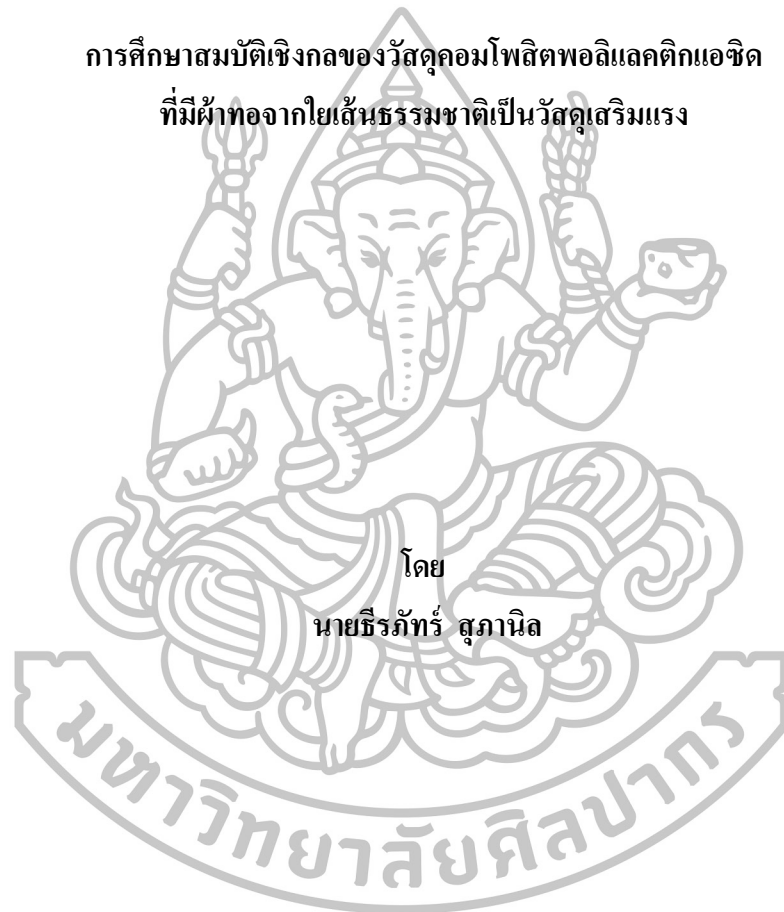




การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตพอลิแลคติกแอซิด
ที่มีผ้าทอจากใยเส้นธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรง



โดย
นายธีรภัทร์ สุภานิล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตพอลิแลคติกแอซิด
ที่มีผ้าทอจากใยเส้นธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**MECHANICAL PROPERTIES OF WOVEN NATURAL FIBERS
BASED POLY (LACTIC ACID) COMPOSITES MATERIAL**



**By
Mr. Theeraphat Suphanil**

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

Master of Engineering Program in Polymer Science and Engineering

Department of Materials Science and Engineering

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2015

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตพอลิแลคติกแอซิด ที่มีฟ้าทอจากใยเส้นธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรง ” เสนอโดย นายธีรภัทร์ สุภานิล เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ชารัทสนวงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐณี โล่ห์พัฒนานนท์

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉันททิพย์ สกุลเขมฤทัย)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐณี โล่ห์พัฒนานนท์)

...../...../.....

55402210 : สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

คำสำคัญ : วัสดุคอมโพสิต, โพลีแลคติกแอซิด, ผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติ

ธีรภัทร์ สุภานิล : การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตพอลิแลคติกแอซิดที่มีผ้าทอจากใยเส้นธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรง. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น และ ผ.ศ. ดร.ณัฐนิ โล่ห์พัฒนานนท์. 153 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อเตรียมวัสดุไบโอบคอมโพสิตที่มีส่วนประกอบทั้งหมดมาจากแหล่งวัตถุดิบที่สร้างขึ้นมาทดแทนได้ โดยเลือกใช้เมตริกซ์เป็นพอลิแลคติกแอซิดและส่วนเสริมแรงเป็นผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติ จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ เส้นใยกล้วย เส้นใยปอแก้ว และเส้นใยป่านศรนารายณ์ ขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัดด้วยความร้อน และทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติทางความร้อน เสถียรภาพทางความร้อน สมบัติเชิงกล ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติการดูดซึมน้ำ และสมบัติการลुकคิดไฟ จากการทดลองพบว่า เส้นใยธรรมชาติจะทำให้วัสดุไบโอบคอมโพสิตมีสมบัติทางความร้อน คือ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิการตกผลึก และอุณหภูมิการหลอมเหลวลดลง เสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุไบโอบคอมโพสิตต่ำกว่าพอลิแลคติกแอซิด และมีเศษเหลืออยู่ใกล้เคียงกัน สำหรับสมบัติเชิงกลพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุไบโอบคอมโพสิตมีลักษณะการแตกหักแบบเปราะเช่นเดียวกัน โดยพบว่าการเสริมแรงด้วยผ้าทอที่วางแบบขนาน หรือแบบตั้งฉาก มีแนวโน้มที่เหมือนกัน คือ การใช้เส้นใยปอแก้วจะมีความแข็งแรงที่สูงสุด ซึ่งเมื่อพิจารณาจากภาพสัณฐานวิทยาจะเห็นว่า เส้นใยปอแก้วมีกลุ่มเส้นใยขนาดใหญ่กว่าเส้นใยธรรมชาติอื่น จึงทำให้วัสดุไบโอบคอมโพสิตสามารถรับแรงกระทำได้ดีขึ้น สำหรับผลของทิศทางของแรงกระทำที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุไบโอบคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยผ้าทอที่วางแบบตั้งฉาก พบว่าการให้แรงกระทำ 45 องศา กับเส้นใยธรรมชาติ จะทำให้วัสดุไบโอบคอมโพสิตมีความแข็งแรงลดลง สำหรับสมบัติการดูดซึมน้ำพบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่าวัสดุไบโอบคอมโพสิตมาก โดยวัสดุไบโอบคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยปอแก้วจะมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าเส้นใยชนิดอื่น สมบัติการลुकคิดไฟพบว่าพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุไบโอบคอมโพสิต สามารถผ่านมาตรฐาน UL94HB และมีค่า LOI อยู่ที่ 20% ทั้งหมด โดยวัสดุไบโอบคอมโพสิตมีอัตราการลามไฟที่ช้ากว่าพอลิแลคติกแอซิดอยู่เล็กน้อย

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1. 2.

55402210 : MAJOR : POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

KEY WORD : COMPOSITE MATERIAL, POLYLACTIC ACID, WOVEN NATURAL FIBER
THEERAPHAT SUPHANIL : MECHANICAL PROPERTIES OF WOVEN
NATURAL FIBER-BASED POLY (LACTIC ACID) COMPOSITES MATERIAL. THESIS
ADVISORS : ASST. PROF. CHANCHAI THONGPIN, AND ASST. PROF. NATINEE
LOPATTANANON.153 pp.

This research was aimed to prepare bio-composite material that all components were obtained from renewable resources. The matrix was poly lactic acid and the reinforcements were plain woven made from long natural fiber such as banana fiber, kenaf fiber and sisal fiber. Bio-composite were fabricated by compression molding and thermal property, thermal stability, mechanical property, morphology, water absorption and flame retardancy were characterized. It was found that the use of natural fibers decreased thermal properties such as glass transition temperature, crystallization temperature and melting temperature of bio-composite material. The thermal stability of bio-composite material was less than that of poly lactic acid and their residues were not different. The mechanical properties of poly lactic acid and bio-composite materials were the same and they showed brittle character. The reinforcement by fabric in parallel and transverse were showed kenaf fiber has greater strength than other fibers. The morphology of fracture surface showed that kenaf fiber had a bigger bundle size than the other fibers. The effect of force direction in mechanical test showed that fiber orientation of 45 degrees reduced strength of bio-composite materials. For water absorption, poly lactic acid had lower water absorption than that of bio-composite materials. The bio-composite materials using kenaf fiber showed high water absorption than the other fibers. The poly lactic acid and bio-composite were passed UL94HB and LOI standard test. The bio-composite were low burning rate than poly lactic acid.



| | |
|---|---------------------------------------|
| Department of Materials Science and Engineering | Graduate School, Silpakorn University |
| Student's signature | Academic Year 2015 |
| Thesis Advisors' signature 1. | 2. |

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จันทรฉาย ทองปิ่น และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฌฐินี โล่ห์พัฒนานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้คอยให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการวิจัย การวิเคราะห์ผลการวิจัย จนถึงการตรวจสอบแก้ไข ข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อย่างละเอียดถี่ถ้วน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความเมตตา เป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะ วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่เคยอบรมสั่งสอนให้ความรู้ และขอขอบคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้โอกาสในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งการสนับสนุน ทางด้านสถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์ ขอขอบคุณคุณพินิจ เกียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ ประจำภาควิชา สำหรับคำแนะนำและการอำนวยความสะดวกทางด้านการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ และ สารเคมี ขอขอบคุณคุณไพโรจน์ ตั้งสุขธวัช นายช่างเทคนิคประจำภาควิชา สำหรับความช่วยเหลือ และการอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือและเครื่องจักร ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของภาควิชา สำหรับการอำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานในทุกๆด้าน จนกระทั่งงานวิจัยนี้เสร็จ สมบูรณ์

ขอขอบคุณเงินทุนอุดหนุนการวิจัยสำหรับนักศึกษาระดับปริญญาโทบัณฑิต จาก ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยศิลปากร ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ นักศึกษาภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุทุกท่าน สำหรับความห่วงใย ความมีน้ำใจ ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา และสุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ส่งเสริมเลี้ยงดู สั่งสอน และให้กำลังใจในการทำงานวิจัยจนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญภาพ..... | ฎ |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ..... | 1 |
| ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 2 |
| ขอบเขตของงานวิจัย..... | 3 |
| ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยสังเขป..... | 3 |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย..... | 4 |
| 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 5 |
| วัสดุคอมโพสิต (Composite material)..... | 5 |
| ไบโอพลาสติก (Bioplastic)..... | 21 |
| เส้นใย (Fiber)..... | 23 |
| การผลิตผ้าฝ้าย..... | 32 |
| งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 34 |
| 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย..... | 39 |
| สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย..... | 39 |
| ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... | 40 |

| บทที่ | หน้า |
|---|------|
| 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... | 49 |
| การศึกษาสมบัติของเส้นใยธรรมชาติ และผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติ..... | 49 |
| สมบัติของเส้นใยธรรมชาติ..... | 49 |
| การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของเส้นใยธรรมชาติด้วยเทคนิค Thermogravimetric analyze (TGA)..... | 51 |
| สมบัติของผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติ..... | 53 |
| การศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุไบโอคอมโพสิต..... | 55 |
| การศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุไบโอคอมโพสิตด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)..... | 55 |
| การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุไบโอคอมโพสิตด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)..... | 58 |
| การศึกษาผลของผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติ ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุไบโอคอมโพสิต..... | 60 |
| ผลของการเสริมแรงด้วยผ้าทอที่วางแบบขนาน ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุไบโอคอมโพสิต..... | 60 |
| ผลของการเสริมแรงด้วยผ้าทอที่วางแบบตั้งฉาก ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุไบโอคอมโพสิต..... | 85 |
| ผลของทิศทางของแรงกระทำที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ เสริมแรงด้วยผ้าทอที่วางแบบตั้งฉาก..... | 109 |
| การศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำ..... | 114 |
| สมบัติการดูดซึมน้ำของเส้นใยธรรมชาติ..... | 114 |
| สมบัติการดูดซึมน้ำของวัสดุไบโอคอมโพสิต..... | 115 |
| การศึกษาสมบัติการลุกติดไฟตามมาตรฐาน UL-94HB และปริมาณออกซิเจนต่ำสุดที่ทำให้สารตัวอย่างเกิดการติดไฟ..... | 117 |
| 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... | 119 |
| สรุปผลการทดลอง..... | 119 |
| ข้อเสนอแนะ..... | 122 |

| | หน้า |
|--|------|
| บรรณานุกรม..... | 123 |
| ภาคผนวก..... | 129 |
| ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลองจากเทคนิคต่างๆ..... | 130 |
| ภาคผนวก ข การนำเสนองานวิจัยบางส่วนในงานประชุมวิชาการ | 149 |
| ประวัติผู้วิจัย..... | 153 |



สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 แสดงองค์ประกอบ และสมบัติของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ..... | 28 |
| 3.1 แสดงสภาวะการขึ้นรูปในงานวิจัย..... | 44 |
| 4.1 แสดงสมบัติ และลักษณะของเส้นใยธรรมชาติ..... | 50 |
| 4.2 แสดงสมบัติ และลักษณะของผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติ..... | 54 |
| 4.3 แสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิการตกผลึกซ้ำ (T_c) และอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m)..... | 57 |
| 4.4 แสดงค่าอุณหภูมิขณะสูญเสียน้ำหนักไป ณ ปริมาณต่างๆ และเศษที่เหลืออยู่ (Residue) ของพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุไบโອคอมโพสิต..... | 57 |
| 4.5 แสดงการดูดซึมน้ำของเส้นใยธรรมชาติ..... | 115 |
| 4.6 แสดงสมบัติการลुकติดไฟ และปริมาณออกซิเจนต่ำสุดที่ใช้ ของชิ้นตัวอย่างวัสดุไบโອคอมโพสิต และพอลิแลคติกแอซิด..... | 116 |
| ก.1 ผลการทดสอบการตัดโค้ง..... | 140 |
| ก.2 ผลการทดสอบการดึงยืด..... | 143 |
| ก.3 ผลการทดสอบการกระแทก..... | 146 |
| ก.4 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ..... | 147 |
| ก.5 ผลการทดสอบการการลुकติดไฟ..... | 148 |

สารบัญภาพ

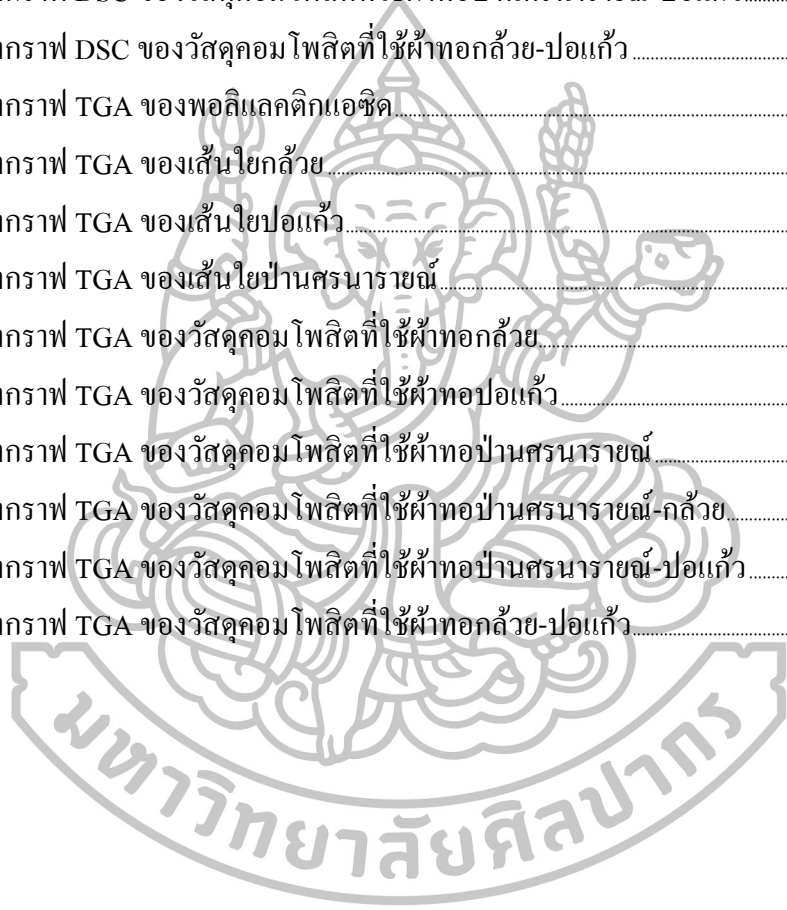
| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 แสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากเทอร์โมพลาสติก..... | 6 |
| 2.2 แสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากเทอร์โมเซตพลาสติก..... | 7 |
| 2.3 แสดงลักษณะและการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรง (Reinforcement) ในวัสดุคอมโพสิต..... | 8 |
| 2.4 แสดงรูปแบบการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรงภายในวัสดุคอมโพสิตแต่ละประเภท ทั้งในแบบเส้นใยสั้น และแบบเส้นใยยาว..... | 9 |
| 2.5 แสดงลักษณะ และองค์ประกอบของเครื่องเอ็กท루เดอร์แบบสกรูเดี่ยว..... | 10 |
| 2.6 แสดงลักษณะของสกรูภายในกระบอกหลอมของเครื่องเอ็กท루เดอร์แบบสกรูเดี่ยว..... | 11 |
| 2.7 แสดงลักษณะเครื่องฉีดที่มีชุดฉีดวางตัวในแนวนอน..... | 13 |
| 2.8 แสดงลักษณะเครื่องกดอัดในกระบวนการกดอัดขึ้นรูปพลาสติก..... | 14 |
| 2.9 แสดงการทดสอบการดึงยืด..... | 16 |
| 2.10 แสดงการทดสอบการตัดโค้ง..... | 17 |
| 2.11 แสดงการทดสอบการกระแทก..... | 18 |
| 2.12 แสดงกลไกการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวแบบเชิงกล..... | 19 |
| 2.13 แสดงกลไกการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวด้วยประจุไฟฟ้า..... | 19 |
| 2.14 แสดงกลไกการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวด้วยพันธะเคมี..... | 20 |
| 2.15 แสดงกลไกการยึดติดแบบแพร่ผ่าน..... | 20 |
| 2.16 แสดงการจำแนกไบโอพลาสติกประเภทต่างๆ..... | 21 |
| 2.17 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA)..... | 23 |
| 2.18 แสดงการจำแนกประเภทของเส้นใยชนิดต่างๆ..... | 24 |
| 2.19 แสดงโครงสร้างพื้นฐาน และการยึดเกาะกันระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลส..... | 25 |
| 2.20 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส..... | 26 |
| 2.21 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของลิกนิน..... | 27 |
| 2.22 แสดงภาพตัดขวางของเส้นใยปอแก้ว ที่กำลังขยาย 500x..... | 29 |
| 2.23 แสดงลักษณะของต้นป่านศรนารายณ์..... | 30 |
| 2.24 แสดงลักษณะของต้นกล้วย..... | 31 |
| 2.25 แสดงลักษณะของเครื่องทอผ้าแบบดั้งเดิม (Loom)..... | 33 |
| 2.26 แสดงลักษณะลายผ้าทอ..... | 34 |

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยใน ส่วนที่ 1 | 43 |
| 3.2 แสดงลักษณะการตั้งชุดทดสอบการเผาไหม้โดยเทคนิค UL-94HB..... | 48 |
| 3.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยใน ส่วนที่ 2 | 48 |
| 4.1 แสดงลักษณะของเส้นใยธรรมชาติในผ้าทอ..... | 50 |
| 4.2 แสดงเส้นกราฟ TGA และ DTG ของเส้นใยธรรมชาติ..... | 52 |
| 4.3 แสดงเส้นกราฟ DSC ของพอลิแลคติกแอซิดกับวัสดุไบโอคอมโพสิต..... | 56 |
| 4.4 แสดงเส้นกราฟ TGA และ DTG ของพอลิแลคติกแอซิดกับวัสดุไบโอคอมโพสิต | 59 |
| 4.5 แสดงลักษณะทิศทางของเส้นใยธรรมชาติภายในวัสดุไบโอคอมโพสิต และแรงกระทำในการทดสอบการตัดโค้ง | 60 |
| 4.6 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดของการตัดโค้ง..... | 61 |
| 4.7 แสดงค่าโมดูลัสการตัดโค้ง | 63 |
| 4.8 แสดงค่าความต้านทานต่อการตัดโค้ง..... | 63 |
| 4.9 แสดงภาพสัณฐานวิทยาในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบการตัดโค้ง..... | 64 |
| 4.10 แสดงลักษณะทิศทางของเส้นใยธรรมชาติภายในวัสดุไบโอคอมโพสิต และแรงกระทำในการทดสอบการดึงยืด | 65 |
| 4.11 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดของการดึงยืด..... | 66 |
| 4.12 แสดงค่าโมดูลัสของยัง..... | 68 |
| 4.13 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึง | 68 |
| 4.14 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด | 69 |
| 4.15 แสดงภาพสัณฐานวิทยาในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบการดึงยืด..... | 70 |
| 4.16 แสดงลักษณะทิศทางของเส้นใยธรรมชาติภายในวัสดุไบโอคอมโพสิต และแรงที่กระทำในการทดสอบการกระแทก..... | 71 |
| 4.17 แสดงค่าความต้านทานการกระแทก..... | 71 |
| 4.18 แสดงภาพสัณฐานวิทยาในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบการกระแทก | 72 |
| 4.19 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดของการตัดโค้ง..... | 74 |
| 4.20 แสดงค่าโมดูลัสการตัดโค้ง | 76 |

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.21 แสดงค่าความต้านทานต่อการตัดโค้ง..... | 76 |
| 4.22 แสดงภาพสัณฐานวิทยาในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบการตัดโค้ง..... | 77 |
| 4.23 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดของการดึงยึด..... | 78 |
| 4.24 แสดงค่าโมดูลัสของยัง..... | 80 |
| 4.25 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึง..... | 80 |
| 4.26 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาด..... | 81 |
| 4.27 แสดงภาพสัณฐานวิทยาในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบการดึงยึด..... | 82 |
| 4.28 แสดงค่าความต้านทานการกระแทก..... | 84 |
| 4.29 แสดงภาพสัณฐานวิทยาในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบการกระแทก..... | 84 |
| 4.30 แสดงลักษณะทิศทางของเส้นใยธรรมชาติภายในวัสดุไบโอคอมโพสิต และแรงกระทำในการทดสอบการตัดโค้ง..... | 85 |
| 4.31 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดของการตัดโค้ง..... | 86 |
| 4.32 แสดงค่าโมดูลัสการตัดโค้ง..... | 88 |
| 4.33 แสดงค่าความต้านทานต่อการตัดโค้ง..... | 88 |
| 4.34 แสดงภาพสัณฐานวิทยาในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบการตัดโค้ง..... | 89 |
| 4.35 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดของการดึงยึด..... | 90 |
| 4.36 แสดงค่าโมดูลัสของยัง..... | 92 |
| 4.37 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึง..... | 92 |
| 4.38 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาด..... | 93 |
| 4.39 แสดงภาพสัณฐานวิทยาในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบการดึงยึด..... | 94 |
| 4.40 แสดงค่าความต้านทานการกระแทก..... | 95 |
| 4.41 แสดงภาพสัณฐานวิทยาในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบการกระแทก..... | 96 |
| 4.42 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดของการตัดโค้ง..... | 97 |

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.43 แสดงค่าโมดูลัสการตัดโค้ง | 100 |
| 4.44 แสดงค่าความต้านทานต่อการตัดโค้ง | 100 |
| 4.45 แสดงภาพสัณฐานวิทยาในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบการตัดโค้ง | 101 |
| 4.46 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดของการดึงยึด | 102 |
| 4.47 แสดงค่าโมดูลัสของยัง | 104 |
| 4.48 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึง | 104 |
| 4.49 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาด | 105 |
| 4.50 แสดงภาพสัณฐานวิทยาในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบการดึงยึด | 106 |
| 4.51 แสดงค่าความต้านทานการกระแทก | 107 |
| 4.52 แสดงภาพสัณฐานวิทยาในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบการกระแทก | 108 |
| 4.53 แสดงค่าโมดูลัสการตัดโค้ง | 110 |
| 4.54 แสดงค่าความต้านทานต่อการตัดโค้ง | 110 |
| 4.55 แสดงค่าโมดูลัสของยัง | 111 |
| 4.56 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึง | 112 |
| 4.57 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาด | 112 |
| 4.58 แสดงค่าความต้านทานการกระแทก | 113 |
| 4.59 แสดงการดูดซึมน้ำของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด | 115 |

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| ก.1 แสดงกราฟ DSC ของพอลิแลคติกแอซิด..... | 131 |
| ก.2 แสดงกราฟ DSC ของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย..... | 131 |
| ก.3 แสดงกราฟ DSC ของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว..... | 132 |
| ก.4 แสดงกราฟ DSC ของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอป่านศรนารายณ์..... | 132 |
| ก.5 แสดงกราฟ DSC ของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอป่านศรนารายณ์-กล้วย..... | 133 |
| ก.6 แสดงกราฟ DSC ของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอป่านศรนารายณ์-ปอแก้ว..... | 133 |
| ก.7 แสดงกราฟ DSC ของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้ว..... | 134 |
| ก.8 แสดงกราฟ TGA ของพอลิแลคติกแอซิด..... | 135 |
| ก.9 แสดงกราฟ TGA ของเส้นใยกล้วย..... | 135 |
| ก.10 แสดงกราฟ TGA ของเส้นใยปอแก้ว..... | 136 |
| ก.11 แสดงกราฟ TGA ของเส้นใยป่านศรนารายณ์..... | 136 |
| ก.12 แสดงกราฟ TGA ของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย..... | 137 |
| ก.13 แสดงกราฟ TGA ของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว..... | 137 |
| ก.14 แสดงกราฟ TGA ของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอป่านศรนารายณ์..... | 138 |
| ก.15 แสดงกราฟ TGA ของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอป่านศรนารายณ์-กล้วย..... | 138 |
| ก.16 แสดงกราฟ TGA ของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอป่านศรนารายณ์-ปอแก้ว..... | 139 |
| ก.17 แสดงกราฟ TGA ของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้ว..... | 139 |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากปัญหาของการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่เพิ่มสูงขึ้นในปัจจุบัน โดยเฉพาะการใช้ทรัพยากรจากแหล่งไม่สามารถทดแทนได้ เช่น ปิโตรเลียม ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตวัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ในชีวิตประจำวันนั้นกำลังจะหมดลงในอนาคตอันใกล้ จึงได้มีการศึกษาพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของวัสดุที่มาจากแหล่งวัตถุดิบทดแทน (Renewable resource) เพิ่มมากขึ้นเพื่อหาวัสดุที่มาใช้ทดแทน โดยเฉพาะการใช้เส้นใยธรรมชาติในการเสริมแรงวัสดุคอมโพสิตซึ่งเป็นหนึ่งในการพัฒนาวัสดุที่น่าสนใจเนื่องจากเป็นทางเลือกที่ดีกว่าการใช้เส้นใยสังเคราะห์ในหลายด้าน เช่น ความหนาแน่นต่ำ ราคาถูก สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีความเป็นฉนวนทางความร้อน และใช้พลังงานในกระบวนการผลิตที่ต่ำ [1-3]

วัสดุคอมโพสิต (Composite) เป็นวัสดุผสมที่ได้จากวัสดุพื้นฐานที่มีสมบัติเชิงเคมีและฟิสิกส์ที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปทำให้วัสดุที่ได้มีโครงสร้างใหม่ที่มีสมบัติดีขึ้น โดยยังคงสามารถแยกวัฏภาค (Phase) ของวัสดุแต่ละประเภทในเนื้อวัสดุคอมโพสิตได้ [4] วัสดุคอมโพสิตเป็นวัสดุสำคัญอย่างหนึ่งที่มีการใช้ในชีวิตประจำวันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นแตกต่างจากวัสดุเชิงเดี่ยวแบบอื่น โดยได้มีการนำวัสดุคอมโพสิตมาประยุกต์ใช้งานตามวัตถุประสงค์ที่หลากหลาย เช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ ชิ้นส่วนเครื่องบิน และเฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น [5]

วัสดุคอมโพสิตประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ 1. เมทริกซ์ (Matrix) เป็นส่วนที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกันให้อยู่ในตำแหน่ง และยังสามารถป้องกันส่วนที่ทำหน้าที่เสริมแรงจากการเสียหายเนื่องจากสภาพแวดล้อม 2. ส่วนเสริมแรง (Reinforcement) เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิตซึ่งมักมีความแข็งแรง และมีค่าโมดูลัสที่สูง โดยสามารถแบ่งประเภทของวัสดุคอมโพสิตจากลักษณะการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรงได้ดังนี้ คือ แบบเส้นใยต่อเนื่อง (Continuous fibers) แบบเส้นใยสั้นไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous fibers, whiskers) แบบอนุภาค (Particles) และแบบผ้า (Fabric, braid) [4,6]

ไบโอพอลิเมอร์ (Biopolymer) เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และสามารถใช้ทดแทนพอลิเมอร์ที่ผลิตจากปิโตรเลียมได้ เช่น พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid,

PLA) ที่มีการใช้ค่อนข้างแพร่หลายเพราะอุณหภูมิขณะหลอมเหลวไม่สูงมากอยู่ที่ประมาณ 170°C และสามารถสังเคราะห์ได้จากสารตั้งต้นคือแลคติกแอซิด (Lactic acid) หรือโพลิแลกติกแอซิด ที่ได้มาจากการหมักน้ำตาลของวัตถุดิบจากการเกษตร เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง ซึ่งสามารถผลิตได้ในประเทศจำนวนมาก ลักษณะที่สำคัญของ พอลิแลคติกแอซิด คือ มีความแข็งแรงสูง เมื่อพิจารณาจากค่าโมดูลัสการดึงยืด (Tensile modulus) และ โมดูลัสการดัดโค้ง (Flexural modulus) พบว่ามีค่าสูงกว่า พอลิเอทิลีน (Polyethylene) และพอลิพรอพิลีน (Polypropylene) [7-8] ดังนั้นเมื่อนำพอลิแลคติกแอซิดมาเป็นส่วนผสมกับวัสดุเสริมแรงจากธรรมชาติ จึงกลายเป็นวัสดุไบโอคอมโพสิต (Bio-composites) ซึ่งการใช้ส่วนเสริมแรงที่เป็นเส้นใยจากธรรมชาติเป็นทางเลือกหนึ่งในการทดแทนเส้นใยสังเคราะห์จากปิโตรเลียม เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีราคาถูก น้ำหนักเบา เป็นวัสดุหมุนเวียน และสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

เนื่องจากการใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นส่วนเสริมแรงที่สำคัญในวัสดุคอมโพสิตเพิ่มมากขึ้น เพราะความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีประสิทธิภาพสูง แต่การศึกษาในวัสดุคอมโพสิตส่วนมากยังมุ่งเน้นแต่การใช้เส้นใยสั้นแบบไม่ต่อเนื่อง [9] งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาสมบัติของวัสดุไบโอคอมโพสิตจากพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยยาวต่อเนื่องแบบผืนผ้า โดยเส้นใยต่อเนื่องแบบผืนผ้านี้จะทำการเตรียมมาจากเส้นใยธรรมชาติที่แตกต่างกัน 3 ชนิดที่สามารถผลิตได้ในประเทศไทย คือ กัญชง (Banana) ปอแก้ว (Kenaf) และป่านศรนารายณ์ (Sisal) ซึ่งจะนำเส้นใยธรรมชาติมาทำการทอเป็นผืนผ้าทั้งรูปแบบเส้นใยชนิดเดี่ยว และแบบเส้นใยผสมสองชนิด (Hybrid fabric) เลือกใช้เมทริกซ์เป็นพอลิแลคติกแอซิดเพื่อให้ได้วัสดุไบโอคอมโพสิตที่มีองค์ประกอบทั้งหมดมาจากแหล่งวัตถุดิบที่สร้างขึ้นมามาทดแทนได้ (Renewable resource) โดยวัสดุไบโอคอมโพสิตใช้วิธีการขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัดด้วยความร้อน (Compression molding) โดยจะนำวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ได้มาศึกษาผลของชนิดเส้นใยธรรมชาติในผืนผ้า และผลของทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยผ้า ที่มีต่อลักษณะ โครงสร้างพื้นฐาน สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกายภาพของวัสดุไบโอคอมโพสิตที่เตรียมได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเตรียมวัสดุคอมโพสิตไบโอคอมโพสิตที่มีส่วนประกอบทั้งหมดมาจากแหล่งวัตถุดิบที่สร้างขึ้นมามาทดแทนได้
- 1.2.2 ศึกษาลักษณะ โครงสร้างพื้นฐาน และสมบัติเชิงกล ของวัสดุไบโอคอมโพสิต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 เตรียมแผ่นเมตริกซ์จากพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ด้วยเทคนิคการกดอัดด้วยความร้อน
- 1.3.2 เตรียมผ้าทอด้วยกี่กระตุก (Loom) โดยใช้ลายทอแบบลายขัด (Plain weave) ที่มีเส้นยืน (Warp) คือเส้นด้ายฝ้าย และเส้นพุ่ง (Weft) คือเส้นใยธรรมชาติที่สนใจ (กล้วยปอแก้ว และป่านศรนารายณ์)
- 1.3.3 เตรียมวัสดุไบโอคอมโพสิต จากแผ่นเมตริกซ์พอลิแลคติกแอซิด และผ้าทอด้วยเทคนิคการกดอัดด้วยความร้อน
- 1.3.4 ทดสอบสมบัติเชิงกล (การดึงยืด การตัด โค้ง และการกระแทก) และ โครงสร้าง สันฐานบริเวณรอยแตกหักกับวัสดุไบโอคอมโพสิต

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยสังเขป

- 1.4.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
 - 1.4.1.1 วิเคราะห์เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยของตน
 - 1.4.1.2 ศึกษาข้อมูลของพอลิแลคติกแอซิด
 - 1.4.1.3 ศึกษาข้อมูลของเส้นใยธรรมชาติ (เส้นใยกล้วย เส้นใยปอแก้ว และเส้นใยป่านศรนารายณ์)
- 1.4.2 ออกแบบวิธีการ และวางแผนการวิจัย
 - 1.4.2.1 ออกแบบและวางแผนการทดลองสำหรับงานวิจัย
 - 1.4.2.2 จัดซื้อวัสดุ สารเคมี และเตรียมวัสดุที่ต้องใช้สำหรับงานวิจัย
- 1.4.3 ดำเนินงานวิจัย
 - ส่วนที่ 1 ศึกษาสมบัติของผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติ
 - 1.4.3.1 ทำการเตรียมผ้าทอด้วยกี่กระตุก โดยในงานวิจัยนี้มีการใช้ผ้าทอทั้งแบบเส้นใยชนิดเดียว และแบบเส้นใยผสมสองชนิด (Hybrid) ที่จะใช้เส้นพุ่งเป็นเส้นใยธรรมชาติสองชนิดวางสลับกันไปในพื้นที่
 - 1.4.3.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติของเส้นใยธรรมชาติ และผ้าทอ โดยทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเส้นใยธรรมชาติ และผ้าทอ ได้แก่ ลักษณะพื้นผิวภายนอก สี จำนวนของเส้นด้ายในผ้าทอ (Fabric density) ความหนาของผ้าทอ น้ำหนักของผ้าทอ และการทดสอบการดึงยืด (Tensile testing)

ส่วนที่ 2 ศึกษาผลของผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติต่อสมบัติของวัสดุไบโอคอมโพสิต

1.4.3.3 การเตรียมแผ่นพอลิแลคติกแอซิด

นำเม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านการอบไล่ความชื้นที่ 60°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มาทำการขึ้นรูปโดยวิธีการกดอัดด้วยความร้อนในแม่พิมพ์ขนาดความหนา 0.1 cm ที่สถานะอุณหภูมิ 170°C ความดัน 750 psi โดยมีการให้ความร้อนก่อน (pre-heat) เป็นเวลา 5 นาที แล้วทำการกดอัด (Compress) อีกเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงเป็นเวลา 15 นาที ก่อนนำออกจากแม่พิมพ์

1.4.3.4 การเตรียมวัสดุไบโอคอมโพสิต

ทำการอบแผ่นพอลิแลคติกแอซิด และผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติในตู้อบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นออก จากนั้นนำแผ่นพอลิแลคติกแอซิด และผ้าทอข้างต้นใส่ในแม่พิมพ์รูปสี่เหลี่ยม โดยมีลักษณะการวางแบบแซนด์วิช (Sandwich structure) เริ่มจากแผ่นพอลิแลคติกแอซิดวางสลับกับผ้าจันครบ 5 ชั้น (กำหนดให้รูปแบบการวางซ้อนกันของผ้าทอมีทั้งแบบขนาน และแบบขวางกัน, Parallel and Cross ply) แล้วปิดประกบแม่พิมพ์ด้วยแผ่นพลาสติกใส (PET) กับแผ่นเหล็กหนา จากนั้นนำชุดแม่พิมพ์ข้างต้นวางลงในเครื่องกดอัดที่ตั้งอุณหภูมิอยู่ที่ 170°C เพื่อให้ความร้อนก่อนเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการกดอัดด้วยความดัน 750 psi อีกเป็นเวลา 5 นาที เมื่อครบกำหนดแล้วปิดระบบทำความร้อน ทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงภายใต้แรงดันคงที่เป็นเวลามากกว่า 1 ชั่วโมง ก่อนแกะแผ่นไบโอคอมโพสิตที่ได้ออกจากแม่พิมพ์

1.4.3.5 การศึกษาผลของผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติต่อสมบัติของวัสดุไบโอคอมโพสิต โดยทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค DSC ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ศึกษาสมบัติเชิงกลกับวัสดุไบโอคอมโพสิตโดยวิธีทดสอบการดึง ยืด การตัดโค้ง การกระแทก ศึกษาลักษณะ โครงสร้างพื้นฐานวิทยา การดูดซึมน้ำ และและศึกษาสมบัติการลุกติดไฟด้วยเทคนิค LOI และมาตรฐาน UL-94HB

1.4.4 ประมวลผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย

1.4.5 สรุปผลการวิจัย

1.4.6 รายงานผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.5.1 สามารถเตรียมวัสดุไบโอคอมโพสิตที่มีปริมาณเส้นใยสูงได้

1.5.2 สามารถเตรียมวัสดุไบโอคอมโพสิตที่มีประสิทธิภาพสูงได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุคอมโพสิต (Composite material) [4,6,10]

วัสดุคอมโพสิตหมายถึง การนำวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดที่มีพื้นฐานสมบัติเชิงเคมี และฟิสิกส์ที่แตกต่างกันมาผสมกันแล้วทำให้วัสดุที่ได้มีโครงสร้างใหม่ที่มีสมบัติดีขึ้น โดยยังคงสามารถแยกวัฏภาค (Phase) ของวัสดุแต่ละประเภทในเนื้อวัสดุคอมโพสิตได้ ซึ่งวัสดุคอมโพสิตจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนเมตริกซ์ (Matrix) และส่วนเสริมแรง (Reinforcement)

2.1.1 ส่วนเมตริกซ์ (Matrix)

เป็นส่วนที่ช่วยห่อหุ้มและยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน เพื่อให้ส่วนเสริมแรงอยู่ในตำแหน่งคงที่ และมีการจัดเรียงตัวตามที่กำหนด โดยทั่วไปเมตริกซ์มักจะมีคุณสมบัติเหนียวสูงแต่มีความแข็งแรงและมีโมดูลัสที่ต่ำกว่าส่วนเสริมแรง หน้าที่ของเมตริกซ์ในวัสดุคอมโพสิต คือ ช่วยรักษาความเสถียรของรูปร่างและขนาด รักษาการกระจายตัวของส่วนเสริมแรง ทำให้วัสดุคอมโพสิตสามารถทนต่อการเสียดสีภายใต้อุณหภูมิหรือแรงกระทำได้ในระดับหนึ่ง และช่วยปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียดสีจากสิ่งแวดล้อมได้ ในปัจจุบันเมตริกซ์ที่นิยมใช้ส่วนมากได้แก่ พอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิกเป็นต้น สำหรับพอลิเมอร์ที่นิยมใช้เป็นเมตริกซ์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และเทอร์โมเซต (Thermoset)

เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) [11] หรือเรซิน เป็นพลาสติกที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมีคุณสมบัติที่เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัวลงจนสามารถเปลี่ยนรูปร่าง และเมื่อได้รับความเย็นจะแข็งตัว คงรูปไว้ได้ เทอร์โมพลาสติกมักมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นสายโซ่ตรงยาว มีการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์น้อยมากจึงสามารถเกิดการหลอมเหลวได้ หรือเมื่อผ่านการอัดด้วยแรงสูงก็ยังไม่ทำลายโครงสร้างเดิม ทำให้สามารถนำกลับมาหลอมเพื่อใช้ใหม่ได้โดยที่สมบัติไม่เปลี่ยนแปลง ดังตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่แสดงในภาพที่ 2.1 สำหรับเทอร์โมพลาสติกที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วไป เช่น พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride, PVC) เป็นต้น



ภาพที่ 2.1 แสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากเทอร์โมพลาสติก [12]

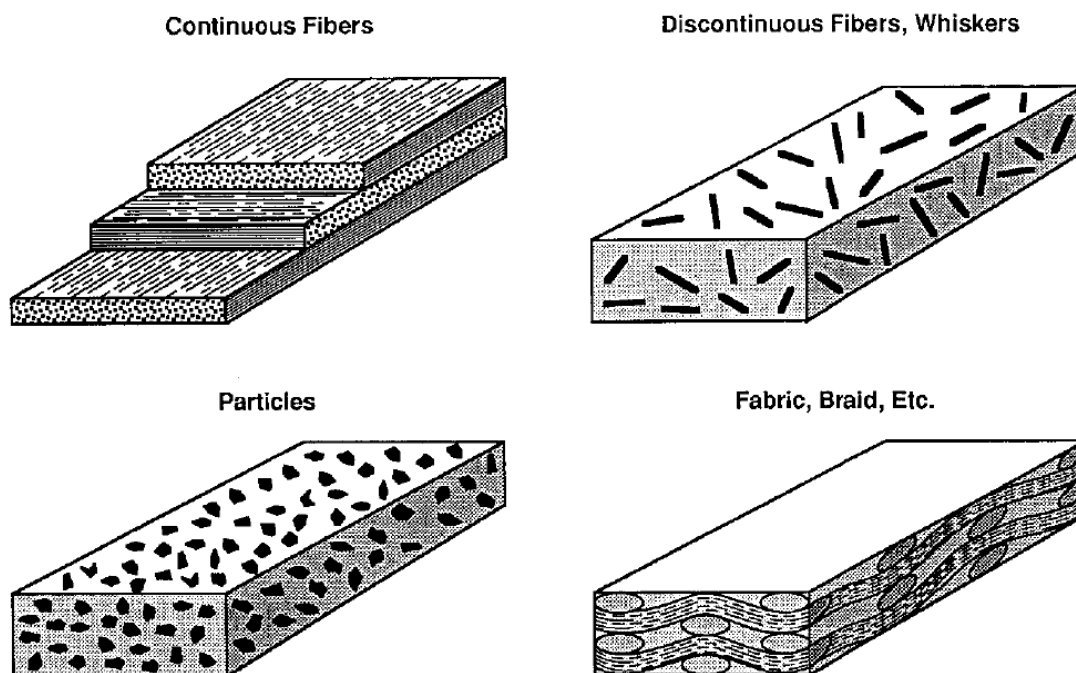
เทอร์โมเซตพลาสติก (Thermoset plastic) [13] เป็นพลาสติกที่มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและมักทนปฏิกิริยาเคมีได้ดี มีความคงรูปหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนหรือแรงดันเพียงครั้งเดียว เมื่อเย็นตัวลงจะมีความแข็งมาก ไม่เกิดอ่อนตัวอีกและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างอีกได้เมื่อให้ความร้อนซึ่งต่างจากเทอร์โมพลาสติก แต่ถ้าให้อุณหภูมิสูงเกินไปก็จะเกิดการแตกและไหม้สลายไป เทอร์โมเซตพลาสติกนี้มักจะมีโมเลกุลจะเชื่อมโยงกันเป็นร่างแหจับกันแน่น มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรงมาก จึงทำให้ไม่สามารถนำมาหลอมเหลวใหม่ได้ การขึ้นรูปพลาสติกชนิดนี้ให้เป็นรูปลักษณะต่างๆ โดยการทำให้อยู่ในรูปของเหลวที่มีความหนืดต่ำที่สามารถไหลไปตามแบบหรือแม่พิมพ์ได้ จากนั้นเรซินจะถูกบ่มโดยการให้ความร้อนหรือเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างสายโซ่ทำให้แข็งตัวคงรูปร่างไว้ได้ ดังตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่แสดงในภาพที่ 2.2 เทอร์โมเซตพลาสติกที่นิยมกันใช้อย่างแพร่หลายมีหลายชนิด เช่น เรซินอีพอกซี (Epoxy resins) พอลิยูรีเทน (Polyurethane) และพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester) เป็นต้น



ภาพที่ 2.2 แสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากเทอร์โมเซต [14]

2.1.2 ส่วนเสริมแรง (Reinforcement)

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุคอมโพสิต โดยทั่วไปมักจะมีความแข็งแรง และมีค่าโมดูลัสที่สูงมากกว่าส่วนเมตริกซ์ เป็นส่วนรับแรงหลักของวัสดุคอมโพสิตที่ส่งผ่านมาจากเมตริกซ์ ประสิทธิภาพของส่วนเสริมแรงนั้นขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของสารเสริมแรงเป็นส่วนสำคัญ สารที่ใช้เสริมแรงอาจมีลักษณะ และรูปร่างได้หลายแบบ เช่น แผ่น เส้นใย อนุภาคนาขนาดเล็ก และเส้นใยเป็นต้น ดังเช่นแสดงในภาพที่ 2.3 ส่วนเสริมแรงที่นิยมใช้ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเส้นใย (Fiber) โดยอาจเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง หรือเส้นใยสั้นก็ได้ ตัวอย่างเส้นใยที่นิยมใช้ในวัสดุคอมโพสิต เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fiber) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) และเส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber) เป็นต้น โดยมากเส้นใยที่จะนำมาใช้เป็นส่วนเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตควรมีคุณสมบัติดังนี้ คือ มีขนาดและลักษณะพื้นผิวของเส้นใยที่สม่ำเสมอ มีค่าโมดูลัสสูง มีความแข็งแรงสูง และไม่เกิดการเสียสภาพไปในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป



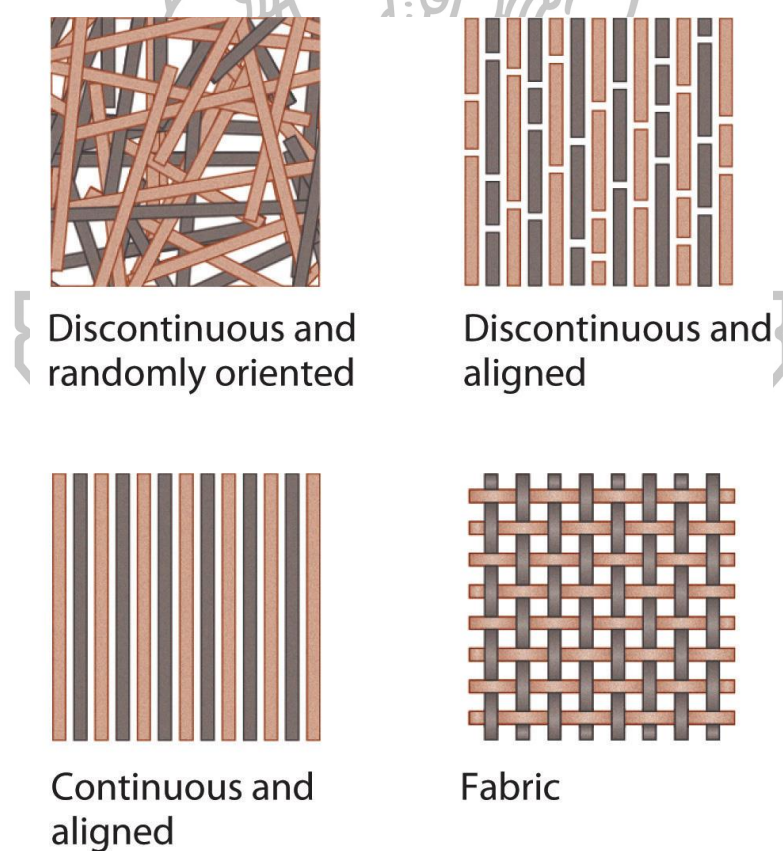
ภาพที่ 2.3 แสดงลักษณะและการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรง (Reinforcement) ในวัสดุคอมโพสิต

[6]

ความยาวของเส้นใยในการเสริมแรงวัสดุคอมโพสิต ส่งผลต่อการกระจายตัวของความเค้น และความเครียดบนปลายเส้นใย กล่าวคือเมื่อความยาวของเส้นใยเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้บริเวณปลายเส้นใยมีความเค้นและความเครียดลดลง ทำให้เส้นใยทำหน้าที่เป็นส่วนรับแรงที่ส่งผ่านมาจากเมตริกซ์โดยผ่านทางผิวหน้าสัมผัสระหว่างเมตริกซ์และเส้นใยได้ดี ดังนั้นจึงต้องทำให้มีการยึดเกาะระหว่างเมตริกซ์และเส้นใยดี เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิต การยึดเกาะกันระหว่างเมตริกซ์และเส้นใยจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิต โดยวัสดุแต่ละประเภทจะมีกลไก และความสามารถในการยึดติดที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะของเส้นใยและเมตริกซ์ที่นำมาใช้

2.1.3 ประเภทของวัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิตสามารถจำแนกแบ่งได้เป็นประเภทต่างๆ โดยอาจจำแนกตามประเภทของเมทริกซ์ การจัดเรียงของเส้นใย และประเภทของสารเสริมแรง โดยเราสามารถแบ่งวัสดุคอมโพสิตออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ตามชนิดของเส้นใยได้ดังนี้ คือ วัสดุคอมโพสิตชนิดเส้นใยสั้น (Discontinuous or short-fiber system) ซึ่งมีทั้งแบบจัดเรียงในทิศทางเดียวกัน (Unidirectional) และจัดเรียงแบบสุ่ม (Random) และวัสดุคอมโพสิตชนิดเส้นใยยาว (Continuous or long-fiber system) ที่อาจจัดเรียงในทิศทางเดียวกัน (Unidirectional) และขัดกันเป็นผ้า (Fabric) ดังแสดงในภาพที่ 2.4 สำหรับวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยยาวจะสามารถควบคุมการจัดเรียงตัวของเส้นใยได้ง่าย ทำให้สามารถคาดเดาคณะสมบัติของวัสดุคอมโพสิต เช่น ความแข็งเกร็ง (Stiffness) และความแข็งแรง (Strength) ได้ แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อใช้เส้นใยสั้นในวัสดุคอมโพสิตจะไม่สามารถควบคุมการจัดเรียงตัวของเส้นใยได้สมบูรณ์ จึงคาดเดาคณะสมบัติของวัสดุคอมโพสิตได้ยาก และสมบัติของวัสดุคอมโพสิตในแต่ละจุดอาจมีความแตกต่างกันด้วย



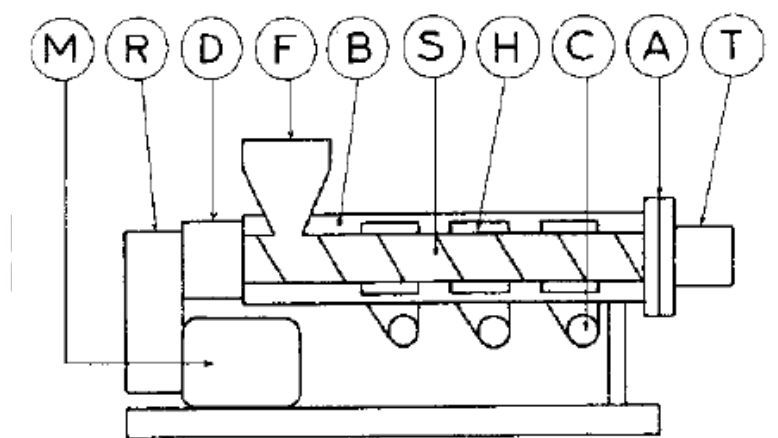
ภาพที่ 2.4 แสดงรูปแบบการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรงภายในวัสดุคอมโพสิตแต่ละประเภท ทั้งในแบบเส้นใยสั้น และแบบเส้นใยยาว [15]

2.1.4 กระบวนการผลิตวัสดุคอมโพสิต [6]

กระบวนการผลิตวัสดุคอมโพสิตที่มีเมทริกซ์เป็นพอลิเมอร์นั้น สามารถใช้เทคนิคกระบวนการขึ้นรูปที่ใช้กับเทอร์โมพลาสติก หรือเทอร์โมเซตพลาสติกได้เช่นกัน สำหรับกระบวนการที่นิยมใช้ในการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิต เช่น กระบวนการขึ้นรูปแบบอัดรีด (Extrusion) กระบวนการฉีดพลาสติก (Injection molding) และกระบวนการกดอัดขึ้นรูปพลาสติก (Compression molding) เป็นต้น

2.1.4.1 กระบวนการขึ้นรูปแบบอัดรีด (Extrusion)

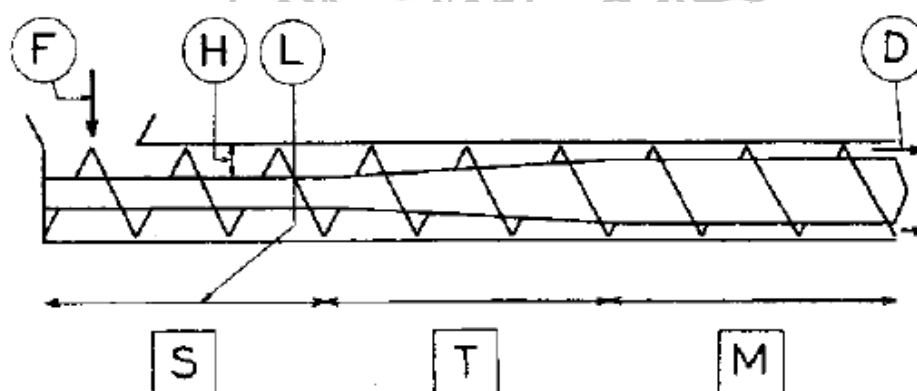
เป็นกระบวนการผลิตพลาสติกที่สามารถผลิตได้ต่อเนื่อง (Continuous process) ในปริมาณมาก เหมาะกับการผลิตวัสดุที่มีลักษณะเป็นเส้นยาว เช่น ถุงพลาสติก ท่อสายไฟ เป็นต้น และยังสามารถผลิตพลาสติกแผ่นบางได้เช่นกัน เครื่องเอ็กสตรูเดอร์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดตามลักษณะของสกรูภายในกระบอกหลอมได้แก่ เครื่องเอ็กสตรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว (Single Screw Extruder) ดังแสดงในภาพที่ 2.5 เครื่องเอ็กสตรูเดอร์แบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder) และเครื่องเอ็กสตรูเดอร์แบบหลายสกรู (Multi Screw Extruder)



ภาพที่ 2.5 แสดงลักษณะ และองค์ประกอบของเครื่องเอ็กสตรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว:

M คือ มอเตอร์ไฟฟ้า R คือ เกียร์ทดรอบ D คือ แบริ่ง F คือ ส่วนป้อน B คือ กระบอกหลอม S คือ สกรู H คือ ตัวให้ความร้อน C คือ ที่หล่อเย็น A คือ ตัวแปลง (Adapter) T คือ หัวดาย (Die) [6]

สำหรับเครื่องเอ็กทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว ภายในกระบอกลอมจะสามารถแยกได้ตามลักษณะเป็น 3 ส่วนตามลักษณะของสกรูและหน้าที่ ดังแสดงในภาพที่ 2.6 คือ ส่วนป้อน (Feed zone) มีร่องของสกรูลึกมากที่สุดและมีขนาดความกว้างของร่องสกรูคงที่ ส่วนนี้ทำหน้าที่หลักคือลำเลียงเม็ดพลาสติกจากส่วนป้อนลงในกระบอกลอม ทำให้เม็ดพลาสติกอุ่น (Preheat) และเริ่มเกิดการผสมของพลาสติกกับวัสดุอื่นแล้วพาพลาสติกไปยังส่วนหลอมอัด ส่วนหลอมอัด (Compression zone) มีลักษณะของร่องสกรูค่อยๆ แคบลงเพื่อทำให้เกิดแรงดันกับพลาสติก เกิดการบด หลอมเหลว และผสมกันเป็นเนื้อเดียวกัน ในส่วนนี้จะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก และในส่วนสุดท้าย คือ ส่วนส่งพลาสติกหลอม (Metering zone) ลักษณะของสกรูจะมีร่องสกรูแคบที่สุดและมีขนาดความกว้างของร่องสกรูคงที่ พลาสติกในส่วนนี้จะถูกหลอมเหลวจนหมดมีความดันที่สูงขึ้น และผสมเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ ก่อนที่จะถูกลำเลียงออกจากกระบอกลอมผ่านหัวดายกลายเป็นพลาสติกแข็งตามลักษณะที่ต้องการ



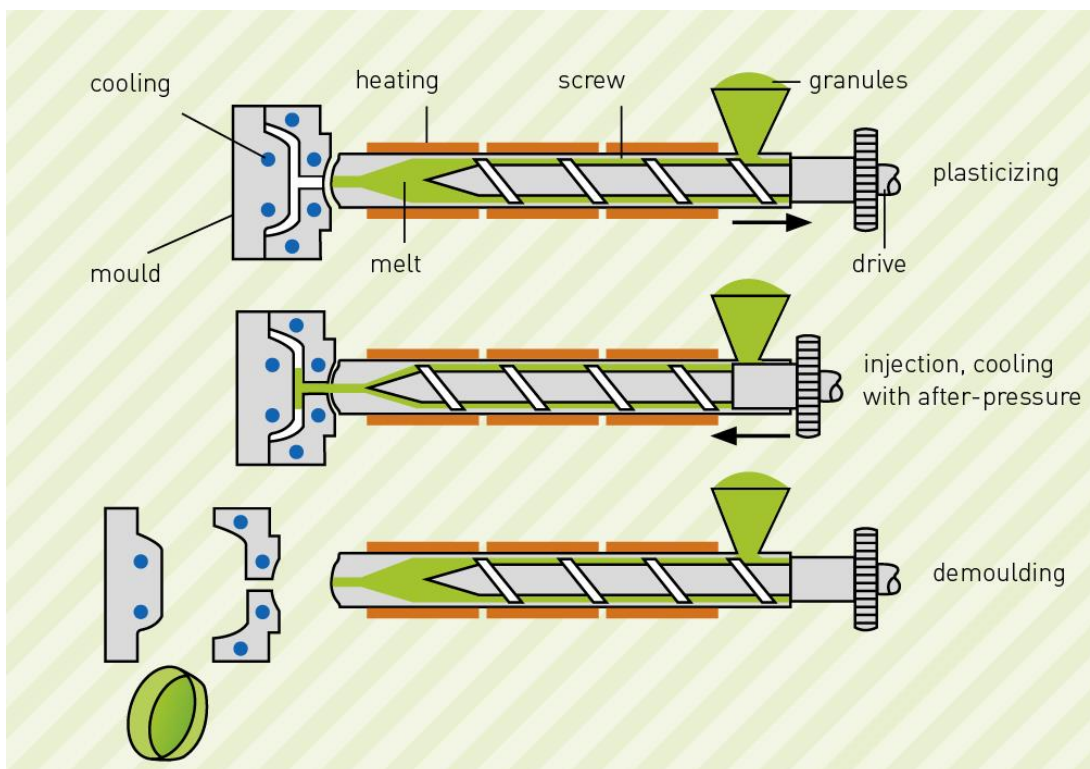
ภาพที่ 2.6 แสดงลักษณะของสกรูภายในกระบอกลอมของเครื่องเอ็กทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว:

S คือ ส่วนป้อน (Feed zone) T คือ ส่วนหลอมอัด (Compression zone) และ M คือ ส่วนส่งพลาสติกหลอม (Metering zone) [6]

2.1.4.2 กระบวนการฉีดพลาสติก (Injection Molding)

เป็นกระบวนการผลิตพลาสติกที่มีลักษณะเป็นแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi Continuous) ที่สามารถผลิตได้อย่างรวดเร็ว เหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก มีรูปทรงสมมาตร และมักมีรอยูนที่เกิดจากพลาสติกหลอมเหลวถูกฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์อยู่บนผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างเช่น แก้วน้ำ ถ้วย ค้ำจับอุปกรณ์ต่างๆ เป็นต้น มีขั้นตอนกระบวนการดังแสดงในภาพที่ 2.7 คือ พลาสติกจะถูกเกลียวสกรูหมุนส่งไปข้างหน้ายังกระบอกสูบที่มีการให้ความร้อน ทำให้พลาสติกหลอมละลาย (Plastication stage) จากนั้นเกลียวสกรูจะดันอัดพลาสติกที่หลอมเหลวฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ (Injection) เมื่อพลาสติกเย็นตัวลงและแข็งตัว แม่พิมพ์จะขยับออกทำให้ชิ้นงานหลุดออกมา (Demolding) เครื่องฉีดพลาสติกทั่วไปที่ใช้ในปัจจุบันสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ เครื่องฉีดที่มีชุดฉีดวางตัวในแนวนอน (Horizontal Injection Molding Machine) ดังแสดงในภาพที่ 2.7 เครื่องฉีดที่มีชุดฉีดวางตัวในแนวตั้ง (Vertical Injection Molding Machine) และเครื่องฉีดแบบหมุน (Rotary Table Machine)

เครื่องฉีดที่มีชุดฉีดวางตัวในแนวนอน เป็นเครื่องฉีดที่มีการวางตัวของสกรูอยู่ในแนวนอน ทำให้รอยประกอบระหว่างเบ้าของแม่พิมพ์ทั้งสองซีกตั้งฉากกับแนวราบ จึงสามารถดันชิ้นงานที่ได้จากการฉีดพลาสติกให้หลุดลงในภาชนะรองรับด้านล่างเครื่องฉีดได้สะดวก และนอกจากนี้การถอดเปลี่ยนแม่พิมพ์ก็สามารถทำได้ง่ายกว่าเครื่องฉีดชนิดอื่น สำหรับเครื่องฉีดที่มีชุดฉีดวางตัวในแนวตั้งมีรอยประกอบระหว่างเบ้าของแม่พิมพ์วางตัวอยู่ในแนวราบตั้งฉากกับแนวของชุดฉีด ทำให้ลักษณะแบบนี้เหมาะสำหรับการฉีดหุ้มเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ เช่น ค้ำไขควง ค้ำมิด ค้ำประแจ เป็นต้น และสำหรับเครื่องฉีดแบบหมุนจะมีชุดฉีดและหน่วยที่ทำให้พลาสติกหลอมเพียงชุดเดียว แต่จะมีเบ้าลำเลียงพลาสติกหลอมหลายชุดเหมาะสำหรับการผลิตพลาสติกที่ต้องใช้เวลาในการให้ความร้อนและการหล่อเย็นนาน เครื่องฉีดแบบหมุนนี้อาจมีเบ้าแม่พิมพ์ได้มากถึง 2 หรือ 3 ชุด



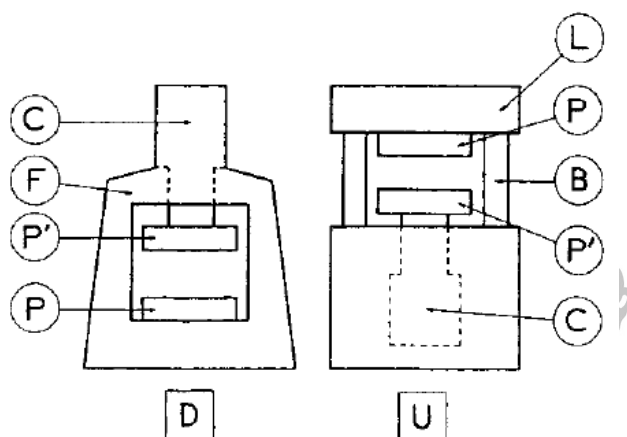
ภาพที่ 2.7 แสดงลักษณะเครื่องฉีดที่มีชุดฉีดวางตัวในแนวนอน (Horizontal Injection Molding Machine) พร้อมกับกระบวนการฉีดขึ้นรูปทั้ง 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนหลอมพลาสติก (Plastication stage) ขั้นตอนฉีดพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์ (Injection) และ ขั้นตอนปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Demoulding) [16]

2.1.4.3 กระบวนการกดอัดขึ้นรูปพลาสติก (Compression Molding)

เป็นวิธีการขึ้นรูปพลาสติกที่มีลักษณะแบบกะ (Batch) มีกระบวนการไม่ซับซ้อน เครื่องมือมีราคาไม่สูง ไม่มีเศษเหลือจากกระบวนการผลิตมากเหมือนกระบวนการฉีดพลาสติก สามารถใช้กับเส้นใยยาวที่เป็นส่วนเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต และสามารถผลิตในปริมาณต่อครั้งที่สูงกว่าการฉีดพลาสติกได้ กระบวนการนี้มีหลักการทำงานคือให้ความร้อนกับพลาสติกจนอ่อนตัวลงหรือหลอมเหลว จากนั้นทำการกดอัดด้วยแรงดันสูงเพื่อทำให้พลาสติกไหลเกิดเป็นรูปแบบตามแม่พิมพ์ที่กำหนด จากนั้นเมื่อชิ้นงานแข็งตัวแล้วก็ทำการปลดออกจากแม่พิมพ์ พลาสติกที่ใช้ในกระบวนการนี้ส่วนมากเป็นเทอร์โมเซตแบบผง เช่น เมลามีน ฟีนอลิก ยูเรีย เนื่องจากเพราะสามารถหลอมละลายได้ดี สำหรับการใส่เทอร์โมพลาสติกในกระบวนการนี้จะต้องใช้เวลามากกว่าเทอร์โมเซตเนื่องจากต้องรอจนแม่พิมพ์เย็นตัวลงถึงจะปลดชิ้นงานได้ เพื่อป้องกันการบิดเบี้ยวของชิ้นงานที่ยังไม่คงรูป แต่การใช้เทอร์โมเซตสามารถปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้

ทันทีเมื่อคงรูปแล้ว ทำให้ไม่เสียเวลาในการเพิ่มความร้อนให้กับแม่พิมพ์อีก สำหรับผลิตภัณฑ์ที่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการนี้ เช่น ช้อน จาน ถ้วย แผ่นพลาสติก และแผ่นเสียง เป็นต้น

เครื่องกดอัดที่ใช้ในกระบวนการกดอัดขึ้นรูปพลาสติก มีส่วนประกอบหลักของเครื่องดังแสดงในภาพที่ 2.8 คือ แผ่นเหล็กอัดจำนวนสองชุด ซึ่งแผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลง ได้อีกแผ่นหนึ่งจะถูกยึดติดกับที่ไว้ ทำให้สามารถเปิดและปิดแม่พิมพ์ได้ อุปกรณ์ให้ความร้อน ระบบขับเคลื่อน (Hydraulic) และอาจมีอุปกรณ์หล่อเย็นรวมอยู่ด้วย



ภาพที่ 2.8 แสดงลักษณะเครื่องกดอัดในกระบวนการกดอัดขึ้นรูปพลาสติก:

P' คือ แผ่นเหล็กที่เคลื่อนที่ได้ P คือ แผ่นเหล็กที่ถูกยึดกับที่ และ C คือ ระบบขับเคลื่อน [6]

สำหรับกระบวนการกดอัดขึ้นรูปพลาสติกมีข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการอื่นดังนี้

- 1) เครื่องมือ และอุปกรณ์มีราคาถูก กลไกขั้นตอนการทำงานไม่ซับซ้อน
- 2) สามารถใช้ได้กับพอลิเมอร์หลากหลายชนิดทั้ง เทอร์โมพลาสติก และเทอร์โมเซตพลาสติก
- 3) สามารถใช้ส่วนเสริมแรงที่เป็นเส้นใยขาว หรือแบบขัดกันเป็นผืนผ้าได้
- 4) เมตริกซ์ และส่วนเสริมแรงไม่เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ (Orientation) เนื่องจากมีการไหลเพียงเล็กน้อย และไม่มีแรงเฉือนเกิดขึ้นในกระบวนการ
- 5) ชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการมีเศษเหลือเกิดขึ้นน้อย
- 6) ไม่เกิดรอยเชื่อม (Weld lines) และรอยตำหนิ (Scars) เหมือนกระบวนการฉีดพลาสติก

ข้อด้อยของกระบวนการอัดขึ้นรูปพลาสติก

- 1) กระบวนการเป็นแบบกะ ดังนั้นวัสดุคอมโพสิตในแต่ละชุดที่เตรียมได้อาจมีสมบัติที่แตกต่างกัน
- 2) ระยะเวลาต่อรอบการผลิต (Cycle time) ยาวนานกว่ากระบวนการอื่น
- 3) ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อน ขนาดเล็ก และแบบหุ้มชิ้นงานได้

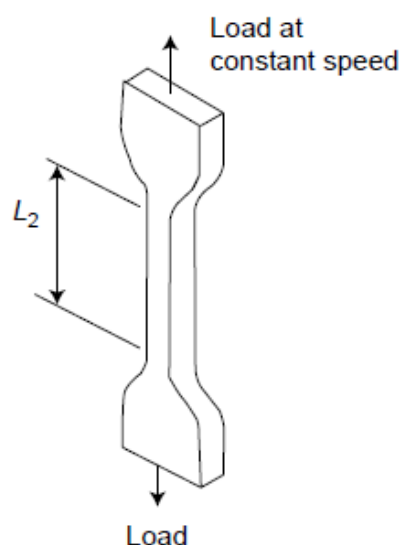
- 4) เป็นเทคนิคที่มีโอกาสเกิดช่องว่างภายใน (Void) ได้มากกว่าเทคนิคอื่น สาเหตุเนื่องมาจากการไหลของเมตริกซ์ที่อาจการกระจายได้ไม่ทั่วถึง เพราะมีการแพร่ความร้อนที่ไม่ทั่วถึงภายในแม่พิมพ์เนื่องจากหนาเกินไป การให้เวลา และแรงกดอัดที่น้อยเกินไป
- 5) การใช้ส่วนเสริมแรงขนาดเล็ก (เส้นใยสั้น ผง) จะเกิดการรวมกลุ่มได้ง่ายกว่าเทคนิคอื่นที่มีการให้แรงเฉือนในกระบวนการ
- 6) ต้องมีการตัดครีป (Flash) ที่เกิดขึ้นทุกครั้ง

2.1.5 การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต [6,10,17,18]

การทดสอบสมบัติเชิงกลเป็นการทดสอบขั้นพื้นฐานเพื่อตรวจวัดสมบัติของวัสดุในการรับแรงกระทำในลักษณะต่างๆ ในเชิงปริมาณ เพื่อให้สามารถนำค่าไปใช้พิจารณาความแข็งแรงของวัสดุโดยวิธีที่นิยมใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลกับวัสดุคอมโพสิต ได้แก่ การทดสอบการดึงยืด (Tensile testing) การทดสอบการดัดโค้ง (Flexural testing) และการทดสอบการกระแทก (Impact testing) เป็นต้น

2.1.5.1 การทดสอบการดึงยืด (Tensile testing)

เป็นการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึงของวัสดุซึ่งเป็นการทดสอบสมบัติทางกลพื้นฐาน โดยการทดสอบจะให้แรงในแนวเส้นตรงกับชิ้นตัวอย่างในทิศทางตรงกันข้ามเพื่อทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 2.9 ซึ่งการทดสอบนี้สามารถวัดค่าที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติต่างๆของวัสดุ เช่น ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) และค่าโมดูลัสของยัง (Young's Modulus) เป็นต้น

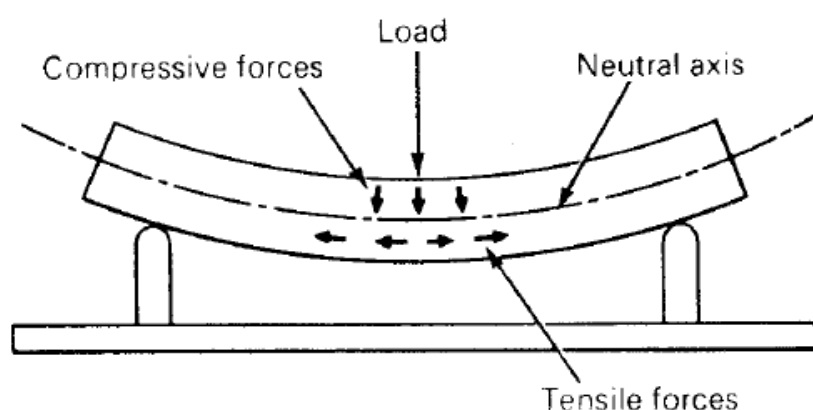


ภาพที่ 2.9 การทดสอบการดึงยืด: แสดงลักษณะแนวแรงดึงที่เกิดขึ้นกับชิ้นตัวอย่างขณะทดสอบ

[18]

2.1.5.2 การทดสอบการดัดโค้ง (Flexural testing)

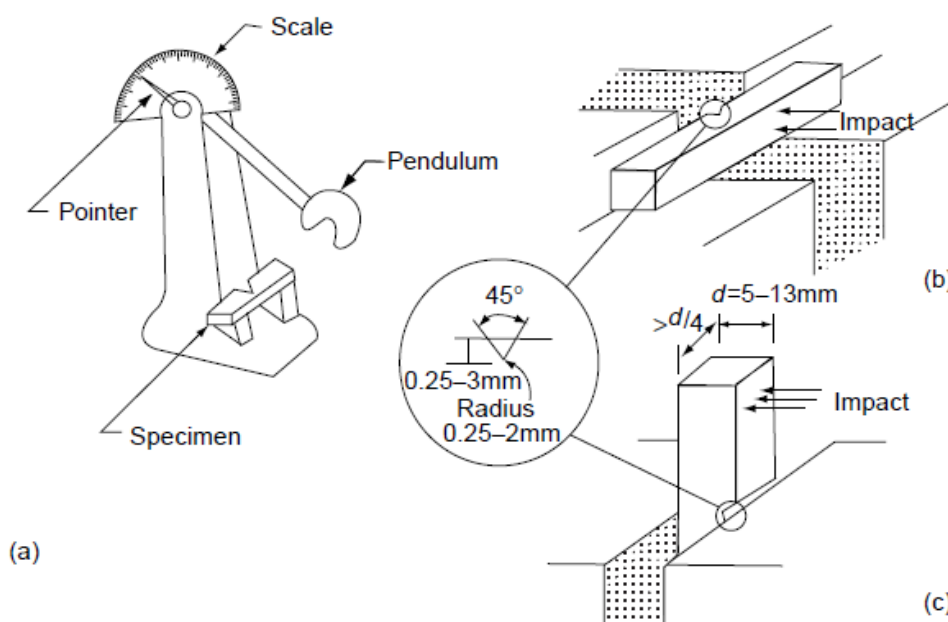
การทดสอบความต้านทานต่อแรงดัดโค้งสามารถใช้ในการประมาณหาค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุได้จากการเกิดแรงดึงยืดที่บริเวณพื้นผิวด้านล่างของชิ้นตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 2.10 โดยทั่วไปการทดสอบการดัดโค้งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่การดัดโค้งแบบ 3 จุด (3 point bending) มีลักษณะฐานรองรับสองจุดซึ่งอยู่ห่างกันแล้วให้แรงกดที่จุดกึ่งกลางของชิ้นตัวอย่าง ดังภาพที่ 2.10 และการดัดโค้งแบบ 4 จุด (4 point bending) ที่มีลักษณะฐานรองรับสองจุดซึ่งอยู่ห่างกันแต่ให้แรงกดสองจุดที่มีระยะห่างระหว่างจุดกดแบบ $1/3$ หรือ $1/4$ ลงบนชิ้นตัวอย่าง ซึ่งการทดสอบนี้สามารถบ่งบอกคุณสมบัติต่างๆของวัสดุได้ เช่น ค่าความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural strength) และค่าโมดูลัสการดัดโค้ง (Flexural modulus) เป็นต้น



ภาพที่ 2.10 การทดสอบการดัดโค้ง: แสดงแรงกดอัด (Compressive forces) ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวด้านบน และแรงดึงยืด (Tensile forces) ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวด้านล่าง กับขึ้นตัวอย่างเมื่อให้แรงขณะทดสอบการดัดโค้งแบบ 3 จุด (3 point bending) [6]

2.1.5.3 การทดสอบการกระแทก (Impact testing)

การทดสอบนี้เป็นการวัดค่าพลังงานของวัสดุคอมโพสิตที่สามารถดูดกลืนจากการกระแทกหรือการตีของลูกตุ้มภายใต้ความเร็วสูงมายังวัสดุได้ และค่าที่หน้าปัดจะบอกถึงค่าพลังงานส่วนที่เหลือและคงอยู่ในลูกตุ้มหลังจากที่มีการตีชิ้นงานทดสอบแล้ว ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาพลังงานที่วัสดุคอมโพสิตดูดกลืนต่อพื้นที่ (Impact strength, kJ/m^2) สำหรับรูปแบบการทดสอบการกระแทกด้วยแรงค้ำของคาน (Fixed beam impact) มีสองมาตรฐานที่นิยมใช้ในการทดสอบแบบนี้ ดังแสดงในภาพที่ 2.11 ได้แก่การทดสอบแบบไอซอด (Izod) ที่วัสดุที่ถูกทดสอบจะถูกจับยึดอยู่ในแนวตั้งในลักษณะของคานยื่น (Cantilever) และการทดสอบแบบชาร์ปี (Charpy) วัสดุที่ถูกทดสอบจะวางอยู่บนแท่นรับที่ไม่มีกรจับยึด (Supported beam)



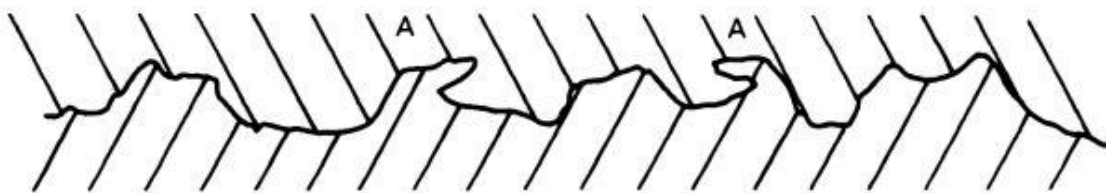
ภาพที่ 2.11 การทดสอบการแตก (a) แสดงลักษณะของเครื่องทดสอบการแตก (b) แสดงการวางชิ้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบการแตกแบบชาร์ปี (c) แสดงการยึดชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการทดสอบการแตกแบบไอซอด [18]

2.1.6 กลไกการยึดติดภายในวัสดุคอมโพสิต [19]

สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของวัสดุคอมโพสิตนั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของส่วนเสริมแรงกับเมทริกซ์เพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นกับการยึดติดกันที่ระหว่างส่วนเสริมแรงกับเมทริกซ์ด้วยเช่นกัน ซึ่งการยึดติดระหว่างส่วนเสริมแรงกับเมทริกซ์นั้นเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิต ซึ่งสามารถแบ่งกลไกการยึดติดภายในของวัสดุคอมโพสิตตามลักษณะต่างๆ ได้ดังนี้

2.1.6.1 การยึดติดเชิงกล (Mechanical Bonding)

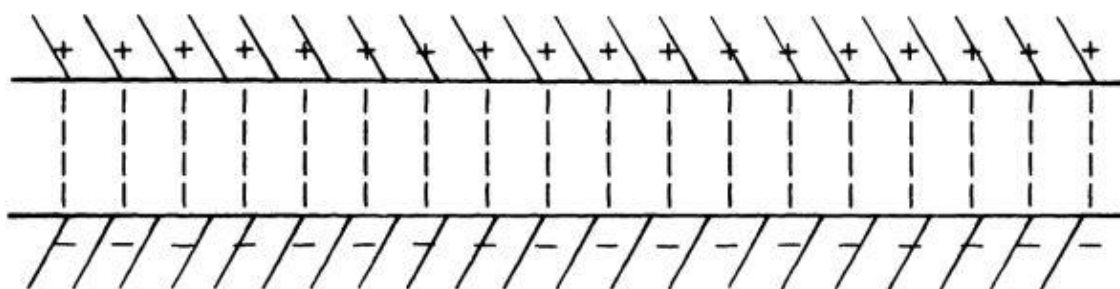
เป็นการยึดติดที่เกิดจากพื้นผิวที่มีความขรุขระของส่วนเสริมแรง ซึ่งเมทริกซ์ที่กระจายล้อมรอบส่วนเสริมแรงนั้นจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวเชิงกล (Interlocking) กับส่วนเสริมแรงขึ้น โดยความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวแบบนี้ขึ้นอยู่กับความขรุขระของพื้นผิวส่วนเสริมแรง ดังแสดงในภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 แสดงกลไกการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวแบบเชิงกล [19]

2.1.6.2 การยึดติดด้วยประจุไฟฟ้า (Electrostatic Bonding)

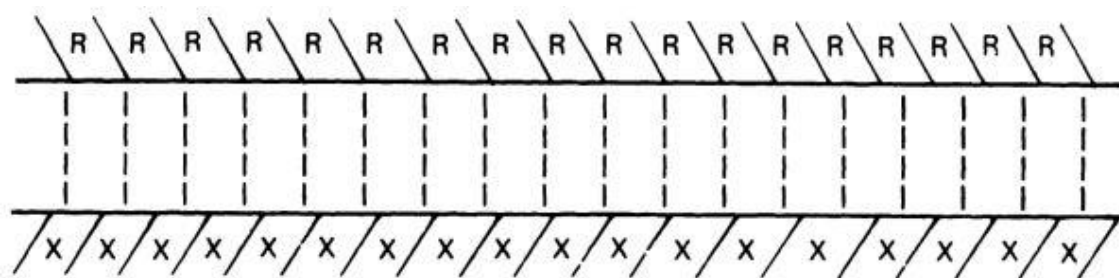
เป็นการยึดติดที่มักเกิดขึ้นชั่วคราวโดยเกิดขึ้นเนื่องจากเมตริกซ์ และส่วนเสริมแรงมีประจุที่แตกต่างกันทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุที่ต่างกันอย่างขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.13 ความแข็งแรงของการยึดติดแบบนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณประจุของแต่ละพื้นผิว และระยะห่างระหว่างพื้นผิวทั้งสองต้องน้อยมาก หากพื้นผิวมีการปนเปื้อนจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการยึดติดด้วยประจุไฟฟ้า



ภาพที่ 2.13 แสดงกลไกการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวด้วยประจุไฟฟ้า [19]

2.1.6.3 การยึดติดทางเคมี (Chemical Bonding)

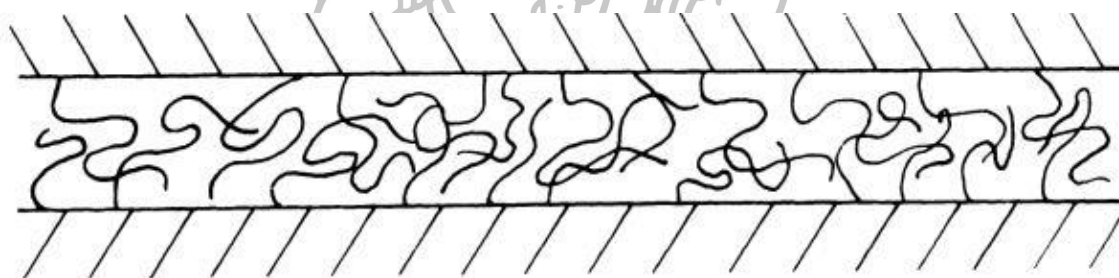
เป็นการยึดติดที่เกิดขึ้นจากหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของส่วนเสริมแรงกับเมตริกซ์เกิดพันธะเคมีระหว่างกันขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.14 โดยระดับความแข็งแรงของการยึดติดนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพันธะ และจำนวนของพันธะที่เกิดขึ้น โดยอาจใช้สารช่วยยึดติด (Coupling agent) ที่จะเกิดพันธะกับส่วนเสริมแรง และเมตริกซ์ทำให้เกิดการยึดติดทางเคมีระหว่างกันขึ้น



ภาพที่ 2.14 แสดงกลการยึดติดกันระหว่างพื้นผิวด้วยพันธะเคมี [19]

2.1.6.4 การยึดติดแบบแพร่ผ่าน (Interdiffusion Bonding)

เป็นการยึดติดที่เกิดขึ้นเมื่อมีการแพร่ของโมเลกุลพอลิเมอร์ระหว่างสองพื้นผิวเกิดขึ้นทำให้สายโซ่พอลิเมอร์จากส่วนเสริมแรงกับเมตริกซ์เกิดการเกี่ยวพันกันขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.15 ความแข็งแรงของการยึดติดแบบนี้ขึ้นกับความยืดหยุ่น (Flexibility) ความสามารถในการเคลื่อนที่แพร่ผ่าน และระดับการเกี่ยวพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์

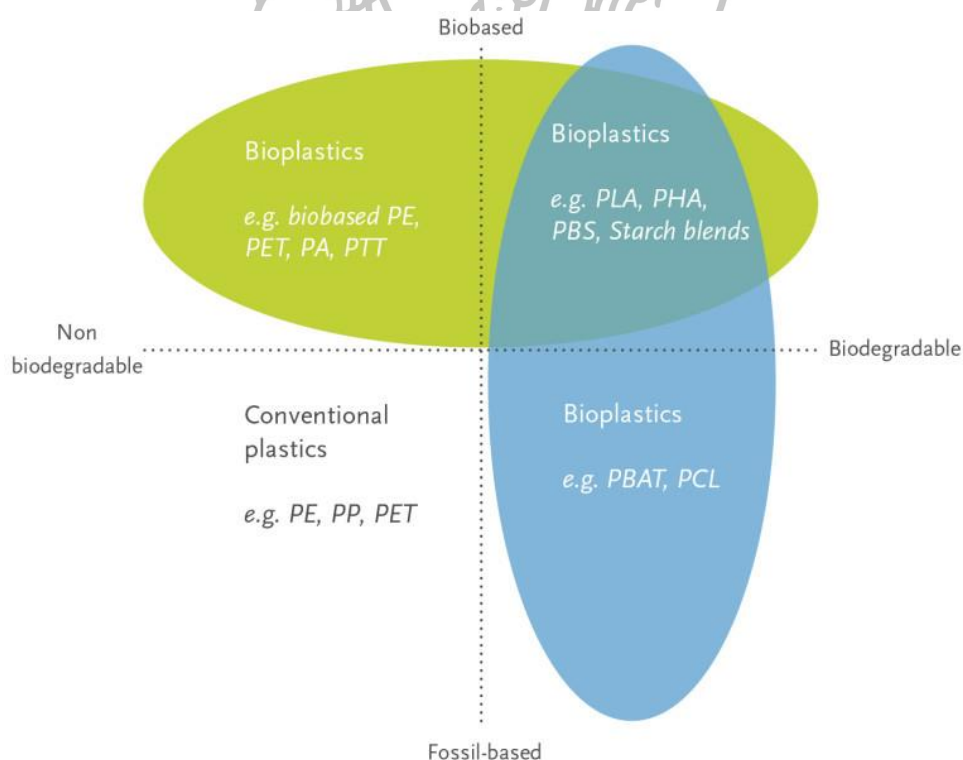


ภาพที่ 2.15 แสดงกลไกการยึดติดแบบแพร่ผ่าน [19]

สำหรับวัสดุคอมโพสิตในงานวิจัยนี้เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงผิวด้วยเคมี (Treated) ทำให้กลไกการยึดติดเป็นแบบการยึดติดเชิงกลเป็นหลัก แต่ทั้งนี้ความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตยังขึ้นกับความแข็งแรงส่วนเสริมแรง และระดับของการยึดเกาะกันระหว่างเมตริกซ์กับส่วนเสริมแรงด้วยเช่นกัน

2.2 ไบโอพลาสติก (Bioplastic) [20]

ไบโอพลาสติก หมายถึงพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่สังเคราะห์มาจากวัตถุดิบมวลชีวภาพ (Biobased materials) เช่น มันสำปะหลัง อ้อย ข้าวโพด แป้ง ยางธรรมชาติ และเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ เป็นต้น ซึ่งไบโอพอลิเมอร์นั้นสามารถนำมาใช้ทดแทนพอลิเมอร์ที่ผลิตจากปิโตรเลียมได้ทั้งในด้านความแข็งแรง และมีที่มาจากแหล่งวัตถุดิบทดแทน (Renewable resource) ที่สามารถหาได้ง่าย ไบโอพลาสติกส่วนมากสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน และอื่นๆ แต่ทั้งนี้ไบโอพลาสติกบางชนิดอาจจะไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติเสมอไป ดังแสดงการจำแนกของไบโอพลาสติกในภาพที่ 2.16 ตัวอย่างของไบโอพลาสติกที่นิยมใช้ในปัจจุบันที่สามารถสลายตัวได้ตามธรรมชาติ เช่น พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene Succinate, PBS) พอลิไฮดรอกซีแอลคาโนเอตส์ (Polyhydroxyalkanoates, PHAs) และพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน (Starch-based plastic) เป็นต้น



ภาพที่ 2.16 แสดงการจำแนกไบโอพลาสติกประเภทต่างๆ [20]

2.2.1 ประเภทของไบโอพลาสติก [21]

ไบโอพลาสติกที่ได้มาจากวัตถุดิบมวลชีวภาพและสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ได้ความนิยมสูงขึ้นมากในปัจจุบัน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ดังนี้

1) ไบโอพลาสติกที่ได้จากมวลชีวภาพ หรือวัตถุดิบทางการเกษตร (Agro-polymers) โดยตรง แบ่งออกได้เป็น

ตระกูลพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) ได้แก่ แป้ง (Starch) เซลลูโลส (Cellulose)

ตระกูลโปรตีน และไขมัน ได้แก่ กลูเตน (Gluten) กากถั่วเหลือง เวย์โปรตีน (Whey protein)

ตระกูลอื่น ได้แก่ ยางธรรมชาติ (Natural rubber, Polyisoprene)

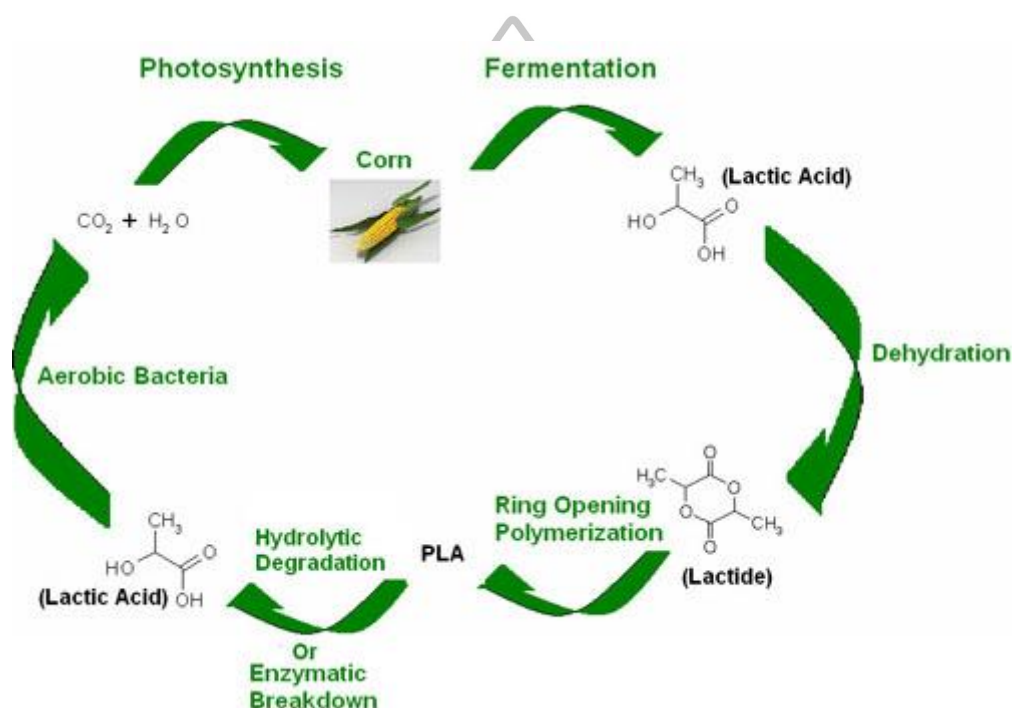
2) ไบโอพลาสติกที่ได้จากกระบวนการผลิตโดยเชื้อจุลินทรีย์ เห็ด-รา เช่น พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Polyhydroxyalkanoate, PHA) ไคติน (Chitin)

3) ไบโอพลาสติกที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเคมี เช่น พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) พอลิเอสเทอร์เอไมด์ (Polyester amide) เป็นต้น

2.2.2 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) [1,23,24]

พอลิแลคติกแอซิดเป็นไบโอพลาสติกที่มีศักยภาพในการทดแทนและแข่งขันกับพลาสติกเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน เช่น พอลิโพรพิลีน (PP) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกัน โดยสามารถปรับปรุงสมบัติได้ด้วยการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุล มีความใส มีสมบัติการขวางกั้น (Barrier properties) มีความสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อได้ดี (Biocompatibility) ไม่เป็นพิษ (Non-toxic) และสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติอย่างสมบูรณ์ ภายใต้สภาวะที่มีความชื้นสูงและอุณหภูมิเหมาะสม ในขั้นตอนของการย่อยสลาย พอลิแลคติกแอซิดดังแสดงในภาพที่ 2.17 ซึ่งมี 2 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการย่อยสลายจะเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ที่พันธะเอสเทอร์ของพอลิแลคติกแอซิดทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สั้นลง และขั้นตอนต่อมาโมเลกุลกรดแลคติกที่แตกออกมาจากสายโซ่ของพอลิแลคติกแอซิดจะถูกย่อยสลายต่อไปด้วยจุลินทรีย์ สำหรับวัตถุดิบหลักที่ใช้ผลิตพอลิแลคติกแอซิดนั้นมาจากแหล่งวัตถุดิบทดแทน ที่ได้มาจากพืชที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น มันสำปะหลัง ข้าวโพด โดยมีกระบวนการผลิตเริ่มต้นจากการบดหรือม่พืชนั้นให้ละเอียดเป็นแป้ง จากนั้นทำการย่อยแป้งที่ได้ให้กลายเป็นน้ำตาลแล้วนำไปหมัก (Fermentation) ด้วยจุลินทรีย์ เพื่อให้เกิดเป็นกรดแลคติก (Lactic Acid) จากนั้นทำการแยกกรดแลคติกที่ได้มาแล้วทำให้บริสุทธิ์นำไปผ่านกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นสารใหม่ ที่มีโครงสร้างทางเคมีมีลักษณะเป็นวงแหวนเรียกว่าที่แลคไทด์ (Lactide) หลังจากนั้นนำมากลั่นแล้วผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อเปิดวงแหวนของแลคไทด์เปลี่ยนโครงสร้างให้กลายเป็น พอลิเมอร์ของแลคไทด์ที่มี

สายโซ่ยาวขึ้นจนกลายเป็นพอลิแลคติกแอซิด ดังภาพที่ 2.17 ซึ่งความยาวของสายโซ่พอลิแลคติกแอซิดจะเป็นสิ่งที่กำหนดคุณสมบัติของพอลิแลคติกแอซิดให้เหมาะสมกับการใช้งานที่กำหนด ในการขึ้นรูปพอลิแลคติกแอซิดนั้นสามารถทำได้ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกทั่วไป เช่น กระบวนการขึ้นรูปแบบอัดรีด (Extrusion) กระบวนการฉีดพลาสติก (Injection Molding) กระบวนการกดอัดขึ้นรูปพลาสติก (Compression Molding) กระบวนการเป่าฟิล์ม (Blown film extrusion) เป็นต้น



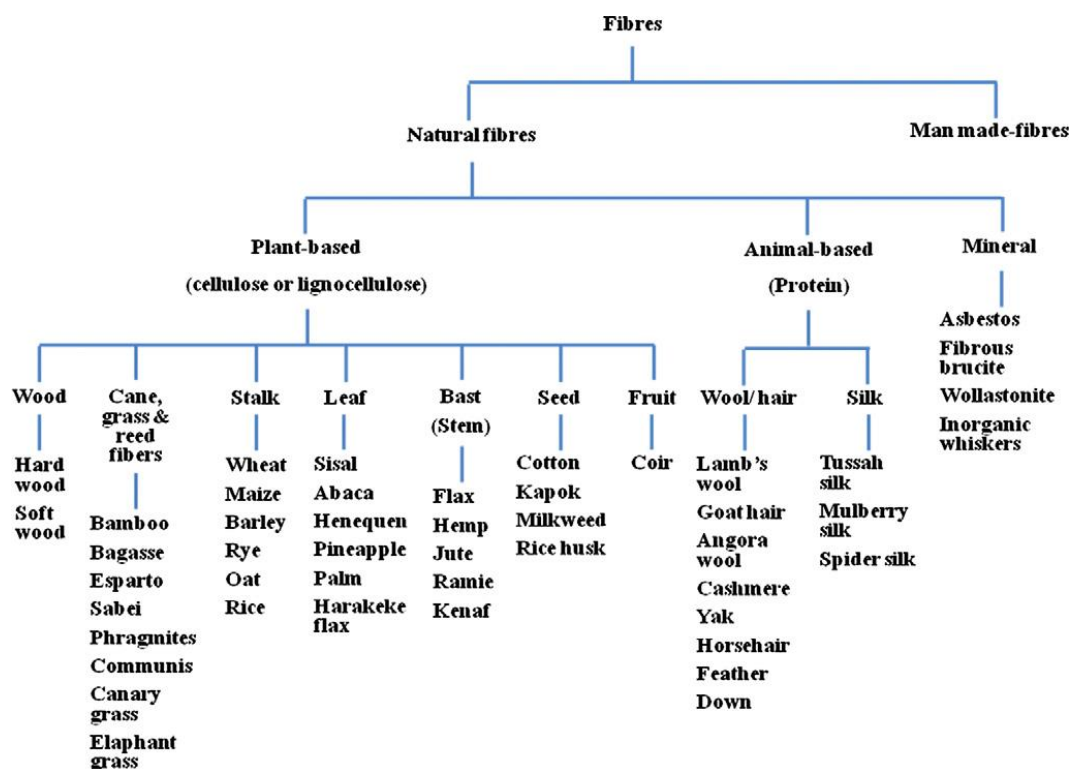
ภาพที่ 2.17 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) ด้วยกระบวนการหมัก (Fermentation) ข้าวโพด และแสดงกระบวนการย่อยสลายตามธรรมชาติ [24]

2.3 เส้นใย (Fiber) [25,26,27]

เส้นใย หมายถึง วัสดุหรือสารใดๆ ทั้งที่เกิดจากธรรมชาติ และที่เกิดจากมนุษย์สร้างขึ้น เส้นใยส่วนใหญ่มักเป็นสารพอลิเมอร์ซึ่งประกอบด้วยธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก และเส้นใยต้องมีสัดส่วนของความยาวต่อความหนาสูงมาก (High ratio of length to thickness) ไม่น้อยกว่า 100 เท่า โดยปกติการจะแยกเส้นใยออกจากวัสดุประเภทอื่น โดยดูจากลักษณะความยืดหยุ่น ความละเอียด และอัตราส่วนระหว่างความยาวกับขนาดหน้าตัด

2.3.1 ประเภทของเส้นใย

เส้นใยสามารถแบ่งได้หลายประเภท หากแบ่งตามแหล่งกำเนิดของเส้นใยจะสามารถแบ่งเส้นใยออกเป็นสองประเภทใหญ่ คือ เส้นใยธรรมชาติ และเส้นใยที่มนุษย์สร้างขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 แสดงการจำแนกประเภทของเส้นใยชนิดต่างๆ [26]

2.3.1.1 เส้นใยที่มนุษย์สร้างขึ้น (Manmade-fibers)

เป็นเส้นใยที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นจากสารอินทรีย์ หรือสารอนินทรีย์ เพื่อใช้ทดแทนเส้นใยธรรมชาติ โดยทั่วไปแล้วเส้นใยที่มนุษย์สร้างขึ้นมักมีความสม่ำเสมอของเส้นใยและสมบัติบางอย่างสูงกว่าเส้นใยธรรมชาติ ตัวอย่างเส้นใยที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่น เส้นใยคาร์บอน ไนลอน (Nylon) เส้นใยอะคริลิก เรยอน (Rayon) อะรามิด (Aramids) เส้นใยแก้ว เป็นต้น

2.3.1.2 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers)

เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุอินทรีย์ที่สำคัญ สามารถพบได้ทั่วไปตามธรรมชาติ เส้นใยธรรมชาติแบ่งออกเป็น 3 ประเภทได้ตามแหล่งกำเนิดของเส้นใยดังนี้

1) เส้นใยที่ได้มาจากพืช (Plant-based) เป็นเส้นใยพื้นฐานที่พบได้ทั่วไป เช่น เส้นใยฝ้าย (Cotton) เส้นใยลินิน (Flax) เส้นใยป่านสนรายนธ์ (Sisal) เส้นใยปอแก้ว (Kenaf).

และเส้นใยกล้วย (Banana) เป็นต้น เส้นใยเหล่านี้มักมีองค์ประกอบหลักส่วนใหญ่เป็นเซลลูโลส (Cellulose)

2) เส้นใยที่ได้จากสัตว์ (Animal-based) เช่น ขนแพะ ขนแกะ และไหม เป็นต้น ซึ่งเส้นใยจากสัตว์เหล่านี้มักจะมีส่วนประกอบหลักเป็นกรดอะมิโนชนิดต่างๆ

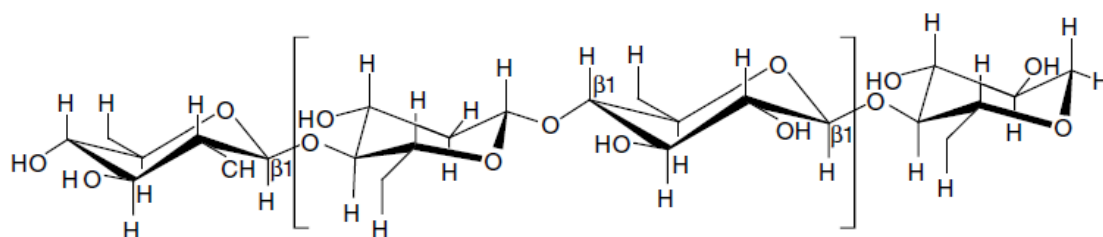
3) เส้นใยที่ได้จากแร่ธาตุ (Mineral) ในปัจจุบันไม่ได้รับความนิยมในการใช้งานเนื่องจากมีผลกระทบต่อสุขภาพ มักถูกใช้กับงานด้านการทนไฟและการทนความร้อน ตัวอย่างเส้นใยที่ได้จากแร่ธาตุ เช่น เส้นใยหิน (Asbestos) Wollastonite เป็นต้น

2.3.2 โครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) [1,25,27,28]

เส้นใยธรรมชาติจากพืชทุกชนิดจัดเป็นเส้นใยที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก และนอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) สามารถพบองค์ประกอบเหล่านี้ได้จากทุกส่วนต่างๆของพืช เช่น เมล็ด ลำต้น ใบ ผล ซึ่งสัดส่วนของสารเหล่านี้จะแตกต่างกันไปตามชนิดของพืช แหล่งที่มา และกระบวนการผลิตเส้นใยธรรมชาติ

2.3.2.1 เซลลูโลส (Cellulose)

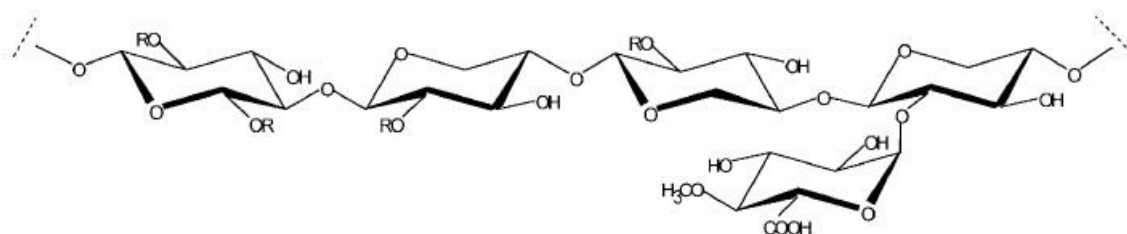
เซลลูโลสมีองค์ประกอบธาตุหลัก 3 ชนิด คือ คาร์บอน 44.4% ไฮโดรเจน 6.2% และออกซิเจน 49.4% ในโครงสร้างหน่วยพื้นฐานเป็นน้ำตาลกลูโคส ($C_6H_{10}O_5$) จำนวนมากต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบเบต้า (1,4-beta-D-glycosidic linkages) ดังแสดงภาพที่ 2.19 จากผลของโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส ทำให้เส้นใยธรรมชาติมีความแข็งแรงสูงเนื่องจากการที่โมเลกุลเรียงตัวตรงกันเป็นสายโซ่ยาวเป็นระเบียบที่ถูกรวมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และมีระดับของการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) สูงมาก ประมาณ 10,000 ทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูง สามารถดูดซึมน้ำและความชื้นได้ดีจากผลของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่ทำหน้าที่ดึงดูดน้ำได้ มีความสามารถต้านทานตัวทำละลายเบสของพวกอัลคาไลน์ได้ แต่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ในบริเวณพันธะไกลโคซิดิก (C-O-C) ทำให้สายโซ่โมเลกุลขาดลงกลายเป็นน้ำตาล



ภาพที่ 2.19 แสดงโครงสร้างพื้นฐาน และการยึดเกาะกันระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลส [1]

2.3.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

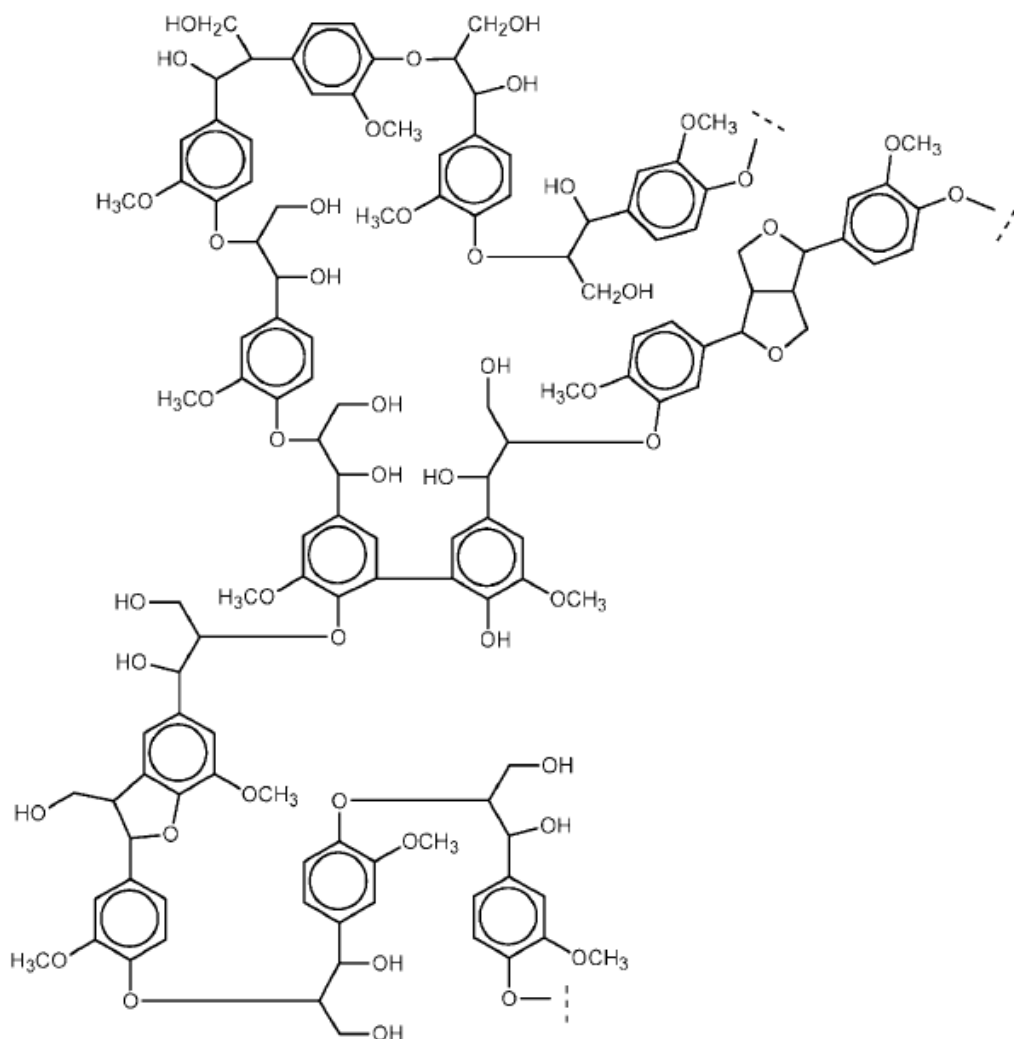
เฮมิเซลลูโลส เป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทหนึ่งที่เรียกว่าเฮเทอโรโพลีแซ็กคาไรด์ (Heteropolysaccharide) ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยจากน้ำตาลหลายชนิด เช่น กลูโคส (Glucose) กาแลคโทส (Galactose) ไซโลส (xylose) และ อะราโบส (Arabose) เป็นต้น สายโซ่ของเฮมิเซลลูโลสมีขนาดสั้นมากมีระดับของการเกิดพอลิเมอร์เพียงประมาณ 50-300 มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลที่ไม่เป็นระเบียบ และโครงสร้างโมเลกุลที่มีลักษณะเป็นกิ่งก้าน ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ทำให้เฮมิเซลลูโลสมีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) สูง เนื่องจากโมเลกุลมีความเป็นขั้วสูงทำให้สามารถดูดความชื้นได้ดี ทำให้เฮมิเซลลูโลสสามารถละลายในตัวทำละลายเบสอัลคาไลน์ และเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) กับสารละลายกรดได้ง่าย



ภาพที่ 2.20 แสดงตัวอย่าง โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [28]

2.3.2.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างลักษณะเป็นกิ่งก้านซับซ้อน ดังแสดงในภาพที่ 2.21 ประกอบขึ้นจากหน่วยย่อยของอะโรมาติกแอลกอฮอล์ (Aromatic alcohol) พากคูมาริล (Coumaryl alcohol) โคนิเฟอริล (Coniferyl alcohol) และไซนาพิล (Sinapyl alcohol) ซึ่งเปลี่ยนแปลงมากจากกรดอะมิโนฟีนิลอะลานีน (Phenylalanine) ด้วยเอนไซม์ฟีนิลอะลานีนแอมโมเนียไลเอส (Phenylalanine Ammonia Lyase) ได้เป็นกรดซินามิก (Cinamic acid) ซึ่งกรดนี้จะถูกเปลี่ยนแปลงเป็นแอลกอฮอล์ทั้ง 3 ต่อไป ลิกนินมีความเป็นอสัณฐานสูง มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ สามารถละลายในตัวทำละลายเบสอัลคาไลน์ เกิดการออกซิไดซ์ได้ง่าย และแต่ไม่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) กับสารละลายกรด



ภาพที่ 2.21 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของลิกนิน [28]

2.3.3 คุณสมบัติโดยทั่วไปของเส้นใยธรรมชาติ [1,29]

คุณสมบัติของเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิดอาจมีความแตกต่างกันบ้าง แต่เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีในหน่วยย่อยเช่นเดียวกัน ทำให้สมบัติหลายอย่างของเส้นใยธรรมชาติมีความคล้ายคลึงกัน ดังเช่น สามารถดูดความชื้นได้ดี นำความร้อนได้ดี ทนต่ออุณหภูมิสูง นำไฟฟ้าดี สามารถติดไฟได้เป็นต้น แต่สำหรับสมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับปริมาณเซลลูโลสภายในตัวเส้นใยธรรมชาติ และลักษณะโครงสร้าง กล่าวคือเส้นใยที่มีปริมาณเซลลูโลสสูง เช่น เส้นใยกล้วย เส้นใยปอแก้ว และเส้นใยสับปะรด จะมีความสามารถต้านทานแรงดึงได้สูงกว่าเส้นใยที่มีปริมาณเซลลูโลสต่ำ เช่น เส้นใยฝ้าย เป็นต้น ซึ่งสำหรับสมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติบางชนิดที่น่าสนใจได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

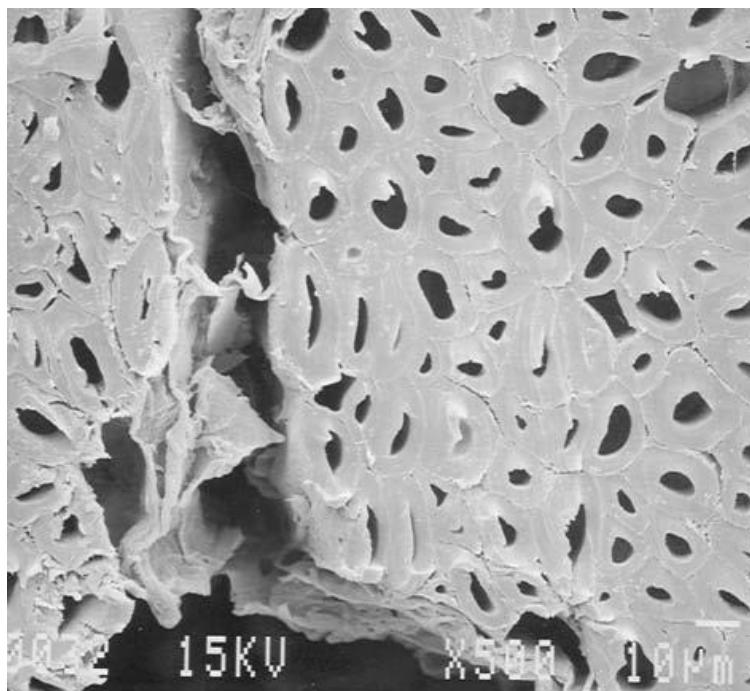
ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบ และสมบัติของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ [1,29,30]

| ชนิดเส้นใย | เซลลูโลส (wt%) | เฮมิ เซลลูโลส (wt%) | ลิกนิน (wt%) | ไผ่ (wt%) | Tensile strength (MPa) | Young's Modulus (GPa) | Elongation at break (%) |
|---------------|-------------------|---------------------------|-----------------|--------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| กล้วย | 56-63 | 20-25 | 7-9 | 3 | 400 | 12 | 3-10 |
| ป่านศรนารายณ์ | 65 | 12 | 9.9 | 2 | 511-635 | 9.4-22 | 2-2.5 |
| ปอแก้ว | 72 | 20.3 | 2.2 | - | 345-1,035 | 27.6 | 2.7-3.2 |
| ไผ่ | 26-43 | 30 | 21-31 | - | 140-230 | 11-17 | - |
| ฝ้าย | 85-90 | 5.7 | 0.7-1.6 | 0.6 | 264-654 | 4.9-10 | 3-7 |
| ลินิน | 71 | 18.6-20.6 | 2.2 | 1.7 | 435 | 27.6 | 2.7-3.2 |
| สับปะรด | 81 | - | 12.7 | - | 400-627 | 1.44 | 14.5 |

2.3.4 เส้นใยปอแก้ว (Kenaf fiber) [1,27,31]

ปอแก้วเป็นพืชในตระกูล Malvaceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Hibiscus cannabinus* L. มีแหล่งกำเนิดอยู่ในทางประเทศเขตร้อนของทวีปแอฟริกา แล้วมีการแพร่กระจายไปในเขตร้อนของทวีปเอเชีย เป็นหนึ่งในพืชที่มีอัตราการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด (ปอแก้วปริมาณ 1 ตัน สามารถดูดซับ CO₂ ได้ราว 1.5 ตัน) ปอแก้วมีลักษณะลำต้นสูงเพรียาวประมาณ 1.5-3.5 เมตร กว้างประมาณ 1-2 เซนติเมตร มีรอบอายุการเก็บเกี่ยวเฉลี่ย 150-180 วัน ขยายพันธุ์ได้โดยการใช้เมล็ด เป็นพืชที่ปลูกง่ายใช้น้ำน้อย จึงสามารถปลูกในที่ขาดแคลนน้ำ และอากาศแล้งได้ดี เส้นใยปอแก้วมักถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ กระดาษ และเชือก สำหรับแหล่งปลูกปอแก้วในประเทศไทยส่วนใหญ่อยู่ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

เส้นใยปอแก้วได้มาจากส่วนของลำต้นกลมมีหนาม โดยการนำลำต้นที่ตัดแต่งแล้วมาทำการแช่น้ำให้นิ่มลงแล้วแยกเปลือกออก สางเส้นใยออกด้วยมือหรือเครื่องจักร จากนั้นล้างทำความสะอาดและทำให้แห้งอีกครั้ง เส้นใยปอแก้วมีลักษณะหยาบ ร่วน มีสีน้ำตาลอ่อนถึงเข้ม เปื่อยยุ่ยได้ง่ายเมื่อเจอความชื้น มีโครงสร้างเป็นมัดกลุ่มเซลล์รูปทรงมนรวมกันเป็นเส้นใยหนึ่งเส้น โดยที่แต่ละเซลล์มีช่องว่างตรงกลางภายใน (Lumen) ที่มีหลายขนาด ซึ่งในแต่ละเส้นใยอาจมีกลุ่มเซลล์อยู่อย่างน้อยตั้งแต่ 8-9 จนมากที่สุดถึง 20-25 เซลล์ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 แสดงภาพตัดขวางของเส้นใยปอแก้ว ที่กำลังขยาย 500x [27]

2.3.5 เส้นใยป่านศรนารายณ์ (Sisal fiber) [1,27,32]

ป่านศรนารายณ์เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวในตระกูล Asparagaceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Agave sisalana* Perrine มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 2.23 ลำต้นคล้ายกับต้นสับปะรดแต่มีขนาดใหญ่กว่ามาก ใบรูปทรงคล้ายดาบปลายแหลม มีความยาว 1.5-2 เมตร เมื่อโตเต็มที่มีความสูงได้ถึงประมาณ 2 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นประมาณ 40 เซนติเมตร มีอายุยืนประมาณ 7-10 ปี นิยมขยายพันธุ์ด้วยหน่อ มีความทนต่อสภาวะอากาศที่แห้งแล้ง ชอบแสงแดดจัด และสามารถเจริญเติบโตได้ในที่ดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ มีถิ่นกำเนิดในเม็กซิโก และอเมริกาใต้ แต่ได้ถูกปลูกกระจายไปในหลายพื้นที่ทั้งแอฟริกา อินเดีย ตะวันตก และเอเชีย ในอดีตชาวมายัน และชาวแอซเท็กได้ใช้เส้นใยจากต้นป่านศรนารายณ์ที่สกัดจากใบรูปทรงคล้ายดาบในการทำผ้าดิบ สำหรับกระบวนการผลิตเส้นใยป่านศรนารายณ์ในปัจจุบัน เส้นใยจะถูกแยกออกจากใบหลังจากนำใบไปล้างน้ำและตากแดดให้แห้งแล้ว โดยจะถูกนำไปบิด และขูด ใบด้วยมือ หรือเครื่องจักรเพื่อแยกเส้นใยออกแล้วจากนั้นนำไปทำความสะอาดแล้วตากแดดให้แห้งอีกครั้ง

เส้นใยป่านศรนารายณ์จัดเป็นเส้นใยแข็งที่ถูกสกัดจากใบของต้นป่านศรนารายณ์ และเป็นหนึ่งในสี่ของเส้นใยธรรมชาติที่ถูกใช้มากที่สุด โดยมีปริมาณถึงครึ่งหนึ่งของปริมาณผลผลิตเส้นใยธรรมชาติทั้งหมด ในแต่ละปีเส้นใยป่านศรนารายณ์ได้ถูกผลิตในปีละประมาณ 4.5 ล้านตัน จากสองประเทศผู้ผลิตหลักคือ แทนซาเนีย และบราซิล

เส้นใยป่านศรนารายณ์มีความยาวตั้งแต่ 0.6-1.5 เมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 100-300 ไมโครเมตร เส้นใยเกิดจากการรวมกลุ่มของเส้นใยกลางที่ผนังเซลล์ถูกเสริมแรงด้วยเกลียวเซลลูโลสที่อยู่อย่างเป็นระเบียบในเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ผิวนอกของผนังเซลล์ประกอบด้วยชั้นที่มีลิกนิน และไซ ทำให้ผิวของเส้นใยไม่เกิดพันธะที่แข็งแกร่งกับพอลิเมอร์เมทริกซ์

เส้นใยป่านศรนารายณ์มีลักษณะผิวเรียบตรง มีสีเหลืองหรือครีม สมบัติการดึงยืดของเส้นใยป่านศรนารายณ์ไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งเส้นใย กล่าวคือเส้นใยที่สกัดจากส่วนโคนใบหรือใกล้ราก จะมีสมบัติการดึงยืด และโมดูลัสที่ต่ำกว่า แต่จะมีระยะการดึงยืดที่จุดขาด (Fracture strain) ที่สูง เส้นใยในส่วนกลางใบจะมีความแข็งแรง และแข็งแกร่งกว่า และเส้นใยที่สกัดจากส่วนปลายใบจะมีคุณสมบัติอยู่กลางๆ เส้นใยป่านศรนารายณ์จะมีความแข็งแรง และความเหนียวที่ลดลงเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น

พอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์ได้ถูกพัฒนาในขณะนี้ โดย Georgia Composites ได้ผลิตวัสดุจากพอลิโพรพิลีน (Propylene, PP) รีไซเคิลบางส่วน เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์ ซึ่งวัสดุนี้ถูกใช้ในการเพิ่มสมบัติของไม้แปรรูป โดยวิธีการกดอัดลามิเนตแบบสองลูกกลิ้ง (Double-belt Laminating press) รวมในแม่พิมพ์เดียวกัน ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้นเพื่อนำไปใช้งาน เช่น มือจับประตู แผ่นรองพื้นรถยนต์ เป็นต้น [33]



ภาพที่ 2.23 แสดงลักษณะของต้นป่านศรนารายณ์ (Sisal plant) [1]

2.3.6 เส้นใยกล้วย (Banana fiber) [1,27,34]

กล้วยเป็นพืชในตระกูล Musaceae มีหลากหลายสายพันธุ์ จัดเป็นไม้ดอกล้มลุกขนาดใหญ่ ทุกส่วนเหนือพื้นดินของกล้วยเจริญจากส่วนที่เรียกว่าหัวหรือเหง้าใต้ดิน ใบของกล้วยประกอบด้วย ก้านใบและแผ่นใบ ฐานก้านใบแผ่ออกเป็นกาบ ซึ่งกาบที่มารวมตัวกันจะกลายเป็นลำต้นเทียมที่คอยชูก้านใบ และช่วยพยุงให้ลำต้นกล้วยตั้งตรง โดยมากกล้วยจะมีความสูงประมาณ 5 เมตร ใบยาวประมาณ 2 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 2.24 สามารถขยายพันธุ์ได้ทั้งเมล็ด และหน่อ ชอบอากาศอบอุ่นและชุ่มชื้น เป็นพืชที่ปลูกง่าย ดูแลไม่ยุ่งยาก และให้ผลผลิตตลอดปี มีถิ่นกำเนิดในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ แต่พบเติบโตทั่วไประหว่างเขตร้อนชื้น เช่น อินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ ไทย ปานามา และกัวเตมาลา เป็นต้น

กล้วยเป็นเส้นใยแข็งที่ได้จากกาบใบ ซึ่งมีวิธีการแยกเส้นใยออกจากใบเช่นเดียวกับเส้นใยป่านศรนารายณ์โดยอาจแยกด้วยมือ หรือใช้เครื่องจักรขูด เส้นใยกล้วยจัดว่าเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีความแข็งแรงสูงโดยมีค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) สูงกว่าฝ้ายถึง 3 เท่า เส้นใยกล้วยมีลักษณะเป็นมันเงามีสีออกเหลืองขาว มีความยาว 2-4 เมตรขึ้นอยู่กับวิธีการผลิต มีผิวเรียบแบนตรงตลอดทั้งเส้นใย แต่ละเส้นใยเดี่ยวของกล้วยยาวประมาณ 4-6 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 17-21 ไมโครเมตร เส้นใยกล้วยมักถูกนำไปใช้เป็นเชือก และในงานหัตถกรรม เช่น กระเป๋า หมวก พรมเช็ดเท้า เป็นต้น



ภาพที่ 2.24 แสดงลักษณะของต้นกล้วย (Banana plant) [1]

2.4 การผลิตผ้าผืน [6,25,35]

การผลิตผ้าผืนโดยวิธีการทอ นั้นเริ่มต้นมากจากการสานเพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์สำหรับใส่ของ ต่อมาได้มีการพัฒนาขึ้นมากกลายเป็นการทอและเปลี่ยนมาใช้ผ้าเพื่อการสวมใส่ ทำให้ในปัจจุบันผ้ามีความหลากหลายทั้งทำจากเส้นใยธรรมชาติ เส้นใยสังเคราะห์ เส้นใยผสม โดยผ้าจะต้องมีลักษณะเป็นผืน ที่มีความกว้างและยาวมากกว่าความหนามาก ผ้าสามารถแบ่งตามกรรมวิธีการผลิตได้เป็น 3 ชนิดคือ ผ้าทอ (Woven) ผ้าถัก (Knit) และผ้าอัดลาย (Non-woven)

2.4.1 ผ้าทอ (Woven)

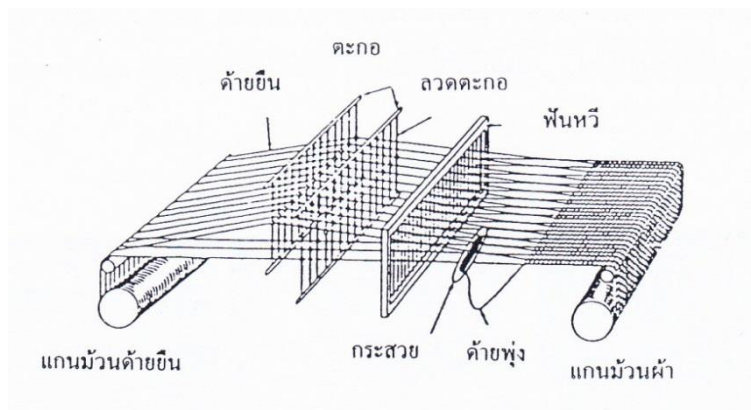
ผ้าทอ คือผ้าที่เกิดจากการนำเส้นด้าย 2 ทิศทางมาสอดขัดกัน ในตำแหน่งที่ตั้งฉากกัน ด้ายที่ขึงแกนตามความยาวของผ้าเรียกว่า เส้นยืน (Warp) และด้ายที่ขัดกับด้ายยืนถูกสานตามความกว้างของผ้าเรียกว่า เส้นพุ่ง (Weft) โดยการขัดกันของด้ายทั้งสองสามารถทำได้หลายรูปแบบ ทำให้ผ้าทอมีความแข็งแรงแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์ในการใช้งาน

2.4.2 หลักการทอ

ผ้าทอมีหลักการพื้นฐานเหมือนกันในทุกรูปแบบการผลิต โดยเลียนแบบมาจากเครื่องทอแบบดั้งเดิมที่เรียกว่า กี่ (Loom) ดังแสดงในรูปที่ 2.25 การทอจะดำเนินมาจากด้านหลังมา ด้านหน้าของเครื่อง เส้นด้ายในแนวยาว คือ เส้นยืน (Warp) และเส้นด้ายที่เรียงในแนวขวาง คือ เส้นพุ่ง (Weft) ด้ายยืนจะถูกจัดเรียงตัวขนานกันบนแกนที่มีความกว้างใกล้เคียงกับผ้า เรียกว่า แกนด้ายยืน (Warp beam) และถูกวางไว้ด้านหลังของเครื่องทอ ด้านหน้าของเครื่องทอจะมีแกนอีกอันหนึ่งคือ แกนเก็บผ้า (Cloth roll) สำหรับม้วนเก็บผ้าที่ทอเสร็จแล้ว ด้ายยืนจะถูกสอดผ่านฟันหวี (Reed) ที่เป็นโลหะมีช่องว่างเล็กๆเรียงอยู่คล้ายหวี เพื่อแยกด้ายยืนให้อยู่ห่างตามที่กำหนด แล้วผ่านตะกอล (Harness) ซึ่งใช้แบ่งหมู่ด้ายยืนเพื่อเปิดให้ด้ายพุ่งสอดเข้าไปขัดกับด้ายยืน และกระสวย (Shuttle) ที่ทำหน้าที่ส่งด้ายพุ่งกลับไปมา

หลักการทำงานของเครื่องทอประกอบด้วย 4 ขั้นตอนพื้นฐาน คือ

- 1) Shedding คือ การยกเส้นด้ายยืนขึ้นและลง โดยการยกตะกอลสลับกัน
- 2) Weft insertion คือ การสอดด้ายพุ่งผ่านระหว่างฟันหวีกับผ้า
- 3) Beating up คือ การอัดด้ายพุ่งให้แน่นกับด้ายยืนด้วยการเลื่อนฟันหวี
- 4) Taking up and letting off คือ การม้วนแกนม้วนผ้าทอเสร็จแล้วเก็บ พร้อมกับปล่อยด้ายยืนออกจากแกนม้วนด้ายยืน



ภาพที่ 2.25 แสดงลักษณะของเครื่องทอผ้าแบบดั้งเดิม (Loom) [35]

2.4.3 ประเภทของลายทอ

ลายทอของผ้ามีหลากหลายชนิด แต่ละแบบเกิดจากยกเส้นด้ายยืนด้วยตะกอในรูปแบบเฉพาะทำให้ผ้าที่ได้มีลักษณะรูปแบบลายทอที่แตกต่างกัน สำหรับโครงสร้างลายทอพื้นฐานมี 3 รูปแบบดังนี้

2.4.3.1 แบบลายขัด (Plain weave)

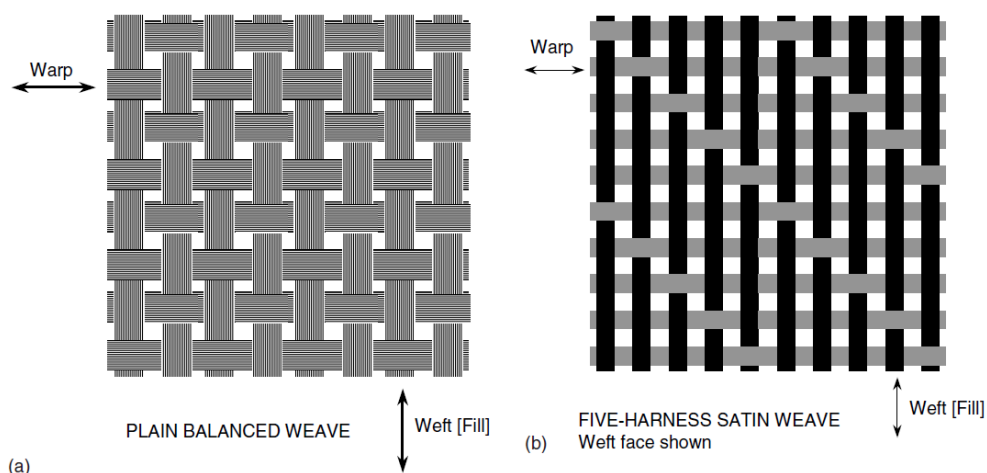
เป็นลายทอที่มีโครงสร้างที่ง่ายที่สุดและมีการใช้มากที่สุด การทอรูปแบบนี้จะมีจุดตัดกันของด้ายยืนกับด้ายพุ่งมากที่สุด ผ้าที่ทอลายนี้มีความแข็งแรงสูง การทอแบบลายขัดจะแบ่งด้ายยืนออกเป็น 2 หมู่ด้ายตะกอ 2 อันที่สลับด้ายยืนตะกอละเส้นสลับกัน เมื่อยกตะกอหนึ่งด้ายยืนหมู่หนึ่งจะถูกยกขึ้น และอีกหมู่จะถูกยกกลง เปิดเป็นช่องให้สอดด้ายพุ่งเข้าไปได้ ลักษณะของลายทอนี้แสดงในภาพที่ 2.26

2.4.3.2 แบบลายทแยงหรือลายสอง (Twill weave)

ผ้าทอด้วยโครงสร้างแบบลายทแยงเรียกว่าลายสอง เป็นผ้าที่ใช้ได้ทนที่สุด มีลักษณะเด่นคือ ด้ายพุ่งจะสอดขัดกับด้ายยืน ทำให้เกิดสันนูนเป็นแนวเส้นทแยงบนผ้า ซึ่งอาจมีลายทอแบบทแยงขวาที่เรียกว่า Z-twill และทแยงซ้ายที่เรียกว่า S-twill หรืออาจเป็นแบบผสมที่มีลักษณะทแยงซ้ายขวามาพบกันตรงกลางที่เรียกว่าลายสองพ้อยน์ (Point-twill) ก็ได้

2.4.3.3 แบบลายต่วน (Satin weave)

เป็นลายทอที่ดัดแปลงมาจากลายสอง โดยการเพิ่มให้เส้นด้ายลอยขยายห่างออกไป ลายทอนี้มีลักษณะเด่นคือ ผ้าจะเรียบมันวาว ลื่น และนุ่ม ผ้าทอนี้ให้เส้นด้ายยืนหรือเส้นด้ายพุ่งเป็นเส้นลอยก็ได้ โดยถ้าเส้นด้ายลอยข้ามอยู่ในทิศทางด้ายยืนจะเรียกว่า Satin แต่ถ้าเส้นด้ายลอยข้ามอยู่ในทิศทางด้ายพุ่ง เรียกว่า Sateen ลายทอนี้ใช้มากกับเส้นใยไหมหรือเส้นใยประดิษฐ์ ลักษณะของลายทอนี้แสดงในภาพที่ 2.26



ภาพที่ 2.26 แสดงลักษณะลายผ้าทอ: (a) ผ้าลายขัด (plain weave) และ (b) ผ้าลายต่วน (satin weave)

[6]

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ลายผ้าทอแบบลายขัดเนื่องจากเป็นลายผ้าที่มีความสมดุลของเส้นใยทั้งสองด้าน ซึ่งจะทำให้วัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรงสม่ำเสมอในทุกทิศทาง

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S. Mishra และคณะ [36] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยผสมของเส้นใยแก้วที่ประกบกับเส้นใยธรรมชาติ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เส้นใยธรรมชาติที่แตกต่างชนิดสองกัน คือ เส้นใยป่านศรนารายณ์ และเส้นใยสับปะรด โดยใช้เมตริกซ์เป็นเรซินพอลิเอสเตอร์ สำหรับเส้นใยป่านศรนารายณ์นั้นจะมีการผ่านการปรับปรุงผิวโดยวิธีการใช้สารละลายด่าง (Alkali treatment) ที่แตกต่างกัน 4 วิธีคือ วิธีปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 5 และ 10wt% โดยวิธี Cyanoethylation และโดยวิธี Acetylation ในการทดสอบสมบัติการดึงยึดกับวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรดกับเส้นใยแก้วพบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของเส้นใยแก้วที่เพิ่มขึ้นในวัสดุคอมโพสิต โดยที่ปริมาณเส้นใยแก้ว 8.6% โดยน้ำหนัก จะเพิ่มค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดถึง 66% เมื่อเทียบกับการใช้เส้นใยสับปะรดเพียงอย่างเดียว สำหรับวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์กับเส้นใยแก้ว การเพิ่มปริมาณของเส้นใยแก้วก็จะส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน โดยการใช้เส้นใยแก้ว 5.7% โดยน้ำหนัก จะเพิ่มค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด และสำหรับวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวกับเส้นใยแก้วพบว่า เส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5% จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด ภาพจากกล้องจุลทรรศน์

อิเล็กทรอนิกส์ของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบการดึงยึด แสดงให้เห็นว่าการยึดเกาะกันของเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงผิวกับเมตริกซ์ดีกว่าเส้นใยธรรมชาติที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิว และในการทดสอบการดูดซึมน้ำพบว่าสมบัติการดูดซึมน้ำของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงผิวมีค่าน้อยกว่าวัสดุคอมโพสิตแบบอื่น

Hu Jinlian และคณะ [37] ได้ทำการศึกษาผลของช่องว่างระหว่างชั้นในวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยกับเรซินอีพอกซี โดยมีรูปแบบการวางชั้นที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบ คือ วางผ้าแบบซ้อนด้านเดียวกัน และวางผ้าแบบสลับด้านกัน จากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ และการทดลองพบว่า การซึมผ่านของเรซินอีพอกซี ในรูปแบบที่แรกจะมีความต่อเนื่อง และรวดเร็วกว่ารูปแบบที่สอง เนื่องจากมีขนาดของช่องว่างที่ใกล้เคียงกันจะทำให้เรซินอีพอกซีสามารถไหลผ่านระหว่างเส้นใยกับช่องว่างได้ดีกว่าในรูปแบบที่สอง ที่มีช่องว่างขนาดใหญ่อยู่ระหว่างเส้นใยทำให้เรซินอีพอกซีไหลผ่านเข้าไปได้ช้ากว่า

R.V. Silva และคณะ [38] ได้ทำการศึกษาวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ โดยมีเมตริกซ์เป็นพอลิยูรีเทน ส่วนเสริมแรง คือ เส้นใยสั้นปานศรนารายณ์ และเส้นใยมะพร้าว ขนาดยาว 1 เซนติเมตร กับเส้นใยยาวเส้นใยปานศรนารายณ์ที่ทำการทอเป็นผ้าฝืน ซึ่งพบว่าในการใช้เส้นใยสั้นเป็นส่วนเสริมแรงนั้น วัสดุคอมโพสิตเส้นใยปานศรนารายณ์จะสามารถรับแรงได้สูงกว่าเส้นใยมะพร้าว และเมื่อใช้ผ้าทอเส้นใยปานศรนารายณ์จะทำให้วัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรงได้สูงที่สุด และในการปรับปรุงเส้นผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะสามารถทำให้ช่วยเพิ่มการยึดเกาะของเส้นใยกับเนื้อพอลิเมอร์เมตริกซ์ได้มากขึ้น จึงส่งผลทำให้วัสดุคอมโพสิตสามารถรับแรงได้สูงขึ้น

S.M. Sapuan และคณะ [39] ได้ทำการศึกษาวัสดุคอมโพสิตของผ้าจากเส้นใยกล้วยกับอีพอกซี โดยการทดสอบสมบัติการดึงยึดในทิศทางที่แตกต่างกันกับตัวอย่าง 3 ชั้นพบว่าค่าแรงเส้นสูงสุด ในแกน x กับ y อยู่ที่ 14.14 MN/m^2 และ 3.398 MN/m^2 ตามลำดับ ค่ายังโมดูลัสในแกน x กับ y อยู่ที่ 0.976 GN/m^2 และ 0.863 GN/m^2 ตามลำดับ ในการทดสอบดัดโค้งแบบสามจุด (Three point bending) พบว่าแรงสูงสุดที่ให้อยู่ที่ 36.25 N จะเกิดความเสียหายกับตัวอย่างขนาด 0.5 mm ค่าแรงเส้นสูงสุด และค่ายังโมดูลัสในแกน x อยู่ที่ 26.181 MN/m^2 และ 2.685 GN/m^2 ตามลำดับ และทำการคำนวณข้อมูลด้วยวิธีการสถิติด้วยวิธี ANOVA-one way พบว่าค่าที่ได้ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยยะสำคัญ

Andressa Cecilia Milanese และคณะ [40] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุคอมโพสิตเส้นใยธรรมชาติ จากผ้าปานศรนารายณ์ พบว่าการใช้เมตริกซ์เป็นเรซินฟีนอลิก จะแสดงสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตที่ดีกว่าเรซินพอลิยูรีเทนเนื่องจาก เนื่องจากมีการยึดเกาะกับเส้นใยปาน

ศรณารายณ์ที่ดีกว่าดังจะเห็นได้ในภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่แสดงรอยแตกหักของชิ้นตัวอย่างวัสดุคอมโพสิตที่ผ่านการทดสอบเชิงกล ในวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เรซินฟีนอลิกจะพบว่าไม่มีช่องว่างระหว่างเส้นใยป่านศรณารายณ์เกิดขึ้นต่างจากวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เรซินพอลิยูรีเทน และในการใช้เส้นใยป่านศรณารายณ์ที่ไม่ผ่านปรับปรุงด้วยความร้อนจะทำให้วัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

M. Jawaid และคณะ [41] ได้ศึกษาการดัดและการโค้งในวัสดุคอมโพสิตที่มีสารเสริมแรงผสมคือ ซ่อปาล์มน้ำมัน (Oil palm empty fruit bunches, EFB) กับผ้าจากเส้นใยปอกระเจา (Jute) ในเมตริกซ์เรซินอีพ็อกซี โดยทดลองศึกษาผลของลักษณะการวางส่วนเสริมแรงโดยมีรูปแบบการวางประเภทที่แตกต่างกัน ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าสมบัติการดัดและการโค้งของวัสดุเสริมคอมโพสิตที่ใช้ผ้าปอกระเจาเป็นส่วนเสริมแรงมีความแข็งแรงสูงที่สุด รองลงมาคือวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ส่วนเสริมแรงผสมทั้งสองอย่าง และวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ EFB เป็นส่วนเสริมแรงเพียงอย่างเดียวตามลำดับ เนื่องจากโครงสร้างของเส้นใยที่เกี่ยวพันกันในผ้าจะทำให้เกิดความต่อเนื่องของการถ่ายเทแรงที่ดีกว่าการใช้เส้นใยเดี่ยวทำให้การใช้ผ้าเส้นใยปอกระเจาเป็นส่วนเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรงมากกว่า

A. Porras และ A. Maranon [42] ได้ทำการศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ประกอบด้วยเมตริกซ์พอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับผ้าจากไม้ไผ่ที่เส้นด้ายแนวขวางมีขนาดใหญ่กว่าเส้นด้ายตามยาว โดยใช้วิธีการขึ้นรูปแบบลามิเนต ที่มีการวางชั้นของฟิล์ม PLA สลับกับชั้นของผ้าไม้ไผ่ แล้วทำขึ้นรูปด้วยการกดอัดด้วยความร้อน ในการทดสอบสมบัติเชิงกลกับวัสดุคอมโพสิตนี้พบว่า ความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตในแนวขวางมีค่าสูงกว่าแนวยาว เนื่องจากผลของขนาดเส้นด้ายไม้ไผ่ในแนวขวางที่มีขนาดใหญ่กว่าจะสามารถช่วยรับแรงให้กับวัสดุคอมโพสิตได้มากกว่าเส้นด้ายขนาดเล็กในแนวยาว

Shinji Ochi [43] ได้ทำการศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เมตริกซ์พอลิแลคติกแอซิด กับเส้นใยปอแก้วเป็นส่วนเสริมแรงแบบจัดเรียงในทิศทางเดียวกัน (Unidirectional) พบว่าการให้ความร้อนกับเส้นใยปอแก้วที่ 180°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงจะทำให้เส้นใยปอแก้วมีความแข็งแรงลดลง ดังนั้นจึงเลือกทำการขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิเพียง 170°C ซึ่งเมื่อทดสอบเชิงกลพบว่าวัสดุคอมโพสิตมีค่าความต้านทานต่อแรงดึง 223 MPa และค่าความต้านทานต่อการดัดโค้ง 254 MPa ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยปอแก้วความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตจะยิ่งเพิ่มสูงขึ้น ในการทดสอบการย่อยสลายเป็นเวลา 4 สัปดาห์พบว่าวัสดุคอมโพสิตน้ำหนักลดลงถึง 38%

Zhaoqian Li, Xiaodong Zhou, และ Chonghua Pei [44] ได้ทำการศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยป่านสรนารายณ์ ต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิตพอลิแลคติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านสรนารายณ์ พบว่าค่าความต้านทานการตัดโค้ง และค่าความต้านต่อแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยป่านสรนารายณ์ที่ยังไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวมีค่าใกล้เคียงกับพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ สำหรับวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยป่านสรนารายณ์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวแล้วมีค่าความต้านทานการตัดโค้งสูงขึ้นเล็กน้อย ในการทดสอบการกระแทกวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านสรนารายณ์ทุกชนิดมีความต้านทานต่อการกระแทกที่สูงกว่าพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ และภาพรอยแตกของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบการกระแทกจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่าการใช้เส้นใยป่านสรนารายณ์ที่ปรับปรุงผิวแล้วมีการยึดเกาะที่ดีกับเมทริกซ์พอลิแลคติกแอซิดกว่าเส้นใยป่านสรนารายณ์ที่ยังไม่ได้ปรับปรุงผิว

V.P. Arthanarieswaran, A. Kumaravel, และ M. Kathirselvam [45] ได้ศึกษาวัสดุคอมโพสิตแบบลามิเนตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยแก้ว เส้นใยกล้วย และเส้นใยป่านสรนารายณ์ โดยทั้งหมดเป็นเส้นใยขาวในรูปแบบเส้นใยชนิดเดี่ยว และเส้นใยผสม ที่มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ใช้การขึ้นรูปโดยวิธีการกดอัดด้วยความร้อน พบว่าสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยกล้วย และเส้นใยป่านสรนารายณ์ทั้งในแบบเดี่ยว และแบบผสมมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ถ้าในวัสดุคอมโพสิตมีการใช้เส้นใยแก้วร่วมอยู่ด้วยจะทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างมาก และในการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่ามีการยึดเกาะของเส้นใยธรรมชาติกับเมทริกซ์ที่ต่ำ โดยพบรอยแยกขนาดเล็ก ช่องว่าง และกลุ่มของเส้นใยที่หลุดออกมา

A. Alavudeen และคณะ [46] ได้ทำการศึกษาผลของรูปแบบการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรงที่เป็นเส้นใยทั้งในแบบสุ่ม และในรูปแบบของผ้าทอที่แตกต่างกันสองชนิด คือ ผ้าทอลายขัด และผ้าทอลายสอง ด้วยเส้นใยกล้วย และเส้นใยปอแก้วในวัสดุคอมโพสิต ซึ่งพบว่าสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ส่วนเสริมแรงด้วยผ้าทอลายขัด มีค่าสูงกว่าการใช้ผ้าทอลายสอง และการใช้เส้นใยแบบสุ่มตามลำดับ สำหรับการใส่เส้นใยผสมทำให้วัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าการใช้เส้นใยธรรมชาติเพียงชนิดเดียว ในการปรับปรุงผิวเส้นใยธรรมชาติด้วย Sodium lauryl sulfate (SLS) จะส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และการไม่ปรับปรุงผิวเส้นใยตามลำดับ

Takashi Nishino และคณะ [47] ได้ทำการศึกษาวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจากฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด-L (PLLA) กับแผ่นปอแก้วที่ผ่านกระบวนการผลิตคล้ายกับกระดาษ พบว่ารูพรุน และกลุ่มเส้นใยบนผิวแผ่นปอแก้วก่อนที่จะขึ้นรูปเป็นวัสดุคอมโพสิตถูกปกคลุมไปด้วย PLLA หลังจากการขึ้นรูปแล้ว เมื่อนำไปทดสอบการดึงยึดวัสดุคอมโพสิตที่มีแผ่นปอแก้วอยู่ 70% โดยน้ำหนัก จะมี

ความแข็งแรงมากที่สุด ซึ่งเมื่อใช้แผ่นปอแก้วเสริมแรงจะทำให้วัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรงสูงกว่า PLLA บริสุทธิ์ได้ ซึ่งจากกราฟแรงดึง-ระยะยืดแสดงให้เห็นว่า PLLA มีพฤติกรรมแบบเหนียว แต่ในวัสดุคอมโพสิตจะมีพฤติกรรมแบบแข็ง-เปราะ เนื่องจากแผ่นปอแก้วที่มีค่าโมดูลัสสูงจึงส่งผลต่อวัสดุคอมโพสิตมากกว่า PLLA และจากผลของรูปแบบการวางแผ่นปอแก้วพบว่า การวางแผ่นปอแก้วขนานกันจะมีความแข็งแรงที่สูงกว่าการวางแผ่นปอแก้วตั้งฉากกัน แต่การวางแผ่นปอแก้วตั้งฉากกันจะทำให้วัสดุคอมโพสิตสามารถรับแรงในทิศทางอื่นได้ดีกว่าการวางแผ่นปอแก้วขนานกัน

Andressa Cecília Milanese, Maria Odila Hilário Cioffi, และ Herman Jacobus Cornelis Voorwald [48] ศึกษาสมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตเรซินฟีนอลิก (Phenolic resin) ที่เสริมแรงด้วยผ้าทอลายขัดจากป่านศรนารายณ์ที่จากธรรมชาติ และผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อน (Thermally treat) พบว่าการใช้ผ้าทอลายขัดสามารถช่วยเสริมแรงกับวัสดุคอมโพสิตได้ โดยมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าเรซินฟีนอลิกบริสุทธิ์ถึง 5 เท่า และค่าความต้านทานการคดโค้งของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอลายขัดที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนมีค่าสูงกว่าเรซินฟีนอลิกบริสุทธิ์อยู่ 28% สำหรับการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่าสมบัติของวัสดุคอมโพสิตอยู่ระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์ และเรซินฟีนอลิกบริสุทธิ์

Young Seok Song และคณะ [49] ได้ทำการศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิตพอลิแลคติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยผ้าทอลายขัด และลายทแยงจากปอ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอจากปอในปริมาณ 20wt% มีค่าต่ำที่สุด รองลงมาคือการใช้ผ้าทอจากปอที่ 10wt% และผ้าทอจากปออย่างเดียวตามลำดับ สำหรับสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตพบว่าการใช้ผ้าทอจากปอที่ 20wt% ส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าการใช้ผ้าทอจากปอที่ 10wt% และผ้าทอจากปออย่างเดียวเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบลายทอแล้วพบว่าการใช้ผ้าทอลายทแยงจะมีสมบัติที่ดีกว่าการใช้ผ้าทอลายขัด เนื่องจากรูปแบบการขัดกันของเส้นด้ายที่แนบชิดมากกว่า

Bushra H. Musa, Rafah A. Nassif, และ Enass M. Hadi [50] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัวที่เสริมแรงด้วยผ้าทอจากเส้นใยกล้วย เปรียบเทียบกับพอลิเอสเทอร์บริสุทธิ์ พบว่าค่าความต้านทานการกระแทกของวัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้น 22% เช่นเดียวกับค่าความต้านทานการคดโค้ง และค่าความต้านทานการกดอัดที่เพิ่มขึ้น 15% และ 12% ตามลำดับเมื่อเทียบกับพอลิเอสเทอร์บริสุทธิ์ เนื่องมาจากการใช้เส้นใยเซลลูโลสในพลาสติกเทอร์โมเซตจะสามารถเกิดการถ่ายเทแรงจากเมตริกซ์ไปสู่เส้นใยได้ต่อเนื่อง ทำให้พลาสติกเทอร์โมเซตที่เปราะจึงสามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้น

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมวัสดุไบโอคอมโพสิตที่มีส่วนประกอบทั้งหมดมาจากแหล่งวัตถุดิบที่สร้างขึ้นมาทดแทนได้ โดยใช้ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่องแบบเส้นผ้า ซึ่งได้แบ่งการทำงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วนดังต่อไปนี้

ส่วนที่ 1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของเส้นใยธรรมชาติ กับผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติ ทั้งแบบชนิดเดี่ยว คือ ผ้าทอเส้นใยกล้วย ผ้าทอเส้นใยปอแก้ว ผ้าทอเส้นใยป่านศรนารายณ์ และผ้าทอแบบผสม คือ ผ้าทอเส้นใยป่านศรนารายณ์-กล้วย ผ้าทอเส้นใยป่านศรนารายณ์-ปอแก้ว และผ้าทอเส้นใยกล้วย-ปอแก้ว โดยผ้าทอทั้งหมดจะทำการทอแบบลายขัด (Plain weave)

ส่วนที่ 2 ศึกษาผลของผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติที่ใช้เป็นส่วนเสริมแรงใน วัสดุไบโอคอมโพสิต ที่มีต่อสมบัติทางความร้อน เสถียรภาพทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติการดูดซึมน้ำ และสมบัติการลวกคืดไฟ

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัตถุดิบ สารเคมี

3.1.2.1 เม็ดพลาสติก พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ชื่อทางการค้า Ingeo™ เกรด 4043D ผลิตโดยบริษัท NatureWorks LLC เป็นสารเมตริกซ์ (Matrix) ในวัสดุไบโอคอมโพสิต

3.1.2.2 เส้นใยป่านศรนารายณ์ จากสหกรณ์หุบกะพง, เพชรบุรี, ประเทศไทย เป็นเส้นใยธรรมชาติที่ใช้เป็นเส้นด้ายพุ่ง (Weft) ในการทอผ้า

3.1.2.3 เส้นใยกล้วย จากโรงสีข้าววนารามิล, นนทบุรี, ประเทศไทย เป็นเส้นใยธรรมชาติที่ใช้เป็นเส้นด้ายพุ่งในการทอผ้า

3.1.2.4 เส้นใยปอแก้ว จากโรงสีข้าววนารามิล, นนทบุรี, ประเทศไทย เป็นเส้นใยธรรมชาติที่ใช้เป็นเส้นด้ายพุ่งในการทอผ้า

3.1.2.5 เส้นด้ายฝ้าย จากศูนย์ทอผ้าพื้นเมืองคูบัว, ราชบุรี, ประเทศไทย เป็นเส้นด้ายที่ใช้เป็นเส้นด้ายยืน (Warp) ในการทอผ้า

3.1.2 อุปกรณ์

3.1.1.1 กี่กระตุก ของศูนย์ทอผ้าพื้นเมืองคูบัว, ราชบุรี, ประเทศไทย

3.1.1.2 เครื่องอบลมร้อนของบริษัท BINDER, Germany

3.1.1.3 เครื่องกดอัดด้วยความร้อน (Compression Molding) ของบริษัท เจริญทัศน์, ประเทศไทย

3.1.1.4 เครื่อง Universal testing Machine, model 5969, ของบริษัท Instron, USA

3.1.1.5 เครื่องทำรอยบาก ของบริษัท Gotech testing machine, Taiwan

3.1.1.6 เครื่อง Impact tester, model B5102.202 ลูกตุ้มขนาด 4J ของบริษัท Zwick, Germany

3.1.1.7 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM), model TM3030, ของบริษัท Hitachi, Japan

3.1.1.8 เครื่อง Thermal Gravimetric Analyzer (TGA), model TGA2 ของบริษัท Mettler, USA

3.1.1.9 เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC), model DSC3 ของบริษัท Mettler, USA

3.1.1.10 เครื่องทดสอบ LOI และ UL94

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ส่วนที่ 1 ศึกษาสมบัติของผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติ

3.2.3.1 ทำการเตรียมผ้าทอด้วยกี่กระตุก โดยร้อยเส้นยืน (เส้นด้ายฝ้าย) ผ่านพื้นหวี และผูกเส้นด้ายเข้ากับตะกอนครบทุกเส้น แล้วจากนั้นตั้งความตึงของเส้นยืนในกี่กระตุกให้เท่ากัน เริ่มทำการทอโดยกดกระเดื่องลงเพื่อให้เส้นยืนเกิดการไขว้กัน จากนั้นนำเส้นใยธรรมชาติสอดผ่านเป็นเส้นพุ่งแล้วทำการอัดให้แน่นด้วยพื้นหวี และกดกระเดื่องอื่นเพื่อให้ตะกอนสลับกัน ทำการทอซ้ำจนได้ความยาวของผืนผ้าตามที่ต้องการแล้วจากนั้นทำการตัดเส้นยืนเพื่อแยกผ้าออกจากแกนม้วน สำหรับผ้าทอแบบเส้นใยผสมสองชนิด (Hybrid) จะใช้เส้นด้ายพุ่งที่สอดผ่านสองชนิด วางสลับกันไปในแต่ละรอบของการยกตะกอน

3.2.3.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติของเส้นใยธรรมชาติ และผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติ

ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเส้นใยธรรมชาติ และผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ ลักษณะพื้นผิวภายนอก สี จำนวนของเส้นใยในผ้าทอ (Fabric density) ความหนาของผ้าทอ น้ำหนักของผ้าทอ การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่นเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA และการทดสอบการดึงยึด (Tensile testing) ซึ่งได้สรุปแผนผังการดำเนินงานวิจัยในส่วนที่ 1 ไว้ในภาพที่ 3.1

3.2.3.2.1 จำนวนของเส้นด้ายในผ้าทอ (Fabric density) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3775 โดยนับจำนวนเส้นด้ายต่อความยาว 2 เซนติเมตร ทั้งในแนวเส้นพุ่ง และเส้นยืน บันทึกผลแล้วทำซ้ำอย่างน้อย 3 ตำแหน่ง

3.2.3.2.2 ความหนาของผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1777 โดยการวัดความหนาของผ้าแบบสุ่มจำนวน 20 ตำแหน่ง แล้วทำการหาค่าเฉลี่ยความหนาของผ้าในหน่วยมิลลิเมตร (mm)

3.2.3.2.3 น้ำหนักของผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3776 โดยตัดผ้าออกมาให้มีขนาดที่แน่นอน ทำการชั่งน้ำหนักอย่างละเอียดจำนวน 3 ครั้ง ใช้ตัวอย่างทั้งหมด 5 ชิ้นงาน แล้วหาค่าเฉลี่ยออกมาในหน่วย g/m^2

3.2.3.2.4 การดูดซึมน้ำ ทดสอบโดยการอบเส้นใยธรรมชาติ ที่อุณหภูมิ $60^{\circ}C$ เป็นเวลา 1 วันเพื่อไล่ความชื้นออกแล้วชั่งน้ำหนักแห้ง จากนั้นนำไปแช่น้ำจนครบเวลา 2 ชั่วโมง นำขึ้นมาจากน้ำชั่งน้ำหนักออกจากผิวและทิ้งไว้เป็นเวลา 1 วันเพื่อให้อยู่ในสภาวะอิมตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry) แล้วชั่งน้ำหนักอิมตัวผิวแห้ง ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย โดยค่าการดูดซึมน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{การดูดซึมน้ำ}; K = \frac{B-A}{A} \times 100$$

โดยที่ K = ค่าการดูดซึมน้ำ (%) A = น้ำหนักแห้งหลังอบ (g) B = น้ำหนักอิมตัวผิวแห้ง (g)

3.2.3.2.5 ความหนาแน่น (Density) ใช้การทดสอบหาความหนาแน่นโดยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำ โดยใช้ภาชนะบรรจุน้ำปริมาตร 80 cm^3 บันทึกน้ำหนักรวมภาชนะ จากนั้นนำเส้นใยธรรมชาติ ใส่ในภาชนะบรรจุน้ำข้างต้น

จนระดับของน้ำเพิ่มขึ้นอีก 10 cm^3 บันทึกน้ำหนักอีกครั้ง ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย โดยค่าความหนาแน่นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{ความหนาแน่น (Density); } \gamma = \frac{B-A}{10}$$

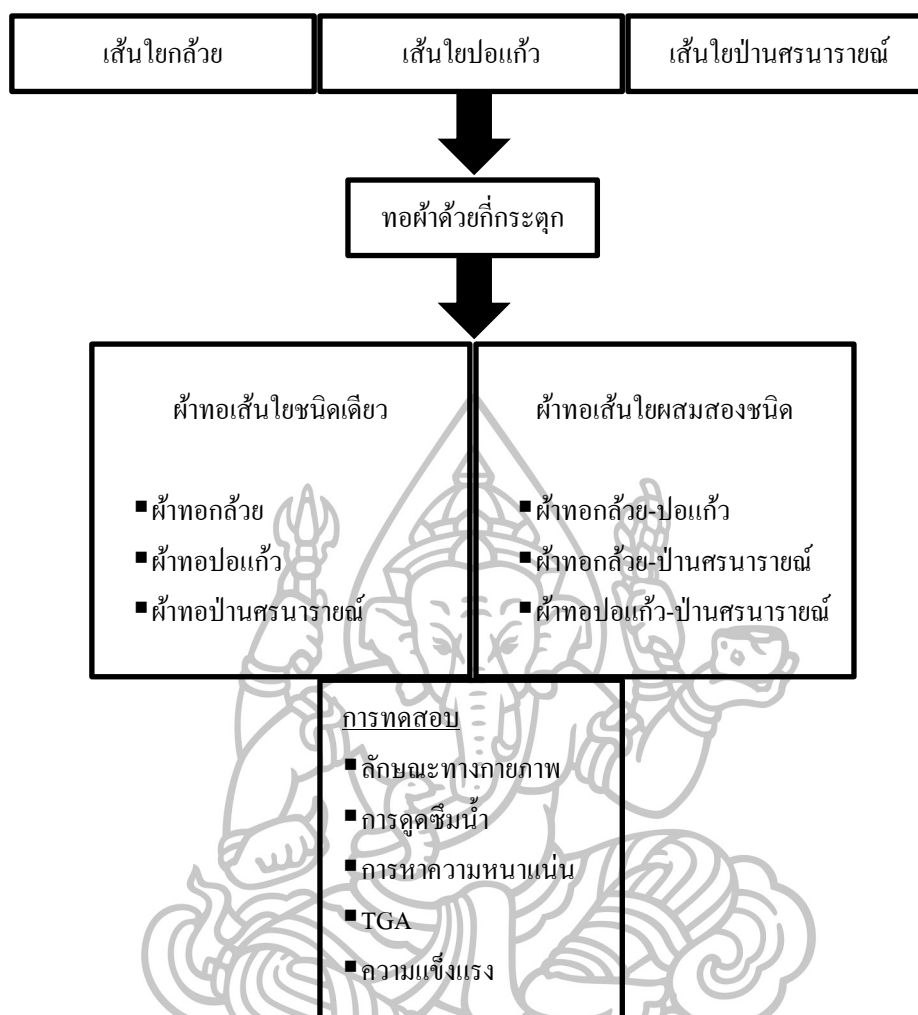
โดยที่ γ คือ ความหนาแน่น (g/cm^3), A คือ น้ำหนักก่อนใส่เส้นใยธรรมชาติ (g), B คือ น้ำหนักหลังจากใส่เส้นใยธรรมชาติ

3.2.3.2.6 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วย Thermal Gravimetric Analyze (TGA)

การทดสอบนี้จะทำการวัดน้ำหนักตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการให้ความร้อน ด้วยเครื่อง Thermal Gravimetric Analyzer (TGA) ของบริษัท Mettler, model TGA2 โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบอยู่ในช่วงตั้งแต่ $50\text{-}600^\circ\text{C}$ ที่อัตราเร็วในการให้ความร้อน $10^\circ\text{C}/\text{min}$ น้ำหนักของชิ้นงานที่ทดสอบอยู่ที่ประมาณ $3\text{-}5 \text{ mg}$ ใช้การทดสอบด้วยระบบ Temperature Scan ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ซึ่งจะได้ข้อมูลพล็อตเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของสารที่สลายตัวไป (%Weight loss) กับอุณหภูมิ ($^\circ\text{C}$)

3.2.3.2.7 การทดสอบการดึงยึด (Tensile testing) สำหรับ

ผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติใช้การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D5035 โดยมีระยะวัดเริ่มต้นที่ 75mm และให้แรงดึงคงที่ที่อัตรา $300 \text{ mm}/\text{min}$ จนชิ้นตัวอย่างขาด ชิ้นตัวอย่างผ้าทอที่ใช้มีขนาด $50 \times 150 \text{ mm}$ ซึ่งทำการทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing Machine ของบริษัท Instron Engineering Corporation, model 5969



ภาพที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในส่วนที่ 1

ส่วนที่ 2 ศึกษาผลของผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติต่อสมบัติของวัสดุไบโอคอมโพสิต

3.2.3.3 การเตรียมแผ่นพอลิแลคติกแอซิด

ทำการอบเม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดในตู้อบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อให้ความชื้นออก จากนั้นนำเม็ดพลาสติกข้างต้นใส่ในแม่พิมพ์รูปสี่เหลี่ยมขนาดความหนา 0.1 cm แล้วปิดประกบแม่พิมพ์ด้วยแผ่นพลาสติกใส (PET) กับแผ่นเหล็กหนา จากนั้นนำชุดแม่พิมพ์ข้างต้นวางลงในเครื่องกดอัดที่ตั้งอุณหภูมิอยู่ที่ 170°C ทำการให้ความร้อนก่อน (Pre heat) เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการกดอัด (Compress) ด้วยความดัน 750 psi อีกเป็นเวลา 5 นาที แล้วนำชุดแม่พิมพ์ออกจากเครื่องกดอัด ทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงเป็นเวลา 15 นาที ก่อนแกะแผ่นพอลิแลคติกแอซิดออกจากแม่พิมพ์ ซึ่งได้แสดงสภาวะการขึ้นรูปนี้ไว้ในตารางที่ 3.1

3.2.3.4 การเตรียมวัสดุไบโอคอมโพสิต

ทำการอบแผ่นพอลิแลคติกแอซิด และผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติในตู้อบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นออก จากนั้นนำแผ่นพอลิแลคติกแอซิด และผ้าทอข้างต้นใส่ในแม่พิมพ์รูปสี่เหลี่ยม โดยมีลักษณะการวางแบบแซนด์วิช (Sandwich structure) เริ่มจากแผ่นพอลิแลคติกแอซิดวางสลับกับผ้าทอจนครบ 5 ชั้น (กำหนดให้รูปแบบการวางซ้อนกันของผ้าทอมีทั้งแบบขนาน และแบบขวางกัน, Parallel and Cross ply) แล้วปิดประกบแม่พิมพ์ด้วยแผ่นพลาสติกใส (PET) กับแผ่นเหล็กหนา จากนั้นนำชุดแม่พิมพ์ข้างต้นวางลงในเครื่องกดอัดที่ตั้งอุณหภูมิอยู่ที่ 170°C เพื่อให้ความร้อนก่อนเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการกดอัดด้วยความดัน 750 psi อีกเป็นเวลา 5 นาที เมื่อครบกำหนดแล้วปิดระบบทำความร้อนทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงภายใต้แรงดันคงที่เป็นเวลามากกว่า 1 ชั่วโมง ก่อนแกะแผ่นไบโอคอมโพสิตที่ได้ออกจากแม่พิมพ์ ซึ่งได้แสดงสภาวะการขึ้นรูปนี้ไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงสภาวะการขึ้นรูปในงานวิจัย

| สภาวะการขึ้นรูป | ขั้นก่อนการกดอัด (Pre heat) | | ขั้นตอนกดอัด (Compress) | | ขั้นตอนลดอุณหภูมิ (Cooling) | |
|------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|
| | เวลา (min) | ความดัน (psi) | เวลา (min) | ความดัน (psi) | เวลา (min) | ความดัน (psi) |
| | แผ่นพอลิแลคติกแอซิด | 5 | - | 5 | 750 | 15 |
| แผ่นไบโอคอมโพสิต | 5 | - | 5 | 750 | > 60 | 750 |

3.2.3.5 การศึกษาผลของผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติต่อสมบัติของวัสดุไบโอคอมโพสิต

ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค DSC ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ศึกษาสมบัติเชิงกลกับวัสดุไบโอคอมโพสิตโดยวิธีทดสอบการดึงยืด การตัดโค้ง การกระแทก ศึกษาการดูดซึมน้ำ และศึกษาสมบัติการลุกติดไฟด้วยเทคนิค LOI และมาตรฐาน UL-94HB ซึ่งได้สรุปแผนผังการดำเนินงานวิจัยในส่วนที่ 2 ไว้ในภาพที่ 3.3

3.2.3.5.1 การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วย Differential Scanning Calorimetry (DSC)

การทดสอบนี้จะทำการวัดความแตกต่างของพลังงานที่ให้ไปเพื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิเมื่อเทียบกับตัวอ้างอิง ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC), ของบริษัท Mettler, model DSC3 โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบอยู่ในช่วงตั้งแต่ 20-180°C ที่อัตราเร็วในการให้ความร้อน 3°C/min น้ำหนักของชิ้นงานที่ทดสอบอยู่ที่ประมาณ 3-5 mg ใช้การทดสอบด้วยระบบ Heat-Cool-Reheat ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ซึ่งจะได้ข้อมูลพล็อตเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้ (J) กับอุณหภูมิ (°C)

3.2.3.5.2 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วย Thermal Gravimetric Analyze (TGA)

การทดสอบนี้จะทำการวัดน้ำหนักตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการให้ความร้อน ด้วยเครื่อง Thermal Gravimetric Analyzer (TGA) ของบริษัท Mettler, model TGA2 โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบอยู่ในช่วงตั้งแต่ 50-600°C ที่อัตราเร็วในการให้ความร้อน 10°C/min น้ำหนักของชิ้นงานที่ทดสอบอยู่ที่ประมาณ 3-5 mg ใช้การทดสอบด้วยระบบ Temperature Scan ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ซึ่งจะได้ข้อมูลพล็อตเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของสารที่สลายตัวไป (%Weight loss) กับอุณหภูมิ (°C)

3.2.3.5.3 การศึกษาสมบัติการดึงยืด (Tensile testing)

ในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 กับชิ้นตัวอย่างวัสดุไบโอคอมโพสิต โดยให้แรงดึงคงที่ที่อัตรา 2 mm/min จนชิ้นตัวอย่างขาด ด้วยเครื่อง Universal testing Machine ของบริษัท Instron Engineering Corporation, model 5969 ในระหว่างการดึงเครื่องจะทำการวัดและบันทึกค่าแรงดึงที่

เปลี่ยนไปตามระยะการยืดตัวของชิ้นตัวอย่างแล้วพล็อตเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด พร้อมทั้งคำนวณค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength), ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) และค่าโมดูลัสของยัง (Young's Modulus) ที่ความเครียดต่างๆ สำหรับรูปร่างของชิ้นตัวอย่างที่ใช้คือ ชิ้นตัวอย่างรูปทรงคัมเบลล์ (Dog bone)

3.2.3.5.4 การศึกษาสมบัติการดัดโค้ง (Flexural testing)

ในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 790 (3 point bending) ด้วยเครื่อง Universal testing Machine ของบริษัท Instron Engineering Corporation, model 5969 โดยให้แรงกดลงที่ที่อัตรา 1.36 mm/min จนชิ้นตัวอย่างบนฐานรอง (support span) หักงอเสียสภาพ ในระหว่างการกดเครื่องจะทำการวัดและบันทึกค่าแรงกดที่เปลี่ยนไปตามระยะการยืดตัวของชิ้นตัวอย่างแล้วพล็อตเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด พร้อมทั้งคำนวณค่าความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural strength) และค่าโมดูลัสการดัดโค้ง (Flexural modulus) ที่ความเครียดต่างๆ สำหรับรูปร่างของชิ้นตัวอย่างที่ใช้คือ ชิ้นตัวอย่างรูปทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular)

3.2.3.5.5 การศึกษาสมบัติการกระแทก (Impact testing)

ในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 256 (Izod mode) ด้วยเครื่อง Impact tester ของบริษัท Zwick, model B5102.202 ลูกตุ้มขนาด 4J โดยบันทึกขนาดความกว้าง ความหนาของชิ้นงานก่อนการทดสอบ และพลังงานที่ทำให้เกิดรอยแตกในหน่วยจูล (J) จากนั้นนำมาคำนวณหาค่า Impact strength (kJ/m^2) ซึ่งคำนวณมาจากค่าพลังงานต่อพื้นที่ของรอยแตก สำหรับรูปร่างของชิ้นตัวอย่างที่ใช้คือ ชิ้นตัวอย่างรูปทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีรอยบากตรงกลาง

3.2.3.5.6 การศึกษาลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยา

(Scanning Electron Microscope, SEM)

ศึกษาลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ของบริษัท Hitachi, model TM3030 โดยบันทึกภาพด้วยกำลังขยาย 50 เท่า ชิ้นตัวอย่างทำการเคลือบด้วยโลหะแพลตตินัม สำหรับบริเวณพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างที่ศึกษาคือ พื้นผิวบริเวณรอยแตกหักของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบเชิงกล

3.2.3.5.7 การศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำ (Water absorption)

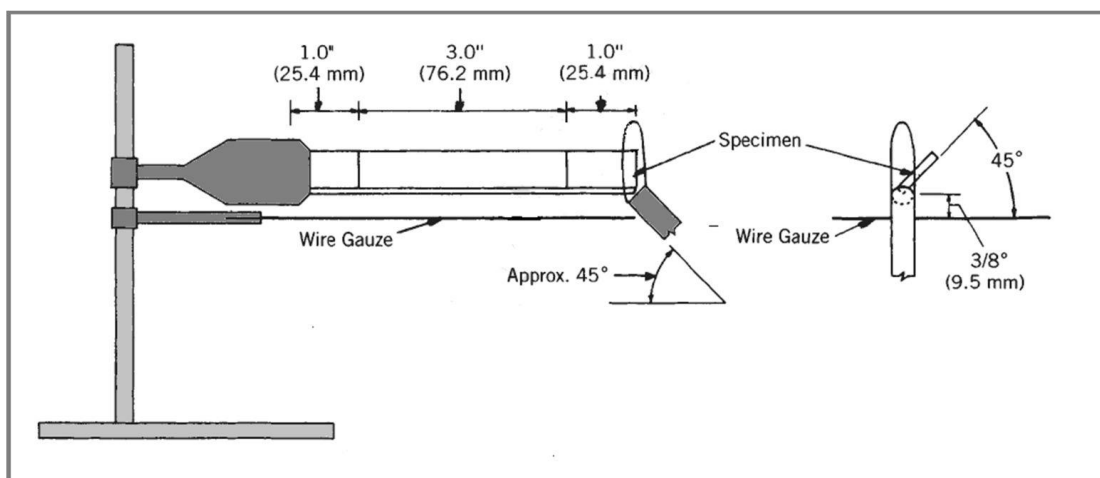
ในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 570 กับชิ้นงานตัวอย่างพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุไบโออกมโพลิต เป็นระยะเวลา 30 วัน โดยก่อนการทดสอบจะทำการอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60 C เป็นระยะเวลา 1 วัน เพื่อไล่ความชื้นออกแล้วชั่งน้ำหนักแห้งของตัวอย่างแต่ละชนิด จากนั้นทำการแช่ตัวอย่างลงในน้ำแล้วทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังจากทำการซับน้ำออกจากผิวทุก 1 วันจนครบกำหนด ทำการคำนวณหาค่าการดูดซึมน้ำ (%) ของตัวอย่างแต่ละชนิดได้จากสมการ

$$\text{การดูดซึมน้ำ: } K = \frac{B-A}{A} \times 100$$

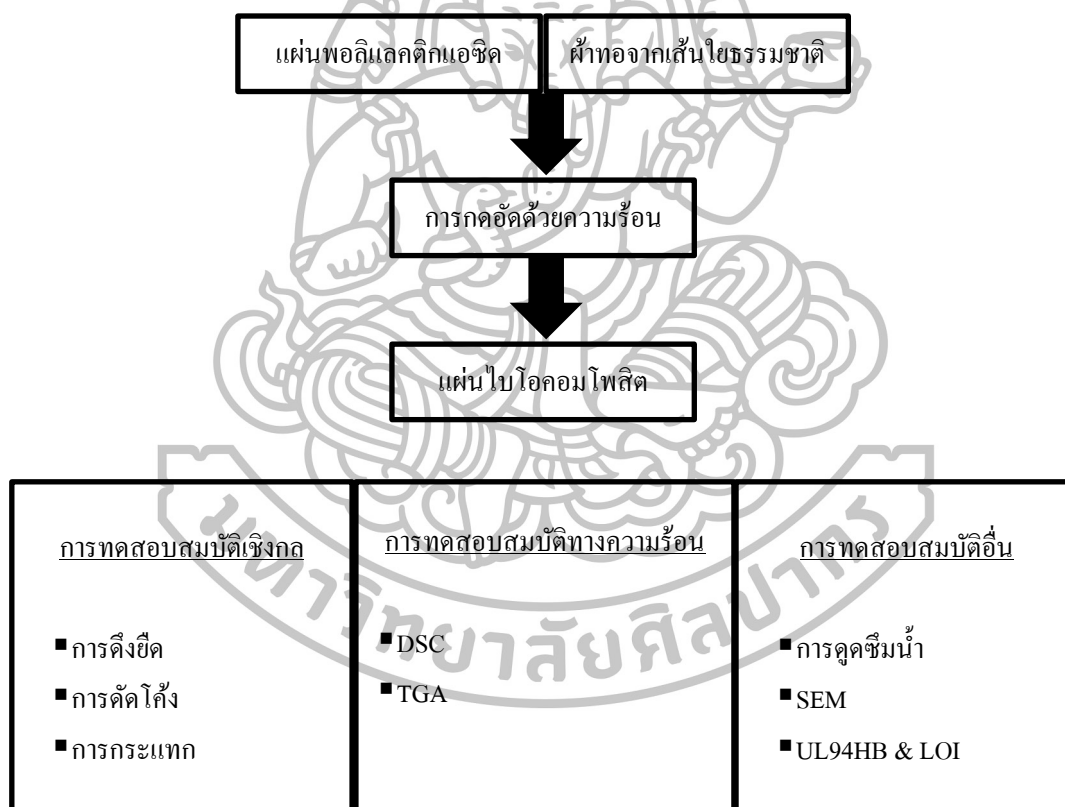
โดยที่ K = ค่าการดูดซึมน้ำ (%) A = น้ำหนักแห้งหลังอบ (g) B = น้ำหนักอิมตัวอย่างแห้ง (g)

3.2.3.5.8 การศึกษาสมบัติการลุกติดไฟ

ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบ UL-94HB (Underwriters Laboratories 94 Horizontal) ตามมาตรฐาน ASTM D3801 และทดสอบหาปริมาณออกซิเจนต่ำสุดที่ทำให้สารตัวอย่างเกิดการติดไฟ (Limiting Oxygen Index, LOI) ตามมาตรฐาน ASTM D2863 กับชิ้นงานตัวอย่างพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุไบโออกมโพลิต โดยการทดสอบ UL-94HB จะทำการตั้งชุดทดสอบดังแสดงในภาพที่ 3.2 เมื่อทดสอบจะบันทึกเวลาที่เผาไหม้ตัวอย่างในแนวนอน ตั้งแต่ระยะเริ่มต้นจนถึงจุดสิ้นสุด หรือจนกระทั่งเปลวไฟดับ แล้วนำมาคำนวณหาอัตราการลามไฟ โดยสามารถแบ่งประเภทของระดับการติดไฟได้ ตามตารางที่ 3.2 สำหรับการทดสอบหาปริมาณออกซิเจนต่ำสุดที่ทำให้สารตัวอย่างเกิดการติดไฟ จะทำการปรับปริมาณสัดส่วนของ ออกซิเจนกับ ไนโตรเจน จนกระทั่งตัวอย่างสามารถลุกติดไฟได้ หลังจากนั้นนำเปลวไฟออก โดยจะบันทึกปริมาณออกซิเจน (%) ที่ต่ำที่สุดที่ตัวอย่างใช้ในการติดไฟได้ สำหรับรูปร่างของชิ้นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบทั้งสองนี้ คือ ชิ้นตัวอย่างรูปทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก



ภาพที่ 3.2 แสดงลักษณะการตั้งชุดทดสอบการเผาไหม้โดยเทคนิค UL-94HB



ภาพที่ 3.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในส่วนที่ 2

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติต่างๆของวัสดุไบโอคอมโพสิตพอลิแลคติกแอซิด (PLA) เสริมแรงด้วยเส้นผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติแบบลายขัด (Plain weave) ที่ใช้เส้นใยธรรมชาติแบบต่างชนิด และแบบผสมกัน โดยจะทำการศึกษาสมบัติของเส้นใยธรรมชาติ กับผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติในด้านสมบัติทางกายภาพ และวัสดุไบโอคอมโพสิตในด้านสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติอื่นๆ สำหรับพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความหนาแน่นอยู่ที่ 1.24g/cm^3 เส้นใยธรรมชาติที่ใช้ทอเป็นเส้นผ้าในงานวิจัยนี้เป็นเส้นใยธรรมชาติจากแหล่งผลิตที่สามารถหาในประเทศไทยได้ จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ เส้นใยกล้วย (Banana) ปอแก้ว (Kenaf) และ ป่านศรนารายณ์ (Sisal)

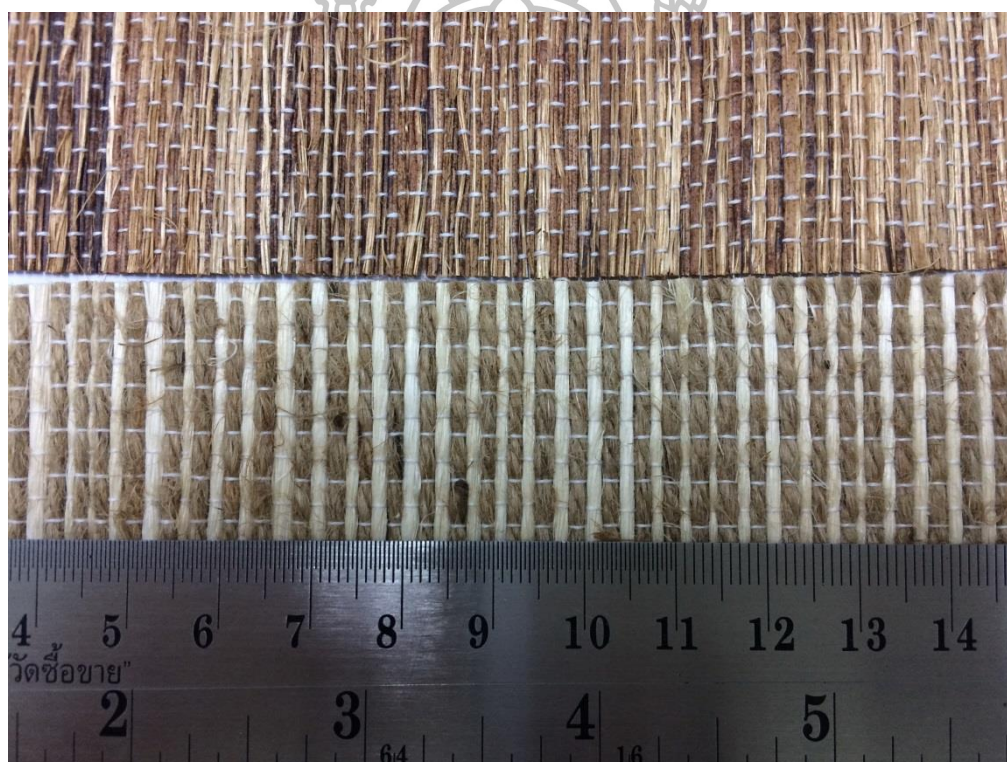
4.1 การศึกษาสมบัติของเส้นใยธรรมชาติ และผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติ

4.1.1 สมบัติของเส้นใยธรรมชาติ

ผลการทดสอบสมบัติของเส้นใยธรรมชาติที่ใช้ในการทดลองทั้งสี่ชนิด ได้แก่ เส้นด้ายฝ้าย เส้นใยกล้วย เส้นใยปอแก้ว และเส้นใยป่านศรนารายณ์ แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 พบว่าลักษณะของเส้นใยธรรมชาติที่ทำการศึกษามีลักษณะแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเส้นใยที่มีการบิดเกลียวได้แก่เส้นด้ายฝ้าย และเส้นใยปอแก้ว กับกลุ่มเส้นใยที่เป็นเส้นตรงได้แก่เส้นใยกล้วย และเส้นใยป่านศรนารายณ์ โดยสีของเส้นใยธรรมชาติมีลักษณะแตกต่างกัน คือ เส้นด้ายฝ้ายมีสีขาว เส้นใยกล้วยมีสีน้ำตาลเข้ม เส้นใยปอแก้วมีสีน้ำตาลอ่อน และเส้นใยป่านศรนารายณ์มีสีเหลืองนวล ดังจะเห็นได้จากภาพที่ 4.1 โดยขนาดและลักษณะของเส้นใยธรรมชาตินั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ พื้นที่เพาะปลูก สายพันธุ์พืช และเทคนิคการเก็บเกี่ยวเป็นต้น [27] สำหรับความหนาแน่นของเส้นใยธรรมชาติมีแนวโน้มเดียวกับงานวิจัยอื่นเช่นกัน [26,27,29] โดยความหนาแน่นของเส้นใยธรรมชาติที่มีค่าเรียงจากมากที่สุดเป็นดังนี้ เส้นใยปอแก้ว เส้นใยป่านศรนารายณ์ เส้นใยกล้วย และเส้นด้ายฝ้ายตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติ และลักษณะของเส้นใยธรรมชาติ

| ชนิดของเส้นใย | ลักษณะโครงสร้างภายนอก | ความหนาแน่น (g/cm ³) |
|---------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| เส้นด้ายฝ้าย | เส้นใยบิดเป็นเกลียว (Twisted fiber) | 0.953 |
| เส้นใยกล้วย | เส้นใยไม่บิดเกลียว (Untwisted fiber) | 0.826 |
| เส้นใยปอแก้ว | เส้นใยบิดเป็นเกลียว (Twisted fiber) | 1.260 |
| เส้นใยป่านศรนารายณ์ | เส้นใยไม่บิดเกลียว (Untwisted fiber) | 1.086 |

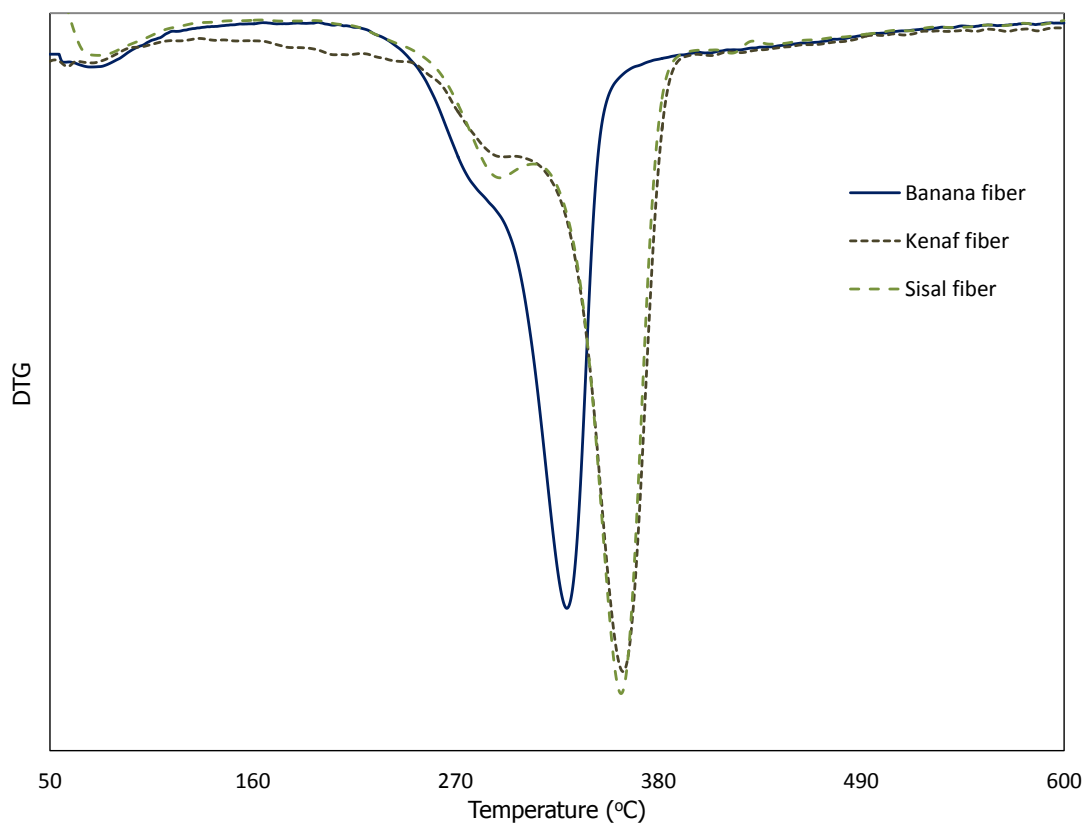
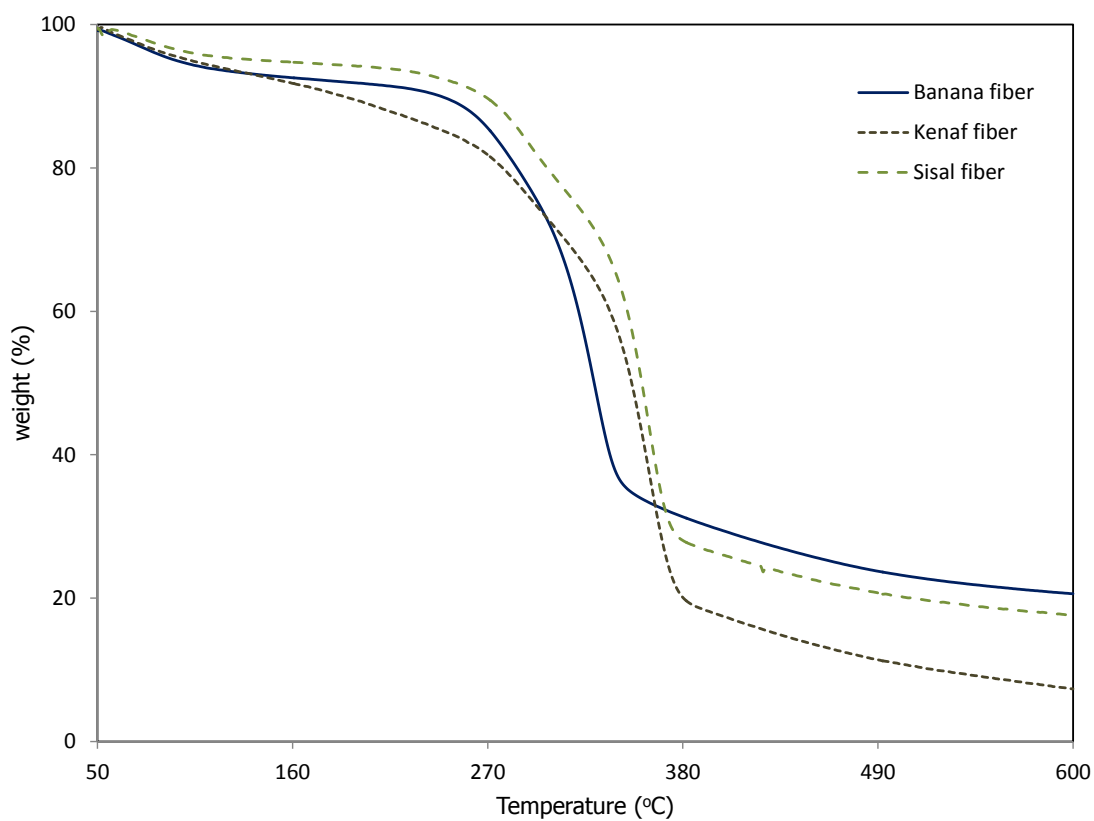


ภาพที่ 4.1 แสดงลักษณะของเส้นใยธรรมชาติในผ้าทอ: ผ้าทอเส้นใยชนิดเดี่ยว จากเส้นใยกล้วย (บน) และผ้าทอเส้นใยผสม จากเส้นใยปอแก้วกับเส้นใยป่านศรนารายณ์ (ล่าง)

4.1.2 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อน ของเส้นใยธรรมชาติด้วยเทคนิค Thermogravimetric analyze (TGA)

ผลการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของเส้นใยธรรมชาติด้วยเทคนิค TGA แสดงไว้ในภาพที่ 4.2 พบว่าเส้นใยธรรมชาติทั้งสามชนิดมีลักษณะขั้นตอนการสลายตัวที่คล้ายคลึงกัน โดยขั้นแรกเกิดจากการระเหยออกของความชื้นภายในเส้นใยธรรมชาติในช่วงอุณหภูมิ 50-150°C ขั้นที่สองจะเกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส กับพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic linkage) ของเซลลูโลสในช่วงอุณหภูมิ 250-370°C การสลายตัวของแอลฟาเซลลูโลส (α -Cellulose) ที่ช่วงอุณหภูมิ 340-370°C [55,56] และการสลายตัวของลิกนิน (Lignin) ที่ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 200-500°C [57,58] พบว่าอัตราการสลายตัวสูงสุดของเส้นใยกล้วย เส้นใยปอแก้วและเส้นใยปานสรนารายณ์ อยู่ที่อุณหภูมิ 330.70°C 361.28°C และ 360.21°C ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเส้นใยกล้วยมีความเสถียรทางความร้อนที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเส้นใยชนิดอื่นที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ สาเหตุเนื่องมาจากเส้นใยกล้วยมีปริมาณลิกนินซึ่งมีการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำ ในปริมาณมากกว่าเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่น สำหรับเศษที่เหลืออยู่ (Residue) ของเส้นใยกล้วย เส้นใยปอแก้ว และเส้นใยปานสรนารายณ์ มีค่าอยู่ที่ 23.43% 10.96% และ 20.30% ตามลำดับ ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณของลิกนินที่มีอยู่ในเส้นใยธรรมชาติ โดยเส้นใยกล้วยมีลิกนินอยู่มากที่สุด รองลงมา คือ เส้นใยปานสรนารายณ์ และเส้นใยปอแก้ว





ภาพที่ 4.2 แสดงเส้นกราฟ TGA (บน) และ DTG (ล่าง) ของเส้นใยธรรมชาติ

4.1.3 สมบัติของผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติ

ผลการทดสอบสมบัติของผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ผ้าทอเส้นใยชนิดเดียว กับผ้าทอเส้นใยแบบผสม รวมทั้งสิ้นทั้งหมดจำนวนหกชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าผ้าทอที่มีการใช้เส้นใยปอแก้วจะมีความหนาแน่นมากกว่าผ้าทอชนิดอื่นที่ไม่มีเส้นใยปอแก้วอยู่ประมาณหนึ่งเท่าตัว เพราะการใช้เส้นใยปอแก้วที่มีลักษณะบิดเกลียวแน่น เมื่อนำมาทอเป็นผ้าขนาดของกลุ่มเส้นใยปอแก้วจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ต่างจากเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่นที่ใช้การหีบกลุ่มของเส้นใยให้มีขนาดใกล้เคียงกับของปอแก้ว เมื่อให้แรงกดในการทอจะทำให้กลุ่มเส้นใยถูกบีบ และมีขนาดของกลุ่มเส้นใยเล็กลง เป็นผลให้เมื่อนำมาทอเป็นผืนผ้าแล้วจึงมีความหนาที่น้อยกว่าผ้าที่ใช้เส้นใยปอแก้ว และยังส่งผลให้ผ้าทอที่ใช้เส้นใยปอแก้วมีน้ำหนักที่มากกว่าผ้าทอที่ไม่มีเส้นใยปอแก้วอีกด้วย

สำหรับจำนวนของเส้นด้ายในผ้าทอ (Fabric density) พบว่าในแนวด้ายยืนมีจำนวนของเส้นด้ายฝ้ายอยู่เท่ากันในทุกรูปแบบ เนื่องมาจากการกำหนดระยะห่างของเส้นด้ายฝ้ายที่ร้อยผ่านพื้นหวี และตะกอกของกี่กระตุก ในกระบวนการทอผ้า แต่ในแนวด้ายพุ่งจำนวนของกลุ่มเส้นใยจะมีความแตกต่างกัน เพราะวากลุ่มเส้นใยกล้วย และเส้นใยป่านศรนารายณ์ ในผ้าทอเกิดจากการหีบด้วยมือให้มีขนาดใกล้เคียงกับเส้นใยปอแก้ว แต่เส้นใยปอแก้วเป็นกลุ่มเส้นใยที่มีการบิดเกลียวแน่น โดยพบว่าผ้าทอที่มีเส้นใยปอแก้วมีจำนวนกลุ่มเส้นใยในผ้าทออยู่ที่ประมาณ 10-13 กลุ่ม/2cm แต่ในผ้าทอชนิดอื่นที่ไม่มีเส้นใยปอแก้วจะมีจำนวนกลุ่มเส้นใยในผ้าทออยู่ที่ประมาณ 16-18 กลุ่ม/2cm

เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของผ้าทอด้วยการทดสอบการดึงยึด (Tensile test) พบว่า ในผ้าทอเส้นใยชนิดเดียว ผ้าทอเส้นใยป่านศรนารายณ์ มีความแข็งแรงกว่าผ้าทอเส้นใยกล้วย และผ้าทอเส้นใยปอแก้วตามลำดับ เนื่องจากการที่เส้นใยป่านศรนารายณ์มีปริมาณของเซลลูโลสที่มีความเป็นผลึกสูง และมีเฮมิเซลลูโลสที่มีความเป็นอสัณฐานต่ำกว่าเส้นใยชนิดอื่น ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Mei-po Ho และคณะ [26] ที่พบว่าเส้นใยป่านศรนารายณ์มีความแข็งแรงที่มากกว่าเส้นใยกล้วย และเส้นใยปอแก้ว เนื่องมาจากปริมาณของเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบในเส้นใยที่แตกต่างกัน และสำหรับในผ้าทอเส้นใยแบบผสม พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับผ้าทอเส้นใยชนิดเดียว กล่าวคือ ผ้าทอป่านศรนารายณ์-กล้วย มีความแข็งแรงมากกว่าผ้าทอกล้วย-ปอแก้ว และผ้าทอป่านศรนารายณ์-ปอแก้วตามลำดับ อันเนื่องมาจากผลของปริมาณเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสในเส้นใยดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติ และลักษณะของผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติ

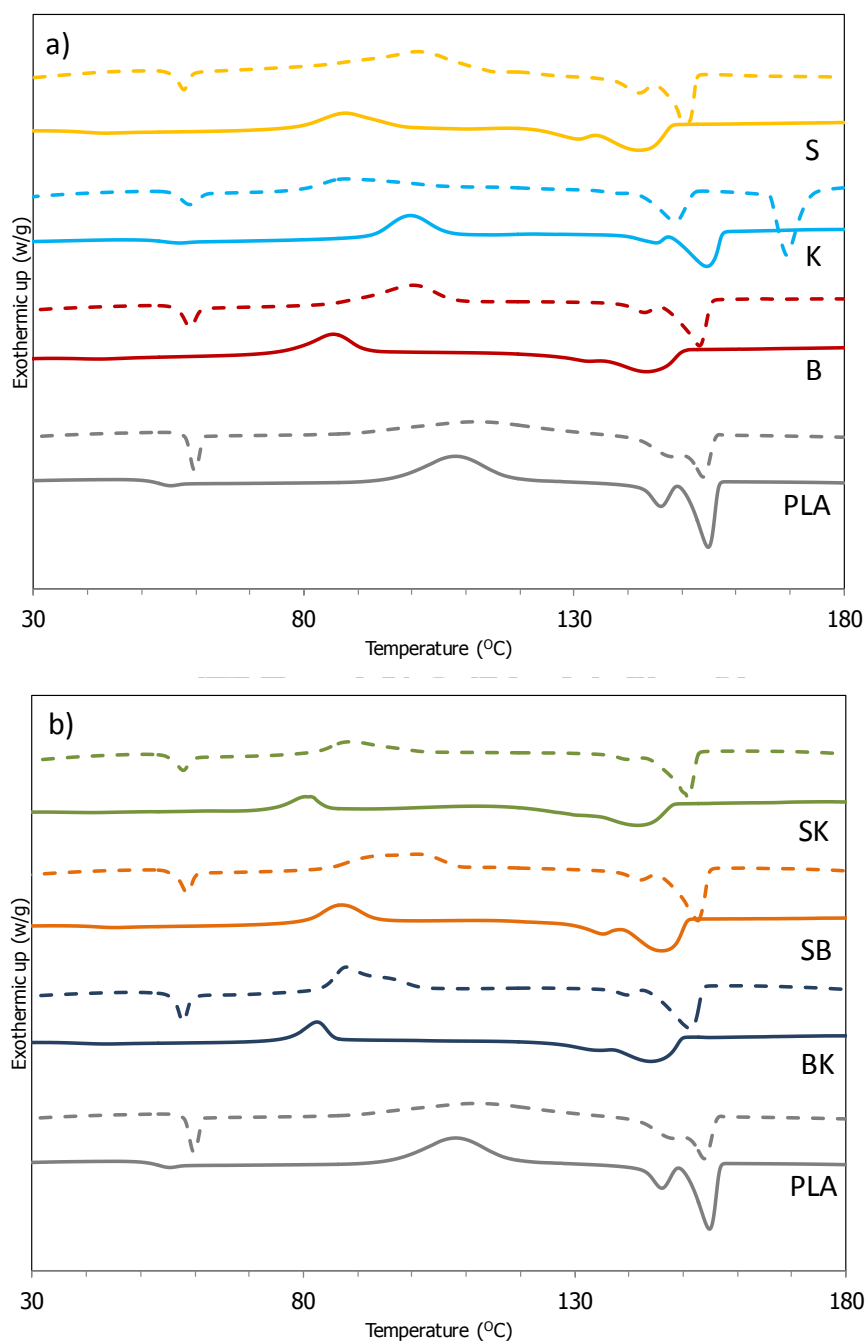
| ชนิดของผ้าทอ | ความหนาของผ้า ทอเฉลี่ย (mm) | น้ำหนักของผ้า ทอเฉลี่ย (g/m ²) | จำนวนของเส้นด้ายในผ้าทอเฉลี่ย | | Tensile strength (MPa) | Modulus (GPa) | Elongation at break (%) |
|------------------------------------|--------------------------------|---|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------|------------------|----------------------------|
| | | | (Fabric density, per 2 cm) | | | | |
| | | | แนวด้ายยืน (เส้นด้ายฝ้าย) | แนวด้ายพุ่ง (เส้นใยธรรมชาติ) | | | |
| ผ้าทอเส้นใย กล้วย | 0.885 | 219.30 | 9 | 16 | 33.88 | 1.83 | 21.54 |
| ผ้าทอเส้นใย ปอแก้ว | 1.537 | 375.30 | 9 | 10 | 25.61 | 0.74 | 28.96 |
| ผ้าทอเส้นใย ปานศรณารายณ์ | 0.643 | 226.80 | 9 | 18 | 58.03 | 1.37 | 56.86 |
| ผ้าทอเส้นใย ปานศรณารายณ์-กล้วย | 0.734 | 239.90 | 9 | 17 | 49.39 | 1.75 | 16.98 |
| ผ้าทอเส้นใย ปานศรณารายณ์-ปอแก้ว | 1.420 | 441.60 | 9 | 12 | 27.06 | 0.67 | 20.05 |
| ผ้าทอเส้นใย กล้วย-ปอแก้ว | 1.316 | 531.00 | 9 | 13 | 29.77 | 0.71 | 19.48 |

4.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุไบโอคอมโพสิต

4.2.1 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุไบโอคอมโพสิตด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)

ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุไบโอคอมโพสิตด้วยเทคนิค DSC แสดงไว้ในภาพที่ 4.3 ในการให้ความร้อนครั้งที่ 2 พบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วอยู่ที่ (T_g) 51.82°C อุณหภูมิการตกผลึกซ้ำ (T_c) อยู่ที่ 108°C และอุณหภูมิการหลอมเหลวอยู่ที่ 154.78°C ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Intan S.M.A. Tawakkal และคณะ [52] ที่พบว่าพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วที่ 61.7°C อุณหภูมิการตกผลึกซ้ำที่ 107.8°C และอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ 152.5°C ตามลำดับสำหรับพอลิแลคติกแอซิดในวัสดุไบโอคอมโพสิตทุกชนิด มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิการตกผลึกซ้ำ และอุณหภูมิการหลอมเหลว ซึ่งแสดงผลไว้ในตารางที่ 4.3 ต่ำกว่าพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ เป็นผลเนื่องมาจากเส้นใยธรรมชาติภายในวัสดุไบโอคอมโพสิต ที่ช่วยให้พอลิแลคติกแอซิดสามารถเกิดผลึกซ้ำขณะให้ความร้อนได้ง่ายขึ้น จึงใช้พลังงานที่ลดลง และส่งผลให้ปริมาตรอิสระ (Free volume) เพิ่มขึ้น สายโซ่โมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิดสามารถเกิดการขยับได้ง่ายขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับงานวิจัยอื่น เช่น ในงานวิจัยของ Rahman และคณะ [51] ที่พบว่าค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของวัสดุพอลิแลคติกแอซิดที่ผสมเส้นใยธรรมชาติมีค่าน้อยกว่าพอลิแลคติกบริสุทธิ์





ภาพที่ 4.3 แสดงเส้นกราฟ DSC ของการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (เส้นประ) และครั้งที่ 2 (เส้นทึบ) ; (a) คือ พอลิแลคติกแอซิด (PLA) เปรียบเทียบกับวัสดุไบโอคอมโพลิตที่ใช้ผ้าทอเส้นใยกล้วย (B) วัสดุไบโอคอมโพลิตที่ใช้ผ้าทอเส้นใยปอแก้ว (K) วัสดุไบโอคอมโพลิตที่ใช้ผ้าทอเส้นใยป่านศรนารายณ์ (S) และ (b) คือ พอลิแลคติกแอซิดเปรียบเทียบกับ วัสดุไบโอคอมโพลิตที่ใช้ผ้าทอเส้นใยกล้วย-ปอแก้ว (BK) วัสดุไบโอคอมโพลิตที่ใช้ผ้าทอเส้นใยป่านศรนารายณ์-กล้วย (SB) วัสดุไบโอคอมโพลิตที่ใช้ผ้าทอเส้นใยป่านศรนารายณ์-ปอแก้ว (SK) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิการตกผลึกซ้ำ (T_{cc}) และอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุไบโอคอมโพสิต ในการให้ความร้อนครั้งที่ 2

| Sample | T_g (°C) | T_{cc} (°C) | T_{m1} (°C) | T_{m2} (°C) |
|------------------------|------------|---------------|---------------|---------------|
| PLA | 51.82 | 108.07 | 146.02 | 154.78 |
| Banana composite | 42.96 | 85.37 | 132.10 | 143.54 |
| Kenaf composite | 52.89 | 99.74 | 145.20 | 154.56 |
| Sisal composite | 41.91 | 87.72 | 130.44 | 142.27 |
| Sisal-Banana composite | 42.00 | 87.02 | 134.99 | 145.97 |
| Sisal-Kenaf composite | 42.11 | 80.41 | 129.94 | 141.73 |
| Banana-Kenaf composite | 41.11 | 82.52 | 133.34 | 144.12 |

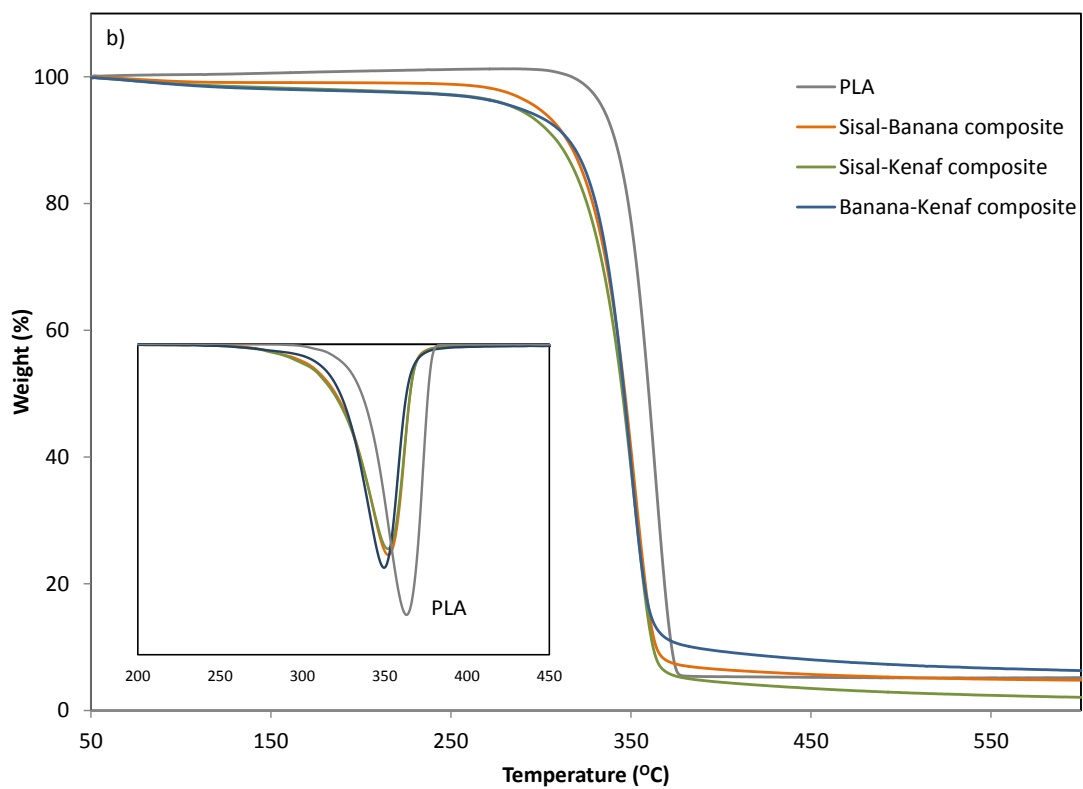
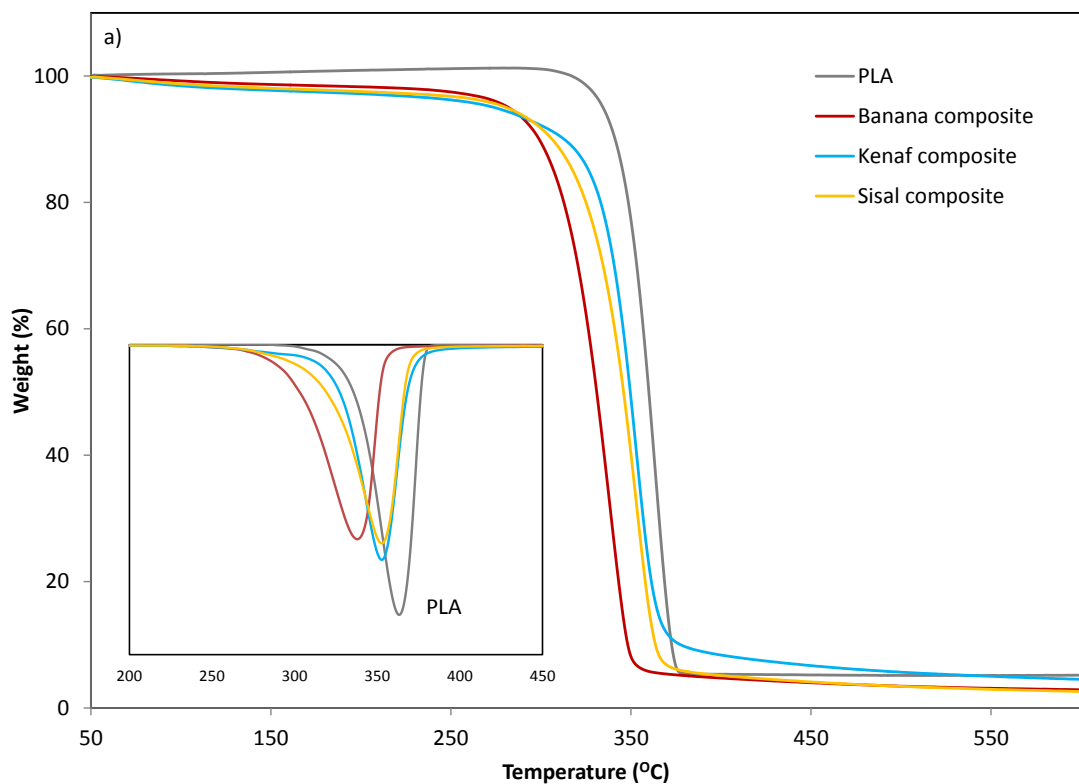
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าอุณหภูมิขณะสูญเสียน้ำหนักไป ณ ปริมาณต่างๆ และค่าที่เหลืออยู่ (Residue) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุไบโอคอมโพสิต

| Sample | $T_{5\%}$ (°C) | $T_{25\%}$ (°C) | $T_{50\%}$ (°C) | $T_{75\%}$ (°C) | Residue (%) |
|------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|
| PLA | 334.50 | 351.17 | 360.00 | 367.17 | 5.34 |
| Banana composite | 282.17 | 317.00 | 331.00 | 341.17 | 5.40 |
| Kenaf composite | 274.50 | 337.50 | 349.67 | 358.83 | 8.57 |
| Sisal composite | 281.00 | 330.33 | 346.00 | 356.00 | 5.31 |
| Sisal-Banana composite | 298.67 | 333.17 | 346.67 | 356.00 | 6.49 |
| Sisal-Kenaf composite | 286.50 | 330.50 | 345.33 | 355.00 | 4.46 |
| Banana-Kenaf composite | 288.17 | 334.50 | 346.17 | 355.00 | 9.29 |

4.2.2 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อน ของวัสดุไบโอคอมโพสิตด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)

ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุไบโอคอมโพสิต ด้วยเทคนิค TGA แสดงไว้ในภาพที่ 4.4 พบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีขั้นตอนการสลายตัวเพียงขั้นตอนเดียวโดยเริ่มสลายตัวตั้งแต่อุณหภูมิ 346 °C ถึง 374°C และสลายตัวสูงสุดอยู่ที่อุณหภูมิ 364°C แต่ในวัสดุไบโอคอมโพสิตมีการสลายตัวของพอลิแลคติกแอซิด และเส้นใยธรรมชาติเกิดควบคู่กัน โดยในเส้นใยธรรมชาติช่วงแรกเกิดการระเหยออกของความชื้นที่เหลืออยู่ในเส้นใยธรรมชาติในช่วงอุณหภูมิ 50-150°C ขั้นที่สองเกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส กับพันธะไกลโคไซด์ของเซลลูโลสในช่วงอุณหภูมิ 250-370°C การสลายตัวของแอลฟาเซลลูโลสในช่วงอุณหภูมิ 340-370°C และการสลายตัวของลิกนินในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 200-500°C หลังจากนั้นสิ่งที่เหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้จะกลายเป็นเถ้า โดยเมื่อพิจารณาพอลิแลคติกแอซิดในวัสดุไบโอคอมโพสิตพบว่ามีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำ และกว้างกว่าพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ ดังจะเห็นได้จากภาพที่ 4.4 และตารางที่ 4.4 เนื่องมาจากผลของความชื้นในเส้นใยธรรมชาติช่วยทำให้พอลิแลคติกแอซิดเกิดการสลายตัวได้เร็วขึ้น และผลของเส้นใยธรรมชาติมีความเสถียรต่อความร้อนที่ต่ำกว่าพอลิแลคติกแอซิด ทำให้การใช้เส้นใยธรรมชาติส่งผลให้วัสดุไบโอคอมโพสิตมีความเสถียรทางความร้อนที่ต่ำกว่าพอลิแลคติกแอซิด

เมื่อพิจารณาวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ช่วงการสูญเสียน้ำหนักไป 50% พบว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วยมีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำที่สุด 331°C แต่วัสดุไบโอคอมโพสิตชนิดอื่นมีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงกว่าที่ 345-350°C และในพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ 360°C สาเหตุเนื่องมาจากเส้นใยกล้วยมีปริมาณลิกนินที่มีการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำ ในปริมาณมากกว่าเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่น สำหรับเถ้าที่เหลืออยู่ของพอลิแลคติกแอซิดอยู่ที่ 5.34% และสำหรับวัสดุไบโอคอมโพสิตมีเศษเหลือสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิดโดยอยู่ในช่วง 5-10% เนื่องจากลิกนินภายในเส้นใยธรรมชาติที่มีหมู่อะโรมาติก (Aromatic) สามารถเกิดเป็นสารประกอบประเภท Carbonaceous ที่ทนต่อการสลายตัวทางความร้อนมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Intan S.M.A. Tawakkal และคณะ [52] ที่พบว่าวัสดุคอมโพสิตพอลิแลคติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอแก้ว มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ลดลงและมีเถ้าเหลืออยู่มากกว่า พอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์เช่นกัน



ภาพที่ 4.4 แสดงเส้นกราฟ TGA และ DTG ของพอลิแลคติกแอซิดกับวัสดุไบโอคอมโพสิต

4.3 การศึกษาผลของผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุไบโอคอมโพสิต

4.3.1 ผลของการเสริมแรงด้วยผ้าทอที่วางแบบขนานต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุไบโอคอมโพสิต

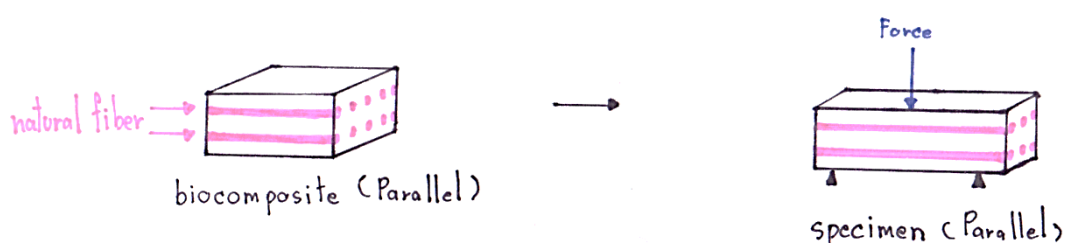
สมบัติของเส้นใยธรรมชาติและผ้าทอได้ทำการศึกษาแล้วในหัวข้อที่ 4.1 ข้างต้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทำการศึกษาผลของการเสริมแรงด้วยผ้าทอที่วางแบบขนาน (Parallel) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุไบโอคอมโพสิต โดยจะทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด ซึ่งประกอบไปด้วยผลการทดสอบ สมบัติการดัดโค้ง (Flexural properties) สมบัติการดึงยึด (Tensile properties) และสมบัติการกระทบ (Impact properties)

4.3.1.1 ผลของการเสริมแรงด้วยผ้าทอแบบชนิดเดียว

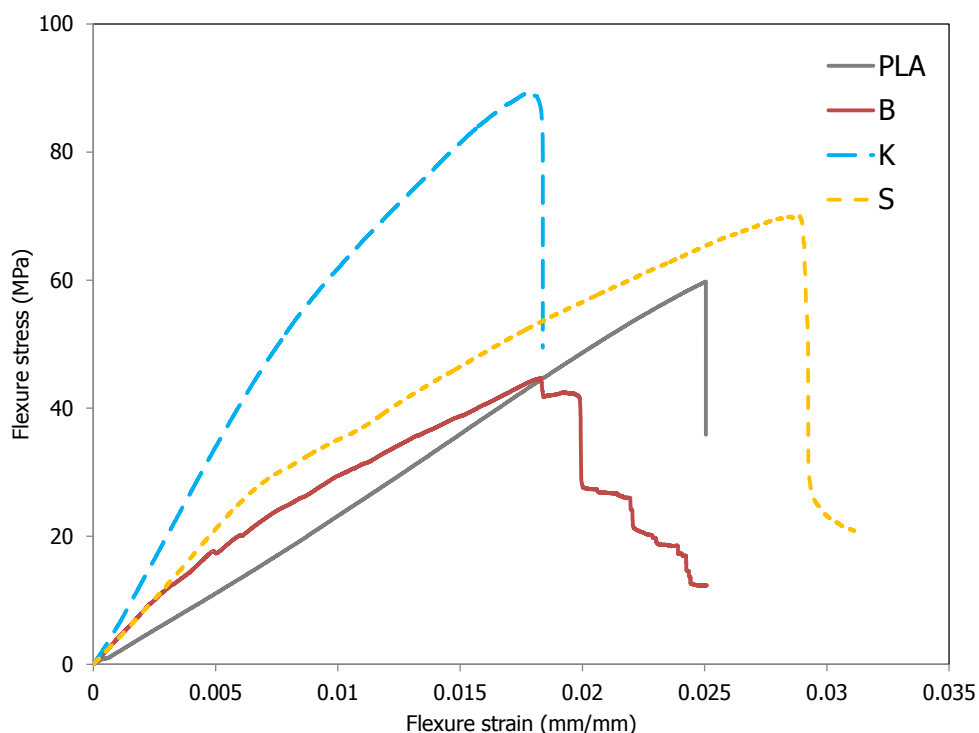
วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอแบบชนิดเดียวเสริมแรง ที่วางในแนวขนานกัน ในส่วนนี้มีทั้งหมด 3 ชนิดได้แก่ วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย (B) วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว (K) วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอป่านศรนารายณ์ (S) ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์แทนด้วยตัวอักษรในวงเล็บด้านท้าย

4.3.1.1.1 การศึกษาสมบัติการดัดโค้งของวัสดุไบโอคอมโพสิต

สมบัติการดัดโค้งของวัสดุไบโอคอมโพสิตสามารถบ่งบอกถึงความทนทานต่อแรงที่ทำให้วัสดุเกิดการโค้งงอได้ ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญสำหรับวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ในงานบางประเภทที่ต้องรับแรงเฉพาะ เช่น งานด้านโครงสร้าง โดยขณะทดสอบเมื่อให้แรงกดกับชิ้นตัวอย่างจะทำให้เกิดแรงดึง (Tensile Force) ที่บริเวณด้านล่าง และเกิดแรงอัด (Compressive Force) ที่บริเวณด้านบนของชิ้นตัวอย่าง ดังนั้นชิ้นตัวอย่างของวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ทำทดสอบการดัดโค้งในงานวิจัยนี้จึงทำการจัดเรียงให้เส้นใยธรรมชาติเป็นไปดังภาพที่ 4.5 เพื่อให้สามารถรับแรงได้ดีที่สุด



ภาพที่ 4.5 แสดงลักษณะทิศทางของเส้นใยธรรมชาติภายในวัสดุไบโอคอมโพสิต และแรงกระทำในการทดสอบการดัดโค้ง

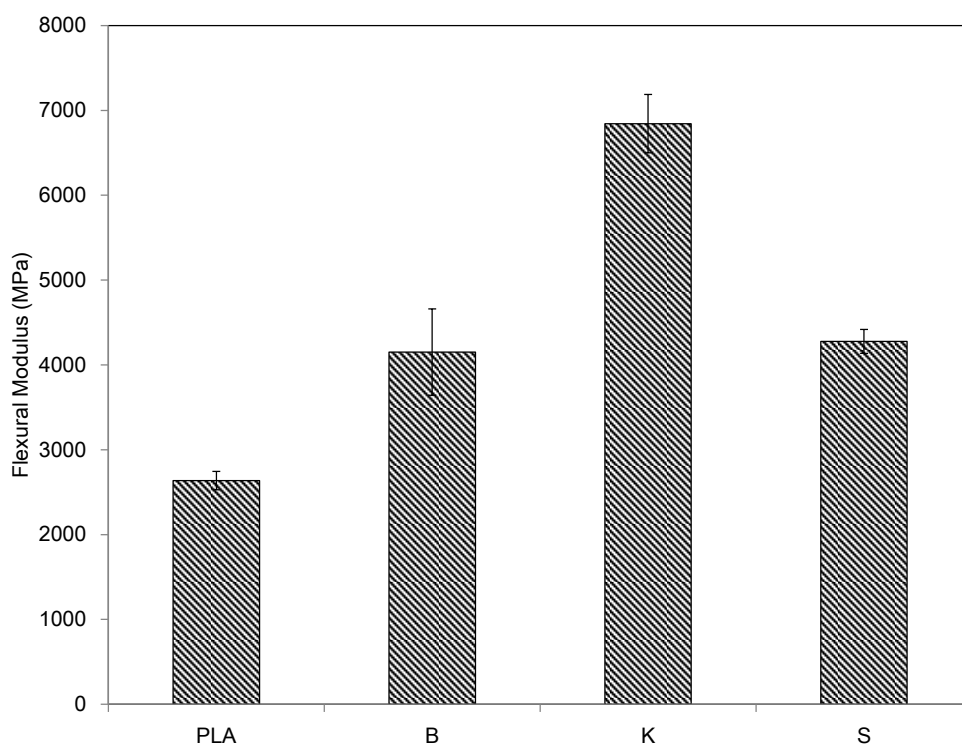


ภาพที่ 4.6 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดของการดัดโค้ง (Flexural Stress-Strain curve) ของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด

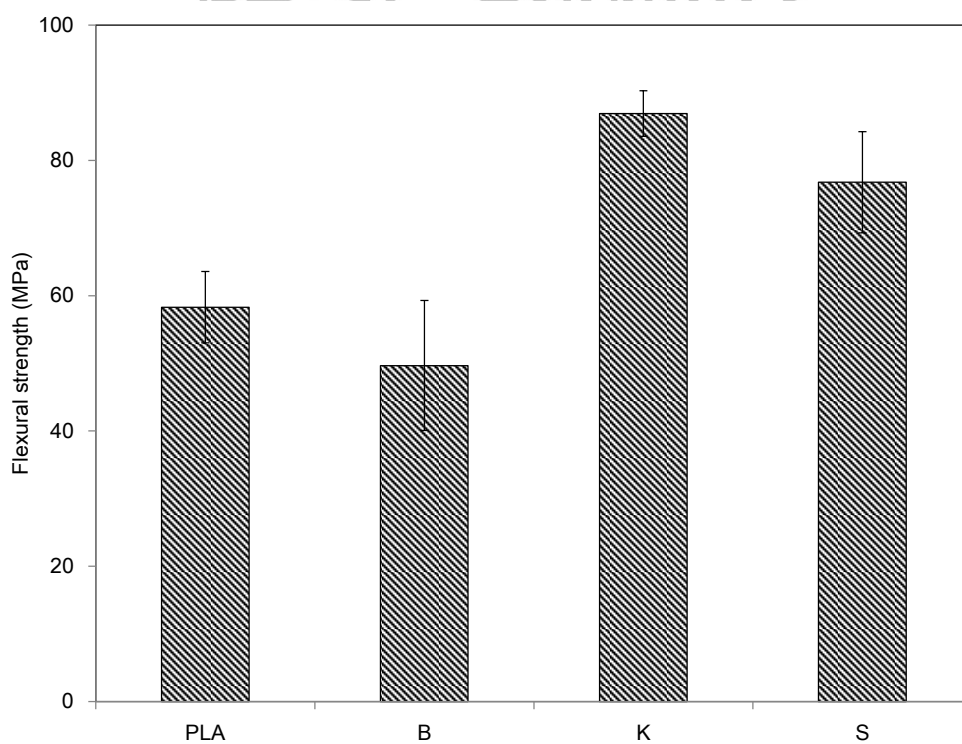
จากกราฟแสดงความเค้น-ความเครียดของการดัดโค้งในภาพที่ 4.6 พบว่าทั้งใน พอลิแลคติกแอซิด และวัสดุไบโอคอมโพสิตทั้งหมดมีลักษณะการแตกหักแบบเปราะ (Brittle Fracture) เช่นเดียวกัน โดยในพอลิแลคติกแอซิด วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว (K) เมื่อให้แรงจนถึงจุดวิกฤติจะเกิดการหักงอเสียหายไปในทันที แต่ในวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย (B) และที่ใช้ผ้าทอปานศรนารายณ์ (S) ยังมีการโค้งงอต่อไปได้อีกอีกหลังจากเริ่มมีการเสียหาย เมื่อพิจารณาพบว่าในขณะที่ให้แรง จะมีการแตกร้าวของพื้นผิวพอลิแลคติกแอซิดในส่วนด้านล่างที่รับแรงดึง (Tension force) เกิดขึ้น แต่เส้นใยธรรมชาติที่อยู่ภายในยังสามารถทำการรับแรงต่อไปได้อีกจนกระทั่งวัสดุไบโอคอมโพสิตโค้งงอมากพอที่เส้นใยธรรมชาติเกิดการหลุดออก (Fiber pulled out) จำนวนมากพอที่จะทำให้ไม่สามารถรับแรงได้อีกต่อไป ดังจะเห็นได้จากภาพหลักฐานวิทยาที่แสดงการขาด และหลุดออกของเส้นใยธรรมชาติในภาพที่ 4.9

จากกราฟค่าโมดูลัสการตัดโค้ง และค่าความต้านทานต่อการตัดโค้งในภาพที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ พบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีค่าโมดูลัสการตัดโค้งที่น้อยกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตทั้งสามชนิด เนื่องจากพอลิแลคติกแอซิดมีความเปราะที่มากกว่าเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งในวัสดุไบโอคอมโพสิตใช้ผ้าทอปอแก้วมีค่าโมดูลัสการตัดโค้งเพิ่มสูงขึ้นมากที่สุด โดยมีค่ามากกว่าพอลิแลคติกแอซิดอยู่ 159.58% และวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย กับที่ใช้ผ้าทอป่านศรนารายณ์ มีค่าโมดูลัสการตัดโค้งสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิดอยู่ 57.43% และ 62.19% ตามลำดับ

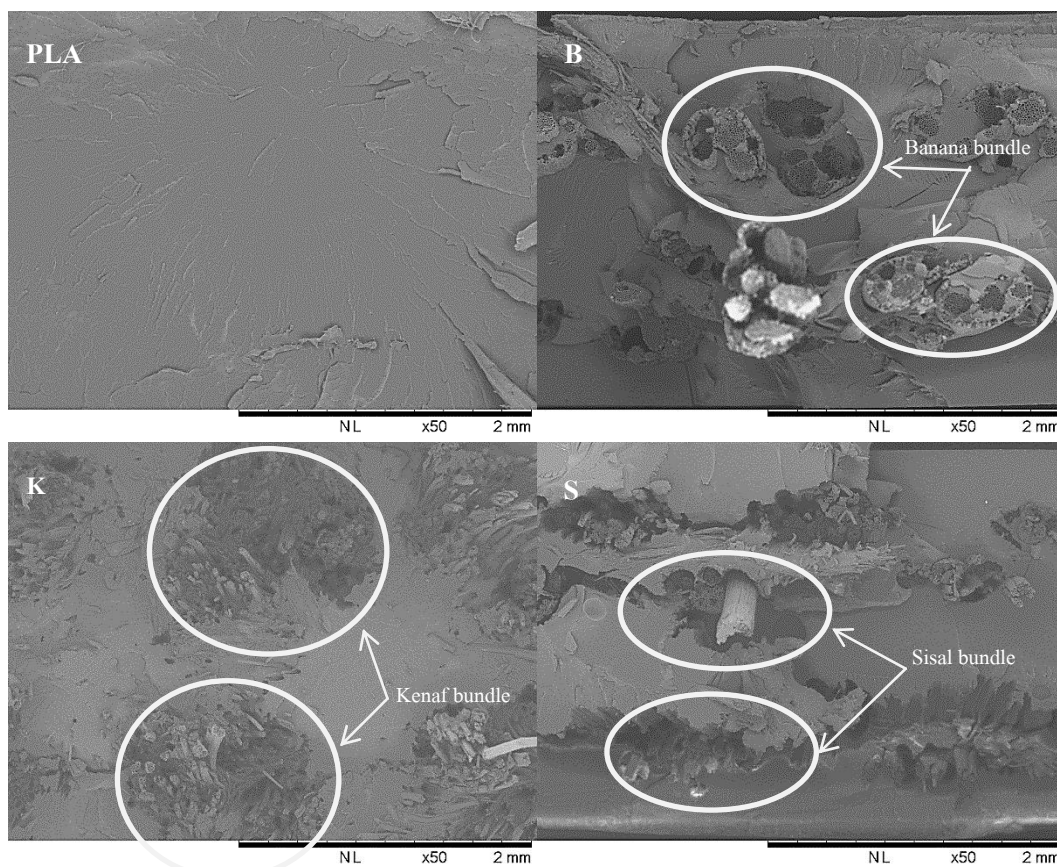
สำหรับค่าความต้านทานต่อการตัดโค้งของพอลิแลคติกแอซิดมีค่าต่ำกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปอแก้วและที่ใช้ผ้าทอป่านศรนารายณ์อยู่ 49.09% และ 31.68% ตามลำดับแต่สูงกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตใช้ผ้าทอกล้วย 14.80% ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสัญญาณวิทยาในภาพที่ 4.9 จะเห็นว่าผ้าทอที่วางในแนวขนาน (Parallel) ภายในวัสดุไบโอคอมโพสิตมีการขาดเกิดขึ้นทั้งด้านบนและด้านล่างในลักษณะเดียวกันโดยพบว่าสาเหตุการเสียหายของวัสดุไบโอคอมโพสิตเกิดจากแรงเค้นที่ถูกส่งผ่านจากเมตริกซ์พอลิแลคติกแอซิดไปยังเส้นใยธรรมชาติมีมากกว่าแรงที่ยึดติดกันระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับเมตริกซ์ ทำให้เส้นใยธรรมชาติเกิดการแยกจากเมตริกซ์ (Debonding) จากนั้นแรงเค้นที่เหลืออยู่จะกระจายไปในเส้นใยธรรมชาติทำให้หลุดออกจากพื้นผิวเมตริกซ์ (Fiber pull out) และเนื่องจากความแข็งแรงของเส้นใยธรรมชาติมีค่าสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิด จึงทำให้ความแข็งแรงของวัสดุไบโอคอมโพสิตนั้นถูกควบคุมโดยความแข็งแรงของเส้นใยธรรมชาติที่เสริมแรงอยู่ภายในมากกว่าพอลิแลคติกแอซิดที่เป็นเมตริกซ์ มีผลให้วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว ซึ่งมีกลุ่มเส้นใยธรรมชาติขนาดใหญ่กว่าเส้นใยธรรมชาติอื่นดังแสดงในภาพที่ 4.9 จึงแสดงความแข็งแรงที่ดีกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตชนิดอื่น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ V.P. Arthanarieswaran และคณะ [45] ที่พบว่าการใช้เส้นใยป่านศรนารายณ์ ทำให้วัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรงมากกว่าเส้นใยกล้วย เพราะที่เส้นใยป่านศรนารายณ์มีความแข็งแรงที่ดีกว่าเส้นใยกล้วย และจากงานวิจัยของ A. Alavudeen และคณะ [46] ที่พบว่าวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยปอแก้วมีความแข็งแรงสูงกว่าเส้นใยกล้วย เนื่องมาจากความแข็งแรงของเส้นใยปอแก้วที่มีค่าสูงกว่าเส้นใยกล้วย



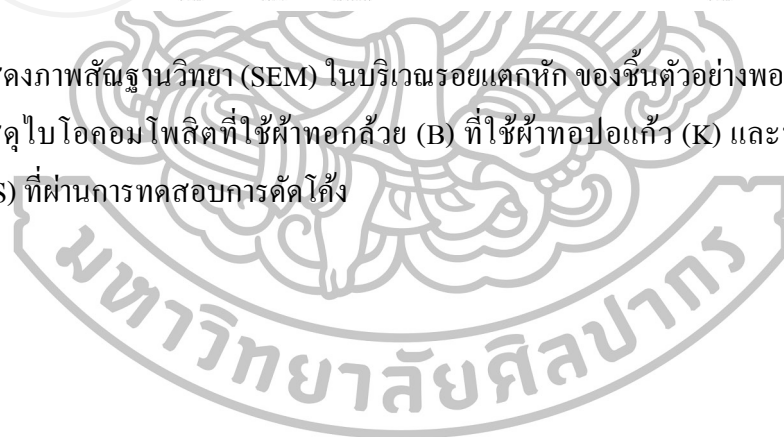
ภาพที่ 4.7 แสดงค่าโมดูลัสการดัดโค้ง ของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด



ภาพที่ 4.8 แสดงค่าความต้านทานต่อการดัดโค้ง ของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด

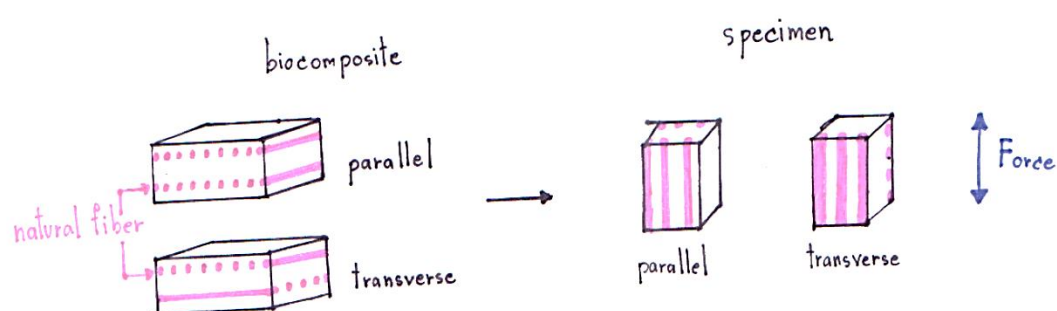


ภาพที่ 4.9 แสดงภาพสัณฐานวิทยา (SEM) ในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย (B) ที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว (K) และที่ใช้ผ้าทอปานศรนารายณ์ (S) ที่ผ่านการทดสอบการตัดโค้ง



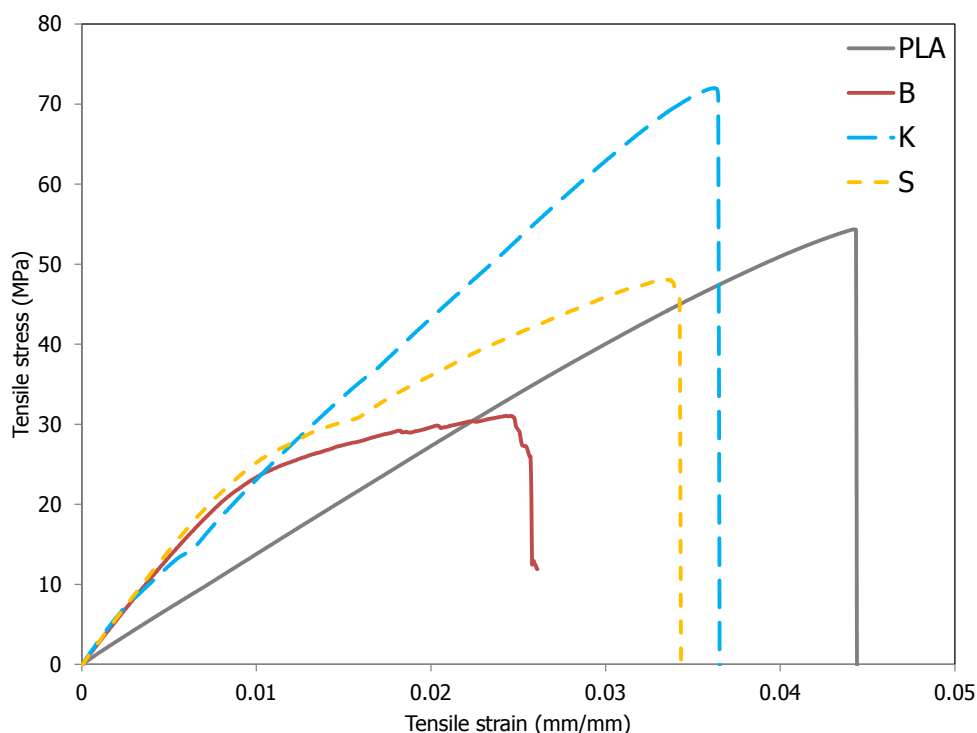
4.3.1.1.2 การศึกษาสมบัติการดึงยึดของวัสดุไบโอคอมโพสิต

สมบัติการดึงยึดของวัสดุไบโอคอมโพสิตสามารถบ่งบอกถึงความทนทานต่อแรงกระทำที่ทำให้วัสดุเกิดการยืดออกได้ ซึ่งถือเป็นสมบัติพื้นฐานอย่างหนึ่ง ที่มีการทดสอบอย่างแพร่หลาย โดยในขณะทดสอบจะทำการวัดแรงดึงไปพร้อมกับระยะที่ยืดออกของชิ้นตัวอย่าง ดังนั้นชิ้นตัวอย่างของวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ทำทดสอบการดึงยึดในงานวิจัยนี้จึงทำการจัดเรียงให้เส้นใยธรรมชาติที่สนใจศึกษาอยู่ในทิศทางเดียวกับแรงดึง เพื่อให้รับแรงดึงที่เกิดขึ้นในขณะทดสอบการดึงยึดดังแสดงในภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 แสดงลักษณะทิศทางของเส้นใยธรรมชาติภายในวัสดุไบโอคอมโพสิต และแรงกระทำในการทดสอบการดึงยึด



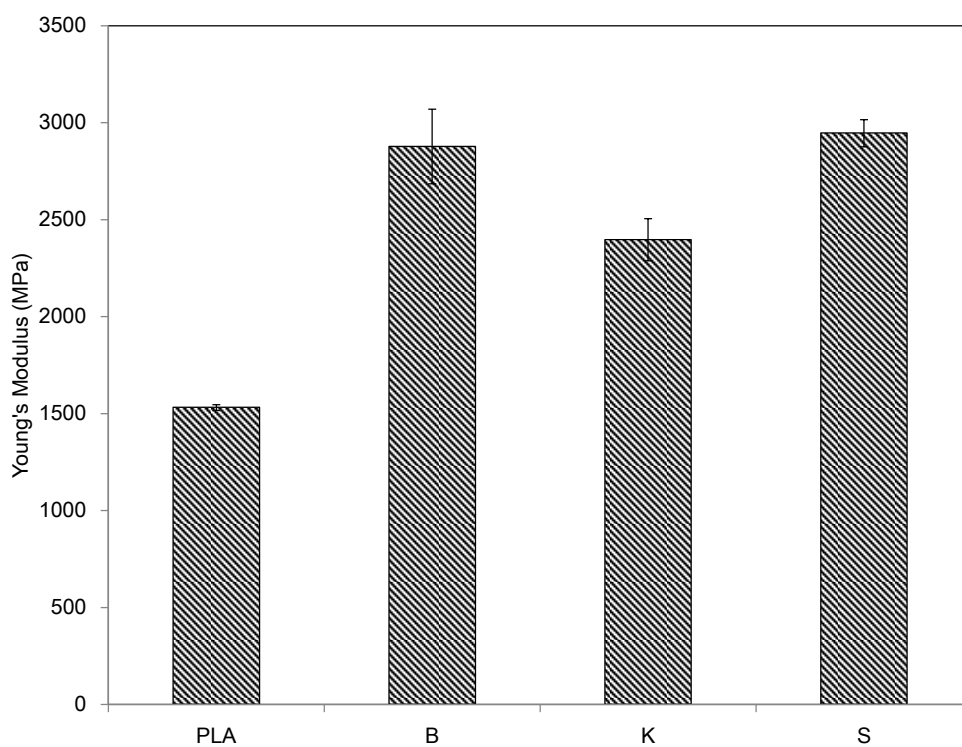


ภาพที่ 4.11 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain curve) ของวัสดุไบโोकอมโพลีลิกแอซิดเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด

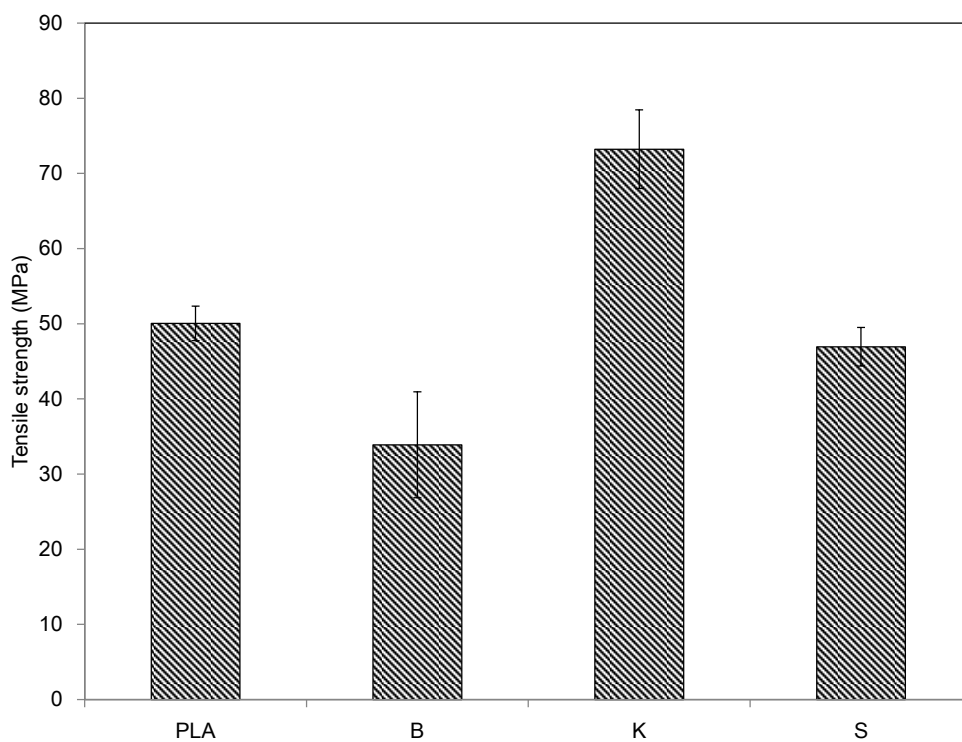
จากกราฟแสดงความเค้น-เครียดของชิ้นตัวอย่างที่ทำการทดสอบการดึงยึดในภาพที่ 4.11 พบว่าทั้งพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุไบโอคอมโพลีลิกแอซิดทั้งหมดมีลักษณะการแตกหักแบบเปราะเช่นเดียวกัน โดยในพอลิแลคติกแอซิด วัสดุไบโอคอมโพลีลิกแอซิดที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว (K) และที่ใช้ผ้าทอป่านศรนารายณ์ (S) เมื่อให้แรงจนถึงจุดวิกฤติจะเกิดการขาดเสียหายไปในทันที แต่ในวัสดุไบโอคอมโพลีลิกแอซิดที่ใช้ผ้าทอกล้วย (B) จะเกิดการแตกร้าวของพื้นผิวพอลิแลคติกแอซิดภายนอกขึ้นและมีการขาดของเส้นใยธรรมชาติบางส่วน แต่เส้นใยธรรมชาติที่เหลือจะยังช่วยประคองวัสดุไบโอคอมโพลีลิกแอซิดไว้ กระทั่งยึดออกมากพอที่ทำให้เส้นใยธรรมชาติเกิดการขาดจำนวนมากจนไม่สามารถรับแรงได้อีกต่อไป ดังจะเห็นได้จากภาพสัณฐานวิทยาที่แสดงการขาด และหลุดออกของเส้นใยธรรมชาติในภาพที่ 4.15

จากกราฟค่าโมดูลัสของยัง ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดในภาพที่ 4.12 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ พบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีค่าโมดูลัสของยังที่ต่ำกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตทั้งสามชนิด โดยมีค่าต่ำกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย (B) ที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว (K) และที่ใช้ผ้าทอป่านสรนารายณ์อยู่ (S) 87.87% 56.51% และ 92.38% ตามลำดับ สำหรับค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิแลคติกแอซิดมีค่าต่ำกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปอแก้วอยู่ 46.43% แต่สูงกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย และที่ใช้ผ้าทอป่านสรนารายณ์อยู่ 32.26% และ 6.19% ตามลำดับ สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าความต้านทานต่อแรงดึง คือ วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปอแก้วมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือที่ใช้ผ้าทอป่านสรนารายณ์ และที่ใช้ผ้าทอกล้วย แต่ทั้งหมดยังมีค่าน้อยกว่าพอลิแลคติกแอซิดอยู่ 6.22% 14.40% และ 39.45% ตามลำดับ

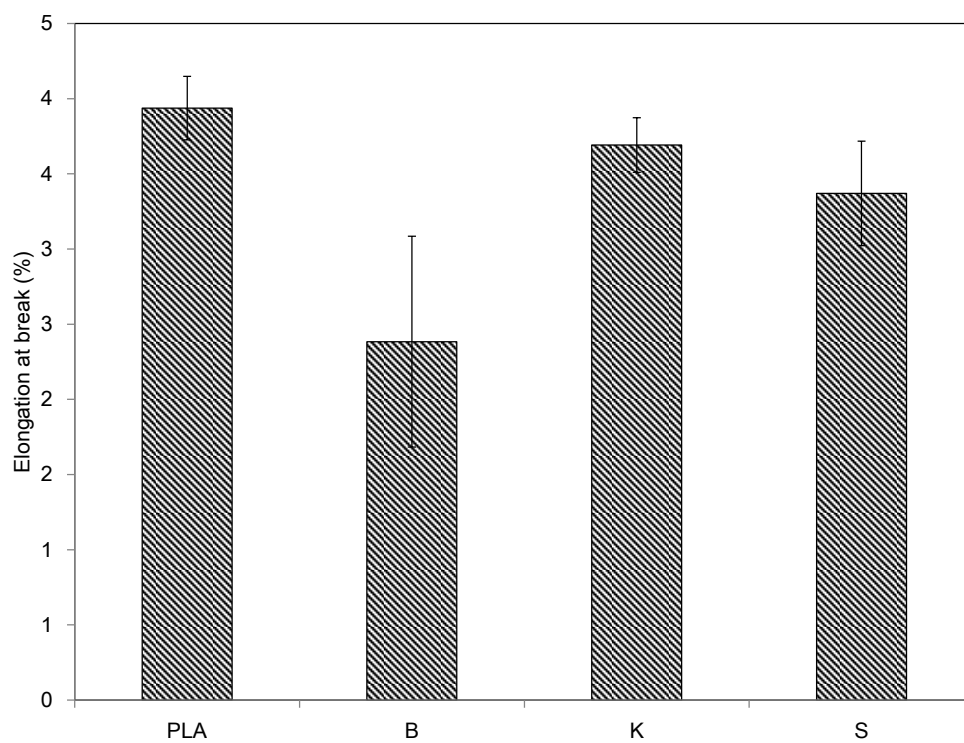
เมื่อพิจารณาจากสัณฐานวิทยาในภาพที่ 4.15 จะเห็นว่าผ้าทอที่วางในแนวขนาน (Parallel) ภายในวัสดุไบโอคอมโพสิตมีการขาดเกิดขึ้นทั้งด้านบนและด้านล่างในลักษณะเดียวกัน โดยพบว่าสาเหตุการเสียหายของวัสดุไบโอคอมโพสิตเกิดจากแรงเค้นที่ถูกส่งผ่านจากเมตริกซ์พอลิแลคติกแอซิดไปยังเส้นใยธรรมชาติมีมากกว่าแรงที่ยึดติดกันระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับเมตริกซ์ ทำให้เส้นใยธรรมชาติเกิดการแยกจากเมตริกซ์จากนั้นแรงเค้นที่เหลืออยู่จะกระจายไปในเส้นใยธรรมชาติทำให้เกิดการขาด หรือหลุดออกจากพื้นผิวเมตริกซ์ และผลของความแข็งแรงของเส้นใยธรรมชาติมีค่าสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิด จึงทำให้ความแข็งแรงของวัสดุไบโอคอมโพสิตนั้นถูกควบคุมโดยความแข็งแรงของเส้นใยธรรมชาติที่เสริมแรงอยู่ภายในมากกว่าพอลิแลคติกแอซิดที่เป็นเมตริกซ์ มีผลให้วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว ซึ่งมีกลุ่มเส้นใยธรรมชาติขนาดใหญ่กว่าเส้นใยธรรมชาติอื่นดังแสดงในภาพที่ 4.15 จึงแสดงความแข็งแรงที่ดีกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตชนิดอื่นดังเช่นในงานวิจัยของ Zhaoqian Li และคณะ [44] ที่พบว่าวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยป่านสรนารายณ์ธรรมชาติ มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด เพราะความแข็งแรงของป่านสรนารายณ์ที่ดีกว่าพอลิแลคติกแอซิด และจากงานวิจัยของ N. Venkateshwaran และคณะ [51] ที่พบว่าวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยป่านสรนารายณ์ มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยกล้วย โดยการเพิ่มปริมาณเส้นใยที่ใช้จะส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตมีแนวโน้มแข็งแรงขึ้น และเมื่อพิจารณาสัณฐานวิทยาพบว่าที่บริเวณรอยแตกหักมีการหลุดออกของเส้นใยธรรมชาติจากผิวของวัสดุคอมโพสิตกลายเป็นรูพรุนขึ้น แสดงให้เห็นถึงการส่งผ่านแรงมายังเส้นใยธรรมชาติจนกระทั่งเส้นใยธรรมชาติขาดออกทำให้วัสดุคอมโพสิตเกิดการเสียหายไป



ภาพที่ 4.12 แสดงค่าโมดูลัสของแข็งของวัสดุไบโອคอมโพลีตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด

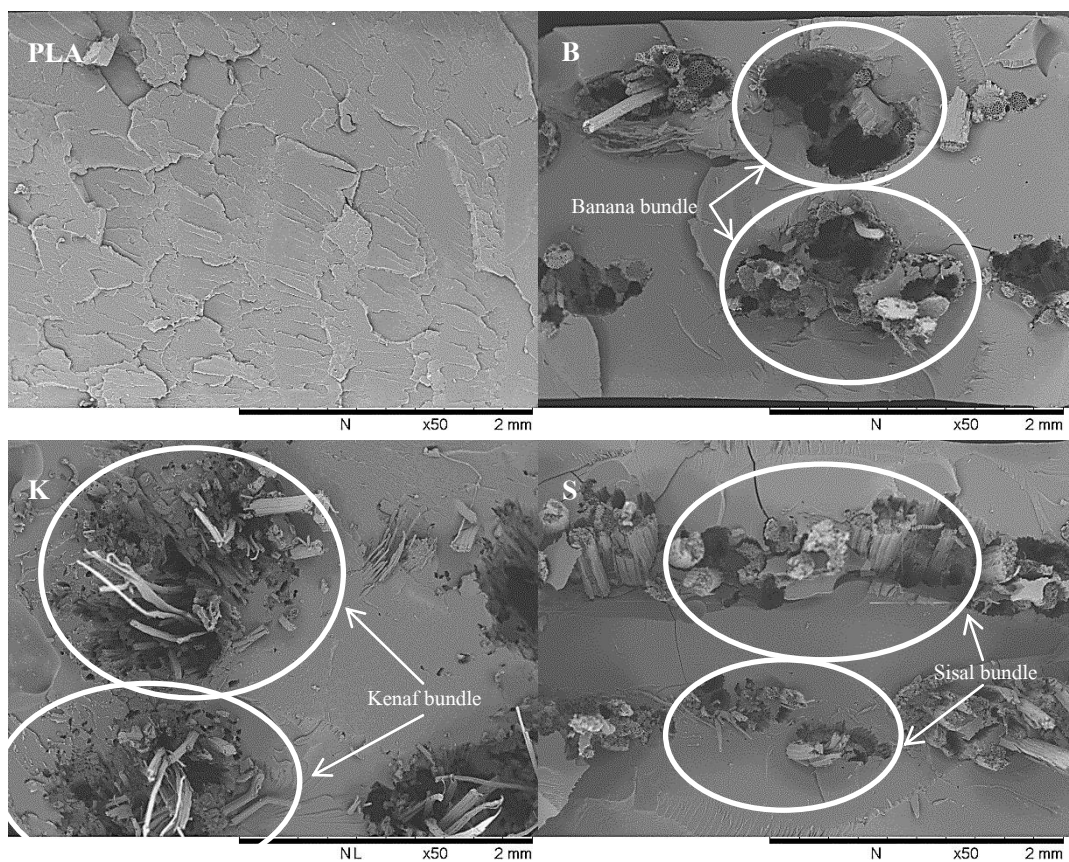


ภาพที่ 4.13 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุไบโອคอมโพลีตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด



ภาพที่ 4.14 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดของวัสดุไบโอโพลิเมอร์เปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด



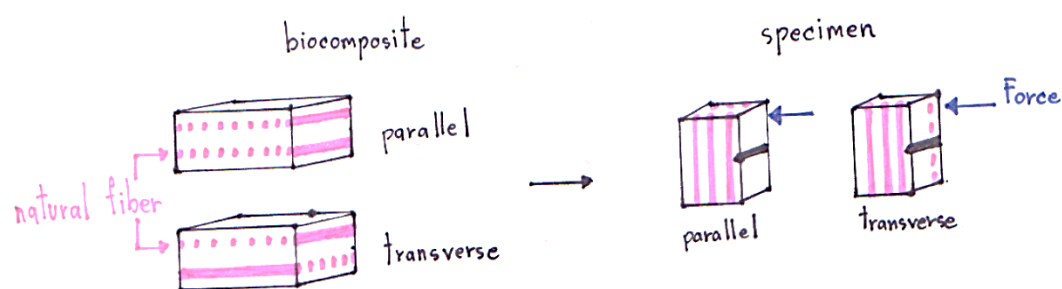


ภาพที่ 4.15 แสดงภาพสัณฐานวิทยา (SEM) ในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างพอลิแลคติก แอซิด (PLA) กับวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย (B) ที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว (K) และที่ใช้ผ้าทอ ป่านศรนารายณ์ (S) ที่ผ่านการทดสอบการดึงยึด

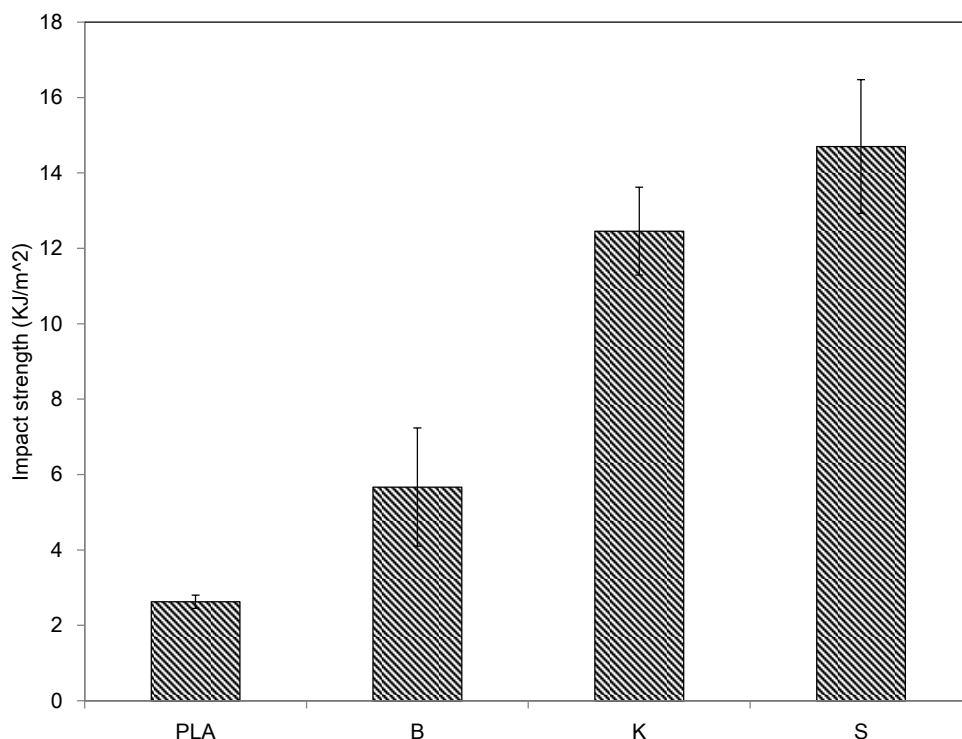


4.3.1.1.3 การศึกษาสมบัติการกระแทกของวัสดุไบโอคอมโพสิต

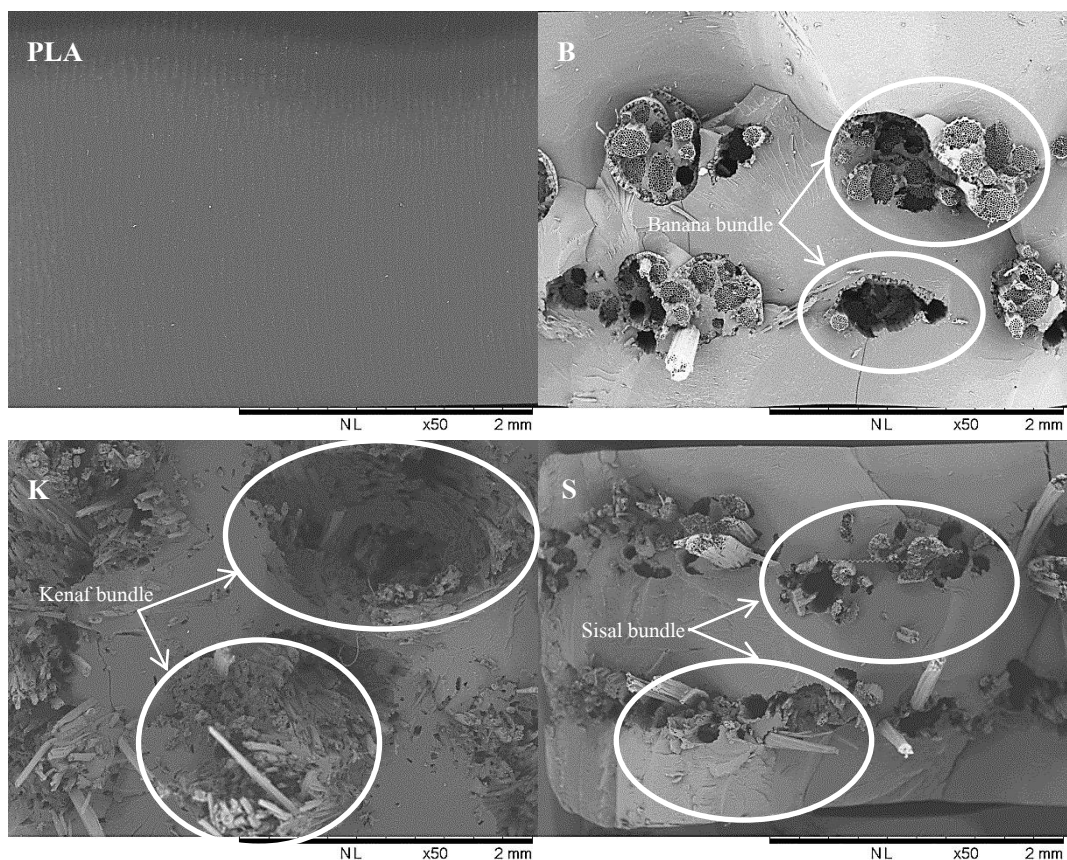
สมบัติการกระแทกของวัสดุไบโอคอมโพสิตสามารถบ่งบอกถึงความสามารถในการรับแรงกระแทก ซึ่งเป็นหนึ่งในคุณสมบัติที่ยากต่อการคำนวณค่า จึงต้องใช้การทดสอบโดยใช้ค้อนเหวี่ยงกระแทกให้ทราบค่าพลังงานที่ใช้ทำให้วัสดุเสียหาย ค่าความต้านทานการต่อการกระแทกที่ได้สามารถทำให้นำไปเลือกใช้วัสดุในสภาวะที่กำหนดได้อย่างปลอดภัย โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการจัดเรียงให้เส้นใยธรรมชาติที่สนใจศึกษาอยู่ในทิศทางตั้งฉากกับแรงกระแทกเพื่อรับแรงที่เกิดขึ้นในขณะทดสอบการกระแทกดังแสดงในภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.16 แสดงลักษณะทิศทางของเส้นใยธรรมชาติภายในวัสดุไบโอคอมโพสิต และแรงที่กระทำในการทดสอบการกระแทก



ภาพที่ 4.17 แสดงค่าความต้านทานการกระแทกของ วัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด



ภาพที่ 4.18 แสดงภาพสัณฐานวิทยา (SEM) ในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย (B) ที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว (K) และที่ใช้ผ้าทอป่านศรนารายณ์ (S) ที่ผ่านการทดสอบการกระแทก

จากค่าความต้านทานการกระแทกแสดงในภาพที่ 4.17 พบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีค่าความต้านทานการกระแทกต่ำที่สุด โดยมีค่าต่ำกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย (B) ที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว (K) และที่ใช้ผ้าทอป่านศรนารายณ์ (S) อยู่ 115.89% 374.42% และ 459.83% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสัณฐานวิทยาในภาพที่ 4.18 จะเห็นว่าพื้นผิวรอยแตกของพอลิแลคติกแอซิดมีลักษณะเรียบเสมอซึ่งแสดงลักษณะการแตกหักแบบเปราะ สำหรับในวัสดุไบโอคอมโพสิตพบกลุ่มของเส้นใยธรรมชาติที่ขาดออก และโผล่ออกมาจากเมตริกซ์นั้น มีลักษณะแตกต่างกัน คือ เส้นใยกล้วยส่วนใหญ่จะโผล่พื้นออกมาจากเมตริกซ์เพียงเล็กน้อยในขณะที่เส้นใยปอแก้ว และเส้นใยป่านศรนารายณ์ จะอยู่ในลักษณะของกลุ่มของเส้นใยที่โผล่หลุดออกมาจากเมตริกซ์จำนวนมากว่า เนื่องจากเส้นใยกล้วยมีความเปราะ และแข็งแรงน้อยกว่าเส้นใยชนิดอื่น จากภาพที่ 4.18 พบว่ากลุ่มของเส้นใยปอแก้วมีขนาดที่ใหญ่ที่สุด แต่ยังมีแข็งแรงน้อยกว่า

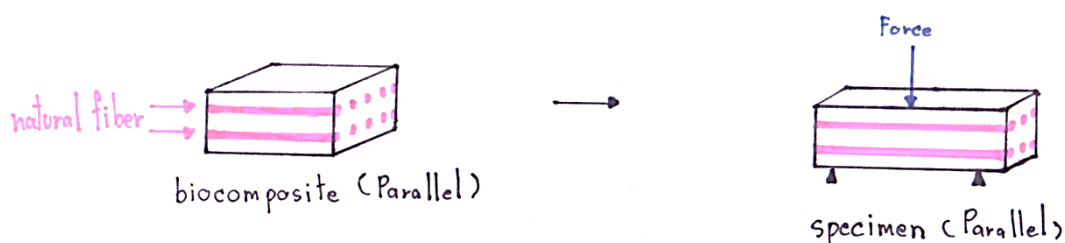
เส้นใยป่านศรนารายณ์ ที่มีปริมาณเซลลูโลสสูงกว่าเส้นปอแก้ว จึงทำให้มีความแข็งแรงสูงกว่า สอดคล้องกับผลการทดลองที่กล่าวไว้ข้างต้น [26,27,29]

4.3.1.2 ผลของการเสริมแรงด้วยผ้าทอแบบเส้นใยผสม

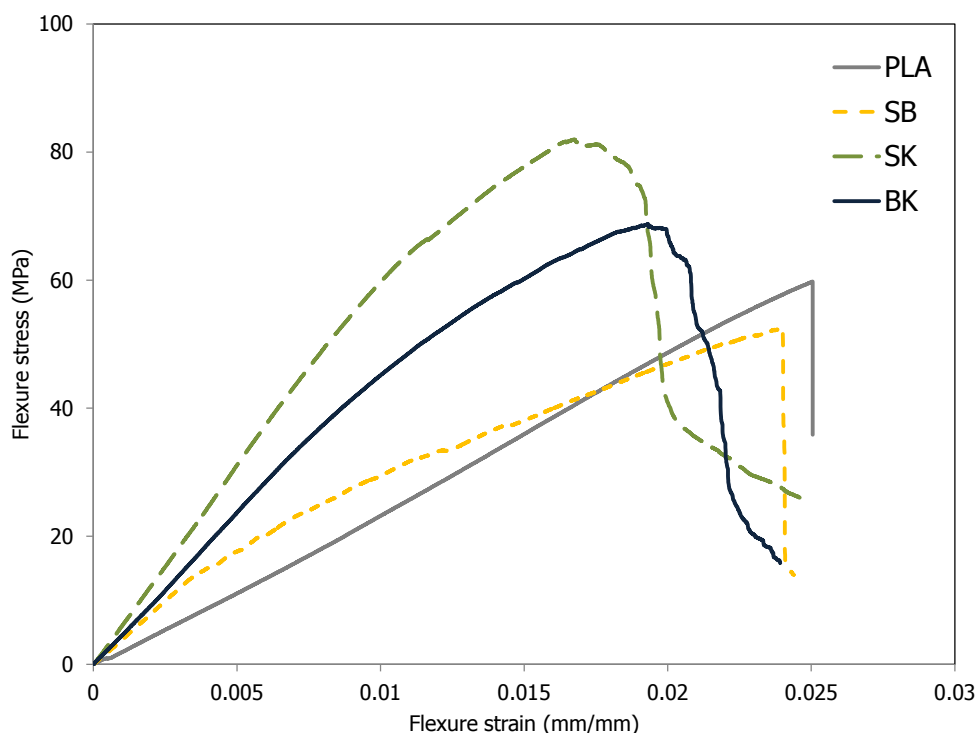
วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอแบบเส้นใยผสมเสริมแรง ที่วางในแนวขนานกัน ในส่วนนี้มีทั้งหมด 3 ชนิดได้แก่ วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอป่านศรนารายณ์-กล้วย (SB) วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอป่านศรนารายณ์-ปอแก้ว (SK) และวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้ว (BK) ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์แทนด้วยตัวอักษรในวงเล็บด้านท้าย

4.3.1.2.1 การศึกษาสมบัติการตัดโค้งของวัสดุไบโอคอมโพสิต

ขั้นตอนตัวอย่างของวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ทำทดสอบการตัดโค้งในหัวข้อนี้ได้ทำการจัดเรียงให้เส้นใยธรรมชาติเป็นไปดังภาพที่ 4.5 เพื่อให้สามารถรับแรงได้ดีที่สุด



ภาพที่ 4.5 แสดงลักษณะทิศทางของเส้นใยธรรมชาติภายในวัสดุไบโอคอมโพสิต และแรงกระทำในการทดสอบการตัดโค้ง

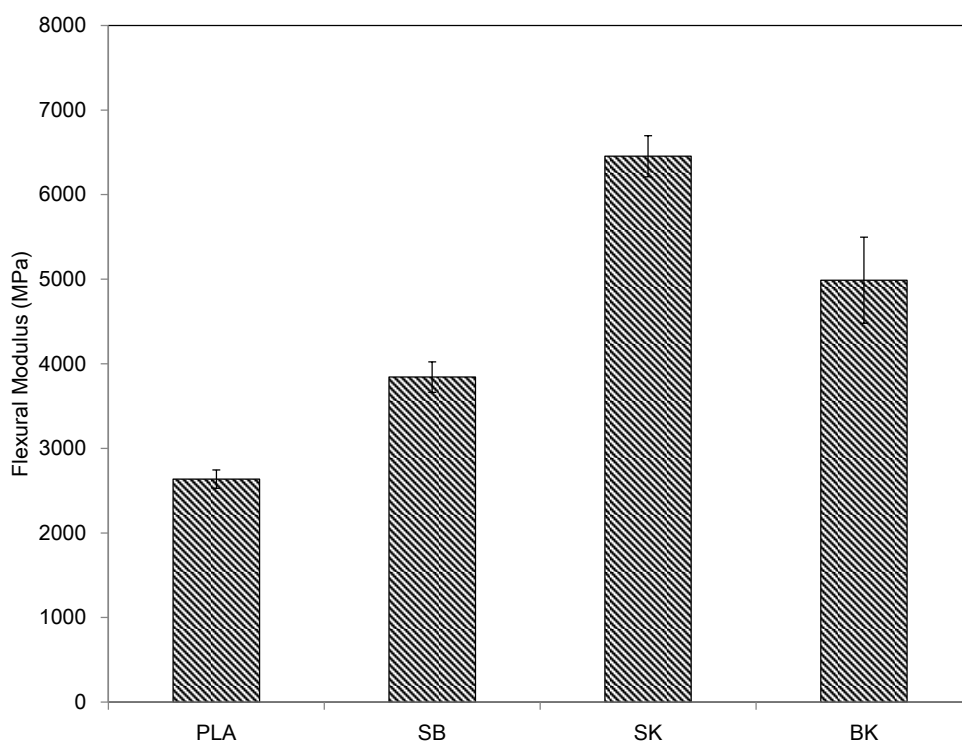


ภาพที่ 4.19 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดของการดัดโค้ง (Flexural Stress-Strain curve) ของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด

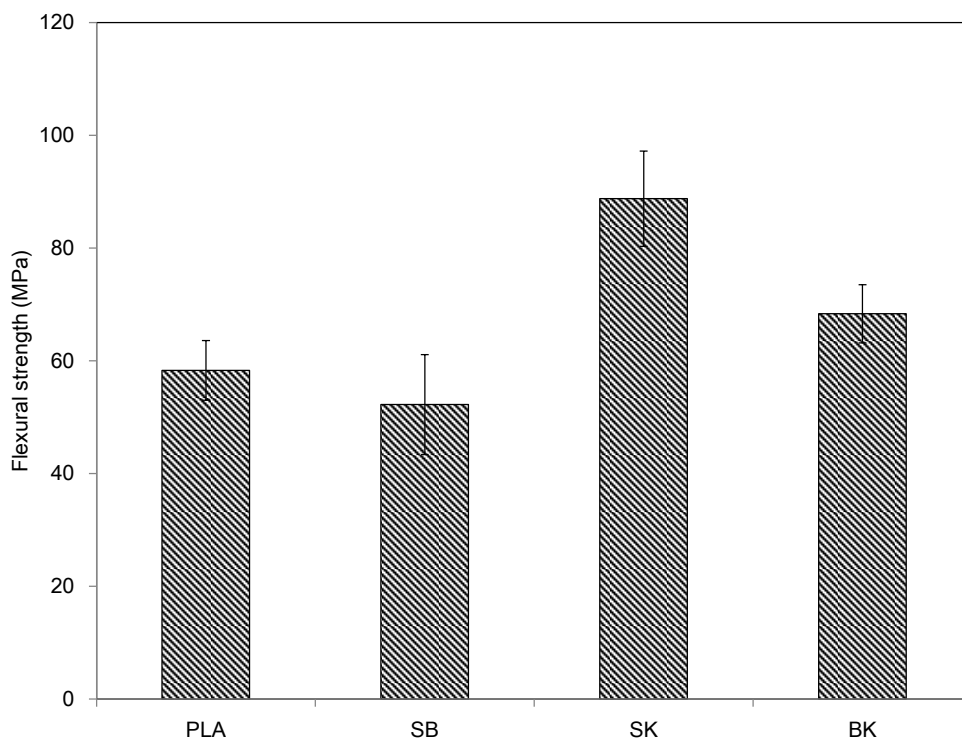
จากกราฟแสดงความเค้น-ความเครียดของการดัดโค้งในภาพที่ 4.19 พบว่าทั้งใน พอลิแลคติกแอซิด และวัสดุไบโอคอมโพสิตทั้งหมดมีลักษณะการแตกหักแบบเปราะ เช่นเดียวกัน โดยในพอลิแลคติกแอซิดเมื่อให้แรงจนถึงจุดวิกฤติจะเกิดการหักงอเสียหายไปในทันที แต่ในวัสดุไบโอคอมโพสิตยังมีการโค้งงอต่อไปอีกหลังจากเริ่มมีการเสียหาย เมื่อพิจารณาพบว่าในขณะที่ให้แรง จะมีการแตกร้าวของพื้นผิวพอลิแลคติกแอซิดในส่วนด้านล่างที่รับแรงดึงเกิดขึ้นก่อน แต่เส้นใยธรรมชาติที่อยู่ภายในยังสามารถทำการรับแรงต่อไปได้อีก จนกระทั่งวัสดุไบโอคอมโพสิตโค้งงอมากพอที่เส้นใยธรรมชาติเกิดการขาดจำนวนมากพอที่จะทำให้ไม่สามารถรับแรงได้อีกต่อไป ดังจะเห็นได้จากภาพสัณฐานวิทยาที่แสดงการขาด และหลุดออกของเส้นใยธรรมชาติในภาพที่ 4.22 ซึ่งลักษณะนี้พบได้เช่นเดียวกับในงานวิจัยที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น [45,46]

จากกราฟค่าโมดูลัสการตัดโค้ง และค่าความต้านทานต่อการตัดโค้งในภาพที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ พบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีค่าโมดูลัสการตัดโค้งที่น้อยกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตทั้งสามชนิด เนื่องจากพอลิแลคติกแอซิดมีค่าโมดูลัสการตัดโค้งที่น้อยกว่าเส้นใยธรรมชาติ [1,2] โดยในวัสดุไบโอคอมโพสิตที่มีเส้นใยปอแก้วทั้งสองชนิด คือวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-ปอแก้ว (SK) และวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้ว (BK) มีค่าโมดูลัสการตัดโค้งเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-กล้วย (SB) ซึ่งทั้งหมดมีค่ามากกว่าพอลิแลคติกแอซิดอยู่ 144.80% 89.20% และ 45.77% ตามลำดับสำหรับค่าความต้านทานต่อการตัดโค้งของพอลิแลคติกแอซิดมีค่าต่ำกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-ปอแก้วและที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้วอยู่ 52.24% และ 17.23% ตามลำดับ แต่สูงกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-กล้วย 10.39% ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบในหัวข้อ 4.3.1.1 ที่พบว่าการใช้เส้นใยปอแก้วจะทำให้วัสดุไบโอคอมโพสิตมีความแข็งแรงที่ดีกว่าเส้นใยปานสรนารายณ์ และเส้นใยกล้วยตามลำดับ

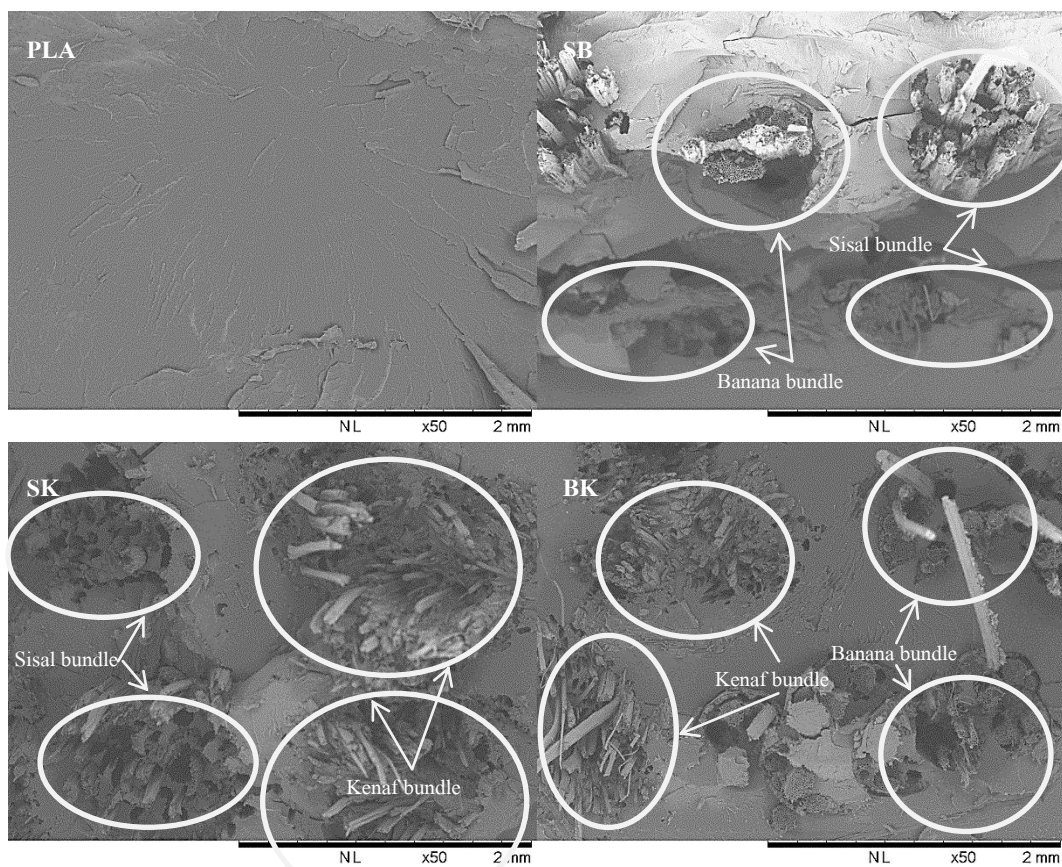
เมื่อพิจารณาจากพื้นฐานวิทยาในภาพที่ 4.22 จะเห็นว่าผ้าทอที่วางในแนวนอนภายในวัสดุไบโอคอมโพสิต มีการขาดเกิดขึ้นทั้งด้านบนและด้านล่างในลักษณะเดียวกัน โดยพบว่าสาเหตุการเสียหายของวัสดุไบโอคอมโพสิตเกิดจากแรงเค้นที่ถูกส่งผ่านจากเมตริกซ์พอลิแลคติกแอซิดไปยังเส้นใยธรรมชาติมีมากกว่าแรงที่ยึดติดกันระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับเมตริกซ์ ทำให้เส้นใยธรรมชาติเกิดการแยกจากเมตริกซ์จากนั้นแรงเค้นที่เหลืออยู่จะกระจายไปในเส้นใยธรรมชาติทำให้เกิดการขาด หรือหลุดออกจากพื้นผิวเมตริกซ์ [19,37,40] และเนื่องจากความแข็งแรงของเส้นใยธรรมชาติมีค่าสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิด [1,2] จึงทำให้ความแข็งแรงของวัสดุไบโอคอมโพสิตนั้นถูกควบคุมโดยความแข็งแรงของเส้นใยธรรมชาติที่เสริมแรงอยู่ภายในมากกว่าพอลิแลคติกแอซิดที่เป็นเมตริกซ์ มีผลให้วัสดุไบโอคอมโพสิตที่มีเส้นใยปอแก้ว ซึ่งมีกลุ่มเส้นใยธรรมชาติขนาดใหญ่กว่าเส้นใยธรรมชาติอื่นดังแสดงในภาพที่ 4.22 จึงแสดงความแข็งแรงที่ดีกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตชนิดอื่น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย V.P. Arthanarieswaran และคณะ [45] และงานวิจัยของ A. Alavudeen และคณะ [46] ที่กล่าวไว้ข้างต้น



ภาพที่ 4.20 แสดงค่าโมดูลัสการดัดโค้ง ของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด



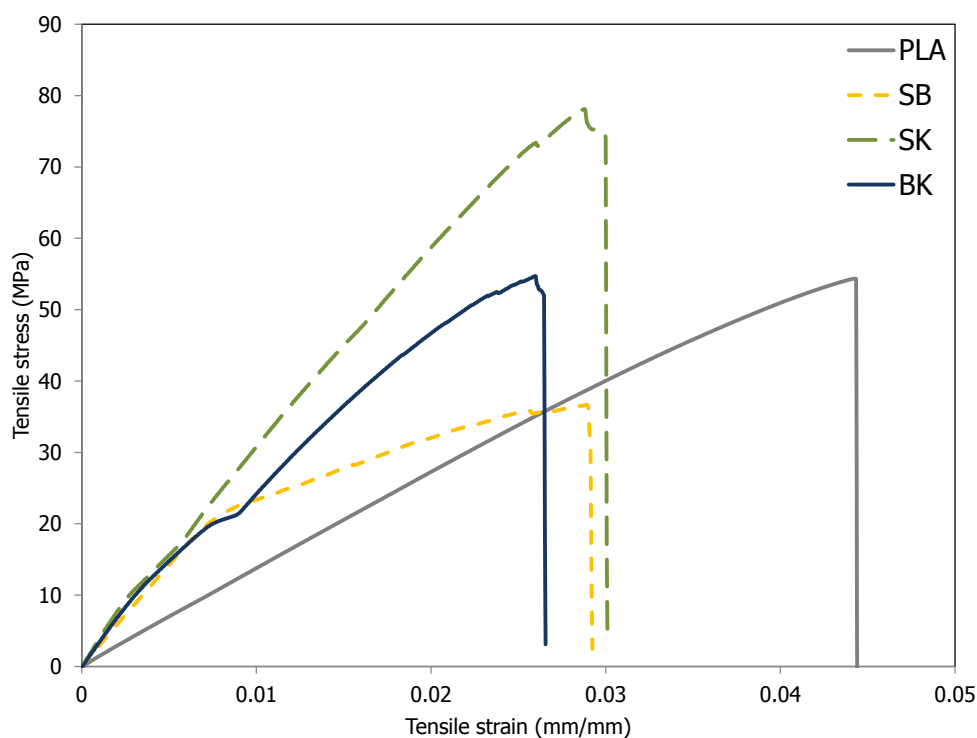
ภาพที่ 4.21 แสดงค่าความต้านทานต่อการดัดโค้ง ของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด



ภาพที่ 4.22 แสดงภาพสัณฐานวิทยา (SEM) ในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างพอลิแลคติก แอซิด (PLA) กับวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยป่านศรนารายณ์-กล้วย (SB) วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยป่านศรนารายณ์-ปอแก้ว (SK) และวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยกล้วย-ปอแก้ว (BK) ที่ผ่านการทดสอบการตัดโค้ง

4.3.1.2.2 การศึกษาสมบัติการดึงยึดของวัสดุไบโอคอมโพสิต

ชิ้นตัวอย่างของวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ทำทดสอบการดึงยึดในหัวข้อนี้ ได้ทำการจัดเรียงให้เส้นใยธรรมชาติที่สนใจศึกษาอยู่ในทิศทางเดียวกับแรงดึง เพื่อให้รับแรงดึงที่เกิดขึ้นในขณะทดสอบการดึงยึดดังแสดงในภาพที่ 4.10

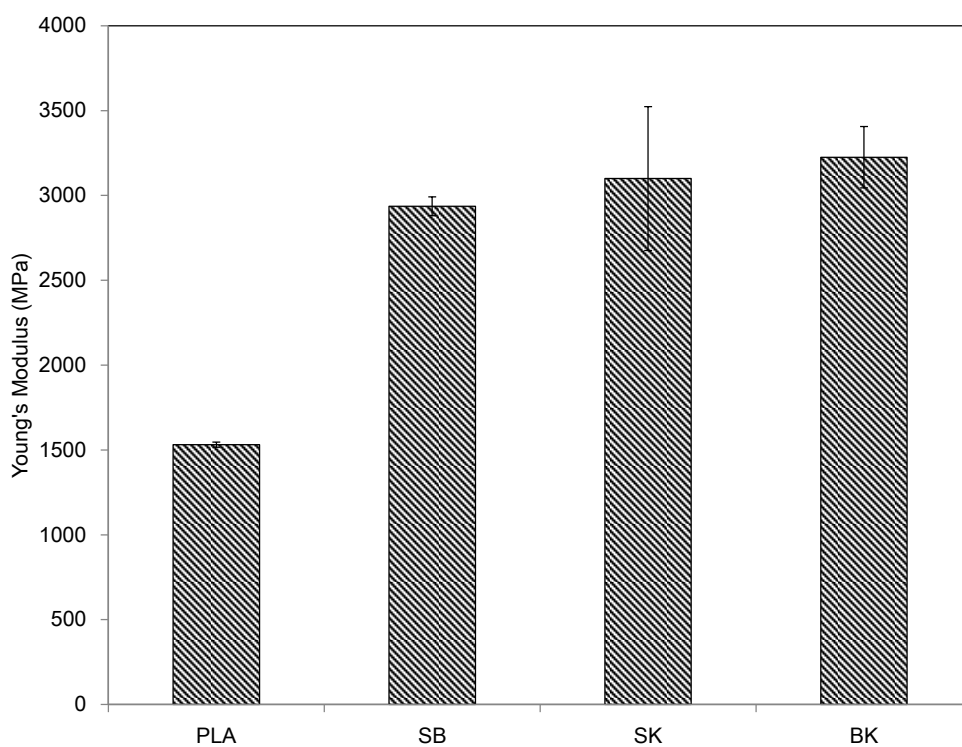


ภาพที่ 4.23 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain curve) ของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด

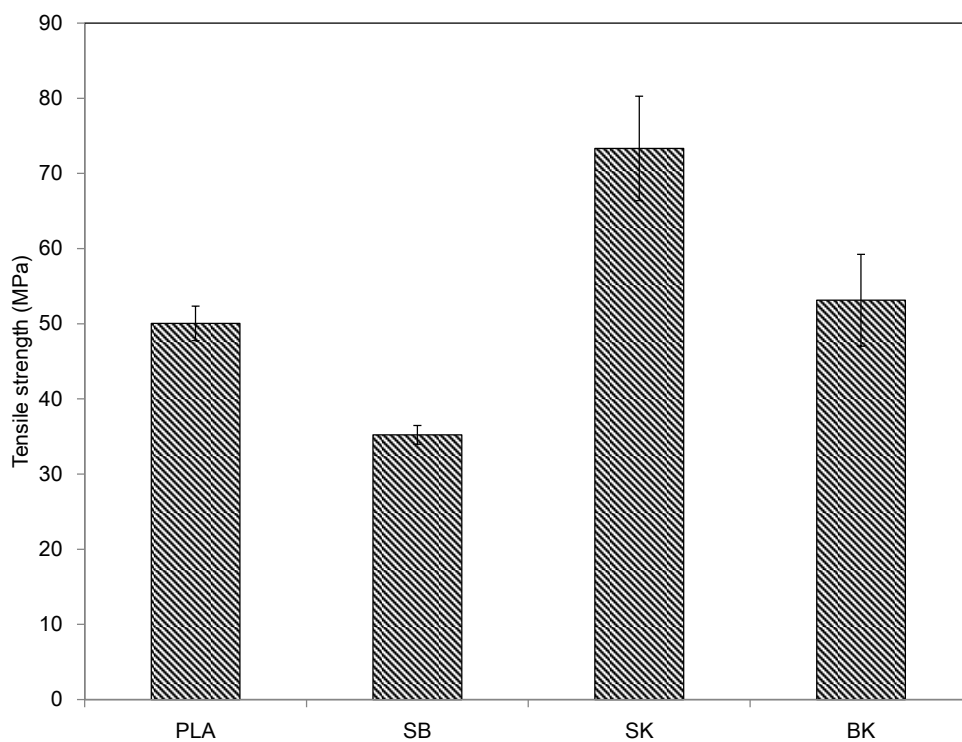
จากกราฟแสดงความเค้น-เครียดของชิ้นตัวอย่างที่ทำการทดสอบการดึงยึดในภาพที่ 4.23 พบว่าทั้งพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุไบโอคอมโพสิตทั้งหมดมีลักษณะการแตกหักแบบเปราะเช่นเดียวกัน ซึ่งเมื่อให้แรงจนถึงจุดวิกฤติจะเกิดการขาดเสียหายไปในทันที โดยในวัสดุไบโอคอมโพสิตจะเกิดการแตกร้าวของพื้นผิวพอลิแลคติกแอซิดภายนอกขึ้นก่อน แล้วจึงเกิดการขาดของเส้นใยธรรมชาติภายในตามมาดังจะเห็นได้จากภาพสัณฐานวิทยาที่แสดงการขาดและหลุดออกของเส้นใยธรรมชาติในภาพที่ 4.27

จากกราฟค่าโมดูลัสของยัง ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดในภาพที่ 4.24 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ พบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีค่าโมดูลัสของยังที่ต่ำกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตทั้งสามชนิด โดยมีค่าต่ำกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-กล้วย (SB) ที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-ปอแก้ว (SK) และที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้ว (BK) 91.75% 102.41% และ 110.61% ตามลำดับ สำหรับค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิแลคติกแอซิดมีค่าต่ำกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-ปอแก้ว และที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้วอยู่ 46.54% และ 6.18% ตามลำดับ แต่มีค่าสูงกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-กล้วยอยู่ 29.63% สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดของวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-กล้วย ที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-ปอแก้ว และที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้ว ทั้งหมดยังมีค่าน้อยกว่าพอลิแลคติกแอซิดอยู่ 52.91% 56.08% และ 50.95% ตามลำดับ สอดคล้องกับผลการทดสอบในหัวข้อ 4.3.1.1 ที่พบว่าการใช้เส้นใยปอแก้วจะทำให้วัสดุไบโอคอมโพสิตมีความแข็งแรงที่ดีกว่าเส้นใยปานสรนารายณ์ และเส้นใยกล้วยตามลำดับ

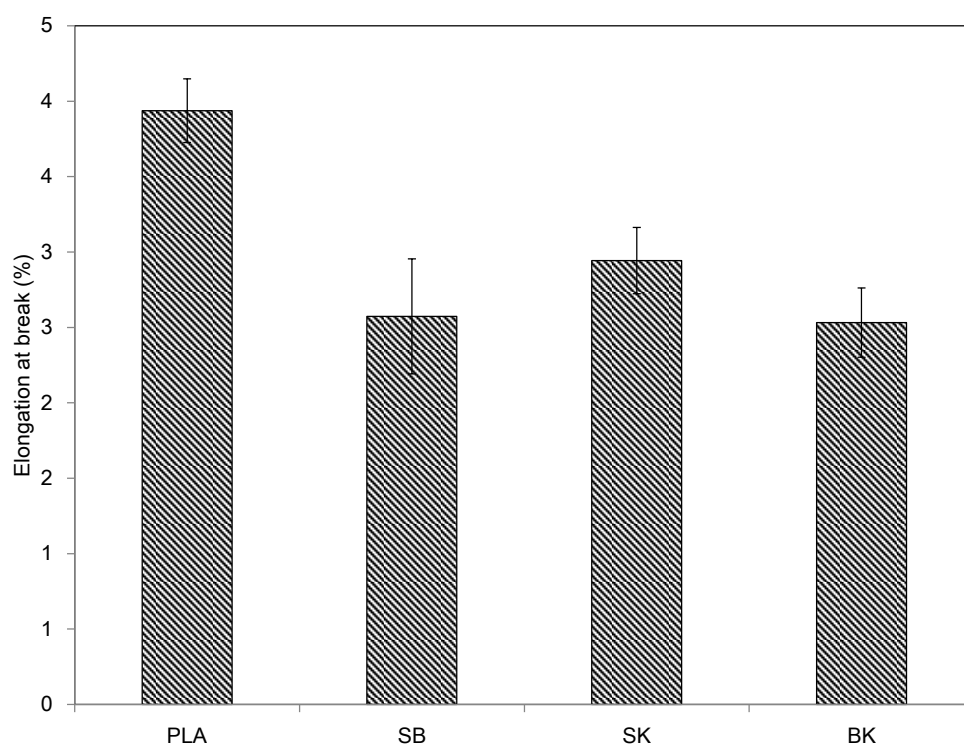
เมื่อพิจารณาจากลักษณะในภาพที่ 4.27 จะเห็นว่าผ้าทอที่วางในแนวขนาน (Parallel) ภายในวัสดุไบโอคอมโพสิต มีการขาดเกิดขึ้นทั้งด้านบนและด้านล่างในลักษณะเดียวกัน โดยพบว่าสาเหตุการเสียหายของวัสดุไบโอคอมโพสิตเกิดจากแรงเค้นที่ถูกส่งผ่านจากเมตริกซ์พอลิแลคติกแอซิดไปยังเส้นใยธรรมชาติมีมากกว่าแรงที่ยึดติดกันระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับเมตริกซ์ ทำให้เส้นใยธรรมชาติเกิดการแยกจากเมตริกซ์จากนั้นแรงเค้นที่เหลืออยู่จะกระจายไปในเส้นใยธรรมชาติทำให้เกิดการขาด หรือหลุดออกจากพื้นผิวเมตริกซ์ [19,37,40] และเนื่องจากความแข็งแรงของเส้นใยธรรมชาติมีค่าสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิด [1,2] จึงทำให้ความแข็งแรงของวัสดุไบโอคอมโพสิตนั้นถูกควบคุมโดยความแข็งแรงของเส้นใยธรรมชาติที่เสริมแรงอยู่ภายในมากกว่าพอลิแลคติกแอซิดที่เป็นเมตริกซ์ มีผลให้วัสดุไบโอคอมโพสิตที่มีเส้นใยปอแก้ว ซึ่งมีกลุ่มเส้นใยธรรมชาติขนาดใหญ่กว่าเส้นใยธรรมชาติอื่นดังแสดงในภาพที่ 4.27 จึงแสดงความแข็งแรงที่ดีกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตชนิดอื่น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [44,51]



ภาพที่ 4.24 แสดงค่าโมดูลัสของแข็งของวัสดุไบโोकอมโพลีดีเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด

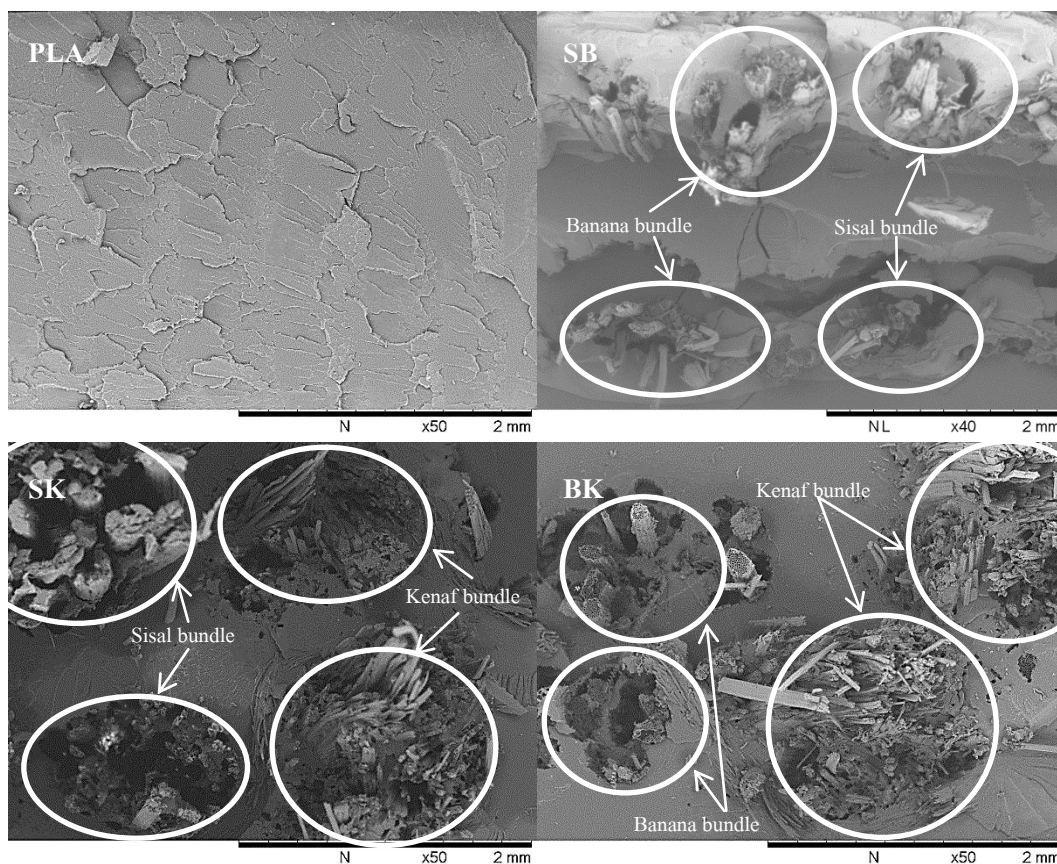


ภาพที่ 4.25 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุไบโोकอมโพลีดีเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด



ภาพที่ 4.26 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดของวัสดุไบโอโพลิเมอร์เปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด

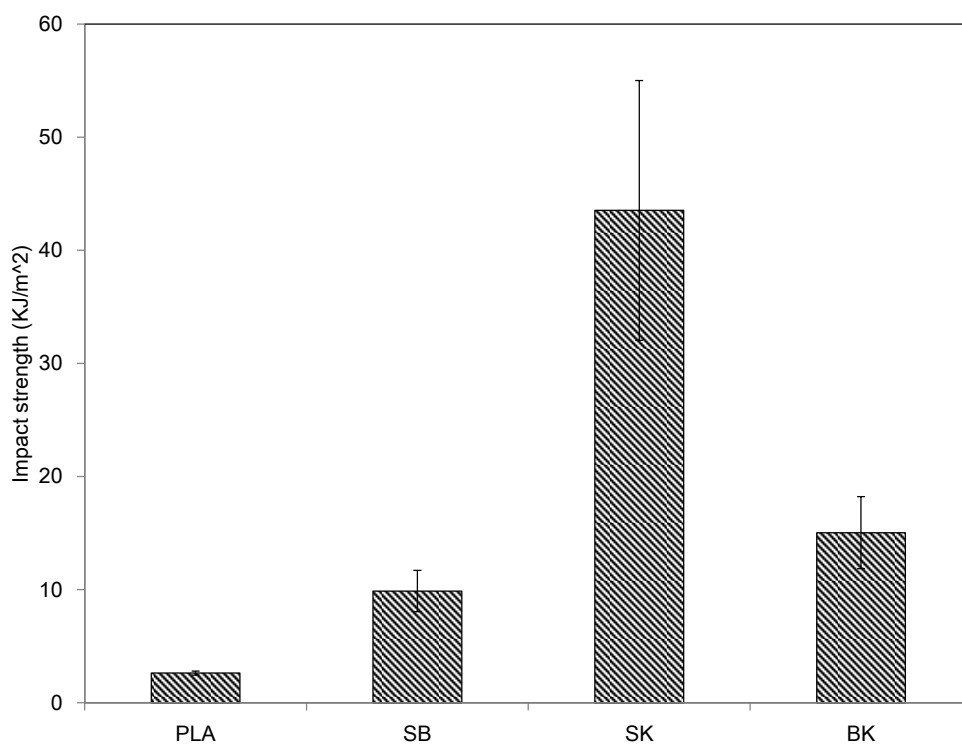




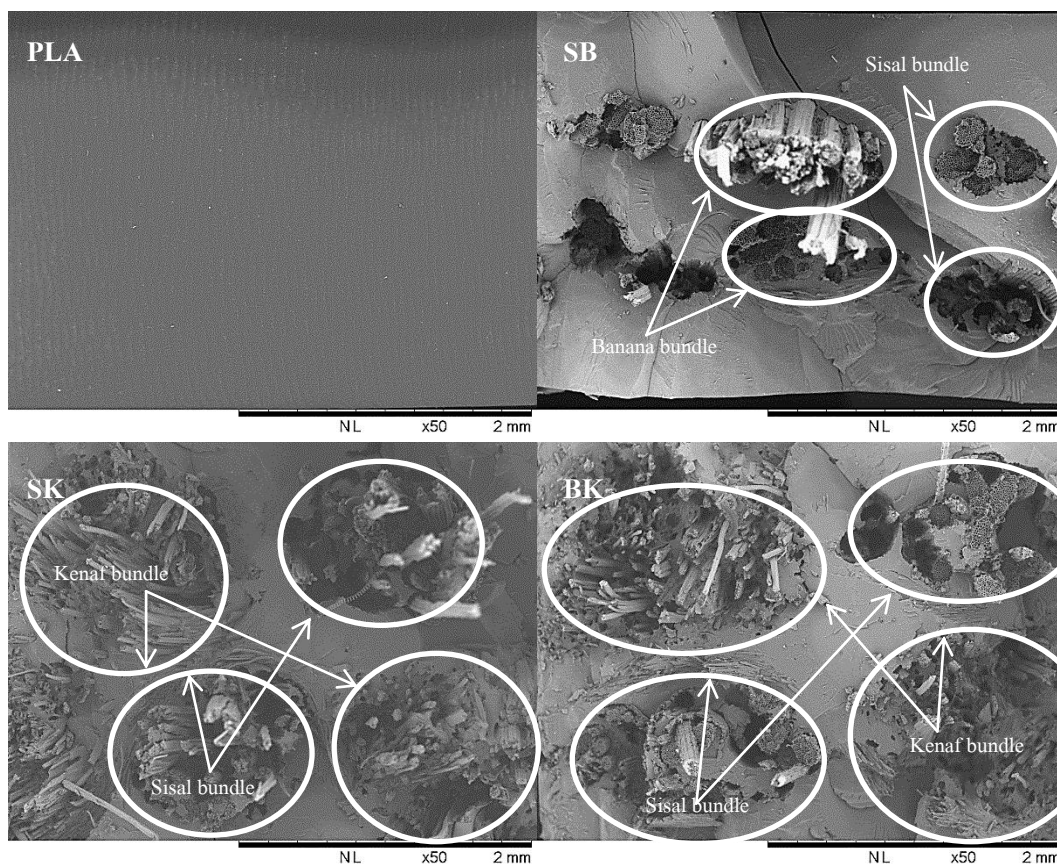
ภาพที่ 4.27 แสดงภาพสัณฐานวิทยา (SEM) ในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างพอลิแลคติก แอซิด (PLA) กับวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยป่านขนารายณ์-กล้วย (SB) วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยป่านขนารายณ์-ปอแก้ว (SK) และวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยกล้วย-ปอแก้ว (BK) ที่ผ่านการทดสอบการดึงยึด

4.3.1.2.3 การศึกษาสมบัติการกระแทกของวัสดุไบโอคอมโพสิต

ในหัวข้อนี้ได้ทำการจัดเรียงให้เส้นใยธรรมชาติในชั้นตัวอย่าง ให้มีลักษณะดังภาพที่ 4.16 ข้างต้น



ภาพที่ 4.28 แสดงค่าความต้านทานการกระแทกของ วัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด



ภาพที่ 4.29 แสดงภาพสัณฐานวิทยา (SEM) ในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-กล้วย (SB) วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-ปอแก้ว (SK) และวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้ว (BK) ที่ผ่านการทดสอบการกระแทก

จากค่าความต้านทานการกระแทกแสดงในภาพที่ 4.28 พบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีค่าความต้านทานการกระแทกต่ำที่สุด โดยมีค่าต่ำกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-กล้วย (SB) ที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-ปอแก้ว (SK) และที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้วอยู่ (BK) 276.08% 1557.87% และ 472.80% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสัณฐานวิทยาในภาพที่ 4.29 จะเห็นว่าพื้นผิวรอยแตกของพอลิแลคติกแอซิดมีลักษณะเรียบเสมอซึ่งแสดงลักษณะการแตกหักแบบเปราะ สำหรับในวัสดุไบโอคอมโพสิตพบว่ากลุ่มของเส้นใยธรรมชาติที่ขาดออกและไหลออกมาจากเมตริกซ์นั้นมีลักษณะแตกต่างกัน คือ เส้นใยกล้วยส่วนใหญ่จะไหลพ้นออกมาจากเมตริกซ์เพียงเล็กน้อย ในขณะที่เส้นใยปอแก้ว และเส้นใยปานสรนารายณ์ จะอยู่ในลักษณะของกลุ่มของเส้นใยที่ไหลหลุดออกมาจากเมตริกซ์จำนวนมากกว่า แสดงให้เห็นว่าเส้นใยกล้วยมีความเปราะ และแข็งแรงน้อยกว่าเส้นใยชนิดอื่น ซึ่งสอดคล้องกับความแข็งแรงของเส้นใยธรรมชาติใน

ลักษณะเดียวกับงานวิจัยอื่นที่กล่าวไว้ข้างต้น [26,27,29] และสำหรับขนาดของกลุ่มเส้นใยธรรมชาตินั้น พบว่ากลุ่มของเส้นใยปอแก้วมีขนาดที่ใหญ่ที่สุดซึ่งส่งผลให้วัสดุไบโอคอมโพสิตที่มีการใช้เส้นใยปอแก้วจึงมีความแข็งแรงที่สูงกว่าเส้นใยธรรมชาติอื่น สอดคล้องกับผลการทดลองก่อนหน้าในหัวข้อ 4.3.1.1.3 ข้างต้น

4.3.2 ผลของการเสริมแรงด้วยผ้าทอที่วางแบบตั้งฉาก ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุไบโอคอมโพสิต

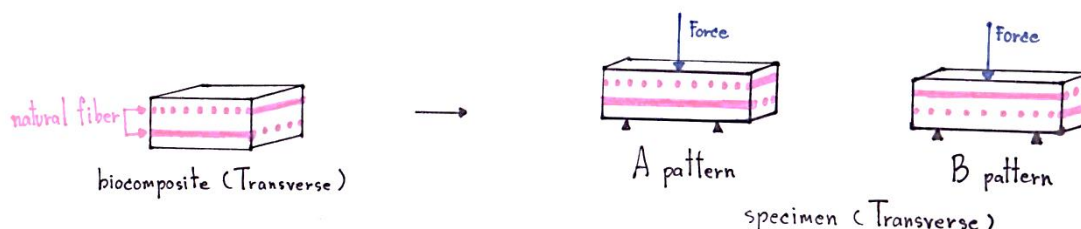
ผลของการเสริมแรงด้วยผ้าทอที่วางแบบขนาน (Parallel) ได้ทำการศึกษาแล้วในหัวข้อที่ 4.3.1 ข้างต้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทำการศึกษาผลของการเสริมแรงด้วยผ้าทอที่วางแบบตั้งฉาก (Transverse) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุไบโอคอมโพสิต โดยจะทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด ซึ่งจะประกอบไปด้วยผลการทดสอบสมบัติการดัดโค้ง (Flexural properties) สมบัติการดึงยึด (Tensile properties) และสมบัติการกระแทก (Impact properties)

4.3.2.1 ผลของการเสริมแรงด้วยผ้าทอแบบเส้นใยเดี่ยว

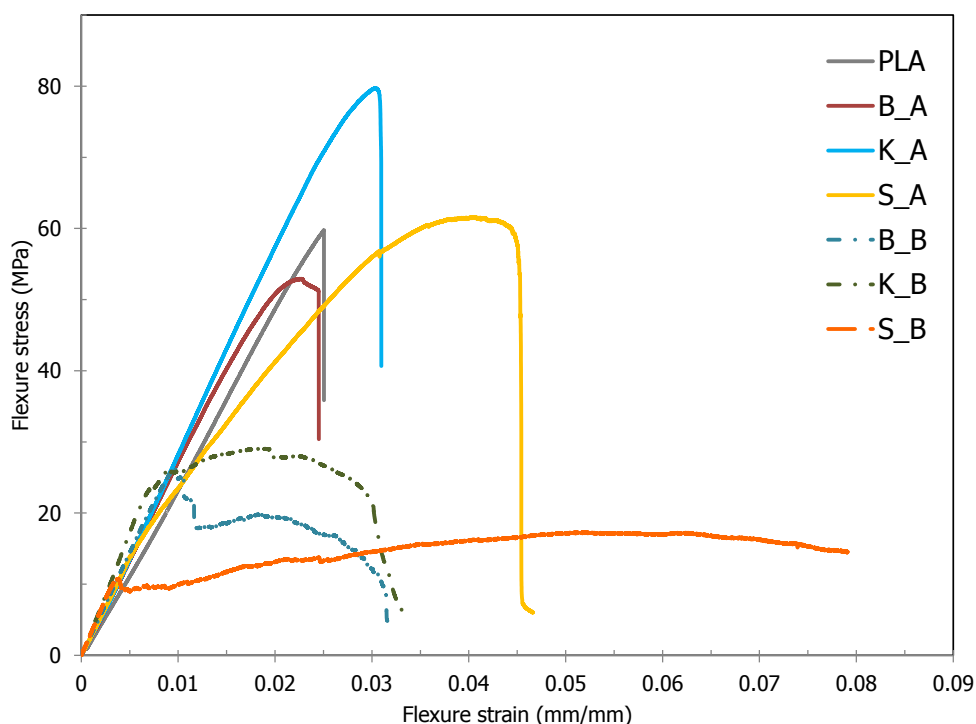
วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอแบบเส้นใยเดี่ยวเสริมแรงที่วางในแนวตั้งฉากกัน ในส่วนนี้มีทั้งหมด 3 ชนิดได้แก่ วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย (B) วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว (K) วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานครนารายณ์ (S) ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์แทนด้วยตัวอักษรในวงเล็บด้านท้าย

4.3.2.1.1 การศึกษาสมบัติการดัดโค้งของวัสดุไบโอคอมโพสิต

เนื่องจากชิ้นตัวอย่างของวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ทำทดสอบการดัดโค้งในส่วนนี้ สามารถมีรูปแบบการจัดเรียงเส้นใยธรรมชาติที่แตกต่างกันได้สองลักษณะดังภาพที่ 4.30 ดังนั้นจึงทดสอบชิ้นตัวอย่างตามลักษณะการจัดเรียงเส้นใยธรรมชาติในรูปแบบข้างต้นเพื่อหาว่ารูปแบบใดจะทำให้วัสดุไบโอคอมโพสิตมีความแข็งแรงที่สุด



ภาพที่ 4.30 แสดงลักษณะทิศทางของเส้นใยธรรมชาติภายในวัสดุไบโอคอมโพสิต และแรงกระทำในการทดสอบการดัดโค้ง



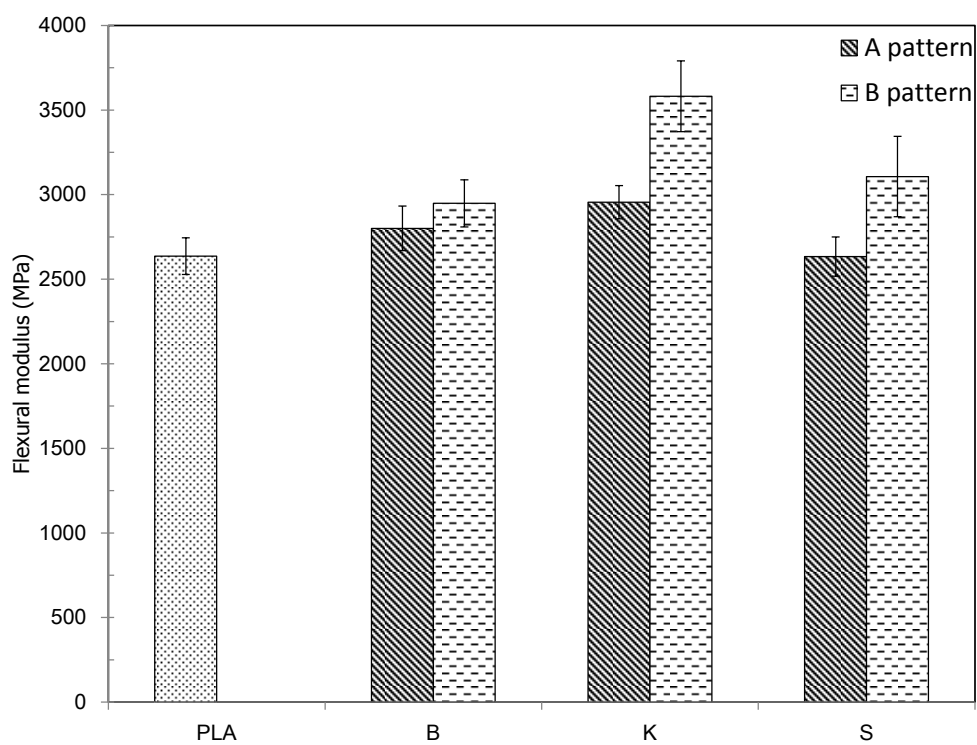
ภาพที่ 4.31 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดของการดัดโค้ง (Flexural Stress-Strain curve) ของวัสดุไบโອคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด

จากกราฟแสดงความเค้น-ความเครียดของการดัดโค้งในภาพที่ 4.31 พบว่าทั้งใน พอลิแลคติกแอซิดมีลักษณะการแตกหักแบบเปราะ ที่เมื่อให้แรงจนถึงจุดวิกฤติจะเกิดการหักงอเสียหายไปในทันที แต่ในวัสดุไบโອคอมโพสิตยังมีการโค้งงอต่อไปได้อีกหลังจากเริ่มมีการเสียหายแล้ว โดยรูปแบบ A นั้นสามารถโค้งงอต่อไปได้น้อยกว่ารูปแบบ B มาก สาเหตุเพราะเมื่อเส้นใยธรรมชาติที่รับแรงดึง (Tension force) ด้านล่างเกิดการเสียหายขึ้น เส้นใยที่อยู่ด้านบนจะรับแรงดึงแทน ซึ่งเส้นใยธรรมชาติที่วางในแนวขนานกับแรงดึงจะรับแรงดึงได้ดีกว่าเส้นใยธรรมชาติที่วางขวางทำให้เมื่อเส้นใยธรรมชาติที่วางขนานกับแรงดึงด้านล่างในรูปแบบ A ขาดออก เส้นใยธรรมชาติด้านบนที่อยู่ในแนวขวางไม่สามารถรับแรงดึงได้ดีจึงเสียหายเกิดการสภาพทำให้วัสดุไบโອคอมโพสิตโค้งงอได้น้อย แต่ในรูปแบบ B จะมีพฤติกรรมตรงกันข้าม คือ เส้นใยธรรมชาติด้านล่างอยู่ในแนวขวางที่รับแรงดึงได้น้อย จึงทำให้วัสดุไบโອคอมโพสิตเริ่มเสียหายก่อน แต่เส้นใยธรรมชาติในแนวขนานด้านบนจะรับแรงดึงได้ดีช่วยทำให้วัสดุไบโອคอมโพสิตโค้งงอต่อไปได้มากกว่า

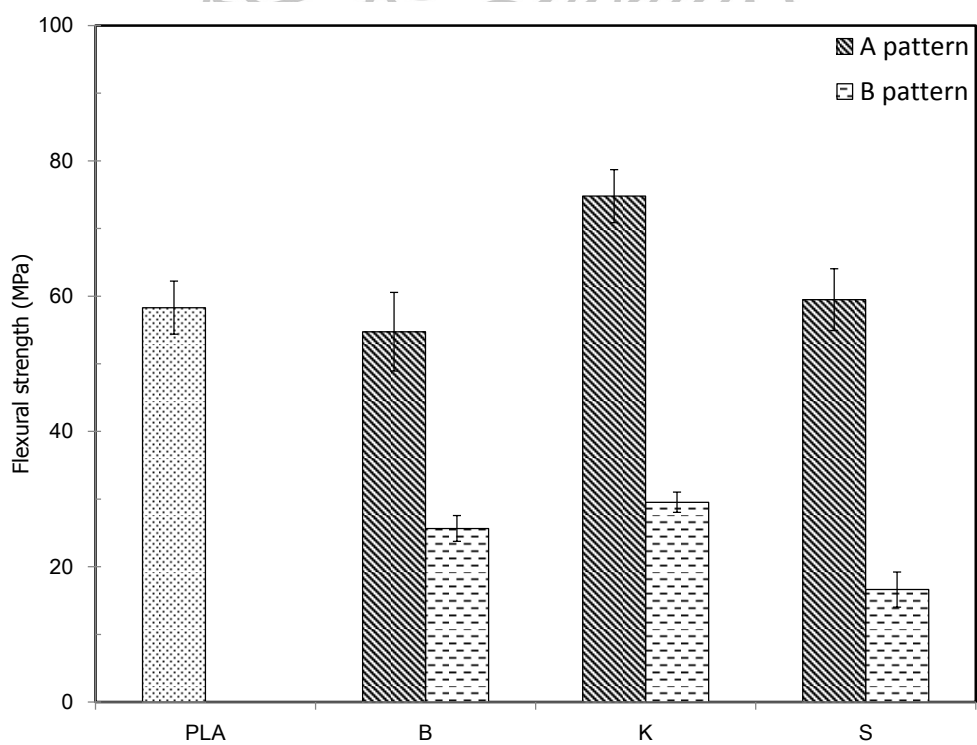
จากกราฟค่าโมดูลัสการตัดโค้ง และค่าความต้านทานต่อการตัดโค้งในภาพที่ 4.32 และ 4.33 ตามลำดับ พบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีค่าโมดูลัสการตัดโค้งที่น้อยกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตทั้งสามชนิด เนื่องจากพอลิแลคติกแอซิดมีค่าโมดูลัสการตัดโค้งที่น้อยกว่าเส้นใยธรรมชาติ [1,2] โดยในรูปแบบ B วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย (B) ที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว (K) และที่ใช้ผ้าทอป่านสนนารายณ์ (S) มีค่าโมดูลัสการตัดโค้งสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิดอยู่ 11.84% 35.82% และ 17.85% ตามลำดับในรูปแบบ A วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย และที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว มีค่าโมดูลัสการตัดโค้งสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิดอยู่ 6.23% และ 12.10% ตามลำดับแต่ วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอป่านสนนารายณ์มีค่าโมดูลัสการตัดโค้งต่ำกว่าพอลิแลคติกแอซิดอยู่ 0.11%

โดยพบว่าในรูปแบบ B จะมีค่าโมดูลัสการตัดโค้งที่สูงกว่ารูปแบบ A สาเหตุเพราะวัสดุไบโอคอมโพสิตในรูปแบบ B เริ่มเกิดการเสียสภาพก่อนรูปแบบ A ค่าความเครียด (Strain) ที่ใช้คำนวณค่าโมดูลัสจึงมีค่าน้อยกว่าในรูปแบบ A ที่เสียสภาพช้ากว่า ทำให้รูปแบบ B มีค่าโมดูลัสที่สูงกว่าสำหรับค่าความต้านทานต่อการตัดโค้งของพอลิแลคติกแอซิดมีค่าสูงกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตโดยในรูปแบบ B วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วยที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว และที่ใช้ผ้าทอป่านสนนารายณ์ มีค่าความต้านทานการการตัดโค้งต่ำกว่าพอลิแลคติกแอซิดอยู่ 55.99% 49.35% และ 71.48% ตามลำดับในรูปแบบ A วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย มีค่าความต้านทานการการตัดโค้งต่ำกว่าพอลิแลคติกแอซิดอยู่ 6.12% แต่วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว และที่ใช้ผ้าทอป่านสนนารายณ์มีค่าความต้านทานการการตัดโค้งสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิดอยู่ 28.27% และ 2.04% ตามลำดับซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบในหัวข้อ 4.3.1.1 ที่พบว่าการใช้เส้นใยปอแก้วจะทำให้วัสดุไบโอคอมโพสิตมีความแข็งแรงที่ดีกว่าเส้นใยป่านสนนารายณ์ และเส้นใยกล้วยตามลำดับ

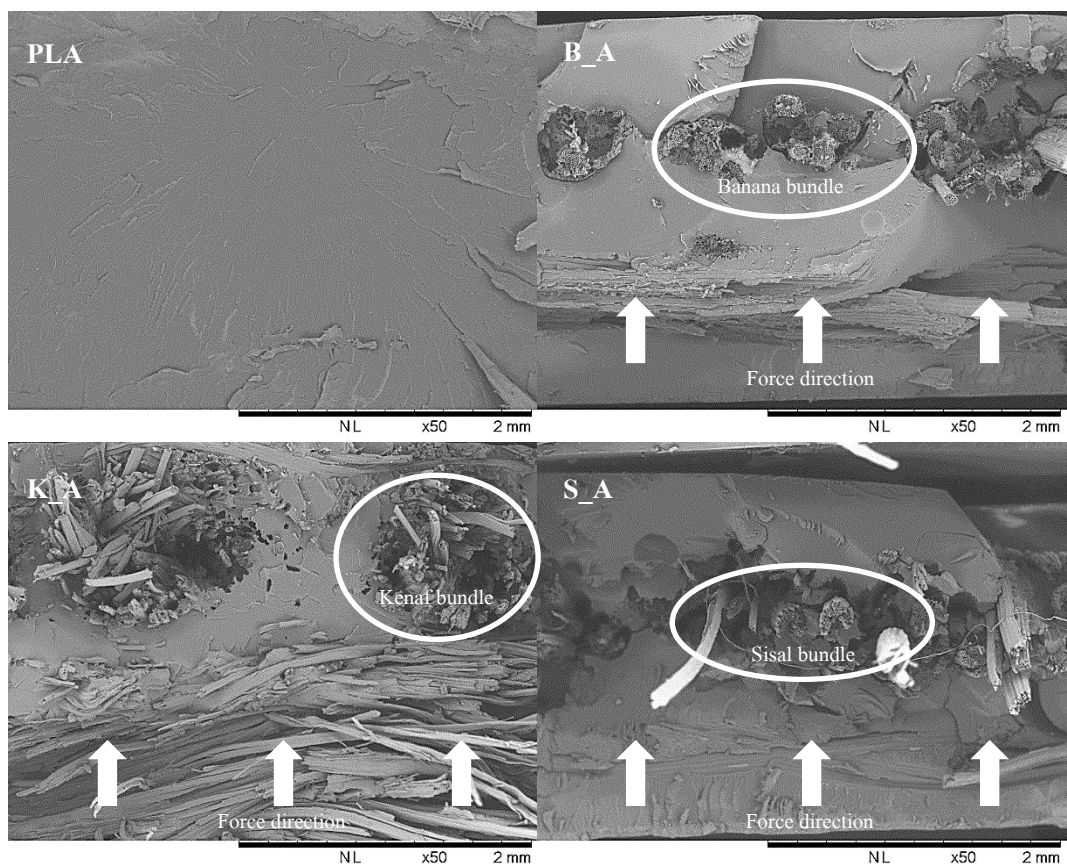
เมื่อพิจารณาจากพื้นฐานวิทยาในภาพที่ 4.34 ของวัสดุไบโอคอมโพสิตในรูปแบบ A จะเห็นว่าผ้าทอที่วางในแนวตั้งฉากภายในวัสดุไบโอคอมโพสิต มีการขาดเกิดขึ้นทั้งด้านบนและด้านล่างในลักษณะที่แตกต่างกันคือ เส้นใยธรรมชาติที่รับแรงดึงด้านล่าง เกิดการขาดหรือหลุดออกจากเมตริกซ์แต่เส้นใยธรรมชาติด้านบนที่รับแรงกด เกิดการแยก หรือฉีกออกของกลุ่มเส้นใยธรรมชาติซึ่งแสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงของวัสดุไบโอคอมโพสิตนั้นถูกควบคุมโดยความแข็งแรงของเส้นใยธรรมชาติที่เสริมแรงอยู่ภายในมากกว่าพอลิแลคติกแอซิดที่เป็นเมตริกซ์ มีผลให้วัสดุไบโอคอมโพสิตที่มีเส้นใยปอแก้ว ซึ่งมีกลุ่มเส้นใยธรรมชาติขนาดใหญ่กว่าเส้นใยธรรมชาติอื่นดังแสดงในภาพที่ 4.34 จึงแสดงความแข็งแรงที่ดีกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตชนิดอื่น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [45,46]



ภาพที่ 4.32 แสดงค่าโมดูลัสการดัดโค้ง ของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด



ภาพที่ 4.33 แสดงค่าความต้านทานต่อการดัดโค้ง ของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด

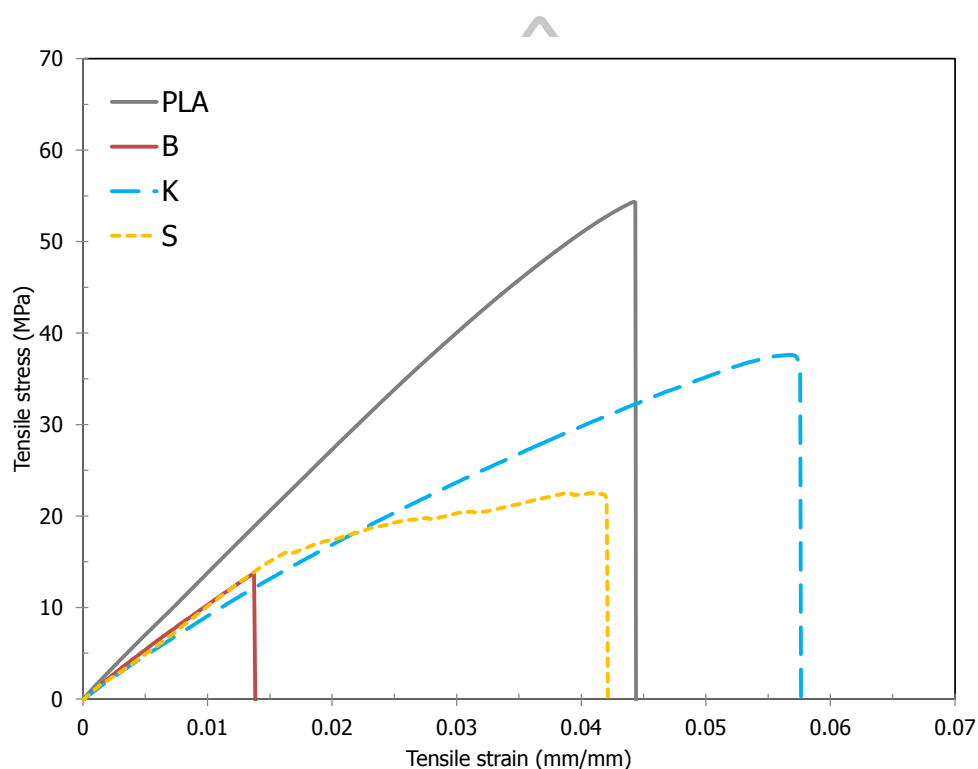


ภาพที่ 4.34 แสดงภาพสัณฐานวิทยา (SEM) ในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างพอลิแลคติก แอซิด (PLA) กับวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย (B) วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว (K) และวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอป่านศรนารายณ์ (S) ในรูปแบบ A ที่ผ่านการทดสอบการ ดัดโค้ง



4.3.2.1.2 การศึกษาสมบัติการดึงยึดของวัสดุไบโอคอมโพสิต

ชิ้นตัวอย่างของวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ทำทดสอบการดึงยึดในงานวิจัยนี้ จึงทำการจัดเรียงให้เส้นใยธรรมชาติที่สนใจศึกษาอยู่ในทิศทางเดียวกับแรงดึง เพื่อให้รับแรงดึงที่เกิดขึ้นในขณะทดสอบการดึงยึด แต่การใช้ผ้าทอเส้นใยธรรมชาติในแนวตั้งฉาก (Transverse) ในการทดสอบนี้ ไม่ทำให้ชิ้นตัวอย่างมีรูปแบบที่แตกต่างกับแบบการทดสอบการตัดโค้ง (ในหัวข้อ 4.3.2.1.1) ดังนั้นจึงทำการจัดเรียงให้เส้นใยธรรมชาติที่สนใจศึกษามีลักษณะดังภาพที่ 4.10 ข้างต้น

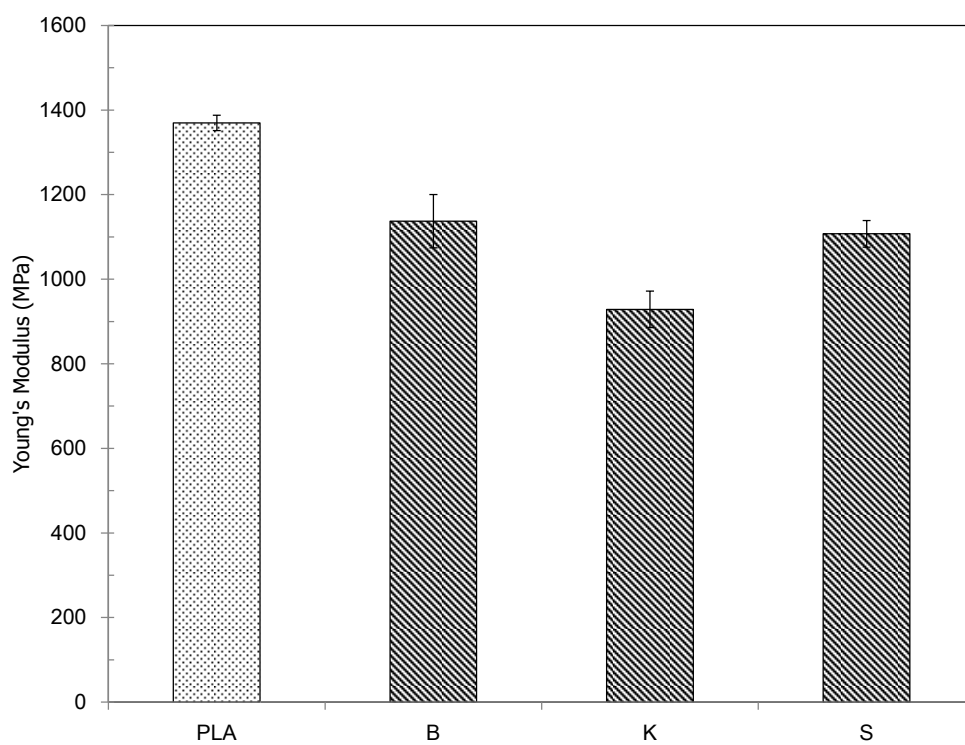


ภาพที่ 4.35 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain curve) ของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด

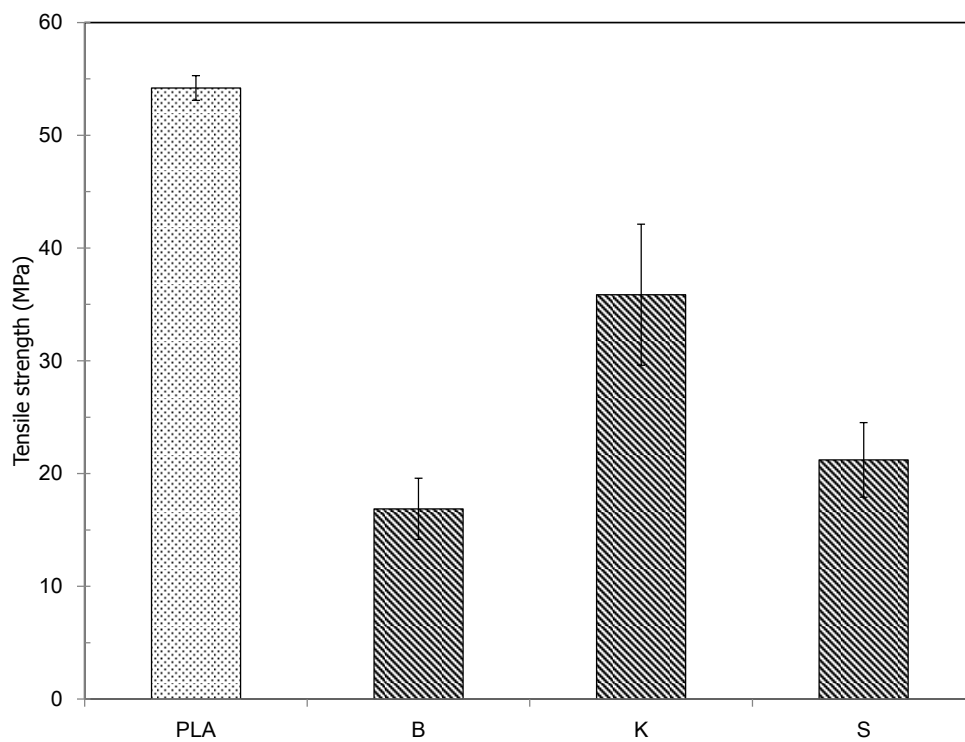
จากกราฟแสดงความเค้น-เครียดของชิ้นตัวอย่างที่ทำการทดสอบการดึงยึดในภาพที่ 4.35 พบว่าทั้งพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุไบโอคอมโพสิตทั้งหมดมีลักษณะการแตกหักแบบเปราะเช่นเดียวกัน ซึ่งเมื่อให้แรงจนถึงจุดวิกฤติจะเกิดการขาดเสียหายไปในทันที โดยในวัสดุไบโอคอมโพสิตจะเกิดการแตกร้าวของพื้นผิวพอลิแลคติกแอซิดภายนอกขึ้นก่อน แล้วจึงเกิดการขาดของเส้นใยธรรมชาติภายในตามมา ดังจะเห็นได้จากภาพสัณฐานวิทยาที่แสดงการขาด และหลุดออกของเส้นใยธรรมชาติในภาพที่ 4.39

จากกราฟค่าโมดูลัสของยัง ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาดในภาพที่ 4.36 4.37 และ 4.38 ตามลำดับ พบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีค่าโมดูลัสของยังที่สูงกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตทั้งสามชนิดโดยมีค่าสูงกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย (B) ที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว (K) และที่ใช้ผ้าทอป่านสรนารายณ์ (S) อยู่ 25.74% 29.35% และ 27.69% ตามลำดับ สำหรับค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิแลคติกแอซิดมีค่าสูงกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย ที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว และที่ใช้ผ้าทอป่านสรนารายณ์อยู่ 66.29% 28.33% และ 57.62% ตามลำดับ สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาดของวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วยมีค่าต่ำกว่าพอลิแลคติกแอซิดอยู่ 56.39% วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว และที่ใช้ผ้าทอป่านสรนารายณ์มีค่าสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิดอยู่ 27.46% และ 3.10% ตามลำดับ

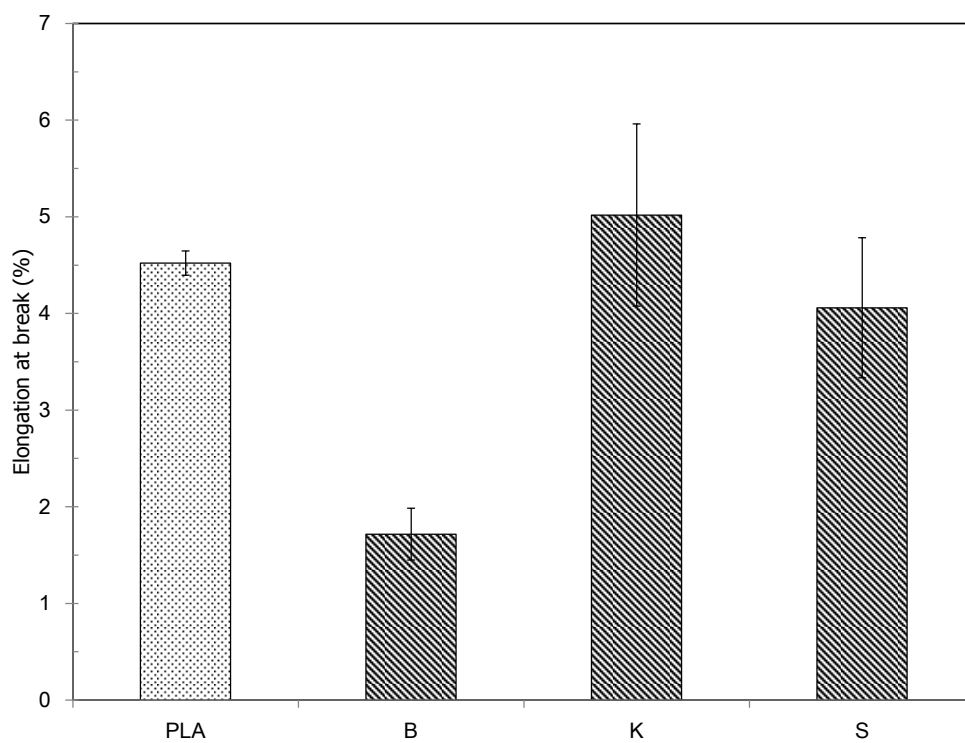
เมื่อพิจารณาจากสัณฐานวิทยาในภาพที่ 4.39 จะเห็นว่าการใช้ผ้าทอที่วางในแนวตั้งฉาก เส้นใยธรรมชาติที่อยู่ในแนวนานกับแรงดึงจะรับแรงดึงได้ดีกว่าเส้นใยธรรมชาติในแนวขวาง และเนื่องจากความแข็งแรงของวัสดุไบโอคอมโพสิตนั้นถูกควบคุมโดยความแข็งแรงของเส้นใยธรรมชาติที่เสริมแรงอยู่ภายในมีผลให้วัสดุไบโอคอมโพสิตที่มีเส้นใยปอแก้ว ซึ่งมีกลุ่มเส้นใยธรรมชาติขนาดใหญ่กว่าเส้นใยธรรมชาติอื่นดังแสดงในภาพที่ 4.39 จึงแสดงความแข็งแรงที่ดีกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตชนิดอื่นแม้ว่าความแข็งแรงของวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอในแนวตั้งฉากมีค่าน้อยกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอในแนวนาน (จากหัวข้อ 4.3.1.1.2) แต่แนวโน้มของความแข็งแรงยังสอดคล้องกับผลการทดสอบในหัวข้อ 4.3.1.1 ที่พบว่าการใช้เส้นใยปอแก้วจะทำให้วัสดุไบโอคอมโพสิตมีความแข็งแรงที่ดีกว่าเส้นใยป่านสรนารายณ์ และเส้นใยกล้วยตามลำดับ



ภาพที่ 4.36 แสดงค่าโมดูลัสของแข็ง ของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด

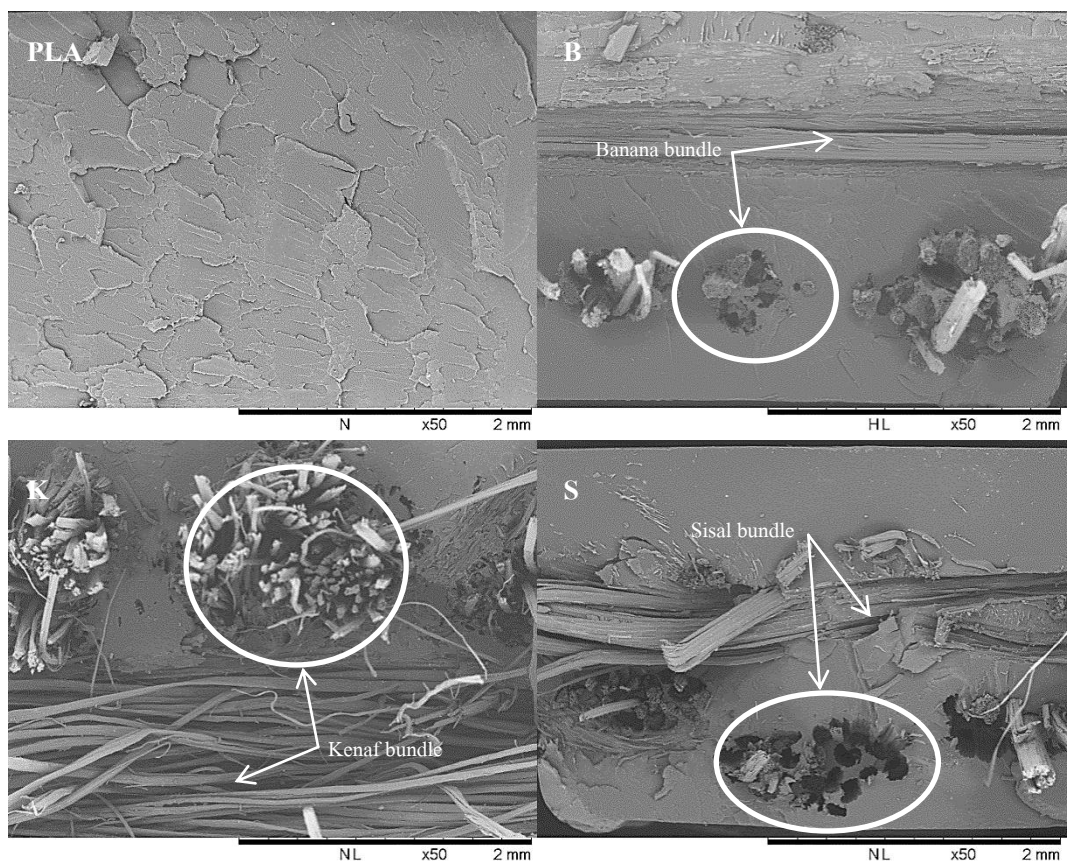


ภาพที่ 4.37 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึง ของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด



ภาพที่ 4.38 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด ของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด



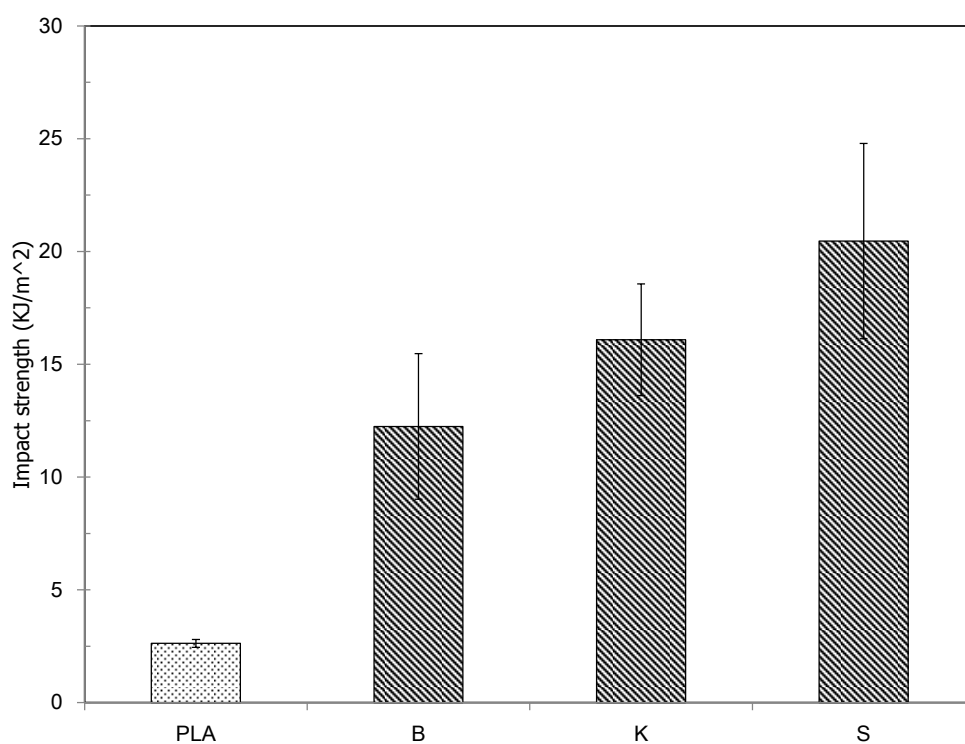


ภาพที่ 4.39 แสดงภาพสัณฐานวิทยา (SEM) ในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างพอลิแลคติก แอซิด (PLA) กับวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย (B) วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว (K) และวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอป่านศรนารายณ์ (S) ที่ผ่านการทดสอบการดึงยึด

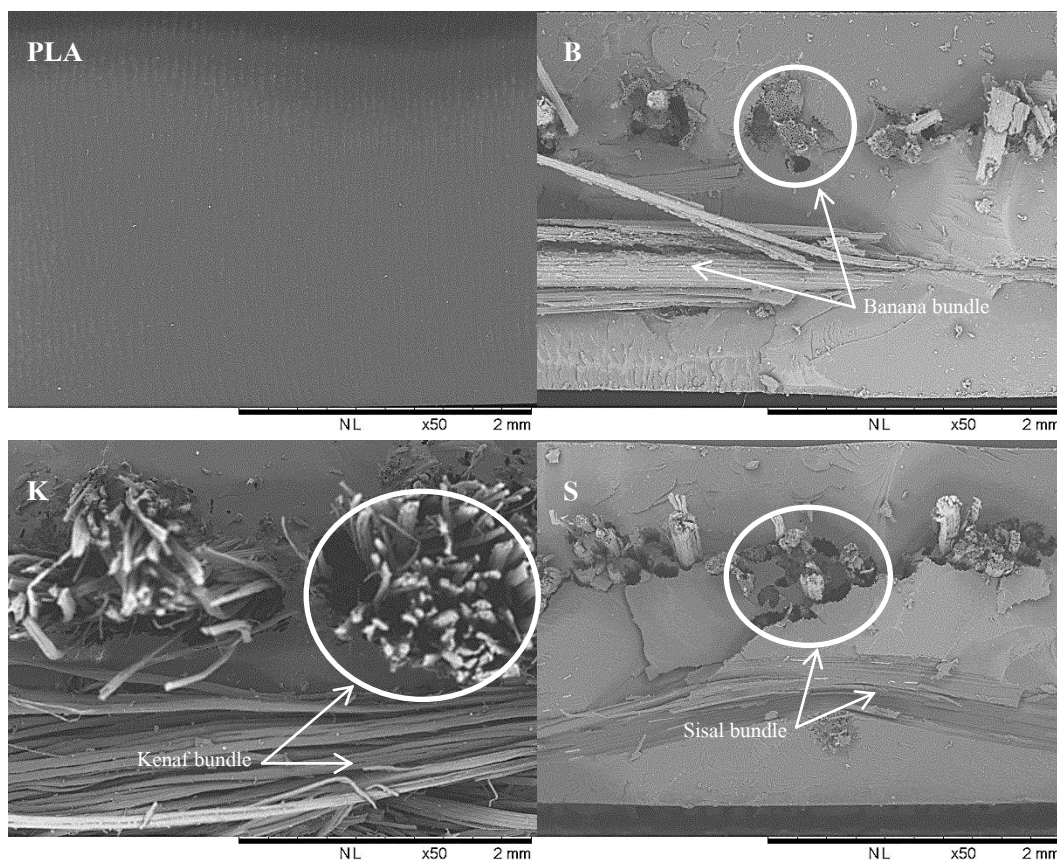


4.3.2.1.3 การศึกษาสมบัติการกระแทกของวัสดุไบโอคอมโพสิต

ในหัวข้อนี้ได้ทำการจัดเรียงให้เส้นใยธรรมชาติในชั้นงาน มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 4.16 ข้างต้น



ภาพที่ 4.40 แสดงค่าความต้านทานการกระแทกของ วัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด



ภาพที่ 4.41 แสดงภาพสัณฐานวิทยา (SEM) ในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย (B) ที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว (K) และที่ใช้ผ้าทอป่านสรนารายณ์ (S) ที่ผ่านการทดสอบการกระแทก

จากค่าความต้านทานการกระแทกแสดงในภาพที่ 4.40 พบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีค่าความต้านทานการกระแทกต่ำที่สุด โดยมีค่าต่ำกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย (B) ที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว (K) และที่ใช้ผ้าทอป่านสรนารายณ์ (S) อยู่ 366.24% 512.79% และ 679.32% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสัณฐานวิทยาในภาพที่ 4.41 จะเห็นว่าพื้นผิวรอยแตกของพอลิแลคติกแอซิดมีลักษณะเรียบเสมอซึ่งแสดงลักษณะการแตกหักแบบเปราะ สำหรับในวัสดุไบโอคอมโพสิตพบกลุ่มของเส้นใยธรรมชาติที่ขาดออก และโผล่ออกมาจากเมตริกซ์นั้นมีลักษณะแตกต่างกัน คือ เส้นใยกล้วยส่วนใหญ่จะโผล่พื้นออกมาจากเมตริกซ์เพียงเล็กน้อย ในขณะที่เส้นใยปอแก้ว และเส้นใยป่านสรนารายณ์ จะอยู่ในลักษณะของกลุ่มของเส้นใยที่โผล่หลุดออกมาจากเมตริกซ์จำนวนมากว่า แสดงให้เห็นว่าเส้นใยกล้วยมีความเปราะ และแข็งแรงน้อยกว่าเส้นใยชนิดอื่น ซึ่งสอดคล้องกับความแข็งแรงของเส้นใยธรรมชาติในลักษณะเดียวกับงานวิจัยอื่นที่กล่าวไว้ข้างต้น [26,27,29] และสำหรับขนาดของกลุ่มเส้นใยธรรมชาตินั้น พบว่ากลุ่มของเส้นใยปอแก้วมี

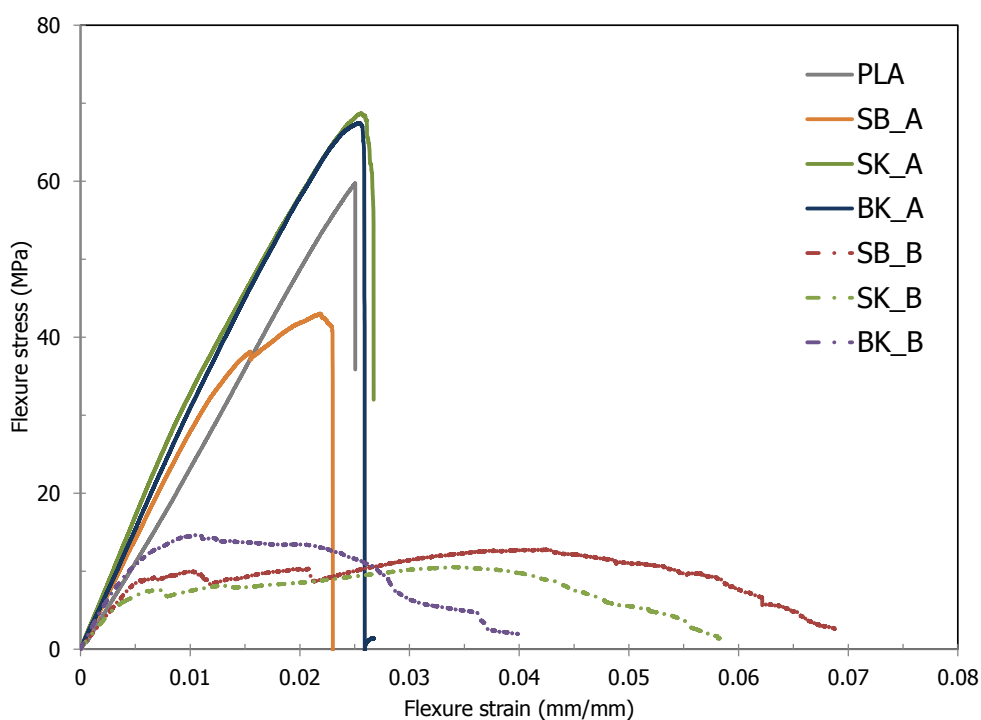
ขนาดที่ใหญ่ที่สุดซึ่งส่งผลให้วัสดุไบโอคอมโพสิตที่มีการใช้เส้นใยปอแก้วจึงมีความแข็งแรงที่สูงกว่าเส้นใยธรรมชาติอื่น สอดคล้องกับผลการทดลองก่อนหน้าในหัวข้อ 4.3.1.1 ข้างต้น

4.3.2.2 ผลของการเสริมแรงด้วยผ้าทอแบบเส้นใยผสม

วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอแบบเส้นใยผสมเสริมแรง ที่วางในแนวตั้งฉากกันในส่วนนี้มีทั้งหมด 3 ชนิดได้แก่ วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้ว (BK) วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอป่านศรนารายณ์-กล้วย (SB) วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอป่านศรนารายณ์-ปอแก้ว (SK) ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์แทนด้วยตัวอักษรในวงเล็บด้านท้าย

4.3.2.2.1 การศึกษาสมบัติการดัดโค้งของวัสดุไบโอคอมโพสิต

เนื่องจากชิ้นตัวอย่างของวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ทำทดสอบการดัดโค้งในส่วนนี้ สามารถมีรูปแบบการจัดเรียงเส้นใยธรรมชาติที่แตกต่างกันได้สองลักษณะดังเช่นในหัวข้อ 4.3.2.1.1 ดังนั้นจึงทดสอบชิ้นตัวอย่างที่จัดเรียงเส้นใยธรรมชาติในลักษณะข้างต้น เพื่อหาว่ารูปแบบใดจะทำให้วัสดุไบโอคอมโพสิตมีความแข็งแรงที่สุด



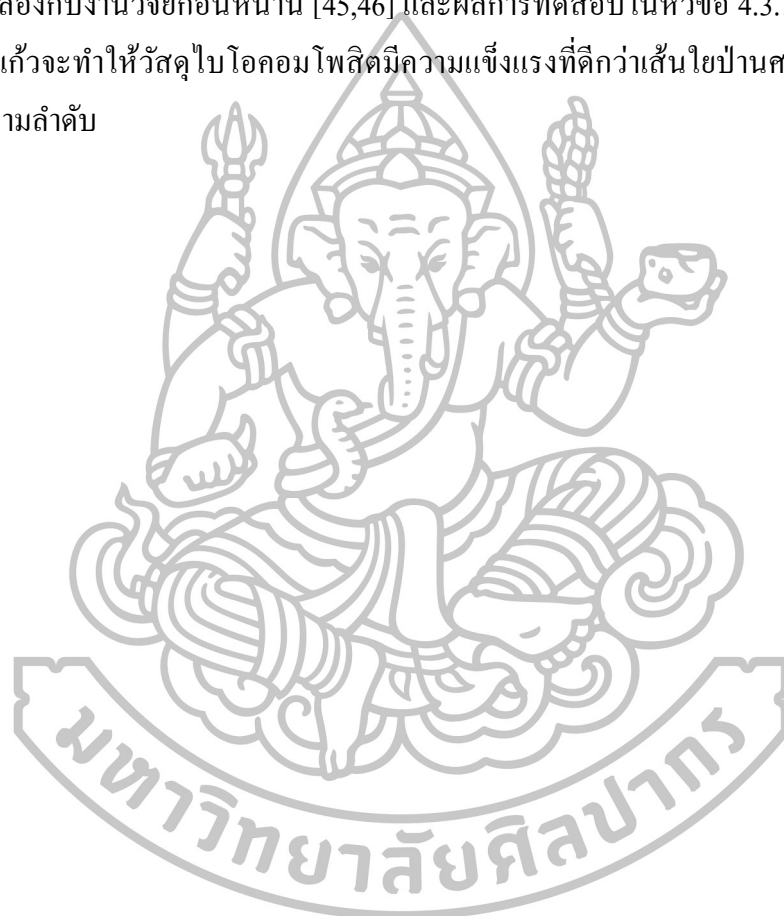
ภาพที่ 4.42 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดของการดัดโค้ง (Flexural Stress-Strain curve) ของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด

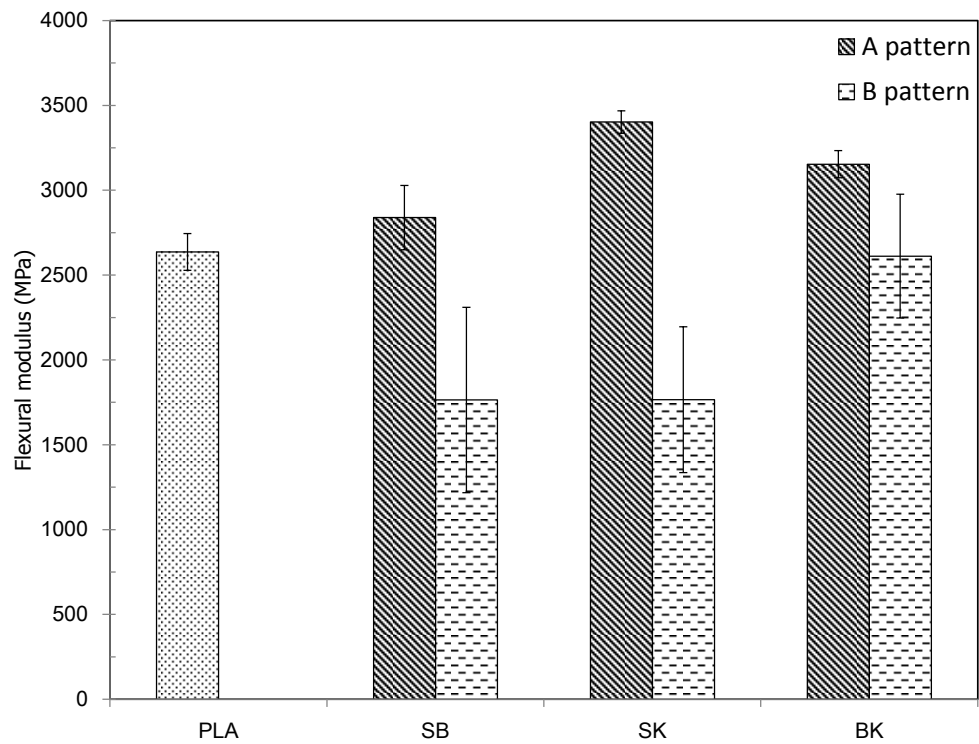
จากกราฟแสดงความเค้น-ความเครียดของการตัดโค้งในภาพที่ 4.42 พบว่าทั้งใน พอลิแลคติกแอซิดมีลักษณะการแตกหักแบบเปราะ ที่เมื่อให้แรงจนถึงจุดวิกฤติจะเกิดการหักงอเสียหายไปในทันที แต่ในวัสดุไบโอคอมโพสิตยังมีการโค้งงอต่อไปได้อีกหลังจากเริ่มมีการเสียหายแล้ว โดยรูปแบบ A นั้นสามารถโค้งงอต่อไปได้น้อยกว่ารูปแบบ B มาก สาเหตุเพราะเมื่อเส้นใยธรรมชาติที่รับแรงดึง (Tension force) ด้านล่างเกิดการเสียหายขึ้น เส้นใยที่อยู่ด้านบนจะรับแรงดึงแทน ซึ่งเส้นใยธรรมชาติที่วางในแนวขนานกับแรงดึงจะรับแรงดึงได้ดีกว่าเส้นใยธรรมชาติที่วางขวาง ทำให้เมื่อเส้นใยธรรมชาติที่วางขนานกับแรงดึงด้านล่างในรูปแบบ A ขาดออก เส้นใยธรรมชาติด้านบนที่อยู่ในแนวขวางไม่สามารถรับแรงดึงได้ดีจึงเสียหายสภาพทำให้วัสดุไบโอคอมโพสิตโค้งงอได้น้อย แต่ในรูปแบบ B จะมีพฤติกรรมตรงกันข้าม คือ เส้นใยธรรมชาติด้านล่างอยู่ในแนวขวางที่รับแรงดึงได้น้อย จึงทำให้วัสดุไบโอคอมโพสิตเริ่มเสียหายก่อน แต่เส้นใยธรรมชาติในแนวขนานด้านบนจะรับแรงดึงได้ดีช่วยทำให้วัสดุไบโอคอมโพสิตโค้งงอต่อไปได้มากกว่า

จากกราฟค่าโมดูลัสการตัดโค้ง และค่าความต้านทานต่อการตัดโค้งในภาพที่ 4.43 และ 4.44 ตามลำดับ พบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีค่าโมดูลัสการตัดโค้งที่น้อยกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตในรูปแบบ A ทั้งสามชนิดเนื่องจากพอลิแลคติกแอซิดมีค่าโมดูลัสการตัดโค้งที่น้อยกว่าเส้นใยธรรมชาติ [1,2] โดยในรูปแบบ B วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-กล้วย (SB) ที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-ปอแก้ว (SK) และที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้ว (BK) มีค่าโมดูลัสการตัดโค้งต่ำกว่าพอลิแลคติกแอซิดอยู่ 33.08% 33.05% และ 0.94% ตามลำดับ และมีค่าความต้านทานต่อการตัดโค้งต่ำกว่าพอลิแลคติกแอซิดอยู่ 74.15% 80.42% และ 78.31% ตามลำดับ ในรูปแบบ A วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-กล้วย ที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-ปอแก้ว และที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้วมีค่าโมดูลัสการตัดโค้งสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิดอยู่ 7.68% 29.04% และ 19.60% ตามลำดับ วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-กล้วย มีค่าความต้านทานการตัดโค้งต่ำกว่าพอลิแลคติกแอซิดอยู่ 14.34% แต่วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-ปอแก้ว และที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้ว มีค่าความต้านทานการการตัดโค้งสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิดอยู่ 14.87% และ 13.90% ตามลำดับ

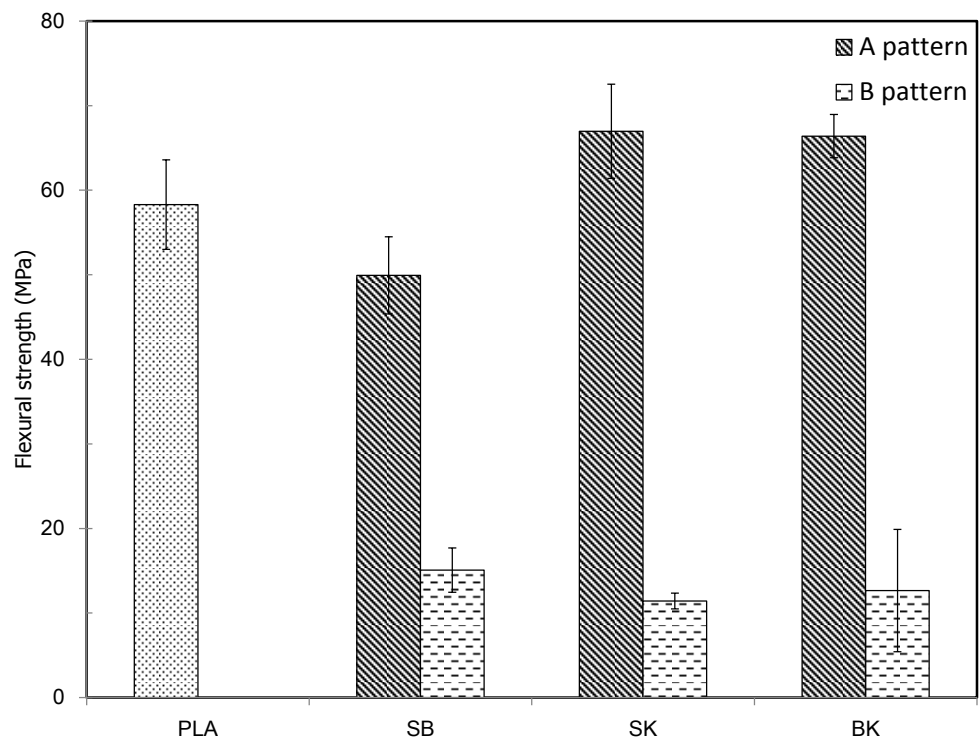
พบว่าในวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอแบบผสมรูปแบบ A จะมีค่าโมดูลัสการตัดโค้ง และค่าความต้านทานการตัดโค้ง ที่สูงกว่ารูปแบบ B สาเหตุเพราะเส้นใยธรรมชาติที่รับแรงดึงด้านล่างในรูปแบบ B อยู่ในแนวขวางไม่สามารถรับแรงดึงได้เหมือนกับในรูปแบบ A ที่อยู่ในแนวขนานกับแรงดึงโดยเมื่อพิจารณาจากสัณฐานวิทยาในภาพที่ 4.45 ของวัสดุไบโอคอมโพสิตในรูปแบบ A จะเห็นว่าผ้าทอที่วางในแนวตั้งฉากภายในวัสดุไบโอคอมโพสิต มีการขาดเกิดขึ้น

ทั้งด้านบนและด้านล่างในลักษณะที่แตกต่างกัน คือ เส้นใยธรรมชาติที่รับแรงดึงด้านล่าง เกิดการขาด หรือหลุดออกจากเมตริกซ์ แต่เส้นใยธรรมชาติด้านบนที่รับแรงกด เกิดการแยก หรือฉีกออกของกลุ่มเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงของวัสดุไบโอคอมโพสิตนั้นถูกควบคุม โดยความแข็งแรงของเส้นใยธรรมชาติที่เสริมแรงอยู่ภายในมากกว่าพอลิแลคติกแอซิดที่เป็นเมตริกซ์ มีผลให้วัสดุไบโอคอมโพสิตที่มีเส้นใยปอแก้ว ซึ่งมีกลุ่มเส้นใยธรรมชาติขนาดใหญ่กว่าเส้นใยธรรมชาติอื่นดังแสดงในภาพที่ 4.45 จึงแสดงความแข็งแรงที่ดีกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตชนิดอื่น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [45,46] และผลการทดสอบในหัวข้อ 4.3.1.1 ที่พบว่าการใช้เส้นใยปอแก้วจะทำให้วัสดุไบโอคอมโพสิตมีความแข็งแรงที่ดีกว่าเส้นใยปานสรนารายณ์ และเส้นใยกล้วยตามลำดับ

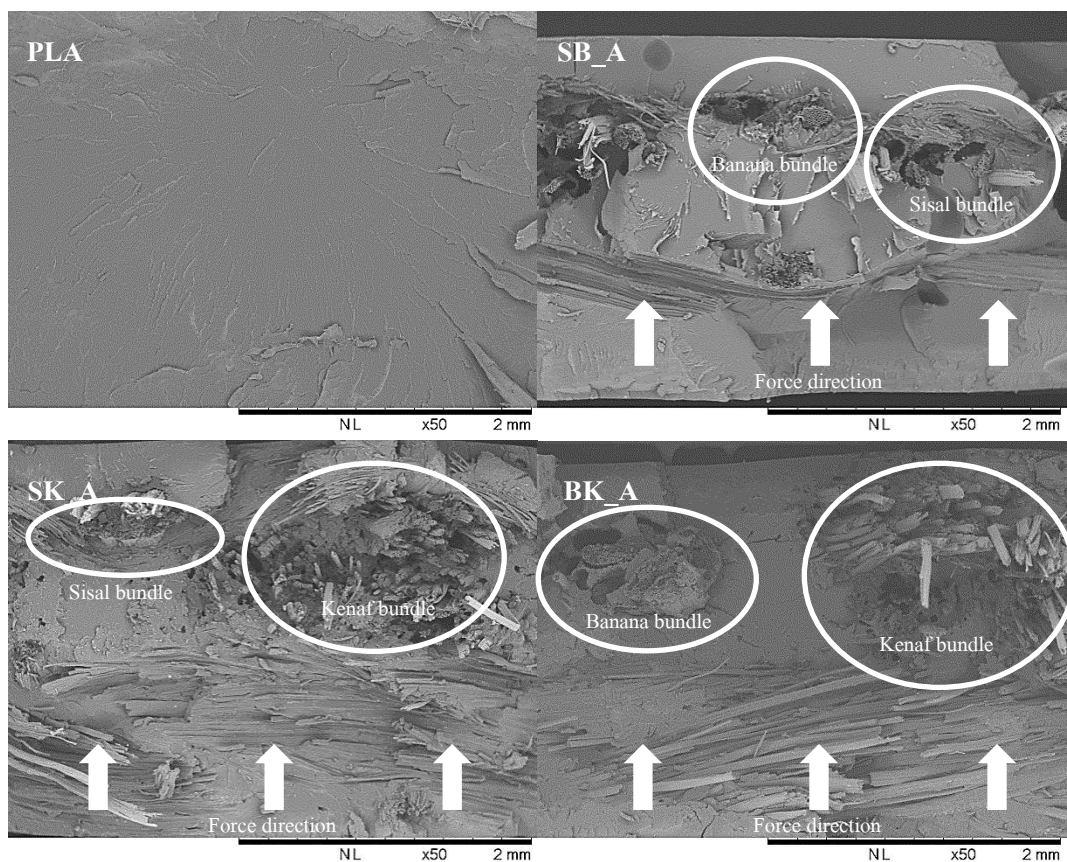




ภาพที่ 4.43 แสดงค่าโมดูลัสการดัดโค้ง ของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด



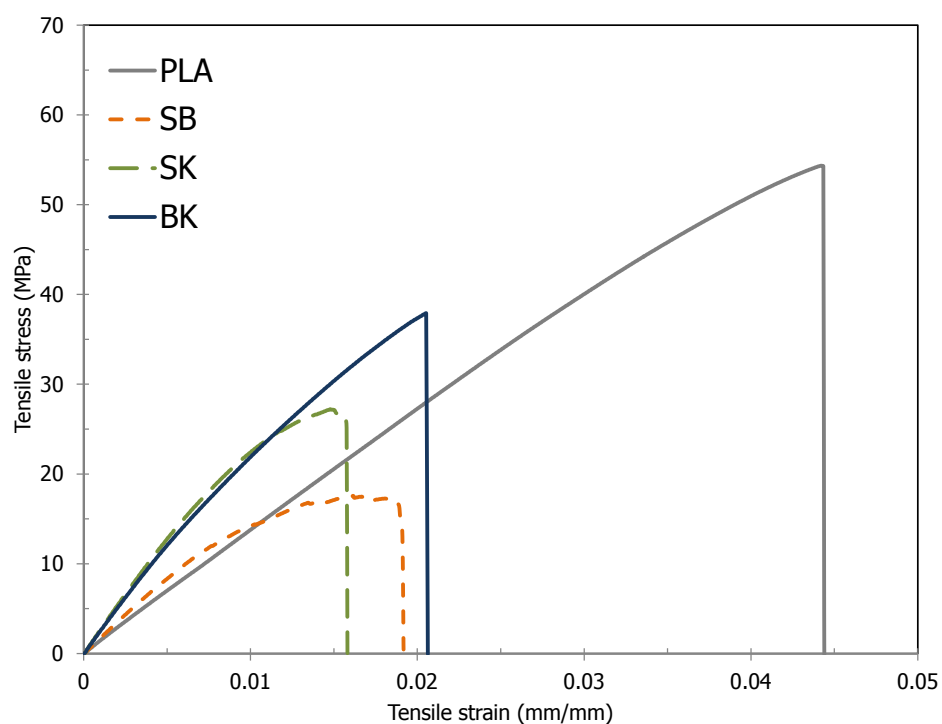
ภาพที่ 4.44 แสดงค่าความต้านทานต่อการดัดโค้ง ของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด



ภาพที่ 4.45 แสดงภาพสัณฐานวิทยา (SEM) ในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างพอลิแลคติก แอซิด (PLA) กับวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-กล้วย (SB) วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-ปอแก้ว (SK) และวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้ว (BK) ในรูปแบบ A ที่ผ่านการทดสอบการดัดโค้ง

4.3.2.2.2 การศึกษาสมบัติการดึงยึดของวัสดุไบโอคอมโพสิต

ชิ้นตัวอย่างของวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ทำทดสอบการดึงยึดในงานวิจัยนี้ จึงทำการจัดเรียงให้เส้นใยธรรมชาติที่สนใจศึกษาอยู่ในทิศทางเดียวกับแรงดึง เพื่อให้รับแรงดึงที่เกิดขึ้นในขณะทดสอบการดึงยึด แต่การใช้ผ้าทอเส้นใยธรรมชาติในแนวตั้งฉาก (Transverse) ในการทดสอบนี้ ไม่ทำให้ชิ้นตัวอย่างมีรูปแบบที่แตกต่างกันแบบการทดสอบการตัดโค้ง (ในหัวข้อ 4.3.2.1.1) ดังนั้นจึงทำการจัดเรียงให้เส้นใยธรรมชาติที่สนใจศึกษามีลักษณะดังภาพที่ 4.10 ข้างต้น

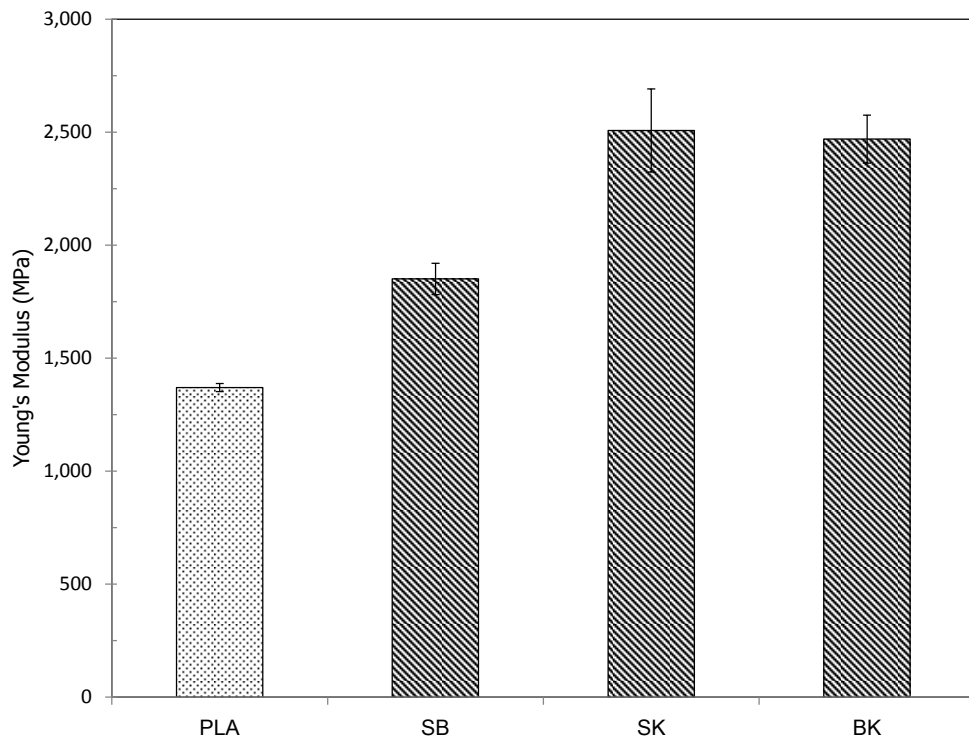


ภาพที่ 4.46 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain curve) ของวัสดุไบโอคอมโพสิต เปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด

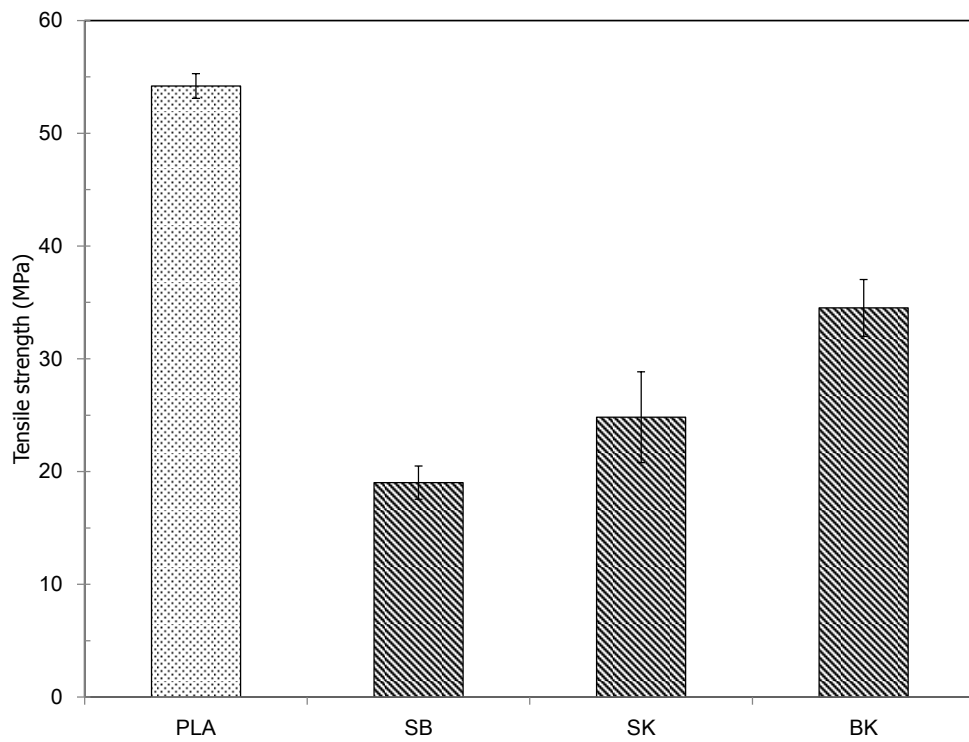
จากกราฟแสดงความเค้น-เครียดของชิ้นตัวอย่างที่ทำการทดสอบการดึงยึดในภาพที่ 4.46 พบว่าทั้งพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุไบโอคอมโพสิตทั้งหมดมีลักษณะการแตกหักแบบเปราะเช่นเดียวกัน ซึ่งเมื่อให้แรงจนถึงจุดวิกฤติจะเกิดการขาดเสียหายไปในทันที โดยในวัสดุไบโอคอมโพสิตจะเกิดการแตกร้าวของพื้นผิวพอลิแลคติกแอซิดภายนอกขึ้นก่อน แล้วจึงเกิดการขาดของเส้นใยธรรมชาติภายในตามมา ดังจะเห็นได้จากภาพสัณฐานวิทยาที่แสดงการขาด และหลุดออกของเส้นใยธรรมชาติในภาพที่ 4.50

จากกราฟค่าโมดูลัสของยัง ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาดในภาพที่ 4.46 4.47 และ 4.48 ตามลำดับ พบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีค่าโมดูลัสของยังที่ต่ำกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตทั้งสามชนิด โดยมีค่าต่ำกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-กล้วย (SB) ที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-ปอแก้ว (SK) และที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้ว (BK) อยู่ 20.84% 63.73% และ 61.25% ตามลำดับ สำหรับค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิแลคติกแอซิดมีค่าสูงกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-กล้วยอยู่ 29.63% แต่ต่ำกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-ปอแก้ว และที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้วอยู่ 46.54% และ 6.18% ตามลำดับ สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาดของพอลิแลคติกแอซิดมีค่าสูงกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตทั้งสามชนิด โดยมีค่าสูงกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-กล้วยที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-ปอแก้ว และที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้วอยู่ 52.91% 56.08% และ 50.95% ตามลำดับ

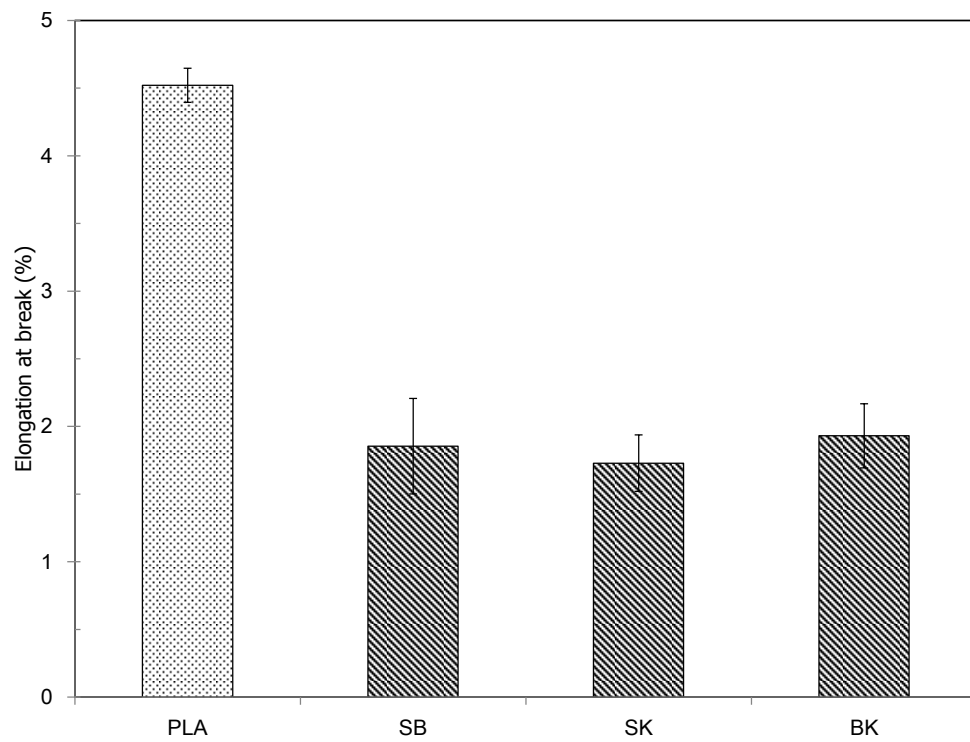
เมื่อพิจารณาจากสัณฐานวิทยาในภาพที่ 4.50 จะเห็นว่าการใช้ผ้าทอที่วางในแนวตั้งฉาก เส้นใยธรรมชาติที่อยู่ในแนวนานกับแรงดึงจะรับแรงดึงได้ดีกว่าเส้นใยธรรมชาติในแนวขวาง และเนื่องจากความแข็งแรงของวัสดุไบโอคอมโพสิตนั้นถูกควบคุมโดยความแข็งแรงของเส้นใยธรรมชาติที่เสริมแรงอยู่ภายใน มีผลให้วัสดุไบโอคอมโพสิตที่มีเส้นใยปอแก้ว ซึ่งมีกลุ่มเส้นใยธรรมชาติขนาดใหญ่กว่าเส้นใยธรรมชาติอื่นดังแสดงในภาพที่ 4.50 จึงแสดงความแข็งแรงที่ดีกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตชนิดอื่น แม้ว่าความแข็งแรงของวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอในแนวตั้งฉากมีค่าน้อยกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอในแนวนาน (จากหัวข้อ 4.3.1.2.2) แต่แนวโน้มของความแข็งแรงยังสอดคล้องกับผลการทดสอบในหัวข้อ 4.3.1.1 ที่พบว่าการใช้เส้นใยปอแก้วจะทำให้วัสดุไบโอคอมโพสิตมีความแข็งแรงที่ดีกว่าเส้นใยปานสรนารายณ์ และเส้นใยกล้วยตามลำดับ



ภาพที่ 4.47 แสดงค่าโมดูลัสของยัง ของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด

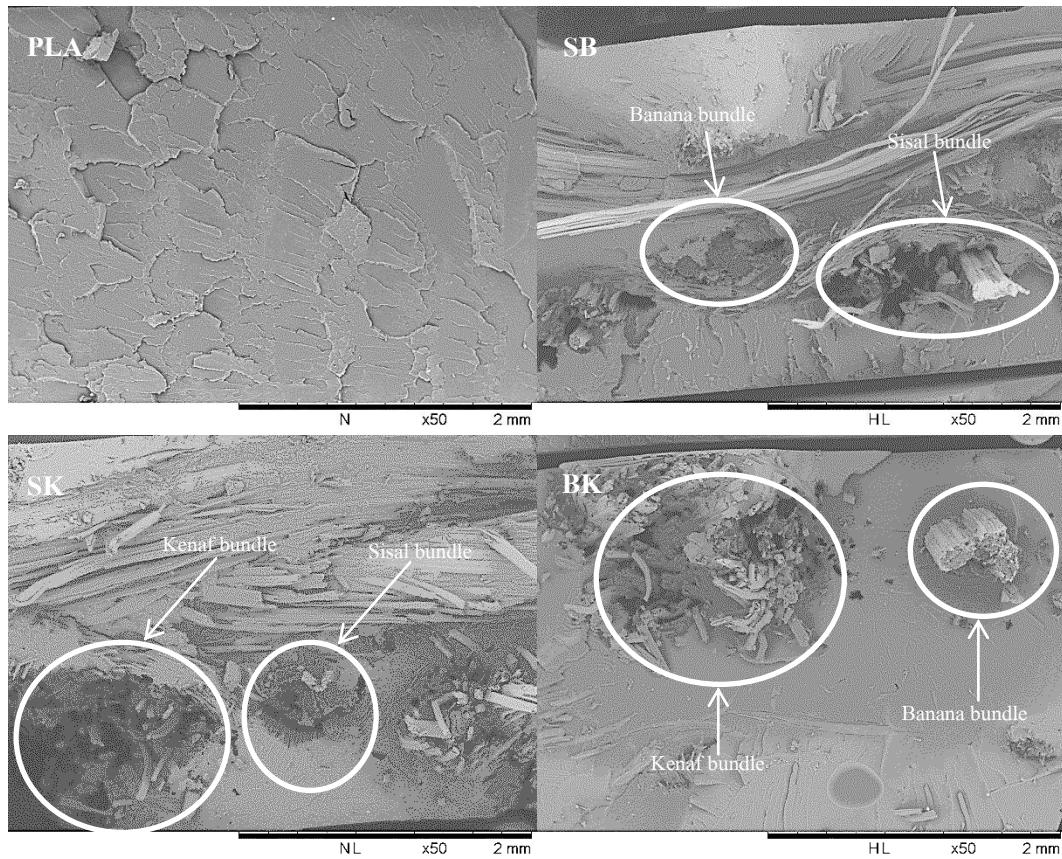


ภาพที่ 4.48 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึง ของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด



ภาพที่ 4.49 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด ของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด



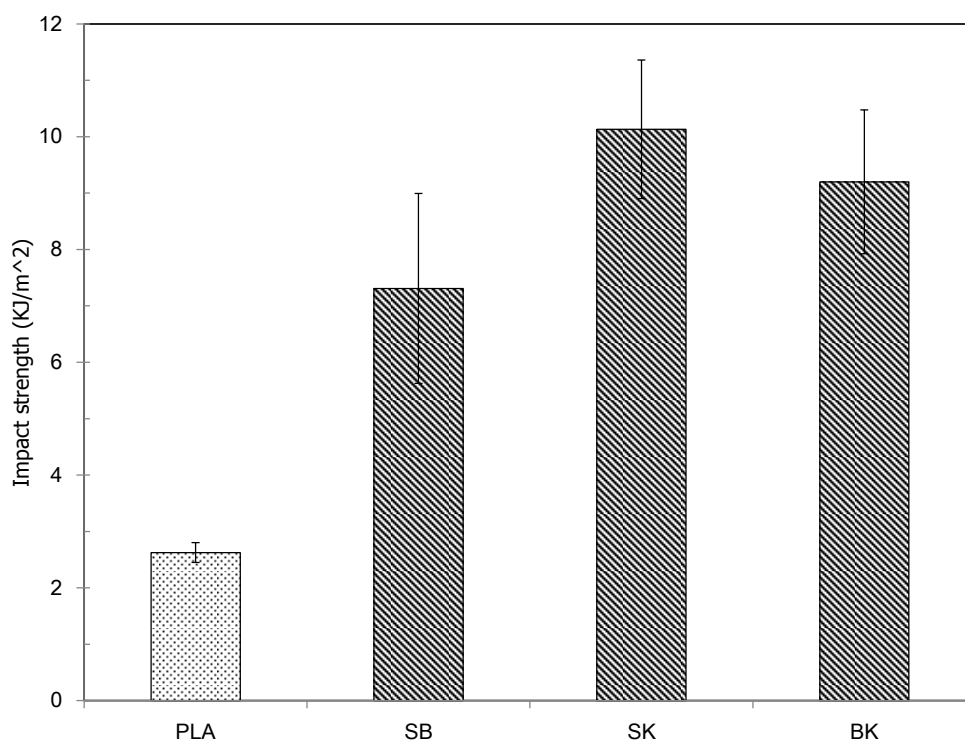


ภาพที่ 4.50 แสดงภาพสัณฐานวิทยา (SEM) ในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างพอลิแลคติก แอซิด (PLA) กับวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-กล้วย (SB) วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-ปอแก้ว (SK) และวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้ว (BK) ที่ผ่านการทดสอบการดึงยึด

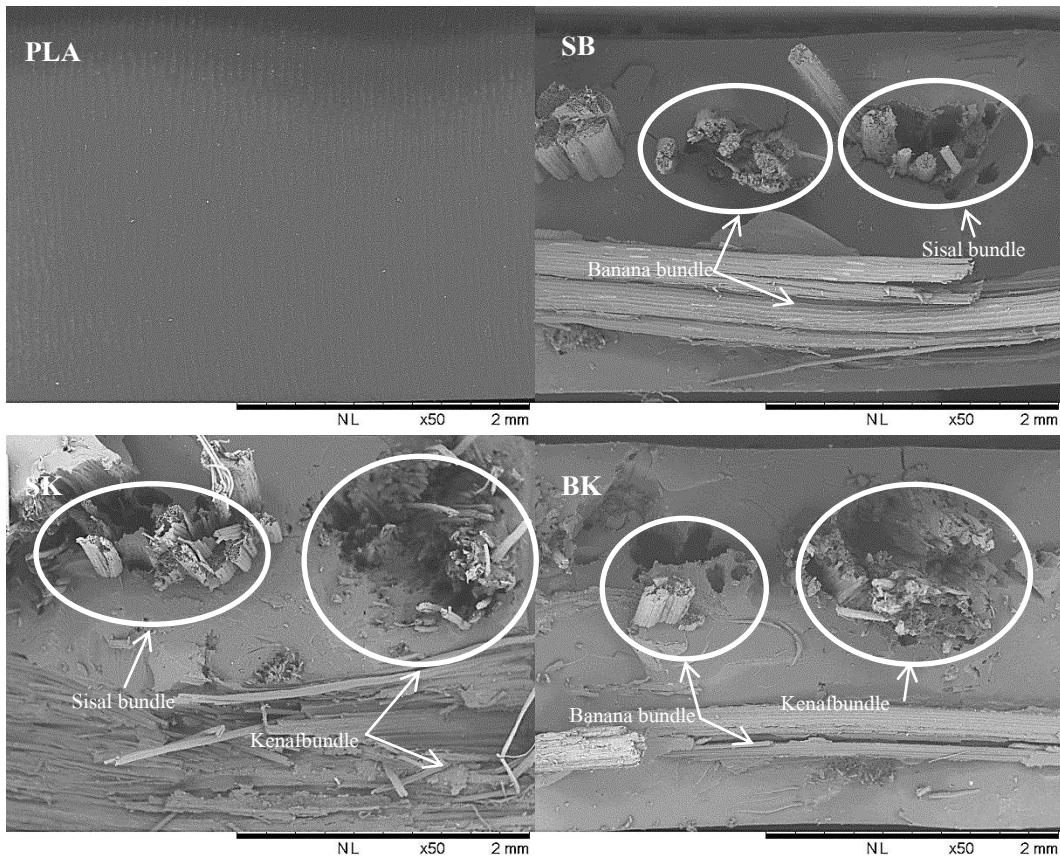
4.3.2.2.3 การศึกษาสมบัติการกระแทกของวัสดุไบโอคอมโพสิต

ในหัวข้อนี้ได้จัดเรียงเส้นใยธรรมชาติภายในชั้นตัวอย่าง ให้มีลักษณะดัง

ในภาพที่ 4.16 ข้างต้น



ภาพที่ 4.51 แสดงค่าความต้านทานการกระแทกของ วัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับ พอลิแลคติกแอซิด



ภาพที่ 4.52 แสดงภาพสัณฐานวิทยา (SEM) ในบริเวณรอยแตกหัก ของชิ้นตัวอย่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-กล้วย (SB) วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-ปอแก้ว (SK) และวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้ว (BK) ที่ผ่านการทดสอบการกระแทก

จากค่าความต้านทานการกระแทกแสดงในภาพที่ 4.40 พบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีค่าความต้านทานการกระแทกต่ำที่สุด โดยมีค่าต่ำกว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-กล้วย (SB) ที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-ปอแก้ว (SK) และที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้ว (BK) อยู่ 178.37% 285.86% และ 250.35% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสัณฐานวิทยาในภาพที่ 4.52 จะเห็นว่าพื้นผิวรอยแตกของพอลิแลคติกแอซิดมีลักษณะเรียบเสมอซึ่งแสดงลักษณะการแตกหักแบบเปราะ สำหรับในวัสดุไบโอคอมโพสิตพบกลุ่มของเส้นใยธรรมชาติที่ขาดออก และโผล่ออกมาจากเมตริกซ์นั้นมีลักษณะแตกต่างกัน คือ เส้นใยกล้วยส่วนใหญ่จะโผล่พื้นออกมาจากเมตริกซ์เพียงเล็กน้อย ในขณะที่เส้นใยปอแก้ว และเส้นใยปานสรนารายณ์ จะอยู่ในลักษณะของกลุ่มของเส้นใยที่โผล่หลุดออกมาจากเมตริกซ์จำนวนมากกว่า แสดงให้เห็นว่าเส้นใยกล้วยมีความเปราะ และแข็งแรงน้อยกว่าเส้นใยชนิดอื่น ซึ่งสอดคล้องกับความแข็งแรงของเส้นใยธรรมชาติใน

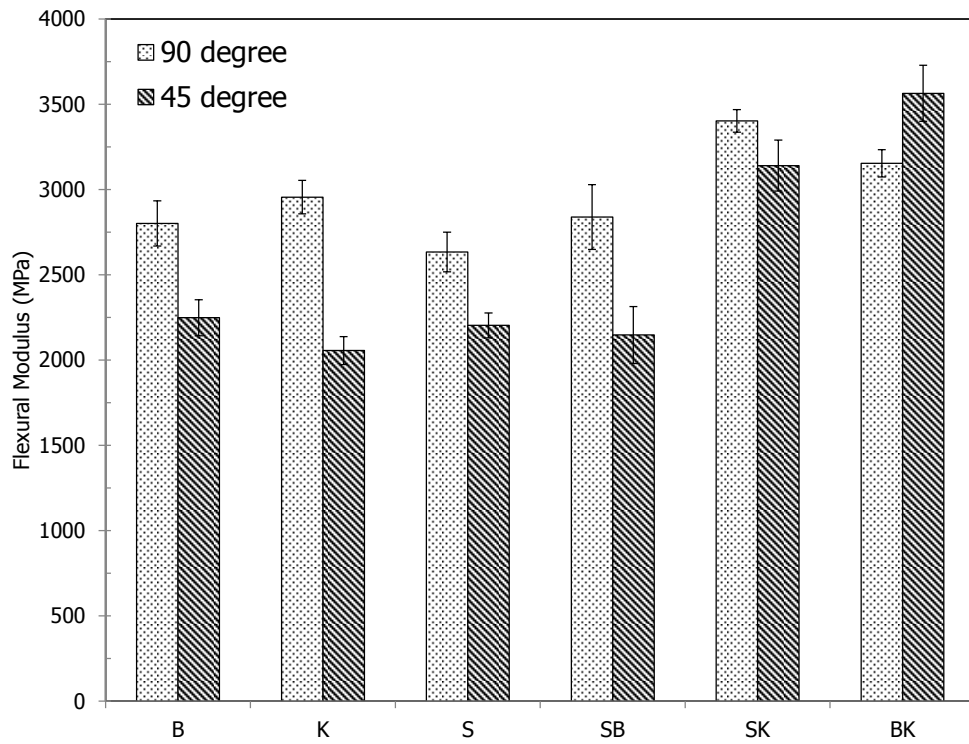
ลักษณะเดียวกับงานวิจัยอื่นที่กล่าวไว้ข้างต้น [26,27,29] และสำหรับขนาดของกลุ่มเส้นใยธรรมชาตินั้น พบว่ากลุ่มของเส้นใยปอแก้วมีขนาดที่ใหญ่ที่สุดซึ่งส่งผลให้วัสดุไบโอคอมโพสิตที่มีการใช้เส้นใยปอแก้วจึงมีความแข็งแรงที่สูงกว่าเส้นใยธรรมชาติอื่น อื่น สอดคล้องกับผลการทดลองก่อนหน้านี้ในหัวข้อ 4.3.1.2 ข้างต้น

4.3.3 ผลของทิศทางของแรงกระทำ ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุไบโอคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยผ้าทอที่วางแบบตั้งฉาก

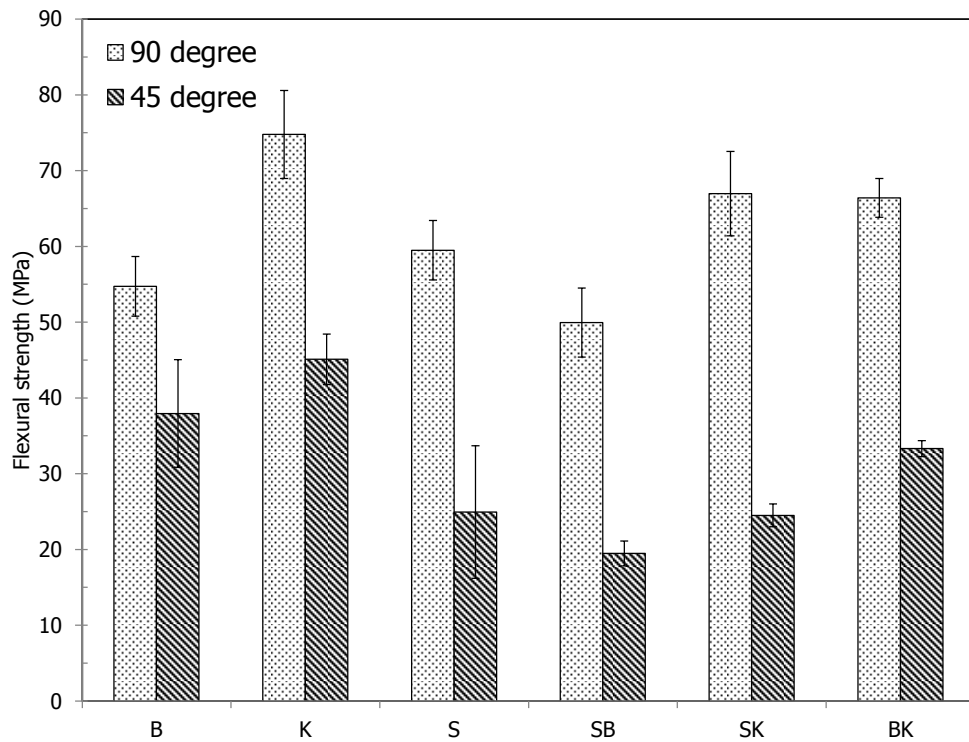
ผลของการเสริมแรงวัสดุไบโอคอมโพสิตด้วยผ้าทอเส้นใยธรรมชาติแบบเดี่ยว และแบบผสม ทั้งในแนวการวางผ้าแบบขนาน (Parallel) และตั้งฉาก (Transverse) ได้ทำการศึกษาแล้วในหัวข้อที่ 4.3.1 และ 4.3.2 ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทำการศึกษาผลของทิศทางของแรงกระทำที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุไบโอคอมโพสิตที่วางผ้าแบบตั้งฉาก ซึ่งจะทำการตัดชิ้นตัวอย่างให้เส้นใยธรรมชาติมีลักษณะทำมุม 45 องศา และศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุไบโอคอมโพสิตดังกล่าว ซึ่งประกอบไปด้วย สมบัติการดัดโค้ง (Flexural properties) สมบัติการดึงยึด (Tensile properties) และสมบัติการกระแทก (Impact properties) โดยผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

4.3.3.1 การศึกษาสมบัติการดัดโค้งของวัสดุไบโอคอมโพสิต

จากกราฟค่าโมดูลัสการดัดโค้ง และค่าความต้านทานต่อการดัดโค้งในภาพที่ 4.53 และ 4.54 ตามลำดับ พบว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตทุกชนิดมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันคือการทดสอบในแนว 45 องศา มีค่าโมดูลัสการดัดโค้ง และค่าความต้านทานต่อการดัดโค้งที่ต่ำกว่าการทดสอบแนว 90 องศา โดยมีค่าที่แตกต่างกันสูงสุดถึง 43.76% และ 173.30% ตามลำดับ เพราะแรงดึง (Tension force) ที่เกิดขึ้นบริเวณด้านล่างตามแนวยาวของชิ้นตัวอย่าง เมื่อเคลื่อนที่ผ่านเส้นใยธรรมชาติแนว 45 องศา ซึ่งขนาดสั้นกว่าชิ้นตัวอย่างที่ทดสอบแนว 0 องศาจะทำให้เส้นใยธรรมชาติในผ้าทอของชิ้นตัวอย่างที่ทดสอบแนว 45 องศา เกิดการถ่ายเทแรงได้ไม่สมบูรณ์ [4,19] สอดคล้องกับงานวิจัยของ W. Hufenbach และคณะ [59] ที่พบว่าวัสดุคอมโพสิตที่ทำการทดสอบการดัดโค้งแนว 45 องศา มีความแข็งแรงลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับวัสดุคอมโพสิตที่ทดสอบแนว 90 องศา และจากงานวิจัยของ StripathyMalaiiahและคณะ [60] ซึ่งได้ทำการศึกษาวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ พบว่าวัสดุคอมโพสิตที่ทดสอบการดัดโค้งแนว 45 องศา มีความแข็งแรงน้อยกว่าวัสดุคอมโพสิต ที่ทดสอบแนว 90 องศา ถึง 217% เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติแนว 90 องศา สามารถรับแรงดึง และถ่ายเทแรงได้ดีกว่าแนว 45 องศา



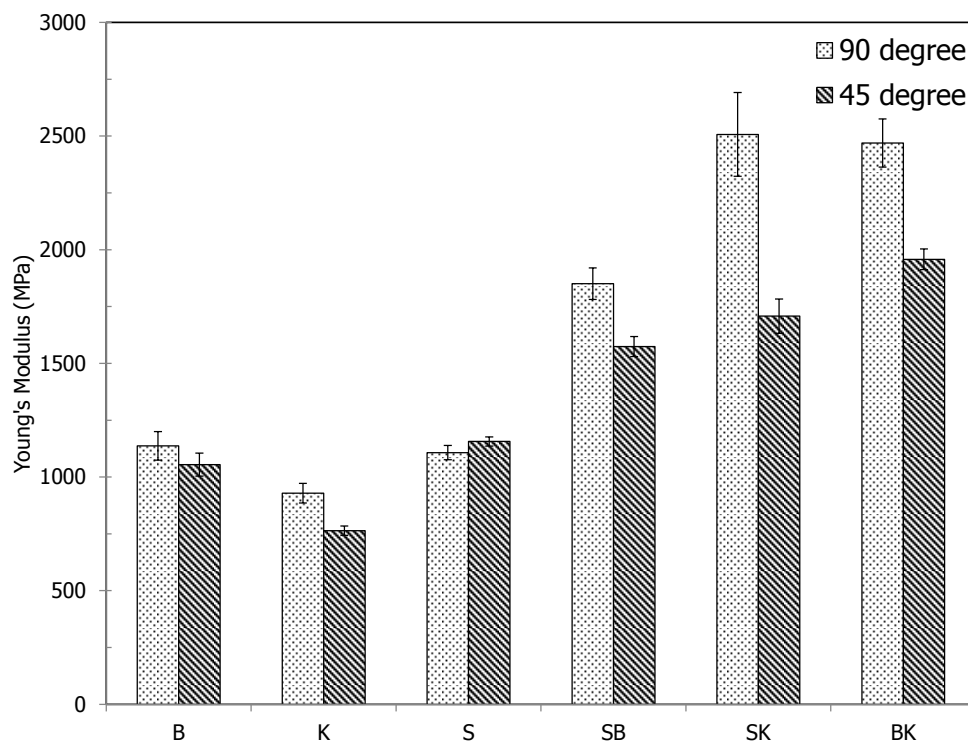
ภาพที่ 4.53 แสดงค่าโมดูลัสการดัดโค้งของวัสดุไบโอคอมโพสิต



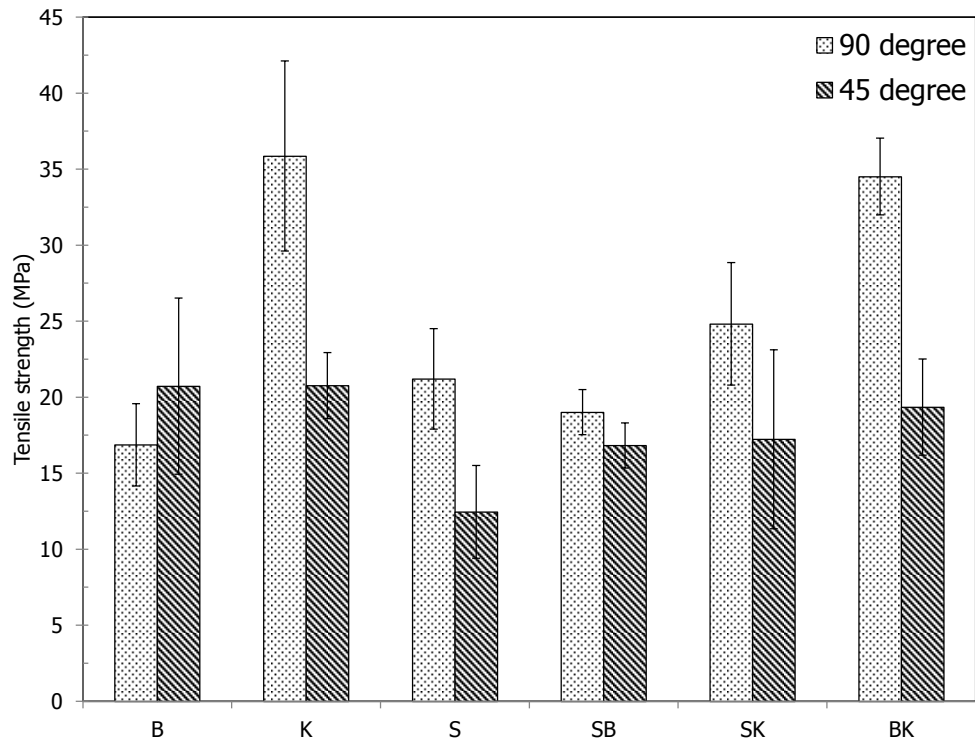
ภาพที่ 4.54 แสดงค่าความต้านทานต่อการดัดโค้งของวัสดุไบโอคอมโพสิต

4.3.3.2 การศึกษาสมบัติการดึงยึดของวัสดุไบโอคอมโพสิต

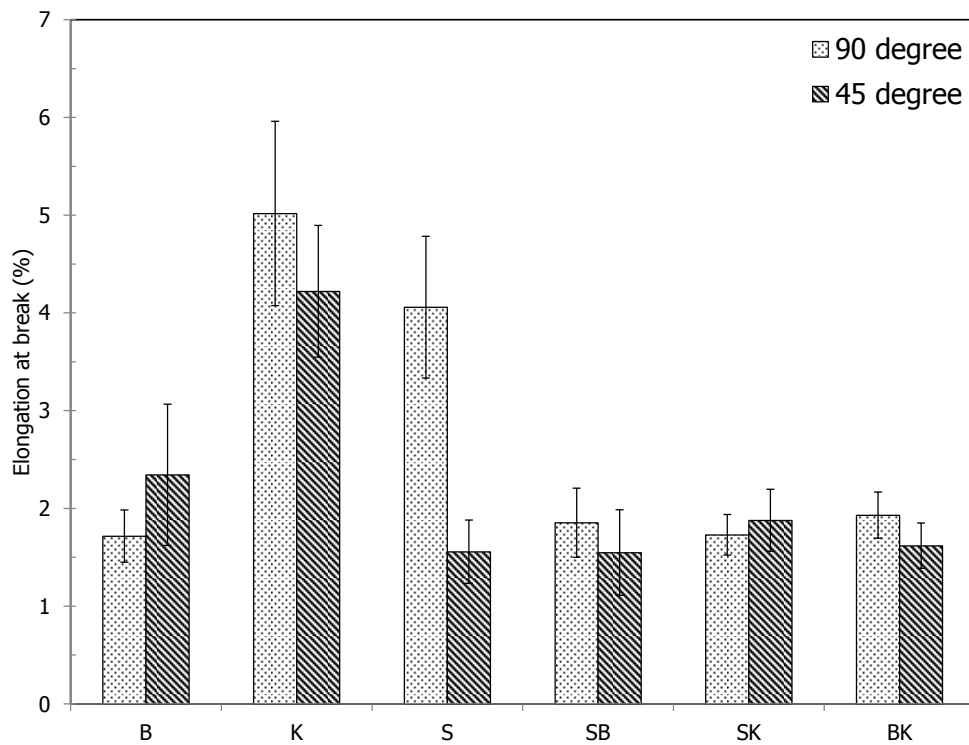
จากกราฟค่าโมดูลัสของยัง ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาดในภาพที่ 4.55 4.56 และ 4.57 ตามลำดับ พบว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ทดสอบแนว 45 องศา มีแนวโน้มของค่าโมดูลัสของยัง และค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ต่ำกว่าการทดสอบแนว 90 องศา โดยมีค่าที่แตกต่างกันสูงสุดถึง 46.81% และ 78.39% ตามลำดับ ซึ่งมีสาเหตุเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ก่อนในหัวข้อ 4.3.3.1 ก่อนหน้า [4,19] แต่สำหรับค่าค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาดกลับมีแนวโน้มที่แตกต่างออกไปในลักษณะการแยกกลุ่มกันของวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอชนิดเดียวกับที่ใช้ผ้าทอแบบผสม โดยผลการทดลองข้างต้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ W. Hufenbach และคณะ [59] ที่พบว่าวัสดุคอมโพสิตที่ทำการทดสอบการดึงยึดแนว 45 องศา มีความแข็งแรงลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับวัสดุคอมโพสิตที่ทดสอบแนว 90 องศา และจากงานวิจัยของ Sripathy Malaiah และคณะ [60] ที่พบว่าวัสดุคอมโพสิตที่ทำการทดสอบการดึงยึดแนว 45 องศา มีความแข็งแรงลดลงอย่างมากถึง 53.5% เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุคอมโพสิตที่ทดสอบแนว 90 องศา เช่นกัน



ภาพที่ 4.55 แสดงค่าโมดูลัสของยังของวัสดุไบโอคอมโพสิต



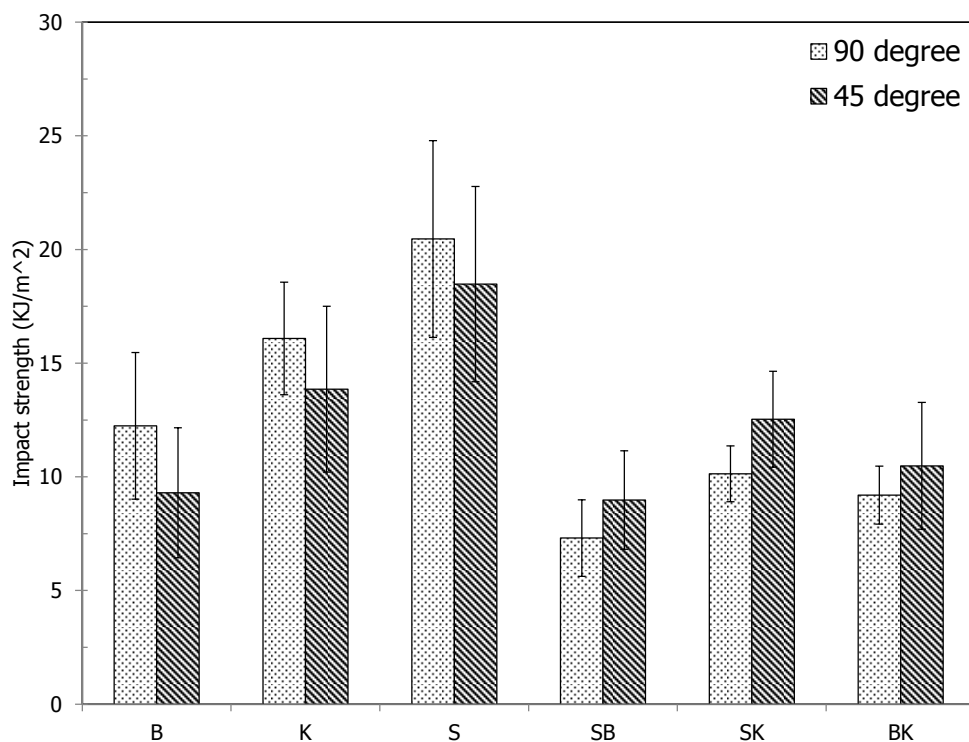
ภาพที่ 4.56 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุไบโออกมโพลิต



ภาพที่ 4.57 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดของวัสดุไบโออกมโพลิต

4.3.3.3 การศึกษาสมบัติการกระแทกของวัสดุไบโอคอมโพสิต

จากกราฟค่าความต้านทานการกระแทกในภาพที่ 4.58 พบว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอชนิดเดียวในการทดสอบแนว 45 องศา มีแนวโน้มของค่าค่าความต้านทานการกระแทกที่ต่ำกว่าการทดสอบแนว 90 องศา โดยมีค่าที่แตกต่างกันสูงสุดถึง 31.68% ซึ่งมีสาเหตุเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ก่อนในหัวข้อ 4.3.3.1 ก่อนหน้า [4,19] แต่ในวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอแบบผสมกลับมีแนวโน้มตรงกันข้าม โดยการทดสอบแนว 45 องศา มีค่ามากกว่าการทดสอบแนว 90 องศา อยู่สูงสุดถึง 23.69% สาเหตุเพราะเมื่อมีแรงกระทำกับเส้นใยที่วางซ้อนกันอยู่ จะทำให้เกิดความพยายามยืดออกของเส้นใยซึ่งช่วยให้เกิดการกระจายแรงได้ดี [61] แต่อย่างไรก็ตามผลนี้ยังขึ้นอยู่กับความแข็งแรง และความยืดหยุ่นของเส้นใย [62] จึงทำให้ปรากฏการณ์นี้ไม่พบในวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอชนิดเดียว



ภาพที่ 4.58 แสดงค่าความต้านทานการกระแทกของวัสดุไบโอคอมโพสิต

4.4 การศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำ

การดูดซึมน้ำของวัสดุนั้นจะส่งผลต่อความแข็งแรง การย่อยสลาย และคุณลักษณะในการใช้งาน โดยส่วนใหญ่แล้ววัสดุพลาสติกส่วนมากมักจะมีลักษณะไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) แต่สำหรับเส้นใยธรรมชาติจะมีลักษณะชอบน้ำ (Hydrophilic) เนื่องจากเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสที่มีอยู่ในเส้นใยธรรมชาติ [1,27,28] ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำของเส้นใยธรรมชาติ พอลิแลคติกแอซิด และวัสดุไบโอคอมโพสิต

4.4.1 สมบัติการดูดซึมน้ำของเส้นใยธรรมชาติ

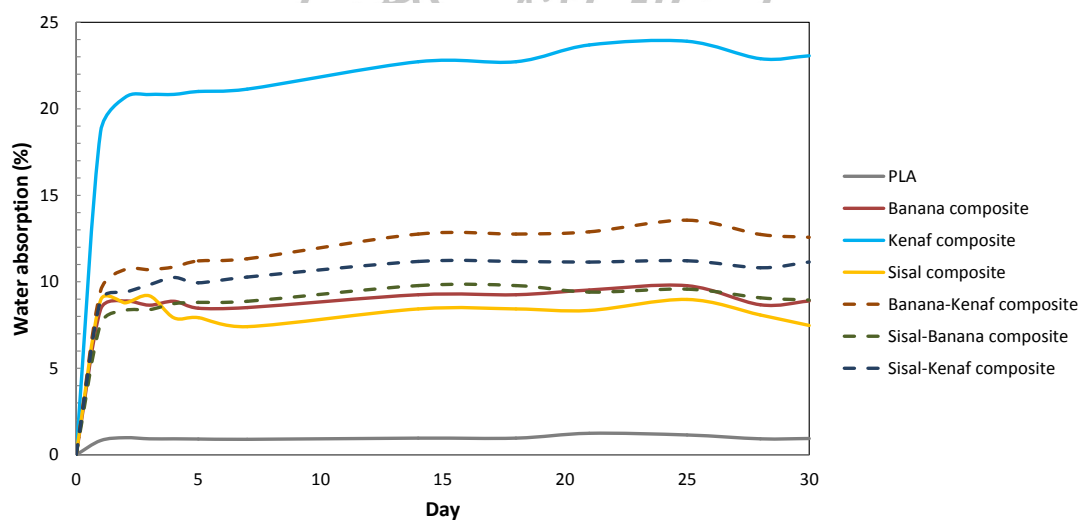
สมบัติการดูดซึมน้ำของเส้นใยธรรมชาติแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าเส้นใยปอแก้วมีค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุด รองลงมา คือ เส้นใยกล้วย เส้นใยป่านศรนารายณ์ และเส้นด้ายฝ้ายตามลำดับ เนื่องมาจากการที่เส้นใยปอแก้วมีองค์ประกอบของเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสที่สูงกว่าเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่น [29,46,63] จึงทำให้มีการดูดซึมน้ำที่สูงกว่า และจากลักษณะทางกายภาพของเส้นใยปอแก้วที่อยู่ในลักษณะเป็นเกลียวขนาดใหญ่ ทำให้เมื่อน้ำซึมผ่านเข้าไปจะถูกกักเก็บไว้ในช่องว่างระหว่างเส้นใยได้ง่ายกว่าเส้นใยธรรมชาติอื่นที่ไม่บิดเกลียว

ตารางที่ 4.5 แสดงการดูดซึมน้ำของเส้นใยธรรมชาติ

| ตัวอย่าง | อัตราการดูดซึมน้ำเฉลี่ย (%) |
|---------------------|-----------------------------|
| เส้นด้ายฝ้าย | 8.49 |
| เส้นใยกล้วย | 9.90 |
| เส้นใยปอแก้ว | 17.42 |
| เส้นใยป่านศรนารายณ์ | 8.55 |

4.4.2 สมบัติการดูดซึมน้ำของวัสดุไบโอคอมโพสิต

สมบัติการดูดซึมน้ำของวัสดุไบโอคอมโพสิตกับพอลิแลคติกแอซิด แสดงในภาพที่ 4.59 พบว่าหลังจากการทดสอบเป็นระยะเวลา 30 วันค่าการดูดซึมน้ำของพอลิแลคติกแอซิดเริ่มเข้าสู่ที่สมดุล แต่สำหรับวัสดุไบโอคอมโพสิตทุกชนิดค่ายังไม่เข้าสู่สมดุล ซึ่งวัสดุไบโอคอมโพสิตทุกชนิดมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิด ที่มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 0.94% โดยปริมาณการดูดซึมน้ำในระยะเวลา 30 วัน ในวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปอแก้วมีค่าสูงสุดที่ 23% รองลงมาคือ วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้ว และที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว-ปานครนารายณ์ ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 12.5% และ 11.1% ตามลำดับ สำหรับวัสดุไบโอคอมโพสิตชนิดอื่นมีค่าการดูดซึมน้ำที่ 30 วันต่ำกว่า 10% ทั้งหมด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิแลคติกแอซิดมีลักษณะไม่ชอบน้ำ และวัสดุไบโอคอมโพสิตมีลักษณะชอบน้ำที่มากกว่า โดยการใช้เส้นใยปอแก้วในวัสดุไบโอคอมโพสิตจะทำให้สามารถดูดซึมความน้ำได้สูงขึ้น สอดคล้องกับผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของเส้นใยธรรมชาติ ในหัวข้อที่ 4.4.1 ข้างต้น



ภาพที่ 4.59 แสดงการดูดซึมน้ำของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด

4.5 การศึกษาสมบัติการลุกติดไฟตามมาตรฐาน UL-94HBและปริมาณออกซิเจนต่ำสุดที่ทำให้สารตัวอย่างเกิดการติดไฟ (Limiting Oxygen Index, LOI)

การติดไฟของวัสดุเป็นปฏิกิริยาร่วมขององค์ประกอบ 3 อย่าง คือ เชื้อเพลิง, แก๊สออกซิเจน และความร้อน ที่เกิดขึ้นเมื่อเชื้อเพลิงได้รับความร้อนมากเพียงพอ และมีออกซิเจนในอากาศไม่น้อยกว่าร้อยละ 16 ซึ่งจะทำให้เกิดการติดไฟ และลุกไหม้ต่อเนื่องขึ้นได้ โดยในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาสมบัติการลุกติดไฟของวัสดุไบโอคอมโพสิตเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด ซึ่งได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงสมบัติการลุกติดไฟ และปริมาณออกซิเจนต่ำสุดที่ใช้ของชิ้นตัวอย่างวัสดุไบโอคอมโพสิต และพอลิแลคติกแอซิด

| ตัวอย่าง | อัตราการลามไฟเฉลี่ย (mm/min) | LOI (%) | ลักษณะการติดไฟ |
|----------|------------------------------|---------|--|
| PLA | 21.23 | 20 | ติดไฟได้ง่าย มีการลามไฟอย่างต่อเนื่อง มีหยดของพอลิเมอร์ลุกติดไฟ มีควันขาวเล็กน้อย ไม่มีเขม่า |
| B | 21.53 | 20 | ติดไฟได้ง่าย มีการลามไฟอย่างต่อเนื่อง หยดของพอลิเมอร์ลุกติดไฟ มีควันดำ เขม่าสีดำ |
| K | 19.45 | 20 | ติดไฟได้ง่าย มีการลามไฟอย่างต่อเนื่อง ไม่มีหยดของพอลิเมอร์เกิดขึ้น มีควันดำ เขม่าสีดำ |
| S | 18.27 | 20 | ติดไฟได้ง่าย มีการลามไฟอย่างต่อเนื่อง หยดของพอลิเมอร์ลุกติดไฟ มีควันดำ เขม่าสีดำ |
| BK | 21.03 | 20 | ติดไฟได้ง่าย มีการลามไฟอย่างต่อเนื่อง ไม่มีหยดของพอลิเมอร์เกิดขึ้น มีควันดำ เขม่าสีดำ |
| SB | 21.88 | 20 | ติดไฟได้ง่าย มีการลามไฟอย่างต่อเนื่อง มีหยดของพอลิเมอร์ลุกติดไฟ มีควันดำ เขม่าสีดำ |
| SK | 18.56 | 20 | ติดไฟได้ง่าย มีการลามไฟอย่างต่อเนื่อง ไม่มีหยดของพอลิเมอร์ มีควันดำ เขม่าสีดำ |

จากตารางที่ 4.6 พบว่าทั้งพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุไบโอคอมโพสิตมีค่า LOI อยู่ที่ 20% และสามารถจัดระดับการติดไฟตามมาตรฐาน UL-94HB ที่มีอัตราการลามไฟต่ำกว่า 40mm/min ได้ทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าการใช้เส้นใยธรรมชาติสามารถปรับปรุงสมบัติการลุกติดไฟของวัสดุไบโอคอมโพสิตได้เล็กน้อยโดยช่วยทำให้มีการลามไฟที่ช้าลง และลดการหยดของพอลิเมอร์ลดลงได้ เนื่องจากผลของเส้นใยธรรมชาติที่สามารถดูดความชื้นได้ดี (หัวข้อที่ 4.4.2) และจากการที่เส้นใยธรรมชาติมีการสลายตัวก่อนพอลิแลคติกแอซิด (หัวข้อที่ 4.2.2) ซึ่งจะเกิดสลายตัวกลายเป็นน้ำเถ้าปกคลุมผิวตัวอย่างวัสดุคอมโพสิต ทำให้ลดพื้นที่สัมผัสในการเข้าทำปฏิกิริยาของออกซิเจนที่ทำให้เกิดการติดไฟ ซึ่งทำให้การลามไฟในวัสดุไบโอคอมโพสิตเกิดขึ้นได้ช้าลงได้ โดยแนวโน้มนี้พบเช่นเดียวกับในงานวิจัยของ Jing Zhan และคณะ [64] พบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีค่า LOI อยู่ที่ 21% และจากงานวิจัยของ Donghwan Cho และคณะ [65] ที่พบว่าพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุคอมโพสิตพอลิแลคติกแอซิดกับเส้นใยปอแก้วมีค่า LOI อยู่ที่ 23.9% โดยวัสดุคอมโพสิตมีอัตราการลามไฟที่ช้ากว่าพอลิแลคติกแอซิดเล็กน้อย



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิตพอลิแลคติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติ โดยมีการเลือกใช้ผ้าทอที่ทอแบบลายขัด (Plain weave) จำนวน 6 ชนิด ทั้งผ้าทอชนิดเดี่ยว คือ ผ้าทอจากเส้นใยกล้วย ผ้าทอจากเส้นใยปอแก้ว ผ้าทอจากเส้นใยป่าน ฝักรายฉิม และผ้าทอแบบผสม คือ ผ้าทอจากเส้นใยป่านฝักรายฉิม-กล้วย ผ้าทอจากเส้นใยป่าน ฝักรายฉิม-ปอแก้ว ผ้าทอจากเส้นใยกล้วย-ปอแก้ว ซึ่งได้แบ่งส่วนของผลการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของเส้นใยธรรมชาติ กับผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติ และ ส่วนที่ 2 ศึกษาผลของผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติที่ใช้เป็นส่วนเสริมแรงในวัสดุไบโोकอมโพสิต ที่มีต่อสมบัติทางความร้อน เสถียรภาพทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติการดูดซึมน้ำ และสมบัติการลุกคิดไฟ

ส่วนที่ 1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเส้นใยธรรมชาติ และผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติ

จากผลการวิจัยพบว่าเส้นใยธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ พวกเส้นใยที่มีการบิดเกลียว ได้แก่ เส้นด้ายฝ้าย และเส้นใยปอแก้ว กับพวกเส้นใยที่ไม่มีการบิดเกลียว ได้แก่ เส้นใยกล้วย และเส้นใยป่านฝักรายฉิม ความหนาแน่นของเส้นใยธรรมชาติจากมากไปน้อย คือ เส้นใยปอแก้ว เส้นใยป่านฝักรายฉิม เส้นใยกล้วย และเส้นด้ายฝ้ายตามลำดับ สมบัติเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ของเส้นใยธรรมชาติ พบว่าเส้นใยกล้วยมีการสลายตัวสูงสุดก่อนเส้นใยป่านฝักรายฉิม และปอแก้วตามลำดับ

สำหรับผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติพบว่า ผ้าทอที่มีการใช้เส้นใยปอแก้วจะมีความหนาแน่นมากกว่าผ้าทอชนิดอื่นประมาณหนึ่งเท่าตัว และยังทำให้น้ำหนักของผ้าทอที่มีการใช้เส้นใยปอแก้วมีน้ำหนักมากกว่าอีกด้วย เพราะว่าเส้นใยปอแก้วมีขนาดใหญ่กว่าเส้นใยชนิดอื่น และส่งผลให้จำนวนของเส้นด้ายในผืนผ้าที่ทอด้วยเส้นใยปอแก้วมีค่าที่น้อยกว่าเส้นใยอื่นอีกด้วย และเมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของผ้าทอจากมากไปน้อยพบว่า สำหรับผ้าทอแบบเดี่ยว คือ ผ้าทอเส้นใยป่านฝักรายฉิม มีความแข็งแรงมากกว่ากล้วย และปอแก้วตามลำดับ และในผ้าทอแบบผสม คือ ผ้า

ทอปานสรนารายณ์-กล้วย มีความแข็งแรงมากกว่าผ้าทอกล้วย-ปอแก้ว และผ้าทอปานสรนารายณ์-ปอแก้วตามลำดับ

ส่วนที่ 2 ศึกษาผลของผ้าทอจากเส้นใยธรรมชาติที่ใช้เป็นส่วนเสริมแรงในวัสดุไบโอคอมโพสิต

จากผลการวิจัยสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิการตกผลึกซ้ำ (T_c) และอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ที่ลดลงต่ำกว่าพอลิแลคติกแอซิด สมบัติเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตเริ่มเกิดการสลายตัวก่อนพอลิแลคติกแอซิด เนื่องมาจากเส้นใยธรรมชาติมีความเสถียรทางความร้อนที่ต่ำกว่า แต่เศษเหลือ (Residue) มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

ผลของการเสริมแรงด้วยผ้าทอที่วางแบบขนาน (Parallel) ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอแบบชนิดเดียว และผ้าทอแบบผสม พบว่าทั้งการทดสอบการตัดโค้ง การดึงยืด และการกระแทก มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน คือ วัสดุไบโอคอมโพสิต และพอลิแลคติกแอซิด แสดงลักษณะการแตกหักแบบเปราะ โดยวัสดุไบโอคอมโพสิตที่มีการใช้เส้นใยปอแก้วมีความแข็งแรงที่สูงที่สุด รองลงมาคือการใช้เส้นใยปานสรนารายณ์ และการใช้เส้นใยกล้วยตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากภาพสัณฐานวิทยาจะเห็นว่า เส้นใยปอแก้วมีกลุ่มเส้นใยขนาดใหญ่กว่าเส้นใยธรรมชาติอื่น จึงทำให้วัสดุไบโอคอมโพสิตสามารถรับแรงกระทำได้ดีขึ้น

ผลของการเสริมแรงด้วยผ้าทอที่วางแบบตั้งฉาก (Transverse) ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอแบบชนิดเดียว และผ้าทอแบบผสม พบว่าทั้งการทดสอบการตัดโค้ง การดึงยืด และการกระแทก มีแนวโน้มเหมือนกับวัสดุไบโอคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยผ้าทอที่วางแบบขนาน คือ วัสดุไบโอคอมโพสิต และพอลิแลคติกแอซิด แสดงลักษณะการแตกหักแบบเปราะ โดยวัสดุไบโอคอมโพสิตที่มีการใช้เส้นใยปอแก้วมีความแข็งแรงที่สูงที่สุด รองลงมาคือการใช้เส้นใยปานสรนารายณ์ และการใช้เส้นใยกล้วยตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากภาพสัณฐานวิทยาจะเห็นว่า เส้นใยปอแก้วมีกลุ่มเส้นใยขนาดใหญ่กว่าเส้นใยธรรมชาติอื่น จึงทำให้วัสดุไบโอคอมโพสิตสามารถรับแรงกระทำได้ดีขึ้น

ผลของทิศทางของแรงกระทำ ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุไบโอคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยผ้าทอที่วางแบบตั้งฉากพบว่า สมบัติการตัดโค้ง และสมบัติการดึงยืด ของวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอชนิดเดียว และที่ใช้ผ้าทอแบบผสม ในแนว 45 องศา มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแนว 90 องศา เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติของการทดสอบแนว 45 องศา มีขนาดที่สั้นกว่าการถ่ายเทแรงจึงเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ ทำให้ความแข็งแรงของวัสดุไบโอคอมโพสิตลดลง สำหรับสมบัติการกระแทกแนว 45 องศา มีแนวโน้มที่แตกต่างกัน คือ วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้า

ทอชนิดเดียวแนว 45 องศา มีค่าน้อยกว่าแนว 90 องศา เช่นเดียวกับการทดสอบเชิงกลอื่น แต่วัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอแบบผสมกลับมีแนวโน้มตรงกันข้าม เนื่องจากผลของชั้นผ้าที่วางซ้อนกันในวัสดุไบโอคอมโพสิต สามารถเกิดการยืดออกเมื่อมีแรงกระทำได้ ทำให้เกิดการกระจายแรงดีขึ้น วัสดุไบโอคอมโพสิตจึงรับแรงกระทำได้ดีขึ้น แต่ผลนี้มีหลายปัจจัยเกี่ยวข้อง เช่น ความแข็งแรง ความยืดหยุ่นของเส้นใย และระดับการยึดติดกับเมตริกซ์ จึงทำให้ปรากฏการณ์นี้จึงไม่พบในวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอเส้นใยชนิดเดียว

จากผลการวิจัยสมบัติการดูดซึมน้ำพบว่า เส้นใยธรรมชาติที่มีเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสสูง จะดูดซึมน้ำได้ดี ทำให้เส้นใยปอแก้วมีค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุด รองลงมา คือ เส้นใยกล้วย เส้นใยป่านศรนารายณ์ และเส้นด้ายฝ้ายตามลำดับ สำหรับวัสดุไบโอคอมโพสิตพบว่า มีการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าพอลิแลคติกแอซิดมาก โดยในระยะเวลา 30 วัน พบว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอปอแก้วมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ ที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้ว และที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว-ป่านศรนารายณ์ สำหรับวัสดุไบโอคอมโพสิตชนิดอื่นมีค่าการดูดซึมน้ำที่ 30 วัน ต่ำกว่า 10% แสดงให้เห็นว่าการใช้เส้นใยปอแก้วจะทำให้วัสดุไบโอคอมโพสิตสามารถดูดซึมความชื้นได้สูงขึ้น สอดคล้องกับผลการดูดซึมน้ำของเส้นใยธรรมชาติเช่นกัน

จากผลการวิจัยสมบัติการลวกติดไฟพบว่าทั้งพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุไบโอคอมโพสิตมีค่า LOI อยู่ที่ 20% และสามารถจัดระดับการติดไฟตามมาตรฐาน UL-94HB ที่มีอัตราการลามไฟต่ำกว่า 40mm/min ได้ทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าการใช้เส้นใยธรรมชาติสามารถปรับปรุงสมบัติการลวกติดไฟของวัสดุไบโอคอมโพสิตได้เล็กน้อย โดยช่วยทำให้มีการลามไฟที่ช้าลง และลดการหยดของพอลิเมอร์ลดลงได้ ทั้งนี้อาจเพราะเมื่อได้รับความร้อนเส้นใยธรรมชาติจะเริ่มเกิดการสลายตัวก่อนพอลิแลคติกแอซิด

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยในครั้งนี้พบว่าการใช้เส้นใยธรรมชาติในรูปแบบของผ้าทอเป็นสารเสริมแรงในวัสดุนั้น ความสม่ำเสมอ และจำนวนของเส้นใยธรรมชาติในผ้าทอควบคุมได้ยาก เนื่องจากใช้กระบวนการทอด้วยที่กระตุกด้วยมือ จึงควรเปลี่ยนไปใช้ผ้าที่ทอด้วยเครื่องจักรซึ่งจะทำให้การควบคุมความสม่ำเสมอของผ้าทอได้ดี และเนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีระดับการยึดเกาะกับเมตริกซ์พอลิแลคติกแอซิดที่ไม่ดีนัก จึงอาจศึกษาในปัจจัยอื่นเพิ่มเติม เพื่อปรับปรุงให้เส้นใยธรรมชาติมีการยึดเกาะกับเมตริกซ์ที่ดีขึ้น เช่น กระบวนการปรับปรุงพื้นผิว และเทคนิคกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน เป็นต้น เพื่อเพิ่มความแข็งแรงในวัสดุไบโอบีโอมโพสิต



บรรณานุกรม

- [1] Amar K. Mohanty, Manjusri Misra, and Lawrence T. Drzal. (2005). **Natural fibers, biopolymers, and biocomposites**. New York: Taylor & Francis.
- [2] S.V.Joshi, and others. (2004). “Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?”. **Composites: Part A Apply Science Manufacturing** 35, 3 (March): 371–376.
- [3] A. O’Donnell, M.A. Dweib, and R.P. Wool. (2004). “Natural fiber composites with plant oil-based resin”. **Composites Science and Technology** 64, 9 (July): 1135-1145.
- [4] Robert M. Jones. (1999). **Mechanics of composite materials**. 2th ed. New York: Taylor & Francis.
- [5] M. Jawaid, H.P.S. Abdul Khalil, and others. (2013). “Effect of jute fibre loading on tensile and dynamic mechanical properties of oil palm epoxy composites”. **Composites: Part B Engineering** 45, 1 (February): 619-624.
- [6] Myer Kutz. (2002). **Handbook of materials selection**. New York: John Wiley & Sons.
- [7] Donald Garlotta. (2001). “A Literature Review of Poly(Lactic Acid)”. **Journal of Polymers and the Environment** 9, 2 (April): 63-84.
- [8] John R. Dorgan, Hans Lehermeier, and Michael Mang. (2000). “Thermal and Rheological Properties of Commercial-Grade Poly(Lactic Acid)s”. **Journal of Polymers and the Environment** 8, 1 (January): 1-9.
- [9] Shinichi Shibata, Yong Cao, and Isao Fukumoto. (2005). “Press forming of short natural fiber-reinforced biodegradable resin: Effects of fiber volume and length on flexural properties”. **Polymer Testing** 24, 8 (December): 1005-1011.
- [10] ณัฐินี โล่พัฒนานนท์. (2552). **พอลิเมอร์เชิงประกอบ: ความรู้พื้นฐานและสมบัติ**. ปัตตานี: โรงพิมพ์ปัตตานีการช่าง.
- [11] PlasticsEurope. (2004). **Thermoplastics**. Accessed June 23. Available from <http://www.plasticseurope.org/what-is-plastic/types-of-plastics-11148/thermoplastics.aspx>

- [12] Qipeng Guo. (2014). **Recycling the 'unrecyclable': a new class of thermoset plastics.** Accessed June 23. Available from <http://www.ferret.com.au/articles/in-focus/recycling-the-unrecyclable-a-new-class-of-thermoset-plastics-n2514349>
- [13] PlasticsEurope. (2004). **Thermosets.** Accessed 23 June. Available from <http://www.plasticseurope.org/what-is-plastic/types-of-plastics-11148/thermosets.aspx>
- [14] **ประเภทของพลาสติก.** (2552). เข้าถึงเมื่อ 25 มิถุนายน. เข้าถึงได้จาก <http://containerplast.tarad.com/article?id=27999&lang=th>
- [15] Bruce A. Averill, and Patricia Eldredge. (2012). **Principles of General Chemistry.** Accessed June 25, 2015. Available from <http://2012books.lardbucket.org/books/principles-of-general-chemistry-v1.0/index.html>
- [16] Michael Thielen. (2012). **Bioplastics - Basics Applications Markets.** Mönchengladbach: Polymedia Publisher.
- [17] จินตมัย สุวรรณประทีป. (2547). **การทดสอบสมบัติเชิงกลของพลาสติก.** กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [18] Manas Chanda and Salil K. Roy. (2007). **Plastics technology handbook.** 4th ed. New York: Taylor & Francis Group.
- [19] F L Matthews and R D Rawlings. (1999). **Composite Materials: Engineering and Science.** Cambridge: Woodhead.
- [20] European bioplastics. (2015). **What are bioplastics?.** Accessed June 25. Available from http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2011/04/fs/Bioplastics_eng.pdf
- [21] European bioplastics. (1993). **FAQ Bioplastics.** Accessed June 28. Available from <http://en.european-bioplastics.org/press/faq-bioplastics/>
- [22] Johan R. C. van der Maarel. (2007). **Introduction to biopolymer physics.** Singapore: World Scientific.
- [23] Rafael Auras, and others. (2010). **Poly(lactic acid) : synthesis, structures, properties, processing, and applications.** New Jersey: John Wiley & Sons.

- [24] กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. (2009). **พลาสติกชีวภาพ**. เข้าถึงเมื่อ 26 มิถุนายน. เข้าถึงได้จาก <http://library.dip.go.th/Industrial%20Innovation/www/innonew0-01.html>
- [25] วิมลรัตน์ ศรีจรัสสิน. (2551). **เทคโนโลยีสิ่งทอเบื้องต้น**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: กราฟแมนเพรส.
- [26] Mei-po Ho, and others. (2012). “Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites”. **Composites Part B: Engineering**. 43, 8 (December): 3549-3562.
- [27] Menachem Lewin. (2007). **Handbook of fiber chemistry**. 3th ed. New York: CRC.
- [28] Pérez J, and others. (2002). “Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview”. **International Microbiology**. 5, 2 (June): 53-63.
- [29] Omar Faruk, and others. (2012). “Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010”. **Progress in Polymer Science**. 37, 11 (November): 1552-1596.
- [30] T. Gurunathan, Smita Mohanty, and Sanjay K. Nayak. (2015). “A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives”. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. 77, (October): 1-25.
- [31] Wikipedia, the free encyclopedia. (2015). **Kenaf**. Accessed June 30. Available from <https://en.wikipedia.org/wiki/Kenaf>
- [32] Wikipedia, the free encyclopedia. (2015). **Sisal**. Accessed June 30. Available from <https://en.wikipedia.org/wiki/Sisal>
- [33] Yan Li, Yiu-Wing Mai, and Lin Ye. (2000). “Sisal fibre and its composites: a review of recent developments”. **Composites Science and Technology**. 60, 11 (August): 2037–2055.
- [34] Wikipedia, the free encyclopedia. (2015). **Banana**. Accessed June 30. Available from <https://en.wikipedia.org/wiki/Banana>
- [35] อัจฉราพร ไสละสูต. (2539). **ความรู้เรื่องผ้า**. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ: สร้างสรรค์-วิชาการ.
- [36] S Mishra, and others. (2003). “Studies on mechanical performance of biofibre/glass reinforced polyester hybrid composites”. **Composites Science and Technology**. 63, 10 (August): 1377-1385

- [37] Hu Jinlian, Liu Yi, and Shao Xueming. (2004). "Study on void formation in multi-layer woven fabrics". **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. 35, 5 (May): 595-603.
- [38] R.V. Silva, and others. (2006). "Fracture toughness of natural fibers/castor oil polyurethane composites". **Composites Science and Technology**. 66, 10 (August): 1328-1335.
- [39] S.M. Sapuan, A. Leenie, M. Harimi, and Y.K. Beng. (2006). "Mechanical properties of woven banana fibre reinforced epoxy composites". **Materials & Design**. 27, 8: 689-693.
- [40] Andressa Cecília Milanese, Maria Odila Hilário Cioffi, and Herman Jacobus Cornelis Voorwald. (2011). "Mechanical behavior of natural fiber composites". **Procedia Engineering**. (10): 2022-2027.
- [41] M. Jawaid, H.P.S. Abdul Khalil, and A. Abu Bakar, (2011). "Woven hybrid composites: Tensile and flexural properties of oil palm-woven jute fibres based epoxy composites". **Materials Science and Engineering: A**. 528, 15 (June):5190-5195.
- [42] A. Porras, and A. Maranon, (2012). "Development and characterization of a laminate composite material from polylactic acid (PLA) and woven bamboo fabric". **Composites Part B: Engineering**. 43, 7 (October):2782-2788.
- [43] Shinji Ochi. (2008). "Mechanical properties of kenaf fibers and kenaf/PLA composites". **Mechanics of Materials**. 40, 4-5 (April-May): 446-452.
- [44] Zhaoqian Li, Xiaodong Zhou, and Chonghua Pei. (2011). "Effect of Sisal Fiber Surface Treatment on Properties of Sisal Fiber Reinforced Polylactide Composites". **International Journal of Polymer Science**. 2011.
- [45] V.P. Arthanarieswaran, A. Kumaravel, and M. Kathirselvam. (2014). "Evaluation of mechanical properties of banana and sisal fiber reinforced epoxy composites: Influence of glass fiber hybridization". **Materials and Design**. 64, (December): 194-202.
- [46] A. Alavudeen, and others. (2015). "Mechanical properties of banana/kenaf fiber-reinforced hybrid polyester composites: Effect of woven fabric and random orientation". **Materials and Design**. 66, (February): 246-257.

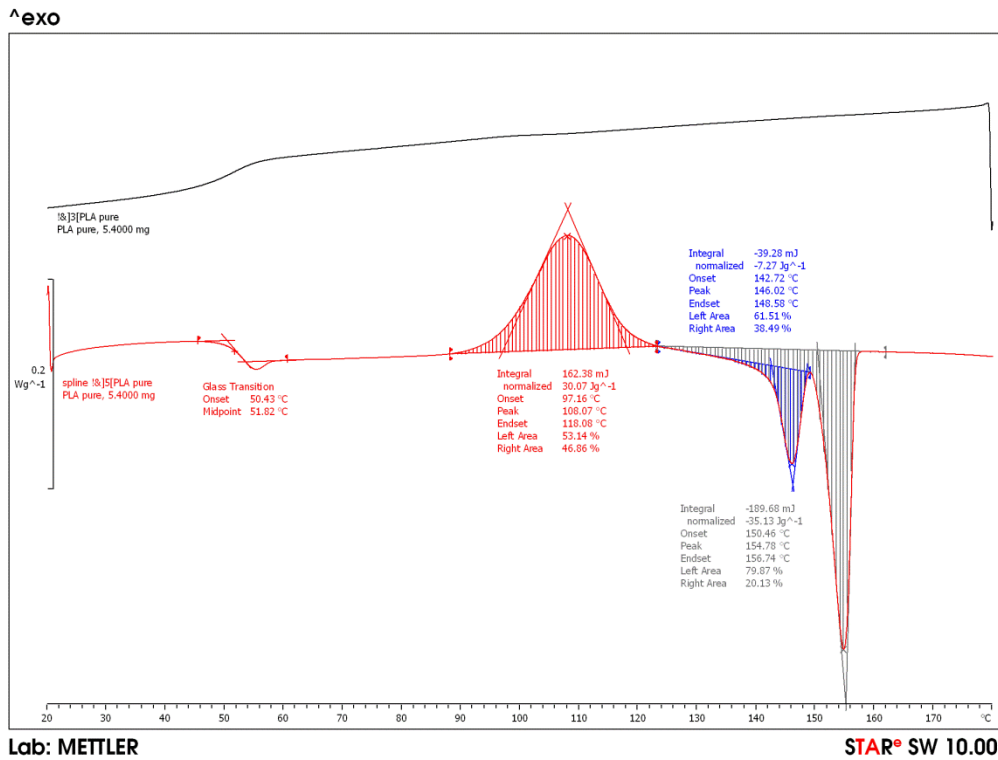
- [47] Takashi Nishino, and others. (2003). "Kenaf reinforced biodegradable composite". **Composites Science and Technology**. 63, 9 (July): 1281-1286.
- [48] Andressa Cecília Milanese, Maria Odila Hilário Cioffi, and Herman Jacobus Cornelis Voorwald. (2012). "Thermal and mechanical behaviour of sisal/phenolic composites". **Composites: Part B: Engineering**. 43, 7 (October): 2843-2850.
- [49] Young Seok Song, and others. (2012). "Viscoelastic and thermal behavior of woven hemp fiber reinforced poly(lactic acid) composites". **Composites: Part B: Engineering**. 43, 3 (April): 856-860.
- [50] Bushra H. Musa, Rafah A. Nassif, and Enass M. Hadi. (2010). "Study of the mechanical properties for unsaturated polyester reinforced by natural fibers". **Journal of Al-Nahrain University**. 13, 3 (September): 65-68.
- [51] Rahman S.H.A, and others. (2012). "Thermal Analysis of Kenaf Derived Cellulose-Filled Poly(lactic acid) Composite Films". Malaysia. In: **International Conference on Agricultural and Food Engineering for Life (CAFEi 2012)**.
- [52] Intan S.M.A. Tawakkal, Marlene J. Cran, and Stephen W. Biggera. (2014). "Effect of kenaf fibre loading and thymol concentration on the mechanical and thermal properties of PLA/kenaf/thymol composites". **Industrial Crops and Products**. 61 (November): 74-83.
- [53] Seong Ok Han, and others. (2012). "Understanding the Reinforcing Mechanisms in Kenaf Fiber/PLA and Kenaf Fiber/PP Composites: A Comparative Study". **International Journal of Polymer Science**. 2012.
- [54] Dmitri Sumigin, Elvira Tarasova, Andres Krumme, and Anti Viikna. (2012). "Influence of cellulose content on thermal properties of poly(lactic) acid/cellulose and low-density polyethylene/cellulose composites". **Proceedings of the Estonian Academy of Sciences**. 61, 3 (August): 237-244.
- [55] Menachem Lewin and Avraham Basch. (1987) **Structure, Pyrolysis, and Flammability of Cellulose**. Vol2. USA: Springer.
- [56] S. Chapple and R. Anandjiwala. (2010). "Flammability of Natural Fiber-reinforced Composites and Strategies for Fire Retardancy: A Review". **Journal of Thermoplastic Composite Materials**. 23, 6 (November): 871-893.

- [57] N.E. Marcovich, M.M. Reboredo, and M.I. Aranguren. (2001). "Modified woodflour as thermoset fillers II. Thermal degradation of woodflours and composites". **Thermochemica Acta**. 372,1-2 (May): 45-57.
- [58] G. Dorez, A. Taguet, L. Ferry, and J.M. Lopez-Cuesta. (2013). "Thermal and fire behavior of natural fibers/PBS biocomposites". **Polymer Degradation and Stability**. 98,1 (January): 87-95.
- [59] W. Hufenbach, and others. (2011). "Mechanical behaviour of textile-reinforced thermoplastics with integrated sensor network components". **Materials and Design**. 32,10 (December): 4931-4935.
- [60] Sripathy Malaiah, Krishna Vinayak Sharma, and M Krishna. (2013). "Investigation on Effect of Fiber and Orientation on the Properties of Bio-Fibre Reinforced Laminates". **International Journal of Engineering Inventions**. 2, 2 (January): 65-70.
- [61] W.J. Cantwell, and J. Morton. (1991). "The impact resistance of composite materials — a review". **Composites**. 22, 5 (September): 347-362.
- [62] K. McDaniels, and others, "High strength-to-weight ratio non-woven technical fabrics for aerospace applications", Cubic Tech. Corp., 2009.
- [63] N. Venkateshwaran, and others. (2011). "Mechanical and water absorption behaviour of banana/sisal reinforced hybrid composites". **Materials & Design**. 32, 7 (August): 4017-4021.
- [64] Jing Zhan, Lei Song, Shibin Nie, and Yuan Hua. (2009). "Combustion properties and thermal degradation behavior of polylactide with an effective intumescent flame retardant". **Polymer Degradation and Stability**. 94, 3 (March): 291-296.
- [65] Donghwan Cho, Yeonhae Woo, and Kwang Hee Lee. (2013). "Flame Retardant Kenaf/PLA Biocomposites: Effect of Ammonium Polyphosphate". Canada. **In:International Conference on Composite Materials 19th (ICCM-19)**.

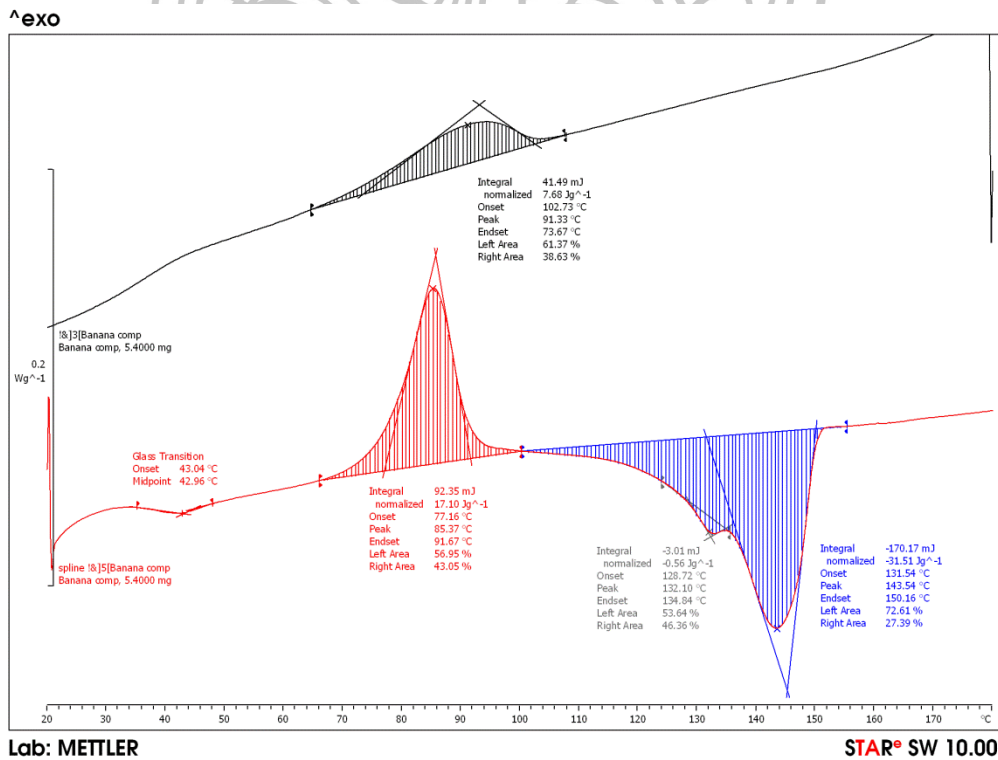




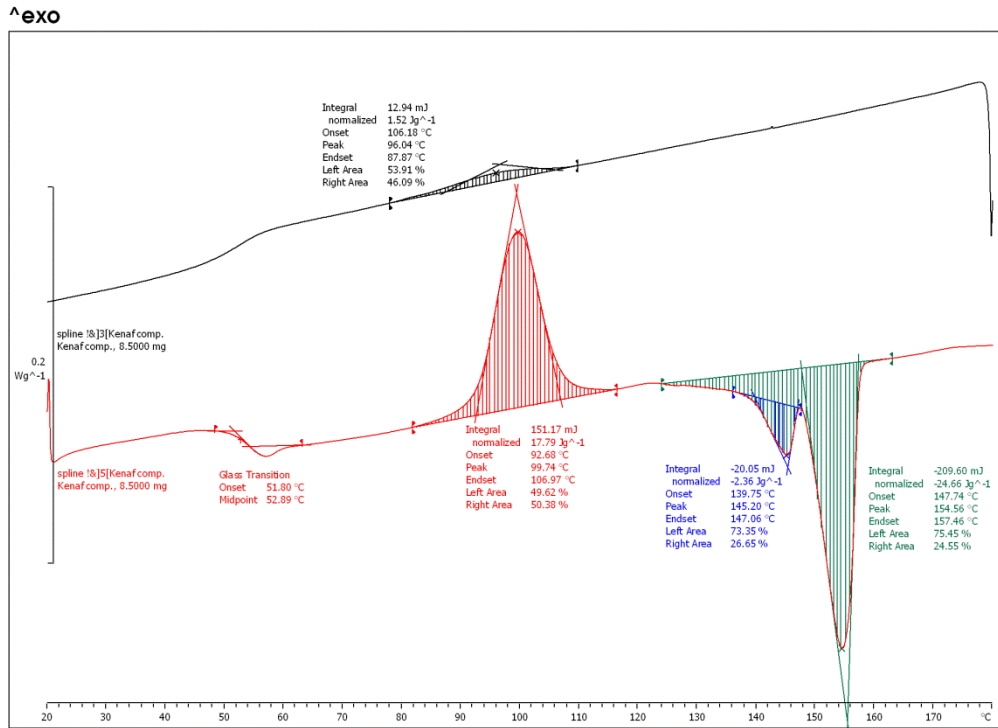
ก-1 ผลการทดสอบการศึกษาสมบัติทางความร้อน



ภาพที่ ก.1 แสดงกราฟ DSC ของพอลิแลคติกแอซิด



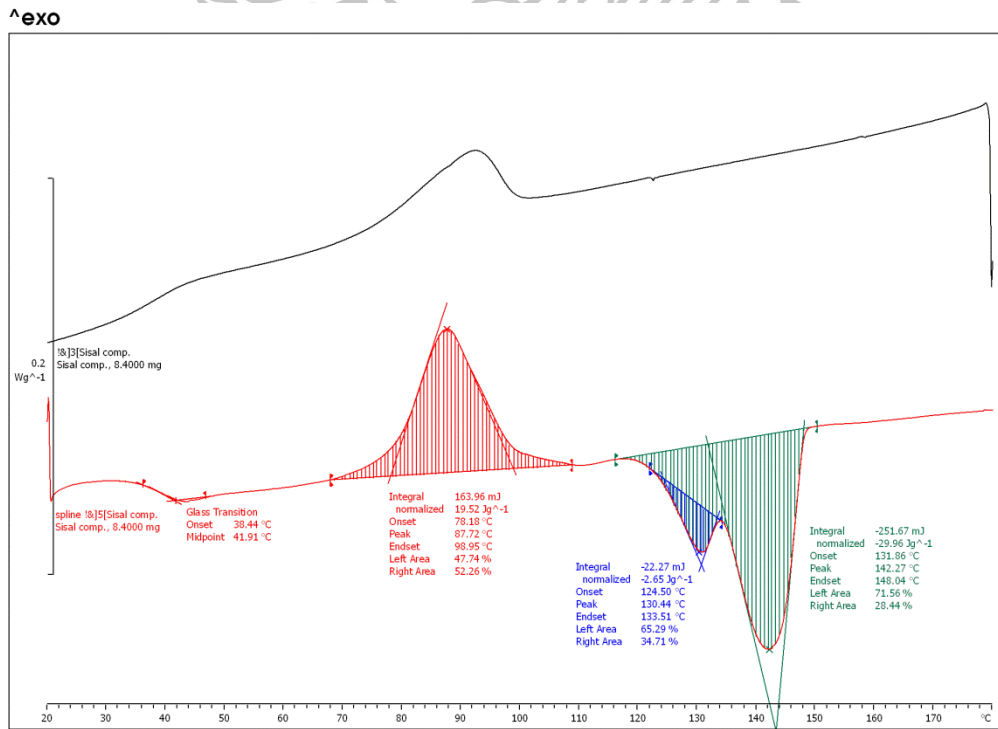
ภาพที่ ก.2 แสดงกราฟ DSC ของวัสดุคอม โปสิตที่ใช้ผ้าทอกกล้วย



Lab: METTLER

STAR[®] SW 10.00

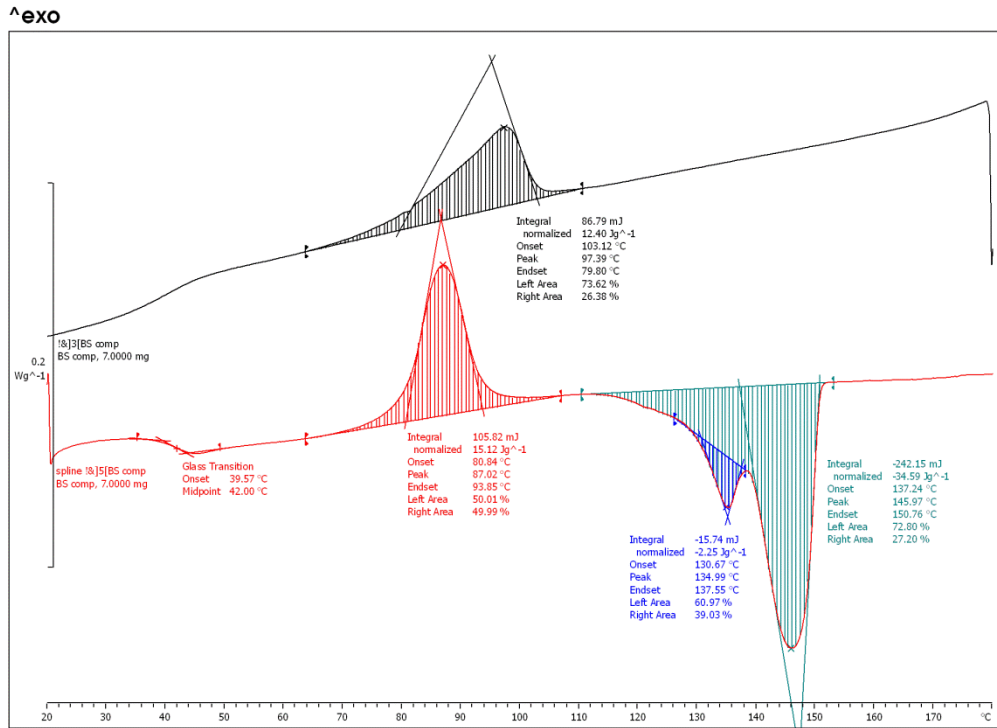
ภาพที่ ก.3 แสดงกราฟ DSC ของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอโปแก้ว



Lab: METTLER

STAR[®] SW 10.00

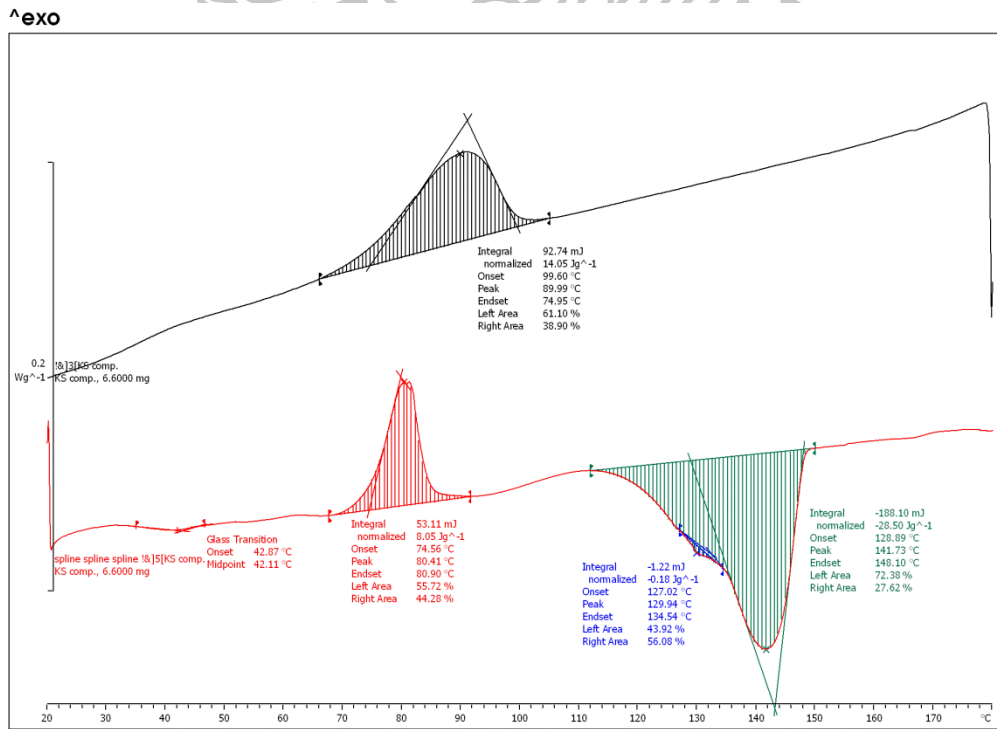
ภาพที่ ก.4 แสดงกราฟ DSC ของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ผ้าทอป่านสรนารายณ์



Lab: METTLER

STAR® SW 10.00

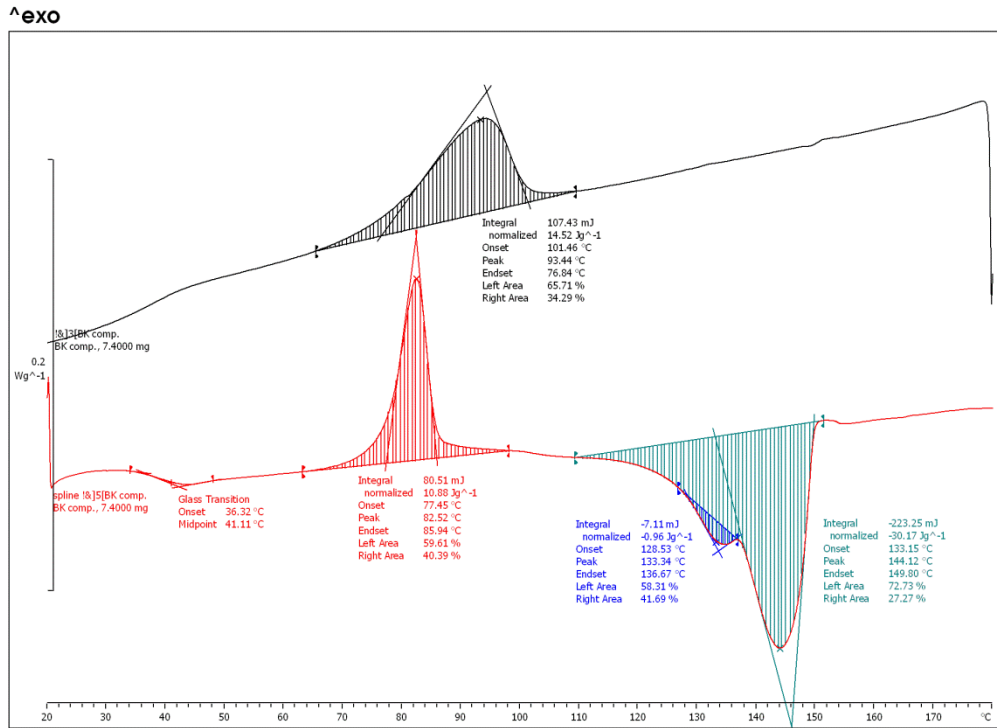
ภาพที่ ก.5 แสดงกราฟ DSC ของวัสดุคอม โพลีตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-กล้วย



Lab: METTLER

STAR® SW 10.00

ภาพที่ ก.6 แสดงกราฟ DSC ของวัสดุคอม โพลีตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-ปอแก้ว

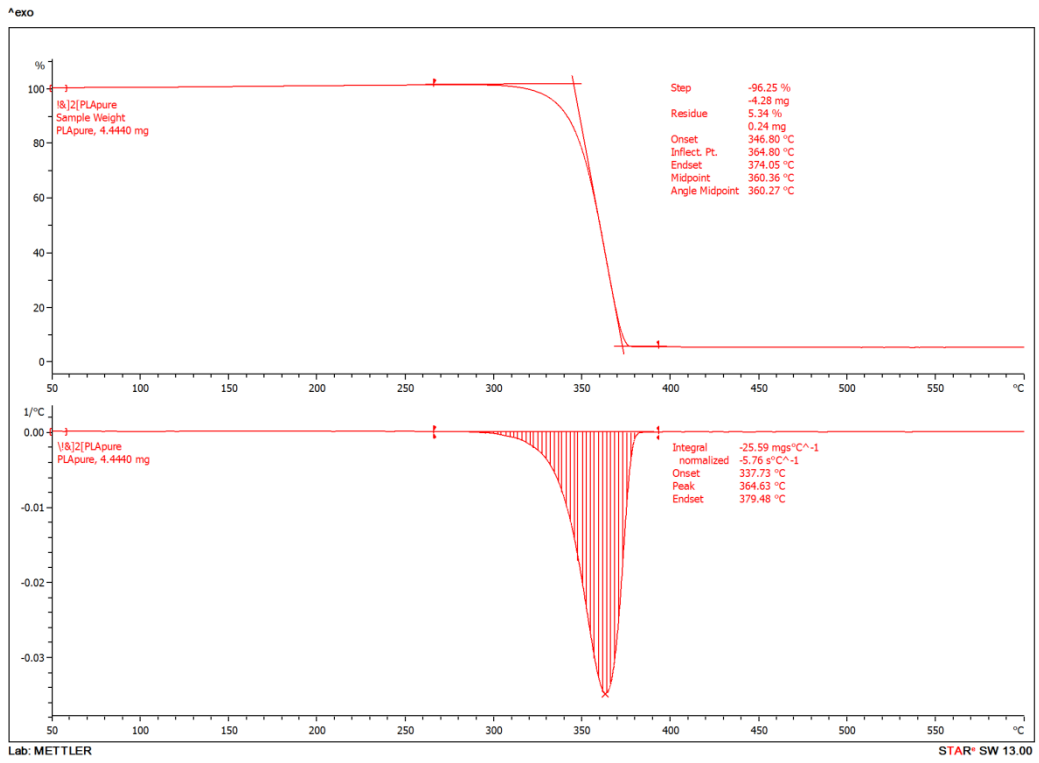


Lab: METTLER

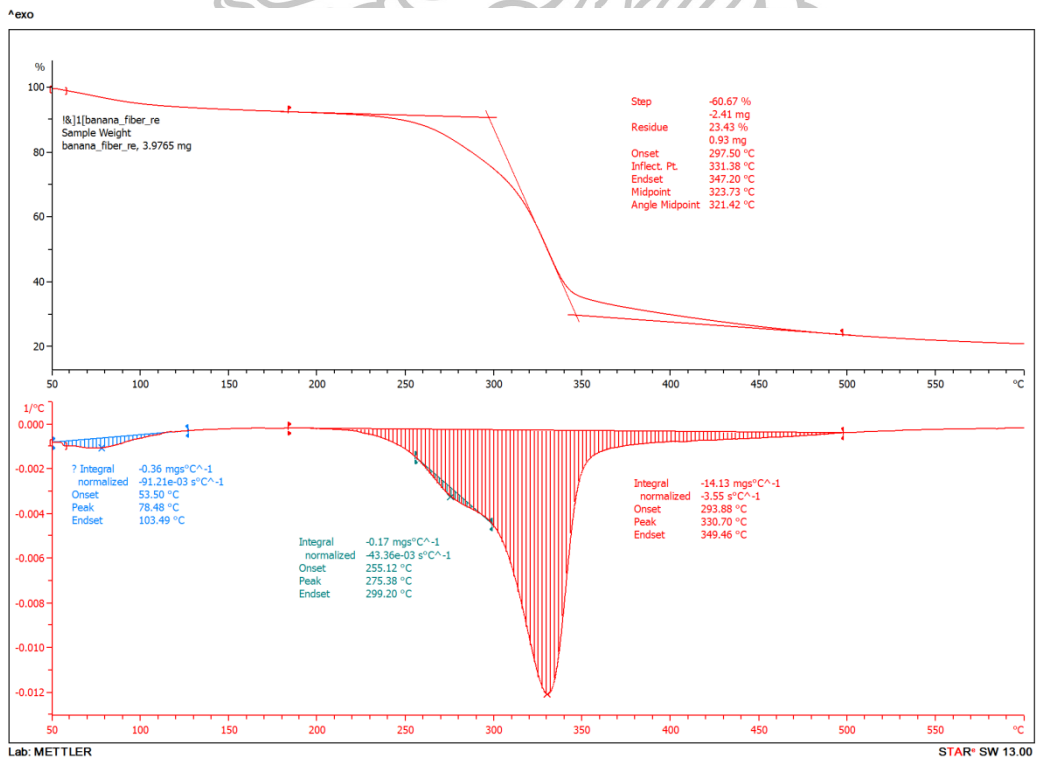
STAR® SW 10.00

ภาพที่ ก.7 แสดงกราฟ DSC ของวัสดุคอม โพลีที่ ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้ว

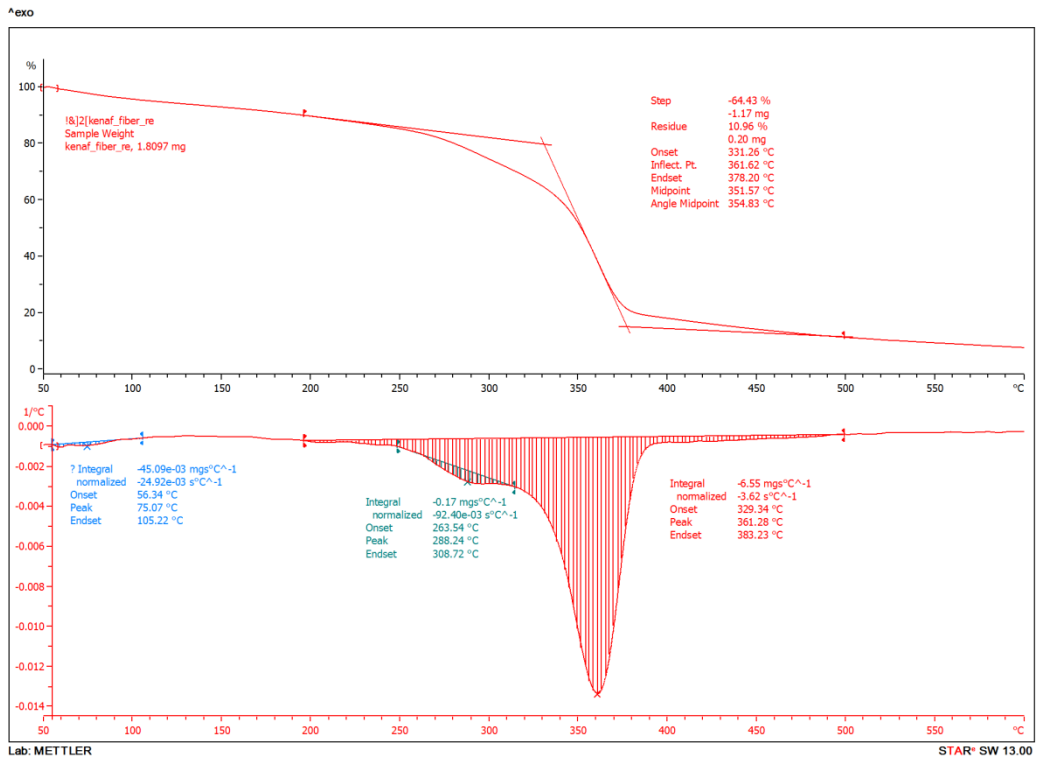




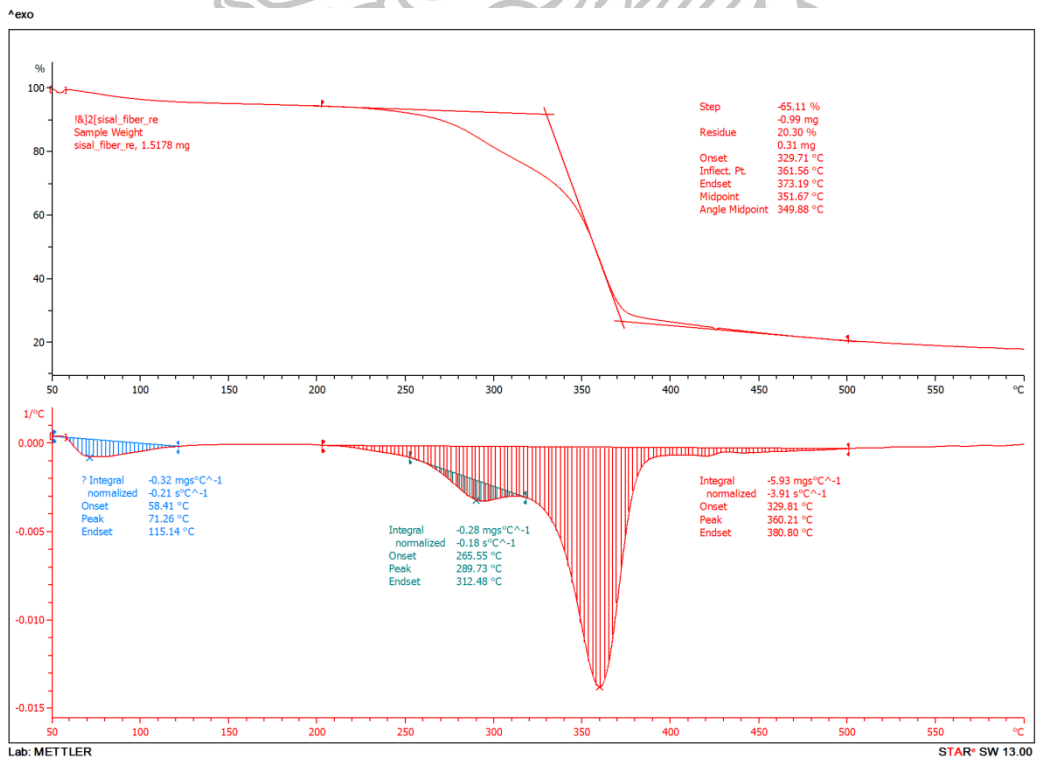
ภาพที่ ก.8 แสดงกราฟ TGA ของพอลิแลคติกแอซิด



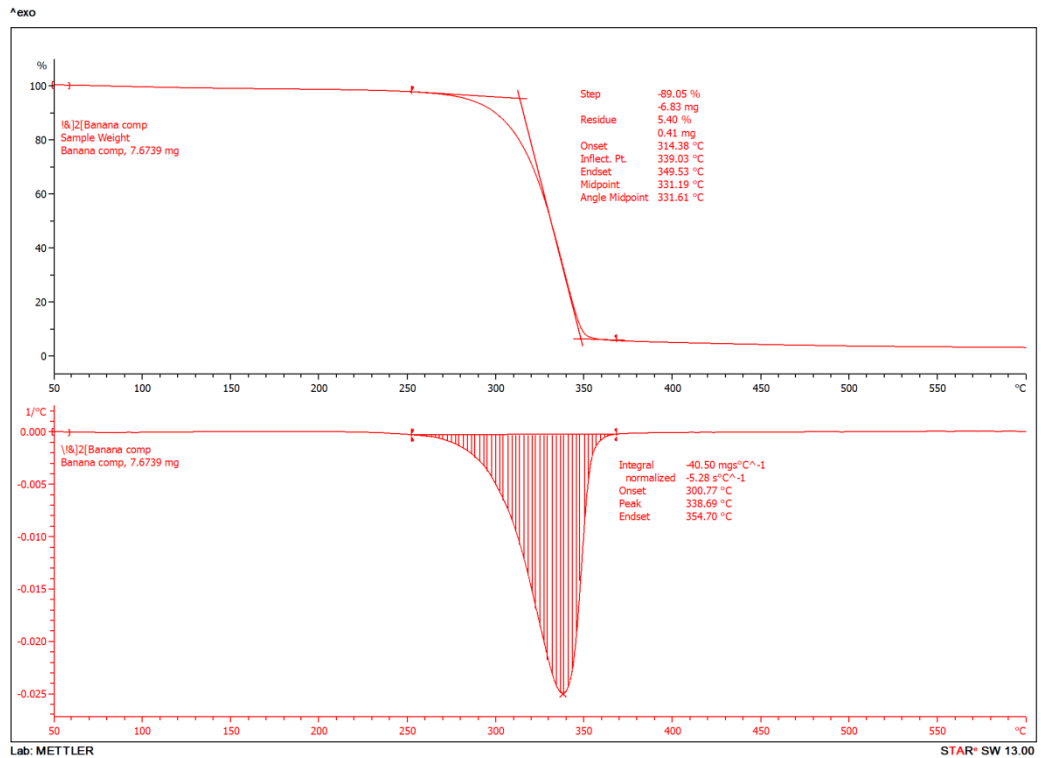
ภาพที่ ก.9 แสดงกราฟ TGA ของเส้นใยกล้วย



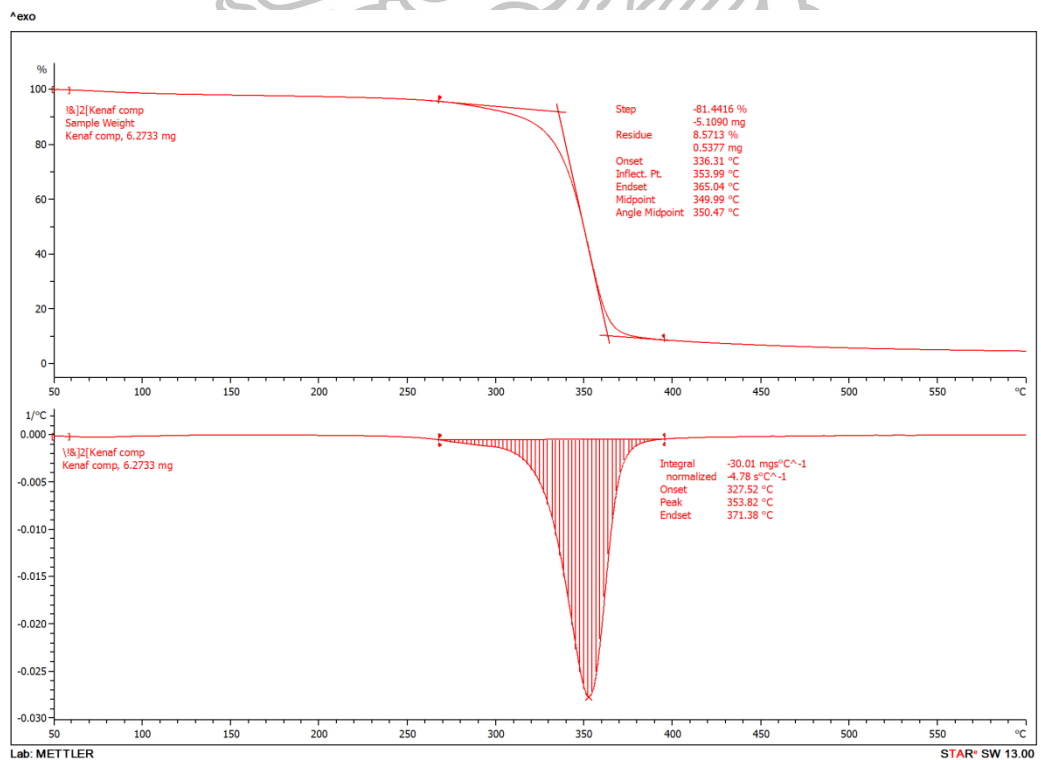
ภาพที่ ก.10 แสดงกราฟ TGA ของเส้นใยปอแก้ว



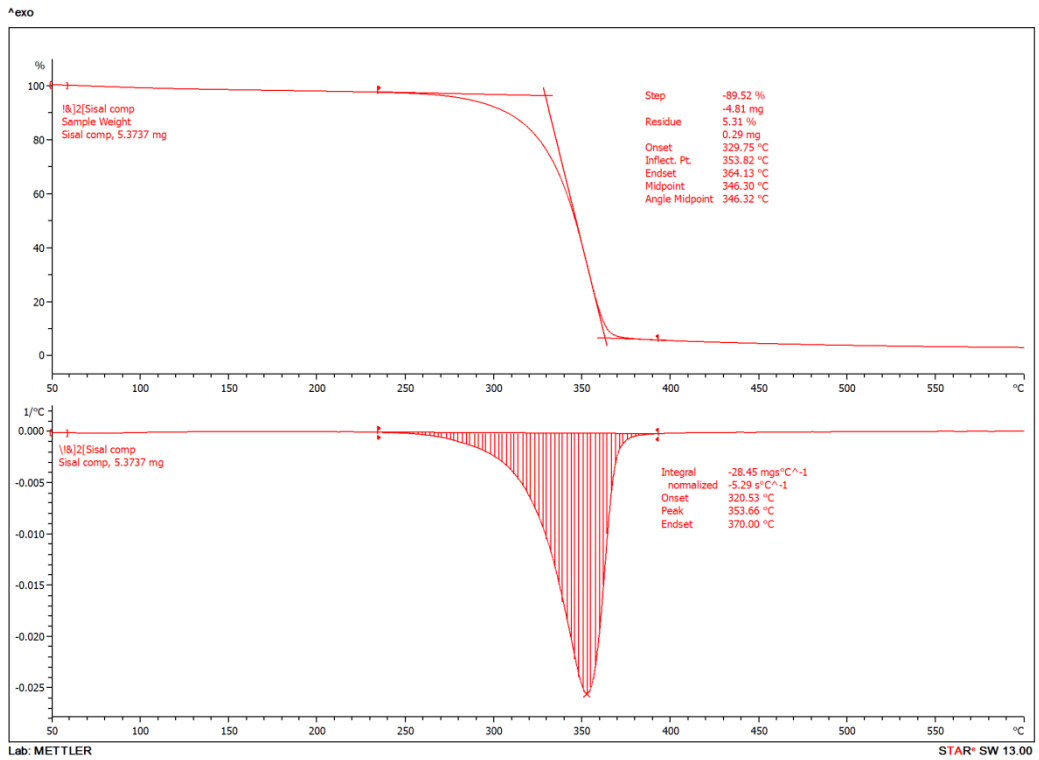
ภาพที่ ก.11 แสดงกราฟ TGA ของเส้นใยป่านศรนารายณ์



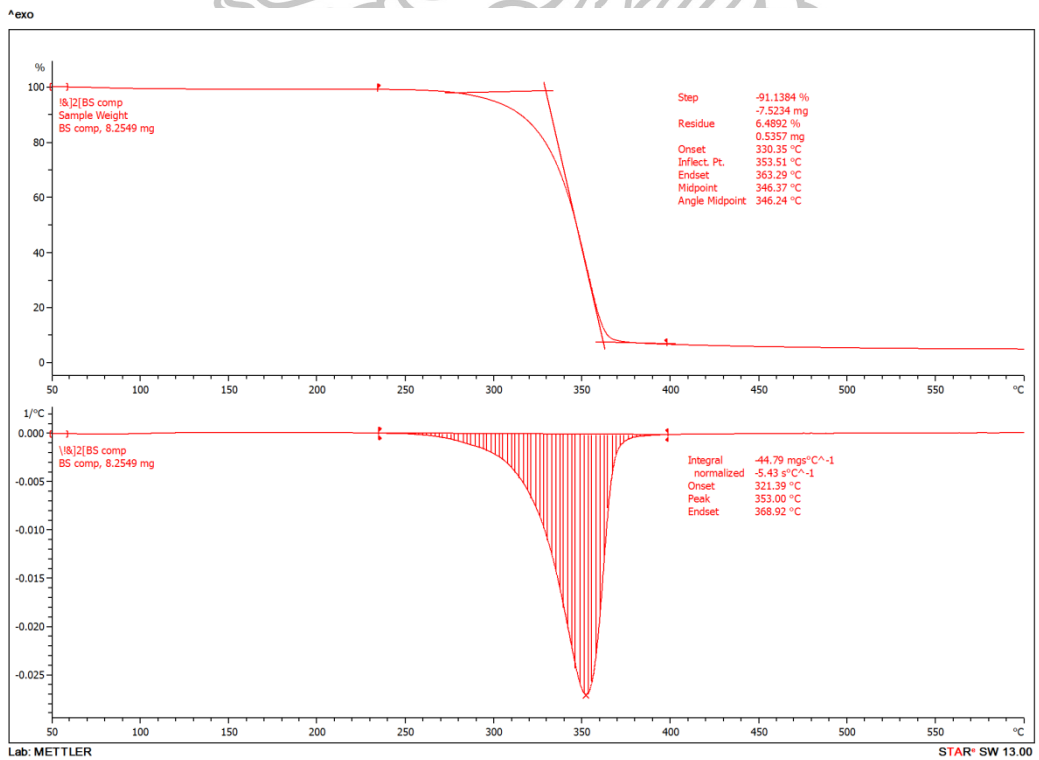
ภาพที่ ก.12 แสดงกราฟ TGA ของวัสดุคอมโพลิตที่ใช้ผ้าทอกล้วย



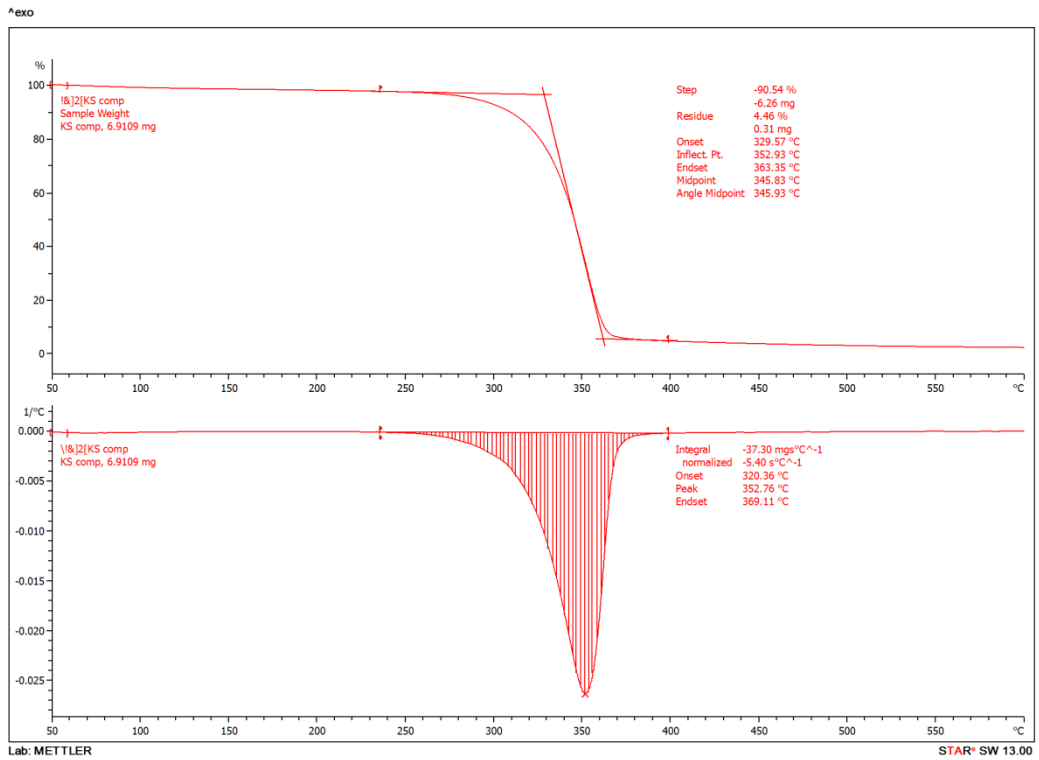
ภาพที่ ก.13 แสดงกราฟ TGA ของวัสดุคอมโพลิตที่ใช้ผ้าทอปอแก้ว



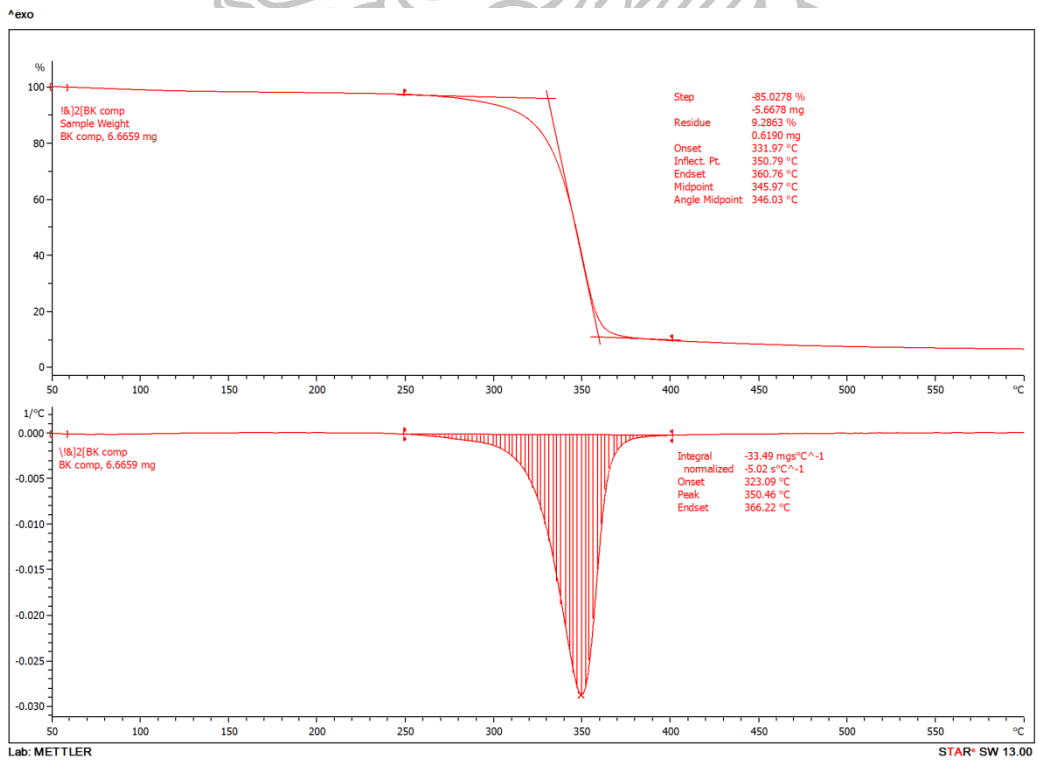
ภาพที่ ก.14 แสดงกราฟ TGA ของวัสดุคอม โพลิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนรายณ์



ภาพที่ ก.15 แสดงกราฟ TGA ของวัสดุคอม โพลิตที่ใช้ผ้าทอปานสรนรายณ์-กล้วย



ภาพที่ ก.16 แสดงกราฟ ของวัสดุคอม โพลีตที่ใช้ผ้าทอปานสรนารายณ์-ปอแก้ว



ภาพที่ ก.17 แสดงกราฟ TGA ของวัสดุคอม โพลีตที่ใช้ผ้าทอกล้วย-ปอแก้ว

ก-2 ผลการทดสอบเชิงกล

ตาราง ก.1 ผลการทดสอบการดัดโค้ง

| Sample | Flexural strength (MPa) | | Flexural Modulus (MPa) | | Flexure extension at break (mm) | |
|---|----------------------------|------|---------------------------|--------|------------------------------------|------|
| | Avg. | SD. | Avg. | SD. | Avg. | SD. |
| PLA | 70.644 | 4.97 | 2,336.90 | 158.04 | 6.889 | 0.77 |
| Banana composite | 49.671 | 9.61 | 4,150.96 | 508.79 | 6.851 | 1.02 |
| Kenaf composite | 86.922 | 3.36 | 6,844.19 | 344.18 | 3.504 | 0.17 |
| Sisal composite | 76.769 | 7.48 | 4,276.44 | 141.16 | 8.844 | 0.55 |
| Parallel Sisal- Banana composite | 52.242 | 8.87 | 3,843.44 | 180.17 | 5.917 | 0.68 |
| Sisal- Kenaf composite | 88.758 | 8.46 | 6,454.38 | 243.48 | 5.217 | 0.69 |
| Banana- Kenaf composite | 68.343 | 5.17 | 4,988.48 | 508.71 | 4.545 | 0.25 |

ตาราง ก.1 ผลการทดสอบการค้ำโค้ง (ต่อ)

| Sample | Flexural strength (MPa) | | Flexural Modulus (MPa) | | Flexure extension at break (mm) | |
|---|----------------------------|--------|---------------------------|----------|------------------------------------|-------|
| | Avg. | SD. | Avg. | SD. | Avg. | SD. |
| | Banana composite | 54.732 | 3.93 | 2,800.96 | 132.16 | 7.425 |
| Kenaf composite | 74.781 | 5.81 | 2,955.48 | 98.16 | 6.797 | 0.42 |
| Sisal composite | 59.488 | 3.92 | 2,633.54 | 115.98 | 12.668 | 1.38 |
| Transverse 0 degree Sisal- Banana composite | 49.940 | 4.56 | 2,839.00 | 189.75 | 8.014 | 1.79 |
| Sisal- Kenaf composite | 66.968 | 5.57 | 3,402.16 | 66.16 | 6.452 | 0.4 |
| Banana- Kenaf composite | 66.401 | 2.56 | 3,153.39 | 79.94 | 6.210 | 0.23 |

ตาราง ก.1 ผลการทดสอบการค้ำโค้ง (ต่อ)

| Sample | Flexural strength (MPa) | | Flexural Modulus (MPa) | | Flexure extension at break (mm) | |
|--|----------------------------|--------|---------------------------|----------|------------------------------------|----------|
| | Avg. | SD. | Avg. | SD. | Avg. | SD. |
| | Banana composite | 37.945 | 7.1 | 2,248.43 | 105.78 | 10.12904 |
| Kenaf composite | 45.095 | 3.33 | 2,055.74 | 82.21 | 12.61164 | 1.68 |
| Sisal composite | 24.950 | 8.75 | 2,203.18 | 73.54 | 18.8979 | 3.77 |
| Transverse 90 degree Sisal- Banana composite | 19.470 | 1.65 | 2,147.19 | 166.84 | 12.3946 | 1.5 |
| Sisal- Kenaf composite | 24.503 | 1.5 | 3,140.46 | 149.83 | 6.93002 | 0.92 |
| Banana- Kenaf composite | 33.309 | 1.05 | 3,563.93 | 164.33 | 8.44902 | 0.83 |

ตาราง ก.2 ผลการทดสอบการดึงยึด

| Sample | Tensile strength (MPa) | | Young's Modulus (MPa) | | Elongation at break (%) | |
|------------------------------------|------------------------|------|-----------------------|---------|-------------------------|------|
| | Avg. | SD. | Avg. | SD. | Avg. | SD. |
| PLA | 34.466 | 1.93 | 1,144.64 | 34.437 | 4.014 | 0.48 |
| Banana composite | 33.889 | 7.04 | 2,876.95 | 192.385 | 2.384 | 0.70 |
| Kenaf composite | 73.227 | 5.23 | 2,396.62 | 108.245 | 3.692 | 0.18 |
| Sisal composite | 46.943 | 2.56 | 2,945.93 | 70.323 | 3.370 | 0.34 |
| Parallel Sisal-Banana composite | 35.214 | 1.24 | 2,936.25 | 55.038 | 2.573 | 0.38 |
| Sisal-Kenaf composite | 73.327 | 6.94 | 3,099.63 | 423.943 | 2.943 | 0.22 |
| Banana-Kenaf composite | 53.130 | 6.10 | 3,225.07 | 181.039 | 2.532 | 0.23 |

ตาราง ก.2 ผลการทดสอบการดึงยึด (ต่อ)

| Sample | Tensile strength (MPa) | | Young's Modulus (MPa) | | Elongation at break (%) | |
|--|------------------------|------|-----------------------|--------|-------------------------|------|
| | Avg. | SD. | Avg. | SD. | Avg. | SD. |
| Banana composite | 16.87 | 2.71 | 1,137.13 | 62.88 | 1.717 | 0.27 |
| Kenaf composite | 35.864 | 6.26 | 928.69 | 43.01 | 5.018 | 0.94 |
| Sisal composite | 21.204 | 3.31 | 1,107.27 | 31.43 | 4.059 | 0.73 |
| Transverse 0 degree Sisal-Banana composite | 19.017 | 1.48 | 1,850.51 | 69.23 | 1.854 | 0.35 |
| Sisal-Kenaf composite | 24.822 | 4.03 | 2,507.19 | 184.21 | 1.729 | 0.21 |
| Banana-Kenaf composite | 34.514 | 2.52 | 2,469.31 | 106.22 | 1.931 | 0.24 |

ตาราง ก.2 ผลการทดสอบการดึงยึด (ต่อ)

| Sample | Tensile strength (MPa) | | Young's Modulus (MPa) | | Elongation at break (%) | |
|--|------------------------|------|-----------------------|-------|-------------------------|------|
| | Avg. | SD. | Avg. | SD. | Avg. | SD. |
| Banana composite | 20.728 | 5.79 | 1,054.59 | 50.85 | 2.344 | 0.72 |
| Kenaf composite | 20.762 | 2.17 | 763.78 | 20.82 | 4.222 | 0.67 |
| Sisal composite | 12.459 | 3.05 | 1,156.33 | 19.95 | 1.557 | 0.32 |
| Transverse 90 degree Sisal-Banana composite | 16.824 | 1.48 | 1,573.68 | 44.15 | 1.548 | 0.44 |
| Sisal-Kenaf composite | 17.233 | 5.89 | 1,707.69 | 75.24 | 1.879 | 0.32 |
| Banana-Kenaf composite | 19.347 | 3.16 | 1,957.60 | 45.36 | 1.619 | 0.23 |

ตาราง ก.3 ผลการทดสอบการกระแทก

| test direction | Sample | Impact strength (KJ/m ²) | |
|-------------------------|------------------------|--------------------------------------|------|
| | | Avg. | SD. |
| | PLA | 3.774 | 0.54 |
| Parallel | Banana composite | 5.67 | 1.6 |
| | Kenaf composite | 12.46 | 1.2 |
| | Sisal composite | 14.70 | 1.8 |
| | Sisal-Banana composite | 9.87 | 1.8 |
| | Sisal-Kenaf composite | 43.53 | 11.5 |
| | Banana-Kenaf composite | 15.04 | 3.2 |
| Transverse 0 degree | Banana composite | 12.242 | 3.23 |
| | Kenaf composite | 16.090 | 2.47 |
| | Sisal composite | 20.462 | 4.33 |
| | Sisal-Banana composite | 7.309 | 1.68 |
| | Sisal-Kenaf composite | 10.131 | 1.23 |
| | Banana-Kenaf composite | 9.199 | 1.28 |
| Transverse 90 degree | Banana composite | 9.296 | 2.86 |
| | Kenaf composite | 13.854 | 3.64 |
| | Sisal composite | 18.480 | 4.29 |
| | Sisal-Banana composite | 8.982 | 2.17 |
| | Sisal-Kenaf composite | 12.532 | 2.11 |
| | Banana-Kenaf composite | 10.482 | 2.79 |

ตาราง ก.4 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

| Day | PLA | | Banana composite | | Kenaf composite | | Sisal composite | |
|-----|--------|--------|------------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|
| | Avg. | SD. | Avg. | SD. | Avg. | SD. | Avg. | SD. |
| 1 | 0.8258 | 0.3731 | 8.4035 | 0.9353 | 18.6734 | 2.2175 | 8.9322 | 0.5916 |
| 2 | 0.9907 | 0.1266 | 8.8906 | 0.5776 | 20.6556 | 2.6112 | 8.7829 | 1.3337 |
| 3 | 0.9260 | 0.2031 | 8.6497 | 0.7384 | 20.8254 | 2.2875 | 9.1891 | 2.1248 |
| 4 | 0.9256 | 0.1338 | 8.8752 | 0.7017 | 20.8313 | 1.6038 | 7.9175 | 2.8803 |
| 5 | 0.9142 | 0.1844 | 8.4735 | 1.6695 | 21.0012 | 1.7166 | 7.9299 | 3.1517 |
| 7 | 0.8970 | 0.2117 | 8.5104 | 1.2941 | 21.1345 | 2.3293 | 7.4084 | 2.6990 |
| 14 | 0.9657 | 0.2116 | 9.2528 | 1.0372 | 22.7192 | 2.2355 | 8.4321 | 1.9494 |
| 18 | 0.9657 | 0.2116 | 9.2528 | 1.0372 | 22.7192 | 2.2355 | 8.4321 | 1.9494 |
| 21 | 1.2450 | 0.2708 | 9.5265 | 1.6269 | 23.6884 | 2.0632 | 8.3434 | 2.5999 |
| 25 | 1.1484 | 0.2823 | 9.7749 | 1.2443 | 23.9022 | 2.1060 | 8.9805 | 2.3410 |
| 28 | 0.9259 | 0.2914 | 8.6726 | 0.9447 | 22.8940 | 1.8902 | 8.0827 | 2.6938 |
| 30 | 0.9443 | 0.3447 | 8.8899 | 1.1749 | 23.0627 | 2.5674 | 7.4763 | 3.1976 |

| Day | Sisal-Banana composite | | Sisal-Kenaf composite | | Banana-Kenaf composite | |
|-----|------------------------|--------|-----------------------|--------|------------------------|--------|
| | Avg. | SD. | Avg. | SD. | Avg. | SD. |
| 1 | 7.5599 | 0.8091 | 8.9131 | 1.6204 | 9.4756 | 1.2967 |
| 2 | 8.3432 | 0.7248 | 9.3804 | 1.4435 | 10.7127 | 1.1100 |
| 3 | 8.3904 | 0.9147 | 9.8302 | 1.4916 | 10.7055 | 1.4009 |
| 4 | 8.7382 | 1.0244 | 10.2489 | 1.3889 | 10.8572 | 1.5454 |
| 5 | 8.8104 | 0.8832 | 9.9419 | 1.0878 | 11.2088 | 1.6808 |
| 7 | 8.8724 | 1.1479 | 10.2735 | 2.3045 | 11.3306 | 1.3748 |
| 14 | 9.7815 | 1.1284 | 11.1760 | 1.6615 | 12.7593 | 1.7659 |
| 18 | 9.7815 | 1.1284 | 11.1760 | 1.6615 | 12.7593 | 1.7659 |
| 21 | 9.4053 | 1.3791 | 11.1403 | 1.6397 | 12.8892 | 2.4496 |
| 25 | 9.5744 | 1.0933 | 11.2156 | 1.5882 | 13.5608 | 2.1309 |
| 28 | 9.0753 | 1.2456 | 10.8114 | 1.9215 | 12.7380 | 2.1696 |
| 30 | 8.9466 | 0.8717 | 11.1445 | 1.1454 | 12.5720 | 2.1907 |

ตาราง ก.5 ผลการทดสอบการการลุกติดไฟ

| Sample | Time (Sec) | | | | | Average burning rate | LOI |
|------------------------|------------|-----|-----|-----|-----|----------------------|-----|
| | | | | | | (mm/min) | (%) |
| PLA | 288 | 293 | 272 | 282 | 278 | 21.23 | 20 |
| Banana composite | 270 | 292 | 278 | 281 | 272 | 21.54 | 20 |
| Kenaf composite | 310 | 312 | 308 | 306 | 306 | 19.46 | 20 |
| Sisal composite | 328 | 335 | 329 | 328 | 322 | 18.27 | 20 |
| Sisal-Banana composite | 277 | 268 | 275 | 273 | 278 | 21.88 | 20 |
| Sisal-Kenaf composite | 320 | 326 | 321 | 328 | 321 | 18.56 | 20 |
| Banana-Kenaf composite | 290 | 268 | 286 | 292 | 290 | 21.04 | 20 |





ข-1 IUPAC World Polymer Congress 2014, The 45th International Symposium on Macromolecules (MACRO2014) ที่ Chiang Mai International Convention and Exhibition Centre จังหวัดเชียงใหม่ วันพฤหัสบดีที่ 10 กรกฎาคม 2557



1053
Tensile Properties of Woven Natural Fibers Based Poly(lactic acid) Composite Material

Theeraphat Suphanil¹, Chanchai Thongpin¹, Natinee Lopattananon²

¹Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, NakhonPathom 73000, Thailand
E-mail: cmaterials@hotmail.com

²Department of Rubber and Polymer Science, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Pattani 94000, Thailand

Introduction

As a result of the increasing environmental awareness, the environmental sustainability and the growing global waste problem concern has there been concerned. This has also led to a significant direction for natural fiber reinforced composite: "Green composite", which is a new biodegradable composite composed of a biodegradable matrix and fibrous biomass [1-4]. Green composites made from bio-resource are expected to be environmentally friendly and can process competitive mechanical properties compared to traditional fiber reinforced composites [5-9].

When biopolymers from natural cellulose, starch, biological reaction, and so on, are disposed of into landfill, they can be decomposed by microorganisms into water and carbon dioxide [10-13]. Among biodegradable polymers, poly(lactic acid) (PLA) has a special interest as a matrix in natural fiber composites for many reasons. Firstly, PLA is a versatile thermoplastic produced from lactic acid monomer coming mainly from the fermentation of corn, potato, sugar beet, and sugar cane. Secondly, the commercially attractive features of PLA includes its degradability in a short period of time (0.5-2 years) in contrast to conventional plastics like PS, PE, etc., which need 500-1000 years [12]. Thirdly, PLA has good mechanical properties that are similar to those of polystyrene [13]. At last, PLA can be melt-processed with standard processing equipment at temperatures below those at which natural fibers start to degrade [14].

Natural fibers are biodegradable and renewable material procured from natural resources which have several advantages such as low cost, easily available, light weight, low density, good thermal insulation properties, acceptable specific strength and modulus [7-8, 15]. Various studies have been made on mechanical analysis of green composite like sisal fiber-reinforced poly(lactic acid) [1], jute fiber-reinforced poly(lactic acid) [3], coir fiber-reinforced poly(lactic acid) [4] and etc.

In this research, we are presenting the development and mechanical characterization of composite material manufactured from woven fabric and poly(lactic acid) (PLA). The influence of three woven fabric type (banana, kenaf and sisal) was investigated by tensile technique according to the ASTM standard.

Experimental

Materials: A commercial grade of poly(lactic acid) (PLA4043D) was purchased from BC polymers marketing Co., Ltd., Thailand. Sisal fiber was purchased from Hubkapong cooperative, Pheichaburi, Thailand. Banana fiber, kenaf fiber and cotton thread were purchased from Narapimon rice mill, Nonthaburi, Thailand. The plain woven fabrics were manufactured with a loom by using cotton thread in warp direction and natural fiber in weft direction.

Preparation of composite: Prior to preparing the composite specimens, PLA pellets and woven fabric were dried at 60°C for 1 h. The PLA pellets were converted into a sheet approximately 0.7 mm in thickness using a hot press at 170°C with a pressure of 500 psi. To produce the woven/PLA composites, the layers of fabrics arranged at transverse direction and PLA sheets were piled up alternate layers shown schematically in Figure 1. Then the mold was pre heated at 170°C for 5 min. Subsequently, the stacks were compressed with a pressure of 750 psi at the same temperature for 5

min. Finally, the specimens were cooled slowly to room temperature over half an hour in the mold under compression. In this experiment, four different types of sample set were prepared: pure PLA, banana/PLA composite, kenaf/PLA composite and sisal/PLA composite. The prepared composites were cut into ASTM-sized specimens for characterization by using laser cutter.

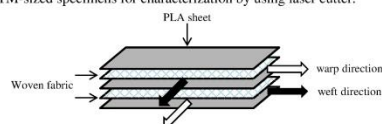


Figure 1 Layering pattern of PLA sheet and Fabric.

Characterization and Testing

Tension Testing:

1. Poly(lactic acid) (PLA) Sheet: Tensile testing was carried out on an Instron universal testing machine (model 5969) according to the ASTM D638-09, at temperature 25°C, humidity 50%, a gauge length of 33 mm and crosshead speed of 2 mm/min. At least five specimens were tested to obtain average tensile properties.

2. Woven fabric: Tensile tested according to ASTM D5035-08 on Instron universal testing machine (model 5969). Fabric specimens prepared by the revealed strip method (50 mm × 150 mm) were characterized in both warp and weft directions. Tensile tests were performed at temperature 25°C, humidity 50%, a gauge length of 75 mm and crosshead speed of 300 mm/min. At least five specimens were tested to obtain average tensile properties.

3. Woven composite: Tensile properties of composite specimens were characterized in accordance with ASTM D3039. Tensile tests were carried out using an Instron universal testing machine (model 5969). The machine was operated at temperature 25°C, humidity 50%, a gauge length of 100 mm and crosshead speed of 2 mm/min. Five specimens were tested to obtain average tensile properties.

Morphological Characterization:

The tensile fractured surface of tested composite specimens were observed by using Hitachi Table Top Microscope SEM, model TM3030. Prior to analysis, the specimens were coated with a thin layer of platinum to get good conductivity, using a Quorum sputter coater (model SC7620).

Results and Discussion

Tensile properties: Fabrics tensile properties such as tensile strength, elongation at break and Young's modulus in both warp and weft directions are summarized in Table 1. It was found that the tensile strength in warp and weft directions is different. The woven fabrics have higher tensile strength in weft direction (fiber side), as compared to warp direction (cotton thread side). This could be attributed to the difference of strength of the fiber in both directions including the number of fiber in each warp line is less dense than weft direction. In contrast, the percentage of elongation of the fabric was similar in both directions. Hence, the strength of these woven fabrics is very much dependent upon weft direction. They could be used in the representative of effect of natural fiber type on reinforcement fabric in laminated composites with the advantage of low cost, biodegradable, acceptable strength and modulus [6-7].

Table 1. Tensile properties of woven fabrics.

| Sample | Mechanical properties | | |
|--------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|
| | Tensile strength (MPa) | Elongation at break (%) | Young's modulus (GPa) |
| Banana fabric | 1.52 ±0.03 | 19.71 ±5.23 | 0.041±0.03 |
| warp side (cotton) | 33.88 ±8.66 | 21.54 ±2.63 | 1.83±0.18 |
| weft side (banana) | | | |
| Kenaf fabric | 1.63 ±0.04 | 25.82 ±9.47 | 0.052 ±0.03 |
| warp side (cotton) | 25.61 ±4.44 | 28.96 ±5.55 | 0.74 ±0.10 |
| weft side (kenaf) | | | |
| Sisal fabric | 1.46 ±0.01 | 33.05 ±5.71 | 0.048 ±0.01 |
| warp side (cotton) | 58.03 ±8.68 | 56.86 ±9.95 | 1.37 ±0.18 |
| weft side (sisal) | | | |

Table 2 summarizes their tensile properties values of pure PLA and composites. The tensile strength of PLA is 34.46 MPa and elongation at break is 4.01%. The PLA presents low elongation until rupture showing brittle behavior. The similar results of PLA have been also previously reported in the literature [12-13]. Tensile strength of the composite (80 wt.% of PLA loading) is influenced by the strength and modulus of fibers [7, 15]. It was found that the composites from sisal/PLA shows the highest tensile strength 41.83 MPa compared to kenaf/PLA is 35.86 MPa and banana/PLA is 16.87 MPa consecutively. This is because sisal fiber possesses higher strength than banana and kenaf fibers [6-9]. The Young's modulus of laminated composites was also showed the same trend, i.e. banana/PLA composite shows highest modulus compared with sisal/PLA and kenaf/PLA composites.

Table 2. Tensile properties of pure PLA and woven fabric laminated composites.

| Sample | Mechanical properties | | |
|------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|
| | Tensile strength (MPa) | Elongation at break (%) | Young's modulus (GPa) |
| Pure PLA | 34.46 ±1.93 | 4.01±0.48 | 1.14 ±0.03 |
| Banana/PLA | 16.87 ±2.70 | 1.71±0.26 | 1.13±0.06 |
| Kenaf/PLA | 35.86±6.25 | 5.01±0.94 | 0.92±0.04 |
| Sisal/PLA | 41.83±0.79 | 5.76±0.90 | 1.10±0.06 |

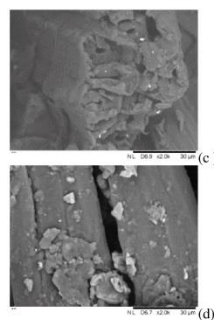
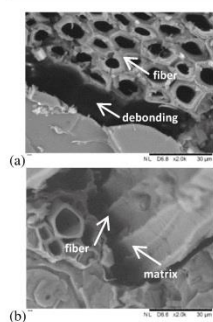


Figure 2. Scanning electron micrograph (2000x) of tensile fracture sample of (a) Banana/PLA composite, (b) Sisal/PLA composite, (c) Kenaf/PLA composite and (d) adhesion of Kenaf/PLA composite.

Morphological analysis: SEM was used to study the tensile fractured surface sample of PLA and woven fiber/PLA laminated composites. The fabric-PLA matrix adhesion in the woven composites can be further understood by examining the micrograph of the fractured surfaces of the specimens. Figure 2 (a) and (b) show the SEM micrographs of tensile-fractured surface of banana fiber/PLA and sisal fiber/PLA laminated composites. Fiber-matrix debonding, matrix crack and fiber pull out is more evident in banana/PLA and sisal/PLA composites, compared to kenaf/PLA laminated composite. Fracture of fiber with little or no pull out of kenaf is visible from the Figure 2 (c). It exhibits that kenaf fibers are well bonded to PLA matrix. Moreover, fiber surfaces and the PLA matrix, shown in the Figure 2 (d), are not clean. This indicated good adhesion between the kenaf fibers and the PLA matrix. Nonetheless, the mechanical properties were not high compared to the other two fibers, which due to the characteristic property of kenaf itself.

Conclusions

In this work, woven fabric and PLA resin were used to fabricate fully biodegradable, an attractive combination of mechanical and physical properties together with their environmental friendly character.

The fabric characterization showed that the plain woven fabric presented higher tensile strength in the weft direction, as compared to the warp direction. This could be attributed to the difference of strength of the fiber in both directions including the number of fiber in each warp line is less dense than weft direction. Hence, the strength of these woven fabrics was very much dependent upon weft direction. In terms of mechanical properties of woven fabric laminated composite, the sisal/PLA composite presented good tensile strength than banana/PLA and kenaf/PLA composites. This was because sisal fiber possessed higher strength than banana and kenaf fibers. The Young's modulus of laminated composites was also showed the same trend, i.e. banana fiber laminated composite showed highest modulus comparing with sisal and kenaf fibers laminated composites.

Acknowledgement. The author is thankful to the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Thailand for financial support. Also the authors would like to thank Assistant professor Dr. Chanchai Thongpin for many helpful discussions.

References

- 1) Pramendra K.B.; Inderdeep S.; Jitendra M. *Wear* **2013**, 297, 829.
- 2) Csizmadia R.; Faludi G.; Renner K.; Móczó J.; Pukánszky B. *Composites: Part A* **2013**, 53, 46

- 3) Anin M.; Asami N. *Energy Procedia* **2013**, 34, 830
- 4) Yu D.; Arvinder G.; Hitoshi T.; Hazim J.H.; Antonio N. N.; Kin-Tak L. *Composites: Part A* **2014**, 63, 76
- 5) Jawaid M.; Abdul Khalil H.P.S.; Omar S.A. *Composites: Part A* **2012**, 43, 288
- 6) Michael P.M. D.; Peter F. D.; Anna B. B.; Guillaume F.; Mark K. H.; Paul M. W. *Composites: Part A* **2014**, 56, 280
- 7) Omar F.; Andrzej K.B.; Hans-Peter F.; Mohini S. *Progress in Polymer Science* **2012**, 37, 1552
- 8) Mei-po H.; Hao W.; Joong-Hee L.; Chun-kit H.; Kin-tak L.; Jinsong L.; David H. *Composites: Part B* **2012**, 43, 3549
- 9) Georgios K.; Arlindo S.; Mihail F. *Composites: Part B* **2013**, 44, 120
- 10) Suprakas S.R.; Mosto B. *Progress in Materials Science* **2005**, 50, 962
- 11) Long Y.; Katherine D.; Lin L. *Progress in Polymer Science* **2006**, 31, 576
- 12) Nampoothiri M.K.; Nair R.N.; John P. R. *Bioresource Technology* **2010**, 101, 8493
- 13) Murali M.R.; Singaravelu V.; Manjusri M.; Sujata K.B.; Amar K.M. *Progress in Polymer Science* **2013**, 38, 1653
- 14) Lim L.T.; Auras R.; Rubino M. *Progress in Polymer Science* **2008**, 33, 820
- 15) Hoi-yan C.; Mei-po H.; kin-tak L.; Francisco C.; David H. *Composites: Part B* **2009**, 40, 655

1087

Thermal Properties of Poly(lactic acid)-Cellulose-Clay Bionanocomposite

Suttinun Phongtamrug and Sirisart Ouajai*

Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok,
Bangkok 10800, Thailand

Phone: +66-2555-2000 ext.4810, Fax: +66-2587-8251,
*E-mail: soj@kmutnb.ac.th

Introduction

Poly(lactic acid), PLA, is one of the most promising biodegradable polymers due to its specific characters such as biocompatibility, high stiffness and strength as well as processability on standard plastic equipment. In recent years, PLA becomes commercialized and utilized in various applications such as food packaging film, containers for short shelf-life products, and drinking cups. A variety of PLA application area has been dramatically developed. However, PLA has its own drawback, i.e., brittleness due to its high glass transition temperature and slow crystallization rate. In order to achieve the application of semi-durable or durable products, many research groups have paid attention on property improvement by using different types of additives, mixed additives as well as various ratios of blended additives [1-3].

In order to improve crystallization rate of polymer, nucleating agent is the preferable additive. Nanoclay such as montmorillonite, kaolinite, and saponite is known as one of the most effective nucleating agents which improves thermal stability of polymers [4-6]. For example, addition of bentonite increases transition temperature in PLA [5]. Moreover, mechanical strength of PLA has been improved when including organo-modified clay 3-10% which might be due to the dispersion of silicate layer in polymer matrix resulting in either intercalated or exfoliated nanocomposite [6]. However, an increase in clay content in the composite causes a decrease in tensile strength [7-9].

Microcrystalline cellulose has been reported to be one of the effective reinforcement fillers in many kinds of polymer [10-12]. However, the cellulose has weak compatibility with hydrophobic polymer. In order to enhance the dispersion and stress transfer to the matrix, either physical modification or chemical modification has been commonly applied. Silane coupling agent is one example used for promoting interfacial adhesion between the fillers and the polymer matrix. Many reports showed that mechanical and physical properties of the composites have been enhanced after silane modification of the fillers [13-14].

This work aims to investigate the effect of the modified cellulose and the clay in PLA composite on thermal properties through compounding process.

Experimental

Materials. PLA 3052D was purchased from NatureWork LLC, USA. Prior to compounding, the PLA pellets were dried at 60°C overnight. Cloisite 30B (organo-modified clay) was used as received from BYK Additives & Instruments, Germany. Microcrystalline cellulose and silane coupling agent were the products from Sigma-Aldrich Co. LLC. Microcrystalline cellulose was chemically modified with the silane coupling agent before using.

Compounding and Specimen Preparation. Compounding of PLA with various contents of modified cellulose and clay were carried out (Table 1) by using a twin-screw extruder (Prism TSE 16 TC, Thermo Electron Corporation, UK) at a temperature of 160-170°C and the screw speed of 10 rpm. The extrudate was cooled by water and cut into pellet.

Thermal property measurement. Degradation behavior of PLA compound was observed by using thermogravimetric analyzer

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นายธีรภัทร์ สุphanil
 ที่อยู่ 87 หมู่ 9 ต.ดอนตะโก อ.เมือง จ.ราชบุรี 70000
 E-mail address t.suphanil@gmail.com

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2555 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมี
 และวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
 มหาวิทยาลัยศิลปากร
 พ.ศ. 2558 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาปิโตรเคมี
 สาขาวิทยาการ และวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

ทุนที่ได้รับระหว่างการศึกษ

พ.ศ. 2555-2557 ทุนผู้ช่วยอาจารย์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
 และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

การนำเสนอผลงาน

1. Theeraphat Suphanil, Chanchai Thongpin, and Natinee Lopattananon, "Tensile Properties of Woven Natural Fibers Based Poly(lactic acid) Composite Material" *45th International Symposium on Macromolecules (MACRO2014), Chiang Mai, Thailand, 10 July 2014.*