

การปรับปรุงสมบัติของเพ็ทรีไซเคิลด้วยพอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลตและผงไม้



นายอภิชาติ พิมพ์พงษ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PROPERTY IMPROVEMENT OF RECYCLED PET BY POLY(BUTYLENE ADIPATE-co-  
TEREPHTHALATE) AND WOOD FLOUR

Mr. Aphichat Pimpong



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science  
Faculty of Science  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2014  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงสมบัติของเพ็ชร์ไซเคิลด้วยพอลิบิวทิลีนแอดิ
	เพต-โค-เทรฟแทเลตและผงไม้
โดย	นายอภิชาติ พิมพ์พงษ์
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. อมร เพชรสม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร. อัญญาพร บุญมหิทธิสุทธิ

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ ทารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรินทร์ ชวศิริ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อมร เพชรสม)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(อาจารย์ ดร. อัญญาพร บุญมหิทธิสุทธิ)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิมลรัตน์ ตระการพุกฤษ)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์)

อภิชาติ พิมพ์พงษ์ : การปรับปรุงสมบัติของพีตริไซเคิลด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลตและผงไม้ (PROPERTY IMPROVEMENT OF RECYCLED PET BY POLY(BUTYLENE ADIPATE-co-TEREPHTHALATE) AND WOOD FLOUR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ออมร เพชรสม, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: อ. ดร. อัญญพร บุญมหิทธิสุทธิ์, 92 หน้า.

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตริไซเคิล (พีตริไซเคิล) ด้วยการทำให้เป็นพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต โดยขั้นแรกพอลิเมอร์ผสมได้ถูกเตรียมจากการผสมพีตริไซเคิลและโคพอลิเอสเทอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงและย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ได้แก่ พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต (พีแบต) ที่อัตราส่วนต่างๆ (ร้อยละ 10-50 โดยน้ำหนัก) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ แล้วขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยกระบวนการฉีดแบบ จากการตรวจสอบผลของปริมาณพีแบตต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สันฐานวิทยา และการดูดซึมน้ำ พบว่า การใส่พีแบตทำให้ความทนแรงกระแทก ร้อยละการยืดตัว และการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมได้รับการปรับปรุง ขณะที่ความทนแรงดึง ยังสัมพันธ์ ความทนแรงดัดโค้ง และเสถียรภาพทางความร้อนมีค่าลดลง นอกจากนี้ จากการตรวจสอบด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรีพบว่า พอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนปรากฏ  $T_g$  เพียงตำแหน่งเดียว ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ของพีตริไซเคิลและพีแบต ซึ่งตรวจสอบได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากการพิจารณาทั้งสมบัติและการลงทุน จึงได้นำพอลิเมอร์ผสมของ 70/30 พีตริไซเคิล/พีแบตไปเตรียมคอมพอสิตด้วยผงไม้ปริมาณต่างๆ (ร้อยละ 5-30 โดยน้ำหนัก) ซึ่งจากการตรวจสอบและเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ พบว่า ความทนแรงดึง ยังสัมพันธ์ ความทนแรงดัดโค้ง เสถียรภาพทางความร้อน และการดูดซึมน้ำของคอมพอสิตได้รับการปรับปรุงเมื่อใส่ผงไม้ในปริมาณที่เหมาะสม

สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์	ลายมือชื่อนิสิต	.....
ปีการศึกษา	2557	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	.....
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม	.....

# # 5571954223 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: RECYCLED POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE) / POLY(BUTYLENE ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE) / WOOD FLOUR / PHYSICAL PROPERTIES

APHICHAT PIMPONG: PROPERTY IMPROVEMENT OF RECYCLED PET BY POLY(BUTYLENE ADIPATE-co-TEREPHTHALATE) AND WOOD FLOUR. ADVISOR: ASSOC. PROF. AMORN PETSOM, Ph.D., CO-ADVISOR: ANYAPORN BOONMAHITTHISUD, Ph.D., 92 pp.

The aim of this work is to improve the physical properties of recycled poly(ethylene terephthalate) (R-PET) through polymer blends and composites. The polymer blends were first prepared by melt mixing of R-PET with varied amounts (10-50 wt%) of a very flexible biodegradable copolyester, namely poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) on a twin screw extruder, followed by an injection molding into test specimens. The effects of PBAT content on the mechanical and thermal properties, morphology and water absorption of the blends were then investigated. The results showed that the incorporation of PBAT caused an improvement in the impact strength, % strain and water absorption and a reduction in the tensile strength, Young's modulus, flexural strength and thermal stability. Moreover, differential scanning calorimetric analysis showed that all the blends exhibited a single glass transition temperature, indicating miscibility between RPET and PBAT, which was evidenced by scanning electron microscopy analysis. From property and economical consideration, the 70/30 R-PET/PBAT blend was selected for preparing composites with varied loadings of wood flour (5-30 wt%). The properties of the prepared composites were also investigated and compared. It was found that the tensile strength, Young's modulus, flexural strength, thermal stability and water absorption could be improved by the incorporation of an appropriate amount of wood flour.

Field of Study: Petrochemistry and  
Polymer Science

Academic Year: 2014

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

บุคคลที่มีส่วนสำคัญในการทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงเป็นรูปเล่ม ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร.อมร เพชรสม อาจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมหิทธิสุทธิ และรองศาสตราจารย์ เสาวรจณี ช่วยจุลจิตร ที่สนับสนุน ตักเตือนแนะนำ เป็นกำลังใจ ให้ความรู้ ตลอดจนสนับสนุนเงินทุนในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยขอกราบพระคุณอย่างสูง

อีกบุคคลที่มีบทบาทสำคัญไม่แพ้กันนั่นก็คือ ดร.พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์ นักวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่คอยสนับสนุนความรู้และกำลังใจ คำแนะนำต่างๆและคอยสั่งสอนจนเกิดทักษะให้แก่ผู้ทำการวิจัยครั้งนี้จนทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ในช่วงแรกผู้วิจัยไม่มีความชำนาญในการแก้ไขปัญหารวมถึงการใช้เครื่องมือต่างๆมากนัก จึงต้องใช้เวลาในการทำงานค่อนข้างมาก จึงต้องขอบขอบคุณผู้ที่มีประสบการณ์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำในการแก้ไข้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง ให้สามารถทำการทดลองสำเร็จได้ในที่สุด

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือ สารเคมี ตลอดจนผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆ ที่ช่วยแนะนำแนวทางในการแก้ไข้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลองให้สำเร็จไปได้ด้วยดีตลอดมา

นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนเครื่องมือที่ใช้ในการทำงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายต้องขอขอบคุณพ่อ คุณแม่ และเพื่อน ที่ให้กำลังใจสนับสนุนมาโดยตลอด รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้ทำวิจัย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัยนี้.....	2
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์.....	1
2.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือเพ็ต (poly(ethylene terephthalate), PET) [1].....	1
2.1.1 สมบัติโดยทั่วไปของ PET.....	2
2.1.2 สมบัติเด่นของ PET.....	2
2.1.3 การนำ PET ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า.....	2
2.2 กระบวนการรีไซเคิล (recycling process).....	3
2.2.1 กระบวนการรีไซเคิลทางเคมี (chemical recycling) [5].....	3
2.2.2 กระบวนการรีไซเคิลทางกายภาพ (physical recycling).....	4
2.3 พอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลตหรือพีแบต (poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) [6].....	5
2.3.1 สมบัติทั่วไปของ PBAT.....	6
2.3.2 สมบัติเด่นของ PBAT.....	6
2.3.3 การนำ PBAT ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า.....	6
2.4 สารตัวเติม (Filler) [9].....	7

2.4.1 ประเภทของสารตัวเติม [9].....	7
2.4.3 ปัจจัยของสารตัวเติมที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์เมทริกซ์.....	8
2.5 ผงไม้ (wood flour, WF) .....	8
2.6 การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [12].....	10
2.6.1 พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable polymer) [12].....	10
2.6.2 ลักษณะการสลายตัว [13].....	11
2.6.3 สมบัติทางกายภาพที่ส่งผลต่อการย่อยสลาย .....	11
2.6.4 สมบัติทางเคมีที่ส่งผลต่อการย่อยสลาย.....	12
2.7 กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ .....	12
2.7.1 การขึ้นรูปด้วยการฉีดแบบ (injection).....	12
2.7.2 ข้อดีของกระบวนการฉีดแบบ [17] .....	14
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
บทที่ 3 วิธีการทดลอง .....	17
3.1 สารเคมีและวัสดุดิบ.....	17
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมขึ้นทดสอบ.....	17
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของขึ้นทดสอบ.....	17
3.4 วิธีการทดลอง.....	18
3.4.1 การผสมพีทีซีไคเซลและพอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต .....	19
3.4.2 การขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมของพีทีซีไคเซล/พอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต.....	21
3.4.3 การผสมพีทีซีไคเซล พอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต และผงไม้ .....	22
3.4.4 การขึ้นรูปคอมพอสิตของพีทีซีไคเซล/พอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต/ผงไม้.....	22
3.5 การทดสอบสมบัติ.....	23
3.5.1 การทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง (tensile properties).....	23



3.5.2 การทดสอบความทนแรงกระแทก (impact strength).....	24
3.5.3 การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength).....	25
3.5.4 การวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (thermogravimetric analyzer, TGA).....	26
3.5.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC).....	27
3.5.6 ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM).....	28
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	29
4.1 ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต .....	29
4.2 สมบัติทางเชิงกล (Mechanical properties) .....	30
4.2.1 สมบัติความทนแรงดึง (tensile properties).....	32
4.2.2 สมบัติความทนแรงกระแทก (impact strength) .....	34
4.2.3 สมบัติความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength).....	36
4.3 สมบัติทางความร้อน.....	38
4.3.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค (DSC).....	38
4.3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA.....	40
4.4 สัณฐานวิทยา (morphology) .....	44
4.5 การดูดซึมน้ำ (Water absorption).....	48
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	50
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	50
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	52
รายการอ้างอิง .....	53
ภาคผนวก ก สมบัติเชิงกล .....	57

ญ

หน้า

ภาคผนวก ข สมบัติทางความร้อน.....	66
ภาคผนวก ค การดูดซึมน้ำ.....	88
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	92



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ประเภทของไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อนแบ่งตามความแข็งแรงและความทนทาน .....	10
ตารางที่ 3.1	อัตราส่วนผสมระหว่าง R-PET และ PBAT .....	20
ตารางที่ 3.2	อัตราส่วนผสมระหว่างพีอีทีไซเคิล พอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต และผงไม้ ..	22
ตารางที่ 4.1	สมบัติเชิงกลของ R-PET, PBAT, พอลิเมอร์ผสมของ R-PET/PBAT และคอมพอสิตของ R-PET/PBAT/WF .....	31
ตารางที่ 4.2	พฤติกรรมทางความร้อนของ R-PET, PBAT, พอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT และคอมพอสิต R-PET/PBAT/WF .....	39
ตารางที่ 4.3	เสถียรภาพทางความร้อนของ R-PET, PBAT, พอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT และคอมพอสิต R-PET/PBAT/WF .....	41

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ PET.....	1
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ PBAT .....	5
รูปที่ 2.3 สัณฐานวิทยาของผงไม้.....	8
รูปที่ 2.4 สัณฐานวิทยาของไม้เนื้อแข็ง .....	9
รูปที่ 2.5 สัณฐานวิทยาของไม้เนื้ออ่อน .....	9
รูปที่ 2.6 เครื่องฉีดแบบ .....	12
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบหลักของเครื่องฉีดแบบ.....	13
รูปที่ 2.8 ชุดฉีด.....	13
รูปที่ 2.9 ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ .....	14
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมและทดสอบสมบัติของพอลิเมอรัสม.....	18
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมและทดสอบสมบัติของคอมพอลสิต.....	19
รูปที่ 3.3 ลักษณะของ (ก) เกล็ด R-PET และ (ข) เม็ด PBAT .....	20
รูปที่ 3.4 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่.....	21
รูปที่ 3.5 เครื่องฉีดแบบ .....	21
รูปที่ 3.6 ผงไม้.....	22
รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล.....	23
รูปที่ 3.8 ขนาดชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 type I.....	24
รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก .....	24
รูปที่ 3.10 ชิ้นงานทดสอบความทนแรงกระแทก.....	25
รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้งของชิ้นงาน .....	26

รูป 12 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ).....	27
รูปที่ 3.13 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ .....	28
รูปที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	28
รูปที่ 4.1 ชิ้นงานของ (a) R-PET, (B) R-PET/PBAT 90/10, (c) R-PET/PBAT 80/20, .....	29
รูปที่ 4.2 พอลิเมอร์คอมพอสิตของ R-PET/PBAT/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ .....	30
รูปที่ 4.3 กราฟความเค้น-ความเครียดของ R-PET, PBAT และพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	33
รูปที่ 4.4 กราฟความเค้น-ความเครียดของ R-PET, พอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ที่อัตราส่วน 70/30 และคอมพอสิตของ R-PET/PBAT/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ .....	34
รูปที่ 4.5 ความทนแรงกระแทกของ R-PET, PBAT และพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ที่ อัตราส่วนต่างๆ.....	35
รูปที่ 4.6 ความทนแรงกระแทกของ R-PET, พอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ที่อัตราส่วน 70/30 .....	36
รูปที่ 4.7 ความทนแรงดัดโค้งของ R-PET, PBAT และพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ที่อัตราส่วน ต่างๆ .....	37
รูปที่ 4.8 ความทนดัดโค้งของ R-PET, พอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ที่อัตราส่วน 70/30 และคอมพอสิตของ R-PET/PBAT/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	37
รูปที่ 4.9 TGA เทอร์โมแกรมของ R-PET, PBAT และพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ที่อัตราส่วน ต่างๆ .....	43
รูปที่ 4.10 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ที่อัตราส่วน 70/30 และคอมพอสิต R-PET/PBAT/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	43
รูปที่ 4.11 สันฐานวิทยาของผงไม้ที่กำลังขยาย 100 เท่า.....	44
รูปที่ 4.12 สันฐานวิทยาของชิ้นทดสอบของ R-PET และพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT.....	45
รูปที่ 4.13 สันฐานวิทยาของชิ้นทดสอบบริเวณรอยแตกหักของพอลิเมอร์ผสม 70/30 R- PET/PBAT และคอมพอสิต R-PET/PBAT/WF ที่กำลังขยาย 500 เท่า .....	47
รูปที่ 4.14 ปริมาณการดูดซึมน้ำสะสมกับจำนวนวันที่แช่น้ำของ R-PET, PBAT และพอลิเมอร์ ผสม R-PET/PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	49

รูปที่ 4.15 ปริมาณการดูดซึมน้ำสะสมกับจำนวนวันที่แช่น้ำของ R-PET, พอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ที่อัตราส่วน 70/30 และคอมพอสิต R-PET/PBAT/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ..... 49



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (poly(ethylene terephthalate), PET) เป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย เพราะมีสมบัติเด่นในเรื่องของความใส น้ำหนักเบา ราคาถูก ทนทานต่อสารเคมี มีความแข็งแรงสูง และมีความสามารถในการสกัดกั้นแก๊สได้ดี จึงนิยมนำ PET มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ฟิล์ม เส้นใย และบรรจุภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม เป็นต้น โดยเฉพาะขวดบรรจุภัณฑ์น้ำดื่มและน้ำอัดลม หากแต่บรรจุภัณฑ์เหล่านี้มีส่วนมากถูกนำไปใช้งานเพียงครั้งเดียวและถูกกำจัดทิ้ง ผลที่ตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ นั่นคือ ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมจากปริมาณขยะพลาสติกจาก PET ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจาก PET มีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมและการย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) สูงซึ่งต้องใช้ระยะเวลาที่ยาวนานในการกำจัด ดังนั้น จึงได้มีการนำ PET กลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการรีไซเคิล (recycling) โดยกระบวนการรีไซเคิลนั้นมีด้วยกัน 2 วิธี คือ การรีไซเคิลทางเคมี (chemical recycling) และทางกายภาพ (physical recycling) หากแต่กระบวนการรีไซเคิลทางเคมีมีขั้นตอนที่ซับซ้อนและราคาสูง จึงอาจไม่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ในระดับอุตสาหกรรม ขณะที่การรีไซเคิลทางกายภาพอาศัยเพียงความร้อนเพื่อให้ PET เกิดการหลอมเหลวและนำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ใหม่ อีกทั้งปริมาณ PET ที่รวบรวมจากบรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วประมาณ 5 ล้านตันต่อปี นั้นมากพอที่ทำให้การรีไซเคิล (recycle PET, (R-PET)) มีความสำคัญในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งนอกจากเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับ R-PET แล้ว ยังช่วยลดปริมาณขยะพลาสติก ลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ลดการใช้พลังงาน และเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าอีกด้วย อย่างไรก็ตาม PET ที่ผ่านการรีไซเคิลแล้วจะมีสมบัติเชิงกลลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ PET บริสุทธิ์ (virgin PET) เนื่องจากได้รับความร้อนและแรงเฉือนเชิงกลในระหว่างกระบวนการรีไซเคิล ซึ่งมีผลทำให้สายโซ่โมเลกุลของ R-PET เกิดการแตกสลายด้วยความร้อนภายใต้ความชื้น (hydrothermal degradation) ดังนั้น จึงมีการปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมจาก R-PET ด้วยการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นเช่น พอลิพรอพิลีน (polypropylene, PP), พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (poly(butylene succinate), PBS) และ พอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต (poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) เป็นต้น และ/หรือสารตัวเติม เช่น ทัลค์ (talc), โวลลาสโทไนต์ (wollastonite) และผงไม้ (wood flour, WF) เป็นต้น เพื่อเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากและนิยมใช้กันทั่วไป หากแต่การเลือกชนิดของพอลิเมอร์หรือสารตัวเติมที่จะนำมาผสมกับ R-PET ควรคำนึงถึงสมบัติและความเข้ากันได้เป็นสำคัญ

งานวิจัยนี้ มีแนวความคิดในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตของ R-PET โดยใช้ PBAT และ/หรือผงไม้ ที่มีขนาดอนุภาค 70-150 ไมโครเมตร เพื่อทำการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของ R-PET โดย PBAT เป็นเทอร์โมพลาสติกแอลิฟาติก-แอโรแมติกโคพอลิเอสเตอร์ (aliphatic-aromatic copolyester) ที่มีความยืดหยุ่นสูง และสามารถเข้ากันได้ดีกับ R-PET อีกทั้งสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยเอนไซม์ซึ่งได้จากจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ ส่วนผงไม้เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีส่วนประกอบหลักเป็นเซลลูโลส (cellulose) ซึ่งได้จากเศษไม้เลื้อยหรือชิ้นไม้เหลือทิ้งจากโรงงานค้าไม้ ที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก นำมาผ่านการบดเพื่อให้ได้เป็นผงที่มีขนาดอนุภาคเล็กประมาณ 70-150 ไมโครเมตร ปัจจุบันผงไม้ได้ถูกนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมพลาสติก เนื่องจากผงไม้มีราคาถูก น้ำหนักเบา และมีความแข็ง (hardness) ต่ำกว่าสารตัวเติมอนินทรีย์ทั่วไป จึงไม่ทำให้เกิดการสึกกร่อนหรือรอยขีดข่วนเครื่องจักรระหว่างกระบวนการผลิต ซึ่งนอกจากจะทำให้สมบัติบางอย่างของผลิตภัณฑ์ได้รับการปรับปรุงแล้ว ยังเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของผลิตภัณฑ์ และช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับผงไม้อีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัยนี้

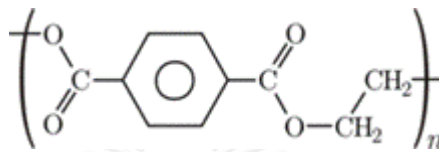
1. เตรียมพอลิเมอร์ผสมของ R-PET/PBAT และคอมพอสิตของ R-PET/PBAT/WF
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตที่เตรียมได้



## บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์

### 2.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือเพ็ต (poly(ethylene terephthalate), PET) [1]

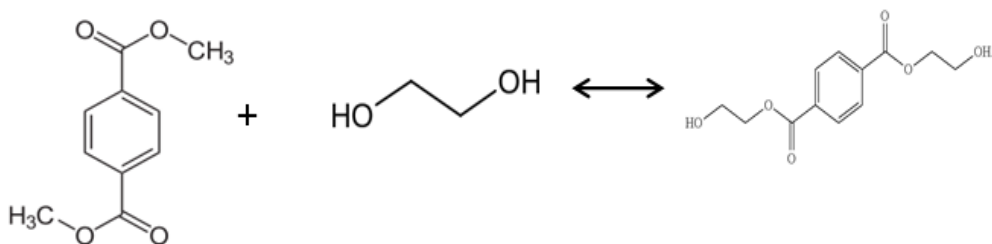
พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือเพ็ต (polyethylene terephthalate, PET) เป็นเทอร์โมพลาสติกแอโรแมติกพอลิเอสเทอร์ (aromatic polyester) ชนิดหนึ่ง ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างทางเคมีดังแสดงใน รูปที่ 2.1



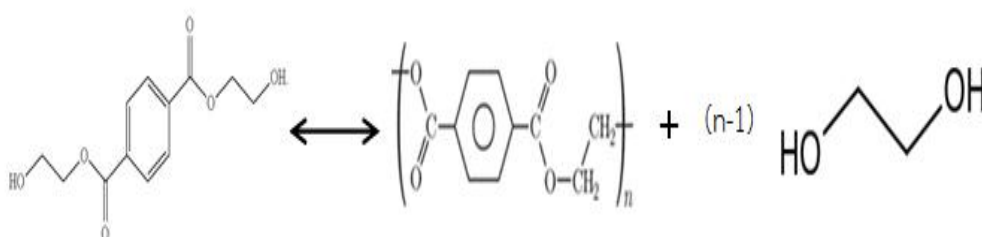
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ PET [1]

PET สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการควบแน่น (condensation process) ระหว่างกรดเทเรฟ-แทลิก (terephthalic acid) กับ เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) หรือใช้ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ (ester interchange) ระหว่างไดเมทิลเทเรฟทาเลต (dimethyl terephthalate) และเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) ซึ่งในทางการค้าจะนิยมใช้วิธีการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์เพราะเกิดปฏิกิริยาและทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย ขั้นตอนการสังเคราะห์ PET มีด้วยกัน 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 ปฏิกิริยาระหว่าง dimethyl terephthalate[2] และ ethylene glycol[3]



ขั้นที่ 2 เป็นการกำจัด ethylene glycol ที่มากเกินไปโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 270-280 องศาเซลเซียส ที่ความดันประมาณ 1 มิลลิเมตรปรอท และในขั้นนี้จะเป็นการสังเคราะห์พอลิเมอร์ให้ได้น้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น



### 2.1.1 สมบัติโดยทั่วไปของ PET

อุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ )	245 - 265	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว ( $T_g$ )	73 - 80	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิการแตกสลาย ( $T_d$ )	350	องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	1.29-1.40	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
อัตราการไหล (MFI) (265 °C)	23	กรัมต่อ 10 นาที [4]

### 2.1.2 สมบัติเด่นของ PET

เนื่องด้วย PET มีสมบัติที่เด่นหลายประการ ดังนี้

1. มีความทนแรงกระแทกและการตกกระทบสูง
2. มีความใส
3. มีน้ำหนักเบา
4. สามารถป้องกันการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี
5. ปลอดภัยต่ออาหารที่สัมผัส และไม่ทำให้รสชาติอาหารเสีย

### 2.1.3 การนำ PET ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ในปัจจุบันนี้ PET ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในทางการค้าอย่างแพร่หลาย โดยนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น

1. ฟิล์ม

## 2. เส้นใย

### 3. บรรจุภัณฑ์ทางด้านอาหาร

ผลิตภัณฑ์ของ PET ส่วนมากถูกนำไปใช้งานเพียงครั้งเดียวและถูกกำจัดทิ้ง ผลที่ตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ นั่นก็คือ ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมจากปริมาณขยะพลาสติกจาก PET ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการย่อยสลายของ PET จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาที่ยาวนานเพราะ PET มีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมและการย่อยสลายทางชีวภาพที่สูง

## 2.2 กระบวนการรีไซเคิล (recycling process)

กระบวนการรีไซเคิลพลาสติกสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ กระบวนการรีไซเคิลทางเคมี และกระบวนการรีไซเคิลทางกายภาพ [5]

### 2.2.1 กระบวนการรีไซเคิลทางเคมี (chemical recycling) [5]

เป็นการทำให้เกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์โดยใช้สารเคมีเพื่อให้ได้มอนอเมอร์หรือสารเคมีพื้นฐานต่างๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นส่วนตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ต่อไป โดยการรีไซเคิลทางเคมีเป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. กระบวนการรีไซเคิลแบบเปียก (wet process) คือ กระบวนการรีไซเคิลโดยอาศัยสารเคมี ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารย่อยสลาย (degrading agent) โดยแบ่งกระบวนการตามชนิดของสารย่อยสลายได้ ดังนี้

1.1 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เป็นกระบวนการรีไซเคิลโดยใช้น้ำเป็นสารย่อยสลาย

1.2 ปฏิกริยามีทาโนไลซิส (methanolysis) เป็นกระบวนการรีไซเคิลโดยใช้ เมทานอลเป็นสารย่อยสลาย

1.3 ปฏิกริยาไกลโคไลซิส (glycolysis) เป็นกระบวนการรีไซเคิลโดยใช้ ไกลคอลเป็นสารย่อยสลาย

2. กระบวนการรีไซเคิลแบบแห้ง (dry process) หรือเรียกว่ากระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) หมายถึง กระบวนการแตกตัวโดยอาศัยความร้อนทำให้สารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่เกิดการแตกตัวเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลงในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรือสภาวะที่ขาดแคลนออกซิเจน

## 2.2.2 กระบวนการรีไซเคิลทางกายภาพ (physical recycling)

กระบวนการรีไซเคิลทางกายภาพเป็นการนำพลาสติกมาผ่านกระบวนการตัด บด และเฉือนเพื่อให้มีขนาดเล็กลง โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. กระบวนการรีเคลมเมชัน (reclamation process) คือการนำพลาสติกมาแยกตามชนิดของพอลิเมอร์ แล้วนำไปผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อผลิตเป็นเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล และนำไปขึ้นรูปเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป โดยกระบวนการรีเคลมเมชันมีขั้นตอน ดังนี้

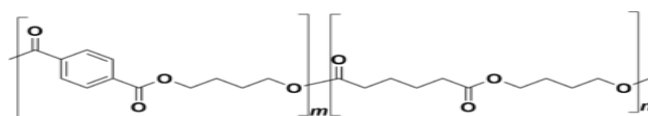
- 1.1 ลดขนาดของพลาสติกให้มีขนาดเล็กลงด้วยการตัด บดและเฉือน
- 1.2 แยกสิ่งเจือปนที่เป็นโลหะและแร่
- 1.3 ล้างเบื้องต้นและบดหยาบ ซึ่งเป็นการล้างสิ่งเจือปนออกและบดหยาบเพื่อให้พลาสติกมีขนาดเล็กลง
- 1.4 ล้างขั้นที่สอง ซึ่งเป็นการล้างเพื่อเอาสิ่งเจือปนออกและมีการดักกำจัดไขมันออก
- 1.5 บดละเอียดและกำจัดฝุ่น เพื่อให้สามารถเข้าเครื่องอัดรีดได้
- 1.6 แยกขยะตามชนิดของพลาสติก
- 1.7 กำจัดน้ำ โดยอาจใช้ลมร้อนเป่า
- 1.8 หลอม โดยการนำพลาสติกมาหลอมหรือเข้าเครื่องอัดรีด เพื่อผลิตเป็นชิ้นงานหรือเป็นเม็ดสำหรับนำไปขึ้นรูปต่อไป

2. กระบวนการคอมมิงเกิลด์ (commingled processing) คือ การนำพลาสติกซึ่งอยู่ในสภาพที่เป็นพลาสติกผสมไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ โดยไม่ผ่านการแยกชนิดของพอลิเมอร์

แม้ว่ากระบวนการรีไซเคิลทางกายภาพจะไม่ทำให้โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไป หากแต่มีแนวโน้มที่จะทำให้สมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ด้อยลง เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์บริสุทธิ์ ซึ่งในทางอุตสาหกรรมนิยมใช้กระบวนการรีไซเคิลทางกายภาพมากกว่าทางเคมี เนื่องจากกระบวนการรีไซเคิลทางกายภาพนั้นมีวิธีการที่ไม่ซับซ้อนและมีต้นทุนในการผลิตที่ถูกลงกว่าทางเคมี ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ PET ซึ่งผ่านกระบวนการรีไซเคิลทางกายภาพมาปรับปรุงสมบัติเพื่อนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป

### 2.3 พอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลตหรือพีแบต (poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) [6]

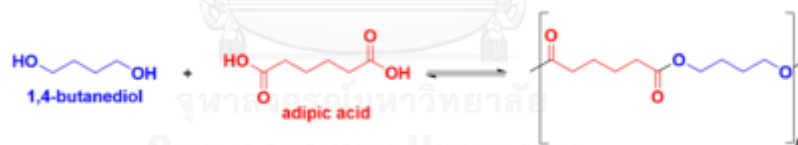
พอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต หรือพีแบต (Poly(butylene adipate-co-terephthalate, PBAT) เป็นเทอร์โมพลาสติกแอลิฟาติก-แอโรแมติกโคพอลิเอสเทอร์ (aliphatic-aromatic polyester) ชนิดหนึ่ง ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างทางเคมีดังแสดงใน รูปที่ 2.2 โดยมีชื่อทางการค้า เช่น Ecoflex, Eastar Bio และ Origo-Bi เป็นต้น



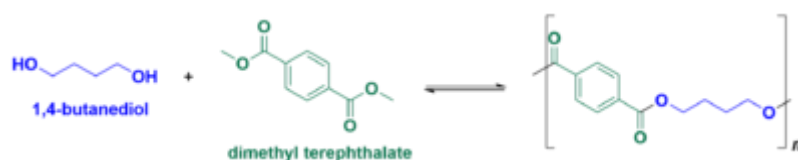
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ PBAT [6]

PBAT สังเคราะห์ได้จาก condensation process ระหว่างบิวเทนไดออล กรดอะดิพิค และกรดเทเรฟทาเลต ขั้นตอนการสังเคราะห์ PBAT มีด้วยกัน 3 ขั้นตอน ดังนี้ [6, 7]

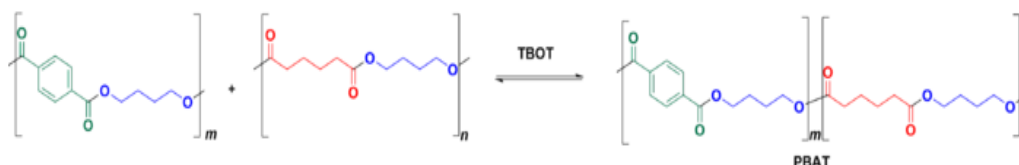
ขั้นที่ 1 เป็นการสังเคราะห์ 1,4-พอลิบิวทิลีนแอดิเพต (poly(1,4-butylene adipate)) โดยใช้สารตั้งต้นเป็น 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butane diol) และกรดอะดิพิค (adipic acid)



ขั้นที่ 2 เป็นการสังเคราะห์ 1,4-พอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลต (poly(1,4-butylene terephthalate)) โดยใช้สารตั้งต้นเป็น 1,4-butane diol และ ไดเมทิลเทเรฟทาเลต (dimethyl terephthalate)



ขั้นที่ 3 เป็นการสังเคราะห์ PBAT โดยใช้สารตั้งต้นเป็น poly(1,4-butylene adipate) จากขั้นที่ 1 และ poly(1,4-butylene terephthalate) และใช้ tetrabutyl orthotitanate (TBOT) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



### 2.3.1 สมบัติทั่วไปของ PBAT[8]

อุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ )	110 - 120	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว ( $T_g$ )	-29	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิการแตกสลาย ( $T_d$ )	มากกว่า 280	องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	1.25-1.27	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
อัตราการไหล (MFI) (190°C)	2.79-4.9	กรัมต่อ 10 นาที

### 2.3.2 สมบัติเด่นของ PBAT

PBAT มีสมบัติที่เด่นหลายประการ ดังนี้

1. มีความยืดหยุ่นสูง
2. ช่วยทำให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้น
3. มีอุณหภูมิขึ้นรูปที่กว้าง
4. สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

### 2.3.3 การนำ PBAT ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

PBAT สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงการค้าได้ โดยผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เช่น

1. ฟิล์ม
2. ใช้ทำถุงปลูกต้นไม้
3. ใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์ (packaging)

## 2.4 สารตัวเติม (Filler) [9]

สารตัวเติม หมายถึง สารที่เติมเพื่อต้องการวัตถุประสงค์บางอย่าง เช่น

1. เพิ่มเนื้อให้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์เพื่อเป็นการลดต้นทุน
2. ปรับปรุงสมบัติจำเพาะของพอลิเมอร์ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสมบัติความทนไฟ เป็นต้น
3. ช่วยในกระบวนการผลิตหรือขึ้นรูป

สารเติมแต่งในระบบอุตสาหกรรมมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด โดยแบ่งเป็นสารอนินทรีย์ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ทัลค์ และโวลลาสโทไนต์ เป็นต้น และสารอินทรีย์ เช่น ผงไม้ เถ้าแกลบและซีลี้อย เป็นต้น

### 2.4.1 ประเภทของสารตัวเติม [9]

สารตัวเติมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. สารตัวเติมประเภทเสริมแรง (reinforcing filler) สารเติมแต่งประเภทนี้จะช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์และความสามารถในการขึ้นรูปให้ดีขึ้น โดยสารเติมแต่งประเภทเสริมแรงจะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้กับของพอลิเมอร์ เช่น สมบัติความทนแรงดึง มอดุลัส การยืดตัว ฦ จุดขาด ความทนแรงกระแทกและความทนแรงดัดโค้ง เป็นต้น ตัวอย่างของสารตัวเติมประเภทเสริมแรง ได้แก่ ซิลิกา และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น
2. สารตัวเติมประเภทเพิ่มเนื้อ (extender) สารเสริมเติมแต่งประเภทนี้มีวัตถุประสงค์หลัก คือ เพิ่มปริมาณเนื้อของผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ลดต้นทุนการผลิต โดยสารเติมแต่งประเภทนี้อาจส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์บางอย่าง เช่น มอดุลัส ความแข็ง และการหดตัวของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น ตัวอย่างของสารตัวเติมประเภทเพิ่มเนื้อ ได้แก่ ทัลค์ แคลเซียมคาร์บอเนต และโซนาเคลย์ เป็นต้น

### 2.4.2 สมบัติทั่วไปของสารตัวเติม

1. ทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. มีเสถียรภาพภายใต้ภาวะกระบวนการผลิตและการใช้งาน
3. ไม่เป็นพิษ (non-toxic) และไม่ทำให้เกิดรสหรือกลิ่น
4. ราคาถูก

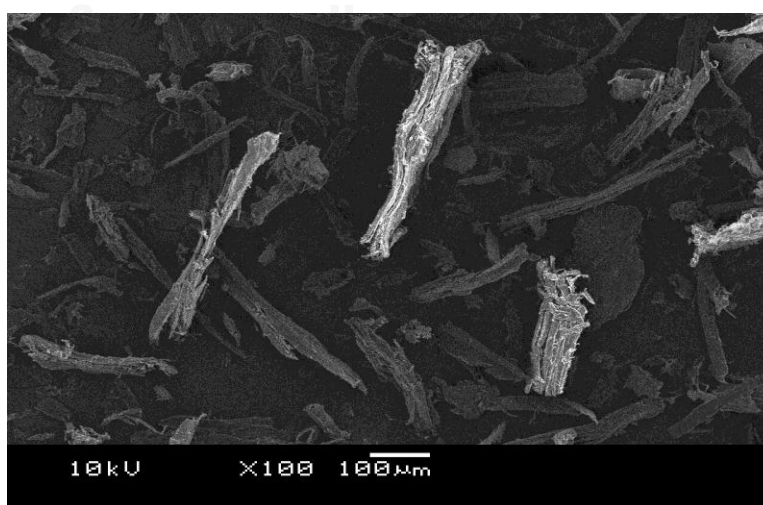
### 2.4.3 ปัจจัยของสารตัวเติมที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์เมทริกซ์

การเลือกใช้สารตัวเติมควรต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. รูปร่างของอนุภาคสารตัวเติม: สารตัวเติมแต่ละชนิดมีรูปร่างแตกต่างกันไป เช่น ทรงกลม ทรงกระบอก เข็ม เส้นใย สามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยม เป็นต้น ซึ่งสารตัวเติมที่มีรูปร่างแตกต่างกันจะส่งผลกระทบต่อสมบัติของพอลิเมอร์เมทริกซ์แตกต่างกันออกไป
2. การกระจายขนาดอนุภาค: การกระจายขนาดอนุภาคส่งผลอย่างมากกับสมบัติทางเชิงกลของพอลิเมอร์เมทริกซ์ หากสารตัวเติมสามารถกระจายตัวได้ดีจะส่งผลให้พอลิเมอร์เมทริกซ์มีสมบัติที่ดีกว่าสารตัวเติมที่เกิดการเกาะกลุ่มกัน
3. พื้นที่ผิว: การยึดเกาะกันระหว่างของพอลิเมอร์และสารตัวเติมจะเกิดขึ้นบริเวณของพื้นที่ผิวของสารตัวเติม ดังนั้นถ้าพื้นที่ผิวมีแนวโน้มยึดเกาะกับสารตัวเติมได้ดีจะส่งผลให้พอลิเมอร์เมทริกซ์มีสมบัติที่ดีขึ้น
4. ส่วนประกอบทางเคมี: เป็นสมบัติที่สำคัญอีกอย่างที่จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการขึ้นรูปของพอลิเมอร์

### 2.5 ผงไม้ (wood flour, WF)

ผงไม้เป็นสารตัวเติมประเภทอินทรีย์ชนิดหนึ่ง โดยมีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส ซึ่งได้จากกระบวนการแปรรูปไม้จากโรงเลื่อยไม้ โดยมีขนาดอนุภาคประมาณ 70-150 ไมครอน [10] และมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาเป็นแบบแท่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.3

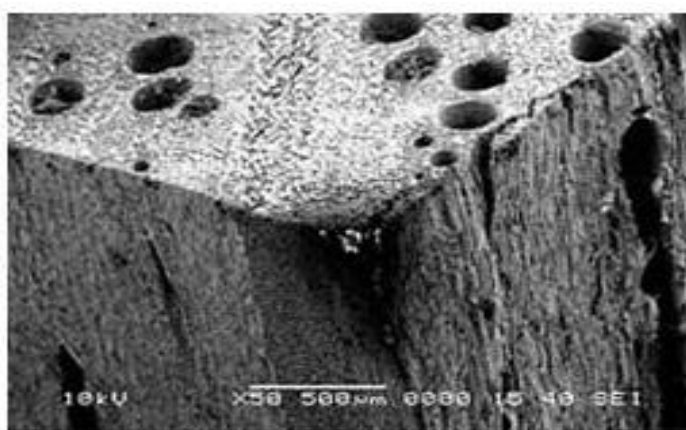


รูปที่ 2.3 สัณฐานวิทยาของผงไม้



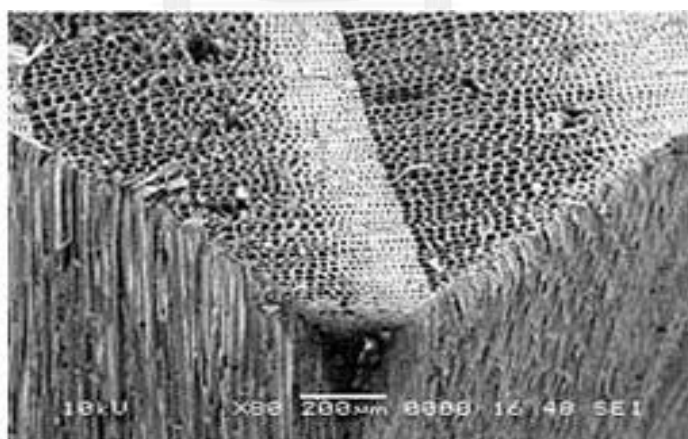
ผงไม้ เป็นสารตัวเติมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก เนื่องจากช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพให้กับพอลิเมอร์ อีกทั้งยังมีราคาถูก น้ำหนักเบา และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยทั่วไปแล้วผงไม้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ผงไม้จากไม้เนื้อแข็ง และผงไม้จากไม้เนื้ออ่อน

ไม้เนื้อแข็งจะมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาดังแสดงในรูปที่ 2.4 พบว่า มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ สามารถรับน้ำหนักกดทับหรือดัดงอได้สูง เช่น ไม้รัง ไม้แดง และไม้ตะเคียน เป็นต้น ซึ่งเป็นไม้ส่วนใหญ่ของประเทศไทย



รูปที่ 2.4 สัณฐานวิทยาของไม้เนื้อแข็ง [11]

ไม้เนื้ออ่อนจะมีลักษณะสัณฐานวิทยาดังแสดงในรูปที่ 2.5 พบว่า ไม่มีรูพรุนและสามารถรับแรงกดได้น้อย เช่น ไม้มะยมป่า ไม้มะพร้าว และไม้สน เป็นต้น



รูปที่ 2.5 สัณฐานวิทยาของไม้เนื้ออ่อน [11]

นอกจากการแบ่งตามลักษณะสัณฐานวิทยายังสามารถแบ่งได้ตามมาตรฐานของกรมป่าไม้ที่กำหนดไว้ในหนังสือของกรมป่าไม้ที่ กส. 0702/6679 ลงวันที่ 3 พฤษภาคม 2517 โดยได้แบ่งไม้ ออกเป็น 3 ประเภท ซึ่งได้แสดงค่าความแข็งแรงของไม้และความทนทานตามธรรมชาติของไม้ไว้ใน ตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1** ประเภทของไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อนแบ่งตามความแข็งแรงและความทนทาน

ประเภทของไม้	ความแข็งแรง	ความทนทาน
	(kg/cm <sup>2</sup> )	(ปี)
ไม้เนื้อแข็ง	> 1000	> 10
ไม้เนื้อแข็งปานกลาง	600-1000	2-10
ไม้เนื้ออ่อน	< 600	< 2

## 2.6 การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [12]

การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) คือกระบวนการย่อยสลายที่เกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ โดยกระบวนการแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 การย่อยสลายในขั้นแรกจะเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อย เอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ endo-enzyme หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของ พันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายในขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (biomass)

### 2.6.1 พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable polymer) [12]

พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable polymer) คือ พอลิเมอร์ที่ ออกแบบโครงสร้างทางเคมีเพื่อให้สามารถย่อยสลายได้โดยใช้จุลินทรีย์ เพื่อให้น้ำหนักโมเลกุลของ สายโซ่พอลิเมอร์มีน้ำหนักลดลงเป็นสาเหตุทำให้สมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ลดลง และเกิดการ

เปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย คือน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือแก๊สมีเทน และมวลชีวภาพใหม่

## 2.6.2 ลักษณะการสลายตัว [13]

ลักษณะการสลายตัวทางชีวภาพของพอลิเมอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ

1. การสลายตัวโดยรวม (bulk erosion) มักจะเกิดขึ้นกับพอลิเมอร์ที่มีลักษณะชอบน้ำ (hydrophilic) ได้แก่ พอลิเมอร์ในกลุ่มของพอลิเอสเทอร์ (polyesters) กลไกการย่อยสลายนั้น น้ำจะเริ่มซึมผ่านเนื้อของพอลิเมอร์โดยเฉพาะบริเวณที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) และเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำให้สารโซ่ของพอลิเมอร์สั้นลง น้ำหนักของโมเลกุลลดลง แต่สมบัติทางกายภาพยังไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก สมบัติเชิงกลจะลดลงอย่างรวดเร็วเพราะสมบัติเชิงกลจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของโมเลกุล

2. การสลายตัวบริเวณผิว (surface erosion) มักเกิดกับพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) การสลายตัวจะเกิดขึ้นบริเวณที่ผิวสัมผัสกับน้ำเท่านั้นเพราะพอลิเมอร์มีลักษณะไม่ชอบน้ำจึงทำให้น้ำไม่สามารถซึมผ่านพอลิเมอร์โดยรวมได้ ส่วนภายในเนื้อของพอลิเมอร์จะยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลง ทำให้วัสดุที่ผลิตจากพอลิเมอร์ประเภทนี้ค่อยๆ บาง ส่งผลทำให้สมบัติทางเชิงกลของพอลิเมอร์จะค่อยๆ ลดลง

## 2.6.3 สมบัติทางกายภาพที่ส่งผลต่อการย่อยสลาย

1. พอลิเมอร์มีความชอบน้ำ (hydrophilic) จะเป็นตัวกำหนดอัตราการไฮโดรไลซิสทั้งภายในเนื้อพอลิเมอร์และผิวหน้าของพอลิเมอร์ ถ้าผลพลอยได้ (by product) จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นพวกกรดหรือด่างจะเกิด autocatalysis เร่งให้พอลิเมอร์ถูกย่อยสลายได้เร็วขึ้น

2. ความเป็นอสัณฐาน (amorphous) ของพอลิเมอร์ ถ้าพอลิเมอร์มีส่วนที่เป็นอสัณฐานมาก น้ำจะซึมผ่านเข้าไปได้ง่าย และสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสหรือการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ (enzymes degradation) ได้ง่ายกว่าบริเวณที่เป็นผลึก

3. อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature,  $T_g$ ) อุณหภูมิการใช้งานมีผลต่อการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการซึมผ่านของน้ำและเอนไซม์ ถ้าใช้งานที่สูงกว่า  $T_g$  ทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ทำให้น้ำซึมผ่านได้ง่าย

4. ขนาดของพอลิเมอร์ถ้ามีขนาดใหญ่จะใช้เวลาในการย่อยสลายนาน

### 2.6.4 สมบัติทางเคมีที่ส่งผลต่อการย่อยสลาย

1. โครงสร้างทางเคมี (chemical structure) ได้แก่ ความชอบน้ำ (hydrophilic) และความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic)
2. ส่วนประกอบทางเคมี ได้แก่ พันธะระหว่างสายโซ่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส หรือการย่อยสลายด้วยเอนไซม์
3. น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) น้ำหนักโมเลกุลมาก การย่อยสลายจำเป็นต้องใช้เวลาในการย่อยสลายนาน
4. ความเป็นผลึก (crystallinity) การสลายตัวของพอลิเมอร์จะเกิดที่เป็นบริเวณอสัณฐานก่อนเนื่องจากน้ำหรือเอนไซม์สามารถซึมผ่านบริเวณอสัณฐานได้ง่ายกว่าบริเวณที่เป็นผลึก
5. ปริมาณการเชื่อมขวาง (degree of crosslinking) ถ้าเป็นพอลิเมอร์แบบเส้นที่ไม่มีการเชื่อมขวางการเกิดไฮโดรไลซิสจะทำให้เกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมขวางมาก

## 2.7 กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

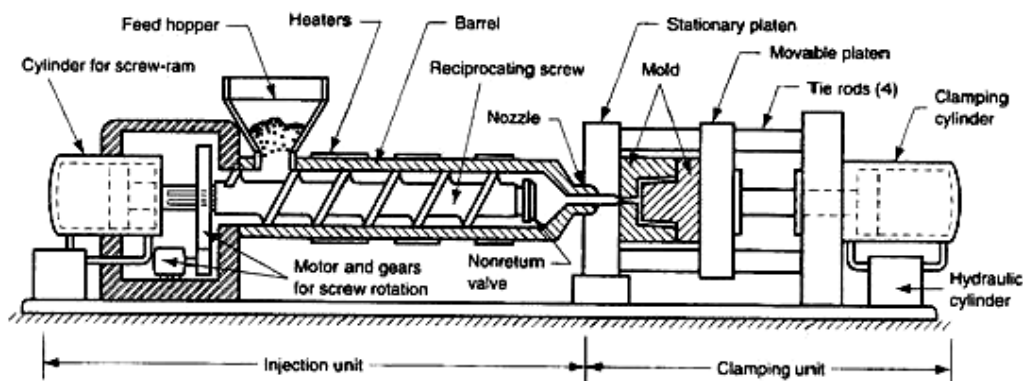
### 2.7.1 การขึ้นรูปด้วยการฉีดแบบ (injection)

รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะเครื่องฉีดแบบ



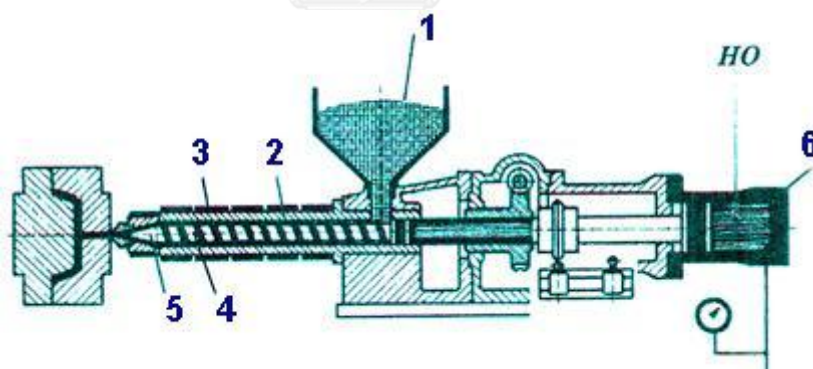
รูปที่ 2.6 เครื่องฉีดแบบ [14]

การฉีดแบบ เป็นการฉีดพลาสติกที่ถูกหลอมเข้าไปในแม่แบบ (mold) ที่ประกบกันอยู่และถูกควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำเพื่อทำให้พลาสติกหลอมนั้นแข็งตัวได้ ผลิตภัณฑ์จะถูกนำออกมาโดยการเปิดแม่แบบ ส่วนประกอบหลักของเครื่องมี 2 ส่วน (รูปที่ 2.7) ได้แก่



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบหลักของเครื่องฉีดแบบ [15]

1.ชุดฉีด (injection unit) (รูปที่ 2.8) การทำงานของชุดหัวฉีด เม็ดพลาสติกที่อยู่ในกรวยเติมจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อสกรูหมุนพาเม็ดพลาสติกออกไปที่กระบอกสูบ และเม็ดพลาสติกก็จะหลอมละลายในกระบอกสูบด้วยความร้อนจากฮีตเตอร์ (heater) สกรูจะทำหน้าที่คลุกเคล้าเม็ดพลาสติกที่ละลายแล้วให้เป็นเนื้อเดียวกัน พร้อมกับขับเคลื่อนให้พลาสติกพุ่งออกจากหัวฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์



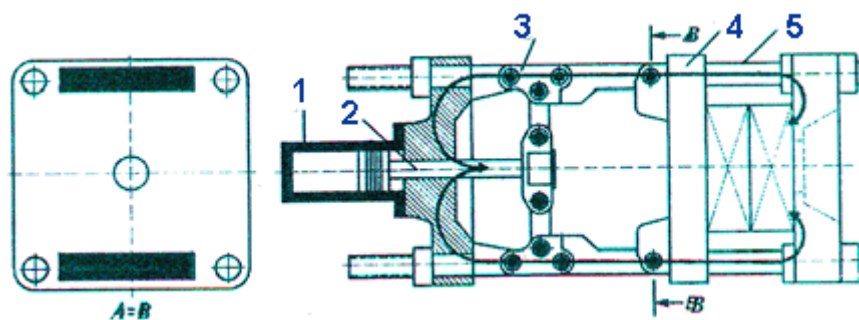
รูปที่ 2.8 ชุดฉีด [15]

ส่วนประกอบต่าง ๆ ตามภาพข้างต้น

1. กรวยเติม (hopper) รับเม็ดพลาสติกเพื่อเติมเข้ากระบอกสูบ
2. กระบอกสูบ (barrel) เป็นห้องที่เก็บพลาสติกซึ่งมีฮีตเตอร์ฝังอยู่
3. ฮีตเตอร์ (heater) สร้างความร้อนให้ฮีตเตอร์หลอมละลาย
4. สกรู (screw) หมุนพาให้พลาสติกเคลื่อนที่ และคลุกเคล้าพลาสติกให้เป็นเนื้อ

เดียวกัน

5. หัวฉีด (nozzle) ฉีดพลาสติกที่ออกจากกระบอกสูบเข้าสู่แม่พิมพ์
  6. ชุดไฮดรอลิก (hydraulic) ให้ชุดฉีดเคลื่อนที่เข้าหรือออกจากแม่พิมพ์
2. ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ (clamping unit) (รูปที่ 2.9) ทำหน้าที่เคลื่อนปิด-เปิดแม่พิมพ์ในจังหวะการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก โดยปกติแม่พิมพ์จะมีสองด้านประกบกัน โดยด้านที่พลาสติกเข้าจะเป็นด้านที่อยู่กับที่ และอีกด้านจะเป็นด้านเคลื่อนที่ ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์แบ่งออกเป็น 2 ระบบจะทำหน้าที่อัดแม่พิมพ์ให้แน่นเพื่อต้านความดันภายในขณะฉีด



รูปที่ 2.9 ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ [16]

ส่วนประกอบต่างๆ ตามภาพข้างต้น

1. กระบอกสูบ ดันให้ก้านสูบเคลื่อนไป-กลับ
2. ก้านสูบ รับแรงจากกระบอกสูบ ดันกลไกให้เคลื่อนที่
3. ชุดกลไก ส่งแรงไปยังแผ่นหน้าแปลนเครื่องฉีดให้เคลื่อนที่
4. หน้าแปลนเครื่องฉีด ยึดแม่พิมพ์ให้สามารถเคลื่อนที่ปิด-เปิดได้
5. เพลาหน้า รองรับการเคลื่อนที่ของหน้าแปลนเครื่องฉีดพลาสติก

### 2.7.2 ข้อดีของกระบวนการฉีดแบบ [17]

1. เป็นกระบวนการผลิตโดยตรงจากเรซินเป็นผลิตภัณฑ์
2. ตกแต่งชิ้นงานเพิ่มเพียงเล็กน้อย หรือไม่จำเป็น
3. สามารถปรับกระบวนการผลิตให้เป็นแบบต่อเนื่องได้อย่างสมบูรณ์
4. ทำซ้ำได้ผลิตภัณฑ์ที่ใกล้เคียงกัน
5. อัตราการผลิตสูง
6. สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีการแทรกวัสดุอื่นร่วมเข้าไปกับพลาสติกได้

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Srithep และคณะ[18] ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกล ความเหนียว และความสามารถในการขึ้นรูปของ R-PET ด้วยการผสมกับเซนเอ็กซ์เทนเดอร์ (chain extenders) PBAT และเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ใน R-PET แบบหลอมเหลว และขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ จากผลการทดลองพบว่าสมบัติเชิงกลของ R-PET ได้รับการปรับปรุงเมื่อทำการเติมเซนเอ็กซ์เทนเดอร์ และ PBAT นอกจากนี้ โมดูลัสของพอลิเมอร์ผสมที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นหลังผ่านการอบเหนียว (annealing) เนื่องจากมีระดับการเกิดผลึกเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปให้กับ R-PET ด้วยกระบวนการฉีดแบบได้ง่ายขึ้น โดยการเติมเซนเอ็กซ์เทนเดอร์ มีผลทำให้สมบัติเชิงกล น้ำหนักโมเลกุล และความหนืดของ R-PET เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ถึงแม้การเติมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จะส่งผลให้ความสามารถในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น แต่สมบัติเชิงกลกลับลดลง เนื่องจากความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่าง R-PET และเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ต่ำ

Jiang และคณะ[19] ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและ PBAT โดยมีอัตราส่วนร้อยละ ดังนี้ 0, 5, 10, 15, 20 และ 100 โดยมวลของ PBAT พบว่า เมื่อปริมาณของ PBAT เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความทนแรงดึงและโมดูลัสของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด และความเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งลักษณะการแตกหักของชิ้นงานเปลี่ยนจากการแตกหักแบบแข็งเปราะ (stiffness) เป็นการแตกหักแบบอ่อนเหนียว (ductile)

Petinakis และคณะ[20] ได้เตรียมคอมพอสิตระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและผงไม้ โดยมีอัตราส่วนร้อยละดังนี้ 0, 5, 10, 20, 30 และ 40 โดยมวลของผงไม้ ด้วยกระบวนการแบบหลอมเหลว และขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ แล้วทำการศึกษาอิทธิพลของแรงยึดเกาะระหว่างเมทริกซ์ของพอลิแลกติกแอซิดและอนุภาคของผงไม้ จากผลการทดลอง พบว่า การเติมผงไม้ส่งผลให้พอลิแลกติกแอซิดมีค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นร้อยละ 95 หากแต่ไม่มีผลทำให้ค่าความทนแรงดึงของคอมพอสิตเพิ่มขึ้น เนื่องจากไม่มีแรงยึดเกาะที่ติระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและผงไม้ อย่างไรก็ตาม การเติมสารคู่ควบเมทิลไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต (methylenediphenyl-diisocyanate) สามารถส่งเสริมให้เกิดแรงยึดเกาะที่ดีขึ้นของพอลิแลกติกแอซิดและผงไม้ ซึ่งสามารถยืนยันผลได้จากการตรวจสอบสัญญาณวิทยาของคอมพอสิตด้วยเครื่องอเล็กตรอนแบบส่องกราด ส่งผลทำให้คอมพอสิตมีค่าความทนแรงดึงและโมดูลัสเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 และ 135 ตามลำดับ

Girija และคณะ[21] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางความร้อนของ PET ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิด ในอัตราส่วนร้อยละ ดังนี้ 20, 40 และ 100 โดยมวลของพอลิแลกติกแอซิด

พบว่า เสถียรภาพทางด้านความร้อนและยังสัมมอดูลัสเพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 20 โดยมวลของพอลิแลกติกแอซิด เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาระหว่างทำการผสม PET และพอลิแลกติกแอซิด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิแลกติกแอซิดมีแนวโน้มของเสถียรภาพและยังสัมมอดูลัสลดลง

Ashveen และคณะ[4] ได้ศึกษาพฤติกรรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต/พอลิแอนิลีนเป็นวัสดุตัวนำสารอนุมูลอิสระ โดยได้ทำการผสม PET กับ nanorod form of polyaniline (NR-PANI) โดยใช้อัตราส่วน NR-PANI ร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยมวล โดยใช้กระบวนการหลอมขึ้นรูป ผลการทดลอง พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของ NR-PANI มากขึ้นจะทำให้มีค่าอัตราส่วนระหว่าง O/C เพิ่มขึ้นแสดงว่าเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ง่ายขึ้นและเมื่อเพิ่ม NR-PANI มากขึ้นจะส่งผลต่อทำให้มีความเปราะมากกว่า PET บริสุทธิ์ จากการศึกษา พบว่า NR-PANI จะเพิ่มปริมาณรองรับสารอนุมูลอิสระได้เพิ่มขึ้น จึงเหมาะที่จะทำเป็นบรรจุภัณฑ์ตัวนำสารอนุมูลอิสระ อย่างไรก็ตาม ต้องพิจารณาถึงสมบัติทางเชิงกลที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของ NR-PANI ด้วย





## บทที่ 3

### วิธีการทดลอง

#### 3.1 สารเคมีและวัตถุดิบ

1. พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือพีอีทีที่ผ่านการใช้งานแล้ว (recycled poly(ethylene terephthalate, R-PET) ที่ถูกย่อยให้อยู่ในรูปของเกล็ดพลาสติก
2. พอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต (poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT)เกรด Ecoflex F Blend C 1200 จากบริษัท BASF ประเทศเยอรมนี
3. ผงไม้สนเกรด Lignocel C120 ขนาดอนุภาค 70-150 ไมครอน จากบริษัท JRS ประเทศเยอรมนี

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมชิ้นทดสอบ

1. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (twin screw extruder) รุ่น Scientific LW-100 จากบริษัท LabTech Engineering (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)
2. เครื่องฉีดแบบ (injection molding machine) รุ่น BA 250 CDC ขนาด 40 ตัน จากบริษัท Wittmann Battenfeld (ศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรมฝ่ายพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

#### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของชิ้นทดสอบ

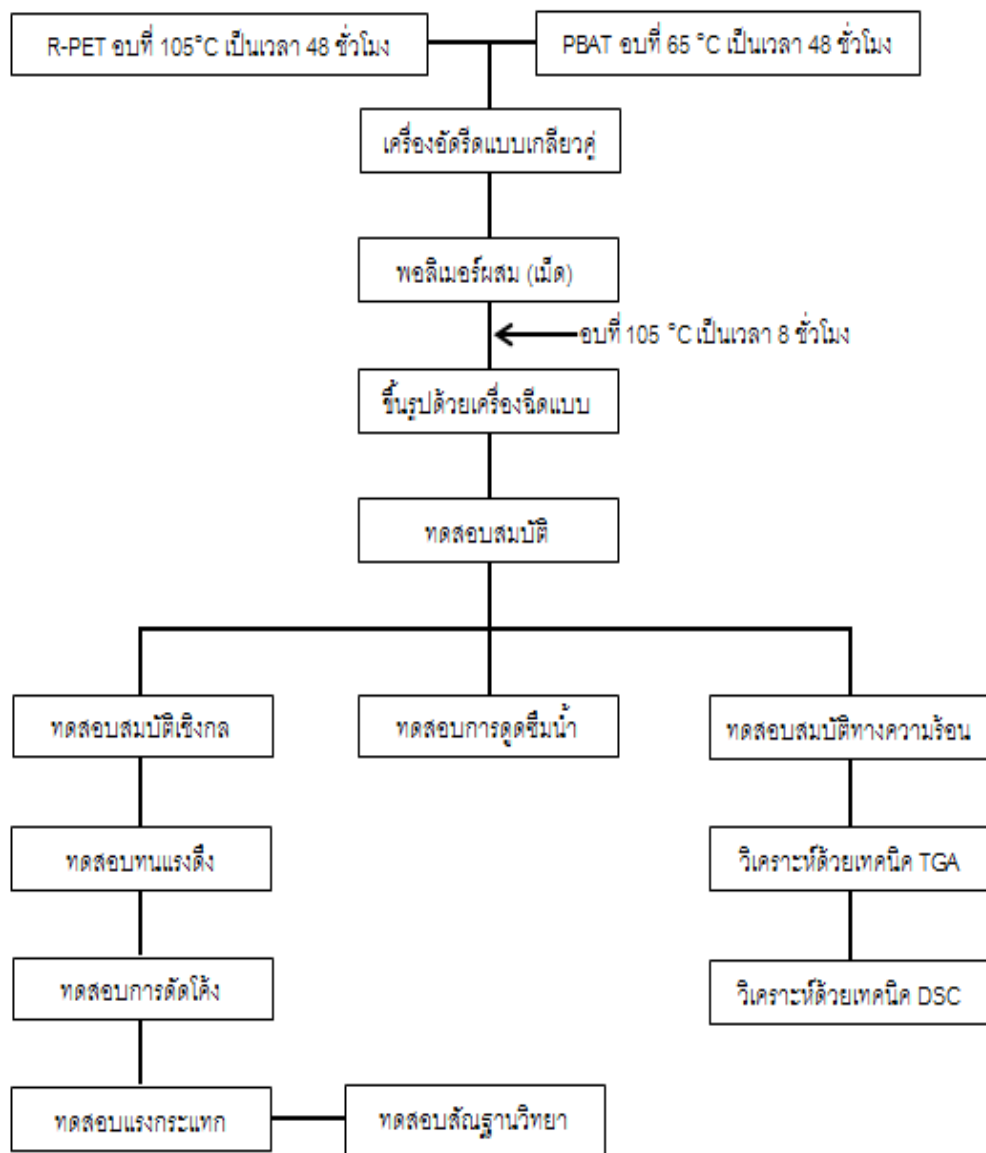
1. เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine) รุ่น Instron 5500R (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)
2. เครื่องทดสอบสมบัติทนแรงกระแทก (impact tester) รุ่น Ceast Resil Impactor 10K (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)
3. เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) รุ่น Netzsch DSC 204F1 Phoenix<sup>®</sup> (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
4. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (thermogravimetric analyzer, TGA) รุ่น Netzsch TG 209F3 (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น JEOL JSM-5410 LV (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

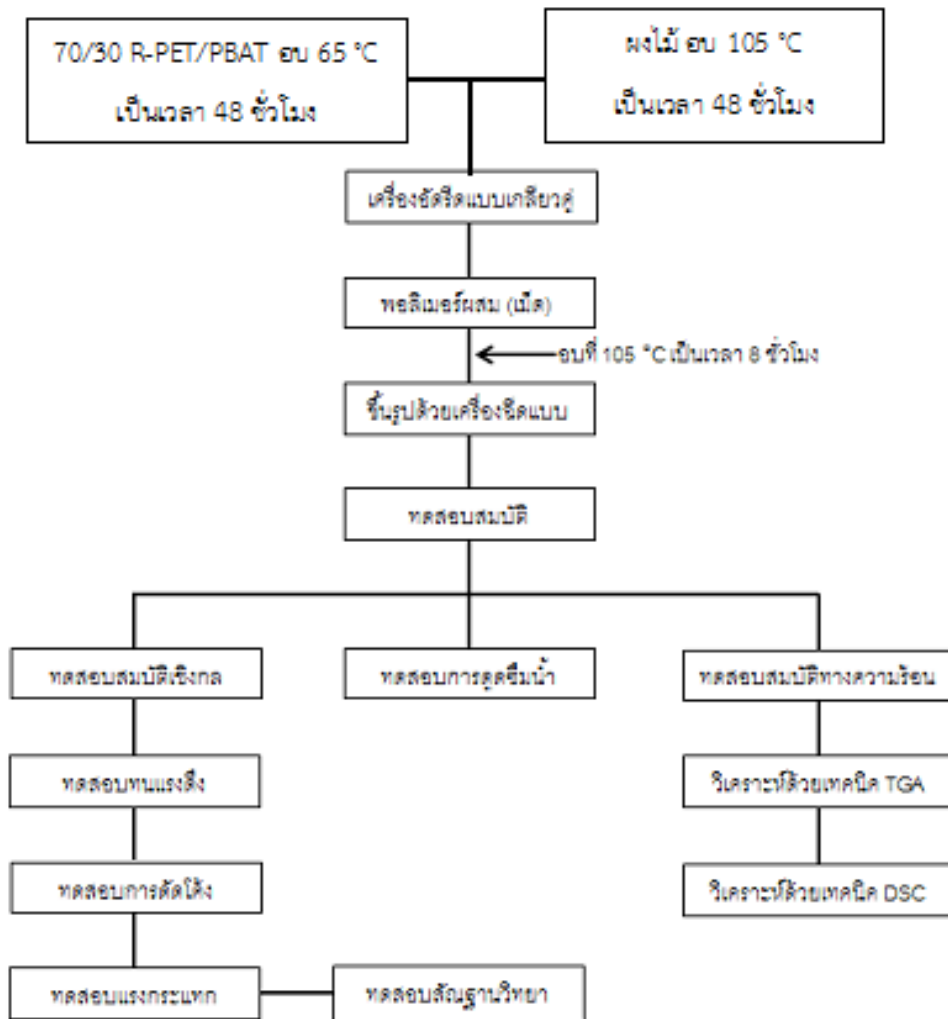
6. เครื่องทดสอบการดัดโค้ง (flexural tester) รุ่น Lloyd 500 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

### 3.4 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการเตรียมและทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอลิิตแสดงในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมและทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสม

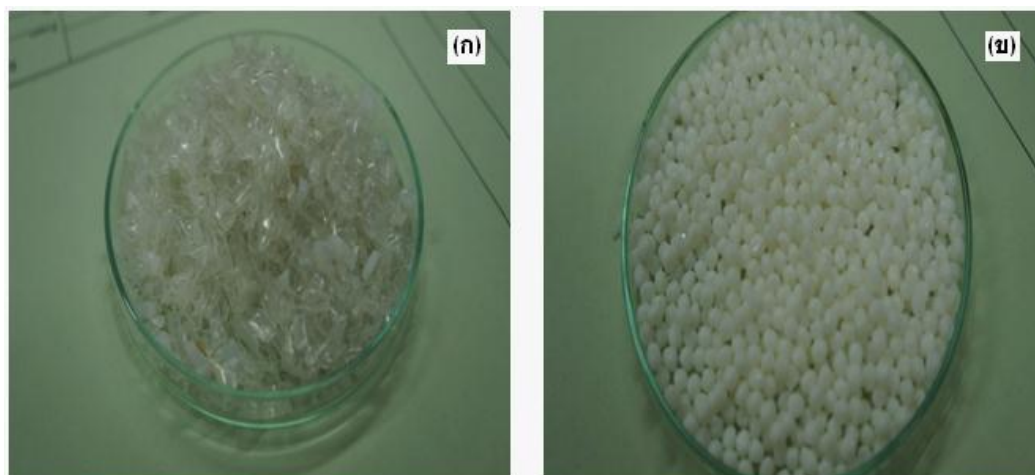


รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมและทดสอบสมบัติของคอมพอลิเอส

### 3.4.1 การผสมพีทีซีเซลและพอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต

นำเกล็ด R-PET และเม็ด PBAT (รูปที่ 3.3) มาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส และ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ตามลำดับ จากนั้นทำการผสม R-PET และ PBAT ในอัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (รูปที่ 3.4) ที่อุณหภูมิตั้งนี้ 240/240/240/240/235/235/235/230 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วรอบ 65 รอบต่อนาที

เมื่อทำการผสมและตัดเป็นเม็ดเรียบร้อยแล้วนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปเก็บเพื่อรอขึ้นรูปต่อไป



รูปที่ 3.3 ลักษณะของ (ก) เกล็ด R-PET และ (ข) เม็ด PBAT

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมระหว่าง R-PET และ PBAT

องค์ประกอบ	R-PET (%)	PBAT (%)
R-PET	100	0
R-PET/PBAT 90/10	90	10
R-PET/PBAT 80/20	80	20
R-PET/PBAT 70/30	70	30
R-PET/PBAT 60/40	60	40
R-PET/PBAT 50/50	50	50
PBAT	0	100



รูปที่ 3.4 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่

### 3.4.2 การขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมของเพ็ทรีไซเคิล/พอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต

นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ไปอบไล่ความชื้นอีกครั้งหนึ่งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดแบบ (รูปที่ 3.5) โดยมีอุณหภูมิในการขึ้นรูปดังนี้

Zone	หัวฉีด	1	2	3
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	290	270	260	235



รูปที่ 3.5 เครื่องฉีดแบบ

### 3.4.3 การผสมพีอีทีไรไซเคิล พอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต และผงไม้

นำผงไม้ (รูปที่ 3.6) มาอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และพอลิเมอร์ผสมของ R-PET/PBAT ที่อัตราส่วนที่มีสมบัติเหมาะสมมาอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำมาผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (รูปที่ 3.4) ที่อุณหภูมิดังนี้ 240/240/235/235/230/230/230/225 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 65 รอบต่อนาที โดยมีอัตราส่วนการผสมดังแสดงในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.6 ผงไม้

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมระหว่างพีอีทีไรไซเคิล พอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต และผงไม้

	5% WF	10% WF	15% WF	20% WF	25% WF	30% WF
R-PET	66.5	63.0	59.5	56.0	52.5	49.0
PBAT	28.5	27.0	25.5	24.0	22.5	21.0
Wood flour	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0

เมื่อทำการผสมและตัดเม็ดเรียบร้อยแล้วนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปเก็บเพื่อรอขึ้นรูปต่อไป

### 3.4.4 การขึ้นรูปคอมพอสิตของพีอีทีไรไซเคิล/พอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต/ผงไม้

นำเม็ดคอมพอสิตที่เตรียมได้ไปอบไล่ความชื้นอีกครั้งหนึ่งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดแบบ (รูปที่ 3.5) โดยมีอุณหภูมิในการขึ้นรูปดังนี้

Zone	หัวฉีด	1	2	3
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	240	235	235	200

### 3.5 การทดสอบสมบัติ

#### 3.5.1 การทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง (tensile properties)

ทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงด้วยเครื่อง universal testing machine (รูปที่ 3.7) เพื่อหาค่าความทนแรงดึง (tensile strength) ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus) และร้อยละการยืดตัว (%strain) ของชิ้นงานทดสอบทั้งพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต ซึ่งชิ้นงานที่เตรียมจะเป็นรูปดัมเบลล์ ตามมาตรฐาน ASTM D 638 type I [22] ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งมีภาพที่ใช้ในการทดลองดังนี้

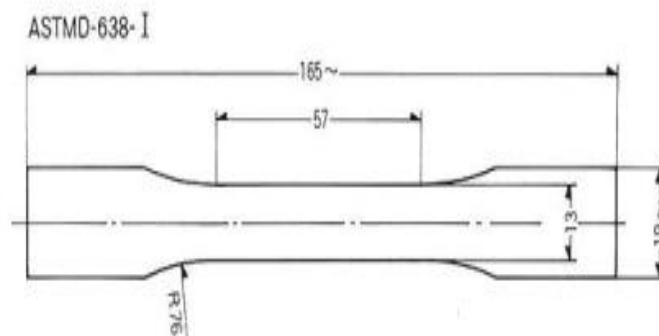
1. ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
2. ความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตร/นาที
3. น้ำหนักที่ใช้ดึงขึ้นทดสอบ 10 กิโลนิวตัน



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล



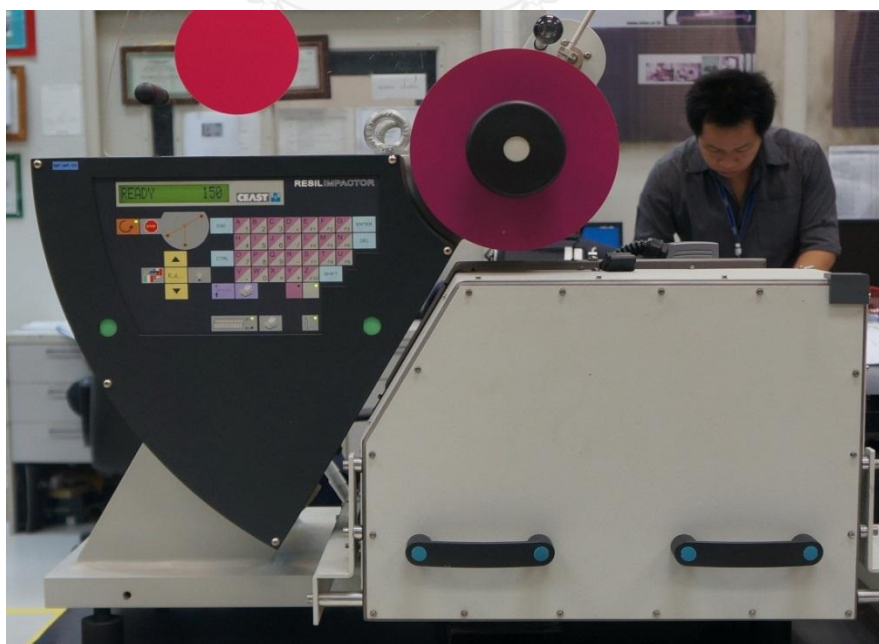
## ASTM D638 Type I



รูปที่ 3.8 ขนาดชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 type I [23]

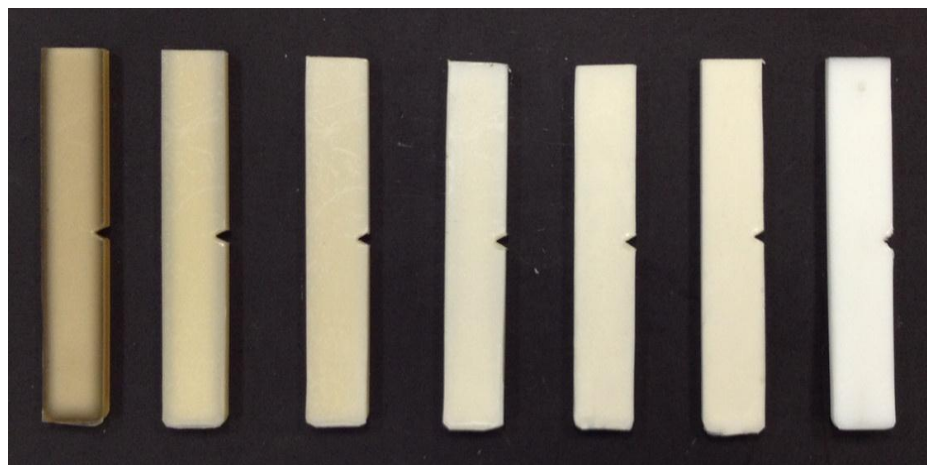
### 3.5.2 การทดสอบความทนแรงกระแทก (impact strength)

เป็นการศึกษาความทนแรงกระแทกของชิ้นงานตามแนวแรงด้วยเครื่อง Impact tester (รูปที่ 3.9) เพื่อหาค่าความทนแรงกระแทกด้วยวิธีแบบ Notched Izod impact ทั้งพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตจะถูกเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D 256 ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และใช้ค้อนน้ำหนัก 2.75 จูลในการทดสอบ โดยมีขนาดของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ดังนี้ ความยาว 63 มิลลิเมตร ความกว้าง 12 มิลลิเมตร และความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร พร้อมทั้งทำการบากที่จุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ (รูปที่ 3.10)



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก





รูปที่ 3.10 ชิ้นงานทดสอบความทนแรงกระแทก

### 3.5.3 การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength)

เพื่อศึกษาความสามารถในการทนแรงดัดโค้งของชิ้นงาน (รูปที่ 3.11) ของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิตโดยเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D 790 โดยมีขนาดของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ดังนี้ ความยาว 126.5 มิลลิเมตร ความกว้าง 12 มิลลิเมตร และความหนา 3 มิลลิเมตร โดยมีภาวการณ์ทดลองดังนี้

1. น้ำหนักหักกด (load cell) 2500 นิวตัน
2. ความกว้างของ span length 55 มิลลิเมตร
3. ความเร็วในการกด 15 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้งของชิ้นงาน

### 3.5.4 การวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (thermogravimetric analyzer, TGA)

ทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (รูปที่ 3.12) เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนโดยน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ

ก่อนทำการวิเคราะห์ต้องนำพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตมาอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสเพื่อทำการไล่ความชื้นออกเป็นเวลา 8 ชั่วโมง และเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น (desiccator) เพื่อรอให้เย็น โดยน้ำหนักที่ใช้ในการวิเคราะห์ต่อครั้งประมาณประมาณ 8-12 มิลลิกรัม โดยมีภาวะการทดลองดังนี้

- |                              |        |                   |
|------------------------------|--------|-------------------|
| 1. อุณหภูมิในการทดลอง        | 25-800 | องศาเซลเซียส      |
| 2. อัตราเร็วในการให้ความร้อน | 20     | องศาเซลเซียส/นาที |
| 3. อัตราการไหลของไนโตรเจน    | 20     | มิลลิลิตร/นาที    |



รูป 12 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) [24]

### 3.5.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี (DSC)

ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมเตอร์ (DSC) (รูปที่ 3.13) เป็นเครื่องมือทดสอบวัสดุโดยการวัดค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดและคายความร้อน (endothermic and exothermic) ซึ่งจะใช้ศึกษาอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature,  $T_g$ ), อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature,  $T_m$ ), อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature,  $T_c$ ), ระดับการเกิดผลึก (degree of crystallization,  $X_c$ ) เป็นต้น

ก่อนทำการวิเคราะห์ต้องนำพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตมาอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นเป็นเวลา 8 ชั่วโมงและเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นเพื่อรอให้เย็น โดยมีภาวะการทดลองดังนี้

- |                              |             |                   |
|------------------------------|-------------|-------------------|
| 1. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง  | -50 ถึง 300 | องศาเซลเซียส      |
| 2. อัตราเร็วในการให้ความร้อน | 10          | องศาเซลเซียส/นาที |
| 3. อัตราการไหลของไนโตรเจน    | 30          | มิลลิลิตร/นาที    |



รูปที่ 3.13 เครื่องดีพีเพอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ [25]

### 3.5.6 ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

เป็นการตรวจสอบสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของชิ้นงานทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 3.14) เพื่อดูลักษณะการแตกหักของชิ้นงาน โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทก และชิ้นงานที่จะทำการทดสอบต้องอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และผ่านการเคลือบผิวด้วยทองคำก่อนนำไปส่องที่กำลังขยาย 500 และ 1000 เท่า



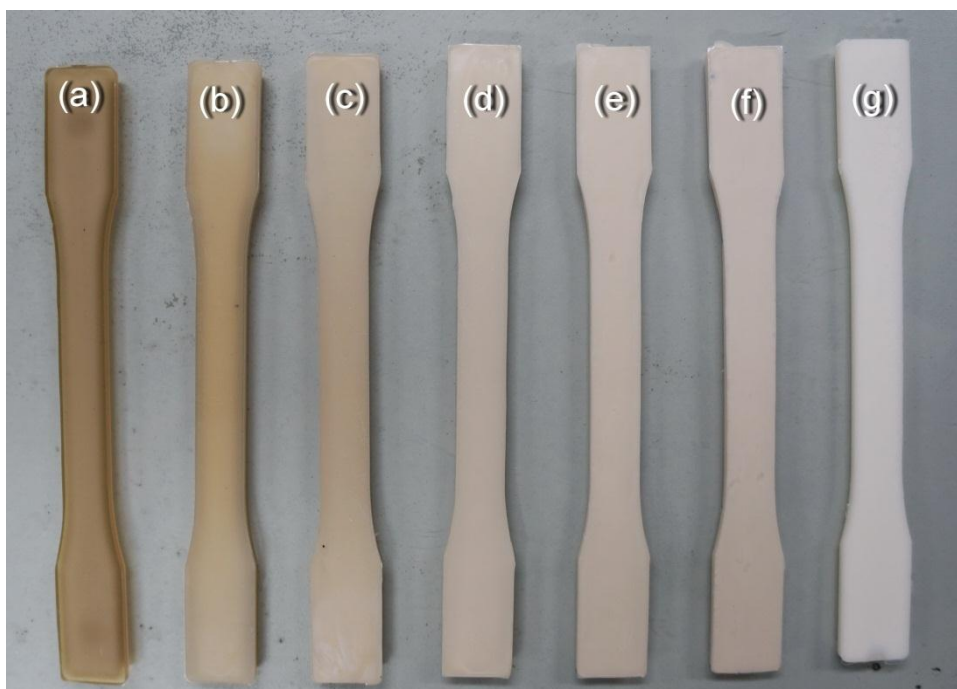
รูปที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

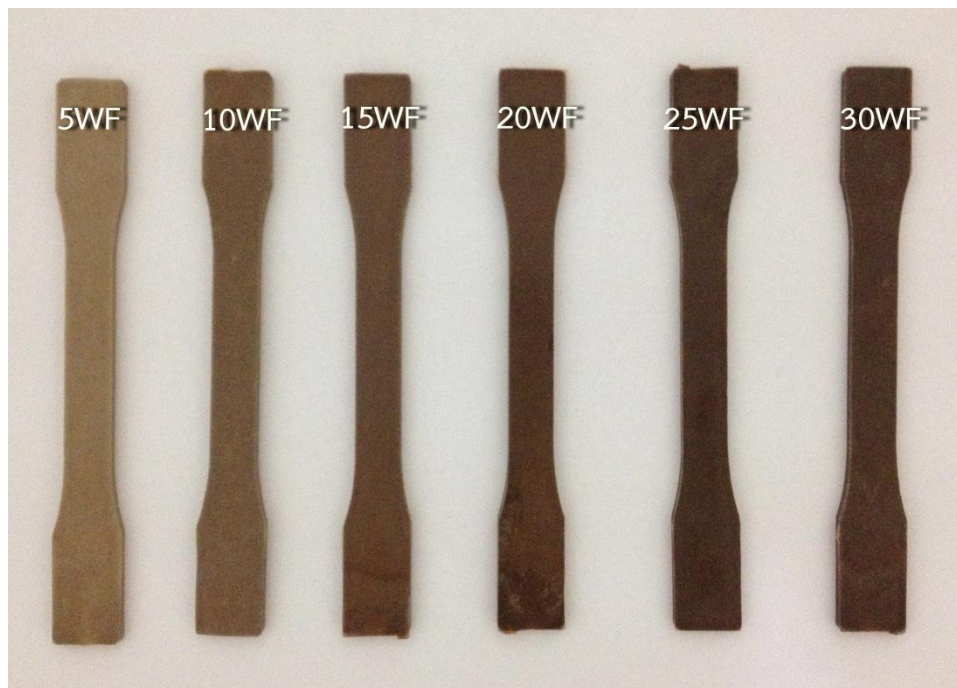
#### 4.1 ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต

เม็ดพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตที่เตรียมได้จากเครื่องอัดรีดถูกนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีดแบบเพื่อให้ได้ชิ้นทดสอบ ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ ซึ่งแสดงลักษณะชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ของ R-PET, PBAT, พอลิเมอร์ผสมของ R-PET/PBAT และคอมพอสิตของ R-PET/PBAT/WF ในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.1 ชิ้นงานของ (a) R-PET, (b) R-PET/PBAT 90/10, (c) R-PET/PBAT 80/20, (d) R-PET/PBAT 70/30, (e) R-PET/PBAT 60/40, (f) R-PET/PBAT 50/50 และ (g) PBAT

จากรูปที่ 4.1 พบว่า ลักษณะชิ้นทดสอบของ R-PET (รูปที่ 4.1a) มีสีเหลืองขุ่นเป็นมันเงา ลักษณะแข็งและเปราะ ขณะที่ PBAT (รูปที่ 4.1g) มีสีขาวเป็นมันเงา ดัดงอได้ ซึ่งเมื่อทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมของ R-PET/PBAT (รูปที่ 4.1b-f) พบว่า เมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้น ชิ้นทดสอบมีสีขาวมากขึ้นและมีลักษณะดัดงอได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับ R-PET



**รูปที่ 4.2** พอลิเมอร์คอมพอสิตของ R-PET/PBAT/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

เมื่อนำพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วนที่มีสมบัติเหมาะสม (70/30 R-PET/PBAT) มาผสมกับผงไม้อัตราส่วนต่างๆ พบว่า ชื้นทดสอบมีสีน้ำตาลเข้มมากขึ้นตามปริมาณของผงไม้ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ 70/30 R-PET/PBAT (รูปที่ 4.2)

#### 4.2 สมบัติทางเชิงกล (Mechanical properties)

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความทนแรงดึง (tensile strength) ยังส์มอดุลัส (Young's modulus) และร้อยละการยืดตัว (%strain) ความทนแรงกระแทก (impact strength) และความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) ของ R-PET, PBAT, พอลิเมอร์ผสมของ R-PET/PBAT และคอมพอสิตของ R-PET/PBAT/WF ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดแบบได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1



ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของ R-PET, PBAT, พอลิเมอร์ผสมของ R-PET/PBAT และคอมพอสิตของ R-PET/PBAT/WF

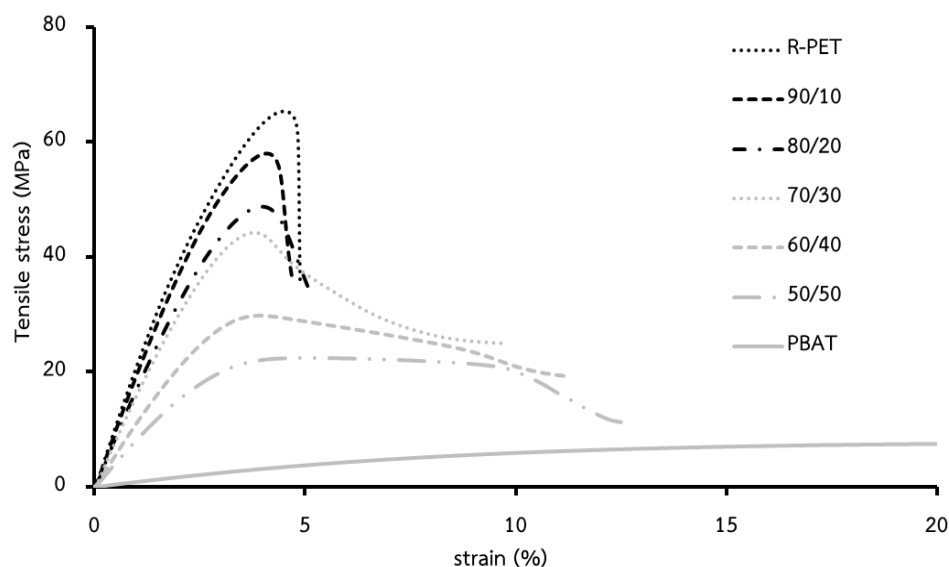
Sample	Tensile strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Strain (%)	Impact strength (kJ/m <sup>2</sup> )	Flexural strength (N/mm <sup>2</sup> )
RPET	65.1±0.3	2226.8±14.5	5.3±0.2	3.2±0.1	59.4±1.5
PBAT	15.0±0.4	85.2±3.5	N/B*	N/B*	4.1±0.1
<i>RPET/PBAT (wt%/wt%)</i>					
90/10	58.2±0.8	2019.6±20.9	5.1±0.2	3.9±0.4	52.6±4.0
80/20	47.7±0.0	1765.8±6.9	5.9±0.7	3.7±0.7	49.6±1.0
70/30	42.5±0.9	1630.0±42.0	9.4±0.4	10.6±0.6	39.9±0.9
60/40	29.7±0.2	1192.5±13.3	12.3±0.2	27.0±1.6	29.4±0.2
50/50	22.7±0.3	897.4±26.6	12.4±0.2	31.2±4.3	23.7±0.4
<i>RPET/PBAT/WF (wt%/wt%/wt%)</i>					
66.5/28.5/5	28.8±0.9	1585.3±54.7	2.4±0.2	5.2±1.2	39.1±0.6
63.0/27.0/10	36.3±1.6	1899.2±58.6	3.0±0.5	4.5±0.2	41.8±0.6
59.5/25.5/15	41.5±0.5	2241.2±64.3	3.4±0.2	3.5±0.3	44.3±0.2
56.0/24.0/20	41.2±1.6	2681.0±40.1	2.6±0.2	2.8±0.3	43.4±1.5
52.5/22.5/25	44.3±0.2	2830.7±69.7	2.9±0.1	3.2±0.2	45.7±0.7
49.0/21.0/30	45.0±0.8	3247.6±69.8	2.5±0.3	2.9±0.1	41.8±2.2

\* Non-broken

#### 4.2.1 สมบัติความทนแรงดึง (tensile properties)

จากตารางที่ 4.1 พบว่า R-PET มีความทนแรงดึง และยังสัมมอดูลัสประมาณ 65.1 MPa และ 2226.8 MPa ตามลำดับ ขณะที่ PBAT มีความทนแรงดึงและยังสัมมอดูลัส ประมาณ 15.0 MPa และ 85.2 MPa ตามลำดับ ดังนั้น PBAT จึงมีความแข็งแรงและความต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับ R-PET ซึ่งส่งผลให้ความทนแรงดึงและยังสัมมอดูลัส ของพอลิเมอร์ผสมลดลงตามปริมาณของ PBAT ที่เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ที่อัตราส่วน 60/40 และ 50/50 พบว่า มีค่าความทนแรงดึงและยังสัมมอดูลัส ต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด (ต่ำกว่า R-PET ประมาณ 2 เท่า) เนื่องจากที่อัตราส่วนดังกล่าวมีปริมาณ PBAT เพิ่มมากขึ้นจนทำให้มีแนวโน้มที่จะเกิดการกลับเฟส (phase reversion) ของพอลิเมอร์ผสม ส่วนร้อยละการยืดตัวของ R-PET มีค่าเพียง 5.3% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมบัติความแข็งและเปราะของ R-PET [18] ขณะที่ PBAT ไม่สามารถคำนวณค่าร้อยละการยืดตัวได้ เนื่องจากในภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้ไม่สามารถทำให้ขึ้นทดสอบ PBAT เกิดการขาด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมบัติเด่นด้านความยืดหยุ่นของ PBAT ดังนั้น เมื่อทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมของ R-PET/PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่า พอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าร้อยละการยืดตัวสูงกว่า R-PET โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PBAT ที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติม PBAT ลงในพอลิเมอร์ผสมสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งและเปราะของ R-PET ได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะที่อัตราส่วน 70/30 R-PET/PBAT มีค่าร้อยละการยืดตัวเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนเนื่องจากมีปริมาณ PBAT ที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการรวมตัวได้ดีกับ R-PET ดังนั้น จึงเลือกพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 70/30 R-PET/PBAT มาเตรียมคอมพอสิตด้วยผงไม้ที่อัตราส่วนต่างๆ ต่อไป ทั้งนี้เนื่องจากที่อัตราส่วนนี้มีการปรับปรุงร้อยละการยืดตัวที่ดีและไม่ทำให้ความทนแรงดึงและยังสัมมอดูลัสเปลี่ยนแปลงไปมากนัก ดังแสดงการเปรียบเทียบสมบัติด้านความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมในลักษณะกราฟความเค้น-ความเครียด (stress-strain curves) ไว้ในรูปที่ 4.3

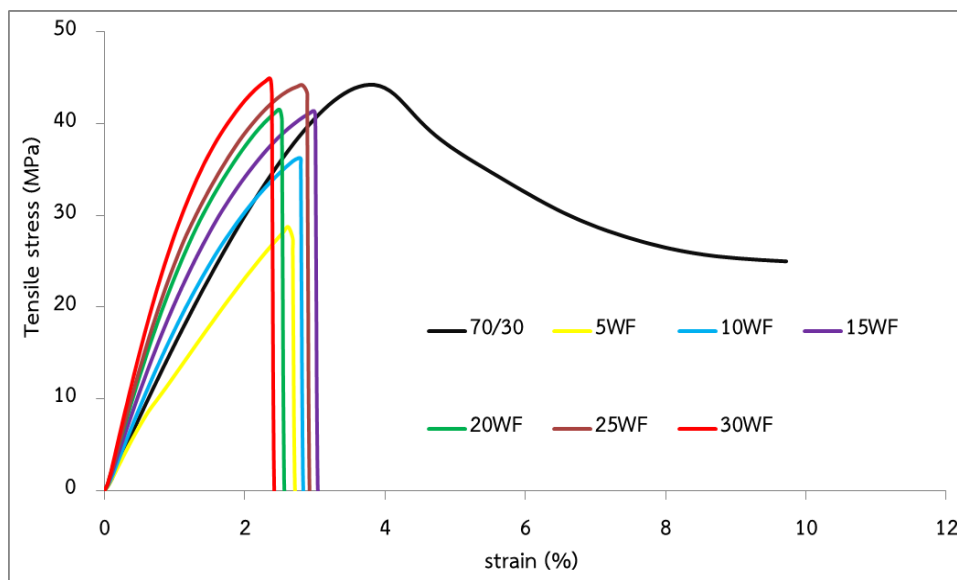




รูปที่ 4.3 กราฟความเค้น-ความเครียดของ R-PET, PBAT และพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ

สมบัติความทนแรงดึงของคอมพอสิตได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 เช่นเดียวกัน พบว่าการเติมผงไม้ลงไปในการคอมพอสิตส่งผลให้ความทนแรงดึงที่ได้มีค่าดังนี้ เมื่อเติมผงไม้ปริมาณ 5-20 wt% มีผลทำให้ความทนแรงดึงของคอมพอสิตลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากผงไม้กระจายตัวไม่ดีในเมทริกซ์ และการไม่มีอันตรกิริยาระหว่างผงไม้และเมทริกซ์ [20] จึงเกิดการส่งผ่านความเค้น (stress transfer) จากพอลิเมอร์เมทริกซ์ไปยังผงไม้ได้ยาก จึงมีผลทำให้ความแข็งแรงลดลง อย่างไรก็ตาม ที่ปริมาณผงไม้ 25 และ 30 wt% พบว่า ค่าความทนแรงดึงของคอมพอสิตมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม โดยเพิ่มจาก 28.8 MPa เป็น 44.2 และ 45.0 MPa ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการจัดเรียงตัวของกลุ่มผงไม้ (aggregated WF) ในทิศทางเครื่องจักร (machine direction) ระหว่างกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดแบบ ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับที่ทดสอบสมบัติความทนแรงดึง นอกจากนี้ พบว่า การเติมผงไม้ลงไปในการคอมพอสิตสามารถปรับปรุงยังสัมมอดูลัสของคอมพอสิตโดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของผงไม้ที่เพิ่มมากขึ้น และที่ปริมาณผงไม้ 20-30 wt% พบว่า ยังสัมมอดูลัสมีค่าสูงกว่า R-PET แสดงให้เห็นว่าการเติมผงไม้ลงไปในการคอมพอสิตสามารถช่วยปรับปรุงความต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของคอมพอสิตได้ ทั้งนี้เนื่องจากผงไม้เป็นวัสดุที่มีสมบัติแข็งตึง (stiffness) จึงเข้าไปลดความสามารถในการเคลื่อนไหวสายโซ่โมเลกุล (chain mobility) ของพอลิเมอร์ หากแต่ที่ปริมาณผงไม้ 5-10 wt% พบว่า ยังสัมมอดูลัสของคอมพอสิตมีค่าต่ำกว่า R-PET ทั้งนี้เนื่องจากผงไม้มีการกระจายตัวไม่ดีจึงทำให้มีปริมาตรอิสระ (free volume) ในเมทริกซ์เพิ่มขึ้น ดังนั้น สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์จึงเคลื่อนไหวได้มากขึ้น และในทำนองเดียวกัน พบว่า ร้อยละการยึดตัวของคอมพอสิต มีค่าต่ำกว่าของพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากเกิดความเค้นสะสม (stress

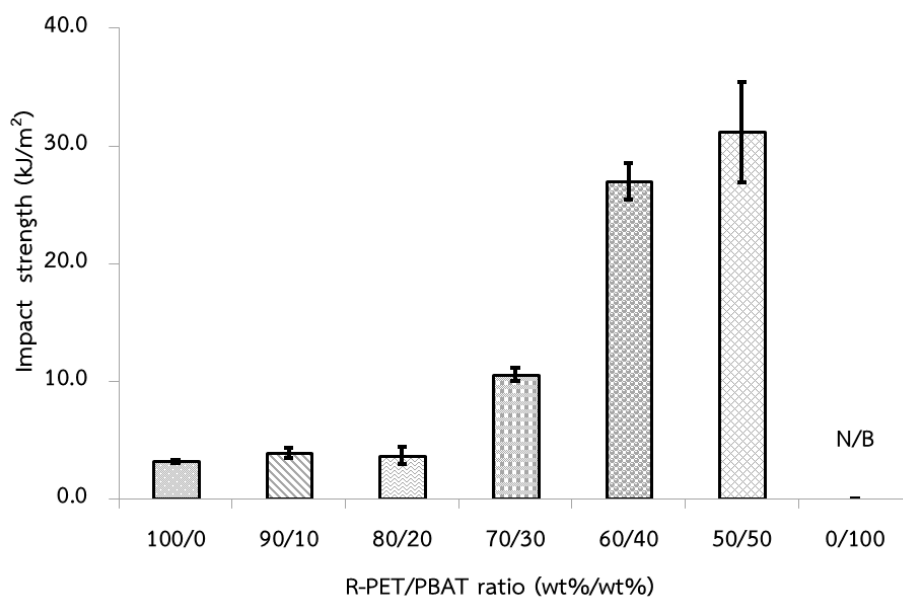
concentration) ภายในชั้นทดสอบที่ทำการเติมผงไม้ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสมบัติแข็งตึง ดังแสดงการเปรียบเทียบสมบัติด้านความทนแรงดึงของคอมพอสิตในลักษณะ stress-strain curves ไว้ในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟความเค้น-ความเครียดของ R-PET, พอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ที่อัตราส่วน 70/30 และคอมพอสิตของ R-PET/PBAT/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

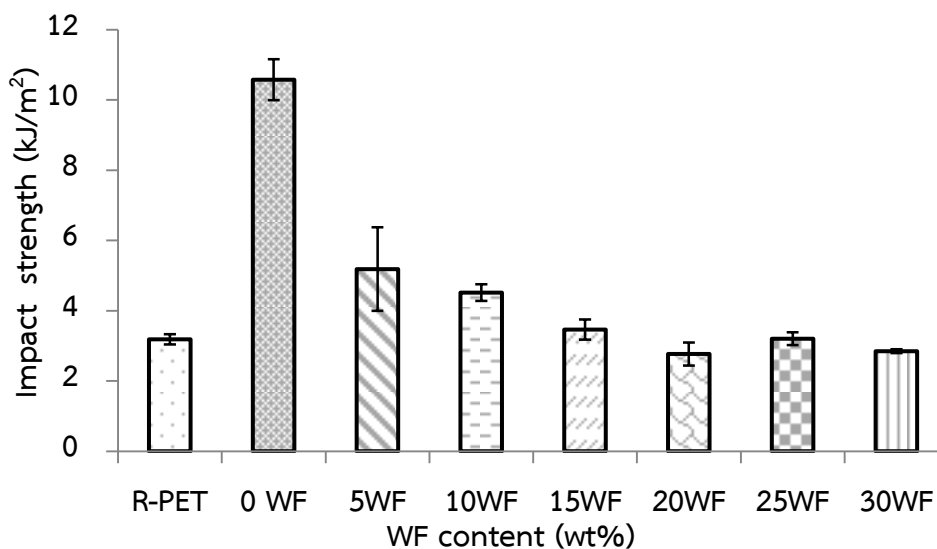
#### 4.2.2 สมบัติความทนแรงกระแทก (impact strength)

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ความทนแรงกระแทกของ R-PET มีค่าค่อนข้างต่ำประมาณ  $3.2 \text{ kJ/m}^2$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่า R-PET เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติแข็งและเปราะ ณ อุณหภูมิห้อง เนื่องจาก R-PET มี  $T_g$  สูงกว่าอุณหภูมิห้อง (ประมาณ 85 องศาเซลเซียส) ขณะที่ชิ้นงาน PBAT ไม่เกิดการแตกหักภายใต้การทดสอบความทนแรงกระแทกที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PBAT เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่นด้านความยืดหยุ่น เนื่องจาก PBAT มี  $T_g$  ต่ำมาก (ประมาณ -30 องศาเซลเซียส) และเมื่อทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมของ R-PET/PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่า พอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าความทนแรงกระแทกสูงกว่า R-PET โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PBAT ที่เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ที่อัตราส่วน 60/40 และ 50/50 พบว่ามีค่าความทนแรงกระแทกสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (สูงกว่า R-PET ประมาณ 7 และ 10 เท่า ตามลำดับ) เนื่องจากมีแนวโน้มที่จะเกิดการกลับเฟส (phase reversion) ของพอลิเมอร์ผสม [19] ดังแสดงการเปรียบเทียบสมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมไว้ในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความทนแรงกระแทกของ R-PET, PBAT และพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ

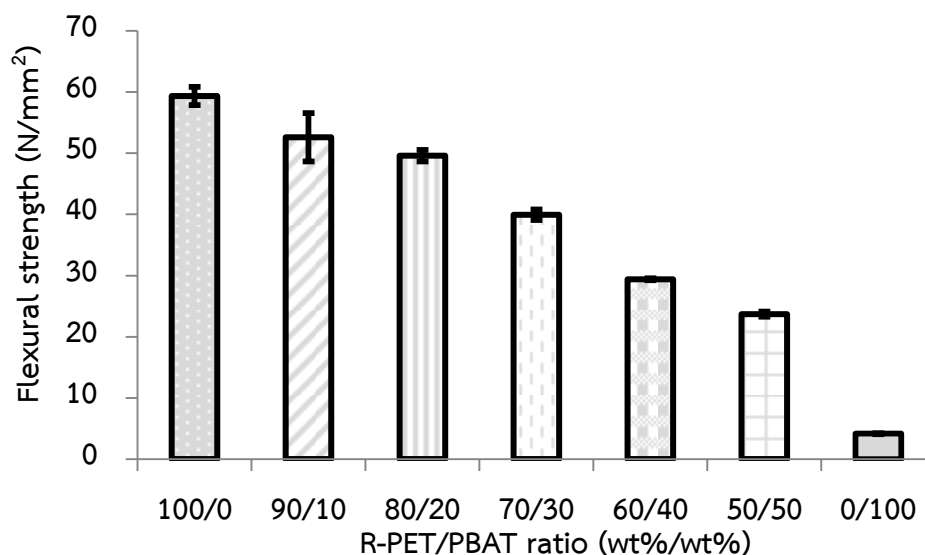
สมบัติความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 เช่นเดียวกันพบว่า การเติมผงไม้ลงไปในคอมพอสิตส่งผลให้ความทนแรงกระแทกมีค่าลดลงตามปริมาณของผงไม้ที่เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงการเปรียบเทียบความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตไว้ในรูปที่ 4.6 ทั้งนี้เนื่องจากผงไม้เป็นวัสดุที่มีสมบัติแข็งตึง จึงเข้าไปลดความสามารถในการเคลื่อนไหวสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ ส่งผลให้ความทนแรงกระแทกลดลง อย่างไรก็ตาม ที่ปริมาณผงไม้ 5-15 wt% พบว่ามีความทนแรงกระแทกสูงกว่า R-PET ทั้งนี้เนื่องจากการมีปริมาตรอิสระในเมทริกซ์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น [20]



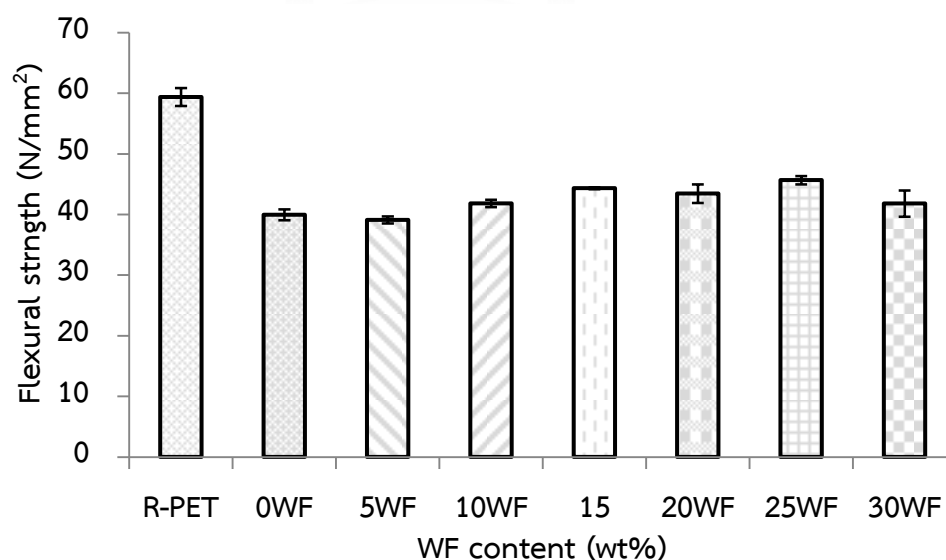
รูปที่ 4.6 ความทนแรงกระแทกของ R-PET, พอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ที่อัตราส่วน 70/30 และคอมพอสิตของ R-PET/PBAT/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

#### 4.2.3 สมบัติความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength)

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ความทนแรงดัดโค้งของ R-PET มีค่าค่อนข้างสูงประมาณ  $59.4 \text{ N/mm}^2$  เนื่องจาก R-PET เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติแข็งตึง ขณะที่ PBAT มีค่าต่ำประมาณ  $4.1 \text{ N/mm}^2$  เนื่องจาก PBAT เป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง จึงทำให้ R-PET มีความทนแรงดัดโค้งสูงกว่า PBAT อย่างเห็นได้ชัด ดังนั้น เมื่อทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมของ R-PET/PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่า พอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีความทนแรงดัดโค้งต่ำกว่า R-PET โดยมีค่าลดลงตามปริมาณของ PBAT ที่เพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมสามารถโค้งงอได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกด ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง ดังแสดงการเปรียบเทียบสมบัติความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมไว้ในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความทนแรงดัดโค้งของ R-PET, PBAT และพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ สมบัติความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิตได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 เช่นเดียวกัน พบว่า การเติมผงไม้ในคอมพอสิตส่งผลให้ความทนแรงดัดโค้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ผงไม้ปริมาณมากกว่า 10 wt% ทั้งนี้เนื่องจากผงไม้เป็นวัสดุที่มีความแข็งตึง จึงเพิ่มความแข็งตึงให้กับคอมพอสิต จึงส่งผลให้คอมพอสิตมีความต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างได้ดี ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง อย่างไรก็ตาม ความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิตยังคงมีค่าต่ำกว่า R-PET ดังแสดงการเปรียบเทียบสมบัติความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิตไว้ในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความทนดัดโค้งของ R-PET, พอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ที่อัตราส่วน 70/30 และคอมพอสิตของ R-PET/PBAT/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

### 4.3 สมบัติทางความร้อน

#### 4.3.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค (DSC)

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของ R-PET, PBAT, พอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT และคอมพอสิต R-PET/PBAT/WF ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดแบบด้วยเทคนิค DSC ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 โดยขึ้นตัวอย่างถูกให้ความร้อนครั้งที่ 1 (first heating scan) ก่อนเพื่อล้างพฤติกรรมทางความร้อน (thermal history) ที่ตกค้างจากกระบวนการขึ้นรูป ซึ่งไม่ใช่พฤติกรรมทางความร้อนที่แท้จริงของขึ้นตัวอย่าง โดยพฤติกรรมทางความร้อนที่ได้จากการทดสอบ ได้แก่ อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว ( $T_g$ ), อุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) และ เอนทัลปีการหลอมเหลว ( $\Delta H_m$ ) โดยพฤติกรรมต่างๆ เหล่านี้สามารถวิเคราะห์ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมที่ปรากฏในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (second heating scan) และสามารถคำนวณระดับความเป็นผลึก (degree of crystallinity,  $X_c$ ) ของ R-PET ได้จากสมการที่ 4.1[18] ขณะที่พฤติกรรมทางความร้อนด้านอุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) และ เอนทัลปีการเกิดผลึก ( $\Delta H_c$ ) สามารถวิเคราะห์ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมที่ปรากฏในขั้นตอนทำให้เย็นตัว (cooling scan)

$$X_c = \frac{\Delta H_m \times 100}{W \times \Delta H_m^\circ} \quad 4.1$$

$X_c$  คือ ร้อยละความเป็นผลึกของ R-PET

$\Delta H_m$  คือ เอนทัลปีของการหลอมเหลว

$\Delta H_m^\circ$  คือ เอนทัลปีของการหลอมเหลว R-PET ที่เกิดผลึก 100% (120 J/g) [18]

$\Delta H_m^\circ$  คือ เอนทัลปีของการหลอมเหลว PBAT ที่เกิดผลึก 100% (114 J/g) [26]

W คือ อัตราส่วนของ R-PET

ตารางที่ 4.2 พฤติกรรมทางความร้อนของ R-PET, PBAT, พอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT และ คอมพอสิต R-PET/PBAT/WF

Sample	$T_g$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)	$T_c$ (°C)	$\Delta H_c$ (J/g)	$X_{c(RPET)}$ (%)
R-PET	84.3	247.8	40.2	200.6	45.6	33.5
PBAT	-30.2	120.7	18.1	40.7	21.0	15.8
<i>R-PET/PBAT(wt%/wt%)</i>						
90/10	58.9	234.7	36.9	191.2	33.8	34.2
80/20	31.5	221.2	24.5	177.1	27.0	25.5
70/30	16.6	209.3	20.6	163.4	33.1	24.5
60/40	5.8	192.6	18.2	147.5	26.0	25.2
50/50	5.4	185.8	16.1	-	-	-
<i>R-PET/PBAT/WF (wt%/wt%/wt%)</i>						
66.5/28.5/5.0	-	248.4	26.6	204.5	33.3	33.3
63.0/27.0/10.0	-	247.8	36.4	204.3	33.1	48.2
59.5/25.5/15.0	-	246.6	31.4	203.3	32.2	44.0
56.0/24.0/20.0	-	245.4	30.6	201.0	29.5	45.6
52.5/22.5/25.0	-	245.5	24.3	199.8	29.8	38.5
49.0/21.0/30.0	-	240.0	26.7	199.6	26.3	45.5

จากตารางที่ 4.2 พบว่า R-PET มี  $T_g$  เท่ากับ 84.3 องศาเซลเซียส ขณะที่ PBAT มี  $T_g$  เท่ากับ -30.2 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมของ R-PET/PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่า ปรากฏ  $T_g$  เพียงค่าเดียวในทุกๆ อัตราส่วน แสดงให้เห็นว่า R-PET และ PBAT สามารถผสมเข้ารวมตัวกันได้อย่างดี (miscible blend) เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเป็นพอลิเอสเทอร์

เหมือนกัน จึงสามารถเข้ารวมตัวกันได้ง่าย นอกจากนี้ พอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมี  $T_g$  ต่ำกว่า R-PET โดยมีค่าลดลงตามปริมาณของ PBAT ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก PBAT มีสมบัติความยืดหยุ่นจึงช่วยส่งเสริมให้สายโซ่โมเลกุลของ R-PET เคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น โดยเฉพาะพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ที่อัตราส่วน 60/40 และ 50/50 พบว่ามี  $T_g$  ลดต่ำลงมากอย่างเห็นได้ชัด (ต่ำกว่า R-PET ประมาณ 16 เท่า) เนื่องจากมีแนวโน้มที่จะเกิดการกลับเฟสของพอลิเมอร์ผสม ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในการทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก และเมื่อทำการเติมผงไม้ลงไปในพอลิเมอร์ผสม 70/30 R-PET/PBAT ที่ทุกอัตราส่วน พบว่า ไม่ปรากฏ  $T_g$  ของคอมพอสิต เนื่องจาก R-PET มีระดับความเป็นผลึกสูงจากการที่ผงไม้ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึก (nucleating agent) ให้กับ R-PET นอกจากนี้ พบว่า R-PET มี  $T_c$  เท่ากับ 200.6 องศาเซลเซียส และ  $X_c$  เท่ากับ 33.5% ขณะที่ PBAT มี  $T_c$  เท่ากับ 40.7 องศาเซลเซียส และ  $X_c$  เท่ากับ 15.8% แสดงให้เห็นว่า R-PET มีความสามารถในการเกิดผลึกได้ดีกว่า PBAT เนื่องจาก PBAT เป็นโคพอลิเมอร์ซึ่งมีโครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอจึงเกิดผลึกได้ยากกว่า ดังนั้น พอลิเมอร์ผสมจึงมีค่า  $T_c$  และ  $X_c$  ต่ำกว่า R-PET และเมื่อเตรียมคอมพอสิตด้วยผงไม้ พบว่า  $T_c$  และ  $X_c$  มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากผงไม้ทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกให้กับ R-PET ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น อย่างไรก็ตาม การเติมผงไม้ในปริมาณมาก (25 และ 30 wt%) พบว่า  $T_c$  และ  $X_c$  มีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มของผงไม้ ซึ่งไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของ R-PET ส่งผลให้ชั้นทดสอบมีความเป็นผลึกลดลงเล็กน้อย สำหรับค่า  $T_m$  จะให้ผลสอดคล้องกับปริมาณผลึก โดย  $T_m$  ของ R-PET (247.8 องศาเซลเซียส) มีค่าสูงกว่า  $T_m$  ของ PBAT (120.7 องศาเซลเซียส) เนื่องจากมีความเป็นผลึกมากกว่า และเมื่อทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่า  $T_m$  ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงตามปริมาณ PBAT ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การเติมผงไม้ในพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ส่งผลให้  $T_m$  ของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

#### 4.3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของ R-PET, PBAT, พอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT และคอมพอสิต R-PET/PBAT/WF ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดแบบ ด้วยเทคนิค TGA ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 โดยเสถียรภาพทางความร้อนที่ได้จากการทดสอบ ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว ( $T_{onset}$ ), อุณหภูมิการสลายตัวร้อยละ 50 ( $T_{50\%}$ ), อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว ( $T_{end set}$ ), และปริมาณชาร์ (char) ในช่วงอุณหภูมิ 25-800 องศาเซลเซียส

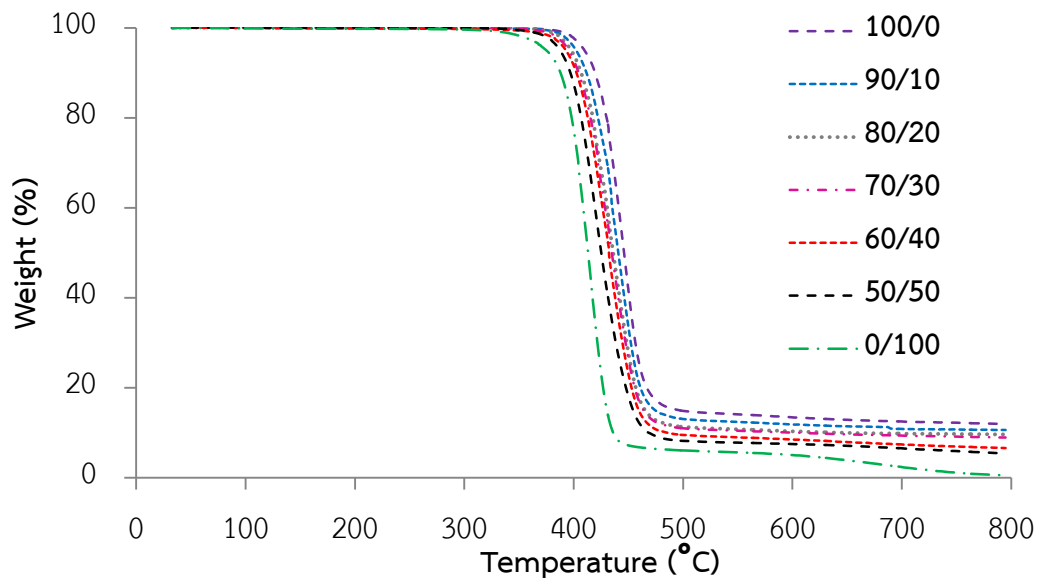


ตารางที่ 4.3 เสถียรภาพทางความร้อนของ R-PET, PBAT, พอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT และคอมพอลิเมอร์ R-PET/PBAT/WF

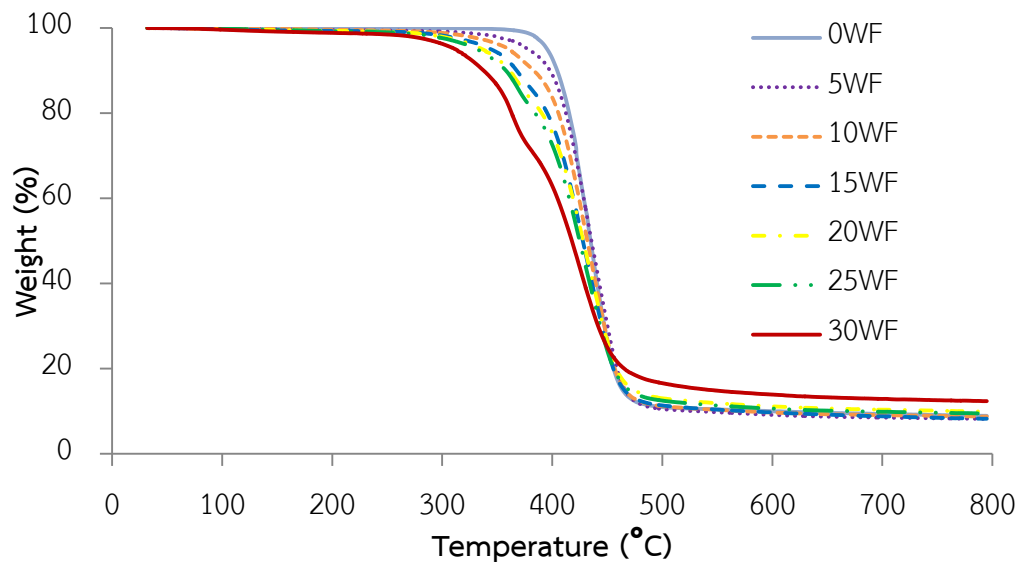
Sample	T <sub>onset</sub> (°C)	T <sub>end set 1</sub> (°C)	T <sub>end set 2</sub> (°C)	T <sub>50</sub> (°C)	%char
R-PET	420.5	463.5	-	446.1	11.9
PBAT	391.3	432.1	-	413.2	0.5
WF	328.9	397.5	-	357.5	19.2
<i>R-PET/PBAT(wt%/wt%)</i>					
90/10	413.7	460.5	-	440.8	10.6
80/20	405.0	459.0	-	436.2	9.6
70/30	404.1	459.1	-	434.8	8.9
60/40	402.3	456.2	-	432.3	6.6
50/50	396.8	449.6	-	425.2	5.4
<i>R-PET/PBAT/WF (wt%/wt%/wt%)</i>					
66.5/28.5/5.0	401.1	-	463.4	435.6	8.2
63.0/27.0/10.0	394.6	383.9	461.4	431.9	8.7
59.5/25.5/15.0	386.7	384.7	460.2	427.8	8.2
56.0/24.0/20.0	384.8	384.3	460.6	428.1	9.9
52.5/22.5/25.0	356.6	388.5	459.2	424.9	9.5
49.0/21.0/30.0	355.0	390.6	454.6	417.9	12.4

จากตารางที่ 4.3 พบว่า R-PET มี T<sub>onset</sub>, T<sub>50</sub>, และ T<sub>end set</sub> มีค่าเท่ากับ 420.5, 446.1 และ 463.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และเหลือปริมาณเถ้า 11.9% ขณะที่ PBAT มี T<sub>onset</sub>, T<sub>50</sub>, และ T<sub>end set</sub> เท่ากับ 391.3, 413.2 และ 432.1 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และเหลือปริมาณเถ้า 0.5% ดังแสดงการเปรียบเทียบเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมในลักษณะเทอร์โมแกรม

ของ TGA ไว้ในรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PBAT มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำกว่า R-PET ดังนั้น เมื่อทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมของ R-PET/PBAT พบว่า พอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วน มี  $T_{onset}$ ,  $T_{50}$ ,  $T_{end\ set}$  และปริมาณถ่านลดลงตามปริมาณของ PBAT ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเติมผงไม้ที่มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำกว่า R-PET และ PBAT ( $T_{onset}$ :  $328.9^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{50}$ :  $357.5^{\circ}\text{C}$ , และ  $T_{end\ set}$ :  $397.5^{\circ}\text{C}$ ) หากแต่เหลือปริมาณถ่านมากกว่า R-PET และ PBAT (char: 19.2%) เนื่องจากผงไม้มีองค์ประกอบหลัก คือ เซลลูโลสซึ่งมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ ขณะที่องค์ประกอบอื่นๆ ในผงไม้ไม่สามารถเกิดการสลายตัวได้หมดภายใต้อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสจึงเกิดเป็นถ่าน พบว่า คอมพอสิตมี  $T_{onset}$  และ  $T_{end\ set}$  ลดลงตามปริมาณผงไม้ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากผงไม้มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ ขณะที่  $T_{end\ set}$  ของคอมพอสิตปรากฏ 2 ตำแหน่ง[21] ที่ปริมาณผงไม้ตั้งแต่ 10 wt% ขึ้นไป โดย  $T_{end\ set}$  ตำแหน่งที่หนึ่งแสดงถึงการสลายตัวของผงไม้ และ  $T_{end\ set}$  ตำแหน่งที่สองแสดงถึงการสลายตัวของพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งพบว่า  $T_{end\ set}$  มีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม 70/30 R-PET/PBAT เนื่องจากถ่านของผงไม้ที่เกิดขึ้นช่วยชะลอการสลายตัวของชิ้นทดสอบ อย่างไรก็ตาม  $T_{end\ set}$  ตำแหน่งที่สองที่ปริมาณผงไม้ 25-30 wt% มีค่าต่ำกว่า  $T_{end\ set}$  ของพอลิเมอร์ผสม 70/30 R-PET/PBAT เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มกันของผงไม้ ดังแสดงการเปรียบเทียบเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิตในเทอร์โมแกรมของ TGA ไว้ในรูปที่ 4.10 อย่างไรก็ตาม การเติมผงไม้ส่งผลทำให้คอมพอสิตมีปริมาณถ่านเพิ่มมากขึ้น โดยถ่านที่เกิดขึ้นปกคลุมพื้นผิวของพอลิเมอร์สามารถป้องกันออกซิเจนไม่ให้แพร่หรือซึมผ่านเข้าไปถึงเนื้อพอลิเมอร์มีผลทำให้คอมพอสิตอาจมีความสามารถต้านทานการลุกไหม้ได้



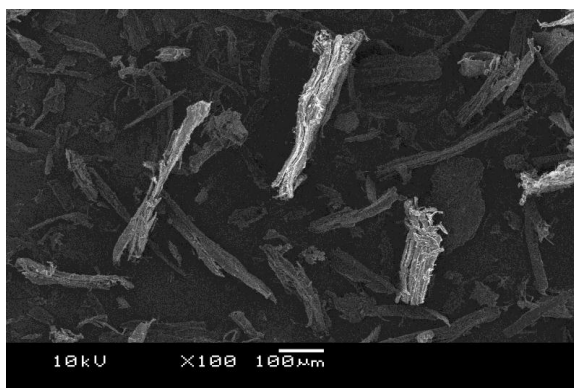
รูปที่ 4.9 TGA เทอร์โมแกรมของ R-PET, PBAT และพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ



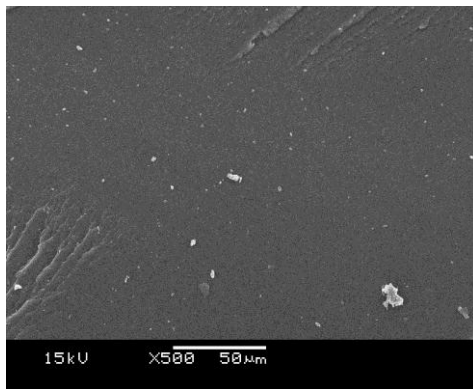
รูปที่ 4.10 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ที่อัตราส่วน 70/30 และคอมพอสิต R-PET/PBAT/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

#### 4.4 สัณฐานวิทยา (morphology)

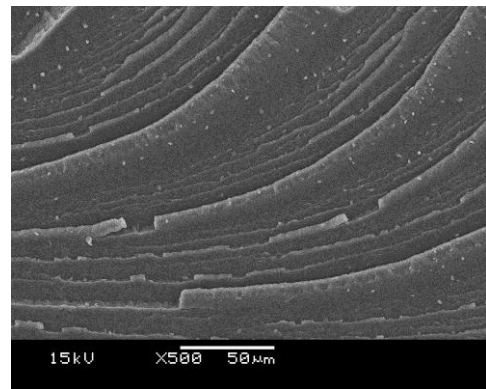
รูปที่ 4.11 แสดงสัณฐานวิทยาของผงไม้ที่กำลังขยาย 100 เท่า นอกจากนี้ รูปที่ 4.12 แสดงสัณฐานวิทยาของชิ้นทดสอบบริเวณรอยแตกหักหลังการทดสอบความทนแรงกระแทกของ R-PET และพอลิเมอร์ผสมR-PET/PBAT ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดแบบที่กำลังขยาย 500 เท่า อย่างไรก็ตาม ไม่สามารถตรวจสอบสัณฐานวิทยาของ PBAT ได้ เนื่องจากชิ้นทดสอบไม่สามารถทำให้แตกหักได้ที่อุณหภูมิห้อง



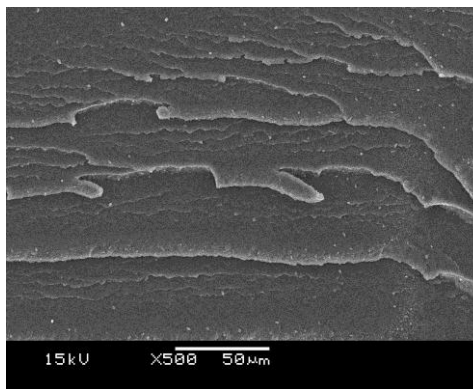
รูปที่ 4.11 สัณฐานวิทยาของผงไม้ที่กำลังขยาย 100 เท่า



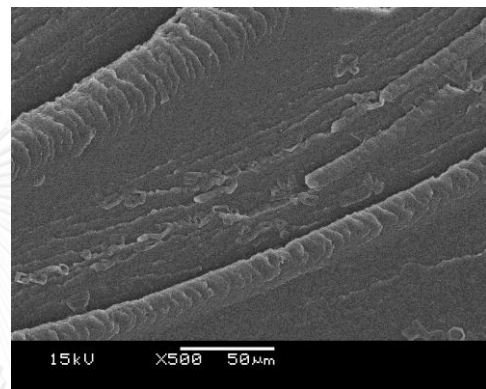
100/0 R-PET/PBAT



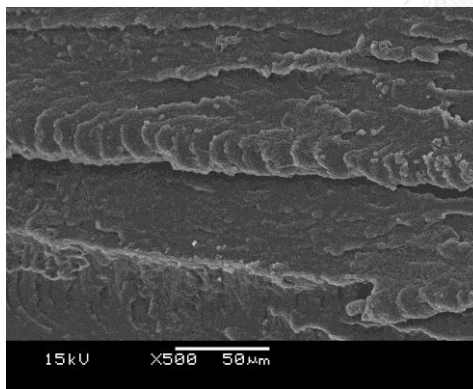
90/10 R-PET/PBAT



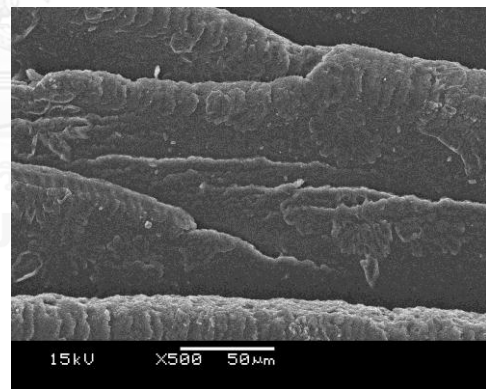
80/20 R-PET/PBAT



70/30 R-PET/PBAT



60/40 R-PET/PBAT



50/50 R-PET/PBAT

#### รูปที่ 4.12 สัณฐานวิทยาของชั้นทดสอบของ R-PET และพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT

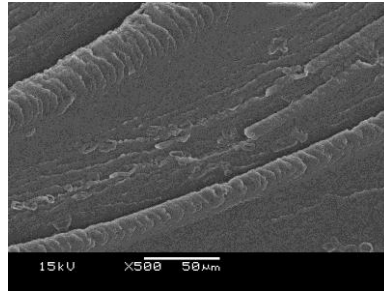
ที่กำลังขยาย 500 เท่า

จากรูปที่ 4.11 พบว่า ผงไม่มีลักษณะอนุภาคเป็นแท่ง (rod-shape) ซึ่งมีขนาดความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D ratio) ค่อนข้างหลากหลาย โดยเฉลี่ยประมาณ 3-10 โดยมีพื้นผิวขรุขระ อีกทั้งมีเศษสะเก็ดของผงไม้ติดอยู่ และจากรูปที่ 4.12 พบว่า สัณฐานวิทยาของ R-PET มีพื้นผิวราบเรียบ ซึ่งแสดงถึงเอกลักษณ์ของวัสดุที่มีสมบัติแข็งเปราะ และเมื่อทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมของ R-PET/PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่า ชั้นทดสอบมีพื้นผิวหยาบและขรุขระมากขึ้น อีกทั้งมีแนวสันต่างๆ

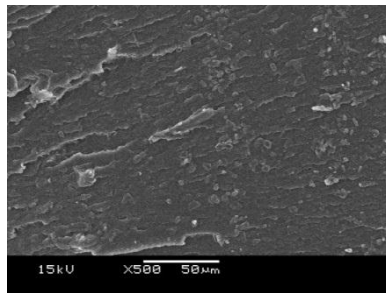
อยู่เป็นจำนวนมากตามปริมาณ PBAT ที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชั้นทดสอบเริ่มมีสมบัติความยืดหยุ่นสูง เนื่องจาก PBAT ช่วยส่งเสริมความยืดหยุ่นให้กับ R-PET

นอกจากนี้ รูปที่ 4.13 แสดงสัณฐานวิทยาของชั้นทดสอบบริเวณรอยแตกหักหลังการทดสอบความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT 70/30 และคอมพอสิต R-PET/PBAT/WF ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดแบบที่กำลงขยาย 500 เท่า

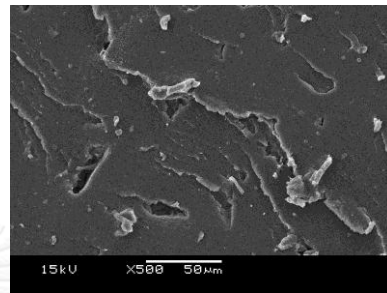




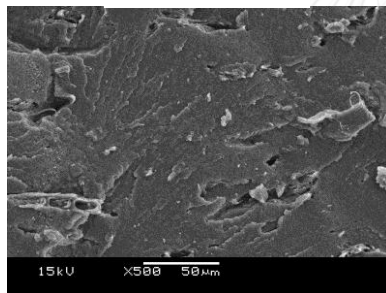
70/30 R-PET/PBAT



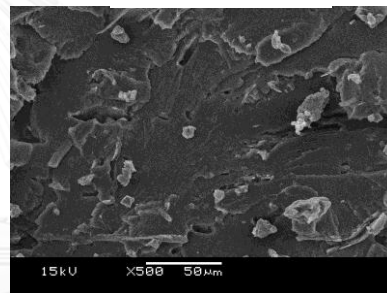
66.5/28.5/5.0



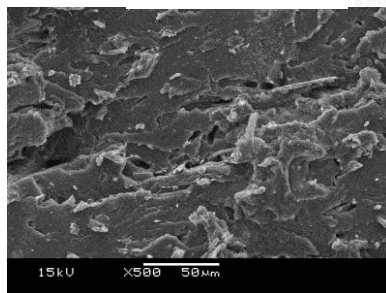
63.0/27.0/10.0



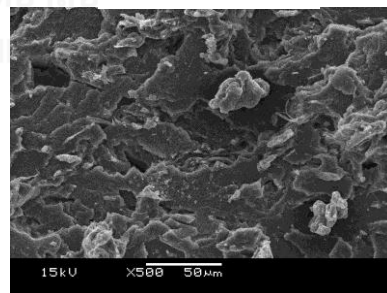
59.5/25.5/15.0



56.0/24.0/20.0



52.5/22.5/25.0



49.0/21.0/30.0

รูปที่ 4.13 สัณฐานวิทยาของชนิดทดสอบบริเวณรอยแตกหักของพอลิเมอร์ผสม 70/30 R-PET/PBAT และคอมพอสิต R-PET/PBAT/WF ที่กำลังขยาย 500 เท่า

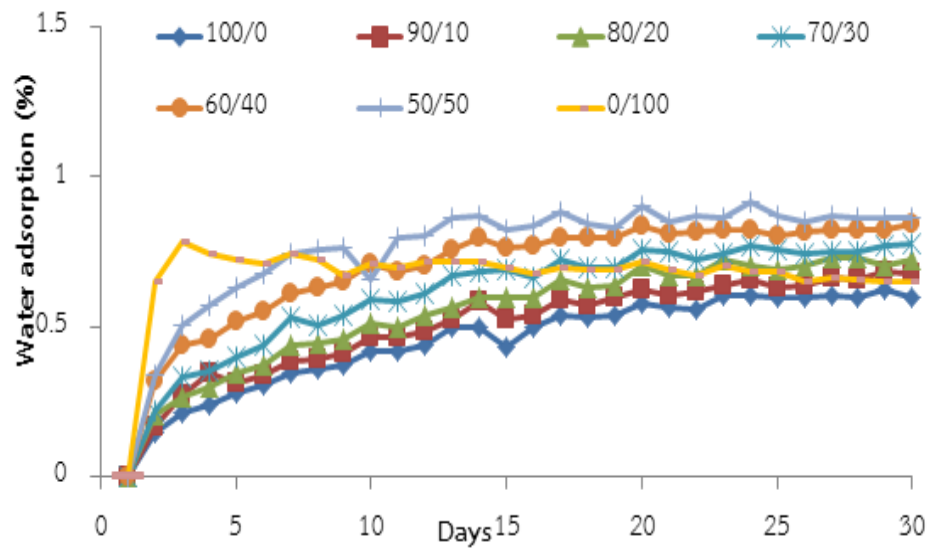
จากรูปที่ 4.13 พบว่า สัณฐานวิทยาของคอมพอลิเมอร์มีผิวราบเรียบมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT 70/30 ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงที่เพิ่มมากขึ้นของคอมพอลิเมอร์ และยังตรวจพบหลุม (hole) ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งเกิดจากการหลุดออกของผงไม้ระหว่างทำการทดสอบความทนแรงกระแทก เนื่องจากการไม่มีอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์และผงไม้ นอกจากนี้ ที่ปริมาณผงไม้ 25 และ 30 wt% เริ่มพบกลุ่มก้อนของผงไม้ หรือหลุมขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งแสดงถึงการเกาะกลุ่มของผงไม้ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดสอบสมบัติเชิงกลที่ได้กล่าวมาข้างต้น

#### 4.5 การดูดซึมน้ำ (Water absorption)

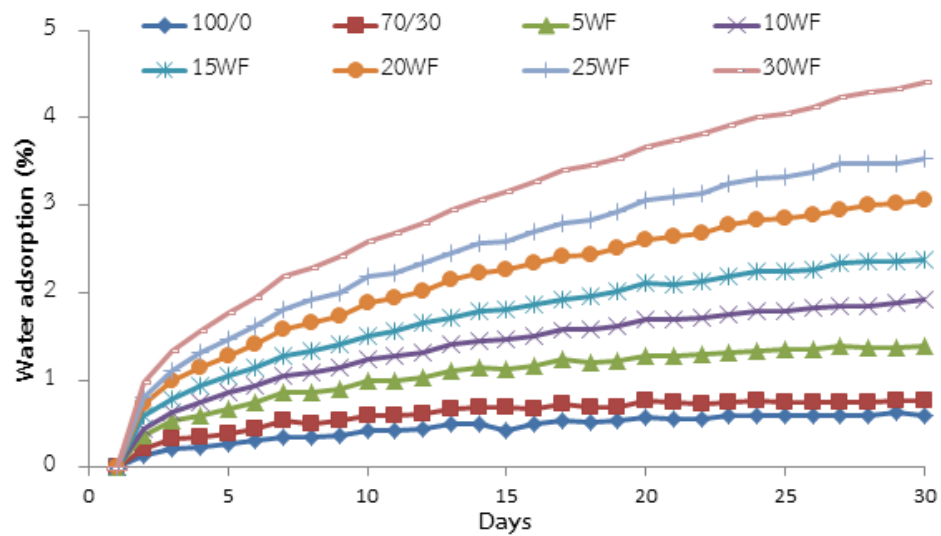
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซึมน้ำสะสมกับจำนวนวันที่แช่น้ำของ R-PET, PBAT, พอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT จากการทดลองพบว่า R-PET มีการดูดซึมน้ำน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับเวลาที่เท่ากันและสามารถดูดซึมน้ำได้ดีในช่วง 5 วันแรกและเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปตั้งแต่สัปดาห์ที่ 3 ของการทดลอง ส่วน PBAT ในช่วงประมาณ 3 วันแรกของการทดลองสามารถดูดซึมน้ำได้เป็นอย่างดี และเริ่มคงที่ในช่วงสัปดาห์ที่ 2 และเมื่อเพิ่มปริมาณของ PBAT ในพอลิเมอร์ผสม พบว่ามีการดูดซึมน้ำได้ดีในช่วงประมาณ 5 วันแรก ซึ่งสามารถดูดซึมน้ำได้เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PBAT ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก PBAT มีส่วนที่มีความยืดหยุ่นมากกว่า R-PET จึงทำให้โครงสร้างเปิดมากกว่า ทำให้น้ำเข้าไปได้ง่ายกว่า เมื่อเพิ่ม PBAT มากขึ้นจึงทำให้การดูดซึมน้ำจึงเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อเวลาผ่านไปในช่วงสัปดาห์ที่ 2 พอลิเมอร์ผสมของ R-PET/PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆจะเริ่มคงที่

เมื่อนำพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ที่อัตราส่วน 70/30 และพอลิเมอร์คอมพอลิเมอร์ R-PET/PBAT/WF ในอัตราส่วนต่างๆ ทดสอบการดูดซึมน้ำ (รูปที่ 4.15) พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณผงไม้มากขึ้น ปริมาณการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามจำนวนวันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของผงไม้ส่วนใหญ่เป็นเซลลูโลสที่มีความชอบน้ำ (hydrophilic)





รูปที่ 4.14 ปริมาณการดูดซึมน้ำสะสมกับจำนวนวันที่แช่น้ำของ R-PET, PBAT และพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.15 ปริมาณการดูดซึมน้ำสะสมกับจำนวนวันที่แช่น้ำของ R-PET, พอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ที่อัตราส่วน 70/30 และคอมพอสิต R-PET/PBAT/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมของ R-PET/PBAT และคอมพอสิตของ R-PET/PBAT/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ และขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ และทำการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตที่เตรียมได้ ซึ่งมีผลดังต่อไปนี้

5.1.1 จากการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT พบว่าความทนแรงดึงและยังสัมมูล์ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับ R-PET และมีค่าลดลงตามปริมาณของ PBAT ที่เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะที่ปริมาณ PBAT มากกว่า 40 wt% พบว่าความทนแรงดึงและยังสัมมูล์มีค่าต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเจน อย่างไรก็ตาม การผสม PBAT ลงใน R-PET ส่งผลให้ร้อยละการยืดตัวของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PBAT ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงการปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงและเปราะของ R-PET ได้รับการปรับปรุง ซึ่งเมื่อพิจารณาสมบัติด้านความทนแรงดึง จึงได้เลือกพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 70/30 R-PET/PBAT มาทำการเตรียมคอมพอสิตด้วยผงไม้ที่อัตราส่วนต่างๆ ต่อไป และจากการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงของคอมพอสิต R-PET/PBAT/WF พบว่า การเติมผงไม้ลงในพอลิเมอร์ผสมส่งผลให้ยังสัมมูล์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของผงไม้ที่เพิ่มมากขึ้น ขณะที่ร้อยละการยืดตัวของคอมพอสิตมีค่าลดลงตามปริมาณของผงไม้ที่เพิ่มขึ้น ส่วนความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมได้รับการปรับปรุงเมื่อทำการเติมผงไม้ที่ปริมาณมากกว่า 25 wt% ขึ้นไป

5.1.2 จากการทดสอบความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PBAT ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ปริมาณ PBAT มากกว่า 40 wt% พบว่า ความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน และเมื่อทำการเติมผงไม้ลงในพอลิเมอร์ผสม 70/30 R-PET/PBAT พบว่า ความทนแรงกระแทกมีค่าลดลงตามปริมาณของผงไม้ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การเติมผงไม้ที่ปริมาณต่ำกว่า 10 wt% พบว่า มีค่าความทนแรงกระแทกสูงกว่า R-PET

5.1.3 จากการทดสอบความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT พบว่า ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงตามปริมาณของ PBAT ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเติมผงไม้ลง

ในพอลิเมอร์ผสม 70/30 R-PET/PBAT พบว่า ความทนแรงดัดโค้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ผงไม้ ปริมาณมากกว่า 10 wt%

5.1.4 จากการวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ด้วยเทคนิค DSC พบว่า สามารถตรวจพบ  $T_g$  เพียงตำแหน่งเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ดีของพอลิเมอร์ผสม และจากการศึกษาความเป็นผลึก พบว่า ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมลดลงตามปริมาณของ PBAT ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเติมผงไม้ในพอลิเมอร์ผสม 70/30 R-PET/PBAT พบว่า ไม่สามารถตรวจพบ  $T_g$  ของคอมพอสิต เนื่องจากผงไม้ทำหน้าที่เป็นสารก่อกวนเคลียสผลึกให้กับ R-PET ส่งผลให้คอมพอสิตมีความเป็นผลึกมากขึ้น

5.1.5 จากการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ด้วยเทคนิค TGA พบว่า เสถียรภาพทางความร้อนและปริมาณเถ้าขารของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าลดลงตามปริมาณของ PBAT ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเติมผงไม้ในพอลิเมอร์ผสม 70/30 R-PET/PBAT พบว่า เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิตลดลงตามปริมาณผงไม้ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ สามารถตรวจพบ  $T_{end\ set}$  สองตำแหน่ง ซึ่งแสดงถึงการสลายตัวของผงไม้และพอลิเมอร์ ตามลำดับ โดยอุณหภูมิการสลายตัวตำแหน่งที่สองมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเติมผงไม้ปริมาณน้อยกว่า 25 wt% นอกจากนี้ การเติมผงไม้ส่งผลให้มีปริมาณเถ้าขารเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้คอมพอสิตมีความสามารถด้านทานการลุกไหม้ได้

5.1.6 จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT ด้วยเทคนิค SEM พบว่า พื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมมีลักษณะหยาบและขรุขระเพิ่มขึ้น ตามปริมาณ PBAT ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า R-PET ได้รับการปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงและเปราะด้วย PBAT และเมื่อเติมผงไม้ในพอลิเมอร์ผสม 70/30 R-PET/PBAT พบว่า พื้นผิวของคอมพอสิตมีความเรียบขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม และมีหลุมที่เกิดจากการหลุดออกของผงไม้ระหว่างทดสอบความทนแรงกระแทก อีกทั้งตรวจพบการเกาะกลุ่มของผงไม้เมื่อเติมผงไม้ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น

5.1.7 จากการทดสอบการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสม R-PET/PBAT พบว่า ขึ้นทดสอบมีความสามารถในการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ และเมื่อเติมผงไม้ในพอลิเมอร์ผสม 70/30 R-PET/PBAT พบว่า ขึ้นทดสอบมีความสามารถในการดูดซึมน้ำมากขึ้นตามปริมาณผงไม้ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า การเติมผงไม้ช่วยส่งเสริมความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพให้กับผลิตภัณฑ์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรใช้สารคู่ควบ เช่น silane เป็นต้น เพื่อปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างผงไม้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์

5.2.2 ทดลองใช้พอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพประเภทอื่น เช่น PLA เป็นต้น แทนการใช้ PBAT



## รายการอ้างอิง

1. *Polyethylene terephthalate*. 2010; Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:PET.png>.
2. *Dimethyl terephthalate*. Available from: [http://en.wikipedia.org/wiki/Dimethyl\\_terephthalate](http://en.wikipedia.org/wiki/Dimethyl_terephthalate).
3. *Ethylene glycol*. Available from: [http://en.wikipedia.org/wiki/Ethylene\\_glycol](http://en.wikipedia.org/wiki/Ethylene_glycol).
4. Ashveen V. Nand, et al., *Characterization of polyethylene terephthalate/polyaniline blends as potential antioxidant materials*. *Materials Chemistry and Physics*, 2012. **134**: p. 443– 450.
5. พิมพ์พันธุ์, ว., เอกสารประกอบการสอนวิชาพลาสติกกรีไซเคิล. 2555, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
6. *Poly(butylene adipate-co-terephthalate)* Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Polybutyrate#Preparation>
7. ZHU, et al., *Synthesis and characterization of poly(butylene adipate-coterephthalate) catalyzed by rare earth stearates*. *Chinese Journal of Chemistry*, 2007. **25**: p. 1581—1583.
8. ecoflex®, *Ecoflex\_F\_Blend\_C1200*.
9. หงวนไธสง., พ.พ.แ.ภ., การเตรียมคอมพอสิตของพอลิโพรพิลีน/ทัลก์/แมกนีเซียมออกไซด์ ซัลเฟต. 2552, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
10. J. G. Gwon, et al., *microcellular structures of high density polyethylene/wood fiber composite using chemical foaming agent*, in *18TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS*.
11. ไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน Available from: <http://www.woodworking.inthai.co>.
12. เทคโนโลยีพอลิเมอร์. Available from: [http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable\\_plastic/bio\\_de\\_plas.html](http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/bio_de_plas.html).
13. เตชะบุญเกียรติ, ว., เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชาพอลิเมอร์ชีวภาพทางการแพทย์. 2553, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
14. machine-ys. *Injection*. Available from: <http://machine-ys.en.made-in-china.com>.

15. abt-plastic. *Injection Unit* Available from: <http://www.abt-plastic.com/th/news-th/6-news-th-00004>.
16. *Injection*. Available from: [http://www.plaztek.org/knowledge3\\_.html](http://www.plaztek.org/knowledge3_.html).
17. สิริสุข., ร., *Injection Molding*. เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชาการกระบวนการผลิตพอลิเมอร์. . 2553, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
18. Srithep, Y., et al., *Processing and characterization of recycled poly(ethylene terephthalate) blends with chain extenders, thermoplastic elastomer, and/or poly(butylene adipate-co-terephthalate)*. *Polymer Engineering & Science*, 2011. **51**(6): p. 1023-1032.
19. Long Jiang, M.P.W., and Jinwen Zhang, *Study of biodegradable polymer blends of poly(lactic acid) with poly(butylene succinate adipate) blends*. *Biomacromolecules*, 2006. **7**: p. 199-207.
20. Petinakis, E., et al., *Effect of Matrix-Particle Interfacial Adhesion on the Mechanical Properties of Poly(lactic acid)/Wood-Flour Micro-Composites*. *Journal of Polymers and the Environment*, 2009. **17**(2): p. 83-94.
21. Girija, B.G., R.R.N. Sailaja, and G. Madras, *Thermal degradation and mechanical properties of PET blends*. *Polymer Degradation and Stability*, 2005. **90**(1): p. 147-153.
22. standard, A., *Designation: D 638 – 03*.
23. international, A. *ASTM D 638*. Available from: <http://www1.odn.ne.jp/aal63880/CUTTER01.htm>.
24. ngb-netzsch. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน. Available from: <http://www.ngb-netzsch.com.cn/products/tg/tg209f3.html>.
25. ngb-netzsch. เครื่องดีพีเพอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์. Available from: <http://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/products-solutions/differential-scanning-calorimetry/dsc-204-f1-phoenix.html>.
26. Al-Itry, R., K. Lamnawar, and A. Maazouz, *Improvement of thermal stability, rheological and mechanical properties of PLA, PBAT and their blends by reactive extrusion with functionalized epoxy*. *Polymer Degradation and Stability*, 2012. **97**(10): p. 1898-1914.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



## ภาคผนวก ก

### สมบัติเชิงกล

ตาราง ก-1 ค่าความทนแรงดึง ยั่งส์มอดุลัสและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต

100/0 RPET/PBAT	tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	% strain (%)
ชั้นที่ 1	65.06	2247.26	5.46
ชั้นที่ 2	64.92	2239.40	5.06
ชั้นที่ 3	65.34	2214.22	5.32
ชั้นที่ 4	64.96	2215.63	5.13
ชั้นที่ 5	65.42	2227.99	5.36
mean	65.13	2226.81	5.27
STDEV	0.30	17.80	0.16

90/10 RPET/PBAT	tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	% strain (%)
ชั้นที่ 1	59.08	2017.56	4.92
ชั้นที่ 2	57.87	2007.70	4.96
ชั้นที่ 3	57.43	2003.68	5.04
ชั้นที่ 4	59.04	2011.90	5.43
ชั้นที่ 5	57.99	2043.19	5.11
mean	58.15	2019.59	5.09
STDEV	0.82	20.85	0.20

80/20 RPET/PBAT	tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	% strain (%)
ชั้นที่ 1	49.81	1781.94	6.83
ชั้นที่ 2	47.72	1760.96	6.00
ชั้นที่ 3	48.77	1809.30	6.00
ชั้นที่ 4	47.15	1773.66	4.94
ชั้นที่ 5	47.67	1770.67	5.65
mean	47.70	1765.82	5.88
STDEV	0.03	6.87	0.68

70/30 RPET/PBAT	tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	% strain (%)
ชั้นที่ 1	42.42	1609.48	9.95
ชั้นที่ 2	44.30	1638.32	9.52
ชั้นที่ 3	42.90	1699.90	9.65
ชั้นที่ 4	43.14	1602.56	8.94
ชั้นที่ 5	42.02	1599.53	9.05
mean	42.45	1629.96	9.42
STDEV	0.44	42.00	0.42

60/40 RPET/PBAT	tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	% strain (%)
ชั้นที่ 1	29.94	1208.30	12.05
ชั้นที่ 2	29.80	1188.86	12.10
ชั้นที่ 3	29.49	1198.78	12.52
ชั้นที่ 4	29.86	1193.98	12.14
ชั้นที่ 5	29.61	1172.51	12.45
mean	29.74	1192.49	12.25
STDEV	0.18	13.27	0.21

50/50 RPET/PBAT	tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	% strain (%)
ชั้นที่ 1	23.15	927.70	12.53
ชั้นที่ 2	22.68	883.38	12.56
ชั้นที่ 3	22.45	865.85	12.22
ชั้นที่ 4	22.46	887.65	12.28
ชั้นที่ 5	22.96	922.58	12.18
mean	22.74	897.43	12.35
STDEV	0.31	26.64	0.18

0/100 RPET/PBAT	tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	% strain (%)
ชั้นที่ 1	14.86	90.00	N/B
ชั้นที่ 2	14.35	82.57	N/B
ชั้นที่ 3	15.40	86.68	N/B
ชั้นที่ 4	15.20	85.46	N/B
ชั้นที่ 5	15.21	81.12	N/B
mean	15.00	85.17	N/B
STDEV	0.41	3.49	N/B

66.5/28.5/5.0 R-PET/PBAT/WF	tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	% strain (%)
ชั้นที่ 1	29.19	1604.99	2.3
ชั้นที่ 2	29.66	1636.14	2.44
ชั้นที่ 3	27.28	1571.25	2.24
ชั้นที่ 4	29.38	1617.08	2.3
ชั้นที่ 5	28.73	1497.03	2.68
mean	28.85	1585.30	2.39
STDEV	0.94	54.71	0.18

63.0/27.0/10.0 R-PET/PBAT/WF	tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	% strain (%)
ชั้นที่ 1	37.75	1865.10	3.12
ชั้นที่ 2	33.88	1954.45	2.43
ชั้นที่ 3	37.67	1813.20	3.84
ชั้นที่ 4	36.23	1935.53	2.80
ชั้นที่ 5	35.79	1927.85	2.73
mean	36.26	1899.23	2.98
STDEV	1.59	58.63	0.54

59.5/25.5/15.0 R-PET/PBAT/WF	tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	% strain (%)
ชั้นที่ 1	41.94	2244.43	3.46
ชั้นที่ 2	41.38	2274.89	3.01
ชั้นที่ 3	40.76	2130.31	3.43
ชั้นที่ 4	41.96	2291.74	3.41
ชั้นที่ 5	41.47	2264.46	3.49
mean	41.50	2241.17	3.36
STDEV	0.49	64.30	0.20

56.0/24.0/20.0 R-PET/PBAT/WF	tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	% strain (%)
ชั้นที่ 1	42.56	2655.87	2.93
ชั้นที่ 2	41.52	2637.66	2.53
ชั้นที่ 3	38.74	2560.79	2.33
ชั้นที่ 4	40.65	2643.86	2.42
ชั้นที่ 5	42.34	2591.95	2.73
mean	41.16	2618.03	2.59
STDEV	1.55	40.13	0.24

52.5/22.5/25.0 R-PET/PBAT/WF	tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	% strain (%)
ชั้นที่ 1	44.17	2763.95	3.04
ชั้นที่ 2	44.09	2830.29	2.88
ชั้นที่ 3	44.14	2788.86	2.96
ชั้นที่ 4	44.19	2825.05	2.89
ชั้นที่ 5	44.67	2945.5	2.95
mean	44.25	2830.73	2.94
STDEV	0.24	69.67	0.06



R-PET/ PBAT/WF	ค่าพลังงาน (kJ/m <sup>2</sup> )								
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	ชั้นที่ 6	ชั้นที่ 7	MEAN	SD
100/0	2.99	3.08	3.13	3.16	3.20	3.36	3.39	3.19	0.14
70/30	9.72	10.32	10.45	10.4 3	10.52	11.05	11.56	10.58	0.58
66.5/28.5/ 5	4.97	4.87	3.88	5.82	4.74	4.47	7.54	5.18	1.19
63.0/27.0/ 10	4.43	4.53	4.28	4.32	4.93	4.38	4.74	4.52	0.24
59.5/25.5/ 15	3.77	3.21	3.67	3.46	3.80	3.17	3.16	3.46	0.29
56.0/24.0/ 20	2.80	2.88	2.96	3.06	2.95	2.66	2.08	2.77	0.33
52.5/22.5/ 25	3.28	3.20	3.22	3.30	3.47	2.96	2.99	3.20	0.18
49.0/21.0/ 30	2.84	2.82	2.93	2.86	2.82	2.90	2.77	2.85	0.05



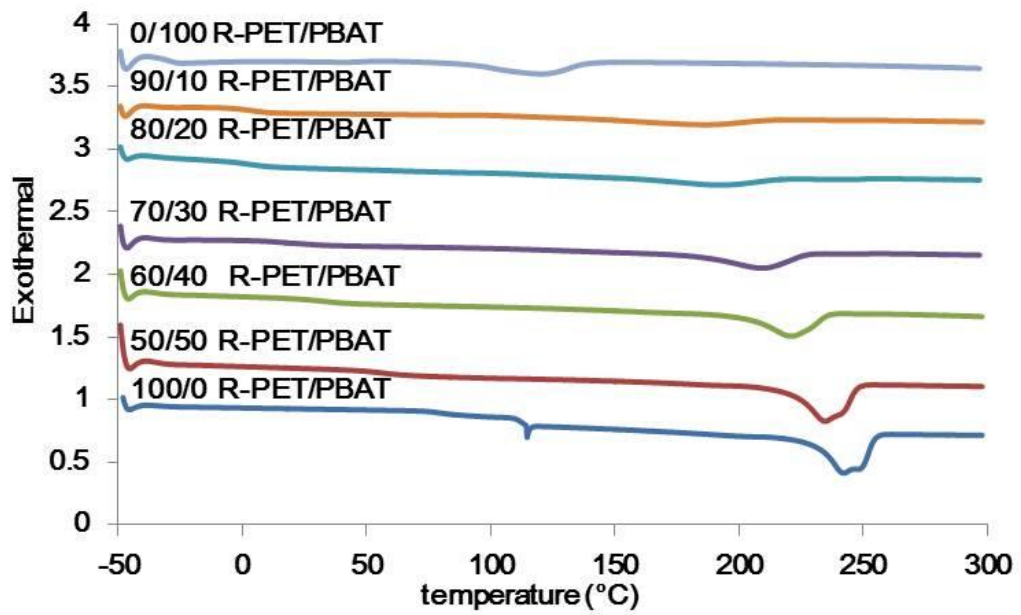
ตาราง ก-3 ค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต

flexural	3 Point bend (N/mm <sup>2</sup> )						
R-PET/PBAT	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	mean	SD
100/0	60.51	58.80	57.01	60.45	60.00	59.35	1.48
90/10	51.54	48.96	49.30	58.26	55.01	52.61	3.97
80/20	50.90	49.94	49.56	49.36	48.25	49.60	0.96
70/30	40.53	40.36	40.56	39.77	38.47	39.94	0.88
60/40	29.57	29.53	29.25	29.24	29.36	29.39	0.15
50/50	24.32	23.85	23.64	23.49	23.15	23.69	0.43
0/100	4.07	4.06	4.24	4.17	4.18	4.14	0.08

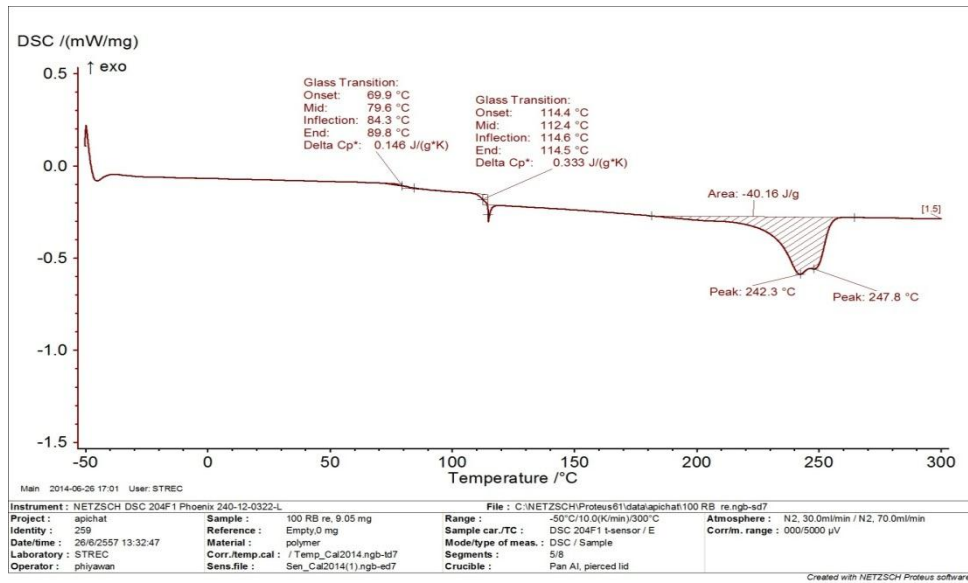
flexural	3 Point bend (N/mm <sup>2</sup> )						
R-PET/PBAT/WF	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	mean	SD
100/0	60.51	58.80	57.01	60.45	60.00	59.35	1.48
70/30	40.53	40.36	40.56	39.77	38.47	39.94	0.88
66.5/28.5/5	39.14	39.61	38.61	39.69	38.39	39.09	0.58
63.0/27.0/10	42.65	42.08	41.81	41.37	41.14	41.81	0.60
59.5/25.5/15	44.50	44.24	44.37	44.06	44.47	44.33	0.18
56.0/24.0/20	44.40	41.67	44.40	41.91	44.83	43.44	1.52
52.5/22.5/25	44.72	45.70	45.33	46.01	46.53	45.66	0.68
49.0/21.0/30	39.80	39.99	41.37	42.89	44.95	41.80	2.15

ภาคผนวก ข  
สมบัติทางความร้อน

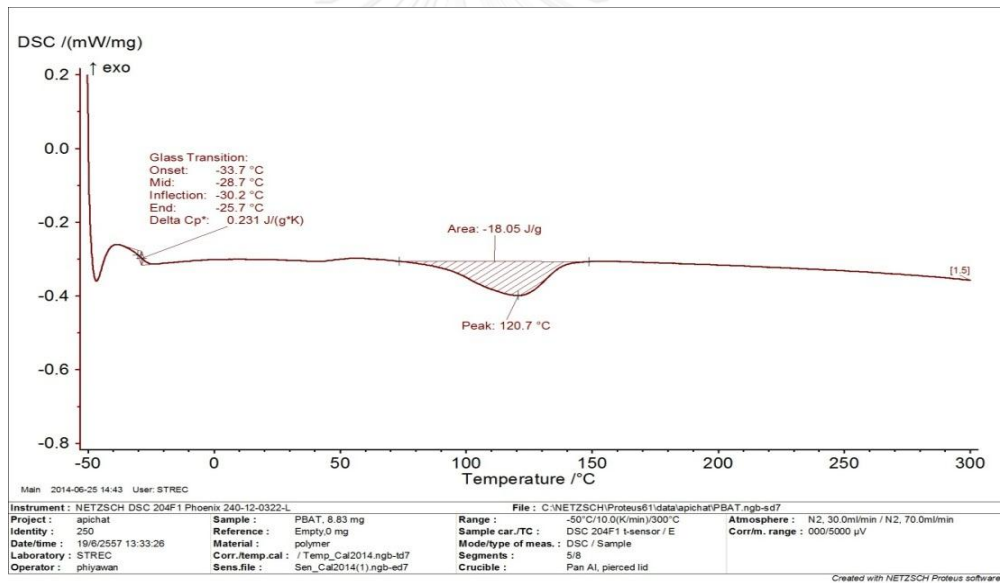
DSC เทอร์โมแกรมจาก 2<sup>nd</sup> heating scan



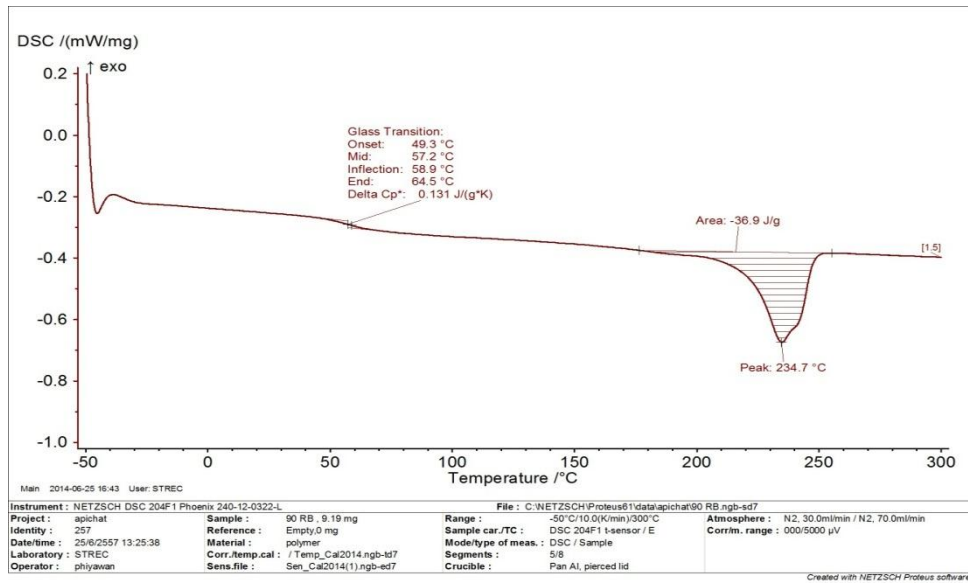
รูปที่ ข-1 DSCเทอร์โมแกรมของ R-PET, PBAT และพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ



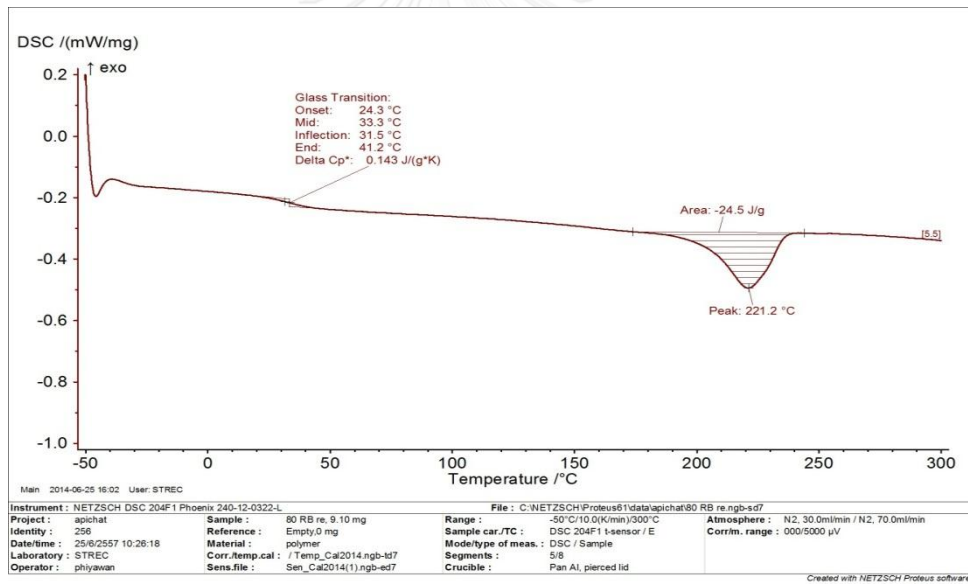
รูปที่ ข-2 DSC เทอร์โมแกรมของ R-PET



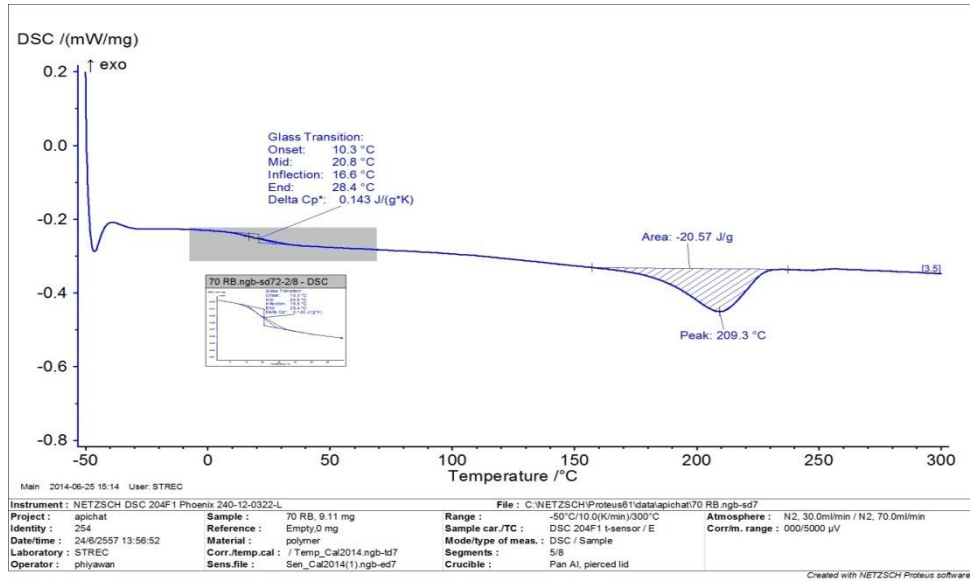
รูปที่ ข-3 DSC เทอร์โมแกรมของ PBAT



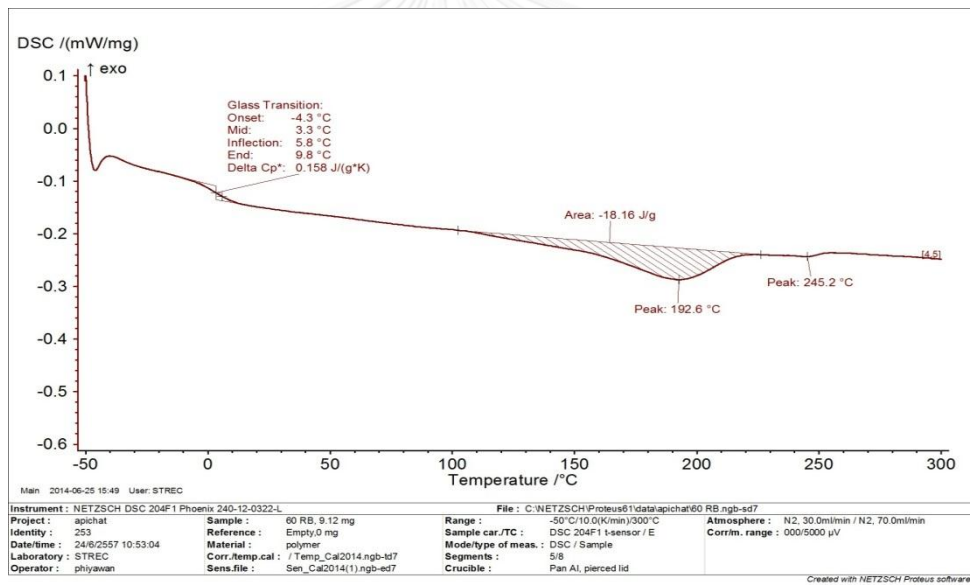
รูปที่ ข-4 DSC เทอร์โมแกรมของ 90/10 R-PET/PBAT



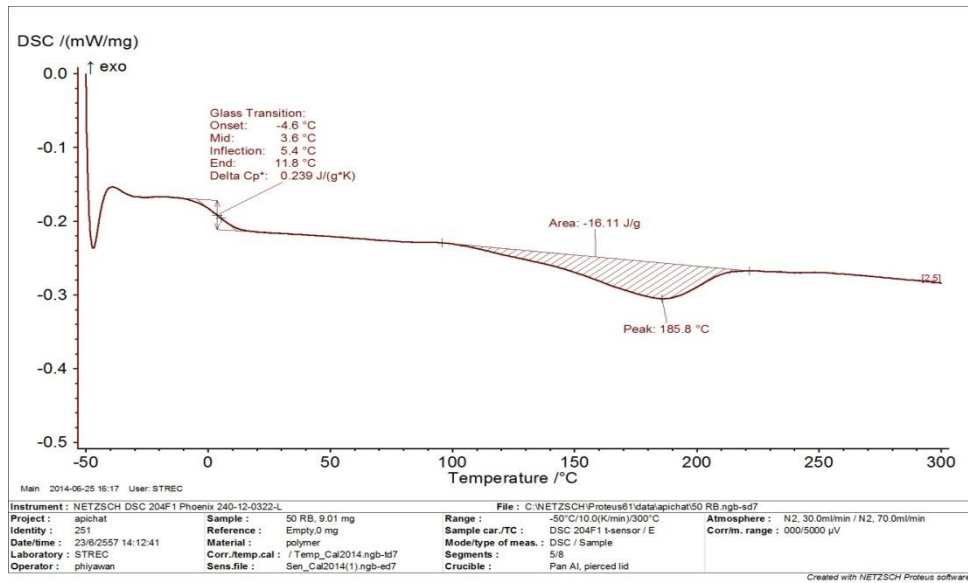
รูปที่ ข-5 DSC เทอร์โมแกรมของ 80/20 R-PET/PBAT



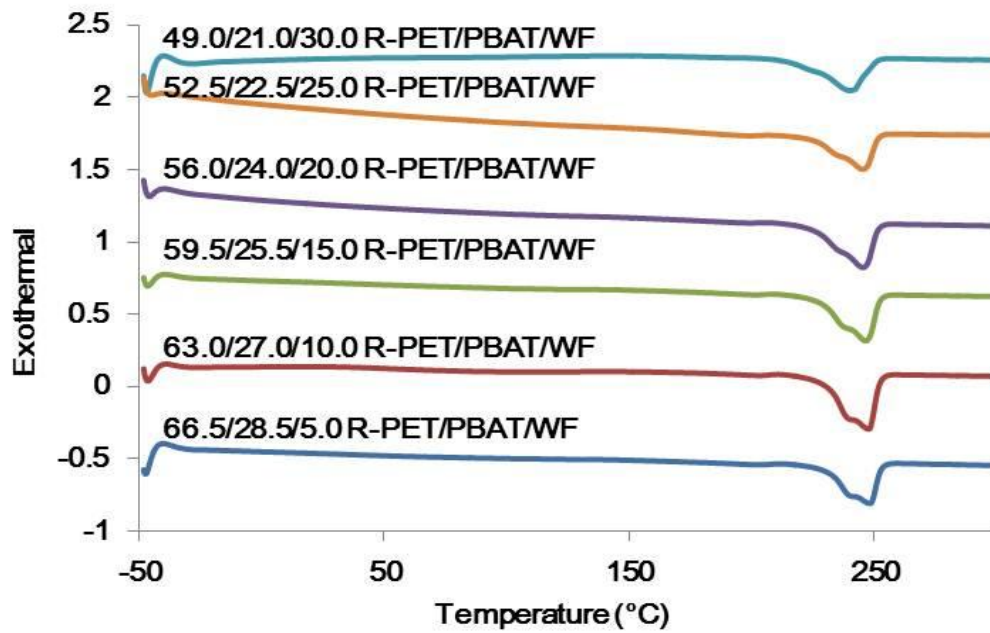
รูปที่ ข-6 DSC เทอร์โมแกรมของ 70/30 R-PET/PBAT



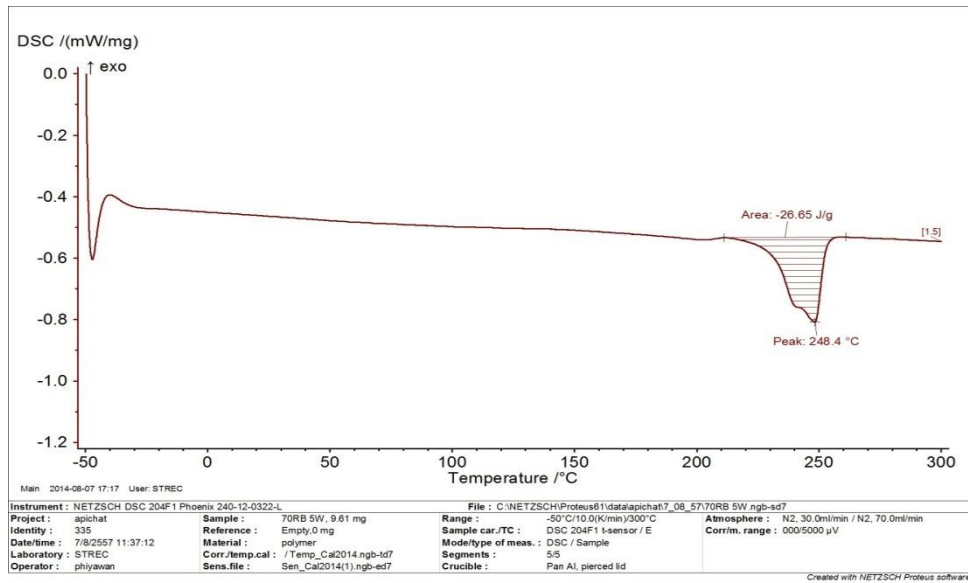
รูปที่ ข-7 DSC เทอร์โมแกรมของ 60/40 R-PET/PBAT



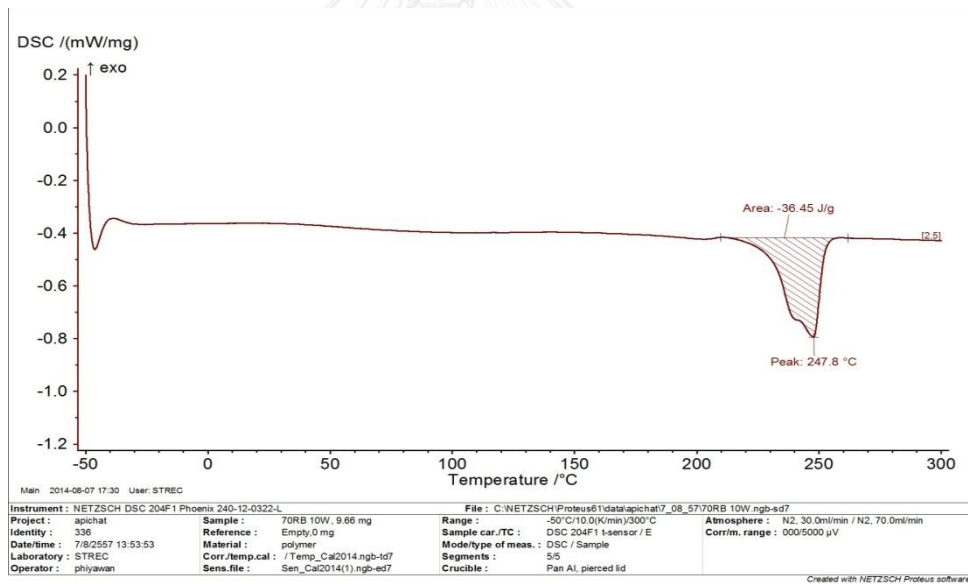
รูปที่ ข-8 DSC เทอร์โมแกรมของ 50/50 R-PET/PBAT



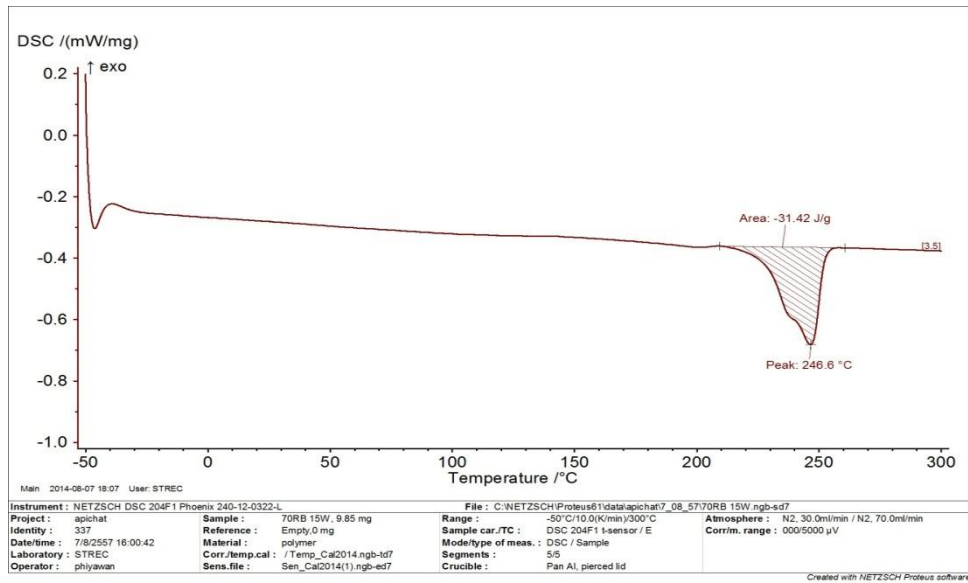
รูปที่ ข-9 DSC เทอร์โมแกรมของคอมพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ



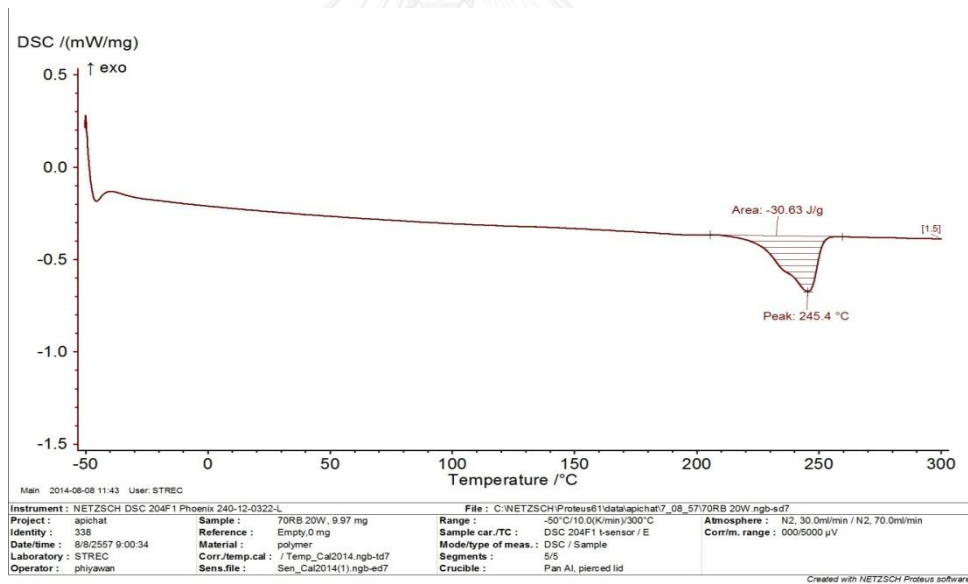
รูปที่ ข-10 DSC เทอร์โมแกรมของ 66.5/28.5/5.0 R-PET/PBAT/WF



รูปที่ ข-11 DSC เทอร์โมแกรมของ 63.0/27.0/10.0 R-PET/PBAT/WF

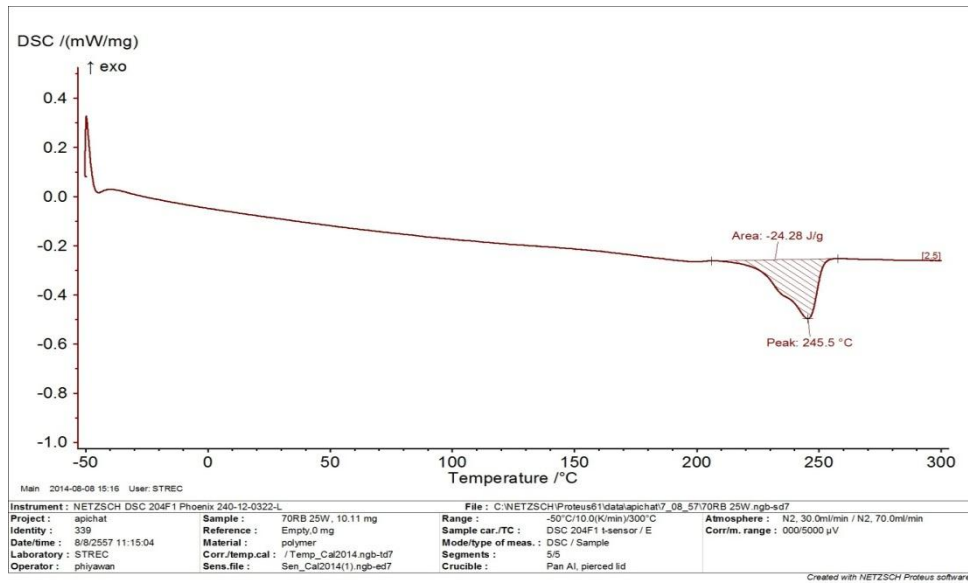


รูปที่ ข-12 DSC เทอร์โมแกรมของ 59.5/25.5/15.0 R-PET/PBAT/WF

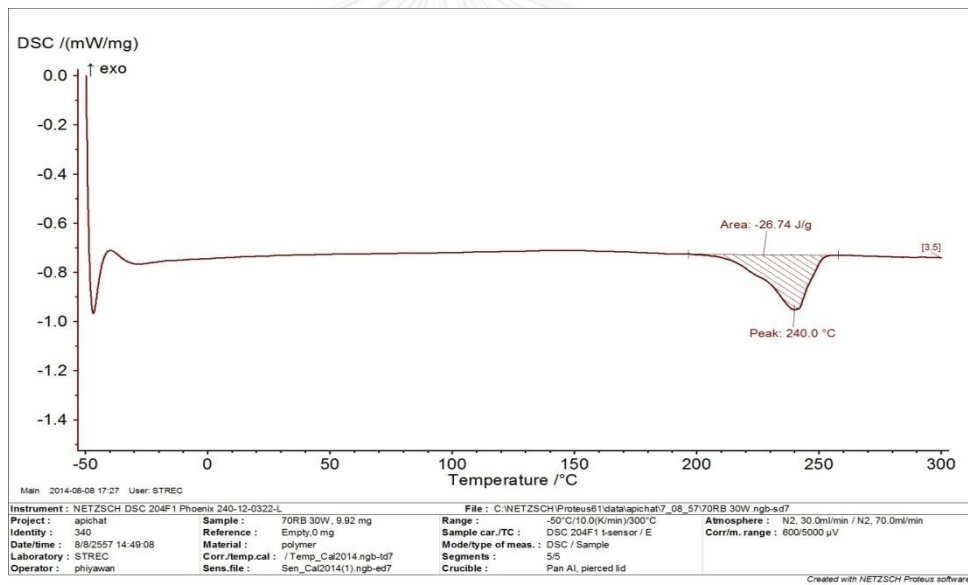


รูปที่ ข-13 DSC เทอร์โมแกรมของ 56.0/24.0/20.0 R-PET/PBAT/WF



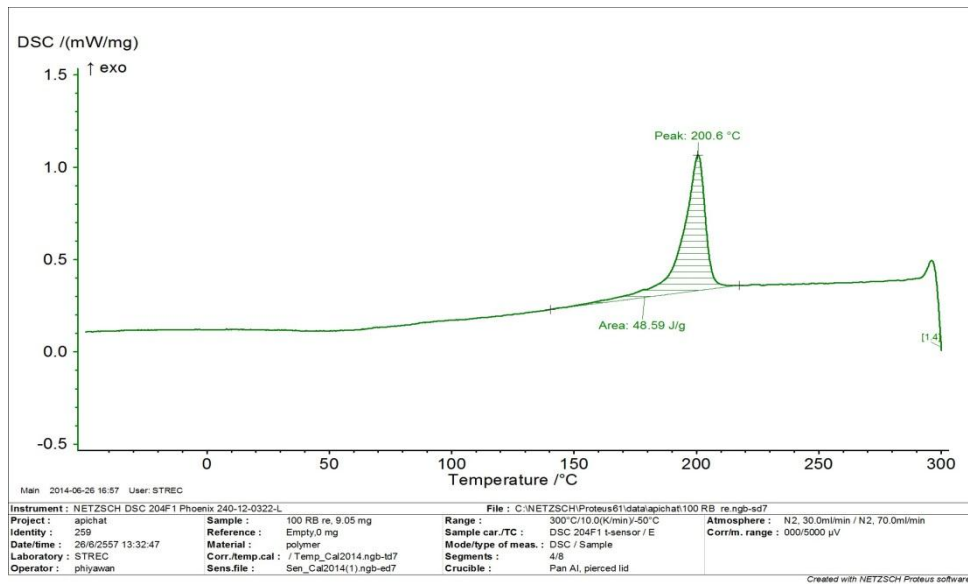


รูปที่ ข-14 DSC เทอร์โมแกรมของ 52.5/22.5/25.0 R-PET/PBAT/WF

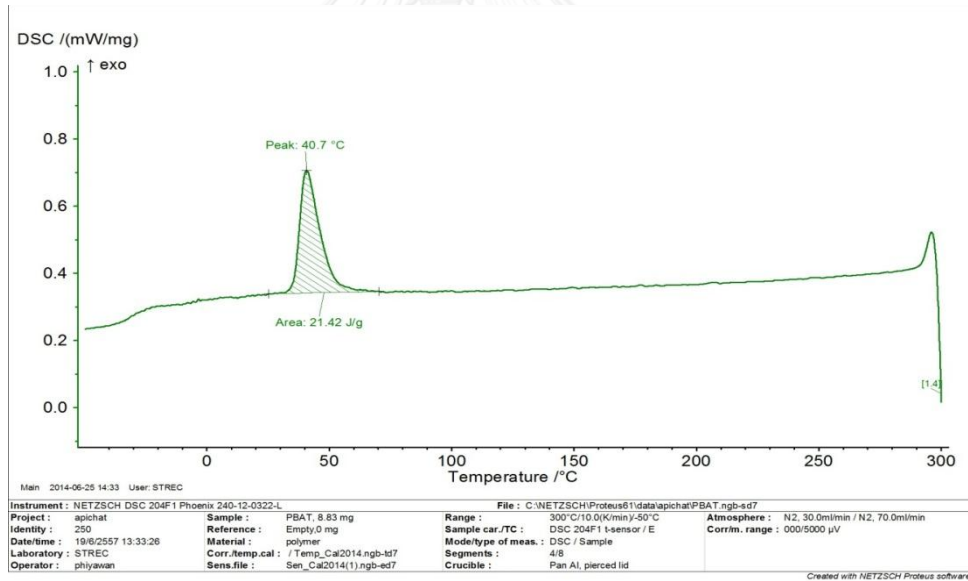


รูปที่ ข-15 DSC เทอร์โมแกรมของ 49.0/21.0/30.0 R-PET/PBAT/WF

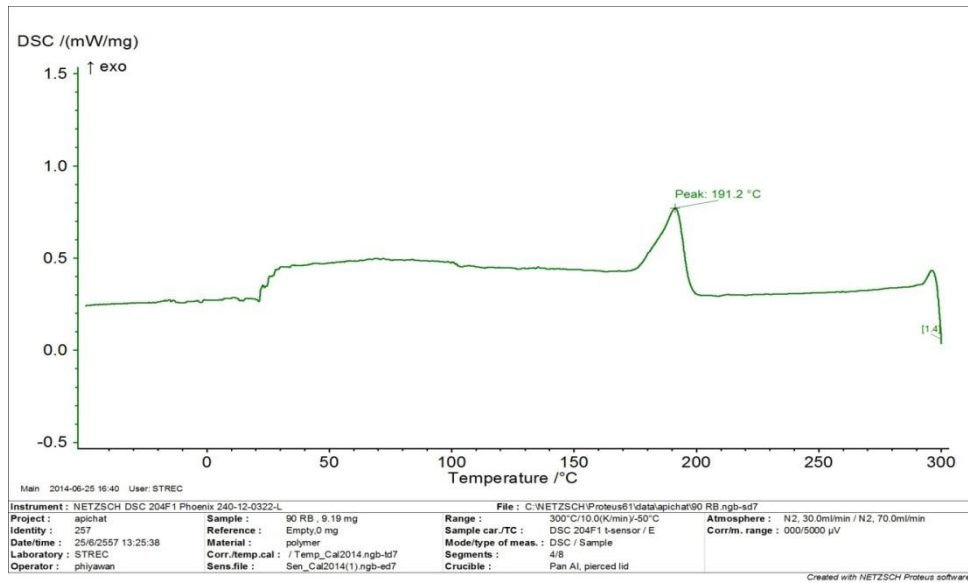
## DSC เทอร์โมแกรมจาก cooling scan



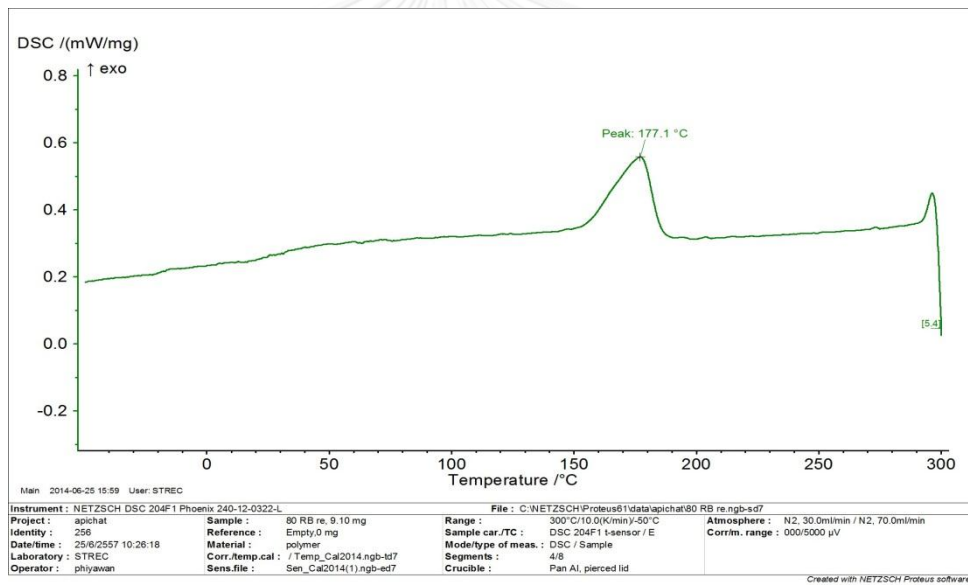
## รูปที่ ข-16 DSC เทอร์โมแกรมของ R-PET



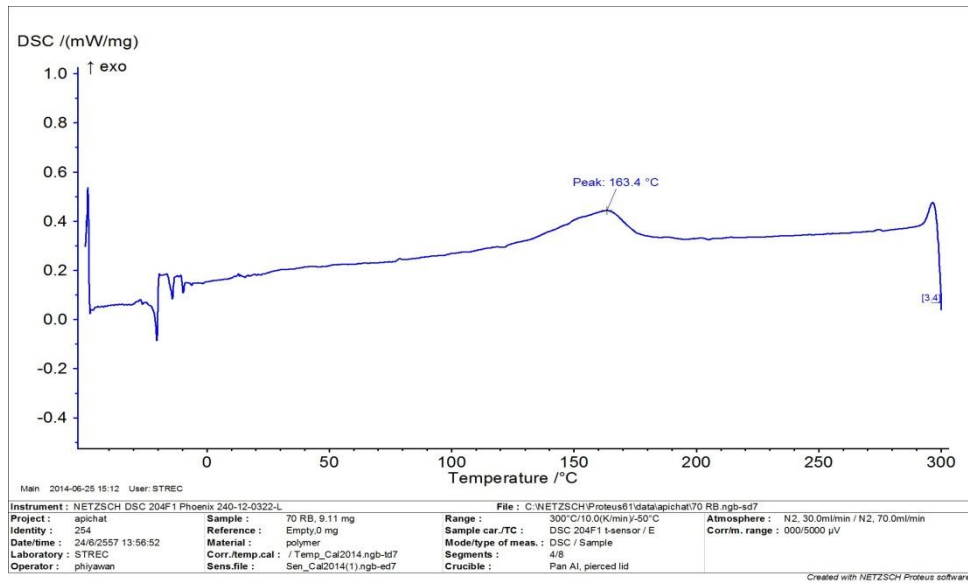
## รูปที่ ข-17 DSC เทอร์โมแกรมของ PBAT



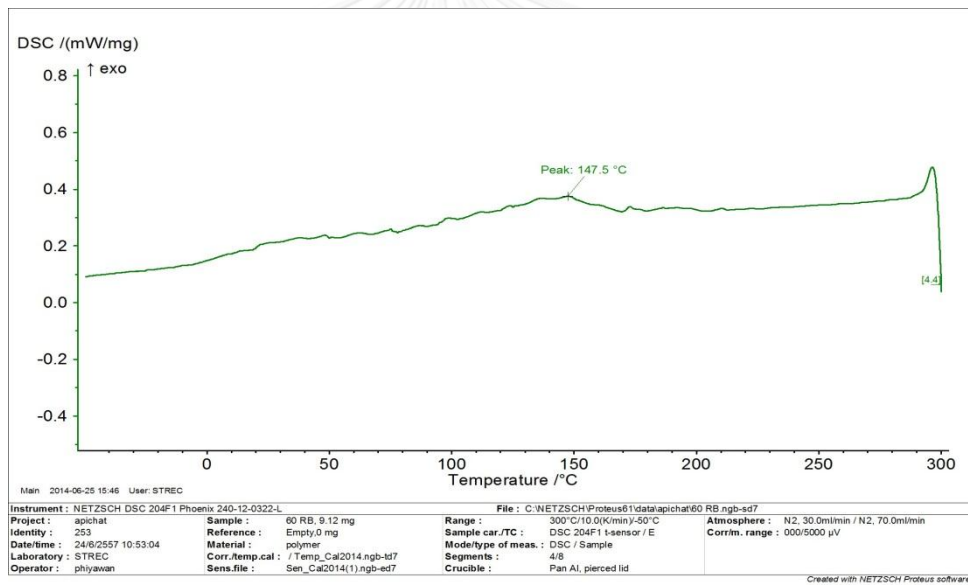
รูปที่ ข-18 DSC เทอร์โมแกรมของ 90/10 R-PET/PBAT



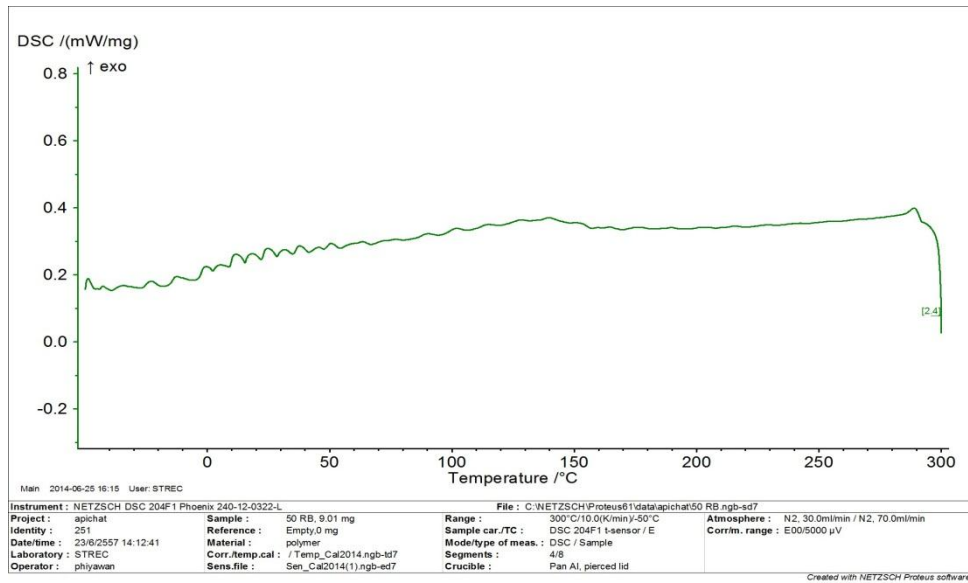
รูปที่ ข-19 DSC เทอร์โมแกรมของ 80/20 R-PET/PBAT



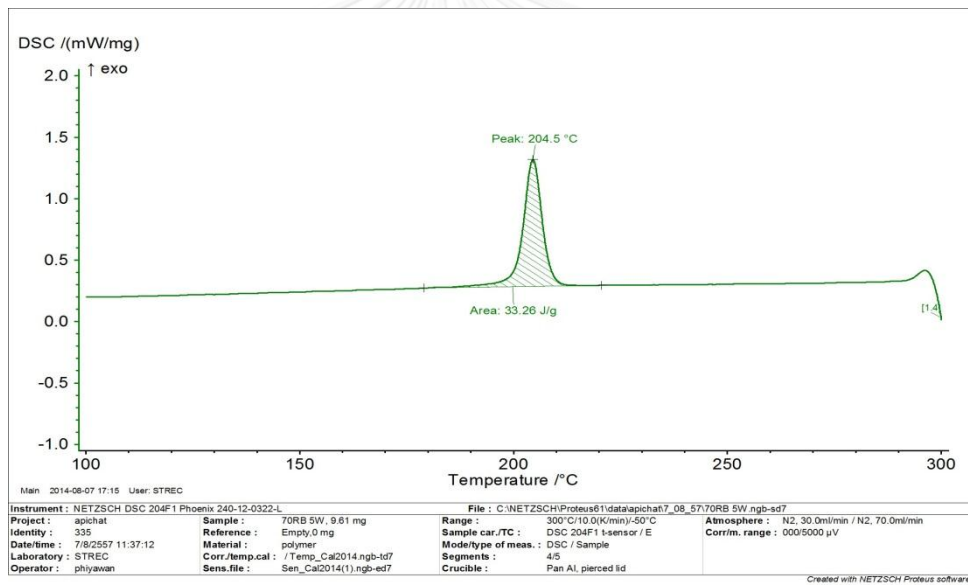
รูปที่ ข-20 DSC เทอร์โมแกรมของ 70/30 R-PET/PBAT



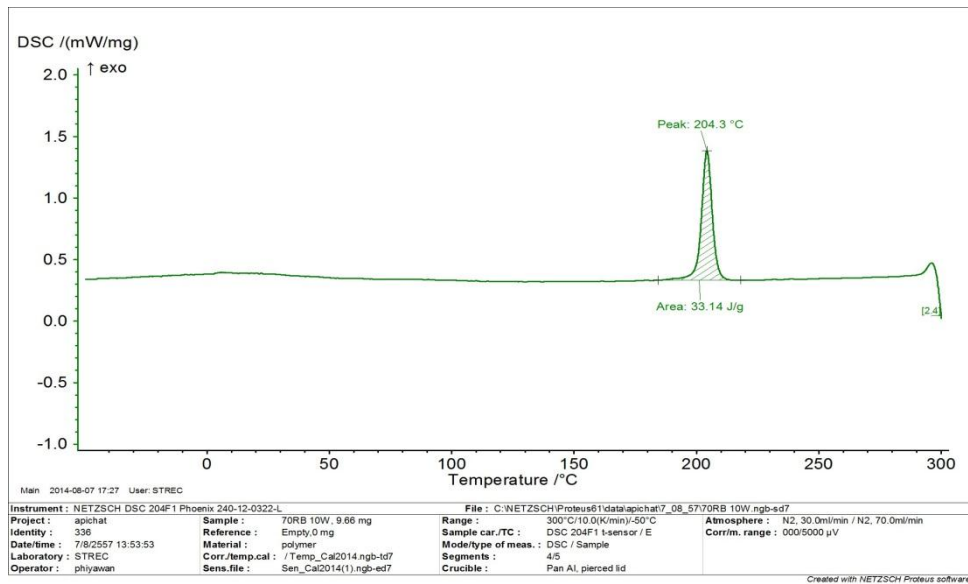
รูปที่ ข-21 DSC เทอร์โมแกรมของ 60/40 R-PET/PBAT



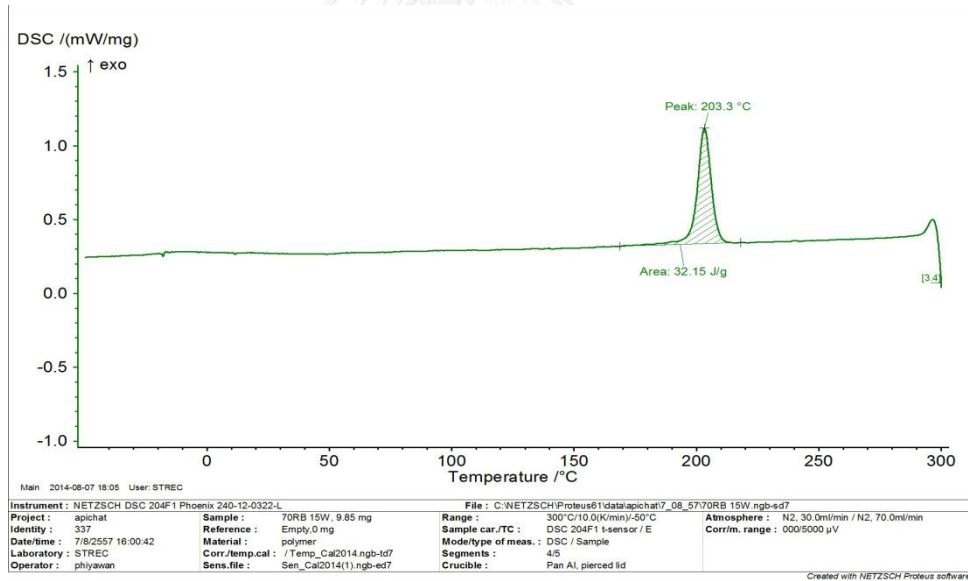
รูปที่ ข-22 DSC เทอร์โมแกรมของ 50/50 R-PET/PBAT



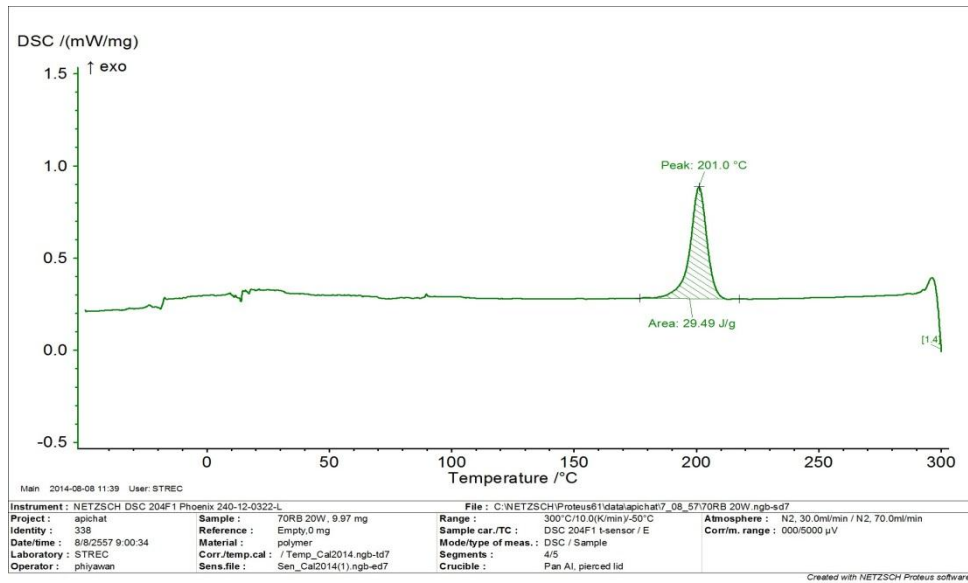
รูปที่ ข-23 DSC เทอร์โมแกรมของ 66.5/28.5/5.0 R-PET/PBAT/WF



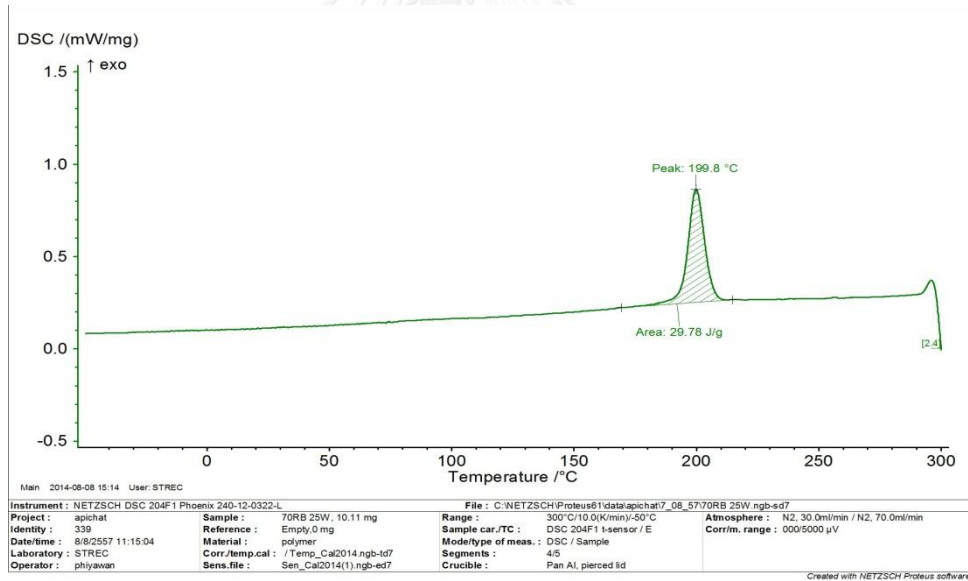
รูปที่ ข-24 DSC เทอร์โมแกรมของ 63.0/27.0/10.0 R-PET/PBAT/WF



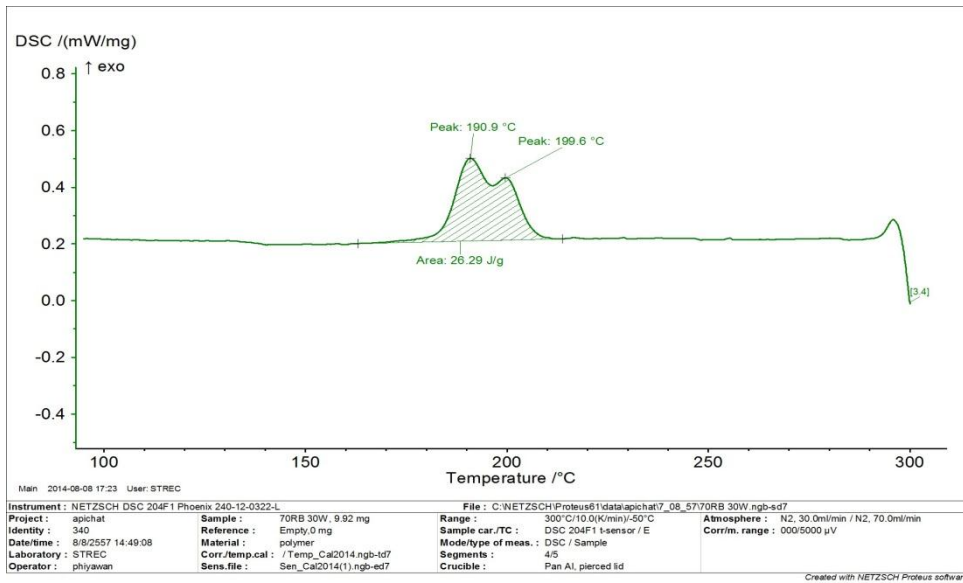
รูปที่ ข-25 DSC เทอร์โมแกรมของ 59.5/25.5/15.0 R-PET/PBAT/WF



รูปที่ ข-26 DSC เทอร์โมแกรมของ 56.0/24.0/20.0 R-PET/PBAT/WF

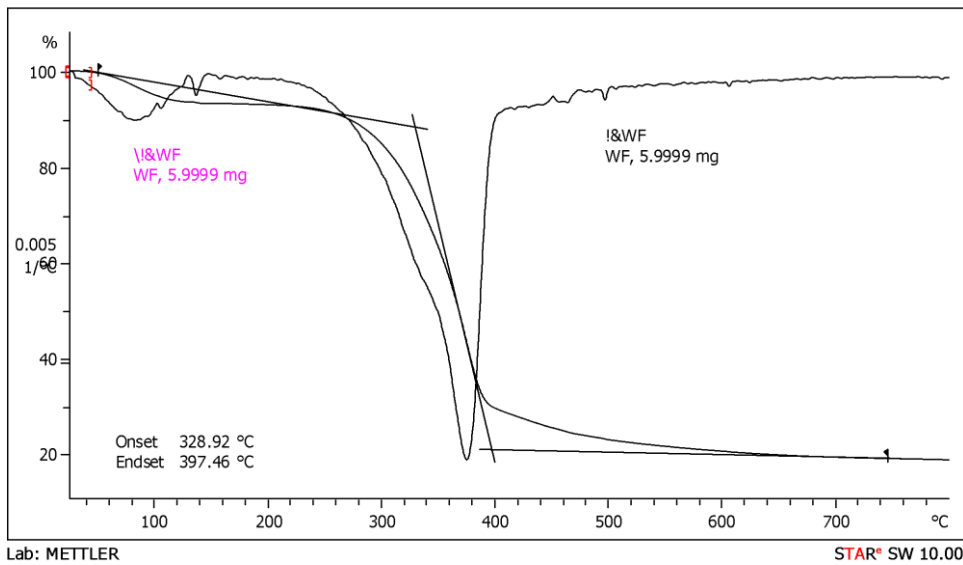


รูปที่ ข-27 DSC เทอร์โมแกรมของ 52.5/22.5/25.0 R-PET/PBAT/WF



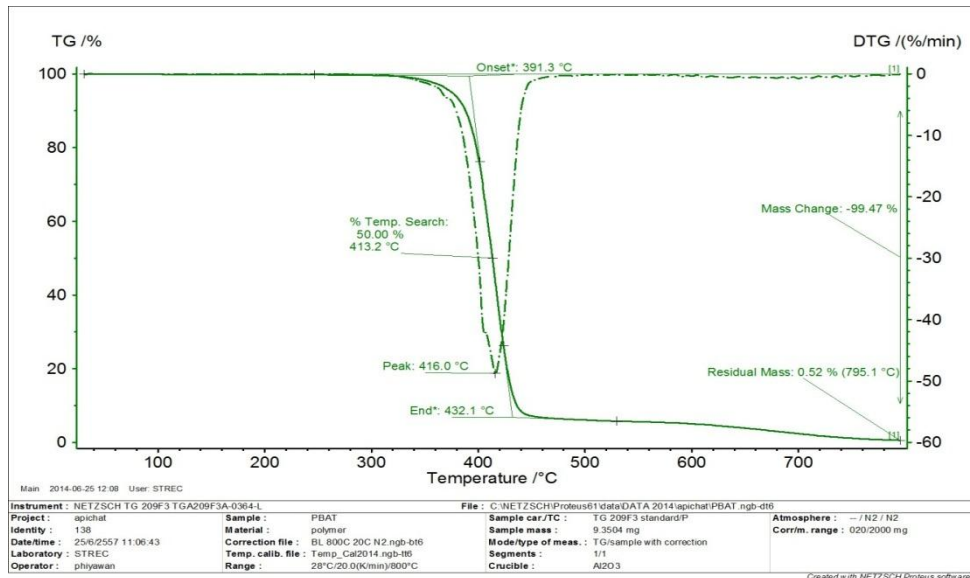
รูปที่ ข-28 DSC เทอร์โมแกรมของ 49.0/21.0/30.0 R-PET/PBAT/WF

TGA เทอร์โมแกรม

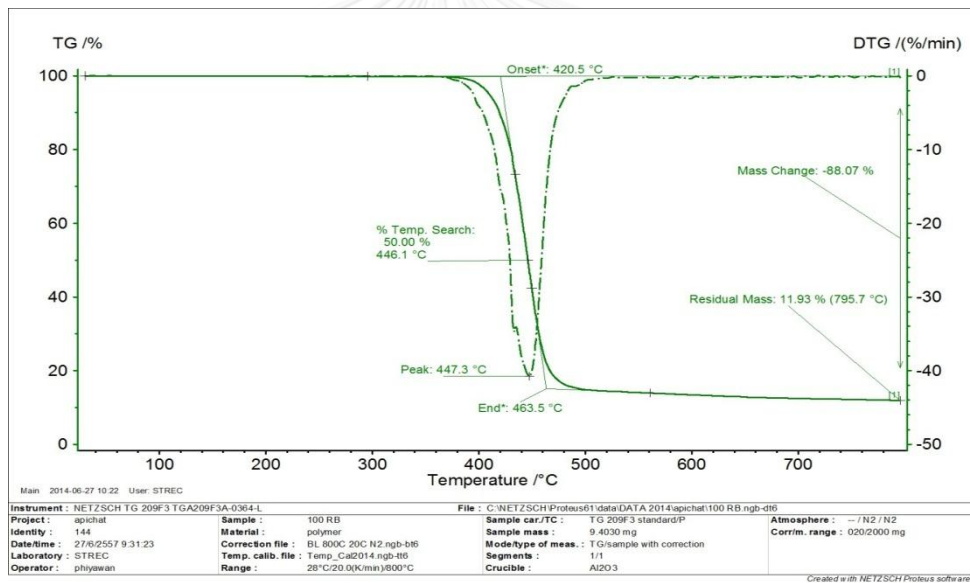


รูปที่ ข-29 TGA เทอร์โมแกรมของผงไม้

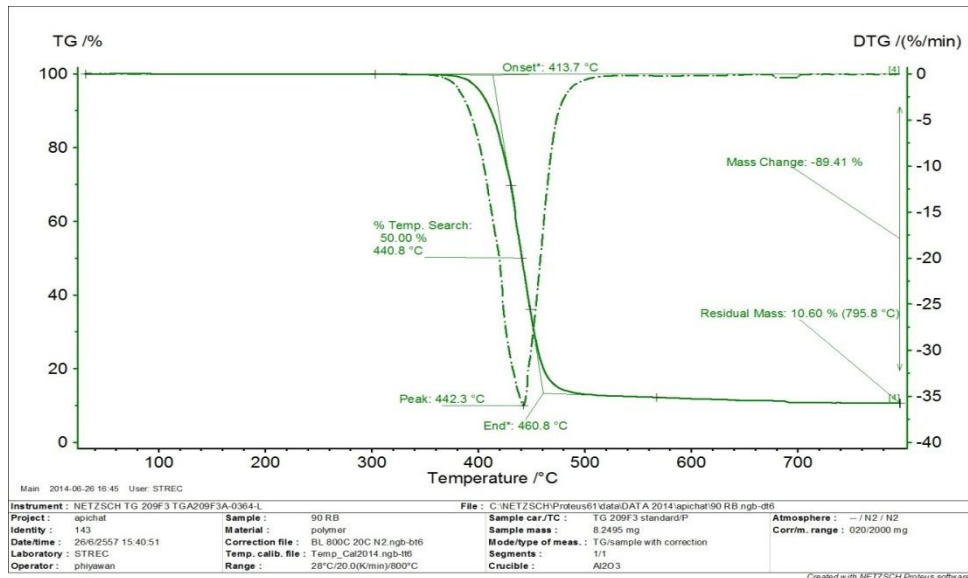




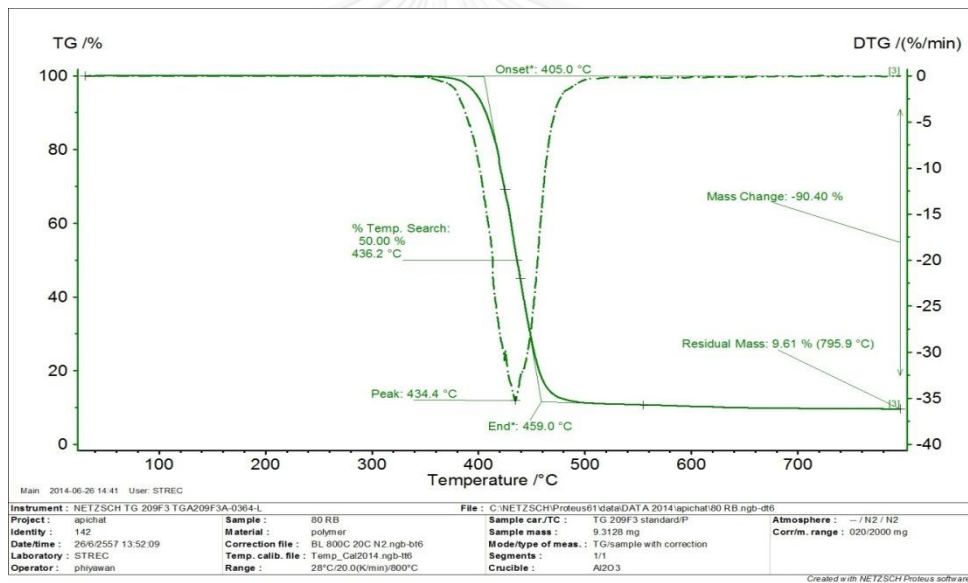
รูปที่ ข-30 TGA เทอร์โมแกรมของ PBAT



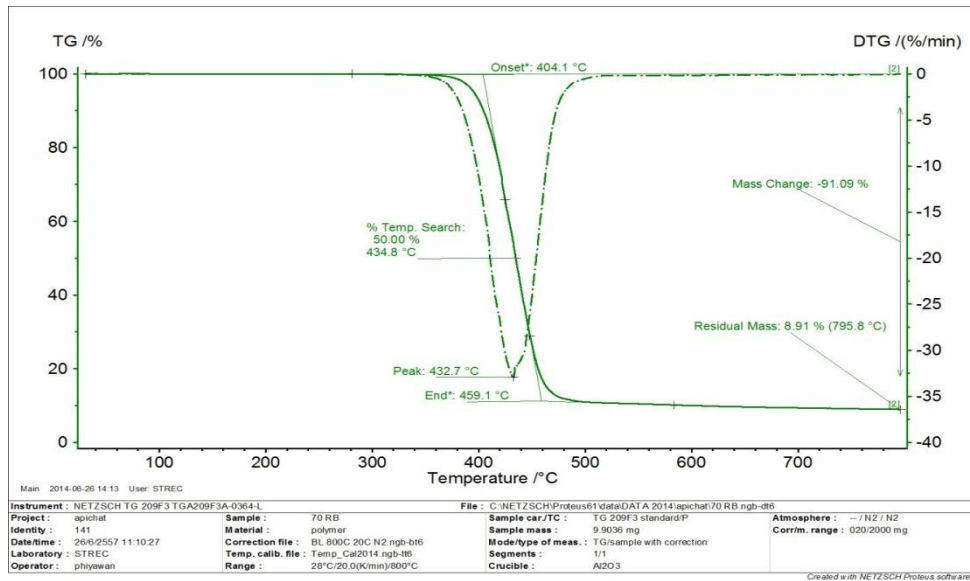
รูปที่ ข-31 TGA เทอร์โมแกรมของ R-PET



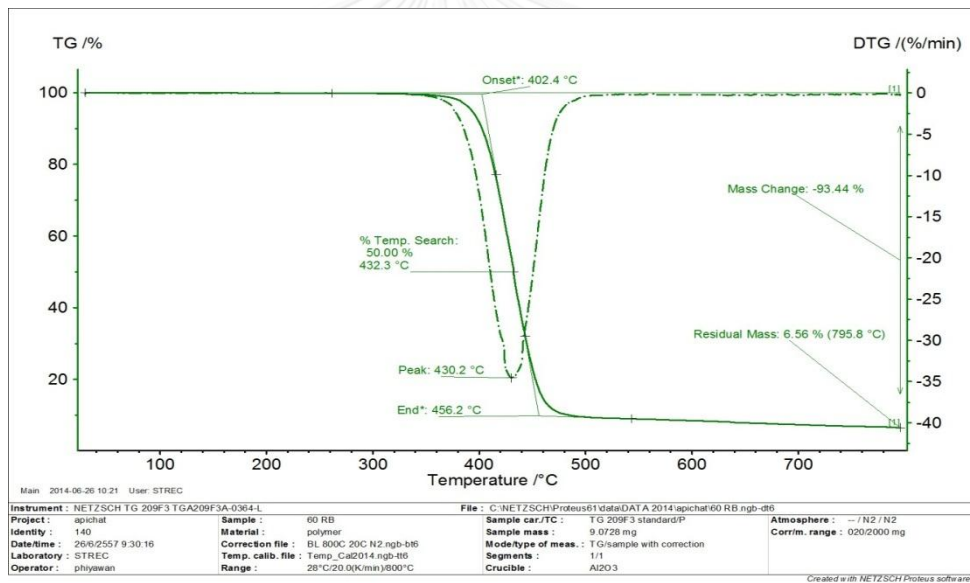
รูปที่ ข-32 TGA เทอร์โมแกรมของ 90/10 R-PET/PBAT



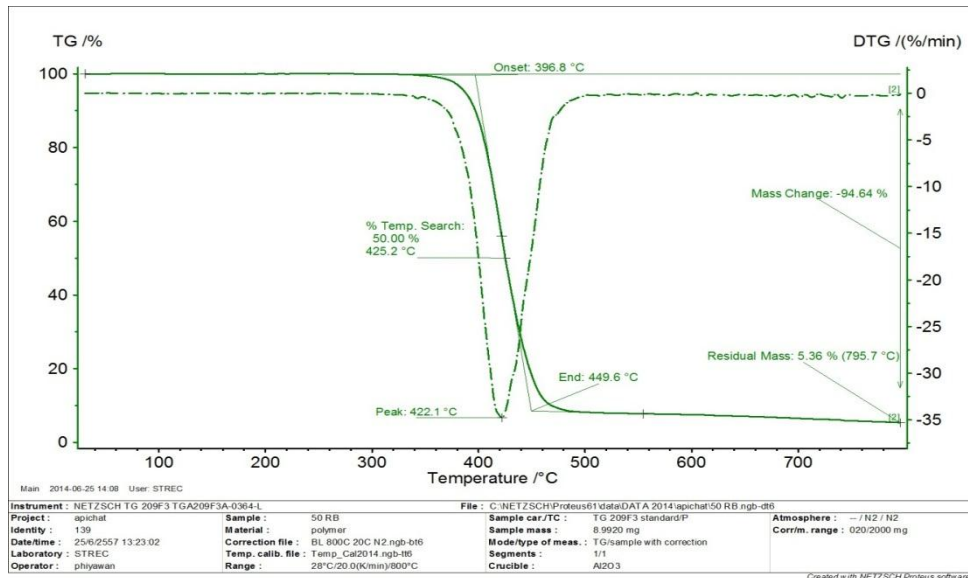
รูปที่ ข-33 TGA เทอร์โมแกรมของ 80/20 R-PET/PBAT



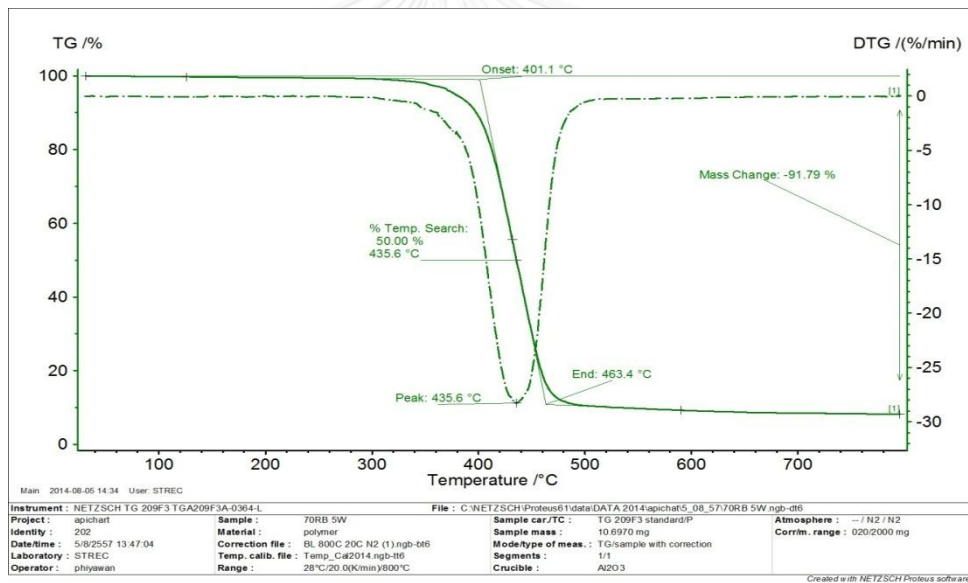
รูปที่ ข-34 TGA เทอร์โมแกรมของ 70/30 R-PET/PBAT



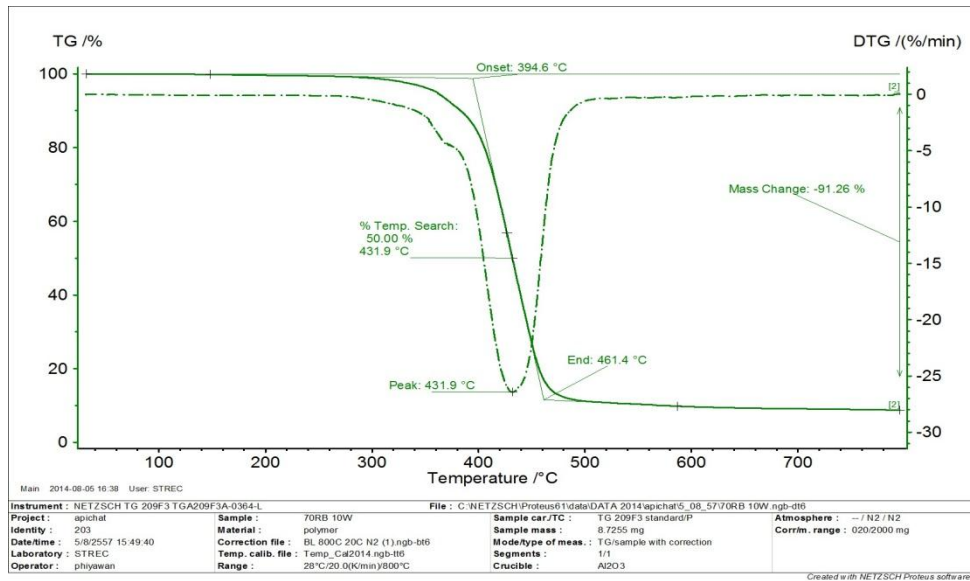
รูปที่ ข-35 TGA เทอร์โมแกรมของ 60/40 R-PET/PBAT



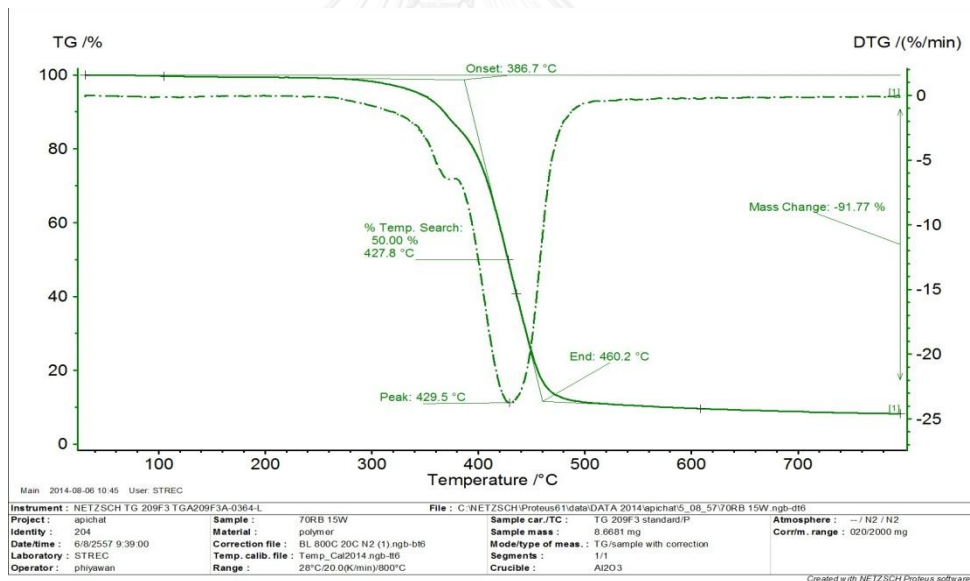
รูปที่ ข-36 TGA เทอร์โมแกรมของ 50/50 R-PET/PBAT



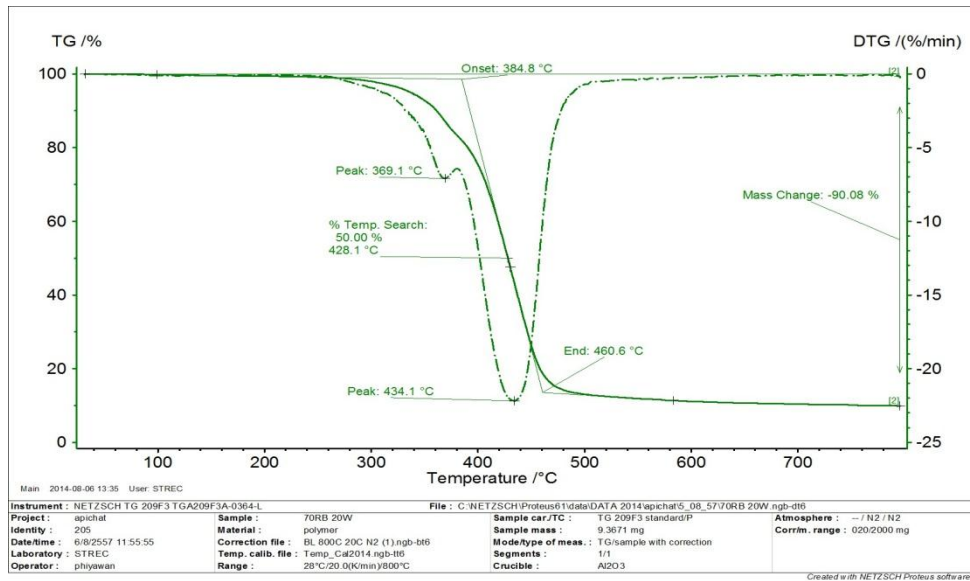
รูปที่ ข-37 TGA เทอร์โมแกรมของ 66.5/28.5/5.0 R-PET/PBAT/WF



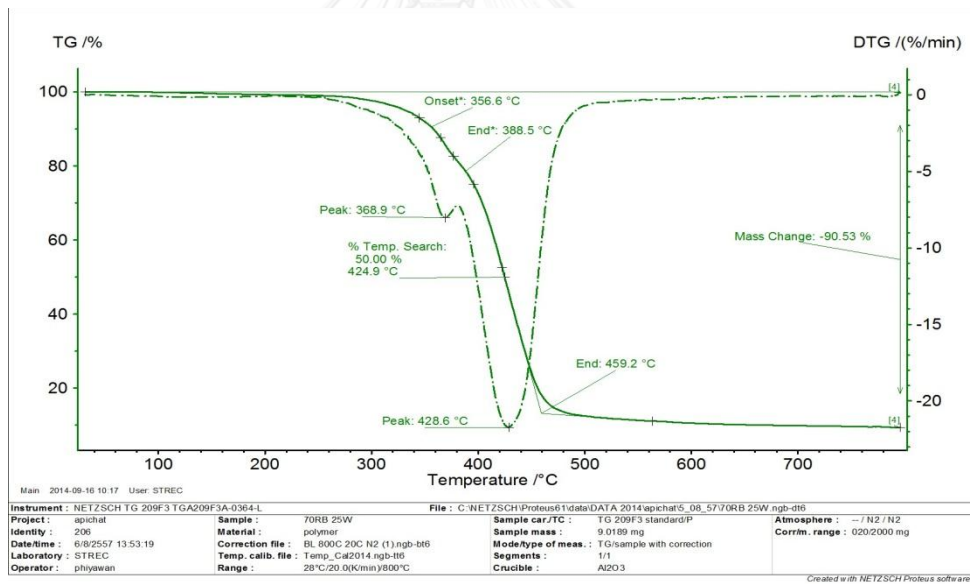
รูปที่ ข-38 TGA เทอร์โมแกรมของ 63.0/27.0/10.0 R-PET/PBAT/WF



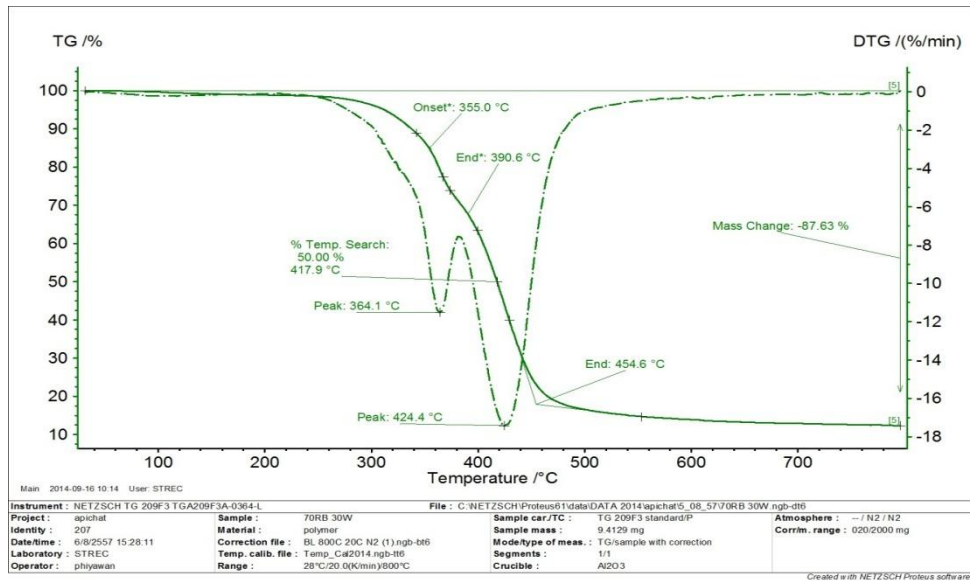
รูปที่ ข-39 TGA เทอร์โมแกรมของ 59.5/25.5/15.0 R-PET/PBAT/WF



รูปที่ ข-40 TGA เทอร์โมแกรมของคอมพอสิต 56.0/24.0/20.0 R-PET/PBAT/WF



รูปที่ ข-41 TGA เทอร์โมแกรมของ 52.5/22.5/25.0 R-PET/PBAT/WF



รูปที่ ข-42 TGA เทอร์โมแกรมของ 49.0/21.0/30.0 R-PET/PBAT/WF

**ภาคผนวก ค**  
**การดูดซึมน้ำ**

**ตาราง ค-1** การดูดซึมน้ำของ R-PET, PBAT และพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วนต่างๆ

วันที่	R-PET/PBAT						
	0/100	50/50	60/40	70/30	80/20	90/10	100/0
	ร้อยละน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง						
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.65	0.34	0.32	0.21	0.21	0.16	0.15
3	0.78	0.50	0.44	0.33	0.27	0.27	0.21
4	0.74	0.57	0.46	0.35	0.30	0.35	0.24
5	0.72	0.63	0.51	0.39	0.34	0.31	0.28
6	0.71	0.67	0.55	0.44	0.37	0.34	0.30
7	0.75	0.74	0.61	0.53	0.43	0.39	0.34
8	0.72	0.76	0.63	0.50	0.44	0.39	0.35
9	0.67	0.76	0.65	0.53	0.46	0.41	0.37
10	0.71	0.66	0.71	0.59	0.51	0.46	0.42
11	0.69	0.79	0.68	0.59	0.50	0.47	0.42
12	0.72	0.81	0.71	0.61	0.54	0.48	0.43
13	0.72	0.86	0.76	0.67	0.57	0.52	0.50
14	0.72	0.87	0.80	0.68	0.59	0.58	0.50
15	0.70	0.82	0.76	0.69	0.60	0.53	0.43



ตาราง ค-1 (ต่อ) การดูดซึมน้ำของ R-PET, PBAT และพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วนต่างๆ

วันที่	R-PET/PBAT						
	0/100	50/50	60/40	70/30	80/20	90/10	100/0
	ร้อยละน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง						
16	0.67	0.83	0.77	0.67	0.60	0.54	0.49
17	0.69	0.88	0.79	0.72	0.65	0.59	0.54
18	0.69	0.85	0.79	0.69	0.63	0.57	0.53
19	0.69	0.83	0.79	0.70	0.64	0.60	0.54
20	0.72	0.90	0.84	0.76	0.70	0.63	0.58
21	0.69	0.85	0.81	0.75	0.67	0.60	0.56
22	0.67	0.87	0.81	0.73	0.67	0.62	0.56
23	0.70	0.86	0.82	0.75	0.72	0.63	0.60
24	0.69	0.92	0.82	0.77	0.70	0.66	0.60
25	0.68	0.87	0.81	0.75	0.69	0.63	0.60
26	0.65	0.85	0.82	0.74	0.70	0.64	0.59
27	0.66	0.87	0.82	0.75	0.73	0.66	0.60
28	0.66	0.86	0.82	0.75	0.73	0.66	0.60
29	0.65	0.86	0.82	0.77	0.71	0.68	0.63
30	0.65	0.86	0.84	0.77	0.72	0.67	0.60

ตาราง ค-2 การดูดซึมน้ำของคอมพอสิต R-PET/PBAT/WF ในอัตราส่วนต่างๆ

วันที่	R-PET/PBAT/WF					
	66.5/28.5/ 5	63.0/27.0/ 10	59.5/25.5/ 15	56.0/24.0 /20	52.5/22.5/ 25	49.0/21.0/ 30
	ร้อยละน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง					
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.37	0.45	0.59	0.72	0.80	0.98
3	0.53	0.64	0.79	0.99	1.10	1.34
4	0.60	0.75	0.94	1.14	1.32	1.56
5	0.68	0.85	1.04	1.28	1.47	1.76
6	0.75	0.93	1.15	1.42	1.62	1.94
7	0.85	1.05	1.28	1.58	1.80	2.19
8	0.86	1.09	1.34	1.66	1.92	2.28
9	0.90	1.15	1.40	1.73	2.00	2.41
10	1.00	1.25	1.51	1.88	2.18	2.59
11	1.00	1.27	1.56	1.94	2.22	2.67
12	1.04	1.31	1.66	2.02	2.35	2.79
13	1.10	1.40	1.71	2.14	2.45	2.96
14	1.15	1.44	1.79	2.23	2.56	3.06
15	1.13	1.46	1.81	2.25	2.59	3.15

ตาราง ค-2 (ต่อ) การดูดซึมน้ำของคอมพอสิต R-PET/PBAT/WF ในอัตราส่วนต่างๆ

วันที่	R-PET/PBAT/WF					
	66.5/28.5/ 5	63.0/27.0/ 10	59.5/25.5/ 15	56.0/24.0/ 20	52.5/22.5/ 25	49.0/21.0/ 30
	ร้อยละน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง					
16	1.17	1.50	1.87	2.34	2.70	3.27
17	1.25	1.58	1.92	2.42	2.80	3.41
18	1.21	1.57	1.95	2.44	2.84	3.45
19	1.23	1.62	2.01	2.52	2.93	3.53
20	1.29	1.70	2.12	2.60	3.06	3.66
21	1.28	1.70	2.10	2.63	3.10	3.73
22	1.29	1.71	2.14	2.68	3.13	3.82
23	1.32	1.75	2.19	2.78	3.25	3.91
24	1.34	1.80	2.25	2.84	3.30	4.02
25	1.34	1.80	2.25	2.84	3.32	4.05
26	1.36	1.82	2.27	2.89	3.39	4.12
27	1.38	1.84	2.34	2.95	3.48	4.23
28	1.38	1.84	2.35	3.01	3.47	4.30
29	1.38	1.89	2.36	3.03	3.47	4.34
30	1.38	1.92	2.38	3.05	3.54	4.40

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอภิชาติ พิมพ์พงษ์

เกิดวันที่ 6 มีนาคม 2531

ที่อยู่ 137 หมู่ 14 ต.เมืองคง อ.ราชไศล จ.ศรีสะเกษ 33160

ประวัติการศึกษา

2554 วท.บ. (เคมี) มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

