

สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม พอลิเอทิลีนเทเรฟ  
ทาเลตรีไซเคิล/พอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลต และวอลลาสโทไนต์คอมพอสิต

MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF RECYCLED  
POLYETHYLENE TEREPHTHALATE /POLYBUTYLENE  
TEREPHTHALATE BLENDS/ WOLLASTONITE COMPOSITE

นางสาวทักษพร รียาพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม พอลิเอทิลีนเทเรฟ  
ทาเลทรีไซเคิล/พอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลต และโพลาลาสโตนีคคอมพอสิต

นางสาวทักษพร รียาพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



หัวข้อวิทยานิพนธ์

สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล/พอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลต และโวลลาสตโทไนต์คอมพอสิต  
Mechanical and Thermal Properties of Recycled Polyethylene Terephthalate/Polybutylene Terephthalate Blends/Wollastonite Composite

ชื่อ - นามสกุล

นางสาวทักษพร ธิยาพันธ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์อำนวย ลาภเกษมสุข, วท.ด.

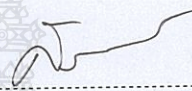
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

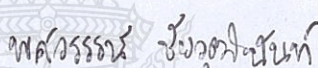
อาจารย์อรรถพล สิมประดิษฐ์พันธุ์, วศ.ด.

ปีการศึกษา

2562

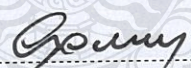
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีย์, Ph.D.)

  
กรรมการ  
(อาจารย์พศวรรณ์ ชัยวัฒน์, วท.ด.)

  
กรรมการ  
(อาจารย์วิรัชชา ขอบพัฒนา, Ph.D.)

  
กรรมการ  
(อาจารย์อรรถพล สิมประดิษฐ์พันธุ์, วศ.ด.)

  
กรรมการ  
(อาจารย์อำนวย ลาภเกษมสุข, วท.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)  
วันที่ 21 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2562



|                      |                                                                                                                                 |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์    | สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต/ไรเซิล /พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต และโพลีลาสโตนีค คอมพอสิต |
| ชื่อ – นามสกุล       | นางสาวทักษพร ธิยาพันธ์                                                                                                          |
| สาขาวิชา             | วิศวกรรมวัสดุ                                                                                                                   |
| อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก | อาจารย์อานวย ลากเกษมสุข, ปร.ด.                                                                                                  |
| อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | อาจารย์อรรถพล สิมประดิษฐ์พันธุ์, ปร.ด.                                                                                          |
| ปีการศึกษา           | 2562                                                                                                                            |

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ ไรเซิลพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (พีอีที) ที่ได้จากเศษหลอดพรีฟอร์มในโรงงานผลิตขวดพลาสติกได้นำมาผสมแบบหลอมเหลวกับพอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต (พีบีที) ทาง การค้าในปริมาณต่างๆ กัน (ร้อยละ 10-50 โดยน้ำหนัก) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่แล้วขึ้นรูปด้วย กระบวนการฉีดแบบ

การใส่พีบีทีปริมาณร้อยละ 30-50 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ความทนแรงกระแทกและยังส่งผลต่อ คุณสมบัติของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้น หากแต่ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และอุณหภูมิการตัดโค้ง จากความร้อนมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับของพีอีทีไรเซิลล้วน และจากพอลิเมอร์ผสมทั้งหมด พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่ใส่พีบีทีปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก มีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด จึงได้นำไปใส่ โพลีลาสโตนีคที่มีความละเอียดสูงมากในปริมาณ 4 อัตราส่วน (ร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนัก)

ความทนแรงกระแทก การยืดตัว ณ จุดขาด และยังส่งผลต่อคุณสมบัติของคอมพอสิตได้รับการปรับปรุง เมื่อใส่ในปริมาณที่เหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับของพอลิเมอร์ผสมล้วน ในขณะที่ความทนแรงดึงและ อุณหภูมิการตัดโค้งจากความร้อนมีค่าลดลง จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่ง แคลอริเมทรี พบว่า อุณหภูมิการเกิดผลึกและอุณหภูมิการหลอมเหลวของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่า สูงขึ้นเมื่อใส่โพลีลาสโตนีค ซึ่งแสดงถึงผลของการก่อนิวเคลียสโดยโพลีลาสโตนีคในขณะขั้นตอนการ เย็นตัว นอกจากนี้ การใส่โพลีลาสโตนีคสามารถลดการหลอมเหลวของคอมพอสิตขณะเกิดการหลอมใหม่ได้ เป็นอย่างดีอีกด้วย

**คำสำคัญ :** พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต, พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต, โพลีลาสโตนีค, พอลิเมอร์ผสม, คอมพอสิต,

**Thesis Title** Mechanical and Thermal Properties of Recycled Polyethylene Terephthalate /Polybutylene Terephthalate Blends /Wollastonite Composite

**Name - Surname** Miss Thaksaporn Riyaphan

**Major Subject** Materials Engineering

**Thesis Advisor** Mr. Amnouy Larpkasemsuk, Ph.D.

**Thesis Co - advisor** Mr. Akaphol Simpraditpan, Ph.D.

**Academic Year** 2019

## ABSTRACT

In this research, recycled polyethylene terephthalate (RPET), obtained from preform scraps in the plastic bottle manufacturing industry, was melt-mixed with a commercial poly (butylene terephthalate) (PBT) at different loadings (10-50 wt%) on a twin screw extruder; and then the blends were injection-molded.

The addition of 30-50 wt% PBT had effects on increasing the impact strength and Young's modulus of the blends, while the expense of the tensile strength, elongation at break and heat distortion temperature (HDT) reduced when compared with those of the neat RPET. Among all the blends, the blend with 40 wt% PBT exhibited the best optimal combination of the mechanical properties; hence, it was subsequently filled with four loadings of ultrafine wollastonite (10-40 wt%).

The impact strength, elongation at break and Young's modulus of the composites were improved by the adding an appropriate amount of wollastonite when compared with those of the neat blend, while the tensile strength and HDT were deteriorated. Based on differential scanning calorimetry analysis, it showed that the crystallization and melting temperatures of RPET in all the composites increased with the presence of wollastonite. This suggested the nucleating effect of wollastonite during the cooling scan. Moreover, the addition of wollastonite showed a strong reduction in the melt dripping of the composites during combustion.

**Keyword:** recycled polyethylene terephthalate, poly (butylene terephthalate), wollastonite, polymer blend, composite.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ตามวัตถุประสงค์ ด้วยความกรุณา ความเอื้อเฟื้อ ด้านวัตถุดิบ เครื่องมืออุปกรณ์ และสถานที่ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงคำปรึกษา ข้อเสนอแนะทางวิชาการจากผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำการศึกษาวิจัยขอกราบขอบพระคุณดังรายนามดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.อำนาจ ลาภเกษมสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักและ ดร.อรรถพล สิมประดิษฐ์พันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้สนับสนุนคอยให้คำแนะนำ ในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้สนับสนุนวัตถุดิบสำหรับการวิจัย รวมทั้งเสียสละเวลาในการให้คำแนะนำ ตรวจทาน และแก้ไขรูปเล่มจนเสร็จสมบูรณ์ และ ดร.พศรธรณ์ ชัยวุฒินันท์ จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือในการทดสอบ รวมถึงช่วยเหลือในการทดสอบตัวอย่าง

ขอขอบพระคุณ และมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ รุ่นพี่รุ่นน้อง เพื่อนๆที่คอยให้กำลังใจ และคณะครู-อาจารย์ ที่ให้การสนับสนุนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจหากงานวิจัยในครั้งนี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ทักษพร รียาพันธ์

## สารบัญ

|                                                                    | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย .....                                              | (3)  |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....                                           | (4)  |
| กิตติกรรมประกาศ .....                                              | (5)  |
| สารบัญ .....                                                       | 6    |
| สารบัญตาราง .....                                                  | 8    |
| สารบัญภาพ .....                                                    | 9    |
| คำอธิบายสัญลักษณ์.....                                             | 12   |
| บทที่ 1 บทนำ.....                                                  | 13   |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย .....                        | 13   |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....                                   | 15   |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....                                         | 15   |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                                 | 16   |
| 1.5 ระยะเวลาดำเนินการ .....                                        | 16   |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                        | 17   |
| 2.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate, PET).....   | 17   |
| 2.2 พอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลต (Polybutylene terephthalate, PBT) ..... | 19   |
| 2.3 พอลิเมอร์ผสม (polymer blends).....                             | 21   |
| 2.4 สารตัวเติม (filler).....                                       | 23   |
| 2.5 โวลลาสโทไนต์ (Wollastonite).....                               | 24   |
| 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....                                    | 26   |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....                                 | 29   |
| 3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย .....                                    | 29   |
| 3.2 เครื่องมือที่ใช้ดำเนินการวิจัย.....                            | 31   |
| 3.3 ขั้นตอนการทดลอง .....                                          | 32   |
| 3.4 วิธีการทดลอง .....                                             | 33   |
| 3.5 วิธีการทดสอบ .....                                             | 37   |

## สารบัญ (ต่อ)

|                                                     |     |
|-----------------------------------------------------|-----|
| บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....                   | 43  |
| 4.1 พอลิเมอร์ผสม RPET/PBT.....                      | 43  |
| 4.2 พอลิเมอร์คอมพอสิต RPET/PBT/โพลีแลคติกแอซิด..... | 57  |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....           | 70  |
| บรรณานุกรม .....                                    | 73  |
| ภาคผนวก .....                                       | 77  |
| ภาคผนวก ก .....                                     | 78  |
| ภาคผนวก ข .....                                     | 98  |
| ภาคผนวก ค .....                                     | 101 |
| ประวัติผู้เขียน .....                               | 119 |





## สารบัญตาราง

|                                                                                                                                                         | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแร่โวลาสโทไนต์.....                                                                                                    | 25   |
| ตารางที่ 3.1 สมบัติของพลาสติก พอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลต เกรด 2092 FF2001.....                                                                              | 30   |
| ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT โดยน้ำหนัก .....                                                                                         | 35   |
| ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT .....                                                                                   | 44   |
| ตารางที่ 4.2 ค่า $T_g$ , $T_c$ , $T_{cc}$ , $T_m$ , $\Delta H_m$ , $\Delta H_{cc}$ และ $\chi_c$ ของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT .....            | 49   |
| ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT.....                                                                    | 53   |
| ตารางที่ 4.4 พฤติกรรมการลุกไหม้ของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT.....                                                                              | 55   |
| ตารางที่ 4.5 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต .....                                                                        | 58   |
| ตารางที่ 4.6 ค่า $T_g$ , $T_c$ , $T_{cc}$ , $T_m$ , $\Delta H_m$ , $\Delta H_{cc}$ และ $\chi_c$ ของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต ..... | 63   |
| ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต .....                                                        | 66   |
| ตารางที่ 4.8 การลุกไหม้ของ พอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต .....                                                                         | 67   |

## สารบัญภาพ

|                                                                                                                              | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ภาพที่ 2.1 ปฏิบัติการสังเคราะห์เพ็ต (เอสเทอร์ฟิเคชัน) .....                                                                  | 17   |
| ภาพที่ 2.2 ปฏิบัติการสังเคราะห์เพ็ต (ปฏิบัติการแลกเปลี่ยนเอสเทอร์).....                                                      | 18   |
| ภาพที่ 2.3 หน่วยซ้ำในโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต .....                                                          | 18   |
| ภาพที่ 2.4 ปฏิบัติการสังเคราะห์พอลิบิวทีลีนเทเรฟทาเลต .....                                                                  | 20   |
| ภาพที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทีลีนเทเรฟทาเลต .....                                                                   | 20   |
| ภาพที่ 2.6 ลักษณะการผสมแบบ (a) dispersive mixing และ (b) distributive mixing.....                                            | 23   |
| ภาพที่ 2.7 โวลาสโทไนต์ที่มีลักษณะเป็นก้อนผลึกแร่ (a), โวลาสโทไนต์ที่ผ่านการบดละเอียด (b)<br>อนุภาคแบบแท่งของโวลาสโทไนต์..... | 25   |
| ภาพที่ 3.1 หลอดพรีฟอร์มเหลือทิ้งในโรงงานการผลิต (พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต).....                                                 | 29   |
| ภาพที่ 3.2 พอลิบิวทีลีนเทเรฟทาเลต (PBT).....                                                                                 | 29   |
| ภาพที่ 3.3 แร่โวลาสโทไนต์.....                                                                                               | 30   |
| ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปและทดสอบพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT .....                                                              | 32   |
| ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการขึ้นรูปและทดสอบพอลิเมอร์คอมพอสิต RPET/PBT/Wollastonite .....                                            | 33   |
| ภาพที่ 3.6 เครื่องบดพลาสติก (Bosco) .....                                                                                    | 34   |
| ภาพที่ 3.7 เศษบดหลอดพรีฟอร์ม PET .....                                                                                       | 34   |
| ภาพที่ 3.8 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่หมุนทิศทางเดียว (CTE-D02L800) .....                                                      | 35   |
| ภาพที่ 3.9 เม็ดพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT .....                                                                                   | 36   |
| ภาพที่ 3.10 เครื่องฉีดขึ้นรูป ARBURG ALLROUNDER 470 C 150T.....                                                              | 36   |
| ภาพที่ 3.11 ขึ้นทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอดตามมาตรฐาน ASTM D 256.....                                                       | 37   |
| ภาพที่ 3.12 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Ceast).....                                                                 | 37   |
| ภาพที่ 3.13 ขึ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM 638 type I.....                                                              | 38   |
| ภาพที่ 3.14 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์เซล (Hounsfield H 50 KS) .....                                                              | 38   |
| ภาพที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM SUS5000).....                                                           | 39   |
| ภาพที่ 3.16 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Netzsch DSC 200 F3).....                                             | 40   |
| ภาพที่ 3.17 เครื่องทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อน HDT .....                                                               | 40   |
| ภาพที่ 3.18 ตู้ทดสอบการติดไฟและลามไฟตามมาตรฐาน UL94 ทดสอบแบบแนวตั้ง .....                                                    | 41   |
| ภาพที่ 3.19 ลักษณะการวางชิ้นงานเพื่อทดสอบการติดไฟและลามไฟ .....                                                              | 42   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

|             |                                                                                                                 |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ภาพที่ 4.1  | ขั้นตอนการทดสอบรูปดัมเบลล์ของ RPET,PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT ที่อัตราส่วนต่างๆ                               | 43 |
| ภาพที่ 4.2  | ความทนแรงกระแทกของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT.....                                                      | 45 |
| ภาพที่ 4.3  | ความทนแรงดึงของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT .....                                                        | 46 |
| ภาพที่ 4.4  | การยืดตัว ณ จุดขาดของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT .....                                                  | 46 |
| ภาพที่ 4.5  | ยังสัมมอดูลัสของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT .....                                                       | 47 |
| ภาพที่ 4.6  | สัณฐานวิทยาของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT (1000x และ 3000x) .....                                       | 48 |
| ภาพที่ 4.7  | DSC เทอร์โมแกรมของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT จากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 .....                  | 49 |
| ภาพที่ 4.8  | DSC เทอร์โมแกรมของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT จากขั้นตอนเย็นตัว ..                                      | 51 |
| ภาพที่ 4.9  | DSC เทอร์โมแกรมของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT จากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 .....                  | 52 |
| ภาพที่ 4.10 | อุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT .....                                        | 54 |
| ภาพที่ 4.11 | ลักษณะการลุกไหม้ของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT ที่ทำให้ฝ้ายติดไฟ (a) และไม่ลุกติดไฟ (b).....            | 55 |
| ภาพที่ 4.12 | ลักษณะการลุกไหม้ของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT ที่ตรวจสอบด้วย UL94 Vertical burning test.....           | 56 |
| ภาพที่ 4.13 | ขั้นตอนการทดสอบรูปดัมเบลล์ของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต                                     | 57 |
| ภาพที่ 4.14 | ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต ..                                             | 59 |
| ภาพที่ 4.15 | สัณฐานวิทยาของผลึกรูปเข็มของโพลีแลคติกไนด์ (500x).....                                                          | 59 |
| ภาพที่ 4.16 | ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต .....                                             | 60 |
| ภาพที่ 4.17 | การยืดตัว ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต ..                                         | 60 |
| ภาพที่ 4.18 | ยังสัมมอดูลัส ของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต .....                                           | 61 |
| ภาพที่ 4.19 | สัณฐานวิทยาของ พอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต (1000x และ 3000x) .....                           | 62 |
| ภาพที่ 4.20 | DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต ที่ได้จากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ..... | 63 |
| ภาพที่ 4.21 | DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต ที่ได้จากขั้นตอนการเย็นตัว.....                | 64 |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

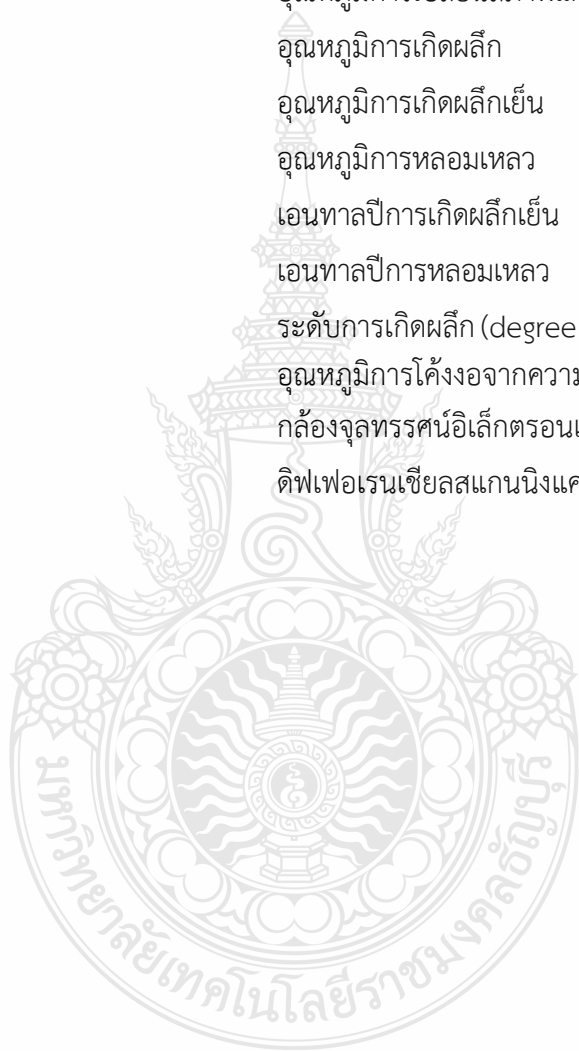
หน้า

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ภาพที่ 4.22 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต ที่ได้จาก<br>ขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2.....           | 65 |
| ภาพที่ 4.23 อุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอม<br>พอสิต.....                                       | 66 |
| ภาพที่ 4.24 ลักษณะการลุกไหม้ของ พอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต ที่ทำให้<br>ฝ้ายติดไฟ (a) และไม่ลุกติดไฟ (b).....         | 68 |
| ภาพที่ 4.25 ลักษณะการลุกไหม้ของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต ที่ผ่าน<br>การตรวจสอบด้วย UL-94 Vertical burning test..... | 68 |



## คำอธิบายสัญลักษณ์

|                 |                                            |
|-----------------|--------------------------------------------|
| RPET            | พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล              |
| PBT             | พอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลต                     |
| MPa             | Mega pascal                                |
| $T_g$           | อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว                 |
| $T_c$           | อุณหภูมิการเกิดผลึก                        |
| $T_{cc}$        | อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น                    |
| $T_m$           | อุณหภูมิการหลอมเหลว                        |
| $\Delta H_{cc}$ | เอนทาลปีการเกิดผลึกเย็น                    |
| $\Delta H_m$    | เอนทาลปีการหลอมเหลว                        |
| $\chi_c$        | ระดับการเกิดผลึก (degree of crystallinity) |
| HDT             | อุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อน               |
| SEM             | กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด        |
| DSC             | ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี          |





## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย (Background and Rationale)

อุตสาหกรรมพลาสติกเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญมากต่อเศรษฐกิจและการพัฒนาประเทศ อุตสาหกรรมยานยนต์เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการแข่งขันด้านการพัฒนาวัตถุดิบสูง โดยเฉพาะการใช้งานพลาสติกเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตชิ้นส่วนประกอบต่างๆ โดยที่ผ่านมามีการนำพลาสติกมาทดแทนชิ้นส่วนโลหะและมีแนวโน้มในการใช้งานทดแทนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องมาตลอด เนื่องจากพลาสติกมีสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา ไม่เป็นสนิม ออกแบบและขึ้นรูปได้ง่าย ทำให้รถยนต์มีน้ำหนักเบา ลดการสิ้นเปลืองพลังงานและช่วยลดต้นทุนในการผลิต พลาสติกหลายชนิดมีประสิทธิภาพในการใช้งานทดแทนโลหะอ่อนจึงสามารถใช้งานทดแทนชิ้นส่วนโลหะในอุตสาหกรรมยานยนต์ได้ นอกจากนี้พลาสติกยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Recycle) [1] การนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของกลุ่มผู้ผลิตอุตสาหกรรมยานยนต์ที่ให้ความสนใจและคำนึงถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมจากขยะพลาสติก โดยที่ผ่านมามีการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว เช่น พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต มาผลิตเป็นชิ้นส่วนในรถยนต์ เช่น ฝาครอบเครื่องยนต์ ฝาครอบไฟ พรหม โครงสร้างระบบปรับอากาศ และ ชิ้นส่วนประกอบอื่นๆ [1] ด้วยเหตุนี้ จึงมีการศึกษา วิจัย และพัฒนาพลาสติกที่นำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ประกอบการ และลดต้นทุนการผลิตอย่างต่อเนื่อง โดยการศึกษามุ่งเน้นไปในเรื่องการพัฒนาสมบัติของพลาสติกซึ่งมีหลายแนวทาง เช่น การปรับปรุงกระบวนการสังเคราะห์ การใช้เทคโนโลยีปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ การเตรียมพอลิเมอร์ผสม พอลิเมอร์คอมพอสิต และการปรับปรุงสมบัติด้วยสารเติมแต่งสมบัติต่างๆ เพื่อเพิ่มสมบัติที่ต้องการให้แก่พลาสติก ทั้งนี้เพื่อเป็นการตอบสนองต่อความต้องการทางวัสดุและด้านวิศวกรรมการใช้งาน

พอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลตเป็นเทอร์โมพลาสติกวิศวกรรม ที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาควบแน่นของสารตั้งต้นคือ กรดเทเรฟทาลิก (Terephthalic Acid, TA) หรือ ไดเมทิลเทเรฟทาเลต (Dimethyl terephthalate, DMT) กับ บิวเทน-1,4 ไดออล (Buthane-1,4 diol) นิยมใช้ทำชิ้นส่วนต่างๆ ในอุตสาหกรรมยานยนต์ [2] เนื่องจากมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี สามารถทนความร้อนได้สูงมาก สามารถระบายความร้อนได้มากกว่าพลาสติกทั่วไป และการที่มีวงแหวนเบนซีนอยู่ในสายโซ่ ทำให้โครงสร้างสามารถเกิดผลึกได้ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่มีราคาแพง [3] เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต หรือเพ็ตซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มพอลิเอสเตอร์เช่นเดียวกัน ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายใน

อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ พลาสติก และเส้นใย [4] มีโครงสร้างโมเลกุลแบบเส้น (Linear polymer) เพื่มีสมบัติที่ดีหลายประการเช่น สามารถทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความใส ความทนทานสารเคมี การสกัดกั้นก๊าซ ทนอุณหภูมิการใช้งานได้สูง และราคาถูก จึงเป็นที่มาของขยะพลาสติกจำนวนมาก ดังนั้น พลาสติกจึงเป็นพลาสติกชนิดหนึ่งที่นิยมนำกลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการรีไซเคิล อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีไซเคิลจะมีสมบัติทางกลและทางความร้อนลดลง เพราะแรงเฉือนและความร้อนในขั้นตอนรีไซเคิลซึ่งทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เกิดการแตกสลาย [5] จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าเมื่อนำพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมาผสมกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตทั้ง 2 ชนิดสามารถผสมเข้ากันได้ (Compatibility) [6] อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการลดต้นทุนวัตถุดิบพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยการเตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตกับเพตโรไซเคิล (RPET) ที่เป็นของเสียจากการผลิตขวดซึ่งยังอยู่ในรูปหลอดพรีฟอร์ม (Pre form) เนื่องจากสมบัติของพอลิเมอร์ที่ลดลงไม่มากนักเพราะผ่านขั้นตอนการแปรรูปเพียงขั้นตอนเดียว และอีกวิธีหนึ่งที่สามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตได้คือการเติมสารตัวเติม (Filler) เป็นสารอีกกลุ่มหนึ่งที่สามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตได้เป็นอย่างดี จึงมีแนวความคิดว่าควรเพิ่มสารตัวเติมในระบบของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตกับเพตโรไซเคิล สารตัวเติมที่ใช้คือวอลลาสโตนิต (Wollastonite) ซึ่งเป็นแร่อนินทรีย์ มีสูตรเคมีคือ  $\text{CaSiO}_3$  องค์ประกอบหลักจะประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และ แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) เป็นแร่ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ลักษณะผลึกมีรูปร่างคล้ายผลึกเข็ม (Acicular or needle-like structure) โดยคาดว่าสารตัวเติมนี้จะสามารถกระจายได้ทั้งในเฟสของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและเพตเพื่อช่วยส่งเสริมสมบัติความแข็งแรงและปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมได้

งานวิจัยนี้จะศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพตโรไซเคิลกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและเติมผงแร่วอลลาสโตนิตเป็นสารตัวเติม โดยจะศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการลุกไหม้ ของตัวอย่างที่เตรียมได้ ซึ่งหากงานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จจะเป็นการลดปริมาณขยะจากพลาสติก และลดปัญหาจากสิ่งแวดล้อม โดยจะมีผลทำให้ต้นทุนการผลิตและการใช้วัตถุดิบจากรสชาติโอโรเลียมเพื่อสังเคราะห์เพตและพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตลดลง สามารถพัฒนาสู่อุตสาหกรรมระหว่างภายในประเทศและต่างประเทศ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย (objectives)

1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสม/คอมพอสิตระหว่างเพตริไซเคิลกับพอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต และแร่โวลลาสโทไนต์ สำหรับใช้เตรียมเป็นชิ้นส่วนประกอบภายในรถยนต์ทดแทนพอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล สันฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติการลุกไหม้ ของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ เพตริไซเคิลจากหลอดพรีฟอร์มที่ผ่านการบดให้มีขนาดใกล้เคียงเม็ดพลาสติกพอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต และแร่โวลลาสโทไนต์

1.3.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม/คอมพอสิต

เตรียมพอลิเมอร์ผสมเพตริไซเคิล/พอลิบิวทิลีน เทเรฟทาเลต ที่อัตราส่วนต่างๆ คือ 100/0, 0/100, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 ร้อยละโดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่หมุนทิศทางเดียวกัน ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ (Injection molding) ทดสอบสมบัติเชิงกล (ความทนแรงกระแทก, ความทนแรงดึง, การยืดตัว ณ จุดขาด, ยังส์มอดุลัส) ของพอลิเมอร์ผสม จากนั้นเลือกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่แสดงสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม เพื่อนำไปเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตโดยการผสมแร่โวลลาสโทไนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ คือ 10, 20, 30 และ 40 ร้อยละโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่หมุนทิศทางเดียว ขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยกระบวนการฉีดแบบ

1.3.3 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

1.3.3.1 ทดสอบความทนแรงกระแทก ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact tester) ที่มีรอยบาก (notched) ตามมาตรฐาน ASTM D256

1.3.3.2 ทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง เพื่อหาความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และยังส์มอดุลัส ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal testing machine) ตามมาตรฐาน ASTM D638

1.3.3.3 ตรวจสอบสันฐานวิทยา (Morphology) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เพื่อหาความเข้ากันได้และการกระจายตัวของส่วนผสมต่างๆ ของชิ้นทดสอบ

1.3.3.4 ตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (differential scanning calorimetry, DSC) เพื่อหา  $T_g$ ,  $T_c$ ,  $T_{cc}$ ,  $T_m$ ,  $\Delta H_{cc}$ ,  $\Delta H_m$  และ  $\chi_c$

1.3.3.5 ทดสอบหาอุณหภูมิการการโค้งงอ (Heat distortion temperature, HDT) ตามมาตรฐาน ASTM 648

1.3.3.6 ทดสอบสมบัติการลุกไหม้ (Combustion properties) ตามมาตรฐาน UL 94 (V-0, V-1, V-2)

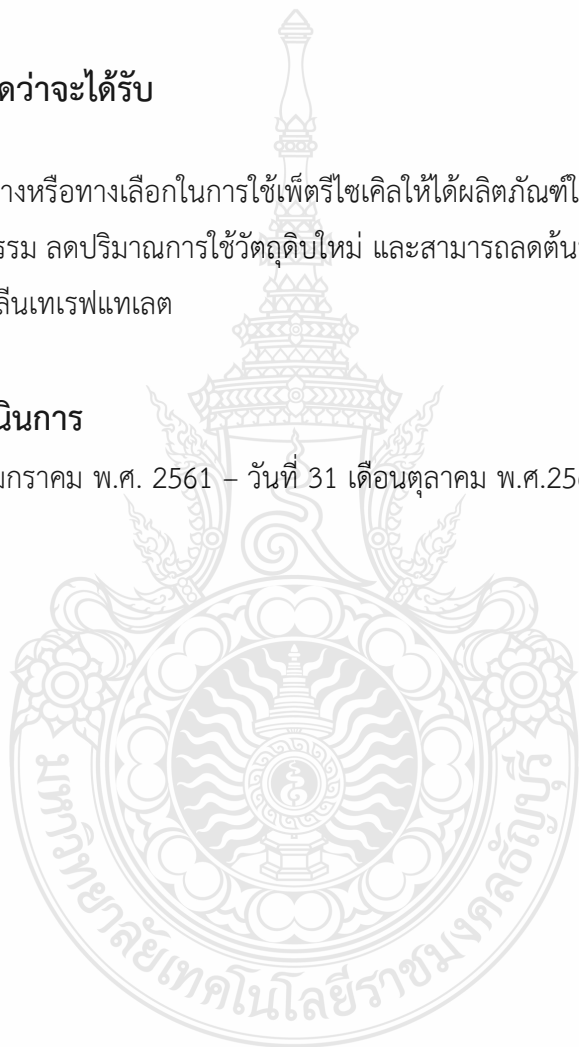
1.3.3.7 วิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผล เพื่อจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์รวมถึงการนำเสนอผลงาน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อเป็นแนวทางหรือทางเลือกในการใช้พีอีทีซีเคลือบให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีสมบัติเหมาะกับการใช้งานภายในอุตสาหกรรม ลดปริมาณการใช้วัตถุดิบใหม่ และสามารถลดต้นทุนวัตถุดิบสำหรับชิ้นส่วนยานยนต์ที่ใช้พอลิเมอร์ที่สิ้นเปลือง

## 1.5 ระยะเวลาดำเนินการ

วันที่ 1 เดือนมกราคม พ.ศ. 2561 – วันที่ 31 เดือนตุลาคม พ.ศ.2562

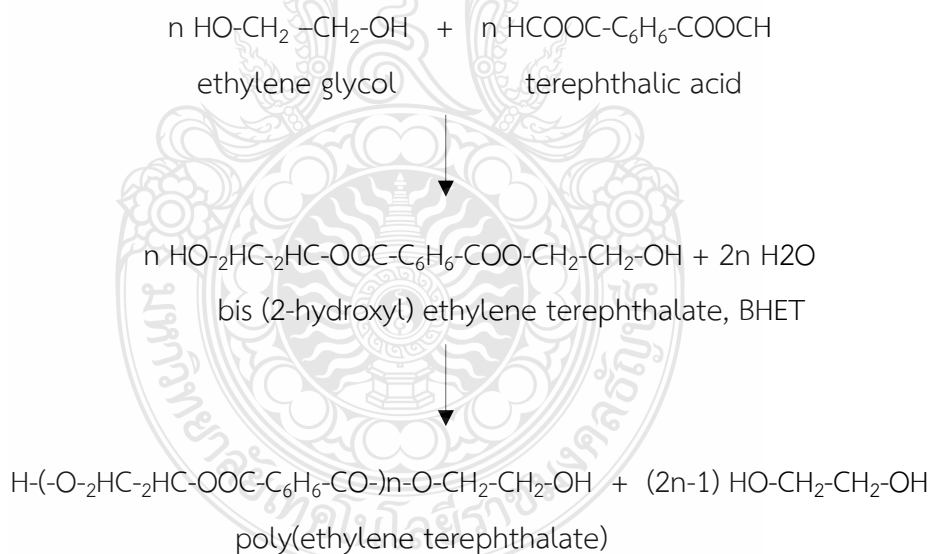


## บทที่ 2

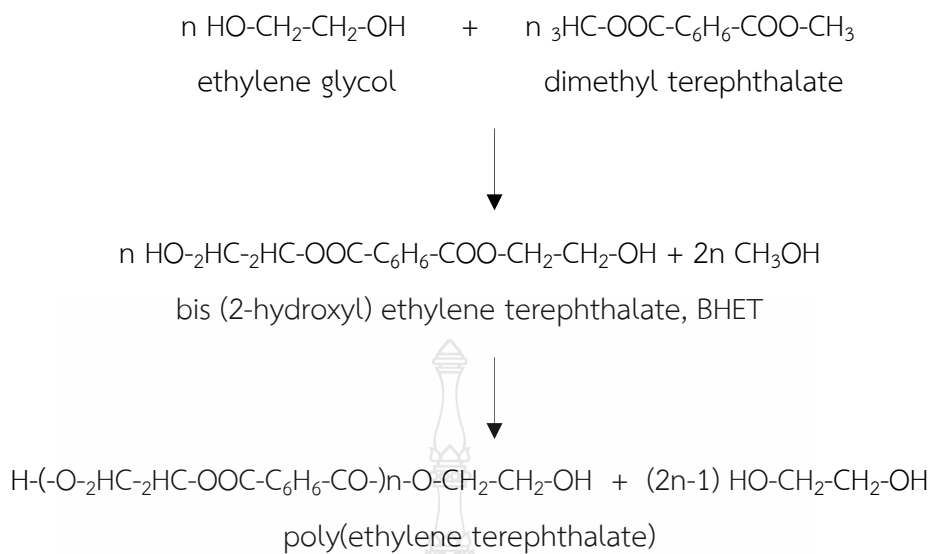
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Review of the Literature)

#### 2.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET)

2.1.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือเพ็ต เป็นเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเตอร์ชนิดอิมิตัวจัดเป็นพลาสติกทางวิศวกรรม (Engineering thermoplastic) ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความใส เสถียรภาพทางความร้อนสูง และทนทานสารเคมี เป็นต้น การนำไปใช้งานส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ ฟิล์มพลาสติกและอุตสาหกรรมสิ่งทอ การสังเคราะห์เพ็ตสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดเทเรฟทาเลอิก (Terephthalic acid) กับเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol) ดังแสดงในภาพที่ 2.1 หรือสามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์ (Ester interchange) ระหว่างสารตั้งต้น 2 ชนิดคือ ไดเมทิลเทเรฟทาเลต (Dimethyl terephthalate) และเอทิลีนไกลคอล ดังแสดงในภาพที่ 2.2

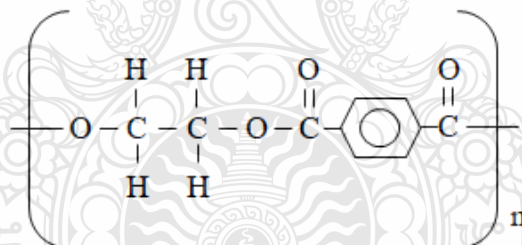


ภาพที่ 2.1 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์เพ็ต (เอสเทอร์ฟิเคชัน) [7,8]



ภาพที่ 2.2 ปฏิกริยาการสังเคราะห์เพ็ต (ปฏิกริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์) [7,9]

จากสมการพบว่าเพ็ตที่สังเคราะห์ได้มีหน่วยซ้ำดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 หน่วยซ้ำในโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต [10]

โครงสร้างหน่วยซ้ำทางเคมีของเพ็ตประกอบด้วยหมู่ เอทิลีนและพาราฟีนีลีน (p-Phenylene) ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างมีความยืดหยุ่น มีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว ( $T_g$ ) อยู่ในช่วง 69–115 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) ประมาณ 255–265 องศาเซลเซียส เนื่องจากเพ็ตมีสมบัติเด่นด้านความใส ความทนทานสารเคมี การดูดซึมความชื้นต่ำ สกัตกั้นการซึมผ่านของแก๊สได้ดี มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง น้ำหนักเบา และราคาถูก เพ็ตที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีความเหนียว ทนทาน และมีความยืดหยุ่นดีเมื่อได้รับแรงกระทบกระแทก จึงไม่แตกเมื่อถูกแรงกดดัน เนื่องจากเพ็ตเป็นเทอร์โมพลาสติก กึ่งผลึก ดังนั้นการนำเพ็ตมาผลิตวัสดุต่างๆ สามารถทำได้โดยเทคนิคการให้ความร้อนและการทำให้เย็นที่

อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ (Heat setting) ซึ่งจะทำให้เพ็ทมีการจัดเรียงโมเลกุลและความเป็นผลึกที่ต่างกัน ซึ่งส่งผลให้สมบัติในการเลือกใช้งานที่แตกต่างกันด้วย

### 2.1.2 กระบวนการรีไซเคิลพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต [7,11,12]

กระบวนการรีไซเคิลเพ็ทมี 2 วิธี คือ กระบวนการรีไซเคิลทางเคมี เป็นการเกิดปฏิกิริยาย่อยสลาย (depolymerization) เพื่อให้ได้เป็นมอนอเมอร์ (monomer) หรือปฏิกิริยาย่อยสลายบางส่วน (partial depolymerization) จะได้โอลิโกเมอร์ (oligomer) ตัวอย่างปฏิกิริยาในกระบวนการรีไซเคิลทางเคมี คือ ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (Hydrolysis reaction) ปฏิกิริยาเมทาโนลิซิส (Methanolysis reaction) ปฏิกิริยาไกลโคลิซิส (Glycolysis reaction)

กระบวนการรีไซเคิลเชิงกล เป็นกระบวนการที่ใช้การหลอมผสมและมีการกำจัดสิ่งเจือปนด้วยการคัดแยก การล้าง และการอบไล่ความชื้น เกล็ดพลาสติกของเพ็ทรีไซเคิลจะผ่านการอัดรีด (Extrusion) เพื่อให้ได้เป็นเม็ดพลาสติก อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการมีสิ่งเจือปนดังกล่าวข้างต้นหรือผลจากการแตกสลายทางความร้อนเป็นผลให้เพ็ทรีไซเคิลมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำ ข้อดีของกระบวนการรีไซเคิลเชิงกล คือ เป็นวิธีที่ง่าย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูง อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของกระบวนการนี้ คือ การลดลงของน้ำหนักโมเลกุลและความหนืด โดยแบ่งวิธีรีไซเคิลเชิงกลเป็น 2 วิธี คือ กระบวนการรีเคลมเมชัน (Reclamation process) เป็นกระบวนการที่มีการคัดแยกขยะพลาสติกตามชนิดของพอลิเมอร์ มีการกำจัดสิ่งเจือปน ล้าง และลดขนาดก่อนเข้าสู่กระบวนการอัดรีด และกระบวนการคอมมิงเกิล (Commingled processing) ขยะพลาสติกจะถูกรวบรวมในสภาพขยะผสมเข้าสู่กระบวนการผลิตโดยไม่ผ่านการคัดแยกตามประเภทของพลาสติก กระบวนการนี้จึงมักมีสิ่งเจือปนมากกว่า

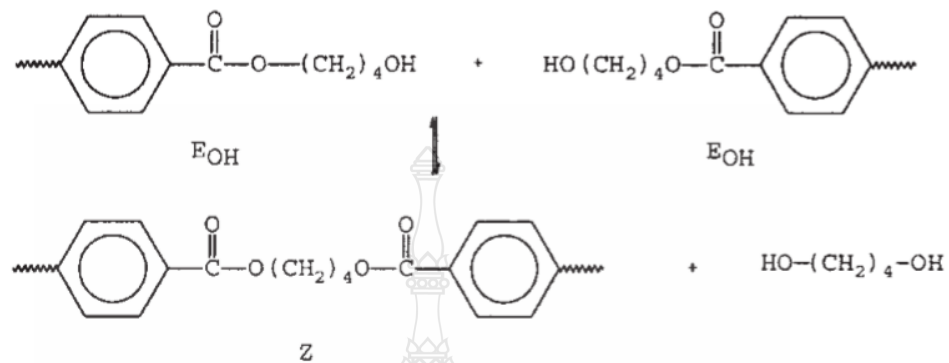
## 2.2 พอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลต (Polybutylene terephthalate, PBT) [7,13]

พอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลตหรือพีบีที (PBT) เป็นพลาสติกในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกวิศวกรรมที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น ระหว่างกรดเทเรฟทาเลอิก หรือไดเทิลเทเรฟทาเลต และบิวเทน 1,4-บิวเทนไดออล (Butane 1,4-diol) โดยในขั้นตอนการสังเคราะห์มี 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือการเตรียมพรีพอลิเมอร์ (Pre polymerization)

และขั้นตอนถัดมาเป็นขั้นตอนพอลิคอนเดนเซชัน ระหว่างขั้นตอนพรีพอลิเมอร์ DMA หรือ TA จะทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน กับหมู่ไดออล ของ 1,4 ไดออล ได้โอลิโกเมอร์ที่มีสายโซ่สั้น

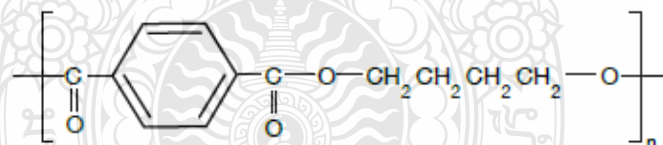


จากนั้นจะเกิดขึ้นตอนพอลิคอนเดนเซชันซึ่งทำให้तिकการเกิดพอลิเมอร์สูงขึ้น ได้พอลิเมอร์ที่มีสายโซ่ยาว ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเบวทีลีนเทรฟทาเลต [13]

การที่พีบีที มีหมู่เมทิลลีนเป็นหน่วยซ้ำในสายโซ่ถึง 4 หมู่ ดังแสดงในภาพที่ 2.5 ทำให้สายโซ่มีความยืดหยุ่นสามารถดัดงอได้ง่าย และความมีขั้วของโมเลกุลต่ำกว่าเพ็ต ดังนั้นจึงมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าเพ็ต คือประมาณ 224 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิคล้ายแก้วประมาณ 22-43 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเบวทีลีนเทรฟทาเลต [10]

โครงสร้างโมเลกุลของพีบีทีมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างโมเลกุลของเพ็ต ดังนั้นสมบัติเชิงกลทั่วจึงคล้ายกันคือ มีความแข็งแรง ความแข็งตึง ความแข็ง และการที่มีหมู่เมทิลลีนมากกว่าเพ็ตทำให้สายโซ่มีความยืดหยุ่นสามารถดัดงอได้ง่าย

สมบัติของพีบีที สามารถทนความร้อนได้สูง เนื่องจากมีวงแหวนเบนซีนอยู่ในสายโซ่โมเลกุลหลัก โครงสร้างสามารถทำให้เกิดเป็นระเบียบได้ (Crystalline) มีความแกร่ง เหนียว ทนต่อแรงกระแทกได้สูง ทนสารเคมีได้ดี โดยเฉพาะ สารละลายกรด ด่าง ไขมัน และน้ำมัน ดูดความชื้นต่ำ มีความสามารถระบายความร้อนจากตัวเองได้ดีกว่าพลาสติกทั่วไป มีสมบัติทางไฟฟ้าดีมาก

## 2.3 พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend)

พอลิเมอร์ผสมเป็นการนำพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันที่มีสมบัติต่างกันมาผสมกันเพื่อให้มีสมบัติตามที่ต้องการเพื่อนำไปใช้งาน การผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากันต้องคำนึงถึงความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์นั้นๆ ทั้งนี้เพราะสมบัติของพอลิเมอร์ผสมขึ้นอยู่กับโครงสร้างของพอลิเมอร์ สภาพขั้ว พฤติกรรมการไหล การกระจายตัวและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ เป็นต้น การเตรียมพอลิเมอร์ผสมมีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับการสังเคราะห์ พอลิเมอร์ชนิดใหม่ขึ้นมาคือสามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมให้ได้ตามต้องการโดยเลือกสมบัติที่ดีจากของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน โดยผสมอัตราส่วนที่เหมาะสม นอกจากนี้แล้วกระบวนการนี้ยังมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ มีระยะเวลาในการผลิตที่รวดเร็ว ต้นทุนต่ำ เช่น การผสมเม็ดพลาสติกบริสุทธิ์กับพลาสติกที่นำกลับมาใช้ใหม่ทั้งแบบที่ใช้เศษพลาสติกบดและพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว [7]

### 2.3.1 กลไกความเข้ากันได้ (Compatibility mechanism) [14-19]

การผสมพอลิเมอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ การผสมแบบเกิดปฏิกิริยาเคมี (Reactive blending) เป็นการผสมพอลิเมอร์ที่มีการเกิดพันธะทางเคมีระหว่างหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ และการผสมแบบไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี (non-Reactive blending) เป็นการผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากันโดยการใช้แรงเฉือนจากเครื่องจักร

ในกระบวนการผสมโดยใช้เครื่องอัดรีด สกรูของเครื่องอัดรีดจะทำให้พอลิเมอร์ได้รับแรงเฉือน และทำให้พอลิเมอร์เกิดการกระจายตัวจนเกิดการผสมขึ้น จุดประสงค์ของการผสมพอลิเมอร์เข้าด้วยกันคือทำให้พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดผสมเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกันโดยพอลิเมอร์แต่ละชนิดจะหลอมเหลวเข้าสู่แต่ละส่วนกันอย่างสมบูรณ์เกิดเป็นเฟสเดียวกันเรียกว่าการผสมที่เข้ากัน (Miscible) ซึ่งจะแสดงลักษณะที่เหมือนเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียว (Homopolymer) แต่ในกรณีที่พอลิเมอร์ผสมยังคงแสดงลักษณะของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกันหรือเกิดการแยกเฟส จะเป็นการผสมแบบไม่เข้ากัน (Immiscible) การที่พอลิเมอร์ไม่สามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้นั้น ทำให้เกิดเฟสที่แตกต่างกันรวมตัวอยู่ด้วยกัน โดยส่วนที่เป็นองค์ประกอบย่อยจะแยกตัวออกจากส่วนที่เป็นองค์ประกอบหลัก ทำให้เกิดเฟสที่ไม่ต่อเนื่องกัน ดังนั้นพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมจึงขึ้นกับขนาดของเฟสย่อย รูปร่าง และการกระจายตัวของเฟสย่อย อีกทั้งพฤติกรรมการไหลในระหว่างกระบวนการผสมก็ส่งผลต่อสมบัติของชิ้นงานที่ขึ้นรูปอีกด้วย อย่างไรก็ตามการทำพอลิเมอร์ผสมอาจมีผลต่อการลดลงของสมบัติเชิงกล อันเนื่องจากการมีแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัส (Interfacial adhesion) ต่ำ ซึ่งการปรับปรุงเพื่อให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติที่ดีขึ้นจึงต้องพิจารณาด้านการปรับปรุงแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสรวมถึงพื้นฐานวิทยาระหว่างผิวสัมผัสเนื่องจากมีความสำคัญต่อการถ่ายโอนความเค้น (Stress transfer)

ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบและสัดส่วนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในพอลิเมอร์ผสม จะมีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากความแตกต่างของสมบัติ ลักษณะเฉพาะตัว พฤติกรรมการไหลและการจัดเรียงของโมเลกุลของแต่ละองค์ประกอบในพอลิเมอร์ผสม ในระบบการผสมที่พอลิเมอร์สามารถเข้ากันได้สมบูรณ์จะแสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เป็นเฟสเดียวคือเหมือนเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียว ส่วนในระบบการผสมที่มีความเข้ากันได้บางส่วนนั้นอนุภาคของเฟสกระจาย (Dispersed phase) จะกระจายอยู่ในเฟสหลักหรือเมทริกซ์ (Matrix) และมีแรงดึงดูดระหว่างเฟส หากระบบการผสมมีความเข้ากันน้อยหรือไม่เข้ากันจะเห็นเฟสกระจายขนาดใหญ่กระจายอยู่ในเฟสหลักโดยไม่มีแรงดึงดูดหรือมีอย่างอ่อนๆระหว่างเฟส

การผสมพอลิเมอร์แต่ละชนิดเข้าด้วยกันส่วนใหญ่มักจะไม่เข้ากันโดยส่วนของเฟสหลักคือพอลิเมอร์ที่มีปริมาณมากกว่าและเฟสกระจายคือพอลิเมอร์ที่มีปริมาณน้อยกว่า การเพิ่มปริมาณของเฟสกระจายในพอลิเมอร์ผสมจะส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันเองของเฟสกระจายและหากปริมาณของเฟสกระจายยังเพิ่มขึ้นอีกจะทำให้เกิดการกลับเฟส เปลี่ยนเป็นเฟสหลักในพอลิเมอร์ผสมซึ่งเรียกว่าการเกิดพฤติกรรมการกลับเฟส (Phase inversion)

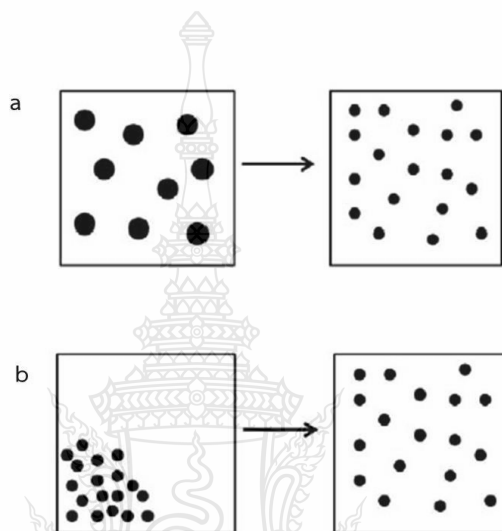
### 2.3.2 หลักการของการผสม [16,20]

ในการผสมพอลิเมอร์เป็นการทำให้ของผสมมีพื้นที่ผิว (Surface area) เพิ่มขึ้นโดยจะเกิดการเคลื่อนที่ของมวล (Mass transfer) ทำให้องค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมเปลี่ยนแปลงขนาด ในช่วงเวลาที่ทำการผสมวิธีการผสมและการเลือกใช้เครื่องมือที่เหมาะสมในการผสมพอลิเมอร์รวมทั้งสารเติมแต่งมีผลต่อระดับการกระจายตัวของสารเติมแต่ง (Degree of dispersion) จะส่งผลต่อพฤติกรรมการไหล (Rheology) ของพอลิเมอร์โดยสามารถแบ่งระบบของการผสมได้ดังนี้

2.3.2.1 ระบบของแข็ง-ของแข็ง (Solid-solid mixing system) แสดงในภาพที่ 2.8 ซึ่งการผสมระบบนี้ อาจทำให้อนุภาคกระจายแยกออกจากกันโดยไม่มีการลดขนาดอนุภาค (Distributive mixing) หรือทำให้อนุภาคกระจายที่เกาะกลุ่มกันลดขนาดลง (Dispersive mixing) ทั้งนี้ ขึ้นกับชนิดของเครื่องผสมสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการผสมระบบของแข็ง-ของแข็งคือขนาดอนุภาค (Particle size) การกระจายขนาดอนุภาค (Particle size distribution) รูปร่างของอนุภาค (Particle shape) ความหนาแน่น (Bulk density) การยึดติดระหว่างผิว (Interfacial adhesion) ความมีขั้ว (Polarity) และความบริสุทธิ์

2.3.2.2 ระบบของแข็ง-ของเหลว (Solid-liquid mixing system) เป็นระบบที่มีของแข็งกระจายอยู่ในของเหลวตัวอย่างเช่น การผสมสารตัวเติมในพอลิเมอร์หลอมเหลวโดยเป็นการให้ความร้อนเพื่อให้พอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลวแล้วมีผลทำให้อนุภาคของสารตัวเติมถูกปกคลุมด้วยพอลิเมอร์ ชนิดนั้นในระหว่างกระบวนการผสมด้วยเครื่องอัดรีด

2.3.2.3 ระบบของเหลว-ของเหลว (Liquid-liquid mixing system) เป็นการผสมพอลิเมอร์มากกว่าสองชนิดเข้าด้วยกันโดยการหลอมผสมโดยเพื่อให้เกิดการผสมแบบไม่มีการลดขนาดของอนุภาคจะต้องทำให้ของเหลวที่ผสมเกิดการแยกออกจากกันแล้วทำให้เกิดการจัดเรียงตัวในทิศทางใหม่ๆ โดยมีการให้แรงเค้นเฉือนและแรงตึงผิวที่สูงและสม่ำเสมอส่วนการผสมแบบที่มีการลดขนาดของอนุภาคที่เกาะกลุ่มกันอยู่ส่วนใหญ่เป็นการทำพอลิเมอร์ผสมเนื่องจากพอลิเมอร์หลอมเหลวทั้ง 2 เฟสไม่สามารถเข้ากันได้หรืออาจเข้ากันได้เพียงบางส่วน



ภาพที่ 2.6 ลักษณะการผสมแบบ (a) Dispersive mixing และ (b) Distributive mixing [21]

โดยปกติการเตรียมพอลิเมอร์ผสมเทอร์โมพลาสติกส่วนใหญ่ มักจะไม่สามารถผสมเข้ากันได้ในระดับโมเลกุลจึงจำเป็นต้องมีตัวประสานเข้ามาช่วยเพื่อให้การผสมเป็นเนื้อเดียว

## 2.4 สารตัวเติม (filler) [16,22]

สารตัวเติม หมายถึง สารที่เติมเพื่อต้องการวัตถุประสงค์บางอย่าง เช่น เพิ่มเนื้อให้กับพอลิเมอร์ เมทริกซ์เป็นการลดต้นทุน หรือ ปรับปรุงสมบัติจำเพาะของพอลิเมอร์ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสมบัติความทนไฟ เป็นต้น

สารเติมแต่งในระบบอุตสาหกรรมมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด โดยแบ่งเป็นสารอนินทรีย์ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ทัลค์ และโวลลาสโทไนต์ เป็นต้น และสารอินทรีย์ เช่น ผงไม้ ถ่านกัมมันต์และซีลีเนียม เป็นต้น การแบ่งประเภทของสารตัวเติมโดยทั่วไปแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ประเภทแรกจะเป็น สารตัวเติมประเภทเสริมแรง (Reinforcing filler) สารเติมแต่งประเภทนี้จะช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์และ

ความสามารถในการขึ้นรูปให้ดีขึ้น โดยสารตัวเติมประเภทเสริมแรงจะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้กับของพอลิเมอร์ เช่น สมบัติความทนแรงดึง โมดูลัส การยืดตัว ณ จุดขาด ความทนแรงกระแทกและความทนแรงดัดโค้ง เป็นต้น ตัวอย่างของสารตัวเติมประเภทเสริมแรง ได้แก่ ซิลิกา และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น และสารตัวเติมประเภทที่ 2 คือสารตัวเติมประเภทเพิ่มเนื้อ (Extender) สารเสริมเติมแต่งประเภทนี้มีวัตถุประสงค์หลัก คือ เพิ่มปริมาณเนื้อของผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ลดต้นทุนการผลิต โดยสารเติมแต่งประเภทนี้อาจส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์บางอย่าง เช่น โมดูลัส ความแข็ง และการหดตัวของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น ตัวอย่างของสารตัวเติมประเภทเพิ่มเนื้อ ได้แก่ ทัลค์ แคลเซียมคาร์บอเนต และโซนาเคลย์ เป็นต้น

2.4.1 ปัจจัยของสารตัวเติมที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์เมทริกซ์ การเลือกใช้สารตัวเติมควรต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.4.2.1 รูปร่างของอนุภาคสารตัวเติม สารตัวเติมแต่ละชนิดมีรูปร่างแตกต่างกันไป เช่น ทรงกลม ทรงกระบอก เข็ม เส้นใย สามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยม เป็นต้น ซึ่งสารตัวเติมที่มีรูปร่างแตกต่างกันจะส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์เมทริกซ์แตกต่างกันออกไป

2.4.2.2 การกระจายขนาดอนุภาค การกระจายขนาดอนุภาคส่งผลอย่างมากกับสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เมทริกซ์ หากสารตัวเติมสามารถกระจายตัวได้ดีจะส่งผลให้พอลิเมอร์เมทริกซ์มีสมบัติที่ดีกว่าสารตัวเติมที่เกิดการเกาะกลุ่มกัน

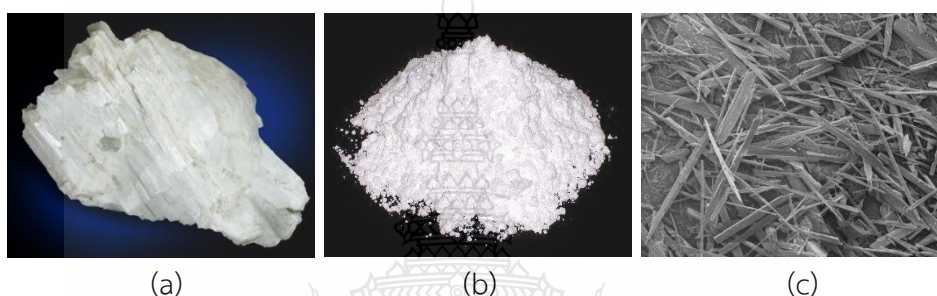
2.4.2.3 พื้นที่ผิว การยึดเกาะกันระหว่างของพอลิเมอร์และสารตัวเติมจะเกิดขึ้นบริเวณของพื้นที่ผิวของสารตัวเติม ดังนั้นถ้าพื้นที่ผิวมีแนวโน้มยึดเกาะกันกับสารตัวเติมได้ดีจะส่งผลให้พอลิเมอร์เมทริกซ์มีสมบัติที่ดีขึ้น

2.4.2.4 ส่วนประกอบทางเคมี เป็นสมบัติที่สำคัญอีกอย่างที่จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการขึ้นรูปของพอลิเมอร์

## 2.5 แร่โวลลาสโทไนต์ (Wollastonite) [23-24]

โวลลาสโทไนต์เป็นแร่ซิลิเกต (metasilicate,  $\text{CaSiO}_3$ ) ที่ได้จากธรรมชาติ มีลักษณะเป็นแท่งผลึกรูปเข็ม (Acicular or needle-like) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โวลลาสโทไนต์ถูกตั้งชื่อตามนักเคมีและแร่วิทยาชาวอังกฤษผู้ค้นพบ คือ W.H. Wollaston โวลลาสโทไนต์บริสุทธิ์มีสีขาว แต่เมื่อมีสิ่งเจือปนจะเปลี่ยนเป็นสีครีม ชมพู หรือสีแดง โวลลาสโทไนต์สังเคราะห์ได้จากกระบวนการให้ความร้อนและความดัน (Hydrothermal) ซึ่งจะเปลี่ยนหินปูน (Limestone) เป็นโวลลาสโทไนต์ และคาร์บอนไดออกไซด์

เพื่อให้สารปราศจากโลหะปนเปื้อนจึงใช้แม่เหล็กในการคัดแยกสิ่งเจือปนดังกล่าว โวลลาสโทไนต์ถูกนำมาใช้ในทางอุตสาหกรรมมากในช่วงปี ค.ศ.1950 ทั้งอุตสาหกรรมพลาสติก สี อุปกรณ์ทนการขีดสี เซรามิก และโลหะ ในปัจจุบันเริ่มนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของวัสดุคอมโพสิตทางการแพทย์ โวลลาสโทไนต์เกรดผงมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างต่ำ (3:1, 5:1) มีความละเอียดให้เลือกตั้งแต่ 5000 เมช (3×9 ไมโครเมตร) 1250 เมช (4×12 ไมโครเมตร) 400 เมช (8×24 ไมโครเมตร) 325 เมช (14×56 ไมโครเมตร) 200 เมช (19×95 ไมโครเมตร) เกรดที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างสูง (10:1, 20:1) มักใช้สำหรับเสริมแรงในพลาสติก มีความยาวแห้งผลึกตั้งแต่ 30-825 ไมโครเมตร



ภาพที่ 2.7 โวลลาสโทไนต์ที่มีลักษณะเป็นก้อนผลึกแร่ (a) [22], โวลลาสโทไนต์ที่ผ่านการบดละเอียด (b) [25], อนุภาคแบบแท่งของโวลลาสโทไนต์ (c) [26]

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแร่โวลลาสโทไนต์ [22]

| องค์ประกอบทางเคมี                                    | ปริมาณ (%) |
|------------------------------------------------------|------------|
| แคลเซียมออกไซด์ (CaO)                                | 47         |
| ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> )                 | 50         |
| สนิมเหล็ก (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )          | 1          |
| อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 0.3        |
| โพแทสเซียม (K <sub>2</sub> O)                        | 0.1        |
| แมงกานีสออกไซด์ (MnO)                                | 0.1        |
| แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)                              | 0.3        |
| ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO <sub>2</sub> )               | 0.3        |
| ฟอสฟอรัส (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )            | 0.04       |

การใช้งานของโวลลาสโทไนต์ส่วนใหญ่นิยมใช้กับพลาสติกวิศวกรรม เช่น ไนลอน พอลิเอสเตอร์ เป็นต้น นอกจากนี้ ยังนำมาเป็นฟิลเลอร์ร่วมกับใยหินในการทำผลิตภัณฑ์จากพีนอลิกเรซิน (เช่น ฝ้าเบรค) เพื่อลดต้นทุนการผลิตและยังเป็นการลดอันตรายจากการใช้ใยหินปริมาณสูงๆ ด้วย เช่นเดียวกับฟิลเลอร์ชนิดอื่นๆ ในการทำให้โวลลาสโทไนต์กระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น สามารถทำได้โดยการปรับแต่งพื้นผิวด้วยซิลเลน นอกจากช่วยเรื่องการกระจายตัวแล้วยังช่วยปรับปรุงการก่อกัมกับพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น ในอุตสาหกรรมเซรามิกและวัสดุก่อสร้างมีการใช้งานโวลลาสโทไนต์เป็นจำนวนมาก และอุตสาหกรรมพลาสติก จะใช้โวลลาสโทไนต์ในการปรับปรุงค่าความแข็งแรง หรือ เป็น Active filler เนื่องจากโวลลาสโทไนต์มีลักษณะเป็นแบบผลึกรูปเข็ม (Needle-like structure) นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงเรื่องการเป็นฉนวนไฟฟ้า มีความทนไฟดีขึ้น และช่วยเรื่องขนาดของชิ้นงานให้ไม่ผันแปรมากเกินไป สำหรับโวลลาสโทไนต์ที่เป็นเกรดที่มีขนาดอนุภาคละเอียดมากจะช่วยปรับปรุงเรื่องความทนทานต่อการขีดข่วนและการกระแทกได้ดี งานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้โวลลาสโทไนต์เพื่อปรับปรุงสมบัติพลาสติกมีหลายด้าน

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 Supawee Makkam and Wanlop Harnnarongchaia [27] ได้ศึกษาสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลของการปรับปรุง PET recycled โดยการ Reactive Extrusion ด้วยเทคนิคแบบหลอมเหลว การยืดสายโซ่ต่อการปรับปรุงโครงสร้างโมเลกุลและสมบัติการยืดตัว (Elongation) ภายใต้ RPET มีสถานะเป็นของแข็ง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มส่วนขยายของสายโซ่มีผลให้น้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น และ RPET มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างขึ้น และมีความหนืดเพิ่มขึ้นเกิดจากกลุ่มสายโซ่ RPET ที่สายโซ่มีการเคลื่อนตัวที่ลดลง สมบัติทางด้าน Tensile พบว่าในสถานะหลอมและแข็งนั้น พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นที่ 0.6 wt% ของ Chains extender หลังจากนั้นมียาลดลงที่ 0.9 wt%

2.6.2 J.D. Badia และคณะ [28] ศึกษาเกี่ยวกับความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต ในส่วนของ Mobile amorphous และ Rigid amorphous โดยการนำเม็ดมาผ่าน กระบวนการรีไซเคิลซ้ำ จำนวน 5 รอบ คือ VPET ซึ่งเป็นเม็ดที่ไม่ผ่านกระบวนการรีไซเคิล และ RPET1-5 ซึ่งเป็นเม็ดที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลครั้งที่ 1 ถึงครั้งที่ 5 ตามลำดับ พบว่าการรีไซเคิลเม็ดซ้ำหลายครั้งส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงและค่าความทนแรงกระแทกเปลี่ยนแปลงไป โดยค่ามอดูลัสของ RPET ที่นำกลับมารีไซเคิล ครั้งที่ 3-5 นั้น พบว่าค่ามอดูลัสของยังส์ ลดลงประมาณ 14% เมื่อเทียบกับ VPET และส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าร้อยละการยืดตัวที่จุดขาดลดลงอย่างชัดเจน หรืออีกนัยหนึ่งวัสดุแสดงความเปราะเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการรีไซเคิลซ้ำหลายครั้ง ซึ่งผลการทดสอบความทนแรงกระแทก

พบว่ามีการลดลงประมาณครึ่งหนึ่งของ VPET เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและสัณฐานวิทยาของพีท ซึ่งสอดคล้องทฤษฎีการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์เนื่องจากปัจจัยทางความร้อนและแรงทางกล

2.6.3 Deshmukh และคณะ [29] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly(butylene terephthalate, PBT) ที่เสริมแรงด้วยโวลลาสโทไนต์ พบว่า PBT และโวลลาสโทไนต์มีอันตรกิริยาระหว่างผิวที่ดีโดยไม่ต้องใช้สารช่วยผสมหรือสารคู่ควบ (coupling agent) ซึ่งผลจากการมีอันตรกิริยาระหว่างผิวช่วยให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบได้รับการปรับปรุง และจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน พบว่า โวลลาสโทไนต์สามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียส (nucleating agent) โดยสังเกตจากเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบของ PBT มีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น

2.6.4 ศยามณ สุวรรณโชติ และ คณะฯ [30] ศึกษาการใช้ PP-g-MAH เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพลาสติกผสม r-PET/PP/WLT โดยการเตรียมพลาสติกผสม/คอมพอสิตระหว่าง r-PET/PP/WLT โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) และขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยการฉีด การหาอัตราส่วนผสมของ พีทและพอลิโพรพิลีนที่เหมาะสม เตรียมโดยการใส่พอลิเอทิลีนในพีทที่อัตราส่วน 10-60 % พบว่าที่การผสมพอลิโพรพิลีน 30 % ให้ค่าสมบัติความทนแรงดึง และความทนแรงกระแทกสูง จากนั้นจึงนำพลาสติกผสมที่อัตราส่วนนี้ มาใส่ PP-g-MAH เพื่อเพิ่มสมบัติความเข้ากันได้โดยเติมในปริมาณ 1-7 phr พบว่า ที่ปริมาณการเติมที่ 3 phr แสดงสมบัติความทนแรงกระแทกและยังสม่ำเสมอแล้วจึงนำพอลิเมอร์ผสมสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) มาเตรียมเป็นวัสดุคอมพอสิตด้วยการใส่โวลลาสโทไนต์ ในอัตราส่วน 5,10,15, และ 20 % จากการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างเคมีของพลาสติกผสม/คอมพอสิต (FTIR) พบว่าวัสดุผสมไม่เกิดฟักใหม่ จึงเป็นการผสมทางกายภาพ และเมื่อตรวจสอบสมบัติทางความร้อน (DSC) พลาสติกผสมมีค่าอุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) ที่สูงขึ้นประมาณ 5-18 องศาเซลเซียส ตามปริมาณของโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้นแสดงว่าโวลลาสโทไนต์สามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกได้ และเมื่อทดสอบอุณหภูมิการดัดงอเนื่องจากความร้อน (HDT) พลาสติกผสม/คอมพอสิตแสดงผลการดัดงอที่อุณหภูมิสูงขึ้นในทุกอัตราส่วนของโวลลาสโทไนต์ ในกรณีสมบัติเชิงกล ค่าความทนแรงดึง และค่าความทนแรงกระแทกจะมีค่าสูงกว่าพีท แต่เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมค่าที่ได้มีความแตกต่างกันไม่มากนัก แต่ค่ามอดูลัสของพลาสติกผสม/คอมพอสิตจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณของโวลลาสโทไนต์

2.6.5 Rashmi Nitin Baxi และคณะ [31] ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติความทนแรงกระแทกในพอลิเมอร์ผสม PET-PBT โดยอัตราส่วนของการผสมคือร้อยละ 60/40 โดยน้ำหนัก และการใช้สารปรับปรุงแรงกระแทกที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ Elvaloy AC 10% และ PP co-polymer B220



MN ในการปรับปรุงสมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม จากการทดลองพบว่า การเติม PP co-polymer สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมได้ดีกว่า ดูได้จากค่าความต้านทานแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก PP co-polymer สามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ผสมได้มากกว่า

2.6.6 P.R.Rajakumar และ R.Nanthini [32] ได้ศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนและสัณฐานทางวิทยาของ PBT/PET โดยใช้เทคนิคการหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 80-20 (PBT/PET) และผสมกับ MMT และ OMMT ในอัตราส่วน 3% และ 5% พบว่าค่าทนแรงกระแทก , การทนต่อแรงดึงและการทนต่อการยืดหยุ่น มีค่าเพิ่มขึ้น 1-7 %โดยน้ำหนัก เนื่องจากความเข้าเป็นเนื้อเดียวกันและการกระจายของตัวที่ดีของ Clay

2.6.7 Makarand Risbud และคณะ [33] ได้ศึกษาการเตรียมคอมพอสิตของ PBT/โพลีแลคติกแอซิด โดยมีการทดลองการหลอมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ ในอัตราส่วน 70:30 และ 50:50 (PBT/W) จากผลการทดลองของ DSC พบว่า พฤติกรรมการหลอมและการตกผลึกมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย สมบัติเชิงกล เช่น tensile modulus มีค่าเพิ่มขึ้นค่อนข้างโดดเด่นเนื่องจากผลการรวมตัวของโพลีแลคติกแอซิด

2.6.8 Zhang และคณะ [34] ได้ศึกษาวัสดุนาโนคอมพอสิตที่ประกอบด้วยอนุภาคนาโนซิลิกาและเตรียมการผสมกับ PBT/PET โดยการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ transesterification ระหว่าง PBT และ PET ถูกยับยั้งเนื่องจากอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีการกระจายตัวได้ดี ในเมทริกซ์ของ PBT /PET ซึ่งได้รับการพิสูจน์แล้วว่าอนุภาคนาโนซิลิกา ทำตัวเป็นตัวยับยั้งของ transesterification ระหว่าง PET และ PBT ระหว่างกระบวนการหลอมเหลว นอกจากนี้อนุภาคนาโนซิลิกา สามารถทำปฏิกิริยากับกลุ่มปลายของโพลีเอสเตอร์ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออยู่ที่ส่วนเชื่อมต่อระหว่างขั้นตอน PBT และ PET

2.6.9 Mohammadreza Nofar และ Hazal Oguz [35] ได้ศึกษาพอลิเมอร์ผสม PBT กับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล และอิทธิพลในการใช้ Chian extender โดยการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ ในอัตราส่วน r-PET และ PBT (25w/75w, 50w/50w, และ 75w/25w) ผลการวิจัยพบว่า การเติม Chian extender ช่วยให้ความหนืดของ PET เพิ่มขึ้น และจากการผสม PBT/r-PET ส่วนที่เป็นสัณฐานสามารถผสมกันได้อย่างสมบูรณ์ เพียงแต่ในส่วนที่เป็นผลึกไม่สามารถหลอมได้อย่างเต็มที่เนื่องจากมีเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้โมเลกุลของ PBT และ PET ยังสามารถตกผลึกร่วมกันและเข้ากันได้เป็นอย่างดีเมื่อการหล่อเย็นที่ช้าลง อย่างไรก็ตาม การเติม Chian extender ไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลมากนัก

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิลหรือเพ็ทรีไซเคิล (RPET) ได้จากหลอดพรีฟอร์มเหลือทิ้งในโรงงานการผลิต (ภาพที่ 3.1)



ภาพที่ 3.1 หลอดพรีฟอร์มเหลือทิ้งในโรงงานการผลิต (พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต)

3.1.2 พอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลต (PBT) ชื่อทางการค้า Duranex® เกรด 2092 FF2001 บริษัท Polyplastics ประเทศญี่ปุ่น แสดงในภาพที่ 3.2 และมีสมบัติตามตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.2 พอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลต (PBT)

ตารางที่ 3.1 สมบัติของพลาสติก พอลิบิวทิลีนเทรฟทาเลตเกรด 2092 FF2001

|                                    | มาตรฐานการทดสอบ | PBT เกรด 2092<br>FF2001 | หน่วย             |
|------------------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------|
| <b>Mechanical Properties</b>       |                 |                         |                   |
| Density                            | ASTM D792       | 1.46                    | g/cm <sup>3</sup> |
| Tensile Strength                   | ASTM D638       | 52.0                    | MPa               |
| Tensile elongation at Break        | ASTM D638       | 15                      | %                 |
| Flexural modulus                   | ASTM D790       | 3130                    | MPa               |
| Bending strength                   | ASTM D790       | 93                      | MPa               |
| Izod notched impact strength       | ASTM D256       | 34.0                    | J/m               |
| <b>Thermal Properties</b>          |                 |                         |                   |
| Heat deflection temperature 1.8MPa | ASTM D648       | 110                     | °C                |
| Flammability rating                | UL 94           | V-0                     |                   |

ที่มา : <http://www.jusuwang.com/plastic/view-41558.html>

3.1.3 แร่โวลลาสไทต์ ขนาดอนุภาค 2000 เมช ชื่อทางการค้า Wollastonite XYNFW-XA แสดงในภาพที่ 3.3 จาก บริษัท Pacific Comma Trading CO.,Ltd ประเทศจีน ได้รับความอนุเคราะห์จากรองศาสตราจารย์เสาวรณ ช่วยจุลจิตร



ภาพที่ 3.3 แร่โวลลาสไทต์ (Wollastonite)

## 3.2 เครื่องมือที่ใช้ดำเนินการวิจัย

### 3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม/คอมโพสิตและชิ้นงานทดสอบ

3.2.1.1 เครื่องซัง รุ่น QHW-6+-R (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

3.2.1.2 เครื่องบดพลาสติก ชื่อรุ่นทางการค้า BOSCO บริษัท BOSCO ENGINEER ประเทศไทย (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

3.2.1.3 เครื่องอบพลาสติก ชื่อรุ่นทางการค้า BINDER FD115 บริษัท Merck KGaA ประเทศเยอรมัน (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

3.2.1.4 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่หมุนทิศทางเดียวกัน (Corotating-screw extruder) ชื่อรุ่นทางการค้า Brabender CTE-D02L800 ประเทศอังกฤษ (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

3.2.1.5 เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) ชื่อรุ่นทางการค้า ARBURG ALLROUNDER 470 C GOLDEN EDITION ขนาดแรงอัดแม่พิมพ์ 150 ตัน (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

### 3.2.2 เครื่องทดสอบและวิเคราะห์

3.2.2.1 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (Impact tester) ชื่อรุ่นทางการค้า Ceast 9709 ประเทศอิตาลี (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

3.2.2.2 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal testing machine) ชื่อรุ่นทางการค้า Hounsfield H 50 K ประเทศอังกฤษ (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

3.2.2.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ชื่อรุ่นทางการค้า SEM SU5000 Hitachi ประเทศญี่ปุ่น (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

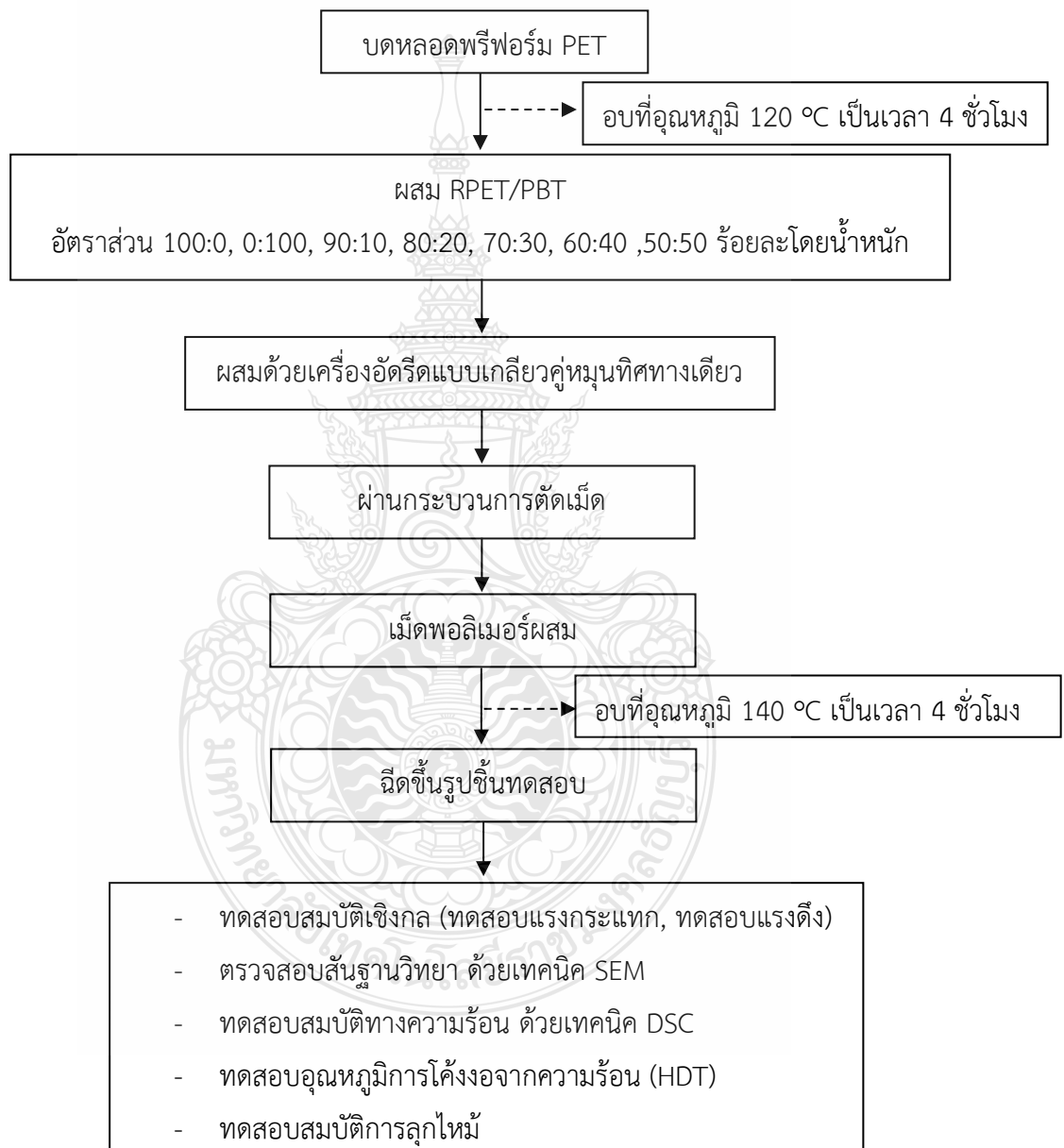
3.2.2.4 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential scanning calorimeter, DSC) ชื่อรุ่นทางการค้า Netzsch DSC 200 F3 ประเทศเยอรมัน (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

3.2.2.5 เครื่องทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อน ชื่อรุ่นทางการค้า CEAST 6911 ประเทศอิตาลี (Heat distortion temperature , HDT) (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

3.2.2.6 เครื่องทดสอบการลุกไหม้และลามไฟ ชื่อรุ่นทางการค้า CEAST ประเทศ อิตาลี (คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

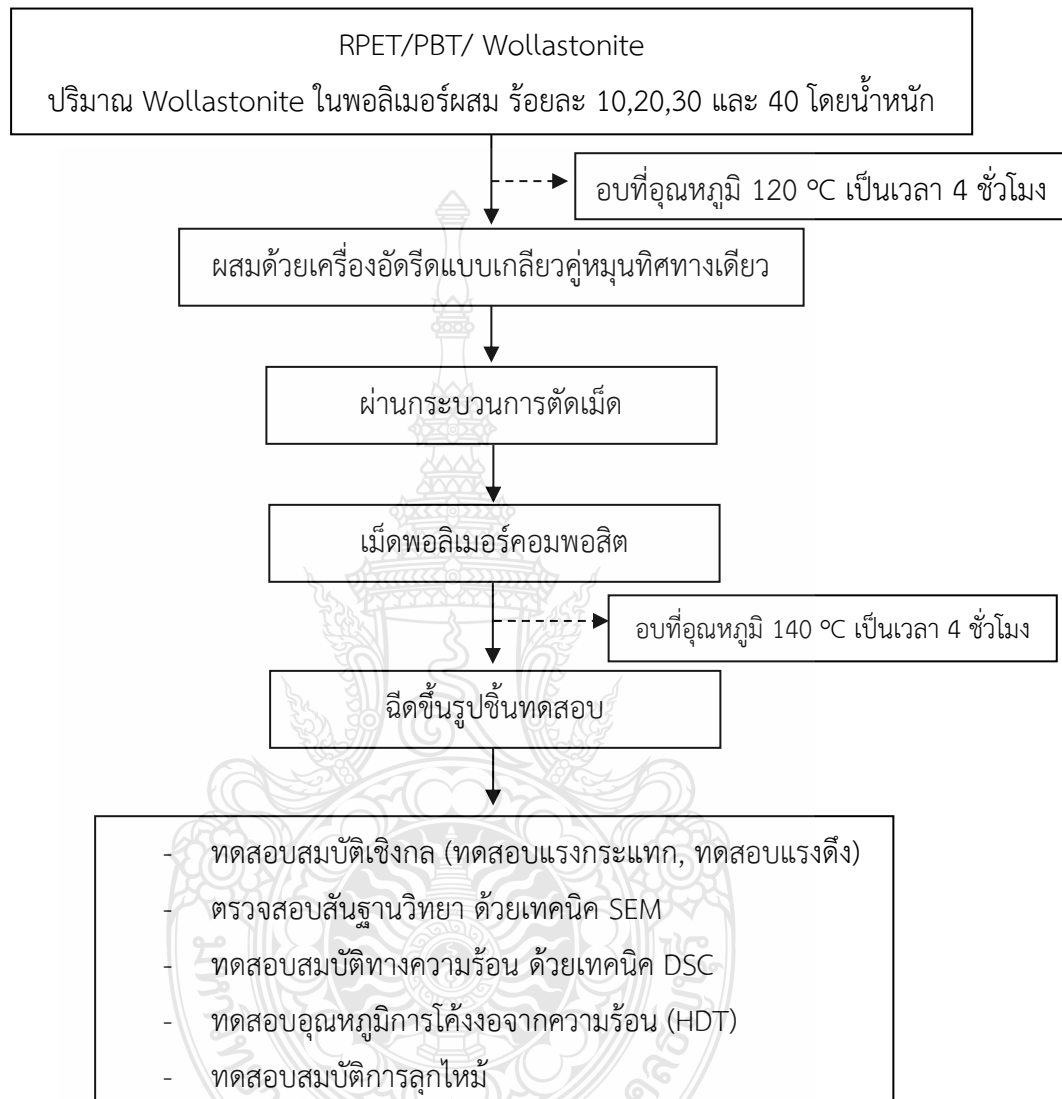
### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การขึ้นรูปและทดสอบพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT ดังแสดงขั้นตอนในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการขึ้นรูปและทดสอบพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT

3.3.2 การขึ้นรูปและทดสอบพอลิเมอร์ผสมคอมพอสิต RPET/PBT/Wollastonite ดังแสดง  
ขั้นตอนในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการขึ้นรูปและทดสอบพอลิเมอร์คอมพอสิต RPET/PBT/ Wollastonite

### 3.4 วิธีการทดลอง

#### 3.4.1 การบดหลอดพรีฟอร์ม

นำหลอดพรีฟอร์มเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกมาบด โดยใช้เครื่องบด  
ดังภาพที่ 3.6 ให้มีขนาดใกล้เคียงกับเม็ด PBT ซึ่งจากการบดจะได้เศษบดหลอดพรีฟอร์ม ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.6 เครื่องบดพลาสติก (Bosco)



ภาพที่ 3.7 เศษบดหลอดพรีฟอร์ม PET

#### 3.4.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT

นำเศษบดหลอดพรีฟอร์ม RPET และเม็ด PBT ไปอบไล่ความชื้นที่ตกค้างในชั้นพลาสติกที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่หมุนทิศทางเดียว ดังแสดงในภาพที่ 3.8 ที่หล่อเย็นด้วยน้ำ โดยใช้ภาวะการผสมดังนี้

|                           |                  |
|---------------------------|------------------|
| โซนป้อน (Feed zone)       | 200 องศาเซลเซียส |
| โซนอัด (Compression zone) | 260 องศาเซลเซียส |
| โซนหลอม (Metering zone)   | 265 องศาเซลเซียส |
| โซนดายน์ (Die zone)       | 245 องศาเซลเซียส |
| ความเร็วรอบสกรู           | 75 รอบ/นาที      |

พอลิเมอร์ผสมที่ได้จากเครื่องผสมแบบเกลียวคู่มีลักษณะเป็นเส้นยาวต่อเนื่อง (Extrudate) ถูกดึงผ่านน้ำเพื่อทำให้เย็นตัว (Cooling) แล้วทำการตัดเป็นเม็ด (Pellet) ได้เม็ดพลาสติกผสมตามภาพที่ 3.9 นำพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มาอบไล่ความชื้นอีกครั้งหนึ่งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยการฉีดแบบ (ภาพที่ 3.10) โดยใช้อุณหภูมิในการฉีดเข้าแบบ ตั้งแต่ 255 - 300 องศาเซลเซียส และตั้งภาวะการฉีดดังนี้

|                                    |                       |
|------------------------------------|-----------------------|
| โซนป้อน (Feed zone)                | 255 องศาเซลเซียส      |
| โซนอัด 1 (Compression zone 1)      | 275 องศาเซลเซียส      |
| โซนอัด 2 (Compression zone 2)      | 280 องศาเซลเซียส      |
| โซนหลอม (Metering zone)            | 285 องศาเซลเซียส      |
| โซนหัวฉีด (Nozzle zone)            | 300 องศาเซลเซียส      |
| ความเร็วในการฉีด (Injection speed) | 10 cm <sup>3</sup> /s |
| แรงดันฉีด (Injection pressure)     | 1050 bar              |

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT โดยน้ำหนัก

| องค์ประกอบ | 1   | 2   | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  |
|------------|-----|-----|----|----|----|----|----|
| RPET (wt%) | 100 | -   | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 |
| PBT (wt%)  | -   | 100 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |



ภาพที่ 3.8 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่หมุนทิศทางเดียว (CTE-D02L800)





ภาพที่ 3.9 เม็ดพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT



ภาพที่ 3.10 เครื่องฉีดแบบ ARBURG ALLROUNDER 470 C 150T

#### 3.4.3 การเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตของ RPET/PBT/แร่ไวลลาสโทไนต์

การเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตของ RPET/PBT/Wollastonite นำพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT ที่เตรียมจากขั้นตอนที่ 3.4.2 ที่มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่เหมาะสม นำมา ผสมกับแร่ไวลลาสโทไนต์ปริมาณร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม จากนั้นนำ สูตรทั้งหมด ใช้ภาวะแบบเดียวกันกับข้อ 3.4.2 อบไล่ความชื้นและผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่องอัดรีด แบบเกลียวคู่หมุนทิศทางเดียว นำพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เตรียมได้มาอบไล่ความชื้นอีกครั้งหนึ่ง ก่อน นำไปขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยการฉีดแบบ

### 3.5 วิธีการทดสอบ

#### 3.5.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล

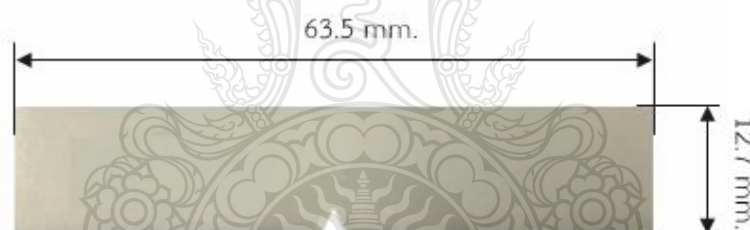
##### 3.5.1.1 สมบัติด้านความทนแรงกระแทก

ทดสอบหาความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod type) โดยนำชิ้นทดสอบที่ได้จากการฉีดแบบขนาด 12.7×63.5 × 3 มิลลิเมตร (กว้าง× ยาว × หนา) ไปบากด้วยเครื่องบากให้รอยบากทำมุม 45 องศา ลึก 2.54 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D 256 (ภาพที่ 3.11) โดยวางชิ้นงานในภาวะการทดสอบ 24 ชั่วโมง เพื่อลดความเครียดภายในชิ้นงาน แล้วจึงทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (ภาพที่ 3.12) ภายใต้ภาวะการทดสอบ คือ น้ำหนักค้อน 2 จูล (Joule) จากนั้นคำนวณค่าความทนแรงกระแทกจากสมการที่ 3.1

$$\text{Impact strength (J/m)} = \frac{\text{Energy (J)}}{\text{Thickness (m)}} \quad (3.1)$$

โดย Energy = พลังงานในการทำให้วัสดุแตกหัก (จูล)

Thickness = ความหนาของชิ้นงาน (เมตร)



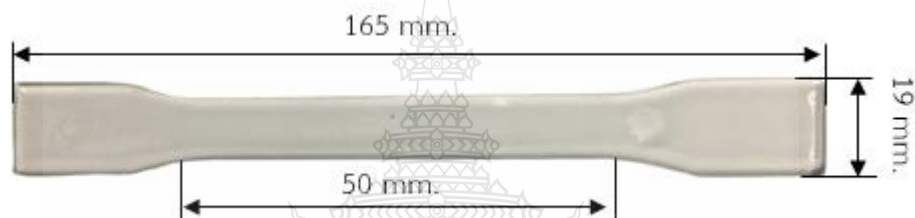
ภาพที่ 3.11 ชิ้นทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอดแบบมีรอยบากตามมาตรฐาน ASTM D 256



ภาพที่ 3.12 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Ceast)

### 3.5.1.2 สมบัติด้านความทนแรงดึง

นำชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D638 type I ที่ได้จากการฉีดแบบ ดังแสดงในภาพที่ 3.13 เก็บไว้ในห้องทดสอบ 24 ชั่วโมง เพื่อลดความเครียดของชิ้นงาน ก่อนนำไปทดสอบด้วยเครื่องยูนีเวอร์เซล (Hounsfield H 50 KS) (ภาพที่ 3.14) ภายใต้ภาวะการทดสอบคือ ระยะดึง (Gauge length) 50 มิลลิเมตร ขนาดของ Load cell เท่ากับ 10 กิโลนิวตัน อัตราการยืดคงที่ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร/นาที อุณหภูมิการทดสอบ  $25 \pm 3$  องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าความทนแรงดึง (Tensile strength) ยังส์มอดุลัส (Young's modulus) และการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break)



ภาพที่ 3.13 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D 638 type I



ภาพที่ 3.14 เครื่องทดสอบยูนีเวอร์เซล (Hounsfield H 50 KS)

### 3.5.1.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพื้นผิวขึ้นทดสอบ

ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ตามภาพที่ 3.15 เพื่อศึกษาการกระจายตัวของส่วนผสมต่างๆ ของขึ้นทดสอบจากการทดสอบสมบัติความทนแรงดึง มาเตรียมเป็นชิ้นขนาดเล็กวางติดบนแท่นอะลูมิเนียมด้วยเทปคาร์บอน จากนั้นนำขึ้นทดสอบเคลือบด้วยฟิล์มบางๆของทองในระบบสุญญากาศ เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ และใช้ความต่างศักย์ที่ 15 kV โดยใช้กำลังขยาย 1,000 และ 3,000 เท่า



ภาพที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM SU5000)

### 3.5.1.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential scanning calorimeter, DSC) ตามภาพที่ 3.16 นำชิ้นงานบรรจุในจานอะลูมิเนียมแล้วปิดผนึกด้วยเครื่องปิดผนึก จากนั้นนำไปทดสอบภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนด้วยภาวะการทดลอง ดังนี้

เริ่มทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 0 ถึง 350 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส/นาที แล้วคงอุณหภูมิที่ภาวะนี้ นาน 5 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิจาก 350 องศาเซลเซียส จนถึง 0 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็ว 10 องศาเซลเซียส/นาที คงอุณหภูมิที่ภาวะนี้เป็นเวลา 5 นาที โดยทดสอบ 2 รอบภายใต้เงื่อนไขเดิม

ทดสอบหาสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิจากเทอร์โมแกรม (Thermogram) โดยบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะจะแสดงพีคการดูดกลืนและคายความร้อน ซึ่ง เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อน ทำให้ทราบอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพ



แก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ), อุณหภูมิการเกิดผลึก (Crystallization temperature,  $T_c$ ), อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (Crystallization cooling temperature,  $T_{cc}$ ), อุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting temperature,  $T_m$ ), เอนทัลปีการหลอมเหลวผลึก (Melting enthalpy,  $\Delta H_m$ ) และปริมาณการเกิดผลึก (Degree of crystallinity,  $\chi_c$ )



ภาพที่ 3.16 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Netzsch DSC 200 F3)

3.5.1.5 การทดสอบสมบัติอุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อน (Heat distortion temperature , HDT) ) ตามภาพที่ 3.17 เตรียมชิ้นทดสอบ ขนาด 13 ×127× 3 มม. (กว้าง×ยาว×หนา) จำนวน 3 ชิ้น วางบนแท่นวางชิ้นงาน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 648 method A โดยให้แรงเค้นชิ้นงานเท่ากับ 1.82 MPa และใช้น้ำมันซิลิโคนเป็นของเหลวตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน ให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ  $2 \pm 0.2$  องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นการหาอุณหภูมิที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบโค้งงอเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวรลงไปตำแหน่ง 0.25 มิลลิเมตร จากตำแหน่งเดิมเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและมีแรงกด บันทึกเป็นค่าอุณหภูมิการเสียรูปภายใต้การได้รับแรงกด



### ภาพที่ 3.17 เครื่องทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อน (Ceast)

#### 3.5.1.6 ทดสอบสมบัติการลุกไหม้

เตรียมตัวอย่างทดสอบ ขนาด 13 x 127 x 3 มม. (กว้าง x ยาว x หนา) จำนวน 5 ชิ้น วางบนแท่นวางชิ้นงานในตู้ทดสอบการติดไฟและลามไฟ (ภาพที่ 3.18) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน UL94 ในแนวตั้ง (Vertical burning test :VB) (ภาพที่ 3.19) จุดไฟ 2 ครั้ง แต่ละครั้งจุดเป็นเวลา 10 วินาที ระยะเวลาที่พลาสติกลุกไหม้ (มีเปลวไฟ) หลังจากจุดแต่ละครั้งจนกระทั่งไฟดับจะถูกบันทึกเวลาเป็น  $T_1$  และ  $T_2$  ส่วน  $T_3$  เป็นเวลาหลังจาก  $T_2$  (วัสดุเกิดการหดร่น) การทดสอบแนวตั้งแบ่งเป็น 3 ระดับ คือ V-0 , V-1 , V-2 ในระดับ V-0 จะต้านทานการติดไฟได้ดีที่สุด

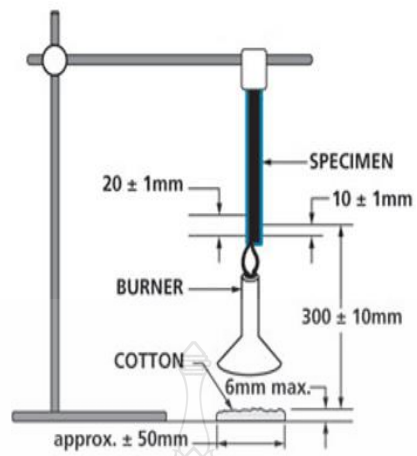
ระดับ V-0 สามารถดับไฟได้เองภายใน 10 วินาที ไม่มีการไหลหยด และไม่เกิดการลุกของเปลวไฟภายใน 30 วินาที

ระดับ V-1 สามารถดับไฟได้เองภายใน 30 วินาที ไม่มีการไหลหยด และไม่เกิดการลุกของเปลวไฟภายใน 60 วินาที

ระดับ V-2 สามารถดับไฟได้เองภายใน 30 วินาที มีการไหลหยด และไม่เกิดการลุกของเปลวไฟภายใน 60 วินาที (มีลักษณะคล้ายกับ V-1 แต่เกิดการไหลหยดของวัสดุประเภทพลาสติกที่ใช้ทดสอบ)



ภาพที่ 3.18 ตู้ทดสอบการติดไฟและลามไฟตามมาตรฐาน UL94 ทดสอบแบบแนวตั้ง



ภาพที่ 3.19 ลักษณะการวางชิ้นงานเพื่อทดสอบการติดไฟและลามไฟ



## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาแนวทางในการนำเพ็ทรีไซเคิล (RPET) ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตหลอดพรีฟอร์มในโรงงานอุตสาหกรรมมาเพิ่มมูลค่าเพื่อให้สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ในทางวิศวกรรม ด้วยการผสมกับพอลิบิวทิลีนเทรฟทาเลต (PBT) และวอลลาสโทไนต์ (wollastonite) ในอัตราส่วนต่างๆ โดยมี RPET เป็นเมทริกซ์หลัก ซึ่งงานวิจัยได้แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

1. เตรียมและทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT
2. เตรียมและทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิต RPET/PBT/Wollastonite

#### 4.1 พอลิเมอร์ผสม RPET/PBT

##### 4.1.1 ลักษณะชิ้นทดสอบ

ภาพที่ 4.1 แสดงชิ้นทดสอบของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT (RPET90/PBT10, RPET80/PBT20, RPET70/PBT30, RPET60/PBT40 และ RPET50/PBT50) ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ



ภาพที่ 4.1 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT ที่อัตราส่วนต่างๆ



จากภาพที่ 4.1 พบว่า ชั้นทดสอบ RPET มีสีใสและโปร่งแสง ขณะที่ PBT มีสีขาวขุ่น ซึ่งเมื่อเตรียมพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT ในอัตราส่วนต่างๆ ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ และขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดแบบ พบว่าชิ้นงานมีลักษณะทึบแสง สีขาวขุ่น ความขาวเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PBT ที่เพิ่มขึ้น

#### 4.1.2 สมบัติเชิงกล

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกล (ความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง ยั่งสัมมอดูลัส และการยืดตัว ณ จุดขาด) ของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT

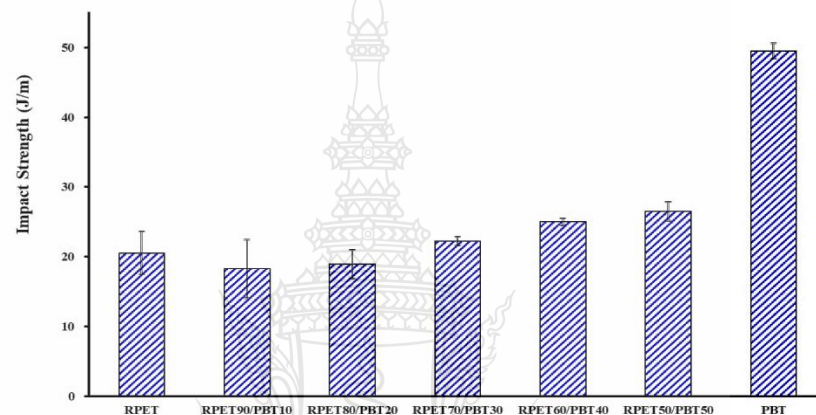
**ตารางที่ 4.1** สมบัติเชิงกลของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT

| Sample       | Impact strength<br>(J/m) | Tensile strength<br>(MPa) | Elongation at<br>break<br>(%) | Young's<br>modulus<br>(MPa) |
|--------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| RPET         | 20.5 ± 3.0               | 61.6 ± 2.0                | 4.8 ± 0.5                     | 1757.7 ± 109.0              |
| PBT          | 49.5 ± 1.0               | 50.4 ± 1.0                | 4.4 ± 0.4                     | 2302.3 ± 203.5              |
| RPET90/PBT10 | 18.3 ± 4.2               | 37.8 ± 7.0                | 2.2 ± 0.5                     | 2312.5 ± 244.5              |
| RPET80/PBT20 | 19.0 ± 2.0               | 46.0 ± 5.7                | 3.0 ± 0.5                     | 1998.8 ± 155.5              |
| RPET70/PBT30 | 22.2 ± 0.6               | 53.2 ± 5.0                | 3.2 ± 0.5                     | 2284.7 ± 187.5              |
| RPET60/PBT40 | 25.0 ± 0.5               | 56.0 ± 6.6                | 3.2 ± 0.5                     | 2451.0 ± 218.5              |
| RPET50/PBT50 | 26.5 ± 1.4               | 49.3 ± 2.6                | 3.0 ± 0.3                     | 1974.0 ± 201.5              |

##### 4.1.2.1 ความทนแรงกระแทก (Impact strength)

จากตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.2 พบว่า ความทนแรงกระแทกของ RPET และ PBT มีค่าเท่ากับ 20.5 และ 49.5 J/m ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเติม PBT ใน RPET ปริมาณ 10 และ 20% โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม (18.3 และ 19.0 J/m ตามลำดับ) มีค่าลดลงและต่ำกว่าของ RPET เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจาก PBT ที่ใส่เข้าไปมีปริมาณน้อยเกินไปจึงไม่สามารถกระจายตัวได้สม่ำเสมอภายในเมทริกซ์ของ RPET และกลายเป็นความบกพร่อง (Defect) ที่เกิดขึ้นภายในชิ้นทดสอบ ซึ่งทำให้ไม่มีผลในการเพิ่มความเหนียว (Toughness) ให้กับ RPET และอาจเป็นเพราะ PBT มีความทนแรงกระแทกสูงกว่า RPET มาก

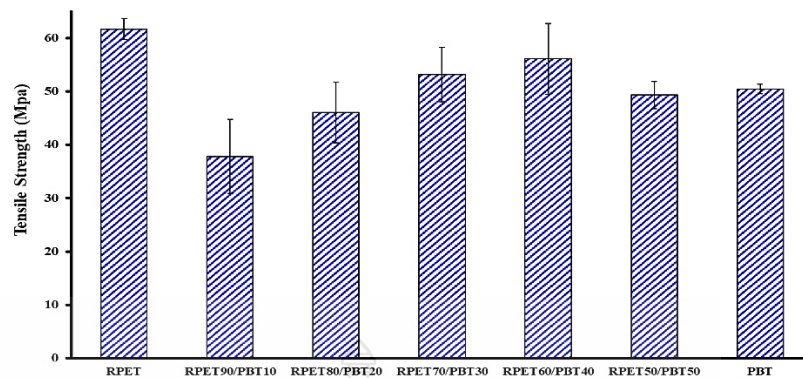
จึงส่งผลให้ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเติม PBT ในปริมาณเพิ่มขึ้น (30, 40 และ 50% โดยน้ำหนัก) พบว่า ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีค่ามากกว่าของ RPET และมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณของ PBT ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก PBT สามารถกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์ของ RPET ได้เพิ่มขึ้น จึงช่วยให้การส่งผ่านความเค้น (stress transfer) จาก RPET ไปยัง PBT เกิดได้ดี และทำให้ PBT สามารถดูดซับพลังงานของการกระแทกได้เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.2 ความทนแรงกระแทกของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT

#### 4.1.2.2 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

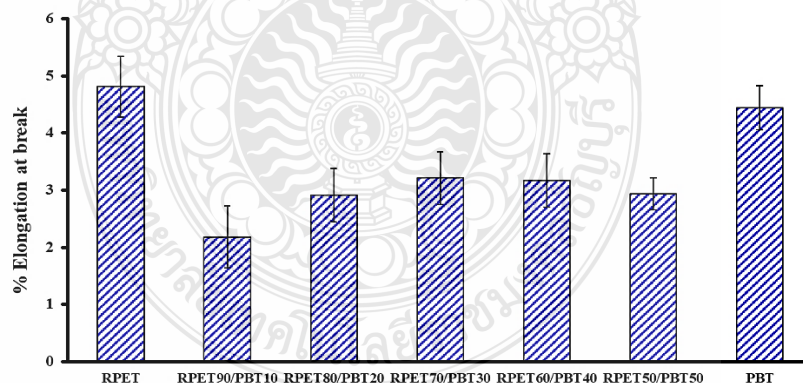
จากตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.3 พบว่า ความทนแรงดึงของ RPET และ PBT มีค่าเท่ากับ 61.6 และ 50.4 MPa ตามลำดับ ดังนั้น การเติม PBT ที่มีความทนแรงดึงต่ำกว่า จึงมีผลทำให้ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมทุกองค์ประกอบมีค่าต่ำกว่าของ RPET หากแต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PBT ที่ใส่เข้าไป และมีค่าสูงที่สุด (56 MPa) เมื่อใส่ PBT ปริมาณ 40% โดยน้ำหนัก และกลับมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อใส่ PBT เพิ่มขึ้นเป็น 50% โดยน้ำหนัก (49.3 MPa) โดยมีค่าใกล้เคียงความทนแรงดึงของ PBT ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการแยกเฟส (Phase separation) ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง จึงทำให้พอลิเมอร์แต่ละประเภทแสดงสมบัติของตัวเองในพอลิเมอร์ผสม หรืออาจเกิดการกลับเฟส (Phase reversion) ซึ่งสามารถยืนยันพฤติกรรมได้จากภาพสัณฐานวิทยาบนผิวชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



ภาพที่ 4.3 ความทนแรงดึงของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT

#### 4.1.2.3 การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break)

จากตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.4 พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาดของ RPET และ PBT มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 4.8 และ 4.4% ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองมีโครงสร้างเป็นแอโรมาติกที่มีความแข็งตึง (Stiffness) สูง จึงทำให้สามารถยืดตัวได้น้อย ดังนั้น การใส่ PBT จึงไม่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT และยังมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย โดยมีค่าสูงที่สุดประมาณ 3.2%

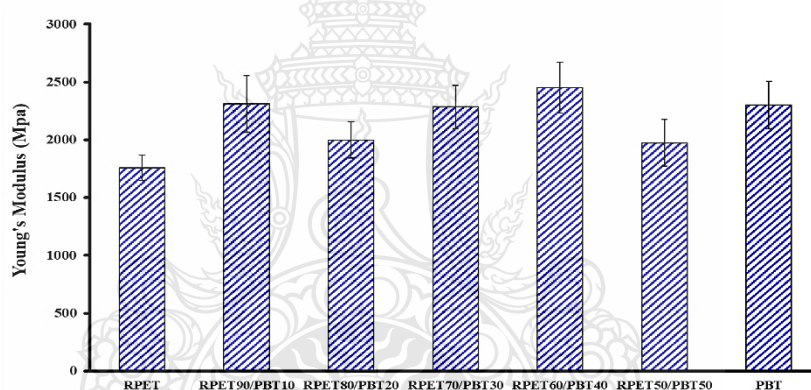


ภาพที่ 4.4 การยืดตัว ณ จุดขาดของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT

#### 4.1.2.4 ยังส์มอดุลัส (Young's modulus)

จากตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.5 พบว่า ยังส์มอดุลัสของ RPET และ PBT มีค่าเท่ากับ 1757.7 และ 2302.3 MPa ตามลำดับ ดังนั้น การเติม PBT ซึ่งมียังส์มอดุลัสสูง

กว่าจึงมีผลทำให้ยังสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงกว่าของ RPET ล้วนโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1974–2451 MPa หากแต่มีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นที่ไม่แน่นอน และการที่พอลิเมอร์ผสมมีค่ายังสัมผัสเพิ่มขึ้นอาจเนื่องสายโซ่ PBT ขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่ RPET รวมทั้งมีการพันกันของสายโซ่ (Chain entanglement) ระหว่าง RPET-PBT และ PBT-PBT ที่ส่งผลต่อความยากง่ายในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพอลิเมอร์ผสม โดยพอลิเมอร์ผสมที่ใส่ PBT ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก มีมอดุลัสสูงเนื่องจากสายโซ่ RPET มีโอกาสพันกับสายโซ่ PBT ได้มากกว่า จึงทำให้เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ยาก และเมื่อใส่ PBT เพิ่มมากขึ้นอาจทำให้เกิดการพันกันเอง ส่งผลให้สายโซ่ RPET เคลื่อนไหวง่ายขึ้น (มอดุลัสลดลง) แต่ถ้า PBT สามารถกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ของ RPET ทำให้ขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่ RPET ได้มากขึ้น (มอดุลัสเพิ่มขึ้น) และลดลงอีกครั้งเมื่อมีการแยกเฟสหรือกลับเฟสดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

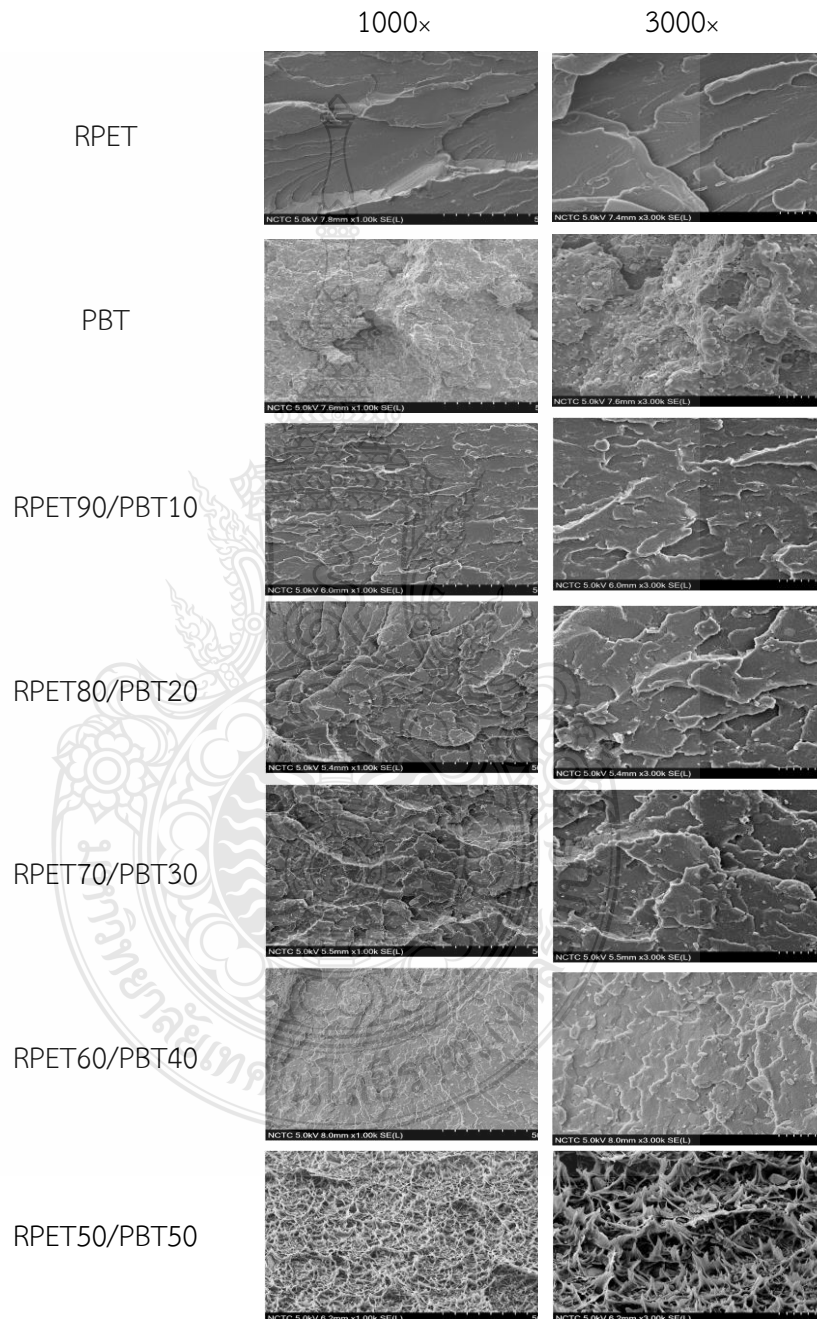


ภาพที่ 4.5 ยังสัมผัสของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT

#### 4.1.3 สัณฐานวิทยา

ภาพที่ 4.6 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณผิวรอยแตกของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT ที่อัตราส่วนต่างๆ จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภายใต้กำลังขยาย 1000× และ 3000× ผลจากการตรวจสอบ พบว่า พื้นผิวรอยแตกของ RPET ล้วน มีลักษณะเรียบและมีริ้วบางๆ ซึ่งแสดงถึงวัสดุที่สามารถรับแรงได้น้อย และมีความแข็งเปราะ ในขณะที่ PBT ล้วน มีพื้นผิวหยาบมากกว่า ซึ่งแสดงถึงวัสดุที่มีความเหนียว (Toughness) และเมื่อผสม PBT กับ RPET พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีพื้นผิวรอยแตกที่หยาบและขรุขระมากขึ้น ซึ่งแสดงว่าพอลิเมอร์ผสม

RPET/PBT มีความเหนียวเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ RPET ล้วน เนื่องจาก PBT ได้เข้าไปเพิ่มความเหนียวให้กับ RPET อย่างไรก็ตาม พบการแยกเฟสหรือกลับเฟสเมื่อใส่ PBT ปริมาณมาก (50% โดยน้ำหนัก) เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่ม (Agglomerate) ของ PBT ซึ่งสอดคล้องและสนับสนุนผลการทดสอบสมบัติเชิงกลที่ได้กล่าวมาแล้ว



ภาพที่ 4.6 สัณฐานวิทยาของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT (1000× และ 3000×)

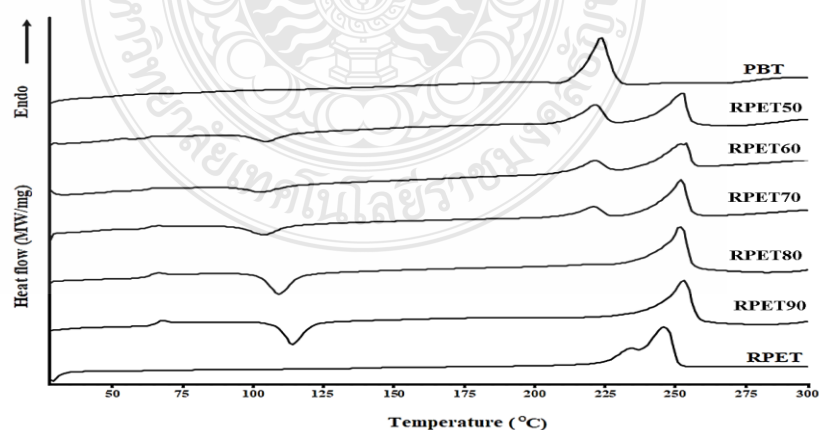
#### 4.1.4 สมบัติทางความร้อน

##### 4.1.4.1 ทดสอบด้วยเทคนิค DSC

ตารางที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว ( $T_g$ ), อุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ), อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น ( $T_{cc}$ ), อุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ), เอนทาลปีการเกิดผลึกเย็น ( $\Delta H_{cc}$ ), เอนทาลปี การหลอมเหลว ( $\Delta H_m$ ) และระดับการเกิดผลึก (Degree of crystallinity,  $\chi_c$ ) ที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (First heating) (ภาพที่ 4.7), การเย็นตัว (Cooling) (ภาพที่ 4.8) และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (Second heating) (ภาพที่ 4.9) ของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT

ตารางที่ 4.2 ค่า  $T_g$ ,  $T_c$ ,  $T_{cc}$ ,  $T_m$ ,  $\Delta H_m$ ,  $\Delta H_{cc}$  และ  $\chi_c$  ของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT

| Sample       | First heating |                  |                      |                       |                       |                          |                 | Cooling       | Second heating |                       |                        |
|--------------|---------------|------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------|---------------|----------------|-----------------------|------------------------|
|              | $T_g$<br>(°C) | $T_{cc}$<br>(°C) | $T_{m\ PBT}$<br>(°C) | $T_{m\ RPET}$<br>(°C) | $\Delta H_m$<br>(J/g) | $\Delta H_{cc}$<br>(J/g) | $\chi_c$<br>(%) | $T_c$<br>(°C) | $T_m$<br>(°C)  | $\Delta H_m$<br>(J/g) | $\chi_{c,RPET}$<br>(%) |
| RPET         | -             | -                | -                    | 236, 248              | 51.0                  | -                        | 42.5            | 210.0         | 233, 247       | 51.6                  | 43.0                   |
| PBT          | -             | -                | 225.0                | -                     | 40.0                  | -                        | 27.6            | 206.0         | 220.6          | 47.4                  | 33.0                   |
| RPET90/PBT10 | 69.8          | 115.5            | -                    | 254.5                 | 49.0                  | 17.6                     | 29.0            | 203.8         | 226.6, 239.3   | 44.5                  | 41.2                   |
| RPET80/PBT20 | 68.0          | 110.8            | -                    | 253.5                 | 43.0                  | 18.4                     | 25.7            | 199.7         | 218, 232.6     | 42.3                  | 44.0                   |
| RPET70/PBT30 | 67.5          | 105.0            | 222.2                | 253.2                 | 32.7                  | 10.7                     | 26.2            | 177.0         | 209            | 24.6                  | 29.3                   |
| RPET60/PBT40 | 68.0          | 104.4            | 223.5                | 255.6                 | 25.5                  | 6.7                      | 26.2            | 167.3         | 200            | 16.4                  | 22.8                   |
| RPET50/PBT50 | 67.0          | 105.6            | 223.3                | 254.0                 | 29.7                  | 8.0                      | 36.3            | 150.3         | 188            | 29.2                  | 48.7                   |



ภาพที่ 4.7 DSC เทอร์โมแกรมของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT จากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1



จากตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.7 พบว่า RPET ล้วน มี  $T_m$  เกิดขึ้น 2 ตำแหน่ง (236 และ 248 องศาเซลเซียส) ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ซึ่งเกิดจากการหลอมเหลวของผลึกที่มีความสมบูรณ์ต่างกัน [35] โดยผลึกที่มีความสมบูรณ์น้อยกว่าเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำกว่าผลึกที่มีความสมบูรณ์มากกว่า นอกจากนี้ ยังไม่พบพีก  $T_g$  และ  $T_{cc}$  ของ RPET ล้วน จึงอาจกล่าวได้ว่า RPET มีความเป็นผลึกอยู่แล้วหรือเกิดผลึกไปแล้วขณะทำให้เย็นลงภายหลังกระบวนการฉีดแบบ โดยมีระดับความเป็นผลึกประมาณ 42.5% ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 4.1

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

โดย  $\Delta H^0_m$  คือ เอนทาลปีการหลอมเหลวของ RPET ที่มีระดับความเป็นผลึก 100% (120 J/g) [36] และ  $w$  คือ สัดส่วนโดยน้ำหนัก (weight fraction) ของ RPET ในชิ้นทดสอบ

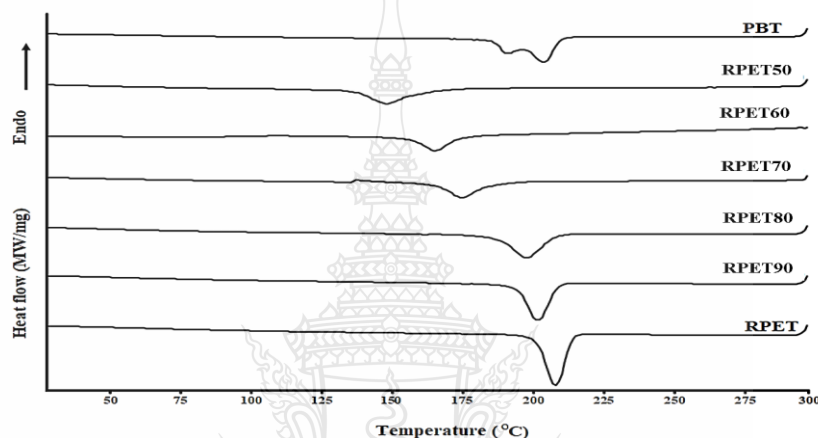
ในขณะที่ PBT ล้วน แสดง  $T_m$  แห่งเดียวที่ 225 องศาเซลเซียส และการใส่ PBT ปริมาณน้อย (10 และ 20% โดยน้ำหนัก) ใน RPET ทำให้ไม่พบ  $T_m$  ของ PBT ในพอลิเมอร์ผสม หากแต่พบได้เมื่อใส่ PBT ปริมาณ 30–50% โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตาม การใส่ PBT ใน RPET ทำให้สามารถพบพีก  $T_g$  และ  $T_{cc}$  ของ RPET ซึ่งแสดงว่าในระหว่างพอลิเมอร์ผสมเย็นตัวลง RPET ยังคงมีความเป็นอสัณฐาน ทั้งนี้เนื่องจาก RPET มีอัตราการเกิดผลึกต่ำมาก [35] จึงไม่สามารถเกิดผลึกได้ทันเวลา ดังนั้น การให้ความร้อนกับพอลิเมอร์ผสมที่อุณหภูมิสูงกว่า  $T_g$  แต่ต่ำกว่า  $T_m$  ได้ช่วยให้สายโซ่ RPET ในเฟสที่เป็น อสัณฐานได้รับพลังงานเพียงพอที่จะเคลื่อนที่มาจัดเรียงตัวเป็นระเบียบในรูปแบบของสเฟียรูไลต์ (Spherulite) ขนาดเล็กที่ตำแหน่ง  $T_{cc}$  ซึ่งสามารถคำนวณหาระดับความเป็นผลึกของ RPET ได้จากสมการที่ 4.2

$$\chi_c (\%) = \frac{[\Delta H_m - \Delta H_{cc}] \times 100}{w \Delta H^0_m} \quad (4.2)$$

ผลจากการคำนวณ พบว่า ระดับความเป็นผลึกของ RPET ในพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณ PBT ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความเป็นผลึกของ PBT (27.6%) มีค่าต่ำกว่าของ RPET (42.5%) อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณ PBT เพิ่มขึ้น 50% พบว่า ระดับความเป็นผลึกของ RPET กลับมีค่าเพิ่มขึ้นอีก แสดงว่าเกิดจากการแยกเฟส ทำให้โมเลกุลของ PBT ไม่ขัดขวางการจัดเรียงตัวของ RPET



นอกจากนี้ พบว่า RPET ในพอลิเมอร์ผสมทั้งหมดแสดง  $T_g$ ,  $T_{cc}$  และ  $T_m$  ซึ่งเป็นพฤติกรรมของพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semicrystalline polymer) จากตารางและรูปพบว่า ทั้ง  $T_g$  และ  $T_{cc}$  ของ RPET ในพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงเล็กน้อยตามปริมาณของ PBT ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก PBT ช่วยให้สายโซ่ RPET เคลื่อนไหวได้ง่ายและเกิดผลึกได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณ PBT เพิ่มขึ้นเป็น 40 และ 50% โดยน้ำหนัก พบว่าพิก  $T_{cc}$  ของ RPET เล็กลงจนเกือบหายไป เนื่องจาก PBT บางส่วนขัดขวางการเกิดผลึกของ RPET

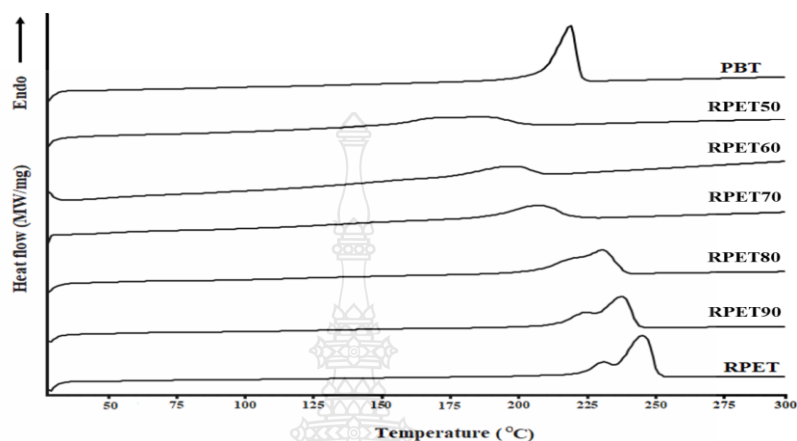


ภาพที่ 4.8 DSC เทอร์โมแกรมของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT จากขั้นตอนการเย็นตัว

จากตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.8 พบว่า RPET ล้วน มี  $T_c$  ที่ 210 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นผลของการเกิดผลึกจาก RPET หลอมเหลวในระหว่างการทำให้เย็นตัวลงมาที่อัตรา 10 องศาเซลเซียส/นาที โดย RPET มีเวลาเพียงพอสำหรับการเกิดผลึก หลังจากที่ได้ถูกลบประวัติทางความร้อนในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 นอกจากนี้  $T_c$  ของ RPET ในพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง (6.2–59.7 องศาเซลเซียส) ตามปริมาณของ PBT ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ  $T_c$  ของ RPET ล้วน ซึ่งแสดงว่า PBT หน่วงการเกิดผลึกของ RPET ทำให้ RPET ในพอลิเมอร์ผสมเกิดผลึกที่อุณหภูมิต่ำกว่าหรือใช้เวลาเกิดผลึกนานกว่า

อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมี  $T_c$  เพียงตำแหน่งเดียว ทั้งที่ RPET และ PBT เกิดผลึกที่อุณหภูมิต่างกัน อาจเป็นผลจากการเกิดผลึกร่วม (Co-crystallization) ในพอลิเมอร์ผสม ซึ่งทำให้พอลิเมอร์ทั้งสองมีความเข้ากันได้เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nofar และ Oguz [35] อย่างไรก็ตาม เมื่อความเข้ากันได้ลดลงทำให้ความกว้างของพิกขยายเพิ่มขึ้นและความสูงของพิกลดลง โดยเฉพาะ RPET50 ที่อาจมี

การแยกเฟสระหว่าง RPET และ PBT ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และการที่ PBT มี  $T_c$  ปรากฏ 2 ตำแหน่ง อาจเกิดจากโครงสร้างส่วนที่เป็นอะลิแฟติกสามารถเกิดผลึกได้ง่ายที่อุณหภูมิสูงกว่าส่วนที่เป็นอะโรแมติก



ภาพที่ 4.9 DSC เทอร์โมแกรมของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT จากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2

จากตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.9 พบว่า ไม่ปรากฏทั้ง  $T_g$  และ  $T_{cc}$  ของขั้นตอนทดสอบทุกองค์ประกอบ แต่มีเพียงพิก  $T_m$  เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจาก RPET เกิดผลึกไปแล้วในขั้นตอนการทำให้เย็นตัว นอกจากนี้ RPET ล้วน และ RPET ในพอลิเมอร์ผสมที่ใส่ PBT ปริมาณ 10 และ 20% โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็น  $T_m$  เกิดขึ้น 2 ตำแหน่ง โดย  $T_m$  ของ RPET ล้วน ปรากฏที่อุณหภูมิ 233 และ 247 องศาเซลเซียส ในขณะที่  $T_m$  ของ RPET ในพอลิเมอร์ผสมปรากฏที่อุณหภูมิประมาณ 226 และ 239.3 องศาเซลเซียส เมื่อใส่ PBT ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก และที่อุณหภูมิ 218 และ 232.6 องศาเซลเซียส เมื่อใส่ PBT ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก การที่มี  $T_m$  เกิดขึ้น 2 ตำแหน่งเป็นผลจากปรากฏการณ์การหลอมเหลวและการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) ระหว่างการให้ความร้อนครั้งที่ 2 โดย  $T_m$  ที่อุณหภูมิต่ำเกิดจากการหลอมเหลวของผลึกที่มีความสมบูรณ์น้อยซึ่งเกิดในขั้นตอนการทำให้เย็นตัว ในขณะที่  $T_m$  ที่อุณหภูมิสูงเกิดจากการหลอมเหลวของผลึกที่ได้เข้ามารวมตัวกันใหม่ (Reorganized crystals) จนมีโครงสร้างสมบูรณ์มากขึ้น นอกจากนี้ พบว่า  $T_m$  ของ RPET ในพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำกว่าของ RPET ล้วน และมีค่าลดลงตามปริมาณของ PBT ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์ผสมที่ใส่ PBT ปริมาณ 30–50% โดยน้ำหนัก

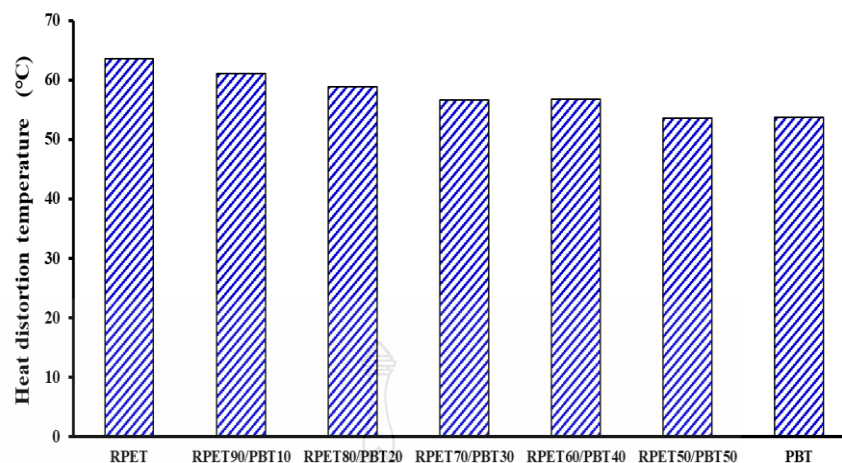
ปรากฏที่  $T_m$  เพียงตำแหน่งเดียว เนื่องจากผลึกที่หลอมเหลวแล้วไม่สามารถรวมตัวกลับมาเกิดผลึกใหม่ได้อีกเนื่องจากถูกขัดขวางด้วย PBT ที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งสามารถคำนวณระดับความเป็นผลึกของ RPET ในขั้นตอนนี้ได้จากสมการที่ 4.1 ซึ่งได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.2 ผลจากการคำนวณ พบว่า ระดับความเป็นผลึกของ RPET ในพอลิเมอร์ผสมที่ใส่ PBT ปริมาณ 10 และ 20% โดยน้ำหนัก มีระดับความเป็นผลึกไม่ต่างจากของ RPET ล้วนมากนัก แต่เมื่อใส่ PBT ปริมาณ 30 และ 40% โดยน้ำหนัก พบว่า ระดับความเป็นผลึกลดต่ำลงมาก เนื่องจากปริมาณ PBT ที่เพิ่มมากขึ้นได้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ RPET ในการจัดเรียงตัวใหม่ และเมื่อใส่ PBT ที่ปริมาณ 50% โดยน้ำหนัก พบว่า ระดับความเป็นผลึกของ RPET กลับเพิ่มขึ้นมากขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการแยกเฟสของพอลิเมอร์ทั้งสองดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

#### 4.1.4.2 อุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อน (Heat distortion temperature)

ตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.10 แสดงค่าอุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อน (HDT) ของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT

| Sample       | HDT (°C) |
|--------------|----------|
| RPET         | 63.6     |
| PBT          | 53.7     |
| RPET90/PBT10 | 61.0     |
| RPET80/PBT20 | 59.0     |
| RPET70/PBT30 | 56.7     |
| RPET60/PBT40 | 56.7     |
| RPET50/PBT   | 53.5     |



ภาพที่ 4.10 อุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT

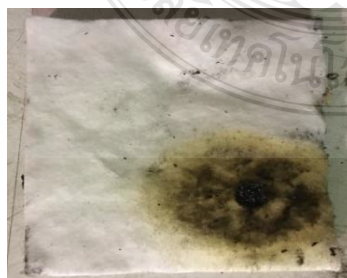
ตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.10 แสดงอุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT โดยพบว่า อุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนของ RPET และ PBT มีค่าเท่ากับ 63.6 และ 53.7 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังนั้น การใส่ PBT ที่มีอุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนต่ำกว่าจึงมีผลทำให้อุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนของพอลิเมอร์ผสมทุกองค์ประกอบมีค่าต่ำกว่าของ RPET ล้วน (3–10 องศาเซลเซียส)

#### 4.1.4.3 สมบัติการลุกไหม้ (Combustion properties)

ตารางที่ 4.4 แสดงพฤติกรรมการลุกไหม้ของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT ที่ผ่านการตรวจสอบด้วย UL-94 Vertical burning test และลักษณะการลุกไหม้ของชิ้นทดสอบทั้งหมดแสดงไว้ในภาพที่ 4.11

ตารางที่ 4.4 พฤติกรรมการลุกไหม้ของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT

| ตัวอย่าง     | UL94 rate | ลักษณะการลุกไหม้                                                                                                                                                                                     |
|--------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| RPET         | V-2       | - การเผาครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ติดไฟและดับได้เอง เกิดการหลอมหยดของส่วนที่เผาไหม้หลายครั้ง และทำให้ฝ้ายเกิดการติดไฟ                                                                                 |
| RPET90/PBT10 | V-2       | - การเผาครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ติดไฟและดับได้เอง เกิดการหลอมหยดของส่วนที่เผาไหม้หลายครั้ง และทำให้ฝ้ายเกิดการติดไฟได้                                                                              |
| RPET80/PBT20 | V-2       | - การเผาครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ติดไฟและดับได้เอง เกิดการหลอมหยดของส่วนที่เผาไหม้ และทำให้ฝ้ายเกิดการติดไฟ                                                                                          |
| RPET70/PBT30 | V-2       | - การเผาครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ติดไฟและดับได้เอง เกิดการหลอมหยดของส่วนที่เผาไหม้ และทำให้ฝ้ายเกิดการติดไฟ                                                                                          |
| RPET60/PBT40 | V-2       | - การเผาครั้งที่ 1 ติดไฟและดับได้เอง ไม่เกิดการหลอมหยดของส่วนที่เผาไหม้ และไม่ทำให้ฝ้ายเกิดการติดไฟ<br>- การเผาครั้งที่ 2 ติดไฟและดับได้เอง เกิดการหลอมหยดของส่วนที่เผาไหม้ และทำให้ฝ้ายเกิดการติดไฟ |
| RPET50/PBT50 | V-0       | - การเผาครั้งที่ 1 ติดไฟได้ยาก ไม่เกิดการหลอมหยดของส่วนที่เผาไหม้ และไม่ทำให้ฝ้ายเกิดการติดไฟ<br>- การเผาครั้งที่ 2 ติดไฟและดับได้เอง เกิดการหลอมหยดของส่วนที่เผาไหม้ แต่ไม่ทำให้ฝ้ายเกิดการติดไฟ    |
| PBT          | V-0       | - การเผาครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ติดไฟได้ยาก ไม่เกิดการหลอมหยดของส่วนที่เผาไหม้ และไม่ทำให้ฝ้ายเกิดการติดไฟ                                                                                          |



(a)



(b)

ภาพที่ 4.11 ลักษณะการลุกไหม้ของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT ที่ทำให้ฝ้ายติดไฟ (a) และไม่ลุกติดไฟ (b)





RPET



PBT



RPET90/PBT10



RPET80/PBT20



RPET70/PBT30



RPET60/PBT40



RPET50/PBT

ภาพที่ 4.12 ลักษณะการลุกไหม้ของ RPET, PBT และพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT ที่ตรวจสอบด้วย UL-94 Vertical burning test

จากตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.12 พบว่า ชิ้นทดสอบสามารถติดไฟและดับได้เอง โดย RPET ล้วน เกิดการหลอมหายของส่วนที่เผาไหม้ภายหลังการติดไฟ และมี UL94 rate เป็น V-2 ขณะที่ PBT ล้วน ติดไฟได้ยากและไม่เกิดการหลอมหายของส่วนที่เผาไหม้ โดยมี UL94 rate เป็น V-0 อย่างไรก็ตาม การใส่ PBT ใน RPET ปริมาณ 10–40% โดยน้ำหนัก ยังมีผลทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการหลอมหายของส่วนที่เผาไหม้ภายหลังการติดไฟ และมี UL94 rate เป็น V-2 แต่เมื่อใส่ PBT ใน RPET ปริมาณ 50% โดยน้ำหนัก มีผลทำให้การเผาพอลิเมอร์ผสมครั้งที่ 1 ติดไฟได้ยาก ไม่เกิดการหลอมหายของส่วนที่เผาไหม้ แต่การเผาครั้งที่ 2 ยังเกิดการหลอมหายของส่วนที่เผาไหม้ และมี UL94 rate เป็น V-0 ซึ่งแสดงว่า PBT มีส่วนช่วยต้านทานการติดไฟและการหลอมหายได้บ้างหากแต่ต้องใส่ในปริมาณมาก

## 4.2 พอลิเมอร์คอมพอสิต RPET/PBT/โวลลาสโทไนต์

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT พบว่า พอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 มีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด โดยมีค่าความทนแรงกระแทกและยังสัมมูล์สูง กว่า RPET ล้วน 21.9% และ 39.4% ตามลำดับ และมีค่าความทนแรงดึง (56 MPa) สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมอื่นๆ (37.8 - 53.2 MPa) ดังนั้น จึงได้เลือกพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 ไปเตรียมเป็นพอลิเมอร์คอมพอสิต W10, W20, W30 และ W40 ที่ใส่โวลลาสโทไนต์ปริมาณ 10, 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากนั้นจึงขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยกระบวนการเดียวกับที่ใช้ขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม แล้วจึงนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา

### 4.2.1 ลักษณะชิ้นทดสอบ

ภาพที่ 4.13 แสดงชิ้นทดสอบของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต W10, W20, W30 และ W40 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ



ภาพที่ 4.13 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต



จากภาพที่ 4.13 พบว่า ชิ้นทดสอบ RPET60/PBT40 มีสีขาวขุ่น ส่วนพอลิเมอร์คอมพอสิต W10, W20, W30 และ W40 มีสีขาวขุ่นและทึบแสงเช่นเดียวกัน โดยสังเกตได้ว่าชิ้นทดสอบมีความขาวเพิ่มขึ้นตามปริมาณของโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น

#### 4.2.2 สมบัติเชิงกล

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกล (ความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และยังสัมมอดูลัส) ของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต

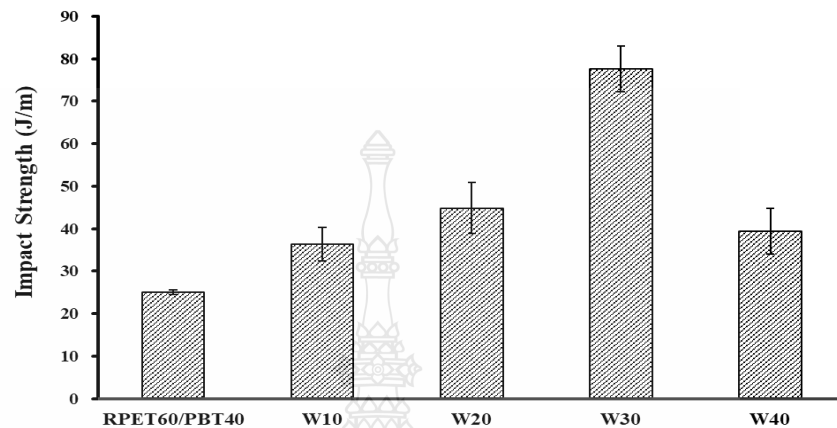
ตารางที่ 4.5 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต

| Sample       | Impact strength<br>(J/m) | Tensile strength<br>(MPa) | Elongation<br>at break<br>(%) | Young's<br>modulus<br>(MPa) |
|--------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| RPET60/PBT40 | 25.0 ± 0.5               | 56.0 ± 6.6                | 3.2 ± 0.5                     | 2451.0 ± 218.5              |
| W10          | 36.3 ± 3.9               | 50.8 ± 0.6                | 5.5 ± 0.8                     | 2309.7 ± 59.8               |
| W20          | 45.0 ± 6.0               | 52.3 ± 0.4                | 4.0 ± 0.7                     | 2613.5 ± 105.7              |
| W30          | 77.7 ± 5.4               | 53.7 ± 0.3                | 3.6 ± 0.2                     | 2974.5 ± 136.3              |
| W40          | 39.5 ± 5.4               | 53.0 ± 0.2                | 3.0 ± 0.3                     | 2901.3 ± 232.7              |

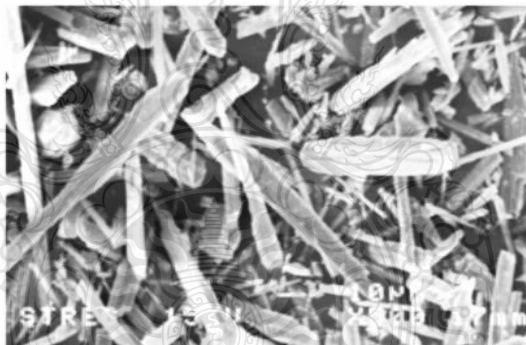
##### 4.2.2.1 ความทนแรงกระแทก (Impact strength)

จากตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.14 พบว่า ความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตทุกองค์ประกอบมีค่ามากกว่าของ RPET60/PBT40 (25 J/m) อย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 36.3–77.7 J/m เนื่องจากโวลลาสโทไนต์มีโครงสร้างผลึกรูปเข็มที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาก (2000 เมช) และมี aspect ratio สูง (~ 10–15) ดังแสดงในภาพที่ 4.15 ซึ่งทำให้สามารถส่งผ่านความเค้นได้ดี โดยความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้นไปจนถึง 30% โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าความทนแรงกระแทกสูงที่สุด (77.7 J/m) ทั้งนี้อาจเนื่องจากโวลลาสโทไนต์ที่ความเข้มข้นนี้สามารถกระจายตัวได้ดีกว่าในพอลิเมอร์เมทริกซ์ และเมื่อใส่เพิ่มเป็น 40% โดยน้ำหนัก พบว่า ความทนแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลง

ทั้งนี้เนื่องจากการเกาะกลุ่มของโวลลาสโทไนต์ที่ทำให้การกระจายตัวลดลงและการส่งผ่านความเค้นลดลง หากแต่ยังมีค่ามากกว่าของ RPET60/PBT40 ดังนั้น โวลลาสโทไนต์จึงสามารถใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อเพิ่มความทนแรงกระแทกของผลิตภัณฑ์ได้เมื่อใส่ในปริมาณที่เหมาะสม



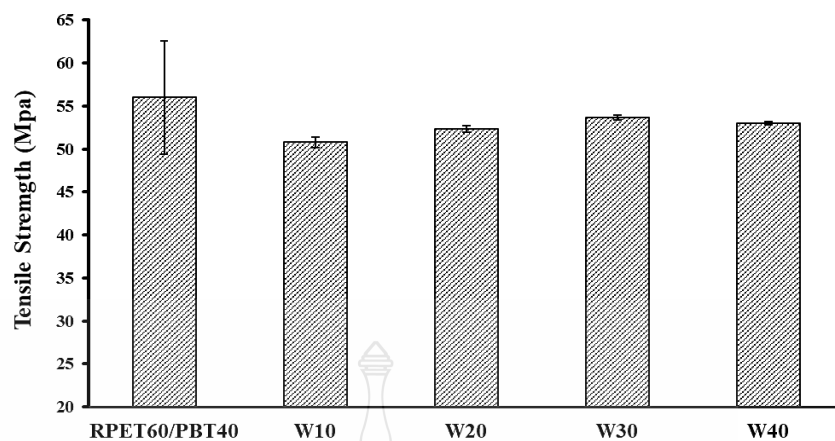
ภาพที่ 4.14 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต



ภาพที่ 4.15 สัณฐานวิทยาของผลึกรูปเข็มของโวลลาสโทไนต์ (500×)

#### 4.2.2.2 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

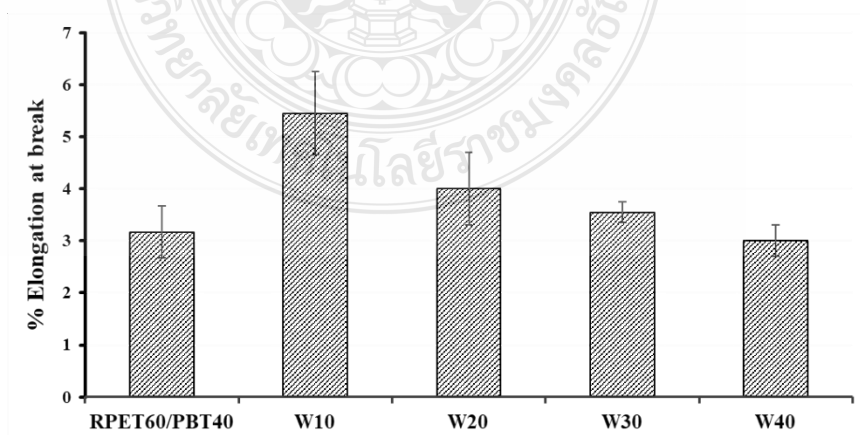
จากตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตทุกองค์ประกอบมีความทนแรงดึงต่ำกว่า RPET60/PBT40 (56 MPa) ประมาณ 4.0–9.3% โดยมีค่าสูงที่สุดประมาณ 53.7 MPa จึงอาจกล่าวได้ว่าโวลลาสโทไนต์ไม่มีผลในการปรับปรุงความทนแรงดึงของคอมพอสิต เนื่องจากไม่มีแรงยึดเกาะระหว่างผิว (interfacial interaction) ของพอลิเมอร์และโวลลาสโทไนต์ ซึ่งอาจยืนยันด้วยภาพที่ได้จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ในลำดับต่อไป



ภาพที่ 4.16 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต

#### 4.2.2.3 การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break)

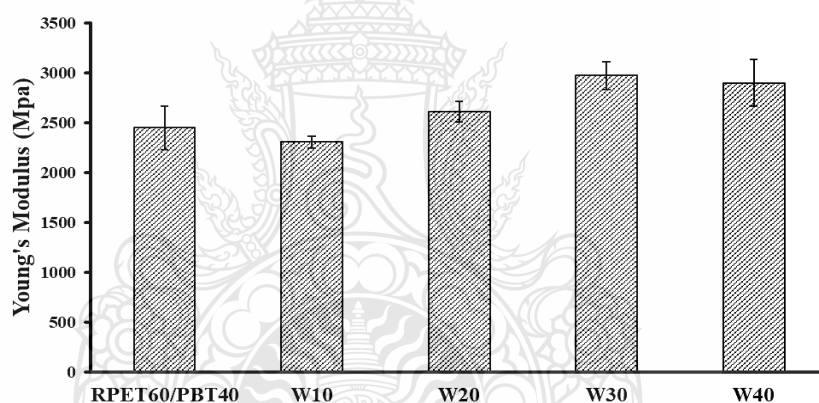
จากตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.17 พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมพอสิตได้รับการปรับปรุงเพียงเล็กน้อยเมื่อใส่โวลลาสโทไนต์ปริมาณ 10–30% โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของ RPET60/PBT40 (3.2%) โดยมีการยืดตัวสูงที่สุดประมาณ 5.5% เมื่อใส่โวลลาสโทไนต์ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก เนื่องจากไม่มีแรงยึดเกาะระหว่างผิวของพอลิเมอร์และโวลลาสโทไนต์จึงทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ง่ายเมื่อใส่ปริมาณเล็กน้อย แต่เมื่อใส่โวลลาสโทไนต์เพิ่มขึ้นมีผลทำให้การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมพอสิตมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากโวลลาสโทไนต์เป็นสารตัวเติมที่มีความแข็งตึง ดังนั้น เมื่อใส่ในปริมาณมากอาจขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมพอสิตลดลง



ภาพที่ 4.17 การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต

#### 4.2.2.4 ยังส์มอดุลัส (Young's modulus)

จากตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.18 พบว่า ยังส์มอดุลัสของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ใส่โวลลาสโทไนต์ 10 % โดยน้ำหนัก (2309 MPa) มีค่าต่ำกว่าของ RPET60/PBT40 (2451 MPa) เล็กน้อย เนื่องจากโวลลาสโทไนต์กระจายตัวไม่สม่ำเสมอในพอลิเมอร์เมทริกซ์ จึงเกิดเป็นความบกพร่องที่มีผลทำให้ค่ายังส์มอดุลัสของพอลิเมอร์คอมพอสิตลดลง แต่เมื่อใส่โวลลาสโทไนต์ปริมาณ 20–40% โดยน้ำหนัก พบว่า ยังส์มอดุลัสของพอลิเมอร์คอมพอสิต (2613.5–2974.5 MPa) มีค่ามากกว่าของ RPET60/PBT40 โดยมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 6.6–21.4% เนื่องจากโวลลาสโทไนต์กระจายตัวได้ทั่วถึงในพอลิเมอร์เมทริกซ์และขัดขวางการเคลื่อนไหวยของสายโซ่พอลิเมอร์ แต่ถ้าใส่ปริมาณมากเกินไป (40% โดยน้ำหนัก) อาจทำให้ยังส์มอดุลัสของคอมพอสิตมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มของโวลลาสโทไนต์

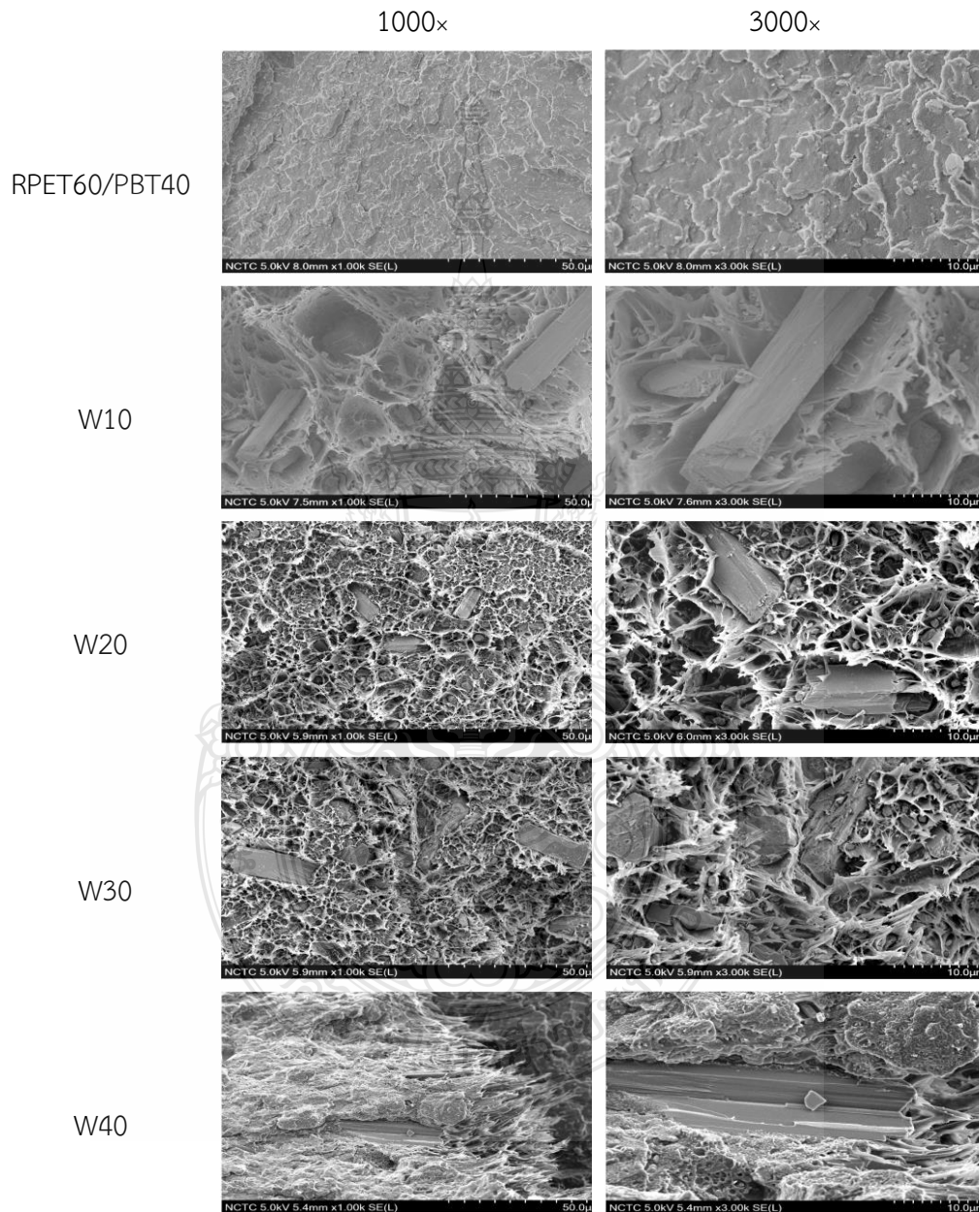


ภาพที่ 4.18 ยังส์มอดุลัสของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต

#### 4.2.3 สัณฐานวิทยา

ภาพที่ 4.19 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณผิวรอยแตกของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ได้จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้กำลังขยาย 1000x และ 3000x จากรูป พบว่า พอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 มีพื้นผิวที่หยาบดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.3 และเมื่อใส่โวลลาสโทไนต์ปริมาณ 10–40% โดยน้ำหนัก ใน RPET60/PBT40 สังเกตเห็นการกระจายตัวของโวลลาสโทไนต์และหลุมขนาดใหญ่ที่เกิดจากโวลลาสโทไนต์ถูกดึงให้หลุดออก (Pull out) ขณะทดสอบ เนื่องจากไม่มีแรงยึดเกาะระหว่างผิว

ของพอลิเมอร์และโวลลาสโทไนต์ โดยสังเกตเห็นช่องว่างระหว่างผิวรอยต่อและพื้นผิวที่เรียบของโวลลาสโทไนต์ อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณของโวลลาสโทไนต์เพิ่มขึ้น พบว่า หลุมมีขนาดเล็กลง และโวลลาสโทไนต์กระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ยกเว้นที่ใส่ในปริมาณ 50 % โดยน้ำหนัก ซึ่งเห็นการเกาะกลุ่มของโวลลาสโทไนต์จนมีขนาดใหญ่ขึ้น



ภาพที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต (1000× และ 3000×)

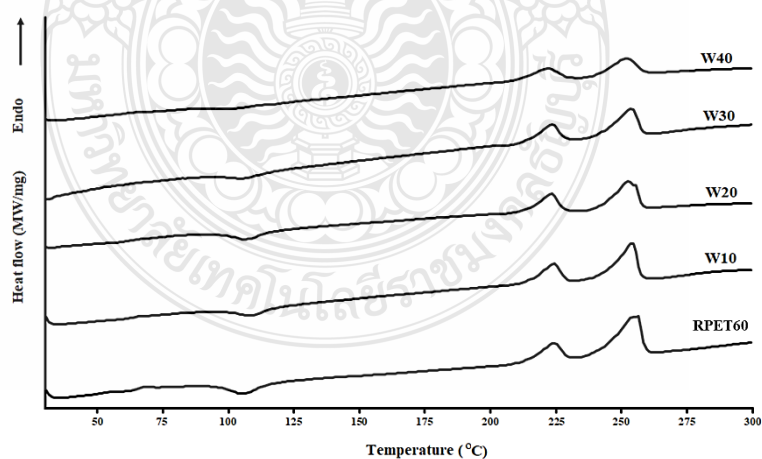
## 4.2.4 สมบัติทางความร้อน

### 4.2.4.1 ทดสอบด้วยเทคนิค DSC

ตารางที่ 4.6 แสดงค่า  $T_g$ ,  $T_c$ ,  $T_{cc}$ ,  $T_m$ ,  $\Delta H_{cc}$ ,  $\Delta H_m$  และ  $\chi_c$  ที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (ภาพที่ 4.20), การเย็นตัว (ภาพที่ 4.21) และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (ภาพที่ 4.22) ของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต

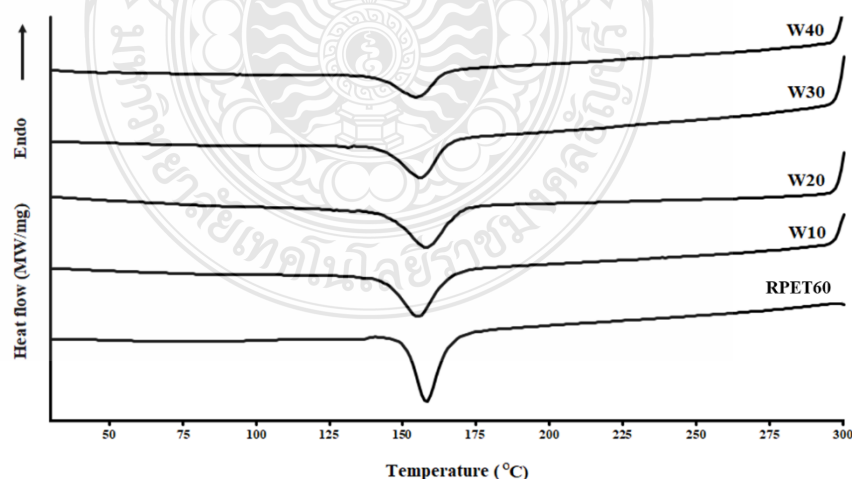
ตารางที่ 4.6 ค่า  $T_g$ ,  $T_c$ ,  $T_{cc}$ ,  $T_m$ ,  $\Delta H_m$ ,  $\Delta H_{cc}$  และ  $\chi_c$  ของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต

| Sample       | First heating |                  |                     |                      |                       |                          |                 | Cooling | Second heating |               |                       |
|--------------|---------------|------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------|---------|----------------|---------------|-----------------------|
|              | $T_g$<br>(°C) | $T_{cc}$<br>(°C) | $T_{m,PBT}$<br>(°C) | $T_{m,RPET}$<br>(°C) | $\Delta H_m$<br>(J/g) | $\Delta H_{cc}$<br>(J/g) | $\chi_c$<br>(%) |         | $T_c$<br>(°C)  | $T_m$<br>(°C) | $\Delta H_m$<br>(J/g) |
| RPET60/PBT40 | 68.0          | 104.4            | 223.5               | 255.6                | 25.5                  | 6.7                      | 26.2            | 167.3   | 200.0          | 16.4          | 22.8                  |
| W10          | 63.7          | 107.4            | 223.6               | 253.7                | 20.2                  | 4.2                      | 24.7            | 169.2   | 205.0          | 14.6          | 22.5                  |
| W20          | 63.6          | 106.0            | 222.6               | 252.3                | 17.0                  | 5.0                      | 21.0            | 173.3   | 206.2          | 16.6          | 29.0                  |
| W30          | -             | 104.4            | 223.0               | 253.4                | 16.0                  | 3.3                      | 25.2            | 172.2   | 203.2          | 11.6          | 23.0                  |
| W40          | 60.0          | 103.3            | 221.5               | 251.4                | 11.0                  | 1.8                      | 21.0            | 174.7   | 206.0          | 8.5           | 19.6                  |



ภาพที่ 4.20 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ได้จากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1

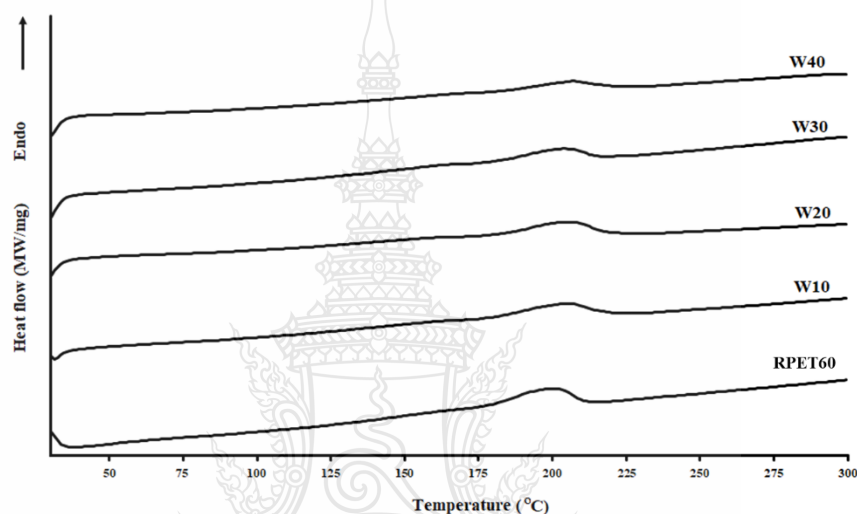
จากตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่าในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 พอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 มี  $T_g$  เท่ากับ 68 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อเติมโวลลาสโทไนต์ปริมาณ 10–40% พบว่า  $T_g$  ของคอมพอสิตมีแนวโน้มลดลง (4.3–8 องศาเซลเซียส) ตามปริมาณโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 60–63.7 องศาเซลเซียส เนื่องจากการใส่โวลลาสโทไนต์มีผลทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้นเพราะไม่มีแรงยึดเกาะระหว่างผิวของพอลิเมอร์และโวลลาสโทไนต์ อีกทั้งยังมีช่องว่างให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้มากขึ้นดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และแสดงในภาพที่ 4.19 อย่างไรก็ตาม ไม่ปรากฏพิก  $T_g$  ของ RPET เมื่อใส่โวลลาสโทไนต์ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก เนื่องจากโวลลาสโทไนต์ที่ความเข้มข้นนี้ช่วยให้ RPET ในคอมพอสิตเกิดผลึกได้มากกว่าคอมพอสิตอื่นๆ เมื่อขึ้นทดสอบถูกทำให้เย็นลงในขั้นตอนการขึ้นรูป นอกจากนี้ ยังสามารถพบ  $T_{cc}$  ของ RPET ในคอมพอสิตทุกองค์ประกอบเมื่อให้ความร้อนกับพอลิเมอร์คอมพอสิตที่อุณหภูมิสูงกว่า  $T_g$  แต่ต่ำกว่า  $T_m$  โดยสายโซ่ RPET ในเฟสที่เป็นอสัณฐานได้รับพลังงานเพียงพอที่จะเคลื่อนมาจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ อย่างไรก็ตาม  $T_{cc}$  ของ RPET ในคอมพอสิตมีแนวโน้มค่อยๆ ลดลงตามปริมาณโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น (RPET เกิดผลึกได้เร็วขึ้น) นอกจากนี้ ยังพบ  $T_m$  ของทั้ง PBT และ RPET ซึ่งการใส่โวลลาสโทไนต์ไม่มีผลทำให้  $T_m$  ของพอลิเมอร์ทั้งสองเปลี่ยนแปลงไปมากนัก โดยสามารถคำนวณหาระดับความเป็นผลึกของ RPET ได้จากสมการที่ 4.2 ซึ่งพบว่า คอมพอสิตที่ใส่โวลลาสโทไนต์ 30% โดยน้ำหนัก มีระดับความเป็นผลึกสูงกว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตอื่นๆ



ภาพที่ 4.21 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต ที่ได้จากขั้นตอนการเย็นตัว



จากตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.21 พบว่า การเติมโวลลาสโทไนต์ใน RPET60/PBT40 มีผลทำให้  $T_c$  ของ RPET ในพอลิเมอร์คอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้น (1.9–7.4 องศาเซลเซียส) ตามปริมาณของโวลลาสโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ  $T_c$  ของ RPET ในพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 ซึ่งแสดงว่า RPET ที่หลอมเหลวใช้เวลาในการเกิดผลึกเร็วขึ้นระหว่างขั้นตอนการเย็นตัวที่อัตรา 10 องศาเซลเซียส/นาทิจึงอาจกล่าวได้ว่าโวลลาสโทไนต์ทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสให้กับ RPET ในพอลิเมอร์คอมพอสิตในขั้นตอนการเย็นตัว



ภาพที่ 4.22 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต ที่ได้จากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2

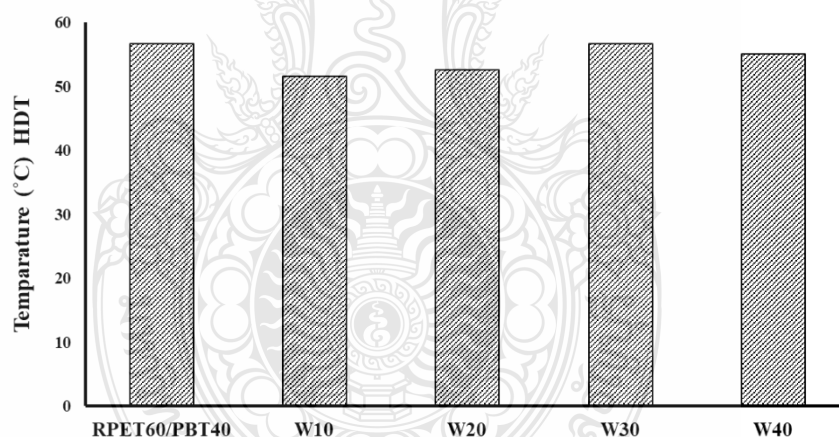
จากตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.22 พบว่า การเติมโวลลาสโทไนต์มีผลทำให้  $T_m$  ของพอลิเมอร์คอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 3.2–6.2 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับ  $T_m$  ของ RPET ในพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 เนื่องจากโวลลาสโทไนต์เป็นสารอนินทรีย์ที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าพอลิเมอร์มาก อย่างไรก็ตาม การใส่โวลลาสโทไนต์ให้ได้คอมพอสิตที่มีโครงสร้างเปิดและมีช่องว่างภายในชั้นทดสอบกระจายอยู่ทั่วไปในพอลิเมอร์เมทริกซ์ จึงทำให้ความร้อนผ่านเข้าไปได้ง่าย ดังนั้น  $T_m$  ของ RPET ในพอลิเมอร์คอมพอสิตจึงเพิ่มขึ้นไม่มากนัก นอกจากนี้ ระดับความเป็นผลึกของ RPET ในพอลิเมอร์คอมพอสิตที่คำนวณจากสมการที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ใส่โวลลาสโทไนต์ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก มีค่ามากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการที่มี  $T_m$  สูงที่สุด

#### 4.2.4.2 อุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อน

ตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.23 แสดงค่าอุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อน (HDT) ของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต

ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต

| Sample       | HDT (°C) |
|--------------|----------|
| RPET60/PBT40 | 56.7     |
| W10          | 51.5     |
| W20          | 52.5     |
| W30          | 56.7     |
| W40          | 55.0     |



ภาพที่ 4.23 อุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต

จากตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.23 พบว่า อุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ใส่โวลลาสโทไนต์ 10 และ 20% โดยน้ำหนัก มีค่าต่ำกว่าของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 ประมาณ 5 องศาเซลเซียส เนื่องจากการกระจายตัวของโวลลาสโทไนต์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ไม่สม่ำเสมอและช่องว่างขนาดใหญ่ในคอมพอสิต (ภาพที่ 4.19) ที่ยอม

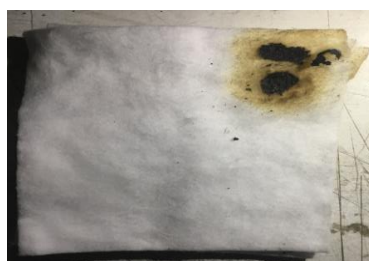
ให้ความร้อนผ่านเข้าไปในชิ้นทดสอบได้ง่ายกว่า จึงทำให้อุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนของคอมพอสิตลดลง ขณะที่คอมพอสิตที่ใส่โวลลาสโทไนต์ปริมาณ 30 และ 40% โดยน้ำหนัก มีค่าอุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนสูงกว่า และมีค่าใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 เนื่องจากโวลลาสโทไนต์กระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้สม่ำเสมอมากขึ้นและช่องว่างมีขนาดเล็กลง (ภาพที่ 4.19) จึงให้ความร้อนผ่านเข้าไปในชิ้นทดสอบได้น้อยลง

#### 4.2.4.3 สมบัติการลุกไหม้ (Combustion properties)

ตารางที่ 4.8 แสดงพฤติกรรมการลุกไหม้ของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ผ่านการตรวจสอบด้วย UL-94 vertical burning test และลักษณะการลุกไหม้ของชิ้นทดสอบทั้งหมดแสดงไว้ในภาพที่ 4.25

**ตารางที่ 4.8** การลุกไหม้ของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิต

| ตัวอย่าง     | UL94 rate | ลักษณะการติดไฟ                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| RPET60/PBT40 | V-2       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- การเผาครั้งที่ 1 ติดไฟและดับได้เอง ไม่เกิดการหยดของส่วนที่เผาไหม้ และ ไม่ทำให้ฝ้ายเกิดการติดไฟ</li> <li>- การเผาครั้งที่ 2 ติดไฟและดับได้เอง เกิดการหยดของส่วนที่เผาไหม้ และทำให้ฝ้ายเกิดการติดไฟ</li> </ul>                     |
| W10          | V-2       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- การเผาครั้งที่ 1 ติดไฟและดับเองในเวลาสั้นๆ ไม่เกิดการหยดของส่วนที่เผาไหม้ และ ไม่ทำให้ฝ้ายเกิดการติดไฟ</li> <li>- การเผาครั้งที่ 2 ติดไฟและดับได้เอง มีการหยดของส่วนที่เผาไหม้ ฝ้ายเกิดการติดไฟและบางตัวอย่างไม่ติดไฟ</li> </ul> |
| W20          | V-2       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- การเผาครั้งที่ 1 ติดไฟและดับได้เอง ไม่เกิดการหยดของส่วนที่เผาไหม้ และ ไม่ทำให้ฝ้ายเกิดการติดไฟ</li> <li>- การเผาครั้งที่ 2 ติดไฟและดับได้เอง มีการหยดของส่วนที่เผาไหม้ และฝ้ายเกิดการติดไฟ</li> </ul>                            |
| W30          | V-0       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- การเผาครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ติดไฟและดับได้เองในเวลาสั้นๆ ไม่เกิดการหยดของส่วนที่เผาไหม้ และ ไม่ทำให้ฝ้ายเกิดการติดไฟ</li> </ul>                                                                                               |
| W40          | V-0       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- การเผาครั้งที่ 1 ติดไฟได้ยาก และครั้งที่ 2 ติดไฟและดับได้เองในเวลาสั้นๆ ไม่เกิดการหยดของส่วนที่เผาไหม้ และ ไม่ทำให้ฝ้ายเกิดการติดไฟ</li> </ul>                                                                                   |



(a)



(b)

ภาพที่ 4.24 ลักษณะการลุกลามไหม้ของ พอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ทำให้ฝ้ายติดไฟ (a) และไม่ลุกลามติดไฟ (b)



ภาพที่ 4.25 ลักษณะการลุกลามไหม้ของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 และพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ผ่านการตรวจสอบด้วย UL-94 Vertical burning test

จากตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.25 พบว่า ชั้นทดสอบที่ใส่โวลลาสโทไนต์ ปริมาณ 10 และ 20% โดยน้ำหนัก สามารถติดไฟและดับได้เอง และไม่เกิดการหลอมหยดของ ส่วนที่เผาไหม้ ในการเผาครั้งที่ 1 ส่วนการเผาครั้งที่ 2 ชั้นทดสอบสามารถติดไฟและดับได้เอง มี การหลอมหยดของส่วนที่เผาไหม้ ฝ้ายเกิดการติดไฟ และมี UL94 rate เป็น V-2 ซึ่งไม่ต่างจาก ของพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 มากนัก อย่างไรก็ตาม เมื่อใส่โวลลาสโทไนต์ปริมาณ 30 และ 40% โดยน้ำหนัก ทำให้ชั้นทดสอบพอลิเมอร์คอมพอสิตติดไฟได้ยาก ไม่เกิดการหลอมหยดของ ส่วนที่เผาไหม้ และมี UL94 rate เป็น V-0 ซึ่งแสดงว่าโวลลาสโทไนต์มีส่วนช่วยต้านทานการติด ไฟและการหลอมหยดเมื่อใส่ในปริมาณมาก



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของ RPET ด้วยการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง RPET และ PBT และนาโนคอมพอสิตระหว่าง RPET, PBT และโวลลาสโทไนต์ด้วยกระบวนการฉีดแบบสามารถสรุปได้ดังนี้ :

5.1.1 จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่ใส่ PBT ปริมาณ 40 % โดยน้ำหนัก หรือ RPET60/PBT40 มีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด ซึ่งมีค่าความทนแรงกระแทกและยังส้อมดูลึสูงกว่า RPET ล้วน นอกจากนี้ ยังมีความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และยังส้อมดูลึสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วนอื่นๆ จึงเลือกพอลิเมอร์ผสม RPET60/PBT40 ไปเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยโวลลาสโทไนต์ปริมาณ 10, 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนัก

5.1.2 จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาบริเวณผิวรอยแตกของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า พื้นผิวรอยแตกของ RPET ล้วน มีลักษณะเรียบและมีริ้วบางๆ ซึ่งแสดงถึงวัสดุที่มีความแข็งแรงเปราะ เช่นเดียวกับพอลิเมอร์ผสมที่ใส่ PBT ปริมาณ 10 และ 20% โดยน้ำหนัก แต่เมื่อปริมาณ PBT เพิ่มขึ้น พบว่า พื้นผิวรอยแตกมีความหยาบและขรุขระมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใส่ PBT ปริมาณ 50% โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงการกลับเฟสที่ PBT กลายเป็นเมทริกซ์และถูกดึงขึ้นจากพื้นผิวเนื่องจากความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมที่เพิ่มมากขึ้น

5.1.3 จากการศึกษากฎการทางความร้อนและพฤติกรรมการเกิดผลึกด้วยเทคนิค DSC พบว่า การใส่ PBT มีผลทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกของ RPET ในพอลิเมอร์ผสมลดลงตามปริมาณ PBT ที่เพิ่มขึ้น ในขั้นตอนการทำให้เย็นตัว ซึ่งแสดงว่า PBT ไม่ช่วยให้ RPET เกิดผลึกได้เร็วขึ้น หากแต่ทำให้ RPET เกิดผลึกได้ยากขึ้น ส่วนในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 พบว่า ระดับการเกิดผลึกของ RPET ในพอลิเมอร์ผสมมีทั้งลดลงและเพิ่มขึ้น โดยขึ้นกับปริมาณของ PBT ที่ใส่เข้าไป

5.1.4 จากการทดสอบหาอุณหภูมิการดัดโค้งจากความร้อน พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีอุณหภูมิการดัดโค้งจากความร้อนต่ำกว่า RPET ประมาณ 3-10 องศาเซลเซียส

5.1.5 จากการศึกษาพฤติกรรมการลุกไหม้ พบว่า RPET ล้วน เกิดการหลอมหายของส่วนที่เกิดการเผาไหม้ภายหลังการติดไฟ โดยมี UL94 rate เป็น V-2 ในขณะที่ PBT ล้วน ติดไฟได้ยากและไม่เกิดการหลอมหายของส่วนที่เผาไหม้ โดยมี UL94 rate เป็น V-0 และเมื่อใส่ PBT ปริมาณ 50% โดยน้ำหนัก มีผลทำให้พอลิเมอร์ผสมติดไฟได้ยากขึ้น แสดงให้เห็นว่า PBT มีส่วนช่วยด้านการติดไฟและการหลอมหายได้บ้างหากแต่ต้องใส่ในปริมาณมาก

5.1.6 จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมพอสิต พบว่า การใส่โวลลาสโทไนต์ในพอลิเมอร์ผสมในปริมาณที่เหมาะสมมีผลทำให้ความทนแรงกระแทก การยืดตัว ณ จุดขาด และยังส่งผลค่ามากกว่าของพอลิเมอร์ผสมล้วน

5.1.7 จากการศึกษาตรวจสอบสัณฐานวิทยาบริเวณผิวรอยแตกของชิ้นทดสอบคอมพอสิตที่ผ่านการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง สังเกตเห็นการกระจายตัวของโวลลาสโทไนต์และหลุมขนาดใหญ่ที่เกิดจากโวลลาสโทไนต์ถูกดึงให้หลุดออกขณะทดสอบ เนื่องจากไม่มีแรงยึดเกาะระหว่างผิวของโวลลาสโทไนต์และพอลิเมอร์

5.1.8 จากการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนและพฤติกรรมการเกิดผลึกของคอมพอสิตด้วยเทคนิค DSC พบว่า การใส่โวลลาสโทไนต์มีผลทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกของ RPET ในคอมพอสิต สูงกว่าในพอลิเมอร์ผสมล้วน ซึ่งแสดงว่าโวลลาสโทไนต์ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกให้กับ RPET ในขั้นตอนการให้เย็นตัว และเมื่อใส่โวลลาสโทไนต์ในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งเสริมให้ระดับการเกิดผลึกของ RPET ในคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้น

5.1.9 จากการศึกษาอุณหภูมิการตัดโค้งจากความร้อนของคอมพอสิต พบว่า การใส่โวลลาสโทไนต์ปริมาณ 10 และ 20% โดยน้ำหนัก มีผลทำให้อุณหภูมิการตัดโค้งจากความร้อนของคอมพอสิต ลดลงประมาณ 4.2-5.2 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมล้วน แต่เมื่อใส่ปริมาณ 30 และ 40% โดยน้ำหนัก มีผลทำให้อุณหภูมิการตัดโค้งจากความร้อนของคอมพอสิตมีค่าใกล้เคียงกับของพอลิเมอร์ผสมล้วน

5.1.10 จากการศึกษาพฤติกรรมการลุกไหม้ พบว่า การใส่โวลลาสโทไนต์ปริมาณเล็กน้อย (10 และ 20 % โดยน้ำหนัก) ยังคงทำให้คอมพอสิตอยู่ในเกณฑ์ UL94 rate เป็น V-2 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณโวลลาสโทไนต์เป็น 30 และ 40 % โดยน้ำหนัก พบว่า ชิ้นทดสอบอยู่ในเกณฑ์ UL94 rate เป็น V-0 แสดงว่าโวลลาสโทไนต์มีส่วนช่วยด้านการติดไฟ และลดการหลอมหายเมื่อใส่ในปริมาณมาก



## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการใช้พอลิเมอร์ชนิดอื่นมาปรับปรุงความเหนียวของพีอีรีไซเคิล
2. ศึกษาการใช้สารตัวเติมชนิดอื่นที่สามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์



## บรรณานุกรม

- [1] “Plastics In Automotive”. **Plastics**. (2012). pp. 20 – 32.
- [2] **Handbook of Polymer**. (2012). ChemTec Publishing. pp.302 - 307.
- [3] W.S. Chow.(2013). **Manufacturing of Nanocomposites with Engineering Plastics**. pp.225-250.
- [4] J. Scheirs and T. E. Long.(2003).**Modern Polyesters: Chemistry and Technology of Polyesters and Copolyesters**. pp.495-540.
- [5] Bilal DEMİREL, Ali YARAS, Hüseyin ELCİCEK. (2013). **Crystallization Behavior of PET Materials**. BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi Cilt.pp.26-35.
- [6] L. A. Utracki.(1999). **Polymer blends handbook**. kluwer academic publishers: pp.677
- [7] นันทน์ลิน ชูทอง. **เพ็ทรีไซเคิล/ในลอน 6/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต: สมบัติทางกายภาพและสัณฐานวิทยา**. คณะวิทยาศาสตร์: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2556.
- [8] Domininghaus, H. (1993). **Plastics for Engineers Materials, Properties, Application.**: New York : Hanser Publishers
- [9] เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร. (2555). **สมบัติของพอลิเมอร์**. กรุงเทพมหานคร:โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [10] CAE DS – Plastics for Injection Moulding , **Polyethyleneterephthalate and Polybutyleneterephthalate**. P.1-4
- [11] Awaja, F. and Pavel, D. (2005). **Recycling of PET**. European Polymer Journal. pp.1453–1477.
- [12] ลักษณะณ รักศักดิ์ศรี.(2556). **การปรับปรุงสมบัติของเพ็ทรีไซเคิลด้วยพอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลตและโวลลาสโทไนต์**. คณะวิทยาศาสตร์: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [13] Darda, P. J., Hogendoorn, J. A., Versteeg, G. F., &Souren, F. (2005). **Reaction kinetics of polybutylene terephthalate polycondensation reaction**. AIChE Journal, 51(2), pp.622-630.
- [14] สมจิตต์ ตั้งชัยวัฒนา. (2016). **พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend**. April 25. Available from: [http://www.dss.go.th/images/st-article/cp\\_5\\_2548\\_polymer\\_blend.pdf](http://www.dss.go.th/images/st-article/cp_5_2548_polymer_blend.pdf).

- [15] Seymour, R.B. and Mark, H.F. (1991). **Application of polymer**. New York: Plenum Press;
- [16] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. (2547). **สารปรับแต่งสมบัติของพอลิเมอร์**. กรุงเทพฯ. บุคเนต.
- [17] Xanthos, M. (2005). **Functional Fillers for Plastics**. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.;
- [18] Alexandre, M. and Dubois, P. (2000). **Polymer-layered silicate nanocomposite: preparation, properties and uses of new class of materials**. Material Science and Engineering. pp.1–63
- [19] Polymer Science Learning Center. (2016). **Nylons** May 19. Available from: <http://pslc.ws/macrog/nylon.htm>.
- [20] ศยามณ สุวรรณโชติ, รัตนาภรณ์ ยวงใย, ชลิตา ออมสิน, (2559) **สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนเทรฟเทเลท/พอลิโพรพิลีน/โพลลาสโตนไนด์คอมพอสิต**, ปริญญา นิพนธ์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
- [21] ปาเจรา พัฒนถาบุตร. (2554). **เอกสารประกอบการสอนวิชาสารเติมแต่งพลาสติก**. นครปฐม: ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [22] อรุษา สรวารี. (2000). **สารเติมแต่ง (Additive)**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [23] Vanderbilt Mineral. **An Introduction to Mineral Fillers for Paints & Coatings**. [online]. Available from: [www.vanderbiltminerals.com](http://www.vanderbiltminerals.com) [2014, Apr 12]
- [24] Vanderbilt. **Minerals Technical Data**. [online]. 2013. Available from: [http://www.vanderbiltminerals.com/product\\_categories/product\\_listing/category/paint-and-coatings-products-vansil-wollastonites](http://www.vanderbiltminerals.com/product_categories/product_listing/category/paint-and-coatings-products-vansil-wollastonites) [2014, Apr 12]
- [25] Wollastonite.n.d. **Wollastonite Powder**. [Online] Available : <http://www.reade.com/products/wollastonite-powder-calcium-metasilicate>
- [26] Wollastonite. n.d. **What is Wollastonite**. [Online] Available : <http://www.namwoll.com> (19 April 2017).

- [27] Supawee Makkam and Wanlop Harnnarongchaia Rheological, (2014). **Mechanical Properties of Recycled PET Modified ,by Reactive Extrusion**, 11th Eco-Energy and Materials Science and Engineering.
- [28] J.D. Badia , E. Strömberg , S. Karlsson , A. Ribes-Greus , (2012) “**The role of crystalline, mobile amorphous and rigid amorphous fractions in the performance of recycled poly (ethylene terephthalate) (PET)**”, Polymer Degradation and Stability 97 : 2011 Elsevier.
- [29] G.S. Deshmukh, D.R. Peshwe, S.U. Pathak<sup>1</sup> and J.D. Ekhe. (2011). **Evaluation of mechanical and thermal properties of Poly (butylene terephthalate) (PBT) composites reinforced with wollastonite**, Transactions of The Indian Institute of Metals. TIIM. pp127-132.
- [30] ศยามณ สุวรรณโชติ,รัตนภรณ์ ยวงใย,ชลิตา ออมสิน, (2559). **สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลท/พอลิโพรพิลีน/โวลลาสโทไนต์คอมพอสิต**, ปริญญา นิพนธ์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
- [31] Rashmi Nitin Baxi,Shailkumar Umakant Pathak, and Dilip Ramkrishna Peshwe. (2011). **Impact modification of a PET-PBT blend using different impact modifiers**, Polymer journal
- [32] P.R.Rajakumar and R.Nanthini. (2011). **Thermal and Morpholgical behaviours of polybutylene terephthalate/polyethylene terphthalate blend nanocomposites**, RJC.
- [33] Makarand Risbud, D. Nabi Saheb, Jyoti Jog, Ramesh Bhonde. (2001). **Preparation, characterization and in vitro biocompatibility evaluation of poly(butylene terephthalate)/wollastonite composites**, Biomaterials 22
- [34] Zhang. (2008). **Polymer Degradation and Stability**. Elsevier Ltd.
- [35] Nofar M. and Oğuz H. (2019). **Development of PBT/recycled- PET blends and the influence of using chain extender**. Journal of Polymers and the Environment, Vol. 27, 1404 – 1417.
- [36] Srithep, Y., Javadi, A., Pilla, S., Turng, L.S., Gong, S., Clemons, C. and Peng, J. (2011) **Processing and characterization of recycled poly(ethylene terephthalate) blends with chain extenders, thermoplastic elastomer, and/or**

**poly(butylene adipate-co-terephthalate).** Polymer Engineering and Science.; 51: 1023–1032.

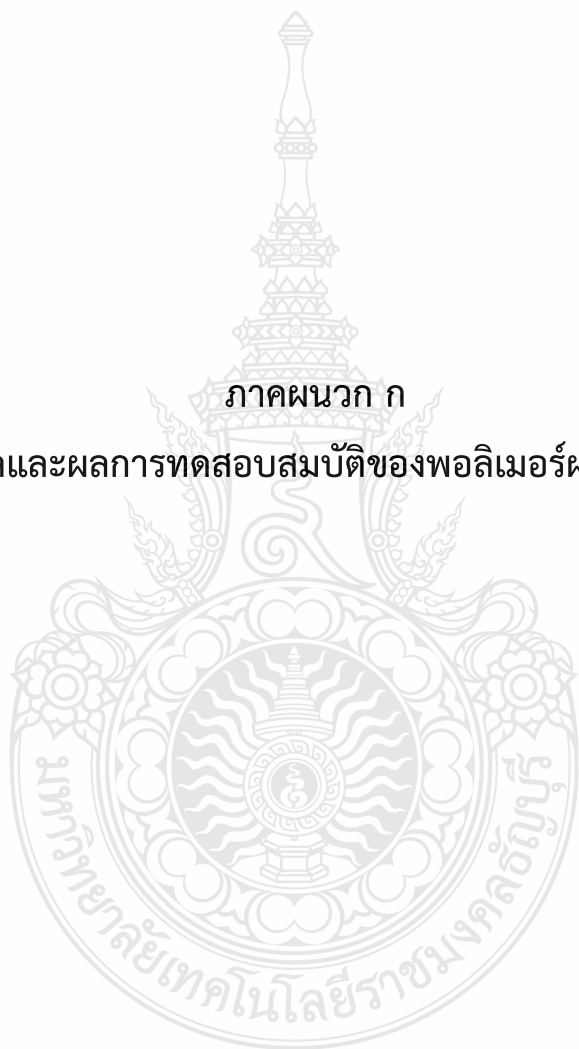


ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมต่างๆ





ก-1 ผลของการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT

ตารางผนวก ก.1 สมบัติการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT ที่ด้วยค้อน 2 J/N

| ตัวอย่าง (%wt) | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | Impact strength<br>(J/m) |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|
| RPET           | 19.10 | 19.05 | 17.02 | 23.67 | 23.74 | 20.5 ± 3.0               |
| PBT            | 50.00 | 50.00 | 50.00 | 50.00 | 47.50 | 49.5 ± 1.0               |
| RPET90/PBT10   | 23.53 | 21.82 | 16.97 | 14.55 | 14.41 | 18.3 ± 4.2               |
| RPET80/PBT20   | 21.82 | 19.39 | 19.39 | 16.97 | 16.97 | 19.0 ± 2.0               |
| RPET70/PBT30   | 22.50 | 22.50 | 22.50 | 22.50 | 21.18 | 22.2 ± 0.6               |
| RPET60/PBT40   | 24.30 | 24.75 | 24.20 | 25.00 | 25.30 | 25.0 ± 0.5               |
| RPET50/PBT50   | 27.50 | 27.50 | 27.50 | 25.00 | 25.00 | 26.5 ± 1.4               |

ตารางผนวก ก.2 สมบัติการดึงยึดของพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT ทดสอบด้วยอัตราการดึง 10 มิลลิเมตร/นาที

| ตัวอย่าง (%wt) | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | Tensile strength<br>(Mpa) |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------------|
| RPET           | 60.24 | 62.00 | 63.31 | 61.06 | 60.00 | 61.6 ± 2.0                |
| PBT            | 50.43 | 51.23 | 51.32 | 49.78 | 49.30 | 50.4 ± 1.0                |
| RPET90/PBT10   | 48.23 | 34.24 | 33.43 | 41.30 | 31.74 | 37.8 ± 7.0                |
| RPET80/PBT20   | 42.57 | 45.58 | 53.69 | 49.38 | 39.19 | 46.0 ± 5.7                |
| RPET70/PBT30   | 57.39 | 57.47 | 50.74 | 45.45 | 54.81 | 53.2 ± 5.0                |
| RPET60/PBT40   | 64.58 | 48.26 | 61.16 | 53.34 | 53.19 | 56.0 ± 6.6                |
| RPET50/PBT50   | 52.24 | 51.30 | 47.94 | 49.16 | 45.92 | 49.3 ± 2.6                |

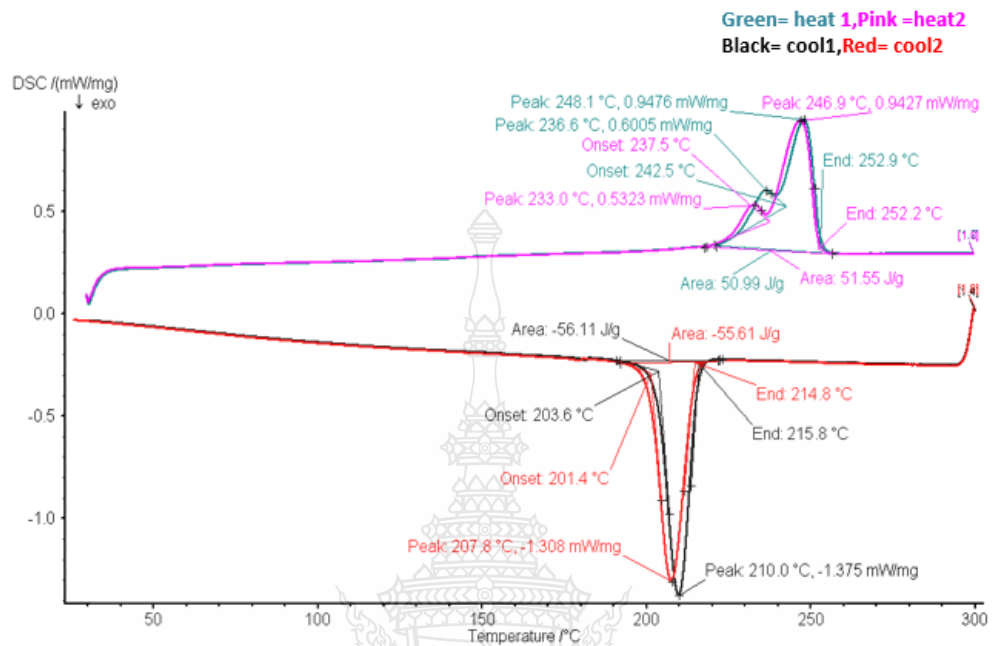
ตารางผนวก ก.3 สมบัติการยืดตัว ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT ทดสอบด้วยอัตราการดึง 10 มิลลิเมตร/นาที

| ตัวอย่าง (%wt) | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | Elongation at break (%) |
|----------------|------|------|------|------|------|-------------------------|
| RPET           | 4.76 | 5.32 | 5.14 | 4.90 | 3.94 | 4.8 ± 0.5               |
| PBT            | 4.79 | 4.75 | 4.57 | 3.85 | 4.26 | 4.4 ± 0.4               |
| RPET90/PBT10   | 2.88 | 1.88 | 1.78 | 2.66 | 1.72 | 2.2 ± 0.5               |
| RPET80/PBT20   | 2.62 | 2.87 | 3.56 | 3.17 | 2.35 | 3.0 ± 0.5               |
| RPET70/PBT30   | 3.77 | 3.41 | 3.27 | 2.51 | 3.09 | 3.2 ± 0.5               |
| RPET60/PBT40   | 3.85 | 2.85 | 3.43 | 2.72 | 2.99 | 3.2 ± 0.5               |
| RPET50/PBT50   | 3.06 | 3.26 | 2.97 | 2.90 | 2.50 | 3.0 ± 0.3               |

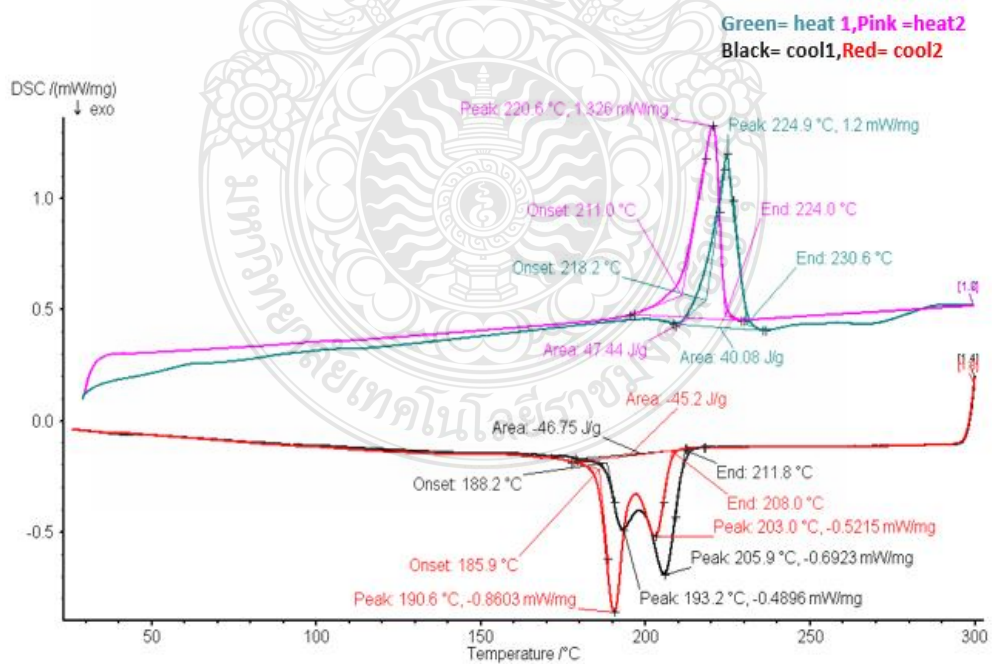
ตารางผนวก ก.4 สมบัติยังส์มอดุลัส ของพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT ทดสอบด้วยอัตราการดึง 10 มิลลิเมตร/นาที

| ตัวอย่าง (%wt) | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | Young's modulus (Mpa) |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------------------|
| RPET           | 1787.30 | 1777.40 | 1567.30 | 1820.60 | 1836.10 | 1757.7 ± 109.0        |
| PBT            | 2251.19 | 2398.36 | 2049.20 | 2590.90 | 2221.87 | 2302.3 ± 203.5        |
| RPET90/PBT10   | 2426.61 | 2379.85 | 2561.43 | 1914.24 | 2280.58 | 2312.5 ± 244.5        |
| RPET80/PBT20   | 2058.18 | 2115.69 | 1791.34 | 1880.22 | 2148.67 | 1998.8 ± 155.5        |
| RPET70/PBT30   | 2222.88 | 2273.09 | 2014.53 | 2407.88 | 2504.95 | 2284.7 ± 187.5        |
| RPET60/PBT40   | 2356.48 | 2214.22 | 2438.41 | 2805.49 | 2440.04 | 2451.0 ± 218.5        |
| RPET50/PBT50   | 2146.48 | 1964.18 | 2193.21 | 1706.73 | 1859.90 | 1974.0 ± 201.5        |

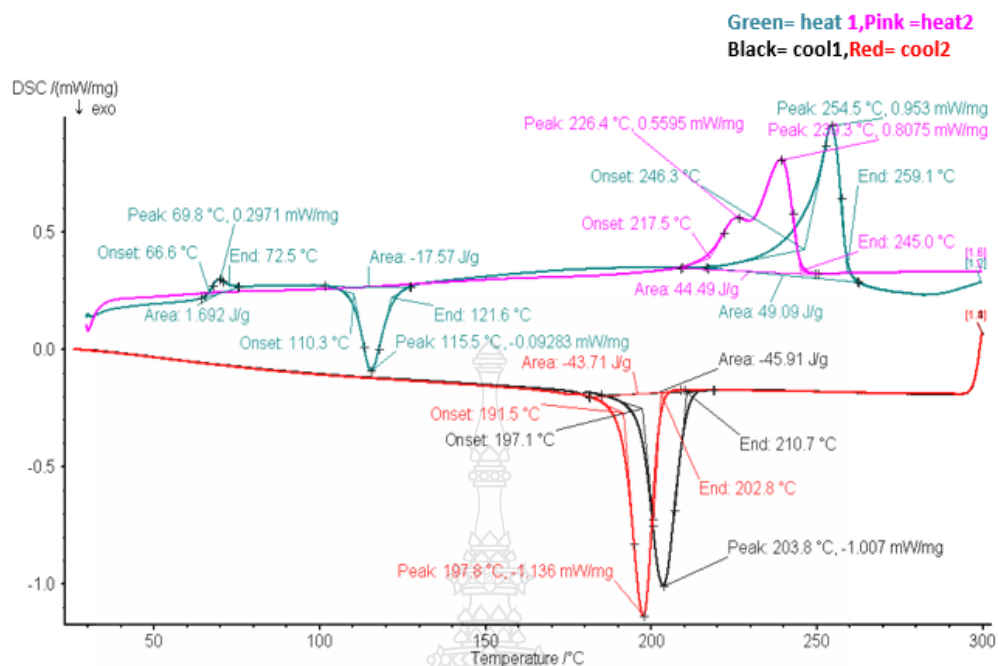
ก-2 ผลของการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT โดยเทคนิค DSC



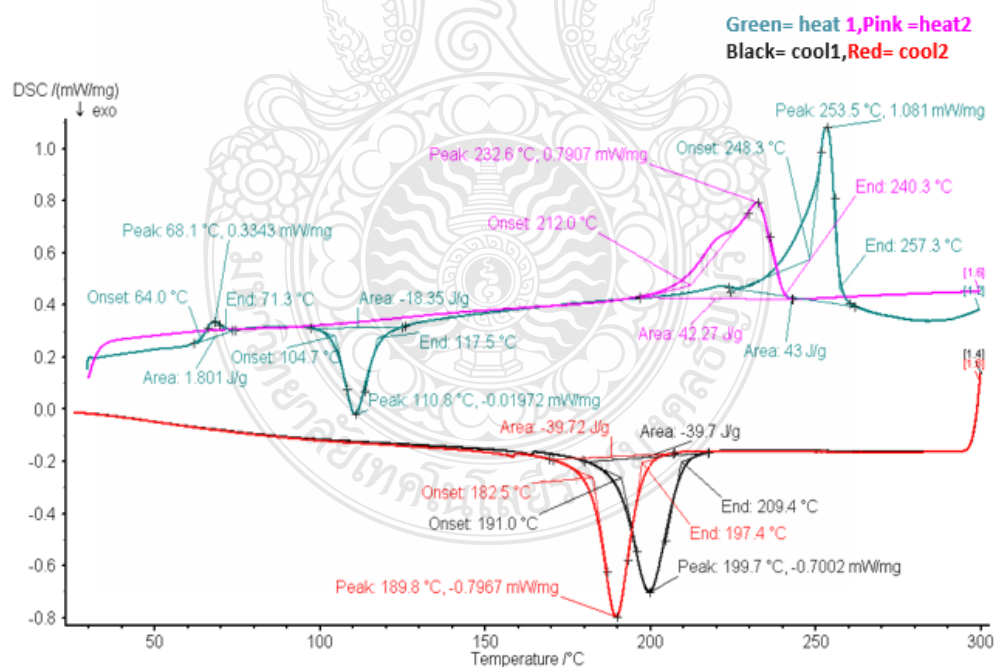
ภาพผนวก ก.1 กราฟ DSC ของ RPET



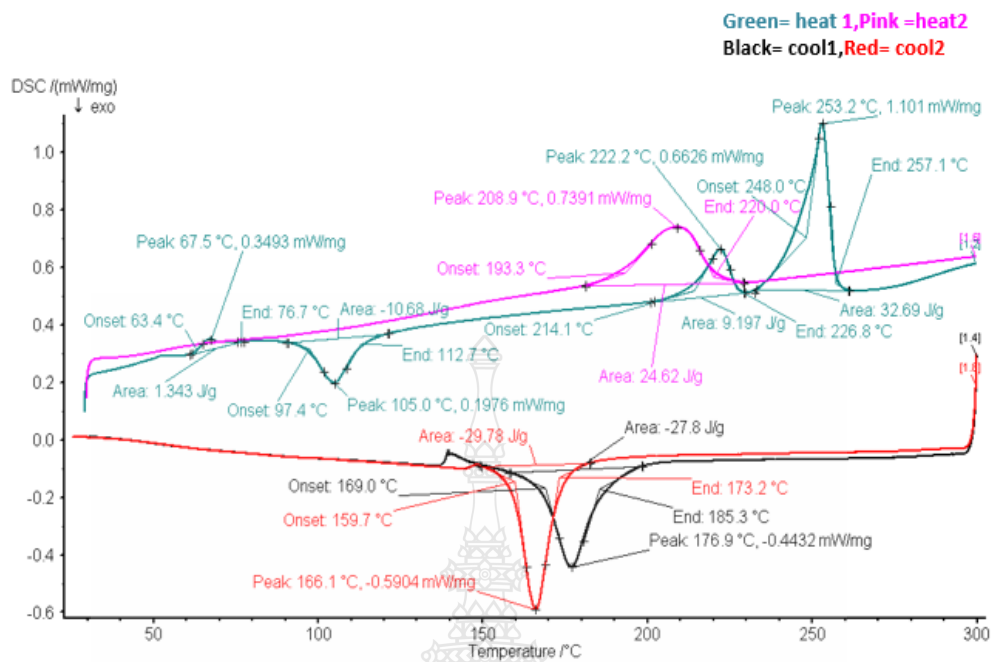
ภาพผนวก ก.2 กราฟ DSC ของ PBT



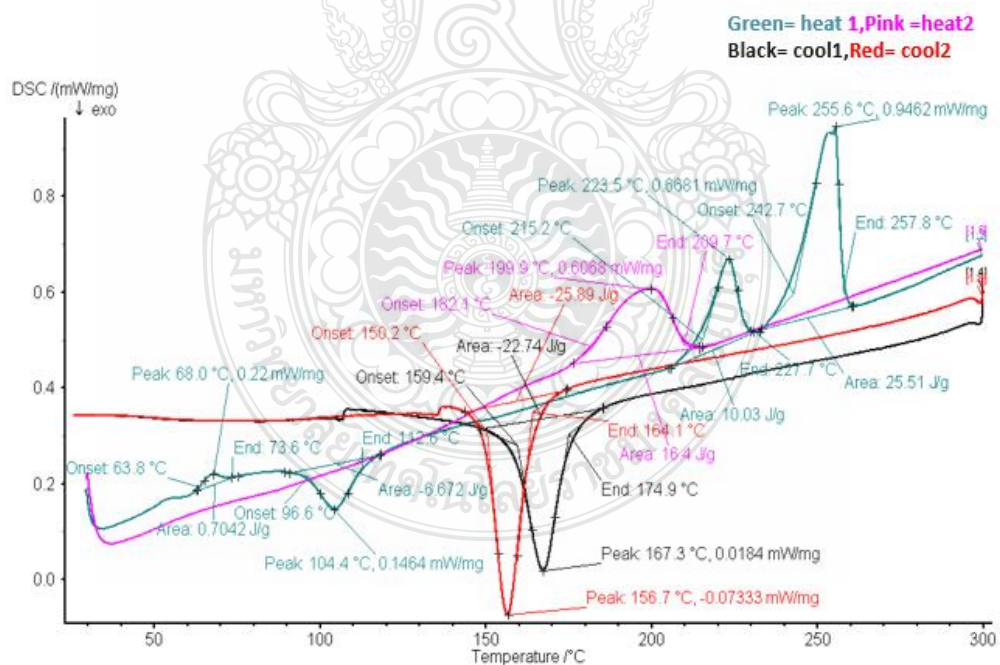
ภาพผนวก ก.3 กราฟ DSC ของ RPET90/PBT10



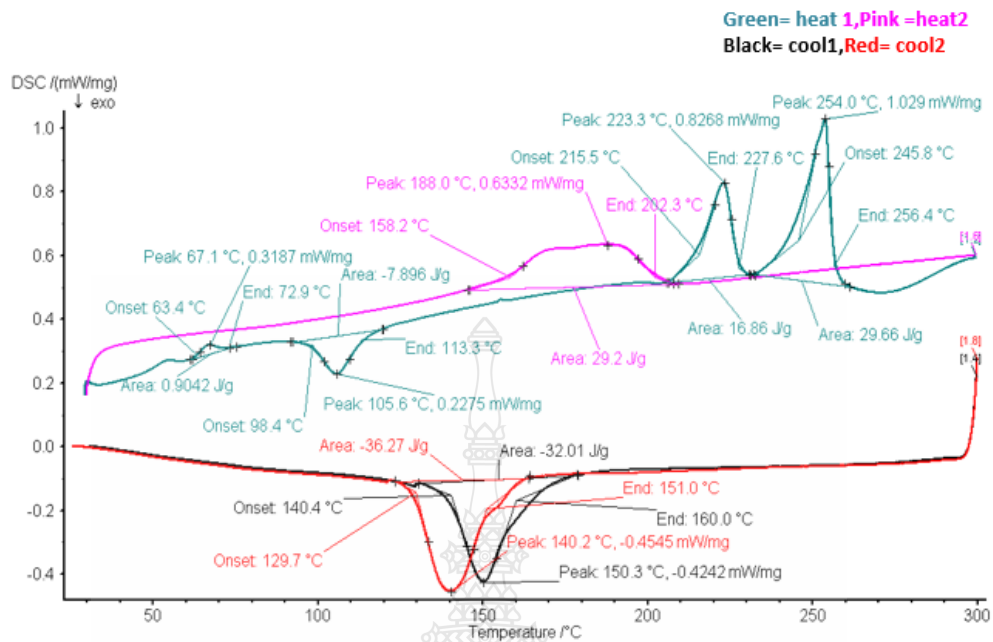
ภาพผนวก ก.4 กราฟ DSC ของ RPET80/PBT20



ภาพผนวก ก.5 กราฟ DSC ของ RPET70/PBT30

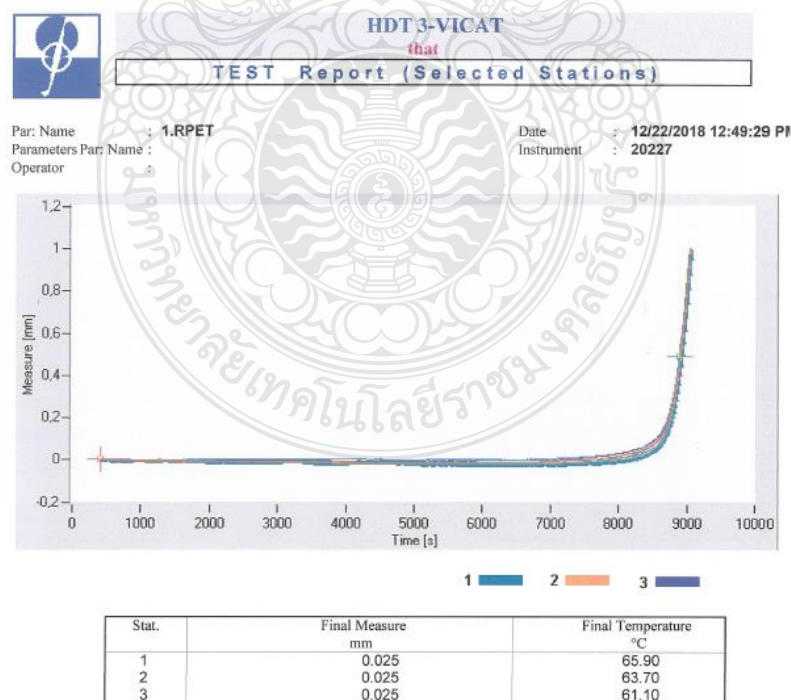


ภาพผนวก ก.6 กราฟ DSC ของ RPET60/PBT40

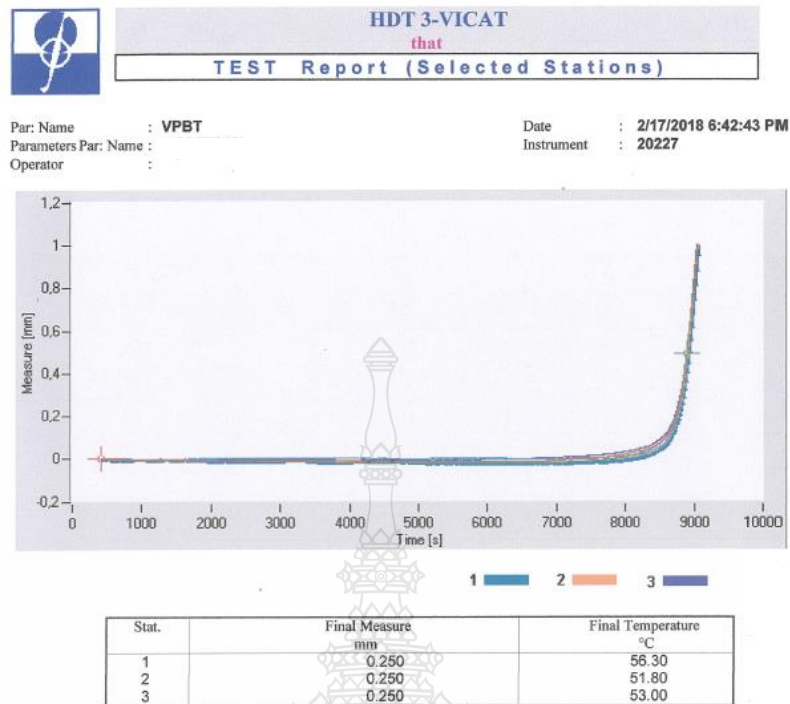


ภาพผนวก ก.7 กราฟ DSC ของ RPET50/PBT50

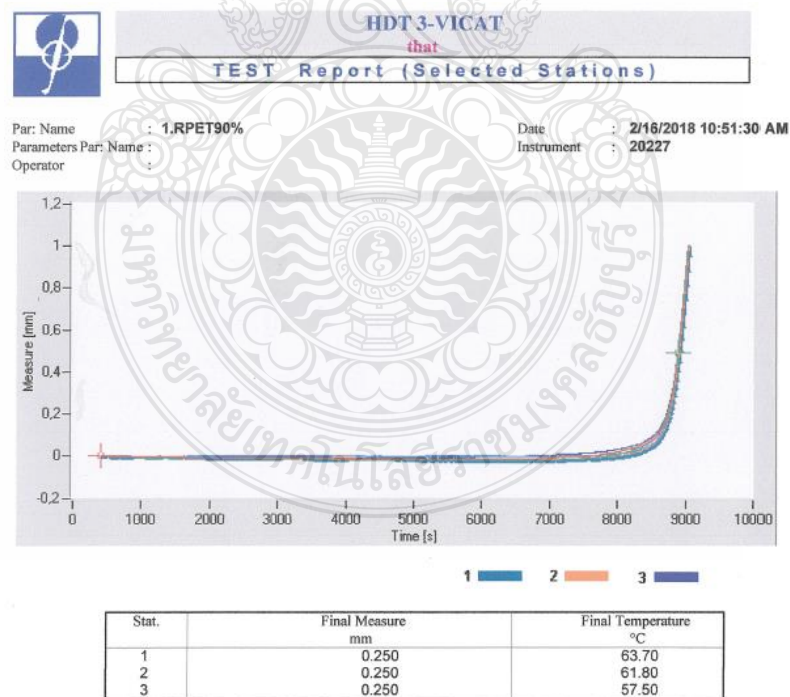
ก-3 ผลของการทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT ด้วยเทคนิค HDT



ภาพผนวก ก.8 กราฟ HDT ของ RPET

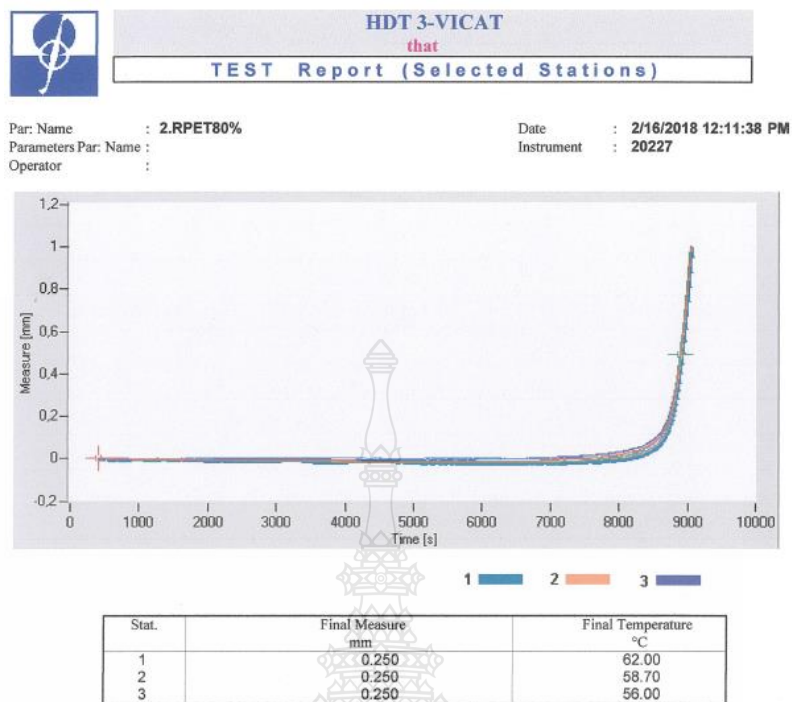


ภาพผนวก ก.9 กราฟ HDT ของ PBT

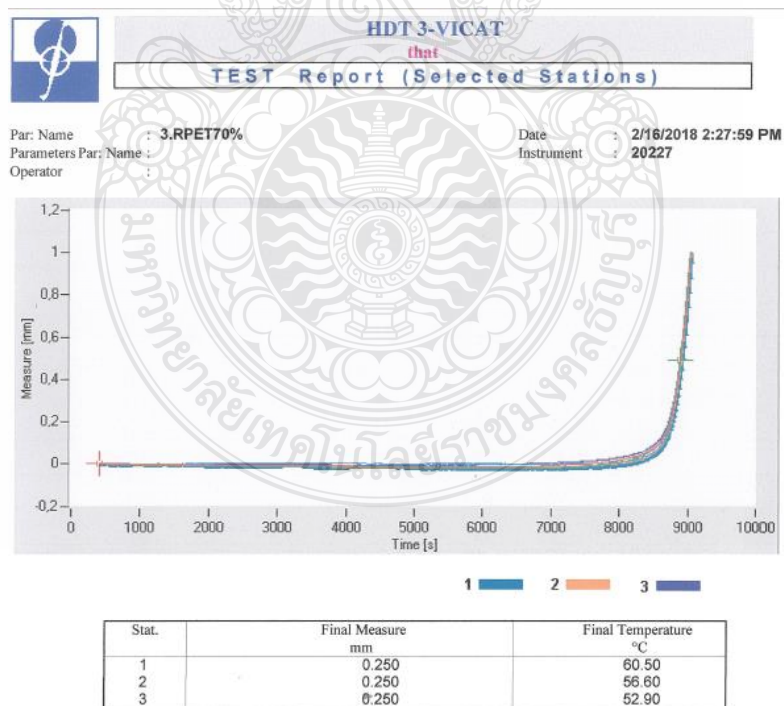


ภาพผนวก ก.10 กราฟ HDT ของ RPET90/PBT10

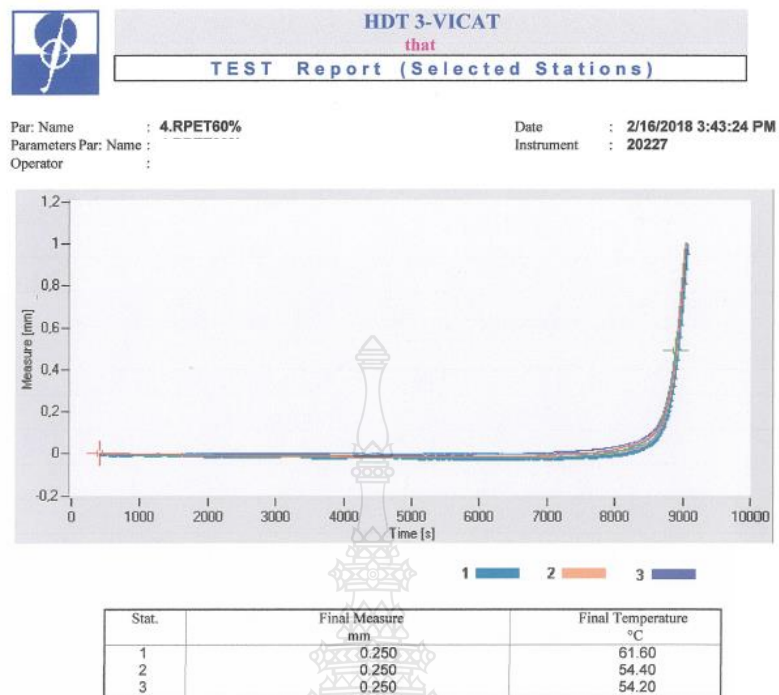




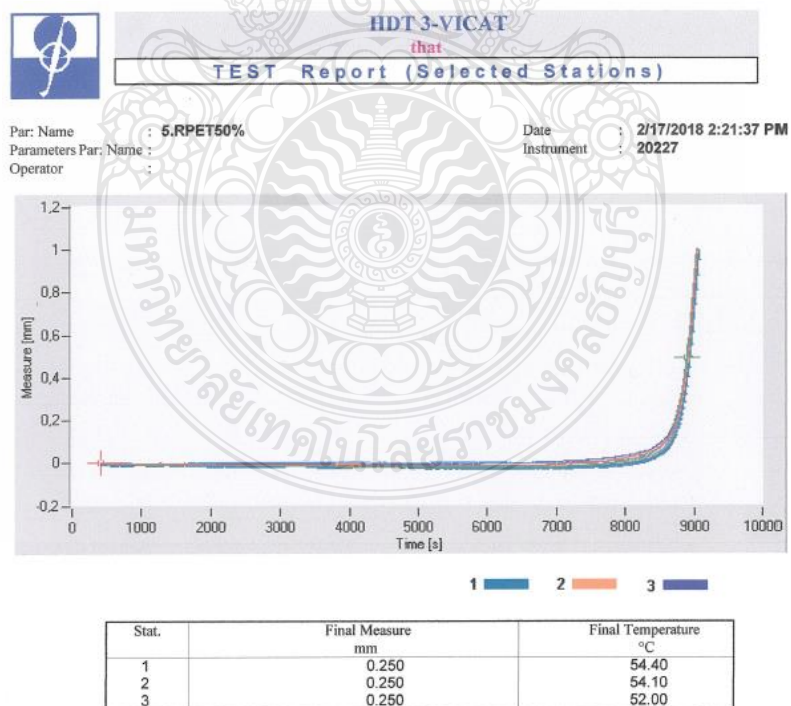
ภาพผนวก ก.11 กราฟ HDT ของ RPET80/PBT20



ภาพผนวก ก.12 กราฟ HDT ของ RPET70/PBT30



ภาพผนวก ก.13 กราฟ HDT ของ RPET60/PBT40



ภาพผนวก ก.14 กราฟ HDT ของ RPET50/PBT50

ก-4 ผลการทดสอบสมบัติการลุกไหม้ของพอลิเมอร์ผสม RPET/PBT ตามมาตรฐาน UL-94

ตารางผนวก ก.5 เงื่อนไขการจัดระดับความรุนแรงในการติดไฟตามมาตรฐาน ASTM-D 3801

| เงื่อนไข                                                                                                | V-0         | V-1          | V-2          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------|--------------|
| เวลาในการติดไฟ $t_1$ หรือ $t_2$ ของแต่ละชิ้นงาน                                                         | $\leq 10$ s | $\leq 30$ s  | $\leq 30$ s  |
| เวลาในการติดไฟรวมของตัวชิ้นงานทั้งหมดในกลุ่มตัวอย่าง ( $t_1 + t_2$ ของชิ้นงาน 5 ชิ้น)                   | $\leq 50$ s | $\leq 250$ s | $\leq 250$ s |
| เวลาในการติดไฟรวมกับเวลาในการวาบไฟของชิ้นงานแต่ละชิ้น หลังจากสัมผัสเปลวไฟเป็นครั้งที่ 2 ( $t_1 + t_2$ ) | $\leq 30$ s | $\leq 60$ s  | $\leq 60$ s  |
| ชิ้นงานเกิดการติดไฟหรือวาบไฟไปถึงระยะที่จับชิ้นงาน                                                      | ไม่มี       | ไม่มี        | ไม่มี        |
| ฝ้ายเกิดการติดไฟเนื่องจากการหยดหรือส่วนที่เกิดจากการเผาไหม้ของชิ้นงาน                                   | ไม่ติดไฟ    | ไม่ติดไฟ     | มีการติดไฟ   |

ตารางผนวก ก.6 ข้อมูลจากการวัดการเผาไหม้ในแนวตั้งตามมาตรฐาน UL-94

| ตัวอย่าง     | $t_1$ (s) | $t_2$ (s) | $t_3$ (s) | การหยด                 | การติดไฟของฝ้าย        |
|--------------|-----------|-----------|-----------|------------------------|------------------------|
| RPET         |           |           |           |                        |                        |
| ชิ้นงานที่ 1 | 2         | 3         | 0         | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ |
| ชิ้นงานที่ 2 | 2         | 2         | 0         | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ |
| ชิ้นงานที่ 3 | 1         | 2         | 0         | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ |
| ชิ้นงานที่ 4 | 3         | 2         | 0         | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ |
| ชิ้นงานที่ 5 | 3         | 2         | 0         | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ |
| RPET90/PBT10 |           |           |           |                        |                        |
| ชิ้นงานที่ 1 | 4         | 2         | 0         | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ |
| ชิ้นงานที่ 2 | 3         | 2         | 0         | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ |
| ชิ้นงานที่ 3 | 2         | 1         | 0         | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ |
| ชิ้นงานที่ 4 | 5         | 3         | 0         | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ |
| ชิ้นงานที่ 5 | 4         | 2         | 0         | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ |

ตารางผนวก ก.6 (ต่อ) ข้อมูลจากการวัดการเผาไหม้ในแนวตั้งตามมาตรฐาน UL-94

| ตัวอย่าง     | $t_1$ (s) | $t_2$ (s) | $t_3$ (s) | การหยุด                | การติดไฟของฝ้าย        |
|--------------|-----------|-----------|-----------|------------------------|------------------------|
| RPET80/PBT20 |           |           |           |                        |                        |
| ชิ้นงานที่ 1 | 11        | 0         | 0         | มีเฉพาะ $t_1$          | มีเฉพาะ $t_1$          |
| ชิ้นงานที่ 2 | 8         | 1         | 0         | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ |
| ชิ้นงานที่ 3 | 4         | 0         | 0         | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ |
| ชิ้นงานที่ 4 | 5         | 5         | 0         | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ |
| ชิ้นงานที่ 5 | 3         | 3         | 0         | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ |
| RPET70/PBT30 |           |           |           |                        |                        |
| ชิ้นงานที่ 1 | 11        | 2         | 0         | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ |
| ชิ้นงานที่ 2 | 6         | 2         | 0         | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ |
| ชิ้นงานที่ 3 | 9         | 2         | 0         | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ |
| ชิ้นงานที่ 4 | 7         | 0         | 0         | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ |
| ชิ้นงานที่ 5 | 9         | 1         | 0         | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ | มีทั้ง $t_1$ และ $t_2$ |
| RPET60/PBT40 |           |           |           |                        |                        |
| ชิ้นงานที่ 1 | 6         | 2         | 0         | มีเฉพาะ $t_2$          | มีเฉพาะ $t_2$          |
| ชิ้นงานที่ 2 | 3         | 1         | 0         | มีเฉพาะ $t_2$          | มีเฉพาะ $t_2$          |
| ชิ้นงานที่ 3 | 2         | 1         | 0         | มีเฉพาะ $t_2$          | มีเฉพาะ $t_2$          |
| ชิ้นงานที่ 4 | 4         | 6         | 0         | มีเฉพาะ $t_2$          | มีเฉพาะ $t_2$          |
| ชิ้นงานที่ 5 | 2         | 2         | 0         | มีเฉพาะ $t_2$          | มีเฉพาะ $t_2$          |
| RPET50/PBT50 |           |           |           |                        |                        |
| ชิ้นงานที่ 1 | 0         | 2         | 0         | มีเฉพาะ $t_2$          | ไม่มี                  |
| ชิ้นงานที่ 2 | 0         | 4         | 0         | มีเฉพาะ $t_2$          | ไม่มี                  |
| ชิ้นงานที่ 3 | 0         | 3         | 0         | มีเฉพาะ $t_2$          | ไม่มี                  |
| ชิ้นงานที่ 4 | 0         | 4         | 0         | มีเฉพาะ $t_2$          | ไม่มี                  |
| ชิ้นงานที่ 5 | 0         | 2         | 0         | มีเฉพาะ $t_2$          | ไม่มี                  |

ตารางผนวก ก.6 (ต่อ) ข้อมูลจากการวัดการเผาไหม้ในแนวตั้งตามมาตรฐาน UL-94

| ตัวอย่าง     | $t_1$ (s) | $t_2$ (s) | $t_3$ (s) | การหยุด | การติดไฟของฝ้าย |
|--------------|-----------|-----------|-----------|---------|-----------------|
| PBT          |           |           |           |         |                 |
| ชิ้นงานที่ 1 | 0         | 0         | 0         | ไม่มี   | ไม่มี           |
| ชิ้นงานที่ 2 | 0         | 0         | 0         | ไม่มี   | ไม่มี           |
| ชิ้นงานที่ 3 | 0         | 0         | 0         | ไม่มี   | ไม่มี           |
| ชิ้นงานที่ 4 | 0         | 0         | 0         | ไม่มี   | ไม่มี           |
| ชิ้นงานที่ 5 | 0         | 0         | 0         | ไม่มี   | ไม่มี           |

ก-5 ผลของการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมพอสิต RPET60/PBT40/Wollastonite

ตารางผนวก ก.7 สมบัติการรับแรงกระแทกของคอมพอสิต RPET60/PBT40/Wollastonite ที่ด้วย  
ค้อน 2J/N

| ตัวอย่าง (%wt) | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | Impact strength<br>(J/m) |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|
| RPET60/PBT40   | 24.30 | 24.75 | 24.20 | 25.00 | 25.30 | $25.0 \pm 0.5$           |
| W10            | 32.40 | 39.02 | 34.04 | 41.72 | 34.36 | $36.3 \pm 3.9$           |
| W20            | 43.77 | 53.63 | 41.91 | 38.70 | 44.61 | $45.0 \pm 6.0$           |
| W30            | 71.38 | 82.67 | 72.29 | 80.00 | 81.93 | $77.7 \pm 5.4$           |
| W40            | 43.37 | 31.61 | 38.21 | 45.51 | 38.55 | $39.5 \pm 5.4$           |

ตารางผนวก ก.8 สมบัติการดึงยึดของคอมพอสิต RPET60/PBT40/Wollastonite ทดสอบด้วย  
อัตราการดึง 10 มิลลิเมตร/นาที

| ตัวอย่าง (%wt) | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | Tensile strength<br>(Mpa) |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------------|
| RPET60/PBT40   | 64.58 | 48.26 | 61.16 | 53.34 | 53.19 | 56.0 ± 6.6                |
| W10            | 50.51 | 51.78 | 50.88 | 50.05 | 50.77 | 50.8 ± 0.6                |
| W20            | 51.59 | 52.15 | 52.87 | 52.54 | 52.08 | 52.3 ± 0.4                |
| W30            | 53.46 | 53.84 | 53.97 | 53.68 | 53.30 | 53.7 ± 0.3                |
| W40            | 53.33 | 52.99 | 52.99 | 52.85 | 52.89 | 53.0 ± 0.2                |

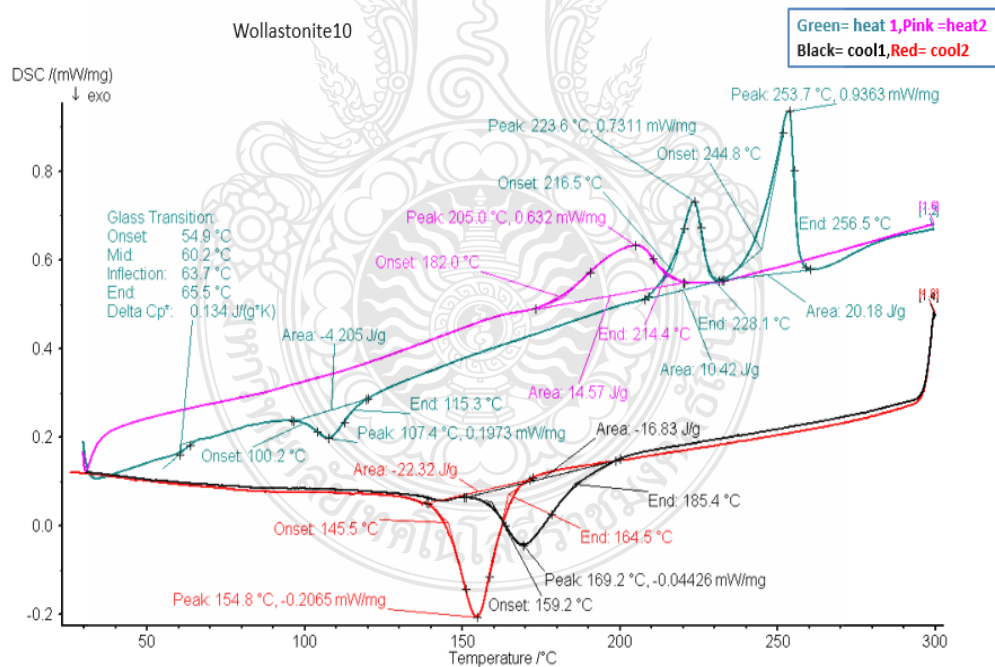
ตารางผนวก ก.9 สมบัติการยืดตัว ณ จุดขาด ของคอมพอสิต RPET60/PBT40/Wollastonite  
ทดสอบด้วยอัตราการดึง 10 มิลลิเมตร/นาที

| ตัวอย่าง (%wt) | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | Elongation at break<br>(%) |
|----------------|------|------|------|------|------|----------------------------|
| RPET60/PBT40   | 3.85 | 2.85 | 3.43 | 2.72 | 2.99 | 3.2 ± 0.5                  |
| W10            | 5.16 | 5.54 | 6.21 | 6.00 | 4.32 | 5.5 ± 0.8                  |
| W20            | 4.64 | 3.11 | 4.76 | 4.25 | 3.48 | 4.0 ± 0.7                  |
| W30            | 3.51 | 3.83 | 3.32 | 3.66 | 3.41 | 3.6 ± 0.2                  |
| W40            | 3.37 | 3.29 | 3.20 | 2.75 | 2.96 | 3.0 ± 0.3                  |

ตารางผนวก ก.10 สมบัติเชิงสัณยศาสตร์ ของคอมพอสิต RPET60/PBT40/Wollastonite  
ทดสอบด้วยอัตราการดึง 10 มิลลิเมตร/นาทีก

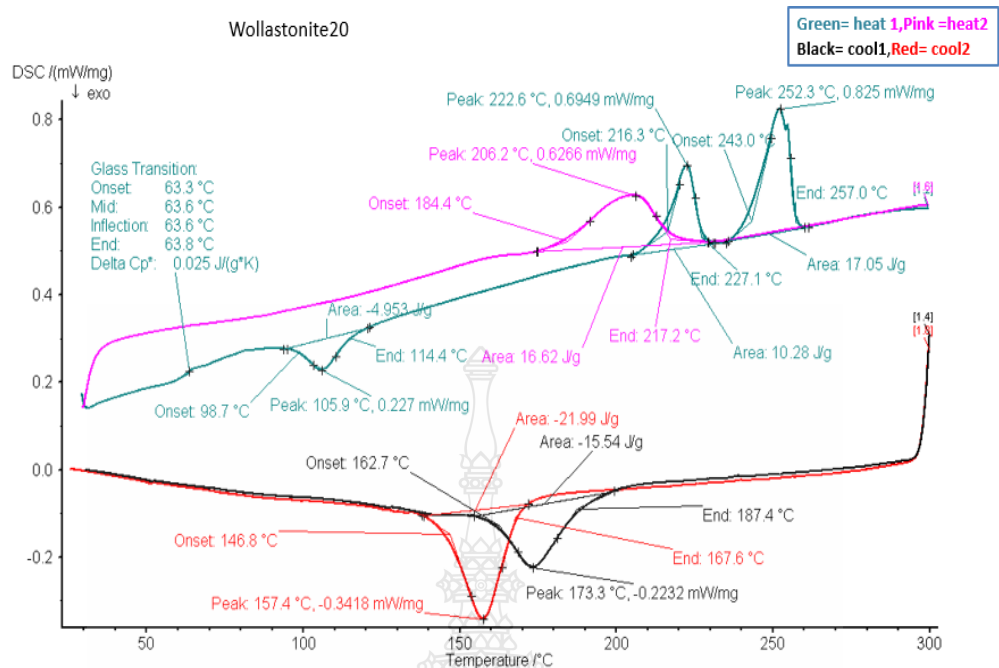
| ตัวอย่าง (%wt) | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | Young's modulus (Mpa) |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------------------|
| RPET60/PBT40   | 2356.48 | 2214.22 | 2438.41 | 2805.49 | 2440.04 | 2451.0 ± 218.5        |
| W10            | 2240.65 | 2358.27 | 2324.13 | 2253.76 | 2371.78 | 2309.7 ± 59.8         |
| W20            | 2618.40 | 2596.87 | 2452.62 | 2657.19 | 2742.36 | 2613.5 ± 105.7        |
| W30            | 2730.99 | 3036.47 | 3024.31 | 3034.88 | 3045.87 | 2974.5 ± 136.3        |
| W40            | 3052.31 | 3050.29 | 2608.62 | 3104.93 | 2690.27 | 2901.3 ± 232.7        |

ก-6 ผลของการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิต RPET60/PBT40/Wollastonite  
โดยเทคนิค DSC

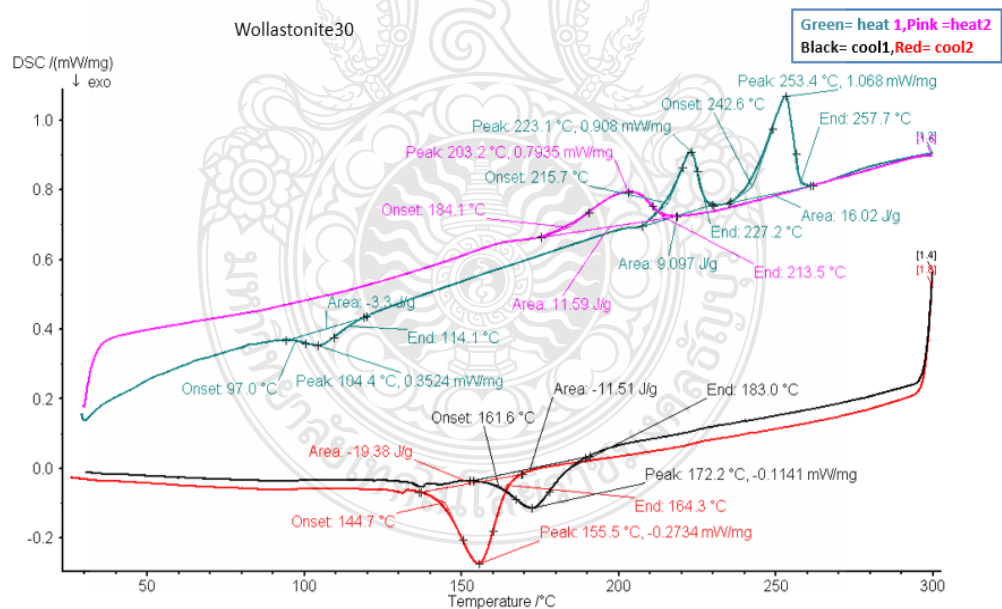


ภาพผนวก ก.15 กราฟ DSC ของ RPET60/PBT40/Wollastonite10

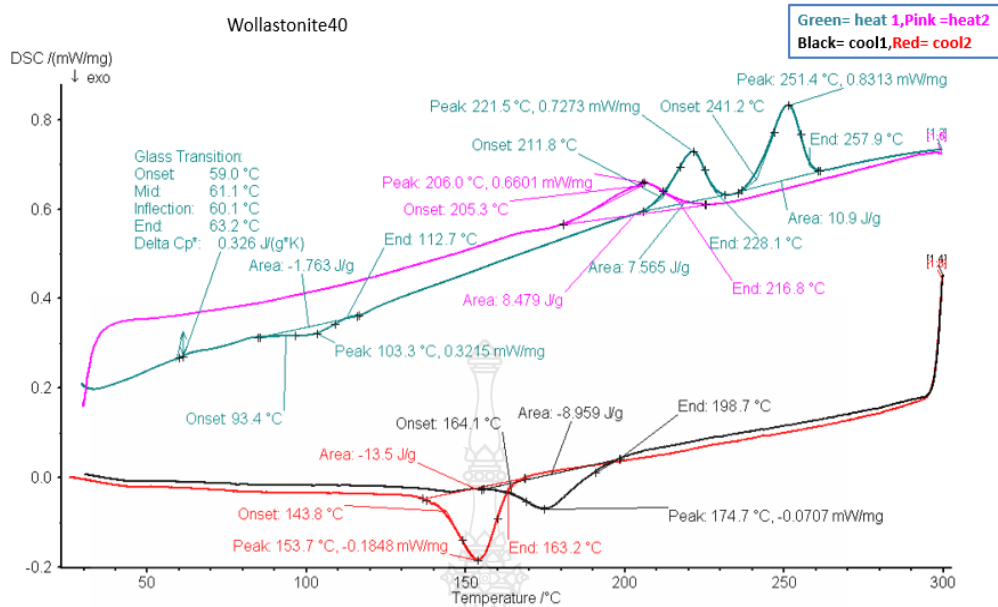




ภาพผนวก ก.16 กราฟ DSC ของ RPET60/PBT40/Wollastonite20

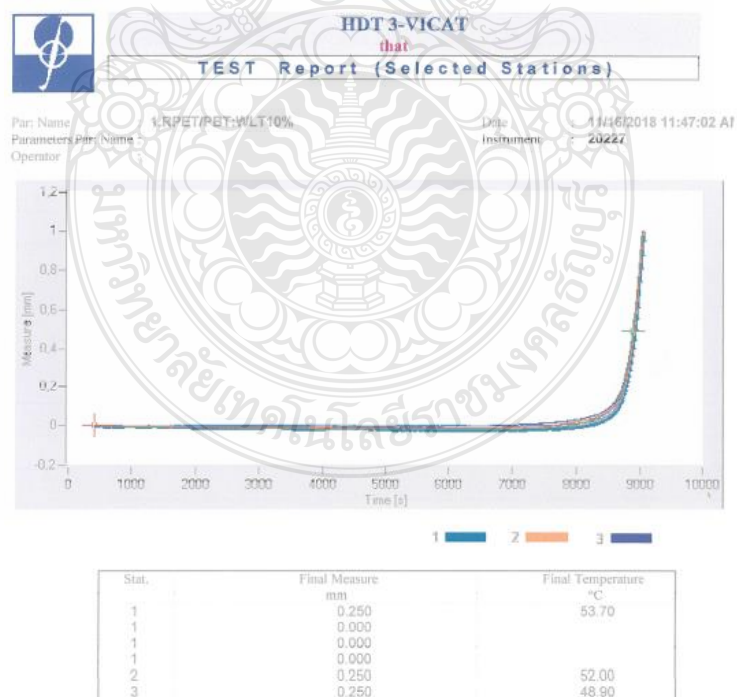


ภาพผนวก ก.17 กราฟ DSC ของ RPET60/PBT40/Wollastonite30

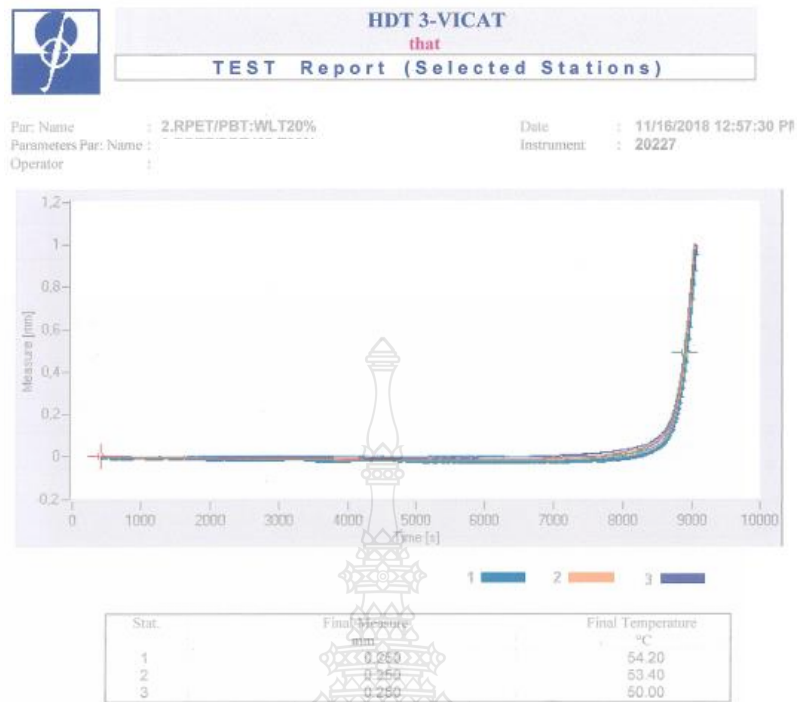


ภาพผนวก ก.18 กราฟ DSC ของ RPET60/PBT40/Wollastonite40

ก-7 ผลของการทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนคอมพอสิต RPET60/PBT40/Wollastonite ด้วยเทคนิค HDT



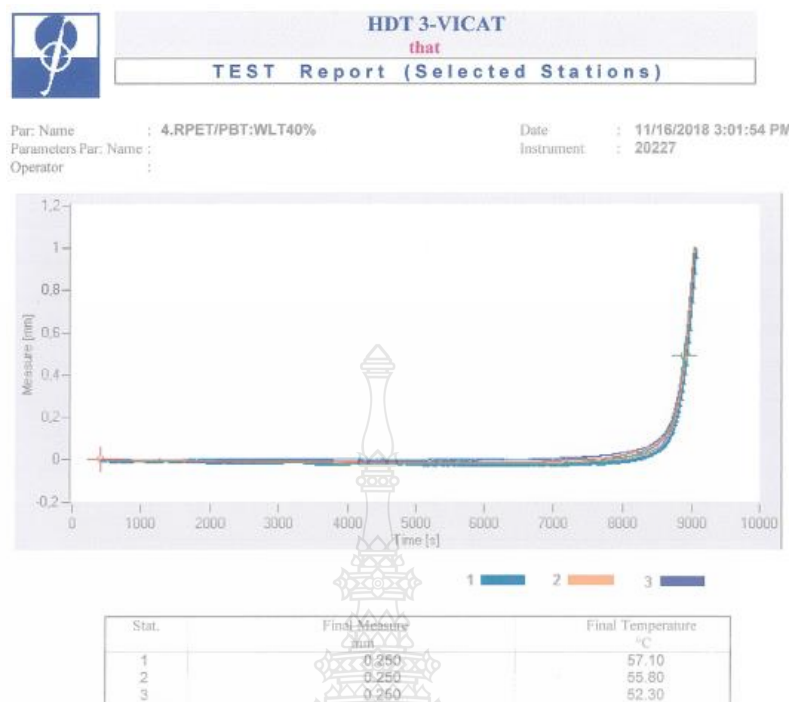
ภาพผนวก ก.19 กราฟ HDT ของ RPET60/PBT40/Wollastonite10



ภาพผนวก ก.20 กราฟ HDT ของ RPET60/PBT40/Wollastonite20



ภาพผนวก ก.21 กราฟ HDT ของ RPET60/PBT40/Wollastonite30



ภาพผนวก ก.22 กราฟ HDT ของ RPET60/PBT40/Wollastonite40

ก-8 ผลการทดสอบการลามไฟของคอมพอสิต RPET/PBT/ Wollastonite ตามมาตรฐาน UL-94

ตารางผนวก ก.11 ข้อมูลจากการวัดการเผาไหม้ในแนวตั้งตามมาตรฐาน UL-94

| ตัวอย่าง     | $t_1$ (s) | $t_2$ (s) | $t_3$ (s) | การหยุด       | การติดไฟของฝ้าย |
|--------------|-----------|-----------|-----------|---------------|-----------------|
| W10          |           |           |           |               |                 |
| ชิ้นงานที่ 1 | 3         | 5         | 0         | มีเฉพาะ $t_2$ | มีเฉพาะ $t_2$   |
| ชิ้นงานที่ 2 | 0         | 10        | 0         | ไม่มี         | ไม่มี           |
| ชิ้นงานที่ 3 | 1         | 12        | 0         | มีเฉพาะ $t_2$ | มีเฉพาะ $t_2$   |
| ชิ้นงานที่ 4 | 2         | 2         | 0         | มีเฉพาะ $t_2$ | ไม่มี           |
| ชิ้นงานที่ 5 | 3         | 1         | 0         | มีเฉพาะ $t_2$ | มีเฉพาะ $t_2$   |

ตารางผนวก ก.11 (ต่อ) ข้อมูลจากการวัดการเผาไหม้ในแนวตั้งตามมาตรฐาน UL-94

| ตัวอย่าง     | $t_1$ (s) | $t_2$ (s) | $t_3$ (s) | การหยุด       | การติดไฟของฝ้าย |
|--------------|-----------|-----------|-----------|---------------|-----------------|
| W20          |           |           |           |               |                 |
| ชิ้นงานที่ 1 | 3         | 3         | 0         | มีเฉพาะ $t_2$ | มีเฉพาะ $t_2$   |
| ชิ้นงานที่ 2 | 3         | 2         | 0         | มีเฉพาะ $t_2$ | มีเฉพาะ $t_2$   |
| ชิ้นงานที่ 3 | 9         | 12        | 0         | ไม่มี         | ไม่มี           |
| ชิ้นงานที่ 4 | 6         | 5         | 0         | มีเฉพาะ $t_2$ | มีเฉพาะ $t_2$   |
| ชิ้นงานที่ 5 | 3         | 5         | 0         | ไม่มี         | ไม่มี           |
| W30          |           |           |           |               |                 |
| ชิ้นงานที่ 1 | 1         | 4         | 0         | ไม่มี         | ไม่มี           |
| ชิ้นงานที่ 2 | 3         | 6         | 0         | ไม่มี         | ไม่มี           |
| ชิ้นงานที่ 3 | 1         | 3         | 0         | ไม่มี         | ไม่มี           |
| ชิ้นงานที่ 4 | 1         | 0         | 0         | ไม่มี         | ไม่มี           |
| ชิ้นงานที่ 5 | 0         | 6         | 0         | ไม่มี         | ไม่มี           |
| W40          |           |           |           |               |                 |
| ชิ้นงานที่ 1 | 0         | 1         | 0         | ไม่มี         | ไม่มี           |
| ชิ้นงานที่ 2 | 1         | 3         | 0         | ไม่มี         | ไม่มี           |
| ชิ้นงานที่ 3 | 0         | 2         | 0         | ไม่มี         | ไม่มี           |
| ชิ้นงานที่ 4 | 0         | 2         | 0         | ไม่มี         | ไม่มี           |
| ชิ้นงานที่ 5 | 0         | 1         | 0         | ไม่มี         | ไม่มี           |

ภาคผนวก ข  
สูตรการคำนวณ



ข-1 การคำนวณค่าความทนแรงกระแทก

$$\text{Impact strength (J/m)} = \frac{\text{Energy (J)}}{\text{Thickness (m)}} \quad (3.1)$$

โดย Energy = พลังงานในการทำให้วัสดุแตกหัก (จูล)

Thickness = ความหนาของชิ้นงาน (เมตร)

ข-2 การคำนวณความเป็นผลึก degree of crystallinity

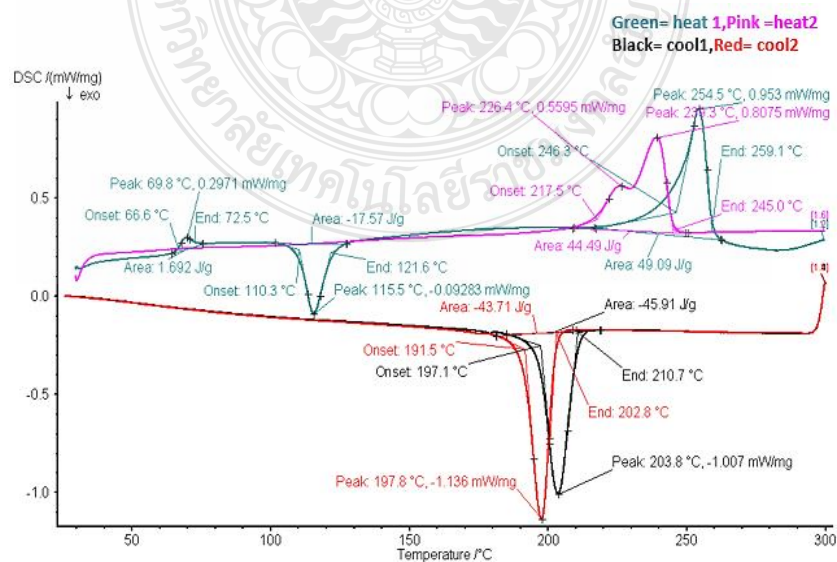
$$\chi_c (\%) = \frac{\Delta H_m}{w \Delta H_m^\circ} \times 100 \quad (4.1)$$

โดย  $\Delta H_m^\circ$  คือ เอนทาลปีการหลอมเหลวของ RPET ที่มีระดับความเป็นผลึก 100% (120 J/g) [36] และ

w คือ สัดส่วนโดยน้ำหนัก (weight fraction) ของ RPET ในชิ้นทดสอบ

$$\chi_c (\%) = \frac{[\Delta H_m - \Delta H_{cc}]}{w \Delta H_m^\circ} \times 100 \quad (4.2)$$

ตัวอย่างเช่น





การคำนวณหาความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมจากกราฟ DSC ของ RPET90/PBT10 จากการให้ความร้อนครั้งที่ 1

$$\Delta H_m = 49.0 \text{ J/g}$$

$$\Delta H_m^\circ = 120 \text{ J/g}$$

$$\Delta H_{cc} = 17.6 \text{ J/g}$$

$$w = 0.9$$

$$\begin{aligned}\chi_c (\%) &= \frac{[49.0 - 17.6] \times 100}{(0.9 \times 120)} \\ &= 29.07\end{aligned}$$



ภาคผนวก ค  
การนำเสนอผลงานวิจัย



ค-1 การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 10



ESTACON 10<sup>th</sup> 2019  
10<sup>th</sup> Engineering Science Technology and Architecture Conference 2019

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์  
เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 10

The 10th Engineering Science Technology  
and Architecture Conference 2019

ความท้าทายด้านวิศวกรรมในอนาคต  
Engineering Challenge Future

วันที่ 30 สิงหาคม 2562  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล  
จ.นครราชสีมา

ดร.วิทยา เวียงกฤต

วิทยาการบรรยายพิเศษ

ผู้ช่วยโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดนครราชสีมา  
สำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดนครราชสีมา

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิจัย

กลุ่มวิศวกรรมโยธา : CE

|                  |                      |                                               |
|------------------|----------------------|-----------------------------------------------|
| รศ.จักรี         | บัณฑิต               | มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ              |
| ดร.ณภา           | สอนเสวนาภาคย์        | มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา                   |
| ดร.ดวงใจดา       | โคตรโมธา             | มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา                   |
| ดร.ประวิ         | ศรีวิมลพงศ์ โพธิ์สาร | มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา                   |
| ผศ.ดร.จิระยุทธ   | สืบสุระ              | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา |
| ผศ.ดร.ชิตศักดิ์  | สุวิทย์พัฒน์พงศ์     | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา |
| ผศ.ดร.รัฐพล      | สันทนา               | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา |
| ผศ.ดร.กษิณดีสุภา | สันทนา               | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา |
| ผศ.ดร.จิรภัทร    | ธัมศิริ              | มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล                       |
| รศ.ดร.ณัฐ        | ธัญญาภักดิ์          | มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล                       |
| ดร.ศิริชัย       | ท่งจิ่ง              | มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล                       |
| อ.หญิงแก้ว       | บุญอ้วน              | มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล                       |
| อ.ธนวิทย์        | สันทนา               | มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล                       |

กลุ่มวิศวกรรมไฟฟ้า : EE

|                 |               |                                               |
|-----------------|---------------|-----------------------------------------------|
| ผศ.ณัฐ          | คุณไฉยม       | มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ              |
| ดร.พงษ์วิมล     | ศรีพลอย       | มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา                   |
| ดร.สุรชัย       | วรรณกัญญา     | มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา                   |
| ดร.ณัฐดา        | นาคประสิทธิ์  | มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา                   |
| ดร.ทศพร         | จันทร์ผ่อง    | มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา                   |
| ผศ.ดร.ณัฐศักดิ์ | โสภณ          | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา |
| ผศ.ดร.ณัฐ       | สุวิทย์       | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา |
| ผศ.ดร.วราภรณ์   | วงศ์ไธรัตน์   | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา |
| ดร.บุรุษ        | อภิสัยภาพันธ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา |
| ดร.ณัฐชา        | วันชนะ        | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา |
| อ.สิงห์ศักดิ์   | เจษฎ์         | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา |

|                    |                |                         |
|--------------------|----------------|-------------------------|
| ศ.ภญ.ดร.วิไลลักษณ์ | วิไลลักษณ์     | มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล |
| ศ.ดร.พิชิตพงษ์     | ดาตติยะนันท์   | มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล |
| ศ.ดร.ชัยพร         | ทรัพย์ประเสริฐ | มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล |
| ศ.ดร.จิตพงษ์       | เกตุคุณธนา     | มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล |
| อ.นพดล             | โคตรพันธ์      | มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล |

กลุ่มวิศวกรรมเครื่องกล : ME

|              |                |                                                        |
|--------------|----------------|--------------------------------------------------------|
| ดร.จรัส      | สัมพันธ์       | มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล                                |
| ดร.ดิลก      | เดชะพล         | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ศูนย์กลางนครราชสีมา |
| ดร.พิเชษฐ์   | เวงอเนน        | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ศูนย์กลางนครราชสีมา |
| ศ.ดร.วิชัย   | ธีระเดชกุล     | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น     |
| ดร.สุวิทย์   | ตันติ          | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น     |
| ดร.สุวิทย์   | ชาญคงประสิทธิ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น     |
| ดร.สุวิทย์   | สุวรรณาพันธ์   | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น     |
| ดร.พิศาล     | บุลย์คำ        | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น     |
| ดร.ปฐมาภรณ์  | ชัยกุล         | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น     |
| ดร.ชัยรัตน์  | ศักดิ์คำ       | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น     |
| ดร.ภาณุทิพย์ | จิตรเขียว      | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น     |
| ดร.ภาณุพันธ์ | ศรีมงคล        | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น     |
| อ.ไพโร       | ศรีโยธยา       | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น     |
| อ.พิเชษฐ์    | แจ้งนัย        | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น     |
| อ.เนกวิทย์   | นันทวัฒน์      | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น     |
| อ.ดร.ธีรธร   | สุภาภา         | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น     |
| อ.พิศาล      | พนันแก้ว       | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น     |
| ศ.ดร.ธีรธร   | พงษ์สุกุล      | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                     |
| ศ.ดร.ธีรธร   | พัสคำ          | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                     |
| ดร.วิริยะ    | นันทน          | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                     |
| ดร.โกศล      | เจริญผล        | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                     |
| ดร.ณัฐ       | พวงอุปมา       | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                     |
| ดร.สุวิทย์   | เกตุเมศย์      | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                     |
| ดร.สุวิทย์   | บุบผา          | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                     |
| ดร.ไพโรจน์   | สุวิทย์        | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                     |
| ดร.นันท      | สุวิทย์        | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                     |
| ศ.ดร.ไพโรจน์ | ชัยพร          | มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล                                |
| ดร.สุวิทย์   | เกตุเมศย์      | มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล                                |
| อ.วิชัย      | ชัยพร          | มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล                                |
| อ.วิชัย      | ชัยพร          | มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล                                |

|                 |                 |                         |
|-----------------|-----------------|-------------------------|
| ผศ.ดร.ชัยนิกร   | กุลวรงค์        | มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล |
| ผศ.ดร.จุฑาทิพย์ | ทองเกษียรสาภารุ | มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล |
| ผศ.ฉานนท์       | ศรีสว่าง        | มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล |
| อ.จักรีน        | วงษ์ชวลิตกุล    | มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล |

กลุ่มวิศวกรรมอุตสาหกรรม : IE และสถาปัตยกรรมศาสตร์ : AR

|                  |              |                                             |
|------------------|--------------|---------------------------------------------|
| รศ.ดร.ชัยสิทธิ์  | คำานักคิดกุล | มหาวิทยาลัยศิลปากร                          |
| รศ.สุคนธ์        | ธนาฤทธิ์     | มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ            |
| ดร.ปรีชญ์        | บุญนิยม      | มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา                 |
| ดร.วราภรณ์       | เกษียรฉานนท์ | มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา                 |
| ผศ.อุทัย         | ธนาฤทธิ์     | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| ผศ.ดร.จิตติวัฒน์ | นันทิการุณ   | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| ผศ.ดร.สุวิทย์    | วรรณศรี      | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| ดร.จารุพงษ์      | บรรณา        | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| อ.นราภรณ์        | บุศรา        | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| ดร.วิภา          | ศารทนต์      | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| อ.รุ่งโรจน์      | โกศล         | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| ดร.ชาญชัย        | เทพา         | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| ดร.ณัฐพร         | อัมรินทร์    | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| อ.ภูทธิ          | แสงพันธ์     | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| ดร.ธีรเชษฐ์      | ธีรพัฒน์     | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| อ.สมาน           | จินตนา       | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| ผศ.ดร.อภิสิทธิ์  | คำานัก       | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| ผศ.ดร.พิชิต      | โพธิ์ศรี     | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| ผศ.นิคม          | บุญญา        | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| ผศ.ธนากร         | ณัฏฐา        | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| รศ.ดร.สุพรรณ     | สุคนธ์       | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| ดร.ประจักษ์      | วิภา         | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| ดร.ธนากร         | แสงพันธ์     | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| อ.ธนากร          | ศิริวรรณ     | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| อ.วิเชียร        | ธีรพัฒน์     | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| อ.กรรณิการ์      | ณัฏฐา        | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| ดร.มณฑนา         | ทองสุก       | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| อ.ประภาพร        | เนียม        | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี |
| รศ.ดร.สิริวัน    | วงษ์ชวลิตกุล | มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล                     |
| ดร.มากร          | โคตรพันธ์    | มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล                     |
| ดร.ศิริวัฒน์     | สาร          | มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล                     |





|               |               |                                                                        |
|---------------|---------------|------------------------------------------------------------------------|
| อ.ณภัทรมณี    | สวัสดีศึกษณ์  | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีสุพรรณบุรี |
| อ.จักรพันธ์   | ธนา           | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีสุพรรณบุรี |
| อ.ปิยะบุษย์   | คัมภีร์คัลลิต | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีสุพรรณบุรี |
| อ.จักรกริช    | ปานเรือนพล    | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีสุพรรณบุรี |
| ดร.จิตติมา    | กุลวงค์       | มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์มุก                                          |
| ดร.ณัฐสุรางค์ | ธะสิงห์เนิน   | มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์มุก                                          |
| ดร.พิพัชรณ    | เพ็ญกมลไวย    | มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์มุก                                          |
| อ.สราวิตรี    | วงศ์เพ็ชร     | มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์มุก                                          |
| อ.โศภณ        | โพธิ์แก้ว     | มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์มุก                                          |
| อ.วิภากร      | เจนชัย        | มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์มุก                                          |
| อ.ศุภพล       | ปราชญ์ปรีชา   | มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์มุก                                          |

คณะกรรมการดำเนินงาน

|                  |                 |                  |
|------------------|-----------------|------------------|
| รศ.ดร.สิงหนภ     | รองอธิบดีพิเศษ  | ประธานกรรมการ    |
| อ.จกัณ           | รองอธิบดีพิเศษ  | รองประธานกรรมการ |
| ดร.จิตติมา       | คุณวุฒิ         | รองประธานกรรมการ |
| ดร.ณัฐธราภ       | ยะสุธเนป        | รองประธานกรรมการ |
| ผศ.ดร.ธีรภัทร    | ชัยศิริ         | กรรมการ          |
| รศ.ดร.ธนุชิต     | อูษัยภักชีชาติ  | กรรมการ          |
| ผศ.ประโชชัย      | ชัยภูมุต        | กรรมการ          |
| ผศ.กฤษฎา         | วิไลทัศน        | กรรมการ          |
| ผศ.ดร.พัชรินทร์  | วาศมัยธนบัน     | กรรมการ          |
| ผศ.ดร.ชัยฟู      | พจิรพัฒน์อุป    | กรรมการ          |
| ผศ.ดร.ชัยภัทร    | คุณวุฒิ         | กรรมการ          |
| ผศ.ดร.อุทราทิพย์ | ทองเคชาสิริมาตุ | กรรมการ          |
| ผศ.ธนาภ          | ศรีสว่าง        | กรรมการ          |
| ผศ.เชษฐพงษ์      | เกตุธเนป        | กรรมการ          |
| ดร.ศิริวัฒน์     | สิทธะเขตต์      | กรรมการ          |
| ดร.มาวต          | โคตรทนต์        | กรรมการ          |
| ดร.ศิริชัย       | หวั่งจิง        | กรรมการ          |
| ดร.ยุทธชัย       | เกษมสันเพียร    | กรรมการ          |
| ดร.ประยงค์       | กิตติอุไร       | กรรมการ          |
| ดร.สุริพร        | มีทอง           | กรรมการ          |
| อ.พริ้งแก้ว      | บุญสืบ          | กรรมการ          |

|              |              |         |
|--------------|--------------|---------|
| อ.ณัฐพร      | สุชนาลัย     | กรรมการ |
| อ.นพพล       | โคตรพันธ์    | กรรมการ |
| อ.รักพงษ์    | ชันวดี       | กรรมการ |
| อ.วชิรชัย    | ชาญสูงเนิน   | กรรมการ |
| อ.บรรณพงษ์   | โกชนิกานะ    | กรรมการ |
| อ.รุ่งทิรา   | เวทนะเวทิน   | กรรมการ |
| อ.สุภาภรณ์   | พัริวโสม     | กรรมการ |
| อ.ธนุรักษ์   | มะโนชัย      | กรรมการ |
| อ.นพพล       | สุเมธาคี     | กรรมการ |
| อ.รพีพรรณ    | ฉะกันเป็นไวย | กรรมการ |
| อ.สราวิทย์   | วงศ์สิทธิ์   | กรรมการ |
| อ.นิติภูมิ   | ไพสวรงค์     | กรรมการ |
| อ.วิญญู      | เจนชัย       | กรรมการ |
| อ.ศศพล       | ปราจิณปรีชา  | กรรมการ |
| อ.วิเชษฐ์    | คลังพิมาย    | กรรมการ |
| อ.ณิชา       | กุดกลาง      | กรรมการ |
| อ.กฤษณ       | บุญคำ        | กรรมการ |
| อ.วิภา       | นางสาทิ      | กรรมการ |
| อ.พิเชษฐพงศ์ | เนปาทอง      | กรรมการ |
| อ.จาตุรงค์   | ระโสม        | กรรมการ |
| อ.พิชัย      | ไทรโสม       | กรรมการ |
| อ.ณิชา       | มิใหม่       | กรรมการ |
| อ.ชัยยศ      | เมืองสุข     | กรรมการ |
| อ.นิศานา     | นพรัตน์      | กรรมการ |

ตารางนำเสนอบทความ ESTACON 2019

| ชื่อ                    | ชื่องาน             | ชื่องาน          | ชื่องาน          | ชื่องาน          | ชื่องาน          | ชื่องาน          | ชื่องาน          | ชื่องาน          |
|-------------------------|---------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| นำเสนอ<br>ภาค<br>บรรยาย | Chairman            | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ |
|                         | Co-Chairman         | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ |
|                         | 15:25 - 15:40       | CE02             | ISGAR26          | ME02             | ISGAR27          | ME16             | CE01             | Other15          |
|                         | 15:45 - 15:50       | CE05             | ISGAR27          | ME03             | ISGAR29          | ME17             | CE02             | Other16          |
|                         | 15:55 - 15:56       | CE06             | ISGAR28          | ME04             | ISGAR30          | ME18             | CE03             | Other17          |
|                         | 15:55 - 15:40       | CE17             | ISGAR29          | ME05             | ISGAR32          | ME19             | CE06             | Other14          |
|                         | 15:45 - 15:50       | CE18             | ISGAR35          | ME06             | ISGAR35          | ME20             | CE26             |                  |
|                         | พิธีเปิดและงานเสวนา |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| นำเสนอ<br>ภาค<br>บรรยาย | Chairman            | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ |
|                         | Co-Chairman         | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ |
|                         | 13:00 - 13:15       | CE07             | ISGAR25          | ME07             | ISGAR33          | ME21             | CE14             |                  |
|                         | 13:20 - 13:35       | CE08             | ISGAR32          | ME08             | ISGAR36          | ME22             | CE19             |                  |
|                         | 13:40 - 13:55       | CE09             | ISGAR34          | ME11             | ISGAR37          | ME23             | CE23             |                  |
|                         | 14:00 - 14:15       | CE10             | ISGAR35          | ME12             | ISGAR38          | ME26             | CE31             |                  |
|                         | 14:20 - 14:35       | CE15             | ISGAR36          | ME28             | ISGAR39          | ME34             | CE27             |                  |
|                         | พิธีปิดและงานเสวนา  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| นำเสนอ<br>ภาค<br>บรรยาย | Chairman            | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ |
|                         | Co-Chairman         | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ | ดร.วิมล<br>วิเศษ |
|                         | 14:50 - 15:05       | CE11             | ISGAR37          | ME20             | ISGAR30          | ME27             | CE28             |                  |
|                         | 15:10 - 15:25       | CE12             | ISGAR38          | ME21             | ISGAR33          | ME30             | CE24             |                  |
|                         | 15:30 - 15:45       | CE13             | ISGAR39          | ME22             | ISGAR34          | ME31             | CE30             |                  |
|                         | 15:50 - 16:05       | CE14             | ISGAR40          | ME23             | ISGAR35          | ME32             | CE32             |                  |
|                         | 16:10 - 16:25       | CE16             | ISGAR41          | ME24             | ISGAR36          | ME33             | CE33             |                  |
|                         | 16:30 - 16:45       | CE17             | ISGAR42          | ME25             | ISGAR37          | ME34             | CE34             |                  |
|                         | 16:50 - 17:05       | CE18             | ISGAR43          | ME26             | ISGAR38          | ME35             | CE35             |                  |

การนำเสนอบทความวิจัยทางเทคโนโลยีสารสนเทศ ให้ผู้นำเสนอที่ลงทะเบียนแล้ว ขึ้น 3 อาคารวิจัยแก้ว เวลา 09.00 – 16.00 น.

**บทความวิจัยแบบโปสเตอร์ กลุ่มวิศวกรรมเครื่องกล**

|      |                                                           |     |
|------|-----------------------------------------------------------|-----|
| ME24 | ศึกษาและออกแบบเครื่องคิดค้นหินปูนและสับต่อเติมกับลำปะเท่ง | 319 |
| ME25 | ศึกษาและออกแบบพัฒนาเครื่องผสมอาหารสุรแบบแห้ง              | 328 |

**บทความวิจัยแบบบรรยาย กลุ่มวิศวกรรมอุตสาหการและงานศิลปกรรมศาสตร์**

|         |                                                                                                                     |     |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| IESAR07 | พอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต/โพลีคาร์บอเนต/พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต/สเมคติกซิลิกา สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกล  | 335 |
| IESAR09 | อิทธิพลของความเร็วรอบเครื่องกลึงที่มีต่อแรงเสียดทานและอุณหภูมิของชิ้นงาน                                            | 342 |
| IESAR10 | พอลิเมอร์ผสมโพลีเอทิลีนเทรฟทาเลต/โพลีไมลิกแอซิด/พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต/สเมคติกซิลิกา สมบัติทางกล และสมบัติทางความร้อน | 349 |
| IESAR12 | การพัฒนาตัวแบบในการจัดเส้นทางในการขนส่งวัสดุชิ้นงานในระบบการผลิตแบบอัตโนมัติ                                        | 354 |
| IESAR13 | การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเชื่อมต่อการเชื่อมแบบ MIG                                                            | 362 |
| IESAR15 | การจำลองสถานการณ์แบบสมมติฐานในการจัดการความเสี่ยงของอุบัติเหตุในระบบ                                                | 369 |
| IESAR16 | ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกวิธีการเชื่อมในการเชื่อมชิ้นงานโลหะ                                                         | 376 |
| IESAR17 | การวิเคราะห์การไหลของของไหลในระบบท่อ                                                                                | 383 |
| IESAR18 | การออกแบบและสร้างเครื่องกลึงแบบอัตโนมัติ                                                                            | 390 |
| IESAR19 | อิทธิพลปัจจัยของกระบวนการผลิตที่มีต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน                                                          | 396 |
| IESAR20 | อิทธิพลของอุณหภูมิในการเชื่อมต่อการเชื่อมแบบ MIG                                                                    | 402 |
| IESAR21 | การประยุกต์ใช้ตัวแบบในการจัดเส้นทางในการขนส่งวัสดุชิ้นงานในระบบการผลิตแบบอัตโนมัติ                                  | 414 |
| IESAR23 | การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเชื่อมต่อการเชื่อมแบบ MIG                                                            | 424 |
| IESAR24 | การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเลือกวิธีการเชื่อมในการเชื่อมชิ้นงานโลหะ                                            | 432 |
| IESAR25 | การปรับปรุงกระบวนการเพื่อลดความสูญเสียในขั้นตอนการบรรจุ                                                             | 441 |
| IESAR26 | การประเมินความเสี่ยงของการทำงานในโรงงาน                                                                             | 447 |
| IESAR27 | การประเมินความเสี่ยงของการทำงานในโรงงาน                                                                             | 456 |
| IESAR28 | การปรับปรุงงานด้วยวิธีการทางวิศวกรรม                                                                                | 465 |
| IESAR29 | การพัฒนาโปรแกรมช่วยในการคำนวณต้นทุนการผลิต                                                                          | 472 |
| IESAR31 | การศึกษาสมบัติของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต/โพลีคาร์บอเนต/พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต/สเมคติกซิลิกา                              | 481 |
| IESAR32 | การพัฒนาระบบการขนส่งแบบอัตโนมัติ                                                                                    | 488 |
| IESAR33 | ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบแห้งที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกล                                                          | 497 |
| IESAR34 | การปรับปรุงประสิทธิภาพการประกอบชิ้นงาน                                                                              | 507 |
| IESAR35 | การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกวิธีการเชื่อมในการเชื่อมชิ้นงานโลหะ                                                 | 514 |
| IESAR36 | พอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต/โพลีคาร์บอเนต/พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต/สเมคติกซิลิกา สมบัติทางกล และสมบัติทางความร้อน  | 523 |

พอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล/พอลิบิวทีลีนเทเรฟทาเลต:

สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา

Recycled poly(ethylene terephthalate)/poly(butylene terephthalate) blends: Mechanical, thermal and morphological properties

วัชรพงษ์ วิภากรณ์<sup>1\*</sup> อำนวย สาบานเกษมสุข<sup>2</sup> อวาทพล ใจประคิษฐ์พันธ์<sup>3</sup> และ พชรวรรณ ชัยบุณนิพันธ์<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 5 รัชโยธิน กรุงเทพมหานคร 12110

<sup>2</sup> ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 110 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย พทุมธานี จังหวัดปทุมธานี 12110

\*วัชรพงษ์ วิภากรณ์ : Thudaporn.v@gmail.com, 086-3259177, 095-6626544

#### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ เศษพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) พรีฟอร์มที่ถูกลบแล้ว ได้ถูกนำมาผสมแบบพอลิเมอร์เหลวกับพอลิบิวทีลีนเทเรฟทาเลต (PBT) ทางอากาศ ปริมาณร้อยละ 10 – 40 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ ตามด้วยการฉีดแบบ พอลิเมอร์ผสมถูกตรวจสอบสมบัติเชิงกล (ความทนแรงกระแทก และสมบัติด้านแรงดึง) คุณสมบัติการโค้งงอ ความร้อน และสัณฐานวิทยา จากการทดสอบพบว่า PET รีไซเคิลที่ใช้ที่ร้อยละ 40 มีความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และยังมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับพอลิเมอร์อื่น ๆ โดยมีทั้งความทนแรงกระแทก และยังมีคุณสมบัติสูงกว่า PET รีไซเคิลล้วน ซึ่งแสดงว่าทั้งความเหนียวและความแข็งตัวของ PET รีไซเคิลได้รับการปรับปรุงไปพร้อมๆ กัน อย่างไรก็ตาม ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และคุณสมบัติการโค้งงอด้วยความร้อนมีค่าต่ำกว่าของ PET รีไซเคิลล้วน และจากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า ผิวของพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงมีสัณฐานวิทยาแบบนิ่มหยุ่น จึงสรุปได้ว่าพรีฟอร์มที่ถูกคัดทิ้งสามารถนำมาปรับปรุงความเหนียวและความแข็งได้ด้วยการผสมกับพรีฟอร์มในปริมาณที่เหมาะสม

**คำสำคัญ:** PET รีไซเคิล; พรีฟอร์ม; สมบัติทางกล; สัณฐานวิทยา

#### Abstract

In this study, poly(ethylene terephthalate) (PET) preform scrap in a crushed form was melt blended with four different loading levels (10–40 wt%) of a commercial poly(butylene terephthalate) (PBT) on a corotating twin screw extruder, followed by injection molding. The blends were examined for their mechanical properties (impact strength and tensile properties), heat distortion temperature (HDT) and morphology. It was found that the blend containing 40 wt% PBT exhibited the highest impact strength, tensile strength, elongation at break and Young's modulus compared with other blends. Moreover, this blend had higher impact strength and Young's modulus than the neat R-PET, indicating the simultaneous improvement in toughness and stiffness of the R-PET. However, the tensile strength, elongation at break



and HDT of this blend were found to be lower than those of the neat R-PET. Scanning electron microscopy image of this blend showed a flexible morphology on its tensile fractured surface. It can be concluded that the toughness and stiffness of the PET preform scrap can be improved by melt blending with an appropriate amount of PBT.

**Keywords:** Recycled PET; Poly(butylene terephthalate); Physical properties; Morphology



## 1. บทนำ

ปัจจุบันพลาสติกได้เข้ามามีบทบาทต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือเพ็ต(poly(ethylene terephthalate), PET) เพราะมีน้ำหนักเบา โปร่งใส มีสมบัติเสถียรที่ดี และรีไซเคิลได้เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การใช้เพ็ตจำนวนมากก่อนก่อให้เกิดปัญหาจากขยะพลาสติกทั้งที่ตกค้างอยู่ภายในโรงงานและสิ่งแวดล้อมตามมา เนื่องจากพลาสติกที่ผลิตจากสารปิโตรเลียมส่วนใหญ่มีความคงทนและย่อยสลายตัวกระบวนการทางธรรมชาติหรือกระบวนการทางชีวภาพได้ยาก [1,2] ดังนั้น จึงได้มีการส่งเสริมให้นำขยะจากเพ็ตมาเพิ่มมูลค่าโดยกระบวนการรีไซเคิลเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ซึ่งตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา งานวิจัยจำนวนมากได้พัฒนาเพ็ตรีไซเคิล (RPET) โดยเชื่อมพอลิเมอร์กลับพลาสติกชนิดอื่นเพื่อปรับปรุงสมบัติของเพ็ตรีไซเคิลที่ลดลง [3,4] ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทดลองผสม RPET ที่ได้จากพรีฟอร์ม (preform) ที่ถูกคัดทิ้งเป็นของเสียภายในโรงงานผลิตขวดเพ็ตกับพอลิบิวทีเร็นเทเรฟทาเลตหรือพีบีที (poly(butylene terephthalate), PBT) ซึ่งเป็นพอลิเอสเตอร์เหมือนเพ็ต โดยมีความหนาแน่น ร้อยละและสารเคมี และสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับเพ็ต แต่มีความทนแรงกระแทกสูงกว่า มีอัตราการเกิดรอยแตกเร็วกว่า สามารถรับน้ำหนักความร้อนได้ดีกว่าพลาสติกทั่วไป [5] จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า พีบีทีและเพ็ตสามารถเข้ากันได้ดี [1,6] ดังนั้น การนำเพ็ตรีไซเคิลมาผสมกับพีบีทีจึงมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้งานด้านวิศวกรรม เช่น ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เครื่องใช้ไฟฟ้า และรถยนต์ เป็นต้น โดยมีผลทำให้ต้นทุนการผลิตและการใช้วัตถุดิบจากสารปิโตรเลียมลดลง

## 2. วัตถุประสงค์และขั้นตอนการวิจัย

### 2.1 วัสดุหลัก

เศษพรีฟอร์มเพ็ตที่ได้จากโรงงานผลิตขวดเครื่องดื่ม และพีบีที (Duragox® 2092 FF2001)

### 2.2 ขั้นตอนการวิจัย

นำพรีฟอร์มเพ็ตเหลือทิ้งที่รวบรวมได้มาบดให้เป็นเกล็ดคั่วเครื่องบดพลาสติกแล้วนำไปผสมกับพีบีทีตามอัตราส่วนคั่งแฉะในตารางที่ 1 คั่วเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่แบบหมุนทางเดียวกับ คั่วอุณหภูมิ 200 – 265 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนของสกรู 75 รอบ/นาที จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ก่อนขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยเครื่องอัดรีดแบบคั่วอุณหภูมิ 255 – 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 1 ปริมาณของ RPET และ PBT ในพอลิเมอร์ผสม

| ส่วนผสม | เบสียลีน (wt%) | พีบีที (wt%) |
|---------|----------------|--------------|
| RPET    | 100            | 0            |
| PBT     | 0              | 100          |
| RPET30  | 30             | 10           |
| RPET20  | 20             | 20           |
| RPET30  | 70             | 30           |
| RPET40  | 60             | 40           |
| RPET50  | 50             | 50           |

### 2.3 การทดสอบสมบัติ

ทดสอบความทนแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D256 ด้วยเครื่อง Coast 9709

ทดสอบสมบัติค้ำแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 (type I) ด้วยเครื่อง LLOYD LR10K โดยตั้งชิ้นงานรูปค้ำแบบสองด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตร/นาที



ตรวจสอบสัณฐานวิทยาแบบมีวอร์นดอสของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 3000X

ทดสอบอุณหภูมิกัดโค้งจากความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D 648 ด้วยแรงดัน 1.82 MPa และใช้น้ำมันซิลิโคนเป็นตัวกลางให้ความร้อนด้วยอัตรา การเพิ่มอุณหภูมิที่  $2 \pm 0.2$  องศาเซลเซียส/นาที แล้ววัดอุณหภูมิที่ชิ้นงานถูกทดลองไปอีก 0.25 มิลลิเมตร

### 3. การวิเคราะห์ผลการวิจัย

ตารางที่ 2 และรูปที่ 1 – 4 แสดง ผลสมบัติเชิงกลของชิ้นงานในเทอมของความทนแรงกระแทก (impact strength, IS) ความทนแรงดึง (tensile strength, TS) การฉีกตัว ณ จุดขาด (elongation at break, EB) และอัตรามอดูลัส (Young's modulus, E) ซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบชิ้นงานจำนวน 5 ชิ้น ในแต่ละสูตร

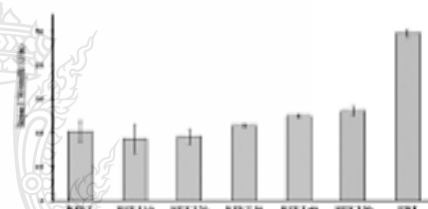
ตารางที่ 2 สมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

| ตัวสาร | IS (J/m) | TS (MPa) | EB (%) | E (MPa) |
|--------|----------|----------|--------|---------|
| RPET   | 20.5     | 61.6     | 0.8    | 1757    |
| PBT    | 49.5     | 50.4     | 0.6    | 2302    |
| RPET10 | 18.3     | 37.8     | 2.2    | 2512    |
| RPET20 | 19.0     | 66.0     | 3.0    | 1999    |
| RPET30 | 22.7     | 53.2     | 3.2    | 2286    |
| RPET40 | 25.0     | 56.0     | 3.2    | 2651    |
| RPET50 | 26.5     | 69.3     | 3.0    | 1976    |

#### 3.1 ความทนแรงกระแทก (IS)

IS ของ RPET และ PBT มีค่า 20.5 และ 49.5 J/m ตามลำดับ ซึ่งเมื่อใส่ PBT ใน RPET ปริมาณ 10 และ 20% ทำให้ IS ของพอลิเมอร์ผสมลดลง และมีค่าต่ำ

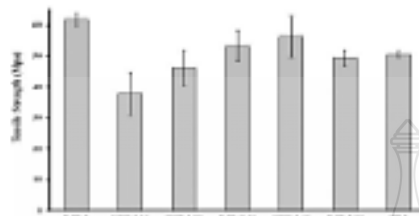
กว่าของ RPET เล็กน้อย เพราะปริมาณของ PBT น้อยเกินไป จึงไม่สามารถกระจายตัวได้สม่ำเสมอในเมทริกซ์ของ RPET จนเป็นความบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ซึ่งไม่มีผลช่วยเพิ่มความเหนียวให้กับ RPET และการที่ PBT มี IS สูงกว่า RPET จึงทำให้ IS ของพอลิเมอร์ผสมลดลงเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อใส่ PBT เพิ่มขึ้น (30, 40 และ 50%) พบว่า IS ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงกว่าของ RPET และเพิ่มต่อเนื่องตามปริมาณของ PBT ที่เพิ่มขึ้น เพราะ PBT กระจายตัวในเมทริกซ์ของ RPET ได้สม่ำเสมอมากขึ้น จึงส่งผ่านความเค้น (stress transfer) จาก RPET ไปยัง PBT ได้ดี และทำให้ PBT ช่วยรับพลังงานการกระแทกได้เพิ่มขึ้น



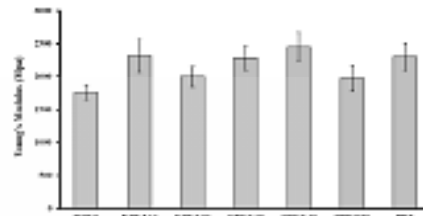
รูปที่ 1 ความทนแรงกระแทกของ ชิ้นงาน

#### 3.2 ความทนแรงดึง (TS)

TS ของ RPET และ PBT มีค่า 61.6 และ 50.4 MPa ตามลำดับ ดังนั้น การใส่ PBT ที่มี TS ต่ำกว่า มีผลทำให้ TS ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำกว่าของ RPET หากแต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PBT ที่ใส่เข้าไป และมีค่าสูงที่สุดเมื่อใส่ PBT 40% และมีค่าลดลงเมื่อใส่ PBT เพิ่มขึ้น 50% และมีค่าใกล้เคียง TS ของ PBT เพราะเกิดการแยกเฟส (phase separation) หรือกลับเฟส (phase reversion) [1] ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง ทำให้พอลิเมอร์แต่ละชนิดต่างแสดงสมบัติของตัวเอง



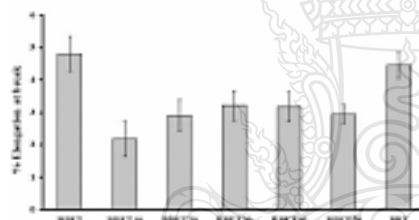
รูปที่ 2 ความทนแรงดึงของชิ้นงาน



รูปที่ 4 ยังสมบัติของชิ้นงาน

### 3.3 การยืดตัว ณ จุดขาด (EB)

EB ของ RPET และ PBT มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 4.8 และ 4.4% ตามลำดับ เพราะพอลิเมอร์ทั้งสองมีโครงสร้างเป็นอะโรมาติกที่มีความแข็งสูง จึงทำให้ยืดตัวได้น้อย การใส่ PBT จึงไม่สามารถปรับปรุง EB ของพอลิเมอร์ผสม และยังไม่มีแนวโน้มลดลงอีกด้วย



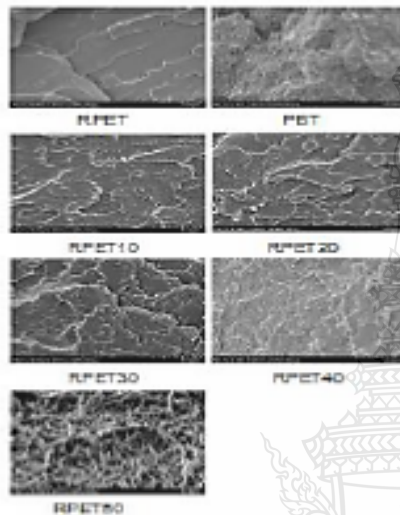
รูปที่ 3 การยืดตัว ณ จุดขาดของ ชิ้นงาน

### 3.4 ยังสมบัติ (E)

E ของ RPET และ PBT มีค่า 1757 และ 2302 MPa ตามลำดับ การใส่ PBT ที่มี E สูงกว่า ทำให้ E ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงกว่าของ RPET แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ไม่แน่นอน และการที่พอลิเมอร์ผสมมีค่า E เพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจากการใส่ PBT ซึ่งขวางการเคลื่อนไหวยของสายโซ่ RPET รวมทั้งมีการพันกันของสายโซ่ RPET-PBT และ PBT-PBT ที่ส่งผลต่อความยากง่ายในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพอลิเมอร์ผสม

### 3.5 ยังฐานวิทยา

ยังฐานวิทยานับว่ามีรอยแตกของชิ้นงานแสดงไว้ในรูปที่ 5 โดยผิวของ RPET มีลักษณะเรียบและมีริ้วบางๆ ซึ่งแสดงถึงวัสดุที่สามารถรับแรงได้น้อยและมีความแข็ง เพราะขณะที่ PBT มีพื้นผิวหยาบกว่ามาก ซึ่งแสดงถึงวัสดุที่มีความเหนียว (toughness) และเมื่อผสม PBT กับ RPET พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีผิวรอยแตกหยาบและขรุขระมากขึ้น ซึ่งแสดงว่าพอลิเมอร์ผสมมีความเหนียวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ RPET เนื่องจาก PBT เข้าไปเพิ่มความเหนียวให้กับ RPET และยังพบการแตกหักสำหรับฟิล์มเมื่อใส่ PBT 50%



รูปที่ 5 ภาพฐานวิทยาศาสตร์ชิ้นงาน

### 3.6 คุณสมบัติการโค้งงอจากความร้อน (HDT)

ตารางที่ 3 แสดงค่า HDT ของชิ้นงาน

ตารางที่ 3 ค่า HDT ของชิ้นงาน

| ตัวอย่าง | HDT (°C) |
|----------|----------|
| RPET     | 63.6     |
| PBT      | 53.7     |
| RPET10   | 61.0     |
| RPET20   | 59.0     |
| RPET30   | 56.7     |
| RPET40   | 56.7     |
| RPET50   | 53.5     |

จากตารางที่ 3 พบว่า HDT ของ RPET และ PBT มีค่า 63.6 และ 53.7 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังนั้น การใช้ PBT ที่มี HDT ต่ำกว่า จึงมีผลทำให้ HDT ของ พอลิเอสเตอร์ผสมมีค่าต่ำกว่าของ RPET (3 - 10 องศาเซลเซียส)

### 4. สรุปผลการวิจัย

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเอสเตอร์ผสม RPET/PBT พบว่า RPET40 มีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด มีทั้งค่าความทนแรงกระแทกและดึงที่มีค่าสูงกว่า RPET และมีความทนแรงดึงสูงกว่าพอลิเอสเตอร์ผสมอื่นๆ สรุปได้ว่าการเติม PBT ช่วยปรับปรุงความเหนียวและความแข็งตัวของ RPET เมื่อใช้ใบปริมายที่เหมาะสม และพบว่า คุณสมบัติการโค้งงอทางความร้อนของพอลิเอสเตอร์ผสมมีค่าต่ำกว่าของ RPET เพราะ PBT มีคุณสมบัติการโค้งงอทางความร้อนที่ต่ำกว่า

### 5. กิตติกรรมประกาศ

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อเครื่องทดสอบและสถานที่ในการวิจัย

### 6. เอกสารอ้างอิง

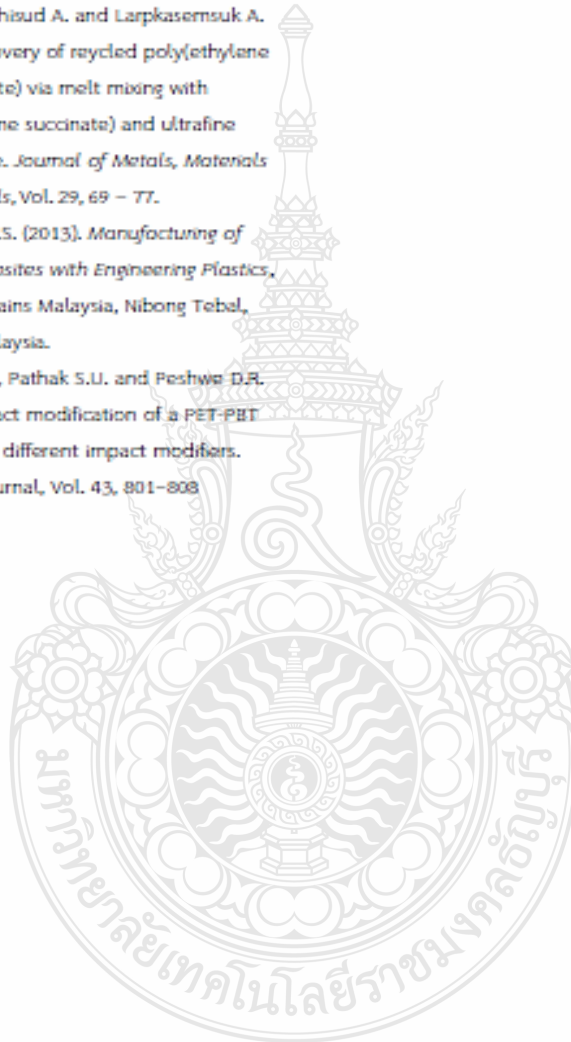
- [1] Nofar M. and Gözü H. (2019). Development of PBT/recycled- PET blends and the influence of using chain extender. *Journal of Polymers and the Environment*, Vol. 27, 1404 - 1417.
- [2] Awaia F. and Pavel D. (2005). Recycling of PET. *European Polymer Journal*, Vol. 41, 1453 - 1477.
- [3] Chaiwutthinan P., Suwannachot S. and Larpsakemsuk A. (2018). Recycled poly(ethylene terephthalate)/polypropylene/wollastonite composites using PP-g-MA as compatibilizer: Mechanical, thermal and morphological

properties. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, Vol. 28, 115 – 123.

[4] Chaiwutthinan P., Chuayjuljit S., Boonmahitthisud A. and Larpkasemsuk A. (2019). Recovery of recycled poly(ethylene terephthalate) via melt mixing with poly(butylene succinate) and ultrafine wollastonite. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, Vol. 29, 69 – 77.

[5] Chow W.S. (2013). *Manufacturing of Nanocomposites with Engineering Plastics*, University Sains Malaysia, Nibong Tebal, Penang, Malaysia.

[6] Baxi R.N., Pathak S.U. and Peshwa D.R. (2011). Impact modification of a PET-PBT blend using different impact modifiers. *Polymer Journal*, Vol. 43, 801–808.



ESTACON 10<sup>th</sup> 2019  
10<sup>th</sup> Engineering, Science, Technology and Architecture Conference 2019



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

ขอขอบเกียรติบัตรฉบับนี้ไว้เพื่อแสดงว่า

ทศพร รียาพันธ์, อำนวย ลาภเกษมสุข, อรรถพล สิมประติงษ์พันธ์ และ พศวรรษน์ ชัยวณิชนันท์  
ได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัยประเภทบรรยาย ในหัวข้อ  
พอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต/ไฮโดรเจล/พอลิไวนิลเพนทาฟเตเลต:  
สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และคุณสมบัติทางไฟฟ้า

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 10  
เฉลิมพระเกียรติ เนื่องในโอกาสมหามงคลพระราชพิธีบรมราชาภิเษก

ให้ไว้ ณ วันที่ 30 สิงหาคม 2562

รองศาสตราจารย์ ดร.สรวง วงษ์ชวลิตกุล  
ประธาน



อาจารย์ ดร.กิตติ วงษ์ชวลิตกุล  
อธิการบดี  
มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ



## ประวัติผู้เขียน

|                   |                                                                                                        |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อ - สกุล       | นางสาวทักษพร รียาพันธ์                                                                                 |
| วัน เดือน ปี เกิด | 7 กันยายน 2530                                                                                         |
| ที่อยู่           | หมู่บ้านศรีราชา หมู่ที่ 3 ถนนเก้ากิโล ตำบลสุรศักดิ์ อำเภอศรีราชา<br>จังหวัดชลบุรี 20110                |
| การศึกษา          | ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมพลาสติก<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                  |
| ประสบการณ์ทำงาน   | วิศวกรควบคุมคุณภาพสำหรับผลิตภัณฑ์ใหม่<br>บริษัทเอคโค ออโต้พาร์ท (ประเทศไทย) จำกัด พ.ศ.2559 ถึงปัจจุบัน |
| เบอร์โทรศัพท์     | 086-325-9177                                                                                           |
| อีเมล             | thaksaporn_r@mail.rmutt.ac.th                                                                          |

