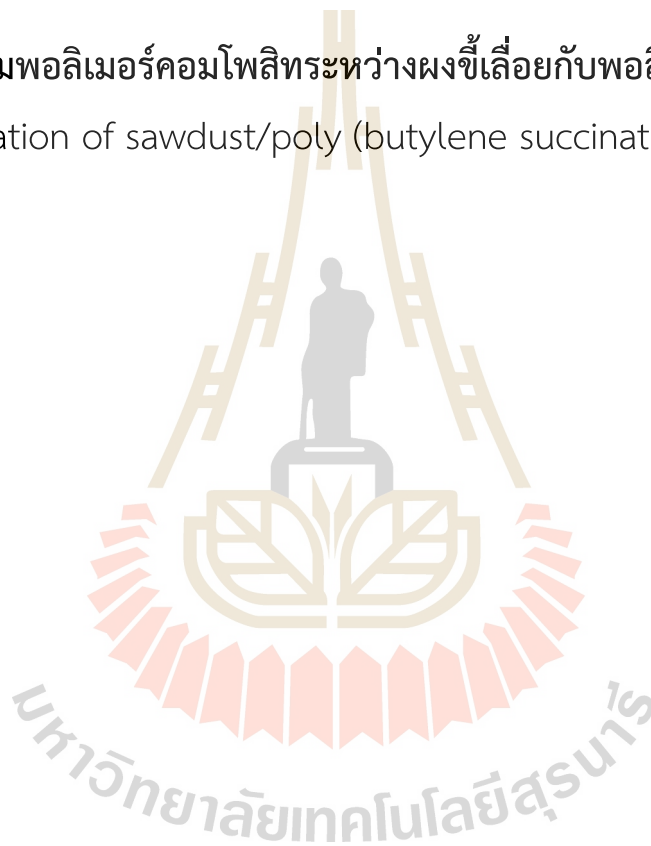




รายงานการวิจัย

การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยู่กับพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต  
(Preparation of sawdust/poly (butylene succinate) composites)



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยนี้เป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยกับพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต  
(Preparation of sawdust/poly (butylene succinate) composites)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร. กษมา จารุกำจร

สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2558  
ผลงานวิจัยนี้เป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กรกฎาคม 2562

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยู่กับพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต ซึ่งได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2558 ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัย นางสาวรพิตา จารปัญญาชีพ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุรนารี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัทคลาเรียนท์ เคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Exolit AP 765, Clariant) และโรงเลื่อยหัวทะเล จังหวัดนครราชสีมา ที่ให้ความอนุเคราะห์ผงซีลี้อยู่ (Albizia lebbek Benth)



## บทคัดย่อ

ผลของปริมาณของผงซีลี้อยู่ต่อสมบัติทางกล สมบัติความต้านทานต่อการติดไฟ สมบัติทางความร้อนและสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยู่และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตถูกวิเคราะห์ ปริมาณผงซีลี้อยู่คือ 10 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความต้านทานต่อแรงดึง ความยืดหยุ่นสูงสุด ณ จุดขาด ความต้านทานต่อแรงกระแทก ความต้านทานต่อการติดไฟ และความเสถียรต่อความร้อนลดลงเมื่อปริมาณผงซีลี้อยู่เพิ่มขึ้น ในขณะที่มอดูลัสแรงดึงเพิ่มขึ้น พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยู่และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีปริมาณผงซีลี้อยู่ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแสดงสมบัติทางกล สมบัติความต้านทานต่อการติดไฟ ความเสถียรต่อความร้อนที่เหมาะสมที่สุด ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นถึงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟซที่ไม่ดีระหว่างผงซีลี้อยู่และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตถูกนำมาใช้เป็นสารหน่วงไฟที่ปริมาณ 10 20 และ 30 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิต สมบัติความต้านทานต่อการติดไฟและมอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตถูกปรับปรุงเมื่อเพิ่มปริมาณของสารหน่วงไฟ ในขณะที่ความต้านทานต่อแรงดึง การยึดหยุ่นสูงสุด ณ จุดขาด ความต้านทานต่อแรงกระแทกและความเสถียรต่อความร้อนลดลง ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นการยึดติดที่อินเตอร์เฟซที่ไม่ดีระหว่างแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยู่ที่ผ่านและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตในปริมาณ 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิตแสดงสมบัติทางกล สมบัติความต้านทานต่อการติดไฟและความเสถียรต่อความร้อนที่เหมาะสมที่สุด

นอกจากนี้ มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตถูกนำมาใช้เป็นสารช่วยให้เข้ากันที่ปริมาณ 3 5 และ 10 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิต เมื่อเพิ่มปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ความต้านทานต่อแรงดึง การยึดหยุ่นสูงสุด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ไม่ส่งผลต่อมอดูลัสแรงดึงและสมบัติความต้านทานต่อการติดไฟ แต่อย่างไรก็ตามความเสถียรต่อความร้อนลดลงเมื่อปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเพิ่มขึ้น ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นไม่เพียงแต่การปรับปรุงการยึดติดที่อินเตอร์เฟซระหว่างสารตัวเติมและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต แต่ยังแสดงการกระจายตัวที่ดีของสารหน่วงไฟและผงซีลี้อยู่ในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

## Abstract

Effect of sawdust content on mechanical, flame retarding, thermal and morphological properties of sawdust/poly (butylene succinate) (PBS) composites were examined. Sawdust contents were 10, 20, 30 and 40 wt%. Tensile strength, elongation at break, impact strength, flame retardancy and thermal stability of the composites were decreased with increasing untreated sawdust content while tensile modulus was increased. Sawdust/ PBS ( 30/ 70) composite showed the optimum mechanical properties, flame retardancy and thermal stability. SEM micrographs revealed poor interfacial adhesion between sawdust and PBS.

Ammonium polyphosphate (APP) was used as a flame retardant at contents of 10, 20 and 30 phr. Flame retardancy and tensile modulus of the composites were improved with increasing APP content while tensile strength, elongation at break, impact strength and thermal stability were reduced. SEM micrographs showed the poor interfacial adhesion between APP and PBS matrix. Sawdust/PBS composite containing 20 phr of APP showed the optimum mechanical properties, flame retardancy and thermal stability.

In addition, maleic anhydride grafted poly (butylene succinate) (PBS-g-MA) was used as a compatibilizer and its contents were 3, 5 and 10 phr. With increasing PBS-g-MA content, tensile strength, elongation at break and impact strength of the composites were improved while tensile modulus and flame retardancy were insignificantly changed. However, thermal stability of the composites was decreased when PBS-g-MA content was increased. SEM micrographs revealed not only the enhancement of interfacial adhesion between fillers and PBS matrix but also good distribution of flame retardants and sawdust in PBS.

## สารบัญ

หน้า

|                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| กิตติกรรมประกาศ.....                                                                                                                          | ก  |
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                                                                                                          | ข  |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                                                                                                       | ค  |
| สารบัญ.....                                                                                                                                   | ง  |
| สารบัญตาราง.....                                                                                                                              | ช  |
| สารบัญรูปภาพ.....                                                                                                                             | ซ  |
| บทที่ 1      บทนำ.....                                                                                                                        | 1  |
| 1.1      ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....                                                                                          | 1  |
| 1.2      วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....                                                                                                     | 3  |
| 1.3      ขอบเขตของโครงการวิจัย.....                                                                                                           | 3  |
| 1.4      ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....                                                                                                    | 4  |
| บทที่ 2      ภูมิหลัง.....                                                                                                                    | 5  |
| 2.1      คุณลักษณะของไม้.....                                                                                                                 | 5  |
| 2.2      พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลส<br>และพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....                                         | 5  |
| 2.3      การปรับปรุงความเข้ากันระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลส<br>และพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....                                          | 8  |
| 2.4      การปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการติดไฟของ<br>พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลส<br>และพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ..... | 10 |
| บทที่ 3      วัสดุและการทดลอง.....                                                                                                            | 13 |
| 3.1      วัสดุ.....                                                                                                                           | 13 |
| 3.2      การทดลอง.....                                                                                                                        | 13 |
| 3.2.1      การเตรียมผงซีลี้อย.....                                                                                                            | 13 |
| 3.2.2      การเตรียมมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีน<br>ซัคซิเนต.....                                                                      | 13 |
| 3.2.3      การวิเคราะห์สมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์<br>พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต.....                                                          | 13 |
| 3.2.3.1      เพอร์เซ็นต์การกราฟท์.....                                                                                                        | 13 |

## สารบัญ (ต่อ)

|         | หน้า                                                                                                                                                         |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | 3.2.3.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน.....14                                                                                                                      |
|         | 3.2.4 การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต.....14                                                                                                                      |
|         | 3.2.5 การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต.....15                                                                                                              |
|         | 3.2.5.1 สมบัติทางกล.....15                                                                                                                                   |
|         | 3.2.5.2 สมบัติความต้านทานต่อการตีไฟ.....15                                                                                                                   |
|         | 3.2.5.3 สมบัติทางความร้อน.....16                                                                                                                             |
|         | 3.2.5.4 สัณฐานวิทยา.....16                                                                                                                                   |
| บทที่ 4 | ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....17                                                                                                                              |
| 4.1     | ผลของปริมาณผงซีลี้อยต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์<br>คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต.....17                                                 |
| 4.1.1   | สมบัติทางกล.....17                                                                                                                                           |
| 4.1.2   | สมบัติความต้านทานต่อการตีไฟ.....20                                                                                                                           |
| 4.1.3   | สมบัติทางความร้อน.....21                                                                                                                                     |
| 4.1.4   | สัณฐานวิทยา.....23                                                                                                                                           |
| 4.2     | ผลของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่อสมบัติทางกายภาพ<br>ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและ<br>พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต.....24                                        |
| 4.2.1   | สมบัติทางกล.....24                                                                                                                                           |
| 4.2.2   | สมบัติความต้านทานต่อการตีไฟ.....27                                                                                                                           |
| 4.2.3   | สมบัติทางความร้อน.....28                                                                                                                                     |
| 4.2.4   | สัณฐานวิทยา.....31                                                                                                                                           |
| 4.3     | ผลสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์<br>คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต<br>ที่มีการใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต.....32 |
| 4.3.1   | การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและเปอร์เซ็นต์การกราฟท์<br>ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต.....32                                                     |
| 4.3.2   | สมบัติทางกล.....33                                                                                                                                           |
| 4.3.3   | สมบัติความต้านทานต่อการตีไฟ.....36                                                                                                                           |
| 4.3.4   | สมบัติทางความร้อน.....37                                                                                                                                     |

## สารบัญ (ต่อ)

|                               | หน้า |
|-------------------------------|------|
| 4.3.5 สัณฐานวิทยา.....        | 40   |
| บทที่ 5   สรุปผลการทดลอง..... | 43   |
| บรรณานุกรม.....               | 44   |
| ประวัติผู้วิจัย.....          | 47   |





## สารบัญตาราง

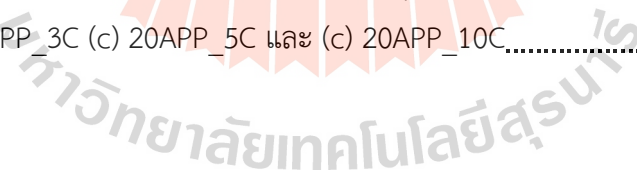
| ตารางที่ | หน้า                                                                                                                                                                                                                                                     |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2.1      | องค์ประกอบทางเคมีของไม้.....5                                                                                                                                                                                                                            |
| 4.1      | สมบัติทางกลของพอลิবিวิธินซ์คซิเน็ตและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่าง<br>ผงซีลี้อยและพอลิবিวิธินซ์คซิเน็ตที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ.....19                                                                                                                          |
| 4.2      | อัตราการเผาไหม้ของพอลิবিวิธินซ์คซิเน็ตและพอลิเมอร์คอมโพสิท<br>ระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิธินซ์คซิเน็ตที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ.....20                                                                                                                      |
| 4.3      | อุณหภูมิการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิবিวิธินซ์คซิเน็ต ผงซีลี้อย<br>และพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิธินซ์คซิเน็ต<br>ที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ.....21                                                                                       |
| 4.4      | สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและ<br>พอลิবিวิธินซ์คซิเน็ตที่ปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่างๆ.....26                                                                                                                                      |
| 4.5      | อัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและ<br>พอลิবিวิธินซ์คซิเน็ตที่ปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่างๆ.....28                                                                                                                                  |
| 4.6      | ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่าง<br>ผงซีลี้อยและพอลิবিวิธินซ์คซิเน็ตที่ปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่างๆ.....30                                                                                                                   |
| 4.7      | สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและ<br>พอลิবিวิธินซ์คซิเน็ตที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20<br>ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ปริมาณ<br>มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิবিวิธินซ์คซิเน็ตต่างๆ.....35                     |
| 4.8      | อัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและ<br>พอลิবিวิธินซ์คซิเน็ตที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20<br>ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์<br>กราฟท์พอลิবিวิธินซ์คซิเน็ตต่างๆ.....37                 |
| 4.9      | ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่าง<br>ผงซีลี้อยและพอลิবিวิธินซ์คซิเน็ตที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียม<br>พอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ปริมาณ<br>มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิবিวิธินซ์คซิเน็ตต่างๆ.....39 |

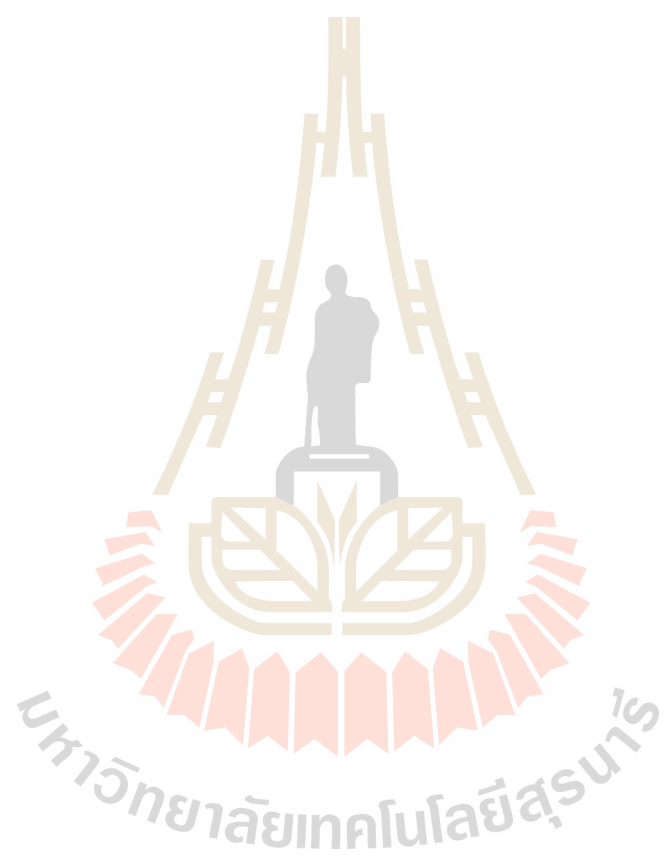
สารบัญรูปภาพ

| รูปที่ | หน้า                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2.1    | โครงสร้างทางเคมีของ (a) เซลลูโลส (b) เฮมิเซลลูโลส และ (c) ลิกนิน.....6                                                                                                                                                                                |
| 4.1    | สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิবিวิลินซัคซิเนตและ<br>พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิลินซัคซิเนต<br>ที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ (a) ความต้านทาน ต่อแรงดึงและมอดูลัสแรงดึง<br>(b) ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อแรงกระแทก.....18   |
| 4.2    | ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิবিวิลินซัคซิเนต ผงซีลี้อย<br>และพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิลินซัคซิเนต<br>ที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ (a) TGA และ (b) DTGA.....22                                                                   |
| 4.3    | ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์<br>คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิลินซัคซิเนตที่ปริมาณ<br>ผงซีลี้อยต่างๆที่กำลังขยาย 100 เท่า (a) 90PBS/10sawdust<br>(b) 80PBS/20sawdust (c) 70PBS/30sawdust (d) 60PBS/40sawdust.....23 |
| 4.4    | สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิลินซัคซิเนต<br>ที่ปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่างๆ (a) ความต้านทานต่อแรงดึง<br>และมอดูลัสแรงดึง และ (b) ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดและ<br>ความต้านทานต่อแรงกระแทก.....25                          |
| 4.5    | ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่าง<br>ผงซีลี้อยและพอลิবিวิลินซัคซิเนตที่ปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่างๆ<br>(a) TGA และ (b) DTGA.....29                                                                                         |
| 4.6    | ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวที่แตกหัก<br>จากแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิลินซัคซิเนต<br>ที่ปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่างๆ ที่กำลังขยาย 1000 เท่า<br>(a) 10APP (b) 20APP และ (c) 30APP.....31      |
| 4.7    | อนุพันธ์ลำดับสองของ IR สเปกตรัมของพอลิবিวิลินซัคซิเนต<br>มาเลอิกแอนไฮไดรด์และมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิবিวิลินซัคซิเนต.....32                                                                                                                        |

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4.8    | สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตต่างๆ (a) ความต้านทานต่อแรงดึงและมอดูลัสแรงดึง และ (b) ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดและความต้านทานต่อแรงกระแทก.....34              |
| 4.9    | ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตต่างๆ (a) TGA และ (b) DTGA.....38                                                                        |
| 4.10   | ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตต่างๆ ที่กำลังขยาย 100 เท่า (a) 20APP (b) 20APP_3C (c) 20APP_5C และ (c) 20APP_10C.....41  |
| 4.11   | ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตต่างๆ ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (a) 20APP (b) 20APP_3C (c) 20APP_5C และ (c) 20APP_10C.....42 |





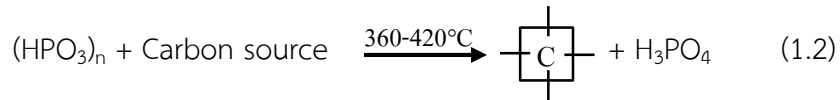
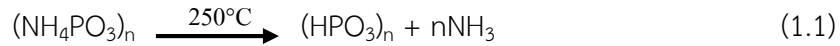
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในปัจจุบัน มีการใช้งานผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพอลิเมอร์กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากพอลิเมอร์มีการสลายตัวช้าภายใต้สภาวะแวดล้อมจึงก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม การใช้พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable polymer) เป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหา พอลิบิวทีเรต (Poly (butylene succinate)) เป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความเหนียวสูง (High toughness) การขึ้นรูปง่าย (Good processability) และมีสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ที่ดี (Dorez และคณะ, 2013) แต่อย่างไรก็ตามพอลิบิวทีเรตชนิดนี้มีราคาสูงจึงมีการใช้งานที่จำกัด การใส่สารตัวเติมเซลลูโลส (Lignocellulosic fillers) เป็นแนวทางหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการลดต้นทุน นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับ สารตัวเติมสังเคราะห์ (Synthetic filler) เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fiber) และสารตัวเติมอนินทรีย์ (Inorganic filler) สารตัวเติมเซลลูโลสนั้นมีราคาถูกกว่าและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ผงซีลี้อยเป็นสารตัวเติมเซลลูโลสชนิดหนึ่งที่ได้จากอุตสาหกรรมการแปรรูปไม้ซึ่งมีการนำไปใช้ประโยชน์น้อย เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงและนำมาทำเป็นไม้อัด ดังนั้นการนำผงซีลี้อยมาใช้เป็นสารตัวเติมในการผลิตวัสดุคอมโพสิตจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าให้กับผงซีลี้อย

แต่อย่างไรก็ตามข้อจำกัดที่สำคัญของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทีเรตชนิดนี้ คือ ความไวต่อการติดไฟสูง (Nie และคณะ, 2012) ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่จำกัดขอบเขตการใช้งานพอลิเมอร์คอมโพสิตนี้ การปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยการเติมสารหน่วงไฟ (Flame retardant) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากและมีประสิทธิภาพ สารหน่วงไฟชนิดไม่มีสารฮาโลเจน (Halogen free flame retardant) ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมี ประสิทธิภาพสูงและไม่มีพิษ สารหน่วงไฟประเภทนี้ที่นิยมใช้โดยทั่วไป เช่น สารประกอบฟอสฟอรัส (Phosphorus compounds) เมทัลไฮดรอกไซด์ (Metal hydroxide) สารประกอบโบรอน (Boron compound) สารประกอบไนโตรเจน (Nitrogen compounds) เป็นต้น แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Ammonium polyphosphate) เป็นสารหน่วงไฟประเภทสารประกอบฟอสฟอรัสที่นิยมใช้กันอย่าง กว้างขวางเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์ กระบวนการเสื่อมสภาพ (Decomposition process) ของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตสามารถอธิบาย ดังสมการที่ 1.1 และ 1.2 สารหน่วงไฟประเภทนี้เมื่อเกิดการเผาไหม้จะมีการสร้างชั้นป้องกันบน พื้นผิวของพอลิเมอร์เพื่อกั้นไฟออกจากพอลิเมอร์ซึ่งเป็นเชื้อเพลิง (Samyn และคณะ, 2007) สาร หน่วงไฟชนิดนี้มีความน่าสนใจ เนื่องจากมีควันน้อยและไม่มีสารพิษ (Nontoxic) จึงเป็นมิตรกับ สิ่งแวดล้อม (Ashton, 2005)



ข้อด้อยอีกประการหนึ่งของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต คือการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟซ (Interfacial adhesion) ที่ไม่ดีระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (Thirmizir และคณะ, 2011) ซึ่งส่งผลให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติทางกลที่ไม่ดี การปรับปรุงความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์คอมโพสิตนั้นมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การดัดแปรเมทริกซ์ (Matrix modification) (Arbelaiz และคณะ, 2006) การดัดแปรพื้นผิวของสารตัวเติม (Filler surface treatment) (Nam และคณะ, 2011) และการเติมสารช่วยให้เข้ากัน (Adding compatibilizer) (Kim และคณะ, 2011) เป็นต้น การใช้สารช่วยให้เข้ากันเป็นวิธีการที่นิยมใช้มาก เนื่องจากสะดวกและมีประสิทธิภาพมาก มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (Maleic anhydride grafted poly (butylene succinate)) เป็นสารช่วยให้เข้ากันที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปมีประสิทธิภาพมากในการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต Thirmizir และคณะพบว่าการใช้สารช่วยให้เข้ากันชนิดมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทีลีนซัคซิเนตทำให้การยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟซระหว่างเส้นใยปอแก้วและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตดีขึ้น (Thirmizir และคณะ, 2011)

จุดประสงค์ของโครงการวิจัยนี้เพื่อศึกษาผลของปริมาณผงซีลี้อยต่อสมบัติทางกล สมบัติความต้านทานต่อการตีไฟ สมบัติทางความร้อน และสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตและศึกษาผลของสารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่อสมบัติทางกล สมบัติความต้านทานต่อการตีไฟ สมบัติทางความร้อน และสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต นอกจากนี้มีผลการศึกษาผลของปริมาณสารช่วยให้เข้ากันชนิดมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทีลีนซัคซิเนตต่อสมบัติทางกล สมบัติความต้านทานต่อการตีไฟ สมบัติทางความร้อนและสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของปริมาณผงซีลี้อยต่อสมบัติทางกล สมบัติความต้านทานต่อการตีไฟ สมบัติทางความร้อน และสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิ บิวทีลีนซัคซิเนต

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของสารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่อสมบัติทางกล สมบัติความต้านทานต่อการตีไฟ สมบัติทางความร้อน และสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต



1.2.3 เพื่อศึกษาผลของสารช่วยให้เข้ากันชนิดมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทีลีนซัคซิเนตต่อสมบัติทางกล สมบัติความต้านทานต่อการติดไฟ สมบัติทางความร้อน และสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ในการวิจัยนี้ มีการศึกษาผลของปริมาณผงซีลี้อยต่อสมบัติทางกล สมบัติความต้านทานต่อการติดไฟ สมบัติทางความร้อน และสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต ปริมาณผงซีลี้อยที่ใช้คือ 10 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตด้วยเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่และขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องฉีด จากสมบัติทางกล สมบัติความต้านทานต่อการติดไฟ และสมบัติทางความร้อน เลือกพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีสมบัติที่เหมาะสมที่สุดไปศึกษาผลของสารหน่วงไฟต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต

แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตเป็นสารหน่วงไฟสำหรับพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต ปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่ใช้คือ 10 20 และ 30 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิต มีการศึกษาสมบัติทางกล สมบัติความต้านทานต่อการติดไฟ สมบัติทางความร้อน และสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต จากนั้นเลือกพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีสมบัติทางกล สมบัติความต้านทานต่อการติดไฟ และสมบัติทางความร้อนที่ดีที่สุดไปศึกษาผลของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทีลีนซัคซิเนตต่อสมบัติทางกล สมบัติความต้านทานต่อการติดไฟ และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต โดยปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทีลีนซัคซิเนตคือ 3 5 และ 10 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิต

### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1.4.1 นำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์
- 1.4.2 เป็นการพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุของประเทศอย่างต่อเนื่อง
- 1.4.3 เป็นการพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ให้สามารถเริ่มการวิจัยและพัฒนาได้ และดำเนินการวิจัยต่อไปได้อย่างต่อเนื่องในระยะยาว
- 1.4.4 ก่อให้เกิดนโยบายและมาตรการที่จูงใจและเอื้อต่อการการลงทุนของอุตสาหกรรมพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
- 1.4.5 ก่อให้เกิดนโยบายและมาตรการสนับสนุนการเร่งรัด พัฒนาต่อยอด และสร้างเทคโนโลยีการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
- 1.4.6 เกิดอุตสาหกรรมใหม่และธุรกิจนวัตกรรมด้านพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
- 1.4.7 เกิดการสร้างมูลค่าใหม่ (Value creation) และสร้างมูลค่าเพิ่ม (Value-added) ที่

ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพและผงซีลี้อยซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือจากการแปรรูปไม้

1.4.8 ได้เอกสารทางวิชาการที่ตีพิมพ์ในระดับประเทศหรือระดับนานาชาติ





## บทที่ 2

### ภูมิหลัง

#### 2.1 คุณลักษณะของไม้

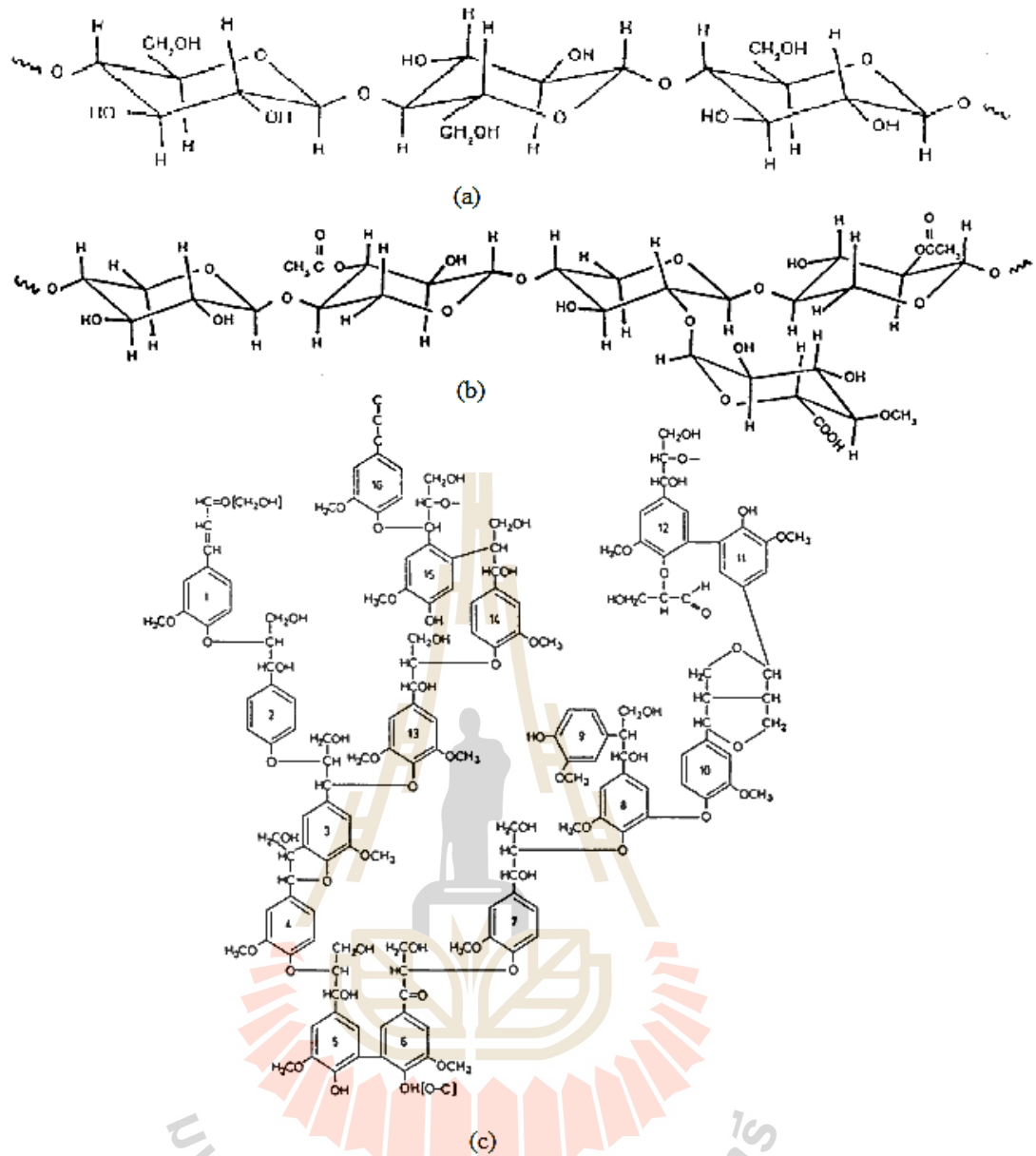
ไม้จัดเป็นวัสดุเซลลูโลส (Lignocellulosic material) ซึ่งประกอบด้วยสามองค์ประกอบหลักคือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) องค์ประกอบทางเคมีของไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) และไม้เนื้ออ่อน (Soft wood) แสดงในตารางที่ 2.1 เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งให้ความแข็งแรงและความคงรูปแก่ไม้ เซลลูโลสประกอบด้วยหน่วยกลูโคสและเชื่อมกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic bonds) (Hendriks และ Zeeman, 2009) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (a) เฮมิเซลลูโลสเป็นโครงสร้างคาร์โบไฮเดรตที่ซับซ้อน ซึ่งประกอบไปด้วยเพนโทส (Pentose) เฮกโซส (Hexose) และกรดน้ำตาล (Sugar acid) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (b) เฮมิเซลลูโลสมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลสและมีกิ่งที่มีสายโซ่สั้นจึงง่ายต่อการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) (Hendriks และ Zeeman, 2009) ลิกนินเป็นวัสดุที่ยึดเส้นใยเซลลูโลสเข้าด้วยกัน ลิกนิน ประกอบไปด้วยหน่วยฟีนิลโพรเพน (Phenylpropane units) ที่แตกต่างกันสามชนิด คือ คูมาริล (Coumaryl) โคนิเฟอร์ิล (Coniferyl) และไซนาพิล (Sinapyl) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (c) หน้าที่หลักของลิกนินคือการรักษาโครงสร้างของไม้และต้านทานต่อจุลินทรีย์

ตาราง 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ (Kozłowski and Przybylak, 2008).

| ชนิด         | เซลลูโลส<br>(เปอร์เซ็นต์) | เฮมิเซลลูโลส<br>(เปอร์เซ็นต์) | ลิกนิน<br>(เปอร์เซ็นต์) |
|--------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| ไม้เนื้อแข็ง | 38-49                     | 19-26                         | 23-30                   |
| ไม้เนื้ออ่อน | 40-45                     | 7-14                          | 25-35                   |

#### 2.2 พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable polymer) เป็นวัสดุคอมโพสิตที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถขึ้นรูปได้เหมือนกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์โดยทั่วไป มีสมบัติทางกล (Mechanical properties) ที่ดี และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ (a) เซลลูโลส (b) เฮมิเซลลูโลส และ (c) ลิกนิน (Pandey, 1999).

Kim Yang และ Kim (2005) ศึกษาผลของปริมาณผงแกลบ (Rice husk flour) และผงไม้ (Wood flour) ต่อความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงแกลบและพอลิবিวิธินซัคซิเนตและพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงไม้และพอลิবিวิธินซัคซิเนต โดยปริมาณสารตัวเติมที่ใช้คือ 10 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อปริมาณผงแกลบและผงไม้เพิ่มขึ้นค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าลดลง เนื่องจากความไม่เข้ากันระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์ นอกจากนี้พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงไม้และพอลิবিวิธินซัคซิเนตมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงแกลบและพอลิ

บิวริลีนซัคซิเนต เป็นผลเนื่องมาจากผงไม้มีปริมาณไฮโดรเซลลูโลสและลิกนินมาก กว่าผงแกลบ ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของสารตัวเติมส่งผลต่อความแข็งแรงของสารตัวเติมเซลลูโลส

Lee และ Seo (2008) ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยสาหร่ายสีแดง (Red algae fiber) ต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดัด (Flexural properties) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยสาหร่ายสีแดงและพอลิบิวริลีนซัคซิเนต โดยทำการศึกษาที่ปริมาณเส้นใย 20 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่ามอดูลัสแรงดัด (Flexural modulus) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นจนถึง 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นถึง 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากการมีปริมาณที่ไม่เพียงพอของพอลิบิวริลีนซัคซิเนตรอบเส้นใย นอกจากนี้เมื่อมีปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานต่อแรงดัด (Flexural strength) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงที่ปริมาณเส้นใย 50 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากการมีปริมาณที่ไม่เพียงพอของพอลิบิวริลีนซัคซิเนตรอบเส้นใย

Liu และคณะ (2009) ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยปอกระเจา (Jute fiber) ต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile properties) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยปอกระเจาและพอลิบิวริลีนซัคซิเนต โดยศึกษาที่ปริมาณเส้นใย 0 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและมอดูลัสแรงดึง (Tensile modulus) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และลดลงเล็กน้อยที่ปริมาณเส้นใย 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การเพิ่มขึ้นของความต้านทานต่อแรงดึงและมอดูลัสแรงดึงในช่วงแรกนั้นน่าจะเกิดจากการส่งผ่านและกระจายแรงที่สม่ำเสมอระหว่างเส้นใยและพอลิเมอร์เมทริกซ์ แต่เมื่อปริมาณเส้นใยมากขึ้นทำให้เริ่มเกิดรอยร้าว (Crack initiation) และมีการกระจายแรงที่ไม่สม่ำเสมอจึงส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและมอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าลดลง ในขณะที่ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใย เนื่องจากเส้นใยทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีความแข็ง (Stiffness) เพิ่มขึ้น จึงทำให้การยืดของพอลิเมอร์คอมโพสิตเป็นไปได้อย่างจำกัด

Thirmizir และคณะ (2011) ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยจากปอแก้ว (Kenaf bast fiber) ต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดัด และความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยจากเยื่อปอแก้วและพอลิบิวริลีนซัคซิเนต โดยทำการศึกษาที่ปริมาณเส้นใย 10 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าที่ปริมาณเส้นใย 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าความต้านทานต่อแรงดัดสูงสุด (Optimum flexural strength) ในขณะที่ค่ามอดูลัสแรงดัดของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเส้นใย นอกจากนี้เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใย สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าลดลง เนื่องจากการมีความแข็งที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์คอมโพสิตเมื่อมีการใส่เส้นใย

## 2.3 การปรับปรุงความเข้ากันระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

โดยทั่วไปปัญหาที่พบในพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือความไม่เข้ากันระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ การปรับปรุงความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์คอมโพสิตนั้นมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การดัดแปรเมทริกซ์ (Matrix modification) การดัดแปรพื้นผิวของสารตัวเติม (Filler surface treatment) และการเติมสารช่วยให้เข้ากัน (Addition of compatibilizer) เป็นต้น

Lee และ Ohkita (2003) ศึกษาผลของสารช่วยให้เข้ากันชนิดมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิคาร์โพรแลคโตน (Maleic anhydride grafted polycaprolactone) ต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงไม้และพอลิคาร์โพรแลคโตน (Polycaprolactone) โดยปริมาณสารช่วยให้เข้ากันที่ใช้คือ 0 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าการใช้สารช่วยให้เข้ากันส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นจาก 13 เป็น 27 เมกะปาสคาลและมอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นจาก 581 เป็น 1011 เมกะปาสคาล ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและมอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารช่วยให้เข้ากันเพิ่มขึ้น และค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าสูงสุดเมื่อใส่สารช่วยให้เข้ากัน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การเพิ่มขึ้นของสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตนั้นเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟซ (Interfacial adhesion) ระหว่างผงไม้กับพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและมอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นในขณะที่การยึดสูงสุด ณ จุดขาดลดลง

Arbelaz และคณะ (2006) ศึกษาผลของการปรับปรุงพอลิเมอร์เมทริกซ์ต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านลินิน (Flax fiber) และพอลิคาร์โพรแลคโตน ปริมาณเส้นใยที่ใช้คือ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยดัดแปรพอลิคาร์โพรแลคโตนด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) 4.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้ไดคิวมิล เพอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide) ซึ่งเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าการดัดแปรพอลิคาร์โพรแลคโตนด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์เพิ่มค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด มอดูลัสแรงดึง ความต้านทานต่อแรงดัดและมอดูลัสแรงดัดของพอลิเมอร์คอมโพสิตเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านลินินและพอลิคาร์โพรแลคโตนอย่างมีนัยสำคัญ

Kim และคณะ (2011) ศึกษาผลของชนิดของสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงไม้และพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต โดยปริมาณผงไม้ที่ใช้คือ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้สารช่วยให้เข้ากันสามชนิดคือ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิโพรพิลีน (Maleic anhydride grafted polypropylene) มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิสไตรีน-เอทิลีน-บิวทีลีน-สไตรีน ไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ (Maleic anhydride grafted poly(styrene-b-ethylene-co-butylene-b-styrene) triblock copolymer) และมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิ

บิวทิลีนซัคซิเนต (Maleic anhydride grafted poly (butylene succinate)) ที่ปริมาณของสารช่วยให้เข้ากัน 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใส่มาเลอิกแอนไฮโดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใส่มาเลอิกแอนไฮโดรด์กราฟท์พอลิโพรพิลีนหรือมาเลอิกแอนไฮโดรด์ กราฟท์พอลิสไตรีน-เอทิลีน-บิวทิลีน-สไตรีน-ไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นผลมาจากส่วนของพอลิโพรพิลีนและพอลิสไตรีน-เอทิลีน-บิวทิลีน-สไตรีน ไตรบล็อกโคพอลิเมอร์ในสารช่วยให้เข้ากันนั้นไม่เข้ากันกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิการโก่งงอ (Heat deflection temperature) แสดงผลไปในทางเดียวกันกับสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง นั่นคือการใช้มาเลอิกแอนไฮโดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ส่งผลให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีอุณหภูมิการโก่งงอที่สูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการใส่มาเลอิกแอนไฮโดรด์กราฟท์พอลิโพรพิลีนและมาเลอิกแอนไฮโดรด์กราฟท์พอลิสไตรีน-เอทิลีน-บิวทิลีน-สไตรีน ไตรบล็อกโคพอลิเมอร์

Nam และคณะ (2011) ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยและการตัดแปรรักษาเส้นใย (Alkali treatment) ต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยจากเปลือกมะพร้าว (Coir fiber) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ปริมาณเส้นใยที่ใช้คือ 10 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยตัดแปรรักษาเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อแรงดึง โมดูลัสแรงดึง ความต้านทานต่อแรงดัด และโมดูลัสแรงดัดของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดลดลง นอกจากนี้การตัดแปรรักษาเส้นใยเพิ่มความต้านทานต่อแรงดึง ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด โมดูลัสแรงดึง ความต้านทานต่อแรงดัดและโมดูลัสแรงดัดของพอลิเมอร์คอมโพสิตอย่างมีนัยสำคัญ ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟซระหว่างเส้นใยจากเปลือกมะพร้าวที่ผ่านการตัดแปรรักษาเส้นใย (Alkali treated coir fiber) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

Nyambo และคณะ (2011) ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างฟางข้าวสาลี (Wheat straw) และพอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid)) โดยปริมาณฟางข้าวที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อมีการใส่ฟางข้าวลงในพอลิแลคติกแอซิดส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิดที่ไม่ใส่ฟางข้าวในขณะที่โมดูลัสแรงดึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การใส่ฟางข้าวยังส่งผลให้ความเสถียรต่อความร้อน (Thermal stability) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าลดลงอีกด้วย และเมื่อใส่สารช่วยให้เข้ากันชนิดมาเลอิกแอนไฮโดรด์กราฟท์พอลิแลคติกแอซิด (Maleic anhydride grafted poly(lactic acid)) ที่ปริมาณ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิตที่ไม่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน แต่ไม่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสแรงดึง และเมื่อปริมาณสารช่วยให้เข้ากันเพิ่มขึ้นเป็น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณสารช่วยให้เข้ากันไม่ส่งผลต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความเสถียรต่อความร้อนของ พอลิเมอร์คอมโพสิต



เนื่องจากที่ปริมาณสารช่วยให้เข้า 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นจุดอิ่มตัวบริเวณอินเตอร์เฟซ (Interfacial saturated point) ดังนั้นเมื่อปริมาณสารช่วยให้เข้าเพิ่มขึ้นเป็น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจึงไม่ส่งผลต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิต

Thirmizir และคณะ (2011) ศึกษาผลของสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยจากเยื่อปอแก้วและ พอลิবিวิธินซัคซิเนต โดยใช้สารช่วยให้เข้ากันชนิดมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิবিวิธินซัคซิเนต โดยทำการศึกษาที่ปริมาณเส้นใย 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าการใช้สารช่วยให้เข้ากันส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้น เนื่องจากการมีการยึดติด (Adhesion) ที่ดีระหว่างเส้นใยและพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในสารช่วยให้เข้ากันที่สัดส่วน 3 5 7 และ 10 ส่วนต่อร้อยส่วนของเรซิน (Part per hundred resin) ต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยจากเยื่อปอแก้วและพอลิবিวิธินซัคซิเนต พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในสารช่วยให้เข้ากันเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 5 ส่วนต่อร้อยส่วนของเรซิน เมื่อมีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในสารช่วยให้เข้ากันมากกว่า 5 ส่วนต่อร้อยส่วนของเรซิน ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อแรงกระแทกลดลง ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการมีปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่เหลือนอกเกินไปส่งผลให้เกิดการตัดสายโซ่พอลิเมอร์ (Chain scission) จึงส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลง

#### 2.4 การปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นเป็นวัสดุที่ติดไฟได้ดี จึงเป็นข้อจำกัดในการใช้งานในหลายๆ ด้าน การปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการติดไฟของวัสดุคอมโพสิต ทำได้โดยการเติมสารหน่วงไฟ (Flame retardant) ซึ่งวิธีที่นิยมใช้กันมากและมีประสิทธิภาพ สารหน่วงไฟชนิดไม่มีสารฮาโลเจน (Halogen free flame retardant) เป็นสารหน่วงไฟที่นิยมใช้เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงและไม่มีพิษ สารหน่วงไฟประเภทนี้สามารถแบ่งได้เป็นหลายประเภท เช่น สารประกอบฟอสฟอรัส (Phosphorus compounds) เมทิลไฮดรอกไซด์ (Metal hydroxide) สารประกอบโบรอน (Boron compound) สารประกอบไนโตรเจน (Nitrogen compounds) เป็นต้น

Choi และคณะ (2009) ศึกษาผลของสารหน่วงไฟต่อสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงไม้และพอลิแลคติกแอซิด โดยสารหน่วงไฟที่ใช้ในการศึกษานี้คือ เมลามีนไพโรฟอสเฟต (Melamine pyrophosphate) โดยใช้ปริมาณผงไม้ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้

ปริมาณสารหน่วงไฟ 10 ส่วนต่อร้อยละของเรซิน พบว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใส่เมลามีนไฟโรฟอสเฟต มีการลดลงของน้ำหนัก (Weight loss) ที่เร็วกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ใส่เมลามีนไฟโรฟอสเฟต แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใส่เมลามีนไฟโรฟอสเฟตมีการลดลงของน้ำหนักที่ช้าลง ซึ่งแสดงถึงกลไกความต้านทานการติดไฟที่ดีของเมลามีนไฟโรฟอสเฟต

Shumao และคณะ (2010) ศึกษาผลของสารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Ammonium polyphosphate) ต่อสมบัติความต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านรามี่ (Ramie fiber) และพอลิแลคติกแอซิด โดยศึกษาปริมาณออกซิเจนที่พอลิเมอร์ต้องการใช้ในการเผาไหม้ (Limiting oxygen index) และการลุกลามไฟของพอลิเมอร์ (UL-94) จากการศึกษพบว่าพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยป่านรามี่นั้นเป็นวัสดุติดไฟง่าย เมื่อนำเส้นใยป่านรามี่มาใส่ในพอลิแลคติกแอซิด จึงส่งผลให้พอลิเมอร์คอมโพสิตติดไฟง่ายเช่นกัน เมื่อมีการใช้สารหน่วงไฟพบว่าสารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิต นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบระหว่างการใส่สารหน่วงไฟลงไปโดยตรงกับการตัดแปรเส้นใยด้วยสารหน่วงไฟต่อสมบัติความต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิต ซึ่งพบว่าการใส่สารหน่วงไฟลงไปโดยตรงมีประสิทธิภาพมากกว่า โดยปริมาณออกซิเจนที่พอลิเมอร์ต้องการใช้ในการเผาไหม้ เพิ่มขึ้นจาก 25 เป็น 28.1 เมื่อมีการใส่สารหน่วงไฟ นอกจากนี้พอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใส่สารหน่วงไฟลงไปโดยตรงยังถูกจัดอยู่ในระดับ V-0 ในการทดสอบการลุกลามไฟของพอลิเมอร์ในขณะที่การปรับปรุงเส้นใยด้วยสารหน่วงไฟไม่ถูกจัดอยู่ในระดับใดเลย

Nie และคณะ (2012) ศึกษาผลของสารหน่วงไฟต่อสมบัติความต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยไผ่ (Bamboo fiber) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โดยใช้ไมโครเอ็นแคปซูลเลตแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Microencapsulated ammonium polyphosphate) เป็นสารหน่วงไฟ โดยปริมาณสารหน่วงไฟที่ใช้คือ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใส่สารหน่วงไฟ ปริมาณออกซิเจนที่พอลิเมอร์ต้องการใช้ในการเผาไหม้นั้นเพิ่มขึ้น 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้ใส่สารหน่วงไฟ และมีอัตราการปล่อยความร้อนสูงสุด (Peak heat release rate) และการปลดปล่อยความร้อนทั้งหมด (Total heat release) ลดลง โดยอัตราการปล่อยความร้อนสูงสุดของคอมโพสิตลดลงจาก 443.2 เป็น 236.2 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร และการปล่อยความร้อนทั้งหมดจาก 62.0 เป็น 36.1 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร

Dorez และคณะ (2013) ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านลินินและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โดยปริมาณเส้นใยที่ใช้คือ 0 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าการใส่เส้นใยในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตส่งผลให้เวลาในการติดไฟ (Ignition time) ลดลง และลดลงมากขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตติดไฟได้ง่ายขึ้น แต่เมื่อพิจารณาที่อัตราการปล่อยความร้อนสูงสุดพบว่าที่ปริมาณเส้นใยมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราการปล่อยความร้อนสูงสุดของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าลดลง เนื่องจากการสลายตัวของ

เส้นใยนำไปสู่การก่อตัวของชั้นป้องกันคาร์บอน (Carbon protective layer) ซึ่งทำหน้าที่กั้นพอลิเมอร์ออกจากไฟและออกซิเจน นอกจากนี้เมื่อมีการเติมสารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตส่งผลให้อัตราการปล่อยความร้อนสูงสุดของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากการก่อตัวของชั้นป้องกันคาร์บอน

Dorez และคณะ (2014) ศึกษาผลของสารหน่วงไฟต่อสมบัติทางความร้อนและสมบัติความต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยปานลินินและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ที่ปริมาณเส้นใย 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและใช้แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตเป็นสารหน่วงไฟที่ปริมาณ 3 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าการใส่เส้นใยปานลินินลงในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ส่งผลให้ความเสถียรต่อความร้อนและเวลาที่ใช้ในการติดไฟของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลดลง แต่อัตราการปล่อยความร้อนสูงสุดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยมีความเสถียรต่อความร้อนที่ต่ำและการติดไฟง่าย เมื่อมีการใส่แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยปานลินินและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ส่งผลให้อัตราการปล่อยความร้อนสูงสุดของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการสร้างชั้นป้องกันของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต ซึ่งทำหน้าที่กั้นพอลิเมอร์คอมโพสิตออกจากไฟและออกซิเจน





## บทที่ 3

### วัสดุและการทดลอง

#### 3.1 วัสดุ

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly (butylene succinate)) เกรด FZ71PD จากบริษัท พีทีที เอ็มซี ซี โปโอเคม จำกัด ผงซีลี้อยอินเดียนวอลนัท (Albizia lebbek Benth) ได้รับจากโรงเลื่อยหัวทะเล จังหวัดนครราชสีมา แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Ammonium polyphosphate, Exolit® AP 765 (TP), ขนาดอนุภาค 8 ไมโครเมตร) ได้รับจากบริษัท คลาเรียนท์ เคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด ไตควิมิล เปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, 99%, ACROS Organics™) และ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, 99%, ACROS Organics™) จากบริษัท อีตัลมาร์ ประเทศไทย จำกัด

#### 3.2 การทดลอง

##### 3.2.1 การเตรียมผงซีลี้อย

ร่อนผงซีลี้อยด้วยตะแกรงขนาด 40 เมช (Mesh) และอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

##### 3.2.2 การเตรียมมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

การเตรียมมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โดยการนำบิวทิลีนซัคซิเนต มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และไตควิมิล เปอร์ออกไซด์ผสมกันก่อน ที่สัดส่วน 100 10 และ 1 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของเรซิน (Part per hundred resin) ตามลำดับ จากนั้นจึงนำส่วนผสมทั้งหมดผสมโดยใช้เครื่องผสมภายใน (Internal mixer, Hakke Rheomix, 3000P) ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที (Thirmizir และคณะ, 2011)

การทำมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตให้บริสุทธิ์ด้วยการละลายมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยคลอโรฟอร์ม นำสารละลายที่ได้ไปตกตะกอนด้วยเมทานอลแล้วจึงนำไปกรอง จากนั้นนำมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ตกตะกอนได้ไปล้างด้วยเมทานอลเพื่อกำจัดไตควิมิล เปอร์ออกไซด์ และมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาแล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Thirmizir และคณะ, 2011)

##### 3.2.3 การวิเคราะห์สมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

###### 3.2.3.1 ปริมาณการกราฟท์

การวิเคราะห์ปริมาณการกราฟท์ (Grafting content) ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยการไตเตรตหาหมู่กรด (Acid group) ที่อยู่ในหมู่แอนไฮไดรด์ (Anhydride group) โดยละลายมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 1 กรัม ในคลอโรฟอร์ม 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปไตเตรตด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.025 โมลาร์ โดยละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในเอทานอล และใช้ฟิ

นอร์ลฟทาไลน์ (Phenolphthalein) เป็นตัวบ่งชี้ (Indicator) ปริมาณการกราฟท์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตหาได้ตั้งสมการที่ 3.1 (Thirmizir และคณะ, 2011)

$$\% \text{ grafting} = \frac{98.06c(V-V_0)}{2 \times 1000m} \times 100\% \quad (3.1)$$

โดยที่  $V$  และ  $V_0$  (มิลลิลิตร) คือ ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไตเตรตของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตตามลำดับ;  $c$  (กรัม/ลิตร) คือ ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์; 98.06 (กรัม/โมล) คือ น้ำหนักโมเลกุลของมาเลอิกแอนไฮไดรด์;  $m$  (กรัม) คือ น้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

### 3.2.3.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโดยใช้เครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (Bruker, Tensor 27) ที่เลขคลื่น (Wavenumber) ระหว่าง  $4000-400 \text{ cm}^{-1}$  โดยใช้ Attenuated total reflectance (ATR) ที่จำนวน สแกน (Scan) 32 สแกนและความละเอียด (Resolution)  $4 \text{ cm}^{-1}$

### 3.2.4 การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต

เตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลีอและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ปริมาณผงซีลีอ 10 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นผสมพอลิเมอร์คอมโพสิตด้วยเครื่อง อัดรีดชนิดสกรูคู่ (Barbender, DSE 35/17D) โดยใช้อุณหภูมิ 130 120 115 และ 110 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบสกรู 20 รอบต่อนาที ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องฉีด (Tederic, TRX60C) โดยใช้ อุณหภูมิ 130 120 115 110 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วในการฉีด 50 เปอร์เซ็นต์ และใช้ความดันในการฉีด 50 เปอร์เซ็นต์ จากสมบัติทางกล สมบัติความต้านทานต่อการตีไฟ และสมบัติทางความร้อน เลือกพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีสมบัติที่ดีที่สุดไปศึกษาผลของสารหน่วงไฟต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต

แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตเป็นสารหน่วงไฟสำหรับพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลีอและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่ใช้คือ 10 20 และ 30 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิต จากนั้นเลือกพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีสมบัติทางกล สมบัติความต้านทานต่อการตีไฟ และสมบัติทางความร้อนที่ดีที่สุดไปศึกษาผลของสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตถูกใช้เป็นสารช่วยให้เข้ากัน ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคือ 3 5 และ 10 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิต

### 3.2.5 การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต

#### 3.2.5.1 สมบัติทางกล

สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิবিวิลีนซัคซิเนตและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิลีนซัคซิเนตถูกทดสอบตาม ASTM D638 โดยใช้เครื่อง Universal testing machine (Instron, 5565) โดยใช้เซลล์วัดแรง 5 กิโลนิวตัน ความเร็วในการดึง 20 มิลลิเมตรต่อนาที และความยาวของเกท 50 มิลลิเมตร

สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิবিวิลีนซัคซิเนตและ พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิลีนซัคซิเนตถูกทดสอบตาม ASTM D256 โดยใช้เครื่อง Impact tester (Instron pendulum impact tester, CEAST 9050) โดยใช้น้ำหนัก 2.7 จูล

### 3.2.5.2 สมบัติความต้านทานต่อการติดไฟ

การทดสอบการเผาไหม้ทางแนวตั้ง (Vertical burning test) ของพอลิবিวิลีน ซัคซิเนตและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิลีนซัคซิเนตถูกศึกษาโดยวิธีการทดสอบการเผาไหม้ในแนวตั้งตาม ASTM D3801 ชิ้นงานทดสอบถูกจับทางแนวตั้งที่ระยะ  $300 \pm 10$  มิลลิเมตรเหนือสำลี ปลายของชิ้นงานอยู่ห่างจากตัวจุดไฟเป็นระยะ  $10 \pm 1$  มิลลิเมตร ไฟถูกจุดที่ปลายของชิ้นงานเป็นเวลา 10 วินาที แล้วจึงนำไฟออก รอจนกระทั่งไฟดับแล้วจึงจุดไฟที่ปลายของชิ้นงานอีกครั้งเป็นเวลา 10 วินาที แล้วบันทึกเวลาที่ชิ้นงานติดไฟ ชิ้นงานถูกจัดลำดับตามมาตรฐาน UL-94 โดยที่สมบัติความต้านทานต่อไฟระดับต่ำสุด คือ V-2 (ระยะเวลาที่ชิ้นงานติดไฟน้อยกว่าหรือเท่ากับ 30 วินาทีและสำลีติดไฟ) และ V-0 แสดงสมบัติความต้านทานต่อไฟที่ดีที่สุด (ระยะเวลาที่ชิ้นงานติดไฟน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 วินาที) ในขณะที่ V-1 แสดงสมบัติความต้านทานต่อไฟที่อยู่ระหว่าง V-0 และ V-2 นอกจากนี้สำหรับชิ้นงานที่ถูกเผาไหม้จนหมดซึ่งไม่สามารถจัดลำดับตามมาตรฐาน UL-94 ถูกจัดเป็น NC (No classification)

อัตราการเผาไหม้ทางแนวนอน (Horizontal burning rate) ของพอลิবিวิลีนซัคซิเนตและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิลีนซัคซิเนตถูกศึกษาโดยวิธีการทดสอบการเผาไหม้ในแนวนอนตาม ASTM D635 ชิ้นงานทดสอบถูกจับทางแนวนอน ไฟถูกจุดที่ปลายด้านหนึ่งของชิ้นทดสอบ เวลาที่ไฟลามจากจุดอ้างอิงแรก (25 มิลลิเมตร จากปลายชิ้นทดสอบ) ถึงจุดอ้างอิงที่สอง (100 มิลลิเมตร จากปลายชิ้นทดสอบ) ถูกบันทึก จากนั้นอัตราการเผาไหม้ถูกคำนวณโดยใช้สมการที่ 3.2

$$V = 60L/t \quad (3.2)$$

โดยที่ V (มิลลิเมตรต่อนาที) คือ อัตราการเผาไหม้; L (มิลลิเมตร) คือระยะการเผาไหม้; t (วินาที) คือ เวลาการเผาไหม้

### 3.2.5.3 สมบัติทางความร้อน

อุณหภูมิการเสื่อมสภาพของพอลิবিวิลีนซัคซิเนตและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิลีนซัคซิเนตถูกศึกษาโดยใช้เครื่อง Thermo gravimetric analyzer (Mettler Toledo, TGA/DSC1) ที่อุณหภูมิระหว่าง 30 ถึง 800 องศาเซลเซียส อัตราการใช้ความ

ร้อนคือ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที การเสื่อมสภาพทางความร้อนของตัวอย่างถูกทดสอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน น้ำหนักของตัวอย่างอยู่ระหว่าง 10 ถึง 15 มิลลิกรัม

#### 3.2.5.4 สัณฐานวิทยา

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวที่แตกหักด้วยแรงดึง (Tensile fractured surface) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลีเนียมและพอลิบิวทีลีนซักซิเนตถูกศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL JCM-6010) ที่ 10 กิโลโวลต์ ขึ้นทดสอบถูกเคลือบด้วยทองคำก่อนศึกษา



## บทที่ 4

### ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลของปริมาณผงซีลี้อยต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

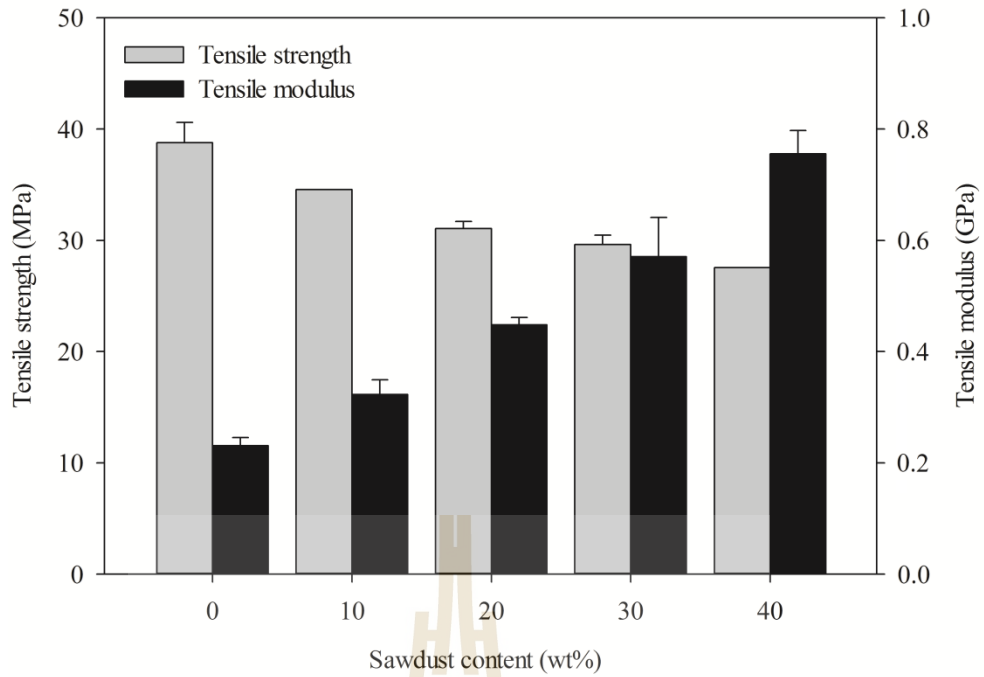
##### 4.1.1 สมบัติทางกล

สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile properties) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต แสดงในตาราง 4.1 เมื่อมีการใส่ ผงซีลี้อยในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลง เนื่องจากความไม่เข้ากัน (Incompatibility) ระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Kim และคณะ, 2005) ความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลงเมื่อปริมาณผงซีลี้อยเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูป 4.1 (a) เนื่องจากความไม่เข้ากันระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและการเพิ่มขึ้นของการรวมตัวของสารตัวเติม (Filler agglomeration) (Liang และคณะ, 2009) ซึ่งสามารถยืนยันได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 4.3)

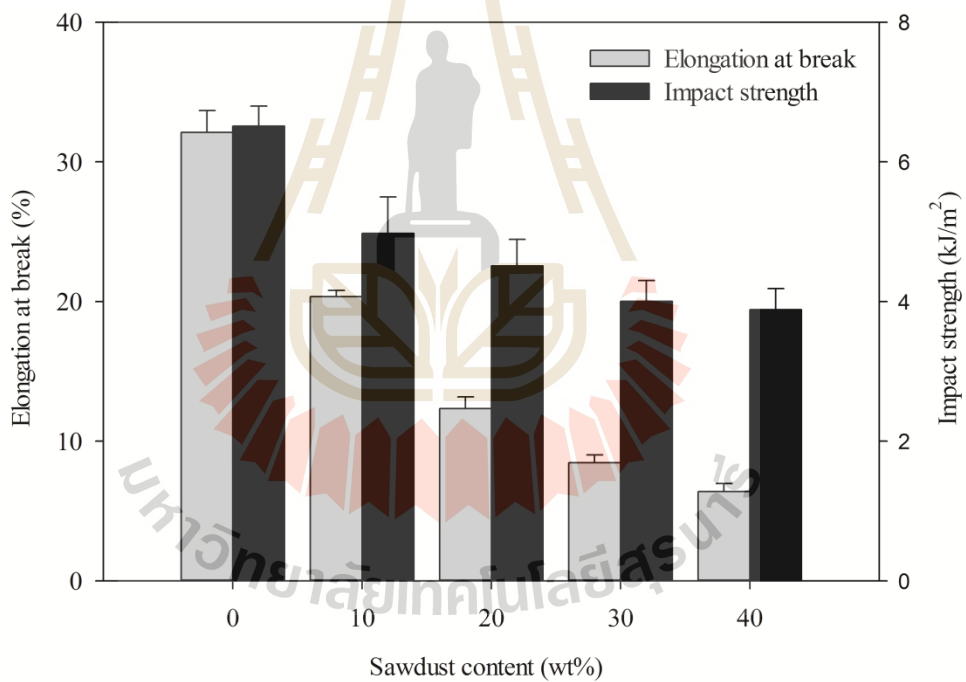
มอดูลัสแรงดึง (Tensile modulus) ของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใส่ผงซีลี้อยลงในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เนื่องจากผงซีลี้อยมีความแข็ง (Stiffness) มากกว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Nam และคณะ, 2011) จากรูปที่ 4.1 (a) มอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงซีลี้อยเพิ่มขึ้น แสดงถึงความสามารถของผงซีลี้อยในการเพิ่มความแข็งให้กับพอลิเมอร์คอมโพสิท (Liang และคณะ, 2009)

ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลงด้วยเช่นกันเมื่อมีการใส่ผงซีลี้อย เพราะการมีผงซีลี้อยส่งผลให้ความยืดหยุ่น (Ductility) ของพอลิเมอร์เมทริกซ์ลดลง (Kim และคณะ, 2005) นอกจากนี้ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลงเมื่อปริมาณผงซีลี้อยเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูป 4.1 (b) เนื่องจากเพิ่มขึ้นของการรวมตัวของสารตัวเติมในพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Liang และคณะ, 2009) ดังแสดงในรูปที่ 4.3

ความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตแสดงในตาราง 4.1 พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิททั้งหมดแสดงความต้านทานต่อแรงกระแทกต่ำกว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เนื่องจากความไม่เข้ากันระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (รูปที่ 4.3) ส่งผลให้เกิดรอยแตกขนาดเล็ก (Microcrack) ซึ่งง่ายต่อการในการแตกหัก (Kim และคณะ, 2005) จากรูปที่ 4.1 (b) เมื่อปริมาณผงซีลี้อยเพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของการรวมตัวของสารตัวเติม ซึ่งก่อให้เกิดความเข้มข้นของความเค้น (Stress concentration) ซึ่งต้องการพลังงานน้อยกว่าในการแตกหัก (Kim และคณะ, 2005)



(a)



(b)

**รูปที่ 4.1** สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิবিริลีนซัคซิเนตและพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิবিริลีนซัคซิเนตที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ (a) ความต้านทานต่อแรงดึงและมอดูลัสแรงดึง (b) ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อแรงกระแทก

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกลของพอลิবিวิธิสังเคราะห์และพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิธิสังเคราะห์ที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ

| Sample name     | Tensile strength (MPa) | Tensile modulus (GPa) | Elongation at break (%) | Impact strength (kJ/m <sup>2</sup> ) |
|-----------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| PBS             | 39.6±0.6               | 0.23±0.01             | 32.6±1.6                | 6.51±0.29                            |
| 90PBS/10sawdust | 34.6±0.2               | 0.32±0.03             | 20.9±1.4                | 4.98±0.52                            |
| 80PBS/20sawdust | 31.1±0.6               | 0.45±0.01             | 12.3±0.9                | 4.51±0.38                            |
| 70PBS/30sawdust | 29.6±0.8               | 0.57±0.07             | 8.5±0.6                 | 4.00±0.30                            |
| 60PBS/40sawdust | 27.6±0.7               | 0.76±0.04             | 6.4±0.6                 | 3.89±0.30                            |



#### 4.1.2 สมบัติความต้านทานต่อการติดไฟ

อัตราการเผาไหม้ทางแนวตั้ง (Vertical burning rate) ของพอลิবিวิธีลีนซัคซิเนต และพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิธีลีนซัคซิเนต แสดงในตารางที่ 4.2 จากผลการทดสอบอัตราการเผาไหม้ทางแนวตั้งพบว่าพอลิবিวิธีลีนซัคซิเนตต้านทานการติดไฟได้ดี แต่เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการหลอมและหยด (Dripping) จึงถูกจัดอยู่ในชั้น V-2 ตามมาตรฐาน UL-94 เมื่อมีการใส่ผงซีลี้อยที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักลงในพอลิবিวิธีลีนซัคซิเนต พอลิเมอร์คอมโพสิทถูกจัดอยู่ในชั้น V-2 ตามมาตรฐาน UL-94 นอกจากนี้ เมื่อปริมาณผงซีลี้อยเพิ่มขึ้นเป็น 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์คอมโพสิทติดไฟได้ดีและไม่ถูกจัดอยู่ในชั้นใดตามมาตรฐาน UL-94 แสดงให้เห็นว่าผงซีลี้อยมีความไวต่อไฟ (Li และคณะ, 2004)

อัตราการเผาไหม้ทางแนวนอน (Horizontal burning rate) ของพอลิবিวิธีลีนซัคซิเนตและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิธีลีนซัคซิเนต แสดงในตารางที่ 4.2 จากผลการทดสอบอัตราการเผาไหม้ทางแนวนอนพบว่าการลามไฟของพอลิবিวิธีลีนซัคซิเนตหยุดก่อนที่จะไฟจะลามถึงจุดอ้างอิงที่สอง (100 มิลลิเมตร จากปลายชิ้นทดสอบ) แสดงให้เห็นว่าพอลิ วิวิธีลีนซัคซิเนตต้านทานการติดไฟได้ดี เมื่อมีการใส่ผงซีลี้อยลงในพอลิবিวิธีลีนซัคซิเนตอัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อปริมาณผงซีลี้อยเพิ่มขึ้นอัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้น เนื่องจากผงซีลี้อยมีความไวต่อไฟ (Li และคณะ, 2004) Nie คณะพบว่าเมื่อมีการใส่เส้นใยไผ่ (Bamboo fiber) ลงในพอลิবিวิธีลีนซัคซิเนตสมบัติความต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลง (Nie คณะ, 2012)

ตารางที่ 4.2 ลำดับตามมาตรฐาน UL-94 และอัตราการเผาไหม้ของพอลิবিวิธีลีนซัคซิเนตและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิธีลีนซัคซิเนตที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ

| Sample name     | UL-94 classification | Horizontal burning rate (mm/min) |
|-----------------|----------------------|----------------------------------|
| PBS             | V-2                  | HB*                              |
| 90PBS/10sawdust | V-2                  | HB*                              |
| 80PBS/20sawdust | NC                   | 30.00±0.10                       |
| 70PBS/30sawdust | NC                   | 31.13±0.52                       |
| 60PBS/40sawdust | NC                   | 34.52±0.56                       |

\*ชิ้นทดสอบหยุดการเผาไหม้ก่อนที่จะไฟจะลามถึงจุดอ้างอิงที่สอง (100 มิลลิเมตร จากปลายชิ้นทดสอบ)

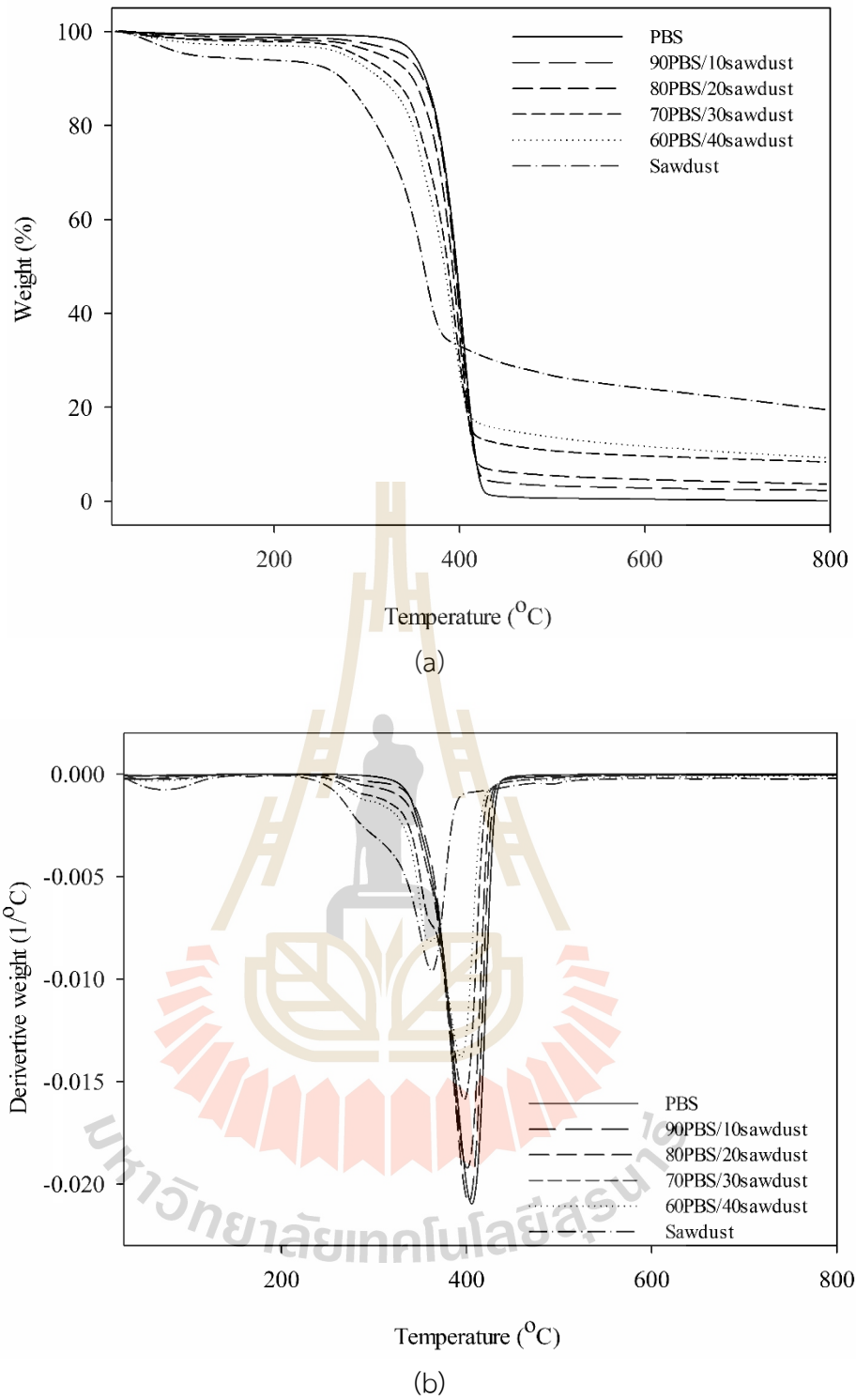


### 4.1.3 สมบัติทางความร้อน

กราฟ TGA และ DTGA ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต แสดงในรูปที่ 4.2 และอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก (Weight loss temperature) และปริมาณซีลี้อย (Residue) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ผงซีลี้อยและ พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต แสดงในตารางที่ 4.3 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก (Weight loss) หนึ่งลำดับที่อุณหภูมิ 405.67 องศาเซลเซียส และไม่มีซีลี้อยเหลืออยู่ ในขณะที่ผงซีลี้อยแสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสามลำดับที่อุณหภูมิ 63.72 278.55 และ 352.33 องศาเซลเซียสเนื่องจากการระเหยของความชื้น การเสื่อมสภาพทางความร้อนของเอมิเซลลูโลสและการเสื่อมสภาพทางความร้อนของเซลลูโลสตามลำดับ (Li และคณะ, 2004) และมีซีลี้อยเหลืออยู่ 19.52 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (a) พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตแสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสามลำดับ เนื่องจากการเสื่อมสภาพของเอมิเซลลูโลสและเซลลูโลสในผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตตามลำดับ อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก (Weight loss temperature) ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลงเมื่อปริมาณผงซีลี้อยเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (b) เนื่องจากการเสื่อมสภาพของผงซีลี้อยมีการเกิดอนุมูลอิสระไปเร่งปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพทางความร้อน (Thermal decomposition) ของพอลิเมอร์เมทริกซ์ เป็นผลให้ความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลง (Li และคณะ, 2004)

**ตารางที่ 4.3** อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและปริมาณซีลี้อยของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ผงซีลี้อย และพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ

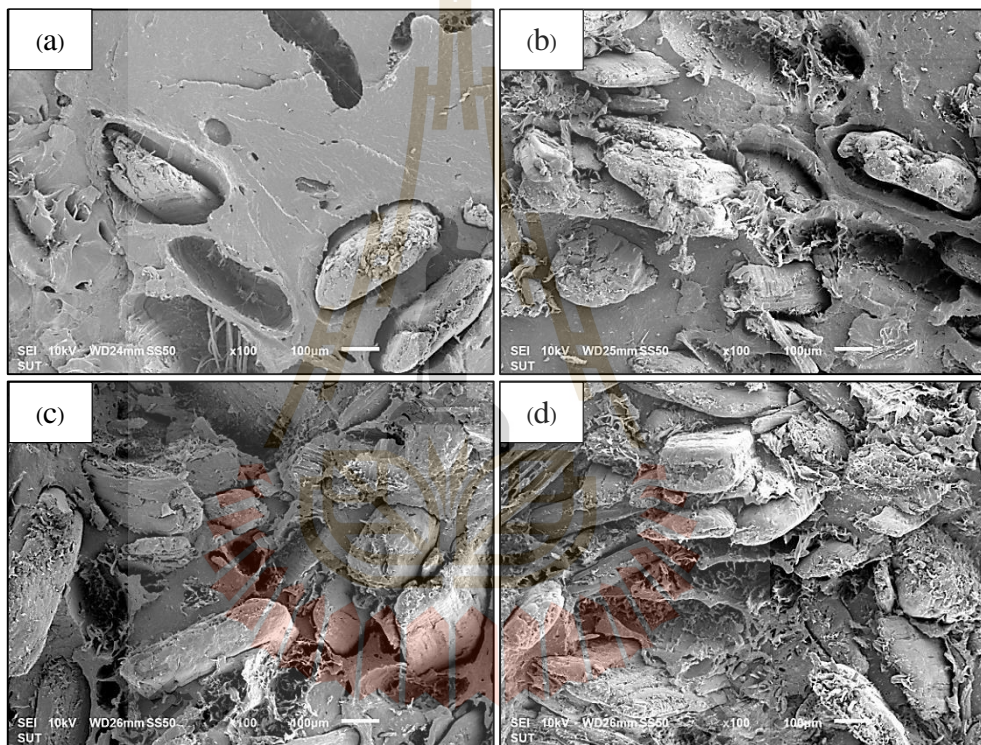
| Sample name     | Weight loss temperature (°C) |                 |                 |                 | Residue (%) |
|-----------------|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|
|                 | 1 <sup>st</sup>              | 2 <sup>nd</sup> | 3 <sup>rd</sup> | 4 <sup>th</sup> |             |
| PBS             | -                            | -               | -               | 405             | 0.0         |
| 90PBS/10sawdust | -                            | -               | -               | 402             | 2.3         |
| 80PBS/20sawdust | -                            | 278             | 356             | 400             | 3.7         |
| 70PBS/30sawdust | -                            | 278             | 355             | 397             | 8.4         |
| 60PBS/40sawdust | -                            | 278             | 355             | 394             | 9.3         |
| Sawdust         | 63                           | 278             | 352             | -               | 19.5        |



รูปที่ 4.2 ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต ผงขี้เลื่อยและพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ (a) TGA และ (b) DTGA

#### 4.1.4 สัณฐานวิทยา

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวที่แตกหักจากแรงดึง (Tensile fractured surface) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลีอียที่และพอลิবিวิลิน ซักซิเนต ที่กำลังขยาย 100 เท่า แสดงในรูปที่ 4.3 จากรูปที่ 4.3 (a) พบรูซึ่งเกิดขึ้นภายหลังการหลุดออกของผงซีลีอียจากพอลิবিวิลินซักซิเนต แสดงถึงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟซ (Interfacial adhesion) ที่ไม่ดีระหว่างผงซีลีอียและพอลิবিวิลินซักซิเนต นอกจากนี้เมื่อปริมาณผงซีลีอียเพิ่มขึ้นพบการรวมตัวกันของผงซีลีอียในพอลิবিวิลินซักซิเนต ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (b)-(d) เป็นผลเนื่องมาจากความไม่เข้ากันระหว่างผงซีลีอียที่และพอลิবিวิลินซักซิเนต ส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลง



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลีอียและพอลิবিวิลินซักซิเนตที่ปริมาณผงซีลีอียต่างๆที่กำลังขยาย 100 เท่า (a) 90PBS/10sawdust (b) 80PBS/20sawdust (c) 70PBS/30sawdust (d) 60PBS/40sawdust

จากสมบัติทางกล สมบัติความต้านทานต่อการตีไฟ สมบัติทางความร้อนและราคาต้นทุนเลือกพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีปริมาณผงซีลีอีย 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักไปศึกษาผลของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลีอียและพอลิবিวิลินซักซิเนต

## 4.2 ผลของแอมโมเนียมโพสิฟอสเฟตต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลีอียและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

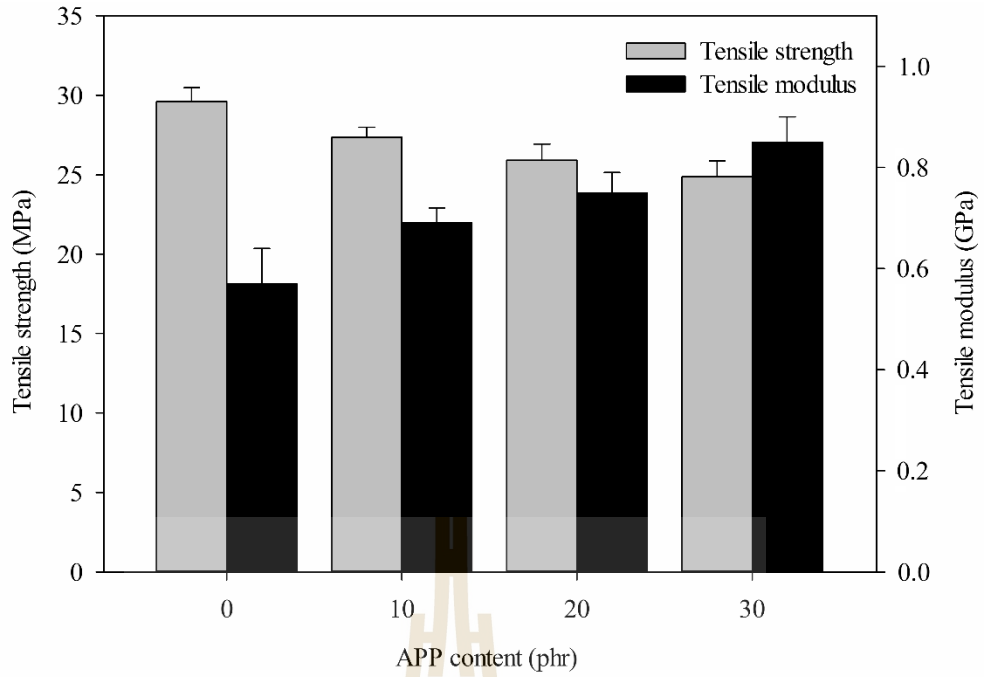
### 4.2.1 สมบัติทางกล

สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลีอียและ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ปริมาณแอมโมเนียมโพสิฟอสเฟตต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.4 เมื่อใส่แอมโมเนียมโพสิฟอสเฟตที่ปริมาณ 10 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิต (10APP) ความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลง และเมื่อปริมาณแอมโมเนียมโพสิฟอสเฟตเพิ่มขึ้นเป็น 20 และ 30 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิต (20APP และ 30APP ตามลำดับ) ความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงอย่างต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 4.4 (a) เนื่องจากการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟซที่ไม่ดีระหว่างแอมโมเนียมโพสิฟอสเฟตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและการรวมกันของแอมโมเนียมโพสิฟอสเฟตในพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Yu และคณะ, 2014) ซึ่งสามารถยืนยันได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 4.6

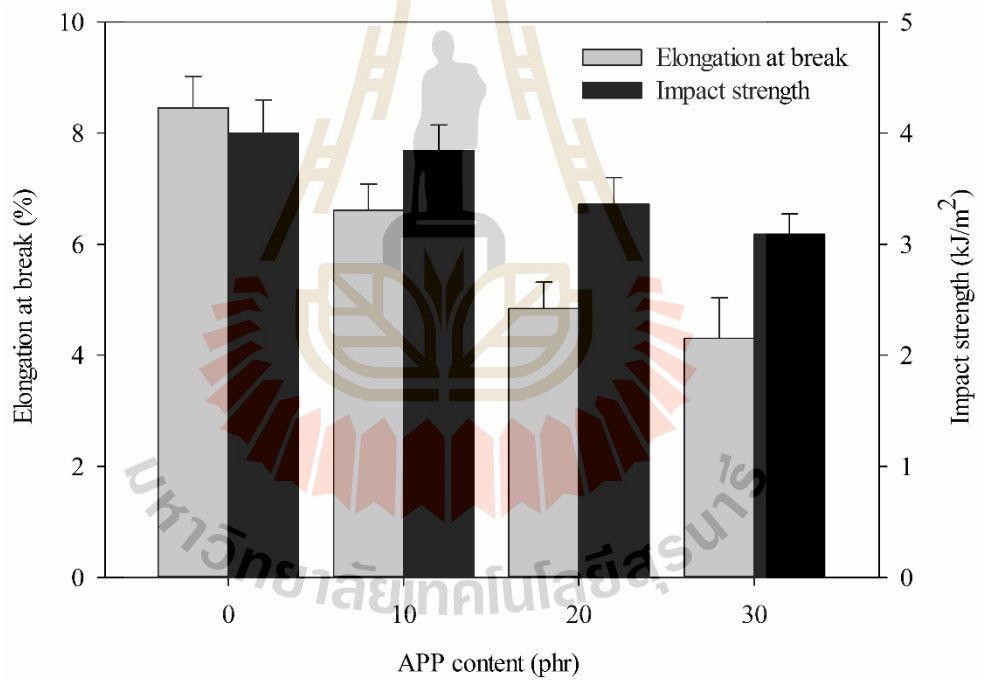
มอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแอมโมเนียมโพสิฟอสเฟตเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.4 (a) เนื่องจากแอมโมเนียมโพสิฟอสเฟตเป็นวัสดุที่มีความแข็งสูงจึงส่งผลให้มอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแอมโมเนียมโพสิฟอสเฟตเพิ่มขึ้น (Yu และคณะ, 2014)

ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงเมื่อปริมาณแอมโมเนียมโพสิฟอสเฟตเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.4 (b) เนื่องจากการรวมกันของแอมโมเนียมโพสิฟอสเฟตในพอลิเมอร์เมทริกซ์และการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟซที่ไม่ดีระหว่างแอมโมเนียมโพสิฟอสเฟตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Yu และคณะ, 2014) ดังแสดงในรูปที่ 4.3

ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลีอียและ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ปริมาณแอมโมเนียมโพสิฟอสเฟตต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.4 (b) ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณแอมโมเนียมโพสิฟอสเฟตเพิ่มขึ้น เนื่องจากการรวมกลุ่มของแอมโมเนียมโพสิฟอสเฟตในพอลิเมอร์เมทริกซ์และการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟซที่ไม่ดีระหว่างแอมโมเนียมโพสิฟอสเฟตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จึงก่อให้เกิดความเข้มของความเค้นซึ่งต้องการพลังงานน้อยกว่าในการแตกหัก (Shukor และคณะ, 2014)



(a)

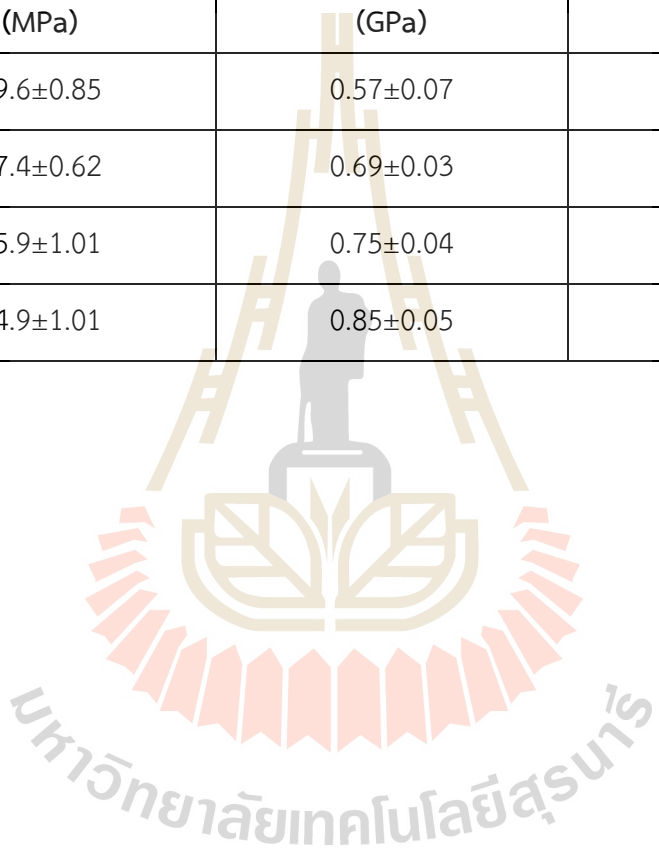


(b)

รูปที่ 4.4 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ ปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่างๆ (a) ความต้านทานต่อแรงดึงและมอดูลัสแรงดึง และ (b) ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดและความต้านทานต่อแรงกระแทก

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিവിစိးနီနီနီနီที่ปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่างๆ

| Sample name     | Tensile strength<br>(MPa) | Tensile modulus<br>(GPa) | Elongation at break<br>(%) | Impact strength<br>(kJ/m <sup>2</sup> ) |
|-----------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|
| 70PBS/30sawdust | 29.6±0.85                 | 0.57±0.07                | 8.45±0.57                  | 4.00±0.30                               |
| 10APP           | 27.4±0.62                 | 0.69±0.03                | 6.61±0.47                  | 3.84±0.23                               |
| 20APP           | 25.9±1.01                 | 0.75±0.04                | 4.84±0.48                  | 3.36±0.24                               |
| 30APP           | 24.9±1.01                 | 0.85±0.05                | 4.30±0.74                  | 3.09±0.18                               |





#### 4.2.2 สมบัติความต้านทานต่อการติดไฟ

อัตราการเผาไหม้ทางแนวตั้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.5 จากผลการทดสอบอัตราการเผาไหม้ทางแนวตั้งพบว่าคอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีการใส่แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 10 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนติดไฟได้ดีและไม่ถูกจัดอยู่ในชั้นใดตามมาตรฐาน UL-94 เนื่องจากปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตไม่เพียงพอต่อการสร้างชั้นป้องกัน (Protective layer) เพื่อกั้นพอลิเมอร์จากไฟและก๊าซออกซิเจน (Shumao และคณะ, 2010) แสดงให้เห็นว่าต้องใส่แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตในปริมาณที่มากขึ้นเพื่อเพิ่มสมบัติความต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้เมื่อมีการใส่แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิตลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตถูกจัดอยู่ในชั้น V-2 ตามมาตรฐาน UL-94 และเมื่อปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตเพิ่มขึ้นเป็น 30 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิตพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตถูกจัดอยู่ในชั้น V-0 ตามมาตรฐาน UL-94 แสดงให้เห็นว่าแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตเพิ่มความต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เนื่องจากแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตสร้างชั้นป้องกันกั้นพอลิเมอร์คอมโพสิตออกจากไฟและออกซิเจน (Shukor และคณะ, 2014) โดยสามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณซีลี้อยเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้น

อัตราการเผาไหม้ทางแนวนอนของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.5 พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีอัตราการเผาไหม้ 31.13 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อมีการใส่แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ทุกปริมาณของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต พบว่าการเผาไหม้หยุดก่อนที่ไฟจะลามถึงจุดอ้างอิงที่สอง แสดงให้เห็นว่าแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตเพิ่มสมบัติความต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิต เนื่องจากแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตสร้างชั้นป้องกันกั้นพอลิเมอร์คอมโพสิตออกจากไฟและออกซิเจน (Shukor และคณะ, 2014)

ตารางที่ 4.5 ลำดับตามมาตรฐาน UL-94 และอัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิวิธิลีนซัคซิเนตที่ปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่างๆ

| Sample name     | UL-94 classification | Horizontal burning rate (mm/min) |
|-----------------|----------------------|----------------------------------|
| PBS             | V-2                  | HB*                              |
| 70PBS/30sawdust | NC                   | 31.13±0.52                       |
| 10APP           | NC                   | HB*                              |
| 20APP           | V-2                  | HB*                              |
| 30APP           | V-0                  | HB*                              |

\*ชั้นทดสอบหยุดการเผาไหม้ก่อนที่จะลามถึงจุดอ้างอิงที่สอง (100 มิลลิเมตร จากปลายชั้นทดสอบ)

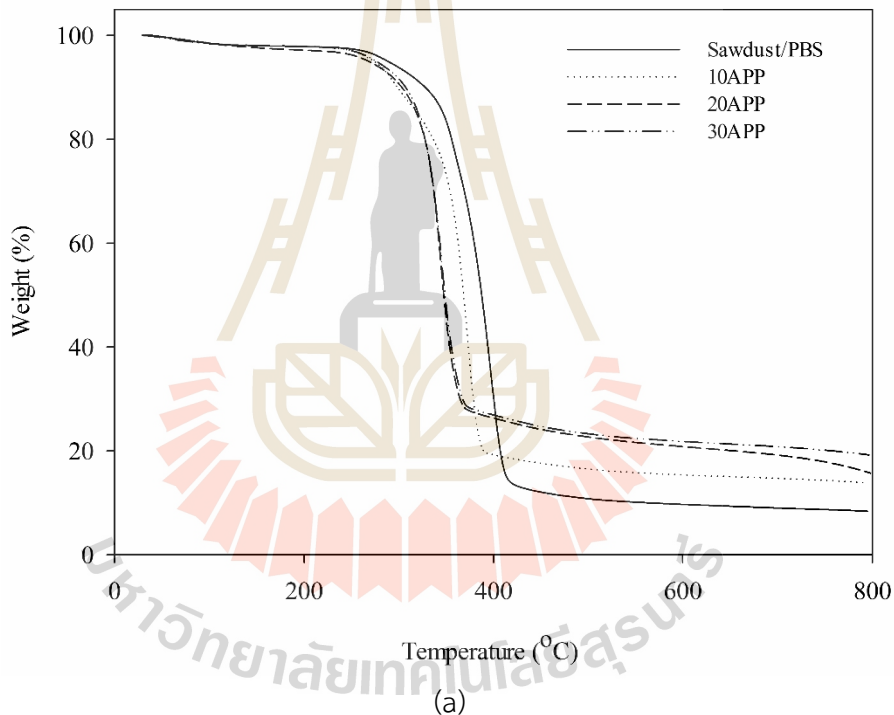
#### 4.2.3 สมบัติทางความร้อน

กราฟ TGA และ DTGA ของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิวิธิลีนซัคซิเนตที่ปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.5 และอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและปริมาณที่เข้าของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิวิธิลีนซัคซิเนตที่ปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.6 พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิวิธิลีนซัคซิเนตที่มีการใส่ผงซีลี้อย 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสามลำดับที่อุณหภูมิ 278.62 356.63 และ 397.50 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเสื่อมสภาพของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสในผงซีลี้อยและพอลิวิธิลีนซัคซิเนตตามลำดับ เมื่อใส่แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่ปริมาณ 10 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิทในพอลิเมอร์คอมโพสิทพบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสามลำดับที่อุณหภูมิ 280.93 356.63 และ 376.33 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักลำดับที่หนึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพทางความร้อนของเฮมิเซลลูโลสในผงซีลี้อย การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักลำดับที่สองเกิดจากการเสื่อมสภาพทางความร้อนของเซลลูโลสในผงซีลี้อยและแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต ซึ่งแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตมีเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสองลำดับที่อุณหภูมิประมาณ 300 และ 550 องศาเซลเซียส (Samyn และคณะ, 2007) การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักลำดับที่สามเกิดจากการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิวิธิลีนซัคซิเนต (Shukor และคณะ, 2014)

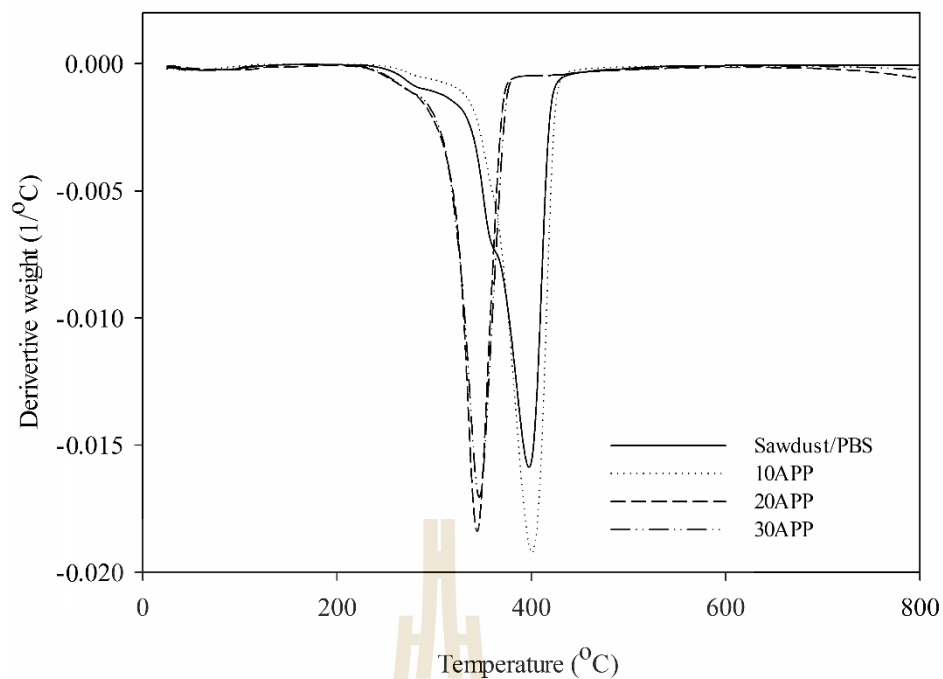
นอกจากนี้เมื่อใส่แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตที่ปริมาณ 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิทในพอลิเมอร์คอมโพสิทพบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสองลำดับที่อุณหภูมิ 282.01 และ 244.17 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักลำดับที่สามของพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลงและซ้อนกันกับอุณหภูมิการ



เปลี่ยนแปลงน้ำหนักลำดับที่สอง เนื่องจากการเสื่อมสภาพทางความร้อนของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตเร่งการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Siat และคณะ, 1997; Bugajny และคณะ, 1999 และ Duquesne และคณะ, 2001;) และเมื่อเพิ่มปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตเป็น 30 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิต อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงน้ำหนักลำดับที่สามของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่าความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงเมื่อปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามปริมาณขี้เถ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้น Dorez และคณะพบว่า การใส่แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านลินิน (Flax fiber) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตส่งผลให้ความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงในขณะที่ปริมาณขี้เถ้าเพิ่มขึ้น (Dorez และคณะ, 2013)



รูปที่ 4.5 ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงขี้เถ้าและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่างๆ (a) TGA และ (b) DTGA



(b)

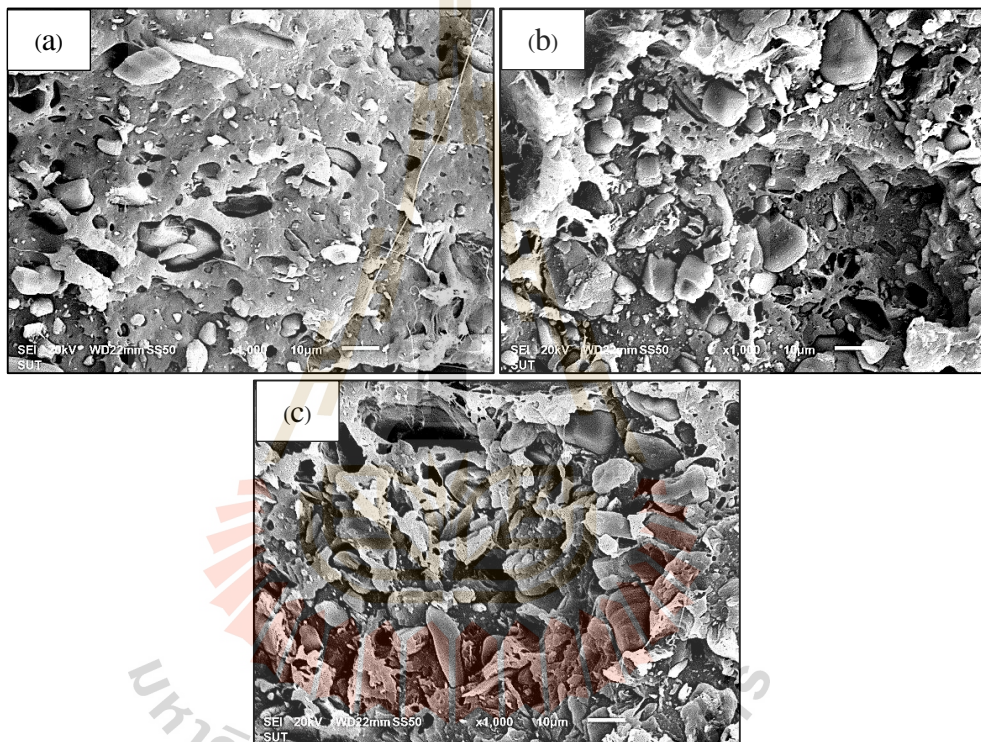
รูปที่ 4.5 ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่างๆ (a) TGA และ (b) DTGA (ต่อ)

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและปริมาณซีลี้อยของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่างๆ

| Sample name     | Weight loss temperature (°C) |                 |                 | Residue (%) |
|-----------------|------------------------------|-----------------|-----------------|-------------|
|                 | 1 <sup>st</sup>              | 2 <sup>nd</sup> | 3 <sup>rd</sup> |             |
| 70PBS/30sawdust | 278                          | 356             | 397             | 8.4         |
| 10APP           | 281                          | 356             | 376             | 10.9        |
| 20APP           | 282                          | -               | 344             | 15.7        |
| 30APP           | 277                          | -               | 342             | 19.2        |

#### 4.2.4 ลัทธิฐานวิทยา

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวที่แตกหักจากแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিธิลีนซัคซิเนตที่ปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่างๆ ที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงในรูปที่ 4.6 พบช่องว่างระหว่างแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตและพอลิবিธิลีนซัคซิเนตดังแสดงรูปที่ 4.6 (a) เนื่องจากความไม่เข้ากันระหว่างแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตและพอลิবিธิลีนซัคซิเนต นอกจากนี้พบการรวมกลุ่มของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตเมื่อปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (b)-(c) ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึง การยืดสูงสุด ณ จุดขาดและความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงเมื่อปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตเพิ่มขึ้น



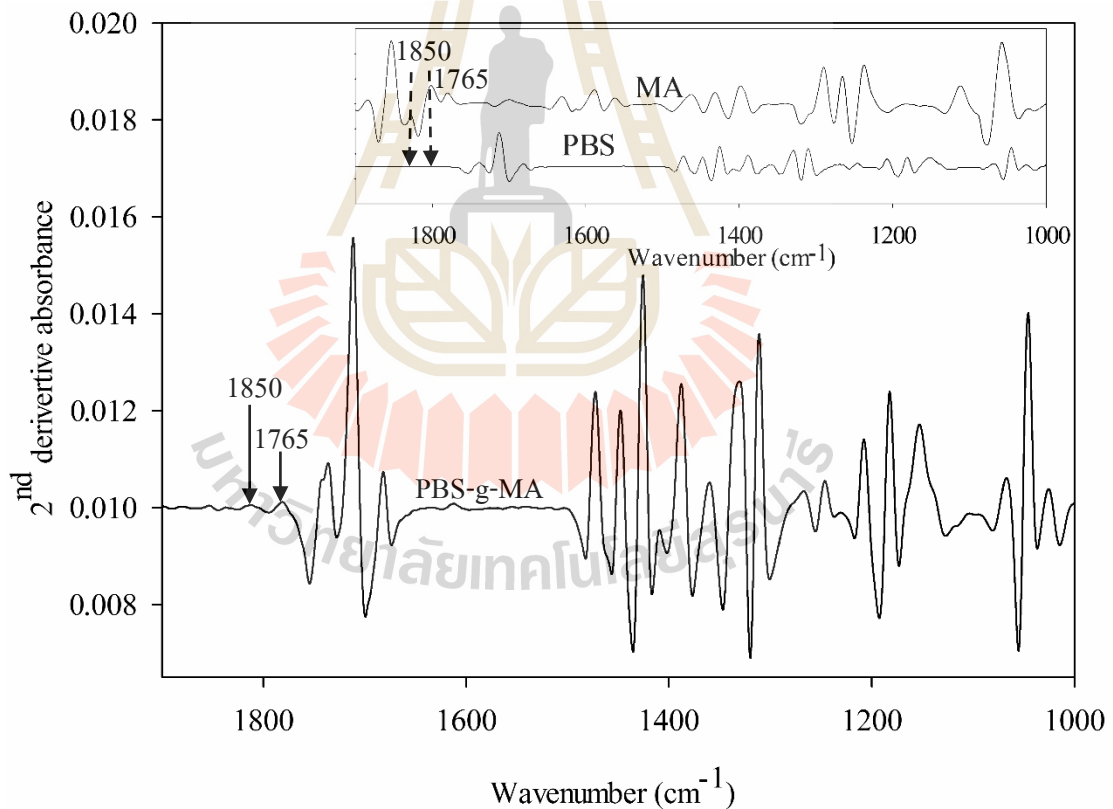
รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวที่แตกหักจากแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিธิลีนซัคซิเนตที่ปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตต่างๆ ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (a) 10APP (b) 20APP และ (c) 30APP

จากสมบัติทางกล สมบัติความต้านทานต่อการตีไฟและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ เลือกพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีปริมาณแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิตไปศึกษาผลของสารช่วยให้เข้ากันชนิดมาเลอิกแอนไฮโดรด์กราฟท์ พอลิবিธิลีนซัคซิเนตต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিธิลีนซัคซิเนต

#### 4.3 ผลสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลีเยอ และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีการใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต

##### 4.3.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและเปอร์เซ็นต์การกราฟท์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

อนุพันธ์ลำดับสอง (Second derivative) ของ FTIR สเปกตรัมของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต แสดงในรูปที่ 4.7 จากสเปกตรัมของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตพบการดูดกลืนสเปกตรัมที่เลขคลื่น (Wavenumber)  $1765$  และ  $1850\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งพบในสเปกตรัมของมาเลอิกแอนไฮไดรด์แต่ไม่พบในสเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โดยสเปกตรัมที่เลขคลื่น  $1765$  และ  $1850\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงลักษณะการดูดกลืนของหมู่ซัคซิโนอิกแอนไฮไดรด์ (Succinic anhydride group) (Phua และคณะ, 2013) จากผลการวิเคราะห์สามารถยืนยันถึงการกราฟท์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์บนพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต นอกจากนี้เปอร์เซ็นต์การกราฟท์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ได้จากการไตเตรทคือ 1.17 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.7 อนุพันธ์ลำดับสองของ FTIR สเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต มาเลอิกแอนไฮไดรด์และ มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

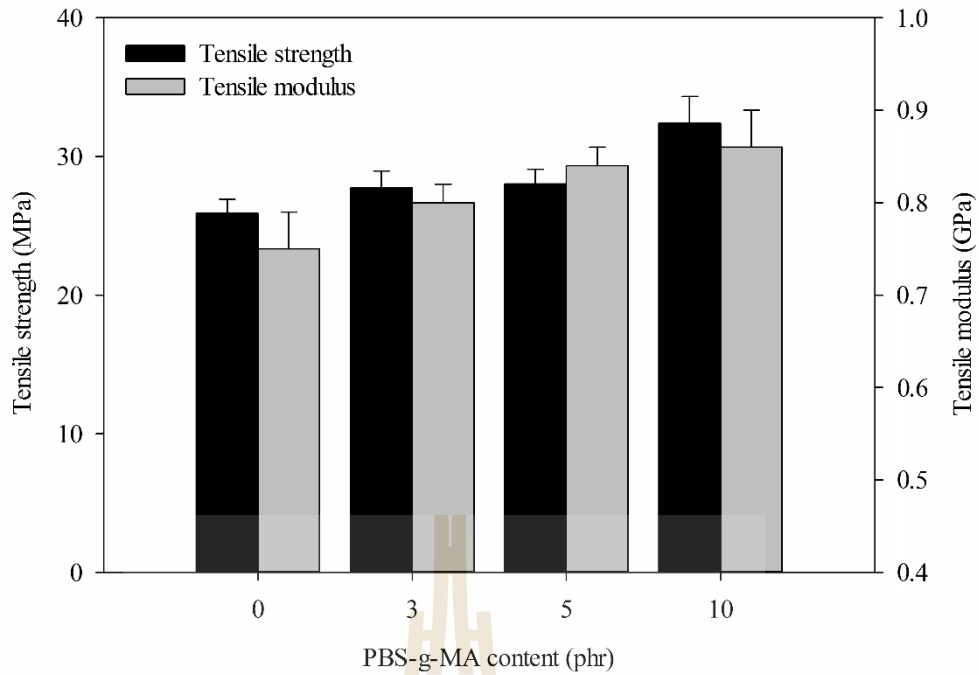
#### 4.3.2 สมบัติทางกล

สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิธินซัคซิเนตที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิবিวิธินซัคซิเนตต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.7 เมื่อใส่มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิবিวิธินซัคซิเนตที่ปริมาณ 3 และ 5 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิตพบว่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน แต่เมื่อปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิবিวิธินซัคซิเนตเพิ่มขึ้นเป็น 10 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิต ความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสระหว่างสารหน่วงไฟและพอลิবিวิธินซัคซิเนต และระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิธินซัคซิเนต (Demir และคณะ, 2006; Kim และคณะ, 2011) โดยสามารถยืนยันได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 (หัวข้อที่ 4.3.5)

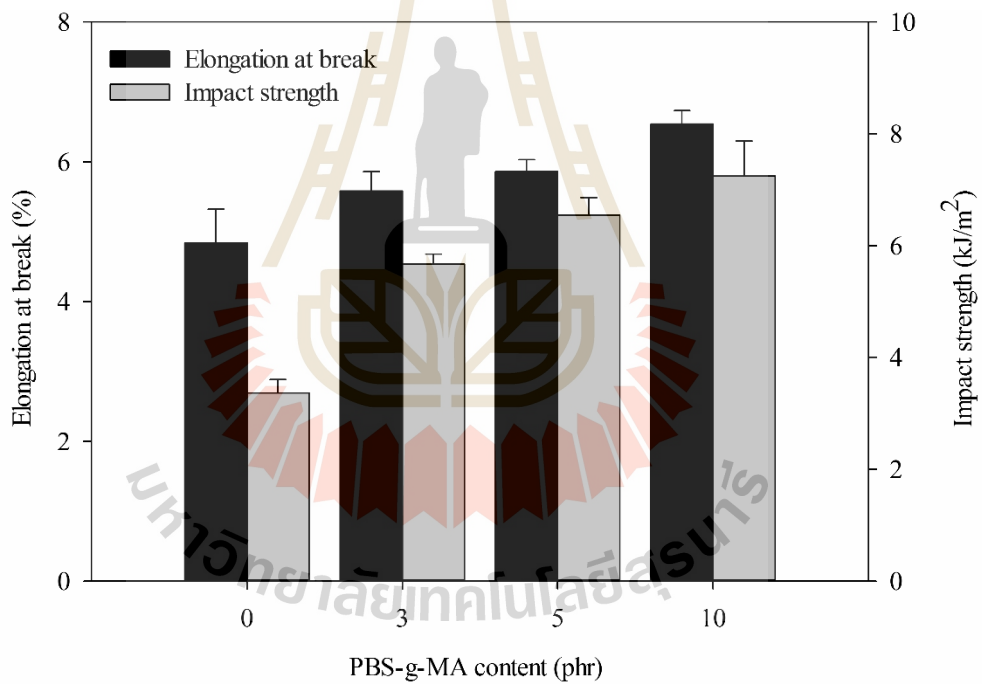
มอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิবিวิธินซัคซิเนตเพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสระหว่างสารหน่วงไฟกับพอลิবিวิธินซัคซิเนตและผงซีลี้อยกับพอลิবিวิธินซัคซิเนตและระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิธินซัคซิเนต (Demir และคณะ, 2006; Kim และคณะ, 2011)

ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิবিวิธินซัคซิเนตเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสระหว่างสารหน่วงไฟกับพอลิবিวิธินซัคซิเนตและผงซีลี้อยกับพอลิবিวิธินซัคซิเนตและระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิธินซัคซิเนต (Demir และคณะ, 2006; Kim และคณะ, 2011) Lee และ Ohkita (2003) พบว่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงไม้และพอลิคาโพรแลคโตน (Polycaprolactone) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นกันเมื่อปริมาณสารช่วยให้เข้ากันชนิด มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิคาโพรแลคโตนเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิবিวิธินซัคซิเนตต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.7 (b) ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิবিวิธินซัคซิเนตเพิ่มขึ้น เพราะการปรับปรุงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสระหว่างสารตัวเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิবিวิธินซัคซิเนตส่งผลให้ประสิทธิภาพการส่งผ่านแรงจากพอลิเมอร์เมทริกซ์สู่สารตัวเติมดีขึ้น (Thirmizir และคณะ, 2011)



(a)



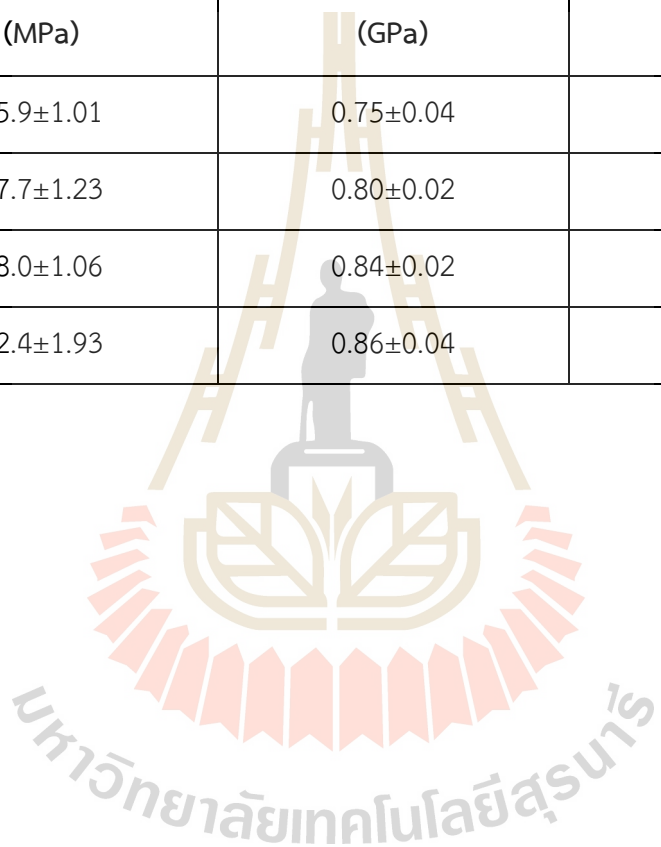
(b)

**รูปที่ 4.8** สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিවိလීନซ်ค်ซินเนตที่ใส่ สาร  
 หน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์ คอมโพสิทที่  
 ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิবিවိလීนซ်ค်ซินเนตต่างๆ (a) ความต้านทานต่อแรงดึง  
 และมอดูลัสแรงดึง และ (b) ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดและความต้านทานต่อแรงกระแทก



ตารางที่ 4.7 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิธีสังเคราะห์ที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮโดรด์กราฟท์พอลิবিวิธีสังเคราะห์ชนิดต่างๆ

| Sample name | Tensile strength (MPa) | Tensile modulus (GPa) | Elongation at break (%) | Impact strength (kJ/m <sup>2</sup> ) |
|-------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| 20APP       | 25.9±1.01              | 0.75±0.04             | 4.84±0.48               | 3.36±0.24                            |
| 20APP_3C    | 27.7±1.23              | 0.80±0.02             | 5.58±0.22               | 5.62±0.18                            |
| 20APP_5C    | 28.0±1.06              | 0.84±0.02             | 5.86±0.17               | 6.54±0.32                            |
| 20APP_10C   | 32.4±1.93              | 0.86±0.04             | 6.54±0.19               | 7.24±0.63                            |



#### 4.3.3 สมบัติความต้านทานต่อการติดไฟ

อัตราการเผาไหม้ทางแนวตั้งของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.8 จากผลการทดสอบอัตราการเผาไหม้ทางแนวตั้งพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีการใส่แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิทลงในพอลิเมอร์คอมโพสิทพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิทถูกจัดอยู่ในชั้น V-2 ตามมาตรฐาน UL-94 และเมื่อมีการใส่มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต คอมโพสิทพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิทถูกจัดอยู่ในชั้น V-2 ตามมาตรฐาน UL-94 แสดงให้เห็นว่ามาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไม่ส่งผลต่อความต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณซีลี้อยไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการใส่มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ทุกปริมาณของสารช่วยให้เข้ากัน Ma และคณะพบว่าการศึกษาช่วยให้เข้ากัน คือ แอลฟา-เมทาอะคริลิก แอซิดกราฟท์พอลิโพรพิลีน ( $\alpha$ -methacrylic acid grafted polypropylene) ส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลแต่ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติการต้านการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิโพรพิลีนและสารหน่วงไฟอินทิวเมสเซน (Intumescent flame retardant/PP composites) (Ma และคณะ, 2002)

อัตราการเผาไหม้ทางแนวนอนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.8 การเผาไหม้พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีการใส่แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิทหยุดก่อนที่ไฟจะลามถึงจุดอ้างอิงที่สอง นอกจากนี้เมื่อมีการใส่มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ทุกปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญต่อความต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิท

**ตารางที่ 4.8** ลำดับตามมาตรฐาน UL-94 และอัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณมาเล็ก แอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตต่างๆ

| Sample name | UL-94 classification | Horizontal burning rate (mm/min) |
|-------------|----------------------|----------------------------------|
| 20APP       | V-2                  | HB*                              |
| 20APP_3C    | V-2                  | HB*                              |
| 20APP_5C    | V-2                  | HB*                              |
| 20APP_10C   | V-2                  | HB*                              |

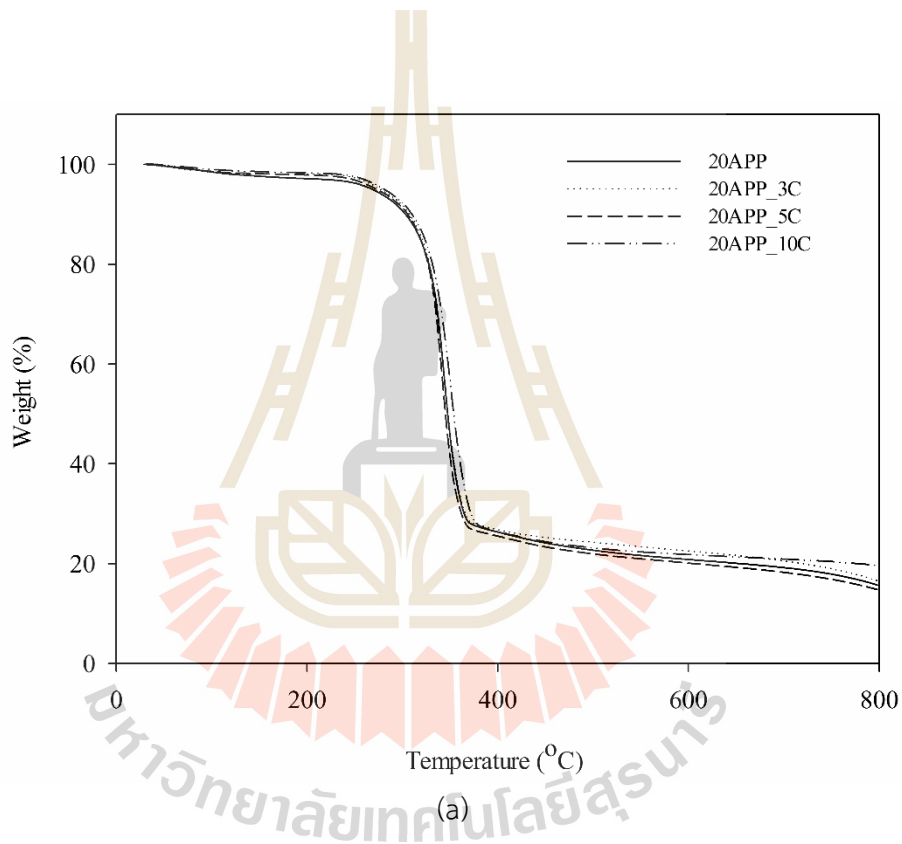
\*ชั้นทดสอบหยุดการเผาไหม้ก่อนที่ไฟจะลามถึงจุดอ้างอิงที่สอง (100 มิลลิเมตร จากปลายชั้นทดสอบ)

#### 4.3.4 สมบัติทางความร้อน

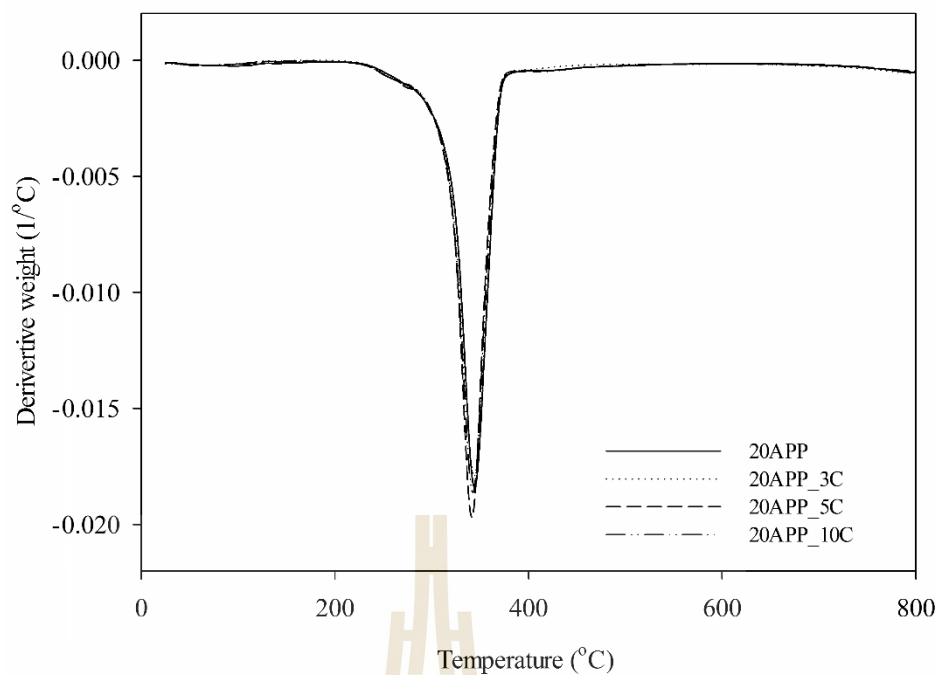
กราฟ TGA และ DTGA ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณมาเล็กแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.9 (a)-(b) และอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและปริมาณซีลี้อยของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณมาเล็กแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.9 พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสองลำดับที่อุณหภูมิ 282.01 และ 244.17 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักลำดับที่หนึ่งเกิดเนื่องจากการสลายตัวทางความร้อนของเฮมิเซลลูโลสในผงซีลี้อย การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักลำดับที่สองเกิดเนื่องจากการสลายตัวทางความร้อนของเซลลูโลสในผงซีลี้อย แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักลำดับที่หนึ่งและสองของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงเล็กน้อยเมื่อมีการใส่มาเล็กแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ปริมาณ 3 และ 5 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิต นอกจากนี้อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักลำดับที่หนึ่งและสองของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการใส่มาเล็กแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ปริมาณ 10 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิต Lee และคณะพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยปอแก้วกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีการใส่มาเล็กแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีอุณหภูมิการเสื่อมสลาย (decomposition temperature) ที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์

คอมโพสิทระหว่างเส้นใยปอแก้วกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Lee และคณะ, 2013) การมีอันตรกิริยาที่มากขึ้นระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์สามารถส่งเสริมกระบวนการเสื่อมสลายของทั้งสององค์ประกอบเป็นเหตุผลว่าการเสื่อมสลายอย่างรวดเร็วขององค์ประกอบหนึ่งสามารถเร่งการเสื่อมสลายขององค์ประกอบข้างเคียง อีกเหตุผลหนึ่งของการมีความเสถียรทางความร้อนที่ต่ำของพอลิเมอร์คอมโพสิทที่มีการใส่มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นเพราะการมีเปอร์ออกไซด์ที่เหลือ (Peroxide residue) ที่ใช้ในกระบวนการกราฟ (Araujo และคณะ, 2008) แสดงให้เห็นว่าความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลงเมื่อมีการใส่มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต นอกจากนี้ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของปริมาณขี้เถ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิทเมื่อมีการใส่มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ทุกปริมาณของสารช่วยให้เข้ากัน



**รูปที่ 4.9** ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เถ้าและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีน ซัคซิเนตต่างๆ (a) TGA และ (b) DTGA



(b)

**รูปที่ 4.9** ลักษณะการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลี้อยและพอลิ บิวทิลีนซัคซิเนตที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของ พอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตต่างๆ (a) TGA และ (b) DTGA (ต่อ)

**ตารางที่ 4.9** อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและปริมาณซีลี้อยของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง ผงซีลี้อยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียม พอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณมาเลอิก แอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตต่างๆ

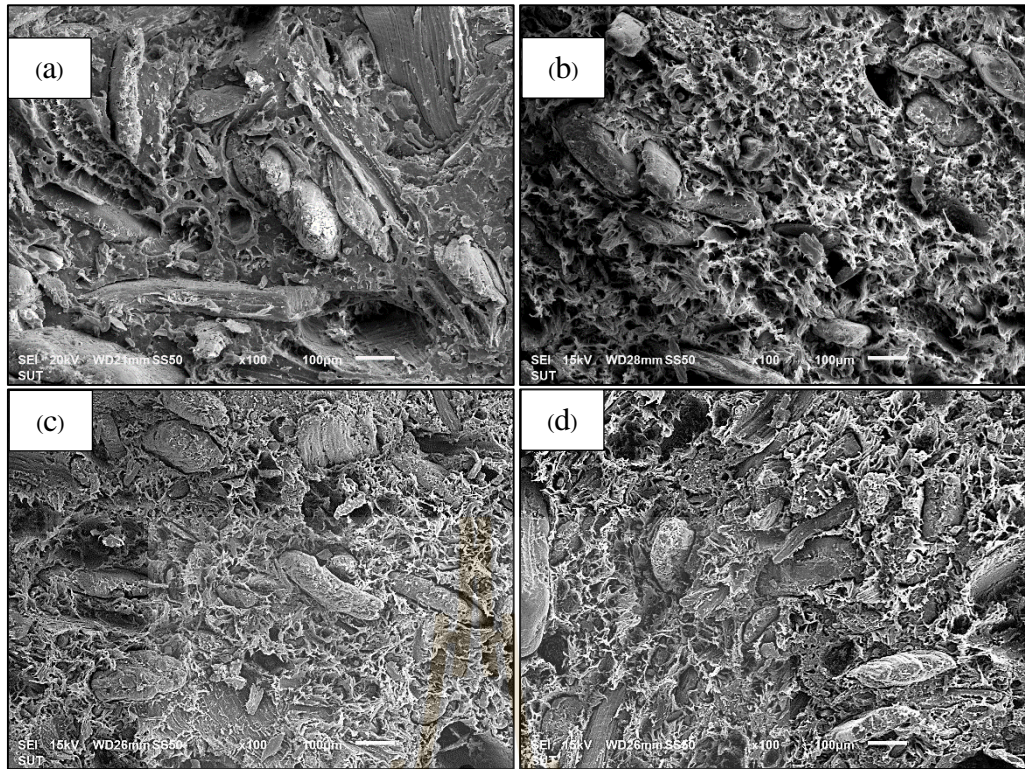
| Sample name | Weight loss temperature (°C) |                 | Residue (%) |
|-------------|------------------------------|-----------------|-------------|
|             | 1 <sup>st</sup>              | 2 <sup>nd</sup> |             |
| 20APP       | 282                          | 344             | 15.7        |
| 20APP_3C    | 280                          | 344             | 16.6        |
| 20APP_5C    | 280                          | 342             | 14.8        |
| 20APP_10C   | 276                          | 341             | 14.7        |

#### 4.3.5 ลัทธิฐานวิทยา

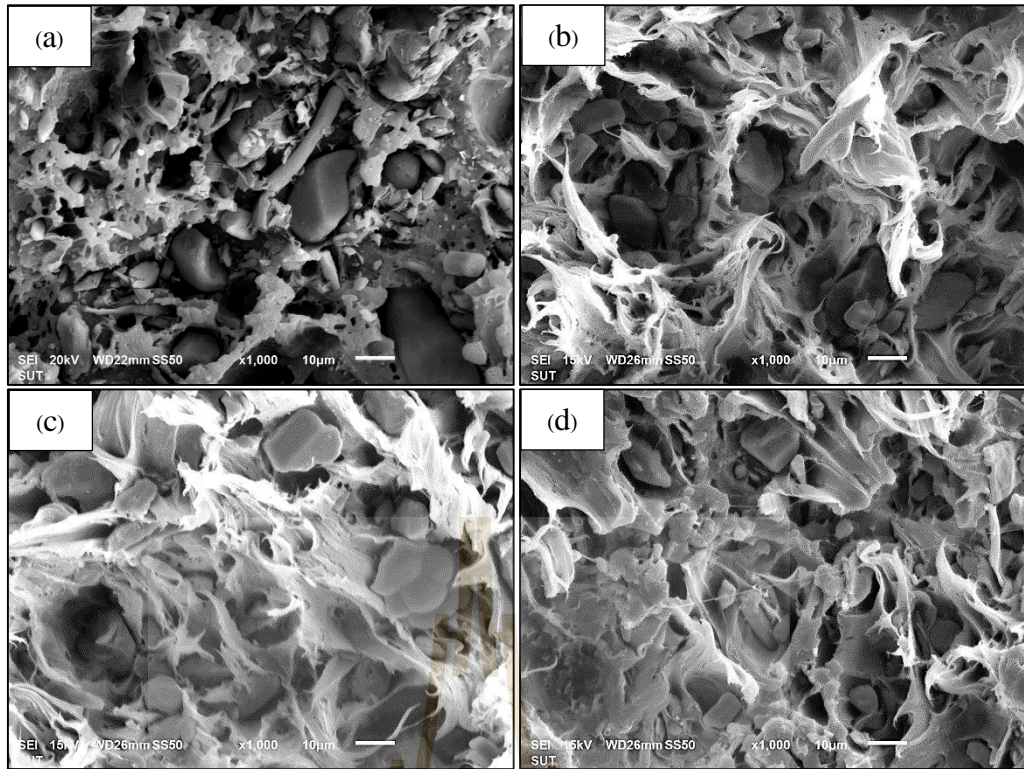
ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวที่แตกหักจากแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลีออยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตต่างๆที่กำลังขยาย 100 เท่า แสดงในรูปที่ 4.10 (a)-(d) จากรูปที่ 4.10 (a) พบรูที่เกิดจากการหลุดออกของผงซีลีออยจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเมทริกซ์ นอกจากนี้ยังพบการรวมกลุ่มกันของผงซีลีออยในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเมทริกซ์ แสดงให้เห็นว่ามีการยึดติดที่ไม่ดีระหว่างผงซีลีออยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการใส่มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตพบการปรับปรุงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสระหว่างผงซีลีออยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (b)-(d)

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวที่แตกหักจากแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลีออยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตต่างๆที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงในรูปที่ 4.11 (a)-(d) จากรูปที่ 4.11 (a) พบการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสที่ไม่ดีระหว่างแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเมทริกซ์ นอกจากนี้ยังพบการรวมกลุ่มกันของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเมทริกซ์ แสดงให้เห็นว่ามีการยึดติดที่ไม่ดีระหว่างแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เมื่อมีการใส่มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตพบการปรับปรุงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสระหว่างสารผงซีลีออยและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและการกระจายตัวที่ดีของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (b)-(d)





รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลีเนียมและพอลิไวนิลีนซัคซิเนตที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิไวนิลีนซัคซิเนตต่างๆ ที่กำลังขยาย 100 เท่า (a) 20APP (b) 20APP\_3C (c) 20APP\_5C และ (d) 20APP\_10C



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงซีลีเนียมและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตที่ใส่สารหน่วงไฟชนิดแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิบิวทีลีนซัคซิเนตต่างๆ ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (a) 20APP (b) 20APP\_3C (c) 20APP\_5C และ (d) 20APP\_10C



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

เมื่อปริมาณผงซีลี้อยเพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อแรงดึง ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ความต้านทานต่อแรงกระแทก ความเสถียรต่อความร้อนและสมบัติความต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิลินซ์คซิเน็ตลดลง ในขณะที่มอดูลัสแรงดึงเพิ่มขึ้น ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงการรวมกันของผงซีลี้อยใน พอลิবিวิลินซ์คซิเน็ตและการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสที่ไม่ดีระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิลินซ์คซิเน็ต จากพอลิเมอร์คอมโพสิททั้งหมด พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิลินซ์คซิเน็ตที่มีปริมาณผงซีลี้อย 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีสมบัติทางกล สมบัติความต้านทานต่อการติดไฟ และความเสถียรต่อความร้อนเหมาะสมที่สุด

แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลี้อยและพอลิবিวิลินซ์คซิเน็ตเพราะชั้นป้องกันที่สร้างขึ้นระหว่างกระบวนการเสื่อมสภาพทางความร้อนของแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต เมื่อปริมาณแอมโมเนียม พอลิฟอสเฟตเพิ่มขึ้น สมบัติความต้านทานต่อการติดไฟของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นในขณะที่สมบัติทางกลและความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลง ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสที่ไม่ดีระหว่างแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตและ พอลิবিวิลินซ์คซิเน็ต

เมื่อปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิবিวิลินซ์คซิเน็ตเพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อแรงดึง การยืดสูงสุด ณ จุดขาด ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ไม่ส่งผลต่อมอดูลัสแรงดึงและสมบัติความต้านทานต่อการติดไฟ แต่อย่างไรก็ตาม ความเสถียรต่อความร้อนลดลงเมื่อปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิবিวิลินซ์คซิเน็ตเพิ่มขึ้น ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่ามีการปรับปรุงการยึดติดบริเวณอินเตอร์เฟสระหว่างสารตัวเติมและพอลิবিวิลินซ์คซิเน็ตเมื่อมีการใส่มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีน นอกจากนี้ยังพบการกระจายตัวของสารหน่วงไฟและผงซีลี้อยในพอลิবিวิลินซ์คซิเน็ต

## บรรณานุกรม

- Araujo J. R., Waldman W. R., De Paoli M. A. (2008). Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibres: Coupling agent effect. *Polymer Degradation and Stability*. 93. 1770-1775.
- Arbelaiz A., Fernandez B., Valea A. and Mondragon I. (2006). Mechanical properties of short flax fibre bundle/poly( $\epsilon$ -caprolactone) composites: Influence of matrix modification and fibre content. *Carbohydrate Polymers*. 64. 224-232.
- Ashton H. C. (2005). *Fire Retardants-Functional Fillers for Plastics*. Wiley-VCH. Weinheim.
- Bugajny M., Le Bras M., Bourbigot S. and Delobel R. (1999). Thermal behaviour of ethylene-propylene rubber/polyurethane/ammonium polyphosphate intumescent formulations-a kinetic study. *Polymer Degradation and Stability*. 64. 157-163.
- Choi S. W., Lee B. H., Kim H. J. and Kim H. S. (2009). Thermal behavior of flame retardant filled PLA-WF bio-Composites. *Mokchae Konghak* 37. 155-163.
- Demir H., Balkose D. and Ulku S. (2006). Influence of surface modification of fillers and polymer on flammability and tensile behavior of polypropylene-composites. *Polymer Degradation and Stability*. 91. 1097-1085.
- Dorez G., Taguet A., Ferry L. and Lopez-Cuesta J. M. (2013). Thermal and fire behavior of natural fibers/PBS biocomposites. *Polymer Degradation and Stability* 98. 87-95.
- Duquesne S., Le Bras M., Bourbigot S., Delobel R., Camino G., Eling B., Lindsay C., Roels T. and Vezin H. (2001). Mechanism of fire retardancy of polyurethane using ammonium polyphosphate. *Journal of Applied Polymer Science*. 82. 3262-3274.
- Kim H. S., Yang H. S. and Kim H. J. (2005). Biodegradability and mechanical properties of agro-flour-filled polybutylene succinate biocomposites. *Journal of Applied Polymer Science* 97. 1513-1521.
- Kim S., Lee B. H., Lee S., Kim H. J. and Dorgan J. R. (2011). Enhanced interfacial adhesion, mechanical and thermal properties of natural flour-filled biodegradable polymer bio-composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 104. 331-338.
- Lee J. M., Ishak Z. A. M., Mat Tai R., Law T. T. and Thirmizir M. Z. A. (2013). Mechanical,

- thermal and water absorption properties of kenaf fiber-based polypropylene and poly(butylene succinate). *Journal of Polymers and the Environment*. 21. 293-302.
- Lee M. W., Han S. O. and Seo Y. B. (2008). Red algae fibre/poly(butylene succinate) biocomposites: The effect of fiber content on their mechanical and thermal properties. *Composites Science and Technology* 68. 1266-1272.
- Lee S. H. and Ohkita T. (2003). Mechanical and thermal flow properties of wood flour-biodegradable polymer composites. *Journal of Applied Polymer Science* 90. 1900-1905.
- Li B and He J. (2004). Investigation of mechanical property, flame retardancy and thermal degradation of LLDPE-wood-fiber composites. *Polymer Degradation and Stability*. 83. 241-246.
- Liang Z., Pan P., Zhu B., Dong T. and Inoue Y. (2009). Mechanical and thermal properties of poly(butylene succinate)/plant fiber biodegradable composite. *Journal of Applied Polymer Science*. 115. 3559-3567.
- Liu L., Yu J., Cheng L. and Qu W. (2009). Mechanical properties of poly(butylene succinate) (PBS) biocomposites reinforced with surface modified jute fiber. *Composites: Part A* 40. 669-674.
- Ma Z. L., Zhao M., Hu H. F., Ding H. T. and Zhang J. (2001). Compatibilization of intumescent flame retardant/polypropylene composites based on  $\alpha$ -methacrylic acid grafted polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science*. 83. 3128-3132.
- Nam T. H., Ogihara S., Tung N. H. and Kobayashi S. (2011). Effect of alkali treatment on interfacial and mechanical properties of coir fiber reinforced poly(butylene succinate) biodegradable composites. *Composites: Part B*. 42. 1648-1656.
- Nie S., Liu X., Dai G., Yuan S., Cai F., Li B. and Hu Y. (2012). Investigation on flame retardancy and thermal degradation of flame retardant poly(butylene succinate)/bamboo fiber biocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*. 125. E485-E489.
- Nyambo C., Mohanty A. K. and Misra M. (2011). Effect of maleated compatibilizer on performance of PLA/wheat straw-based green composites. *Macromolecular Materials and Engineering* 296. 710-718.
- Phua Y. J., Chow W. S. and Ishak Z. A. M. (2013). Reactive processing of maleic

- anhydride-grafted poly(butylene succinate) and the compatibilizing effect on poly(butylene succinate) nanocomposites. *Express Polymer Letters*. 7. 340-354.
- Samyn F., Bourbigot S., Duquesne S., Delobel R. (2007). Effect of zinc borate on the thermal degradation of ammonium polyphosphate. *Thermochimica Acta*. 456. 134-144.
- Sahoo S., Misra M. and Mohanty A. K. (2013). Effect of compatibilizer and fillers on the properties of injection molded lignin-based hybrid green composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 127. 4110-4121.
- Shukor F., Hassan A., Islam M. S., Mokhtar M. and Hasan M. (2014). Effect of ammonium polyphosphate on flame retardancy, thermal stability and mechanical properties of alkali treated kenaf fiber filled PLA biocomposites. *Materials & Design*. 54. 425-429.
- Shumao L., Jie R., Hua Y., Tao Y. and Weizhong Y. (2010). Influence of ammonium polyphosphate on the flame retardancy and mechanical properties of ramie fiber-reinforced poly(lactic acid) biocomposites. *Polymer International* 59. 242-248.
- Siat C., Bourbigot S. and Le Bras M. (1997). Thermal behaviour of polyamide-6-based intumescent formulations a kinetic study. *Polymer Degradation and Stability*. 58. 303-313.
- Thirmizir M. Z. A, Ishak Z. A. M, Taib R. M., Rahim S. and Mohamad Jani S. (2011). Kenaf bast fiber filled biodegradable poly(butylene succinate) composites: effects of fiber loading, fiber length, and maleated poly(butylene succinate) on the flexural and impact properties. *Journal of Applied Polymer Science*. 122. 3055-3063.
- Yu T., Li Y. and Wang Y. (2014). Flammability and mechanical properties of ramie Reinforced poly(lactic acid) composites by using DOPO. *Journal of Engineering Science*. 10. 9-18.



## ประวัติผู้วิจัย

### หัวหน้าโครงการ

นางสาว กษมา จารุกำจร ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์ สถานที่ติดต่อ สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000 การศึกษา พ.ศ. 2533 วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง มหาวิทยาลัย ขอนแก่น พ.ศ. 2536 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) มหาวิทยาลัยมหิดล และ พ.ศ. 2542 Ph.D. (Polymer Engineering) The University of Akron, OH, USA สาขาวิชาการที่มีความสนใจ กระบวนการขึ้นรูปและตรวจสอบพอลิเมอร์ (Polymer processing and characterization) และ พอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิต (Polymer blends and composites) ผลงานทางวิชาการ ประกอบด้วย บทความทางวิชาการ 45 บทความ และรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ 10 ฉบับ

