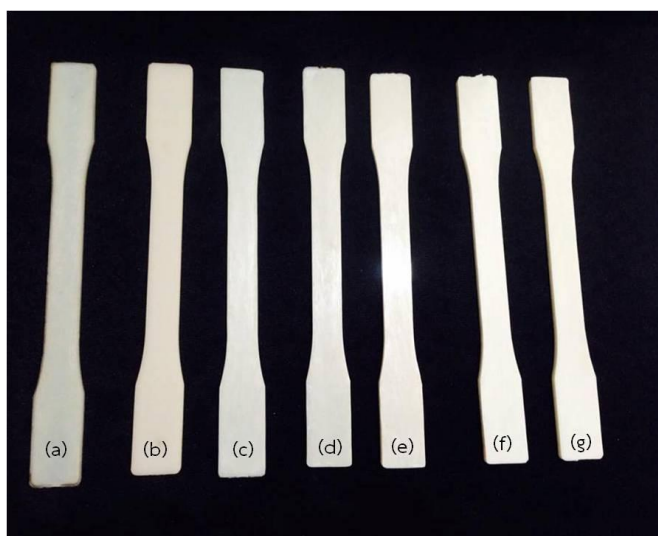


## บทที่ 4

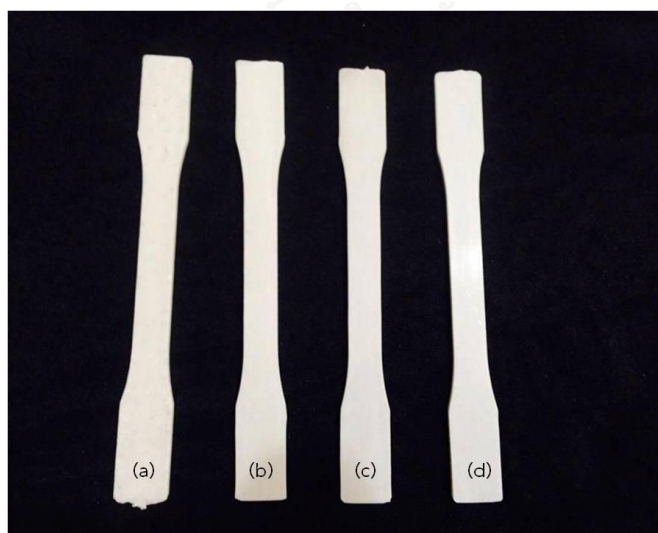
### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ลักษณะชิ้นทดสอบ

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงลักษณะชิ้นทดสอบของ p-PET, PBS, พอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS และ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิตในปริมาณ WT ต่างๆ ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ชิ้นทดสอบของ (a) p-PET, (b) PBS และพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS ที่อัตราส่วน (c) 90/10, (d) 80/20, (e) 70/30, (f) 60/40 และ (g) 50/50



รูปที่ 4.2 ชิ้นทดสอบของ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิตในปริมาณ WT: (a) 10, (b) 20, (c) 30 และ (d) 40 phr

จากรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 พบว่า p-PET (รูปที่ 4.1(a)) มีสีเทาปนเขียว ทึบแสง แข็งแต่เปราะ ขณะที่ PBS (รูปที่ 4.1(b)) มีสีขาวขุ่น ทึบแสง ยืดหยุ่นและสามารถโค้งงอได้ ซึ่งเมื่อนำ p-PET ไปผสมกับ PBS พบว่า ชั้นทดสอบของพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS (รูปที่ 4.1 (c-g)) มีสีเทาปนเขียวทึบแสง ซึ่งเมื่อเพิ่มองค์ประกอบของ PBS ในพอลิเมอร์ผสม พบว่า ชั้นทดสอบสามารถโค้งงอได้ และเมื่อนำพอลิเมอร์ผสมตามอัตราส่วนที่เลือกไว้ 60/40 p-PET/PBS ไปผสมกับ WT ในปริมาณต่างๆ พบว่า ชั้นทดสอบมีความแข็งมากขึ้น ทึบแสง และมีเฉดสีเปลี่ยนไปเป็นสีเทาตามปริมาณของ WT ที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.2(a-d))

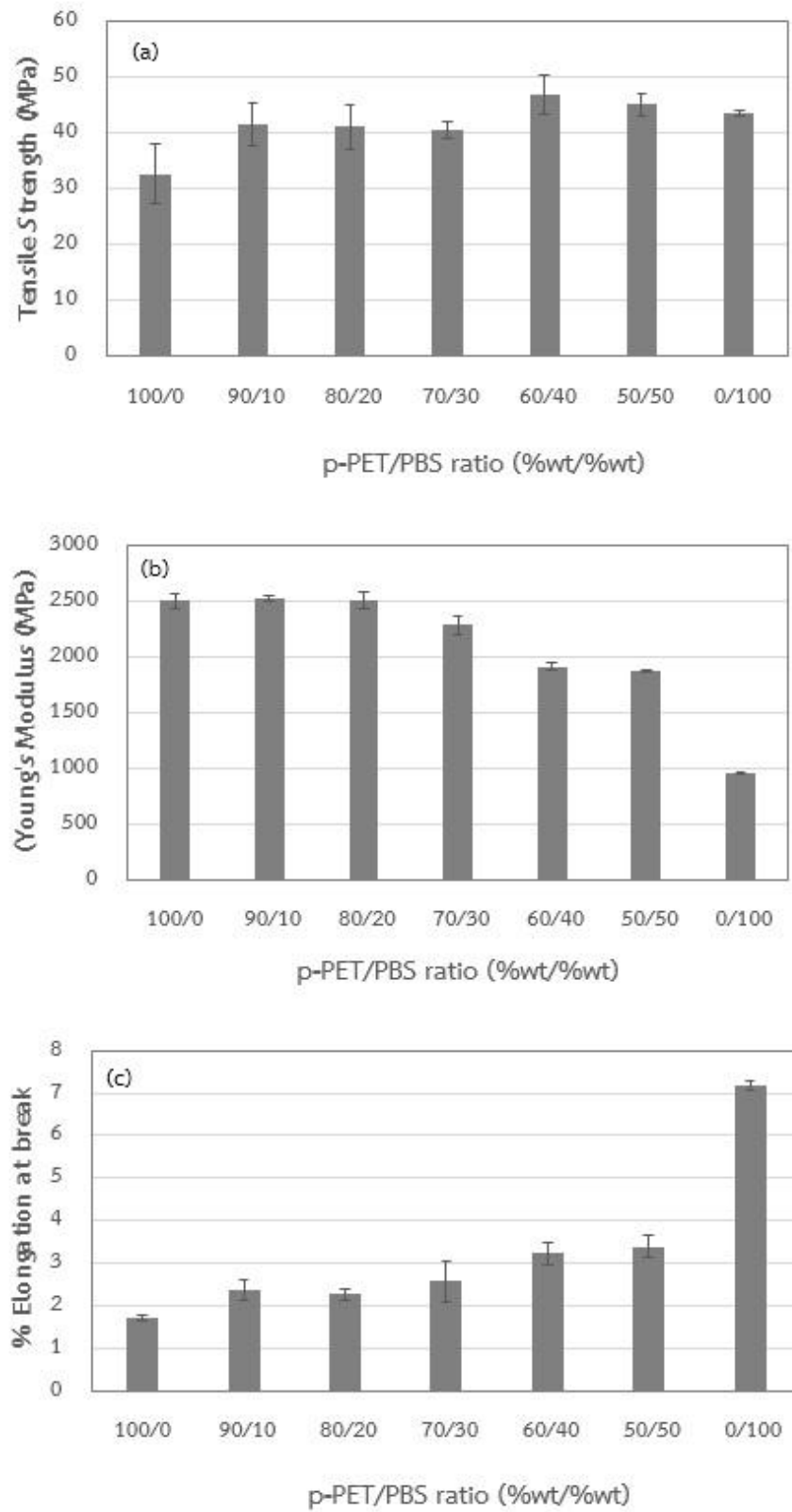
## 4.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS

### 4.2.1 สมบัติด้านแรงดึง (Tensile properties)

ตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.3 แสดงสมบัติด้านแรงดึงในเทอมของความทนแรงดึง (tensile strength, TS), ยั่งสัมมอดูลัส (Young's modulus, E) และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break, EB) ของ p-PET, PBS และพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน

ตารางที่ 4.1 สมบัติด้านแรงดึงของ p-PET, PBS และพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS

Sample (p-PET/PBS)	TS (MPa)	E (MPa)	EB (%)
100/0	32.71 ± 5.2	2505.34 ± 65	1.72 ± 0.06
90/10	41.62 ± 3.9	2519.60 ± 27	2.36 ± 0.2
80/20	41.08 ± 3.9	2502.23 ± 77	2.27 ± 0.1
70/30	40.51 ± 1.6	2283.68 ± 78	2.57 ± 0.4
60/40	46.84 ± 3.5	1915.84 ± 38	3.23 ± 0.2
50/50	45.06 ± 1.9	1876.73 ± 76	3.39 ± 0.2
0/100	43.54 ± 0.6	961.52 ± 5.9	7.18 ± 0.1



รูปที่ 4.3 สมบัติด้านแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยังส์มอดุลัส (c) การยืดตัว ณ จุดขาดของ p-PET, PBS และพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.3(a) พบว่า p-PET มีความทนแรงดึงต่ำกว่า PBS เนื่องจาก p-PET เกิดการแตกสลายจากกระบวนการไฮโดรลิซิสในระหว่างกระบวนการผลิต ส่งผลให้มีความแข็งแรงต่ำกว่า PET บริสุทธิ์ทั่วไป และเมื่อเติม PBS ลงใน p-PET พบว่า ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าสูงกว่า p-PET ล้วน (32.71 MPa) และเพิ่มมากที่สุดที่ปริมาณ PBS 40 wt% (46.84 MPa) หากแต่เมื่อเพิ่มปริมาณ PBS มากขึ้น ส่งผลให้ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง อาจเนื่องจาก PBS เกิดการเกาะกลุ่มกันหรือแยกวัฏภาคระหว่าง p-PET และ PBS

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.3(b) พบว่า p-PET มียังสัมมอดูลัสสูงกว่า PBS เนื่องจาก p-PET เป็นพลาสติกที่มีความแข็งมากกว่า PBS และเมื่อเติม PBS ลงใน p-PET พบว่า ยังสัมมอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่า p-PET ล้วน (2505 MPa) และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ PBS เพิ่มขึ้น (ลดลงต่ำสุด 25% ที่ปริมาณ PBS 50 wt%) เนื่องจาก ยังสัมมอดูลัสที่ต่ำกว่าของ PBS (961 MPa)

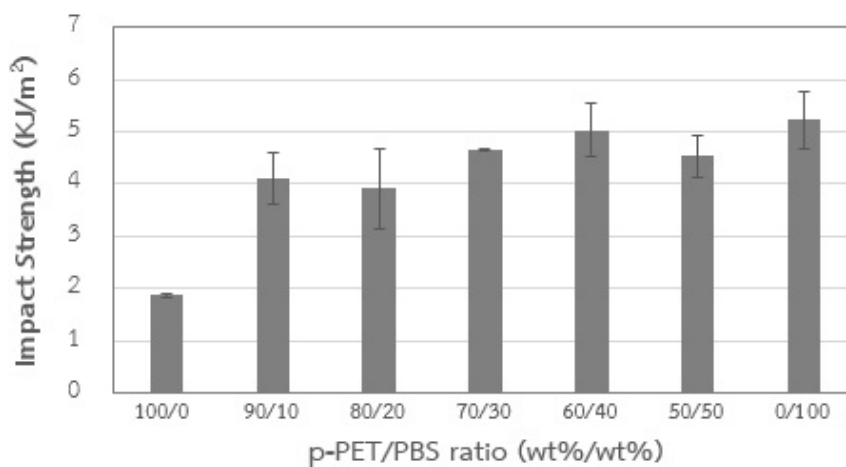
จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.3(c) พบว่า p-PET มีการยืดตัว ณ จุดขาดต่ำกว่า PBS อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจาก p-PET เป็นพลาสติกที่มีความเปราะมากกว่า PBS อีกทั้งเกิดการแตกสลายของโมเลกุลในระหว่างกระบวนการผลิต ดังที่กล่าวข้างต้น และเมื่อเติม PBS ลงใน p-PET พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าสูงกว่า p-PET ล้วน (1.72%) และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ PBS เพิ่มขึ้น (เพิ่มขึ้นสูงสุด 49% ที่ปริมาณ PBS 50 wt%) เนื่องจาก การยืดตัว ณ จุดขาดที่สูงกว่าของ PBS (7.18%)

#### 4.2.2 ความทนแรงกระแทก (Impact strength, IS)

ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.4 แสดงความทนแรงกระแทกของ p-PET, PBS และพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน

ตารางที่ 4.2 ความทนแรงกระแทกของ p-PET, PBS และพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS

Sample (p-PET/PBS)	IS (KJ/m <sup>2</sup> )
100/0	1.86 ± 0.02
90/10	4.11 ± 0.5
80/20	3.91 ± 0.7
70/30	4.64 ± 0.01
60/40	5.03 ± 0.5
50/50	4.53 ± 0.4
0/100	5.22 ± 0.5



#### รูปที่ 4.4 ความทนแรงกระแทกของ p-PET, PBS และพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS

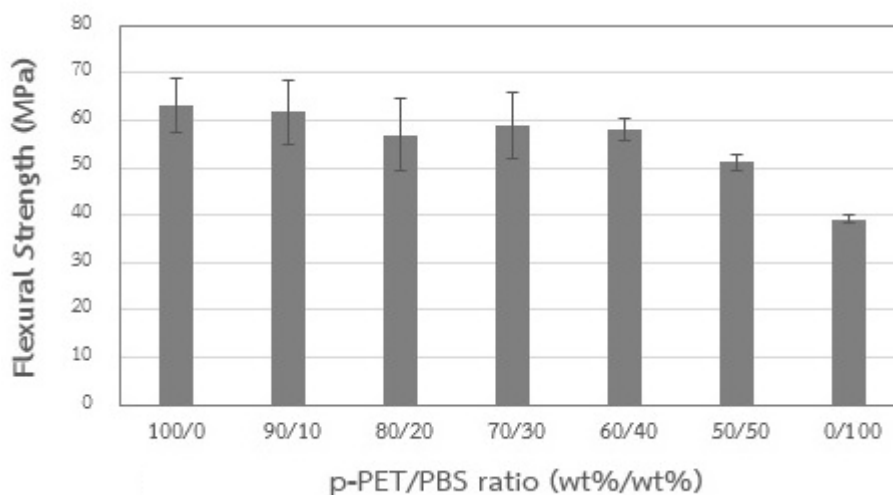
จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.4 พบว่า p-PET มีค่าความทนแรงกระแทกที่ต่ำมาก (1.86 kJ/m<sup>2</sup>) ซึ่งเป็นคุณลักษณะของพลาสติกที่แข็งเปราะ เนื่องจาก p-PET มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature,  $T_g$ ) ค่อนข้างสูง (ประมาณ 79 องศาเซลเซียส) ขณะที่ PBS มีค่าความทนแรงกระแทกค่อนข้างสูง (5.22 kJ/m<sup>2</sup>) ซึ่งแสดงถึงสมบัติของพลาสติกที่เหนียว เนื่องจาก PBS มี  $T_g$  ค่อนข้างต่ำ (ประมาณ -40 องศาเซลเซียส) และเมื่อเติม PBS ลงใน p-PET พบว่า ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าสูงกว่า p-PET ล้วน และเพิ่มมากที่สุดที่ ปริมาณ PBS 40 wt% (5.03 kJ/m<sup>2</sup>) หากแต่เมื่อเพิ่มปริมาณ PBS มากขึ้น ส่งผลให้ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง อาจเนื่องจาก PBS เกิดการเกาะกลุ่มกันหรือแยกวัฏภาคระหว่าง p-PET และ PBS ดังที่กล่าวมาข้างต้น

#### 4.2.3 ความทนแรงดัดโค้ง (Flexural strength, FS)

ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.5 แสดงความทนแรงดัดโค้งของ p-PET, PBS และพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน

ตารางที่ 4.3 ความทนแรงดัดโค้งของ p-PET, PBS และพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS

Sample (p-PET/PBS)	FS (MPa)
100/0	62.38 ± 5.9
90/10	61.68 ± 6.9
80/20	56.99 ± 7.6
70/30	58.84 ± 6.9
60/40	58.08 ± 2.2
50/50	51.17 ± 1.6
0/100	39.17 ± 0.7



รูปที่ 4.5 ความทนแรงดัดโค้งของ p-PET, PBS และพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.5 พบว่า p-PET มีความทนแรงดัดโค้งสูงกว่า PBS เนื่องจาก p-PET เป็นพลาสติกที่มีความแข็งมากกว่า PBS และเมื่อเติม PBS ลงใน p-PET พบว่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มต่ำกว่า p-PET ล้วน (62.38 MPa) และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ PBS เพิ่มขึ้น (ลดลงต่ำสุด 18% ที่ปริมาณ PBS 50 wt%) เนื่องจาก ความทนแรงดัดโค้งที่ต่ำกว่าของ PBS (39.17 MPa) จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้พอลิเมอร์ผสมสามารถดัดโค้งได้ง่าย เมื่อเติม PBS ที่มีความอ่อนนุ่มกว่าเข้าไปใน p-PET ที่มีความแข็ง ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับผลการทดสอบยังสัมผัสดูลัส และการยึดตัว ณ จุดขาด ในการทดสอบความทนแรงดึง ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS ข้างต้น ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS ที่อัตราส่วน 60/40 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีความทนแรงดึงและความทนแรงกระแทกสูงที่สุด นำไปเตรียมเป็นคอมพอสิตกับ WT ที่ปริมาณ 10, 20, 30 และ 40 phr

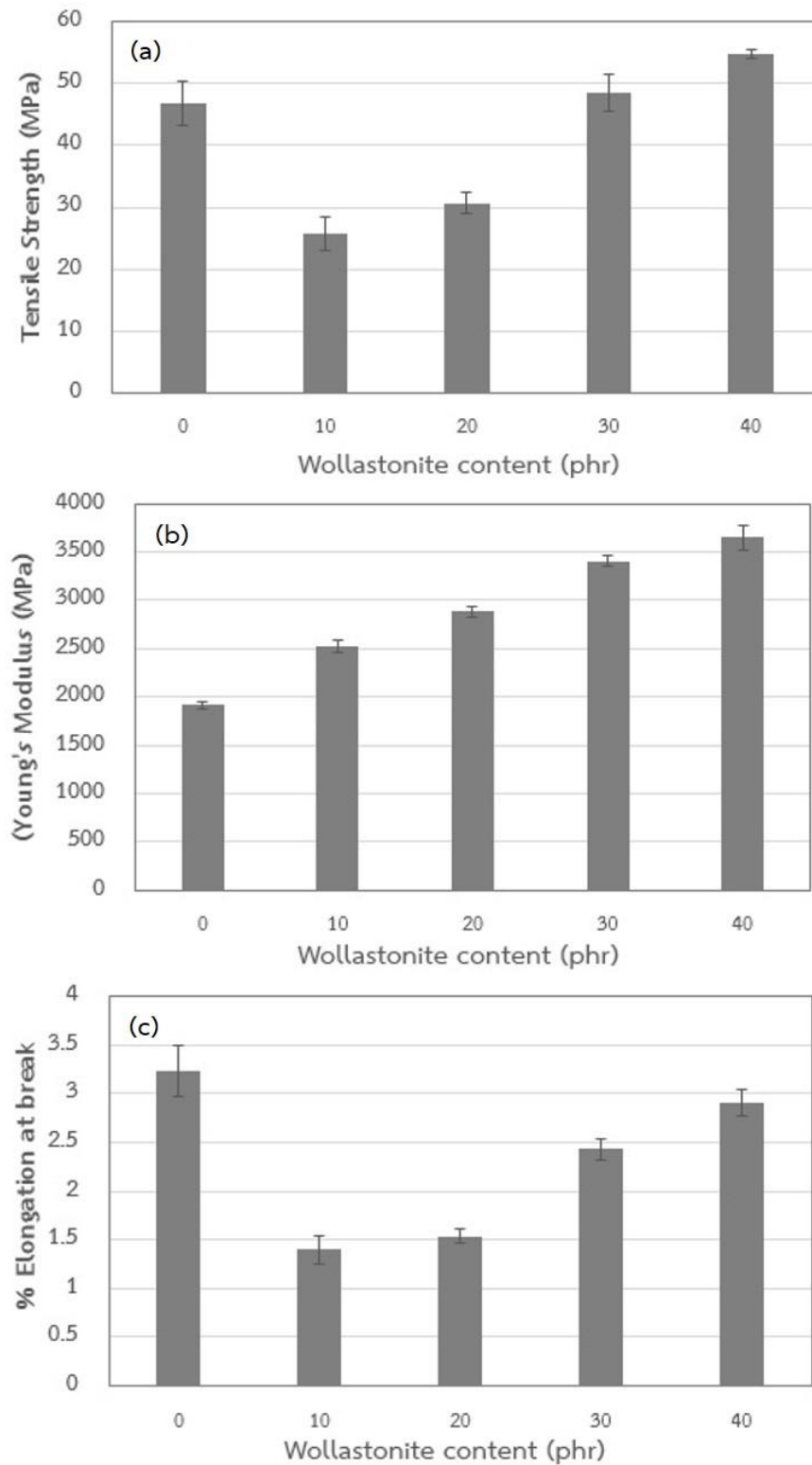
#### 4.3 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิต p-PET/PBS/WT

##### 4.3.1 สมบัติด้านแรงดึง (Tensile properties)

ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.6 แสดงสมบัติด้านแรงดึงในเทอมของความทนแรงดึง (tensile strength, TS), ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus, E) และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break, EB) ของ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต

ตารางที่ 4.4 สมบัติด้านแรงดึงของ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต

Sample (p-PET/PBS/WT) (wt%/wt%/phr)	TS (MPa)	E (MPa)	EB (%)
60/40/0	46.84 ± 3.4	1915.84 ± 38	3.23 ± 0.2
60/40/10	25.79 ± 2.6	2528.94 ± 66	1.40 ± 0.1
60/40/20	30.66 ± 1.6	2885.82 ± 52	1.53 ± 0.1
60/40/30	48.53 ± 2.9	3404.97 ± 55	2.43 ± 0.1
60/40/40	54.84 ± 0.6	3649.94 ± 133	2.91 ± 0.1



รูปที่ 4.6 สมบัติด้านแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยั่งส์มอดุลัส (c) การยืดตัว ณ จุดขาดของ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.6(a) พบว่า การเติม WT ที่ปริมาณ 10-20 phr ส่งผลทำให้ความทนแรงดึงของคอมพอสิตมีค่าลดลงต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS ล้วน (46.84 MPa) เนื่องจาก WT มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะเสริมแรงคอมพอสิตได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณ WT เพิ่มขึ้นเป็น 30-40 phr พบว่า ความทนแรงดึงของคอมพอสิตได้รับการปรับปรุง และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ WT เพิ่มขึ้น (เพิ่มขึ้น 17% ที่ปริมาณ WT 40 phr) เนื่องจาก WT มีปริมาณมากเพียงพอให้เกิดการเสริมแรงคอมพอสิต และเกิดการจัดเรียงตัวที่ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.6(b) พบว่า ยังสัมพันธ์ของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS ล้วน (1916 MPa) เนื่องจากความแข็งดึงของ WT ขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยยังสัมพันธ์ของคอมพอสิตได้รับการปรับปรุงสูงสุดเมื่อเติม WT ที่ปริมาณ 40 phr (3650 MPa)

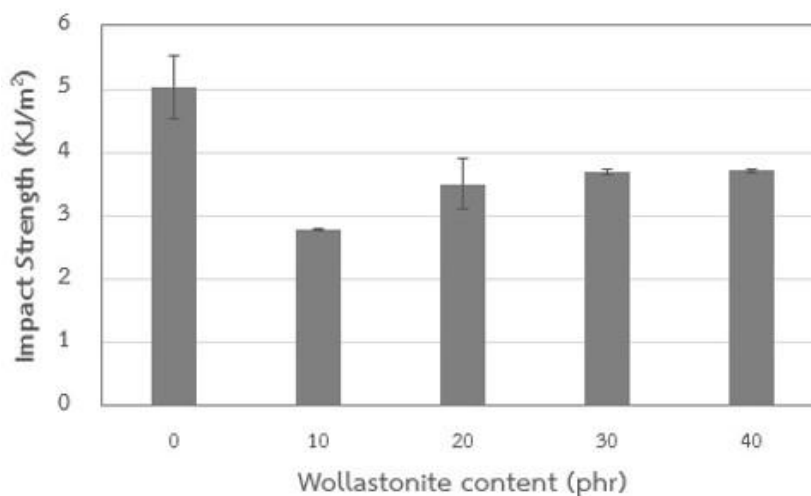
จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.6(c) การยืดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS ล้วน (3.2%) เนื่องจาก WT มีความแข็งดึงสูง จึงขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ หากแต่การยืดตัว ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ WT ที่เพิ่มขึ้น โดยมีการยืดตัว ณ จุดขาดต่ำสุดเมื่อเติม WT ที่ปริมาณ 10 phr (1.4%) เนื่องจากปริมาณ WT ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีการจัดเรียงตัวที่ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ดังที่กล่าวมาข้างต้น

#### 4.3.2 ความทนแรงกระแทก (Impact strength, IS)

ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4. แสดงความทนแรงกระแทกของ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต

ตารางที่ 4.5 ความทนแรงกระแทกของ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต

Sample (p-PET/PBS/WT) (wt%/wt%/phr)	IS (kJ/m <sup>2</sup> )
60/40/0	5.03 ± 0.5
60/40/10	2.78 ± 0.01
60/40/20	3.51 ± 0.4
60/40/30	3.69 ± 0.03
60/40/40	3.71 ± 0.03



รูปที่ 4.7 ความทนแรงกระแทกของ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต

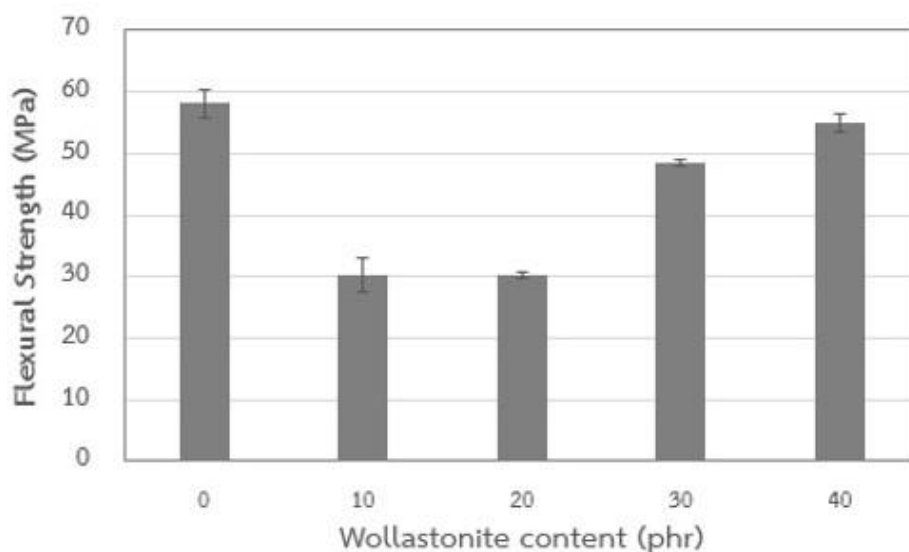
จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.7 พบว่า ความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS ล้วน (5.03 kJ/m<sup>2</sup>) เนื่องจากอนุภาค WT มีความแข็งตึง (stiffness) สูง จึงขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้ความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตมีค่าลดลง หากแต่ยังมีค่าสูงกว่า p-PET ล้วน นอกจากนี้ พบว่า ความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ WT ที่เพิ่มขึ้น โดยมีความทนแรงกระแทกต่ำสุดเมื่อเติม WT ที่ปริมาณ 10 phr (2.78 kJ/m<sup>2</sup>) เนื่องจาก ปริมาณ WT ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการเสริมแรงมากขึ้นและมีการจัดเรียงตัวที่ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ดังที่กล่าวมาข้างต้น

#### 4.3.3 ความทนแรงดัดโค้ง (Flexural strength, FS)

ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.8 แสดงความทนแรงดัดโค้งของ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต

ตารางที่ 4.6 ความทนแรงดัดโค้งของ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต

Sample (p-PET/PBS/WT) (wt%/wt%/phr)	FS (MPa)
60/40/0	58.08 ± 2.1
60/40/10	30.11 ± 2.7
60/40/20	30.26 ± 0.5
60/40/30	48.55 ± 0.5
60/40/40	54.92 ± 1.5



รูปที่ 4.8 ความทนแรงดัดโค้งของ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.8 พบว่า ความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS ล้วน (58.1 MPa) โดยการเติม WT ที่ปริมาณ 10-20 phr ส่งผลให้ความทนแรงดัดโค้งลดลงต่ำสุด (30 MPa) ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณ WT ไม่เพียงพอให้เกิดการเสริมแรงขึ้น หากแต่เมื่อปริมาณ WT เพิ่มขึ้นเป็น 30-40 phr ส่งผลให้ความทนแรงดัดโค้งมีการเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นถึงการเสริมแรงที่มากขึ้น ดังที่กล่าวมาข้างต้น

#### 4.4 สมบัติทางความร้อน

##### 4.4.1 พฤติกรรมการเกิดผลึก (Crystallinity behavior)

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดผลึกของ p-PET, PBS และพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS และ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต ด้วยเทคนิค DSC ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.7 ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature,  $T_c$ ) ที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัว (cooling scan) และอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature,  $T_g$ ), อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature,  $T_m$ ), และเอนทัลปีการหลอมเหลว (melting enthalpy,  $\Delta H_m$ ) ที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง (second heating scan) จากนั้นคำนวณหาระดับความเป็นผลึก (degree of crystallinity,  $X_c$ ) จากสมการที่ 4.1 สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส/นาที

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_m}{w \times \Delta H_m^0} \times 100 \quad (4.1)$$

โดย  $\Delta H_m$  คือ เอนทัลปีการหลอมเหลว

$\Delta H_m^0$  คือ เอนทัลปีการหลอมเหลวของพีทีทีที่เกิดผลึก 100% = 120.0 J/g

หรือของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เกิดผลึก 100% = 110.3 J/g

w คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของพีทีทีใช้แล้วในพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต

ตารางที่ 4.7 พฤติกรรมการเกิดผลึกของ p-PET, PBS และพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS และ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต

Sample	PBS					p-PET				
	$T_c$ (°C)	$T_g$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)	$X_c$ (%)	$T_c$ (°C)	$T_g$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)	$X_c$ (%)
p-PET	-	-	-	-	-	215.1	79.4	247.2	35.35	29.5
PBS	74.4	-40.0	113.9	73.9	67.0	-	-	-	-	-
p-PET/PBS (wt%/wt%)										
90/10	-	-35.4	108.7	1.5	13.6	214.3	70.6	245.9	30.0	27.7
80/20	-	-34.3	107.8	2.1	9.5	214.6	70.4	244.9	41.1	42.8
70/30	83.5	-32.2	110.5	8.2	24.8	214.7	69.6	244.3	28.7	34.1
60/40	85.5	-27.0	110.9	12.1	27.4	213.7	69.4	244.1	25.0	34.7
50/50	80.9	-32.2	110.6	18.6	33.7	213.1	71.5	243.8	21.3	35.5
p-PET/PBS/WT (wt%/wt%/phr)										
60/40/0	85.5	-27.0	110.9	12.1	27.4	213.7	69.4	244.1	25.0	34.7
60/40/10	86.1	-27.1	112.7	20.6	46.7	213.6	67.9	245.2	14.7	20.4
60/40/20	87.1	-26.7	112.1	14.0	31.7	215.2	69.7	245.7	32.7	24.5
60/40/30	88.1	-28.7	111.9	10.6	24.02	214.2	68.6	244.9	21.0	29.2
60/40/40	83.0	-28.4	114.4	10.1	22.8	213.4	71.1	244.4	17.1	23.8

จากตารางที่ 4.7 พบว่า PBS มี  $T_g$ ,  $T_c$  และ  $T_m$  ที่ -40, 74.4 และ 113.9 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ขณะที่ p-PET มี  $T_g$ ,  $T_c$  และ  $T_m$  ที่ 79.4, 215.1 และ 247.2 องศาเซลเซียส และเมื่อผสม p-PET กับ PBS พบว่า  $T_g$  ของ PBS มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PBS ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสายโซ่ที่แข็งตัวของ p-PET ขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของ PBS และค่า  $T_g$  ของ p-PET มีค่าลดลงตามปริมาณ PBS ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าค่า  $T_g$  ที่ต่างและความยืดหยุ่นที่สูงของ PBS ไปเพิ่มการเคลื่อนไหวของสายโซ่ p-PET หลังจากผสมกับ PBS ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณ PBS ที่สูงขึ้น (50 wt%) ค่า  $T_g$  ของ PBS ในพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำลง ขณะที่ค่า  $T_g$  ของ p-PET มีค่าสูงขึ้น บ่ง

บอกว่าเกิดการแยกเฟส (phase separation) ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดและเริ่มแสดงสมบัติเฉพาะตัว แต่อย่างไรก็ตาม การแสดงให้เห็นพิกของ  $T_g$  สองตำแหน่ง แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ทั้งสองไม่มีความเข้ากันได้ (immiscible blends) ขณะที่  $T_m$  ของ PBS ในพอลิเมอร์ผสม พบว่า มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ PBS ล้วนเนื่องจาก p-PET ไปขัดขวางการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลอย่างสมบูรณ์ของ PBS โดยการเติม PBS ปริมาณน้อย (10 และ 20 wt%) พบว่า  $T_m$  มีค่าต่ำกว่าเมื่อเติม PBS ปริมาณมาก (30-50 wt%) ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับค่า  $X_c$  พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีค่า  $X_c$  น้อยกว่า PBS ล้วน โดยการเติม PBS ปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้  $X_c$  มีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่  $T_c$  และ  $T_m$  ของ p-PET ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนของ  $T_c$  พบว่า  $T_c$  ของ PBS มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ PBS ล้วน แสดงให้เห็นว่าการเติม p-PET ส่งผลให้ PBS เกิดผลึกได้เร็วขึ้น หากแต่การเติม PBS ที่ปริมาณ 10 และ 20 wt% ไม่พบ  $T_c$  ของ PBS ในพอลิเมอร์ผสม อาจเนื่องจากมีปริมาณ PBS อยู่เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม การเติม WT ลงใน พอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS พบว่า ค่า  $T_g$ ,  $T_c$  และ  $T_m$  ของ p-PET และ PBS เกิดการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก หากแต่  $X_c$  ของ PBS มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเติม WT ที่ปริมาณ 10 และ 20 phr และมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ WT เป็น 30 และ 40 phr เนื่องจาก WT ไปขัดขวางการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุล PBS ขณะที่  $X_c$  ของ p-PET มีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก WT ไปขัดขวางการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุล p-PET ทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดผลึกลดลง

#### 4.4.2 เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability)

ผลการวิเคราะห์หาเสถียรภาพทางความร้อนของ p-PET, PBS และ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิเริ่มสลายตัว ( $T_{onset}$ ), อุณหภูมิการสลายตัวที่ 50% ( $T_{50\%}$ ), อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว ( $T_{endset}$ ) และปริมาณถ่าน (char) ที่เหลืออยู่

ตารางที่ 4.8 เสถียรภาพทางความร้อนของ p-PET, PBS และ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต

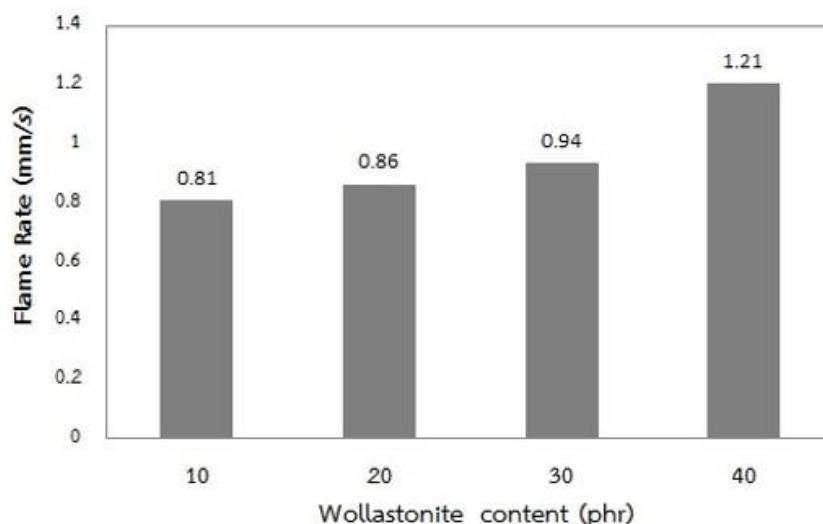
Sample	$T_{onset}(^{\circ}C)$	$T_{end\ set}(^{\circ}C)$	$T_{50\%}(^{\circ}C)$	Char(%)
p-PET	417	482	449	15.06
PBS	361	440	409	4.16
p-PET/PBS/WT (wt%/wt%/phr)				
60/40/0	392	478	435	8.31
60/40/10	376	480	430	16.06
60/40/20	390	475	438	21.40
60/40/30	399	476	442	27.14
60/40/40	403	483	450	31.07

จากตารางที่ 4.8 พบว่า p-PET มีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 417–482 องศาเซลเซียสและมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ 50% เท่ากับ 449 องศาเซลเซียส ขณะที่ PBS มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 361–440 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ 50% เท่ากับ 409 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า PBS มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำกว่า p-PET ดังนั้น เมื่อผสม PBS ปริมาณ 40 wt% ลงใน p-PET (60/40 p-PET/PBS) จึงเป็นผลทำให้พอลิเมอร์ผสมมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวต่ำกว่า p-PET อยู่ในช่วงประมาณ 392–478 องศาเซลเซียสและมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ 50% เท่ากับ 480 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ พบว่า p-PET มีปริมาณต่ำกว่า PBS จึงทำให้พอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS มีปริมาณน้อยกว่าลงเมื่อเติม PBS ในพอลิเมอร์ผสม นอกจากนี้ การเติม WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS พบว่า การเติม WT ที่ปริมาณ 10-20 phr ส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS ทั้งนี้เนื่องจากแรงยึดเกาะระหว่าง WT และพอลิเมอร์เมทริกซ์ต่ำ จึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเฟส ซึ่งทำให้ความร้อนสามารถแพร่หรือซึมผ่านเข้าไปในชั้นทดสอบได้ง่าย ส่งผลให้เกิดการสลายตัวของชั้นทดสอบเร็วขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณ WT เพิ่มขึ้นเป็น 30-40 phr ส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนได้รับการปรับปรุงมากขึ้น แสดงให้เห็นถึงการเกิดแรงยึดเหนี่ยวที่ดีกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ดังที่กล่าวมาข้างต้น นอกจากนี้ พบว่าคอมพอสิตในทุกอัตราส่วนมีปริมาณต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ WT ที่เพิ่มมากขึ้น



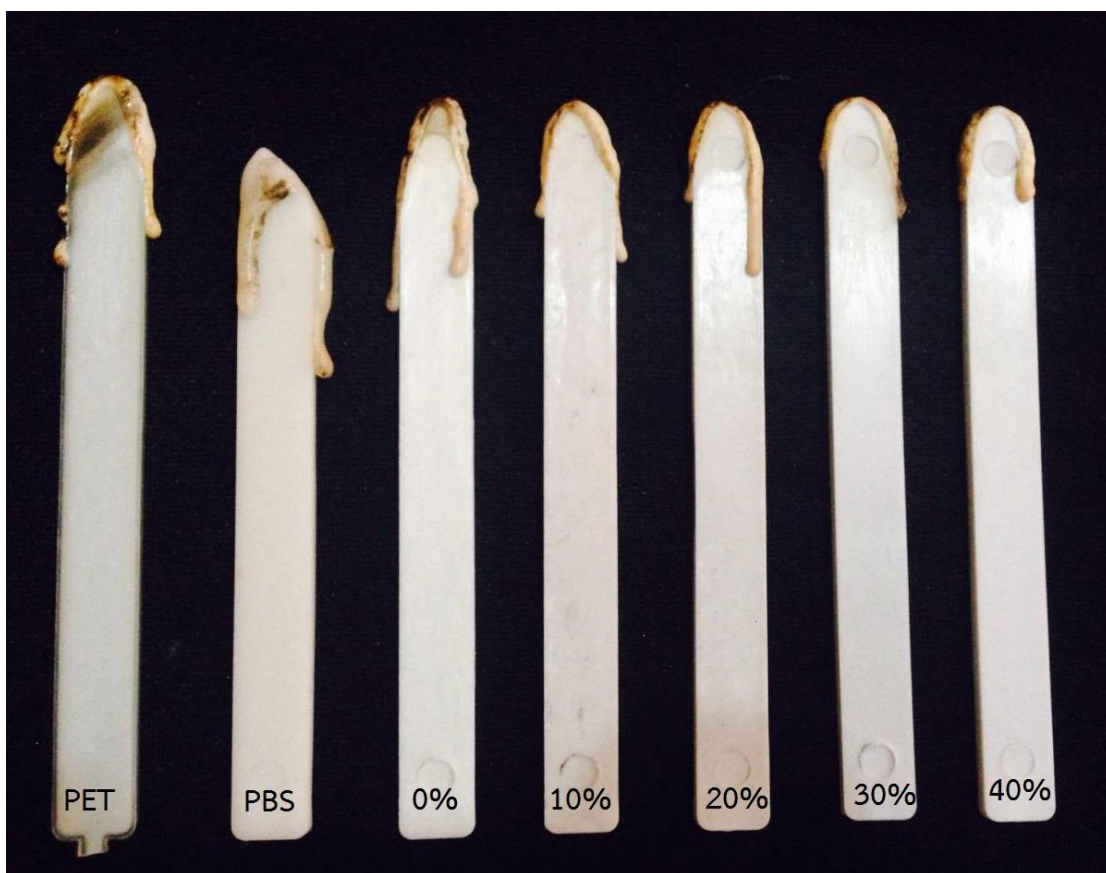
#### 4.5 การทดสอบการลามไฟ (Flame rate test)

รูปที่ 4.9 แสดงค่าอัตราการลามไฟของ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต ตามมาตรฐาน UL-94 โดยการทดสอบในแนวตั้ง (vertical burning test)



รูปที่ 4.9 อัตราการลามไฟของ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต

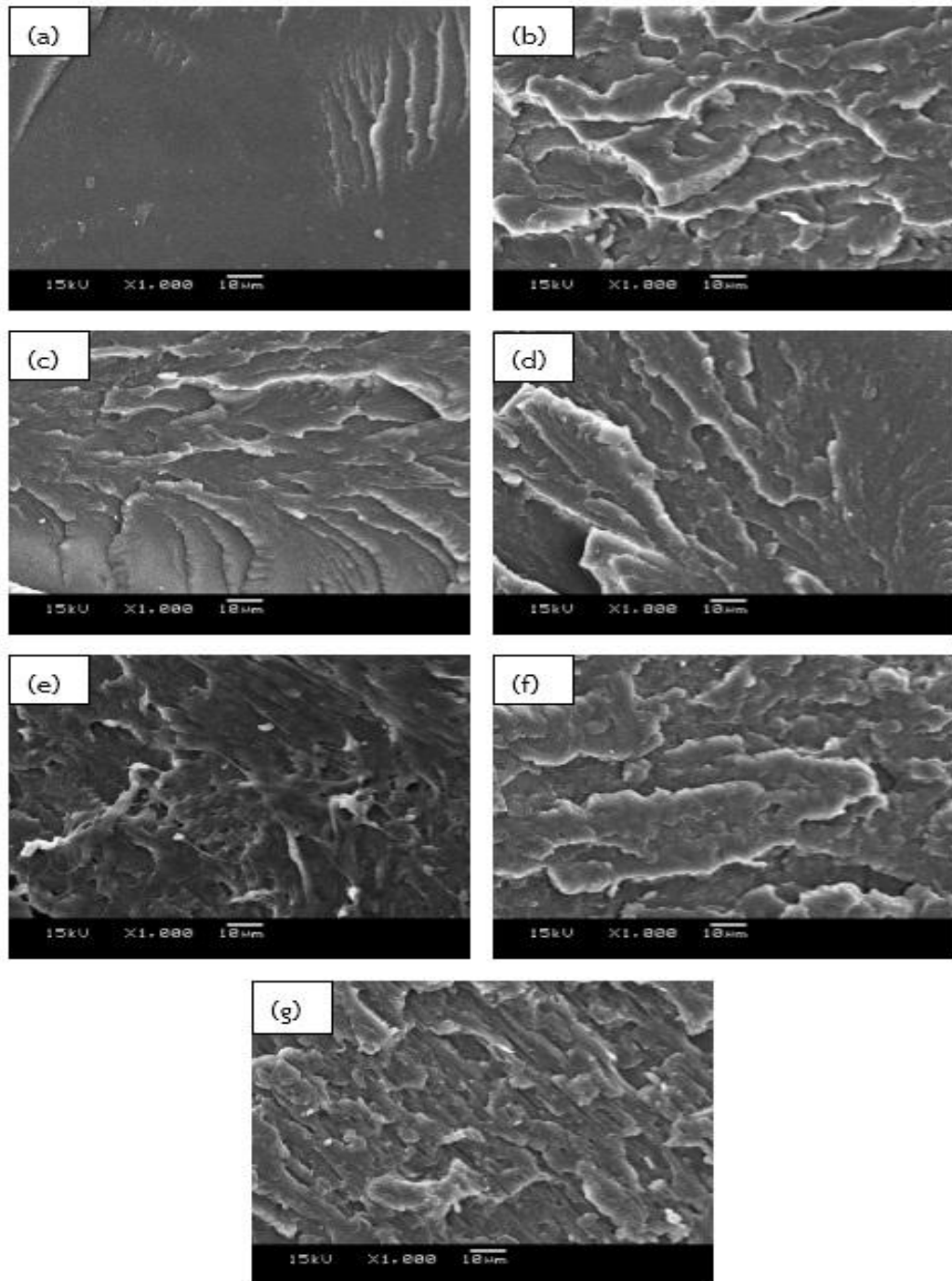
จากรูปที่ 4.9 พบว่า ชิ้นทดสอบ p-PET, PBS และ พอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS ไม่สามารถเกิดการติดไฟได้จากการทดสอบนี้ เนื่องจาก p-PET และ PBS มีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด (limit oxygen index, LOI) สูงกว่า เท่ากับ 28% และ 27% ตามลำดับ จึงทำให้ไม่สามารถเกิดการติดไฟได้ที่ภาวะการทดสอบ (ปริมาณออกซิเจน 21%) ขณะที่ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิตเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง และเกิดการหลอมหยุด ดังนั้น จึงจัดอยู่ในเกณฑ์ V-2 ตามมาตรฐาน UL-94 นอกจากนี้ พบว่า การเติม WT ลงในพอลิเมอร์ผสม ส่งผลให้อัตราการลามไฟของคอมพอสิตเร็วขึ้นตามปริมาณ WT ที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวที่ไม่ดีระหว่าง WT และ พอลิเมอร์เมทริกซ์ จึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเฟส ส่งผลให้ออกซิเจนสามารถแพร่หรือซึมผ่านเข้ามาในชิ้นทดสอบได้ง่าย ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่เพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การเติม WT ในปริมาณมากขึ้นช่วยทำให้การหลอมหยุดหลังติดไฟของคอมพอสิตลดลง โดยที่ปริมาณ 10 และ 20 phr จะยังเกิดการหลอมหยุดเป็นทางยาวและที่ปริมาณ 30 และ 4 phr พบว่าระดับการหลอมหยุดลดลงมากเมื่อเทียบกับ p-PET, PBS และ พอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ลักษณะชิ้นทดสอบของ p-PET, PBS, พอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS และ 60/40 p-PET/PBS/WT คอมพอสิตภายหลังการตีไฟ

#### 4.6 สัณฐานวิทยา (Morphology)

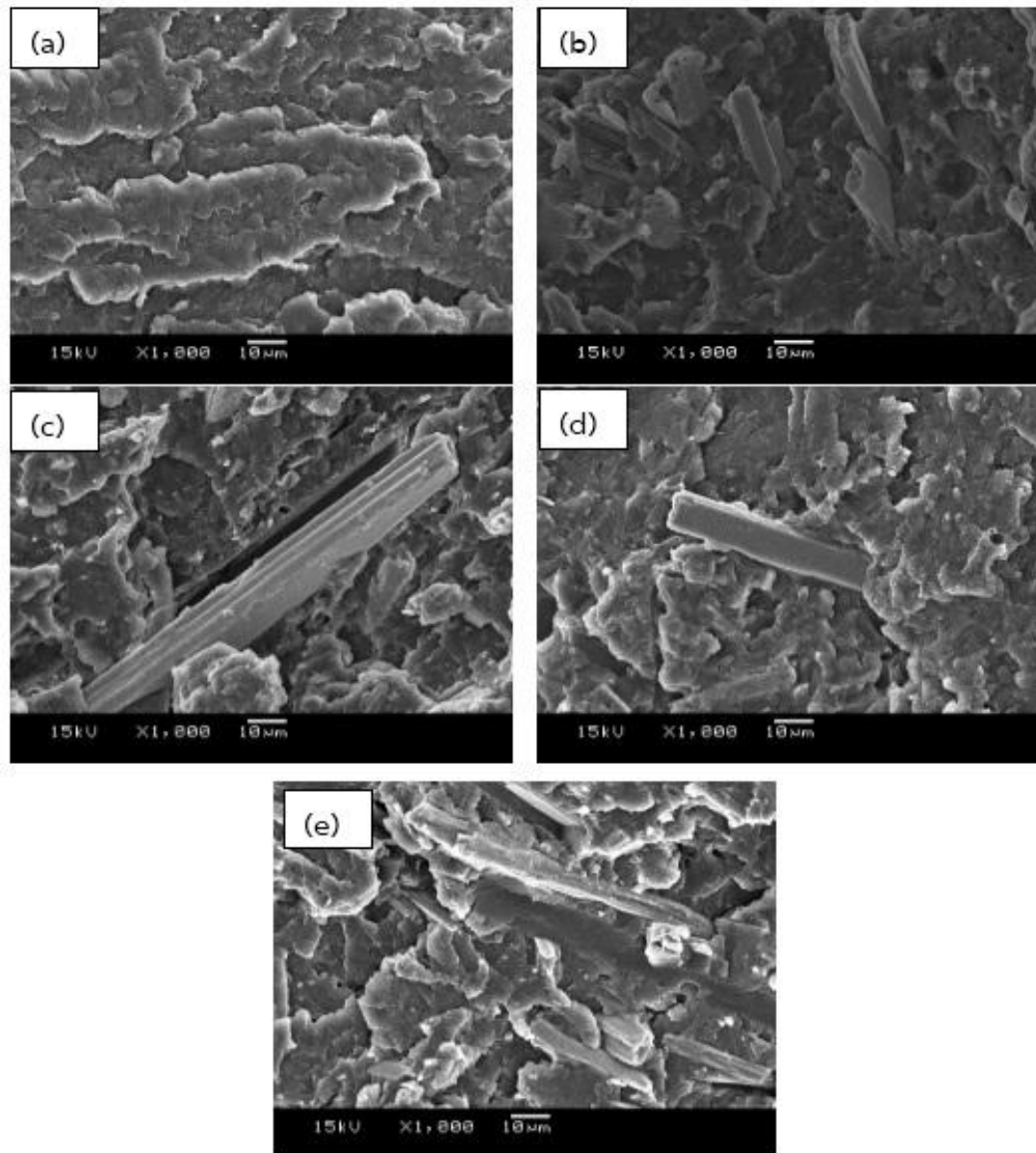
รูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักจากการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของ p-PET, PBS และพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS และ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต ซึ่งตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 4.11 สัณฐานวิทยาของ (a) p-PET, (b) PBS และพอลิเมอร์ผสม p-PET /PBS ที่อัตราส่วน (c) 90/10, (d) 80/20, (e) 70/30 (f) 60/40 และ (g) 50/50 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

จากรูปที่ 4.11(a) พบว่า p-PET มีพื้นผิวรอยแตกหักค่อนข้างเรียบ ซึ่งเป็นลักษณะของวัสดุที่มีความแข็งแรงเพราะ ขณะที่ PBS มีพื้นผิวรอยแตกหักขรุขระเป็นคลื่นกระจายทั่วไปบนพื้นผิว (รูปที่ 4.11(b)) ซึ่งแสดงถึงวัสดุที่มีความเหนียวและยืดหยุ่น และเมื่อเติม PBS ลงใน p-PET พบว่า

พื้นผิวบริเวณรอยแตกขรุขระและเป็นคลื่นกระจายมากขึ้นตามปริมาณ PBS ที่เพิ่มมากขึ้น (รูปที่ 4.10(c-g)) แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมมีความเหนียวมากกว่า p-PET จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมข้างต้นสามารถบ่งบอกได้ว่า PBS สามารถเพิ่มความเหนียวให้กับ p-PET ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS ที่ได้กล่าวมาข้างต้น

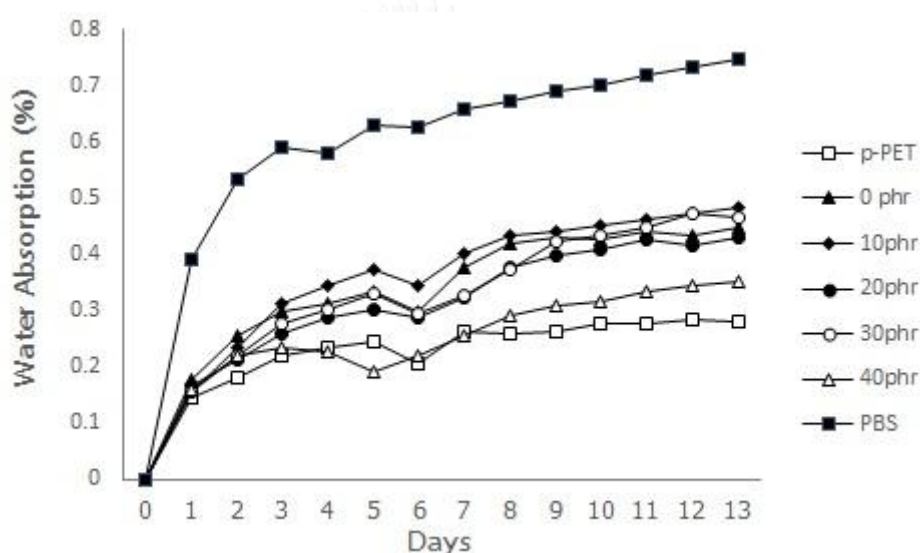


รูปที่ 4.12 สัณฐานวิทยาของ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิตที่ปริมาณ WT: (a) 0, (b) 10, (c) 20 และ (d) 30 phr ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

จากรูปที่ 4.11 พบว่า การเติม WT ที่ปริมาณ 10 และ 20 phr (รูปที่ 4.11(b) และ (c) ตามลำดับ) เกิดช่องว่างบริเวณพื้นผิวระหว่าง WT และ พอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งแสดงถึงแรงยึดเกาะระหว่างเฟสต่ำ ขณะที่การเติม WT ที่ปริมาณ 30 และ 40 phr (รูปที่ 4.11(d) และ (e) ตามลำดับ) พบว่ามีปริมาณ WT กระจายตัวอยู่ในตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์มากขึ้น และยังคงช่องว่างจากการหลุดออกของ WT บางส่วนระหว่างทำการทดสอบสมบัติแรงดึง ซึ่งสอดคล้องกับผลสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตที่ได้กล่าวมาข้างต้น

#### 4.7 การดูดซึมน้ำ (Water absorption)

รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำและจำนวนวันที่ทำการทดสอบของ p-PET, PBS, พอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS และ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต



รูปที่ 4.13 การดูดซึมน้ำของ p-PET, PBS, พอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS และ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต

จากรูปที่ 4.12 พบว่า ชิ้นทดสอบในทุกอัตราส่วนมีการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน 7 วันแรกของการทดสอบ และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามจำนวนวันที่ทดสอบที่เพิ่มขึ้น หลังจากนั้นการดูดซึมน้ำค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัว นอกจากนี้ พบว่า p-PET มีการดูดซึมน้ำน้อยที่สุด เนื่องจาก p-PET เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ขณะที่ PBS มีการดูดซึมน้ำสูงที่สุด และเมื่อเติม PBS ปริมาณ 40 wt% ลงใน p-PET พบว่า การดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ p-PET นอกจากนี้ พบว่า คอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS อย่างไรก็ตาม การดูดซึมน้ำของคอมพอสิตลดลงตามปริมาณ WT ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก WT เป็นสารตัวเติมอินทรีย์ที่ไม่ดูดซึมน้ำ หากแต่การเติม WT ที่ปริมาณต่ำ (10 phr) ส่งผลให้การ

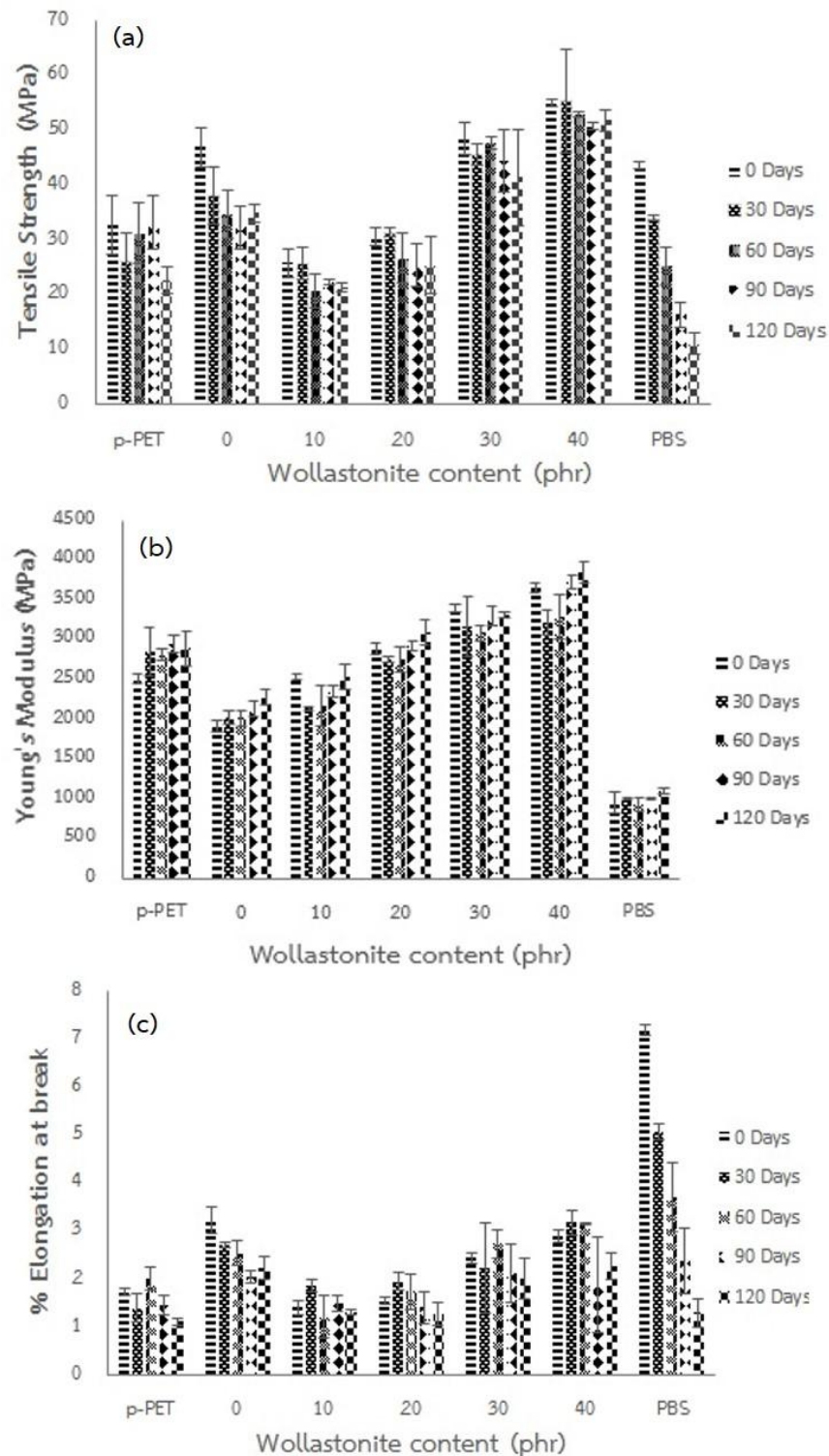
ดูดซึมน้ำมากกว่าพอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS เนื่องจากแรงยึดเกาะระหว่าง WT และ พอลิเมอร์เมทริกซ์ต่ำ ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างรอยต่อของเฟส ส่งผลให้คอมพอสิตสามารถดูดซึมน้ำได้มากขึ้น จากผลการดูดซึมน้ำแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของคอมพอสิตที่ใส่สารตัวเติมผงไม้ ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเกิดการย่อยสลายโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ที่เคลื่อนตัวเข้าไปในผลิตภัณฑ์โดยอาศัยน้ำเป็นตัวกลางได้มากขึ้น

#### 4.8 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability)

การศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการทดสอบโดยการฝังดินภายใต้สภาวะควบคุมทั้งอัตราส่วนผสมของดิน (ปุ๋ยคอก : ดิน เป็น 1 : 1) ระยะเวลาในการรดน้ำหน้าดิน (7 วัน/ครั้ง) ปริมาณน้ำที่ใส่รดในแต่ละครั้ง (1 ลิตร) รวมถึง ความลึกของการฝังดิน (15 เซนติเมตร)

##### 4.8.1 สมบัติด้านแรงดึงหลังฝังดิน

สมบัติด้านแรงดึง (ความทนแรงดึง ยั่งสัมมอดูลัส และการยืดตัว ณ จุดขาด) ของ p-PET, PBS, พอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS และ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต หลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 วัน แสดงไว้ในรูปที่ 4.13

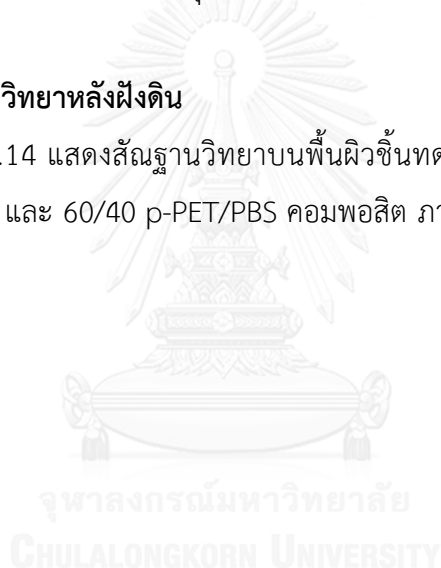


รูปที่ 4.14 สมบัติด้านแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยังส์มอดุลัส, (c) การยืดตัว ณ จุดขาดของ p-PET, PBS, พอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS และ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิตภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 วัน

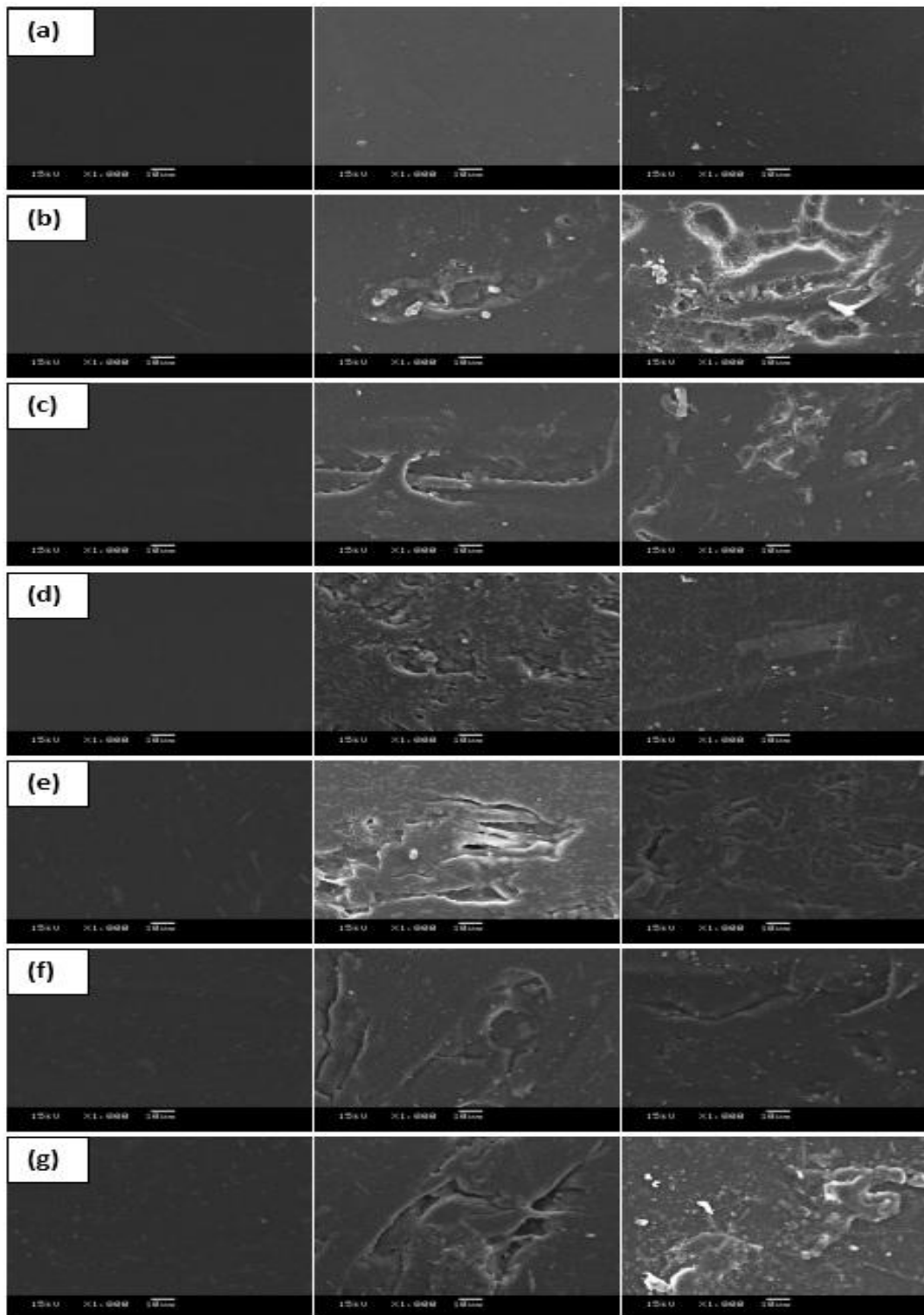
จากรูปที่ 4.13 พบว่า ความทนแรงดึง ยังสัมพันธ์และการยืดตัว ณ จุดขาดของ p-PET ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก p-PET ไม่เกิดการย่อยสลายทางธรรมชาติเมื่อทำการฝังดิน ขณะที่ความทนแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดของ PBS มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจาก PBS เกิดการย่อยสลายเมื่อทำการฝังดิน จึงเกิดเป็นจุดบกพร่องบนพื้นผิวขึ้นทดสอบ หากแต่ยังสัมพันธ์ของ PBS ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนพอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS พบว่า ความทนแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลง ขณะที่ยังสัมพันธ์ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อเวลาผ่านไป ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลการย่อยสลายของ PBS ทำให้เกิดจุดบกพร่องกระจายบนพื้นผิวของชิ้นทดสอบ นอกจากนี้ การเติม WT ใน พอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS พบว่า ความทนแรงดึง ยังสัมพันธ์และการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการลดลงของสมบัติแรงดึงใน PBS บริสุทธิ์ ทั้งนี้เนื่องจาก WT เป็นสารตัวเติมอินทรีย์ที่ไม่เกิดการย่อยสลาย

#### 4.8.2 สัณฐานวิทยาหลังฝังดิน

รูปที่ 4.14 แสดงสัณฐานวิทยาบนพื้นผิวชิ้นทดสอบของ p-PET, PBS, พอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS และ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต ภายหลังจากฝังดินเป็นเวลา 60 และ 120 วัน







รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยาของ (a) p-PET, (b) PBS, (c) พอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS และ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิตที่ปริมาณ WT: (d) 10, (e) 20, (f) 30 และ (g) 40 phr ภายหลังจากฝังดินเป็นเวลา 0, 60 และ 120 วัน

จากรูปที่ 4.14 พบว่า หลังจากฝังดินเป็นเวลา 60 และ 120 วัน พบว่า พื้นผิวของ p-PET (รูปที่ 4.14(a)) มีลักษณะเรียบ แสดงให้เห็นว่าชิ้นทดสอบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือการย่อยสลาย ขณะที่ PBS มีการกร่อนบนพื้นผิว (surface erosion) และมีการกร่อนบนพื้นผิวที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อทำการฝังดินเป็นเวลา 120 วัน (รูปที่ 4.14(b)) ซึ่งเกิดการถูกย่อยสลายโดยการฝังดิน และเมื่อเติม PBS ที่ปริมาณ 40 wt% ลงใน p-PET (60/40 p-PET/PBS) พบว่า เกิดการกร่อนบนพื้นผิวเป็นหลุมเล็กๆ (รูปที่ 4.14(c-g)) เมื่อทำการฝังดิน เกิดจากการย่อยสลายของ PBS บางส่วน หากแต่รอยกร่อนนั้นมีขนาดเล็กกว่า PBS ล้วน ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับสมบัติแรงดึงหลังทำการฝังดิน



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและการย่อยสลายทางชีวภาพของพีดีซีแล้วด้วยการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพีดีซีแล้วและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (p-PET/PBS) และพอลิเมอร์คอมพอสิตของพีดีซีแล้ว, พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และโพลลาสโทไนต์ (p-PET/PBS/WT) ด้วยวิธีการฉีดแบบสามารถสรุปได้ดังนี้:

1. จากการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านแรงดึง ด้านแรงกระแทก และด้านแรงดัดโค้ง ของพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS พบว่า การเติม PBS ลงใน p-PET ทำให้ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และความทนแรงกระแทก ของพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้น ขณะที่ยังสัมพันธ์กับความทนแรงดัดโค้งลดลง แสดงให้เห็นว่า PBS ช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความเปราะของ p-PET โดยเฉพาะพอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีความทนแรงดึงและแรงกระแทกสูงสุด จึงนำไปเตรียมเป็นคอมพอสิตกับ WT ที่ปริมาณ 10, 20, 30 และ 40 ส่วนต่อเรซินร้อยละ

2. จากการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านแรงดึง ด้านแรงกระแทก และด้านแรงดัดโค้ง ของ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต พบว่า ความทนแรงดึงของคอมพอสิตได้รับการปรับปรุงเมื่อเติม WT ที่ปริมาณ 30 และ 40 ส่วนต่อเรซินร้อยละ ขณะที่ยังสัมพันธ์ของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนได้รับการปรับปรุง อย่างไรก็ตาม การยืดตัว ณ จุดขาด ความทนแรงกระแทกและแรงดัดโค้งมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS นอกจากนี้ การเติม WT ที่ปริมาณ 30 และ 40 ส่วนต่อเรซินร้อยละ แสดงสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการเติม WT ที่ปริมาณ 10 และ 20 ส่วนต่อเรซินร้อยละ โดยการเติม WT ที่ปริมาณ 40 ส่วนต่อเรซินร้อยละ มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด

3. จากการตรวจสอบการเกิดผลึก พบว่า การเติม PBS ลงใน p-PET ทำให้ ค่า  $T_g$  ของ PBS ในพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำลง ขณะที่ค่า  $T_g$  ของ p-PET มีค่าสูงขึ้น อีกทั้งส่งผลให้ระดับการเกิดผลึกของ p-PET ในพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้  $T_c$  และ  $T_m$  ของ p-PET ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก อย่างไรก็ตาม  $T_c$  ของ PBS มีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่  $T_m$  มีค่าลดลง และเมื่อใส่สารตัวเติม WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS พบว่า  $T_g$ ,  $T_c$  และ  $T_m$  ของ p-PET และ PBS ไม่มีการเปลี่ยนแปลง อีกทั้งระดับการเกิดผลึกของ p-PET ในคอมพอสิตมีค่าลดลง ขณะที่ระดับการเกิดผลึกของ PBS มีค่าเพิ่มขึ้นที่ปริมาณ PBS 10 และ 20 wt% เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม

4. จากการตรวจสอบเสถียรภาพทางความร้อน พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีเสถียรภาพทางความร้อนลดลงเล็กน้อยจาก p-PET และเมื่อเติม WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS พบว่าเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิตได้รับการปรับปรุงเมื่อทำการเติม WT ที่ปริมาณ 30 และ 40 ส่วนต่อเรซินร้อยละ

5. จากการศึกษาการลามไฟ พบว่า การเติม WT ทำให้คอมพอสิตมีอัตราการลุกลามไฟเร็วขึ้นตามปริมาณ WT ที่เพิ่มขึ้นโดย p-PET, PBS และพอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS ไม่เกิดการติดไฟในภาวะการทดสอบ และระดับการหลอมหยดหลังติดไฟของคอมพอสิตลดลงเมื่อทำการเติม WT ในปริมาณมากขึ้น

6. จากการศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำ พบว่า p-PET มีการดูดซึมน้ำที่ค่อนข้างต่ำมาก ขณะที่ PBS มีการดูดซึมน้ำได้ดี และเมื่อเติม PBS ลงใน p-PET ปริมาณ 40wt% พบว่า มีการดูดซึมน้ำสูงขึ้นและเมื่อใส่สารตัวเติม WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS พบว่า การดูดซึมน้ำของคอมพอสิตมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS และลดลงตามปริมาณ WT ที่เพิ่มขึ้น หากแต่การเติม WT ที่ปริมาณ 10 ส่วนต่อเรซินร้อยละมีการดูดซึมน้ำที่มากกว่า พอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS เล็กน้อย

7. จากการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพ พบว่า PBS, พอลิเมอร์ผสม 60/40 p-PET/PBS และ 60/40 p-PET/PBS คอมพอสิต สามารถเกิดการย่อยสลายได้ในภาวะการทดสอบ หากแต่ p-PET ล้วน ไม่สามารถเกิดการย่อยสลายได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยเพิ่มระยะเวลาทดสอบให้มากขึ้น หรือเปลี่ยนชนิดของดินในการทดสอบ เพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง
2. ทดลองใช้สารคู่ควบเพื่อปรับปรุงการยึดเกาะของโพลลาสโตนีต์และพอลิเมอร์เมทริกซ์
3. ศึกษาการใช้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีความยืดหยุ่นสูงชนิดอื่นๆ
4. ศึกษาวิธีขึ้นรูปแบบอื่น เช่น การเป่าฟิล์ม เพื่อศึกษาชาถึงกระบวนการขึ้นรูปที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต

## รายการอ้างอิง

1. Polymer Science Learning Center. Polyesters Available from: <http://www.pslc.ws/macrog/pet.htm> [25 June 2016].
2. เสาวรณน์ ช่วยจุลจิตร. สมบัติของพอลิเมอร์. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
3. Kayaisang S, Saikrasun S, Amornsakchai T. Potential Use of Recycled PET in Comparison with Liquid Crystalline Polyester as a Dual Functional Additive for Enhancing Heat Stability and Reinforcement for High Density Polyethylene Composite Fibers. Journal of Polymers and the Environment 21(1) (2013):191-206.
4. Nabil H, Ismail H, Rashid AA. Effects of partial replacement of commercial fillers by recycled poly(ethylene terephthalate) powder on the properties of natural rubber composites. Journal of Vinyl and Additive Technology 18(2) (2012):139-46.
5. วิมลวรรณ พิมพ์พันธ์. เอกสารประกอบการสอนวิชาพลาสติกรีไซเคิล. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
6. Pawlak A, Morawiec J, Pazzagli F, Pracella M, Galeski A. Recycling of postconsumer poly(ethylene terephthalate) and high-density polyethylene by compatibilized blending. Journal of Applied Polymer Science 86(6) (2002):1473-85.
7. Intech open Science, Technology and Medicine. Biodegradable Polymers Available from: <http://www.intechopen.com/books/biodegradation-life-of-science/biodegradable-polymers> [22 June 2016].
8. PTT MTT Biochem. FZ91PD for Paper Lamination Available from: <http://www.pttmcc.com/new/download/FZ91PD.PDF> [22 June 2016].
9. Liu L, Yu J, Cheng L, Qu W. Mechanical properties of poly(butylene succinate) (PBS) biocomposites reinforced with surface modified jute fibre. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 40(5) (2009):669-74.
10. National Metal and Materials Technology Center (MTEC). BioPlastic Available

- from:[http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable\\_plastic/type\\_de\\_plas.html](http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html) [24 June 2016].
11. คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาเคมี มหาวิทยาลัยแม่โจ้. บทที่ 10 สารเติมแต่งพอลิเมอร์ Available from: [http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/s\\_muangpil](http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/s_muangpil) [25 June 2016].
  12. อ.ดร. อนงค์นาฏ สมหวังธนโรจน์. Engineering Materials Available from: <http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~sanongn1/additives.pdf> [22 June 2016].
  13. อรุษา สรวารี. สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2545.
  14. NYGLOS®. Chemically Modified/Untreated Wollastonite Available from: <http://www.sandb.com/our-products/nyglos-chemically-modifieduntreated-wollastonite/> [24 June 2016].
  15. Keiwa Rozai Co.,Ltd. Wollastonite Available from: <https://www.keiwa-jp.com/en/products/material/wollastonite.html> [22 June 2016].
  16. Wikimedia commons, Wollastonite-cell Available from: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wollastonite-cell.png?uselang=fr> [22 June 2016].
  17. Gai G-S, Yang Y-F, Fan S-M, Cai Z-F. Preparation and properties of composite mineral powders. Powder Technology 153(3) (2005):153-8.
  18. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). สารนำรู้ : วัสดุนำรู้ : โพลีเมอร์คอมโพสิต Available from: <https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/79-> [22 June 2016].
  19. IEEE Globaspec. 1.6: Processing of Thermoplastics Available from: <http://www.globaspec.com/reference/64229/203279/1-6-processing-of-thermoplastics> [22 June 2016].
  20. Panyathaiplastic. งานฉีดพลาสติก Available from: [http://www.panyathaiplastic.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=16:article-cap4&catid=1:category-captifycontent](http://www.panyathaiplastic.com/index.php?option=com_content&view=article&id=16:article-cap4&catid=1:category-captifycontent) [24 June 2016].
  21. IBSRT B2B Pictures. plastic pipe fitting making machine Pictures Available from: <http://www.ibsrt.com/imglist/plastic-pipe-fitting-making-machine-id-36424-p-1.html> [22 June 2016].
  22. ดร.รชนี พัทธวรากร. เอกสารประกอบการสอนกระบวนการผลิต 262481 เทคโนโลยีกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์. เชียงใหม่,2555.

23. Yupapin PP., Pivsa-Art S, Ohgaki H., Threepopnatkul P., Wongnarat C.. and Intolo W. Effect of TiO<sub>2</sub> and ZnO on Thin Film Properties of PET/PBS Blend for Food Packaging Applications. Energy Procedia 56 (2014):102-11.
24. Chiellini E., Corti A., Giovannini A., Narducci P., Paparella AM. and Solaro R. Evaluation of biodegradability of poly( $\epsilon$ -caprolactone)/poly(ethylene terephthalate) blends. Journal of environmental polymer degradation 4(1) (1996):37-50.
25. Aravinthan G. and Kale DD. Blends of poly(ethylene terephthalate) and poly(butylene terephthalate). Journal of Applied Polymer Science 98(1) (2005):75-82.
26. Srithep Y., Javadi A, Pilla S., Turng L-S., Gong S and Clemons C. Processing and characterization of recycled poly(ethylene terephthalate) blends with chain extenders, thermoplastic elastomer, and/or poly(butylene adipate-co-terephthalate). Polymer Engineering & Science 51(6) (2011):1023-32.
27. Deshmukh GS., Peshwe DR., Pathak SU.,and Ekhe JD. Evaluation of mechanical and thermal properties of Poly (butylene terephthalate) (PBT) composites reinforced with wollastonite. Transactions of the Indian Institute of Metals 64(1) (2011):127-32.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



## ภาคผนวก ก

## สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงดึง

ตาราง ก-1 สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS

องค์ประกอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	ยั้งส์มอดุลัส (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)
<b>p-PET</b>	35.82374	2447.232	1.760635
	27.33082	2534.692	1.755436
	38.88681	2602.321	1.713223
	27.18451	2495.222	1.602236
	34.30039	2447.232	1.760635
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>32.70525</b>	<b>2505.34</b>	<b>1.718433</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>5.24033</b>	<b>65.42592</b>	<b>0.067934</b>
<b>PBS</b>	958.3247	7.121846	958.3247
	965.0211	7.14676	965.0211
	964.6517	7.191291	964.6517
	966.2218	7.073571	966.2218
	953.3722	7.379362	953.3722
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>961.5183</b>	<b>7.182566</b>	<b>961.5183</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>5.934095</b>	<b>0.117955</b>	<b>5.934095</b>
p-PET 90/10	45.19501	2533.723	2.144232
	45.74711	2539.245	2.512604
	37.30074	2519.159	2.336781
	38.02405	2472.156	2.682881
	41.83173	2533.723	2.144232
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>41.61973</b>	<b>2519.601</b>	<b>2.364146</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>3.919356</b>	<b>27.54998</b>	<b>0.235109</b>
p-PET 80/20	39.57509	2468.699	2.137996
	43.6025	2585.749	2.250624
	38.83511	2429.167	2.175262
	46.63355	2585.177	2.443247
	36.74158	2442.335	2.336781

ตาราง ก-1 สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS (ต่อ)

องค์ประกอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	ยังส์มอดุลัส (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>41.07757</b>	<b>2502.226</b>	<b>2.268782</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>3.979039</b>	<b>77.30706</b>	<b>0.123736</b>
p-PET 70/30	41.11122	2310.259	2.245874
	39.83511	2291.471	3.365022
	38.06952	2356.354	2.259532
	41.90756	2150.165	2.68849
	41.60292	2310.145	2.306688
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>40.50527</b>	<b>2283.679</b>	<b>2.573121</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>1.574835</b>	<b>78.38245</b>	<b>0.478757</b>
p-PET 60/40	44.89757	1957.426	2.939008
	42.92913	1908.605	3.48272
	52.04929	1883.06	3.243185
	48.14134	1954.794	3.514536
	46.16082	1875.296	2.982055
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>46.83563</b>	<b>1915.836</b>	<b>3.232301</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>3.477046</b>	<b>38.78641</b>	<b>0.269782</b>
p-PET 50/50	47.61453	1869.464	3.630946
	46.4843	1868.123	3.489704
	43.17349	1878.458	3.011942
	44.27921	1882.293	3.241821
	43.75488	1885.328	3.559166
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>45.06128</b>	<b>1876.733</b>	<b>3.386716</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>1.899087</b>	<b>7.660558</b>	<b>0.255658</b>

ตาราง ก-2 สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงดึงของพอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT

องค์ประกอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	ยังส์มอดุลัส (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)
p-PET/PBS/WT	44.89757	1957.426	2.939008
60/40/0	42.92913	1908.605	3.48272
	52.04929	1883.06	3.243185
	48.14134	1954.794	3.514536
	46.16082	1875.296	2.982055
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>46.83563</b>	<b>1915.836</b>	<b>3.232301</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>3.477046</b>	<b>38.78641</b>	<b>0.269782</b>
p-PET/PBS/WT	26.85528	2614.636	1.544008
60/40/10	22.92467	2535.206	1.249119
	26.66644	2441.255	1.281052
	23.34043	2489.885	1.556615
	29.17504	2563.712	1.351846
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>25.79237</b>	<b>2528.939</b>	<b>1.396528</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>2.625448</b>	<b>66.71948</b>	<b>0.145292</b>
p-PET/PBS/WT	29.44727	2951.488	1.603447
60/40/20	32.36338	2909.795	1.448312
	32.61456	2853.591	1.567952
	29.37425	2899.083	1.581387
	29.48022	2815.163	1.459157
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>30.65594</b>	<b>2885.824</b>	<b>1.532051</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>1.676117</b>	<b>52.66436</b>	<b>0.072708</b>
p-PET/PBS/WT	45.28555	3498.506	2.335548
60/40/30	45.77664	3394.257	2.437677
	50.61762	3389.834	2.325182
	51.92337	3349.837	2.456581
	49.06686	3392.425	2.602745
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>48.53401</b>	<b>3404.972</b>	<b>2.431546</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>2.926974</b>	<b>55.42975</b>	<b>0.112364</b>

ตาราง ก-2 สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงดึงของพอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT (ต่อ)

องค์ประกอบ	ความทนแรงดึง (MPa)	ยังส์มอดุลัส (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)
p-PET/PBS/WT	55.65322	3719.438	3.010468
60/40/40	54.04398	3681.76	3.028759
	54.27693	3791.383	2.734162
	55.12644	3440.067	2.948964
	55.11909	3617.059	2.806941
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>54.84393</b>	<b>3649.941</b>	<b>2.905859</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>0.665561</b>	<b>133.2071</b>	<b>0.129586</b>



ตาราง ก-3 สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS

องค์ประกอบ	ความทนแรงกระแทก (KJ/m <sup>2</sup> )
p-PET	1.86
	1.83
	1.86
	1.9
	1.86
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>1.86</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>0.024</b>
PBS	5.58
	4.76
	4.51
	5.66
	5.6
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>5.22</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>0.54</b>
p-PET 90/10	3.72
	3.8
	3.72
	4.65
	4.65
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>4.108</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>0.49</b>
p-PET 80/20	2.8
	3.72
	3.73
	4.65
	4.65
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>3.91</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>0.77</b>

ตาราง ก-3 สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS (ต่อ)

องค์ประกอบ	ความทนแรงกระแทก (KJ/m <sup>2</sup> )
p-PET 70/30	4.65
	4.65
	4.62
	4.65
	4.65
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>4.64</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>0.013</b>
p-PET 60/40	5.58
	5.58
	4.67
	4.67
	4.67
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>5.034</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>0.498</b>
p-PET 50/50	4.76
	4.76
	4.67
	4.67
	3.80
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>4.532</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>0.412</b>

ตารางที่ ก-4 สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT

องค์ประกอบ	ความทนแรงกระแทก (KJ/m <sup>2</sup> )
p-PET/PBS/WT	5.58
60/40/0	5.58
	4.67
	4.67
	4.67
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>5.034</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>0.50</b>
p-PET/PBS/WT	2.79
60/40/10	2.79
	2.80
	2.79
	2.75
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>2.784</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>0.02</b>
p-PET/PBS/WT	3.66
60/40/20	2.79
	3.70
	3.66
	3.72
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>3.506</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>0.401</b>
p-PET/PBS/WT	3.66
60/40/30	3.73
	3.66
	3.70
	3.72
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>3.694</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>0.033</b>

ตารางที่ ก-4 สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT (ต่อ)

องค์ประกอบ	ความทนแรงกระแทก (KJ/m <sup>2</sup> )
p-PET/PBS/WT	3.73
60/40/40	3.70
	3.73
	3.66
	3.73
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>3.71</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>0.031</b>





ตารางที่ ก-5 สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS

องค์ประกอบ	ความทนแรงกระแทก (MPa)
p-PET	59.22
	59.77
	71.34
	67.52
	58.05
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>63.180</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>5.895</b>
PBS	39.57
	38.72
	39.57
	38.09
	39.88
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>39.166</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>0.740</b>
p-PET 90/10	67.07
	67.12
	50.1
	62.1
	62.03
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>61.684</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>6.946</b>
p-PET 80/20	45.77
	64.23
	57.52
	63.71
	53.72
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>56.99</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>7.655</b>

ตารางที่ ก-5 สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS (ต่อ)

องค์ประกอบ	ความทนแรงกระแทก (MPa)
p-PET 70/30	56.8
	61.57
	48.75
	59.37
	67.71
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>58.84</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>6.935</b>
p-PET 60/40	60.31
	60.46
	57.32
	55.64
	56.69
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>58.084</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>2.185</b>
p-PET 50/50	51.91
	49.88
	53.05
	51.89
	49.11
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>51.168</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>1.621</b>

ตารางที่ ก-6 สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT

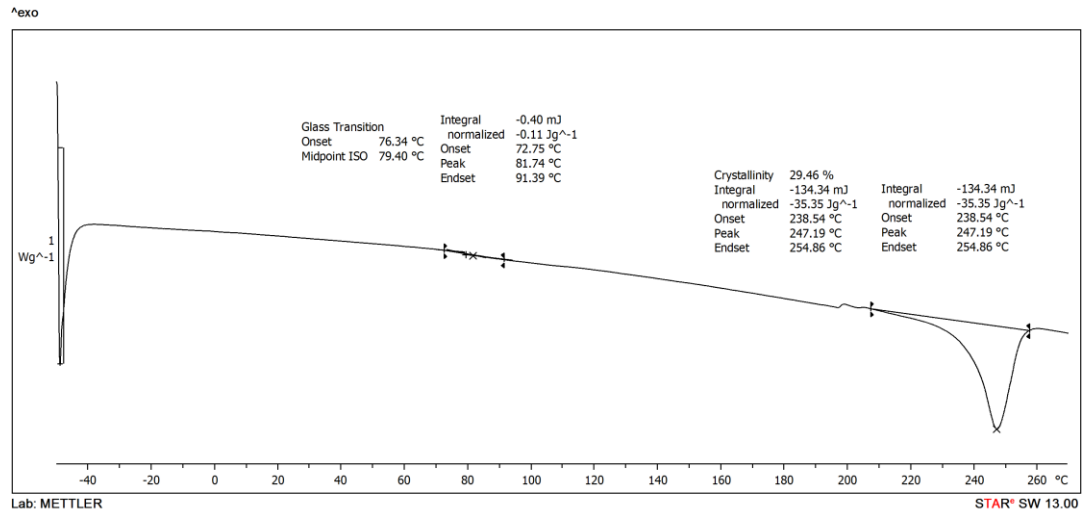
องค์ประกอบ	ความทนแรงกระแทก (MPa)
p-PET/PBS/WT	5.58
60/40/0	5.58
	4.67
	4.67
	4.67
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>5.034</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>0.50</b>
p-PET/PBS/WT	2.79
60/40/10	2.79
	2.8
	2.79
	2.75
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>2.784</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>0.02</b>
p-PET/PBS/WT	3.66
60/40/20	2.79
	3.7
	3.66
	3.72
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>3.506</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>0.401</b>
p-PET/PBS/WT	3.66
60/40/30	3.73
	3.66
	3.7
	3.72
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>3.694</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>0.033</b>

ตารางที่ ก-6 สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงกระทำของพอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT (ต่อ)

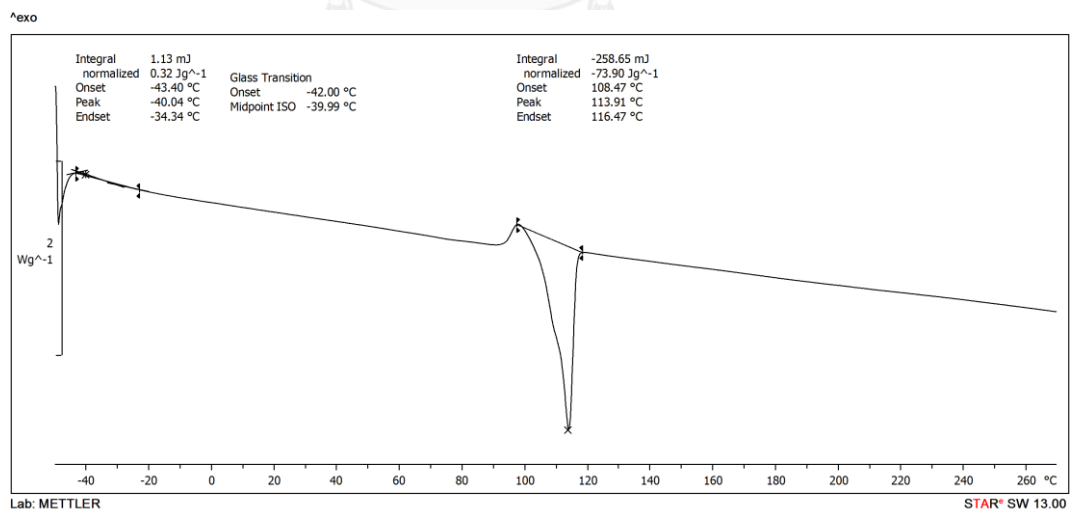
องค์ประกอบ	ความทนแรงกระทำ (MPa)
p-PET/PBS/WT	3.73
60/40/40	3.7
	3.73
	3.66
	3.73
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>3.71</b>
<b>ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน</b>	<b>0.031</b>



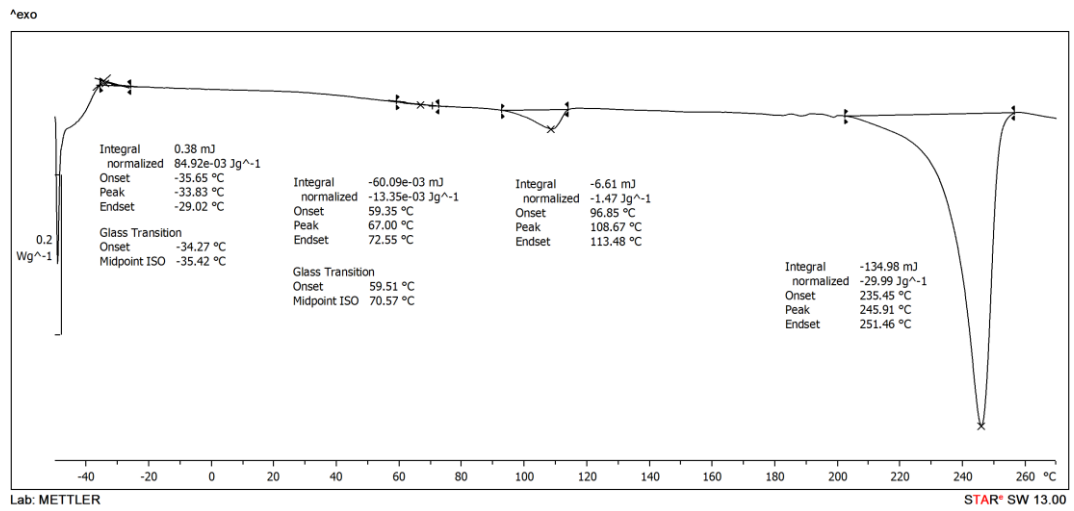
ภาคผนวก ข  
เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DSC



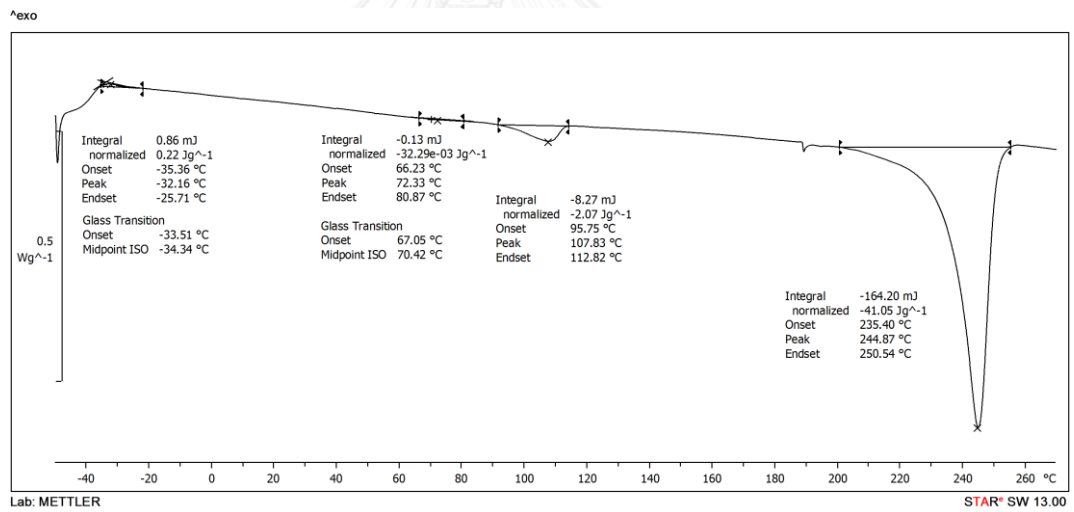
รูป ข-1 DSC เทอร์โมแกรมของพีดีซีแล้ว



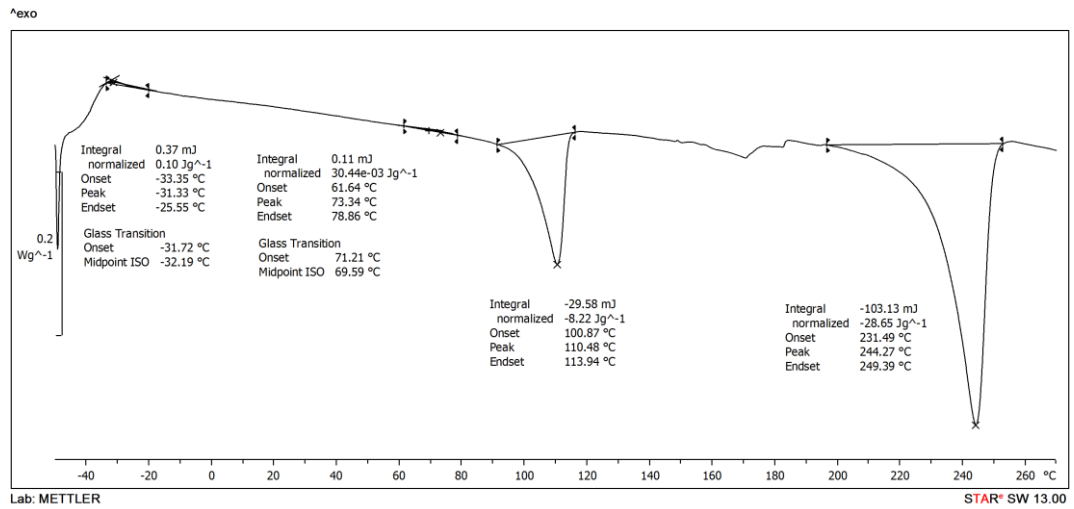
รูป ข-2 DSC เทอร์โมแกรมของ PBS



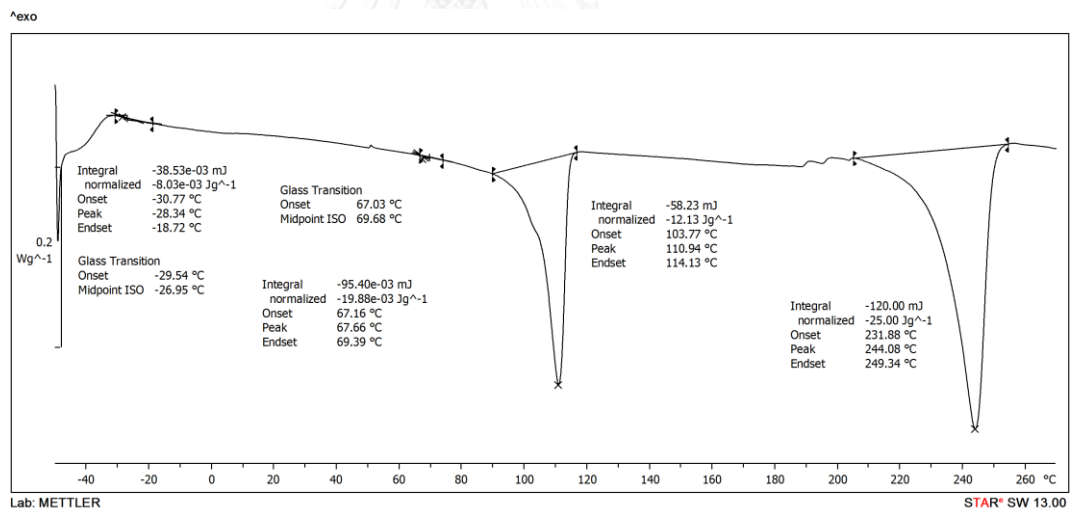
รูป ข-3 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS 90/10



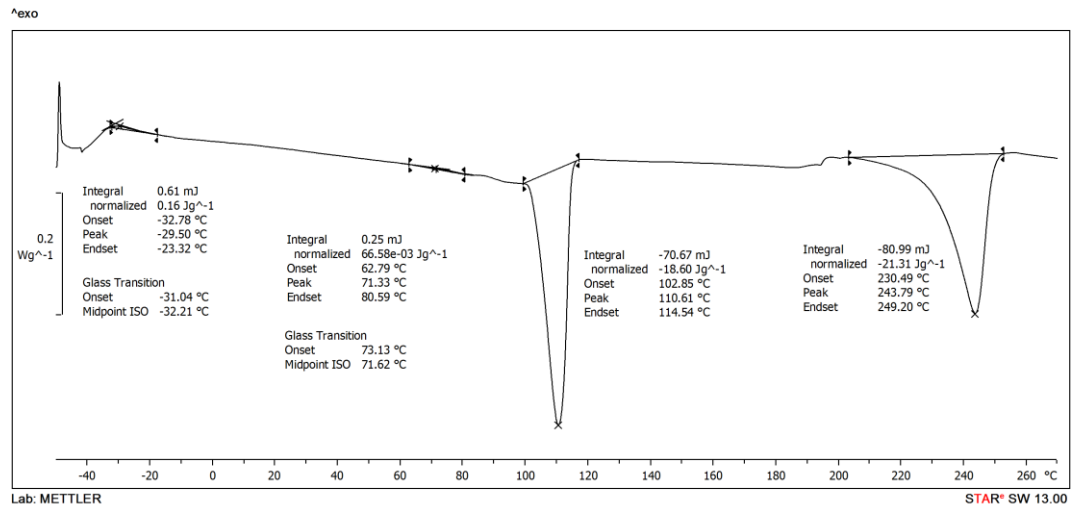
รูป ข-4 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS 80/20



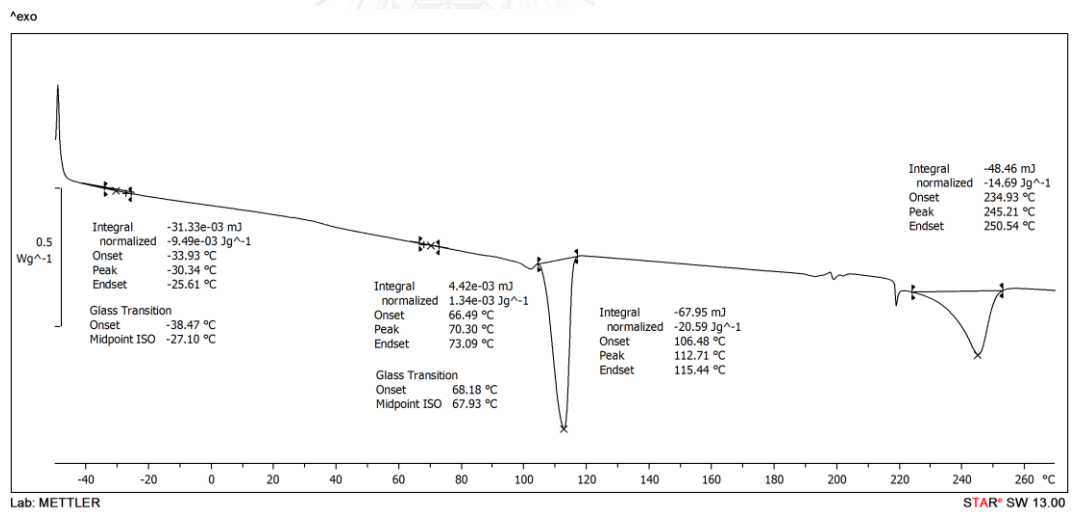
รูป ข-5 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS 70/30



รูป ข-6 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS 60/40

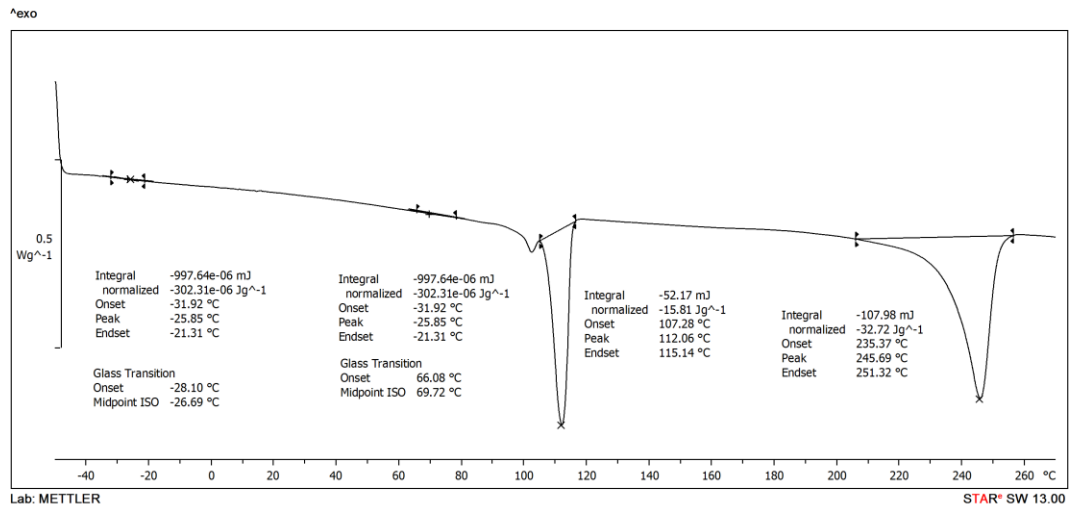


รูป ข-7 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS 50/50

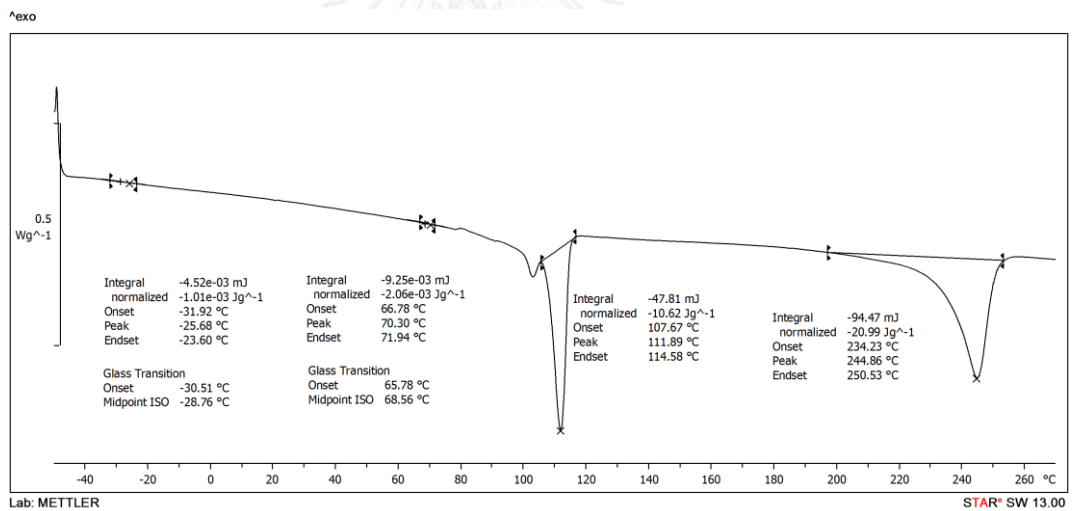


รูป ข-8 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT 60/40/10

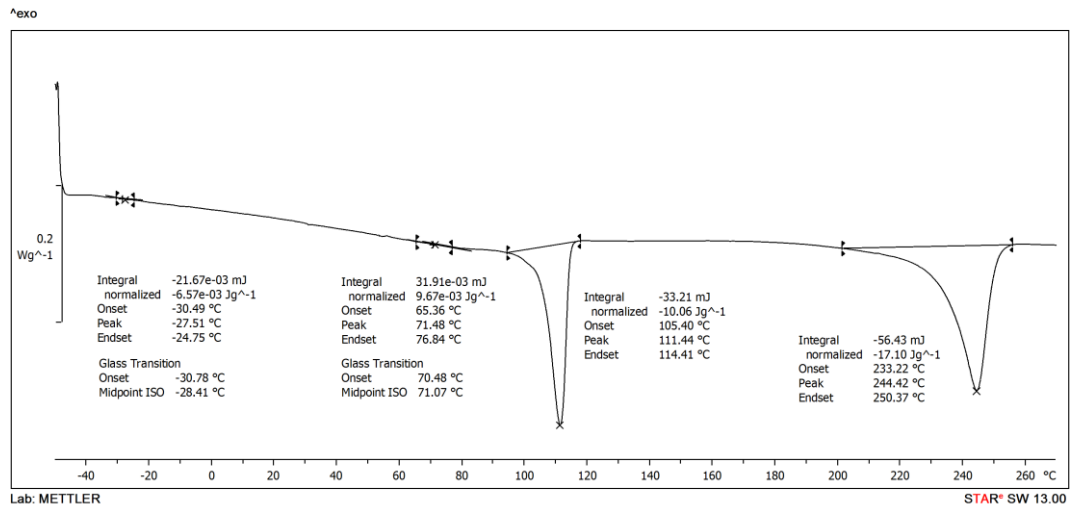




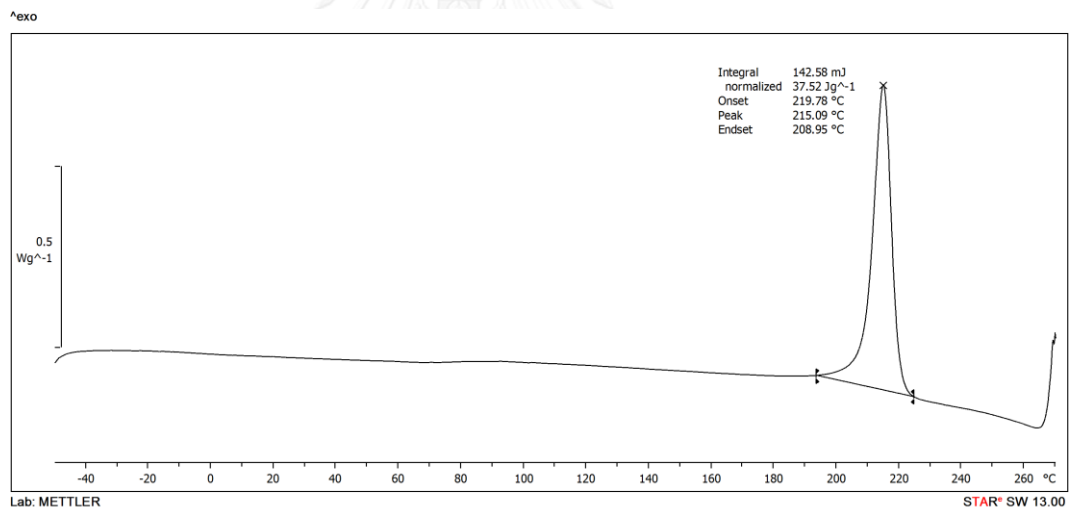
รูป ข-9 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT 60/40/20



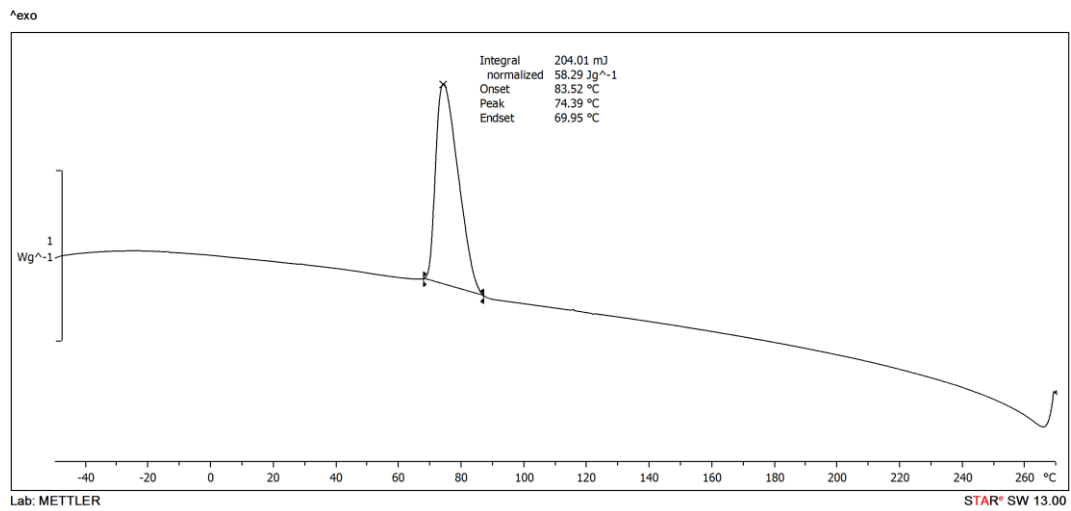
รูป ข-10 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT 60/40/30



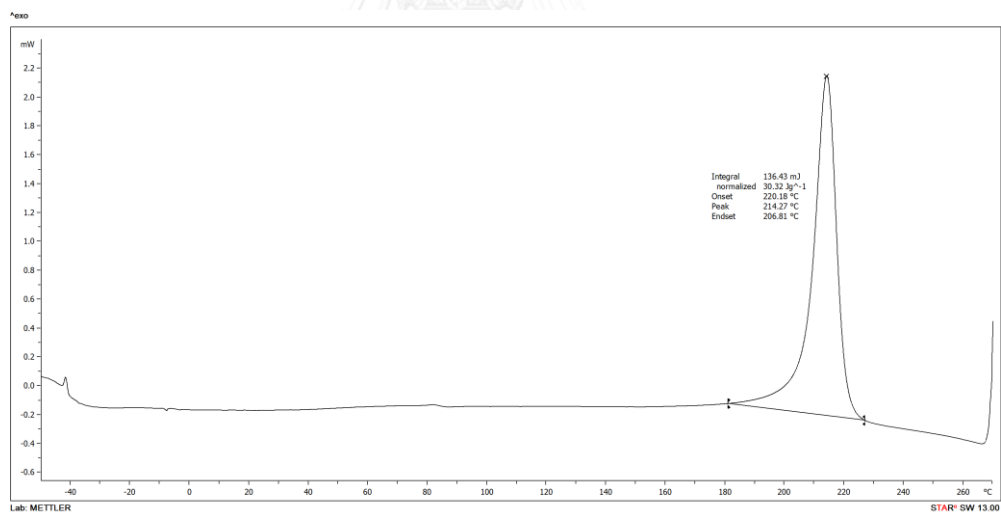
รูป ข-11 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT 60/40/40



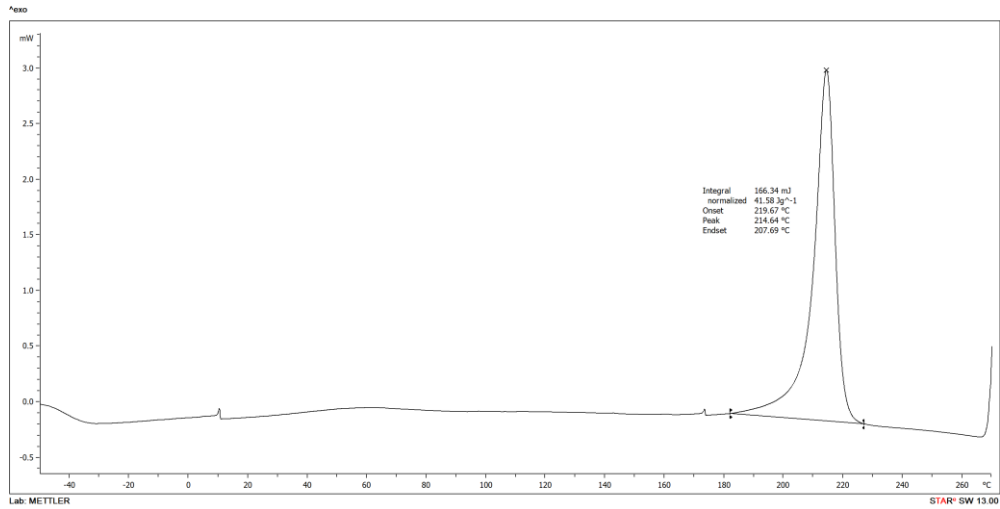
รูป ข-12 DSC เทอร์โมแกรมขณะหล่อเย็นของพีทีซีแล้ว



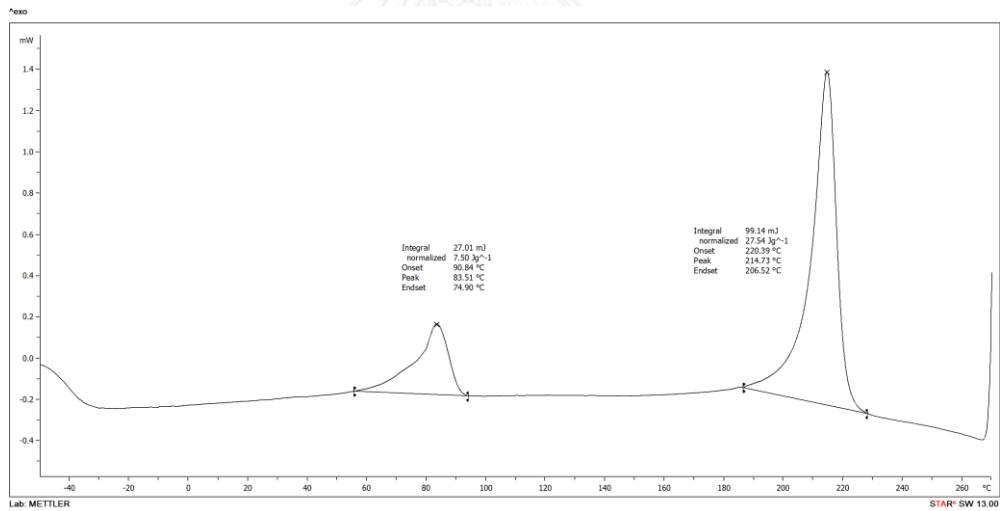
รูป ข-13 DSC เทอร์โมแกรมขณะหล่อเย็นของ PBS



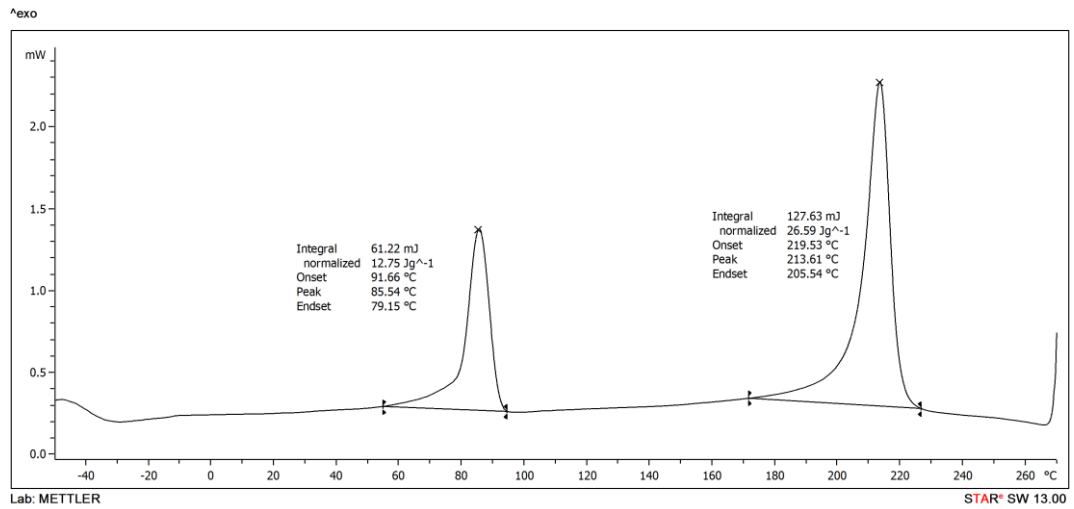
รูป ข-14 DSC เทอร์โมแกรมขณะหล่อเย็นของพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS 90/10



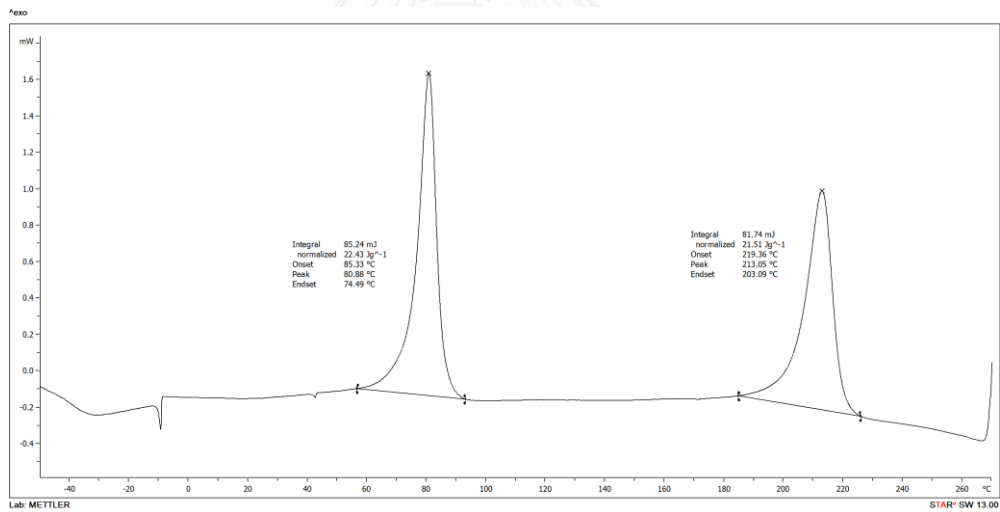
รูป ข-15 DSC เทอร์โมแกรมขณะหลอมเย็นของพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS 80/20



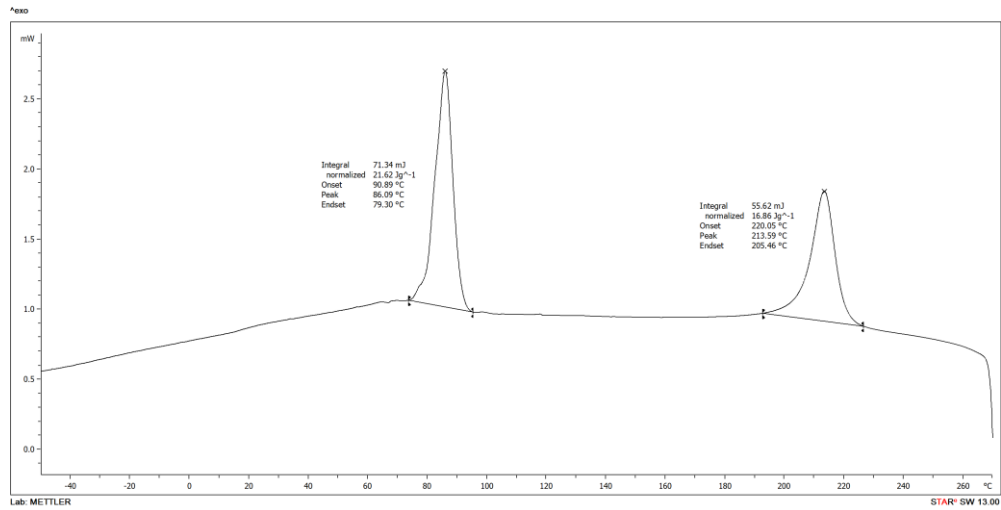
รูป ข-16 DSC เทอร์โมแกรมขณะหลอมเย็นของพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS 70/30



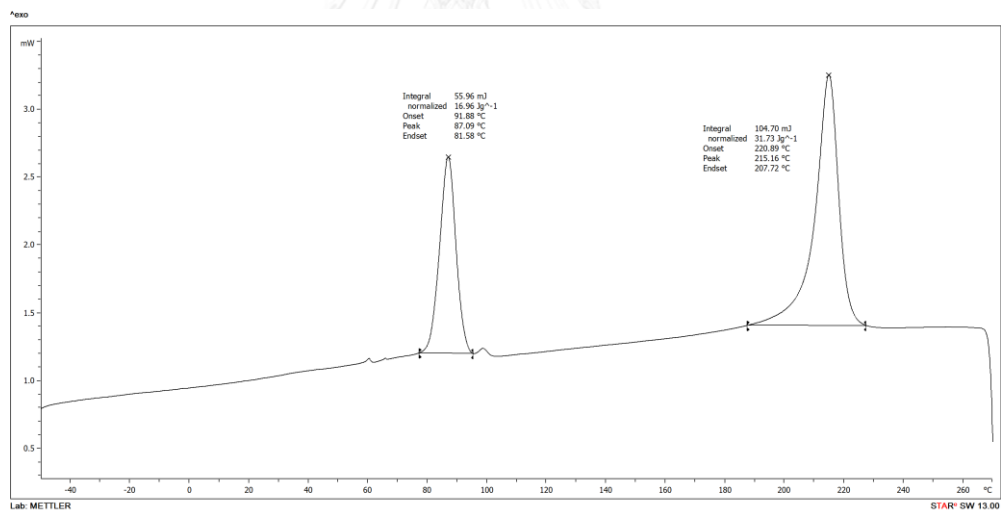
รูป ข-17 DSC เทอร์โมแกรมขณะหลอมเย็นของพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS 60/40



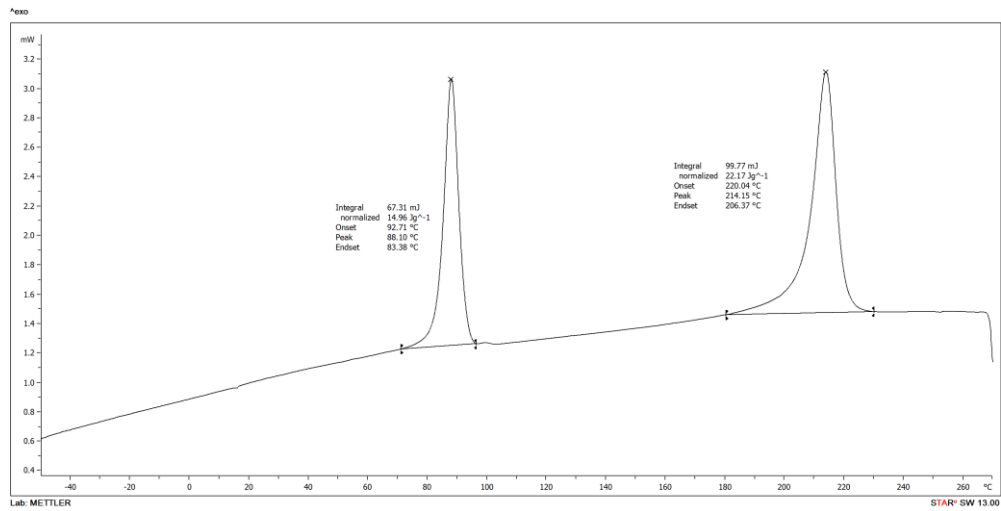
รูป ข-18 DSC เทอร์โมแกรมขณะหลอมเย็นของพอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS 50/50



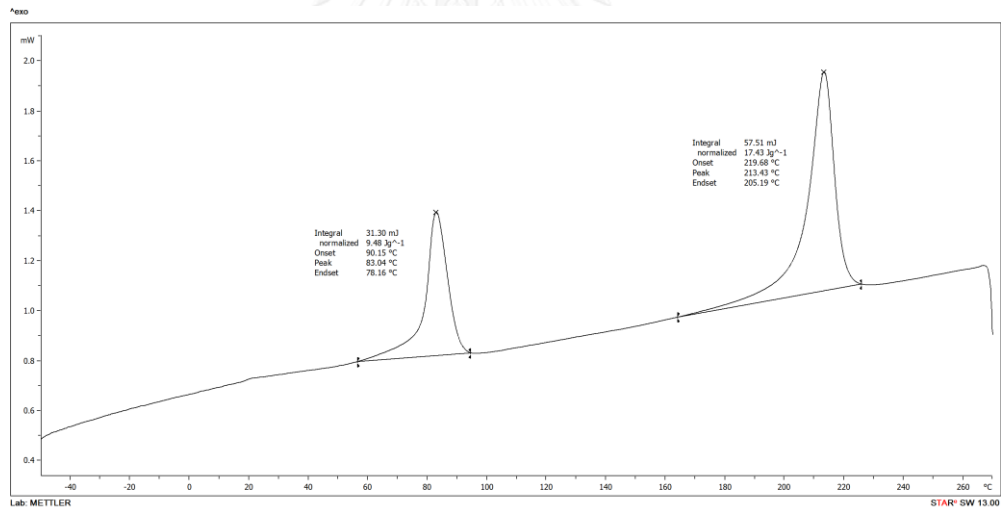
รูป ข-19 DSC เทอร์โมแกรมขณะหล่อเย็นของพอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT 60/40/10



รูป ข-20 DSC เทอร์โมแกรมขณะหล่อเย็นของพอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT 60/40/20

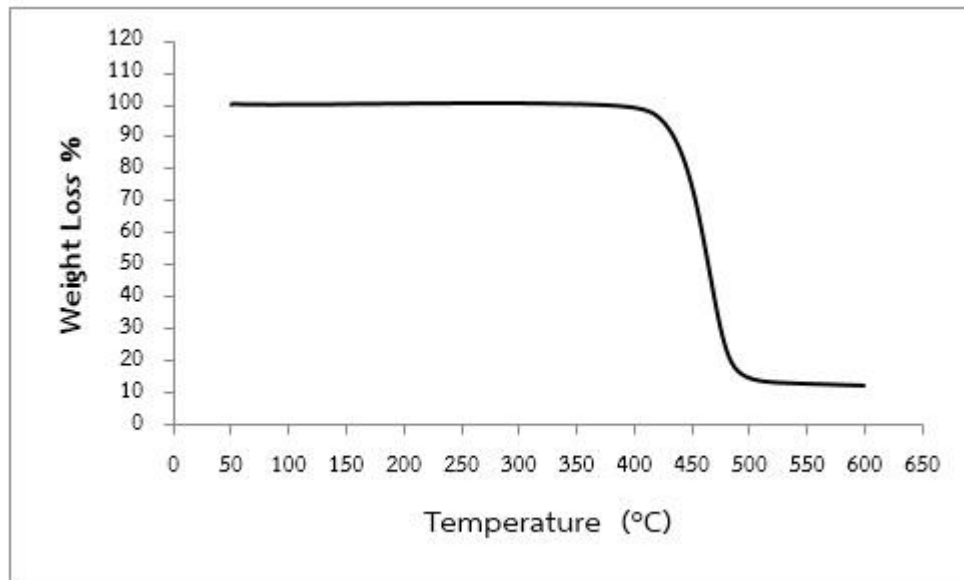


รูป ข-21 DSC เทอร์โมแกรมขณะหล่อเย็นของพอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT 60/40/30

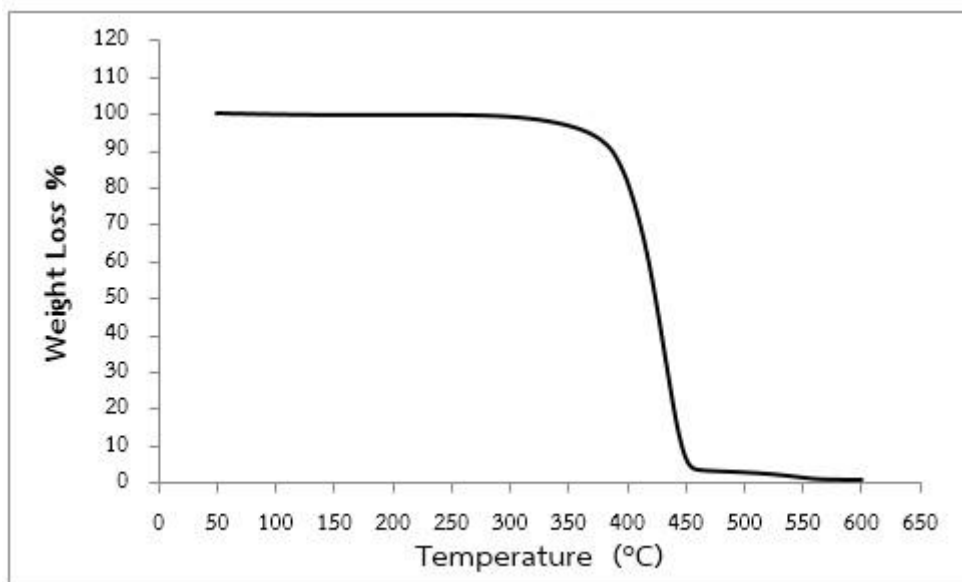


รูป ข-22 DSC เทอร์โมแกรมขณะหล่อเย็นของพอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT 60/40/40

ภาคผนวก ค  
เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA

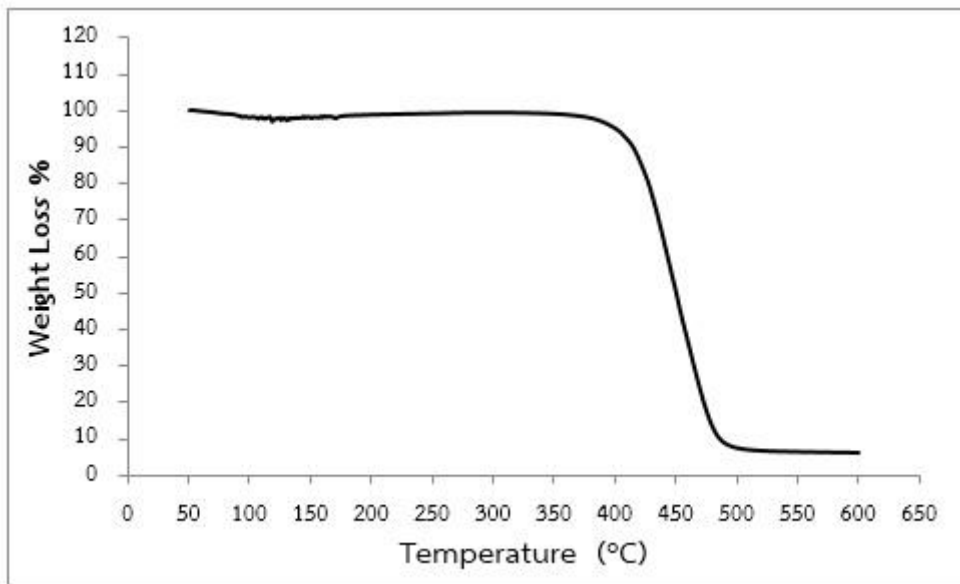


รูป ค-1 TGA เทอร์โมแกรมของเพ็ดใช้แล้ว

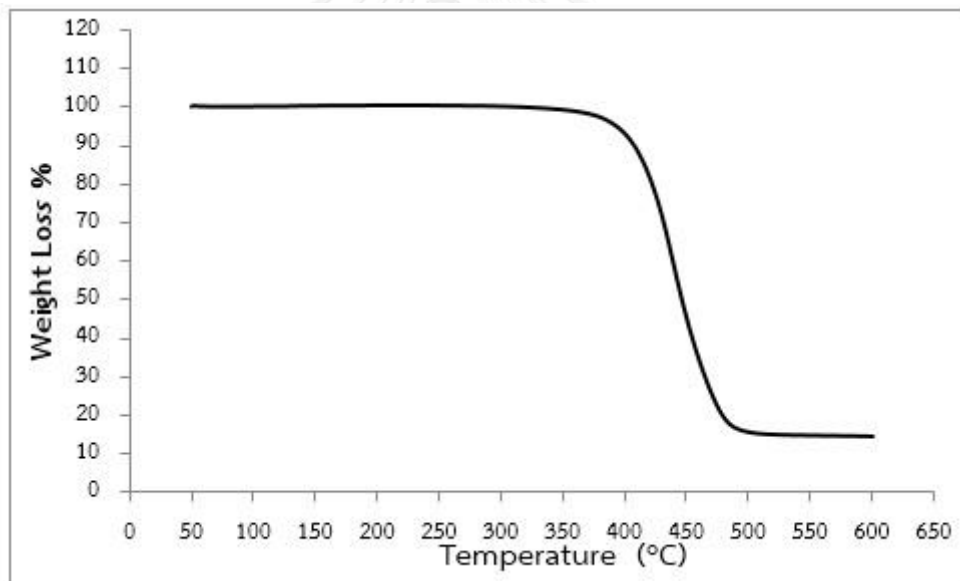


รูป ค-2 TGA เทอร์โมแกรมของ PBS

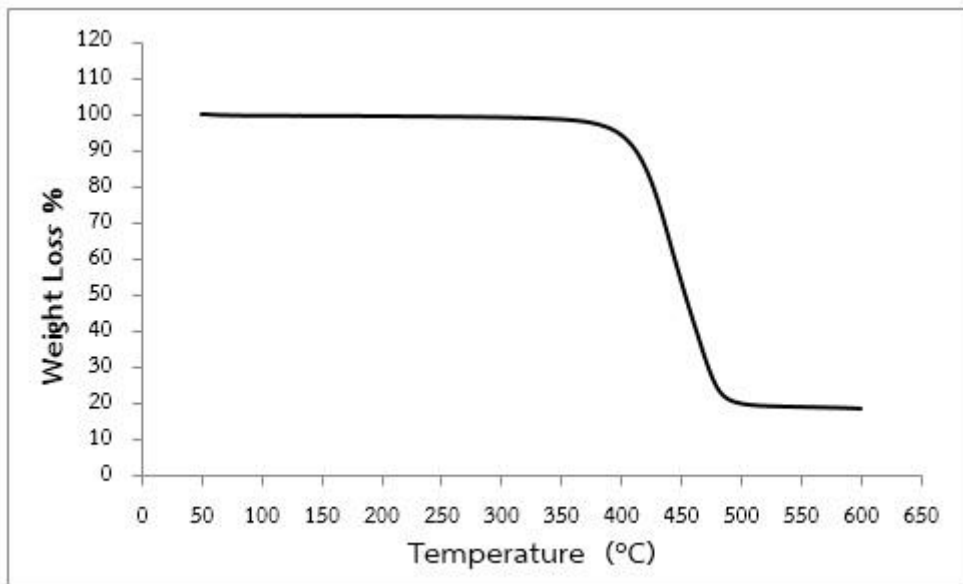




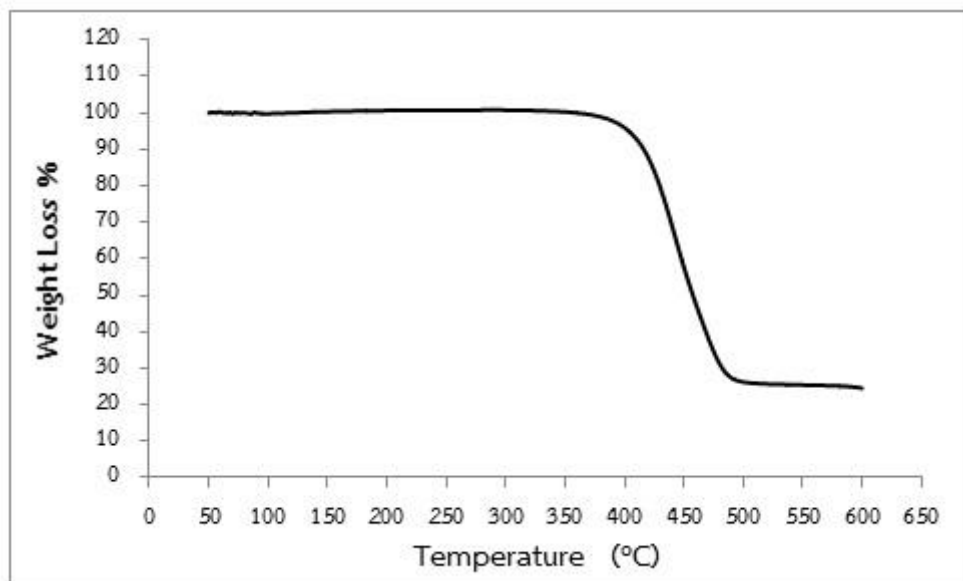
รูป ค-3 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT 60/40/0



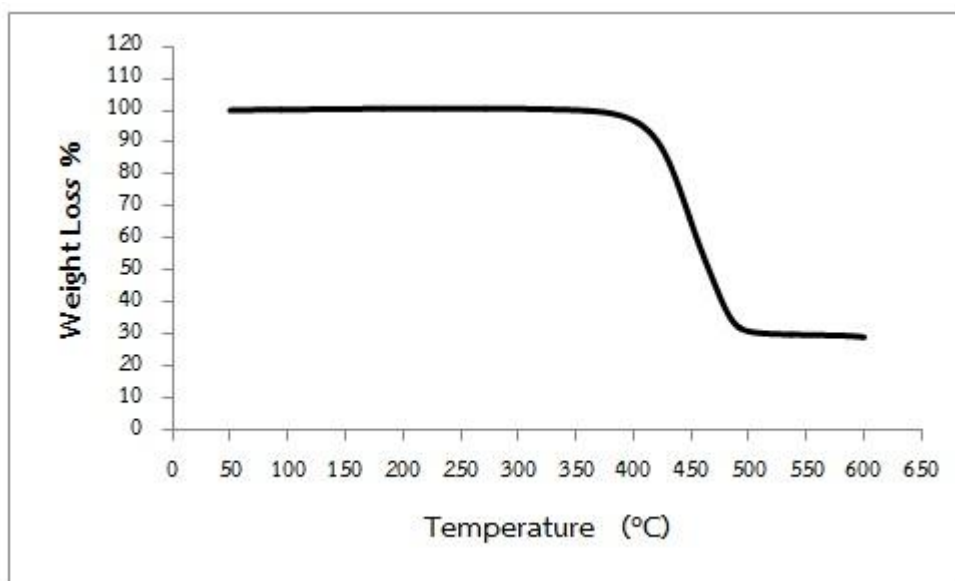
รูป ค-4 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT 60/40/10



รูป ค-5 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT 60/40/20



รูป ค-6 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT 60/40/30



รูป ค-7 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT 60/40/40



## ภาคผนวก ง

สมบัติความทนแรงดึงของพีทีซีแล้ว, PBS, พอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS และ พอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ผ่านการฝังดินเป็นระยะเวลา 4 เดือน

ตารางที่ ง-1 สมบัติความทนแรงดึงของพีทีซีแล้ว, PBS, พอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS และ พอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ผ่านการฝังดินเป็นระยะเวลา 4 เดือน

PVC/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	Tensile Strength (MPa)				
	0 month	1 month	2 month	3 month	4 month
100/0/0	32.70 ± 5.24	26.05 ± 5.30	31.08 ± 5.54	33.27 ± 4.86	22.60 ± 2.50
0/100/0	43.53 ± 0.59	33.87 ± 0.94	25.35 ± 3.41	16.26 ± 2.39	10.94 ± 1.96
60/40/0	46.84 ± 3.48	38.00 ± 2.97	34.62 ± 4.47	32.29 ± 3.87	34.80 ± 1.68
60/40/10	25.79 ± 2.63	25.60 ± 0.78	20.62 ± 3.17	22.20 ± 0.41	21.33 ± 0.90
60/40/20	30.66 ± 1.68	31.25 ± 1.92	26.57 ± 4.52	25.27 ± 3.91	25.36 ± 5.34
60/40/30	48.53 ± 2.93	45.59 ± 9.49	47.62 ± 1.19	44.49 ± 5.69	41.30 ± 8.80
60/40/40	54.84 ± 0.67	55.21 ± 0.54	52.88 ± 0.42	50.70 ± 0.51	51.77 ± 1.90

ตารางที่ ง-2 การยืดตัว ณ จุดขาดของพีดีซีแล้ว, PBS, พอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS และ พอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ผ่านการฝังดินเป็นระยะเวลา 4 เดือน

PVC/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	% Elongation at break (%)				
	0 month	1 month	2 month	3 month	4 month
100/0/0	1.72 ± 0.07	1.39 ± 0.29	1.99 ± 0.24	1.44 ± 0.21	1.11 ± 0.08
0/100/0	7.18 ± 0.12	5.07 ± 0.16	3.70 ± 0.26	2.39 ± 0.68	1.29 ± 0.28
60/40/0	3.23 ± 0.27	2.70 ± 0.06	2.53 ± 0.45	2.04 ± 0.14	2.22 ± 0.23
60/40/10	1.40 ± 0.15	1.87 ± 0.13	1.20 ± 0.37	1.50 ± 0.16	1.30 ± 0.07
60/40/20	1.53 ± 0.07	1.95 ± 0.18	1.74 ± 0.30	1.40 ± 0.33	1.26 ± 0.22
60/40/30	2.43 ± 0.11	2.22 ± 0.94	2.73 ± 0.01	2.11 ± 0.61	1.99 ± 0.42
60/40/40	2.91 ± 0.13	3.17 ± 0.27	3.15 ± 0.70	1.87 ± 0.99	2.27 ± 0.27



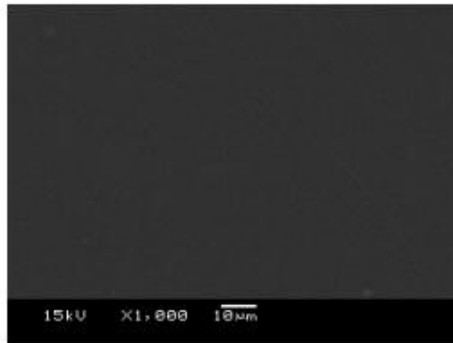
ตารางที่ ง-3 ยั่งส์มอดูลัสของพีทีซีแล้ว, PBS, พอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS และ พอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ผ่านการฝังดินเป็นระยะเวลา 4 เดือน

PVC/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	Young's Modulus (MPa)				
	0 month	1 month	2 month	3 month	4 month
100/0/0	2505.34 ± 65.43	2856.48 ± 306.2	2805.20 ± 73.66	2943.00 ± 114.45	2891.53 ± 213.47
0/100/0	961.52 ± 5.93	997.35 ± 8.20	923.81 ± 93.58	1006.01 ± 13.5	1098.75 ± 44.21
60/40/0	1915.84 ± 38.79	2025.016 ± 79.83	2011.34 ± 99.08	2123.85 ± 98.31	2278.26 ± 106.26
60/40/10	2528.94 ± 66.72	2138.13 ± 25.73	2159.59 ± 257.49	2350.02 ± 83.54	2536.75 ± 151.16
60/40/20	2885.82 ± 52.66	2755.26 ± 27.25	2761.73 ± 158.30	2927.48 ± 62.96	3088.00 ± 157.88
60/40/30	3404.97 ± 55.43	3166.83 ± 371.77	3086.85 ± 89.87	3302.20 ± 121.74	3313.79 ± 34.30
60/40/40	3649.94 ± 133.21	3211.12 ± 156.98	3286.40 ± 287.98	3722.17 ± 87.91	3852.31 ± 125.18

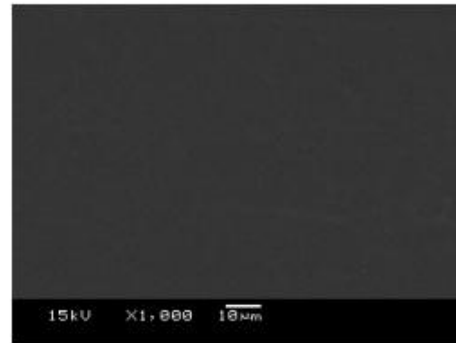
## ภาคผนวก จ

สัณฐานวิทยาของเพ็ตไฉแล้ว,PBS, พอลิเมอร์ผสม p-PET/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ และพอลิเมอร์คอมพอสิต p-PET/PBS/WT ที่อัตราส่วนต่างๆ หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 4 เดือน

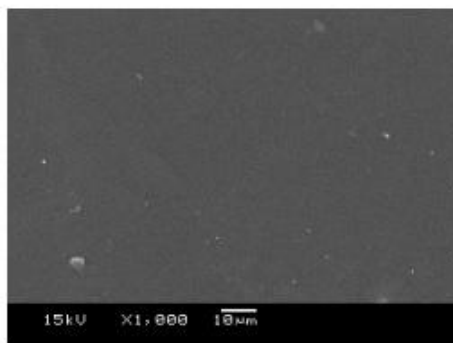
0 เดือน



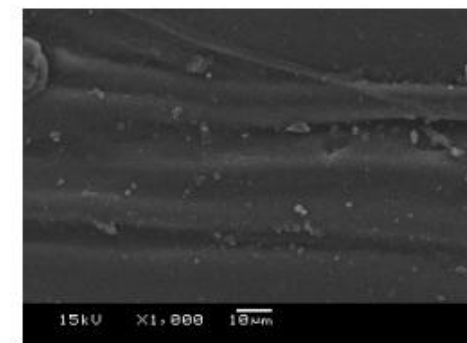
1 เดือน



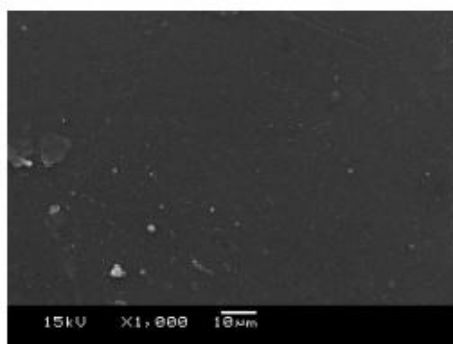
2 เดือน



3 เดือน

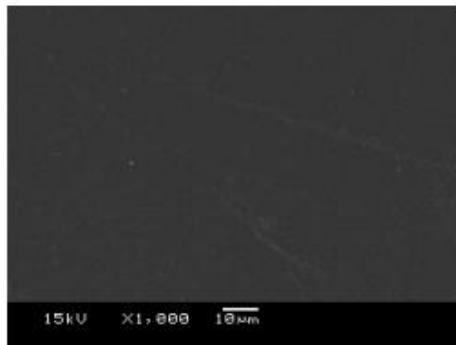


4 เดือน

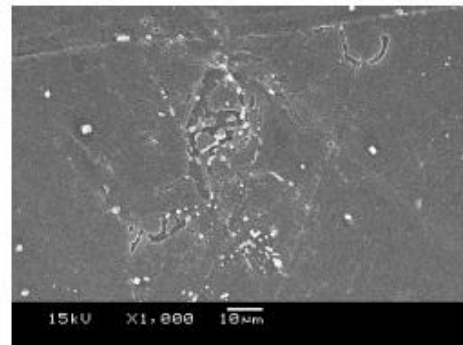


รูปที่ จ-1 สัณฐานวิทยาบริเวณผิวของชิ้นทดสอบ p-PET หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 4 เดือน

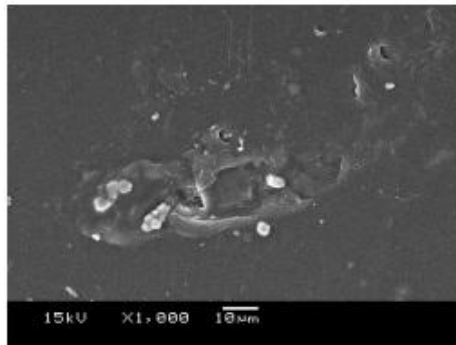
0 เดือน



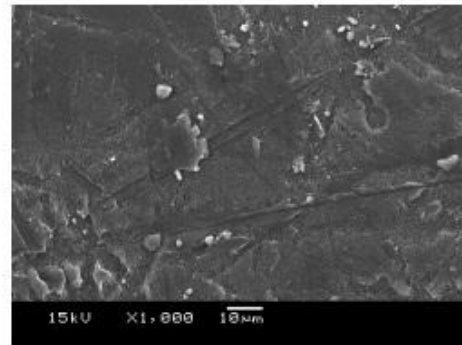
1 เดือน



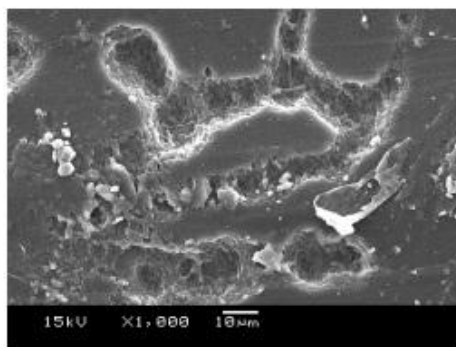
2 เดือน



3 เดือน



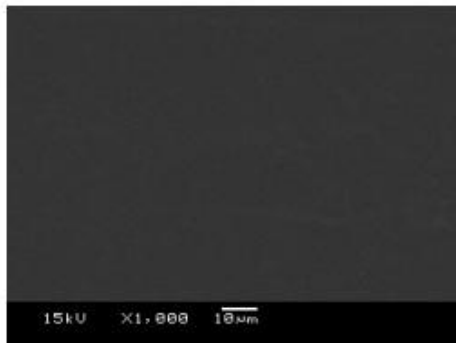
4 เดือน



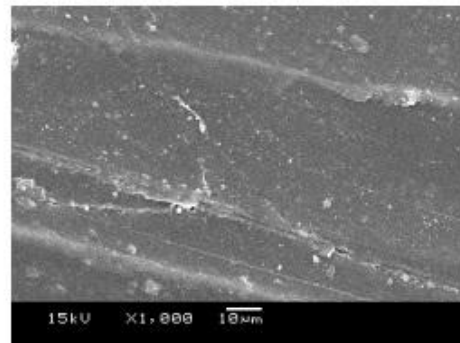
รูปที่ จ-2 สัณฐานวิทยาบริเวณผิวของชั้นทดสอบ PBS หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 4 เดือน



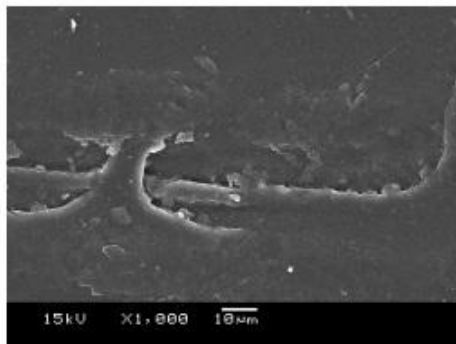
0 เดือน



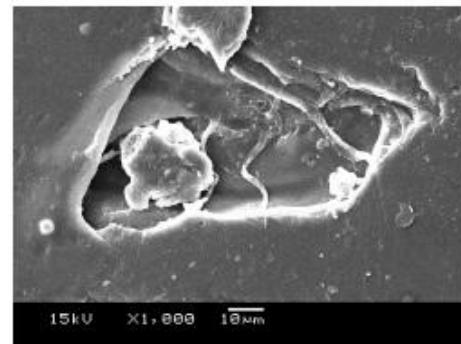
1 เดือน



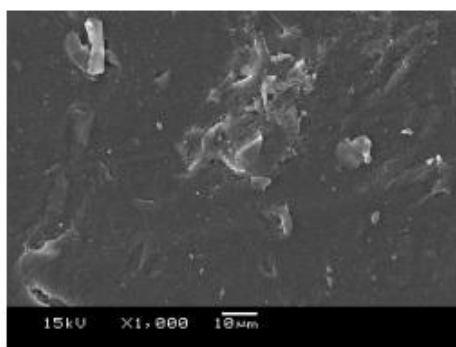
2 เดือน



3 เดือน

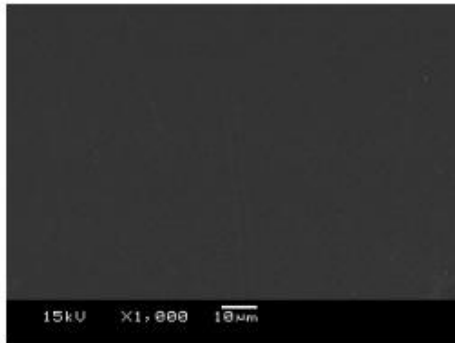


4 เดือน

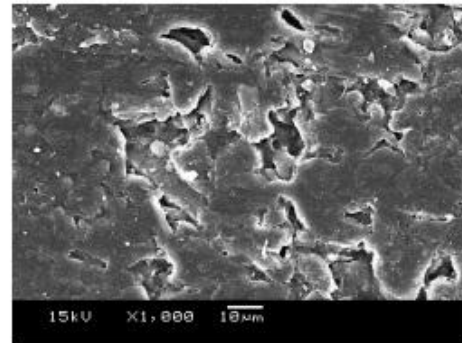


รูปที่ จ-3 สัณฐานวิทยาบริเวณผิวของชั้นทดสอบ p-PET/PBS/WT 60/40/0 หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 4 เดือน

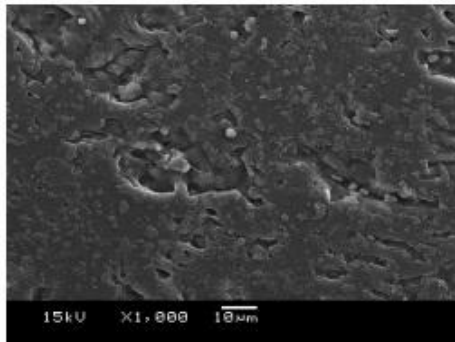
0 เดือน



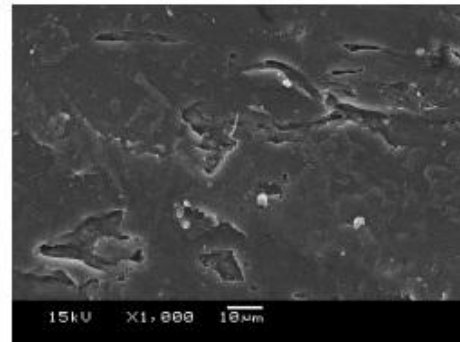
1 เดือน



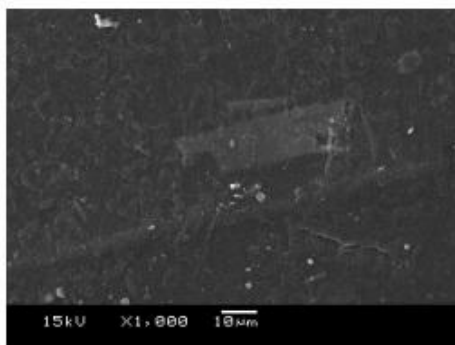
2 เดือน



3 เดือน

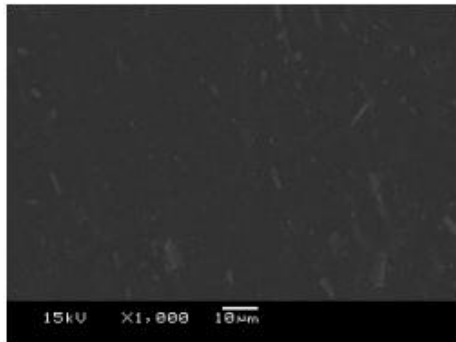


4 เดือน

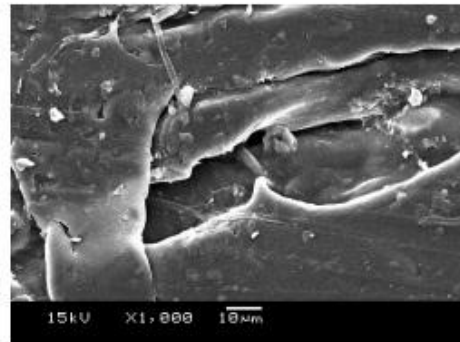


รูปที่ จ-4 สัณฐานวิทยาบริเวณผิวของชั้นทดสอบ p-PET/PBS/WT 60/40/10 หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 4 เดือน

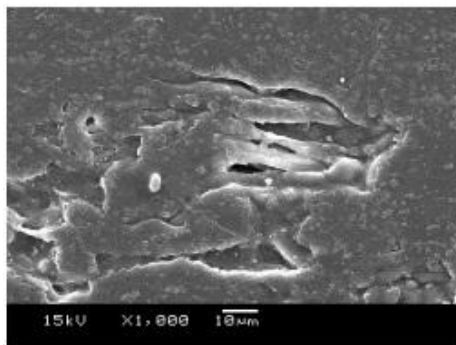
0 เดือน



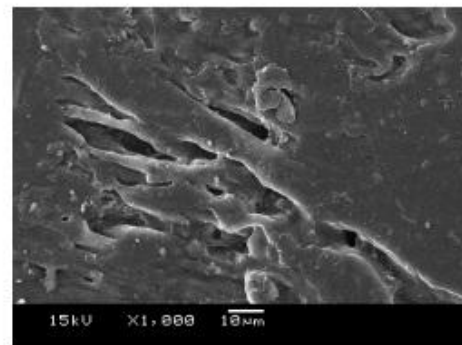
1 เดือน



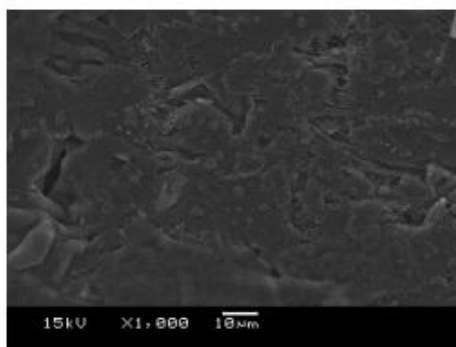
2 เดือน



3 เดือน

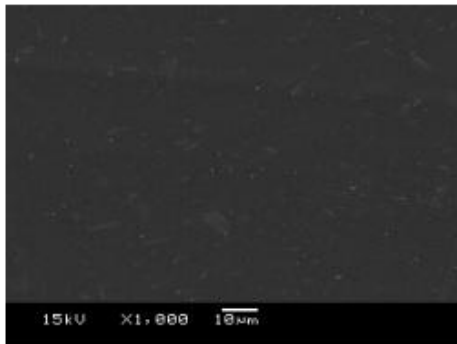


4 เดือน

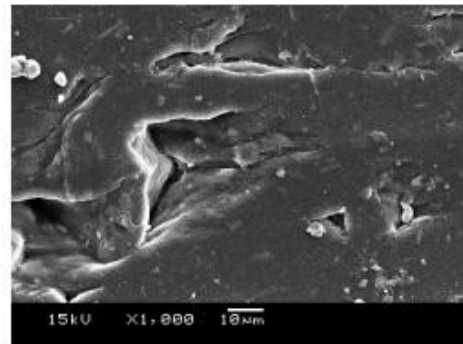


รูปที่ จ-5 สัณฐานวิทยาบริเวณผิวของชั้นทดสอบ p-PET/PBS/WT 60/40/20 หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 4 เดือน

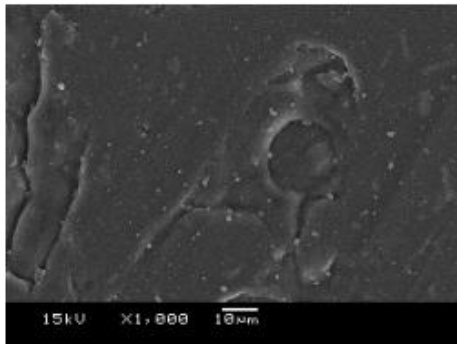
0 เดือน



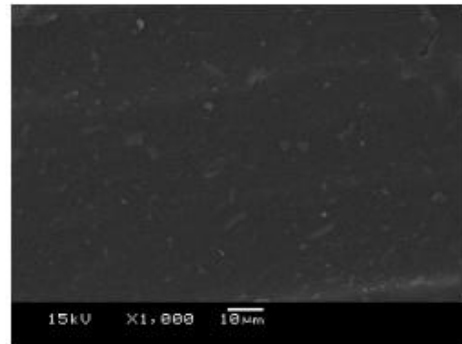
1 เดือน



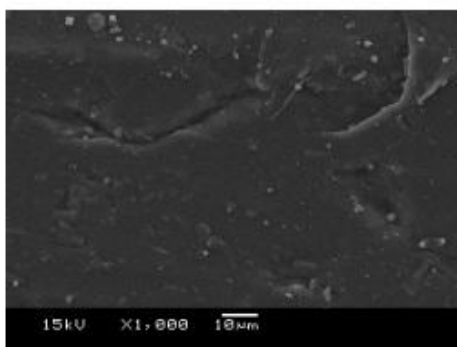
2 เดือน



3 เดือน

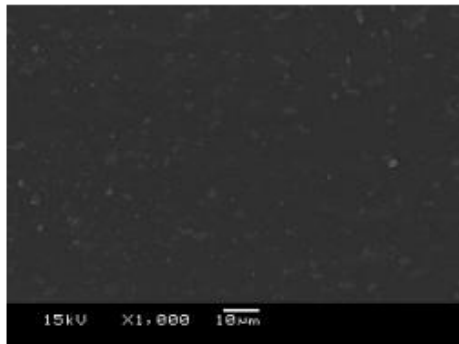


4 เดือน

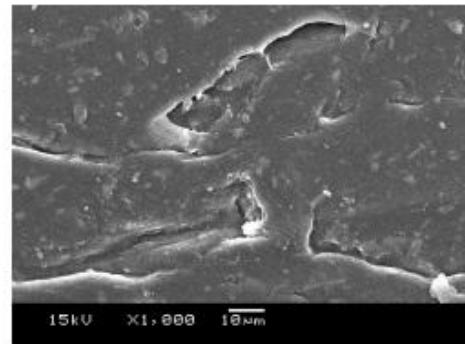


รูปที่ จ-6 สัณฐานวิทยาบริเวณผิวของชั้นทดสอบ p-PET/PBS/WT 60/40/30 หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 4 เดือน

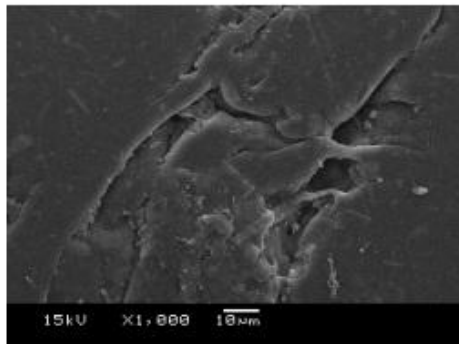
0 เดือน



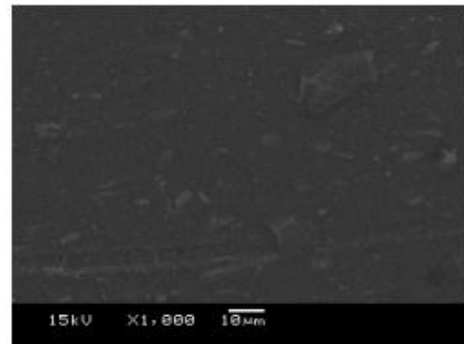
1 เดือน



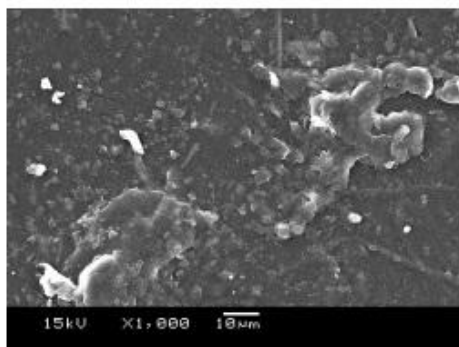
2 เดือน



3 เดือน



4 เดือน



รูปที่ จ-7 สัณฐานวิทยาบริเวณผิวของชิ้นทดสอบ p-PET/PBS/WT 60/40/40 หลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 4 เดือน

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกลศาสตร์ นีรนาทมานิต เกิดเมื่อวันที่ 13 กันยายน พ.ศ. 2534 สำเร็จการศึกษา  
ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชา  
วัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557 หลังจากนั้นจึงเข้า  
ศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยี  
สิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554

