

**วัสดุเชิงประกอบจากโฟมพอลิสไตรีนรีไซเคิลและเส้นใยธรรมชาติ**  
**Composite Material from Recycled Polystyrene Foam and Natural Fibers**

**อาดิลละฮ์ ศิริวัลลภ**  
**Adilah Sirivallop**

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต**  
**สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม**  
**มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of**  
**Master of Science in Technology and Environmental Management**  
**Prince of Songkla University**

**2558**

**ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**

ชื่อวิทยานิพนธ์ วัสดุเชิงประกอบจากโพลิเมอร์ไนโรซิลและเส้นใยธรรมชาติ  
 ผู้เขียน นางสาวอาติละห์ ศรีวัลลภ  
 สาขาวิชา เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม

---

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....

..... ประธานกรรมการ

(ดร.วิลาสินี ศรีพรหม)

(ดร.วรางคณา จิตตชุ่ม)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

..... กรรมการ

(ดร.วิลาสินี ศรีพรหม)

.....

..... กรรมการ

(ดร.วัชรวดี ลิ้มสกุล)

(ดร.วัชรวดี ลิ้มสกุล)

..... กรรมการ

(ดร.ชนิตา อารีรบ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
 ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีและการ  
 จัดการสิ่งแวดล้อม

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. วีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(3)

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ \_\_\_\_\_

(ดร.วิลาสินี ศรีพรหม)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ \_\_\_\_\_

(นางสาวอาติละห์ ศรีวัลลภ)

นักศึกษา

|                 |   |
|-----------------|---|
| ชื่อวิทยานิพนธ์ | วัสดุเชิงประกอบจากโพลีฟอสโฟลีนรีไซเคิลและเส้นใยธรรมชาติ |
| ผู้เขียน        | นางสาวอาทิตย์ ศิริวัลลภ                                 |
| สาขาวิชา        | เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม                        |
| ปีการศึกษา      | 2557  |

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการรีไซเคิลโพลีฟอสโฟลีน (Polystyrene; PS) โฟม ด้วยวิธีการละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ต่างๆ คือ โทลูอีน ทินเนอร์ อะซิโตน น้ำมันสน และตัวทำละลายผสม เพื่อนำมาผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบระหว่าง PS รีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ (เส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วย) โฟม PS สามารถละลายได้ดีในโทลูอีนและทินเนอร์ ได้เป็นสารละลายเนื้อเดียว ไม่มีฟองอากาศ ภายในระยะเวลาการละลาย 4 ชม. โดยสารละลาย PS กับทินเนอร์ มีความใสมากที่สุด ส่วนในอะซิโตนและน้ำมันสน ไม่สามารถละลาย โฟม PS ให้เป็นเนื้อเดียวกันกับตัวทำละลายได้ แต่พบว่าการละลาย PS ในอะซิโตน ช่วยให้วัสดุที่ได้ระเหยแห้ง (แข็งตัว) ได้เร็วที่สุด ตัวทำละลายผสมระหว่างทินเนอร์กับอะซิโตนที่อัตราส่วน 150 : 50 mL สามารถละลายโฟมได้เป็นเนื้อเดียว ไม่มีฟองอากาศ และตัวทำละลายระเหยได้เร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับทินเนอร์ ส่วนการปรับสภาพเส้นใยด้วย 5% (w/v) NaOH พบว่าเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณหมู่ -OH และสาร non-cellulose ลดลงตามระยะเวลาการปรับสภาพที่เพิ่มขึ้น และเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพเส้นใย 6 ชม. ถูกนำมาใช้ในการเสริมแรงวัสดุเชิงประกอบ เนื่องจากมีลักษณะพื้นผิวขรุขระที่เหมาะสมสำหรับการยึดเกาะหรือประสานกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี ซึ่งพบว่าเส้นใยปรับสภาพมีการกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีกว่าเส้นใยไม่ปรับสภาพ และวัสดุเชิงประกอบระหว่าง PS รีไซเคิลกับเส้นใยปรับสภาพมีสมบัติเชิงกลด้านความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทกสูงกว่า PS รีไซเคิล แต่มีความทนต่อแรงดัดโค้งต่ำกว่า การย่อยสลายทางชีวภาพของวัสดุเชิงประกอบเกิดขึ้นได้เร็วกว่าวัสดุ PS รีไซเคิล

**คำสำคัญ:** การรีไซเคิลโพลีฟอสโฟลีน, เส้นใยธรรมชาติ, วัสดุเชิงประกอบ, การละลาย, ตัวทำละลายอินทรีย์

|                      |  |
|----------------------|--|
| <b>Thesis Title</b>  | Composite Material from Recycled Polystyrene Foam and Natural Fibers |
| <b>Author</b>        | Miss Adilah Sirivallop   |
| <b>Major Program</b> | Technology and Environmental Management                              |
| <b>Academic</b>      | 2014   |

### ABSTRACT

This research was to study the optimal conditions for Polystyrene (PS) foam recycling by dissolution method with several organic solvents; toluene, thinner, acetone, turpentine and mixed solvent to produce the composite materials from recycled PS and natural fibers (coconut and banana fibers). PS foam dissolves well in toluene and thinner within 4 hrs giving homogenous solution without air bubble and the solution of PS in thinner was found to be the clearest solution. PS foam could not completely dissolve in acetone or turpentine (shows heterogeneous solution) but dissolving PS in acetone providing the fastest solidification of polymer solution. The solution of PS foam in mixed solvent between thinner and acetone at the ratio 150 : 50 mL show homogenous mixing with no air bubbles and the mixed solvent evaporates faster than pure thinner. The treatment of natural fibers with 5% (w/v) NaOH shows that the amount of -OH groups and non-cellulose of the fibers was decreased with the increasing treatment time. The natural fibers treated for 6 hrs were used to reinforce the recycled PS due to its optimum rough surface which is suitable for good adhesion and well interlock with polymer matrix. The treated fibers disperse in polymer matrix better than in the untreated fibers. The mechanical properties; tensile strength and impact strength, of composites recycled PS with treated fibers is higher than that of pure recycled PS whereas their flexural strength is lower. The biodegradable of composite PS recycled reinforced with natural fiber is enhanced compared to the recycled PS.

**Keyword:** Polystyrene foam recycling, Natural fiber, Composite material, Dissolution, Organic solvent.

## สารบัญ

|   | หน้า      |
|---|-----------|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย)                        | (5)       |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)                     | (6)       |
| กิตติกรรมประกาศ                           | (7)       |
| สารบัญ                                    | (8)       |
| รายการตาราง                               | (11)      |
| รายการรูป                                 | (12)      |
| สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ                   | (15)      |
| <b>บทที่ 1 บทนำ</b>                       | <b>1</b>  |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย          | 1         |
| 1.2 กรอบแนวคิดการวิจัย                    | 3         |
| 1.3 วัตถุประสงค์                          | 5         |
| 1.4 ขอบเขตของการวิจัย                     | 5         |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ             | 6         |
| <b>บทที่ 2 การตรวจเอกสาร</b>              | <b>7</b>  |
| <b>2.1 พลาสติก (Plastic)</b>              | <b>7</b>  |
| 2.1.1 การแบ่งประเภทของพลาสติก             | 8         |
| 2.1.2 พอลิสไตรีน (Polystyrene)            | 11        |
| 2.1.3 การรีไซเคิลขยะพลาสติก               | 15        |
| <b>2.2 เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fiber)</b> | <b>19</b> |
| 2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ  | 19        |
| 2.2.2 สมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติ       | 22        |
| 2.2.3 เส้นใยมะพร้าว (Coconut Fiber)       | 24        |
| 2.2.4 เส้นใยกล้วย (Banana Fiber)          | 24        |
| 2.2.5 การปรับสภาพเส้นใยธรรมชาติ           | 25        |

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| <b>2.3 วัสดุเชิงประกอบ (Composite Material)</b>  | 27   |
| 2.3.1 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ   | 28   |
| 2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ   | 31   |
| <b>2.4 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ (Mechanical Properties)</b>                            | 32   |
| 2.4.1 ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength)  | 32   |
| 2.4.2 ความต้านทานต่อแรงคด (Flexural strength)  | 34   |
| 2.4.3 ความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Strength)  | 36   |
| <b>2.5 สมบัติเชิงความร้อน (Thermal Properties)</b>                                     | 38   |
| <b>2.6 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable)</b>  | 40   |
| <b>2.7 การวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>   | 42   |
| <b>บทที่ 3 วิธีการวิจัย</b>  | 44   |
| <b>3.1 วัสดุและสารเคมี</b>   | 45   |
| <b>3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์</b>  | 46   |
| <b>3.3 วิธีการวิจัย</b>  | 47   |
| 3.3.1 การตรวจเอกลักษณ์โฟมพอลิสไตรีน  | 47   |
| 3.3.2 การละลายโฟมพอลิสไตรีนในตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยวและตัวทำละลายอินทรีย์ผสม          | 48   |
| 3.3.3 การเตรียมเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วย   | 50   |
| 3.3.4 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิสไตรีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ               | 53   |
| 3.3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิสไตรีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ | 55   |
| 3.3.6 ทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable)                            | 58   |
| 3.3.7 แผนภูมิการดำเนินงานวิจัย   | 60   |
| <b>บทที่ 4 ผลและบทวิจารณ์ผลการวิจัย</b>  | 63   |
| <b>4.1 การตรวจเอกลักษณ์โฟมพอลิสไตรีน</b>   | 64   |
| 4.1.1 โครงสร้างทางเคมีของโฟมตัวอย่าง   | 64   |
| 4.1.2 น้ำหนักโมเลกุลของโฟมพอลิสไตรีน   | 65   |

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 4.2 การละลายโพลีเมทรีนในตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยวและตัวทำละลายอินทรีย์ผสม             | 66   |
| 4.2.1 การละลายโพลีเมทรีนด้วยตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยว                                 | 66   |
| 4.2.2 การละลายโพลีเมทรีนด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ผสม                                    | 74   |
| 4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีและลักษณะโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของเส้นใยธรรมชาติ   | 81   |
| 4.3.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมี  | 81   |
| 4.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของเส้นใยธรรมชาติ                       | 83   |
| 4.4 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างโพลีเอทรีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ               | 86   |
| 4.4.1 ลักษณะวัสดุเชิงประกอบระหว่างโพลีเอทรีนรีไซเคิลกับเส้นใยมะพร้าว                 | 87   |
| 4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบระหว่างโพลีเอทรีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ | 90   |
| 4.5.1 ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength)   | 91   |
| 4.5.2 ความทนแรงคดโค้ง (Flexural strength)  | 93   |
| 4.5.3 การทดสอบความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength)                                   | 95   |
| 4.6 การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ   | 96   |
| บทที่ 5 บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ  | 98   |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย   | 98   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ   | 101  |
| เอกสารอ้างอิง  | 102  |
| ภาคผนวก  | 113  |
| ประวัติผู้เขียน  | 131  |



## รายการตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 สูตรโครงสร้างของเทอร์โมพลาสติก  | 10   |
| 2.2 สมบัติเชิงกลของโพลีเอทิลีน  | 13   |
| 2.3 องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณความชื้น และมุมไมโครไฟบริลลาของเส้นใยต่างๆ  | 22   |
| 2.4 ลักษณะเฉพาะเกี่ยวกับความหนาแน่น เส้นผ่านศูนย์กลาง และสมบัติเชิงกลของเส้นใยจากธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์                          | 23   |
| 3.1 ปริมาณโพลีเอทิลีนและตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยว  | 49   |
| 3.2 ปริมาณโพลีเอทิลีนและตัวทำละลายอินทรีย์ผสม   | 50   |
| 3.3 สัดส่วนและน้ำหนักของโพลีเอทิลีนกับเส้นใยธรรมชาติในวัสดุประกอบ   | 56   |
| 4.1 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของโพลีเอทิลีน  | 65   |
| 4.2 ลักษณะการละลายของโพลีเอทิลีนในตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยวต่างๆ หลังจากคนต่อเนื้อเป็นเวลา 1-4 ชม.                                     | 67   |
| 4.3 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยวขณะละลายโพลีเอทิลีนที่เวลาต่างๆ   | 70   |
| 4.4 ระยะเวลาการระเหยแห้งของโพลีเอทิลีนรีไซเคิล และปริมาณตัวทำละลายที่เหลือในโพลีเอทิลีนรีไซเคิล                                       | 73   |
| 4.5 ลักษณะสารละลายโพลีเอทิลีนในตัวทำละลายอินทรีย์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ   | 75   |
| 4.6 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยวและตัวทำละลายผสม หลังการละลาย 4 ชม.   | 76   |
| 4.7 ระยะเวลาการระเหยแห้งของโพลีเอทิลีนรีไซเคิล และปริมาณตัวทำละลายผสมที่เหลือในโพลีเอทิลีนรีไซเคิล                                    | 78   |
| 4.8 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบระหว่างโพลีเอทิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยมะพร้าว ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพ ในปริมาณต่างๆ | 88   |
| 4.9 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบระหว่างโพลีเอทิลีนรีไซเคิลกับเส้นใยกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และผ่านการปรับสภาพ ในปริมาณต่างๆ   | 89   |
| 4.10 วัสดุทั้งหมดจากโพลีเอทิลีนรีไซเคิลที่นำไปทดสอบสมบัติเชิงกลด้านต่างๆ  | 90   |

## รายการรูป

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 1.1 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย  | 4    |
| 2.1 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลแบบลูกโซ่ของ Thermoplastic                       | 8    |
| 2.2 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลแบบตาข่ายของ Thermosetting                       | 11   |
| 2.3 โครงสร้างพอลิस्टาไทริน   | 11   |
| 2.4 กลไกการผลิตพอลิस्टาไทริน   | 12   |
| 2.5 กลไกการละลายของพอลิเมอร์   | 15   |
| 2.6 กระบวนการรีไซเคิลพลาสติกด้วยเทคนิคต่างๆ                                | 16   |
| 2.7 การเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน บริเวณผนังเซลล์พืช       | 20   |
| 2.8 โครงสร้างของเซลลูโลส   | 20   |
| 2.9 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส   | 21   |
| 2.10 โครงสร้างของลิกนิน  | 21   |
| 2.11 ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการทางเคมี | 26   |
| 2.12 ปฏิกิริยาเคมีของเซลลูโลสที่ปรับสภาพด้วยสารละลายเบส                    | 27   |
| 2.13 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับวัสดุองค์ประกอบ  | 30   |
| 2.14 รูปทรงของวัสดุสำหรับการทดสอบความต้านทานแรงดึง                         | 32   |
| 2.15 ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของวัสดุ              | 33   |
| 2.16 การทดสอบความทนต่อแรงดัดโค้งของวัสดุ                                   | 35   |
| 2.17 การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก  | 36   |
| 2.18 การทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod และ Charpy                                  | 37   |
| 2.19 TGA เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์กับเส้นใย                   | 39   |
| 2.20 กลไกการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยจุลินทรีย์ของพลาสติก                      | 41   |
| 3.1 โฟมแผ่นตัวอย่าง  | 45   |
| 3.2 วัสดุสำหรับเตรียมเส้นใย  | 45   |
| 3.3 การเตรียมโฟมพอลิस्टาไทริน  | 48   |
| 3.4 การละลายโฟมพอลิस्टาไทรินโดยใช้เครื่อง Hot plate Magnetic stirrer       | 49   |

## รายการรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 3.5 เส้นใยธรรมชาติก่อนการปรับสภาพ   | 51   |
| 3.6 เส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพ  | 52   |
| 3.7 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบพอลิเอสไตรีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ   | 54   |
| 3.8 สารละลายผสมพอลิเอสไตรีนกับเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วย   | 55   |
| 3.9 ขนาดและรูปร่างของวัสดุเพื่อทดสอบความต้านทานแรงดึง   | 56   |
| 3.10 ขนาดของวัสดุและการทดสอบความต้านทานแรงดัด   | 57   |
| 3.11 ขนาดของวัสดุและการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก  | 58   |
| 3.12 ขนาดของวัสดุเพื่อทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ   | 58   |
| 3.13 การฝังกลบวัสดุพอลิเอสไตรีนต่างๆในดินธรรมชาติ   | 59   |
| 3.14 แผนผังขั้นตอนการรีไซเคิลโฟมพอลิเอสไตรีนด้วยวิธีการละลาย  | 60   |
| 3.15 แผนผังขั้นตอนการเตรียมเส้นใยธรรมชาติ   | 61   |
| 3.16 แผนผังขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบโฟมพอลิเอสไตรีนและเส้นใยธรรมชาติ  | 62   |
| 4.1 <sup>1</sup> H-NMR สเปกตรัมของโฟมพอลิเอสไตรีน   | 64   |
| 4.2 GPC โครมาโมแกรมของโฟมพอลิเอสไตรีน   | 65   |
| 4.3 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวทำละลายแต่ละชนิดขณะละลายโฟมพอลิเอสไตรีนที่ระยะเวลาต่างๆ                                  | 70   |
| 4.4 ร้อยละของน้ำหนักของตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยว ที่ระยะเวลาต่างๆ ในระหว่างการระเหยแห้ง                                    | 72   |
| 4.5 พอลิเอสไตรีนรีไซเคิลที่เตรียมได้ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ต่างๆ หลังจากทิ้งไว้ให้แห้ง                                     | 74   |
| 4.6 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยว และตัวทำละลายผสม หลังการละลาย 4 ชม.                                | 76   |
| 4.7 ร้อยละของน้ำหนักของตัวทำละลายอินทรีย์ผสม ที่ระยะเวลาต่างๆ ในระหว่างการระเหยแห้ง                                       | 77   |
| 4.8 กราฟ TGA ของโฟมพอลิเอสไตรีนและวัสดุพอลิเอสไตรีนรีไซเคิล   | 80   |
| 4.9 กราฟ FTIR ของเส้นใยมะพร้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Untreated) และผ่านการปรับสภาพ (Treated) ที่ระยะเวลา 6, 12 และ 24 ชม. | 81   |

## รายการรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.10 กราฟ FTIR ของเส้นใยกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Untreated) และผ่านการปรับสภาพ (Treated) ที่ ระยะเวลา 6, 12 และ 24 ชม.   | 82   |
| 4.11 SEM ไมโครกราฟของเส้นใยมะพร้าว  | 84   |
| 4.12 SEM ไมโครกราฟของเส้นใยกล้วย  | 85   |
| 4.13 ค่า Tensile strength ของวัสดุพอลิस्टาไทรีนรีไซเคิล (PS) และวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิस्टาไทรีนรีไซเคิลกับเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและที่ผ่านการปรับสภาพ ในปริมาณ 2, 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก | 91   |
| 4.14 การขาดออกกายหลังการทดสอบความทนต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบพอลิस्टาไทรีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ  | 93   |
| 4.15 ค่า Flexural strength ของวัสดุพอลิस्टาไทรีนรีไซเคิลและวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิस्टาไทรีน รีไซเคิลกับเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพ ที่ปริมาณเส้นใย 2, 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก                      | 94   |
| 4.16 ค่า Impact strength ของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิस्टาไทรีนรีไซเคิลกับเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วยที่ปรับสภาพที่สัดส่วนเส้นใย 2, 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก   | 96   |
| 4.17 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุพอลิस्टาไทรีนรีไซเคิลต่างๆ ที่ผ่านการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ  | 97   |

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ในปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรและการพัฒนาด้านเทคโนโลยีและวัสดุเป็นไปอย่างรวดเร็ว ทำให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกถูกผลิตออกมาใช้เป็นจำนวนมากเพื่อแทนที่วัสดุธรรมชาติชนิดต่างๆ เช่น ไม้ แก้ว และ โลหะ เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ มีน้ำหนักเบา และมีความสะดวกในการใช้งาน แต่ในขณะเดียวกันผลกระทบหรือปัญหาที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณการใช้พลาสติกอย่างรวดเร็วในปัจจุบันคือ ปัญหาขยะพลาสติก โดยเฉพาะอย่างยิ่งขยะบรรจุภัณฑ์จำพวกโฟม เนื่องจากโฟมพลาสติกใช้เวลาในการย่อยสลายมากกว่า 700 ปี การกำจัดสามารถทำได้ยาก และยังไม่มียุทธศาสตร์กำจัดโฟมหรือทำลายโดยไม่ให้มีการปล่อยแก๊สเรือนกระจกสู่บรรยากาศได้ ซึ่งในปี พ.ศ. 2554 พบว่าประเทศไทยมีขยะพลาสติกและโฟมมากถึงร้อยละ 14 ของปริมาณขยะหรือประมาณ 2.7 ล้านตันต่อปี หรือประมาณ 7,000 ตันต่อวัน (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2554) ซึ่งกระบวนการในการกำจัดขยะพลาสติกที่นิยมใช้กันทั่วไป คือ การเผาไหม้ ส่งผลให้เกิดมลภาวะทางอากาศ และการฝังกลบที่ต้องใช้ระยะเวลาอันส่งผลให้ดินไม่สามารถดูดซับน้ำได้ ปัญหาที่ตามมาคือเกิดน้ำท่วมและปัญหาสิ่งแวดล้อมอื่นๆ

แนวทางการแก้ปัญหาการเพิ่มขึ้นของปริมาณขยะพลาสติกและมลพิษที่เกิดจากขยะคือ การลดปริมาณการใช้ (Reduce) การนำกลับมาใช้ซ้ำ (Reuse) และการนำไปผ่านกระบวนการแปรสภาพ โดยเฉพาะการหลอม แล้วนำมาขึ้นรูปเป็นวัสดุใหม่หรือการรีไซเคิล (Recycle) ซึ่งกระบวนการรีไซเคิลพลาสติกมีหลากหลายแนวทาง ขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น การผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากพลาสติก โดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงโดยไม่ใช้แก๊สออกซิเจน และการนำพลาสติกผ่านกระบวนการหลอมแล้วขึ้นรูปเป็นเม็ดพลาสติกใหม่ (Hai-Yong and Julie, 2005) กระบวนการรีไซเคิลเหล่านี้ต้องอาศัยพลังงานความร้อนที่สูงมากและเครื่องมือที่ราคาแพง ทำให้กระบวนการรีไซเคิลโดยใช้ความร้อนมีต้นทุน

การผลิตที่สูงขึ้นตามไปด้วย จากการศึกษาพบว่า กระบวนการรีไซเคิลด้วยวิธีการละลายโดยใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสม เป็นกระบวนการหนึ่งที่มีศักยภาพสำหรับการรีไซเคิลพลาสติกโพลีไค โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยพลังงานความร้อนและเครื่องมือที่มีราคาสูงมาก จึงเป็นกระบวนการรีไซเคิลพลาสติกโพลีไคที่มีต้นทุนการผลิตต่ำและสามารถทำได้ง่าย แต่ผลของการนำพลาสติกผ่านการแปรรูปหรือรีไซเคิลพลาสติกที่ได้จะมีคุณภาพด้อยลงจากพลาสติกเดิม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพพลาสติกรีไซเคิล โดยส่วนใหญ่จะมีการผสมกับสารอื่นๆ เรียกว่า สารเติมแต่ง (Additives) เพื่อปรับปรุงสมบัติของพลาสติกให้ดีขึ้นซึ่งสารที่เติมมีหลายประเภท เช่น สารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) สารปรับปรุงคุณภาพ (Modifier) สารคงสภาพ (Stabilizer) สารยับยั้งปฏิกิริยา (Inhibitor) สารหล่อลื่น (Lubricant) และรงสี (Pigment) (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2554) สารเติมแต่งเหล่านี้เป็นสารเคมี เมื่อนำมาผสมเข้ากับพลาสติกแล้วก็อาจเข้าสู่ร่างกายและเกิดการสะสมสารเคมีในร่างกายปริมาณมากขึ้นซึ่งเป็นอันตรายกับชีวิตได้ นอกจากการปรับปรุงคุณภาพพลาสติกด้วยสารเคมีแล้ว ยังพบว่ามี การนำพลาสติกรีไซเคิลผสมเข้ากับวัสดุอื่นๆ เพื่อเสริมให้พลาสติกรีไซเคิลมีสมบัติเชิงกลหรือเชิงเคมีที่ดีขึ้น เช่น ยาง เส้นใยสังเคราะห์หรือเส้นใยธรรมชาติ วัสดุเหล่านี้สามารถเสริมแรงให้พลาสติกรีไซเคิลมีสมบัติเด่นหลายประการ โดยเฉพาะความหนาแน่นต่ำ ทนทาน และมีความยืดหยุ่นสูง น้ำหนักเบาเหมาะสำหรับการใช้งานด้านต่างๆ ตั้งแต่บรรจุภัณฑ์ อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ เฟอร์นิเจอร์ ตลอดจนอุปกรณ์ในงานก่อสร้าง วัสดุนี้นี้จะมีสมบัติโดยรวมของวัสดุเสริมแรงและพอลิเมอร์รวมกันเรียกว่า วัสดุเชิงประกอบ (Composite Material) (Kengkhetkit and Amornsakchai, 2012) ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม เศษวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรจึงมีอยู่ในปริมาณมาก ขยะจากการเกษตรเหล่านี้สามารถนำมาผลิตเป็นเส้นใยที่ใช้ในการเสริมแรงวัสดุพอลิเมอร์ได้ เช่น เส้นใยสับปะรด เส้นใยปาล์ม น้ำมัน เส้นใยกล้วยและเส้นใยมะพร้าว สามารถเสริมแรงให้พลาสติกรีไซเคิลมีสมบัติด้านต่างๆที่ดีขึ้น

เพื่อเป็นการลดปัญหาขยะพลาสติก โดยเฉพาะพลาสติกโพลีโพรพิลีน ซึ่งเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยาก และไม่นิยมนำมารีไซเคิล เนื่องจากมีน้ำหนักเบา แต่มีปริมาตรมาก การขนส่งและค่าใช้จ่ายจึงไม่คุ้มทุน โพลีโพรพิลีนส่วนใหญ่ใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหาร จึงมีคราบอาหารปนเปื้อนภาชนะอยู่มาก ดังนั้นจึงต้องผ่านกระบวนการทำความสะอาดหลายขั้นตอน ซึ่งต่างจากพลาสติกทั่วไป เช่น ขวดน้ำพลาสติก PET หรือ PP ที่สามารถนำเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลได้ทันที ขยะโพลีโพรพิลีนจึงเป็นขยะที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลผลิตทางการเกษตรและพลาสติกรีไซเคิล ผู้วิจัยจึงเลือกนำพลาสติกโพลีโพรพิลีนมารีไซเคิล โดยใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforcement Material) ให้มีสมบัติที่ดีขึ้น

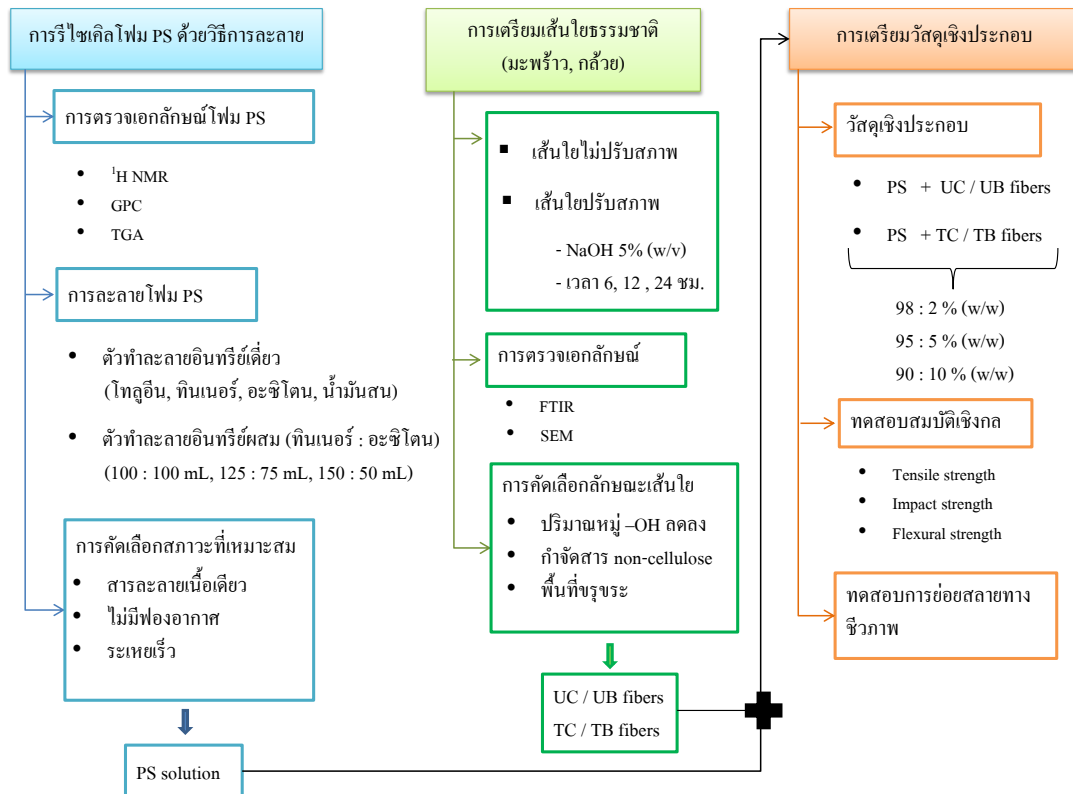
เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติเป็นอินทรีย์วัตถุที่สำคัญ หาได้ง่ายจากธรรมชาติ มีความหนาแน่นต่ำ ทำให้มีน้ำหนักเบา มีปริมาณมาก เกิดขึ้นได้ใหม่เรื่อยๆ จึงมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ (Verma. *et al.*, 2012) ด้วยเหตุนี้เส้นใยธรรมชาติจึงนิยมใช้เป็นสารเติมแต่งในพลาสติก โดยอาจเป็นทั้งสารตัวเติมและสารเสริมแรงเพื่อเป็นการลดต้นทุน ทำให้ได้วัสดุเชิงประกอบชนิดใหม่ที่มีสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติให้กับวัสดุเชิงประกอบที่ผลิตด้วย (Bledzki and Gassan, 1999; Akil, *et al.*, 2011; Karthikeyan and Balamurugan, 2012)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการรีไซเคิลพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนด้วยวิธีการละลายด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ที่เหมาะสม และผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบ (Composite Material) ที่เสริมแรงด้วย เส้นใยพืชในท้องถิ่นคือเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วย เพื่อให้วัสดุรีไซเคิลมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ซึ่งเป็นแนวทางสำหรับการลดปริมาณขยะในท้องถิ่น และแนวทางการผลิตวัสดุชนิดใหม่ที่มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง แต่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าพลาสติกรีไซเคิลทั่วไป

## 1.2 กรอบแนวคิดการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ ส่วนแรกเป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการรีไซเคิลโพลีเอทิลีน โดยกระบวนการละลายด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ โดยทำการละลายในตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยวและตัวทำละลายอินทรีย์ผสมเพื่อให้ได้สารละลายโพลีเอทิลีนที่มีลักษณะเนื้อเดียวใส ไม่มีฟองอากาศและตัวทำละลายสามารถระเหยออกได้เร็วเพื่อการแข็งตัวของพอลิเมอร์ที่เร็วขึ้น ส่วนที่สองเป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมเส้นใยธรรมชาติโดยการปรับสภาพเส้นใยด้วยสารละลายเบสที่ระยะเวลาต่างๆ แล้วทำการทดสอบเอกลักษณ์และตรวจสอบฐานวิทยาเส้นใยด้วยเทคนิค FTIR และ SEM ตามลำดับ เพื่อใช้เป็นวัสดุเสริมแรง และส่วนที่สามเป็นการเตรียมวัสดุเชิงประกอบจากโพลีเอทิลีนรีไซเคิลโดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติทั้งที่ไม่ปรับสภาพและปรับสภาพเส้นใยที่อัตราส่วนต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบการยึดเกาะกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ เนื่องจากการปรับสภาพทำให้เส้นใยลดสภาพขี้และกำจัดสารพวก non – cellulose บริเวณพื้นผิวเส้นใยออกไป ช่วยให้เส้นใยยึดเกาะและกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีขึ้น จากนั้นนำวัสดุไปทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ เช่น ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงดัดโค้ง และความทนต่อแรงกระแทก แล้วทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ

เพื่อเปรียบเทียบกับวัสดุพอลิस्टาไทรนรีไซเคิลที่ไม่เติมเส้นใยและวัสดุพอลิस्टาไทรน โดยแสดงลำดับการศึกษาดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย



### 1.3 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการรีไซเคิล โฟมพอลิสไตรีน โดยวิธีการละลายด้วยตัวทำละลายอินทรีย์
- 2) เพื่อผลิตวัสดุเชิงประกอบจากเส้นใยธรรมชาติและ โฟมพอลิสไตรีนที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น
- 3) เพื่อศึกษาวิเคราะห์สมบัติเชิงกล และความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ผลิตขึ้น

### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) โฟมพอลิสไตรีนที่ใช้ในงานวิจัย คือ โฟมแผ่น หนา 3.81 cm
- 2) ตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้ คือ โทลูอิน ทินเนอร์ อะซิโตน และน้ำมันสน
- 3) เส้นใยธรรมชาติเตรียมจากส่วนของเปลือกมะพร้าวและลำต้นกล้วย
- 4) ปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 5% (w/v) เป็นระยะเวลา 6, 12 และ 24 ชม.
- 5) สัดส่วนของเส้นใยธรรมชาติที่ใช้ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบมี 3 ปริมาณ คือ 2, 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้กระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการรีไซเคิลโฟมพอลิสไตรีนด้วยตัวทำละลายอินทรีย์
- 2) ได้กระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการผลิตวัสดุเชิงประกอบพอลิสไตรีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ
- 3) เป็นการลดปริมาณขยะโฟมพอลิสไตรีนและขยะจากการเกษตร อีกทั้งเพิ่มมูลค่าแก่วัสดุพลาสติกกรีไซเคิลและวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร

## บทที่ 2

### การตรวจเอกสาร

#### 2.1 พลาสติก (Plastic)

พลาสติกจัดเป็นสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลซ้ำๆ ต่อกันเป็นโมเลกุลสายยาวๆ และประกอบด้วยธาตุสำคัญ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจน นอกจากนี้อาจมีธาตุอื่นๆ เป็นส่วนประกอบย่อย ได้แก่ ไนโตรเจน ฟลูออรีน คลอรีน และกำมะถัน เป็นต้น (Shah, *et al.*, 2008) พบว่ามีการใช้คำว่า "พลาสติก" และ "พอลิเมอร์" ในความหมายเดียวกันหรือใกล้เคียงกัน แต่คำว่า "พอลิเมอร์" มักหมายถึงวัสดุประเภทพลาสติก ยาง เส้นใย และกาว ส่วนคำว่า "พลาสติก" จะหมายถึงสารผสมระหว่างพอลิเมอร์และสารเติมแต่ง เช่น สี สารพลาสติกไซเซอร์ สารเพิ่มเสถียรภาพ และฟิลเลอร์ ที่ถูกนำมาใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปโดยการขึ้นรูปให้มีรูปทรงต่างๆ เช่น ถัง จาน และช้อน ซึ่งคำว่าพอลิเมอร์ หรือ polymer มาจากคำกรีก 2 คำ คือ คำว่า poly แปลว่า มาก และคำว่า mer แปลว่า หน่วย ดังนั้นพอลิเมอร์จึงแปลว่า สารที่มีโมเลกุลประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆ ต่อกันเป็นสายยาวๆ (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2554)

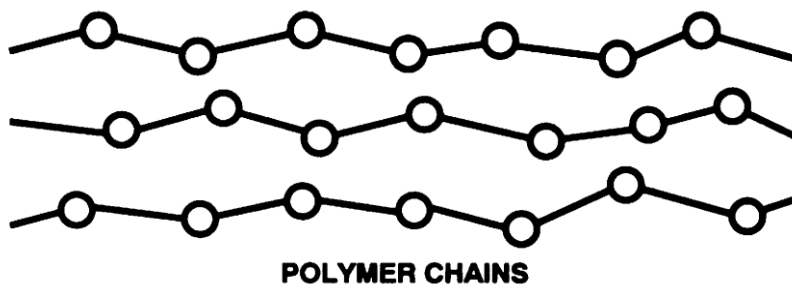
พลาสติก คือ วัสดุสังเคราะห์มีคุณสมบัติทางโครงสร้างพิเศษที่เรียกว่า High Molecular Weight คือในหนึ่งโมเลกุลมีจำนวนอะตอมมากกว่าสารชนิดอื่นมากมาย จึงทำให้มีคุณสมบัติที่ดีในหลายด้านพร้อมกันไป เช่น คุณสมบัติทางกายภาพ มีความแข็งแรง เหนียว ยืดหยุ่น ทนต่อการสึกกร่อน ทนน้ำ ทนความร้อน และคุณสมบัติทางเคมี การทนกรด ทนด่าง และทนต่อการกัดกร่อน นอกจากนี้ยังทนทานต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ทางธรรมชาติ เนื่องจากพลาสติกสังเคราะห์จะต่อต้านการเกาะติดของจุลินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์ในธรรมชาติไม่สามารถสร้างเอนไซม์ชนิดใหม่ขึ้นมาเพื่อย่อยสลายพลาสติกสังเคราะห์ได้ (Shah, *et al.*, 2008)

### 2.1.1 การแบ่งประเภทของพลาสติก

พลาสติกสามารถแบ่งออกตามลักษณะการยึดเกาะตัวของโครงสร้างโมเลกุลได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ พลาสติกประเภทกึ่งรูป (Thermoplastics) และพลาสติกประเภทคงรูป (Thermosettings)

#### 2.1.1.1 พลาสติกประเภทกึ่งรูป (Thermoplastics)

เป็นพลาสติกที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก หลังจากนำไปหล่อทำเป็นผลิตภัณฑ์แล้วจึงเปรียบเสมือนน้ำที่นำไปทำน้ำแข็ง เมื่อถูกความร้อนก็จะละลายกลายเป็นน้ำอีก และน้ำนี้ก็สามารถนำกลับไปทำน้ำแข็งได้อีกไม่มีที่สิ้นสุด โครงสร้างของพลาสติกประเภทนี้จะประกอบด้วยโมเลกุลเดี่ยวเกาะตัวแบบต่อแขนยาวออกเป็นเส้นด้าย (Filament) หรือแบบลูกโซ่ (chain) ดังรูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพลาสติกอาจเกิดได้ง่ายโดยการไหลเลื่อนระหว่างโมเลกุลที่มีแรงยึดเหนี่ยว เรียกว่า Van der Waal's forces ดึงดูดโมเลกุลเข้าไว้ด้วยกันอย่างอ่อนๆ



รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลแบบลูกโซ่ของ Thermoplastic

เทอร์โมพลาสติกที่มีการใช้งานมากแบ่งได้ 7 ประเภท มีดังนี้

1) โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) เป็นพลาสติกใส แข็ง ทนแรงกระแทกดี ไม่เปราะแตกง่าย และกันแก๊สซึมผ่านดี ใช้ทำขวดบรรจุน้ำดื่ม ขวดน้ำมันพืช สามารถนำรีไซเคิลเป็นเส้นใย สำหรับทำเสื้อกันหนาว พรม และใยสังเคราะห์สำหรับยัดหมอน เป็นต้น

2) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) เป็นพลาสติกที่เหนียวและแตกยาก ค่อนข้างแข็งแต่ยืดได้มาก ทนทานต่อสารเคมีและสามารถขึ้นรูปทรง

ต่างๆ ได้ง่าย ใช้ทำขวดนม ขวดน้ำและบรรจุภัณฑ์สำหรับน้ำยาทำความสะอาดและยาระดม เป็นต้น สามารถนำรีไซเคิลเป็นขวดน้ำมันเครื่อง ท่อ ลังพลาสติกและไม้เทียม เป็นต้น

3) โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride, PVC) ใช้ทำท่อน้ำประปา สายยางใส แผ่นฟิล์มสำหรับห่ออาหาร แผ่นพลาสติกสำหรับทำประตู หน้าต่างและหนังเทียม เป็นต้น สามารถนำรีไซเคิลเป็นท่อน้ำประปาหรือรางน้ำสำหรับการเกษตร กรวยจราจร เฟอรันิเจอร์ ฝ้านั่งพลาสติก ดับเบิ้ล เคเบิล และแผ่นไม้เทียม เป็นต้น

4) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) เป็นพลาสติกที่มีความนิ่ม เหนียว ยืดตัวได้มาก ใส ทนทาน แต่ไม่ค่อยทนต่อความร้อน ใช้ทำฟิล์มห่ออาหารและห่อของ ถุงใส่ขนมปัง ถุงเย็นสำหรับบรรจุอาหาร สามารถนำรีไซเคิลเป็นถุงดำสำหรับใส่ขยะ ถุงหิ้ว ถังขยะ กระเบื้องปูพื้น เฟอรันิเจอร์ และแท่งไม้เทียม เป็นต้น

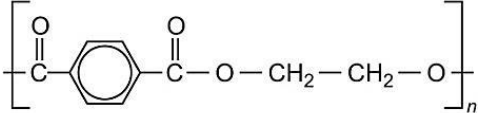
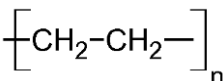
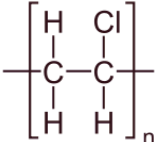
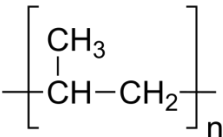
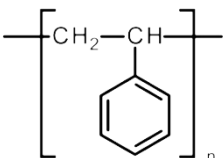
5) โพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เป็นพลาสติกที่มีความใส ทนทานต่อความร้อน คงรูปเหนียว และทนแรงกระแทกได้ดี นอกจากนี้ยังทนต่อสารเคมีและน้ำมัน ใช้ทำภาชนะบรรจุอาหาร เช่น กล่อง ชาม จาน ถัง ตะกร้ากระบอกลใส่น้ำแช่เย็น ขวดซอส แก้วโยเกิร์ต ขวดบรรจุยา สามารถนำรีไซเคิลเป็นกล่องแบตเตอรี่ในรถยนต์ ชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น กันชนและกรวยสำหรับน้ำมัน ไฟท้าย ไม้กวาดพลาสติกและแปรง เป็นต้น

6) โพลิสไตรีน (Polystyrene, PS) เป็นพลาสติกที่มีความใส แต่เปราะและแตกง่าย ใช้ทำภาชนะบรรจุของใช้ต่างๆ หรือโฟมใส่อาหาร เป็นต้น สามารถนำรีไซเคิลเป็นไม้แขวนเสื้อ กล่องวิดีโอ ไม้บรรทัด กระเปาะเทอร์โมมิเตอร์ แผงสวิทช์ไฟ ฉนวนความร้อน ถาดใส่ไข่ และเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ ได้

7) พลาสติกชนิดอื่นๆ ที่ไม่ได้มีการระบุชื่อจำเพาะ แต่ไม่ใช่พลาสติกชนิดใดชนิดหนึ่งใน 6 ที่ได้กล่าวไป แต่เป็นพลาสติกที่นำมาหลอมใหม่

(ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2554)

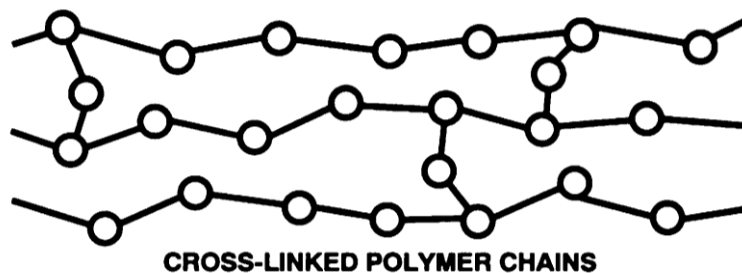
## ตารางที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของเทอร์โมพลาสติก

| ชนิดของเทอร์โมพลาสติก                           | สูตรโครงสร้าง  |
|---|--|
| 1. โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)                  |    |
| 2. โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงและต่ำ (HDPE, LDPE) |    |
| 3. โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC)                       |  |
| 4. โพลีโพรพิลีน (PP)                            |  |
| 5. โพลีสไตรีน (PS)                              |  |

### 2.1.1.2 พลาสติกประเภทคงรูป (Thermosetting)

หรือที่รู้จักกันทั่วไปว่า พลาสติกแข็ง คือ พลาสติกที่มีรูปทรงถาวร ซึ่งผ่านกรรมวิธีการผลิตโดยใช้ความร้อน (Heat) หรือแรงอัด (Pressure) ขึ้นรูป แต่เมื่อเย็นตัวลงจะไม่สามารถทำให้อ่อนตัวโดยใช้ความร้อนหรือนำไปหลอมละลายขึ้นรูปใหม่ได้อีก เปรียบเสมือนไขเมื่อนำไปต้มสุกแล้วจะทำให้เหลวเหมือนเดิมอีกไม่ได้ สามารถเรียกพลาสติกชนิดนี้อีกชื่อหนึ่งว่า ดิวโรพลาสติก (Duroplastics) โครงสร้างของพลาสติกแบบคงรูปร่างจะมีการเกาะตัวของโมเลกุลเป็นแบบตาข่ายหรือร่างแห (Net) ดังรูปที่ 2.2 เวลาได้รับความร้อนจะไม่ยืดหรือหดตัว แต่จะเกิดพันธะ

โคเวเลนต์ ยึดระหว่างโมเลกุลขึ้น ตัวอย่างเช่น Phenol formadehyde หรือที่เรียกว่า Bakelite และยางดิบหากผ่านกรรมวิธี Vulcanization ก็เป็นพลาสติกประเภทของรูปอย่างหนึ่ง

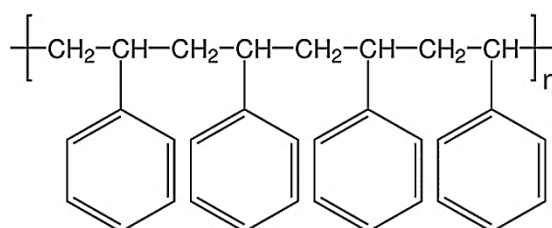


รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลแบบตาข่ายของ Thermosetting

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการรีไซเคิลพลาสติกประเภทพอลิสไตรีนและผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบ โดยมีพอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ

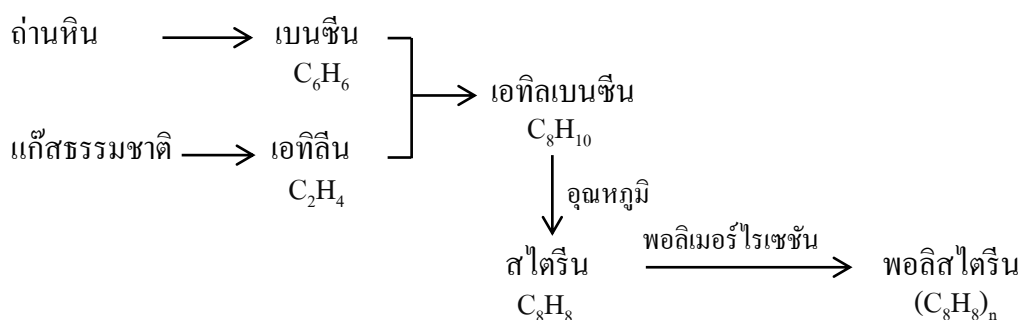
### 2.1.2 พอลิสไตรีน (Polystyrene; PS)

พอลิสไตรีนส่วนใหญ่ถูกเตรียมโดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบรวมตัวที่มีจุดว่องไวเป็นอนุมูลอิสระจากสไตรีน โดยผลิตขึ้นจากสไตรีนมอนอเมอร์ ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอน ที่ได้จากปิโตรเลียม ในการผลิตพอลิสไตรีนยังมีวัตถุดิบอื่นๆ ที่ใช้ร่วมด้วย ได้แก่ เบนซีน เอทิลีน และบิวทาไดอีน



รูปที่ 2.3 โครงสร้างพอลิสไตรีน (Hidehito, *et al.*, 2013)

พอลิสไตรีนเป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก คือ หลอมเป็นของเหลวได้ โดยที่อุณหภูมิห้องจะอยู่ในสถานะของแข็ง แต่จะหลอมละลายเมื่อทำให้ร้อนและแข็งตัวเมื่อเย็นลง พอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous) หรือไม่มีความเป็นผลึกเลยจะมีลักษณะแข็งใส เปราะและแตกหักง่าย ทนต่อแรงกระแทกได้ต่ำ สามารถทำเป็นสีต่างๆ ได้ และยืดหยุ่นได้จำกัด (อินดาศย์ รัชเวทย์, 2555; Mwashaa, *et al.*, 2013) กลไกการผลิตของพอลิสไตรีนเป็นดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กลไกการผลิตพอลิสไตรีน

#### 2.1.2.1 โฟมพอลิสไตรีน (Polystyrene Foam)

โฟม หมายถึง พลาสติกที่ฟูหรือขยายตัวมีอยู่มากมายหลายประเภท หากผ่านกระบวนการที่ใช้สารขยายตัว (Blowing Agent) ก็จะทำให้พลาสติกนั้นกลายเป็นโฟม เรียกว่า พลาสติกโฟม (Foam Plastic) ตัวอย่างของพลาสติกโฟมที่รู้จักกันทั่วไป เช่น ฟองน้ำ ก่อถ่วง โฟมใส่อาหาร โฟมแผ่น โฟมฉนวนเพื่อเป็นฉนวน ซึ่งพลาสติกโฟมเหล่านี้ผลิตจากพลาสติกที่แตกต่างประเภทกันออกไป โดยสามารถแบ่งตามกระบวนการผลิตได้ 2 ประเภท ดังนี้

1) Expandable Polystyrene หรือ EPS คือ โฟม PSที่ใช้แก๊สเพนเทน ( $C_5H_{12}$ ) ตระกูลเดียวกับแก๊สหุงต้มหรือแก๊สบิวเทน ( $C_4H_{10}$ ) เป็นสารที่ทำให้ขยายตัว (Blowing Agent) ในระหว่างกระบวนการผลิตวัตถุดิบที่เรียกว่า Polymerization เนื้อพลาสติก PS จะทำปฏิกิริยากักเก็บแก๊สเพนเทนเอาไว้ภายในเมื่อนำมาผลิต EPS โฟม วัตถุดิบจะขยายตัวและเมื่อได้รับความร้อนจากไอน้ำ (Steam) ก็จะกลายเป็นเม็ดโฟมขาวๆ จากนั้นจึงนำไปขึ้นรูป (Molding) ซึ่งมี 2 ลักษณะคือ การอัดขึ้นรูปเป็นรูปร่างต่างๆ ตามลักษณะแม่พิมพ์ (Shape Molding) เช่น เป็นกถ่วงน้ำแข็งและบรรจุภัณฑ์ต่างๆ และการอัดขึ้นรูปเป็นก้อนสี่เหลี่ยม (Block Molding) แล้วนำมาตัดตามขนาดและรูปร่างที่ต้องการโดยทั่วไป EPS โฟมจะขยายตัวประมาณ 50 เท่าและเมื่อขยายตัวแล้วจะมีอากาศเข้ามาแทนที่ถึง 98% ของปริมาตร มีเพียง 2% เท่านั้นที่เป็นเนื้อพลาสติก PS และนี่คือสาเหตุ



ที่ทำให้ไม่เสียรูปทรง นอกจากนี้ยังใช้เป็นวัสดุฉนวนในการทำถนนเพื่อแก้ปัญหาถนนทรุด และยังใช้เป็นฉนวนรักษาความร้อนและเย็น เนื่องจากอากาศที่มีอยู่ภายในถึง 98% ทำหน้าที่เป็นฉนวนได้อย่างดี

2) Polystyrene Paper หรือ PSP คือ โฟม PS ที่ใช้แก๊สหูงดัมหรือแก๊สชีวเทน ทำให้ขยายตัว วัตถุดิบที่ใช้ก็คือเม็ดพลาสติก PS ทัวไปเข้าสู่กระบวนการฉีดโดยใช้สกรูซึ่งมีความร้อนจากไฟฟ้าเช่นเดียวกับการฉีดพลาสติกทั่วไป (Screw Extrusion) เมื่อเม็ดพลาสติก PS ผ่านสกรูความร้อนก็จะหลอมตัว ขณะที่ออกจากปลายสกรูก็จะถูกฉีดแก๊สชีวเทนผสมเข้าไปทำปฏิกิริยาให้พลาสติกที่กำลังหลอมนั้นเกิดการขยายตัวประมาณ 20 เท่า ฉีดออกเป็นแผ่นแล้วม้วนเข้าคล้ายม้วนกระดาษ (เรียกว่า Paper/PSP) จากนั้นจะทำการม้วน โฟม PSP ที่ได้ขึ้นรูปด้วยความร้อนตามลักษณะแม่พิมพ์ (Thermal Forming) เช่น ถ้วยใส่อาหารหรือถาด (สรินทร์ ลีมนานาท, 2544)

#### สมบัติเชิงกลของโฟมพอลิสไตรีน (Polystyrene Foam)

โฟมพอลิสไตรีนเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางกลแตกต่างจากพลาสติกพอลิสไตรีนอย่างสิ้นเชิง เนื่องจากลักษณะโครงสร้างแบบเซลล์ที่มีแก๊สอยู่ภายในดังได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ คุณสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิสไตรีนแปรผันตามความหนาแน่นเป็นหลัก ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของโฟมพอลิสไตรีน

| คุณสมบัติ                          | พอลิสไตรีน  | โฟมพอลิสไตรีน |      |      |
|------------------------------------|-------------|---------------|------|------|
| ความหนาแน่น ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) | 1040 - 1070 | 28            | 55   | 70   |
| ความต้านแรงดึงคราก (MPa)           | 25 - 69     | 0.4           | 0.9  | 1.2  |
| โมดูลัสยืดหยุ่นแรงดึง (GPa)        | 1.79 - 3.38 | -             | -    | -    |
| ความต้านแรงกดคราก (MPa)            | 90          | 0.19          | 0.45 | 0.70 |
| โมดูลัสยืดหยุ่นแรงกด (MPa)         | -           | 6.5           | 21.3 | 32.3 |

ตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าโฟมพอลิสไตรีนมีค่าความแข็งแรงต่ำกว่าพลาสติกพอลิสไตรีนมาก โดยโฟมมีพฤติกรรมเป็นวัสดุเปราะ (Brittle Material) เมื่อได้รับแรงดึงและพบว่าทั้งความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงกดและ โมดูลัสยืดหยุ่นแรงดึงมีความสัมพันธ์

เป็นเส้นตรงกับความหนาแน่นโพลีเมอร์ (สวัสดี ภูมิสวัสดี และ ชัยยากร จันทร์สุวรรณ, 2547; Siddique, *et al.*, 2008)

#### 2.1.2.2 ตัวทำละลายของพอลิไสตรีน



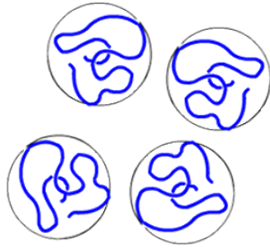
เนื่องจากพอลิไสตรีน จัดเป็นสารประเภทไฮโดรคาร์บอน จึงสามารถเกิดการบวม (Swelling) และละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ต่างๆ (Brandrup, *et al.*, 1975) ดังนี้

- 1) ตัวทำละลายประเภทไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนเบนซีนเป็นองค์ประกอบ (Aromatic Hydrocarbons) เช่น Benzene, Toluene, Xylene และ Ethyl benzene
- 2) ตัวทำละลายประเภทไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอะตอมต่อกันเป็นสายโซ่ (Chlorinated Aliphatic Hydrocarbons) เช่น Methylene chloride, Chloroform และ Carbon tetrachloride
- 3) ตัวทำละลายอื่นๆ เช่น Pyridine, Acetone, Cyclohexanone, Dimethylformamide, Cyclohexane, Methyl ethyl ketone, Diisopropyl ketone, Tetrahydrofuran, Ethyl acetate, Butyl acetate, Tributyl phosphate, Methylcyclohexane และ Ethylcyclohexane

#### 2.1.2.3 พฤติกรรมการละลายของพอลิเมอร์

ความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์ในตัวทำละลายต่างๆ ขึ้นอยู่กับสภาพขั้ว (Polarity) ของพอลิเมอร์กับตัวทำละลาย โดยทั่วไปพอลิเมอร์เป็นสารที่ไม่มีขั้ว จึงสามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วและตัวทำละลายที่มีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายกับพอลิเมอร์ชนิดนั้น ในบางครั้งตัวทำละลายที่มีขั้วบางชนิดอาจสามารถนำมาใช้ในกระบวนการรีไซเคิลด้วยการละลายได้ เนื่องจากตัวทำละลายนั้นมีโครงสร้างของพันธะไฮโดรเจนที่ไม่ชัดเจน (Garcia, *et al.*, 2009)

พอลิเมอร์มีพฤติกรรมการละลายค่อนข้างแตกต่างจากวัสดุที่มีสถานะของแข็งชนิดอื่นๆ เนื่องจากโครงสร้างพอลิเมอร์เกิดจากการต่อกันจนเป็นสายโซ่ยาวของมอนอเมอร์และมีจำนวนมาก ขดพันกันอย่างหนาแน่นและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง ซึ่งมีลักษณะการละลายแสดงดังรูปที่ 2.5

|   |   |   |
|---|---|---|
|  |  |  |
| a) Polymer molecules in solid state just after being added to a solvent           | b) First step: a swollen going in solvent   | c) second step: solvated polymer molecules dispersed into a solution                |

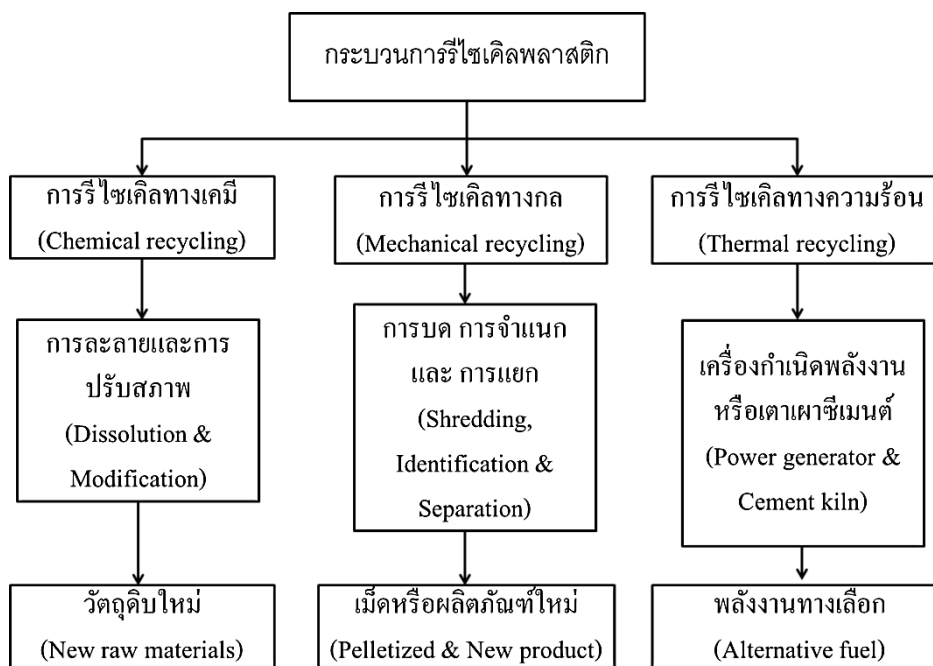
**รูปที่ 2.5** กลไกการละลายของพอลิเมอร์ (Miller-Chou and Koenig, 2003)

นอกจากนี้ความเร็วในการละลายของพอลิเมอร์ยังขึ้นกับรูปร่างและขนาดของพอลิเมอร์ ถ้าพอลิเมอร์มีขนาดใหญ่ พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์กับตัวทำละลายมีน้อยความสามารถในการละลายก็จะช้าลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดพองที่สามารถละลายได้เร็วกว่า และถ้าหากพอลิเมอร์มีความเป็นผลึกสูง มีการยึดเหนี่ยวของพันธะไฮโดรเจนระหว่างพอลิเมอร์ที่แข็งแรงมากกระบวนการจะหยุดเพียงขั้นต้นตอนแรกพอลิเมอร์แสดงลักษณะเป็นเจลบวมในตัวทำละลาย แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์กับตัวทำละลายมีความแข็งแรงมากกว่า กระบวนการจะดำเนินต่อไปจนถึงขั้นที่เกิดการคลายตัวหรือแยกออกของสายพอลิเมอร์แล้วกระจายตัวทั่วพื้นที่ของสารละลาย และทำให้พอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาวะเจลเกิดการละลายในเร็วขึ้น จนได้เป็นสารละลายหนืดพอลิเมอร์ (Polymer Science Research Center, 2000; Narasimhan, 2001)

### 2.1.3 การรีไซเคิลขยะพลาสติก

ปัจจุบันมีแนวโน้มการใช้งานและผลิตพลาสติกมากขึ้น เนื่องจากมีราคาถูก น้ำหนักเบา และสามารถผลิตให้มีสมบัติต่างๆ ตามต้องการได้ง่าย จากการเลือกชนิดของวัตถุดิบ ปฏิกิริยาเคมี กระบวนการผลิตและกระบวนการขึ้นรูป เมื่อมีการใช้และผลิตพลาสติกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดขยะพลาสติกในปริมาณมากขึ้นตามด้วย ดังนั้นการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่หรือการรีไซเคิลพลาสติกจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เพื่อลดปัญหาขยะพลาสติก ซึ่งการรีไซเคิล

พลาสติกที่ผ่านมามีหลายวิธี สามารถแบ่งวิธีการรีไซเคิลพลาสติกได้เป็น 3 กระบวนการหลัก คือ การรีไซเคิลเชิงกล การรีไซเคิลทางความร้อน และการรีไซเคิลทางเคมี แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กระบวนการรีไซเคิลพลาสติกด้วยเทคนิคต่างๆ (ปรับจาก Hai-Yong and Julie, 2005)

1) การรีไซเคิลเชิงกล (Mechanical Recycling) เป็นเทคนิคที่ง่ายและนิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบัน โดยการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้แล้วมาคัดแยกประเภท ล้างทำความสะอาด แล้วนำไปบดเป็นชิ้นเล็กๆ และหลอมเป็นเม็ดพลาสติกใหม่ที่มีคุณภาพด้อยกว่าพลาสติกเดิม แล้วนำกลับไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่หรือใช้ผสมกับเม็ดพลาสติกใหม่เพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการก่อนนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูป แต่การรีไซเคิลด้วยวิธีนี้ยังพบปัญหาของพลาสติกที่ผ่านการรีไซเคิลมักมีคุณภาพต่ำลง ซึ่งเกิดจากการแตกหักของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้ไม่สามารถนำพลาสติกกรีไซเคิลไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและมีราคาที่ถูกลงเรื่อยๆ จนเกิดภาวะไม่คุ้มต่อการลงทุนที่ต้องอาศัยเครื่องจักรและพลังงานที่สูง

2) การรีไซเคิลทางความร้อน (Thermal Recycling) เป็นเทคนิคการรีไซเคิลโดยอาศัยพลังงานความร้อน หรือเรียกว่าวิธี Thermolysis เพื่อให้พลาสติกหรือสายพอลิเมอร์เกิดการแตกหักหรือขาด แบ่งได้ 3 วิธี ดังนี้

2.1) Pyrolysis เป็นกระบวนการที่ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกออกโดยใช้ความร้อนสูงภายในสุญญากาศประมาณ อุณหภูมิ 400-800 °C และตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อช่วยให้สารแยกตัวเป็นของเหลวได้ง่ายขึ้น นอกจากของเหลวแล้วยังมีผลิตภัณฑ์ข้างเคียง เช่น กากคาร์บอน ซึ่งเป็นของแข็ง สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ ในส่วนที่เป็นกากที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสคือ แก๊สไฮโดรคาร์บอนประกอบด้วยแก๊สมีเทน อีเทน โพรเพน และบิวเทน เป็นต้น ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการควบแน่นเป็นของเหลว เรียกว่า น้ำมันดิบสังเคราะห์ (Synthetic crude oil) สามารถนำกลับมาใช้ในโรงกลั่นและบางส่วนที่ไม่เกิดการควบแน่นจะถูกนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนภายในกระบวนการต่อไป

2.2) Gasification เป็นกระบวนการที่ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกออกโดยใช้ความร้อนแบบใช้ออกซิเจน ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า Pyrolysis ผลลัพธ์ที่ได้คือ Syngas ซึ่งเป็นแก๊สที่ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สออกซิเจนสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง แต่ถ้าทำการแยกก่อนนำมาใช้ในรูปของสารเคมีจะมีมูลค่าสูงขึ้น 2-3 เท่า

2.3) Hydrogenation เป็นเทคนิคที่ปรับปรุงมาจากกระบวนการกลั่นน้ำมันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสายพอลิเมอร์จะถูกทำให้แตกหรือขาดออกจากกันด้วยความร้อนโดยมีการให้สัมผัสกับไฮโดรเจนที่มากเกินพอที่ความดันสูงกว่า 100 บรรยากาศ จนเกิดการแตกตัว (Cracking) ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นเชื้อเพลิงเหลว เช่น น้ำมันแก๊สโซลีนหรือดีเซล

กระบวนการรีไซเคิลพลาสติกด้วยความร้อนถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์อย่างมาก เนื่องจากสามารถจัดการขยะพลาสติกที่มีความแข็งสูง และมีสิ่งปนเปื้อนอื่นๆที่ไม่ใช่พลาสติกได้ แต่ข้อจำกัดที่ยังไม่สามารถใช้กระบวนการนี้ได้อย่างแพร่หลาย คือ เป็นกระบวนการที่ต้องอาศัยเครื่องมือเครื่องจักร เชื้อเพลิงและพลังงานสูงมาก ทำให้ค่าใช้จ่ายในกระบวนการรีไซเคิลนี้สูงตามไปด้วย (Siddique, *et al.*, 2008)

3) การรีไซเคิลทางเคมี (Chemical Recycling) เป็นกระบวนการที่ทำให้โครงสร้างสายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการขาดหรือแตกออก (Depolymerization) ได้เป็นมอนอเมอร์ (Monomer) หรือโอลิโกเมอร์ (Oligomer) เป็นผลิตภัณฑ์ เมื่อนำมาทำให้บริสุทธิ์โดยการกลั่นและตกผลึกจะได้เป็นสารตั้งต้นที่มีคุณภาพสูงสามารถนำไปใช้ผลิตเป็นวัตถุดิบพลาสติกใหม่ได้ และ

เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพของพลาสติกรีไซเคิลให้ดีขึ้น จึงได้มีการนำพลาสติกมาปรับปรุงโดยวิธีทางเคมี (Chemical Modification) ให้มีพลาสติกรีไซเคิลมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับพลาสติกใหม่ได้ การปรับปรุงทางเคมีสามารถใช้ได้ทั้งกับพลาสติกชนิดเดี่ยวและพลาสติกผสม ถ้าเป็นพลาสติกชนิดเดี่ยว จะใช้วิธีการละลายและตกตะกอน (Dissolution and Reprecipitation) แล้วเติมสารเติมแต่ง (Additives) เพื่อปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้น แต่ถ้ากรณีพลาสติกผสมมักใช้สารช่วยในการผสมให้เข้ากันได้ดี โดยทั่วไปเรียกว่า Compatibilizer (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2550; Kang and Schoenung, 2005)

นอกจากนี้การรีไซเคิลพลาสติกทางเคมีที่เริ่มเป็นที่นิยมคือการรีไซเคิลพลาสติกด้วยวิธีการละลาย เป็นกระบวนการแยกวัสดุโดยใช้ตัวทำละลาย (Solvent – Based Separation) ซึ่งจะได้พอลิเมอร์ที่มีความบริสุทธิ์สูง และเหมาะสำหรับการนำกลับมาใช้ใหม่ (Natarajan, 2013) ข้อสำคัญของวิธีนี้คือการเลือกใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสม เพื่อละลายพลาสติก และการกำจัดส่วนประกอบที่ไม่ต้องการให้ละลายอยู่ในสารละลายในกรณีที่เป็นพลาสติกผสม เช่น การใช้ตัวทำละลายผสมระหว่าง Xylene กับ Cyclohexanone ในการแยกพลาสติกผสม PS-PVC-HDPE-PP ออกเป็น 3 เฟส หรือการใช้ N-Methy 1-2-Pyrolidinone (NMP) ในการแยกพลาสติกผสม PET-HDPE และเมื่อละลายพลาสติกหรือแยกพลาสติกด้วยการละลายแล้ว สามารถนำพลาสติกนั้นกลับมาขึ้นรูปใหม่ได้ ซึ่งวิธีการรีไซเคิลด้วยการละลาย นิยมใช้กับพลาสติกประเภท PET, PS และ Polyester ก่อนจะนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยา Depolymerization จนได้เป็นมอนอเมอร์ (Karaduman, *et al.*, 2002)

กระบวนการละลายของพอลิเมอร์ (Polymer Dissolution) ด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม เป็นกระบวนการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสำหรับการจัดการขยะประเภทโฟมพอลิสไตรีน เพราะมีต้นทุนในการผลิตต่ำแต่เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาการรีไซเคิลโฟมพอลิสไตรีนด้วยวิธีการละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ต่างๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการรีไซเคิลโฟมพอลิสไตรีนจนเป็นวัสดุใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

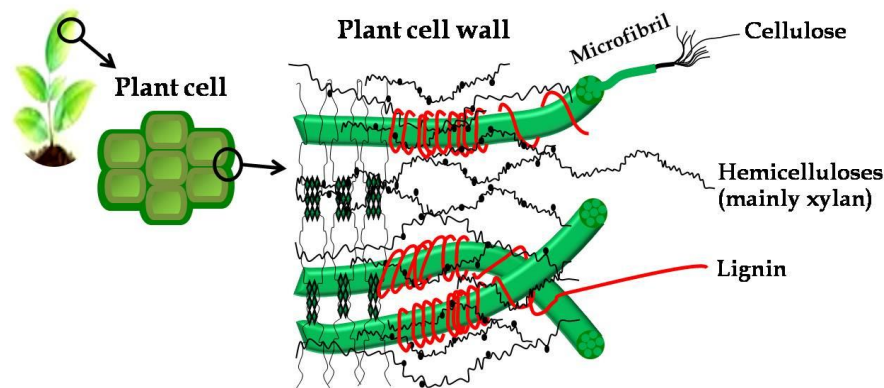
## 2.2 เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fiber)

เส้นใยธรรมชาติมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการโดยเฉพาะในด้านสิ่งแวดล้อมสามารถหาได้ง่ายภายในประเทศ ต้นทุนการผลิตต่ำ และราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ แต่มีสมบัติด้านความเหนียว ความทนต่อแรงดึง และจากการศึกษางานวิจัยพบว่า มีการนำเส้นใยธรรมชาติจากพืชมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในพลาสติกแทนที่เส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยปอ เส้นใยป่านศรนารายณ์ เส้นใยมะพร้าว เส้นใยกล้วย และเส้นใยสับปะรด โดยมีแนวโน้มในการนำเส้นใยจากธรรมชาติมาใช้ประโยชน์มากขึ้น (Rokbi, *et al.*, 2011; Sumaila, *et al.*, 2013; Salaman, 2012)

เส้นใยจากพืชแต่ละประเภทที่ใช้ในการเสริมแรงส่งผลที่แตกต่างกันต่อผลิตภัณฑ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการใช้งานในด้านต่างๆ คุณสมบัติของเส้นใยพืชที่แตกต่างกันนั้นเกิดจากลักษณะทางกายภาพ พื้นที่หน้าตัด ลักษณะพื้นผิวของเส้นใย และลักษณะทางเคมีของพืชแต่ละประเภท เช่น ปริมาณ โครงสร้างของเซลล์ลูลอส ปริมาณลิกนินที่เคลือบบริเวณผิวเส้นใย นอกจากนี้การผสมหรือวิธีการผลิตด้วยวิธีแตกต่างกันมีผลต่อสมบัติผลิตภัณฑ์เช่นกัน

### 2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ

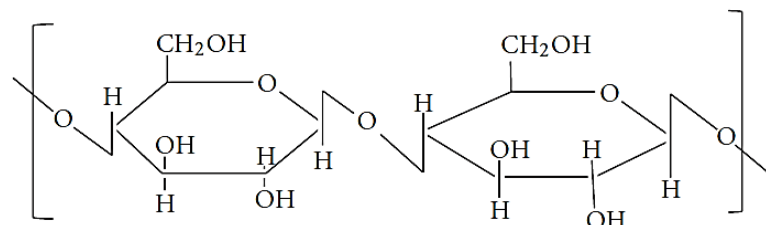
องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยพืช มีความหลากหลายขึ้นอยู่กับชนิดเส้นใย เส้นใยธรรมชาติประกอบด้วยพอลิเมอร์หลัก 4 ชนิด คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส เพกทิน และลิกนิน มีการจัดเรียงตัวบริเวณผนังเซลล์ ของเซลล์พืช โดยมีสายของเซลลูโลสเป็นแกนหลักและพันล้อมรอบด้วยโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน (Khalil, *et al.*, 2007; Punyamurthy, *et al.*, 2014) แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน บริเวณผนังเซลล์พืช

(Ratanakhanokchai, *et al.*, 2013)

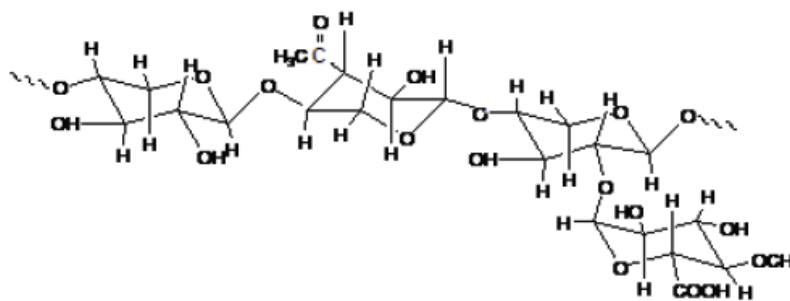
1) เซลลูโลส (Cellulose) เป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่งเกิดจากเซลลูโลส ยึดเกาะกันด้วยพันธะ  $\beta$ -1,4-glycosidic เป็นโมเลกุลใหญ่มีสูตรเป็น  $(C_6H_{10}O_5)_n$  โครงสร้างของ โมเลกุลแสดงดังรูป 2.8 โครงสร้างเคมีของเซลลูโลสมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของเส้นใย กล่าวคือ ในโมเลกุลเซลลูโลสจะเกิดจากหน่วยโมเลกุลซ้ำ (Repeat units) ยึดจับกันเป็นสายยาว หน่วย โมเลกุลซ้ำ คือ เซลโลไบโอส (Cellobiose) เกิดจากเบต้ากลูโคส 2 โมเลกุลยึดเกาะกันด้วยพันธะ C-O-C โมเลกุลเซลลูโลสจะมีหมู่ไฮดรอกไซด์ (-OH) อยู่มากมายทำหน้าที่ดูดน้ำหรือเกิดปฏิกิริยา จับกับหมู่ธาตุอื่นๆ การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเซลลูโลสมีความเป็นระเบียบ (Crystalline) ก่อนข้างมาก คือ 85-95 % และระหว่างสายโมเลกุลจะมีการยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) เป็นระยะๆ ซึ่งมีผลทำให้เส้นใยเซลลูโลสมีความเหนียวแข็งแรงค่อนข้างสูง ทนทานต่อสารที่เป็นด่างได้ (Bledzki and Gassan, 1999; John and Anandjiwala, 2008; Njuguna, *et al.*, 2011; John and Thomas, 2008)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของเซลลูโลส (Williams, *et al.*, 2011)

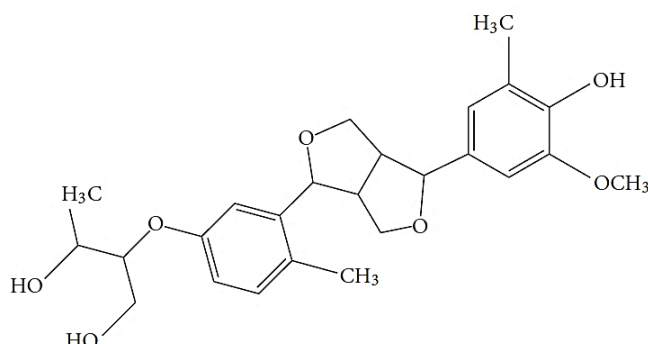


2) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่งซึ่งคล้ายเซลลูโลสแต่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส กาแลกโตส แมนโนส ไซโลส อะราบิโนส รวมทั้งกรดกลูโคนิก ยึดเกาะกันแบบ  $\beta$ -1,3-glycosidic bond เฮมิเซลลูโลสพบในเนื้อเยื่อของพืชโดยรวมอยู่กับสารอื่นๆ เช่น ลิกนิน เซลลูโลส เป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ มีความเป็นไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) สูง และละลายได้ง่ายในสารที่เป็นด่างและกรด มีสูตรทางเคมีคือ  $(C_6H_{12}O_5)_n$  (Silapasunthorn, 2010; John and Anandjiwala, 2008; Williams, *et al.*, 2011) โครงสร้างเฮมิเซลลูโลสแสดงดังรูป 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (Hon and Sriraishi, 2001)

3) ลิกนิน (Lignin) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนมีน้ำหนักโมเลกุลสูง อยู่รวมกับเซลลูโลส ลิกนินเป็นสารที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจน รวมกันเป็นหน่วยหลายชนิด ซึ่งมีโครงสร้างเป็นอะโรมาติก (Aromatic) ไม่ละลายน้ำ ไม่ยืดหยุ่น พืชที่มีลิกนินมากจึงมีสมบัติของความแข็งแรงและทนทานสูง (John and Thomas, 2008)



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของลิกนิน (Williams, *et al.*, 2011)

สัดส่วนขององค์ประกอบเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ส่งผลถึงสมบัติของเส้นใย (Rahman and Khan, 2007) โดยองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณความชื้น และมุมไมโครไฟบริลลาของเส้นใยต่าง

| Fiber    | Cellulose<br>(wt%) | Hemicelluloses<br>(wt%) | Lignin<br>(wt%) | Pectin<br>(wt%) | Moisture<br>content<br>(wt%) | Waxes<br>(wt%) | Microfibrillar<br>Angle (deg) |
|----------|--------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|----------------|-------------------------------|
| Jute     | 61 - 71.5          | 13.6 - 20.4             | 12 - 13         | 0.2             | 12.5 - 13.7                  | 0.5            | 8                             |
| Banana   | 63 - 64            | 10                      | 5               | -               | 10 - 12                      | -              | -                             |
| Oil palm | 60                 | -                       | 11              | -               | -                            | -              | 46                            |
| Coir     | 32 - 43            | 0.15 - 0.25             | 40 - 45         | 3-4             | 8                            | -              | 30 - 49                       |

(Akil, *et al.*, 2011; Sumaila, *et al.*, 2013)

### 2.2.2 สมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติ

สมบัติของเส้นใยธรรมชาติไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยธรรมชาติเท่านั้น สมบัติต่างๆ ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของเซลลูโลสและปัจจัยอื่นๆ เช่น จำนวนเซลล์ ขนาดของเซลล์ และขนาดของลูเมน เส้นใยที่มีการยึดมากกว่า 5% จะนุ่มแต่เหนียว ในขณะที่เส้นใยธรรมชาติที่มีการยึดน้อยกว่า 5% จะเหนียวแต่เปราะ สมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติแสดงในตารางที่ 2.4

โดยทั่วไปเส้นใยธรรมชาติเหมาะสำหรับนำมาเสริมแรงพอลิเมอร์ เนื่องจากความแข็งแรง และความเหนียวสูง ความหนาแน่นของเส้นใยธรรมชาติต่ำกว่าเส้นใยแก้ว ดังนั้นจึงสามารถผลิตวัสดุเชิงประกอบมีน้ำหนักเบาได้ (Akil, *et al.*, 2011)

ตารางที่ 2.4 ลักษณะเฉพาะเกี่ยวกับความหนาแน่น เส้นผ่านศูนย์กลาง และสมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์

| Fiber    | Density<br>(g cm <sup>-3</sup> ) | Diameter<br>(μm) | Tensile Strength<br>(MPa) | Young's<br>Modulus (GPa) | Elongation<br>at Break (%) |
|----------|----------------------------------|------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Jute     | 1.3 - 1.49                       | 25 - 200         | 393 - 800                 | 13 - 26.5                | 1.16 - 1.5                 |
| Oil palm | -                                | -                | 80                        | 0.5                      | 17                         |
| Banana   | 1.35                             | -                | 529 - 914                 | 27 - 32                  | 3                          |
| Coir     | 1.15 - 1.46                      | 100 - 460        | 131 - 220                 | 4 - 6                    | 15 - 40                    |
| Carbon   | 1.78                             | 5 - 7            | 3400 - 4800               | 240 - 425                | 1.4 - 1.8                  |

(Akil, *et al.*, 2011; Bledzki and Gassan, 1999; Cheung, *et al.*, 2009; John and Anandjiwala, 2008)

ปัจจุบันได้มีความสนใจในการประยุกต์ใช้เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers) มาใช้ประโยชน์เป็นเส้นใยเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบ เนื่องจากเส้นใยสังเคราะห์มีราคาแพง (Rahman and Khan, 2007; Geethamma, *et al.*, 1998) ประเทศไทยมีเส้นใยธรรมชาติมากมาย บางชนิดเป็นเศษเหลือทิ้งจากภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม เช่น เส้นใยอ้อยจากอุตสาหกรรมน้ำตาล เส้นใยมะพร้าวจากอุตสาหกรรมกะทิ ซึ่งเหลือจากอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น นอกจากนี้เส้นใยธรรมชาติยังมีข้อดีอีกหลายประการดังนี้

- 1) หาง่าย เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีใช้ไม่หมดสิ้น และมีให้เลือกมากมายหลายชนิด
- 2) เส้นใยบางชนิดเป็นของเหลือทิ้งหรือเป็นวัชพืช มีราคาถูก ทำให้สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิต
- 3) เส้นใยมีสมบัติเชิงกลดี บางชนิดมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง
- 4) ความหนาแน่นต่ำ ทำให้มีน้ำหนักเบา
- 5) สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ไม่เป็นปัญหาในการกำจัด
- 6) ช่วยกำจัดและลดกากของเสียจากเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม

### 2.2.3 เส้นใยมะพร้าว (Coconut Fiber)

มะพร้าว มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Cocos nucifera* Linn. เป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของประเทศไทย เนื่องจากคนไทยใช้เนื้อมะพร้าวในการบริโภคเป็นอาหารทั้งคาวและหวานในชีวิตประจำวัน มะพร้าวสามารถขึ้นได้ในทุกจังหวัดทั่วประเทศ แต่ขึ้นได้ดีในดินที่มีสภาพเป็นกลางหรือเป็นกรดเล็กน้อยคือ pH ระหว่าง 6-7 ลักษณะดินร่วนหรือร่วนปนทรายที่มีการระบายน้ำดี มีฝนตกกระจายสม่ำเสมอแทบทุกเดือน อากาศอบอุ่นหรือค่อนข้างร้อน และมีแสงแดดมาก ภาควิชาที่มีการปลูกมะพร้าวมากและปลูกเป็นอาชีพ คือ ภาคใต้ ภาคตะวันออก และภาคตะวันตก

เส้นใยมะพร้าวจะถูกแกะออกมาจากค่านในของเปลือกมะพร้าว ซึ่งสามารถแกะออกมาได้ด้วยมือหรือใช้เครื่องช่วยแกะ และเป็นเส้นใยที่มีการนำมาผสมใช้เป็นวัสดุก่อสร้างมากที่สุด เนื่องจากเป็นวัสดุธรรมชาติที่ไม่มีสารพิษ มีปริมาณมาก ราคาต่ำและสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ ซึ่งส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติต่างๆ ที่เหมาะสม (Assasutjarit, *et al.*, 2005) แต่ยังมีเส้นใยมะพร้าวบางส่วนถูกนำไปทิ้งเป็นขยะหรือถูกเผาทิ้ง ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาต่อสภาพแวดล้อม

เส้นใยมะพร้าวทั่วไปมีความยาวประมาณ 350 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.12-0.25 mm ความหนาแน่นเส้นใยเท่ากับ  $1,250 \text{ kg.m}^{-3}$  และเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรง รับแรงดึงได้ดี เนื่องจากมีลิกนินในองค์ประกอบเป็นปริมาณมากที่สุด (Khalil, *et al.*, 2007; Rahman and Khan, 2007; Faruk, *et al.*, 2012; Samia, *et al.*, 2012; Verma, *et al.*, 2013) เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยพืชชนิดอื่น มีความโค้งงอต่ำ ทนต่อความเปื่อยขึ้นและการทำลายของจุลินทรีย์ได้ดี

### 2.2.4 เส้นใยกล้วย (Banana Fiber)

ต้นกล้วยเป็นไม้ผลเขตร้อนมีถิ่นกำเนิดในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้เจริญเติบโตได้ดีในทุกภาคของประเทศไทย เส้นใยกล้วยได้จากพืชพันธุ์มิวซา (*Musa*) ชนิด *Textilis* มีหลายชนิด ตามปกติเคยเรียกว่าป่านมะนิลา (Manila hemp) แต่ปัจจุบันนี้คำว่า อบาคา (*Abaca*) รู้จักกันแพร่หลาย กาบ คือ ก้านใบ แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนนอกที่สุดเป็นส่วนที่ใช้ใยได้ ส่วนกลางมีลักษณะเหมือนฟองน้ำ มีอากาศและน้ำบรรจุเต็ม แยกใยจะได้เพียงเล็กน้อยและค่อนข้างเปื่อย และส่วนด้านในจะใช้ใยได้ กาบนอกสุดมีสีเขียวอ่อน บางที่เป็นสีม่วง ต่อไปสีจะค่อยๆ าจลงจนกระทั่งเป็นสีขาว (บุญรา สร้อยระย้า, 2545)

เส้นใยกล้วยพบมากบริเวณลำต้นกล้วย รูปร่างของเส้นใยกล้วยตามความยาว จะประกอบด้วยกลุ่มของเส้นใยเล็กๆ เรียงแนวยาวของเส้นใย เป็นรูปทรงกรวย ตอนปลาย

แหลม จัดอยู่ในประเภทเส้นใยสั้น ลักษณะตามขวางเป็นรูปรีเกือบกลม มีลูเมนเห็นได้ชัดเจนผนังเซลล์ค่อนข้างบางเส้นใยค่อนข้างแข็งแรงและกระด้าง แต่เส้นใยด้วยมีความมันคล้ายไหม มีความเหนียว สามารถต้านแรงดึงได้ดี ใยด้วยมีความเหนียวมาก ดึงยืดหยุ่นตัวได้เล็กน้อย ทนต่อแบคทีเรียในน้ำเค็มได้ดีมาก (เอกสารประกอบการสอน, เทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2012; Shah, *et al.*, 2008; Venkateshwaran and Elayaperumal, 2010; Kumar, *et al.*, 2013; Pothan, *et al.*, 2003)

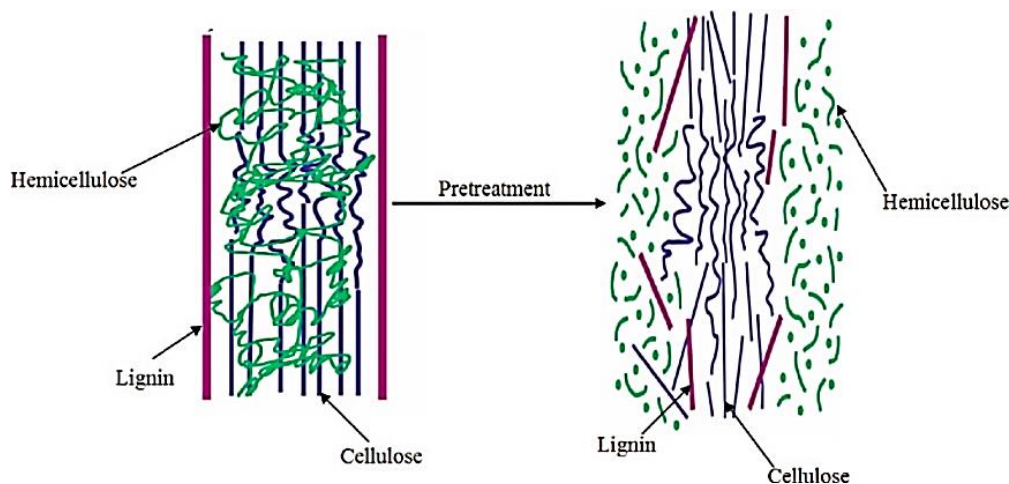
คุณสมบัติที่สำคัญของเส้นใยธรรมชาติ คือ สมบัติด้านพื้นผิวของเส้นใย เส้นใยเซลลูโลสมีคุณสมบัติชอบน้ำและดูดความชื้นได้ดี (Hydrophilic) เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลน้ำในผนังเซลล์ ปริมาณความชื้นในเส้นใยทำให้เกิดปัญหาการยึดติดของเส้นใยกับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติของการไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) อย่างไรก็ตามการปรับสภาพเส้นใยธรรมชาติด้วยวิธีการทางกายภาพและทางเคมีจะสามารถลดปัญหานี้ได้ (Ku, *et al.*, 2011; Wambua, *et al.*, 2003; Srinivasulu, 2013; Shah, *et al.*, 2008)

### 2.2.5 การปรับสภาพเส้นใยธรรมชาติ

การปรับสภาพเส้นใยเป็นกระบวนการที่ช่วยทำให้เส้นใยมีคุณภาพดีขึ้น โดยมีความสำคัญมากในกรณีของการผลิตวัสดุเชิงประกอบ เมื่อพิจารณาเส้นใยพืชซึ่งมีสภาพขรุขระเป็น Hydrophilicity หรือดูดซึมน้ำได้ดี เนื่องจากโครงสร้างของเซลลูโลสภายในเซลล์ ดังนั้นการเข้ากันได้ระหว่างเฟสเส้นใยกับพอลิเมอร์จึงเป็นไปได้ยาก เนื่องจากมีสภาพขรุขระตรงข้ามทำให้เส้นใยไม่สามารถกระจายตัวในเนื้อเมทริกซ์ได้สม่ำเสมอ ซึ่งการยึดเกาะระหว่างเส้นใยธรรมชาติและพอลิเมอร์เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ (Lee, *et al.*, 2008; Abdullah and Ahmad, 2012; Rahman and Khan, 2007; Barliantand and Wiloso, 2007)

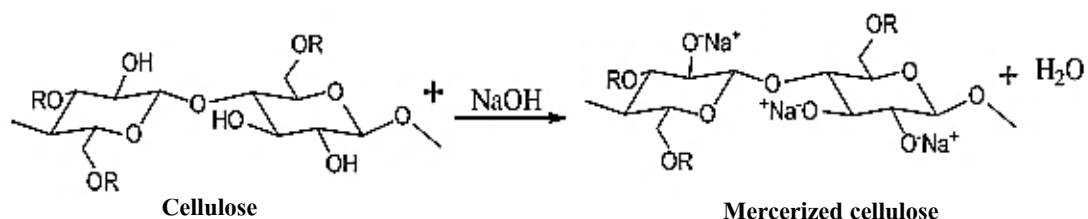
การปรับสภาพเส้นใยจึงเป็นกระบวนการสำคัญในการเตรียมเส้นใยพืชเพื่อใช้ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบ การปรับสภาพเส้นใยสามารถแบ่งเป็น 2 รูปแบบใหญ่ๆ คือ การปรับสภาพด้วยกระบวนการทางกล เป็นกระบวนการยืด การรีด และการผ่านกระบวนการด้วยความร้อน ซึ่งกระบวนการทางกลจะเป็นการดัดแปลงโครงสร้างพื้นผิวของเส้นใย แต่ไม่ได้มีผลต่อองค์ประกอบของเส้นใยแต่อย่างใด (Bledzki and Gassan, 1999) และการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี เช่น การปรับปรุงสภาพพื้นผิวเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือเรียกว่า Alkaline treatment ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมในการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยก่อนนำไปเสริมแรงในวัสดุพอลิเมอร์ (Rosa, *et al.*, 2009; Faruk, *et al.*, 2012) โดยกลไกการทางเคมีสามารถชะล้างสารพวกลิกนิน (lignin) ไขมัน (wax) และสารประกอบอื่นๆ ที่

ไม่ใช่เซลลูโลสที่ผิวของเส้นใยออกไป ซึ่งสารเคลือบเหล่านี้เป็นตัวขัดขวางการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์กับเส้นใยเซลลูโลส (El-Meligy, *et al.*, 2010; Karthikeyan and Balamurugan, 2012; Ku, *et al.*, 2011; Rout, *et al.*, 200; Sgriccia, *et al.*, 2008; Shah, *et al.*, 2008; Setyanto, *et al.*, 2013) แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะ โครงสร้างของเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการทางเคมี (Mosier, *et al.*, 2005)

การปรับสภาพเส้นใยด้วย NaOH เป็นการปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส โดยการทำลายพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างของเซลลูโลส ทำให้เกิดการแปลงหมู่ -OH บนโครงสร้างของเซลลูโลส กลายเป็นเป็นหมู่ -ONa แสดงปฏิกิริยาเคมีดังรูปที่ 2.12 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสภายหลังการปรับสภาพด้วย NaOH สามารถช่วยให้เส้นใยยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น เนื่องจากทำให้เส้นใยลดสมบัติการชอบน้ำและสามารถเข้ากับพอลิเมอร์เมทริกซ์ซึ่งมีสมบัติไม่ชอบน้ำได้ดีขึ้น (Akil, *et al.*, 2011; Chandra Rao, *et al.*, 2012; John and Anandjiwala, 2008; Ku, *et al.*, 2011; Shah, *et al.*, 2008; Punyamurthy, *et al.*, 2014)



รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยาเคมีของเซลลูโลสที่ปรับสภาพด้วยสารละลายเบส (Kaushik, *et al.*, 2012)

ผลของการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเส้นใยด้วยวิธีการ Alkaline treatment นอกจากเป็นการกำจัดสารเคลือบต่างๆ และสารพวก non - cellulose บริเวณพื้นผิวเส้นใย เช่น ลิกนิน ไชมันหรือเอมิเซลลูโลส และทำลายโครงสร้างพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างเซลลูโลสแล้วยังช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวบนเส้นใยเซลลูโลสที่เหมาะสมสำหรับการยึดเกาะหรือการประสานกัน (Interlocking) ระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีขึ้น การยึดกันที่ดีเป็นผลให้วัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใยธรรมชาติมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น และสามารถคงคุณสมบัติไว้ได้นาน (El-Meligy, *et al.*, 2010; Karthikeyan and Balamurugan, 2012; Faruk, *et al.*, 2012)

### 2.3 วัสดุเชิงประกอบ (Composite Material)

วัสดุเชิงประกอบหรือวัสดุคอมโพสิต (Composite materials) หมายถึง วัสดุที่เกิดจากการรวมตัวของวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไปแล้วทำให้วัสดุมีสมบัติที่ดีขึ้น สำหรับความหมายเชิงวิศวกรรมของวัสดุเชิงประกอบ หมายถึง วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันทำให้สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เกิดขึ้นมีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นการทำนายหรือคาดคะเนสมบัติของวัสดุเชิงประกอบจึงไม่สามารถทำนายได้จากวัสดุที่เป็นองค์ประกอบชนิดใดเพียงชนิดเดียว (Hull and Clyne, 1996; Verma, *et al.*, 2013; Reddy, *et al.*, 2014; Sabah, *et al.*, 2012)

องค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

1) ส่วนเมทริกซ์หรือเนื้อพื้น (Matrix phase) คือองค์ประกอบหลัก เป็นส่วนที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) เมทริกซ์ที่นิยมใช้คือ พอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิก เป็นต้น ซึ่งมีหน้าที่ดังนี้

- 1.1) ให้เส้นใยหรืออนุภาคกระจายตัวและยึดเกาะตามทิศทางที่ต้องการ
- 1.2) ป้องกันไม่ให้เส้นใยหรืออนุภาคเสียหายอันเนื่องมาจากสิ่งแวดล้อม
- 1.3) ถ่ายเทแรงกระทำจากภายนอกไปสู่เส้นใยหรืออนุภาค
- 1.4) ช่วยกำหนดรูปร่างของวัสดุผสม

2) ส่วนเสริมแรง (Reinforce phase) เป็นส่วนที่ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรง มักเป็นส่วนที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous phase) ซึ่งอาจมีลักษณะเป็นแผ่นอนุภาคเล็กๆ หรือเป็นเส้นใยก็ได้ ซึ่งส่วนใหญ่มักใช้ เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน หรือเส้นใยธรรมชาติ เป็นวัสดุเสริมแรง หน้าที่ของตัวเสริมแรง มีดังนี้

- 2.1) เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุเชิงประกอบ
- 2.2) สามารถรับแรงกระทำจากภายนอก โดยแรงกระทำนั้นจะถูกถ่ายทอดไปตามเส้นใยหรืออนุภาค

วัตถุประสงค์ของการสร้างวัสดุเชิงประกอบ คือ ความต้องการผลิตวัสดุที่มีคุณสมบัติผสมผสานที่วัสดุเดี่ยวแต่ละชนิดไม่สามารถทำได้ ซึ่งการผสมผสานดังกล่าวจะเป็นการดึงคุณสมบัติเด่นของวัสดุเดี่ยวที่ใช้ในการผสมแต่ละชนิด ทำให้กลายเป็นคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบนั่นเอง

### 2.3.1 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ (หฤทภัก กิรติเสวี, และคณะ, 2553)

ถ้าแยกตามวัสดุเสริมแรง สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดหลัก ได้แก่

1) วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-Reinforced) คือ การนำอนุภาคมาเป็นส่วนเสริมแรง ทำให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีความแข็งแรง เช่น คอนกรีต หรือทำให้วัสดุเชิงประกอบสามารถทนความร้อนได้มากขึ้น

2) วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใย (Fibrous) คือ การนำเส้นใยมาเป็นส่วนเสริมแรง ทำให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีความเหนียวสูง โดยขึ้นอยู่กับน้ำหนักที่ผสม เช่น พอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วหรือเส้นใยคาร์บอน และพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ



3) วัสดุเชิงประกอบโครงสร้าง (Structural) คือ วัสดุผสมระหว่างวัสดุเนื้อเดียว (Homogenous) กับวัสดุผสม ทำให้คุณสมบัติที่ได้้นอกจากจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาผสมแล้ว แต่ยังมีลักษณะ โครงสร้างที่หลากหลายเนื่องจากขึ้นอยู่กับรูปร่างทางเรขาคณิต (Geometrical Design) ของธาตุประกอบอีกด้วย

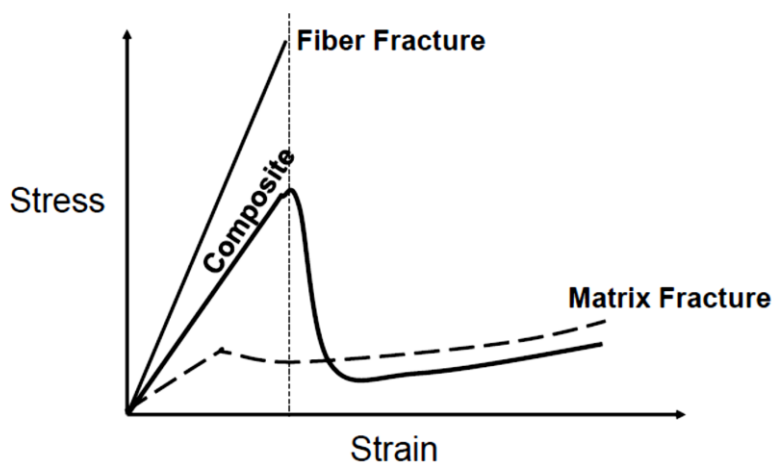
ถ้าจำแนกวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของวัสดุที่เป็นเมทริกซ์จะสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภทได้แก่ วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal matrix composite) วัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic matrix composite) และวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite)

1) วัสดุเชิงประกอบโลหะ ได้พัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงในการทนทานต่อความล้าของโลหะให้ดีขึ้น โดยเฉพาะอะลูมิเนียมและไทเทเนียม ที่เป็นเมทริกซ์โลหะที่ต้องการให้มีสมบัติพิเศษในการใช้งานในอุตสาหกรรมอากาศยาน สารเสริมแรงอาจอยู่ในลักษณะของอนุภาคเส้นใย นอกจากนี้ สารเสริมแรงสำหรับโลหะต้องมีความแข็งแรงสูงและทนความร้อนสูงด้วย เนื่องจากโลหะต้องใช้อุณหภูมิสูงมากในการขึ้นรูปและสารเสริมแรงที่ใช้ต้องไม่เกิดการกัดกร่อนกับเมทริกซ์โลหะจากข้อจำกัดเหล่านี้ทำให้สารเสริมแรงอนินทรีย์และเส้นใยแก้วไม่สามารถใช้เสริมแรงให้กับเมทริกซ์โลหะได้ สารเสริมแรงที่ใช้จึงต้องเป็นสารเสริมแรงเซรามิกหรือสารเสริมแรงโลหะ เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ อะลูมินา เส้นใยโบรอน โดยทั่วไปวัสดุเชิงประกอบโลหะจะนำไปใช้งานในลักษณะเดียวกับโลหะ สารเสริมแรงที่เติมเข้าไปจะเป็นการปรับปรุงสมบัติของเมทริกซ์โลหะให้ดียิ่งขึ้น และมีอายุการใช้งานนานขึ้น อย่างไรก็ตามการนำไปใช้งานยังจำกัดเนื่องจากต้นทุนในการผลิตที่สูงมาก (Hunt, *et al.*, 2001)

2) วัสดุเชิงประกอบเซรามิก เซรามิกเป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ไม่นำความร้อน ทนต่อการกัดกร่อน และอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับความร้อนต่ำมาก เซรามิกจึงนำมาใช้ในงานที่ต้องการความทนทานต่ออุณหภูมิสูง และในสภาวะที่มีการกัดกร่อนสูง แต่ข้อเสียของเซรามิกคือเปราะและแตกหักง่ายเมื่อเกิดรอยแตกแล้วไม่สามารถซ่อมแซมได้โดยง่าย การเสริมแรงให้กับเมทริกซ์เซรามิกเป็นการปรับปรุงสมบัติให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีความเหนียว และทนทานมากขึ้น สารเสริมแรงจะเข้าไปขวางการแพร่ของรอยแตกที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน เมื่อวัสดุเชิงประกอบได้รับแรงจะไม่เกิดการเปราะแตกในทันทีเนื่องจากรอยแยกจะถูกหน่วงด้วยสารเสริมแรง สำหรับเมทริกซ์เซรามิกที่ไม่เสริมแรงจะแสดงสมบัติที่เปราะ และแตกทันทีเมื่อได้รับแรงกระทำจนถึงจุดจุดหนึ่ง ดังนั้น การใส่สารเสริมแรงเข้าไปจะทำให้วัสดุเชิงประกอบเซรามิกที่ได้มีความเหนียวทนทานมากขึ้น สารเสริมแรงที่ใช้ในการ

เสริมแรงอาจอยู่ในรูปอนุภาคหรือเส้นใย ได้แก่ อะลูมินา ซิลิกา ซิลิกอนคาร์ไบด์ และคาร์บอน และสำหรับเมทริกซ์เซรามิก ได้แก่ ซีเมนต์ คาร์บอน ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น

3) วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ โดยธรรมชาติพอลิเมอร์เป็นสารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างเป็นหน่วยซ้ำ เชื่อมต่อกันเป็นสายยาว ทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงไม่สูงนัก มีความหนาแน่นต่ำ และมีความทนทานต่อการกัดกร่อน การเสริมแรงให้พอลิเมอร์ทำได้โดยการเติมเส้นใยเสริมแรงลงในพอลิเมอร์ให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีความแข็งแรงมากขึ้น (Bongarde and Shinde, 2014) โดยทั่วไปเส้นใยเสริมแรงสำหรับวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์มักเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูงเพื่อทำหน้าที่ในการรับและกระจายแรงกระทำ โดยวัสดุเชิงประกอบจะมีความแข็งแรงสูงที่สุดตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง การเสริมแรงนี้ทำให้พอลิเมอร์เมทริกซ์สามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้นโดยไม่เปลี่ยนรูปร่างดังแสดงรูปที่ 2.13 ที่แสดงถึงสมบัติเชิงกลอย่างง่ายของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เมื่อให้แรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใย



รูปที่ 2.13 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับวัสดุองค์ประกอบ (Campbell, 2010)

สมบัติเชิงกลนี้เป็นสมบัติร่วมที่เกิดจากสมบัติของเมทริกซ์พอลิเมอร์ และสมบัติของเส้นใยเสริมแรงประกอบกันทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าวัสดุพอลิเมอร์เนื่องจากเส้นใยเสริมแรงทำหน้าที่รับแรงกระทำ แต่สำหรับระยะยืดสูงสุดนั้นวัสดุเชิงประกอบจะมีความสามารถในการยืดสูงสุดได้ไม่เกินระยะยืดสูงสุดของเส้นใยเสริมแรงสำหรับพอลิเมอร์เมทริกซ์ควรมีความเหนียวทนทานมากพอที่จะห่อหุ้มเส้นใยเสริมแรงไว้

สารเสริมแรงในรูปอนุภาคมีส่วนเสริมความแข็งแรงได้ไม่ดีเท่ากับรูปเส้นใย เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของสารเสริมแรงส่งผลต่อการกระจายแรง จึงนิยมเรียกสารเสริมแรงในรูปอนุภาคว่า สารเติม (Filler) วัสดุเชิงประกอบจะมีความแข็งแรงมากขึ้นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยทำให้ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อความหนาแน่นของวัสดุเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้สามารถนำวัสดุเชิงประกอบมาใช้สำหรับงาน โครงสร้างบางชนิดที่ต้องรับแรงกระทำที่ไม่สูงมากนักเช่น เฟอร์นิเจอร์ต่างๆ (Bledzki and Gassan, 1999)

### 2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติด้านต่างๆของวัสดุเชิงประกอบ ที่จะช่วยให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติต่างๆ ที่ดีขึ้น เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน จะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ซึ่งถ้าเป็นวัสดุเชิงประกอบของพอลิเมอร์กับเส้นใยมีปัจจัย ดังนี้

1) สมบัติของเส้นใยเสริมแรง

2) สมบัติของพอลิเมอร์

3) สัดส่วนของเส้นใยเสริมแรง (Fiber Volume Fraction) เนื่องจากวัสดุที่เป็นเส้นใยเสริมแรง มักมีสมบัติเชิงกลสูงกว่าพอลิเมอร์ ดังนั้นหากวัสดุเชิงประกอบมีเส้นใยเสริมแรงมากขึ้น จะทำให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลสูงขึ้น แต่การผสมเส้นใยเสริมแรงกับพอลิเมอร์ก็มีขีดจำกัดเนื่องจากเส้นใยเสริมแรงควรมีเนื้อพอลิเมอร์ห่อหุ้มอยู่โดยรอบ

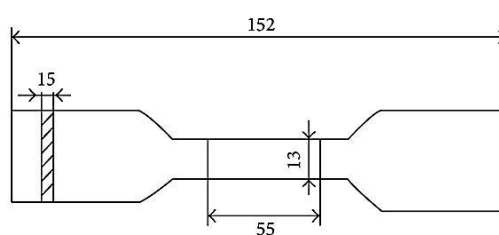
4) การจัดเรียงตัว (Orientation) ของเส้นใยในวัสดุเชิงประกอบ เนื่องจากเส้นใยเสริมแรงให้ค่าสมบัติเชิงกลตามแนวยาวสูงกว่าแนวขวาง ดังนั้นหากเส้นใยในวัสดุเชิงประกอบมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันแล้ว สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่แสดงออกมาจะมีค่าแตกต่างกันตามแนวแรงที่กระทำ (Rosa, *et al.*, 2009)

## 2.4 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ (Mechanical Properties)

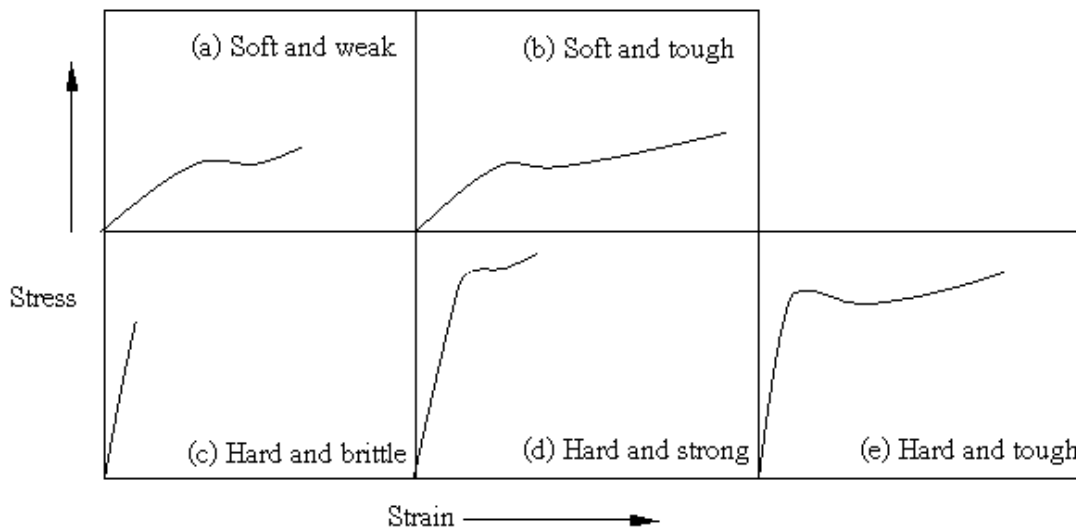
### 2.4.1 ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength)

ความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ สามารถทดสอบจากลักษณะการยืดออกของตัวอย่างเมื่อได้รับแรงดึงจากภายนอกโดยอาศัยเทอม 2 เทอมที่สัมพันธ์กัน คือความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain ) ความเค้น คือ แรงที่ใช้ในการดึงหรือยืดตัวอย่างต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัด ( Setyanto, *et al.*, 2013)

การทดสอบความต้านทานแรงดึงของวัสดุที่สำคัญคือต้องเตรียมชิ้นงานหรือวัสดุให้เป็นรูปทรงตามมาตรฐานการทดสอบ แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.14 ซึ่งจะได้จากการเตรียมชิ้นงานแบบต่างๆ ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุ เช่น กรณีของพลาสติก อาจจะได้จากกระบวนการฉีด (Injection moulding) หรือได้จากการตัดแผ่นพลาสติก ถ้าหากพลาสติกดังกล่าวมีความแข็งต่ำ เช่น พลาสติก PVC ในขณะที่ทดสอบจะใช้เครื่อง Universal testing machine โดยจะทำการจับชิ้นงานที่ตำแหน่งปลายทั้งสองด้านด้วยระยะคงที่ (ตามมาตรฐานกำหนด) แล้วทำการดึงยืดชิ้นงานด้วยอัตราการดึงที่คงที่ทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของแรงและระยะยืดของชิ้นงานบริเวณตรงกลาง ผลที่ได้เบื้องต้นจากการทดสอบคือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะทาง ซึ่งอาจจะมีรูปร่างแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของพอลิเมอร์และสภาวะ (ความเร็ว, อุณหภูมิ) ที่ทำการดึง แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 รูปทรงของวัสดุสำหรับการทดสอบความต้านทานแรงดึง



รูปที่ 2.15 ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ

สำหรับพฤติกรรมแรงเค้นความเครียดของวัสดุพอลิเมอร์สามารถมีได้หลายลักษณะขึ้นอยู่กับชนิดของชิ้นงาน ซึ่งสามารถแสดงลักษณะแรงเค้นความเครียดของพอลิเมอร์ชนิดที่แข็งเปราะ โดยจะเกิดการแตกหักในช่วงที่เกิดการเสียรูปแบบยืดหยุ่น และเป็นพฤติกรรมของวัสดุพลาสติกที่มีลักษณะแบบเดียวกับวัสดุกลุ่มโลหะ โดยช่วงแรกจะเกิดการเสียรูปแบบยืดหยุ่นตามด้วยการเกิดการจั่นและบริเวณที่มีการเสียรูปแบบถาวรก่อนที่จะเกิดการแตกหัก ซึ่งมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นมาก และการเสียรูปแบบยืดหยุ่นทั้งหมดจนกระทั่งเกิดการแตกหักซึ่งเป็นลักษณะการเสียรูปของยาง คือวัสดุสามารถยืดออกแล้วคืนรูปได้อย่างมากภายใต้แรงเค้นต่ำ ซึ่งจะพบในพอลิเมอร์กลุ่มอีลาสโตเมอร์ (Elastomers) จากแรงและระยะทางที่ได้ สามารถนำมาคำนวณค่า Tensile parameters ต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\text{ความเค้น (Tensile stress)} = \frac{\text{แรง (F)}}{\text{พื้นที่หน้าตัด (A)}}$$

ความเครียด ( $\mathcal{E}$ ) คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวที่เปลี่ยนไปของตัวอย่างเมื่อได้รับแรงดึงต่อความยาวเริ่มต้น

$$\text{ความเครียด (Tensile strain)} = \frac{\text{ความยาวที่เปลี่ยนไป}(\Delta L)}{\text{ความยาวเดิม (L)}}$$

$$\text{ความแกร่ง (Tensile modulus)} = \frac{\text{ความเค้น} (\sigma)}{\text{ความเครียด} (\mathcal{E})}$$

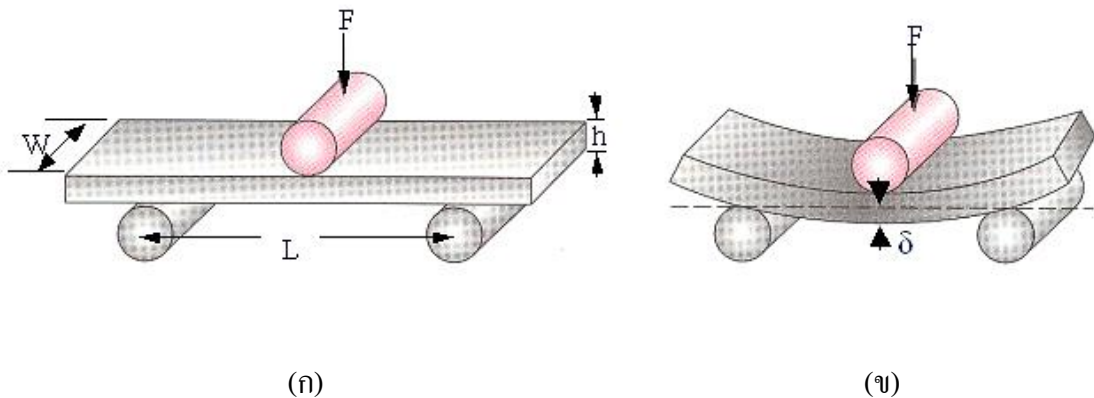
จากค่าความเครียด เราสามารถหาค่าร้อยละการยืดตัว (Elongation) ได้จากสมการ

$$\text{ร้อยละการยืดตัว} = \text{ความเครียด} \times 100$$

ร้อยละการยืดตัวเป็นตัวบอค่าความอ่อนตัว (Ductile) ของวัสดุ วัสดุใดที่มีค่าร้อยละความยาวที่เปลี่ยนแปลงมากแสดงว่า มีความอ่อนตัวมาก การยืดตัว ณ จุดที่ขาด (Elongation at break) มีความสำคัญในการศึกษาคุณภาพของวัสดุ เช่น ถ้ามีค่าร้อยละการยืดตัวที่เปลี่ยนแปลงต่ำกว่าปกติ แสดงว่า อาจมีรูพรุนหรือรอยแตกภายในวัสดุนั้น

#### 2.4.2 ความต้านทานต่อแรงคดโค้ง (Flexural strength)

ความต้านทานต่อแรงคดโค้ง (Flexural strength) เป็นค่าความเค้นที่ได้จากการทดสอบให้ชิ้นงานเกิดการงอตัวโดยใช้หัวกด (Indenter) กดลงในลักษณะตั้งฉากกับชิ้นงานที่อยู่ในลักษณะแนวนอนบนตัวรองรับ (Supporting jig) เป็นตัวกำหนดช่วงห่าง (Span) ซึ่งการทดสอบในลักษณะนี้ชิ้นงานหรือวัสดุทดสอบจะได้รับแรงเค้นดึง (Tensile stress) และแรงเค้นกด (Compressive stress) โดยแรงเค้นกดจะเกิดด้านบนชิ้นงานและแรงเค้นดึงจะเกิดด้านใต้ชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.16



**รูปที่ 2.16** การทดสอบความทนต่อแรงดัดโค้งของวัสดุ (ก) ก่อนใช้แรงกด และ (ข) การโค้งงอของวัสดุเมื่อใช้แรงกด

การทดสอบแรงดัดโค้งแบ่งเป็น 2 วิธี คือ วิธี 3 จุด (3-point bending) เป็นการให้แรงกระทำที่จุดกึ่งกลางของชิ้นงานทดสอบและมีจุดรองรับในทิศทางตรงกันข้ามบริเวณปลายชิ้นงานทั้ง 2 ด้านที่มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางเท่ากัน และวิธี 4 จุด (4-point bending) เป็นการให้แรงกระทำที่จุด 2 จุดด้านบนบริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานและจุดรองรับอยู่ที่ทิศทางตรงกันข้ามบริเวณปลายทั้ง 2 ด้านที่มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางเท่ากัน ซึ่งค่าความต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural strength) สามารถหาได้จากสมการ

$$\text{ความต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural strength)} = \frac{3FL}{2wh^2}$$

|       |   |     |   |
|-------|---|-----|---|
| เมื่อ | F | คือ | น้ำหนักที่ทำให้เกิดการแตกของพอลิเมอร์           |
|       | L | คือ | ระยะห่างระหว่างตำแหน่งของวัสดุที่รองรับตัวอย่าง |
|       | W | คือ | ความกว้างของตัวอย่าง                            |
|       | H | คือ | ความสูงของตัวอย่าง                              |

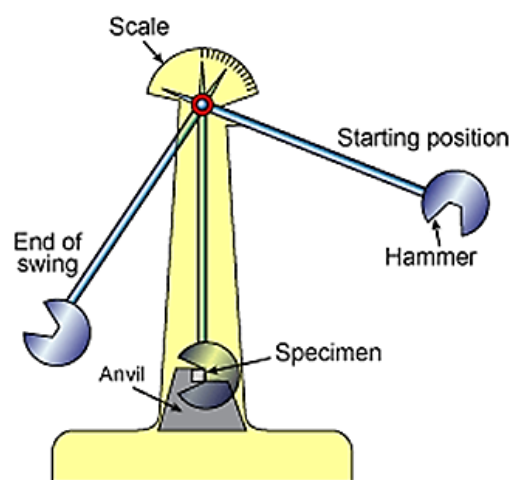
โมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ในการทำให้ตัวอย่างโค้งงอสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{โมดูลัสความยืดหยุ่น (Flexural Modulus)} = \frac{L^3 F}{4wh^2 \delta}$$

เมื่อ  $\delta$  คือ ระยะที่ตัวอย่างเกิดการโค้งงอเมื่อถูกกดด้วยแรง F

#### 2.4.3 ความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Strength)

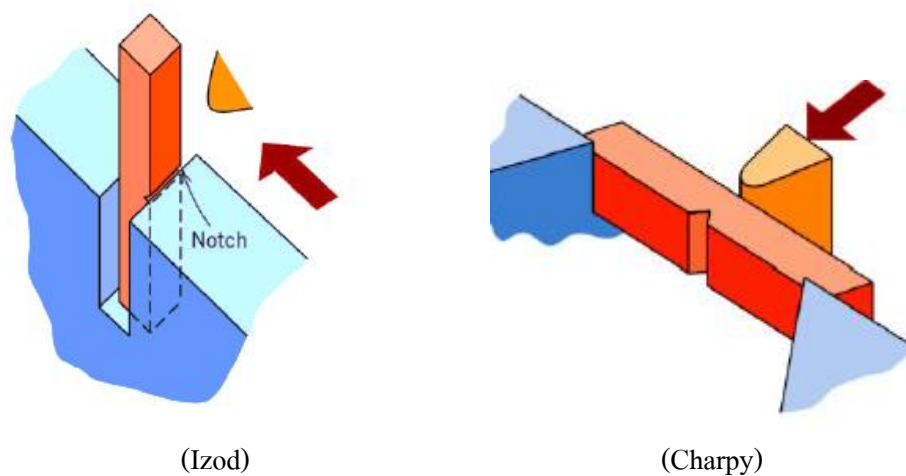
การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงานเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเหนียวของ (Toughness) ของวัสดุที่สามารถทนต่อแรงกระแทก โดยใช้วิธีการกระแทกด้วยความเร็วสูงเข้ากระแทกกับวัสดุทดสอบจนเกิดการเสียรูปหรือแตกหัก โดยความเหนียวของวัสดุจะสัมพันธ์กับพลังงานที่ถูกดูดซับ ซึ่งวิธีการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุสามารถทดสอบได้ 2 ประเภท ตามลักษณะของวัสดุทดสอบคือ การทดสอบแบบ Pendulum test โดยใช้ Pendulum ที่ทราบค่าพลังงานที่แน่นอน ดังรูปที่ 2.17 และการทดสอบแบบ Falling weight test โดยใช้ค้อนน้ำหนักหรือตัวกระแทกอื่น โดยที่พลังงานที่ใช้ในการทดสอบจะควบคุมโดยกำหนดระยะความสูงจากค้อนน้ำหนักถึงวัสดุทดสอบ



รูปที่ 2.17 การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก



การทดสอบวัสดุประเภทพอลิเมอร์ นิยมใช้การทดสอบแบบ Pendulum test จะใช้ค้อนเหวี่ยงกระแทกชิ้นงาน แล้วพลังงานส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปในการทำให้ชิ้นงานแตกหัก สามารถอ่านค่าพลังงานที่ใช้ไปได้จากเข็มหน้าปัด ในการทดสอบจะต้องมีการทำรอยบากที่วัสดุทดสอบเพื่อให้เกิดจุดรวมแรง (Stress concentration point) ซึ่งการทดสอบด้วยวิธีนี้สามารถแบ่งการทดสอบเป็น 2 แบบ ตามลักษณะตำแหน่งการวางวัสดุทดสอบ คือ Izod วางวัสดุแนวตั้ง และ Charpy วางวัสดุแนวนอน ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod และ Charpy

ค่าพลังงานที่อ่านได้สามารถนำมาคำนวณเป็นค่า Impact strength ได้จากสูตร

$$\text{ความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength)} = \frac{\text{พลังงาน (J)}}{\text{ความหนา (m)}}$$

หรือบางกรณี จะใช้สมการ

$$\text{ความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength)} = \frac{\text{พลังงาน (J)}}{\text{พื้นที่รอยบาก (m}^2\text{)}}$$

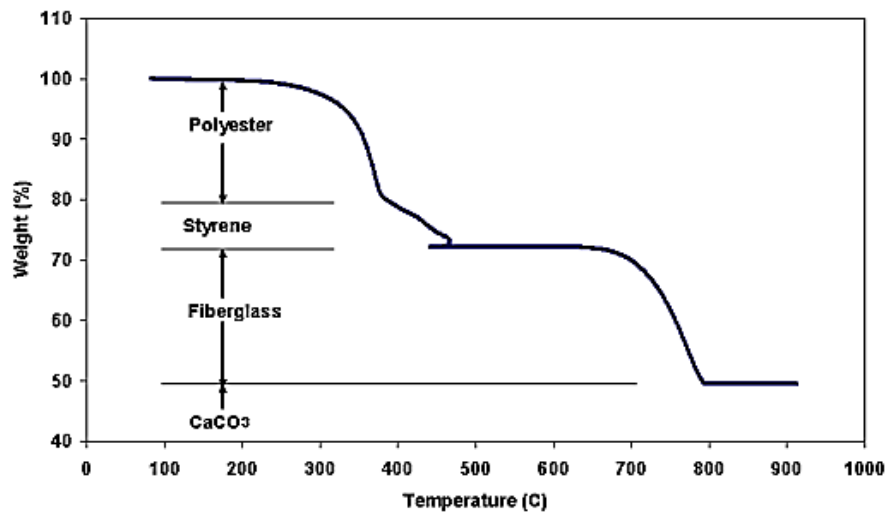
## 2.5 สมบัติเชิงความร้อน (Thermal Properties)

สมบัติเชิงความร้อนเป็นการตอบสนองของวัสดุต่อกลไกทางความร้อน เช่น การดูดซับพลังงานของของแข็งในรูปของความร้อนด้วยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและขนาดพลังงาน โดยถ่ายเทไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ถ้าวัสดุมีสองบริเวณที่มีอุณหภูมิต่างกัน โดยวัสดุอาจเกิดการหลอมเหลวในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ความจุความร้อน การขยายตัวจากความร้อนและการนำความร้อนเป็นสมบัติทางความร้อนที่สำคัญของวัสดุของแข็งในการนำไปใช้งาน

1) การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis : TGA) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุ โดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊สหรือระเหยของน้ำ การตกผลึก (Crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (Decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และรีดักชัน (Reduction) หรือ ปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry)

ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็กซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจนหรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่น ออกซิเจนหรือออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ

ข้อมูลการวิเคราะห์จะถูกบันทึกเป็นเทอร์โมแกรมที่แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่าง และอุณหภูมิดังรูปที่ 2.19 การสูญเสียน้ำหนักในช่วงแรกของการวิเคราะห์หรือที่อุณหภูมิต่ำอาจเกิดจากการระเหยของน้ำหรือตัวทำละลาย แต่ที่อุณหภูมิสูงมักเกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ ข้อมูลเหล่านี้ทำให้ทราบเกี่ยวกับความเสถียรต่ออุณหภูมิของพอลิเมอร์ เทคนิคนี้ยังมีประโยชน์มากในการวิเคราะห์หาสารที่ระเหยหรือสารเติมแต่งที่ใส่ลงไปพอลิเมอร์อีกด้วย



รูปที่ 2.19 TGA เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์กับเส้นใย (Anderson Materials Evaluation, 2013)

นอกจากนี้ข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA ยังสามารถวิเคราะห์ทดสอบข้อมูลอื่นๆ ได้ดังนี้

- 1) วิเคราะห์จุดหลอมเหลว (Melting points)
- 2) วิเคราะห์ความร้อนจำเพาะ (Specific heat)
- 3) วิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของวัสดุ (Purity of materials)
- 4) วิเคราะห์ความเสถียรต่ออุณหภูมิ (Thermal stability)
- 5) วิเคราะห์การเปลี่ยนสถานะ (Phase transition)
- 6) วิเคราะห์สภาพเป็นผลึก (Crystallinity)
- 7) วิเคราะห์สารที่มีหลายโครงสร้าง (Polymorphism)
- 8) การดูด หรือคายพลังงาน (Desorption/Adsorption)
- 9) การระเหย (Vaporization)

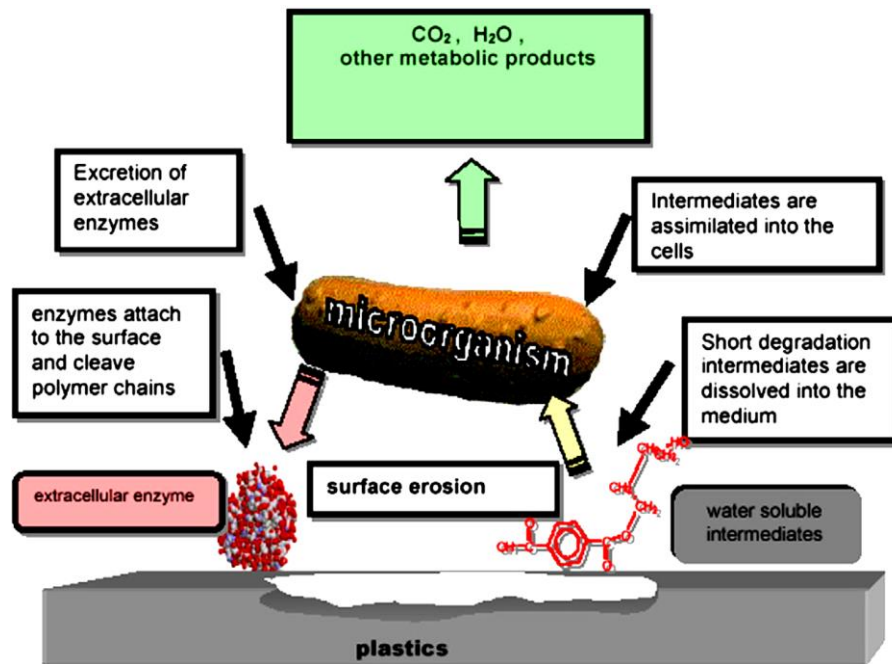
## 2.6 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable) ของพอลิเมอร์

ปัจจุบันมีหลายองค์กรทั่วโลกได้ดำเนินการจัดทำมาตรฐานผลิตภัณฑ์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Plastics) ขึ้น และให้คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพซึ่งมีความแตกต่างกันเล็กน้อยไว้ ดังนี้

ASTM D6400-99 ให้ความหมายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ย่อยสลายได้เนื่องจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย ราและสาหร่าย

ISO 472:1998 ให้ความหมายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะเป็นสาเหตุทำให้สมบัติต่างๆ ของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่งซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมกับชนิดของพลาสติกและการใช้งาน ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2550)

การย่อยสลายทางชีวภาพ คือ การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ Endo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ Exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (Ultimate biodegradation) คือ พลังงานและสารประกอบที่มีขนาดเล็กและเสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ(Biomass) กลไกการย่อยสลายทางธรรมชาติของพลาสติกแสดงดังรูปที่ 2.20 (Rudnik and Briassoulis, 2011; Kodama, 2013)



รูปที่ 2.20 กลไกการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยจุลินทรีย์ของพลาสติก

การทดสอบอาศัยหลักการย่อยสลายทางชีวภาพในสภาวะที่มีออกซิเจนและควบคุมสภาวะการย่อยสลายโดยการฝังกลบในดินธรรมชาติที่มีจุลินทรีย์ช่วยในการย่อยสลาย จุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติจะช่วยย่อยสลายวัสดุพอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำ แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สมีเทน จากกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ และวัดอัตราการย่อยสลายของพลาสติกจากการวัดปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลาย โดยการดูดซับด้วยสารละลายต่าง (Shah. *et al.*, 2008)

งานวิจัยฉบับนี้มีความสนใจทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของวัสดุเชิงประกอบโดยวิธีการฝังดินธรรมชาติ โดยศึกษาน้ำหนักที่หายไปของวัสดุเชิงประกอบเปรียบเทียบกับพลาสติกกรีซเคล็ดที่ไม่มีการผสมของเส้นใยภายใต้ระยะเวลาที่กำหนด

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Shin and Chase, (2005) ได้ศึกษาการรีไซเคิลพอลิสไตรีน โดยการละลายด้วยตัวทำละลายอินทรีย์จากธรรมชาติ คือ d-limonene ซึ่งมีลักษณะเป็นน้ำมันที่ได้จากเปลือกของผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว เช่น มะนาว ส้ม เปรียบเทียบกับการละลายพอลิสไตรีนในตัวทำละลาย Tetrahydrofuran Dimethylformide และ Dimethylacetamide พบว่า โฟมพอลิสไตรีนสามารถละลายได้ในตัวทำละลาย d-limonene ได้เป็นสารละลายพอลิสไตรีนที่มีความหนืดและเหนียว ส่วนในตัวทำละลายอินทรีย์อื่นๆ ได้สารละลายที่มีความใสและมีความหนืดน้อยกว่า ซึ่งผลของการละลายโฟมพอลิสไตรีนจนได้เป็นสารละลายพอลิสไตรีน สามารถนำไปผลิตเป็นเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 700 nm ที่ความเข้มข้น 30% w/w

Naik and Mishra, (2007) ได้ศึกษาวัสดุเชิงประกอบระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับพอลิสไตรีน โดยศึกษาพอลิสไตรีนกับเส้นใยกล้วยและเส้นใยป่านศรนารายณ์ ซึ่งใช้อัตราส่วนระหว่างเส้นใยกับพอลิสไตรีนคือ 55: 45 % โดยน้ำหนัก และใช้ maleic anhydride ปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใย และเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่ไม่มีการปรับสภาพเส้นใยพบว่า วัสดุที่ปรับสภาพเส้นใยมีคุณสมบัติเชิงกลเช่น ความต้านทานแรงดึง ค่ามอดูลัส และความแข็งที่ดีกว่า

Albakri, *et al.*, (2008) ได้ศึกษาวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิสไตรีน เสริมแรงด้วยเส้นใยจากกากอ้อยที่มีการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยนำเส้นใยผสมกับพอลิสไตรีนในสารละลาย methyl ethyl ketone พบว่าวัสดุผสมที่ได้เมื่อนำไปศึกษาคุณสมบัติเชิงกล เช่น ความต้านทานแรงอัดและความต้านทานแรงดึง มีค่าเพิ่มขึ้น

Chaisupakitsin, *et al.*, (2010) ได้ศึกษาวัสดุเชิงประกอบจากใยมะพร้าวกับโฟมพอลิสไตรีน ซึ่งปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยด้วยสารละลายแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Mg(OH)_2$ ) และเมื่อนำวัสดุผสมที่ผ่านการปรับสภาพและไม่ปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยมาศึกษาพบว่า วัสดุผสมที่ไม่ปรับสภาพเส้นใยจะดูดซึมน้ำได้มากกว่า เนื่องจากเส้นใยมะพร้าว มีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบหลักโดยเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกไซด์ ( $-OH$ ) เป็นหมู่มีขั้วสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ดี ทำให้เส้นใยมะพร้าวดูดซึมน้ำได้ สำหรับวัสดุผสมที่ผสมกับเส้นใยมะพร้าวปรับสภาพพบว่า ดูดน้ำได้น้อยกว่า เนื่องจากความเป็นเบสของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ มีผลให้หมู่  $-OH$  ของเส้นใยมะพร้าวเปลี่ยนเป็นหมู่  $-O^-$  บางส่วน จึงทำให้เส้นใยดูดซึมน้ำได้ลดลงและมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นสูงที่กว่า

Sapoun and Bachtiar, (2012) ศึกษาวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิस्टาไทรินที่เสริมแรงด้วยเส้นใยตาล และศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิस्टาไทรินโดยใช้เส้นใยในอัตราส่วนที่ต่างกันคือ 10, 20, 30, 40 และ 50 % โดยน้ำหนัก และเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพบว่า วัสดุเชิงประกอบที่มีสัดส่วนของเส้นใยมากขึ้น จะช่วยให้วัสดุมีค่าความต้านทานแรงดึงและค่ามอดุลัสสูงขึ้น

Fakhrul and Islam, (2013) ได้ศึกษาวัสดุเชิงประกอบของพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยจากขี้เถ้า โดยนำมาผสมกับสารละลายพอลิเอสเตอร์และเมทานอล วัสดุผสมที่ได้มีความต้านทานแรงดึงลดลงเมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ และได้ศึกษาความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพพบว่าวัสดุเชิงประกอบจากพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยขี้เถ้ามีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีกว่าพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์

Setyanto, *et al.*, (2013) ได้ศึกษาผลของการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยมะพร้าวด้วยAlkaline พบว่าการปรับสภาพเส้นใยโดยใช้ NaOH เข้มข้น 5% (w/v) ช่วยให้สมบัติเชิงกลด้าน Tensile และ Elongation ของเส้นใยดีขึ้น และช่วยลดความสามารถในการดูดน้ำของเส้นใยได้มากขึ้น และเมื่อศึกษาสภาพพื้นผิวของเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วย SEM พบว่า เส้นใยที่ไม่ปรับสภาพ (Untreated) มีสิ่งปนเปื้อนเคลือบบริเวณพื้นผิว ซึ่งเป็นองค์ประกอบของลิกนิน เฮมิเซลลูโลส แวกซ์และไขมัน ส่วนเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพ (Treated) พบว่า ส่วนต่างๆที่เคลือบเส้นใย ถูกกำจัดออกไป เส้นใยมีพื้นผิวไม่เรียบ ซึ่งการปรับสภาพเส้นใยทำให้เส้นใยเผยองค์ประกอบของเซลลูโลสได้มากขึ้น ซึ่งเป็นส่วนที่มีสมบัติความแข็งแรงและความเหนียวมาก ทำให้เส้นใยมีความทนต่อแรงสูงขึ้น

### บทที่ 3

#### วิธีการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการรีไซเคิล โฟมพอลิสไตรีน โดยวิธีการละลายด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ เพื่อนำไปผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบที่ใช้เส้นใยธรรมชาติ คือ เส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วย เป็นวัสดุเสริมแรง โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบผลจากการปรับสภาพพื้นผิวเส้นใย และปริมาณของเส้นใยที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ นอกจากนี้ยังศึกษาความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ได้ โดยแบ่งการวิจัยออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

ส่วนแรกคือการตรวจวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของ โฟมที่นำมารีไซเคิล และการเลือกตัวทำละลายอินทรีย์และระยะเวลาการละลายที่เหมาะสมสำหรับการรีไซเคิลโฟมพอลิสไตรีน โดยทดสอบการละลายของโฟมพอลิสไตรีนในตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยวและตัวทำละลายอินทรีย์ผสม เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการละลายของโฟมในตัวทำละลายอินทรีย์ที่แตกต่างกันที่ระยะเวลาต่างๆ โดยพิจารณาจากลักษณะของสารละลายที่ได้ ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวทำละลายอินทรีย์แต่ละชนิดระหว่างกระบวนการละลายของโฟมที่ระยะเวลาต่างๆ เพื่อเลือกตัวทำละลายอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับรีไซเคิล โฟมพอลิสไตรีน ซึ่งจะให้สารละลายโฟมพอลิสไตรีนที่มีลักษณะใสเป็นเนื้อเดียว ปราศจากฟองอากาศและสามารถแข็งตัวหรือขึ้นรูปได้อย่างรวดเร็ว

ส่วนที่สองเป็นการเตรียมและการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติทั้ง 2 ชนิด คือเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วย โดยทำการปรับสภาพเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ระยะเวลาต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยก่อนและหลังการปรับสภาพ ซึ่งส่งผลต่อการยึดเกาะที่ติระหว่างเส้นใยธรรมชาติและโฟมพอลิสไตรีนในวัสดุเชิงประกอบ

ส่วนที่สามเป็นการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของ โฟมพอลิสไตรีนและเส้นใยธรรมชาติ (เส้นใยกล้วย และเส้นใยมะพร้าว) ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและที่ผ่านการปรับสภาพในปริมาณต่างๆ กัน เพื่อศึกษาผลของชนิดของเส้นใย การปรับสภาพเส้นใย และปริมาณเส้นใยที่ผสมในวัสดุเชิงประกอบ ที่มีต่อสมบัติเชิงกลต่างๆ ของวัสดุที่ได้ รวมทั้งศึกษาความสามารถในการย่อย



สลายทางชีวภาพของวัสดุเชิงประกอบ โดยการวัดปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุเชิงประกอบ หลังจากการฝังกลบภายใต้สภาวะที่กำหนด

### 3.1 วัสดุและสารเคมี

- 1) โฟมแผ่น ขนาดกว้าง 60 cm ยาว 120 cm และหนา 3.80 cm



รูปที่ 3.1 โฟมแผ่นตัวอย่าง

- 2) เส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วย เตรียมได้จากส่วนของเปลือกมะพร้าวและลำต้นกล้วย ตามลำดับ โดยตัดให้มีความยาวประมาณ 1-3 mm



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.2 วัสดุสำหรับเตรียมเส้นใย (ก) เปลือกมะพร้าว (ข) ลำต้นกล้วย

- 3) โทลูอิน (Toluene) เกรด AR จากบริษัท Fisher Chemical, UK
- 4) อะซิโตน (Acetone) เกรด AR จากบริษัท Burdick & Jackson, Korea
- 5) ทินเนอร์ (Thinner) จากบริษัท TOA Paint, Thailand
- 6) น้ำมันสน (Turpentine) จากบริษัท TOA Paint, Thailand
- 7) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) จากบริษัท Ajax Finechem,

Australia

- 8) เตตระไฮโดรฟูเรน (Tetrahydrofuran) จากบริษัท Merck KGaA, Germany

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) Magnetic stirrer
- 2) Petri dish
- 3) กระจกอินดิเคเตอร์
- 4) ตะแกรงร่อน
- 5) เครื่องปั่นเส้นใย
- 6) เครื่อง Universal testing machine ของบริษัท INSTRON รุ่น 3366
- 7) เครื่อง Pendulum impact tester ของบริษัท Resil Impactor รุ่น 21130
- 8) เครื่อง Universal testing machine ของบริษัท INSTRON รุ่น 3342
- 9) เครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ของบริษัท Bruker

Optics รุ่น PerkinElmer Spectrum

- 10) เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น Quanta 400
- 11) เครื่อง Thermo Gravimetric Analysis (TGA) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น TGA7
- 12) เครื่อง Proton Nuclear Magnetic Resonance ( $^1\text{H}$  NMR) รุ่น Bruker 400 MHz

จากบริษัท INNOVA

- 13) เครื่อง Gel Permeation Chromatography (GPC) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น LC-20A

### 3.3 วิธีการวิจัย (Research methodology)

#### 3.3.1 การตรวจเอกลักษณ์โพลีเมอริสไตรีน

โพลีเมอร์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย โดยเบื้องต้นก่อนที่จะนำไปละลายได้พิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีและกายภาพ เพื่อยืนยันการเป็นโพลีเมอริสไตรีน โดยพิสูจน์โครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยด้วยเครื่อง Proton Nuclear Magnetic Resonance ( $H^1$  NMR) และเครื่อง Gel Permeation Chromatography (GPC) ตามลำดับ ส่วนพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของโพลีเมอริสไตรีนศึกษาจากเครื่อง Thermo Gravimetric Analysis (TGA)

##### 3.3.1.1 การพิสูจน์โครงสร้างทางเคมีของโพลีเมอร์ด้วยเทคนิค NMR

การพิสูจน์โครงสร้างทางเคมีของโพลีเมอร์เพื่อยืนยันการเป็นโพลีเมอริสไตรีน พิสูจน์ด้วยเครื่อง Proton Nuclear Magnetic Resonance ( $H^1$  NMR) โดยทำการละลายตัวอย่างด้วยตัวทำละลาย  $d\text{-CDCl}_3$  และทดสอบที่ความถี่ 500 MHz เพื่อยืนยันตำแหน่งโปรตอนของมอนอเมอร์ในสายโพลีเมอริสไตรีน

##### 3.3.1.2 การตรวจสอบน้ำหนักโมเลกุลของโพลีเมอริสไตรีนด้วยเทคนิค GPC

ค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ( $M_w$ ) และการกระจายของน้ำหนักโมเลกุล (PDI) ของโพลีเมอริสไตรีน วิเคราะห์โดยใช้เทคนิค Gel Permeation Chromatography (GPC)

โดยนำสารละลายโพลีเมอริสไตรีนในตัวทำละลายโทลูอีนไปหาน้ำหนักโมเลกุลโดยใช้เทคนิค GPC (Shodex Standard SM-105) เชื่อมต่อกับคอลัมน์ Shodex GPC KF-806 M และ KF-803 L (300 mm Length x 8.0 mm ID) ใช้ RI-Detector และ Tetrahydrofuran (THF) เป็น mobile phase ที่อัตราการไหล 1.0 mL/min ที่อุณหภูมิ 40 °C กำหนดหาน้ำหนักโมเลกุลจากสารมาตรฐานโพลีเมอริสไตรีน ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 3,790 - 3,053,000  $g\cdot mol^{-1}$

##### 3.3.1.3 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของโพลีเมอริสไตรีนด้วยเทคนิค TGA

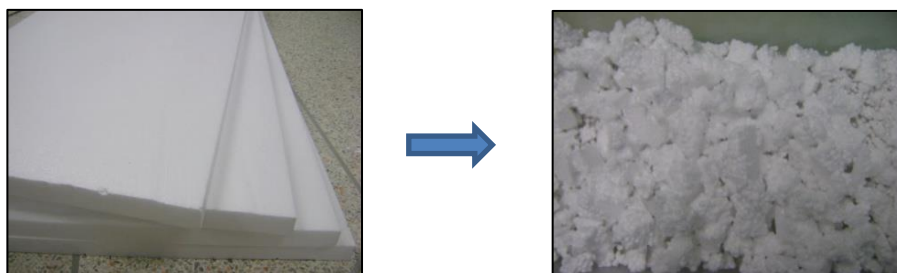
การศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุโพลีเมอริสไตรีนและโพลีเมอริสไตรีนรีไซเคิล โดยใช้เทคนิค Thermo Gravimetric Analysis (TGA) ทดสอบที่อุณหภูมิ 50 °C แล้วเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 600 °C ด้วยอัตราการเพิ่ม 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักกับอุณหภูมิ แล้วนำไปวิเคราะห์ความเสถียรทางความร้อนและอุณหภูมิที่วัสดุเกิดการสลายตัว

### 3.3.2 การละลายโพลีสไตรีนในตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยวและตัวทำละลายอินทรีย์ผสม

#### 3.3.2.1 การละลายโพลีสไตรีนด้วยตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยว

การศึกษาวิจัยชิ้นนี้ เป็นขั้นตอนการศึกษาพฤติกรรมของการละลายของโพลีสไตรีนในตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยว 4 ชนิด คือ โทลูอิน, ทินเนอร์, อะซิโตน และน้ำมันสน โดยเปรียบเทียบความสามารถในการละลาย ลักษณะเนื้อสารละลายโพลีสไตรีน และเปรียบเทียบความสามารถในการระเหยของตัวทำละลายทั้ง 4 ชนิด ในช่วงเวลาต่างๆ คือ 1, 2, 3 และ 4 ชม. ตามลำดับ โดยตรวจสอบผลจากการวัดปริมาณโพลีสไตรีนที่ละลายได้ภายใน 4 ชม. สังเกตและบันทึกลักษณะเนื้อสารละลายโพลีสไตรีน พร้อมทั้งชั่งน้ำหนักสารละลายและคำนวณปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของตัวทำละลายทุกๆ ชม. โดยมีขั้นตอนการทดลองตามลำดับ ดังนี้

- 1) นำแผ่นโพลีสไตรีน มาหักให้เป็นชิ้นเล็กๆ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การเตรียมโพลีสไตรีน

- 2) ตวงตัวทำละลายทั้ง 4 ชนิด คือ โทลูอิน, ทินเนอร์, อะซิโตน และน้ำมันสน ตามลำดับ พร้อมทั้งชั่งน้ำหนักโพลีสไตรีนเพื่อใช้ในการละลายตามปริมาณที่แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาณ โฟมพอลิสไตรีนและตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยว

| ปริมาณโฟมพอลิสไตรีน (g) | ปริมาณตัวทำละลาย (mL) |          |         |          |
|-------------------------|-----------------------|----------|---------|----------|
|                         | โทลูอีน               | ทินเนอร์ | อะซิโตน | น้ำมันสน |
| 30                      | 200                   | 200      | 200     | 200      |

3) นำเศษโฟมพอลิสไตรีนค่อยๆ ละลายในตัวทำละลายแต่ละชนิด ละลายโดยใช้เครื่อง Magnetic stirrer ที่อุณหภูมิห้อง ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การละลายโฟมพอลิสไตรีน โดยใช้เครื่อง Hot plate Magnetic stirrer

4) ขณะละลายโฟมพอลิสไตรีนในตัวทำละลายแต่ละชนิด ทำการสังเกต ถ่ายรูปและชั่งน้ำหนักสารละลายพอลิสไตรีนทุกๆ ชั่วโมง จนครบ 4 ชม.

5) คำนวณหาร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวทำละลายแต่ละชนิดในสารละลายพอลิสไตรีน ที่ระยะเวลาการละลาย 1, 2, 3 และ 4 ชม. ตามลำดับ โดยใช้สมการดังนี้

$$\text{ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก} = \frac{W_I - W_A}{W_I} \times 100$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } W_I &= \text{น้ำหนักตัวทำละลายเริ่มต้น} \\ W_A &= \text{น้ำหนักตัวทำละลายสุดท้าย} \end{aligned}$$

6) เมื่อละลายครบ 4 ชม. นำสารละลายพอลิสไตรีนที่ได้ วางทิ้งไว้ใน อุณหภูมิห้อง เพื่อให้ตัวทำละลายระเหยออกจนหมด และทำการชั่งน้ำหนักทุกวัน จนกว่า พอลิสไตรีนแข็งตัวหรือมีน้ำหนักคงที่ติดต่อกันเป็นเวลา 5 วัน

7) ทำการทดลองตั้งแต่ขั้นตอน 1 ถึงขั้นตอน 6 ซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อให้ได้ ข้อมูลที่แม่นยำ

### 3.3.2.2 การละลายโพลีพอลิสไตรีนด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ผสม

จากการละลายโพลีพอลิสไตรีนด้วยตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยว ตาม ขั้นตอนข้อ 3.3.2.1 พบว่าตัวทำละลายแต่ละชนิดให้ผลการทดลองแตกต่างกัน โดยทินเนอร์ให้ สารละลายพอลิสไตรีนที่มีลักษณะเนื้อเดียวและใสที่สุด และอะซิโตนสามารถย่อยโพลีและระเหย ได้เร็วที่สุด จึงนำตัวทำละลายทั้งสอง คือ ทินเนอร์และอะซิโตน ผสมเข้าด้วยกันเพื่อพัฒนาการ ละลายโพลีพอลิสไตรีนให้ได้สารละลายใส เนื้อเดียว ไม่มีฟองอากาศ และตัวทำละลายสามารถ ระเหยเร็ว ช่วยให้พอลิสไตรีนแข็งตัวได้เร็วขึ้น ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการละลายโพลี พอลิสไตรีนในตัวทำละลายผสมระหว่างทินเนอร์ต่ออะซิโตน ในอัตราส่วนต่างๆ ดังนี้ 100 : 100, 125 : 75 และ 150 : 50 mL ตามลำดับ โดยขั้นตอนการละลายโพลีพอลิสไตรีนและการศึกษาข้อมูลมี ลักษณะเช่นเดียวกับการละลายโพลีพอลิสไตรีนด้วยตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยว (ข้อ 3.3.2.1) โดยใช้ อัตราส่วนการละลายของโพลีพอลิสไตรีนและตัวทำละลายผสม ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปริมาณโพลีพอลิสไตรีนและตัวทำละลายอินทรีย์ผสม

| ปริมาณโพลีพอลิสไตรีน (g) | อัตราส่วนตัวทำละลายผสม (mL) |
|--------------------------|-----------------------------|
|                          | ทินเนอร์ : อะซิโตน          |
| 30                       | 100 : 100                   |
|                          | 125 : 75                    |
|                          | 150 : 50                    |

### 3.3.3 การเตรียมเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วย

เส้นใยธรรมชาติที่ใช้ในการงานวิจัยนี้ คือ เส้นใยจากเปลือกมะพร้าวและเส้นใยจากลำต้นกล้วยเพื่อเป็นวัสดุเสริมแรงพอลิเมอร์ โดยศึกษาเปรียบเทียบโครงสร้างทางเคมีและลักษณะพื้นผิวของเส้นใยใน 2 สภาพ คือ เส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Untreated) และเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพ (Treated) ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยตรวจสอบผลจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเคมีด้วยเครื่อง FTIR และตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หรือ SEM

3.3.3.1 การปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติ มีขั้นตอนตามลำดับดังนี้

- 1) เตรียมเส้นใยจากเปลือกมะพร้าว ก่อนที่จะนำไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่า และนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชม.
- 2) ส่วนเส้นใยกล้วย ได้จากการนำลำต้นกล้วยมาตัดให้มีความยาวประมาณ 20 cm แล้วแยกเป็นชิ้นกลีบ จากนั้นล้างให้สะอาดแล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชม.



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.5 เส้นใยธรรมชาติก่อนการปรับสภาพ (ก) เส้นใยมะพร้าว และ (ข) เส้นใยกล้วย

3) นำเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วย ที่ได้จากขั้นที่ 1 และ 2 มาปั่นด้วยเครื่องปั่นแห้ง จนได้เส้นใยที่มีสายสั้น แล้วนำมาตัดด้วยกรรไกรอีกครั้ง จากนั้นร่อนด้วยตะแกรงร่อนแปรง จนได้เส้นใยที่มีความยาว 1–3 mm โดยประมาณ

4) จากนั้นเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 5% (w/v) เพื่อใช้ในการปรับสภาพพื้นผิวเส้นใย (Sumaila, *et al.*, 2013; Setyanto, *et al.*, 2013)

5) ทำการปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วยที่ได้จาก ข้อ 3 โดยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 6, 12 และ 24 ชม.

6) จากนั้นล้างเส้นใยด้วยน้ำกลั่น จนกระทั่งน้ำล้างเส้นใยมีค่า pH เป็นกลาง แล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชม.



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.6 เส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพ (ก) เส้นใยมะพร้าว และ (ข) เส้นใยกล้วย

### 3.3.3.2 การพิสูจน์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติด้วยเทคนิค

#### FTIR

เส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วย ทั้งที่ผ่านการปรับสภาพ (Treated) และไม่ผ่านการปรับสภาพ (Untreated) ได้นำไปพิสูจน์เอกลักษณ์โครงสร้างเคมีของเส้นใย ด้วยเครื่องมือ Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) เพื่อตรวจสอบและเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของเส้นใยและเพื่อยืนยันผลของการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเส้นใย โดยการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR ได้ทำการบันทึกการดูดกลืนสัญญาณในช่วงเลขคลื่น 600 – 4,000  $\text{cm}^{-1}$

### 3.3.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของเส้นใยธรรมชาติ

#### ด้วย SEM

นำเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วยทั้งที่ผ่านการปรับสภาพ (Treated) และไม่ผ่านการปรับสภาพ (Untreated) วิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน [Scanning Electron Microscope (SEM) Quanta 400] ที่กำลังขยาย 100X และ 1000X เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสภาพพื้นผิวและขนาดของเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพและไม่ผ่านการปรับสภาพ เทคนิคนี้อาศัยการโฟกัสของลำแสงอิเล็กตรอนที่ส่องกราดไปบนผิวของเส้นใยจนได้ภาพในลักษณะ 3 มิติ



### 3.3.4 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิสไตรีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ

ตัวทำละลายและกระบวนการละลายที่เหมาะสมสำหรับการรีไซเคิล โฟมพอลิสไตรีน ได้จากขั้นตอนการละลายโฟมพอลิสไตรีนด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ (ข้อ 3.3.2) ตัวทำละลายที่ได้คือตัวทำละลายผสมระหว่างทินเนอร์ต่ออะซิโตนที่สัดส่วน 150 : 50 mL ส่วนการเตรียมเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วยที่เหมาะสม (ข้อ 3.3.3) คือการปรับสภาพเส้นใยด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นระยะเวลา 6 ชม. จากนั้นนำสารละลายพอลิสไตรีนในตัวทำละลายผสม และเส้นใยธรรมชาติเข้าสู่กระบวนการผสมเพื่อเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบ โดยเติมเส้นใยใน ปริมาณต่างๆ คือ 2, 5 และ 10 % โดยน้ำหนักของวัสดุ ทั้งเส้นใยที่ปรับสภาพและไม่ปรับสภาพ เพื่อ เปรียบเทียบปริมาณของเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลแต่ละด้านของวัสดุเชิงประกอบ และ ความสามารถในการกระจายตัวและการยึดเกาะของเส้นใยที่ปรับสภาพและไม่ปรับสภาพกับ พอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยตรวจสอบผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ คือ ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงดัดโค้ง และความต้านทานแรงกระแทก

#### 3.3.4.1 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิสไตรีนรีไซเคิลกับ เส้นใยธรรมชาติ

การเตรียมวัสดุเชิงประกอบ ให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ เพื่อสะดวก ต่อการทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ โดยขึ้นรูปพอลิเมอร์ในภาชนะ Petri dish วัสดุเชิงประกอบที่ได้ จะมีลักษณะทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลางยาว 15 cm และหนา 2.7 mm โดยประมาณ ได้จากการ เตรียมสารละลายพอลิสไตรีนในตัวทำละลายผสมระหว่างทินเนอร์ต่ออะซิโตนผสมกับเส้นใย ธรรมชาติ ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมตามลำดับดังนี้

- 1) หักแผ่นโฟมพอลิสไตรีนเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก ปริมาณ 37.5 g
- 2) ชั่งเส้นใยธรรมชาติ (เส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วย ทั้งที่ ปรับสภาพและไม่ปรับสภาพ) ตามตารางที่ 3.3
- 3) ตวงทินเนอร์ 187.5 mL และอะซิโตน 62.5 mL (อัตราส่วน 3 : 1) เทผสมเข้าด้วยกันในบีกเกอร์ขนาด 500 mL จนได้ปริมาตรรวมของตัวทำละลาย 250 mL แล้ว ชั่งน้ำหนักตัวทำละลายเริ่มต้นก่อนการละลายโฟมพอลิสไตรีน
- 4) นำบีกเกอร์ที่มีตัวทำละลายจากข้อ 3 วางบนเครื่อง Magnetic stirrer เพื่อละลายและผสมพอลิสไตรีนกับเส้นใยเข้าด้วยกัน

5) ทำการละลายโพลีฟอสไฟไตรอินสลับกับการเติมเส้นใยธรรมชาติทีละน้อยจนหมดภายใน 1 ชม. เพื่อให้เส้นใยกระจายได้ดีในเนื้อสารละลายโพลี



รูปที่ 3.7 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบพอลิฟอสไฟไตรอินรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ

6) เมื่อละลายโพลีฟอสไฟไตรอินและเติมเส้นใยธรรมชาติจนหมดจากนั้นทำการคนต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 4 ชม. จะได้สารละลายผสมพอลิฟอสไฟไตรอินกับเส้นใยธรรมชาติ ที่ใสและปราศจากฟองอากาศ

7) นำสารละลายผสมพอลิฟอสไฟไตรอินกับเส้นใยธรรมชาติจากข้อ 6 ค่อยๆเทลงในภาชนะ Petri dish ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางยาว 15 cm จนเต็มภาชนะพอดี แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 สัปดาห์ จนวัสดุแข็งตัว แล้วจึงนำวัสดุออกจากภาชนะตั้งไว้ที่อุณหภูมิจนวัสดุแข็งตัว



รูปที่ 3.8 สารละลายผสมพอลิस्टาไทรินกับเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วย

### 3.3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิस्टาไทรินรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ

วัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิस्टาไทรินรีไซเคิลและเส้นใยธรรมชาติ ทั้งเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Untreated) และผ่านปรับสภาพ (Treated) ในสัดส่วนของเส้นใยปริมาณต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.3 จะถูกนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล เพื่อเปรียบเทียบและตรวจสอบสมบัติเชิงกลด้านต่างๆ ของแต่ละวัสดุเชิงประกอบและวัสดุพอลิस्टาไทริน ซึ่งการทดสอบสมบัติเชิงกลจะประกอบด้วยการทดสอบความต้านแรงดึง ความต้านทานแรงคดโค้ง และความต้านทานแรงกระแทก โดยทดสอบตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนและน้ำหนักของโพลีเอสเตอร์กับเส้นใยธรรมชาติในวัสดุประกอบ

| อัตราส่วน<br>โพลีเอสเตอร์ต่อเส้นใย<br>(% w/w) | วัสดุเชิงประกอบ (g)  |             |                    |             |
|---|----------------------|-------------|--------------------|-------------|
|   | PS + Untreated Fiber |             | PS + Treated Fiber |             |
|   | PS + UC              | PS + UB     | PS + TC            | PS + TB     |
| 98 : 2  | 37.5 : 0.77          | 37.5 : 0.77 | 37.5 : 0.77        | 37.5 : 0.77 |
| 95 : 5  | 37.5 : 1.97          | 37.5 : 1.97 | 37.5 : 1.97        | 37.5 : 1.97 |
| 90 : 10                                       | 37.5 : 4.17          | 37.5 : 4.17 | 37.5 : 4.17        | 37.5 : 4.17 |

\*หมายเหตุ UC = Untreated Cocconut TC = Treated Coconut  
UB = Untreated Banana TB = Treated Banana

### 3.3.5.1 การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile strength)

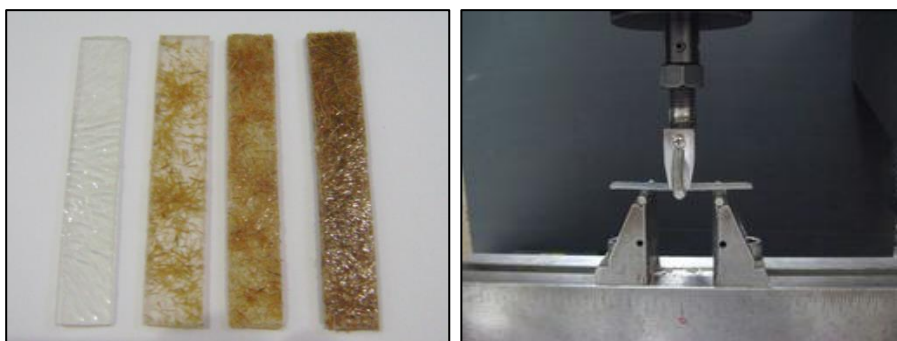
การทดสอบความต้านทานแรงดึงทำการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบ Universal testing machine โดยทำการวัด ณ อุณหภูมิห้อง และเตรียมวัสดุเชิงประกอบเป็นทรงคัมเบล มีความยาวพิกัด (Gauge length:  $L_0$ ) 60 mm ดังรูปที่ 3.9 โดยกำหนดอัตราเร็วในการดึง  $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  และใช้ตัววัดแรง (Load cell) ขนาด 1000 N



รูปที่ 3.9 ขนาดและรูปทรงของวัสดุเพื่อทดสอบความต้านทานแรงดึง

### 3.3.5.2 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural strength)

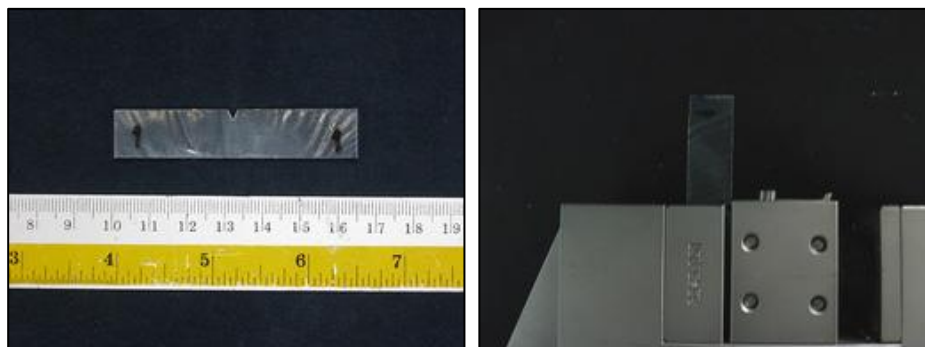
การทดสอบแรงดัดโค้งเป็นการวิเคราะห์ความสามารถในการดัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบ โดยการทดสอบจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D790 ทดสอบโดยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ชิ้นงานที่เตรียมมีความยาว 80 mm กว้าง 12.7 mm และหนา 2.3 mm ดังรูปที่ 3.10 ระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้ง 2 ด้านเท่ากับ 42 mm และความเร็วในการทดสอบ  $1.13 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  เส้นผ่านศูนย์กลางของเพลากด 5 mm ทดสอบที่อุณหภูมิ  $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 51 %



รูปที่ 3.10 ขนาดของวัสดุและการทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง

### 3.3.5.3 การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength)

การทดสอบความทนแรงกระแทกเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 ทำการทดสอบด้วยเครื่องทนแรงกระแทก โดยใช้ตุ้มน้ำหนักเหวี่ยงกระแทก (Pendulum impact) แบบ Izod (V-Notched) ขนาดของตุ้มน้ำหนักคือ 1 J ความเร็วหัวทดสอบ  $3.46 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ทดสอบที่อุณหภูมิ  $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 53 % ชิ้นงานที่เตรียมมีความยาว 65 mm กว้าง 12.7 mm และหนา 2.5 mm และทำรอยบาก (Notch) ด้านข้างที่จุดกึ่งกลางประมาณ 2 mm ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ขนาดของวัสดุและการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก

### 3.3.6 ทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable)

การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของวัสดุพลาสติกทดสอบโดยการฝังกลบวัสดุลงในดินตามธรรมชาติ เป็นระยะเวลา 50 วัน แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่สูญเสียน้ำหนักและสังเกตลักษณะทางกายภาพของวัสดุพลาสติกที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากฝังในดิน ซึ่งการทดลองมีขั้นตอนตามลำดับดังนี้

- 1) เตรียมวัสดุพลาสติกให้มีขนาดเท่ากัน คือ 1.5 x 3 cm โดยมีวัสดุดังนี้
  - 1.1) โฟมพอลิสไตรีน (PS Foam)
  - 1.2) วัสดุพอลิสไตรีนรีไซเคิลที่ไม่เติมเส้นใย (PS)
  - 1.3) วัสดุเชิงประกอบพอลิสไตรีนกับเส้นใยมะพร้าว (PS + 10% TC)
  - 1.4) วัสดุเชิงประกอบพอลิสไตรีนกับเส้นใยกล้วย (PS + 10% TB)



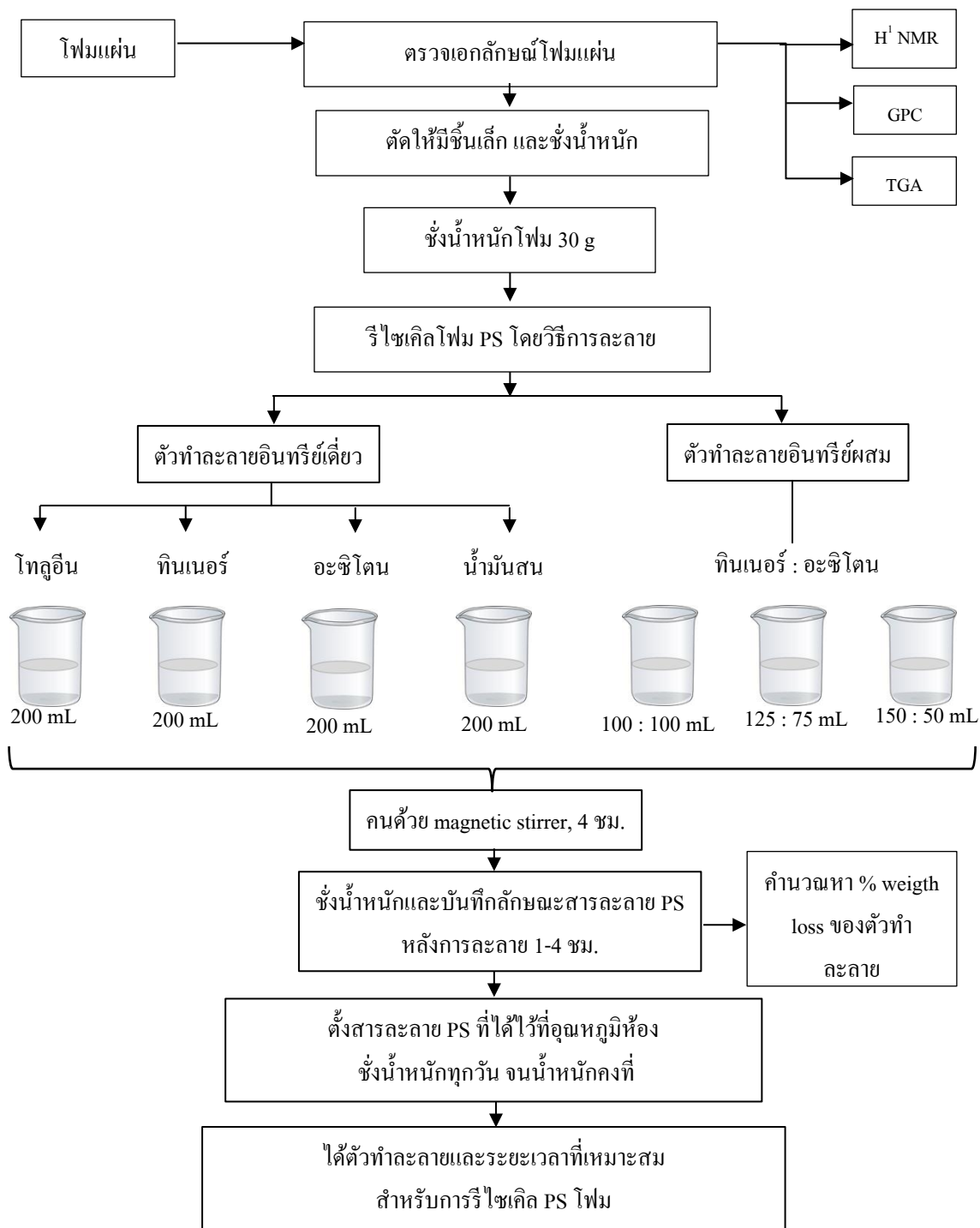
รูปที่ 3.12 ขนาดของวัสดุเพื่อทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ

- 2) นำวัสดุที่เตรียมได้ชั่งน้ำหนักก่อนนำไปฝังกลบในดินธรรมชาติ
- 3) นำวัสดุทั้งหมดฝังในดินธรรมชาติลึกประมาณ 15 cm จากผิวดิน เป็นระยะเวลา 50 วัน
- 4) เมื่อครบกำหนดนำวัสดุที่ฝังดินทำความสะอาดแล้วทิ้งให้แห้งในโถดูดความชื้นเป็นระยะเวลา 2 วัน แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาน้ำหนักที่สูญเสียไปของวัสดุแต่ละชนิด
- 5) สังเกตและเปรียบเทียบน้ำหนักที่หายไปของวัสดุแต่ละชนิด



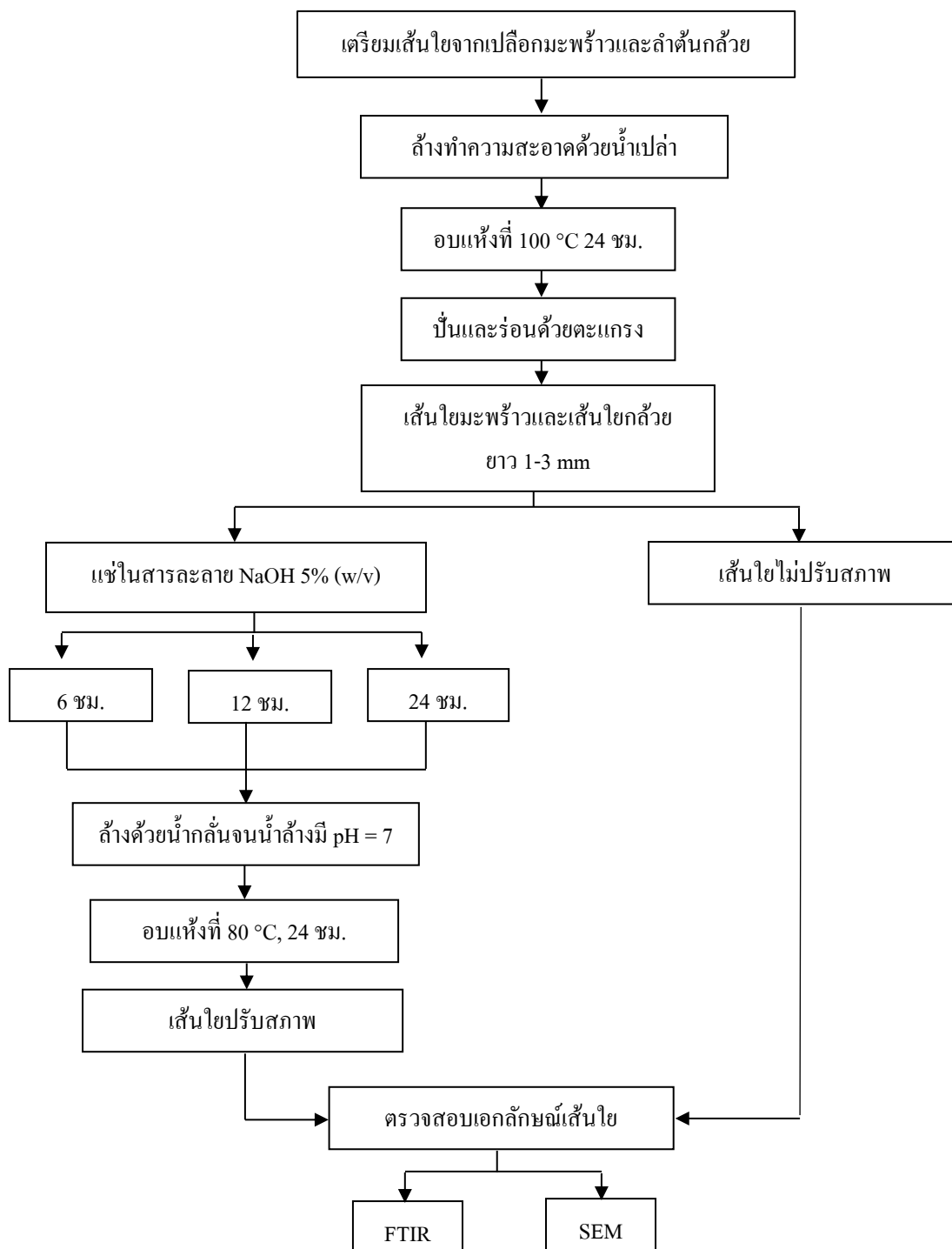
รูปที่ 3.13 การฝังกลบวัสดุพอลิโอสไตรีนต่างๆในดินธรรมชาติ

3.3.7 แผนภูมิการดำเนินงานวิจัย

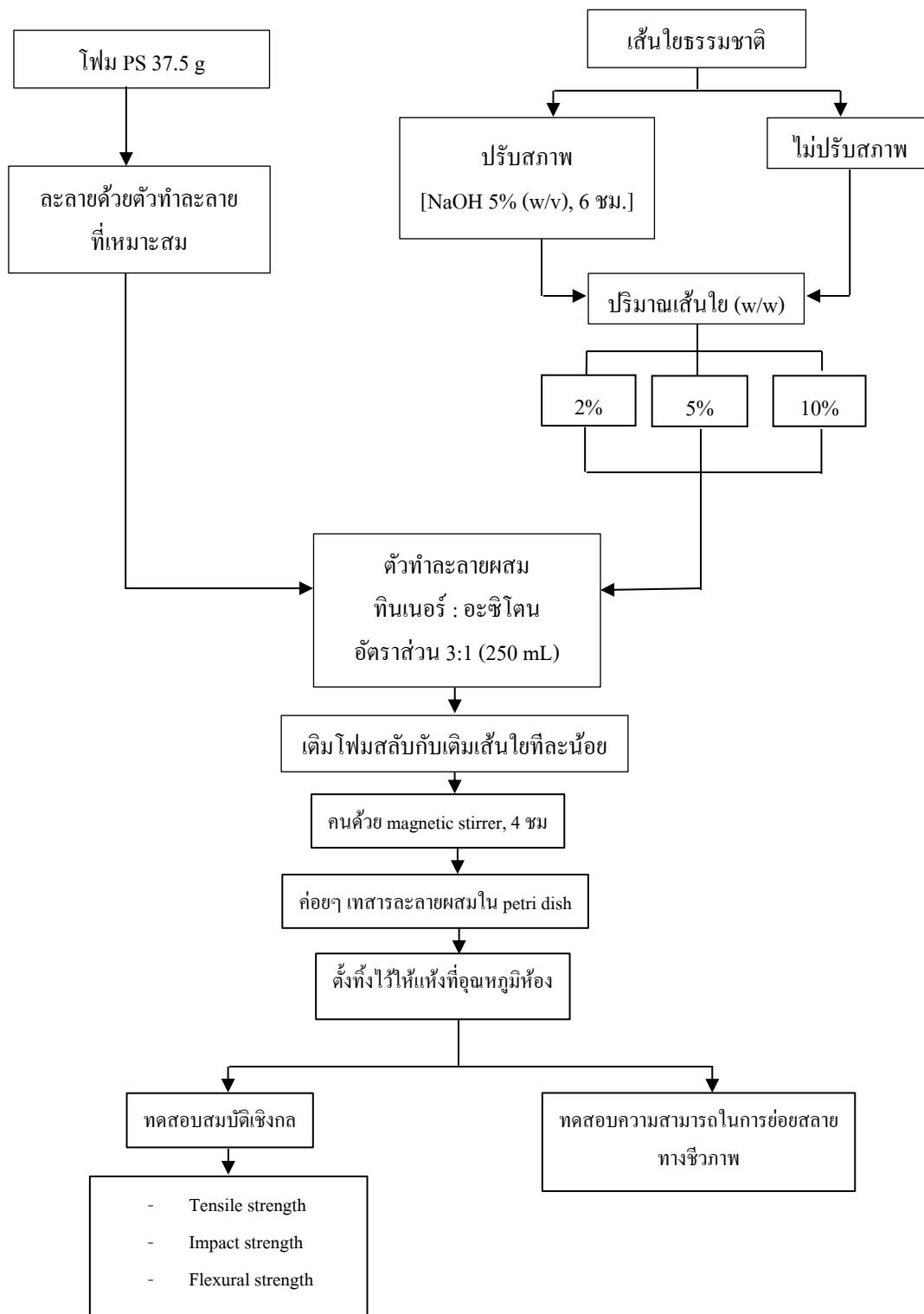


รูปที่ 3.14 แผนผังขั้นตอนการรีไซเคิลโพลีเมอร์พอลิสไตรีนด้วยวิธีการละลาย





รูปที่ 3.15 แผนผังขั้นตอนการเตรียมเส้นใยธรรมชาติ



รูปที่ 3.16 แผนผังขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ โพลีพอลิสไตรีนและเส้นใยธรรมชาติ

## บทที่ 4

### ผลและบทวิจารณ์ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการละลายโพลีเอทิลีนใน ตัวทำละลายอินทรีย์ต่างๆ แล้วขึ้นรูปเป็นวัสดุเชิงประกอบระหว่างโพลีเอทิลีนกับเส้นใยธรรมชาติ คือ เส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วย ในอัตราส่วน 2, 5 และ 10 % โดยน้ำหนักของวัสดุเชิงประกอบ ศึกษาสมบัติเชิงกล และความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ได้ โดย แบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

ส่วนแรกศึกษาผลของการตรวจเอกลักษณ์ของโพลีเอทิลีนที่ใช้ในงานวิจัยและ ศึกษาผลของการละลายโพลีเอทิลีนในตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยวและและตัวทำละลายอินทรีย์ ผสม ในช่วงเวลาตั้งแต่ 1-4 ชม.

ส่วนที่สองศึกษาผลของการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 5% (w/v) ที่เวลา 6, 12 และ 24 ชม. ที่มีต่อโครงสร้างทางเคมีและสัณฐานวิทยาของ เส้นใยธรรมชาติ คือ เส้นใยมะพร้าว และเส้นใยกล้วย

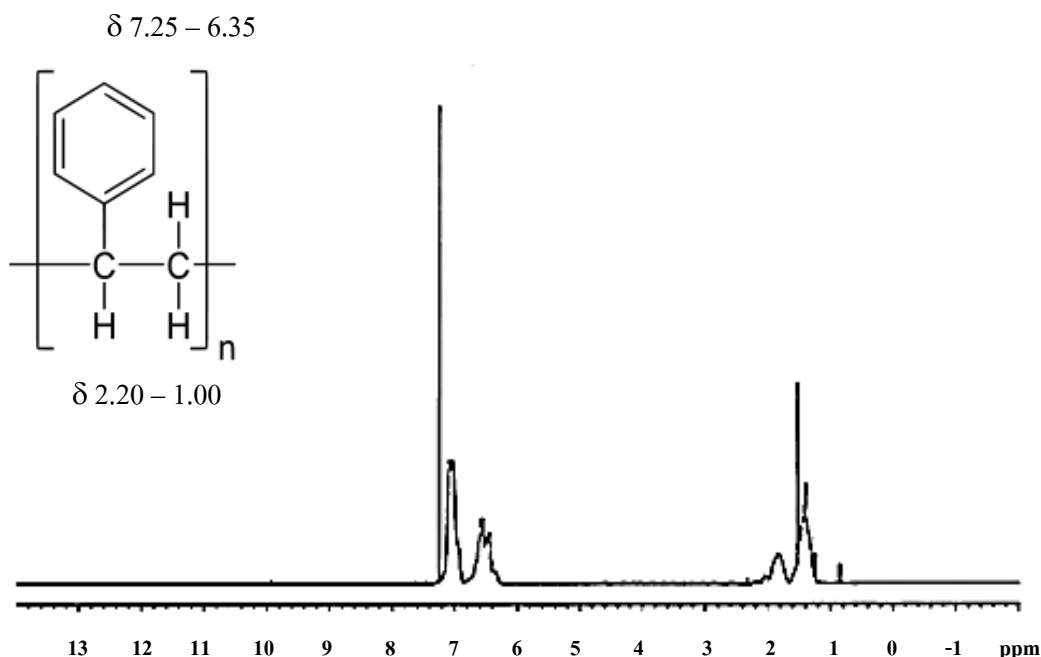
ส่วนที่สามศึกษาเปรียบเทียบผลของการปรับสภาพเส้นใยและปริมาณเส้นใย ธรรมชาติที่มีต่อสมบัติเชิงกล และความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของวัสดุเชิงประกอบ โพลีเอทิลีนกับเส้นใยธรรมชาติ โดยสัดส่วนของเส้นใยธรรมชาติที่ใช้ในการขึ้นรูปเป็นวัสดุเชิง ประกอบ คือ 2, 5 และ 10 % โดยน้ำหนักของวัสดุเชิงประกอบ

#### 4.1 การตรวจเอกลักษณ์โพลีเมอร์โพลีสไตรีน

โครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของโพลีเมอร์ตัวอย่างสามารถศึกษาได้ด้วยเทคนิค  $^1\text{H NMR}$  และ GPC ตามลำดับ ซึ่งผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการอธิบายพฤติกรรมและการละลายและสมบัติต่างๆของวัสดุจากโพลีเมอร์

##### 4.1.1 โครงสร้างทางเคมีของโพลีเมอร์ตัวอย่าง

การวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบของโพลีเมอร์ตัวอย่างด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  พบว่าในสารละลายโพลีเมอร์ตัวอย่าง ( $\text{CDCl}_3$ )  $\delta$ : 2.20 – 1.00 (3H, 3 x CH ใน PS) และ 7.25 – 6.35 (5H, aromatic H ของสไตรีน) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งตรงกับโครงสร้างของสไตรีนมอนอเมอร์ในโพลีสไตรีน (Bevington and Huckerby, 2006; Kamide, *et al.*, 1988) จึงแสดงให้เห็นว่าโพลีเมอร์ที่นำมาใช้ศึกษาเป็นโพลีเมอร์โพลีสไตรีน โดยไม่พบตำแหน่งฟังก์ชันของโพลีเมอร์อื่นเจือปน



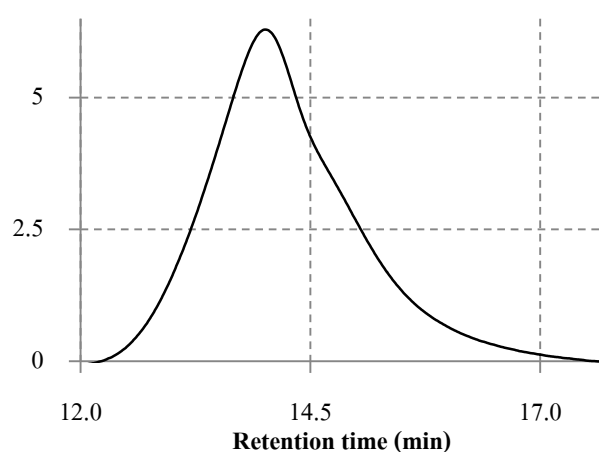
รูปที่ 4.1  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตรัมของโพลีเมอร์โพลีสไตรีน

#### 4.1.2 น้ำหนักโมเลกุลของโพลีเมอริสไตรีน

จากการตรวจสอบน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ( $\overline{M}_n$ ) และการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (Polydispersity index; PDI) ของโพลีเมอริสไตรีน ด้วยเครื่อง Gel Permeation Chromatography (GPC) แสดงผลดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 สังกเกตได้ว่าโพลีเมอริสไตรีนมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยค่อนข้างสูงและมีค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลหรือค่า PDI เท่ากับ 2.17 แสดงว่า โพลีเมอริสไตรีนที่ใช้ในการศึกษามีขนาดความยาวโซ่ของแต่ละโมเลกุลไม่สม่ำเสมอ และมีการกระจายตัวของขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วงกว้าง คือมีสายโซ่โพลีเมอร์สั้นยาวกระจายไม่เท่ากัน (Garcia, *et al.*, 2009) เป็นผลให้โพลีเมอริสไตรีนสามารถละลายได้ง่ายในตัวทำละลายที่เหมาะสม นอกจากนี้ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของโพลีเมอร์สามารถใช้ในการประเมินสมบัติเชิงกลต่างๆ ของวัสดุโพลีเมอร์ ซึ่งโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 10,000 จะมีสมบัติที่แข็งแรงทนทาน (Odiان, G. (2004). Principle of Polymerization, 4th edn. Wiley Interscience, New York.)

ตารางที่ 4.1 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของโพลีเมอริสไตรีน

| ตัวอย่าง        | $\overline{M}_n$ (g.mol <sup>-1</sup> ) | PDI  |
|-----------------|---|------|
| โพลีเมอริสไตรีน | 120,491                                 | 2.17 |



รูปที่ 4.2 GPC โครมาโมแกรมของโพลีเมอริสไตรีน ( $\overline{M}_n = 120,491$  g.mol<sup>-1</sup> และ PDI = 2.17)

## 4.2 การละลายโพลีสไตรีนในตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยวและตัวทำละลายอินทรีย์ผสม

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการรีไซเคิลโพลีสไตรีนด้วยกระบวนการละลาย โดยแบ่งการศึกษาการละลายโพลีสไตรีนเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกคือการศึกษาการละลายโพลีสไตรีนในตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยว เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการละลายโพลีสไตรีนในตัวทำละลายต่างๆ และส่วนที่สองคือ การละลายโพลีสไตรีนในตัวทำละลายอินทรีย์ผสม โดยเลือกตัวทำละลายจากขั้นตอนที่หนึ่ง เพื่อหาชนิดของตัวทำละลายและสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการรีไซเคิล โพลีสไตรีน ซึ่งทำให้ได้สารละลายพอลิเมอร์ใสเนื้อเดียว ไม่มีฟองอากาศ สามารถระเหยแห้งได้ง่าย และรวดเร็ว เพื่อสะดวกแก่การนำไปขึ้นรูปผลิตเป็นวัสดุผสม ทั้งนี้เพื่อพัฒนากระบวนการรีไซเคิลโพลีสไตรีนที่สะดวก รวดเร็ว ใช้พลังงานน้อย และต้นทุนต่ำ









### 4.2.1 การละลายโพลีสไตรีนด้วยตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยว

การละลายโพลีสไตรีนด้วยตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยว เป็นการทดสอบความสามารถในการละลายของโพลีตัวอย่างในตัวทำละลายอินทรีย์แต่ละชนิด ได้แก่ โทลูอีน, ทินเนอร์, อะซิโตน และน้ำมันสน โดยการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะการละลายของโพลีสไตรีน ความสามารถในการระเหยแห้งของตัวทำละลาย และระยะเวลาการแข็งตัวของโพลีสไตรีนรีไซเคิล









#### 1) ลักษณะการละลายของโพลีสไตรีนในตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยว

การละลายโพลีสไตรีนด้วยตัวทำละลายอินทรีย์จำนวน 4 ชนิด คือ โทลูอีน, ทินเนอร์, อะซิโตน และน้ำมันสน ใช้โพลีสไตรีน 30 g ละลายในตัวทำละลาย 200 mL เปรียบเทียบผลการละลายหลังจากคนต่อเนื่องที่ระยะเวลา 1, 2, 3 และ 4 ชม. ให้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ลักษณะการละลายของโพลีโพรพิลีนในตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยวต่างๆ หลังจากคนต่อเนื่องเป็นเวลา 1-4 ชม.

| เวลาที่ใช้คน<br>(ชม.) | ลักษณะการละลายของโพลีโพรพิลีนในตัวทำละลายอินทรีย์ต่างๆ  |  |   |  |
|-----------------------|---|--|---|--|
|                       | โทลูอีน   | ทินเนอร์   | อะซิโตน   | น้ำมันสน   |
| 1                     |  <p>PS foam ละลายหมด 30 g<br/>สารละลายเหลว เนื้อเดียว<br/>มีฟองอากาศเล็กน้อย</p> |  <p>PS foam ละลายหมด 30 g<br/>สารละลายเหนียวข้น เนื้อเดียว<br/>มีฟองอากาศกระจายโดยทั่ว</p> |  <p>PS foam ละลายหมด 30 g<br/>ของผสมแยก 2 เฟส<br/>เนื้อโพลีเมอร์ มีฟองอากาศมาก</p> |  <p>PS foam ละลายได้ 8.84 g<br/>ของผสมแยก 2 เฟส<br/>โพลีเมอร์จับตัวเป็นก้อน</p>   |
| 2                     |  <p>สารละลายเนื้อเดียว<br/>ใสขึ้น ไม่มีฟองอากาศ</p>                             |  <p>สารละลายเนื้อเดียว<br/>ใสขึ้น ไม่มีฟองอากาศ</p>                                       |  <p>ของผสมแยก 2 เฟส<br/>เนื้อโพลีเมอร์ มีฟองอากาศมาก</p>                          |  <p>PS foam ละลายได้ 13.92 g<br/>ของผสมแยก 2 เฟส<br/>โพลีเมอร์จับตัวเป็นก้อน</p> |

ตารางที่ 4.3 ลักษณะการละลายของโฟมพอลิสไตรีนในตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยวต่างๆ หลังจากคนต่อเนื่องเป็นเวลา 1-4 ชม. (ต่อ)

| เวลาที่ใช้คน<br>(ชม.) | ลักษณะการละลายของโฟมพอลิสไตรีนในตัวทำละลายอินทรีย์ต่างๆ  |   |  |  |
|-----------------------|--|---|--|--|
|                       | โทลูอิน  | ทินเนอร์  | อะซิโตน  | น้ำมันสน   |
| 3                     |  <p>สารละลายเนื้อเดียว<br/>ใสขึ้น ไม่มีฟองอากาศ</p> |  <p>สารละลายเนื้อเดียว<br/>ใสขึ้น ไม่มีฟองอากาศ</p>       |  <p>ของผสมแยก 2 เฟส<br/>เนื้อ โฟม มีฟองอากาศ</p>  |  <p>PS foam ละลายได้ 19.62 g<br/>ของผสมแยก 2 เฟส<br/>โฟมจับตัวเป็นก้อน</p>  |
| 4                     |  <p>สารละลายเนื้อเดียว<br/>ใส ไม่มีฟองอากาศ</p>    |  <p>สารละลายเนื้อเดียว<br/>ใสมากที่สุด ไม่มีฟองอากาศ</p> |  <p>ของผสมแยก 2 เฟส<br/>เนื้อ โฟม มีฟองอากาศ</p> |  <p>PS foam ละลายได้ 22.79 g<br/>ของผสมแยก 2 เฟส<br/>โฟมจับตัวเป็นก้อน</p> |



หลังการผสมกันของโพลีเมอร์พอลิไธรีนกับตัวทำละลายเป็นเวลา 1 ชม. พบว่า โทลูอิน, ทินเนอร์ และอะซิโตน สามารถละลายโพลีเมอร์พอลิไธรีนได้หมด 30 g ในขณะที่โพลีเมอร์พอลิไธรีนละลายได้เพียง 10.38 g ในน้ำมันสน โดยที่โทลูอินและทินเนอร์สามารถละลายโพลีเมอร์พอลิไธรีนได้เป็นสารเนื้อเดียว แต่ยังคงมีฟองอากาศในสารละลายพอลิไธรีนกับทินเนอร์ และหลังการละลาย 4 ชม. สารละลายพอลิไธรีนในโทลูอินและทินเนอร์ปรากฏเป็นสารละลายใสเนื้อเดียว ไม่มีฟองอากาศ โดยที่ทินเนอร์ให้สารละลายพอลิไธรีนที่ใสที่สุด ส่วนในอะซิโตนและน้ำมันสน โพลีเมอร์ละลายได้บางส่วน ของผสมที่ได้แยกเป็น 2 เฟส คือ ตัวทำละลายกับพอลิไธรีนเหนียว และพบว่าภายใน 4 ชม. น้ำมันสนสามารถละลายโพลีเมอร์พอลิไธรีนได้เพียง 22.79 g

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า โพลีเมอร์พอลิไธรีนสามารถละลายได้ดีและผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับโทลูอินและทินเนอร์ เนื่องจากโทลูอินและทินเนอร์มีสภาพขั้วและโครงสร้างทางเคมีที่เป็นวงเบนซีนหรืออะโรมาติกคล้ายกับพอลิไธรีนจึงสามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี (Garcia, *et al.*, 2009; Shin and Chase, 2005) ในขณะที่อะซิโตนไม่มีโครงสร้างของวงเบนซีนที่คล้ายกับพอลิไธรีน จึงทำให้พอลิไธรีนละลายได้ในลักษณะที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับอะซิโตน (Hwang, *et al.*, 1999) แต่อะซิโตนสามารถกำจัดอากาศในเนื้อโพลีเมอร์ออกไป ทำให้โพลีเมอร์พอลิไธรีนที่อยู่ในสถานะของแข็งมีปริมาตรลดลงอย่างรวดเร็ว จนเป็นของเหลวหนืด (Mwashaa, *et al.*, 2013) ทั้งนี้ความสามารถในการละลายสามารถพิจารณาได้จากค่า Polarity Index ของตัวทำละลายแต่ละชนิด สารที่มีค่า Polarity Index ใกล้เคียงกันสามารถละลายพอลิไธรีนได้ในลักษณะเดียวกัน

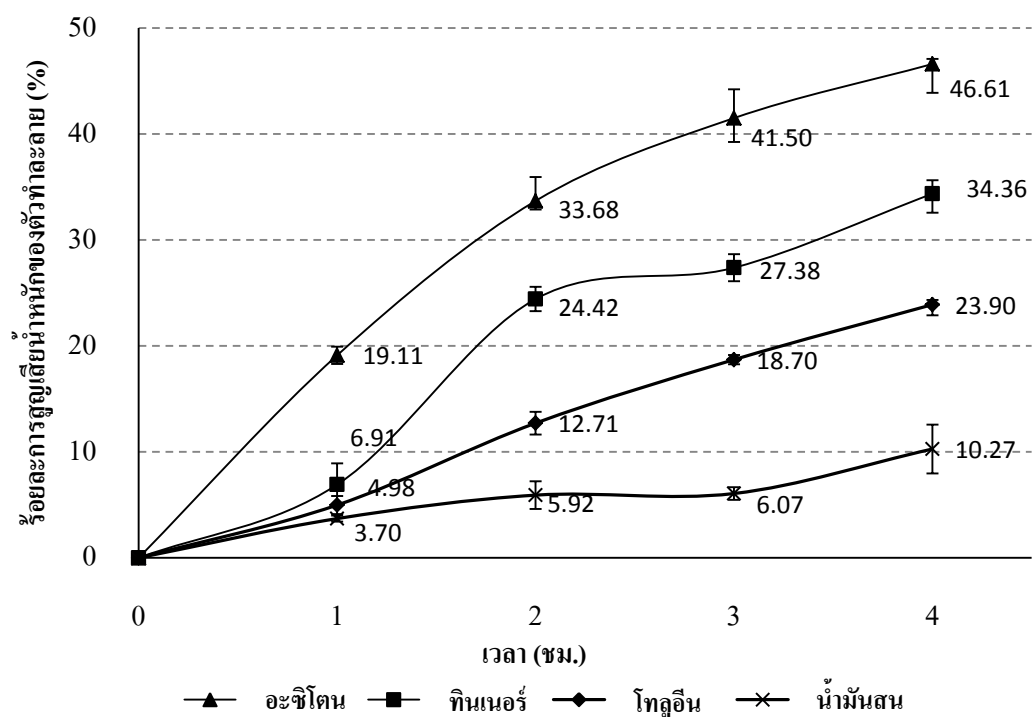
## 2) ปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยวที่เวลาต่างๆ

โพลีเมอร์ 30 g ถูกนำมาละลายในตัวทำละลายอินทรีย์แต่ละชนิดปริมาตร 200 mL ชนิดละ 3 ตัวอย่าง น้ำหนักของตัวทำละลายที่สูญเสียไปในระหว่างการละลายโพลีเมอร์พอลิไธรีนในเวลา 1, 2, 3 และ 4 ชม. ถูกบันทึก เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการระเหยของตัวทำละลายแต่ละชนิดในของผสมที่เวลาต่างๆ ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง ทั้ง 3 ครั้งในแต่ละชนิดของตัวทำละลายแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยวขณะละลายโพลีเอทิลีนไทรินที่เวลาต่างๆ

| เวลา<br>(ชม.) | ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวทำละลาย |              |              |              |
|---------------|--------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
|               | โทลูอิน                              | ทินเนอร์     | อะซิโตน      | น้ำมันสน     |
| 1             | 19.11 ± 0.82*                        | 6.91 ± 2.00  | 4.98 ± 0.85  | 3.70 ± 0.29  |
| 2             | 33.68 ± 0.29                         | 24.42 ± 1.14 | 12.71 ± 1.07 | 5.92 ± 1.30  |
| 3             | 41.50 ± 2.72                         | 27.38 ± 1.28 | 18.70 ± 0.44 | 6.07 ± 0.59  |
| 4             | 46.61 ± 0.48                         | 34.36 ± 1.79 | 23.90 ± 1.00 | 10.27 ± 2.30 |

\*ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง



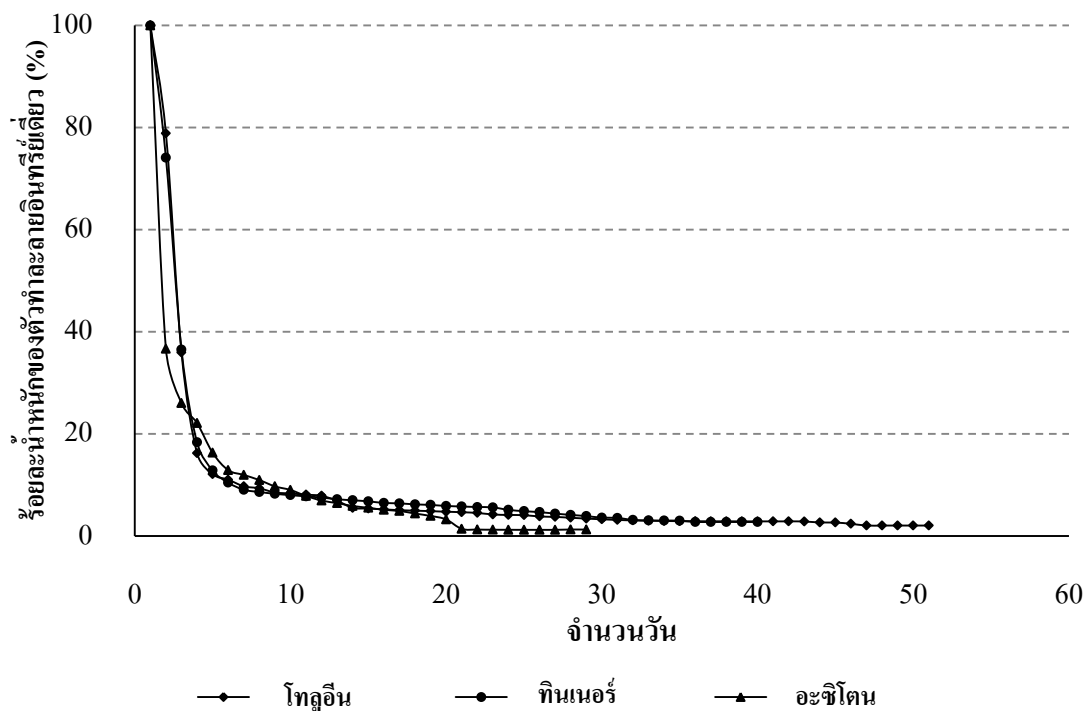
รูปที่ 4.3 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวทำละลายแต่ละชนิดขณะละลายโพลีเอทิลีนไทรินที่ระยะเวลาต่างๆ

จากการชั่งน้ำหนักของผสมระหว่างโพลีเมอร์และตัวทำละลายอินทรีย์ทุกๆ 1 ชม. และคำนวณหาร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวทำละลาย เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการระเหยของตัวทำละลายแต่ละชนิด รูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าอัตราการสูญเสียน้ำหนักซึ่งแสดงถึงอัตราการระเหยของตัวทำละลายอินทรีย์ในระหว่างการผสม มีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ตัวทำละลายทุกชนิดระเหยได้มากที่สุดในช่วง 1 ชม. แรกของการผสม และจะมีการสูญเสียน้ำหนักหรือระเหยได้ลดลงเรื่อยๆ ในชั่วโมงถัดไปตลอดช่วงเวลาการผสมสาร 4 ชม. เนื่องจากเมื่อปริมาณของโพลีเมอร์เติมลงไปผสมกับตัวทำละลายเพิ่มมากขึ้น ความเข้มข้นของของผสมจะเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ตัวทำละลายระเหยออกจากของผสมได้น้อยลง

อะซิโตนมีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดในระหว่างการผสม 4 ชม. คือ 46.61% ตามด้วยทินเนอร์ (34.36%) โทลูอีน (23.90%) และน้ำมันสน (10.27%) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอะซิโตนที่ผสมอยู่กับโพลีเมอร์สามารถระเหยได้ดีที่สุด ตามด้วย ทินเนอร์ โทลูอีน และน้ำมันสน ตามลำดับ เนื่องจากความสามารถในการระเหยของของเหลวขึ้นอยู่กับจุดเดือดหรือความดันไอของตัวทำละลายแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิและความดันคงที่ ตัวทำละลายที่มีจุดเดือดสูงกว่า จะมีความดันไอลดต่ำกว่า และระเหยกลายเป็นไอน้ำได้น้อยกว่า (Brady *et al.*, 2000) ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลจุดเดือดและความดันไอของตัวทำละลายอินทรีย์ที่นำมาละลายโพลีเมอร์ น้ำมันสนมีจุดเดือดสูงสุดประมาณ 150 – 180 °C และมีความดันไอลดต่ำสุดเท่ากับ 5 hectopascal (hPa) (ที่ 20 °C) จึงระเหยตัวได้น้อยที่สุด ส่วนอะซิโตนมีจุดเดือดต่ำที่สุดเท่ากับ 56 °C และมีความดันไอสูงสุดเท่ากับ 240 hPa (ที่ 20 °C) อะซิโตนจึงระเหยได้มากที่สุด (Mwashaa, *et al.*, 2013)

### 3) ระยะเวลาการแข็งตัวของสารละลายโพลีเมอร์ไตรีน

น้ำหนักของสารละลายหลังการผสมโพลีเมอร์ไตรีน 30 g ในตัวทำละลายแต่ละชนิดคือ โทลูอีน, ทินเนอร์ และอะซิโตน ปริมาตร 200 mL เป็นเวลา 4 ชม. แล้วตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องทุกวัน จนพอลิเมอร์แข็งตัวและมีน้ำหนักคงที่ เพื่อเปรียบเทียบอัตราการระเหยแห้งของสารละลายพอลิเมอร์ ในตัวทำละลายแต่ละชนิด



รูปที่ 4.4 ร้อยละของน้ำหนักของตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยว ที่ระยะเวลาต่างๆ ในระหว่างการระเหยแห้ง

รูปที่ 4.4 แสดงร้อยละของน้ำหนักของตัวทำละลายอินทรีย์ที่ระยะเวลาต่างๆ ในระหว่างการระเหยแห้ง พบว่าตัวทำละลายทั้ง 3 ชนิดระเหยแยกออกจากสารละลายพอลิเมอร์ได้อย่างรวดเร็วในช่วง 5 วันแรก หลังตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง โดยที่อะซิโตนซึ่งมีจุดเดือดต่ำที่สุด ระเหยได้เร็วกว่า โทลูอีนและทินเนอร์ซึ่งระเหยได้ในอัตราเร็วใกล้เคียงกัน หลังจาก 5 วันแรก อัตราการระเหยของตัวทำละลายทั้ง 3 ชนิด ลดลงมากอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอาจเนื่องมาจากการที่บริเวณพื้นผิวด้านบนของตัวอย่างในแม่พิมพ์ซึ่งสัมผัสกับอากาศภายนอกมากที่สุด เริ่มแห้ง และแข็งตัวเร็วกว่าบริเวณภายในของเนื้อสารละลาย ทำให้ตัวทำละลายแต่ละชนิดที่ถูกกักไว้ภายในเนื้อพอลิเมอร์ระเหยออกได้ช้าลง ส่งผลให้ปริมาณตัวทำละลายที่ระเหยออกไปได้มีค่าลดลง เมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 2 สัปดาห์ ตัวทำละลายมีน้ำหนักลดลงอย่างช้าๆ และเริ่มคงที่ โดยอะซิโตนมีน้ำหนักคงที่เร็วที่สุด คือ ภายใน 20 วัน ซึ่งสอดคล้องกับจุดเดือดของอะซิโตนซึ่งมีค่าต่ำที่สุดในขณะที่ทินเนอร์และโทลูอีนมีน้ำหนักคงที่ที่ระยะเวลามากกว่า 30 วัน เนื่องจากมีจุดเดือดสูงกว่าอะซิโตน จากกราฟพบว่าร้อยละของน้ำหนักของตัวทำละลายเมื่อพอลิเมอร์รีไซเคิลแห้งสนิท

แล้ว มีค่าคงที่ที่ประมาณ 1–2 % แสดงให้เห็นว่ามีตัวทำละลายบางส่วนระเหยออกไปไม่หมด ซึ่งถูกกักอยู่ในเนื้อพอลิไตรีนรีไซเคิลได้

**ตารางที่ 4.4** ระยะเวลาการระเหยแห้งของพอลิไตรีนรีไซเคิล และปริมาณตัวทำละลายที่เหลือในพอลิไตรีนรีไซเคิล

| สารละลาย      | ระยะเวลาการระเหยแห้งของพอลิไตรีนรีไซเคิล |                        | น้ำหนักตัวทำละลายที่เหลือในพอลิไตรีนรีไซเคิล (g) |
|---------------|--|------------------------|--|
|               | จำนวนวันเฉลี่ย (วัน)                     | น้ำหนักคงที่เฉลี่ย (g) |  |
| PS + โทลูอิน  | 46 ± 4.72*                               | 34.17 ± 1.24           | 4.14 ± 1.24                                      |
| PS + ทินเนอร์ | 41 ± 1.15                                | 33.13 ± 0.78           | 3.14 ± 0.78                                      |
| PS + อะซิโตน  | 28 ± 1.00                                | 30.99 ± 0.78           | 0.99 ± 0.78                                      |

\*ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

จากตารางที่ 4.4 พบว่า สารละลายพอลิไตรีนในตัวทำละลายต่างๆ คือ โทลูอิน, ทินเนอร์ และอะซิโตน มีน้ำหนักคงที่คือระเหยแห้งภายในเวลา 46, 41 และ 28 วัน ตามลำดับ และมีค่าน้ำหนักคงที่เฉลี่ยตามลำดับดังนี้ 34.17, 33.13 และ 30.99 g น้ำหนักคงที่เฉลี่ยของพอลิเมอร์รีไซเคิลทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าสูงกว่าน้ำหนัก 30 g (น้ำหนักโพลีที่นำมาละลาย) แสดงว่าตัวทำละลายบางส่วนไม่สามารถระเหยออกไปได้หมด ซึ่งตัวทำละลายที่มีความดันไอต่ำกว่า (จุดเดือดสูงกว่า) จะระเหยออกไปจากสารละลายพอลิเมอร์ได้น้อยกว่า จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีทางสถิติ (F-test) (Moore and McCabe, 2006) พบว่าน้ำหนักคงที่เฉลี่ยของพอลิไตรีนรีไซเคิลด้วยโทลูอินและทินเนอร์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่น้ำหนักคงที่เฉลี่ยของพอลิไตรีนรีไซเคิลด้วยโทลูอินหรือทินเนอร์ มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ .05 กับพอลิไตรีนรีไซเคิลในอะซิโตน

รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะของพอลิไตรีนรีไซเคิลที่เตรียมได้หลังจากทิ้งไว้ให้แห้ง พบว่า พอลิไตรีนรีไซเคิลจากการละลายในอะซิโตน มีสีขาวขุ่น มีรูพรุน และฟองอากาศภายใน ซึ่งเกิดจากการระเหยออกไปได้ง่ายและรวดเร็วกว่าของอะซิโตนเมื่อเปรียบเทียบกับโทลูอินและทินเนอร์ พอลิเมอร์รีไซเคิลที่ได้จากการละลายโพลีในโทลูอินและทินเนอร์ มีลักษณะใส ไม่มี

ฟองอากาศ ผิวเรียบ แต่เมื่อละลายในโทลูอีน พอลิเมอร์จะมีสีขุ่นกว่าสีของพอลิเมอร์ที่ละลายด้วยทินเนอร์เล็กน้อย



(ก) โทลูอีน



(ข) ทินเนอร์



(ค) อะซิโตน

รูปที่ 4.5 พอลิสไตรีนรีไซเคิลที่เตรียมได้ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ต่างๆ หลังจากทิ้งไว้ให้แห้ง (ก) โทลูอีน (ข) ทินเนอร์ และ (ค) อะซิโตน






#### 4.2.2 การละลายโฟมพอลิสไตรีนด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ผสม

จากผลการทดลองละลายโฟมพอลิสไตรีนในตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยวพบว่าทินเนอร์สามารถละลายโฟมพอลิสไตรีนจนได้สารละลายเนื้อเดียวที่มีความใสมากกว่าตัวทำละลายชนิดอื่น และไม่มีฟองอากาศภายใน 4 ชม. ส่วนตัวทำละลายอะซิโตนสามารถระเหยได้เร็วที่สุด ทำให้พอลิเมอร์รีไซเคิลแข็งตัวเร็วที่สุด เนื่องจากตัวทำละลายทั้งสองมีความเป็นพิษน้อยกว่าโทลูอีน การผสมทินเนอร์และอะซิโตนในอัตราส่วนต่างๆ จึงเป็นอีกระบบตัวทำละลายที่สามารถนำมาใช้ในการรีไซเคิลโฟมพอลิสไตรีน เพื่อให้ได้สารละลายเนื้อเดียว ไม่มีฟองอากาศ และตัวทำละลายสามารถระเหยได้เร็วกว่าการใช้ทินเนอร์เพียงอย่างเดียว เพื่อลดระยะเวลาการแข็งตัวและการขึ้นรูปพอลิเมอร์

##### 1) ลักษณะสารละลายพอลิสไตรีนในตัวทำละลายอินทรีย์ผสม

ผลการละลายโฟมพอลิสไตรีน 30 g ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ผสมระหว่างทินเนอร์กับอะซิโตน ในอัตราส่วน 100 : 100, 125 : 75 และ 150 : 50 mL โดยการคนอย่างต่อเนื่อง 4 ชม. แสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ลักษณะสารละลายโพลีโพลิสไตรีนในตัวทำละลายอินทรีย์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ

| อัตราส่วนระหว่างทินเนอร์ : อะซิโตน (mL)   |   |   |  |   |
|---|---|---|--|---|
| อะซิโตน (200 mL)  | 100 : 100 mL  | 125 : 75 mL   | 150 : 50 mL  | ทินเนอร์ (200 mL)   |
|  |  |  |  |  |
| สารผสม 2 เฟส  | สารผสม 2 เฟส  | สารละลายเนื้อเดียว<br>สีขาวขุ่น<br>มีฟองอากาศ<br>เล็กน้อย                         | สารละลายเนื้อเดียว<br>สีขาวขุ่นเล็กน้อย<br>ไม่มีฟองอากาศ                           | สารละลายเนื้อเดียว<br>ใส<br>ไม่มีฟองอากาศ   |

จากตารางที่ 4.5 พบว่า โพลีโพลิสไตรีนในตัวทำละลายอินทรีย์ผสมระหว่างทินเนอร์กับอะซิโตนในอัตราส่วน 100 : 100 mL ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับตัวทำละลายซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับการละลายโพลีโพลิสไตรีนในอะซิโตน ส่วนสารละลายโพลีโพลิสไตรีนในตัวทำละลายอินทรีย์ผสมระหว่างทินเนอร์กับอะซิโตนในอัตราส่วน 125 : 75 และ 150 : 50 mL มีลักษณะเป็นสารเนื้อเดียว โดยที่ตัวละลายผสมระหว่างทินเนอร์กับอะซิโตนอัตราส่วน 150 : 50 mL ให้สารละลายเนื้อเดียวก่อนข้างใสและไม่มีฟองอากาศ แสดงให้เห็นว่าเมื่อตัวทำละลายผสมที่มีสัดส่วนของทินเนอร์มากขึ้น จะให้สารละลายที่มีความใสเพิ่มขึ้นและมีความเป็นเนื้อเดียวมากขึ้น

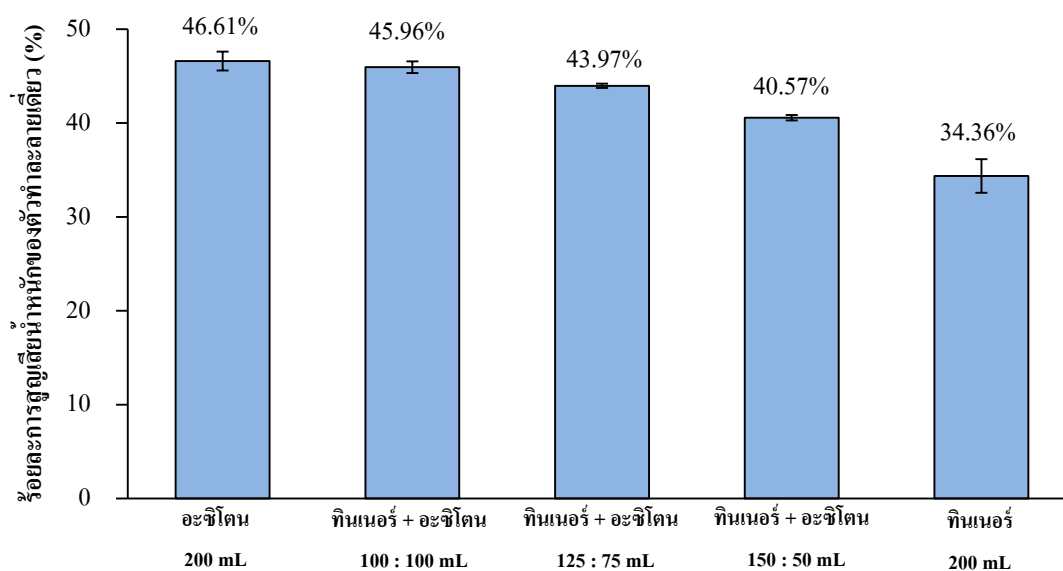
2) ปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของตัวทำละลายอินทรีย์ผสม

ผลการวัดปริมาณน้ำหนักของตัวทำละลายที่ระเหยไปในระหว่างการคนผสมพอลิเมอร์ 30 g กับตัวทำละลายผสม 200 mL เป็นเวลา 4 ชม. ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.6 ถูกนำมาใช้เปรียบเทียบความสามารถในการระเหยของตัวทำละลายผสมระหว่างทินเนอร์กับอะซิโตนในอัตราส่วนต่างๆ เมื่อละลายโพลีโพลิสไตรีน

ตารางที่ 4.6 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยวและตัวทำละลายผสม หลังการละลาย 4 ชม.

| ตัวทำละลาย                         | ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวทำละลาย (%) |
|------------------------------------|--|
| อะซิโตน 200 mL                     | 46.61 ± 1.00*                            |
| ทินเนอร์ + อะซิโตน<br>100 : 100 mL | 45.96 ± 0.62                             |
| ทินเนอร์ + อะซิโตน<br>125 : 75 mL  | 43.97 ± 0.24                             |
| ทินเนอร์ + อะซิโตน<br>150 : 50 mL  | 40.57 ± 0.28                             |
| ทินเนอร์ 200 mL                    | 34.36 ± 1.79                             |

\*ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง



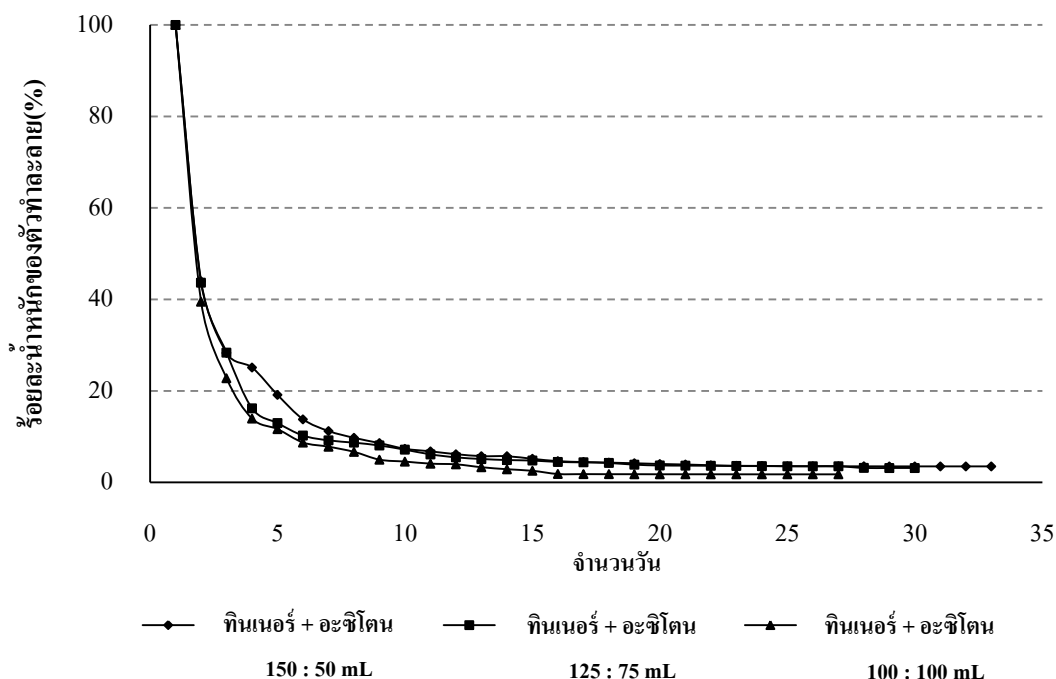
รูปที่ 4.6 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยว และตัวทำละลายผสม หลังการละลาย 4 ชม.



จากรูปที่ 4.6 พบว่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวทำละลายผสมระหว่างทินเนอร์กับอะซิโตนที่อัตราส่วน 100 : 100, 125 : 75 และ 150 : 50 mL มีค่าเท่ากับ 45.95, 43.97 และ 40.57 % ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณอะซิโตนลดลง ทำให้ความสามารถในการระเหยของตัวทำละลายผสมลดลงตามลำดับ เนื่องจากที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน อะซิโตนระเหยได้เร็วกว่าทินเนอร์

3) ระยะเวลาการแข็งตัวของสารละลายโพลีเมอริสไตรีนในตัวทำละลายอินทรีย์ผสม

น้ำหนักของสารละลายหลังการผสมโพลีเมอริสไตรีน 30 g ในตัวทำละลายผสมระหว่างทินเนอร์และอะซิโตนในอัตราส่วน 100 : 100, 125 : 75 และ 150 : 50 mL เป็นเวลา 4 ชม. แล้วตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องถูกบันทึกทุกวัน จนพอลิเมอร์แข็งตัวและมีน้ำหนักคงที่ เพื่อเปรียบเทียบอัตราการระเหยแห้งของสารละลายพอลิเมอร์ ในตัวทำละลายผสมในแต่ละอัตราส่วน แสดงผลดังรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.7 ร้อยละของน้ำหนักของตัวทำละลายอินทรีย์ผสม ที่ระยะเวลาต่างๆ ในระหว่างการระเหยแห้ง

จากรูปที่ 4.7 พบว่าในทุกอัตราส่วนของตัวทำละลายผสมระหว่างทินเนอร์กับอะซิโตน น้ำหนักของตัวทำละลายลดลงประมาณ 70% ภายใน 2 วันหลังตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นตัวทำละลายจะค่อยๆ ระเหยออกอย่างช้าๆ ในลักษณะเดียวกับการระเหยของตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยวในพอลิเมอร์รีไซเคิลซึ่งอธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2.1 (3) ภายใน 15 วันของการระเหยแห้ง ตัวทำละลายมีน้ำหนักลดลงเหลือเพียง 5% และน้ำหนักคงที่ที่ประมาณ 2-5 % โดยตัวทำละลายผสมระหว่างทินเนอร์และอะซิโตนที่อัตราส่วน 100 : 100 mL ระเหยแห้งได้ภายในระยะเวลาสั้นที่สุด ตามด้วย 125 : 75 และ 150 : 50 mL ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณอะซิโตนในสารละลายผสมที่ลดลง ตัวทำละลายผสมที่มีปริมาณอะซิโตนมากกว่าจะสามารถระเหยได้เร็วกว่า และเมื่อปริมาณอะซิโตนลดลงความสามารถในการระเหยของตัวทำละลายผสมจึงลดลงไปด้วย

**ตารางที่ 4.7** ระยะเวลาการระเหยแห้งของพอลิสไตรีนรีไซเคิล และปริมาณตัวทำละลายผสมที่เหลือในพอลิสไตรีนรีไซเคิล

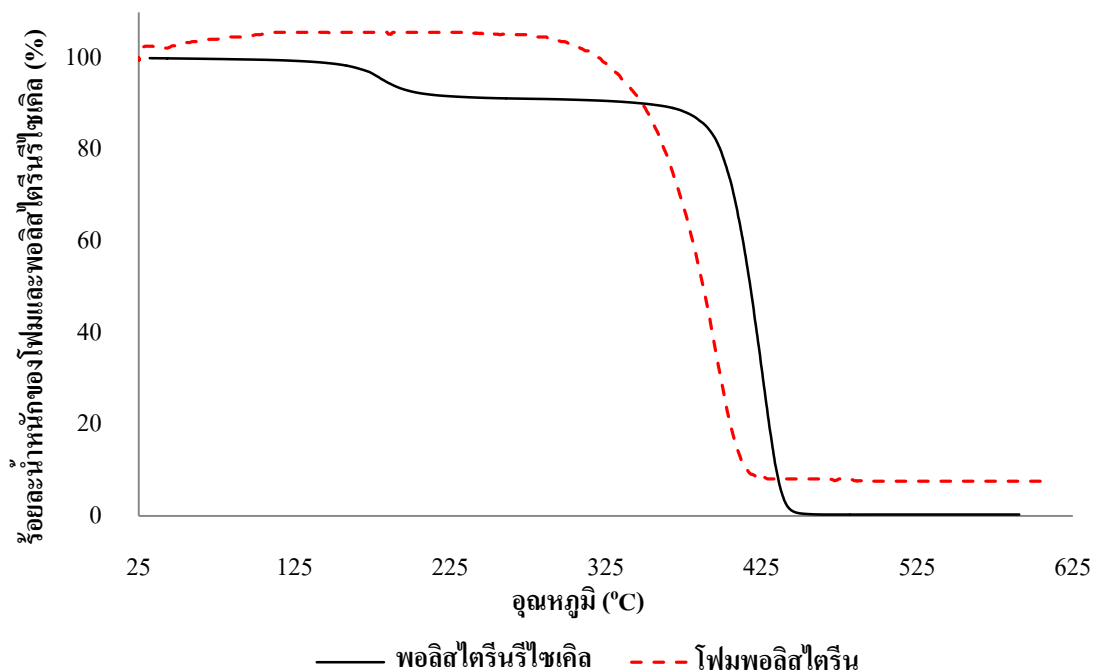
| ตัวทำละลายผสม                      | ระยะเวลาการระเหยแห้งของพอลิสไตรีนรีไซเคิล |                        | น้ำหนักตัวทำละลายที่เหลือในพอลิสไตรีนรีไซเคิล (g) |
|------------------------------------|---|------------------------|---|
|                                    | จำนวนวันเฉลี่ย (วัน)                      | น้ำหนักคงที่เฉลี่ย (g) |   |
| ทินเนอร์ + อะซิโตน<br>100 : 100 mL | 28 ± 1.15*                                | 31.38 ± 0.85           | 1.38 ± 0.85                                       |
| ทินเนอร์ + อะซิโตน<br>125 : 75 mL  | 31 ± 1.00                                 | 32.86 ± 0.66           | 2.86 ± 0.66                                       |
| ทินเนอร์ + อะซิโตน<br>150 : 50 mL  | 33 ± 0.00                                 | 33.40 ± 0.52           | 3.40 ± 0.52                                       |

\*ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

จากตารางที่ 4.7 พบว่า สารละลายพอลิสไตรีนในตัวทำละลายผสมระหว่างทินเนอร์และอะซิโตนที่อัตราส่วน 100 : 100 mL มีน้ำหนักคงที่เฉลี่ย 31.38 g ภายในเวลา 28 วัน และเมื่อปริมาณของอะซิโตนลดลงเป็น 75 และ 50 mL ตามลำดับ พอลิเมอร์รีไซเคิลที่เตรียม

ได้มีน้ำหนักที่เฉลี่ยเพิ่มขึ้นเท่ากับ 32.86 และ 33.40 g ตามลำดับ และใช้เวลาในการระเหยแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 31 และ 33 วัน ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธี F-test พบว่าระยะเวลาการระเหยแห้งของพอลิเมอร์รีไซเคิลและน้ำหนักที่เฉลี่ยของพอลิสไตรีนที่รีไซเคิลด้วยตัวละลายผสมระหว่างทินเนอร์กับอะซิโตนที่อัตราส่วน 125:75 mL กับพอลิสไตรีนรีไซเคิลในตัวละลายผสมที่อัตราส่วน 150 :50 mL ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ข้อมูลทั้งสองของพอลิสไตรีนที่รีไซเคิลด้วยตัวละลายผสมที่อัตราส่วน 150 : 50 mL มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ .05 กับพอลิสไตรีนรีไซเคิลตัวละลายผสมที่อัตราส่วน 100 : 100 mL นอกจากนี้พบว่าน้ำหนักของพอลิสไตรีนรีไซเคิลมีค่ามากกว่าน้ำหนักของโพลี (30 g) ที่นำมาละลายในตัวทำละลาย แสดงว่าตัวทำละลายไม่สามารถระเหยออกได้หมด โดยน้ำหนักของตัวทำละลายที่เหลือในพอลิสไตรีนรีไซเคิลจะลดลง เมื่อปริมาณของอะซิโตนในตัวทำละลายผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากอะซิโตนระเหยได้ง่ายกว่าทินเนอร์ ปริมาณทินเนอร์ที่ถูกกักไว้ในเนื้อพอลิเมอร์ ไม่สามารถระเหยออกมาได้จึงมากกว่าปริมาณของอะซิโตน

เพื่อเป็นการยืนยันว่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมาของพอลิเมอร์หลังจากการละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ คือน้ำหนักของตัวทำละลายที่ไม่สามารถระเหยออกไปได้หมด โพลีพอลิสไตรีนก่อนและหลังการรีไซเคิลด้วยการละลายในตัวทำละลายผสมทินเนอร์กับอะซิโตนอัตราส่วน 150:50 mL จึงถูกนำมาทดสอบการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA แสดงผลดังรูปที่ 4.8 พบว่าวัสดุพอลิสไตรีนรีไซเคิลด้วยวิธีการละลายมีการสลายตัว 2 ครั้ง คือ 1) ที่ช่วงอุณหภูมิ 160 – 180 °C พอลิเมอร์มีน้ำหนักลดลงประมาณ 5% ซึ่งแสดงถึงการสลายของตัวทำละลายที่ผสมอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ และ 2) ที่ช่วงอุณหภูมิ 370 – 450 °C แสดงถึงการสลายตัวของพอลิสไตรีน (Bourbigot, *et al.*, 2004) ในขณะที่โพลีพอลิสไตรีนก่อนการรีไซเคิลสลายตัวครั้งเดียวที่อุณหภูมิประมาณ 310 – 415 °C แสดงให้เห็นว่าพอลิสไตรีนรีไซเคิลที่แข็งตัวแล้วยังคงมีตัวทำละลายค้างอยู่ในเนื้อวัสดุ และยังพบว่าวัสดุพอลิสไตรีนรีไซเคิล สามารถทนความร้อนได้สูงขึ้นเมื่อเทียบโพลีพอลิสไตรีนก่อนนำมารีไซเคิล



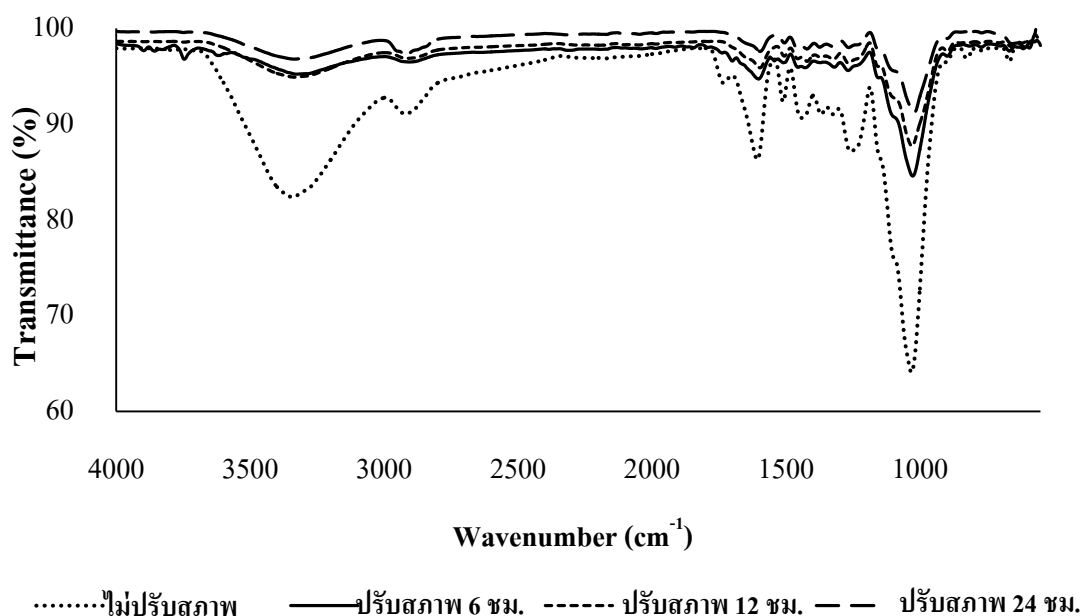
รูปที่ 4.8 กราฟ TGA ของโฟมโพลีเอทิลีนและวัสดุโพลีเอทิลีนรีไซเคิล

จากการละลายโฟมโพลีเอทิลีนในตัวทำละลายอินทรีย์ผสมระหว่างทินเนอร์กับอะซิโตนในอัตราส่วนต่างๆ แสดงให้เห็นว่าสารละลายโพลีเอทิลีนในตัวทำละลายผสมที่มีอัตราส่วนของทินเนอร์มากกว่า มีความเป็นเนื้อเดียวมากขึ้น ฟองอากาศลดลงและมีความใสเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันตัวทำละลายผสมมีปริมาณอะซิโตนลดลง ความสามารถในการระเหยของตัวทำละลายในสารละลายลดลงไปด้วย เพราะฉะนั้นตัวละลายผสมระหว่างทินเนอร์กับอะซิโตนที่อัตราส่วน 150 : 50 mL จึงเป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับการรีไซเคิลโฟมโพลีเอทิลีนด้วยวิธีการละลาย ในเวลา 4 ชม. ที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากตัวทำละลายอินทรีย์ผสมดังกล่าว สามารถละลายโฟมโพลีเอทิลีนจนได้สารเนื้อเดียวใส ไม่มีฟองอากาศ และระเหยตัวได้เร็ว เพื่อความสะดวกในการขึ้นรูปเป็นวัสดุเชิงประกอบต่อไป ซึ่งเป็นกระบวนการรีไซเคิลโฟมโพลีเอทิลีนที่ง่าย มีต้นทุนต่ำ และไม่ต้องใช้พลังงานความร้อน

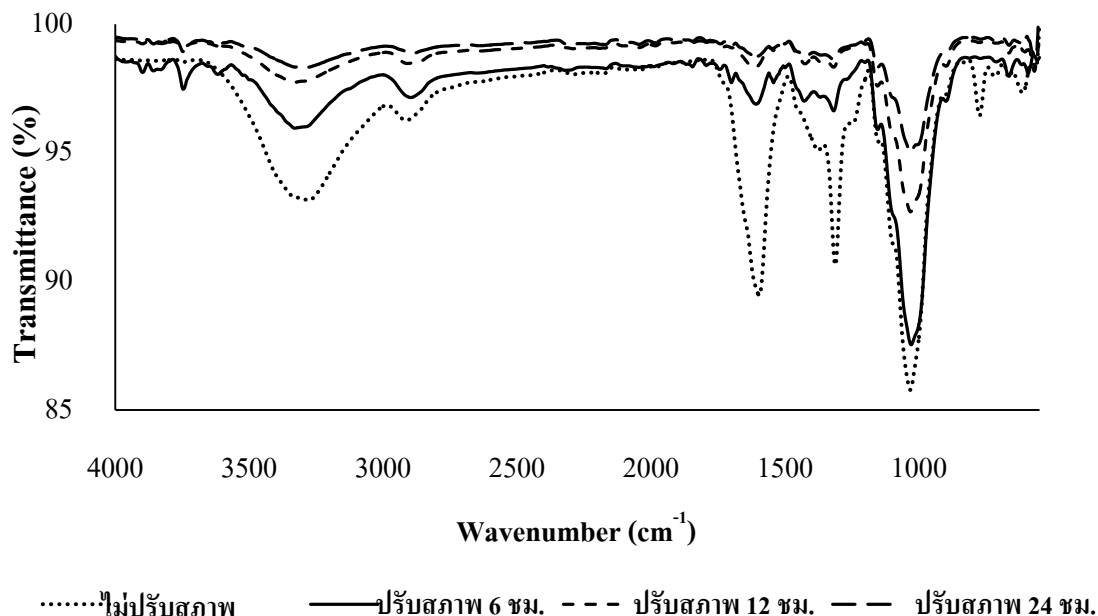
#### 4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีและลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของเส้นใยธรรมชาติ

##### 4.3.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมี

ผลการศึกษามูลุ่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR ของเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วย ก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5% (w/v) ที่ระยะเวลา 6, 12 และ 24 ชม. แสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 กราฟ FTIR ของเส้นใยมะพร้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Untreated) และผ่านการปรับสภาพ (Treated) ที่ระยะเวลา 6, 12 และ 24 ชม.



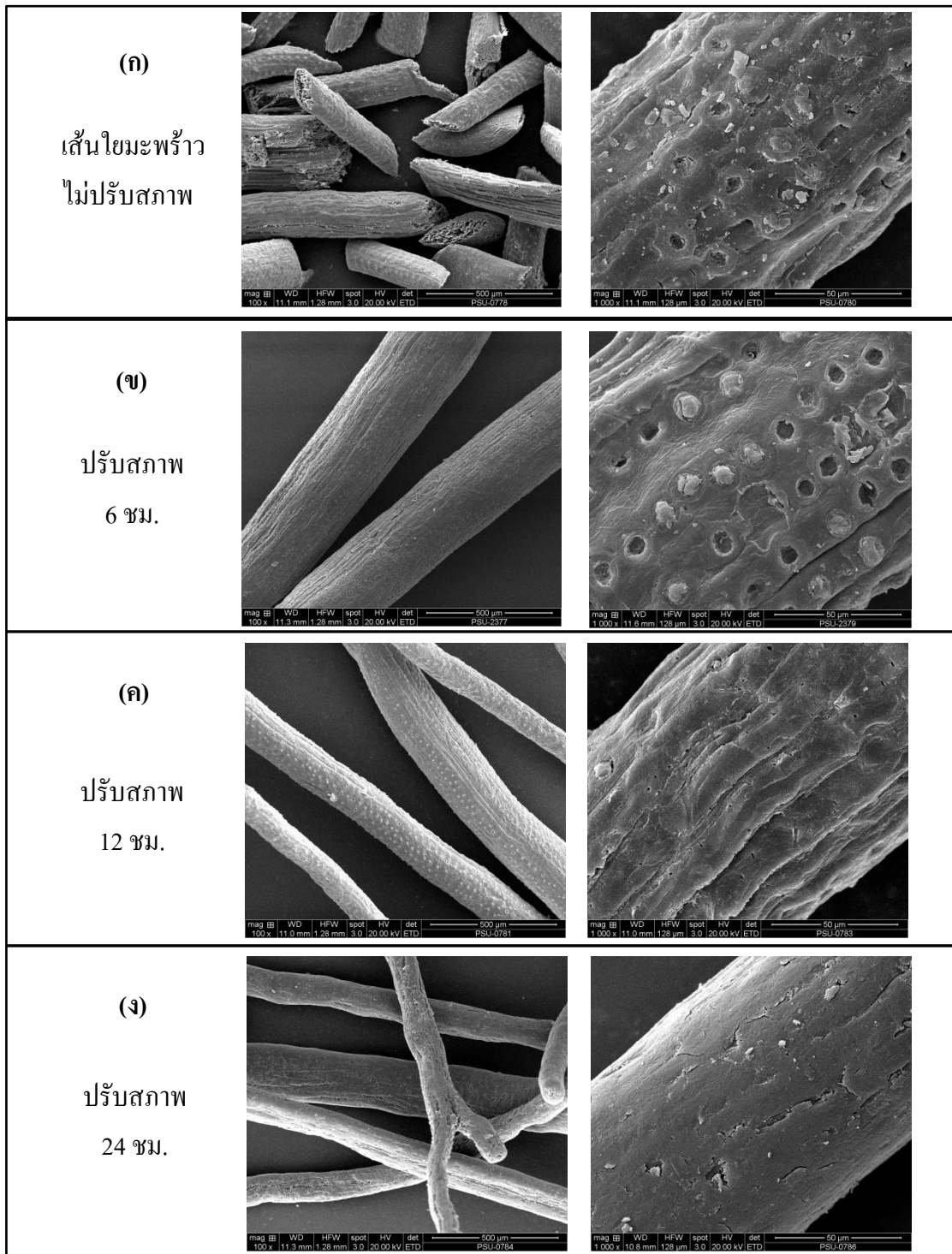
รูปที่ 4.10 กราฟ FTIR ของเส้นใยกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Untreated) และผ่านการปรับสภาพ (Treated) ที่ ระยะเวลา 6, 12 และ 24 ชม.

จากการศึกษาโครงสร้างเคมีของเส้นใย พบว่าเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว มีพีคที่เลขคลื่นประมาณ  $3300 - 3500 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงหมู่  $\text{-OH}$  stretching ภายในโครงสร้างเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสของเส้นใยทั้งสอง ที่ทำให้เส้นใยมีสมบัติการดูดซึมน้ำ (Hydrophilic) ได้ดี (Ibrahim, *et al.*, 2010; Samia, *et al.*, 2012) และพีคที่เลขคลื่น  $2916 - 2918 \text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณ  $\text{C-H}$  stretching จากหมู่  $\text{-CH}_2$  ภายในโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส และพีคที่เลขคลื่น  $1600 - 1733 \text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณ  $\text{C=O}$  stretching จากหมู่คาร์บอนิล ซึ่งอยู่ในโครงสร้างของลิกนิน (lignin) และเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) (Shah, *et al.*, 2008) และพีคที่เลขคลื่น  $1300 - 1400 \text{ cm}^{-1}$  เป็นของหมู่  $\text{-CH}_3$  asymmetric และ  $\text{C-H}$  symmetric ภายในโครงสร้างของลิกนิน (Shah, *et al.*, 2013; El-Meligy, *et al.*, 2010; Samia, *et al.*, 2012) ซึ่งเส้นใยมะพร้าวจะปรากฏพีคของลิกนินไม่ชัดเจนทั้งที่มีปริมาณลิกนินมากกว่าเมื่อเทียบกับเส้นใยกล้วย เนื่องจากลิกนินในเส้นใยมะพร้าวอยู่ลึกเข้าไปในผนังเซลล์ และเส้นใยมะพร้าวมีผนังเซลล์หนากว่าเส้นใยกล้วย (Khalil, *et al.*, 2007) เมื่อเปรียบเทียบพีคของหมู่ต่างๆ ที่เป็นโครงสร้างของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน พบว่าเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายเบส มีความเข้มของพีคตำแหน่งต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นน้อยลง เมื่อเทียบกับเส้นใยที่ไม่ผ่านการ

ปรับสภาพ โดยที่เส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเวลานานขึ้น จะมีความเข้มของพีคลดลง ซึ่งแสดงถึงการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ -OH ของโมเลกุลเซลลูโลส ที่เกิดจากปฏิกิริยาไอออไนเซชันของหมู่ -OH ในโมเลกุลเซลลูโลสกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้หมู่อื่นๆ ที่ไม่ใช่เซลลูโลสและสารเคลือบผิวเส้นใยต่างๆ ถูกกำจัดออกไปด้วย เช่น ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และแว็กซ์ ซึ่งสังเกตจากพีคของหมู่ C=O หายไป จากการพิสูจน์โครงสร้างเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วยพบว่า การปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถลดปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลและกำจัดและสารต่างๆ เช่น ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส บริเวณพื้นผิวของเส้นใยได้จริง ซึ่งจะช่วยให้เส้นใยลดสมบัติความเป็นไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) และเพิ่มพื้นที่ในการยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดียิ่งขึ้น (Benyahia, *et al.*, 2007; Balakrishna, *et al.*, 2013; Haque, *et al.*, 2009; Abdullah and Ahmad, 2012; Sgriccia, *et al.*, 2008; Setyanto, *et al.*, 2013; Gopinath and Vadivu, 2014; Punyamurthy, *et al.*, 2014)

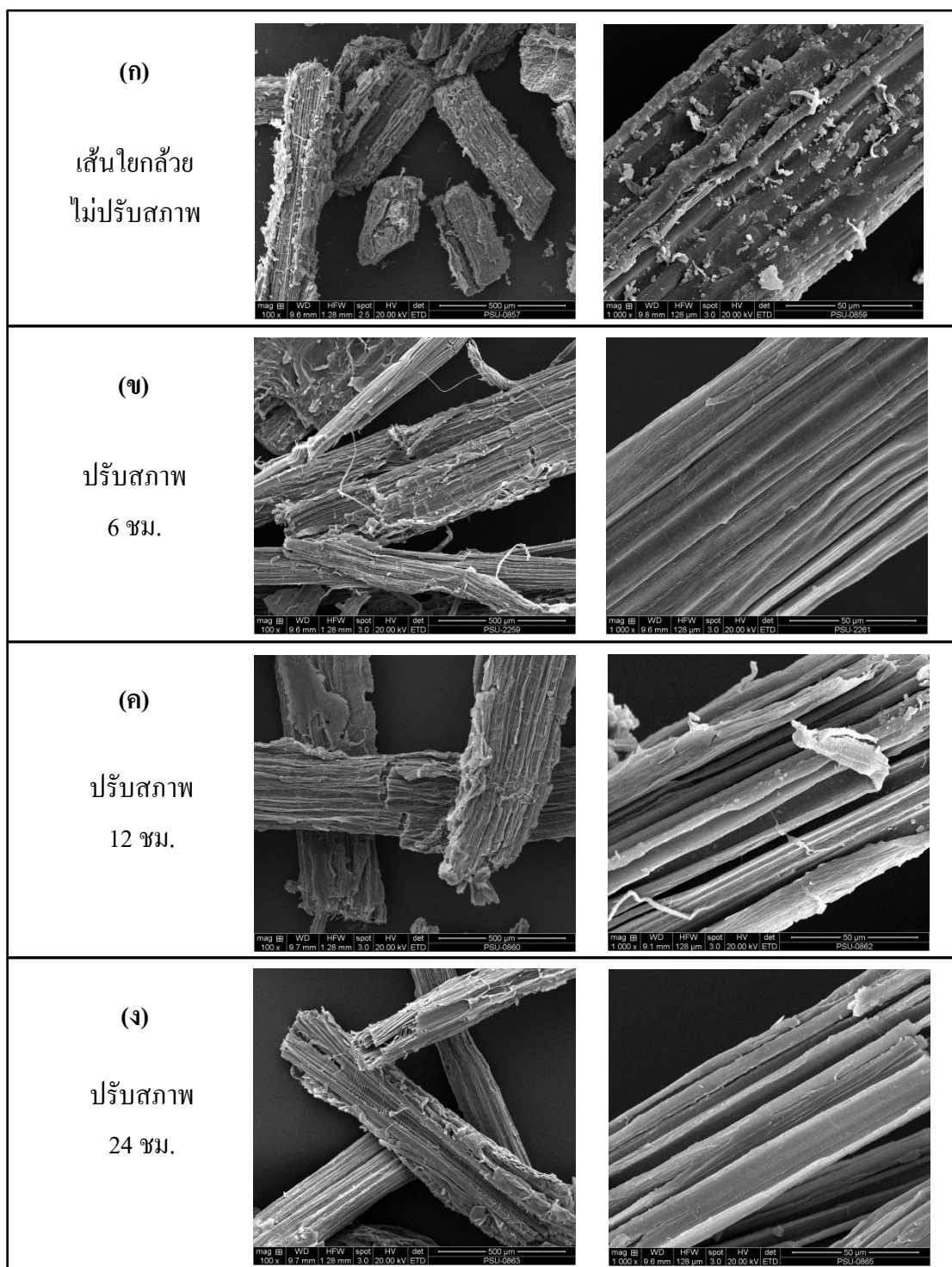
#### 4.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของเส้นใยธรรมชาติ

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วยโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) เพื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Untreated Fiber) และเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพ (Treated Fiber) ด้วย NaOH ที่ระยะเวลา 6, 12 และ 24 ชม. แสดงดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 พบว่า เส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วย ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ มีลักษณะพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากมีสิ่งเจือปนต่างๆ หรือสารพวก non-cellulose เคลือบบนพื้นผิวเส้นใย ในขณะที่เส้นใยที่ปรับสภาพด้วย NaOH ที่ 6, 12 และ 24 ชม. มีผิวเรียบและสม่ำเสมอมากขึ้น เมื่อใช้เวลานานในการปรับสภาพมากขึ้น เนื่องจากสิ่งเจือปนต่างๆ ที่ไม่ใช่เซลลูโลสหลุดออกไป และทำให้ขนาดรัศมีเส้นใยเล็กลง (Mulinari, *et al.*, 2011; Rokbi, *et al.*, 2011; Gopinath and Vadivu, 2014) ซึ่งการปรับสภาพเส้นใยเป็นเวลา 6 ชม. ทำให้เส้นใยมีลักษณะพื้นผิวที่เหมาะสม คือ ไม่มีสิ่งสกปรกเกาะที่พื้นผิว แต่ยังคงมีบริเวณที่เป็นหลุมขรุขระหรือที่เรียกว่าคิวติเคิล (cuticle) เหลืออยู่ (เห็นได้ชัดจากภาพถ่ายของเส้นใยมะพร้าว) ซึ่งจะช่วยให้การยึดเกาะหรือประสานเข้ากับพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Interlocking) ได้มากขึ้น และช่วยให้วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น (Gopinath and Senthil, 2014; Karthikeyan and Balamurugan, 2012; Rahman and Khan, 2007; Rosa, *et al.*, 2009; Sgriccia, *et al.*, 2008; Shah, *et al.*, 2008; Setyanto, *et al.*, 2013) แต่เส้นใยที่ปรับสภาพนาน 12 และ 24 ชม. พื้นผิวจะถูกทำลายไปมากกว่า ซึ่งทำให้พื้นที่ที่เป็นหลุมขรุขระหายไป



รูปที่ 4.11 SEM ไมโครกราฟของเส้นใยมะพร้าว (ก) ไม่ปรับสภาพ (ข) ปรับสภาพ 6 ชม. (ค) ปรับสภาพ 12 ชม. และ (ง) ปรับสภาพ 24 ชม.





รูปที่ 4.12 SEM ไมโครกราฟของเส้นใยกล้วย (ก) ไม่ปรับสภาพ (ข) ปรับสภาพ 6 ชม. (ค) ปรับสภาพ 12 ชม. และ (ง) ปรับสภาพ 24 ชม.

จากผลการตรวจเอกลักษณะและสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5% (w/v) ที่ระยะเวลาต่างๆ แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพเส้นใยด้วย NaOH ทำให้เส้นใยมีลักษณะพื้นผิวเรียบมากขึ้น และทำให้โครงสร้างหรือองค์ประกอบภายในเส้นใยต่างๆ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ถูกกำจัดออกไป เห็นได้ชัดเจนจากข้อมูล FTIR กราฟและ SEM ไมโครกราฟ ของเส้นใยที่ปรับสภาพนาน 12 และ 24 ชม. ซึ่งการกำจัดพวกเฮมิเซลลูโลส จะทำให้เส้นใยลดสมบัติการดูดซึมน้ำ ความชื้น การกำจัดลิกนินในปริมาณที่เหมาะสม (ผลจากการปรับสภาพนาน 6 ชม.) จะช่วยเพิ่มพื้นผิวขรุขระ หรือผิวเคลือบของเส้นใยเซลลูโลสให้สามารถประสานเข้ากับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้มากขึ้น (El-Meligy, *et al.*, 2010; Karthikeyan and Balamurugan, 2012)

ดังนั้นเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพที่เวลา 6 ชม. จึงมีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบพอลิเอสไตรีนในขั้นต่อไป เนื่องจากยังคงมีองค์ประกอบภายในเส้นใยอยู่ในปริมาณที่ไม่น้อยจนเกินไป สามารถคงสมบัติความเหนียวและความแข็งแรงของเส้นใยได้ และมีลักษณะพื้นผิวที่เหมาะสมสำหรับการประสานเข้ากับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี จึงสามารถเสริมให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น (Mulinari, *et al.*, 2011)

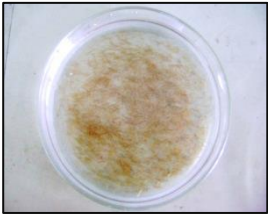
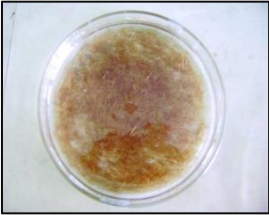
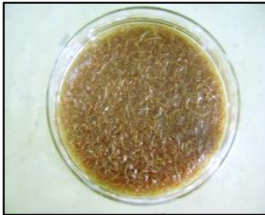



#### 4.4 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเอสไตรีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ

วัสดุเชิงประกอบในการศึกษานี้เตรียมจากโพลีพอลิเอสไตรีนที่รีไซเคิลด้วยวิธีการละลายในตัวทำละลายผสมระหว่างทินเนอร์กับอะซิโตนที่อัตราส่วน 150 : 50 mL และเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ คือ เส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วย ทั้งที่ไม่ปรับสภาพ (Untreated) และที่ปรับสภาพ (Treated) ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5% (w/v) เป็นระยะเวลา 6 ชม. ผลการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยธรรมชาติในเนื้อวัสดุและสมบัติเชิงกล คือ ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนต่อแรงดัดโค้ง (Flexural strength) และความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength) ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ แสดงดังหัวข้อต่อไปนี้







#### 4.4.1 ลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยธรรมชาติในวัสดุเชิงประกอบ

ลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยธรรมชาติในวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจาก โฟม พอลิสไตรีนรีไซเคิลกับเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วยทั้งที่ไม่ปรับสภาพและที่ปรับสภาพใน ปริมาณ 2, 5 และ 10% โดยน้ำหนัก แสดงในตารางที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ขึ้นรูปใน Petri dish เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 13 cm และความหนาประมาณ 2-3 mm มีลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยที่แตกต่างกัน ระหว่างวัสดุที่เติมเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพ วัสดุที่เติมเส้นใยมะพร้าวหรือเส้นใยกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Untreated) ในทุกอัตราส่วนการผสม เส้นใยมีการกระจายตัวภายในเนื้อพอลิเมอร์ได้ไม่ดี มีการยึดเกาะกันเองระหว่างเส้นใย จึงทำให้เส้นใยจับตัวกันเป็นก้อนบริเวณส่วนกลางของวัสดุเชิงประกอบ ส่วนวัสดุที่เติมเส้นใยมะพร้าวหรือเส้นใยกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพ (Treated) ในปริมาณที่เท่ากัน เส้นใยมีการกระจายตัวในเนื้อพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น ไม่จับตัวเป็นก้อน และเมื่อปริมาณเส้นใยที่ผสมลงไปมากขึ้น ความสม่ำเสมอของการกระจายตัวก็จะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากมีความหนาแน่นของเส้นใยในเนื้อพอลิเมอร์มากขึ้น จึงทำให้เห็นพื้นที่ว่างในเนื้อพอลิเมอร์ที่ไม่มีเส้นใยกระจายตัวอยู่ลดลง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระบวนการปรับสภาพเส้นใยด้วยสารละลายเบสช่วยให้การยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยกับเนื้อพอลิเมอร์ดีขึ้น เนื่องจากพื้นผิวของเส้นใยมีสภาพความเป็นขี้ลดลง และมีสิ่งสกปรกที่รบกวนการยึดเกาะของเส้นใยกับพอลิเมอร์ลดน้อยลง ทำให้การกระจายตัวของเส้นใยทั้ง 2 ชนิดที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว กระจายตัวในเนื้อพอลิเมอร์ได้ดีกว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

ตารางที่ 4.8 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบระหว่างโพลีเอสเตอร์เรซินที่เคลือบเส้นใยมะพร้าว ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพ ในปริมาณต่างๆ

| ชนิดเส้นใย                   | วัสดุเชิงประกอบระหว่างโพลีเอสเตอร์เรซินที่เคลือบเส้นใยที่ปริมาณต่างๆ   |   |   |
|------------------------------|--|---|---|
|                              | 2% (w/w)   | 5% (w/w)  | 10% (w/w)   |
| เส้นใยมะพร้าว<br>ไม่ปรับสภาพ |  <p>เส้นใยกระจายตัวไม่ทั่ว<br/>กระจายตัวหนาแน่น<br/>บริเวณกลางแผ่นวัสดุ</p> |  <p>เส้นใยกระจายตัวไม่ทั่ว<br/>กระจายตัวหนาแน่น<br/>บริเวณกลางแผ่นวัสดุ</p> |  <p>เส้นใยอัดตัวกันแน่น<br/>ภายในเนื้อวัสดุ<br/>เส้นใยโผล่ออกมา<br/>บริเวณผิวบนของวัสดุ</p>      |
| เส้นใยมะพร้าว<br>ปรับสภาพ    |  <p>เส้นใยกระจายตัวทั่ว<br/>วัสดุมากขึ้น<br/>แต่ไม่สม่ำเสมอ</p>           |  <p>เส้นใยกระจายตัวทั่ว<br/>วัสดุมากขึ้น<br/>แต่ไม่สม่ำเสมอ</p>           |  <p>เส้นใยอัดตัวกันแน่น<br/>ภายในเนื้อวัสดุ<br/>เส้นใยจมตัวอยู่ใต้<br/>พื้นผิวของพอลิเมอร์</p> |

ตารางที่ 4.9 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบระหว่างโพลีเอสเตอร์เรซินที่เคลือบเส้นใยกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และผ่านการปรับสภาพ ในปริมาณต่างๆ

| ชนิดเส้นใย                 | วัสดุเชิงประกอบระหว่างโพลีเอสเตอร์เรซินที่เคลือบเส้นใยที่ปริมาณต่างๆ   |   |  |
|----------------------------|--|---|--|
|                            | 2% (w/w)   | 5% (w/w)  | 10% (w/w)  |
| เส้นใยกล้วย<br>ไม่ปรับสภาพ |  <p>เส้นใยกระจายตัวไม่<br/>สม่ำเสมอและจับตัวกัน<br/>เป็นข่อมๆ</p> |  <p>เส้นใยกระจายตัวไม่ทั่ว<br/>กระจายตัวหนาแน่น<br/>บริเวณกลางแผ่นวัสดุ</p> |  <p>เส้นใยอัดตัวกันแน่น<br/>ภายในเนื้อวัสดุ</p>   |
| เส้นใยกล้วย<br>ปรับสภาพ    |  <p>เส้นใยกระจายตัวทั่ว<br/>วัสดุมากขึ้น<br/>แต่ไม่สม่ำเสมอ</p> |  <p>เส้นใยกระจายตัวทั่ว<br/>วัสดุมากขึ้น<br/>แต่ไม่สม่ำเสมอ</p>           |  <p>เส้นใยอัดตัวกันแน่น<br/>ภายในเนื้อวัสดุ</p> |

#### 4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิโพรพิลีนที่เคลือบเส้นใยธรรมชาติ

วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนที่เคลือบเส้นใยมะพร้าวหรือกับเส้นใยกล้วย ที่ปริมาณเส้นใย 2, 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก ถูกนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลด้านต่างๆ คือ สมบัติด้านความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนต่อแรงดัดโค้ง (Flexural strength) และความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength) เพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้กับแผ่นพอลิโพรพิลีนที่เคลือบเส้นใยที่ไม่เติมเส้นใย วัสดุโพรพิลีนที่เคลือบเส้นใยและวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ทั้งหมดจะถูกนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 วัสดุทั้งหมดจากพอลิโพรพิลีนที่เคลือบเส้นใยนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลด้านต่างๆ

| ความทนต่อแรงดึง<br>(Tensile strength) | ความทนต่อแรงดัดโค้ง<br>(Flexural strength) | ความทนต่อแรงกระแทก<br>(Impact strength) |
|---------------------------------------|--|---|
| PS                                    | PS   | PS                                      |
| PS + 2% UC                            | —  | —                                       |
| PS + 5% UC                            | —  | —                                       |
| PS + 10% UC                           | —  | —                                       |
| PS + 2% TC                            | PS + 2% TC                                 | PS + 2% TC                              |
| PS + 5% TC                            | PS + 5% TC                                 | PS + 5% TC                              |
| PS + 10% TC                           | PS + 10% TC                                | PS + 10% TC                             |
| PS + 2% UB                            | —  | —                                       |
| PS + 5% UB                            | —  | —                                       |
| PS + 10% UB                           | —  | —                                       |
| PS + 2% TB                            | PS + 2% TB                                 | PS + 2% TB                              |
| PS + 5% TB                            | PS + 5% TB                                 | PS + 5% TB                              |
| PS + 10% TB                           | PS + 10% TB                                | PS + 10% TB                             |

\*หมายเหตุ

UC = Untreated Coconut fiber

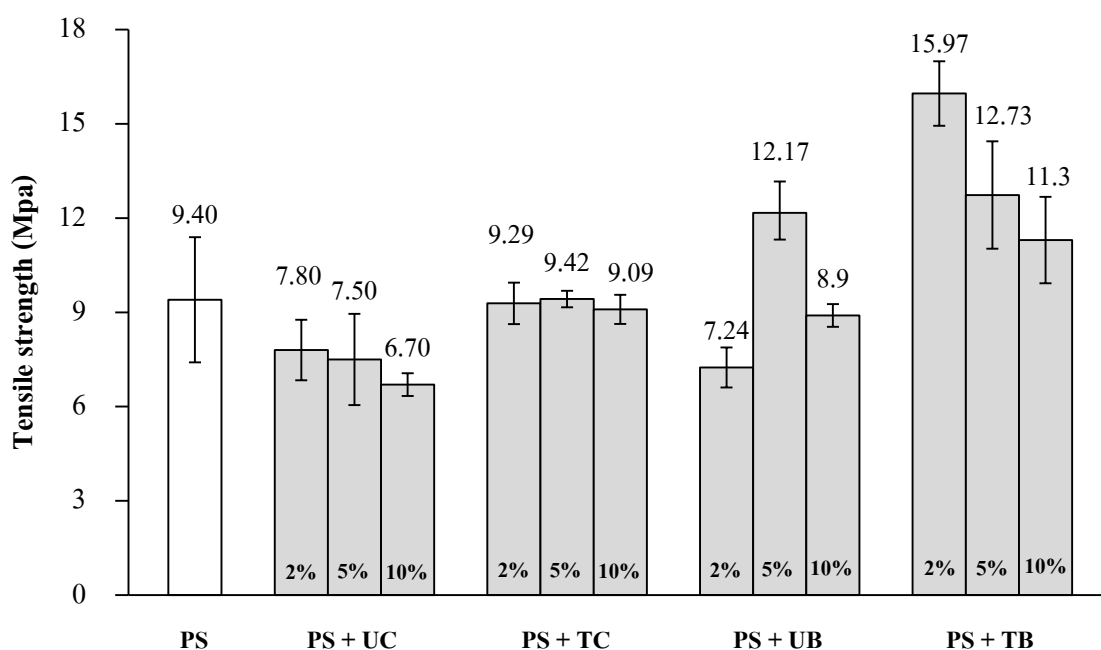
TC = Treated Coconut fiber

UB = Untreated Banana fiber

TB = Treated Banana fiber

#### 4.5.1 ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength)

การทดสอบความทนต่อแรงดึงของวัสดุ เพื่อเปรียบเทียบค่า Tensile strength ของวัสดุพอลิสไตรีน (PS) กับวัสดุเชิงประกอบพอลิสไตรีนผสมเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วยในปริมาณ 2, 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก ทั้งเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพและไม่ผ่านการปรับสภาพ แสดงผลดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ค่า Tensile strength ของวัสดุพอลิสไตรีนรีไซเคิล (PS) และวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิสไตรีนรีไซเคิลกับเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วย ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและที่ผ่านการปรับสภาพ ในปริมาณ 2, 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.13 พบว่าค่า Tensile strength ของวัสดุเชิงประกอบพอลิสไตรีนรีไซเคิลกับเส้นใยกล้วยที่ปรับสภาพแล้ว มีค่าสูงกว่าของพอลิสไตรีนรีไซเคิล ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่ผสมเส้นใยกล้วยที่ไม่ปรับสภาพมีค่า Tensile strength ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิสไตรีนรีไซเคิล เนื่องจากการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใย ทำให้เส้นใยมีสภาพขี้แบบไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เช่นเดียวกับพอลิเมอร์ และช่วยเพิ่มพื้นผิวขรุขระของเส้นใยเซลลูโลสทำให้เส้นใยที่ปรับสภาพแล้วสามารถยึดเกาะกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ และกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี (Ku, *et al.*, 2011; Rahman and Khan, 2007; Wambua, *et al.*, 2003; Shah, *et al.*, 2008) จึงเป็นตัว

ช่วยเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ทำให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีความทนต่อแรงดึงเพิ่มมากขึ้น แต่การเติมเส้นใยที่ไม่ปรับสภาพลงไปผสมกับพอลิस्टาไทรนรีไซเคิล เส้นใยยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ไม่ดี และจับกลุ่มเป็นก้อนในเนื้อพอลิเมอร์ดังที่อธิบายไปแล้วในหัวข้อ 4.4.1 ซึ่งเส้นใยที่กระจายตัวไม่สม่ำเสมอในเนื้อพอลิเมอร์ ทำให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีความทนต่อแรงดึงลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการผสมเส้นใยกล้วยที่ปรับสภาพแล้วลงในวัสดุในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีค่า Tensile strength ลดลง เนื่องจากเส้นใยที่มีปริมาณมากขึ้นสามารถกระจายตัวในเนื้อพอลิเมอร์ได้แย่ง ทำให้วัสดุเชิงประกอบทนต่อแรงดึงได้ลดลงไปด้วย (Sumaila, *et al.*, 2013; Ibrahim, *et al.*, 2010)

สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่ผสมเส้นใยมะพร้าวที่ไม่ปรับสภาพ พบว่ามีค่า Tensile strength ต่ำกว่าพอลิस्टาไทรนรีไซเคิลเช่นเดียวกับวัสดุเชิงประกอบที่ผสมเส้นใยกล้วยที่ไม่ปรับสภาพ ในขณะที่วัสดุที่ผสมเส้นใยมะพร้าวที่ปรับสภาพแล้ว พบว่ามีค่า Tensile strength ใกล้เคียงกับของพอลิस्टาไทรนรีไซเคิล แสดงให้เห็นว่าวัสดุเชิงประกอบจากพอลิस्टาไทรนกับเส้นใยกล้วยมีความทนต่อแรงดึงได้มากกว่าวัสดุที่ผสมเส้นใยมะพร้าว เนื่องจากเส้นใยกล้วยมีปริมาณของเซลลูโลสที่มีโครงสร้างที่เป็นระเบียบ (Crystalline) มากกว่า จึงมีค่า Tensile strength และค่า Young's Modulus สูงกว่าเส้นใยมะพร้าว (Akil, *et al.*, 2011; Bledzki and Gassan, 1999; Cheung, *et al.*, 2009; John and Anandjiwala, 2008; Monteiro, *et al.*, 2008; Venkateshwaran and Elayaperumal, 2010; Mukhopadhyay, *et al.*, 2008; Punyamurthy, *et al.*, 2014) และเนื่องจากเส้นใยกล้วยมีขนาดเส้นใยเล็กกว่าเส้นใยมะพร้าว ทำให้ช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์มีน้อยกว่า ซึ่งสังเกตได้จากการแตกหักของวัสดุหลังจากการทดสอบความทนต่อแรงดึง ดังรูปที่ 4.14 พบว่าวัสดุเชิงประกอบ PS + 5% TC บริเวณที่แตกหักมีเส้นใยมะพร้าวโผล่ออก (Pullout) จากเนื้อวัสดุอยู่มากกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีเส้นใยกล้วย เนื่องจากเส้นใยมะพร้าวมีขนาดรัศมีเส้นใยใหญ่กว่า (high microfibril angle) เส้นใยกล้วย (Abdullah and Ahmad, 2012) ทำให้มีการกระจายตัวและการประสานกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ไม่ดี (Brahmakumar, *et al.*, 2005; Karthikeyan and Balamurugan, 2012) เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำบริเวณช่องว่างของวัสดุ จึงทำให้วัสดุขาดออกได้ง่ายและเร็วกว่า ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบพอลิस्टาไทรนกับเส้นใยมะพร้าวมีค่า Tensile strength น้อยกว่า (Rout, *et al.*, 2001; Wambua, *et al.*, 2003; Agunsoye, *et al.*, 2012; Natarajan and Balasubramanya, 2013; Goulart, *et al.*, 2011; Zizumbo, *et al.*, 2011)





**รูปที่ 4.14** การขาดออกกายหลังการทดสอบความทนต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบพอลิस्टาไตรีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติ (ก) PS + 5% TC และ (ข) PS + 5% TB

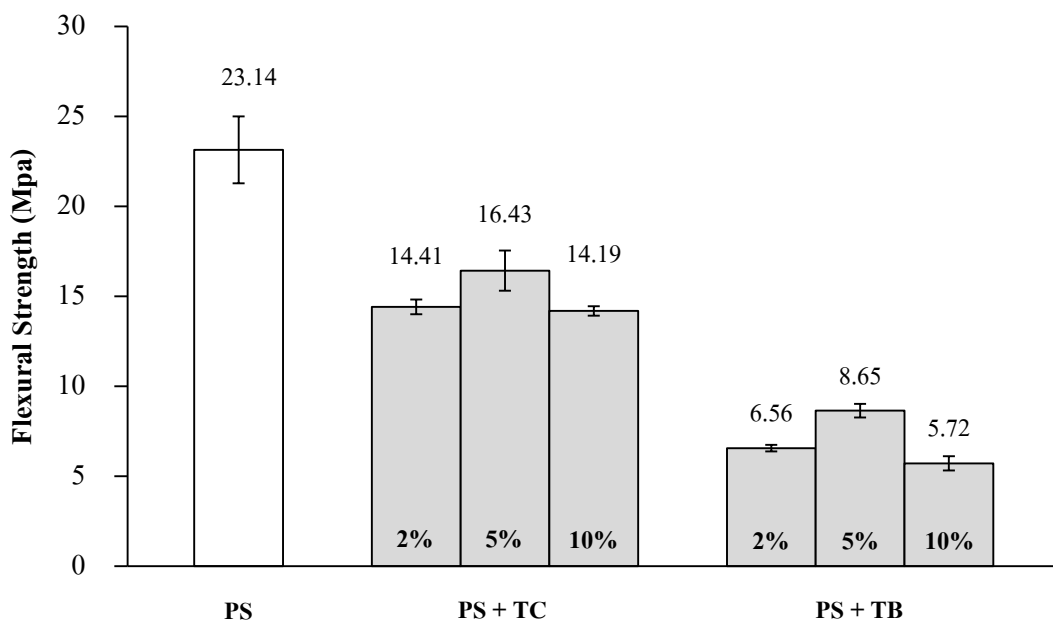
จากการศึกษาผลของการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วยด้วย NaOH ที่มีต่อความทนต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ ยืนยันได้ว่าการปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยสามารถช่วยให้เส้นใยมีการยึดเกาะกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีขึ้น ทำให้วัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิस्टาไตรีนกับเส้นใยมีความสามารถทนต่อแรงดึงได้มากขึ้น (Abdullah and Ahmad, 2012; Rahman, 2014; Kumar, *et al.*, 2013; Gopinath and Vadivu, 2014) วัสดุเชิงประกอบพอลิस्टาไตรีนกับเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพแล้วเท่านั้น จึงถูกนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลด้านอื่นๆ ต่อไป

#### 4.5.2 ความทนแรงค้ำโค้ง (Flexural strength)

การทดสอบหาค่า Flexural Strength ของวัสดุเชิงประกอบพอลิस्टาไตรีนกับเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพที่ปริมาณเส้นใย 2, 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก ซึ่งทดสอบโดยใช้แรงกดลงด้านบนกลางแผ่นวัสดุ และมีแรงดึงกระทำกับด้านล่างตรงปลายทั้งสองข้างของแผ่นวัสดุ (ดูหัวข้อ 2.4.2) เพื่อเปรียบเทียบความทนต่อการค้ำโค้งของพอลิस्टาไตรีนรีไซเคิล (PS) กับวัสดุเชิงประกอบ ให้ผลแสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่าค่า Flexural Strength ของวัสดุเชิงประกอบพอลิस्टาไตรีนกับเส้นใยมะพร้าว (PS + TC) และเส้นใยกล้วย (PS + TB) มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิस्टาไตรีนรีไซเคิล (PS) แสดงให้เห็นว่า วัสดุเชิงประกอบที่เติมเส้นใยธรรมชาติสามารถทนต่อแรงกดได้ลดลง หรือสามารถถูกค้ำโค้งได้ง่ายขึ้น เนื่องจากแรงที่กระทำต่อวัสดุตั้งฉากกับทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยในวัสดุเชิงประกอบ ในขณะที่การทดสอบความทนต่อแรงดึง แรงที่ใช้ดึงตั้งฉากกับแรงที่ใช้ทดสอบความทนต่อการค้ำโค้ง ซึ่งแสดงว่าแรงดึงกระทำกับวัสดุ

ในทิศเดียวกับการจัดเรียงตัวของเส้นใยที่ผสมอยู่ในวัสดุเชิงประกอบ ทำให้วัสดุทนต่อแรงดึงได้ดีขึ้น นอกจากนี้พบว่าค่า Flexural Strength ของวัสดุเชิงประกอบ PS + TC มีค่าสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบ PS + TB ที่ปริมาณเส้นใยเท่ากัน แสดงว่าวัสดุเชิงประกอบพอลิโอสไตรีนรีไซเคิลกับเส้นใยกล้วยสามารถดัดงอได้ง่ายกว่าวัสดุที่เติมเส้นใยมะพร้าว ซึ่งอาจเนื่องมาจากเส้นใยมะพร้าวส่วนใหญ่ในวัสดุเชิงประกอบมีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันกับแรงกดและแรงดึงที่ใช้ทดสอบวัสดุมากกว่าเส้นใยกล้วยในวัสดุเชิงประกอบ ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบที่ผสมเส้นใยมะพร้าว สามารถทนต่อแรงกระทำในทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นผิวด้านบน/ล่างของวัสดุได้มากกว่าแรงดึงจากการทดสอบ Tensile strength ซึ่งกระทำในทิศเดียวกับพื้นผิวด้านบนและล่างของวัสดุ (Martin Alberto Masuelli, 2013)

Flexural strength ของวัสดุเชิงประกอบมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเส้นใย (ทั้งเส้นใยกล้วยและเส้นใยมะพร้าว) ในวัสดุเชิงประกอบมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2% เป็น 5% แต่ Flexural strength กลับมีค่าต่ำที่สุดเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มเป็น 10% แสดงให้เห็นว่าปริมาณเส้นใยที่เพิ่มมากขึ้น ช่วยให้วัสดุเชิงประกอบทนต่อการดัดโค้งได้ดีขึ้น แต่เมื่อปริมาณเส้นใยที่ผสมกับพอลิเมอร์มากเกินไปมีผลทำให้วัสดุทนต่อการดัดโค้งได้น้อยลง เนื่องจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของเส้นใยเมื่อมีความหนาแน่นของเส้นใยในวัสดุเชิงประกอบมากขึ้น เช่นเดียวกับที่ค่า Tensile strength ของวัสดุเชิงประกอบลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.5.1

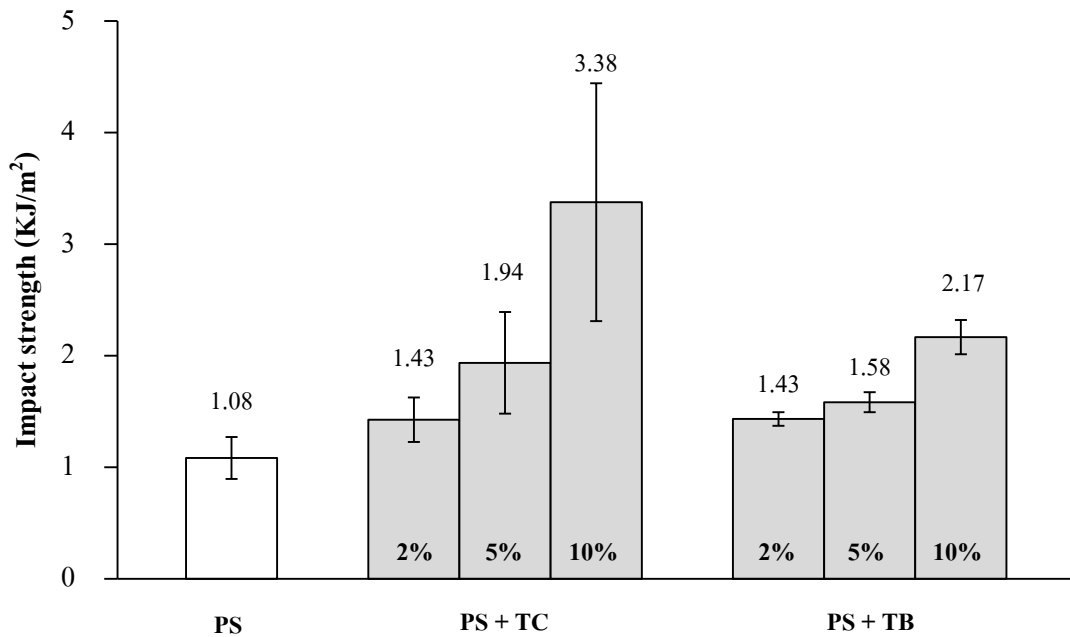


รูปที่ 4.15 ค่า Flexural strength ของวัสดุพอลิโอสไตรีนรีไซเคิลและวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิโอสไตรีนรีไซเคิลกับเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพ ที่ปริมาณเส้นใย 2, 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก

ดังนั้นปริมาณเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพมีผลต่อสมบัติด้านความทนต่อแรงค้ำโค้งของวัสดุเชิงประกอบพอลิस्टาไทรีนรีไซเคิล วัสดุเชิงประกอบพอลิस्टาไทรีนรีไซเคิลผสมเส้นใยมะพร้าวปริมาณ 5% โดยน้ำหนักมีความทนต่อแรงค้ำโค้งมากที่สุด แต่วัสดุเชิงประกอบที่ผสมเส้นใยกล้วยที่ 10% มีความทนต่อแรงค้ำโค้งน้อยที่สุด

#### 4.5.3 ความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength)

การทดสอบหาค่าความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength) ของวัสดุเชิงประกอบพอลิस्टาไทรีนกับเส้นใยมะพร้าว (PS + TC) และเส้นใยกล้วย (PS + TB) ที่ผ่านการปรับสภาพที่ปริมาณเส้นใย 2, 5 และ 10% โดยน้ำหนัก เพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงและความสามารถในการรองรับแรงกระแทกกับพอลิस्टาไทรีนรีไซเคิล (PS) ให้ผลแสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่าค่า Impact strength ของวัสดุเชิงประกอบ PS +TC และ PS + TB มีค่าสูงกว่าวัสดุพอลิस्टาไทรีนรีไซเคิล และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่มากขึ้นด้วย โดยเมื่อใช้ปริมาณเส้นใยเท่ากัน วัสดุประกอบ PS + TC มีความทนต่อแรงกระแทกมากกว่าวัสดุเชิงประกอบ PS + TB แสดงให้เห็นว่าเส้นใยมะพร้าวในวัสดุเชิงประกอบสามารถช่วยลดคลื่นพลังงานในระหว่างการกระแทกที่กระทำต่อวัสดุได้มากกว่าเส้นใยกล้วย (Abdullah and Ahmad, 2012) เนื่องจากมีขนาดเส้นใยที่ใหญ่กว่า ทำให้ที่ร้อยละโดยน้ำหนักของเส้นใยเท่ากัน ปริมาตรของเส้นใยมะพร้าวที่ผสมในเนื้อวัสดุมีค่ามากกว่าปริมาตรของเส้นใยกล้วย



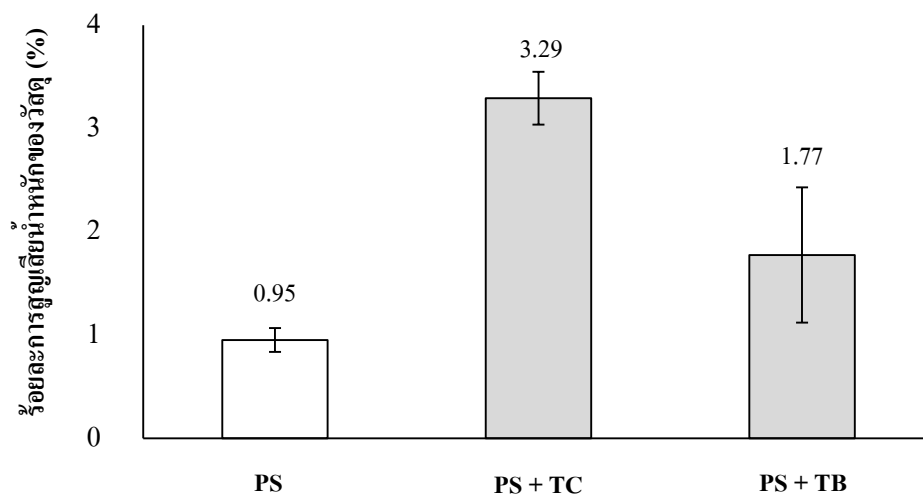
**รูปที่ 4.16** ค่า Impact strength ของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิสไตรีนไรโซเคลกับเส้นใยมะพร้าว และเส้นใยกล้วยที่ปรับสภาพที่สัดส่วนเส้นใย 2, 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก

ดังนั้นปริมาณเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยกล้วยที่ปรับสภาพมีต่อสมบัติด้านความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบพอลิสไตรีนไรโซเคล โดยเฉพาะวัสดุเชิงประกอบพอลิสไตรีนไรโซเคลที่เติมเส้นใยมะพร้าวปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก มีความทนต่อแรงกระแทกสูงสุด

#### 4.6 การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ

วัสดุเชิงประกอบพอลิสไตรีนกับเส้นใยมะพร้าว (PS + TC) และเส้นใยกล้วย (PS + TB) ที่ปริมาณเส้นใย 10% โดยน้ำหนัก ถูกนำมาทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยการฝังกลบในดินธรรมชาติ เป็นระยะเวลา 50 วัน เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพกับพอลิสไตรีนไรโซเคล (PS) และโฟมพอลิสไตรีน (PS Foam) โดยบันทึกน้ำหนักของวัสดุก่อนและหลังการฝังกลบ (ข้อมูลจากตารางภาคผนวกที่ 5) แล้วคำนวณน้ำหนักที่

เปลี่ยนแปลงไป พบว่าหลังผ่านการฝังกลบในดินธรรมชาติเป็นเวลา 50 วัน โฟมพอลิสไตรีน (PS Foam) มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นประมาณ 29.69% เนื่องจากภายในโฟมมีช่องว่างหรือรูพรุนมาก ทำให้เศษดินหรือสิ่งปนเปื้อนจากดิน เข้าแทรกบริเวณช่องว่างดังกล่าว ในขณะที่น้ำหนักของวัสดุพอลิสไตรีนรีไซเคิล (PS) และวัสดุเชิงประกอบ PS + TC กับ PS + TB มีค่าลดลงจากน้ำหนักเริ่มต้น ดังแสดงในรูป 4.17



**รูปที่ 4.17** ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุพอลิสไตรีนรีไซเคิลต่างๆที่ผ่านการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ

วัสดุเชิงประกอบทั้ง 2 ชนิดมีการสูญเสียน้ำหนักมากกว่า PS และค่าร้อยละของน้ำหนักที่ลดลงของวัสดุเชิงประกอบพอลิสไตรีนกับเส้นใยและวัสดุพอลิสไตรีนรีไซเคิลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 แสดงให้เห็นว่าเส้นใยกล้วยและเส้นใยมะพร้าวในวัสดุเชิงประกอบ ช่วยให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพของวัสดุได้เร็วขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วโฟมพอลิสไตรีนเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการย่อยสลายและการผุกร่อนทางธรรมชาติได้น้อยมาก ต้องอาศัยระยะเวลาในการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์และปัจจัยอื่นๆ เช่น ความชื้น สภาพความเป็นกรด-ด่างของดิน อากาศภายในดิน ที่เหมาะสมเป็นเวลายาวนาน โഴ่พอลิเมอร์จึงจะแตกหักเป็นมอนอเมอร์ จนสุดท้ายได้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) แก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) และน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) (Webb, *et al.*, 2000) ดังนั้นค่าน้ำหนักที่ลดลงของวัสดุเชิงประกอบที่ฝังกลบได้ดินภายในระยะเวลา 50 วัน อาจเป็นน้ำหนักของเส้นธรรมชาติที่เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพไปได้ก่อน จึงทำให้วัสดุเชิงประกอบมีการลดลงของน้ำหนักมากกว่าวัสดุพอลิสไตรีนรีไซเคิลซึ่งไม่มีเส้นใยธรรมชาติผสมอยู่

## บทที่ 5

### บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการรีไซเคิล โฟมพอลิสไตรีนโดยวิธีการละลายด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบผลของการละลายพอลิสไตรีนในตัวทำละลายอินทรีย์ต่างๆ ที่ระยะเวลาต่างๆ เพื่อให้ได้สารละลายพอลิสไตรีนที่มีความเป็นเนื้อเดียว ไม่มีฟองอากาศ และตัวทำละลายสามารถระเหยออกได้ง่ายและเร็วเพื่อสะดวกแก่การแข็งตัวและการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ รวมทั้งศึกษาผลของการปรับสภาพพื้นผิวและปริมาณของเส้นใยธรรมชาติที่มีต่อสมบัติเชิงกลและความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิสไตรีนรีไซเคิลกับเส้นใยมะพร้าวและกล้วย

โดยแบ่งขอบเขตการศึกษาเป็น 4 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการตรวจเอกลักษณ์ โฟมพอลิสไตรีน ส่วนที่สองการละลายโฟมพอลิสไตรีนในตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยวและตัวทำละลายอินทรีย์ผสม ตามด้วย การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีและลักษณะ โครงสร้างสัณฐานวิทยาของเส้นใยธรรมชาติเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงหลังการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยด้วยสารละลายเบส และส่วนสุดท้ายคือ การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิสไตรีนรีไซเคิลกับเส้นใยธรรมชาติในปริมาณต่างๆ ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาได้ตามลำดับดังนี้

การตรวจเอกลักษณ์ของโพลีเมอร์ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  และ GPC เป็นการยืนยันว่า ตัวอย่างโพลีเมอร์ที่ใช้ทดสอบ คือ โพลีเมอร์พอลิสไตรีน และมี  $\overline{M}_n$  เท่ากับ 120,491  $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$  และค่า PDI เท่ากับ 2.17

การละลายโฟมพอลิสไตรีนในตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยว พบว่าตัวทำละลายโทลูอีนและทินเนอร์สามารถละลายโฟมพอลิสไตรีนได้หมด 30 g ภายในเวลา 4 ชม. จนได้เป็นสารเนื้อเดียวใส ไม่มีฟองอากาศ โดยตัวทำละลายทินเนอร์สามารถละลายโฟมพอลิสไตรีนจนได้สารละลายที่ใสที่สุด ส่วนตัวทำละลายอะซิโตนและน้ำมันสนไม่สามารถละลายโฟมพอลิสไตรีนให้

เป็นสารละลายเนื้อเดียวได้ โดยพบว่าสารละลายเกิดการแยกส่วนระหว่างพอลิเมอร์กับตัวทำละลาย และเมื่อวัดปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของตัวทำละลาย เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการระเหย ของตัวทำละลายขณะละลาย พบว่าอะซิโตนมีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุด เนื่องจาก อะซิโตนมีความสามารถในการระเหยได้ดีที่สุด ตามด้วยทินเนอร์ โทลูอิน และน้ำมันสน ตามลำดับ และพบว่าสารละลายพอลิสไตรีนในอะซิโตนสามารถแข็งตัวและมีน้ำหนักคงที่เร็วที่สุด ตามด้วย สารละลายพอลิสไตรีนในทินเนอร์และโทลูอินตามลำดับ และพบว่าน้ำหนักคงที่ของพอลิสไตรีนที่ แข็งตัวแล้วมีค่าแตกต่างกันและมีค่ามากกว่าน้ำหนักพอลิสไตรีนโพลีที่ใช้ละลาย ซึ่งเป็นน้ำหนัก ของตัวทำละลายที่ถูกกักไว้ในก้อนพอลิเมอร์ไม่สามารถระเหยออกมาได้ พบว่าอะซิโตนมีปริมาณ น้อยที่สุด ตามด้วยทินเนอร์ และโทลูอิน ตามลำดับ

การละลายโพลีพอลิสไตรีนในตัวทำละลายอินทรีย์ผสมระหว่างทินเนอร์กับ อะซิโตนที่อัตราส่วน 150 : 50 mL ได้สารละลายมีความใสมากที่สุด ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับ สารละลายพอลิสไตรีนในตัวทำละลายเดี่ยวทินเนอร์ และพบว่าสารละลายพอลิสไตรีนในตัวทำ ละลายผสมระหว่างทินเนอร์กับอะซิโตนทำให้สารละลายสามารถแข็งตัวและมีน้ำหนักคงที่ได้เร็ว ขึ้น เมื่อเทียบกับสารละลายพอลิสไตรีนในตัวทำละลายเดี่ยวทินเนอร์ พอลิสไตรีนรีไซเคิลสามารถ ทนความร้อนได้สูงขึ้น โดยมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวระหว่าง 370 - 450 °C เมื่อเทียบกับโพลี พอลิสไตรีนซึ่งมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวระหว่าง 325 °C - 425 °C

การตรวจเอกลักษณ์เส้นใยด้วย FTIR พบว่า การปรับสภาพเส้นใยที่ระยะเวลา มาก ขึ้น สามารถลดปริมาณหมู่ไฮดรอกไซด์และกำจัดสารพวก non-cellulose ต่างๆเช่น ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส บริเวณพื้นผิวของเส้นใย ช่วยให้เส้นใยลดสมบัติความเป็นไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) ปรับปรุงพื้นผิวและเพิ่มพื้นที่ในการยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น และเมื่อวิเคราะห์ลักษณะ โครงสร้างสัณฐานวิทยาพบว่าเส้นใยที่มีการปรับปรุงสภาพ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง มีพื้นผิวเกลี้ยงมากขึ้นตามระยะเวลาการปรับสภาพที่มากขึ้น เนื่องจากการกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ออกไป ซึ่งการปรับสภาพเส้นใยที่ระยะเวลา 6 ชม. แสดงองค์ประกอบภายในเส้นใยอยู่ในปริมาณที่ ไม่น้อยจนเกินไปสามารถคงสมบัติความเหนียวและความแข็งแรงของเส้นใยได้และมีลักษณะ พื้นผิวที่เหมาะสมช่วยให้เกิดการประสานกันกับพอลิเมอร์ได้ดี

การเตรียมวัสดุประกอบระหว่างพอลิสไตรีนรีไซเคิลที่ได้จากการละลายในตัวทำ ละลายผสมระหว่างทินเนอร์กับอะซิโตน พบว่าเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพมีการกระจายใน พอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีกว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และเส้นใยกัวยกระจายตัวได้สม่ำเสมอ มากกว่าเส้นใยมะพร้าว

การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุพอลิस्टาไทรนรีไซเคิลต่างๆ คือความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงดัดโค้ง และความทนต่อแรงกระแทก พบว่าเส้นใยที่ปรับสภาพแล้วจะช่วยให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เมื่อมีอัตราส่วนการผสมระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใย และมีทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยที่เหมาะสม วัสดุเชิงประกอบพอลิस्टาไทรนรีไซเคิลกับเส้นใยกล้วยที่ปรับสภาพแล้วมีความทนต่อแรงดึงได้สูงกว่าวัสดุที่ผสมเส้นใยมะพร้าวที่ปรับสภาพและพอลิस्टาไทรนรีไซเคิล ปริมาณเส้นใยที่เพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ความทนต่อแรงดึงของวัสดุมีค่าลดลง

การทดสอบความทนต่อแรงดัดโค้งพบว่าวัสดุเชิงประกอบพอลิस्टาไทรนรีไซเคิลกับเส้นใยมะพร้าวที่ปรับสภาพมีความทนต่อแรงดัดโค้งได้มากกว่าวัสดุที่ผสมเส้นใยกล้วย แต่ทนต่อแรงดัดโค้งได้น้อยกว่าพอลิस्टาไทรนรีไซเคิล ปริมาณเส้นใยที่ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีค่า Flexural strength สูงสุดคือ 5% โดยน้ำหนัก

การผสมเส้นใยธรรมชาติลงในพอลิस्टาไทรนรีไซเคิล ทำให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้ทนต่อแรงกระแทกได้มากขึ้น โดยวัสดุเชิงประกอบที่ผสมเส้นใยมะพร้าวสามารถทนต่อแรงกระแทกได้ดีกว่าวัสดุที่ผสมเส้นใยกล้วย และความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเส้นใยที่ผสมลงไปมีค่ามากขึ้น

การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของวัสดุพอลิस्टาไทรนต่างๆ โดยการฝังดินธรรมชาติ พบว่าน้ำหนักของวัสดุวัสดุเชิงประกอบทั้งที่เติมเส้นใยกล้วยหรือเส้นใยมะพร้าว มีปริมาณน้ำหนักที่สูญเสียไปมากกว่าพอลิस्टาไทรนรีไซเคิล (PS) และโฟมพอลิस्टาไทรน (PS foam) แสดงให้เห็นว่าการเติมเส้นใยธรรมชาติลงไปผสมกับพอลิस्टาไทรนรีไซเคิล ช่วยให้วัสดุเชิงประกอบมีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีขึ้น



## 5.2 เสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาผลของความยาวและชนิดของเส้นใยธรรมชาติอื่นๆ ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ

5.2.2 ควรศึกษาผลของสารปรับสภาพเส้นใยชนิดอื่น ในการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใย เพื่อให้สามารถเกิดการกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีขึ้น

5.2.3 ควรศึกษาการผสมสารเติมแต่งในสารละลายพอลิسترินรีไซเคิล เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและเชิงเคมีต่างๆของพอลิسترินรีไซเคิลให้ดีขึ้น

5.2.4 ควรศึกษาการขึ้นรูปของวัสดุเชิงประกอบในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้วัสดุเชิงประกอบมีความเป็นเนื้อเดียวมากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2554). “รายงานสถานการณ์มลพิษ ของประเทศไทย ปี 2554.” (ออนไลน์) เข้าถึงได้ที่ ([http://www.pcd.go.th/info\\_serv/Eco\\_Asean/files/Report\\_Thai2554.pdf](http://www.pcd.go.th/info_serv/Eco_Asean/files/Report_Thai2554.pdf)) (5 มกราคม 2558)
- เทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2012). “เส้นใยธรรมชาติ.” (ออนไลน์) เข้าถึงได้ที่([http://epg.science.cmu.ac.th/induschem/article\\_detail.php?article\\_id=104](http://epg.science.cmu.ac.th/induschem/article_detail.php?article_id=104)) (7 พฤศจิกายน 2557)
- บุษรา สร้อยระย้า ชมภูษุช เพื่อนพิภพ ดวงกมล ตั้งสถิตพร อชชา ศิริพันธุ์ และประพาฬภรณ์ ชีรมงคล. (2014). “การพัฒนาบรรจุภัณฑ์เพื่อสิ่งแวดล้อมจากเส้นใยกล้วยสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร สำเร็จรูป.”, วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร., 7, 9-24.
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (2550). “พลาสติก.” (ออนไลน์) เข้าถึงได้ที่ ([http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable\\_plastic/history\\_plas.html](http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/history_plas.html)) (15 มกราคม 2558)
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (2550). “พลาสติกกรีไซเคิล” (ออนไลน์) เข้าถึงได้ ที่ ([http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable\\_plastic/type\\_de\\_plas.html](http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html)) (15 มกราคม 2558)
- สรินทร ลิมปนาท. (2544). “มารู้จักกับโฟมพอลิสไตรีนกันดีกว่า.” (ออนไลน์) เข้าถึงได้ที่ (<http://www.material.chula.ac.th/RADIO45/November/radio11-1.htm>) (10 มกราคม 2558)
- สวัสดิ์ ภูมิสวัสดิ์ และ ชัยยากร จันทร์สุวรรณ. (2547). “คุณสมบัติของพอลิสไตรีนสำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.”, เอกสารประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18 ประจำปี 2547, ขอนแก่น: 18-20 ตุลาคม 2547.
- หฤทภักดิ์ กิรติเสวี นัตรชัย วีระนิติสกุล และ อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี. (2553). “ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ.”, วิศวกรรมสารมก., 70, 18-32.
- Abdul Khalil, H. P. S., Siti Alwani, M., and Mohd Omar, A. K. (2007). *Chemical composition, Anatomy, Lignin distribution, and Cell wall structure of Malaysian plant waste fibers*, BioResources, North America.

- Abu-Sharkh, B. F., and Hamid, H. (2004). "Degradation study of date palm fibre/polypropylene composites in natural and artificial weathering: mechanical and thermal analysis." *Polymer Degradation and Stability*, 85(3), 967-973.
- Achilias, D. S., Kanellopoulou, I., Megalokonomos, P., Antonakou, E., and Lappas, A. A. (2007). "Chemical Recycling of Polystyrene by Pyrolysis: Potential Use of the Liquid Product for the Reproduction of Polymer." *Macromolecular Materials and Engineering*, 292(8), 923-934.
- Agung, E. H., Sapuan, S. M., Hamdan, M. M., Zaman, H. M. D. K., and Mustofa, U. (2011). "Study on abaca (*Musa textilis* Nee) fibre reinforced high impact polystyrene (HIPS) composites by thermogravimetric analysis (TGA)." *International Journal of the Physical Sciences*, 6(8), 2100-2106.
- Agunsoye, J. O., Isaac, T. S., and Samuel, S. O. (2012). "Study of Mechanical Behaviour of Coconut Shell Reinforced Polymer Matrix Composite." *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 11, 774-779.
- Akil, H. M., Omar, M. F., Mazuki, A. A. M., Safiee, S., Ishak, Z. A. M., and Abu Bakar, A. (2011). "Kenaf fiber reinforced composites: A review." *Materials & Design*, 32(8-9), 4107-4121.
- Amianti, M., and Botaro, V. R. (2008). "Recycling of EPS: A new methodology for production of concrete impregnated with polystyrene (CIP)." *Cement and Concrete Composites*, 30(1), 23-28.
- Asasutjarit, C., Hirunlabh, J., Khedari, J., Charoenvai, S., Zeghmati, B., and Shin, U. C. (2007). "Development of coconut coir-based lightweight cement board." *Construction and Building Materials*, 21(2), 277-288.
- Ashori, A. (2008). "Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries!" *Bioresource Technology*, 99(11), 4661-4667.
- Ayrilmis, N., Jarusombuti, S., Fueangvivat, V., Bauchongkol, P., and White, R. (2011). "Coir fiber reinforced polypropylene composite panel for automotive interior applications." *Fibers Polym*, 12(7), 919-926.

- Balakrishna, A., Rao, D. N., and Rakesh, A. S. (2013). "Characterization and modeling of process parameters on tensile strength of short and randomly oriented Borassus Flabellifer (Asian Palmyra) fiber reinforced composite." *Composites Part B: Engineering*, 55(0), 479-485.
- Barett (2001). "Why Does Styrofoam Dissolve in Turpentine?" (ออนไลน์) เข้าถึงได้ที่ (<http://classroom.synonym.com/styrofoam-dissolve-turpentine-19005.html>) (17 มกราคม 2558)
- Barliantiand, V., and Wiloso, E. I. (2007). "Physicochemical Treatment On Coir Dust To Improve Hydrophobicity And Oil Sorption Capacity." *AKTA KIMIA INDONESIA*, 3(1), 21-26.
- Bevington, J. C., and Huckerby, T. N. (2006). "Studies of end-groups in polystyrene using <sup>1</sup>H NMR." *European Polymer Journal*, 42(6), 1433-1436.
- Bledzki, A. K., and Gassan, J. (1999). "Composites reinforced with cellulose based fibres." *Progress in Polymer Science*, 24(2), 221-274.
- Bongarde, U. S., and Shinde, V. D. (2014). "Review on natural fiber reinforcement polymer composites." *Engineering Science and Innovative Technology*, 3(2), 431-436.
- Brahmakumar, M., Pavithran, C., and Pillai, R. M. (2005). "Coconut fibre reinforced polyethylene composites: effect of natural waxy surface layer of the fibre on fibre/matrix interfacial bonding and strength of composites." *Composites Science and Technology*, 65(3-4), 563-569.
- Brandrup, J., Immergut, E. H., and McDowell, W. (1975). *Polymer handbook*, Wiley.
- Chandra Rao, C. H., Madhusudan, S., Raghavendra, G., and Venkateswara Rao, E. (2012). "Investigation in to Wear behavior of coir Fiber Reinforced Epoxy Composites with the Taguchi Method." *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(5), 371-374.
- Cheung, H.-y., Ho, M.-p., Lau, K.-t., Cardona, F., and Hui, D. (2009). "Natural fibre-reinforced composites for bioengineering and environmental engineering applications." *Composites Part B: Engineering*, 40(7), 655-663.
- Csukas, B., Varga, M., Balogh, S., Miskolczi, N., Angyal, A., Bartha, L., Szakacs, H., and Varga, C. (2012). "Knowledge based model for polymer composite design and production." *Materials & Design*, 38(0), 74-90.

- Dhal, J. P., and Mishra, S. C. (2013). "Processing and Properties of Natural Fiber-Reinforced Polymer Composite." *Journal of Materials*, 6.
- El-Meligy, M. G., Mohamed, S. H., and Mahani, R. M. (2010). "Study mechanical, swelling and dielectric properties of prehydrolysed banana fiber – Waste polyurethane foam composites." *Carbohydrate Polymers*, 80(2), 366-372.
- Faizur Rahman, A., Arun, A. P., Sanjay Gandhi, B. (2014). "Comparative study on the mechanical properties of banana and sisal woven rovings polyester composites." *Applied Science Innovations Pvt. Ltd., India*, 364-372.
- Fakhrul, T., and Islam, M. A. (2013). "Degradation Behavior of Natural Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites." *Procedia Engineering*, 56(0), 795-800.
- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H.-P., and Sain, M. (2012). "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010." *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552-1596.
- Fitzpatrick, B., Cieran, B., Cooke, G., and Rotello, V. M. (2012). "Macromol. Chem. Phys. 17/2012." *Macromolecular Chemistry and Physics*, 213(17), 1753-1753.
- Garcia, iacute, a, M., Teresa, a., Gracia, I., Duque, G., Lucas, A. d., Rodr, and guez, J. F. (2009). *Study of the solubility and stability of polystyrene wastes in a dissolution recycling process.*
- Garcia, M., Duque, G., Gracia, I., de Lucas, A., and Rodriguez, J. (2009). "Recycling extruded polystyrene by dissolution with suitable solvents." *J Mater Cycles Waste Manag*, 11(1), 2-5.
- Garcia, M. T., Gracia, I., Duque, G., Lucas, A. d., and Rodriguez, J. F. (2009). "Study of the solubility and stability of polystyrene wastes in a dissolution recycling process." *Waste Management*, 29(6), 1814-1818.
- Geethamma, V. G., Thomas Mathew, K., Lakshminarayanan, R., and Thomas, S. (1998). "Composite of short coir fibres and natural rubber: effect of chemical modification, loading and orientation of fibre." *Polymer*, 39(6–7), 1483-1491.
- Gopinath, S., and Senthil Vadivu, K. (2014). "Mechanical Behavior of Alkali Treated Coir Fiber and Rice Husk Reinforced Epoxy." *Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(1), 1268-1271.

- Goulart, S. A. S., Oliveira, T. A., Teixeira, A., Miléo, P. C., and Mulinari, D. R. (2011). "Mechanical Behaviour of Polypropylene Reinforced Palm Fibers Composites." *Procedia Engineering*, 10(0), 2034-2039.
- Graupner, N., Herrmann, A. S., and Mussig, J. (2009). "Natural and man-made cellulose fibre-reinforced poly(lactic acid) (PLA) composites: An overview about mechanical characteristics and application areas." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(6-7), 810-821.
- Gu, H. (2009). "Tensile behaviours of the coir fibre and related composites after NaOH treatment." *Materials & Design*, 30(9), 3931-3934.
- Haque, M. M., Hasan, M., Islam, M. S., and Ali, M. E. (2009). "Physico-mechanical properties of chemically treated palm and coir fiber reinforced polypropylene composites." *Bioresource Technology*, 100(20), 4903-4906.
- Hari Setyanto, R., Diharjo., K., Made Miasa, I., and Setyono, P. (2013). "A Preliminary Study: The Influence of Alkali Treatment on Physical and Mechanical Properties of Coir Fiber." *Materials Science Research*, 2(4), 80-88.
- Ho, M.-p., Lau, K.-t., Wang, H., and Bhattacharyya, D. (2011). "Characteristics of a silk fibre reinforced biodegradable plastic." *Composites Part B: Engineering*, 42(2), 117-122.
- Hopewell, J., Dvorak, R., and Kosior, E. (2009). "Plastics recycling: challenges and opportunities." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115-2126.
- Hwang, G. C., Kim, B. K., Bae, S. Y., Yi, S. C., and Kumazawa, H. (1999). "Degradation of Polystyrene in Supercritical Acetone." *J. Ind. Eng. Chem.*, 5(2), 150-154.
- Ibrahim, M. M., Dufresne, A., El-Zawawy, W. K., and Agblevor, F. A. (2010). "Banana fibers and microfibrils as lignocellulosic reinforcements in polymer composites." *Carbohydrate Polymers*, 81(4), 811-819.
- John, M. J., and Anandjiwala, R. D. (2008). "Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites." *Polymer Composites*, 29(2), 187-207.
- John, M. J., and Thomas, S. (2008). "Biofibres and biocomposites." *Carbohydrate Polymers*, 71(3), 343-364.

- Kamide, K., Matsuda, S., and Kowsaka, K. (1988). "Dissolved State of Atactic Polystyrene in Aromatic Solvents: Approaches through <sup>1</sup>H NMR, FT-IR and Adiabatic Compressibility." *Polym J*, 20(3), 231-241.
- Kang, H.-Y., and Schoenung, J. M. (2005). "Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and technology options." *Resources, Conservation and Recycling*, 45(4), 368-400.
- Karaduman, A., Simsek, E. H., Çiçek, B., and Bilgesü, A. Y. (2002). "Thermal degradation of polystyrene wastes in various solvents." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 62(2), 273-280.
- Karthikeyan, A., and Balamurugan, K. (2012). "Effect of alkali treatment and fiber length on impact behavior of coir fiber reinforced epoxy composites." *Journal of Scientific & Industrial Research*, 71, 627-631.
- Kengkhetkit, N., and Amornsakchai, T. (2012). "Utilisation of pineapple leaf waste for plastic reinforcement: 1. A novel extraction method for short pineapple leaf fiber." *Industrial Crops and Products*, 40(0), 55-61.
- Kodama, Y. (2013). *Degradability: Enzymatic and in Simulated Compost Soil of PLLA:PCL Blend and on Their Composite with Coconut Fiber*.
- Koitabashi, M., Noguchi, M., Sameshima-Yamashita, Y., Hiradate, S., Suzuki, K., Yoshida, S., Watanabe, T., Shinozaki, Y., Tsushima, S., and Kitamoto, H. (2012). "Degradation of biodegradable plastic mulch films in soil environment by phylloplane fungi isolated from gramineous plants." *AMB Expr*, 2(1), 1-10.
- Ku, H., Wang, H., Pattarachaiyakoop, N., and Trada, M. (2011). "A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites." *Composites Part B: Engineering*, 42(4), 856-873.
- Kumar, M., Singh, R. K., H.Shekhar, and P.Poomalai (2013). "Studies on banana fiber reinforced high density polyethylene (HDPE)/polyamide (PA)-66 blend composites." *Wudpecker Journal of Food Technology*, 1(4), 062-073.
- Lee, H., Cho, D., and Han, S. (2008). "Effect of natural fiber surface treatments on the interfacial and mechanical properties of henequen/polypropylene biocomposites." *Macromol. Res.*, 16(5), 411-417.

- Liu, Y., Wang, J., Zheng, Y., and Wang, A. (2012). "Adsorption of methylene blue by kapok fiber treated by sodium chlorite optimized with response surface methodology." *Chemical Engineering Journal*, 184(0), 248-255.
- Madakson, P. B., Yawas, D.S., Apasi, A. (2012). "Characterization of Coconut Shell Ash for Potential Utilization in Metal Matrix Composites for Automotive Applications." *International Journal of Engineering Science and Technology*, 4(3).
- Manoj Kumar, R. K. S., H Shekhar, P Poomalai (2013). "Studies on banana fiber reinforced high density polyethylene (HDPE)/polyamide (PA)-66 blend composites." *Wudpecker Journal of Food Technology* 1(4), 062-073.
- Miller-Chou, B. A., and Koenig, J. L. (2003). "A review of polymer dissolution." *Progress in Polymer Science*, 28(8), 1223-1270.
- Mitra, B. C., Basak, R. K., and Sarkar, M. (1998). "Studies on jute-reinforced composites, its limitations, and some solutions through chemical modifications of fibers." *Journal of Applied Polymer Science*, 67(6), 1093-1100.
- Monteiro, S. N., Terrones, L. A. H., and D'Almeida, J. R. M. (2008). "Mechanical performance of coir fiber/polyester composites." *Polymer Testing*, 27(5), 591-595.
- Moore, D. S., and McCabe, G. P. (2006). *Introduction to the Practice of Statistics, Fifth Edition*, W.H. Freeman.
- Mukhopadhyay, S., Figueiro, R., Arpaç, Y., and Senturk, U. (2008). "Banana Fibers – Variability and Fracture Behaviour." *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 3(2).
- Mulinari, D. R., Baptista, C. A. R. P., Souza, J. V. C., and Voorwald, H. J. C. (2011). "Mechanical Properties of Coconut Fibers Reinforced Polyester Composites." *Procedia Engineering*, 10(0), 2074-2079.
- Munirah Abdullah, N., and Ahmad, I. (2012). "Effect of Chemical Treatment on Mechanical and Water-Sorption Properties Coconut Fiber-Unsaturated Polyester from Recycled PET." *ISRN Materials Science*, 2012, 8.
- Mwashaa , A., Armstrong-Richardsonb, A., and Wilsonc, W. (2013). "Management of Polystyrene Wastes Using a Supercritical Solvent - Propanone." *The Association of Professional Engineers of Trinidad and Tobago*, 41, 23-28.



- Nakamura, H., Shirakawa, Y., Kitamura, H., Sato, N., Shinji, O., Saito, K., and Takahashi, S. (2013). "Mechanism of wavelength conversion in polystyrene doped with benzoxanthene: emergence of a complex." *Sci. Rep.*, 3.
- Natarajan, K., Balasubramanya, C. (2013). "Mechanical and Morphological Study of Coir Fiber Reinforced Modified Epoxy Matrix Composites." *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(12), 583-587.
- Njuguna, J., Wambua, P., Pielichowski, K., and Kayvantash, K. (2011). "Natural Fibre-Reinforced Polymer Composites and Nanocomposites for Automotive Applications." *Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites*, 661-700.
- Odian, G. (2004). *Principles of Polymerization*, Wiley.
- Patel, M., von Thienen, N., Jochem, E., and Worrell, E. (2000). "Recycling of plastics in Germany." *Resources, Conservation and Recycling*, 29(1-2), 65-90.
- Peck, D., Kandachar, P., and Tempelman, E. (2015). "Critical materials from a product design perspective." *Materials & Design*, 65(0), 147-159.
- Polymer Science Research Center (2000). "How to a polymer get dissolved" (ออนไลน์) เข้าถึงได้  
ที่ (<http://pslc.ws/macrog/property/solpol/ps3.htm>) (14 พฤษภาคม 2558)
- Pothan, L. A., Oommen, Z., and Thomas, S. (2003). "Dynamic mechanical analysis of banana fiber reinforced polyester composites." *Composites Science and Technology*, 63(2), 283-293.
- Prakash Reddy, B., Satish, S., and Thomas Renald, C. J. (2014). "Investigation on Tensile and Flexural Properties of Coir Fiber Reinforced Isophthalic Polyester Composites." *Journal of Current Engineering and Technology*(2), 220-225.
- PrakashReddy, B., Satish, S., and ThomasRenald, C. J. (2014). "Investigation on Tensile and Flexural Properties of Coir Fiber Reinforced Isophthalic Polyester Composites." *Journal of Current Engineering and Technology*(2), 220-225.
- Rahman, M. M., and Khan, M. A. (2007). "Surface treatment of coir (*Cocos nucifera*) fibers and its influence on the fibers' physico-mechanical properties." *Composites Science and Technology*, 67(11-12), 2369-2376.

- Ramadevi Punyamurthy, D. S., Basavaraju Bennehalli, Pramod V. Badyankal (2014). "Study of the effect of chemical treatment on the tensile behaviour of abaca fiber reinforced polypropylene composites." *Journal of Advances in Chemistry*, 10(6), 2814-2822.
- Ratanakhanokchai, K., Waeonukul, R., Pason, P., Tachaapaikoon, C., Kyu, K. L., Sakka, K., Kosugi, A., and Mori, Y. (2013). *Paenibacillus curdlanolyticus Strain B-6 Multienzyme Complex: A Novel System for Biomass Utilization*.
- Rokbi, M., Osmani, H., Imad, A., and Benseddiq, N. (2011). "Effect of Chemical treatment on Flexure Properties of Natural Fiber-reinforced Polyester Composite." *Procedia Engineering*, 10(0), 2092-2097.
- Rosa, M. F., Chiou, B.-s., Medeiros, E. S., Wood, D. F., Williams, T. G., Mattoso, L. H. C., Orts, W. J., and Imam, S. H. (2009). "Effect of fiber treatments on tensile and thermal properties of starch/ethylene vinyl alcohol copolymers/coir biocomposites." *Bioresource Technology*, 100(21), 5196-5202.
- Rout, J., Misra, M., Tripathy, S. S., Nayak, S. K., and Mohanty, A. K. (2001). "The influence of fibre treatment on the performance of coir-polyester composites." *Composites Science and Technology*, 61(9), 1303-1310.
- Sabah, M., Ansari, M., Saleh, H. (2012). "A Study On Mechanical, Thermal and Morphological Properties Of Natural Fibre/Epoxy Composite." *Journal of Purity*, 1(5), 267-296.
- Salaman, A. J. (2012). "Tensile and Impact properties of Polystyrene matrix composites reinforced by Palm natural fiber and Carbon fibers." *Academic Research International*, 3(2), 114-116.
- Salton, G., and McGill, M. J. (1986). *Introduction to Modern Information Retrieval*, McGraw-Hill, Inc.
- Samia S. Mir, S. M. N. H., Md. J. Hossain, and Mahbub Hasan (2012). "Chemical Modification Effect on the Mechanical Properties of Coir Fiber." 16(2).
- Santafe Junior, H. P. G., Lopes, F. P. D., Costa, L. L., and Monteiro, S. N. (2010). "Tensile Behavior of lignocellulosic reinforced polyester composites: Part III coir fiber." *Revista Matéria*, 15(2), 202-207.

- Sgriccia, N., Hawley, M. C., and Misra, M. (2008). "Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(10), 1632-1637.
- Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A., and Ahmed, S. (2008). "Biological degradation of plastics: A comprehensive review." *Biotechnology Advances*, 26(3), 246-265.
- Shin, C., and Chase, G. G. (2005). "Nanofibers from recycle waste expanded polystyrene using natural solvent." *Polym. Bull.*, 55(3), 209-215.
- Siddique, R., Khatib, J., and Kaur, I. (2008). "Use of recycled plastic in concrete: A review." *Waste Management*, 28(10), 1835-1852.
- Sobczak, L., Lang, R. W., and Haider, A. (2012). "Polypropylene composites with natural fibers and wood – General mechanical property profiles." *Composites Science and Technology*, 72(5), 550-557.
- Souza, P. S., Rodrigues, E. F., Prêta, J. M. C., Goulart, S. A. S., and Mulinari, D. R. (2011). "Mechanical properties of HDPE/textile fibers composites." *Procedia Engineering*, 10(0), 2040-2045.
- Srinivasulu, B., Subhas, C. (2013). "Influence of Banana Fibre Chemical Modification on the Mechanical and Morphological Properties of Woven Banana Fabric/Unsaturated Polyester Resin Composites." *Polymers from Renewable Resources*, 4(2), 61-84.
- Subramanian, P. M. (2000). "Plastics recycling and waste management in the US." *Resources, Conservation and Recycling*, 28(3-4), 253-263.
- Sumaila, M., Amber, I., and Bawa, M. (2013). "Effect of fiber on the length on the physical properties of random oriented, Nonwoven short Banana (*Musa Balbisiana*) fiber/Epoxy Composite." *ASIAN JOURNAL OF NATURAL & APPLIED SCIENCES*, 2, 39-49.
- Venkateshwaran, N., and Elayaperumal, A. (2010). "Banana Fiber Reinforced Polymer Composites - A Review." *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(15), 2387-2396.
- Verma, D., Gope, P. C., Shandilya, A., Gupta, A., and Maheshwari, M. K. (2013). "Coir Fibre Reinforcement and Application in Polymer Composites: A Review." *Journal of Materials and Environmental Science*, 4(2), 263-276.

- Wambua, P., Ivens, J., and Verpoest, I. (2003). "Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?" *Composites Science and Technology*, 63(9), 1259-1264.
- Webb, J. S., Nixon, M., Eastwood, I. M., Greenhalgh, M., Robson, G. D., and Handley, P. S. (2000). "Fungal Colonization and Biodeterioration of Plasticized Polyvinyl Chloride." *Applied and Environmental Microbiology*, 66(8), 3194-3200.
- Zizumbo, A., Licea-Claverie, A., Lugo-Medina, E., Garcia-Hernandez, E., Madrigal, D., and Zizumbo, R. (2011). "Polystyrene Composites Prepared with Polystyrene Grafted-fibers of Sugarcane Bagasse as Reinforcing Material." *Journal of the Mexican Chemical Society*, 55(1), 33-41.



**ภาคผนวก**

ตารางภาคผนวกที่ 1 น้ำหนักเริ่มต้นและสุดท้ายและร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยวแต่ละชนิดขณะละลายโพลีเมทริกซ์ไตรีนที่เวลาต่างๆ (ทดลอง 3 ซ้ำ)

| เวลา  | ตัวทำละลาย | น้ำหนักตัวทำละลายเริ่มต้น (g) | น้ำหนักตัวทำละลายสุดท้าย (g) | % weight loss |
|-------|------------|-------------------------------|------------------------------|---------------|
| 1 ชม. | โทลูอีน    | 170.43                        | 163.55                       | 4.04          |
|       |            | 170.77                        | 161.36                       | 5.51          |
|       |            | 170.67                        | 161.47                       | 5.39          |
|       | ทีนเนอร์   | 168.09                        | 160.36                       | 4.60          |
|       |            | 167.89                        | 154.48                       | 7.99          |
|       |            | 167.54                        | 153.91                       | 8.13          |
|       | อะซิโตน    | 155.14                        | 125.96                       | 18.81         |
|       |            | 154.61                        | 123.58                       | 20.07         |
|       |            | 154.35                        | 125.86                       | 18.46         |
|       | น้ำมันสน   | 156.67                        | 150.95                       | 3.65          |
|       |            | 156.83                        | 151.44                       | 3.44          |
|       |            | 158.13                        | 151.78                       | 4.02          |
| 2 ชม. | โทลูอีน    | 171.52                        | 151.47                       | 11.69         |
|       |            | 170.96                        | 151.90                       | 11.15         |
|       |            | 170.79                        | 144.68                       | 15.29         |
|       | ทีนเนอร์   | 168.1                         | 129.23                       | 23.12         |
|       |            | 168.1                         | 125.6                        | 25.28         |
|       |            | 168.3                         | 126.45                       | 24.87         |
|       | อะซิโตน    | 154.68                        | 101.43                       | 34.42         |
|       |            | 156.6                         | 105.78                       | 32.45         |
|       |            | 155.58                        | 102.41                       | 34.17         |
|       | น้ำมันสน   | 158.18                        | 149.75                       | 5.33          |
|       |            | 157.45                        | 149.56                       | 5.01          |
|       |            | 157.66                        | 145.98                       | 7.41          |

ตารางภาคผนวกที่ 1 น้ำหนักเริ่มต้นและสุดท้ายและร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยวแต่ละชนิดขณะละลายโพลีพอลิस्टาไร์อินที่เวลาต่างๆ (ทดลอง 3 ซ้ำ) (ต่อ)

| เวลา  | ตัวทำละลาย | น้ำหนักตัวทำละลายเริ่มต้น (g) | น้ำหนักตัวทำละลายสุดท้าย (g) | % weight loss |
|-------|------------|-------------------------------|------------------------------|---------------|
| 3 ชม. | โทลูอิน    | 170.73                        | 144.12                       | 15.57         |
|       |            | 171.59                        | 136.17                       | 20.64         |
|       |            | 171.29                        | 137.25                       | 19.87         |
|       | ทีนเนอร์   | 168.5                         | 120.35                       | 28.58         |
|       |            | 169.06                        | 122.54                       | 27.52         |
|       |            | 169.04                        | 125.03                       | 26.03         |
|       | อะซีโตน    | 156.15                        | 90.65                        | 41.95         |
|       |            | 155.15                        | 91.43                        | 41.07         |
|       |            | 155.89                        | 91.22                        | 41.48         |
|       | น้ำมันสน   | 158.05                        | 149.28                       | 5.55          |
|       |            | 157.21                        | 147.88                       | 5.93          |
|       |            | 157.34                        | 146.77                       | 6.72          |
| 4 ชม. | โทลูอิน    | 170.4                         | 128.74                       | 24.45         |
|       |            | 170.58                        | 130.34                       | 23.59         |
|       |            | 170.52                        | 130.19                       | 23.65         |
|       | ทีนเนอร์   | 168.2                         | 113.03                       | 32.80         |
|       |            | 167.74                        | 106.82                       | 36.32         |
|       |            | 168.89                        | 111.54                       | 33.96         |
|       | อะซีโตน    | 154.5                         | 84.15                        | 45.53         |
|       |            | 154.8                         | 81.23                        | 47.52         |
|       |            | 154.86                        | 82.45                        | 46.76         |
|       | น้ำมันสน   | 157.28                        | 145.25                       | 7.65          |
|       |            | 157.74                        | 140.13                       | 11.16         |
|       |            | 157.78                        | 138.86                       | 11.99         |



ตารางภาคผนวกที่ 2 น้ำหนักเริ่มต้นและสุดท้ายและร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวทำละลายผสมระหว่างทินเนอร์กับอะซิโตนที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาการละลาย 4 ชม. (ทดลอง 3 ซ้ำ)

| ตัวทำละลาย                         | น้ำหนักตัวทำละลายเริ่มต้น (g) | น้ำหนักตัวทำละลายสุดท้าย (g) | % weight loss |
|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------|
| อะซิโตน 200 mL                     | 154.5                         | 84.15                        | 45.5          |
|                                    | 154.8                         | 81.23                        | 47.5          |
|                                    | 154.86                        | 82.45                        | 46.8          |
| ทินเนอร์ + อะซิโตน<br>100 : 100 mL | 161.95                        | 88.41                        | 45.4          |
|                                    | 161.66                        | 87.56                        | 45.8          |
|                                    | 159.89                        | 85.33                        | 46.6          |
| ทินเนอร์ + อะซิโตน<br>125 : 75 mL  | 163.69                        | 91.53                        | 44.1          |
|                                    | 164.21                        | 92.44                        | 43.7          |
|                                    | 163.76                        | 91.47                        | 44.1          |
| ทินเนอร์ + อะซิโตน<br>150 : 50 mL  | 165.83                        | 98.01                        | 40.9          |
|                                    | 166.34                        | 99.23                        | 40.3          |
|                                    | 166.07                        | 98.82                        | 40.5          |
| ทินเนอร์ 200 mL                    | 168.2                         | 113.03                       | 32.8          |
|                                    | 167.74                        | 106.82                       | 36.3          |
|                                    | 168.89                        | 111.54                       | 34.0          |

ตารางภาคผนวกที่ 3 น้ำหนักและระยะเวลาสำหรับการแข็งตัวของสารละลายโพลีเมอร์ใน  
ตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยวแต่ละชนิด

| ตารางบันทึกน้ำหนักสารละลายโพลีเมอร์ 30 g ในตัวทำละลาย 200 mL |                                   |        |        |               |        |        |              |       |        |
|--|-----------------------------------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------------|-------|--------|
| วันที่   | หลังจากการละลายโพลีเมอร์ครบ 4 ชม. |        |        |               |        |        |              |       |        |
|  | PS + โทลูอีน                      |        |        | PS + ทินเนอร์ |        |        | PS + อะซิโตน |       |        |
|  | ตัวอย่าง                          |        |        | ตัวอย่าง      |        |        | ตัวอย่าง     |       |        |
|  | 1                                 | 2      | 3      | 1             | 2      | 3      | 1            | 2     | 3      |
| 1  | 174.12                            | 160.34 | 160.19 | 155.11        | 136.82 | 141.54 | 114.15       | 118.4 | 105.38 |
| 2  | 151.43                            | 130.11 | 127.54 | 128.06        | 104.05 | 112.34 | 61.89        | 63.33 | 55.67  |
| 3  | 85.88                             | 77.64  | 71.88  | 84.51         | 69.44  | 61.44  | 52.5         | 51.01 | 51.02  |
| 4  | 54.7                              | 52.37  | 48.56  | 57.77         | 49.45  | 45.76  | 48.8         | 49.53 | 46.48  |
| 5  | 47.1                              | 47.44  | 44.41  | 50.01         | 44.03  | 39.97  | 45.5         | 47.27 | 37.63  |
| 6  | 44.07                             | 47.11  | 43.43  | 46.68         | 39.48  | 39.68  | 42.37        | 45.5  | 34.09  |
| 7  | 40.46                             | 46.84  | 42.09  | 42.46         | 39.18  | 39.44  | 41.06        | 44.89 | 33.68  |
| 8  | 39.7                              | 46.48  | 41.56  | 41.52         | 38.93  | 39.12  | 40.01        | 43.78 | 33.35  |
| 9  | 39.14                             | 46.27  | 39.06  | 40.83         | 38.6   | 38.93  | 39.11        | 42.05 | 32.93  |
| 10   | 38.7                              | 46.11  | 38.85  | 40.26         | 38.4   | 38.79  | 38.24        | 41.35 | 32.73  |
| 11   | 38.33                             | 45.86  | 38.53  | 39.81         | 38.26  | 38.56  | 37.5         | 39.35 | 32.57  |
| 12   | 38.07                             | 45.63  | 38.11  | 39.47         | 38.03  | 38.35  | 36.05        | 38.84 | 32.29  |
| 13   | 37.51                             | 42.38  | 37.97  | 38.78         | 37.8   | 38.11  | 35.5         | 38.37 | 32.08  |
| 14   | 37.35                             | 37.19  | 37.73  | 38.57         | 37.56  | 37.87  | 35.09        | 37.58 | 31.88  |
| 15   | 37.21                             | 37     | 37.53  | 38.4          | 37.23  | 37.65  | 34.59        | 37.23 | 31.86  |
| 16   | 37.01                             | 36.77  | 37.27  | 38.16         | 36.64  | 37.41  | 34.31        | 37    | 31.37  |
| 17   | 36.9                              | 36.43  | 37.12  | 38.01         | 36.53  | 37.37  | 34.13        | 36.68 | 31.33  |
| 18   | 36.81                             | 36.21  | 37.01  | 37.91         | 36.21  | 37.12  | 33.83        | 35.75 | 31.29  |
| 19   | 36.68                             | 36.15  | 36.83  | 37.73         | 36.18  | 36.97  | 33.56        | 34.91 | 31.25  |

ตารางภาคผนวกที่ 3 น้ำหนักและระยะเวลาสำหรับการแข็งตัวของสารละลายโพลีเมอไรต์ไทริน  
ในตัวทำละลายอินทรีย์เดี่ยวแต่ละชนิด (ต่อ)

| ตารางบันทึกน้ำหนักสารละลายโพลี 30 g ในตัวทำละลาย 200 mL |  |       |       |               |       |       |              |       |       |
|---|--|-------|-------|---------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| วันที่  | หลังจากการละลายโพลีเมอไรต์ไทรินครบ 4 ชม. |       |       |               |       |       |              |       |       |
|   | PS + โทลูอีน                             |       |       | PS + ทินเนอร์ |       |       | PS + อะซิโตน |       |       |
|   | ตัวอย่าง                                 |       |       | ตัวอย่าง      |       |       | ตัวอย่าง     |       |       |
|   | 1  | 2     | 3     | 1             | 2     | 3     | 1            | 2     | 3     |
| 20  | 36.53                                    | 36.01 | 36.67 | 37.56         | 35.84 | 36.77 | 33.28        | 33.56 | 31.19 |
| 21  | 36.38                                    | 35.93 | 36.49 | 37.37         | 35.77 | 36.68 | 31.19        | 31.13 | 31.1  |
| 22  | 36.26                                    | 35.8  | 36.19 | 37.21         | 35.65 | 36.59 | 31.13        | 30.89 | 31.08 |
| 23  | 36.18                                    | 35    | 35.84 | 37.14         | 35.6  | 36.47 | 31.07        | 30.89 | 31.07 |
| 24  | 36.09                                    | 34.89 | 35.67 | 36.86         | 35.36 | 35.33 | 31.04        | 30.88 | 31.07 |
| 25  | 36.3                                     | 34.66 | 35.5  | 36.74         | 35.07 | 34.86 | 31.03        | 30.88 | 31.06 |
| 26  | 35.98                                    | 34.53 | 34.93 | 36.6          | 34.89 | 34.53 | 31.03        | 30.88 | 31.06 |
| 27  | 35.82                                    | 34.49 | 34.78 | 36.33         | 34.76 | 33.94 | 31.03        | 30.88 | 31.06 |
| 28  | 35.67                                    | 34.32 | 34.44 | 36.05         | 34.63 | 33.49 | 31.03        |       | 31.06 |
| 29  | 35.52                                    | 34.19 | 34.06 | 35.76         | 34.52 | 33.07 | 31.03        |       |       |
| 30  | 35.35                                    | 34.04 | 33.82 | 35.59         | 34.44 | 32.3  |              |       |       |
| 31  | 35.22                                    | 33.97 | 33.52 | 35.47         | 34.37 | 32.29 |              |       |       |
| 32  | 34.96                                    | 33.98 | 33.38 | 35.07         | 33.43 | 32.28 |              |       |       |
| 33  | 34.87                                    | 33.98 | 33.27 | 34.72         | 33.43 | 32.27 |              |       |       |
| 34  | 34.74                                    | 33.97 | 33.15 | 34.66         | 33.42 | 32.27 |              |       |       |
| 35  | 34.68                                    | 33.97 | 33.09 | 34.58         | 33.42 | 32.26 |              |       |       |
| 36  | 34.63                                    | 33.97 | 33.08 | 33.75         | 33.42 | 32.26 |              |       |       |



ตารางภาคผนวกที่ 4 น้ำหนักและระยะเวลาสำหรับการแข็งตัวของสารละลายโฟมพอลิस्टาไรีนในตัวทำละลายอินทรีย์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ

| ตารางบันทึกน้ำหนักสารละลายพอลิस्टาไรีน ในตัวทำละลายผสมที่อัตราส่วนต่างๆ |                                   |        |        |                                   |        |        |                                    |       |        |
|---|-----------------------------------|--------|--------|-----------------------------------|--------|--------|------------------------------------|-------|--------|
| วันที่  | ทินเนอร์ : อะซิโตน ( 150 : 50 mL) |        |        | ทินเนอร์ : อะซิโตน ( 125 : 75 mL) |        |        | ทินเนอร์ : อะซิโตน ( 100 : 100 mL) |       |        |
|   | ตัวอย่าง                          |        |        | ตัวอย่าง                          |        |        | ตัวอย่าง                           |       |        |
|   | 1                                 | 2      | 3      | 1                                 | 2      | 3      | 1                                  | 2     | 3      |
| 1   | 128.01                            | 125.85 | 127.83 | 121.53                            | 117.62 | 123.03 | 118.41                             | 92.53 | 114.24 |
| 2   | 73.11                             | 72.53  | 72.65  | 68.54                             | 73.65  | 66.64  | 64.57                              | 55.78 | 62.54  |
| 3   | 58.43                             | 57.67  | 56.46  | 56.86                             | 54.24  | 56.09  | 52.65                              | 40.55 | 50.35  |
| 4   | 55.77                             | 53.54  | 53.94  | 45.97                             | 43.76  | 44.35  | 45.13                              | 33.75 | 43.92  |
| 5   | 49.05                             | 47.98  | 48.73  | 44.01                             | 39.64  | 41.62  | 43.76                              | 32.03 | 41.59  |
| 6   | 45.54                             | 41.45  | 43.24  | 40.75                             | 38.75  | 38.35  | 39.78                              | 31.34 | 39.37  |
| 7   | 42.72                             | 39.51  | 40.53  | 39.54                             | 38.23  | 37.24  | 38.63                              | 31.1  | 38.62  |
| 8   | 40.31                             | 38.63  | 39.47  | 39.02                             | 37.86  | 36.76  | 38.01                              | 30.96 | 36.72  |
| 9   | 39.54                             | 36.77  | 38.75  | 38.64                             | 37.43  | 35.88  | 37.42                              | 30.81 | 33.44  |
| 10  | 38.98                             | 35.46  | 37     | 38.33                             | 35.55  | 35.57  | 37                                 | 30.75 | 32.95  |
| 11  | 38.25                             | 35.08  | 36.46  | 37.97                             | 33.97  | 34.73  | 36.64                              | 30.72 | 32.28  |
| 12  | 37.86                             | 34.85  | 35.27  | 37.64                             | 33.34  | 33.91  | 36.56                              | 30.68 | 32.04  |
| 13  | 37.37                             | 34.49  | 34.88  | 37.21                             | 32.96  | 33.75  | 35.32                              | 30.66 | 31.82  |
| 14  | 37.98                             | 34.24  | 34.46  | 36.96                             | 32.69  | 33.64  | 34.58                              | 30.64 | 31.54  |

ตารางภาคผนวกที่ 4 น้ำหนักและระยะเวลาสำหรับการแข็งตัวของสารละลายโฟมพอลิสไตรีนในตัวอย่างละลายอินทรีย์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ(ต่อ)

| ตารางบันทึกน้ำหนักสารละลายพอลิสไตรีน ในตัวอย่างละลายผสมที่อัตราส่วนต่างๆ |                                   |       |       |                                   |       |       |                                    |       |       |
|--|-----------------------------------|-------|-------|-----------------------------------|-------|-------|------------------------------------|-------|-------|
| วันที่   | ทินเนอร์ : อะซิโตน ( 150 : 50 mL) |       |       | ทินเนอร์ : อะซิโตน ( 125 : 75 mL) |       |       | ทินเนอร์ : อะซิโตน ( 100 : 100 mL) |       |       |
|  | ตัวอย่าง                          |       |       | ตัวอย่าง                          |       |       | ตัวอย่าง                           |       |       |
|  | 1                                 | 2     | 3     | 1                                 | 2     | 3     | 1                                  | 2     | 3     |
| 15   | 37.33                             | 33.87 | 33.83 | 36.78                             | 32.66 | 33.56 | 33.87                              | 30.62 | 31.47 |
| 16   | 36.34                             | 33.56 | 33.64 | 36.05                             | 32.64 | 33.47 | 32.31                              | 30.6  | 31.4  |
| 17   | 36.13                             | 33.32 | 33.54 | 35.88                             | 32.62 | 33.43 | 32.29                              | 30.59 | 31.38 |
| 18   | 35.86                             | 33.24 | 33.51 | 35.54                             | 32.61 | 33.41 | 32.28                              | 30.58 | 31.36 |
| 19   | 35.55                             | 33.19 | 33.47 | 34.56                             | 32.59 | 33.39 | 32.28                              | 30.58 | 31.35 |
| 20   | 35.17                             | 33.13 | 33.44 | 34.12                             | 32.58 | 33.37 | 32.27                              | 30.57 | 31.34 |
| 21   | 34.9                              | 33.07 | 33.43 | 34.05                             | 32.58 | 33.36 | 32.27                              | 30.57 | 31.34 |
| 22   | 34.54                             | 32.98 | 33.42 | 33.88                             | 32.57 | 33.45 | 32.27                              | 30.57 | 31.33 |
| 23   | 34.23                             | 32.96 | 33.39 | 33.73                             | 32.56 | 33.45 | 32.27                              | 30.56 | 31.33 |
| 24   | 34.2                              | 32.95 | 33.38 | 33.7                              | 32.56 | 33.44 | 32.26                              | 30.56 | 31.32 |
| 25   | 34.01                             | 32.94 | 33.37 | 33.64                             | 32.56 | 33.43 | 32.26                              | 30.56 | 31.32 |
| 26   | 33.98                             | 32.93 | 33.36 | 33.64                             | 32.55 | 33.43 | 32.26                              | 30.56 | 31.32 |
| 27   | 33.97                             | 32.92 | 33.36 | 33.63                             | 32.55 | 33.43 | 32.26                              | 30.56 | 31.32 |
| 28   | 33.97                             | 32.92 | 33.36 | 33.63                             | 32.55 | 32.42 | 32.26                              |       | 31.32 |

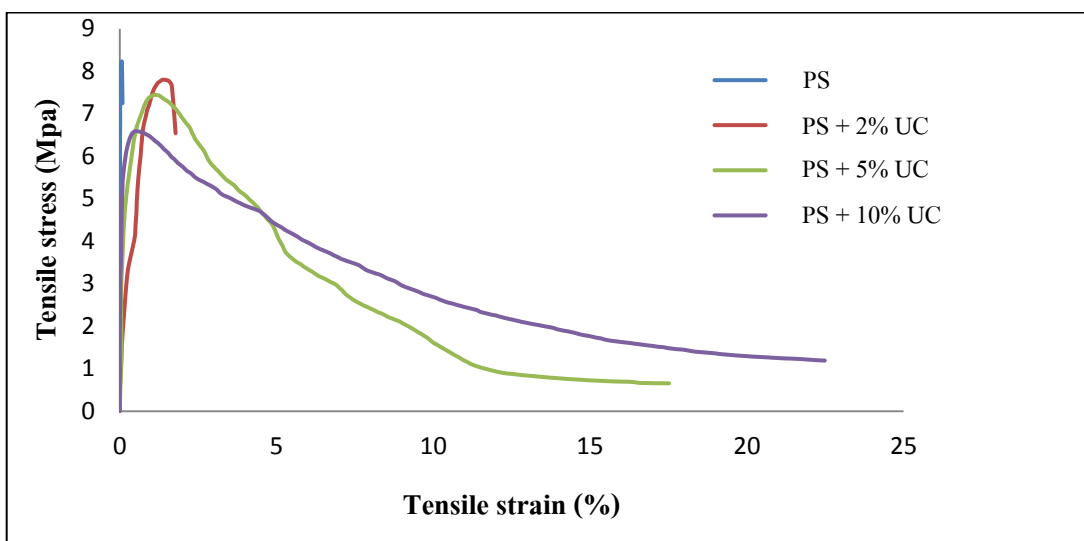
ตารางภาคผนวกที่ 4 น้ำหนักและระยะเวลาสำหรับการแข็งตัวของสารละลายโพลีเอสเตอร์ในตัวอย่างละลายอินทรีย์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ (ต่อ)

| ตารางบันทึกน้ำหนักสารละลายโพลีเอสเตอร์ในตัวอย่างผสมที่อัตราส่วนต่างๆ |                                   |       |       |                                   |       |       |                                    |   |       |
|--|-----------------------------------|-------|-------|-----------------------------------|-------|-------|------------------------------------|---|-------|
| วันที่   | ทินเนอร์ : อะซิโตน ( 150 : 50 mL) |       |       | ทินเนอร์ : อะซิโตน ( 125 : 75 mL) |       |       | ทินเนอร์ : อะซิโตน ( 100 : 100 mL) |   |       |
|  | ตัวอย่าง                          |       |       | ตัวอย่าง                          |       |       | ตัวอย่าง                           |   |       |
|  | 1                                 | 2     | 3     | 1                                 | 2     | 3     | 1                                  | 2 | 3     |
| 29   | 33.96                             | 32.91 | 33.35 | 33.62                             | 32.55 | 32.42 | 32.26                              |   | 31.32 |
| 30   | 33.95                             | 32.91 | 33.35 | 33.62                             | 32.55 | 32.42 |                                    |   |       |
| 31   | 33.95                             | 32.91 | 33.35 | 33.62                             |       | 32.42 |                                    |   |       |
| 32   | 33.95                             | 32.91 | 33.35 | 33.62                             |       |       |                                    |   |       |
| 33   | 33.95                             | 32.91 | 33.35 |                                   |       |       |                                    |   |       |

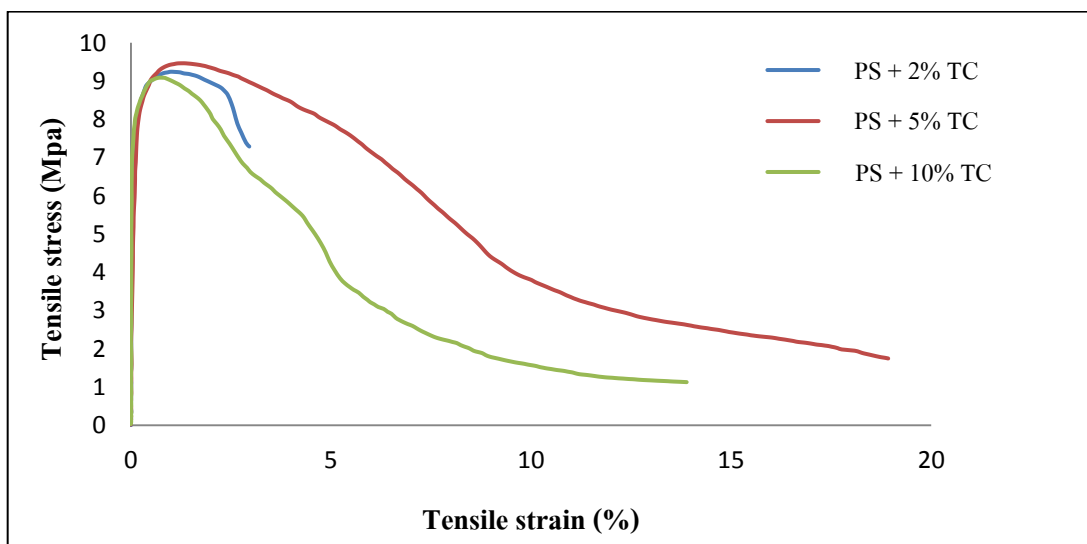
ตารางภาคผนวกที่ 5 น้ำหนักเริ่มต้นและน้ำหนักสุดท้ายของวัสดุในการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังกลบในดินธรรมชาติเป็นเวลา 10 วัน

| ตัวอย่าง |            | น้ำหนักเริ่มต้น (mg) | น้ำหนักสุดท้าย (mg) | น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง (mg) |
|----------|------------|----------------------|---------------------|----------------------------|
| PS Foam  | ตัวอย่าง 1 | 22.9                 | 30.6                | + 7.7                      |
|          | ตัวอย่าง 2 | 25.4                 | 33.1                | + 7.7                      |
|          | ตัวอย่าง 3 | 22.1                 | 27.6                | + 5.5                      |
| PS       | ตัวอย่าง 1 | 730.5                | 723.9               | - 6.6                      |
|          | ตัวอย่าง 2 | 805.5                | 798.5               | - 7.0                      |
|          | ตัวอย่าง 3 | 858.5                | 849.2               | - 9.3                      |
| PS + TC  | ตัวอย่าง 1 | 1270.1               | 1228.7              | - 41.4                     |
|          | ตัวอย่าง 2 | 1331.1               | 1299.8              | - 31.3                     |
|          | ตัวอย่าง 3 | 1317.5               | 1270.6              | - 46.9                     |
| PS + TB  | ตัวอย่าง 1 | 1406.7               | 1389.8              | - 16.9                     |
|          | ตัวอย่าง 2 | 1154.0               | 1135.5              | - 18.5                     |
|          | ตัวอย่าง 3 | 1208.6               | 1178.4              | - 30.2                     |

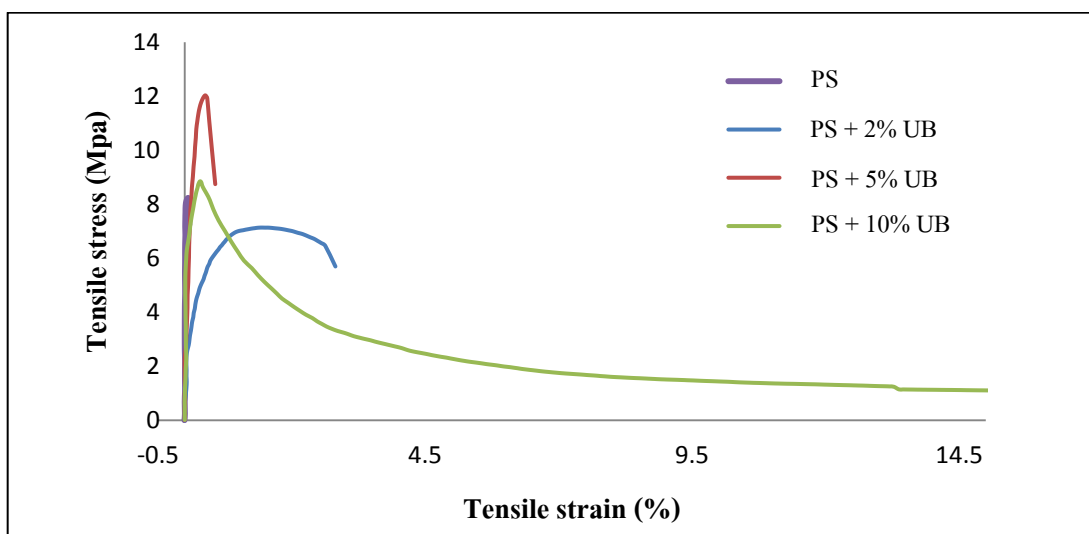




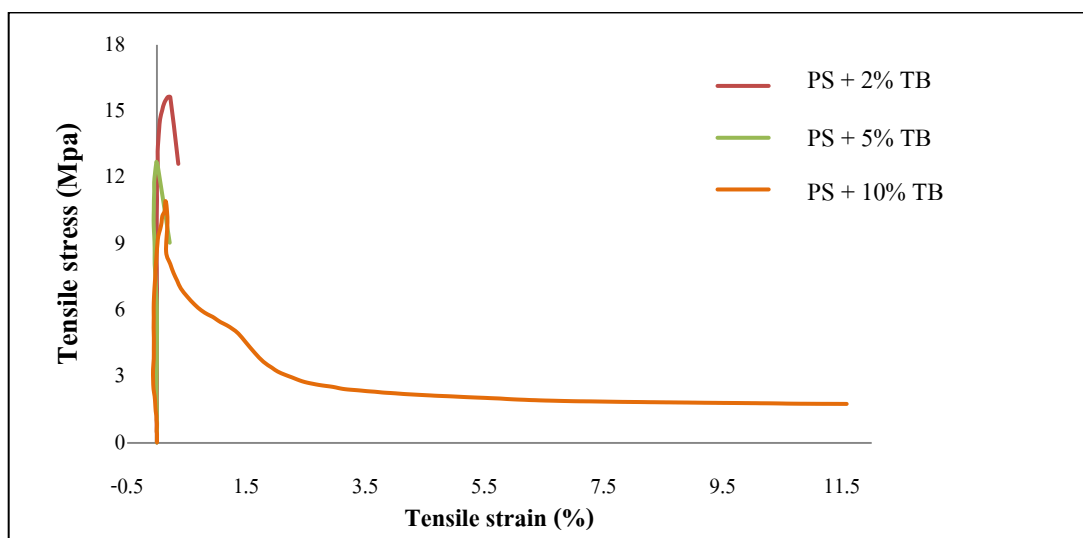
รูปภาคผนวกที่ 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile stress และ Tensile strain ของพอลิस्टาไร์นรีไซเคิล (PS) และวัสดุเชิงประกอบพอลิस्टาไร์นรีไซเคิลกับเส้นใยมะพร้าวไม่ปรับสภาพ (PS + UC) ที่ปริมาณ 2, 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก



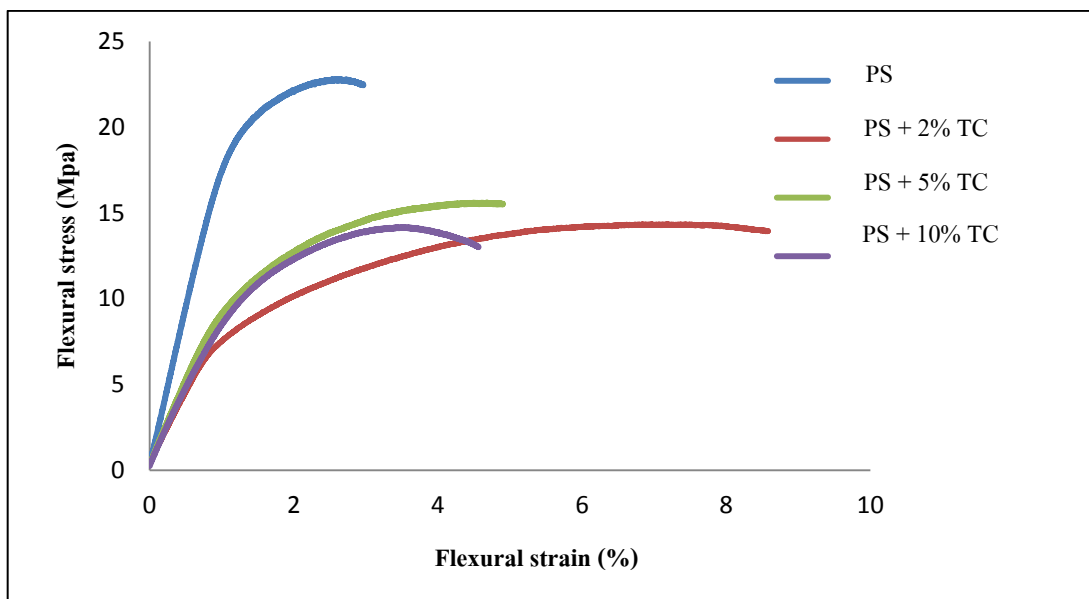
รูปภาคผนวกที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile stress และ Tensile strain ของวัสดุเชิงประกอบพอลิस्टาไร์นรีไซเคิลกับเส้นใยมะพร้าวปรับสภาพ (PS + TC) ที่ปริมาณ 2, 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก



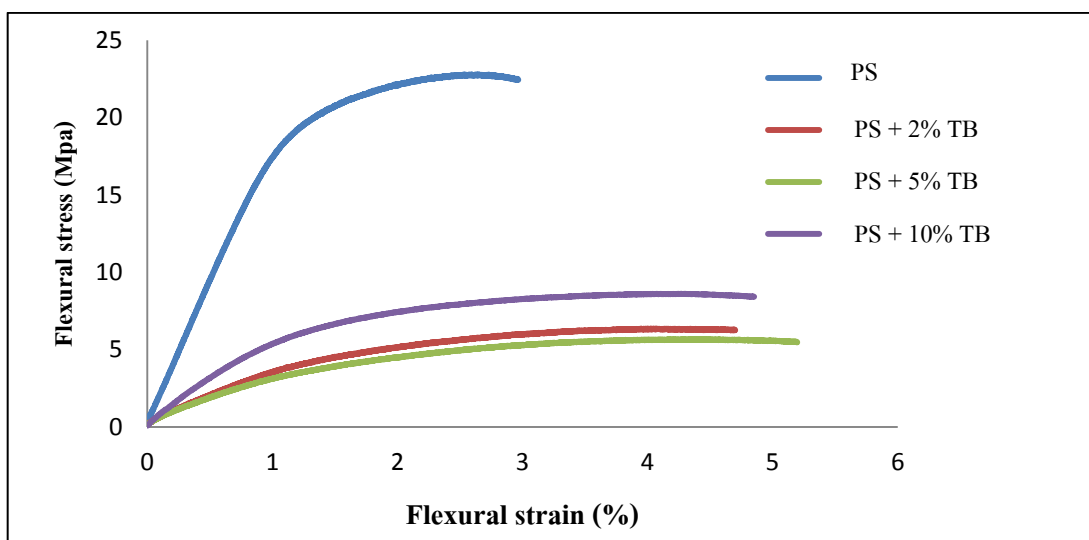
รูปภาคผนวกที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile stress และ Tensile strain ของพอลิस्टาไรรีนรีไซเคิลที่ไม่เติมเส้นใย (PS) และวัสดุเชิงประกอบพอลิस्टาไรรีนรีไซเคิลกับเส้นใยกล้วยไม้ปรับสภาพ (PS + UB) ที่ปริมาณ 2, 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก



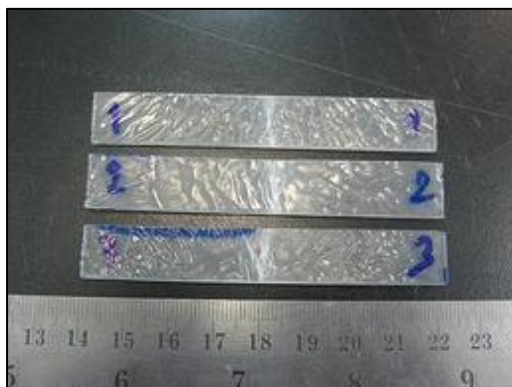
รูปภาคผนวกที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile stress และ Tensile strain ของวัสดุเชิงประกอบพอลิस्टาไรรีนรีไซเคิลกับเส้นใยกล้วยไม้ปรับสภาพ (PS + TB) ที่ปริมาณ 2, 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก



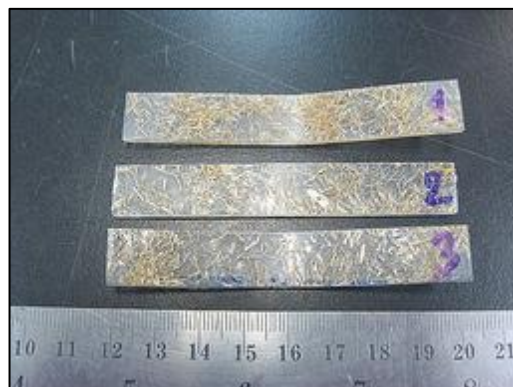
รูปภาคผนวกที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural stress และ Flexural strain ของพอลิस्टาไร์นรีไซเคิล (PS) และวัสดุเชิงประกอบพอลิस्टาไร์นรีไซเคิลกับเส้นใยมะพร้าวปรับสภาพ (PS + TC) ที่ปริมาณ 2, 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก



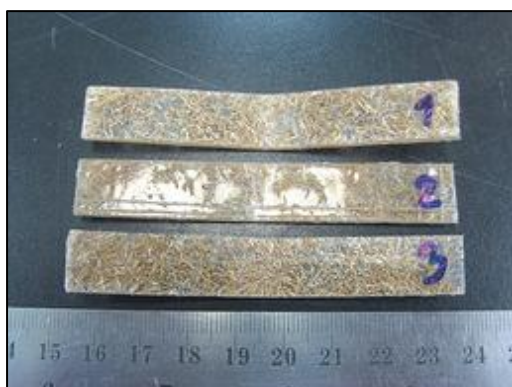
รูปภาคผนวกที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural stress และ Flexural strain ของพอลิस्टาไร์นรีไซเคิล (PS) และวัสดุเชิงประกอบพอลิस्टาไร์นรีไซเคิลกับเส้นใยกล้วยปรับสภาพ (PS + TB) ที่ปริมาณ 2, 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก



(ก)



(ข)

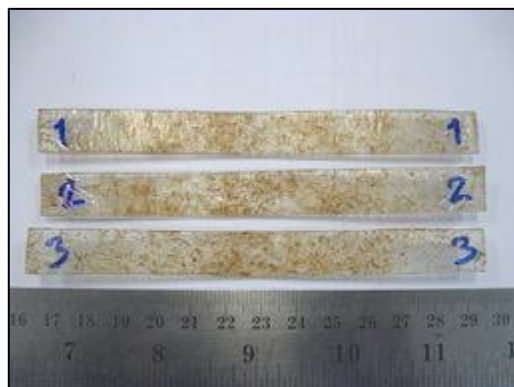


(ค)

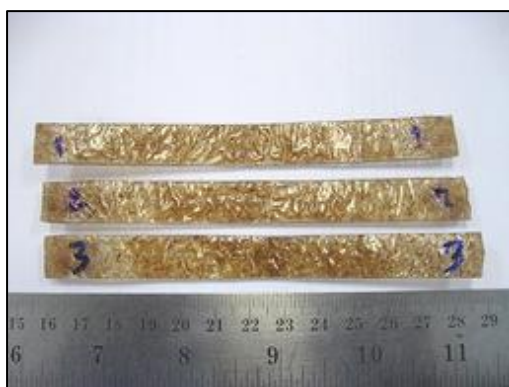


(ง)

รูปภาคผนวกที่ 7 ลักษณะการค้ำงของพอลิสไตรีนรีไซเคิลและวัสดุเชิงประกอบพอลิสไตรีนรีไซเคิลกับเส้นใยมะพร้าวหลังการทดสอบความทนต่อแรงดัดโค้ง (ก) PS (ข) PS + 2% TC (ค) PS + 5% TC และ (ง) PS + 10% TC



(ก)

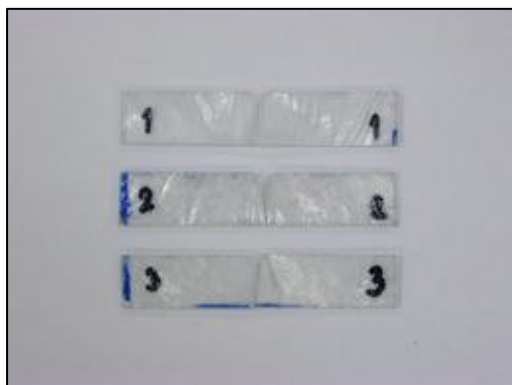


(ข)

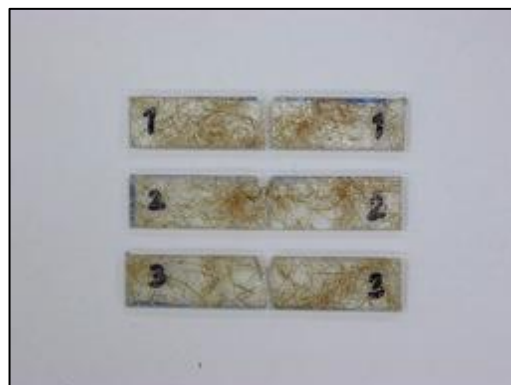


(ค)

**รูปภาคผนวกที่ 8** ลักษณะการตัดโค้งของวัสดุเชิงประกอบพอลิสไตรีนรีไซเคิลกับเส้นใยกล้วยหลังการทดสอบความทนต่อแรงดัดโค้ง (ก) PS + 2% TB (ข) PS + 5% TB และ (ค) PS + 10% TB



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

**รูปภาคผนวกที่ 9** ลักษณะการแตกหักของพอลิस्टาไร์นรีไซเคิลและวัสดุเชิงประกอบพอลิस्टาไร์นรีไซเคิลกับเส้นใยมะพร้าวหลังการทดสอบความทนต่อแรงกระแทก (ก) PS (ข) PS + 2% TC (ค) PS + 5% TC และ (ง) PS + 10% TC



(ก)



(ข)



(ค)

**รูปภาคผนวกที่ 10** ลักษณะการแตกหักของวัสดุเชิงประกอบพอลิस्टาไทรนรีไซเคิลกับเส้นใยกล้วยหลังการทดสอบความทนต่อแรงกระแทก (ก) PS + 2% TB (ข) PS + 5% TB และ (ค) PS + 10% TB